



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

컨테이너선 개방갑판구역 화재진압을 위한
관통형 분사장치의 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Penetration Type Injection Device
for Fire Suppression above the Weather Deck Area of Container Ship



지도교수 최재혁

2018년 2월

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

한 상 구



공학박사 학위논문

컨테이너선 개방갑판구역 화재진압을 위한
관통형 분사장치의 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Penetration Type Injection Device
for Fire Suppression above the Weather Deck Area of Container Ship



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

한 상 구

본 논문을 한상구의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 윤 석 훈 (인)

위원 임 태 우 (인)

위원 이 경 우 (인)

위원 천 강 우 (인)

위원 최 재 혁 (인)



2017년 12월 13일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	viii

제1장 서 론

1.1 배경 및 목적	1
1.2 선박화재와 관련된 SOLAS 규제	2
1.2.1 IMO Regulation에 따른 설계 요구 사항	14
1.2.1.1 Water Mist Lance	14
1.2.1.2 Mobile Water Monitor	15
1.2.1.3 MSC.1/Circ.1472	16

제2장 기존 연구 현황에 대한 검토

2.1 Water Mist Lance & Mobile Water Monitor 연구 현황	19
2.2 기존 제품들의 기술 검토에 대한 결론	32
2.2.1 기존 Water Mist Lance의 문제점	32
2.2.2 기존 Mobile Water Monitor의 문제점	33

제3장 개념설계 및 시뮬레이션

3.1 Water Mist Lance(물분무창)	34
----------------------------------	----

3.1.1 Water Mist Lance 관통해석에 대한 이론적 배경	39
3.1.2 Water Mist Lance 관통해석 유한요소 모델	43
3.1.3 Water Mist Lance 관통해석 경계조건	47
3.2 Mobile Water Monitor	49
3.2.1 지배방정식	49
3.2.2 난류모델(Shear Stress Transport, SST)	53
3.2.3 기본개념 설계	54
3.2.4 Mobile Water Monitor's Nozzle Orifice 유동해석	59
3.2.4.1 Nozzle Orifice 유동해석의 정량적 목표 및 해석대상 범위 설정	59
3.2.4.2 모델링 및 해석 경계조건	66
3.2.5 Mobile Water Monitor 분사각도 및 정류격자 길이에 따른 유동해석	70
3.2.5.1 모델링 및 해석 경계조건	70
3.2.6 Mobile Water Monitor 구조해석	77
3.2.6.1 구조안정성 평가 과정	78
3.2.6.2 유동-구조 연성해석을 위한 모델링 및 해석 경계조건	79
제4장 Water Mist Lance 연구결과	
4.1 Water Mist Lance 관통해석	83
4.1.1 Water Mist Lance 관통해석 결과	83
4.2 Water Mist Lance 성능실험	102
4.2.1 Water Mist Lance 제작 및 성능실험	102

제5장 Mobile Water Monitor 연구결과

5.1 Mobile Water Monitor 유동해석	106
5.1.1 압력조건별 노즐 오리피스 구경 유동해석 결과	107
5.1.2 분사각도에 따른 정류격자 길이 유동해석 결과	123
5.1.2.1 35° 분사각도의 경우	123
5.1.2.2 90° 분사각도의 경우	129
5.2 Mobile Water Monitor 구조해석	134
5.2.1 지지구조 구조건전성 검증을 위한 구조해석 결과	134
5.3 Mobile Water Monitor 성능실험	138
5.3.1 Mobile Water Monitor용 Nozzle 제작	138
5.3.1.1 유량계수 설계기술 개발	138
5.3.1.2 Mobile Water Monitor 제작 및 성능실험	152
5.3.2 Mobile Water Monitor 성능실험(분사거리 및 분사높이)	156
5.3.2.1 Mobile Water Monitor 1차 성능실험	156
5.3.2.2 Mobile Water Monitor 2차 성능실험	158
5.3.2.3 Mobile Water Monitor 설계 변경 및 3차 성능실험	160
5.3.2.4 Mobile Water Monitor 최종 성능실험	170
5.3.2.5 Mobile Water Monitor 성능실험 결과와 유동해석 결과 비교	177
제6장 결 론	179
참 고 문 헌	181

List of Tables

Table 1 Fire Accidents at weather deck area of Container Ship	13
Table 2 Performance Comparison of Mobile Water Monitor Manufacturer ...	31
Table 3 Nodes & Elements	46
Table 4 Material Properties of SUS316L	46
Table 5 Boundary Conditions of Conatiner & Water Mist Lance	47
Table 6 Performance Comparison of Single Nozzle and Through nozzle	58
Table 7 Estimated Horizontal Distance According to Parabolic Motion	64
Table 8 Estimated Discharge Velocity Using Bernoulli Equation	65
Table 9 Nozzle Orifice Range for Flow Analysis	65
Table 10 Finite Element Model Information of Mobile Water Monitor	68
Table 11 Boundary Conditions of Mobile Water Monitor	69
Table 12 Finite Volume Model Grid Information of Mobile Water Monitor Nozzle Analysis	76
Table 13 Boundary condition of mobile water monitor flow analysis	76
Table 14 Structural Safety Quantitative Goals of Mobile Water Monitor	77
Table 15 Boundary Conditions for Flow-Structural Analysis of Mobile Water Monitor	79
Table 16 Finite Element Model Information of Mobile Water Monitor	81
Table 17 Properties of SUS304	82

Table 18	Analysis Results of Equivalent Stress	101
Table 19	Test Results of Water Mist Lance	105
Table 20	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 4 bar	121
Table 21	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 5 bar	121
Table 22	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 6 bar	121
Table 23	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 7 bar	122
Table 24	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 8 bar	122
Table 25	The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 9 bar	122
Table 26	Structural Analysis Result of Basic Model	137
Table 27	Structural Analysis Result of Shape Change Model	137
Table 28	Nozzle Prototype's Flow Coefficient Based on Measurement Results	151
Table 29	Nozzle Orifice Dia. Using the Flow Coefficient Prediction Standard	151
Table 30	Results of Horizontal Throw Length Measurement Using Prototype	153
Table 31	Nodes & Elements of Mobile Water Monitor	163
Table 32	Analysis Result Summary	163
Table 33	Performance Data of Mobile Water Monitor	175
Table 34	Specification of Container Ship in Operation	176
Table 35	Preliminary Test Result Table of Mobile Water Monitor	178

List of Figures

Fig. 1 World Seaborne Trade in 2006 (Billion Ton-Miles)	6
Fig. 2 Attractive Long-Term Growth in Containerized Trade	6
Fig. 3 50 years of Container Ship Growth	7
Fig. 4 Classification of Fire Extinguishing Equipment for Ships	11
Fig. 5 Cargo Area of Container Ship	12
Fig. 6 Picture of M/V CHARLOTTE MAERSK Fire Accident	12
Fig. 7 Transportation of Packaged Dangerous Goods using Container Ship	17
Fig. 8 Concept of Using Mobile Water Monitor(Section View)	18
Fig. 9 Concept of Using Mobile Water Monitor(Plan View)	18
Fig. 10 Picture of Water Mist Lance for Land Use	29
Fig. 11 Picture of UNITOR's(Norway) Water Mist Lance	29
Fig. 12 Picture of Nabtech's(Korea) Water Mist Lance	30
Fig. 13 Mobile Water Monitor of Domestic and Foreign Companies	30
Fig. 14 Picture of UNITOR's Mobile Water Monitor Spraying	31
Fig. 15 Relation of Number of Water Mist Versus Total Surface Area	38
Fig. 16 Notation of LS-DYNA	42
Fig. 17 3D Model of Container & Water Mist Lance	44
Fig. 18 Piercing Nozzle Models of Water Mist Lance	44

Fig. 19	Finite Element Model of Container & Water Mist Lance	45
Fig. 20	Finite Element Model of Water Mist Lance	45
Fig. 21	Stress Strain Curve of Water Mist Lance Materials	46
Fig. 22	Fixed Boundary Condition of Container Wall	48
Fig. 23	Load Boundary Condition of Water Mist Lance	48
Fig. 24	Schematic Diagram of Spray & Jet Nozzle	57
Fig. 25	Schematic Diagram of Through Type Nozzle	57
Fig. 26	Schematic Diagram of Basic Nozzle Model	58
Fig. 27	Parabolic Motion	63
Fig. 28	Schematic Diagram for Nozzle and Discharge Water	63
Fig. 29	Schematic Diagram of Mobile Water Monitor	67
Fig. 30	3D Modeling of Mobile Water Monitor for Flow Analysis	67
Fig. 31	Flow Field and Finite Element Model of Mobile Water Monitor	68
Fig. 32	Boundary of External Flow Field of Mobile Water Monitor	69
Fig. 33	In case of 35° Throw angle	74
Fig. 34	In case of 90° Throw angle	75
Fig. 35	Structural Safety Assessment Process	78
Fig. 36	Mobile Water Monitor 3D Model for Structural Analysis	80
Fig. 37	Finite Element Model of Mobile Water Monitor	80
Fig. 38	Boundary Conditions of Mobile Water Monitor at 9 bar	81
Fig. 39	Fixed Boundary Condition of Mobile Water Monitor	82

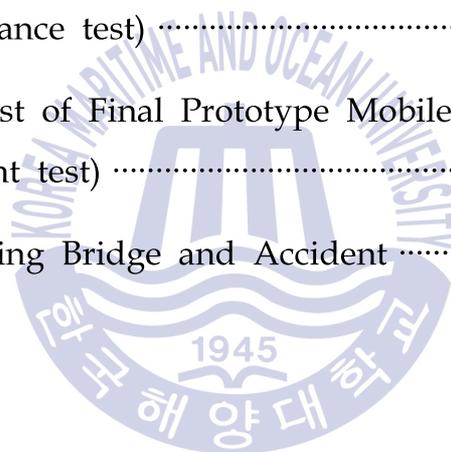
Fig. 40	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 1	86
Fig. 41	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 1	86
Fig. 42	Penetration Response Behavior of Container 1	87
Fig. 43	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 1	87
Fig. 44	Max. Equivalent Stress of Container 1	88
Fig. 45	Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 1	88
Fig. 46	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 2	89
Fig. 47	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 2	89
Fig. 48	Penetration Response Behavior of Container 2	90
Fig. 49	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 2	90
Fig. 50	Max. Equivalent Stress of Container 2	91
Fig. 51	Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 2	91
Fig. 52	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 3	92
Fig. 53	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 3	92
Fig. 54	Penetration Response Behavior of Container 3	93
Fig. 55	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 3	93
Fig. 56	Max. Equivalent Stress of Container 3	94
Fig. 57	Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 3	94
Fig. 58	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 4	95
Fig. 59	Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 4	95
Fig. 60	Penetration Response Behavior of Container 4	96

Fig. 61 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 4	96
Fig. 62 Max. Equivalent Stress of Container 4	97
Fig. 63 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 4	97
Fig. 64 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 5	98
Fig. 65 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 5	98
Fig. 66 Penetration Response Behavior of Container 5	99
Fig. 67 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 5	99
Fig. 68 Max. Equivalent Stress of Container 5	100
Fig. 69 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 5	100
Fig. 70 Schematic Diagram of Water Mist Lance Including Piercing Nozzle ..	103
Fig. 71 Schematic Diagram of Hammer for Water Mist Lance	103
Fig. 72 Picture of Flow Test For Water Mist Lance Nozzle	104
Fig. 73 Picture of Flow Test For Water Mist Lance Nozzle	104
Fig. 74 Picture of Hammer Penetration Test	105
Fig. 75 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 4 bar	110
Fig. 76 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 5 bar	112
Fig. 77 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 6 bar	114
Fig. 78 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 7 bar	116
Fig. 79 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 8 bar	118
Fig. 80 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 9 bar	120
Fig. 81 Fluid Velocity Gradient of Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at a 35° Throw Angle	125

Fig. 82	Fluid Velocity Graph of Each Stabilizer at 35° Throw Angle	126
Fig. 83	Throw Picture of Mobile Water Monitor	126
Fig. 84	Water Volume Fraction of Each Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at 35° Throw Angle	127
Fig. 85	Water Volume Fraction Graph of Each Stabilizer at 35° Disch. Angle	128
Fig. 86	Fluid Velocity Gradient of Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at a 90° Throw Angle	130
Fig. 87	Fluid Velocity Graph of Each Stabilizer at 90° Throw Angle	131
Fig. 88	Water Volume Fraction of Each Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at 90° Throw Angle	132
Fig. 89	Water Volume Fraction Graph of Each Stabilizer at 90° Throw Angle	133
Fig. 90	Structural Analysis Results of the Basic Model(Stress)	135
Fig. 91	Structural Analysis Results of the Basic Model(Safety Factor)	135
Fig. 92	Structural Analysis Result of Shape Change Model(Stress)	136
Fig. 93	Structural Analysis Result of Shape Change Model(Safety Factor)	136
Fig. 94	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 22mm)	140
Fig. 95	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 23mm)	141
Fig. 96	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 23.4mm)	142
Fig. 97	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 24mm)	143
Fig. 98	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 25mm)	144
Fig. 99	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 26.9mm)	145
Fig. 100	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 27mm)	146

Fig. 101	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 28mm) ..	147
Fig. 102	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 29mm) ..	148
Fig. 103	Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 30mm) ..	149
Fig. 104	Nozzle Flow Coefficient Estimation Criteria	151
Fig. 105	1st Prototype Design(Locking Bolt application)	152
Fig. 106	2nd Prototype Design(Locking Pad application)	152
Fig. 107	1st Prototype of Mobile Water Monitor	153
Fig. 108	Setting Prototypes for Horizontal Throw Length Test	154
Fig. 109	Spray Performance Test of Mobile Water Monitor	154
Fig. 110	Horizontal Throw Length Measurement	155
Fig. 111	Setting of 1st Prototype Mobile Water Monitor	157
Fig. 112	Performance Test of 1st prototype Mobile Water Monitor	157
Fig. 113	Setting of 2nd prototype Mobile Water Monitor	159
Fig. 114	Performance Test of 2nd Prototype Mobile Water Monitor	159
Fig. 115	3D Modeling of Mobile Water Monitor	162
Fig. 116	Finite Element Model of Mobile Water Monitor	162
Fig. 117	Fixed Support of Mobile Water Monitor	164
Fig. 118	Boundary Condition of Mobile Water Monitor	165
Fig. 119	Load Condition of Mobile Water Monitor	165
Fig. 120	Max. Deformation of Mobile Water Monitor	166
Fig. 121	Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor	166

Fig. 122 Max. Deformation of Mobile Water Monitor Valve Part	167
Fig. 123 Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor Valve Part	167
Fig. 124 Max. Deformation of Mobile Water Monitor support part	168
Fig. 125 Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor support part	168
Fig. 126 Setting of 3rd Prototype Mobile Water Monitor	169
Fig. 127 Performance Test of 3rd prototype Mobile Water Monitor	169
Fig. 128 Setting of Final Prototype Mobile Water Monitor	172
Fig. 129 Performance Test of Final Prototype Mobile Water Monitor (33° spray distance test)	173
Fig. 130 Performance Test of Final Prototype Mobile Water Monitor (90° spray hight test)	173
Fig. 131 Picture of Lashing Bridge and Accident	174



A Study on Optimal Design of Penetration Type Injection Device for Fire Suppression above the Weather Deck Area of Container Ship

Han, Sang Goo

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

According to the SOLAS Convention, vessels constructed after January 1st 2016 that are carrying five or more containers in a weather deck area, are required to have a Water Mist Lance and a Mobile Water Monitor fire extinguisher in order to combat container fires.

In this study, the optimum model was selected from numerical analysis for Water Mist Lance and Mobile Water Monitor fire extinguisher and the prototypes were manufactured based on the analysis results.

Additionally, performance tests were conducted to compare with the initial analysis results.

Water Mist Lance is a fire extinguisher that spray water through the inside of a container wall with a sharp nozzle like a lance. The radius of curvature of the leading edge is the key design point.

5 models(10mm/12.5mm/15mm/17.5mm/20mm) with different radius of curvatures were subjected to penetration analysis using ANSYS LS-DYNA for this study. As a result of the overall analysis, 15mm was interpreted as an optimal model which was applied to the Water Mist Lance prototype. As a result of the performance test, the penetrating ability of the container

wall was measured resulting in the flow coefficient(K) of 30, the discharge quantity of 67 l /min, and the throw length of 6m.

For the study of the mobile water monitor which satisfies the design standard required by the SOLAS Convention, Numerical analysis was carried out on the setting of the nozzle orifice range for each working pressure, the setting of the length of stabilizer to equalize the channel of the water discharged from the nozzle and the structural safety.

First, ANSYS WorkBench was utilized to analyze the optimal nozzle range. As a result, the size of nozzle orifice was calculated as 29mm at 4bar, 27mm at 5bar, 25mm at 6bar, 24mm at 7bar, 23mm at 8bar and 22mm at 9bar.

Second, the maximum throw length was analyzed with ANSYS FLUENT at throw angle of 35° and 90° , stabilizer length of 3cm, 4cm, 5cm. As a result of interpreting the throw length as a volume fraction, a gradient was formed in the range of about 1 to 2 m, and it was similar to the actual result. The maximum throw length was calculated as 47m at a stabilizer length of 4cm.

Finally, ANSYS WorkBench was used to analyze the flow - structure ductility of the valve part and support part of the Mobile Water Monitor. As a result of the analysis, deformation and stress were generated due to discharge pressure and reaction force of water, but it was within the allowable range.

Based on the results of the analysis, the prototype was manufactured and the experimental results were obtained. As a result, the discharged quantity of 62.7m³/h and the throw length of 41m were obtained at the inlet pressure of 4bar and the discharge angle of 33.8° .

The fire extinguisher studied in this paper is expected to have a high value as a new fire extinguishing system because it can minimize the increase of the capacity of the main fire pump. Further studies on the improvement of marine(ship, offshore plant, etc.) and water-based fire extinguishing equipment is necessary.

컨테이너선 개방갑판구역 화재진압을 위한 관통형 분사장치의 최적설계에 관한 연구

한 상 구

기관시스템공학과
한국해양대학교 대학원

초 록

SOLAS협약에서 2016년 1월 1일 이후 건조되는 개방갑판구역에 컨테이너를 5단 이상 적재하는 선박은 컨테이너 화재진압을 위하여 Water Mist Lance 및 Mobile Water Monitor를 의무적으로 비치하도록 규정하였다.

본 연구에서는 Water Mist Lance 및 Mobile Water Monitor 소화장치에 대하여 수치해석을 통해 최적의 모델을 선정하고 해석결과를 바탕으로 실험장치를 제작, 성능실험을 실시하는 연구를 수행하였다.

Water Mist Lance는 끝이 창(槍)처럼 뾰족한 노즐을 컨테이너 벽면을 관통하여 화재가 발생한 내부에 물을 분사하는 소화장치로 침단부분의 곡률반경이 설계의 핵심사항이다. 본 연구에서는 침단곡률반경이 다른 5가지 모델(10mm, 12.5mm, 15mm, 17.5mm, 20mm)에 대하여 ANSYS LS-DYNA를 이용해 관통해석을 실시하였다.

해석결과 15mm가 최적의 모델로 해석되었고, Water Mist Lance를 제작하여 성능실험을 실시하였다. 성능실험 결과, 컨테이너 벽면 관통 성능과 유량계수(K) 30, 분사량 67 ℓ/min, 분사거리 6m의 성능을 확인할 수 있었다.

SOLAS협약에서 요구하고 있는 성능기준을 만족하는 Mobile Water Monitor 연구를 위해 사용압력별 Nozzle Orifice 범위설정, Nozzle에서 토출되는 물의 채널을 균일하게 하는 정류격자 길이 설정 및 물에 의한 Mobile Water Monitor의 구조안전성에 대하여 수치해석을 실시하고, 실험 장치를 제작하여 성능실험을 실시하였다.

첫째로, Nozzle은 관통형 Nozzle을 적용하여 최적의 Nozzle Orifice 범위를 ANSYS WorkBench를 사용하여 해석하였다. 해석결과, Nozzle Orifice 크기는 사용압력 4bar에서 29mm, 5bar에서 27mm, 6bar에서 25mm, 7bar에서 24mm, 8bar에서 23mm, 9bar에서 22mm로 계산되었다.

둘째로, 분사각도 35° 와 90° 에서 정류격자 길이 3cm, 4cm, 5cm에 대해 최대 분사거리를 ANSYS FLUENT를 통해 해석하였다. 물의 체적분율을 기준으로 분사거리를 해석한 결과 약 1 ~ 2m의 영역에서 구배가 형성되어 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 최대 분사거리는 정류격자 길이 4cm에서 47m로 계산되었다.

마지막으로 Mobile Water Monitor의 관로부와 지지부에 대한 유동-구조 연성해석을 ANSYS WorkBench를 사용하여 수행하였다. 해석결과 소화수의 분사압력 및 반력으로 인해 변형과 응력이 발생하지만 허용범위 이내였다.

해석결과를 바탕으로 실험장치를 제작하여 성능실험을 실시하였고, 그 결과 Mobile Water Monitor 입구압력 4bar, 분사각도 33.8° 에서 분사량 $62.7\text{m}^3/\text{h}$, 분사거리 41m를 얻을 수 있었다.

본 논문을 통해 연구된 화재진압용 소화장치는 본선 소화펌프의 용량 증가를 최소화 할 수 있다는 점에서 신조되는 선박의 소화장치로서 활용가치가 높을 것으로 기대되며, 향후 해상 및 육상의 수계 소화장치 개선 연구에도 도움이 될 것으로 판단된다.

제1장 서론

1.1. 배경 및 목적

2000년 우리나라의 국내총생산은 약 11조 2,170억 원으로 이 중 해양산업이 차지하는 비중은 2.7 %였으나, 2007년 국내총생산은 비약적인 발전을 이루어 약 79조 1,810억 원으로 이 중 해양산업의 비중은 3.3 %였던 것으로 한국해양수산개발원의 연구서 조사되었다. 아울러 2020년까지 국내 총생산에서 해양산업이 차지하는 비중은 10 %로 증가할 것으로 전망했다. 여전히 해양산업의 발전 잠재력이 크므로 향후 국가 경제적인 측면이 해양산업에 있음을 보여주는 것으로 판단된다[한국해양재단, 2014].

또한, 경제적인 성장은 보편적으로 해상물동량의 수요를 창출하며 이에 부응하여 해상 교역을 위한 선박량 증가를 가져오게 된다. 최근 선박량 증가추세는, World Fleet Statistics(IHS Fairplay, 2014)의 자료를 보면 2014년 세계 총 선박량은 약 11억6천7백만 G/T로서 2008년의 8억3천만 G/T와 비교해 불과 6년 만에 40 %이상 증가되었고, 선종별로 보면 해상교통량과 밀접한 관계가 있는 화물선의 증가율이 전체 증가율과 거의 동일한 40 %이다. 그 중에서도 컨테이너선(43.6 %)이 기타액체화물선(382.9 %) 다음으로 큰 폭으로 증가하였다[심유택, 2017].

이러한 선박량의 증가로 다양한 화물이 국제적으로 운송되고, 이로 인해 각종 사고발생 가능성이 높아지고 있다. 그 동안 발생한 선박사고 중 화재 등으로 인해 일어난 사고가 5 %이하에 머물렀지만, 2010년 이후 5 %이상으로 증가한 점으로 보아 해양산업의 지속적인 발전에도 불구하고 화재 등으로 인해 발생하는 선박사고는 지속적으로 증가하고 있다. 자세히 살펴보면 2009년부터 2013년까지 우리나라에서 화재·폭발로 인해 일어난 선박사고는 2012년 7.58 % (55건)으로 가장 높았고, 2009년 4.70 % (34건), 2010년 3.39 % (25건), 2011년 6.03 % (57건), 2013년 6.74 % (43건)로 지속적으로 증가하는 양상을 보였다[유지선, 정영진, 2015].

이러한 선박화재는 고가의 선박과 적재된 화물 그리고 선원들의 생명과 재산을

바다 속으로 침몰시킬 수 있는 선박 운항 상 장애요인 이라고 할 수 있는데 대개 화재발생 원인을 보면 화물의 특성상 자연발화와 선원들의 부주의로 발생하는 인위적인 경우가 크다 할 수 있다. 또한, 선박에서의 화재와 일반적인 화재의 가장 큰 차이점은 소화활동이 제한된다는 것이다. 선박은 대양을 항해하는 특성상 외부로부터의 화재진압에 대한 도움을 받을 수 없으므로 화재를 진압하는 소화작업을 선박의 내부에서 자체적으로 해결하여야 한다[김동찬, 김만웅, 조대한 & 이영호, 2012].

더불어 선박화재는 발화물과 발생장소에 따라 약간의 차이는 있으나, 순식간에 선박 전체로 화재가 확산되어 선박기능을 정지시키므로 바다 또는 호수의 물위에서 운영되는 특수한 여건을 감안하여 충분한 예방책을 세워야 한다.

이에 따라서 1974년 해상인명안전협약(SOLAS)¹⁾ 제Ⅱ-2장에서는 방화, 화재탐지 및 소화를 위하여 선박이 갖추거나 이행되어야 할 사항들을 규정하고 있다 [SOLAS, 2016].

특히, 소화장치는 “언제든지 누구나 쉽게 사용할 수 있어야 하며, 확실한 소화 성능을 발휘해야 한다.”는 원칙에 따라 많은 요건이 정해져 있다. 이러한 요건들의 원칙 및 공통점을 정리하면 아래와 같다[한국선급, 2004].

가. 지침 및 훈련

- 1) 선박에 설치되는 모든 소화장치는 언제든지 누구나 쉽게 사용할 수 있도록 작동과 관련된 지침 및 주의사항을 소화장치를 조작하는 장소에 게시하도록 요구하고 있으며, 평상시에 적절한 훈련²⁾을 실시하도록 요구하고 있다.

나. 소화장치의 신뢰성

1) SOLAS(International Convention of Safety Of Life At Sea)는 1912년 4월에 발생한 “M/V TITANIC”의 침몰사고를 계기로 해상에서의 인명안전을 위해 1914년에 제정된 국제협약이다. 그 이후에 1929년, 1948년, 1960년, 1974년에 대폭적인 개정이 이루어졌으며, SOLAS가 현재의 형태로 발전한 것은 1974년에 개정된 SOLAS이다.

2) 모든 선원은 매달 1회의 소화훈련에 참가하여야 한다. 총 선원의 25%를 초과하는 선원이 그 전월에 당해 선박에서 소화훈련에 참가하지 아니하였다면 선원의 훈련은 출항후 24시간 이내에 행해져야 한다.

- .1 소화장치는 화재로 인해 작동불능이 되거나 작동 중의 의도하지 않은 상황으로 인해 작동불능이 되어서는 안 된다.
- .2 따라서 소화장치에 의해 보호되는 구역 내에서 발생한 화재로 인해 소화장치 관련 기기 및 관장치가 손상되는 일이 없도록 소화장치와 관련된 모든 기기와 관련 관장치는 그 소화장치에 의해 보호되는 구역 내에 설치되거나 보호구역을 통과하지 않는 것이 원칙이다.
- .3 또한, 소화장치는 매우 높은 안전계수를 가지도록 설계하여, 소화장치 작동시에 발생하는 의도하지 않은 상황에서도 항상 사용할 수 있어야 한다. 이러한 요건에는 관장치에 발생하는 과도한 압력으로 관장치가 손상되거나 관장치에서 소화제가 누설되는 것을 금지하는 요건, 화재의 확실한 진압을 위해 충분한 양의 소화제를 언제든지 사용할 수 있도록 선박 내에 비치하여야 하는 요건, 통상 인원이 배치되는 구역에서 소화장치 작동에 관련된 기기로의 원활한 접근을 위한 요건 등이 있다.

다. 인명피해의 최소화

- .1 소화장치를 작동시켜 소화제가 보호구역에 방출되었을 때, 그 구역 내에 있는 인원이 그 구역 외부로 탈출할 수 있도록 탈출설비가 요구된다.
- .2 대부분의 소화제는 질식효과와 냉각효과를 사용하며, 이러한 소화제는 독성을 가진 경우가 많다. 따라서 인명의 안전을 위해서는 소화제가 방출되는 것을 알리는 경보장치, 경보장치에 따른 대응조치에 대한 교육 및 훈련, 안전한 탈출을 위해 화재로부터 사람을 보호할 수 있는 탈출경로, 비상호흡구와 같이 탈출 시에 인원의 생명유지를 위해 필요한 설비 등에 대한 요건이 있다.

라. 비상수단

- .1 소화장치의 원활한 작동을 위해 많은 요건들이 정해져 있지만, 자체적인 원인 또는 외부적인 요인으로 인해 소화장치를 작동시킬 수 없는 경우가 있을 수 있다.

.2 이러한 소화장치의 작동불능 상태를 고려한 적절한 비상수단을 요구하고 있다.

본 논문에서는 선박 화재사고 시 가장 중요한 안전장치 중 하나인 소화장치 개발을 위하여 국내외 유사 제품에 대한 개발동향을 파악하고, 실험장치 제작에 앞서 시행착오를 줄이기 위해 유동해석 및 구조해석을 실시, 최적의 모델을 선정하여 이에 대한 실험장치를 제작해 성능실험을 실시함으로써 최적의 Water Mist Lance 및 Mobile Water Monitor를 설계하는데 목적이 있다.



1.2 선박 화재와 관련된 SOLAS 규제

선박은 기본적으로 여객과 화물을 운송하는 목적의 운송기계이며, 대부분의 선박은 화물을 운송하는 화물선이다. 화물선은 운송하는 화물의 종류에 따라 다양한 형태가 존재하는데, 최근에는 포장된 형태의 화물 즉, 컨테이너를 운송하는 컨테이너 선박이 크게 증가하였다.

화물의 운송은 자동차, 철도, 비행기 및 선박 등으로 이뤄지는데, IMO가 발행한 GHG Study Report 등에 따르면, 국제적인 물동량의 약 80 %는 선박으로 운송되고 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 선박은 Fig. 1과 같이 에너지, 식량, 원재료, 최종제품 등 여러 형태의 화물을 운송하고 있다. Fig. 1에서 기타로 분류되어 있는 화물로는 컨테이너, 자동차, 강판(Steel Plate) 등이 대표적이며, 많은 부분이 컨테이너 화물에 해당될 것으로 판단된다. 또한, 이러한 상황을 고려해 볼 때, 컨테이너 선박은 해상 물동량의 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 2는 컨테이너 물동량의 증가 추이와 컨테이너 물동량 변화량과 국제 GDP의 성장률을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 컨테이너의 물동량은 1990년부터 2009년까지 연 평균 10.1 %, 2010년부터 2015년까지 연 평균 7.3 % 성장하였다는 것을 알 수 있다. 2009년부터 컨테이너 물동량이 급격하게 줄어든 것은 2009년에 발생한 금융위기에 의한 것으로 판단된다.

특히, 전년 대비 컨테이너 물동량의 변화율은 국제 GDP 성장률과 유사한 형태를 나타낸다는 것을 알 수 있는데, 2009년에 발생한 금융위기에 의한 컨테이너 물동량의 급격한 감소는 국제 GDP 성장률보다 3배 이상 큰 것으로 나타나고 있다.

Fig. 1과 Fig. 2를 종합하여 검토해 보면, 컨테이너 물동량은 매년 7 % ~ 10 % 정도의 증가율로 지속적으로 증가하고 있으며, 국제 경기에 매우 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 이는 컨테이너로 운송되는 화물이 에너지 및 원재료와 관련된 제품이 아니라 최종 제품 위주로 운송되기 때문인 것으로 판단된다.

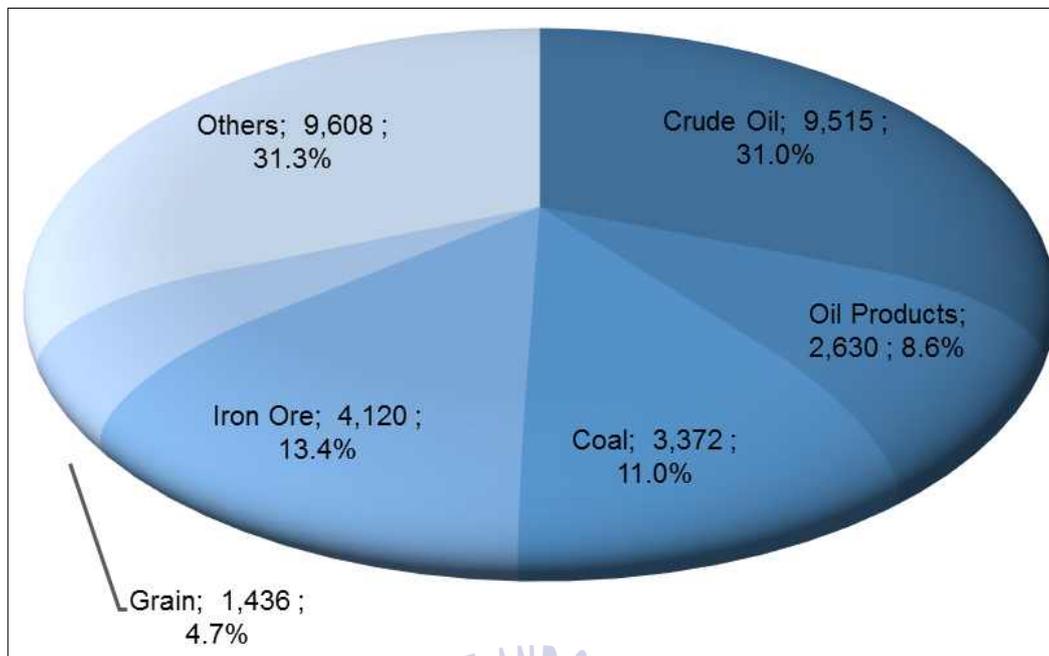


Fig. 1 World Seaborne Trade in 2006 (Billion Ton-Miles)
(Source: IMO Second GHG Study Report)

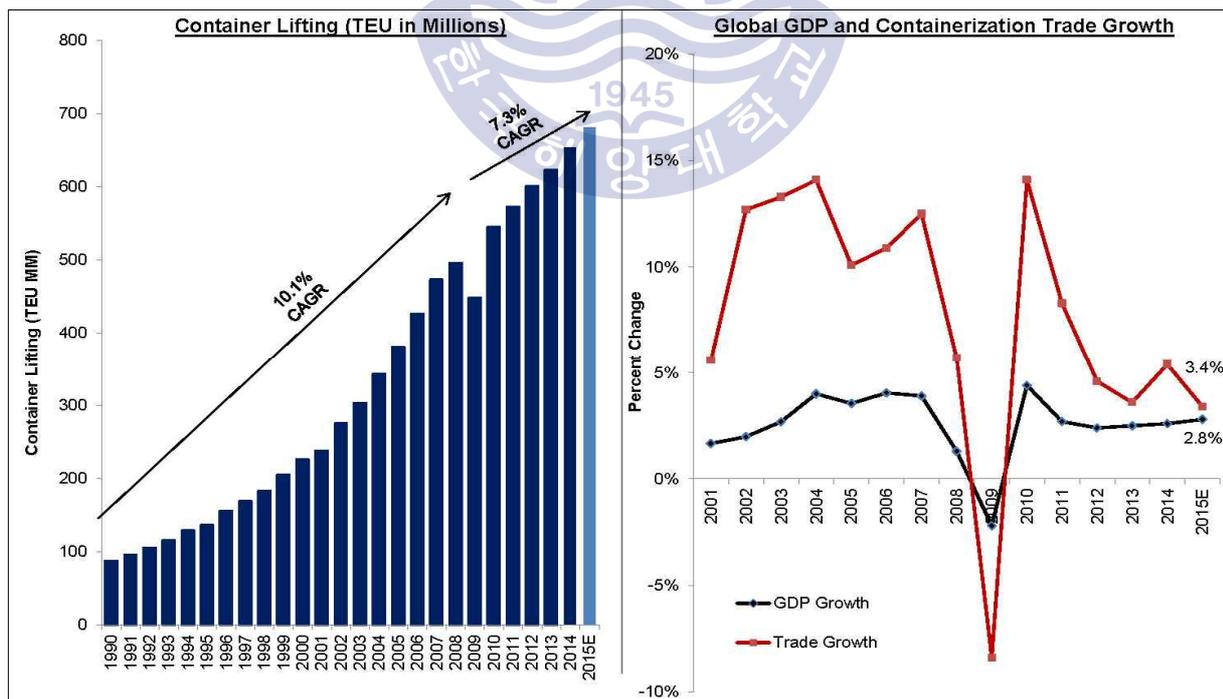


Fig. 2 Attractive Long-Term Growth in Containerized Trade
(Source: Investor Presentation. Nov. 2015, TAL international)

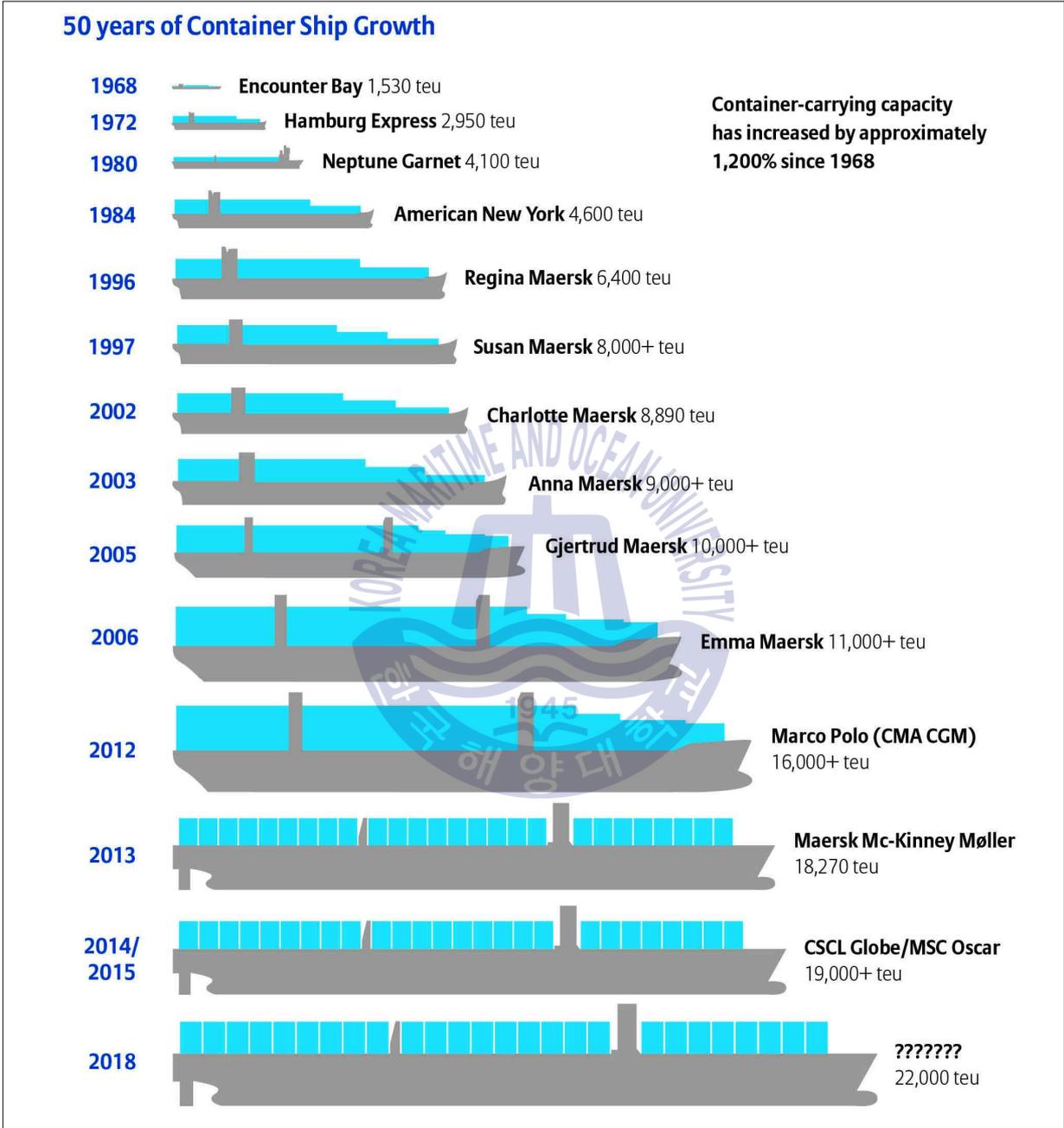


Fig. 3 50 years of Container Ship Growth
 (Source: Container Ship Design, World Shipping Council)

또한, 이러한 컨테이너 물동량의 증가로 인해, Fig. 3과 같이 컨테이너 선박의 수와 컨테이너 선박의 크기가 필연적으로 증가하고 있다. 이러한 선박 크기의 증가로 인해 컨테이너 선박의 적재되는 컨테이너 수는 필연적으로 증가하며, 이에 따라 개방갑판에 적재되는 컨테이너의 적재 단수도 증가되게 되었다.

컨테이너 선박 크기의 증가는 결과적으로 컨테이너선을 이용한 포장된 상태의 위험물(Dangerous Goods)의 운송의 증가로 이어졌다.

위험물이란 운송 시 건강, 안전, 재산 및 환경에 부당한 피해를 끼칠 수 있는 모든 물질 및 제품을 말한다. 화약류, 인화성 액체, 산화성 물질 등을 포함한 위험물에는 이전에 위험물을 담았던 세척되지 않는 빈 포장용기도 포함된다.

위험물은 제품의 위험성에 따라 제1급부터 9급까지 분류하며, 제1급은 화약류, 제2급은 가스류, 제3급은 인화성 액체, 제4급은 가연성 고체, 제5급은 산화성 물질 및 유기과산화물, 제6급은 독극물 및 전염성 물질, 제7급은 방사성 물질, 제8급은 부식성 물질, 제9급은 기타의 위험물 및 제품이다[해양한국, 2015].

포장 위험물을 해상운송하기 위해서는 국제해상위험물규칙(IMDG CODE)³⁾에서 정하는 운송요건에 적합하여야 한다.

이를 위해 화주는 위험물을 정확하게 분류해야 하고, 해당 위험물에 가장 적합한 포장용기를 사용해야 하며, 적절한 표시, 표찰 및 명찰을 부착하고, 선박에서도 적절하게 격리, 적재 및 고박 되어야 한다. 이와 함께 위험물 운송관련 종사자는 관련 교육을 의무적으로 받아야 하며, 위험물과 관련된 사고시의 비상조치법 및 의료 응급처치법을 숙지해야 한다. 화주 및 선박소유자 또는 선장은 위험물과 관련된 선적서류(컨테이너 수납검사증, 위험물 신고서 등)를 준

3) IMDG코드(International Maritime Dangerous Goods Code)는 1956년 유엔경제사회이사회의 위험물운송 전문가위원회에서 제정한 '위험물 운송에 관한 유엔권고(일명 오렌지북)를 기본 골격으로 국제해사기구가 1965년 제정한 포장 위험물의 해상운송 시 적용하는 국제규칙이다. IMDG코드는 위험물을 그 특성에 따라 제1급부터 제9급까지 분류하고 이들 위험물의 표시 및 표찰, 포장방법 및 포장용기 기준, 선적서류, 선박 적재방법 및 위험물 상호 간의 격리 등 포장 위험물의 해상운송에 관한 기본원칙을 규정하고 있다. 위험물의 화재 또는 누출 시 비상 대응절차, 인명사고 시 의료응급처치지침, 화물고박지침 및 선박에서 살충제의 안전사용 방법 등에 관한 규정도 수록돼 있다. 2004년 31차 개정판부터 강제화 됐다. 2015년 37차가 개정된 IMDG코드는 2년마다 개정되고 있고, 국내 규정도 이에 맞춰 개정되고 있다.

비해야 하며, 이를 반드시 1년 이상 사무실 또는 선상에 보관해야 한다.

하지만, 컨테이너를 통한 위험화물 운송 시 화주들이 컨테이너에 화물 적입 시 안전하게 철저한 포장 및 고박을 하고 제대로 운송인(선주, 선장 등)에게 화물에 대한 주의사항을 사전에 충실히 고지해야 하는데 추가 운임이나 혹은 IMDG 코드에 규정된 보다 엄격한 운송 요건들을 피하기 위하여 통상적으로 무해한 제품으로 화물을 기술함으로써 의도적으로 부정확하게 신고하는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 컨테이너 선사는 화물 자체가 적입된 상태에서 봉인되어 있기 때문에 컨테이너 내장 화물의 종류와 포장 등 적입 상태를 알 수 없다.

따라서, 위험화물이 일반화물로 둔갑되고, 액체 위험화물에 대한 포장을 철저히 하지 않아 누설이 생기면서 주변에 실린 컨테이너 화물에 오염 시키는 경우도 있으며 선박이 열대 해역을 통과하면서 고온 다습한 날씨로 인해 컨테이너 내부의 온도가 오르면서 자연발화 등으로 인한 폭발 및 화재가 발생하기도 한다[한국선주상호보험, 2017].

이와 같이 선박에서 화재사고는 선박에서 발생하는 가장 위험한 사고 중의 하나이므로 이러한 화재를 진압하기 위해 선박에 설치되는 소화설비는 가장 중요한 안전장치 중 하나이다.

선박에서 사용되는 소화설비는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 소화펌프, 가스계 소화설비 및 수계 소화설비가 있으며, 소화펌프는 모든 선박에 공통적으로 적용되는 소화설비이다. 이러한 소화 시스템은 선박 내에 발생할 수 있는 화재를 진압 및 소화시키는 Internal Fire Fighting System이라 할 수 있으며, External Fire Fighting System은 타 선박 소화설비로서 타 선박 화재 시 Fire Monitor를 통하여 화재진압을 할 수 있다. Tug Boat, Patrol Vessel, Coast Guard 등에 적용되고 있으며, Touch Screen을 이용한 소화모니터의 이동 각도 및 각종 밸브의 개폐동작을 한눈에 알 수 있다. 또한, 각 타 선박 소화 모니터를 Jet Mode 또는 Spray Mode로 설정하여 소화수를 방출할 수 있다[정경문, 손영일, 2009].

최근 IMO에서는 2014년 5월 개최된 제93차 MSC회의에서 해사안전위원회 결의안 Resolution MSC.365(93)을 채택, 해상인명안전협약(SOLAS)를 개정하여,

2016년 1월 1일 이후에 건조되는 개방갑판에 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 되어있는 모든 선박에 Water Mist Lance 1set와 Mobile Water Monitor 4sets(작은 선박은 2sets)를 의무적으로 설치하도록 하였다. 이 소화장치는 주 소화펌프와 비상 소화펌프에서 해수를 공급하고, 소화전 및 소화호스에서 해수를 소화수로서 공급하는 방식으로 작동된다.

선박의 개방갑판상에 컨테이너를 5단 이상 적재할 수 있는 선박은 대부분이 컨테이너 선박이며, 이러한 컨테이너 선박의 화물구역은 Fig. 5와 같이 갑판하부 구역(화물창, Cargo Hold)과 갑판상부구역(개방갑판구역, Weather Deck)로 구분된다. 컨테이너 선박의 화물창은 기존에 탄산가스 소화설비(CO₂ System) 등이 설치되어 있어, 화재 발생 시에 신속한 화재진압이 가능하지만, 개방갑판 구역은 화재 발생 시에 소화전 이외에는 별도의 소화설비가 없어 화재 발생 시에 많은 피해가 발생하였다.

Fig. 6은 2010년 7월 7일 발생한 M/V “Charlotte Maersk”호의 화재사고 현장의 모습이며, 동 사고는 말레이시아 연안 근처에서 화재가 발생하여 육상의 지원(소방선, 소방비행기 등)을 받을 수 있지만[Danish Maritime Accident Investigation Board, 2012]⁴⁾, 대양에서는 이러한 지원을 받을 수 없는 상황이 되므로 개방갑판 구역의 고단에 있는 컨테이너에서 발생한 화재에 대한 대안이 필요한 상황이다.

4) 덴마크 해사 사고 조사위원회는 화재가 Methyl Ethyl Ketone Peroxide(MEKP)를 보관하고 있는 컨테이너에서 발생한 것이라고 분석하였다.

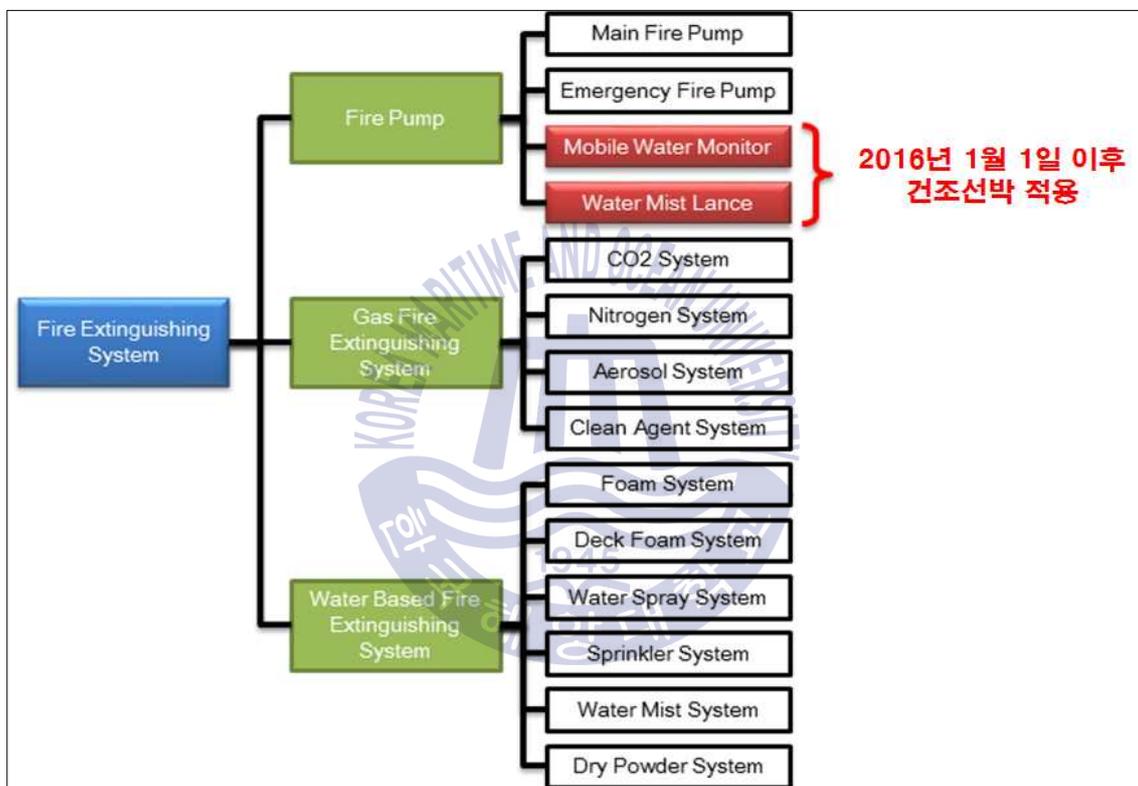


Fig. 4 Classification of Fire Extinguishing Equipment for Ships



Fig. 5 Cargo Area of Container Ship



Fig. 6 Picture of M/V CHARLOTTE MAERSK Fire Accident(2010.07.07.)

개방갑판 화물구역에 컨테이너를 적재할 수 있는 선박의 소화설비에 대한 논의는 2007년 10월에 개최된 제83차 해사안전위원회(MSC83, 83rd Maritime Safety Committee)에서부터 시작되었다.

83차 MSC회의에서는 독일이 MSC 83/25/5 “Proposed review of SOLAS chapter II-2 with regard to fire protection of cargoes carried on deck”를 제출하여 개방갑판에서 적재되어 있는 컨테이너에서 발생하는 화재사고가 자주 발생하고 있으며, 이를 제어할 수 있는 수단이 없어 많은 문제가 되고 있음을 지적하였다. MSC 83/25/5에 따르면, 1998년부터 2006년 까지 컨테이너 선박의 개방갑판에서 최소 12건의 화재사고가 발생하였으며, 그 상세는 Table 1과 같다.

Table 1 Fire Accidents at weather deck area of Container Ship

No.	Ship Name	Year	Kind of accident	Loss
1	DG Harmony	1998	Fire	Total loss, US\$16 Mil.
2	Sealand Mariner	1998	Explosion, Fire	Two Fatalities
3	Aconagua	1998	Explosion, Fire	Unknown
4	Ever Decent	1999	Fire following a Collision	Unknown
5	CMA Djakarta	1999	Explosion, Fire	Total loss
6	Hanjin Bremen	2000	Fire	Unknown
7	Slovan Treveller	2001	Fire	Unknown
8	Hanjin Pennsylvania	2002	Fire, Explosion	Two Fatalities, CTL*, US\$70 Mil. Loss
9	Sea Elegance	2003	Fire	One Fatality
10	LT Utile	2003	Fire	Unknown
11	MOL Renaissance	2006	Fire	Unknown
12	Hyundai Fortune	2006	Fire	possibly CTL*, 5,500 TEU

* CTL means Constructive Total Loss.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 IMO에서는 약 7년 간의 논의를 거쳐서, Mobile Water Monitor와 Water Mist Lance에 대한 요건인 Res. MSC.365(93) 및 MSC.1/Circ.1472를 발행하였으며, 2013년 6월에 개최된 제92차 MSC회의에서 승인(Approval)된 후, 2014년 5월에 개최된 제93차 MSC회의에서 채택(Adoption)되었다[IMO, 2014].

Res. MSC.365(93) 및 MSC.1/Circ.1472는 묵시적 수락절차를 거쳐서 2016년 1월 1일 이후에 건조되는 선박부터 적용되고 있다.

2010년 이후 선박을 이용한 포장위험물질의 해상운송은 2010년 7,732 천톤, 2011년 8,675 천톤, 2012년 10,163 천톤, 2013년 11,945 천톤, 2014년 13,613 천톤으로 매년 증가하고 있으며, 이 중 컨테이너 선박을 이용한 운송도 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 지속적으로 증가하고 있다. 이와 함께, Table 1에서 언급된 컨테이너 선박 화재사고 이외에 2010년 이후 MSC FLAMINIA(6,732TEU, 2012년), H/J GREEN EARTH(13,000TEU, 2015년), M/V KAMALA(2,500TEU, 2015년) 등 컨테이너 선박에서 위험화물 등으로 인한 사고도 지속적으로 발생하고 있어 폭발·화재로부터 인명안전, 화물보호를 위한 소화설비(장치)는 선박에 지속적으로 비치·운용되어야 한다[한국해사위험물검사원, 2015].

1.2.1 IMO Regulation에 따른 설계 요구 사항

Res. MSC.365(93)에 따라 개정된 SOLAS 협약에서는 2016년 1월 1일 이후에 건조되는 개방감판상에 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 설계된 모든 선박에 Mobile Water Monitor와 Water Mist Lance의 선박 비치를 의무화 하고 있으며, MSC.1/Circ.1472에서는 Mobile Water Monitor의 형식승인을 위한 기술적 요건들을 다루고 있다[IMO, 2014; 해양수산부, 2016; ABS, 2016].

1.2.1.1 Water Mist Lance

SOLAS Reg. II-2/7.3.1.1에서는 “Water Mist Lance는 컨테이너 벽을 관통하여 소화주관에 연결되었을 때 폐쇄공간(컨테이너 등) 내부에 물분무를 발생할 수 있는 관통 노즐을 갖춘 관으로 이루어져야 한다.”라고 규정하고 있다.

이는 선원들이 접근할 수 있는 장소에 적재되어 있는 컨테이너(일반적으로 Tier 1~Tier 3)의 내부에서 화재가 발생할 경우, 화재가 다른 컨테이너로 화재가 확산되기 이전에 화재를 진압하기 위한 장비로서 Water Mist Lance의 사용을 의무화 하고 있는 것이다.

1.2.1.2 Mobile Water Monitor

Mobile Water Monitor는 적재된 컨테이너 베이(Bay)⁵⁾ 사이에서 소화수를 최고단 컨테이너(일반적으로 Tier 5 ~ Tier 10)까지 공급할 수 있어야 하며, 선박의 갑판 상부에서 무인 또는 1인이 쉽게 작동시킬 수 있는 것이어야 하는 것이 원칙이다.

Mobile Water Monitor는 SOLAS Reg. II-2/7.3 및 MSC.1/Circ.1472의 요건에 적합하여야 하며, 관련 요건의 내용을 정리하고 있다. SOLAS Reg.II-2/7.3의 내용을 정리하면 아래와 같다.

가. 개방(노천)갑판 상에 컨테이너를 5단 이상 적재하도록 설계된 선박은 Water Mist Lance에 추가하여 다음과 같이 Mobile Water Monitor를 비치하여야 한다.

- .1 너비가 30m 미만인 선박에는 적어도 2개의 Mobile Water Monitor
- .2 너비가 30m 이상인 선박에는 적어도 4개의 Mobile Water Monitor

나. Mobile Water Monitor, 모든 필요한 호스, 장치 및 요구되는 고정 장구는 화물구역의 화재발생 시 차단될 가능성이 없는 화물구역 바깥구역에서 즉시 사용할 수 있도록 유지하여야 한다.

다. 다음과 같이 충분한 수의 소화전이 비치되어야 한다.

- .1 비치된 모든 Mobile Water Monitor는 각 컨테이너 베이 전후에 효과적인 물 장벽을 형성할 수 있도록 동시에 작동 가능하여야 한다.
- .2 두 줄기의 사수(Two jets of water)는 0.27 N/mm²(화물선 총톤수 6,000톤 이상) 또는 0.25 N/mm²(화물선 총톤수 6,000톤 미만)의 압력으로 공급 가능

5) 베이(Bay)는 인접해 있는 두 개의 래싱 브릿지 또는 래싱 스테이션 사이에서 길이 방향으로 뻗어있는 여러 개의 스택을 포함하는 해치 또는 해치 커버와 관련된 컨테이너의 횡 방향 블록

하여야 한다.

- .3 요구되는 Mobile Water Monitor의 각각은 갑판상의 컨테이너 최상단까지 도달하는데 필요한 압력으로 별도의 소화전에서 공급 가능하여야 한다.
- 라. Mobile Water Monitor는 소화주관에 연결할 수도 있다. 단, 소화펌프와 소화주관 직경은 요구되는 압력에서 소화호스로부터 Mobile Water Monitor와 두 줄기의 사수를 동시에 작동하기에 적절한 것을 조건으로 한다.
- 마. 각 Mobile Water Monitor의 작동성능은 선내 최초검사 중에 주관청이 인정하는 시험을 받아야 하며, 시험은 다음 사항을 확인하여야 한다.
 - .1 Mobile Water Monitor는 안전하고 효과적인 작동을 확보하기 위하여 선내 구조물에 고정할 수 있어야 한다.
 - .2 Mobile Water Monitor의 물줄기는 모든 요구되는 소화호스에 연결된 Mobile Water Monitor와 물분사가 동시에 작동된 상태에서 갑판상의 컨테이너 최상단까지 도달하여야 한다.

1.2.1.3 MSC.1 / Circ.1472

- 가. 국제협약 체결 당사국 정부 및 선급으로부터 형식인증을 받을 것
- 나. 내식성 재료로 제작할 것
- 다. 단일의 Monitor로서 분사(Jet) 및 분무(Spray)의 형태로 해수(Sea Water)를 방출할 수 있을 것
- 라. 소화수 계통에서 소화수를 공급받을 수 있도록 연결부(Coupling)를 갖출 것
- 마. 선박의 최고단(Top Tier)의 컨테이너에 최소 60 m³/h의 유량으로 소화수를 공급할 수 있을 것(Fig. 8 ~ Fig. 9 참조)
- 바. Mobile Water Monitor 입구부에서의 압력이 4 bar이고, 분사각도가 30 ~ 35°인 경우에, 수평 분사거리가 40 m 이상일 것
- 사. 소화펌프(Fire Pump)는 기존의 요건(2줄기 또는 4줄기)에 의해 요구되는 유량(180 m³/h)과 Mobile Water Monitor에 의해 필요한 유량(240 m³/h + a)을 동시에 공급할 수 있을 것

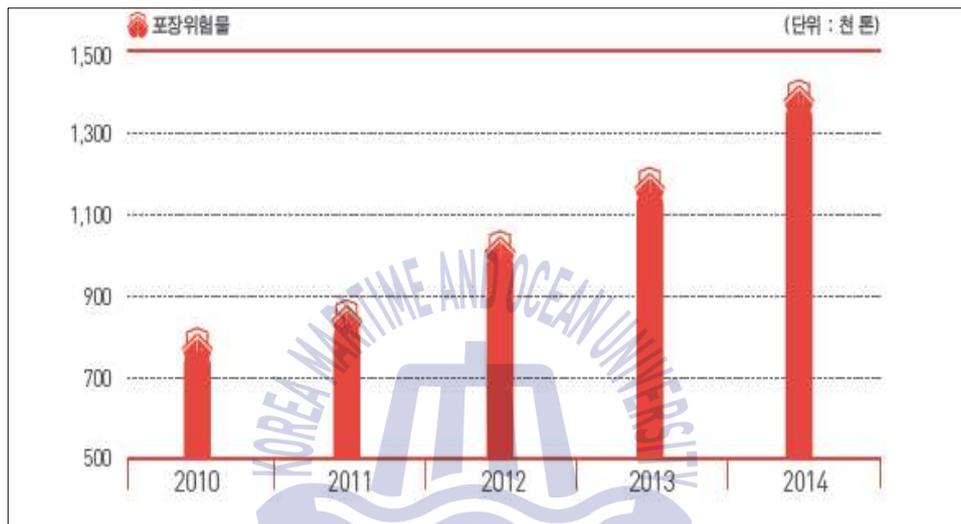


Fig. 7 Transportation of Packaged Dangerous Goods using Container Ship

(Source: Korea Maritime Dangerous Goods Inspection & Research Institute)

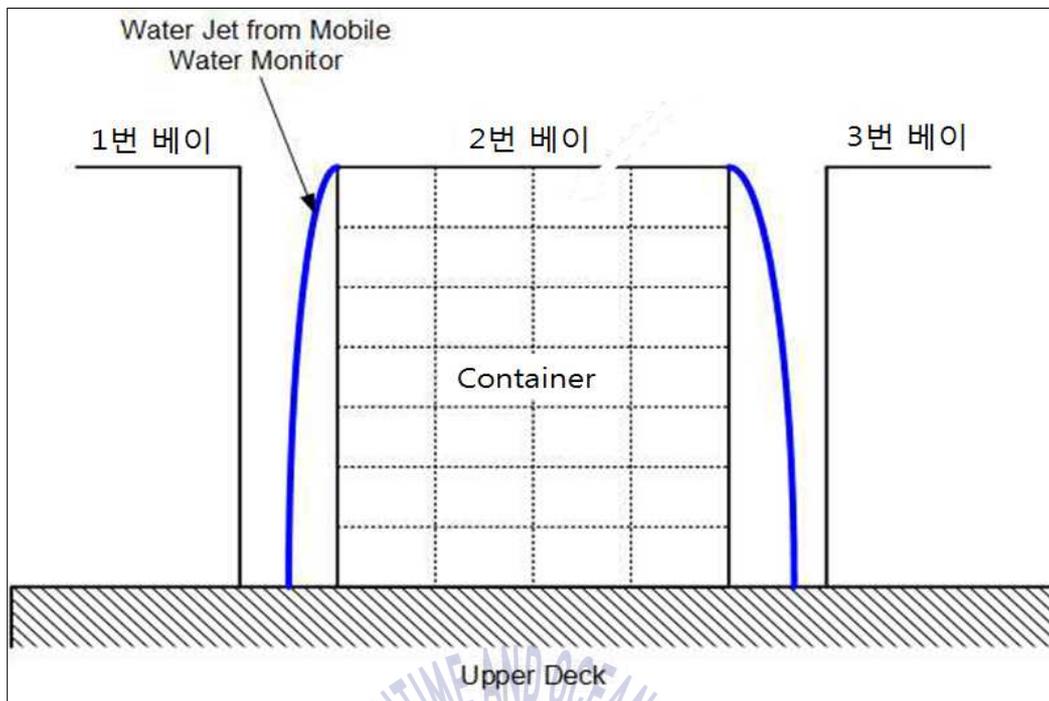


Fig. 8 Concept of Using Mobile Water Monitor(Section View)

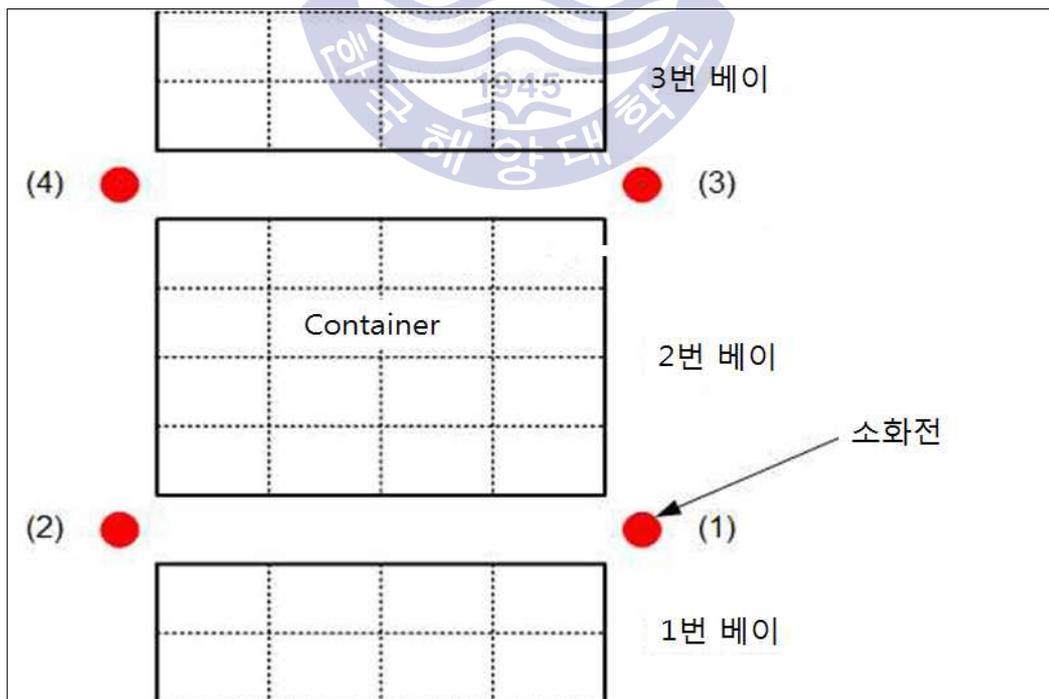


Fig. 9 Concept of Using Mobile Water Monitor(Plan View)

제2장 기존 연구 현황에 대한 검토

2.1 Water Mist Lance & Mobile Water Monitor 연구 현황

Fig. 10에서 보는 바와 같이 Water Mist Lance는 끝이 창(lance)처럼 뾰족한 노즐을 화재가 발생한 구역의 컨테이너 벽면에 관통시켜서 내부에 소화수를 분무하여 화재를 진압하는 소화장치이다. 소화수는 미분무 상태로 분사함으로써 소화효과를 극대화 시킨다.

절연성이 요구되는 전기제품, 항공기 및 선박의 기관실 등과 같이 물 분사가 제한적인 곳에는 전통적으로 CFC 계통의 소화약제가 내장된 할론 소화설비가 유류화재와 전기화재 등의 화재진압에 사용되었다. 하지만, 이러한 CFC 계통의 소화약제는 환경오염물질을 내포하고 있으며, 지구 온난화지수와 오존층 파괴 지수가 높아 세계 각국은 몬트리올 의정서(1987년 서명)를 통하여 CFC를 사용하는 화학물질의 제조를 1994년부터 금지시켰고[배강열 등, 2009], Halon 1301로 대표되던 선박용 소화시스템은 대체 시스템이 절실히 요구되었다. 할론 소화설비의 신규 설치가 금지된 이후로는 이산화탄소(CO₂) 소화설비가 주로 선박에 설치되었지만, 온실가스인 CO₂의 사용을 제한하려는 분위기에 따라 CO₂ 소화설비를 대체하기 위한 다양한 형태의 소화설비들이 개발되고 있다[한용식 등, 2010].

특히, 미분무 소화설비는 과거 50년 전부터 물을 미립화 하여 화재 진압에 이용함으로써 소화효과를 극대화하는 연구가 진행되어 왔다. 초기 미세 물분무 시스템의 사용은 화재진압 시 노즐로부터 화원까지 도달하는 물분무의 양을 측정하거나 예측하기가 쉽지 않아 물분무 입자가 화원에 도달하지 못하는 문제와 미립화하기 위한 고압발생 및 이로 인한 마찰손실 등 경제적 문제로 인하여 제한적이었다[박헌태, 2003; 김봉환 등, 2003; 이수경 등, 2007]. 하지만, 2002년 7월 기관구역 국부소화시스템 설치가 의무화 되면서 Water Mist System에 대한 연구가 활기를 띠게 되었다. 미분무 소화설비는 고압의 물을 노즐을 통해 분사시킬 때 발생하는 미세한 물방울(<1,000 μm)로 화재를 신속하게 제압하는 기술로써 친환경적 측면과 인명 안전성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다[이창효 등, 2006].

미분무 화재진압 설비가 가장 적극적으로 활용되고 있는 곳이 선박 분야이다. IMO는 2005년에 선박용 미분무 화재진압설비(Water Mist System)의 승인 기준으로 IMO MSC/Circ.1165을 개발 하였으며, 선박에 설치되는 미분무 화재진압설비는 이 요건을 만족하여야 한다[최병일 등, 2007].

Water Mist 소화 시스템에서 화재를 적절히 제어하기 위한 주요변수는 화재 크기, 분무유량, 분사각, 액적의 운동량, 액적의 크기 등이 매우 중요한 변수이다. 그 중에서 액적크기는 무엇보다도 중요한자로 작용하지만 화원 및 화염냉각, 복사열 차단, 산소차단 등 복합적인 효과에 의해 화재를 억제하게 되므로 이들을 동시에 만족하는 최적의 액적크기를 선정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 예를 들어 화염냉각이 중요변수이면 액적의 증발과 열전달을 효율적으로 촉진하기 위하여 액적크기는 작을수록 유리하다. 그러나 화원을 냉각시키기 위해서는 화재의 부력을 극복하고 화원에 도달하기 위하여 액적의 크기는 다소 큰 것이 유리하다 [김성찬 등, 2002].

NFPA750에 따르면 노즐 아래 1 m 위치에서 밀집도가 낮은 분무 영역의 액적크기의 99 %가 1000 μm 보다 작은 크기로 규정하고 있다. 또한 Class B(액체 연료) 화재에서는 400 μm 이하로 규정하고 있다[NFPA 750, 1996].

Herterich는 액적의 열전달율을 최대로 하는데 바탕을 두고 최적의 액적크기를 350 μm 정도로 제시하였다[Herterich, 1960].

Gutler는 액적증발을 통한 냉각효과의 최대화를 위한 화염영역내 잔존시간을 확보하는데 바탕을 두고 최적 액적크기를 70 μm 정도로 제시하였다[Guttler, 1972].

Kaleta 등은 소화성능을 최대로 하기 위하여 300 ~ 900 μm 정도를 제시하고 있으나, 화염과 노즐과의 거리 및 주위환경 등에 크게 의존한다는 사실을 제시하였다[Kaleta, 1986].

정리하면, Water Mist에 대한 이해의 부족과 모호한 기준으로 인하여 Water Mist 시스템의 개발과 설치기준 등은 소화 시스템을 생산하는 제조사에 의존하고 있는 실정이다[김성찬 등, 2003].

물은 큰 표면장력으로 인해 미립화하기 어려운 액체로 물의 표면장력을 낮추어 소화효과를 높이기 위해 물의 계면활성제를 첨가하는 시도도 많이 이루어지고 있으며 표면장력이 낮아지면 A급 화재의 경우 화재표면과의 접촉면적이 넓어져 빠른 액적증발로 인해 냉각효과를 증가시킬 수 있고, B급 화재의 경우 화재 표면에 유화층을 형성하여 가연성 증기의 억제 및 산소차단으로 소화효과를 증가시킬 수 있다. 불소계 계면활성제는 특히 높은 계면활성능과 극히 낮은 표면장력으로 인해 첨가제로 많이 쓰이고 있지만 현재 사용되는 불소계 계면활성제는 PFOS (Perfluorooctanoic Sulfonate)를 함유하고 있으며, PFOS는 생체잔류성 유기화합물 (POPs)로 잠재적 발암성이 있는 것으로 규정되어 EU에서는 소화약제의 경우 2011년 6월 27일 이후 전면 규제되었고[이동호 등, 2010], 우리나라도 2012년 2월 9일 이후 소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준에 의해 PFOS에 대한 규제가 이루어지고 있다[김승일, 2014]. 더불어, IMO의 MSC/Circ.1165에 근거하여 소화제에 사용되는 첨가물에 대하여 인체에 무해하고 검사기관의 승인을 받은 제품만을 사용하도록 하고 있다[IMO, 2005; 김영한, 2009].

소화설비용 분무 노즐은 미분무수 소화 시스템의 핵심 부품이며[이수경, 2007], 노즐의 사용압력에 따라 저압, 중압, 고압으로 나누어진다[이찬주, 2004]. 고압 분무 노즐이 저압 분무 노즐에 비해 효과적인지 아닌지 여부에 대해서는 많은 논의가 진행되고 있다[조현준, 2015]. 화재에 대해 노즐 방향이 최적화되지 않을 경우에는 압력 영역과 상관없이 최적의 성능을 발휘할 수 없으므로 특정 압력 영역을 선정하는 것이 비현실적일 수도 있다[Jack, 2005].

이에 대한 국외 연구로는 미국의 USCG에서 선박의 엔진룸 크기의 공간에 대하여 다양한 사용 Water Mist 시스템 및 배기조건에 대하여 소화성능을 실험하였다[Back et al., 1999].

Downie 등은 메탄 확산화염에 대하여 단일 물분무 노즐을 이용하여 화염과 물분무와의 상호작용시의 플럼 영역의 온도 및 가스농도의 영향을 파악하였고 [Downie et al., 1995],

Hua 등은 분무액적의 유동, 연소, 열 및 물질전달을 고려하여 분무패턴, 분무

액적의 크기 및 분사량과 같은 변수에 대하여 화재진압의 효과를 수치해석적으로 파악하였다[Hua et al., 2002].

그러나 수치해석에 의한 이론적인 결과만을 파악하였으며 실험결과에 대한 정량적인 비교가 부족하였다.

국내 연구로 김명배 등은 가솔린 Pool화재(액면화재) 시 Water Mist의 분사로 인한 유입공기의 증가가 화염의 연소율을 증가시키며, 임계압력 및 임계유효 유량에 대한 소화한계를 설정하였으며 화염냉각에 의한 소화효과가 지배적임을 제시하였다[Kim et al., 1997]. 그러나 노즐과 화원사이의 거리가 짧고 화원의 크기가 상대적으로 작기 때문에 실제 화재 공간에 대한 소화특성으로 작용되기에는 다소 무리가 있다[김성찬 등, 2003]. 김성찬 등은 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향을 수치기법과 실험을 병행하여 연구하였고[김성찬 등, 2003], 김호용 등은 분무수 특성이 화염의 소화에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였다[김호영 등, 2004].

이와 같은 연구결과에서 보듯이 Water Mist에 의한 화재억제 실험은 대부분 실험적으로 진행되고 설계 및 성능 특성은 제작사의 고유 모델로 공개되지 않고 있다[Geoff Tanner et al., 2003]. 또한, 일반적으로 Water Mist Nozzle 내부의 유동이 복잡한 와류형태를 가질 때 Water Mist의 직경이 작아진다고 알려져 있으며, Water Mist Nozzle 내부에서 와류를 발생시키기 위해 삽입되는 스웰(Swirl) 등에 대한 정보는 기업 비밀 또는 특허권을 통해 보호되고 있다[이경우, 2008].

하지만, 미분무수를 이용한 소화설비는 작은 양의 소화 용수로 화재진압을 가능하게 할 뿐만 아니라, 2차 수손피해를 최소화시킬 수 있는 소화시스템으로 국내에서도 관련 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 최근에는 전량 수입에 의존했던 노즐 및 시스템의 국산화율도 높아지고 있는 실정이다. 하지만, 수입 제품과 동등한 성능의 미분무수 노즐 개발이 주로 이루어졌으며, 비용 경쟁력이 우수한 설비 개발 및 소화성능을 향상시킬 수 있는 연구 등은 미미한 실정이다[황원준 등, 2009].

정희택 등은 분무 노즐에 대한 독자적인 기술 확보를 위해 미분무 소화 노즐의

분무특성 예측 연구를 실시하였다. 단일 노즐과 다중분사 노즐의 분무 유동특성을 분석하고 실험결과와 비교하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다중분사 노즐이 유량을 증가시킬 수 있고, 분사각도 향상되었다[정희택 등, 2005].

본 논문에서 연구하고자 하는 Water Mist Lance는 SOLAS협약에서 “컨테이너 벽을 관통하여 소화주관에 연결되었을 때 폐쇄공간 내부에 물분무를 발생할 수 있는 관통 노즐을 갖춘 관으로 이루어져야 한다”라고 규정하고 있는 바, 기본적으로 화재가 발생한 구역의 강재(Steel Plate)로 제작되는 컨테이너 벽면에 Water Mist Lance를 관통시켜 작동해야 하므로, 기존 선박에 설치되어 있는 미분무 소화설비 노즐과는 그 첨단부분과 강도 측면에서는 차별성을 가져야 한다.

또한, 선원들이 화재가 발생한 구역에 접근할 수 있어야 하고, 컨테이너 선박의 특성상, 선원이 직접적으로 접근할 수 있는 1~3단(1~3tier)에 적재되어 있는 컨테이너에만 적용이 가능하다.

특히, 선박용 Water Mist Lance는 컨테이너 벽면을 관통시켜야 하므로, 끝단의 첨단곡률반경(Apex Curvature Radius)이 강재를 관통할 수 있을 정도로 작아야 하며, 이 경우에도 끝단이 충분한 강성을 가질 수 있는 것이어야 한다.

하지만, 최근에 국내·외 기업에서 출시하고 있는 Water Mist Lance는 끝단이 충분한 강성을 가지면서도 적절한 첨단곡률반경을 가지도록 제작하는 것이 어렵다는 점을 고려하여 Fig. 11 및 Fig. 12와 같이 컨테이너 벽면을 뚫을 수 있는 별도의 설비(예: 전기드릴 등)를 제공하는 형식으로 되어 있다.

또한, Water Mist Lance의 사용 목적이 화재가 발생한 컨테이너 내부에 소화수를 공급하는 것이고, 화재가 발생한 컨테이너는 내부에서 발산되는 열로 인해 인원이 가까이 접근한다는 것이 매우 어렵고, 2차적인 사고를 유발할 수 있다. 그래서 Water Mist Lance는 충분한 길이를 갖추고, 손쉽게 컨테이너 벽면을 뚫을 수 있는 구조이어야 한다.

더불어, 화재가 발생한 컨테이너 벽면의 온도를 예상하고, 해당 온도에서의 강재(Steel)의 항복강도를 산정하여, 해당 항복강도를 가지는 강판(Steel Plate)을 뚫기 위해 필요한 첨단곡률반경을 산정하여야 하며, 이를 고려하여 Water Mist

Lance를 연구하여야 한다.

Fig. 13은 국내·외 기업들이 개발하여 공개한 Mobile Water Monitor를 나타낸 것으로서, Viking(덴마크), Tanktech(韓), Navutec(韓)은 기존 소화노즐과 동일한 형식의 노즐을 적용하고 있으며, Unitor(노르웨이)는 관통형 노즐을 사용한다는 것을 알 수 있다. 또한, Table 2에서 알 수 있듯이, 관통형 노즐을 사용하는 Unitor의 Mobile Water Monitor가 가장 긴 분사거리를 가진다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 관창⁶⁾은 소방대상물 내·외에 설치하는 소화전용과 포 소화발포용, 소방 자동차용, 선박용 등으로 화재진압 시 가장 많이 사용되고 화재진압의 70% 이상을 담당하는 중요한 소방기구 중의 하나이다.

기존의 관창은 방수량의 조정과 직사·분무 방수형태만이 조절토록 한 단순 기능의 제품이지만, 수많은 화재현장을 보아서 알 수 있듯이 화재진압에 가장 공헌도가 큰 소화장치는 역시 관창이다. 관창은 펌프에서 수류를 노즐까지 정류하면서 속도를 증가시키는 소방기구이고, 노즐은 관창에 따라 정류된 수류를 더욱 증폭시켜 효과적으로 방출하여 그 도달거리를 크게 하는 역할을 하며, 방수압력에 의해 방수량을 변화시킬 수 있다. 특히, 분무 노즐형 관창은 직사 방수와 분무방수가 가능하고, 이들 방수형태는 관창커버의 회전에 따라 이동하는 니들(Needle)의 위치에 따라 이루어진다.

또한 분무 노즐형은 화재 시 흡열에 따른 냉각소화 효과가 뛰어나고, 옥내 화재에서는 산회회석 또는 질식소화 효과가 있으며, 복사열과 열기류로 인해 화점에 접근할 수 없는 경우 보호수막의 형성으로 화점의 접근이 용이하고, 배연 효과도 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로부터 최근 관창은 분무노즐을 가장 많이 사용하고 있다. 하지만, 국내 관창 제작사의 경우 독자적인 노하우나 기술력이 아주 미미한 상태로 거의 대부분 외국사의 제품을 모방하고 있거나, 비싼 로열티를 지불하고 제작하고 있는 실정이다[이동명, 2003].

이동명 등은 관창에서의 분사 형태가 니들의 위치에 따라 결정되는 직사분무

6) 소방관창은 소방호스(수관)에 연결하여 화재를 진압하는 데 사용하는 기구이다. 물의 분사를 만든 다음, 화점을 겨냥하여 사용한다. 수관이 꼬여 화재의 진압을 방해하는 것을 방지하는 효과도 있다.(출처: 위키백과)

와 방사분무인 경우에 대하여 노즐 입구에서의 압력을 변화시키면서 관창 출구에서의 유동특성을 해석하였다. 직사분무의 분사형태는 노즐 출구 부근에서 방사분무의 형태를 보이지만, 바로 직사분무의 형태를 나타내었다. 방사분무의 경우 압력의 변화에 따라 니들의 전·후부에서 캐비테이션(Cavitation)이 형성되었다. 이것은 유속이 증가함에 따라 일반적으로 압력손실이 커지기 때문이며, 다시 말하면 노즐의 유동면적이 니들 부분에서 급격한 유동면적 축소 즉, 유동비의 감소로 인해 압력손실이 커졌기 때문인 것으로 판명되었다[이동명 등, 2003a; 이동명 등, 2003b].

유용호 등은 자동모니터 소화설비의 적용성 연구를 수행하였다. 자동모니터 소화설비란 화재 발생시 화재가 최대 화재강도로 이어지기 전 사전에 화재위치를 운영자 또는 센서로 파악하여 자동/수동으로 화원에 직접 분사가 가능한 시스템이다. 이탈리아에서는 이미 상용화가 되어 있는 시스템으로 수원과 연결된 배관에 고정 설치되어 상하/좌우 및 화원과 거리 따라 분사방식의 조절로 화재초기에 진압이 가능하고 물분무와 동일한 냉각효과가 가능하다[유용호 등, 2016].

Fire Fighting Monitor는 화재 시 화점을 향해 폼(Form)이나 물을 분사하는 소화장치이며, 선박 등에서 화재를 진압하기 위해 이동식 또는 고정 설치되어 상하 및 좌우로 소화제의 분출방향을 조정할 수 있는 기능이 있다.

Form Monitor 소화시스템을 살펴보면, Body 입구에서부터 포말용액과 공기를 혼합해 포말이 만들어 지도록 설계되어 있고, 혼합액이 Body를 지나 노즐을 거쳐 분사된다. 포말용액이 Body를 지나면서 구부러진 유로에 의해 충격파가 발생하여 유동손실이 일어나는데, 이러한 이유로 유로 형상의 변화는 Form Monitor의 분사거리 및 유동특성에 많은 영향을 준다. 따라서 Form Monitor의 다양한 유로 형상에 따른 분사거리 및 유동특성의 관계에 대한 접근이 필요하다.

하지만, 지금까지 Form Monitor의 분사거리 및 유동특성에 대한 수치 해석적 예측을 위한 방법은 거의 전문한 상태이다. 이는 Form Monitor 뿐만 아니라 Water Monitor의 경우에도 유로형상 및 노즐 등에 대한 연구가 거의 없으며,

대부분 제작사의 설계에 의존하고 있는 실정이다[이영훈 등, 2016; 류영춘 등, 2014].

한상구 등은 컨테이너 선박용 Mobile Water Monitor에 대한 노즐 오리피스, 정류격자 선정을 위한 유동해석 및 구조안정성을 위한 유동-구조해석 연구를 실시하였다[한상구 등, 2017]

Fire Fighting Monitor와 관련된 각 제조사들의 특허를 살펴보면, Elkhart Brass Manufacturing Company, Inc.가 개발한 Fire Fighting Monitor(2004년 특허출원/2010년 공개)는 호스 또는 파이프에 연결된 입구부, 노즐 또는 스트림 형성기가 장착된 배출구로 구성되어 있다. 유체(일반적으로 물 또는 폼)의 흐름 또는 압력의 증가에 따라 반력이 증가하고, 이는 Monitor Body에 모멘트로 작용하는데 풋 프린트(Foot Print)를 통해 Portable Monitor가 전복 또는 미끄러지는 것을 방지할 수 있다. 또한, Monitor를 통한 유체의 흐름에 대한 제어는 반력을 안전한 수준으로 감소시킬 수 있지만, 수동차단밸브 없이 소화전 밸브 등으로 유체흐름을 조절하도록 하고 있다[Elkhart Brass Manufacturing Company, 2004].

Akron Brass Co.가 등록한 Positionable Outlet for a Water Monitor는 움직이지 않는 정지부와 회전과 높이조절이 가능한 가동부로 구성된다. 정지부와 가동부 사이에 삽입된 볼 베어링은 각 부의 회전 마찰을 줄이고, 가동부에 작용하는 반경 방향 및 축 방향 하중을 지지한다. 이 Water Monitor는 전기모터 및 감속기어를 사용하여 고속, 저 토크의 출력을 상대적으로 저속, 고 토크의 힘으로 Water Monitor의 유체 배출구를 선택 위치로 이동시킨다. 다만, 고압에서 Water Monitor를 통해 흐르는 유체가 베어링에 분리력을 가하고 이 분리력은 전기모터와 감속기어에 부과된 기계적 부하를 증가시켜 부품의 과도한 마모 및 수명 저하를 초래할 수 있다[Akron Brass Co, 2013].

Antonio B. Marchese가 등록한 Fire Fighting Monitor는 두 개의 노즐을 갖고 화원에 유체를 분사하는 장치이다. 대부분의 Monitor는 소화전이나 다른 수원과의 연결을 제공한 다음 노즐을 부착 한 단일 콘센트를 통해 유체를 화원에 분사하며, 360° 회전과 상하 방향으로 움직여 노즐이 원하는 방향으로 향할 수

있도록 한다. 상하 패턴으로 움직여 노즐이 소방차에서 원하는 방향으로 향하게 할 수 있습니다. 종래의 Monitor와 달리, 본 발명은 2개의 노즐을 갖는 Monitor에 관한 것으로, 각 노즐은 개별적으로 움직일 수 있고, 동시에 제어 될 수 있는 특징이 있다[Antinio, 2000].

Arthur Brown, Inc의 Fire Fighting Water Turret는 소방용 Monitor로서 선회 가능한 조인트로 분리된 3개의 연속 섹션으로 구성되어 있으며 상호 회전 가능한 만곡 튜브를 사용하여 화원이 위치한 방향에 맞춰 분사하는 방식이다. 섹션은 축이 서로 예각(45°)에 있는 2개의 회전 가능한 조인트로 분리되며, 연결 조인트 축은 상호 의존적 즉, 한 조인트의 회전은 다른 조인트의 축방향 또는 각도 방향을 변경하는 특징이 있다[Arthur Brown Inc., 2001]

마지막으로, Trapp James M.이 등록한 Fire Fighting Monitor with Remote Control는 유체 공급원에 연결되도록 구성된 기초부와 유체의 입출구를 포함하는 Monitor Housing으로 구성된다. Monitor는 원격 조작이 가능하며, 유출구의 노즐은 관통형 노즐과 관창과 유사한 분사노즐로 구성된 것이 특징이다[Trapp James, 2004].

이상의 특허들을 검토한 결과 Water Monitor 소화장치는 "Water Cannon", "Fire Fighting Monitor", "Fluid Monitor", "Monitor"로 다양하게 불리고 있으며, 대부분이 수원과 연결된 배관 등에 영구적으로 고정되어 사용되는 경우도 있고, 화재발생 구역으로 이동할 수 있도록 트레일러에 Monitor를 장착하여 사용하는 경우도 있다[Titan Monitors, 2013].

또한, 화원에 소화수를 분사주수를 통한 냉각효과를 얻으려고 할 경우 일시적으로 많은 양을 분사해야 하므로 관통형 노즐이 적용되고 있으며, 열 차폐 및 질식효과 등을 효과를 같이 보기 위해서는 분사와 분무기능이 혼합되어 있는 관창형태의 노즐을 적용하고 있는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 분무 노즐형 관창은 분사(Jet)시 강력한 와류가 형성되어 분사거리 측면에서 매우 불리하기 때문에, SLOAS협약 또는 이 협약에 근거하여 소화장치를 형식승인 해주는 선급법인의 승인기준에 적합한 Mobile Water Monitor

를 연구하기 위해서 정량적 목표를 만족할 수 있는 적합한 형상으로 판단되는 관통형 노즐을 적용한 Monitor를 연구하는 것으로 방향을 설정하였다.

다만, 관통형 노즐을 채용할 경우, 분사 및 분무를 하나의 노즐로 구현할 수 없다는 문제점이 있을 수 있는데, 이는 Fig. 14에 나타난 UNITOR社의 Mobile Water Monitor와 같이, 분무를 발생시킬 수 있는 분무발생기(Spray Shield)를 이용하여 해결할 수 있다.

Water Mist Lance	김성찬 등 2003	분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향을 수치기법과 실험을 병행하여 연구
	정희택 등 2005	단일 노즐과 다중분사 노즐의 분무 유동특성을 분석하고 실험결과와 비교하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다중분사 노즐이 유량을 증가시킬 수 있고, 분사각도 항상
	이창효 등 2006	미분무 소화설비는 고압의 물을 노즐을 통해 분사시킬 때 발생하는 미세한 물방울(<math><1,000 \mu\text{m}</math>)로 화재를 신속하게 제압하는 기술로써 환경친화적 측면과 인명 안전성 측면에서 많은 장점
	이수경 2007	소화설비용 분무노즐은 미분무수 소화시스템의 핵심 부품
Mobile Water Monitor	이동명 2003	관창은 펌프에서 수류를 Nozzle까지 정류하면서 속도를 증가시키는 소방기구이고, Nozzle은 관창에 따라 정류된 수류를 더욱 증폭시켜 효과적으로 방출하여 그 도달거리를 크게 하는 역할을 하며, 방수압력에 의해 방수량을 변화 가능 수원과 연결된 배관에 고정 설치되어 상하좌우 및 화원과 의 거리에 따라 분사방식의 조절로 화재초기에 진압이 가능하고 물분무와 동일한 냉각효과가 가능한 자동모니터 소화설비 연구
	유용호 등 2016	선회 가능한 조인트로 분리된 3개의 연속 섹션으로 구성되어 있으며 상호 회전 가능한 만곡 튜브를 사용하여 화원이 위치한 방향에 맞춰 분사하는 방식의 Fire Fighting Water Turret라는 소방용 Monitor 특허
	Arthur Brown Inc., 2001	Monitor가 유체 공급원에 연결되도록 구성된 기초부와 유체의 유입구 및 유출구를 포함하는 Monitor Housing으로 구성된다. Monitor는 원격 조작이 가능하며, 유출구의 노즐은 관통형 노즐과 관창과 유사한 분사노즐로 구성된 것이 특징인 Fire Fighting Monitor with Remote Control 특허
	Trapp James M. 2004	관창은 펌프에서 수류를 Nozzle까지 정류하면서 속도를 증가시키는 소방기구이고, Nozzle은 관창에 따라 정류된 수류를 더욱 증폭시켜 효과적으로 방출하여 그 도달거리를 크게 하는 역할을 하며, 방수압력에 의해 방수량을 변화 가능 수원과 연결된 배관에 고정 설치되어 상하좌우 및 화원과 의 거리에 따라 분사방식의 조절로 화재초기에 진압이 가능하고 물분무와 동일한 냉각효과가 가능한 자동모니터 소화설비 연구



Fig. 10 Picture of Water Mist Lance for Land Use

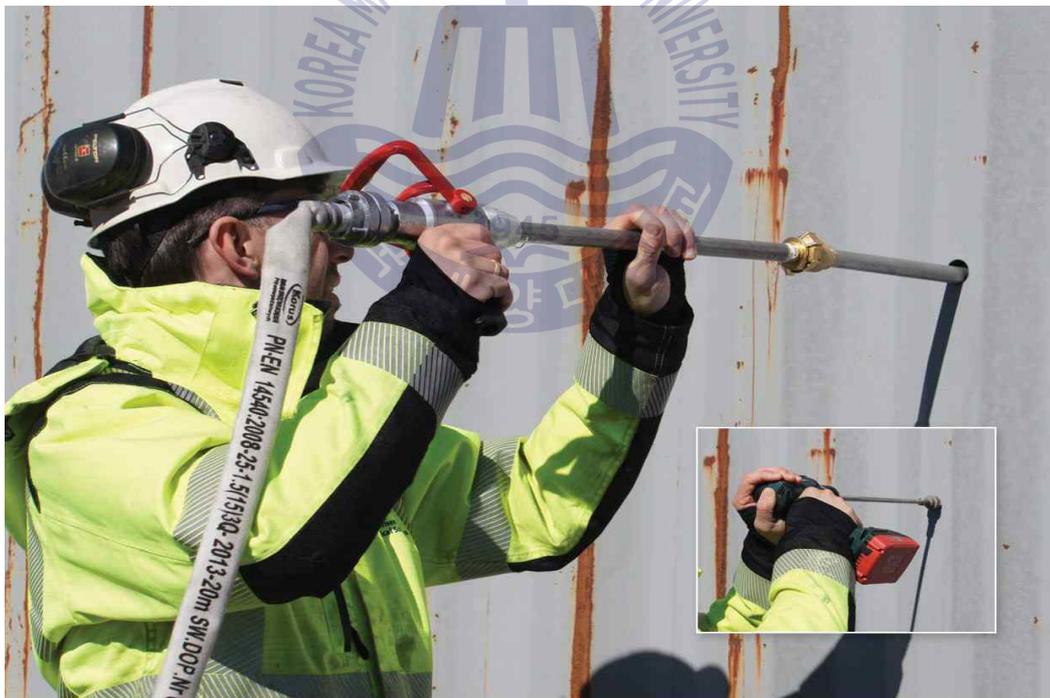


Fig. 11 Picture of UNITOR's(Norway) Water Mist Lance
(Source: UNITOR)



Fig. 12 Picture of Navutec's(Korea) Water Mist Lance
(72 ℓ /min at 4bar, 10m throw length at 4 bar, hammer 2.8kg)

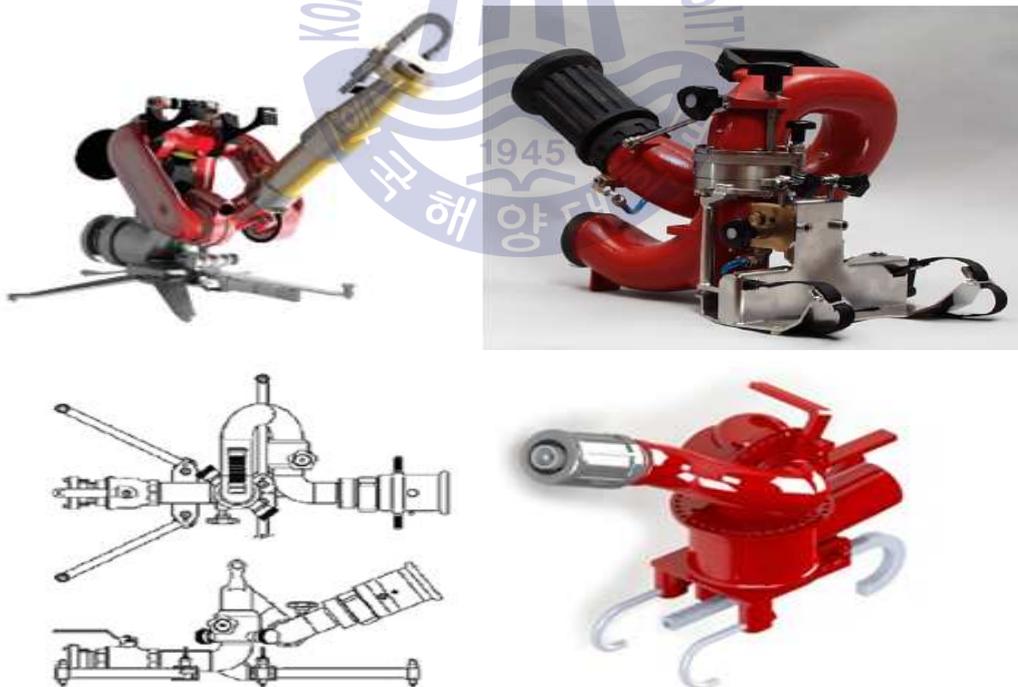


Fig. 13 Mobile Water Monitor of Domestic and Foreign Companies
[From left to right, clockwise from Unitor(Norway), Viking(Denmark), Tank Tech(Korea), Navutec(Korea)]

Table 2 Performance Comparison of Mobile Water Monitor Manufacturer

회사명	Inlet Pressure	Throw Length	Flow Rate
Unitor	4 bar	40 m	80 m ³ /h
Viking	8 bar	50 m	90 m ³ /h
Tankteck	5 bar	42 m	66 m ³ /h
Navutec	4 bar	40 m	78 m ³ /h



Fig. 14 Picture of UNITOR's Mobile Water Monitor Spraying
(Source: UNITOR)

2.2 기존 제품들의 기술 검토에 대한 결론

기존 타사 제품들의 사양을 검토해 본 결과, 기존에 개발되어 있는 Water Mist Lance와 Mobile Water Monitor에서 발견된 문제점들을 정리하면 아래와 같다.

2.2.1 기존 Water Mist Lance의 문제점

Water Mist Lance는 내부 공간에 화재가 발생한 컨테이너 내부에 소화수를 공급하는 장치로서, 약 2 mm 두께의 강판(Steel Plate)으로 제작되어 있는 컨테이너 벽면을 관통할 수 있는 것이어야 한다. 하지만, 약 2mm 두께의 강판을 관통하기가 쉽지 않다는 점을 고려하여, 기존에 개발되어 있는 Water Mist Lance들은 별도의 관통용 도구(전기드릴 등)를 별도로 제공하는 문제점 있었다.

일반적인 선박의 환경을 고려할 경우, 화재 시에 별도의 관통용 도구를 이용하여 컨테이너 벽면에 관통부를 만든다는 것이 그리 쉬운 상황이 아니며, 별도의 관통도구가 제공될 경우, 보관 시에 분실의 우려도 상당히 존재할 것으로 예상된다.

또한, 기존에 개발되어 있는 Water Mist Lance들은 육상에서 사용되던 제품들을 선박용으로 개량한 것으로서, 그 길이가 비교적 짧아, Water Mist Lance가 컨테이너 벽면을 관통한 관통부와 조작자가 조작하는 위치까지의 거리가 상대적으로 짧아지는 문제점이 있었다. Water Mist Lance가 컨테이너 벽면을 관통한 부위와 조작자간의 거리가 짧을 경우, 화재가 발생한 컨테이너에서 방출되는 복사열로 인해, 선원이 Water Mist Lance를 조작하기가 어려워 질 수 있다는 문제점이 있었다.

따라서, 일체형으로 컨테이너 벽면을 관통할 수 있으며, Water Mist Lance의 조작장소와 관통부의 거리를 최소 1 m 이상 유지할 수 있는 Water Mist Lance의 개발이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

2.2.2 기존 Mobile Water Monitor의 문제점

- 가. 기존의 Mobile Water Monitor는 단일의 노즐을 채택하고 있어서 적용하는 선박에서 요구되는 분사높이가 높아 요구되는 압력이 높아질 경우, 분사 유량이 같이 증가하게 되어 SOLAS에서 요구하는 최소 유량인 1,000 LPM (60 m³/h)보다 더 많은 유량을 분사하게 되며 이에 따라, 선박에 설치하는 펌프의 용량이 매우 커진다는 단점이 있었다.
- 나. 기본적으로 선박에는 합계 용량이 180 m³/h인 소화펌프 2대를 설치하여야 하는데, 개정된 SOLAS의 요건에 따라 기존 소화펌프의 용량에 추가적으로 Mobile Water Monitor에서 요구되는 용량의 소화수를 동시에 공급할 수 있는 펌프를 설치하여야 한다. 예를 들어, 1,000 LPM 용량의 Mobile Water Monitor 4대를 설치한다면, Mobile Water Monitor로 인해 증가되는 소화펌프의 용량은 최소한 240 m³/h이며, 합계용량이 최소한 420 m³/h인 소화펌프를 설치하여야 한다.
- 다. 합계용량이 420 m³/h인 소화펌프를 선박의 기관실에 설치하는 것은 상대적으로 좁은 공간인 선박의 기관실을 고려해 볼 때, 상당히 어려운 작업이며, 소화펌프에 부착되는 전기모터의 용량이 커지게 되어, 발전기의 용량과 주전원배전반(Main Switch Board)의 용량을 증가시켜야 하는 상황까지 유도될 수 있다.
- 라. 기존의 Mobile Water Monitor를 적용할 경우에는 Mobile Water Monitor에 의해 증가하는 펌프의 필요 용량이 240 m³/h 보다 커지게 되어, 선박 기관실의 기기 배치 및 전력계통의 설계를 변경하여야 하는 등의 문제점이 발생하게 될 것으로 예상된다.
- 마. 따라서, Mobile Water Monitor는 Mobile Water Monitor로 인해 요구되는 펌프용량의 증가분을 최소화할 수 있는 방향으로 개발되어야 함을 알 수 있었다.

제3장 개념설계 및 시뮬레이션

3.1 Water Mist Lance(물분무 창)

세계적으로 경제규모의 확대와 조선기술의 발달, 해운환경의 변화에 의하여 선박이 전문화, 대형화되면서 자동화 선박이 등장하고 있으나, 선박에서의 화재에 의한 인명 및 재산 피해는 끊임없이 발생하고 있으며, 그 규모도 대형화되고 있다. 특히, 1990년 159명의 사망자가 발생한 스칸디나비아스타호의 선박화재를 계기로 국제해사기구(ICS)는 선박에서의 대형 화재사고를 예방하기 위하여 화재안전에 대한 규제를 크게 강화하였다. 2000년 해상인명안전협약(SOLAS)의 주요개정 내용 중 하나는 유류화재를 진압하는 소화설비로 미분무수 소화장치의 설치를 의무화 한 것이다. 미분무수 화재진압 기술은 기존의 전기·전자적 위험 및 유류 화재에 널리 사용되어온 할로겐화합물 소화장치의 대체기술로써 오존층 파괴물질인 할로겐화합물이 1987년 몬트리올 의정서(Montréal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer)에 의해 그 생산이 중지됨에 따라 더욱 주요한 소화장치로 부상하며 기술개발이 가속화 되었다[김성윤 등, 2006].

또한, IMO 93차 MSC회의(2014.05.14. ~ 23.)에서는 개방(노출)갑판 상에 컨테이너를 운송하도록 설계된 선박 또는 개방갑판 상에 5단 이상의 컨테이너를 운송하도록 설계된 선박들은 Water Mist Lance를 비치하도록 SOLAS II-2/10.7.3 규칙이 추가되었다.

Water Mist Lance에 사용되는 유체인 물은 화재 진압에 유리한 물리적 특성을 가지고 있다. 물의 높은 열용량($4.2 \text{ J/g} \cdot \text{K}$)과 높은 기화잠열($2,442 \text{ J/g}$)은 화염 및 연료로부터 상당한 양의 열을 흡수 할 수 있고, 증기로 증발할 때 1,700배 팽창하여 주변 산소 및 연료 증기를 희석하는 결과를 가져온다. 미세한 물방울이 형성되면 열 흡수 및 증발에 사용할 수 있는 물의 표면적이 크게 증가하므로 화재 진압 시 물의 유효성이 더욱 높아진다. 주어진 물의 부피(0.001 m^3)에 대해 물의 표면적은 물방울 사이즈가 6 mm인 경우, 총 물방울 개수는 8.8×10^3 , 총 표면적 1 m^2 , 물방울 사이즈가 1 mm인 경우, 총 물방울

개수는 1.9×10^6 , 총 표면적 6 m^2 , 물방울 사이즈가 0.1 mm 인 경우, 총 물방울 개수는 1.9×10^9 , 총 표면적 60 m^2 로 증가한다.

그러나 화재 진압에서 Water Mist는 가스계 작용제(Agent)처럼 기능을 하지 않는다. 또한, 화재공간에 물을 주입 할 때 형성되는 모든 Spray가 화재 진압과 직접 관련되는 것도 아니다. 그것들은 다음과 같이 여러 개의 입자로 나누어진다 [Zhigang et al., 2000].

1. 불에 도달하기 전에 날아가 버리는 물방울
2. 화재 불꽃에 침투하거나 화재 불꽃 아래의 연소 표면에 도달하여 냉각에 의한 열분해를 방지하는 물방울 및 사용 가능한 산소를 희석시키는 증기
3. 격실의 벽, 바닥 및 천장에 부딪혀 이들을 냉각하는 물방울
4. 격실을 횡단하면서 증기로 기화되어 화재 불꽃, 고온 가스, 격실 및 기타 표면의 냉각에 기여하는 물방울
5. 화재 확산을 방지하기 위해 인접한 가연성 물질을 적시는 물방울

상기와 같은 미분무수의 물리적 특성으로 Water Mist Lance의 소화 메커니즘은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 미분무수가 증발하면서 주위의 열을 흡수하는 증발잠열로 인한 냉각효과;

모든 물이 증기로 기화 될 때, 응축된 증기 또는 부분적으로 기화된 물과 비교하여 소화에 필요한 열 흡수가 절반으로 감소될 수 있음이 밝혀졌다. 미세한 물방울이 형성되면, 수피의 표면적과 고온의 가스 및 화염으로부터 스프레이가 열을 추출하는 속도가 상당히 증가합니다.

Kanury 및 Herterich에 의해 제시된 바와 같이, 액적의 증발 속도는 1) 주변 온도 2) 액적의 표면적 3) 열전달 계수 4) 주변 가스에 대한 액적의 상대 속도에 의존한다. $100 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$ 의 물방울에 대해서, 열전달 계수 H는 물방울의 크기와 직접 관련이 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다[Rasbash, 1986; Kanury, 1994; Herterich, 1960].

$$H = \frac{0.6}{d} KPr^{1.5} Re^{0.5} \quad (3.1)$$

여기서 d 는 물방울의 지름, K 는 공기의 열전도도, Pr 은 Prandtl 수, Re 는 레이놀즈수이다.

연료 표면에서 열을 제거하거나 연료 표면 위의 증기·공기 혼합물의 농도가 냉각으로 인해 가연성 한계 아래로 떨어지면 연료가 화재지점 아래로 냉각되어 화재가 진압된다. 연료 표면을 냉각시키기 위해 Spray는 화염 영역을 관통하여 연료 표면에 도달한 다음 화염이 공급할 수 있는 속도보다 높은 속도로 연료 표면에서 특정 양의 열을 제거해야 한다. 대류 및 복사에 의해 화염으로부터 연료로 열이 주로 전달되는 반면, Water Mist에 의한 연료 냉각은 주로 물의 증기로의 전환에 기인하는 것으로 인식된다. 따라서, 화재 진압을 위해 물에 의해 제거되어야 하는 단위 면적당 열률(Heat Rate)은 다음과 같이 주어진다.

$$S_h = (H_f - \lambda_f)m_b + R_a - R_b \quad (3.2)$$

여기서 S_h 는 물 분사에 의해 단위 면적당 제거되는 열, H_f 는 화염에 들어오는 연료의 단위 질량 당 화염으로부터의 대류 열전달, λ_f 는 증기의 단위 질량을 생성하는데 필요한 열, m_b 은 단위 면적당 연소율, R_a 는 연료 표면에서 열전달의 다른 형태, R_b 는 λ_f 에 포함되지 않은 표면에서 열손실(예 : 복사 열손실)이다[Zhigang, 2000].

- 미분무수의 증발에 의한 수증기의 생성과 체적의 팽창으로 인한 가연성 물질 주위의 산소 농도가 낮아지는 질식효과

구역(Compartment) 단위에서, 구역 내의 산소 농도는 물 분무가 뜨거운 구역으로 분사되고 화재, 고온 가스 및 표면으로부터 열을 흡수 할 때 미세한 물방울이 증기로 급속 증발 및 팽창됨으로써 실질적으로 감소 될 수 있습니다. 100 m³ 부피의 공간에서 5.5 리터의 물이 완전히 증기로 전환 될 때 산소 농도가 약 10 % 감소되는 것으로 계산되었다.

Water Mist에 의한 구역 내의 산소 농도의 감소는 구역의 화염 크기,

사전 연소 기간의 길이, 구역의 부피 및 환기 조건의 함수이다. 화재 규모나 화재 발생 전 기간이 길어지면 화재로 인한 산소 고갈과 높은 격실 온도로 인하여 더 많은 수증기가 발생되어 산소 변위(Displacement)가 증가합니다. 이 결합된 효과는 격실의 산소 농도를 상당히 감소시키고 화재 억제를 위한 Water Mist의 효과를 향상시킨다.

국소화된 규모에서 물 분사가 화염으로 침투하여 증기로 전환되면 증발하는 물은 액체의 1,700배로 팽창합니다. 증발하는 물의 체적 팽창은 화염으로 공기(산소)의 접촉을 방해하고, 연료의 연소를 위해 이용 가능한 연료 증기를 희석시킨다. 결과적으로, 연료 증기가 연료-공기 혼합물의 낮은 인화 한계 이하로 희석되거나 연소를 유지하는데 필요한 산소 농도가 임계 수준 이하로 감소되는 경우, 화재는 진압 될 것이다[Zhigang, 2000].

- 화염주위의 미분무수들에 의하여 화염으로부터 주위 가연성 물질로 방출되는 복사열 차폐효과

Water Mist가 연료의 표면에 닿거나 덮으면, 물은 불타고 있는 표면뿐만 아니라 불타는 연료 표면의 복사에 의한 더 이상의 가열을 막기 위한 열장벽 역할을 할 수 있습니다[Ravigururajan et al., 1989; Coppalle, 1993; Log, 1996]. 또한, 연료 표면 위의 공기에 있는 수증기는 복사에너지를 흡수하는 Gray Body Radiator로 작용하고, 이를 감소된 강도로 연료 표면에 다시 방출합니다. Water Mist에 의한 복사열을 차단하면 화재가 불이 붙지 않는 연료 표면으로 확산되는 것이 멈추고 연료 표면에서 기화 또는 열분해 속도가 감소한다[Zhigang, 2000].

위의 세 가지 소화 메커니즘에서 알 수 있듯이 미분무수 소화장치의 소화 성능은 미분무수의 증발속도에 의존한다는 것을 알 수 있다. 미분무수는 미분무수의 표면적을 통해 열을 흡수하여 증발하게 되는데, 동일한 물을 사용하여 동일한 열전달계수를 가지는 경우에는 전열면적으로 간주되는 표면적이 넓을수록 증발속도가 빨라지게 된다. 그러므로 더 작은 지름의 미분무수를 사용할수록 미분무수 소화장치의 소화 성능이 향상된다고 할 수 있다.

예를 들어, 반지름이 r 인 구의 체적과 표면적은 각각 아래의 (3.3), (3.4)식과 같다. 아래의 식을 이용하여 동일한 체적 V 의 물로 n 개의 미분무수를 만든다고 할 때, 미분무수들의 표면적의 합은 Fig. 15에서 알 수 있듯이 미분무수 숫자 (N)의 증가에 따라 증가한다. 이는 더 작은 직경을 가지는 미분무수를 만들게 되면 더 많은 표면적 즉, 전열면적을 가지게 되어 더 좋은 소화성능을 가지게 된다는 것을 의미한다.

$$\text{구의 체적} : \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (3.3)$$

$$\text{구의 표면적} : 4\pi r^2 \quad (3.4)$$

다만, 미분무수의 크기가 미분무수 소화장치의 소화성능을 판별하는 중요한 인자일 수는 있지만, 동일한 직경을 가지는 미분무수라 하더라도, 미분무수간의 평균자유거리, 미분무수의 관성력, 미분무수와 미분무수 사이에서의 공기 유동 등에 따라서 소화성능이 달라질 수 있으므로 이를 유의하여야 한다.

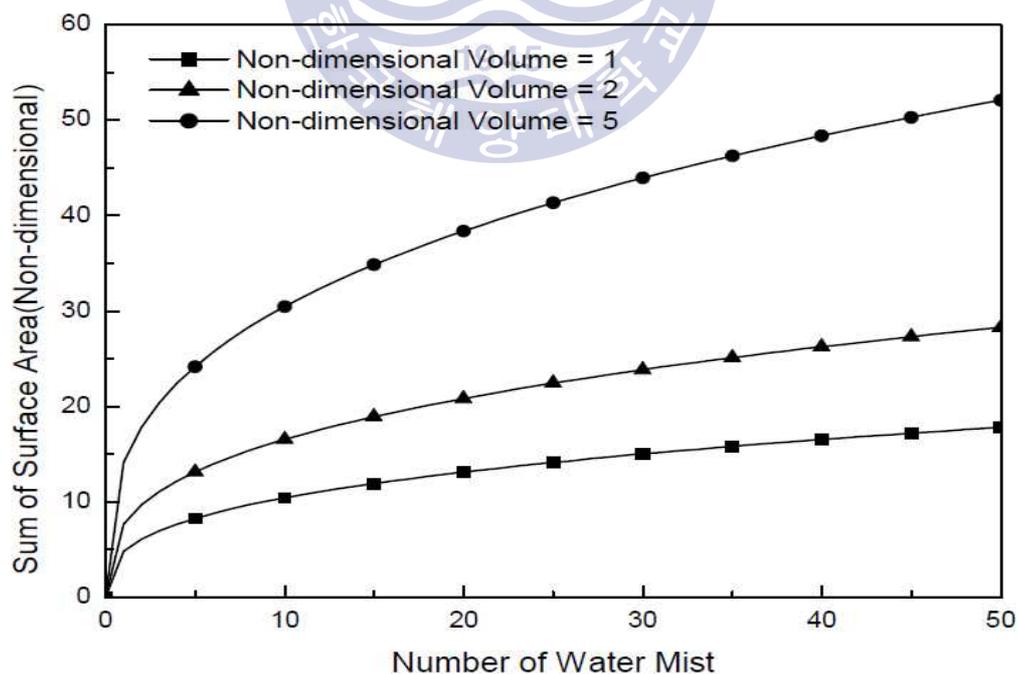


Fig. 15 Relation of Number of Water Mist Versus Total Surface Area

3.1.1 Water Mist Lance 관통해석에 대한 이론적 배경

Water Mist Lance를 이용한 화재진압을 위해서는 소화수가 컨테이너 내부에 분무되어 앞 절에서 서술한 소화원리를 이용하여 화재를 진압하는 방식이다. 그러나, 소화수를 컨테이너 내부에 분무하기 위해서는 우선 Water Mist Lance가 컨테이너 벽면을 관통해야 하고 이를 위해서는 Water Mist Lance의 첨단부분 곡률반경이 설계 시 중요한 고려요소이다. 따라서, 3차원 구조물의 비선형 동적 거동해석, 충돌 및 접촉 해석에 세계적으로 이용되고 있는 LS-DYNA 프로그램을 사용하였다.

LS-DYNA의 기초 이론을 설명하기 위해 Fig. 16과 같이 도식화 하였다. 고정된 직교 좌표계 X_α ($\alpha = 1, 2, 3$)에서 b 점이 있는 동일한 직교 좌표계 X_i ($i = 1,2,3$)로 이동하데 시간에 의존한 변형이 있음을 관찰하였다.

Lagrangian 방정식이 고려되기 때문에 변형은 아래와 같이 변환된 좌표 X_α 및 시간 t 로 표현될 수 있다.

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \tag{3.5}$$

$$x_i(X_\alpha, 0) = X_\alpha \tag{3.6}$$

$$\dot{x}(X_\alpha, 0) = V_i(X_\alpha) \tag{3.7}$$

여기서 시간 $t = 0$ 는 초기 조건을, V_i 는 초기속도를 나타낸다.

LS-DYNA는 운동량방정식을 이용하여 기본적인 계산이 수행되며, 지배방정식은 아래와 같다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \tag{3.8}$$

$$\sigma_{ij} n_j = t_i(t) \tag{3.9}$$

$$x_i(X_\alpha, t) = D_i(t) \tag{3.10}$$

$$(\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j = 0 \tag{3.11}$$

경계 ∂_{b1} 에서 견인 경계조건 (3.9), 경계 ∂_{b2} 에서 변위 경계조건 (3.10), $x_i^+ - x_i^-$ 일 때 내부경계 ∂_{b3} 를 통한 접촉 불연속 (3.11)을 만족하는 운동량방정식 (3.8)에 대한 해답을 찾는다.

여기서 σ_{ij} 는 Cauchy 스트레스이다. Cauchy 스트레스는 연속적으로 움직이는 물체의 어느 점에 대한 응력을 9가지의 응력으로 정의하며, 3개의 서로 수직인 응력과 6개의 서로 수직인 전단응력으로 구성된다. ρ 는 재료의 밀도, f 는 Body의 하중밀도이다. \ddot{x} 는 가속도로 콤마는 공변 미분을 나타낸다. n_j 는 ∂_b 의 엘리먼트 영역에 바깥쪽으로 향하는 방향을 나타낸다.

$$\rho V = \rho_0 \quad (3.12)$$

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (3.13)$$

질량보존은 일반적으로 (3.12)와 같이 정의된다. 여기서, V 는 상대체적, 즉 변형 구배 모양 F_{ij} 를 결정한다. ρ_0 는 기준 질량을 나타낸다.

$$E = V s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p+q) \dot{V} \quad (3.14)$$

에너지방정식 (3.14)는 시간으로 미분되고, 상태방정식 평가 및 전체 에너지 균형을 위해 사용된다. 여기서 s_{ij} 는 편차응력, p 는 압력, q 는 체적점성을 나타내며, 편차응력과 압력은 아래의 식 (3.15)와 식 (3.16)으로 나타낼 수 있다.

$$s_{ij} = \sigma_{ij} + (p+q)\delta_{ij} \quad (3.15)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij} - q = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} - q \quad (3.16)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker 델타($\delta_{ij} = 1$ if $i = j$; 반면 $\delta_{ij} = 0$)이고, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 텐서이다.

$$\int_v (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f) \delta x_i dv + \int_{\partial b1} (\sigma_{ij} n_j - t_i) \delta x_i ds + \int_{\partial b3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j \delta x_i ds = 0 \quad (3.17)$$

δx_i 은 ∂b_2 상에서 모든 경계조건을 만족하고 적분은 현재의 형상에 적용된다. Divergence 정리를 적용하면 다음식과 같이 나타난다.

$$\int_v (\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} dv = \int_{\partial b_1} \sigma_{ij} n_j \delta x_i ds + \int_{\partial b_3} (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_i \delta x_i ds \quad (3.18)$$

$$(\sigma_{ij} \delta x_i)_{,j} \sigma_{ij,j} \delta x_i = \sigma_{ij} \delta x_{i,j} \quad (3.19)$$

$$\delta \pi = \int_v \rho \ddot{x}_i \delta x_i dv + \int_v \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dv - \int_v \rho f_i \delta x_i dv - \int_{\partial b_1} t_i \delta x_i ds = 0 \quad (3.20)$$

식 (3.20)은 평형방정식을 요약한 형태로 가상일의 주요 상태를 나타낸다. 이 방정식은 노드점에서 상호 연결된 유한요소의 메쉬를 겹쳐 놓고, 시간에 따라 각 부분을 추적하는 방법으로 계산된다.

$$x_i(X\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^k \varnothing_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (3.21)$$

식 (3.21)은 시간에 따른 노드점의 위치를 나타내는 공식으로 \varnothing_j 는 파라메트릭 좌표 (ξ, η, ζ) 의 형상(보간) 함수이다. k 는 요소에 정의된 노드점의 수, x_i^j 는 i 방향의 j 노드의 좌표이다. 유한요소의 위치는 도출된 노드점에 종속된 유한요소의 격자를 겹쳐 놓는 방법으로 계산된다.

$$\delta \pi = \sum_{m=1}^n \delta \pi_m = 0 \quad (3.22)$$

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho x_i \ddot{\Phi}_i^m dv + \int_{v_m} \sigma_{ij}^m \Phi_{i,j}^m dv - \int_{v_m} \rho f_i \Phi_i^m dv - \int_{\partial b_1} t_i \Phi_i^m ds \right\} = 0 \quad (3.23)$$

$$\Phi_i^m = (\varnothing_1, \varnothing_2, \dots, \varnothing_k)_i^m \quad (3.24)$$

식 (3.22)에서 $\delta \pi$ 는 n 개의 요소들을 합한 것이며, 식 (3.23)은 다음과 같이 행렬 표기 방정식이 된다.

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{v_m} \rho N^t N \alpha dv + \int_{v_m} B^t \sigma dv - \int_{v_m} \rho N^t b dv - \int_{\partial b_1} N^t t ds \right\}^m = 0 \quad (3.25)$$

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (3.26)$$

여기서, N 은 보간 매트릭스이고, σ 는 응력벡터이다. 또, B 는 변형률-변형 매트릭스이며, a 는 노드의 가속도 벡터를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dots \\ x_1 \\ \dots \\ x_2 \\ \dots \\ x_3 \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} a_{x_1} \\ a_{y_1} \\ \dots \\ a_{z_k} \end{bmatrix} = Na \quad (3.27)$$

$$b = b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

b 는 body force load 벡터이고, t 는 traction load가 적용되었다[John O. Hallquist, 1998; 권오현, 2016].

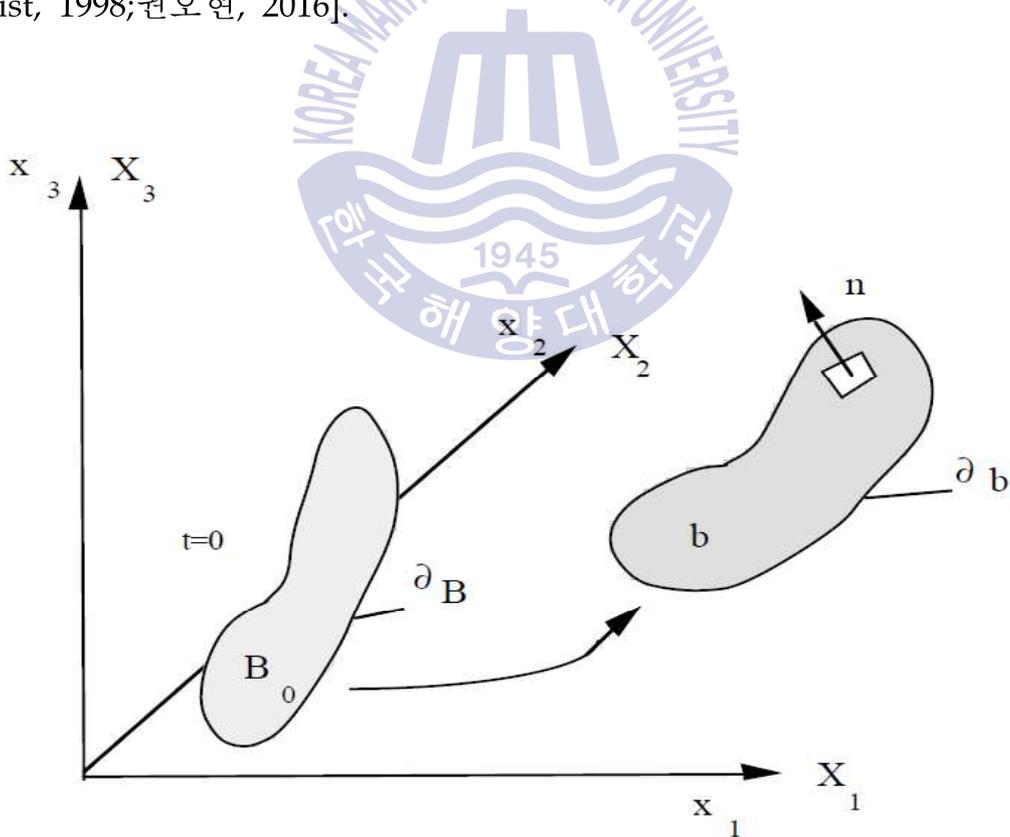


Fig. 16 Notation of LS-DYNA

3.1.2 Water Mist Lance 관통해석 유한요소 모델

컨테이너 Wall의 두께를 고려하여 Water Mist Lance 노즐의 관통가능 침단 곡률반경 선정을 위한 구조해석을 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS LS-DYNA을 사용하여 수행하였다.

Fig. 17은 Water Mist Lance의 3D 모델을 나타낸다. Water Mist Lance의 관통 성능을 총 5개의 모델을 선정하여 각 모델별 성능 검토를 진행하였으며, 각 모델은 Fig. 18에 나타내었다. 각 모델은 동일한 형상에 각 치수를 변경하여 관통 성능 검토를 진행하였으며, 컨테이너 Wall의 두께는 정량적 항목에서 제시하고 있는 1.6 mm를 적용하여 해석을 진행하였다.

Fig. 19 ~ Fig. 20에는 Water Mist Lance(Piercing 노즐 포함)의 유한요소 모델을 나타내었다. 유한요소 모델에 사용된 Nodes의 개수는 25,536개이며, Elements의 개수는 25,170개이며, 5개 모델이 모두 동일하며, Table 3에 상세히 나타내었다.

Water Mist Lance에 사용된 재질은 SUS316L이며 재질에 대한 상세한 기계적 물성은 Table 4에 나타내었으며, 적용한 Stress Strain Curve는 Fig. 21에 나타내었다.

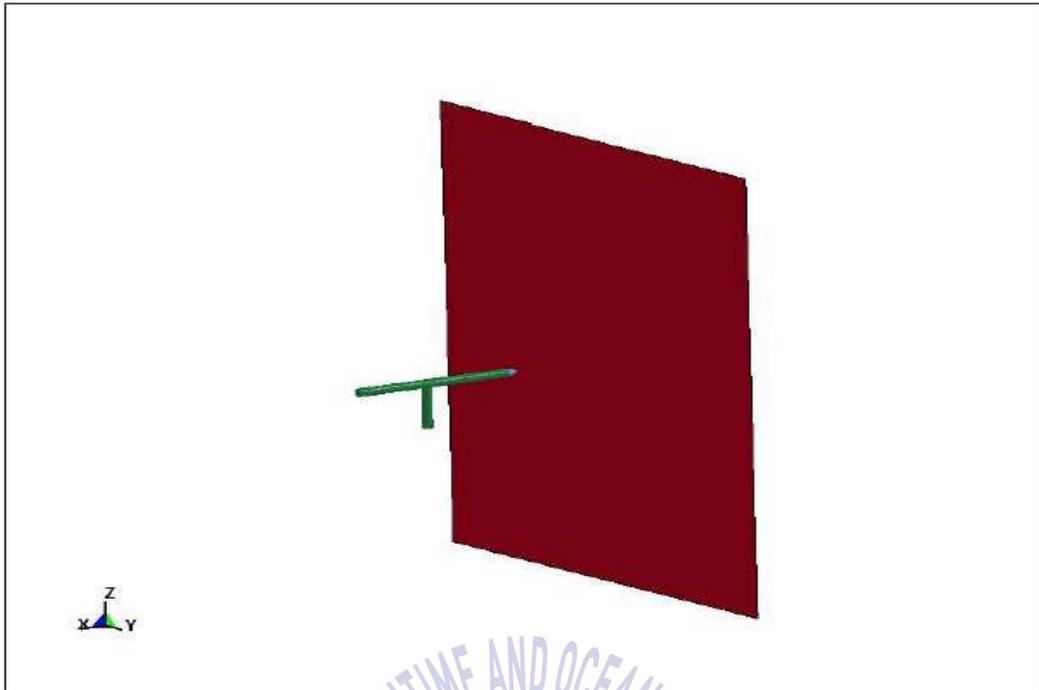


Fig. 17 3D Model of Container & Water Mist Lance

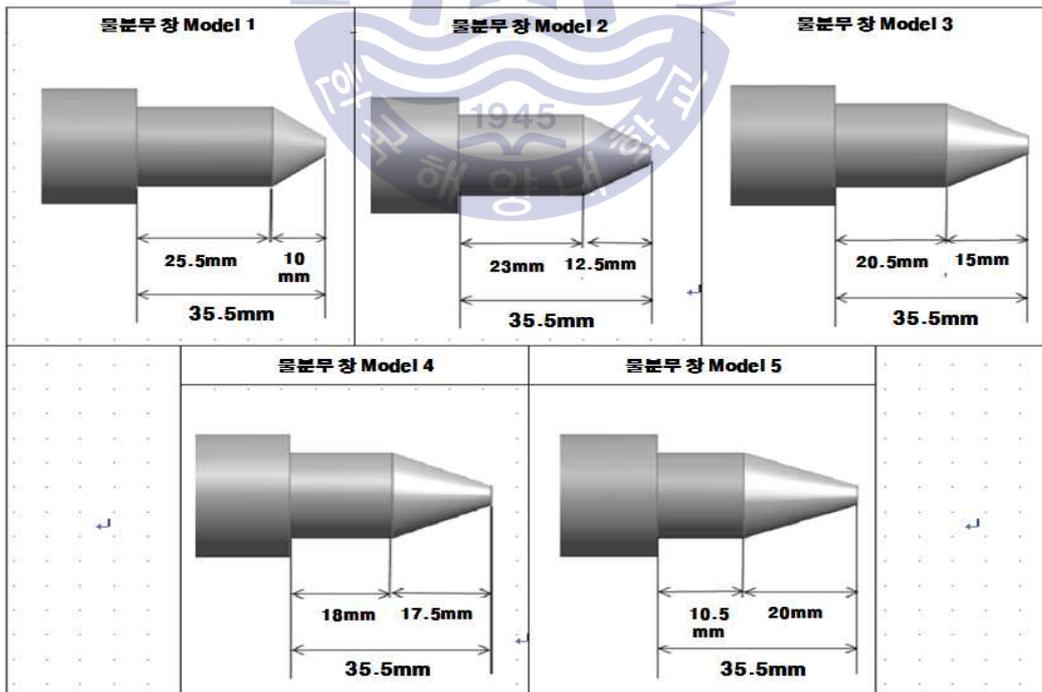


Fig. 18 Piercing Nozzle Models of Water Mist Lance



Fig. 19 Finite Element Model of Container & Water Mist Lance



Fig. 20 Finite Element Model of Water Mist Lance

Table 3 Nodes & Elements

Mesh	Node	Element
Lance	25,536	25,170

Table 4 Material Properties of SUS316L

Category	Material	Density (kg/m ³)	Possion ratio	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)
Water Mist Lance	SUS316L	7,850	0.3	200	205

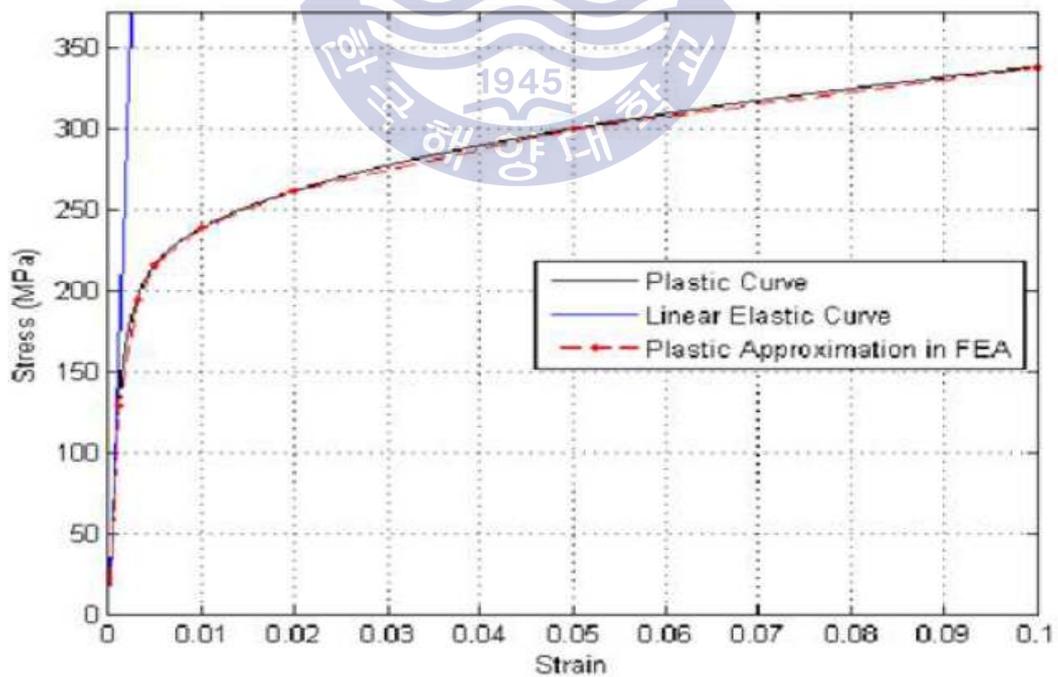


Fig. 21 Stress Strain Curve of Water Mist Lance Materials

3.1.3 Water Mist Lance 관통해석 경계조건

Fig. 22에 Water Mist Lance 관통해석에 적용된 고정 경계조건을 나타내었다.

Water Mist Lance 관통해석은 컨테이너 Wall을 Water Mist Lance의 Piercing 노즐이 관통하는지에 대한 관점에서 검토가 이루어져야 하므로 컨테이너에 대한 관통해석은 효율을 위하여 간단하게 판으로 모사하였으며, Fig. 22에 녹색으로 표시된 판 끝단부의 모든 부분의 모든 방향의 자유도를 구속하였다.

Fig. 23는 Water Mist Lance의 하중 경계조건을 나타낸 그림이다. Water Mist Lance는 25 m/s의 속도로 이동하여 Fig. 23에 표기된 외부에서 컨테이너 내부를 향하여 충돌하는 조건을 적용하였으며, 5개 모델 모두 동일한 해석 조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 상기 경계조건을 Table 5와 같이 정리하였다.

Table 5 Boundary Conditions of Conatiner & Water Mist Lance

Boundary condition items	Conditions
Container	Wall(plate)
	Fixed end of the plate
Water Mist Lance	Conflicts with 25 m/s

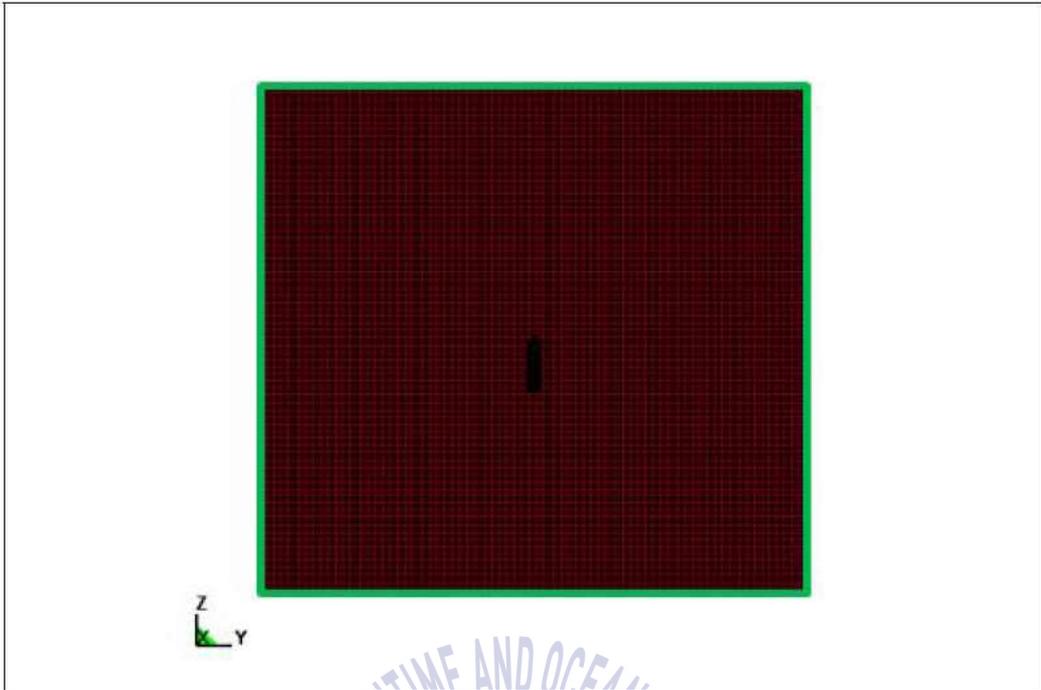


Fig. 22 Fixed Boundary Condition of Container Wall

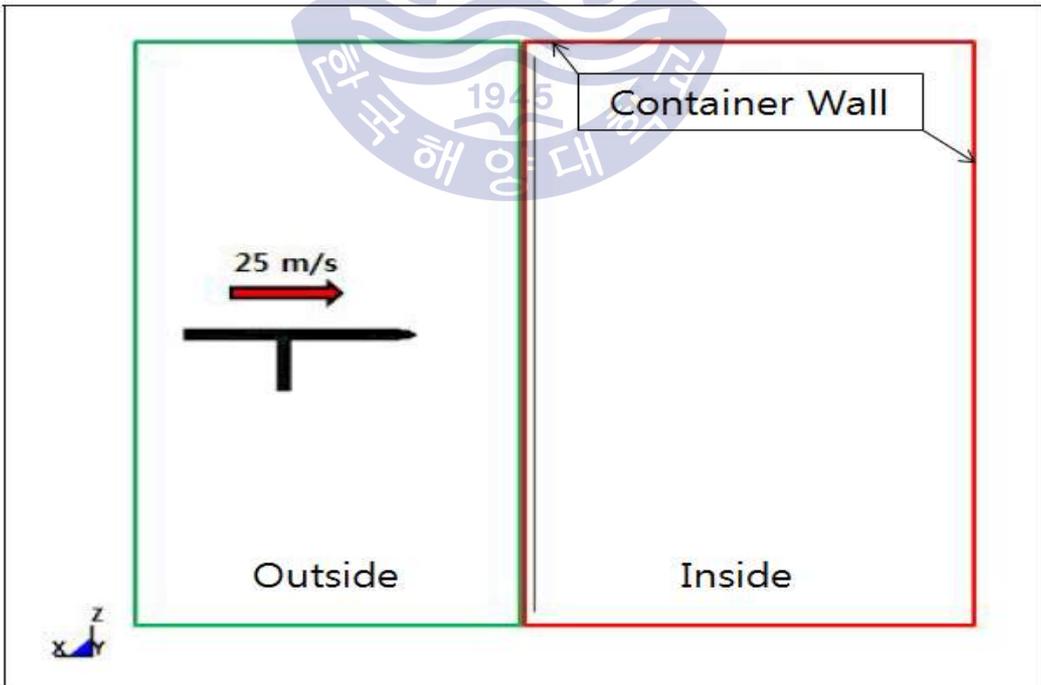


Fig. 23 Load Boundary Condition of Water Mist Lance

3.2 Mobile Water Monitor

Mobile Water Monitor는 컨테이너 선박의 화물구역 화재를 진압하기 위해 노천갑판(Weather Deck)구역에 설치하여 사용하는 장치이다. 일반적으로 Mobile Water Monitor는 화재 시 설치되어 상하 및 좌우로 소화제의 분출방향을 조정할 수 있도록 설계되어 있다. 소화제가 주입되는 압력, 분사각도 및 노즐의 직경에 영향을 받아 분사된다. 소화제인 유체는 Mobile Water Monitor의 아래 Body부에 연결되어 들어와 관로를 타고 흘러가 좁아지는 노즐을 통과하면서 유체의 속력이 올라가 소화지점에 분사가 된다.

노즐에서 유체 분사 시 더 적은 힘을 발생시키면서 더 많은 유량을 분사시킬 필요가 있다. 따라서 낮은 압력 손실로 노즐 형상을 결정하는 것이 필수적이다.

또한, 노즐 형상에 의해 생성된 힘을 최소화도 필요하다. 설계상에서 가장 주요한 변수는 분사량과 분사거리이다.

3.2.1 지배방정식

Mobile Water Monitor는 물을 소화제로 사용하는 소화설비이고, 화재가 발생한 경우에 소화수를 노즐을 통해 분출하여 화재를 진압한다. 물은 비압축성 유체이고, 펌프를 통해 가압된 소화수가 노즐을 통해 일정한 압력으로 분사되므로 정상상태 유동으로 가정할 수 있다. 비압축성 유체의 정상상태 유동해석에 대한 기본방정식은 연속방정식, 운동방정식과 나비에-스토크스 방정식이다. 식 (3.29), 식 (3.30) 및 식 (3.31)은 각각 정상상태 비압축성유체의 연속방정식, 운동방정식과 나비에-스토크스(Navier-Stokes) 방정식이다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.29)$$

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.30a)$$

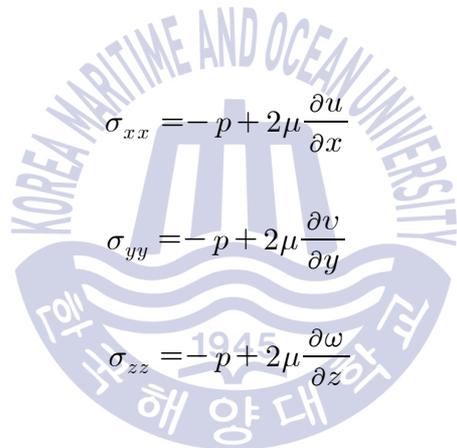
$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.30b)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \quad (3.30c)$$

식 (3.30)은 유체 운동에 대한 일반적인 미분방정식이다. 실제로 위 식들은 모든 연속체(유체나 고체)에, 운동 중이거나 정지되어 있거나에 관계없이 적용될 수 있다.

또한, 식 (3.30) 방정식은 응력과 속도 모두를 포함하고 있는 관계로 방정식의 수보다 미지수가 더 많기 때문에 먼저 응력과 속도 사이의 관계를 정립하는 것이 필요하다. 비압축성 Newton 유체의 경우 응력(Stress)은 변형률(Rate of Strain)과 선형적인 관계에 있는 것으로 알려져 있으며, 직교 좌표에서 이 관계들을 표현하면 다음과 같다.

(수직응력의 경우)



$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.31a)$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.31b)$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (3.31c)$$

(전단응력의 경우)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.31d)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \quad (3.31e)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.31f)$$

식 (3.31)을 식 (3.30)에 대입하고 그리고 비압축성 유동의 운동방정식 (3.20)을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

(x방향)

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + \omega\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (3.32a)$$

(y방향)

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + \omega\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (3.32b)$$

(z방향)

$$\rho\left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u\frac{\partial \omega}{\partial x} + v\frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega\frac{\partial \omega}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}\right) \quad (3.32c)$$

나비에-스토크스 방정식은 뉴턴의 운동방정식($F = ma$)에 기반하고 있으며, 좌변이 가속도, 우변이 유체에 작용하는 단위 질량당 힘을 나타내고 있다 [Young et al., 2010].

또한, Mobile Water Monitor에서 소화수가 분사되면서 소화수의 압력에 의한 관로 내부에 압력과 소화수의 분사시 발생하는 추력에 의한 반력을 지지부에서 견뎌주어야 한다. 따라서, 압력과 추력에 대한 변형이 발생할 수 있으므로 이에 대한 이론적 배경도 같이 파악되어야 한다.

공학재료의 파괴는 크게 연성파괴와 취성파괴로 나눌 수 있다. 대부분의 금속은 연성을 띄게 되며 항복에 의해 파괴된다. 이때 응력-변형률 거동은 파괴에 이르기까지 선형을 띄게 되며 갑작스런 파괴가 발생한다.

힘이 물체에 작용할 때 변형이 발생하며 이러한 외력에 의한 일은 물체에 포텐셜에너지로 저장되는데 이를 변형률에너지라 한다. 여기서 변형률에너지밀도 (Strain Energy Density)의 개념을 이용하는데 변형률에너지밀도란 단위 체적당 변형률에너지를 의미한다[이승현 등, 2015].

물체의 주축을 사용하여 주응력 σ_1 , σ_2 및 σ_3 를 두 가지로 표현할 수 있다:

- (a) 체적변화만 일어나고 각주 방향으로 작용하는 응력 σ_{av} 에 의한 등가응력 상태,
- (b) 체적 변화가 없이 왜곡을 일으키는 편향응력 상태. 여기서

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3.33)$$

Hooke's의 법칙에서

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.34)$$

여기서 σ 는 응력, ϵ 은 변형, E 는 탄성계수이다. 또한, 단위체적당 변형 에너지는 (3.35)식과 같다.

$$u = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon = \int_0^\epsilon E\epsilon d\epsilon = \frac{1}{2} E\epsilon^2 = \frac{1}{2} \epsilon\sigma \quad (3.35)$$

이를 단위체적당 총 변형에너지로 다시 표현하면 (3.8)식과 같다.

$$u = \frac{1}{2}(\epsilon_1\sigma_1 + \epsilon_2\sigma_2 + \epsilon_3\sigma_3) \quad (3.36)$$

여기서,

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (3.37)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (3.38)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (3.39)$$

ν 는 포아송 비이며, 총 변형에너지 u 에 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 를 대입하여 다시 풀면 총 변형 에너지는 (3.40)와 같이 표현된다.

$$u = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3.40)$$

위 식에서 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{av}$ 로 가정하면 유체의 정역학적인 하중 또는 체적변화에 따른 변형 에너지를 (3.41)식과 같이 얻을 수 있다.

$$u_\nu = \frac{1-2\nu}{6E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3.13)$$

단위체적당 전단변형에너지는 (3.14)식과 같다.

$$u_d = u - u_\nu \quad (3.41)$$

여기서 (3.42)식을 얻을 수 있다.

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (3.42)$$

단, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 이면 $u_d = 0$ 이다. 즉, 등가응력 상태에서 전단변형은 존재하지 않는다.

재료의 단순한 인장실험에서 $\sigma_1 = S_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 로 u_d 는 (3.43)식과 같이 간략화된다.

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (3.43)$$

여기서 S_y 는 항복응력이며, (3.44)식과 같은 경우에 발생한다.

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq S_y \quad (3.44)$$

따라서, (3.44)식은 연성재료의 항복이 발생할 것으로 예측되는 등가 또는 유효 응력을 나타냅니다. 이 응력은 대개 σ' 로 표시되며 von Mises stress(또는 등가 응력)으로 알려져 있다[Jong et al., 2009].

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.45)$$

3.2.2 난류모델(Shear Stress Transport Model, SST)

수치해석에 있어서 격자보다 더 작은 영역 내에서 발생하는 난류유동은 위의 지배방정식만으로는 해결 할 수 없으므로, 복잡하고 난해한 난류유동을 단순화 할 수 있는 난류모델의 도입이 필수적이다.

유동해석에 있어 널리 적용되고 있는 난류 모델은 k- ϵ 과 k- ω 모델과 같은 Two Equation 모델이다. 그러나 이 두 개의 Two Equation 모델은 각각 고유의 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, k- ϵ 모델은 강한 역압력 구배에 대한 민감도가 결여되어 있고, k- ω 모델의 경우에는 자유류의존성(Freestream Dependency)이 있다는 것이다[권민성, 2010].

이와 같은 두 모델의 단점을 서로 보완하기 위하여 k-ε과 k-ω 모델을 결합시킨 형태의 k-ω 전단응력전달(Shear Stress Transport, SST) 모델이 개발되었다[Menter, 1994]. 이 모델은 벽면 근처에서 k-ω 모델을 사용하여 벽함수 등이 필요 없으며, 경계조건만으로 정확한 계산이 가능하고, 원방에서는 k-ε 모델을 사용하여 원방 경계값이 계산에 영향을 미치지 않도록 하고 있다.

이 난류모델은 벽함수를 사용하지 않고 원방에서의 자유류 값에도 영향을 받지 않는 성질을 가지며 수치결과도 여러 경우에 있어서 실험과 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

이 난류모델의 지배방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega \kappa + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_\kappa \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}] \quad (3.46)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.47)$$

위 식에서 함수 F_1 값에 따라서 k-ε 모델과 k-ω 모델이 자동적으로 적용되게 된다. 즉, $F_1 = 1$ 일 경우 k-ω 모델, $F_1 = 0$ 일 경우 k-ε 모델에 해당된다. 그리고 상수값은 다음 식에 의해 결정된다.

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (3.48)$$

위 식에서 Φ_1 은 k-ω 모델에서의 상수값에 해당되며, Φ_2 는 k-ε 모델에서의 상수값에 해당된다[권민성, 2010].

3.2.3 기본개념 설계

Mobile Water Monitor는 분사(Jet)와 분무(Spray)가 가능하여야 하기 때문에 일반적으로 Fig. 24에 나타낸 분사·분무 겸용노즐을 사용하고 있다. 하지만, 이러한 형태의 노즐은 분사 시에 강력한 와류가 생성되어, 분사거리 측면에서 비효율적이기 때문에 본 논문에서는 Fig. 25에 나타낸 관통형 노즐을 적용하는 것으로 결정하였다.

Mobile Water Monitor는 선박의 기관실에 설치되는 소화펌프(Fire Pump)로부터 소화수인 해수(Sea Water)를 공급받게 되는데, Mobile Water Monitor의 기본 용량이 60 m³/h이고, 선박마다 4 sets를 비치하여야 하므로, Fire Pump 용량이 기본적으로 240 m³/h의 용량이 추가되어야 한다. 하지만, Table 6에서 나타낸 바와 같이, 기존의 단일형 노즐을 적용할 경우, 240 m³/h에 추가하여 10~30 % 정도의 추가용량이 필요하지만, 관통형 노즐을 적용할 경우, 요구되는 펌프의 용량을 240 m³/h에 고정시킬 수 있기 때문에 상당한 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 판단된다.

노즐은 관통형 노즐로서 기존에 개발되어 판매되고 있는 해적퇴치용 Water Cannon(삼성중공업, Unifire(스웨덴) 등)의 노즐 등에 적용되는 관통형 노즐에 대한 자료를 검토하고, Fig. 26과 같은 기본 모델을 설계 하였다.

노즐의 성능은 K-factor, 분사속도, 분사각 등으로 규정할 수 있다. K-factor는 노즐의 설계 시에 중요한 인자로 식 (3.49)와 같이 유량(Q)과 압력(P)의 관계를 나타내며, K-Factor는 노즐의 유량계수이다.

$$Q(\ell/\text{min}) = K\sqrt{P(\text{bar})} \quad (3.49)$$

예를 들어, Mobile Water Monitor를 4 bar를 기준으로 개발한다고 가정할 때, K-Factor가 500인 노즐을 적용하면 유량이 1,000 ℓ/min(60 m³/h)인 Mobile Water Monitor를 개발할 수 있다.

유량계수와 관련된 이론은 관로 내에 단면적이 다른 노즐과 같은 장치를 설치하고 입구(A₁, V₁), 출구(A₂, V₂)에 대해 베르누이 정리를 적용하면 비압축성 유체의 경우 다음 식이 성립한다.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.50)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (3.51)$$

여기서, P, A, V 는 노즐 입·출구의 압력, 단면적, 유속이고, ρ 는 유체의 밀도이다. 식 (3.50)에서 V₂를 구해 식 (3.51)에 대입하면 유량 Q_i는 다음 식과 같이

구해진다.

$$Q_i = A_2 V_2 = A_2 \sqrt{\frac{2\rho(P_1 - P_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = A_2 \sqrt{\frac{2\rho(\Delta P)}{1 - m^2}} \quad (3.52)$$

여기서, m 은 단면적 $\frac{A_2}{A_1}$ 의 비이다.

축소된 단면적 A_2 는 유체의 관성 때문에 실제의 노즐 구경보다 조금 하류쪽에서 최소로 되어 노즐 출구의 단면적보다 적게 된다. 이것을 축류(Vena - Contracta)라고 하는데 A_2 는 유체의 밀도나 기구의 형상에 의해서도 변하므로 실제 측정하는 것은 곤란하여 보통 단면 A_0 로 대신하는 것이 일반적이다. 이러한 조건들을 고려하여 실제의 단면적에 유출계수(Discharge Coefficient)라고 하는데 유출계수를 도입하면 다음 식으로 주어진다.

$$Q_i = A_2 V_2 = CA_0 V_2 = CA_0 \sqrt{\frac{2\rho(P_1 - P_2)}{1 - m^2}} = CA_0 \sqrt{\frac{2\rho(\Delta P)}{1 - m^2}} \quad (3.53)$$

식 (3.29)의 의해 이론적으로 계산된 유량은 실제 유체에서는 유체의 점도, 밀도, 온도 및 기타 팽창계수 등에 의해 실제의 유량과는 다소 차이가 있다. 따라서, 이러한 조건을 고려하여 여러 가지 계수를 곱해 수정하여야 한다.

이때 유출계수 C 와 유량계수 K 사이에는

$$K = \frac{C}{\sqrt{1 - m^2}} \quad (3.54)$$

가 된다. 유량계수 K 는 실측에 의해 정해진다[김동화, 2003].

본 연구에서 연구하고자 하는 Mobile Water Monitor 유량계수 K 측정에 관한 사항은 5.3.1.1.에서 자세히 설명하였다.

Fig. 26에서 노즐의 출구부 직경 D 의 범위는 15 mm ~ 35 mm로 설정하였으며, 이는 Mobile Water Monitor가 작동압력 범위 4 bar ~ 9 bar에서 60 m³/h의 유량을 가져야 한다는 것을 고려한 것이다.

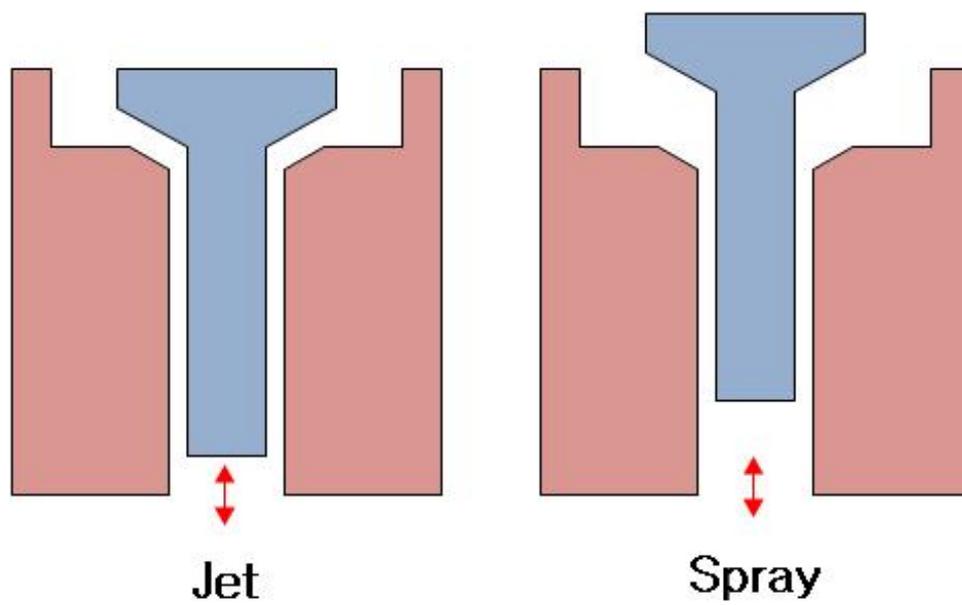


Fig. 24 Schematic Diagram of Spray & Jet Nozzle

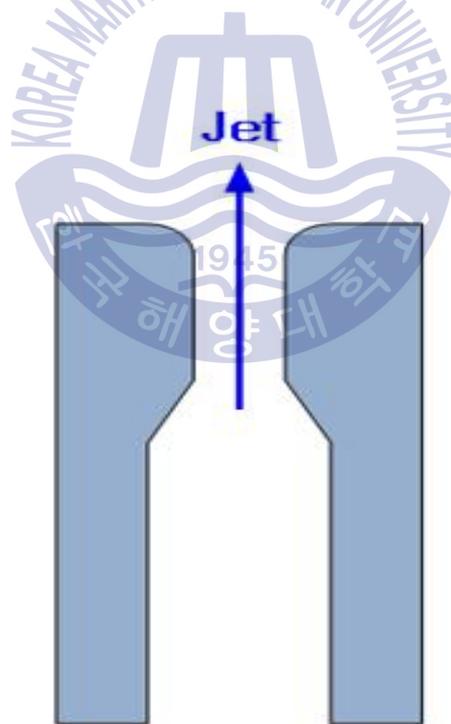


Fig. 25 Schematic Diagram of Through Type Nozzle

Table 6 Performance comparison of Single nozzle and through nozzle

K	Req. Height (m)	Req. Press. (bar)	Req. Q'ty (m ³ /h)	Total Req. Q'ty (m ³ /h, 4 sets)	Additional Capacity (m ³ /h)	Remark
707.1	10	2	60.00	240.0	0.0	기존제품 (단일형노즐)
707.1	20	4	84.85	339.4	99.4	
707.1	30	6	103.92	415.7	175.7	
707.1	10	2	60.00	240.0	0.0	실험노즐 (관통형노즐)
500.0	20	4	60.00	240.0	0.0	
408.2	30	6	60.00	240.0	0.0	

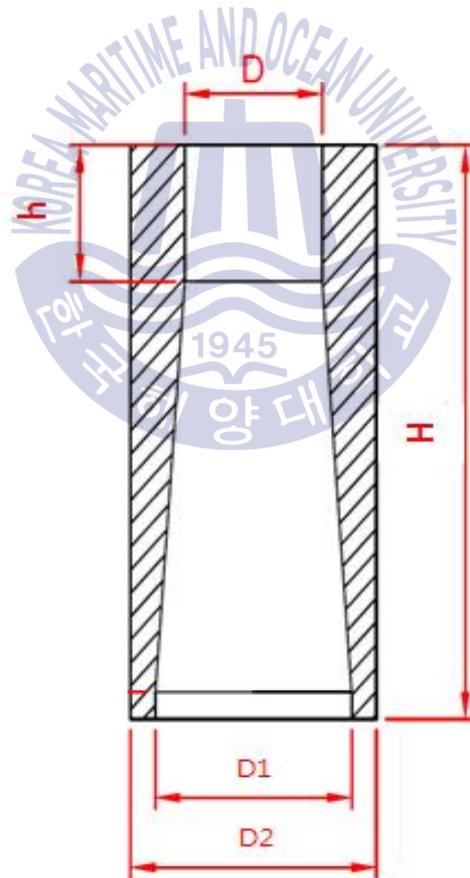


Fig. 26 Schematic Diagram of Basic Nozzle Model

3.2.4 Mobile Water Monitor's Nozzle Orifice 유동해석

본 해석에서는 4 Bar ~ 9 Bar까지의 Nozzle Orifice에 따라 유동해석을 통해 분사유량 60 m³/h와 분사거리 40 m이상의 정량적 목표(SOLAS 설계기준)를 만족하는 최적의 Nozzle Orifice를 구하고자 하였다. 해석은 상용프로그램인 ANSYS Work Bench[ANSYS, 2017]를 사용하여 해석을 수행하였다.

최근 대부분의 실험은 컴퓨터를 이용한 전산해석이 이루어진 후 이 결과를 설계에 반영하여 최종 모델을 제작하는 방법을 취하고 있다. 이러한 방법을 이용하면 많은 시행착오를 줄일 수 있기 때문에 형상의 변경으로 발생하는 제작비를 줄일 수 있다.

또한, 제작시간이 절약되기 때문에 완제품의 상용화까지 시간을 대폭 줄일 수 있다. 상용화가 빨리 이루어진 만큼 시장의 선점효과를 누릴 수 있기 때문에 전산해석의 결과를 이용한 설계의 변경은 아주 유용하다고 할 수 있다.

예전에는 실제 구조물을 제작하여 똑같은 조건하에 실험을 통해 결과를 얻을 수 있었지만, 현재는 3D 모델링 작업을 통해 구조물의 형상을 실제와 동일하게 만들고 똑같은 외부 경계조건을 입력하여 해석을 수행하면 실제와 거의 흡사한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 다양한 형상의 모델과 다양한 해석조건이 주어질 경우 쉽게 적용할 수 있기 때문에 실제 실험하기 어려운 부분도 컴퓨터를 이용하면 쉽게 해석을 수행할 수 있다. 또한, 전산해석을 수행할 경우 실험 시 발생할 수 있는 안전사고에 대한 걱정이 없기 때문에 인명피해가 전혀 발생하지 않는다. 이러한 이유로 컴퓨터를 이용한 전산해석은 제품 개발을 위한 선택이 아니라 필수적인 요소가 되었다.

3.2.4.1 Nozzle Orifice 유동해석의 정량적 목표 및 해석대상 범위 설정

Mobile Water Monitor의 노즐 설계에서 가장 중요한 사항은 노즐 끝단 오리피스 직경을 예측하는 것이라고 판단된다. 오리피스 직경의 예측은 각 노즐이 해당 방출압력(4 Bar ~ 9 Bar)에서 1,000 LPM(60 m³/h)의 유량을 가지면서도 발사각도가 30° ~ 35°일 때 수평 도달거리가 40m 이상이 되도록 하여야 한다.

따라서, 해당되는 압력에서 수평 도달거리가 40m 이상이 되는 오리피스 직경의 범위를 예측하고, 해당 범위의 오리피스 직경을 가지는 노즐을 제작하여 K값을 계측하여야 한다.

이때 측정된 K값을 이용하여 해당되는 압력에서 요구되는 유량인 1,000 LPM(60 m³/h)을 가지는 오리피스의 정확한 직경을 예측하여 노즐을 다시 제작하고, 제작된 노즐의 수평 도달거리가 요구 조건인 40m 이상이 되는지를 확인하여야 한다.

물론 이러한 반복적인 접근방법은 많은 노력과 시간이 요구된다. 따라서, 해당 압력에서의 오리피스 직경의 범위를 비교적 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다.

Mobile Water Monitor에서 방출되는 소화수의 운동은 기본적으로 발사체의 포물선 운동과 원칙적으로 유사하다. 또한 노즐에서 방출되는 소화수의 유량은 오리피스의 직경과 초기 방출속도의 함수이다. 즉, 유량이 고정되어 있는 상황이라고 한다면, 오리피스의 직경과 소화수의 초기 방출속도는 반비례하게 된다.

Fig. 27과 같이, 초기속도가 V_0 이고, 발사각이 θ 인 포물선 운동이 있다고 가정할 때, 발사된 발사체의 최대도달거리와 최대 도달 높이는 각각 아래 식과 같다.

$$D_{\max} = \frac{V_0^2 \sin 2\theta}{g} \quad (3.55)$$

$$H_{\max} = \frac{(V_0 \sin \theta)^2}{2g} \quad (3.56)$$

상기의 식은 공기의 저항이 없다는 조건에서 수평 도달거리와 수직 도달 높이를 계산하기 때문에, 상기의 식을 이용하여 Mobile Water Monitor에서 방출되는 소화수의 수평 도달거리와 수직 도달높이를 정확하게 예측할 수는 없다.

Mobile Water Monitor에서 방출되는 소화수의 실제 수평 도달거리와 수직 도달높이는 공기의 저항뿐만 아니라, 소화수 내부에 존재하는 와류, 와류에 의

해 발생하는 액적(mist)의 저항 등 다양한 저항이 존재하기 때문에 정확한 수평 도달거리는 포물선 운동의 이론적 계산으로 계산된 값보다 적을 것으로 판단된다.

포물선 운동방정식을 이용하여 계산된 최대 수평거리와 오리피스 직경 및 초기 발사속도간의 상관관계는 Table 7과 같다.

또한, Table 7에서 나타낸 포물선 운동을 고려하여 계산된 수평 방사거리는 유량을 만족시키기 위한 오리피스의 직경과 초기 발사속도만의 상관관계를 통해 계산되므로, 노즐에 작용되는 압력에 따른 수평 도달거리를 예측하기 위해서는 해당 압력에 해당되는 초기 발사속도의 범위를 예측하여야 한다.

노즐에서 방출되는 소화수를 개략적으로 나타내면 Fig. 28과 같으며, 그림에 나타낸 1지점과 2지점에 대해 베르누이 방정식으로 나타내면 아래 식과 같다.

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + P_2 + \Delta P \quad (3.57)$$

상기의 식에서 1지점과 2지점 사이의 거리가 충분히 떨어져 있어서, 2지점에서의 압력과 속도가 모두 0이라고 가정할 조건이라면, 1지점에서의 압력과 속도는 직접적인 상관관계를 가지게 된다. 이를 이용하면, 노즐에 작용하는 압력과 방출되는 소화수의 속도를 추정할 수 있으며, 그 결과는 아래 표와 같다.

노즐에 작용되는 압력에 따른 초기 발사속도의 범위는 베르누이 방정식을 이용하여 예측할 수 있다.

Table 8에 나타낸 방출속도는 유동손실 등을 모두 고려하지 않은 것으로 실제 노즐에서의 방출속도는 계산된 방출속도보다 낮은 속도를 유지할 것이다. 베르누이 방정식을 이용하여 계산된 방출속도와 Table 7에서 나타낸 포물선 운동을 고려한 방출속도 및 이에 따른 수평 도달거리를 상호 비교해 보면, 각 압력별로 요구되는 유량인 1,000 LPM(m³/h)와 수평 도달거리를 모두 만족시킬 수 있는 오리피스 직경의 범위를 추정할 수 있다.

예를 들어, 방출압력이 4 bar인 경우에 베르누이 방정식으로 계산한 추정 방출

속도는 28.28 m/s이다. Table 7에서 방출속도가 28.28 m/s 보다 낮은 방출속도를 가지는 오리피스 직경은 최소 28 mm 이상이다.

따라서, 4 bar에 대해서는 오리피스 직경이 최소 28 mm 이상이 되어야 함을 알 수 있고, 유동 손실 등을 고려하지 않은 점을 고려해 볼 때, 4 bar에 대해서는 오리피스 직경이 28 mm ~ 31 mm 정도일 것으로 추정되며, 이를 모든 압력범위에 대해 적용하여 해당되는 오리피스 직경의 범위를 추정하면 Table 9와 같다.



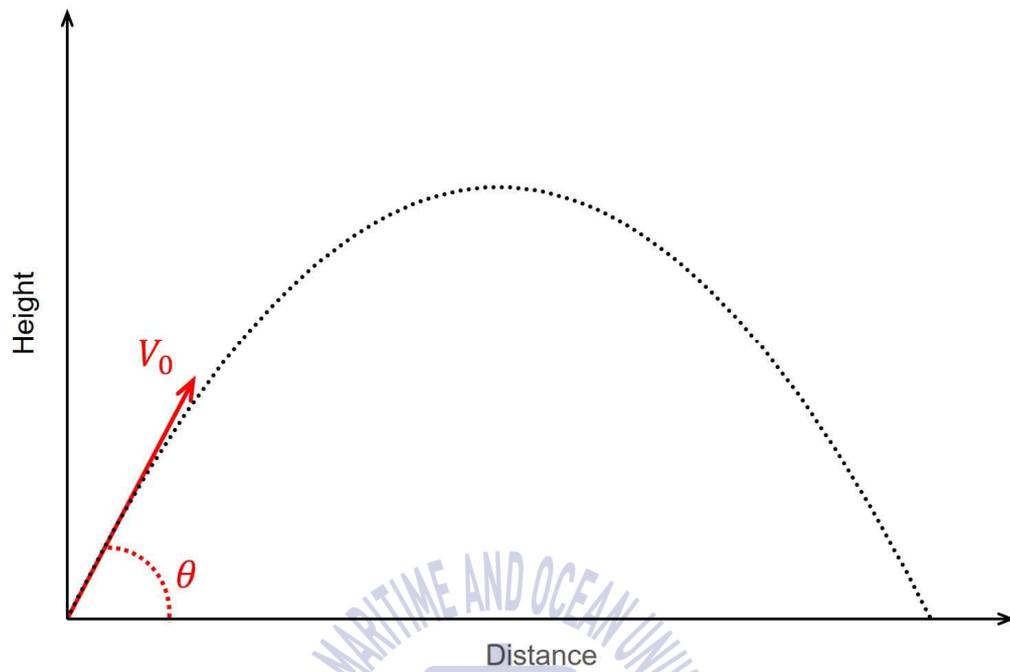


Fig. 27 Parabolic Motion

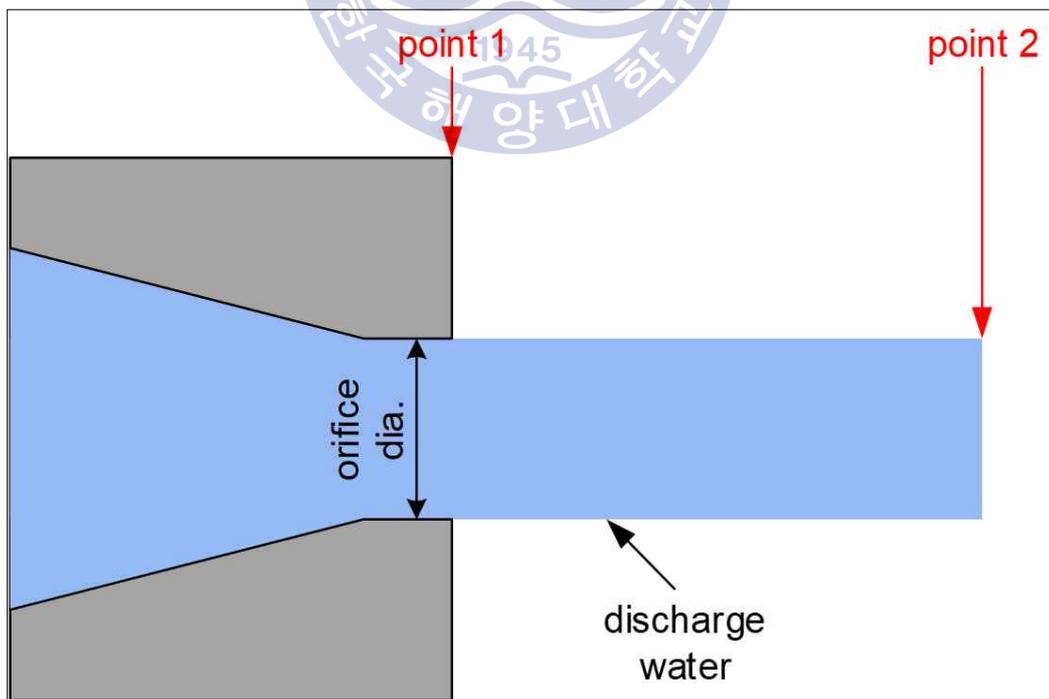


Fig. 28 Schematic Diagram for Nozzle and Discharge Water

Table 7 Estimated Horizontal Distance According to Parabolic Motion

Flow rate (m ³ /h)	orifice dia. (mm)	sec. area of orifice (mm ²)	discha. velocity (V_0)	disch. angle (deg.)	horizotal distance (m)
60.00	32.00	804.25	20.72	35	41.14
60.00	31.00	754.77	22.08	35	46.71
60.00	30.00	706.86	23.58	35	53.25
60.00	29.00	660.52	25.23	35	60.99
60.00	28.00	615.75	27.07	35	70.18
60.00	27.00	572.56	29.11	35	81.17
60.00	26.00	530.93	31.39	35	94.39
60.00	25.00	490.87	33.95	35	110.43
60.00	24.00	452.39	36.84	35	130.01
60.00	23.00	415.48	40.11	35	154.14
60.00	22.00	380.13	43.84	35	184.14
60.00	21.00	346.36	48.12	35	221.80
60.00	20.00	314.16	53.05	35	269.60
60.00	19.00	283.53	58.78	35	330.99
60.00	18.00	254.47	65.50	35	410.91
60.00	17.00	226.98	73.43	35	516.46

Table 8 Estimated Discharge Velocity Using Bernoulli Equation

Disch. Press. (bar)	Disch. Press. (Pa)	Density of Water (kg/m ³)	Disch. Vel. (m/s)
4.0	400,000.0	1,000	28.28
5.0	500,000.0	1,000	31.62
6.0	600,000.0	1,000	34.64
7.0	700,000.0	1,000	37.42
8.0	800,000.0	1,000	40.00
9.0	900,000.0	1,000	42.43

Table 9 Nozzle Orifice Range for Flow Analysis

Inlet pressure [Bar]	Estimated [mm]
4	31~28
5	28~25
6	26~23
7	26~23
8	24~21
9	24~21

3.2.4.2 모델링 및 해석 경계조건

Mobile Water Monitor에 대한 설계도면을 바탕으로 3차원 모델링 작업을 수행하였다. Fig. 29는 Mobile Water Monitor의 설계도면을 나타낸 것이며, 유동 해석에 적용될 3차원 모델링은 유동장을 고려하여 간소화된 모델링을 Fig. 30에 나타내었다.

또한, Mobile Water Monitor의 3차원 모델의 출구유량 및 분사거리에 대한 유동해석을 위해서는 외부에 유체가 유동할 수 있는 외부 유동장이 필요로 하다.

본 해석에서는 분사거리를 고려하여 유동장의 크기를 분사방향으로 70 m, 높이방향 20 m, 폭 2 m로 설정하여 생성하였고, ANSYS Workbench를 사용하여 [ANSYS, 2017] 유한요소 모델로 Fig. 31에 나타내었다. 모델의 유한요소 구성 정보를 Table 10에 나타내었다.

유동해석을 위한 경계조건으로 분사되는 유체는 상온의 물을 사용 하였고, 외부 유동장은 대기 조건과 같은 상온의 공기를 사용하였다. 유체가 중력에 의해 떨어지는 효과를 부여하기 위하여 중력조건을 전체 유동장에 부여하였다.

또한, Mobile Water Monitor의 곡관을 따라 외부 유동장에 분사되는 유동 특성을 고려해 여러 가지 해석결과 가장 정확한 결과를 나타낸 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다. 초기 전체 유동장 조건은 공기로 가득 차 있는 상태로 해석을 수행 하였고, Table 11에 조건들을 나타내었다.

Mobile Water Monitor의 입구에 각 압력별 사용조건인 4 Bar ~ 9 Bar의 압력에 따라 유동해석을 수행할 Nozzle Orifice를 분류하였고, Nozzle의 출구를 통해 분사된 유체가 빠져나가는 외부 유동장의 경계에 대기조건과 같은 0 Bar Opening 조건을 외부 유동장의 바닥면은 Wall로 설정하여 Fig. 32와 같이 나타내었다.

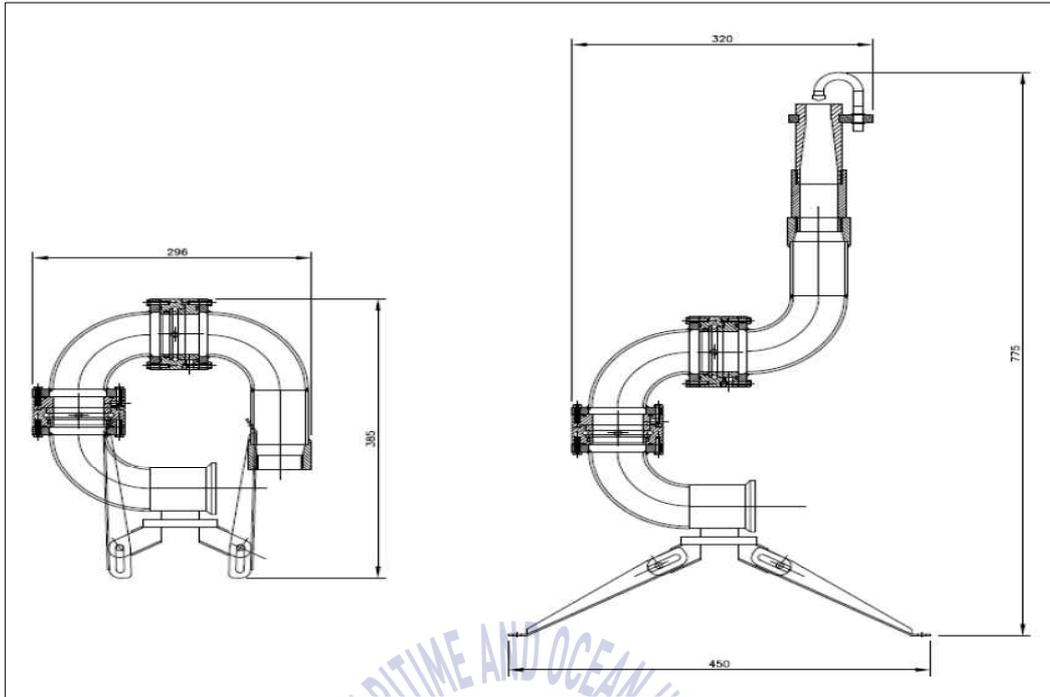


Fig. 29 Schematic Diagram of Mobile Water Monitor

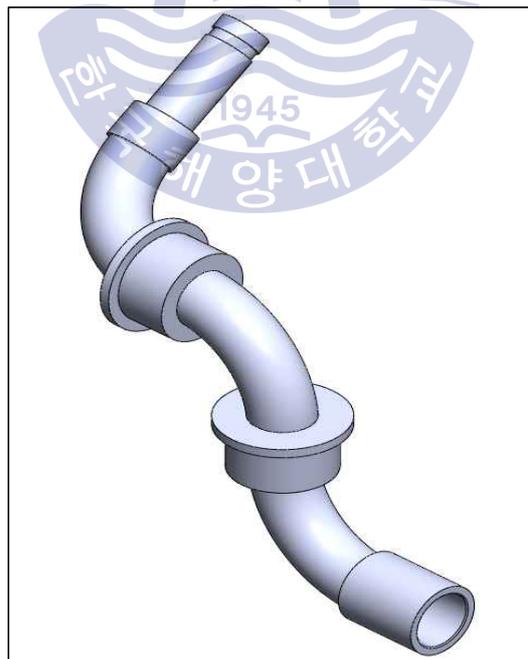


Fig. 30 3D Modeling of Mobile Water Monitor for Flow Analysis



Fig. 31 Flow Field and Finite Element Model of Mobile Water Monitor

Table 10 Finite Element Model Information of Mobile Water Monitor

Category	Nodes	Elements
Mesh	2,224,850	3,675,445

Table 11 Boundary Conditions of Mobile Water Monitor

Boundary condition items	Conditions
Disch. fluid	25°C Water
Outside fluid	25°C Air
Turbulence	SST(Shear Stress transport)
Initial Condition	25°C Air

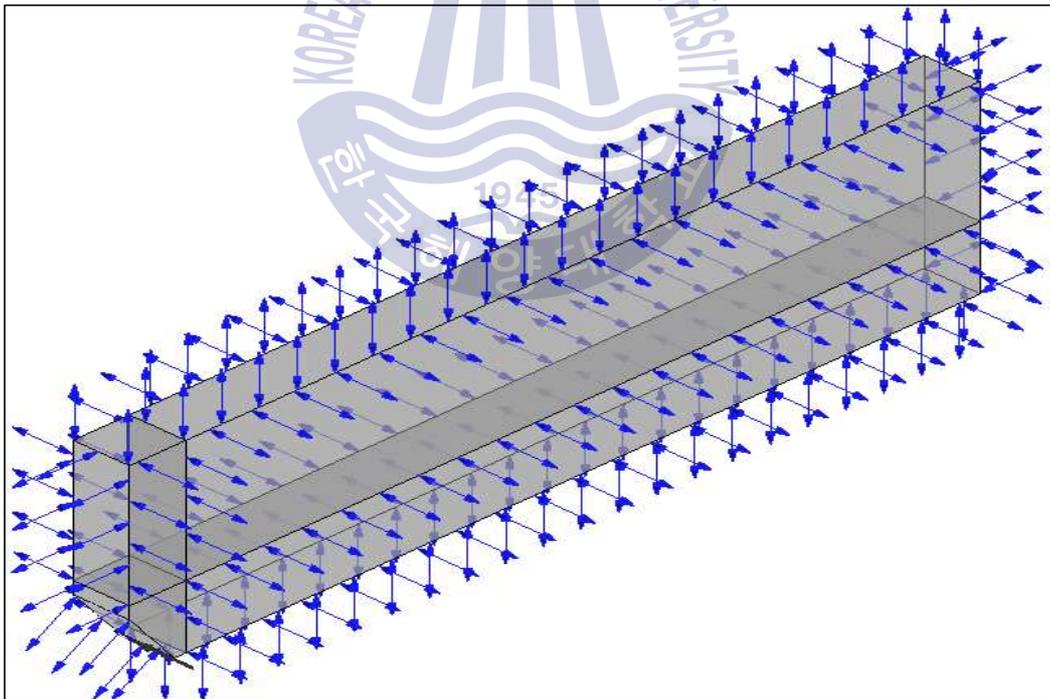


Fig. 32 Boundary of External Flow Field of Mobile Water Monitor

3.2.5 Mobile Water Monitor 분사각도 및 정류격자 길이에 따른 유동해석

3.2.5.1 모델링 및 해석 경계조건

본 절에서는 Mobile Water Monitor의 분사각도 및 노즐의 정류격자(Stabilizer)의 길이에 따른 성능을 예측하였다. 여기서 정류격자는 노즐에서 토출되는 유체의 채널을 균일하게 만드는 역할을 한다. 이러한 비교 데이터를 바탕으로 최적화된 노즐의 조건을 설계하였다. 본 절에서는 전산 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS FLUENT R17.1을, 해석 데이터의 후처리에는 CFD-Post를 사용하였다. Mobile Water Monitor 노즐의 전산 유동해석에 관한 상세한 내용은 아래와 같다.

가. Volume of Fluid Model(VOF)

VOF 모델은 고정된 격자계에서 적용되는 표면 추적 기법을 사용하는 다상 유동해석 모델로 2개 이상의 상의 경계면 분포를 해석 목적으로 한다. 즉, 2개 이상의 혼합되지 않은 유체(Immiscible Fluids)가 존재할 때 각 유체 사이의 상호 작용에 따른 계면(Free-Surface)에 관심을 두고 해석하게 되는데, VOF 모델은 단 하나의 운동방정식을 각 상에서 공유하고, 계산되는 격자에서의 각 상의 부피 비만을 고려하여 계산하게 된다. VOF 모델을 이용하여 정확한 계면 추적을 하기 위해서는 계면의 길이(Interface Length)보다 해석에 사용되는 격자의 크기를 작게 적용하여야 한다. 현재 VOF 모델은 Pressure-Based Solver에서만 적용 가능하고, Steady/Transient 모드에서 모두 사용 가능하다. 또한, 대부분 해석 대상에서 중력을 고려해야 한다.

<지배방정식>

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j F_{gravity} = m_p \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g \quad (3.58)$$

Surface tension과 Wall Adhesion은 운동방정식에 추가적인 Source Term으로 처리하여 계산한다.

- Volume Fraction 보존 방정식

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon_k}{\partial x_j} = S_{\epsilon k} \quad (3.59)$$

상간의 계면 추적은 격자 내에서 각 상의 부피비를 계산하여 결정하게 되며, 상변화 혹은 화학반응에 의한 계면의 질량 전달은 사용자 정의 함수를 사용하여 처리할 수 있다.

계면을 추적하는 해석을 수행할 때, 고려되어야 할 물리적 현상이 있는데, 액체의 분자 사이 인력의 결과로 발생하는 표면 장력(Surface Tension)이다. 액체 표면에서의 힘의 방향은 반경 방향 내측이며, 전체 구면에 걸쳐 힘의 방사형 구성요소의 결합이 있으므로, 표면의 오목한 면에서 압력이 증가한다. 표면 장력은 표면 반경방향 바깥쪽의 압력구배 힘으로 반경 방향 내측 분자 간 인력의 균형에 영향을 준다.

ANSYS FLUENT를 이용한 해석 시 표면장력 고려 여부는 Reynolds Number에 의해 결정되게 되며, $We \gg 1$ 혹은 $Ca \ll 1$ 일 경우, 표면장력은 매우 중요해진다.

$$Re \ll 1, \text{ Capillary Number} \quad Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (3.60)$$

$$Re \gg 1, \text{ Weber Number} \quad We = \frac{\rho L U^2}{\sigma} \quad (3.61)$$

표면장력의 영향은 운동량 보존 방정식에서 추가적인 소스항으로 처리하여 아래와 같이 모델링 된다.

$$\vec{F}_{pq} = \frac{\sigma(\alpha_p \rho_p \kappa_p \nabla \alpha_p) + (\alpha_q \rho_q \kappa_q \nabla \alpha_q)}{\frac{1}{2}(\rho_p + \rho_q)}, \kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} \right) \quad (3.62)$$

ANSYS FLUENT에서 표면장력 설정은 Continuum Surface Force(CSF)방법과 Continuum Surface Stress(CSS) 방법을 이용할 수 있다[ANSYS Fluent Theory Guide].

나. 모델링 및 해석 경계조건

본 유동해석은 분사의 종류(35° & 90° 분사)에 따른 Mobile Water Monitor 노즐의 분사거리를 예측하는데 목적이 있으며, 노즐의 기본 디자인에서 정류격자 길이를 변화하였을 때 분사거리가 어떻게 변화되는지를 확인해보고자 하였다.

Mobile Water Monitor 노즐 해석의 전체 도메인 형상은 35° 분사각도의 경우 길이 L: 70 m, 높이 H: 30 m 의 크기이며 2D로 형상을 간략화 하였다. 90° 분사각도의 경우 길이 L: 5 m, 높이 H: 30 m 의 크기이며, 마찬가지로 2D로 구성하였다. 노즐 정류격자의 길이는 3 cm, 4 cm, 5 cm로 구분하여 노즐을 디자인하였다. 본 해석은 현실을 구현한 3D 해석이 아닌 간단화한 2D 해석을 수행하였으며 그 이유는 다음과 같다.

- 1 분사거리를 해석의 대상으로 하였기에 반경 및 방향에 대한 고려를 제외하여도 3D 해석과 동일한 결과를 얻을 수 있다.
- 2 분사거리에 대한 정확한 해석을 위해 유동의 흐름방향에 부합하면서 2D 해석에 신뢰성이 높은 hexahedrons model 만으로 도메인 전체를 구성할 수 있다.
- 3 2D로 간략화 함에 따라 해석에 필요한 격자 숫자가 최대 반경길이의 배수만큼 줄어들고 해석시간 또한 비례하여 감소한다.

Table 12는 Mobile Water Monitor 노즐 해석의 유한체적모델 격자 정보를, Fig. 33과 Fig. 34는 Mobile Water Monitor 노즐의 해석을 위한 전체 도메인의 모습과 도메인에 적용한 격자(meshing)의 형상을 나타내었다.

Fig. 33은 35° 분사각도의 경우, 노즐 도메인 및 격자 형상(Fig. 33A)과 전체 도메인 형상(Fig. 33B)이며, Fig. 34는 90° 분사각도의 경우, 전체 도메인 형상(Fig. 34A)과 노즐 도메인 및 격자 형상(Fig. 34B)이다. 관내 벽면에 의한 유동의 구배를 충분히 발달시키기 위해 노즐 길이는 노즐 직경의 4배 이상으로 구성하였다.

Table 13은 본 논문에서 수행한 Mobile Water Monitor의 유동해석을 위한 경계 조건을 나타내었다. 관련한 내용을 상세히 서술하면, 작동유체는 청수(Fresh water)로 하였고, 난류모델은 노즐의 정류격자에서 채널의 변화가 분사거리에 주요하게 영향을 미치므로 Wall 주변과 Stream Line을 모두 고려하는데 특화되어 있는 SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하였다.

입구 및 출구 조건은 Mobile Water Monitor의 검사에서 활용되는 조건을 참고하여 각각 405,300 Pa (= 4 atm)과 0 Pa 압력조건으로 하였다. 대기조건은 표준대기(Standard Atmosphere) 물리량을 참고하여 기압: 101,325 Pa, 지상 기온: 15 °C, 중력 가속도: 9.8066 m/s², 공기밀도: 1.225 kg/m³ 로 적용하였다.



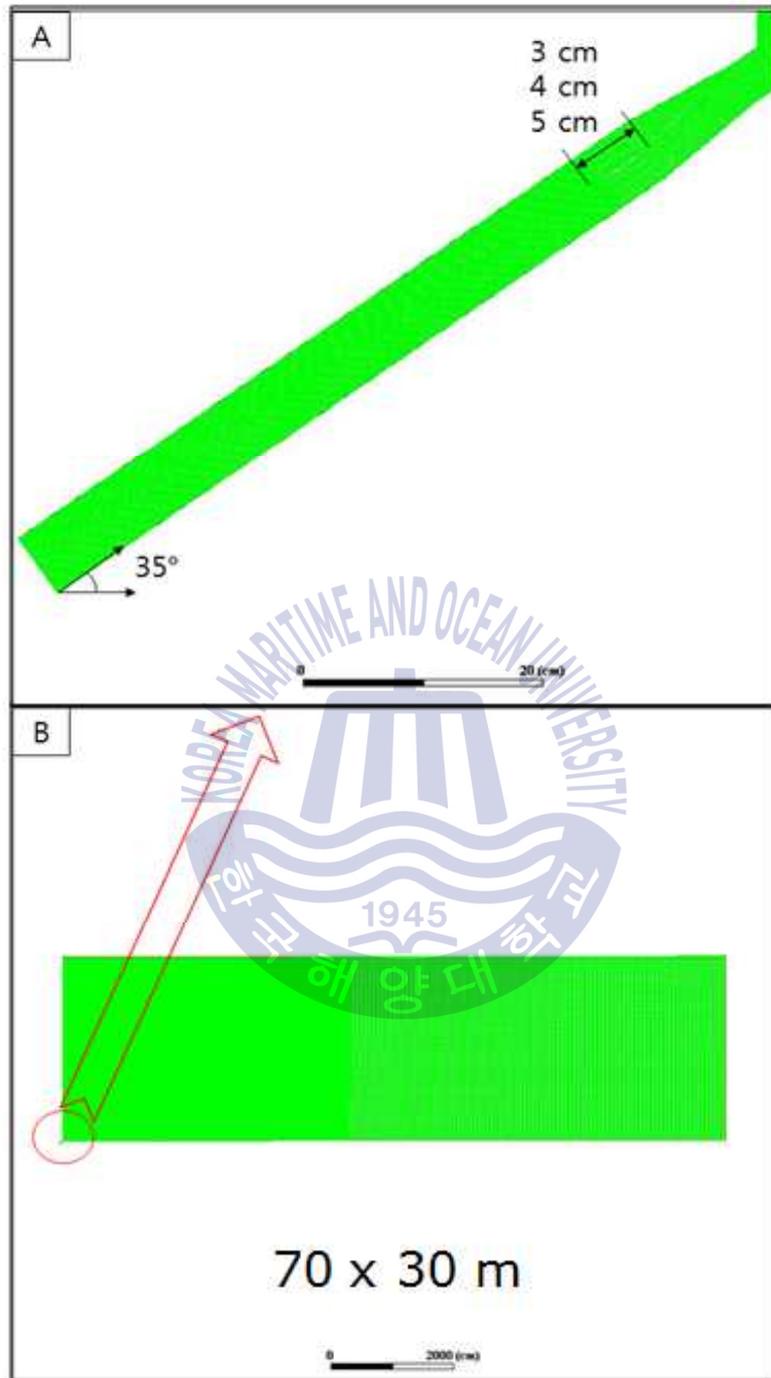


Fig. 33 In case of 35 ° Throw Angle,
 A: Nozzle domain and grid shape, B: Entire
 domain and grid shape

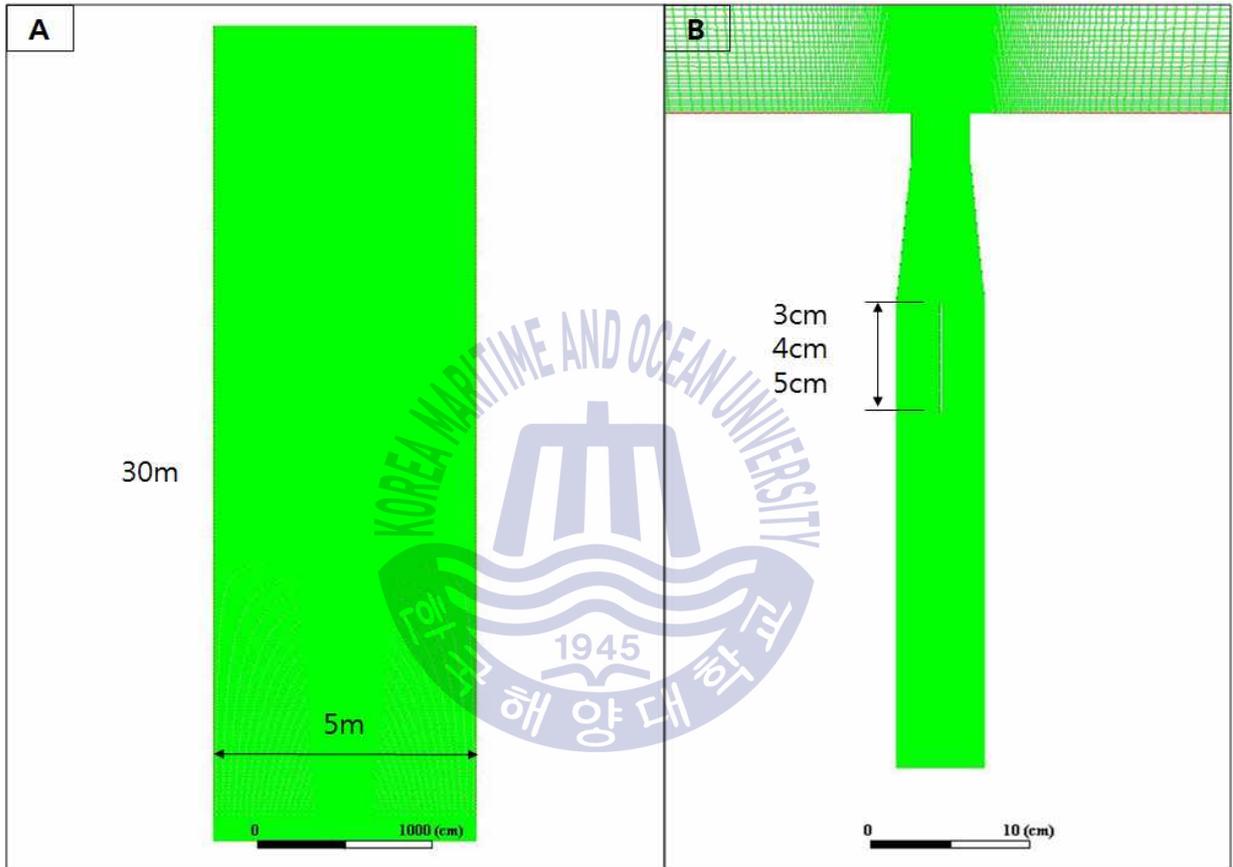


Fig. 34 In case of 90° Throw Angle,

A: Entire domain and grid shape, B: Nozzle domain and grid shape

Table 12 Finite Volume Model Grid Information of Mobile Water Monitor Nozzle Analysis

Case		Type	Nodes	Elements
35°	3 cm	Hexahedrons	276,887	278,200
	4 cm	Hexahedrons	277,887	279,200
	5 cm	Hexahedrons	278,887	280,200
90°	3 cm	Hexahedrons	166,979	168,356
	4 cm	Hexahedrons	185,079	186,576
	5 cm	Hexahedrons	186,679	188,196

Table 13 Boundary Conditions of Mobile Water Monitor Flow Analysis

Category	35°	90°
Material	Fresh Water, 25 °C	Fresh Water, 25 °C
Eddy model	Shear Stress Transport	Shear Stress Transport
Inlet condition	405,300 Pa, Pressure-inlet	405,300 Pa, Pressure-inlet
Outlet condition	0 Pa, Outlet-vent	0 Pa, Outlet-vent
Wall condition	No slip wall	No slip wall
Remark	Standard Atmosphere	Standard Atmosphere

3.2.6 Mobile Water Monitor 구조해석

Mobile Water Monitor는 작동압력인 4 Bar부터 9 Bar까지 여러 모델이 있다. 목표 성능인 분사거리와 유량을 만족한다면 구조적으로 시스템이 안정성을 유지하는지 검토할 필요가 있다. 가장 먼저 Mobile Water Monitor 시스템의 내부에 걸리는 내압에 따라 유동-구조 연성해석을 통하여 안전성을 평가한다.

그리고 유체가 분사될 때 반력이 발생하게 되는데 이를 지지해주는 다리 부분의 부품의 안전성을 평가하여 적절한 형상과 두께를 가질 수 있도록 해석이 필요하다. 먼저 분사를 통해 발생하는 반력을 구한 결과를 바탕으로 유동-구조 연성해석을 통하여 다리 부분의 안전성을 평가하였다.

구조해석의 목적에 따른 정량적 목표를 Table 14와 같이 나타내었다. Mobile Water Monitor를 지지해주는 Support Leg를 제외한 부품들은 안전율 3이상을 만족하도록 하였고, Support Leg의 안전율은 2이상을 만족하도록 설정하였다. 이를 만족하는 결과를 보기 위하여 유동-구조의 연성해석을 통하여 전체 시스템의 안전성 평가를 진행하였다.

Table 14 Structural Safety Quantitative Goals of Mobile Water Monitor

Pressure (Bar)	Components	Safety factor
9	Elbow	3 over
	Inlet Connector	3 over
	Nozzle Connector	3 over
	Bearing	3 over
	Base Plate	3 over
	Support Leg	2 over

3.2.6.1 구조안전성 평가 과정

각 부품별 구조안전성평가 과정을 Fig. 35와 같이 아래에 나타내었다. 먼저 유체가 흐르는 관로에 대하여 가장 높은 압력조건인 9 Bar때의 내압조건을 부여하여 구조안전성 평가를 먼저 실시하여 안전율을 검토하고, 결과가 정량적 목표에 만족한다면 Support Leg의 구조 안전성평가를 실시한다. 이 또한 가장 높은 압력조건인 9 Bar일 때 생기는 반력인 추력에 의해 생기는 응력에 대하여 구조안전성을 평가한다. 만약 기본 설계된 모델에 대하여 평가 결과가 정량적 목표 안전율에 미치지 못한다면 Support Leg의 두께를 키워 안전율을 높이도록 한다.



Fig. 35 Structural Safety Assessment Process

3.2.6.2 유동-구조 연성해석을 위한 모델링 및 해석 경계조건

Mobile Water Monitor의 구조안전성 평가를 위하여 기본 설계도면을 이용해 Fig. 36과 같이 3차원 모델링을 완성하였고 이를 Fig. 37과 같이 유한요소 모델로 구성하여 나타내었다. 해석의 정확성 및 적절한 해석조건을 검토하여 Nodes 338,144개, Elements 185,538개로 구성하여 Table 16에 나타내었다.

또한, 구조해석을 위한 경계조건은 Mobile Water Monitor의 사용조건인 4 Bar에서 9 Bar까지의 분사압력 중에서 가장 구조상으로 취약한 조건으로 판단되는 9 Bar에서의 분사압력조건을 해석조건으로 사용하였다. 먼저 유동해석을 통하여 9 Bar에서의 해석을 통해 계산된 압력을 유동-구조 연성해석(Fluid-Structure Analysis)을 통하여 구조해석에 Fig. 38과 같이 경계조건으로 부여하였다. 상기 경계조건을 Table 15와 같이 정리하였다. 또한, Mobile Water Monitor의 작동 중 지면에 접하는 Support Leg의 4개 지지점을 Fig. 39와 같이 고정하였다.

Support Leg의 재질은 기본 설계 시 적용한 SUS304이며, 이에 대한 물성 정보는 Table 17에 나타내었다.

Table 15 Boundary Conditions for Flow-Structural Analysis of Mobile Water Monitor

Boundary condition items	Conditions
Perssure	9 bar at inside of pipe line
Support Leg	Fixed 4-Support Leg

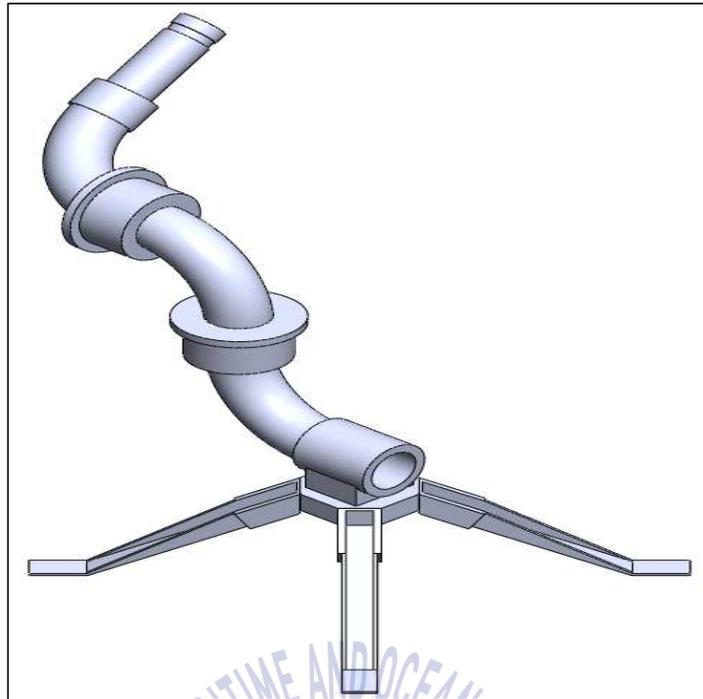


Fig. 36 Mobile Water Monitor 3D Model for Structural Analysis



Fig. 37 Finite Element Model of Mobile Water Monitor

Table 16 Finite Element Model Information of Mobile Water Monitor

Category	Nodes	Elements
Mesh	338,144	185,538

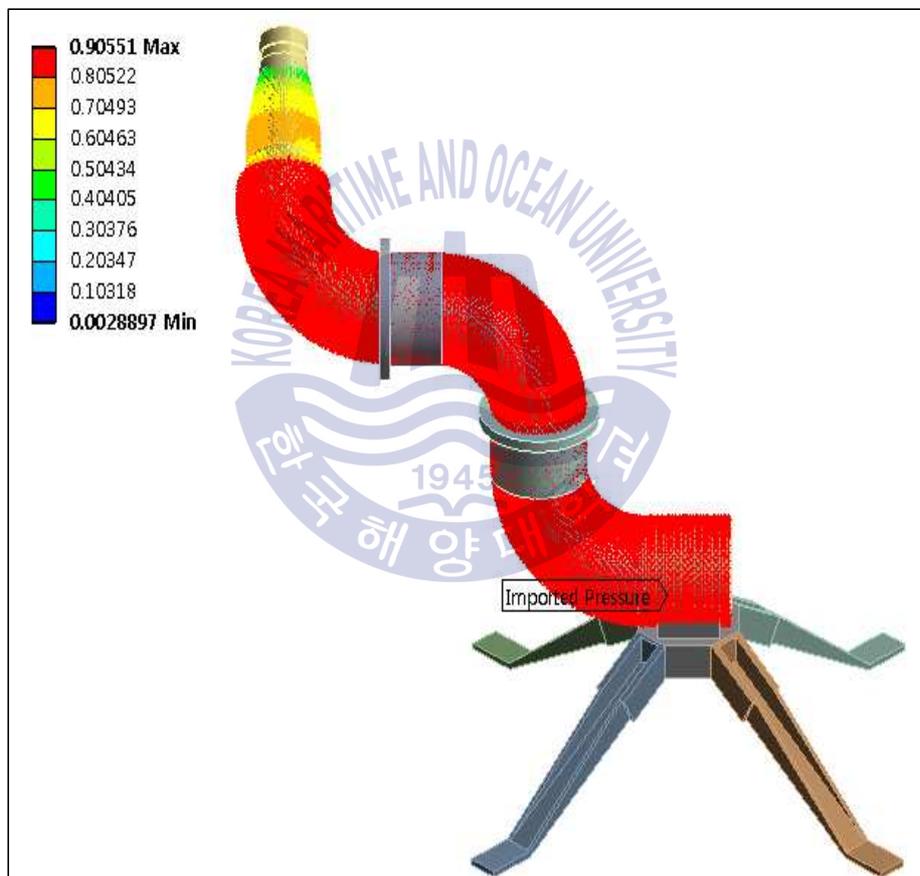


Fig. 38 Boundary Conditions of Mobile Water Monitor at 9bar

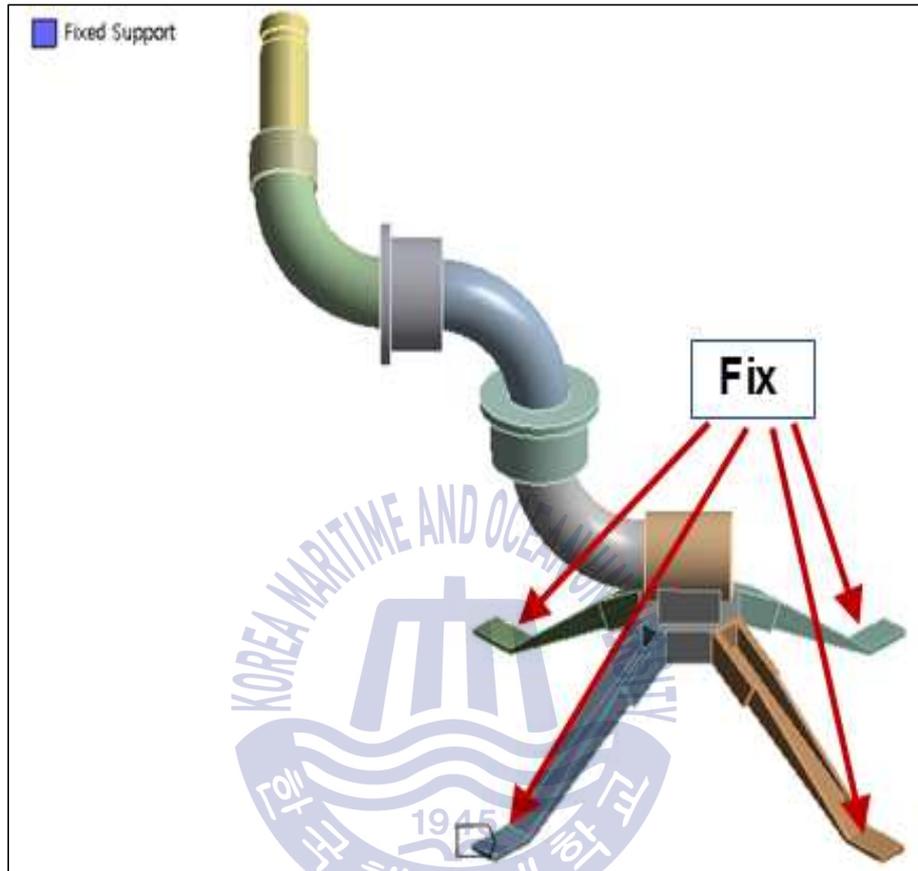


Fig. 39 Fixed Boundary Condition of Mobile Water Monitor

Table 17 Properties of SUS304

Material	Density [kg/m ³]	Tensile Strength, Yield [MPa]	Tensile Strength, Ultimate [MPa]	Poisson's Ratio
SUS304	8,000	215	505	0.29

제 4 장 Water Mist Lance 연구결과

4.1 Water Mist Lance 관통 해석

4.1.1 Water Mist Lance 관통해석 결과

Fig. 40은 Water Mist Lance Model 1(침단부분 원뿔 모양을 한 부분의 길이가 10 mm)의 시간변화에 따른 관통응답 거동을 나타내었다.

본 수치해석은 앞장에서 설명한 것처럼 Water Mist Lance를 25 m/s의 속도로 컨테이너 벽면에 충돌하였을 때 컨테이너 벽면의 관통과 Water Mist Lance의 변형을 확인하고자 하였으며, 관통해석을 위한 충돌시간은 0.02초이다. 0.09초에 컨테이너 벽면에 닿는 순간이며 0.01초에서 Model 1과 컨테이너 벽면에 응력이 작용하기 시작하고 0.011초에 최대응력으로 인한 변형이 최대인 순간이다. 0.02초는 충돌 후 Model 1이 컨테이너 벽면을 관통하지 못하고 충돌하는 힘에 의해 튕겨져 나온 모습이다.

Fig. 41 ~ Fig. 43은 컨테이너 벽면과 Model 1이 상호 충돌 순간의 모습을 상호간 변형에너지를 제외한 이들의 유한요소모델 상태를 나타내고 있으며, Fig. 44 ~ Fig. 45는 충돌로 인해 컨테이너 벽면과 Model 1에 작용한 최대 응력 상태를 시각화해서 나타내었다. 컨테이너 벽면은 항복응력을 벗어났지만 인장강도 범위내에 있어 충돌 시 컨테이너 벽면에 변형만 발생되었고, Water Mist Lance 자체는 항복응력 이하의 힘이 작용하여 변형이 발생되지 않았기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 Water Mist Lance 침단 부분의 손상이 없고, 컨테이너 벽면을 관통하는 성능을 확보하지 못하였으므로 침단부분의 곡률반경 설계가 부적합한 것으로 판단하였다.

Fig. 46은 Water Mist Lance Model 2(침단부분 원뿔 모양을 한 부분의 길이가 12.5 mm)의 관통응답거동을 나타내었다. Model 1과 같이 0.02초간 해석을 수행하였고, 0.011초에 최대응력이 발생하는 순간이며, 0.02초에 MODEL 2의 침단부분이 컨테이너 벽면을 관통한 모습을 나타내었다.

Fig. 47 ~ Fig. 49는 컨테이너 벽면과 Model 2가 충돌하였을 때 이들 유한 요소모델의 상태를 나타내고 있으며, Fig. 50 ~ 51은 충돌결과로 인한 컨테이너 벽면과 Model 2의 침단부분에 발생하는 최대 증가응력을 시각적으로 나타내었다. 해석결과 충돌로 인해 컨테이너 벽면은 파공이 발생하지 않았고, Water Mist Lance 자체는 항복응력 이하로 변형이 발생되지 않았기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 Water Mist Lance 침단 부분의 설계가 부적합한 것으로 판단하였다.

Fig. 52는 Water Mist Lance Model 3(침단부분 원뿔 모양을 한 부분의 길이가 15 mm)의 관통응답거동을 나타내었다. Model 1과 같이 0.02초간 해석을 수행하였고, 0.011초에 최대응력이 발생하는 순간이며, 0.02초에 MODEL 3의 침단부분이 컨테이너 벽면을 관통한 모습을 나타내었다.

Fig. 53 ~ Fig. 55는 컨테이너 벽면과 Model 3이 충돌하였을 때 이들 유한 요소모델의 상태를 나타내고 있으며, Fig. 56 ~ 57은 충돌결과로 인한 컨테이너 벽면과 Model 3의 침단부분에 발생하는 최대 증가응력을 시각적으로 나타내었다. 해석결과 충돌로 인해 컨테이너 벽면은 인장강도를 벗어나 파공이 발생하였으며, Water Mist Lance 자체는 항복응력 이하로 변형이 발생되지 않았기 때문에 본 연구에서 목표로 하는 Water Mist Lance 침단 부분의 설계가 적합한 것으로 판단하였다.

Fig. 58은 Water Mist Lance Model 4(침단부분 원뿔 모양을 한 부분의 길이가 17.5 mm)의 관통응답거동을 나타내었다. Model 1과 같이 0.02초간 해석을 수행하였고, 0.011초에 최대응력이 발생하는 순간이며, 0.02초에 MODEL 4의 침단부분이 컨테이너 벽면을 관통한 모습을 나타내었다.

Fig. 59 ~ Fig. 61은 컨테이너 벽면과 Model 4가 충돌하였을 때 이들 유한 요소모델의 상태를 나타내고 있으며, Fig. 62 ~ 63은 충돌결과로 인한 컨테이너 벽면과 Model 4의 침단부분에 발생하는 최대 증가응력을 시각적으로 나타내었다. 해석결과 충돌로 인해 컨테이너 벽면은 인장강도를 벗어나 파공이 발생하였으나, Water Mist Lance 자체는 항복응력을 벗어나 변형이 발생되어 본 연

구에서 목표로 하는 Water Mist Lance 침단 부분의 설계가 부적합한 것으로 판단하였다.

마지막으로 Fig. 64는 Water Mist Lance Model 5(침단부분 원뿔 모양을 한 부분의 길이가 20 mm)의 관통응답거동을 나타내었으며, Model 1,2와 같이 0.011초 지점이 충돌 순간이며, 0.012초에 MODEL 5에 의해 컨테이너 벽면이 파공된 모습을 나타내었다.

Fig. 65 ~ Fig. 67은 컨테이너 벽면과 Model 5가 충돌하였을 때 유한요소 모델의 형상이며, Fig 68 ~ Fig. 69는 충돌결과로 컨테이너 벽면과 Model 5의 침단부분이 변형된 형상과 충돌로 인해 이들에 작용한 최대 등가응력을 시각화하여 나타내었다. 해석결과 컨테이너 벽면은 인장강도를 벗어나 파공이 발생되었지만, Water Mist Lance Model 5는 침단 부분이 인장강도에는 이르지 않았지만 항복응력을 벗어나 심한 변형이 발생되었으므로 요구 성능을 확보하지 못한 것으로 판단하였다.

따라서, Water Mist Lance로 가장 적합한 해설결과를 낸 Model 3이 본 연구에서 가장 적합한 것으로 판단하였다.

추가적으로 Water Mist Lance의 각 모델에 대한 등가응력 결과는 Table 18에 정리하였다.

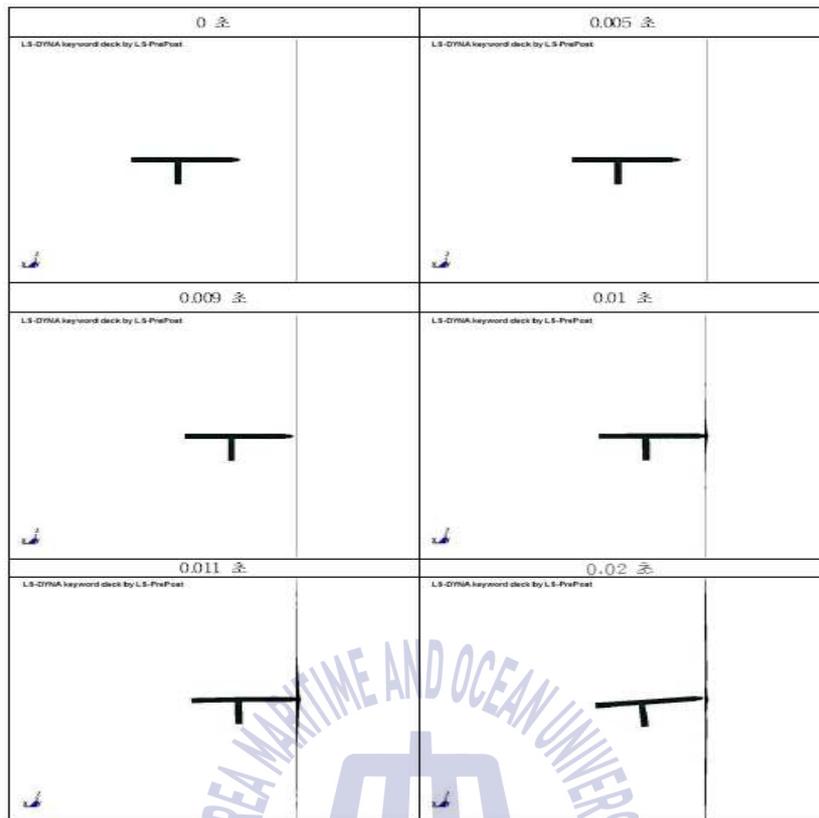


Fig. 40 Penetration Response Behavior of Water Mist
Lance Model 1



Fig. 41 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 1

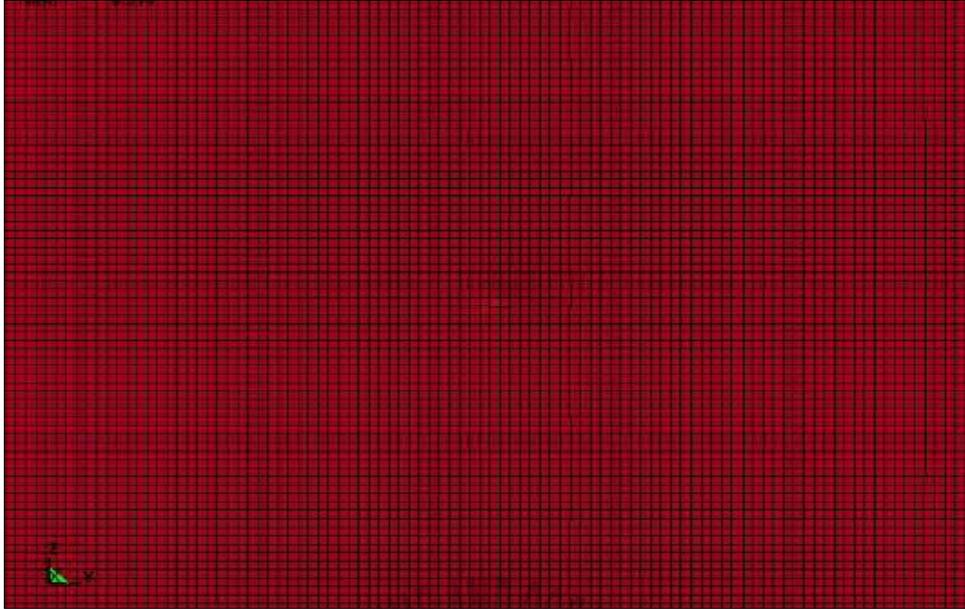


Fig. 42 Penetration Response Behavior of Container 1

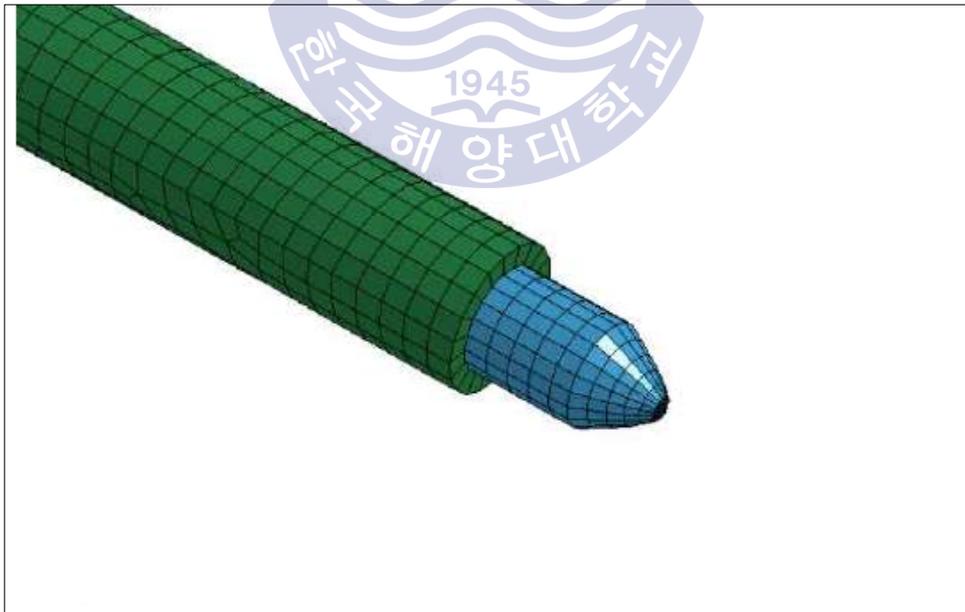


Fig. 43 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 1

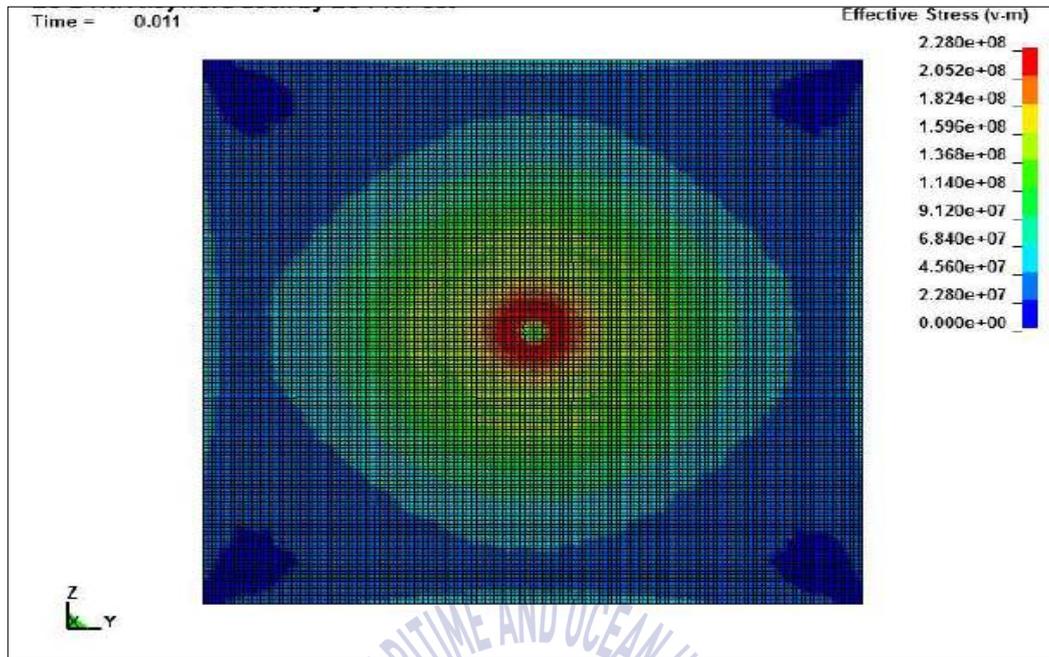


Fig. 44 Max. Equivalent Stress of Container 1

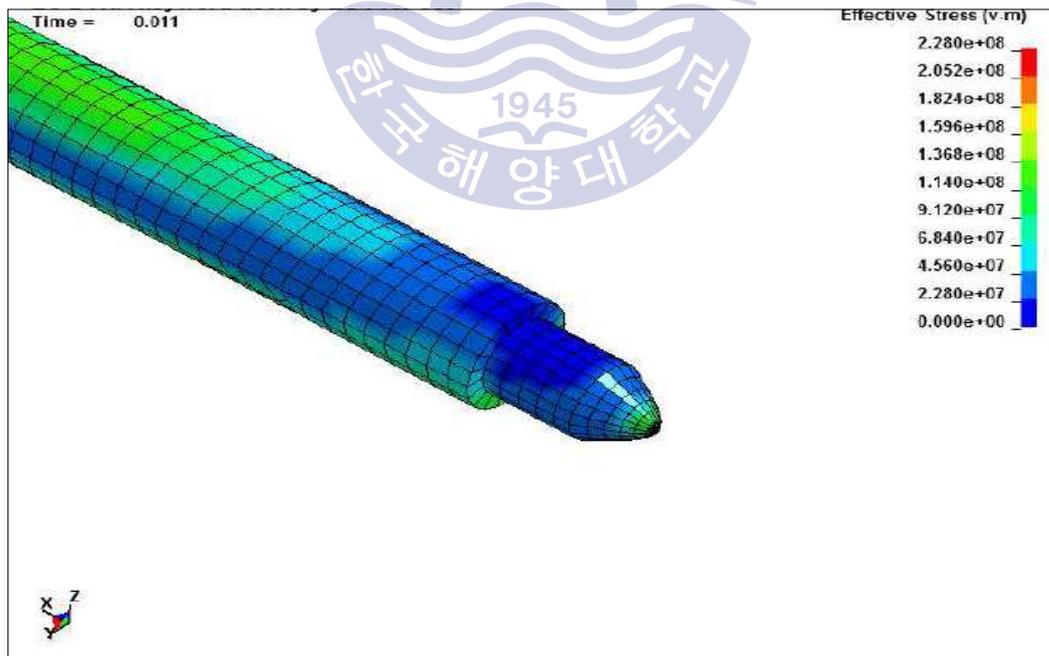


Fig. 45 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 1

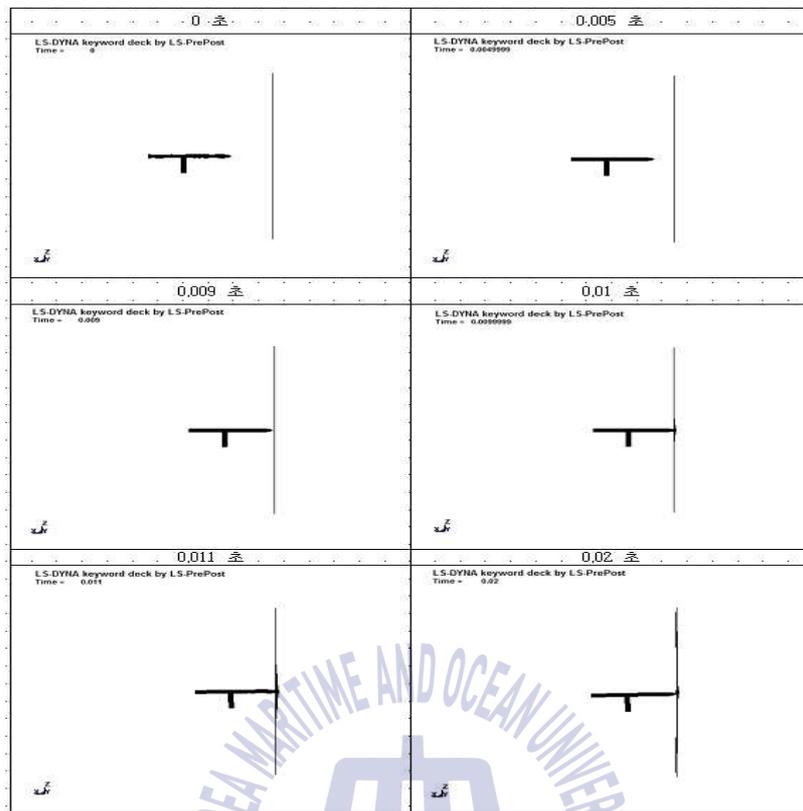


Fig. 46 Penetration Response Behavior of Water Mist
Lance Model 2



Fig. 47 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 2

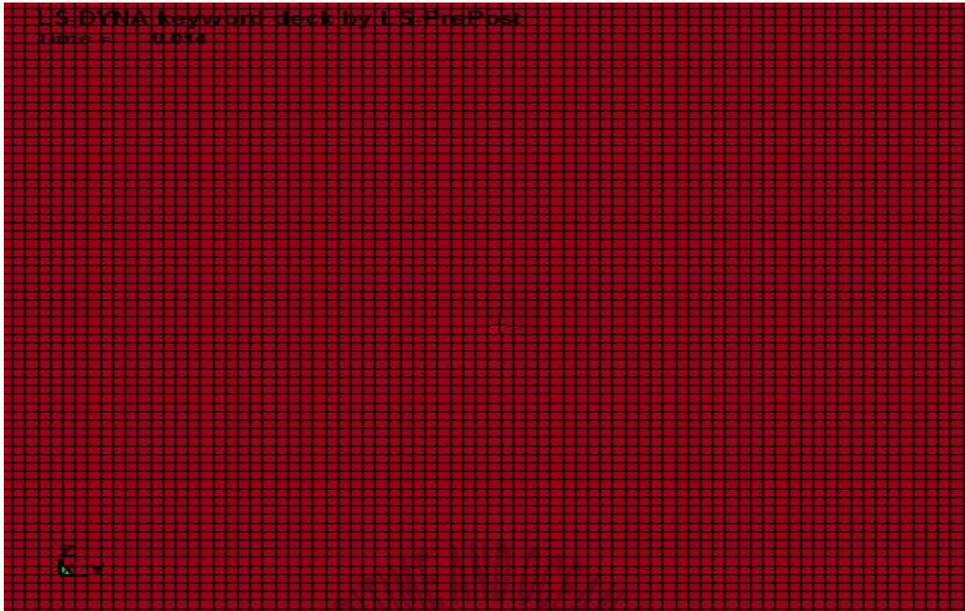


Fig. 48 Penetration Response Behavior of Container 2

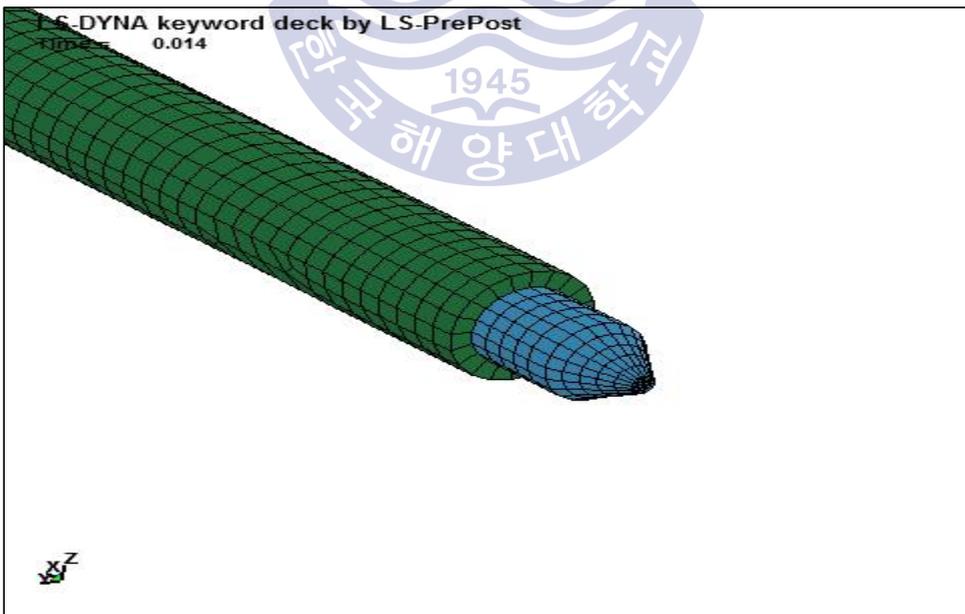


Fig. 49 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 2

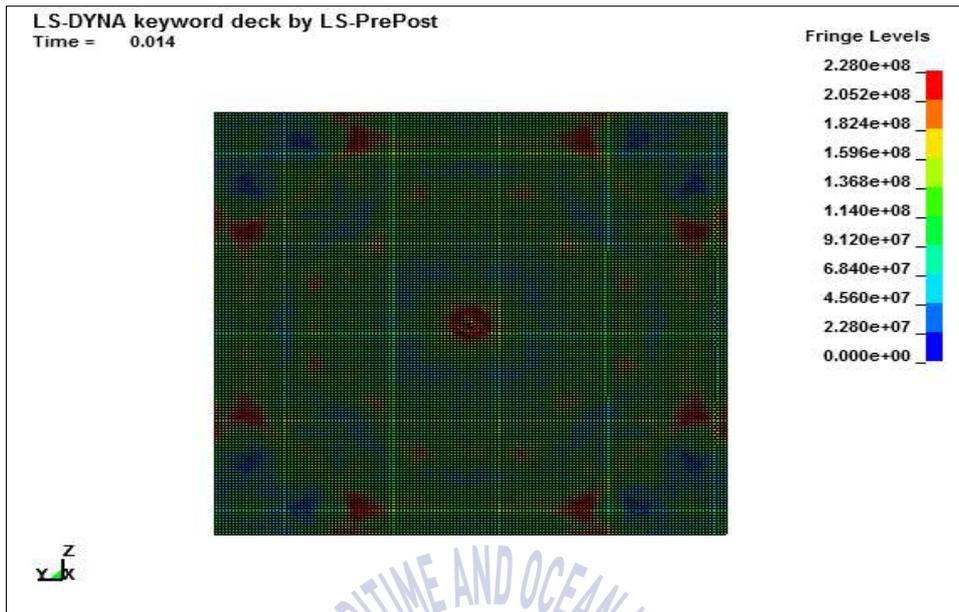


Fig. 50 Max. Equivalent Stress of Container 2

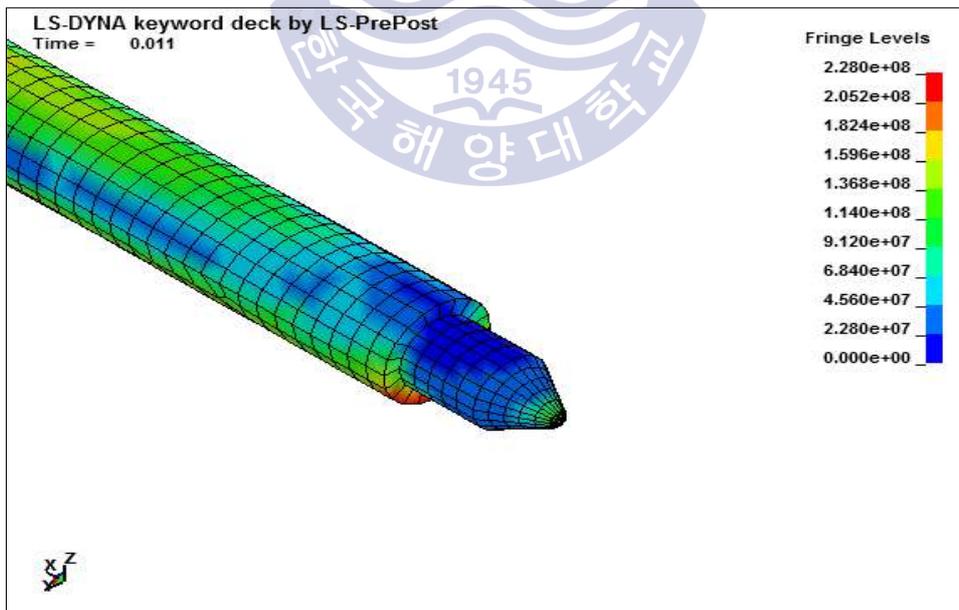


Fig. 51 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 2

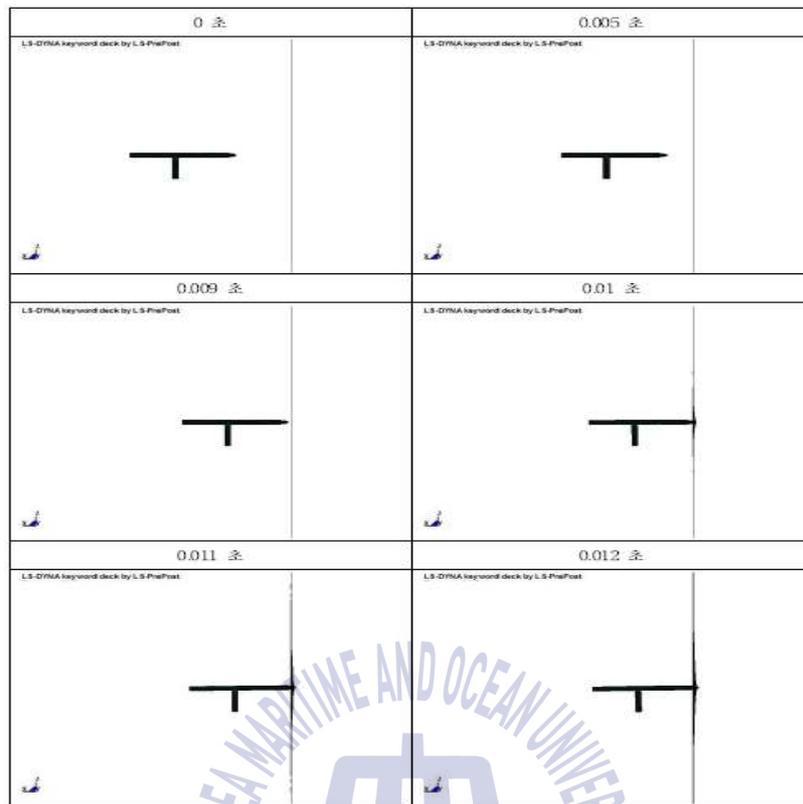


Fig. 52 Penetration Response Behavior of Water Mist
Lance Model 3

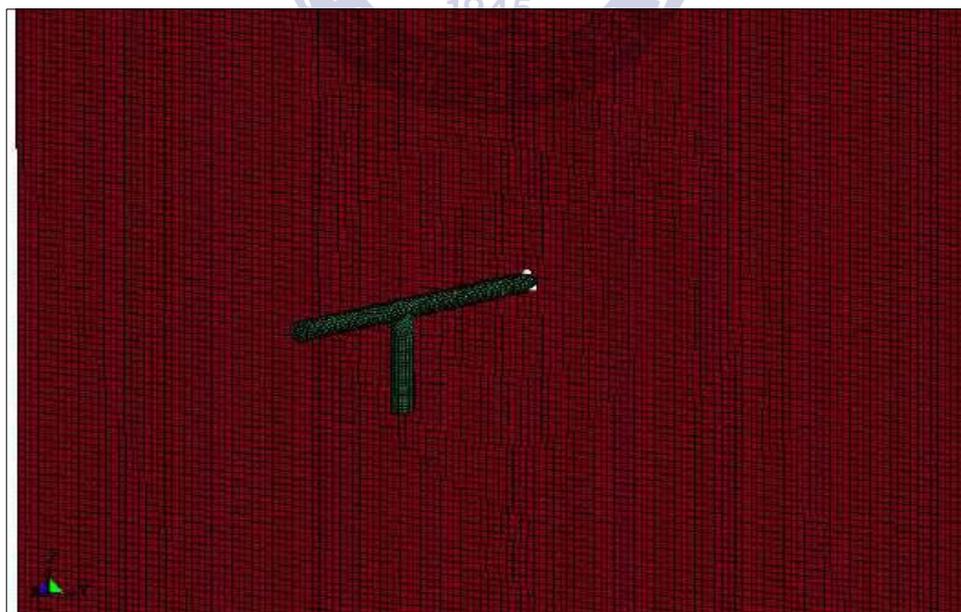


Fig. 53 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance
Model 3

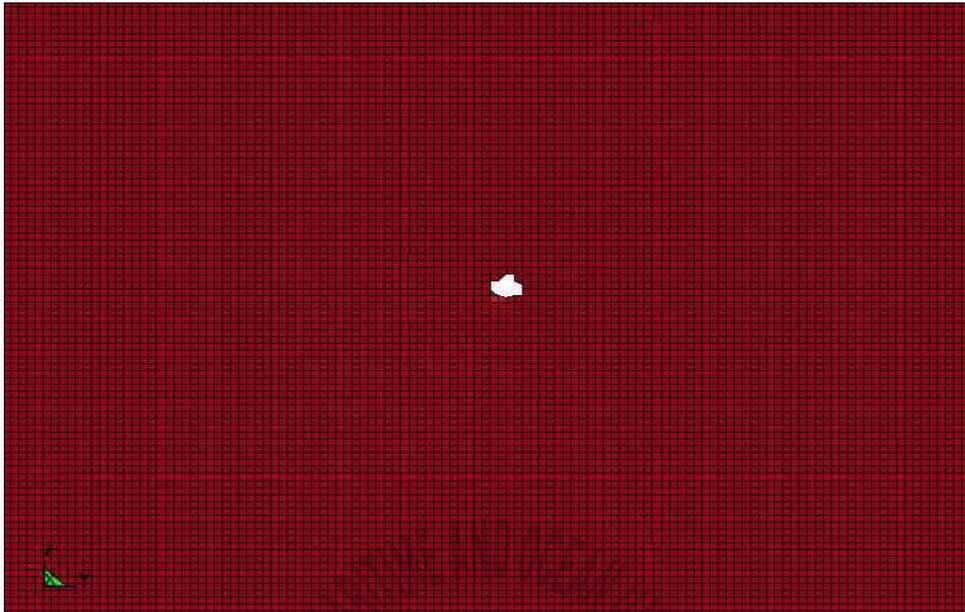


Fig. 54 Penetration Response Behavior of Container 3

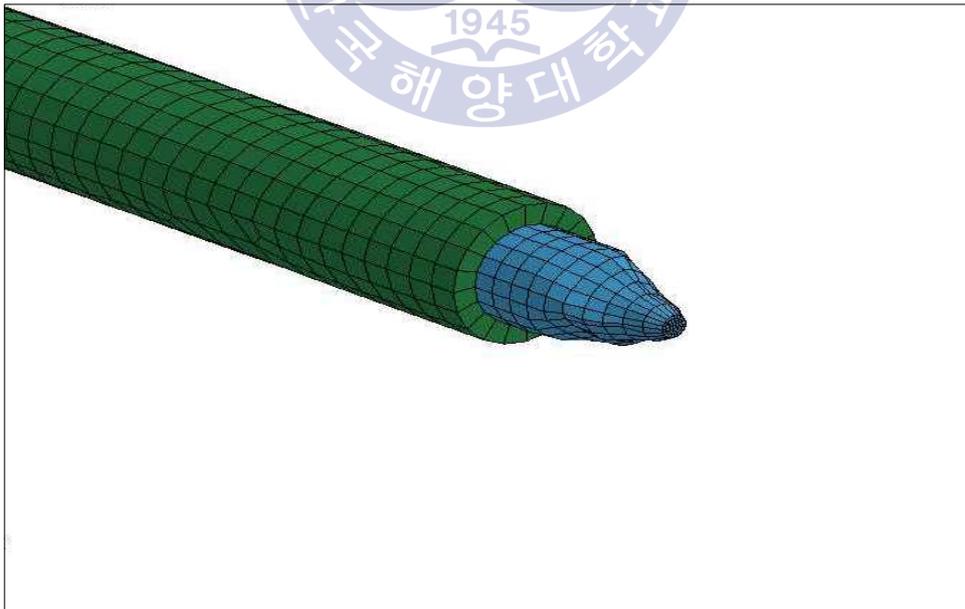


Fig. 55 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 3

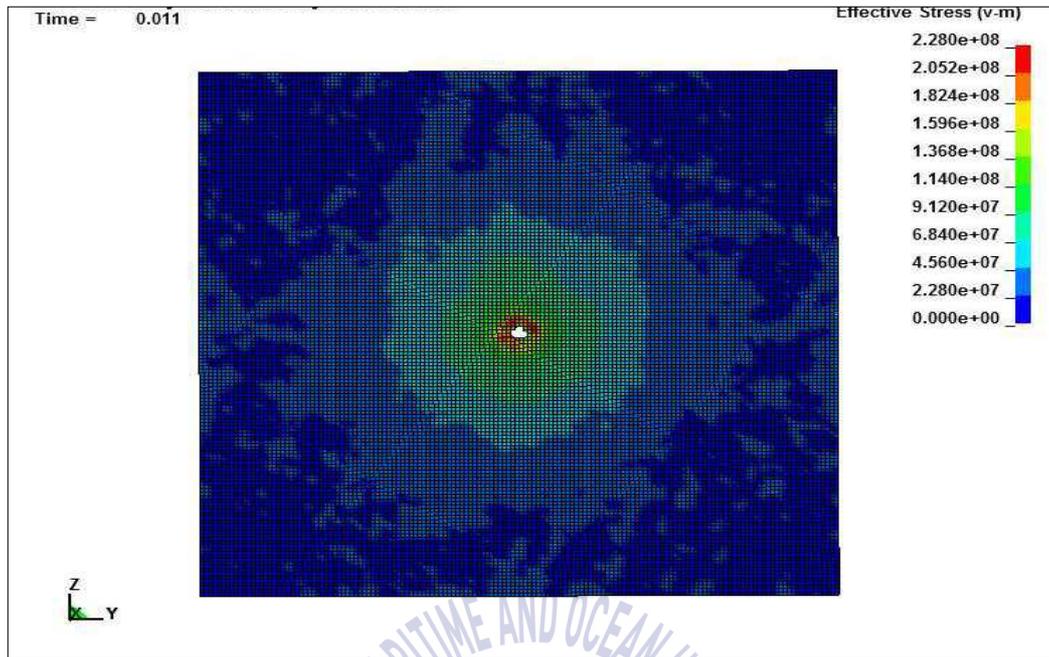


Fig. 56 Max. Equivalent Stress of Container 3

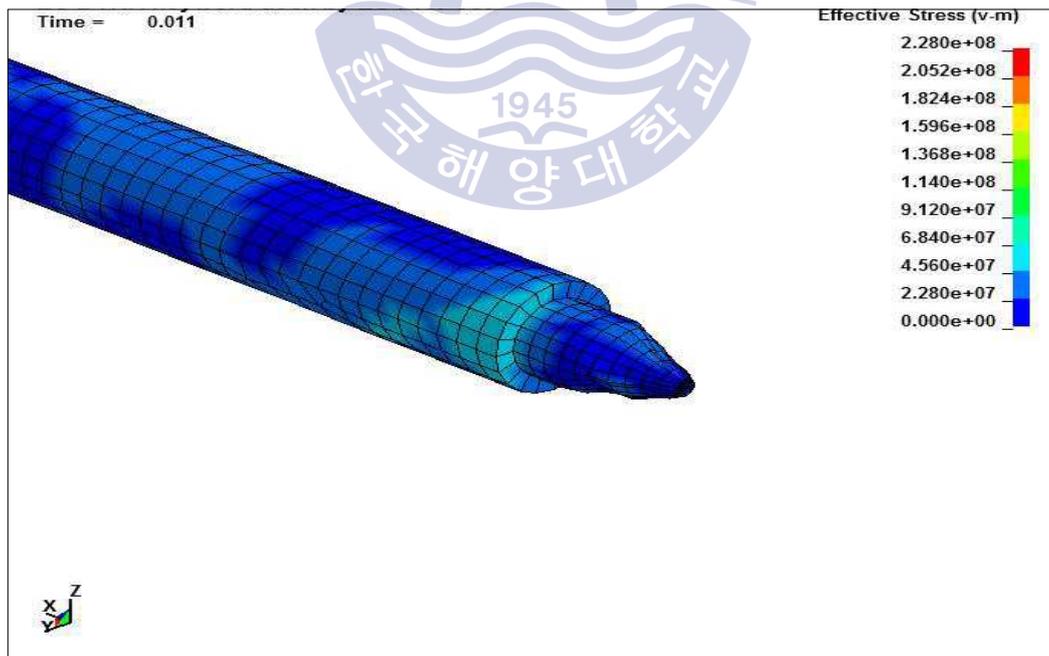


Fig. 57 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 3

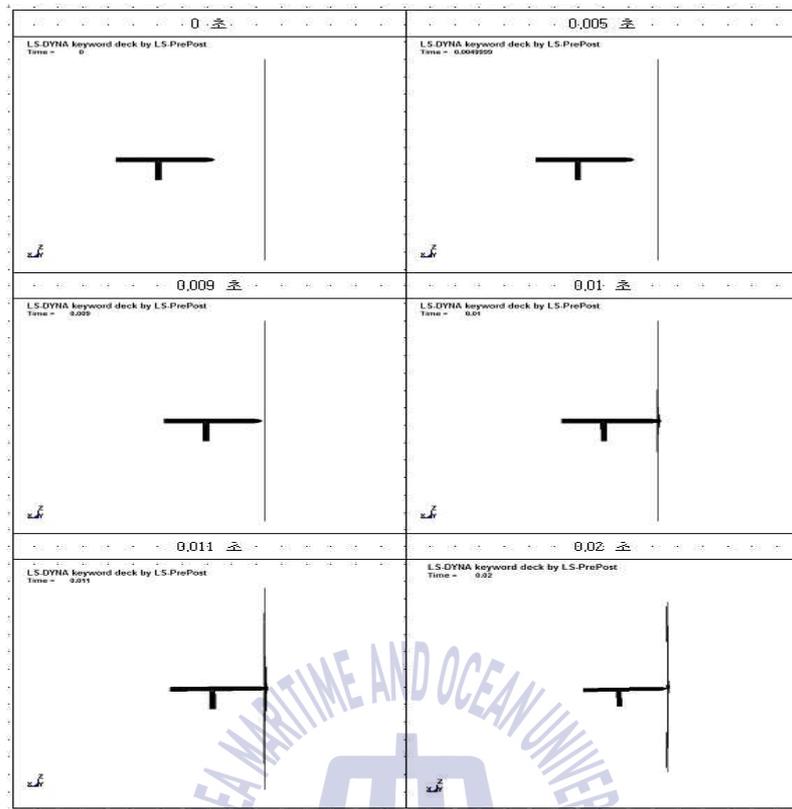


Fig. 58 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 4



Fig. 59 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 4

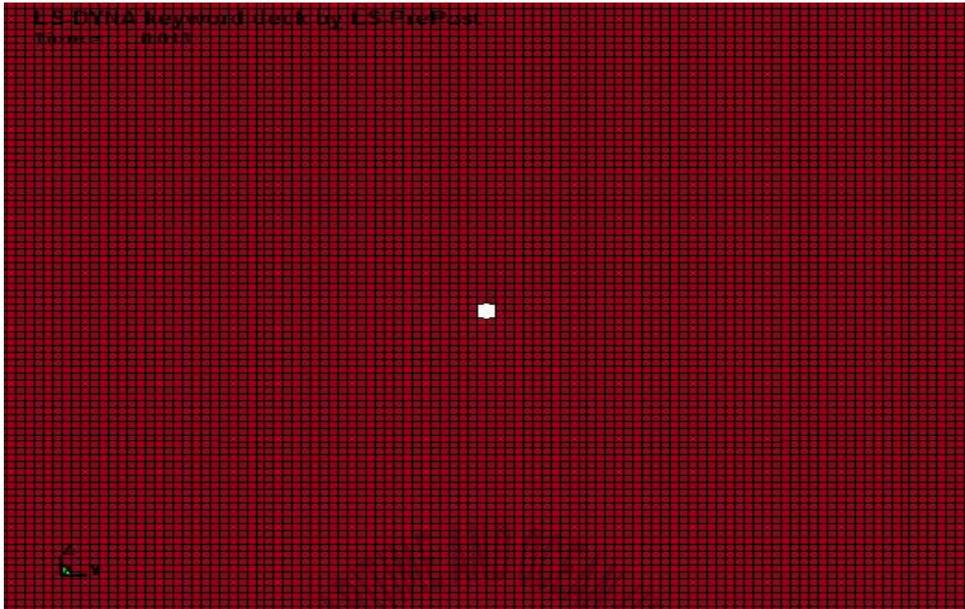


Fig. 60 Penetration Response Behavior of Container 4

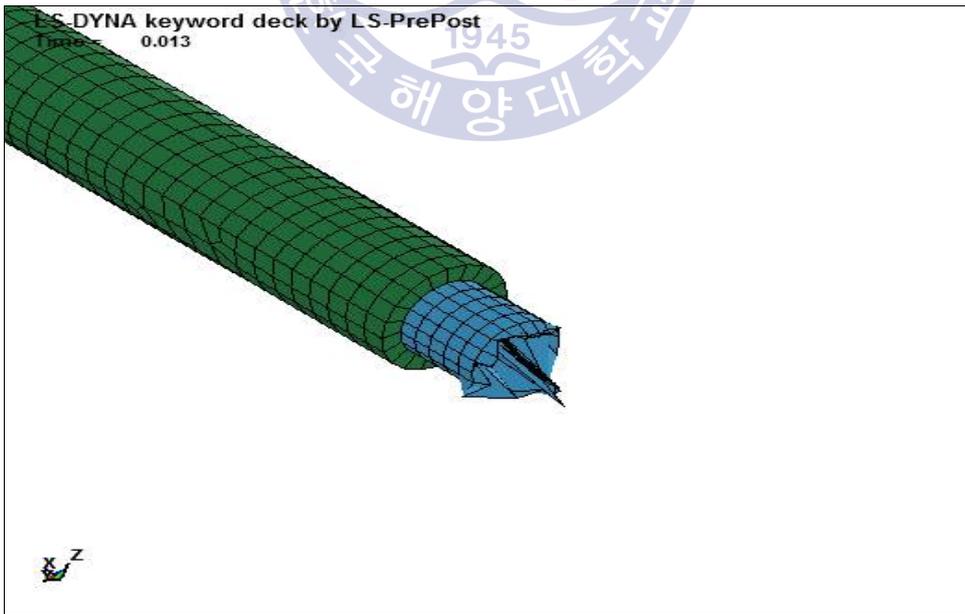


Fig. 61 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 4

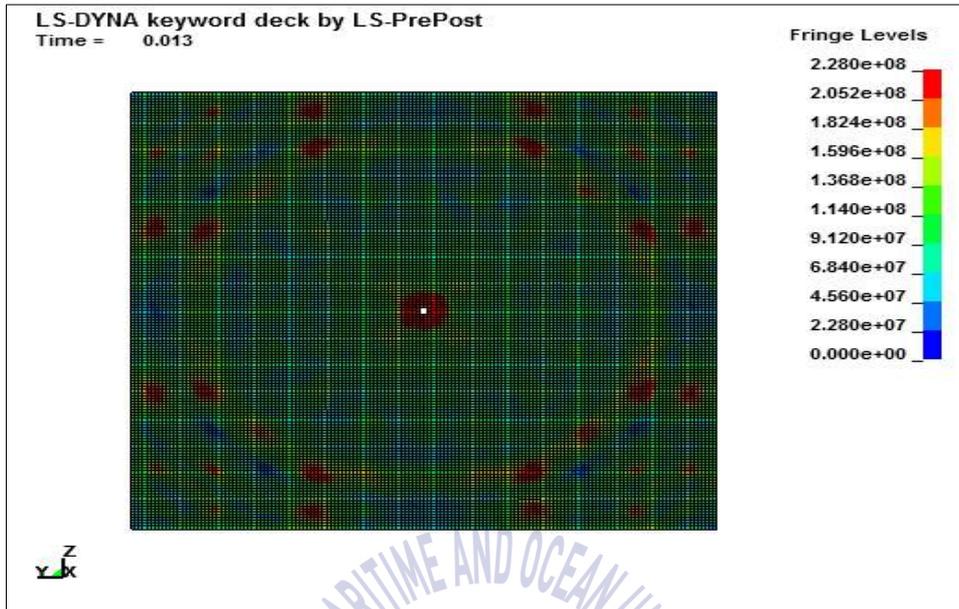


Fig. 62 Max. Equivalent Stress of Container 4

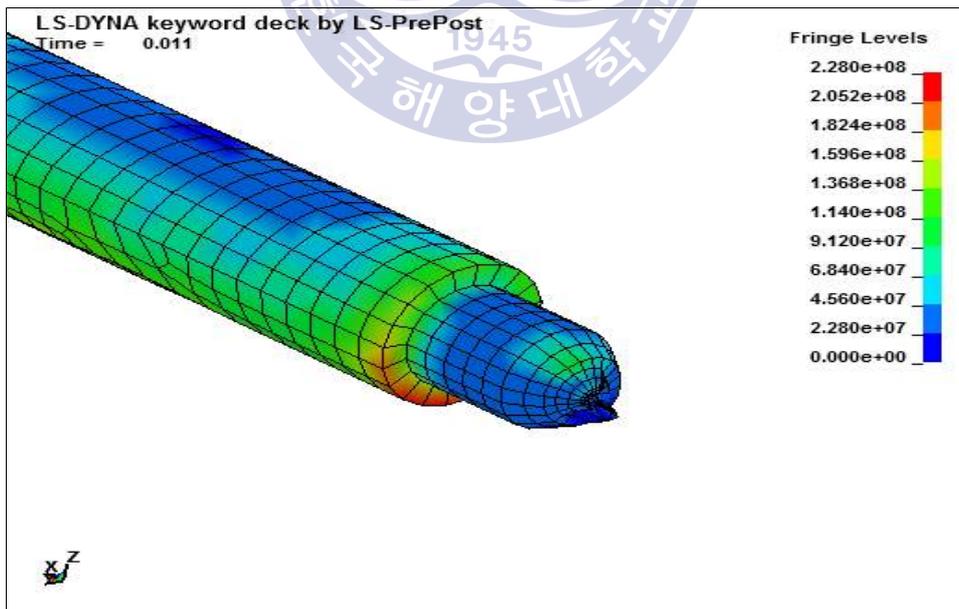


Fig. 63 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 4

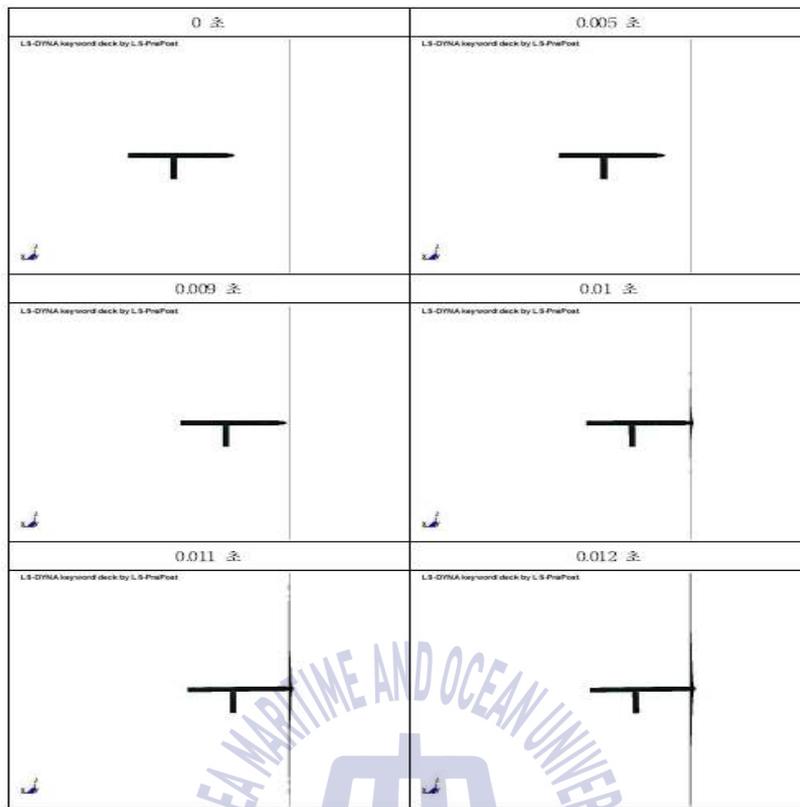


Fig. 64 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 5



Fig. 65 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance Model 5

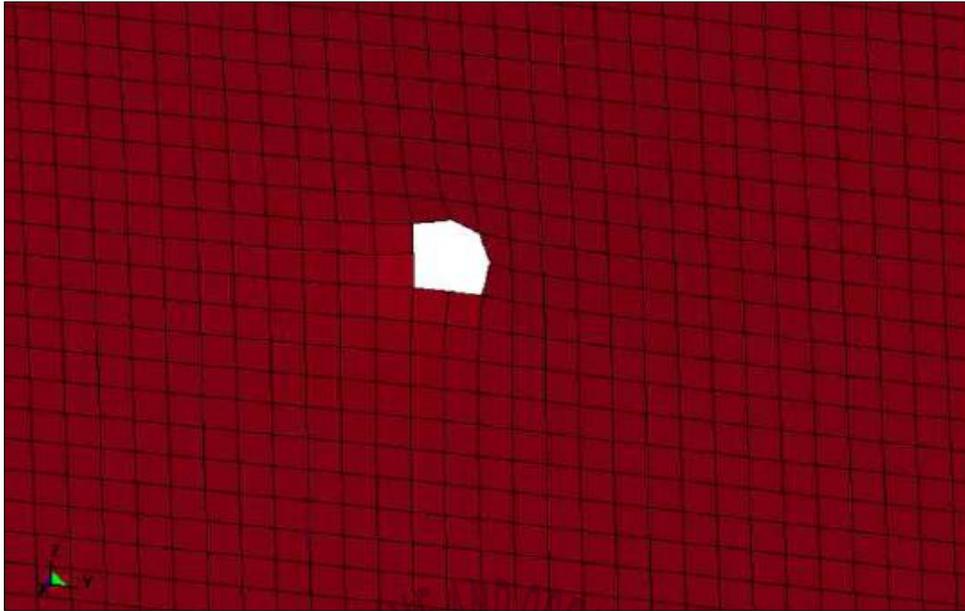


Fig. 66 Penetration Response Behavior of Container 5

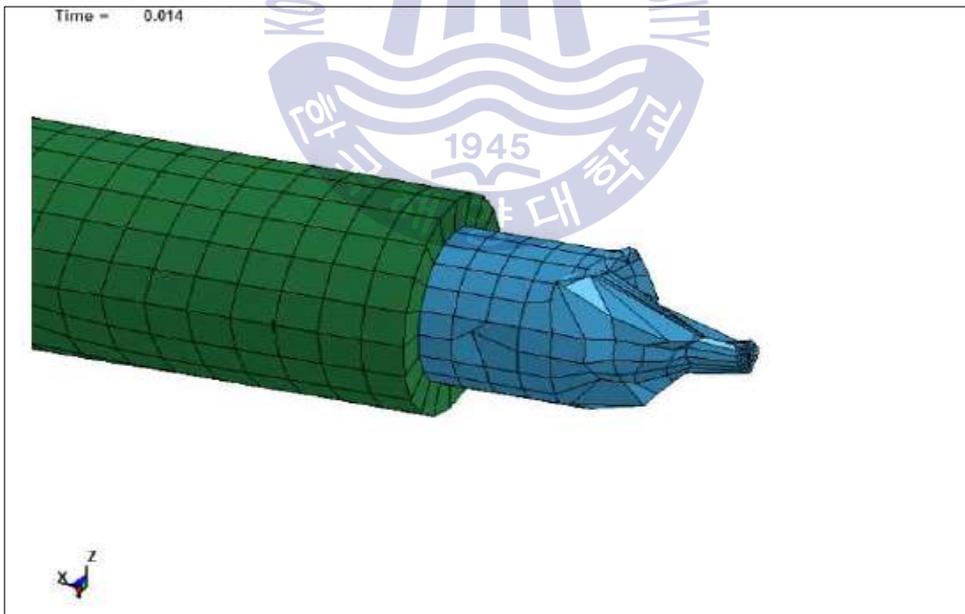


Fig. 67 Penetration Response Behavior of Water Mist Lance 5

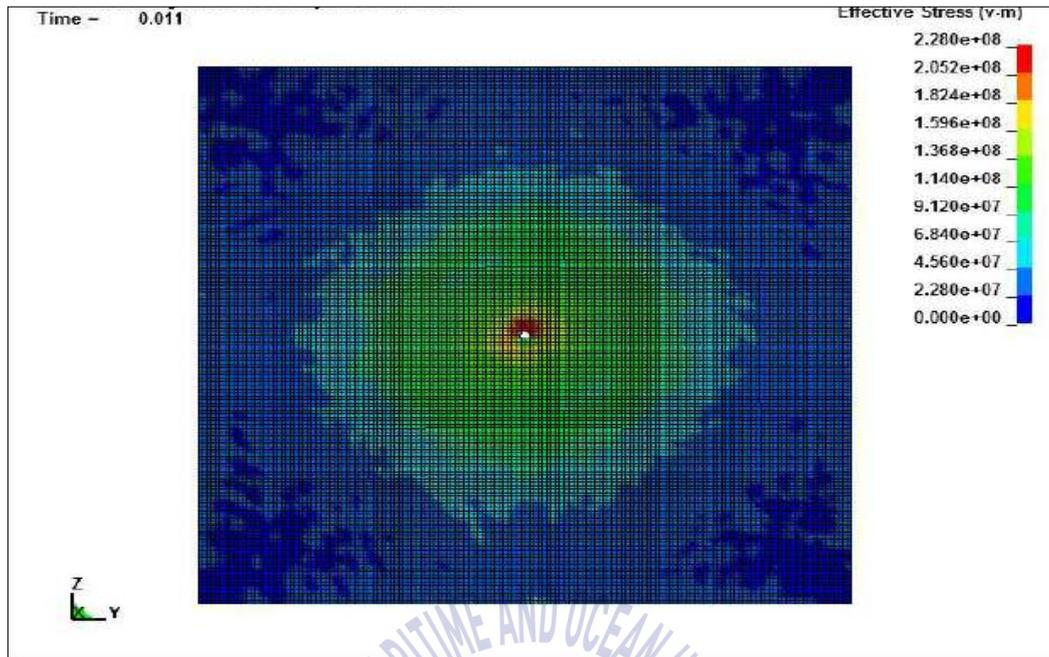


Fig. 68 Max. Equivalent Stress of Container 5

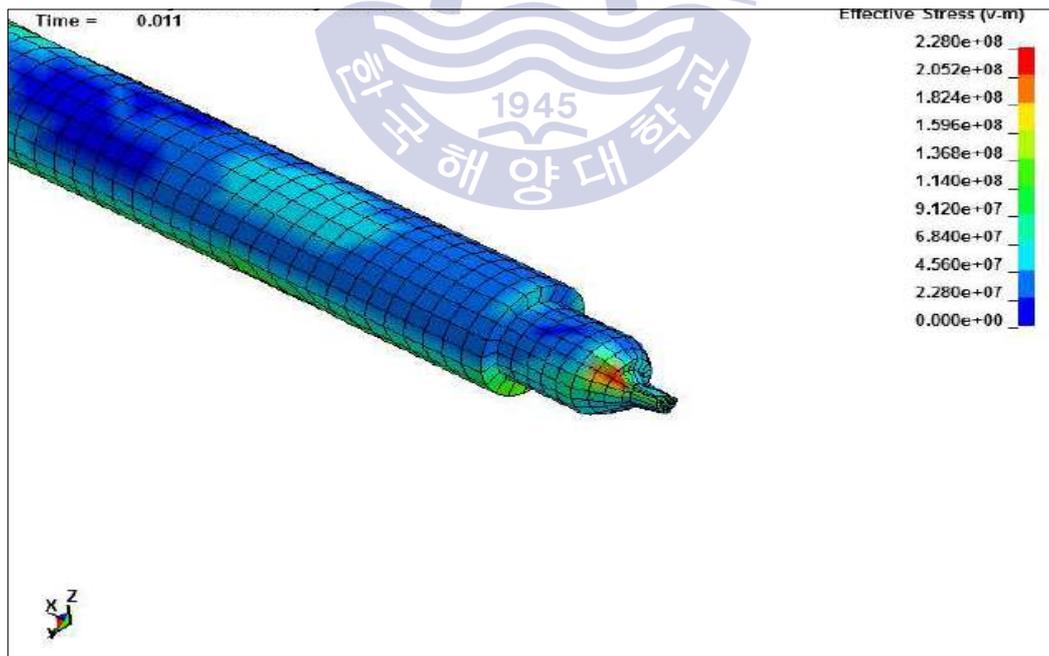


Fig. 69 Max. Equivalent Stress of Water Mist Lance 5

Table 18 Analysis Results of Equivalent Stress

Division		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Maximum Equivalent Stress(MPa)	Container	272.0	303.2	369.4	402.4	612.6
	Lance	139.1	162.1	148.4	211.4	330.6

4.2 Water Mist Lance 성능실험

4.2.1 Water Mist Lance 제작 및 성능실험

앞 절의 관통해석 결과를 바탕으로 모델 3의 형상으로 Fig. 70과 같이 Water Mist Lance(Piercing 노즐 포함)를, Water Mist Lance가 컨테이너 벽면을 원활히 관통할 수 있도록 전용 해머를 Fig. 71과 같이 설계하고, 실험장치를 제작하여 Fig. 72 ~ Fig. 73과 같이 유량 테스트를 실시하였다. 성능실험 결과는 Table 19에 나타내었다.

Water Mist Lance 테스트 아래와 같은 순서로 실시하였으며 그 모습을 Fig. 74와 같이 나타내었다.

- .1 컨테이너 화재가 발생하면 Water Mist Lance를 소방호스와 연결
- .2 해머를 이용하여 화재발생 컨테이너 벽의 특정위치에 집중 타격
- .3 Water Mist Lance가 구멍을 관통하는지 확인하고 관통하지 않으면 해머를 이용하여 Water Mist Lance가 구멍을 통과할 수 있게 확장
- .4 컨테이너 벽에 충분한 구멍을 뚫었다면 Water Mist Lance를 구멍에 통과
- .5 Water Mist Lance의 손잡이를 잡고 후단의 밸브를 열어 분사를 시작
- .6 Water Mist Lance의 소화수 분사가 화재에 집중될 수 있도록 적절히 조절

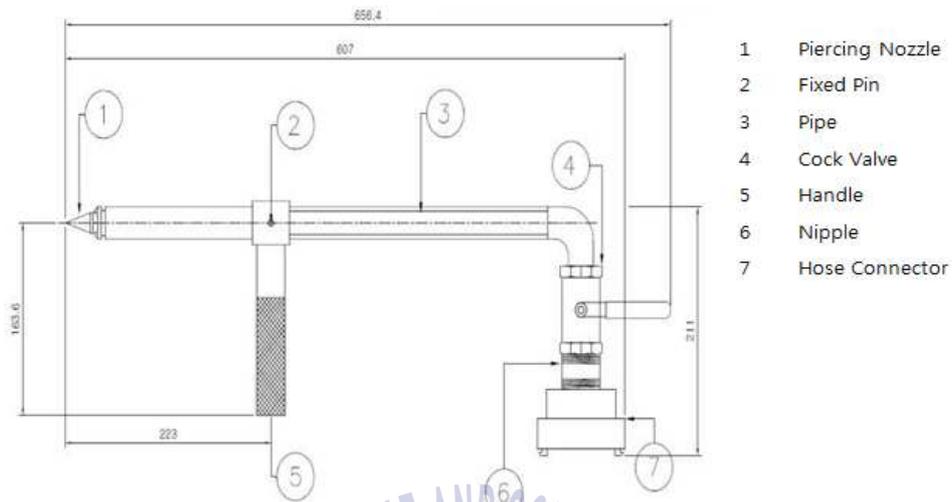


Fig. 70 Schematic Diagram of Water Mist Lance Including Piercing Nozzle

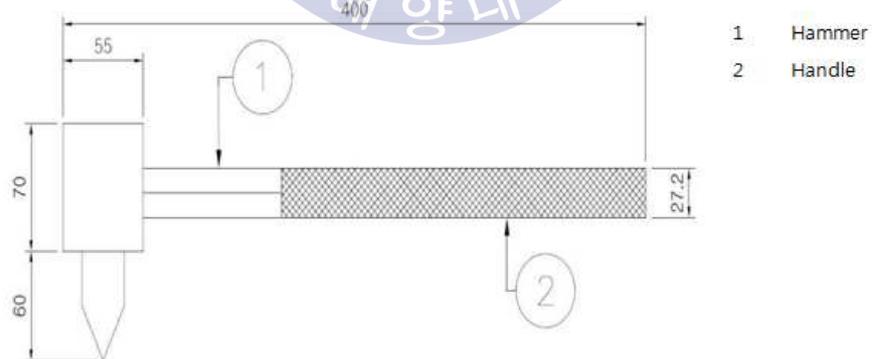


Fig. 71 Schematic Diagram of Hammer for Water Mist Lance



Fig. 72 Picture of Flow Test For Water Mist Lance Nozzle



Fig. 73 Picture of Flow Test For Water Mist Lance Nozzle



Fig. 74 Picture of Hammer Penetration Test

Table 19 Test Results of Water Mist Lance

K-Factor	Inlet Press. (bar)	Max. Working Press. (bar)	Flow Rate (lpm)	Throw Length (m)	Spray Angle (°)
30	5	16	67	6	60

제 5 장 Mobile Water Monitor 연구결과

5.1 Mobile Water Monitor 유동해석

5.1.1 압력조건별 Nozzle Orifice 구경 유동해석 결과

Mobile Water Monitor 입구 압력 조건인 4 Bar ~ 9 Bar까지 각 Nozzle Orifice에 따른 유동해석 해석결과를 Fig. 75 ~ Fig. 80에 나타내었다.

Mobile Water Monitor의 분사량 및 분사거리에 대한 압력별 해석결과를 살펴보면 Fig. 75에 나타낸 바와 같이 입구압력 4 bar, Nozzle Orifice 31 mm(A)에서 분사량 $65.78 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 36.5 m, 30 mm(B)에서 분사량 $63.42 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 38 m, 29 mm(C)에서 분사량 $61.51 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 40.1 m, 28 mm(D)에서 분사량 $56.3 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 40.5 m로 계산되었다.

이는 유체역학의 기본적인 공식인 “유량 Q는 단면적 A와 유속 V에 비례” 한다는 공식에 따른 것으로 Nozzle Orifice 직경이 감소함에 따라 분사량이 감소하는 이유를 설명할 수 있다. 또한, 동일 압력에서 Nozzle Orifice 직경이 감소함에 따라 유속은 증가하게 되고, 식 (3.55)에 따라 분사거리도 늘어난다는 것으로 설명할 수 있다.

따라서, 압력 4 bar에서 SOLAS협약에서 요구하는 정량적 목표(분사량 $60 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 40 m)를 만족하는 최적의 Nozzle Orifice는 Fig. 75(C) 결과와 같이 분사량 $60.51 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 40.1 m를 가지는 29 mm로 해석되었다.

Fig. 76은 입구압력 5 bar, Nozzle Orifice 28 mm(A)에서 분사량 $64.34 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 40.8 m, 27 mm(B)에서 분사량 $60.18 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 41.6 m, 26 mm(C)에서 분사량 $57.71 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 42.3 m, 25 mm(D)에서 분사량 $53.12 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 43.7 m로 계산된 결과이다. 5 bar에서 정량적 목표를 만족하는 Nozzle Orifice는 Fig. 76(B) 결과와 같이 분사량 $60.18 \text{ m}^3/\text{h}$, 분사거리 41.6 m를 가지는 27 mm로 해석되었다.

Fig. 77은 입구압력 6 bar, Nozzle Orifice 26 mm(A)에서 분사량 64.43 m³/h, 분사거리 44.2 m, 25 mm(B)에서 분사량 61.22 m³/h, 분사거리 44.8 m, 24 mm(C)에서 분사량 56.69 m³/h, 분사거리 45.6 m, 23 mm(D)에서 분사량 52.02 m³/h, 분사거리 46.5 m로 계산된 결과이다. 6 bar에서 정량적 목표를 만족하는 Nozzle Orifice는 Fig. 77(B) 결과와 같이 분사량 61.22 m³/h, 분사거리 44.8 m를 가지는 25 mm로 해석되었다.

Fig. 78은 입구압력 7 bar, Nozzle Orifice 26 mm(A)에서 분사량 66.67 m³/h, 분사거리 44.7 m, 25 mm(B)에서 분사량 63.37 m³/h, 분사거리 45 m, 24 mm(C)에서 분사량 60.68 m³/h, 분사거리 46 m, 23 mm(D)에서 분사량 55.21 m³/h, 분사거리 47.4 m로 계산된 결과이다. 7 bar에서 정량적 목표를 만족하는 Nozzle Orifice는 Fig. 78(C) 결과와 같이 분사량 60.68 m³/h, 분사거리 46 m를 가지는 24 mm로 해석되었다.

Fig. 79는 입구압력 8 bar, Nozzle Orifice 24 mm(A)에서 분사량 64.87 m³/h, 분사거리 47.3 m, 23 mm(B)에서 분사량 61.55 m³/h, 분사거리 49.6 m, 22 mm(C)에서 분사량 57.42 m³/h, 분사거리 50.1 m, 21 mm(D)에서 분사량 52.27 m³/h, 분사거리 51.3 m로 계산된 결과이다. 8 bar에서 정량적 목표를 만족하는 Nozzle Orifice는 Fig. 79(B) 결과와 같이 분사량 61.55 m³/h, 분사거리 49.6 m를 가지는 23 mm로 해석되었다.

Fig. 80에서 입구압력 9 bar, Nozzle Orifice 24 mm(A)에서 분사량 68.81 m³/h, 분사거리 49.5 m, 23 mm(B)에서 분사량 64.21 m³/h, 분사거리 50.6 m, 22 mm(C)에서 분사량 61.77 m³/h, 분사거리 51.4 m, 21 mm(D)에서 분사량 57.40 m³/h, 분사거리 52.9 m로 계산된 결과이다. 9 bar에서 정량적 목표를 만족하는 Nozzle Orifice는 Fig. 80(C) 결과와 같이 분사량 61.77 m³/h, 분사거리 51.4 m를 가지는 22 mm로 해석되었다.

이상의 결과를 Table 20 ~ Table 25에 사용압력에 따른 Nozzle Orifice별 분사거리, 분사량의 정량적인 결과 값을 나타내 비교하였다.

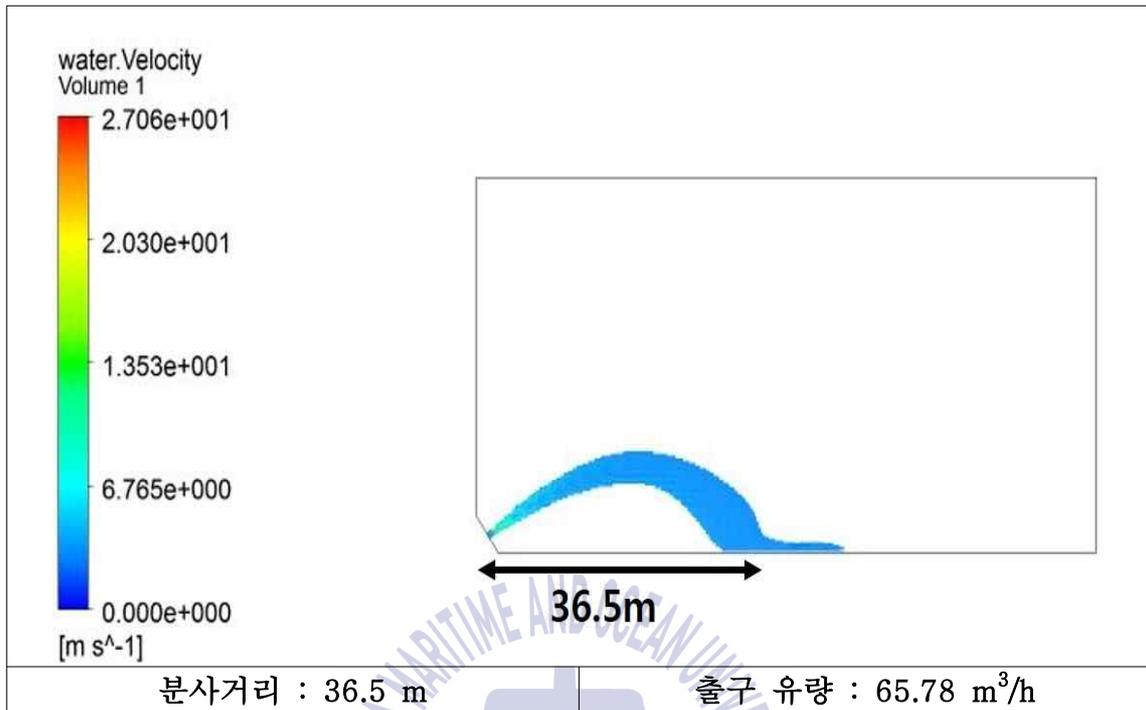
Nozzle Orifice별 계산결과 중 분사거리를 만족하며, 소화펌프 용량 증가를

최소화 할 수 있는 분사량을 갖는 결과를 선택한 것이며, 최적의 Nozzle Orifice 직경은 4 Bar에서 29 mm, 5 Bar에서 27 mm, 6 Bar에서 25 mm, 7 Bar에서 24 mm, 8 Bar에서 23 mm, 9 Bar에서 22 mm이다.

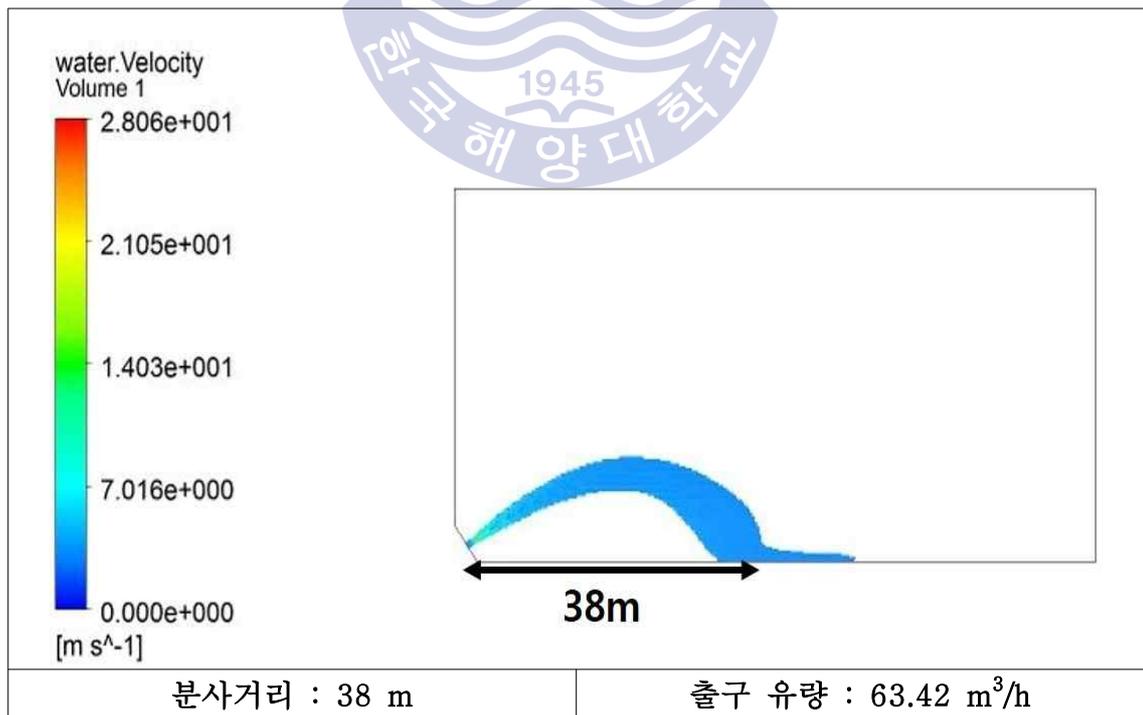
이러한 해석결과와 다음절의 정류격자 길이 해석결과를 바탕으로 실험장치를 제작, 성능실험을 실시하여 해석결과와 비교하였다.



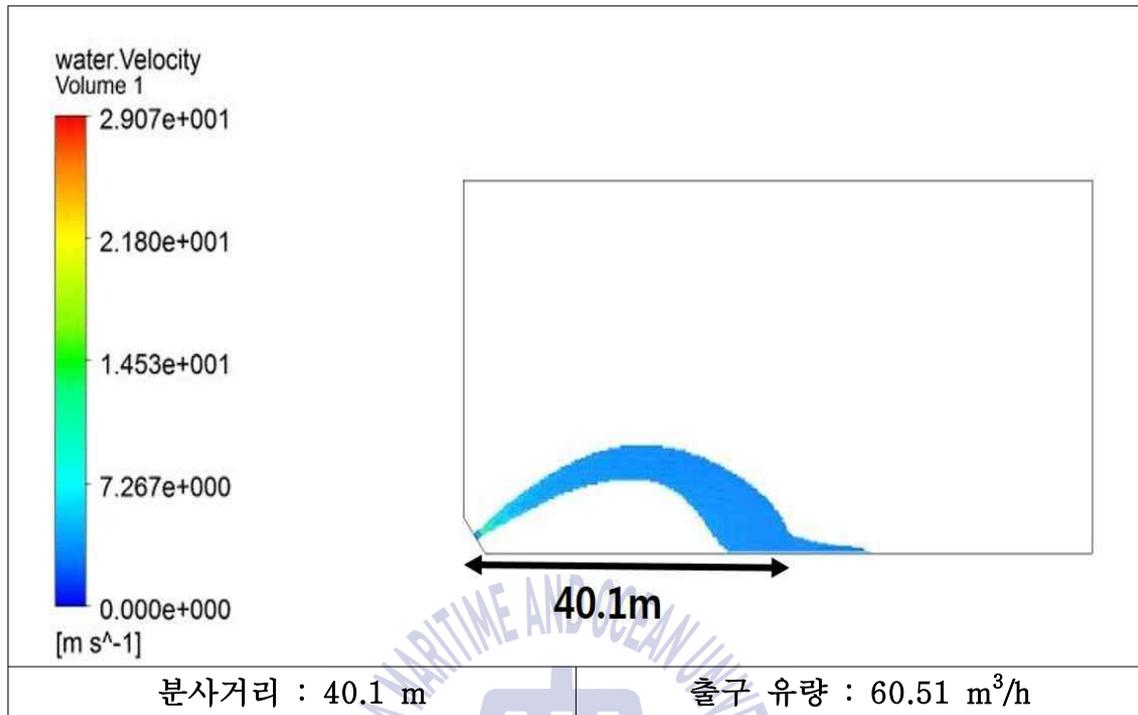
(A) Nozzle Orifice : 31 mm



(B) Nozzle Orifice : 30 mm



(C) Nozzle Orifice : 29 mm



(D) Nozzle Orifice : 28 mm

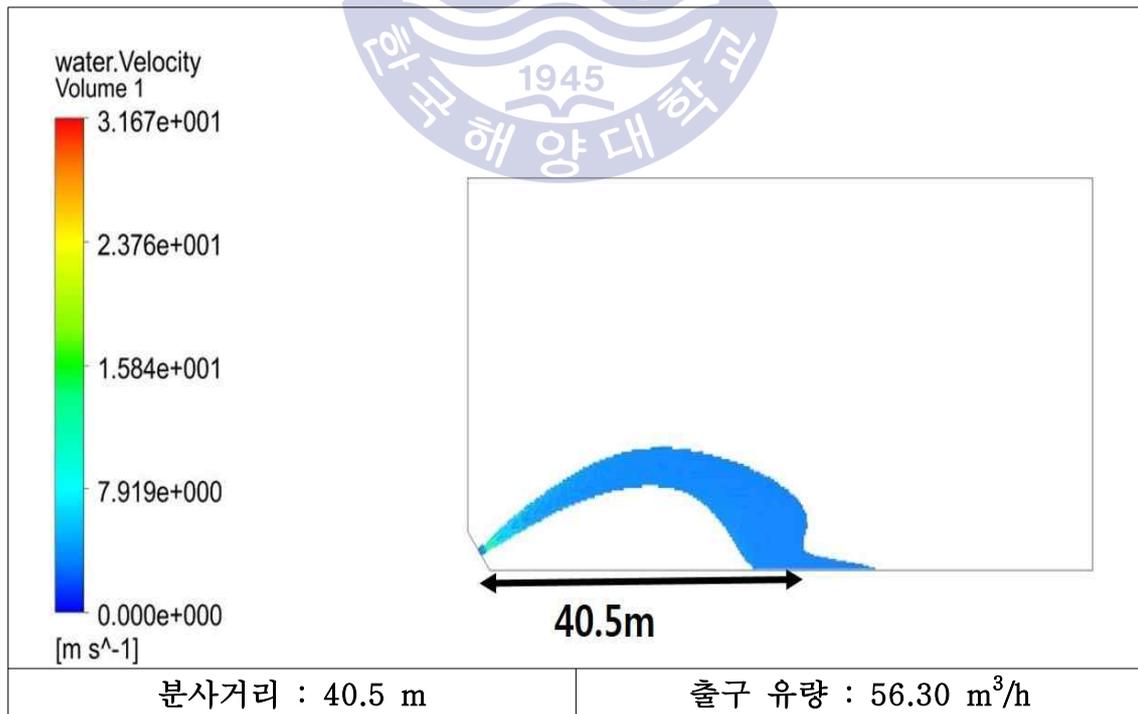
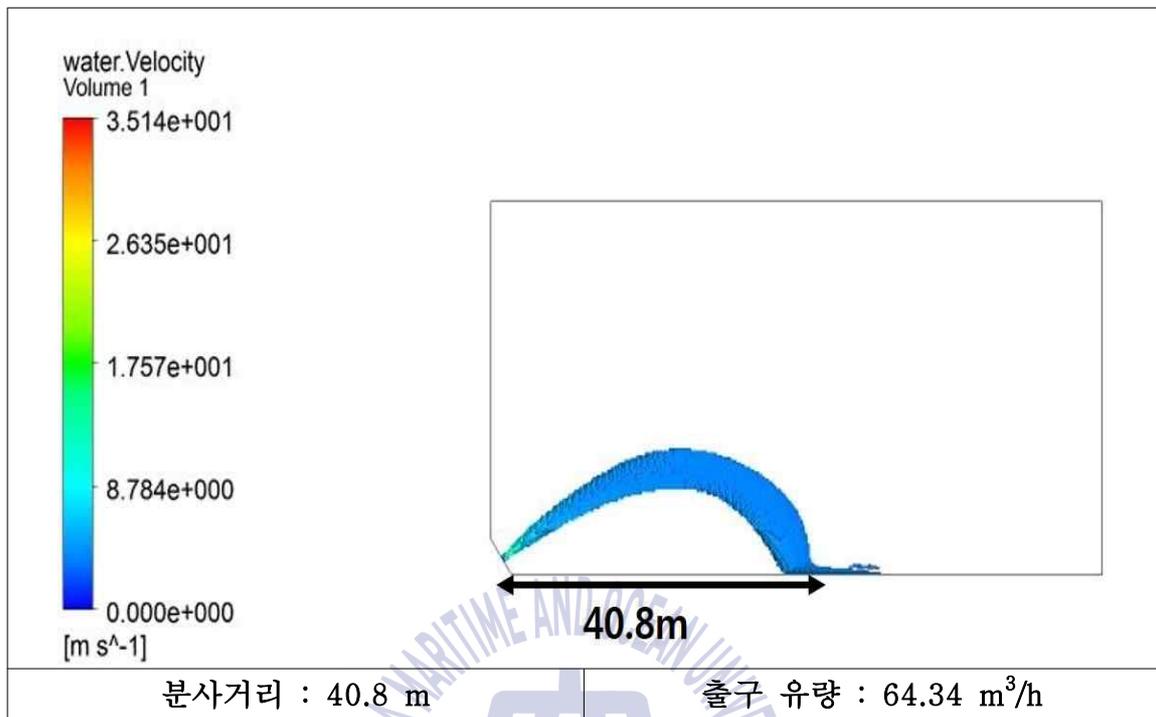
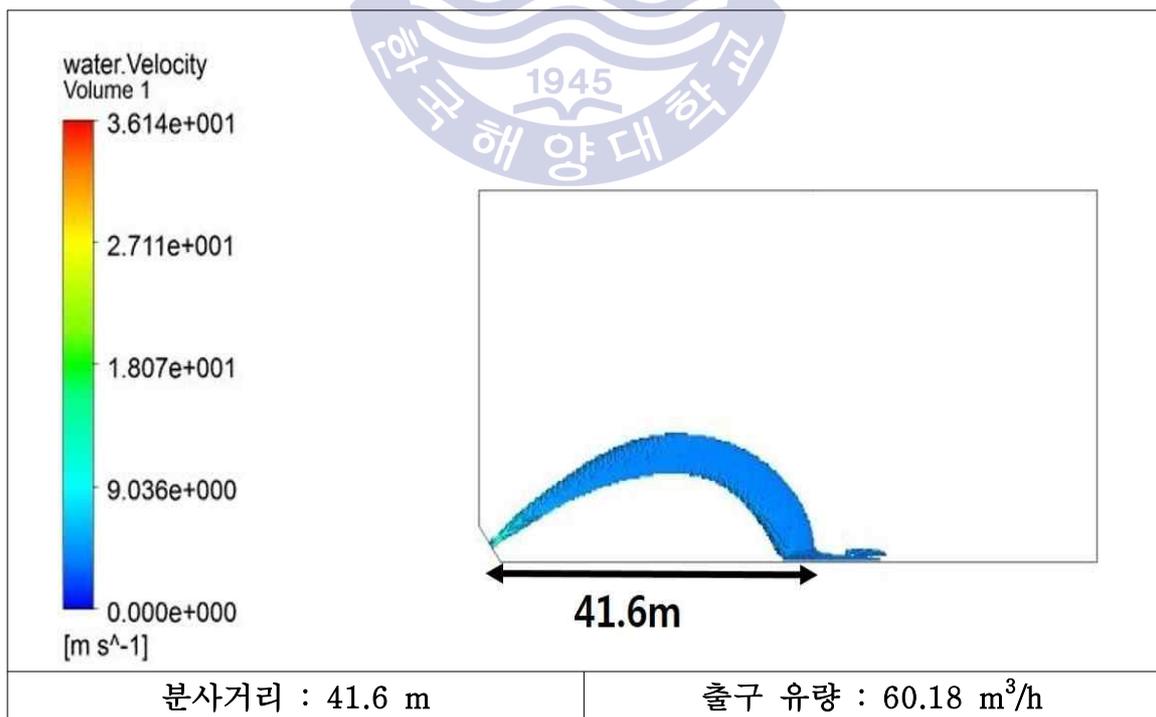


Fig. 75 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 4 bar

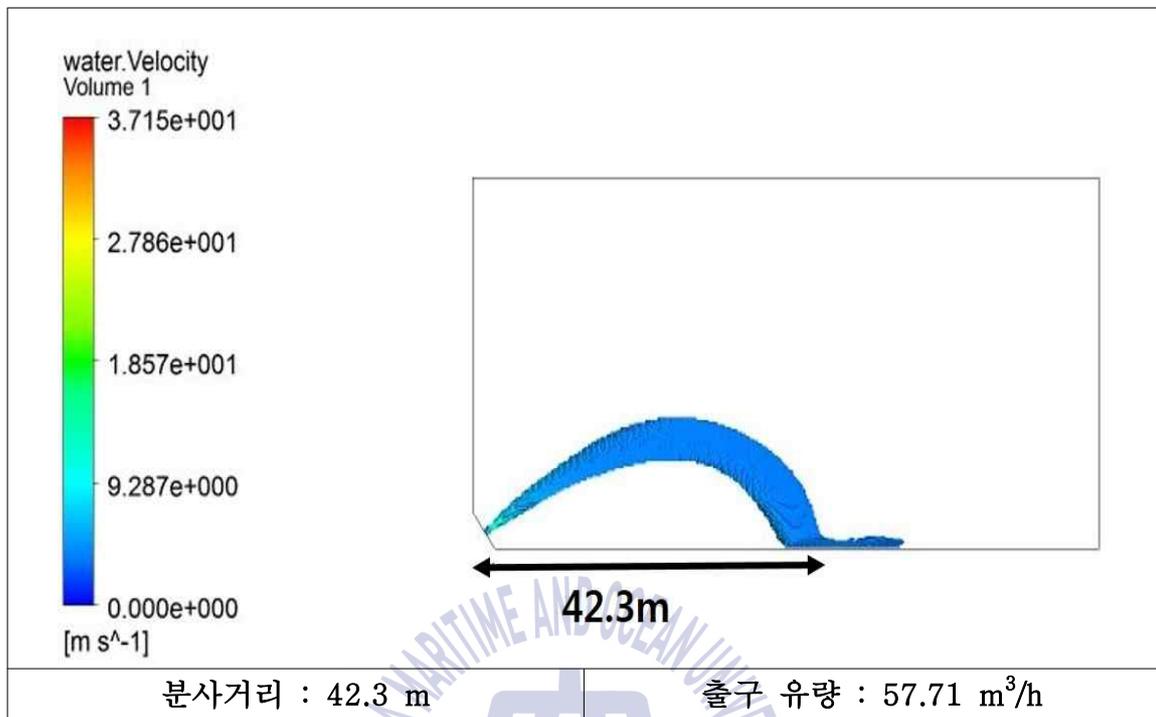
(A) Nozzle Orifice : 28 mm



(B) Nozzle Orifice : 27 mm



(C) Nozzle Orifice : 26 mm



(D) Nozzle Orifice : 25 mm

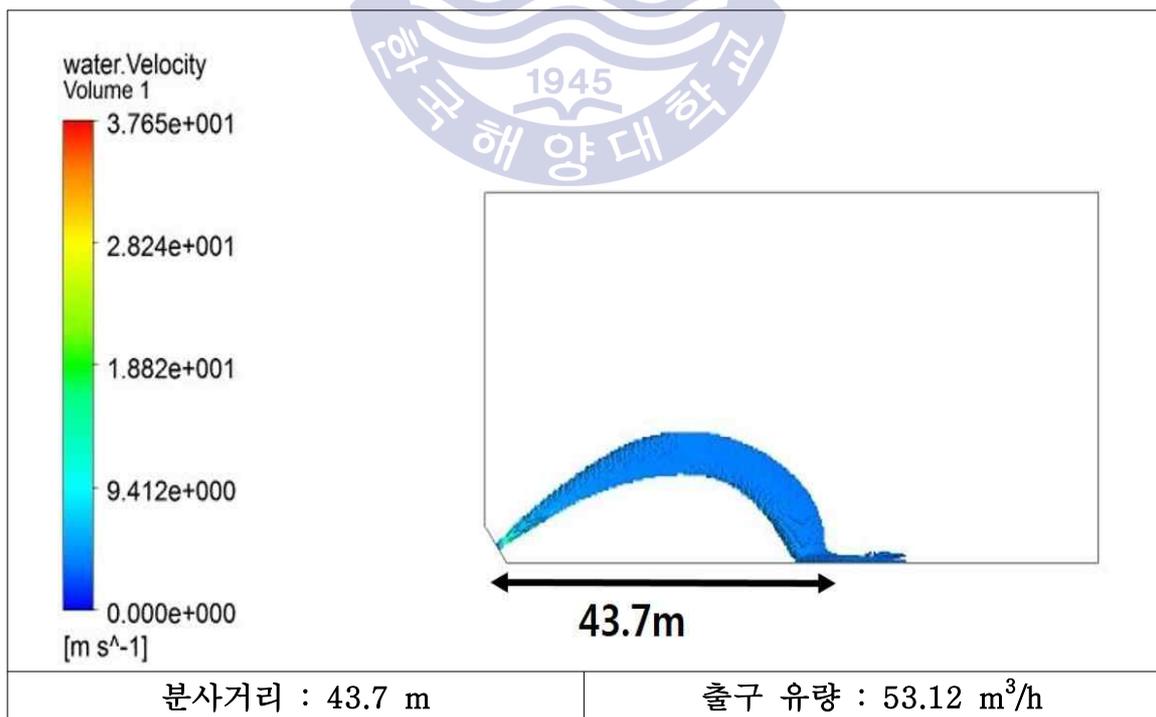
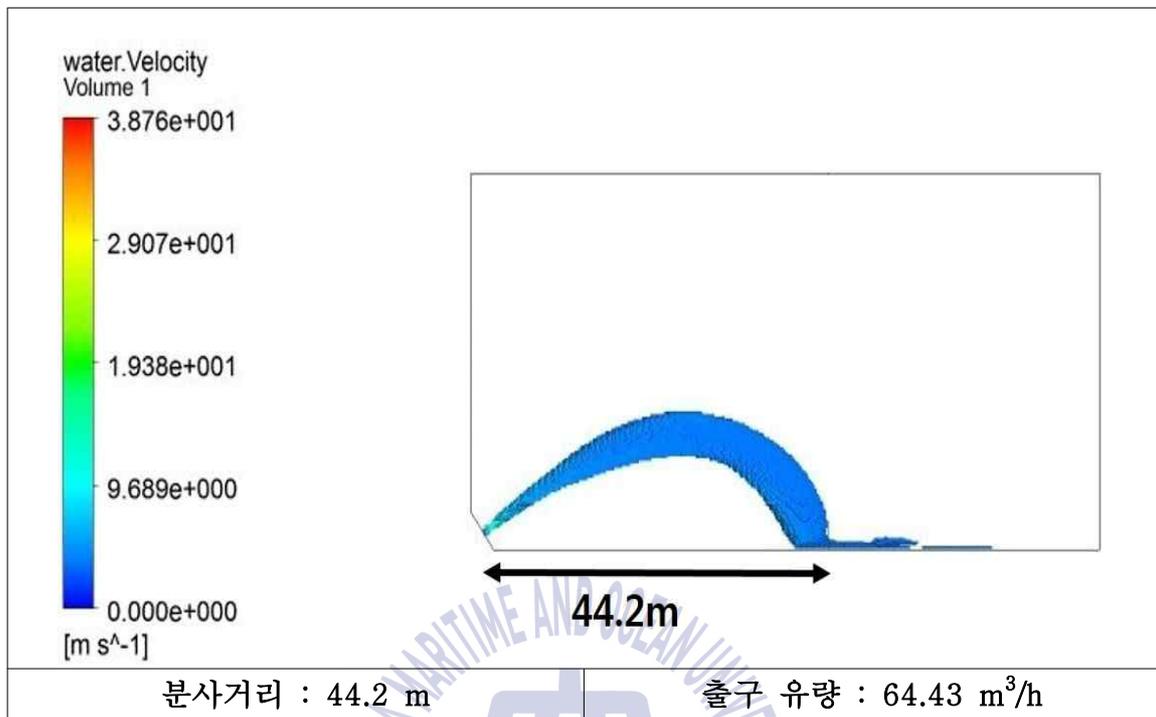
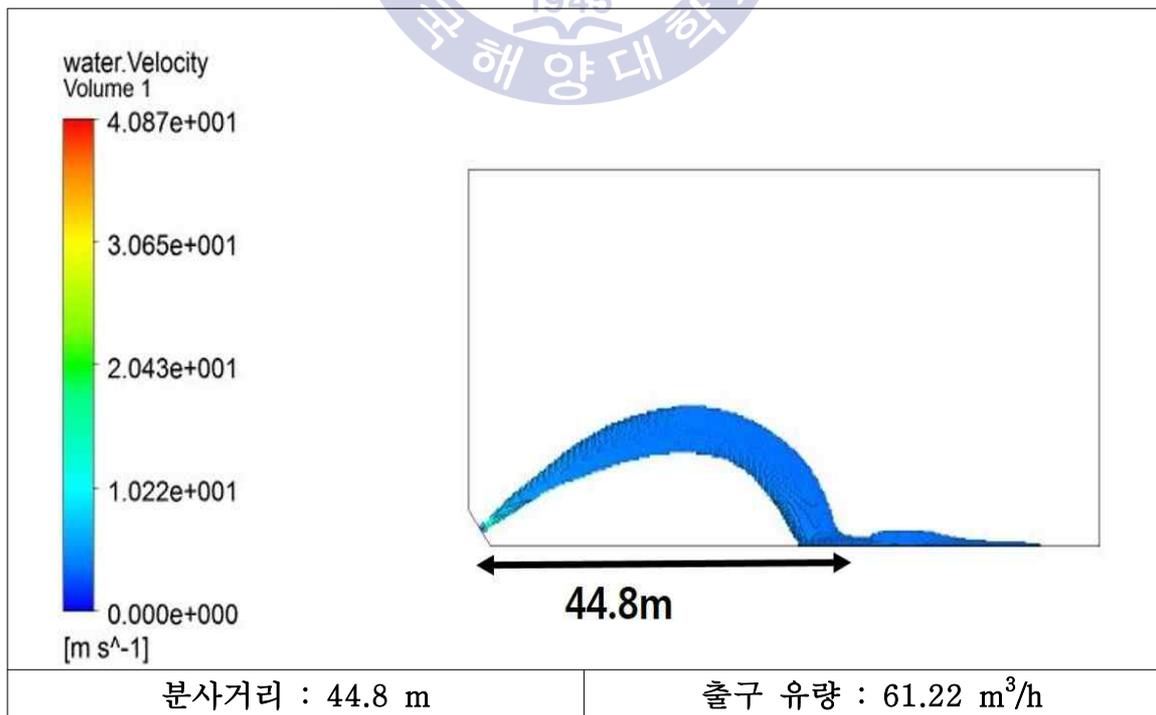


Fig. 76 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 5 bar

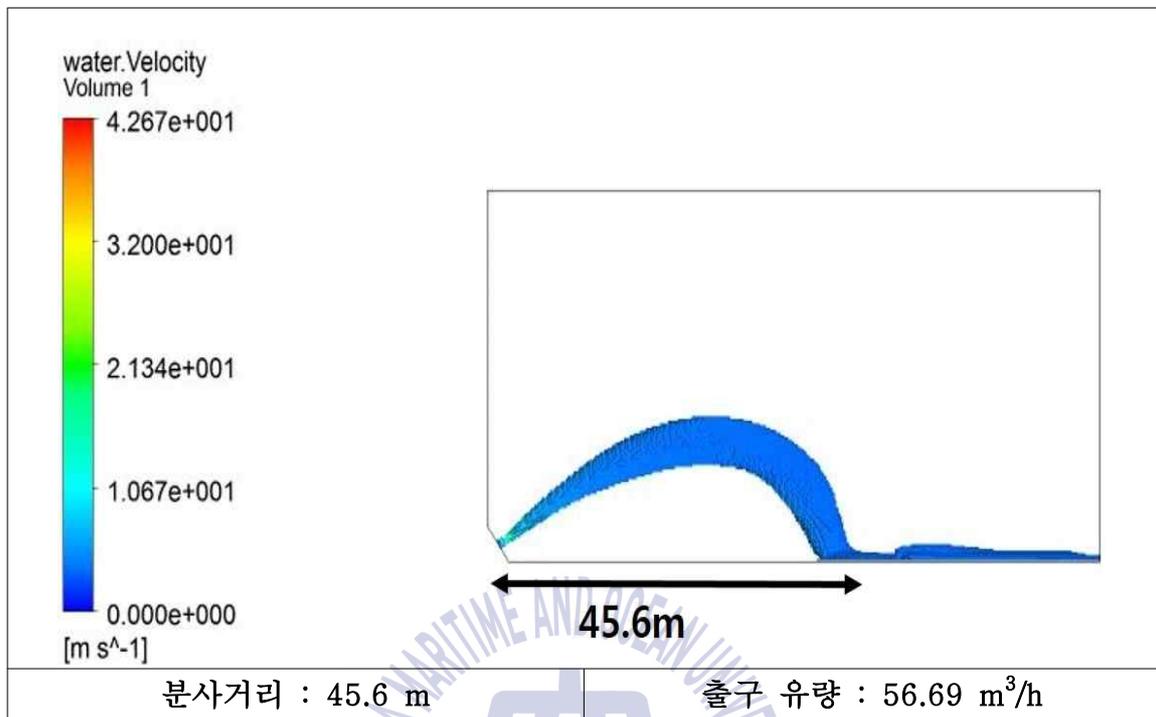
(A) Nozzle Orifice : 26 mm



(B) Nozzle Orifice : 25 mm



(C) Nozzle Orifice : 24 mm



(D) Nozzle Orifice : 23 mm

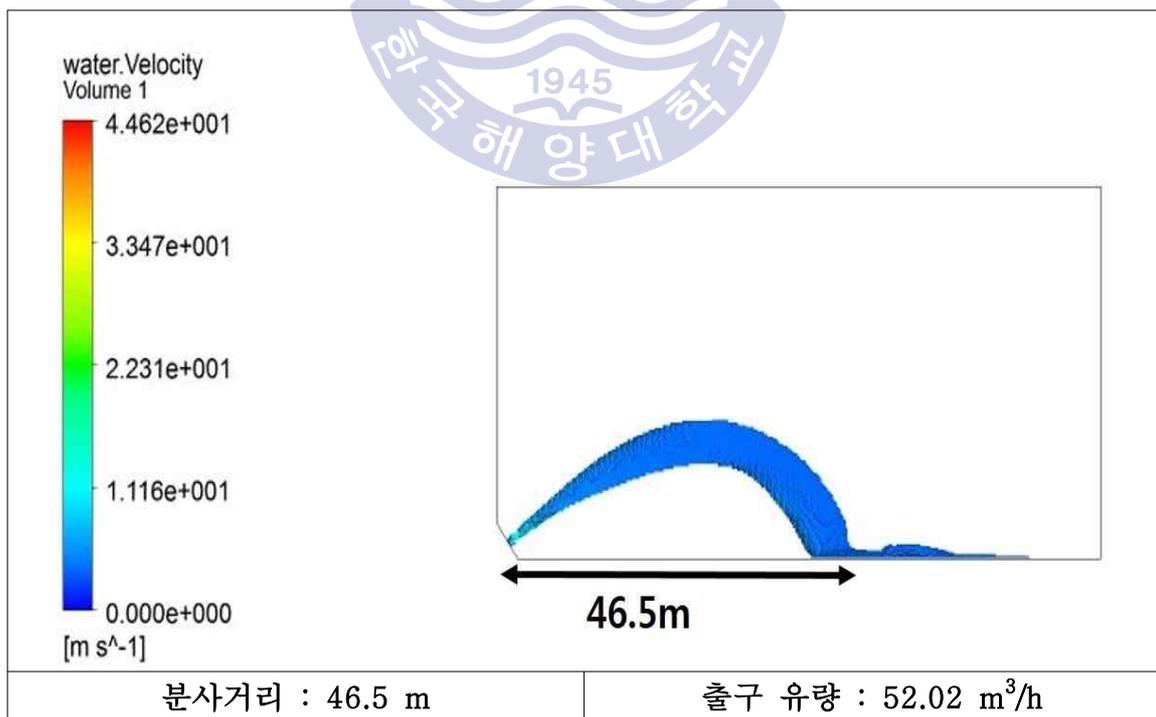
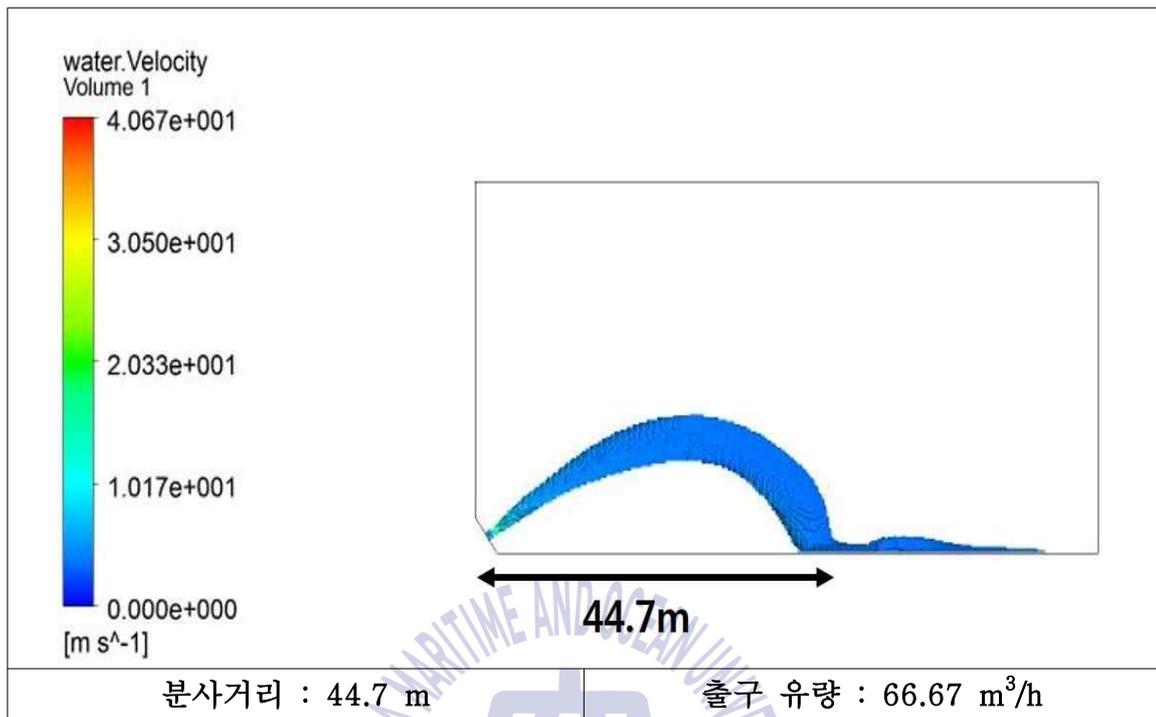
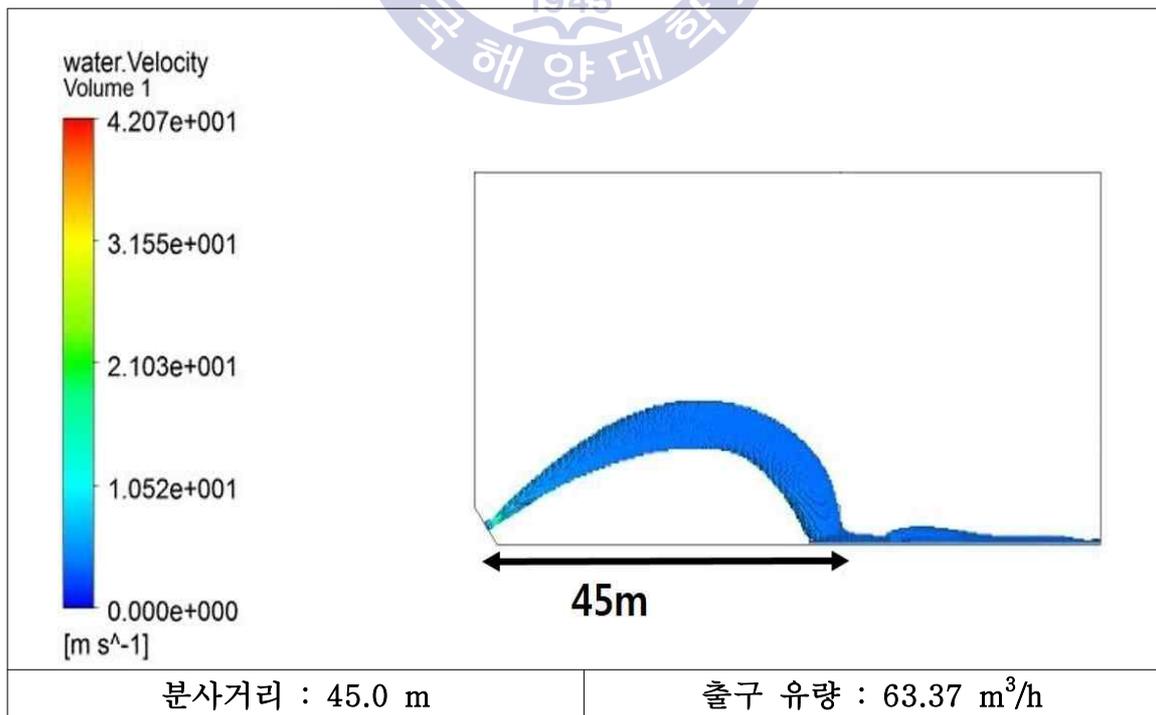


Fig. 77 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 6 bar

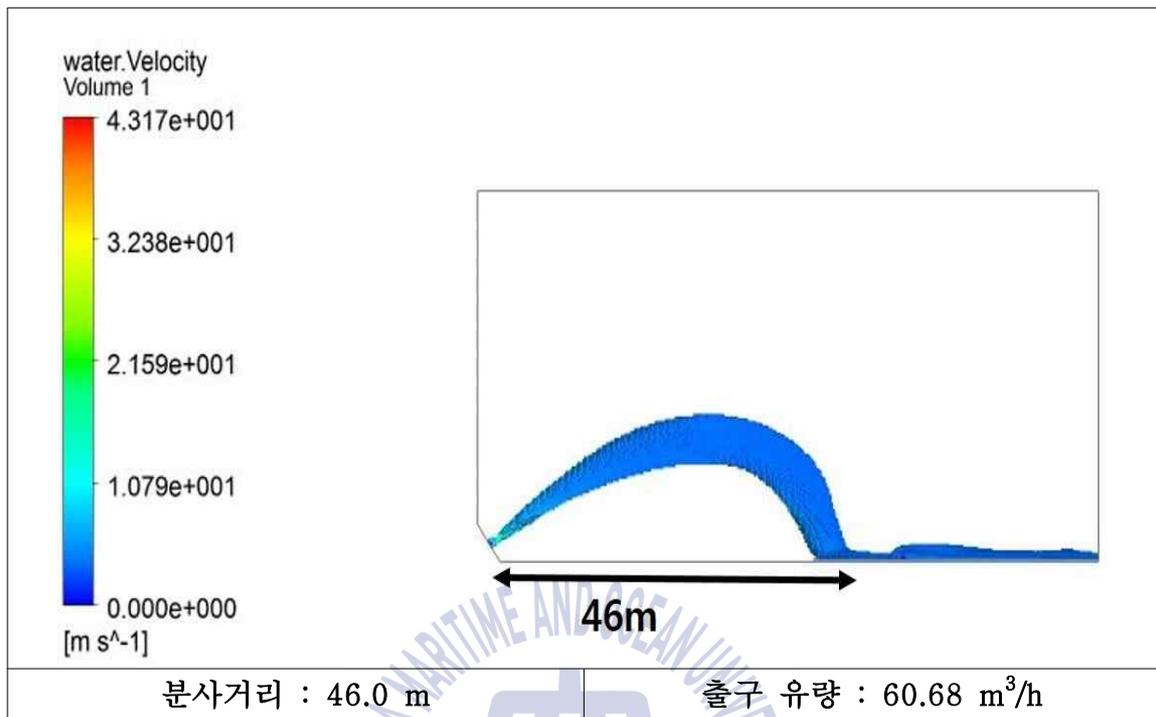
(A) Nozzle Orifice : 26 mm



(B) Nozzle Orifice : 25 mm



(C) Nozzle Orifice : 24 mm



(D) Nozzle Orifice : 23 mm

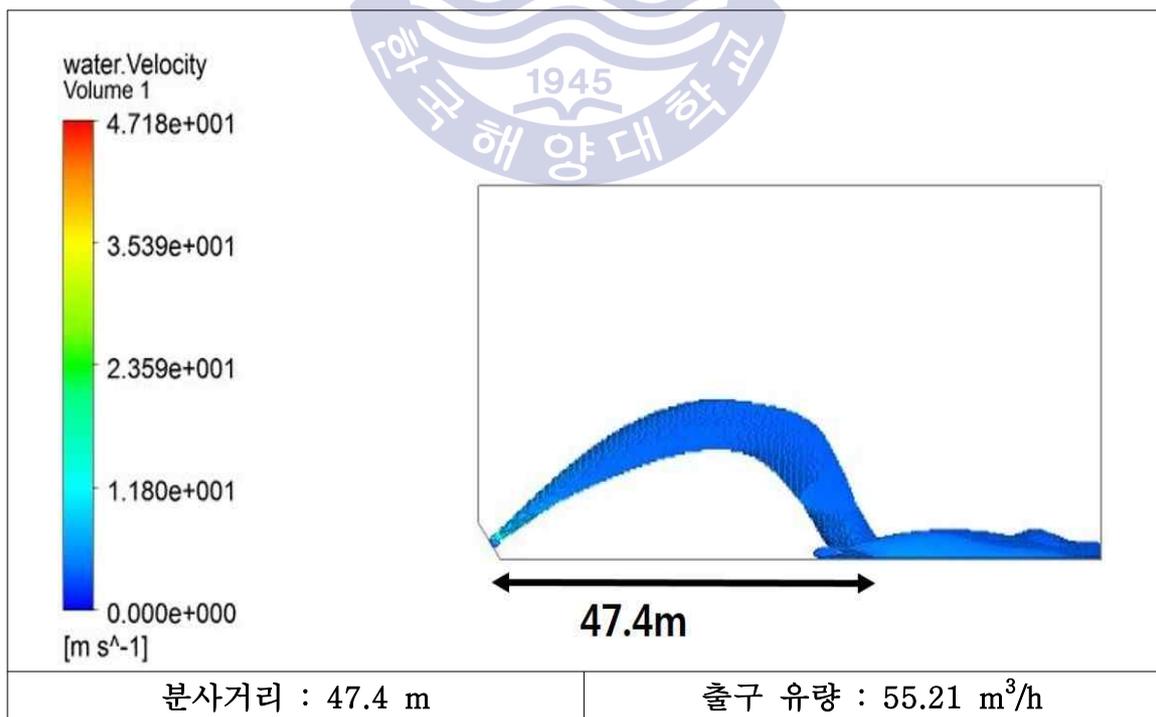
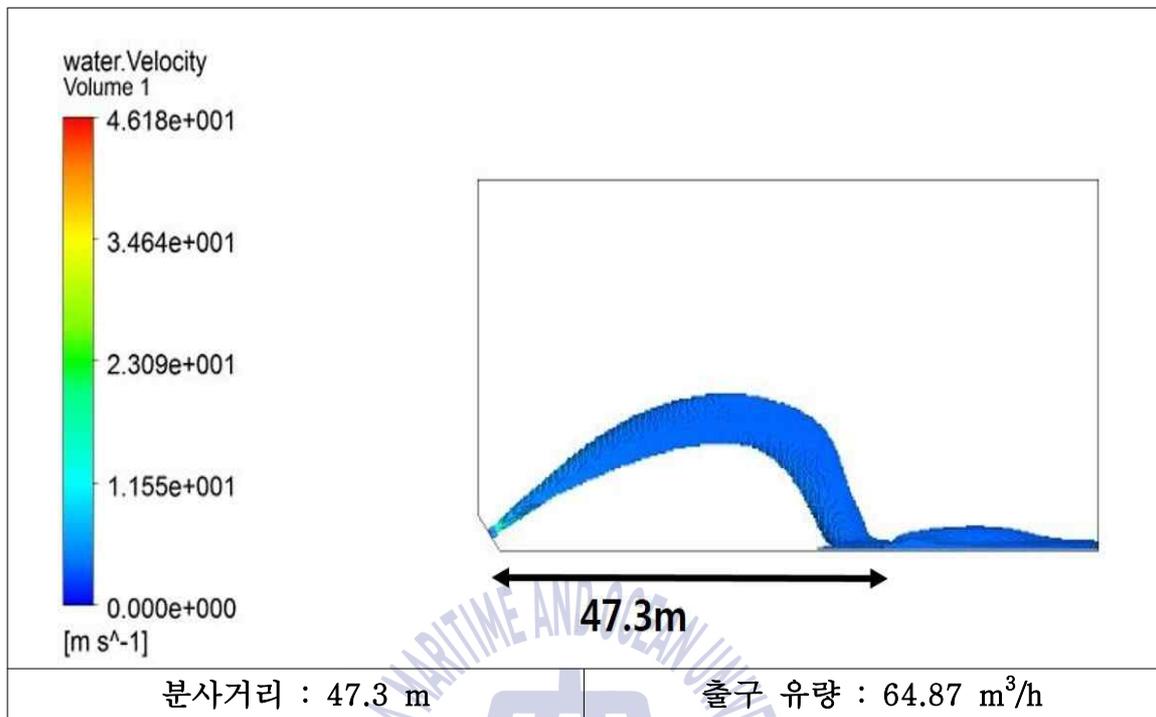
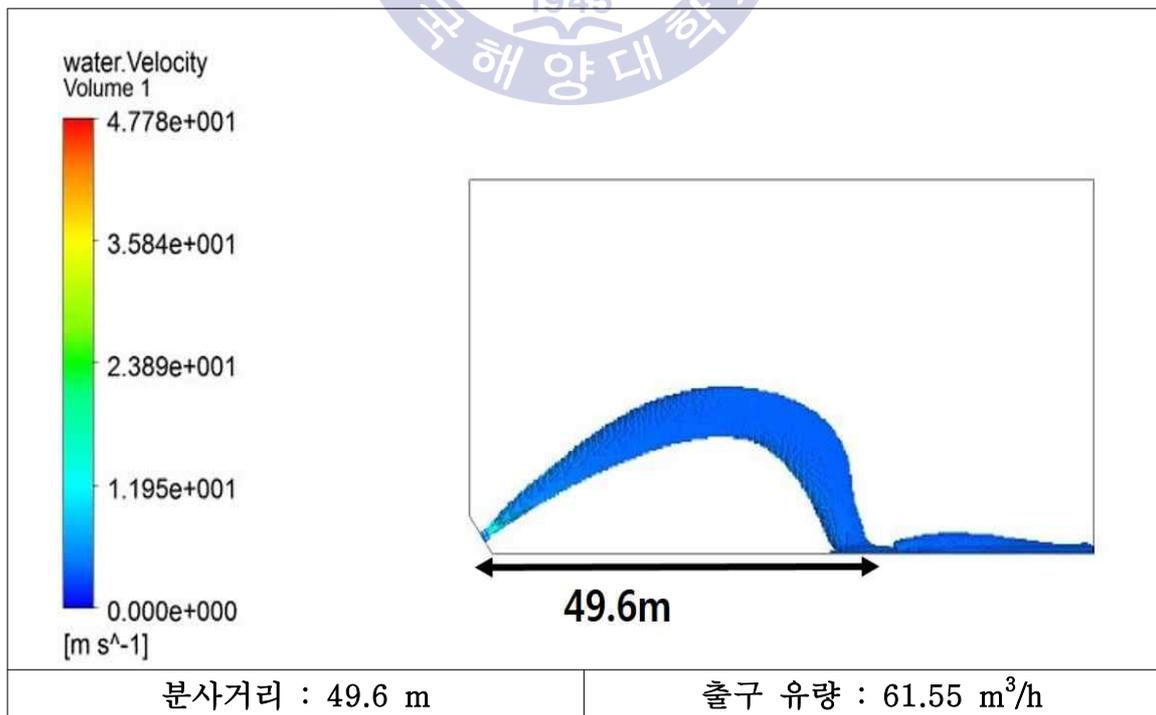


Fig. 78 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 7 bar

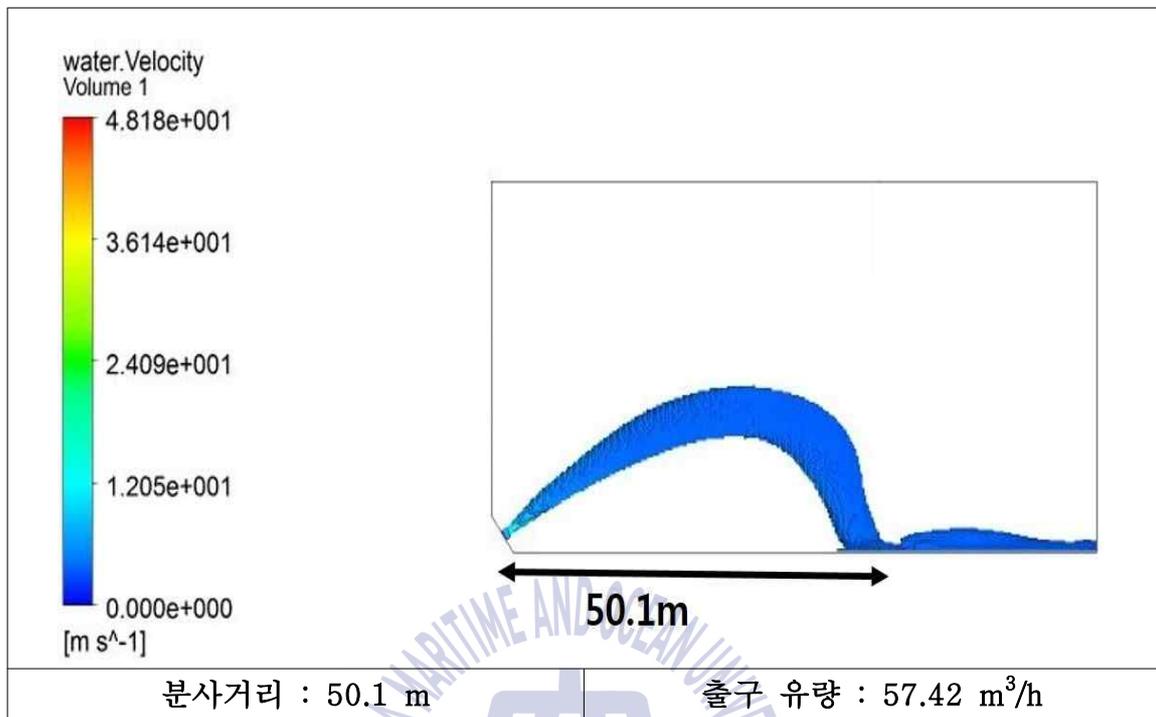
(A) Nozzle Orifice : 24 mm



(B) Nozzle Orifice : 23 mm



(C) Nozzle Orifice : 22 mm



(D) Nozzle Orifice : 21 mm

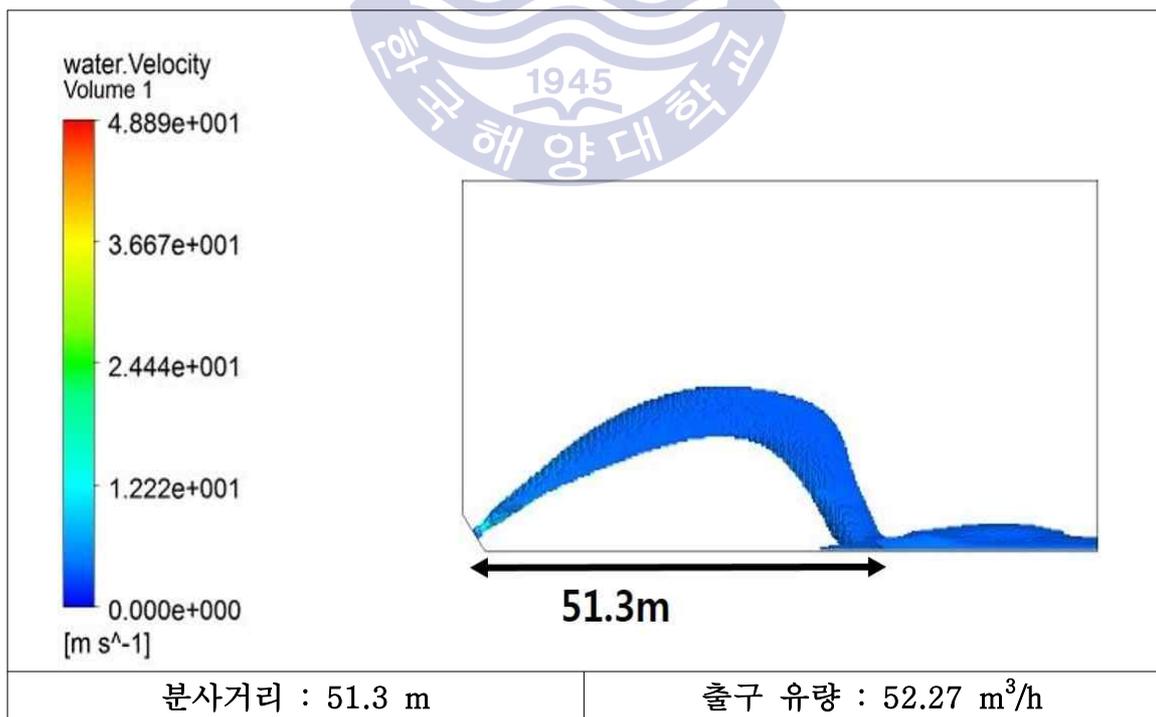
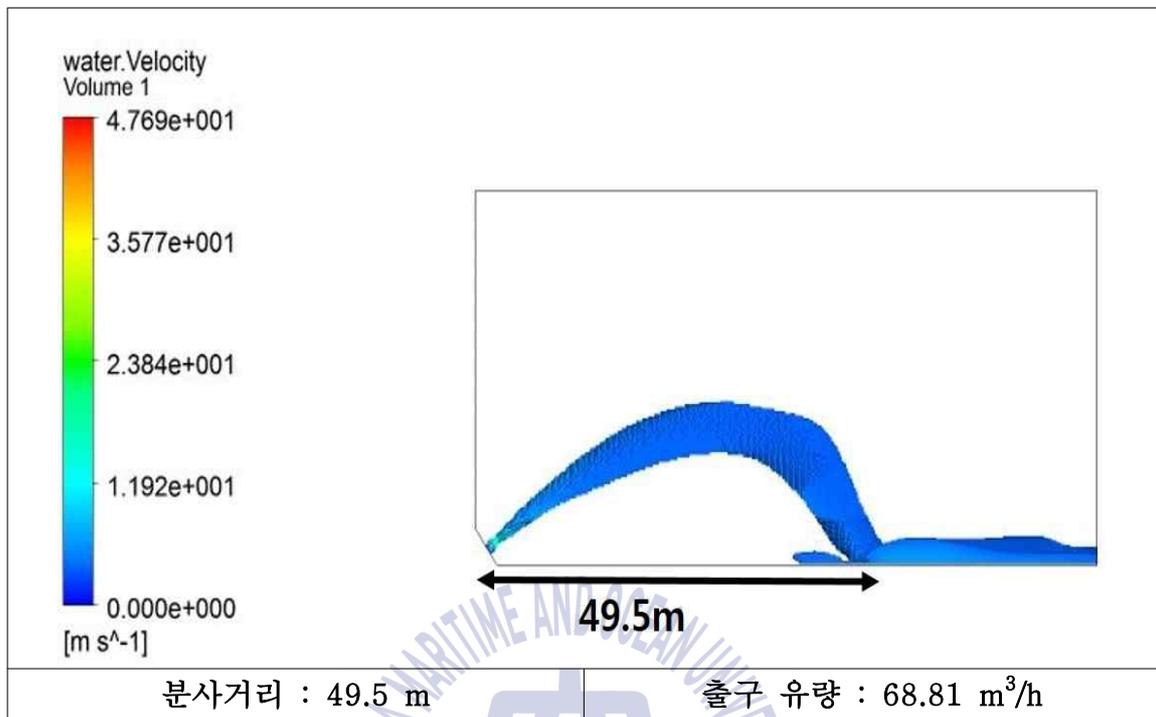
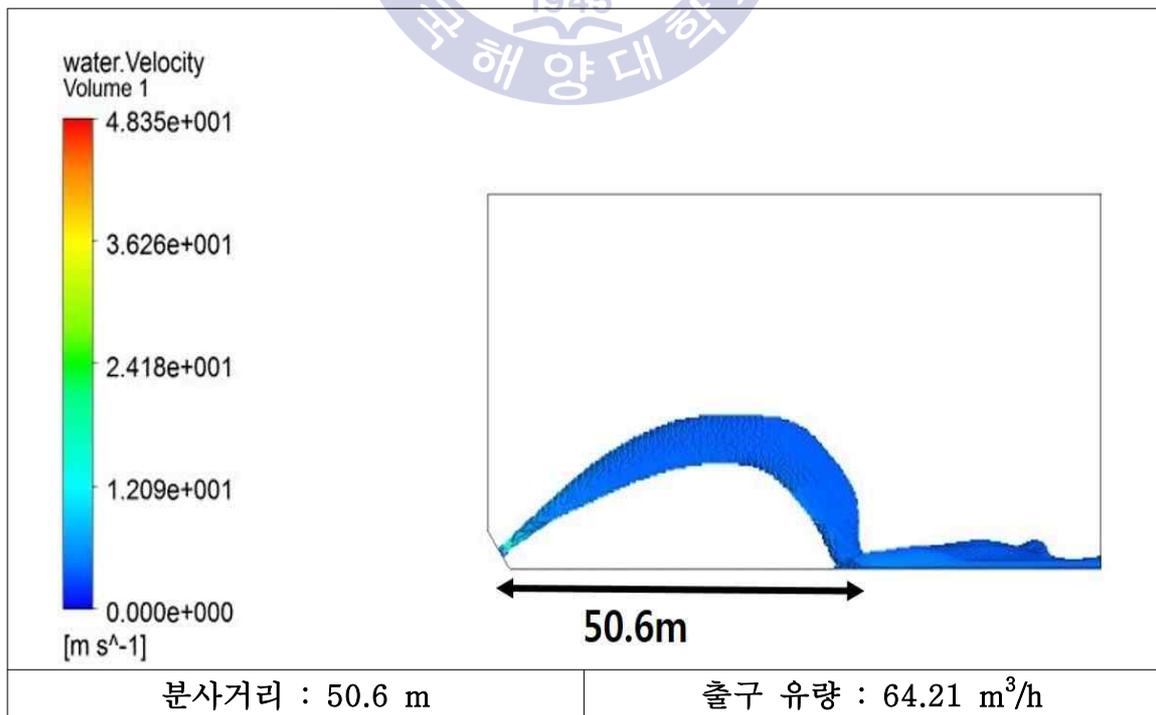


Fig. 79 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 8 bar

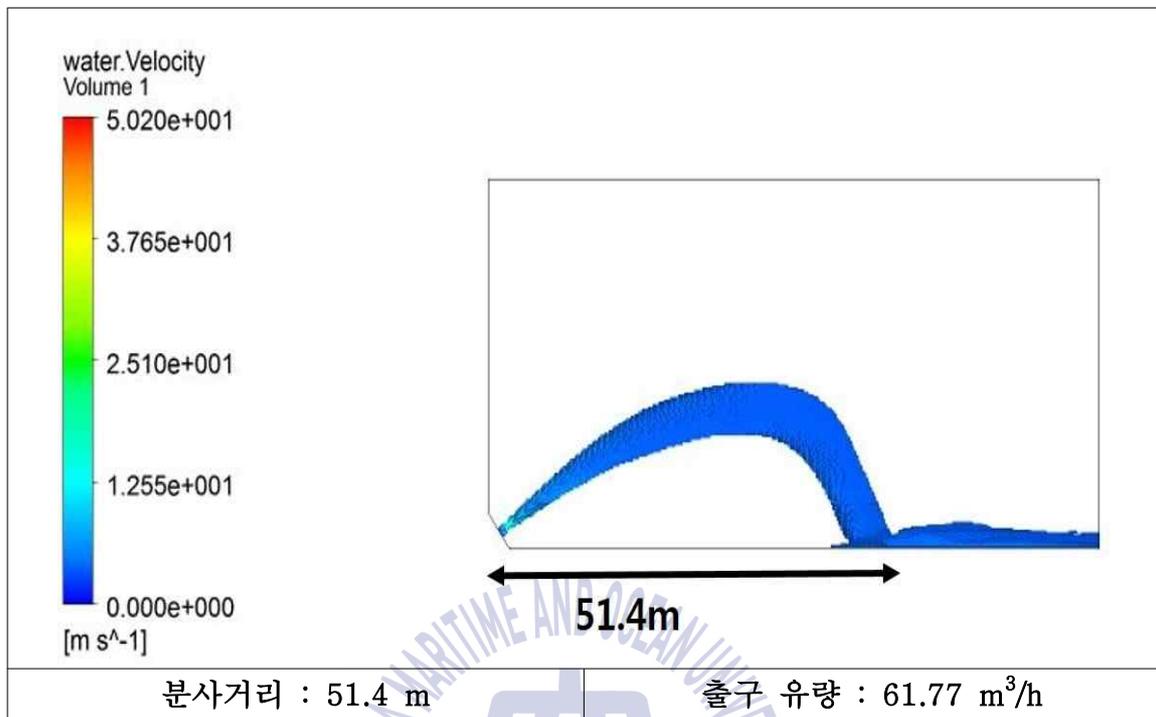
(A) Nozzle Orifice : 24 mm



(B) Nozzle Orifice : 23 mm



(C) Nozzle Orifice : 22 mm



(D) Nozzle Orifice : 21 mm

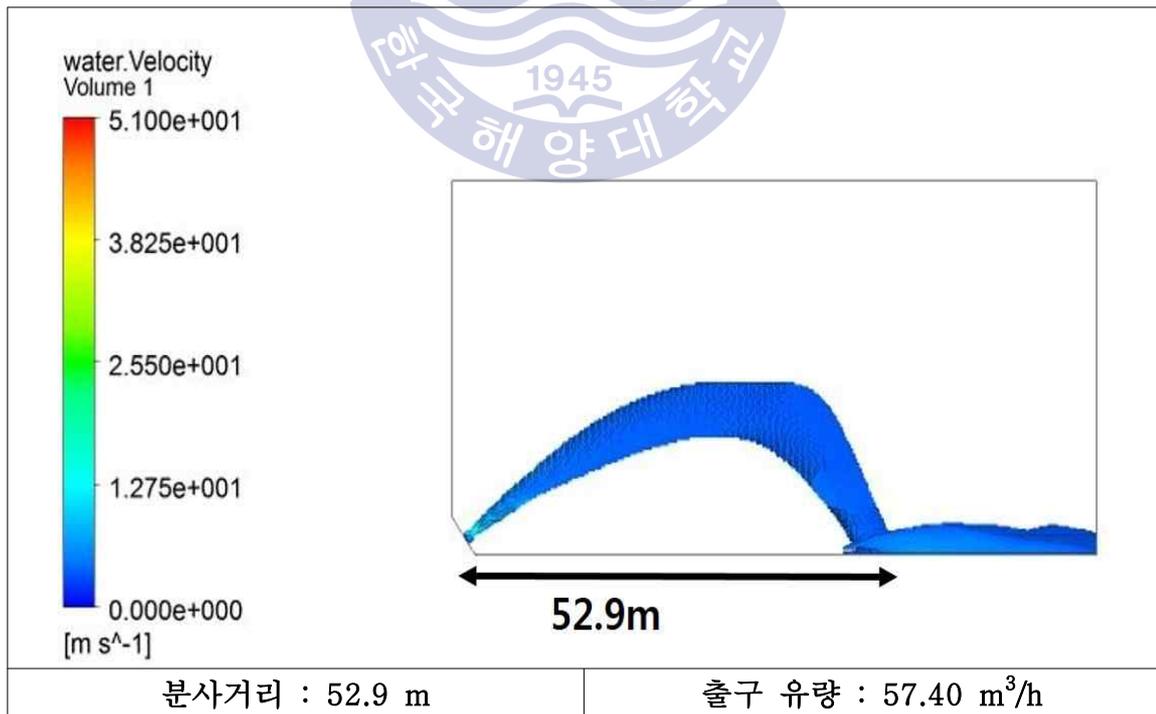


Fig. 80 The Throw Length by Nozzle Orifice Diameter at 9 bar

Table 20 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 4 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
31	4	65.78	35	36.5
30	4	63.42	35	38.0
29	4	60.51	35	40.1
28	4	56.30	35	40.5

Table 21 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 5 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
28	5	64.34	35	40.8
27	5	60.18	35	41.6
26	5	57.71	35	42.3
25	5	53.12	35	43.7

Table 22 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 6 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
26	6	64.43	35	44.2
25	6	61.22	35	44.8
24	6	56.69	35	45.6
23	6	52.02	35	46.5

Table 23 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 7 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
26	7	66.67	35	44.7
25	7	63.37	35	45.0
24	7	60.68	35	46.0
23	7	55.21	35	47.4

Table 24 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 8 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
24	8	64.87	35	47.3
23	8	61.55	35	49.6
22	8	57.42	35	50.1
21	8	52.27	35	51.3

Table 25 The Throw Length & Flow Rate by Nozzle Orifice at 9 bar

Nozzle Orifice [mm]	Inlet Pressure [bar]	Flow Rate [m^3/h]	Ditch. Angle [deg]	Ditch. Length [m]
24	9	68.81	35	49.5
23	9	64.21	35	50.6
22	9	61.77	35	51.4
21	9	57.40	35	52.9

5.1.2 분사각도에 따른 정류격자 길이 유동해석 결과

유동해석은 3.2.5절에서 언급한 바와 같이 분사각도를 35° 와 90° 두 가지로 구분하였고, 각 조건에서 노즐 정류격자의 길이를 3 cm, 4 cm, 5 cm 로 다양화 하였을 때 나타나는 분사거리의 변화를 확인하고자 하였다. 해석 방법에는 35° 분사의 경우 시간에 따른 변화가 없는 정상상태 해석으로 계산하였고, 90° 분사의 경우 시간에 종속된 비정상상태로 해석을 수행하였다.

분사거리에 대한 정의는 35° 분사각도의 경우, 노즐에서 분사된 물이 노즐과 동일한 높이에 도달하기까지의 최소거리로 하였다. 90° 분사각도의 경우, 노즐에서 분사된 물이 가장 높은 위치에 도달한 높이로 정의하였다.

5.1.2.1 35° 분사각도의 경우

Mobile Water Monitor의 해석 중 분사각도가 35° 인 경우, 분사된 물은 중력에 의한 대기 조건과의 밀도 차이로 인해 포물선을 그리며 낙하하게 된다. 이러한 물의 형상은 시간에 지남에 따라 변화하지 않고 일정한 모습을 보이기 때문에 정상상태를 가정하여 해석을 수행하였다.

가. 유체 속도를 활용한 비교

Fig. 81은 분사된 청수의 속도구배(velocity gradient)를 시각화한 그림이다. 분사거리는 위에서 설명한 정의를 바탕으로 a선을 기준으로 하였다. 속도구배를 기준으로 분사거리를 표현한 경우 각각의 노즐 정류격자 길이에서 유속이 강하게 나타난 거리는 3 cm = 40 m, 4 cm = 44 m, 5 cm = 42 m로 노즐 정류격자의 길이 4 cm에서 물의 분사 길이가 가장 길었다. 이러한 분사거리에 대한 해석 결과는 Fig. 82를 통해서 분명하게 확인할 수 있다. Fig. 82는 Fig. 81의 a선을 기준으로 한 분사거리와 유체속도의 관계를 나타낸다. 검정색, 빨간색, 그리고 파란색은 각각 노즐길이 3 cm, 4 cm, 5 cm의 결과이다.

이러한 결과는 관을 지나며 유동의 구배가 발달하는 현상을 완화하기 위한 목적으로, 다시 말하자면 채널의 유동을 안정화하기 위해 설치된 분사 노즐의

정류격자가 405,300 Pa (= 4 atm)의 입구조건의 경우 4 cm에서 가장 우수한 성능을 보였다.

Fig. 81, Fig. 82와 같이 유체의 속도를 기준으로 분사거리를 표현할 경우, 두 가지 영역이 관찰된다. 첫 번째로 약 15 m의 넓은 영역에 걸쳐 속도 구배가 나타나는 영역이 있었다. 앞서 언급한 속도구배에서의 분사거리는 이 영역을 기준으로 표현한 것이다. 두 번째로 이러한 약 15 m의 영역 중에서도 b로 나타낸 약 5 m의 영역 내에서는 강한 유체속도가 관찰된다. 여기에서 유체 속도는 분사되는 청수와 대기의 공기를 구분하지 못한다. 그러나 실제 소화노즐에서 분사되는 물의 모습은 Fig. 83과 같이 약 1 ~ 2 m 직경의 원형으로 나타나기 때문에, 이렇듯 속도구배를 활용하여 분사거리를 나타내는 것은 현실적이지 못하다.

나. 물의 체적 분율을 활용한 비교

Mobile Water Monitor의 해석을 위해서는 대기의 공기를 제외한 분사된 청수만을 대상으로 한 현실적인 해석결과가 필요하다. 그렇기 때문에 Fig. 84를 통하여 청수의 체적 분율(volume fraction)을 기준으로 분사거리를 다시 나타내었다.

Fig. 84에서 분사거리는 노즐 정류격자의 길이 3 cm = 44 m(Fig. 84a), 4 cm = 47 m(Fig. 84b), 5 cm = 45 m(Fig. 84c)이고, 위와 동일하게 분사거리를 확인하기 쉽도록 Fig. 85를 통해 그래프로 나타내었다. 속도구배를 나타낸 Fig. 85와 마찬가지로 물의 체적 분율로 나타낸 해석에서도 노즐 정류격자의 길이 4 cm에서 분사거리가 가장 길게 나타났다. 또한 Fig. 85, Fig. 85에서 c의 영역으로 표시한 것과 같이 약 1 ~ 2 m 영역에 걸쳐 구배(gradient)가 나타나므로 앞서 보인 속도구배를 활용한 해석보다 더욱 현실적이라 할 수 있다.

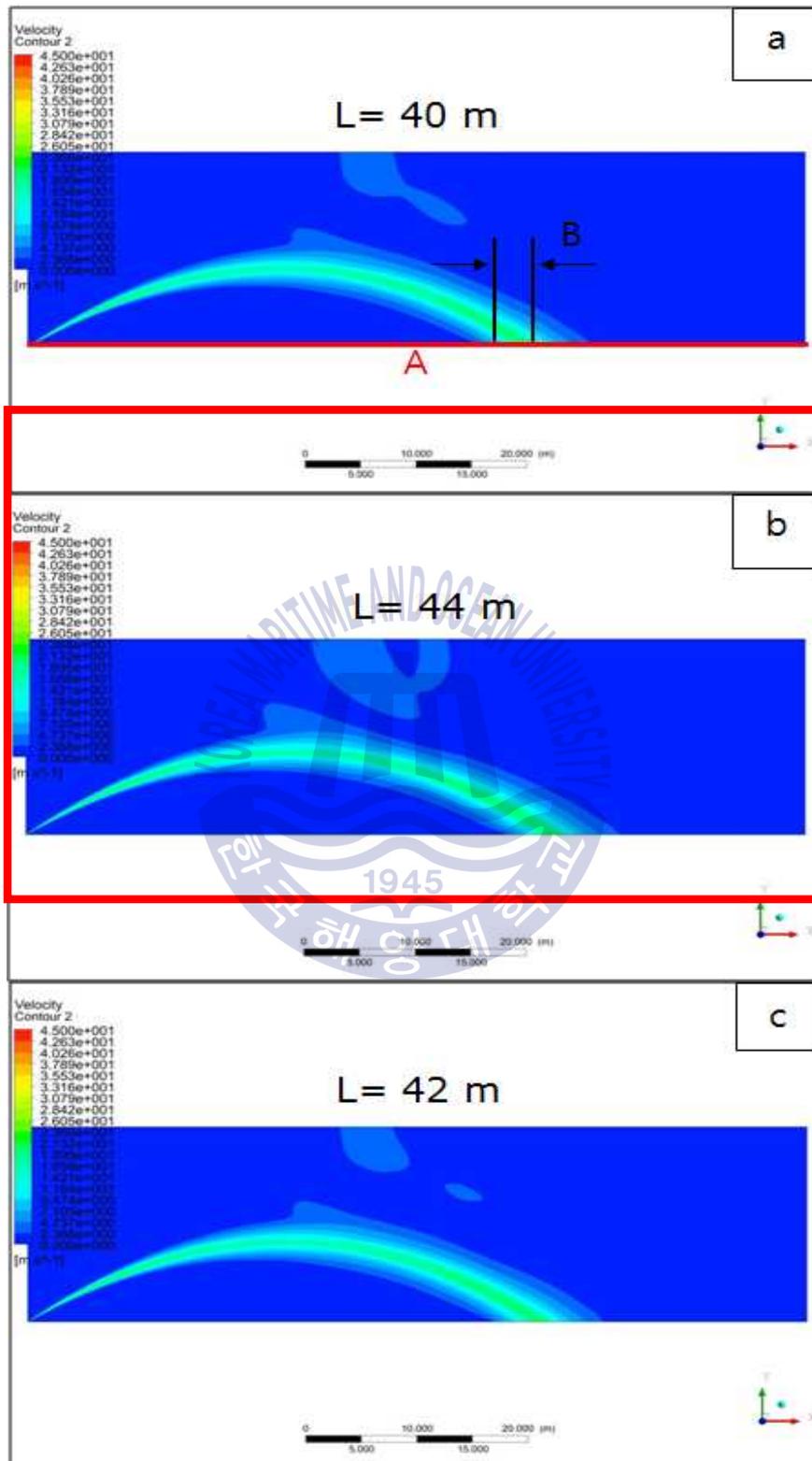


Fig. 81 Fluid Velocity Gradient of Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at a 35° Throw Angle

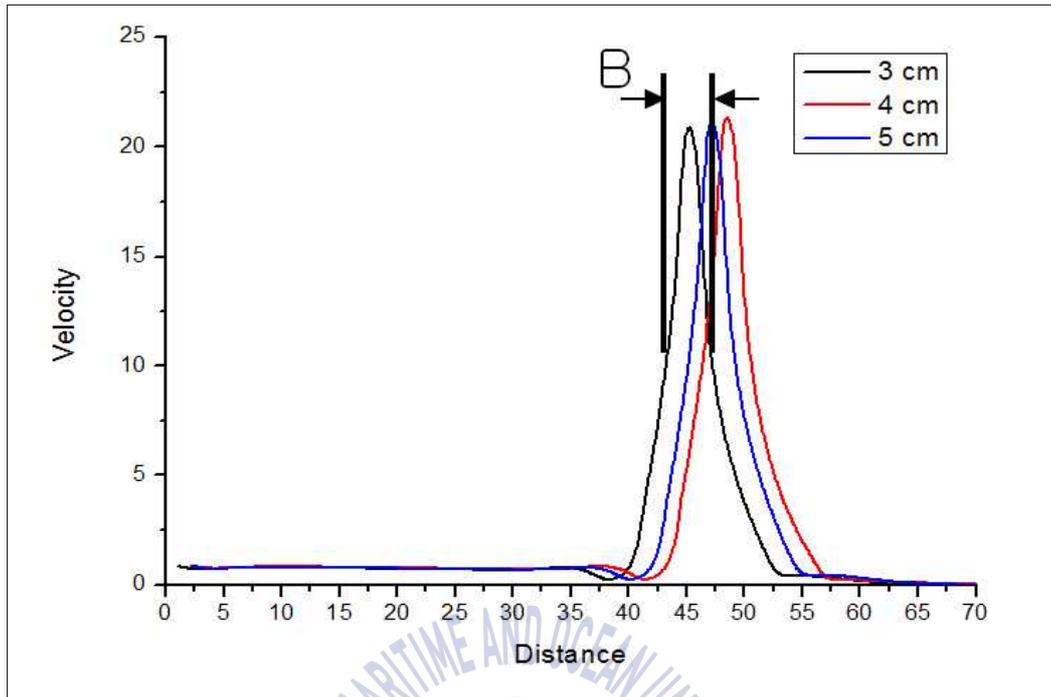


Fig. 82 Fluid Velocity Graph of Each Stabilizer at 35° Throw Angle

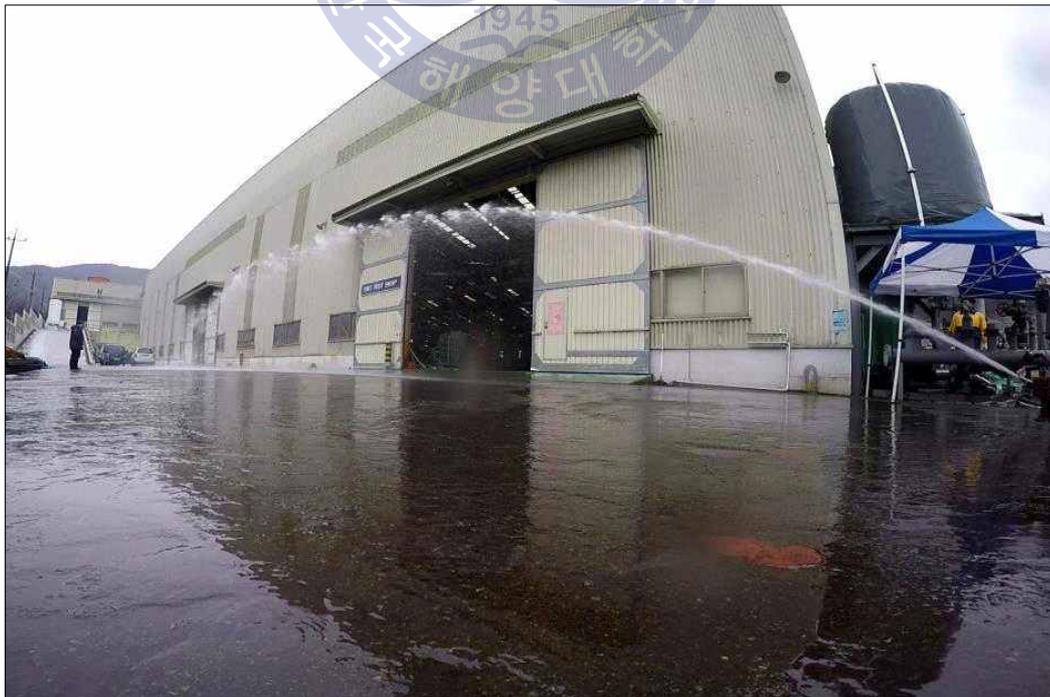


Fig. 83 Throw Picture of Mobile Water Monitor

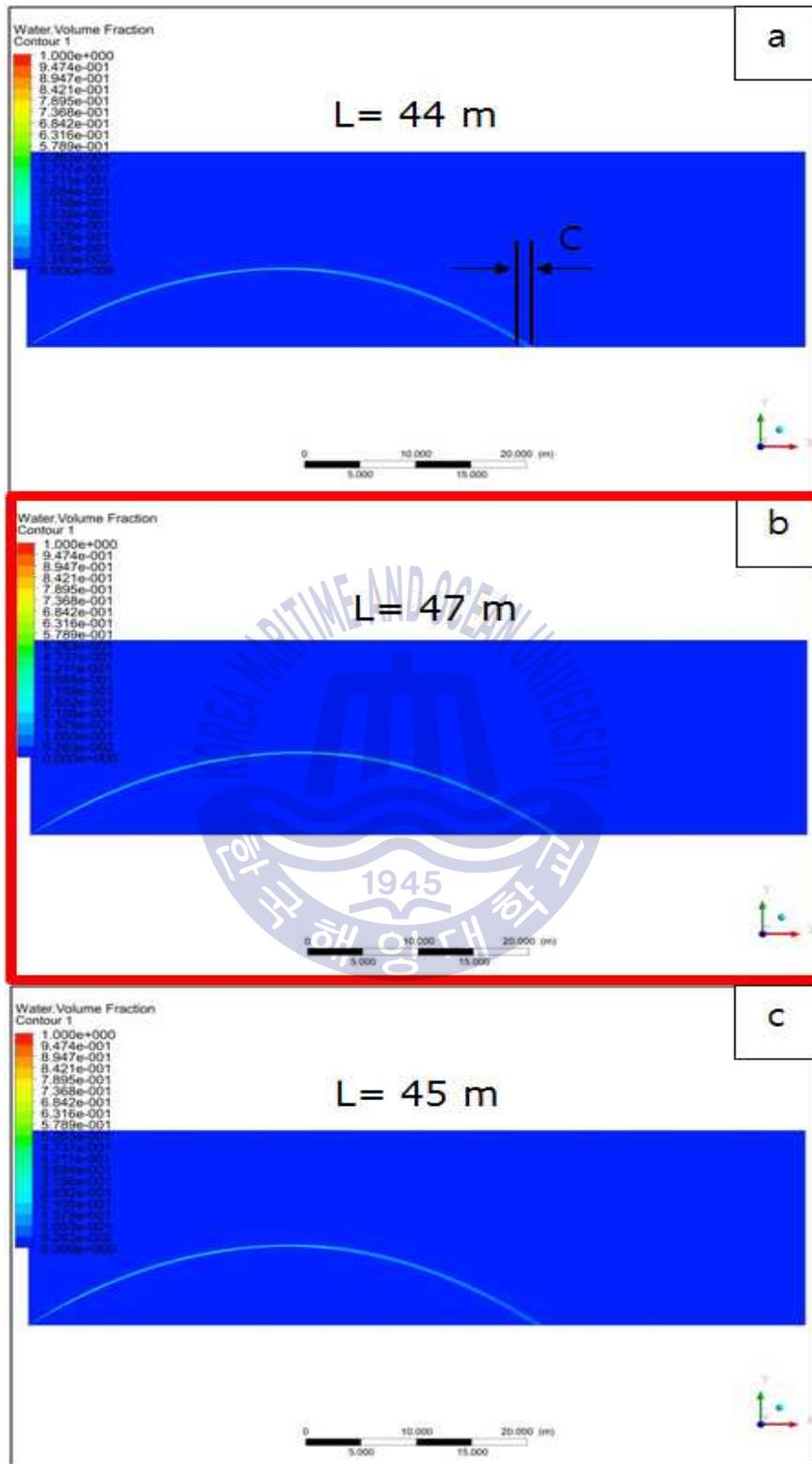


Fig. 84 Water Volume Fraction of Each Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at 35° Throw Angle

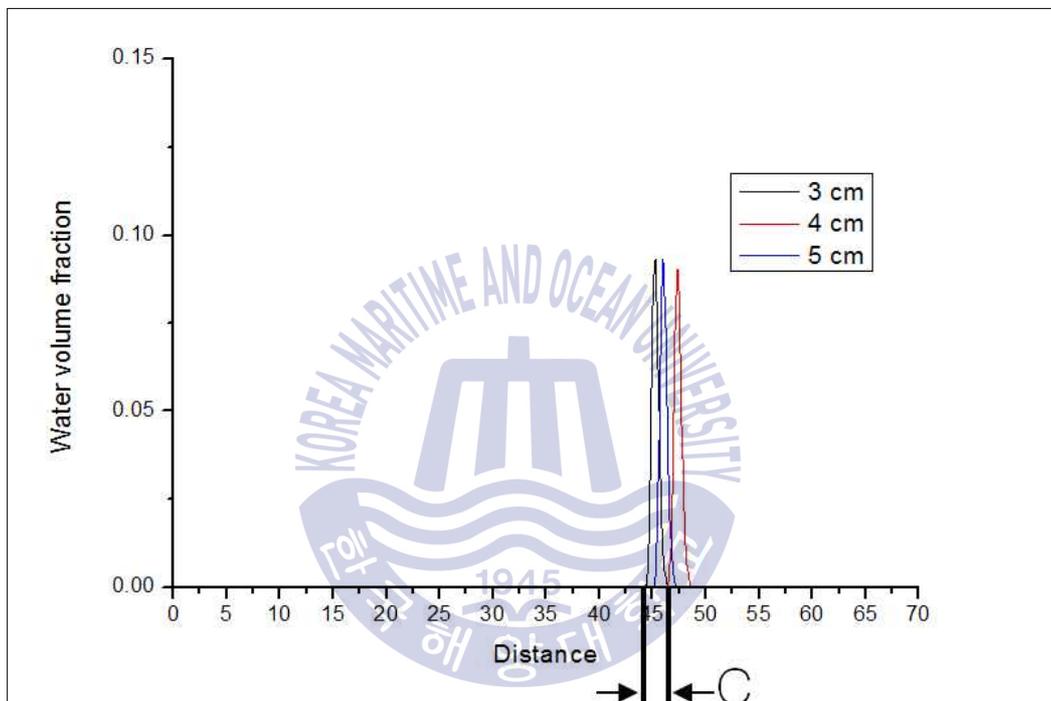


Fig. 85 Water Volume Fraction Graph of Each Stabilizer at 35° Throw Angle

5.1.2.2 90° 분사각도의 경우

Mobile Water Monitor의 해석 중 분사각도가 90°인 경우, 분사된 물은 중력에 의한 대기 조건과의 밀도 차이로 인해 분수대에서 볼 수 있는 물의 형태로 낙하하게 된다. 이러한 물의 형상은 점성력 보다는 관성력에 종속되게 된다. 다시 말하자면 난류성이 강하게 작용하기 때문에 시간이 지남에 따라 액적의 형태가 다양하게 변화하므로 비정상상태를 가정하여 해석을 수행하였다.

1) 유체 속도를 활용한 비교

Mobile Water Monitor의 운용 조건에는 수직분사도 포함되어 있으므로 90°의 분사각도를 대상으로 한 전산유동해석을 수행하였다. 35°분사각도의 해석과 마찬가지로 Fig. 86를 통해 분사된 청수의 속도구배를 시각화하였다. 속도구배를 기준으로 표현한 경우, 분사거리는 각 각의 노즐 정류격자 길이에 따라 3 cm = 25 m, 4 cm = 27 m, 5 cm = 25 m 로 나타났으며 이 중 4 cm 에서 청수의 분사거리가 가장 길었다. 이것은 35°분사각도의 실험과 동일한 결과이다. 이러한 분사거리에 대한 해석을 분명하게 확인할 수 있도록 Fig. 87을 통해 그래프로 나타내었다. Fig. 87은 Fig. 86의 D선을 기준으로 한 분사거리와 유체속도의 관계를 나타낸다. 이 D선은 노즐 출구 중심의 수직선이다. 각각의 정류격자 길이 3, 4, 5 cm 에 따라 검정색, 빨간색, 그리고 파란색으로 표현하였다.

2) 물의 체적 분율을 활용한 비교

35° 분사각도와 동일하게 90° 분사각도의 경우에도, Fig. 88을 통해 청수의 체적 분율(volume fraction)을 기준으로 분사거리를 다시 나타내었다. Fig. 88에서 Mobile Water Monitor의 분사거리는 노즐 정류격자의 길이 3 cm = 25 m(Fig. 88a), 4 cm = 26 m(Fig. 88b), 5 cm = 25 m(Fig. 88c)으로 나타났다.

분사거리를 확인하기 쉽도록 Fig. 89를 통해 청수 체적 분율과 분사거리와의 관계로 그래프로 나타내었다. 35° 분사각도와 동일하게 90°분사각도의 경우, 물의 체적 분율로 나타낸 해석에서도 노즐 정류격자의 길이 4 cm에서 분사거리가 가장 긴 것으로 나타났다.

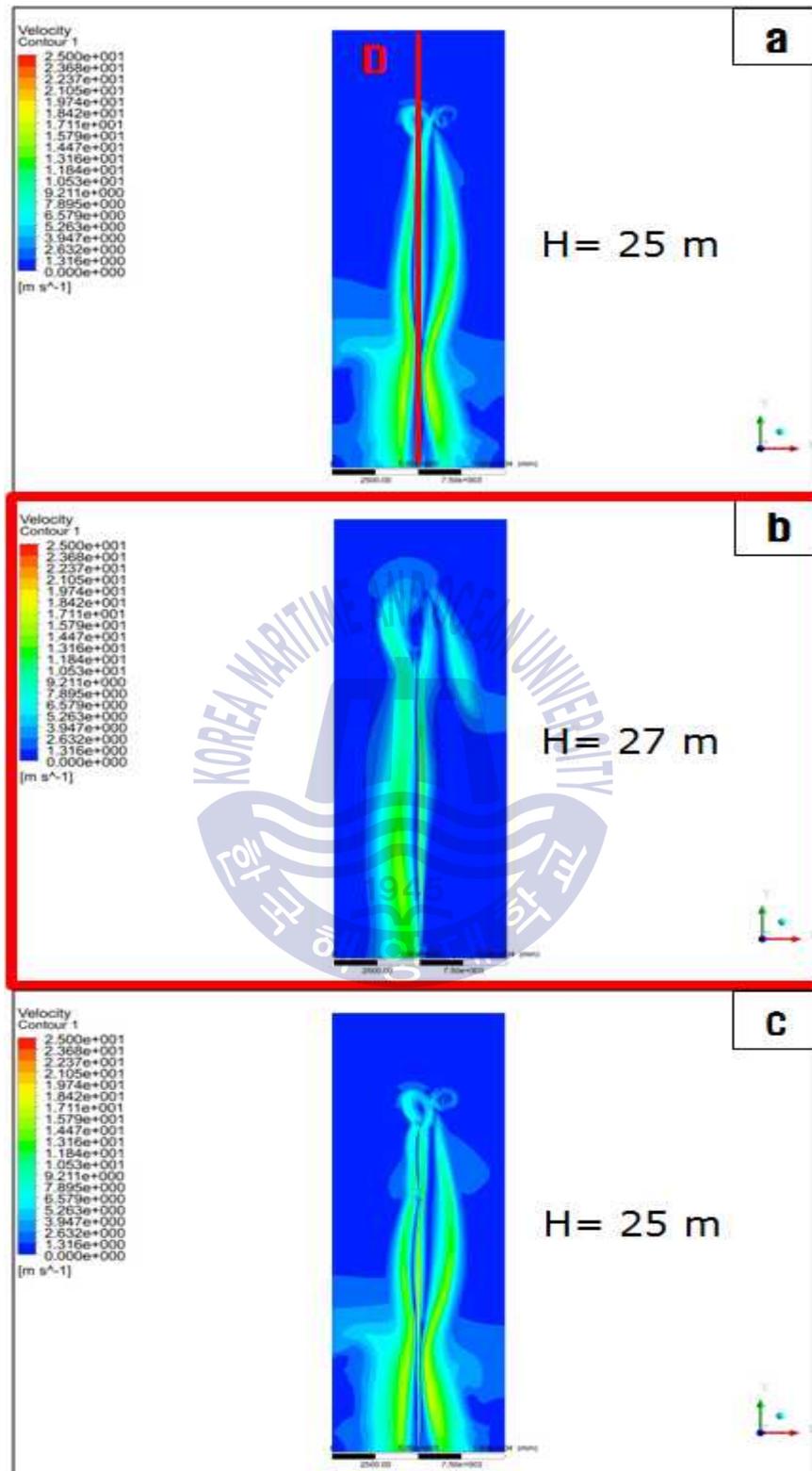


Fig. 86 Fluid Velocity Gradient of Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at a 90° Throw Angle

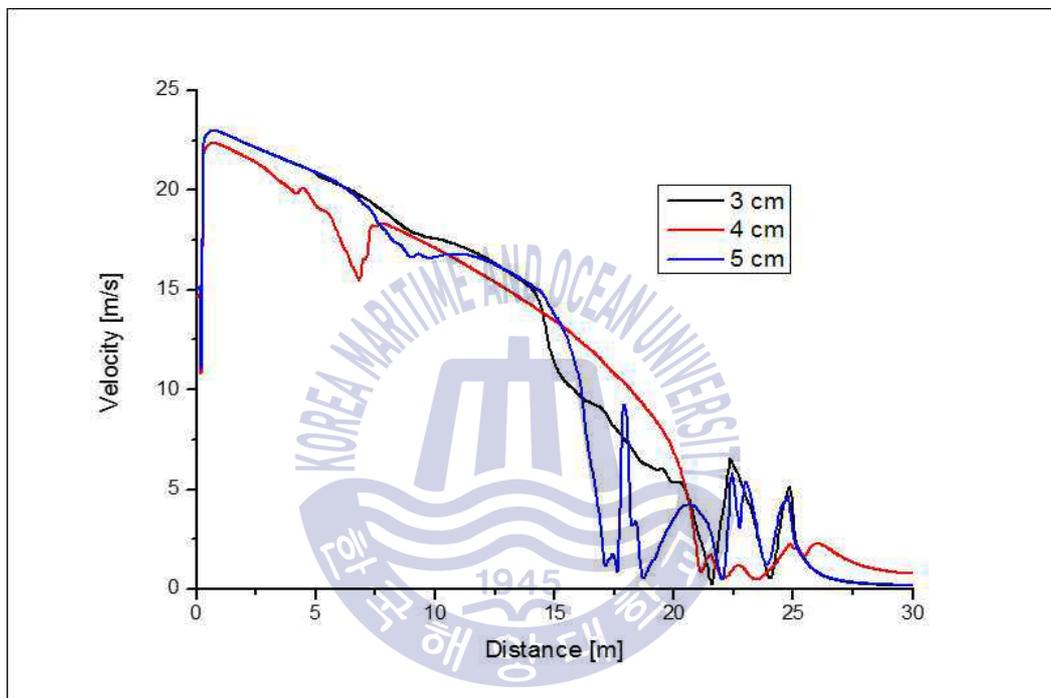


Fig. 87 Fluid Velocity Graph of Each Stabilizer at 90° Throw Angle

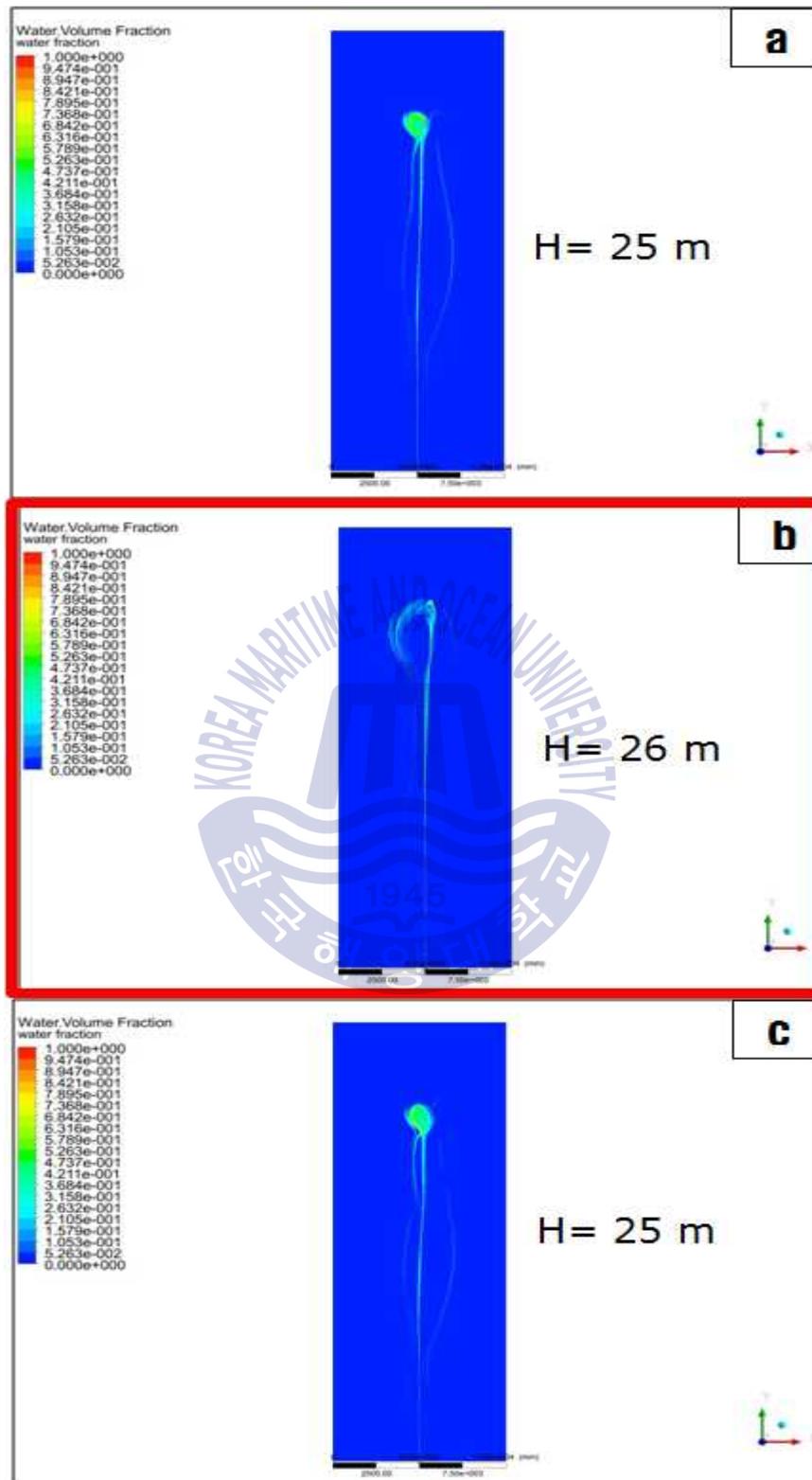


Fig. 88 Water Volume Fraction of Each Stabilizer(a: 3 cm, b: 4 cm, c: 5 cm) at 90° Throw Angle

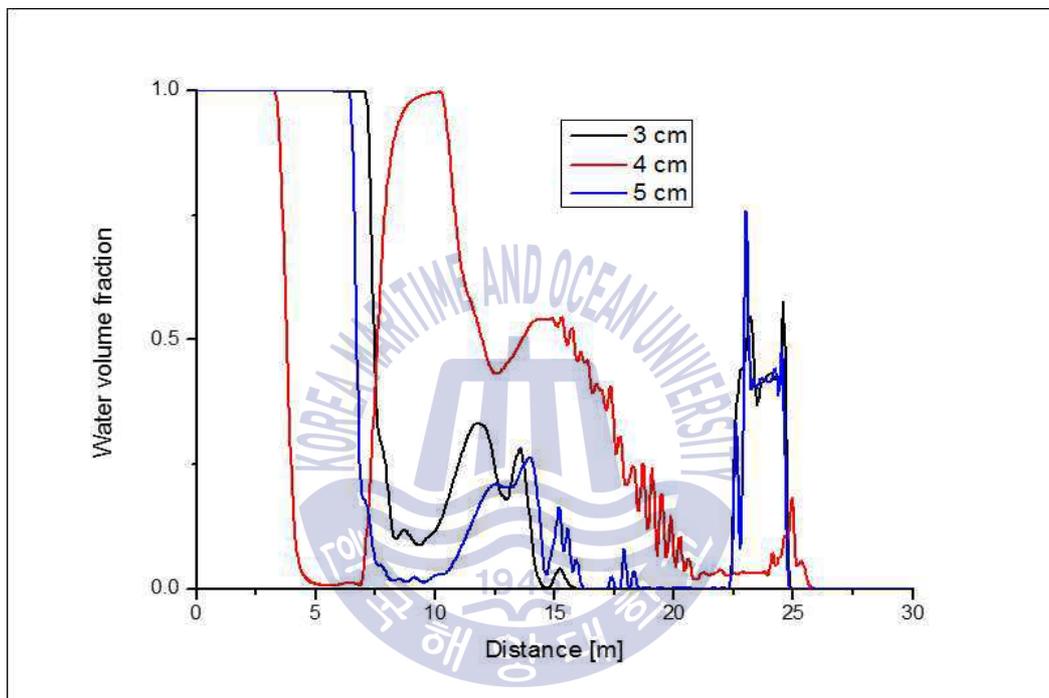


Fig. 89 Water Volume Fraction Graph of Each Stabilizer at 90°
Throw Angle

5.2 Mobile Water Monitor 구조해석

5.2.1 지지구조 구조건전성 검증을 위한 구조해석 결과

주어진 경계조건을 바탕으로 유체-구조 연성해석을 통하여 구해진 추력을 이용하여 응력과 안전율을 계산하기 위하여 구조해석을 하였다. 먼저 기본 설계된 Mobile Water Monitor에 대하여 구조해석을 진행하였다. 기본 설계된 모델의 구조해석 결과 발생하는 응력을 Fig. 90에, 그에 대한 안전율을 Fig. 91에 나타내었다. 해석 결과를 바탕으로 취약한 부품이라 판단되는 Support Leg의 부품 형상을 변경하여 동일한 조건을 사용해 구조해석을 진행하였다. Support Leg의 구조안전성을 높이기 위해 기존 3 mm이던 두께를 4 mm로 변경하여 해석한 결과의 응력을 Fig. 92에 안전율을 Fig. 93에 나타내었다.

Mobile Water Monitor의 안전율은 내압이 발생하는 관로 부분의 부품들은 성능유지 및 파손 방지를 위해 안전율을 3 이상으로 설정하였고, Support Leg에는 소화수 분사에 의한 반력이 크게 작용하고, 안전율을 높이면 Support Leg의 무게가 증가로 이동을 위해 바퀴 등을 설치해야하고 재료비가 증가하는 문제가 있을 수 있어 안전율을 2로 설정하였다. 즉, 안전율 3이란 Mobile Water Monitor 관로 각 부품의 허용응력을 기준응력(항복응력) 대비 33 % 까지만 허용한다는 의미이며, Support Leg는 기준응력(항복응력) 대비 50 % 까지만 허용한다는 의미이다.

이러한 해석은 유동-구조 연성해석을 통하여 구하여야하고, 해석은 상용프로그램인 ANSYS WorkBench를 사용하여 해석을 수행하였다.

기본 모델(Support Leg 두께 3 mm)과 변경 모델(Support Leg 두께 4 mm)에 대한 해석결과 기본 모델에서 최대 응력 113.650 MPa, 안전율 1.892로 Table 26과 같이 계산되었고, 변경 모델에서 최대 응력 81.565 MPa, 안전율 2.636으로 Table 27과 같이 계산되었다. 위와 같은 구조해석에 따라 기본 모델과 변경 모델에 대하여 구조안전성 평가의 모든 정량적 설계기준에 만족하는 모델로 판단된다.

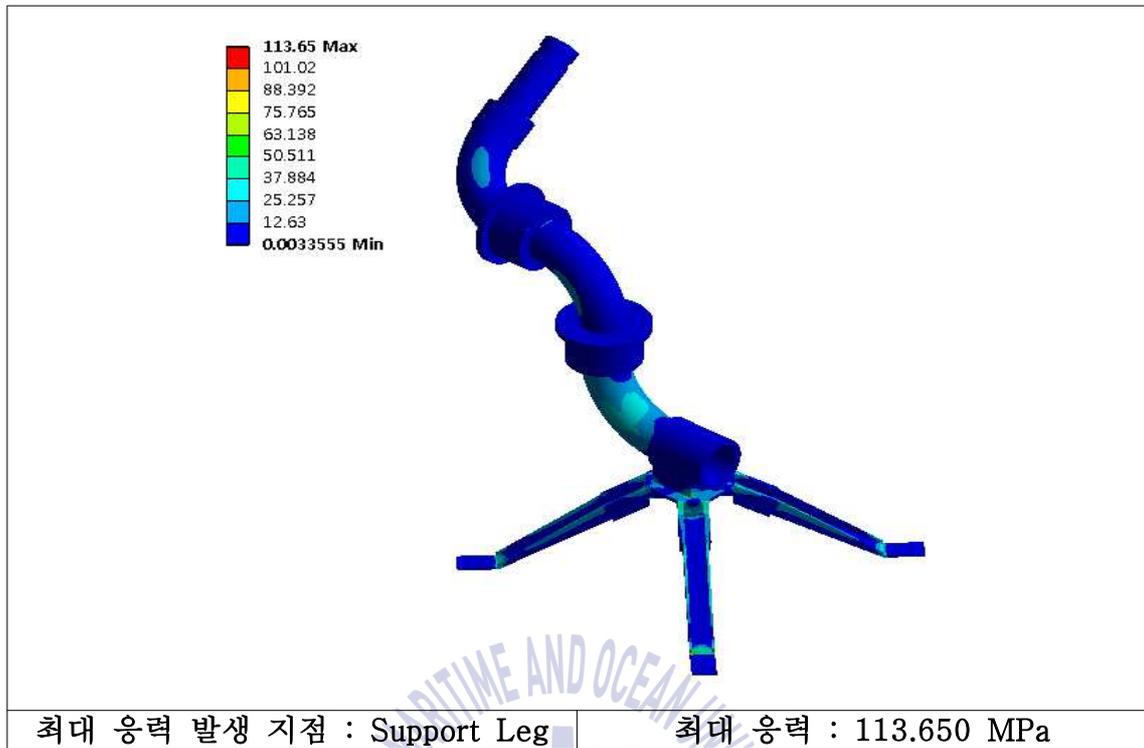


Fig. 90 Structural Analysis Results of the Basic Model (Stress)

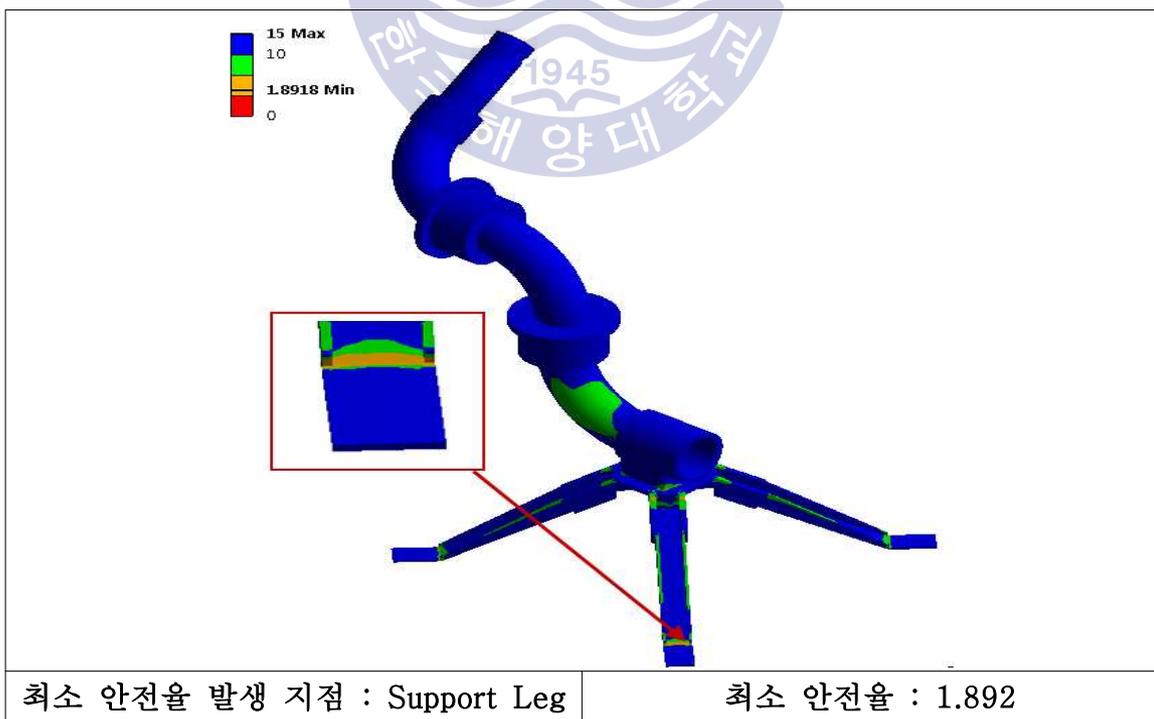


Fig. 91 Structural Analysis Results of the Basic Model (Safety Factor)

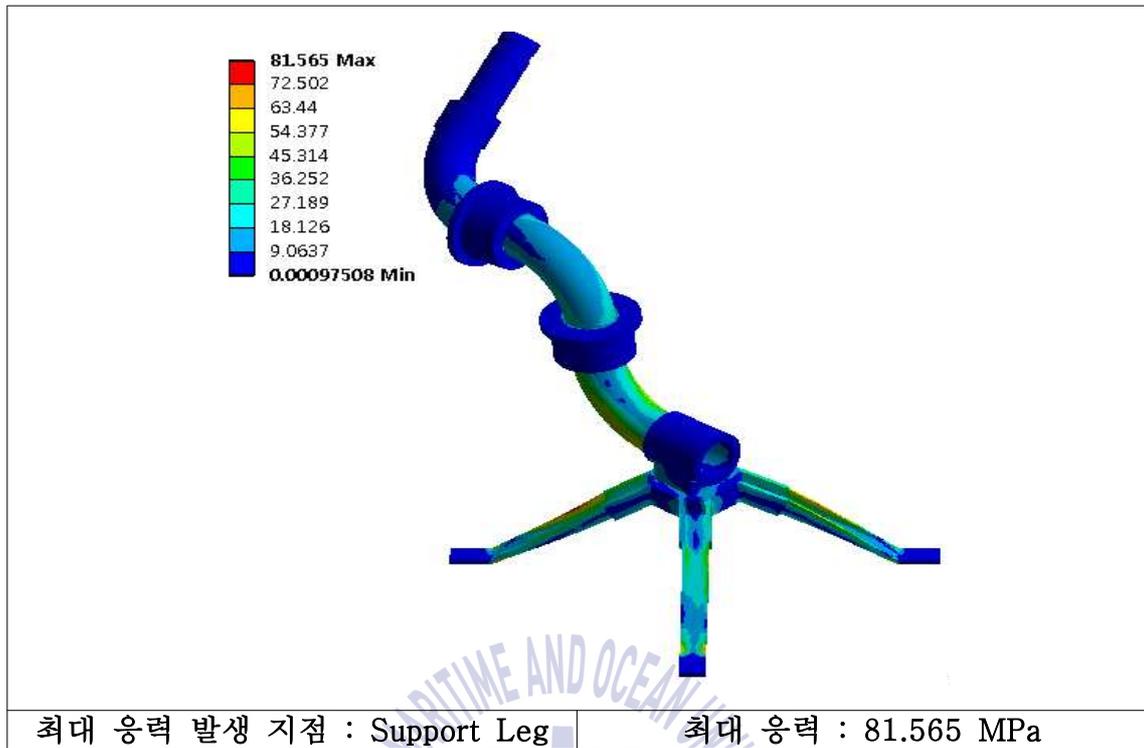


Fig. 92 Structural Analysis Result of Shape Change Model (Stress)

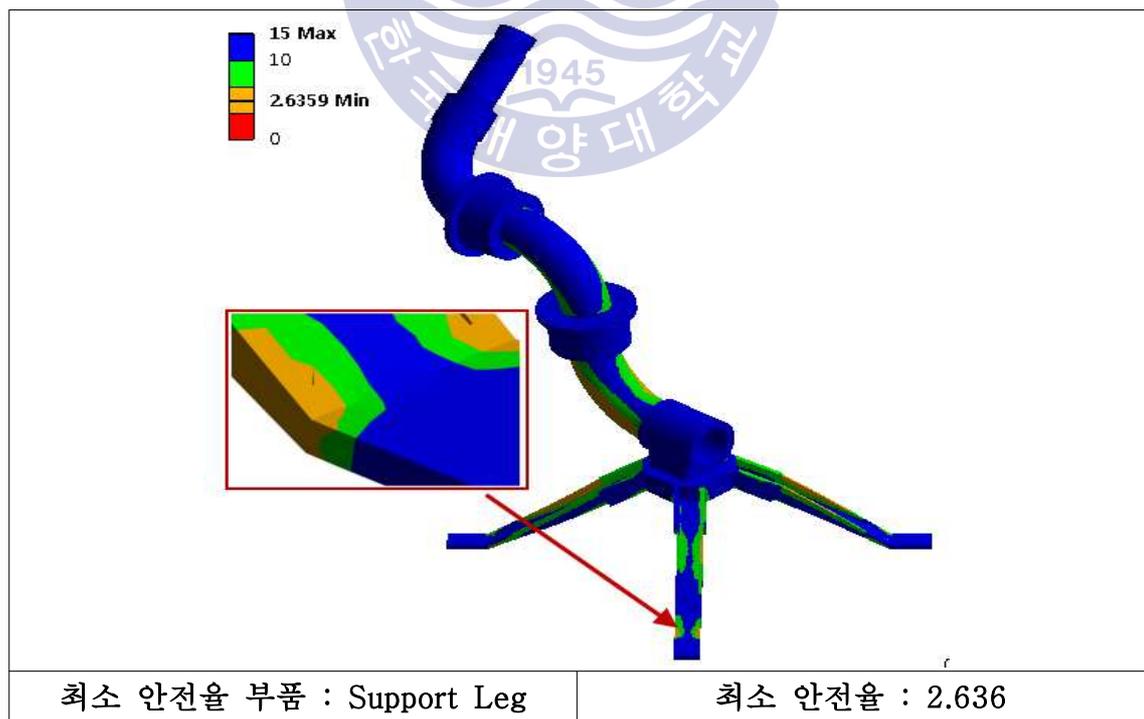


Fig. 93 Structural Analysis Result of Shape Change Model (Safety Factor)

Table 26 Structural Analysis Result of Basic Model

Part	Stress [MPa]	Safety Factor	Results
Elbow	62.783	3.425	OK
Inlet Connector	43.150	4.983	OK
Nozzle Connector	4.382	15.000	OK
Bearing	27.823	7.727	OK
Base Plate	45.553	4.720	OK
Support Leg	113.650	1.892	X

Table 27 Structural Analysis Result of Shape Change Model

Part	Stress [MPa]	Safety Factor	Result
Elbow	62.573	7.766	OK
Inlet Connector	43.038	4.995	OK
Nozzle Connector	4.3821	15.000	OK
Bearing	27.684	3.436	OK
Base Plate	40.992	5.245	OK
Support Leg	81.565	2.636	OK

5.3 Mobile Water Monitor 성능실험

5.3.1 Mobile Water Monitor용 Nozzle 제작

기본 Nozzle 모델에 대한 유동해석 결과를 반영하여 Nozzle Orifice 직경을 각각 22 mm, 23 mm, 23.4 mm, 24 mm, 25 mm, 26.9 mm, 27 mm, 28 mm, 29 mm, 30 mm로 하여 10개를 제작하였다.

동아대학교가 운영하고 있는 “고기능성밸브 기술 지원센터”에 설치되어 있는 펌프, 전자식 압력계(Pressure Transmitter) 및 전자식 유량계를 이용하여 Nozzle에 대한 유량계수 측정 실험을 실시하였다.

다만, “고기능성밸브 기술 지원센터”에 설치되어 있는 배관은 125A인 반면, Nozzle이 설치될 Mobile Water Monitor의 직경은 50A~65A이므로, Mobile Water Monitor용 배관과 기존의 배관을 연결해 줄 수 있는 Jig(125A→50A)를 제작하여 Nozzle에 대한 유량계수를 측정하였다.

5.3.1.1. 유량계수 설계 기술 개발

정확한 유량계수의 측정을 위하여 압력은 0 bar에서 10 bar까지 순차적으로 압력을 증가시키고, 다시 0 bar 까지 순차적으로 압력을 감소시키면서 유량을 계측하여 유량계수 K를 계측하였다.

Fig. 94 ~ Fig. 103은 제작된 Nozzle을 이용하여 실제 계측된 압력, 유량 및 유량계수를 나타낸 것이다. 다만, 실제 계측된 값으로부터 계산한 유량계수 K는 압력의 상승 및 하강 시에 매우 크게 변동되는 것을 알 수 있는데, 이는 전자식 압력계와 유량계의 반응시간(Response Time)의 차이에 의한 것으로 계측 결과를 검토해보면 2~3초 정도의 반응시간 차이가 존재한다는 것을 알 수 있다.

이를 고려하여 비정상적으로 높거나 낮은 유량계수를 가지는 구간을 Filtering하여 최종적인 유량계수 그래프를 Fig. 94(d) ~ Fig. 103(d)와 같이 얻을 수 있었다.

노즐에 대한 유량 성능실험 방법은 1) 압력계를 부착한 소화수 공급파이프에 실험용 노즐을 부착한 후 최저 사용압력에서 최고 사용압력까지 약 10 % 간격의 각 압력 단계별로 소화수 유량을 측정하며, 1회에는 압력을 올리면서 2회에는 압력을 내리면서 유량을 측정한다. 실험용 노즐은 2개로 한다. 2) 최저 사용압력에서 최고 사용압력까지 약 10 % 간격의 각 압력단계에서의 유량계수 K를 다음 식에 따라 산정한다.

$$K = \frac{Q}{P^{0.5}} \quad (5.1)$$

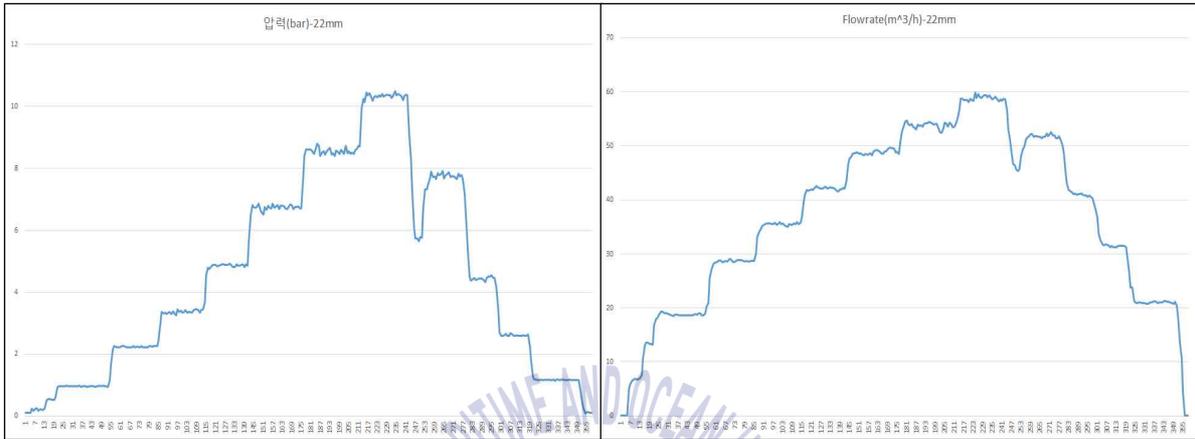
이 식에서, P는 압력(bar), Q는 유량(l/min)이다.

성능기준은 2개의 노즐에 대하여 각각 압력단계별로 실험하여 산정한 유량계수 K의 평균치가 실험장치의 $\pm 5\%$ 이내로 규정하고 있다[IMO, 1994].



Pressure(bar) at 22mm

Flowmeter(m³/h) at 22mm

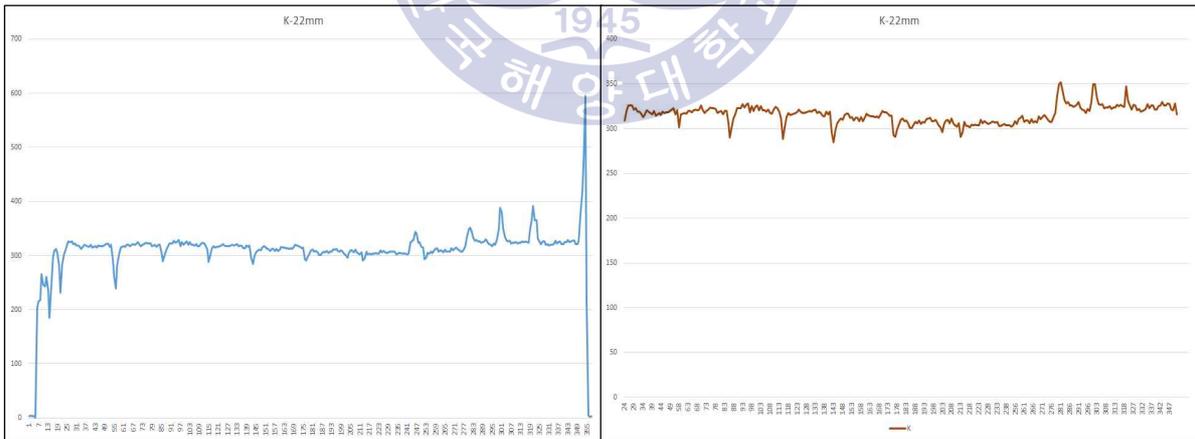


a. Pressure

b. Flow rate

K-Factor at 22mm

K-Factor at 22mm



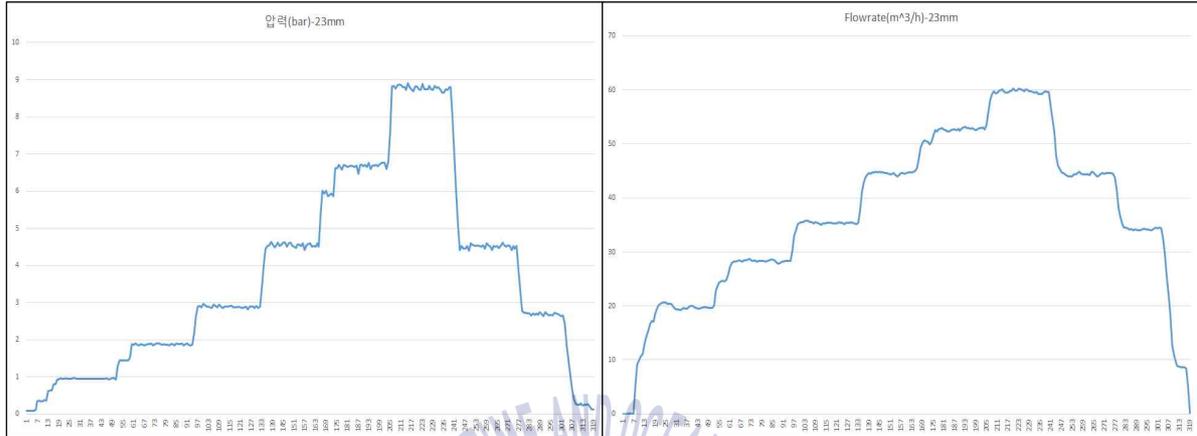
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 94 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 22mm)

Pressure(bar) at 23mm

Flowmeter(m³/h) at 23mm

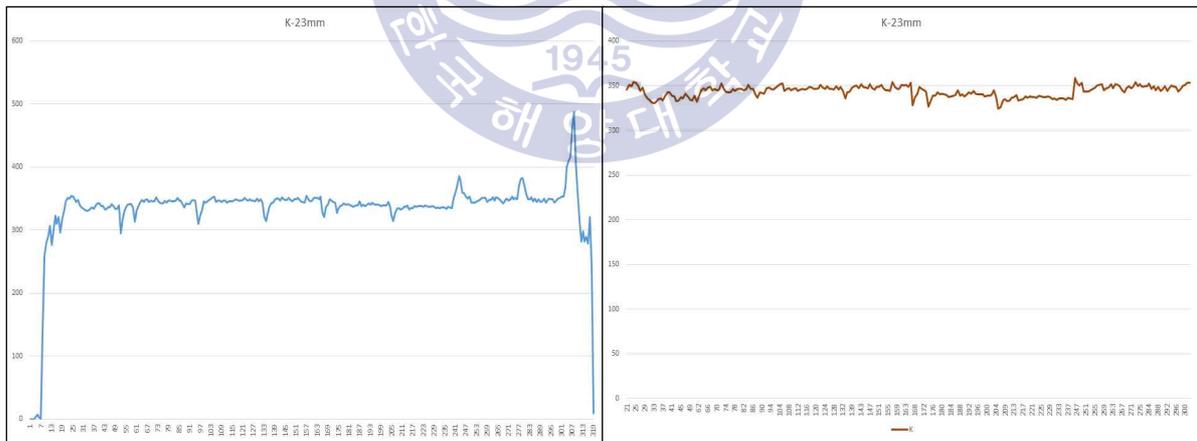


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 23mm

K-Factor at 23mm



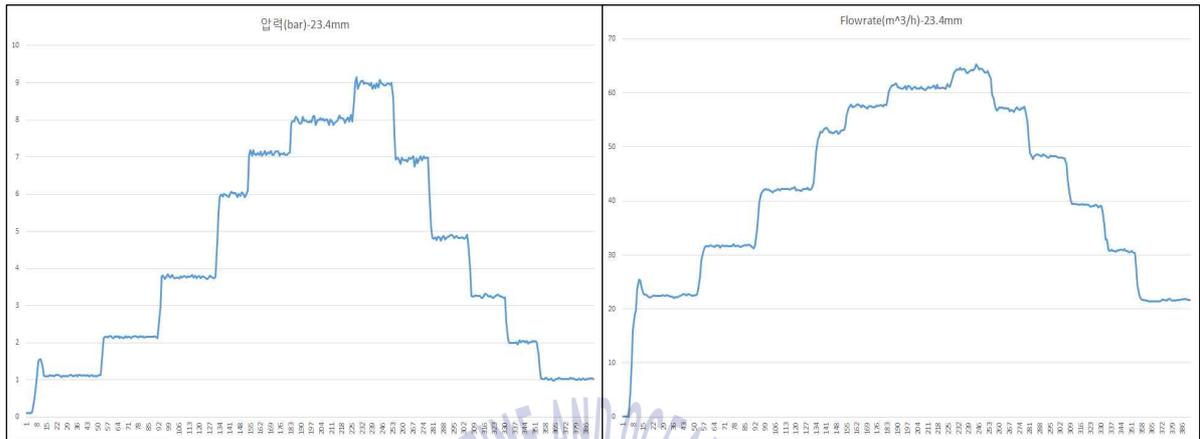
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 95 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 23mm)

Pressure(bar) at 23.4mm

Flowmeter(m³/h) at 23.4mm

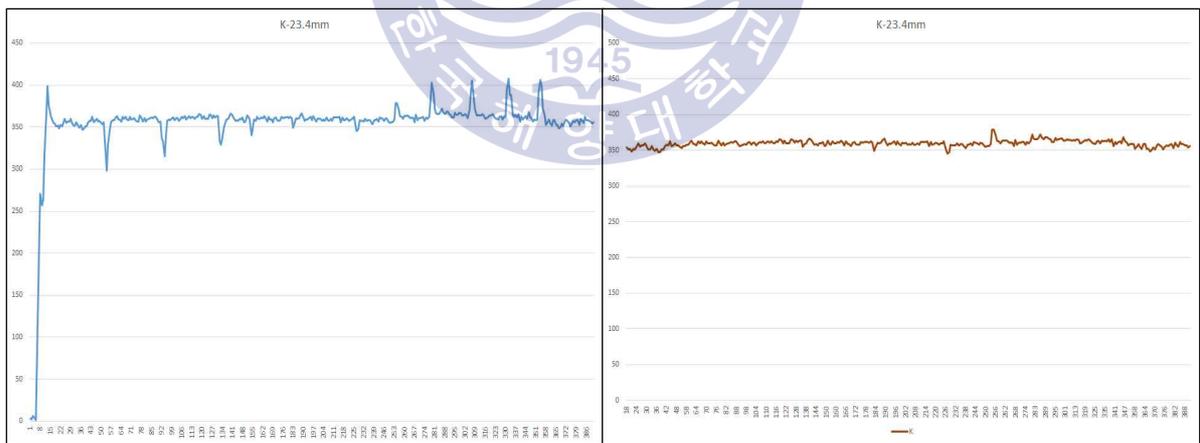


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 23.4mm

K-factor at 23.4mm



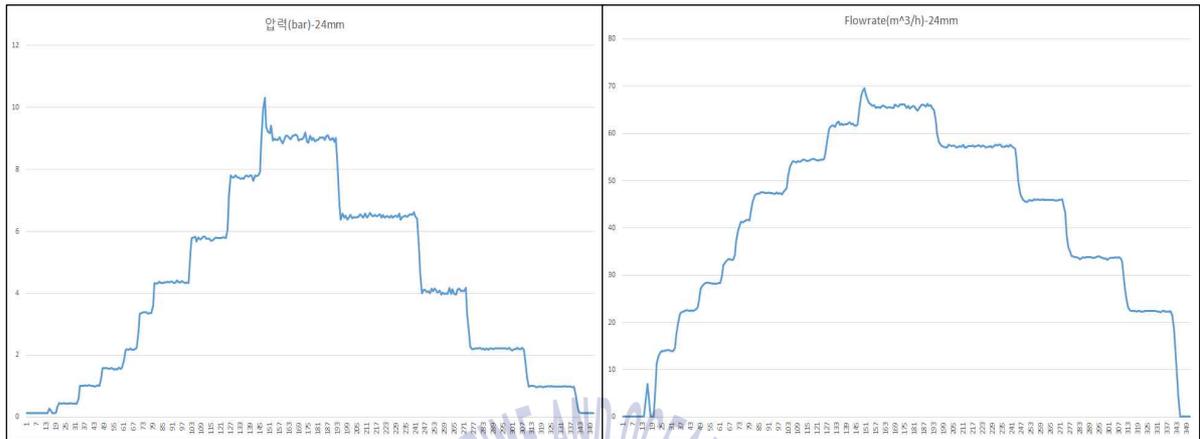
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 96 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 23.4mm)

Pressure(bar) at 24mm

Flowmeter(m³/h) at 24mm

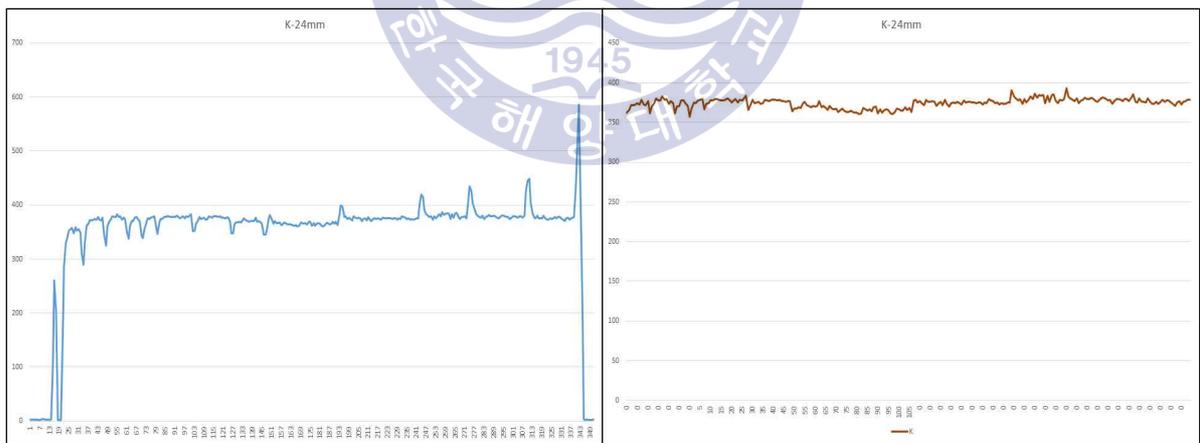


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 24mm

K-factor at 24mm



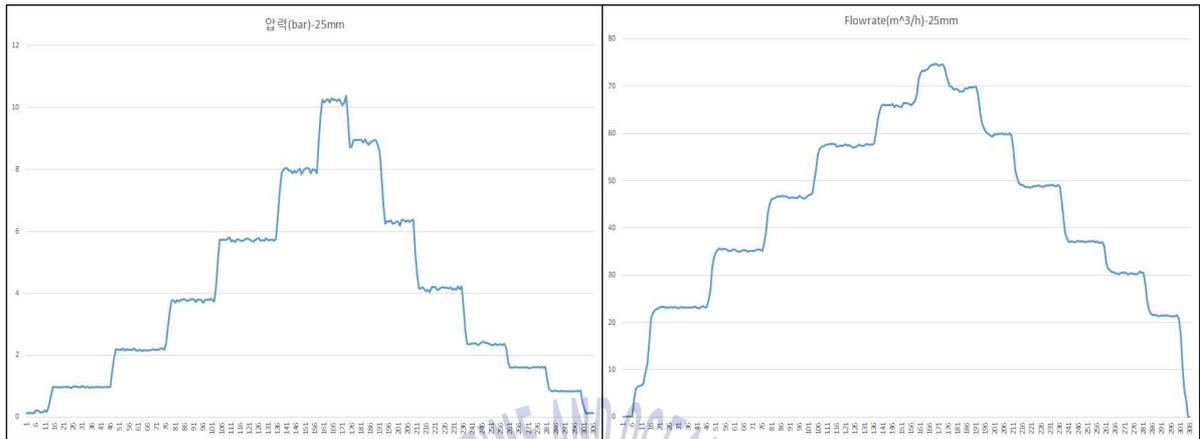
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 97 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 24mm)

Pressure(bar) at 25mm

Flowmeter(m³/h) at 25mm

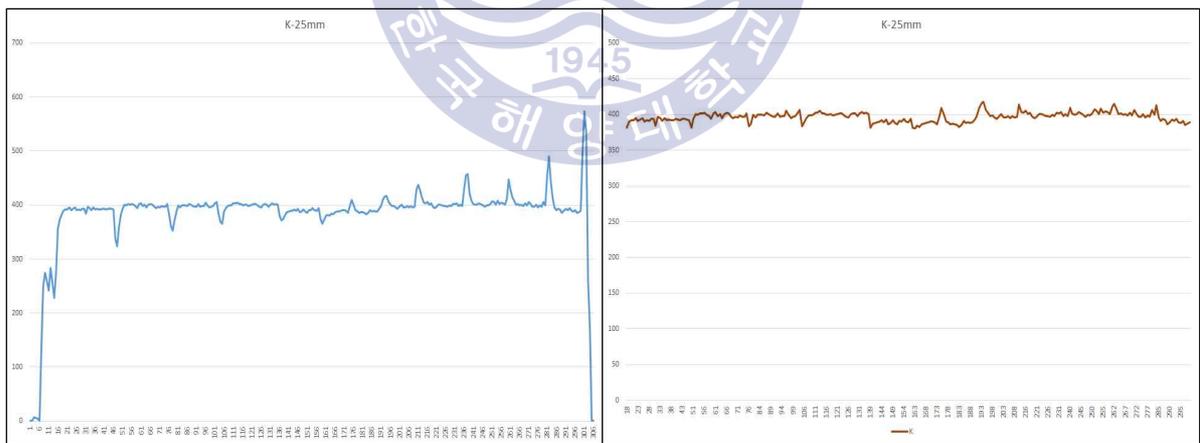


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 25mm

K-factor at 25mm



c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 98 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 25mm)

Pressure(bar) at 26.9mm

Flowmeter(m³/h) at 26.9mm

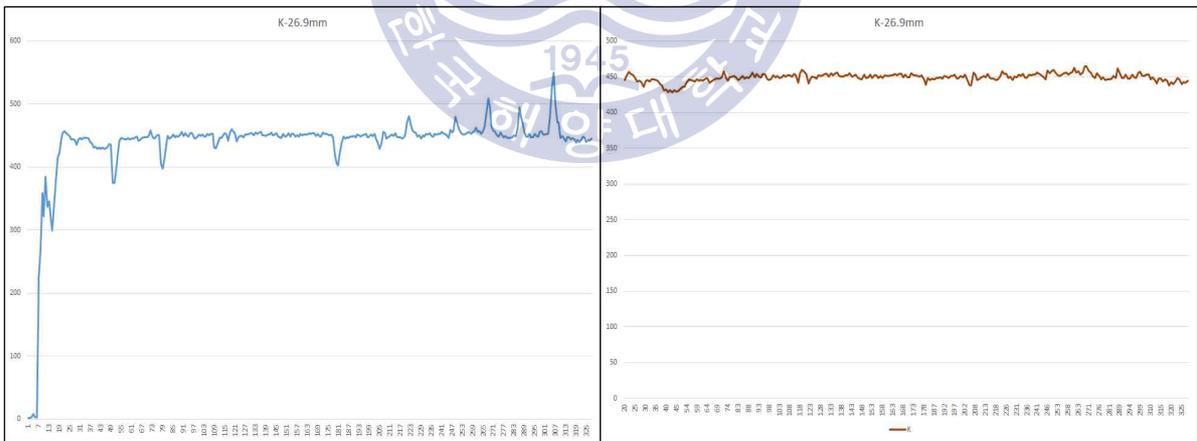


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 26.9mm

K-factor at 26.9mm



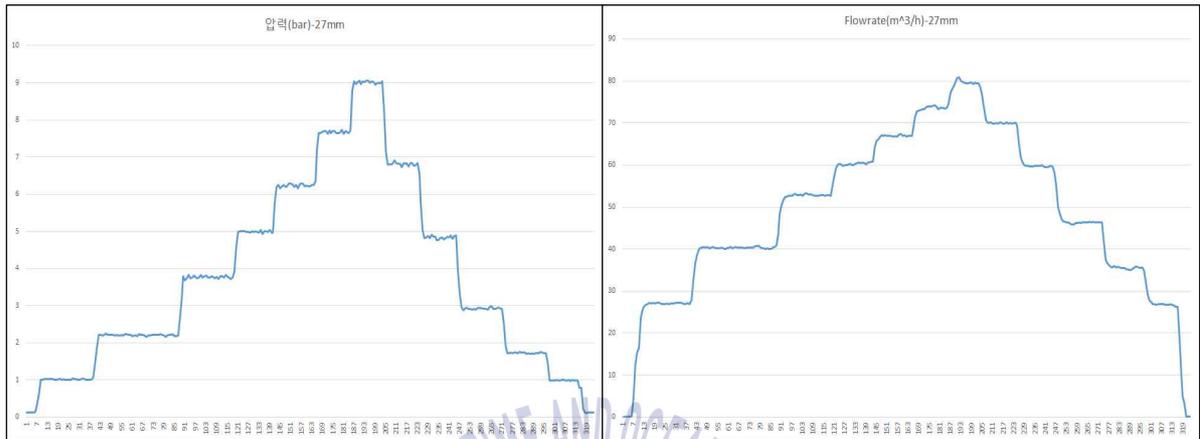
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 99 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 26.9mm)

Pressure(bar) at 27mm

Flowmeter(m³/h) at 27mm

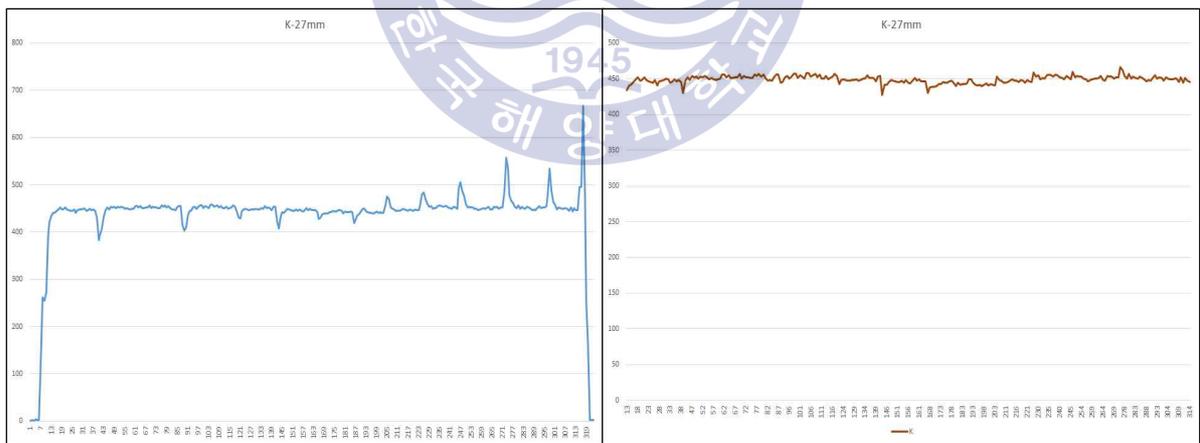


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 27mm

K-factor at 27mm



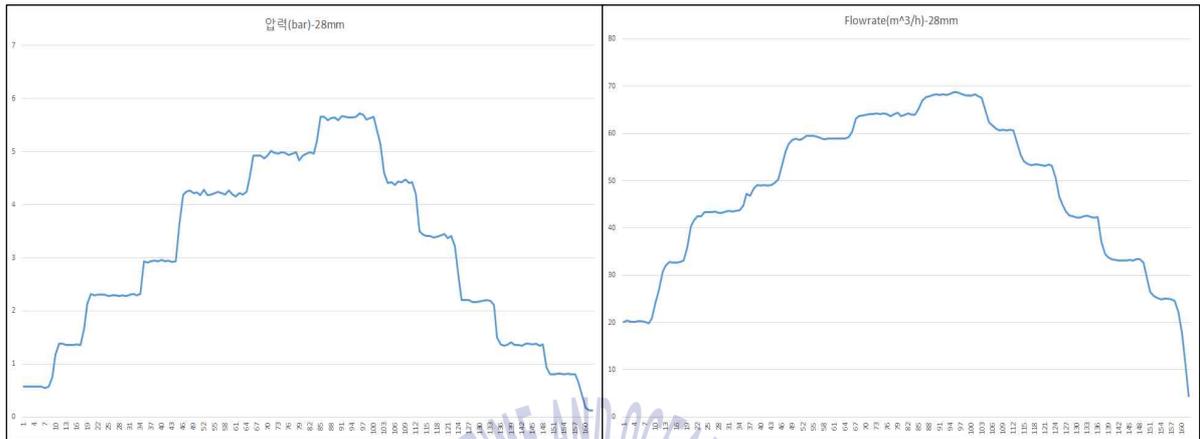
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 100 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 27mm)

Pressure(bar) at 28mm

Flowmeter(m³/h) at 28mm

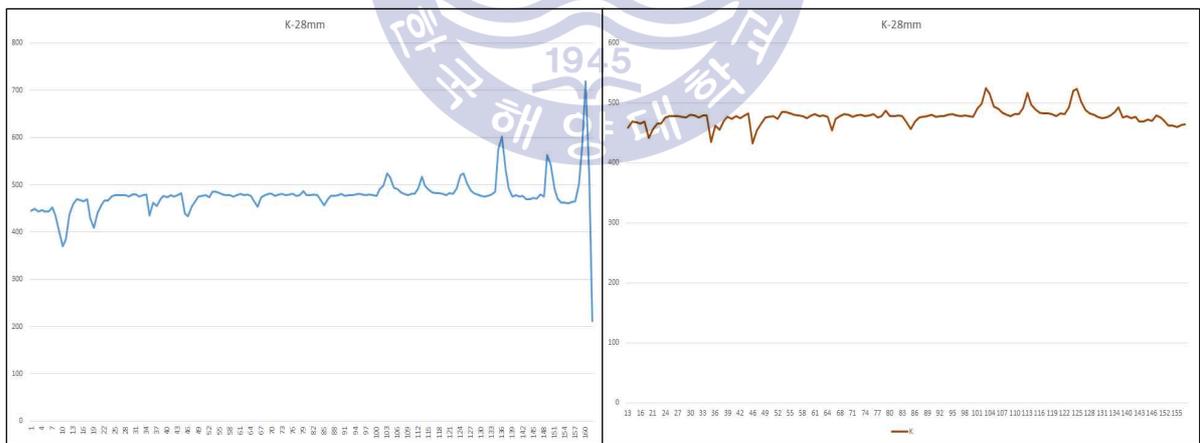


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 28mm

K-factor at 28mm



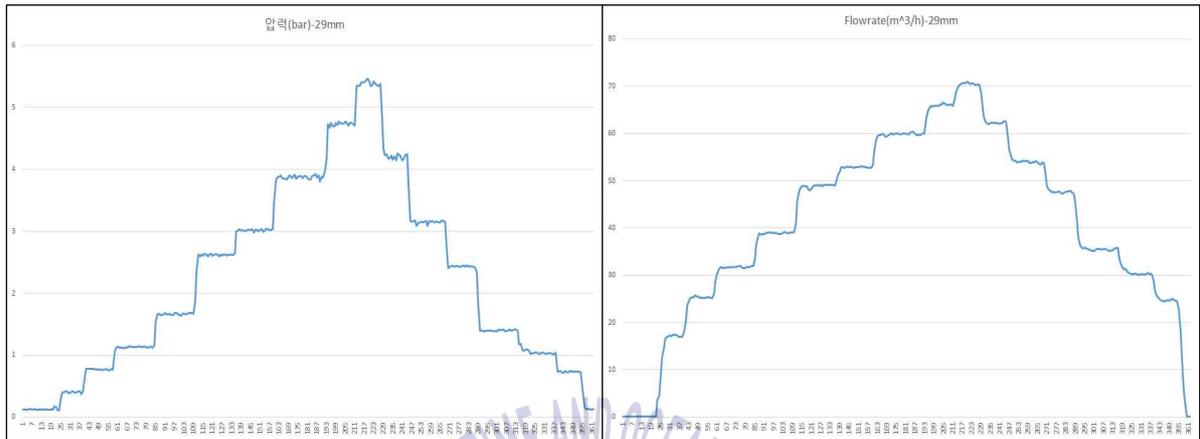
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 101 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 28mm)

Pressure(bar) at 29mm

Flowmeter(m³/h) at 29mm

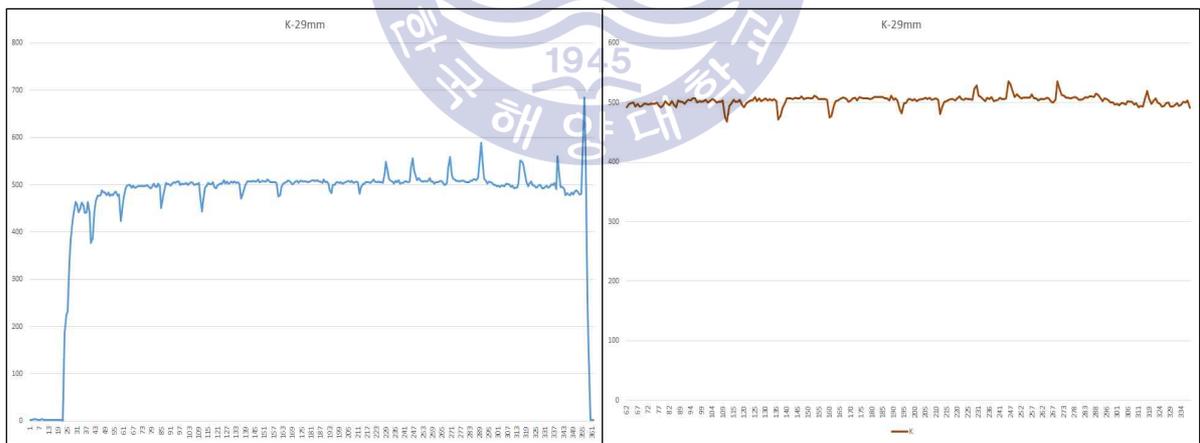


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 29mm

K-factor at 29mm



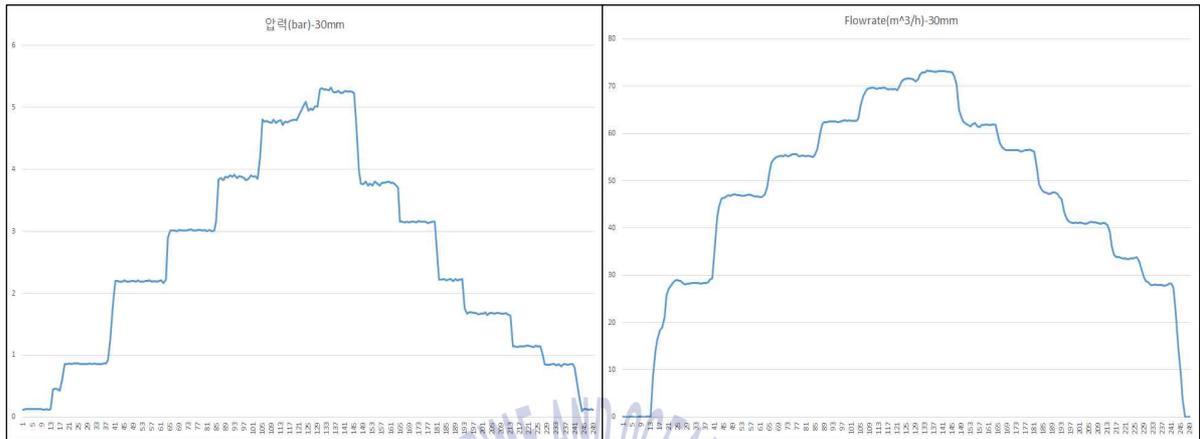
c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 102 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 29mm)

Pressure(bar) at 30mm

Flowmeter(m³/h) at 30mm

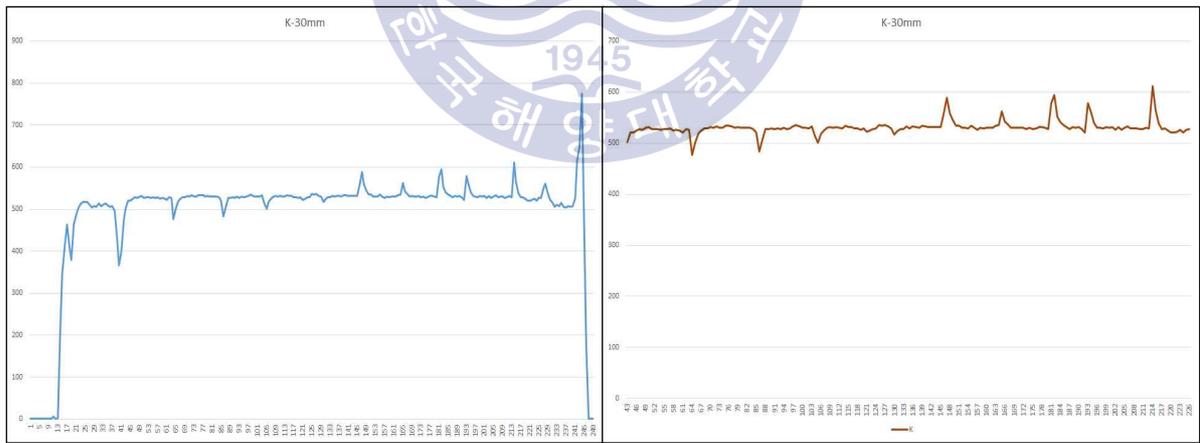


a. Pressure

b. Flow rate

K-factor at 30mm

K-factor at 30mm



c. Flow coefficient

d. Flow coefficient(Filtering)

Fig. 103 Measurement Results Using Prototype(Nozzle Orifice Dia. 30mm)

10개의 Nozzle에 대해 Fig. 94(d) ~ Fig. 103(d)와 같이 Filtering 된 유량계수 Chart를 완성하고, 전체의 압력범위에 대한 유량계수의 평균값을 해당 Nozzle의 유량계수로 결정하였으며, 그 결과는 Table 28과 같다.

Table 28을 이용하여 유량계수와 Orifice Diameter를 각각 X축 및 Y축으로 하여 Chart를 그려보면 Fig. 104와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 선형회귀를 하면 상관계수 R^2 이 0.9984로서 매우 잘 수렴한다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 Fig. 104에 나타나 있는 선형회귀 방정식을 Nozzle의 유량계수 설계 기준으로 확립하였다.

또한, 확정된 유량계수 예측 기준에 따라 Table 29와 같이 본 논문에서 목표로 하고 있는 Nozzle의 사용압력 범위(4~9 bar)에 대한 각 Nozzle Orifice Dia.를 결정하였다.



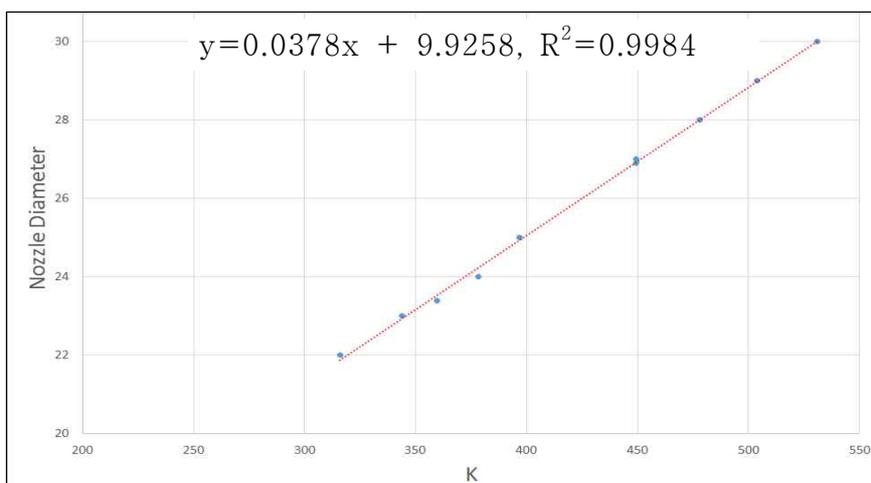


Fig. 104 Nozzle Flow Coefficient Estimation Criteria

Table 28 Nozzle Prototype's Flow Coefficient Based on Measurement Results

Orifice Diameter(mm)	유량계수(K)
22.0	316
23.0	343.8
23.4	359.7
24.0	378.4
25.0	396.7
26.9	449.3
27.0	449.3
28.0	478
29.0	504
30.0	531

Table 29 Nozzle Orifice Dia. Using The Flow Coefficient Prediction Standard

Q(lpm)	P(bar)	K(Q/P0.5)	A	B	D	D'
1000	9.0	333.3333	0.0378	9.9258	22.5258	22.6
1000	8.0	353.5534	0.0378	9.9258	23.29012	23.3
1000	7.0	377.9645	0.0378	9.9258	24.21286	24.3
1000	6.0	408.2483	0.0378	9.9258	25.35759	25.4
1000	5.0	447.2136	0.0378	9.9258	26.83047	26.9
1000	4.0	500.0000	0.0378	9.9258	28.8258	28.9

5.3.1.2. Mobile Water Monitor 제작 및 성능실험

Mobile Water Monitor의 주요 구성품은 Nozzle, Spray Shield, Elbow, Bearing, Locking Device, Inlet Connection, Support이며, 성능실험을 위해 각 구성품에 대한 설계를 바탕으로 Mobile Water Monitor를 제작하였다.

다만, 최초 설계는 Fig. 105와 같이 작동 시 베어링을 고정시켜주는 Locking Device로 Locking Bolt를 적용하였으나, 성능실험 중 유체의 유동에 의한 회전 Moment에 비해 Locking Bolt의 Locking Load가 작다는 문제점이 발견되어, 이를 Fig. 106과 같이 Locking Pad로 변경하여 Mobile Water Monitor를 제작하였다.

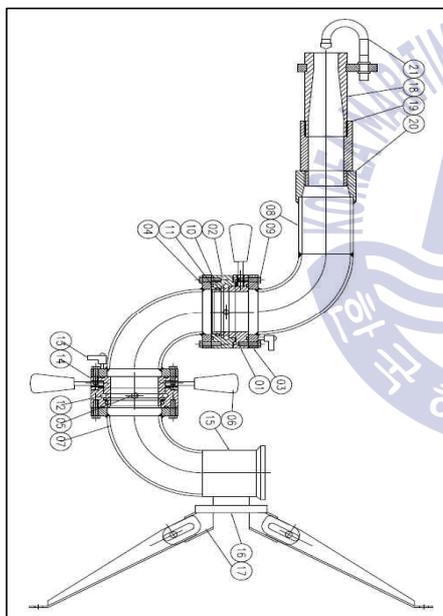


Fig. 105 1st Prototype Design(Locking Bolt Application)

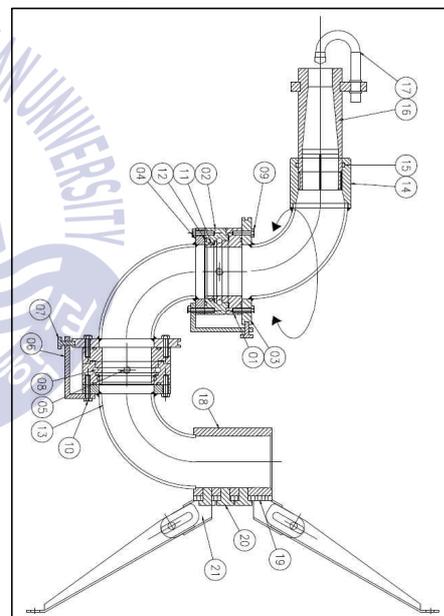


Fig. 106 2nd Prototype Design (Locking Pad Application)

Fig. 107은 1차 Prototype 모습을 나타내었으며, 정류자를 고려하여 S자 곡선의 형태로 완성하였다. 또한, Mobile Water Monitor 본체가 Nozzle로부터 유체 분사 시 발생하는 반력에 의해 넘어지거나 이동하는 것을 방지하기 위하여 선박의 Deck Plate에 Support Leg 부분이 안정적으로 고정될 수 있도록 하였다.



Fig. 107 1st Prototype of Mobile Water Monitor

Table 30은 제작된 Mobile Water Monitor를 대상으로 수평 방사거리를 측정한 결과이며, Fig. 108 ~ Fig. 110은 Test Bed를 구성하여 성능실험 하는 모습을 나타내었다.

Table 30 Results of Horizontal Throw Length Measurement Using Prototype

Nozzle Model	Inlet Pressure (bar)	Flow Rate (m ³ /h)	Ditch. Angle (deg.)	Ditch. Distance (m)
N-4	4	60	35	47
N-5	4	53.7	35	49.4
N-6	4	49	35	51.1
N-7	4	45.4	35	51.6
N-8	4	42.4	35	51.8
N-9	4	40	35	52.2



Fig. 108 Setting Prototypes for Horizontal Throw Length Test



Fig. 109 Spray Performance Test of Mobile Water Monitor



a. Lateral direction



b. Longitudinal direction

Fig. 110 Horizontal Throw Length Measurement

5.3.2 Mobile Water Monitor 성능실험(분사거리 및 분사높이)

5.3.2.1 Mobile Water Monitor 1차 성능실험

Fig. 111 및 Fig. 112에 1차 Prototype 성능 시험을 모습을 나타내었다. 펌프 용량, 분사각도 및 분사거리를 고려하여 테스트 베드를 구성, 성능실험을 실시하였다.

그 결과, 3 bar ~ 7 bar까지 Test를 진행하였으나 Mobile Water Monitor의 배관이 한쪽 방향을 치우쳐져 있다는 구조적인 문제점 때문에 상당한 추력 (Thrust Force)과 회전 모멘트가 발생하게 되는 단점이 있었으며, 이로 인해 지면에 안정적으로 고정시키기가 쉽지 않은 문제점이 있었다.

따라서, 1차 성능실험을 바탕으로 Mobile Water Monitor용 Hose 및 Hose Connector Type을 변경하여 2차 성능실험을 실시하였다.

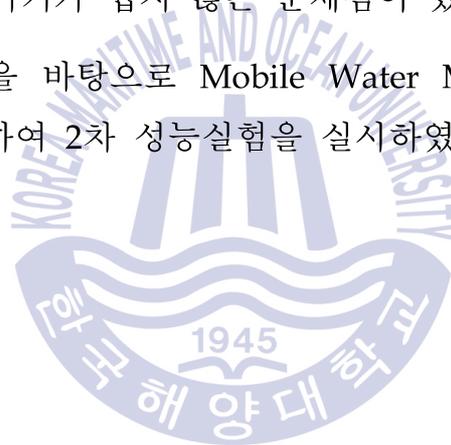




Fig. 111 Setting of 1st Prototype Mobile Water Monitor



Fig. 112 Performance Test of 1st Prototype Mobile Water Monitor

5.3.2.2 Mobile Water Monitor 2차 성능실험

Fig. 113 및 Fig. 114에 2차 성능실험을 모습을 나타내었다. 1차 성능실험과 마찬가지로 펌프용량, 분사각도 및 분사거리를 고려하여 Test-Bed를 구성하였다.

그 결과, 최초 압력이 올라가면서 Mobile Water Monitor의 안정성에 대한 문제가 보완되지 않아 Operator가 Mobile Water Monitor 본체를 잡은 상태에서 성능실험이 진행되었다.

따라서, 1차, 2차 성능실험 결과를 바탕으로 기존 설계에 의해 제작된 Mobile Water Monitor는 구조적으로 불안정성을 내포하고 있다고 판단되어, 배관의 구조 변경, Support Leg의 형상변경 등을 통해 추력과 회전 모멘트를 최소화 할 수 있도록 재설계하여 3차 성능실험을 추진하였다.





Fig. 113 Setting of 2nd Prototype Mobile Water Monitor



Fig. 114 Performance Test of 2nd Prototype Mobile Water Monitor

5.3.2.3 Mobile Water Monitor 설계 변경 및 3차 성능실험

1차, 2차 성능실험을 통해 Mobile Water Monitor의 중심점 즉, 물이 분사되는 부분이 위쪽으로 설계되어 있어서 불안전했던 부분을 보완하여 바닥 부분에서 본체의 중심 부분이 형성될 수 있도록 설계를 최대한 낮게 변경하였다.

Fig. 115는 1, 2차 성능실험을 통해 발견된 문제점을 개선하여 설계한 Mobile Water Monitor의 3D 모델을 나타내었다. Mobile Water Monitor는 크게 Valve Part와 Support Part로 구성되어 있으며, Valve Part로 유체가 유입되어 강한 압력이 작용하며, 강한 압력에 의한 추력을 Support Part에서 지지하는 작동 형태를 보인다. 3차 Prototype 제작을 위해 설계 변경된 Mobile Water Monitor의 Valve Part와 Support Part의 구조안전성을 검토하고 설계 검증을 진행하였다. 해석의 효율성 및 정확도를 높이기 위하여 연결부의 Bolt 및 Stopper Pin 등은 모델에서 제외하였으며, 구성품 중 Ball Bearing을 적용하여 구조물의 형태를 자유롭게 변경할 수 있으나, 작동 유체에 의하여 하중이 가장 많이 작용하는 형태를 고려하여 모델링 및 해석을 진행하였다.

Fig. 116에는 설계 변경된 Mobile Water Monitor의 유한요소 모델을 나타내었다. 유한요소 모델에 사용된 Node의 개수는 178,815개이며, Element의 개수는 214,706개이며, Table 31에 상세히 나타내었다. Mobile Water Monitor에 사용된 재료는 SUS316L이며 재료에 대한 상세한 기계적 재료 물성은 Table 32에 나타내었다.

Fig. 117 ~ Fig. 118에 Mobile Water Monitor에 적용된 고정 경계조건을 나타내었다.

Mobile Water Monitor는 Valve Part에서 물을 분사하여 화재 발생 시 사용되며, 물 분사를 위하여 입구부분은 호스와 연결되어 있으며, Support 하부의 Support Leg Pin이 선체 하부에 고정되어 체결된다. 따라서 호스와 연결되는 부분의 앞뒤 방향 자유도를 구속하였으며, 선체와 체결되는 Support Leg Pin 부분의 모든 방향의 자유도를 구속하였다.

Fig. 119는 Mobile Water Monitor 하중 경계조건을 나타낸 그림이다. Valve

Part의 내부에 작동 유체가 유입되어 내압이 작용하며 Working Pressure의 최고 압력인 24 bar(작동압력에 150% 안전율을 적용)를 적용하여 해석을 진행하였다. 실제 Inlet에서 24 bar를 적용하면 유체의 이동 방향에 따라 압력 차에 의하여 압력이 실제적으로 감소하는 경향을 보이지만 구조물의 안전성을 고려하여 모든 방향에 내압이 24 bar 작용한다고 가정하여 해석을 진행하였다.

Fig. 120 ~ Fig. 125에 Mobile Water Monitor의 내압해석 결과를 나타내었다. Mobile Water Monitor의 최대 변형은 2.47 mm로 구조물의 총 길이에 비하여 미비한 변형이므로 구조안전성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, 최대 응력은 약 154.7 MPa이 발생하였으며, 허용응력이 205 MPa보다 낮으므로 Mobile Water Monitor는 구조적으로 안전하다고 판단된다.

각 Part별로 해석 결과를 검토하면 Valve Part의 최대 변형은 2.47 mm이며, 물이 분사되면서 압력이 작용하는 Spray Shield Stem과 Cock 부위에서 발생한다. 최대응력은 약 154.7 MPa이 Pipe 내부에서 곡률로 발생하는 모멘트에 의하여 발생하였으나, 허용응력이 205 MPa 보다 낮으므로, Valve Part는 구조적으로 안전할 것으로 판단된다.

Support Part의 최대 변형은 0.52 mm이며, Valve Part를 고정하는 위치에서 발생하며, Valve Part에 내압이 작용하며 발생하는 추력에 의하여 최대 변형이 발생한다. 최대 응력은 약 128.9 MPa이 Support Part 하부의 지지구조에서 발생하며, Valve Part 추력에 의하여 발생하는 변형에 의하여 압축이 발생하며 최대응력이 발생한다.

하지만 Support Part의 허용응력이 205 MPa보다 낮으므로, Support Part는 구조적으로 안전하다고 판단된다. Mobile Water Monitor의 각 Part에 대한 구조해석 결과는 Table 33에 정리하였다.

성능실험 결과, 4 bar 기준 분사거리 및 분사유량은 정량적 목표에 가깝게 도달하였으며, 현재까지 진행한 Test 결과 중 안정성, 분사거리 및 분사유량이 최적으로 나타났음을 확인하였고 이를 바탕으로 구조적으로 설계 변경한 부분이 목표수준에 도달하였음을 확인하였다. Fig. 126 ~ 127은 성능실험 모습을 나타내었다.

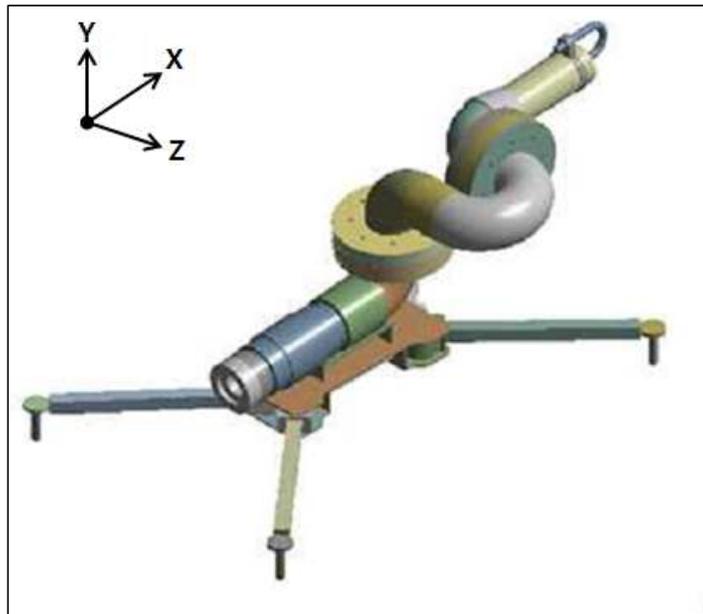


Fig. 115 3D Modeling of Mobile Water Monitor

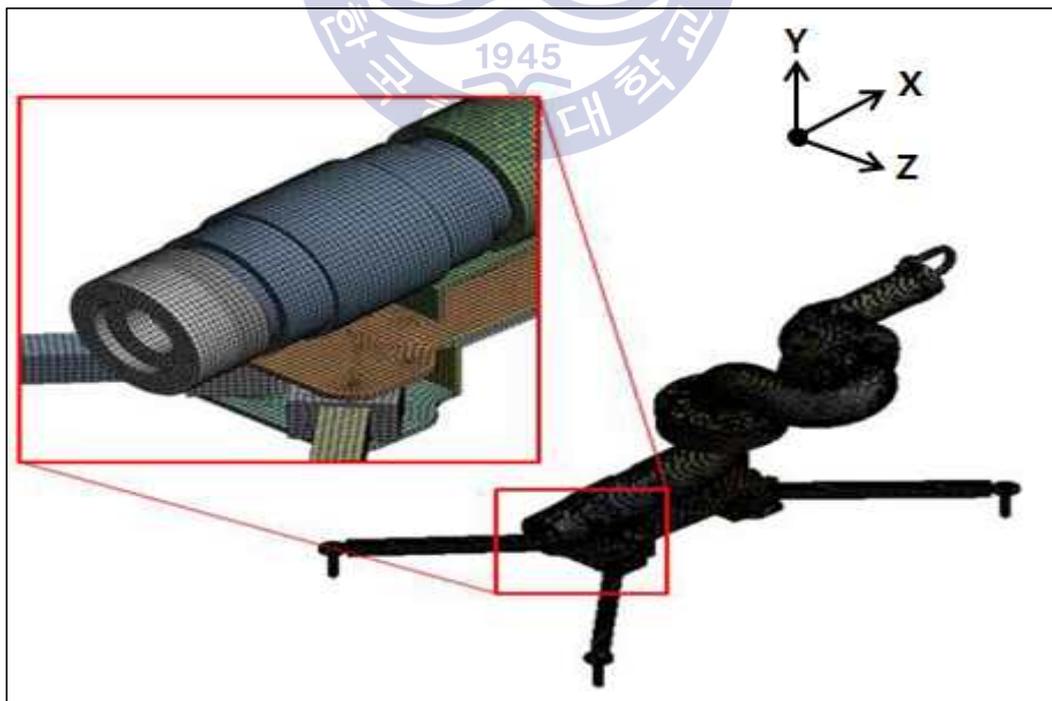


Fig. 116 Finite Element Model of Mobile Water Monitor

Table 31 Nodes & Elements of Mobile Water Monitor

Category	Node	Element
Mesh	178,815	214,706



Table 33 Analysis Result Summary

Part		Maximum deformation (mm)	Maximum stress (MPa)	Yield stress (MPa)	Evaluation
Mobile water monitor	Valve part	2.47	154.7	205	OK
	Support part	0.52	128.9	205	OK

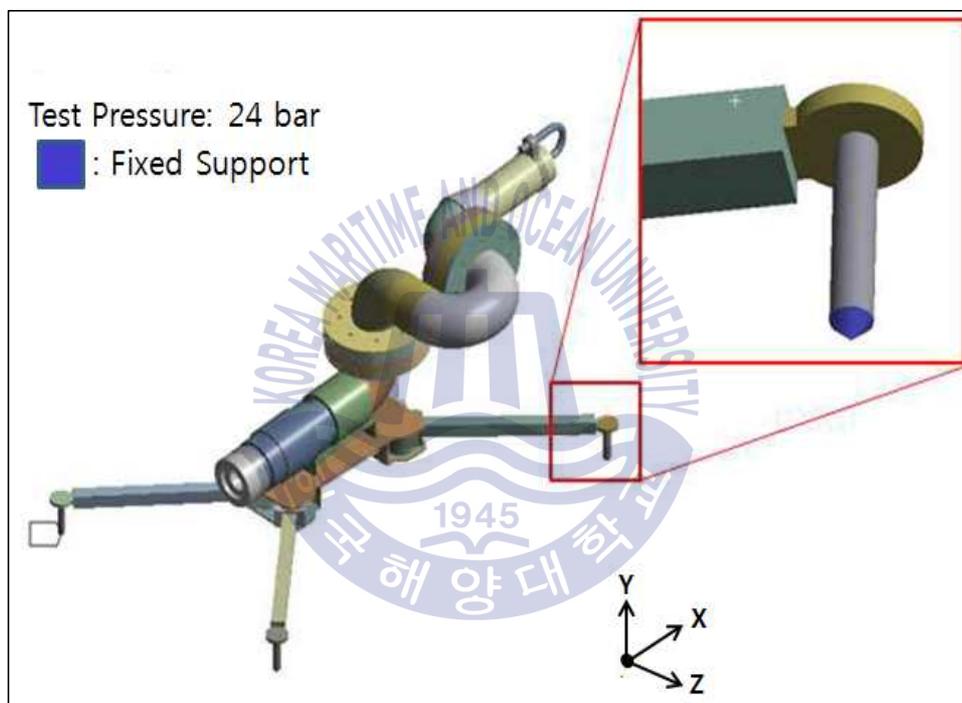


Fig. 117 Fixed Support of Mobile Water Monitor

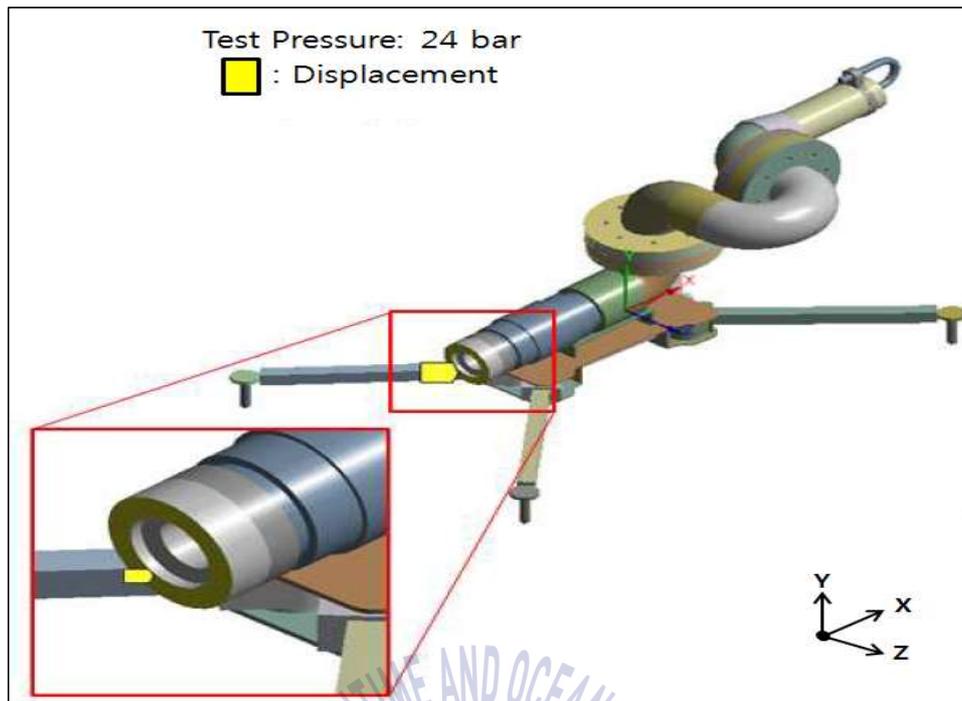


Fig. 118 Boundary Condition of Mobile Water Monitor

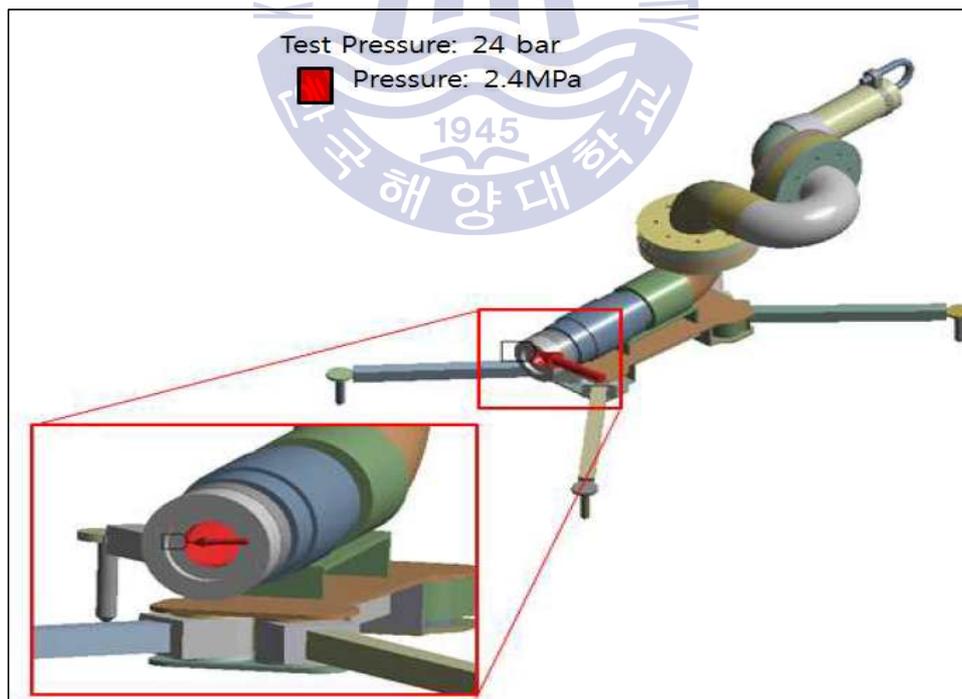


Fig. 119 Load Condition of Mobile Water Monitor

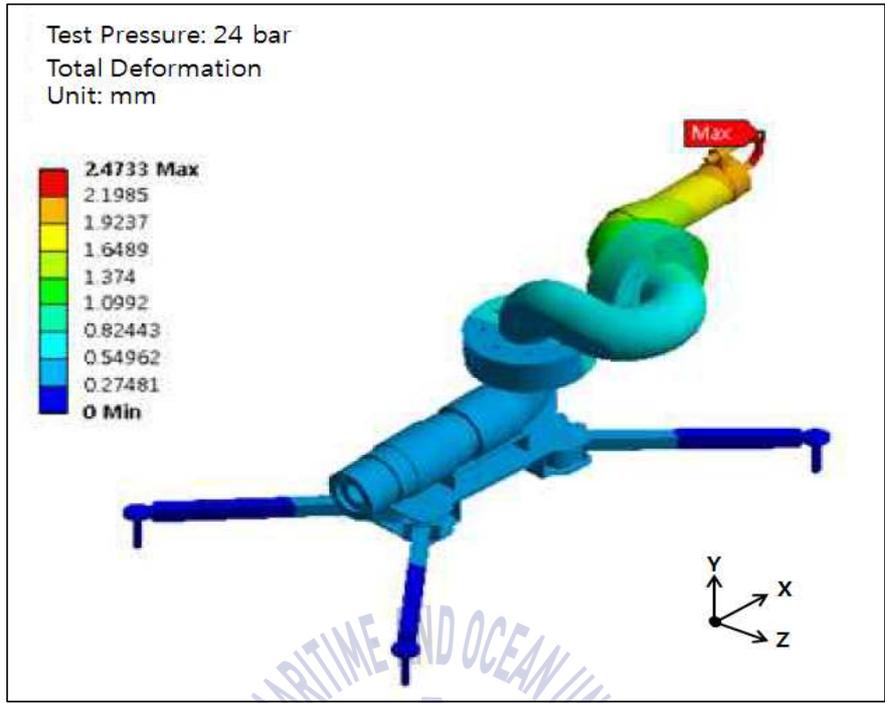


Fig. 120 Max. Deformation of Mobile Water Monitor

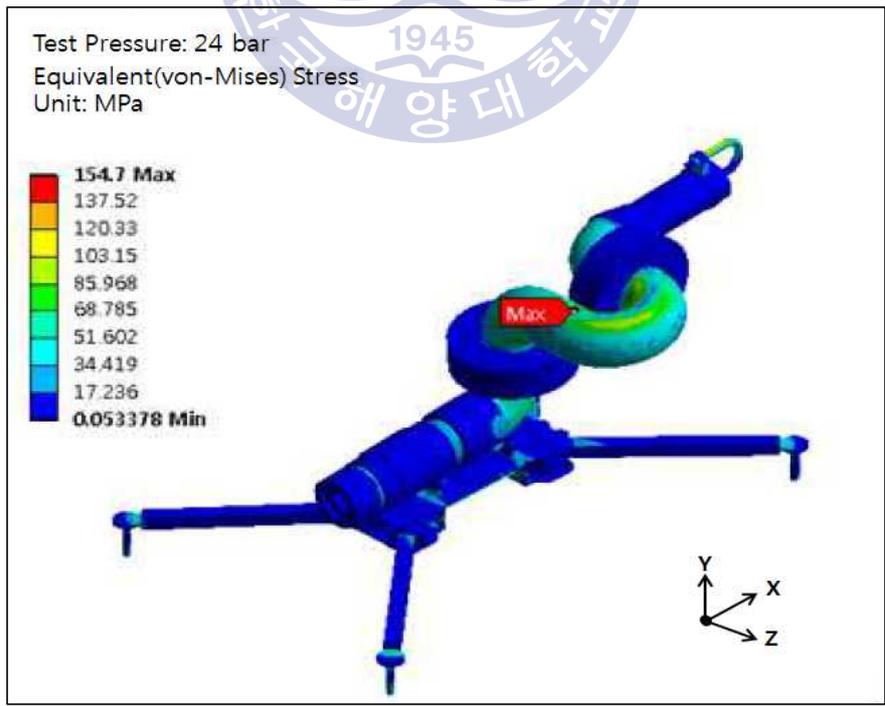


Fig. 121 Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor

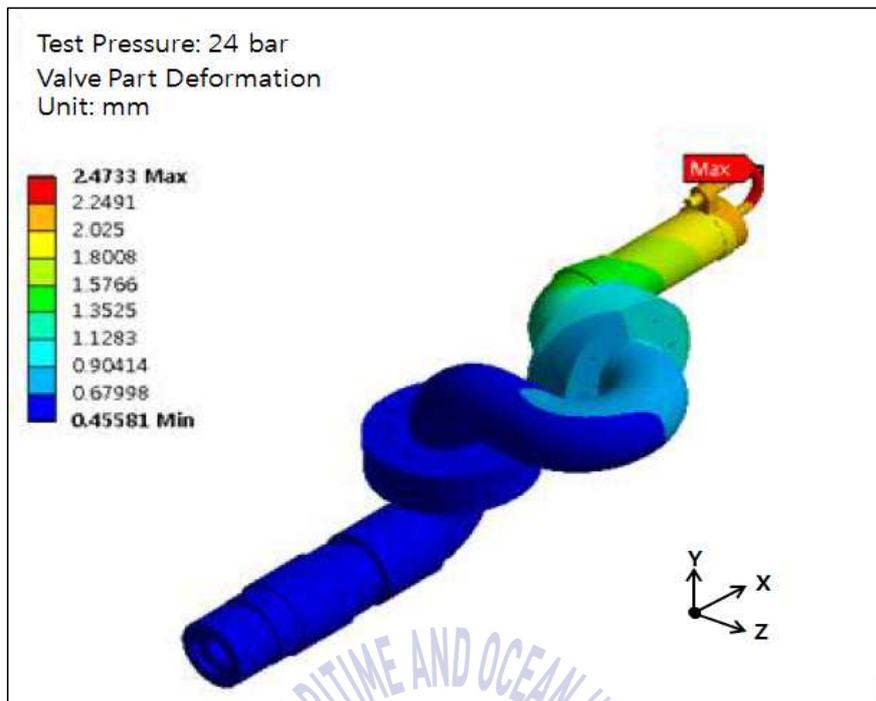


Fig. 122 Max. Deformation of Mobile Water Monitor Valve Part

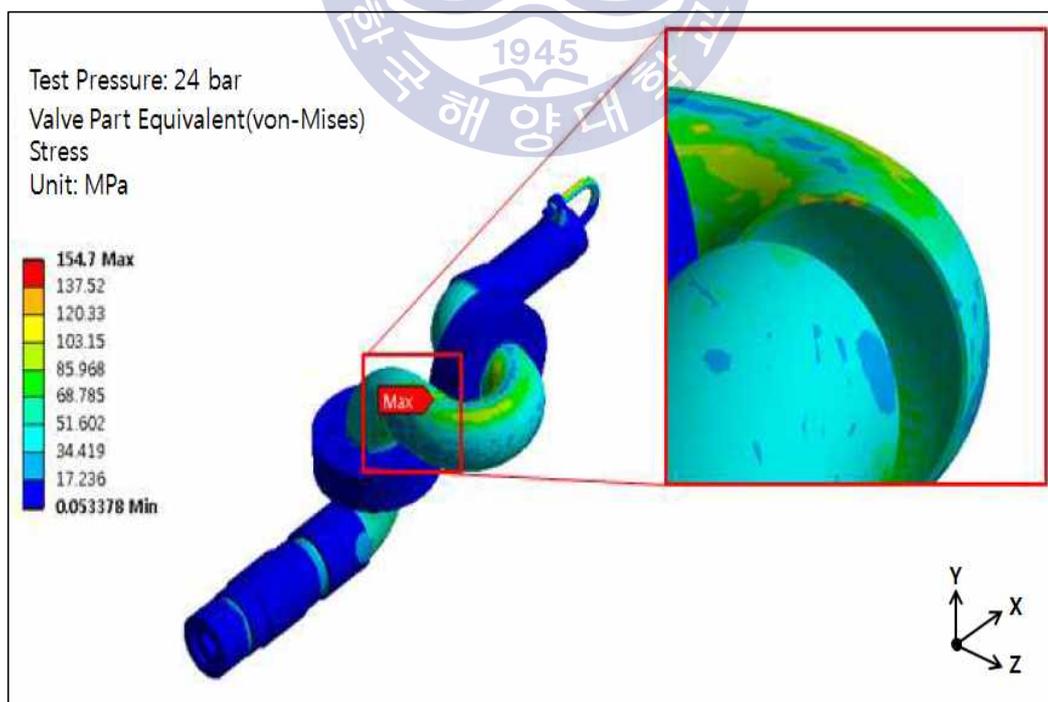


Fig. 123 Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor Valve Part

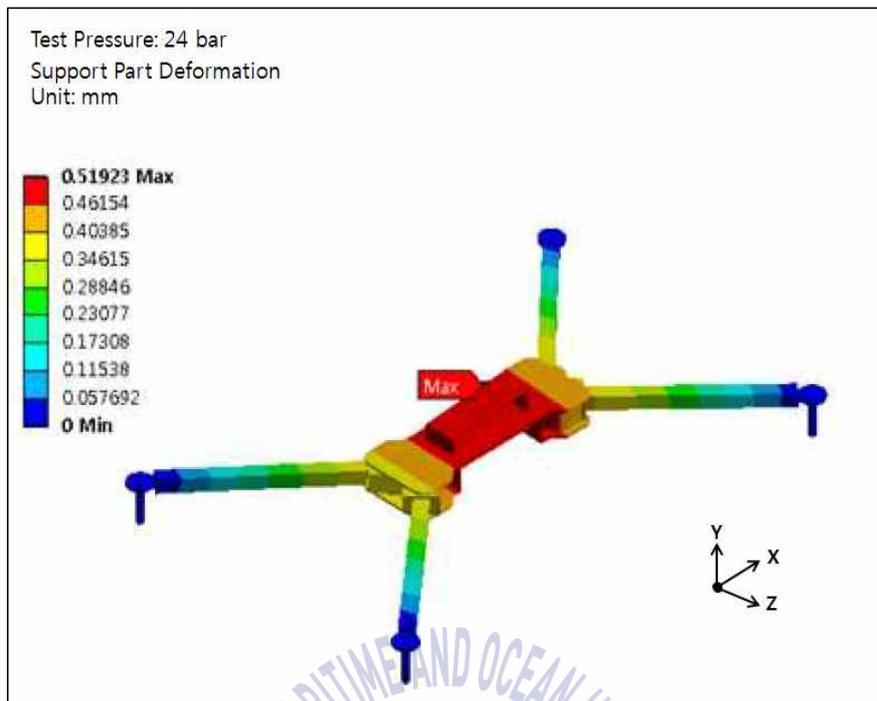


Fig. 124 Max. Deformation of Mobile Water Monitor Support Part

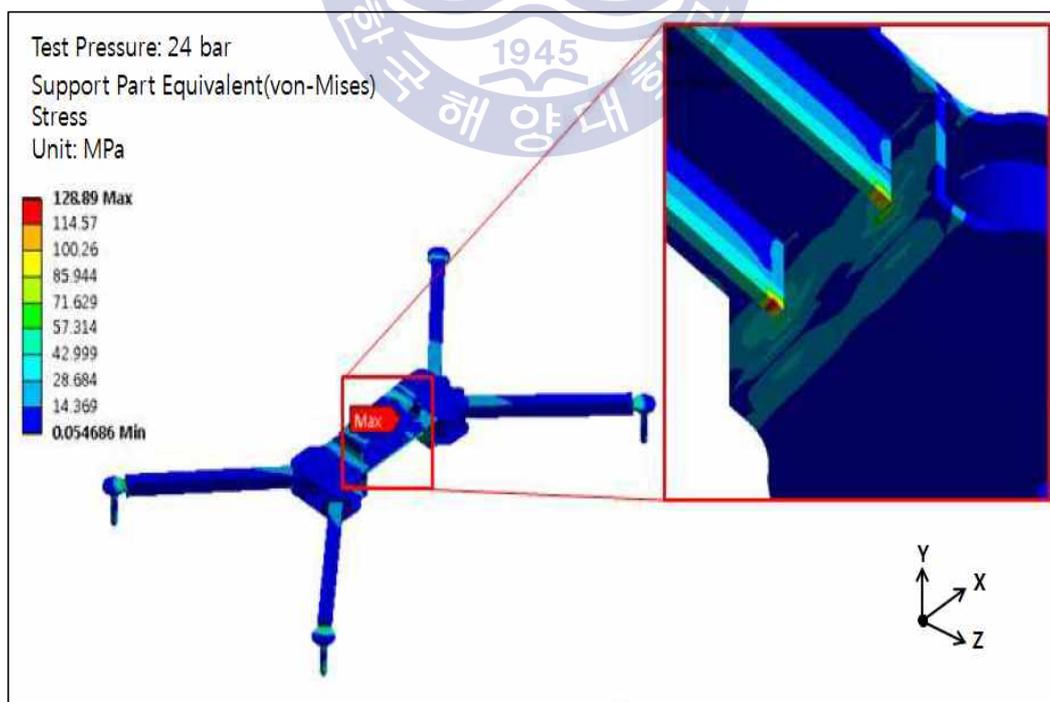


Fig. 125 Max. Equivalent Stress of Mobile Water Monitor Support Part



Fig. 126 Setting of 3rd Prototype Mobile Water Monitor



Fig. 127 Performance Test of 3rd Prototype Mobile Water Monitor

5.3.2.4 Mobile Water Monitor 최종 성능실험

현재까지 성능실험을 진행하면서 압력이 높아지면서 발생한 본체의 불안정성을 보완하기 위해서 최종 Prototype는 Support Leg 하단 부분에 Magnetic을 부착하여 테스트를 진행하였고, 그 결과 압력이 올라가도 움직이거나 넘어지는 문제를 해결할 수 있었다.

Valve와 일체형으로 제작했던 기존 Prototype에서 Valve에서 유량을 감소시킬 수 있는 요인이 될 수 있다고 판단하여 Valve 부분을 제외시켰으며 10K 50A 기성품 Valve를 부착할 수 있도록 제작하였다.

최종 성능실험은 기존 Test와 같은 방법으로 Fig. 128 ~ Fig. 130과 같이 진행하였으며, Support Leg에 Magnetic을 부착함으로써 실험장치의 안정성 효과를 비교 분석하였다.

Table 33은 최종 성능실험에 사용된 Mobile Water Monitor로 분사각도 별 3 bar에서 6 bar까지 분사거리 및 분사높이를 측정한 Performance data이다.

Table 34는 기존 운항중인 컨테이너 선박의 제원을 나타내었다. 21,900 TEU 컨테이너 선박의 경우 갑판상 컨테이너 10단(Tier)까지 적재할 수 있으며, 갑판 상 높이는 31.7 m이다. 또한, Lashing Bridge는 컨테이너 3단의 높이에 있으며, 이 Lashing Bridge로부터 컨테이너 최상단까지 높이는 21 m이다. 소화펌프는 90 m³/h 2세트가 설치되어 있다. 컨테이너 갑판상(해치커버 상부)에 컨테이너를 고단으로 적재할 경우 상부 컨테이너의 전도 안정성 차원에서 Lashing Bridge를 설치하며, 가운데 사람이 통행할 수 있고 갑판상 2 ~ 3 Tiers 높이에서 그 상부에 있는 컨테이너를 Lashing Wire 또는 Lashing Rod 등을 이용 고박할 수 있도록 설치된 구조물이다. 자세한 모습은 Fig. 131에 나타내었다.

SOLAS협약에 따라 본 연구에서 제작한 Mobile Water Monitor 4 Sets를 본선에 비치할 경우 Table 33에서 분사각도 30°, 입구압력 4 bar에서 62.7 m³/h의 분사유량을 가지므로 250.8 m³/h의 소화펌프 용량 증가를 필요로 한다. 이는 Table 2에서 UNITOR社의 Mobile Water Monitor 분사유량 80 m³/h를 기준으로

추가 펌프용량 320 m³/h가 필요로 하므로 본 연구의 Mobile Water Monitor가 UNITOR社 제품에 비해 21% 추가 소요용량을 감소시킬 수 있다.

또한, 컨테이너 선박에 따라 소화전 압력이 다양하므로 그에 적합한 노즐을 교환 적용할 수 있는 본 연구의 Mobile Water Monitor는 선주의 입장에서 소화 펌프 용량 증가를 최소화할 수 있다는 점에서 큰 매력이 있을 것으로 보인다.





Fig. 128 Setting of Final Prototype Mobile Water Monitor



Fig. 129 Performance Test of Final Prototype Mobile Water Monitor
(33° spray distance test)



Fig. 130 Performance Test of Final Prototype Mobile Water Monitor
(90° spray height test)



Fig. 131 Picture of Lashing Bridge(up, cargotec) and Accident(down, in.printerest.com)

Table 33 Performance Data of Mobile Water Monitor

Angle (°)	Pressure (bar)	Flow Rate (m ³ /h)	Max. Hight (m)	Max. Ditch. Length (m)
30°	3	54.3	7	33
	4	62.7	9	40
	5	70.1	9	45
	6	76.8	10	48
40°	3	54.3	9	39
	4	62.7	12	42
	5	70.1	14	45
	6	76.8	16	48
50°	3	54.3	12	30
	4	62.7	15	34
	5	70.1	19	35
	6	76.8	21	40
60°	3	54.3	13	25
	4	62.7	18	30
	5	70.1	22	33
	6	76.8	26	39
70°	3	54.3	19	22
	4	62.7	23	26
	5	70.1	26	31
	6	76.8	29	35
80°	3	54.3	19	8
	4	62.7	23	10
	5	70.1	27	12
	6	76.8	32	13

Table 34 Specification of Container Ship in Operation

Container Capacity	6,900TEU	10,400TEU	16,400TEU	21,900TEU
Ship's dimension (LBP/B/D)	259 x 42.8 x 24.8	318 x 48.2 x 27.3	382 x 53.5 x 29.9	412 x 58.6 x 33.1
Tiers of containers on deck	8	9	10	11
Height of top tier container from upper deck	23.5	26.5	29.2	31.7
Tiers of lashing bridge	1	2	3	3
Height of top tier container from lashing bridge top	18.4	18.4	18.4	21.0
Fire Pump Capacity (기준)	90m ³ /h × 90m × 2 sets	90m ³ /h × 90m × 2 sets	90m ³ /h × 100m × 2 sets	90m ³ /h × 100m × 2 sets

5.3.2.5 Mobile Water Monitor 성능실험 결과와 유동해석 결과 비교

유동해석을 통하여 4 cm의 정류격자가 최적화 디자인임을 확인하고, 이를 바탕으로 Mobile Water Monitor를 제작하여 성능실험을 수행하였다. 성능실험은 선급검사원 입회하에 예비시험(Preliminary test)의 형식으로 진행되었으며 그 결과는 Table 35를 통해 확인할 수 있다.

앞선 전산유동해석을 통하여 35° 분사각도에서 분사거리는 47 m로 계산되었으며 실제 실험에서는 33.8°에서 41 m로 6 m의 차이가 있었다. 하지만 이러한 오차는 분사각도에서의 1.2°차이와 유동해석에서는 포함되지 않는 바람에 의한 영향을 고려하였을 때 오차범위 내에 있는 것으로 판단된다. 유동해석 수행 시, 다양한 대기조건을 가정하여 많은 경우의 수로 해석을 진행한다면 더욱 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것이다.

90° 분사각도에서의 전산유동해석과 실험에서 관찰된 분사거리는 각각 26 m와 26 m로 두 값은 동일하였다. 이러한 90° 분사각도에서의 정확한 유동해석의 결과는 실험조건에서 분사각도의 차이가 없었을 뿐만 아니라 계산에서 시간에 따른 변화를 반영한 비정상해석을 수행하였기 때문으로 판단된다. 본 해석에서 수행한 비정상상태의 해석은 정상상태와 비교하여 약 10배 이상의 반복계산이 수행되었다. 무거운 계산을 수행한 만큼 정확도도 더욱 향상되었을 것으로 판단된다.

Mobile Water Monitor의 유동해석은 분사거리를 대상으로 수행하였기에 예비 시험의 결과에서 언급된 유량(Flow rate)에 대한 결과를 시각화하여 보일 수 없었다. 그러므로 노즐 출구의 평균 유속과 노즐의 단면적을 활용하여 (5.2)와 같이 간단한 수식을 통해 계산하였다.

$$Q = V \times A \quad (5.2)$$

여기서 Q 는 유량, V 는 노즐 출구의 평균 속도, A 는 노즐 단면적이다.

Table 35 Preliminary Test Result Table of Mobile Water Monitor

Category	Case 1.	Case 2.
Nozzle Model	N-4	N-4
Inlet Press.	4.0 bar	4.0 bar
Flow Rate	62.7 m ³ /h	63.8 m ³ /h
Profecion Angle	33.8°	90°
Profecion Distance	41 m	26 m

제 6 장 결 론

SOLAS협약에서 2016년 1월 1일 이후 건조되는 갑판상 컨테이너를 5단 이상 적재할 수 있는 선박은 의무적으로 개방갑판구역 컨테이너에서 화재발생 시 인명 및 화물보호를 위해 Water Mist Lance 및 Mobile Water Monitor를 비치하도록 하였다. 본 논문에서는 개방갑판구역 컨테이너 화재진압을 위해 SOLAS협약에서 규정하고 있는 Water Mist Lance와 Mobile Water Monitor에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 위해 비용절감, 시간절약을 위해 대부분의 연구개발에서 사용하고 있는 수치해석 방법을 적용하여 최적의 모델을 선정, 성능실험을 실시하여 수치해석 결과의 타당성을 검증하였다.

가. **Water Mist Lance**는 컨테이너 벽면(Steel Plate)을 관통할 있는 Piercing Nozzle 침단부분의 형상이 핵심요소이다. 본 논문에서는 충격에 의한 침단부분의 형상 변형이 없고 컨테이너 벽면에 대한 관통성능을 향상시킬 수 있도록 원뿔(Conicity) 형상을 가진 침단 부분의 길이가 각 10mm, 12.5mm, 15mm, 17.5mm, 20mm인 5가지 모델에 대하여 관통해석을 수행하였다.

해석결과 15mm 모델에서 Piercing Nozzle 침단부분의 변형이 없고, 컨테이너 벽면을 관통하는 결과를 확인하여 적합한 모델로 판단하였다.

15mm 모델을 기준으로 Water Mist Lance를 제작하여 성능실험을 실시하였다. 입구압력 5bar, 분사각도 60°에서 분사유량 67 l/min, 분사거리 6m의 계량적인 결과를 확인할 수 있었다.

나. **Mobile Water Monitor**는 분사유량 60m³/h, 분사거리 40m이상의 성능기준을 만족하는 노즐 오리피스 크기, 분사각도별 최적의 정류격자 길이 및 분사압력에 의한 구조안전성 평가 연구를 위해 유동해석, 구조해석을 실시하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1 사용압력별 성능기준을 만족하는 Nozzle Orifice는 4bar에서 29mm, 5bar에서 27mm, 6bar에서 25mm, 7bar에서 24mm, 8bar에서 23mm, 9bar에서 22mm로 계산되었다.

- .2 또한, 분사각도 35°, 90° 조건에서 최대 분사거리를 갖는 정류격자 길이는 분사각도 35°인 경우 4cm(분사거리 47m), 분사각도 90°인 경우 4cm(분사거리 26m)로 계산되어 정류격자 길이 4cm가 가장 적합한 것으로 판단하였다.
- .3 다음으로 Mobile Water Monitor 구조안전성 평가결과, Valve part(관로부분)의 Spray Shield Stem과 Cock 부위에서 최대 변형 2.47mm, 관로 내부에서 곡률로 발생하는 모멘트에 의해 최대응력 154.7MPa이 발생하였으나, 허용응력 205MPa보다 낮아 Valve Part는 구조적으로 안전할 것으로 판단하였다. 또한, Support Part(지지부분)의 경우 Valve Part를 고정하는 위치에서 최대 변형 0.52mm, Support Part 하부의 지지구조에서 최대 응력 128.9MPa이 발생하였지만 허용응력 205MPa보다 낮아 Support Part는 구조적으로 안전할 것으로 판단하였다.

이상의 해석결과를 바탕으로 Mobile Water Monitor를 제작하여 성능실험을 실시하였다. 입구압력 4bar, 분사각도 33.8°에서 분사유량 62.7m³/h, 분사거리 41m, 분사각도 90°에서 분사유량 63.8m³/h, 분사높이 26m로 성능실험 결과를 얻었다.

전산유동해석을 통해 35° 분사각도에서 분사거리는 47m로 계산되었으나, 성능실험에서는 33.8°에서 41m로 6m의 차이가 있었다. 하지만, 이러한 오차는 분사각도 1.2° 차이, 유동해석에서는 포함되지 않는 바람 등에 의한 것으로 판단된다. 분사각도 90°에서는 해석결과와 시험결과가 26m로 동일하였다.

컨테이너 선박에서 각종 위험화물로 인한 폭발·화재가 지속적으로 발생하고 있고, SOLAS협약에서 개방 갑판상 컨테이너 화재에 대응하기 위하여 Water Mist Lance 및 Mobile Water Monitor를 의무적으로 비치하도록 규정하였는바, 본 논문을 통해 연구된 화재진압용 소화장치는 본선 소화펌프의 용량증가를 최소화 할 수 있다는 점에서 신조 컨테이너 선박에 저비용·고효율 소화장치로서 활용가치가 높을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김동찬, 김만웅, 조대환, 이영호, 2012. 선박화재사고의 재해방지에 관한 연구, *한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집*, pp.73-78.
2. 김동화, 2003. 차압식 유량계에 의한 유량측정, *한밭대학교 지상강좌*, pp. 144-150.
3. 김봉환, 김용관, 문철진, 홍철현, 이형욱, 최현호, 2003. 미세물분무 소화성능에 관한 연구, *대한설비공학회*, Vol.15, No.7, pp.572-579.
4. 김성윤, 안병호, 김동석, 김유태, 2006. 선박용 미분무수 소화설비의 성능평가연구, *한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집*, pp.155-156.
5. 김성찬, 유홍선, 홍기배, 2002. 분무노즐의 분무특성에 관한 실험적연구, *미래신기술연구소 논문집*, Vol.11 No.1, pp.9-17.
6. 김성찬, 유홍선, 박현태, 방기영, 2003. 화재용 중저압 물분무 노즐의 분무특성에 관한 연구, *한국안전학회지*, Vol.18 No.1, pp.28-32.
7. 김성찬, 유홍선, 2003. 물분무에 의한 화재제어 특성에 관한 연구, *설비공학논문집*, 15(4), pp.261-268.
8. 김성찬, 유홍선, 박현태, 방기영, 2003. 물분무 노즐의 분사각이 화재실 내부의 온도장에 미치는 영향, *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp.1703-1708.
9. 김승일, 2014. 물분무의 소화성능 향상을 위한 첨가제의 소화효과 비교, 박사학위논문, 충북대학교.
10. 김영한, 2009. 선박용 미분무수 소화설비, *한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집*, pp.11-21.

11. 김호영, 오상엽, 정진택, 2004. 분무수 분무특성이 액체연료 Pool 화염의 소화에 미치는 영향, *대한기계학회논문집(B)*, Vol.28, No.12, pp.1591-1599.
12. 권민성, 2010. 3차원 전산유체역학을 이용한 수처리제의 관내 혼화 효율 최적화, 석사학위논문, 대구대학교.
13. 권오현, 2016. LS-DYNA 해석을 통한 차량 충돌조건이 차량과 가드레일의 충돌변형에 미치는 영향, 석사학위논문, 가천대학교.
14. 류영춘, 서부교, 성정현, 이영훈, 박영철, 2014. 폼모니터의 분사거리 예측을 위한 유동해석에 관한 연구, *한국산학기술학회논문지*, Vol.15, No.10, pp.5939-5944.
15. 박현태, 2003. 미세물분무를 이용한 연증냉각에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 중앙대학교.
16. 배강열, 정희택, 김형범, 정인수, 김창, 2009. 이동식 미분무수 노즐의 소화 특성에 대한 수치 시뮬레이션, *한국동력기계공학회지*, 제13권, 제5호, pp.25-33.
17. 심유택, 2017. 침몰선박의 잔존유 회수 시스템 최적화에 관한 연구, 박사학위논문, 한국해양대학교.
18. 이경우, 2008. 선박용 Water Mist 소화시스템의 배관망해석 및 유동해석에 관한 연구, 박사학위논문, 한국해양대학교.
19. 이동명, 2003. 관창의 유동특성에 관한 연구, *한국화재소방학회논문지*, Vol.17, No.3, pp.55-60.
20. 이동명, 김엽래, 박승욱, 2003. 레이저를 이용한 화재진압용 관창 개발에 관한 연구, *한국화재소방학회 학술대회 논문집*, Vol.2003, No.4, pp.157-163.
21. 이동명, 김엽래, 박승욱, 2003. 소방 자동차용 관창의 분무특성 연구, *한국화재소방학회 학술대회 논문집*, Vol.2003, No.10, pp.135-141.

22. 이동호 et al., 2010. *친환경 고발포 특수 소화약제 연구개발*, 소방방재청 최종보고서, 인천대학교 산학협력단.
23. 이수경, 고명재, 이성규, 2007. 미세물분무 소화건의 소화성능에 관한 비교실험 연구, *한국화재소방학회 학술대회 논문집*, pp.143-148.
24. 이수경, 고명재, 이성규, 2007. 미세물분무 소화건의 소화성능에 관한 비교실험 연구, *한국화재소방학회 학술대회 논문집*, pp.143-148.
25. 이승현, 김병일, 2015. 평면변형률상태에서의 von Mises 항복기준의 특성에 관한 이론적 연구, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, NO.9, pp.6391-6396.
26. 이영훈, 류영춘, 성정현, 박영철, 2016. 유로형상변경에 따른 폼 모니터 분사거리 변화의 수치적 해석, *한국산학기술학회 논문집*, Vol.17, NO.1, pp.244-251.
27. 이창효, 정희택, 최병일, 한용식, 옥영욱, 2006. 미분무수 소화시스템의 분무 및 소화 특성 예측을 위한 유동장 수치 시뮬레이션, *대한기계학회 춘계학술대회*, pp.710-715.
28. 이찬주, 2004. 고정식 국부소화장치용 저압 미분무수 노즐의 성능평가연구, 한국화재보험협회, 방재기술 36호, pp.26-33.
29. 유용호, 박상현, 한상주, 박진욱, 2016. 대심도 복층터널 초기화재 진압을 위한 자동모니터 소화설비의 적용성 연구, *한국터널지하공간학회논문집*, Vol.18, No.5, pp.419-429.
30. 유지선, 정영진, 2015. 폭발의 위험성에 의한 선박화재의 사고사례 분석, *한국소방화재학회 논문지*, Vol.29, No.1, pp. 80-86.
31. 정경문, 손영일, 2009. Marine Fire Fighting System 소개 및 기술동향, *대기계학회 학술대회*, pp.347-351.
32. 정희택, 이창효, 정향남, 최병일, 한용식, 옥영욱, 2005. 소화 노즐의 분무 특성 예측을 위한 CFD기법의 적용, *창원대학교 유체기계 연구개발 발표*

- 회 논문집, pp.233-239.
33. 조현준, 2015. *미분무소화설비의 국내·외 기준 비교연구*, 석사학위 논문, 서울시립대학교.
 34. 최병일, 한용식, 오창보, 김명배, 김창, 2007. 선박기관구역 미분무수 소화설비 화재진압 성능 평가, *한국화재소방학회 논문지*, 제21권, 제2호, pp.111-117.
 35. 한국선주상호보험, 2017. *컨테이너를 통한 위험화물의 안전한 운송*.
 36. 한국해사위험물검사원, 2015. *국제해상위험물규칙(IMDG Code) 소개*.
 37. 한국해양재단, 2014. *해양산업과 경제*, <http://koreamaritimefoundation.or.kr>
 38. 한국선급, 2004. *선박용 고정식 소화장치*, Technical Information, 2004005/IMO. pp.6-7, pp.56-57.
 39. 한상구, 최재혁, 하민재, 김종수, 2017. 컨테이너 화재진압을 위한 Mobile Water Monitor의 수치해석에 관한 연구, *한국마린엔지니어링학회 논문지*, 제41권, 제9호, pp.841-849.
 40. 한용식 et al., 2010. 선박 거주구역용 미분무수 노즐의 열응답 특성에 관한 실험적 연구, *한국화재소방학회 추계학술대회 논문집*, pp163-166.
 41. 황원준, 김황진, 오규형, 이성은, 2009. 미분무수 소화설비의 소화특성 실험, *한국화재소방학회 논문지*, 23(2), pp.78-84.
 42. 해양수산부, 2016. *선박소방설비기준*, 해양수산부고시 제2016-34호
 43. 해양한국, 2015. *위험물 해상운송 동향과 전망(502호)*.
 44. ABS(미국선급협회), 2016. *Guide for the class notation for fire fighting systems for on deck cargo areas of container carriers*
 45. Akron Brass Co. 2013. *Positionable Outlet for a Water Monitor*, United States Patent, US 8678022 B2

46. ANSYS Fluent 14.5 Theory Guide
47. Antinio B. Marchese. 2000. *Fire Fighting Monitor Apparatus*, United States Patent, US 6305620 B1.
48. Arthur Brown, Inc, 2001. *Fire Fighting Water Turret*, United States Patent, US 6655613 B1.
49. Back, G., Lattimer, B., Beyler, C., DiNenno, P. and Hansen, B., 1999. *Full-Scale Testing of Water Mist Fire Suppression Systems for Small Machinery Spaces and Spaces with Combustible Boundaries-Volume I and II*, USCG R&D Center, Report No. CG-D-21-99-1.
50. Coppalle, A., 1993. Fire Protection: Water Curtains, *Fire Safety Journal*, Vol. 20, pp.241-255.
51. Danish Maritime Accident Investigation Board, 2012. *Marine Accident Report_CHARLOTTE MAERSK FIRE(2010.7.7)*.
52. Downie, B., Polymeropoulos, C. and Gogos, G., 1995. Interaction of a Water Mist with Bouyant Methane Diffusion Flame, *Fire Safety Journal*, Vol.24, pp.359-381.
53. Elkhart Brass Manufacturing Company, Inc, 2004. *Fire Fighting Monitor*, United States Patent, US7644777 B2.
54. Geoff Tanner and Keith F. Knasiak, 2003. Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles, *The Third International Water Mist Conference of Spraying Systems Co.*, pp.1-16.
55. Guttler E., 1972. *Normal Pressure vs. High Pressure: a Comparison*, *Fire Int.* 37, pp.94-101.
56. Herterich, A. O., 1960. *Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: the Diffuse Jet - Spray Jet*, The Dr. Alfred Huthig Publishing Co.

57. Herterich, A. O., 1960. *Water as an Extinguishment Agent*, Alfred Huthig Publishing Company.
58. Hua, J., Kumar, K., Khoo, B.C. and Xue, H., 2002. A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume, *Fire Safety Journal*, Vol.37, pp.631-657.
59. IMO, SOLAS(Consolidated Edition 2016), Translated and Compiled by Korea Register, pp.542-545
60. IMO, 1994. MSC/Circ.668
61. IMO, 2014. Report of the maritime Safety Committee on Its Ninety-Third Session(Agenda item 22), pp.12-13.
62. IMO, 2014. Res. MSC.1/Circ.1472
63. IMO, 2005. Res. MSC.1/Circ.1165
64. John O. Hallquist, 1998. LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation
65. Jong, C.I and William Springer, 2009. *Teaching von Mises Stress: From Principal Axes to Non-Principal Axes*, American Society for Engineering Education.
66. Jack R. Mawhinney and Gerard G. Back, 2005. *SFPE 방화공학 핸드북(3판)_미분무수화재진압설비*, 한국화재보험협회
67. Kaleta A., 1986. *Effect of Dropsizes on Extinguishing Effectiveness of a Water Spray*, Archivum Combustions, 6(3-4), pp.201-212.
68. Kanury, A.M., 1994. *Introduction to Combustion Phenomena, Eighth Edition*, Gordon and Breach Science Publishers, USA
69. Kim, M.B., Jang, Y.J. and Yoon, M.O., 1997. Extinction Limit of a Pool Fire with a Water Mist, *Fire Safety Journal*, Vol.29, pp.295-306.

70. Log, T., 1996. Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays, *Fire Safety Science-Proceedings of Fourth International Symposium*, pp. 425-434.
71. Menter, F.R., 1994. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 32(8), 1598-1605
72. *NFPA 750 Standard on Water Fire Protection System*. 1996, pp.1-40.
73. Rasbash, D.J., 1986. *Extinction of Fire with Plain Water: A Review, Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 1145-1163.
74. Ravigururajan, T.S. and Beltran, M.R., 1989. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, pp.171-181.
75. Titan Monitors Leaflet, 2013. *The Design and Construction of Fire Fighting Monitors*, Angus Fire(www.noha.no/en/products).
76. Trapp James M., 2004. *Fire Fighting Monitor with Remote Control*, United States Patent, US 20050167122 A1.
77. www.cfd-online.com
78. Young, Munson, Okiishi and Huebsch, 2010. *A Brief Introduction to FLUID MECHANICS(4th Edition)*, John Wiley & Sons Inc.
79. Zhigang Liu, Andrew K. Kim, 2000. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems – Fundamental Studies, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.10, no.3, pp.32-50.

감사의 글

2011년 두려움과 설렘으로 시작했던 대학원 석사, 박사과정이 어느덧 시간이 흘러 논문으로 결실을 맺게 되었습니다.

저에게 새로운 배움의 길을 열어주시고, 무사히 논문을 마무리할 수 있도록 세심한 지도와 격려를 아끼지 않으신 윤석훈 교수님, 최재혁 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 부족한 저의 논문을 심사해 주시고, 소중한 충고와 조언을 해주신 임태우 교수님, 천강우 팀장님께도 진심으로 감사드립니다.

학위과정을 통하여 부족한 저에게 논문과 관련된 많은 자료와 조언을 해주신 이경우 박사님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 저의 박사논문이 완성될 수 있도록 도움을 주신 모든 분, 특히 신우중 후배님, 장세현 박사님에게도 감사의 말씀을 드리며, 제가 무사히 학업을 마칠 수 있도록 배려해주고 이해해 주신 KOEM해양환경교육원 동료들에게도 미안한 마음과 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로, 제가 있기까지 항상 염려하시고 보살펴주신 아버지, 어머니, 장인 어른, 장모님께 감사드리며, 만수무강하시길 기원합니다. 또한, 직장과 학업을 병행하느라 남편과 아빠의 역할에 소원해질 수밖에 없었던 상황을 묵묵히 참고 견뎌준 사랑하는 아내 정재란, 자녀 승윤, 찬희, 채윤과 함께 이 기쁨을 간직하고자 합니다.