

工学博士 學位論文

효율적 함정 수중충격 시뮬레이션을 위한
실험계획법의 적용에 관한 연구

**A Study on Application of Design of Experiment Methodology
to Efficient UNDEX Ship Shock Simulation**

指導教授 李 相 甲

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科

權 正 逸

본 論文을 權正逸의 工學博士 學位 論文으로 認准함.

委員長 鄭 正勳



委 員 趙 大昇



委 員 金 載洙



委 員 趙 琮來



委 員 李 相甲



2005年 12月 日

韓國海洋大學校 大學院
海洋시스템 共學科 權正逸

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 수중폭발 충격하중과 이로 인한 함정 충격응답 특성	4
2.1 수중폭발 현상과 충격하중	4
2.1.1 수중폭발 현상	4
2.1.2 수중폭발 충격하중	9
2.2 함정의 충격응답 특성	18
3. 함정 수중충격 M&S의 고도화를 위한 절차 수립	20
3.1 개 요	20
3.2 LS-DYNA/USA를 이용한 함정 수중충격 M&S에 있어서의 유의사항 ·	20
3.3 함정 수중충격 시뮬레이션 절차	22
3.3.1 Step 1 - 프로젝트 정의	23
3.3.2 Step 2 - 해석 케이스 설정	24
3.3.3 Step 3 - 구조모델 생성	25
3.3.4 Step 4 - 주변유체 모델 생성	26
3.3.5 Step 5 - 전체 모델 생성	28
3.3.6 Step 6 - 해석 케이스에 따른 입력자료 작성	29
3.3.7 Step 7 - 응답 해석	30
3.3.8 Step 8 - 결과 검토 및 가시화	31
4. 함정 수중충격 M&S에 적합한 실험계획법의 방법론 정립	33
4.1 개 요	33
4.2 실험계획법의 기본개념	33
4.2.1 실험계획법의 정의	33
4.2.2 실험계획법의 적용순서	34

4.2.3 실험계획법의 종류	36
4.3 요인배치법을 이용한 실험계획법	38
4.3.1 2^n 형의 일부실험법	38
4.3.2 실험의 배치방법	40
4.3.3 분산분석과 F 검증	43
4.3.4 $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법	46
5. 실험계획법을 이용한 Parametric Study 방법론의 적용연구	47
5.1 개 요	47
5.2 수중폭발 충격하중에 대한 현재의 합정 내충격 강화 기준	47
5.3 Parametric Study의 프로세스 자동화를 위한 통합 방법 정립	49
5.4 수중폭발 충격파의 손상잠재력 척도로서의 용골충격계수 적절성 검토	53
5.4.1 요인배치법과 분산분석을 통한 적절한 검토	53
5.4.2 고 찰	63
5.5 수중폭발 가스구체 압력파의 손상잠재력 척도로서의 버블계수 도출	64
5.5.1 용골충격계수의 가스구체 압력파의 손상잠재력 척도로서의 문제점	64
5.5.2 버블계수의 도출 및 유용성 검토	68
5.5.3 요인배치법과 분산분석을 통한 버블계수의 적절한 검토	73
5.5.4 고찰	81
6. 결 론	82
참 고 문 헌	84
부 록 : 요인배치법 적용을 위한 통계이론	A1

List of Tables

Table 2.1 Shock wave parameters	10
Table 2.2 Gas bubble parameters	13
Table 4.1 Experimental numbers of factorial design	39
Table 4.2 Main and interaction effects for 2^n design	39
Table 4.3 Two one-half fractions of 2^3 design	40
Table 4.4 2^{3-1} design with defining relation	40
Table 4.5 Two one-half fractions of 2^4 design	42
Table 4.6 Analysis of variance table for one-half fractions of 2^4 design	42
Table 4.7 Analysis of variance table for 2^n design	44
Table 5.1 Selection of factors and level values for shock response analysis	53
Table 5.2 Design matrix of one-half 2^4 fractions	56
Table 5.3 Analysis of variance for maximum vertical velocity	59
Table 5.4 Analysis of variance for maximum vertical acceleration	59
Table 5.5 Analysis of variance for maximum effective stress	60
Table 5.6 Analysis of variance for convergent value of SRS	60
Table 5.7 Analysis of variance for maximum vertical velocity	61
Table 5.8 Analysis of variance for maximum vertical acceleration	61
Table 5.9 Analysis of variance for maximum effective stress	62
Table 5.10 Analysis of variance for convergent value of SRS	62
Table 5.11 Three kinds of uniform free-free Timoshenko beams	65
Table 5.12 Wetted vertical natural frequency of 3 Timoshenko beams	66
Table 5.13 Selection of factors and level values for whipping response analysis	73
Table 5.14 $p^{m \times q^n}$ fractional design matrix	75
Table 5.15 Original data for maximum bending moment	75
Table 5.16 Summation of total each level of factor	76
Table 5.17 Summation of $T_{\bar{v}}$ for weight and type	76
Table 5.18 Summation of $T_{i,k}$ for weight and location	76
Table 5.19 Summation of $T_{\cdot,k}$ for type and location	77
Table 5.20 Variance analysis for maximum bending moment	78

Table 5.21	Variance analysis for maximum bending moment with pooling	78
Table 5.22	Variance analysis for response variables	
	with same KSF (Type 2)	79
Table 5.23	Variance analysis for response variables	
	with same KSF (Type 3)	79
Table 5.24	Variance analysis for response variables	
	with same BF (Type 2)	80
Table 5.25	Variance analysis for response variables	
	with same BF (Type 3)	80

List of Figures

Fig. 2.1 Underwater explosion phenomena	4
Fig. 2.2 Pulsation of gas bubble from UNDEX	5
Fig. 2.3 UNDEX energy distribution	6
Fig. 2.4 Shock wave pressure profile with surface cut-off	7
Fig. 2.5 Bulk cavitation regions under UNDEX	8
Fig. 2.6 Closing pulse due to bulk cavitation closure	8
Fig. 2.7 Surface phenomena due to UNDEX	9
Fig. 2.8 Pressure profile of shock wave	10
Fig. 2.9 Time history of gas bubble radius and vertical velocity	13
Fig. 2.10 Imaginary gas bubble	15
Fig. 2.11 Time history of fluid acceleration and pressure	16
Fig. 2.12 Occurrence mechanism of bubble jet	17
Fig. 2.13 Damage pattern of local hull structure by shock wave	18
Fig. 2.14 Damage pattern of equipments by shock wave	18
Fig. 2.15 Failure of hull girder by whipping	19
Fig. 2.16 Hole in ship bottom from bubble pulse loading	19
Fig. 3.1 Staggered solution scheme of LS-DYNA/USA	21
Fig. 3.2 Attention particulars in UNDEX ship shock simulation using LS-DYNA/USA	21
Fig. 3.3 Analysis procedure of UNDEX ship shock simulation	23
Fig. 3.4 Complete surrounding fluid model	28
Fig. 3.5 Total finite element model combined ship structure with fluid model	29
Fig. 3.6 Flow chart of LS-DYNA/USA analysis process	30
Fig. 3.7 Post process using LS-POST	31
Fig. 4.1 Experiment sequence based on D.O.E.	34
Fig. 5.1 UNDEX geometry based on KSF	48
Fig. 5.2 Execution flow chart in ModelCenter	50
Fig. 5.3 Execution main window in ModelCenter	51
Fig. 5.4 Process flow chart of ModelCenter related with LS-DYNA/USA ..	51
Fig. 5.5 Idealization of pseudo-damped shock response spectrum	52
Fig. 5.6 Composition of Matlab wrapper for post-processing	52

Fig. 5.7 3 dimensional finite element models for UNDEX ship shock simulation	54
Fig. 5.8 Locations of data acquisition for UNDEX ship shock simulation	56
Fig. 5.9 Experimental design for UNDEX arrangement with same KSF	57
Fig 5.10 Experimental process according to D.O.E. sequence	57
Fig. 5.11 Results of whipping response analysis according to KSF variance	67
Fig 5.12 Relationship between bubble factor and keel shock factor	70
Fig. 5.13 Results of whipping response analysis according to BF variance	71
Fig. 5.14 Relationship between 1st pulsating frequency of gas bubble and natural frequencies of beams	72
Fig. 5.15 Location of data acquisition for whipping response analysis	74

A Study on Application of Design of Experiment Methodology to Efficient UNDEX Ship Shock Simulation

Kweon, Jung-II

**Division of Marine Systems Engineering
Graduate School, Korea Maritime University**

ABSTRACT

In the secure aspect of naval ship's survivability with fulfillment of particular mission, such as combat, contrary to the commercial ship, the assessment of its vulnerability against the expecting enemy's non-contacting UNDERwater EXplosion(UNDEX) attacks is one of the most important particulars for the consideration of in the its design and construction. Though the ship shock trial/tests should be ,in principle, conducted for the final evaluation of the shock resistant safety of naval ship against the UNDEX shock loadings, unfortunately, they are very time consuming and enormously expensive with realistic difficulties such as immense extra expense for the minimization of environmental effects, and can not be almost re-performed due to the test characteristics. To work out these problems, UNDEX ship shock modeling & simulation (M&S) technology has been actively and well developed out in the inside and outside of the country with an equivalent usefulness to the ship shock test/trials using the latest IT technology and advanced M&S tools. Since the full scale UNDEX ship shock M&S with three dimensional analysis method are also time consuming and expensive, however, there are still many obstacles to figure out the UNDEX ship shock response characteristics according to the diverse UNDEX scenarios and the change of ship design.

In this study, the Parametric Study methodology was suggested to figure out the ship shock response features effectively according to diverse UNDEX scenarios with the application of a statistical method, Design Of Experiment(D.O.E.) methodology, to the UNDEX ship shock M&S field for the first time in the world. For this purpose, the efficient procedures of UNDEX

ship shock M&S were set up for the collection and analysis of simulation result data necessary to D.O.E. methodology, and the integration process method to perform the whole processes of Parametric Study automatically was also established by wrapping LS-DYNA/USA, commercial F.E. shock response analysis program the most widely used for the UNDEX M&S, into ModelCenter, commercial program for the engineering process integration.

The adequateness of the ship shock hardening criteria based on just one type of keel shock factor was examined as the application study for the validation of the usefulness of Parametric Study methodology using D.O.E. methodology suggested in this study. For this purpose, according to the established D.O.E. methodology suitable for the UNDEX ship shock M&S through this study, a series of UNDEX shock M&S for the real Korean Naval ships, and the collected simulation results were analyzed statistically. Since the ship shock response characteristics are very different from the two shock loadings subjected to UNDEX, that is, shock wave and bubble pulse wave in the UNDEX shock M&S, these were treated separately. Through the series of numerical calculations, the important conclusions were driven as follows :

- The keel shock factor, adopted as a shock hardening criteria of surface ship, has been proved to be suitable for a measure of damage potential of UNDEX shock wave. That is, from the statistical viewpoint, the effects of factors, such as charge type, charge weight, angle of attack and the location of charge along the length of surface ship, consisting of keel shock factor were confirmed to be not significant on the ship shock response magnitudes under the UNDEX conditions with the same keel shock factor.
- However, the keel shock factor was clarified to be not suitable for a measure of a measure of the damage potential of an gas bubble pulse wave originated in the ship whipping response, that is, the beam-like behavior of hull girder, and a 'bubble factor' was proposed as a new measure from the relationship among the fluid acceleration due to bubble pulsating movement, charge weight and charge depth. It was also confirmed that the new bubble factor proposed using D.O.E.

methodology was more effective than the keel shock factor as a measure of damage potential of bubble pulse wave in the statistical side.

It might be told that the above results derived through this study could be helpful to the establishment of original ship hardening criteria of Korean Navy, and also be expected that the Parametric Study methodology suggested in this study using D.O.E. one would be used as an efficient approach to the various engineering M&S fields of large complex mechanical system, such as ship, airplane, automobile and railway vehicle, as well as to the UNDEX ship shock M&S.

1. 서 론

함정의 생존성(survivability) 확보 측면에서 예상되는 적의 수중폭발(UNDEX; UNDERwater EXplosion) 공격에 대한 대상 함정의 취약성(vulnerability) 평가는 함정 설계·건조 시에 고려되어야 할 가장 중요한 사항 중의 하나이다. 미국해군의 경우 내충격 강화(shock hardening)가 요구되는 새로운 등급의 수상함에 대해서는 시제함(lead ship)에 대한 실선충격시험(ship shock trial)을 반드시 실시하고, 시험동안 발생한 여러 가지 손상에 대한 원인규명과 보완대책을 마련하여 후속함 건조에 반영하도록 규정하고 있다[1].

그러나 실선충격시험을 수행하기 위해서는 막대한 비용·인력·시간이 소요되며, 시험 특성상 재시험이 거의 불가능하고 환경영향의 최소화를 위한 과도한 과외비용의 지출 등의 많은 현실적 어려움이 있다. 한 예로서, 1994년 6월에 수천만 US\$를 들여 실시한 미국해군의 AEGIS급 함정인 USS John Paul Jones (DDG 53)의 실선충격시험의 경우 4년여 간의 준비기간과 50여 개 정부기관의 관련인원 300여명이 투입되었고, 환경단체의 소송제기로 인해 실선충격시험에 따른 환경영향 평가를 위하여 많은 과외비용의 지출과 시험시기가 약 3개월 지연되었으며, 실제 시험에 있어서도 가혹한 해상상태 및 함정 인도(delivery) 지연문제로 인하여 계획된 4회의 시험 중 2회만 실시하는 등 많은 난관이 있었다.

미국해군을 비롯한 선진 해군국가에서는 1990년대부터 급격히 발전하기 시작한 전산기 환경과 함정 수중충격 모델링·시뮬레이션(M&S; modeling & simulation) 도구에 발맞춰 실선충격시험의 보조자로서, 궁극적으로는 실선충격시험을 대체할 수 있을 정도로 신뢰성 있는 함정 수중충격 M&S 기술 개발에 몰두하고 있다. 한 예로서, 미국해군에서는 NAVSEA(Naval Sea Systems Command) 주관 하에 1996년부터 3년간 약 6백만 US\$의 연구비를 투입하여 위의 DDG 53의 실선충격 시험에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하고 시험 결과와 비교·검토를 통해 M&S 기술의 고도화 및 정확도 검증을 위한 연구[2~3]를 수행하였다. 이 연구를 통해 유용성이 상당 부분 입증된 M&S 기술을 더욱 발전시키기 위하여 후속 연구로서 2001년에 수행한 AEGIS급 함정인 USS Winston Churchill(DDG 81-DDG 53을 많이 수정, 보완한 동급의 함정)의 실선충격시험에 대한 M&S 연구 프로젝트를 현재 수행 중에 있다[4].

국내의 경우 1980년대 후반부터 수중충격에 대한 함정 내충격 기술의 중요성을 인식하여 국방과학연구소, 한국기계연구원을 중심으로 수중충격에 의한 구조물의 충격응답 M&S 기법 연구, 관련 해석도구의 개발 및 상용 해석프로그램의 도입·활용을 통한 실제 함정 적용연구 등의 활발한 연구[5~30]가 수행되고 있으며, 이러한 연구를 통해 핵심기반기술은 상당부분 구축되었다고 판단된다. 그러나 선진 해

군국가와는 달리 실선충격시험을 위한 예산확보의 어려움, 관련 전문인력의 부족 등 많은 현실적 문제로 인해 거의 실선충격시험 사례가 없으며, 1980년대 후반부터 시작된 탑재장비에 대한 충격시험도 대상 장비의 내충격 성능 만족 여부의 검증 목적으로만 주로 수행되어 왔기 때문에 함정의 종합적인 내충격 설계 및 성능 평가를 위해 반드시 요구되는 관련 실적 자료의 축적이 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

이러한 국내의 상황에도 불구하고 많은 비용이 요구되는 실선충격시험과 같은 많은 인력과 예산이 소요되는 시험연구는 향후 더욱 어려워 것으로 예상되기 때문에 함정 수중충격 M&S 기술의 고도화는 선진 해군국가보다도 오히려 국내의 경우 더욱 절실히라 판단된다. 그 동안의 관련 연구는 주로 신조 함정 획득사업의 일환으로서 설계단계에서 대상 함정의 내충격 안전성 검토를 위한 기술용역의 형태로 이루어져 왔기 때문에 체계적이고 종합적인 연구개발은 상대적으로 미약하며, 실선충격시험의 대안으로써 M&S 기술의 적극적인 활용을 위해서는 반드시 전제되어야 할 정확도 검증에 대한 관련 연구는 더욱 미미한 실정이다. 따라서 함정 수중충격 M&S의 신뢰성과 효율성을 제고하기 위한 기술개발이 절실히 요망된다. 한편, 3차원 해석방법을 이용한 실제 함정의 수중충격 M&S에 있어서도 많은 시간과 노력이 요구되기 때문에 다양한 수중폭발 시나리오 또는 대상 함정의 설계변경에 따른 충격응답 특성을 파악하는 데 있어서도 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 통계학적 방법인 실험계획법(D.O.E.; Design Of Experiment methodology)을 세계 최초로 함정 수중충격 M&S 분야에 적용하여 다양한 수중폭발 시나리오에 따른 함정 충격응답 특성을 효율적으로 파악할 수 있는 Parametric Study 방법론을 제시하고, 제시된 Parametric Study의 전 과정을 자동적으로 수행할 수 있는 프로세스 통합 방법을 정립하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 방법론의 유용성을 검증하기 위한 적용연구로서 한국해군의 실제 함정에 대한 일련의 수중충격 M&S를 수행하여 하나의 용골충격계수(keel shock factor) 값으로 주어지는 함정의 내충격 강화기준의 적절성 여부를 검토하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 함정 수중충격 M&S와 관련한 국내외 최신 연구동향을 살펴보고, 본 연구의 필요성과 목적에 대해 기술하였다. 2장에서는 수중폭발의 물리적 현상과 이로 인한 충격하중 및 수중폭발 충격하중에 대한 함정의 충격응답 특성을 살펴보았다. 3장에서는 함정 수중충격 M&S의 신뢰성과 효율성을 제고하기 위해 본 연구에서 수립한 업무절차(work flow)를 한국해군의 실제 함정을 예로 하여 상세히 기술하였다. 4장에서는 함정 수중충격 M&S에 있어서 다양한 수중폭발 조건에 따른 대상 함정의 충격응답 특성을 효율적으로 파악할 수 있도록 실험계획법 가운데 요인배치법 중 교락법을 적용한 일부실시법에 대한 Parametric Study 방법론을 제시하였다. 5장에서는 제시된 Parametric

Study의 전 과정을 자동적으로 수행할 수 있도록 정립한 프로세스 통합 방법을 자세히 설명하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 방법론의 유용성을 검증하기 위한 적용연구로서 수행한 한국해군의 실제 함정에 대한 일련의 수중충격 M&S를 통해 수중폭발 충격파와 가스구체 압력파에 대한 함정의 내충격 강화기준으로 주어지는 용골충격계수의 적절성 여부에 대한 검토결과를 기술하였다. 또한, 함정의 휘핑 응답 손상잠재력의 척도로서는 용골충격계수의 부적절함을 제시하고, 새로운 물리량인 ‘버블계수 (bubble factor)’를 도출, 이에 대한 유용성을 확인하였다. 본 논문의 결론부인 6장에서는 본 연구를 통해 도출된 주요한 결과를 요약하였다.

본 연구에서 제시한 실험계획법을 이용한 Parametric Study 방법론은 함정 수중충격 M&S 분야뿐만 아니라 선박, 항공기, 자동차, 철도차량 등의 대형복합기계시스템의 다양한 공학 M&S 분야에 많은 활용될 수 있으리라 판단된다.

2. 수중폭발 충격하중과 이로 인한 함정 충격응답 특성

2.1 수중폭발 현상과 충격하중

2.1.1 수중폭발 현상

폭발이란 TNT 폭약과 같은 불안정한 물질이 외부자극에 의해 폭발이라는 순간적인 화학반응을 거쳐 안정된 상태의 고온, 고압의 가스로 변화는 과정이다. 수중에서 폭발이 발생하는 경우의 물리적 현상들을 Fig 2.1에 도시하였으며, 본 절에서는 수중폭발에 의한 이들의 현상에 대해 개별적으로 상세히 설명하고자 한다.

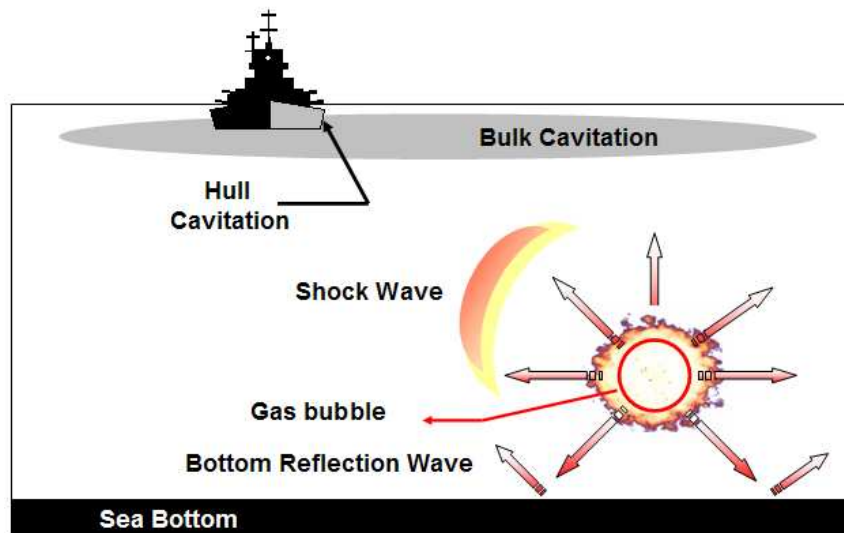


Fig. 2.2 Underwater explosion phenomena

수중폭발이 일어나면 매우 높은 온도와 압력을 가진 가스구체(gas bubble)가 생성됨과 동시에 급작스런 에너지의 방출로 인하여 주위의 물에 교란이 발생한다. 이 경우 상당한 물의 부피변화가 생기고 압축성 유동이 발생한다. 수중폭발에 의하여 야기된 교란은 폭약 근방에서는 음속($\approx 1,500\text{m/sec}$)의 3~5배 속도로, 어느 정도 거리를 통과하면서부터는 대략 음속으로 구상파(spherical wave)의 형태로 물속을 전파해 가는데, 이를 충격파(shock wave)라 한다. 충격파는 백색 스펙트럼(white spectrum)을 갖는 충격하중으로 선체에 작용하여 고차모드의 과도응답(transient response)을 발생시키며, 심한 경우 선체 국부구조 및 주요 탑재장비에

치명적인 손상을 입히게 된다.

충격파가 전파해 가는 동안 폭발 시 생성된 고압의 가스구체는 주위 수압에 대해 주기적인 팽창과 수축의 맥동(pulsating)운동과 함께, 일정한 크기를 갖기 때문에 부력에 의해 수직상승(migration)을 한다. 맥동운동의 각 주기마다 가스구체가 최소 크기가 되는 시점에서 주위 수압에 의해 붕괴되며, 이 때 마다 압력펄스를 방사하는데 이를 가스구체 압력파(bubble pulse wave)라 한다. 한편, 가스구체의 수직상승 속도는 주위 유체의 저항력(drag force) 때문에 가스구체가 최소 크기가 되기 바로 직전에 갑자기 커지게 된다. 가스구체 맥동운동의 주기와 함정 선체거더(hull girder)의 저차 상하방향 고유진동 주기가 비슷하기 때문에 가스구체 압력파는 선체거더의 상하방향 보 거동(beam-like behavior) 즉, 휘핑(whipping)을 유발시키며, 심한 경우 과도한 휘핑 굽힘모멘트로 인하여 선체거더는 종강도를 상실할 수 있다. Fig. 2.2는 가스구체의 반경 및 수직상승 속도의 시간이력과 물 속 임의의 한 점에서의 수중폭발에 의한 압력 시간이력을 개념적으로 보여주고 있다 [31]. 수중폭발에 의해 방출되는 전체 에너지는 Fig. 2.3에서 보듯이 전체 에너지의 약 53%가 충격파의 형태로 전파되며, 약 47%가 가스구체의 맥동운동 에너지로 사용된다.

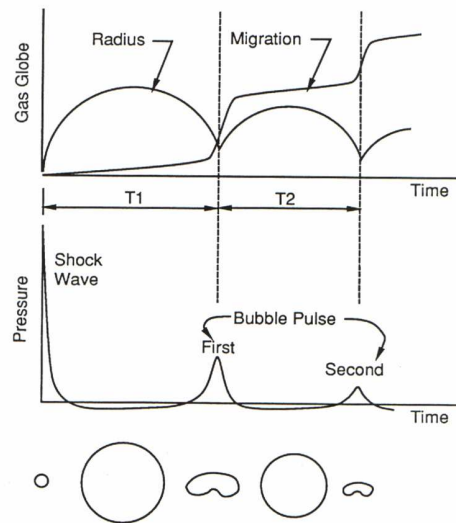


Fig. 2.3 Pulsation of gas bubble from UNDEX

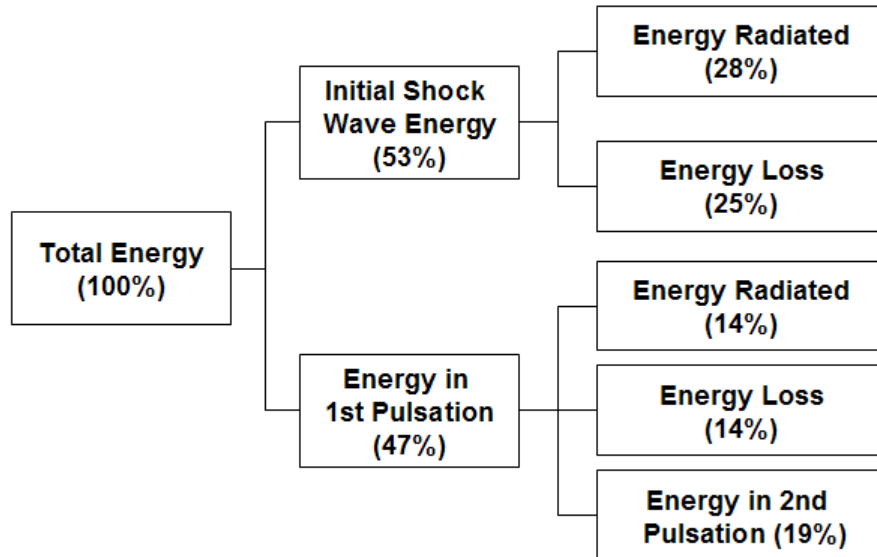


Fig. 2.3 UNDEX energy distribution

물속을 전파해가는 충격파가 해저면(sea bottom), 자유수면(free surface) 또는 선체 접수구조표면(wetted structural surface)에 도달하면 이들 경계면에서 충격파는 반사(reflection) 또는 굴절(refraction)하게 된다. 압축파(compression wave)인 충격파가 해저면에 도달하면 일부는 굴절하여 통과하고 나머지는 반사하게 되는데, 해저면에 의한 반사파 역시 압축파로서 선체에 또 다른 충격하중으로 작용하지만, 통상의 충격응답 해석에 있어서는 이의 영향을 고려하지 않고 있다. 그러나 천수(shallow water) 지역에서 수중폭발이 일어나는 경우에는 이의 영향을 무시할 수 없으며, 이를 정확히 고려하기 위해서는 해저면의 상태에 따른 반사계수를 정확히 알아야 한다. 충격파가 자유수면에 도달하면 물의 임피던스(impedance, 밀도×음속)가 공기의 임피던스에 비해 훨씬 크기 때문에 거의 전반사(total reflection)가 이루어지며, 이 경우 반사파는 양의 압력을 갖는 압축파인 충격파와는 달리 음의 압력을 갖는 인장파(rarefaction wave)이다. 수면 하 임의의 한 점에서의 압력 시간이력을 생각해보면, Fig. 2.4에 보인 바와 같이 인장반사파가 도달하는 시점에서 먼저 도착한 입사충격파 압력과 인장반사파 압력이 중첩되어 압력은 급격히 감소하는데 이러한 현상을 자유수면에 의한 컷오프(surface cutoff)라 하며, 입사충격파가 도달한 시간부터 인장반사파가 도달할 때까지의 시간을 컷오프 시간(cut-off time)이라 한다[32].

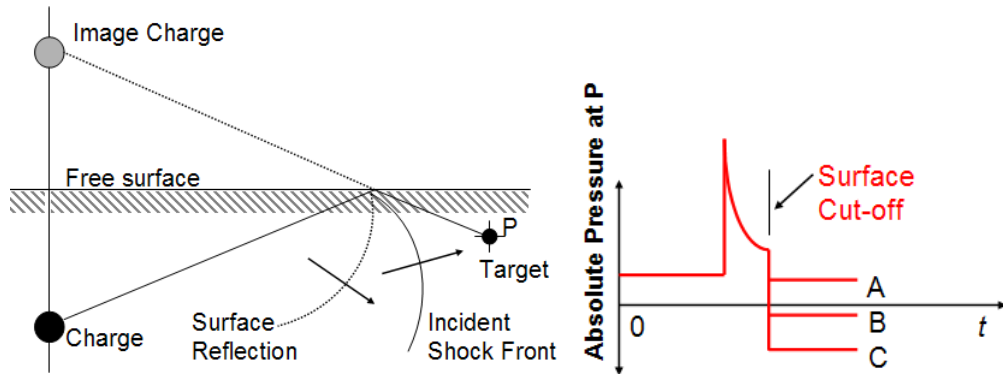


Fig. 2.4 Shock wave pressure profile with surface cut-off

수면 아래 위치에 따라 절대압력(입사충격파에 의한 압력 + 인장반사파에 의한 압력 + 수압)이 캐비테이션(cavitation) 발생압력(실제로는 $-3 \sim -2\text{psi}$ 이지만, 통상 0psi 로 간주함) 이하로 떨어지게 되어 상당히 넓은 영역에 걸쳐 캐비테이션이 발생하는데 이러한 현상을 광역캐비테이션(bulk cavitation) 현상이라 한다. 캐비테이션이 발생하면 캐비테이션 영역 내의 물 입자는 순간적인 수직속도(kick-off velocity)를 갖게 되며, 캐비테이션이 일어나지 않은 물과 분리된다. 광역캐비테이션 영역 내의 물 입자들의 운동으로부터 수상함의 충격파에 의한 전체거동을 파악할 수 있다. 한편, 광역캐비테이션 영역 내의 물 입자들의 운동으로 인해 광역캐비테이션 상 경계(upper boundary)와 하 경계(lower boundary)가 결국에는 만나게 되어 캐비테이션이 종료되며, 이 때 폐쇄압력파(closing pulse)가 발생하여 선체에 또 다른 충격하중으로 작용하게 된다. 한 예로서 Fig. 2.5에는 50,000lb HBX-1 폭약이 수심 300ft에서 폭발하는 경우 발생하는 광역캐비테이션 영역(수직축에 대해 대칭이므로 절반만 도시)과 캐비테이션이 종료되는 즉, 상, 하 경계가 만나는 수심(파란 점선)을 도시하였다. Fig. 2.6에는 이 경우에 있어서 캐비테이션이 가장 먼저 종료되는 위치(수심 25ft, 폭약으로부터의 수평거리 850ft)에서의 압력 시간이력을 도시하였다. Fig. 2.6에서 보듯이 폐쇄압력파의 최대크기는 입사충격파의 대략 20% 내외지만 작용시간(duration)이 입사충격파에 비해 수 배 이상이기 때문에 이의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 수상함(surface ship)의 충격응답 해석을 정확히 예측하기 위해서는 반드시 광역캐비테이션의 영향을 고려하여야 한다[33~34].

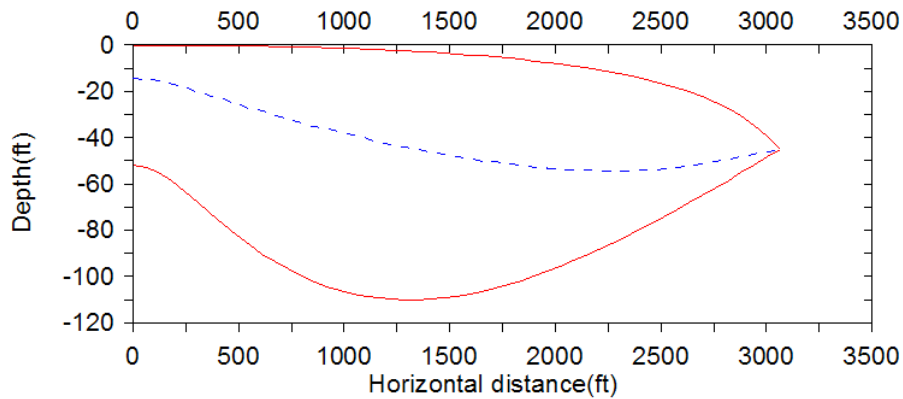


Fig. 2.5 Bulk cavitation regions under UNDEX

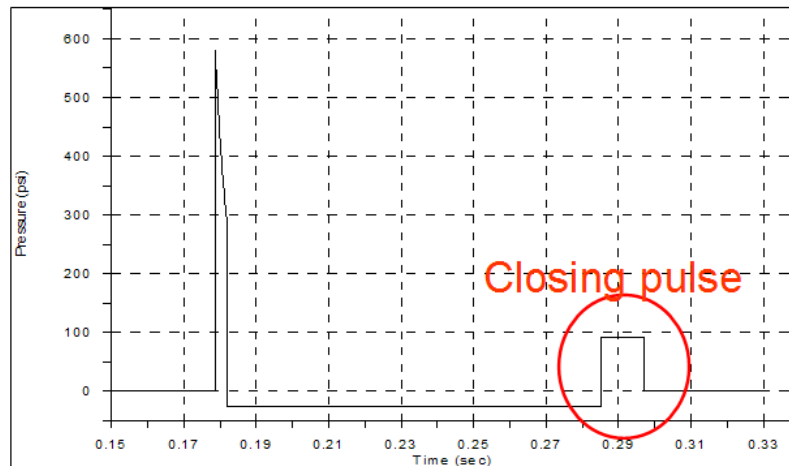


Fig. 2.6 Closing pulse due to bulk cavitation closure

한쪽 면은 물과 접하고 있으며, 다른 쪽 면은 공기와 접하고 있는 선체외판에 충격파가 도달하게 되면 이 경우에도 음압을 갖는 인장반사파가 발생하며, 입사충격파의 크기, 입사각과 외판의 단위면적 당 질량에 따라 캐비테이션이 발생할 수 있으며, 이러한 캐비테이션을 선각캐비테이션(hull cavitation) 또는 국부캐비테이션(local cavitation)이라고 한다. 이 경우에도 캐비테이션이 종료되면 폐쇄압력과 발생하여 선체에 또 다른 하중으로 작용한다. 그러나 선저에 있는 발라스트(ballast) 탱크의 외판처럼 양쪽 면이 모두 물과 접하고 있는 경우에는 이러한 선각 캐비테이션이 발생하지 않는다. 무한평판(infinite flat plate)에 대한 선각캐비테이션 이론으로부터 충격파에 의한 선체외판의 국부거동(local behavior)을 비교적 정확히 예측할 수 있다. 그리고 수중폭발에 의해 자유수면에서 발생하는 현상을

Fig. 2.7에 도시하였다. 수중폭발 직후 발생한 충격파가 자유수면에 도달하면 광역 캐비테이션 현상으로 인해 스프레이 돔(spray dome)이 형성되고, 이어서 가스구체 압력파가 자유수면에 도달하면 스프레이 돔을 관통하는 물기둥(plume)이 발생한다[35].

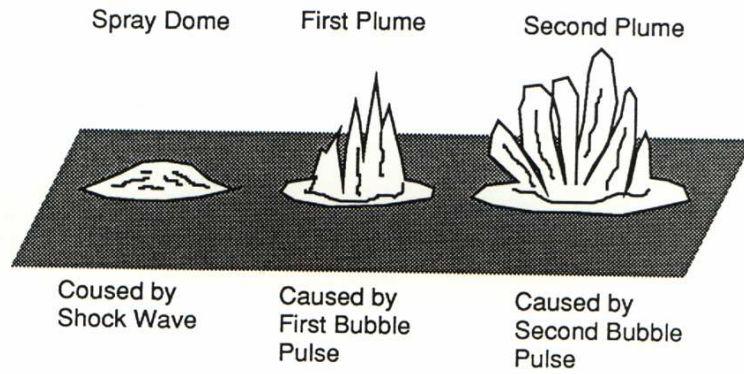


Fig. 2.7 Surface phenomena due to UNDEX

2.1.2 수중폭발 충격하중

폭발원으로부터 거리 R 만큼 떨어진 무한수역 내 임의의 한 점에서 충격파에 의한 유체압력의 시간이력은 식 (2.1) 및 Fig. 2.8과 같이 지수감소 함수의 형태로 나타낼 수 있다[31, 37].

$$P(t) = P_{max} e^{-\frac{(t-t_1)}{\Theta}}, \quad t \geq t_1 \quad (2.1)$$

여기서 P_{max} 는 폭발 시의 최대압력, t_1 은 폭발원으로부터 이 지점까지 충격파의 도달시간, Θ 는 감쇠상수(decay constant)이다. P_{max} 및 Θ 는 폭약의 중량 W 및 폭발거리(stand-off) R 의 함수로서 각각 식 (2.2) 및 (2.3)과 같이 주어진다.

$$P_{max} = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1} \quad (\text{psi}) \quad (2.2)$$

$$\Theta = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2} \quad (\text{msec}) \quad (2.3)$$

여기서 K_1, K_2, A_1, A_2 는 폭약의 종류에 따른 실험상수로서 아래 Table 2.1에서와 같이 폭약마다 서로 다른 상수값을 가진다.

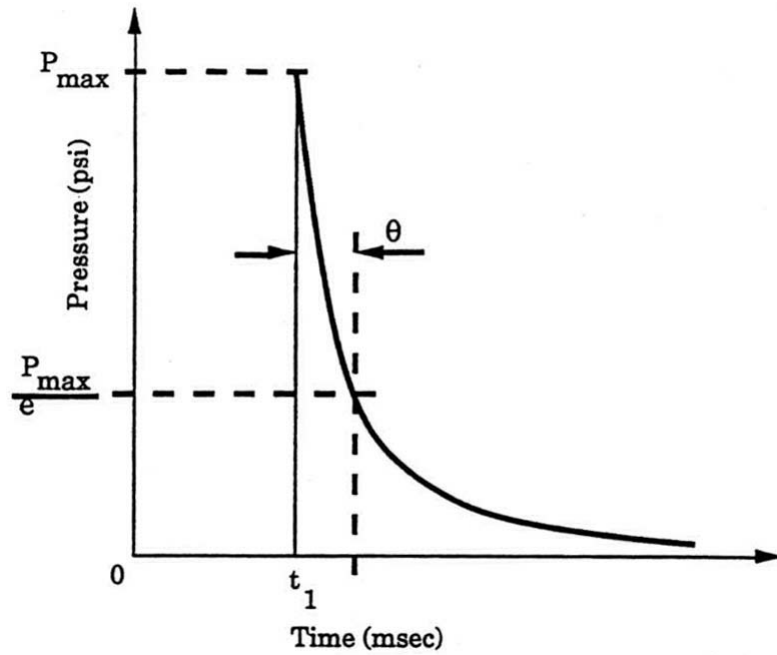


Fig. 2.8 Pressure profile of shock wave

Table 2.1 Shock wave parameters

		HBX-1	TNT	PENTOLITE	NUKE
$P_{\max}$	K_1	22,347.6	22,505	24,589	4.38E6
	A_1	1.144	1.180	1.194	1.180
Decay Constant	K_2	0.056	0.058	0.052	2.274
	A_2	-0.247	-0.185	-0.257	-0.220
Impulse	K_3	1.786	1.798	1.674	11,760
	A_3	0.856	0.980	0.903	0.910
Energy	K_4	3,086.5	3,034.9	3,135.2	3.313E8
	A_4	2.039	2.155	2.094	2.040

충격파에 의한 물의 유동은 압축성이며 폭발원으로부터 일정거리를 통과하면서 음속으로 전파해감으로 음향파(acoustic wave) 이론에 의해 기술될 수 있다. 따라

서 압력 $P(t)$ 를 갖고 구상파의 형태로 전파에 가는 충격파에 의한 물입자의 속도는 식 (2.4)와 같이 주어진다.

$$u(t) = \frac{P(t)}{\rho c} + \frac{1}{\rho R} \int_0^t P(t) dt \quad (2.4)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, c 는 물 속에서의 음속이다.

충격파에 의한 물의 유동은 압축성이며 폭약으로부터 일정거리를 지난 후의 충격파 전파속도는 대략 음속과 같기 때문에 음향파 이론에 의해 기술될 수 있다. 충격파가 구상파의 형태로 전파되기 때문에 충격파에 의한 유체속도는 평면파(plane wave) 이론에 의한 계산식 $u(t) = P(t)/\rho c$ 에 충격파가 지나간 후의 유동 즉, 후류(after flow)의 영향을 고려한 항이 추가된 계산식으로 계산된다. 후류의 영향은 폭약에 가까울수록 커짐을 알 수 있다. 아래에는 충격파를 평면파로 가정했을 때 충격파에 의한 역적(impulse)과 단위체적당 에너지 즉, 에너지밀도 계산식을 각각 식 (2.5)과 (2.6)에 나타내었다.

$$I = \int_0^t P(t) dt = K_3 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_3} \quad (\text{lb-sec/in}^2) \quad (2.5)$$

$$E = \int_0^t p u dt = K_4 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_4} = \frac{W}{R^2} \quad (\text{lb-sec/in}^3) \quad (2.6)$$

위 식에서 보듯이 충격파에 의한 역적 및 에너지밀도도 폭약의 중량 W 과 폭약으로부터의 거리 R 의 함수이며, K_3, K_4, A_3, A_4 역시 폭약의 종류에 따른 실험상수이다. 충격파에 의한 선체외판의 속도 및 소성변형(plastic deformation) 양은 대략 에너지밀도의 제곱근에 비례한다. Table 2.1에는 대표적인 폭약 종류들에 대한 충격파 파라미터(K_i, A_i)의 값을 정리하였다[36].

함정 선체에 작용하는 충격파에 의한 충격하중의 세기를 대략 충격파의 에너지 밀도의 제곱근에 비례하는 충격계수(shock factor)로 표현하며, 식 (2.7)~(2.8)에 보인 바와 같은 용골충격계수(keel shock factor) 또는 선각충격계수(hull shock factor)가 널리 사용되고 있다.

$$\text{Keel Shock Factor} = \frac{\sqrt{W}}{R_1} \times \frac{(1 + \sin \Theta)}{2} \quad (2.7)$$

$$\text{Hull Shock Factor} = \frac{W}{R_0} \quad (2.8)$$

용골충격계수는 폭약중량 W 폭약에서 용골까지의 최단거리 R_0 및 입사각 θ 의 함수로서 충격파가 전선에 입힐 수 있는 손상잠재력을 나타내는 척도이며, 선각충격계수는 폭약중량 W 폭약에서 선체외판까지의 최단거리 R_0 의 함수로서 충격파가 선체외판에 입힐 수 있는 손상잠재력을 나타내는 척도이다.

충격계수는 무차원 값이 아니기 때문에 이의 값을 표현할 때는 반드시 사용된 폭약중량과 거리의 단위를 명시해야 한다. 현재 함정의 내충격 강화기준은 하나의 충격계수 값으로 주어지며, 수상함의 경우에는 용골충격계수 값으로, 잠수함의 경우에는 선각충격계수 값으로 주어진다. 가스구체의 최대반경 및 맥동운동 1차 주기를 계산하기 위한 실험식을 식 (2.9)~(2.10)에 나타내었다.

$$T = K_5 \frac{W^{1/3}}{(D+33)^{5/6}} \quad (\text{sec}) \quad (2.9)$$

$$R_{\max} = K_6 \frac{W^{1/3}}{(D+33)^{1/3}} \quad (\text{ft}) \quad (2.10)$$

가스구체의 최대반경 및 맥동운동 1차 주기는 폭약의 중량 W 과 폭발수심 D 의 함수이며, K_5, K_6 는 폭약의 종류에 따른 실험상수로서 대표적인 폭약에 대한 이들의 값을 Table 2.2에 정리하였다. 보다 정확한 최대반경과 주기를 계산하기 위해서는 가스구체의 거동 즉, 맥동운동과 수직상승에 대한 운동방정식을 풀어야 한다. 현재까지 Hicks가 제시한 운동방정식[38~39]이 가장 널리 사용되고 있으며, 가스구체의 맥동운동 1차 주기 동안에 대해서만 실제 현상과 잘 일치하는 결과를 주는 것으로 알려져 있다. Fig. 2.9에는 HBX-1 폭약, 270kg, 540kg, 810kg, 1080kg, 4500kg이 수중에서 폭발한 경우에 대해 Hicks의 운동방정식을 풀어서 계산된 가스구체의 반경 및 수직상승 속도의 시간이력을 도시하였다. 폭발수심은 모든 경우 동일한 용골충격계수 값을 갖도록 조정되어 있다. 동일한 용골충격계수 값을 갖는 수중폭발 조건 하에서는 폭약 중량이 클수록 즉, 폭발수심이 깊을수록 가스구체의 최대반경, 맥동운동 1차 주기 및 최대 수직상승 속도가 커짐을 알 수 있다.

Table 2.2 Gas bubble parameters

		HBX-1	TNT	PENTOLITE	NUKE
Bubble Period	K_5	4.761	4.268	4.339	515
Bubble Radius	K_6	14.14	12.67	12.88	1500

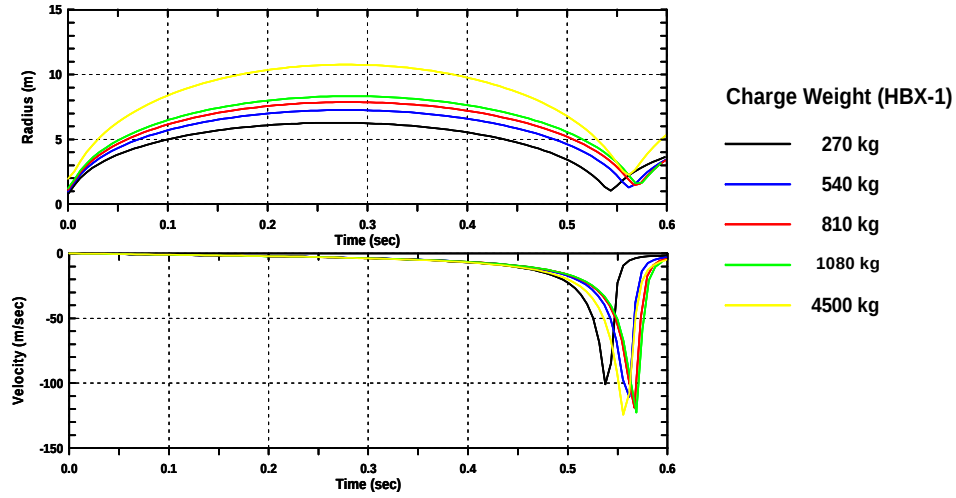


Fig. 2.9 Time history of gas bubble radius and vertical velocity

수중폭발 시 초기충격파에 의해 주위 물의 상당한 부피변화가 생기며 압축성 유동이 발생한다. 초기충격파가 지나간 후에는 방사속도를 갖는 후류가 발생하며 이후의 가스구체의 맥동에 의한 유동은 비압축성의 이상유체로서 취급할 수 있다. 자유수면이 있는 무한수심의 이상유체 속에서 가스구체가 맥동운동 시 구의 형태를 유지한다고 가정하면 가스구체의 맥동과 수직상승에 대한 무차원 운동방정식과 초기조건식은 다음과 같이 식 (2.11)~(2.12)로 주어진다[40].

$$\dot{a} = \sigma \quad (2.11)$$

$$\dot{n} = \lambda$$

$$\dot{\sigma} = -\frac{3\delta}{(2\delta-a)} \left[\frac{\sigma^2}{a} \left(1 - \frac{2a}{3\delta} \right) - \frac{\lambda^2}{6a} + \frac{n}{an_0} - \frac{(\gamma-1)\epsilon}{a^{3\gamma+1}} + \frac{a}{4\delta^2} \left(C_a \frac{\lambda^2}{4a} + \frac{\sigma\lambda}{3} - \frac{a}{n_0} \right) \right]$$

$$\dot{n} = -3 \left[\frac{1}{n_0} + \frac{\sigma\lambda}{a} - C_a \frac{\lambda^2}{4a} + \frac{a}{4\delta^2} (3\sigma^2 + a\dot{\sigma}) \right]$$

$$a(0) = R^{-3(\gamma-1)} \left[1 + \frac{R^{1-\gamma}}{3(\gamma-1)} \right] \quad (2.12)$$

$$\sigma(0) = 0$$

$$n(0) = n_0$$

$$\lambda(0) = 0$$

여기서 a 는 무차원 가스구체 반경, σ 는 무차원 반경속도, n 는 폭발원에서의 무차원 수두, λ 는 무차원 수직상승이동속도, δ 는 무차원 폭발깊이, C_d 는 수직상승이동시 가스구체의 항력계수(2.0~2.25), γ 는 단열상수, R 는 폭약의 종류에 따른 실험상수이고 상첨자는 시간에 따른 미분이다.

가스구체의 거동에 의한 유체충격력을 계산하기 위해 이상유체의 맥동운동과 부력 의해 수직상승 이동하는 가스구체에 의한 유동은 속도포텐셜을 이용하면 기술할 수가 있다. 자유수면의 영향을 고려하기 위해서는 Fig. 2.10과 같이 정상 가스구체를 도입하면 가스구체의 운동에 의한 물입자의 속도포텐셜 Φ 는 다음과 같이 식 (2.13)으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_1} \cos\theta_1 - \frac{e_1}{r_2} - \frac{e_2}{r_2} \cos\theta_2 \quad (2.13)$$

$$e_1 = \frac{\dot{v}}{3}, \quad e_2 = -\frac{\dot{v}}{2} \left(u_m + \frac{\dot{v}}{12d} \right)$$

여기서 e_1 은 source의 크기로서 가스구체 부피의 변화속도의 함수이며, e_2 는 dipole의 크기로서 가스구체 부피의 변화속도, 수직상승 속도 U_m 및 폭발수심 d 의 함수이다.

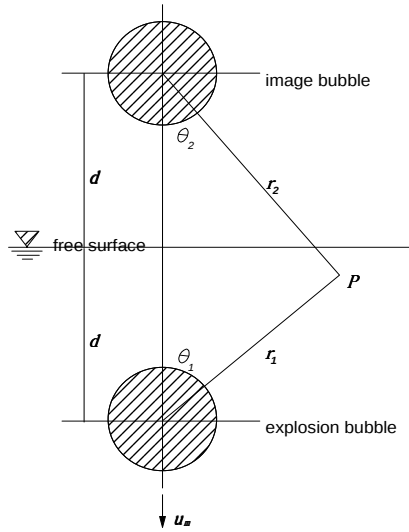


Fig. 2.10 Imaginary gas bubble

수중폭발이 선체에서 어느 정도 떨어진 곳에서 발생하여 선체가 가스구체의 운동에 의한 물입자의 속도포텐셜에 영향을 주지 않는다고 가정하면 가스구체 반경 방향으로의 물의 압력 p 및 속도 u 는 다음 식 (2.14)로부터 구할 수 있다. 이 가정은 통상 폭발깊이 d 가 $d \gg 2.5B_m$ 이면 만족되고, 여기서 B_m 은 최대 수선폭이다.

$$p = \rho \Phi \quad (2.14)$$

$$u = -\nabla \Phi$$

여기서 상첨자 $\cdot$ 는 시간에 대한 전미분으로서 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_m \frac{\partial}{\partial y}$ 로 계산된다. 식 (2.14)에 식 (2.13)을 대입하면 자유수면 아래 임의의 점 P 에서의 가스구체 반경 방향으로의 물의 압력 p_I 와 가속도 $\ddot{u}$ 는 식 (2.15)~(2.16)과 같이 계산된다.

$$p_I = \rho \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\dot{e}_1}{r_i} + \frac{\dot{e}_2}{r_i^2} \cos \theta_i \right. \\ & \left. - u_m \left[\frac{e_1}{r_i^2} \cos \theta_i - \frac{e_2}{r_i^3} (1 - 3 \cos^2 \theta_i) \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

$$\dot{u}_I = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\dot{e}_1}{r_i^2} + 2 \frac{\dot{e}_2}{r_i^3} \cos \Theta_i - 2 u_m \left[\frac{e_1}{r_i^3} \cos \Theta_i - \frac{e_2}{r_i^4} (1 - 4 \cos^2 \Theta_i) \right] \right\} \quad (2.16)$$

위의 식을 이용하여 폭약중량에 따른 유체의 가속도와 압력을 시간이력으로 나타낼 수 있고 동일한 용골충격계수의 값을 가질 때 폭약 중량이 작을수록 유체 충격력은 커진다는 것을 알 수 있다.

가스구체의 부피의 변화속도 및 수직상승 속도는 가스구체의 거동에 대한 운동 방정식으로부터 계산된다. Fig. 2.11에는 HBX-1 폭약, 270kg, 540kg, 810kg, 1080kg, 4500kg이 수중에서 폭발한 경우에 대해 계산된 유체가속도 및 유체압력의 시간이력을 도시하였다. 이 경우에도 폭발수심은 모든 경우 동일한 용골충격계수 값을 갖도록 조정되어 있다. 동일한 용골충격계수 값을 갖는 수중폭발 조건 하에서는 폭약의 중량이 작을수록 유체가속도와 유체압력이 커짐을 알 수 있다.

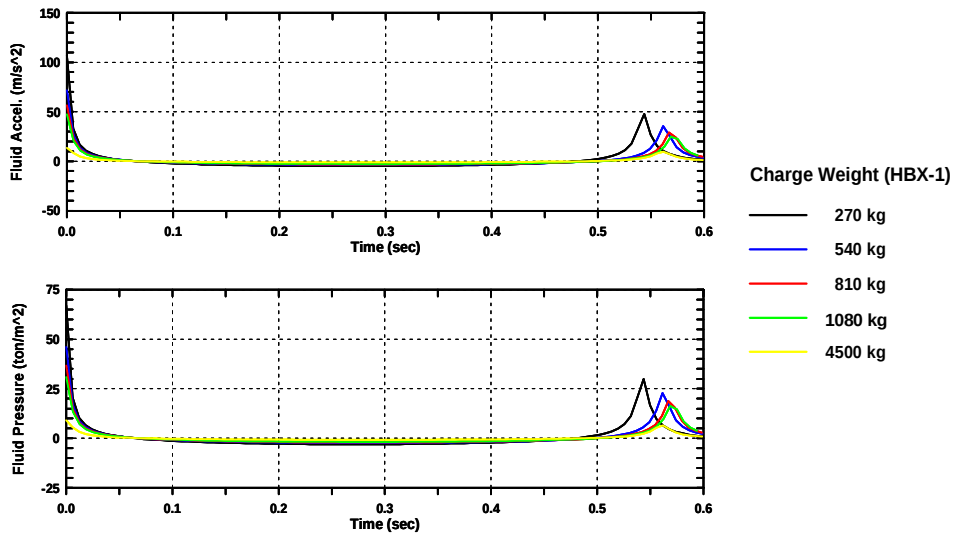


Fig. 2.11 Time history of fluid acceleration and pressure

가스구체 최대반경의 1.2배 이내에서 폭발이 일어나는 경우는 가스구체가 주위 수압에 대해 팽창하는 중에 선체와 간섭이 생겨서 정상적인 수축을 하지 못하고 갑자기 붕괴하게 되며, 이 경우 가스구체 압력파가 아닌 Fig. 2.12에 보인 바와 같이 매우 급속한 제트 유동(jet flow)이 발생하게 된다. 제트 유동은 마치 접촉폭발이 일어난 경우처럼 선체거더의 휘핑응답 뿐 만 아니라 선체구조에 큰 파공(hole)

을 발생시킬 수 있다.

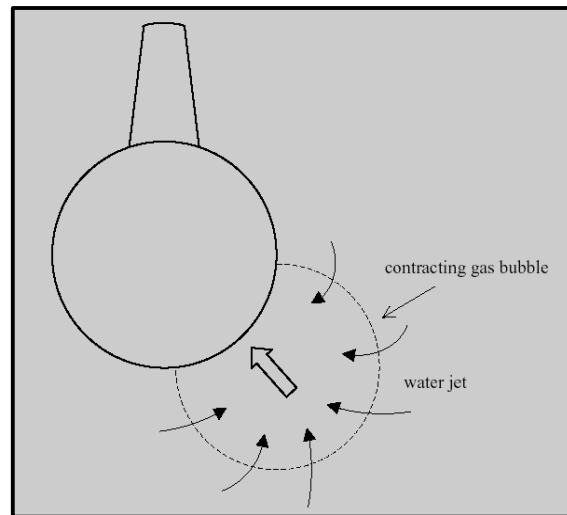


Fig. 2.12 Occurrence mechanism of bubble jet

2.2 함정의 충격응답 특성

앞 절에서 언급한 바와 같이 충격파는 함정 선체외판 및 국부구조와 탑재장비에 치명적인 손상을 입힐 수 있다. Fig. 2.13과 2.14에는 충격파에 의한 대표적인 손상 사례를 도시하였다.

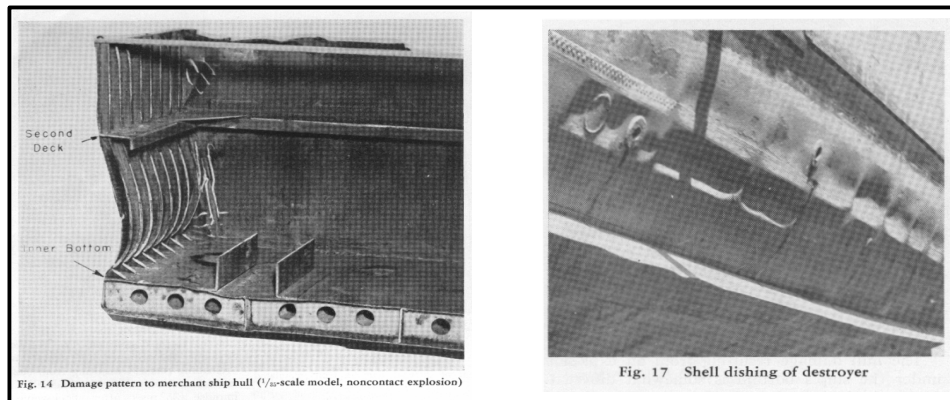


Fig. 2.13 Damage pattern of local hull structure by shock wave

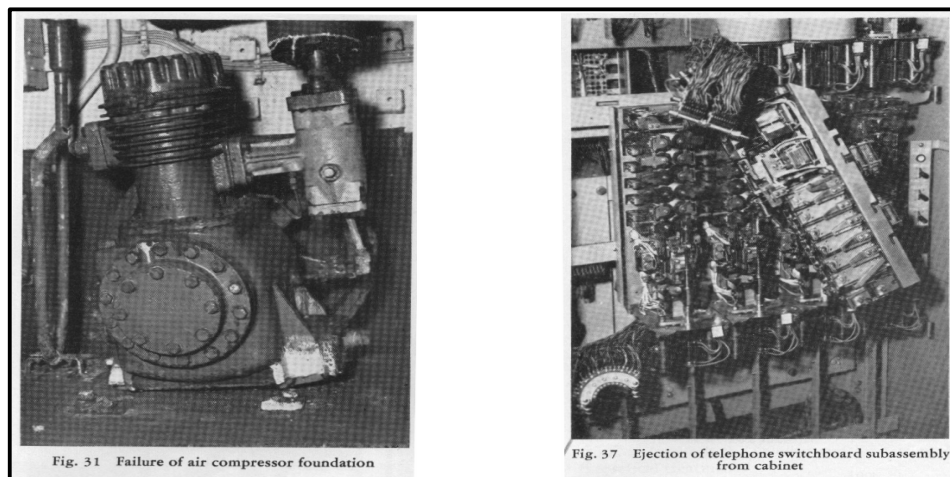


Fig. 2.14 Damage pattern of equipments by shock wave

가스구체 압력파는 함정 선체거더의 휘핑응답을 유발하며, 심한 경우 Fig. 2.15에 보인 바와 같이 선체거더의 종강도를 상실할 수 있게 한다. 또한 선체에 근접해서 폭발이 일어나면 bubble jet이 발생하고 Fig. 2.16에 보인 바와 같이 선체에 큰 파공이 발생할 수 있다.

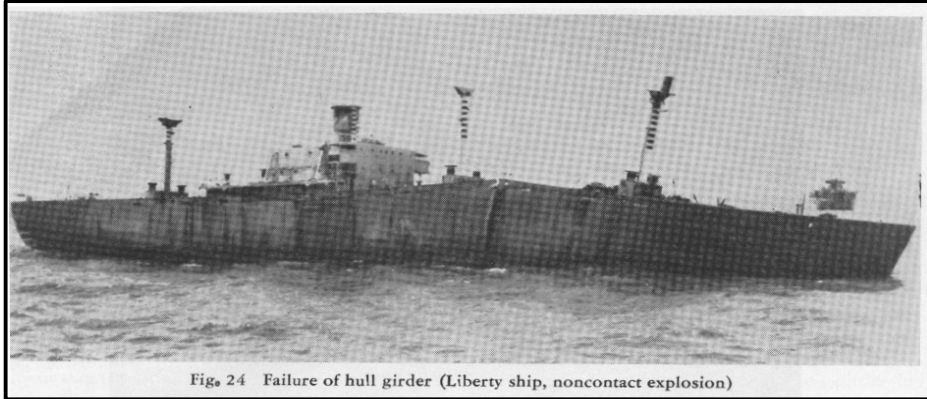


Fig. 2.15 Failure of hull girder by whipping

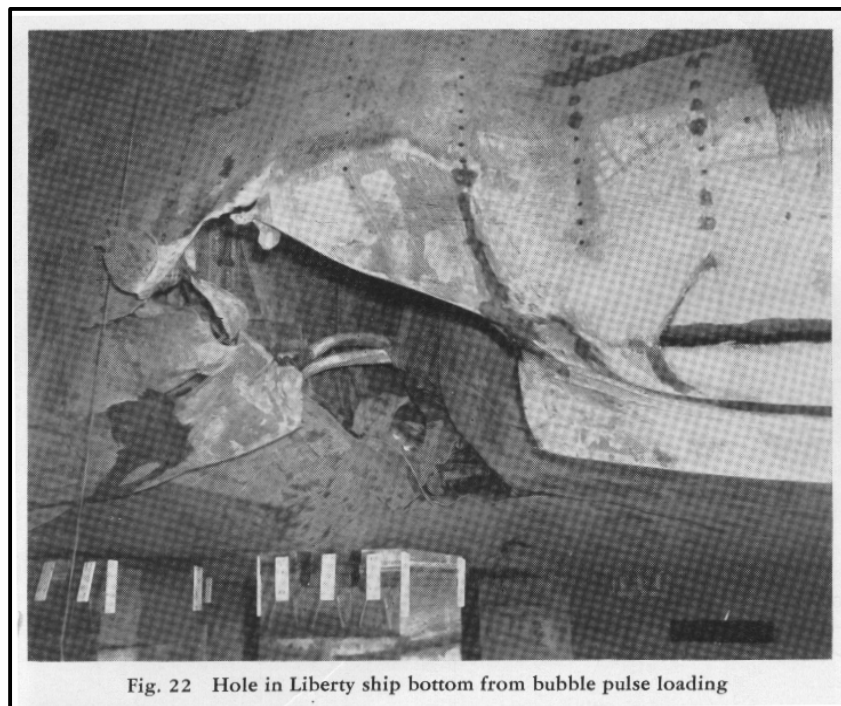


Fig. 2.16 Hole in ship bottom from bubble pulse loading

3. 함정 수중충격 M&S의 고도화를 위한 절차 수립

3.1 개 요

함정 수중충격 해석은 다른 유한요소법을 이용한 해석과정과 전체적으로는 큰 차이가 없으나 해석 대상과 결과에 대한 정확성을 갖기 위해서는 매우 복잡한 과정이 필요하다. 본 장에서는 함정 수중충격 시뮬레이션 업무흐름(work flow)을 상세히 분석하여 이를 실제로 구현할 수 있도록 구체적이고 명시적인 형태로 나타내고자 하였다.

함정 수중충격 시뮬레이션은 통상의 CAE(Computer Aided Engineering) 과정과 마찬가지로 크게 시뮬레이션을 위한 모델생성 및 관련 입력자료를 작성하는 전처리 과정, 시뮬레이션을 실행하는 본 과정 및 시뮬레이션 결과 검토 및 가시화 업무를 수행하는 후처리 과정으로 구분할 수 있다. 이를 위해 사용되는 도구로서는 전처리 과정에서는 FEMB[41]와 TrueGrid[42]를, 시뮬레이션 실행도구로서는 LS-DYNA와 USA(Underwater Shock Analysis)를 연계한 LS-DYNA/USA [43~45]를, 후처리 과정에서는 LS-POST를 주로 사용하고 있다. 이들 상용도구들을 도입·활용하여 현재 사용 중인 시뮬레이션 흐름을 분석하여 업무절차를 수립하였다. 아래에서는 LS-DYNA/USA를 이용한 함정 수중충격 시뮬레이션에 있어서의 유의사항과 각 해당 단계에서의 업무절차를 상세히 기술하였다.

3.2 LS-DYNA/USA를 이용한 함정 수중충격 M&S에 있어서의 유의사항

잠수함과는 달리 수상함의 수중폭발 충격파에 의한 충격응답 시뮬레이션을 정확하게 수행하기 위해서는 입사충격파가 자유수면과 접수구조표면에서 반사되어 생기는 인장반사파에 의해 유체영역에서 발생하는 광역캐비테이션과 선각캐비테이션 현상을 고려하여야 한다. LS-DYNA/USA를 이용하여 캐비테이션을 고려한 수상함의 수중충격 시뮬레이션을 위해서는 Fig. 3.1에 보인 바와 같이 3개의 연성계(coupled field) 즉, 구조계(S), 캐비테이션이 발생하는 유체영역(V)과 이의 경계면(D)을 함께 취급하여야 한다. 캐비테이션이 발생하는 유체영역에 대해서는 LS-DYNA의 MAT_90로 정의되는 음향요소(acoustic element)인 유한체적요소로, 모델링에 포함되지 않은 기타 유체영역을 고려하기 위해 이의 경계면을 경계요소인 DDA(Doubly Asymptotic Approximation) 요소로 모델링 한다. 일반적으로 선체 접수구조부에서는 선체구조 유한요소와 유체 유한체적요소가 1대1 대응

(matching)이 되도록 모델링한다[46].

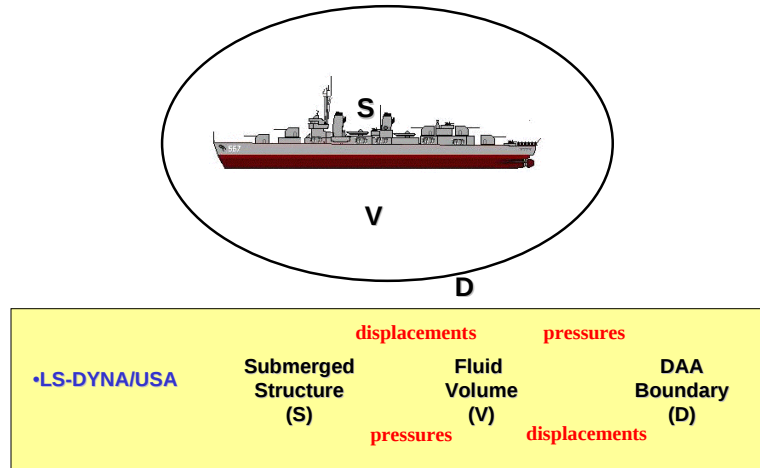


Fig. 3.1 Staggered solution scheme of LS-DYNA/USA

LS-DYNA/USA를 이용하여 유체영역에서 발생하는 캐비테이션을 고려한 수중 충격 시뮬레이션에 있어서는 Fig. 3.2에 나타난 바와 같이 몇 가지 유의하여야 할 사항이 있는데, 이는 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성 문제와 LS-DYNA/USA 상의 제한조건을 함께 반영한 것이다.

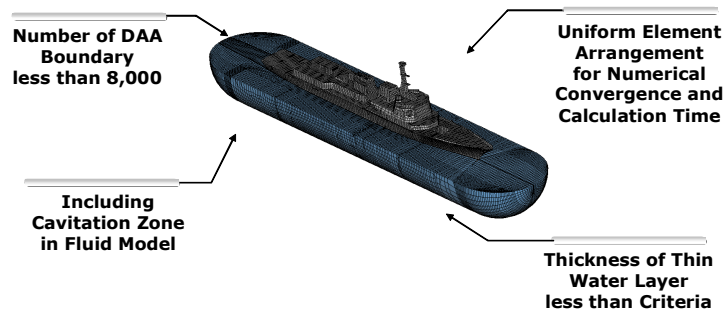


Fig. 3.2 Attention particulars in UNDEX ship shock simulation using LS-DYNA/USA

첫 번째 유의사항으로, 현재 USA 프로그램은 유한요소 모델링에 포함되지 않은 유체영역을 고려하기 위한 DAA 요소의 개수를 최대 8,000개로 제한하고 있기 때문에[45] 이를 넘지 않는 범위에서 시뮬레이션 모델을 구성하여야 하며, 가급적이면 DAA 요소의 수를 줄일 수 있는 모델링 기법을 사용하여야 한다. 왜냐하면 음해법(implicit method)을 사용하는 USA 프로그램에서 DAA 요소들의 해를 구하는 시간이 전체 시뮬레이션 시간의 대부분을 차지하기 때문이다. 이러한 제한조건은

유체 유한요소 모델 뿐 만 아니라 선체구조 유한요소 모델의 요소크기를 결정하는 가장 중요한 기준이 된다.

두 번째는, 구조계 및 유한체적요소로 모델링 된 유체영역의 해를 계산하는 LS-DYNA는 양해법(explicit method)을 사용하기 때문에 안정된 해를 얻기 위해서는 선체 접수구조부와 직접 만나는 첫 번째 층(layer)의 유체 유한체적요소의 크기를 $2\rho D/\rho_s t_s \leq 5$ 의 조건을 만족하도록 결정하여야 한다. 여기서 D 는 유체 유한체적요소의 깊이, ρ 는 유체밀도, ρ_s 및 t_s 는 각각 접수구조 외판의 밀도 및 두께이다.

세 번째는, 유한요소 모델링에 포함시킬 유체영역의 범위와 관련한 사항이다. 미해군의 실선충격시험에 대한 M&S 연구결과[2, 4]에 의하면, 유한요소 모델링에 포함시킬 유체영역의 함정 길이 및 폭 방향으로의 크기가 선체 충격응답에 미치는 영향은 미미하지만 깊이방향으로의 크기는 매우 큰 영향을 미치기 때문에 함정 깊이방향으로의 유체 유한요소 모델링 범위는 반드시 고려중인 수중폭발 조건에 해당되는 광역캐비테이션 하 경계 깊이와 같도록 하여야 정확한 결과를 얻을 수 있음이 확인되었다. 또한, 수중폭발 조건이 달라지면 광역캐비테이션 영역이 달라지므로 각 수중폭발 조건별로 이를 반영한 유체 유한요소 모델을 구성하여야 한다.

마지막 유의사항으로, 안정적인 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 구조계의 유한요소 모델은 가능한 동일한 크기로 균일하게 생성하여야 하며, 가능한 삼각형 요소의 사용을 배제하여야 한다.

3.3 함정 수중충격 시뮬레이션 절차

현재 사용하고 있는 시뮬레이션 업무흐름을 분석하여 보다 체계적이고 표준화된 방법으로 함정 수중충격 해석을 수행하기 위해 수립한 해석절차를 Fig. 3.3에 나타내었다. 아래에서는 각 단계별로 상세한 해석절차를 설명하였다.

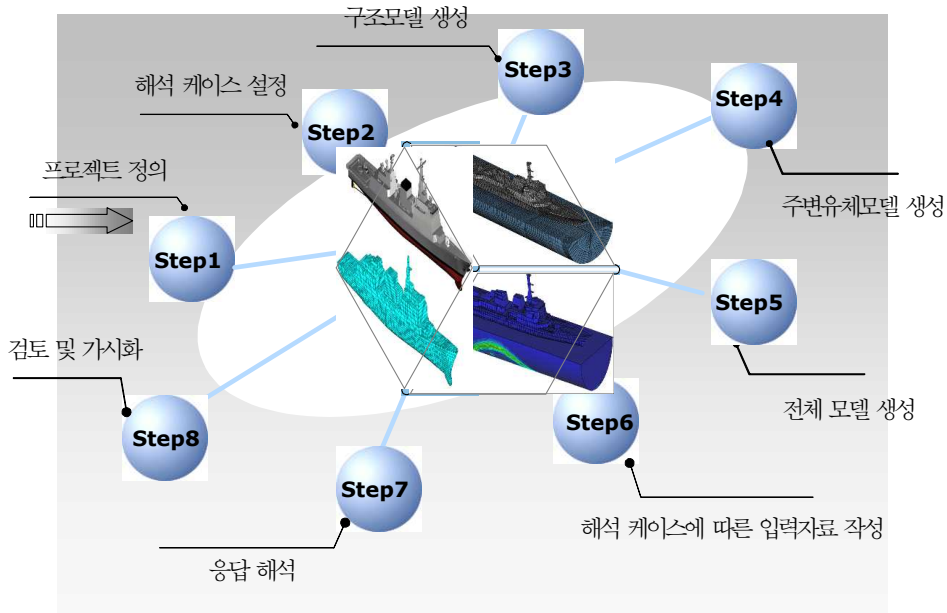
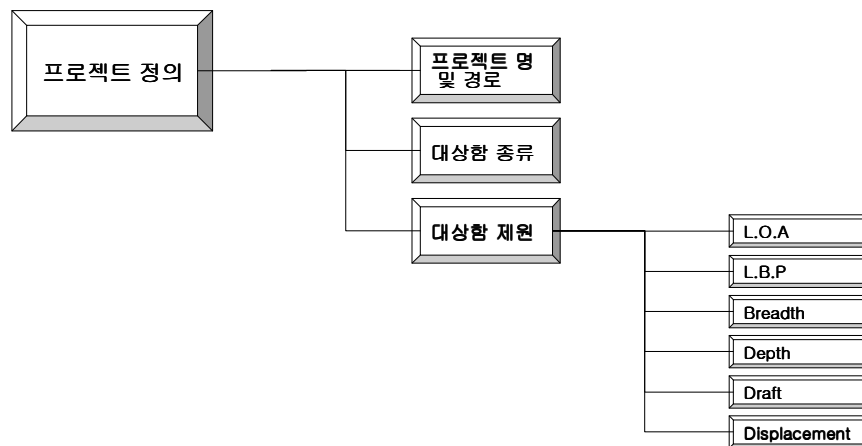


Fig. 3.3 Analysis procedure of UNDEX ship shock simulation

3.3.1 Step 1 - 프로젝트 정의



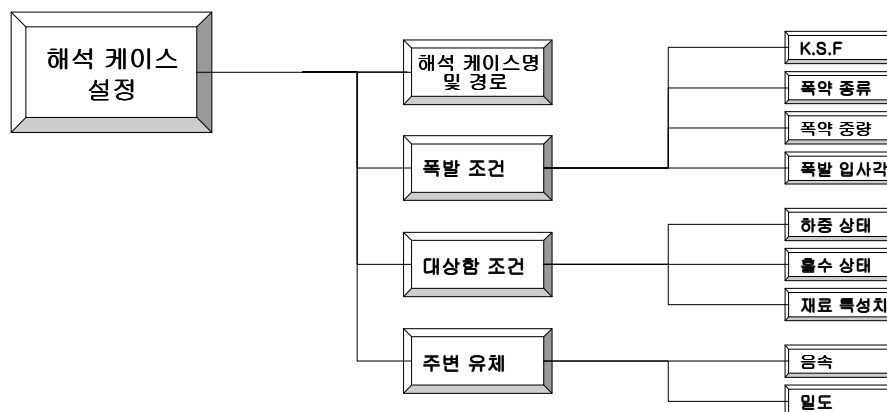
본 단계에서는 특정 대상항에 대해 수행되는 모든 수중충격 시뮬레이션은 프로젝트 단위로 구분하여 일반사항과 대상항의 기본제원을 정의한다. 정의된 기본제원 정보는 이후 과정에서 가장 기본적인 입력자료로 사용하게 된다. 시뮬레이션을 위한 시작단계인 본 단계에서는 시뮬레이션 모델생성을 위해 아래의 필수자료들

이 확보되었는지 반드시 확인하여야 한다.

- 전체 구조도면
- 선도(lines) 자료
- 하중 조건별 중량 분포도 및 상세자료
- 구획별 배치도면
- 탑재장비 관련자료

대상함의 기본제원 중에서 하중상태에 따른 배수량과 흘수 정보는 구조모델 생성에 있어서 선체 접수구조부의 요소배치에 직접 반영이 되는 중요한 기준으로 활용된다.

3.3.2 Step 2 - 해석 케이스 설정

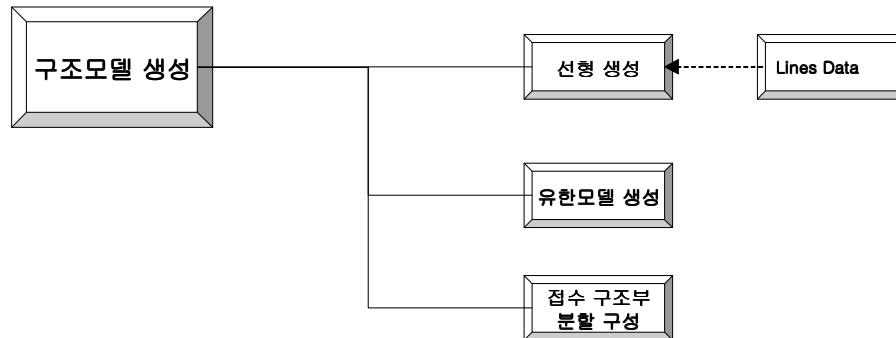


같은 대상함일지라도 시뮬레이션을 위한 수중폭발 조건과 대상함의 하중 상태가 달라질 수 있기 때문에 이를 해석 케이스 단위로 구분하는 것이 바람직하다. 본 단계에서는 수중폭발 조건으로, 폭약종류 및 무게, 입사각(angle of attack)을 정의한다. 폭발 거리는 용골충격계수의 계산식에 따라 자동적으로 계산된다.

동일한 용골충격계수 값을 갖는 수중폭발 조건이라 할지라도 폭약종류, 무게 및 입사각에 따라 유체영역에서 발생하는 광역캐비테이션 영역의 크기가 달라지고, 대상함의 하중상태에 따라서 흘수도 달라지므로 본 단계에서 이를 고려한 해석 케이스별 유체영역의 유한요소 모델링 범위를 미리 결정해 두어야 한다. 이를 위한 계산과정과 필요한 프로그램의 사용방법은 아래의 ‘Step 4 - 주변유체 모델 생성’ 단계에서 자세히 설명하였다. 유체의 물성치로 사용하게 되는 음속과 밀도의

정보는 USA 프로그램의 FLUMAS 모듈(module)과 LS-DYNA의 입력자료로 사용하게 된다.

3.3.3 Step 3 - 구조모델 생성



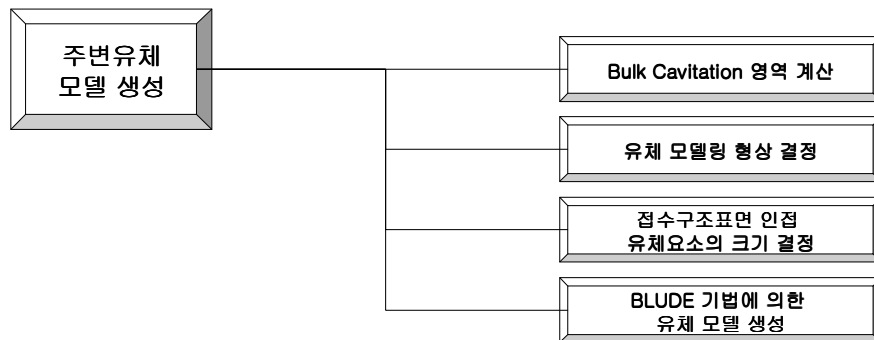
위의 'Step 1 - 프로젝트 정의' 단계에서 선정된 대상함의 전체 구조모델을 범용 유한요소 전처리기를 이용하여 생성하는 단계이다. 'Step 2 - 해석 케이스 설정' 단계에서 정의된 대상함의 하중상태에 따른 홀수위치를 기준으로 선체의 접수외판 요소들을 분할하도록 하면서, 전체적인 구조계의 요소크기는 main solver의 제한조건을 넘지 않도록 하는 것이 가장 중요하다. 즉, LS-DYNA/USA를 이용한 수중충격 시뮬레이션을 위해 사용되는 요소의 개수는 구조 및 유체 유한요소 모델에서는 거의 제한이 없지만, 3.2절에서 설명한 바와 같이 현재 USA 프로그램에서는 DAA 요소수를 최대 8,000개로 제한하고 있기 때문에 대상함의 종류에 상관없이 동일한 기준을 적용하여 구조계의 유한요소 모델을 생성하게 되면 이러한 제한조건을 위배할 수 있다. 왜냐하면 유체 유한요소 모델을 생성하기 위해 사용되는 전처리기인 TrueGrid에서는 대상함의 선체 접수구조부의 외판을 이용하여 선체 외부의 법선방향으로 요소 배열을 미리 지정한 간격으로 그대로 투영시켜 유체 유한체적요소를 만드는 'BLUDE 기법'을 사용하므로 선체 접수구조부의 판 요소 개수가 유체 유한요소 모델에서 DAA 요소의 수로 바로 연결되기 때문이다. 또한, DAA 요소수가 전체 시뮬레이션 시간의 대부분을 차지하기 때문에 이를 가급적 줄일 수 있는 모델링 기법을 사용하여야 한다.

따라서 구조 유한요소의 크기와 배치를 대상함의 크기에 따라 미리 고려하지 않으면 다음 Step의 주변유체 모델 생성과정에서는 이들 DAA 요소수를 줄일 수 없기 때문에 대상함의 특성을 고려한 기준이 필요하게 된다. 현재 LS-DYNA/USA를 이용한 함정 수중충격 시뮬레이션에 있어서 전체 DAA 요소수가 평균적으로 5,000개 내외, 그리고 최대 7,000개를 넘지 않도록 선체 접수구조부의 유한요소 모

텔을 생성하는 것이 계산효율 면에서 바람직하다고 알려져 있다. 이러한 제약조건 하에서 대상함의 강도에 영향을 미치는 모든 구조부재를 정확히 표현하면서도 적절한 수준의 DAA 요소의 개수가 유지되도록 선체구조 유한요소 모델을 생성하기 위해서는 종방향 보강재의 위치와 개수는 원래대로 유지하고 횡방향 늑골을 기준으로 종횡비(aspect ratio)를 조절하여 아래의 식을 만족하도록 선체 길이방향 요소분할 크기를 결정하도록 한다.

$$2 \times (0.9 \times (\text{선체길이 방향 요소분할 크기} \times \text{종 방향 보강재 간격})) \leq 5000 \sim 7000$$

3.3.4 Step 4 - 주변유체 모델 생성



위의 ‘Step 3 - 구조모델 생성’ 단계에서 대상함의 전체 구조모델이 생성되면 ‘Step 2 - 해석 케이스 설정’ 단계에서 설정한 수중폭발 조건에 따른 광역캐비테이션의 크기를 고려하여 TrueGird를 이용하여 유체영역 모델을 생성하는 단계이다. 먼저 대상함의 하중상태에 따른 홀수 아래의 선체 접수구조부에 대한 판 요소들만의 정보를 전처리기 FEMB를 사용하여 MSC/NASTRAN의 입력자료 포맷으로 변환하여 TrueGrid 실행을 위한 입력자료로 불러들이는데, 이때 선체 접수구조부에 대한 유한요소 입력자료에 대한 수정은 불가능하다. 한편, 고려중인 수중폭발 조건에 대한 광역캐비테이션 하 경계를 기준으로 하는 유체모델 전체 형상에 관한 기하학적 데이터를 FEMB를 사용하여 IGES 포맷으로 작성하여 TrueGird의 초기 입력자료로 사용한다. 선체 접수구조부를 감싸는 유체영역의 형상은 일반적으로 반 원통형 모양이 되도록 한다. 그 이유는 모든 선체 접수구조부의 외부 법선방향으로의 유체영역의 크기를 평균적으로 동일하게 할 수 있기 때문이다.

3.2절에서 언급한 바와 같이 유한요소 모델링에 포함시킬 함정 깊이방향으로의 유체 유한요소 모델링 범위는 반드시 고려중인 수중폭발 조건에 해당하는 광역캐비테이션 하 경계 깊이와 같도록 한다. 이 깊이를 기준으로 선체 홀수높이에서 함

정 폭 방향과 길이방향으로도 같은 길이만큼 확장을 시켜 주는 것이 바람직하다. 반 원통형 모양에 있어서 함정 길이방향과 폭 방향의 기하학적 구성은 같은 반경을 가지도록 하고, 대상함 길이방향으로의 유체영역의 길이는 다음의 공식을 사용하여 계산할 수 있다. 또한, 수중폭발 조건에 따라 광역캐비테이션 영역이 달라지므로 각 수중폭발 조건별로 이를 반영한 유체 유한요소모델을 구성하여야 한다.

대상함의 $L.B.P. + 2 \times \text{광역캐비테이션의 하 경계 깊이} = \text{전체 유체 모델의 길이}$

Fig. 3.4에서 보볼 수 있듯이 대상함을 감싸고 있는 주변 유체영역은 크게 'thin water layer'와 'water boundary'의 두 부분으로 나눌 수 있다. 전자는 대상함의 점수구조부와 직접적으로 같은 절점을 공유하는 유체 유한요소 모델로서 3.2절에서 기술한 바와 같이 안정적인 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 유체 유한체적요소의 크기가 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$2\rho D/\rho_s t_s \leq 5 \quad (3.1)$$

여기서 D 는 유체의 유한체적요소 길이, ρ 는 유체밀도, ρ_s 및 t_s 는 각각 점수구조부 외판의 밀도 및 두께이다.

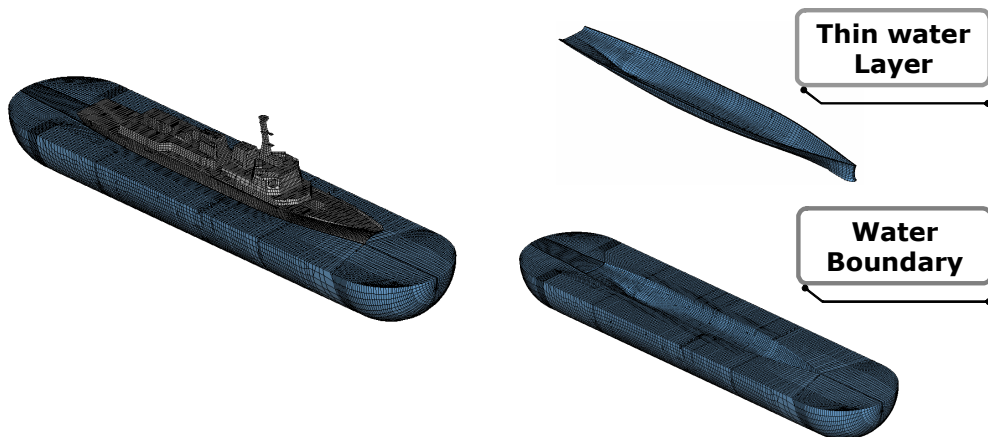
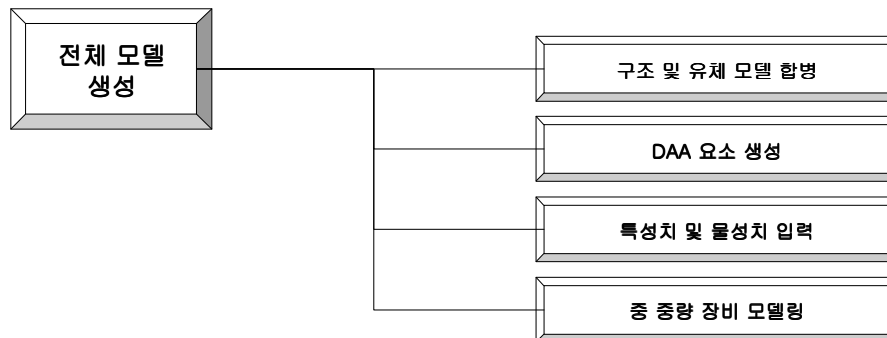


Fig. 3.4 Complete surrounding fluid model

3.3.5 Step 5 - 전체 모델 생성



'Step 3 - 구조모델 생성' 단계와 'Step 4 - 주변유체 모델 생성' 단계를 거쳐서 완성된 구조와 유체 모델은 아직 무관한 상태로 있기 때문에 Fig. 3.5에 보인 바와 같이 합병하여 전체 시뮬레이션 모델을 생성하고 그 결과를 LS-DYNA/USA 입력자료 포맷으로 저장하여야 한다. 구조 및 유체 모델을 합병하기 위해 FEMB를 사용한다. TrueGrid를 이용한 유체 유한요소 모델은 LS-DYNA나 MSC/NASTRAN 입력자료 형식으로 모델정보를 저장한다. 이를 대상함 구조모델이 있는 FEMB 내에서 호출하면 자동으로 절점, 요소, 그리고 'PART' 등의 정보가 새로운 ID를 부여받으며 합병이 된다.

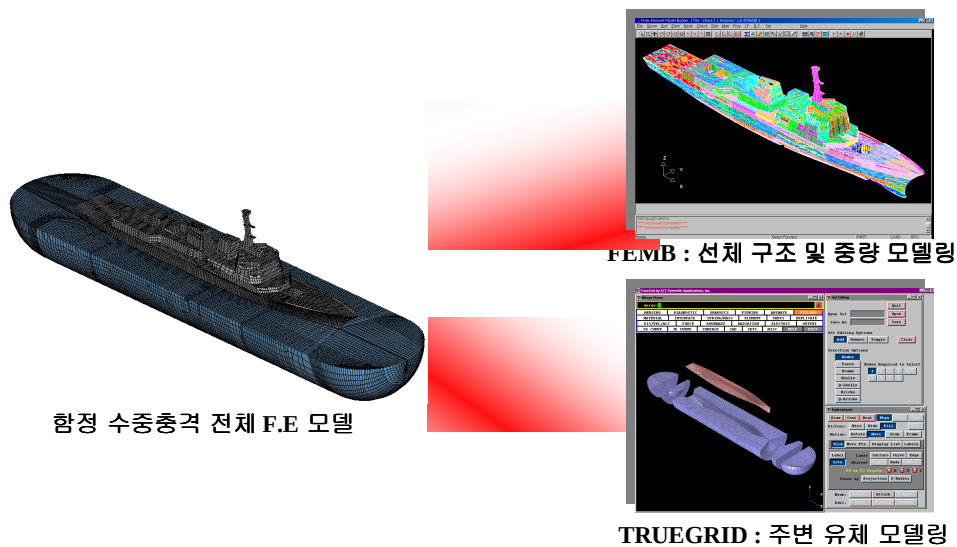
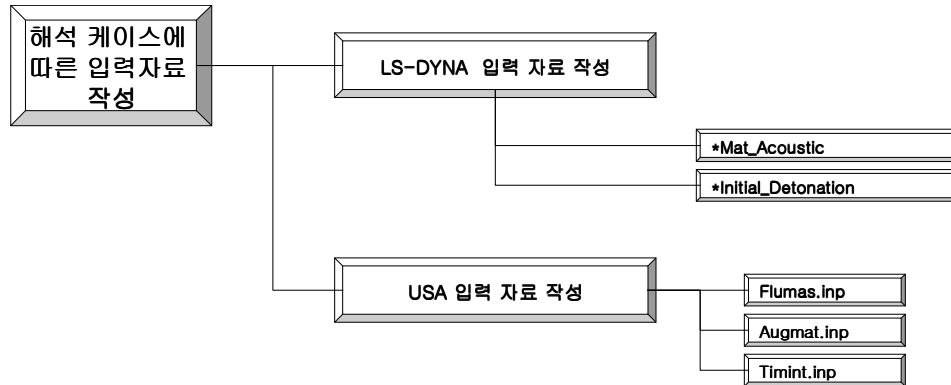


Fig. 3.5 Total finite element model combined ship structure with fluid model

3.3.6 Step 6 - 해석 케이스에 따른 입력자료 작성



Step 5까지의 단계를 거치면 고려중인 수중폭발 및 하중상태에 따른 시뮬레이션 모델에 대한 LS-DYNA의 입력자료가 작성된다. 본 단계에서는 USA 프로그램의 각 모듈을 실행시키기 위한 입력자료의 작성과 더불어 LS-DYNA의 입력자료 중에서 수중폭발 조건에 따라 변경되는 몇 가지 실행 명령문에 대한 입력자료를 작성하는 단계이다.

LS-DYNA/USA는 Fig. 3.6에서 보인 바와 같이 한 해석 케이스에 대해 총 4번의 실행 과정을 거치게 되는데 매 실행과정마다 다른 입력자료가 필요하며, 실행 과정에서 오류가 발생하게 되면 그 시점에서 실행이 중지되기 때문에 신중히 입력자료를 작성하여야 한다. 참고로 USA 프로그램의 모듈을 실행하는 중에 오류가 발생하여도 화면에는 오류 메시지가 나타나지 않기 때문에 각 모듈별 실행이 완료되면 반드시 결과 파일을 열어서 오류가 발생했는지를 확인하고 다음 과정으로 넘어가야 한다.

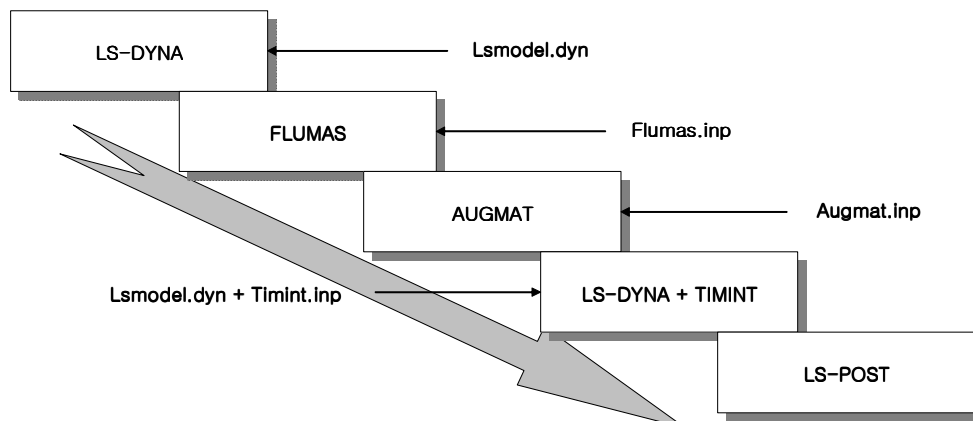
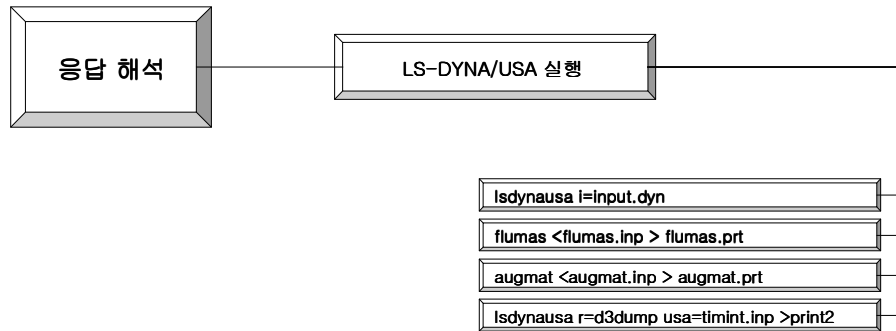


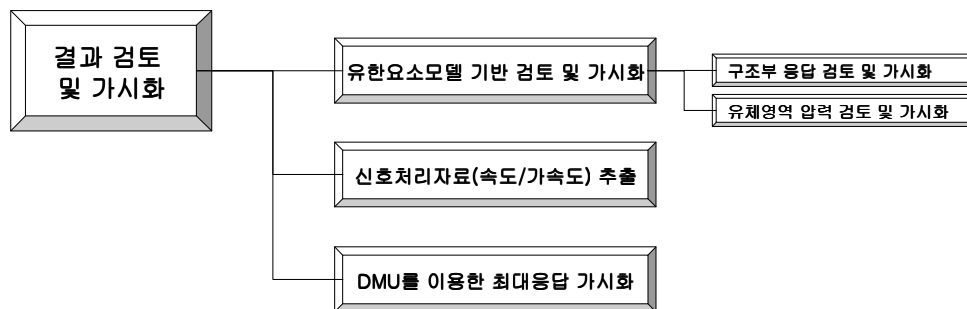
Fig. 3.6 Flow chart of LS-DYNA/USA analysis process

3.3.7 Step 7 - 응답 해석



Step 6의 단계를 거치면서 LS-DYNA/USA를 실행하기 위한 모든 입력자료의 작성이 완료된다. ‘Step 2 - 해석 케이스 설정’ 단계에서 고려한 수중폭발 조건에 대한 입력자료는 서로 다른 폴더에 있어야 하며, 각 해당 폴더에서의 실행은 DOS 명령 프롬프트를 이용하여 수행한다.

3.3.8 Step 8 - 결과 검토 및 가시화



‘Step 7 - 응답 해석’ 단계에서 모든 실행이 성공적으로 수행된 것을 확인하면 후처리를 이용하여 결과 검토 및 가시화 업무를 수행한다. 이를 위해 LS-DYNA의 전용 후처리인 LS-POST를 사용하여 그림 3.7에 보인 바와 같이 유체영역 내의 충격파 전파, 함정 구조부에서의 변위, 속도, 가속도 및 응력을 확인한다. 또한, 응답해석 결과를 세밀하게 검토할 필요가 있는 경우에는 관심 있는 위치의 절점들에서 응답결과를 추출하고 필요한 용도에 따라 가공한다.

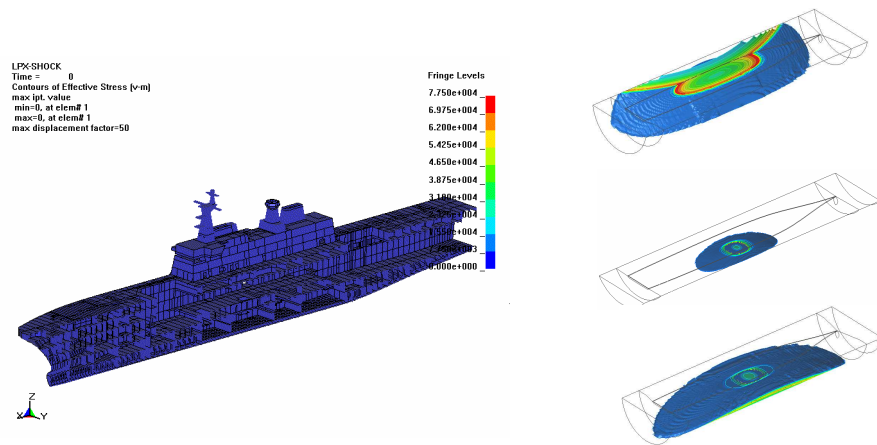


Fig. 3.7 Post process using LS-POST

이상의 결과 검토에 앞서서 가장 먼저 확인해야 할 사항은 'Step 2 - 해석 케이스 설정' 단계에서 설정한 수중폭발 조건에 대하여 경험식을 통해 계산된 초기충격파의 최대값과 시뮬레이션을 통해 계산된 최대값이 동일한지를 확인한다. 이를 위해서 Step 7의 과정을 마치면 해당 폴더에 생성되는 'incident_pressure.1' 파일을 열고 그래프 편집 프로그램을 사용하여 확인할 수 있다.

4. 함정 수중충격 M&S에 적합한 실험계획법의 방법론 정립

4.1 개 요

다양한 시뮬레이션 시나리오에 따른 대상 함정의 충격응답 특성을 효과적으로 파악하기 위해 본 장에서는 실험계획법을 이용한 Parametric Study 방법론을 소개하고자 한다.

임의의 수중폭발 충격하중에 대한 대상함 선체와 탑재장비의 모든 충격응답들의 집합을 모집단이라고 가정하면 수중폭발 발생요인에 따라 이러한 모집단의 충격응답 특성은 당연히 달라질 것이다. 이러한 변화특성을 유발하는 수중폭발 충격하중의 발생요인에 대한 영향을 분석하기 위해 대상함 전체의 응답을 평가할 수 있는 대표적인 응답위치로부터 자료를 수집하고, 수중폭발의 발생요인에 따른 집단간의 분산과 같은 요인 내에서도 측정된 표본에서 수치적 오차 및 여러 요인들로 인한 교호작용으로 인한 응답으로부터 분산의 추정치를 구하여 이 집합들의 비를 분산분석을 위한 검정통계량으로 구성한다면 수중폭발 충격하중의 발생요인의 특성에 따른 대상함의 응답특성을 체계적으로 분석할 수 있다.

본 장에서는 함정 수중충격 M&S와 같은 복잡한 공학해석에 효과적인 Parametric Study 분석방법으로 적용하고자 하는 실험계획법의 기본개념과 종류, 그리고 통계적 분석방법에 대해 간략히 설명하였다[47~50].

4.2 실험계획법의 기본개념

4.2.1 실험계획법의 정의

실험계획법은 실험을 어떻게 수행하고, 데이터를 어떻게 취득하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 방법이다. 즉, 실험계획법이란 비용 대비 최대의 효과를 얻을 수 있는 실험을 수행하기 위한 계획방법을 의미한다. 이러한 실험계획법을 함정 수중충격 M&S에 적용하는 경우 시뮬레이션 실행이 실험을 의미한다. 따라서 실험계획법에 따라 시뮬레이션 시나리오를 계획한다면 많은 시간과 노력이 요구되는 함정 수중충격 시뮬레이션에 있어서도 최소의 해석 수행만으로 최대의 정보를 얻을 수 있다.

4.2.2 실험계획법의 적용순서

실험을 계획하고 이를 실시하여 얻어진 데이터를 분석하며, 그 결과를 실제로 적용시키는 일련의 과정은 일반적으로 다음의 순서에 따라 실시한다. 경우에 따라서 약간의 차이가 있을 수 있으나 대부분의 실험에 적용될 수 있으며, 통상적으로 Fig. 4.1에 나타낸 바와 같이 일곱 단계로 나누어 구분된다.

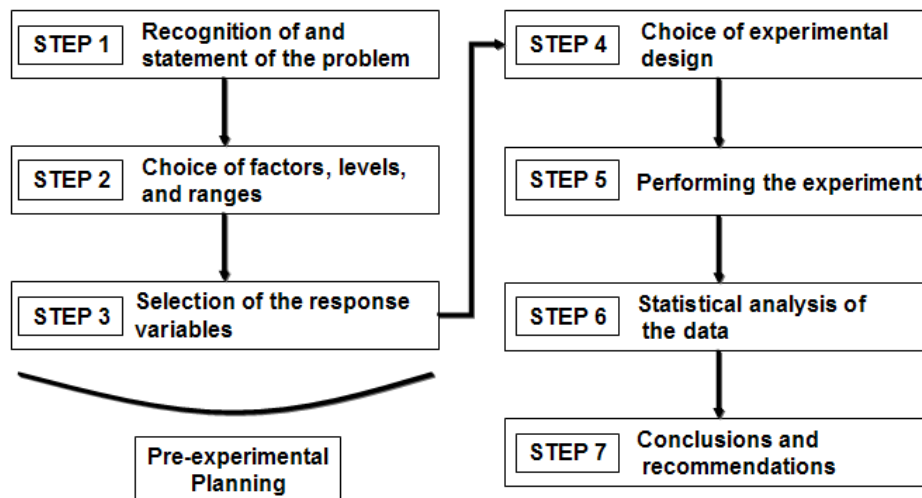


Fig. 4.1 Experiment sequence based on D.O.E[51].

Step 1 : 문제에 대한 이해와 진술

실험의 목적은 알고자 하는 문제의 최적조건을 알아내거나 어떤 조치를 취하기 위해서, 또는 표준화를 하기 위해서 실시한다. 이러한 실험에는 일반적으로 많은 노력과 경비가 들어가기 마련이므로 효율적인 실험을 하기 위해서는 실험의 목적을 명확히 하고 그 목적을 달성할 수 있도록 문제에 대한 명확한 이해와 기술을 바탕으로 필요한 계획을 세워야 한다.

Step 2 : 인자와 인자 수준의 선택

무수히 존재하는 요인 중에서 실험의 목적으로 채택한 요인을 인자(factor)라고 하며, 인자를 양적 또는 질적으로 변화시킬 경우의 그 정도를 인자의 수준(level)이라고 한다.

Step 3 : 반응인자의 선택

실험을 통해 개선 또는 파악하고자 하는 인자에 대하여 실험의 목적과 관련된 모든 특성치를 반응인자(response variable)라고 하며, 이는 앞서 설정된 인자들의 수와 수준 수에 대한 변화로 인해 얻어지는 데이터이다.

Step 4 : 실험의 배치와 실험순서의 랜덤화

인자와 수준이 선택되면 실험배치의 형태를 정한다. 통상 인자의 수가 적을 경우에는 다원배치를, 인자의 수가 많을 경우에는 직교배열표(orthogonal array)를 사용한다. 실험배치와 실험순서가 잘못되면 통계적인 해석을 하여도 여러 가지 원인으로 인해 그 결과를 해석하기가 불가능하기 때문에 실험계획법에서 사용되는 기본원리 즉, 랜덤화의 원리, 반복의 원리, 블록화의 원리, 교락의 원리, 그리고 직교화의 원리 등을 충분히 숙지해야 한다.

Step 5 : 실험의 실시

실험의 배치와 실험순서가 정해지면 실험하는 방법에 대한 표준을 작성하여 이것을 충분히 숙지한 후에 실험을 실시해야 한다. 이때 반드시 계획대로 실험을 실시하는 것이 중요하다. 특히, 실험순서와 인자수준의 조합이 틀리지 않도록 해야 한다. 실험 데이터는 미리 정해놓은 용지에 기입토록 하고, 실험 중에 일어난 현상은 전부 상세히 기록하여 두어야 한다. 실험기간 중에 기록한 특기사항은 실험이 끝나고 실험결과의 검토 시 중요한 정보가 되기 때문이다. 실험계획법에서 실험의 계획을 잘 세우는 것도 중요하지만, 실험의 실시도 중요하기 때문에 계획대로 실시되도록 하기 위한 실험의 관리방법에 대해 검토해 두어야 한다. 관리되지 않은 실험에서 얻은 결론은 조치를 잘못하여 중대한 실수를 초래할 수 있기 때문이다.

Step 6 : 실험결과의 확인 및 분석

실험계획대로 실험이 진행되었는지를 우선 확인 한 다음에 실험에서 얻은 결과 데이터를 정리하고 순서에 따라 필요한 계산을 하여 판정한다. 소정의 유의수준(level of significance)에서 유의차가 있다는 결과가 나왔으면 다음에 차이는 어느 정도인가를 추정한다. 판정에 따라 조치를 하게 되는데 이 때 주의할 사항은 계산이 제대로 되어 있는지 다시 체크 할 필요가 있다. 또한, 실험에서 주어진 조건 내에서만 실험결과에 대해 결론을 지어야 하며, 취급한 인자에 대한 결론도 그 인자수준의 범위 내에서만 얻어지는 결론이어야 한다. 실험계획법에서 얻어진 데이터의 통계적 분석과 해석에 많이 사용되는 방법으로 분산분석, 통계적 검정가 추정, 상관분석, 그리고 회귀분석 등이 있다.

Step 7 : 가설의 수용 여부 판단 및 조치

해석결과에 따라 실제적인 결론을 내리고 시스템의 변화 등을 통한 조치를 취해야 한다. 예를 들면 작업표준을 개정한다, 개정하지 않는다, 재실험한다 등의 조치를 하고 조치한 결과는 반드시 다시 체크한다.

4.2.3 실험계획법의 종류

실험계획법의 종류는 매우 많지만 비교적 많이 사용되는 것으로 먼저 요인배치법(factorial design)을 생각할 수 있다. 이는 인자의 각 수준의 모든 조합에 대하여 실험을 행하는 방법으로 인자의 수가 많은 복잡한 실험의 경우 실험 횟수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 이와 같이 실험 횟수가 많아져서 문제가 되는 경우, 크게 유의(significant)하지 않고 결과해석에 어려움이 있는 고차의 교호작용(interaction)에 대하여 검출을 하지 않는 대신 실험의 횟수를 줄일 수 있는 교략법을 이용한 일부실험법이 많이 사용된다. 한편, 다구찌의 표준 직교배열표를 이용한 인자설계 기법은 설계변수의 최적조합을 찾아내고, 제품개발 및 설계뿐만 아니라 제조공정에서도 품질향상에 가장 효과적인 방법으로 제시되고 있는 다구찌 방법과 최근에는 통계적 분석방법의 하나인 반응표면분석(response surface analysis)을 염두에 두고 데이터 수집계획을 세울 때 사용하는 반응표면법(response surface method)이 많이 사용되고 있다.

아래에서는 여러 가지 실험계획법 중에서 대표적으로 널리 사용되고 있는 3가지 방법에 대해 간략히 설명하였다.

다구찌 방법

근대 품질관리분야에서 획기적 기여를 한 일본의 다구찌 박사가 제안한 실험계획법의 한 방법론[52]으로써 종래의 실험계획법에 비하여 '실험에 의하여 기술정보의 획득효율을 높여주기 위한 일반적인 기술의 전체'라는 광범위한 전체 아래 기술 정보의 획득효율에 초점을 맞춘 실험계획법이라고 할 수 있다. 기존의 실험계획법에서는 제어 불가능한 환경조건이나 제어하기 어려운 생산조건, 공정조건 등의 원인(통상 잡음인자로 간주함)들이 데이터에 주는 영향의 정도를 평가하기 어려웠으나 이를 객관적이고 개량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고, 또한 품질 산포의 크기를 계량특성치인 손실함수나 SN비(Signal-to-Noise ratio)의 형태로 변환하여 산포를 작게 하는 인자들의 조건을 찾아가는 로버스트(robust) 실험계획법을 주로 사용한다.

그러나 초기에 알려진 바와 달리 현재까지 다구찌 방법을 이용한 실험계획법의 연구에서 특정 부분에서는 모호하고 오도되기 쉬운 것으로 판명되고 있으며, 또한 다음과 같은 비판이 제기되고 있다[53]. 즉, 성능척도로서 SN비의 사용이 때로는 납득하기 어렵고, 계획 변수를 모형화 하는데 있어서 유연성이 부족한 점이 나타

나고 있다. 또한, 직교배열표에 의한 실험계획에서 교호작용을 무시한 오직 주효과만의 계획을 이용하며, 실험계획에 있어서 비경제적인 디자인과 최적화에만 집중하므로 연속적 실험을 가능하게 할 수 있는 공식적인 방법이 없는 등의 문제가 발생하고 있다.

반응표면법

실험계획법 중 설계변수와 목적함수와의 관계를 회귀모형 함수로 나타내는 방법이 반응표면법이다. 독립변수들과 종속변수 간의 함수 관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따라서 종속변수의 반응치가 어떻게 달라지는가를 예측하기 위해 사용하며 독립변수가 어떠한 값에서 반응치가 최적화될 것인가를 찾아 낼 수 있다. 이러한 반응표면법은 일반적으로 다음과 같은 가정 하에서 사용한다.

- 종속변수와 선형 변환된 독립변수들 간의 함수관계는 실험자가 정한 흥미영역(region of interest)에서 1차 또는 2차의 저차 회귀모형으로 근사될 수 있다.
- 독립변수는 계량변수(quantitative variable)들이며, 실험자가 그 수준을 임의로 정의할 수 있고, 거의 무시할 수 있는 정규분포의 실험오차를 갖는다.
- 종속변수도 계량변수이고 실험오차를 가지며 실험자가 그 값을 임의로 정할 수 없는 반응변수이다.

요인배치법

일반적으로 k^n 요인배치법이란 인자의 수가 n 이고 각 인자의 수준 수가 k 인 실험계획법으로, 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어지는 실험이다. 따라서 실험이 반복되지 않아도 k^n 개의 실험횟수가 실시돼야 한다. 요인배치법에 의한 실험을 요인실험(factorial experiment)이라고 하고, 요인실험에서는 모든 요인효과(인자의 효과와 교호작용)를 추정할 수 있다는 특징이 있다.

k^n 요인실험에서는 2수준계와 3수준계가 널리 사용되고 있다. 즉 2^n 과 3^n 요인실험이 많이 사용된다. 2^2 이면 인자가 두 개로 A, B 이고 각 인자의 수준이 2인 실험이다. 이것은 이원배치법에서 수준이 각각 2인 실험과 동일한 것이다. 2^3 이면 삼원배치실험에서 각 인자의 수준이 2인 경우이다. 3^2 이면 수준이 각각 3인 이원배치실험이다.

$p^m \times q^n$ 요인실험은 모두 인자의 수가 $m+n$ 개인데, 이 중에서 m 개의 인자는 수준 수가 p 이고, n 의 인자는 수준 수가 q 인 실험이다. 예를 들어, $3^2 \times 4^1$ 이면 삼

원배치 실험으로 2인자는 3수준이고, 다른 하나의 인자는 4수준의 실험을 의미한다.

일반적인 실험계획법에서 반응인자의 최대, 최소값 및 최적값을 찾기 위한 접근 방법에서는 상기 언급한 다구찌 방법이나 반응표면법 등이 효과적인 방법으로 사용될 수 있으나, 함정 수준충격 M&S의 특성상 반복 실험이 없고, 각 수준수의 인자들로 인한 반응인자의 영향을 분석하여 통계적 가설을 검정하기 위해서는 Parametric Study 방법론으로서 요인배치법이 적합하므로 이를 적용하였다. 본 연구에서는 이러한 요인배치법 중의 실험의 수를 줄이면서도 정도(accuracy)를 유지하기 위한 Parametric Study 방법론으로써 교락법에 근거한 일부실시법의 방법과 분석방법으로 분산분석의 과정을 자세히 설명하고자 한다.

4.3 요인배치법을 이용한 실험계획법

4.3.1 2ⁿ형의 일부실시법

실험계획법 중에서 요인배치법 또는 다원배치법(multi-way factorial design)을 사용할 경우 고려중인 인자의 수 또는 수준 수가 늘어나면 그에 따른 실험 횟수는 Table 4.1과 같이 급속하게 불어난다.

Table 4.1 Experimental numbers of factorial design

인자 수	수준 수	실험 횟수	인자 수	수준 수	실험 횟수
4	2	$2^4 = 16$	3	3	$3^3 = 27$
5	2	$2^5 = 32$	4	3	$3^4 = 81$
6	2	$2^6 = 64$	5	3	$3^5 = 243$
7	2	$2^7 = 128$	6	3	$3^6 = 729$
8	2	$2^8 = 256$	3	4	$4^3 = 64$
9	2	$2^9 = 512$	4	4	$4^4 = 256$
10	2	$2^{10} = 1,024$	5	4	$4^5 = 1,024$

실험 횟수가 이와 같이 증가하면 실험에 따른 여러 가지 제약 조건이 발생하기 때문에 실험의 정도가 나빠져서 오차분산이 크게 되거나, 검출력(power of test)이 낮아지거나, 아니면 추정의 폭이 넓어지는 등의 이유로 인하여 실험 목적에 따른 통계적 분석이 어려워진다. 이와 같이 실험 횟수가 과다하게 많은 경우에는 본래의 실험목적 달성을 할 수 있는 범위에서 가능한 한 실험의 크기를 줄일 필요가

있다. 가령 2^n 형 요인실험에서 주효과와 2인자 교호작용에 관심이 있으면 Table 4.2와 같은 주효과와 모든 교호작용이 일어난 경우만의 실험을 수행하면 된다. 이와 같이 필요로 하는 요인에 대한 정보를 얻기 위하여 의미가 적은 고차의 교호작용을 희생시켜서 실험 횟수를 적게 하자는 것이 일부실험법의 개념이다.

Table 4.2 Main and interaction effects for 2^n design

인자 수	실험 크기	주효과	교호 작용				
			2인자	3인자	4인자	5인자	6인자
2	4	2	1	–	–	–	–
3	8	3	3	1	–	–	–
4	16	4	6	4	1	–	–
5	32	5	10	10	5	1	–
6	64	6	15	20	15	6	1

따라서 주효과와 2인자 교호작용만의 추정이나 검정만 필요하다면 반드시 인자의 모든 조합에서 실험할 필요가 없으며, 불필요하거나 고차의 교호작용은 구하지 않고 실험의 크기를 작게 하여 인자의 조합 중 일부만 실험하는 일부실험법이 효과적이라 할 수 있다.

4.3.2 실험의 배치방법

일부실험법의 배치는 교락법의 배치로부터 간단히 유도할 수 있다. 예를 들어 2^3 요인 실험을 생각하면 3인자 교호작용 ABC 를 블록과 교락시킨 배치는 Table 4.3과 같이 된다. 여기에서 $1/2$ 반복의 실험, 즉 블록 1에 있는 4개의 조합만을 실험하였다면 주효과와 교호작용을 구하기 위하여 Table 4.4를 작성할 수 있다.

Table 4.3 Two one-half fractions of 2^3 design

정의 대비 $I=ABC$	
블록 1	블록 2
a	(1)
b	ab
c	ac
abc	bc

Table 4.4 2^{3-1} design with defining relation $I=+ABC$

요인효과	처리조합				제수
	a	b	c	abc	
M(평균)	+	+	+	+	4
A	+	-	-	+	2
B	-	+	-	+	2
C	-	-	+	+	2
AB	-	-	+	+	2
AC	-	+	-	+	2
BC	+	-	-	+	2
ABC	+	+	+	+	2

A 의 주효과는 a 를 포함하는 조합과 포함하지 않는 조합의 차로서 다음과 같다.

$$A = \frac{1}{2} \{ (a+abc) - (b+c) \} \quad (4.1)$$

또한 교호작용 BC 는 b, c 를 짝수 개 포함하는 조합과 아닌 것의 차로서 다음과 같다.

$$BC = \frac{1}{2} \{ (a+abc) - (b+c) \} \quad (4.2)$$

이 식은 주효과 A 를 추정하는 식과 동일한 것으로 완전히 교락하고 있다. 이와 같이 동일한 추정식으로 표시할 수 있는 요인효과를 별명(alias)이라 한다. Table 4.4로부터 서로 별명관계에 있는 것은 A 와 BC 이외에, B 와 AC , C 와 AB 이다. 어느 요인효과가 별명이 되어 있느냐는 정의대비에 요인효과를 곱해서 얻을 수 있다. 단, 2^n 형에서는 $A^2=B^2=C^2=1$ 임을 유의하여야 한다.

$$A \text{의 별명: } A \times (ABC) = A^2 BC = BC \quad (4.3)$$

$$B \text{의 별명: } B \times (ABC) = AB^2 C = AC$$

$$C \text{의 별명: } C \times (ABC) = ABC^2 = AB$$

주효과 A 와 교호작용 BC 가 동시에 추정되므로, BC 가 존재하지 않으면 주효과 A 를 구할 수 있다. 따라서 일부실험법은 별명 중 어느 한 쪽의 효과가 존재하지 않을 경우에 사용할 수 있다. 위의 Table 4.3에서 블록 1만 사용할 수 있는 경우는 2인자 교호작용 AB, AC, BC 가 모두 무시될 수 있는 경우라야 한다. 일반적으로 일부실험법이 사용되는 것은 인자의 수가 많은(5개 이상) 경우이고, 그 때에는 주효과와 2인자 교호작용의 별명은 3차 이상의 고차의 교호작용이 되도록 배치할 필요가 있다.

마찬가지로 2^4 형 실험에서 $1/2$ 반복 실험의 경우도 일부실험을 계획하고 그 별명관계를 설명할 수 있다. 정의대비를 최고차 교호작용인 $ABCD$ 로 택하여 2개의 블록을 작성하면 Table 4.5와 같다.

Table 4.5 Two one-half fractions of 2^4 design

정의대비 $I=ABC$	
블럭 1 (+ $ABCD$)	블럭 2 (- $ABCD$)
(1)	a
ab	b
ac	c
ad	d
bc	abc
bd	abd
cd	acd
$abcd$	bcd

두 블럭 중에서 임의로 하나의 블럭을 택하여 실험하면 2^4 형의 $1/2$ 반복 실험이 된다. 이때의 별명관계는 다음 식 (4.4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= BCD & AB &= CD \\
 B &= ACD & AC &= BD \\
 C &= ABD & AD &= BC \\
 D &= ABC
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

블럭 1또는 2의 8회의 실험을 하였을 경우에 분산분석표는 Table 4.6과 같다. 이때 3차 교호작용 (BCD, ACD, ABD, ABC)은 없는 것으로 무시하고 2차 교호작용 (AB, AC, AD, CD, BD, BC)을 오차로 보면 주효과 A, B, C, D 에 대한 검정이 가능하다.

Table 4.6 Analysis of variance table for one-half fractions of 2^4 design

요인	ϕ
$A(=BCD)$	1
$B(=ACD)$	1
$C(=ABD)$	1
$D(=ABC)$	1
$E \begin{cases} AB=CD \\ AC=BD \\ AD=BC \end{cases}$	3 $\begin{cases} 1 \\ 1 \\ 1 \end{cases}$
T	7

4.3.3 분산분석과 F 검증

2^n 형의 요인배치법에서 각 처리조합의 반복이 r 회 있다고 가정하면 주효과 A, B, C, D등은 식 (4.5)에 의하여 얻어진다. 그리고 2인자 및 3인자 교호작용은 각각 식 (4.6) 및 (4.7)과 같이 구할 수 있다. 4인자의 이상의 교호작용은 별로 의미가 없으므로 본 연구에서는 생략한다.

$$\text{주효과} = \frac{1}{2^{n-1} \cdot r} [(1\text{수준의 데이터의 합}) - (0\text{수준의 데이터의 합})] \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{2인자 교호작용} = \frac{1}{2^{n-1} \cdot r} [& \quad (4.6) \\ & (\text{해당인자의 수준의 합이 짝수인 처리조합의 데이터의 합}) \\ & - (\text{해당인자의 수준의 합이 홀수인 처리조합의 데이터의 합})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{3인자 교호작용} = \frac{1}{2^{n-1} \cdot r} [& \quad (4.7) \\ & (\text{해당인자의 수준의 합이 짝수인 처리조합의 데이터의 합}) \\ & - (\text{해당인자의 수준의 합이 홀수인 처리조합의 데이터의 합})] \end{aligned}$$

다음으로 각 요인의 변동은 다음과 식 (4.8)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{각 인자의 변동} &= 2^{n-2} \mu (\text{주효과})^2 & (4.8) \\ \text{각 2인자 교호작용의 변동} &= 2^{n-2} \mu (\text{2인자 교호작용})^2 \\ \text{각 3인자 교호작용의 변동} &= 2^{n-2} \mu (\text{3인자 교호작용})^2 \end{aligned}$$

식 (4.8)에서 오른쪽 항의 괄호 속에 있는 데이터들의 합간의 차를 대비(contrast)로 간주한다면 다음과 같은 식 (4.9)처럼 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{각 인자의 변동} &= \frac{1}{2^n r} (\text{대비})^2 & (4.9) \\ \text{각 2인자 교호작용의 변동} &= \frac{1}{2^n r} (\text{대비})^2 \\ \text{각 3인자 교호작용의 변동} &= \frac{1}{2^n r} (\text{대비})^2 \end{aligned}$$

예를 들어, 2^4 요인실험에서 주효과 A는 다음 식 (4.10)과 같이 표현되므로 A의 변동은 식 (4.11)과 같다.

$$A = \frac{1}{2^3 r} [T_{1\dots} - T_{0\dots}] \quad (4.10)$$

$$S_A = 2^{4-2} r(A)^2 = \frac{1}{2^4 r} (T_{1\dots} - T_{0\dots})^2 \quad (4.11)$$

교호작용 $A \times B$ 의 변동은 2인자 교호작용 AB 로부터 구할 수 있다.

$$AB = \frac{1}{2^3 r} [T_{11\dots} + T_{00\dots} - T_{01\dots} - T_{10\dots}] \quad (4.12)$$

$$S_{A \times B} = 2^{4-2} r(AB)^2 = \frac{1}{2^4 r} (T_{11\dots} + T_{00\dots} - T_{01\dots} - T_{10\dots})^2 \quad (4.13)$$

이로부터 2^k 형의 요인배치법에 대한 분산분석표는 Table 4.7의 형태를 갖는다.

분산분석은 여러 집단들에서 어떤 이유나 인자에 의하여 집단들 간에 서로 다른 특성이 있는가를 밝혀볼 수 있는 분석기법이라 할 수 있다. 분산분석에서는 비교하고자 하는 집단들이 분산이 같은 정규분포 모집단이라고 가정한다면 집단들의 평균이 같으면 그 특성이 같다고 할 수 있다. 이를 위해서는 각 집단들로부터 표본을 얻고 그 표본들의 평균값들이 얼마나 큰 차이가 나는지를 분석하게 된다. 이러한 분산분석의 문제를 해결하기 위한 전제조건은 비교하고자 하는 집단들이 서로 독립이고 각 집단에서 자료들은 정규분포(normal distribution)하며 일정한 분산을 갖는다는 것이다. 예를 들어, 임의의 서로 다른(독립인) 집단들의 평균이 같은가를 알아보기 위해 표본들을 얻었다고 하면 각각의 표본평균들은 모집단들의 평균들이 다르기 때문에 차이가 있는 것인지, 또는 모집단들의 평균들이 같은데도 불구하고 표본을 추출하는 과정에서 차이가 난 것인지를 결정하는 것이 곧 분산분석의 문제가 된다.

분산분석을 통한 통계적 검정을 실시하기 위한 가설을 세우는데 집단 간의 평균은 같다고 정의하면 이와 반대의 가설은 평균이 같지 않다는 의미가 된다. 전자를 귀무가설이라고 하고 후자를 대립가설이라고 하는데 귀무가설은 어떤 요인의 수준간의 차이에 대하여 특성치의 차이가 없다는 의미한다. 가설검증에는 얻어진 표본평균들이 얼마나 차이가 있는가를 나타내는 검증통계량이 필요한데 이는 수집된 표본평균들의 분산으로써 구할 수 있다. 다시 말하면, 표본평균들의 분산이 크

다면 이는 표본평균들의 차이가 큰 것이 되므로 귀무가설을 기각하게 될 것이다. 그러나 표본평균들의 분산은 표본평균들의 단위나 조건에 따라 크기가 다르기 때문에 표본평균들의 분산이 갖는 단위를 제거한 무차원화 한 검증통계량을 만들어 이용하게 된다.

Table 4.7 Analysis of variance table for 2^n design

요인		S	ϕ
인자	$\begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\begin{matrix} S_A \\ S_B \\ S_C \\ S_D \\ \vdots \end{matrix}$	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \end{Bmatrix} \binom{n}{1} = n \text{개}$
2인자 교호 작용	$\begin{Bmatrix} A \times B \\ A \times C \\ A \times D \\ B \times C \\ \dots \end{Bmatrix}$	$\begin{matrix} S_{A \times B} \\ S_{A \times C} \\ S_{A \times D} \\ S_{B \times C} \\ \vdots \end{matrix}$	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \end{Bmatrix} \binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2} \text{개}$
3인자 교호 작용	$\begin{Bmatrix} A \times B \times C \\ A \times B \times D \\ \vdots \end{Bmatrix}$	$\begin{matrix} S_{A \times B \times C} \\ S_{A \times B \times D} \\ \vdots \end{matrix}$	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \binom{n}{3} = \frac{n(n-1)(n-2)}{6} \text{개}$
$\vdots$			
오차	E	S_E	$2^n(r-1)$
합계	T	S_T	$2^n r - 1$

그럼 분산분석을 위한 검증통계량을 만들기 위하여 수집된 표본을 이용하여 분산을 추정하여 보면 첫째로, 표본평균들의 분산으로부터 모집단의 분산을 추정하는 방법이 있고, 둘째로, 모든 집단들의 분산이 같다는 가정 하에서 각 집단 내의 표본들 간의 통상적인 분산의 추정치를 구할 수 있다. 앞에서 구한 분산의 두 가지 추정치에 대하여 검증통계량을 구성하기 위해 이를 비율로 구성한 값을 분산 분석에는 $F \text{ value}(F_0)$ 라고 하고, 이를 이용하여 가설을 검정하는 방법을 F 검정이라고 한다. 모집단의 분산들이 같다는 가정 하에서 각각의 집단 내의 표본에서 얻어진 분산의 추정치에 비해 집단 간 표본평균들의 분산이 크면 클수록 비교하고자 하는 집단들의 평균들이 같지 않다는 것을 의미하게 된다.

F 검정에 사용되는 $F \text{ value}$ 와 자유도는 F 분포의 특성을 가지게 되는데 이 F 분포는 분산이 같은 정규분포 모집단에서 두 개의 표본에 구한 분산의 비가 각각의 표본의 자유도에 대하여 일정한 비율로 나타나는 분포를 의미한다. 이러한

F 분포는 항상 측정 데이터의 집단을 A라고 하고 비교하고자 하는 데이터의 집단을 B라고 할 때 A로부터 계산된 통계량을 B 분포에 비추어 비교를 하기 때문에 항상 두 개의 자유도를 가지는데, 이는 정규분포와는 달리 비대칭 구조를 가진 모습이다. 이는 만일 두 집단 간의 분산분석에서 A란 집단의 자유도가 50이고 B란 집단의 자유도가 60일 때의 F value와 B 집단만 표본이 증가하여 자유도가 70일 때의 F value 값이 다르기 때문에 이를 반영한 분포이다. 요인배치법을 이용한 분산분석과 그에 따른 통계적 이론은 부록 A에 자세히 수록하였다.

4.3.4 $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법

앞 절까지는 2^m 형 요인실험만 자세히 언급하였는데 $p^m \times q^n$ 형의 요인실험으로 수준이 다른 인자들을 포함하는 요인실험을 취급할 수 있다. 두 인자 A, B에 수준수가 각각 3과 4이라면 이것은 $3^1 \times 4^1 = 3 \times 4$ 요인실험이고, 3인자 A, B, C의 실험에서 수준수가 각각 2, 2 및 4이라면 이것은 $2^2 \times 4$ 요인실험이다. $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법에서 실험의 배치방법에 따른 분석과정은 부록 A를 바탕으로 다음 5장에서 분석하게 될 데이터를 이용하여 자세히 그 적용과정을 설명하고자 한다.

5. 실험계획법을 이용한 Parametric Study 방법론의 적용연구

5.1 개 요

수중폭발에 대한 함정의 충격응답 특성을 효과적으로 파악하기 위해서 현재 수중폭발이 일어날 수 있는 여러 가지 가상 시나리오를 미해군의 실선충격시험 규정[1] 등을 근거로 하여 충격응답 해석을 실시하고 있다. 하지만 이러한 한정적인 해석 시나리오만으로 수중폭발에 의한 함정의 충격응답 특성을 효과적으로 파악하기는 거의 불가능하므로 체계적인 해석 시나리오 구축 및 분석방법이 요구되고 있는 상황이다. 이를 위해 본 장에서는 통계학적 분석 방법인 실험계획법을 함정 수중충격 시뮬레이션에 적용하여 여러 요인에 대한 함정 충격응답 특성을 효과적으로 파악할 수 있는 Parametric Study 방법론을 제시하고자 한다.

본 장에서는 함정 수중충격해석에서 내충격 강화 기준 충격하중의 세기로 널리 사용되고 있는 용골충격계수(KSF; Keel Shock Factor)[54]의 각 인자들의 변화가 대상함의 충격응답과 휘핑응답에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 한국해군의 수상함 2척에 대하여 실험계획법의 방법론에 따라 3차원 전선 충격응답해석과 1차원 보유주 휘핑응답해석을 각각 2^n 형과 $p^m \times q^n$ 형의 일부 실시법을 적용하였다. 이를 통해 고려중인 대상함들의 대표적인 지점에서의 충격응답 물리량들에 대하여 통계학적 분석방법인 분산분석을 실시하여 현재 내충격 강화를 위해 사용하고 있는 기준 물리량들에 대한 적절성 검토와 나아가 새로운 물리량을 도출하고자 하였다.

5.2 수중폭발 충격하중에 대한 현재의 함정 내충격 강화 기준

수중폭발에 대한 수상함의 내충격 강화 기준 충격하중의 세기로 용골충격계수가 널리 사용되고 있고, 식 (5.1)과 같이 정의된다. 즉, 수중폭발 충격파에 의해 선체 외판에 가해지는 충격 에너지밀도의 제곱근에 근사적으로 비례하는 물리량으로서, 충격파가 전선에 가할 수 있는 손상잠재력의 크기를 나타내는 척도이다.

$$KSF = \frac{\sqrt{W}}{R} \frac{(1 + \sin\Theta)}{2} \quad (5.1)$$

여기서 W 는 폭약중량, R 은 폭약으로부터 용골까지의 거리, 입사각 Θ 는 Fig. 5.1에 보인 바와 같다. 일반적으로 용골충격계수의 계산에 있어서 폭약중량과 폭

발거리의 단위로는 각각 lb 및 ft가 사용된다.

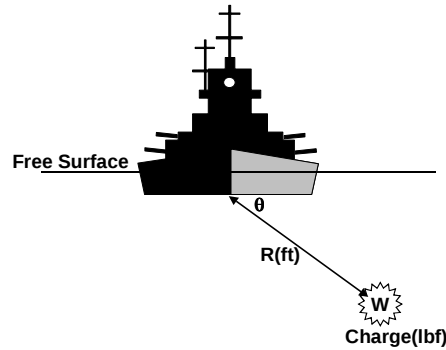


Fig. 5.1 UNDEX geometry based on KSF

위의 용골충격계수는 동일한 값을 갖는 수중폭발 조건에서는 충격파에 의한 선체구조의 충격응답 크기가 거의 대등하게 나타난다고 알려져 있다. 이로 인해 실선충격시험이나 수치해석에서 용골충격계수가 가장 중요한 인자로서 사용되어져 오고 있다. 하지만 동일한 용골충격계수를 가진 폭발조건이라 할지라도 폭약종류에 대한 등가 폭약무게와 폭발거리, 그리고 폭발입사각 등 전체적인 폭발조건은 무수한 조합으로 인해 달라질 수 있다. 또한, 2장에서 언급한 바와 같이 동일한 용골충격계수를 가지는 폭발조건이라 할지라도 이를 구성하는 인자들의 변화에 대한 가스구체의 거동은 동일한 양상을 나타내지 않고 있다. 이와 같이 특정한 용골충격계수의 값만으로 다양한 수중폭발 조건에 관계없이 함정의 내충격 특성을 평가하는 물리량으로서 타당항가에 대한 검증은 아직 국내적으로 확인된 바 없이 개념적인 의미로서 함정 선체나 탑재장비에 관한 충격응답의 기준으로 현재 사용되고 있다[55].

용골충격계수를 구성하는 각 인자들, 즉 폭약중량, 폭발거리 및 입사각 뿐만 아니라 폭약종류 및 폭발위치에 대한 다양한 변화 조건에 대한 함정의 충격응답과 휘핑응답 특성을 살펴보기 위해 실험계획법을 사용하여 동일한 용골충격계수로 표현되는 폭발 조건에 대한 대상함의 전체적인 거동을 분석하고, 현재 사용하고 있는 내충격 평가 방법에 타당성을 검토하고자 하였다.

5.3 Parametric Study의 프로세스 자동화를 위한 통합 방법 정립

실험계획법의 종류에 따른 폭발조건의 배치에 대한 입력자료는 해석의 목적에

관계없이 많은 파라미터와 폭발배치의 기하적인 구성관계를 살펴보아야 하는 복잡한 과정이 요구된다. 또한, 해석과정에서 시간이력에 따른 엄청나게 많은 결과 데이터를 생성하기 때문에 이로부터 원하는 물리량을 얻기 위해서도 많은 시간과 노력이 요구되는 실정이다. 이를 위해서 LS-DYNA/USA의 입력자료의 자동생성과 해석의 수행, 그리고 생성된 출력파일로부터 데이터를 효과적으로 분석하도록 공학 프로세스의 통합에 매우 효과적인 범용 프로그램인 ModelCenter[56~57]를 사용하였다. ModelCenter는 해석서버(analysis server)라는 자체 네트워크 프로토콜(protocol)을 이용하여 각종 응용 프로그램과의 연계를 통해 네트워크상에 있는 범용 CAD/CAE 프로그램 및 In-House 프로그램의 통합 및 실험계획법, 민감도해석(Design Sensitivity Analysis), 강건 최적설계(Robust Optimal Design), 그리고 신뢰성 최적설계(Reliability Based Design Optimization) 등에 널리 활용되는 범용 프로그램이다.

ModelCenter는 다수의 응용 프로그램을 연결하여 특정 목적의 공학 프로세스를 자동화할 수 있는 모델로 구성하는 기능을 지원한다. 본 연구에서는 3장에서 언급한 바와 같이 함정 수중충격 M&S의 절차에 따라 1회 실험마다 4번의 해석과정이 필요한 LS-DYNA/USA와의 연동을 위해 3번의 랩핑(wrapping) 과정과 3개의 스크립트(script) 형식의 제어문을 통해 이를 개체화하고 상호연계를 통한 자동화 연산방식을 Fig. 5.2와 같이 구현하였다. 앞에서 언급한 랩핑 과정이란 응용 프로그램을 ModelCenter와 연계하기 위해서는 응용 프로그램이 존재하는 전산기에 통신 프로토콜인 Analysis Server와 ASCII 포맷의 스크립트 파일인 랩퍼(wrapper)를 통해 통신하는 과정을 의미한다. 랩퍼는 해당 응용 프로그램의 입력 파일의 생성, 응용 프로그램의 실행, 출력 파일에서 필요한 정보를 추출해 내기 위한 매개체 역할을 한다. 일반적으로 랩퍼는 RowFieldInputFile, RowFieldOutputFile, 그리고 RunCommand의 세 부분으로 구성된다. 응용 프로그램이 해당 전산기 운영체제 하에서 배치모드(batch mode)로 실행이 가능한 경우 이러한 랩퍼만으로도 응용 프로그램과 ModelCenter의 연계가 가능하지만 특정 환경 아래에서만 실행이 가능한 응용 프로그램 즉, 매트랩(Matlab)과 같은 전산언어로 작성된 In-House 프로그램은 랩퍼 작성뿐만 아니라 응용 프로그램을 인식하기 위해 ModelCenter 내의 환경 설정을 변경해 주어야 한다.

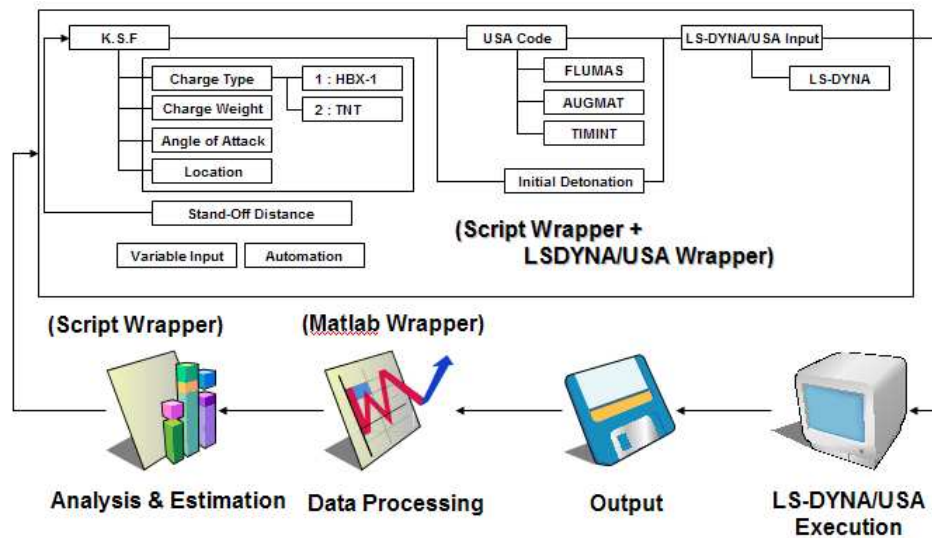


Fig. 5.2 Execution flow chart in ModelCenter

각 모듈의 응용프로그램 개체들을 ModelCenter 안에서 하나의 프로세스 모델로 구성될 수 있도록 Fig. 5.3과 같이 하나의 아이콘 형태로 표현하였으며, 이들 개체 간을 화살표 형식으로 나타낸 데이터 입출력 흐름을 통해 각각의 폭발조건에 대한 입력과 그에 대한 결과 특성치를 출력하였다. 또한 실험계획법을 이용한 충격응답 해석에서는 LS-DYNA/USA와 후처리를 통해 결과 분석과 정리를 위해 매트랩을 이용한 In-House 프로그램을 구성하고, 이들을 각각 랩퍼(wrapper)를 통해 ModelCenter와 연계하였다.

Fig. 5.4에서 나타낸 바와 같이 정해진 실험계획법의 순서에 따라 ModelCenter 자체 내에서 제공하는 스크립트 랩퍼를 통해 LS-DYNA/USA의 입력파일을 생성하고, 이를 LS-DYNA/USA 랩퍼가 LS-DYNA, FLUMAS 모듈, AUGMAT 모듈, 그리고 TIMINT 모듈에 필요한 입력자료를 생성한다. 이를 통해 LS-DYNA/USA를 실행하면 계산종료 시간까지 정해진 시간간격에 따라 binary 형태의 'D3PLOT'과 ASCII 형태의 결과 파일인 'NODOUT'과 'ELOUT'을 생성하게 된다. NODOUT은 미리 입력자료에 기입된 절점(node)들에 대하여 각 방향의 자유도에 따른 변위, 속도, 그리고 가속도 등을 기록한 파일이고, ELOUT은 요소들이 가지는 각 방향 성분별 응력, 변형률 등의 자료를 기록한 결과파일이다.

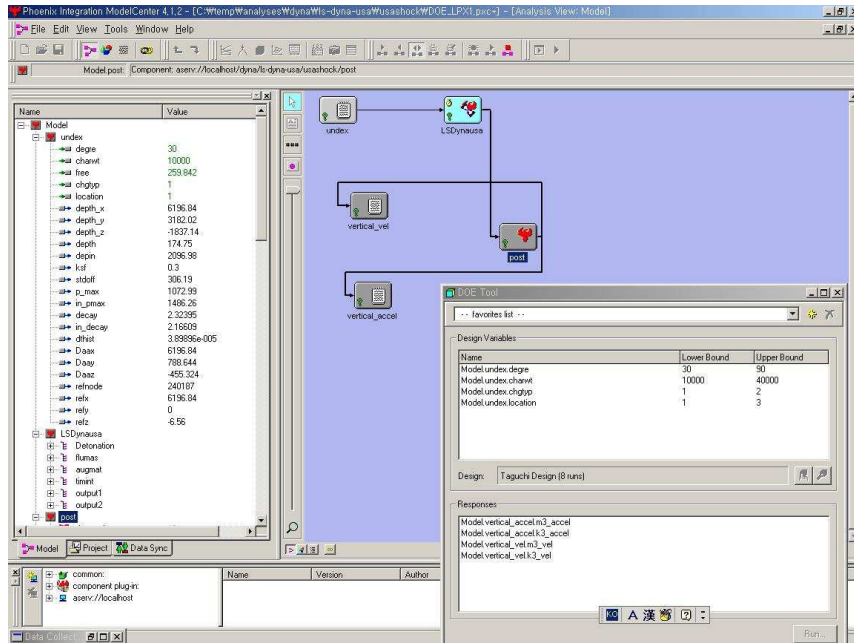


Fig. 5.3 Execution main window in ModelCenter

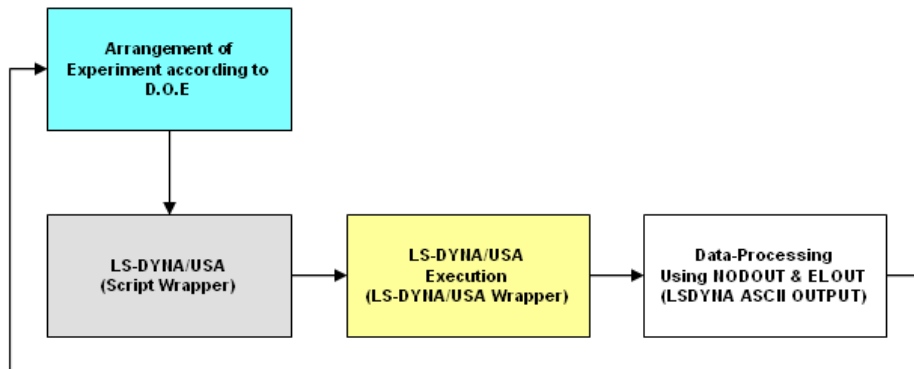


Fig. 5.4 Process flow chart of ModelCenter related with LS-DYNA/USA

본 연구에서는 실험계획법을 위해 선정된 반응인자는 선체 길이방향의 최대 수직 속도, 가속도, 그리고 유효응력(effective stress)을 추출하고, 대표적인 탑재장비인 발전기의 지지부에 대한 감쇠 의사속도 충격응답 스펙트럼[58]을 Fig. 5.5와 같이 구하여 주파수 영역에 따라 변위, 속도, 그리고 가속도의 평균적인 수렴치를 선정하였다. 이를 위해 NODOUT을 통해 반응인자로 선정된 속도와 가속도, 그리고 충격응답 스펙트럼을 구하기 위한 데이터를 추출하고 ELOUT에서 유효응력성분을 추출하였다. 필요한 데이터의 성격에 따라 필터링 과정과 최대값 도출, 그리

고 각 위치별의 배분 등은 아래 Fig. 5.6과 같이 매트랩을 통해 처리하였다.

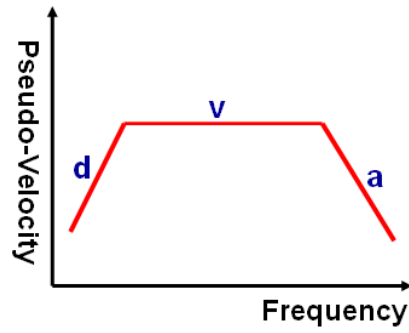


Fig. 5.5 Idealization of pseudo-damped shock response spectrum

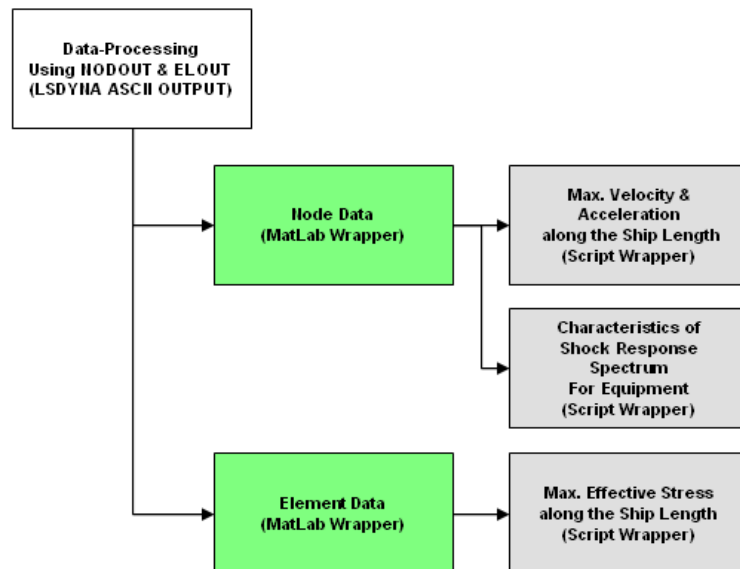


Fig. 5.6 Composition of Matlab wrapper for post-processing

5.4 수중폭발 충격파의 손상잠재력 척도로서의 용골충격계수 적절성 검토

5.4.1 요인배치법과 분산분석을 통한 적절성 검토

본 절에서는 앞의 4장에서 언급한 실험계획법 중 일부실험시법을 사용하여 동일한 용골충격계수의 폭발 조건에 대하여 해석 대상함들의 충격파에 대한 응답 특성을 살펴보고자 하였다. 실험계획법의 적용은 4장의 2.2절에서 기술한 순서에 따라 시험을 실시하였다.

Step 1 : 실험목적의 설정

현재 수중폭발 충격파에 대한 세기의 척도로서 앞의 5.2절에서 언급한 바와 같이 용골충격계수가 내충격 강화 기준으로 사용되고 있다. 용골충격계수의 물리적 의미에 따라 동일한 용골충격계수로 구성된 수중폭발 조건에서는 대상함의 응답 특성이 유사함을 의미한다. 이를 실험계획법으로 검증하기 위해 본 Step 1에서는 먼저 파악하고자 하는 문제를 인식하고 가설을 세우게 되는데, 여기서는 '동일한 용골충격계수 아래 이를 구성하는 인자의 변화에 대한 충격 응답 특성을 같다'라고 설정하였다.

Step 2 : 인자와 인자 수준의 선택

실험계획법에 의한 3차원 전선 충격응답 시뮬레이션을 수행하기 위하여 아래 Table 5.1과 같이 동일한 용골충격계수 값을 가지도록 선정된 4개의 인자의 값을 변화시키는 수중폭발 조건을 결정하였다.

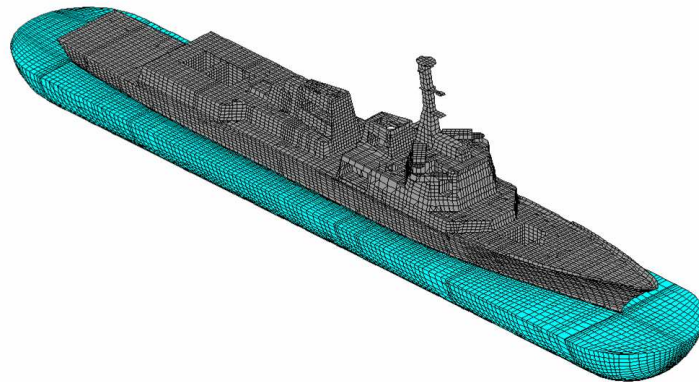
Table 5.1 Selection of factors and level values for shock response analysis

인자(factor)		수준량(level value)
A	폭약 종류(charge type)	TNT ~ HBX-1
B	등가 폭약무게(equivalent charge weight)	10,000 lb ~ 40,000 lb
C	폭발 입사각(angle of attack)	30° ~ 90°
D	폭발 위치(explosion location)	Bow ~ Stern

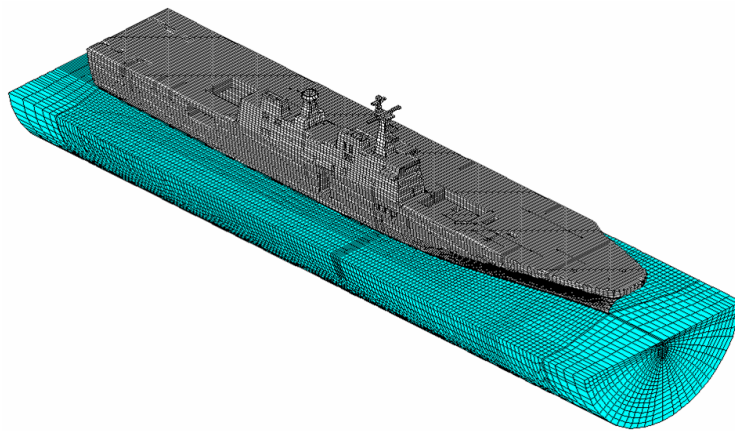
Step 3 : 반응인자의 선택

해석을 위한 대상함으로 Fig. 5.7에 나타난 바와 같이 AEGIS급 구축함과 대형 수송함에 대하여 충격응답 해석을 실시하였다. 대상함에 대한 유한요소 모델링 방

법은 일반적인 함정의 선체단면이 중 횡단면에 대해 비대칭이기 때문에 전선에 대해 3차원 전선 모델링을 수행하였다. 또한, 대상함의 정확한 충격응답 시뮬레이션을 위해 자유수면과 접수외판에서 반사된 인장충격파에 의해 각각 발생하는 광역캐비테이션과 선각캐비테이션의 영향을 고려할 수 있도록 대상함뿐만 아니라 주변유체를 포함하여 3차원 유한요소 모델링을 구성하였다[59].



(a) AEGIS급 구축함



(b) 대형 수송함

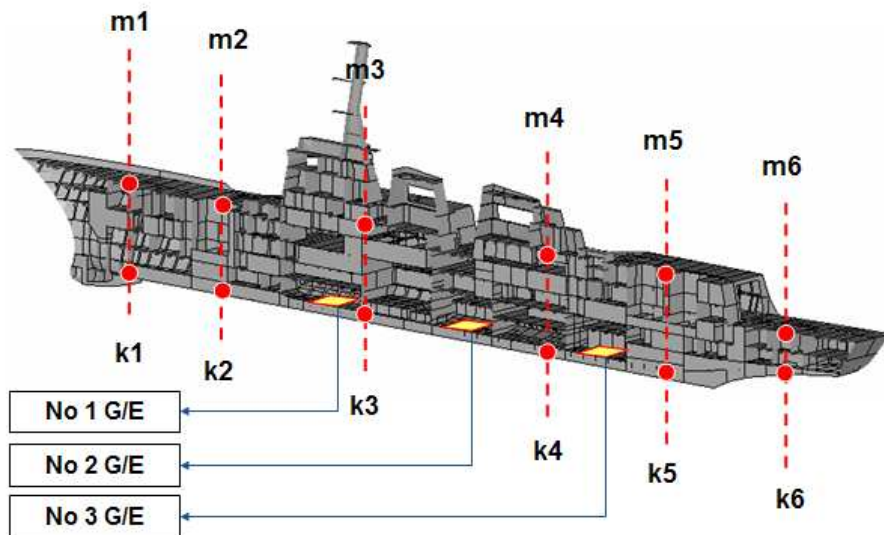
Fig. 5.7 3 dimensional finite element models for UNDEX ship shock simulation

시뮬레이션 프로그램으로는 LS-DYNA(version 960)/USA(version 5.9902d)를 사용하였으며, 충격파에 의한 유체-구조 상호작용 해석기법으로는 1차 DAA 방법을 사용하였다[60]. 충격응답 시뮬레이션을 위한 해석시간은 대상함의 충격응답 특성의 최대값을 파악하는 데 충분하다고 판단되는 0.15초 동안만을 고려하였다. 충격파에 대한 선체구조의 내충격 응답 특성치는 Fig. 5.8에서 나타낸 것처럼 선체 길

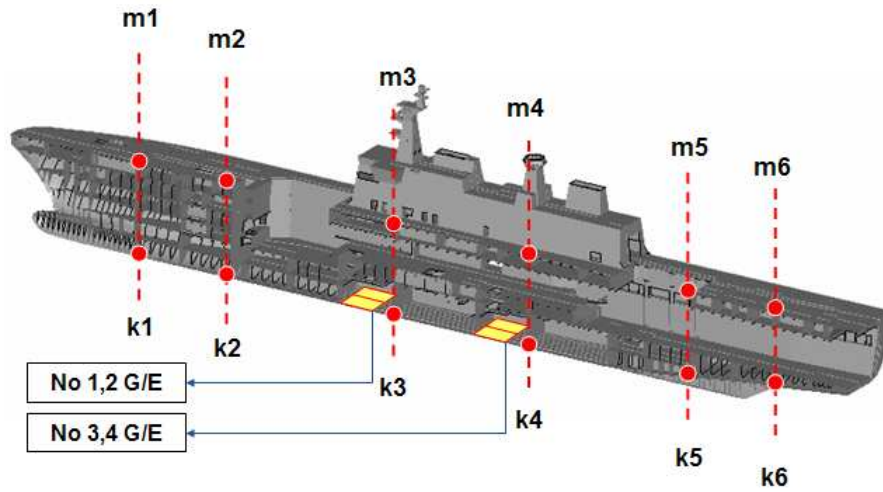
이방향으로 용골과 주갑판의 총 12군데의 수직방향 속도와 가속도 성분의 시간이력의 최대값과 주변부재의 유효응력의 최대값을 선정하였다. 계산된 속도 및 가속도 시간이력을 10kHz의 샘플링 주파수로 추출하고, 이들 데이터를 250Hz의 컷오프(cut-off) 주파수를 갖는 4차 버터워스(butterworth) 저역통과(low-pass) 디지털 필터를 사용하여 필터링하였다. 또한, 탑재장비의 응답특성을 살펴보기 위해 대표적인 장비인 발전기(generator)에 대하여 지지부에 대한 수직방향 가속도 성분을 이용하여 감쇠 의사속도 충격응답 스펙트럼을 구하여 이에 대한 변위, 속도, 그리고 가속도의 수렴치를 비교, 검토하였다.

Step 4 : 실험의 배치와 실험순서의 랜덤화

인자의 수와 수준수를 고려하면 원래 $2^4=16$ 회이었던 실험횟수를 교락법을 사용하여 실험 블록을 2개로 나누어 그중 한 블록에 대한 8회만 실시하였다. 2^4 형 요



(a) AEGIS급 구축함



(b) 대형 수송함

Fig. 5.8 Locations of data acquisition for UNDEX ship shock simulation

인배치법에서 4인자 교호작용 ABCD를 블록과 교락시킨 배치는 Table 5.2와 같다. 두 블록 중에서 임의로 하나의 블록을 택하여 실험하면 2^4 형의 1/2 반복 일부 배치법의 실험이 된다. 동일한 용골충격계수의 값을 갖도록 선정된 폭약 종류 및 중량과 폭발위치에 대해서 해당하는 폭발거리를 Fig. 5.9에서 나타낸 것처럼 배치 되도록 하였다.

Table 5.2 Design matrix of one-half 2^4 fractions

실험 횟수	폭약무게	폭약종류	폭발각도	폭발위치	블록 1					블록 2				
					실험조건				처리조합	실험조건				처리조합
					A	B	C	D		A	B	C	D	
1	40000	TNT	90°	선미	1	1	1	0	abc	0	1	1	0	bc
2	40000	TNT	30°	선수	1	1	0	1	abd	0	1	0	1	bd
3	10000	TNT	90°	선수	0	1	1	1	bcd	1	1	1	1	abcd
4	10000	TNT	30°	선미	0	1	0	0	b	1	1	0	0	ab
5	40000	HBX-1	90°	선수	1	0	1	1	acd	0	0	1	1	cd
6	40000	HBX-1	30°	선미	1	0	0	0	a	0	0	0	0	(1)
7	10000	HBX-1	90°	선미	0	0	1	0	c	1	0	1	0	ac
8	10000	HBX-1	30°	선수	0	0	0	1	d	1	0	0	1	ad

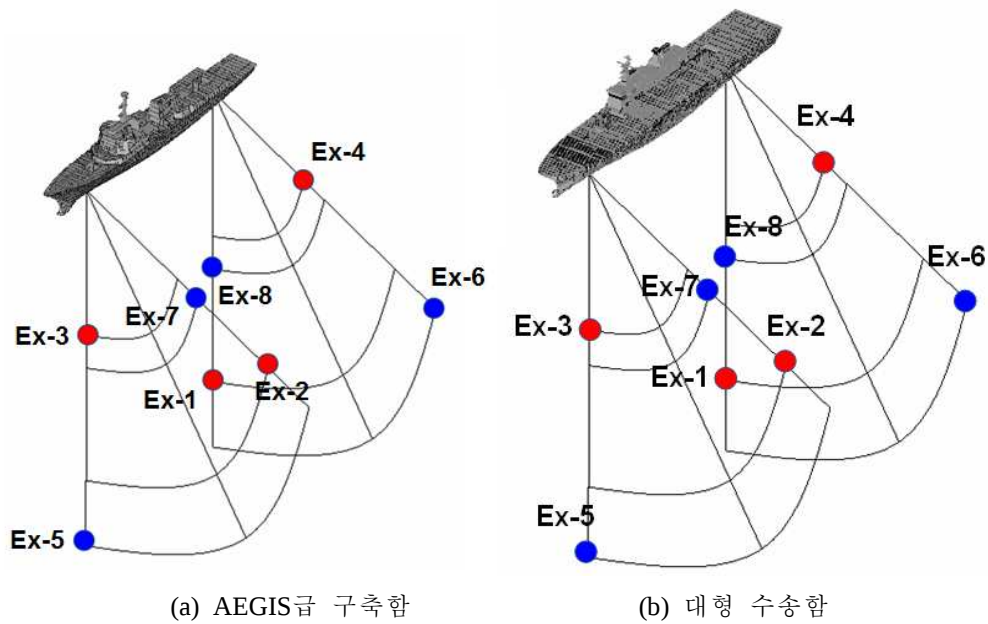


Fig. 5.9 Experimental design for UNDEX arrangement with same KSF

Step 5 : 실험의 실시

이미 앞의 5.3절에서 자세히 언급한 바와 같이 고려중인 실험계획에 따른 수중 폭발 조건을 반영한 입력 자료의 생성과 결과의 출력을 ModelCenter를 중심으로 Fig. 5.10에 나타낸 바와 같이 과정을 거쳐 실험을 실시하였다.

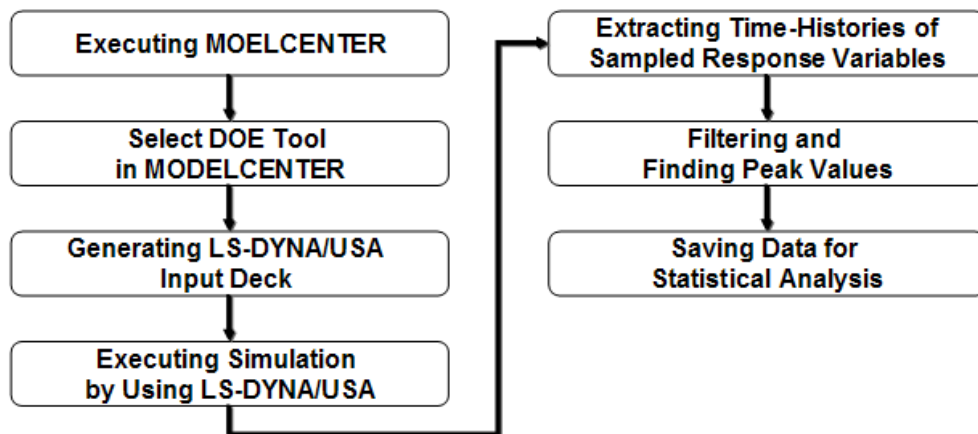


Fig. 5.10 Experimental process according to D.O.E. sequence

Step 6 : 실험결과의 확인 및 분석

본 연구에서는 동일 조건에 대한 반복실험이 없고, 각각의 응답위치에서 추출된 데이터들을 독립성분으로 간주하여 각 대상함 마다 총 45번의 분산분석을 실시하였다. 고려중인 대상함에 따라 F 검정을 위한 선정된 반응치 즉, 수직방향 속도와 가속도, 유효응력, 그리고 충격응답 스펙트럼의 수렴치 성분들에 대하여 분산분석표를 작성하여 검정에 필요한 F_0 값만을 정리하여 아래 Table 5.3~5.10에서 나타내었다. F 검정을 통한 가설검증은 유의수준 α 에서 만약 F_0 의 값이 $F(\phi_A, \phi_E; \alpha)$ 보다 크면 귀무가설을 기각하고, 아니면 채택한다.

먼저 AEGIS급 구축함의 경우, 선체 길이 방향으로 수직방향의 속도 성분과 가속도 성분에서는 각각 1군데와 9군데, 유효응력 성분에서 6군데, 그리고 충격응답 스펙트럼의 수렴 성분에서는 5군데에서 F_0 가 $F(\phi_{\text{인자}}, \phi_E; 0.05)$ 보다 큰 것으로 나타났지만, $F(\phi_{\text{인자}}, \phi_E; 0.01)$ 에서는 모두 작은 것을 알 수 있다. 또한 대형 수송함의 경우에서도 선체 길이 방향으로 수직방향의 속도 성분과 가속도 성분에서는 2군데, 유효응력 성분에서 6군데, 그리고 충격응답스펙트럼의 수렴 성분에서는 8군데에서 F_0 가 $F(\phi_{\text{인자}}, \phi_E; 0.05)$ 보다 큰 것으로 나타났지만, $F(\phi_{\text{인자}}, \phi_E; 0.01)$ 에서는 역시 모두 작은 것을 알 수 있다.

분산분석을 통한 F 검증에서 유의수준이 낮을수록 가설을 위배할 수 있는 위험률을 작아지므로 본 연구에서 Step 1에서 세운 가설, 즉 용골충격계수를 구성하는 각각의 인자들 간의 수준 차에 대한 대상함의 응답특성에서 이들 인자의 수준 간에 특성치의 차이가 없다는 가설을 유의수준 1% 내에서 수용할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5.12 Analysis of variance for maximum vertical velocity (구축함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	1.775	0.139	3.081	10.616*	34.1	10.1
KL_2	3.596	0.039	0.462	7.071	34.1	10.1
KL_3	0.560	0.037	0.061	7.431	34.1	10.1
KL_4	1.082	0.064	0.538	3.598	34.1	10.1
KL_5	0.975	0.443	0.607	7.981	34.1	10.1
KL_6	0.337	0.298	1.827	8.562	34.1	10.1
MD_1	0.479	0.010	0.652	2.979	34.1	10.1
MD_2	2.068	0.000	0.204	9.607	34.1	10.1
MD_3	1.986	0.213	0.290	7.102	34.1	10.1
MD_4	10.085	0.095	1.626	6.555	34.1	10.1
MD_5	3.794	0.042	4.741	2.292	34.1	10.1
MD_6	0.190	0.115	1.658	8.106	34.1	10.1

Table 5.13 Analysis of variance for maximum vertical acceleration (구축함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	2.051	0.003	0.523	10.277*	34.1	10.1
KL_2	0.104	0.040	0.087	6.532	34.1	10.1
KL_3	4.598	0.019	8.568	23.955*	34.1	10.1
KL_4	0.113	1.457	4.602	10.147*	34.1	10.1
KL_5	0.434	0.131	0.002	5.036	34.1	10.1
KL_6	0.017	0.308	2.952	9.809	34.1	10.1
MD_1	0.190	0.067	0.000	8.554	34.1	10.1
MD_2	0.864	0.706	8.139	3.793	34.1	10.1
MD_3	0.345	0.913	19.676*	10.156*	34.1	10.1
MD_4	1.006	2.512	23.586*	3.847	34.1	10.1
MD_5	2.159	0.096	14.286*	27.548*	34.1	10.1
MD_6	0.102	0.186	3.130	23.285*	34.1	10.1

Table 5.14 Analysis of variance for maximum effective stress (구축함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	0.168	0.355	0.566	13.506*	34.1	10.1
KL_2	0.001	3.571	2.832	8.367	34.1	10.1
KL_3	7.022	0.145	9.379	0.002	34.1	10.1
KL_4	0.096	0.198	0.165	4.157	34.1	10.1
KL_5	0.497	0.096	0.262	19.421*	34.1	10.1
KL_6	0.022	0.139	0.166	12.311*	34.1	10.1
MD_1	0.029	0.108	0.529	8.664	34.1	10.1
MD_2	2.117	0.005	4.846	2.116	34.1	10.1
MD_3	2.273	5.347	11.646*	1.212	34.1	10.1
MD_4	2.557	2.931	0.000	7.479	34.1	10.1
MD_5	1.536	0.320	7.554	25.270*	34.1	10.1
MD_6	0.026	0.010	0.704	10.621*	34.1	10.1

Table 5.15 Analysis of variance for convergent value of SRS (구축함)

Equip.	Factor	F_Value(F_0)				Significant Level	
		Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
No # 1 G/E	Displace.	18.130*	0.555	0.347	8.569	34.1	10.1
	Velocity	1.298	0.060	0.738	5.792	34.1	10.1
	Acceler.	0.050	0.705	9.077	17.685*	34.1	10.1
No # 2 G/E	Displace.	25.982*	0.097	0.053	1.199	34.1	10.1
	Velocity	0.160	0.628	2.558	0.103	34.1	10.1
	Acceler.	9.960	0.010	31.663*	7.850	34.1	10.1
No # 3 G/E	Displace.	7.722	0.271	0.131	3.706	34.1	10.1
	Velocity	0.857	0.195	3.048	14.348*	34.1	10.1
	Acceler.	0.044	0.891	7.719	7.854	34.1	10.1

Table 5.16 Analysis of variance for maximum vertical velocity (수송함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	0.003	0.010	0.259	14.901*	34.1	10.1
KL_2	0.014	0.011	0.176	8.161	34.1	10.1
KL_3	0.214	0.028	0.419	2.798	34.1	10.1
KL_4	0.223	0.054	0.496	6.157	34.1	10.1
KL_5	0.007	0.091	0.144	5.411	34.1	10.1
KL_6	0.022	0.041	0.016	4.143	34.1	10.1
MD_1	0.009	0.022	0.466	15.102*	34.1	10.1
MD_2	0.101	0.112	0.037	4.531	34.1	10.1
MD_3	0.272	0.075	0.788	1.647	34.1	10.1
MD_4	0.444	0.062	1.101	4.676	34.1	10.1
MD_5	0.052	0.071	0.467	4.668	34.1	10.1
MD_6	0.000	0.039	0.127	6.581	34.1	10.1

Table 5.17 Analysis of variance for maximum vertical acceleration (수송함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	0.004	0.057	0.223	14.713*	34.1	10.1
KL_2	0.000	0.010	0.194	1.167	34.1	10.1
KL_3	0.555	0.007	0.984	3.477	34.1	10.1
KL_4	0.112	2.415	0.594	5.139	34.1	10.1
KL_5	0.680	0.281	0.000	1.249	34.1	10.1
KL_6	0.004	0.038	0.137	5.388	34.1	10.1
MD_1	0.101	0.054	0.102	8.922	34.1	10.1
MD_2	0.063	0.003	0.003	3.536	34.1	10.1
MD_3	0.360	0.011	3.267	3.929	34.1	10.1
MD_4	0.190	0.654	6.631	11.742*	34.1	10.1
MD_5	0.000	0.460	0.880	9.744	34.1	10.1
MD_6	0.007	0.095	0.378	6.374	34.1	10.1

Table 5.18 Analysis of variance for maximum effective stress (수송함)

Response Location	F_Value(F_0)				Significant Level	
	Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
KL_1	2.716	2.489	0.944	3.525	34.1	10.1
KL_2	2.107	0.361	1.901	17.630*	34.1	10.1
KL_3	6.030	0.234	6.353	16.216*	34.1	10.1
KL_4	4.192	0.122	3.274	7.245	34.1	10.1
KL_5	1.226	0.118	1.607	15.792*	34.1	10.1
KL_6	0.009	1.164	1.396	10.508*	34.1	10.1
MD_1	0.849	0.038	0.051	0.851	34.1	10.1
MD_2	1.816	0.002	0.147	21.735*	34.1	10.1
MD_3	5.215	0.024	0.008	0.185	34.1	10.1
MD_4	3.405	0.131	20.119*	1.809	34.1	10.1
MD_5	5.711	0.106	9.142	0.028	34.1	10.1
MD_6	0.720	0.005	4.996	0.135	34.1	10.1

Table 5.19 Analysis of variance for convergent value of SRS (수송함)

Equip.	Factor	F_Value(F_0)				Significant Level	
		Weight	Type	Angle	Location	% 0.01	% 0.05
No # 1 G/E	Displace.	4.462	0.315	0.082	7.384	34.1	10.1
	Velocity	4.268	0.888	24.063*	12.637*	34.1	10.1
	Acceler.	5.573	0.097	13.774*	26.845*	34.1	10.1
No # 2 G/E	Displace.	3.445	0.583	0.232	5.527	34.1	10.1
	Velocity	1.808	0.057	0.050	6.084	34.1	10.1
	Acceler.	1.645	0.427	0.029	17.467*	34.1	10.1
No # 3 G/E	Displace.	5.791	0.122	0.051	3.503	34.1	10.1
	Velocity	9.933	0.706	7.414	20.938*	34.1	10.1
	Acceler.	4.724	0.041	8.073	8.255	34.1	10.1
No # 4 G/E	Displace.	3.859	0.791	0.481	4.581	34.1	10.1
	Velocity	1.729	0.086	0.260	1.836	34.1	10.1
	Acceler.	5.900	0.000	9.858	10.350*	34.1	10.1

Step 7 : 가설의 수용 여부 판단 및 조치

통계학적 분석을 통한 가설의 기각 및 수용 여부에 대한 판단과정을 통해 조치를 취하는 것이 마지막 과정인 Step 7이다. 앞서 언급한 것처럼 F 검증에 사용되는 유의수준은 처음 세운 가설을 위반할 확률을 의미하는 것으로 이는 작으면 작을수록 신뢰성이 높은 것으로 앞서 반응치에 대한 결과 분석에서 대상함의 종류에 관계없이 유의 수준 1%내에 모든 물리량이 존재하므로 처음 세운 가설을 수용할 수 있다고 통계학적으로 판단된다. 즉 '동일한 용골충격계수 아래 이를 구성하는 인자의 변화량에 대한 대상함의 충격응답 특성을 같다'라고 할 수 있다. 이로부터 동일한 용골충격계수의 조건에서는 폭발 배치에 관계없이 대상함의 충격응답특성은 동일하다고 할 수 있으며, 대표성을 지니는 특정 수중폭발 배치에서 수치해석을 통해서 대상함의 내충격 응답특성을 파악해도 된다는 결론을 얻을 수 있다.

5.4.2 고 찰

본 연구에서는 수상함에 대한 전선 충격응답해석을 통해 용골충격계수의 각 인자들이 대상함의 충격응답 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 실험계획법 중 일부실시법을 사용한 분산분석을 통해 대상함의 충격응답에 대한 용골충격계수의 물리적 의미의 적절성을 증명하였다.

5.5 수중폭발 가스구체 압력파의 손상잠재력 척도로서의 버블계수 도출

폭약중량(이에 따른 폭발거리 또는 입사각)이 달라도 용골충격계수가 같은 수중폭발조건에 대해서는 충격파에 의한 선체구조의 충격응답 크기가 거의 대등하기 때문에 하나의 용골충격계수로써 수상함의 내충격 강화 기준 수중폭발 충격파의 세기를 대표할 수 있음을 앞 절에서 증명하였다. 그러나 용골충격계수는 수중폭발에 있어서 하나의 중요한 척도이지만 충격파와는 전혀 다른 특성을 갖는 충격하중인 가스구체 압력파와는 직접적인 물리적 관계를 갖지 않기 때문에 가스구체 압력파 세기를 나타내는 척도로서는 적합하지 않다. 그 이유는 용골충격계수가 같더라도 폭약중량(이에 따른 폭발거리 또는 입사각)이 다르면 가스구체 압력파에 의한 선체거더의 상하방향 보 거동 응답 즉, 휘핑응답 크기가 매우 달라지기 때문이다.

본 절에서는 실제 수상함들과 매우 유사한 제원과 경계조건(양단자유)을 갖는 3종의 균일단면 Timoshenko 보들에 대해 휘핑응답 해석을 수행하여 위의 사실을 재확인하고, 이로부터 수중폭발 휘핑에 대한 선체거더의 종강도 안전성 평가에 있어서 용골충격계수로 주어지는 현재의 내충격 강화 기준 충격하중 세기의 표현방법이 갖는 문제점을 제기하였다. 그리고 이러한 문제점을 해결하기 위해 가스구체 압력파 세기의 척도로 사용할 수 있는 새로운 물리량(본 논문에서는 ‘버블계수(BF; bubble factor)’라 명명하였음)을 도출하고, 이를 앞의 3종의 Timoshenko 보들의 휘핑응답 해석에 적용하여 그 유용성을 검토하였다.

5.5.1 용골충격계수의 가스구체 압력파의 손상잠재력 척도로서의 문제점

수중폭발로 인한 가스구체 압력파로 인한 휘핑응답에 대한 함정 선체거더의 종강도 안전성 평가와 관련하여 용골충격계수를 기준으로 하는 경우의 문제점을 제기하기 위해 동일한 용골충격계수를 갖는 수중폭발 조건 하에서 폭약중량(이에 따른 폭발거리 또는 입사각)의 차이가 선체거더의 휘핑응답 크기에 어떠한 영향을 미치는지를 일련의 수치계산을 통해 살펴보았다. 수치계산 대상으로는 Table 5.11과 같이 실제 수상함들과 매우 유사한 제원과 경계조건(양단자유)을 갖는 3종의 균일단면 Timoshenko 보들을 선택하였다. 여기서 사용된 3종의 수치계산 모델은 실제 건조 완료되었거나 건조 중인 한국해군의 고속정(Type 1), AEGIS급 구축함(Type 2), 그리고 대형 수송함(Type 3)의 중앙단면부를 기준으로 하였다.

Table 5.11 Three kinds of uniform free-free Timoshenko beams

Item	Type 1	Type 2	Type 3
L.O.A (m)	50.0	150.0	200.0
L.B.P (m)	50.0	150.0	200.0
Breadth (m)	9.1	21.0	31.4
Depth (m)	5.0	12.8	20.0
Draft (m)	2.5	6.3	6.6
D.W.T (ton)	717	14,798	31,654
Effective shear area (m ²)	0.064	0.246	0.851
Moment of Inertia (m ⁴)	0.678	41.0	221.3
Young's Modulus (N/m ²)	2.07×10^{11}		
Poisson Ratio	0.3		

해석을 위해 대상 보들을 21개의 절점, 20개의 등간격 Timoshenko 보요소로 모델링 하였다. 구조질량과 부가수질량은 각 절점의 집중질량으로 치환하였으며, 보 요소의 질량은 없다고 가정하였다. 한국기계연구원에서 모드중첩법에 의거하여 개발한 선체거더 보 유추 휘핑응답 해석 프로그램인 'UNDEXWHIP'[61]을 사용하여 해석을 수행하였다. 모드중첩법에 의한 휘핑응답 계산을 위해 Table 5.12에 나타낸 바와 같이 대상 Timoshenko 보들의 5차까지의 상하방향 점수진동 고유모드를 사용하였으며, 2초 동안의 휘핑응답을 계산하였다. 또한, 모든 감쇠는 무시하였으며, 가스구체 압력과 시간이력을 계산하기 위해 자유수면과 가스구체의 수직상승을 고려한 Hicks의 가스구체 운동방정식을 사용하였고, 1차 가스구체 압력파만을 고려하였다.

해석을 위한 수중폭발 조건과 관련해서는 lb 및 ft 단위계를 사용하여 계산되는 용골충격계수를 0.1에서부터 0.4까지 0.05간격으로 변화시켰으며, 폭약종류로는 TNT 폭약을 택하여 중량을 270kg에서부터 2,700kg까지 270kg 간격으로 변화시켰다. 또한, 대상 보들의 길이방향에 따른 폭발위치와 입사각과 관련해서는 가장 큰 휘핑응답을 유발하는 경우인 보 중앙부 직하에서 폭발하는 경우만을 고려하였다. 앞의 총 70개의 수중폭발 조건에 대한 휘핑응답 해석을 보다 효율적으로 수행하기 위해 ModelCenter와 UNDEXWHIP을 연계하여 요구되는 휘핑응답 해석 프로세스를 자동화하였다.

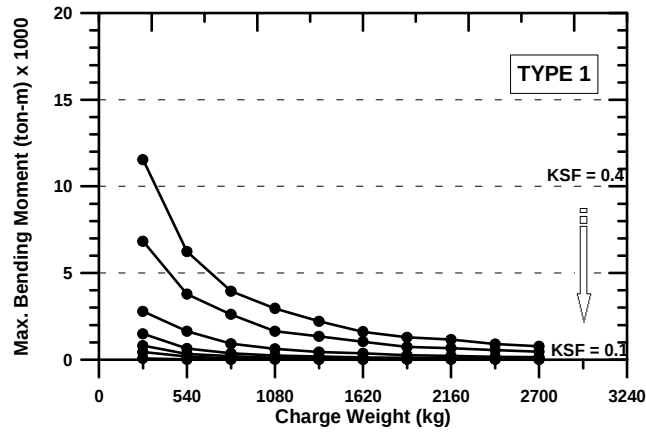
Table 5.12 Wetted vertical natural frequency of 3 Timoshenko beams

Mode(Hz)	Type 1	Type 2	Type 3
1 (2-node)	2.654	0.862	0.843
2 (3-node)	6.563	1.981	1.976
3 (4-node)	11.289	3.216	3.256
4 (5-node)	16.273	4.453	4.564
5 (6-node)	21.293	5.670	5.855

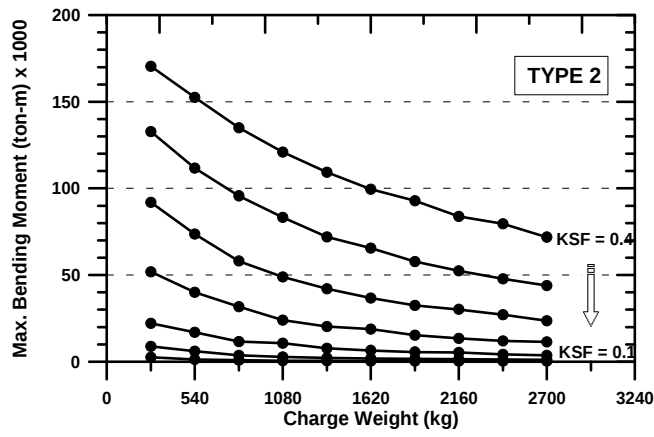
Fig. 5.11(a)~(c)에는 3종의 Timoshenko 보 각각에 대해 용골충격계수와 폭약중량 크기의 변화에 따른 휘핑 최대 굽힘모멘트의 변화를 도시하였다. 최대 굽힘모멘트는 고려한 모든 폭발조건에 대해 보 중앙부에서 발생한다. 이들 그림에서 보듯이 3종의 Timoshenko 보 모두에 대해 동일한 용골충격계수를 갖는 경우 폭약중량이 작을수록(폭발거리가 짧을수록) 최대 굽힘모멘트가 커지며, 용골충격계수가 클수록 최대 굽힘모멘트에 대한 폭약중량 크기의 영향이 커져 감을 알 수 있었다.

이상으로부터 알 수 있듯이 동일한 용골충격계수를 갖는 폭발조건이라 하더라도 어떤 폭약중량 크기(또는 폭발거리)를 택하느냐에 따라 휘핑응답 크기가 매우 달라지기 때문에, 임의적으로 선택한 폭약중량(또는 폭발거리)에 대한 휘핑해석 결과를 토대로 대상 함정 선체거더의 수중폭발 휘핑에 대한 종강도 안전성을 평가한다는 것은 매우 작위적인 일이라 판단된다. 따라서 수중폭발 휘핑에 대한 함정 선체거더의 종강도 안전성 설계기준 충격하중 세기가 용골충격계수를 사용하여 표현된다면 용골충격계수뿐만 아니라 구체적인 폭약 종류와 중량(또는 폭발거리)도 함께 주어져야 한다. 그러나 실제 전투상황을 고려한 구체적인 폭발조건을 사전에 상정한다는 것은 현실적으로 매우 어려울 뿐만 아니라, 설령 상정이 가능하더라도 이 또한 매우 제한적인 기준이 될 수밖에 없다.

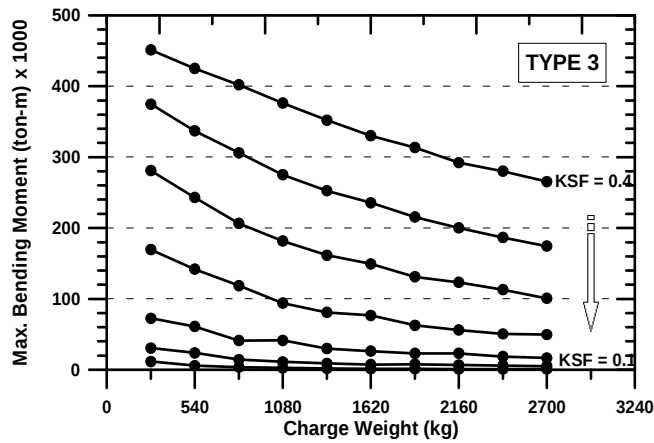
따라서 하나의 용골충격계수로서 내충격 강화 기준 충격파의 세기를 대표할 수 있듯이 하나의 값으로써 선체거더 종강도 안전성 설계기준 가스구체 압력파의 세기를 대표할 수 있는 새로운 물리량의 도출이 절실히 요구된다.



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 5.11 Results of whipping response analysis according to KSF variance

5.5.2 버블계수의 도출 및 유용성 검토

수중폭발 시 선체거더의 휘핑응답을 유발하는 직접적인 원인은 가스구체 압력과
에 의한 유체가속도로 인하여 발생하는 유체관성력이다. 가스구체 거동에 의한
유동이 이상유체 유동이고 가스구체는 구의 형상을 유지한다고 가정하면, 자유수
면과 가스구체의 수직상승을 고려하지 않는 경우 가스구체의 주위 수압에 대한
팽창·수축의 맥동운동으로 인해 가스구체 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어진 지
점에서 발생하는 유체가속도는 다음과 같이 표현된다[62].

$$\dot{u}_r = \frac{\dot{V}}{4\pi r^2} = \frac{\dot{R}}{r^2} \left(\ddot{R} + 2\frac{\dot{R}^2}{R} \right) \quad (5.2)$$

여기서 $\dot{u}_r$ 는 가스구체 반경방향 유체가속도, $\dot{V}$ 는 가스구체의 체적가속도이며,
 R , $\dot{R}$ 및 $\ddot{R}$ 은 각각 가스구체의 반경, 반경속도 및 반경가속도이다. 한편, 가스구
체의 최대반경 R_{max} 및 1차 맥동주기 T_1 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{max} \propto \frac{W^{1/3}}{P^{1/3}}, \quad T_1 \propto \frac{W^{1/3}}{P^{5/6}} \quad (5.3)$$

여기서 W 는 폭약중량이며, P 는 정수압 수두로서 폭발깊이 D 가 ft 단위를 갖는
경우 $P = D + 33$ 이다. 그리고 1차 맥동주기 동안의 가스구체 평균 반경속도 $\dot{R}_{avg}$
및 평균 반경가속도 $\ddot{R}_{avg}$ 는 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{R}_{avg} &\approx \frac{2R_{max}}{T_1} \propto P^{1/2} \\ \ddot{R}_{avg} &\approx \frac{2R_{max}}{T_1^2} \propto \frac{P^{4/3}}{W^{1/3}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

1차 맥동주기 동안 가스구체의 평균반경은 최대반경에 비례하며 가스구체 중심
으로부터의 거리 r 은 정수압 P 에 비례한다는 것에 주목하면, 가스구체 1차 맥동
주기 동안의 평균 유체가속도 $(\dot{u}_r)_{avg}$ 는 식 (5.2), (5.3) 및 (5.4)로부터 다음과 같
이 표현된다.

$$(\dot{u}_r) \propto \frac{W^{1/3}}{P^{4/3}} \propto \frac{1}{\bar{R}_{avg}} \quad (5.5)$$

본 논문에서는 가스구체 압력과의 세기를 나타내는 물리량이 선체거더의 휘핑 응답을 유발하는 하중 즉, 가스구체의 맥동운동에 의한 유체가속도와 직접적인 관계를 가질 것이라는 판단 하에 식 (5.5)의 평균 유체가속도와 폭약중량 및 정수압 수두(폭발깊이)의 관계로부터 다음과 같이 버블계수를 정의하였다.

$$\text{Bubble Factor} = \sqrt{3} \omega \frac{10^6 W}{2(D+33)^4} \quad (5.6)$$

여기서 폭약중량 W 와 폭발깊이 D 의 단위는 각각 lb 및 ft이다. 한편, 2장에서 기술한 바와 같이 대상 구조물의 중앙부 직하에서 폭발이 일어나는 경우가 가장 큰 휘핑응답을 유발하기 때문에 수중폭발 휘핑에 대한 선체거더의 종강도 안전성 평가 관점에서 본 버블계수를 사용한다는 전제 하에 입사각의 영향은 배제하였다.

본 연구에서 도출한 버블계수의 유용성을 검토하기 위해 앞에서 고려한 3종의 균일단면 Timoshenko 보들에 대해 휘핑응답 해석을 수행하였다. 휘핑응답 해석방법과 폭약종류 및 폭약중량 조건은 2장에서 기술한 내용과 동일하다. 다만, Fig. 5.12에서 보듯이 고려한 폭약중량 범위에서 본 버블계수들을 용골충격계수로 환산했을 때 5.5장에서와 같이 0.1~0.4의 범위에 있도록 하기 위하여 버블계수를 0.4부터 1.0까지 0.1간격으로 변화시켰다. 이 경우에도 고려한 수중폭발 조건의 총 수는 70개이다.

Fig. 5.13(a)~(c)에는 3종의 Timoshenko 보 각각에 대해 버블계수와 폭약중량 크기의 변화에 따른 휘핑 최대 굽힘모멘트의 변화를 도시하였다. 이 경우에도 최대 굽힘모멘트는 고려한 모든 폭발조건에 대해 보 중앙부에서 발생하였다. 이들 그림에서 보듯이 Type 2 및 Type 3의 보들의 경우에는 폭약중량에 상관없이 버블계수가 같은 수중폭발 조건에 대해서는 최대 굽힘모멘트가 거의 일정함을 알 수 있었다. 그러나 Type 1 보의 경우에는 용골충격계수를 기준으로 한 경우와 마찬가지로 같은 버블계수를 가져도 폭약중량이 작을수록(폭발깊이가 얕을수록) 최대 굽힘모멘트가 커짐을 알 수 있었다.

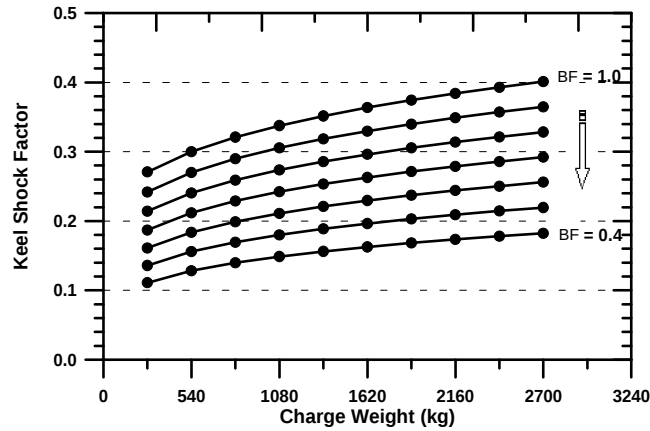
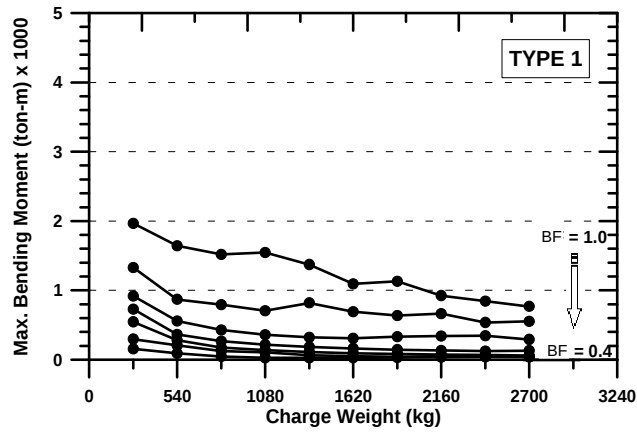


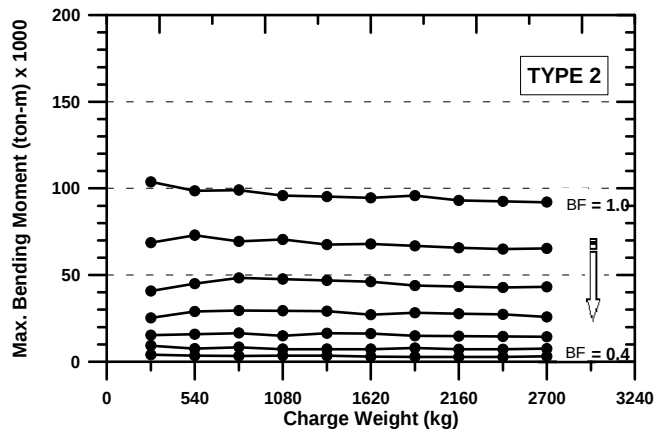
Fig. 5.12 Relationship between bubble factor and keel shock factor

Type 1 보의 경우 길이 및 배수량이 작아서 Fig. 5.14(a)~(c)에서 보듯이 Type 2 및 Type 3의 보들에 비해 1, 2차 상하방향 고유진동수가 고려한 수중폭발 조건 하에서의 가스구체 1차 맥동 진동수(실험식으로 계산한 값들임) 보다 상대적으로 크기 때문에 이러한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 선체거더에 대한 가스구체 압력파의 휘핑 손상잠재력은 폭발조건 뿐만 아니라 휘핑응답을 지배하는 선체거더의 상하방향 접수진동 저차 고유진동수와 가스구체 1차 맥동 진동수의 상관성과도 매우 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

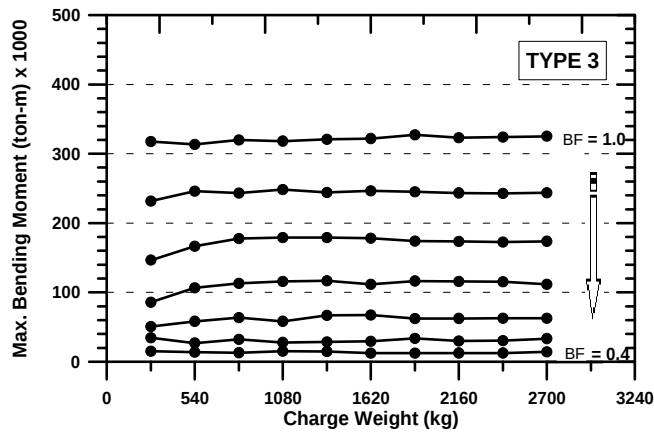
그러나 실제 함정 선체거더의 수중폭발 휘핑에 대한 종강도 안전성 문제는 Type 1 보와 같은 소형 함정보다는 휘핑응답이 매우 큰 Type 2 및 Type 3의 보들과 같은 대형 함정에 있어서 매우 중요한 문제이며, 실제 대형 함정들의 상하방향 접수진동 저차 고유진동수 값들은 Type 2 및 Type 3의 보들의 고유진동수와 매우 유사하리라 판단되기 때문에 본 연구에서 제시한 버블계수의 실제적인 유용성은 충분하리라 생각된다.



(a) Type 1

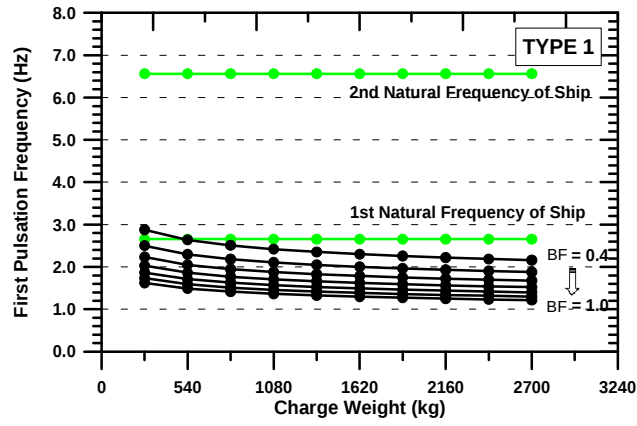


(b) Type 2

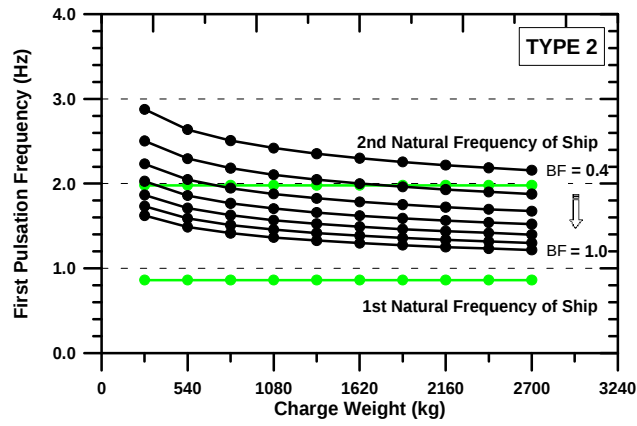


(c) Type 3

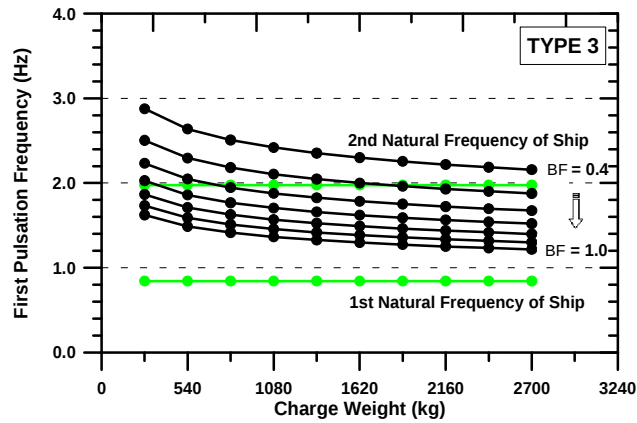
Fig. 5.13 Results of whipping response analysis according to BF variance



(a) Type 1



(b) Type 2



(a) Type 3

Fig. 5.14 Relationship between 1st pulsating frequency of gas bubble and natural frequencies of beams

5.5.3 요인배치법과 분산분석을 통한 버블계수의 적절성 검토

실험계획법을 이용한 분석 절차는 앞서 충격파에 대한 용골충격계수의 타당성을 검증하던 과정과 거의 동일하다. 다만 실험의 목적에 부합하는 인자의 선택과 수준수에 차이가 있어 여기서는 $p^m \times q^n$ 요인배치법을 사용하였다.

Step 1 : 실험목적의 설정

앞서 언급한 바와 같이 현재 가스구체 압력파에 대한 휘핑응답 세기의 척도로서 용골충격계수가 내충격 강화 기준으로 사용되고 있다. 이에 대한 부적절함을 도출하고 앞서 새로운 물리량으로 버블계수에 대한 유용성을 검증하고자 Step 1에서는 '동일한 용골충격계수와 버블계수 아래 이를 구성하는 인자의 변화에 대한 각각의 휘핑응답 특성은 같다'라고 설정하였다.

Step 2 : 인자와 인자 수준의 선택

실험계획법에 의한 1차원 보 유추 해석을 수행하기 위하여 동일한 용골충격계수와 버블계수 값을 가지도록 Table 5.13과 같이 선정된 3개의 인자의 값을 변화시키는 수중폭발 조건을 결정하였다.

Table 5.13 Selection of factors and level values for whipping response analysis

인자(factor)		수준량 (level value)
A	폭약 종류 (charge type)	TNT ~ HBX-1
B	등가 폭약무게 (equivalent charge weight)	270kg ~ 810kg
C	폭발 위치 (explosion location)	Bow ~ Midship

1. Charge Type
TNT
HBX-1

2. Charge Weight
270 kg
540 kg
810 kg

3. UNDEX Location
Bow
Middle(1/4)
Midship(1/2)

Step 3 : 반응인자의 선택

수치계산 대상으로는 Table 5.11과 같이 앞에서 버블계수의 유용성을 검증할 때 사용한 실제 수상함들과 매우 유사한 제원과 경계조건(양단자유)을 갖는 3종의 군

일단면 Timoshenko 보들 중에서 Type 2와 Type 3을 택하였다. 이는 실제 함정의 휘핑으로 인한 종강도 안전성 문제는 Type 1과 같은 소형 함정보다는 휘핑 응답이 매우 큰 Type 2 및 Type 3과 같은 대형 함정에 있어서 매우 중요한 문제이고, 실제 대형 함정들의 상하방향 접수진동 저차 고유진동수 값들은 Type 2와 3의 고유진동수와 매우 유사하기 때문이다. 이들 이상화 모델들의 대하여 Fig. 5.15와 같이 임의의 위치에서 작용하는 어떤 하중에 대하여도 가장 큰 응답이 유발된다고 예상되는 중앙단면부에서의 수직방향 변위, 속도 그리고 전단력과 굽힘 모멘트의 최대값을 특성치로 선택하였다.

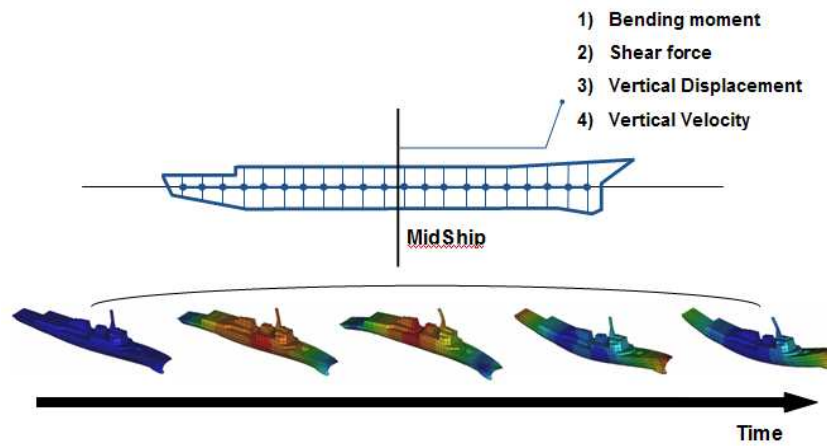


Fig. 5.15 Location of data acquisition for whipping response analysis

Step 4 : 실험의 배치와 실험순서의 랜덤화

휘핑응답 특성 파악을 위해 실험계획법 중에서 앞서 사용한 일부실험법이 아닌 $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법을 사용하였다. 그 이유는 인자로 선택된 3가지 물리량들에 대한 수준수가 다르기 때문인데, 폭약종류가 2 수준계이고 나머지 폭약중량과 폭발위치가 3 수준계로 선정하였기 때문에 여기서는 Table 5.14와 같이 $3^2 \times 2^1 = 9 \times 2$ 요인실험이다. 고려중인 해석 대상에서 용골충격계수와 버블계수의 영향을 모두 분석 대상으로 가설에서 설정하였으므로 이들을 고려한 총 실험 횟수는 216회가 된다.

Table 5.14 $p^m \times q^n$ fractional design matrix

Charge Type	Charge Weight	Explosion Location		
		Stern	Middle	MidShip
HBX-1	270 kg	Ex-1	Ex-7	Ex-13
	540 kg	Ex-2	Ex-8	Ex-14
	810 kg	Ex-3	Ex-9	Ex-15
TNT	270 kg	Ex-4	Ex-10	Ex-16
	540 kg	Ex-5	Ex-11	Ex-17
	810 kg	Ex-6	Ex-12	Ex-18

Step 5 : 실험의 실시

앞에서 버블계수의 도출을 위해 사용한 UNDEXWHIP과 ModelCenter를 연계하여 휘핑응답 해석에 필요한 데이터의 입·출력 과정을 자동화하였다.

Step 6 : 실험결과와 확인 및 분석

Step 5의 계산 과정을 거쳐 각 실험의 경우에 대하여 반응인자 별로 분산분석을 수행하게 된다. 여기서는 앞서 4장과 부록 A에서 언급한 바와 같이 $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법에 대한 분산분석을 통한 F 검정 과정을 한 가지 대표적인 반응인자에 대하여 수행하는 과정을 나타내었다. Type 2의 대형 수송함에 대한 이상화 모델에 대하여 버블계수 0.8일 때 대하여 최대 굽힘 모우멘트를 예를 들어 분산분석의 순서대로 나타내었다. 먼저 Table 5.15의 원 데이터로부터 총합계를 구하면 Table 5.16과 같다.

Table 5.15 Original data for maximum bending moment (Type 2, BF = 0.8)

Weight	Location Type	End	Middle	Midship
270 kg	HBX-1	59.369	57.246	115.553
	TNT	60.690	52.552	123.092
540 kg	HBX-1	71.679	63.502	151.002
	TNT	69.933	62.017	149.974
810 kg	HBX-1	76.257	68.097	162.815
	TNT	73.153	62.679	156.624

Table 5.16 Summation of total each level of factor

Weight	Location Type	End	Middle	Midship	Total
270 kg	HBX-1	59.369	57.246	115.553	468.502
	540 kg	60.690	52.552	123.092	
540 kg	HBX-1	71.679	63.502	151.002	568.108
	TNT	69.933	62.017	149.974	
810 kg	HBX-1	76.257	68.097	162.815	599.625
	TNT	73.153	62.679	156.624	
Total		411.081	366.094	859.060	1636.235

원 데이터로부터 요인과 요인과의 교호작용에 대한 효과를 개략적으로 파악하는 것이 다음 순서이지만, 본 연구에서는 주효과의 영향을 분석하고자 하므로 Table 5.17~5.19와 같이 2원표를 이용하여 각 요인과 교호작용에 대한 변동을 계산하였다. 각 요인들의 교호작용은 뒤에 오차항에 풀링(pooling)시켜 오차로 간주하였다.

4장에 언급한 바와 같이 각 인자와 교호작용에 대한 변동은 식 (5.7)과 같이 계산하고, 또한 선택된 인자들의 자유도는 식 (5.8)과 같이 계산하였다.

Table 5.17 Summation of T_{ij} for weight and type

구분	HBX-1	TNT	$T_{i.}$
270 kg	232.169	236.334	468.502
540 kg	286.184	281.924	568.108
810 kg	307.169	292.456	599.625
$T_{.j}$	825.521	810.714	1636.235

Table 5.18 Summation of $T_{i.k}$ for weight and location

구분	End	Middle	Midship	$T_{i.}$
270 kg	120.059	109.798	238.645	468.502
540 kg	141.612	125.520	300.976	568.108
810 kg	149.410	130.776	319.439	599.625
$T_{.k}$	411.081	366.094	859.060	1636.235

Table 5.19 Summation of $T_{.jk}$ for type and location

구분	End	Middle	Midship	$T_{\cdot\cdot}$
HBX-1	207.305	188.845	429.371	825.521
TNT	203.776	177.249	429.689	810.714
$T_{\cdot\cdot k}$	411.081	366.094	859.060	1636.235

$$CT - T^2/N = \frac{1636.235^2}{18} = 148736.985 \quad (5.7)$$

$$S_T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - CT = 59.369^2 + 57.246^2 + \dots + 62.679^2 + 156.624^2 - CT = 26987.159$$

$$S_A = \sum_i \frac{T_{i\cdot\cdot}^2}{mn} - CT = \frac{1}{2 \times 3} (468.502^2 + 568.108^2 + 599.625^2) - CT = 1561.545$$

$$S_B = \sum_j \frac{T_{\cdot j\cdot}^2}{ln} - CT = \frac{1}{3 \times 3} (825.521^2 + 810.714^2) - CT = 12.181$$

$$S_C = \sum_k \frac{T_{\cdot\cdot k}^2}{lm} - CT = \frac{1}{3 \times 2} (411.081^2 + 366.094^2 + 859.060^2) - CT = 24762.488$$

$$S_{AB} = \sum_i \sum_j \frac{T_{ij\cdot}^2}{n} - CT = \frac{1}{3} (232.169^2 + \dots + 292.456^2) - CT = 1603.537$$

$$S_{A \times B} = S_{AB} - S_A - S_B = 1603.537 - 1561.545 - 12.181 = 29.811$$

$$S_{AC} = \sum_i \sum_k \frac{T_{i\cdot k}^2}{m} - CT = \frac{1}{2} (120.059^2 + \dots + 319.439^2) - CT = 26905.040$$

$$S_{A \times C} = S_{AC} - S_A - S_C = 26905.040 - 1561.545 - 24762.488 = 581.007$$

$$S_{BC} = \sum_j \sum_k \frac{T_{\cdot jk}^2}{l} - CT = \frac{1}{3} (207.305^2 + \dots + 429.689^2) - CT = 24786.994$$

$$S_{B \times C} = S_{BC} - S_B - S_C = 24786.994 - 12.181 - 24762.488 = 12.326$$

$$S_E = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_{A \times B} + S_{A \times C} + S_{B \times C}) = 27.801$$

$$\Phi_T = N - 1 = (3 \times 2 \times 3) - 1 = 17 \quad (5.8)$$

$$\Phi_A = l - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$\Phi_B = m - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\Phi_C = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$\Phi_{A \times B} = (l - 1)(m - 1) = (3 - 1)(2 - 1) = 2$$

$$\Phi_{A \times C} = (l - 1)(n - 1) = (3 - 1)(3 - 1) = 4$$

$$\Phi_{B \times C} = (2-1)(3-1) = 2$$

$$\Phi_E = \Phi_T - (\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C + \Phi_{A \times B} + \Phi_{A \times C} + \Phi_{B \times C}) = 17 - (2 + 1 + 2 + 2 + 4 + 2) = 4$$

위의 결과들로부터 분산분석표를 작성하고 F-검정을 실시하였다. Table 5.20에는 주효과와 교호작용에 대한 분산분석표를 같이 나타내었다. 여기서 기술적으로 유의하지 않는 교호작용들을 오차항으로 풀링하여 분산분석표를 작성하면 Table 5.21과 같다. 이와 같은 과정을 통해 $p^m \times q^n$ 형의 요인배치법에서 분산분석표를 이용하여 F-검정을 실시한 결과를 Table 5.22~5.25에 나타내었다.

Table 5.20 Variance analysis for maximum bending moment
(Type 2, BF = 0.8)

요인	S	D.O.F.	V	F_0
Weight(a)	1561.545	2	780.772	112.338
Type(b)	12.181	1	12.181	1.753
Location(c)	24,762.488	2	12,381.244	1,781.414
$a \times b$	29.811	2	14.906	2.145
$a \times c$	581.007	4	145.252	20.899
$b \times c$	12.326	2	6.163	0.887
Error	27.801	4	6.950	-
Total	26987.159	17	-	-

Table 5.21 Variance analysis for maximum bending moment with pooling
(Type 2, BF = 0.8)

요인	S	D.O.F	V	F_0
Weight(a)	1561.545	2	780.772	14.393
Type(b)	12.181	1	12.181	0.225
Location(c)	24762.488	2	12381.244	228.245
Error	650.946	12	54.245	-
Total	27610.304	17	-	-

Table 5.22 Variance analysis for response variables with same KSF (Type 2)

Response Variable	Factor	F_Value : Keel Shock Factor						Significant Level %	
		0.20		0.30		0.40		0.05	0.01
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		
Bending Moment	Location	59.6	28.1	88.9	97.0	168.5	304.2	3.89	6.93
	Type	25.2	14.4	39.7	35.5	10.5	11.6	4.75	9.33
	Weight	19.9	7.8	11.5	14.4	12.8	24.0	3.89	6.93
Shear Force	Location	32.5	32.4	64.1	56.1	59.3	43.1	3.89	6.93
	Type	1.4	0.9	0.5	0.0	1.1	1.5	4.75	9.33
	Weight	15.8	15.8	20.2	16.4	19.9	23.9	3.89	6.93
Vertical Displace.	Location	64.9	77.6	42.6	54.1	151.5	247.5	3.89	6.93
	Type	83.0	60.6	19.3	20.9	15.7	12.3	4.75	9.33
	Weight	71.4	73.6	13.8	15.5	8.2	15.0	3.89	6.93
Vertical Velocity	Location	62.1	47.7	32.9	40.8	46.1	79.0	3.89	6.93
	Type	14.8	17.6	17.9	22.1	10.7	10.2	4.75	9.33
	Weight	51.1	51.8	41.6	47.3	27.8	45.1	3.89	6.93

Table 5.23 Variance analysis for response variables with same KSF (Type 3)

Response Variable	Factor	F_Value : Keel Shock Factor						Significant Level %	
		0.20		0.30		0.40		0.05	0.01
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		
Bending Moment	Location	86.4	38.0	137.8	170.8	242.1	379.8	3.89	6.93
	Type	25.8	13.9	58.4	59.2	11.1	12.7	4.75	9.33
	Weight	26.0	18.0	17.1	14.1	16.9	19.2	3.89	6.93
Shear Force	Location	64.8	63.6	85.4	84.6	53.0	46.2	3.89	6.93
	Type	2.2	1.6	0.1	0.0	5.3*	7.7*	4.75	9.33
	Weight	11.6	10.7	18.3	17.2	17.2	19.0	3.89	6.93
Vertical Displace.	Location	465.7	23.3	953.8	38.4	1507.	80.7	3.89	6.93
	Type	6.3*	21.2	5.9*	14.8	11.8	18.3	4.75	9.33
	Weight	31.1	36.6	11.1	30.5	10.7	15.2	3.89	6.93
Vertical Velocity	Location	77.8	10.4	61.2	10.7	36.0	36.2	3.89	6.93
	Type	6.7*	20.4	10.7	4.5	3.4	2.3	4.75	9.33
	Weight	29.9	33.2	22.2	32.8	12.9	35.0	3.89	6.93

Table 5.24 Variance analysis for response variables with same BF
(Type 2)

Response Variable	Factor	F_Value : Bubble Factor						Significant Level %	
		0.60		0.80		1.00		0.05	0.01
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		
Bending Moment	Location	233.3	169.0	315.6	824.1	823.2	1024.	3.89	6.93
	Type	0.0	0.0	0.1	0.3	8.2*	13.9	4.75	9.33
	Weight	1.2	2.4	10.3	12.5	0.3	1.1	3.89	6.93
Shear Force	Location	196.1	165.1	101.5	88.6	53.9	30.3	3.89	6.93
	Type	0.9	1.0	1.3	1.3	4.2	3.0	4.75	9.33
	Weight	5.7*	6.3*	8.8	7.6	14.8	11.3	3.89	6.93
Vertical Displace.	Location	87.0	249.4	49.8	68.9	208.9	193.2	3.89	6.93
	Type	0.4	1.2	0.7	0.4	8.4*	4.6	4.75	9.33
	Weight	0.0	3.4	0.2	0.0	0.0	0.4	3.89	6.93
Vertical Velocity	Location	327.6	129.4	74.5	45.6	35.0	59.6	3.89	6.93
	Type	12.4	4.5	5.6*	1.0	5.8*	7.5*	4.75	9.33
	Weight	26.7	10.8	11.2	4.0*	10.3	14.7	3.89	6.93

Table 5.25 Variance analysis for response variables with same BF
(Type 3)

Response Variable	Factor	F_Value : Bubble Factor						Significant Level %	
		0.60		0.80		1.00		0.05	0.01
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.		
Bending Moment	Location	157.9	82.8	228.2	204.1	400.9	300.1	3.89	6.93
	Type	0.8	0.0	0.2	0.0	20.3	8.5*	4.75	9.33
	Weight	6.8*	2.0	14.4	10.4	0.2	0.2	3.89	6.93
Shear Force	Location	270.4	241.7	130.7	122.2	51.5	41.1	3.89	6.93
	Type	1.6	2.0	3.4	3.2	6.4*	6.2*	4.75	9.33
	Weight	9.0	8.4	5.5*	5.4*	13.1	12.5	3.89	6.93
Vertical Displace.	Location	472.1	52.8	446.7	28.6	435.9	55.9	3.89	6.93
	Type	97.6	0.4	65.2	2.0	46.7	0.7	4.75	9.33
	Weight	23.5	6.2*	14.1	3.5	5.4*	0.6	3.89	6.93
Vertical Velocity	Location	114.0	17.4	58.0	10.7	31.4	18.2	3.89	6.93
	Type	11.0	4.6	5.5*	9.5	8.6*	8.5*	4.75	9.33
	Weight	0.4	0.3	0.3	6.3*	3.0	8.9	3.89	6.93

Step 7 : 가설의 수용 여부 판단 및 조치

기존의 휘핑응답 세기의 기준인 용골충격계수를 Type 2와 Type 3의 보들에 사용한 결과에서는 반응인자로 잡은 물리량들이 거의 대부분 가설검증을 위해 설정한 유의수준을 넘어서는 것을 알 수 있다. 하지만 유사한 가스구체 압력파가 발생하도록 설정한 버블계수를 이용한 계산결과를 보면 기진력이 작용하는 위치에 대한 응답은 물리적으로 당연히 크게 나타나지만 폭약 종류 및 무게에 대한 응답의 크기는 몇몇 지점에서 유의수준을 벗어나는 것을 제외하고 대부분 유의수준 내에 값이 존재하는 것을 알 수 있다. 즉 전체적으로 용골충격계수로 인한 결과보다 상당히 개선된 것을 알 수 있다. 이로부터 초기 가설의 수용여부를 판단해 보면 엄밀히 통계학적으로는 초기 가설을 수용할 수는 없다. 즉 초기 가설을 기각해야 마땅하나 이는 앞서 언급한 바와 같이 가스구체의 맥동 진동수와 대상함의 저차 고유진동수의 차이에 기인하여 나타나는 것으로 본 연구에서 제시하는 버블계수가 현재의 휘핑응답 세기의 기준인 용골충격계수에 비해서는 상당히 효과적인 것을 알 수 있다.

5.5.4 고찰

본 연구에서는 함정 선체거더에 대한 수중폭발 가스구체 압력파의 휘핑 손상잠재력의 크기를 나타낼 수 있는 새로운 척도로서 선체거더의 휘핑응답을 유발하는 하중 즉, 가스구체의 맥동운동에 의한 유체가속도와 폭약중량 및 폭발깊이의 관계식으로부터 버블계수를 도출하였다. 본 버블계수를 실제 함정과 유사한 제원과 경계조건을 갖는 2종의 균일단면 Timoshenko 보들에 대하여 실험계획법을 이용하여 휘핑응답 해석에 적용하여 실제적인 유용성을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 통계학적 방법인 실험계획법을 세계 최초로 함정 수중충격 M&S 분야에 적용하여 다양한 수중폭발 시나리오에 따른 함정 충격응답 특성을 효율적으로 파악할 수 있는 Parametric Study 방법론을 제시하고, 제시된 Parametric Study의 전 과정을 자동적으로 수행할 수 있는 프로세스 통합 방법을 정립하였다. 본 연구에서 제시한 방법론의 유용성을 검증하기 위한 적용 연구로서 한국해군의 실제 함정에 대한 일련의 수중충격 M&S를 수행하여 하나의 용골충격계수 값으로 주어지는 함정의 내충격 강화기준의 적절성 여부를 검토하였다.

본 연구를 통해 얻은 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 함정 수중충격 M&S에 있어서 다양한 수중폭발 조건에 따른 대상 함정의 충격응답 특성을 효율적으로 파악할 수 있도록 실험계획법 중에서 교락법을 사용한 일부실시법과 분산분석을 이용한 Parametric Study 방법론을 제시하였다.
- (2) 고도화된 함정 충격응답 시뮬레이션과 실험계획법에서 요구되는 시뮬레이션 결과자료의 수집과 분석에 효율적인 함정 수중충격 M&S의 절차를 수립하였으며, 상용 공학 프로세스 통합도구인 ModelCenter를 기반으로 제시된 Parametric Study 방법론의 전 과정을 자동적으로 수행할 수 있는 프로세스 통합 방법을 정립하였다.
- (3) 함정 내충격 강화기준의 적절성 여부를 검토하기 위한 일련의 수치계산을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.
 - 현재 함정의 내충격 강화기준으로 주어지는 용골충격계수가 수중폭발 충격파의 손상잠재력의 척도로서 적절함을 확인하였다. 즉, 동일한 용골충격계수 값을 갖는 수중폭발 조건 하에서는 용골충격계수를 구성하는 인자들(폭약 종류 및 중량, 폭발 입사각과 함정 길이방향에 따른 폭발위치)의 대상 함정의 충격응답 크기에 미치는 영향이 통계학적 관점에서 유의(significant)하지 않음을 검증하였다.

- 그러나 용골충격계수가 함정의 휘핑응답 즉, 선체거더의 보 거동 응답의 주 기진원인 가스구체 압력파의 손상잠재력의 척도로서는 부적절함을 제시하고, 새로운 척도로서 ‘버블계수’를 가스구체의 맥동운동에 의한 유체가속도와 폭약중량 및 폭발깊이의 관계식으로부터 도출하였다. 또한, 실험계획법을 이용하여 도출된 버블계수가 용골충격계수에 비해 가스구체 압력파의 손상잠재력의 척도로서 통계학적 관점에서 훨씬 적절함을 확인하였다.

함정 내충격 강화기준의 적절성 여부 검토를 통해 도출된 위의 결과들은 향후 한국해군의 독자적인 함정 내충격 강화기준 정립에 일조할 수 있으리라 판단된다. 또한, 본 연구에서 제시한 실험계획법을 이용한 Parametric Study 방법론은 함정 수중충격 M&S 분야뿐만 아니라 선박, 항공기, 자동차, 철도차량 등의 대형복합기계시스템의 다양한 공학 M&S 분야에 많은 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] NAVSEA 0908-LP-000-0010(Partially Classified), "Test Plan for Routine Shock Testing of Ships", 1975. 1.
- [2] Malone, P. E., "Surface Ship Shock Modeling and Simulation: Extended Investigation", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2000. 12.
- [3] Shin, Y.S., "Total Ship Shock Modeling and Simulation Using LS-DYNA/USA", Proceedings of LS-DYNA User Conference, Japan, 2000.
- [4] Schneider, N. A. and Shin Y. S., "Ship Shock Trial Modeling and Simulation of USS Winston S. Churchill (DDG81)", Technical Report NPS-ME-03-004, Naval Postgraduate School, 2003. 9.
- [5] 박병욱, 안진우, 조윤식-389 "구조모델의 수중충격 실험", 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp.440-443, 1997. 11.
- [6] 안진우, "수중구조 충격응답 해석", 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 436-439, 1997. 11.
- [7] 안진우, 박병욱, "이차 이중점근근사법을 이용한 수중충격해석기법 연구", 대한조선학회 '98추계학술대회 논문집, pp.381-384, 1998. 11.
- [8] 안진우, 박병욱, 조윤식, "수중폭발에 의한 벌크 캐비테이션이 구조응답에 미치는 영향연구", 대한조선학회 '99추계학술대회 논문집, pp.587-590, 1999. 11.
- [9] 정정훈, 허영철, 김병현, "수중폭발 충격파에 의한 3차원 선체 충격응답해석", 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp.549-552, 1997. 11.
- [10] 조윤식, 박병욱, 김두기, "DYTRAN을 이용한 수중충격해석 모델링 기법", 대한조선학회 '98추계학술대회 논문집, pp.385-389, 1998. 11.
- [11] 김정수, 정배훈, 최중효, 정정훈, "수중폭발하중을 받는 수중구조물의 유체-구조 상호작용 해석", 대한조선학회 '98추계학술대회 논문집, pp.390-394, 1998. 11.
- [12] 조윤식, 안진우, 박병욱, "선체 휘핑해석 기법연구", NWSD-513-940977, 국방과학연구소, 1994.
- [13] 조윤식, "수중폭발 가스구체의 거동과 선체의 동적응답", 해상발전무기체계 '96세미나 논문집, 국방과학연구소, 1996. 6.
- [14] 조윤식, 박병욱, "수중폭발 가스구체에 의한 선체거동의 Trade-off Study", 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp.453-456, 1997. 4.
- [15] 정정훈, 허영철, 김병현, "수중폭발 휘핑응답 해석을 통한 선체거동 종강도 평가", 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp.429-433, 1997. 4.
- [16] 이상갑, 권정일, 정성민, 정정훈, 김병현, "수중폭발에 의한 Bulk Cavitation

- 의 현상 해석”, 대한조선학회 ‘00추계학술대회 논문집, p.345, 2000.11
- [17] 이상갑, 권정일, 정성민, 정정훈, “Bulk Cavitation을 고려한 수상선의 수중폭발 충격응답해석”, 대한조선학회 ‘00추계학술대회 논문집, p.346, 2000.11
- [18] 이상갑, 권정일, 정정훈, “수중구조물의 수중폭발 충격응답해석 기법”, 대한조선학회 ‘01추계학술대회 논문집, pp.289-293, 2001. 4
- [19] 권정일, 이상갑, 정정훈, “부유식 충격시험기에 탑재된 비선형 탄성마운트 지지 장비시스템의 수중폭발 충격응답해석”, 대한조선학회 ‘01추계학술대회 논문집, pp.393-396, 2001.11
- [20] 정정훈, 권정일, 이상갑, 이민형, 주용택, “주변 유체를 포함한 3차원 전선 수중폭발 충격응답 해석”, 대한조선학회 ‘01추계학술대회 논문집, pp.390-392, 2001.11
- [21] 권정일, 이정욱, 이상갑, 정정훈, “해석 모델링 방법에 따른 선체거더의 수중폭발 휘핑응답 해석결과 비교”, 대한조선학회 ‘04추계학술대회 논문집, pp.408-412, 2004.10
- [22] 이상갑, 권정일, 정정훈, “수중폭발 충격파와 가스구체 압력파를 함께 고려한 구조물의 동적응답해석”, 대한조선학회 ‘05추계학술대회 논문집, pp.1012-1016, 2005. 5
- [23] Sang-Gab Lee, Jeong-II Kwon and Seong-Min Chung, “Shock Response Analysis of Surface Ship under Underwater Explosion”, 대한조선학회 선박해양구조회 ‘00발표연구 논문집, pp.223-231, 2000. 8
- [24] 이상갑, 권정일, 정성민, 정정훈, 김병현, “수중폭발 충격응답 구조-유체상호작용 해석기법”, 대한조선학회 선박해양구조회 ‘01발표연구 논문집, pp.93-94, 2001. 2
- [25] 이상갑, 정정훈, 권정일, “수중폭발 충격응답해석 Code의 현황”, 대한조선학회 선박해양구조회 ‘01발표연구 논문집, pp.93-98, 2001. 8
- [26] 이상갑, 박중규, 권정일, 정성민, “Hydrocode를 이용한 수중폭발충격응답 해석”, 한국소음진동공학회 ‘00추계학술대회 논문집, pp.1174-1179, 2000. 6
- [27] 권정일, 이상갑, 정정훈, “MIL-S-901D 부유식 충격시험기의충격응답 해석”, 한국소음진동공학회 ‘01추계학술대회 논문집, pp.761-765, 2001.11
- [28] 이상갑, 정정훈, 권정일, “수상선의 수중폭발 충격응답에 대한 유체 모델링의 영향”, 한국전산구조공학회 ‘01추계학술대회 논문집, pp.351-358, 2001. 4
- [29] 이상갑, 권정일, 정정훈, “MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션”, 해상발전 무기체계 ‘02세미나 논문집, pp.595-600, 2002. 7
- [30] 정정훈, 권정일, 이상갑, “수중폭발 가스구체 압력파에 의한 선체거더 휘핑응답 크기의 척도 : 휘핑계수의 도출”, 해상발전무기체계 ‘04세미나 논문집,

pp.89-94, 2004. 6

- [31] 한국선급, 선박 진동 · 소음 제어 지침, 1997
- [32] 오동현, 정정훈, 조대승, 김병현, “Bulk cavitation을 고려한 선체거더의 초기 충격응답 해석”, 대한조선학회 ‘99추계학술대회 논문집, pp582-586, 1996. 11
- [33] Santiago, Leonard D., “Fluid-interaction and cavitation effects on a surface ship model due to an underwater explosion”, Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1996.
- [34] 이상갑, 권정일, 정정훈, “수상선의 수중폭발 충격응답에 대한 유체 모델링의 영향”, 한국전산구조공학회 ‘01춘계학술대회 논문집, pp.351-358, 2001. 4
- [35] 정정훈, 허영철, 김병현, “수중폭발에 의한 함정 선체 충격응답 해석”, MSC 9th korea user’s conference 논문집, pp 679-691, 1998.
- [36] B.M Dobratz, “LLNL Explosive Handbook, UCRL-52997 , Lawrence Livermore National Laboratory , CA, pp.21-23, 1981
- [37] Shin, Y. S. and Geers, T. L., 1995, “Response of Marine Structures to Underwater Explosion”, Lecture Note.
- [38] 정정훈, 허영철, 김병현, “수중폭발 휘핑응답 해석을 통한 선체거더 종강도 평가”, 대한조선학회 ‘97춘계학술대회 논문집, pp.429-433, 1997. 4
- [39] Hicks, A. N., “Explosion Induced Hull Whipping in Advanced in Marine Strucutre”, Elsevier Science Publishers, 1986
- [40] 이민형, 이성열, 김용찬, “선체거더 보유추 휘핑응답 해석을 위한 향상된 가스 구체 거동해석 기법 연구” 세종대학교 연구보고서, 2003
- [41] FEMB User’s Manual (Version 26NT), Livermore Soft Technology Corporation, 1999.
- [42] TrueGrid User’s Manual (Version 1.4.0), XYZ Scientific Applications, Inc., 1998.
- [43] LS/DYNA3D User’s Manual (Version 960), Livermore Soft Technology Corporation, 2001.
- [44] Shin, Y. S., “LS-DYNA/USA Training Guide for Ship Shock Modeling and Simulation”, 2000. 8.
- [45] ETC DIVISION, USA Keyword User’s Manual (Version 5.9901), Anteon Corporation, 1999
- [46] 정정훈, 허영철, 김병현, “LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격 응답 해석”, 대한조선학회 ‘00추계학술대회 논문집, 2000. 11
- [47] 박성현, 현대실험계획법 (개정판), 민영사, 2004.
- [48] 성내경, 실험설계와 분석, 자유아카데미, 2001

- [49] 조재립, 실험통계학, 청문각 2005
- [50] Douglas C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, INC. 2001
- [51] Jung-Hoon Chung, Jeong-Il Kwon, Sang-Gab Lee, "Application of Design of Experiment Methodology to the UNDEX Whole Ship Shock Modeling & Simulation" Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium, USA, 2005
- [52] Ross, P.J, "Taguchi : Techniques for Quantity Engineering", Kraus International Publications, New York, 1996
- [53] 정형철, "다구찌 실험계획 및 분석에 대한 반응표면 방법론적 대안", 평택대학교 논문집 제10집, 제2호, pp288~304, 1998.
- [54] STANAG 4137, 1976, "Standard Underwater Explosion Test for Operational Surface Ships and Craft," NATO Standardization Agreement.
- [55] 권정일, 이상갑, 정정훈, "함정 수중 충격 Modeling & Simulation을 위한 실험계획법의 적용 가능성 검토", 함정기술연구회 '05발표논문집, pp 173-190, 2005
- [56] Phoenix Integration Inc., ModelCenter User's Guide, 2001.
- [57] Phoenix Integration, 1998, "Next Generation Design Environment for the Integrated Enterprise", Enterprise Engineering Solutions: White Paper, pp. 1-11.
- [58] Gaberson, H. A. and Chapler, R. S., "Shock Severity Measurement for Facilities Equipment", Proceedings of the 69th Shock & Vibration Symposium, 1998.
- [59] 정정훈 외, 2003, "KDX-III 수중폭발 충격응답 수치 시뮬레이션", 한국기계연구원 연구보고서, BSI599-1041.M.
- [60] Geers, T.L., "Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motions of Submerged Structures", J. of the Acoustical Society of America, Vol. 64, No. 5, pp.1500-1508, 1978.
- [61] 정태영 외, 1989, CSDP(I)-진동제어 시스템 개발, 한국기계연구소 선박분소 연구보고서 UCN 174-1320.D.
- [62] Cole, R.H., 1965, Underwater Explosion, Dover Publications Inc.

감사의 글

일전에 교수님과 함께 출장을 가는 길에 어딘지는 모르겠으나, 긴 터널을 지나면서 교수님께서 저에게 이런 말씀을 하신 것이 기억이 납니다. 인생이 이 터널과 같다고! 그리고 그 당시 교수님 당신도 아직 터널 속에 있다고 하시면서 저 멀리서 희미한 출구의 불빛이 보이긴 하지만 아직은 끝에 다가선 것이 아니라고 하셨습니다. 그 때는 교수님께서 하신 말씀의 뜻을 완전히 이해하지 못했습니다. 지금 돌아보니 교수님께서 그 때 하신 말씀이 조금이나마 이해가 되려고 하는 까닭은 저 자신이 이제 그 터널의 입구를 등지고 서 있다는 느낌을 지울 수 없어서 그런 것 같습니다.

10여년 넘게 학교에 있으면서 지금 가고 있는 이 길에서 어떻게 방향을 잡고 나아가야 할 지 많은 고민과 생각을 하며 그 무수한 시간을 연구실에서 지내면서 그래도 흔들림 없이 이 논문을 완성하기까지 도와주신 분들이 너무 많아 늘 감사하며 생활하였던 것 같습니다. 처음 저를 이끌어주실 때나 지금이나 늘 한결 같은 모습으로 인생에서 있어 유일한 스승으로 저를 믿어주시고, 때론 호된 꾸지람과 함께 격려를 아끼지 않으셨던 이상갑 지도교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다. 그리고 석사과정에서부터 박사과정까지 저의 보잘 것 없는 능력에 용기와 열정이 불어넣어 주시며, 매순간 새로운 학문에 대한 지적 호기심과 성취감을 느끼도록 이끌어 주신 한국기계연구원의 정정훈 박사님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 학문적 깊이와 열정을 가늠하기 어려울 정도로 평소에도 많은 가르침을 주시지만, 특히 바쁘신 와중에도 저의 논문심사를 위해 애써주신 부산대학교 조대승 교수님과 해양개발공학부의 김재수 교수님, 그리고 기계정보공학부의 조종래 교수님께도 이 작은 지면을 빌어 감사를 전하고 싶습니다. 또한, 제가 조선공학도로써 늘 깊이있는 가르침을 주시는 학부의 여러 교수님들과 한국기계연구원의 김병현 센터장님을 비롯한 여러 분들에게도 깊은 감사를 드립니다.

학부 때부터 힘든 실험실 생활 속에서 같이 고생하던 많은 후배, 동기, 그리고 선배들은 떠나고 없지만, 대신 그 자리에 묵묵히 앉아 많은 도움을 주며 열심히 생활하는 정대, 인호, 여훈, 승영, 그리고 정호에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

서른 넘은 아들이 아직 학교에 다니는 모습에 속도 많이 상하셨을 텐데 한번도 내색하지 않고 묵묵히 저를 지켜봐 주시면서 끝없는 후원과 사랑을 주시는 부모님께 이 논문을 품에 안겨드리고 싶습니다. 마지막으로 제 삶의 이유가 되는 사랑하는 아내, 은주에게 이 논문을 바칩니다.

부록 A : 요인배치법 적용을 위한 통계이론

1. 데이터의 구조

A 인자의 수준수가 l 이고 B 인자의 수준수가 m 인 반복이 없는 2인자의 요인배치법의 데이터의 구조식은 식 (1)과 같다.

$$x_{ij} = \mu + a_i + b_j + e_{ij} \quad e_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_E^2) \text{ 이고 서로 독립} \quad (1)$$

$$i=1, 2, \dots, l \quad j=1, 2, \dots, m$$

여기서 μ 는 실험전체의 모평균, a_i 와 b_j 는 각각 A_i 와 B_j 가 주는 효과, x_{ij} 는 A_i 와 B_j 에서 얻은 측정값, e_{ij} 는 A_i 와 B_j 에서 얻은 측정값의 오차를 의미한다.

인자 A, B 가 모두 모수인자이므로 식 (2)을 가정한다.

$$\sum_{i=1}^l a_i = 0, \quad \sum_{j=1}^m b_j = 0 \quad (2)$$

실험에서 얻은 $N=lm$ 개의 데이터는 보통 Table 1과 같이 배열한다. 여기에서 유의할 사항은 T_i 와 $\bar{x}_i$ 는 A_i 수준에서의 m 개 데이터의 합과 평균인 반면에 T_j 와 $\bar{x}_j$ 는 B_j 수준에서의 합과 평균을 의미한다.

Table 1 반복이 없는 이원배치법의 데이터의 배열

인자A 인자B	A_1	A_2	$\dots$	A_l	합	평균
B_1	x_{11}	x_{21}	$\dots$	x_{l1}	$T_{.1}$	$\bar{x}_{.1}$
B_2	x_{12}	x_{22}	$\dots$	x_{l2}	$T_{.2}$	$\bar{x}_{.2}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_m	x_{1m}	x_{2m}	$\dots$	x_{lm}	$T_{.m}$	$\bar{x}_{.m}$
합	$T_{.1}$	$T_{.2}$	$\dots$	$T_{.l}$	T	
평균	$\bar{x}_{.1}$	$\bar{x}_{.2}$	$\dots$	$\bar{x}_{.l}$		$\hat{x}$

$$T_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad \overline{x_i} = \frac{T_i}{m}, \quad i=1,2,\dots,l$$

$$T_j = \sum_{i=1}^l x_{ij}, \quad \overline{x_j} = \frac{T_j}{l}, \quad j=1,2,\dots,m$$

2. 변동의 분해

개개의 데이터 x_{ij} 와 총평균 $\widehat{\bar{x}}$ 의 차이는 다음과 같이 세 부분으로 나누어진다.

$$(x_{ij} - \widehat{\bar{x}}) = (\overline{x_i} - \widehat{\bar{x}}) + (\overline{x_j} - \widehat{\bar{x}}) + (x_{ij} - \overline{x_i} - \overline{x_j} + \widehat{\bar{x}}) \quad (3)$$

양변을 제곱한 후에 모든 i 와 j 에 대하여 합하면 다음의 식 (4)를 얻는다.

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \widehat{\bar{x}})^2 \quad (4)$$

$$= \sum_i \sum_j (\overline{x_i} - \widehat{\bar{x}})^2 + \sum_i \sum_j (\overline{x_j} - \widehat{\bar{x}})^2 + \sum_i \sum_j (x_{ij} - \overline{x_i} - \overline{x_j} + \widehat{\bar{x}})^2$$

위의 식에서 왼쪽 항은 S_E 총변동 S_T 이고, 오른쪽 항은 차례대로 A 의 변동, B 의 변동, 오차변동인 $S_A S_B$ 가 된다.

데이터로부터 변동을 계산할 때에는 아래 식 (5)을 이용하는 것이 편리하다.

$$S_T = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \widehat{\bar{x}})^2 = \sum_i \sum_j x_{ij}^2 - CT \quad (5)$$

여기에서 CT 는 수정항으로서 $CT = T^2/lm$ 이다.

$$S_A = \sum_i \sum_j (\overline{x_i} - \widehat{\bar{x}})^2 = m \sum_i (\overline{x_i} - \widehat{\bar{x}})^2 = \sum_i \frac{T_i^2}{m} - CT \quad (6)$$

$$S_B = \sum_i \sum_j (\overline{x_j} - \widehat{\bar{x}})^2 = l \sum_j (\overline{x_j} - \widehat{\bar{x}})^2 = \sum_j \frac{T_j^2}{l} - CT \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
S_E &= \sum_i \sum_j (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \hat{x})^2 \\
&= \sum_i \sum_j \{ (\bar{x}_{ij} - \hat{x}) - (\bar{x}_i - \hat{x}) - (\bar{x}_j - \hat{x}) \}^2 \\
&= \sum_i \sum_j (\bar{x}_{ij} - \hat{x})^2 - \sum_i \sum_j (\bar{x}_i - \hat{x})^2 - \sum_i \sum_j (\bar{x}_j - \hat{x})^2 \\
&= S_T - S_A - S_B
\end{aligned} \tag{8}$$

3. 자유도(Degree of Freedom)의 계산

총변동 S_T 는 lm 개의 제품들의 합에서 하나의 선형제약조건 $\sum_i \sum_j (\bar{x}_{ij} - \hat{x}) = 0$ 이 있으므로 자유도는 $\phi_T = lm - 1$ 이 된다. 다음으로 A 의 변동 S_A 는 l 개의 제품들의 합 $\sum_i (\bar{x}_i - \hat{x})^2$ 에서 하나의 제약조건 $\sum_i (\bar{x}_i - \hat{x}) = 0$ 이 있으므로 자유도는 $\phi_A = l - 1$ 이 된다. 같은 방법으로 B 의 변동 S_B 의 자유도는 $\phi_B = m - 1$ 이 된다. 오차변동 S_E 의 자유도는 lm 개의 제품들의 합 $\sum_i \sum_j (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \hat{x})^2$ 에서 선형 제약조건으로 l 개의 $\sum_j (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \hat{x}) = 0$ 이 있고, m 개의 $\sum_i (\bar{x}_{ij} - \bar{x}_i - \bar{x}_j + \hat{x}) = 0$ 이 있는데 이 중에서 $l + m - 1$ 개의 조건이 만족되면 마지막 하나의 조건은 자동적으로 만족되므로 실제로 독립적인 선형제약조건은 $l + m - 1$ 개가 있다. 따라서 오차변동의 자유도는 식 (9)와 같이 된다.

$$\phi_E = lm - (l + m - 1) = (l - 1)(m - 1) \tag{9}$$

총변동 S_T 가 S_A S_B S_E 로 분해되는 것과 마찬가지로 총변동의 자유도 ϕ_T 도 식 (10)과 같이 ϕ_A ϕ_B ϕ_E 로 나누어진다.

$$\phi_T = \phi_A + \phi_B + \phi_E \tag{10}$$

ϕ_E 를 구할 때 쉽게 $\phi_E = \phi_T - \phi_A - \phi_B$ 의 관계로부터 구하는 것이 편리하다.

4. 평균제품의 기대값과 F 검정

개개의 데이터 x_{ij} 는 확률변수이며 인자 A 가 모수인자인 경우에는 a_i 도 μ 와 같은 고정된 상수이므로 x_{ij} 의 기대값과 분산은 각각 다음과 같다.

$$E(x_{ij}) = E[\mu + a_i + e_{ij}] = \mu + a_i \quad (11)$$

$$Var(x_{ij}) = Var(\mu + a_i + e_{ij}) = Var(e_{ij}) = \sigma_E^2 \quad (12)$$

또한, e_{ij} 는 $N(0, \sigma_E^2)$ 의 분포에 따르므로 x_{ij} 는 $N(\mu + a_i, \sigma_E^2)$ 의 분포를 따르고 있음을 알 수 있다.

제공합 S_A 와 S_E 는 확률변수 x_{ij} 들의 함수이므로 x_{ij} 들로 구성된 통계량들이며 기대값과 분산을 가지고 있고 어떤 확률분포를 따르고 있을 것이다. 따라서 평균 제공 V_A 와 V_E 도 기대값, 분산, 확률분포를 각각 가지고 있다. 따라서 데이터의 구조식을 이용하여 평균제공 V_A 와 V_E 의 기대값을 구하여 보면 식 (1)과 (2)의 구조식으로부터 다음 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} = \frac{1}{m} \sum_j [\mu + a_i + e_{ij}] = \frac{1}{m} [m\mu + a_i + \sum_j e_{ij}] \\ &= \mu + a_i + \bar{e}_i \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\bar{e}_i = \frac{1}{m} \sum_j e_{ij}$ 를 의미한다. 또한 $\hat{e} = \frac{1}{lm} \sum_i \sum_j e_{ij}$ 로 놓고 모수인자의 성질인 $\sum a_i = 0$ 을 사용하여 식 (13)은 식 (14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \frac{1}{lm} \sum_i \sum_j x_{ij} = \frac{1}{lm} \sum_i \sum_j (\mu + a_i + e_{ij}) = \frac{1}{lm} (lm\mu + m \sum_i a_i + \sum_i \sum_j e_{ij}) \\ &= \mu + \hat{e} \end{aligned} \quad (14)$$

V_A 의 기대값은 S_A 의 자유도가 $\phi_A = l-1$ 이므로 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$E(V_A) = \frac{E(S_A)}{l-1}$$

먼저 S_A 의 기대값을 구한 후 $E(V_A)$ 를 구하여 보면 아래 식 (15)와 같다.

$$E(S_A) = E \left[m \sum_{i=1}^l (\overline{x_i} - \widehat{x})^2 \right] \quad (15)$$

여기에 식 (13)과 (14)를 대입시키면 식 (16)과 같이 된다.

$$E(S_A) = E \left[m \sum_i \{ (\mu + a_i + \overline{e_i}) - (\mu + \widehat{\theta}) \}^2 \right] = m E \left[\sum_i \{ a_i + (\overline{e_i} - \widehat{\theta}) \}^2 \right] \quad (16)$$

여기에서 a_i 는 고정된 상수이므로 식 (17)과 같이 되고, 식 (16)은 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$E \left[\sum_i a_i (\overline{e_i} - \widehat{\theta}) \right] = \sum_i a_i E(\overline{e_i} - \widehat{\theta}) = 0 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E \left[\sum_i a_i^2 \right] &= \sum_i a_i^2 = m, \quad E \left[\sum_i a_i^2 + 2 \sum_i a_i (\overline{e_i} - \widehat{\theta}) + \sum_i (\overline{e_i} - \widehat{\theta})^2 \right] \\ E(S_A) &= m \sum_i a_i^2 + m E \left[\sum_i (\overline{e_i} - \widehat{\theta})^2 \right] \\ &= (l-1)m \left[\frac{\sum_i a_i^2}{l-1} \right] + (l-1) E \left[\frac{m}{l-1} \sum_i (\overline{e_i} - \widehat{\theta})^2 \right] \\ &= (l-1)m\sigma_A^2 + (l-1)\sigma_E^2 \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 V_A 의 기댓값은 식 (19)처럼 얻을 수 있다.

$$E(V_A) = \frac{E(S_A)}{l-1} = \sigma_E^2 + m\sigma_A^2 \quad (19)$$

같은 방법으로 잔차변동 S_E 의 기대값을 구하면 식 (20)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E(S_E) &= \\ &= E \left[\sum_i \sum_j (x_{ij} - \overline{x_i})^2 \right] = E \left[\sum_i \sum_j \{ (\mu + a_i + e_{ij}) - (\mu + a_i + \overline{e_i}) \}^2 \right] \\ &= E \left[\sum_i \sum_j (e_{ij} - \overline{e_i})^2 \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$= (m-1) \sum_i E \left[\frac{1}{m-1} \sum_j (e_{ij} - \overline{e_i})^2 \right] = (m-1) \sigma_E^2$$

여기서 $(m-1)$ 은 잔차변동의 자유도 ϕ_E 이므로 V_E 의 기댓값은 식 (21)이 성립한다.

$$E(V_E) = \frac{E(S_E)}{(m-1)} = \sigma_E^2 \quad (21)$$

실제의 데이터로부터 계산한 V_E 의 값은 하나의 표본으로부터 구한 σ_E^2 의 불편 추정값(unbiased estimator)이므로 $\widehat{\sigma_E^2} = V_E$ 로 표현된다. 이렇게 구한 평균제곱의 기대치를 사용하여 분산분석표로부터 F 검정을 실시할 수 있다. 요인배치법은 고려중인 각 인자들의 수준에서 특정치의 차이가 유의한가를 알아보기 위한 계획이다. 따라서 각 수준에서의 주효과를 $a_j, j=1, 2, \dots, J$ 라 할 때, “수준 간에 특정치의 차이가 없다.”라는 가설검정의 귀무가설(null hypothesis)과 대립가설(alternative hypothesis)을 식 (22)와 같이 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0: a_1 &= a_2 = \dots = a_J = 0 \\ H_1: a_j &\text{는 모두 0은 아니다.} \end{aligned} \quad (22)$$

이 가설을 수준변화에 따른 모평균간의 산포의 성질비교를 통해 다르게 표현하면 다음 식 (23)과 동일하다.

$$H_0: \sigma_A^2 = 0 \quad H_1: \sigma_A^2 > 0 \quad (23)$$

식 (23)의 귀무가설이 성립될 경우에는 제곱평균 V_A 와 V_E 의 비는 아래 식 (24)와 같다.

$$F_0 = \frac{S_A/\phi_A}{S_E/\phi_E} = \frac{V_A}{V_E} = \frac{V_A/\sigma_E^2}{V_E/\sigma_E^2} \quad (24)$$

동일한 모분산 σ_E^2 을 갖는 모집단으로부터 독립인 2개의 분산의 비를 나타내고 있으므로, 통계량 F_0 는 자유도 ϕ_A, ϕ_E 를 갖는 F 분포를 따르게 됨을 알 수 있다.

따라서 식 (22) 또는 식 (23)의 가설검정은 유의수준 α 에서 만약 F_0 의 값이 $F_0 > F(\phi_A, \phi_E; \alpha)$ 이면 귀무가설을 기각하고, 아니면 채택한다.

5. 통계적 가설검정

모집단의 모수의 값이나 확률분포에 대하여 어떤 가설(hypothesis)을 설정하고, 이가설의 성립여부를 표본의 자료를 통하여 검정(testing)하여 통계적 결정을 내리는 것을 통계적 가설검정 또는 간단히 통계적 검정이라 부른다. 통계적 검정은 통계적 추정과는 대조적으로 모집단에 관한 가설이 먼저 설정되며 이 가설이 옳은가의 여부를 알기 위하여 표본자료에서 얻은 통계량을 이용하는 것이다. 일반적으로 모집단 분포의 모양은 대개 주어지므로 모수의 가설에 대한 검정이 많다. 검정의 대상으로 삼는 가설을 귀무가설이라고 하고, 이에 대립되거나 이를 부정하는 가설을 대립가설이라고 한다.

표본을 관찰하여 얻어진 결과에 의해 가설을 부정할 때에는 그 가설을 기각(reject)한다고 하고, 가설을 부정하지 못할 때에는 그 가설을 채택(accept)한다고 말한다. 여기서 유의하여야 할 것은 귀무가설이 기각되지 않았다고 해서 반드시 이 가설이 옳다는 뜻은 아니다. 단지 표본관찰의 결과로 볼때 귀무가설을 부정할 만한 충분한 이유가 없기 때문이며, 이 경우에는 기각판정을 보류한 데 불과하다고 해석하여도 무방할 경우가 많다.

가설검정의 결과를 나누어 보면, 귀무가설 (H_0)이 맞는 경우에 이를 채택하거나 기각하는 두 가지 결정이 있고, 귀무가설이 틀린 경우에 이를 채택하거나 기각하는 두 가지 결정이 있다. 따라서 모두 네 가지의 가능한 경우가 있는데 잘못된 판단을 내리는 경우는 두 가지로서, 맞는 귀무가설을 기각하는 때와 틀린 귀무가설을 채택하는 때이다. 전자의 경우에는 제1종의 과오(type I error)를 범했다고 말하고 후자의 경우에는 제 2종의 과오(type II error)를 범했다고 한다. 제 1종의 과오를 범할 확률을 α 로 표시하며, 이를 유의수준(level of significance)또는 위험률이라 하고, 제 2종의 과오를 범할 확률을 β 로 표시하여 $(1-\beta)$ 의 값을 검출력(power of test)이라고 한다. 검출력 또는 검정력이란 검정하려는 귀무가설이 틀린 경우에 이를 기각하는 확률이므로 귀무가설의 잘못을 검출해 내는 확률이 된다. 통계적 검정은, 맞는 귀무가설을 기각하는 제1종의 과오를 가능한 한 줄이고 가설의 잘못을 찾아내는 검출력을 크게 하는 것이 바람직하다.

귀무가설이 세워지면 표본을 선택하고 관찰하여, 그 가설을 기각할 것인가 채택할 것인가를 결정하기 위한 통계량을 구해야 한다. 이러한 통계량을 검정통계량(test statistic)이라고 한다. 검정통계량도 통계량이므로 확률변수이며, 어떤 확률분포를 갖는다. 검정통계량의 분포를 알면, 그 영역을 기각역(rejection region)과

채택역(acceptance region)으로 나누어, 검정통계량의 값이 기각역에 위치하면 귀무가설을 기각하고, 채택역에 위치하면 채택하게 된다. 기각역과 채택역을 나누는 경계치를 기각치(critical value)라고 부른다. 귀무가설이 맞을 때에는 검정통계량의 값이 기각역에 위치할 가능성이 있는데, 이러한 확률을 검정의 유의수준이라고 하며 이것은 제1종의 과오에 해당한다.