

공학석사 학위논문

워터젯식 해저굴삭장비의 설계에 관한
기초연구

*A Study on the Basic Design of Sub-sea Trenching
Machine Using Water Jetting*

지도교수 박한일

2007년 8월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김현아

본 논문을 김현아의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 서영교 (인)

위 원 : 공학박사 박한일 (인)

위 원 : 공학박사 김재수 (인)

2007년 8월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 현 아

목 차

ABSTRACT	i
목차	ii
표 목차	iii
그림 목차	iv
I. 서 론	5
II. 굴삭 공법의 소개와 개발 사례	7
2.1 굴삭공법의 종류	7
2.2 워터젯을 이용한 해저굴삭장비의 개발 사례	10
III. 해저굴삭장비의 개념 설계	14
3.1 워터젯 공법에 영향을 미치는 요소	14
3.2 펌프설계	20
3.3 이젝터설계	24
3.4 노즐설계 및 배치	33
3.5 완성된 개념설계	35
IV. 결 론	37
참고문헌	39

표 목 차

Table 2-1 SeaVation사의 V-System장비의 펌프 세부사항	10
Table 2-2 OES사의 Sumatran tiger장비의 세부사항	12
Table 2-3 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher 세부사항	13
Table 2-4 3가지 워터젯 굴삭 장비의 특징	13
Table 3-1 비 압밀지반에서의 유실속도	15
Table 3-2 유체역학적 양의 차원	20
Table 3-3 OES사의 장비와1/10 모형의 세부사항	21
Table 3-4 실제 장비와 1/10모형의 펌프 사양	22
Table 3-5 워터젯 노즐분사용 펌프 결정 단계와 특징	22
Table 3-6 고압 노즐 분사기 세부사항	23
Table 3-7 Block형 이젝터 탑재펌프 비교	27
Table 3-8 이젝터 설계조건	29
Table 3-9 반복횟수에 따른 굴삭량	30
Table 3-10 후드형 이젝터 탑재펌프 세부사항	30
Table 3-11 이젝터 형식 결정 단계별 특징	32
Table 3-12 Sumatran Tiger장비와 QWJ-H Mass Flow Jetting장비의 노즐배치형상	33

그림 목차

Fig. 2-1	해저굴삭장비 작업 진행도	7
Fig. 2-2	Mechanical cutter식 해저굴삭장비	8
Fig. 2-3	쟁기식 해저굴삭장비	8
Fig. 2-4	워터젯식 해저굴삭장비	9
Fig. 2-5	Sea-Vation사의 V-system장비	10
Fig. 2-6	OES사의 Sumatran Tiger장비	11
Fig. 2-7	HYCB사의 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher장비	12
Fig. 3-1	일반 노즐(왼쪽) 형상, 수중노즐(오른쪽) 형상	14
Fig. 3-2	준설선에서의 이젝터와 노즐의 위치	17
Fig. 3-3	Water ejector 시스템	18
Fig. 3-4	이젝터 시스템에서 제거 입자 직경과 흡입속도의 관계	19
Fig. 3-5	모형에 사용 될 펌프일체 조립형상	23
Fig. 3-6	직접 흡입형(왼쪽)과 Air Lift System(오른쪽)	24
Fig. 3-7	Block 형식의 이젝터 (제 1안)	25
Fig. 3-8	Block형 이젝터 상부에 탑재 고려된 모터의 종류	26
Fig. 3-9	후드형 이젝터 하부 형상 (제 2안)	27
Fig. 3-10	이젝터 일체와 본체와의 조립상태	28
Fig. 3-11	파이프라인 굴삭단면도	29
Fig. 3-12	IPV-835 수중펌프 성능곡선	30
Fig. 3-13	모래슬러리 이동 통로인 상부 거름판	31
Fig. 3-14	이젝터 전체 형상	31
Fig. 3-15	설계 노즐 형상	33
Fig. 3-16	분사노즐(좌) 및 배치형상(우)	34
Fig. 3-17	완성된 해저굴삭장비 개념도	35

A Study on the Basic Design of Sub-sea Trenching Machine Using Water Jetting

By

Hyun-a Kim

*Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

ABSTRACT

Sub-sea ground is digged by a trenching machine before cables or pipelines are laid on the sea bed. There are three methods for trenching the sea bed; mechanical cutter method, plough method and water jetting method. Water jet method is the most widely used over the world. Water jet depends on various parameters; pump pressure, water flow rate, number of passes, stand-off distance, nozzle type, soil shear strength etc.

In this research, basic concept design of water jet trenching machine is proposed. A new type of ejector, so called hood type ejector is invented. In the concept, the distance between nozzles and ground is decreased. This concept design will improve trenching affectivity. Employing such design concept a prototype model is published.

I. 서론

최근 들어 세계적으로 케이블 및 파이프라인을 이용한 해양구조물에 대한 관심이 고조되고 있으며 전 세계적으로 매년 수천 km의 해저 케이블과 파이프라인이 새로 매설되고 있다. 국내에서는 1990년 후반부터 해저 케이블 포설을 시작하였으며 2004년 동해-1 고래 지역에 해양 플랫폼이 건설되면서 해저 파이프라인 매설이 시작하였다. 또한 현재 해저 케이블 및 파이프라인 매설은 현대중공업과 KT서브마린 등이 성공적으로 시공하고 있다.

해저 케이블과 파이프라인은 주로 파와 해류에 의해 야기되는 외부하중에 대해 안정성이 유지되어야 한다. 이런 해양구조물의 항구적인 안정성을 유지하기위해 설치 및 매설작업이 이루어지며, 작업 시 수심, 케이블 및 파이프라인의 크기, 해저지반의 종류에 따라 다양한 형태의 작업장비가 필요하다. 특히 케이블 및 파이프라인을 매설하기 전에 해저지반을 제거하는 특수한 장비를 해저굴삭장비라고 일컫는다.

해저 굴삭장비는 그 응용공법에 따라 크게 미케니컬(Mechanical cutter) 커터식, 쟁기(Plough)식, 워터젯(Water jetting)식으로 나눌 수 있다. 이중 워터젯 공법은 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 굴삭공법으로 고압의 워터젯으로 해저지반을 제거하는 것을 말한다.

이미 여러 선진국에서는 다양한 형태의 해저굴삭장비를 연구 개발하고 있다. 그 대표적 예로 영국의 SMD(Soil Machine Dynamics)사, 미국의 PERRY사[F. Hettinger, J. Machine (2005)]와 Shilling Conan사, 호주의 OES사, 프랑스의 SIMEC사, 싱가포르의 SeaVation사 등은 다양한 장비를 직접 개발하여 자체 기술력을 보유하고 있으며 더 열악한 환경에서 구동이 가능한 장비개발에 주력하고 있다. 뿐만 아니라 해양사업에 있어 후발주자라 할 수 있는 중국의 HYBC사에서도 자체 장비개발에 성공하여 수심이 얇은 지역에서 비교적 성공적인 실적을 보여주고 있다. 하지만 우리나라의 경우 케이블 및 파이프라인 매설이 꾸준히 증가하고 있음에도 불구하고 독자적인 기술개발 없이 외국의 기술을 도입하여 사용하고 있는 실정이다. 이에 현 시점에서 해저굴삭장비에 관한 기술개발이 시급하다고 하겠다.

이에 본 연구에서는 국·내외에 사용되고 있는 대표적 굴삭장비를 선정하여 각 장비에 대한 특징을 파악하고 워터젯 공법을 해저 굴삭장비에 응용하기위한 기초 연구로 굴삭장비 설계에 필요한 이론을 정리하였다. 이를 바탕으로 각 장비에서 발생했던 문제점을 극복하는 새로운 개념의 굴삭장비의 개념설계를 실시하여 새로운 워터젯식 굴삭장비 모델을 제시하는데 그 목적이 있다.

II 굴삭공법의 소개와 개발 사례

2.1 굴삭공법의 종류

굴삭(trenching)작업이란 파이프가 해저에 매설될 수 있도록 해저 바닥을 파내는 공정을 말한다. Fig. 2-1에서 볼 수 있듯이 해저 굴삭 작업은 지원선이 해저굴삭장비와 연결되는 견인줄(Tow-line)을 당겨 전진하면서 작업이 진행되며 음빌리컬 라인(Umbilical line)을 통해 해저 장비에 필요한 전력과 물을 공급한다[R.D. Koster (2003)].

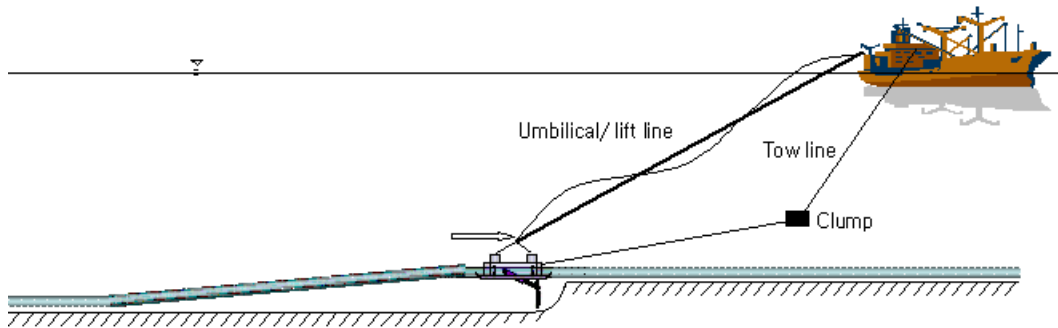


Fig. 2-1 해저굴삭장비 작업 진행도

해저굴삭장비에 사용 되는 굴삭공법은 그 순서에 따라 케이블이나 파이프라인 부설에 앞서 매설 장소를 굴삭 하는 선 굴삭(Pre trenching)과 파이프라인을 해저면에 부설한 후 케이블이나 파이프라인의 하부를 특수한 굴삭기로 굴삭 하여 침설시키는 후 굴삭(Post trenching)으로 나눌 수 있으며, 특수 굴삭장비의 응용 공업에 따라 메커니컬 커터(Mechanical Cutter)공법, 쟁기(Plough)공법, 워터젯(Water Jetting)공법으로 나눌 수 있다.

Fig. 2-2는 메커니컬 커터식 해저굴삭장비다. 메커니컬 커터 공법은 선 굴삭 방법으로 파이프라인의 손상 가능성이 높기 때문에 파이프를 두고 직접적으로 굴삭 할 수가 없으며 주로 부드럽고 응집력 있는 토질에 사용된다. 모래같은 비 점성토에서는 지질이 바로 제거되지 않으므로 비효율적이라 사용하지 않지만 굳은 점토의 500배 이상의 강도를 지닌 50MPa까지의 바위를 굴삭 할 수 있다.

파이프라인과 굴삭면이 닿는 길이는 파이프라인의 강성과 굴삭 깊이에 좌우되며 그 길이는 일반적으로 50~150m가 된다. 또한 메커니컬 공법은 선 굴삭공법이므로 파이프를 깔기 전에 제거된 모래가 조류 등에 의해 구덩이에 다시 채워질 수 있으므로 굴삭 한 모래를 되도록 멀리 쌓아두어 되메움현상이 일어나지 않도록 해야 한다.



Fig. 2-2 Mechanical cutter식 해저굴삭장비

Fig. 2-3은 쟁기식 해저굴삭장비이다. 쟁기식 공법은 1983년 아일랜드 서해에서 전력 케이블 부설에 처음 사용되었다. 이는 후 굴삭의 형태로 비 점성토(Sand 또는 Soft Silt)나 점성토에 사용되며 토질의 비 배수전단강도 5KPa까지 사용가능한 것으로 알려져 있다. 또한 최대 굴삭 깊이는 1.5~1.7m까지이며 파이프직경이 30inch 미만인 경우에 사용한다. 초기 굴삭용 쟁기공법은 주로 천해나 강에서 사용되어 왔으며 바다에서는 130~250톤을 넘어가는 매우 큰 형상을 하고 있어서 아주 큰 견인력을 필요로 한다[J.H Kober(2000)].



Fig. 2-3 쟁기식 해저굴삭장비

Fig. 2-4는 워터젯식 해저굴삭장비이다. 워터젯 공법은 고압으로 압축된 공기나 물을 노즐을 통하여 해저면에 분사시켜 구덩이를 만드는 방법으로 모터 또는 동력 펌프로 분사압력을 생성한다.

워터젯 공법은 토질의 종류에 따라 굴삭효과가 크게 좌우된다. 주로 점성토의 경우는 토질의 비배수 전단강도에 따라 굴삭속도가 결정되며 비점성토의 경우는 점성토에 비하여 낮은 분사압력이 요구되지만 굴삭면의 붕괴를 방지하기 위하여 낮은 각도의 굴삭이 요구되는 공법이다[조철희 (2001)].

굴삭장비에 필요한 물과 전기는 지원선에서 움빌리컬 라인을 통해 해저면의 장비에 전달한다. 그러므로 움빌리컬 호스의 정적 및 동적 운동에 의해 작업이 제한되기도 하고 수심이 깊은 경우, 마찰 손실이 커져 워터젯 효과가 떨어지기도 한다. 이 공법은 노즐의 형태나 작업선에 설치되는 펌프설비를 제외하고는 작업의 개선이 거의 이루어지지 않고 있었지만, 북해에서 심해저 파이프라인의 부설시 이 공법이 채택되어 작업선의 크기, 계류장치의 강도, 굴삭작업의 소요 동력이 증가되었으며, 잠수설비 보강이 이루어졌으며 현재까지 가장 보편적인 파이프라인 굴삭공법으로 널리 이용되고 있다[G.W. Lewis (1988)].



Fig. 2-4 워터젯식 해저굴삭장비

2.2 워터젯을 이용한 해저굴삭장비의 개발 사례

본 절에서는 워터젯 공법을 이용한 해저굴삭장비의 응용사례를 살펴보고 각 장비의 특징에 대해 알아보았다. 워터젯 공법을 사용하는 굴삭장비를 개발·생산하는 주요 업체로는 호주의 OES(Ocean Engineering System)사, 싱가포르의 SeaVation사, 중국의 HYCB (Tianjin Tanggu Offshore Shipping Engineering Services Co., Ltd)사 등을 들 수 있다. 이 회사들의 주요 장비는 OES사의 Sumatran Tiger/Bengal Tiger, SeaVation사의 V-system, HYCB사의 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher이다.



Fig. 2-5 SeaVation사의 V-system장비

Fig. 2-5는 SeaVation 사의 V-system장비로 Mass Flow Jetting 타입이다. 선상펌프 타입으로 단일노즐(Single-nozzle)을 이용한다. 단순한 프레임과 수중에 떠서 굴삭 작업을 진행하는 것이 특징이다. 수중에 떠서 양쪽에 달린 추로 균형을 유지하여 작업을 진행하는 것은 속이 보이지 않는 수중작업에서는 어렵고 또한 적절한 조정이 가능하다 하더라도 노즐에서 분사되는 분사 반발력과 해류 그리고 모선의 움직임이 그대로 장비에 전달되기 때문에 굴삭 면이 고르지 못한 현상이 발생한다.

Table 2-1 Seavation사의 V-System장비의 펌프 세부사항

타입	Mass Flow Jetting	지반강도
무게 [ton]	15	-
펌프 [HP]	600	25 Kpa 모래, 진흙
	1200	25 Kpa이상의 진흙

Table 2-1은 V-system의 해저 지반의 강도에 따른 2가지 타입의 펌프 사용조건을 보여주고 있다.



Fig. 2-6 OES사의 Sumatran Tiger장비

Fig. 2-6은 호주 OES사의 Sumatran Tiger장비로 제트 머신(Jet machine)타입이다. 장비는 Sled보다 작은 형태의 Skid를 통해 이동하고로 제트 슬레드(Jet-Sled)에 비해 가로 길이가 짧아 장비의 크기가 비교적 작다. 또한 굴삭 면과 함께 장비가 이동되므로 노즐과 해저면의 이격거리가 거의 없다. 선상 펌프 형식에 다중노즐(Multi-nozzle)을 사용하며 비교적 깊은 수심에서 모래와 전단강도가 높은 진흙까지 굴삭이 가능한 것으로 알려져 있다.

Sumatran Tiger장비에서 이젝터는 노즐 뒷부분에 위치하고 공기를 주입하는 모래슬러리를 제거하는 Air-Lift 시스템을 택하고 있다. 본 장비는 후 굴삭의 형태로 파이프라인을 따라 전진하고 다양한 깊이에서 공사 실적이 풍부한 것이 특징이다. 하지만 Fig. 2-6에서도 확인 할 수 있듯이 부가 장비가 많아서 진수 및 회수 과정이 복잡하여 추가 비용이 발생하며 선상펌프를 사용하므로 깊은 수심에서는 효율이 떨어지므로 작업시간이 길어진다.

OES사의Sumatran Tiger장비의 세부사항은 Table 2-2과 같다.

Table 2-2 OES사의 Sumatran tiger장비의 세부사항

타입	Jet Machine
파이프 직경 [inch]	20~52
크기 [m X m X m]	6.6 X 2.1 X 3.8
무게 [ton]	12
굴삭 깊이 [m]	1~110
선상펌프 [HP]	Feed pump 900
	Booster pump 850
이젝터 사양 [m ³ /min]	30~40 (air lift)
요구 전력 [V]	440/220
부가장비	수중 스캐너 USBL 수중 청음기 시스템 TV 시스템 장력 측정기



Fig. 2-7 HYCB사의 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher장비

Fig. 2-7은 중국 HYBC사의 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher장비이다. Jet-Sledge 타입으로 슬래드가 트렌치 넓이 보다 넓은 간격으로 위치하고 있다.

QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher장비는 슬래드가 밸러스트 기능을 포함하고 있어 부력조절이 가능하고 슬래드로 이동하므로 굴삭속도가 빠른 것이 특징이다. 선상펌프 타입을 다중노즐을 사용하고 있으며 다른 장비에 비해 모터를 사용하여 직접 흡입하는 이젝터 시스템을 사용하고 있다.

Fig. 2-7에서 확인할 수 있듯이 노즐이 슬래드 부분 보다 아래쪽으로 길게 수직으로

배치되어있는데 이는 굴삭 시 슬래드가 해저 면과 닿으므로 굴삭이 진행 될수록 노즐과 해저면의 이격거리가 멀어지는 것을 방지하기위한 것으로 해석이 가능하다. 하지만 이런 노즐배치는 진수 시 노즐 부분이 해저 면에 먼저 닿으면서 해저 면이 충분히 굴삭 되지 않을 경우 노즐이 부러지는 현상을 발생하게 한다. Table 2-3은 HYBC사의 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher장비의 세부사항이다.

Table 2-3 QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher 세부사항

타입	Jet Sledge
크기 [m X m X m]	9 X 8.6 X 4.6
굴삭 깊이 [m]	3~60
선상펌프	디젤 고압펌프
	원심펌프
이젝터 사양 [m3/min]	360~720 (사류펌프)
요구 전력 [V]	440/220

Table 2-4는 4가지 굴삭장비의 각 특징을 나타낸 것이다.

Table 2-4 3가지 워터젯 굴삭 장비의 특징

	V-system	Sumatran Tiger	QWJ-H Mass Flow Jetting Trencher
특징	<ul style="list-style-type: none"> - Mass flow Jetting - Single-nozzle - 선상펌프 	<ul style="list-style-type: none"> - Jet machine - Multi-nozzle - 선상펌프 - Air 이젝터 	<ul style="list-style-type: none"> - Jet sledge - Multi-nozzle - 선상펌프 - 수중 이젝터
장점	간단한 프레임 구조	<ul style="list-style-type: none"> - 공사 경험이 풍부 - 노즐과 해저면 사이 이격거리가 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> - 슬래드 벨러스트 기능 포함 - 전진속도가 빠름
단점	장비의 안정성이 떨어져 굴삭 면이 고르지 못함	부가 장비가 복잡하여 Mob./Demob.시 비용과다	얕은 수심(50M)에서의 실적만 보유

본 연구에서는 운영이 안정적이고 공사 경험이 많은 OES사의 장비와 굴삭 속도가 빠른 중국의 HYBC사의 장비를 참고하여 기본 개념 설계를 수행하였다.

Ⅲ. 워터젯 굴삭장비의 개념 설계

3.1 워터젯 공법에 영향을 미치는 요소

워터젯 공법은 해저지반의 종류, 해류 그리고 수심처럼 굴삭 환경 조건과 노즐 내부설계, 노즐 형상비, 노즐 분사속도와 노즐 이격거리 등의 노즐 자체 성능에 따라 굴삭 효과가 달라진다. 본 절에서는 설계에 앞서 워터젯 공법에 영향을 미치는 다양한 변수를 파악하였다.

첫 번째 요소는 노즐 내부 설계이다. 일반적으로 지상에서 노즐을 사용할 경우에는 노즐 수축부에 따라 노즐의 분사형태와 성능이 좌우된다. Fig. 3-1의 왼쪽에 볼 수 있듯이 수축부는 곡선 형태를 나타낸다. 일반적으로 수축부의 곡선은 이론식에 의해서만 정의될 수 없기 때문에 대부분 실험을 통한 반 실험식에 의해 유도되며 수축부의 형상은 고차원 다항식, 타원의 식, sign 곡선 식 등이 이용된다. 하지만 수중에서 노즐을 사용할 경우 노즐형상은 Fig. 3-1의 오른쪽에서 볼 수 있는 것처럼 각도가 $13^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 인 원뿔(Cone)모양의 형태가 수압 손실이 작고, 현장에서 조립도 용이한 것으로 알려져 있다.

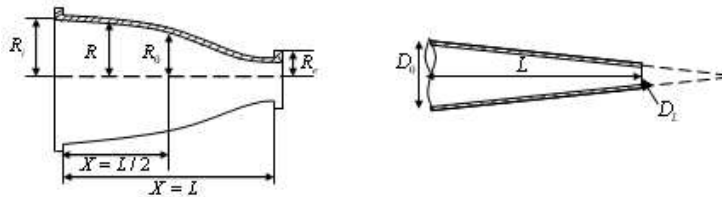


Fig. 3-1 일반 노즐(왼쪽) 형상, 수중노즐(오른쪽) 형상

두 번째 요소는 노즐 형상비로 이는 노즐 출구 길이와 노즐 직경의 비(D/L)를 일컫는 것이다. 이와 관련된 실험 결과를 참고하면 형상비에 따른 분사유동의 특성과 운동량 분석이 가능하다. 형상비를 0, 1, 2, 3, 4로 변화시켜 같은 압력으로 분류를 분사할 경우와 같은 형상비에 다른 압력의 분류를 분사 하는 실험을 통해 형상비가 증가 할수록 압력손실이 작고, 모멘텀의 크기가 크다는 것을 알 수 있다[남궁정환, 2003]. 이는 형상비가 커질수록 분류의 직진성이 향상되기 때문이다.

세 번째 요소는 노즐 분사 속도이다. 일반적으로 노즐 출구에서 분사된 분류는 공기 중보다 수중에서 더 빨리 감소한다. 또한 노즐 출구에서 분사된 분류의 속도가 해류 등에 의한 유실속도보다 빠른 구간에서 굴삭이 일어나므로 이 구간을 파악하는 것이 중요하다. 즉 평균 워터젯 분사속도가 반드시 해류에 의한 유실(washout)속도보다 빨라야만 효과적인 굴삭이 가능해지므로 굴삭하려는 곳의 해저지반 유실 속도를 파악하는 것이 중요하다. 알려진 비 압밀지반에 대한 유실 속도는 Table 3-1과 같다[N.N. Kozhevnikov (2004)].

Table 3-1 비 압밀지반에서의 유실속도

Unconsolidated soil [mm]	Washout velocity [m/s]
soft ooze sand	1
Medium sand, Loamy sand	1.2~1.5
Fine and medium gravel(≤25)	1.8~2
Coarse gravel(≤75)	2~2.5

네 번째는 노즐 타입이다. 일반적으로 워터젯에 사용되는 노즐은 단일노즐(Single nozzle)과 다중노즐(Multi nozzle)2가지로 나눌 수 있다. 단일노즐은 펌프의 용량이 작고 굴삭 깊이가 깊지 않던 초기 준설선으로 굴삭이 이루어지던 때는 주로 사용되었으나 작업 수심이 깊어지고 고압 펌프 및 수중 펌프가 개발되면서 현재는 다중노즐이 널리 사용되고 있다. 단일노즐을 사용할 경우에는 펌프에서 노즐에 전달되기까지 형상손실이 적어 효율이 좋고 좁은 지역을 굴삭 할 때 유리하지만 굴삭 할 지점을 정확하게 굴삭 할 수 있는 조정력이 갖추어져야 한다. 반면 같은 용량의 펌프에 다중노즐을 사용할 경우, 단일노즐보다 큰 형상손실이 발생하므로 노즐 하나만을 비교할 경우는 효율이 떨어진다고 볼 수 있으나 넓은 면적을 굴삭 할 수 있는 장점이 있다[N.N. Kozhevnikov (2004)].

다섯 번째 요소는 노즐의 이동속도이다. 이는 굴삭장비의 이동속도로 표현되기도 한다. 노즐 이동속도는 굴삭 깊이와 반비례하며 이는 노즐의 이동속도가 느릴수록 단위 시간당 대상 지반에 압력이 작용하는 시간이 길어진다는 사실로 설명이 가능하다. 즉 단위 지반에 수압이 작용하는 시간은 수압 직경을 노즐 이동속도로 나누어줌으로써 구할 수 있다. 일반적으로 점성토에서는 분사압력에 굴삭속도가 비례한다. 예를 들면, 1000psi의 압력으로 40KPa 응력의 토질을 2m/min의 속도로 굴삭 하다가 15KPa의 점토질을 만난

다고 가정하면, 같은 1000psi의 압력으로 4m/min의 속도를 낼 수가 있다. 또는 같은 상황에서 100KPa의 응력을 가진 지반을 만나면 굴삭 속도가 1.5m/min로 낮아질 수 있다. 반면 비점성토에서는 낮은 분사압력(130psi)에서도 자르거나 굴삭하기가 쉽지만 굴삭 경사면을 20°~30°로 유지해야 굴삭면이 무너지지 않으므로 이 각도를 유지하면서 굴삭 하는 것이 중요하다. 그리고 굴삭 된 토질이 파이프가 바닥에 닿기 전에 되 메워지지 않아야하므로 이를 위해 모래 슬러리를 구덩이에서 충분히 멀리 보내야한다.

여섯 번째 요소는 노즐 반복횟수이다. 일반적으로 파이프라인 굴삭은 3회 반복을 기본으로 한다. 이는 굴삭 압력과 노즐 이동속도를 고정시키고 노즐 이동 횟수를 증가시켜가며 실험한 결과를 참고 할 수 있는데 결과는 3회 반복까지는 굴삭 된 깊이가 빠르게 증가하지만, 그 후에는 깊이의 변화가 급격히 둔화된다는 사실에서도 알 수 있다. 이것은 굴삭 깊이가 깊어지면서 노즐에서 분사된 물과 해수사의 마찰이 증가하고 노즐과 해면사이의 거리가 멀어지기 때문이다. 따라서 3회 반복이후에는 노즐에서 분사된 워터젯이 분산됨으로써 깊이의 변화가 감소하는 것이다. 그렇기 때문에 3회 반복이후에는 분사 압력을 증가시키거나 노즐을 하향 이동시켜 노즐 이격거리를 감소시키는 방법을 사용해야 할 것이다[김형목 (2001)].

일곱 번째는 펌프의 종류이다. 현재 상용으로 쓰이고 있는 펌프의 종류는 구동 특징에 따라 다양한 종류가 있지만 해저굴삭에 사용되는 펌프는 그 위치에 따라 크게 선상펌프와 수중펌프로 나눌 수 있다. 먼저 선상펌프는 지원선 위에 설치된 펌프에서 고압의 물과 공기의 혼합물을 움빌리컬 라인을 통해 해저굴삭장비로 공급하는 형식이다. 하지만 선상 펌프 형식을 사용할 경우 깊은 수심에서는 수두손실이 커지므로 효율이 떨어진다. 이에 반해 수중펌프 형식은 굴삭장비에 직접 펌프를 장착하는 형태로 주위의 물을 이용하여 바로 분사하는 형태로 양정 개념이 없어 선상펌프 형식에 비해 효율성이 뛰어나다. 하지만 실제로 크기가 크고 무게가 무거우므로 장비에 부착할 경우 배치와 무게 중심의 관련한 연구가 선행되어야 할 필요가 있다. 또 한 굴삭 작업을 하는 동안 주변의 물을 흡입할 가능성이 있기 때문에 약간의 모래가 섞인 물을 흡입할 수 있는 시스템이나 모래를 차단하여 흡입하는 시스템이 필요하다.

마지막으로 여덟 번째 요소는 이젝터 시스템이다. 이젝터의 사전적 의미는 압력이 있는 증기·공기·물을 노즐로부터 분사시켜 주위의 증기나 물을 배출하거나 응축시키는 장

치를 일컫는 것으로 해저굴삭장비에서는 노즐에서 분사된 분류가 해저 지반을 굴삭하면서 부유하는 모래슬러리 등이 구덩이에 되메워지지 않도록 멀리 보내는 시스템이다. 워터젯을 이용하여 굴삭 할 경우 진흙 슬러리는 해류에 의해 떠내려가지만 모래의 경우 대부분이 다시 제자리에 가라앉는 경우가 많다고 알려져 있다. 특히 강성이 큰 파이프라인의 경우 굴삭 면에 파이프라인이 단기까지 평균 30분~2시간이 걸리는 것을 감안한다면 워터젯으로 분유시킨 모래슬러리를 배출 시킬 도구는 필수적이다. 이런 필요성 때문에 1990년부터 연구된 것이 바로 노즐과 이젝터를 함께 구동하는 방법으로 실제 장비에서 많이 응용되고 있는 형태이다. 기존의 준설선에 사용할 경우 이젝터와 워터젯 분사구와의 조합은 아래 Fig. 2-5에서 볼 수 있듯이 노즐의 앞·뒤쪽에 위치하여 기능을 수행한다.

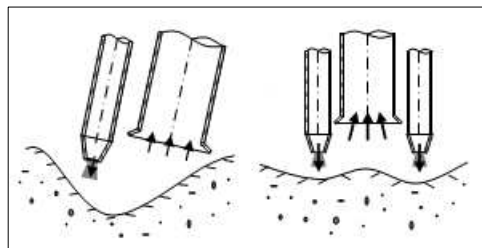


Fig. 3-2 준설선에서의 이젝터와 노즐의 위치

하지만 굴삭장비를 이용할 경우 이젝터의 형상과 위치는 다양하다. 기본적으로 이젝터의 종류는 공기를 이용한 Air-Lift시스템과 직접흡입시스템 그리고 베르누이 법칙을 이용하여 배출시키는 water ejector시스템으로 나눌 수 있다. 첫 번째 Air-Lift시스템은 수직 파이프 기둥 내부에 공기를 주입하는 형식이다. 굴삭장비의 수직 파이프 아래쪽에 공기를 주입하게 되면 기둥내부의 밀도는 줄어들게 되고 기둥 아래와 위쪽은 외부의 수압이 다르게 작용하므로 부유하려는 힘이 생기게 된다. 간단한 구동원리와 얕은 수심에서도 효과가 좋기 때문에 Air-lift시스템은 모래슬러리 제거 방법 중 가장 보편적인 방법으로 사용되고 있다. 하지만 깊은 수심에서는 공기의 압축성 때문에 많은량의 공기를 충분히 공급하지 않는다면 효과가 떨어진다.

두 번째 직접흡입시스템은 유량이 큰 펌프와 스크류를 이용하여 모래슬러리를 직접적으로 흡입·배출하는 형태로 효율은 가장 좋으나 모래가 펌프내의 스크류와 직접 접촉하게 되면 빨리 닳아 스크류를 자주교체해 줄 필요가 있다. 즉 모래슬러리 속에 함유된 모래와 스크류의 접촉을 최대한 막는 것이 직접흡입시스템 사용의 중요한 변수이다. 일반적

으로 직접펌프시스템에 사용되는 펌프는 분류/사류펌프로 흡입·배출 용량이 큰 것이 특징이다.

Fig. 3-3은 water ejector시스템이다. Water ejector시스템은 베르누이 법칙을 응용한 것으로 펌프가 깨끗한 물만 흡입하여 고압으로 보내면 흡입 호스를 통해 모래슬러리가 깨끗한 물이 이동하는 속도가 빠른 쪽으로 자연스럽게 이동하며 혼합 호스를 통해 배출하는 방법이다. 베르누이 법칙은 유체의 속력이 증가하면 압력이 낮아지고, 반대로 감소하면 압력이 높아진다는 것으로 이때 유체는 고압에서 저압으로 흐르므로 상대적으로 속도가 느린 모래슬러리는 자연스럽게 고속으로 흐르는 유체 쪽으로 흐르게 되는 것이다.

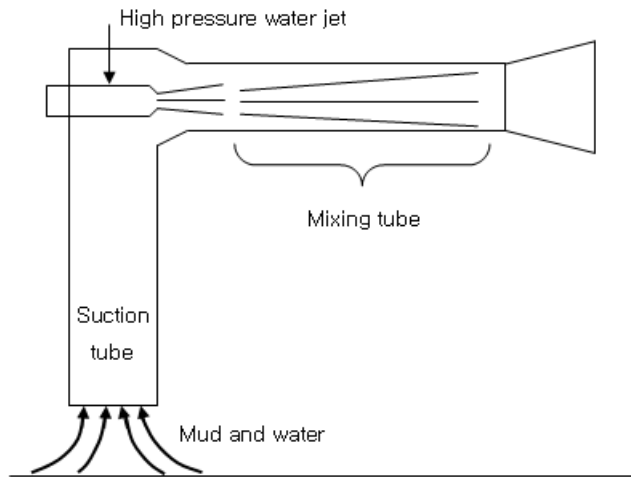


Fig. 3-3 Water ejector 시스템

모든 이젝터 시스템에서 가장 중요한 변수는 지질의 유형이다. 지질에 정해진 파이프 라인의 크기와 굴삭속도에 따라 굴삭 깊이, 굴삭단면경사를 결정한다. 고압의 워터젯 시스템의 경우는 워터젯으로 일부 해저지반을 제거하므로 총 굴삭 단면은 이젝터의 모래슬러리 제거 양에만 의존하지 않는다. 하지만 저압의 워터젯 시스템에서는 이젝터의 모래슬러리 제거량이 총 굴삭량과 같다고 볼 수 있다.

이젝터 효율과 일반적으로 모든 방법에 영향을 미치는 다른 중요한 변수는 지반 입자의 크기와 각 사이즈 범위의 상대적인 비율이다. 흡입 호스내부의 흡입속도는 퇴적물의 이동속도보다 충분히 커야 한다. 이런 속도는 특히나 모래나 자갈 등이 많은 지반에서 주의가 필요하다.

Fig. 3-4는 이젝터 시스템에서 제거할 모래나 자갈의 직경에 대한 흡입속도를 산출할 수 있는 그래프이다[J.B. Lincoln(1985)].

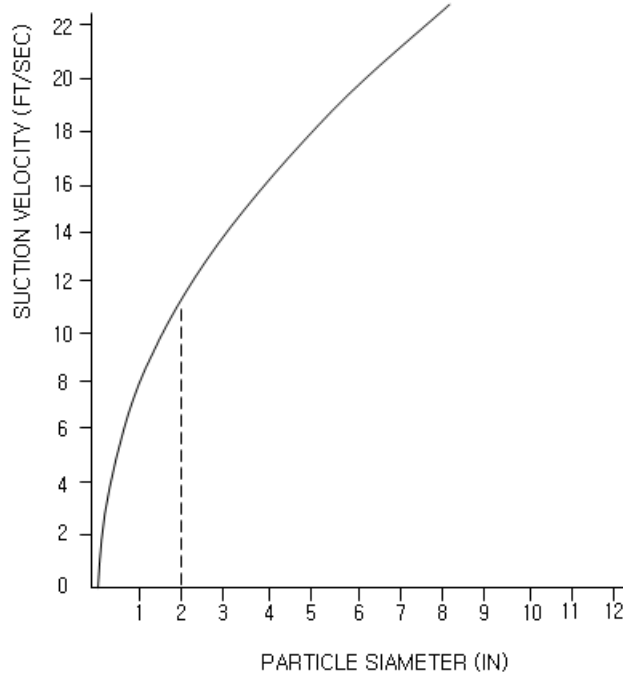


Fig. 3-4 이젝터 시스템에서 제거 입자 직경과 흡입속도의 관계

3.2 설계 개요

본 연구에서 설계하고자하는 장비의 설계개요는 다음과 같다.

1. 워터젯 공법을 이용한다.
2. 전진 속도가 빠른 Jet-Sled 장착한다.
3. 이젝터의 효과를 높여 굴삭효과를 높이는데 중점을 두었다.
4. 노즐의 손상을 줄이는 설계 방안을 제시 할 것이다.

설계 장비는 실험의 1/10크기로 앞 절에서 살펴본 응용 사례를 참고로 단점을 보완하는 형태로 펌프, 이젝터, 노즐 설계를 차례대로 수행하였다. 실험자료는 자료의 접근성이 좋고 장비의 안정성이 확보된 OES사의 장비자료를 참고하였다.

Table 3-2은 모형제작에 필요한 기본적인 사양결정에 참고하기 위한 유체역학적 양의 차원이고 세부사항은 다음과 같다.

Table 3-2 유체역학적 양의 차원

양	차원	실험 : 1/10 모형
유량	$Q \propto VL^2 (Q/ VL^2 = const)$	1 : 10 ² √10
압력	$p \propto \rho V^2 (p/ \rho V^2 = const)$	1 : 10
전력	$P \propto \rho V^3 L^2 (P/ \rho V^3 L^2 = const)$	1 : 10 ³ √10
길이	L	1 : 10
시간	$T \propto \sqrt{L}$	1 : √10

Table 3-3는 실험의 세부사항을 프로이드 상사법칙을 이용하여 1/10축소하여 계산한 결과로 실제 장비의 값을 상사하여 설계 모형의 세부 사항을 결정하였다. 하지만 전력의 경우 1/10로 상사를 시킬 경우 실제 장비를 구동 시킬 수 있는 최소한의 값인 0.5HP보다 작은 전력량이 산출된다. 모형은 실제치수보다 작은 파이프라인을 실제로 굴삭 할 수 있어야하므로 굴삭능력을 가늠할 수 있는 유량과 분사압력의 조건을 부합하는 장비의 전력을 사용하기로 하였다.

Table 3-3 OES사의 장비와 1/10 모형의 세부사항

	OES	Model (1/10)
펌프 유량 [ℓ/min]	10,200	32
펌프 압력 [bar]	65.6	6.56
노즐 분사 압력 [bar]	70	7
분사 노즐 직경 [inch]	4	0.4
매설 파이프라인 직경 [inch]	25 ~ 30	2.5 ~ 3.0
비배수 전단강도 [kPa]	200	20

본 연구에서 설계하는 모형은 상용화된 제품을 가능한 많이 사용하여 한정된 제작비의 한계를 극복할 수 있었다. 본 장에서는 모형의 제작 파트를 펌프, 이젝터, 노즐 등으로 크게 나누어 서술하고 마지막으로 완성된 개념설계안을 제시하였다.

3.2 펌프 설계

본 절에서는 워터젯 노즐에 직접 연결되는 펌프의 설계를 수행하였다. 펌프설계는 워터젯 능력을 직접적으로 가늠할 수 있는 부분이다. 현재 사용되는 굴삭장비의 펌프를 살펴보면 많은 유량과 고압으로 분사 할 수 있는 사양이 요구되는 것을 알 수 있다. Table 3-4은 OES사의 Sumatran Tiger장비에 사용되는 펌프의 사양과 이를 1/10로 축소 한 모형에 적용 될 펌프의 사양을 비교한 것이다.

Table 3-4 실제 장비와 1/10모형의 펌프 사양

	Sumatran Tiger		1/10 Model
	Feed pump	Booster pump	
유량 [ℓ/min]	30,000	10,000	90
압력 [bar]	20	70	7
동력 [HP]	900	800	

OES사의 펌프 사양을 살펴보면 2가지 종류의 펌프를 사용하는 것을 알 수 있는데 하나는 선상에서 물을 끌어올리는 유량이 큰 Feed 펌프와 다음으로 고압으로 압력을 가하여 움블리컬 호스를 통해 해저면의 장비로 전달하는 Booster 펌프이다. 워터젯 공법을 사용하는 장비는 깊은 수심에서 사용 할수록 수심에 대한 수압때문에 고압으로 변환된 물이 다량 필요로 하다. 때문에 유량이 큰 Feed 펌프와 고압으로 분사할 수 있는 Booster 펌프를 나누어 사용하고 있다. 이런 점은 실제 펌프의 특징상 두 조건을 만족하는 펌프를 찾기 힘들다는 것을 간접적으로 보여주는 부분이라 할 수 있다. 모형에 필요한 펌프유량은 손실계수를 1.5로 두었을 때 펌프에서 직접 분사되는 유량이 50 ℓ/min이고 워터젯 노즐압력은 10bar의 압력으로 분사가 가능하도록 설계하였다. 동력은 상사시키지 않고 유량과 압력을 만족하는 상용펌프의 동력을 그대로 사용하기로 한다.

펌프형식은 탑재위치에 따라 수중펌프와 선상펌프의 형태로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 수중펌프의 경우 손실 수두가 없는 수중펌프를 사용하여 그 성능을 확인하려 했으나 국내에 유통되고 있는 수중펌프는 대부분이 공사 현장이나 물고임을 방지하는 배수를 목적으로 제조되었기 때문에 분사 유량은 충분하지만 분사 압력이 낮아 장비에 장착하기 어려운 점이 있음을 발견했다. 그래서 설계로 제작된 모형으로 실험을 실시할 경우, 실험

은 노즐의 분사효과를 눈으로 확인할 수 있는 해안가에서 수행하게 되므로 펌프형태는 선사펌프형태로 외부에서 장비로 물을 공급하기로 결정했다.

선사펌프 형태로 사용가능한 펌프는 일반적으로 사용할 수 있는 펌프 중 압력에 비해 유량이 풍부한 펌프로 본 연구에서는 고압 분무기로 선정하였다. 고압 분무기는 농약 분사 시 사용하는 것으로 눈에 다량의 농약분사가 가능하므로 본 연구에서 설계하는 장비에 필요한 사항에 부합하였다. 고압 분무기의 유량은 상용화된 범위가 60~120 ℓ/min이고 분사압력은 30~45bar이다. 이는 모형실험을 수행 할 수 있는 사양이고 상용화 제품이 많아 다른 펌프에 비해 저렴하게 구할 수 있다.

Table 3-5는 수중펌프형식과 선사펌프형식의 각 특징을 비교하고 본 연구에 적용여부를 표시한 것이다. Table 3-6는 워터젯 노즐에 연결 될 고압 분무기의 세부사항이다. Table 3-7는 모형실험 시 필요한 부가 장치로 펌프 이동장치와 전력원인 엔진에 관한 세부사항이다. Fig. 3-5는 모형 워터젯을 지원할 펌프를 엔진과 이동장치에 장착한 모습이다.

Table 3-5 워터젯 노즐분사용 펌프 결정 단계와 특징

	제 1안	제2안
형식	수중펌프	선사펌프
특징	-펌프효율이 좋음 -전기배선이 간단 -장비배치가 어려움	-안정적인 물 공급 -심해에서는 마찰손실이 커짐 -지원선과 장비를 연결하는 라인수 증가
적용	X	O

Table 3-6 고압 노즐 분사기 세부사항


모델		KS-100A		
형식		횡형3륜 플런저		
직경 * 행정		38*36		
회전수	상용 [rpm]	750		
	관수 [rpm]	1200		
흡수량	상용 [ℓ/min]	92	120	
	관수 [ℓ/min]	145		
압 력	상용 [kg/cm ²]	30		
	최고 [kg/cm ²]	40		
유회유 용량 [ℓ]		1.8		
v-폴리직경 [mm]		300(B-2)		

Table 3-7 노즐 연결 펌프 구동에 사용될 부가장비 세부사항

엔진	엔진형식	가솔린엔진
	모델명	DE270BG
	최대마력 [HP]	8
	시동방식	리코일 스타팅(key)
	사용연료	자동차용 무연가솔린
	중량 [kg]	25
이동장치	다이 [A]	4륵다이
	치수(L×W×H) [mm]	1100×650×1130
	중량 [kg]	118
	호스 [m]	100
	흡입호스 포함, 노즐/약대포함	



Fig. 3-5 모형에 사용 될 펌프일체 조립형상

3.3 이젝터 설계

해저굴삭작업에서 이젝터의 기능이 중요하다는 것은 앞에서 이미 언급하였다. 본 절에서는 실제 장비에서 사용되는 이젝터 시스템의 응용 사례분석을 통해 효과적인 이젝터 시스템의 타입을 선정하고 이젝터 사양설계를 수행하였다.



Fig. 3-6 직접 흡입형(왼쪽)과 Air Lift System(오른쪽)

Fig 3-6는 HYBC사와 OES사의 두 장비의 이젝터 시스템을 비교한 것이다. Fig 3-6에서 볼 수 있듯이 HYBC사는 직접흡입시스템을 응용하고 있고 OES사의 장비는 Air-lift시스템을 응용하고 있다. 두 장비의 공통점은 모두 모래슬러리와 외부 해류가 함께 이젝터 시스템에 유입된다는 점이다.

본 연구에서는 직접흡입시스템을 기본 타입으로 하고 모래슬러리와 외부해류를 차단하여 이젝터의 효율을 증가하는 방법을 추가하였다. 이젝터 설계는 크게 외부흐름을 차단하고 모래슬러리가 이동하는 부분과 흡입할 수 있는 프레임 부분과 흐름을 생성하는 펌프부분으로 나누어 수행하였다. 본 절에서는 제 1안인 Block형 프레임과 상부 탑재펌프의 특징을 서술하고 Block형 프레임의 단점을 극복하는 제 2안인 후드형 프레임과 탑재펌프 2가지 설계안을 차례로 서술하였다.

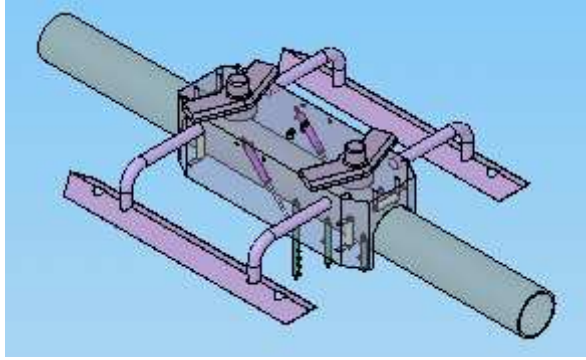


Fig. 3-7 Block 형식의 이젝터 (제 1안)

Fig. 3-7은 제 1안 Block형 이젝터 프레임과 상부펌프 설계안의 개념도이다. Block 형태의 막이 모래슬러리와 외부 흐름을 차단하는 형태이다. 즉, 모형 본체를 Block으로 제작하고 상부에 펌프장착하여 흐름을 생성하면 모래슬러리가 Block내부에서 펌프를 통해 외부로 배출되는 원리이다. Block의 소재는 철제 구조물에 가장 보편적으로 사용되는 SUS304이고 실험 시 굴삭 효과를 직접 확인하기 위해 Block아랫부분을 투명 아크릴판으로 제작하여 굴삭효과를 확인할 수 있다. 또한 파이프라인이 지나는 앞·뒤판을 고무로 제작하여 전진하면서 가해지는 충격을 흡수 할 수 있는 설계안이다.

상부 탑재 펌프의 사양은 저속(rpm이 낮음)으로 회전하고 많은 유량을 흡입 할 수 있어야 한다. 여기서 rpm이 높을 경우 Block 안에서 와류가 형성되어 밖으로 배출되지 않고 Block내부에서 회전운동만 생성되어 워터젯 노즐효과를 방해하기 때문에 낮은 rpm으로 구동되는 펌프를 설계한다. 일반적으로 펌프 내부의 모터는 4개, 6개, 8개의 코일 다발이 회전하면서 흐름을 생성한다. 펌프내부 코일 다발의 개수에 따라 4극, 6극, 8극으로 나뉘고 그 중 4극이 가장 일반적으로 사용되는 펌프형식이다. 회전수는 모터의 극수와 함께 결정되며 간단하게 모터 회전식을 산출하는 식은 3-1과 같다. 식 3-1에서도 알 수 있듯이 극수가 커질수록 rpm은 낮아지지만 코일다발이 많아지므로 펌프크기는 커진다.

$$n = \frac{120f}{p} [rpm] \quad (3-1)$$

여기서, n= rpm f= 전원의 주파수(Hz) p= 모터의 극수



Fig. 3-8 Block형 이젝터 상부에 탑재 고려된 모터의 종류

Fig 3-8은 Bolck 프레임 상부에 부착할 모터로 고려된 장비의 그림이다. 왼쪽부터 수중교반기, 목공용 3상모터와 스크류, 전동믹싱드릴과 스크류 이렇게 총 3가지 방안이 모색되었다.

Fig. 3-8 a는 기산 수기사의 수중교반기로 침전방지 교반, PH조정, 하수처리장 교반 등에 사용되고 있다. 국내에서 판매되고 있는 수중교반기의 사양은 4극수로 생성 해류속도는 1.6~6.4m/sec이고 처리 유량은 최소 3,000~49,000 l/min으로 비교적 저속에 많은 유량 처리가 가능하다. 국내수요가 많지 않아 생산량이 작다.

Fig. 3-8 b는 목공용 3상 모터이다. 목공용 3상 모터는 일반적인 모터에 비해 케이싱이 길어 스크류 장착이 가능하다. 일반적으로 삼상은 380v 단상을 220v를 말한다. 국내에서는 공업용 동력 모터는 안정적인 전기 공급을 위해 380v를 사용하고 일반 가정용 모터는 220v를 사용하고 있다. 본 연구에서 목공용 3상 모터를 사용하기 위해서는 3상유도 전동기보유가 필요하였다.

Fig. 3-8 c는 전동믹싱드릴로 사용전력 1300W인 콘크리트 믹서기로는 0~700rpm까지 조절이 가능하다. rpm을 작게 조정할 경우 회전력이 모멘텀으로 전환되므로 스크류를 충분히 회전시켜 흐름 생성이 가능하다. 상용제품이 다양하여 선택의 폭이 넓다. 하지만 직접 구입 후 시험 가동을 해 본 결과 장시간 가동이 불가능하고 가동 시 장비에서 많은 열이 발생하므로 수중에서 사용할 경우 냉각의 문제가 발생한다.

Block형의 이젝터 프레임과 낮은 rpm의 펌프를 탑재 할 경우 모래슬러리의 흡입력은 우수하나 높이에 비해 길이방향이 길게 제작된 Block의 양쪽면이 파이프라인 쪽으로 휘어지는 현상이 생길 가능성이 제기되었다. 이젝터 프레임이 휘어진다는 것은 모래슬러리가 펌프의 구동으로 외부로 이동할 수 있는 공간이 줄어들고 이는 파이프라인을 타고 전

진하는 장비의 이동을 방해하는 요인으로 해석 할 수 있다. Table 3-7는 Block형 이젝터 상부탑재에 고려되었던 펌프형식과 적용여부를 나타낸 표이다.

Table 3-7 Block형 이젝터 탑재펌프 비교

이젝터 형식	상부 펌프 형식		적용 여부
Block 형식 + 상부 펌프 탑재	교반기	- 성능 가장적합 - 가격이 높음	X
	목공용3상모타 + 프로펠러	- 저렴한 가격 - 크기가 커짐	X
	전동믹싱드릴 + 프로펠러	- rpm조정 가능 - Block 찌그러짐	X

Table 3-7을 참고하면 Block형 이젝터 프레임으로 제작하면 수직 수평 롤러 등의 추가 장비장착 공간 활용이 자유롭지 못하고 장비 진행을 방해하므로 다음 제 2안인 후드형 설계안을 고안하였다.

Fig. 3-9는 두 번째로 설계한 이젝터 프레임 개념도이다. 후드형 이젝터는 노즐로 분사하여 모래슬러리가 발생하는 부분을 중점적으로 흡입하도록 설계되었다. 또한 후드내부에 노즐이 부착되어 노즐과 이젝터를 일체형으로 설계하였다. 이는 모래슬러리와 외부 흐름을 차단하는 영역을 워터젯 노즐이 분사되는 영역으로 집중화시킨 형상이다.

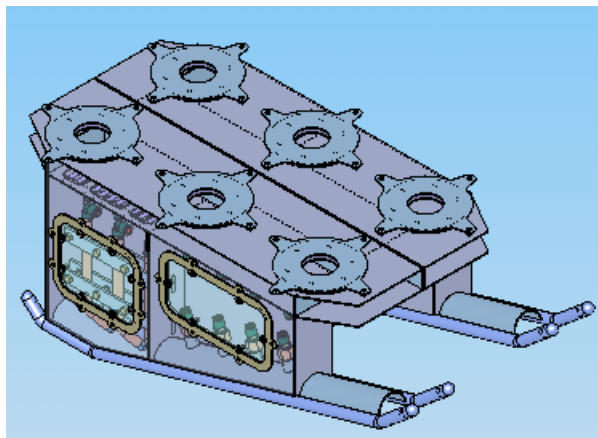


Fig. 3-9 후드형 이젝터 하부 형상 (제 2안)

Fig. 3-10은 이젝터와 본체와의 조립상태를 보여준다. 이젝터는 본체 프레임과 상·하 1자유도 링크로 연결이 되어있어 상하운동이 가능하도록 설계하였다. 처음 Launching시 후드 뒷부분부터 해저면에 안착을 하게 되고 굴삭이 진행되면서 점점 앞쪽 부분도 굴삭면을 따라 내려가는 시스템이다. 굴삭이 진행되면서 지면이 제거되면 후드 자체무게에 따라 아래로 가라앉도록 설계를 하였다. 상하 이동 범위는 현재 매설 파이프라인 125A의 직경의 105%까지이다. 이는 기존 Jet-Sled 장비에서 노즐이 고정되어 발생 하던 노즐과 해저면의 이격거리를 줄일 수 있으며 이격거리를 줄여 노즐에서 분사되는 워터젯의 효과의 감소를 방지할 수 있다.

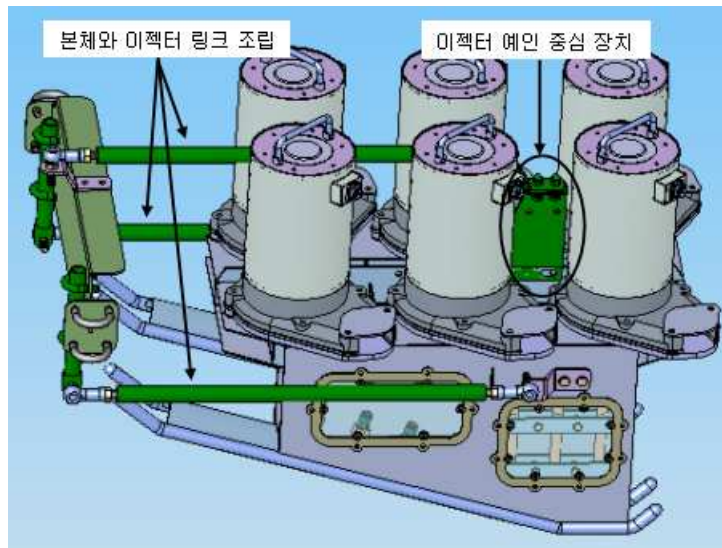


Fig. 3-10 이젝터 일체와 본체와의 조립상태

본 연구에서는 10bar의 워터젯 분사압력으로 굴삭을 진행하게 된다. 앞서서도 언급했듯이 저압 워터젯 시스템은 이젝터로 제거하는 모래슬러리의 양이 굴삭 하는 총 량이 된다. 일반적으로 이젝터 시스템에 포함되는 순수 모래량은 water ejector시스템의 경우 슬러리 양의 25%로 고려하고 air-lift시스템은 순수 모래량을 30%로 정의한다. 굴삭 깊이는 일반적으로 어로활동이 없는 곳의 경우 1~2m, 어로활동이 있는 곳에서는 4m이상을 굴삭 한다. 평균 굴삭 작업시간은 장비점검 및 진수/회수의 시간을 제외하고 하루 20시간으로 정의하며 일반적인 굴삭장비의 진행 속도는 1~2km/day가 일반적이다. 굴삭량은 1pass의 경우 한 번에 모래를 총 굴삭 량만큼 제거해야하고 2pass의 경우는 총 굴삭량의 1/2이 되고 3pass의 경우는 총 굴삭량의 1/3이 1회 굴삭량이 된다. Table 3-8은 이

젝터 설계 조건을 실험과 1/10로 상사하여 모형에 적용된 값을 나타낸다.

Table 3-8 이젝터 설계조건

	실제작업 현황	1/10모형
굴삭깊이 [m]	1~2	0.1~0.2
굴삭속도 [m/h]	100 (1~2km/day)	31.6
매설 파이프 직경 [m]	1	0.1
굴삭 단면 [m ²]	9	0.09

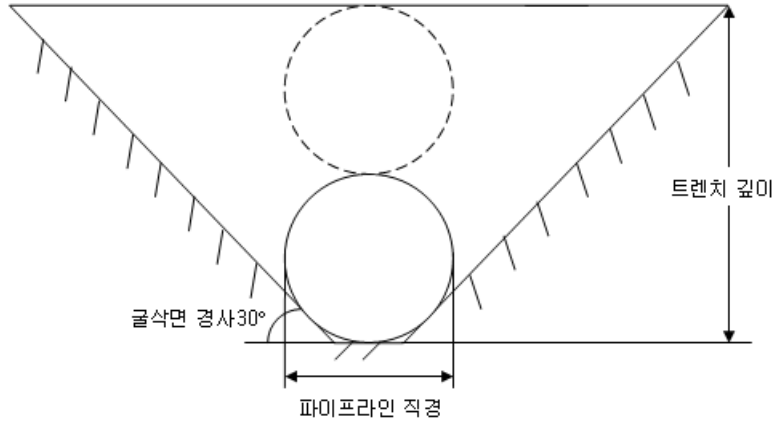


Fig. 3-11 파이프라인 굴삭단면도

Fig. 3-11는 파이프라인 굴삭단면도이다. 해저 파이프라인 굴삭은 공사의 성격에 따라 굴삭 깊이가 다르다. 본 연구에서는 매설 파이프라인의 직경2배 깊이를 굴삭 하는 조건이고 굴삭단면은 사다리꼴로 고려하고 굴삭면 경사는 모래지반의 안정 경사각 30°로 가정하였다. 굴삭량 계산에 필요한 펌프의 효율은 80%로 순수 모래량은 25%로 가정하였다.

Table 3-9는 Table 3-8에서 얻은 설계조건으로 1~3 회 반복 할 경우 모형의 굴삭량을 나타낸다. 굴삭량 계산은 식 3-2를 참고로 한다.

$$\text{굴삭량} = \frac{\text{굴삭단면} \times \text{굴삭속도}}{\text{펌프효율} \times \text{반복횟수} \times \text{순수모래량}} \quad (3-2)$$

Table 3-9 반복횟수에 따른 굴삭량

반복횟수	굴삭량
1 pass	$\frac{0.09 \times 31.6}{0.8 \times 1 \times 0.25} = 14.22m^3/h = 237l/min$
2 pass	$\frac{0.09 \times 31.6}{0.8 \times 2 \times 0.25} = 7.11m^3/h = 118.5l/min$
3 pass	$\frac{0.09 \times 31.6}{0.8 \times 3 \times 0.25} = 4.74m^3/h = 79l/min$

Table 3-9를 참고로 이젝터 상부에 탑재할 펌프를 선정한다. 본 연구에서는 모래슬러리를 흡입하므로 오물용 수중펌프를 사용하였으며 그 세부사항은 Table 3-10과 같다. Fig. 3-12는 수중펌프의 성능곡선으로 모형실험이 실시되는 1m미만에서 유량이 1pass로도 충분히 모래 슬러리 제거가 가능하다는 결과가 나온다.

Table 3-10 후드형 이젝터 탑재펌프 세부사항

이젝터 상부 탑재 펌프	세부사항
모델명	IPV-835
전압 [V]	단상 220
정격출력 [HP]	1
전양정 [m]	18.5
최대양수량 [l/min 전양정(m)시]	400(0.5)
흡상고 [m]	0
중량 [kg]	15
토출경 [mm]	50(A)
제품크기 [mm] A×B×C	190×425×255

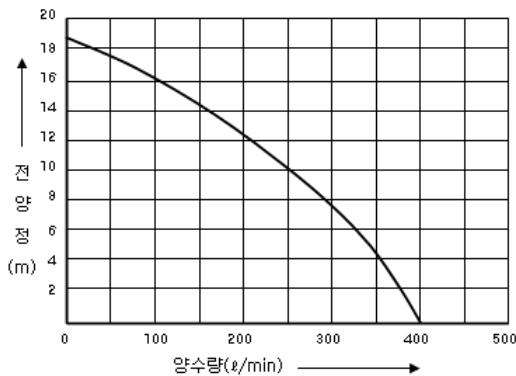


Fig. 3-12 IPV-835 수중펌프 성능곡선

본 연구에서 사용할 상부 탑재 펌프는 배수의 목적으로 생산된 것이므로 모래 슬러리를 흡입하면서 펌프내부의 손상이 생길 가능성이 있으므로 6대를 장착하여 실험 시 유량 변화에 따른 굴삭 효과를 검증이 가능하도록 설계하였다. 직접 흡입 이젝터 시스템의 경우, 펌프내부의 프로펠러가 모래슬러리와 접촉하여 빨리 닳거나 이물질이 끼어 작동이 멈추는 경우가 발생할 수 있다. 해상 작업의 경우 작업이 중단되는 것은 큰 데미지로 작용하므로 굴삭장비가 멈추지 않도록 설계를 하는 것이 중요하다. Fig. 3-13과 같이 흡입부에서 거름판을 설치하여 펌프 내부를 통과하는 알갱이 크기의 제한을 두어 막힘 방지를 하였다.

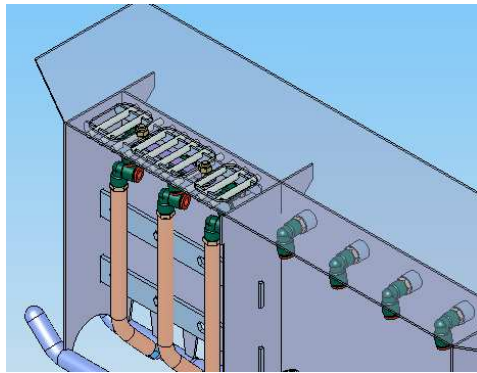


Fig. 3-13 모래슬러리 이동 통로인 상부 거름판

Fig. 3-14는 이젝터의 하부의 후드와 상부 펌프를 조립한 전체 이젝터 형상이다.

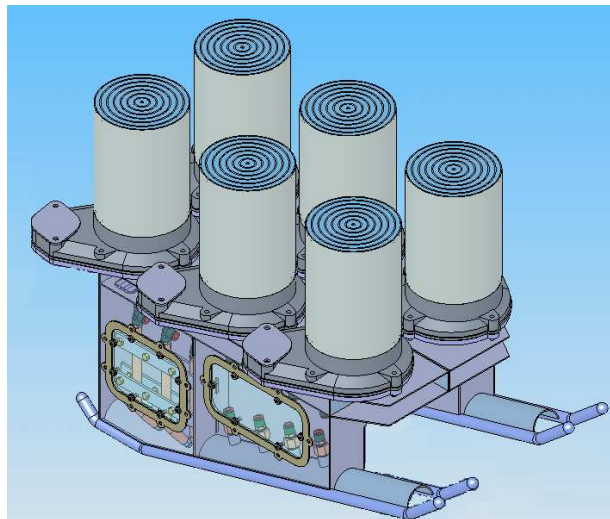


Fig. 3-14 이젝터 전체 형상

Table 3-11은 이젝터 설계의 각 단계를 표로 나타낸 것이다.

Table 3-11 이젝터 형식 결정 단계별 특징

	탑재모터	수중교반기
제 1안 Bolck형	장점	- 유량이 풍부 - rpm이 낮음
	단점	- 가격이 높음
	적용여부	X
	이젝터 형식	목공용 3상모터+ 스크류
	장점	- 케이싱 축이 길어 스크류 장착 용이 - 가격이 저렴 - 단상모터에 비해 크기가 작음
	단점	- 3상 유도전동기 가격이 높음
	적용여부	X
	이젝터 형식	전동믹서+ 스크류
	장점	- rpm 조절이 가능 - 흡입력이 강함 - 저렴한 가격
	단점	- 강한 흡입력으로 Block이 찌그러짐 - 장시간 가동이 어려움
	적용여부	X
	제 2안 후드형	이젝터 형식
장점		- 모래슬러리 흡입·배출이 가능함 - 위아래 이동이 가능 - 노즐과 이젝터의 일체형으로 효율이 극대화
단점		- 펌프내부의 프로펠러의 손상 가능성이 있음
적용여부		O

3.4 노즐 설계 및 배치

일반적으로 공기 중에서 분사된 워터젯은 물보다 밀도와 점성이 작은 공기와 접촉하게 되므로 노즐 수축부의 형상에 따라 워터젯의 직진성과 모멘텀의 전달성이 달라진다. 하지만 수중에서 분사된 워터젯은 공기 중에서보다 훨씬 더 큰 마찰을 받아 빠른 속도로 분류의 속도와 모멘텀의 크기가 감소한다. 그러므로 수중 굴삭작업에서는 노즐이 지반에 가까이 위치할수록 워터젯의 속도와 모멘텀의 감소가 작아 굴삭이 효과적으로 이루어진다고 볼 수 있다. 즉, 수중노즐은 수축부가 15°원뿔형으로 조립이 쉬운 형태를 사용한다. 본 연구에서는 각 노즐에서 10bar의 압력으로 분사하고 분사유량을 32 ℓ/min이상으로 설계하였다. 손실계수를 1.5로 두어 펌프에서는 50 ℓ/min를 분사하도록 설정하였다. 노즐은 각 7개 ×2set로 총 14개를 부착한다. Fig. 3-15는 설계 노즐형상이다.

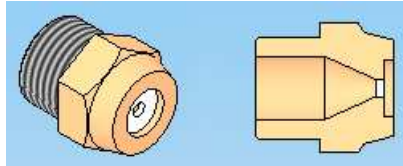




Fig. 3-15 설계 노즐 형상

수중작업에서 노즐배치는 워터젯 효과에 크게 작용하는 변수중의 하나로 실제 장비에 장착된 노즐 배치 형상을 살펴보면 그 특징을 알 수 있다. Table 3-12는 OES사의 굴삭 장비와 중국의 HYCB사의 굴삭장비의 노즐 부분을 비교해 놓은 것이다.

Table 3-12 Sumatran Tiger 장비와 QWJ-H Mass Flow Jetting 장비의 노즐배치형상

	Sumatran Tiger 장비	QWJ-H Mass Flow Jetting 장비
노즐배치형상		
특징	일정 간격을 두고 위쪽을 향해 원을 그리며 위·아래 배치	등 간격으로 정면을 향해 수직으로 배치

OES사의 Sumatran Tiger장비는 프레임 당 20개 이상의 노즐이 위쪽을 향하여 부착되어 있다. 노즐수가 많아지면서 각 노즐에서 분사되는 유량이 작아 노즐 앞부분의 지질이 제거되기까지 시간이 비교적 많이 소요되지만 노즐과 해저면과의 이격거리가 거의 없어 굴삭이 안정적으로 이루어진다. 하지만 굴삭이 충분히 이루어지기 전에 작업선이 장비를 당길 경우 노즐이 부러지는 현상이 자주발생하며 작업 중 노즐을 교체해야하는 경우가 빈번해진다. HYBC사의 QWJ-H Mass Flow Jetting 장비는 프레임 당 10여개의 노즐이 등 간격으로 정면을 향해 배치되어있다. 노즐 프레임이 슬래드 바닥보다 더 아래쪽에 위치하는 이유는 Jet sled의 특징상 슬래드는 진수나 작업이 진행되는 중에도 해저면 위치에 안착되어있기 때문에 굴삭이 진행될수록 노즐과 해저면사이의 이격거리가 발생하기 때문이다. 이런 노즐 배치는 진수 시 노즐끝 부분이 해저 면에 부딪혀 노즐의 손상을 유발한다. 이런 문제점을 파악하여 본 연구에서는 Fig. 3-16과 같이 후드형 이젝터 내부에 노즐을 부착하여 노즐의 손상을 최소화하고 이젝터와 노즐을 일체화하여 이젝터가 상·하로 움직일 때 노즐도 함께 이동하므로 노즐과 해저면 사이의 이격거리를 최소화하는 방안을 고안하였다.

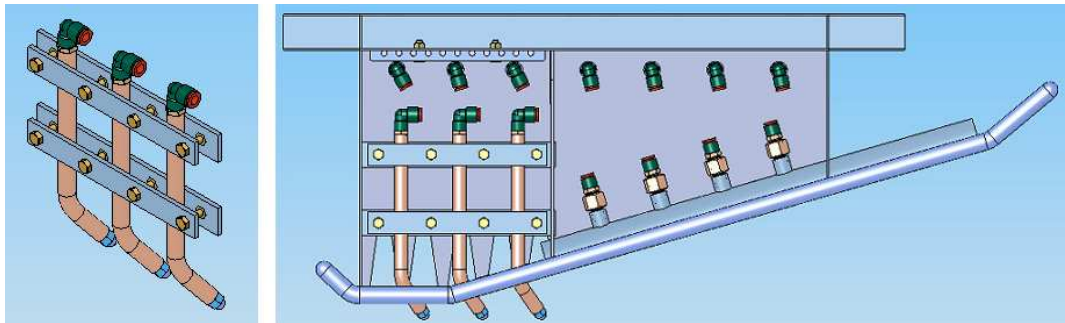


Fig. 3-16 분사노즐(좌) 및 배치형상(우)

본 장비의 워터젯은 다음과 같은 순서로 진행이 되도록 설계하였다. 먼저 장비가 진수 되면 굴삭장비가 해저면에 안착하게 되며 Fig. 3-16 좌측의 노즐 3개가 먼저 구동된다. 노즐 7개를 구동 할 수 있는 유량과 압력으로 3개의 노즐을 구동하기 때문에 진수시 해저면의 표면을 깨뜨리는 효과가 커지므로 노즐이 부러지는 문제점을 극복할 수 있도록 설계하였다. 그리고 굴삭이 진행되면서 후드형 이젝터가 아래로 움직이면 잠겨 있던 노즐이 차례대로 분사를 하도록 설계하였으며 모형실험 시 노즐 팁과 해저면의 각도 조절이 가능하도록 제작하여 실험을 통하여 가장 이상적인 각도를 찾을 수 있도록 설계하였다.

3.5 완성된 개념설계

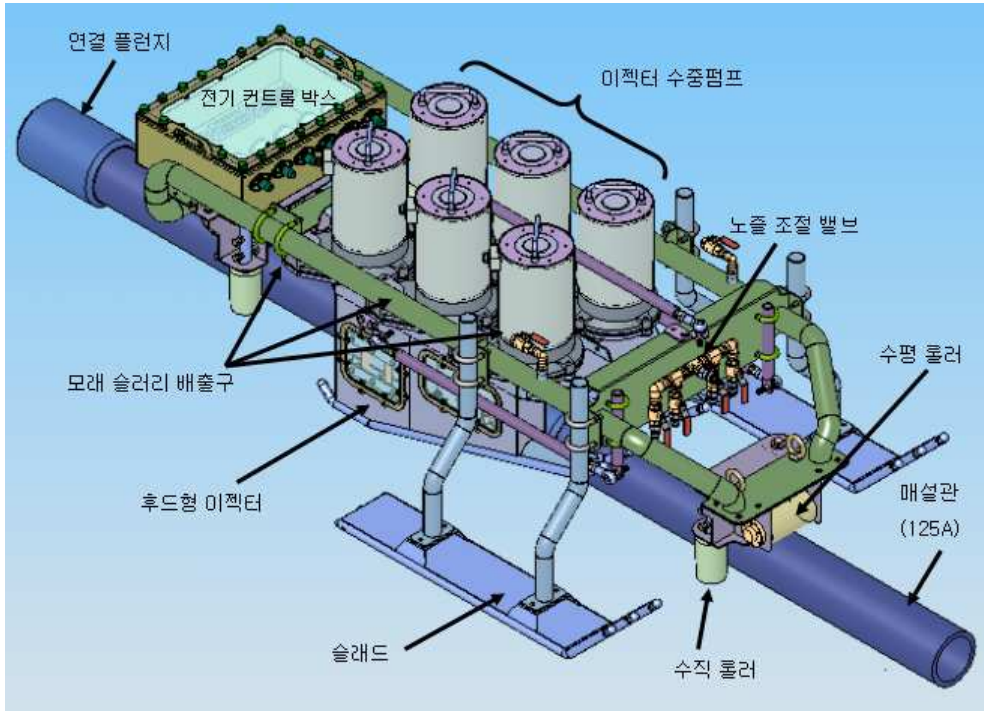


Fig. 3-17 완성된 해저 굴삭 장비 개념도

Fig. 3-17은 앞 절에서 언급했던 각 단계의 설계를 종합한 완성된 굴삭장비 개념도이다. Jet-sled의 타입으로 양쪽에 Sled가 위치하여 균형을 잡고, 파이프라인을 타고 이동하는 후드형 이젝터와 노즐, 수중 펌프 그리고 수중펌프 구동을 위한 전기 장치와 프레임으로 구성되어 있다. 전기 컨트롤 박스는 펌프 6대 각각에 연결되어 한 대가 작동하지 않을 경우 식별이 가능하도록 제작하였다. 특히 수중에서 전기는 방수가 완전하지 않을 경우 큰 사고로 이어질 가능성이 크므로 완벽한 방수가 되는 컨트롤 박스를 제작하였다.

부가 장비로는 파이프라인을 따라 전진이 가능한 수직 롤러와 파이프라인 위에 안착이 가능하도록 하는 수평 롤러가 있다. 일반적으로 파이프라인은 강성이 크므로 케이블처럼 reel에 감아서 이동하기보다는 일정 길이로 절단되어 운반되며 파이프라인을 용접 및 연결하면서 바로 해저면에 놓는다. 이때 용접 및 연결부위는 굴삭장비의 전진을 방해하는 변수로 작용한다. 본 연구에서는 수평 롤러의 직경을 크게 설계하고 수직 롤러는 위아래 두께를 다르게 설계하여 파이프라인 연결 및 용접 부분을 타고 넘어 갈 수 있도록 제작하

였다. 또한 노즐밸브를 만들어 실험 시 노즐의 구동 노즐을 조정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 설계한 해저굴삭장비 특징은 위 아래로 움직이는 후드형 이젝터에 노즐을 부착하여 설계함으로써 굴삭이 진행되면서 발생하던 노즐과 해저면사이의 이격거리를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 기존 장비에서 빈번히 발생하던 노즐손상 문제점을 극복할 수 있다는 점이다.

IV. 결 론

해양개발의 활성화를 위해 국가적 차원의 지원이 이루어지기 시작하면서 해저 케이블이나 파이프라인 매설이 지속적으로 이루어지고 있다. 하지만 그에 부합하는 기술 자료의 수집과 굴삭장비에 관한 체계적이고 전문적인 연구는 미약한 실정이다. 이런 시대적인 요구에 따라 본 연구에서는 해저 케이블 및 파이프라인 매설작업 중 굴삭작업에 사용되는 해저굴삭장비에 대한 연구를 수행하였다.

먼저 굴삭 장비에 적용되는 굴삭 공법의 종류와 특징을 조사 하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 워터젯 공법을 굴삭장비에 적용하여 설계를 수행하였다. 또한 워터젯 굴삭에 영향을 미치는 이론적 요소를 정리하고 현재 국내·외에서 사용 중인 장비사례를 조사하여 각 장비의 특징과 장·단점을 파악하였다. 이런 문헌 조사와 자료 수집을 바탕으로 워터젯 공법을 적용한 새로운 개념의 해저굴삭장비의 1/10 모형에 대한 개념설계를 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

1. 해저굴삭장비 모형은 Jet-sled타입으로 크기는 1200mm x 800mm x 500mm이고 재질은 SUS304이다.

2. 설계 작업환경 조건은 수심 10m이내, 매설 파이프라인 직경은 약 10cm이다.

3. 워터젯 펌프는 유량 90 ℓ/min이고 분사 압력 30bar이상 구동이 가능한 고압 분무기로 8마력 디젤 엔진으로 구동된다.

4. 워터젯 노즐은 원뿔형으로 직경 1mm에 분사압력 10bar로 총 14개가 7개씩 후드형 이젝터 내부에 장착하였다. 노즐은 처음 3개가 먼저 분사하고 굴삭이 진행되면 순차적으로 나머지 노즐이 구동하도록 설계하여 진수시 해저표면 굴삭이 용이하다.

5. 이젝터는 직접흡입시스템을 선택하였으며 이젝터 펌프는 유량 300 ℓ/min인 오물용 볼텍스 수중펌프로 선정했으며 총 6대를 장착하여 실험 시 작업 멈춤 현상을 방지하였다. 이젝터 하부는 모래슬러리와 외부의 흐름을 차단하는 후드형으로 설계하여 기존 장비에 비해 모래슬러리 제거효과가 더 뛰어나다.

6. 기존의 Jet-Sled 장비에서는 노즐의 위치가 고정되어 있어 굴삭이 반복될수록 노

즐과 해저면 사이의 이격거리가 커지면서 굴삭 효과가 급격히 떨어지는 단점을 가지고 있었지만 후드형식 이젝터는 가이드를 따라 이젝터가 매설파이프 직경의 105%까지 아래로 움직일 수 있고 이젝터와 노즐을 일체형으로 설계하였으므로 굴삭이 진행되면서 발생하던 노즐과 해저면 사이의 이격거리 감소효과가 크다.

7. 아래로 움직이는 후드형 이젝터는 이격거리를 줄일 뿐만 아니라 장비의 진수 시 해저면에 장비가 안착할 때 발생하던 노즐손상이나 해저면이 충분히 굴삭되기 전에 장비가 당겨져 발생하던 노즐 부러짐 현상을 방지한다.

추후 이를 바탕으로 제작된 모형으로 실험을 수행하여 얻은 데이터를 수집·분석하여 좀 더 세부적인 사항을 개량한다면 앞으로 계속적으로 이루어질 국내의 파이프라인 굴삭 작업을 성공적으로 시공할 수 있을 뿐만 아니라 국내 관련기업의 장비개발에도 중요한 역할을 할 수 있을 것이라 생각한다. 또한 이런 국내 기술을 바탕으로 해저 굴삭장비에 대한 기술력이 축적된다면 해외 파이프라인 및 케이블 굴삭작업에 국내 기업이 시공할 수 있는 충분한 경쟁력을 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 남궁정환 (2003), “노즐 형상비 변화에 따른 고압 분사류의 유동특성 연구”, 전북대학교 대학원, 기계항공공학과 석사논문.
- [2] 조철희 (2001), “해저관로개론”, 대선, 221-242.
- [3] 김형목 (2001), “워터젯을 이용한 암석의 절삭에 관한연구”, 서울대학교 대학원, 자원공학과, 석사논문
- [4] F. Hettinger, J. Machine (2005), “Cable and Pipeline Burial at 3000Meters”, Oceans 2005 Washington, D.C.
- [5] J.H Kober, F.D Messina, D. Dean (2000) “New Advances In Jet-Assisted Plowing For The Undersea Cable Construction Industry”, OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition Vol.1, 267-275
- [6] R.D. Koster (2003), “Trenching of Offshore pipelines and Cables using the Seajet Trencher”, Ingeokring Newsletter, vol 9, No 1.
- [7] N.N. Kozhevnikov (2004), “A Theory of Soil Ripping by a Submerged Water Jet and the Design of Jet Soil Ripping for Dredgers”, Power Technology and Engineering, Vol 38, No 3, 21-27
- [8] G.W. Lewis, F.D. Messian (1988), “Development of a High Performance Jetter for Ocean Cable Burial”, Ocean Community Conference, vol 2, 763-774.
- [9] J.B. Lincoln (1985). “Subsea Pipeline Trenching”, Australians Conference on coastal and Ocean Engineering. vol.1, 169-181