

공학석사 학위논문

해양방류관거 설계를 위한
수리 및 수치 실험연구

A Study on Hydraulic and Numerical Experiment
for Ocean Outfall Riser Design

지도교수 박한일

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

설 원 재

본 논문을 설원재의 공학석사 학위논문으로 인준함

주임 최경식 공학박사 (인)

위원 서영교 공학박사 (인)

위원 박한일 공학박사 (인)

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

설 원 재

A Study on Hydraulic and Numerical Experiment for Ocean Outfall Riser Design

By

Won-Jae Seol

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

ABSTRACT

Coastal waters are increasingly polluted by the polluted water which is discharged from lands. Due to such increased polluted water discharge, the degree of coastal water pollution has been considerably increased. For solving this pollution problem in coastal area, polluted water is firstly purified by a proper process and then discharged into far coastal water through a ocean outfall pipeline. A outfall pipeline system consists of main pipe, riser and diffuser. Because an ocean outfall riser is week to ocean environmental loads, it must be designed in safe and economic point of view. Therefore technical examination is needed in the preliminary design stage.

In this study, various hydraulic model experiments are accomplished for the examination of ocean outfall riser safety and some numerical analyses are carried out for its fatigue failure. A case study is carried out for the ocean outfall riser which is installed near Gadukdo in Busan.

목 차

Abstract	i
목차	iv
표 목차	vi
그림 목차	vii
기호 목차	ix
1. 서 론	1
2. 방류관거 설계 시 고려사항	4
2.1 해양환경요소	4
2.1.1 해양파	5
2.1.2 해 류	11
2.1.3 선박계류 및 어로활동	12
2.2 가덕도 주변의 해양환경	13
2.2.1 수심	13
2.2.2 조위	13
2.2.3 조류	13
2.2.4 파랑	14
2.3 해양방류관거의 구성	14
2.4 디퓨저영역 위치선정	15
2.5 설계 기준	15
2.5.1 라이저에 대한 설계	16
2.5.2 케이싱 시스템(casing system)에 대한 설계	16
2.5.3 디퓨저 설계	16
2.5.4 디퓨저와 라이저의 재료	17
3. 수리모형 실험	18
3.1 실험장비와 실험방법	18
3.1.1 실험장비	18
3.1.2 실험방법	20
3.2 모형축적과 모형제작	21
3.2.1 모형축적	21

3.2.2 모형제작	22
3.3 실험의 종류	25
3.4 실험에 대한 결과 및 고찰	26
3.4.1 토크에 대한 실험결과	27
3.4.2 가속도에 대한 실험결과	28
4. 방류관거에 대한 강도계산	37
4.1 개론	37
4.2 해상상태	37
4.3 방류관거 모델링	37
4.3.1 방류관거 모델	37
4.4 피로파괴해석	38
4.4.1 요구사항	38
4.4.2 응력집중계수(SCF)	38
4.4.3 피로파괴	39
4.5 정적최종강도해석	43
5. 결론	46
참고문헌	47

표 목차

Table 2-1	천해파와 심해파의 특성치 요약	7
Table 2-2	가덕도 일원의 조위	13
Table 2-3	동남해안에서의 유의파고 출현률	14
Table 2-4	각 성분에 대한 재료	17
Table 3-1	모형방류관거 재원	22
Table 3-2	실험에서 사용된 파랑과 조류 (1)	25
Table 3-3	실험에서 사용된 파랑과 조류 (2)	25
Table 3-4	토크에 대한 실험결과	28
Table 3-5	ANSYS에 의한 연결부분에 작용하는 최대응력	28
Table 4-1	주파이프, 라이저, 그리고 디퓨저의 재원	38
Table 4-2	피로해석 요구사항	38
Table 4-3	응력집중계수	39
Table 4-4	원통형 단면의 유형과 위치에 의한 응력 분류	40
Table 4-5	연결부위1의 피로해석결과 (E'-curve)	41
Table 4-6	연결부위4의 피로해석결과 (K'-curve)	42
Table 4-7	정적최종강도해석에 사용되는 하중	43
Table 4-8	정적최종강도해석 결과 (자갈층이 완전한 경우)	43
Table 4-9	정적최종강도해석 결과 (자갈층이 없는 경우)	44

그림 목차

Fig. 1-1 해양방류관거의 전형적인 형상.	1
Fig. 1-2 해양방류관거의 위치도	3
Fig. 2-1 파이프론 적용의 타당성	5
Fig. 2-2 파의 특성 정의	6
Fig. 2-3 심해파의 상대수심에 따른 파형 비교	7
Fig. 2-4 원형 실린더에 대한 부가관성계수	8
Fig. 2-5 원형 실린더에 대한 항력계수	9
Fig. 2-6 Reynold 수에 따른 원형 실린더 주위에서의 흐름	10
Fig. 2-7 원형 실린더에 대한 양력계수	10
Fig. 2-8 해류의 흐름방향으로 파이프 진동이 시작되는 유속	11
Fig. 2-9 해류 흐름방향의 직각방향으로 파이프가 진동을 시작되는 유속	11
Fig. 2-10 해저 파이프라인을 횡단하는 어구	12
Fig. 2-11 파이프라인 매설지역을 통과한 선박의 통과횟수에 대한 예	12
Fig. 2-12 해저면 디퓨저의 형상	17
Fig. 3-1 조파수조의 형상.	18
Fig. 3-2 해양방류관거의 종단면도.	20
Fig. 3-3 해양방류관거의 라이저 부분 단면도(원형).	21
Fig. 3-4 해양방류관거 시스템의 실험모델(단위 : mm).	22
Fig. 3-5 모형 방류관거의 상세 도면.	23
Fig. 3-6 방류관거 매설지점의 단면도(모형)	24
Fig. 3-7 데이터 측정기를 이용한 토크와 가속도의 측정결과	26
Fig. 3-8 순수자료를 처리하는 과정에 대한 예(Case 301)	27
Fig. 3-9 Case 301에 대한 실험결과	29
Fig. 3-10 Case 302에 대한 실험결과	30
Fig. 3-11 Case 303에 대한 실험결과	31
Fig. 3-12 Case 304에 대한 실험결과	31
Fig. 3-13 Case 305에 대한 실험결과	32

Fig. 3-14 Case 501에 대한 실험결과	33
Fig. 3-15 Case 502에 대한 실험결과	33
Fig. 3-16 Case 503에 대한 실험결과	34
Fig. 3-17 Case 504에 대한 실험결과	35
Fig. 3-18 Case 505에 대한 실험결과(acceleration)	35
Fig. 3-19 Case 506에 대한 실험결과.	36
Fig. 4-1 ANSYS 프로그램에서의 모델링 형상	44
Fig. 4-2 절점번호로 표시한 유한요소 모델링	44
Fig. 4-3 해양환경에서 랜덤하중에 대한 API 피로곡선들	45
Fig. 4-4 해상 상태 8번에 대한 연결부위에서의 응력값	45

기호 목차

a	: 구조물 축에 수직으로 작용하는 물입자의 구조물에 대한 순간상대 가속도
a_x	: 물입자의 수평 가속도
a_z	: 물입자의 수직 가속도
c	: 파형속도(celerity)
c_m	: 부가질량계수 (added mass coefficient)
C_M	: 부가관성계수
C_D	: 항력계수
C_s	: 충격하중계수
C_L	: 양력계수
D	: 라이저 직경
D_t	: 구조물 외경
e	: 표면거칠기 높이 (roughness height)
f_n	: 라이저의 고유진동수
f_D	: 구조물의 단위길이 당 작용하는 항력
f_m	: 구조물 축에 수직으로 작용하는 단위길이 당 관성력
f_L	: 구조물 축과 속도 벡터에 수직으로 작용하는 단위길이 당 양력
f_s	: 속도방향으로 작용하는 단위길이 당 충격하중
f_s	: 와동방출의 주파수 (Hz)
H	: 파고
Kc	: Keulegan-Carpenter 수
K_s	: 안정성계수
k	: 파수 (wave number)
L	: 파장
N_w	: 1년간 발생하는 빈도(회/년)

P_s	: 해당되는 파랑의 발생 확률
Re	: Reynolds 수
S_t	: Strouhal 수
T_s	: 해당되는 파랑의 주기
T	: 파주기
U	: 속도
u	: 물입자의 수평속도
U_m	: 물입자의 최대속도
u_r	: 구조물 축에 직각으로 작용하는 물입자의 파이프에 : 대한 상대속도
U_m	: 물입자의 최대속도
V_s	: 구조물 표면에 직각인 충격을 가하는 수면 물입자의 속도
V	: 라이저 축에 직각인 유속
V_r	: 감소속도 (reduced velocity)
η	: 파의 변위
ω	: 파의 주파수 (wave frequency)
v	: 물입자의 수직속도
ρ	: 해수의 밀도
ν	: 물의 동점성계수 (dynamic viscosity)
δ	: 구조재료 감쇄의 대수 감소율
ε	: 구조물의 피복재에 따른 계수
σ_R	: 응력범위 (Stress Range)
σ_{\max}	: 최대응력 (Maximum Stress)
σ_{\min}	: 최소응력 (Minimum Stress)

1. 서론

최근까지 세계 여러 연안 도시들은 오수를 주변의 연안에 방류해왔다. 이의 결과로 해양환경의 오염도는 상당히 증가하게 되어 그러한 도시와 지역의 거주자들은 심각한 환경오염의 영향을 받게 되었다. 정부와 관계기관에서는 이러한 환경오염을 방지하도록 대중으로부터 계속적인 압력을 받고 있기 때문에 정부는 연안역 오염에 대해 다각적인 대책을 강구하고 있으며, 또한 연안역 환경오염도를 줄이기 위하여 많은 프로젝트를 실시하고 있다. 연안역의 오염을 줄이기 위한 정확한 방법은 오수를 toxins, greases, 해로운 박테리아를 제거하는 적당한 과정을 거쳐서 처리하고, 그 후에 배출구를 통해 배출하는 것이다. 여기서 사용되는 배출구가 바로 해양방류관거인데, 해양방류관거란 육지에서 미리 결정된 해양의 어느 지점까지 처리된 배출수를 이송하는 관이다. 해양방류관거의 기본적인 형상은 주파이프, 라이저 그리고 디퓨저(diffuser)로서 구성되는데, Fig. 1-1과 같이 구성된다. 배출수는 디퓨저라고 하는 구조물을 통하여 해저 바닥부근에서 해양 환경으로 방출된다. 배출수가 방류되는 면적을 디퓨저 영역(diffuser zone)이라 하며, 방류관은 해저 파이프라인이 될 수도 있고 해저면 터널이 될 수도 있다. 심해저 방류관은 대개 1.2m 직경을 초과하는 관을 필요로 하며, 20m 이상의 수심에서 배출수를 처분한다.

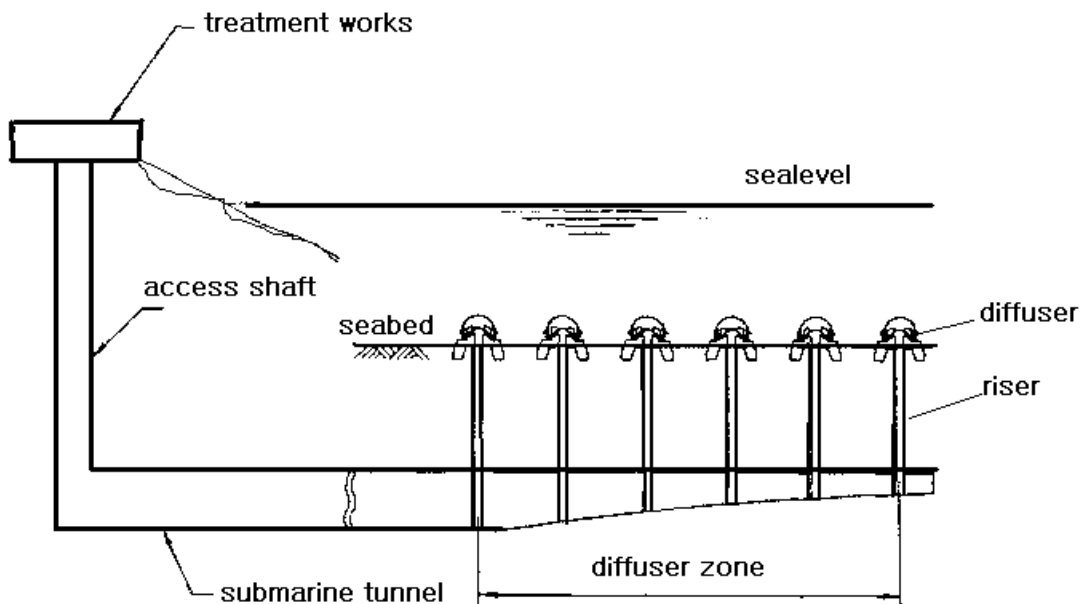


Fig. 1-1 해양방류관거의 전형적인 형상.

녹산 및 신호공단은 21세기에 물류시스템의 거점지로 자리 잡게 되는데 Fig. 1-2에서 보듯이 가덕도의 오른쪽 중간 연안지역에 오, 폐수 문제가 제기될 것으로 예상되므로 이같은 문

제를 해결하기 위해서는 해양방류관거 설치가 필요하다. 해양방류관거는 육상의 오, 폐수를 처리한 후에 해저 파이프라인을 통하여 처리된 오, 폐수를 해양으로 방류하는 장치이다. 해양방류관은 해저면 위에 얹힌 상태로 건설되는 경우가 있고, 해저면을 준설한 후에 파이프라인을 매설하여 다시 보강토로 덮는 방법이 있다. 해양방류관인 경우는 주변에 각종 어로 활동이나 선박의 앵커가 작용할 수 있기 때문에 해저면을 준설하고 매설하는 방법이 바람직하다.

해양방류관거는 열악한 해양환경에 노출되어 있으므로 손상을 입을 가능성이 아주 높으며 그로 인한 경제적, 환경적 피해는 막심하다. 따라서 해양방류관거 시스템의 기능이 손상되거나 신뢰성을 잃지 않도록 제반 요소를 잘 고려해야 한다. 해양방류관거의 사고요인에는, 파도, 해류, 토사이동, 어구나 앵커의 충격, 지진, 부식, 생물부착 등이 있다.

이러한 해양방류관거 시스템의 설계 및 운용에 있어서 고려해야 할 사항으로는 환경하중의 산정, 부설 노선의 선정, 파이프의 구조설계, 해저면 굴삭 및 부설, 파이프 연결 등이 있다. 해양방류관거 설계는 경제적이고 안전해야 하며 이를 위해서는 신뢰성 있는 자료에 근거하여 기술적인 검토와 연구가 계속 수행되어야 한다.

해양방류관거의 배출구 끝부분인 라이저 부분은 해저면 위로 노출되어 해양환경에 직접적인 영향을 받게 된다. 파랑과 조류 등에 의해서 직접적인 하중을 받게 되는 라이저 부분은 폭풍우와 같은 악천후에는 물론이고 평상시에도 주기적인 하중을 받게 되는데, 이와 같은 하중은 비록 주변의 토양에 의해서 많은 감쇄효과를 가질지라도 해저면에 매설된 주파이프와 라이저의 연결부분에 피로파괴를 발생시킬 수 있다. 연결부분에서 피로문제가 발생하여 라이저 부분이 파손되면, 방류관거는 주변토사에 의해서 막히게 되어 그 기능을 수행할 수 없게 된다. 따라서 해양방류관거의 라이저 부분에 대한 보호와 구조적인 해석이 필요하다.

이에 본 논문에서는 해양방류관거 부분 중에서 가장 핵심적이고도 손상의 위험도가 높은 라이저 부분에 대한 모형 실험과 피로해석을 수행한다. 본 논문의 목적과 그 연구 범위는 다음과 같다.

연구의 목적은 해양방류관거 설계에 따른 수리모형 실험을 통하여 실제 해양방류관거의 안전성을 판단하고 해양구조물 해석전용 상용프로그램을 이용하여 구조해석을 하는 것이다.

연구의 범위는 주 파이프 부분에 발생하는 토크(torque)를 측정하고 주 파이프 부분에 대한 라이저의 가속도를 측정하며 또한 해양환경하중에 의한 라이저와 파이프 결합부분의 피로(fatigue)문제 해석을 수행한다.

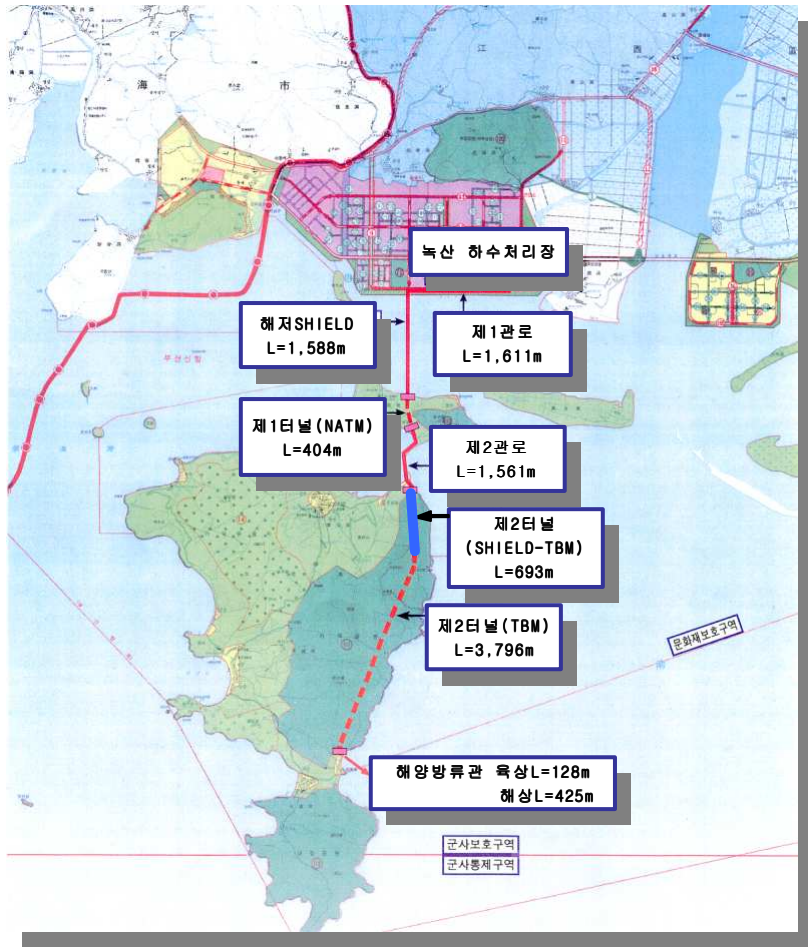


Fig. 1-2 해양방류관거의 위치도.

2. 방류관거 설계 시 고려사항

2.1 해양환경요소

해양방류관거는 열악한 환경에 노출되어 있으므로 손상을 입을 가능성이 아주 높다. 따라서 해양방류관거 시스템의 기능이 손상되거나 신뢰성을 잃지 않도록 제반 해양환경요소를 잘 고려해야 한다. 해양방류관거의 경우 고려해야 할 환경요소에는 파도, 해류, 지반안정, 지진, 수온, 부식 및 생물부착 등이 있다. 이러한 환경요소는 방류관거 설치해역에 대한 장기간의 관측에 의하여 얻어지는데 만일 대상해역의 직접적인 관측 자료가 없을 때에는 적절한 간접적인 통계자료 및 다른 유사해역에 대한 자료를 근거로 하여 합리적이고 안전한 추정을 해야 할 것이다.

여러 가지 환경요소 중에서도 파도나 해류 등은 방류관거에 직접적인 영향을 미치므로 그 하중특성에 대해서 자세히 검토되어야 한다. 해양방류관거의 설계 시에는 이러한 하중들에 의해 발생하는 응력 또는 변위가 허용범위 내에 있어야 한다. 환경하중을 규칙적이고 선형적인 것으로 가정하여 취급하기도 하지만 실제 상황은 불규칙적이고 비선형적이므로 시간영역법에 의한 컴퓨터시뮬레이션에 의해 해석하기도 하며 통계 및 확률적인 측면에서 평가할 경우도 많다. 설계 시 고려될 환경하중은 보통 50년 또는 100년 주기에서 발생할 확률이 가장 높은 최대하중이다.

해양방류관거는 파도나 해류와 같은 직접적인 해양환경 인자에 의해서도 영향을 받지만, 간접적인 요인에 의한 2차적인 영향도 중요하다. 대표적인 것 중의 하나가 지반세굴이다. 지반세굴이 발생하면 해양환경에 노출되는 라이저의 면적이 많아지게 되며, 이로 인하여 보다 더 큰 하중이 라이저에 작용하게 된다. 한편 이러한 요인이외에도 어선의 어구나 선박의 닻과 같은 기계적인 외력에 의해서도 쉽게 손상 받는다. 따라서 이러한 불안정 요인들에 대한 자세한 검토가 있어야만 해양방류관거를 안전하게 보호할 수 있는 방비책이 나올 수 있다. 해양방류관거의 방호는 가장 기본적으로는 콘크리트 피복을 적용하며, 보다 안전한 방법은 파이프라인을 해저면에 매설하는 방법을 사용한다. 보다 특수한 상황에서는 사석을 덮는 것과 같은 특수 공법 등을 적용한다.

한편 해양방류관거는 환경하중 이외에도 파이프라인 자체의 기능상 유발된 하중을 받고 있다. 기능하중은 환경하중이 작용하지 않는 이상적 조건하에서 시스템의 운용 및 취급상 필수적으로 수반되는 하중으로서 자중, 내부압력 등에 의한 하중이다.

2.1.1 해양파

본 논문에서는 가장 기본적인 선형파 이론인 Airy파이론에 대한 개략적인 내용을 소개하고 이를 바탕으로 파하중을 구하는 방법을 설명한다.

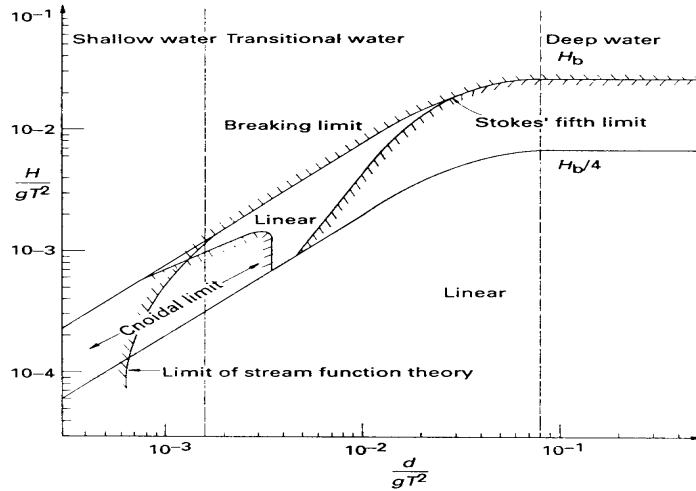


Fig. 2-1 파이론 적용의 타당성

2.1.1.1 Airy파 이론 (선형파 이론)

1845년 G.B. Airy가 파장이나 수심에 비해 파고가 매우 작다고 가정하여 유도한 파이론으로서 미소진폭파이론 (Small-Amplitude Wave Theory) 또는 선형파이론 (Linear Wave Theory) 이라고 부른다. 따라서 Airy파 이론의 유도과정에서는 표면동적 경계조건의 비선형항이 무시될 수 있어 결과식이 단순하게 표현될 수 있다.

파에 대한 결과식을 표현하기 이전에 파의 특성에 대해 먼저 설명한다. 파의 진행 방향을 x , 정수면으로부터 위 방향을 z , x 와 z 에 대해 직각인 y 의 직각좌표계(x, y, z)를 사용한다 (Fig. 2-2). 파는 일정한 수심 h 의 매끄러운 수평 바닥 위로 x 방향으로 진행한다고 가정한다. 한편 파는 일정한 파형을 유지하며 해류와 자유 표면에 방해받지 않는다고 가정한다. 해수는 비압축성이고 비점성이며 그리고 유동은 비회전성으로 가정한다. Fig. 2-2는 이러한 가정에 따라 만들어진 파의 일반적 형태를 나타낸다. 여기서 파고 H 는 파골(trough)부터 파봉(crest)까지의 수직 거리이며, 파장 L 은 완전한 두 파봉(crest) 사이의 거리이다. 파주기 T 는 특정한 점을 한 파장이 통과하는데 소요되는 시간이고, 파형속도(celerity) c 는 파형의 진행속도이며, 파의 변위 η 는 임의의 시간과 위치에 있어서 해수면으로부터 정수면까지의 수직방향 변위이다.

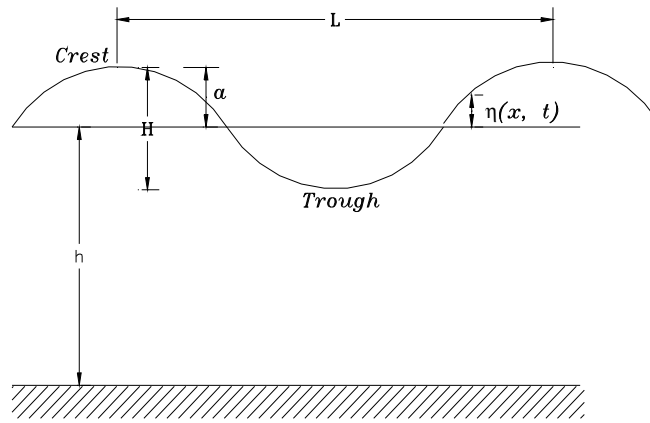


Fig. 2-2 파의 특성 정의.

한편 파의 정의에 관련된 변수들을 정리하면 다음과 같다.

$$k = \frac{2\pi}{L} : \text{파수 (wave number)}$$

$$c = \frac{\omega}{k} : \text{파형속도 (wave celerity)}$$

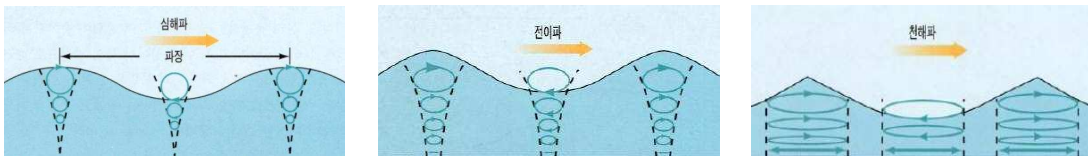
$$\omega = \frac{2\pi}{T} : \text{파의 주파수 (wave frequency)}$$

Table 2-1 천해파와 심해파의 특성치 요약

	Shallow Water	Deep Water
1. 수면 변위	$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta$	$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta$
2. 파형 속도	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$c = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. 물입자 속도		
(a) 수평방향	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \Theta$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{gk} e^{kz} \cos \Theta$
(b) 수직방향	$v = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} k(d+z) \sin \Theta$	$v = \frac{H}{2} \sqrt{gk} e^{kz} \sin \Theta$
4. 물입자 가속도		
(a) 수평방향	$a_x = \frac{H}{2} gk \sin \Theta$	$a_x = \frac{H}{2} gk e^{kz} \sin \Theta$
(b) 수직방향	$a_z = \frac{H}{2} gk^2(d+z) \cos \Theta$	$a_z = -\frac{H}{2} gk e^{kz} \cos \Theta$

여기서,

$$\Theta = kx - \omega t$$



$$kh < \frac{\pi}{10}$$

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$$

$$\frac{\pi}{10} < kh < \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$$

$$kh > \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$$

Fig. 2-3 심해파의 상대수심에 따른 파형 비교.

2.1.1.2 파하중 (Wave Load)

해양파가 발생하면 앞에서 설명한 바와 같이 물입자는 운동을 하게 되고 속도 및 가속도를 갖는다. 이와 같은 물입자의 속도 및 가속도에 의해서 해수 중에 놓인 구조물에 파랑하중이 발생한다. 파랑하중은 관성력, 항력, 그리고 양력으로 나누어진다. 관성력과 항력은 물입자의 흐름방향과 같은 방향의 힘이며 양력 (lift force)은 물입자 흐름방향에 수직으로 작용하는 힘이다. 관성력과 항력은 널리 알려진 모리슨 방정식을 근거로 하여 계산된다.

(A) 관성력

구조물의 단위길이 당 작용하는 관성력은 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$f_m = \rho \frac{\pi D_t^2}{4} a + \rho C_m \frac{\pi D_t^2}{4} a \quad (2-1)$$

위에서 C_m 은 다음의 여러 조건에 좌우된다.

- Reynolds 수 ($Re = U_m D_t / \nu$)
- Keulegan-Carpenter 수 ($Kc = U_m T / D_t$)
- 파이프의 표면거칠기 (e / D_t)

원형 실린더에 대한 부가관성계수 C_M 의 값이 Re 수와 Kc 수의 함수로써 Fig. 2-4에 주어 있다

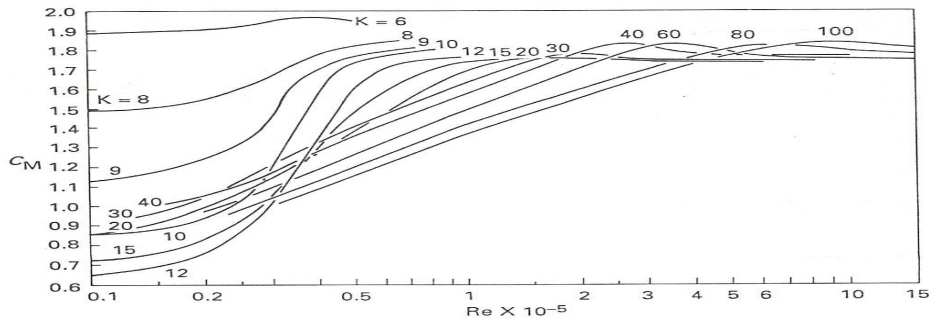


Fig. 2-4 원형 실린더에 대한 부가관성계수.

(B) 항 력

구조물의 단위길이 당 작용하는 항력은 다음 식으로 계산된다.

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D u_r |u_r| D_t \quad (2-2)$$

일반적으로 항력계수 C_D 도 C_m 과 마찬가지로 Reynolds수, Keulegan-Carpenter수, 파이프 표면거칠기 대한 함수이다. 파이프의 항력계수 C_D 가 Reynolds 수와 Keulegan-Carpenter 수의 함수로 Fig. 2-5 에 제시되었다. 한편 정상흐름에 대한 항력계수는 Kc 수가 무한대인 경우의 값과 동일하며 파도와 해류를 동시에 고려할 경우에는 해류에 의한 Kc 수의 증가가 고려되어야 한다.

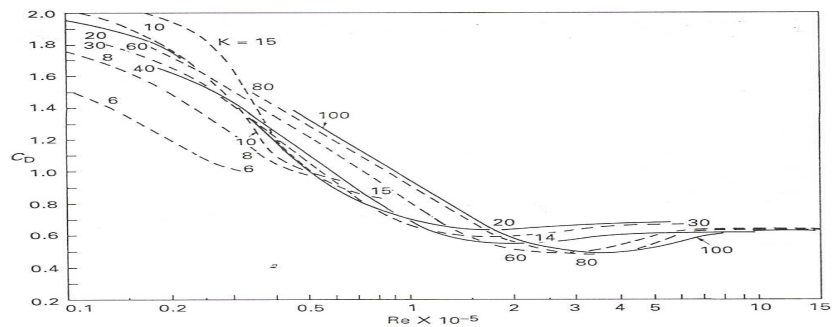


Fig. 2-5 원형 실린더에 대한 항력계수

(C) 양 력

양력은 크기가 작아 중요하게 다루어지지 않는으나 구조물을 진동시키므로 구조물의 동적 해석 시 중요한 역할을 한다. 즉 라이저에 반복하중을 가하여 피로파괴를 유발할 수 있다. 양력은 다음식에 의하여 계산된다.

$$f_L = \frac{1}{2} \rho C_L D_t U_m^2 \quad (2-3)$$

양력계수인 C_L 값도 관성계수나 항력계수와 마찬가지로 Reynolds수, Keulegan-Carpenter수, 파이프의 표면거칠기의 함수이다. 파이프의 양력계수인 C_L 가 Re

수와 K_c 수의 함수로 Fig. 2-7에 제시되었다. Fig. 2-7은 파이프의 표면거칠기에 관계없이 사용할 수 있다. 특히 양력은 해류에 의한 하중해석에서 중요하게 다루어지므로 다음절 해류 부분에서 언급할 와류유기진동 (vortex-induced vibration) 에 연관하여 자세히 설명될 것이다.

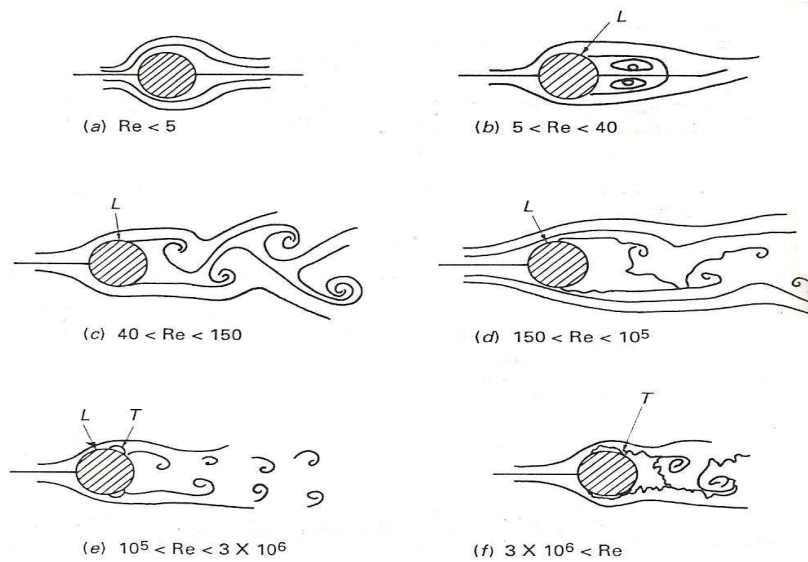


Fig. 2-6 Reynold 수에 따른 원형 실린더 주위에서의 흐름.

관성력과 항력 그리고 양력이 동시에 작용하는 경우 이들의 결합에 의한 영향을 구하기 위해서는 이들 사이의 위상차를 고려하여 합성해야 한다.

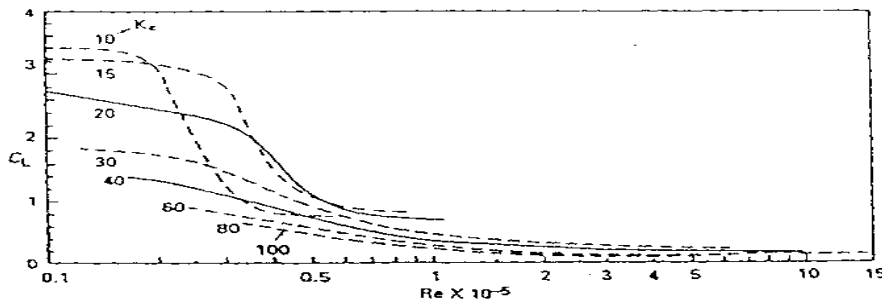


Fig. 2-7 원형 실린더에 대한 양력계수.

(D) 파도에 의한 충격하중 (wave slamming)

해양방류관거는 파도에 의한 충격하중을 받을 수 있으므로 이에 의한 방류관거의 동적거동을 고려해야 한다. 파도에 의해 파이프의 단위길이 당 작용하는 충격하중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f_s = \frac{1}{2} \rho C_s V_s^2 D \quad (2-4)$$

충격하중계수 C_s 는 이론적 또는 실험적 방법을 사용하여 결정할 수 있으며 매끄러운 표면의 원형 실린더에 대해서는 C_s 값이 3.0 이상이 된다. 충격하중에 대한 반응을 계산할 경우 동적증폭 (dynamic amplification) 을 고려해야 한다. 양단고정인 구조물 구간에 대해서는 끝단의 모멘트 및 경간 중앙의 모멘트에 동적증폭계수 1.5 와 2.0 을 각각 적용해 준다.

2.1.2 해 류

와동방출에 의하여 해류와 같은 방향으로 발생하는 진동은 $1.0 < V_r < 3.5$, $K_s < 1.8$ 일 때 일어날 수 있으며, 유속에 따라서 와동방출은 파이프를 중심으로 하여 대칭 또는 교대로 일어날 수 있다. $V_r < 2.2$ 일 경우, 와동방출은 대칭이고, $V_r > 2.2$ 인 경우 와동방출은 비대칭인데 초기운동을 일으키기에 필요한 유속은 Fig. 2-8로부터 결정할 수 있다.

한편 해류 흐름방향의 직각 방향으로 발생하는 진동은 $K_s < 16$ 일 때와 Fig. 2-9으로부터 결정되는 V_r 의 값에 따라서 일어날 수 있다.

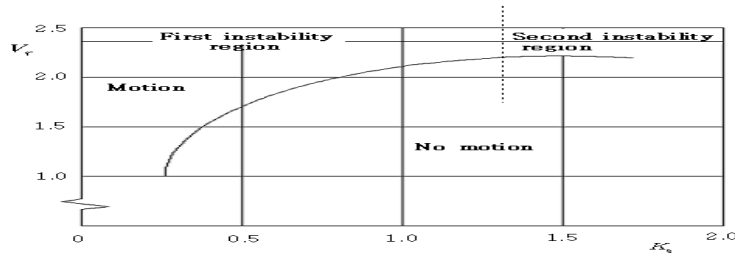


Fig. 2-8 해류의 흐름방향으로 파이프 진동이 시작되는 유속

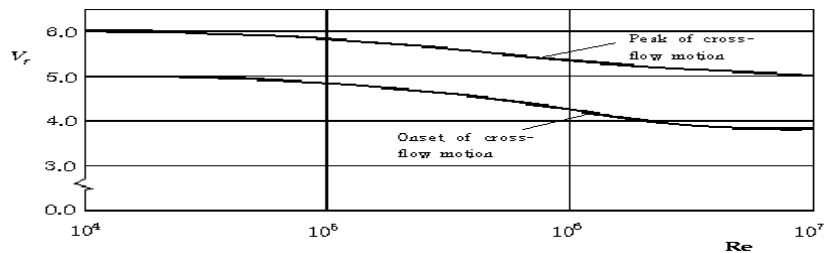


Fig. 2-9 해류 흐름방향의 직각방향으로 파이프가 진동을 시작되는 유속

2.1.3 선박계류 및 어로활동

설치된 해양방류관거는 닻이나 어로활동에 의해서 직접적인 충격하중을 받게 된다. 심해에서는 계류선의 길이가 제한되므로 닻에 의한 손상이 거의 없는 것으로 간주할 수 있으나, 천해에서는 닻이나 漁具 (fishing board) 에 의한 파손위험이 상당히 높다. 어구가 파이프라인 위를 통과하는 현상이 Fig. 2-10에 나타나 있다.

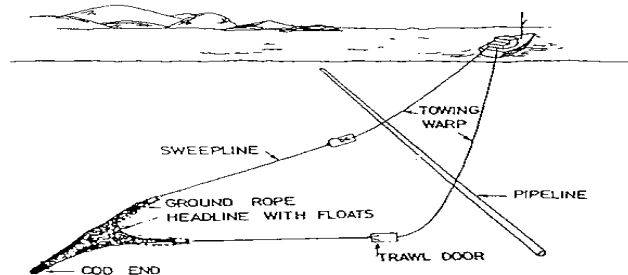


Fig. 2-10 해저 파이프라인을 횡단하는 어구

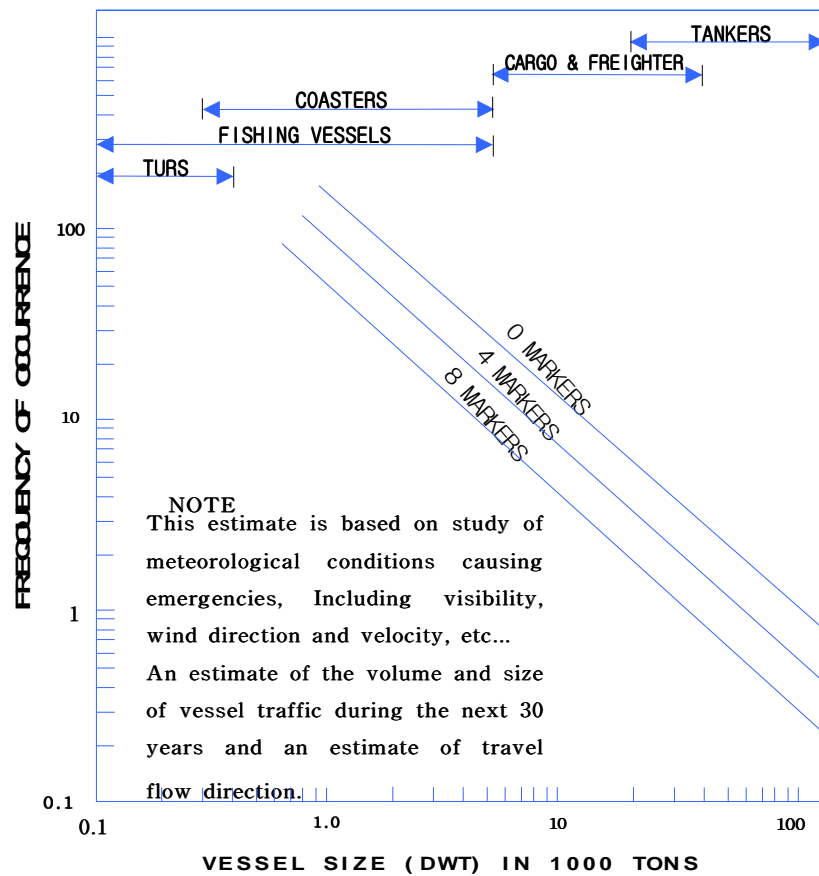


Fig. 2-11 파이프라인 매설지역을 통과한 선박의 통과횟수에 대한 예

2.2 가덕도 주변의 해양환경

가덕도 동쪽에 건설되어진 해양방류관거를 해석하기 위하여 주변해양환경을 조사한 자료들이다(Fig. 1-2 위치도). 가덕도는 부산시 강서구 천가동에 속하는 섬으로서 남해안으로 유입하는 낙동강 하구에 인접해 있다. 동경 128°50' 북위 35°02' 에 위치하며 면적은 20.7km²이다. 해안선은 비교적 단조로우며, 섬의 동안 남안 서안은 수심이 매우 깊으나 북안은 얕은 갯벌로 되어 있다. 실험과 강도계산에서 고려되어야 할 가덕도를 중심으로 한 주변 해양 환경에 대해서 살펴본다.

2.2.1 수심

해양방류관거는 가덕도의 동측에 설치 될 예정이다. 방류관거의 끝 부분인 라이저가 위치하는 부분은 수심이 약 12m 정도이다. 육지에서 약간 멀어지면서 수심이 약 8~10m를 유지하고 있으며, 해양방류관거가 매설된 대부분의 위치에서는 8~12m의 수심이다.

2.2.2 조위

가덕도 주변 해역의 조위는 녹산하수처리장 건설 기본 및 실시설계 보고서(1995)에 근거하면 아래의 Table. 2-2와 같다.

Table. 2-2 가덕도 일원의 조위

약최고만조위 (H.H.W)	대조평균만조위 (H.W.O.S.T)	소조평균만조위 (H.W.O.N.T)	평균해면 (M.S.L)	소조평균간조위 (L.W.O.N.T)	대조평균간조위 (L.W.O.S.T)	약최저간조위 (L.L.W)
177.4	165.6	116.8	88.7	60.6	11.8	(±)0.0

2.2.3 조류

교통부 수로국의 가덕도 주변해역의 창·낙조시 최강유속은 0.1~1.1m/s로 나타나며, 가덕도 주변해역은 평균대조시 최강유속이 창조시 WNW유향으로 0.26~0.66m/s, 낙조시 SE유향으로 0.2~0.74m/s로 나타난다[동아대 보고서,1999].

2.2.4 파랑

가덕도를 중심으로 동측해역은 남동쪽으로 외해에 직접적으로 노출되어 파랑의 영향을 받는 반면, 서측해역과 북측해역은 주변이 섬으로 둘러싸여 파랑의 영향이 적다. 본 논문에서는 남해안에서 출현하는 유의파고를 이용하여 실험을 수행하였다. Table. 2-3은 남해안에서의 유의파고의 출현률을 나타내고 있다. 아래서 알 수 있듯이 남해안에서는 유의파고가 0.4 ~ 0.9m가 지배적이며, 가장 큰 유의파고는 4.1m로서 악천후 시에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Table. 2-3 동남해안에서의 유의파고 출현률

유의파고(m)	평균주기(sec)	출현률(%)
0.4	2.43	56.5
0.9	3.65	34.9
1.4	4.55	5.5
1.9	5.30	1.6
2.4	5.96	0.6
2.9	6.5	0.7
3.4	7.09	0.1
3.9	-	-
4.1	-	0.1

2.3 해양방류관거의 구성

해양방류관거는 연안역에서 해저 터널 또는 해저배관 시작점까지 입수 샤프트(access shaft)와 입수 샤프트에서 심해 디퓨저 영역까지 해저 터널 또는 해저 배관, 마지막으로 디퓨저 영역 성분들을 포함한다(Fig. 1-1 참조).

디퓨저 영역은 방류관거의 가장 해양쪽에 있는 부분이고 많은 라이저로 구성되어 있다. 방류에 요구되어지는 라이저의 개수는 방류관 주변의 흐름장, 관계기관에 의해 요구되는 방류관의 초기 희석도, 육상으로부터의 거리, 어로활동 영역에 의해 지배된다. 라이저는 해저파이프를 해저면 위 디퓨저까지 연결하는 연직의 관이다. 디퓨저 구조물은 다중관인데, 이 관은 방류관의 수리학적 요구조건에 따라 크기와 형상이 변화하게 된다. 디퓨저의 기능은 처리된 배출

수가 초기 희석 조건을 만족하도록 해수와 충분히 혼합되도록 하는 것이다. 라이저는 구조적 안정성을 유지하기 위하여 일정한 간격으로 떨어져서 위치하게 된다.

2.4 디퓨저영역 위치선정

디퓨저와 라이저 구조물의 적당한 위치를 결정하는 과정은 현장조사와 개념적인 설계에 의해서 이루어지는데, 이 작업은 최종 위치 선정 이전에 수행되어야 한다. 디퓨저 영역의 선정은 현장에 관련된 해양학적 자료에 기초한 플룸거동의 수치모델링과 연계해서 방류관 시스템의 수리학적 평과에 기초해야 한다. 디퓨저 영역의 일반적 위치가 결정되고 나면, 특정한 디퓨저 현장 선정 작업을 수행한다. 해저면에 디퓨저를 설치하기에 적당한 장소는 상대적으로 평평하며, 해저면에 있는 물체로부터 방해받지 않아야 한다. 또한 지배적인 해저면 조류방향에 대해 직각되어야 한다. 만약 고려되어지는 디퓨저 면적이 침전물 지역에 위치한다면, 선정된 디퓨저 위치는 침전물의 이동에 대해 안전한 곳이어야 한다.

그러므로 적당한 장소의 결정은 초기 설계 과정의 일부로서 상당한 양의 현장자료에 대한 수집과 평가가 필요하다. 방류관 디퓨저와 라이저의 설계와 건설 계획에 대해 요구되는 현장 작업은 다음과 같다. 해수면과 해저면에 대한 조류(current), 수심에 따른 온도와 염분, 파랑, 바람, 해저 퇴적물과 해저 암반층의 형성에 관한 지리학적, 해저면의 수심, 제안된 디퓨저 영역에 대한 사이드스캔 소나(side scan sonar), 다이버나 ROV에 의한 디퓨저 영역에 대한 시계 측정과 암반층에 대한 성질과 상태 결정하기 위한 압력시험이 필요하다.

이와 같은 현장조사로부터 얻은 자료는 라이저와 디퓨저의 위치를 결정하기 위한 전반적인 적합성을 평가하기 위해서 사용된다. 특히 퇴적물 깊이와 특성, 암반의 성질, 해저면 퇴적물의 안정성, 디퓨저 구조물 주변의 세굴 가능성의 요소에는 상당한 주의를 요한다.

2.5 설계 기준

방류관 라이저와 디퓨저의 설계에 있어서 주된 요구조건은 내, 외부 수리학적 기능(performance), 작동수명(operational life), 구조적 통합성(structural integrity), 안전성(reliability), 유지성(maintainability)등 이다.

라이저, 디퓨저, 해저면 보호 시스템(seabed protection system)의 설계에서 주된 기준은 우선 설계수명(design life)은 대구경의 방류관은 100년의 설계 수명을, 설계수심(design water depth)은 최대 조석(tide)과 폭풍우 surge를 포함한 초기와 장기간 관측된 수심을 선

택하고 최대 해수면과 해저면 조류와 설계 파고와 주기는 전형적으로 100년 재현주기를 취한다. 그리고 해수와 배출수의 밀도, 하중의 적용 조건에 따른 안전성 설계계수, 라이저나 디퓨저의 부식에 대한 허용, 앵커나 앵커체인, 어로활동 장비와 같은 외부충격 하중에 대한 고려와 마지막으로 내진 설계를 해야 한다.

2.5.1 라이저에 대한 설계

연직의 라이저는 해저면 주 파이프에서 해저면 위 디퓨저까지 연결된 오수 처분을 위한 관으로서 기능을 한다. 이 라이저는 장기적으로(일반적으로 100년) 외부 해수의 정수압과 하중에 견딜 수 있도록 설계된다.

2.5.2 케이싱 시스템(casing system)에 대한 설계

케이싱은 외부 하중으로부터 라이저와 디퓨저를 구조적으로 보호하는 장치이다. 이러한 외부 하중은 선박의 앵커, 앵커체인 감김(snag), 지진활동, 어구장비 등으로부터 발생한다. 케이싱의 설계는 현장에 따라 특정한 일이고, 실제현장과 국부적 환경에 따라 주의를 요한다. 케이싱의 길이와 크기는 해저면 토양의 성질과 강도에 따라서 디퓨저 설치현장에 대하여 상당히 달라진다.

라이저의 설계에 대한 극한 하중이 발생하는 경우는 큰 앵커나 앵커체인에 의한 접촉이나 감김현상에 의해서 발생한다. 디퓨저 주위를 앵커 체인이 둘러싸거나 앵커 감김에 의해 발생하는 전형적인 하중은 약 200 - 300 ton 정도의 크기이다. 케이싱 구조물은 부식방지를 위해서 에폭시(epoxy)나 폴리우레탄(polyurethane) 코팅을 사용하여 100년 기대수명으로 설계된다.

2.5.3 디퓨저 설계

디퓨저는 해저면 위에 노출된 수리학적 시스템으로서, 그 기능은 배출수를 바다에 효과적으로 배출해서 희석시키는 것이다. 디퓨저 내부 직경은 배출수의 배출을 최대화 할 수 있는 흐름속도가 되도록 결정한다. 디퓨저의 형상과 내부 윤곽을 결정하기 위해 사용되어지는 주된 설계 기준은 다음과 같다.

첫째, 디퓨저는 설계 수명동안 설계 수리학적 기능을 유지하기 위하여 내부적으로 매끄러

위야 한다. 둘째 내부는 설계 수명동안 기능을 유지하기 위해서 부식과 침식에 대하여 저항성이 뛰어나야 한다. 셋째 구조물은 외부 정수압과 동수압에 저항하기 위하여 충분한 강성과 강도를 가져야 한다. 넷째 구조물은 기능 수행 중 외부 하중에 견디기 위하여 충분히 강해야 한다.

디퓨저는 부가적인 보호시스템에 의해서 보호되거나 디퓨저 자체만으로 형성된다. 보호장비는 무거운 강철 케이슨형 구조물 또는 강한 철근 콘크리트 구조물(combined with deformable energy absorbing shedd)의 형태이다(Fig. 2-12 참조). 돔형 구조물의 충격에 대한 해석은 상당히 복잡하고 일반적으로 그러한 구조물의 원형 실험을 통해서 그 성능을 평가한다.

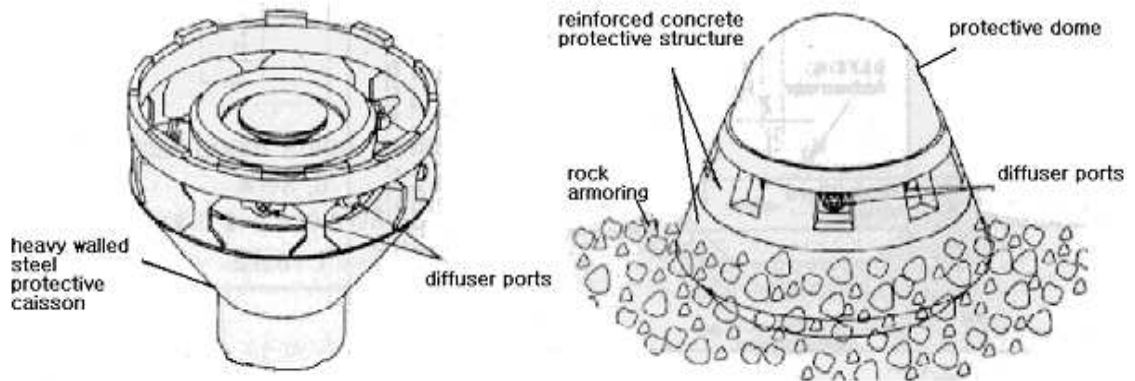


Fig. 2-12 해저면 디퓨저의 형상

2.5.4 디퓨저와 라이저의 재료

일반적으로 해양구조물은 30 - 50년의 설계수명으로 설계한다. 구조물 재료는 화학적으로 충분한 저항성을 가져야 한다. 이와 더불어 디퓨저 구조물과 보조적인 성분들은 앵커, 어구 등에 의한 충격과 침식에 저항해야 한다. 라이저와 디퓨저에 적당한 재료가 Table. 2-4에 나와 있다.

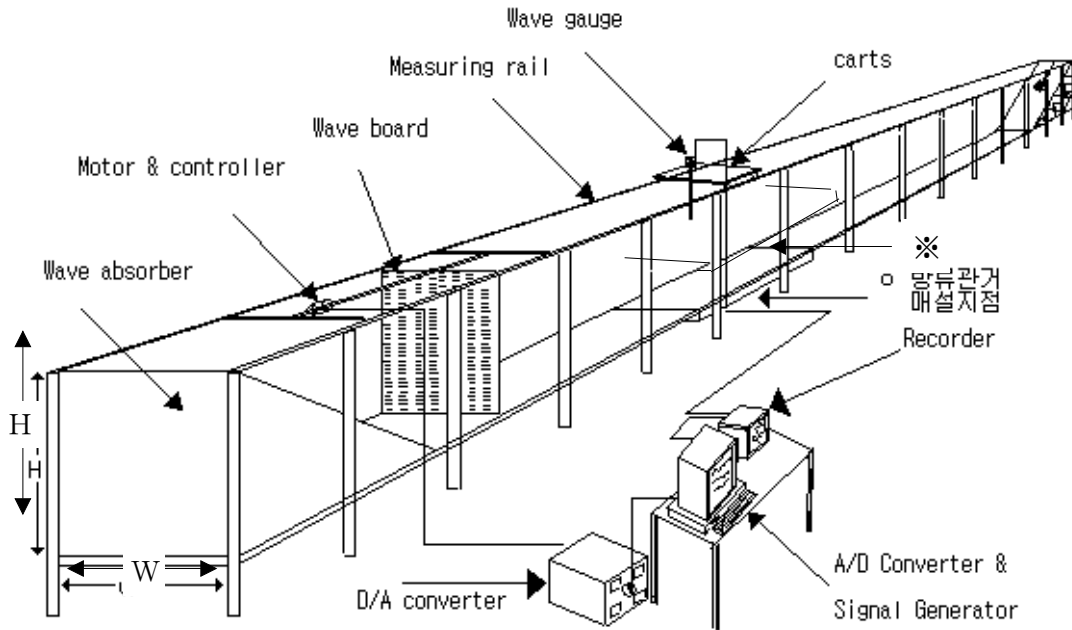
Table. 2-4 각 성분에 대한 재료

구성 성분	재료
Riser	· Filament wound fiberglass, Coated and lined steel, Reinforced concrete, Stainless steel
Diffuser Manifold	· Fiberglass
Diffuser Encasement	· Reinforced concrete
Protective Armor	· Cross-linked HDPE, Fiberglass, Reinforced concrete, Steel

3. 수리모형 실험

3.1 실험장비와 실험방법

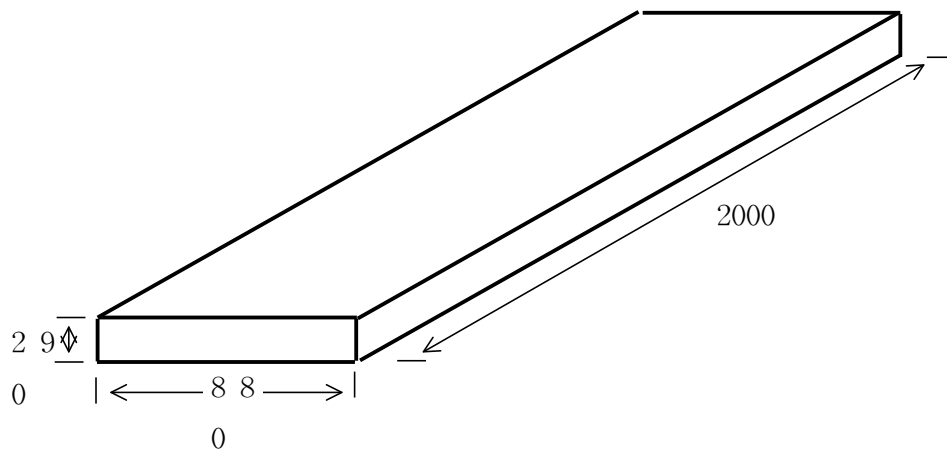
3.1.1 실험장비



(a) 조파수조의 전체 형상도



(b) 실제 모형실험을 위한 조파수조의 전체 형상



(c) 조파수조 매설부분의 형상(mm)



(d) 방류관거 매설 위한 조파수조의 굴삭부분

Fig. 3-1 조파수조의 형상

Fig. 3-1의 (a)는 본 연구실(한국해양대학교 해양과학기술대학 N-139호)에서 보유하고 있는 조파수조의 전반적인 형상을 보여주며, (c)는 방류관거 모형이 묻히게 되는 부분의 형상을 보여준다. 조파수조는 크기 $1 \times 1 \times 25$ (m) (W×H×L) 크기의 피스톤형 2차원 수조로 규칙파 및 불규칙파 생성 가능하고 수조의 중간부분에 수조바닥 아래 약 $0.88 \times 0.29 \times 4$ (m)(W×H×L)의 공간을 확보 하여 해저파이프를 매설하는 실험이나 계류장치 등을 실험 가능하다. 그리고 조류 발생장치 이용하여 정방향, 역방향 조류발생 가능하고 마지막으로 조류와 파랑을 동시에 재현 가능하다.

3.1.2 실험방법

본 논문에서는 크게 두 가지 항목에 대하여 실험을 수행한다.

첫째 토크 게이지를 사용하여 해양환경에 의해서 주 파이프와 라이저의 연결부분에 얼마나 큰 토크가 발생하는지를 확인한다. 라이저 부분은 일부분이 해양환경에 직접적으로 노출되기 때문에 하중을 직접적으로 받게 되며 또한 이 힘이 주 파이프와 연결된 부분으로 전달된다. 토크의 크기가 크지 않을지라도 파랑에 의해서 힘을 받으면 라이저가 운동을 하여 결합부분에 피로문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 이 부분에 대한 실험이 필요하다.

둘째 가속도계를 사용하여 해양환경에 의한 라이저의 진동 정도를 확인한다. 파랑과 조류가 작용하면 라이저는 흐름 방향으로 진동하기도 하지만, 와동방출(vortex shedding)에 의해서 흐름의 직각방향으로 진동하기도 한다. 흐름방향 진동은 파랑의 주기에 따라서 운동하게 되어서 진동수가 상당히 작은 값이 되지만, 흐름의 직각방향 운동성분은 와동방출의 진동수에 따라서 운동하게 된다. 와동방출의 진동은 진폭은 상당히 작지만, 진동수는 흐름방향 성분에 비해 크게 나타날 수 있기 때문에 이 성분도 고려할 필요가 있다.

이상의 실험항목에 대한 구조물의 영향을 살펴보기 위하여 다양한 파랑과 조류조건에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 3-2는 전체 방류관거의 종단면도를 나타내고 있다. 본 논문에서는 방류관거의 끝부분인 라이저의 한 부분에 대해서만 실험을 하였다. 디퓨저 부분에 대한 상세도(원형)는 Fig. 3-3에서 보여주고 있다. 방류관거 보호는 암반층의 보호단면에 대하여 실험을 수행하였다.

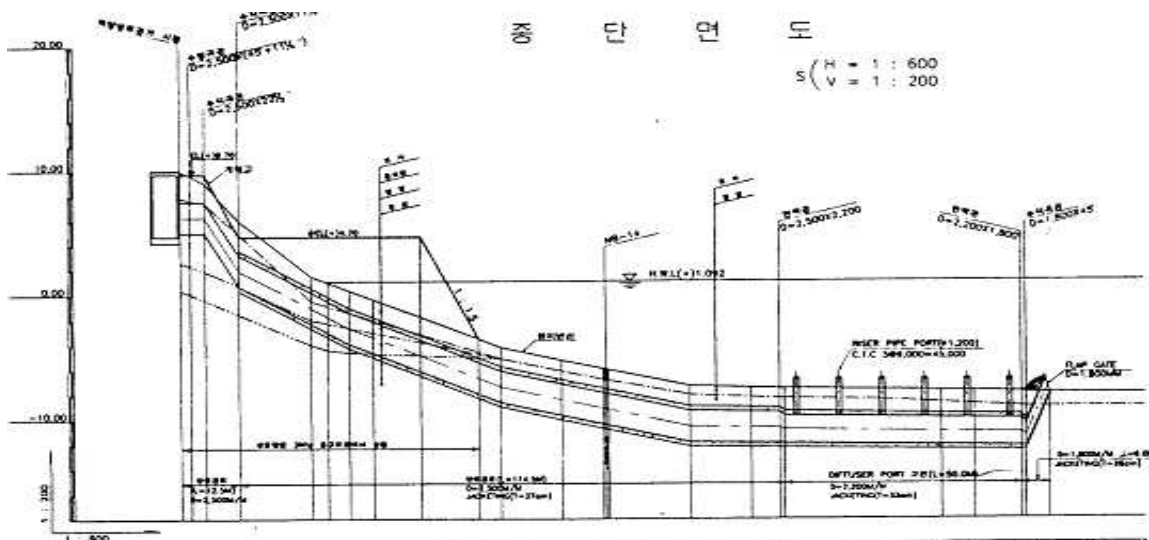


Fig. 3-2 해양방류관거의 종단면도.

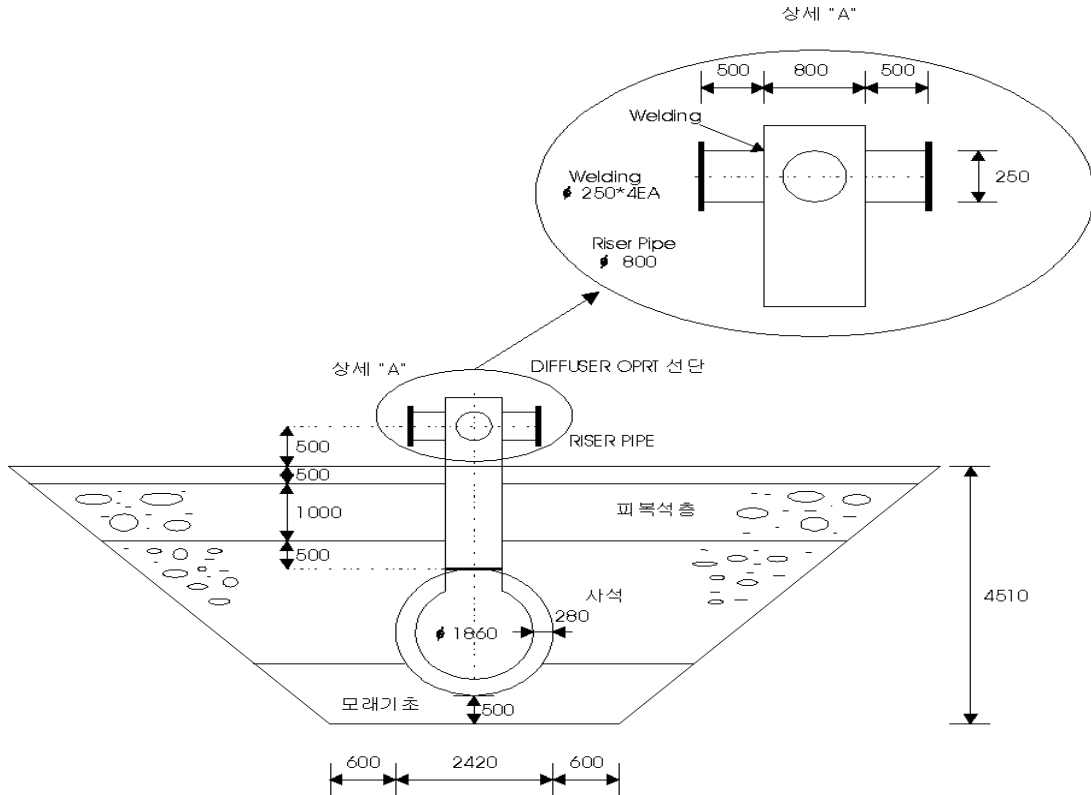


Fig. 3-3 해양방류관거의 라이저 부분 단면도(원형).

3.2 모형축적과 모형제작

3.2.1 모형축적

모형 실험이 실제 모형의 조건을 그대로 재현하기 위해서는 각종 비례축소 규칙 (scaling law) 에 따라야 한다. 비례축소 규칙은 각종 무차원 변수에 의해서 수행될 수 있는데, 실제 구조물과 모형 모형과의 무차원 변수를 조절함에 의해서 모형실험의 결과를 실제 구조물에 적용시킬 수 있는 것이다.

비례축소 규칙의 가장 기본은 기하학적 상사이다. 기하학적 조건 외에 실험의 중요성에 따라서 다양한 상사 법칙이 적용된다. 본 논문에서는 자유표면이 존재하고 점성력이 중요한 성분이 될 수 있기 때문에, 프루드 수와 레이놀즈 수에 대한 상사 법칙을 적용시킨다.

3.2.2 모형제작

1/15의 기하학적 상사법칙을 적용시켜서 해양방류관거 실험모델의 제원은 Table. 3-1과 Fig. 3-4와 같다.

Table. 3-1 모형방류관거 재원

구분	길이(mm)
주 파이프의 직경	110
주 파이프의 길이	880
라이저의 직경	53
라이저의 전체 높이	225
라이저의 매설깊이	158
디퓨저의 직경	17
디퓨저의 길이	33
모형실험의 수심	800

Fig. 3-5는 모형방류관거와 토크 게이지의 상세 도면을 나타낸다. Fig. 3-6은 방류관거 보호단면도 실험모형에 대한 형상과 제원을 나타내며, Fig. 3-7은 방류관거 시스템의 모형을 조파수조에 설치했을 때의 형상과 그 제원을 나타내고 있다.

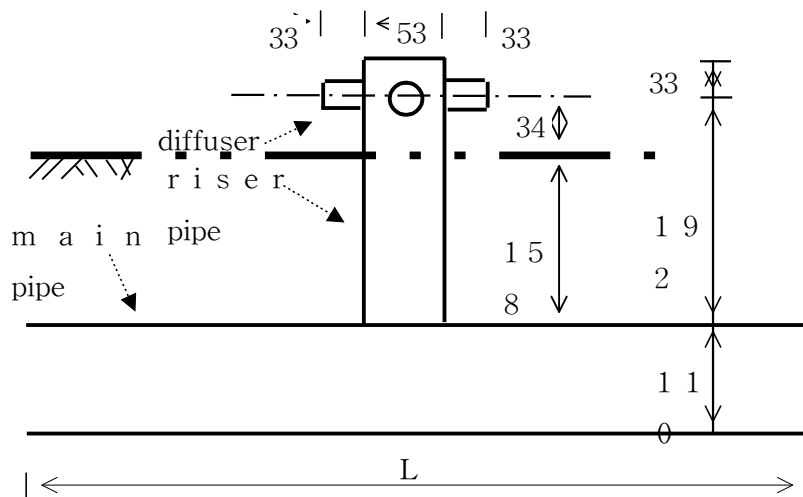


Fig. 3-4 해양방류관거 시스템의 실험모델(단위 : mm).

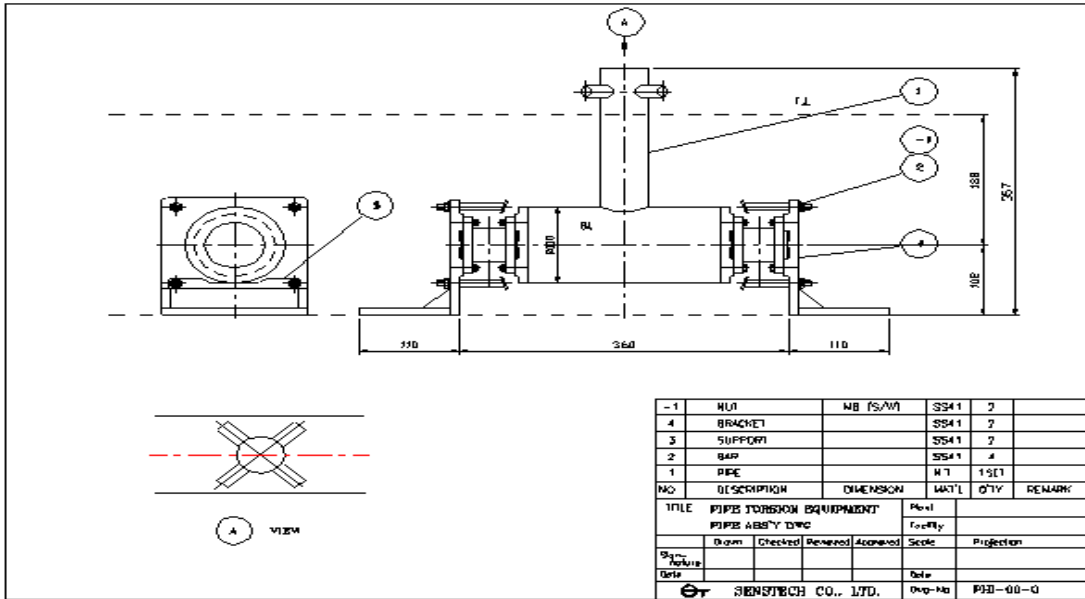


Fig. 3-5 모형 방류관거의 상세 도면.

Table. 3-1을 사용하여 모형실험에서 사용될 사석과 피복석의 중량은 Table. 3-2와 같다.

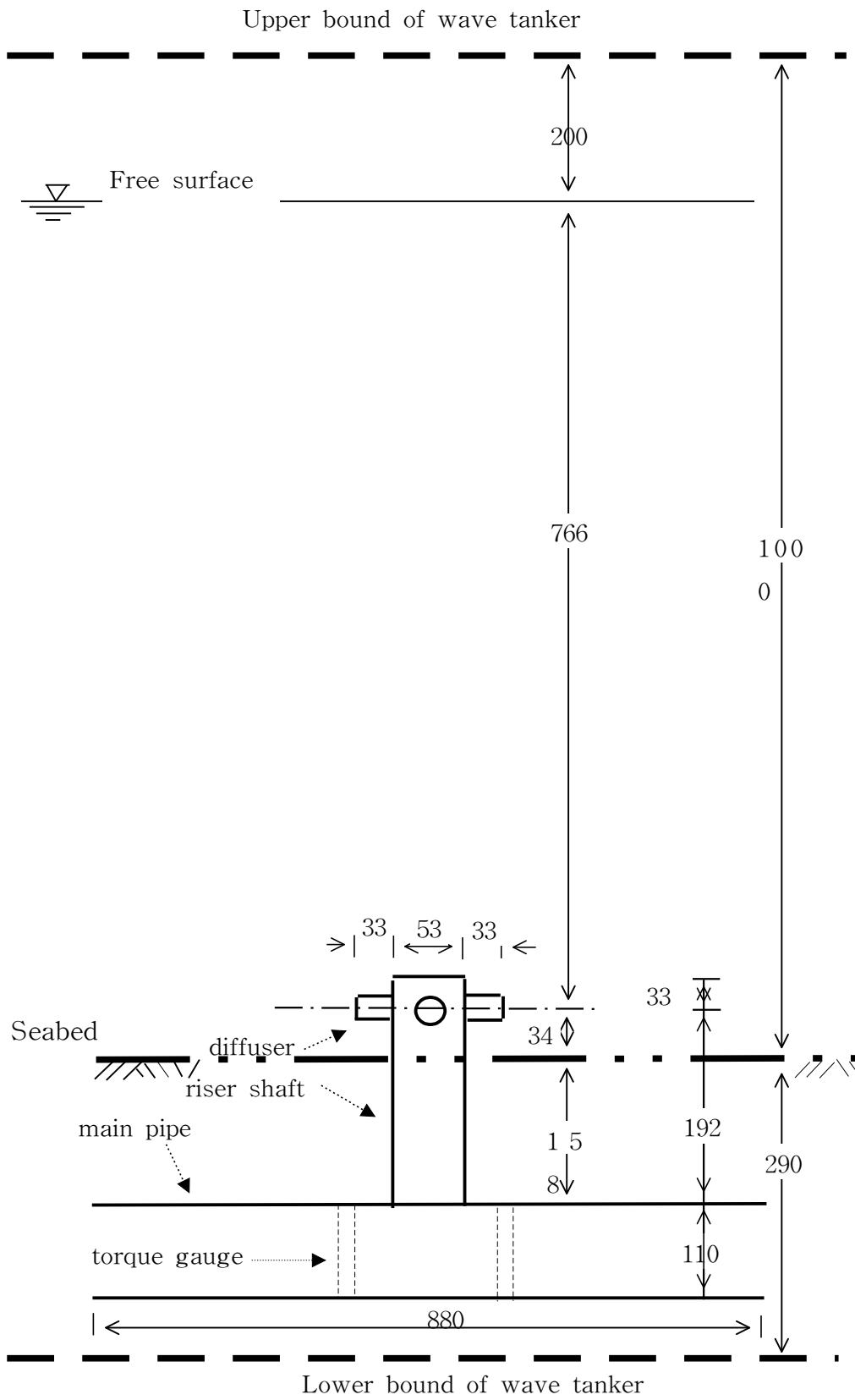


Fig. 3-6 방류관거 매설지점의 단면도(모형).

3.3 실험의 종류

본 논문에서는 해양환경조건에 대한 해양방류관거의 상태를 알아보기 위하여 다양한 파랑과 조류 조건을 이용하여 실험을 수행하였다.

실험에서 사용된 파랑의 파고와 주기, 조류의 속도, 그리고 수심은 Table. 3-2과 같다. 이 값들은 3장에서 조사된 가덕도 주변해양환경을 근거로 하여 조합되었다.

Table. 3-2 실험에서 사용된 파랑과 조류 (1)

Case No	주기(sec)		파고(cm)		조류(cm/s)		수심(cm)	
	모형	원형	모형	원형	모형	원형	모형	원형
301	2	7.75	15.2	228	21	81	80	1200
302	2	7.75	11.44	172	21	81	80	1200
303	1.33	5.15	17.89	268	21	81	80	1200
304	1.33	5.15	10.07	151	21	81	80	1200
305	1.25	4.84	13.64	205	21	81	80	1200

Table. 3-2에서 사용된 자료 외에 해저면에 보다 더 큰 영향을 주기 위하여 수심을 낮추어서 실험을 수행하였다. Table. 3-3은 이에 대한 자료를 나타내는데, 이 실험에서는 1/30의 축소효과를 나타낼 수 있다.

Table. 3-3 실험에서 사용된 파랑과 조류 (2)

Case No	주기(sec)		파고(cm)		조류(cm/s)		수심(cm)	
	모형	원형	모형	원형	모형	원형	모형	원형
501	2.0	10.9	13.5	405	0.0	0.0	40	1200
502	1.33	7.3	13.0	390	0.0	0.0	40	1200
503	1.25	6.8	12.0	360	0.0	0.0	40	1200
504	0.0	0.0	0.0	0.0	19	104	40	1200
505	2.0	10.9	10.5	315	19	104	40	1200
506	1.33	7.3	10.0	300	19	104	40	1200

Table. 3-3에서 case 501~503에서는 파랑만 작용하는 경우이고, case 504는 조류만 작

용하는 경우인데, 이것은 지반세굴에 중요한 영향을 미치는 매개변수를 알아보기 위해서이다.

3.4 실험에 대한 결과 및 고찰

실험결과는 크게 3가지로 나누어진다. 첫째는 라이저의 운동에 의해서 매설된 주 파이프 부분에 작용하는 토크를 측정하였고, 둘째는 라이저의 끝부분에 가속도계를 설치하여서 라이저에 작용하는 가속도를 측정하였다. 가속도는 파랑과 조류의 흐름방향과 와동방출에 의해서 발생하는 흐름의 직각방향에 대하여 각각 측정하였다. 마지막으로 파랑과 조류에 대한 라이저 주변에서 지반 변동 상황을 관찰하였다.

Fig. 3-7은 토크 측정기와 가속도계의 측정값을 나타내는 데이터 측정기를 보여준다.

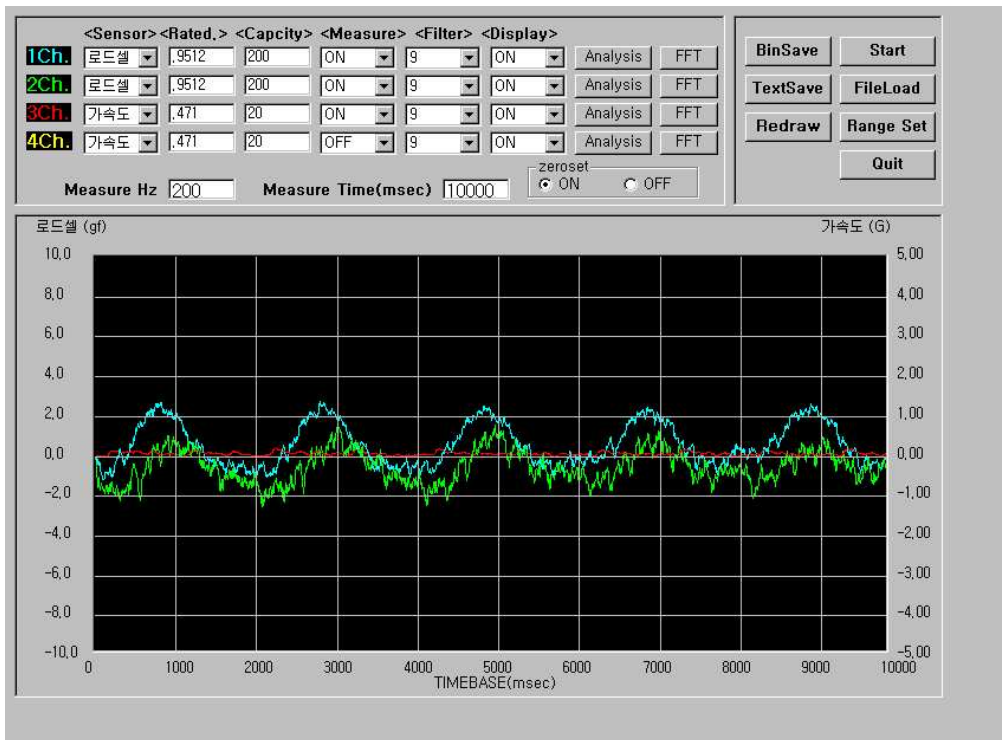
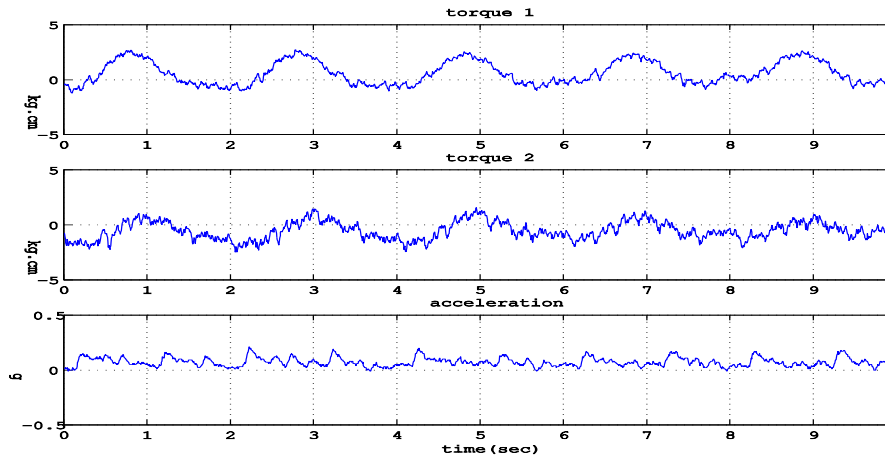


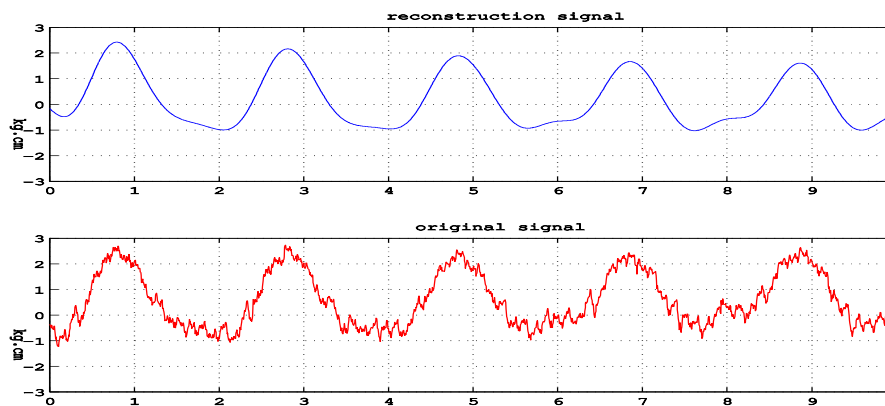
Fig. 3-7 데이터 측정기를 이용한 토크와 가속도의 측정 결과.

데이터 측정기로부터 받은 자료는 적당한 신호처리 과정을 거치게 된다. Fig. 3-8는 신호처리과정을 보여주는데, 이것은 case 301에 대한 결과이다. 먼저 (a)는 측정기로부터 받은 순수 자료인데, 여기에는 전기적인 잡음이 포함되어 있기 때문에 이와 같은 잡음들을 제거해야 한다. 따라서 주파수변환을 통하여 신호 외의 잡음성분들을 제거하면 결과적으로 (b)와 같이

깨끗한 신호가 생성된다. 모든 해석결과는 위와 같은 과정을 거치게 된다. 해석결과에서 토르는 두 개의 좌우 게이지 중 왼쪽의 값을 취했다.



(a) 순수자료



(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-8 순수자료를 처리하는 과정에 대한 예(Case 301)

3.4.1 토크에 대한 실험결과

Table. 3-4는 토크 게이지를 이용하여 얻은 실험에 대한 결과를 나타내고 있다. Table. 3-4에서 나타내는 토크값을 실제 원형에 적용시키기 위해서 상사법칙을 이용하였다. 상사법칙을 적용하여 얻은 원형에서의 토크값은 주기가 10.9초이고 파고가 405cm인 case 501에서 얻은 9720(kg · m)로서 가장 큰 값으로 나타났다. 이 값이 실제 방류관구에 어떻게 영향을 미치는지를 알아보기 위해 구조해석용 프로그램인 ANSYS(version 6.1)를 이용하였다. ANSYS를 이용하여 얻은 응력값은 Table. 3-5에서 나타난다. Table. 3-5에서 보면 알 수 있듯이 주

파이프와 라이저의 연결부분에는 상당히 작은 응력이 발생할 것으로 예측할 수 있다. 일반적으로 강철의 허용응력이 300(MPa) 이기 때문에, Table. 3-5에서 나온 결과값에 약 20(최대 응력집중계수)의 응력집중계수를 곱한다 할지라도 강철의 허용응력에는 못 미치기 때문에 방류관거 구조물은 충분히 안전하다고 판단된다.

Table. 3-4 토크에 대한 실험결과

실험 종류 (배율)	토크(kg · m)	
	모형	원형
301(1/15)	0.032	1620.0
302(1/15)	0.014	708.75
303(1/15)	0.013	658.13
304(1/15)	0.007	354.38
305(1/15)	0.007	354.38
501(1/30)	0.012	9720.0
502(1/30)	0.007	5670.0
503(1/30)	0.005	4050.0

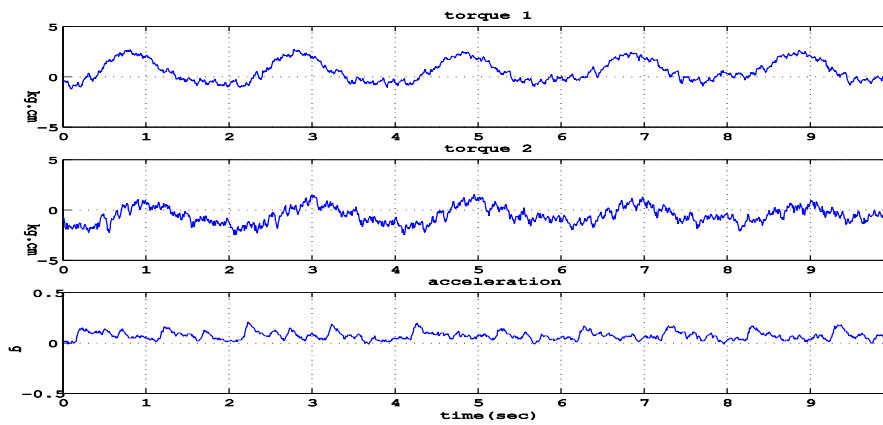
Table. 3-5 ANSYS에 의한 연결부분에 작용하는 최대응력

실험 종류 (배율)	응력(MPa)
301(1/15)	0.487
302(1/15)	0.363
303(1/15)	0.356
304(1/15)	0.315
305(1/15)	0.315
501(1/30)	1.588
502(1/30)	1.037
503(1/30)	0.817

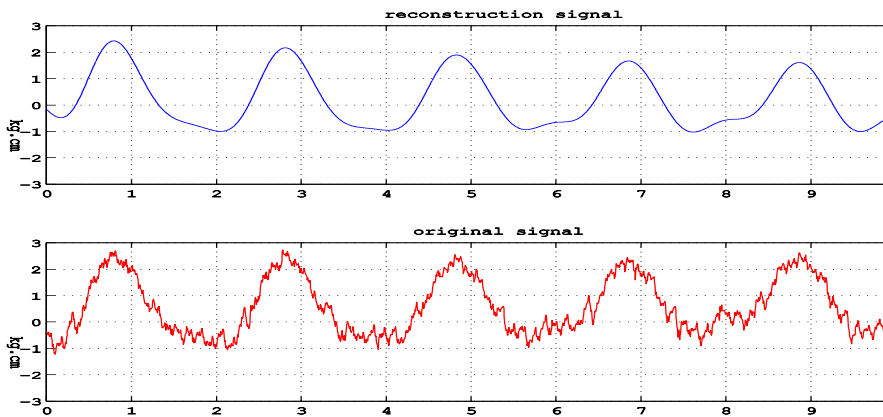
3.4.2 가속도에 대한 실험결과

가속도에 대한 실험결과는 크게 2가지로 나누어지는데, 한 가지는 흐름방향 성분이고 또 다른 한 가지는 흐름의 직각방향 성분이다. 먼저 흐름방향 성분은 case 301~305 인데 이를 살펴보면, 대부분의 실험 경우에 대하여 가속도는 $0.1g$ ($g=9.8m/s^2$) 이하의 진폭으로 나타나고 있다. 이것은 방류관거의 라이저 부분이 파랑에 의해서 큰 운동을 하지 않고 있음을 알 수 있다.(Fig. 3-10 에서 Fig. 3-14까지 참고) 다음은 흐름의 직각방향 성분을 살펴보면 case 501~506 경우인데, 실험결과를 살펴보면 대부분의 경우에 흐름방향과 마찬가지로 가속도는

상당히 작은 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 와동방출에 의한 응답을 보는 것인데, 와동방출의 형성에 의해서 구조물이 거의 진동하지 않음을 나타낸다.(Fig. 3-14 에서 Fig. 3-19까지 참고) 이것은 모형 구조물의 고유진동수는 729 (Hz)로 나타나는데 반하여 와동방출의 진동수는 이보다 훨씬 작고, 또한 라이저에 붙어 있는 디퓨저로 인하여 와류가 형성되기 어렵기 때문이다. 그러나 조류만 작용시킨 case 504의 경우에는 다른 경우보다 약간 큰 가속도가 발생하고 있음을 볼 수 있다(Fig. 3-17).

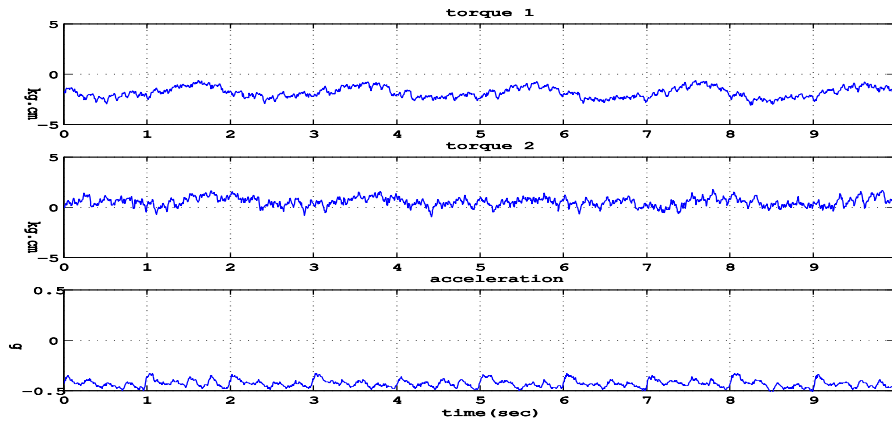


(a) 순수자료

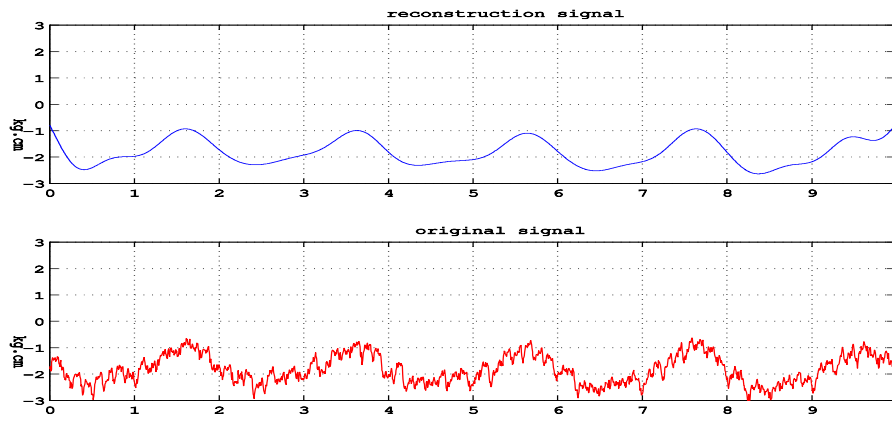


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-9 Case 301에 대한 실험결과

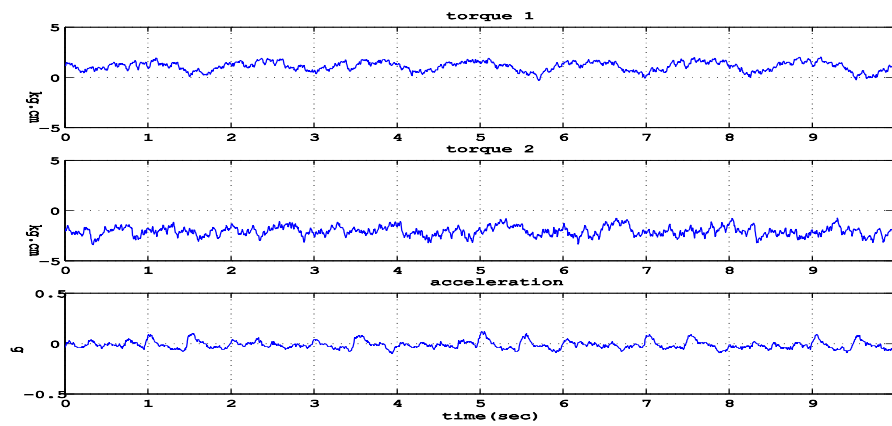


(a) 순수자료

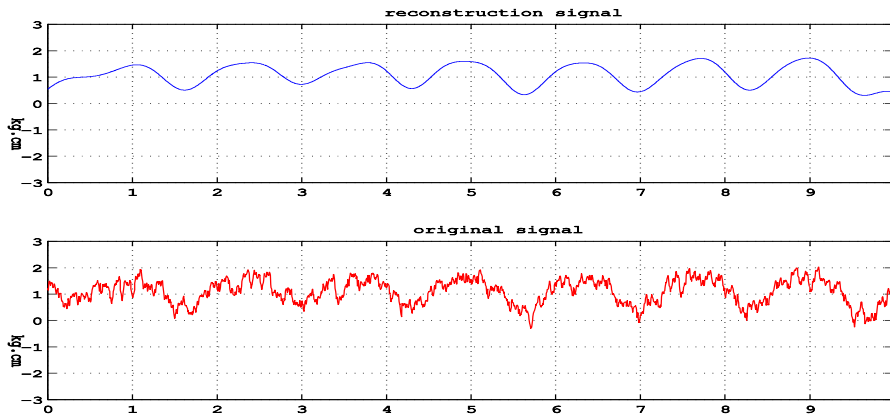


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-10 Case 302에 대한 실험결과

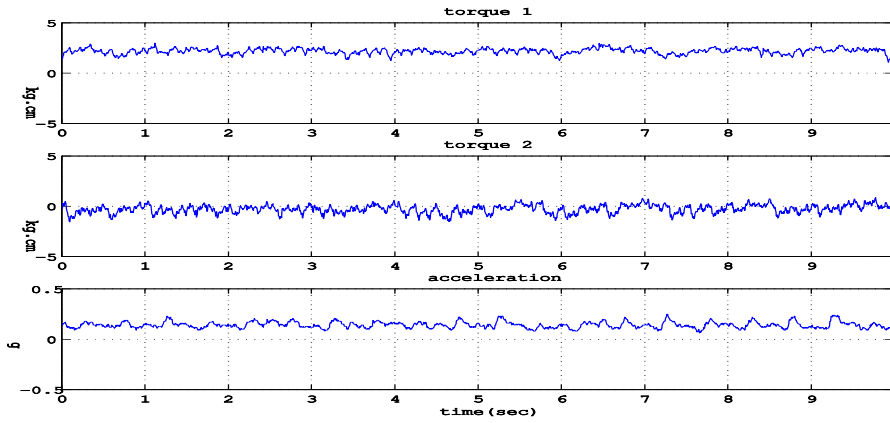


(a) 순수자료

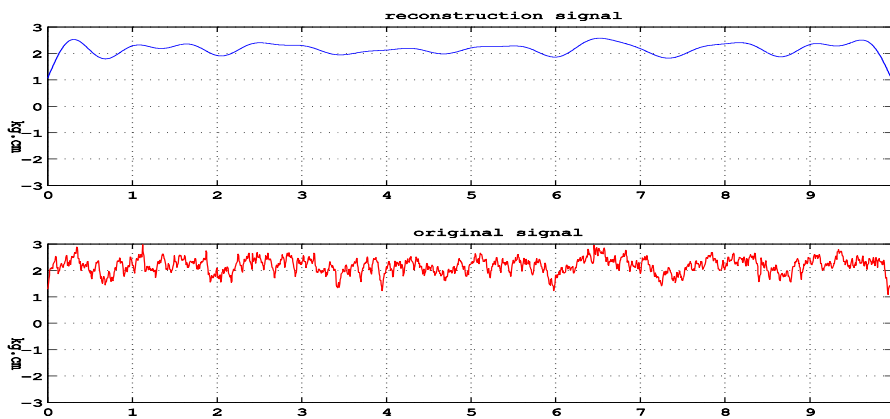


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-11 Case 303에 대한 실험결과

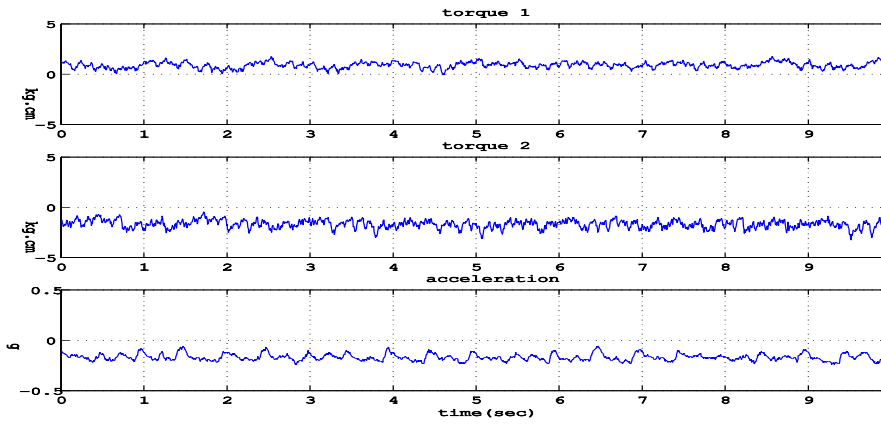


(a) 순수자료

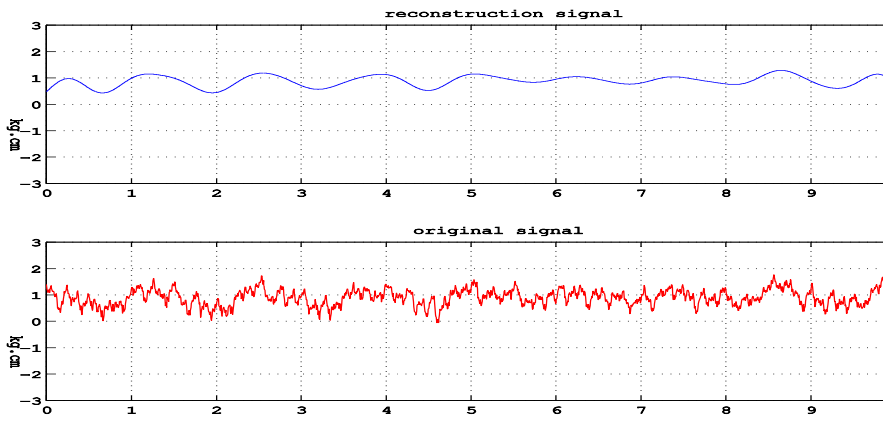


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-12 Case 304에 대한 실험결과

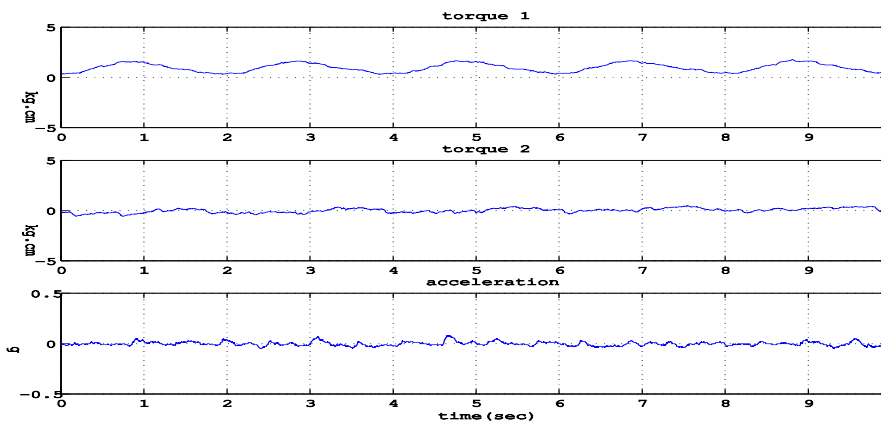


(a) 순수자료

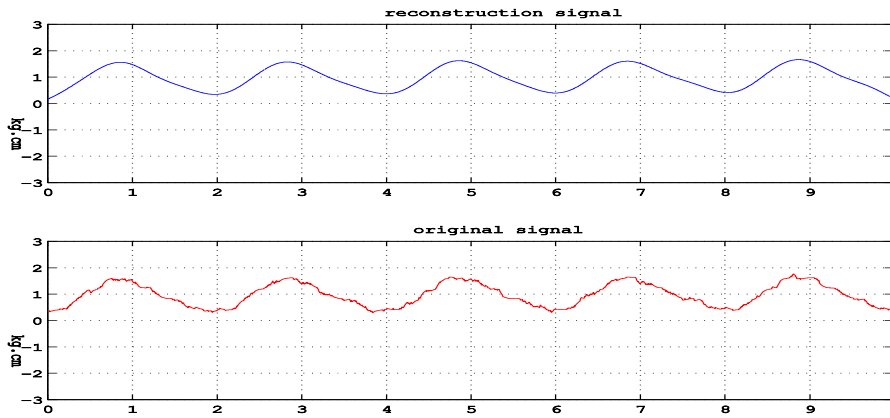


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-13 Case 305에 대한 실험결과

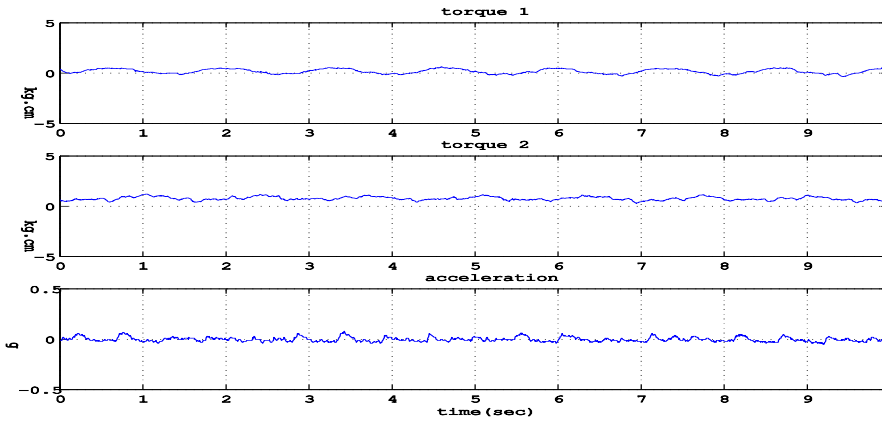


(a) 순수자료

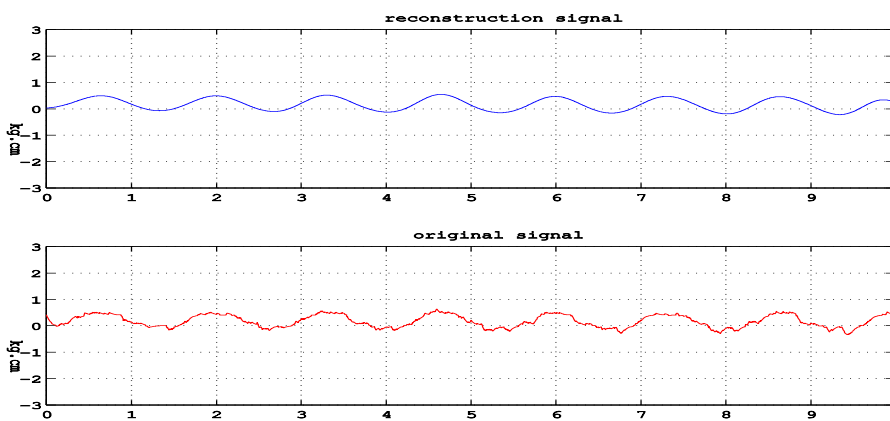


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-14 Case 501에 대한 실험결과

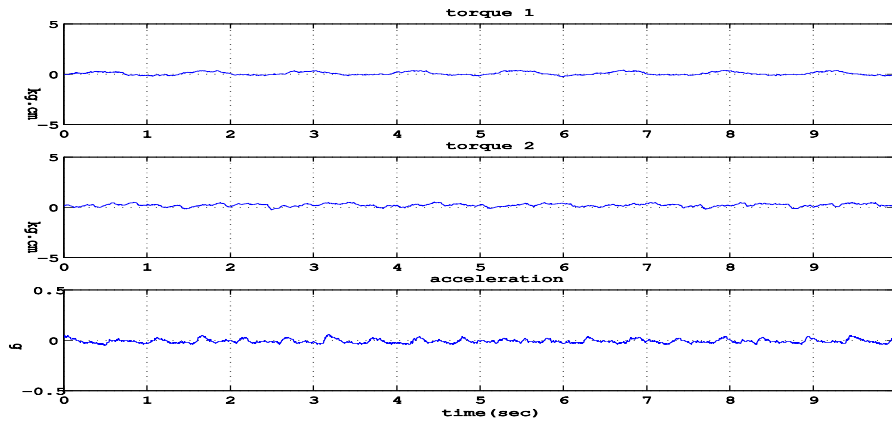


(a) 순수자료

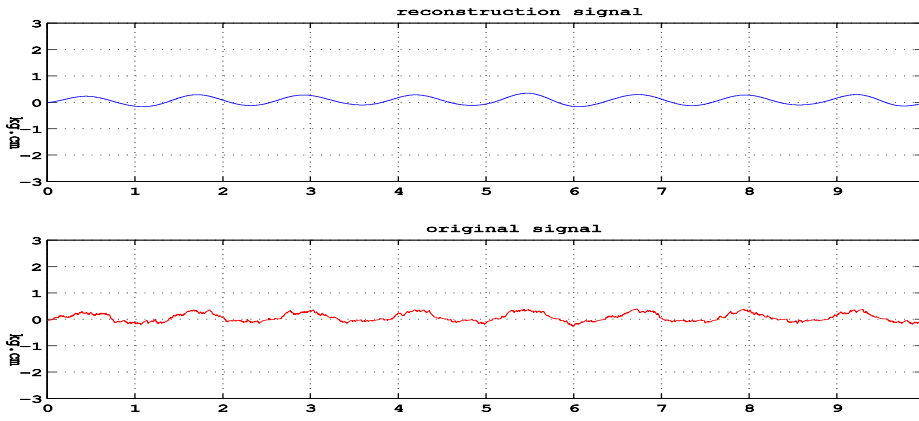


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-15 Case 502에 대한 실험결과

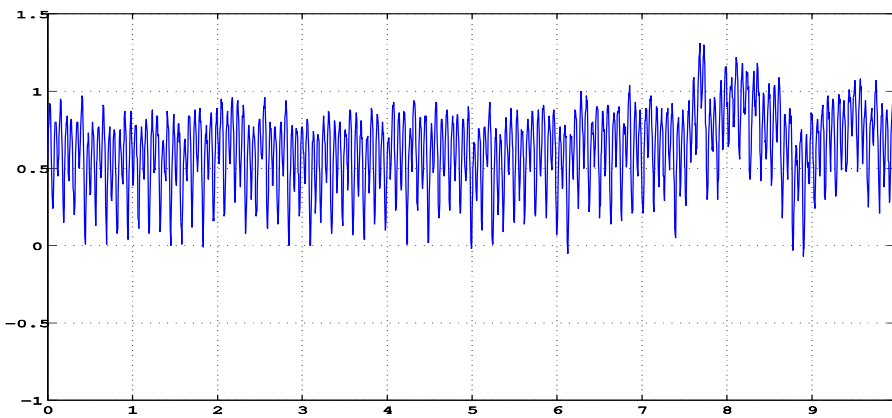


(a) 순수자료

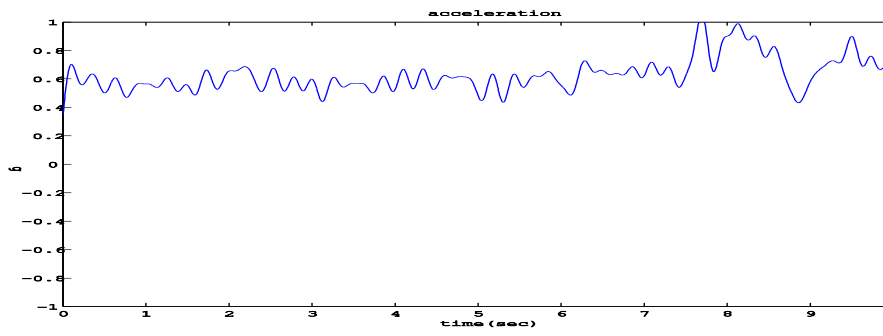


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-16 Case 503에 대한 실험결과

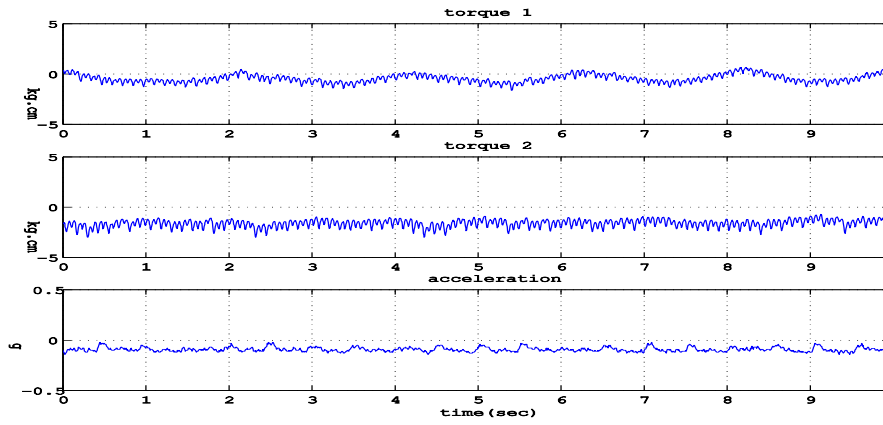


(a) 순수자료

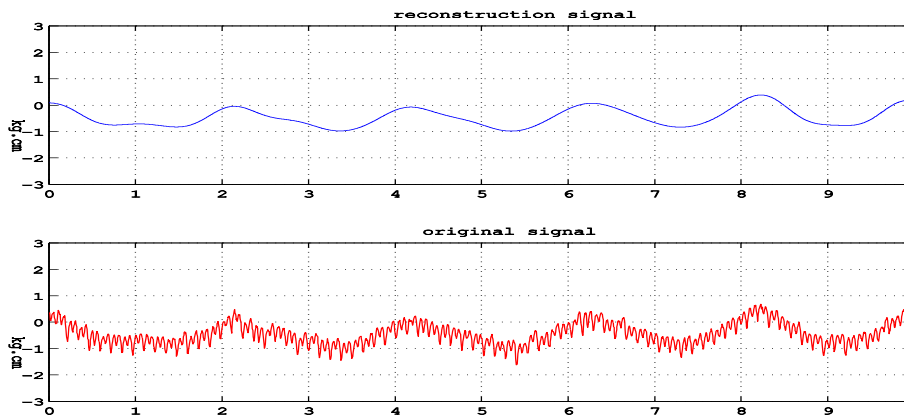


(b) 신호처리과정 후의 자료(acceleration)

Fig. 3-17 Case 504에 대한 실험결과(acceleration)

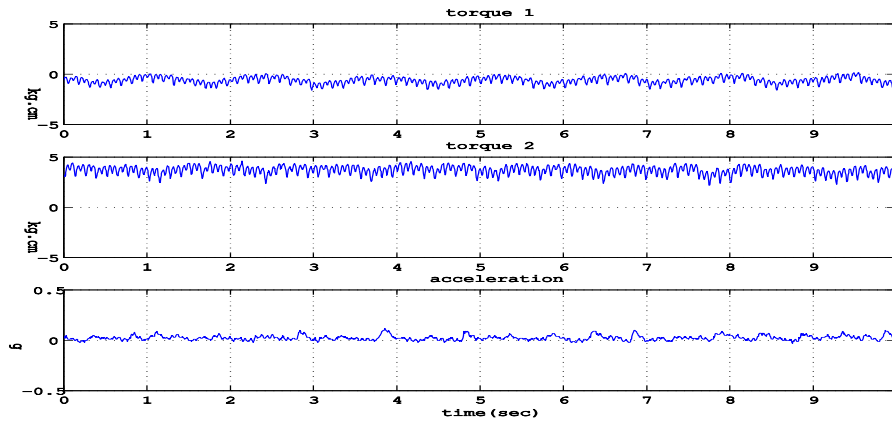


(a) 순수자료

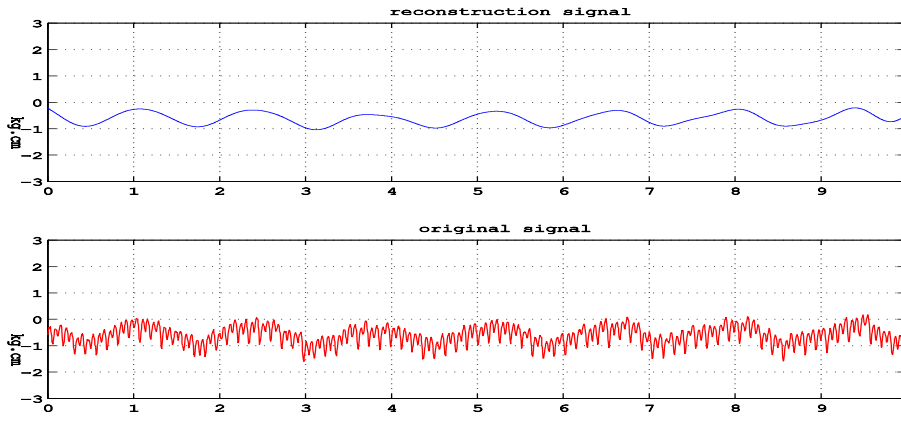


(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-18 Case 505에 대한 실험결과



(a) 순수자료



(b) 신호처리과정 후의 자료(torque 1)

Fig. 3-19 Case 506에 대한 실험결과

4. 방류관거에 대한 강도계산

4.1 개론

원통형부재(파이프, 라이저 등)로 이루어진 구조물들은 주로 연결부위(joints)에서 강도상의 문제 발생한다. 연결부위의 연결은 일반적으로 용접방식으로 이루어지는데, 이 경우 용접부위에서의 응력집중(stress concentration)에 의해 실제의 최대 응력값은 전체응력계산(global stress analysis)에서 얻는 공칭(nominal) 응력값보다 훨씬 큰 값이 된다. 이 실제 응력값을 핫스팟(hot spot)응력이라 하고, 이 핫스팟 응력과 공칭응력값의 비를 응력집중계수(stress concentration factor, SCF)라고 부른다.

부재의 강도계산은 정적최종강도계산(ultimate static strength analysis)와 피로해석으로 나눈다. 정적최종강도계산은 순간적으로 작용하는 하중에 의한 응력을 구하여 부재의 허용응력과 비교하여 그 부재의 안정성을 검증하는 것이다. 이 경우 외부하중은 대체로 최대하중들의 결합으로 이루어진다. 반면에 피로해석은 부재재료의 허용응력보다 작은 응력이 장기간 작용함으로써 연결부위에서 작은 크랙(crack)을 발생시키고, 시간이 경과함에 따라 이 크랙이 점차 커져 그 연결부위가 피로파괴에 대해서 안전한지를 검증한다. 피로해석의 경우 실험에 의한 공식을 많이 사용하는데, 주요한 매개변수는 응력범위와 작용횟수이다. 따라서 피로해석을 할 때, 구조물에 대해 동적해석이 이루어지며 그 외부하중은 변동하중(여기서는 파랑하중임)만 고려된다.

4.2 해상상태

본 논문의 연구대상인 가덕도 동안의 주요한 해상상태는 파랑은 S 및 S10° W방향이 지배적이며, 구체적인 파랑의 분포는 2장에서의 Table. 2-2를 참고한다. 주기는 Pierson-Moskowitz의 파랑 스펙트럼 형식에 근거하여 계산하였다. 교통부 수로국의 조사에 의하면 가덕도 주변해역의 창·낙조 시 조류의 최대유속이 0.1~1.1m/sec로 나타난다. 따라서 본 해석에서는 조류의 속도를 1.0m/sec로 하였다.

4.3 방류관거 모델링

4.3.1 방류관거 모델

구조물은 Fig. 3-4과 Fig. 3-6과 같이 주 파이프에서 연직으로 올라와 있는 라이저와 라이저의 끝 부분에 연결된 네 개의 디퓨저(diffuser)로 구성된다. 그 구체적인 제원은 Table. 4-1에 제시되어 있다.

Table. 4-1 주파이프, 라이저, 그리고 디퓨저의 제원

	외경 (mm)	벽두께 (mm)
주 파이프	1650	15.0
라이저	800	12.7
디퓨저	250	9.3

본 계산에서는 하나의 라이저가 포함된 주 파이프라인 좌우 0.5m를 연구대상으로 하였다 (Fig. 4-1). 경계조건을 살펴보면 주 파이프 양단은 고정으로, 그리고 주 파이프에서 라이저와 연결된 부위는 3개 병진방향을 고정으로 구속하였고 회전방향은 구속하지 않았다(Fig. 4-2). 라이저 부분은 4개의 요소로 나누어져 있는데 이것은 토양의 모델링과 관련되어 있다.

4.4. 피로 파괴 해석

4.4.1 요구사항

피로파괴해석에서는 응력범위만 계산하기 때문에 외부하중은 파랑만 고려한다. 파랑의 방향은 메인 라인에 수직인 방향으로 가정하였다. 사용수명은 50년, 안전계수는 1.5로 하였다 (Table. 4-2).

Table. 4-2 피로해석 요구사항

피로수명(Fatigue Life Time)	50년
안전계수(Safety Factor)	1.5

4.4.2 응력집중계수(SCF)

응력집중계수는 연결되는 부재들의 직경, 벽두께 그리고 연결방식 등에 의해 결정된다. 본 해석에서는 Kwang의 공식에 따라 범용프로그램 SACS의 JOINT CAN 모듈에서 계산하였다(Table. 4-3).

Table. 4-3 응력집중계수

STRESS CONCENTRATION FACTOR REPORT								
COMMON CHORD BRACE			***** BRACE *****			***** CHORD *****		
JOINT	JOINT	JOINT	AXIAL	IN PLANE	OUT OF PLANE	AXIAL	IN PLANE	OUT OF PLANE
1	2	16	11.236	5.242	10.076	19.668	7.713	17.354
1	3	16	11.236	5.242	10.076	19.668	7.713	17.354
4	10	6	7.934	3.947	7.162	11.751	4.608	10.369
4	5	6	7.934	3.947	7.162	11.751	4.608	10.369
4	10	8	7.934	3.947	7.162	11.751	4.608	10.369
4	5	8	7.934	3.947	7.162	11.751	4.608	10.369

그리고 또 응력집중계수(SCF)는 각 부재 하중방식에 따라서도 일정하다(Table. 4-3를 참조). OUT-PLAN-MOMENT의 경우처럼 파랑의 방향을 주 파이프에 수직인 방향으로 설정하였기 때문에 연결부위 1과 4 (Fig. 4-1 참조)의 응력집중계수는 각각 17.35와 10.37이다.

4.4.3 피로 파괴

피로파괴 해석은 먼저 여러 해상상태에서의 응력범위를 계산한다.

하나의 해상상태에 대한 응력범위는 그 해상상태에서 응답이 안정되었을 때 최대응력과 최소응력사이의 차이이다. 즉

$$\sigma_R = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

여기서,

σ_R : 응력범위(Stress Range)

σ_{max} : 최대응력(Maximum Stress)

σ_{min} : 최소응력(Minimum Stress)

다음은 그 해상상태가 1년 동안 발생하는 회수를 계산한다.

$$N_w = 3.1558 \times 10^7 \times P_s / T_s$$

여기서,

N_w : 1년간 발생하는 빈도(회/년)

P_s : 해당되는 파랑의 발생확률

T_s : 해당되는 파랑의 주기

또한 응력범위에 상응하는 허용출현빈도는 선택된 S-N 곡선(plot of stress range S against number of cycles to failure N)에서 그 응력범위에 상응하는 점을 찾아 얻는다. 본 해석에서는 API RP 2A의 S-N 곡선을 채택하였다. 이것은 Fig. 4-4와 같이 부동한 용접상태에 따라 여러 개의 곡선들이 제시된다. 이 곡선들에 대한 설명은 Table. 4-4에 나와 있다.

Table. 4-4 원통형 단면의 유형과 위치에 의한 응력 분류

API curve	설명
D'	완전한 관통 홈(groove) 용접으로 된 단순한 T-, Y- 또는 K-연결
E'	부분적인 관통 홈 용접으로 된 단순한 T-, Y- 또는 K-연결
X'	교차된 부재에서의 완전한 단순한 T-, Y- 또는 K-연결, 또는 정확한 이론적 해석에 의해 결정되는 연결
X	개선된 프로파일을 갖는 연결, 형식은 위와 동일함.
K'	주 부재의 γ 비 r/t가 24를 넘지 않는 단순한 T-, Y- 또는 K-연결
K	개선된 프로파일을 갖는 연결, 형식은 위와 동일함.

각 연결점에서 그와 연결된 유한요소들의 응력값들은 서로 다르다. 이는 8번 과랑상태에 대한 응력응답(Fig. 4-4)에서 잘 나타나 있다. 이 Fig. 4-4에서 보면 연결점1과 연결된 유한요소 1과 8에서의 응력값 중에서는 유한요소1에서의 응력값이 가장 크고, 연결점 4와 연결된 유한요소 11, 3, 7, 4에서의 응력값 중에서는 유한요소 11에서의 응력값이 가장 크다. 따라서 연결점1에서는 유한요소1, 연결점4에서는 유한요소11의 응력만 고려하여 피로계산을 수행하였다.

해수의 성질은 다음과 같이 가정하였다.

- 해수밀도 : 1025 kg/m³
- 관성계수 C_m : 2.0
- 항력계수 C_D : 1.2

유한요소1의 연결점1에 대해 Fig. 4-3 의 E'곡선(피로한도를 0.80ksi로 하였음)을 적용하여 피로파괴를 계산하였다. 응력계산결과는 다음의 Table. 4-5과 같다.

Table. 4-5 연결부위1의 피로해석결과 (E'-curve)

유의 파고 (m)	평균주기 (sec)	1년출현빈도	Hot spot stress 범위 (ksi)	허용빈도	파괴
0.4	2.43	7.34×10^6	0	∞	0
0.9	3.65	3.02×10^6	0.040	∞	0
1.4	4.55	3.81×10^5	0.257	∞	0
1.9	5.30	9.53×10^4	0.634	∞	0
2.4	5.96	3.18×10^4	1.350	8.26×10^7	0.0004
2.9	6.50	3.40×10^4	1.615	3.09×10^7	0.0011
3.4	7.09	4.45×10^3	1.720	2.18×10^7	0.0002
3.9	-	-	-	-	-
4.4	-	-	-	-	-
4.9	8.51	3.71×10^3	3.569	3.09×10^5	0.0120
1년에 발생하는 누적 피로파괴					0.0137

위의 Table. 4-5에서 연결점1에서 1년에 발생하는 누적 피로파괴는 0.0137로서 이에 상응한 연결점1의 피로수명은 48.7년으로 추정된다.

연결부위 1에 대한 피로파괴해석으로부터 안전계수를 1.5로 하였을 때 피로수명은 48.7년으로서 설계수명인 50년과 거의 같다. 따라서 연결부위 1에 대해서는 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다. 주어진 치수에 대해 용접방법을 E'곡선에 상응하는 방법 또는 그보다 좋은 방법을 사용한다면 설계수명 50년 내에 피로에 의한 파괴에는 견딜 수 있다.

유한요소11의 연결점4에 대해 Fig. 4-5의 K'곡선(피로한도를 0.55ksi로 하였음)을 적용하여 피로파괴를 계산하였다. 응력계산결과는 다음의 Table. 4-6과 같다.

Table. 4-6에서 연결점4에서 1년에 발생하는 누적 피로파괴는 1.224×10^{-4} 로서 이에 상응한 연결점1의 피로수명은 545년으로 추정된다.

Table. 4-6에서 보면 연결부위 4에 대한 피로파괴해석으로부터 안전계수를 1.5로 하였을 때 피로수명은 545년으로서 설계수명인 50년에 비하면 훨씬 길다. 따라서 연결부위 4에 대해서는 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다. 주어진 치수에 대해 임의의 용접방법을 사용하여도 설계수명 50년 내에는 피로에 의한 파괴에는 견딜 수 있다.

Table. 4-6 연결부위4의 피로해석결과 (K'-curve)

유의파고 (m)	평균주기 (sec)	1년 출현빈도	Hot spot stress 범위 (ksi)	허용빈도	파괴
0.4	2.43	7.34×10^6	0.0	∞	0
0.9	3.65	3.02×10^6	0.03	"	0
1.4	4.55	3.81×10^5	0.06	"	0
1.9	5.30	9.53×10^4	0.11	"	0
2.4	5.96	3.18×10^4	0.48	"	0
2.9	6.50	3.40×10^4	0.60	1.055×10^8	3.22×10^{-4}
3.4	7.09	4.45×10^3	0.91	2.198×10^7	2.02×10^{-4}
3.9	-	-	-	-	
4.4	-	-	-	-	
4.9	8.51	3.71×10^3	1.29	5.30×10^6	7.00×10^{-4}
1년에 발생하는 누적 피로파괴					1.224×10^{-4}

4.5 정적최종강도해석

정적최종강도해석에서 사용되는 하중에는 파랑과 조류가 포함된다. 파랑은 50년 주기의 파랑을 선택하였는데, 그 파고는 5.81m이고 평균주기는 9.27초, 그리고 조류의 속도는 1.0m/sec이며, 파랑과 조류 모두 주 파이프에 수직인 방향으로, 동일한 방향으로 흐른다고 가정하였다. 이 경우는 파이프라인의 연결에서 가장 위험한 경우에 해당하므로 위와 같이 가정하였다.

Table. 4-7 정적최종강도해석에 사용되는 하중

파랑	파고(m)	5.81
	주기(sec)	9.27
	방향	주 파이프에 수직
해류	속도(m/sec)	1.0
	방향	주 파이프에 수직

먼저 피복석층과 사석층이 완전한 경우에 대해 그 연결부위1과 4에서의 최대등가응력, 그리고 절점 5, 6, 10에서의 X방향변위를 구하였다.

Table. 4-8 정적최종강도해석 결과 (자갈층이 완전한 경우)

절점	항목	수치		위치
		공칭	SCF고려	
1	등가응력(MPa)	7.84	136.0	라이저와 주 파이프 사이
4	"	6.95	72.1	라이저와 디퓨저 사이
5	X-변위(mm)	3.9		라이저 끝단
6	"	3.3		디퓨저의 끝단
10	"	1.4		머드 라인에서

위의 Table. 4-8 에서 볼 수 있듯이 정적해석에 응력은 일반적인 강재의 허용응력(일반적으로 약 300MPa)보다 훨씬 작다. 라이저 끝단과 디퓨저 끝단의 변위는 약 3.9mm와 3.3mm로서 비교적 작다. 머드 라인면에서도 약 1.4mm정도의 변위가 발생한다.

다음 피복석층과 사석층이 완전히 벗겨져 주 파이프가 해수에 노출된 경우에 대하여 위의 경우의 같이 응력과 변위를 계산하였다. 계산결과는 아래의 Table. 4-9에 나와 있다. Table. 4-8 와 Table. 4-9을 비교해보면 등가응력에서 연결부위 4에서는 거의 변화가 없고 연결부위1에서는 139.0MPa에서 169.9MPa로 증가하였다. 이 응력값도 일반인 강재의 허용응력보다 작으므로 안전하다고 여겨진다. 변위는 절점 4, 5, 10에서 각각 5.1mm, 5.9mm, 2.6mm로 나타났다.

Table. 4-9 정적최종강도해석 결과 (자갈층이 없는 경우)

절점	항목	수치		위치
		공칭	SCF고려	
1	등가응력(MPa)	9.79	169.9	라이저와 주 파이프 사이
4	"	6.94	71.9	라이저와 디퓨저 사이
5	X-변위(mm)	5.9		라이저 끝단
6	"	5.1		라이저의 끝단
10	"	2.6		머드 라인에서

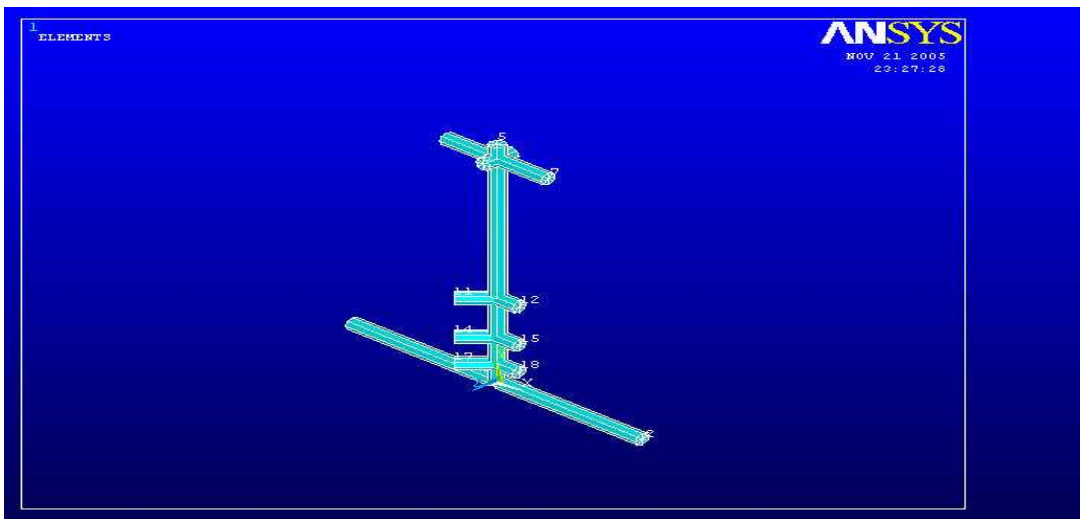


Fig. 4-1 ANSYS 프로그램에서의 모델링 형상.

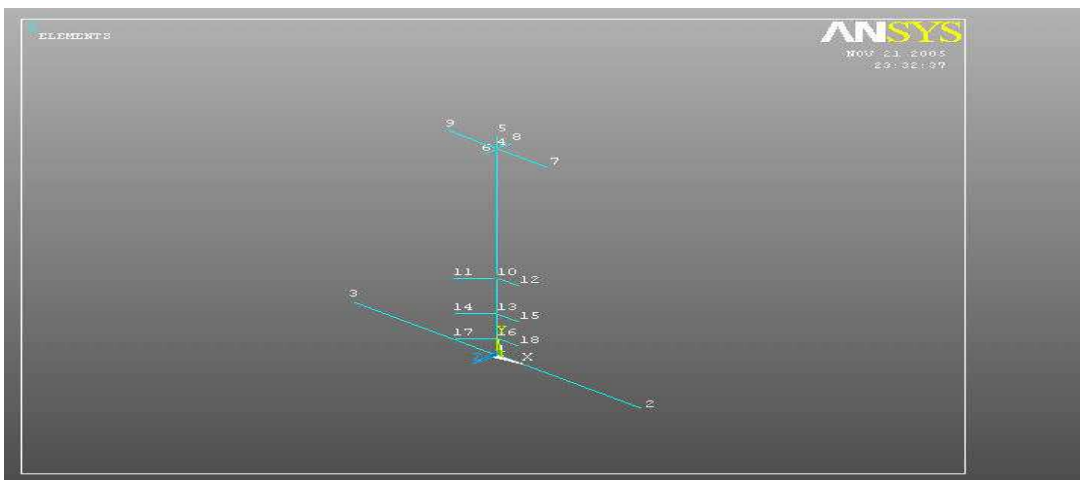


Fig. 4-2 절점번호로 표시한 유한요소 모델링

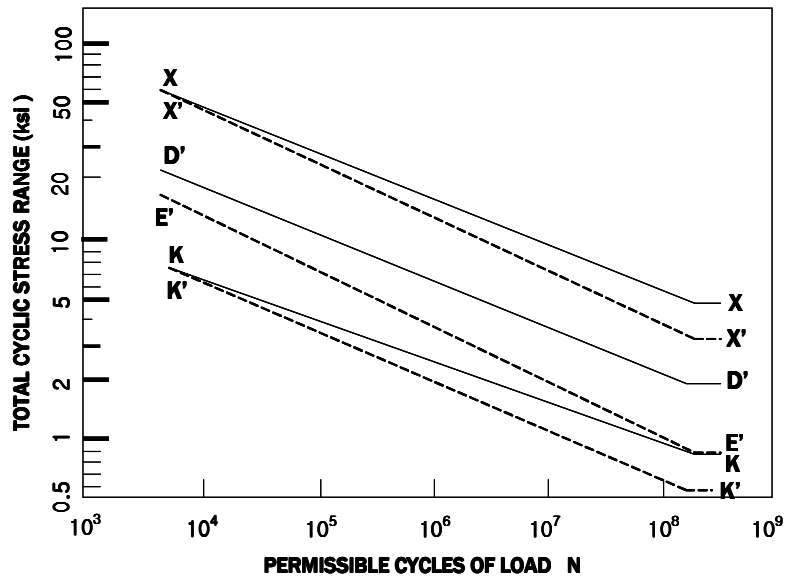


Fig. 4-3 해양환경에서 랜덤하중에 대한 API 피로곡선들.

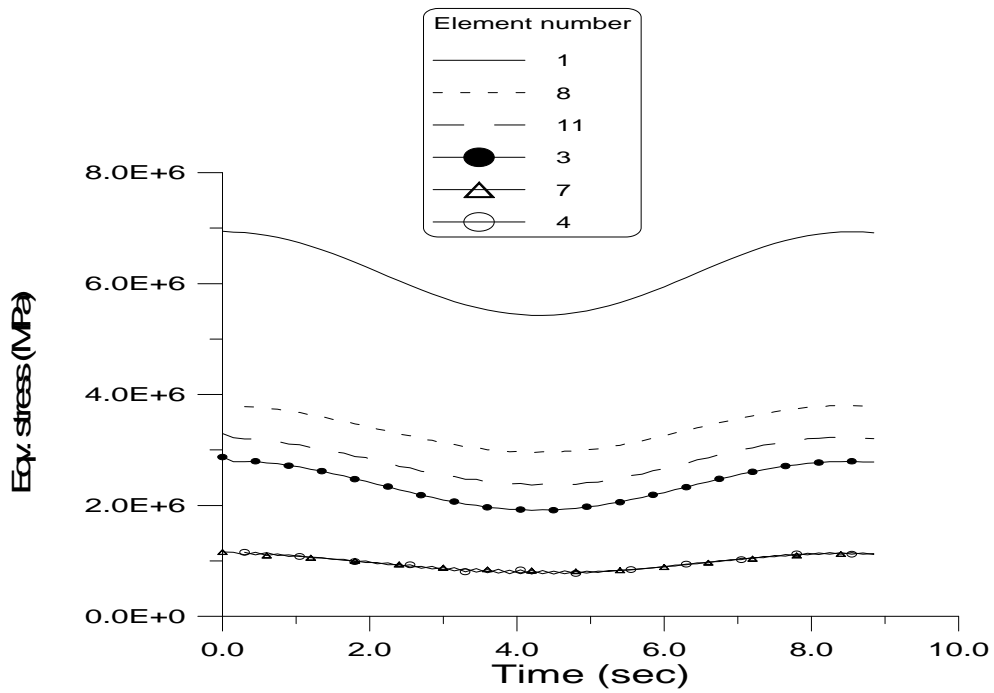


Fig. 4-4 해상 상태 8번에 대한 연결부위에서의 응력값.

5. 결 론

본 연구에서는 육상에서 발생한 오수를 외해로 배출시키는 해양방류관의 안전을 분석하기 위해서 물리실험 및 수치해석을 수행하였다. 연구대상은 부산 가덕도 해역에 설치된 해양방류관을 선택하였다. 물리실험에서는 해양환경에 의해서 라이저와 주 파이프의 연결부분에 작용하는 토크를 측정하였다. 또한 상사법칙을 적용하여 실제 모델에서 발생할 수 있는 토크를 산정하였다. 구조해석 상용프로그램인 ANSYS(version 6.1)를 이용하여 실제 모델에서 발생하는 응력을 계산하였는데 본 실험에서 행한 모든 경우에 대하여 얻어진 응력이 강철의 일반적인 허용응력보다 상당히 작은 값으로 측정되었다. 따라서 라이저와 주 파이프의 연결부분에서는 일시적인 해양환경하중에 대해서는 안전할 것으로 판단된다. 그리고 가속도계를 사용하여 흐름방향과 흐름의 직각방향에 대한 라이저의 가속도를 측정하였다. 파랑에 의해서 운동하는 흐름방향 성분은 가속도가 $0.1g(g = 9.8m/s^2)$ 이하의 값으로 측정되었다. 또한 와동방출에 의해서 발생하는 흐름의 직각방향 성분도 대부분의 경우에 가속도는 작은 값으로 측정되었다. 이것은 라이저에 연결된 디퓨저 때문에 뚜렷한 와류(vortex)가 형성되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

연결부위 1에 대해 API RP 2A의 E'곡선을 적용한 피로수명은 48.7년으로서 설계수명인 50년과 거의 같다. 연결부위 4에 대해 API RP 2A의 K'곡선을 적용한 피로수명은 545년으로서 설계수명인 50년에 비하면 훨씬 길다. 따라서 연결부위 5에 대해서는 주어진 치수에 대해 임의의 용접방법을 사용하여도 설계수명 50년 내에는 피로에 의한 파괴에 견딜 수 있다.

피복석층과 사석층이 완전한 경우, 50년 주기의 해상상태에 대해, 최대등가응력은 연결부위 5에서 발생하며, 일반적인 강재의 허용응력(일반적으로 약 300MPa)보다 훨씬 작다. 피복석층과 사석층이 완전히 벗겨져 주 파이프가 해양환경에 노출된 경우, 최대 등가응력은 역시 연결부위 5에서 발생하며, 이 값도 일반적인 강재의 허용응력보다 작으므로 안전하다고 여겨진다.

향후과제로는 쇄굴현상에 대해 깊이 있는 연구가 필요하며 다양한 크기의 라이저에 대해 실험할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] American Petroleum Institute, 1995. "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", 20th edition., 1995
- [2] Arnold, M. S., 1989, "The Offshore Installation of Ocean Outfalls Diffuser Assemblies From a Semi-submersible", OTC 6017.
- [3] Brooks, R. P., 1990, "Design and Construction Planning of Deepwater Ocean Outfall Riser Shafts and Diffuser Structures", OTC 6386.
- [4] Herbich, J. B., 1981, "Offshore Pipeline design Elements", Marcel Dekker Inc.
- [5] McClelland B. and Reifel M. C., 1986, "Planning and Design of Fixed Platform", Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York.
- [6] Pater, M. H., 1989, "Dynamics of Offshore Structure", Butterworths & Co. Ltd.
- [7] SAP IP Inc., 1996, ANSYS User's Manual, Release 6.1.
- [8] Sarpkaya, T. and Isaacson, M., 1981, "Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures", VanNostrand Reinhold Co.
- [9] O.M. Faltinsen, 1998, "SEA LOADS ON SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES", CAMBRIDGE.
- [10] 이석우, 1992, "한국근해해상지", 집문당, pp. 278.
- [11] (주)도화종합기술공사, 1997, "녹산하수처리장 방류관거 기준 및 실시 설계에 따른 수리 모형실험".
- [12] 홍기훈, 김식현, 정창수, 정종률, 2000, "해양환경영향평가개론: 폐기물 및 기타 물질 최종처분과 해양환경관리", 시그마프레스.
- [13] 고재용, 2003, "ANSYS와 유한요소법" 시그마프레스.