

이어도 종합해양과학기지에 대한 設計波力の 검토 I: 삼차원 수리모형실험

Investigation on the Design Wave Forces for Ear-Do Ocean Research Station. I: Three Dimensional Hydraulic Model Tests

전인식* · 심재설** · 최성진*

In-Sik Chun*, Jae-Seol Shim**, and Seong-Jin Choi*

要 旨 : 한국해양연구소는 1998년에 이어도 종합해양과학기지의 기본설계를 수행한 바 있으며 深海 설계파에 Morison 식과 Stream function 이론을 적용하여 設計波力을 결정한 바 있다. 본 연구에서는 삼차원 수리모형실험을 통하여 이어도 해역에서의 파랑전파를 모의하였으며, 구조물의 파력 및 Air gap를 계속하고 이들을 SACS 프로그램의 계산치와 비교함으로써 기본설계 값들의 타당성을 검토하였다. 그 결과, 시도된 4개의 深海波向 중에서 SSW, S, SE 계열의 파향에 대해서는 계속치가 SACS 계산치 보다 작게 나타났다. 그러나, 유일하게 구조물에 미치기 전에 碎波되는 NNW계열의 파향에서는 전반적으로 SACS 계산치를 상회하였으며, 一方向性 흐름과 파가 복합되어 있는 경우와 매우 유사한 파력변화를 보여주었다. 구조물의 Air gap은 모든 심해파향에 대하여 계속치가 기본설계치보다 작은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 이어도, 수리모형실험, 수평파력, 모리슨 식, 자켓 구조물, 삭스 프로그램

Abstract □ Korea Ocean Research and Development Institute performed the basic design of the Ear-Do Ocean Research Station in 1998. The design wave was taken to be the deep water wave which was obtained through wave hindcasting procedure. Wave forces acting on the structure were calculated by Morison formula utilizing the stream function theory of 5th. order. In the present study, a three dimensional hydraulic model testing was undertaken to investigate the validity of the basic design, measuring wave propagation over the Ear-Do, horizontal wave forces and air gaps. The measured forces were all compared by the corresponding values calculated by SACS program based on the design wave. The results showed that in the three deep water wave directions (SSW, S, SE) the measured wave forces appeared less than the SACS calculated. But in the NNW wave direction, the measured forces generally exceeded the calculated values and showed a peculiar pattern very similar to the case that waves are superimposed by an unidirectional current. It was also found that the measured air gap underneath the structure appeared less than the values taken in the basic design for all wave directions.

Keywords : Ear-Do, hydraulic model testing, horizontal wave forces, Morison formula, offshore jacket structures, SACS program, air gap

1. 서 론

해양관측타워와 석유 시추탑 등을 포함한 해양구조물의 일반적인 형상은 단일기둥 또는 자켓으로 구성되는

下部 구조물과 실제 해상업무가 수행되는 상부구조물로 이루어져 있다. 이러한 해양구조물은 가혹한 해상조건하에서도 구조물 자체의 안정성과 구조물의 기능을 그대로 유지해야 하는 특수성을 갖는다. 구조물의 안정성과

*건국대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Konkuk University, 93-1 Mojin-Dong, Kwangjin-Ku, Seoul 143-701, Korea)
**한국해양연구소 연안·항만공학연구센터(Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)



Fig. 1. Location of Ear-Do Ocean Research Station.

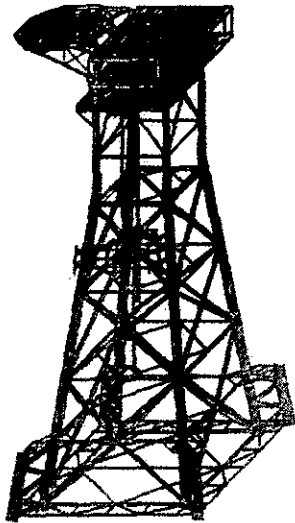


Fig. 2. Ear-Do Ocean Research Station.

내구성을 보장하기 위해서는 설치위치에서의 자연조건의 결정, 구조물의 설계 및 시공 그리고 설치 후 안정도 모니터링 등이 총체적으로 정확히 이루어진다는 전제하에서 가능하다. 자연조건은 다시 파랑, 해 조류, 풍속 및 風透流, 그리고 지질조건 및 지진 등으로 구분되며 이들은 구조물의 설계이전에 철저한 현장조사를 통하여 정확한 재원을 획득하여야 한다.

한국해양연구소(1998)는 Fig. 1과 같이 수심 40 m (DL 기준)의 이어도 해역에 자켓식 해양구조물(Fig. 2)의 설치를 추진하고 있으며, Table 1과 같은 설계조건

Table 1. Design conditions of Ear-Do Ocean Research Station

구분	제원	비고
조위	3.7m	천문조 + 기상조
구조물 설치수심	40 m	DL 기준
설계파고	24.6 m	심해설계파
설계파 주기	15초	
파정	61.38 m	바다 기준
파곡	36.78 m	바다 기준
천단고 (DL 기준)	24 m	61.38(파정) - 40(DL 수심) + 1.5(여우고) + 1.0(beam 깊이) = 23.88 ⇒ 24 m
Air gap	2.62 m	24 + 40 - 61.38 = 2.62 m

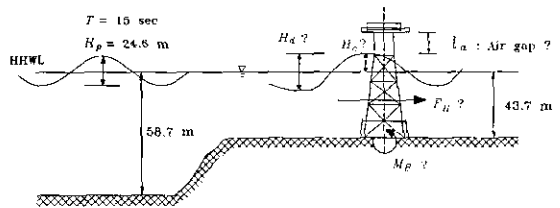


Fig. 3. Wave forces and air gap formation by the propagation of shallow water waves.

에 대한 구조물의 기본설계를 수행한 바 있다. 기본설계 시 중요하게 고려해야 되는 요소는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 구조물에 작용하는 파력과 그리고 상부구조물 하단의 수면 상 높이(Air gap)이다. Air gap이 충분치 못하면 波峰이 상부구조를 충격적으로 강타하여 구조물에 심대한 피해를 줄 수 있다. 이어도 해역은 장기간 축적된 파랑관측 데이터가 없기 때문에 인근 바람자료를 이용한 파랑의 Hindcasting기법으로 설계파를 산정하였으며(최대파고 개념), 기본설계 시 Morison 식과 Stream function 5차 파를 채택하는 SACS 프로그램을 이용하여 파력과 Air gap를 결정하였다.

상기 설계절치는 일반적으로 深海에 위치한 해양구조물에 대한 것이며, 이어도 해양과학기지와 같이 방향에 따라 상당히 급경사를 이루는 水中 암초(수면 하 약 4.5 m) 인근에 설치되는 경우에 그대로 적용하는 것은 무리이다. 파랑이 구조물로 전파되면서 碎波를 비롯한 非線型的 변형이 발생할 가능성이 있다. 구조물 위치에서 碎波의 상시 발생은 충격쇄파압의 발생으로 인하여 구조물에 강한 충격력을 작용시켜 구조물의 안정도를 현저히 저해할 수 있다. 이와 같은 파의 비선형 변형은 기존의 淺海波 전파모델로는 정확히 예측할 수 없다. 또한, 波力을 계산하기 위하여 사용되는 Morison 식은 이

론적으로 水粒子的 운동학적 성분의 도출이 가능한 대칭성 波形에 대하여 적용이 가능하다. 더욱이, 식 내의 항력계수와 관성력계수는 대부분 실험실 모형실험의 결과로서 제시되었으며, 적용되는 파동이론에 따라서 그 결과에 현격한 차이가 있는 것으로 지적되고 있다. 만약, 이어도 구조물에 비대칭성 파형을 갖는 非線型波 및 碎波가 도래할 경우에는 상기 Morison식의 계산치보다 현저히 큰 파력이 발생할 수 있다. 이와 같은 비선형 파랑 변형은 구조물의 상부구조 하 Air gap에도 영향을 줄 수 있다.

이에도 해석이 상기와 같이 현재 가용한 이론적 또는 수치적 수단들의 적용한계 또는 기 검증범위를 넘어서고 있기 때문에 이들 이론적 수단에만 의존하여 구조물을 설계하는 것은 위험성이 있으며 최소한 수리모형실험을 통하여 확인할 필요가 있다. 본 연구는 이어도 암초 상에서의 심해 설계과의 천해역 전파를 수리모형실험을 통하여 삼차원 조파수조에 模擬하여 구조물 설치점에서의 천해파 발생 양상을 조사한다. 또한, 구조물에 작용하는 파력 및 air gap를 예측하여 기본설계 과정에서 설계파력이 합리적으로 설정되었는지 확인하고, 나아가 수정·보완에 필요한 정보를 제공한다. 자켓식 해양구조물의 靜的設計가 구조물 전체에 작용하는 水平波力이 최대치를 보이는 시점에서 이루어짐을 고려하여 (Dawson, 1983, pp. 282-329) 파력의 계측을 수평파력으로 국한하기로 한다. 파향은 4개의 심해파향, 즉, SE, S, SSW, NNW로 하며, 조파파는 규칙파를 사용하나 S 파향에 대해서는 불규칙파 실험을 포함한다. 계측파력은 각각 해양구조물 설계 프로그램인 SACS의 계산파력과 비교한다.

2. 模型構造物에 대한 파력 및 Air gap의 결정

2.1 模型構造物에 대한 축척오차의 검토

해양구조물의 圓形斷面 部材(직경 D)의 단위길이 당 작용하는 波力은 다음과 같은 Morison 식에 의하여 결정된다.

$$f = \frac{1}{2} \rho_w C_D D u |u| + \rho_w C_I \frac{\pi}{4} D^2 a_x \quad (1)$$

식 (1)에서 u 와 a_x 는 각각 水粒子的 수평방향 속도와 가속도를 의미한다. C_D 와 C_I 는 각각 항력계수와 관성력계수를 의미하며 공히 Reynolds 수의 함수이다. 즉,

Table 2. Hydrodynamic coefficients in prototype and model

구분	원형	모형(1/120)
L (수심 43.7 m)	270 m	2.25 m
u_{max} (정수면)	6.53 m/s	0.60 m/s
D (파일직경)	1.651 m	1.38 cm
Re	1.1×10^7	8.2×10^3
C_D, C_I	0.65, 1.5	1.2, 2.0

$$C_D = \phi(Re), C_I = \phi'(Re) \quad (2)$$

여기서, $Re = u_{max} D / \nu$ 이다. u_{max} 는 수립자의 최대 수평 속도이며 ν 는 동점성계수를 의미한다.

SPM (1977; pp.7-110~7-120)에 의하면 Re 에 따른 C_D 와 C_I 의 변화는 다음과 같다.

$$C_D \approx 1.2; Re < 1 \times 10^5 \\ \approx 0.6 - 0.7; Re > 4 \times 10^5 \quad (3)$$

$$C_I \approx 2.0; Re < 2.5 \times 10^5 \\ \approx 1.5; Re > 5 \times 10^5 \quad (4)$$

모델의 축척을 제 3장의 수리모형실험의 축척 1/120과 동일하게 하여 식 (2)~(3)을 적용하고 原型과 模型에 합당한 C_D, C_I 값을 구하면 Table 2와 같다.

模型 스케일에서 波力의 실험치와 SACS 계산치를 비교할 때 유의할 점은 模型과 原型사이에 이들 두 파력의 大小 관계가 유지될 뿐, 이들의 定量的 비율은 유지되지 않는다는 사실이다. 파력은 식 (1)에 의거, 水粒子的 운동학적 성분(u, a_x)에 의하여 결정되며 파력의 大小는 이들 운동학적 성분의 大小에 따른다. u 와 a_x 는 Froude 相似律을 따르게 되며 動水力学 계수 C_D, C_I 에 관계없이 模型과 原型사이에 파력의 大小관계가 유지되는 것이다.

水粒子的 운동학적 성분들과 달리 波力 그 자체는 Froude 상사를 만족시키지 않는다. 왜냐하면, Table 2에서 보는 바와 같이 原型과 模型사이에 동수역학 계수들(C_D, C_I)의 값이 다르기 때문이다. 따라서, 두 개의 파력간의 비율이 原型과 模型사이에 유지될 수 없다. 이와 같은 이유로 模型에서의 파력을 原型 파력으로 직접 전환할 수 없으며 原型 파력값은 模型에서의 수립자의 운동학적 성분을 Froude 相似律에 의거 原型 값으로 전환한 다음 이에 원형구조물에 상응하는 動水力学 계수들을 적용하여 산출하여야 한다. 만약, 模型에서의 파력 및 바다모멘트를 Froude 相似律(기하학적 축척

Table 3. Maximal horizontal wave forces and moments for model structure ($C_D = 1.2, C_I = 2.0$) : SACS

구분	파향(도)	파향(도)												
		0	10	20	22.5	30	40	45.0	50	60	67.5	70	80	90
선형파	FN(N)	9.88	9.84	9.70	9.67	9.62	9.58	9.58	9.58	9.62	9.64	9.63	9.82	9.87
	$M_B(N\cdot m)$	2.23	2.23	2.19	2.18	2.21	2.14	2.15	2.15	2.17	2.17	2.17	2.23	2.23
Stream function파	FN(N)	11.61	11.60	11.54	11.51	11.20	11.34	11.32	11.22	11.37	11.46	11.47	11.53	11.53
	$M_B(N\cdot m)$	3.21	3.19	3.18	3.18	3.13	3.15	3.15	3.11	3.12	3.16	3.16	3.18	3.16

Table 4. Air gap of the model structure (deck level from the bottom : 53.3 cm)

계산 프로그램	파동이론		Stream function 파	
	파정고 (cm)	air gap (cm)	파정고 (cm)	air gap (cm)
SACS	47.0	6.3	51.0	2.3
기본설계				2.18

의 3층)에 의거하여 原型 값으로 직접 환산하면 Reynolds 수의 변화에 따른 현저한 縮尺誤差(scale effect)가 발생하게 된다.

2.2 模型構造物에 대한 파력 및 Air gap의 계산

이어도 模型構造物에 대하여 SACS 프로그램을 적용하여 최대수평파력 F_H 와 바닥을 기준으로 한 최대모멘트 M_B 를 Table 3에 제시하였다. 이어도 구조물은 底面이 정사각형인 四方 대칭형이며 파향을 0°~90°로 변환시킨 것은 구조물 위치에서의 모든 가능한 입사방향을 고려하기 위한 것이다. 파동이론은 線形波와 기본설계 시 채택하였던 Stream function 5차 파를 이용하였다. 표를 보면 전반적으로 후자가 전자보다 큰 파력 및 모멘트의 값을 보임을 알 수 있다. 線形波와 Stream function 파를 각각 채택할 때, 이어도 模型構造物과 같은 小形 구조물에 대한 SACS 프로그램의 적용성은 한국해양연구소 (1999, pp. 118-164)에 상세히 검토되어 있다.

模型構造物에서의 Air gap를 SACS를 이용하여 계산하였으며 그 결과를 Table 4에 제시하였다. 線形波에 비하여 Stream function파는 현저히 작은 Air gap를 보여주고 있으나 기본설계 시 채택한 2.18 cm(模型 스케일) 보다는 크게 나타났다.

3. 수리모형실험

3.1 실험장비

한국건설기술연구원에 설치되어 있는 삼차원 조파수

조(48 m×48 m×1.2 m)를 이용하였다. 조파장치는 파스톤식 조파장치로서 조파판은 길이 3 m의 판이 10개 직렬로 연결된 형태이며 5개씩의 조파판이 동시에 가동된다. 파고계는 용량식 파고계로서 실험전과 실험후에 보정을 하여 사용하였다. 波力計 센서는 strain gauge형으로서 파력성분 $F_x, F_y, M_z(x, y)$: 수평 좌표)를 측정할 수 있는 三分力 檢出器이다. 최대계측범위는 파력은 10 kg, 모멘트는 5 kg·m이다. 파력계 센서의 증폭기는 動的 증폭기로서 게인(gain)을 조절할 수 있으며 본 실험에서는 1 kg을 4 volts, 1 kg·m를 10 volts로 독취하였다. 데이터 독취장치는 19채널의 파고계와 파력계 3채널을 수용하기 위하여 총 22채널을 가동하였다.

3.2 模型製作 및 설치

이어도 주변 等水深圖와 실험수조의 크기(48 m×48 m×1.2 m)를 감안하여 길이 축척비율 $l_r = 1/120$ 로 하였다. 이어도 模型 및 파 제원의 模擬는 Froude 相似律을 따랐다.

이어도 模型의 模擬 해역은 海圖 상 수심 55 m 이 내만 축소 제한하였으며 模型을 Fig. 4와 같이 설치하였다. 차후의 파고계측을 위하여 地面에 일정간격의 測點을 표시하였다. 波誘導臺(wave guider)는 조파기에서 이어도 模型에 도달하기까지는 불투과식, 그 이후는 투과식으로 처리하였다(그림에는 S 파향만 도시).

구조물 模型은 부재의 剛性이 차후 파력측정에 영향을 줄 것임을 고려하여 가급적이면 큰 강성을 얻기 위하여 철심을 박은 아크릴 튜브로 제작하였다. 模型의 상부는 차후 파력계에 연결할 목적으로 圓形 아크릴 판을 부착하였다(Fig. 5). 아크릴판은 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 가로 2 m, 세로 3 m, 높이 80.3 cm의 견고한 철제 프레임에 연결하였다. 프레임은 파도가 지나갈 때 프레임 다리와 模型構造物 사이의 상호간섭효과를 방지하기 위하여 비교적 크게 채택한 것이며 높이는 파력의 계측을 위하여 模型構造物이 바닥에서 약 1 cm 정

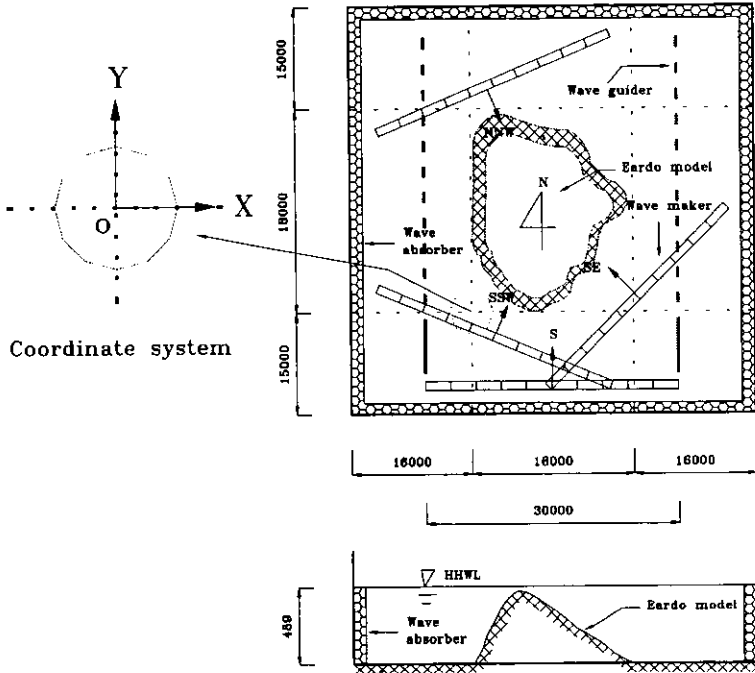


Fig. 4. Plane layout of Ear-Do model.



Fig. 5. The model of Ear-Do structure.

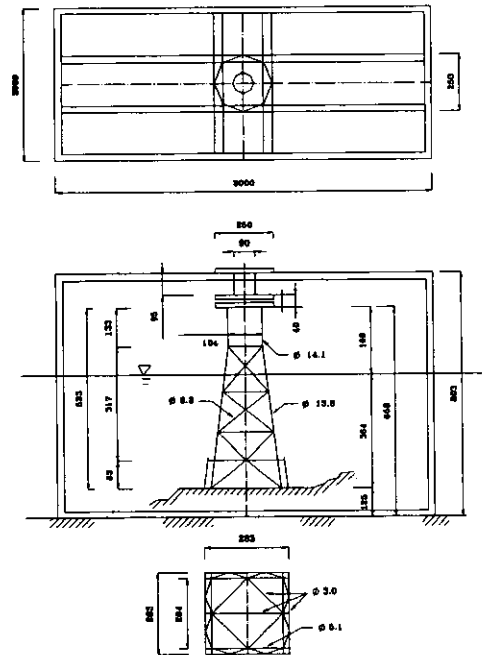


Fig. 6. Installation of the Ear-Do model structure.

도 離隔될 수 있도록 정한 것이다.

3.3 실험조건 결정

본 모형실험의 조건은 Table 5와 같다. 수심은 약 최고만조위(HHWL)로 하였다. 造波波向은 이어도 模型 주

변(수심 489 mm)에서 NNW, SSW, S, SE으로 설정하였으며(이하 深海波向으로 칭함), 각 深海波向에 대한 조

Table 5. Experimental conditions

구분	원형	모형(1/120)
조위	3.7 m	30.8 m
천단고 (DL 기준)	24 m	200 mm (HHWL + 169 mm)
구조물설치 수심	43.7 m	363 mm
이어도 주변수심	58.7 m	489 mm
설계파고	24.6 m	205 mm
설계파 주기	15초	1.37초

파기 위치는 Fig. 4에 표시되어 있다.

3.4 파고 및 파력계측

3.4.1 파고계측

測點의 좌표의 원점을 Fig. 4와 같이 설정하고 동쪽
으로 +X, 북쪽으로 +Y로 하며 측정간격은 횡, 종방향
각 1m로 설정하여 측정점을 총 323개로 하였다(Fig. 7).
또한, 참조점 파고계를 조파기 前面에(참조점 #1), 조파
기에서 가장 먼 측정점(참조점 #3), 그리고 이어도 구조
물 위치(참조점 #2)에 각각 고정 운영하였다. 파고계측

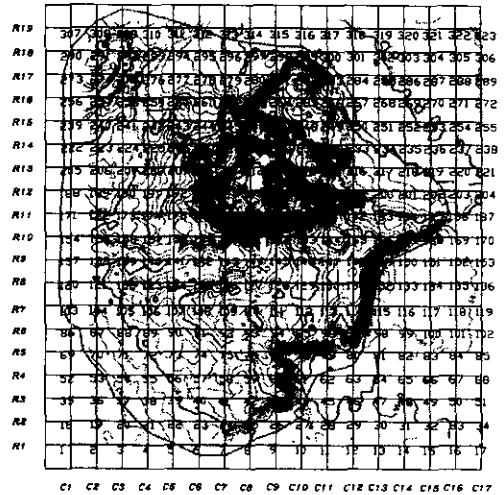


Fig. 7. Measurement points of wave height.

의 데이터 독취는 공히 20 Hz로 하였다.

3.4.2 파력계측

수심 55 m에서 深海波向은 Fig. 4에서 보이는 바와 같
으나 입사파가 이어도 模型을 전파하면서 굴절 및 회

Table 6. Experimental cases (H_p : mean wave height outside the Ear-Do model; H_d : mean wave height at the structure position)

실험안	입사파 조건 (원형스케일)	측정항목	계측지속 시간(초) (분석구간)	독취율 (Hz)	입사파향(수심 58.7 m)			
					NNW	SSW	S	SE
A	규칙파: 설계파(이어도 주변) $H_p=24.6$ m, $T=15$ 초 $d=58.7$ m	파고(263점)	80(30-50)	20	○	○	○	○
		파력(13방향, 0-90도, 10도 간격)	80(30-50)	40	○	○	○	○
		Air gap	(30-50)		○	○	○	○
		SACS(13 방향)			○	○	○	○
B	규칙파: 설계파(구조물 위치) $H_p=24.6$ m, $T=15$ 초 $d=43.7$ m	파력(5방향, 0-90도, 22.5도 간격)	80(30-50)	40		○	○	○
		Air gap	80(30-50)			○	○	○
		SACS(5 방향)				○	○	○
C	규칙파: 이어도 주변 $H_p=18.0$ m, $T=15$ 초 $d=58.7$ m	파고(263점)	80(30-50)	20			○	
		파력(5방향, 0-90도, 22.5도 간격)	80(30-50)	40			○	
D	불규칙파: 이어도 주변 (유의파) $H_p=18.0$ m, $T=15$ 초 $d=58.7$ m	파고(263점) 파력(5방향, 0-90도, 22.5도 간격)	80(30-80)	20 40			○ ○	
E	쇄파: 구조물 위치 $H_p=32.0$ m, $d=58.7$ m	파력(5방향), 0-90도, 22.5도 간격	80(30-80)	100			○	
F	규칙파: 설계파(이어도 주변) $H_p=24.6$ m, $T=15$ 초 $d=58.7$ m	파력(5방향), 0-90도, 22.5도 간격	80(30-120)	100	○			
G	규칙파: 이어도 주변 $H_p=19.6$ m, $T=15$ 초 $d=58.7$ m	파력(5방향), 0-90도, 22.5도 간격	80(30-120)	100	○			

절현상을 겪게 되므로 실제 구조물 위치에 발생할 淺海波向을 판단하기는 매우 어렵다. 따라서, 구조물 위치에서 가능한 모든 파 입사방향을 고려하기 위하여 파력센서의 x방향을 Fig. 4에서 설정한 고정좌표계의 +X 축에서 반시계방향으로 0°와 90°사이에 일정각도(10° 또는 22.5°)를 돌려가며(구조물의 방향은 고정) 파력(F_x , F_y , M_y)을 측정하였다. 여기서, x방향은 구조물 위치에서의 기상적 파 진행방향과 일치한다. 구조물의 靜的設計가 수평파력($F_H = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$)의 최대치의 시점에서 이루어짐을 감안하여 본 파력계측은 수평파력의 도출에 역점을 두기로 한다. 다만, 모멘트 성분인 M_y 는 계측시그널의 양상을 파악하기 위해서만 이용하는 것으로 국한한다.

3.5 실험안 및 측정항목

본 수리모형실험에서는 총 7개의 實驗案이 수행되었으며 Table 6은 각 실험안들의 세부사항을 제시한 것이다. (A)안은 이어도 주변(수심 58.7 m)에 기본설계의 설계파를 발생시켜 수행한 것이다. 또한, 실험결과와 비교목적 상 구조물 위치에도 설계파를 구현한 (B)안에 대한 실험을 수행하였다. 불규칙파 실험(Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼)은 주어진 수심에 설계파를 有意波로 발생시키기에는 조파장치에 무리가 따라 波高가 다소 작은 18 m(模型 15 cm)에 대하여 수행하였다(D 안). 이 경우에도 비교목적 상 규칙파 실험을 아울러 수행하였다(C 안). 또한, 碎波의 충돌에 의한 파력의 증가효과를 검토하기 위하여 심해파고를 조정하는 시행착오 과정을 거쳐 구조물 위치에 碎波를 발생시켜 실험을 수행하였다(E 안).

실험안(F)와 (G)는 추가적으로 수행한 실험안이다. 제 4.3 절에서 기술되어 있지만 NNW 파향에 대한 파력의 실험결과가 타 심해파향의 결과와 매우 판이하였기 때문에 再 실험을 수행한 것이다. NNW 파향은 이어도 정상상을 거치면서 발생한 碎波의 영향이 구조물의 위치까지 파급된다. 쇄파는 일반적으로 매우 짧은 시간동안에 작용하기 때문에 碎波力の 尖頭值를 계측할 목적으로 (F) 안 실험에서는 (A)파는 달리 데이터 독취간격을 0.01초로 짧게 하였다. (G)안에서는 (F)안과 동일하나 심해파고만 19.6 cm로 감소시켜 실험을 수행하였다.

본 실험안들에서 실험지속시간과 분석구간은 계측시그널이 안정된 변화를 보이는 시간구간을 고려하여 선정된 것이며 전자는 계측 전 시행착오적 과정을 거쳐서, 후자는 계측시그널의 시간변화를 사전 검토하여 결정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 분석방법

Fig. 3에 표시한 바와 같이 조파기 전면에서의 입사파고 H_p (참조점 #1), 구조물 위치에서의 파고 H_d (참조점 #2), 분석구간내(Table 6 참조) 최대 수평파력 F_H ($= \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$), 파력성분 F_x , F_y 및 모멘트 성분 M_y , 분석구간내 파정고의 최대치(H_c)_{max} 그리고 Air gap l_a 를 계측하여 그 결과를 분석하였다. 규칙파에 대한 파고는 평균파고로, 불규칙파의 파고는 유의파고로 결정하였다. 파정고(H_c)_{max}는 靜水面(模型 수심 36.4 cm)을 기준으로 한 것이며 Air gap는 구조물의 天端高를 이용하여(Table 5 참조)

$$l_a = 16.9 \text{ cm} - (H_c)_{\text{max}} \tag{5}$$

로 결정하였다.

4.2 이어도 근처에서의 파고분포

실험안(A)에 대하여 각 添綴波向(수심 58.7 m)별로 Fig. 7의 測點을 따라 파고를 계측하였으며 이중 NNW에 대하여 구조물 인근의 파고분포를 Fig. 8에 제시하였다. Fig.

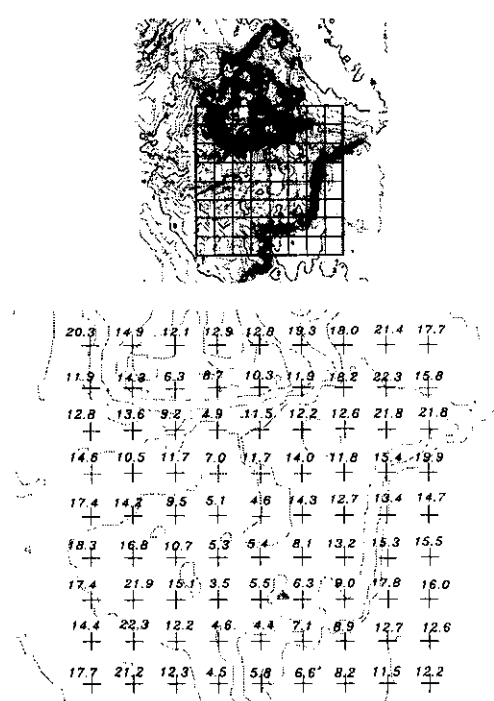


Fig. 8. Wave height distribution for NNW direction.



Fig. 9. Photograph of the experiment for NNW direction.

9에서 보이는 바와 같이 NNW 파향은 입사파가 이어도 頂上에서 심하게 碎波되어 전달되기 때문에 구조물 인근에서의 파고가 설계파보다 현저히 작게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 타 深海波向에서의 파고는 설계파고와 비교하여 작거나 비슷하게 나타났으며 구조물 위치에서 쇄파 또는 파 집중현상은 발생하지 않았다. 그러나, SE 파향에서는 쇄파까지 미치지 못했지만 구조물 前面에서 해저경사(약 1:5)가 급한 지형적 영향 때문에 구조물 인근에서 파고가 他 심해파향에 비하여 다소 크게 나타났다.

이어도 模型 頂上部는 모든 실험안에서 碎波가 발생하였으며 (A), (B), (E), (F)안에서는 정상부가 파주기에 따라 공기 중에 노출되는 현상을 보였다. 이어도 전체를 보면 파의 집중현상은 발견되지 않았고 다만 파 진행방향에서 보았을 때 좌 우 측에서 약간의 굴절이 발생하였다.

4.3 수평파력 및 모멘트

각 실험안 별로 이어도 模型 밖, 조파기 前面에서의 파고 H_p , 구조물 위치에서의 파고 H_d , 파력성분 F_x , F_y , M_y 의 시계열을 검토하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 대표적으로 NNW 파향과 SSW 파향의 기록 (구조물 위치 假想 파향 45°)을 보여주고 있다. Fig. 10에서 구조물 위치에서의 수면변위 η_d 가 상당히 불규칙적으로 나타나 있음을 볼 수 있다. 반면, Fig. 11에서 알 수 있듯이 SSW, S, SE 파향들은 모든 계측시그널들이 비교적 안정적이고 규칙적인 변화를 보였다. NNW 파향에서 불규칙적인 시그널을 보이는 것은 波가 이어도 頂上部를 지나면서 발생하는 碎波의 영향이 구조물위치까지 파급되기

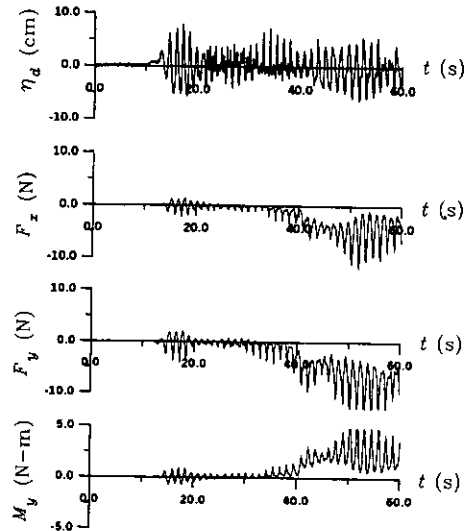


Fig. 10. Signals from wave gauge and wave force meter for case (A): NNW direction.

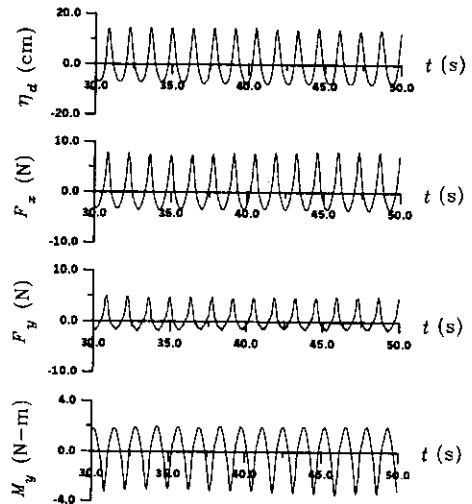


Fig. 11. Signals from wave gauge and wave force meter for case (B): SSW direction.

때문이다.

波力 시그널도 역시 불규칙적으로 나타나 있으며, 특기할 만한 사실은 세 파력성분의 변화가 공히 한 쪽으로 치우쳐 있다. 시그널을 보면 碎波가 발달하기 전의 초기에는 陰陽이 교차하고 있으나 20초 이후에 갑자기 한 쪽으로 치우치는 현상이 발생하는데 30초 이후의 시그널은 마치 一方向性 흐름에 波가 중첩되어 있는 경우의 파력양상을 보이고 있다. 이의 확인을 위한 再 실험

험(Table 6의 (F)안)에서는 데이터 독취간격을 100 Hz, 실험 지속시간을 120초로 길게 하였으나 결과는 Fig. 10 과 매우 유사하였다(한국해양연구소, 1999, pp. 118-164).

이와 같은 현상은 파고를 약화시켜 造波한($H_p = 19.6$ m) (G)안에서도 마찬가지로 발생하였다. 이에 대한 원인은 현재로서는 확실하지 않으나 碎波에 의한 이차적 흐름에 기인된 것으로 보인다. 실제로 실험도중 이어도 頂上部에 뿌린 浮遊體들이 碎波에 의하여 빠른 속도로 구조물 방향으로 이동함을 확인하였다. 이 특이한 현상에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 파력계측기록에서 F_x 와 F_y 를 이용하여 수평파력을 구

Table 7. Measured values of air gap in prototype scale

실험안	심해파향	H_d (m)	$(H_c)_{max}$ (m)	L_d (m)
A	NNW	6.4	8.6	11.7
	SSW	26.8	18.8	1.5
	S	23.6	17.3	3.0
	SE	24.1	16.7	3.6
B	NNW			
	SSW	25.8	17.4	3.1
	S	23.2	17.1	3.2
	SE	24.2	17.3	3.1
C	S	16.8	15.2	8.4
D	S	14.6	15.2	5.1
E	S	24.3	20.9	-0.6
F	NNW			13.2
G	NNW			13.2

하고 분석구간내 최대치 F_p 와 그리고 尖頭值들의 평균을 각각 구하여 Fig. 12-15에 도시하였다. 그림들에서 수평축은 구조물 위치에서의 假想的 파 입사방향을 나타낸다. SACS의 계산결과는 深海 設計波 H_p 가 이 구조물 위치에 그대로 구현된다고 가정하고 도출한 것이다.

Fig. 12에서의 NNW 파향의 결과는 (A)안, (F)안과 (G)안에 대한 것이며 실험결과가 碎波의 영향 때문에 상당정도 분산되어 있다. (F)안과 (G)안의 결과는 수평파력 시그널이 비교적 안정적 변화를 보이는 시간구간에서 얻어진 것이다. 모든 가상 입사방향에 대하여 계측

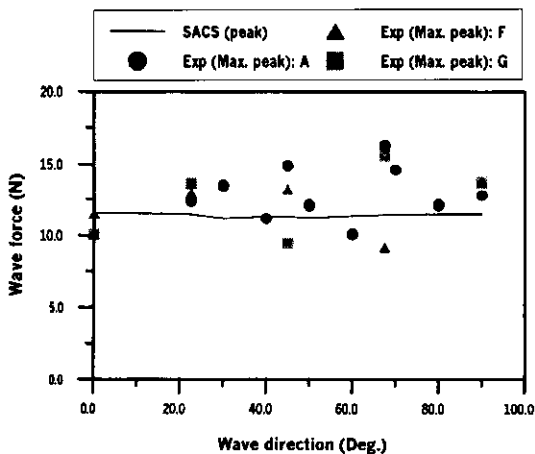


Fig. 12. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (A), (F) & (G), NNW-dir.

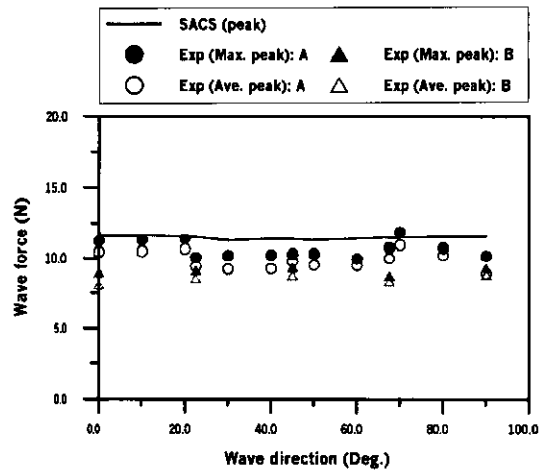


Fig. 13. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (A) & (B), SSW-dir.

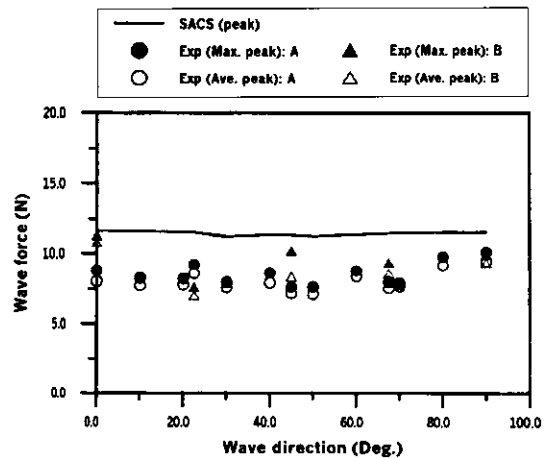


Fig. 14. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (A) & (B), S-dir.

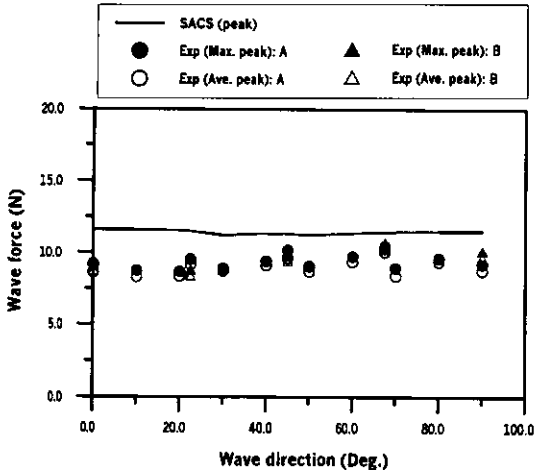


Fig. 15. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (A) & (B), SE-dir.

치가 전반적으로 SACS 계산치를 상회함을 알 수 있다.

SSW, S, SE 파향에 대해서는 이어도 模型 주변의 평탄해역에 설계파를 구현한 실험안(A)와 구조물 위치에 설계파를 구현한 실험안(B)의 결과를 동시에 도시하였다. 전반적으로 모든 假想 입사방향에 대하여 계측치가 SACS 계산치보다 작은 값을 보이고 있다. SSW 파향(Fig. 13)에서는 (A)안이 (B)안보다 다소 큰 결과를 보이고 있는데 이는 평탄해역에 구현된 설계파가 이어도를 지나면서 증폭되었기 때문인 것으로 보인다. 반면 S 파향(Fig. 14)과 SE 파향(Fig. 15)은 (A)안과 (B)안이 거의 비슷한 결과를 보이고 있다.

Fig. 16은 파고 18 m(原型 값)에 대한 (C)안(규칙파)과 (D)안(불규칙파)의 파력변화를 보여주고 있는 바, 불규칙파에 의한 파력이 규칙파의 값들보다 크나 SACS 계산치(설계파)보다 현저히 작다. 본 이어도 구조물의 설계파고는 최대파고 개념이며 有意波高는 약 15 m임을 상기할 때, 이 유의파고를 사용하는 불규칙파 실험 역시 설계파의 SACS 계산치보다 현저히 작은 파력을 줄 것으로 판단된다.

한편, S 파향에 대하여 쇄파파력을 나타낸 Fig. 17에서는 계측파력이 SACS 계산치(설계파)를 월등히 상회함을 알 수 있다. 구조물 위치에서의 수면변위 계측값이 碎波의 영향 때문에 정확한 수치는 아니나 파고가 설계파고와 유사하게 나타났다(평균 20.29 cm). 그러나, 波頂高 H_c 는 17.45 cm로서 설계파가 구조물 위치에 구현된 (B)안, S의 $H_c = 14.29$ cm 보다 크게 나타났다. 이는 쇄

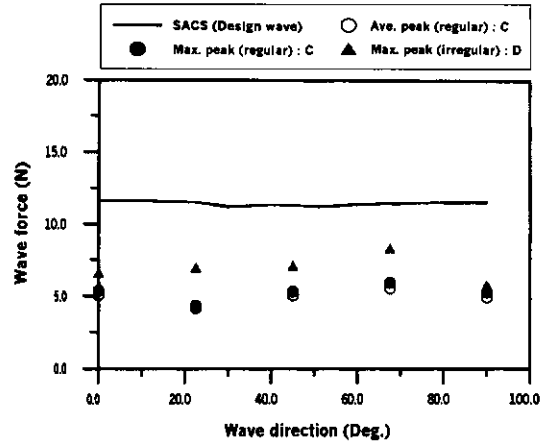


Fig. 16. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (C) & (D), S-dir.

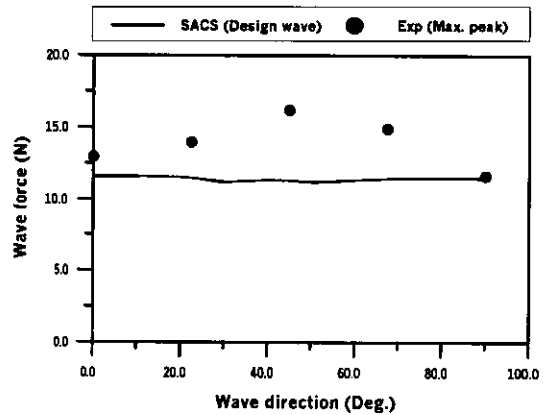


Fig. 17. Comparison of the horizontal wave forces from SACS and experiment: case (E), S-dir.

파의 특성상 당연히 예상되는 결과이다.

4.3 구조물의 Air gap

각 실험안(Table 6)에 대하여 계측한 구조물 위치에서의 파고 H_d , 최대 波頂高(H_c)_{max} 그리고 Air gap L_a 를 模型의 축척 1/120을 적용하여 原型 값으로 환산하면 Table 6과 같다. 최대 波頂高는 분석구간에서 발견되는 최대값을 사용하였다. (A)안 SSW 파향에서의 값 1.5 m를 제외하고는 나머지 모든 실험안에서 계측값이 기본 설계에서 채택한 2.62 m보다 크음을 알 수 있다. 본 계측치는 각 실험안의 분석구간 중 발견되는 최대 波頂高를 사용하였음을 감안하면 주어진 설계파고에 대해서 기본설계 채택 값이 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 제안

이어도 및 이어도 구조물에 대한 삼차원 수리모형실험을 수행하여 4개의 대표적 深海波向에 대한 이어도 주변의 파고분포와 구조물에 작용하는 파력 및 Air gap를 계측하였다. 실험결과는 해양구조물 해석 전문프로그램인 SACS의 계산결과와 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 설계파를 평탄해저에 구현하는 경우, 모든 深海波向에 대해서 이어도 頂上部를 포함하는 구조물 인근해역에서의 파고분포는 거의 설계파고(20.5 cm, 模型 값)보다 작거나 유사하다. 또한, 구조물 위치에서 碎波는 발생하지 않았으나 이어도 頂上部는 모든 深海波向에서 捲波性 碎波가 발생한다. 따라서, 구조물 입사파가 이어도 頂上部를 넘어오는 NNW 파향에서는 구조물 위치에서 他 深海波向에 비교하여 파고가 현저히 작다.

- SSW, S, SE 파향의 각각에 대하여 설계파를 평탄해저에 구현하는 경우와 구조물 위치에 구현하는 경우의 파력 실험결과를 비교할 때 이들은 별 차이가 없다. 또한, 계측파력은 설계파를 입력으로 한 SACS의 계산파력보다 유사하거나 작다.

- NNW 파향에 대해서 설계파를 평탄해저에 구현하는 경우, 모든 가상 파향에 대하여 계측파력이 SACS 계산치(설계파) 보다 큰 것으로 나타났다.

- 설계파고보다 작은 파고(18 m)를 평탄해저에 구현하여 규칙파와 불규칙파 실험을 수행한 결과, 불규칙파가 규칙파보다 최고 1.4배 정도 파력이 크나 설계파의 SACS 계산치 보다는 작게 나타났다. 따라서, 본 설계의 有意波高(약 15 m)에 대한 불규칙파 실험 역시 SACS 계산치(설계파)보다는 작은 파력을 줄 것으로 판단된다.

- Air gap는 거의 모든 실험안에 대하여 기본설계에서 채택한 2.62 m 보다 크다. 단, 설계파를 평탄해저에

구현하는 경우의 SSW 파향에서 유일하게 작게 나타났으나(1.5 m) Air gap가 데이터 분석구간내의 최대 파정고를 이용하여 계산한 점을 감안하면 전반적으로 기본 설계 값이 타당한 것으로 판단된다.

NNW 파향은 他 深海波向과는 달리 심해파가 이어도 구조물의 頂上部를 넘어 碎波되며 구조물에 전파되는 경우이다. 파력실험결과를 보면 他 파향의 값들과 비교하여 구조물 위치에서 파고가 작음에도 불구하고 파력이 더 크게 나타났다. 또한, 파력성분의 시간변화가 전반적으로 양의 값 또는 음의 값 일변도의 값을 보이고 있으며 파와 흐름이 복합되어 있는 경우에 예상할 수 있는 파력 시그널과 유사하다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1999년에 한국해양연구소가 지원하여 수행한 “이어도 종합해양과학기지의 삼차원 수리모형실험” 사업의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 심심한 감사를 표합니다.

참고문헌

한국해양연구소, 1999. '99 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. BSPM 99020-00-1209-2.
 한국해양연구소, 1998. '98 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서, 해양수산부, BSPM 98004-00-1118-2.
 Dawson, T.H., 1983. Offshore Structural Engineering, Prentice-Hall, Inc.
 SPM, 1977. Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, Corps of Engineers, U.S. Army.