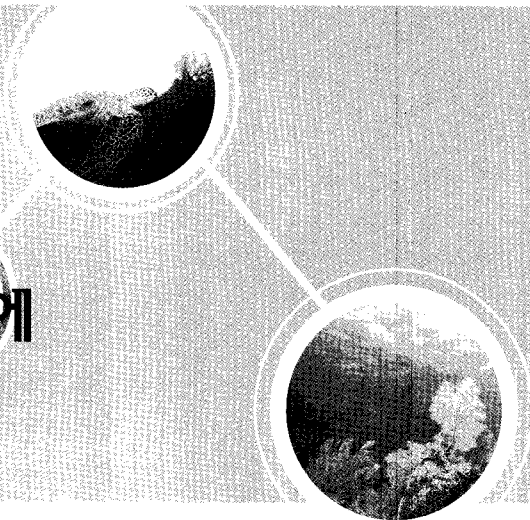


# 수중부재의 파력산정에 관한 고찰



**오재택**  
(주)유신 전무이사, 항만 및  
해안기술사  
ohjttt@yooshin.co.kr



**나용진**  
국토해양부 과장, 토목구조  
공학 박사  
ujna@korea.kr

## 1. 서론

오늘날의 선진 기술부국들은 영해주권의 수호와 바다자원의 선점을 위해 해양 기지구축과 개발에 박차를 가해 오고 있으며, 우리나라 또한 신국제 해양질서에 대응하여 해양영토 관리와 해양부국 구현을 위한 청색혁명의 기치아래 해양자원 탐사, 해양과학기지 구축, 해상풍력·파력 발전, 국제공동시추 사업 등에 점진적인 연구·투자와 참여를 적극 확대하고 있다. 이에 따른 해양 기반시설의 연구·설계와 시공을 담당하는 우리 해안·항만 기술자들의 역할중대가 크게 기대되고 있으며, 이에 상응하는 국제수준의 연구기관과 실적 및 기술역량의 확충에 대한 필요성과 그 중요성은 두말할 나위가 없을 것이다. 이러한 해양·연안 기반시설의 핵심요소인 플랫폼(자켓), 돌핀, 해상교각과 같은 수중부재에 대한 파력산정과 관련하여, GK해상도로(주)에서 시행한 부산-거제간 연결도로 민

간투자사업의 수리모형실험 결과와 국내의 설계기준과 관련문헌에 따른 수치계산 결과를 비교·분석함으로써 우리 연구·기술자들의 실무적 난제가 무엇인지, 좀 더 유의 접근해야 할 요건이 무엇인지 또 이의 해소를 위한 향후 과제가 무엇인지에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 파력산정 요건에 관한 고찰

수중부재에 대한 파력산정식은 국내외를 막론하고 Morison식을 기본으로 하고 있다. 본 고찰에서는 상기 부산-거제간 연결도로(이하 거가대교)의 해상교각에 대한 HR Wallingford(영국)의 수리모형실험 보고서(2005)에 제시된 실현상의 파력값과 Morison식에 의한 수치계산 결과간의 비교·분석을 통해, Morison식 적용시의 설계 고려요건 즉 파형, 위상 및 파력계수

의 선정에 관한 적정성을 평가하고 Wave/Current-Structure Interaction에 따른 Hydrodynamic 특성상의 설계 유의요건에 대해 설계 안전성과 경제성 관점에서 고찰한다.

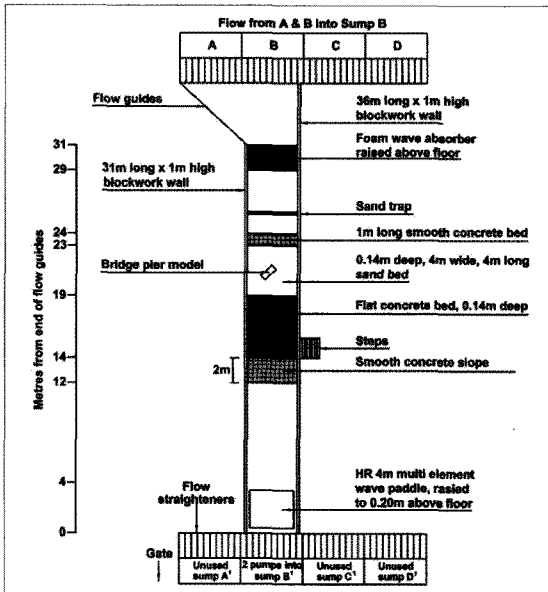
2.1 비교·고찰의 방법

1) 수리실험 개요 및 결과

① 실험의 개요

• 전술한 수리모형실험은 해상교각에 대한 입사 파향별 Wave와 Current를 외력으로 하여 시행한 5가지 경우의 실험으로서 그 실험 개요는 다음과 같으며, 실험모형의 평면 개요도는 <그림 1>과 같다.

- 실험목적 : 해상교각에 대한 파력산정 검증
- 실험기관 : HR Wallingford (영국)
- 모형수조 : 4.0m(B) x 36.0m(L) x 1.0m(H), 불규칙파 Wave+Current 수조
- 모형축척 : 1 : 50 (정상모형)



<그림 1> 실험모형 평면도

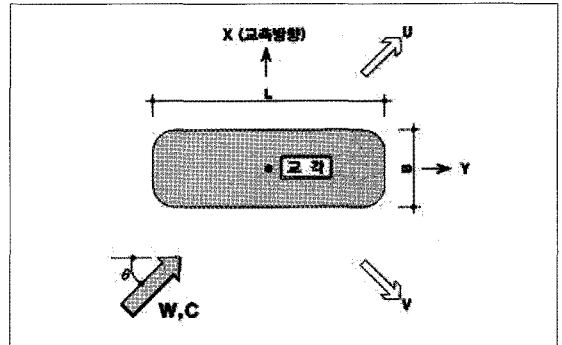
- 실험조건 : 외력조건 - 파랑 및 조류 (100년빈도)부재형상 - Semi Circular Ends Rectangular Body

② 실험결과

• 좌표계는 <그림 2>에 보인 바와 같이 Wave와 Current의 진행방향은 (+)U, S.W.L상향은 (+)Z, 교축방향은 (+)X, 교축직각은 (+)Y이다. 결과 도입에 있어 파력합력은 (+)U방향으로 취하고 Z분력은 제외하였으며, CASE-A의 실험값은 타 CASE와 유사조건으로 비교하기 위해 중심조정후 보정하였고 실험결과는 <표 1>과 같다.

2) 비교·고찰 방법

각 CASE별 파력계산 조건과 실험값간의 비교 일



<그림 2> 부재형상(교각) 개요도

관성을 유지하고 분석Case의 단순화를 위해 다음의 조건과 기준을 적용하였다.

① 수치계산의 조건

• 외력조건 : 수리실험의 경우와 동일하게 Wave Only(이하  $W_0$ ), Wave+Current(이하  $W+C$ ), Current Only(이하  $C_0$ ) 조건으로 하고,  $W+C$  조건은 Co-Directional로 하였으며, Wave는  $H_{max}(=1.8H_s)$ 를 적용하였다.

〈표 1〉 수리실험 개요 및 결과

(단위 : kN, m)

CASE	A(50)		C(42)		Za(33)		Zb(28)		Zc(23)	
입사각	50 deg		42 deg		33 deg		28 deg		23 deg	
부재폭	18.5Lx13B (m)		37.7Lx19B (m)		23.7L x 13B (m)					
수심	21.9 m		28.2 m		28.4 m					
Hs	5.5 m		7.2 m		6.9 m					
Tp	16.1 sec		17.0 sec		17.0 sec					
조류속	1.19 m/s		1.10 m/s		0.98 m/s					
실험파력값	Fu	Mu	Fu	Mu	Fu	Mu	Fu	Mu	Fu	Mu
Wave Only	8,368	110,056	41,149	547,373	14,412	241,794	17,763	256,088	15,339	238,687
Wave+Current	8,309	112,528	54,362	844,317	15,006	215,193	14,500	213,269	13,722	211,541
Current Only	645	5,640	4,200	114,917	1,159	12,352	896	10,050	764	8,535

주 1) 입사각은 교축 직각방향을 기준한 각도이며, CASE-A의 파력은 수심보정(28.4m)된 값임

2) 부재폭의 L은 교축방향 길이, B는 직각방향 길이임

〈표 2〉 수치계산 제원

CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
수심	28.4 m	28.2 m			28.4 m	
Hmax	9.9 m	13.0 m			12.4 m	
부재폭	22.5 m	39.4 m		23.8 m	22.6 m	21.2 m

주) CASE-(38)은 비교 및 도식시의 편의를 위해 입사각을 균등화한 임의 CASE이며, 값적용은 CASE-Za값 또는 C와 Za의 중간값을 취함

- 부재형상 : 실험시의 실험상은 Angular Body이나, 수치계산에 있어서는 CASE-C(최대 부재폭)의  $D/L_A$ (상대폭원)=0.149로서, Isaacson(1979)의 제안기준인 0.2 또는 Norwegian Petroleum Directorate에서 제시한 0.15 보다 작으므로 Morison식의 적용조건인 Rounded Body(Pile)로 적용하였다.
- 파형조건 : CASE-A(최소 파고)의  $H/gT^2$ (상대 파고)=0.0039로서 Le Mehaute(1970)의 제안기준인 0.001보다 크므로 Stokes 2nd Order Wave를 적용하고, 비교를 위해 3rd Order 및 Airy Wave에 대해서도 검토하였다.
- 위상조건 : 단일부재에 대한 고찰이므로 위치위상은 고려하지 않았으나, 최대파력 산정을 위한 시각위상은  $t=15.4$ sec로 동일 적용하였으며 비

교를 위해  $t=0.0$ sec( $\eta_{max}$ )와  $t=14.5$ sec에 대해서도 검토하였다.

② 비교·분석의 방법

- 검토 항목  
파력산정시의 주요 설계요건인 파형, 시각위상, 파력계수 그리고 수동역학적 특성에 관한 Flow Separation, Current, Free Surface Effect의 문제 등을 검토항목으로 설정하였다.
- 검토 기준과 방법  
- 파력산정에 관한 수리모형 실험은 Wave-Structure Interaction상의 제 불규칙 특성 및 항력과 관성력간의 상대 변동성 등이 복합적으로 반영된 실현상적 결과로서, 수리실험 전반에 관한 상당 수준의 신뢰도를 전제로 하여 실험값을

〈표 3〉 수리실험 조건별 단위파력

(단위 : kN · m)

CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
Wo 조건	26.29	34.61		40.48	47.07	49.09
W+C조건	26.88	53.39		36.03	39.20	43.51
Co 조건	1.30	7.27		2.07	1.85	1.76
관성력 성분비	84%	87%		81%	80%	79%

〈표 4〉 Wave Profile별 파력비교

(단위 : kN)

구 분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력(Wo조건)	Stokes 2nd	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
	Stokes 3rd	57.92	94.84	85.56	85.56	85.31	85.00
	Airy	28.15	29.02	27.35	27.35	27.11	26.80
상대파력비(Wo조건)	S 2nd/M	179%	185%	150%	150%	129%	124%
	S 3rd/M	220%	274%	211%	211%	181%	173%
	Airy/M	107%	84%	68%	68%	58%	55%

본 고찰의 비교·분석의 기준으로 하였다.

- 파력계산에서는 CASE(입사각)별로 Wave Force 와 Moment를 각각 산출하되 비교 편의를 위해 수중부재의 검토관건인 Moment값을 기준으로 분석하였으며, 단위는 SI계이다.
- 실험 및 계산 파력의 비교는 CASE별 동질성 확보를 위해 단위파력으로 환산하였다. 환산방법은 Morison식( $F = CD \times H^2 \times D + CM \times H \times D^2$ )의 논리에 따라 항력과 관성력의 성분비를 산출하고 각 성분별로 파고(H)와 부재폭(D)의 가중평방근을 취해 1차원화 하였으며, 외력조건별 실험값의 단위파력은 〈표 3〉과 같다.
- 결과 비교를 위한 표와 그림에서, 실험값과 수치 계산값을 각각 M과 N으로 표기하였다.

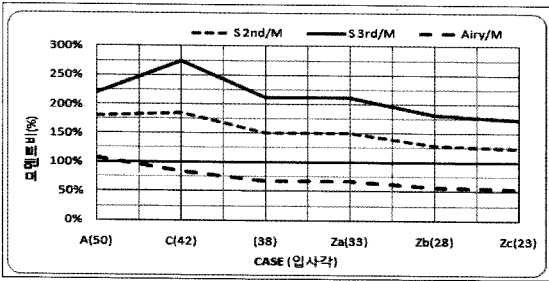
## 2.2 Morison식의 설계 고려요건

Morison식에 의한 설계파력 산정시의 고려요건은 외적요건으로서 파고와 부재폭원, 내적요건으로서 Kinematic Factor인 파형과 위상 및 Phase Index

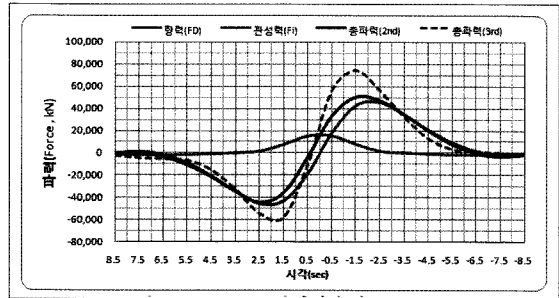
개념의 파력계수를 들 수 있다. 본 절에서는 Morison식의 내적요건인 파형, 위상, 파력계수의 선정에 따른 영향도와 적정성(실현상 재현도)에 대해 분석하고, 설계 적용상의 유의점이 무엇인지 고찰하였다.

### 1) 파형에 대해

- 국내의 설계기준에 의하면 파력산정시는 Finite Amplitude Wave(F.A.W) 특성을 반영토록 명시하고 있다. 본 절에서는 파고계급과 수심에 따른 Wave Profile별 파력영향 평가를 위해, Wo조건(CM=0.6)에서의 Stokes 2nd, 3rd Order Wave 및 Airy Wave Profile의 최대파력값과 실험값을 비교·분석하였으며 그 결과는 아래의 〈표 4〉, 〈그림 3〉과 같다. 또한 CASE-C의 파력성분(2nd Order)과 Order별 총파력을 〈그림 4〉에 참고로 제시하였다.
- 상기의 표와 그림에서 보듯, CASE-Z(a, b, c)의 2nd 및 3rd Order에서의 실험값 대비 상대파력



〈그림 3〉 Wave Profile별 파력비교



〈그림 4〉 Wave Order별 총파력 비교(CASE-C)

비는 각 124~150%, 173~211%의 범위로서 3rd Order의 경우는 실험값에 비해 과대파력을 나타낸다. 실험 CASE의 최대값(CASE-Zc)을 적정 만족하는 Morison식의 계산값은 Stokes 2nd Order Wave를 적용한 경우로서 Le Mehaute의 Validity Region과도 잘 일치함을 확인할 수 있다. 한편, Airy Wave의 경우는 실험값 대비 55~68%에 불과하여 실현상에 비해 과소 산정됨으로써 파력산정에 있어서의 파형선정의 중요성을 실감할 수 있다.

- 특이사항으로서, 파랑입사각에 따른 실험값의 단위파력은 최대 49.1kN(CASE-Zc)과 최소 34.6kN(CASE-C)으로서 1.4배의 상대편차를 보이고 있으나, 수치계산값은 CASE별로 일정하고 오히려 CASE-C에서는 최대로 되어 실험값 대비 약 1.9배의 과대파력을 나타낸다. 이는

파형의 문제를 넘어 Morison식의 적용 한계점으로 해석되며 설계실무에서의 유의점으로 파악할 수 있다. 이러한 실현상에서의 파력편차와 CASE-A, C의 경우와 같은 파고계급과 부재폭원에 따른 특성변화에 대해서는 후술의 Hydrodynamic 특성에서 상세히 고찰한다.

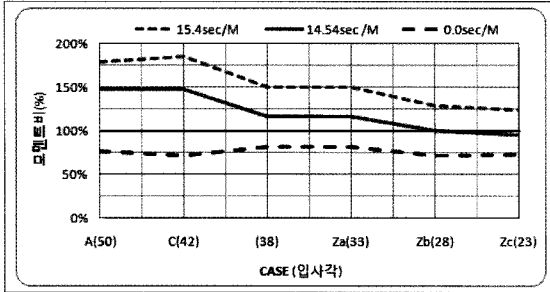
2) 위상에 대해

- 시각위상차에 따른 파력 변동성을 평가하기 위해, 최대파력시의 시각위상  $t=15.4\text{sec}$ 와  $t=14.5\text{sec}$ (CASE-A 최대 파력 위상) 및  $t=0.0\text{sec}$ (최대파형 위상)에서의 CASE별 수치계산값(Stokes 2nd Order,  $CM=0.6$ )과 실험값을 <표 5>와 <그림 5>에 비교·분석하였다.
- $W_0$ 조건에서 평가해 볼 때, 먼저 위상  $t=0.0\text{sec}$ 의 경우 파정고는 최대가 되나 실험값 대비 상

〈표 5〉 시각위상별 파력비교

구분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력( $W_0$ 조건)	$t=15.4\text{sec}$	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
	$t=14.5\text{sec}$	38.62	51.24	47.31	47.31	46.93	46.45
	$t=0.0\text{sec}$	20.11	24.60	33.13	33.13	33.70	35.41
상대파력비( $W_0$ 조건)	15.4sec/M	179%	185%	150%	150%	129%	124%
	14.5sec/M	147%	148%	117%	117%	100%	95%
	0.0sec/M	76%	71%	82%	82%	72%	72%

주) CASE-A의 최대파력 위상은 14.5sec임



〈그림 5〉 시각위상별 상대파력비교

대 파력비는 80%로서  $t=15.4\text{sec}$ 의 60% 이하에 불과하여 현저하게 파소 산정됨을 알 수 있고,  $t=14.5\text{sec}$ 의 경우 상대 파력비는 95%~147%이나  $t=15.4\text{sec}$ 의 80% 수준으로 파소 산정되었다. 이와 같이 최대파력은 시각위상에 따라 크게 좌우되므로 설계 실무에서는 파고계급과 파형특성 등에 지배되는 시각위상의 선정에 유의해야 함을 알 수 있고, 특히 F.A.W 취급에 있어서의 그 중요성은 두말할 나위가 없을 것이다.

- 한편, 최대파력의 시각위상과 파형에 따라서는 SWL상 수상부 관성력의 실효성 여부 즉, Morison 파력과 실현상간의 부분적 괴리의 문제가 있으며, 이에 대해서는 후술의 Free Surface Effect에서 상세히 고찰한다.

### 3) 파력계수에 대해

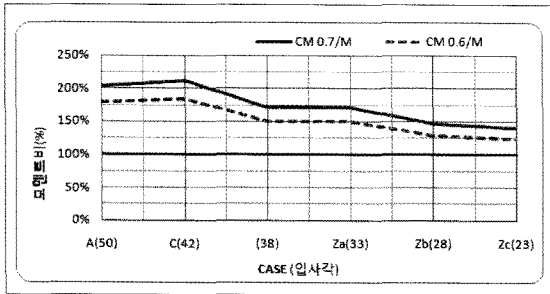
- 파력산정에 관한 Morison식의 핵심적 고려요건은 역시 파력계수( $C_D$ ,  $C_M$ )로서, 이중 관성력계수( $C_M$ )는 항력계수( $C_D$ )에 비해 선정대역이 넓고 변동성이 크므로 일관성이 있는 계수선정과 그 적정성 여부에 대한 확신은 아직까지도 난감한 실정이다.
- 본 절에서는 이러한 관성력계수( $C_M$ )에 대해, 실험결과에 의한 여추산값과 항만 및 어항 설계기준(국토해양부)에 의한 산정값을 비교·분석함으로써 계수선정에 따른 파력영향도와 그 적정성(실험상 재현성) 및 설계유의점에 대해 고찰하였다.

#### ① 실험값에 의한 $C_M$ 추산

- $W_0$ 와  $W+C$ 의 각 조건에 대해 평가하였으며,  $C_D$ 는 0.7(설계기준)로 적용하고  $C_M$ 을 0.7 및 0.6으로 했을 때의 CASE별 계산값과 실험값과의 비교 결과는 〈표 6〉 및 〈그림 6〉에 제시한 바와 같다.
- 먼저,  $C_M=0.7$ 일 때 실험값 대비 계산 모멘트비는  $W_0$  및  $W+C$ 조건에서 각 140~211%, 138~204%이며,  $C_M=0.6$ 일 때 각 124~185%, 121~180%로서  $C_M$ 계수 변화에 따른 파력 영향

〈표 6〉 파력계수별 파력비교

구분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력( $W_0$ 조건)	CM0.7	53.74	73.19	68.93	68.93	68.84	68.73
	CM0.6	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
상대파력비( $W_0$ 조건)	CM0.7/M	204%	211%	170%	170%	146%	140%
	CM0.6/M	179%	185%	150%	150%	129%	124%
단위파력( $W+C$ 조건)	CM0.7	54.92	73.71	69.61	69.61	69.55	69.47
	CM0.6	48.31	64.47	61.47	61.47	61.49	61.52
상대파력비( $W+C$ 조건)	CM0.7/M	204%	138%	193%	193%	177%	160%
	CM0.6/M	180%	121%	171%	171%	157%	141%



〈그림 6〉 파력계수별 파력비교 (Wo조건)

도는 각 CASE 공히 15% 수준으로 나타났으며, 수치계산 결과에서는 Current 유무에 따른 CASE간의 파력편차는 거의 없음(Current의 관성력 성분 제외 때문)을 알 수 있다.

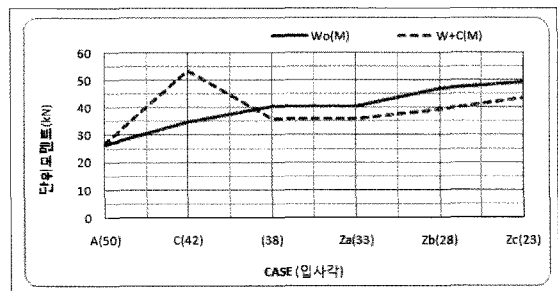
- $C_M=0.6$ 의 경우, 실험값 대비 최소 모멘트비는 W+C조건에서 120%(CASE-Zc) 수준으로서 설계 안전성과 경제성측면에서 볼 때 적정 파력계수로 평가되며, 이는  $C_M$ 값을 역추산함에 있어 실험값의 최고치는 상회하되 최대 130% 이하가 되도록 선정하였기 때문이다.

② 설계기준에 의한  $C_M$  선정

- 국내 설계기준에 의하면, CASE-A에서  $Re=6.33 \times 10^7 (U_{max}=3.5\%, \text{Rounded Body})$ 이므로  $C_M=1.5$ 가 되며, 타 CASE도 이와 동일하다.
- 참고적으로 T. Sawaragi에 의하면, 원형파일의 경우  $C_M=2.0$ (Small Body)~ $0.3$ (Large Body)으로 제시하고 있고, 설계경제성 확보를 위해서는 계수선정에 유의함은 물론 Diffraction Theory와의 비교 검토를 권고하고 있으며, S. Chakrabarti 또한 파력계수에 관한 각종 Test Data의 조건, Current, Vortex 등에 따라 그 값이 크게 달라질 수 있음에 유념할 것을 강조하고 있다.

③ 파력계수에 관한 고찰

- 종합적으로 분석해 볼 때, 대동소이한 파랑과 부재 조건임에도 불구하고 실험 추산계수(0.6)와 설계 산정계수(1.5)간의 과다 상위로 인한 파력편차는 2배 이상이 되며, 동일한 추산계수(0.6)에서도 CASE간 파력편차가 1.5배가 되어 실험상과 수치계산간에는 괴리가 있음을 알 수 있다. 이는 설계기준에만 의존한 파력계수의 일관된 적용은 설계 안전성과 경제성 측면에서 상당한 무리가 있음을 뜻하며, 수리실험과 관련 문헌자료 등에 근거하여 유의·선정해야 할 것이다.
- 특이점으로서, 실험상인 실험값을 분석해 볼 때 전항의 〈표 3〉과 다음의 〈그림 7〉과 같이, 동일한  $C_M$ 조건에서도 파랑입사각과 Current 유무에 따라 CASE별 단위파력이 크게 상이한 점에 주목할 필요가 있겠다. 이는 수리실험에 의해서만 검출될 수 있는 문제로서 부재폭-파고-입사각과 Flow간의 Hydrodynamic 특성차에 따른 결과로 해석되며, 이에 대해서는 후술의 Flow Separation 및 Current에서 상세히 고찰한다.
- 한편, Shore Protection Manual(CERC)에 의하면 파력계수 선정에 따른 파력 변동폭은  $\pm 50\%$ 로서 부재설계시의 안전율을 1.5( $H_{max}$  적



〈그림 7〉 Current 유무에 따른 파력비교 (실험값)

〈표 7〉 입사각별 파력의 실험치(M)와 계산치(N)의 비교

구분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력	Wo (M)	26.29	34.61	40.48	40.48	47.07	49.09
	W+C(M)	26.88	53.39	36.03	36.03	39.20	43.51
상대파력비	Wo/Zc(M)	54%	71%	82%	82%	96%	100%
	W+C/Zc(M)	62%	123%	83%	83%	90%	100%
단위파력	Wo (N)	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
	W+C(N)	48.31	64.47	61.47	61.47	61.49	61.52

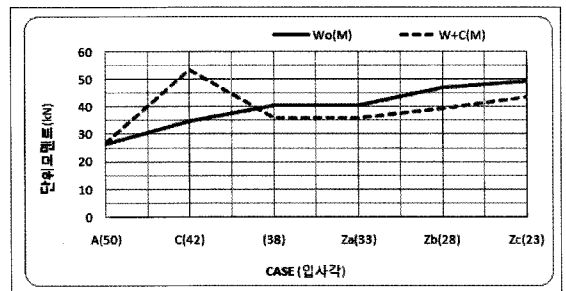
용시)~2.0(H<sub>s</sub> 적용시)으로 고려토록 권고하고 있을 만큼 오늘날까지도 파력계수의 불확실성은 크고 이로 인한 설계자의 고뇌 또한 심대한 실정으로서, 보다 많은 수리실험과 진전된 연구를 통한 설계 Guidance의 제시가 절실하다.

### 2.3 파력장의 Hydrodynamic 특성요건

본 절에서는 CASE별 실험결과와 수치계산의 비교·평가 과정에서 나타나는 설계 유의특성 즉, Wave/Current-Structure Interaction상의 Hydrodynamic 특성에 기인한 Flow Separation, Current, Free Surface Effect 문제들을 분석해 보는 한편, 파력산정과 관련한 설계 안전성 및 경제성 관점에서 이러한 특성들을 어떻게 취급해야 할 것인지 또 향후의 과제가 무엇인지에 대해 고찰하였다.

#### 1) Flow Separation 문제

- 파력값을 단위 폭원·과고로 1차원화 했을 경우, 실험값 또한 계산값처럼 Current 유무에 관계없이 CASE별로 일정해야 함에도 불구하고 아래의 〈표 7〉과 〈그림 8〉과 같이, 실현상의 실험값에서는 Wo 및 W+C조건 공히 입사각에 따라 일정한 감소경향(CASE-Zc 기준)을 나타낸다.
- 이를 분석해 볼 때, 실험값 CASE-A(50°)의 경우 Wo 및 W+C조건에서 CASE-Zc(23°) 대비 각



〈그림 8〉 입사각별 파력의 실험치(M)와 계산치(N)의 비교

-46%, -38%의 파력차인이 발생한다. 즉 파랑입사각이 부재축에 직각방향(23°→50°) 일수록 파력분산되고 역으로 예각(50°→23°) 일수록 파력이증됨을 알 수 있다. 이는 본 거가대교의 실험 CASE와 같이 Angular 부재로서 상대폭원(D/L)이 일정비를 초과하는 경우에 나타나는 Flow Separation에 의한 것으로 이해된다.

- 이러한 파랑 입사각에 따른 파력의 가중·감쇠 현상은 CASE별로 균일한 파력값을 나타내는 수치계산에서는 검출되지 않고 수리실험으로만 파악할 수 있는 특이점으로서 설계 안전성과 경제성 측면에서의 유의점이라 하겠다. 물론, 소형의 단일부재를 취급할 경우 이러한 특성은 묵과될 수도 있겠으나 자켓이나 돌핀과 같은 Group pile에 대한 파력산정의 경우에는 입사각과 위치위상에 따라 Angular(Large) Body로 취급하고 특성 반영할 필요가 있겠으며, 이를



〈표 8〉 입사각별 Airy-Stokes의 파력비교 (Wo조건)

CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
Airy Wave	23.93	23.62	23.75	23.75	23.75	23.75
Stokes 2nd	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78

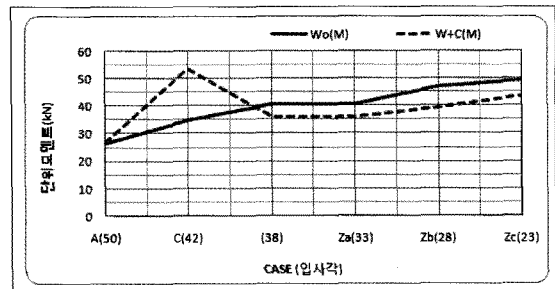
주) Airy Wave의 시각위상은 12.8sec(CASE-A) 및 13.6sec(기타CASE)임

위해서는 Flow Separation의 상관요인(부재형상-폭원-파랑입사각)과 파력영향도에 관한 체계적인 실험과 아울러 Diffraction Theory와의 비교연구 등이 전제되어야 할 것이다.

- 특이사항으로, 수치계산에서는 CASE-A(50°)가 타 CASE에 비해 상당한 파력감소로 나타나는 점이다. 이는 파력의 1차원화 과정에서 파고계급이 낮은 CASE-A의 파력성분에 내재된 유한진폭과 특성차를 고려하지 않은 결과로 사료되며, 이에 대해서는 Wo조건인 Airy-Stokes Wave간의 파력값을 비교한 다음의 〈표 8〉, 〈그림 9〉에서 잘 확인할 수 있다. 한편 W+C조건인 실험값의 경우, 수치계산과 달리 CASE-C는 CASE-Z 대비 1.2~1.5배의 파력가중을 나타냈으며 이 점에 대해서는 후술하는 Current 문제에서 고찰한다.

2) Current 문제

- 파력산정시의 Current 영향을 분석해 볼 때, 전항의 〈표 7〉과 〈그림 8〉에서 보듯, 국내 설계기준에 의하면 흐름에 대한 파력은 항력으로만 반영토록 되어 있어 Current의 관성력 성분은



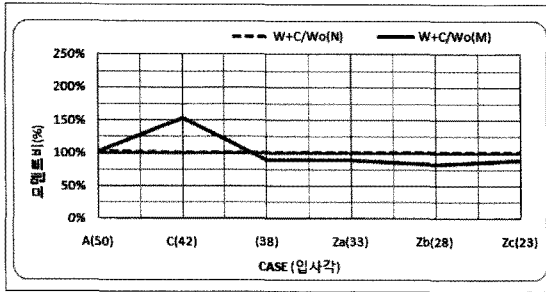
〈그림 9〉 입사각별 Airy-Stokes의 파력비교 (Wo조건)

무시되므로 Wo 및 W+C조건 모두 CASE별 수치계산값은 거의 일정하게 된다. 그러나 실험상인 실험값의 경우, Wo조건에서는 수치계산과 유사한 경향을 나타내는 반면 W+C조건에서는 Current 영향이 확연히 드러남으로써 파력산정시 감안해야 할 주요 특성요건임을 확인할 수 있다.

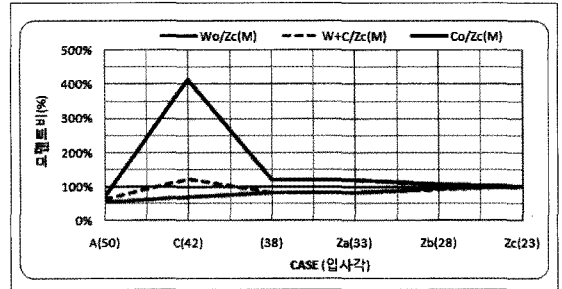
- 실험값에서의 Current 유무에 따른 상대영향도 (W+C/Wo)를 분석한 아래의 〈표 9〉와 〈그림 10〉을 보면, CASE-C(42°)에서 최대 154%로서 항력으로만 산입한 수치계산의 영향도에 비해 1.5배의 상대편차를 나타내며, 특히 Co조건

〈표 9〉 Current 유무에 따른 상대영향도 비교

구분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력	Wo (N)	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
	W+C(N)	48.31	64.47	61.47	61.47	61.49	61.52
	Wo (M)	26.29	34.61	40.48	40.48	47.07	49.09
	W+C(M)	26.88	53.39	36.03	36.03	39.20	43.51
상대영향도	W+C/Wo(N)	103%	101%	101%	101%	101%	101%
	W+C/Wo(M)	102%	154%	89%	89%	83%	89%



〈그림 10〉 Current 유무에 따른 상대영향도 비교



〈그림 11〉 실험조건별 상대파력 비교 (실험값)

실험값을 분석한 다음의 <표 10>과 <그림 11>에서도 이와 동일한 영향특성을 확인할 수 있다. 이는 실현상의 파력장에서 Current의 관성력 성분이 유효하게 작용하는 것으로 해석할 수 있으며, 이에 관한 설계 안전성 측면에서의 유의·반영과 이를 위한 설계기준의 보완연구가 절실하다 하겠다.

- 특이사항으로서, Current 영향도가 임의 입사각을 전후하여 (+)에서 (-)로 변함으로써 파력이 가중되거나 감소되는 점이다. 이는 파랑입사각과 부재폭에 관계된 Flow Separation에 따라 그 정도는 다를 수도 있을 것이나 Current의 관성력은 Wave의 관성력과는 상이한 hydrodynamic 특성으로서 작용하기 때문으로 이해될 수밖에 없다 하겠다. 왜냐하면 다음의 <표 10>과 <그림 11>의 Wo조건 실험값에서 보듯, Wave의 관성력이나 부재폭의 영향으로 볼 수 있는 특이점은 나타나지 않기 때문이다.
- 따라서, 파력에서의 이러한 Current 영향도

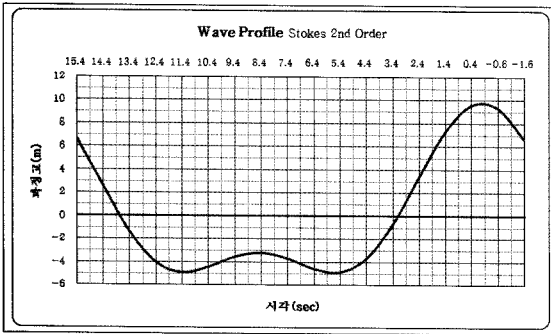
는 입사각에 따라 좌우될 것으로 평가된다. 즉, 입사각 45°(추정) 내외에서 파력가중이 최대가 되고 50° 이상, 40° 이하를 경계로 역전되면서 Wo조건보다 파력감소될 것으로 예상된다. 한편, 거가대교 수리실험에서는 파향과 유향이 co-directional이었으나 Wave와 Current의 입사각이나 크기가 서로 상위할 경우에는 current-structure interaction상의 hydrodynamic 특성차로 인해 본 고찰과는 또다른 경향과 파력 영향도를 나타낼 것으로 사료되며, 이는 향후 연구과제의 하나가 되겠다.

### 3) Free Surface Effect 문제

- 국내의 설계기준과 SPM 등에서는 파력의 정밀 산정을 위해서는 Free Surface Effect를 반영토록 명시하고 있다. 이는 F.A.W의 Non-Linear 특성에 입각한 실현상 구형(최적파력 산정)을 위한 취지이겠으나 Morison식의 적용한계로 인해 산정파력과 실현상간에는 부분적인 괴리가

〈표 10〉 실험조건별 상대파력 비교 (실험값)

구 분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
상대파력비	Wo/Zc(M)	54%	71%	82%	82%	96%	100%
	W+C/Zc(M)	62%	123%	83%	83%	90%	100%
	Co/Zc(M)	74%	414%	118%	118%	105%	100%

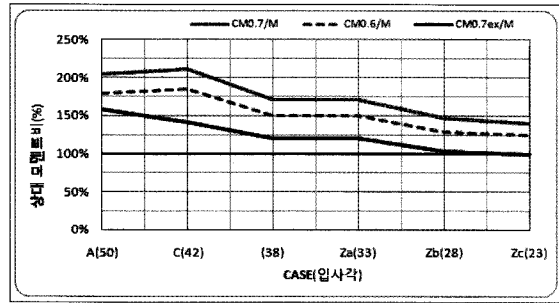


〈그림 12〉 Wave Profile (CASE-C)

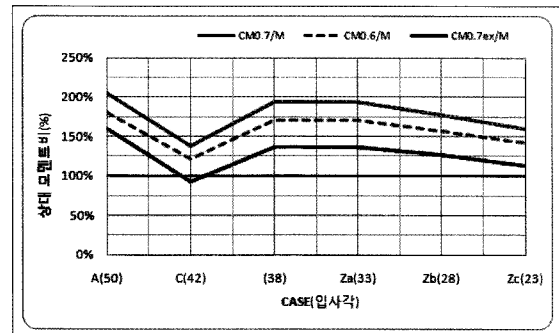
있을 것으로 사료된다.

- 즉, 앞 절의 〈그림 4〉와 아래의 〈그림 12〉에서 보듯, Solitary Wave를 제외한 대개의 F.A Wave에서의 최대파력은 파봉에서 파곡으로 전환(최대가속도)되는 시각위상에서 발생하여 이 위상 직후의 (+)Z 파정고는 실제적으로 소멸(수상관성력 미약)됨에도 불구하고, Morison식 적용에 이러한 수상관성력 여과없이 산입(Free Surface Effect 중첩)할 경우에는 실현상 이상의 과대파력(특히 모멘트값)으로 평가될 수 있다는 점이다.

- 이러한 관점에서 검토한 수상 관성력 제외시의



〈그림 13〉 수상관성력 제외시의 파력비교 (Wo조건)



〈그림 14〉 수상관성력 제외시의 파력비교 (W+C조건)

계산값과 실험값의 비교결과는 다음의 〈표 11〉, 〈그림 13, 14〉와 같으며, Wo 및 W+C조건인 CASE-Za~Zc에서의 파력계수별 수상관성

〈표 11〉 수상관성력 제외시의 파력비교

구분	CASE	A(50)	C(42)	(38)	Za(33)	Zb(28)	Zc(23)
단위파력(Wo 조건)	CM0.7	53.74	73.19	68.93	68.93	68.84	68.73
	CM0.6	47.13	63.95	60.79	60.79	60.79	60.78
	CM0.7ex	41.65	48.79	48.57	48.57	48.69	48.92
상대파력비(Wo 조건)	CM0.7/M	204%	211%	170%	170%	146%	140%
	CM0.6/M	179%	185%	150%	150%	129%	124%
	CM0.7ex/M	158%	141%	120%	120%	103%	100%
단위파력(W+C조건)	CM0.7	54.92	73.71	69.61	69.61	69.55	69.47
	CM0.6	48.31	64.47	61.47	61.47	61.49	61.52
	CM0.7ex	42.84	49.31	49.24	49.24	49.39	48.84
상대파력비(W+C조건)	CM0.7/M	204%	138%	193%	193%	177%	160%
	CM0.6/M	180%	121%	171%	171%	157%	141%
	CM0.7ex/M	159%	92%	137%	137%	126%	112%

력 제외시의 상대파력비는 120~137%로서, 상대파력비 150~193%인 수상관성력 포함시에 비해 실험값 대비 파력편차가 상당 해소됨으로써, Morison식 적용에 있어 수상관성력 제외의 경우가 실험상에 보다 잘 근사함을 알 수 있다 (CASE-A, C의 경우는 전술의 특성 문제를 참조).

- 물론, Morison식의 수상관성력 산입과 관련하여 파력계수의 제 변동성과 설계안전성 측면의 탄력적 대응과 계산편의의 관행적 수단으로 이해할 수도 있겠으나, 심해역 고파랑 조건에서의 파력산정 경우와 같이 정밀해석과 설계 경제성이 요긴한 경우에는 수상관성력의 제외가 바람직할 것으로 사료되며, 이에 관한 진일보의 실험·연구와 이에 바탕한 세부지침의 정립이 절실하다.

### 3. 결과 및 제언

#### 3.1 고찰의 결과

수중부재의 파력산정 요건에 대한 고찰 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- 먼저, 파력산정에 있어 수리실험이 갖는 의미와 결과 적용성은 매우 크고 주효하다.
  - Morison식에서의 조건 적용 한계와 hydrodynamic 특성대응 한계의 검출
  - 파랑입사각별 파력가중과 감쇠 현상(Flow Separation) 검출
  - 파력계수의 편차발생과 적정성 평가에 관한 실험현상 측면의 기준 제시
  - Current 관성력의 유효성과 Wave-Current의 hydrodynamic 특성차 검출 등이 있다.

- Morison식의 일반적 고려요건인 파형, 위상과 파력계수에 관한 설계 주안점과 유의점을 재확인할 수 있었다.

- 천이해역~심해역의 고파랑 조건하의 F.A.W Theory 적용성과 Validity Region 도표의 활용성 확인
- 동일해역, 동일부재 조건에서의 시각위상에 따른 최대파력의 역전현상과 편차도 및 발생요인의 확인
- 파력계수( $C_M$ )의 변동폭과 기준·자료의 한계와 부족에 따른 설계 불확실성의 확인과 설계 유의사항의 도출 등이 있다.

- 또한, 향후의 과제로서

- 설계 안전성과 경제성 제고 측면에서의 제 변수의 변동대역 수렴과 정확성 평가를 위한 체계적인 수리모형실험과 연구의 시행 및 이를 통한 설계 Guidance의 정립
- 파력장의 hydrodynamic 특성 즉, Flow Separation, Current Force, Free Surface Effect, Diffraction Theory, Vortex 등에 관한 진일보된 수리/수치실험·연구와 검증 시행 및 이를 통한 설계기준 보완과 지침 수립 등을 들 수 있겠다.

#### 3.2 제언

해양·항만 기반기술의 역량강화와 선진화를 향한 우리 연구·기술자와 정부·기관의 목표와 의지는 이미 확고하다 하겠으며, 이의 조기 실현을 열망하는 뜻에서 다음의 건의와 제안을 드리며 본 고찰을 맺고자 한다.

- 기술투자와 지원

- 파력산정에 관한 Laboratory 또는 Prototype Model Test는 많은 시간과 비용을 필요로 하는

만큼, 실험·연구성과 및 설계기술의 “사전구축-즉시활용 (Trigger Rule in Design Engineering)”이 가능하도록 적기의 예산투입과 집중적인 지원이 요긴하다.

- 이러한 실험·연구가 단위 Project 또는 기관별로 집행되거나 단속적으로 시행되기 보다는 체계화·통합화·일관화가 바람직하며 이를 위한 정부차원의 시스템 구축이 절실히 요구된다.

■ 전문 협업체계 구축

- 파력해석에 관한 실무 적용성 향상, 기술기준 보완, 사업 시행착오 배제 및 설계기술 수출 등을 위한 관산학연의 협업체계 강화와 전문가 그룹의 구축과 운용을 제안한다.

참고문헌

국토해양부 (2005). 항만 및 어항 설계기준 - 상권. pp. 148.  
 CERC (1977). Shore Protection Manual Vol. II. pp. 7-113.  
 Chakrabarti, S. (1994). Hydrodynamics of Offshore Structures. p. 197.  
 HR Wallingford (2005). Busan-Geoje Fixed Link Physical Model Tests.  
 Sawaragi, T. (1995). Coastal Engineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions. pp.82.

저자 약력 오재택

- 1975~1982 : 부산대학교 공과대학(토목공학) 학사
- 1996~1998 : 부산대학교 산업대학원(토목공학) 석사
- 1982~1994 : 동아건설산업(주)
- 1994~2003 : (주)한국항만기술단
- 2003~2008 : (주)랜드마크월드와이드
- 2008~현재 : (주)유신(항만부) 전무이사

저자 약력 나웅진

- 1991~1994 : 연세대학교 공과대학(토목공학) 학사
- 1995~1997 : 연세대학교 공과대학(토목공학) 석사
- 1996~2005 : 해양수산부 시설사무관, 서기관
- 2005~2008 : 미국 UC.Irvine 공과대학(토목구조공학) 박사
- 2008~현재 : 국토해양부(첨단도로환경과) 과장