

# 크로스 케이블로 접속된 인터로킹 케이슨 방파제의 파력분산특성 Dispersion Characteristics of Wave Forces on Interlocking Caisson Breakwaters by Cross Cables

서지혜\* · 이진학\*\*\* · 박우선\*\*\* · 원덕희\*

Ji Hye Seo\*, Jin Hak Yi\*\*\*, Woo Sun Park\*\*\* and Deck Hee Won\*

**요지** : 이상 기후현상으로 인해 폭풍의 강도가 커지고, 지속시간 또한 길어지고 있어 연안 피해가 점차 대규모화되고 있다. 이러한 변화에 대응하기 위하여 기존 방파제에 대한 평가기준과 신설 방파제의 설계기준이 강화되고 있다. 최근 케이슨식 방파제의 구조적 안정성을 향상시키기 위하여 개별 케이슨이 독립적으로 파에 저항하도록 하였던 방파제 케이슨을 서로 인터로킹시키는 방안이 관심을 받고 있다. 이는 각각의 케이슨에 작용하는 힘을 분산시켜 이상파랑이 발생할 경우에도 최대파력이 저감되어 방파제의 안정성을 확보할 수 있도록 한 것이다. 본 연구에서는 케이블을 이용하여 케이슨 상부를 방파제 기준선방향으로 인터로킹시켰을 때의 파력의 분산특성에 대해서 분석하였다. 수치해석의 효율을 위해 기반과 연결 케이블은 선형 스프링으로 모형화하고 케이슨은 강체로 가정한 정적 선형모형을 개발하였다. 수치해석 결과, 입사각이 커질수록 케이블을 통하여 전달되는 파력비가 높아지고, 인터로킹 케이블의 강성이 클수록 전달 파력비가 증대되어 파력분산 효과가 높아지는 특성을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 인터로킹, 케이슨방파제, 수치해석, 이상파랑, 파력분산

**Abstract** : Damage level of coastal structures has been scaled up according to increase of wave height and duration of the storm due to the abnormal global climate change. So, the design criteria for new breakwaters is being intensified and structural strengthening is also conducted for the existing breakwaters. Recently, interlocking concept has been much attention to enhance the structural stability of the conventional caisson structure designed individually to resist waves. The interlocking caisson breakwater may be survival even if unusual high wave occurs because the maximum wave force may be reduced by phase lags among the wave forces acting on each caisson. In this study, the dispersion characteristics of wave forces using interlocking system that connect the upper part of caisson with cable in the normal direction of breakwater was investigated. A simplified linear model was developed for computational efficiency, in which the foundation and connection cables were modelled as linear springs, and caisson structures were assumed to be rigid. From numerical experiments, it can be found that the higher wave forces are transmitted through the cable as the angle of incident wave is larger, and the larger the stiffness of the interlocking cable makes larger wave dispersion effect.

**Keywords** : interlocking, caisson breakwater, numerical analysis, unusual wave, force dispersion

## 1. 서 론

우리나라 수출·입 물동량의 98% 이상을 담당하고 있는 항만의 구조적 안전성 확보는 국가의 경제발전 및 국민의 안전과 직결되어 있다. 최근 지구온난화 등에 따른 기후변화로 인해 최대풍속이 67 m/s 이상인 슈퍼태풍의 내습이 빈번해지고 있으며, 기후예측모형별로 상이하지만 대부분의 학계에서는 한반도에 영향을 미칠 수 있는 북서태평양지역에서 이러한 강력한 열대성저기압 발생이 늘어나는 추세가 앞으로도 계속될 것이라고 전망하고 있다(Emanuel, 2013; Gleixner et

al., 2014).

이에 태풍의 규모 확대(National Typhoon Center, 2011)로 인해 설계파를 초과하는 고파랑이 동반되는 현상을 생각해 보면 방파제에 대한 추가적인 안정성 확보는 매우 중요하다(Fig. 1, 2). 케이슨식 혼성방파제의 시공이 많은 일본의 피해사례에서 내구년수 50년 안에 파랑에 의한 활동피해가 발생(Takayama and Higashira, 2002)한 사례를 보면 기후변화가 진행되어 이상파랑 발생 빈도수가 증가하면 방파제 피해 발생도 더욱 빈번하게 일어날 것이라는 것을 예상할 수 있다.

1904년 이후 우리나라에 영향을 준 총 336개의 태풍 가운데

\*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Corresponding author : Woo Sun Park, Coastal Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 787 haean-ro, Sangnok-gu, Ansan, 15627, Korea, Tel: +82-31-400-6325, Fax: +82-31-408-5823, wspark@kiost.ac.kr)

\*\*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원(Ocean and Technology (OST) School, Korea Maritime and Ocean University (KMOU))

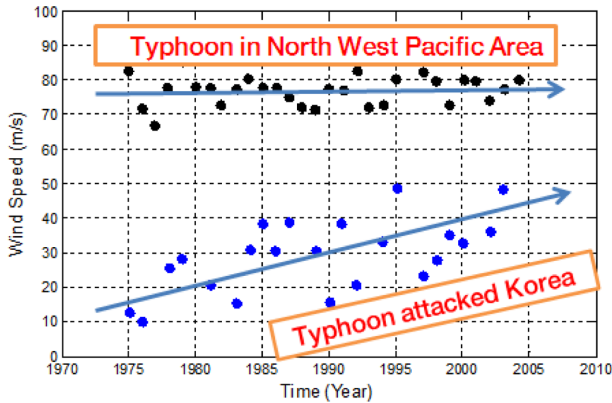


Fig. 1. The annual trend in the maximum wind speed of typhoon.

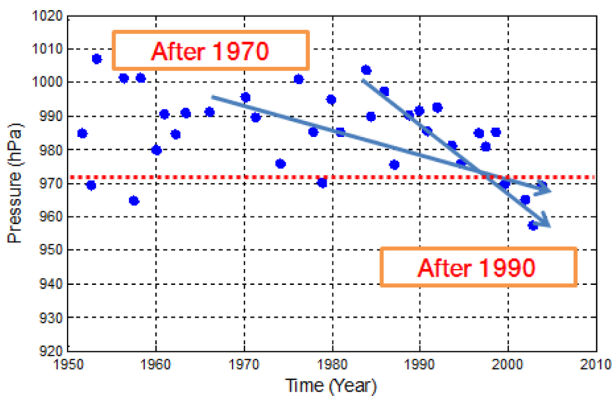


Fig. 2. The annual trend in the lowest pressure of typhoon.

데, 기후변화의 영향을 받은 것으로 판단되는 2012년 제15호 태풍 볼라벤(Bolaven)은 Fig. 3에서처럼 서해안으로 내습하였으며, 제14호 태풍 덴빈(Tenbin)에 연이어 발생하여 피해를 가중시켰다. 제주도를 강타한 볼라벤은 서귀포항 외항이 제 기능을 할 수 없을 정도로 동방파제 상치 콘크리트가 파손되고 전면 TTP 대부분이 유실되는 등 막대한 피해를 가져왔다(Fig. 4). 방파제는 한번 활동피해가 발생하면 보수가 용이하지 않기에 사전에 활동피해를 막는 방안모색이 시급한 실정이다.

최근 이러한 이상파랑에 대한 대응방안으로 케이슨 장대화가 관심을 받고 있다. 케이슨을 장대화하면 케이슨의 단위 길이 당 작용하는 최대파력을 저감할 수 있어 같은 단면으로도 케이슨의 안정성으로 높일 수 있는 장점이 있기 때문이다(Battjes, 1982; Takahashi and Shimosako, 1990). 케이슨을 일체로 길게 제작하거나 인접케이슨을 강결하는 경우, 장비의 용량제한으로 인한 시공상의 어려움, 지반의 부등침하에 따른 구조 안전성 확보의 어려움 등이 있어 이와 같은 방법으로는 길이 제한이 있어 실제적인 장대화에 따른 파력분산 효과를 얻기는 쉽지 않다. 따라서, 최근 인접 케이슨을 서로 인터로킹시켜 파력분산효과를 얻는 방법에 대한 시도가 행해지고 있다(Kim et al., 2010 and 2011; Hyundai Dvp, 2009 and 2011; Park et al., 2011). 케이슨을 인터로킹시키는 방법을 사용하면

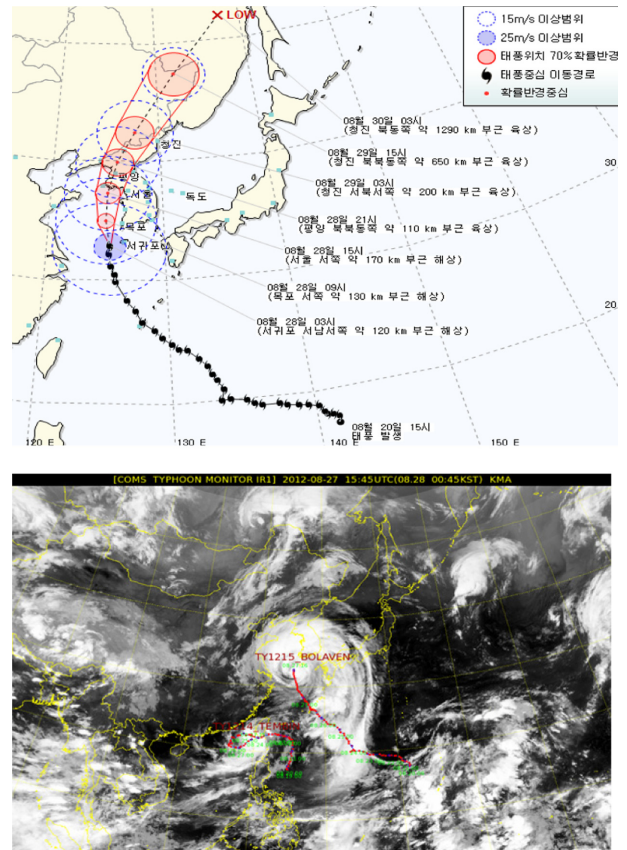


Fig. 3. The track of typhoon Bolaven(a), satellite image(b) (KMA).

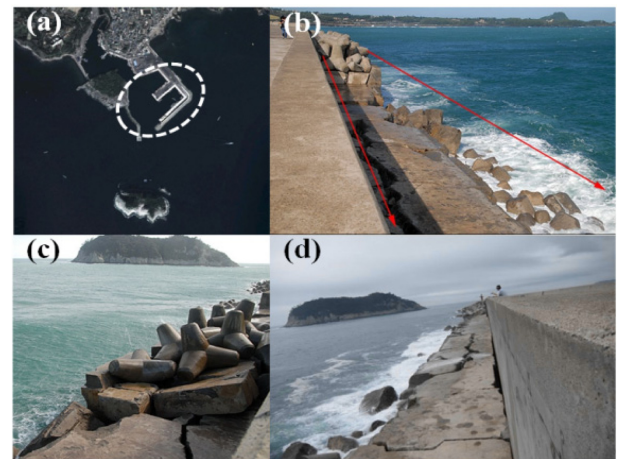


Fig. 4. Layout of Seowipo harbor(a). East breakwater(b), sea(c) and harbor side(d) of south breakwater. (Chae et al., 2013)

기존의 시공장비를 그대로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 지반의 부등침하에 따른 추가적인 구조문제로 부터도 자유로울 수 있다.

본 연구에서는 기존의 케이슨 방파제의 인접 케이슨을 케이블을 이용하여 서로 체결하였을 경우에 대해서 연구하였다. 즉, Fig. 5에 보인 것처럼 인접 케이슨을 케이블을 X형으로 연결한 경우의 케이블에 의한 파력분산효과와 케이블을 통하여 인접 케이슨으로 전달되는 힘의 특성에 대해서 분석하였다.

## 2. 해석모델

케이블로 연결된 인터로킹 케이슨 방파제의 파력분산특성을 수치적으로 분석하기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같이 파고가  $A$ , 진동수가  $\omega$ 인 규칙파가 수심  $h$ 인 해역에 설치된 인터로킹 케이슨 방파제에 경사각  $\psi$ 로 입사하는 경우를 고려하였다. 여기서, 방파제 기준선에 직각 방향을  $x$ , 기준선 방향을  $y$ , 정수면으로부터 연직방향을  $z$ 로 가지는 직교좌표계 ( $x, y, z$ )를 사용하였다.

### 2.1 정적 평형방정식

파력을 받는 인터로킹 케이슨 방파제를 효율적으로 해석하기 위하여, 케이슨은 강체거동을 하는 것으로 가정하고 사석마운드를 포함하는 지반은 Elastic Half Space Theory에 기초한 Winkler 모델로 연직방향과 수평방향의 선형 스프링으로 모형화하였으며 (Newmark and Rosenblueth, 1971), 인접 케이슨을 서로 접속하는 케이블은 선형 스프링으로 단순화하였다(Fig. 6).

수평, 연직 및 회전방향에 대한 힘의 평형조건으로부터,  $i$ -번째 케이슨에 작용하는 평형방정식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow 2k_H^I \xi_i - 2k_H^I H_c \theta_i - k_H^I (\xi_{i-1} + \xi_{i+1} - H_c \theta_{i-1} - H_c \theta_{i+1}) = F_H^W \quad (1)$$

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow k_V^S B_c \zeta_i + k_V^S \frac{B_c^2}{2} \theta_i = -W + F_V^W \quad (2)$$

$$\sum M_O = 0 \Rightarrow 2k_H^I H_c \xi_i + k_V^S \frac{B_c^2}{2} \zeta_i - \left( 2k_H^I H_c^2 + k_V^S \frac{B_c^3}{3} \right) \theta_i + k_H^I H_c (\xi_{i-1} + \xi_{i+1} - H_c \theta_{i-1} - H_c \theta_{i+1}) = -F_H^W d + Wb - F_V^W l \quad (3)$$

여기서,  $\xi_i$ 와  $\zeta_i$ 는 각각  $i$ -번째 케이슨의  $x, z$  방향의 변위이며,  $\theta_i$ 는  $y$ 축방향의 회전각이다.  $k_H^S$ 와  $k_V^S$ 는 지반의 수평, 연직방향 강성계수이며,  $k_H^I$ 는 케이슨을 연결하는 케이블의 강성계수이다.  $F_H^W$ 와  $F_V^W$ 는 케이슨에 작용하는 수평, 연직방향의 파력을 의미하며,  $W$ 는 케이슨의 중량이다. Elastic Half Space Theory에 기초한 Winkler 모델을 이용하면, 지반강성계수는 다음과 같이 얻을 수 있다 (Newmark and Rosenblueth, 1971).

$$k_H^S = \frac{E_s \sqrt{B_c W_c}}{1 - \nu^2} k_T \quad (4)$$

$$k_V^S = \frac{E_s \sqrt{W_c / B_c}}{1 - \nu^2} c_s \quad (5)$$

여기서,  $E_s$ 와  $\nu$ 는 각각 지반의 영계수, 포아송비를 의미하며, 형상계수  $k_T$ 와 중형비  $c_s$ 는 Table 1에 정리하였다. 또한 케이블의 강성계수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

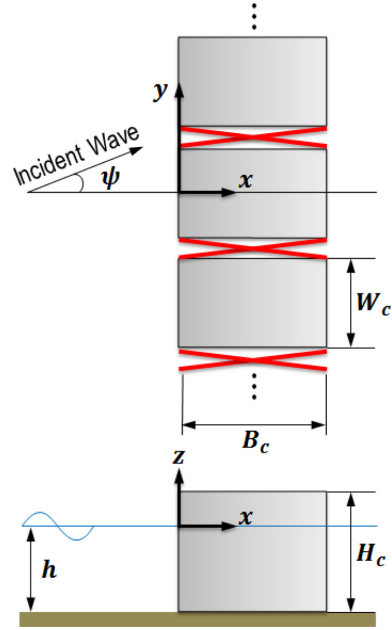


Fig. 5. Definition sketch for an interlocking caisson breakwater by cross cables.

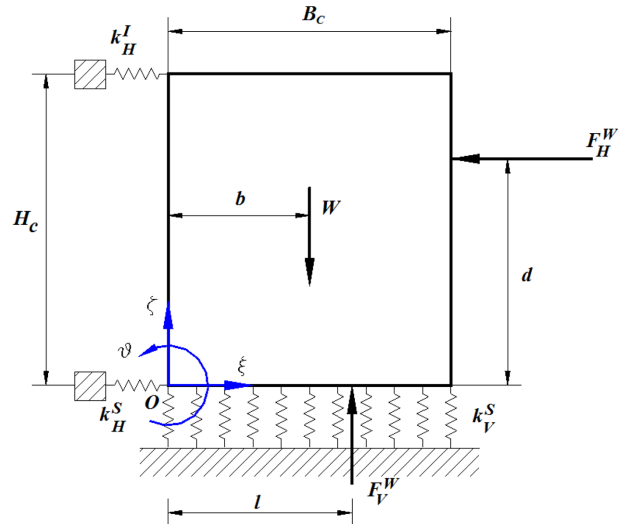


Fig. 6. Simple model for an interlocking caisson breakwater.

Table 1. Coefficient,  $k_T$  and  $c_s$

Aspect ratio	$c_s$	$k_T$				
		$\nu = 0.1$	$\nu = 0.2$	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.4$	$\nu = 0.5$
1.0	1.06	1.00	0.938	0.868	0.792	0.704
1.5	1.07	1.01	0.942	0.864	0.770	0.692
2.0	1.09	1.02	0.945	0.870	0.784	0.686
3.0	1.13	1.05	0.975	0.906	0.806	0.700
5.0	1.22	1.15	1.050	0.950	0.850	0.732
10.0	1.41	1.25	1.160	1.040	0.940	0.940

$$k_H^I = \frac{E_c A_c}{L_c} \quad (6)$$

여기서,  $E_c, A_c$ 와  $L_c$ 는 각각 케이블의 탄성계수, 단면적 및 길이를 의미한다.

## 2.2 케이슨에 작용하는 파력

파가 방파제에 경사지게 입사하게 되면, 각 케이슨의 최대 파력은 위상차를 갖고 작용하게 된다. 본 연구에서는 인터로킹 케이슨에 작용하는 설계파력을 이 위상차를 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$F_H^W = F_H^G \times \gamma_d; F_V^W = F_V^G \times \gamma_d \quad (7)$$

여기서,  $F_H^W, F_V^W$  = 수평 및 연직방향 설계파력;  $F_H^G, F_V^G$  = Goda 파압(Goda, 2010) 분포를 면적분한 수평 및 연직방향 파력;  $\gamma_d$  = 위상차가 고려된 저감계수를 의미한다. 저감계수  $\gamma_d$ 는 Fig. 7에 보인 바와 같이 케이슨으로 구성된 무한 방파제에 경사로 입사하는 선형파에 대한 속도포텐셜을 이용하여 결정하였다[부록 참조]. 즉,

$$\gamma_d = \gamma \cdot \cos \delta \quad (8)$$

여기서,

$$\gamma = \frac{\sin \frac{kW_c \sin \psi}{2}}{\frac{kW_c \sin \psi}{2}}; \delta = ky_i \sin \psi \quad (9)$$

$\gamma$ 는 케이슨 면내 압력의 위상차 효과를 나타낸다.

## 3. 수치해석결과

### 3.1 수치해석조건

인접 케이슨 결합에 따른 파력분산효과를 살펴보기 위하여 수심 15 m에 케이슨( $B_c$  20 m  $\times$   $W_c$  20 m  $\times$   $H_c$  20 m) 10함을

연결한 방파제를 시험대상으로 선정하였다(Fig. 8). 유의주기 15s, 유의파고 9 m 파를 재현주기 50년 설계파로 설정하였으며, 입사각 변화에 따른 파력분산특성을 파악하기 위해 방파제 기준선으로부터 각각 10, 20, 30도로 입사하는 3가지 경우를 고려하였다. 또한, 연결 케이슨의 강성이 분산효과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 지반의 강성계수( $k_H^S$ ) 값 대비 케이슨의 강성계수( $k_H^I$ )가 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 변화하는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

하중케이스(Load Case)는 케이슨 각각에 최대 설계파력( $F_H^G = 57$  MN)이 작용될 경우, 즉, 10개의 하중케이스(LC1~LC10)를 사용하였다. Fig. 9에 각 하중케이스의 작용 파력분포를 최대 설계파력으로 무차원화하여 입사각 변화에 따라 제시하였다. 입사각이 커짐에 따라 작용 파력의 기울기가 급격하게 증가하며, 입사각 20° 및 30°의 경우에는 작용 파력이 크게 변하여 몇몇의 케이슨에서 작용파력이 반대가 되는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 수치해석결과

인터로킹에 의한 파력분산특성을 파악하기 위하여 케이슨

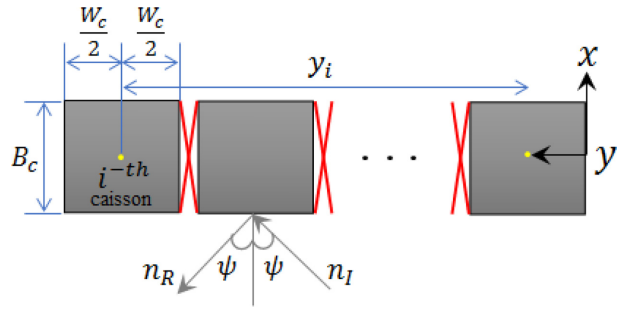


Fig. 7. Definition sketch for calculating wave force acting on the  $i$ -th caisson considering phase lags.

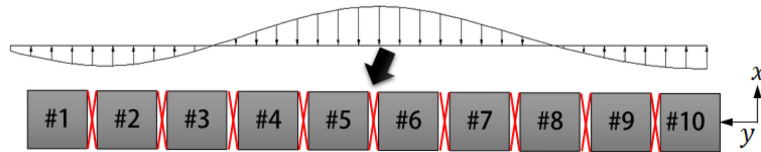


Fig. 8. Definition of caisson numbers.

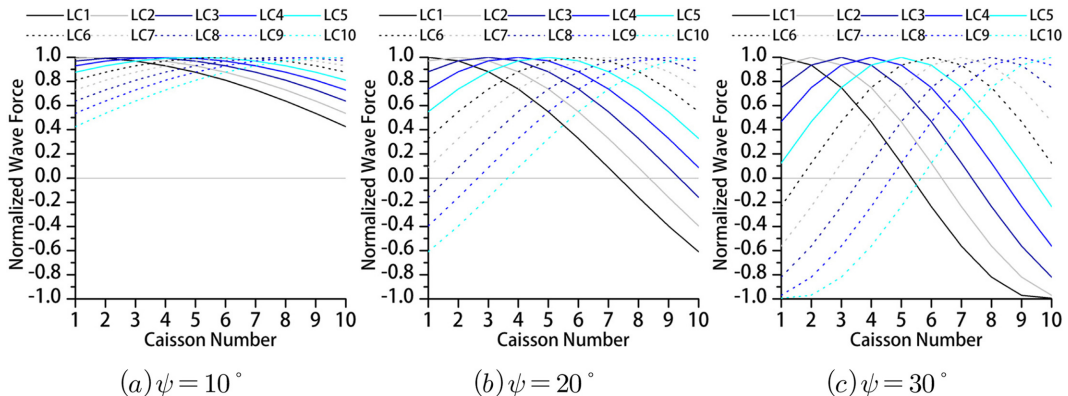


Fig. 9. Distribution of normalized wave forces acting on the greakwater with three different wave attack angles.

을 통하여 직접 지반으로 전달되는 수평파력과 케이블 장력의 변화를 살펴보았다.

### 3.2.1 지반으로 전달되는 수평파력

케이스에 작용하는 수평파력이 지반으로 전달되는 정도는 수평방향 지반스프링의 반력으로 판단할 수 있다. Fig. 10에 입사각, 케이스 연결케이블 강성 및 하중케이스 변화에 따른 지반 수평반력을 최대 수평파력으로 무차원화하여 제시하였다.

그림을 보면, 입사각과 연결 케이블의 강성이 클수록 직접 지반으로 전달되는 수평 파력이 감소됨을 알 수 있다. 즉, 연결 케이블을 통하여 인접 케이스으로 전달되는 힘이 커져 분산효과가 증대됨을 알 수 있다. 강성비가 0.1일 때 입사각이

10도인 경우는 1% 이내, 20도인 경우는 2.2 ~ 4.9%, 30도인 경우는 4.6 ~ 6.7%의 하중분산효과를 보였으며(Fig. 10 a ~ c), 입사각이 30도인 경우 강성비가 0.1이면 4.6 ~ 6.7%, 강성비가 0.2이면 8.2 ~ 11.4%, 0.3이면 11.6 ~ 14.7%로 하중 분산효과가 증대되었다(Fig. 10 c, f, i).

하중분산효과가 크지 않은 것은 현재 해석은 선형모델을 이용하여 설계하중 이내에서만 해석을 실시하였기 때문이다. 지반의 스프링을 마찰저항력을 고려한 비선형 스프링으로 모델링하고 설계파 이상의 이상고파랑에 대하여 해석으로 수행한다면 하중분산효과는 급격히 증대될 것으로 예상된다. 즉, 각 케이스의 수평방향 최대 저항력이 마찰저항력으로 제한되기 때문에 초과되는 하중은 연결 케이블을 통하여 인접 케이스

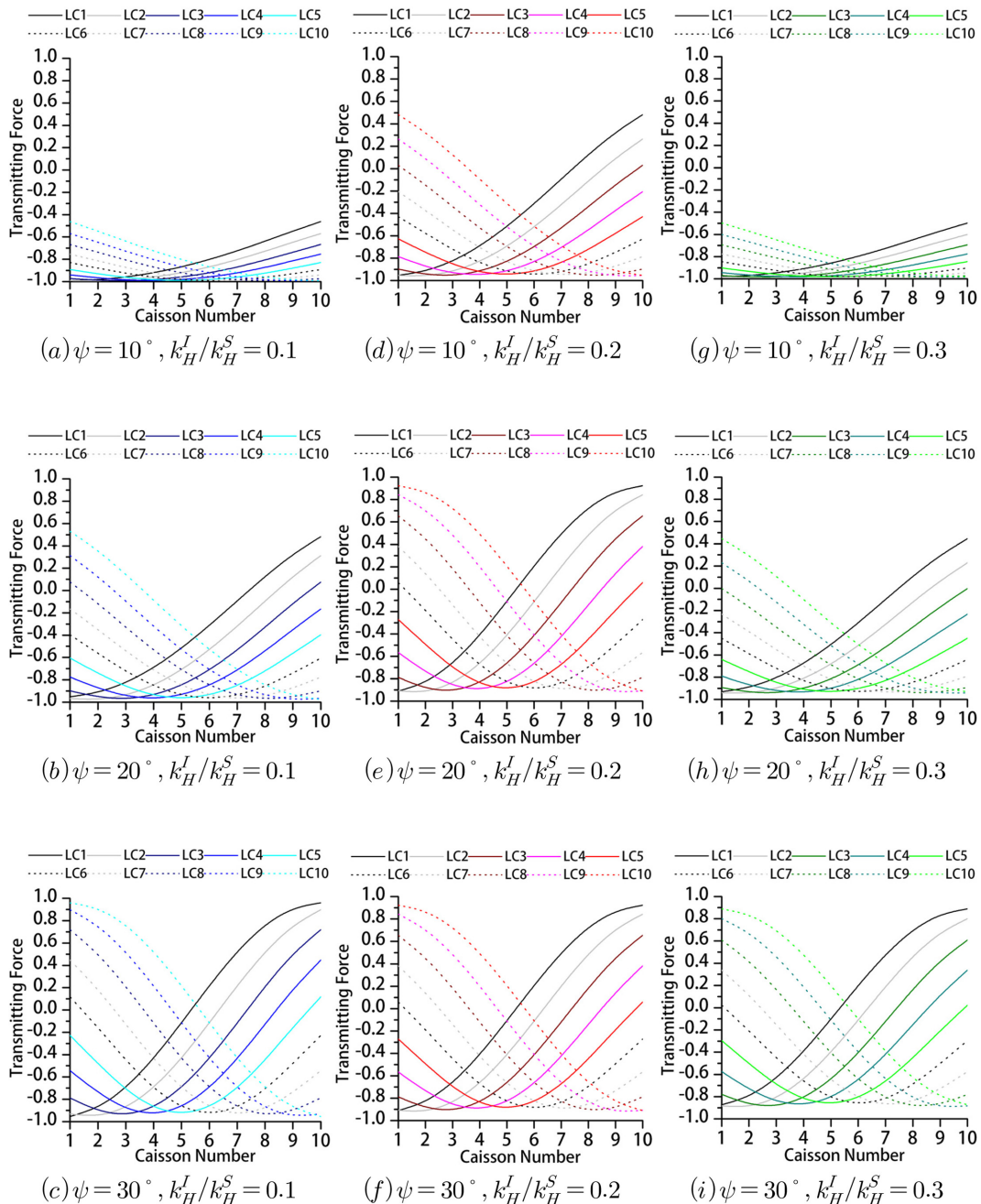


Fig. 10. Variations of transmitting forces to the seabed.

으로 전달되기 때문이다.

### 3.2.2 연결 케이블 장력

케이슨과 케이슨을 연결하는 케이블에 작용하는 장력을 한 케이슨에 작용하는 최대 설계파력으로 나눈 값을 Fig. 11에 제시하였다. 그림을 보면 입사각이 증가할수록, 그리고 연결 케이블의 강성계수가 증가할수록 장력이 증가함을 알 수 있다. 즉, 강성비가 0.1일 때 입사각이 10도인 경우는 4.8%, 20도인 경우는 13.0%, 30도인 경우는 18%로 나타났으며(Fig.

11 a ~ c), 입사각이 30도인 경우 강성비가 0.1이면 18.5%, 0.2이면 33.3%, 0.3이면 45.7%로 장력이 증대되었다(Fig. 11 c, f, i). 또, Fig. 8의 하중 곡선과 비교하여 보면, 케이블에 작용하는 최대장력은 인접케이슨에 작용하는 파력차가 가장 큰 위치, 즉 하중곡선 기울기가 가장 급한 곳에서 발생함을 알 수 있다. 이는 케이블의 장력이 케이슨의 상대변위에 비례하기 때문이다.

앞에서 살펴본 수평지반반력과 케이슨의 장력의 정성적인 특징을 자세히 살펴보기 위하여 특정 하중조건(LC1)에서 입

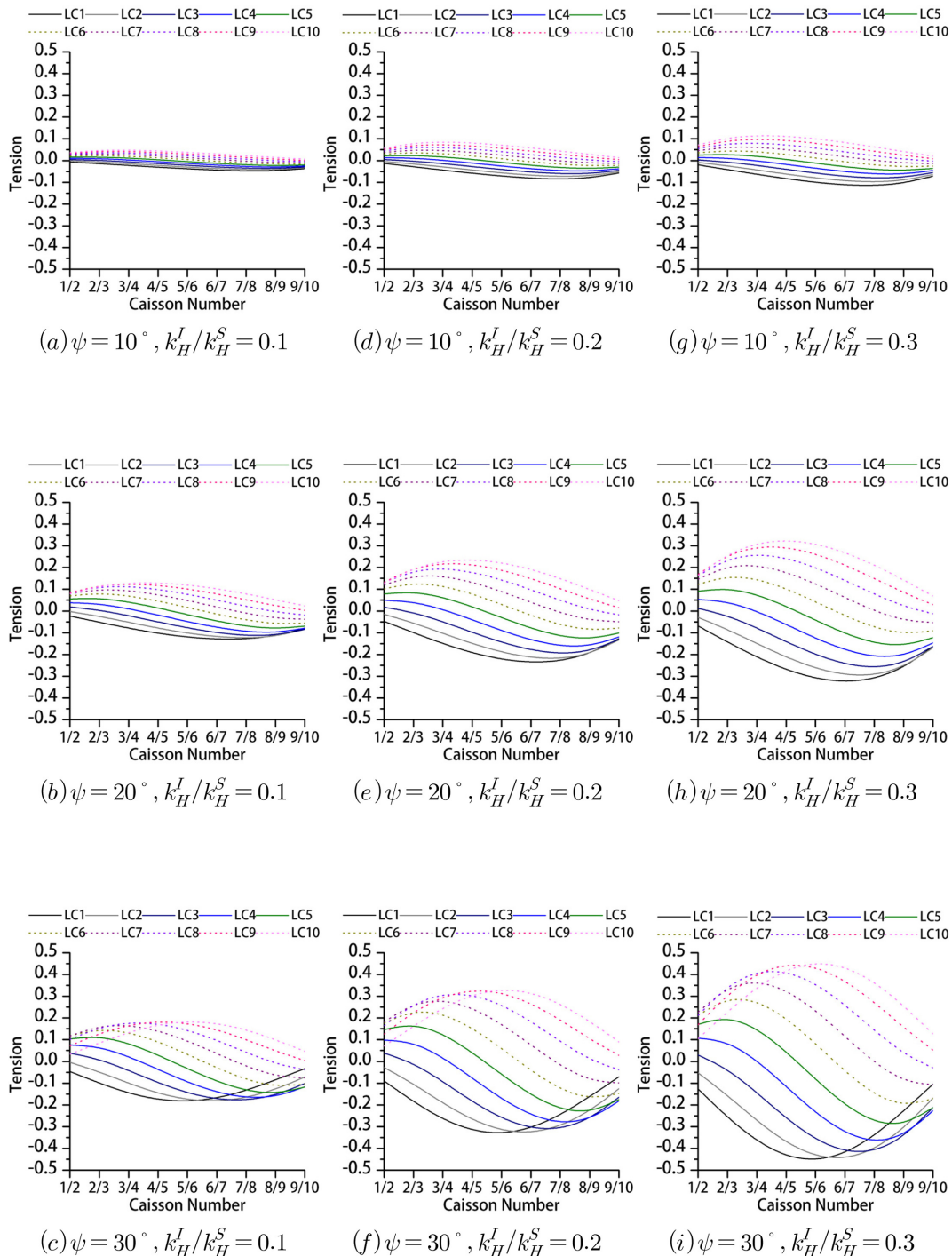


Fig. 11. Variations of tensions in connecting cables.

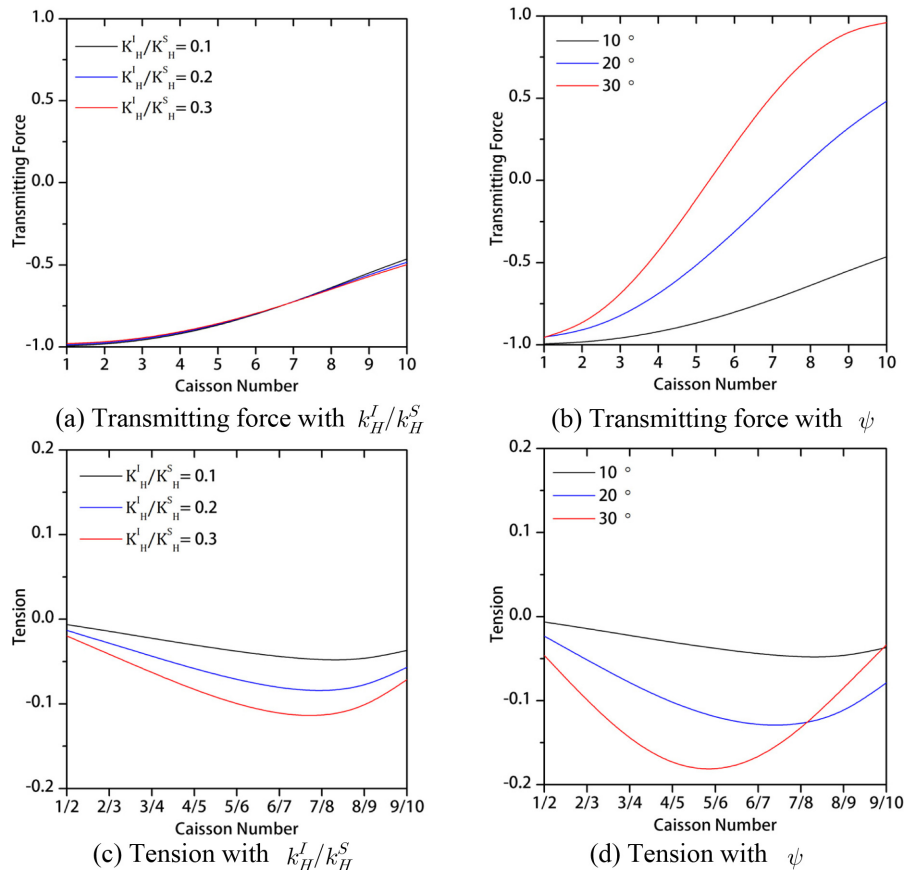


Fig. 12. Transmitting forces to the seabed & tensions in connecting cables for LC1.

사각과 강성비에 따라 비교하여 도시하였다(Fig. 12). Fig. 11과 Fig. 12의 결과를 보면 입사각이 클수록 파력분산효과가 증대됨을 알 수 있고 분산효과를 높이기 위해서는 케이블의 강성을 크게 하는 것이 필요함을 알 수 있다. 그러나 강성이 증가함에 따라 담당 하중 증가율이 감소는 하지만 케이블의 강성(단면적)을 증가하면 담당해야 할 장력도 따라서 증가하게 된다. 따라서, 분산되는 하중에 따른 적절한 규모의 케이블 강성 설계가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이상파랑에 대한 대응방안으로 고려되고 있는 케이블 연결에 의한 인터로킹 방파제의 파력분산효과를 살펴보기 위하여, 선형 정적해석 모델을 구축하였으며, 이를 이용하여 수치실험을 실시하였다. 총 10함의 케이슨으로 구성된 방파제를 대상으로 주요 설계변수인 설계파의 입사각과 연결 케이블의 강성변화에 따라 수치해석을 수행하였다. 도출된 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

-입사각이 증가하면 파력분산효과와 연결 케이블의 장력이 증가한다.

-연결 케이블 강성이 증가하면 파력분산효과가 증가하며, 케이블 장력도 증가한다.

-연결 케이블의 최대 장력은 케이슨에 작용하는 파력을 연

결한 곡선의 기울기가 가장 급한 곳에서 발생한다.

방파제 케이슨에 설계파 보다 큰 이상 고파랑이 내습하면 특정 케이슨에 설계파력보다 큰 파력이 작용될 수 있다. 이러한 경우, 인터로킹 효과에 의해 방파제는 활동에 안전할 수 있다. 이와 같이 이상 고파랑이 작용하는 경우는 본 논문에서 제시한 경향과는 다른 거동을 보이게 된다. 따라서, 설계파 보다 큰 파가 경사로 입사하는 경우의 인터로킹 케이슨 방파제의 응답특성을 알기 위해서는 지반 수평방향 지반반력의 비선형 특성 및 충격 쇄파의 효과를 고려한 비선형 동적 해석이 필요하다. 인터로킹 케이슨 방파제를 경제적으로 설계하기 위해서는 단위 케이슨이 아닌 방파제 전체의 관점에서의 접근이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 ‘관리형 해상처분장 건설기술 개발(PE99324)’의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Battjes, J.A. (1982). Effect of short-crestedness on wave loads on long structures, *Applied Ocean Research*, 4(3), 165-172, 1982.
- Chae, J.W. et al. (2013). Extreme Waves Generated by Typhoon

- Bolaven (201215) in Southern Korean Waters, Proc. 7th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, 996-1001.
- Dalrymple, R. A., and Dean, R. G. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. Prentice-Hall,
- Emanuel, K.A. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century, Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(30), 12219-12224.
- Gleixner, S., Keenlyside, N., Hodges, K. I., Tseng, W. L., and Bengtsson, L. (2014). An inter-hemispheric comparison of the tropical storm response to global warming, Climate Dynamics, 42(7-8), 2147-2157.
- Goda, Yoshimi. (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific, 708.
- Hyundai Dvp. company. (2009). Report of Alternative-design of Counter Facilities Construction at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 2-1)
- Hyundai Dvp. company. (2011). Report of Basic Design of South-Breakwater at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 1 on Zone 1)
- Kim, B.H., Lee, J.W., Park, W.S. and Jung, J.S. (2010). Making Long Caisson Breakwater Using interlocking System, KSCE J. Civil Engrg., 58(12), 65-71.
- Kim, B.H., Kim, J.S., Park, S.Y. and Kim, J.W. (2011). Design Case of the 3D Interlocking Breakwater, Proc. KAOSTS '11 Conf., 1903-1906.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA). (2012). Data report of typhoon Bolaven (201215). 12a.
- National Typhoon Center. (2011). Typhoon White Book, 11-1360016-000001-01.
- Newmark, Nathan M. and Rosenblueth, Emilio. (1971). Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, Inc.
- Park, S.H., Park, W.S. and Kim, H.S. (2011). Evaluation of Structural Behavior for Interlocking Breakwater, Proc. KAOSTS '11 Conf., pp. 1915-1918.
- Park, W.S., Yi, J.H., Won, D.H., and Seo, J.H. (2013). Dispersion Characteristics of Wave Forces on Interlocking Caisson Breakwaters, Proc. KSCDP '13 Conf., 70.
- Takahashi, S., and Shimosako, K. (1990). Reduction of wave force on a long caisson of vertical breakwater and its stability. Technical Notes No. 685, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan.
- Takayama, T. and Higashira, K. (2002). Statistical analysis on damage characteristics of breakwaters. Proc. of Ocean Development Conf., 18, 263-268. (in Japanese).

---

Received 16 July, 2015

Revised 20 September, 2015

Accepted 21 September, 2015

## 부록 : 파력저감계수, $\gamma_d$ 결정

무한 벽에 경사로 입사하는 부분중복파에 대한 속도포텐셜 ( $\Phi$ )은 다음과 같이 주어진다(Dalrymple and Dean, 1991).

$$\Phi(x, y, z; t) = \text{Re} \left[ \frac{gH}{2\omega} \phi(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \right] \quad (\text{A1})$$

여기서,  $\phi(x, y) = (e^{ikx \cos \psi} + K_R e^{-ikx \cos \psi}) e^{iky \sin \psi}$ ,  $K_R$ 은 반사계수,  $\psi$ 은 파랑의 입사각을 의미한다.

케이슨에 작용하는 동수압은 선형화된 베르누이방정식에 의하여 다음과 같이 표현되며,

$$p = -\rho_f \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (\text{A2})$$

$i$ 번째 케이슨에 작용하는 파력,  $F_H^S$ 는 이를 작용면에 대해 적분하여 산정할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} F_H^S &= \int_{y_i - \frac{W_c}{2}}^{y_i + \frac{W_c}{2}} \left[ \int_{-h}^0 p \, dz \right] dy \\ &= \rho_f g \frac{H}{2} (1 + K_R) W_c h \frac{\tanh kh}{kh} \cdot \gamma \cdot \sin(\omega t - \delta) \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

여기서,

$$\gamma = \frac{\sin \frac{k W_c \sin \theta}{2}}{\frac{k W_c \sin \theta}{2}}; \quad \delta = k y_i \sin \theta \quad (\text{A4})$$

식(7)의 저감계수  $\gamma_d$ 는 기준 케이슨( $y_i = 0$ )에 최대하중이 작용하는 때의  $i$ 번째 케이슨의 파력을 연직방향 최대압력분포를 케이슨 전면에 적용하여 구한 파력에 대한 비로 정의할 수 있다. 즉,

$$\gamma_d = \gamma \cdot \cos \delta \quad (\text{A5})$$