

## 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 메커니즘 분석

이우동\* · 허동수\*\*

Lee, Woo-Dong\*, Hur, Dong-Soo\*\*

### Analysis on Mechanism of Wave Attenuation under Wave-Current Interaction

#### ABSTRACT

In this study, we conducted a numerical simulation using Navier-Stokes Solver (HYMO-WASS-3D) in order to analyze wave attenuation under wave-current interaction found in existing hydraulic experiments. It showed that wave energy and wave height are reduced as the wave propagates in coexisting fields between waves and currents. And the wave attenuation became more serious as the velocity of current and thus turbulence intensity were increased at wave-current coexisting field. As well, the wave attenuation became more serious with lower wave height and shorter period when the wave propagates the same distance under interactions between waves and currents.

**Key words :** Wave-current interaction, Turbulence intensity, Wave attenuation, Wave energy, HYMO-WASS-3D

#### 초록

본 연구에서는 기존의 수리모형실험에서 나타나는 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠현상을 분석하기 위하여 Navier-Stokes Solver를 이용한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 파랑과 흐름이 만날 경우, 유속의 난류성분이 증가하여 난류강도가 커지는 것을 확인하였다. 이것으로부터 파랑이 전파될수록 난류의 영향으로 파랑에너지가 감소하고, 파고가 줄어드는 현상을 이해할 수 있었다. 그리고 흐름의 유속이 증가할수록 난류강도가 증가함으로 파고감쇠효과가 크게 나타났다. 또한 파랑이 동일한 거리를 전파할 때에 파고가 작을수록, 주기가 짧을수록 파고감쇠현상이 심화되는 것을 확인할 수 있었다.

**검색어 :** 파랑-흐름의 상호작용, 난류강도, 파랑변형, 파랑에너지, 3차원 수치모델

## 1. 서론

해양에는 다양한 물리적 외력이 존재하며, 그 외력들 간에는 끊임없이 상호간섭이 발생한다. 여기에서 파랑과 흐름의 상호작용이 가장 대표적이라고 할 수 있으며, 이것을 수리학적으로 이해하기 위하여 많은 연구들이 수행되었다. 하지만 아직까지 파랑-흐름의 상호작용에 의한 수리특성이 명확하지 않다.

과거에는 포텐셜 이론에 근거한 연구들(Zhao and Faltinsen, 1988; Baddour and Song, 1990; Isaasson and Cheung, 1993; Lin and Hsiao, 1994)과 2차원 수조를 이용한 수리모형실험들(Iwasaki and Sato, 1971; Kemp and Simons, 1982; Kemp and Simons, 1983; Sakai and Saeki, 1984; Chawla and Kirby, 1988; Umeyama, 2005; Lee et al., 2006)이 주로 이루어졌다. 여기서 포텐셜

\* 중신회원·국립경상대학교 해양산업연구소 선임연구원 (Gyeongsang National University · leewoodong@gnu.ac.kr)

\*\* 중신회원·교신저자·국립경상대학교 해양토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · dshur@gnu.ac.kr)

Received February 1, 2016/ revised April 14, 2016/ accepted June 7, 2016

이론에 의한 연구들은 파랑-흐름의 상호작용 하에서 진행되는 파랑의 파고가 지속적으로 상승하여 결국에는 파형경사가 임계점에 도달하여 쇄파가 발생함으로써 파랑에너지가 감소하는 결과가 도출되었다. 하지만 이와 상반되는 현상(파랑-흐름의 상호작용하에서 파고가 서서히 감소)들이 수리모형실험(Iwasaki and Sato, 1971; Kemp and Simons, 1983; Sakai and Saeki, 1984; Lee et al., 2006)에서 나타나고 있다.

2000년대를 접어들면서 컴퓨터 성능이 향상함에 따라 계산부하가 큰 VOF법 기반의 Navier-Stokes solver를 이용하는 연구들이 진행되었다(Mizutani et al., 2002, 2005; Lee et al., 2011). 이 연구들에서는 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고감소현상이 나타나고 있다. 하지만 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 현상만을 논의할 뿐, 근본적인 파랑변형 메커니즘을 분석하지 못하고 있다. 이에 Umeyama (2005)는 수리모형실험을 통하여 파랑-흐름의 공존장에서 상호작용과 난류구조와 관계를 분석하였지만, 이것 역시 파랑변형 메커니즘을 이해하기에는 부족함이 많다.

최근에는 파랑-흐름 공존장에서 상호간섭에 의한 유동구조를 해석하기 위하여 몇몇의 수치모델이 개발되었다(Olabarrieta et al., 2010; Teles et al., 2013; Son and Lynett, 2014). 그리고 이 연구들은 기존의 수리모형실험결과와 비교·분석하여 높은 일치도를 나타내는 고정도의 수치모델인 것을 알 수 있다. 그러나 파랑-흐름 공존장의 유동구조만을 논의하고 있을 뿐, 파랑변형에 대해서는 거의 고찰하지 않고 있다.

본 연구에서는 PBM (Porous Body Model) 기반의 3차원 수치모델(Hur et al., 2012)을 토대로 파랑-흐름의 상호작용 하에서 지형변동까지 고려할 수 있게 개발된 HYMO-WASS-3D (Lee and Hur, 2014)을 이용한다. 그리고 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 메커니즘을 면밀히 분석하며, 나아가 두 외력간의 상호간섭에 의해 발생하는 난류가 파랑변형에 미치는 영향을 파악한다.

## 2. 수치모델의 개요

본 연구에서는 파랑과 흐름의 비선형 상호간섭에 파랑변형 메커니즘을 분석하기 위하여 파랑-흐름의 공존장에서 유체-지반의 상호작용에 의해서 지형변동까지 예측할 수 있는 Navier-Stokes solver 기반의 HYMO-WASS-3D (Lee and Hur, 2014)를 이용한다. 이 수치모델은 PBM (Porous Body Model)과 VOF법을 기반으로 하며, 난류해석을 위하여 Germano et al. (1991)과 Lilly (1992)가 제안한 동적 와동점성모델 그리고 자유수면의 표면장력을 고려하기 위하여 CSF (Continuum Surface Force)모델(Brackbill et al., 1992)을 적용하고 있다.

## 2.1 지배방정식

기초방정식은 3차원 비압축성·점성유체에서 파랑과 흐름을 무반사로 발생시킬 수 있는 소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성 구조물 내부의 유체저항을 고려한 수정된 Navier-Stokes 운동량 방정식 (2)로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - E_i \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $v_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속,  $q^*$ 는 소스의 유량밀도,  $\gamma_v$ 는 체적 공극률,  $\gamma_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 면적 공극률,  $t$ 는 시간,  $\rho_m$ 는 온도, 염분, 부유사농도를 고려한 물의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\nu_T$ 는 온도, 염분, 부유사농도를 고려한 물의 동점성계수( $\nu_m$ )와 와동점성계수( $\nu_t$ )의 합을 의미한다.  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ 는 변형률속도텐서,  $S_i$ 는 CSF모델에 기초한 표면장력항,  $Q_i$ 는 파랑 또는 흐름의 소스항,  $R_i$ 는 투과성 매체에 의한 유체저항항,  $g_i$ 는 중력가속도항,  $E_i$ 는 에너지 감쇠항을 나타낸다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i v_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = F q^* \tag{3}$$

VOF함수  $F$ 는 각 격자에서 유체가 차지하고 있는 체적비율로서 연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM(porous body model)에 기초한 VOF함수를 적용하여 유체의 보존형식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

나머지 상세한 수치해석방법에 대해서는 Lee and Hur (2014)를 참조하기 바란다.

## 2.2 흐름생성

수치구조 HYMO-WASS-3D는 엇갈림 격자체계(staggered mesh system)로 구성되며, 무반사 조파시스템을 적용하고 있다. Eq. (4)와 같이 흐름소스셀의 격자크기( $\Delta x_s$ )에 따른 유량밀도( $q^*$ )를 지배방정식 (1)-(3)에 대입한다. 따라서 목표 흐름을 정확하게 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 흐름소스에 의한 유동 및 파동장의 교란을 배제할 수 있다. 그리고 무반사 조파시스템에 대한 상세한 사항은 Hur and Lee (2011)를 참조할 수 있다.

$$q^* = \begin{cases} V_c / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $V_c$ 는 입사흐름의 유속,  $x_s$ 는 소스셀을 의미하며, 나머지 셀( $x \neq x_s$ )에서는 유량밀도( $q^*$ )가 0으로 주어진다.

### 2.3 수치모델의 검증

본 연구에서 이용하는 HYMO-WASS-3D는 Lee and Hur (2014)에서 파랑-흐름의 상호작용에서 파랑변형특성(파고감쇠 현상)에 관한 Iwasaki and Sato (1971)의 수리모형실험결과를 매우 잘 나타내었다. 또한 Umeyama (2005)의 실험조건과 동일한 계산 결과가 파랑-흐름 순방향, 역방향 상호작용에 의한 연직평균유속분포를 매우 잘 재현하였다. 따라서 수치모델 HYMO-WASS-3D는 파랑-흐름 상호작용에 관하여 충분히 타당성과 유효성이 입증된 것으로 판단된다. 검증에 관한 상세한 사항들은 Lee and Hur (2014)에서 확인할 수 있다.

### 2.4 수치수조의 구성 및 입사조건

Fig. 1은 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 특성을 분석하기 위하여 구성된 수치수조이다. 무반사로 파랑/흐름을 생성시키기 위하여 해석영역의 양쪽 끝에는 파랑/흐름 소스를 배치하고, 그 배후에는 부가적인 감쇠영역을 설치한다. 여기서 해석영역은 길이

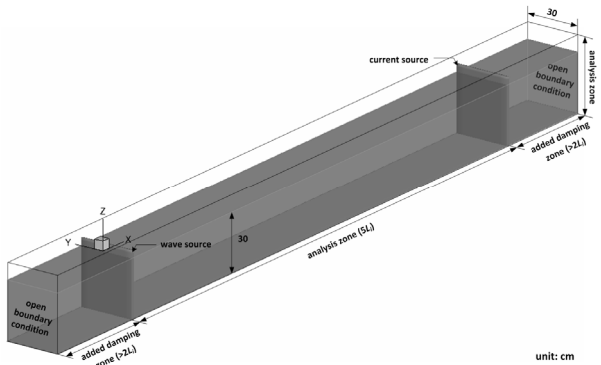


Fig. 1. Definition Sketch of a Numerical Water Tank for Simulations of Wave-Current Interaction

Table 1. Incident Wave and Current Conditions

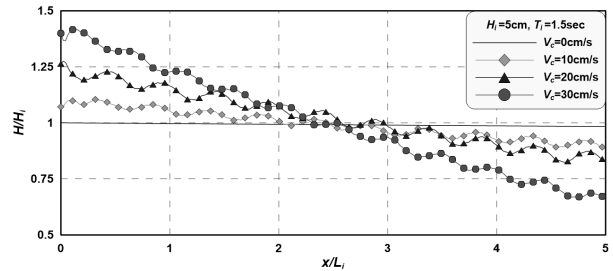
Wave		Current
height	period	velocity
$H_i$ [cm]	$T_i$ [sec]	$V_c$ [cm/s]
3	1.2	0
5	1.5	10
7	1.8	20
		30

는  $5L_i$  ( $L_i$ 는 입사파장), 폭은 30cm, 수심은 30cm이고, 양쪽의 감쇠영역의 길이는 각각  $2L_i$  이상으로 설정하여 파랑/흐름의 에너지를 점진적으로 흡수하여 경계에서의 반사를 최소화 한다. 수치시물레이션에 이용된 입사외력조건은 Table 1과 같이 나타내며, 입사파고( $H_i$ )는 3, 5, 7cm, 입사주기( $T_i$ )는 1.2, 1.5, 1.8s 그리고 입사유속( $V_c$ )은 0, 10, 20, 30cm/s이다. 여기서 계산격자는  $\Delta x = 2cm$ ,  $\Delta y = 2cm$ ,  $\Delta z = 1cm$  그리고 계산시간간격( $\Delta t$ )은  $1/1000s$ 를 고려한다. 그리고 모든 시물레이션은 먼저 흐름장이 안정된 후에 파랑을 조파하는 것으로 한다.

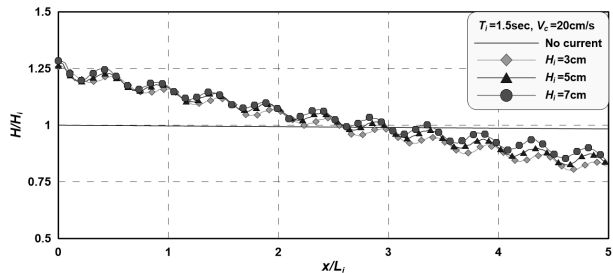
## 3. 수치해석결과

### 3.1 파고분포

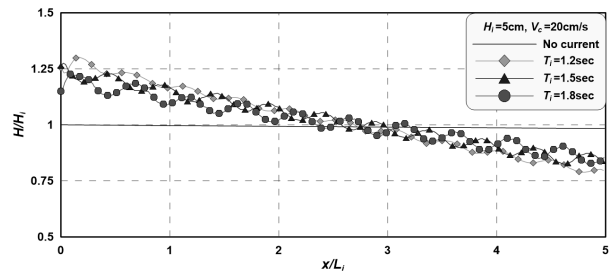
Fig. 2는 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고변화를 입사파고에 대하여 무차원화한 것으로 (a)는  $H_i = 5cm$ ,  $T_i = 1.5s$ 의 파랑조건에 대한 입사유속 변화, (b)는  $T_i = 1.5sec$ ,  $V_c = 20cm/s$ 의 파랑



(a) Effects of Incident Current Velocities



(b) Effects of Incident Wave Heights



(c) Effects of Incident Wave Periods

Fig. 2. Spatial Distributions of Wave Heights under Interaction between Wave and Current

파랑-흐름조건에 대한 입사파고 변화 그리고 (c)는  $H_i = 5cm$ ,  $V_c = 20cm/s$ 의 파랑과 흐름조건에 대한 입사주기 변화에 따른 분포를 각각 나타낸다. 그래프에서 실선은 흐름이 없는 경우이다. 그리고 (a)에서 마름모는  $V_c = 10cm/s$ , 삼각형  $V_c = 20cm/s$ , 원은  $V_c = 30cm/s$ , (b)에서는 마름모는  $H_i = 3cm$ , 삼각형  $H_i = 5cm$ , 원은  $H_i = 7cm$  그리고 (c)에서는 마름모는  $T_i = 1.2s$ , 삼각형  $T_i = 1.5s$ , 원은  $T_i = 1.7s$ 의 경우를 각각 의미한다.

Fig. 2로부터 모든 경우에서 파랑과 흐름이 만나는 지점 ( $x/L_i = 0$ )에서 입사파고( $H_i$ )보다 파고가 상승한 후, 파랑이 전파되면서 점진적으로 파고가 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 파랑과 흐름이 만나는 지점에서 파고가 상승하는 현상은 두 물리력이 충돌하면서 에너지가 증폭되기 때문에 나타나는 현상으로 과거의 여러 연구들에서 논의되었다(Kemp and Simons, 1953; Lee et al., 2006). 그리고 (a)의 입사유속이 증가할수록 파고감쇠효과는 크게 나타나며, (b)와 (c)에서 입사파랑조건 변화에 대해서는 입사 파고가 작을수록 입사주기가 짧을수록 파고감쇠효과는 큰 경향을 보이고 있지만, 유속의 변화에 의한 영향보다는 작은 것을 확인할 수 있다. 여기서 (c)의 경우는 각기 파장이 다르기 때문에 파랑이 같은 거리를 전파할 때는 입사주기가 짧을수록 파고감쇠효과는 크게 증가하게 된다. 그리고 흐름이 없는 경우에도 수치확산에 의해 미미한 파고감쇠가 나타나, 이것에 대해서는 본 논문에서 논의하지 않기로 한다.

이상의 결과들은 전반적으로 흐름의 유속( $V_c$ )과 파속( $C_i$ )과의 관계로 설명될 수 있다. 즉  $V_c/C_i$ 가 증가할수록( $V_c$ 가 증가할수록,  $T_i$ 가 짧아질수록) 강한 상호작용에 의해 파고감쇠 효과가 크게 발생한다. 반면에 파고에 따른 파속이 거의 유사하여  $V_c/C_i$ 의 차이 또한 미소하여 파고감쇠가 비슷하게 나타나는 것으로 보이지만, 본 연구에서 조파에 적용한 Stokes 3차 파의 근사이론에 따르면 미소하지만 파고가 증가할수록 파속( $C_i$ )이 커지게 된다. 이에 입사 파고가 증가할수록 파고감쇠 효과가 조금 더 나타나는 것으로 판단된다.

따라서 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고감쇠 현상은  $V_c/C_i$ 와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 파랑에너지 특성

Fig. 3은 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파장평균 파랑에너지 손실( $\overline{E_L}$ )을 흐름의 유속( $V_c$ )과 파속( $C_i$ )과의 비( $V_c/C_i$ )에 따라 나타낸다. 여기서  $\overline{E_L}$ 은 5과장을 진행하는 동안 발생한 손실에너지의 평균값이며, 파랑에너지( $E$ )는 Eq. (5)를 적용하여 계산한다.

$$E = \rho \int_{-h}^{\eta} \left\{ \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right\} dz \quad (5)$$

여기서  $u, v, w$ 은  $x, y, z$ 방향의 유속성분,  $\rho$ 는 유체밀도,  $h$ 는 수심,  $\eta$ 는 수면높이,  $p$ 는 압력 그리고  $g$ 는 중력가속도이다.

Fig. 3으로부터  $V_c/C_i$ 가 증가할수록 파장평균 파랑에너지 손실이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 상반되는 두 외력이 만나서 발생하는 상호작용에 의해 나타나는 현상이며,  $V_c/C_i$ 가 커질수록 강한 상호작용이 발생함으로 인하여 파랑에너지 손실이 커지는 것으로 생각된다. 이와 같은 파랑에너지 손실은 파고의 변화로 나타나기 때문에  $V_c/C_i$ 가 커질수록 파고감쇠 현상도 뚜렷이 나타나게 된다. 또한 파랑에너지 손실의 원인에 대해서는 난류현상과 연관하여 후술한다.

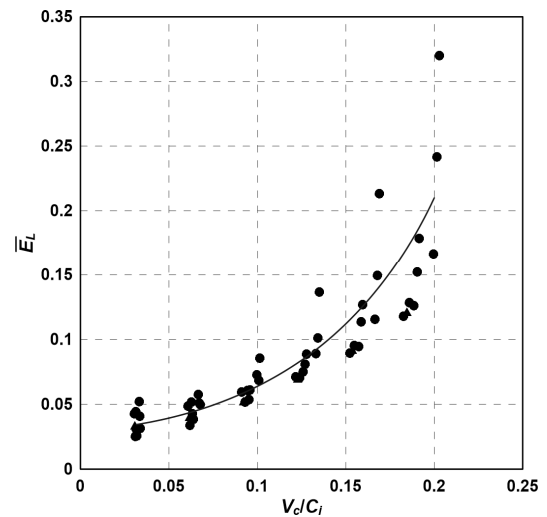


Fig. 3. Distributions of Wavelength-Averaged Wave Energy Dissipations under Wave-Current Interaction

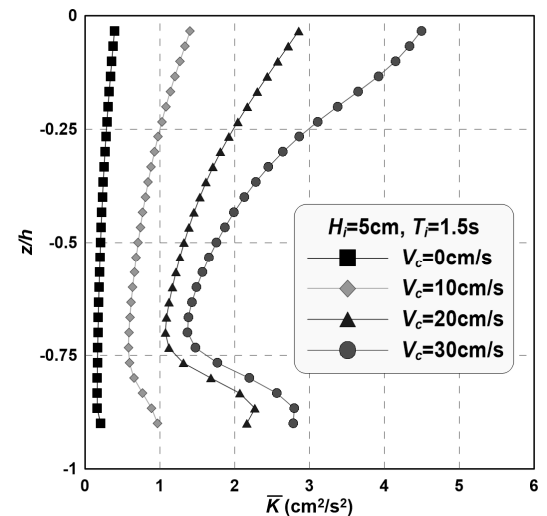


Fig. 4. Vertical Distributions of Mean Turbulence Intensity under Wave-Current Interaction

### 3.3 난류특성

Fig. 4는 파랑-흐름의 상호작용 하에서 3주기 동안 평균한 난류강도의 연직분포로서 대표적인 파랑조건에 대하여 나타내고 있다. 그리고 난류강도는 Christensen (2006)이 제안한 Eq. (6)을 이용한다. 여기서 Eq. (7a)는 격자규모의 난류강도( $K_{GS}$ )로서 수치모델에서 계산된 유속을 적용하여 산정하고, Eq. (7b)는 아격자규모의 난류강도( $K_{SGS}$ )로서 난류모델로부터 얻어진 값을 대입하여 산정한다. 그래프에서 사각형은  $V_c = 0cm/s$ , 마름모는  $V_c = 10cm/s$ , 삼각형  $V_c = 20cm/s$  그리고 원은  $V_c = 30cm/s$ 의 경우를 나타낸다

$$\bar{K} = \frac{1}{3T_i} \int_t^{t+3T_i} \{K_{GS} + K_{SGS}\} dt \quad (6)$$

$$K_{GS} = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (7a)$$

$$K_{SGS} = \left( \frac{\nu_t}{C_s \Delta} \right)^2 \quad (7b)$$

여기서  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ 은 난류성분의 유속,  $\nu_t$ 는 LES기법의 난류모델 (Smagorinsky, 1963)에서 추정된 와동점성계수,  $C_s$ 는 동적 와동 점성모델(Germano et al., 1991; Lilly, 1992)에서 산정된 모델상수,  $\Delta$ 는 필터의 대표길이(= $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ )<sup>1/3</sup>)를 나타낸다.

Fig. 4로부터 파랑-흐름이 공존할 경우 그렇지 않은 경우(파랑만 존재하는 경우)에 비해 평균난류강도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 입사유속( $V_i$ )이 증가할수록( $V_i/C_i$ 가 커질수록) 두 외력간의 상호작용이 강하게 일어나기 때문에 전체적인 평균난류강도가 크게 증가한다. 특히 파랑과 흐름의 상호간섭이 가장 활발한 정수면 부근에서 최대의 평균난류강도가 발생하는 것을 알 수 있다. 여기에 나타나지 않은 많은 경우에서도  $V_i/C_i$ 가 커질수록 평균난류강도가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이 같은 난류구조는 파랑에너지를 감소시켜, 결국에는 파고를 줄이는 현상으로 나타나게 된다.

모든 해석결과를 종합하면, 파랑과 흐름이 만나면 난류강도가 강해지게 되고, 이 영향에 의해서 파랑에너지가 손실된다. 결국에는 파랑에너지 손실이 파고감쇠 현상으로 나타나며,  $V_i/C_i$ 가 커질수록 감쇠율이 증가한다. 이것이 바로 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고감쇠 메커니즘으로 이해될 수 있다.

### 4. 결론 및 고찰

아직까지 파랑-흐름의 상호작용에 의한 수리특성은 명확히 밝혀진 부분이 많지 않다. 또한 과거의 수리모형실험에서 파랑-흐름의

상호작용에 의한 파고감쇠 현상이 나타나고 있음에도 이것에 대한 논의는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 파랑-흐름의 공존장을 직접 해석할 수 있는 수치모델 HYMO-WASS-3D (Lee and Hur, 2014)를 적용하여 수치모의를 수행하였다. 파랑-흐름의 상호작용 하에서 명확하게 검토된 주요내용을 기술하면 아래와 같다.

- (1) 파랑과 흐름의 입사조건을 고려한 결과,  $V_i/C_i$ 가 커질수록 파고감쇠 효과가 커지는 것을 확인하였다.
- (2)  $V_i/C_i$ 가 커질수록 파랑과 흐름의 상호작용이 강하여 파랑에너지의 손실이 증가하였고, 이 영향으로 파고가 감쇠하는 것으로 나타났다.
- (3) 파랑과 흐름의 상호작용 하에서 난류강도는 파랑만 존재할 경우보다 증가하였고,  $V_i/C_i$ 가 커질수록 강한 상호작용이 발생하기 때문에 난류강도가 크게 증가하였다. 특히 상호작용이 가장 활발한 정수면 부근에서 최대값이 발생하였다.

또한 난류강도가 증가할수록 파랑에너지 손실이 커지고, 결국에는 파고가 감쇠하는 것을 알 수 있었다.

이로서 지금까지 명확히 이해할 수 없었던 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 메커니즘을 본 연구를 통해 파악할 수 있었다. 향후에는 본 연구의 수치모델을 적용하여 다양한 형태로 나타나는 파랑-흐름의 상호작용에 대해서 심도 깊은 연구를 수행할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안침식 대응기술 개발).

### References

Baddour, R. E. and Song, S. (1990). On the interaction between waves and currents. *Ocean Eng.*, Vol. 17, pp. 1-21.

Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992). "A continuum model for modeling surface tension." *Journal Comp. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354.

Chawla, A. and Kirby, J. T. (1988). "Experimental study of wave breaking and blocking on opposing currents." *Proc. 26<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng., ICCE*, Vol. 1, pp. 759-772.

Christensen, E. D. (2006). "Large eddy simulation of spilling and plunging breakers." *Coastal Eng.*, Vol. 53, pp. 463-485.

Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model." *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 1760-1765.

Hur, D. S. and Lee, W. D. (2011). "On generation methods of

- oblique incidence waves in three-dimensional numerical wave tank with non-reflected system.” *Journal Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 401-406 (in Korean).
- Hur, D. S., Lee, W. D. and Cho, W. C. (2012). “Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet.” *Ocean Eng.*, Vol. 44, pp. 100-116.
- Isaasson, M. and Cheung, K. F. (1993). “Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body.” *Appl. Ocean Res.*, Vol. 15, pp. 39-52.
- Iwasaki, T. and Sato, M. (1971). “Energy damping of wave propagating against currents (2).” *Proc. Coastal Eng. Conf., JSCE*, Vol. 18, pp. 55-59 (in Japanese).
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1982). “The interaction between waves and a turbulent current: Waves Propagating with the Current.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 116, pp. 227-250.
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1983). “The interaction of waves and a turbulent current: Waves Propagating Against the Current.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 130, pp. 73-89.
- Lee, K. H., Mizutani, N., Komatsu, K. and Hur, D. S. (2006). “Experimental study on wave-current interaction.” *Proc. 16<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE*, pp. 600-606.
- Lee, W. D. and Hur, D. S. (2014). “Development of a 3-d coupled hydro-morphodynamic model between numerical wave tank and morphodynamic model under wave-current interaction.” *Journal Korean Society of Civil Eng., KSCE*, Vol. 34, pp. 1463-1476 (in Korean).
- Lee, W. D., Mizutani, N. and Hur, D. S. (2011). “Effect of crossing angle on interaction between wave and current in the river mouth.” *Journal Japan Society of Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Eng.)*, Vol. 67, pp. 256-261 (in Japanese).
- Lilly, D. K. (1991). “A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method.” *Phy. Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
- Lin, M. C. and Hsiao, S. S. (1994). “Boundary element analysis of wave-current interaction around a large structure.” *Eng. Analysis with Boundary Elements*, Vol. 14, pp. 325-334.
- Mizutani, N., Hur, D. S. and Maeda, Y. (2002). “Numerical analysis of nonlinear wave-current interaction in side harbor.” *Proc. Coastal Eng. Conf., JSCE*, Vol. 49, pp. 51-55 (in Japanese).
- Mizutani, N., Lee, K. H., Komatsu, K. and Hur, D. S. (2005). “Fundamental study on wave-current interaction.” *Proc. Coastal Eng. Conf., JSCE*, Vol. 21, pp. 307-312 (in Japanese).
- Olabarrieta, M., Medina, R. and Castanedo, S. (2010). “Effects of wave-current interaction on the current profile.” *Coastal Eng.*, Vol. 57, pp. 643-655.
- Sakai, S. and Saeki, H. (1984). “Effects of opposing current on wave transformation on sloping sea bed.” *Proc. 19<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Eng., ICCE*, pp. 1219-1232.
- Son, S. and Lynett, P. J. (2014). “Interaction of dispersive water waves with weakly sheared currents of arbitrary profile.” *Coastal Eng.*, Vol. 90, pp. 64-84.
- Teles, M. J., Pires-Silva, A. A. and Benoit, M. (2013). “Numerical modelling of wave current interactions at a local scale.” *Ocean Modelling*, Vol. 68, pp. 72-87.
- Umeyama, M. (2005). “Reynolds stresses and velocity distributions in a wave-current coexisting environment.” *Journal Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 131, pp. 203-212.
- Zhao, R. and Faltinsen, O. M. (1988). “Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface.” *Appl. Ocean Res.*, No. 2, pp. 87-99.