

자 료

타원형 수중천퇴상의 규칙파 및 불규칙파의 전파변형 실험(I):비쇄파조건 Experiments for Wave Transformation of Regular and Irregular Waves over a Submerged Elliptic Shoal(I) : Non-breaking Conditions

이종인* · 이정욱*

Jong In Lee* and Jung Wook Lee*

要 旨 : 타원형 천퇴해역에 대한 규칙파 및 일방향 불규칙파의 전파변형에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험은 비쇄파조건의 규칙파와 천퇴의 정상부에서 부분쇄파가 발생하는 일방향 불규칙파를 대상으로 수행되었다. 수리모형실험 조건에 대해 포물형근사식을 적용한 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

핵심용어 : 타원형 천퇴, 수리모형실험, 규칙파, 일방향 불규칙파, 수치해석, 포물형근사식

Abstract □ Hydraulic model experiments were conducted for a series of regular and uni-directional irregular waves propagating over a submerged elliptic shoal. Two different sets of experiments have been studied; one considers regular wave transformation with no breaking, and the other considers uni-directional irregular wave with partial breaking on top of the shoal. The numerical experiments are also performed using a numerical model based on the parabolic approximation equation. The result of the numerical experiments are compared with that of hydraulic experiments.

Keywords : elliptic shoal, hydraulic model experiment, regular wave, uni-directional irregular wave, numerical analysis, parabolic approximation equation

1. 서 론

연안구조물을 설계하기 위해서는 구조물에 미치는 해양외력의 평가가 선행되어야 하며, 여러 가지 해양외력중 구조물 건설위치에서의 파고, 즉 천해설계파는 제체중량, 제체형상, 피복재의 중량 등의 결정에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 가장 중요한 설계외력이라 할 수 있다. 천해설계파를 산정하기 위해서는 이용 가능한 자료가 있는 심해에서 천해까지 전파하는 파랑을 해석하여야 한다. 심해로부터 천해로 전파하는 파랑은 해저지형과 인위적인 구조물 등의 영향으로 변형을 겪게 되며, 지배적인 특성으로 쇄파현상이 나타나는 천해역에서 파랑은 급격한 변형을 겪게 된다. 이러한 천해설계파의 산정에는 일반적으로 수치모형이 활용되고 있다.

천해설계파를 산정하기 위해 여러 연구자들에 의해 개

발된 수치모형은 그 정확성을 평가할 필요가 있으며, 수치모형의 정확성 평가에는 수리모형실험자료가 일반적으로 활용된다. 파랑의 전파변형에 대한 대표적인 실험자료는 Berkhoff *et al.*(1982), Vincent and Briggs(1989), Chawla *et al.*(1996)의 실험을 들 수 있다. Berkhoff *et al.*(1982)은 타원형 천퇴가 1/50의 경사면에 놓여 있는 영역에 규칙파를 대상으로 실험을 수행하였으며, 계측영역은 비쇄파영역이다. Vincent and Briggs(1989)는 다방향 조파기를 이용하여 타원형 수중천퇴상의 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파의 전파변형에 관한 실험을 수행하였다. Vincent and Briggs(1989)의 실험은 여러 파랑조건에 의해 실험되었으나, 파고계측이 천퇴후면 하나의 단면에서만 수행된 것이 단점이라 할 수 있다. Chawla *et al.*(1996)은 원형 천퇴상을 전파하는 파랑의 쇄파현상을 실험하였다. Chawla *et al.*(1996)의 실험은 Vincent and

*한국건설기술연구원 수자원환경연구부(Corresponding author: Jong In Lee, Water Resources and Environmental Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea. jilee@kict.re.kr)

Briggs(1989)의 실험과 유사한 개념으로 실시되었으나, 천퇴중심부에서의 수심이 0.03m이고, 파고가 작은 파를 입사시켜 천퇴 중심부 부근에서만 쇄파가 발생하도록 하여 쇄파영향을 검토한 것이 단점이라 할 수 있다. 그리고 국내에서는 Suh *et al.*(2001)이 원형 천퇴에 대한 규칙파 실험을 실시하였으며, 수치모형 적용시 바닥경사의 제곱 항과 바닥곡률항의 중요성을 실험결과와의 비교를 통해 입증하였다.

본 실험에서는 파랑의 전파변형을 해석하기 위해 여러 가지 조건을 설정하여 실험을 수행하고 있다. 실험에 적용된 수중천퇴는 Vincent and Briggs(1989)의 실험모형과 제원이 유사하며, 타원형 천퇴는 일정 수심상에 위치한다. 현재 1차 실험이 완료되었고 보다 체계적인 2차 실험을 준비하고 있으며, 본 논문에서는 비쇄파조건에 해당하는 1차 수리실험결과의 일부를 제시하고자 한다. 수리실험결과는 포물형근사식에 의한 수치해석결과와 비교하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험수조 및 실험영역

수리모형실험은 한국건설기술연구원의 평면수조에서 수행되었으며, 수조는 길이 42m, 폭 36m, 높이 1.2m이다. 실험에 사용된 조파기는 4개의 구동부로 구성되어 있고, 각 구동부에 연결된 조파판 하나의 폭은 5m, 높이는 1.2m로서 조파판의 전체폭은 20m이다. 실험에 사용된 조파기는 전기서보피스톤식으로서 규칙파 기준으로 최대파고 0.3m, 주기 0.5 sec~5 sec의 파를 재현할 수 있으며, 규칙파 및 일방향 불규칙파의 조파가 가능하다. 파고계측에 사용된 파고계는 용량식파고계(모델명 CHT4-50)로서 길이는 0.5m이고, 측정범위는 $\pm 0.25\text{m}$ 이다. 본 실험에서는 30대의 용량식파고계를 이용하여 0.25m 간격으로 파고를 계측하였으며, 1대의 파고계는 기준점에 상시 설치하여 과도한 입사파의 발생유무를 확인하였다.

Fig. 1은 실험영역을 도시한 것으로서 전술한 평면수조 내에 설치하였다. 실험시 수조내에서의 반사파 발생을 억제시키기 위해 조파기 전면의 수조벽에는 1:10의 경사로 쇄석을 배치하고, 조파기 후면벽에는 1:3의 경사로 쇄석을 배치한 후 전면에 추가적인 소파시설을 배치하였다. 그리고 실험영역 측면은 1:2의 경사로 쇄석을 설치하고 전면에 유도판과 소파시설을 배치하여 조파기에서 발생된 파랑을 유도함과 동시에 반사파의 발생을 억제하였다. 실험에 사용된 수중천퇴는 알루미늄으로 뼈대를 제작한 후 모

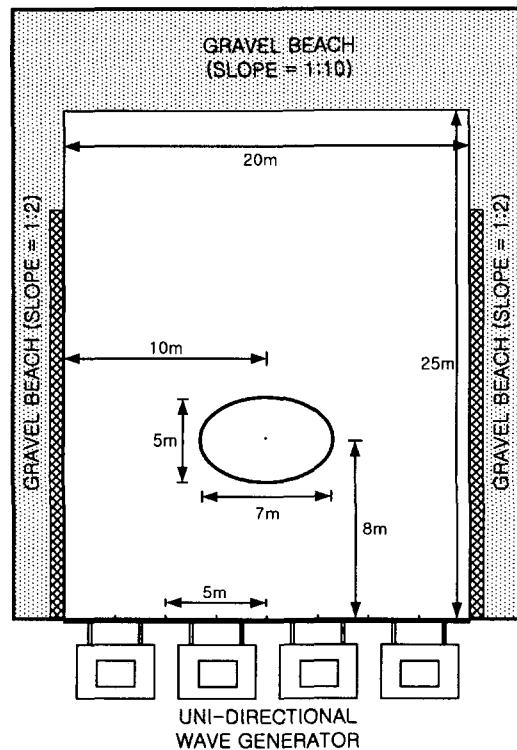


Fig. 1. Test basin and location of elliptic shoal.

르타르로 피복하였으며, 수중천퇴의 중심은(8m, 10m)에 위치한다.

2.2 실험모형 및 실험조건

본 실험에서는 Vincent and Briggs(1989)의 실험에서 사용한 타원형 천퇴와 유사한 주축반경 7m, 종축반경 5m인 모형을 이용하였으며, 타원형 천퇴의 경계는 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{X}{2.5}\right)^2 + \left(\frac{Y}{3.5}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

여기서, X' 과 Y' 은 각각 주축과 종축을 나타내는 천퇴 중심을 기준으로 한 국부좌표계이다. 천퇴단면의 임의점에서의 수심 $h(m)$ 은 식 (2)로 정의되며, 타원형 천퇴의 중앙부 최대높이가 0.35m이기 때문에 배경수심(h_0)이 0.5m인 경우에 최소수심은 0.15m이다.

$$h(m) = 0.875 \left\{ 1 - \left(\frac{X}{3.125} \right)^2 - \left(\frac{Y}{4.375} \right)^2 \right\} - 0.525 \quad (2)$$

Fig. 2는 본 실험에서 설정한 계측단면을 도시한 것으

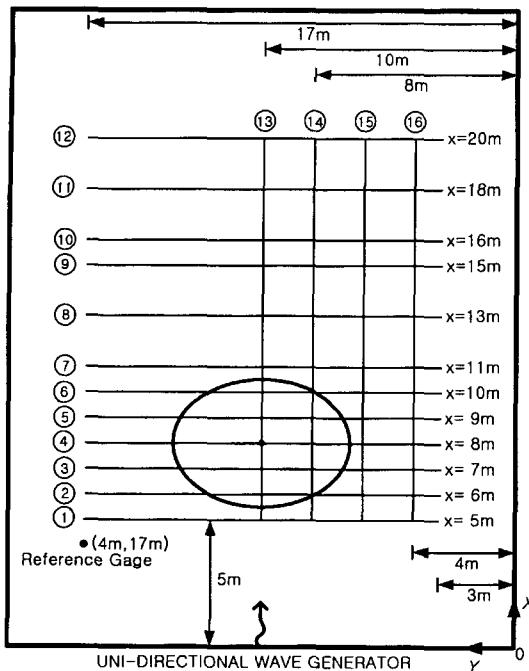


Fig. 2. Locations of measurement sections.

로서 전체 16개의 단면에 대해 파고를 측정하였다.

수리실험에 사용된 입사파는 규칙파(RP)와 일방향 불규칙파(IP)로서 입사파의 주기는 1.0 sec(RP1, IP1), 1.4 sec(RP3, IP3), 1.8 sec(RP5, IP5)이고, 파고는 0.05m이다. 입사파가 불규칙파인 경우에 주기와 파고는 유의파 기준이며, Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하여 재현하였다. 본 실험은 비쇄파조건을 대상으로 하였으나, 불규칙파 적용시 천퇴 정상부에서 약간의 쇄파가 발생하였다. 그러나 전체적으로는 비쇄파조건이라 할 수 있다. Table 1은 본 연구에서 수행한 실험조건을 정리한 것이다.

3. 수치모형

3.1 포물형근사식

파랑의 전파변형을 검토하기 위해 본 연구에서 수행하

는 수중천퇴 실험에서는 반사파의 영향을 무시할 수 있으므로 Kirby(1986)에 의해 유도된 다음과 같은 광각 포물형근사식(wide-angle parabolic approximation equation)을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial x} + i(k_o - \beta_1 k)A + \frac{A}{2C_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left(C C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) \\ + \frac{\sigma_2}{\omega C_g} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(C C_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) + W_b A = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, A 는 파의 복소 진폭함수, k 는 파수, k_o 는 기준수심에서의 파수, C 는 파속, C_g 는 군속도, ω 는 각주파수, W_b 는 쇄파 및 바닥마찰에 의한 에너지 감쇠계수이다. 식 (3)에서 σ_1 과 σ_2 는 광각 입사시 파 진행방향의 정밀도를 개선시키기 위한 각도 보정계수로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= i \left(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_o}{k} \right) + \beta_3 \left(\frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2kC_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} \right) \\ \sigma_2 &= -\frac{\beta_3}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 β_1 , β_2 , β_3 는 각 성분파의 입사각도에 따라 정해지는 계수로 Kirby(1986)에 제시되어 있다. $\beta_1=1$, $\beta_2=-0.5$, $\beta_3=0$ 이면 기존의 협각 포물형근사식을 얻을 수 있으며, $\beta_1=1$, $\beta_2=-0.75$, $\beta_3=-0.25$ 이면 Padé 근사식으로 $| \theta | < 45^\circ$ 의 범위까지 정확성이 유지된다. 본 연구에서는 후자를 선택하여 수치모형을 구성하였다.

3.2 쇄파조건

포물형근사식을 이용하여 불규칙파를 해석하는 일반적인 방법은 사용되는 주파수 스펙트럼과 방향 스펙트럼을 유한개의 등구간 또는 등에너지 방법 등으로 분할한 후 각각의 개별 성분파에 대해 파랑의 전파변형을 모의하고, 그 결과를 합성하는 방법이다. 그러나 이러한 방법을 사용하게 되면 개별 성분파들의 진폭이 작아 쇄파 되지 않고 진행하게 되므로 쇄파현상을 적절히 재현하지 못한다.

Table 1. Test conditions for submerged shoal test

CASE ID	Regular waves		CASE ID	Uni-directional irregular waves		Water depth (m)
	Wave period (sec)	Wave height (m)		Significant wave period (sec)	Significant wave height (m)	
RP1	1.0	0.05	IP1	1.0	0.05	$h_0=0.5$
RP3	1.4	0.05	IP3	1.4	0.05	
RP5	1.8	0.05	IP5	1.8	0.05	

따라서 본 연구에서는 각각의 개별 성분파를 해석함으로 인해 발생하는 문제점을 최소화하기 위해 계산영역의 모든 점에 대해 각각의 개별 성분파를 동시에 계산한 후 계산된 파고로부터 구한 rms파고(H_{rms})와 대표주기에 대한 쇄파 한계파고(H_{max})를 구한 후, 불규칙파의 부분쇄파를 모의할 수 있는 Battjes and Janssen(1978)의 쇄파조건식을 이용하여 쇄파현상을 모의하였다.

Battjes and Janssen(1978)에 의해 제안된 쇄파조건식은 식 (5)와 같다.

$$W_b = \frac{\alpha}{8\pi} Q_b \omega_m H_{max}^2 / E \quad (5)$$

여기서, ω_m 은 rms파고의 각 주파수, α 는 조정계수로서 일반적으로 1을 사용하며, Q_b 는 불규칙파의 파군 중 쇄파되는 개별파의 비율, H_b 는 Miche type의 쇄파 한계파고, E 는 파의 전체에너지로서 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^2 \quad (6)$$

$$H_{max} = \gamma_1 k_m^{-1} \tanh(\gamma_2 k_m d / \gamma_1) \quad (7)$$

$$E = H_{rms}^2 / 8 \quad (8)$$

여기서, γ_1 과 γ_2 는 각각 쇄파 한계 파형경사와 쇄파 한계 파고수심비를 조정해 주는 계수로서 실험을 통해 각각 1.0과 0.8의 값이 권장되고 있다.

규칙파인 경우에는 부분쇄파가 발생하지 않으므로 Q_b 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Q_b &= 0, & H_{rms} < H_{max} \\ Q_b &= 1, & H_{rms} \geq H_{max} \end{aligned} \quad (9)$$

Battjes and Janssen(1978)의 쇄파조건식은 파형경사의 증가에 따른 심해조건에서의 쇄파와 쇄파대내에서의 파고 수심비의 증가에 의한 쇄파를 고려할 수 있으며, 불규칙파군의 고파랑 통과시에도 부분쇄파를 모의할 수 있다.

3.3 입사파 및 유의파 산정

포물형모형으로 일방향 불규칙파를 해석하기 위해서는 주파수 스펙트럼을 등구간 또는 등에너지분할 방법 등으로 개별 성분파 형태로 분리하여야 하며, 본 연구에서는 등구간분할 방법으로 각각의 개별 성분파로 분리하여 해석하였다.

주파수 스펙트럼 $S(f)$ 로부터 각각의 주기와 진폭을 갖는 개별 성분파들을 구할 수 있으며, 수면변위 η 는 성분파들의 선형중첩된 형태인 식 (10)으로 표시될 수 있다.

$$\eta = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n e^{i\phi_n} \right\} \quad (10)$$

여기서, N 은 계산에 사용된 성분파의 총갯수, a_n 은 n 번째 입사 성분파의 진폭, ϕ_n 은 n 번째 성분파의 위상 함수(phase function)이다. 그리고 입사경계($x=0$)에서 성분파들의 복소진폭 A 는 다음과 같이 표시된다.

$$A(0, y, n) = a_n e^{il_n y} \quad (11)$$

여기서, l_n 은 파수벡터 k_n 의 y 방향 성분이다.

$$l_n = k_n \sin \theta_n \quad (12)$$

식 (12)에서 θ_n 은 n 번째 성분파가 x 축과 이루는 각이다.

입사경계에서 입력된 성분파들은 수심변화에 따른 천수, 굴절, 회절 및 쇄파 등과 같은 제반변형을 겪으면서 계산영역의 모든 격자점에서 진폭과 방향이 결정된다. 계산된 파고가 Rayleigh 분포를 따른다고 가정하면, 한 격자점(i, j)에서의 유의파고($H_{1/3}$)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{1/3}(i, j) = \sqrt{8 \sum_{n=1}^N |A_{n,i,j}|^2} \quad (13)$$

식 (13)에서 $A_{n,i,j}$ 는 격자점 (i, j) 에서의 n 번째 성분파의 복소진폭을 의미한다.

그리고 파의 진행방향은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial \operatorname{Im}(\ln A_n)}{\partial y}}{\frac{\partial \operatorname{Im}(\ln A_n)}{\partial x} + \frac{1}{k_n}} \right] \quad (14)$$

여기서, $\operatorname{Im}(Z)$ 는 복소수 Z 의 허수부분(imaginary part)을 의미한다. 그리고 해석에 필요한 파수는 선형 분산 관계식을 이용하여 계산하였다.

4. 실험결과

수리실험결과와의 비교를 위해 수치해석을 실시하였으며, 수리모형실험과 동일한 영역인 $0 \leq X \leq 20m$, $0 \leq Y \leq 25m$ 의 영역을 격자간격 0.05m인 정방형 격자(401×501)로 구성하였다. 불규칙파 수치실험은 주어진 주파수 스펙

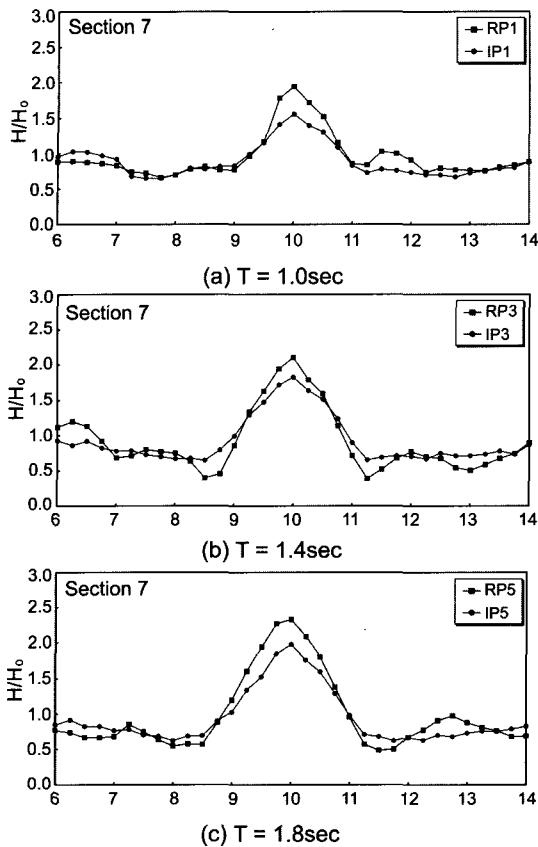


Fig. 3. Normalized wave heights along section 7.

트럼을 21개로 분할한 후 개별 성분파를 구성하였으며, 주기 1.0 sec인 경우에는 $f = 0.7\text{ Hz} \sim 2.0\text{ Hz}$ 의 범위를 $\Delta f = 0.0650\text{ Hz}$ 로, 주기 1.4 sec인 경우에는 $f = 0.5\text{ Hz} \sim 1.43\text{ Hz}$ 의 범위를 $\Delta f = 0.04643\text{ Hz}$ 로, 주기 1.8 sec의 경우에는 $f = 0.39\text{ Hz} \sim 1.11\text{ Hz}$ 의 범위를 $\Delta f = 0.03611\text{ Hz}$ 로 분할하였다. 본 연구에서 적용한 수치모형에 대한 보다 자세한 사항은 이(2001)를 참조할 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2의 단면 7을 따른 상대파고(H/H_o)를 도시한 것으로서 Vincent and Briggs(1989)의 실험에서와 같이 규칙파와 일방향 불규칙파의 파고분포는 큰 차이를 보이지 않는다. 여기서, H_o 는 입사파의 파고이다. 전체적으로 일방향 불규칙파를 적용한 결과가 규칙파를 적용한 결과보다 파고가 낮게 나타났으며, 이는 규칙파와는 달리 불규칙파는 여러 주기가 합성된 파이기 때문에 주기별로 굴절양상이 서로 달라 파 에너지의 집중도가 규칙파에 비해 다소 낮기 때문으로 생각된다. 본 실험에서 적용된 타원형 천퇴는 $Y=10\text{m}$ 을 중심으로 대칭이기 때문에 계측된

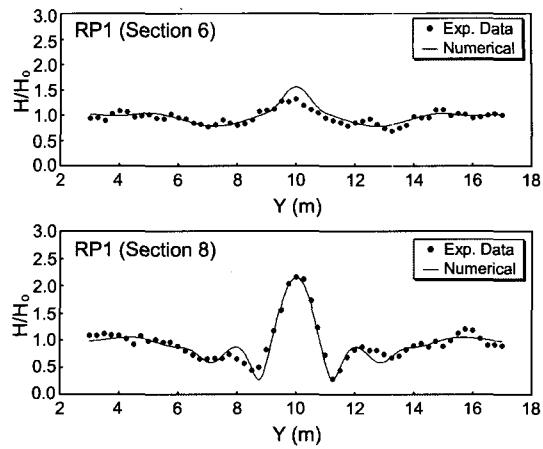


Fig. 4. Normalized wave heights along section 6 & 8 (CASE RP1).

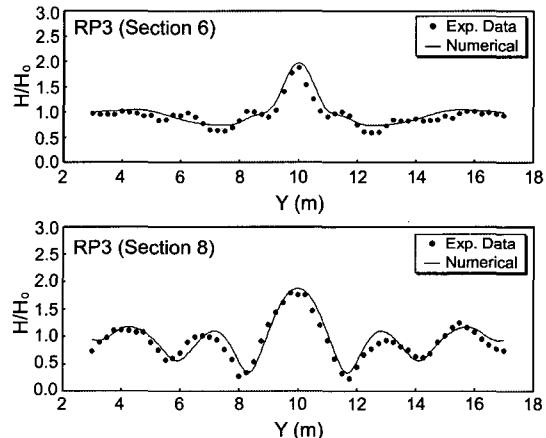


Fig. 5. Normalized wave heights along section 6 & 8 (CASE RP3).

상대파고도 중심선 좌우로 동일하게 나타나야 하지만, Fig. 3(a)의 경우에는 다소 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 실험오차에 기인하는 것으로 추후 반복실험을 통한 보다 정확한 자료를 제공할 예정이다.

Fig. 4~Fig. 6은 각각 $T=1.0\text{ sec}$ (RP1), $T=1.4\text{ sec}$ (RP3), $T=1.8\text{ sec}$ (RP5)인 규칙파 실험에서 단면 6와 단면 8을 따른 상대파고를 수치해석결과와 비교 도시한 것이다. RP1과 RP3의 경우에는 수리실험결과와 수치해석결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 단면 13을 따라서 2 이상의 상대파고가 계측되었다. RP3의 경우에는 수리실험결과가 수치해석결과보다 크게 나타나며, 이는 타 실험안의 결과로 미루어 볼 때 실험결과에 오차가 있는 것으로 생각된다. RP3 실험안에 대해서는 추후 재실험을 수행할 예정이다.

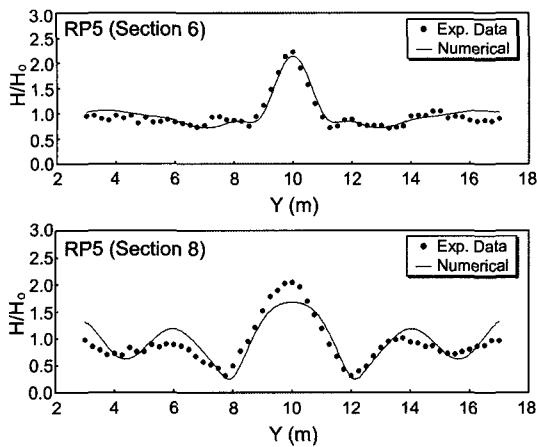


Fig. 6. Normalized wave heights along section 6 & 8(CASE RP5).

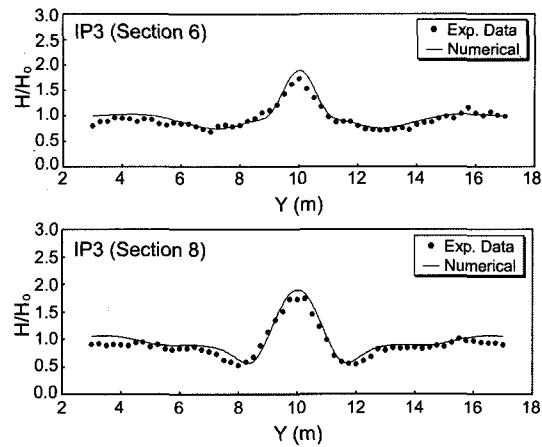


Fig. 8. Normalized wave heights along section 6 & 8(CASE IP3).

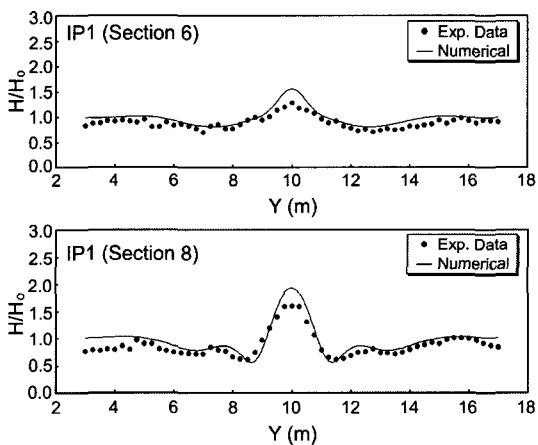


Fig. 7. Normalized wave heights along section 6 & 8(CASE IP1).

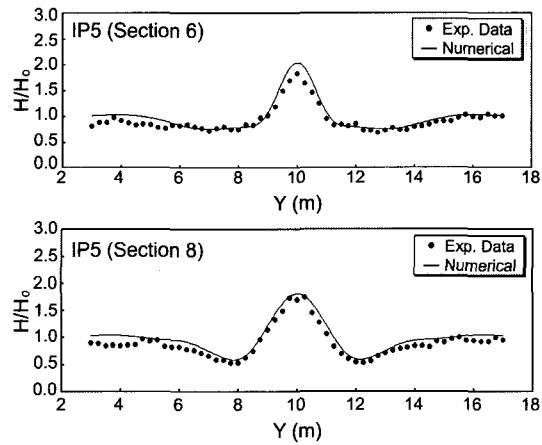


Fig. 9. Normalized wave heights along section 6 & 8(CASE IP5).

Fig. 7~Fig. 9는 각각 $T_{1/3}=1.0\text{ sec}(\text{IP1})$, $T_{1/3}=1.4\text{ sec}(\text{IP3})$, $T_{1/3}=1.8\text{ sec}(\text{IP5})$ 인 일방향 불규칙파 실험의 상대파고를 수치해석결과와 비교 도시한 것으로서 전반적으로 수리실험결과와 수치해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 수치해석결과가 수리실험결과보다 약간 크게 나타나는 것은 불규칙파중 고파랑 통과시에 발생하는 부분쇄파와 수치해석시 바닥마찰 등에 의한 에너지손실을 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 타원형 수중천퇴해역을 진행하는 규칙파 및 불규칙파의 변형을 수리모형실험과 수치해석을 통

해 고찰하였다. 수리실험결과에 의하면 입사파가 불규칙파인 경우가 규칙파인 경우보다 상대파고가 약간 작게 나타났다. 그리고 수리실험결과와 수치해석결과는 비교적 잘 일치하였으며, 불규칙파의 전파변형을 해석하기 위해 본 연구에서 사용된 수치기법이 적절함을 알 수 있었다.

일부 실험결과에서 실험오차가 포함되어 있는 것으로 판단되어 현재 기 수행된 실험보다 체계적인 실험이 준비중에 있으며, 추후 파랑해석모형의 정확성을 검증할 수 있는 수리실험결과를 제공할 예정이다.

참고문헌

이종인, 2001. 천해설계파 산정 수치모형 개발, 한국건설기

- 술연구원.
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and setup due to breaking of random waves, *Proc. 16th Inter. Conf. Coastal Eng.*, pp. 569-587.
- Berkhoff, H.C.W., Booij, N. and Radder, A.C., 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, *Coastal Eng.*, **6**, pp. 255-279.
- Chawla, A., Ozkan-Haller, H.T. and Kirby, J.T., 1996. Experimental study of breaking waves over a shoal, *Proc. 25th Inter. Conf. Coastal Eng.*, pp. 2-15.
- Kirby, J.T., 1986. Higher order approximation in the parabolic equation method for water waves, *J. of Geophysical Research*, **91**, pp. 933-952.
- Suh, K.D., Lee, C.H., Park, Y.H. and Lee, T.H., 2001. Experimental verification of horizontal two-dimensional modified mild-slope equation model, *Coastal Eng.*, **44**, pp. 1-12.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, **115**(2), pp. 269-284.

Received August 7, 2002

Accepted September 5, 2002