

## 다방향 불규칙파에 의한 직립벽 주위의 연파특성 Hydraulic Experiments of Stem Waves due to Multi-Directional Random Waves along a Vertical Caisson

유형석\* · 김규한\*\* · 정의진\*  
Hyung Seok Yoo\*, Kyu Han Kim\*\* and Eui Jin Jung\*

**요 지 :** 본 연구에서는 주파향 입사각에 따른 다방향 불규칙파의 연파특성을 수리실험을 통하여 분석하였다. 아울러, 다방향 불규칙파의 연파특성을 동일한 조건을 이용한 일방향 불규칙파의 실험결과와 비교하였다. 실험결과, 다방향 불규칙파의 경우에도 직립벽을 따라 발달하는 연파는 입사각의 증가에 따라 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 아울러, 연파의 폭도 일방향 불규칙파와 거의 동일하게 나타났다. 반면, 다방향 불규칙파에 의한 연파의 크기는 일방향 불규칙파의 경우에 비해 현저히 작음이 확인되었다.

**핵심용어 :** 연파, 일방향 및 다방향 불규칙파, 직립케이슨, 수리실험

**Abstract :** Hydraulic experiments were conducted to analyze the characteristics of stem waves due to multi-directional random wave incidence with the different incident angles of main wave direction. Both multi-directional and uni-directional random waves were used to generate the stem waves and their results were compared with each other. The experiment shows multi-directional random waves developed along the vertical wall tend to increase as the incident angle increases similar to the uni-directional waves. Moreover, the stem wave widths were almost same as those in uni-directional random wave cases. However, the experiment demonstrate the stem wave heights were significantly smaller in multi-directional random wave cases than in uni-directional random wave cases.

**Keywords :** Stem waves, Uni-directional & Multi-directional random waves, Vertical caisson, Hydraulic experiments

### 1. 서 론

연파(Stem Wave)는 직립구조물에 파랑이 일정각도 이하로 경사지게 입사되어 구조물을 따라 진행하면서 파고가 증폭되는 현상으로 구조물 전면의 파랑분포 해석 및 구조물의 적정 마루높이 산정 등을 위해서 연파의 특성을 면밀히 파악할 필요가 있다(이 등, 2007).

연파에 대한 기존연구는 대부분 일정 주기를 가지는 규칙파, 고립파, 크노이드파를 대상으로 하였으며(Berger and Kohlhase, 1976; Melville, 1980; Yue and Mei, 1980; Liu and Yoon, 1986; Yoon and Liu, 1989; 이·윤, 2006; 이 등, 2007), 주로 파랑의 입사각 및 비선형성에 따른 연파의 발달 특성을 중요하게 다루고 있다(이 등, 2008). 실험역의 파랑조건인 불규칙성을 가지는 불규칙파의 연파특성은 비교적 최근에 이루어 졌으며, Mase et al.(2002)과 이 등(2008)의 연구가 있다.

Mase et al.(2002)은 규칙파 및 일방향 불규칙파, 파랑의

비선형성 및 선형성에 대한 연파특성, 연파의 발달과정에서 쇄파가 끼치는 영향에 대하여 수치 및 수리실험을 통하여 검토하였으며, 직립벽의 접선방향에 대한 연파의 크기는 규칙파와 불규칙파에 상관없이 입사각이 증가할수록 커지고, 입사각의 비선형성이 증가할수록 작아지며, 쇄파는 연파의 성장을 억제함을 나타내었다.

이 등(2008)은 입사각에 대한 연파특성의 변화를 위주로 규칙파 및 일방향 불규칙파의 연파특성을 수치 및 수리실험을 통하여 검토하였다. 아울러, 직립벽의 접선방향은 물론, 직각방향, 즉 연파의 폭에 대해서도 검토하였으며, 직립벽의 접선방향에 대한 연파의 크기는 규칙파 및 불규칙파 모두 유사한 특성을 보이나, 제체 직각방향의 파고분포 경향은 매우 큰 차이가 있음을 나타내었다.

본 연구에서는 실제 해역에서 발생하는 파랑의 특징인 다방향 불규칙파의 연파특성을 확인하기 위하여 일방향과 다방향 불규칙파에서의 연파특성에 대한 차이점 및 유사점에 대하여 검토하였다. 연구방법으로써 직립구조물에 대한 일방향

\*한국폴리텍III대학 강릉캠퍼스 산업잠수학과(Corresponding author : Hyung Seok Yoo, Department of Commercial Diving, Korea polytechnics, Gangneung, Gangwon 210-932, Korea)

\*\*관동대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kwandong University, Gangneung, Gangwon 210-701, Korea, soma0226@gmail.com)

및 다방향 불규칙파의 수리실험을 수행하였으며, 입사파의 주파향과 구조물이 이루는 입사각에 따른 연파특성의 변화를 위주로 체제 접근방향(방향)은 물론, 직각방향(방향)의 파고분포에 대하여 분석하였다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험시설 및 기기

수리실험은 길이 32 m, 폭 40 m, 높이 1.5 m인 평면조파수조에서 수행하였다(Fig. 1 참조). 실험에 이용된 조파장치는 다방향 불규칙파 조파기로서 규칙파 및 일방향 불규칙파의 조파도 가능한 사형(snake type) 조파기이다. 조파장치는 36개의 패널로 구성되어 있으며, 각 구동부에 연결된 조파판은 폭 0.75 m, 높이는 1.5 m로서 조파판의 전체 폭은 27 m이다. 실험에 사용된 조파기는 전기서보포스톤식(AE 서보모터)으로서 최대수심 1.2 m, 최대파고 0.4 m, 주기 0.7~3.0 sec의 파를 재현할 수 있다.

본 실험에서의 분석시스템은 실험에 사용된 파의 제원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 계측된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석하는 기능을 하는 컴퓨터, A/D, D/A 변환기 및 증폭기로 구성되어 있다.

파고계측에 이용된 파고계는 용량식파고계를 사용하였다. 실험에 적용된 용량식파고계의 측정범위는 0 cm~±0.3 m 이고, 오차는 0.5% 이다. 본 실험에서는 총 10대의 파고계를 운

용하여 반복측정하며 파고계측을 수행하였다.

### 2.2 실험영역 및 모형제작

수리실험은 일반적으로 폐쇄되어 있는 한정된 공간의 수조 내에서 이루어진다. 따라서, 조파실험을 수행할 경우, 수조벽면으로부터 실제현상과 상관없는 반사파가 발생되며, 이러한 반사파는 계측영역의 파랑장을 교란시킬 수 있으므로 적절한 소파장치를 배치하여 반사파를 제어하여야 한다. 따라서, 수리실험 수행시에는 Fig. 1과 같이 모든 수조벽면에 플라스틱 재질의 직립 소파장치를 설치하였으며, 조파기 후면은 경사식의 소파시설을 배치하여 반사파를 제어하였다. 특히, 반사파가 가장 탁월하게 발생될 것으로 예상되는 조파기 반대편은 소파장치와 벽면 사이에 사석을 1:1 경사로 채워 벽면으로부터의 반사파를 최소화하고자 하였다. Fig. 1은 수리실험의 실험영역 및 모형설치 개념도를 나타낸 것이다.

아크릴로 제작된 연장길이 15 m의 직립 케이스 모형은 조파기 전면으로부터 5 m 이격된 위치를 시점으로 설치하였다. 직립 케이스 모형의 높이는 0.63 m, 정수면으로부터 구조물 상단까지의 여유고는 0.13 m이다. 이는 실험파랑조건에 대해 월파가 발생되지 않는 조건을 충분히 고려한 것이다. 구조물과 입사파의 주파향이 이루는 입사각은 파향에 따라 구조물의 설치각도를 변경시켜 조절하였다.

실험의 수심조건은 연파의 발달상황을 면밀히 검토하기 위해 실험영역을 0.5 m의 일정수심으로 제작하였으며, 하상은

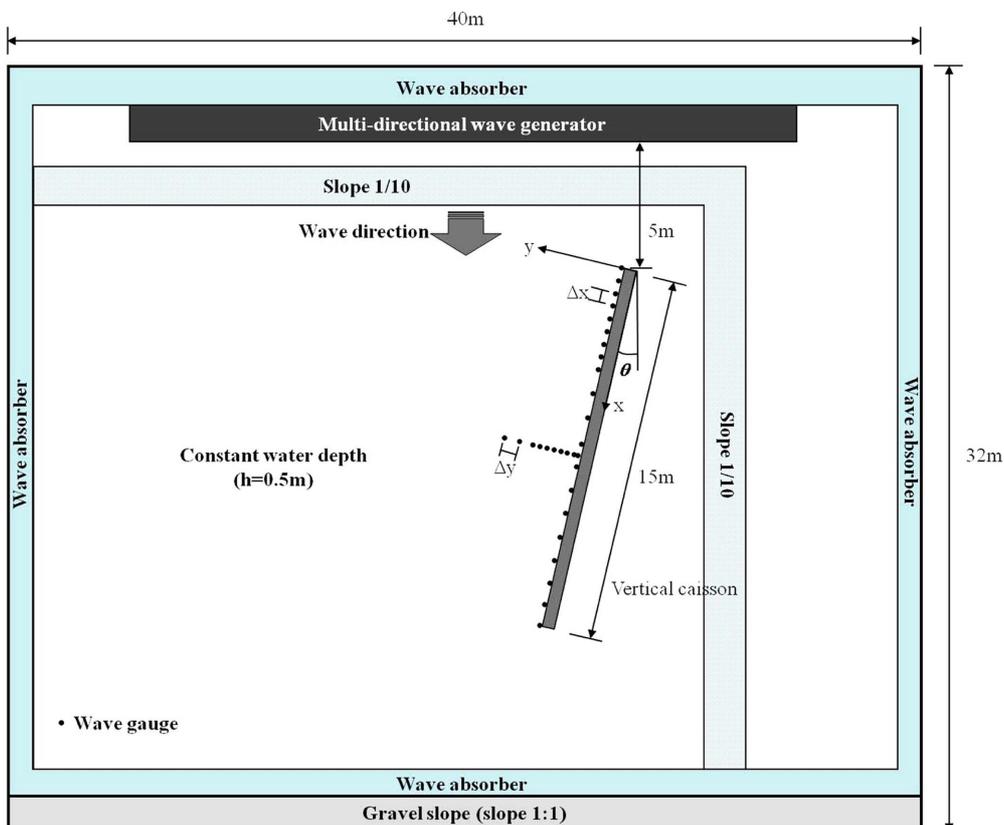


Fig. 1. Experimental setup.

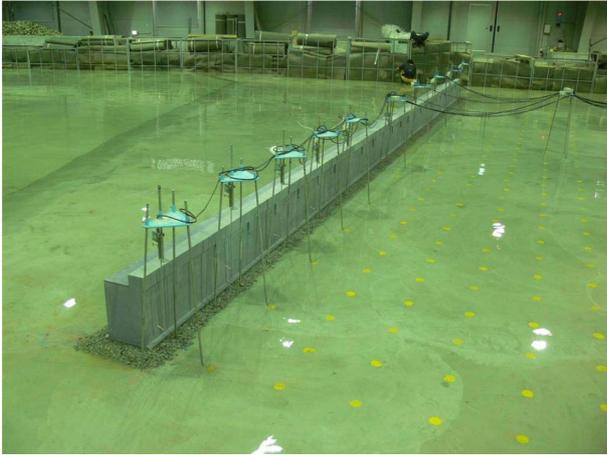


Fig. 2. The photo of Experiment setup.

시멘트 모르타르를 이용하여 고정상으로 완성하였다. Fig. 2는 모형이 setup된 사진을 나타낸 것이다.

### 2.3 실험조건

본 연구는 직립벽에서 발달하는 다방향 불규칙파의 연파특성을 검토하기 위한 1차적인 연구로서, 일방향 및 다방향 불규칙파에서의 연파특성에 대한 유사점과 차이점을 주파향 입사각의 변화에 따른 연파발달특성을 중점으로 확인하였다. 따라서, 비선형성이 유사한 두가지 파랑조건을 이용하였으며, 쇄파 또는 월파는 발생되지 않도록 실험과 조건을 설정하였다.

수리실험에 적용된 입사파 조건은 일방향과 다방향 불규칙파의 연파특성을 해석함에 있어 해석결과의 신뢰성을 확보하고자 Table 1에서 정리한 바와 같이 파형경사( $k_{1/3}H_{1/3}$ )가 유사한 2가지의 파랑조건을 설정하여 양자의 실험결과를 서로 비교할 수 있도록 하였다. 유의파고( $H_{1/3}$ ) 및 주기( $T_{1/3}$ )는 CASE1의 경우 0.034 m, 0.91 sec, CASE2의 경우 0.028 m, 0.82 sec로 유의파의 파장( $L_{1/3}$ )은 각각 1.2732과 1.0437, 상대수심( $k_{1/3}h$ )은 각각 2.4477과 2.9860, 파형경사( $k_{1/3}H_{1/3}$ )는 각각 0.1678, 0.1685이다. 여기서, ( $H_{1/3}$ ), ( $T_{1/3}$ )은 직립구조물의 시점 즉, 접선방향(x방향)의 첫 번째 파고계측점에서의 유의파고 및 주기를 각각 나타낸 것이다. 다방향 불규칙파는 Bretschneider-Mitsuyasu형 주파수스펙트럼(光易, 1970)과 Mitsuyasu-Goda형 방향함수(Goda and Suzuki, 1975)를 적용하였으며, 방향함수는 풍파의 경우로 가정하여 방향집중도 매개변수  $S_{max}$ 를 10으로 설정하였다. 아울러, 입사파의 주파향과 구조물이 이루는 입사각  $\theta$ 는 10°, 20°, 30°로 설정하였다.

Table 1. Conditions of Incident wave

| Test No. | Water depth (h) | Incident angle ( $\theta$ ) | Significant wave height ( $H_{1/3}$ ) | Significant wave period ( $T_{1/3}$ ) | Significant wave length ( $L_{1/3}$ ) | Relative water depth ( $k_{1/3}h$ ) | Wave steepness ( $k_{1/3}H_{1/3}$ ) |
|----------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CASE1    | 0.5 m           | 10°                         | 0.034 m                               | 0.91 sec                              | 1.2732                                | 2.4477                              | 0.1678                              |
| CASE2    |                 | 30°                         | 0.028 m                               | 0.82 sec                              | 1.0437                                | 2.9860                              | 0.1685                              |

Table 2. Conditions of wave height measurement

| Direction                             | Measurement range  | Measurement interval   |
|---------------------------------------|--------------------|--|
| x-direction<br>(along the front wall) | 15 m<br>(y=0.05 m) | x=0~4 m : $\Delta x=0.5$ m                                       |
|                                       |                    | x=4~15 m : $\Delta x=1.0$ m                                      |
| y-direction<br>(normal to the wall)   | 2.5 m<br>(x=7.6 m) | y=0.0~0.2 m : $\Delta y=0.1$ m                                   |
|                                       |                    | y=0.2~1.2 m : $\Delta y=0.2$ m                                   |
|                                       |                    | y=1.2~1.5 m : $\Delta y=0.3$ m<br>y=1.5~2.5 m : $\Delta y=0.5$ m |

### 2.4 분석방법

직립구조물 접선방향(방향)의 파고계측은 제체에서 0.05 m 이격시켜 Table 2에 정리된 바와 같이 x=0~4 m는 0.5 m 간격, x=4~15 m는 1 m 간격으로 총 15 m 구간을 계측하였다. 계측범위 15 m는 CASE1의 파랑조건으로  $11.8(L_{1/3})_0$ 에 해당되며, CASE2의 파랑조건으로는 약  $14.4(L_{1/3})_0$ 에 해당된다.

직립구조물 직각방향(y방향)의 파고계측은 x=7.6 m의 위치에서 제체 직각방향으로 파고계를 배치하여 수행하였다. 이는 CASE1의 입사파조건으로  $x(L_{1/3})_0 \approx 6$ 의 위치에 해당되며, CASE2의 입사파조건으로는  $x(L_{1/3})_0 \approx 7.3$ 의 위치에 해당된다. y 방향의 파고계는 Table 2에서 정리한 바와 같이 x=0~0.2 m는 0.1 m 간격, y=0.2~1.2 m는 0.2 m 간격, y=1.2~1.5 m는 0.3 m 간격, y=1.5~2.5 m는 0.5 m 간격으로 배치하여 총 2.5 m의 범위를 계측하였다. 계측범위 2.5 m는 CASE1의 파랑조건으로 약  $2(L_{1/3})_0$ 에 해당되며, CASE2의 파랑조건으로는 약  $2.4(L_{1/3})_0$ 에 해당된다.

본 수리실험에서 설정된 파고계측의 범위 및 간격은 일방향 불규칙파를 이용하여 연파특성을 검토한 Mase et al.(2002)과 이 등(2008)의 연구성과를 검토하여 결정한 것이다. 입사파의 주파향과 구조물이 이루는 각  $\theta \approx 20^\circ$  이상일 경우, x방향으로  $6(L_{1/3})_0$ 이내에서 연파의 성장이 멈추고 일정하게 유지된 것과 y방향으로는 연파의 폭이 가장 크게 나타난  $\theta \approx 10^\circ$ 인 경우에도 연파의 폭이  $2(L_{1/3})_0$  이내인 것을 고려한 것이다.

파고의 분석은 전체 계측시간을 300 sec로 하여 이중 후반부 95~300 sec 사이 205 sec 동안의 데이터를 이용하였다. 이는 실험파의 유의주기( $T_{1/3}$ )를 고려하면 200파 이상에 해당된다. 계측 간격은 0.05 sec로 하여 디지털신호로 작성하였으며, FFT를 이용한 자료의 처리에는 2° 개인 4,096개의 데이터를 이용하였다. 파고의 통계분석은 Zero-up-crossing법으로 해석하였다.

아울러, 조파기에 입력된 목표스펙트럼과 파고계에서 계측된 스펙트럼을 상호 비교한 후 유사한 스펙트럼이 형성될 때까지 반복적으로 실험을 수행하는 조정(Calibration)작업을 수행하였다. Fig. 3은 목표스펙트럼 및 제체 시점부에서 계측된 스펙트럼을 비교하여 도시한 것이다.

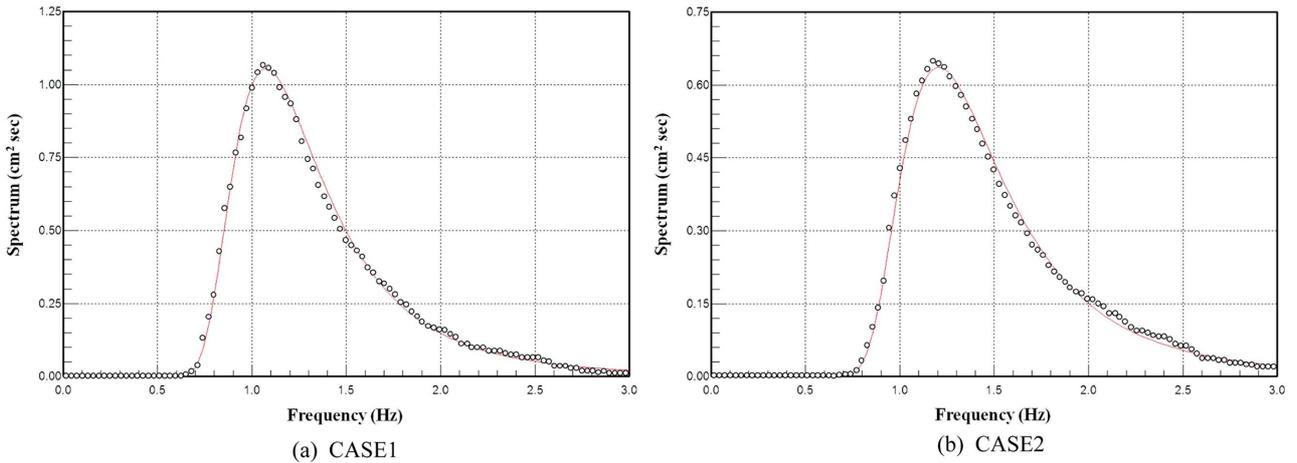


Fig. 3. Spectrum of Incident wave.

### 3. 결과분석

본 연구에서는 일방향 및 다방향 불규칙파를 이용하여 직

립구조물의 접선방향(x방향)으로 발달해 나가는 연파에 대해 각각 수리모형실험을 수행하였으며, 입사파의 주파장과 구조물이 이루는 입사각의 변화를 위주로 직립구조물의 접선방향

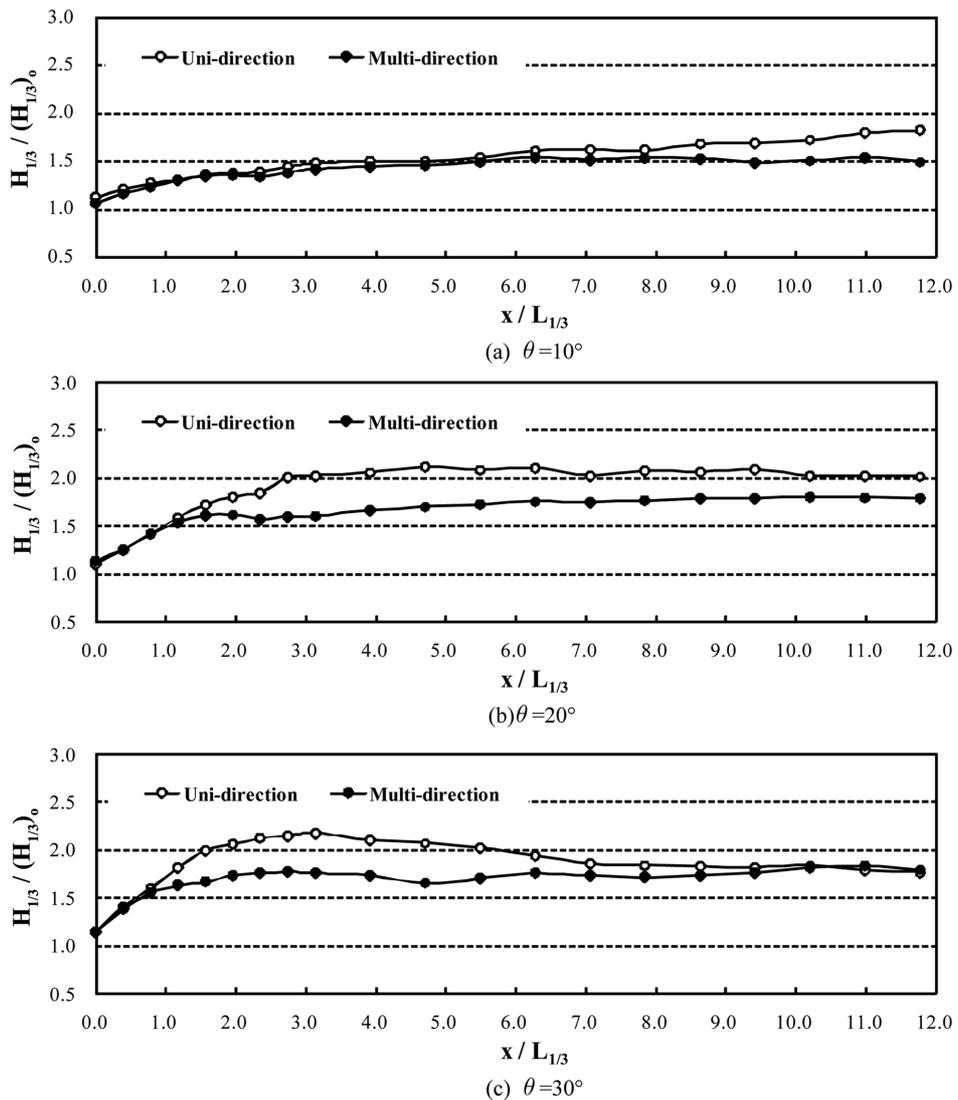


Fig. 4. Comparison of stem wave height due to uni-directional and multi-directional random wave (x-direction, CASE1).

(x방향)과 직각방향(y방향)에 대한 파고분포를 분석하여 양자의 차이점과 유사점을 검토하였다.

직립구조물 접선방향(x방향)의 상대거리  $x/(L_{1/3})_0$ 에 따른 상대유의파고  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ 를 입사각별로 Fig. 4(CASE1)와 Fig. 5(CASE2)에 도시하였다.

다방향 불규칙파의 실험결과, 주파향과 구조물이 이루는 입사각  $\theta$ 가 20, 30°인 조건에서는  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 \approx 1.8$  정도에서 수렴되는 것으로 나타났으며, 입사각  $\theta$ 가 10°인 조건에서는  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 \approx 1.5$ 에서 더 이상 성장하지 못하는 것으로 나타났다.

반면, 일방향 불규칙파의 실험결과에서는 입사각  $\theta$ 가 약

20°, 30°인 경우에  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 \approx 2$  정도까지 발달하고,  $\theta$ 가 10°인 경우에는 실험영역 내에서 충분히 발달하지는 못하지만 지속적인 증가경향이 확인되었으며, 이는 일방향 불규칙파를 이용한 기존의 연구(Mase et al., 2002; 이 등, 2008)와 동일한 경향임을 알 수 있다.

이러한 실험결과를 통하여 일방향 불규칙파에 비하여 다방향 불규칙파에서 발달되는 연파의 크기는 일방향 불규칙파에서 발달하는 연파에 비해 현저히 작다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 파랑의 다방향성에 의한 에너지 분산효과로 연파의 크기가 감소된 것으로 이해할 수 있으나, 이

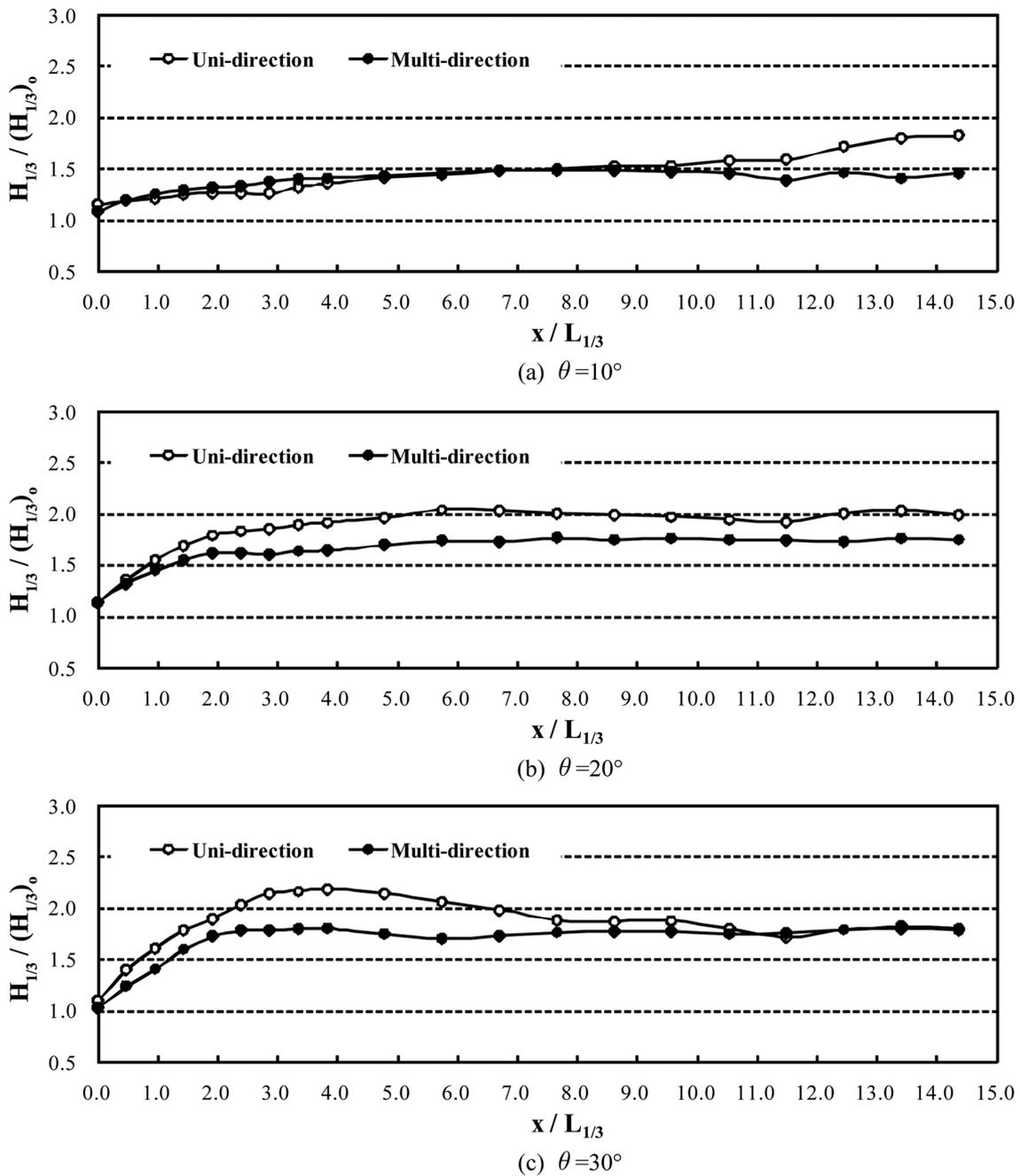


Fig. 5. Comparison of stem wave height due to uni-directional and multi-directional random wave (x-direction, CASE2).

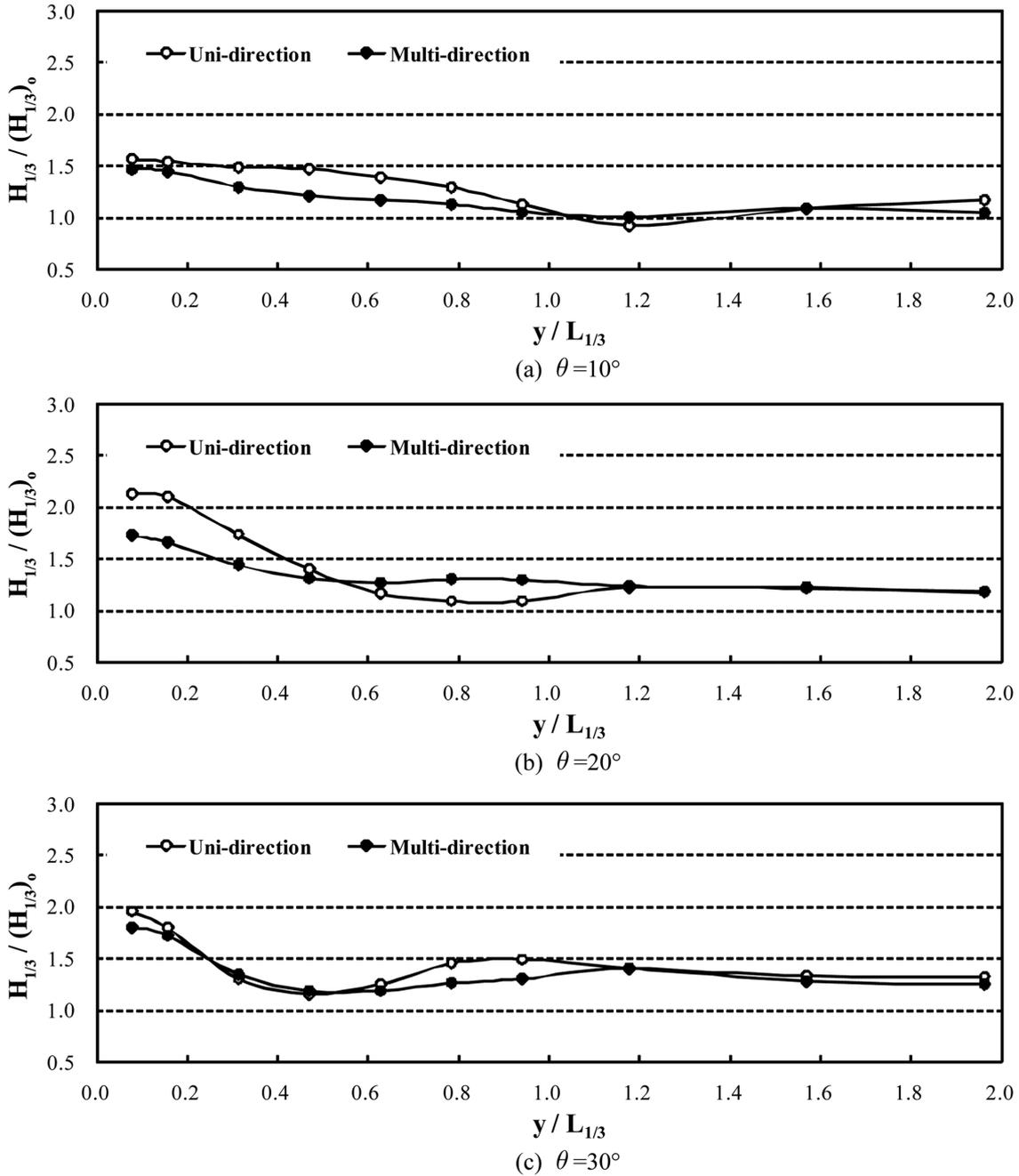


Fig. 6. Comparison of stem wave height due to uni-directional and multi-directional random wave (y-direction, CASE1).

에 대한 정확한 해석을 위해서는 방향분포함수 등을 달리한 다양한 종류의 파랑제원을 이용하여 추가적인 실험을 수행할 필요가 있을 것이다.

아울러, 실험결과로부터 연파가 성장하여 상대유의파고비  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ 가 거의 일정하게 되는 상대거리( $x/(L_{1/3})_0$ )는 모두 입사각이 커질수록 짧아지는 동일한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 입사각이 커질수록 연파가 충분히 발달하는데 필요한 거리가 짧아짐을 의미한다. 입사각  $\theta=20^\circ, 30^\circ$ 인 경우 일방향과 다방향 불규칙파 모두 동일하게  $x/(L_{1/3})_0$ 가 각각 5와 3 정도에서 나타났으나,  $\theta=10^\circ$ 의 경우에는 다방향 불규칙파의 경우  $6\sim 7(L_{1/3})_0$  이후에 나타나, 실험영역 내에서

계속적으로 증가하는 일방향 불규칙파의 경향과는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다.

직립구조물 직각방향(y방향)의 상대거리  $y/(L_{1/3})_0$ 에 따른 상대유의파고  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ 를 입사각별로 Fig. 6(CASE1)와 Fig. 7 (CASE2)에 도시하였다.

실험결과를 살펴보면, 체체 직각방향(y방향)의 파고가 최소가 되기까지의 상대거리  $y/(L_{1/3})_0$ 로 나타난 연파의 폭이 일방향 및 다방향 불규칙파에서 모두 입사각  $\theta$ 가 증가함에 따라 감소하는 동일한 경향을 보이고 있으며, 그 폭의 크기 또한 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

입사각에 따른 연파의 폭은  $\theta=10^\circ$ 일 경우에는  $y/(L_{1/3})_0 \approx$

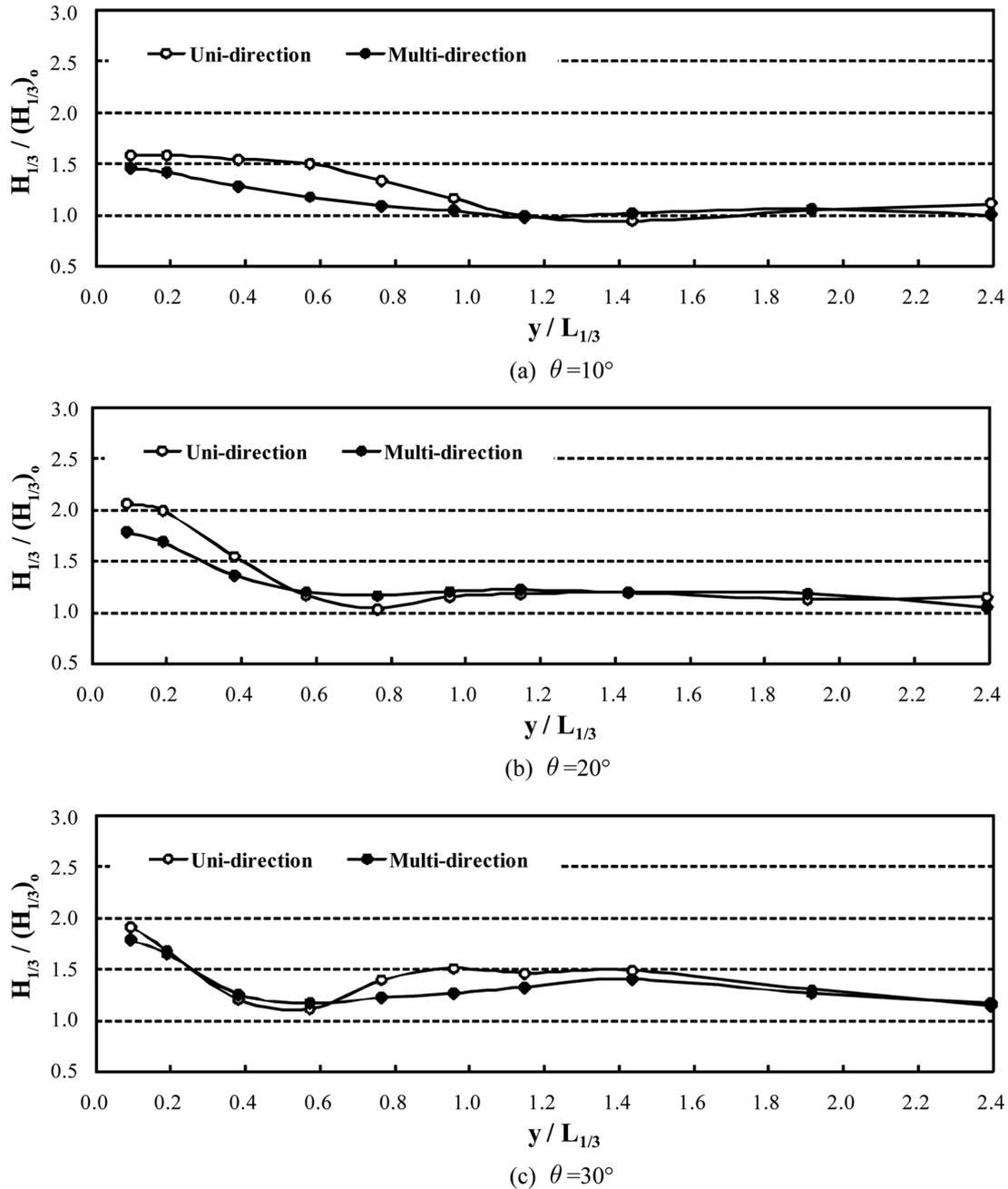


Fig. 7. Comparison of stem wave height due to uni-directional and multi-directional random wave (y-direction, CASE2).

1.2,  $\theta=20^\circ$ 일 경우에는  $y/(L_{1/3})_0 \approx 0.8$ ,  $\theta=30^\circ$ 일 경우에는  $y/(L_{1/3})_0 \approx 0.5$  정도로 나타났으며, 일방향 불규칙파를 이용한 기존의 연구(이 등, 2008)와 동일한 경향임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 실제 해역에서 발생되고 있는 다방향 불규칙파를 이용한 수리실험을 수행함으로써, 다방향 불규칙파에 의한 연파의 발달특성을 분석하고, 동일조건인 일방향 불규칙파 실험결과와 비교함으로써 그 차이점과 유사점에 대하여 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다방향 불규칙파의 주파향과 구조물이 이루는 입사각  $\theta=20, 30^\circ$ 인 조건에서는 연파의 상대유의파고비  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 \approx 1.8$  정도에서 수렴되며, 입사각  $\theta=10^\circ$ 인 조건에서는  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 \approx 1.5$ 에서 더 이상 성장하지 못하는 것으로 나타나, 다방향 불규칙파의 경우, 일방향 불규칙파에서 나타나는 연파에 비하여 그 크기가 현저히 작다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상에 대한 보다 심도 있는 해석을 위해서는 방향분포 함수 등을 달리한 다양한 종류의 파랑제원을 이용하여 추가적인 실험을 수행할 필요가 있을 것이다.
- (2) 상대유의파고비  $H_{1/3}/(H_{1/3})_0$ 가 거의 일정하게 되는 상대거리  $x/(L_{1/3})_0$ 는 입사각  $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에 대해 각각  $x/(L_{1/3})_0$

≃6~7, 5, 3 정도에서 나타나, 입사각이 커질수록 연파가 충분히 발달하는데 필요한 거리가 짧아짐을 확인할 수 있었다.

(3) 제체 직각방향( $y$ 방향)의 파고가 최소가 되기까지의 상대거리  $y/(L_{1/3})_0$ 로 나타낸 연파의 폭은 입사각  $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에 대해 각각  $y/(L_{1/3})_0 \approx 1.2, 0.8, 0.5$  정도로 일방향 및 다방향 불규칙파 모두 입사각  $\theta$ 가 증가함에 따라 감소하는 동일한 경향을 보임을 알 수 있으며, 그 폭의 크기 또한 거의 차이가 없음을 확인 하였다.

본 연구의 성과는 향후 실제 해양에 존재하는 다방향 불규칙파에 대한 연파해석은 물론, 항만 및 해양구조물 설계에 이용되는 파랑변형수치모델의 검증자료로써 활용될 수 있을 것이며, 또한, 일방향 불규칙파에 의한 실험을 수행하여 얻어진 결과에 대해 다방향성 입사파의 특성을 고려하고자 할 경우 검토할 수 있는 자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 향후, 다양한 방향분포함수, 파랑의 비선형성, 쇄파 등을 고려한 추가적인 실험을 통해 보다 광범위한 경우에 대한 결과도출이 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구의 일부는 지역혁신센터의 지원에 의한 것임을 밝히며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

이종인, 김영택, 윤성범 (2007). Boussinesq방정식을 이용한 규칙파의 연파해석. 한국해양·해양공학회지, 19(5), 446-456.

이종인, 윤성범 (2006). 직립벽을 따른 연파의 수리 및 수치실험. 대한토목학회논문집, 26(4B), 405-412.

이종인, 최준우, 윤성범 (2008). 직립벽을 따른 일방향 불규칙파의 연파실험. 한국해양·해양공학회논문집, 20(1), 49-61.

Berger, V. and Kohlhase, S. (1976). Mach-reflection as a diffraction problem. Proc. 15th Conf. Coastal Engineering, ASCE, Vol. 1, 796-814.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum, Tech. Note Port and Harbour Res. Inst. No. 230, 45.

Liu, P.L-F. and Yoon, S. B. (1986). Stem waves along depth discontinuity. J. of Geophysical Research, 91(C3), 3979-3982.

Mase, H., Memita, T., Yuhi, M., and Kitano, T. (2002). Stem waves along vertical wall due to random wave incidence. Coastal Engineering, 44, 339-350.

Melville, W.K. (1980). On the Mach reflection of solitary wave. J. of Fluid Mechanics, 98, 258-297.

Yoon, S.B. and Liu, P.L-F. (1989). Stem waves along breakwater. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 111(5), 635-648.

Yue, D.K.P. and Mei, C.C. (1980). Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge. J. of Fluid Mechanics, 99, 33-52.

光易 恒 (1970). 風波のスペクトルの達(2), 有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について, 第17回 海岸工講演會論文集, 1-7.

원고접수일: 2010년 10월 20일

수정본채택: 2010년 12월 23일

게재확정일: 2010년 12월 27일