

다방향 쇄파 발생 전후의 파랑 성분간 에너지 전이 및 소산

홍기용* · 에스톨히오 메자**

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

**멕시코 국립과학기술대학교 응용과학고등기술연구소

Energy Dissipation and Transfer among Wave Components during Directional Breaking Processes

KEY-YONG HONG* AND EUSTORGIO MEZA**

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, IPN, Mexico

KEY WORDS: Breaking Wave 쇄파, Directional Wave 다방향파, Wave Spectrum 파랑스펙트럼, Energy Dissipation 에너지소산, Energy Transfer 에너지전이

ABSTRACT: Wave energy dissipation and energy transfer between wave components, during the directional wave breakings, are investigated. Directional incipient and plunging breakers were generated by focusing the multi-frequency and multi-directional wave components at a designed location, based on a constant wave amplitude and a constant wave steepness frequency spectrum. The time series of surface wave elevation was measured at 9 different locations around the wave focusing point, using a wave gauge array. In order to examine the variation of the directional spreading function, the horizontal velocity of fluid motion was also measured. By comparing energy spectrums, before and after the breaking, the characteristics of energy dissipation and energy transfer, caused by wave breaking, are investigated. Their dependencies on directionality, as well as frequency, are analyzed. The breakings significantly dissipate wave energy, through energy transfer, in the upper region of the peak-frequency band, while enhancing wave energy in the low-frequency band.

1. 서 론

파랑은 해양에서 발생하는 다양한 물리적 현상을 유발하는 중요 요소로서, 해양파에 기인하는 여러 현상을 정확히 해석하기 위해서는 파랑의 역학적 특성에 대한 올바른 이해가 요구된다. 해양파의 역학적 특성은 해양파가 진행하는 해역의 지형적 특성과 파랑 상호간의 간섭 및 외부 환경 인자와의 간섭에 의해 변화하며, 이 때 파랑 에너지의 증감도 함께 발생한다. 특히 심해파의 경우 쇄파 현상이 파랑 에너지 손실의 주요 원인으로 작용하며, 쇄파 진행 과정에서 파군을 형성하는 여러 주파수 성분들 사이에 에너지 교환이 발생한다. 따라서 심해에서 쇄파에 의한 에너지 소산 및 전이 특성을 정확히 이해하는 것은 심해파의 역학적 특성 및 변화를 해석하는 데 필수적이다.

쇄파에 의한 에너지 손실은 해양파의 발달에 영향을 미치는 세가지 에너지 교환 요소 중 하나이며, 해양파 스펙트럼의 장기적인 발달과정은 아래와 같은 파 작용 보존 방정식에 의해 표현된다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (C_g E) = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} \quad (1)$$

여기서 E 는 수평좌표, 시간, 파주기 및 파향의 함수인 파랑의 에너지 밀도를 나타내며, C_g 는 파랑의 군속도이다. 식의 오른쪽 소오스항은 전체 에너지의 이송율을 나타내며, S_{in} 은 바람에 의한 에너지 입력항, S_{nl} 은 파랑 상호간의 비선형 간섭에 기인하는 서로 다른 주파수 성분간의 에너지 이송율을 나타내고, S_{dis} 은 에너지 소산항으로서 심해의 경우 쇄파가 주요 원인이 된다. 쇄파는 극한의 강비선형 현상이기 때문에 해석적인 접근에 한계가 있으며, 이 때문에 실해역 파랑 모델에서 쇄파에 의한 에너지 소산항은 정확한 추정어 어려운 실정이다. 이에 따라 서로 다른 다양한 경험식들이 쇄파의 에너지 소산을 표현하기 위해 제안되어 왔으나 상호 간의 차이가 커서 파랑 모델에 의한 실해역 파랑장의 추정시 정확성을 좌우하는 요소가 되어왔다.

쇄파에 의한 에너지 소산 및 전이 특성을 정량적으로 해석하려면, 파군에 포함된 경계파들을 제거하고 자유파 성분들의 에너지 특성을 살펴보아야 한다. 경계파와 자유파의 결정론적 비선형 분리기법은 Prislín et al.(1997)에 의해 제안된 바 있

제1저자 홍기용 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7511 kyhong@kriso.re.kr

며, 이에 기초하여 광대역의 불규칙파에 적용 가능한 합성과 모델이 일방향파(Zhang et al., 1996) 및 다방향파(Zhang et al., 1999)에 대해 정립되었다. Meza et al.(2000)은 2차원 수조에서 심해 및 중간수심 조건에 대해 파랑집중기법을 이용하여 플러징과 스피링 쇄파를 생성하고, 쇄파 발생 전후의 해수면 상승을 계측하였다. 이들은 각각에 대해 합성과 모델을 적용하여 자유파를 분리한 후 이로부터 에너지 스펙트럼을 구하여 서로 비교함으로써, 주파수 함수로 주어지는 쇄파에 의한 에너지 소산 특성을 조사하였다. 이를 통해 에너지 손실이 정점주파수보다 고주파 영역에서 배타적으로 발생함을 발견하였으며, 정점 주파수 부근의 파랑 성분들이 가장 큰 에너지 밀도를 가짐에도 불구하고 쇄파에 기인하는 이들 성분들의 에너지 증감은 크지 않음을 밝혔다. 또한 정점 주파수보다 저주파 영역의 파랑 성분들은 고주파 영역 성분과들이 손실한 에너지의 일부를 획득함을 보였다. 이러한 주장들은 쇄파에 기인한 백파 현상의 에너지 손실을 묘사하는 기존의 경험식들과는 크게 차이를 보이므로, 해양파 스펙트럼의 장기적인 발달과 관련하여 중요한 발견일 수 있으며, 해양파 특성의 올바른 추정을 위해서는 쇄파에 기인하는 에너지 손실 및 전이 특성에 대한 보다 정확한 이해가 필요함을 보여준다.

쇄파의 강비선형적 특성과 쇄파시의 해수와 공기와의 상호 작용 때문에 이론적 또는 수치적으로 쇄파의 에너지 증감을 다루는 것은 아직까지는 성공적이지 못하며, 실험적 조사관측을 통해 쇄파의 동력학적 특성을 밝히려는 노력 또한 다양한 외부인자의 영향을 받는 해양의 환경조건 때문에 현실적으로 여러 어려움을 갖는다. 본 연구는 실험실에서 실험역파의 특성인 방향성을 갖는 쇄파를 생성하고 계측함으로써, 실험역파의 에너지 소산 및 에너지 전이(WEDET: Wave Energy Dissipation and Energy Transfer) 특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해서는 방향성을 갖는 실험역 쇄파의 정밀한 재현과 계측이 요구된다. 본 연구에서는 주파수 성분 중첩에 의한 일방향 파랑집중 기법(Rapp and Melville, 1990; Kway et al., 1998)을 확장한 주파수 및 방향 성분 중첩기법(홍기용 등, 2002a, 2002b)을 적용하여 다방향 쇄파를 생성하고 계측하였다.



Fig. 1 Measuring system of wave characteristics

2. 다방향 쇄파 계측실험

2.1 조파시설 및 계측기의 구성

다방향 쇄파 생성 및 계측실험은 한국해양연구원 해양안전시스템연구소의 다방향 조파수조에서 실시되었다. 실험에 이용 가능한 수조영역의 크기는 길이 30m 폭 56m 깊이 4.5m이며, 실험이 수행된 수심은 3.4m이다. 수조의 북쪽면에는 상하이동이 가능한 피스톤 방식의 서펜트형 조파 시스템이 설치되어 있다. 조파 시스템은 88개의 조파판으로 구성되어 있고, 각각의 조파판은 높이가 2m, 폭이 0.5m로서 조파 시스템의 전체 길이는 44m에 달하며, 조파판의 바닥은 수조 바닥으로부터 2.2m 이격되어 있다. 수조의 동쪽면은 연직벽으로 이루어져 있고, 남쪽 및 서쪽면은 다공 경사판과 연직 다공망의 조합으로 이루어진 소파기가 설치되어 있다.

급격한 기울기를 갖는 다주파수 다방향 감쇠파의 특성을 보유한 다방향 쇄파의 해수면 상승과 입자 속도를 계측하기 위해 13개의 용량식 파고계와 한 개의 전자기 유속계를 사용하였다. 계측기는 수조 폭방향으로 이동 가능한 수조 작업대에 부착된 계측기 설치대(Fig. 1)에 고정하였으며, 계측기 설치대는 수조 작업대의 레일을 따라 수조 길이 방향의 이동이 가능하다. 다만, 파고계 1번과 2번은 조파기로부터 길이 방향으로 6.67m 이격된 작업대 위에 직접 설치하여 길이 방향의 위치를 고정하였으며, 두 파고계 간의 거리는 1.18m로서 생성된 쇄파의 반복성 확인을 주목적으로 사용하였다. 나머지 파고계와 유속계의 설치대 위의 배열은 Fig. 2와 같다. 파고계 간의 거리는 1.5m 간격을 유지하였고, 유속계는 정수면 아래 0.46m 위치에 설치하였다. 유속계의 x 방향과 y 방향은 각각 북쪽과 서쪽 방향을 양의 방향으로 설정하였다.

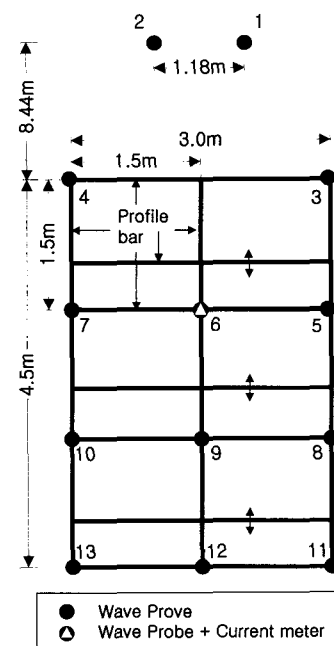


Fig. 2 Wave gauges and current meter array

2.2 쇄파 생성 및 계측

파향 제어와 동시에 고주파에서 시작하여 저주파의 순서로 파랑을 생성하여 수조의 목표 지점에 파랑을 집중함으로써 가파른 기울기의 감쇠파를 생성하였으며, 등파기울기(CWS : Constant Wave Steepness) 스펙트럼과 등파진폭(CWA : Constant Wave Amplitude) 스펙트럼을 각각 적용하여 비교하였다. 자유파 성분들이 동일한 기울기를 갖는 등파기울기 스펙트럼은 저주파에서 날카로운 정점을 가지며 주파수가 커질수록 스펙트럼의 크기가 작아지고, 자유파 성분들이 동일한 파진폭을 갖는 등파진폭 스펙트럼은 모자 모양의 스펙트럼 형상을 갖는다. 각 스펙트럼에 대해 파랑 집중점에서의 가상 최대 파정진폭 A_f 는 1.0m로 가정하였으며, βA 로 주어지는 실제 생성파의 최대 파정진폭 A_f 는 크기계수 $\beta (<1)$ 를 적용하여 형상을 제어하였다.

실험에서 생성되고 계측된 4종의 파형 특성이 Table 1에 요약된다. 여기서 P는 플런징 쇄파(plunging breaking wave)를 나타내며, I는 상응하는 플런징 쇄파의 조건에서 크기계수 β 를 조절하여 쇄파가 발생하지 않는 최대 파고의 집중파를 의미하는 초기 쇄파(incipient breaking wave)를 나타낸다. 첨자 c는 중심주파수를, Δf 는 주파수 폭을, t_b 는 조파기 구동 후 쇄파까지의 시간을 나타낸다. 선형 이론에 의해 설정된 파랑 집중지점은 조파기 중심 전면 15.0m에 위치한다. P1과 P2의 플런징 쇄파들은 파랑 집중점에 접근함에 따라 점점 에너지가 집중되어 파고가 높아지고 기울기가 증가하여 마침내 깨어지는 단일 쇄파를 형성한다. 반면에 I1, I2의 비쇄파 중 가장 큰 파고를 형성하는 초기 쇄파들은 플런징 쇄파들에 비해 조금 작은 파고값을 갖는다. 초기 쇄파들의 에너지 분포 특성을 조사함으로써, 수조에서의 3차원적인 다방향 파랑 집중에 따른 에너지 분포 특성을 파악할 수 있다. 즉 플런징 쇄파에서의 에너지 소산 및 전이 특성을 고찰함에 있어, 진행파의 상호간섭, 파의 회절, 다방향 집중파의 공간적 분포, 반사파의 영향 등 쇄파 이외의 효과에 의한 파랑 에너지의 공간적 변화를 이해하여 이를 쇄파에 기인한 에너지 변화와 분리하기 위한 목적으로 초기 쇄파 실험을 수행하였다.

Table 1 Spectral conditions for directional wave focusing in wave basin

| Type of Spectrum | Type of Breaking | f_c (Hz) & k_c (rad/m) | Δf (Hz) | α (°) | A_f (m) | t_b (s) |
|------------------|------------------|----------------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|
| CWA | Plunging (P1) | 0.6/1.45 | 0.3 | 45 | 0.40 | 65 |
| | Incipient (I1) | 0.6/1.45 | 0.3 | 45 | 0.28 | 65 |
| CWS | Plunging (P2) | 0.6/1.45 | 0.3 | 45 | 0.45 | 75 |
| | Incipient (I2) | 0.6/1.45 | 0.3 | 45 | 0.31 | 75 |

Common parameters :
 $N_f = 32, N_\theta = 200, \delta t = 0.05\text{sec},$
 Assumed focusing point : $(x_b, y_b) = (0.0\text{m}, 15.0\text{m}),$
 Water depth : $h = 3.4\text{m}$

파고계 배열이 설치된 계측기 설치대를 예상 쇄파 지점을 중심으로 전후 좌우로 이동하면서 서로 다른 9개의 지점에서 파랑을 계측하였다. 중앙 위치에서 설치대 전면과 고정 파고계와의 길이방향 거리는 8.44m이며, 북쪽(조파기 방향)과 남쪽으로는 각각 3.85m, 동쪽과 서쪽으로는 각각 3.75m를 이동하여 계측을 실시하였다. 파고계 및 유속계가 쇄파에 의한 백색파의 발생지점 밖에 위치하도록 계측 위치를 선형함으로써, 백색파 발생 전후의 파랑 에너지 스펙트럼 차이를 고찰하였다. 또한 각각의 파군에 대해 2회에 걸쳐 파고 및 유속을 계측하여 반복성을 확인하였다. 자료 취득은 40Hz의 주파수로, 102.4sec동안 4096 지점에 대해 이루어졌다. 파고계와 유속계는 선형 최소자승회귀법을 사용하여 보정하였으며, 파고계와 유속계의 표준편차는 각각 0.3mm와 0.5mm/sec 였다.

3. 계측 결과의 해석

계측 시계열 자료는 FFT(Fast Fourier Transform)로 처리하여 에너지 분포를 고찰하였다. P2 쇄파의 파랑집중 과정이 Fig. 3에 보여지며, 다방향 파랑집중에 의해 파형 전면의 기울기가 급격히 증가하면서 파 진행 방향으로 파형의 비 대칭성이 한계에 도달함에 따라 쇄파가 발생하는 것을 볼 수 있다. 초기 쇄파에 대해 쇄파 발생 전후의 시계열(Fig. 4)과 조파기에 평행한 쇄파 발생 이전 단면에서의 시계열이(Fig. 5)에 보여진다. 파랑 집중 지점 이전 영역(북쪽)에서 Fig. 4는 주파수 성분 중첩에 의한 파랑 집중효과를 뚜렷이 보여주며, Fig. 5는 방향성에 의한 파랑 집중 효과를 보여준다. Fig. 4의 파랑 집중 지점 이후 영역(남쪽)에서의 집중파의 해체 과정은 상대적으로 미약하게 나타나며, 이는 파랑 집중 지점에서의 비선형성 증가로 인한 파랑장의 불안정성에 따른 영향과 수조의 공간적 제약에 기인한 수조 벽면 및 소파기로부터의 반사파 영향이 복합적으로 작용한 것으로 추정된다. 비선형성이 클수록 불안정한 집중파를 생성하며, 결과적으로 쇄파의 정점 파고 값이 작아지는 현상은 등파기울기 스펙트럼에 의한 초기 쇄파의 정점 파고 값이 등파진폭 스펙트럼의 상응하는 값에 비해 훨씬 크게 나타나는 점에 의해 확인된다(Fig. 4).

쇄파의 과정은 매우 불안정한 물리 현상이기 때문에 실험시 발생하는 작은 교란에 의해서도 생성된 쇄파의 특성이 변화할 수 있으며, 수조 실험은 여러 가지 원인의 잡음을 포함하는 것이 일반적이므로, 생성 쇄파의 반복성을 검증하는 것이 필요하다. 동일한 조건을 적용하여 생성한 P2 플런징 쇄파의 쇄파 지점 전후의 파진폭 및 파 진행 방향 유속 스펙트럼을 Fig. 6에 도시하였다. 등파진폭 스펙트럼과 등파기울기 스펙트럼 모두에서 쇄파 이전 영역에서는 반복 실험의 결과가 거의 동일함을 볼 수 있으며, 쇄파 이후 지점에서도 비교적 양호한 일치성을 확인할 수 있다.

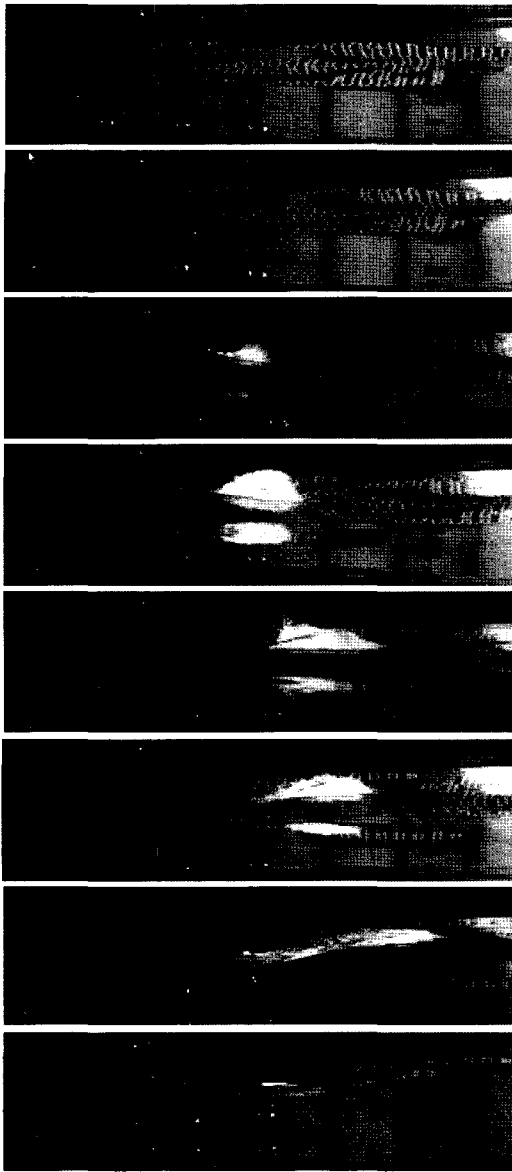


Fig. 3 A series of plunging breaking processes

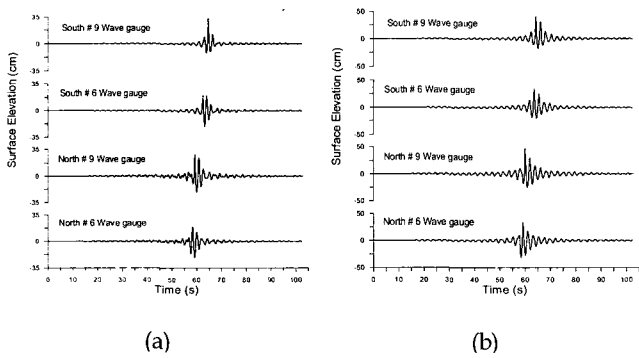


Fig. 4 Time history of wave elevation at various locations along the centerline around a wave focusing point (a) CWA, (b) CWS

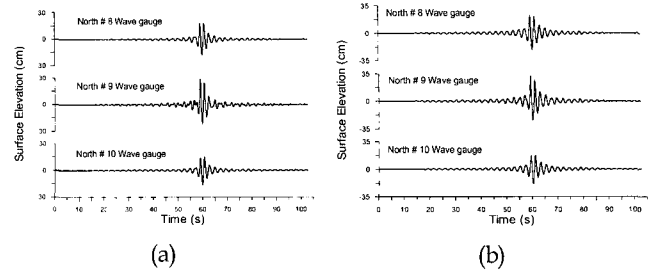


Fig. 5 Time history of wave elevation at various locations along a transverse line in front of a wave focusing point (a) CWA, (b) CWS

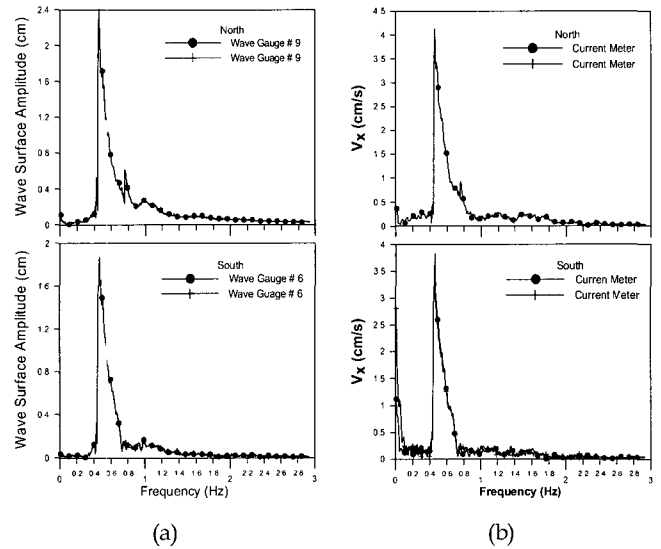


Fig. 6 Comparison of wave amplitude spectra of two different runs at a fixed location (a) Surface elevation, (b) Velocity

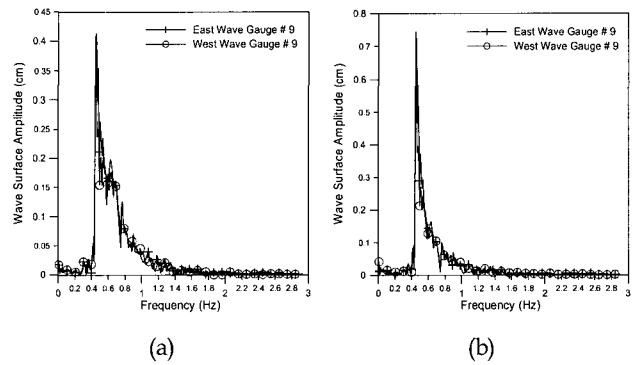


Fig. 7 Comparison of wave amplitude spectra of symmetric locations in front of a wave focusing point (a) CWA, (b) CWS

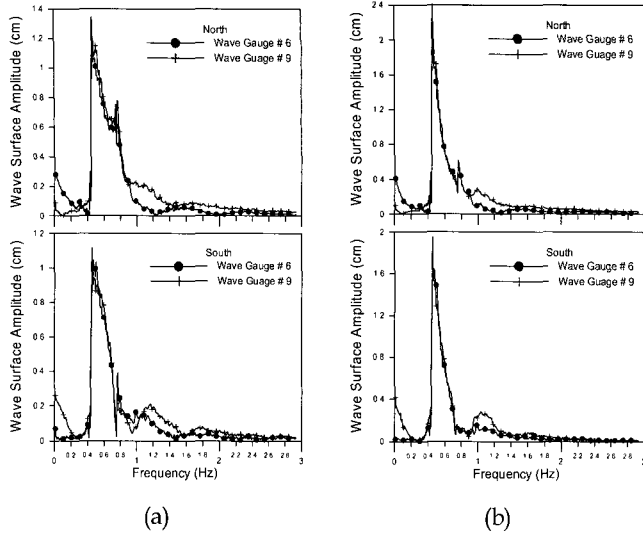


Fig. 8 Evolution of focused wave packet (a) CWA, (b) CWS

북쪽 계측 영역에서 수조의 길이 방향 중심선에 대해 서로 대칭인 두 지점의 파진폭 스펙트럼을 비교하였다(Fig. 7). 파 스펙트럼의 종류에 관계없이 두 지점의 스펙트럼이 양호한 일치성을 보여주며, 수조의 물리적 조건에 의한 간섭에 무관하게 안정적인 다방향 파랑집중이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 수조 길이 방향 중심선 위의 여러 위치에서 계측한 플러징 쇄파의 파진폭 스펙트럼을 보여준다. 각각의 그림에서 비교한 두 지점은 파랑 집중점 이전 또는 이후 영역에서 인접한 두 계측점이다. 영역 또는 스펙트럼 종류에 관계없이 모든 스펙트럼은 유사한 형태를 보여준다. 정량적으로는 정점 주파수 부근에서는 거의 동일한 값을 보이지만, 저주파 및 고주파 영역에서는 상당한 차이가 발견된다. 스펙트럼의 차이는 파랑 간섭에 의한 경계파 성분, 파랑의 회절, 파랑집중의 방향성에 기인한다. 파랑의 회절 및 방향성 효과는 주로 자유파 성분에 의해 지배되는 현상이므로 이들 효과는 정점 주파수 부근에 집중되며, 스펙트럼 양 끝단의 영역은 파랑간의 간섭에 기인하는 합주파수 및 차주파수 비선형 성분이 지배적인 영역이므로 양 끝단에서 두 스펙트럼의 차이는 경계파 성분의 영향임을 알 수 있다. 이러한 현상들은 Rapp and Melville(1990), Kway et al.(1998), Nepf and Wu(1998)의 연구에서도 유사한 결과가 얻어진 바 있다.

특정 주파수에서의 파고는 상응하는 자유파 성분 파고와 여러 경계파 성분들 파고의 합으로 주어진다. 스펙트럼의 정점 주파수 근처에서는 자유파 성분이 지배적이고 경계파 성분들이 상대적으로 무시할 수 있는 크기이다. 쇄파 전후에서 이러한 경향은 유지되며, 약비선형 간섭의 효과는 짧은 진행 거리 내에서는 미미하기 때문이다. 그러나, 저주파와 고주파 영역에서는 경계파 성분들의 기여도가 자유파 성분 크기에 상응하거나 심지어 커질수도 있음이 알려져 있다(Zhang et al., 1996). 이에 따라 양 끝단의 주파수 영역에서는 위치에 따른 파고 스펙트럼의 차이가 현저하다.

펙트럼의 차이가 현저하다.

쇄파를 생성하는 합성파의 파군이 진행할 때 발생하는 경계파에 의한 스펙트럼 변화는 다음의 두 가지 특징을 갖는다. 첫째, 조파기로부터 가까운 파랑 집중점 이전 지역에서는 서로 다른 주파수 성분의 자유파들이 합성되기 이전이므로 강한 비선형 간섭이 아직 발생하지 않는다. 파랑 집중점에 가까워짐에 따라 차츰 저주파 성분들이 고주파 성분들을 따라 잡으면서 강한 비선형 간섭이 발생하고 경계파 성분들이 커진다. 이에 따라 쇄파 발생 직전에 저주파 및 고주파 영역에서 에너지가 현저히 증가하는 현상이 발생한다. 파랑 집중점을 지나치면, 역으로 저주파 성분들이 고주파 성분들을 앞서가기 시작하면서 파랑 집중점으로부터 멀어질수록 비선형 간섭의 크기가 점차 감소한다. 둘째로, 자유파의 위상속도와 동일한 주파수를 갖는 경계파의 위상속도가 서로 다르기 때문에 자유파와 경계파의 파고가 변화하지 않는 경우조차도 수조내 위치에 따라 합성파의 파고가 서로 다를 수 있다.

4. 쇄파에 의한 에너지 소산 및 전이

쇄파 전후의 파랑 에너지 스펙트럼을 비교함으로써, 쇄파에 기인하는 에너지 소산 및 전이 특성을 파악할 수 있다. 쇄파에 기인하는 스펙트럼의 변화를 Fig. 9(등파진폭 스펙트럼)와 Fig. 10(등파기울기 스펙트럼)에 도시하였다. 각각에서 초기 쇄파의 경우에 나타나는 파랑 집중점 전후의 에너지 차이는 계측 시스템의 오류를 제외하면 경계파 성분과 자유파 성분의 공간적인 회절 및 방향 집중에 기인한다. 그러나 앞에서 논의된 바와 같이 경계파의 영향은 주파수의 양 끝단에서만 중요하므로, 정점 주파수 부근에서 나타나는 에너지 차이는 집중파의 방향성에 따르는 파의 산란에 의해 발생한다. 플러징 쇄파의 경우는 초기 쇄파에서와는 달리 쇄파에 기인하는 에너지 소산 및 주파수 성분들 간의 전이 효과를 포함한다. 초기 쇄파와 비교할 때 정점 주파수 부근(0.45~0.75 Hz)에서는 상대적으로 높은 주파수에서 쇄파에 기인하는 에너지 소산이 현저하다. 고주파 영역에서는 전체적으로 작은 정도의 에너지 소산이 관찰된다. 반면에 저주파 영역에서는 초기 쇄파의 결과와 비교할 때 오히려 쇄파 후에 에너지 증가가 관찰된다. 초기 쇄파와 플러징 쇄파 모두에서 저주파 영역에서 파랑 집중점 이후에 에너지의 증가가 발생하나, 플러징 쇄파의 경우에서 증가하는 비율이 상대적으로 크다는 것은 쇄파에 의해 저주파 영역으로 에너지 전이가 발생했음을 의미한다.

쇄파에 의한 에너지 소산 및 전이를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 초기 쇄파와 플러징 쇄파의 비교를 통한 파의 공간적인 산란 효과를 제거하는 것과 함께, 경계파에 기인하는 스펙트럼 변화를 올바르게 해석하여 이를 계측 결과로부터 제거하는 것이 필수적이다. 이를 위해 시계열 자료의 Fourier 변환 시 비선형파 해석기법(Zhang et al., 1999)의 적용이 요구되며, 향후의 연구과제로 남는다.

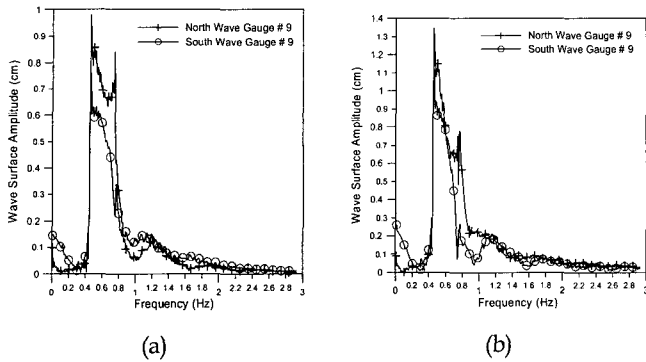


Fig. 9 Energy dissipation and transfer of a CWA breaking wave (a) Incipient breaker, (b) Plunging breaker

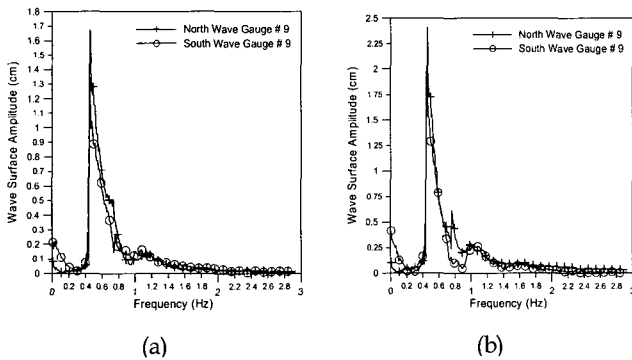


Fig. 10 Energy dissipation and transfer of a CWS breaking wave (a) Incipient breaker, (b) Plunging breaker

5. 결 론

심해에서 쇄파에 의한 에너지 소산 및 에너지 전이 특성을 고찰하고자 다방향 조파수조를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 파랑의 주파수 성분 및 방향 성분의 동시 제어를 통해 합성파를 목표 지점에 집중시킴으로써 초기 쇄파와 플러징 쇄파를 생성하였으며, 파고계와 유속계를 이용하여 파랑 집중점 전후의 파랑 특성을 계측하였다. 초기 쇄파의 관찰로부터 파의 산란에 기인하는 파랑 스펙트럼의 공간적인 변화를 추정하였으며, 플러징 쇄파에 대한 다음의 에너지 소산 및 전이 특성을 파악하였다.

정점 주파수 부근에서는 상대적으로 높은 주파수에서 현저한 에너지 소산이 발생하며, 고주파 영역에서는 매우 작은 정도의 에너지 소산이 발생한다. 저주파 영역에서는 쇄파시 에너지 전이에 의해 에너지의 증가가 발생한다.

파랑 스펙트럼의 정점 주파수 부근에서는 자유파 성분의 영향이 지배적이며, 경계파 성분의 영향은 미미하다. 반면에

저주파 및 고주파 영역에서는 자유파 성분에 비견할 만큼 경계파의 영향이 크게 나타나며, 쇄파에 기인하는 효과로부터 이를 분리하기 위해서는 비선형 파랑 해석기법의 도입이 필요하다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 기본연구사업과 과학기술부 국제공동연구사업의 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

홍기용, 류슈췌, 양찬규 (2002a). "파랑집중에 의한 다방향 극한 파 생성의 효율성에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 1-6.

홍기용, 류슈췌, 홍석원 (2002b). "다방향 극한파 생성의 이론적 연구", 대한조선학회논문집, 제39권, 제1호, pp 38-48.

Kway, H.L., Loh, Y.S. and Chan, E.S. (1998). "Laboratory Study of Deep-Water Breaking Waves", Ocean Engineering, Vol 25, pp 657-676.

Meza, E., Zhang, J. and Seymour, R. (2000). "Free-Wave Energy Dissipation in Experimental Breaking Waves", J. Phys. Oceanogr., Vol 28, pp 1,496-1,510.

Nepf, H.M. and Wu, C.H. (2000). "A Comparison of Two and Three Dimensional Wave Breaking", J. Phys. Oceanogr., Vol 30, pp 2,404-2,418.

Prislin, I., Zhang J. and Seymour, R. (1997). "Deterministic Decomposition of Deep Water Short-Crested Irregular Gravity Waves", J. Geophys. Res., Vol 102, pp 12,677-12,688.

Rapp, R.J. and Melville, W.K. (1990). "Laboratory Measurements of Deep-Water Breaking Waves", Philos. Trans. Roy. Soc. London, A 331, pp 735-800.

Zhang, J., Chen, L., Ye, M. and Randall, R.E. (1996). "Hybrid Wave Model for Unidirectional Irregular Waves, Part I. Theory and Numerical Scheme". Appl. Ocean Res., Vol 18, pp 77-92.

Zhang, J., Yang, J., Prislin, I., Wen, J. and Hong, K. (1999). "Deterministic Wave Model for Short-Crested Ocean Waves, Part I. Theory and Numerical Scheme". Applied Ocean Research, Vol 21, pp 167-188.

2003년 9월 9일 원고 접수

2003년 11월 17일 최종 수정본 채택