

경사진 실린더에 작용하는 플런징 쇄파 충격력의 불안정성 고찰

홍기용[†] · 신승호

한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부

Instability of Plunging Breaking Wave Impact on Inclined Cylinder

Keyyong Hong[†] and Seung-Ho Shin

Department of Ocean Engineering, Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI
104 Sinseong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

플런징 쇄파에 의해 실린더에 작용하는 충격력을 실험적으로 고찰하였다. 쇄파는 조파기의 구동주파수를 선형적으로 감소시켜 수조의 목표지점에 파랑을 집중시킴으로써 생성되며, 쇄파의 파형은 등파기울기 스펙트럼을 채택하였다. 실린더와 쇄파 전면의 접촉각이 충격력에 미치는 영향을 고찰하기 위해 3개의 경사각을 적용하였으며, 압력 분포 및 정점 값에 대한 실린더 직경의 영향을 살피기 위해 3개의 서로 다른 직경을 갖는 실린더가 사용되었다. 충격 압력의 최대 값을 찾기 위해 실린더를 수조 길이방향으로 조금씩 이동하며 총 8개 지점에서 실험을 수행하였다. 실린더 표면의 압력과 합력은 piezo-electric형 압력계와 3축 로드셀을 사용하여 30 kHz의 빈도로 계측하였다. 실린더 직경, 경사각 및 회전각에 따른 정점 충격압력과 충격력의 변화를 분석하였으며, 실린더 표면의 압력분포를 고찰하였다. 실린더의 수조 내 위치 및 실린더 표면의 위치는 정점압력의 크기와 시계열 형상을 지배하는 주요 인자이며, 반면에 실린더 직경과 경사각의 영향은 상대적으로 미미하다. 충격현상은 매우 불안정하기 때문에 동일조건 반복 실험에서도 계측 값의 넓은 분포가 발생한다.

Abstract – Impact on cylindrical surface caused by plunging breaking waves is investigated experimentally. The breaking waves are generated in a wave flume by decreasing the wavemaker frequencies linearly and focusing the generated wave components at one specific location. The breaking wave packets are based on constant wave steepness spectrum. Three inclination angles of cylinder are applied to examine the effect of contact angle between cylinder and front surface of breaking waves. Also, the effect of cylinder diameter on pressure distribution and its peak value is investigated by adopting three cylinders with different diameters. The longitudinal location of cylinder is slightly moved in eight different points to find out a probable maximum value of impact pressure. The pressures and total force on cylinder surface are measured by piezo-electric pressure sensors and 3-components load cell with 30kHz sampling rate. The variation of peak impact pressures and forces is analyzed in terms of cylinder diameter, inclination angle and location. Also, the pressure distribution on cylindrical surface is examined. The cylinder location and surface position are more important parameters that govern the magnitude and shape of peak pressures, while the cylinder diameter and inclined angle are relatively insignificant. In a certain conditions, the impact phenomenon becomes very unstable which results in a large variation of measured values in repeated runs.

Keywords: Wave Impact Force(파랑 충격력), Plunging Breaking Wave(플런징 쇄파), Inclined Cylinder(경사 실린더), Pressure Distribution(압력 분포), Peak Pressure(정점 압력)

1. 서 론

파랑은 선박이나 해양구조물의 안전을 위협하는 가장 중요한 외력으로 간주되고 있으며, 흔히 구조물에 충격력의 형태로 작용

하는 극한파는 국부적 손상을 야기하고, 이에 기인하여 전체 구조물의 붕괴로 이어지기도 한다. 또한 경제적인 해양구조물의 설계는 설계 환경외력의 정확한 추정에 크게 좌우된다. 따라서 극한파에 의한 외력이 해양구조물에 작용하는 양상과 그 물리적 특성을 올바르게 이해하는 것은 안전하고 경제적인 해양구조물의 설계를 위

[†]Corresponding author: kyhong@moeri.re.kr

해 필수적이다.

해양구조물의 수면 하 부재의 형상은 흔히 실린더 형태를 갖는다. 이는 유선형의 단면이 파랑 및 조류 등의 외력에 대한 대응에 유리하기 때문이다. 대양에서의 극한파는 일반적으로 쇄파의 형태로 나타나며, 특히 플러징 쇄파의 경우 구조물에 강한 충격력으로 작용한다. 선행 연구들(Basco & Niedzwecki[1989]; Kjeldsen *et al.*[1986])에 따르면, 실린더에 작용하는 플러징 파력은 상응하는 진폭을 갖는 파에 의한 비충격 파력에 비해 2배 이상의 크기일 수 있다.

플러징 쇄파는 쇄파의 과정에서 자유수면 내부에 공기를 포함하게 되고, 이로 인하여 형성되는 공기방울들은 역학적으로 매우 불안정한 상태에 놓이기 때문에, 플러징 쇄파와 구조물의 간섭에 의한 충격력은 입사파 조건의 작은 변화에도 상당히 민감하게 반응하며, 미세한 초기 조건의 차이에 의해서도 상당한 정점압력의 변화가 발생한다(Zhou *et al.*[1991]; Chan *et al.*[1995]). 이와 같은 공기방울의 불안정성은 계측된 압력의 시계열에서 보이는 진동의 원인으로 설명되기도 한다(Zhou *et al.*[1991]).

본 연구는 극한파에 의해 해양구조물에 작용하는 충격 파랑하중에 대한 실험적 기초 연구로서 해양구조물의 대표적인 부재 형상인 실린더에 대한 극한파 충격력의 특성을 고찰하고자 수행되었다. 플러징 쇄파는 현상이 불안정할 뿐 아니라 시간에 따른 자유수면의 변화가 급격하므로 공간적인 위치에 따라 압력 특성이 판이하게 달라지며, 플러징 쇄파에 의해 실린더에 작용하는 충격 압력은 실린더 표면 위치에 따라 변화한다. 그러므로 실린더에 작용하는 표면압력 분포를 올바로 파악하기 위해서는 실린더 표면의 다양한 위치에서 압력을 계측하는 것이 필요하다. 또한 불안정한 정점압력 특성을 파악하기 위해서는 반복 실험을 통한 절대치의 변화를 고찰하는 것이 필수적이다.

해양구조물의 실린더형 부재는 입사파에 대해 다양한 경사각으로 설치되므로 경사각에 따른 정점압력 및 분포의 변화를 파악할 필요가 있으며, 실린더의 직경은 파랑하중의 특성을 지배하는 중요한 인자이므로 실린더의 직경과 극한파 대표 파장의 비에 따른 압력 특성의 변화도 중요한 관심의 대상이다.

2. 쇄파의 생성 및 충격력 계측

2.1 플러징 쇄파의 생성

쇄파는 길이 25 m, 폭 0.6 m, 깊이 0.8 m의 이차원 조파수조에서 생성되었으며, 적용된 수심은 0.5 m이다. 쇄파는 서로 다른 파랑성분들의 파정을 특정 시간에 수조 내 목표 지점에 일치시키는 파랑집중 기법을 이용하여 생성될 수 있다(홍기용 등[2002]).

쇄파 생성을 위한 파랑 스펙트럼은 성분파들의 파기울기가 동일한 등파기울기 스펙트럼을 채택하였으며, 중심주파수는 1.0 Hz 주파수폭은 1.0 Hz이다. 선행 이론에 의한 파랑 집중점은 조파기 전면 11.3 m이며, 파랑 집중점에서 성분파들 파진폭의 합은 25 cm이다.

Table 1. Experimental conditions for impact pressure distribution caused by plunging breaker on inclined cylinders

Cylinder Diameter D (cm)	Cylinder Location x_c (m)	Tilt Angle θ (°)	Rotation Angle ϕ (°)
8	11.10 11.20	0°	0°
10	11.25 11.30	15°	15°
15	11.35 11.40 11.50 11.60	30°	30°

2.2 실린더의 실험조건

실린더에 작용하는 극한파 충격력 모형실험을 위한 실험조건은 Table 1과 같다. 실험은 서로 다른 직경을 갖는 3개의 모형에 대해 실시하였으며, 실린더의 전체 높이 40 cm 중에서 11 cm가 수면 아래에 위치한다. 파향 진행 방향 전후 경사각에 따른 충격력 변화와 실린더 표면 위치에 따른 충격력의 분포 특성을 고찰하였다. 압력의 표면 분포는 상하 방향으로 설치된 계측기 배열을 축 방향으로 회전하면서 계측함으로써 얻었으며 이를 위해 회전각을 적용하였다.

2.3 충격력의 계측

극한파에 의한 압력 및 충격력의 시계열 특성은 Piezo Electric 압력센서와 로드셀을 사용하여 계측하였으며, 조파기에 의해 생성된 극한 쇄파의 시계열은 실린더 측면에 설치한 용량식 파고계를 이용하여 계측하였다. 압력센서는 실린더의 길이 방향으로 3 cm 간격으로 설치하였다. 가장 상부에 1번 센서부터 가장 아래에 설치된 10번 센서까지 10개의 센서가 사용되었으며, 8번 센서는 정수면에 위치한다. 사용된 Piezo Electric 압력센서는 Kistler사의 701A 모델로서 계측부의 지름이 9.5 mm이다. 압력 센서는 250 bar 까지 가능한 계측 범위를 가지며, 80 pC/bar의 해상도를 지니고, 70 kHz 이상의 공진주파수를 갖는다. 자료 취득을 위한 A/D 보드는 National Instrument 사의 NI4772 보드를 사용하였으며, 채널당 30 kHz의 빈도로 자료를 취득하였다.

3. 쇄파 충격력의 해석

이차원 수조에서 생성된 쇄파는 파정 전면의 경사가 급격해지면서 파정의 상부가 하부보다 빠르게 진행하여 하부를 치면서 공기방울이 형성되는 플러징 쇄파의 특징이 분명하게 보이며, 쇄파의 정점 파진폭은 17.1 cm가 얻어진다. 쇄파는 수조 폭 방향의 중앙에 위치한 실린더에 충격력으로 작용하며, 플러징 쇄파가 실린더에 충격력으로 작용하는 연속적인 과정의 전형적인 예가 Fig. 1에 보여진다.

실험에서 계측된 파 진행방향으로의 충격력 정점 값과 실린더 표면의 충격압력이 최대가 되는 위치에서의 충격압력 정점 값이 Fig. 2와 Fig. 3~Fig. 5에 도시된다. 실린더 직경, 경사각 및 회전각의 영향과 쇄파 지점의 위치에 의한 충격력의 변화가 고찰된다. 본 연구에서 설정한 쇄파 조건에서는 거의 모든 경우에 3번과 4번 압

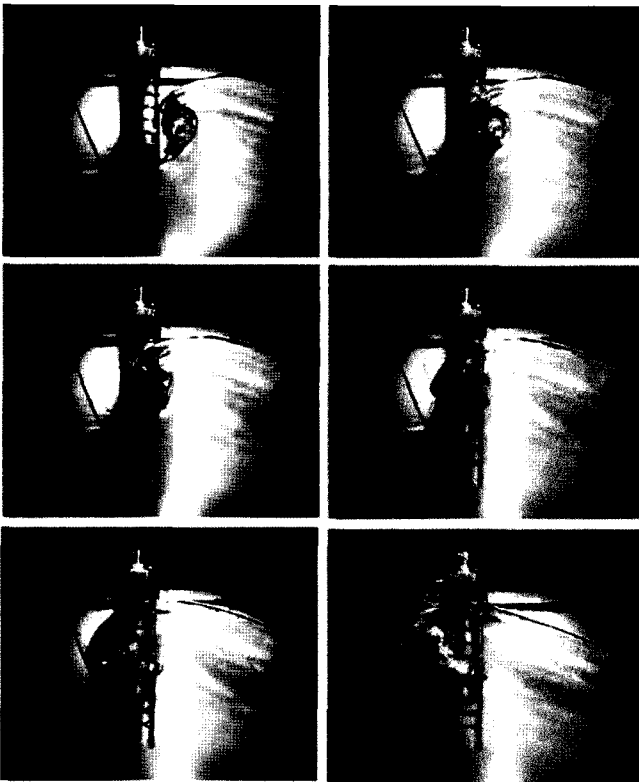


Fig. 1. Successive scenes of impact moment of plunging breaker on cylinder.

력센서 중 하나에서 최대 정점 값이 발생하였으나, 쇄파 현상의 불안정성에 기인하여 최대 정점 값은 반복 실험에서 상당한 편차를 보인다. 특히 쇄파의 전면과 실린더 사이에 공기가 갇혀 밀폐되는 경우 불안정성이 커져서 값의 편차가 매우 크게 나타난다. 이는 보다 효과적으로 밀폐된 공기층이 형성되는 직경이 큰 실린더에서 편차가 크게 나타나는 현상으로부터도 관찰된다. 그러나 실린더 표면에 대한 압력의 적분을 의미하는 충격력의 경우 반복 실험에서 상대적으로 안정적인 분포를 보인다(Fig. 2).

직경이 큰 경우에 일반적으로 벽면 효과가 증가하므로 정점파압의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있으나, 실린더 직경이 일정 크기 이상으로 커지면 회전각이 0°인 경우에 벽면 효과의 차이는 미미하다. 실험에 사용된 실린더 중에서 직경이 80 cm인 경우에만 상대적으로 현저하게 작은 값을 보이며(Fig. 3), 실린더 직경이 10 cm인 경우(Fig. 4)와 15 cm(Fig. 5)인 경우는 유사한 경향을 보인다. 실린더 직경이 10 cm일 때의 예를 보면, 최대 정점파압은 33.5 psi의 값을 가지며, 경사각과 회전각이 영이고 쇄파 지점이 조파기로부터 11.25 m일 때 3번 압력센서에서 발생하였다.

경사각이 연직에 가까울수록, 그리고 입사 파향에 대한 회전각이 작을수록 증가하는 경향을 보인다. 경사각이나 회전각이 증가하면 실린더 표면에 직각인 방향의 유체입자 속도가 감소하므로 파압이 감소하는 것으로 판단된다. 다만, 경사각이 15°인 경우는 연직인 경우와 비교할 때, 정점 값의 크기 차이가 미미하며, 정점

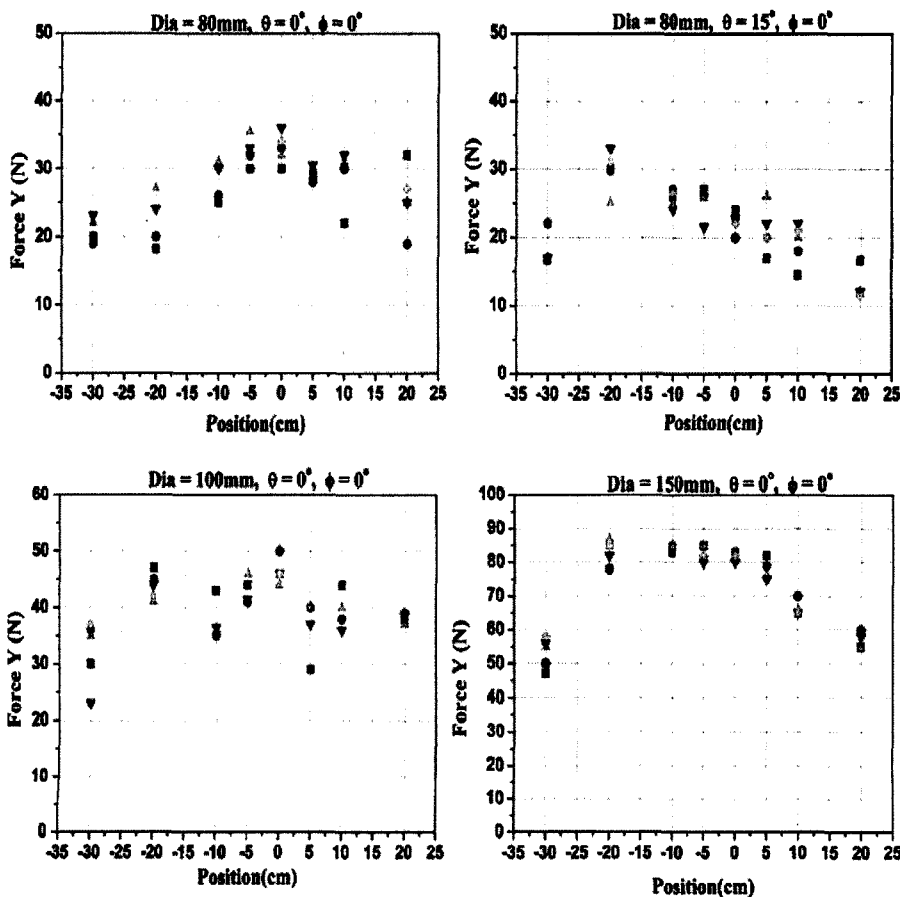


Fig. 2. Distribution of impact forces acting on inclined cylinder caused by plunging breaking wave in repeated run.

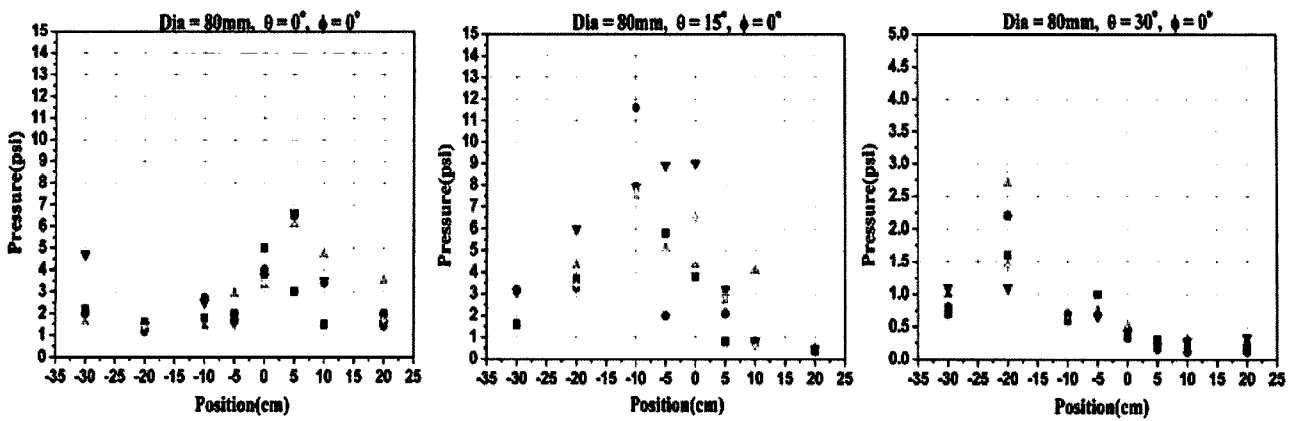


Fig. 3. Distribution of peak pressures acting on inclined cylinder caused by plunging breaking wave in repeated runs ($D = 80$ mm).

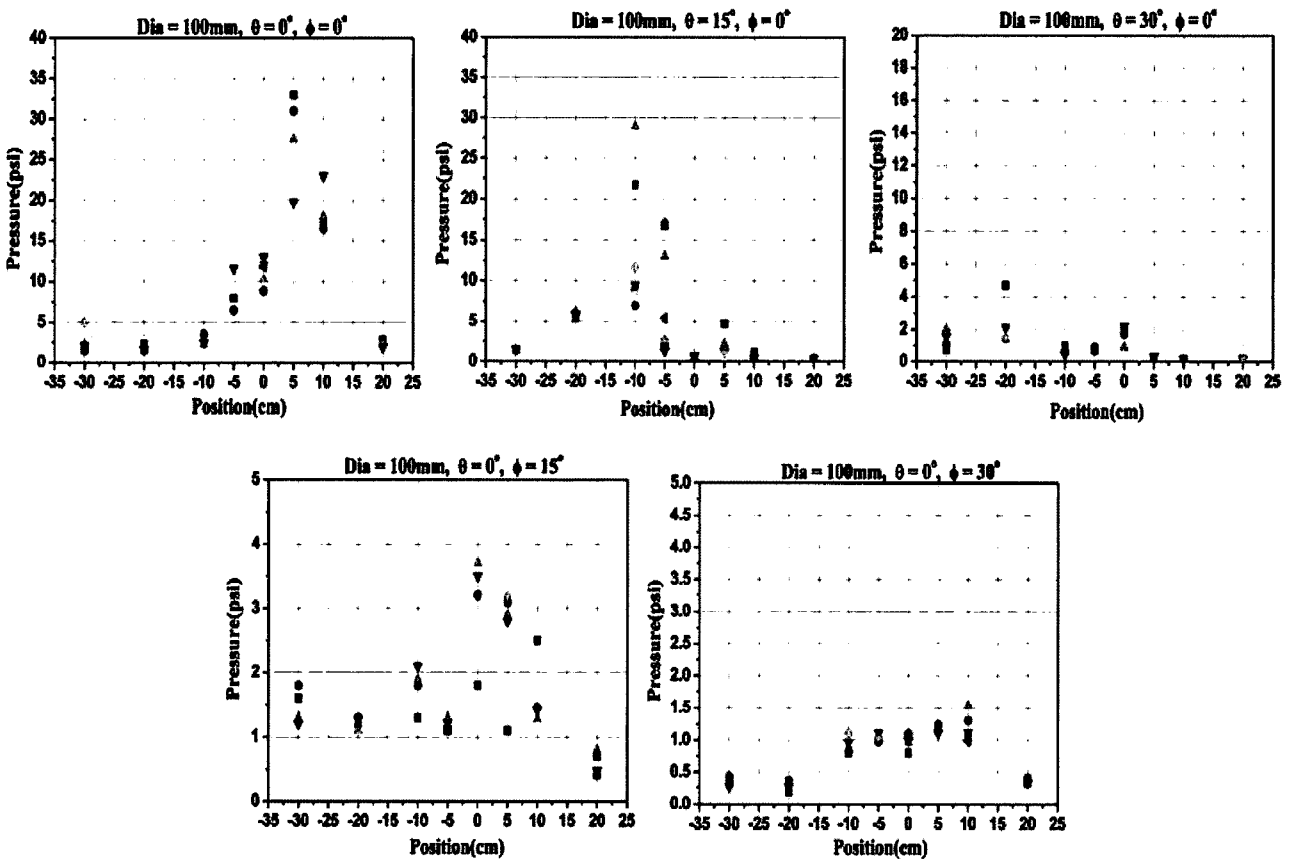


Fig. 4. Distribution of peak pressures acting on inclined cylinder caused by plunging breaking wave in repeated runs ($D = 100$).

값이 발생하는 길이 방향 위치에서만 차이를 보인다. 그러나 경사각이 30°인 경우에는 정점 값의 크기가 현저히 작아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 차이는 파랑 전면의 기울기가 어느 한계 이상으로 급격해지면 더 이상 형상을 유지하지 못하고 부서지기 때문이다.

쇄파 지점을 변화시키면서, 정점파압의 변화를 고찰하면 일반적으로 특정의 한 경우가 다른 경우들에 비해 정점파압이 매우 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는 쇄파 형상의 위치에 따라 파압이 급격하게 변화함을 의미한다. 따라서 실린더에 작용하는 정점파압을 올바르게 예측하기 위해서는 쇄파 지점을 주의 깊게 설정하여야

한다. 또한 회전각에 크기에 따른 파압의 변화는 실린더에 연직 방향의 유체속도 변화에 밀접하게 연관된다.

실린더 표면에 작용하는 파압 시계열(Fig. 4)은 조건에 따라 다양한 형태와 크기로 나타나며, 특히 연직 위치에 따라 최대파압의 크기는 커다란 차이를 갖는다. 충격 파압 시계열의 정점 상승시간은 대부분의 경우에 0.001~0.002 sec이며, 경향도 유사하다. 하강 시간은 상승시간에 비해 다소 긴 경우가 일반적이나, 조건에 따라서는 보다 완만한 하강을 보이기도 하며, 경향도 서로 차이가 있다. 특히 충격 파압이 상대적으로 크게 작용하는 위치에서는 상승 및 하강 시계열의 변화가 보다 급격하게 나타난다. 그러나 반복실

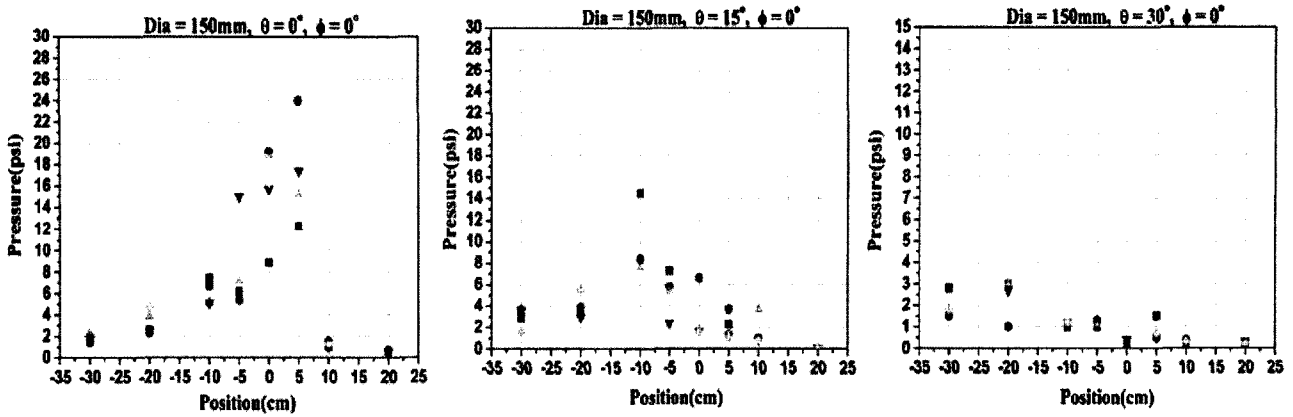


Fig. 5. Distribution of peak pressures acting on inclined cylinder caused by plunging breaking wave in repeated runs ($D = 150$ mm).

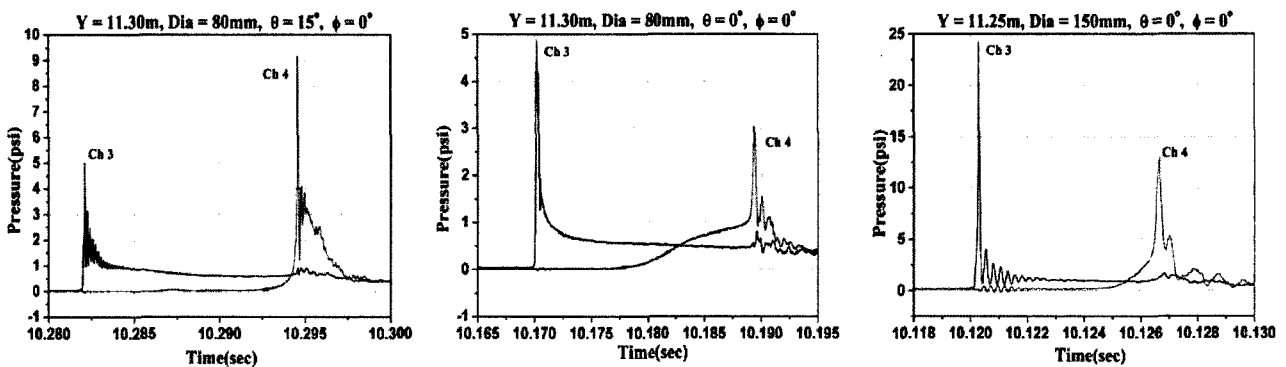


Fig. 6. Time series of impact pressures acting on inclined cylinder caused by plunging breaking wave.

험에서 나타나는 정점 파압의 변동성에도 불구하고, 시계열의 형상은 비교적 균일하게 나타난다.

4. 결 론

해양구조물의 대표적인 부재 형상인 실린더에 극한파가 작용할 때 발생하는 충격력을 실험적으로 고찰하였다. 동일한 파고를 갖는 해양파일지라도 규칙파와는 달리 쇄파는 충격 효과에 의해 정점파압이 크게 증가하므로 충격 효과에 의해 발생하는 극한응력 특성을 정확히 파악하여 해양구조물의 설계 시 반영하는 것은 안전성 확보에 매우 중요하다.

주파수 성분의 위상 제어에 의한 파랑집중으로 플러징 쇄파 형태의 극한파를 생성하였으며, 실린더의 직경, 경사각 및 회전각에 따른 충격파압 분포 및 파 진행방향으로의 충격력 변화를 살펴보았다. 특히 쇄파 현상의 불안정성에 기인하는 정점 파압 및 충격력의 변동성을 고찰하였다.

정점파압의 크기는 쇄파 위치에 따라 민감하게 변화하며, 동일한 쇄파에서 실린더 표면의 위치에 따라 파압의 크기는 크게 다르다. 또한 초기 조건의 변화에 의해서도 상당한 크기의 파압변화가 예측되며, 이는 쇄파 생성 및 진행 과정이 매우 불안정한 물리적 현상임을 나타낸다. 일반적으로 실린더의 직경이 클수록 정점파압이 다소 증가하며, 이는 충격파에 대한 벽면 효과가 증가되기

때문이다. 실린더가 수직으로 놓일 때가 경사각을 갖는 경우보다 정점파압이 크게 나타나며, 이는 쇄파 시 유체 입자의 최대속도가 수평방향의 움직임에서 나타나기 때문으로 생각된다.

쇄파에 기인하는 충격이 불안정한 현상임에도 불구하고, 반복 실험에서 얻어지는 충격파압의 시계열 변화는 매우 유사한 현상을 보여준다. 다만 반복실험에서 정점파압의 크기는 상당한 차이를 보여주기도 하며, 서로 다른 실험조건 또는 서로 다른 위치에서의 파압 시계열은 상이한 형태로 나타나는 것이 일반적이다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 기본연구사업으로 수행한 “기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발”과 과학기술부 국제공동연구사업으로 한국해양연구원에서 수행한 “극한파 특성의 비선형 해석 및 해양구조물 적용 연구”의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 홍기용, 류슈취, 양찬규, 2002, “파랑집중에 의한 다방향 극한파 생성의 효율성에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지,

- 제16권, 제5호, 1-6.
- [2] Basco, D.R. and Niedzwecki, J.M., 1989, "Breaking wave force distributions and design criteria for slender piles", OTC 6009, 425-431.
- [3] Chan, E.S., Cheong, H.F. and Tan, B.C., 1995, "Laboratory study of plunging wave impacts on vertical cylinders", Coastal Eng., Vol. 25, 87-107.
- [4] Kjeldsen, S.P., Torum, A. and Dean, R.G., 1986, "Wave forces on vertical piles caused by 2 and 3 dimensional breaking waves", Proc. 20st Int. Conf. Coastal Eng., Taipei. ASCE, New York, 1929-1942.
- [5] Zhou, D., Chan, E.S. and Melville, W.K., 1991, "Wave impact pressures on vertical cylinders", Appl. Ocean Res., Vol. 13, No. 5, 220-234.

2007년 6월 19일 원고접수

2007년 8월 21일 수정본 채택