

외부 정수압을 받는 복수 원통의 연쇄 내파에 관한 실험연구

태구무타퀴¹·박상현²·손정민¹·조상래^{2,3,†}·노인식⁴·이필승⁵·조윤식⁶
부경대학교 조선해양시스템공학과¹
울산대학교 조선해양공학부²
㈜울산랩³
충남대학교 선박해양공학과⁴
한국과학기술원 기계공학과⁵
국방과학연구소⁶

Tests on the Serial Implosion of Multiple Cylinders Subjected to External Hydrostatic Pressure

Muttaqie Teguh¹·Sang-Hyun Park²·Jung Min Sohn¹·Sang-Rai Cho^{2,3,†}·In Sik Nho⁴·Phill-Seung Lee⁵·Yoon Sik Cho⁶
Department of Naval Architecture & Marine Systems Engineering, Pukyong National University¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan²
UlsanLab Inc.³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University⁴
Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology⁵
Agency for Defense Development⁶

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In the present paper, implosion responses of two adjacent cylindrical tubes under external hydrostatic pressure were experimentally investigated. The cylinder models were fabricated of aluminium alloy 6061-T6 commercial tubes. In the experiment, a pair of two-cylinders were placed inside of a support frame in a medium-size pressure chamber, whose design pressure was 6.0MPa. The distance between the two-cylinders was 30 millimeter measured from outer shell at the mid-length. The implosion tests were performed with water and compressed nitrogen gas as the pressurizing media. The ambient static pressure of the chamber and local dynamic pressure near the two-imploded models were measured simultaneously. It was found that the energy released during an implosion from the first, weaker cylinder triggered the instability of the second, stronger cylinders. In other words, the resulting shock wave of the first implosive impact from the weaker cylinder could cause the premature failure of the neighboring stronger cylinders. The non-contact implosion phenomena from the two-cylindrical tube were clearly observed.

Keywords : Implosion experiment(내파 실험), Serial implosion(연쇄 내파), Two-cylinders(두 개의 원통), Collapse pressure(붕괴 압력), External hydrostatic pressure(외부 정수압)

1. 서론

내파(implosion)란 폭발(explosion)에 대응하는 단어로 어떤 구조물의 외부에 작용하는 압력이 구조물 내부의 압력보다 커서 구조물이

내측으로 급속히 찌그러들어 붕괴(collapse) 되고 심한 경우 구조물을 파열시키기도 하는 현상이다. 이런 현상은 심해에서 발생할 수 있는데 구조물의 급속한 변형으로 인해 충격파가 발생하게 되고 경우에 따라서는 주변 구조물을 연쇄적으로 붕괴시키기도 한다.

잠수체의 내압 선체와 내압 선체 외부에 설치되는 부가 구조물은 심해 환경의 높은 입력을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 전통적으로 잠수체의 내압 선체는 붕괴 압력을 기준으로 적절한 안전계수를 고려하여 설계되고 있다. 만약 부가 구조물의 붕괴 압력이 내압 선체의 붕괴 압력보다 낮으면 부가 구조물의 내파 현상으로 인한 충격파가 내압 선체의 조기 붕괴를 유발할 수도 있다. 따라서 잠수체의 내압 선체 설계에 있어 단독 붕괴 압력뿐만 아니라 인접한 부가 구조물과의 내파 상호작용도 고려하여야 한다.

내파 현상에 대한 이해를 위해 단일 구조물을 이용한 연구가 오랫동안 여러 연구자들에 의해 수행되었다. Urick (1963)은 처음으로 내파실험 결과를 공개하였다. 공기로 채운 유리병에 추를 달아 150m 에서 2300m 수심까지 유리병을 가라앉히고, 유리병의 붕괴 시 발생한 충격파를 수중음파탐지기(hydrophone)로 측정하였다. Orr and Schoenberg (1976)도 실험실과 실제 해양에서 유리병에 대한 내파실험을 수행하였다. 이 들은 내파로부터 발생한 음향신호를 분석하여 내파 초기에 음압 펄스(negative pressure pulse)가 발생하고 연이어서 날카로운 양압 펄스(positive pressure pulse)가 발생하는 것을 확인하였다. Turner (2007)는 유리구에 대한 내파실험을 수행하였으며, 그 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. Turner의 내파실험 연구는 금속 원통에 대한 실험으로 확장되었다 (Turner & Ambrico, 2012). 유리구는 전형적인 취성 재료로 붕괴 후 여러 조각으로 산산조각이 났지만 붕괴 시 발생한 압력 펄스는 이후에 측정된 금속 원통의 압력 펄스와 유사한 특성을 보여주었다. 이 이후에도 금속 원통에 대한 내파 실험 연구가 다른 연구자들에 의해 계속 수행되었으며 (Farhat et al., 2013; Ikeda et al., 2013; Gupta et al., 2014; Gupta et al., 2015; Teguh et al., 2018), 복합소재로 제작된 원통에 대한 내파 실험도 추가되었다 (Pinto et al., 2015).

인접한 구조물들의 대한 연쇄 내파는 2001년에 일본의 슈퍼 가미오칸데(Super-Kamiokande) 중성미자 실험실에서 발생한 사고로부터 처음 보고되었다 (Cartlidge, 2001). 한 개의 튜브에서 발생한 내파로 인한 충격파가 인접 튜브에 연쇄적으로 전달되어 11,000개의 광전관 튜브(photomultiplier tube) 중 약 7,000개의 튜브가 연쇄적으로 파괴되었다. 이 사고 이후 충격파로 인한 연쇄 반응의 위험을 완화하기 위해 다수의 광전관 튜브에 대한 내파 실험 및 해석을 수행하기도 하였다 (Ling et al., 2013).

최근에는 폭약을 이용하여 수중 폭발 시 발생한 충격파로 인한 심해 구조물의 거동을 조사하였다 (Qu & Zhou, 2017; Javier et al., 2018; Matos et al., 2018). Qu & Zhou (2017)는 복합소재 원통 모델에 대하여 수중 폭발 실험으로 국부 손상을 입히고, 손상된 원통 모델에 수압 붕괴 실험을 수행하였다. Javier et al. (2018)은 탄소/에폭시 복합재로 제작된 원통형 파이프에 대하여 수중 폭발을 일으키는 내파 실험을 수행하였다. 모델에 붕괴 압력의 80%에 해당하는 정수압을 가한 후 폭약을 폭발시켜 내파가 발생하도록 하였다. Matos et al. (2018)은 알루미늄합금 모델을 사용하여 유사한 실험을 수행하였다.

Nho et al. (2017)은 비선형 유한요소해석을 통해 원통형 모델의 임계압력을 추정하는 해석적 기법을 개발하고 실험 결과와 비교하여

검증하였다. 이후 원통형 모델의 붕괴모드를 이상화하는 간이 물리 모델을 개발하고 이를 사용하여 구조물이 붕괴 시 발생하는 충격파 크기를 추정하는 간이 해석법을 개발하였다 (Nho et al., 2020).

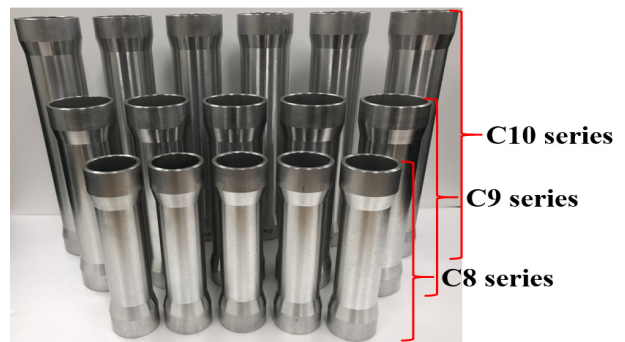
본 연구에서는 단일 원통에 대한 내파 실험 (Teguh et al., 2018)에 이어 붕괴 압력이 서로 다른 세 가지의 알루미늄합금 원통 모델을 설계 및 제작하여 내파 실험을 수행하고 이를 통해 내파와 인접 잠수체의 상호작용에 대하여 연구하였다. 내파 실험은 압력 용기(pressure chamber)와 고압 질소 공급 장치를 이용하여 수행되었다. 여기서 고압 질소 공급 장치는 구조물 붕괴 이후의 유체 압력이 붕괴 압력을 유지하도록 하여 실제 해역과 유사한 환경을 재현할 수 있는 장치이다.

2. 실험 모델

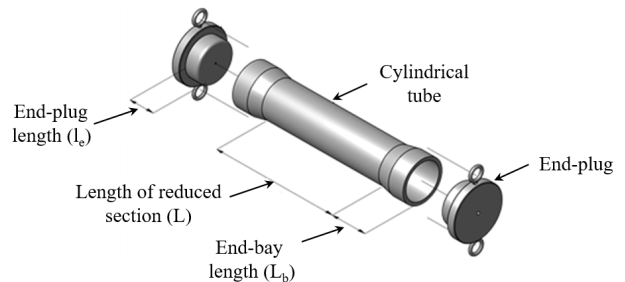
2.1 실험 모델 제작

붕괴 압력이 서로 다른 세 가지 모델 C8 시리즈, C9 시리즈와 C10 시리즈를 Fig. 1과 같이 제작하였다. C8 시리즈는 5개(C8A, C8B, C8C, C8D, C8E), C9 시리즈는 5개(C9A, C9B, C9C, C9D, C9E) 그리고 C10 시리즈는 6개(C10A, C10B, C10C, C10D, C10E, C10F)로 총 16개의 실험 모델을 제작하였으며, 이 중에서 7개의 모델(C8A, C8B, C9A, C9B, C9C, C10A, C10B)을 사용하여 단일 모델 실험과 복수 원통 실험을 수행하였다.

실험 모델의 모재는 전체 길이가 2000mm, 두께는 5mm이며, 외경이 60mm와 80mm인 알루미늄 합금 6061-T6 파이프이다. 각 모델의 붕괴 설계압력을 설정 한 후 수치해석을 통해 모델의 길이와 두께를 결정하였다. 모델의 자세한 치수와 붕괴 설계 압력



(a) Fabricated test models



(b) Schematic assembly of the test models

Fig. 1 Aluminum-alloy cylinder models

Table 1 Geometries of test models

Model	Main cylinder dimension (mm)					$P_{c, design}$ (MPa)
	L	L_b	l_e	t	D_{inner}	
C8 series	145	50.0	25.0	0.6	50.0	1.4
C9 series	195	50.0	25.0	1.0	70.0	2.1
C10 series	300	50.0	25.0	1.2	70.0	2.3

($P_{c, design}$)은 Table 1에 정리하였다. 마감 플러그(end plug)와 모델의 평행부 경계에서의 파단을 방지하기 위해 모델 내부 마감 플러그가 끝나는 부분에서 두께를 점점 줄어듦도록 제작하였다.

2.2 재료 물성치

재료의 기계적 특성을 얻기 위해 인장 시편을 제작하여 인장 실험을 수행하였다. 인장 시편은 KS 규격(KS B 0801)을 참고하여 모재 당 4개씩을 제작하였다. 인장 시편의 중앙부는 곡이 진 형태 그대로이고 인장 시험기에 물릴 양단 그림부는 프레스로 눌러 평평하게 하였다. 인장 실험 결과를 Table 2에 정리하였다. C8 시리즈, C9 시리즈, C10 시리즈의 탄성계수, 항복강도 그리고 인장 강도의 평균값을 보여주고 있다.

Table 2 Material properties of test models

Model	Young's modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)
C8 series	70,100	171	199
C9 series	66,500	217	241
C10 series	67,300	204	222

3. 내파 실험

3.1 실험 장치

실제 해중에서는 잠수체가 동일 수심을 유지하면 좌굴에 의해 급격히 붕괴되더라도 붕괴에 의해 발생하는 충격 압력이 지나가면 다시 동일 수심의 압력, 즉 붕괴 압력을 유지하게 된다. 하지만 압력 용기를 사용하여 수압 실험을 하는 경우는 압력 용기의 부피에 제한이 있어 구조물이 외부 압력에 의해 붕괴가 시작되면 구조물 외부 유체가 채워야할 부피는 갑자기 늘어난다. 그러나 공급되는 유체의 양은 이 변화를 따르지 못해 실험 모델의 외부 압력은 급격히 저하된다. 따라서 실험실에서 압력 용기를 사용하여 붕괴실험을 하면 구조물의 붕괴 상태까지의 의미 있는 물리량은 얻을 수 없다. 하지만 붕괴 이후의 거동은 실제 해중에서 발생하는 현상을 모사할 수는 없다. 모델의 붕괴 직후 주변 압력의 급격한 저하 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 고압 질소 공급 시스템을 사용하였다. 압력 용기 내부의 90%를 물로 채우고 나머지 10%를 고압 질소로 채웠다. 그리고 기압은 고압 질소 공급 시스템을 사용하였다. 붕괴 압력 도달 직후 모델의 갑작스런 붕괴로 외부 유체가 채워야할 공간이 증가하게 된다. 이 증가된 공간을 고압 질소의 부피가 순간적으로 팽창하면서 채우게 되고 외부의 압력에 변화는 무시할 수 있을 정도가 된다. 따라서 붕괴 직전과 직후에 압력 용기 내부의 압력은 실제 해중 상태와 마찬가지로 동일한 값을 유지할 수 있게 된다.

또한 관측창과 신호선 관통구를 통해 구조물이 붕괴되는 순간을 고속촬영하고, 동압력 센서를 사용하여 구조물 붕괴 직후에 발생하는 충격 압력을 계속 할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 내파 실험에 사용된 실험 장비들을 보여준다. 압력 용기는 길이가 2.8m이고 내경이 1.3m이며, 두께는 32mm이다. 설계 압력은 6.0MPa로 수심 600m에 해당하는 수압까지 압력을 가

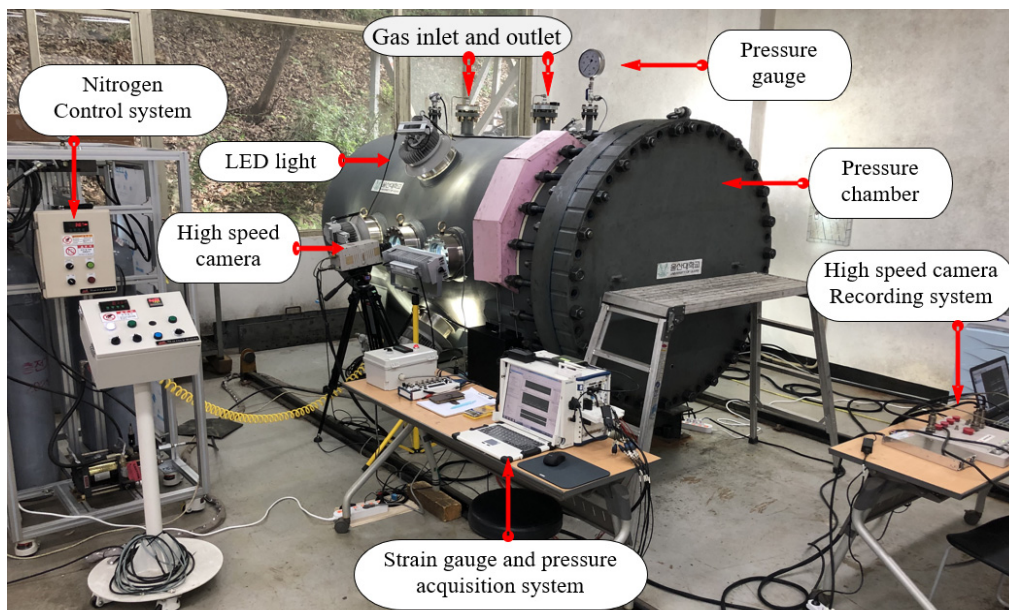


Fig. 2 Experimental set-up for implosion tests

할 수 있으며, 고압 질소 공급 장치는 최대 4개의 고압 질소 가스 용기를 입력 용기 내부로 공급할 수 있다.

실험에서는 정압력 센서(PDR 1000)와 동압력 센서(PCB Piezotronics 138 series) 두 종류의 압력 센서를 사용하였다. 정압력 센서를 사용하여 압력 용기 상부와 하부에서의 정압력을 계측하고, 동압력 센서로는 모델 붕괴 시 발생하는 충격 압력을 측정하여 모델 주변 6곳에서 측정하였다. 압력 센서의 샘플링 레이트 (sampling rate)는 100kHz 이다. 고속 카메라는 동압력 센서와 동기화 되어 촬영되었으며, 초당 3000프레임(3000fps) 으로 설정되었다.

3.2 단일 모델 실험

복수 원통에 대한 실험을 수행하기에 앞서 단일 모델에 대한 내파 실험을 수행하여 각 모델의 붕괴 압력 및 동적 충격 압력을 실험적으로 확인하였다. 단일 모델에 대한 내파 실험은 C8A, C9A, C10A 모델을 사용하였다. Fig. 3은 단일 모델 실험을 위한 동압력 센서의 설치 위치를 보여준다. 총 6개의 동압력 센서를 설치 할 수 으며, 여기서 모델의 중심에서 원주 방향으로 압력 분포를 확인하기 위해 4개의 압력 센서(P1, P2, P3, P4)를 설치 하였으며, 모델 길이 방향으로 압력 분포를 확인하기 위해 압력 센서 P4를 기준으로 P5와 P6 압력 센서를 배치하였다.

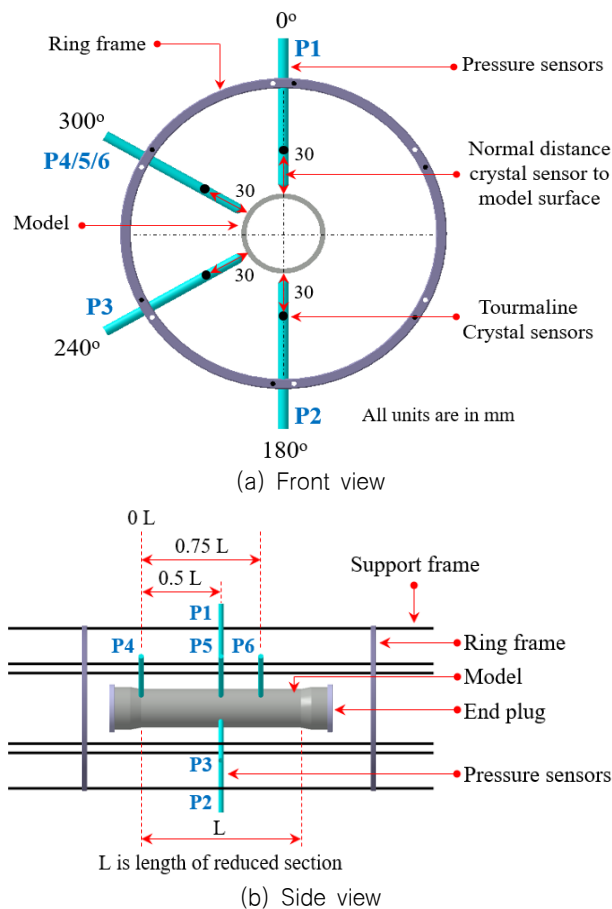


Fig. 3 Arrangement of dynamic pressure sensors for one-cylinder tests

3.3 복수 원통 실험

인접 구조물의 내파 상호작용에 대한 연구를 수행하기 위해 두 개의 원통 모델을 사용하여 내파 실험을 수행하였다. 복수 원통에 대한 내파 실험은 두 가지 시나리오로 수행되었다. 첫 번째는 붕괴 압력의 차가 큰(50%) C8B-C9C 복수 원통에 대하여 수행하였으며, 다음으로 붕괴 압력의 차가 작은(10%) C9B-C10B 복수 원통에 대하여 수행하였다.

Fig. 4는 두 개 원통 모델의 동압력 센서의 설치 위치를 보여준다. 두 모델은 수직 방향으로 설치되었으며, 두 모델의 원통 사이의 거리는 30mm이며, 동압력 센서와 모델의 원통 사이의 거리도 30mm이다. 동압력 센서의 설치 위치는 모델 중심에서 좌우 대칭이 대도록 설치하였다.

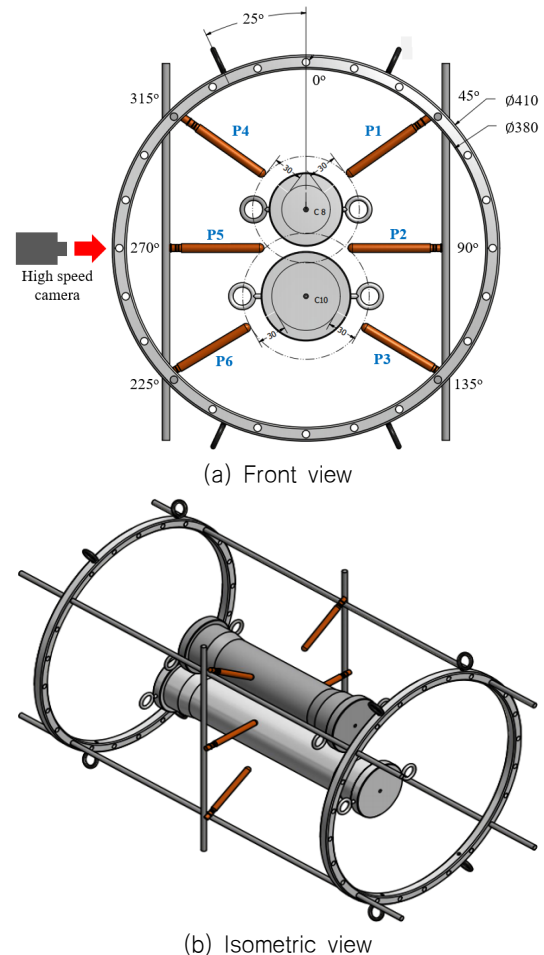


Fig. 4 Arrangement of dynamic pressure sensors for two-cylinder tests

4. 실험 결과

4.1 단일 모델 실험

단일 모델에 대한 내파 실험에서 계측한 양압력 이력을 Fig. 5

에 나타내었다. 붕괴 직후에도 압력이 유지되는 것을 볼 수 있다. 각 모델에 대한 붕괴 압력은 C8A 모델은 1.40MPa이며, C9A 모델과 C10A 모델은 각각 2.11MPa과 2.27MPa로 실험 모델 설계 시 예상하였던 붕괴 압력과 잘 일치하는 것을 Table 1에서 확인할 수 있다. 모델의 붕괴 형상을 Fig. 6(a)와 (b)에서 보여주고 있다. 길이 방향과 단면의 형상을 보여준다. C8A 모델에서는 원주 방향의 파형이 4개인 붕괴 모드(Lobe 4)가, C9A와 C10A 모델에서는 파형이 3개인 붕괴 모드(Lobe 3)가 관찰되었다.

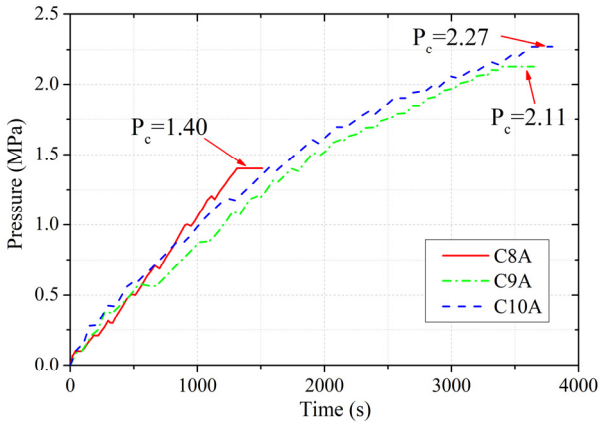
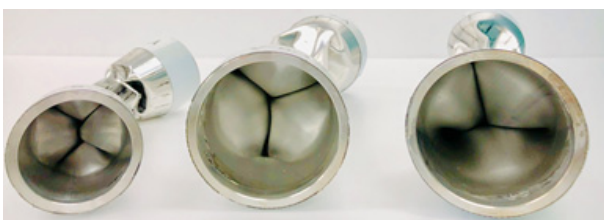


Fig. 5 Static pressure histories of single-cylinder tests



(a) Longitudinal deformed shape



(b) Cross-sectional deformed shape

Fig. 6 Failure shapes of single-cylinder tests

Fig. 7은 C10A 모델의 시간에 따른 정압력 이력과 붕괴 압력(2.27MPa)에 도달($t=3630s$) 직전과 직후의 동압력 이력을 보여준다. 6개의 동압력 센서 중 2개의 동압력 센서(P3, P6)는 측정 오류가 발생하여 4개의 충격파만을 얻었다. 붕괴 압력에 도달하기 직전까지 동압력이 0을 유지하고 있다가 모델이 붕괴 직후 충격 압력이 발생하고 25ms 이후 다시 0으로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 보여준 C10A 모델의 동압력 이력을 음압 펄스가 시작하는 시점으로부터 4ms 동안의 압력 변화를 보여준다. 모델의 붕괴 직후 음압이 발생하는데, 이는 원통 표면이 내측으로 급격히 유체면과 분리될 때 충격 압력이 점차 떨어지는 것이다. 원통의 중앙부가 내측으로 붕괴하여 내측면이 서로 접촉하기 직전 최대 음압(-0.76MPa)에 도달한 후 모든 충격 압력이 빠르게 증가하여 최대 양압 2.01MPa에 도달하게 된다. 여기서 원통 중앙부에 설치된 동압력 센서 P1, P2, P5와 원통 끝단에 설치된 동압력 센서 P4에서 계측된 충격 압력으로부터 원통 길이 방향의 압력 변화를 알 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 원통 끝단에서 계측한 압력(P4)은 최댓값이 0.82MPa를 보이는 반면에 중앙부에서 계측한 압력(P1, P2, P5)은 최댓값이 1.5 ~ 2.0MPa를 보임을 알 수 있다.

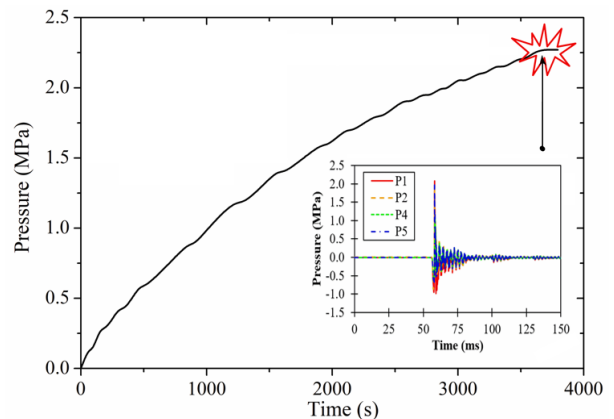


Fig. 7 Static pressure history and dynamic pressure immediately after collapse (Model C10A)

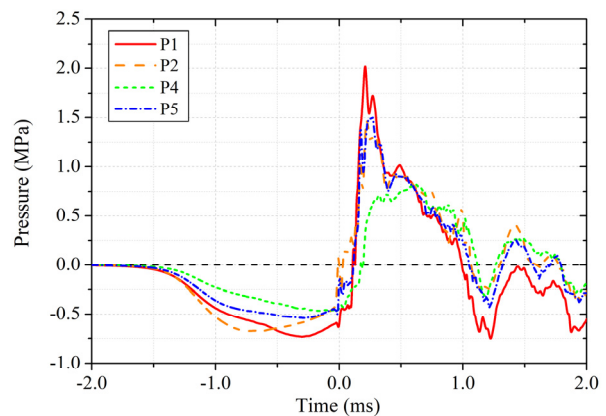


Fig. 8 Dynamic pressure histories of single-cylinder tests: Model C10A

4.2 복수 원통 실험

복수 원통의 내파 실험 결과를 Table 3에 정리하였다. C8B-C9C 복수 원통에 대한 실험 결과 C8B 모델이 압력용기 내부의 압력이 1.34MPa에서 먼저 붕괴하였으나 C9C 모델은 C8B 모델의 붕괴로 인해 발생하는 충격파에 의해 심한 탄성거동은 보였으나 붕괴되지는 않았다. 이후 압력을 다시 가하여 압력 용기 내부 압력이 2.08MPa에 도달하였을 때 C9C 모델이 붕괴하였다. Fig. 9는 두 모델의 붕괴 형상을 보여준다. 단일 모델에 대한 내파 실험 결과와 마찬가지로 C8B 모델은 4개의 파형, C9C 모델은 3개의 파형이 관찰되었다.

Table 3 Implosion test results

Model	Test method	Collapse pressure (MPa)	No. of lobe (failure mode)
C8A	Single-cylinder tube	1.40	4
C9A		2.11	3
C10A		2.27	3
C8B	Two-cylinder tubes	1.34	4
C9C		2.08	3
C9B	Two-cylinder tubes	2.08	3
C10B			3

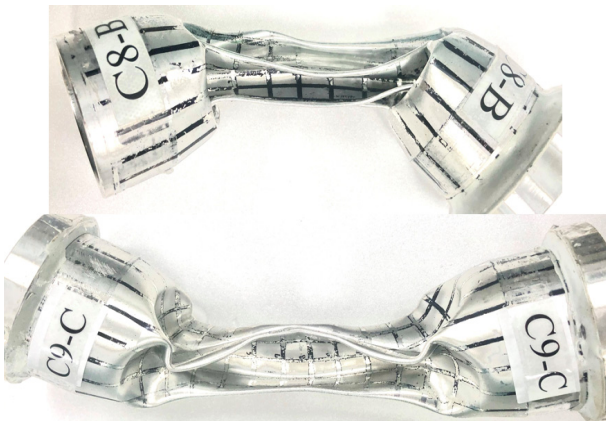
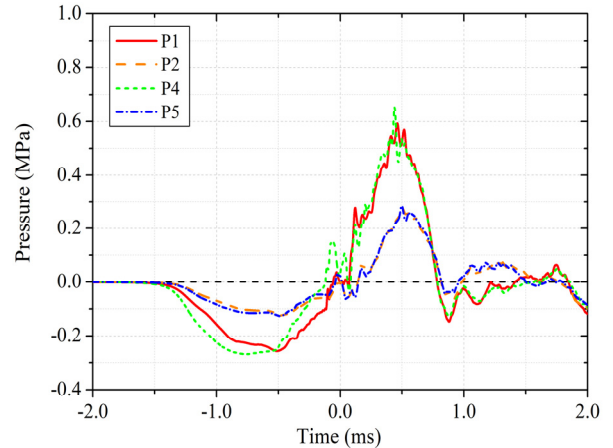


Fig. 9 Failure shapes of two-cylinders test: Models C8B-C9C

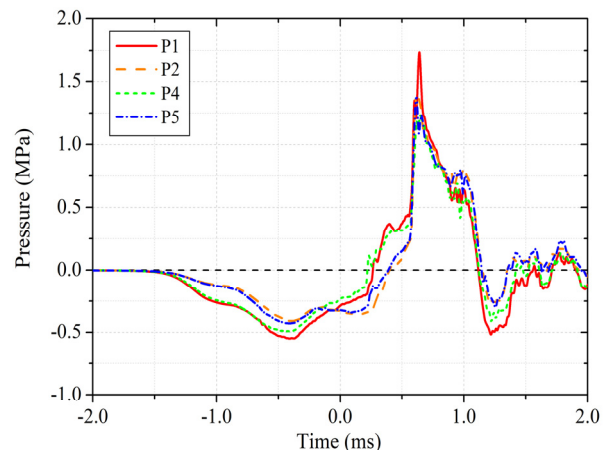
이와는 달리 C9B-C10B 복수 원통에 대한 실험 결과 예상 붕괴 압력이 낮은 C9B 모델이 압력 용기 내부 압력이 2.08MPa에 도달하였을 때 붕괴가 되어 붕괴 시 발생한 충격파의 영향으로 C10B 모델이 연쇄적으로 붕괴되었다. Fig. 10은 C8B-C9C 복수 원통에 대한 충격파 이력을 보여준다. C8B-C9C 복수 원통의 경우 시간차를 두고 독립적으로 붕괴가 발생하였기 때문에 단일 모델 실험과 같은 경향을 보인다. 그러나 C9B-C10B 복수 원통의 경우는 두 원통이 연쇄적으로 붕괴하였기 때문에 충격파가 중첩된 것을 Fig. 11에서 확인 할 수 있다.

C9B-C10B 복수 원통 모델에 대한 실험 결과를 충격 압력과 모델 붕괴 진행 과정에 대하여 세부적으로 비교 분석하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 시간 10ms 이내에 발생한 두 모델 C9B-C10B의

충격 압력 이력과 붕괴 진행 과정을 보여준다. Fig. 12에서 모델 C9B는 위쪽에 설치되어 있으며, 모델 C10B는 아래쪽에 설치되어 있다. 프레임 #1에서는 두 모델은 붕괴 압력에 도달하기 전으로 구조물에서 변형과 충격 압력이 발생하지 않는다. 이후 프레임



(a) Model C8B



(b) Model C9C

Fig. 10 Dynamic pressure histories of the two-cylinders test: Models C8B-C9C

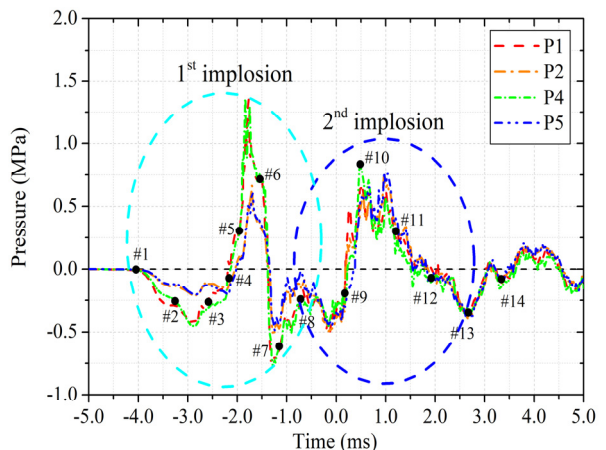


Fig. 11 Dynamic pressure histories of the two-cylinders test: Models C9B-C10B

#2 및 #3에서는 C9B 모델이 붕괴되기 시작하면서 음압 펄스가 발생한다. 프레임 #4 및 #5에서는 C10B 모델이 완벽하게 유지되는 동안 C9B 모델의 중앙부는 완전히 접촉을 하게 된다. 이 단계에서 첫 번째로 발생한 내파의 최대 음압(-0.49MPa)에 도달한 후 모든 충격 압력이 빠르게 증가하여 최대 양압 1.40MPa에 도달한다. 프레임 #6 및 #7에서는 C9B 모델의 좌굴 전파가 마감 플러그까지 진행된 후 C10B 모델이 연쇄적으로 붕괴되기 시작하는 것을 확인 할 수 있다. 프레임 #6 이후 C9B 모델의 충격 압력이 C10B 모델을 통과하여 이전보다 더 큰 음압(-0.75MPa)가 발생한다. 이후로 프레임 #7 ~ #9에서 갑작스럽게 충격 압력이 증가하기 전 버블 간섭으로 약간의 압력 증가가 발견 된다. 프레임 #10에서 C10B 모델의 셸이 접촉 하며 최대 양압 0.80MPa에 도달한다. 이 단계에서 프레임 #14까지 C10B 모델은 아래쪽으로 구부러지는 것을 확인되며, 이후에 시간이 경과됨에 따라 동충격 압력은 Fig. 7과 같이 0MPa으로 다시 수렴하게 된다.



Fig. 12 High speed image sequences of the two-cylinders test: Models C9B-C10B

5. 결론

본 연구에서는 두 개의 원통에 대한 수중 내파 실험을 수행하여 인접한 구조물에 대한 내파의 영향을 조사하였다.

두 모델의 붕괴 압력 차이가 50%인 C8B-C9C 복수 원통 실험에서는 붕괴 압력이 낮은 C8B 모델이(단독 붕괴 압력 1.34MPa) 붕괴 직후 두 번째 C9C 모델(단독 붕괴 압력 2.08MPa)의 탄성 거동은 고속 촬영 영상으로 확인 되었으나, 붕괴되지는 않았다. 하지만 붕괴 압력 차이가 10%인 C9B-C10B 복수 원통 실험에서는 붕괴 압력이 낮은 C9B 모델의 붕괴 후 붕괴 압력이 높은 C10C 모델이 연쇄적으로 붕괴하는 것을 볼 수 있었고, 동충격 압력은 중첩되는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과로부터 부가 구조물에 내파가 발생하면 주 구조물은 단독 붕괴 압력보다 낮은 압력에서도 붕괴될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

향후 모델의 붕괴 압력과 내부 부피의 차이가 보다 다양한 경우에 대한 추가적인 내파 실험연구를 수행하여 내파 충격이 인접 구조물에 미치는 영향을 고찰할 필요가 있다.

후기

이 연구는 수중근접폭발 특화연구실 과제의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.

References

- Cartlidge, E., 2001. Accident grounds neutrino lab. URL: <http://Physicsworld.com> [Accessed 15 November 2001].
- Farhat, C., et al., 2013. Dynamic implosion of underwater cylindrical shells: Experiments and Computations. *International Journal of Solids and Structures*, 50, pp.2943-2961.
- Gupta, S., LeBlanc, J. M. & Shukla, A., 2015. Sympathetic underwater implosion in a confining environment. *Extreme Mechanics Letters*, 3, pp.123-129.
- Gupta, S., Parameswaran, V., Sutton, M. A. & Shukla, A., 2014. Study of dynamic underwater implosion mechanics using digital image correlation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Royal Society Publishing, 470(2172).
- Ikeda, C., M., Wilkerling, J. & Duncan, J. H., 2013. The implosion of cylindrical shell structures in a high-pressure water environment. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Royal Society Publishing, 469(2160).
- Nho, I.S. et al., 2017. Buckling analysis of circular cylinders with initial imperfection subjected to hydrostatic pressure. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp.267-273.

Nho, I.S. et al., 2020. Implosion analysis of circular cylinder using simplified model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(1), pp.8–14.

Javier, C., Matos, H., & Shukla, A., 2018. Hydrostatic and blast initiated implosion of environmentally degraded Carbon-Epoxy composite cylinders. *Composite Structures*, 202, pp.897–908.

Ling, J., et al., 2013. Implosion chain reaction mitigation in underwater assemblies of photomultiplier tubes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 729, pp.491–499.

Matos, H., Gupta, S., & Shukla, A., 2018. Structural instability and water hammer signatures from shock-initiated implosions in confining environments. *Mechanics of Materials*, 116, pp.169–179.

Orr, M. & Schoenberg, M., 1976. Acoustic signatures from deep water implosions of spherical cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 59(5), pp.1155–1159.

Pinto, M., Gupta, S., & Shukla, A., 2015. Study of implosion of carbon/epoxy composite hollow cylinders using 3-D Digital Image Correlation. *Composite Structures*, 119, pp.272–286.

Qu, T., & Zhou, M., 2017. Implosion of composite cylinders due to underwater impulsive loads. *Dynamic Response and Failure of Composite Materials and Structures*, Woodhead Publishing, pp.239–262.

Teguh, M., et al., 2018. Implosion tests of aluminium alloy tubes under external hydrostatic pressure. *37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2018)*, Madrid, Spain 17–22 June 2018.

Turner, S. E., 2007. Underwater implosion of glass spheres. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(2), pp.844–852.

Turner, S. E. & Ambrico, J. M., 2012. Underwater implosion of cylindrical metal tubes. *Journal of Applied Mechanics*, 80(1), 11013.

Urick, R. J., 1963. Implosions as sources of underwater sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp.2026–2027.

