

에어백 인플레이터의 수중폭발 특성에 대한 실험 연구

김형준¹· 최걸기¹· 나양섭²· 박경훈³· 정현^{1,†}
KAIST 기계공학과¹
KAIST 재난학연구소²
국방과학연구소 6본부³

An Experimental Study on UNDEX Characteristics of Airbag Inflators

Hyeongjun Kim¹· Gulgi Choi¹· Yangsub Na²· Kyung Hoon Park³· Hyun Chung^{1,†}
Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea¹
KAIST Institute for Disaster Study, Daejeon, Korea²
Division of 6th R&D Institute, Agency for Defense Development, Jinhae, Korea³

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.

This paper deals with an experimental study of the dynamics of an underwater bubbles and shock waves, generated by rapid underwater release of highly compressed gas. Airbag inflators, which are used for automobile's airbag system, are used to generate the extremely-rapid underwater gas release. Experimental studies of the complex underwater bubble dynamics as well as underwater shock wave were carried out in a specifically designed cylindrical water tank. The water tank is equipped with a high-speed camera and pressure sensors. The high-speed camera was used to capture the expansion and collapse of the gas bubble created by inflators, while pressure sensors was used to measure the underwater shock propagation and magnitudes. The experimental results were compared against the results of explosion of pentolite explosive. Several physical phenomena that has been observed and discussed, which are different from the explosive underwater explosion.

Keywords : Underwater explosion (수중폭발, UNDEX), Airbag inflator (에어백 인플레이터), Gas bubble (가스 버블), Shock wave (충격파)

1. 서론

함정 생존성의 주요 요소인 내충격 성능평가를 위해 함정 건조 후 실선 충격시험 (LFT&E; Live Fire Test & Evaluation)이 필수적이며 일부 선진국에서 이를 수행하고 있다 (Clements, 1972; NAVSEA, 1995; Constanzo, 2011). 그러나 폭약을 사용한 실선 충격시험은 높은 비용과 긴 시험 시간, 먼 바다에서 폭약을 사용한다는 위험성 및 해양 오염과 해양 생태계에 미치는 부정적인 영향 등 현실적인 어려움을 갖고 있다 (Young, 1973). 시제함(leading ship)을 실험 목적으로만 사용할 수 없고, 수리 및 보수 후 실전에 배치해야 하는 특성도 고려해야 한다. 이러한 현실적인 어려움을 극복하고자 해안이나 부두에서 폭약을 사용하지 않고 수중 폭발시험에 준하는 함정 내충격 성능을 확인할

수 있는 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

폭약을 사용하지 않은 무폭약 충격시험은, 수중에서 폭약이 폭발하면서 발생시키는 수중 충격파가 함정에 미치는 영향을 폭약의 사용 없이 재현하는 것을 목적으로 연구되고 있다. 폭약이 수중에서 폭발할 때 발생하는 수중 충격파의 크기와 주파수 특성에 맞는 수중충격파를 재현하기 위한 다양한 방법이 연구되어 왔다 (Antonov et al., 2014; Beatty, 1972; Brussieux et al., 2011; Buogo et al., 2009; Chahine et al., 1995; Cook et al., 1997; Gilburd et al., 2012, Thompson, 2000). 현재까지 에어건(Air gun)을 사용한 방법, 전자기 시스템, 전기화학적 시스템 등이 개발되었으나, 발생시킬 수 있는 수중충격의 규모 면에서 에어건을 사용한 방법이 가장 각광받고 있다.

에어건은 해저 지질조사를 위한 인공 지진파를 발생시키기 위해 일정 수심에서 강력한 수중 충격파를 발생시키기 위해 사용된 장비였다. 약

20~250 in³ (0.3~4L)의 공압 챔버 (pneumatic chamber) 안에 약 2,000~3,000 psi (14~21 MPa) 로 압축된 공기를 순식간에 방출하면서 수중 충격파를 발생시킨다. 해저 지질조사를 위해 사용될 때 단독으로 사용되기보다 다수의 에어건을 등간격으로 평행하게, 또는 삼각형으로 배열하여 사용되며, 필요에 따라 수십 개의 에어건이 동시에 사용되기도 한다. 일반적으로 공압 챔버의 크기가 클수록 저주파 영역에서, 크기가 작을수록 고주파 영역에서 신호를 발생시키기 때문에 발생시키고자 하는 충격파의 주파수를 고려하여 하나의 큰 에어건 대신에 다수의 작은 에어건을 사용하기도 한다 (Dragoset, 2000; Krail, 2010, Li & Wang 2013).

해저 지질 및 자원 조사를 위해 사용되던 에어건을 함정 내 충격 시험에 적용하는 방법은 Thompson에 의해 처음 시도되었고 (Thompson, 2000), 영국 해군의 함정을 대상으로 내충격 시험을 진행하기도 하였다. 이러한 에어건 시스템은 압축공기를 다시 주입하는 시간을 제외하고 반복적으로 발파할 수 있다는 장점이 있으나, 고압의 압축기(compressor), 제어장치 등 초기 비용이 매우 높다는 단점이 있다. 또한 폭약에 의해 발생한 수중 충격파와 비교하면 고주파 영역으로 갈수록 그 유사성이 떨어지는 제약이 있다 (de Graaf et al., 2014b; Watson et al., 2016; Yu et al., 2007).

본 연구는 무폭약 충격시험 기술 개발을 위해, 에어건과 같이 고압의 압축공기를 수중에서 빠른 속도로 방출할 때 발생하는 수중 버블과 수중 충격파의 특성을 관찰하기 위한 실험 연구이다. 에어건에 비해 크기가 훨씬 작고 경제적인, 상용차에 사용되는 에어백 인플레이터를 수중에서 고압가스를 고속으로 팽창시키기 위해 사용하였다. 에어백 인플레이터의 수중 발파시 발생하는 버블의 복잡한 거동과 수중 충격파를 관찰하기 위해 초고속 카메라를, 수중충격파의 크기와 전파를 측정하기 위해 3개의 수중 압력 센서를 사용하였다. 가스발생량이 서로 다른 에어백 인플레이터를 사용하여 가스 발생량이 수중폭발 거동에 미치는 영향을 고려하였다. 다수의 인플레이터가 동시에 발파할 때의 현상도 고려하였다. 실험의 결과는 펜톨라이트(pentolite)를 사용한 폭약시험의 결과와 비교하여, 폭약에 의한 수중폭발과 고압 가스 방출에 따른 수중폭발의 특성에 대해 논의하였다.

2. 에어백 인플레이터의 발파 특성

에어백 인플레이터는 승용차의 에어백 모듈에서 고속으로 가스를 발생시켜 에어백을 팽창시키는 역할을 하는 장비이다. 가장 일반적인 운전석 에어백 (driver airbag), 조수석 에어백 (passenger airbag) 뿐만 아니라 커튼 에어백 (curtain airbag), 사이드 에어백 (side airbag: 횡충돌로부터 탑승자를 보호하기 위해 좌석의 옆에서 팽창되는 에어백), 무릎 에어백 등 다양한 종류의 에어백 모듈이 사용되고 있으며, 에어백 모듈에 따라 가스 발생량이 다른 에어백 인플레이터가 사용되고 있다. 에어백 인플레이터는 그

작동 방식에 따라 가스 발생제(gas generant)의 연소반응에 의해 가스를 발생시키는 점화식 (pyrotechnic) 방식과, 압력용기에 보관된 고압가스를 기폭제(initiator)를 사용하여 방출시키는 하이브리드 (hybrid) 방식으로 나뉜다. 주로 가스 발생량이 크지 않은 사이드 에어백, 커튼 에어백 등에 하이브리드 방식이 사용되고, 가스 발생량이 큰 운전석 및 조수석 에어백에는 점화식 방식이 사용된다. Fig. 1은 각 에어건 인플레이터의 모습이다.



Fig. 1 Side, curtain, driver's airbag inflators (from the left)

본 연구에서는 에어건 시스템과 유사한 방식으로 가스를 방출하는 하이브리드 방식의 에어백 인플레이터를 사용하였다. 가스 발생량이 서로 다른 사이드 에어백과 커튼 에어백 인플레이터를 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 인플레이터의 제원이다.

Table 1 Specification of airbag inflators

Position	Side	Curtain
Model	LE-060B(SAB)	LE-110D(CAB)
Length	155 mm	282 mm
Diameter	25 mm	25 mm
Weight	245 g	457 g
Gas can. Volume	25.4 ml	66.0 ml
Gas pressure	9.8 Mpa	25 MPa
P _{max} (air)	60k Pa	110 kPa
Time to P _{max}	15 ms	25 ms
Moles	0.5	1.1
Gas ratio	Ar(80.7%), He(3.4%), N ₂ (5.9%), CO ₂ (4.2%), H ₂ O(5.8%)	Ar(85.7%), He(3.6%), N ₂ (4.0%), CO ₂ (2.8%), H ₂ O(3.9%)
Explosion type	Hybrid 15% explosive gas 85% compressed air	Hybrid 10% explosive gas 90% compressed air
Gas temp.	260°C	150°C

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 사이드 에어백 내부 구조이다. 불활성 가스 (97% Ar, 3% He)는 약 100 bar의 압력으로 압축되어 있고, 착화 전류 1.2 A를 2 ms 동안 가하거나, 1.75 A를 0.5 ms 동안 가하면 기폭제로 흔히 사용되는 Zirconium-Potassium Perchlorate (ZPP)가 반응하여 소량의 폭약(Nitroguanidine)을 기폭시킨다. 기폭된 폭약의 폭발충격으로 압축가스를 가두고 있는 압력용기 노즐의 막(membrane)을 파괴시키고, 이로 인해 압축 가스가 방출되게 된다. Nitroguanidine은 추진제 (propellant)로 주로 사용되는 폭약으로 0.95의 상대효과도 계수 (RE factor: Relative Effectiveness factor)를 가지고 있다 (Wikipedia, 2017). 상대효과도 계수는 폭약의 폭발력을 TNT의 폭발력과 상대 비교한 값으로 폭약의 무게와 동일한 폭발력을 내기 위한 TNT의 무게의 비율이며, 계수가 클수록 폭발력이 크다.

사이드 에어백은 가스 발생 몰(mole)수는 0.5몰이고, 발파시 내부 기폭제와 폭약에 의해 가스 온도가 260°C에 도달하며, 수중에서 단열상태로 가정하고 이상기체 상태방정식으로 추정하면 약 21 L의 가스를 발생시킨다. 수중 버블의 형태를 완전한 구로 가정하면 반지름 약 17 cm의 버블이 발생할 것으로 계산할 수 있다.

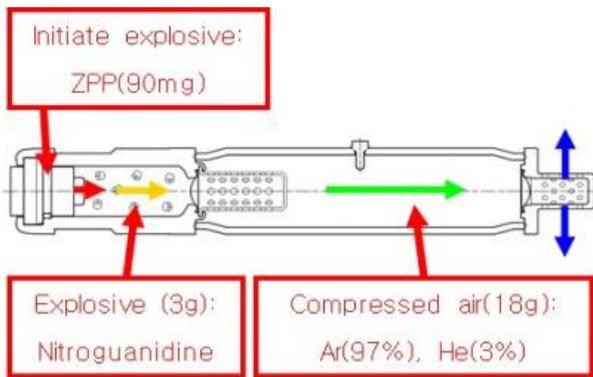


Fig. 2 Structure of hybrid airbag inflator

커튼 에어백의 경우도 발파 기체는 동일하나, 압축된 가스의 양이 1.1몰로 사이드 에어백의 2.2배이다. 커튼 에어백의 경우 발파시 내부 가스가 150°C에 도달하며, 약 34 L의 가스를 발생시킨다. 역시 이상적인 구로 수중버블의 형태를 가정하면 반지름 약 20 cm의 버블이 발생할 것으로 계산할 수 있다.

3. 실험 장치 및 구성

실험은 KAIST에서 수중폭발을 위해 제작된 원통형 수조에서 수행되었다. Fig. 3과 같이 수조는 내부 지름 3 m, 높이 4 m의 크기이며, 수조 바닥으로부터 1.5 m와 2 m 높이에 각각 2개씩 총 4개의 관측창이 있다. 관측창은 지름 300 mm의 원형으로 설계되었고 같은 높이에서 카메라와 조명을 위해 서로 마주보게 설치되었다.

Table 2 Specification of pressure sensor

Model	Piezo electronics model 138A
Measurement range	25000 psi (172.37 MPa)
Sensitivity	(±20%) 0.18 pC/psi (0.026 pC/kPa)
Sensing element	Tourmaline
Temp. range	0 to 100°F (-17.8 to 37.5°C)
Electrical connector	10-32 coaxial jack

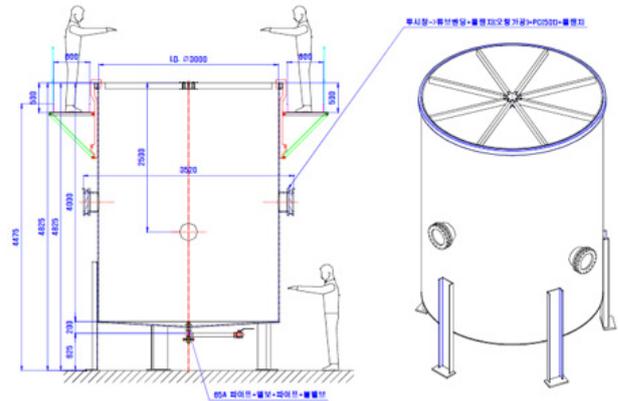


Fig. 3 Layout of water tank

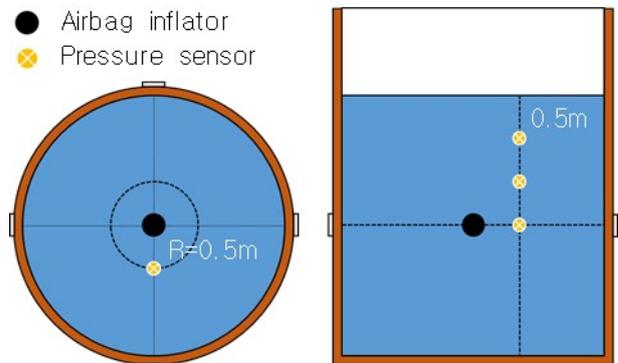


Fig. 4 Sensors placement in the water tank

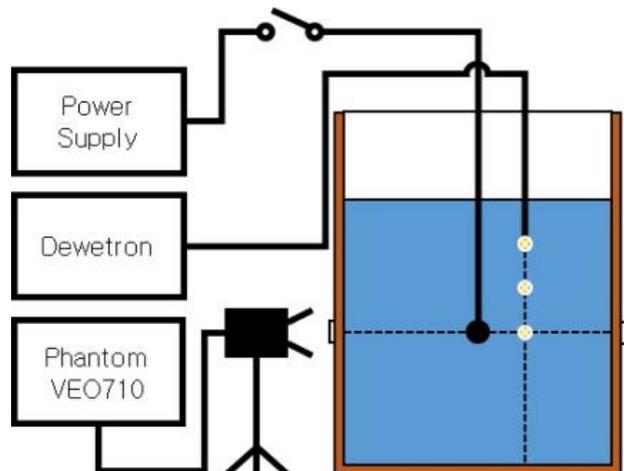


Fig. 5 Experimental setup

버블 거동을 관찰하기 위해 초고속 카메라 (Phantom사의 VEO710, 최대 680,000 fps)을 사용하였다. 수중충격파의 전파와 크기를 계측하기 위해 수조 내부에 Fig. 4와 같이 압력센서를 설치하였다. 에어백 인플레이터의 노즐(nozzle)을 수조의 정중앙 수심 1.5 m 지점에 배치하였으며, 수조 중앙에서 수평으로 500 mm 떨어진 위치에 수심 50 cm, 100 cm, 150 cm 위치에 총 3개의 압력센서를 배치하였다. Table 2는 사용한 압력센서의 제원이다. Data Acquisition을 위해 Dewetron (signal response: 300 kHz, sampling rate: 1 MHz)을 사용하였다. Fig. 5와 6은 실험을 위한 장비의 배치 도식과 실제 실험 전경을 나타내었다.



Fig. 6 Experimental setup (real)

4. 실험 결과

4.1. 수중 버블의 거동 특성

에어백 인플레이터의 발파로 발생하는 수중 버블의 거동을 관찰하기 위해 7500 fps (single SAB explosion) 및 2000 fps (double SAB, CAB explosion)로 촬영된 초고속 카메라 영상을 분석하여 최대 버블 직경과 버블 팽창의 속도 및 발파 후 다시 최소 지름이 될 때까지의 주기를 관측하였다. Fig. 7은 사이드 에어백 인플레이터의 거동을, Fig. 8은 커튼 에어백 인플레이터의 버블의 거동을 촬영한 영상이다. 그림에서 보여주듯 발파 후 구형에 가까운 타원면(Ellipsoid) 형상으로 버블이 생성된 후 다

시 수축하여 붕괴한다. 에어백 인플레이터 노즐이 원통형으로 긴 인플레이터의 길이방향과 수직인 반경 방향으로 나 있어 그 방향으로 가장 빠르게 가스가 방출되어, 반경 방향으로 긴 타원면 형상으로 버블이 발생하는 것으로 보인다. 최대 반경에 도달 후 가장 빠르게 팽창했던 방향으로 가장 먼저 수축하여 버블의 크기가 줄어든다. 이 때 폭약으로 발생한 버블과 달리 반경 방향으로 붕괴하면서 버블 내부의 가스로 인해 인플레이터의 길이 방향을 따라 양쪽으로 버블이 나뉘게 되고, 이후 나뉜 버블이 두번째 최대 크기에 도달하게 된다. 두번째 최대 크기 도달 후 다시 크기가 줄어들면서 버블 내부의 가스가 작은 버블들로 붕괴하고, 부력에 의해 수면 쪽으로 떠오르는 거동을 보인다. 소형 에어건을 사용한 De Graaf의 실험과 비교하면 버블의 거동 면에서는 에어백 인플레이터의 버블도 유사하다고 할 수 있다 (De Graaf et al., 2014c).

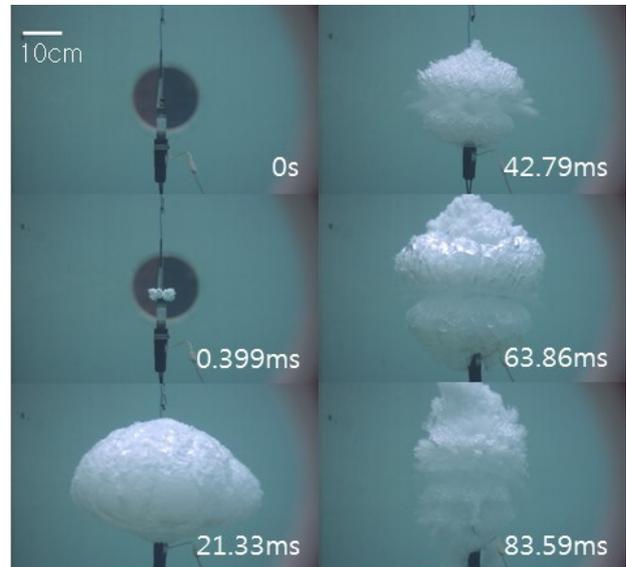


Fig. 7 Side airbag explosion (exp3)

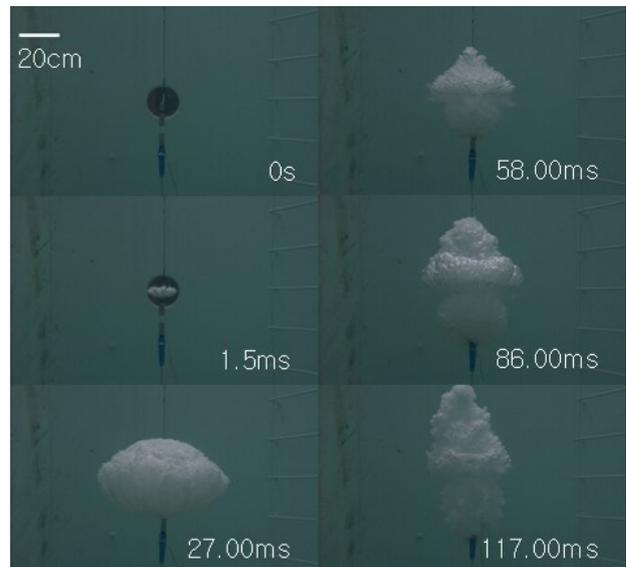


Fig. 8 Curtain airbag explosion (exp5)

Fig. 9는 사이드 에어백의 길이방향을 수평으로 두고 발파했을 때 버블의 사진이다. 인플레이터의 인플레이터 반경방향으로 긴 타원면이 발생하고, 버블이 수축할 때 반경방향으로 버블이 두 개로 나뉘는 현상에 중력이 영향을 미치는지 확인하기 위하여 실험을 진행하였다. 그림에서 보이듯 시간이 흐르면서 부력에 의해 다소 수면방향으로 버블 전체가 떠오르긴 하지만, 인플레이터의 반경방향으로 긴 타원면 형태의 버블이 발생하고, 버블이 수축하면서 두 개의 버블로 나뉘는 거동 모두 중력의 영향보다 에어백 인플레이터의 노즐의 방향에 따른 것으로 보인다.

Fig. 10은 사이드 에어백 두 개를 동시에 발파한 사진이다. 두 버블이 최대크기에서 서로 맞닿도록 중심에서 각각 21.5 cm 서로 떨어뜨려 놓고 발파하였다. 버블이 최대 크기에 도달하면서 서로 닿고, 이후 수축하는 과정에서 서로를 끌어당기는 방향으로

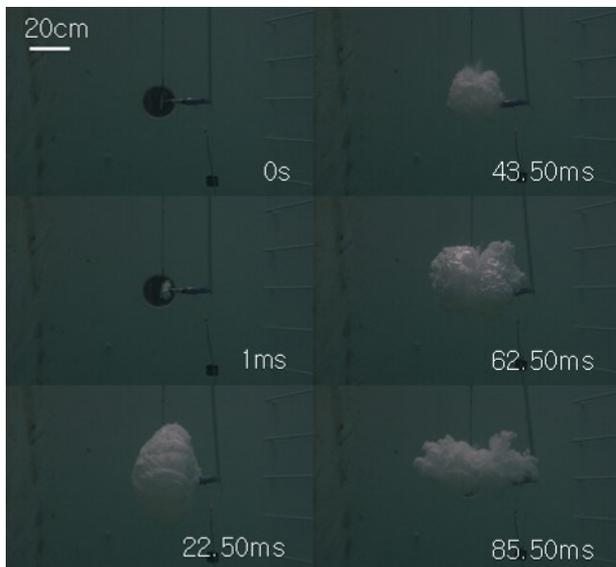


Fig. 9 Side airbag explosion (horizontal dir.) (exp10)

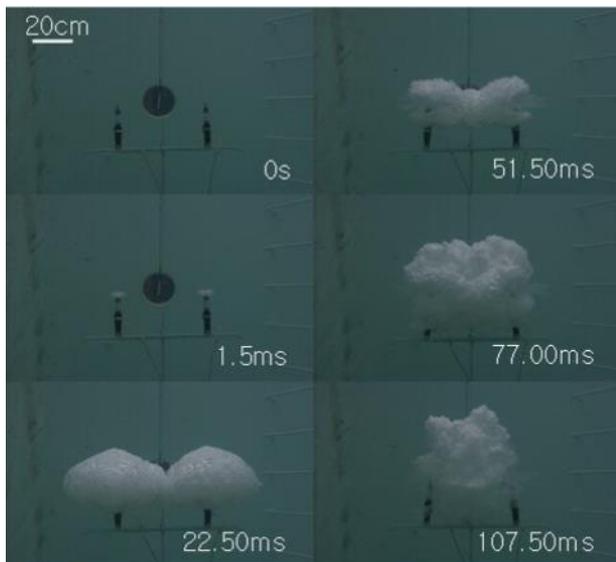


Fig. 10 Side airbag array explosion (exp7)

붕괴하는 모습을 볼 수 있다. 인플레이터의 반경 방향으로 첫 번째 버블이 붕괴하는 모습이 관찰되지만, 두 버블 중심 방향으로 양쪽 버블이 수축하며 붕괴하기 때문에 두 번째 버블의 명확한 모습은 관찰이 어려웠다. Table 3은 버블의 거동 특성을 정리한 표이다.

Table 3 Period and radius of bubbles

	Type	1 st MBR (mm)	1 st MBT (ms)	1 st BCT (ms)	2 nd MBR (mm)	2 nd MBT (ms)
1	SAB. S.V.	246	19.7	43.2	168	63.6
2	SAB. S.V.	233	20.4	43.6	163	63.5
3	SAB. S.V.	247	21.3	42.8	174	63.9
4	CAB. S.V.	323	22.8	56.3	217	81.5
5	CAB. S.V.	325	27.0	58.0	211	86.0
6	CAB. S.V.	325	27.0	56.5	205	81.5
7	SAB. A .V.	-	22.5	51.5	-	77.0
8	SAB. A .V.	-	25.0	50.5	-	71.5
9	SAB. A .V.	-	24.0	50.0	-	79.0
10	SAB. S .H.	-	22.5	43.5	-	62.5
SAB.: Side airbag		S.: Single A.: Array		MB: Max. bubble BC: Bubble collapse		
CAB.: Curtain airbag		V.: Vertical H.: Horizontal		R: Radius T: Time		

4.2. 수중 충격파 특성

1MHz의 샘플링 주파수 (sampling rate)로 3개의 압력센서를 사용하여 에어백 인플레이터 발파시 수중 충격파를 측정하였다. Fig 11은 3개의 센서에서 측정된 압력값들이다. 센서 1은 인플레이터 노즐과 같은 수심 150 cm, 센서 2는 수심 100 cm, 센서 3은 수심 50 cm에 배치되어 있으며, 에어백 인플레이터와의 거리는 각각 50 cm, 70.7 cm, 111.8 cm 이다.

Fig 11에서 보이듯이 에어백 인플레이터의 경우, 발파 초기에 내부 기폭제 작용에 의한 압력 변동이 0.2ms 정도 발생하다가 내부 Nitroguanidine의 발파로 인한 압력의 급격한 증가, 그리고 고압 가스의 팽창으로 인한 압력, 그리고 버블이 최대 크기에 접근하면서 압력이 떨어지는 현상 등을 관찰할 수 있다. 초기 압력 최대값 이후 압력값의 변화는 압력용기 내 압축가스가 노즐을 통해 분사되면서 용기 내 압력이 강하게 되고 이에 따라 버블의 팽창속도도 줄어들게 되어, 이에 따라 압력도 줄어들게 된다. 전체적으로 압력이 줄어들면서 버블이 최대 크기에 도달하면 음압 (negative pressure)이 걸리게 된다. 압력이 줄어드는 과정에서 발생하는 압력의 동요는 분출되는 가스 제트(gas jet)가 버블의

경계와 만나면서 난류를 발생시키면서 제트가 붕괴하면서 발생하는 것으로 보인다 (de Graaf et al., 2014a).

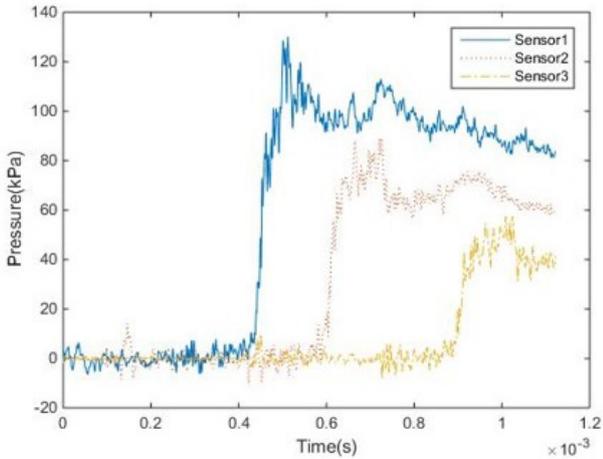


Fig. 11 Pressure before reflection shock is reached

Fig. 12는 초기 충격파를 푸리에 변환 하여 얻은 주파수 중 버블이 붕괴한 이후에도 주요하게 남아있는 주파수를 제거한 결과이다. 첫 번째 버블이 붕괴하는 40 ms 이후의 데이터를 푸리에 변환해 보면 150 Hz 이하의 주파수가 큰 영향을 끼치게 되며, 이를 제거함으로써 초기에 주요한 영향을 끼치는 충격파의 주파수를 알 수 있게 된다. 따라서 에어백 인플레이터의 초기 충격파에서 주요한 주파수는 500 Hz와 915 Hz이다. 에어건 연구 (Watson et al., 2016)와 비교하면 크기가 작은 에어백 인플레이터가, 수십~100 Hz 근방 주파수의 충격파를 발생시키는 에어건에 비해 높은 주파수의 충격파를 낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

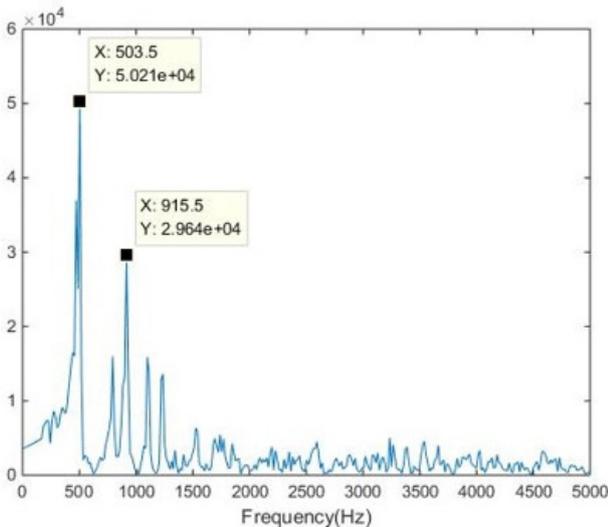


Fig. 12 Major frequency of pressure (exp3)

Fig. 13은 착화된 이후부터 첫 번째 버블이 붕괴하기까지의 압력과 그에 따른 버블의 형상을 나타낸 것이다.

에어건 인플레이터가 발생시키는 충격하중의 특징을 폭약의 경우와 비교하기 위해서, 펜톨라이트 5g을 사용하여 수중폭발 실험

험도 수행하였다. 펜톨라이트는 1.33의 상대효과도 계수를 가진 폭약으로서, (주)한화의 협조로 실험을 진행하였다. 비교를 위해 수심 및 폭약의 위치는 에어백 인플레이터 실험과 동일하게 유지하였다. Fig. 14는 폭약과 같은 수심에 위치한 센서에서 측정된 초기 충격파의 압력이다. 초기 충격파 발생 후 최대 지름 50.6 cm, 22.2 Hz로 진동하는 버블이 발생하였으나, 초기 충격파의 특성을 관찰하기 위해 발파 후 1ms 동안의 압력에 대해서만 분석하였다. 그림에서 보듯 최대 압력 (peak pressure)은 16.85 MPa이고, 저주파에서 약 1000 Hz 영역까지 걸쳐 고주파로 갈수록 줄어드는 특성을 보여주고 있다.

ONR 보고서 (Brenner, 2007)에 의하면, 에어건에 의해 발생하는 수중 충격파의 최대 압력과 주파수는 다음의 식에 비례한다.

$$\text{최대 압력 (peak pressure): } P \sim P_0 V^{1/3} D^{-1} \quad (1)$$

$$\text{최대압력 주파수 (peak frequency): } f \sim P_0^{1/2} V^{-1/3} \quad (2)$$

이때, P_0 은 압축공기의 초기 압력, V 는 압력용기의 부피, D 는 에어건과 측정점의 거리이다.

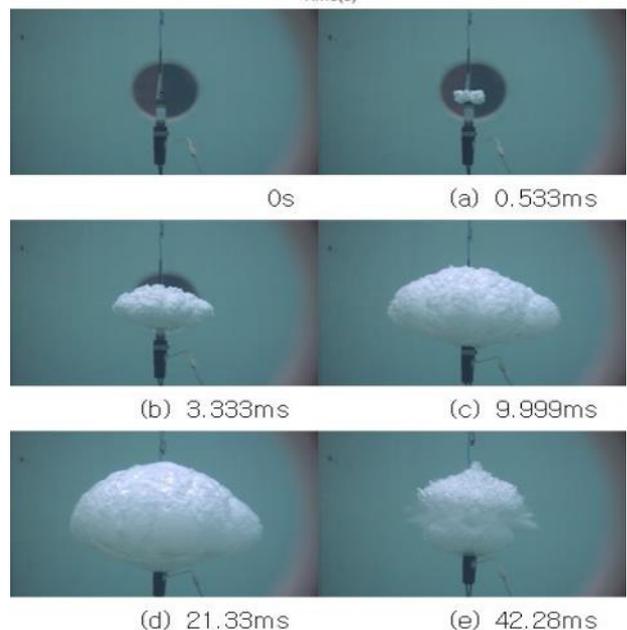
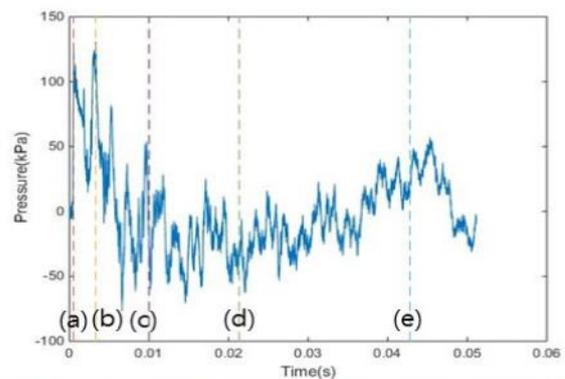


Fig. 13 Pressure and bubble shape (exp3)

5. 결 론

본 연구는 수중에서 고압의 가스 분출로 인해 발생하는 버블의 거동과 수중 충격파의 특성을 에어백 인플레이터를 사용하여 실험을 수행하여 정량적으로 계측하고 분석하고자 하였다. 이를 위해 초고속 카메라를 사용하여 버블의 거동을 관측하였고, 수중 압력센서를 사용하여 수중 충격파를 계측하였다.

본 실험 연구를 통해 에어백 인플레이터의 수중 발파로 인해 발생하는 버블의 형상이 에어건을 사용할 때와 유사하다는 것을 확인할 수 있었으며, 작은 크기로 인해 에어건보다 높은 주파수대의 충격 신호를 발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

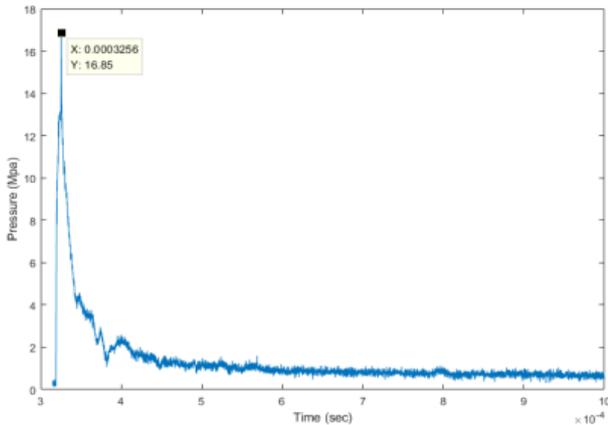
본 실험연구는 무폭약 실선 충격시험장치 개발을 위한 기초 연구로서, 폭약을 사용하지 않는 안전한 수중 충격파 발생원으로 하이브리드 타입의 에어백 인플레이터의 가능성을 확인하였다. 또한 에어백 인플레이터의 수중폭발로 발생하는 충격파와 버블의 특성과 에어백 인플레이터의 규격(압력용기의 크기, 초기 압력 등)의 관계에 대해서 고찰하였다. 본 연구의 결과는 향후 무폭약 충격시험 장치 개발을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

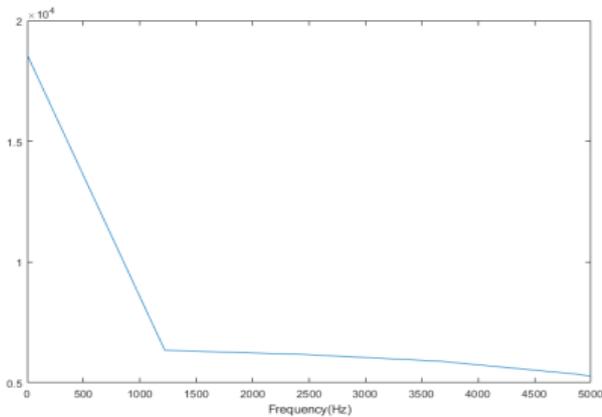
본 연구는 국방과학연구소 “수중 근접폭발 특화연구실” 과제의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

- Antonov, O. Efimov, S. Tz. Gurovich, V. Yanuka, D. Shafer, D. & Krasik, Y. E., 2014. Diagnostics of a converging strong shock wave generated by underwater explosion of spherical wire array. *Journal of Applied Physics*, 115(22), 223303.
- Beatty, L. G., 1972. *Bubble frequencies of air gun sources (No. NRL-MR-2503)*. Naval research Lab Orlando FL Underwater Sound Reference Div.
- Brenner, M. 2007. *Navy ship underwater shock prediction and testing capability study*. Office of Naval Research (ONR). Report-No. JSR, pp.07-200.
- Brussieux, C. Viers, Ph. Roustan, H. & Rakib, M. 2011. Controlled electrochemical gas bubble release from electrodes entirely and partially covered with hydrophobic materials. *Electrochimica Acta*, 56(20), pp.7194-7201.
- Buogo, S. Plocek, J. & Vokurka, K., 2009. Efficiency of energy conversion in underwater spark discharges and associated bubble oscillations: experimental results. *Acta*



(a) Peak pressure



(b) Spectral density (MPa) of shock wave

Fig. 14 Peak pressure and frequency of pentolite explosion

Table 1와 같이 사이드 에어백과 커튼 에어백은 각각 다른 초기 압력과 부피를 갖고 있으나, 사이드 에어백이 평균 124 kPa, 커튼 에어백이 211 kPa의 최대 압력의 충격파를 발생시켰으므로 식(1)에 따른다고 볼 수 있다. 식(2)에 따르면 커튼 에어백의 경우가 사이드 에어백의 경우보다 약 1.16배 높은 주파수를 가지고 있으나, 그 차이가 매우 적어 실험으로 뚜렷이 구별되지 않았다. 두 개의 어레이의 경우 평균 294 kPa의 충격파를 발생시켜 중첩의 효과가 잘 작동하는 것을 볼 수 있다.

기존의 에어건을 사용한 수중 충격파 연구처럼, 충격파의 크기는 폭약의 경우에 비해 수백배 작으나 다수의 에어백 인플레이터를 동시에 목표물에 인접하여 사용하면 일정부분 크기의 제한을 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 수십~100 Hz 영역의 충격파를 발생시키는 에어건보다 더 높은 주파수 영역의 수중 충격파를 발생시킬 수 있을 것으로 예상되지만, 500 Hz 이상의 주파수 영역에서 폭약의 수중폭발에 비해 고주파 영역이 부족한 점도 보인다. 이는 초기 압력이 더 높거나, 압력 용기의 크기가 좀 더 작은 인플레이터를 사용해서 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 다양한 압력용기의 크기와 초기 압력을 가진 서로다른 에어백 인플레이터의 적절한 조합을 사용하는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

- Acustica united with Acustica*, 95(1), pp.46–59.
- Chahine, G. L. Frederick, G. S. Lambrecht, C. J. Harris, G. S. & Mair, H. U., 1995. Spark-generated bubbles as laboratory-scale models of underwater explosions and their use for validation of simulation tools. In *SAVIAC Proceedings of the 66th Shock and Vibrations Symposium* (Vol. 1).
- Clements, E. W. 1972. *Shipboard Shock and Navy devices for its simulation (No. NRL-7396)*. Naval Research Lab Washington DC.
- Cook, J. A. Gleeson, A. M. Roberts, R. M. & Rogers, R. L., 1997. A spark-generated bubble model with semi-empirical mass transport. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4), pp.1908–1920.
- Costanzo F.A., 2011. Underwater explosion phenomena and shock physics. In: Proulx T. (eds) *Structural Dynamics, Volume 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer: New York, NY.
- De Graaf, K. L. Brandner, P. A. & Penesis, I., 2014a. Bubble dynamics of a seismic airgun. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55, pp.228–238.
- De Graaf, K. L. Brandner, P. A. & Penesis, I., 2014b. The pressure field generated by a seismic airgun. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55, pp.239–249.
- De Graaf, K. L. Penesis, I. & Brandner, P. A., 2014c. Modelling of seismic airgun bubble dynamics and pressure field using the Gilmore equation with additional damping factors. *Ocean Engineering*, 76, pp.32–39.
- Dragoset, B., 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*, 19(8), pp.892–897.
- Gilburd, L. Efimov, S. Gefen, A. F. Gurovich, V. Tz. Bazalitski, G. Antonov, O. & Krasik, Y. E., 2012. Modified wire array underwater electrical explosion. *Laser and Particle Beams*, 30(2), pp.215–224.
- Krail, P. M., 2010. *Airguns: Theory and operation of the marine seismic source*. Course notes for GEO-391: Principles of seismic data acquisition, University of Texas at Austin.
- Li, Z. Wang, H., 2013. Numerical simulation of the multi-level air-gun array based on over/under source. *Energy Science and Technology*, 6(1), pp.52–60.
- McCarthy, R. H., 1995. *Shock Design Criteria for Surface Ships (Vol. 10)*. NAVSEA 0908-LP-000-3010, Naval Sea Systems Command.
- Thompson, P.R., 2000. *Shock testing of naval vessels using seismic airgun arrays*, US patent 6662624 B1.
- Young, G. A., 1973. *Guide-lines for evaluating the environmental effects of underwater explosion tests (No. NOLTR-72-211)*. Naval Ordnance Lab White Oak MD.
- Yu, W. Jianglin, F. Zhang, Z. Rongying, S. & Hongxing, H., 2007. Shock spectrum calculation of structural response to UNDEX. *14th International Congresson Sound & Vibration*, Cairns, Australia, 9–12 July 2007.
- Watson, L. Dunham, E. & Ronen, S., 2016. Numerical modeling of seismic airguns and low-pressure sources. *Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting*, Dallas, Texas, USA, 16–21 October 2016.
- Wikipedia, 2017, TNT equivalent, [Online] Available at https://en.wikipedia.org/wiki/TNT_equivalent [accessed 10 September 2017]

