

무폭약 시험 장치 개발을 위한 수중폭발 특성에 대한 연구

이한솔¹·박규동¹·나양섭²·이승규³·박경훈⁴·정현^{1,†}
충남대학교 선박해양공학과¹
카이스트 안보융합연구원²
카이스트 기계공학과³
국방과학연구소 해양기술연구원⁴

A Study on the Characteristics of Underwater Explosion for the Development of a Non-Explosive Test System

Hansol Lee¹·Kyudong Park¹·Yangsub Na²·Seunggyu Lee³·Kyunghoon Pack⁴·Hyun Chung^{1,†}
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University^{1,†}
Security Convergence Research Institute, KAIST, Daejeon²
Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon³
Marine System Technology Institute, Agency for Defense Development⁴

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 study deals with underwater explosion (UNDEX) characteristics of various non-explosive underwater shock sources for the development of non-explosive underwater shock testing devices. UNDEX can neutralize ships' structure and the equipment onboard causing serious damage to combat and survivability. The shock proof performance of naval ships has been for a long time studied through simulations, but full-scale Live Fire Test and Evaluation (LFT&E) using real explosives have been limited due to the high risk and cost. For this reason, many researches have been tried to develop full scale ship shock tests without using actual explosives. In this study, experiments were conducted to find the characteristics of the underwater shock waves from actual explosive and non-explosive shock sources such as the airbag inflators and Vaporizing Foil Actuator (VFA). In order to derive the empirical equation for the maximum pressure value of the underwater shock wave generated by the non-explosive impact source, repeated experiments were conducted according to the number and distance. In addition, a Shock Response Spectrum (SRS) technique, which is a frequency-based function, was used to compare the response of floating bodies generated by underwater shock waves from each explosion source. In order to compare the magnitude of the underwater shock waves generated by each explosion source, Keel Shock Factor (KSF), which is a measure for estimating the amount of shock experienced by a naval ship from an underwater explosion, was used.

Keywords : Underwater explosion (수중 폭발, UNDEX), Non-explosive underwater shock test(무폭약 수중충격시험), Underwater shock wave(수중 충격파), Shock Response Spectrum(SRS), Keel Shock Factor(KSF)

1. 서론

해군 함정에서 내충격 성능은 전투성능 유지 및 생존성 향상에 필수적으로 요구된다. 어뢰나 기뢰가 원거리에서 폭발시 함정의 전투불능 사례는 대부분 함정 선체의 충격손상보다는 주요 탑재 장비의 충격손상에 기인하는 것으로 알려져 있다. 이러한 원거리에서 수중폭발시 함정의 내충격 성능은 시뮬레이션을 통해 활발히 연구되고 있으나, 미국, 유럽 등에서도 이러한 해석 결과를 통해서만 내충격 성능을 평가할 수 없기 때문에 실제 해상에서 고성능 폭약을 사용하여 건조된 함정을 충격시험을 통해 내

재 장비의 충격손상에 기인하는 것으로 알려져 있다. 이러한 원거리에서 수중폭발시 함정의 내충격 성능은 시뮬레이션을 통해 활발히 연구되고 있으나, 미국, 유럽 등에서도 이러한 해석 결과를 통해서만 내충격 성능을 평가할 수 없기 때문에 실제 해상에서 고성능 폭약을 사용하여 건조된 함정을 충격시험을 통해 내

충격성을 검증하고 있다. 그러나 실제 폭약을 사용한 실선 충격 시험은 많은 비용과 오랜 기간이 소요됨은 물론, 해양 오염과 생태계에 부정적인 영향을 미치며 인근 해역을 지나는 선박들과 시험요원들의 안전을 위협하기 때문에 선도함 건조시 실선에서 내충격 성능을 검증하지 못하는 국가들도 아직 많다.

최근 폭약을 사용하지 않고 실선 충격시험을 진행하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Antonov et al., 2014; Beatty, 1972). 그 중 대표적으로 에어건과 수중 전기 폭발이 사용되고 있으나, 수중 충격의 규모가 큰 에어건이 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 에어건은 수십 Hz의 주파수만을 가지기 때문에 에어건을 사용한 충격 시험의 경우 저주파 영역에서는 수중폭발로 인한 충격파와 비슷하지만, 그보다 높은 주파수 영역에서는 유사성이 떨어진다 (de Graaf et al., 2014; Watson et al., 2016; Yu et al., 2007). 일반적으로 공압 챔버의 크기가 클수록 저주파 영역에서, 크기가 작을수록 고주파 영역에서 신호를 발생시키기 때문에 높은 주파수를 발생시키기 위해서 하나의 큰 에어건 대신 다수의 작은 에어건을 사용하기도 한다 (Dragoset, 2000; Karil, 2010; Li & Wang, 2013).

본 연구에서는 무폭약 시험 장치 개발을 위하여 에어건의 발파 방식과 유사한 고압가스 분사체인 에어백 인플레이터를 사용하였다. 폭약에 비해 부족한 충격파의 크기는 에어백 인플레이터를 군집으로 사용하거나 용량을 키우면 극복할 수 있을 것으로 예상된다 (Kim et al., 2017). 저주파 영역에서 영향을 주는 에어건의 단점을 극복하기 위하여 고주파 영역을 보유한 무폭약 수중폭발 충격원인 VFA(Vaporizing Foil Actuator)를 사용하였다.

본 연구의 목적은 버블 펄스와 워터제트의 영향을 고려하지 않은 원거리 수중폭발(Far-field UNDEX) 충격 거동의 특징을 파악하기 위해 최초로 다수의 에어백 인플레이터를 군집 사용하여 폭약의 충격파 크기를 재현하고, VFA의 고주파수 영역에 대한 영향을 관찰하였다. 나아가 기존에 존재하지 않은 두 개의 무폭약 에너지원을 중첩 발파할 수 있는 인프라를 구축하고, 중첩 발파 시, 발생한 수중 충격파를 모형 부유체에 충돌시켜 배의 응답을 실험적으로 분석하였다. 수중 충격파의 크기와 속도의 측정을 위해 수중 압력센서를, 부유체의 응답을 알아보기 위해 스트레인 게이지와 가속도 센서를 사용하였다. 각 센서의 데이터를 수집하기 위해 NI DAQ 장비를 사용하여 데이터를 수집하였다.

2. 에어백 인플레이터와 VFA의 특성

2.1 에어백 인플레이터의 발파 원리 및 수중폭발 특성

에어백 인플레이터는 승용차의 에어백 모듈에서 고속으로 가스를 발생시켜 에어백을 팽창시키는 역할을 하는 장비이다. 가장 일반적인 운전석 에어백, 조수석 에어백뿐만 아니라 커튼 에어백, 사이드 에어백 등 다양한 종류의 에어백 모듈이 사용되고 있으며, 에어백 모듈에 따라 가스 발생량이 다른 에어백

Table 1 Specification of airbag inflator

Model	LE2-120C
Length	261 mm
Diameter	25 mm
Weight	355 g
Gas can. Volume	75 ml
$P_{max}(\text{air})$	120 kPa
Moles	1.33
Gas ratio	Ar(85.9%), He(3.7%), N ₂ (3.9%), CO ₂ (2.7%), H ₂ O(3.8%)
Explosion type	Hybrid 10% explosive gas 90% compressed air
Gas temp.	100 °C

인플레이터가 사용되고 있다. 에어백 인플레이터는 그 작동 방식에 따라 가스 발생제의 연소반응에 의해 가스를 발생시키는 점화식 방식, 압력용기에 보관된 고압가스를 기폭제를 사용하여 방출시키는 하이브리드 방식으로 나뉜다. 본 실험에 사용한 커튼 에어백 인플레이터는 폭약의 대체 에너지원으로 가장 각광을 받고 있는 에어건의 작동방식과 같은 하이브리드 방식이다. 커튼형 에어백 인플레이터는 승용차 프레임의 B필러 루프라인에 장착되어 있으며 충돌 시 팽창하였다가 바로 바람이 빠지는 전방 에어백과는 달리 수 초간 팽창력이 줄어들지 않고 유지되어 2차 충돌에 대비하는 작동 프로세스를 가지고 있다. 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 폭약을 기폭시키고, 압축 가스를 막고 있는 얇은 금속막을 순간적으로 파괴하여 내부 압축 가스를 방출하게 된다. Table 1은 본 연구에 사용된 에어백 인플레이터의 제원이다.

2.2 VFA의 발파 원리 및 수중폭발 특성

본 실험에서 에어백 인플레이터의 발파와 함께 사용한 VFA는 얇은 금속에 강한 펄스 대전류를 가해 발파시키는 방식이다. 금속에 순간적인 펄스 대전류를 가하면 금속의 온도가 증가하고 이로 인해 금속의 저항이 높아진다. 이 저항으로 인해 금속의 온도가 더 상승하고 저항이 증가해 전류가 잘 흐르지 못해 전기에너지가 열에너지로 금속에 축적된다. 이로 인해 금속은 상변화를 일으키며 플라즈마의 형태로 바뀌게 되고 플라즈마를 통해 대량의 전류가 흐르며 금속의 반응 에너지가 강한 빛과 폭음을 동반하며 퍼져나간다. 금속이 고체에서 고온의 기체로 상변화를 일으키기 때문에 급속한 부피 팽창이 발생하고, 주변의 매질을 밀어내며 강한 충격파를 발생시킨다 (Tkachenko et al., 2007; Sarkisov et al., 2005). VFA를 이용하여 금속가공,

Table 2 Specification of aluminum foil

Model name	Aluminum(Al) Sheet
Thickness	0.05 mm
Purity	99 %
Atomic number	13
Atomic weight	0.143 amu
Crystal structure	Face centred cubic
Electrical resistivity (at 20°C)	2.67 (uOhm)
Temperature coefficient (0-100 °C)	0.0045 K ⁻¹

이종금속 충돌용접 등을 수행하고 있으며 (Vivek et al., 2012), 다양한 wire의 배치를 이용하여 강한 수중 충격파를 생성하는 연구도 수행되고 있다 (Shafer et al., 2013; Antonov et al., 2012; Krasik et al., 2006). 금속 전기 폭발에 사용되는 금속은 구리, 알루미늄 등이 있는데 5% 이내의 에너지 차이에서 알루미늄의 버블이 구리의 버블보다 약 14% 이상 크고, 더 큰 폭발이 발생하여, 구리보다 효율이 더 높고, 폭약의 충격파 크기를 구현하는데 더 적합한 알루미늄 시트를 사용했다. Table 2는 본 실험에 사용된 알루미늄 포일의 제원이다.

3. 실험 장비 설치 및 구성

무폭약 충격원에 의해 발생한 수중 충격파의 최대 압력 값에 대한 경험식을 도출하기 위해 실험을 진행하였다. 실험은 충남대학교가 보유한 Circulating Water Channel (CWC) 및 KAIST가 보유한 원형 수조에서 진행되었다. CWC는 길이 2.4 m, 폭 1.2 m, 높이 0.9 m이고, 원형 수조는 지름 3 m, 높이 4 m의 크기이다. 수중 충격파의 최대 압력 값을 측정하기 위해 수조 내부에 압력센서를 설치하였다. Table 3은 압력센서의 제원이다. 무폭약 충격원을 발파하기 위한 장비로 DC Power Supply를 사용하였다. 데이터 획득을 위해 NI PXIe-1082 새시와 PXIe-4492(24.8 kS/s) 카드를 사용하였다. Fig. 1은 무폭약 충격원의 발파를 위한 실험 장비의 구성이다.

선형 실험에서 무폭약 수중폭발의 특성을 파악한 뒤 무폭약 충격원에 의해 발생한 부유체의 응답을 파악하기 위해 대전 국방과학연구소(ADD)가 보유한 원형 수조에서 실험을 진행하였다. 원형 수조는 지름 22 m, 높이 15 m의 크기이다. 두 가지 무폭약 충격원을 동시에 발파하기 위해서 중첩 발파 시스템을 도입하였다. 중첩 발파 시스템에는 하나의 trigger를 통해 여러 채널에서 신호를 내보내는 장비인 delay generator와 신호를 받아 회로를 연결시키는 relay switch가 사용되었다. Delay generator는 4가지 독립적인 채널을 통해 1500 ps의 정확도로 신호를 내보내고, relay switch는 이 신호를 받아 10 ms 동안 무폭약 충격원과 발파 에너지원의 회로를 연결시킨다. Fig. 2는 중첩 발파 시스템의 구성이다.

Table 3 Specification of pressure sensor

Model	W138A02
Measurement range	1 kpsi (6895 kPa)
Sensitivity	(±15 %) 5 mV/psi (0.73 mV/kPa)
Sensing element	Tourmaline
Temp. range	0 to 100 °F (-17.8 to 37.8 °C)
Electrical connector	10-32 Coaxial Jack

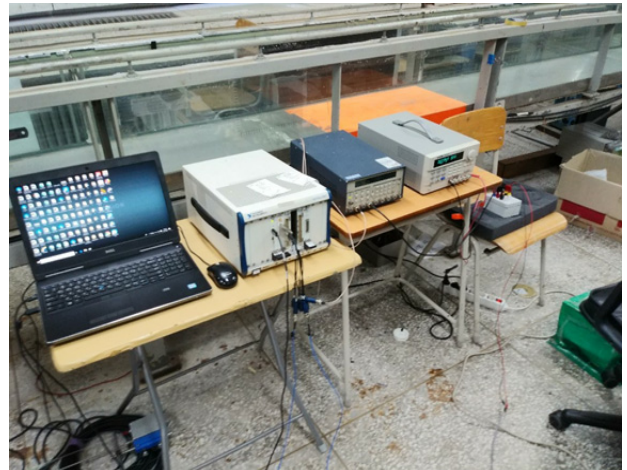


Fig. 1 Equipment setup for airbag inflator experiment

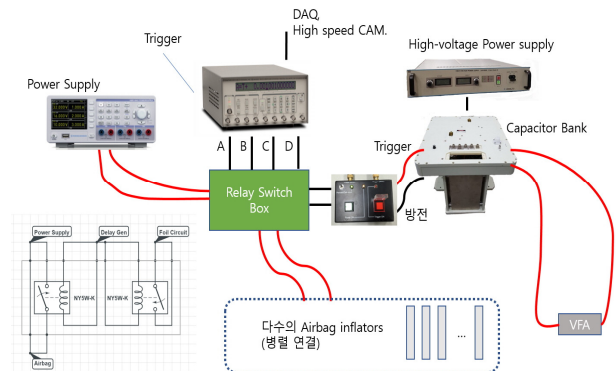


Fig. 2 Experimental setup

무폭약 충격원 중 하나인 에어백 인플레이터를 부유체 하단 중앙에서 발파하기 위해 최대 16개의 에어백 인플레이터를 사용할 수 있는 그리드(Grid)를 제작하였다. 무폭약 충격원에 의해 발생한 수중 충격파를 측정하기 위해 수조 내부에 수중압력 센서를 설치하였다. 또한, 부유체의 응답을 파악하기 위해 부유체 내부에 압력센서 및 가속도 센서, 스트레인 게이지를 설치하였다. 실험에 사용된 부유체는 길이 1.8 m, 폭 1.2 m, 높이 0.9 m, 두께 10 t의 크기이고, 부유체의 훼손을 방지하기 위해 부유체 내부에 높이 15 cm의 격벽을 0.4 m 간격으로 설치하였다. 부유체와 에어백 인플레이터 사이의 거리는 에어백 인플레이터 발파 시, 발생하는 버블의 크기를 고려하여 72 cm로 설정하였다. Fig. 3는 부유체의 모습이고, Table 4는 가속도 센서의 제원이다. Fig. 4는 부유체와 무폭약 폭발원의 위치이다.



Fig. 3 Floating body for underwater shock experiments

Table 4 Specification of acceleration sensor

Model	350B21
Sensitivity	0.05 mV/g
Measurement range	±100000 g
Frequency range	1 to 10000 Hz
Weight	0.15 oz

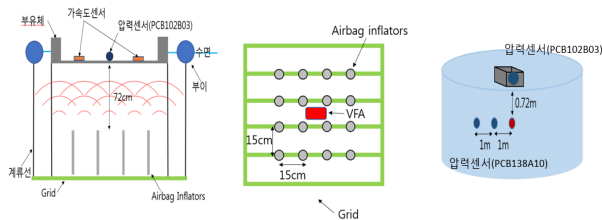


Fig. 4 Location of floating body, grid and sensors

4. 실험 결과

4.1 무폭약 수중 충격파의 특성

에어건과 작동 방식이 유사한 하이브리드식 에어백 인플레이터의 수중 충격파 특성을 확인하기 위해 충남대학교가 보유한 회류 수조에서 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm 거리에서 에어백 인플레이터를 발파하여 실험을 진행하였다. 에어건에 의한 수중 충격파의 최대 압력값과 유사하게 에어백 인플레이터는 거리에 따라 최대 압력 값이 반비례한다. 이를 통해 에어백 인플레이터는 에어건과 거동이 유사한 것을 확인할 수 있었다. 식 (1)은 ONR 보고서 (Brenner, 2007)에서 발췌한 에어건에 의해 발생한 수중 충격파의 최대 압력값이다.

$$\text{최대 압력(Peak pressure)} P_{\max} = KP_0 V^{1/3} D^{-1} \quad (1)$$

여기서, K는 실험상수, P₀는 압축가스의 초기 압력, V는 압력용기의 부피, D는 발파 지점과 측정점 간 거리를 의미한다.

실제 실험을 통해 얻어진 최대 압력값과 회귀(regression)법

을 이용하여 실험상수 K (0.157)를 구할 수 있었다. Fig. 5은 실험상수 K (0.157)를 대입한 식 (1)과 실제 압력값을 비교한 그래프이다.

본 연구에서는 에어백 인플레이터에 의해 발생한 수중 충격파의 최대 압력값 경험식을 검증하기 위해 추가적인 실험을 진행하였다. 에어백 인플레이터 1개의 분사 지점에서부터 8개의 압력센서를 설치하고, 200 KHz의 샘플링으로 3초간 반복 실험을 진행하였다. Fig. 6은 에어백 인플레이터와 압력센서 사이의 배치이고, Table 5은 거리에 대한 충격파 크기를 나타낸 데이터이다.

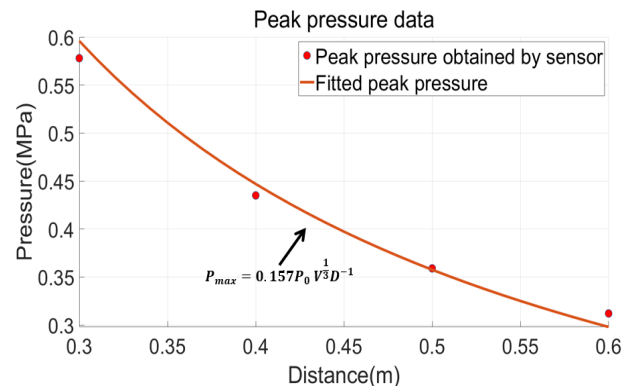


Fig. 5 Peak pressure obtained by sensor and fitted peak pressure

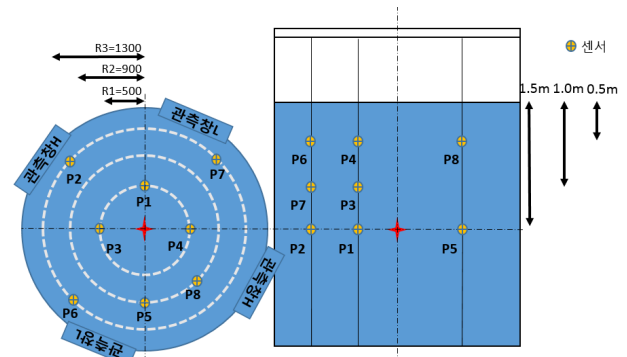


Fig. 6 Drawing of airbag inflator and sensors

Table 5 Peak pressure for one airbag inflator

Distance (m)	Actual peak pressure (kPa)	Theoretical peak pressure (kPa)
0.5	361.07	357.53
0.7	232.22	255.38
0.9	201.70	198.63
1.1	164.45	162.51
1.3	150.75	137.51
1.34	140.54	133.41
1.39	113.51	128.61
1.64	105.90	109.00

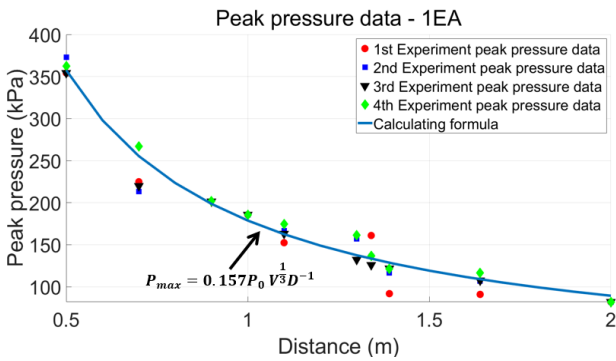


Fig. 7 Experimental peak pressure and calculating formula for one airbag inflator

각 거리에서 측정된 실제 압력 데이터와 실험상수 K (0.157)를 대입한 식 (1)을 그래프로 그려 비교하였다. 압력 값과 실제 데이터 값은 최대 10% 내외의 오차를 보인다. Fig. 7은 실제 압력 값과 식 (1)을 그린 그래프이다.

또한, 에어백 인플레이터의 개수에 대한 수중 충격파의 특성을 파악하기 위해서, 에어백 인플레이터 2개를 동일한 환경에서 발파하여 실험을 진행하였다. 각 에어백 인플레이터 사이의 거리는 80 cm이다. 식 (2)은 Airguns (Krail, 2010)에서 발체한 에어건을 군집해서 발파했을 경우 발생한 수중 충격파의 최대 압력식이다.

$$P_{max} = K P_0 N \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{1}{3}} D^{-1} \quad (2)$$

여기서, K는 실험 상수 (0.157), P₀는 압축가스의 초기 압력, N은 개수, V는 압력용기의 부피, D는 발파 지점과 측정점 간 거리를 의미한다.

Table 6은 실제 실험을 통해 얻어진 거리에 대한 최대 충격파 크기와 식 (2)에 실험 상수 K (0.157)을 대입한 이론 최대 충격파의 크기를 비교하여 나타낸 데이터이다. 또한 Fig. 8은 각 거리에서 식 (2)에 실험 상수 K (0.157)와 에어백 인플레이터 개수 N (2)을 대입하여 그린 그래프와 실제 실험을 통해 얻어진 데이터 값을 비교했다.

Table 6 Peak pressure for two airbag inflators

Distance (m)	Actual peak pressure (kPa)	Theoretical peak pressure (kPa)
0.5	567.3	567.55
0.7	333.06	405.39
0.9	287.67	315.30
1.1	240.23	257.98
1.3	214.78	218.29
1.34	211.76	211.77
1.39	199.72	204.15
1.64	175.59	173.03

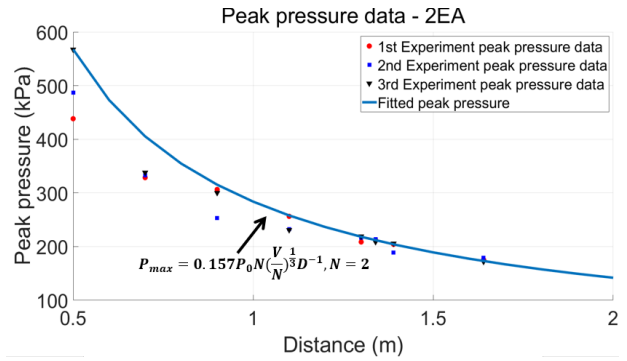


Fig. 8 Experimental peak pressure and calculating formula for two airbag inflators

최대 오차율은 약 17%이고, 오차율이 거리에 비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 환경에서 2개의 에어백 인플레이터 사이의 거리를 두어 중첩 발파하면서 거리가 멀어질수록 각 에어백 인플레이터에서 발생한 수중 충격파가 서로 중첩하여 평면파 형태로 퍼져나가는 특성에 기인한다. 이를 통해 에어백 인플레이터와 에어건 의해 발생한 수중 충격파의 특성이 유사한 것을 확인할 수 있었다.

실험실 규모의 한계로 부족한 데이터 확보 및 경험식에 대한 추가 검증을 위해 대전 국방과학연구소(ADD)가 보유한 원형 수조에서 에어백 인플레이터의 개수를 늘려 실험을 진행하였다. Table 7은 에어백 인플레이터 개수와 거리에 대한 최대 압력값이다.

Table 7 Peak pressure in various cases

The number of airbag inflator (EA)	Distance (m)	Actual peak pressure (kPa)	Theoretical peak pressure (kPa)
1	1	185.7	178.8
1	2	82.03	89.38
2	1	279.5	283.77
2	2	131.5	141.89
3	1	338.6	371.85
3	2	169.4	185.92
5	2.8	184	186.68
16	0.72	1658.1	1756.5

실제 폭약과 무폭약 충격원이 발생시킨 수중 충격파의 크기를 비교하기 위해 KSF(Keel Shock Factor)를 사용하였다. 수중 폭발 충격치인 KSF는 선체에 가해지는 충격을 가늠하는 충격에너지 지표이다 (Park et al., 2003). 식 (3)은 KSF를 구하는 식이다.

$$KSF \text{ (Keel Shock Factor)} = \frac{\sqrt{W}}{R} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2}\right) \quad (3)$$

여기서, W는 폭약 중량(lb), R은 폭약과 부유체의 직선거리(ft), θ는 폭약과 수직인 수면에 대한 수직선과 폭약과 부유체에 대

한 대각선 사이의 각도를 의미한다.

실선에서 충격 시험 에너지원으로 활용이 가능하려면 KSF는 0.1 정도 이상의 값이 도출되어야 한다 (Nawara, 2003). 에어백 인플레이터의 개수에 대한 KSF값을 구하기 위해서 앞서 구한 최대 압력값 경험식인 식 (2)를 이용하였다. Table 8은 부유체와 에어백 인플레이터 사이의 거리에 따른 에어백 인플레이터의 개수와 KSF의 값이다.

Table 8 KSF in various cases

Distance (m)	The number of Airbag inflator (EA)	Peak pressure (kPa)	KSF
0.5	1	357.5	0.0006
	30	3451.9	0.01
	87	7019.8	0.025
	197	12104.8	0.05
	446	20870.7	0.1
0.72	1	248.3	0.0004
	41	2952.2	0.01
	121	6074	0.025
	275	10499.6	0.05
	622	18091.7	0.1
1	1	178.8	0.0003
	55	2585.4	0.01
	163	5334.3	0.025
	370	9213.4	0.05
	838	15876.7	0.1

4.2 수중 충격파가 부유체의 거동에 미치는 영향

본 실험은 실험실 스케일에서 불가능했던 부유체의 거동을 확인하기 위해 지름 22 m, 높이 15 m의 원형 수조에서 진행되었다. 부유체의 거동과 폭약의 충격파와 무폭약 충격파가 부유체에 미치는 영향을 분석하기 위해서 FFT, spectrogram, shock response spectrum (SRS)과 error measures 기법 중 Russel의 에러 기법을 사용하였다. Table 9은 수행한 실험 case이다. 에어백 인플레이터의 개수에 대한 충격파 특성의 비교를 위해 1개, 4개, 5개, 9개의 에어백 인플레이터를 발파하는 실험을 진행하였고, VFA의 중첩에 대한 충격파 특성의 비교를 위해, 에어백 인플레이터 9개와 VFA를 중첩 발파하여 실험을 진행하였다. 또한 보유한 발파 장비의 제원을 고려하여 에어백 인플레이터 최대 16개와 VFA를 중첩하여 총 6가지 case의 실험을 진행하였다. A.I는 에어백 인플레이터, VFA는 알루미늄 포일을 의미하고 TNT(TriNitro Toluene)를 사용한 실선 충격시험 데이터의 경우, 폭약실험을 진행한 KAIST 측의 자료를 제공받았다.

Table 9 Experimental case

	A.I	VFA	TNT	Depth from Floating Body	Width from Floating Body
Case 1	1	X	X	0.72 m	0 m
Case 2	4	X	X	0.72 m	0 m
Case 3	5	X	X	0.72 m	0 m
Case 4	9	X	X	0.72 m	0 m
Case 5	9	O	X	0.72 m	0 m
Case 6	16	O	X	0.72 m	0 m
Case 7	X	X	1 kg	5 m	5 m

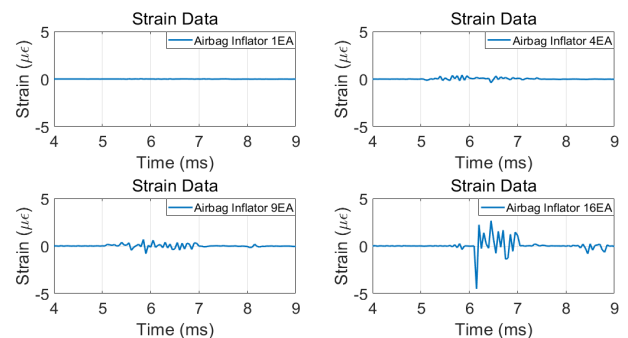


Fig. 9 Strain of floating body

무폭약 충격원을 사용한 시험 조건에서 부유체로부터 수직거리를 0.72 m로 설정하고, 실험을 진행하였다. 이는 폭발원에 의해 발생한 버블의 반지름에 대해서 폭발원과 부유체 사이의 거리의 비가 2 이상이어야 하는 원거리 수중폭발 시험의 조건을 만족하면서 초기 충격파의 크기가 최대가 될 수 있는 거리로 설정했기 때문이다.

Fig. 9은 같은 조건 하에서 에어백 인플레이터의 개수를 증가시켜 부유체의 응답 중 스트레인 데이터를 비교한 그림이다. 에어백 인플레이터의 개수에 비례하여 부유체의 strain이 확연히 커지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 무폭약 수중 충격파에 의해 발생한 부유체의 가속도 응답을 보여준다. 사용한 가속도 데이터는 좌측 상단부터 우측 하단까지 에어백 인플레이터 4개, 9개, 에어백 인플레이터 9개와 VFA 그리고 TNT 1kg을 부유체에서 수평으로 5 m, 수직으로 5 m 지점에서 발파한 Case의 데이터 그래프이다. Table 10는 최대 가속도 값을 나타내었다.

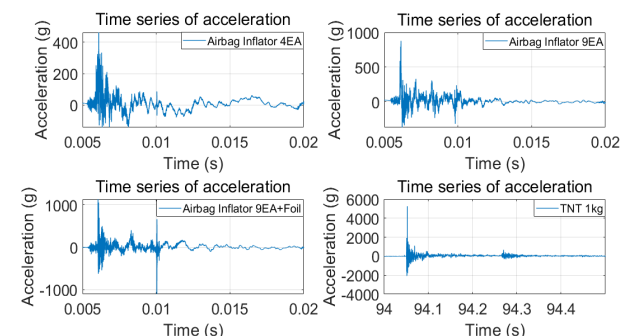


Fig. 10 Acceleration of floating body

Table 10을 통해 에어백 인플레이터의 개수가 증가할수록 최대 가속도 응답이 커지는 것을 확인할 수 있고, VFA를 중첩하여 발파하면 가속도의 크기가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11는 에어백 인플레이터 9개, A.I 9개와 VFA, 에어백 인플레이터 16개 그리고 TNT 1kg의 충격파가 부유체에 도달했을 때의 주파수 응답을 나타내었다. 이 때 peak frequency 값은 무폭약 충격원을 사용했을 경우, first peak frequency가 110Hz~120Hz, second peak frequency가 330Hz~340Hz에서 주요하였고, 폭약을 사용했을 경우, 50Hz와 290Hz의 주요한 주파수를 확인할 수 있었다. peak frequency에서의 응답 크기도 에어백 인플레이터의 개수가 증가할수록, VFA를 중첩시킬수록 더 커지는 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 가속도 데이터를 충격 응답 스펙트럼으로 나타내었고, Table 12은 각 case의 peak value와 발생한 frequency를 표로 나타내었다. 크기의 비교를 위해서 y축은 log로 나타내었다. 충격 응답 스펙트럼은 충격 또는 peak vibration vibration

Table 10 Peak acceleration of experimental case

Case	Peak Acceleration
Airbag Inflator 4 EA	463 g
Airbag Inflator 9 EA	866 g
Airbag Inflator 9 EA + VFA	1135 g
TNT 1kg	8896 g

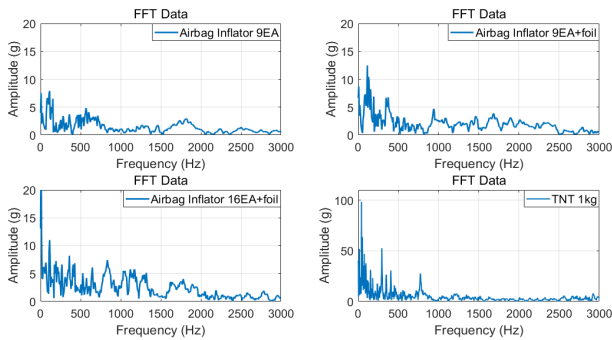


Fig. 11 FFT of acceleration

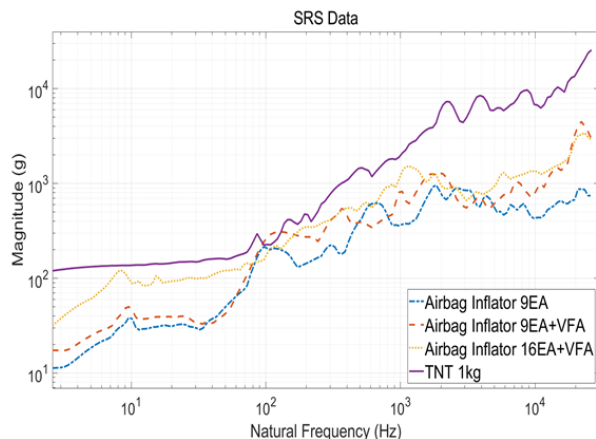


Fig. 12 Shock response spectrum of acceleration data

Table 11 SRS peak value and natural frequency

Case	Peak Value	Natural Frequency
Airbag Inflator 9 EA	963 g	1839 Hz
Airbag Inflator 9 EA + VFA	4493 g	22040 Hz
Airbag Inflator 16 EA + VFA	3420 g	23350 Hz
TNT 1kg	23850 g	24740 Hz

response로 인한 vibration response로 인한 진동의 크기를 나타내는데 사용되는 주파수 기반 기능으로 SRS는 충격, 지진 등의 일시적인 진동을 정량화할 수 있다. SRS의 진폭은 충격에 의해 생성된 일련의 질량 스프링 감쇠 시스템의 frequency to peak vibration response이다. Table 11에서 에어백 인플레이터를 사용하여 발생시킨 충격파보다 VFA를 중첩하여 발생시킨 충격파가 부유체에 도달했을 경우, 고주파 영역에서의 응답을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 에어백 인플레이터 16개와 VFA를 중첩 발파했을 경우, 다른 경우에 비해 충격파의 magnitude가 10~1000Hz 영역에서 폭약과 가장 유사한 것을 확인하였다. 또한 에어백 인플레이터만을 발파했을 경우, 1000Hz 이상 영역에서는 magnitude가 일정한 반면, VFA를 중첩하여 발파했을 경우, 폭약과 유사하게 magnitude가 더 증가하는 것을 볼 수 있었고, 폭약에 의해 발생한 충격파와 더 유사한 부유체의 거동을 발생시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

실제 폭약과 무폭약 시험 장치의 수중 충격파가 부유체의 거동에 미치는 영향을 정량적으로 비교하기 위해 comprehensive error measure 개념을 도입했다. Error measure는 서로 다른 데이터의 magnitude, phase의 차이를 수치적으로 평가하기 위해 나온 개념이다. 위상 오차 인자는 크기와는 무관하며 0과 1 사이의 값이 있어야 한다. 또한, 크기 오차 인자는 위상 오차 인자와는 무관하다. 이 두 가지 오차 인자를 평가하여 종합적으로 comprehensive error factor를 도출한다. 이 세 가지 인자 모두 0에 가까울수록 유사한 데이터이다. 충격 시험 데이터의 경우 comprehensive error factor의 값이 0.25이하면 유사하다고 판단 가능하다. 이 논문에서는 Russel's error measure를 사용한다 (Russell, 1997).

$$m = (\sum c_i^2 - \sum m_i^2) / \sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2} \quad (4)$$

$$RM = \text{sign}(m) \text{Log}_{10}(1 + |m|) \quad (5)$$

$$RP = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\sum c_i m_i}{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}} \right) \quad (6)$$

$$C = \sqrt{\frac{\pi}{4} (RM^2 + RP^2)} \quad (7)$$

식 (5)의 RM은 Russell's magnitude로 크기 오류 인자를 나타낸다. 식 (6)의 RP는 Russell's Phase로 위상오류를 나타낸다. 식 (7)의 RC는 Russell's comprehensive error factor로 종합적인 오류 팩터를 의미한다. m_n 는 하나의 데이터 컬럼을 의미하고, C_n 는 또 다른 하나의 비교 대상이 될 데이터 컬럼을 의미한다. Table 12는 TNT 1kg을 발파하여 발생한 주파수 데이터와 에어백 인플레이터 9개, 에어백 인플레이터 9개와 VFA 중첩 발파, 에어백 인플레이터 16개와 VFA를 중첩 발파한 주파수 데이터를 Russell's error measure 기법을 사용하여 비교 결과 값이다. Russell's magnitude 값은 중첩발파와 에어백 인플레이터의 개수를 증가시킨 데이터가 0에 가까워지는데 Russell's phase는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 중첩 발파의 경우 발생한 충격파가 완전히 중첩되지 않아 발생하는 것으로 예상된다. 충격 응답 스펙트럼을 Russell's error measure 기법을 사용하여 계산한 Table 13은 에어백 인플레이터만 발파한 case에 비해 에어백 인플레이터와 VFA를 중첩 발파한 Case가 magnitude error와 phase error가 0에 더 가까워져 두 요소의 종합적인 인자인 comprehensive error factor가 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다.

Table 12 Comparison fast fourier transform data

Case	Russell's Phase	Russell's Magnitude	Russell's Comprehensive Error Factor
Airbag Inflator 9 EA	0.29	1.197	1.092
Airbag Inflator 9 EA + VFA	0.301	1.041	0.96
Airbag Inflator 16 EA + VFA	0.304	0.907	0.848

Table 13 Comparison shock response spectrum

Case	Russell's Phase	Russell's Magnitude	Russell's Comprehensive Error Factor
Airbag Inflator 9 EA	0.189	1.144	1.027
Airbag Inflator 9 EA + VFA	0.117	0.827	0.741
Airbag Inflator 16 EA + VFA	0.117	0.821	0.735

5. 결론

본 연구에서는 무폭약 충격원인 다수의 에어백 인플레이터와 VFA를 수중에서 각각 그리고 동시에 발파할 때 발생하는 수중 충격파의 특성을 분석했다. 반복 실험을 통해 에어백 인플레이터에 의해 발생한 수중 충격파 압력에 대한 경험식을 얻었고,

이를 이용하여 해군에서 실선 충격시험을 수행할 때 대표적인 지표로 활용되는 KSF로 환산한 데이터 시트를 작성하였다. 또한 ADD가 보유한 수중폭발 시험장에서 최초로 다수의 에어백 인플레이터를 군집 사용하여 폭약의 충격파 크기를 재현하고, VFA를 중첩 발파할 수 있는 인프라를 구축하여 중첩 발파 시, 발생한 수중 충격파를 부유체에 충돌시켜 부유체의 응답을 분석하였다. 본 실험 연구를 통해 에어백 인플레이터는 압축 공기 분사체인 에어건과 발파 방식이 유사할 뿐만 아니라 에어백 인플레이터에 의해 발생한 충격파는 에어건에 의해 발생한 충격파의 특성 및 거동과 동일하다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 여러 개의 에어건을 사용하는 대신 에어건과 에어백 인플레이터를 혼합하여 사용한다면 경제적인 뿐만 아니라 충격파의 크기를 세밀하게 조정할 수 있을 것이다. 또한 VFA를 중첩한다면 보다 넓은 주파수 범위에서 폭약의 주파수 특성을 모사할 수 있을 것이다. 본 연구는 실선 수중충격시험이 더욱 안전하고, 경제적이며 단기간에 수행이 가능토록 하여 많은 예산 절감과 함정 시험평가 기간을 단축할 수 있는 계기가 될 것이다. 또한 향후 실선에서 사용할 무폭약 실선 충격 시험장치 개발을 위한 연구와 무폭약 실선 충격시험을 더욱 발전시킬 수 있는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 수중근접폭발 특화연구실 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원과 충남대학교 연구장려장학금에 의해 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

- Antonov, O. Efimov, et al., 2014. Diagnostics of a converging strong shock wave generated by underwater explosion of spherical wire array. *Journal of Applied Physics*, 115(22), 223303.
- Antonov, O. Gilburd, et al., 2012. Generation of extreme state of water by spherical wire array underwater electrical explosion. *Physics of Plasmas*(1994-present), 19(10), 102702.
- Beatty, L. G., 1972. Bubble frequencies of air gun sources (No. NRL-MR-2503). Naval research Lab Underwater Sound Reference Div., Orlando FL
- Brenner, M. 2007. Navy ship underwater shock prediction and testing capability study. *Office of Naval Research(ONR)*. Report-No. JSP, pp.07-200.
- de Graaf, K. L. Brandner, P. A. & Penesis, I., 2014. The pressure field generated by a seismic airgun. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55, pp.239-249.
- Dragoset, B., 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays.

The Leading Edge, 19(8), pp.32–39.

Kim, H. J., et al., 2017. An experimental study on UNDEX characteristics of airbag inflators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(5), pp.439–446.

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.

Krasik, Ya. E., et al., 2006. Generation of sub-Mbar pressure by converging shock waves produced by the underwater electrical explosion of a wire array. *Physical review*(2006), E73, 057301.

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.

Nawara, T., 2003. *Exploratory analysis of submarine tactics for mine detection and avoidance*. Monterey, CA:Naval Postgraduate School. Retrieved 2006-06-10.

Park, I. K., Kim, J. C., An, C. W. & Cho, D. S., 2003. Measurement of naval ship responses to underwater explosion shock loadings. *IOS Press, Shock and Vibration 10*, 365–377.

Russell, M. D., 1997. Error Measure for Comparing Transient Data: Part1: Development of a Comprehensive Error Measure, Part2: Error Measure Case Study The Proceedings of the 68th Shock and Vibration Symposium, 3–6 November 1997, Hunt Valley, Maryland.

Sarkisov, G. S. et al., 2005. Nanosecond electrical explosion of thin aluminum wires in a vacuum: Experimental and computational investigations. *Physical Review E*, 71(4), 046404.

Shafer, D. et al., 2013. Peculiarity of convergence of shock wave generated by underwater electrical explosion of ring-shaped wire. *Physics of plasmas*, 20, 052702.

Physics of Plasmas (1994–present), 20(5), 052702. Tkachenko, S. I. et al., 2007. Analysis of the discharge channel structure upon nanosecond electrical explosion of wires. *Physics of Plasmas(1994–present)*, 14(12), 123502.

Vivek, A. (2012). *Rapid vaporization of thin conductors used for impulse metalworking*. Doctoral dissertation: The Ohio State University.

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.

Yu, W., et al., 2007. Shock spectrum calculation of structural response to UNDEX. *14th International Congress Sound & Vibration*, Cairns, Australia, 9–12 July 2007.

