

## 수중음향 분석을 통한 충격신관 지연기능 시험평가

나태흠<sup>1)</sup> · 장요한<sup>1)</sup> · 정지훈<sup>1)</sup> · 김관주<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제8기술연구본부

<sup>2)</sup> 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

### Test and Evaluation for Time Delay Function of Point Detonating Fuze by Underwater Sound Analysis

Taeheum Na<sup>1)</sup> · Yohan Jang<sup>1)</sup> · Jihoon Jeong<sup>1)</sup> · Kwanju Kim<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> *The 8th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

<sup>2)</sup> *Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Korea*

(Received 23 September 2016 / Revised 16 December 2016 / Accepted 24 February 2017)

#### ABSTRACT

This study proposes an evaluation method for time delay function(TDF) of Point Detonation(PD) fuse using underwater explosion and water entry phenomena. Until now, nothing but the naked eyes of an observer or video images have been used to determine whether the TDF of PD fuze is operated or not. The observer has verified the performance of TDF by analysing the shape of the plume formed by underwater explosion. However, it is very difficult to evaluate the TDF of PD fuse by these conventional methods. In order to overcome this issue, we propose a method using underwater sound signal emitted from the underwater explosion of high explosive charge. The result shows that the measured sound signal is in accord with the physical phenomena of water entry of warhead as well as underwater explosion. Also, from the hypothesis test of bubble period, difference on underwater sound analysis between dud event and delay one is proved

Key Words : Underwater Sound(수중음향), Point Detonating Fuze(충격신관), Underwater Explosion(수중폭발), Water Entry(수중입사)

#### 1. 서론

현재 K519 충격신관의 양산품 수락시험 시 신관의

순발기능, 지연기능 작동여부 평가방법은 국방규격<sup>[1]</sup>과 시사장 수락시험절차서<sup>[2]</sup>(이하 ‘절차서’)에 따라 육안관측과 비디오 영상분석을 통하여 확인하고 있다. 절차서에 규정된 사격제원과 조건으로 발사된 탄두는 수십 km 비행 후 낙하하여 해상에 탄착하게 된다. 순발기능으로 충격신관을 사용할 경우, 탄두가 해수면에 충돌

\* Corresponding author, E-mail: kwanju@hongik.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

함과 동시에 탄두에 탑재된 TNT 화약이 폭발하기 때문에 물기둥의 모양과 청음을 통해 신관의 작동여부 판정은 비교적 수월하다.

그러나 해수면 충돌 후 25 ms ~ 65 ms(기준값 : 50 ms) 동안 지연<sup>3)</sup>되어 수중에서 폭발하는 충격신관(지연기능)을 탑재한 경우, 물기둥 모양은 폭발수심과 파고에 따라 다양한 형상으로 나타나고 시정조건에 따라 육안관측 뿐만 아니라 비디오 영상 획득도 용이하지 않기 때문에 관측자에 따라 신관 작동 여부를 다르게 판단할 수 있다. 따라서 국과연 OO시험장에서는 보다 신뢰성 있는 시험 방법을 적용하고자 수중음향센서(hydrophone)를 이용한 시험평가방법을 연구하고 있다.

현재까지의 연구에서는 탄두의 폭발 위치와 계측지점 간의 거리가 멀고 파고에 의한 센서의 상하움직임에서 발생하는 계측신호의 왜곡현상으로 신관 작동 여부를 판정할 수 있는 논리적 근거와 계측신호의 명확한 해석이 부족하였다<sup>4,5)</sup>.

본 연구에서는 이와 같은 제한 사항을 해소하기 위해 이전의 연구에서보다 가까운 거리(약 3 km)에서 측정된 계측 자료를 기반으로 충격신관의 지연기능 작동과 비작동(불발) 신관 사이의 물리적 현상에 대한 차이점을 규명하고, 통계적 가설검정(hypothesis testing)을 통하여 수중음향계측 결과의 차이가 신관작동여부에 따라 다르게 나타남을 밝혀내고자 했다.



Fig. 1. Shapes of the water plumes depending on the function of the PD fuse on sea surface (captured by video camera)

## 2. 관련이론

기폭시간 지연기능을 갖춘 충격신관 K519는 해수면 충돌 후 약 50 ms 지연된 후 수중에서 탄두를 폭발시

킨다. 따라서 탄두의 수중입사(water entry)시 탄두의 수중 운동특성 및 고폭화약(TNT)의 수중폭발 특성들을 살펴볼 필요가 있다.

### 2.1 수중폭발 현상

수중에서 고폭화약이 폭발하면 화약은 순간적으로 고온고압의 상태가 되어 수중으로 충격파를 발생시키고, 이어서 폭발반응 생성물에 의해 기포가 형성된다.

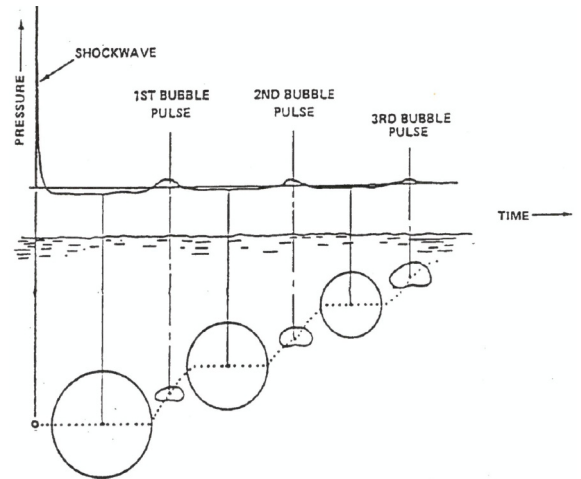


Fig. 2. Shock wave and bubble pulses from an explosion<sup>6)</sup>

그 후 기포는 일련의 팽창과 수축을 반복하면서 수면으로 부상하여 결국에는 소멸된다. 일반적으로 화약의 수중 폭발위력은 기포의 주기적인 운동과정에서 발생하는 기포에너지의 형태로 나타난다. 기포에너지는 기포의 최대 팽창반경과 진동주기, 폭발수심에 의하여 결정되며, 이는 식 (1)과 같이 기포주기(first bubble period)로 그 특성을 나타낼 수 있다.

$$T = K \times \frac{W^{1/3}}{(H + H_0)^{5/6}} \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 화약종류에 대한 특정상수,  $R$ 은 폭발지점까지의 거리,  $W$ 는 폭약 중량,  $H$ 는 수중 폭발 깊이,  $H_0$ 는 1대기압에 해당하는 물의 깊이 10.1 m 이다.

본 논문에서는 수중음향센서로 측정된 기포주기로 부터 충격신관이 작동하는 폭발수심을 산출하는데 기

포주기 관계식 (1)를 이용하고자 한다. 한편, 충격신관 K519는 TNT 화약으로 충전된 155 mm 항력감소고폭탄 K307에 적용되는 신관이므로 TNT에 대한 기포주기 관련 상수는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Proposed coefficients of similitude equation for the first bubble period

	Swisdak <sup>[7]</sup>	Reid <sup>[8]</sup>
$K$	2.110	2.064

2.2 수중입사체 운동방정식

수중폭발에서 기포주기는 식 (1)과 같이 화약의 종류와 화약량, 폭발수심에 따라 다르게 나타난다. 결국 폭발수심은 충격신관의 지연시간 동안 수중에서 움직인 수직거리가 되기 때문에 기포주기의 분석을 위해 수중 운동체 운동특성을 살펴보고자 한다.

탄두를 강체(rigid body)로 가정하고, 추진력에 의한 회전토크와 질량 변화가 없으며 물속에 완전히 잠기기 때문에 탄두의 수중운동체 방정식은 유체역학적인 힘과 모멘트, 추진력, 중력 및 부력에 의한 힘과 모멘트의 합으로 표현된다. 여기서 탄두의 회전과 중력, 부력은 추진력에 비해 상대적으로 작기 때문에 관련 요소를 제거하고, 2차원적 운동체 거동을 고려하면 6자유도 수중운동체 방정식은 식 (2)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$m\dot{v} = -\frac{1}{2}\rho AC_d v^2 \tag{2}$$

여기서,  $m$ ,  $\rho$ ,  $A$ ,  $v$ 는 각각 탄두의 질량, 물의 밀도, 탄두의 단면적, 탄두의 속도를 나타내고,  $C_d$ 는 항력계수로 비압축성 유체에서는 일정한 값으로 간주한다.

이로부터, 탄두의 수면입사 각(angle of fall)  $\theta$ 와 수중 직선운동에 대해 식 (2)로부터 식 (3)<sup>[9]</sup>과 식 (4)를 얻는다.

$$\frac{v_p(t)}{v_i(t)} = \frac{1}{1 + \beta V_i A}, \quad \beta = \frac{\rho A C_d}{2m} \tag{3}$$

$$H(t) = \frac{1}{\beta} \ln(\beta v_i t + 1) \sin\theta \tag{4}$$

여기서,  $v_p$ 는 탄두의 수중 속도,  $H$ 는 폭발수심,  $v_i$ 는 입수시 탄두의 속도,  $t$ 는 경과 시간을 나타낸다.

2.3 수중입사체 초공동 현상

초공동은 자연공동에 의한 증기공동(vapor cavity)과 초공동 물체나 수면근처에서의 가스가 기포화된 환기공동(ventilated cavity)의 두 가지로 분류된다. 공기 중에서 수면으로 진입하는 탄환은 공기를 끌고 들어가 환기 초공동을 형성한다. 이러한 초공동 현상의 가시화에 대한 연구는 일찍이 Leslie<sup>[1964]</sup><sup>[10]</sup>에 의하여 수행되었으며 9.7 mm 탄환이 230 m/s로 수중입사 시 수중음향 신호를 고속영상 촬영을 통하여 확인하였다. 이때, 초공동 현상뿐만 아니라 4개의 bubble pulse를 확인하였다. Shi HH & Kume M<sup>[2004]</sup><sup>[11]</sup>은 구경 5.7 mm의 탄환이 352 m/s로 수중 입사하는 모습을 고속영상으로 촬영하고 수중음향 신호를 계측한 실험에서 수중기포의 형성과 붕괴에 대한 원인이 탄환의 굴절과 회전임을 확인하였다. Fig. 3은 Shi HH & Kume M의 고속영상 사진으로 공기 중에서 수면으로 진입하는 탄환은 공기를 끌고 들어가 환기 초공동(ventilated supercavity)을 형성하는 모습을 확인할 수 있다. 이어 탄환의 불안정성으로 인해 탄도는 굴절되고 공동은 수면으로부터 폐쇄된다. 이와 동시에 수중에서는 기포(mango bubble)가 급격하게 생성되고 수축과 팽창을 반복하여 수중폭발과 유사하게 주기성 신호를 갖게 되는 형태로 나타나는 것을 알 수 있다.

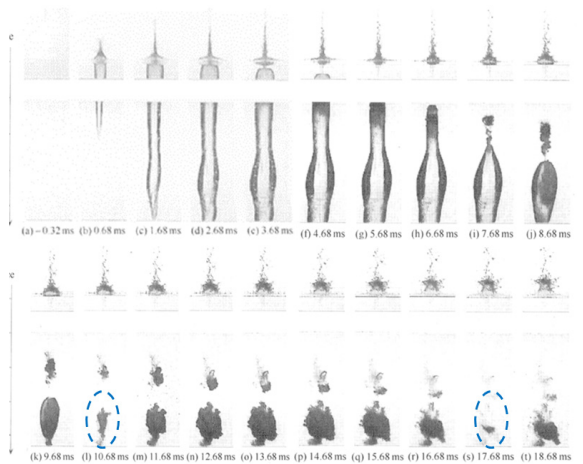


Fig. 3. Photographs of water entry projectile taken by the high-speed camera by 1,000 fps<sup>[12]</sup>

### 3. 시험 방법 및 결과

#### 3.1 시험 방법

수중음향 분석을 통한 충격신관 K519의 지연기능에 대한 평가를 위해 Fig. 4와 같이 시험요원의 안전을 고려하여 예상탄착지에서 약 3 km 떨어진 선박에서 수심 8 m 지점에 수중음향센서(Brüel & Kjør 社 8104 hydrophone)를 설치하고, 표본추출속도(sampling rate)는 200 kHz, 계측시간은 포에서 발사한 시점부터 탄착 후 20 sec까지로 하였다. 또한, 탄도계측레이더로 매 발 탄착지 좌표를 확인하고, 선박의 GPS(Global Positioning System)정보를 이용해 탄착지와 계측지 사이의 거리를 확인하였으며, 선박에 설치된 수심기로 탄착지에서의 수심을 확인하였다.

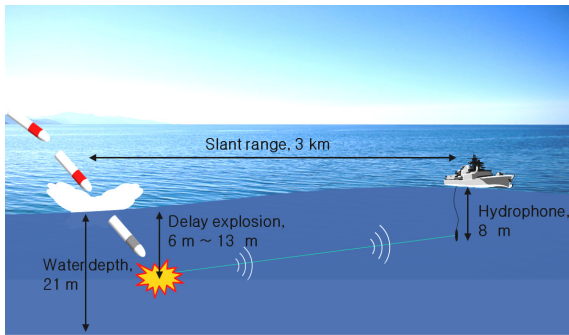


Fig. 4. The concept of measurement by using the hydrophone

수중음향 분석을 위한 충격신관의 시료구성은 지연기능 8발, 비작동 9발로 구성하였으며, 비작동의 경우에 대한 시험은 동일 중량과 형상의 모의신관(dummy PD fuze)을 사용하였다. 이들 두 경우를 비교, 분석하기 위해 신관 이외의 추진장약과 사격제원 조건은 모두 동일하게 조정하였다. 충격신관의 순발기능에 대한 시험은 본 논문에서는 제외하였다.

#### 3.2 시험 결과

충격신관의 지연기능을 탑재한 탄두 7발(1발 계측 실패)과 모의신관을 탑재한 탄두 9발에 대한 시험 결과, 각각 Fig. 5, Fig. 6과 같은 수중음향 신호들을 얻었다. 지연기능 작동의 경우에는 3개의 신호파형이 나타나는 것과 달리, 비작동의 경우 4개의 신호파형이 나타났다.

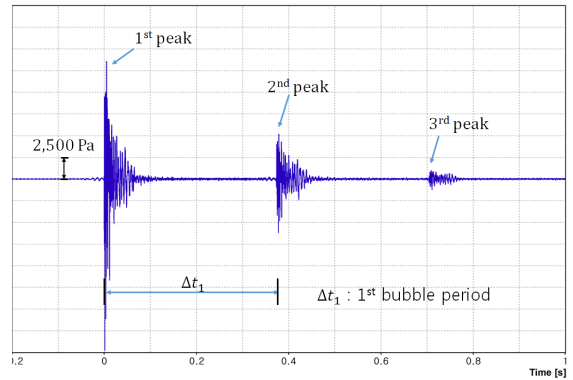


Fig. 5. The example of measured underwater sound signal for delay function case

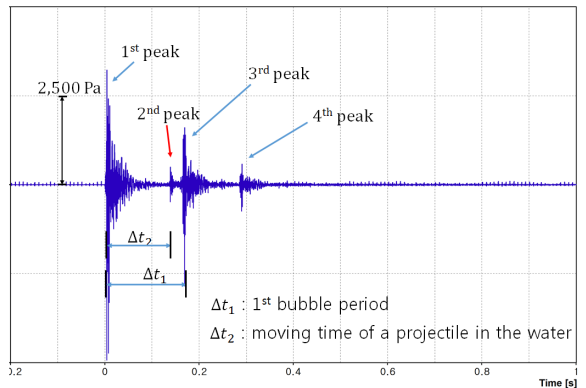


Fig. 6. The example of measured underwater sound signal for dud case

### 4. 수중음향분석

수중음향 분석을 위해 필요한 수식의 상수들을 Table 2에 정리하였다. 물의 밀도  $\rho$ 는 시험당일의 수온을 고려하여 적용하였으며, 탄두의 단면적은 탄두직경으로부터 계산하였다. 또한 항력계수는 문헌을 참고하였으며, 질량은 탄의 제원을 참고하였다.

Table 2. Parameters of the equations used in this study

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$C_d$	$m$ [kg]	$W$ [kg]	$v_i$ [m/s]	$\theta$ [°]
1,027	0.0189	0.19	46.4	10.76	321	60

4.1 지연기능 충격신관

충격신관의 지연기능은 탄두가 수면과 충돌한 시점부터 약 50 ms 시간지연 후에 탄두에 충전된 TNT를 수중에서 폭발시킨다. 이어 수중 폭발로 인한 기포를 형성할 것이다. 따라서 수중 폭발시 발생한 신호의 정체성을 확인하기 위해 예측한 기포주기를 이용하여 신관의 지연 작동 시간을 추정하여 보았다. 기포주기와 탄두의 TNT중량을 식 (1)에 대입하면 폭발 수심을 추정할 수 있고, 수중 탄두 운동특성으로부터 수중 폭발 지점까지 도달하는데 소요된 경과시간을 계산하면 신관의 지연 작동 시간을 확인할 수 있다.

Table 3. Theoretical bubble period and water depth caused by delay time

delay time range (ms)		explosion depth (m)	bubble period(ms)	
			Swisdak <sup>[7]</sup>	Reid <sup>[8]</sup>
lower limit	25	6.0	<b>412.9</b>	403.9
standard	50	10.8	350.7	343.1
upper limit	65	13.2	324.0	<b>317.0</b>

Table 4. Theoretical water depth and delay time caused by bubble period of the delay function

	measured value	theoretical value			
		Swisdak <sup>[7]</sup>		Reid <sup>[8]</sup>	
	bubble period, $\Delta t_1$ (ms)	explosion depth (m)	delay time (ms)	explosion depth (m)	delay time (ms)
1	373	10.6	49.1	10.1	45.9
2	370	<b>10.8</b>	<b>50.1</b>	10.3	47.0
3	374	10.5	48.7	10.0	45.6
4	375	10.5	48.3	9.9	45.2
5	377	10.3	47.5	9.8	44.5
6	376	10.4	47.9	9.9	44.8
7	379	10.2	46.8	<b>9.7</b>	<b>43.8</b>
average	375	10.5	48.3	9.9	45.3

Table 3는 충격신관 K519의 KM2지연화약의 지연 범위에 따른 수심과 수심에 따른 기포 주기를 각각 식 (4)와 식 (1)를 이용하여 추정한 값으로, 지연기능 범위에서 탄두가 폭발할 경우 지연신관의 폭발수심은 6 m ~ 13 m 범위로 나타나며 기포주기는 317 ms ~ 413 ms의 범위로 예측되었다.

Table 4는 지연기능 7발에 대한 기포주기 예측값과 식 (4)와 식 (1)로 계산한 신관의 폭발수심과 지연시간을 각각 정리한 결과이다. 지연기능으로 작동한 신관의 폭발수심은 9.7 m ~ 10.8 m이고, 이는 44 ms ~ 50 ms의 지연시간에 해당하므로 충격신관의 지연시간 기준범위를 만족한다. 따라서, Fig. 5의 처음 두 신호 간의 시간 간격은 신관의 지연기능에 따라 탄두가 수중에서 폭발함으로써 발생하는 기포주기임을 확인할 수 있다.

4.2 비작동 신관

비작동의 경우 Fig. 6과 같은 수중음향 신호가 예측된다. 그림에서 보듯이 3개의 주기성 신호(1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup> peak)외에 1개의 단일 신호(2<sup>nd</sup> peak)가 확인됨을 알 수 있다. 주기성 신호의 경우 수중 입사 시 발생하는 초공동 현상으로 인한 생성기포(mango bubble)의 팽창-수축과 관련된 것으로 설명할 수 있으나, 대구경 탄두에 있어서 기포주기의 정량적인 계산은 매우 어렵다.

단일 신호로 보이는 2<sup>nd</sup> peak은 탄두가 수중에서 운동하여 해저에 충돌할 때 발생하는 것으로 추정된다. 이를 검증하기 위해 Fig. 6의 1<sup>st</sup> peak와 2<sup>nd</sup> peak의 시간차이( $\Delta t_2$ )를 탄두가 수면에서 해저까지 이동하는 시간으로 가정하고, 식 (4)를 이용하여 예상 수심을 계산해 보았다. Table 5에는 예측된 주기성 신호  $\Delta t_1$ 과  $\Delta t_2$ 를 이용하여 계산된 탄착지 수심을 나타내었다.  $\Delta t_2$ 로 계산한 탄착지역 예상 수심은 20.6 m ~ 21.8 m로 시험 시 선박에 장착된 수심기로 확인한 탄착지역 수심 21 m에 근접함을 알 수 있다. 따라서 식 (4)는 탄두의 수중 운동특성을 잘 반영 하고 있으며, 2<sup>nd</sup> peak는 탄두가 해저에 충돌할 때 발생하는 음원임을 보여준다.

여기서 주목해야 할 사항으로 2<sup>nd</sup> peak은 다른 신호에 비해 매우 작은 압력 크기를 가지고 있어 탄착지와 계속지간 거리, 해저의 구성 물질, 계속 간 신호대 잡음비 등에 따라 나타나지 않을 수도 있다는 점이다.

Table 5. Time between 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> peak, estimated water depth of dud projectiles

	bubble period, $\Delta t_1$ (ms)	$\Delta t_2$ (ms)	estimated depth (m)
1	157	127	21.0
2	160	123	20.6
3	162	2 <sup>nd</sup> peak unconfirmed	-
4	163	2 <sup>nd</sup> peak unconfirmed	-
5	170	2 <sup>nd</sup> peak unconfirmed	-
6	165	135	21.8
7	165	134	21.7
8	160	133	21.7
9	160	129	21.2
average	162	130	21.3

또한, 2<sup>nd</sup> peak은 탄두가 수중 입사 시점부터 해저까지 수중운동 후 충돌하여 발생하는 신호이기 때문에 시험 환경 보다 수심이 깊을 경우 3<sup>rd</sup> peak에 가려져 나타나지 않을 수 있다. 시험결과, 3<sup>rd</sup> peak은 탄두가 수중 입사 시점부터 160 ms 지난 후에 나타난다. 따라서 탄두가 수중 입사 후 160 ms 경과된 시점(수심 24.5 m)부터 3<sup>rd</sup> peak의 duration(약 70 msec)을 고려한 230 ms 경과한 시점(수심 30.5 m)까지의 범위에서 탄두의 해저 충돌 신호는 3<sup>rd</sup> peak에 가려 확인이 제한된다. 이를 통해, 해당 시험 지역은 해상 탄착지역 위치와 만조와 간조사이의 해수면 고도차인 조차(tidal range)에 따라 수심의 변화가 크기 때문에 시험 전 수심 정보 확인에 대한 필요성을 확인하였다.

5. 통계적 가설검정

지연기능과 비작동에서 예측된 기포주기의 형상과 크기에는 차이가 있음을 직관적으로 알 수 있다. 그러

나 지연기능과 비작동의 차이를 보다 명확하고 신뢰도 있는 방법으로 비교하기 위해 통계적 가설검정(statistical test of hypothesis)을 수행하였다. 검정 방법은 두 집단의 모평균에 대한 동일성 검정(two sample t-test)을 수행하였으며 가설검정의 절차는 Fig. 7과 같고 지연기능 작동 집단과 비작동 집단 간의 기포주기의 모평균을 대상으로 하였다.

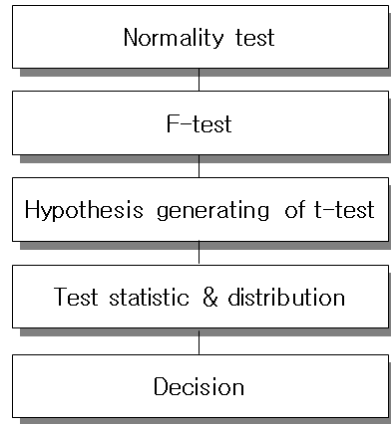


Fig. 7. The flow chart of statistical test of hypothesis

두 집단의 모평균에 대한 동일성 검정에 있어서의 전제조건은 ‘두 집단이 서로 독립이며, 정규분포를 따른다’는 것이다. 또한, 두 집단의 모분산이 동일하다고 전제할 수 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 모평균의 동일성 검정 방법은 달라지기 때문에, 모평균의 동일성 검정에 우선하여 정규성 검정(normality test)과 모분산의 동일성 검정(F-test)을 수행하였다<sup>12)</sup>. 상용 통계분석 소프트웨어인 Minitab R16.0을 이용하여 정규성 검정과 모분산의 동일성 검정을 수행한 결과, 두 집단은 정규성이 있으며 모분산은 동일하다고 할 수 있다.

정규성과 모분산의 동일성 조건을 전제로 지연기능 집단과 비작동 집단의 기포주기에 대한 모평균의 동일성 검정을 수행하였다. 가설은 두 집단의 모평균이 같다는 귀무가설(null hypothesis :  $H_0$ )과 모평균이 다르다는 대립가설(alternative hypothesis :  $H_1$ )을 식 (5), 식 (6)과 같이 설정할 때 검정통계량과 귀무가설의 기각역(critical region)은 식 (7), 식 (9)와 같이 주어진다. 식 (7)에서 불편 추정량  $S_p$ 는 식 (8)과 같다.

이 때,  $\mu_1, \bar{X}_1, n_1, S_1^2$ 은 충격신관 지연기능 작동

집단의 기포주기에 대한 모평균, 표본평균, 표본수, 표본 분산으로 정의하였고,  $\mu_2, \bar{X}_2, n_2, S_2^2$ 은 각각 충격신관 지연기능 비작동 집단의 기포주기에 대한 모평균, 표본평균, 표본수, 표본분산으로 정의하였다.

검정결과, 기포주기의 검정통계량이 기각역에 해당하여 유의 수준(significant level) 5 %에서 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택할 수 있다. 따라서 지연기능 집단과 비작동 집단의 기포주기는 통계적으로 다르다는 결론을 도출하였다.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \tag{5}$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \tag{6}$$

$$T(X) = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_P \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t_{(n_1+n_2-2)} \tag{7}$$

$$S_P = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}} \tag{8}$$

$$two-tailed\ test : |T(X)| \geq t_{(n_1+n_2-2; \alpha/2)} \tag{9}$$

Table 6. The results of the two sample t-test, for delay function group versus dud projectiles group

		delay	dud
bubble period (ms)	$n$	7	9
	$\bar{X}$	375	162
	$S$	8.47	14.75
	$S_P$	3.51	
	$T(X)$	121.29	
	$\alpha$	0.05	
	$t_{(14;0.025)}$	2.145	
	decision	$H_0$ rejection, $\therefore \mu_1 \neq \mu_2$	

## 6. 결론

본 논문에서는 수중음향 분석을 통한 충격신관의 지연기능 시험평가 방법에 대하여 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 신관의 지연기능 작동으로 인한 수중폭발 시 발생하는 수중음향신호를 계측하고 기포주기를 분석하여 물리적인 현상을 해석하였다.

둘째, 수중입사체의 초공동 현상으로 인하여 생성된 기포의 팽창-수축 현상과 수중운동체의 운동방정식을 적용하여 신관 비작동 시 발생하는 수중음향신호에 대한 물리적인 현상을 해석하였다.

셋째, 충격신관 지연기능의 작동과 비작동에 따른 계측된 수중음향신호의 기포주기가 형태상 유사한 양상으로 나타남에 따라, 통계적 가설검정 통하여 서로 다른 신호임을 확인 하였다. 이를 통해 지연기능 작동과 비작동 사이의 기포주기 차이는 신관의 기능적인 측면에서 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

향후에는 원격 계측이 가능한 부이(buoy) 시스템을 적용하여 예상탄착지와 보다 근접한 지역에서 계측을 수행함으로써 신뢰성 높은 계측 데이터를 확보하고, 신관기능별 계측자료 데이터베이스를 구축하여 다양한 조건을 반영한 판정 절차를 수립해야 한다. 또한 비작동 신관에서의 기포주기의 정량적 예측에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## References

- [1] KDS 1390-3002-1, "Fuze, Point Detonating, KOOO," Agency for Defense Development, Korea, pp. 1-24, 2004.
- [2] F-155H-1A, "Fuze, Point Detonating, KOOO LAP," Agency for Defense Development, Korea, pp. 156-163, 2013.
- [3] KDS 1390-1030, "Dealy Element MO Loading, Assembling and Packing," Agency for Defense Development, Korea, pp. 1-19, 1982.
- [4] Taeheum Na, Noseok Park, Bogyun Kim, Bongsoo Kim, Sihong Choi, "A Study on Test and Evaluation Methods of Delay Function for PD Fuze," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 3-4, 2014.
- [5] Sihong Choi, "Measurement of the Impact Fuze

- Phenomena using the Underwater Explosion,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 479-484, 2014.
- [6] Robert J. Urick, “Principles of Underwater Sound,” McGraw-Hill, USA, pp. 86-98, 1967.
- [7] Michael M. Swisdak, Jr., “Explosion Effects and Properties; Part II - Explosion Effects in Water,” Naval Surface Weapons Center, USA, pp. 11-17, 1978.
- [8] Warren D. Reid, “The Response of Surface Ships to Underwater Explosions,” DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia, pp. 1-6, 1996.
- [9] H. H. Shi, T. Takami, “Some Progress in the Study of the Water Entry Phenomena,” Experiments in Fluids 30, pp. 475-477, 2001.
- [10] Charles B. Leslie, “Underwater Noise Produced by Bullet Entry,” The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, No. 6, pp. 1138-1144, 1964.
- [11] H. H. Shi, Kume, “Underwater Acoustics and Cavitating Flow of Water Entry,” ACTA MECHANICA SINICA, Vol. 20, No. 4, pp. 374-382, 2004.
- [12] Yonggu Lee, Samyong Kim, “Introduction to Statistics,” Yulgokbooks, Korea, pp. 342-351, 2008.