대 한 조 선 학 회 논 문 집
제40권 제4호 2003년 8월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 40, No. 4, pp. 66-74, August 2003

함정의 수중폭발 충격시험을 위한 계측장비 시스템 개발

박일권*, 조대승**, 김종철*

국방과학연구소 제2체계개발본부 해상시험장*, 부산대학교 조선해양공학과**

Development of Measurement System for the Underwater Explosion Shock Test of Naval Ships

Il-Kwon Park*, Dae-Seung Cho** and Jong-Chul Kim*

ADD NSRDC NWSTR* , PNU Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering**

Abstract

In non-contact underwater explosion shock test of a real naval ship, measurement of shock loadings and responses should require onboard system to be able to safely trigger an explosive and to simultaneously and successfully measure scores of shock signals in the deteriorated environment. For this purpose, we have developed a shock-hardened measurement system resistible to 170g peak acceleration having 4 msec duration by resiliently mounting general purpose measurement instruments in racks. The system can simultaneously measure and record 200 signals to evaluate shock loadings and responses of the test ship by triggering an explosive and measurement instruments at the same time. We prove the performance of the developed system by introducing the signal acquisition results from of a real ship underwater shock test, firstly performed in Korea.

※Keywords: UNDEX(수중폭발), Shock test(충격시험), Measurement system(계측시스템), Shock-resistant capability(내충격 성능), MSH(기뢰 탐색함)

1. 서론

기뢰 등의 비접촉 수중 폭발시 발생하는 높은 압력의 충격파는 함정에 과도한 충격 운동(shock motion)을 야기시켜 선체 구조 및 탑재장비의 손상을 유발(Michael 1995, Keil 1961)한다. 이로 인해 세계 2차 대전 중에는 500~2,000lb 규모의 자기감응 기뢰의 수중폭발 충격으로 인해 영국 650여척, 독일 및 이태리 2,000여척, 일본 1,500여척의 선박이 침몰되거나 손상된 것으로 보고 되고 있다(Daniel 1984).

이에 2차 대전 종료 후 각국 해군은 신규 건조 함정을 대상으로 비접촉 수중폭발에 대한 선체,

접수일: 2003년 5월 21일, 승인일: 2003년 7월 19일
† 주저자, E-mail: ikpark@add.re.kr
Tel: 055-540-6817

장비 및 기기의 내충격성을 확보하여 생잔성능(survivability)을 향상시키고자 함정에 대한 내충격 성능 기준(NAVSEA 1995)을 설정하고, 수중폭발로 인한 함정의 충격 응답 해석(Sacvuzzo 등 2000, Shin 2000)과 함께 탑재 장비에 대한 충격 시험(Clements 1972, MIL-STD-901D 1989)을 실시한 후 이를 만족하는 장비만을 함정에 탑재하고 있다. 또한, 실선을 대상으로 선체구조와 탑재 장비의 내충격 시험을 검증하고자 실선 수중폭발 충격시험을 수행하고 있다.

한편, 실선 내충격 성능을 평가하기 위해서는 수중폭발 현상 및 선체 구조와 탑재 장비의 충격 응답 측정이 요구되며, 이를 위해서는 시험대상선에 설치되는 계측 장비 자체가 수중폭발에 대한 충분한 내충격 성능을 가져야만 한다. 이에 선진 각국에서는 실선 충격 시험을 위해 내충격 성능이 뛰어난 계측장비 시스템을 개발·활용하고 있으나 기술 보안사항으로 취급하고 있어 이를 국내에서 도입·활용하기는 곤란한 실정이다.

본 연구에서는 반복시험이 불가능하고 막대한 비용과 시간이 소요되는 실선 비접촉 수중폭발 충격 시험을 안전하면서도 성공적으로 수행하기 위하여 시험대상선에 탑재하여 수중에 설치된 폭약의 기폭 제어는 물론 수중폭발로 인해 선체에 가해지는 충격 압력과 선체 및 탑재 장비의 충격응답 등을 획득하기 위한 계측장비 시스템을 개발하고, 이의 내충격 성능을 낙하 충격실험 및 수치해석적 방법으로 평가하였다. 개발된 계측장비 시스템의 성능은 4회의 실선 수중폭발 충격 시험에 대한 적용 결과를 이용하여 평가·검증하였다.

2. 수중폭발 충격시험 개요

2.1 시험 목적

함정의 실선 충격시험은 선체 및 탑재 장비의 내충격 성능 검증, 충격 하중 산정, 장비 및 선체 구조의 충격응답 연구, 장비의 충격손상 또는 작동불량에 대한 원인 분석, 함정 내충격 설계 기준 및 해석기법 정립, 실선 충격시험 기준 설정 등의 목적으로 수행되고 있다(Pusey 1984/1989, NAVSEA 1989). 또한, 새로운 폭발물의 시험, 폭발 현상학 연구 및 표적에 대한 손상 측정 등의 목적으로도 수행되고 있다.

2.2 시험의 종류

수중에 폭약을 설치하여 시험대상물에 충격하중을 가하는 수중폭발 충격시험은 시험대상에 따라 함정의 내충격성 입증을 위한 실선시험(full-scale ship test), 새로운 함의 개발을 위한 연구목적의 모델시험(model test) 및 대형 장비의 내충격성 검증을 위한 중중량 충격시험(MIL-STD-901D 1989) 등이 있다.

2.3 시험대상 함정

실선 충격시험은 충격강화 설계(shock hardening design)된 함정에 대해서는 모두 실시하는 것이 원칙이나 과도한 비용 소요와 인원투입(FY87 기준시, 5~50백만불, 20~200명), 시험의 실시에 따른 함정의 제반 위험요소 및 안전 등을 고려하여 선별적으로 시험하고 있다.

미해군에서는 시험대상 함정으로 동급 계열의 전투함과 비전투함에 대해서 대표함 1척을 시험하고, 지원정과 소형상륙정은 시험하지 않는 것으로 알려져 있다. 충격 시험시 대상함은 계류나 정지상태에서 주요 시스템을 정상 작동상태로 유지토록 규정되어 있다(NAVSEA 1989).

2.4 폭약의 크기 및 배치

선체와 폭약간의 거리가 너무 근접하게 되면 선체 거어더에 과도한 굽힘모멘트를 유발하거나 충격하중의 국부구조 집중으로 선체구조상에 치명적인 손상을 야기시킬 수 있다. 이에 폭약은 가능한 한 시험대상 함정으로부터 멀리 설치하되 폭약량과 폭발수심을 조정하여 원하는 충격량을 가하도록 제시하고 있다. 미해군에서는 HBX-1급 폭약 기준으로 전장 425ft 이하의 수상함은 1,200lb급, 전장 425-625ft의 수상함과 잠수함은 10,000lb급, 그 이상의 수상함은 40,000lb급의 폭약을 사용토록 하고 있다. 또한, 폭약은 자유표면효과와 해저

반사파에 의한 영향이 적은 선측에 설치하도록 규정하고 있다(NAVSEA 1989).

한편, 시험 장소는 충격파의 해저 반사영향을 감소시키기 위해 통상 180m 이상의 충분한 수심을 가지는 해역으로 하되 폭발지점으로부터 20마일 이내에는 잠수부를 소개시켜야 하며, 상선의 항로나 어업수역에서의 시험은 피하도록 규정하고 있다.

2.5 측정 항목 및 계측 위치

실선 충격시험시 충격량을 평가하고 선체의 충격응답을 분석하기 위해 일반적으로 측정하는 항목과 이의 측정 목적은 Table 1에 나타내었다.

실선 충격시험은 반복시험이 불가능하고 매우 큰 과도응답이 순간적으로 발생되므로 시험 전에 완벽한 계측시스템의 구성, 철저한 시험계획 및 준비가 요구된다. 충격응답을 측정하기 위한 장비는 센서 및 신호증폭기, 기록기 및 기타 보조장치로 구성되며, 안전한 기폭과 함께 최소 50~200개의 신호를 측정·기록하기 위한 계측 장비의 동시 트리거링(triggering)이 가능하여야만 정확한 신호 측정과 분석이 가능하다.

계측위치는 충격 응답 해석 또는 경험에 의거하여 충격응답을 가장 잘 측정할 수 있는 곳으로 선정한다. 일반적인 주요 측정 위치는 늑골부재, 구조 격벽, 상부구조 및 마스트 등의 주요 선체 구조부, 주기관, 발전기 등의 주요장비 및 이의 받침대, 발사대 및 유도탄체를 포함한 무장 시스템과 특수한 설치물 및 기타 관심구역 등이다.

계측 위치별 사용 센서는 변위량이 클 것으로 예상되는 고유진동수 20Hz이하의 장비의 충격응답은 변위계로 계측하되 외국의 경우 거의 1인치의 변위 응답이 계측된 사례가 있으므로 최대 예측 변위량을 고려한 변위계 선정이 요구된다. 고유진동수 20~100Hz를 갖는 장비나 구조물은 이 범위에서 주파수 변화에 대한 충격응답 속도 변화가 심하므로 속도계로 측정하고, 이보다 높은 주파수 영역의 충격 응답은 가속도계로 측정하는 것이 바람직하다.

Table 1 Measurement items in shock tests

Measurement items	Measurement Purpose
Pressure	Underwater shock environment
Velocity	Structural shock response at keel position
Acceleration	Structural and equipment shock response
Displacement	Relative motions of equipment foundations
Strain	Structural and material response evaluations
Shock motion	Structural motion behaviors

압력계는 선체에 가해지는 충격압력 계측에 사용되며, 선체 하부 또는 측면부의 수중에 설치한다. 선체구조에 작용하는 응력과 변형율은 스트레인 게이지를 이용해서 계측하며, 충격에 의한 주요품목의 상대거동을 분석하기 위한 고속카메라는 상부구조, 마스트 및 그곳에 설치된 장비, 발사대, 유도탄, 적재된 단정(craft), 특수한 설치품 및 기타 관심구역 등에 설치한다(Pusey 1989, NAVSEA 1989).

3. 계측장비 시스템 개발

3.1 계측장비 시스템 구성 및 주요 특성

본 연구에서 실선 충격시험을 위해 개발한 계측장비 시스템의 전체 구성은 Fig. 1, 이의 주요 사양과 특성은 Table 2~Table 4에 나타내었다.

다음 계측 장비들은 일반 상용 정밀 계측장비들로서 센서류를 제외하면 장비 자체가 충분한 내충격 성능을 가지고 있지 못하다. 이에 센서류를 제외한 장비들은 Fig. 1에 보인 바와 같이 별도 보호 랙을 이용하여 3중 탄성지지 시켰다. 또한, 정밀 고속카메라는 와이어 마운트를 이용하여 2중 탄성지지하여 내충격 성능을 확보하도록 설계하였다.

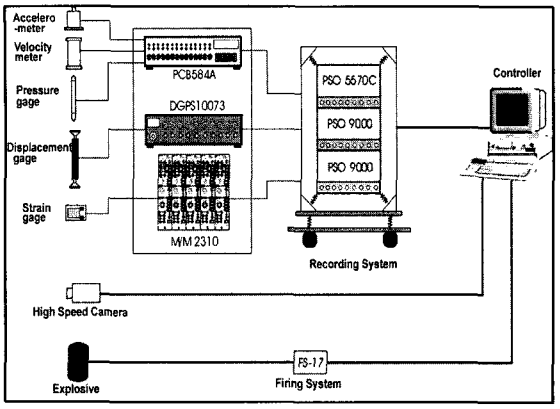


Fig. 1 Schematic diagram of the developed measurement system

Table 2 Characteristics of sensors

Type	Model	Range
Accelerometer	PCB 305A05	2500g
Displacement gage	GE 4.01	6 inch
Pressure gage	PCB 138A10	10,000psi
Strain gage	M/M CO.	50,000με
Velocity meter	GE 2.75	20(ft/s)
High-speed camera	KODAK HG2000	1000(F/S)

Table 3 Characteristics of signal conditioner

Type	Model	Ch. No.	Freq. Range
Acceleration	PCB 584A	120	0.05~100(kHz)
Pressure	PCB 584A	10	0.05~100(kHz)
Strain	MM 2310	60	DC~65(kHz)
Displacement	DGPS 10073	10	

Table 4 Characteristics of recorder system

Type	Capability
Recording type	Digital recording (SRAM)
Storage memory	200CH*2MByte/channel.
A/D converter	12 bit resolution
Sampling frequency	200 kHz (variable/channel)
Anti-aliasing Filter	10k, 20k, 80 kHz(variable in steps)
Input range	±10V (variable in steps)
Model	PSO5570C+PSO9000*2ea

3.2 기폭 및 계측장비 제어 시스템 개발

실선 충격시험시 안전한 기폭 제어와 폭약 폭발 후의 실시간 다중채널 신호를 정확하게 계측하기 위해서는 계측장비의 효율적 제어시스템이 필요하다. 본 연구에서는 기폭 시스템과 200개의 다중채널을 구성하는 센서, 신호증폭기, 신호녹음기 및 고속 카메라 등을 실시간으로 원격 제어할 수 있는 보오드와 PC용 제어프로그램을 개발하였으며, 이의 주요 사양과 기능은 Table 5에 나타내었다. 개발된 제어프로그램은 Windows 환경하에서 수중폭발 충격시험 시나리오에 따른 시험조건과 시험제원 등의 관리와 함께 GPIB 인터페이스와 D/A 변환기를 이용하여 설치된 폭약의 원격 기폭과 계측 장비의 동시 제어 기능을 가진다.

개발된 제어프로그램을 이용한 실선 충격시험 순서도는 Fig. 2에 나타내었다.

3.3 계측장비 시스템의 내충격 성능 평가

수중폭발 충격에 의한 선체, 탑재장비 및 주요 구조물 등의 충격응답을 계측하기 위해서는 계측장비 자체가 수중폭발 충격에 대하여 충분한 내충격 성능을 보유하여야 한다. 이에 개발된 계측장비 시스템의 내충격 성능을 평가하고자 충격시험기(shock machine)를 이용한 시험을 수행하고, 최대 피크 충격량과 충격지속시간 변화에 따른 계측장비 시스템의 내충격성능을 평가하였다.

3.3.1 충격시험기를 이용한 내충격 성능 평가

계측장비 시스템의 내충격 성능 검증에 사용한 충격시험기의 주요 제원과 충격시험 장면은 Table 6과 Fig. 3에 각각 나타내었다. 반정현파(half sine wave) 충격 파형을 가한 경우의 계측 장비 시스템의 랙 완충 마운트 하부에서 계측한 입력신호와 랙 내부에 설치된 장비의 상부에서 계측한 출력신호의 시간이력은 Fig. 4에 예시하였으며, 입력 충격량의 변화에 따른 계측장비의 충격응답은 Table 7에 나타내었다.

Table 5 Main particulars of the control system for underwater explosion shock test

Type	Specification & Capability
Hard-ware	◦ Rugged PC (Pentium Pro) ◦ 64 MB RAM Memory/Super VGA card ◦ Equipment control/Data communication interface card ◦ Recorder, high-speed camera and firing system interface card
Soft-ware	◦ Control of recorder, high-speed camera and firing system ◦ Countdown, timer and display ◦ Checking the synchronous operation of recording system and display ◦ Monitoring measurement system ◦ Data backup, play back and analysis

Table 6 Characteristics of shock machine

Type	Specification
Shock table	95cm x 95cm(longitudinal)
Shock wave & max. acceleration level	Sine wave : 1,000 g
	Pulse wave : 130 g
	Saw tooth wave : 200 g
Shock duration time	0.5 ~ 65 msec
Maximum test weight	250 lbs
Maximum velocity	25 ft/sec

Table 7 Shock test results of instrumentation system using shock machine

Drop Hight (cm)	Test Rack			
	Shock input		Shock above mount	
	Max. response (g)	Duration (msec)	Max. response (g)	Duration (msec)
16	78	5	9	43
19	87	5	10	46
22	97	5	10	52
26	109	4.5	11	44
30	121	4	12	40
35	134	4	11	46
40	154	4	13	55
50	177	4	19	30

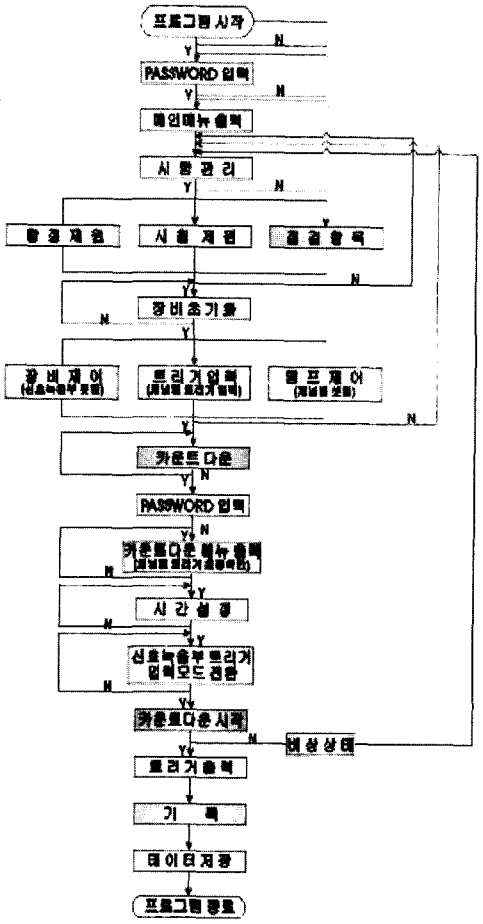


Fig. 2 Flow chart of operating software

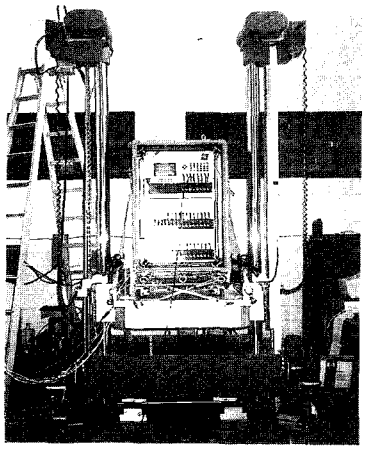


Fig. 3 View of drop shock test

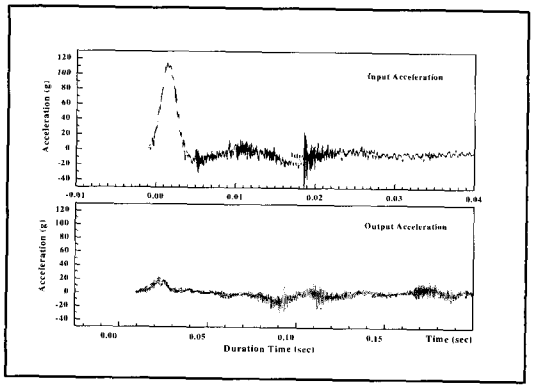


Fig. 4 An example of shock input and output response of the test system

상기 결과로부터 계측장비 랙에 장착된 탄성 마운트의 충격 완충효율은 80~93% 범위에 있음을 확인할 수 있다. 작동중인 계측장비 자체의 최대 내충격 허용수준이 20g임을 고려하여(Fig. 6 참조), 3중 탄성지지한 계측장비 시스템의 최대 허용 충격은 충격지속시간 4msec인 최대 피크 충격가속도가 170g로 설정하였다.

3.3.2 전달함수를 이용한 내충격성능 평가

실선 충격시험시 충격지속시간과 최대 피크 충격량의 변화에 따른 계측장비 시스템의 내충격 성능을 평가하고자 낙하 충격 실험결과를 이용해서 계측장비 시스템의 충격응답 전달함수를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 상기 전달함수를 이용해서 충격지속시간 3~10 msec를 기준으로 최대 충격가속도 변화에 따른 시스템의 내충격성능을 평가한 결과는 Fig. 6에 나타내었는데 충격지속시간이 길어지면 계측장비의 내충격성능이 감소함을 확인할 수 있다.

4. 계측장비 시스템의 실선 수중폭발 충격 시험 적용

4.1 실선 충격시험 개요

본 연구에서 개발한 계측장비 시스템을 이용해서 진해만 근해에서 880톤급 기뢰 탐색함을 대상으로 4차례의 실선 수중폭발 충격시험을 수행하였

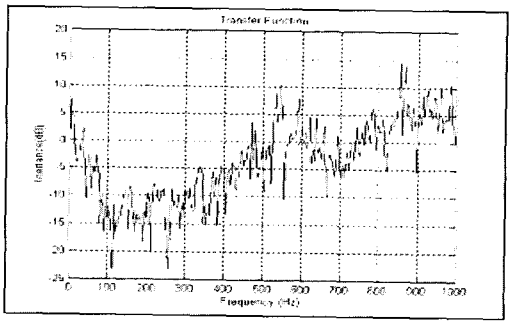


Fig. 5 Shock transfer function of test instrumentation obtained from drop shock test

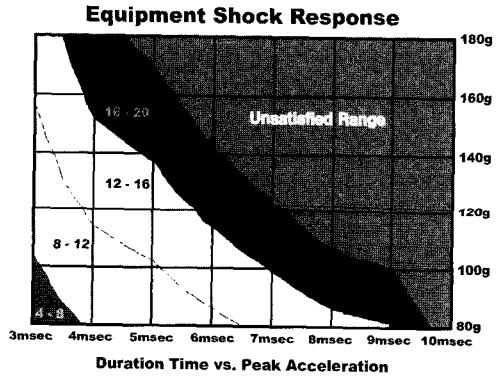


Fig. 6 Shock response level of system due to duration time and peak acceleration

Fig. 7 View of MSH shock test

다. 이때, 1,200lb급의 HBX-1 폭약을 계류삭으로 지지하는 방법(bridle method)으로 함정과 폭약간의 거리를 3조의 와이어 로우프로 조정하여 매 시험시마다 서로 다른 용골충격계수(keel shock factor; KSF)를 갖도록 하였다. 또한, 실선에 가해지는 충격 하중과 충격응답은 압력계, 가속도계, 변위계, 응력계로 구성된 총 200개의 센서를 선체의 늑골부 및 주요 탑재장비의 마운트 상·하부에 부착하여 동시 계측하였다. Fig. 7에는 충격시험 당시의 현장 사진을 나타내었다.

4.2 신호 획득율 결과 및 고찰

개발된 계측장비 시스템을 이용하여 기폭 후 신호 취득을 수행한 결과 충격하중과 응답을 성공적으로 취득한 채널의 수는 Table 8에 나타내었다. 또한, 선체에 작용한 충격압력과 선체의 충격응답에 대한 시간이력 계측 결과를 Fig. 8에 예시하였으며, KSF가 가장 클 때 선체에 가해진 충격압력과 계측장비가 설치된 상부갑판에서의 충격응답의 최대·최소치 분석결과는 Table 9에 나타내었다.

Table 8 Numbers of successful data acquisition channels

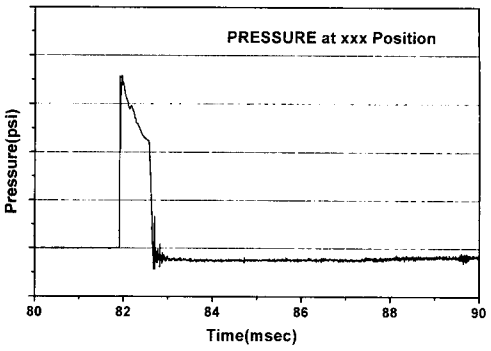
Sensor type	Accel.		Disp.	Strain	Press.	Total
	PE*	PR**				
Installation	120	30	10	30	10	200
1st exp.	63	3	6	8	10	90
2nd exp.	111	29	9	23	10	182
3rd exp.	115	26	7	29	10	187
4th exp.	117	26	0	10	8	161

*PE(Piezo-electric type),

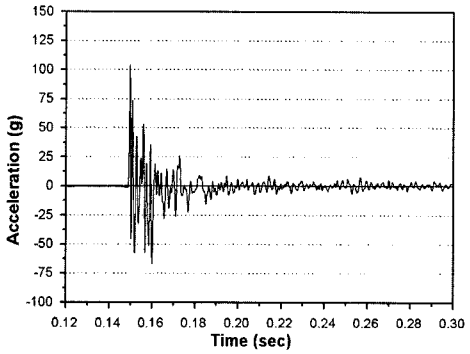
**PR(Piezo-resistive type)

Table 9 Shock response in condition of maximum keel shock factor

Response	Position	Minimum		Maximum	
		Peak	Duration (msec)	Peak (g)	Duration (msec)
Pressure	Hull outside	400 psi	0.6	550 psi	0.6
Accel.	0-2 Deck	19.4g	6.0	58.6 g	1.0



(a) Shock pressure at an outside hull



(b) Shock response at a ship structure

Fig. 8 Examples of measured signals during the MSH shock test

상기 결과로부터 사전 조정 단계인 1차 시험시에는 신호 획득율이 45%에 불과하였으나 센서와 신호선의 부착 방법 개선 및 신호증폭기의 게인 설정치를 조정한 2차 시험 이후에는 최소 81%의 신호를 획득하였다. 이와 같은 신호 획득율은 1987년 호주에서 소해함에 대한 충격 시험시의 신호획득율 60%보다 21% 이상 높은 것이다(Hatt, D.J. et, 1989). 또한, 센서와 케이블의 선정과 부착방법 및 충격력 전달특성이 양호한 부착위치 선정, 전원 노이즈의 배제 등에 관한 경험이 보다 축적될 경우 신호 획득율을 더욱 높일 수 있을 것으로 판단한다.

한편, KSF가 가장 높았던 4차 시험시 변위계

신호 획득에 실패한 것은 측정된 신호에 잡음(noise) 성분이 지배적이었기 때문이며, 이의 원인은 센서 자체의 성능 문제라고 사료한다.

또한, 변형율 신호의 획득율이 다소 저조한 원인은 게이지 자체가 강한 충격에 미 적응하였거나 충격응답중 손상된 것으로 판단된다. 상기의 실선 수중폭발 충격 시험 결과 본 연구에서 개발한 실선 수중폭발 충격시험 계측장비 시스템은 안전한 기폭 제어와 함께 아주 짧은 시간 동안에 발생하는 다중채널 충격 신호를 효율적으로 획득할 수 있다고 판단한다. 아울러, 계측장비가 위치한 상부 갑판상에서의 최대 충격 피크 가속도가 본 연구에서 개발한 계측 장비의 내충격 성능보다 훨씬 낮은 58.6g로서 시험 대상선에 대해 보다 높은 KSF를 갖는 수중폭발 충격시험에도 개발 장비를 이용한 충격하중 및 충격 응답 계측이 가능하다고 사료한다.

5. 결 론

본 연구에서는 실선 수중폭발 충격 시험을 위하여 시험 대상 함정에 탑재하여 안전한 기폭 제어와 함께 아주 짧은 시간 동안에 작용하는 충격 압력과 가속도, 변위, 응력 등의 충격응답을 200채널까지 동시에 계측·기록할 수 있는 장비 시스템을 개발하였다.

개발된 시스템은 센서류를 제외한 계측장비들이 랙에 3중 탄성지지 되어 있으며, 낙하 충격 실험과 전달함수를 이용한 내충격 성능 평가 결과로부터 실선 탑재시 충격지속시간 4 msec에 최대 피크 충격가속도가 170g의 충격량이 가해지는 조건에서도 실선 충격 신호 측정이 가능할 것으로 평가되었다. 또한, 880톤급 기뢰 탐색함에 탑재하여 4회의 실선 수중폭발 충격시험 및 계측을 수행한 결과 1차 사전 조정 시험시를 제외한 3회의 본 시험에서 최소 81%의 신호 획득이 가능하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 계측장비 시스템은 향후 한국 함정의 내충격 성능 평가를 위한 실선 수중폭발 시험에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 평가한다. 아울러, 계측된 결과는 함정의 내충격 설계와 해석 및 성능 평가 기술의 고도화에도 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- 박일권, 안호일, 구명훈, 1998, "수중폭발충격 시험장비체계의 내충격성능시험 결과보고서", 국과연 NWSD-513-981384.
- 박일권, 안호일, 1999, "함정의 수중폭발 충격시험 운용방법 및 관련 시험기법조사/획득 귀국보고서", 국과연 NSDC-613-991198.
- 박일권, 이형대, 1993, "다중채널 충격신호시스템 설계 /성능시험 기법 연구", 국과연 DSDC-513-931044.
- 박일권 외 11명, 2001, "MSH 수중폭발충격시험 수행결과보고서", 국과연 NSDC-513- 010190.
- 박일권 외 3명, 1993, "다중채널 신호획득/제어 체계 구성 설계 연구", 국과연 DSDC-513-93450.
- Clements, E.W., 1972, "Shipboard Shock and Navy Devices for Its Simulation", NRL Report 7396.
- Daniel, R.J., 1984, "Mine Warfare Vessels and Systems", Inter. Symposium on Mine Warfare Vessels and Systems, RINA.
- Hatt, D.J. et, 1988, "Minehunter Inshore Shock Trials-Phase 2: Limited Shock Trial for Developing Trial Methology and Logistics", Department of Defence Material Research Laboratory Technical Note MRL-TN-539.
- Keil, A. H., 1961, "The Response of Ships to Underwater Explosions", Transactions of the SNAME, Vol. 69.
- Michael, O., Said. 1995, "Theory and Practice of Total Ship Survivability for Ship Design", Naval Engineers Journal.
- MIL-STD-901D, 1989, Shock Tests, H.I. (High Impact) Shipboard Machinery,

Equipment and Systems, Requirements For.
•NAVSEA, 1989, "Ship Post-Delivery Tests and Trials Guidance Manual", 0900-LP-095-3010.
•NAVSEA, 1995, Shock Design Criteria for Surface Ships, 0908-LP-000-3010A.
•Pusey, H.C., 1984, "Reflections on Trends in Dynamics - The Navy's Perspective", Shock and Vibration Bulletin, Vol.54.
•Pusey, H.C., 1989, "Underwater Shock Measurement", Shock and Vibration Digest.
•Sacvuzzo, R.J. and Pusey, H.C., 2000, "Naval Shock Analysis and Design", The SAVIAC Monogram SVM-17.
•Shin, Y.S., 2000, "Total Ship Shock Modeling and Simulation Using LS-DYNA/USA", Proc. of LS-DYNA User Conference, Osaka, Japan.

< 박 일 권 >