Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 3, pp. 342-348, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.3.342

Research Paper 시험평가 부문

이중충격파형 충격시험장비를 이용한 충격시험 결과 및 분석

배 종 수*,1)

1) 국방과학연구소 제7기술연구본부

The Shock-Test Result and Analysis Using Dual-Pulse Shock Testing Machine

Jongsoo Bae*,1)

1) *The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 25 January 2018 / Revised 23 February 2018 / Accepted 11 May 2018)

ABSTRACT

The important issue of equipment installed in maritime weapon system is shock survivability against underwater explosion(UNDEX). If the shock survivability of equipment should not be guaranteed, the successful mission also could not be achieved. For that reason, the shock-resistance of each equipment under UNDEX environment should be demonstrated before deployment at combat field. However, the actual UNDEX test on the ocean is too expensive to conduct. Also, it has diverse dangerous factors. The main characteristic of UNDEX is a dual-pulse shock. The vertical shock test machine able to simulate dual pulse shock signal on the ground will be introduced in this paper. The dual-pulse shock signal presented in certain shock standard was achieved with this shock-test machine on the ground. The analytical procedure to set a test condition was verified by comparing simulation result with experiment result.

Key Words : UNDEX(수중폭파), Dual-Pulse Shock(이중충격파형), Shock-Test(충격시험), Shock Resistance(내충격성)

기 호 설 명

a_1, a_2 : 1차와 2차 충격파의 최대 가속도
t_1, t_2 : 1차와 2차 충격파의 지속시간
M : 1자유도 진동계의 질량
K : 1자유도 진동계의 탄성계수
C : 1자유도 진동계의 감쇠계수
w_n : 고유진동수
K_1 : 가속스프링의 강성
K_2 : 감속스프링의 강성

* Corresponding author, E-mail: js_bae@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서 론

해양무기체계 및 해양무기체계에 탑재되는 장비의 경우 임무 수행 중 근접-비접촉식 수중폭파(UNDEX : Underwater explosion)로 인한 손상에 노출될 가능성이 높다. 수중 폭파에 의해서 수중에서 발생된 충격파는 잠수함과 수상함 등의 외부 구조물에 큰 가속도와 짧은 주기의 충격을 전달하며, 이로 인해 함정에 탑재된 탑재장비에도 큰 충격력이 전달되게 된다. 따라서 수중폭파에 대한 내충격성은 성공적인 임무수행을 위해 해양무기체계는 물론, 탑재되는 장비들이 반드시 갖추어야할 성능이다[1-2]. 수중폭파 환경에 노출된 해양무기체계의 성공적인 임무수행 보장을 위해 해군을 포함한 많은 연구자들은 내충격성 검증을 위한 시험 및 해석기법에 폭넓고 깊이 있는 연구를 수행해오고 있다[3-5].

비접촉식 수중폭파의 주요 특성은 이중충격파이며, 수중폭파에 의해 발생되는 이중충격파에 대한 해양무기체계 탑재장비들의 충격안정성을 평가하기 위한 규격으로는 MIL-S-901D, BV043/85와 STANAG 등이 있다. 해양무기체계 뿐만 아니라, 항공/우주/지상무기 체계의 운용환경, 충돌 및 근접폭파 환경 등의 극한 충격환경 하에서 탑재장비들의 내충격성 검증은 해당 무기체계들이 전장에서의 임무수행 성공여부를 결정하는 중요한 부분이다. 이러한 내충격성 검증을 위한 방법으로는 해석적 접근과 시험적 접근으로 구분할 수 있으며, 시험적 접근의 경우 실제 근접-비접촉식 수중폭파 시험과 지상에서 충격시험장비를 이용하여 수중폭파에 의해 발생되는 충격신호를 구현하여 시험하는 방법으로 구분할 수 있다.

실제 수중폭파를 통한 충격시험을 실시할 경우 전장에서의 충격발생 환경과 가장 유사한 환경을 모사하여 시험할 수 있다는 장점이 있지만 고비용과 위험성 그리고 환경적인 문제로 인해 실제 시험 수행에 있어서는 많은 어려움들이 존재한다. 이러한 어려움들을 극복하고 시험대상체들의 수중폭파에 대한 내충격성을 검증하기 위하여 다양한 충격 시험장비들을 이용하여 국내외 시험기관에서 지상충격시험을 수행하고 있다[3-8]. 본 논문에서는 네덜란드 응용과학연구소(TNO)에서 운용중인 수직형 충격시험장비와 동일한 개념으로 국제기술협력을 통하여 개발된 수직형 충격시험장비에 대해서 소개하고, 실제 운용시험을 수행하며 얻어진 결과를 소개 및 분석하였다.

2. 수중폭파에 의한 이중충격파형

수중폭파에 의해 해양무기체계에 탑재된 장비에 전달되는 충격의 특성은 Fig. 1과 같은 이중충격파형의 형태로 전달된다. 이러한 이중충격파형의 생성원리는 수중폭파에 의한 충격파가 잠수함이나 수상함과 같은 해양무기체계의 선체에 전달될 때 1차 충격파가 발생하고, 물과 해양무기체계의 구조물 사이의 상호작용에 의한 반응으로 2차 충격파가 생성된다[7,8]. 서론에서 언급한 충격안정성을 평가하기 위한 다양한 규격 중 BV043은 해양무기체계의 종류 및 탑재장비의 설치위치, 그리고 충격의 방향에 따라 충격신호의 특성을 Fig. 2와 같은 의사속도 충격응답선도(Pseudo Velocity Shock Response Spectrum: SRS) 선도로 나타내고 있으며, 충격응답선도로 규정된 충격신호를 구현하기 위한 시간영역(Time-domain)에서의 이중충격파형 신호를 제시하고 있다. 시간영역에서의 이중충격파형은 식 (1)의 변환식을 통해 주파수 영역의 충격응답선도로 변환될 수 있다.

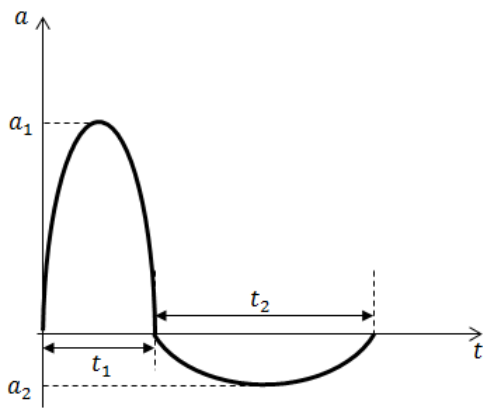


Fig. 1. Dual-pulse shock induced by UNDEX

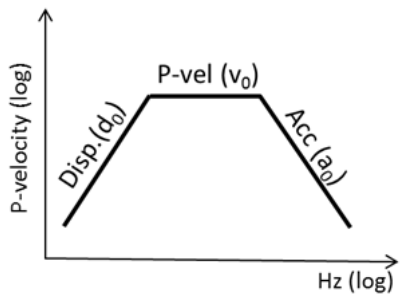


Fig. 2. Pseudo velocity shock response spectrum

$$a_1 = \frac{1}{2}a_0,\ a_2 = -\frac{\pi V_1}{2t_2}$$
$$t_1 = \frac{\pi V_2}{2a_1},\ t_2 = \frac{2d_0}{V_1} - t_1 \quad (1)$$
$$V_1 = \frac{2}{3}V_0$$

3. 의사속도 충격응답선도(Pseudo Velocity SRS)

충격응답선도는 Fig. 3과 같은 1자유도 진동계로 구성된 계를 가상하고 충격입력이 가해졌을 때, 각 1자유도 진동계의 최대응답을 도시한 것이다.

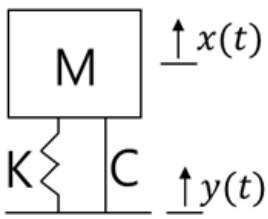


Fig. 3. 1-Degree of freedom vibration system

본 연구에서는 의사속도 충격응답선도를 결과분석에 이용하였으며, 의사속도 충격응답선도는 1자유도 계의 최대 상대변위에 고유진동수(w_n)를 곱한 값을 고유진동수에 대응시키면 얻을 수 있다. 의사속도라고 표현하는 이유는 1자유도 진동계의 감쇠의 유무에 관계없이 최대 상대변위에 고유진동수를 곱하면 속도차원을 갖기 때문에 의사속도라고 부른다.

의사속도 충격응답선도에서 변위-속도-가속도가 주파수에 대한 의사속도(Pseudo-velocity) 함수로 나타내어 지는 것에 대한 이해는 다음과 같이 할 수 있다.

해당 1자유도 진동계에서 상대변위 $z(t)$를 식 (2)로 정의하고, 상대변위 $z(t)$에 대한 운동방정식은 식 (3)와 같이 정의할 수 있다.

$$z(t) = x(t) - y(t) \quad (2)$$

$$M\ddot{z}(t) + C\dot{z}(t) + Kz(t) = -M\ddot{y}(t) \quad (3)$$

위 식 (3)의 해는 식 (4)와 같이 충격(Force($f(t)$)과 단위충격응답(Unit impulse response($h(t)$))을 정의하고 식 (5)의 컨볼루션 적분(Convolution integral)으로 구해질 수 있다[9].

$$f(t) = -M\ddot{y}(t), h(t) = \frac{1}{Mw_d}e^{-\zeta w_n(t)}\sin w_d t \quad (4)$$

$$z(t) = \int_0^t f(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (5)$$

상대변위 $z(t)$는 위의 과정을 통해서 식 (6)와 같이 구해진다.

$$z(t) = -\frac{1}{w_d}\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{-\zeta w_n(t-\tau)}\sin w_d(t-\tau)d\tau \quad (6)$$

식 (6)의 상대변위 $z(t)$에 따라 의사사속도는 식 (7)과 같이 구해진다.

$$S_v(\text{의사속도}) = w_n z_{\max} \quad (7)$$
$$= w_n[-\frac{1}{w_d}\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{-\zeta w_n(t-\tau)}\sin w_d(t-\tau)d\tau]_{\max}$$

따라서 Fig. 2의 의사속도 충격응답선도 상의 변위-속도-가속도는 주파수에 대한 의사속도함수로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$S_d(\text{변위}) = |z(t)|_{\max} = \frac{S_v}{w_n}$$
$$S_v(\text{속도}) = |\dot{z}(t)|_{\max} \quad (8)$$
$$S_a(\text{가속도}) = |\ddot{z}(t)|_{\max} = w_n S_v$$

4. 수직형 충격시험장비

4.1 수직형 충격시험장비의 구성

본 연구에서 사용된 수직형 충격시험장비의 개념은 Fig. 4와 같으며, 장비의 구성품은 Table 1과 같다.

해당 수직형 충격시험장비는 네덜란드 응용과학연구소 TNO에서 충격시험에 사용하는 장비와 동일한 개념과 동일한 성능으로 제작된 장비로서 수중폭파에 의해 발생되는 이중충격파형을 지상에서 모사할 수 있는 충격시험장비이다. 해당 장비의 주요 구성품은 디스크

스프링으로 구성된 가속/감속 스프링과 파단볼트이다. 가속/감속 스프링은 각 8열로 구성되어 있으며, 장비에 이용되는 디스크 스프링은 Schnorr GmbH사의 디스크 스프링으로 스프링 하나의 강성은 66.6 MN/m이다. 원하는 강성을 구현하기 위해서 해당 디스크 스프링을 그에 맞게 적절히 적층하여 가속/감속 스프링의 강성을 설정한다. 파단볼트는 가속스프링이 압축되며 원하는 충격에너지를 발생시킬 수 있는 탄성에너지가 저장될 때까지 상부의 이동부분이 움직이지 않도록 하여 충격이 발생하지 않게 잡아주는 역할을 한다. 실제 충격시험에서는 3가지 강도의 파단볼트가 사용되며, 구현하고자 하는 충격에너지 레벨을 고려하여 파단볼트를 선정한다.

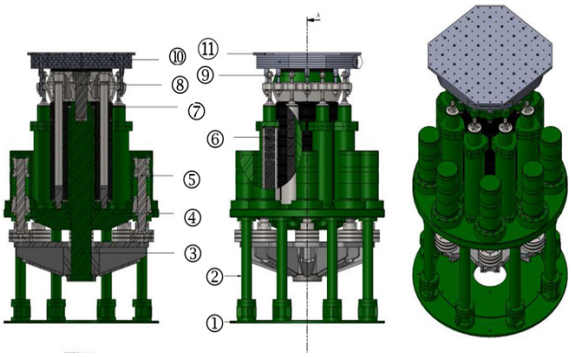


Fig. 4. The vertical shock test machine

Table 1. The components of shock test machine

번호	명칭
1	Base
2	Vertical Supporter
3	Central Moving Part
4	Fixed Plate
5	Hydraulic part
6	Deceleration Spring
7	Acceleration Spring
8	Break Bolt
9	Traverse
10	Aluminium Layer
11	Test table

4.2 수직형 충격시험장비의 구동원리

수직형 충격시험장비를 이용한 충격시험에서의 충격신호는 디스크 스프링으로 구성된 가속/감속 스프링의 강성과 가속 스프링의 압축거리(Stroke)에 의해서 결정된다. 수직형 충격시험장비의 구동원리는 간략하게 Fig. 5와 같이 설명할 수 있다. 원하는 충격신호를 구현하기 위한 충분한 에너지가 가속스프링의 압축에 의해 저장될 때까지 파단볼트는 파단 되지 않아야 하며, 파단볼트가 파단 되면서 구속되어 있던 장비의 상부부분이 가속되며 1차 충격이 발생된다. 1차 충격 발생 후 가속된 상부 부분은 감속 스프링의 압축에 의해 감속되었다가 스프링의 팽창에 의해 2차 충격을 발생시킨다.

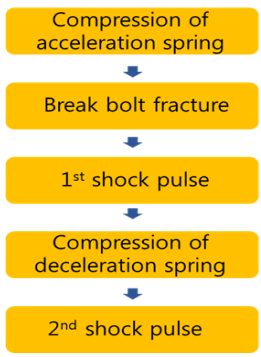


Fig. 5. The operation step of shock test machine

5. 수직형 충격시험장비를 이용한 충격시험

5.1 시험조건

앞서 소개된 수직형 충격시험장비를 이용하여 실제 이중충격파형 충격시험을 수행하였다. 수중폭파에 의한 내충격설계 규격에 요구된 목표신호 중 구현하고자 하는 신호를 선정하고 해당 신호를 구현하기 위해서 수직형 충격시험장비의 동적거동분석을 통하여 시험조건을 도출하였다. 해당 수직형 충격시험장비의 동적거동은 가속스프링의 압축 시 스프링에 저장된 탄성에너지는 파단볼트가 파단 된 후 1차 충격을 발생시키는 이동부분의 운동에너지로 모두 변환 된다는 가정 하에 분석되었다. 수직형 충격시험장비로 목표신호를 구현하기 위해서 설정할 수 있는 시험조건변수는 가속/감속 스프링의 강성과 파단볼트가 파단되기 전 가속스프링이 압축될 수 있는 압축거리이다. 시험을 수행하기

위해서 참고한 충격시험규격상의 요구신호에는 시간영역에서의 1차 충격파와 2차 충격파의 주기 및 가속도 크기와 주파수 영역(Frequency-domain) 상의 SRS 신호가 제시 되어 있다. 제시된 요구신호를 만족시키기 위한 강성 및 압축거리는 아래 Table 2와 같이 도출 되었다. 시험장비의 동적거동분석을 통해서 도출된 가속/감속 스프링의 강성 및 압축거리는 스프링에 저장된 탄성에너지가 충격을 발생시키는 운동부분의 운동에너지로 모두 변환된다는 가정 하에 도출되었으나, 실제 시스템에서의 에너지 손실은 불가피한 부분이다. 따라서 해당 사항을 반영하여, 실제 장비 조건에서는 이론적으로 도출된 강성조건보다 약 15 % 높게 설정하고 150 kg의 더미질량(Dummy mass)를 시험테이블(Test table)에 체결하여 시험을 준비하였다. 계측에 사용된 가속도계는 TE connectivity 사의 EGCS-B2-1000-L2M가 사용 되었으며, 자료획득장비(Data Acquisition System : DAQ)의 샘플링 주파수(Sampling frequency)는 20 KHz이다. Fig. 6과 같이 계측 위치는 시험장비의 시험테이블 상부이다.

Table 2. Test condition

구분	이론적 도출조건	실제 장비 조건	비고
K_1(MN/m)	1182.1	1355.6	$K1$: 가속 $K2$: 감속
K_2(MN/m)	133.9	148.1	
Stroke(mm)	2.8	2.8	

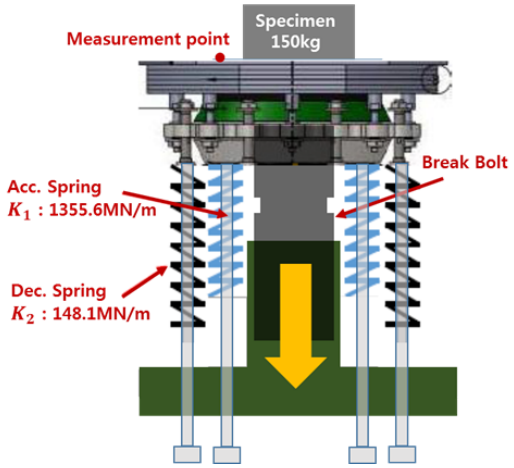


Fig. 6. The details of shock test

5.2 시험결과 및 분석

충격시험장비의 동적거동 분석을 통하여 도출한 시험 조건을 검증하기 위해서 주파수 영역상의 기준(Reference) 신호와 실제 시험을 통해서 얻어진 충격신호를 비교하였으며, 이와 더불어 Matlab을 이용한 시뮬레이션 결과와 실제시험 결과를 비교 하였다. 본 연구의 마지막 단계로 동일한 강성조건으로 가속 스프링의 압축거리(Stroke)만 변화시켜 충격시험을 수행하여 구현되는 충격신호를 비교 하였다.

5.2.1 시간영역과 주파수 영역 상의 시험결과

목표신호를 구현하기 위해 도출된 시험조건으로 충격시험이 수행되었으며 그 결과는 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 얻어졌다. Fig. 7은 시간영역상의 충격파형을 나타내며, Fig. 8은 주파수 영역상의 충격응답선도를 나타낸다. Fig. 7에 나타난 충격파형의 1차파는 약 32.9 g의 최대가속도와 0.009 sec의 지속시간(duration), 2차파는 약 22 g의 최대가속도와 0.021 sec 지속시간의 파형이 생성되었다. 시간영역상의 충격시험결과 그래프상의 1차파와 2차파 발생 이후 발생된 잔류진동은 수직형 충격시험장비의 감속스프링의 거동으로 인하여 나타는 결과이고 이러한 현상으로 인해 주파수 영역상의 충격응답선도 결과 그래프의 저주파 영역에서 피크(Peak) 현상이 발생된 것으로 판단된다. 실제로 시간영역상의 잔류진동의 발생주기의 평균은 약 0.058 sec이고, 충격응답선도 결과상에서는 약 17 Hz 주파수에서 피크점이 존재함을 알 수 있다. Fig. 8의 충격응답선도상에서 검은색 점선은 구현하고자 했던 목표신호를 나타내며, 붉은색 선은 시험을 통해 얻어진 충격신호의 충격응답선도를 나타낸다. 저주파 영역에서는 목표했던 신호보다 약간 높은 신호가 구현되었으며, 고주

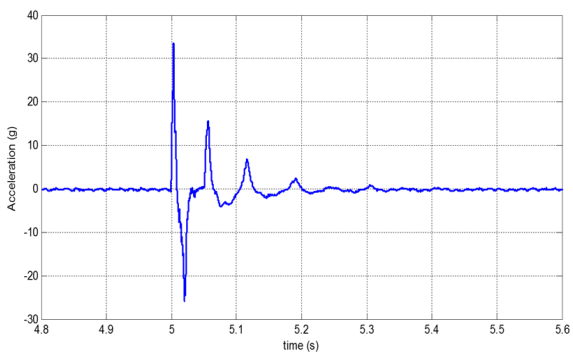


Fig. 7. The result of shock test : Time-domain

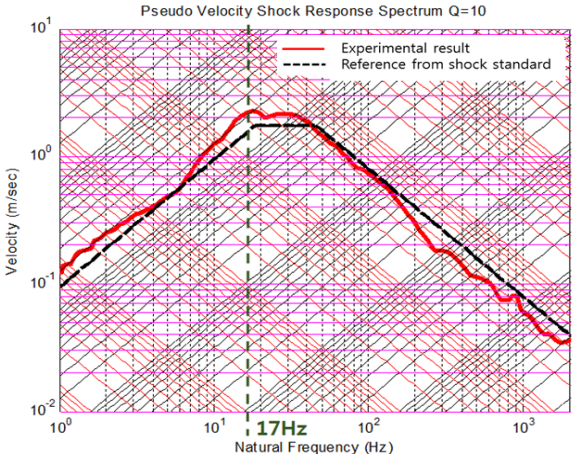


Fig. 8. The result of shock test : Frequency domain (SRS)

파 영역에서는 목표신호보다 약간 낮은 에너지레벨의 신호가 구현되었다. 하지만 전체적인 에너지 레벨을 고려하였을 때 장비의 동적거동분석을 통해 시험조건을 도출한 과정이 크게 예측치를 벗어나지 않음을 결과를 통해서 확인할 수 있다. 참고한 충격시험규격을 기준으로 한 일반적인 내충격성 검증시험은 충격응답선도상의 요구되는 에너지레벨 이상의 신호를 시험대상체에 가하여 충격발생 후에도 장비의 성능이 정상적으로 유지되는 것을 검증하는 것이 주목적이다.

5.2.2 시뮬레이션(Simulation) vs. 실제시험 결과

Fig. 9는 실제 충격시험결과와 시뮬레이션(Simulation) 결과를 비교 한 것이다. 붉은색 선은 실제 시험결과를 그리고 초록색 선은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션은 Matlab을 통해서 수행되었으며, 충격시험규격상의 1, 2차 파형의 가속도 크기 및 지속시간을 참고하여 시간영역에서의 이상적인 2차 충격파형을 생성시키고, 그것을 이용하여 주파수 영역상에 충격응답선도로 변환 하였다. 결과를 비교해보면 앞서 시험결과에서 언급한 감속스프링의 거동으로 인한 저주파 영역에서의 피크 현상과 약 200 Hz 이상의 영역에서 시뮬레이션 결과보다 조금 높은 신호가 구현 되었음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 200 Hz 이상의 영역에서의 높은 신호가 실제 시험에서 구현된 이유는, 실제 충격시험장비를 이용하여 충격시험을 할 경우 충격이 발생하기 전 유압구동 유닛으로 가속스프링을 압축하는 과정과 충격이 발생했을 때 기계적 시스템인 충격시험장비 고유의 기계적 잡음(Mechanical noise)가 계측 값에 영향을 끼친 결과로 예측된다. 하지만 이는 고주파 영역에서의 현상이고 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 크게 차이가 없으므로 실제 장비를 이용하여 충격시험을 수행하는 과정에는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

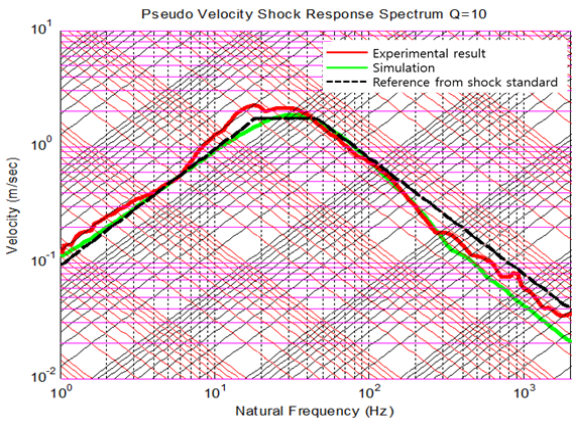


Fig. 9. Experimental result vs. Simulation

5.2.3 Stroke 변화에 따른 충격신호변화

앞에서도 언급하였지만 참고한 충격시험규격을 기준으로 하여 수행되는 충격시험의 경우 충격시험규격상에 제시된 기준신호와 가장 유사하되 그 이상의 충격을 시험대상체에 가하여 내충격성을 검증한다. Fig. 8의 결과를 보면 알 수 있듯이 검은색 점선으로 표시된 기준 신호보다 고주파영역에서 조금 낮은 신호가 구현되어 가속/감속 스프링의 강성은 그대로 유지하고, 가속 스프링의 압축거리만 조금 늘려서 시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그에 대한 결과는 Fig. 10과 같다. 여기서 초록색 선은 Fig. 8의 결과이며, 붉은색 선과 하늘색 선은 압축거리를 2 mm 늘려서 수행 한 시험결과를 나타낸다. 이 결과로부터 해당 충격시험장비의 동일조건 충격시험 재현성이 보장됨을 알 수 있다. 적은 양이지만 압축거리를 늘렸을 경우 압축거리를 늘리기 전의 시험결과와 비교했을 때, 조금 더 높은 에너지 레벨의 충격신호가 구현되었음을 알 수 있었다. 하지만 저주파 영역과 비교했을 때 고주파 영역에서의 효과는 크지 않음을 알 수 있다. 이로부터, 전체적인 에너지레벨을 올리기 위해서 압축거리를 늘리는 것이 효과가 있지만 주파수 영역에 따라서 좀 더 세밀한 신호구현을 위해서는 압축거리 뿐만 아니

라 가속/감속 스프링의 강성을 적절히 함께 변경하여 시험을 수행해야 함을 알 수 있다.

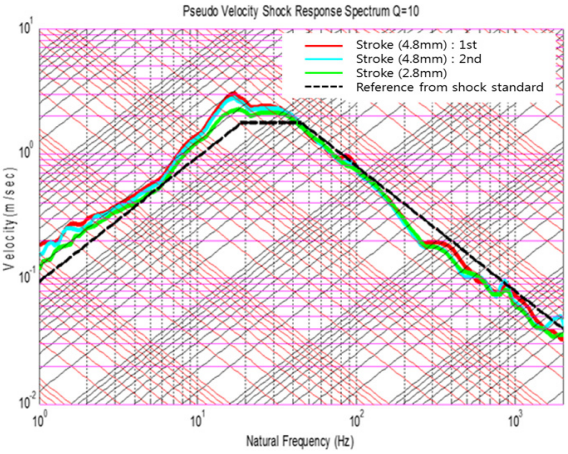


Fig. 10. The shock test result with different stroke

6. 결 론

네덜란드 응용과학연구소 TNO와의 기술협력으로 제작된 수직형 충격시험장비에 대한 소개와 해당 장비를 이용한 충격시험 및 그 결과를 소개하고 분석하였다. 충격시험 규격에 제시된 충격신호를 구현하기 위해서 장비의 동적거동분석을 통해 가속/감속 스프링의 강성 조건 및 압축거리 등의 시험 조건을 도출하였고 도출된 조건으로 장비를 설정하여 시험을 수행하였다. 그 결과, 목표로 했던 충격신호에 근접한 신호를 구현할 수 있음을 확인하였고, 이는 시뮬레이션 결과와도 유사함을 확인할 수 있었으나, 저주파영역과 고주파 영역에서 약간의 차이는 발생됨을 알 수 있었다. 하지만 이는 실제 기계적 시스템이 갖는 고유의 특성을 이상적인 시뮬레이션 과정으로 완벽히 모사할 수 없다는 것을 고려했을 때, 시험적 결과와 해석적 결과가 상당히 일치한다고 판단된다. 또한 압축거리를 증가시켜 구현된 신호의 특성을 분석하였고, 압축거리가 증가됨에 따라 전체적인 에너지 레벨은 증가하였음을 확인 할 수 있었으나, 고주파 영역에서의 신호조절 효과는 크지 않음을 알 수 있었다. 이를 통해 더욱 정확하고 세밀한 요구신호 구현을 위해서는 압축거리 뿐만 아니라 가속/감속 스프링의 강성도 적절히 조절하여 충격신호를 조절한다면, 보다 정확한 요구신호 구현 및 신뢰성 높은 충격시험을 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

References

[1] Military Specification, BV043, “Germany Defence Naval Ship Construction Specification for Shock Safety,” 1985.

[2] Military Specification, MIL-S-901D, “Shock Tests, H.I(High Impact) Shipboard Machinery Equipment and Systems. Requirements for,” 1989.

[3] G Wang, Y Xiong, W Tang, “A Novel Heavy-weight Shock Test Machine for Simulating Underwater Explosive Shock Environment” Int. Journal of Mechanical Sciences, Vol. 77, pp. 239-248, 2013.

[4] C. W. Shul, T. H. Kim, M. S. Yang, and G. S. Lee, “Development of Large Scale Heavy Weight Shock Testing System,” Proceedings of KSME Conference, pp. 377-382, 2014.

[5] Shul C. W., Kim T. H., Kim, Y. J., Yang, M. S. nd Lee G. S, H. H., “Feasibility Study on Development of Horizontal Type Shock Testing Machine Using MR Damper,” Proceedings of KSAS Annul Conference, Vol. 2013, No. 11, pp. 1075-1078, 2013.

[6] T. H. Kim, C. W. Shul, M. S. Yang, and G. S. Lee, “An Analytic Investigation on the Implementation Method for Required Signal of Heavy Weight Shock Test Machine,” Proceedings of KSME Annul Conference, pp. 400-405, 2014.

[7] M. S. Kang, C. W. Shul, “A Sequential Design of Dual Pulse Generation System Based on Dynamic Analysis of Pulse Shape,” Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 1, pp. 98-107, 2017.

[8] T. H. Kim, J. S. Bae, C. W. Shul, “Investigation on the Parameter Determination and Implementation of a Dual-Pulse Shock Test Machine Using a MR Damper,” Journal of Mechanical Science and Technology, 30(12) pp. 5381-5387, 2016.

[9] Gaberson, H. A., “The Pseudo Velocity Shock Spectrum Rules and Concepts,” Proceedings of the 60th Meeting of the Machinery Failure Prevention Technology Society, pp. 369-401, 2006.