

MIL-S-901 중간중량 충격시험기의 하중특성에 관한 고찰

정 정 훈 · 김 병 현* · 허 영 철*

Review on the Shock Characteristics of the MIL-S-901 Medium Weight Shock Machine

J. H. Chung, B. H. Kim and Y. C. Huh

ABSTRACT

All critical equipment installed aboard naval ships and submarines is required to be shock-qualified by tests on the MIL-S-901 shock test machines where testing is practical. The intent of the shock requirements is to produce combat vessels which are resistant to the underwater explosion weapon attack. To efficiently design equipment for passing a series of shock tests, the shock environment of the shock test machine should be clearly identified. In this paper, the shock characteristics of the MIL-S-901 Medium Weight Shock Machine(MWSM) are reviewed, based on the existing test data. An analytical model for the MWSM is also discussed.

1. 서 론

함정의 생존성(survivability) 측면에서 가장 중요한 요소 중의 하나인, 적의 예상되는 비접촉 수중 폭발 공격에 대한 대상함의 내충격 안전성 확보를 위하여 각국 해군에서는 함정의 전투 및 운항 성능에 필수적인 탑재장비에 대해 가능한 한 충격시험을 통하여 내충격 성능을 검증하도록 요구하고 있다. 한국 해군에서도 미국 해군의 탑재장비에 대한 충격사양인 MIL-S-901[1]에 따라 함정 탑재장비의 내충격 성능을 검증 받도록 장비제작사에게 엄격히 요구하고 있다.

일반적으로 충격시험을 규정하는 방법은 다음과 같은 3가지 방법 즉, 첫 번째는 충격하중 시간이력

을 규정하는 방법, 두 번째는 충격응답스펙트럼을 규정하는 방법, 세 번째는 충격시험기 자체 및 시험절차를 규정하는 방법으로 분류할 수 있다[2]. 첫 번째와 두 번째 방법은 시험체의 중량이 매우 작거나 시험체가 충격하중에 대해 강체거동을 하는 경우를 제외하고는 시험체와 충격시험기의 상호작용(interaction)으로 인해 충격시험기가 규정된 충격하중 시간이력이나 충격응답스펙트럼을 구현하는데 있어서의 허용오차 폭이 크지 않으면 원칙적으로 불가능한 시험방법이다. MIL-S-901에 의한 충격시험은 상기 세 번째 시험방법으로서, Table 1에 보인 바와 같이 시험보조장치(충격시험기에 대상장비를 취부할 fixture 또는 mount, 각종 볼트 및 너트 포함)를 포함한 시험대상 장비의 총 중량에 따라 충격시험을 분류하고, 각 충격시험을 위한 충격시험기와 시험절차를 규정하고 있다. 따라서 MIL-S-901 충격시험에서는 원칙적으로 충격시험기

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

의 충격하중특성이나 시험대상 장비의 충격응답특성을 파악하기 위한 계측이 요구되지 않기 때문에, 수십 년간 합정용 탑재장비의 내충격 성능검증에 사용되어온 이들 MIL-S-901 충격시험기의 하중특성에 대한 연구사례나 시험데이터 축적이 미국 내에서조차 별로 이루어지지 않았으며, 국내의 경우에는 거의 전무한 실정이다. 이로 인해 국내의 합정용 탑재장비 제작사들은 MIL-S-901 충격사양을 만족해야 하는 장비의 내충격 설계, 제작에 많은 기술적 어려움을 겪고 있다.

본 고에서는 MIL-S-901 충격시험기 중에서 현재 국내에서 수요가 가장 많은 중간중량 충격시험기의 하중특성을 미국에서 기 수행한 시험결과[3,4]를 바탕으로 검토하였다. 아울러 대상장비의 내충격 설계를 위해 MIL-S-901 충격시험 시에 장비가 받게 될 최대충격가속도를 예측할 수 있는 충격시험기-장비 연성계의 간략화 해석모델에 대해서도 검토하였다.

2. MIL-S-901 중간중량 충격시험기 개요

MIL-S-901 중간중량 충격시험기는 Fig. 1에 보인 바와 같이 3,000lb의 충격해머가 180°보다 큰 각(최대 270°)으로 스윙하여 4,500 lb의 충격시험대(anvil plate) 바닥 중앙을 가격하여 충격을 발생시키는 기계적 장치이다. 충격시험대는 직경 12.2 인치 블트에 의해 받침대와 연결되어 있으며, 받침대는 coil spring으로 지지된 콘크리트 블록과 연결되어 있다. 충격시험대는 받침대와의 연결을 위한 앵커볼트에 의해 수직방향으로 최대 3인치까지 움직일 수 있으며(MIL-S-901 충격시험에서는 동일 시험대상 장비에 대해 충격시험대의 허용변위를 3 인치와 1.5인치로 각각 세팅하여 시험하도록 되어 있음), 시험대상 장비를 취부하는 면은 5ft × 5ft 크기의 정팔각형 모양으로 되어 있다.

충격시험대는 충격해머가 가격하는 순간 수직상방으로 순간속도를 갖고 운동하기 시작하며 운동변위가 허용변위에 도달하면 변위 stopper와 충돌하며, 이 순간 중력에 의한 자유낙하보다 훨씬 빠른 속도로 수직 하방으로 낙하한다. 변위 stopper와 충돌시 충격시험대와 장비의 운동위상에 따라 대상장비는 충격해머의 가격에 의한 충격가속도 보다도 훨씬 큰 충격가속도를 받을 수 있다. MIL-S-901 중간중량 충격시험에서는 시험대상 장

비를 직접 충격시험대 위에 취부하는 것이 아니라 실제 탑재되는 함정 선체구조를 모사하기 위해 시험대상 장비를 길이 5ft, 깊이 4인치 standard channel(단위길이당 중량 : 7.25lb/ft) 또는 carbuilding channel(단위길이당 중량 : 13.8 ft/lb)에 취부하고, 이를 충격시험대 양단에 직접 취부된 2개의 길이 5ft, 깊이 7인치 shipbuilding channel base(단위길이당 중량 22.7lb/ft) 또는 fabricated channel base에 취부하도록 되어 있다. MIL-S-901에서는 시험대상 장비를 channel base에 취부하기 위한 channel의 수를 장비중량과 마운트볼트 간격에 의해 규정하고 있으며, standard channel 2개가 carbuilding channel 1개에 해당한다.

한편, Fig. 1에서 보는 바와 같이 중간중량 충격시험기는 1축 즉, 수직방향으로만 가진할 수 있기 때문에 장비의 횡방향(athwartship direction)으로도 충격이 전달될 수 있도록 30° 경사진 channel base를 충격시험대에 취부하고, 이 위에 channel에 고정된 장비를 취부하는 30° 경사 충격시험을 아울러 요구하고 있다.

충격시험을 위한 충격해머 높이와 관련해서는 충격시험대 위의 총중량 즉, 장비의 중량과 취부장치(channel base, base, 블트 및 너트)의 중량의 합에 따라 최소 및 최대 높이를 규정하고 있으며 시험대상 장비의 운전조건 각각에 대해 최소 6회의 충격을 가하도록 요구하고 있다(수직시험 3회-충격시험대 허용변위 3인치, 최소, 최대 높이에서 각각 1회, 허용변위 1.5인치, 최대높이에서 1회; 같은 방법으로 30° 경사시험 3회).

3. MIL-S-901 중간중량 충격시험기의 하중특성

본 절에서는 미해군연구소에서 실제 장비대신 강체모델을 사용하여 수행한 기 시험결과[3,4]를 토대로 중간중량 충격시험기의 하중특성을 고찰한다.

Fig. 2에는 충격해머 충돌속도($= \sqrt{2gh}$, g : 중력가속도, h : 충격해머 낙하높이)와 이로 인한 충격시험대 초기속도의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보듯이 충격시험대의 초기속도는 충격해머 충돌속도 즉, 충격해머 낙하높이에 선형적으로 비례(기울기는 약 0.545)함을 알 수 있다. 또한 충격시험대의 초기속도는 2절에서 기술한 channel에

취부된 시험체의 중량에는 거의 무관함이 확인되었다. 그러나 Fig. 3에 보인 바와 같이 시험체의 속도는 시험체의 중량이 커짐에 따라 감소함을 알 수 있으며, 충격해머의 낙하높이가 높을수록 중량 증가에 따른 감소량이 크고, 같은 낙하높이에서는 중량이 커질수록 감소량이 줄어듬을 알 수 있다.

Fig. 4는 충격해머 충돌속도와 충격시험대의 최대가속도에 대한 시험결과를 보여주고 있다. Fig. 4에는 계측된 충격신호를 각각 1,000Hz 및 300Hz의 저역통과필터(low-pass filter)를 사용하여 얻은 시험결과를 함께 보여주고 있다. Fig. 4에서 보듯이 충격시험대의 최대가속도는 초기속도와 마찬가지로 충격해머 충돌속도에 선형적으로 비례함을 알 수 있으며, 이 경우에도 channel에 취부된 시험체의 중량에는 거의 무관함이 확인되었다. 또한 300 Hz와 1,000Hz의 저역통과필터를 사용하여 얻은 최대충격가속도 값의 큰 차이로부터 충격해머의 충돌에 의한 충격시험대의 거동에는 상대적으로 고주파성분이 많음을 알 수 있다.

Fig. 5에는 충격시험대에서 계측된 충격신호의 충격응답스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 5에서 보듯이 주파수 범위 10~1,000Hz 사이에서 충격시험대의 운동은 velocity-shock(순간적인 속도변화에 의한 충격으로서, 이의 충격응답스펙트럼은 주파수에 상관없이 일정하며, 그 크기는 순간 속도변화량과 같음)으로 간주할 수 있다. 한편, 10Hz 이하에서는 변위가 일정하며 그 크기는 충격시험대의 허용변위(이 경우에는 3인치)에 접근하며, 1,000Hz 이상에서는 가속도가 일정하며, 그 크기는 계측된 원형(raw) 충격신호의 최대가속도 크기로서 5,000~10,000g 범위의 값을 가짐을 알 수 있다.

4. MIL-S-901 중간중량 충격시험기의 간략화 해석모델

2절에서 기술한 바와 같이 장비가 탑재되는 함정 선체구조를 모사하기 위한 여러 종류의 channel로 이루어진 취부장치(mounting platform)의 강성에 비해 충격해머, 충격시험대 및 시험대상장비는 강체로 취급할 수 있기 때문에 중간중량 충격시험기를 Fig. 6에 보인 바와 같이 이상화할 수 있다[5]. 여기서 M_1 , M_2 , M_3 및 K 는 각각 충격해머의 질량, 충격시험대의 질량, 시험대상장비의 질량 및 취부장치의 강성을 나타낸다. 충격해

며 가격에 의해 구조에 심한 항복과 볼트연결부에 과도한 미끄러짐이 발생하지 않는다면 감쇠를 무시해도 타당하리라 판단된다.

Fig. 6과 같이 이상화된 1자유도계의 충격해머의 충돌시점에서부터 충격시험대가 허용변위에 도달해 변위 stopper와 충돌하기 직전까지의 거동은 다음의 운동방정식과 초기조건에 의해 기술될 수 있다.

• 운동방정식

$$\begin{aligned} M_2 \ddot{y}_2 + Ky_2 &= Ky_3 \\ M_3 \ddot{y}_3 + Ky_3 &= Ky_2 \end{aligned} \quad (1)$$

• 초기조건

$$y_2(0) = y_3(0) = \dot{y}_3(0) = 0, \quad \dot{y}_2(0) = U_2 \quad (2)$$

식 (1) 및 (2)로부터 충격해머의 충돌에 의해 시험대상 장비에 작용하는 최대가속도(g) G_I 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} G_I &= \frac{K | y_2 - y_3 |_{\max}}{gM_3} \\ &= \frac{\omega}{g} \frac{M_2}{M_2 + M_3} U_2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\omega = \sqrt{\frac{(M_2 + M_3)K}{M_2 M_3}}$, U_2 는 충격시험대의 초기속도로서 Fig. 2의 실험결과로부터 대략 $0.545 \times \sqrt{2gh}$ 로 추정할 수 있다.

한편, 충격시험대가 허용변위에 도달하여 변위 stopper와 충돌한 후의 거동을 기술하기 위해 충돌시의 시간을 0으로 하는 새로운 시간변수 T 와 그 때의 충격시험대의 변위를 0으로 하는 새로운 공간변수 Z_2 와 Z_3 를 도입하면 변위 stopper와의 충돌직후의 거동은 새로운 시간 및 공간변수에 대하여 식 (1)과 같은 형태의 운동방정식과 다음 식으로 주어지는 초기조건에 의해 기술될 수 있다.

• 초기조건

$$\begin{aligned} Z_2(0) &= 0, \quad \dot{Z}_2(0) = -\alpha \dot{Y}_{2s} \\ Z_3(0) &= Y_{3s} - Y_{2s} = \Delta Y_s, \quad \dot{Z}_3(0) = \dot{Y}_{3s} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$Y_{2s} = y_2(t_s), \quad \dot{Y}_{2s} = \dot{y}_2(t_s),$$

$$Y_{3s} = y_3(t_s), \quad \dot{Y}_{3s} = \dot{y}_3(t_s) \text{ 이고}$$

α 는 충돌반발계수로서 대략 0.4~0.6사이의 값을 갖으며, t_s 는 충격시험대와 변위 stopper가 충돌할

때까지의 절대시간이다.

이상으로부터 stopper와 충돌에 의해 시험대상장비에 걸리는 최대가속도(g) G_{II} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{G_{II}}{G_I} = \frac{|\dot{y}_2 - \dot{y}_3|_{\max}}{|\ddot{Z}_2 - \ddot{Z}_3|_{\max}} \quad (5)$$

$$= \sqrt{\left[\left(\frac{1-\alpha P}{1+P} \right) \cos \omega t_i - \left(\frac{1+\alpha}{1+P} \right) \right]^2 + [\sin \omega t_i]^2}$$

여기서 $P = \frac{M_3}{M_2}$ 이다.

식 (3)과 (5)로부터 MIL-S-901 충격시험에 의한 시험대상 장비에 작용하는 최대가속도를 추정할 수 있으며, 추정된 충격가속도에 대상장비의 질량을 곱한 값을 등가 정적하중으로 택해 내충격 설계를 수행할 수 있다.

5. 맷음말

본 고에서는 MIL-S-901 충격시험기 중에서 현재 국내에서 수요가 가장 많은 중간중량 충격시험기의 하중특성과 충격시험기-장비 연성계의 1자유도 간략화 모델을 통하여 시험대상 장비가 받게 될 최대충격가속도를 손쉽게 예측할 수 있는 방법에 대해 기존의 연구결과를 토대로 검토하였다.

본 검토내용은 MIL-S-901 중간중량 충격시험 사양을 만족하는 합정용 탑재장비의 내충격 설계에 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다. 아울러 한국기계연구원에서 국내 장비제작사의 하나인 케이티전기(주)로부터 무상양여를 통해 1999년 10월에 이전, 설치한 MIL-S-901 중간중량 충격시험기에 대해 현재 진행중인 성능검증시험을 위한 참고자료로 활용할 예정이며, 본 시험결과는 추후 발표할 기회를 갖고자 한다.

참고 문헌

- [1]MIL-S-901D, Shock Tests. H.I.(High-Impact) Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for, 1989. 3.
- [2]C.M. Harris, Shock and Vibration Handbook(Fourth Edition), Chapter 26, 1995.
- [3]I. Vigness, "Navy High-Impact Shock Machines for Lightweight and Mediumweight Equipment", NRL Report 5618, 1961. 1.

[4]E. W. Clements, "Shipboard Shock and Navy Devices for its Simulation", NRL Report 7396, 1972. 7.

[5]W. P. Welch and P. D. Saunders, "Structural and Vibration Analysis of Navy Class High Impact, Medium Weight Shock Test", Proceedings of the 38th Shock and Vibration Symposium, 1968.

Table 1 MIL-S-901 Shock Tests

	Light Weight Shock Test	Medium Weight Shock Test	Heavy Weight Shock Test
Test Machine	LWSM	MWSM	SFSP or LFSP
Test Load's Weight	Up to 550lb	Up to 7,400lb	Up to 60,000lb (SFSP) Up to 400,000lb (LFSP)
Excitation	Three axis Hammer Impact (Top, Back, Side)	Single Axis Hammer Impact (Vertical)	4 Shots Underwater Explosions

Note : LWSM-Light Weight Shock Machine

MWSM-Medium Weight Shock Machine

SFSP-Standard Floating Shock Platform

LFSP-Large Floating Shock Platform

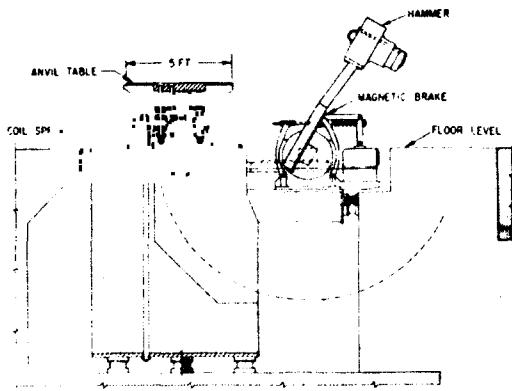


Fig. 1 MIL-S-901 High-Impact Shock Machine for Medium Weight Equipment

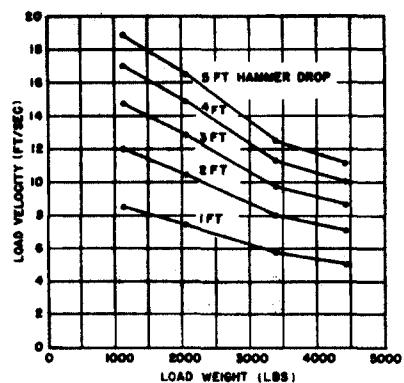


Fig. 4 Relations between the maximum load velocity and load weight

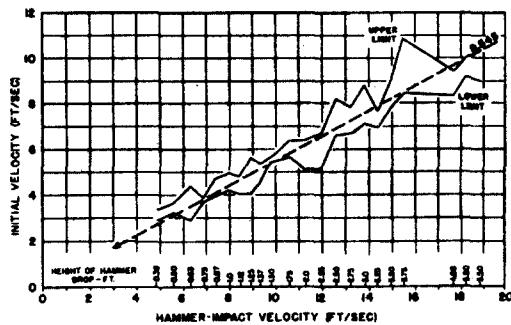


Fig. 2 Relations between the initial velocity of anvil table and hammer-impact velocity

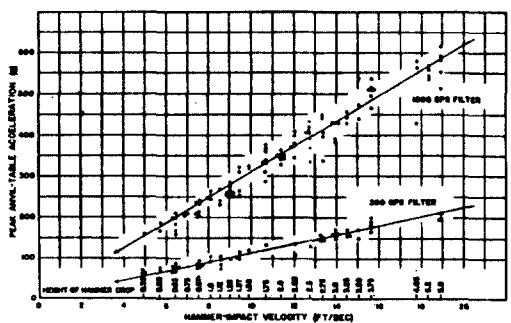


Fig. 3 Relations between the peak acceleration of anvil table and hammer-impact velocity

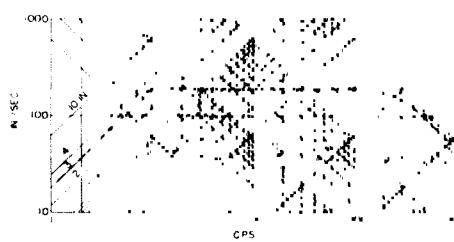


Fig. 5 Shock response spectrum for motion of the anvil table

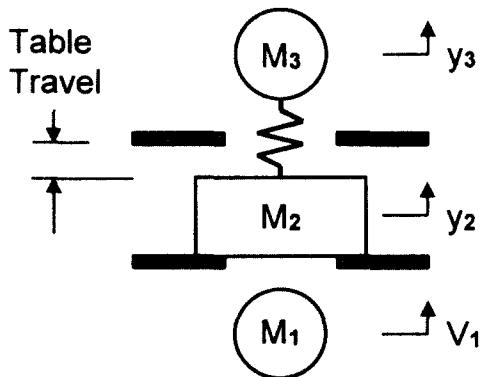


Fig. 6 Simplified mathematical model for Medium Weight Shock Machine