Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 27(2) : 213~220, 2017
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2017.27.2.213

한국소음진동공학회논문집 제 27 권 제 2 호, pp. 213~220, 2017
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

폭발볼트와 착화기의 파이로충격 계측 및 특성 분석

Pyroshock Measurement and Characteristic Analysis of Explosive Bolt and Pyrotechnic Initiator

이 주 호* · 황 대 현** · 장 재 경** · 이 응 조* · 김 동 진*** · 이 정 률** · 한 재 흥†

Juho Lee, Dae-Hyun Hwang, Jae-Kyeong Jang, YeungJo Lee, Dong-Jin Kim, Jung-Ryul Lee and Jae-Hung Han

(Received December 19, 2016 ; Revised January 26, 2017 ; Accepted January 26, 2017)

Key Words : Pyroshock(파이로충격), Explosive Bolts(폭발볼트), Pyrotechnic Initiator(파이로테크닉 착화기), Shock Measurement(충격량 계측)

ABSTRACT

Pyroshock produced by the pyrotechnic devices can induce failures in nearby electronic devices. To handle and mitigate pyroshock inducing problems, appropriate measurement of pyroshock is essential. In this study, pyroshock measurement technique is established using laser Dopper vibrometers (LDVs) and shock accelerometers. Pyroshock produced by the explosive bolts and the pyrotechnic initiators under various environments is measured. The characteristics of pyroshock including the effects of supporting structures, propagation form on thin plate, sensor (contact and non-contact) types are discussed.

1. 서 론

폭발볼트, 분리너트와 같은 파이로테크닉 분리 장치들은 높은 신뢰성, 저렴한 비용, 작은 크기 등의 장점으로 즉각적인 분리가 필요한 발사체, 미사일, 전투기 등 다양한 시스템에 적용되고 있다[1,2]. 하지만 파이로테크닉 장치에서 생성되는 파이로충격(pyroshock)은 주변 전자장비 탑재체 등에 치명적인 파손을 유발하여 주의가 필요하다[3]. 파이로충격은 일반적으로 크기와 주파수 특성에 따라 near-field, mid-field, far-field로 구분한다[4].

파이로충격으로 인한 문제를 방지하기 위해 주로 충격 절연계(shock isolator)를 탑재체와 구조물 사이에 장착하고 있으며, 형상기억 합금 메쉬 와셔 절연계와 같은 성능이 향상된 절연계도 꾸준히 개발되고 있다[5~7]. 또한, 파이로충격 생성 자체를 줄이기 위해 폭발볼트의 분리 신뢰도를 높여 화약 사용량을 줄이는 연구[8], 고폭약을 사용하지 않고 기계적 메커니즘을 이용해 분리하는 저충격 분리장치에 대한 연구[9] 등이 수행되고 있다. 수치 해석 기법(hydrocodes)을 이용하여 폭발볼트에서 생성되는 파이로충격을 예측하고 생성 메커니즘을 규명하는 연구도 수행되었다[10].

구조물에서의 파이로충격 전파에 관한 연구도 꾸

† Corresponding Author; Member, Dept. of Aerospace Engineering, KAIST
E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr
* The 4th R&D Institute, Agency for Defense Development
** Dept. of Aerospace Engineering, KAIST
*** Defence R&D Center, Hanwha Corporation

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

준히 수행되고 있다. 파이로충격 전파 해석은 유한요소법(FEM, finite element method)을 이용한 해석법[11]과 가상 모드 합성 기법(virtual mode synthesis)을 활용한 통계적 에너지 해석법(SEA, statistical energy analysis)[12]이 개발되어 사용되고 있다. 하지만, 유한요소법은 고주파수 구조 모드를 정확히 해석하기 위해서는 매우 큰 계산 비용을 필요로 하여 저주파수 대역의 진동 위주로 해석이 가능하고 통계적 에너지 해석법은 구조물을 하부 구조로 나누어 공간에서의 평균값을 계산하기 때문에 복잡한 구조물을 직접 해석 할 수 없다는 한계가 있다.

파이로충격 시험은 실제 파이로테크닉 장치를 이용하거나, 파이로충격 모사장치를 이용하여 수행되고 있다[13]. 파이로충격 모사장치는 주로 기계적 충격 방식으로 구성되며, 실제 화약을 사용하지 않아 비용이 절감되나 높은 주파수의 파이로충격을 모사하는데 어려움이 있다. 파이로충격 전파 관련 연구는 주로 시험을 통해 이루어지며, 정확한 계측이 필수적이다.

이 연구에서는 파이로충격 계측 기법을 정립하였으며, 이를 바탕으로 폭발볼트와 파이로테크닉 착화기의 파이로충격을 계측하였다. 계측된 결과로부터 각 파이로 장치의 파이로충격 특성과, 구조물에서의 파이로충격 전파 특성, 센서 특성 등을 분석하였다.

2. 파이로충격 계측 기법

2.1 파이로충격 계측

파이로충격 계측은 아래와 같은 기준서 (standards)를 바탕으로 수행되며, 이 연구에서는 이를 바탕으로 계측 기법을 정립하여 활용하였다.

- Pyroshock, United States Military Standard, MIL-STD-810G, Method 517.1, 2008.[3]
- Pyroshock Test Criteria, NASA Technical Standard, NASA-STD-7003A, 2011.[4]

일반적으로 파이로충격 측정을 위해 충격 가속도계를 이용한 가속도 측정을 수행한다. 하지만 near-field 에서는 잘못된 가속도계 선정으로 인해 가속도계가 파손되거나, 센서의 범위를 초과하거나, 가속도계 공진으로 인한 신호의 포화(saturation)가 발생하는 등 전체 스펙트럼에 대한 계측 결과의 신뢰성을 저해할 수 있다. 이러한 문제는 대개 파이로충격 환경에서 가진되는 주파수 범위 보다 매우 높은 고유진동수(1 MHz 이상)를 갖는 압전 저항형(piezoresistive) 가속도계를 활용함으로서 방지할 수 있다[3]. 또는, 충격 절연장치나 기계적 필터가 내장된 압전기형(piezoelectric) 가속도계를 활용할 수 있다. 이 연구에서는 23 kHz 기계적 필터가 내장된 PCB사의 350B03 충격 가속도계를 사용하였다.

최근에는 레이저 도플러 진동계(laser doppler vibrometer, LDV)를 이용한 파이로충격 계측도 많이 이루어지고 있다. LDV는 비접촉 방식으로, 표면에서 반사된 레이저를 도플러 효과를 이용하여 표면에서의 속도값을 계측한다. 접촉식 센서인 가속도계 등과 달리 구조물의 특성에 영향을 미치지 않으며, 센서 공진 문제가 없고, 원거리에서 측정이 가능하며, 작은 표면에서도 측정이 가능하기 때문에 파이로충격 계측에서 점차 사용이 되고 있다. 하지만 측정하는 표면이 크게 이동하는 경우 측정이 불가능하며, 장비의 가격이 비싸고, 파편, 폭발 부산물이 시야를 가리거나, LDV를 파손시킬 수 있는 경우에는 사용이 제한되는 단점이 있다. 이 연구에서는 Polytec사의 OFV-505 LDV를 사용하였다.

샘플링 주파수는 구하고자 하는 SRS의 최대 주파수보다 최소 10배 이상이어야 하며, 안티앨리어싱 필터 컷오프 주파수는 나이키스트 주파수의 절반 이하이어야 하며, 안티앨리어싱 필터 감쇠 경도는 60 dB/octave 이상이어야 한다[3]. 이 연구에서는 계측된 결과에 대역 통과 필터(10차 버터워스 필터)를 적용하여 계측 과정에서 발생하는 고주파수 노이즈, 앨리어싱 문제, 저주파수 신호 드리프트(drift) 문제를 해결하였다.

2.2 파이로충격 데이터 처리

파이로충격은 일반적으로 가속도 시간 이력과 그로부터 계산된 스펙트럼으로 나타낸다[4]. 주파수 특성을 확인하기 위해 가장 널리 쓰이는 스펙트럼은 충격 응답 스펙트럼(SRS, shock response spectrum)이다. 실제 하드웨어의 모드 정보와 감쇠 정보가 있다면 파이로충격 가속도 시간 이력으로부터 구조물의 응답을 계산할 수 있지만, 많은 경우 높은 고유진동수를 갖는 구조물에 대해서는 이를 정확히 알 수 없기에 관심 있는 주파수 대역 전체에 대해 계산을 수행한다.

SRS는 서로 다른 고유진동수를 갖는 일자유도(SDOF, single-degree-of-freedom) 시스템이 연결된 평판에 파이로충격 가속도가 가해진 경우, 각각의 일자유도 시스템에 발생하는 최대 가속도를 계산하여 이를 하나의 주파수-가속도 그래프에 나타낸 것이다. 이 중 양의 최대 가속도만 모은 것을 positive SRS, 음의 최대 가속도만 모은 것을 negative SRS, 절대값의 최대 가속도만 모은 것을 maximax SRS로 정의되며, 하나의 그래프로 나타내기 위해 maximax SRS가 일반적으로 사용된다. 일관성을 위해 $Q = 10$(감쇠비 $\zeta = 0.05$)로 가정한 후, 관심 있는 주파수 대역에 대해 1/12 옥타브 단위로 SRS를 계산한다[3]. 이러한 SRS를 계산할 수 있는 MATLAB 코드가 공개되어 있으며[14], 이 연구에서도 이를 개량하여 사용하였다.

3. 폭발볼트 파이로충격 계측

3.1 계측 시험 구성

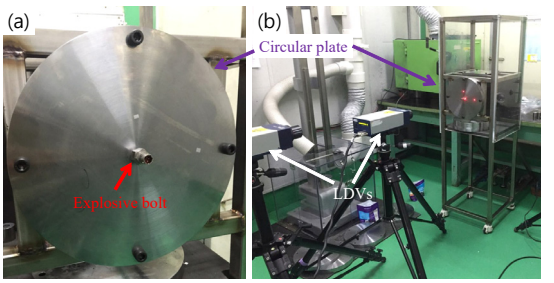
폭발볼트의 파이로충격 계측은 Fig. 1과 같이 세 대의 LDVs를 이용하여 수행하였다. 폭발볼트는 지름 300 mm인 탄소강 S45C 원형판의 중심에 치구를 이용하여 고정하였으며, 원형판의 두께는 22 mm, 32 mm 두 가지를 준비하였다. 파이로충격 계측 위치는 폭발볼트 중심축에서 11 mm, 50 mm, 90 mm 떨어진 위치로서, 원형판 표면에 수직한 방향의 속도를 계측하였다.

LDVs 정확성 향상을 위해 LDV 교정 장치 (Brüel & Kajær's calibration exciter type 4294)를 이용해 교정을 수행하였다. 샘플링 주파수와 샘플링 시간은 1 MHz, 30 ms로 설정하였으며, LDV 컨트롤러 및 결과 후처리에 100 Hz ~ 100 kHz 대역 통과 필터를 적용하였다.

이 계측 시험에서 사용된 폭발볼트는 리치컷형 타입으로, 국방과학연구소와 한화/방산이 개발하여 양산중인 제품이다. 볼트의 직경은 1/2 인치(12.7 mm)이며, 착화기가 고폭약(RDX, PETN)을 폭발시키고 볼트 몸체를 파손시켜 분리가 이루어지게 한다.

3.2 계측 결과 및 분석

파이로충격 계측은 두께 22 mm 원형판에 대해 3회 반복, 두께 32 mm 원형판에 대해 2회 반복 수행하였으며, 가속도 시간 이력과 충격 응답 스펙트럼을 Figs. 2, 3에 나타내었다. 각 구조물, 각 계측위치에서의 최대 진폭(peak-to-peak) 가속도는 Table 1에 정리하였다. 동일한 폭발볼트, 구조물의 경우 실험에 따라 약간의 차이는 있으며, 구조물의 형태 및 계측위치에 따라 파이로충격 값이 크게 변화하며 특히 얇은 구조물에서 높은 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 하지만, 파이로충격의 감쇠는 얇은 구조물에서 더 크게 발생하여 가속도의 크기가 빨리 감소하며,



(a) (b)

Fig. 1 Experimental setup for pyroshock measurement of explosive bolts

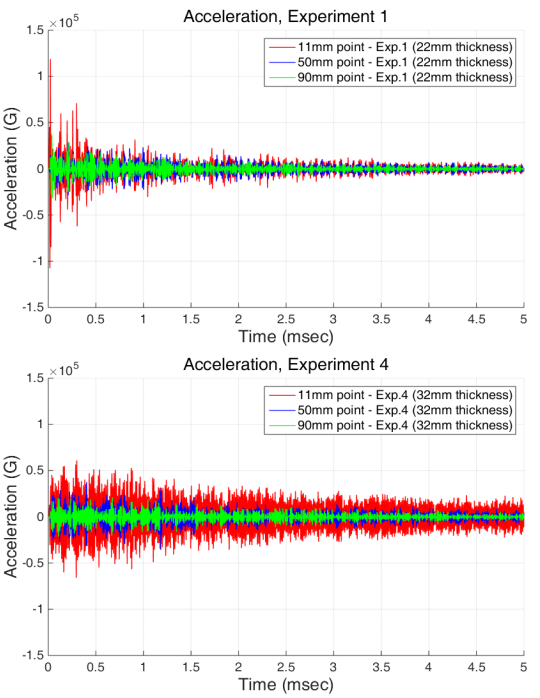


Fig. 2 Pyroshock measurement results of explosive bolts in terms of acceleration

Table 1 Maximum peak-to-peak acceleration

	11 mm point	50 mm point	90 mm point
Exp. 1 (22T)	226.5 kG	57.3 kG	69.8 kG
Exp. 2 (22T)	239.6 kG	72.5 kG	62.0 kG
Exp. 3 (22T)	230.5 kG	57.7 kG	63.3 kG
Exp. 4 (32T)	126.8 kG	73.3 kG	42.5 kG
Exp. 5 (32T)	131.7 kG	56.8 kG	47.8 kG

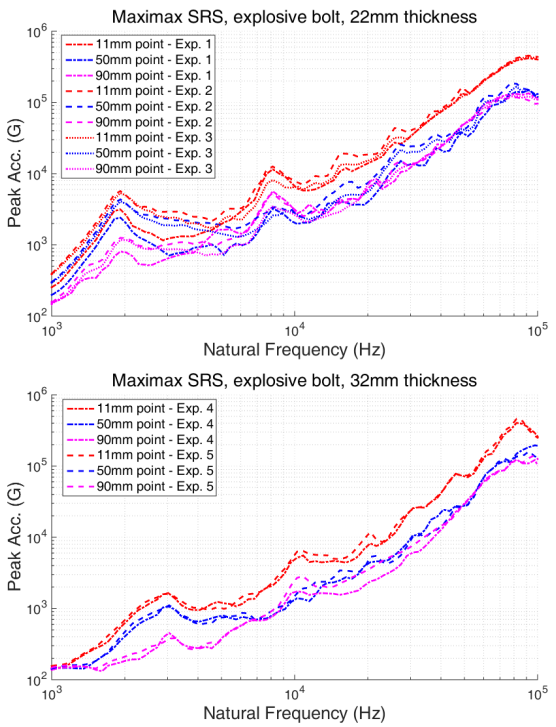


Fig. 3 Pyroshock measurement results of explosive bolts in terms of maximax SRS

두꺼운 구조물에서는 가속도의 크기가 오래 유지됨을 확인할 수 있다.

충격 응답 스펙트럼에서도 유사한 특성을 관찰할 수 있다. 다만, 충격 응답 스펙트럼은 최대 가속도에 주로 영향을 받기 때문에 감쇠에 의한 특성은 거의 나타나지 않으며, 최대 가속도 값이 큰 얇은 구조물에서의 충격 응답 스펙트럼이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 충격 응답 스펙트럼에서는 여러 개의 피크가 관찰되는데 이는 구조물의 진동 모드로 인한 것이다. 상용 FEM 코드를 이용한 원형판과 볼트의 2차원 모드 해석 결과, 두께 22 mm 원형판의 1차 및 2차 모드의 고유진동수는 2180 Hz, 7560 Hz이며, 두께 32 mm 원형판의 1차 및 2차 모드의 고유진동수는 3060 Hz, 9830 Hz로 계산되었다. 두께 22 mm 원형판과 볼트의 1차 및 2차 모드 형상과 계측 위치를 Fig. 4에 나타내었다.

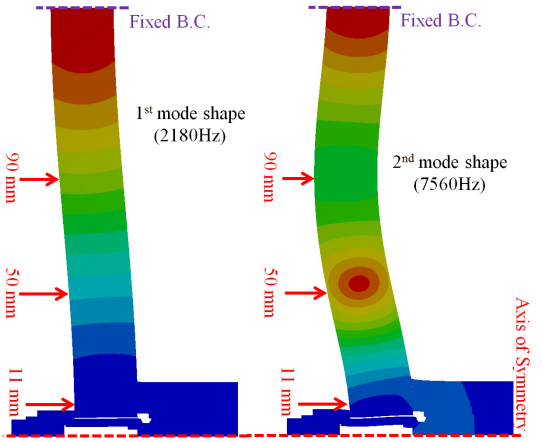


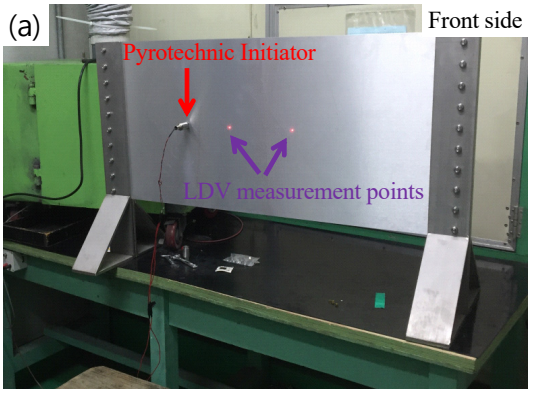
Fig. 4 Mode shapes of a 22 mm circular plate with a explosive bolt

충격 응답 스펙트럼에서도 이와 유사한 주파수에서 피크가 관측됨을 확인할 수 있다. 다만, 두 번째 피크 (2차 모드)의 경우 50 mm 위치에서는 잘 나타나지 않으며, 이는 50 mm 위치가 2차 모드의 마디선에 위치하기 때문이다.

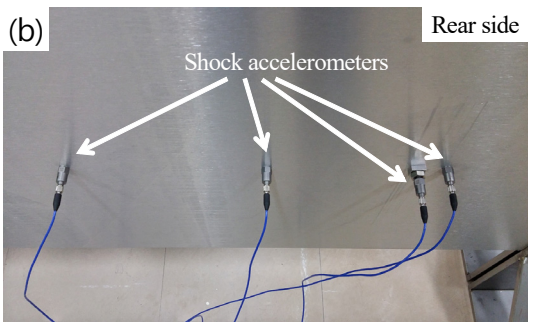
4. 파이로테크닉 착화기 파이로충격 계측

4.1 계측 시험 구성

파이로테크닉 착화기의 파이로충격 계측은 Fig. 5와 같이 네 개의 충격 가속도계와 세 대의 LDVs를 이용하여 수행하였다. 착화기는 길이 1 m, 폭 0.5 m, 두께 5 mm인 알루미늄합금 6061 평판에 스테인레스 강으로 제작된 치구를 이용하여 고정하였다. 파이로충격 계측 위치는 착화기 고정 위치에서 30 mm, 150 mm, 350 mm 떨어진 위치로서, 충격 가속도계를 체결할 수 있도록 나사형 구멍을 준비하였다. 착화기 치구를 고정하는 볼트에도 나사형 구멍을 준비하여 0 mm 위치에서의 파이로충격도 계측할 수 있도록 하였다. 충격 가속도계의 샘플링 주파수와 샘플링 시간은 100 kHz, 10 sec로 설정하였으며, 결과



(a)



(b)

Fig. 5 Experimental setup for pyroshock measurement of pyrotechnic initiators

후처리에 100 Hz ~ 10 kHz 대역 통과 필터를 적용하였다. 충격 가속도계 내부에는 고주파수 충격으로 인한 센서 보호를 위해 23 kHz 기계적 필터가 내장되어 있어 그 이상 주파수 성분을 갖는 신호는 계측이 되지 않으며, 10 kHz까지의 신호만 1 dB 오차 이내의 정확성을 보장[15]하기에 위와 같은 필터를 적용하여 부정확한 신호는 제거하였다.

이 실험에서 LDVs로는 충격 가속도계 체결 위치 반대쪽에서 충격 가속도계 아랫면의 속도를 직접 계측하여 충격 가속도계 결과를 검증하는데 활용될 수 있도록 하였다. 또한, 충격 가속도계 체결로 인한 특성을 확인하기 위하여 나사형 구멍이 없는 평판을 별도로 준비하여 충격 가속도계 없이 LDVs를 사용한 계측도 수행하였다.

이 계측 시험에서 사용된 착화기는 한화/방산이 개발하여 양산중인 제품(PC800)으로, ZPP(zirconium potassium perchlorate) 210 mg이 장약되어 있고 10 cc 부피에 800 psi 압력을 생성한다.

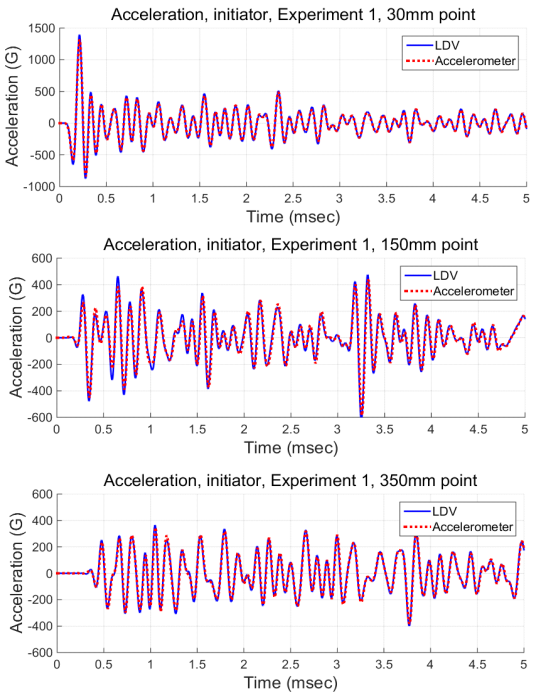


Fig. 6 Comparison of initiator pyroshock between LDVs and accelerometers

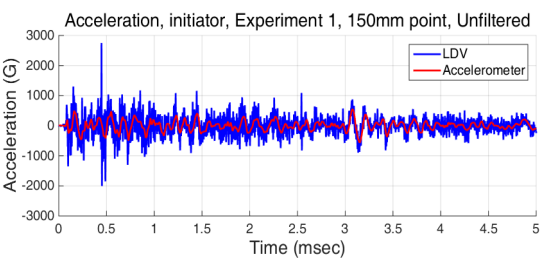


Fig. 7 Comparison of initiator pyroshock between sensors without band-pass filtering

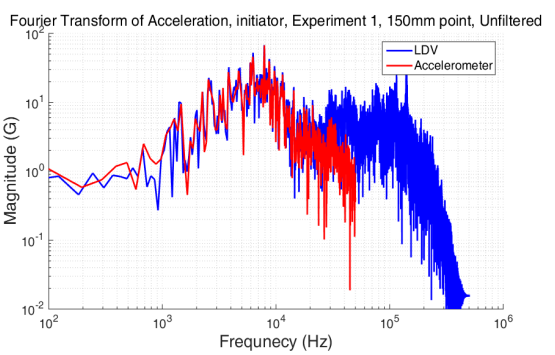


Fig. 8 Fourier transform of acceleration at 150 mm point using raw data

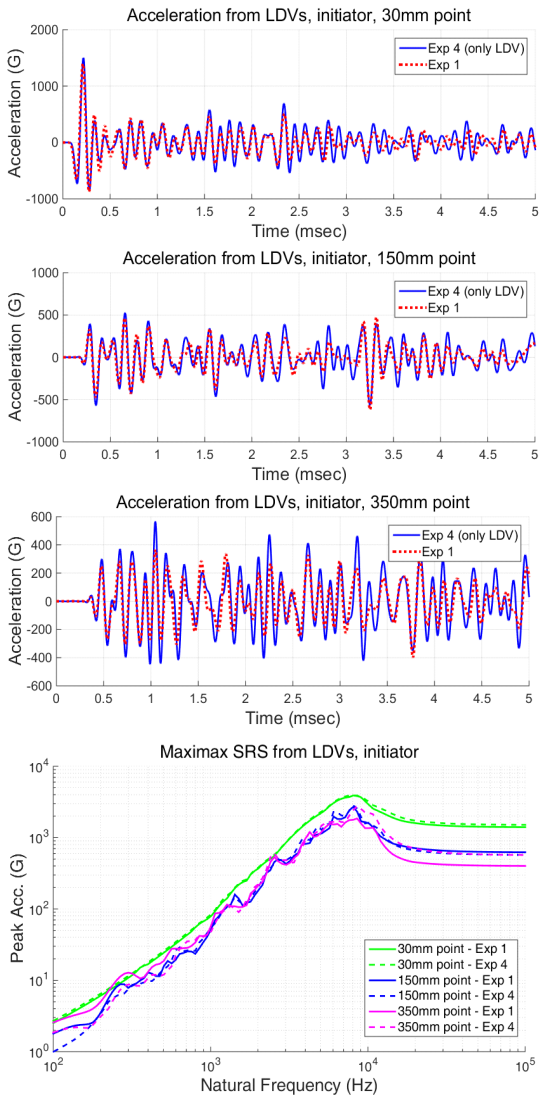


Fig. 9 LDV measurement results comparison between experiment 1 and 4

4.2 계측 결과 및 분석

파이로충격 계측은 나사형 구멍이 있는 평판에 대해 충격 가속도계와 LDVs를 이용하여 3회 반복(실험 1, 2, 3), 나사형 구멍이 없는 평판에 대해 앞, 뒷면 각 1회 반복 수행하였다(실험 4, 5). 동일한 조건에 대한 반복 실험을 통해 높은 반복성을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

우선, 동일한 대역 통과 필터(100 Hz~10 kHz)를 적용한 충격 가속도계와 LDVs 계측 결과를 Fig. 6에서 비교하였다. LDVs로 충격 가속도계 아랫면을

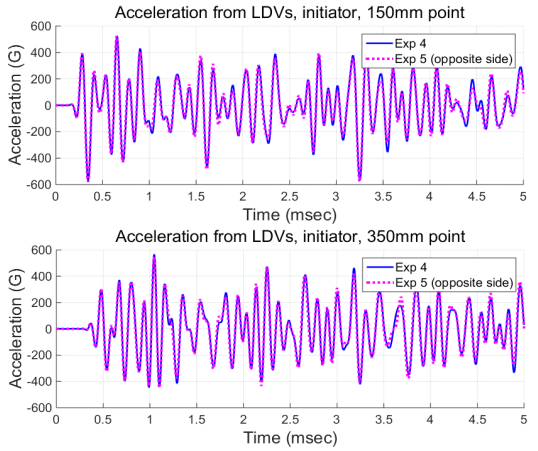


Fig. 10 LDV measurement results comparison between experiment 4 and 5

직접 계측하였기 때문에 거의 동일한 계측 결과를 얻을 수 있었다. 다만, 대역 통과 필터를 적용하지 않은 원자료(raw data)는 Fig. 7과 같이 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 충격 가속도계에 내장된 23 kHz 기계적 필터로 인해 그 이상 주파수 성분의 가속도는 계측되지 않기 때문이며 가속도 시간 이력의 푸리에 변환(Fig. 8)을 통해 쉽게 확인할 수 있다. 푸리에 변환 결과를 보면 23 kHz 이하에서는 충격 가속도계와 LDVs의 계측 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있으며, 그 이상의 고주파수 성분은 LDVs에서만 계측됨을 알 수 있다. 또한, 계측 위치가 착화기로부터의 멀어질수록 파이로충격이 도달하는데 걸리는 시간이 증가함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 평판에서의 파이로충격 전파 속도를 유추할 수 있다.

다음으로 실험 1과 4의 비교를 통해 접촉식 센서인 충격 가속도계가 파이로충격 전파에 미치는 영향을 Fig. 9와 같이 확인할 수 있다. 가속도계 부착으로 인해 해당 위치의 질량이 늘어난 효과가 나타나, 계측된 가속도 값이 상대적으로 감소함을 확인할 수 있으며, 질량 부가 효과(mass loading effect)[16]로 알려져 있다. 또한, 이러한 충격 가속도계의 영향은 가속도의 크기가 상대적으로 작은 350 mm 위치에서 크게 나타남을 확인할 수 있다. 충격 가속도계의 질량 부가 효과는 충격 응답 스펙트럼에서는 크게 나타나지 않기에, 충격 가속도계 계측으로도 충격 응답 스펙트럼을 신뢰성 있게 구할 수 있다.

마지막으로, 실험 4와 5의 비교를 통해 평판에서의 파이로충격 전파 특성을 분석 할 수 있다. 뒷면에서 계측된 실험 5의 결과는 실험 4와 반대 방향으로 계측되었으므로 −1을 곱해 보정한 후 Fig. 10에 비교하였다. 둘의 계측 결과는 매우 비슷하며, 이는 파이로충격이 평판에서 전파되어질 때 윗면과 아랫면이 같은 방향, 같은 크기로 움직임을 의미한다. 이는 굽힘파 (flexural wave)의 특성으로 파이로충격이 평판에서 굽힘파의 형태로 주로 전파되어짐을 확인할 수 있다. 굽힘파는 anti-symmetric 램파 (lamb wave)로도 알려져 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 충격 가속도계와 LDVs를 이용한 파이로충격 계측 기법을 정립하였으며, 폭발볼트와 파이로테크닉 착화기의 파이로충격을 반복적으로 계측하였다. 폭발볼트의 주변 구조물에 따른 파이로충격 특성을 분석하였다. 파이로테크닉 착화기에서 생성된 파이로충격의 얇은 평판 전파 특성을 분석하였으며, 충격 가속도계와 LDVs의 결과 비교 검증을 통해 계측의 정확성을 확인하고 각 센서의 한계와 특징을 분석하였다.

후 기

이 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

References

(1) Brauer, K. O., 1974, Handbook of Pyrotechnics, Chemical Publishing Co., New York.

(2) Bement, L. J. and Schimmel, M. L., 1995, A Manual for Pyrotechnic Design, Development and Qualification, NASA Technical Memorandum 110172.

(3) Department of Defense, 2008, Pyroshock, United States Military Standard, MIL-STD-810G Method 517.1.

(4) Ryschkewitsch, M. G., 2011, Pyroshock Test Criteria, NASA Technical Standards, NASA-STD-7003A.

(5) Youn, S.-H., Jeong, H.-K. and Han, J.-H., 2011, Comparisons of Isolation Performances for the SMA Mesh Washer Isolator with the Variation of Pre-compressed Displacement, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 162~168.

(6) Jeong, H.-K., Lee, J., Han, J.-H. and Wereley, N. M., 2016, Design of Frequency-tunable Mesh Washer Isolators Using Shape Memory Alloy Actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 27, No. 9, pp. 1265~1280.

(7) Yoon, S.-H., Jang, Y.-S. and Han, J.-H., 2010, Compressed Mesh Washer Isolators Using the Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, No. 4, pp. 407~421.

(8) Lee, J., Han, J.-H., Lee, Y. and Lee, H., 2015, A Parametric Study of Ridge-cut Explosive Bolts using Hydrocodes, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 16, No. 1, pp. 50~63.

(9) Hwang, D.-H., Lee, J., Han, J.-H., Lee, Y. and Kim, D., 2016, Numerical Analysis and Simplified Mathematical Modeling of Separation Mechanism for the Ball-type Separation Bolt, Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 20, No. 3, pp. 63~70.

(10) Lee, J., Hwang, D.-H., Jang, J.-K., Kim, D.-J., Lee, Y., Lee, J.-R. and Han, J.-H., 2016, Pyroshock Prediction of Ridge-cut Explosive Bolts Using Hydrocodes, Shock and Vibration, Vol. 2016, Article ID 1218767.

(11) Benedetti, M., Garofalo, G., Zumpano, M. and Barboni, R., 2007, On the Damping Effect Due to Bolted Junctions in Space Structures Subjected to Pyro-shock, Acta Astronautica, Vol. 60, No. 12, pp. 947~956.

(12) Lee, D.-O., Han, J.-H., Jang, H.-W., Woo, S.-H. and Kim, K.-W., 2010, Shock Response Prediction of a Low Altitude Earth Observation Satellite During Launch Vehicle Separation, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 11, No. 1, pp. 49~57.

(13) Lee, J.-R., Chia, C.-C. and Kong, C.-W., 2012, Review of Pyroshock Wave Measurement and Simulation for Space Systems, Measurement, Vol. 45, No. 4, pp. 631~642.

(14) Irvine, T., 2012, An Introduction to the Shock

Response Spectrum, Revision S.

(15) PCB Piezotronics Vibration Division, 2004, PCB Product Catalog, VIB-300E-1104.

(16) Lee, J. Y., 2015, Model Updating in Small Structural Dynamics Model by Elimination of Mass Loading Effect of Accelerometer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 40~47.

Juho Lee received B.S. and Ph.D. degree in aerospace engineering from KAIST in 2010 and 2016, respectively. He is currently a senior researcher of Agency for Defense Development. His research interest includes pyrotechnics, pyrotechnic release devices, pyroshock, structural dynamics and control.

Jae-Hung Han received B.S., M.S. and Ph.D. degree from KAIST in 1991, 1993 and 1998. He is currently a professor and head of aerospace engineering department at KAIST. He is interested in smart materials, real-time shape estimation, structural dynamics and control.