

금속 및 플라스틱 재질의 해머 타격판에 의해 발생된 신호의 파워 비교

김진후* · 이영현

동아대학교 에너지 자원공학과

Comparison of Signal Powers Generated with Metal Hammer Plate and Plastic Hammer Plate

Jin-Hoo Kim* and Young-Hyun Lee

Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University

요 약: 천부 탄성파탐사가 직면한 과제 중의 하나는 어떻게 작은 음원 발생장치로 큰 진폭의 고주파 신호를 발생시킬 수 있는가 하는 문제이다. 본 연구에서는 천부 탄성파탐사 음원으로 가장 많이 사용되고 있는 해머로 PE, 나일론, 알루미늄, 철판 등의 타격판을 타격하였을 때의 성능을 시험하였다. 이를 위하여 해머 타격으로 발생하는 충격력, 가속도, 지반 진동 속도를 측정하고 이들의 파워를 산출하여 상호 비교하였다. 앞선 연구에 의하면 해머로 알루미늄 타격판을 타격했을 때 가장 큰 진폭의 탄성파가 발생할 것으로 예상되었으나, 실제 측정 결과 철판 또는 PE 재질의 타격판을 타격했을 때 보다 더 작은 탄성파 에너지가 발생되었다. 플라스틱 재질의 타격판을 타격했을 경우, 진폭은 비록 작으나 180~200 Hz 대역의 신호를 얻을 수 있었으며, 250 Hz 이상의 신호를 발생시키기는 어려운 것으로 보인다.

주요어: 해머, 타격판, 충격력, 가속도, 탄성파, 파워 스펙트럴 밀도

Abstract: One of the most challenging issues facing shallow seismic survey is how to generate large amplitude of high frequency signal with small seismic sources. We tested the performance of the most commonly used shallow seismic source, hammer, with four plates: PE, nylon, aluminum, and steel plates. We compared their signal powers in terms of impulsive forces, accelerations, and ground vibration velocities caused by hammer impacts. According to a previous work, hammer blowing to an aluminum plate would generate the largest amplitude among four combinations. However, it was found in this experimental research that aluminum plate delivers seismic wave energy to the ground less than that generated with steel or PE plate. Even though the amplitude is relatively small, plastic plates could provide seismic pulses of 180~200 Hz in the bandwidth, and it seems to be very hard to generate seismic energy over the frequency of 250 Hz.

Keywords: hammer, plate, impulsive force, acceleration, seismic wave, power spectral density

서 론

천부 탄성파탐사에서 음원의 선택은 아마도 탄성파탐사의 성공 여부를 좌우하는 여러 요소들 중에 가장 중요한 요소 중의 하나일 것이다. 음원의 결정은 탐사 여건과 직결되며, 주로 다음과 같은 기준으로 선택한다. 즉, 조사하고자 하는 탐사심도까지 전파되어 굴절 또는 반사되어 지면으로 되돌아오는 탄성파는 충분한 에너지를 가져야 하며, 그 주파수 대역은 높고 스펙트럼이 넓어 탐사자료 해석을 위한 적절한 분해능을 가져

야 한다(Knapp and Steeples, 1986).

음원의 에너지와 진폭 스펙트럼의 형상 외에도, 음원의 결맞음(coherency)과 신호대잡음비 등이 음원 선택에서 고려되어야 하며, 이밖에 사용의 편리성, 안정성, 음원의 반복성 역시 고려되어야 한다.

폭발성 음원과 비폭발성 음원 등 다양한 음원들의 에너지와 파워 스펙트럼 비교는 Hearn and Kay (1991), Miller *et al.* (1986), Miller *et al.* (1992), Miller *et al.* (1994), Doll *et al.* (1998), Buhneemann and Holliger (1998) 등에 의해 연구되었으며, 대부분 특정 지역에서의 음원 특성을 상호 비교하였다. 국내 연구로는 김중렬 등(1994a)이 비폭발성 음원인 낙하형 탄성파 발생원을 개발하여 현장 적용성과 신호대 잡음비를 높이는 성과를 거두었으며, 김중렬 등(1994b)은 음원 배열을 이용해 P-파 에너지 증진과 표면파 에너지 감소 효과를 현장 실험을 통해 보여주었다. 이에 앞서 Mereu *et al.* (1963)은 타격

2011년 8월 11일 접수; 2011년 9월 6일 수정; 2011년 10월 27일 채택;

*Corresponding author

E-mail: jkim@dau.ac.kr

Address: Dept. of Energy and Mineral Resources Engineering,
Dong-A University, 840 Hadan-dong, Saha-gu,
Busan 604-714, Korea

판에 의해 충격 에너지가 탄성 에너지로 변환되는 과정을 비롯하여 낙하 추와 타격판의 다양한 조합에 따른 탄성 에너지의 크기 변화에 대해 실험적으로 고찰하였다. 이들은 철제 타격판을 이용한 실험을 통하여 타격판에 의해 발생하는 탄성과의 진폭(A)은 타격판의 질량(M)과 충격에 의한 타격판의 최대 속도(V_c) 사이에

$$A \propto M^{2/3} V_c \quad (1)$$

$$V_c = (1+e) \frac{m}{m+M} u \quad (2)$$

의 관계가 성립함을 보였다. 여기서 e 는 낙하 추와 타격판 사이의 반발계수를 나타내며, m 은 낙하 추의 질량을, 그리고 u 는 낙하 추의 속도를 나타낸다. 식 (1)에서 보듯이 탄성과의 진폭은 타격판의 질량과 타격판의 최대 속도와 곱에 비례하며, 타격판의 최대속도는 낙하 추의 질량, 속도, 그리고 낙하 추와 타격판 사이의 반발계수와도 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 천부 탄성파탐사에 주로 사용되는 해머를 대상으로 타격판의 재질에 따른 음원의 선택 기준 충족 여부를 조사하였으며 해머와 타격판 조합에 따라 발생하는 탄성과의 특성을 상호 비교하였다. 탐사 대상지역의 지반 조건에 따라 음원의 반응 특성이 달라지기 때문에(Pullan and MacAulay, 1987) 특정한 해머-타격판 결합이 최상의 선택이라고 단정할 수는 없으나, 동일한 실험조건 하에서 타격판의 재질에 따라 발생하는 충격력과 가속도, 그리고 지반 진동속도 등을 측정하고 이들의 파워 스펙트럴 밀도(PSD; power spectral density)함수를 구하여 파워를 정량적으로 비교함으로써 현장에서 사용 가능한 타격판의 재질과 상대적으로 우수한 해머-타격판 조합을 찾고자 하였다.

실험 방법

해머와 타격판

타격판의 재질에 따른 탄성과 발생 특성을 비교하기 위해 공업용 플라스틱의 일종인 PE (Polyethylene)와 나일론(Mono Cast Nylon), 금속제인 알루미늄과 철 등 4가지 재질을 채택하여 직경 150 mm, 높이 30 mm 로 타격판을 제작하였다. 타격판의 탄성역학적 특성은 Table 1에 설명하였다. 동포아송비(ν_d)와 동탄성계수(E_d)는 타격판의 P파 속도(V_p)와 S파 속도(V_s)를 초음파 속도 측정기(SonicViewer 170, OYO Corp.)로 측정한 후 아래의 관계식

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2((V_p/V_s)^2 - 1)} \quad (3)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$E_d = 2G_d(1 + \nu_d) \quad (5)$$

을 이용하여 산출하였다. 여기서 G_d 는 동강성률을 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 플라스틱 재료의 타격판은 금속 재료의 타격판에 비해 동포아송비가 대체로 큰 반면 동탄성계수는 현저히 작은 값을 보인다.

타격판의 반발계수는 타격판을 콘크리트 바닥에 고정시키고 질량 1 kg의 해머를 약 50 cm 높이에서 자유낙하 시킨 후 되튐 높이(h')와 낙하 높이(h) 비를 이용하여 산출하였다.

$$\text{Rebound Coefficient} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (6)$$

낙하 높이와 되튐 높이는 고속 카메라(Phantom Miro eX2, 코미)를 이용해 초당 1,000 프레임의 속도로 찍은 영상을 캡처하여 구했다. 반발계수 측정 결과 나일론 타격판의 반발계수가 0.84로 가장 컸으며, 철제 타격판의 반발계수가 0.58로 가장 작게 나타났다.

질량 1 kg의 해머를 높이 1m에서 자유낙하 시킨다고 가정하고, 타격판의 질량 및 반발계수를 식 (1)과 (2)에 대입하면 탄성과 진폭(A)의 상대적 크기를 예상할 수 있다. 이 때, 탄성과 진폭은 알루미늄 타격판을 사용할 경우 4.04, 나일론 타격판인 경우 3.75, 철제 타격판인 경우 3.47, PE 타격판인 경우 3.36으로 알루미늄 타격판을 사용했을 경우 진폭이 가장 클 것으로 예상된다. 여기서 진폭의 단위는 임의의 단위이다. 식 (1)에 의하면 일반적으로 플라스틱제 타격판에 비해 상대적으로 질량이 큰 금속제 타격판을 타격할 경우에 더 큰 진폭의 탄성과가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 타격판의 질량과 반발계수를 측정하면 플라스틱제 타격판을 사용하더라도 금속제 타격판을 사용했을 때와 비슷하거나 또는 더 큰 진폭을 보이는 최적의 해머 질량을 결정할 수 있다.

충격력 측정

충격력(impulsive force)이란 충돌하는 두 물체 사이에 작용한 힘을 말한다. 일반적으로 충격력은 매순간 변하므로 충격을 가하는 동안의 평균적인 힘을 의미하기도 한다. 본 실험은 일정한 에너지로 타격판을 타격할 경우 타격판을 통과하여 지표면에 전달하는 에너지 즉, 충격력을 알아보기 위함이다. 충격력 실험을 위해 힘 센서(force sensor)가 부착된 힘 측정판(Model FP-BTA, Vernier)을 이용하였다. 힘 측정판 위에 타격

Table 1. Physical and elastic properties of hammer plates.

Plates	Mass (g)	V_p (km/sec)	V_s (km/sec)	Dynamic Poisson's ratio	Dynamic Elastic modulus (kg/cm ²)	Rebound Coefficient
PE	516	2.49	0.98	0.41	25,000	0.79
Nylon	686	2.64	1.25	0.36	50,000	0.84
Aluminum	1,510	6.70	3.69	0.28	950,000	0.74
Steel	4,400	5.95	3.52	0.23	2,400,000	0.58

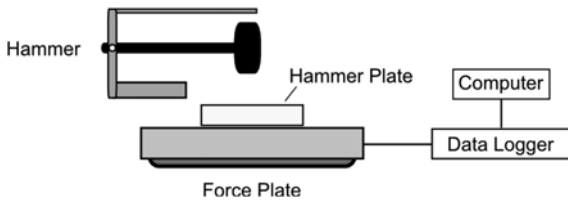


Fig. 1. Experimental setup for measuring impulsive force caused by hammer impact to the selected plate.

판을 올려놓고 일정한 높이에서 해머를 낙하시켜 타격판에 충격을 가하여 타격판을 통해 전달되는 힘을 30회 반복해서 측정하여 자료처리 하였다. 일정한 에너지로 타격판을 타격하기 위해 Fig. 1과 같이 해머에 힌지(hinge)를 부착한 해머 거치대를 제작하여 사용하였다. 힘 측정판은 타격에 의해 발생하는 되튐을 최대한 억제하기 위하여 바닥에 고정하였다.

가속도 측정

일정한 에너지로 타격판을 타격할 경우 타격판에서 직하 방향으로 일정 거리 떨어진 지점에서의 매질의 진동 특성을 비교하기 위하여 가속도를 측정하였다. Fig. 2와 같이 균질한 매질을 모사하기 위하여 PE 재질의 봉재를 1m 높이로 제작하였으며, 가속도계(Model LGA-BTA, Vernier)를 봉재 상단에서 50 cm 지점에 수직으로 고정시켰다. 봉재 상단에 타격판을 밀착시키고, 일정한 높이에서 해머를 낙하시켜 타격판을 통해 전달되는 에너지에 의한 가속도 변화를 30회 반복해서 측정하여 자료처리를 하였다.

지반 진동속도 측정

다양한 재질의 타격판에서 발생한 탄성파가 지반을 통해 전파되는 경우 일정 거리 떨어진 지점에서의 지반의 진동 특성을 비교하기 위하여 지오폰(28 Hz)을 이용해 탄성파를 수신하

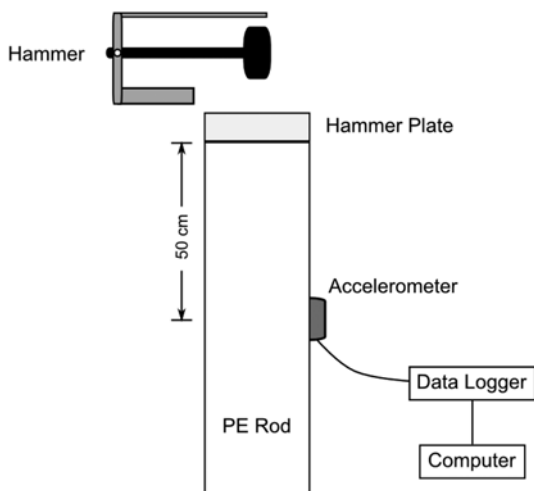


Fig. 2. Experimental setup for measuring acceleration caused by hammer impact to the selected plate.

였다. 발파점에서 1~10 m 떨어진 지점에 지오폰을 설치하고 70 cm 높이에서 해머를 자유낙하 시켜 자료를 취득하였다. 데이터 수집은 탄성과 탐사기(Model 7024, Bison Inc.)를 사용하였고, 아날로그 필터는 오픈하였다.

PSD 및 신호 파워 비교

해머-타격판 조합으로 얻은 자료를 상호 비교하기 위하여 자기회귀 모델(autoregressive model)을 이용한 공분산 방법(Kay and Marple, 1981)으로 PSD (power spectral density)를 구했으며 이를 적분하여 신호의 파워를 산출하였다. 자기회귀 모델을 이용한 PSD는 FFT로 구한 파워 스펙트럼에 비해 부드러운 곡선의 형태로 나타나기 때문에 스펙트럼 비교가 용이하며, 전 주파수 영역에 걸친 신호의 파워를 정량적으로 비교하는데 용이하다.

충격력 비교

Fig. 3은 각 해머-타격판 조합에 의한 충격력을 시계열로 비교한 것이다. 충격력 피크 값은 PE 타격판과 알루미늄 타격판이 가장 큰 값을 보이며 철제 타격판이 가장 작은 값을 보인다. 충격 지속시간은 PE 타격판이 가장 짧게 나타나며, 나이론 타격판과 알루미늄 타격판은 충격력이 시간에 따라 급속히 감소하다가 충격 발생 후 약 3~7 msec에 걸쳐 서서히 감소하는 경향을 보인다. 철제 타격판의 경우 충격 지속시간이 나이론 또는 알루미늄 타격판의 경우와 비슷한 값을 보이나 시간에 따른 충격력 감소가 다소 완만하고 충격 발생 후 약 4 msec 시점에서 2차 피크가 뚜렷이 나타나는 등 다른 타격판과 다른 특성을 보인다.

Fig. 4는 충격력 시계열 자료에서 얻은 PSD를 상호 비교한

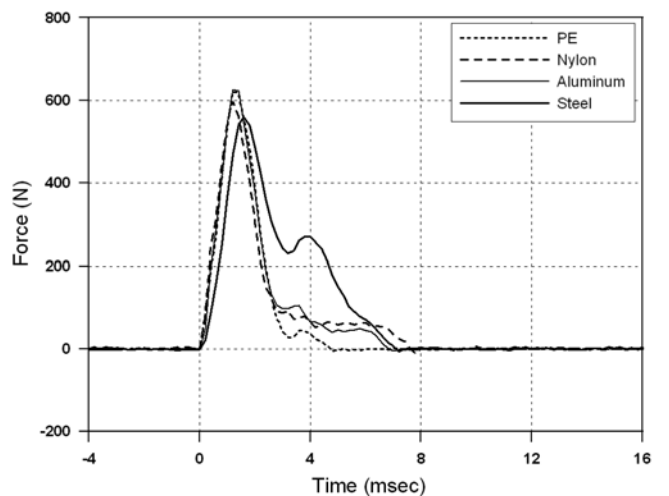


Fig. 3. Comparison of impulsive forces caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the lowest peak and slow decay of force.

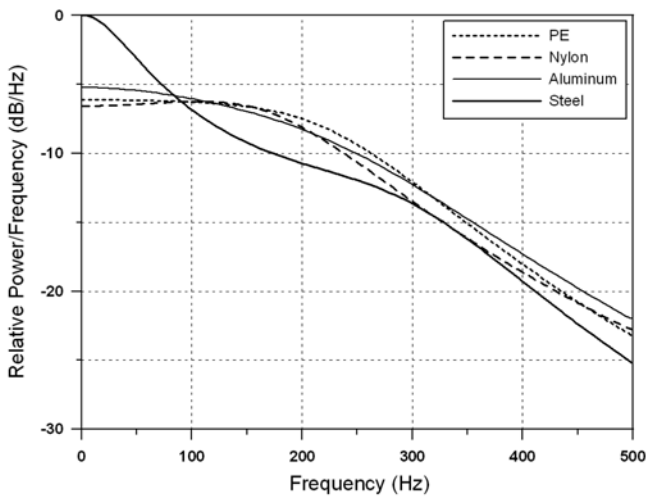


Fig. 4. Comparison of power spectral density of impulsive forces caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the higher energy power at less than 80 Hz.

것이다. PE나 나일론 등 플라스틱 재질의 타격판과 알루미늄 타격판을 타격했을 경우 PSD 패턴은 거의 유사하며, 약 200 Hz 이상에서 급격히 PSD 값이 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해 철제 타격판을 타격했을 경우에는 약 80 Hz 이하에서 다른 타격판들에 비해 더 큰 에너지를 포함하고는 있으나 주파수 증가에 따라 PSD 값이 급격히 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 5는 각 타격판을 해머로 타격했을 경우 충격력의 PSD로부터 산출한 파워를 박스 플롯(boxplot)으로 나타낸 그림이다. 여기서 보여주는 가로 선은 아래에서부터 최소값, 3사분위값, 중앙값(median), 1사분위값, 최대값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 철제 타격판을 타격했을 경우 충격력 파워가 34.24 dB

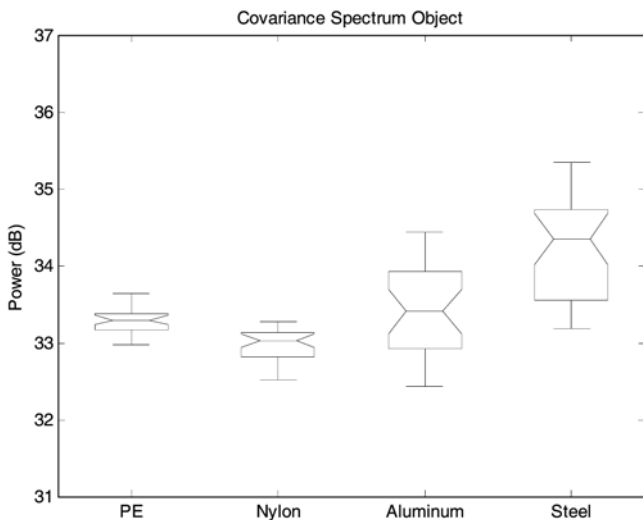


Fig. 5. Comparison of impulsive force powers caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the largest power, whereas the nylon plate shows the smallest power.

로 가장 크게 나타났고, 그 다음 알루미늄과 PE 재질의 타격판을 타격했을 경우 각각 33.42 dB와 33.28 dB로 거의 비슷한 파워를 보이고 있으며, 나일론 재질의 타격판을 타격했을 경우 32.95 dB로 가장 작게 나타나고 있다. 여기서 파워의 단위인 dB는 상대적인 값의 비교를 위해 사용하였으며, 값의 크기, 즉 절대 값은 A/D 변환에 따른 변환계수에 따라 달라지는 값으로 큰 의미는 없다. 한편, 알루미늄과 철제 등 금속제 타격판을 타격했을 경우에는 PE나 나일론 등 플라스틱 재질의 타격판을 타격했을 경우에 비해 편차가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이로부터 플라스틱 재질의 타격판이 하부로 전달하는 충격력은 금속제 타격판에 비해 다소 작지만 타격판의 커플링에 덜 민감하여 상대적으로 일정한 충격력을 하부로 전달하는 것으로 보인다.

가속도 비교

Fig. 6은 각 해머-타격판 조합에 의한 오프셋 50 cm에서의 가속도 변화를 시계열로 나타낸 것이다. 철제 타격판을 타격했을 경우 진폭이 가장 크게 나타나며, 알루미늄 타격판이나 플라스틱제 타격판을 타격했을 경우는 진폭뿐만 아니라 진폭 변화 패턴도 거의 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 7은 가속도 시계열 자료에서 얻은 PSD를 상호 비교한 것이다. 철제 타격판을 타격했을 경우 PSD 피크 값은 약 130 Hz에서 나타나고 있으며, 그 밖의 타격판을 타격했을 경우에는 주파수에 따라 단조 감소하는 경향을 보이고 있다. 알루미늄 타격판의 경우 PSD가 50 Hz 이상 대역에서 가장 작게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 각 타격판을 해머로 타격했을 경우 일정 거리에서 측정된 가속도로부터 산출한 신호 파워를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 철제 타격판을 타격했을 경우 가속도 파워는 -16.12 dB로 가장 크게 나타났고, 그 다음 PE와 나일론 등 플

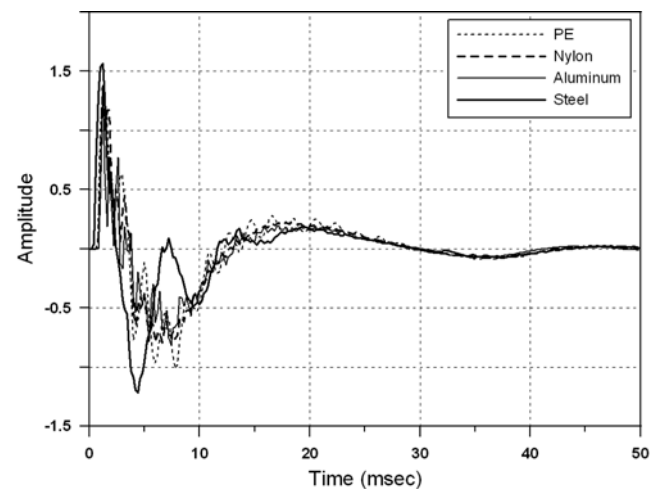


Fig. 6. Comparison of acceleration variation caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the largest variation.

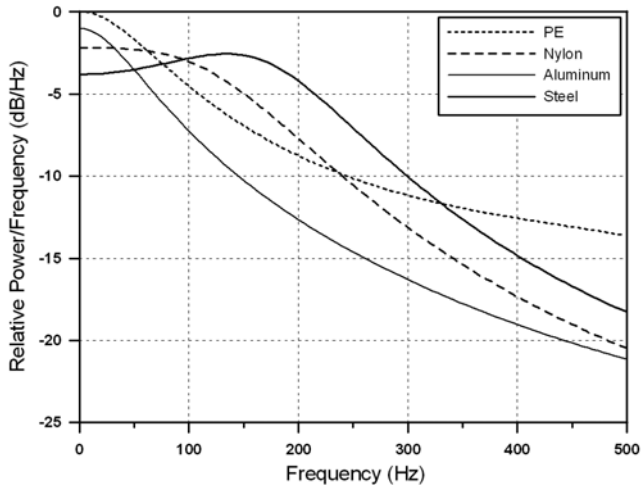


Fig. 7. Comparison of power spectral density of accelerations caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the peak at the frequency of 130 Hz.

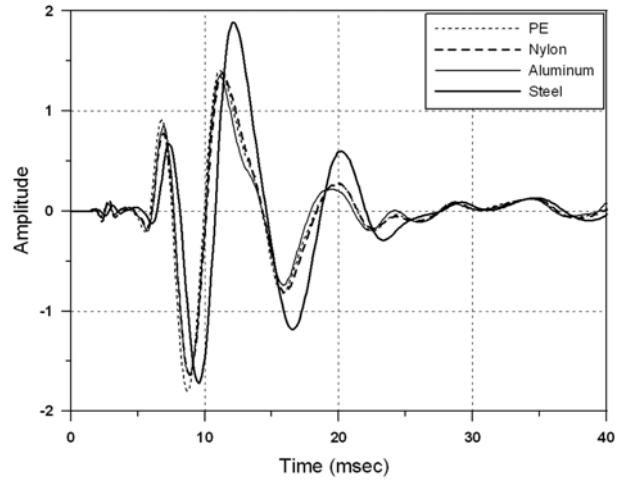


Fig. 9. Comparison of seismic waves caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the largest amplitude, whereas the aluminum plate shows the smallest amplitude.

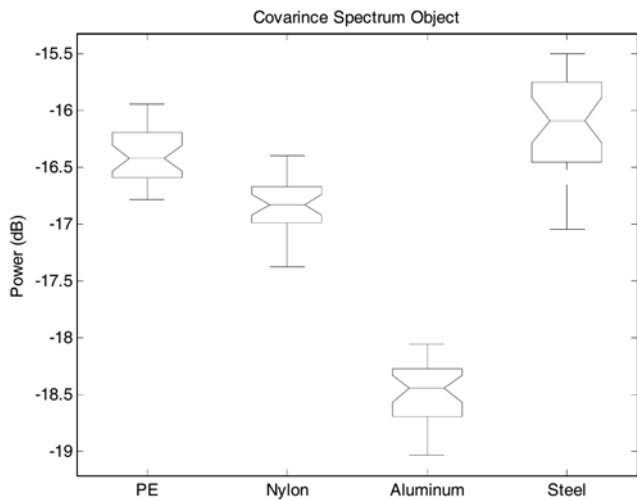


Fig. 8. Comparison of acceleration powers caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the largest power, whereas the aluminum plate shows the smallest power.

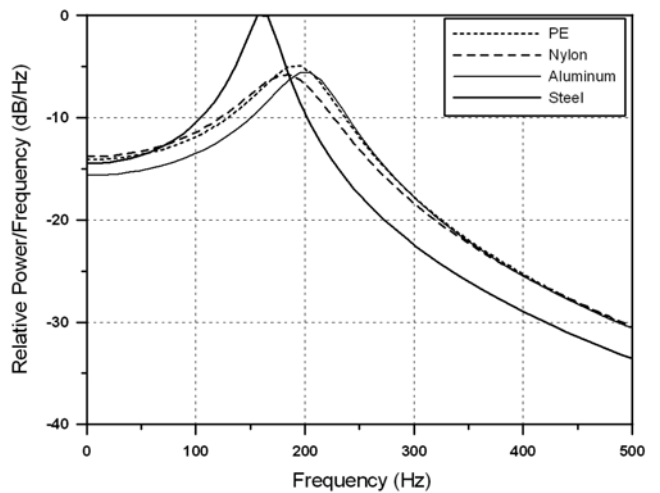


Fig. 10. Comparison of power spectral density of seismic waves caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the peak at the frequency of 160 Hz, whereas plastic and aluminum plates show the peaks around 180 ~ 200 Hz.

라스틱 재질의 타격판을 타격했을 경우 각각 -16.40 dB와 -16.83 dB로 측정되었다. 알루미늄 재질의 타격판을 타격했을 경우 파워는 -18.47 dB로 가장 작게 측정되었는데, 이는 철타격판을 사용했을 경우에 비해 파워가 약 40% 감소된 것을 의미한다. 이렇게 알루미늄 타격판을 사용했을 경우 파워가 감소한 이유는 알루미늄 타격판의 경우 탄성과 전파속도가 커서 지반과의 음향 임피던스 차가 크게 발생한다는 점과 해머의 타격 위치와 타격판의 표면 상태에 따라 반발계수에 큰 차이를 보인다는 점 등 타격판의 물성 및 커플링과 연관이 있을 것으로 판단된다. 이러한 현상은 실제 탄성파탐사에도 영향을 미쳐 지오폰에 수신되는 탄성파의 진폭을 감쇠시키는 요인으로 작용할 가능성이 높은 것으로 보인다.

지반 진동속도 비교

Fig. 9는 각 해머-타격판 조합에 의해 발생된 탄성파를 1 m 거리에서 지오폰으로 수신하여 시계열로 나타낸 것이다. 철타격판을 타격했을 경우 파고가 가장 크게 나타났으며, 알루미늄 타격판을 타격했을 경우와 PE나 나일론 등 플라스틱 재질의 타격판을 타격했을 경우에는 거의 비슷한 양상의 탄성파가 발생되었다. 그러나 알루미늄 타격판을 타격할 때 파고가 가장 작게 수신되었다.

Fig. 10은 오프셋 1 m인 지오폰 수신 자료에서 얻은 PSD를 상호 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 철타격판을 사용했을 경우 약 160 Hz에서 피크값을 보이며 플라스틱제 타격판과 알

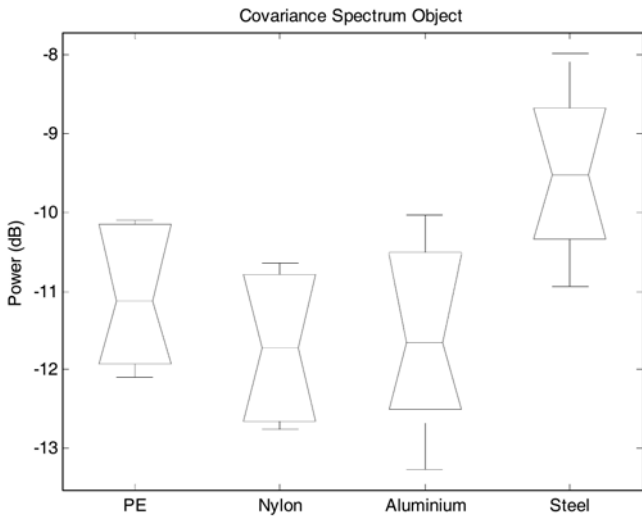


Fig. 11. Comparison of velocity powers caused by hammer impacts with various plates. The steel plate shows the largest power, and the aluminum plate shows relatively small power and the largest standard deviation.

루미늄 타격판을 사용했을 경우 약 180~200 Hz에서 피크값을 보이고 있다. 알루미늄 타격판의 경우 플라스틱제 타격판에 비해 피크 주파수는 높은 반면 PSD가 다소 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 해머로 타격하는 경우 250 Hz 이상에서는 PSD가 피크 값에 비해 6 dB 이상 감소하므로 이 주파수 이상의 신호는 얻기 힘들 것으로 예상된다.

Fig. 11은 각 타격판을 해머로 타격했을 경우 1 m 거리에서 수신한 탄성과 자료의 신호 파워를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 철제 타격판을 타격했을 경우 탄성과의 신호 파워가 -9.50 dB로 가장 크게 나타났고, 나일론과 알루미늄 타격판을 타격했을 경우 각각 -11.71 dB와 -11.58 dB로 낮게 측정되었다. 이는 알루미늄 타격판을 타격했을 경우 철제 타격판에 비해 파워가 약 38% 감소함을 의미한다. 알루미늄 타격판을 사용했을 경우 신호 파워가 작고 표준편차가 다른 타격판에 비해 크게 나타나는 것은 앞서 언급한 바와 같이 알루미늄 타격판의 물성 및 커플링과 연관이 있는 것으로 보인다.

결 론

타격판의 재질에 따른 탄성과 발생 에너지를 상대적으로 비교하기 위하여 PE, 나일론 등 플라스틱 재질의 타격판과 알루미늄, 철제 등 금속제 타격판을 이용하여 해머로 타격했을 때 발생하는 충격력, 가속도, 그리고 지반 진동 속도를 동일 조건 하에서 수집하여 분석하였다.

수집된 신호로부터 공분산 알고리즘을 이용하여 PSD를 구했으며 이를 적분하여 신호 파워를 산출하여 상호 비교하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 해머의 낙하속도가 일정할 경우 해머 질량, 타격판 질량 및 반발계수로 계산한 탄성과 진폭은 알루미늄 재질의 타격판을 사용했을 경우에 가장 클 것으로 예상된다.

2) 그러나 충격력, 가속도, 지반 진동속도 등을 비교한 결과 철제 타격판을 사용할 경우 신호 파워가 다른 타격판을 사용할 경우에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

3) PE와 나일론 등 플라스틱 재질의 타격판을 사용했을 경우, 탄성과 신호 파워는 철제 타격판을 사용했을 경우에 비해 모두 작은 값을 보이나 두 타격판 사이에서는 큰 차이가 없었으며, 플라스틱과 알루미늄 재질의 타격판이 철제 타격판(160 Hz)에 비해 약간 높은 주파수(180~200 Hz)의 탄성과를 발생시키는 것으로 관측되었다. 그러나 해머로 타격판을 타격하는 경우 250 Hz 이상의 탄성과 신호는 얻기 힘들 것으로 예상된다.

4) 알루미늄 타격판을 사용했을 경우가 플라스틱 타격판을 사용했을 때 보다 큰 에너지가 발생할 것으로 예상되었으나, 실험 결과 오히려 작게 관측되었다. 이는 알루미늄의 탄성과 속도가 커서 지반과의 음향 임피던스 차가 크다는 점과 해머의 타격 위치에 따라 반발력에 큰 차이를 보인다는 점 등 타격판의 물성과 타격 위치, 커플링 등과 연관이 있는 것으로 판단된다.

본 연구 결과 탄성과탐사를 수행함에 있어서 일반적으로 사용되는 알루미늄 타격판보다 철제 타격판을 사용했을 경우, 피크 주파수는 다소 낮지만 더 큰 진폭의 탄성과를 발생시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한 플라스틱 재질의 타격판을 사용하는 경우 철제 타격판에 비해 비록 진폭은 다소 작지만 고주파 대역의 탄성과를 발생시킬 수 있는 것으로 보인다. 알루미늄 타격판을 사용할 경우 타격 위치와 커플링이 탄성과 진폭에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 세심한 주의가 요망된다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음. 본 연구를 위하여 각종 실험을 도와준 김성보, 정지현, 이종철 군 등에 감사하며, 본 논문의 질적 수준 향상을 위해 많은 노력을 기울여 심사해주신 익명의 두 분 심사자께도 감사드립니다.

참고문헌

김중렬, 김기석, 김유성, 현혜자, 성낙훈, 1994a, 탄성과 발생원 개발 및 응용성, 한국자원공학회지, **31**, 248-257.
 김중렬, 김유성, 현혜자, 김기석, 1994b, 천부 지질구조 규명을 위한 P범 발생원의 응용성, 한국자원공학회지, **31**, 407-412.
 Buhemann, J. and Holliger, K., 1998, Comparison of high-frequency seismic sources at the Grimsel test site, central Alps, Switzerland, *Geophysics*, **63**, 1363-1370.

- Doll, W. E., Miller, R. D., and Xia, J., 1998, A non-invasive shallow seismic source comparison on the Oak Ridge Reservation, Tennessee, *Geophysics*, **63**, 1318-1331.
- Hearn, S. J. and Kay, M. H., 1991, Evaluation of P- and S-wave Sources for Shallow Seismic Reflection, *Exploration Geophysics*, **22**, 169-174.
- Kay, S. M. and Marple, S. L., 1981, Spectrum analysis-A modern perspective, *Proc. IEEE*, **69**, 1380-1419.
- Knapp, R. W. and Steeples, D. W., 1986, High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation, *Geophysics*, **51**, 276-282.
- Mereu, R. F., Uffen, R. J., and Beck, A. E., 1963, The use of a coupler in the conversion of impact energy into seismic energy, *Geophysics*, **18**, 531-546.
- Miller, R. D., Pullan, S. E., Steeples, D. W., and Hunter, J. A., 1992, Field comparison of shallow seismic sources near Chino, California, *Geophysics*, **57**, 693-709.
- Miller, R. D., Pullan, S. E., Steeples, D. W., and Hunter, J. A., 1994, Field comparison of shallow P-wave seismic sources near Houston, Texas. *Geophysics*, **59**, 1713-1728.
- Miller, R. D., Pullan, S. E., Waldner, J. S., and Haeni, F. P., 1986, Field comparison of shallow seismic sources, *Geophysics*, **51**, 2067-2092.
- Pullan, S. E. and MacAulay, H. A., 1987, An in-hole shot gun source for engineering seismic surveys, *Geophysics*, **52**, 985-996.