

AE 측정을 위한 탐촉자의 보정에 대한 고찰 A Study on the Transducer Calibration for Acoustic Emission Measurement

김 교 원 (Kim, Gyo Won)

시설안전기술공단

요약/Abstract

암석 시료의 파괴시에 발생하는 AE신호를 측정하여 파괴와 관련된 미세균열의 발생원에 대한 연구를 위하여서는 탐촉자에서 기록장치까지 전과정에 대한 검증이 필요하다. 특히 탐촉자는 기계적인 진동을 전기신호로 전환하는 기능을 가진 예민한 장치로서 다양한 인자에 의하여 예민도가 달라질 수 있기 때문에 보정시험을 실시하여야 한다. 압전 압력형 PAC 탐촉자를 NBS나 DG의 변위형 탐촉자에 의하여 보정하는 시험을 실시하였다. NBS 및 PAC 탐촉자는 파의 입사방위각에는 무관하나 입사각에는 예민하게 반응한다. 즉, 입사각이 90° 일 때에는 입사각 15° 이하일 때 보다 약 10배의 큰 출력을 나타내었다. 또한, 시험에 사용된 PAC 탐촉자의 경우 강도에 대한 개별 예민도의 차이가 최대 약 40%이었다. 압력형 PAC 탐촉자는 변위형 표준탐촉자로 절대치 보정시험을 실시한 결과 보정계수는 평균 77mv/pm이었다.

In order to investigate the source mechanism of micro cracks through acoustic emission measurement induced by rock fracture, careful calibration of the entire linkage of the detecting system, from the transducers to transient recorder, is an essential requirement prior to testing. Transducers and digitizing system are generally the weakest links in the measurement system because they must translate mechanical motions into digital electric signals. In this study, PAC piezoelectric pressure transducers are calibrated with a standard NBS conical shaped displacement transducer and a DG piezoelectric displacement transducer. The NBS and PAC transducers are insensitive to changes in horizontal impingement angle but sensitive to changes in incident angle. The ray path along the longitudinal axis of the transducer produced a maximum response while the ray path perpendicular to the transducer axis gave a minimum. And a difference in individual transducers factor for a peak-to-peak amplitude of PAC transducers was within 40%. An average PAC transducer coefficient was determined as 77mv/pm by an absolute calibration test using NBS transducer.

1. 서 론

실내암석시험시 발생하는 AE(Acoustic Emission) 신호를 정확하게 수신하는 것은 사용하는 시험 장치에 대한 충분한 검증이 있을 때 가능하게 된다. 특히 Kim(1989)에 의하면 암석시험 파괴시 발생하는 AE 신호의 미세한 진동을 수신하기 위하여서는 극히 예민한 탐촉자를 사용하여야 하며 또한 넓은 범위의 주파수 영역을 가지는 AE 신호에 대하여 직선적인 반응을 보이는 탐촉자이어야 한다. 아울러 데이터를 수신하고 기록하는 장비도 높은 주파수의 AE파를 충분한 정밀도로 기록할 수 있도록 데이터 기록빈도가 높은 성능의 장비이어야 한다. 적절한 성능을 가진 측정장치라 하더라도 다양한 요인에 의하여 수신되는 AE파의 특성이 영향을 받게 되므로, AE에 대한 연구는 탐촉자에서 기록장비까지의 일련의 시험설비가 완벽하게 보정된 후에 가능하게 된다. 본 고에서는 AE 연구에 많이 사용되는 Piezo-Electric 탐촉자의 보정방법에 대하여 고찰하였다.

2. 탐촉자 개요

AE 신호는 극히 미세한 강도를 보이는 고주파수 영역의 탄성파이기 때문에 AE 신호를 정확히 수신하기 위한 적절한 탐촉자의 선정이 중요하다. 시료 표면에서의 기계적인 진동은 탐촉자에 의하여 전기적인 AE 신호로 전환되기 때문에 일반적으로 이 전환부가 전체 AE 측정 계통 중에서 가장 취약한 부분이다. 시험에 사용된 3종류의 탐촉자는 압전 압력형 탐촉자, 압전 변위형 탐촉자 및 원추형 변위 탐촉자이었다.

가. 압전 압력형 탐촉자(Piezoelectric Pressure Transducer)

제작사인 Physical Acoustic Corp.가 제공한 반응 스펙트럼에 의하면 모델 μ M80D(PAC로 약칭) 탐촉자는 공진주파수가 1,000kHz로서 200~1,000kHz 까지 대체로 수평적인 반응을 보이고 있다. PAC 탐촉자는 크기가 외경 9mm로서 소형이고 아주 예민하며 넓은 주파수 영역에서 상당히 수평적인 반응을 보이고 있기 때문에 실내 암석파괴에 대한 AE 연구시 유리한 점이 있다. 그러나 제작사에서 절대치에 대한 보정결과를 제공하지 않으며 다양한 요인에 의

하여 측정결과가 상이 할 수 있기 때문에 AE 연구와 같은 정밀한 분석이 요구되는 경우 적절한 방법으로 보정할 필요가 있다.

나. 압전 변위형 탐촉자(Piezoelectric Displacement Transducer)

Dunegan사의 모델 S9208 압전 변위형(DG로 약칭) 탐촉자는 주파수 100~1,000kHz 범위에서 수평적인 반응을 보이며 예민도는 $1v/(m/sec)$ 이나 크기가 직경 20mm, 높이 30mm 정도로서 접촉면적이 시료규격에 비하여 상대적으로 크기 때문에 AE 발생원의 위치를 결정하는데 오차가 크게 될 수 있다. 따라서 DG 탐촉자는 PAC 탐촉자의 보정에 활용되었다. 변위형 탐촉자이면서 제작사의 보정확인서에 제시된 예민도의 단위가 속도인 것은 변위로 수신된 출력을 적분하여 표시한 결과로 보여진다.

다. 원추형 변위 탐촉자(Conical shaped Displacement Transducer)

미국 국립표준국(National Bureau of Standards, NBS)에서 설계되어서 Industrial Quality사에서 제작된 모델 IQ1501 변위형 탐촉자는 주파수 50~1,000kHz 범위에서 거의 수평적인 반응을 보이며 공칭 변위 예민도는 $2 \times 10^6 v/m$ 이다. NBS 탐촉자는 직경 약 15cm 정도로 크지만 시료와의 접촉면적은 직경 1mm이기 때문에 부착하는데 어려움이 있어서 시험용보다는 PAC 탐촉자를 절대치로 보정하는데 사용하였다.

3. 반응 특성

이상의 3종류의 탐촉자에 의하여 기계적인 진동이 전기신호로 전환되는 특성을 파악하기 위하여 모세관 유리(직경 1mm) 파단진동과 10cm 높이에서 작은 철구(직경 4mm) 낙하진동시험을 탐촉자가 부착된 면과 그 배면에서(Fig.10의 시험모식도 참조) 실시한 결과를 Fig.1과 Fig.2에 나타내었다. 모세관 유리 파단은 진원에서의 초동이 제하(Unloading)하는 경우와 같으며 철구의 자유낙하는 재하>Loading)를 가하는 경우와 같다. 즉 모세관 유리를 매질표면에 기울여서 대고 서서히 손가락에 압력을 가하여 파단시키면 표면은 서서히 내려가다가 파괴시 갑자기 상향변위(Unloading)되면서 진동하게 되고, 철구를 낙하하면 시료표면이 낙하 순간 하향변위>Loading)되

면서 진동하여 탄성파가 발생하게 된다. 이를 각각 순간제하(Step Unloading) 및 순간재하(Step Loading)라 한다.

Fig.1은 탐촉자가 부착된 면에서 시험을 실시한 경우로서 DG 및 NBS 탐촉자의 모세관 유리 파단에 의한 순간제하(Step Unloading)시에는 왼쪽 그림과 같이 초동이 하향으로 내려가며 철구 낙하에 의한 순간재하(Step Loading)시에는 초동이 상향으로 올라가나 PAC 탐촉자는 그와 반대의 양상을 보이고 있다. Fig.2는 탐촉자가 부착된 면의 뒷면에서 전술한 바와 같은 시험을 실시한 결과이다. 이 결과는 Fig.1과는 파형에서 다소의 차이를 보이고 있으며 DG 및 NBS 탐촉자는 기계적인 진동을 전기신호로 동일한 형태로 전환하나 PAC 탐촉자는 이들과는 상이한 파형을 보이고 있다. 그러나, 중요한 것은 일정한 표면진동에 대하여 초동 파형이 일정한 방향이고 같은 강도를 보이고 있으므로 PAC 탐촉자는 시험용 탐촉자로 적합함을 알 수 있다.

Fig.1의 DG 및 NBS 탐촉자에 의한 파형에서 초동 이후에 보이는 급격한 하향 Peak는 탐촉자가 부착된 면에서 시험이 수행되었기 때문에 표면파가 도달한 결과로 보인다. 배면에서 시험이 수행되어 표면파의 전달이 상당히 지연되었을 Fig.2에서는 이와 같은 하향 Peak가 존재하지 않는다는 사실이 이를 입증하고 있다. PAC 탐촉자는 표면파 또는 전단파가 수신되므로서 강도와 주파수가 변화되고 있음을 알 수 있다. 따라서 AE 연구를 위하여서는 수신된 파형 중 순수한 압축파인 초동을 이용하여야 한다.

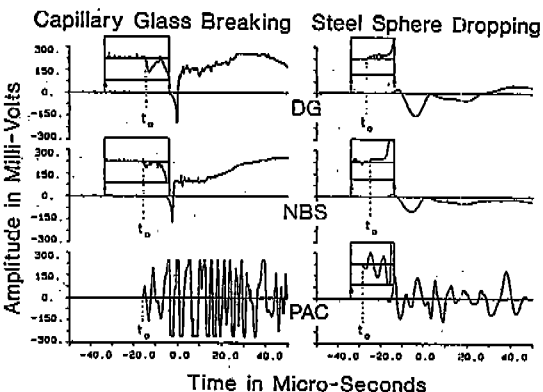


Fig. 1 Typical reponse of different type of transducers for step unloading and step loading forces at the transducer attached face (Note that the amplitude scale in inserted boxes is 10 times expanded).

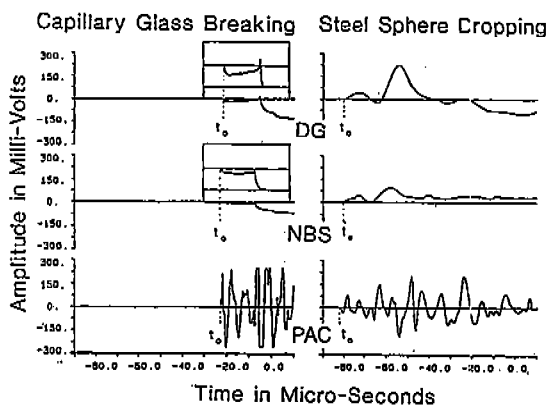


Fig. 2 Typical reponse of different type of transducers for step unloading and step loading forces at the opposite face (Note that the amplitude scale in inserted boxes is 10 times expanded).

4. 탐촉자 보정

전술한 바와 같이 DG 탐촉자는 NBS 탐촉자와 동일한 반응을 보이므로 PAC 탐촉자의 보정은 이들 두 탐촉자에 의하여 실시하였다.

가. 입사방위각 예민도 보정

암석파괴시의 AE 신호는 임의의 위치에서 발생되기 때문에 탐촉자에서의 상대적인 위치가 일정하지 않아서 입사방위각이 상이하게 된다. 따라서, 수평면 상에서의 파동의 전파경로와 탐촉자 연결부 사이의 각을 입사방위각이라 정의하고 Fig.3과 같이 균질한 두꺼운 철판에서 입사방위각에 대한 예민도 보정시험을 실시하였다. 이러한 방법은 Simons, Turner and Wadley(1987) 등에 의하여 사용된 바 있다. 그림에서 원주상의 작은 점이 연필심(모세관 유리와 동일한 효과를 제공함) 파단에 의한 순간제하(Unloading)를 가한 지점이고 원 중앙에 보정될 PAC 탐촉자를 설치하였다. 사각형으로 표시된 NBS 탐촉자는 일정한 입사방위각이 유지되도록 발신지점을 이동함에 따라 이동·설치하였다. 시험 결과는 Fig.4에서 보는 바와 같이 NAB 탐촉자 뿐만 아니라 PAC 탐촉자에 의하여 기록된 초동의 강도가 일정함을 알 수 있다. 즉, PAC 탐촉자는 파동의 입사방위각에는 무관함을 알 수 있다.

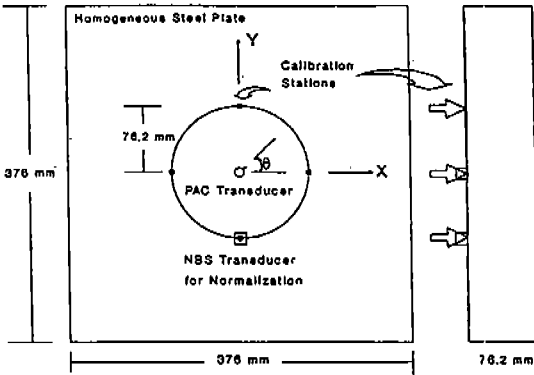


Fig. 3 Configuration of calibration technique for impingement angle(θ) sensitivity.

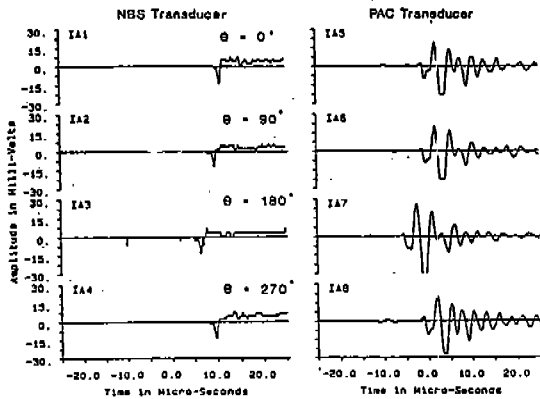


Fig. 4 Typical wave forms produced by pencil lead fracture during calibration of impingement angle sensitivity.

나. 입사각 예민도 보정

암석파괴시의 AE 신호 발생원 위치의 임의성으로 인하여 전술한 입사방위뿐만 아니라 입사각도 달라지게 된다(Dowding and Kim, 1988). 입사각은 파동의 전파경로와 탐촉자 부착면사이의 각으로 정의하고 Fig.5와 같은 방법으로 입사각 예민도 보정시행을 실시하였다. 매질은 직경 150mm의 반원주상의 균질한 세립질의 화강섬록암을 이용하였다. 여기서는 DG 탐촉자를 표준탐촉자로 하였으며 보정될 PAC 탐촉자는 그림에서 CT로 표시한 바와 같이 저면에 부착하였고 원주상에 연필심 파단 순간제하 지점을 두었다. 이렇게 하므로써 표준 탐촉자에의 입사각은 36°로 유지하면서 보정될 탐촉자에의 입사각은 변화시킬 수 있었다.

시험 결과는 Fig.6에 나타난 바와 같이 표준탐촉자에 의한 초동의 강도가 일정한 반면 PAC 탐촉자에 의한 초동은 강도가 변화되고 있다. 수회에 걸친 반복시행을 통하여 측정된 초동의 강도를 입사각 변화에 대한 이론적인 강도변화(점선)와 함께 Fig.7에 표시하였다. 이 결과로 볼 때 실측된 입사각 예민도는 이론치와는 다소 상이하며 입사각에 따라 최대 약 10배 정도의 수신강도차이가 있으므로 AE 연구를 위하여 PAC 탐촉자를 사용하는 경우 탐촉자에 대한 AE 발생원의 상대적인 위치에 따라서 수신된 파의 강도는 반드시 보정되어야 함을 알 수 있다.

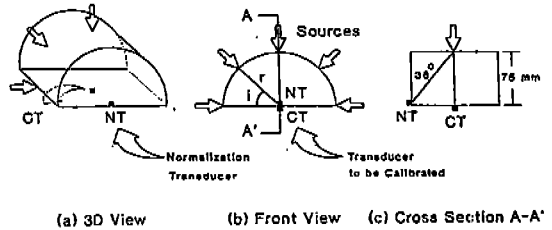


Fig. 5 Configuration of calibration technique for incident angle(i) sensitivity showing constant source angle(90°) and constant transducer incident angle to normalization transducer(36°).

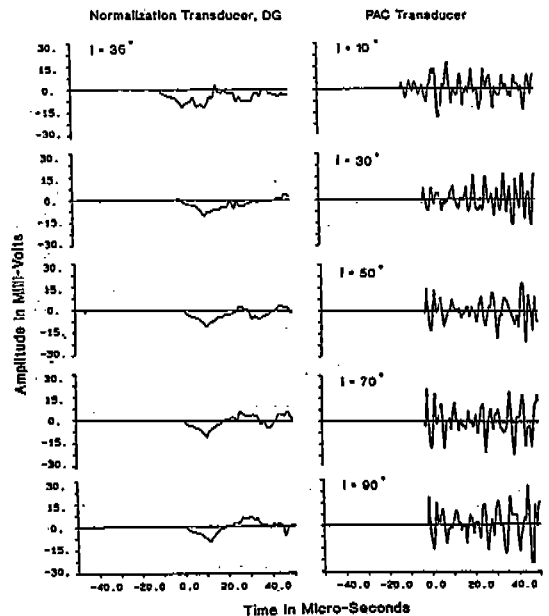


Fig. 6 Normalized typical wave forms produced by pencil lead fracture during calibration for incident angle sensitivity.

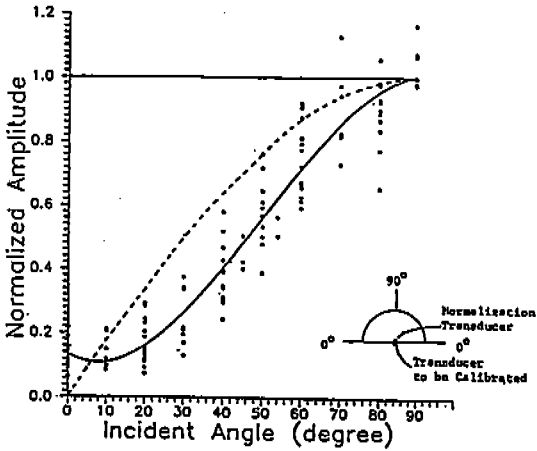


Fig. 7 Incident angle sensitivity of PAC transducer showing a maximum sensitivity difference by a factor of 10.

다. 탐촉자 개별 예민도 보정

같은 공정에 의하여 제작되는 동일 모델의 탐촉자라 하더라도 여러 요인에 의하여 개개 탐촉자의 예민도에 차이가 날 수 있으며 연결선이나 증폭기에서의 차이도 있을 수 있다. 따라서 각 탐촉자는 시험 전과정에서 동일한 증폭기에 연결하여 사용함이 바람직하다. 이러한 개별 예민도 보정시험 모식도는 Fig.8과 같으며 그 결과는 Fig.9에 정리한 바와 같다. 검토된 동일 모델인 8개의 PAC 탐촉자는 동일한 입사방위각, 동일 입사각 및 동일 거리에서도 개개 탐촉자는 초동강도에서 약 40% 정도의 오차가 있었다. 따라서 이러한 개별 예민도를 AE 연구시에 반영하여야 한다.

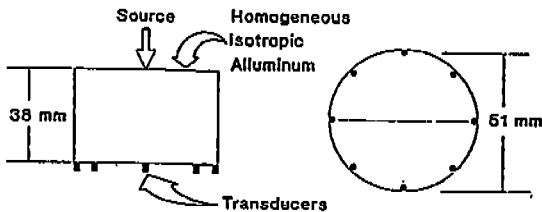


Fig. 8 Configuration of calibration technique for individual transducer factors.

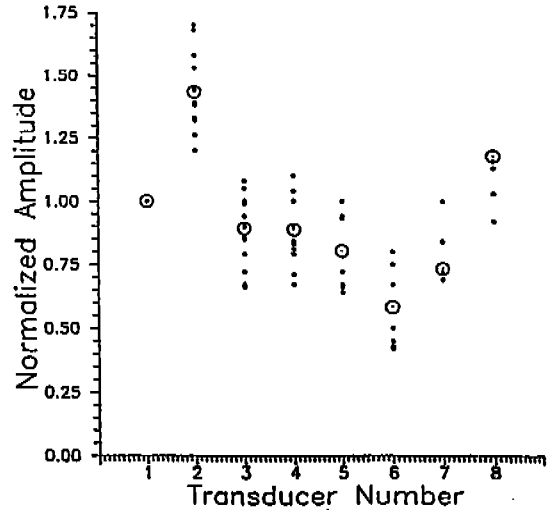


Fig. 9 Variation of individual transducer factors.

라. 절대치 보정

PAC 탐촉자에서 출력되는 초동의 강도는 전기력인 볼트로 주어지기 때문에 입사변위, 입사속도 또는 입자가속도로 전환하여야 AE 측정에 의한 미세균열의 발생원에 대한 정량적인 연구가 가능하게 된다. 이를 위하여 Fig.10과 같이 각 탐촉자의 위치에서 동일입사조건을 주고 보정시험을 실시하였다. 그 결과는 Fig.1 및 Fig.2에 제시된 파형이며 Table 1에 정리한 바와 같다.

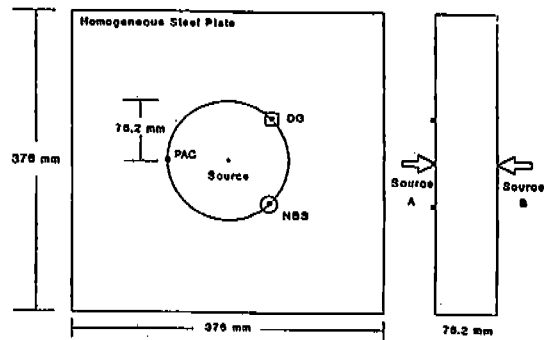


Fig. 10 Configuration for absolute calibration of PAC transducer.

참 고 문 헌

Table 1 Determination of PAC transducer coefficient.

Transducer Type	Source Location	Amplitude		Corrected Amplitude(mv) ²	Coefficient, mv/pm
		mv	pm ¹¹		
NBS	Front Face	4.3	21.5		0.2
DG		9.5			0.44
PAC		235.7		1683.6	78.31
NBS	Back Face	2.6	13.0		0.2
DG		6.4			0.49
PAC		472.5		984.4	75.72

주 : 1) Pico-meter(10⁻⁹ m), 2) 입사각 보정값도

5. 결 론

암석 시료의 파괴시에 발생하는 AE신호를 정확하게 측정하기 위하여서는 탐촉자에서 기록장치까지 전과정에 대한 검증이 필요하다. 특히 큰 영향을 미치는 탐촉자에 대한 보정시험을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 압전 압력형 PAC 탐촉자는 NBS나 DG의 변위형 탐촉자와는 진동에 대하여 상이한 반응을 보이거나 적절한 방법에 의하여 보정되는 경우 정량적인 AE 연구에 적용할 수 있다.
- 2) NBS 및 PAC 탐촉자는 파의 입사방위각에는 무관하나 입사각에는 예민하게 반응한다. 즉, 입사각이 90° 일 때에는 입사각 15° 이하일 때 보다 약 10배의 큰 출력을 나타내었다.
- 3) 탐촉자는 동일한 모델로써 같은 제작공정을 가지더라도 개개의 예민도에 차이가 있을 수 있다. 시험에 사용된 PAC 탐촉자의 경우 초동의 강도에 대한 개별 예민도의 차이가 최대 약 40%이었다.
- 4) 표준 변위형 NBS 탐촉자로 절대치 보정시험을 실시한 결과 압력형 PAC 탐촉자의 보정계수는 평균 77mv/pm로서 상당히 민감한 탐촉자임을 알 수 있었다.

Dowding, C.H. and Kim, G.W. 1988, Micro Seismic Motions from Expansive Agent induced Rock Fracturing, Final Project Report, U.S. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, pp.10-11.

Kim, G.W., 1989, Refinements of Acoustic Emission Measurement to Deduce Three Dimensional Rock Fracture Source Mechanisms, PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL., pp.36-56.

Simons, J.A., Turner, C.D. and Wadley, H.N.G. 1987, Vector Calibration of Ultrasonic and Acoustic Emission Transducers, Jour. of Acoustic Society of America, vol.82, no.4, pp. 1122-1130.

김교원
 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-9
 시설안전기술공단
 TEL : 0343)80-3192
 FAX : 0343)80-3216