

## 음향방출에 의한 평면결함의 위치표정 기술 (AE Source Location Techniques in Planar Defects)

우창기 · 이장규\* / 인천대학교, 박성완 / 인천전문대학, 김봉각 / 충청대학, 윤중희 · 인승현 / 인천대학교 대학원

### Abstract

The results of source location in terms of AE signal occurred by the spot exciting as suggested in this research, it has been confirmed that AE technique is quite fruitful in figuring out the location of the occurrence, form, size and direction of the defects. Thus, it is expected that the application of the experimental method suggested in this study would make it possible to identify, in the nondestructive way, the location of the defect in the material.

Key words: AE, source location, spot excitation, identification, NDE/NDT

### 1. 서론

AE신호의 처리법 중에서 가장 정량적인 결과로 얻어지는 것이 위치표정이며, 위치표정은 기본적으로 탄성파의 감쇠특성과 전파속도에 의존한다. 신호의 특성에 따라 연속형 신호에는 탄성파의 감쇠특성을 이용하고, 돌발형 신호에는 탄성파의 전파속도를 이용한다. 그러므로, AE에 의한 위치표정은 압력용기와 같은 구조물에 있어서 결함의 위치 및 균열의 시간적 진전에 따른 연속적인 추적과 외부로부터 들어오는 잡음의 제거에 매우 적합한 방법이다.

AE 발생원(AE source)의 위치표정 기술은 다양하게 개발<sup>(1),(2)</sup>되고 있으며, 대부분은 AE파가 각 센서에 도달하는 시간차<sup>(3),(4)</sup>로부터 구해진다. 그러나, AE 위치표정의 문제점은 (1) 대단히 빠른 전파속도와 짧은 시간차를 이용한다는 점 (2) 탄성파가 재료 내부에서 전파되는 동안 감쇠되어 AE 발생위치가 센서 중앙에서 벗어나 전체 센서에서 감지되지 않을 가능성이 높다는 점 (3) 3개 이하의 센서를 사용하여 쌍곡선의 교점

에서 구하는 경우 오히려 AE 표정위치가 센서사이의 중심에 표정되어 진다는 점을 들 수 있다. 그러므로 정확한 위치표정과 소정의 정밀도를 얻기 위해서는 사전에 표정위치의 확인과 AE센서의 갯수 및 배치 등을 고려하여 계획해야 한다.

요컨대, 다음과 같이 4개의 센서가  $(X, 0)$ ,  $(-X, 0)$ ,  $(0, Y)$ ,  $(0, -Y)$  인 점에 위치하는 모델이 제안<sup>(5)</sup>되었으며, 결국 식 (1)로부터 진짜 음원을 찾을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} X &= aB\sqrt{\frac{b^2 + A^2}{b^2B^2 - a^2A^2}} \\ Y &= Ab\sqrt{\frac{A^2 + b^2}{b^2B^2 - a^2A^2}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $a = (1/2)\Delta t_x V$ ,  $A = (1/2)\Delta t_y V$ ,  $b = (X^2 - a^2)^{1/2}$  및  $B = (Y^2 - A^2)^{1/2}$  이다.

따라서, 본 연구에서는 전술한 바와 같은 위치표정 원리에 입각하여 비파괴적으로 spot 가진에 의하여 측정된 AE 신호로부터 결함의 위치를 표정하는 새로운 실험방법을 제안하였으며, 그 결과로부터 결함의 발생위치, 형상, 치수 및 방위 등을 동정해 보고자 한다.

### 2. 실험 및 실험방법

#### 2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 실험재료는 일반구조용 압연강재인 SS400으로 화학적 조성파 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에서 보는바와 같다.

또한, 시험편은 동일한 배치(batch)에서 채취하여 압연방향으로 절단하고, 밀링바이스 물림부 30mm를 포함하여  $300 \times 230 \times 5(t)$ mm의 치수로  $\pm 0.001$ mm까지 제어가능한 터치포인트센서(Nikken, TP-20)를 장착한 밀링머신으로 앤드밀을 사용하

여 직사각형으로 가공한 후, 가공된 표면을 정밀 연마 하였다. 또한, 시험영역 중앙(150, 100)의 결함(균열)은 수퍼EDM드릴(KTC, SD-1M)을 사용하여  $\phi 0.5\text{mm}$ 로 미소구멍을 낸 후, Fig. 1에서 보는바와 같이 결함길이  $a$ 는 2mm와 4mm로, 결함 경사각  $\alpha$ 는  $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지  $15^\circ$  간격으로  $\phi 0.3\text{mm}$ 의 와이어를 사용하여 와이어컷 방전가공기(Daewoo 320, Fine Sodick EX21)로 가공하였다.

## 2.2 실험방법

Fig. 1과 같이 주철 정반 위에 지그를 설치하고,  $300 \times 200\text{mm}$  시험영역의 각 모서리로부터  $30 \times 25\text{mm}$  떨어진 위치(센서1 (30, 25), 센서2 (270, 25), 센서3 (30, 175) 및 센서4 (270, 175))에 sp2-loc의 sensor location에 의해 설정된 좌표에 대하여 arbitrary sensor location 방법에 의하여 4개의 AE센서를 직사각형 형태로 x-y linear하게 배열하였다. 한편 고진공 그리스(Dow coming high vacuum grease)를 사용하여 각 센서를 압착시키고 마그네틱 홀더(magnetic holder)를 이용하여 spot 가진시 충격에 의해 센서가 시험편에서 분리되지 않도록 고정한 후, 밀링바이스를 사용하여 최종적으로 시험편을 고정하였다.

본 연구에서는 Spartan 2000으로 예비실험을 통하여 얻은 실험조건으로부터 Fig. 1과 같은 시험편의 결함을 동정(identification)하기 위하여 유압식 vibration shaker로 ①, ② 및 ③의 위치에서 각각 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 조건으로 약 3초 동안 spot 가진을 하여 AE신호를 발생시키고, 각 조건마다 10회 연속 측정하였다. 센서의 감도측정 및 AE 측정조건은 Table 3과 같고, 실험전 센서가 정상적으로 시험편 표면에 압착되었는지를 살펴보기 위하여 AST(Auto Sensor Test)를 실행시켜, 출력신호가 2dB 이내에 있는지 확인하였다.<sup>(6)</sup>

본 실험에 앞서 AE신호에 의한 결함 동정이 정량적으로 가능한지를 알아보기 위해 시험영역 중앙(150, 100)에 수퍼EDM드릴을 사용하여  $\phi 0.3\text{mm}$ 로 미소구멍을 가공하고, 전술한 바와 같은 방법에 의해 결함의 길이에 대한 직경의 효과를 검토하였다. 그 결과 시험편 가공상의 문제점으로 인하여  $\phi 0.5\text{mm}$ 의 치수로 시험영역 중앙(150, 100)에 드릴구멍을 내고, 결함길이  $a$ 는 드릴의 직경보다 큰 치수인 2mm와 4mm로 결정하였다.

Table 1 Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.017	0.58	0.017	0.010

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, $\nu$
326.56	433.45	26.0	205.94	0.30

Table 3 Experimental condition

Threshold (dB)	Gain (dB)	PDT ( $\mu$ sec)	HDT ( $\mu$ sec)	HLT ( $\mu$ sec)
Fixed, 45	20	300	600	1,000

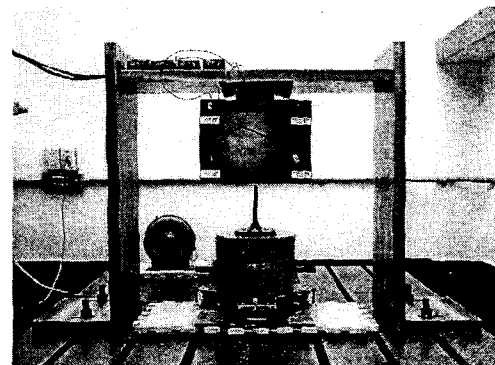
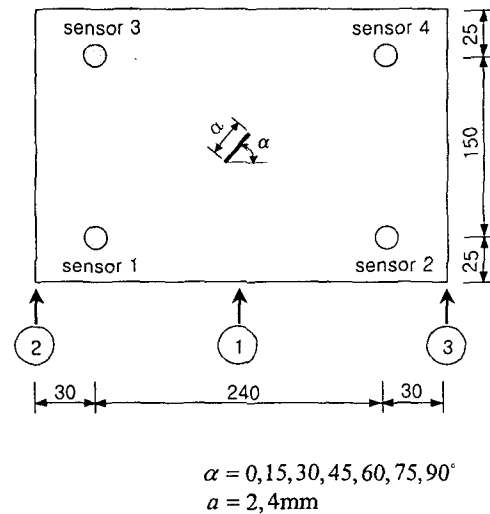


Fig. 1 Schematic configuration of experiment

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 원공결함을 갖는 경우

Fig. 2, Fig. 4 및 Fig. 6의 ①과 ②는 각각 수평 및 수직방향으로 x-y linear하게 배치된 센서로부터 측정에 의하여 위치표정된 ( $X_s$ ,  $Y_s$ )와 AE 이벤트 수와의 관계이고, ③은 ①과 ②의 결과로부터 얻어진 planar clustering tabular display이며, ④는 AE 진폭과 에너지와의 관계이다. Fig. 3, Fig. 5 및 Fig. 7에서 Q-Q plots이 제시하는 형태는 검정분포값의 분위수(직선)에 대한 변인의 분포분위수(점)를 그래프화한 것으로 검정분포의 유형이 변인에 적절할 경우 점들이 직선주위에 모여, 정규분포를 전체로 95% 신뢰수준에서 검정을 실시하여 통상 직선에서 많이 벗어난 점들은 결측값으로 처리하면 된다.

우선 Fig. 2, Fig. 4 및 Fig. 6에 시험편이  $\phi$  0.3mm의 원공결함을 갖는 경우 각각 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 가진에 대한 대표적인 예를 도시해 보았다. 각각의 그림과 측정된 자료에서 알 수 있는바와 같이 시험영역 중앙(150, 100)의 위치에서 이벤트가 다수 발생함을 개략적으로 확인할 수 있으며, 그 값은 최종적으로 5Hz의 경우 (149.965, 99.944), 10Hz의 경우 (149.932, 99.964) 및 15Hz의 경우 (149.982, 99.971)의 위치에 결함이 확실히 존재하고 있음을 표정하고 있다. Fig. 3, Fig. 5 및 Fig. 7의 Q-Q plots으로부터 각각 결함의 치수는 대략 x방향에 대하여 0.5mm, 0.5mm 및 0.3mm로, y방향에 대하여 0.4mm, 0.4mm 및 0.4mm로 예측할 수 있다.

또한, 가진 Hz별로 나누어 고찰해 보면 Fig. 2 ④의 5Hz인 경우에는 45~70dB 사이의 저진폭 범위로 AE 에너지 값이 비교적 작게 나타났고, Fig. 6 ④의 15Hz인 경우에는 85~100dB 사이의 고진폭 범위로 AE 에너지 값이 비교적 크게 나타났으며, Fig. 4 ④의 10Hz인 경우에는 65~90dB 사이의 중진폭 범위로 AE 에너지 값 역시 5Hz와 15Hz 사이의 범위로 나타났다.

한편, Fig. 8은 가진 Hz 및 가진위치에 대한 전반적인 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 경우에 대하여 Fig. 2~Fig. 7까지의 분석결과와 마찬가지로 결함의 치수는

대략 x방향에 대하여 0.5mm로, y방향에 대하여 0.4mm로 나타났다. 따라서, 예측된 값은  $\phi$  0.3mm의 원공결함에 대하여 실제의 가공치수를 고려하면 양호하게 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

#### 3.2 결함길이를 결함경사각을 갖는 경우

전술한 바와 같이 Fig. 9~Fig. 22는 Fig. 1의 조건에 대한 실험결과를 3.1절과 동일한 방법에 의해 간단하게 정리한 것이다. AE원의 위치표정 결과 각각의 경우에 대하여 결함길이  $a=2\text{mm}$ 인 경우에는 1.5~2.5mm로, 결함길이  $a=4\text{mm}$ 인 경우에는 3.0~3.5mm로 관측되었다. 후자의 경우에는 그 결과값이 다소 작게 관측되었는데 이는 시험편의 크기가 작거나 혹은 센서의 크기가 너무 크기 때문에 나타나는 상호간섭에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 센서를 부착할 때 발생하는 오차를 감안하면 정밀·정확도가 높은 편이며, 상대적으로 시험편이나 구조물의 크기가 커진다면 그 오차는 줄어들 것이다. 또한, 본 연구에서 사용한 AE센서(PAC R15, resonant frequency 150kHz)는 통상 그 대역이 주변 잡음보다는 높기 때문에 충분하다고 할 수 있으며, 대개의 시험편에서 나타난 중앙(150, 100) 부근의 결함위치 표정결과는 길이 및 각도를 만들기 위하여 와이어 가공구멍(wire start hole)을  $\phi$  0.5mm로 1차 가공했을 때 생성된 원공부분의 치수효과 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9~Fig. 22로부터 결함경사각  $\alpha$ 에 대한 이벤트의 분포를 ( $X_s$ ,  $Y_s$ )에 대하여 고찰해보면 일반적으로 결함경사각  $\alpha$ 가  $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 증가함에 따라 이벤트의 분포가  $X_s$ 쪽에서  $Y_s$ 쪽으로 그 폭이 변하여 결함경사각  $\alpha=45^\circ$ 에서는 이벤트의 크기가 비슷하게 나타났으며, 그보다 큰 결함경사각일 경우에는 반대로 나타났다. 이는 결함길이  $a$ 가 평면결함으로 가정되어 그 크기가 큰 방향으로 투영되어 나타나는 현상으로 사료된다.

한편, 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 실험조건에 대한 분석결과 10Hz의 결과값이 가장 양호했으며, 가진위치 또한 ①의 위치에서 가장 좋은 결과값을 얻을 수 있었는데, 그 원인은 ②와 ③의 위치에서는 spot 가진시 충격에 의하여 시험편과 마그네틱 홀더 사이에서 발생한 잡음이 포함되기 때문인 것으로 추정된다.

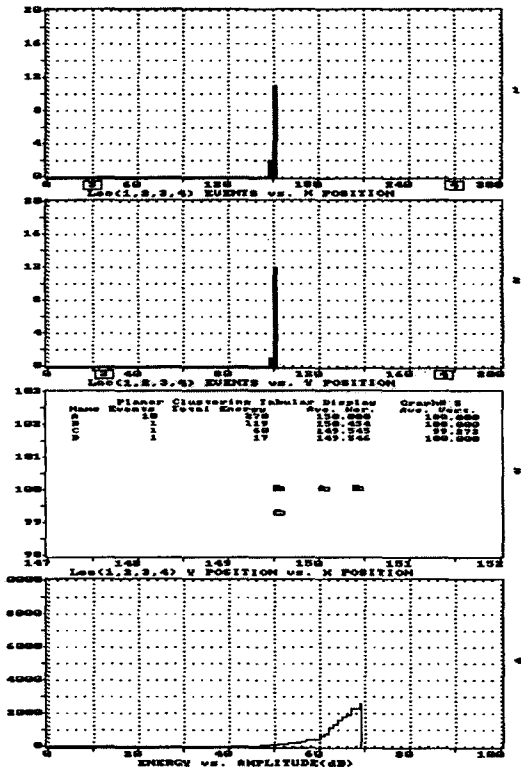


Fig. 2 AE source location ( $\phi$  0.3mm, 5Hz)

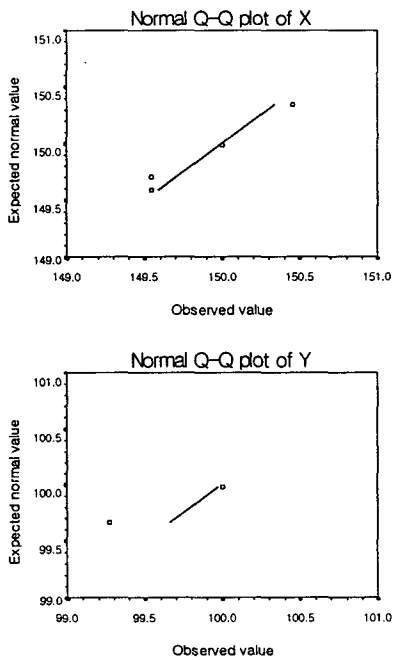


Fig. 3 Statistical analysis of AE source location ( $\phi$  0.3mm, 5Hz)

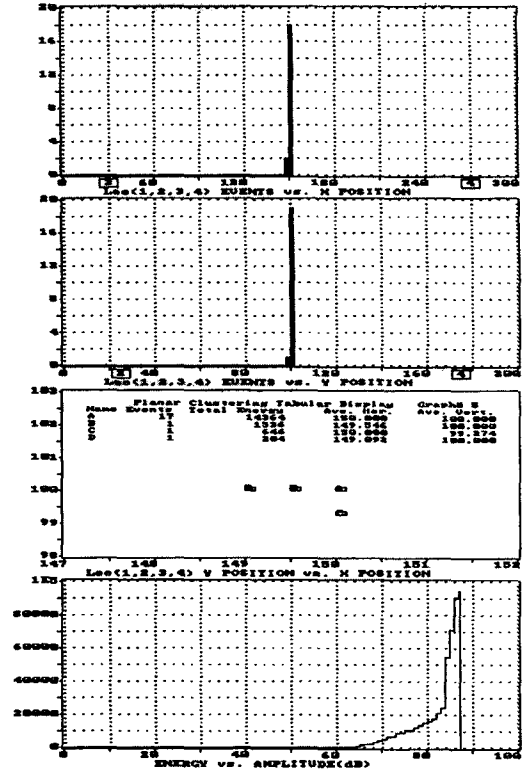


Fig. 4 AE source location ( $\phi$  0.3mm, 10Hz)

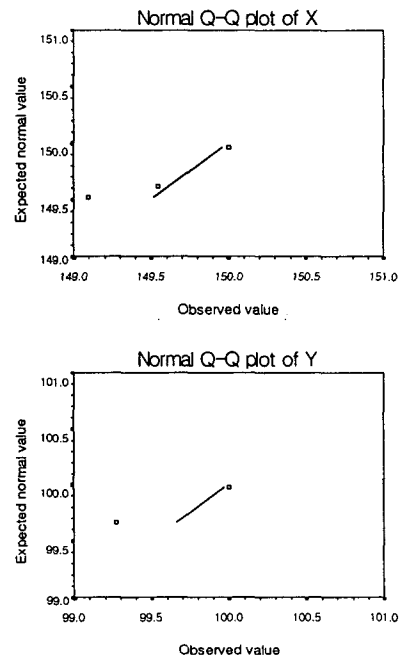


Fig. 5 Statistical analysis of AE source location ( $\phi$  0.3mm, 10Hz)

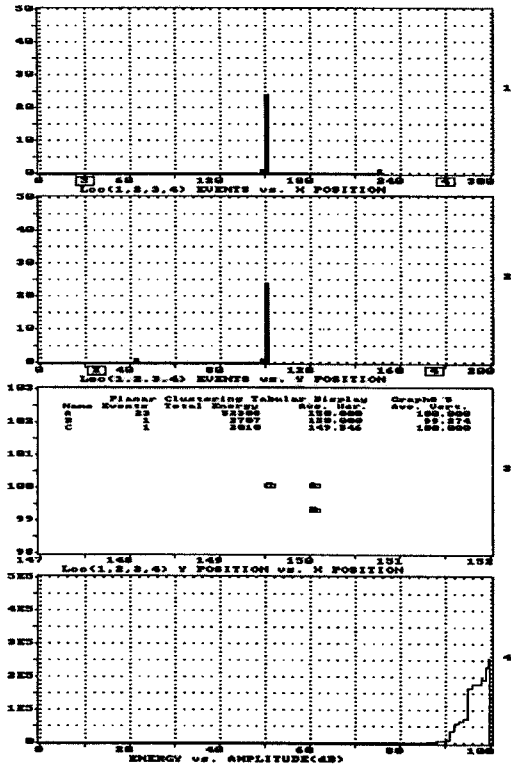


Fig. 6 AE source location ( $\phi$  0.3mm, 15Hz)

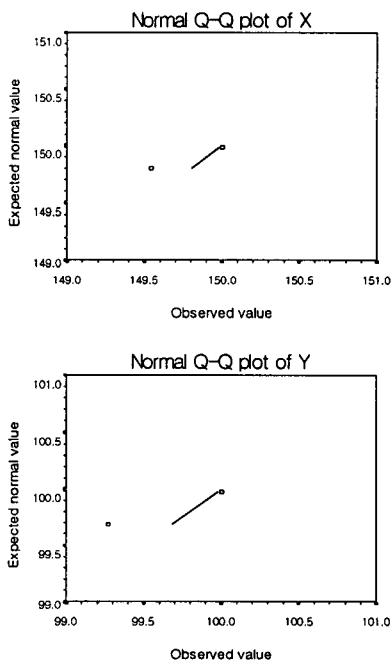


Fig. 7 Statistical analysis of AE source location ( $\phi$  0.3mm, 15Hz)

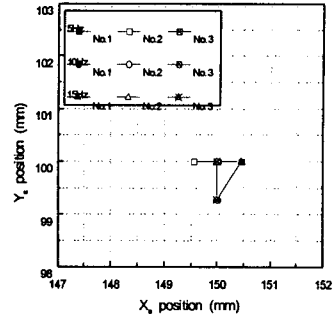


Fig. 8 Event identification ( $\phi$  0.3mm)

#### 4. 결론

본 연구에서는 제안한 spot 가짐에 의한 AE 위치표정으로부터 비파괴적으로 재료의 손상량을 동정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Spot 가짐에 의해 발생된 AE 음원의 위치 표정결과로부터 AE범은 결함의 발생 위치, 형상, 치수 및 방위 등을 알아내는데 아주 유용한 방법임을 확인하였다.

2. 결함길이  $a=2\text{mm}$ 인 경우에는  $1.5\sim 2.5\text{mm}$ 로, 결함길이  $a=4\text{mm}$ 인 경우에는  $3.0\sim 3.5\text{mm}$ 로 관측되었다. 이는 시험편의 크기가 작거나 혹은 센서의 크기가 너무 크기 때문에 나타나는 상호 간섭에 의한 것으로 판단된다.

3. 결함경사각  $\alpha$ 에 대한 이벤트의 분포를 ( $X_s, Y_s$ )에 대하여 고찰한 결과, 일반적으로 결함경사각  $\alpha$ 가  $0^\circ\sim 90^\circ$ 로 증가함에 따라 이벤트의 분포가  $X_s$ 쪽에서  $Y_s$ 쪽으로 그 폭이 변하여 결함경사각  $\alpha=45^\circ$ 에서는 이벤트의 크기가 비슷하게 나타났으며, 그보다 큰 결함경사각일 경우에는 반대로 나타났다. 이는 결함길이  $a$ 가 평면결함으로 가정되어 그 크기가 큰 방향으로 투영되어 나타나는 현상으로 사료된다.

4. 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 실험조건에 대한 분석결과 10Hz의 결과값이 가장 양호했으며, 가진 위치 또한 ①의 위치에서 가장 좋은 결과값을 얻을 수 있었는데, 그 원인은 ②와 ③의 위치에서는 spot 가짐시 충격에 의하여 시험편과 마그네틱 홀더 사이에서 발생한 잡음이 포함되기 때문인 것으로 추정된다.

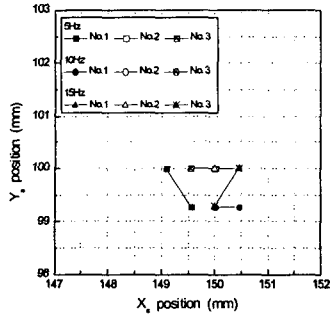


Fig. 9 Event identification ( $\alpha=0^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

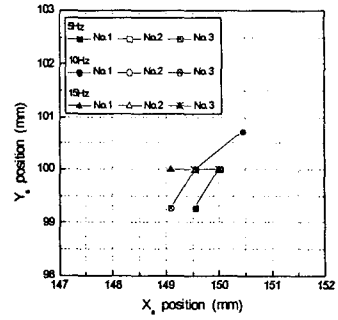


Fig. 13 Event identification ( $\alpha=30^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

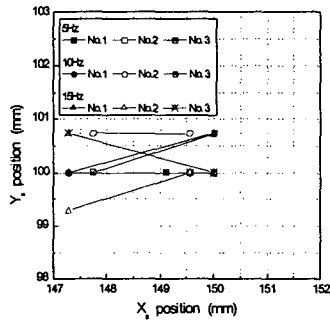


Fig. 10 Event identification ( $\alpha=0^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

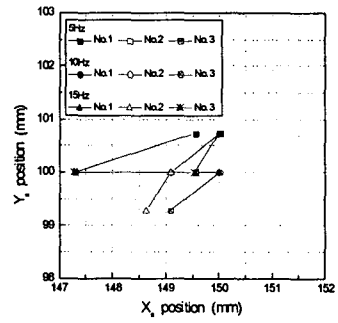


Fig. 14 Event identification ( $\alpha=30^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

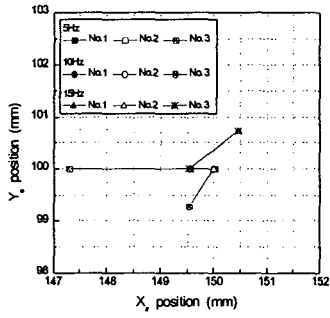


Fig. 11 Event identification ( $\alpha=15^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

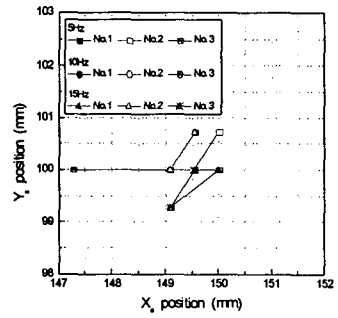


Fig. 15 Event identification ( $\alpha=45^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

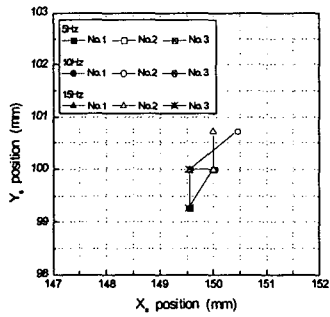


Fig. 12 Event identification ( $\alpha=15^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

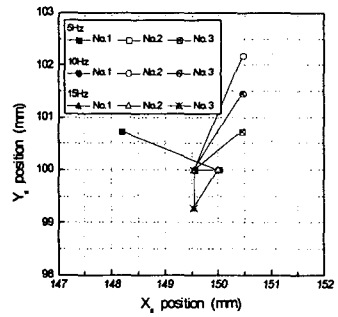


Fig. 16 Event identification ( $\alpha=45^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

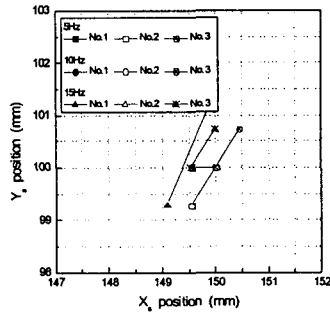


Fig. 17 Event identification ( $\alpha = 60^\circ$ ,  $a = 2\text{mm}$ )

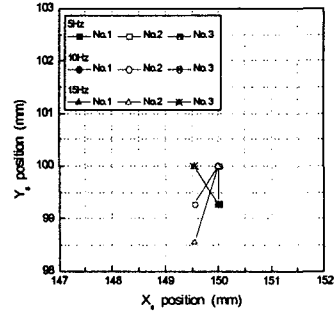


Fig. 21 Event identification ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $a = 2\text{mm}$ )

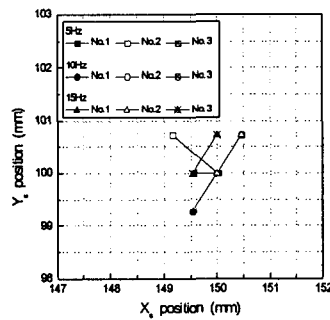


Fig. 18 Event identification ( $\alpha = 60^\circ$ ,  $a = 4\text{mm}$ )

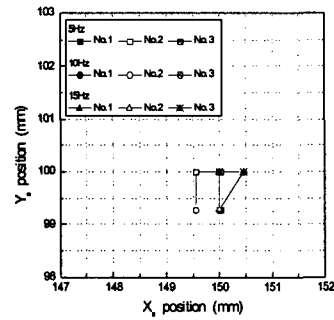


Fig. 22 Event identification ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $a = 4\text{mm}$ )

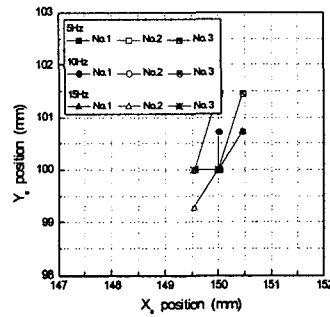


Fig. 19 Event identification ( $\alpha = 75^\circ$ ,  $a = 2\text{mm}$ )

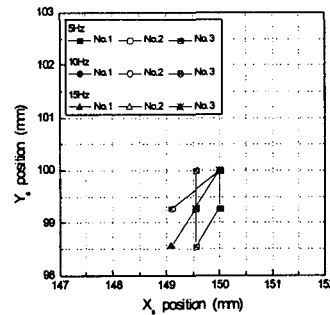


Fig. 20 Event identification ( $\alpha = 75^\circ$ ,  $a = 4\text{mm}$ )

### References

1. Baldev Raj and B.B. Jha, "Fundamentals of acoustic emission", British J. of NDT, Vol.36, No.1, pp.16-23, 1994.
2. 眞家敦子, 本間恭二, 結城宏信, "ニューラルネットワークによるAE源の位置標定およびその標定誤差に関する研究", 日本機械學會論文集(A編), 第66巻, 第634号, pp.1187-1192, 1999.
3. Ronnie K. Miller and Paul McIntire, *Non-destructive Testing Handbook (2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT, 1987.
4. Masayasu Ohtsu, "Source inversion of acoustic emission waveform", *Structural Eng. / Earthquake Eng.*, Vol.5, No.2, pp.275s-283s, 1988.
5. S.P. Yinf, D.R. Hamlin and D. Tameberger, "A multi channel acoustic emission monitoring system with simultaneous multiple event data analyses", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.55, No.2, pp.350-356, 1974.
6. *Spartan 2000 User's manual & Technical manual*, Physical Acoustics Corporation, 1995.

E-mail: zkrhee@hanmail.net / zkrhee@korea.com  
Fracture Mechanics Research Group