

# Spot 가진을 이용한 평면결함의 음향방출 위치표정

이장규\*, 박성완<sup>+</sup>, 우창기<sup>++</sup>

(논문접수일 2002. 12. 6, 심사완료일 2004. 6. 10)

## AE Source Location in Planar Defects using Spot Excitation

Zhang-Kyu Rhee\*, Sung-Oan Park<sup>+</sup>, Chang-Ki Woo<sup>++</sup>

### Abstract

From the results of AE(Acoustic Emission) source location 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. As the results of examining the distribution of event for the angle of crack  $\alpha$  to Xs and Ys, as the increases from  $0^\circ \sim 90^\circ$ , gradually changes its width from the axis Xs to the axis Ys. So event appears approximately similar in its size at the angle of crack  $\alpha = 45^\circ$ , yet opposite when  $\alpha$  is lager. It is believed that this is a phenomenon where its crack length  $a$ , assumed as a planar defect, is to be projected toward the direction with a larger size. Thus, it is expected that the application of the experimental method suggested in this study would make it possible to identify the location of the defect in the material in the nondestructive way.

**Key Words :** AE(음향방출), Source Location(위치표정), Spot Excitation(spot 가진), Identification(동정), Planar Defect(평면결함), NDE/NDI/NDT(비파괴 평가/검사/시험)

## 1. 서론

AE신호의 처리법 중에서 가장 정상적인 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 의

한 위치표정은 압력용기와 같은 구조물에 있어서 결함의 위치 및 균열의 시간적 진전에 따른 연속적인 추적과 외부로부터 들어오는 잡음의 제거에 매우 적합한 방법이다<sup>(1)</sup>.

AE 발생원(AE source)의 위치표정 기술은 다양하게 개발되고 있으며<sup>(2-8)</sup>, 대부분은 AE파가 각 센서에 도달하는 시간차로부터 구해진다<sup>(9,10)</sup>. 그러나, AE 위치표정의 문제점은 (1) 대단히 빠른 전파속도와 짧은 시간차를 이용한다는

\* 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)  
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지  
+ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과  
++ 인천대학교 기계공학과

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 교점에서 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<sup>(11)</sup>.

예를 들어, 다음과 같이 4개의 센서가 (X, 0), (-X, 0), (0, Y), (0, -Y)인 점에 위치하는 모델이 제안되었으며, 결국 식 (1)로부터 진짜 음원을 찾을 수 있게 된다<sup>(12)</sup>.

$$X = aB\sqrt{\frac{b^2 + A^2}{b^2B^2 - a^2A^2}} \quad (1)$$

$$Y = Ab\sqrt{\frac{a^2 + B^2}{b^2B^2 - a^2A^2}}$$

여기서,  $a = (1/2)\Delta t_x V$ ,  $A = (1/2)\Delta t_y V$ ,  $b = (X^2 - a^2)^{1/2}$  및  $B = (Y^2 - A^2)^{1/2}$ 이고,  $\Delta t_x$ 와  $\Delta t_y$ 는 각각 x와 y축 방향의 음파의 도달시간차이며,  $V$ 는 음파의 속도이다.

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 등정해 보고자 한다.

## 2. 실험 및 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 실험재료는 일반구조용 압연강재인 SS400으로 화학적 조성과 기계적 성질은 각각 Table 1과

Table 1 Chemical composition of SS400(wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.017	0.58	0.017	0.010

Table 2 Mechanical properties of SS400

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 2에서 보는바와 같다.

시험편은 동일한 배치(batch)에서 채취하여 압연방향으로 절단하고, 밀링바이스 물림부 30mm를 포함하여 300×230×5(t)mm의 치수로 ±0.001mm까지 제어가능한 터치포인트센서(Nikken, TP-20)를 장착한 밀링머신으로 앤드밀을 사용하여 직사각형으로 가공한 후, 가공된 표면을 정밀 연마하였다. 또한, 시험영역 중앙(150, 100)의 결합(균열)은 슈퍼EDM드릴(KTC, SD-1M)을 사용하여 ø0.5mm로 미소구멍을 낸 후, Fig. 1에서 보는바와 같이 결합길이  $a$ 는 2mm와 4mm로, 결합경사각  $\alpha$ 는 0°~90°까지 15° 간격으로 ø0.3mm의 와이어를 사용하여 와이어컷 방전가공기(Daewoo 320, Fine Sodick EX21)로 가공하였다.

### 2.2 실험방법

Fig. 1과 같이 주철 정반 위에 지그를 설치하고, 300×200mm 시험영역의 각 모서리로부터 30×25mm 떨어진 위치(센서1(30, 25), 센서2(270, 25), 센서3(30, 175) 및 센서4(270, 175))에 PAC사의 SP2-LOC 센서배치(sensor location)법에 의해 설정된 좌표에 대하여 임의센서배치(arbitrary sensor location)법에 의하여 4개의 AE센서를 직사각형 형태로 배열하였다. 한편 고진공 그리스(Dow corning high vacuum grease)를 사용하여 각 센서를 압착시키고 마그네틱 홀더(magnetic holder)를 이용하여 spot 가진 시 충격에 의해 센서가 시험편에서 분리되지 않도록 고정 한 후, 밀링바이스를 사용하여 최종적으로 시험편을 고정하였다.

본 연구에서는 Spartan 2000으로 예비실험을 통하여 얻은 실험조건으로부터 Fig. 1과 같은 시험편의 결함을 동정(identification)하기 위하여 유압식 진동가진기(vibration shaker)로 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 감도 측정 및 AE 측정조건은 Table 3과 같고, 실험 전 센서가 정상적으로 시험편 표면에 압착되었는지를 살펴보기 위하여 AST(Auto Sensor Test)를 실행시켜, 출력신호가 2dB 이내 에 있는지 확인하였다<sup>(13,14)</sup>.

본 실험에 앞서 AE신호에 의한 결합 동정이 정량적으로 가능한지를 알아보기 위해 시험영역 중앙에 슈퍼EDM드릴을 사용하여 ø0.3mm로 미소구멍을 가공하고, 전술한 바와 같은 방법에 의해 결함의 길이에 대한 직경의 효과를 검토하였다. 그 결과 시험편 가공상의 문제점으로 인하여 ø0.5mm의 치수로 시험영역 중앙에 드릴구멍을 내고, 결합길이  $a$ 는 드릴의 직경보다 큰 치수인 2mm와 4mm로 결정하였다.

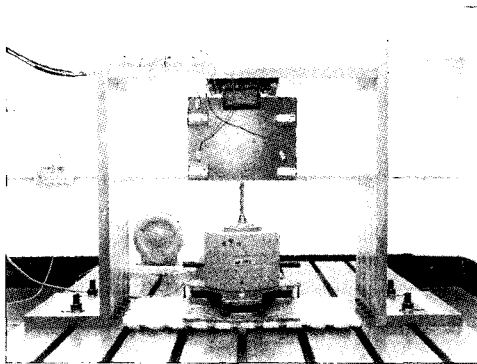
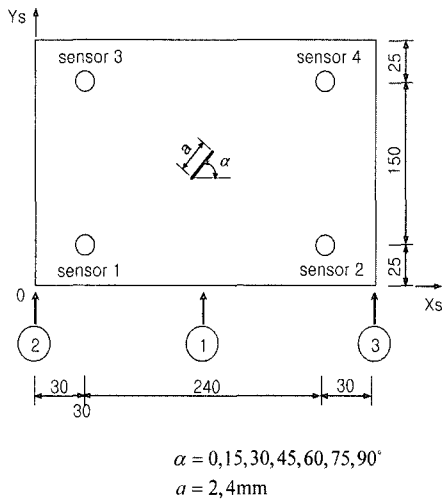


Fig. 1 Schematic configuration of experiment

Table 3 Experimental condition

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 원공결함이 있는 경우

Fig. 2, Fig. 4 및 Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 수평 및 수직 방향의 직사각형으로 배치된 센서로부터 측정에 의하여 위치표정된 ( $X_s, Y_s$ )와 AE 이벤트 수와의 관계이고, (c)는 (a)와 (b)의 결과로부터 얻어진 평면군집표(planar clustering tabular)이며, (d)는 AE 진폭과 에너지와의 관계이다. Fig. 3, Fig. 5 및 Fig. 7에서 Q-Q plots이 제시하는 형

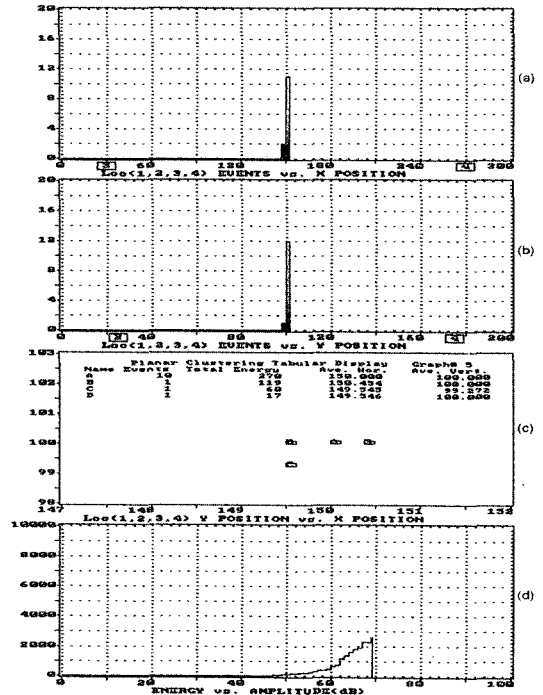


Fig. 2 AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 5Hz)

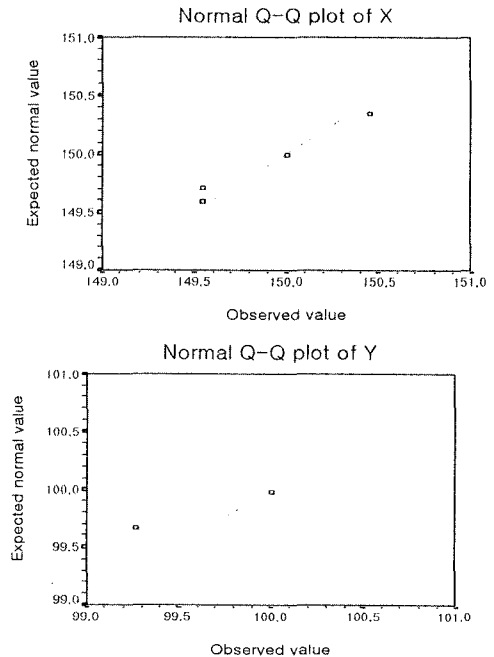


Fig. 3 Statistical analysis of AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 5Hz)

태는 검정분포값의 분위수(직선)에 대한 변인의 분포분위수(점)를 그래프화한 것으로 검정분포의 유형이 변인에 적절할 경우 점들이 직선주위에 모여, 정규분포를 전제로 95% 신뢰수준에서 검정을 실시하여 통상 직선에서 많이 벗어난 점들은 결함값으로 처리하면 된다.

우선 Fig. 2, Fig. 4 및 Fig. 6에 시험편이  $\phi 0.3\text{mm}$ 의 원공결함을 갖는 경우 각각 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 가진에 대한 대표적인 예를 도시해 보았다. 각각의 그림과 측정된 자료에서 알 수 있는바와 같이 시험영역 중앙의 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 확실하게 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 (d)의 5Hz인 경우에는 45~70dB 사이의 저진폭 범위로 AE 에너지 값이 비교적 작게 나타났고, Fig. 6 (d)의 15Hz인 경우에는 85~100dB 사이의 고진폭 범위로 AE 에너지 값이 비교적 크게 나타났으며, Fig. 4 (d)의 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 보는바와 같이 각각의 경우에 대하여 Fig. 2~Fig. 7까지의 분석결과와 비교해 볼 때, 결함의 치수는 x방향에 대하여 약 0.5mm로 비슷하며, y방향에 대해서는 다소 큰 약 0.7mm로 나타났다. 따라서, 예측된 값은  $\phi 0.3\text{mm}$ 의 원공결함에 대하여 실제의 가공치수를 고려하면 양호하게 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.2 결함길이와 결함경사각이 있는 경우

전술한 바와 같이 Fig. 9~Fig. 22는 Fig. 1의 조건에 대한 실험결과를 3.1절과 동일한 방법에 의해 간단하게 정리한 것이다.

AE원의 위치표정결과 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, 상

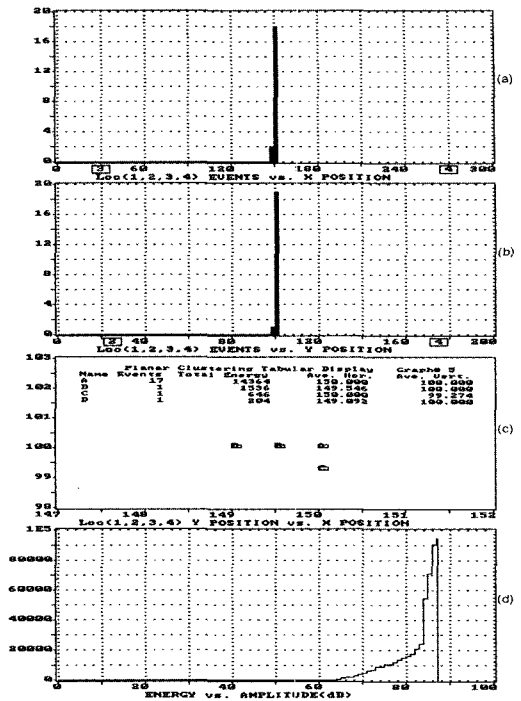


Fig. 4 AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 10Hz)

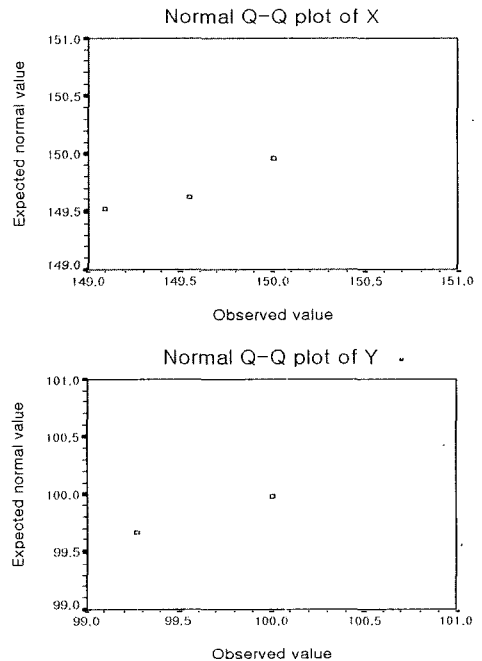


Fig. 5 Statistical analysis of AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 10Hz)

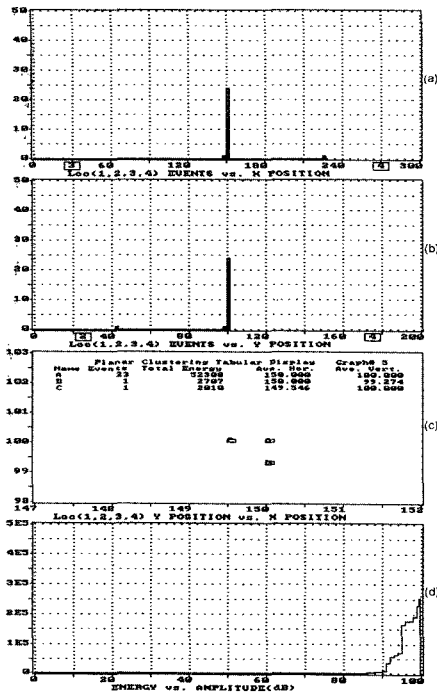


Fig. 6 AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 15Hz)

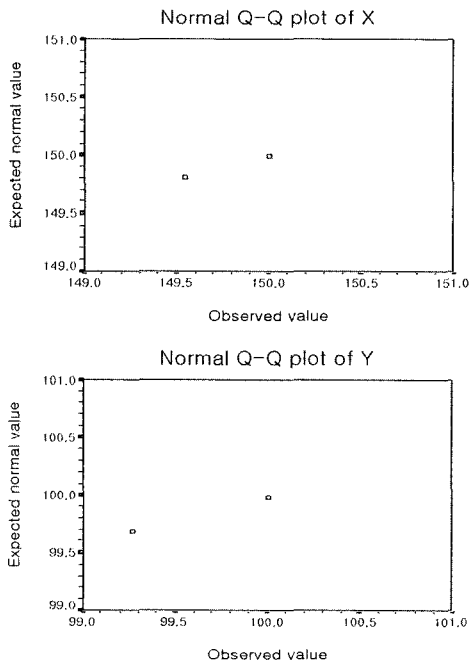


Fig. 7 Statistical analysis of AE source location ( $\phi 0.3\text{mm}$ , 15Hz)

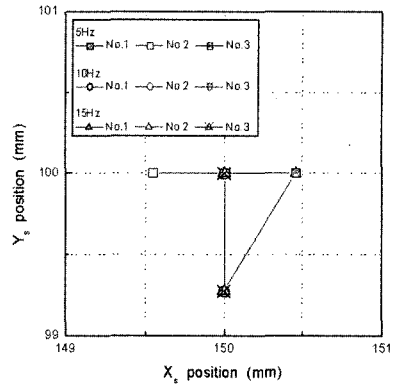


Fig. 8 Event identification ( $\phi 0.3\text{mm}$ )

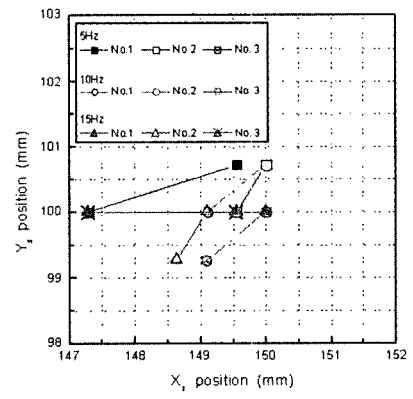
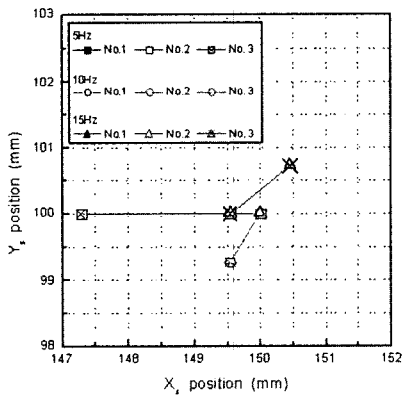
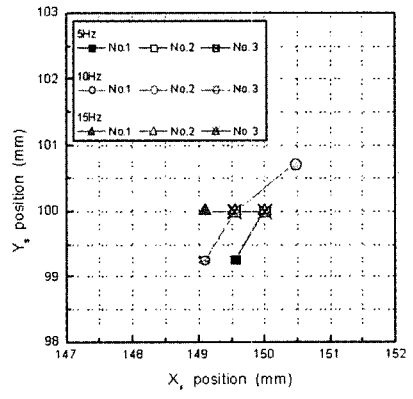
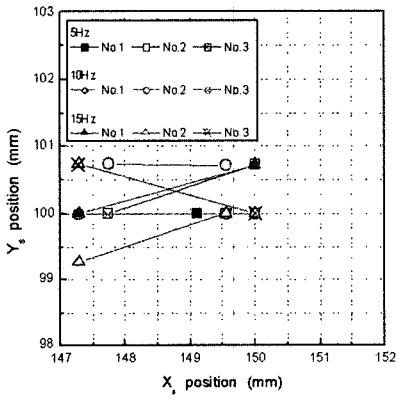
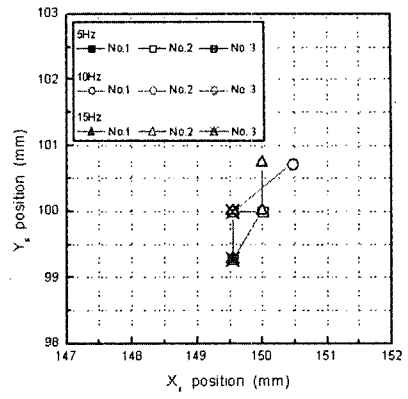
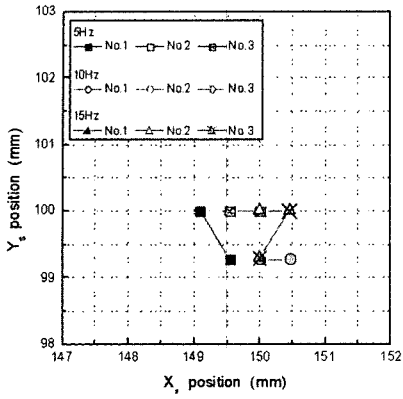
대적으로 시험편이나 구조물의 크기가 커진다면 그 오차는 줄어들 것이다. 또한, 본 연구에서 사용한 AE센서(PAC R15, 공진주파수 150kHz)는 통상 그 대역이 주변 잡음보다는 높기 때문에 충분하다고 할 수 있으며, 대개의 시험편에서 나타난 중앙부근의 결합위치 표정결과는 길이 및 각도를 만들기 위하여 와이어 가공구멍(wire start hole)을  $\phi 0.5\text{mm}$ 로 1차 가공했을 때 생성된 원공부분의 치수효과 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9~Fig. 22로부터 결합경사각  $\alpha$ 에 대한 이벤트의 분포를 ( $X_s$ ,  $Y_s$ )에 대하여 고찰해보면 일반적으로 결합경사각  $\alpha$ 가  $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 증가함에 따라 이벤트의 분포가  $X_s$ 쪽에서  $Y_s$ 쪽으로 그 폭이 변하여 결합경사각  $\alpha=45^\circ$ 에서는 이벤트의 크기가 비슷하게 나타났으며, 그보다 큰 결합경사각일 경우에는 반대로 나타났다. 이는 결합길이  $a$ 가 평면결합으로 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 가진 시 충격에 의하여 시험편과 마그네틱 홀더 사이에서 발생한 잡음이 포함되기 때문인 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 제한한 spot 가진에 의한 AE 위치표정으로 부터 비파괴적으로 재료의 손상량을 동정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.



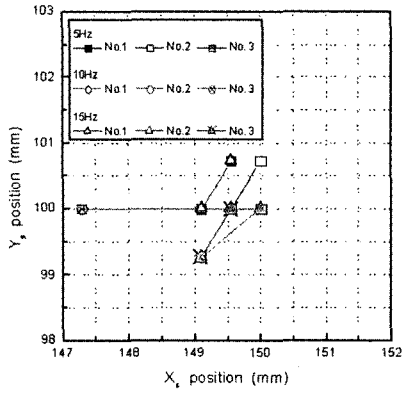


Fig. 15 Event identification ( $\alpha=45^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

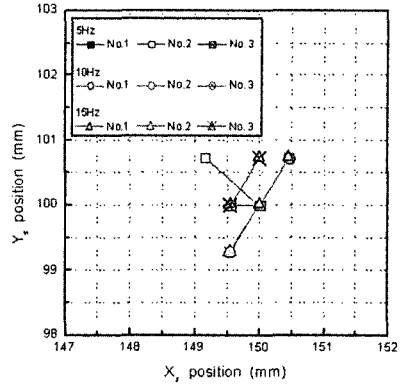


Fig. 18 Event identification ( $\alpha=60^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

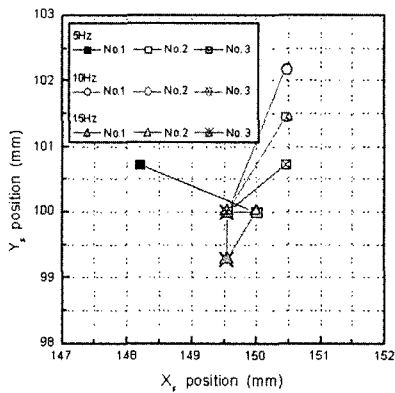


Fig. 16 Event identification ( $\alpha=45^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

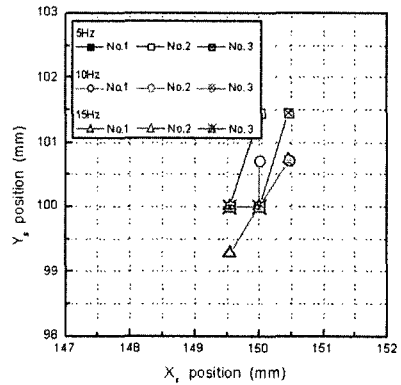


Fig. 19 Event identification ( $\alpha=75^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

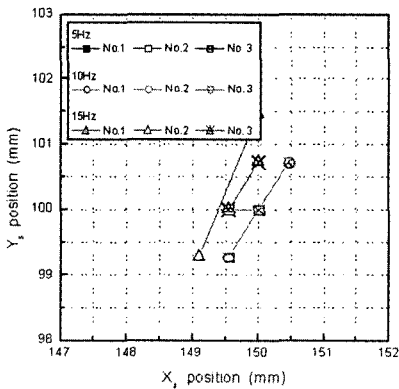


Fig. 17 Event identification ( $\alpha=60^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

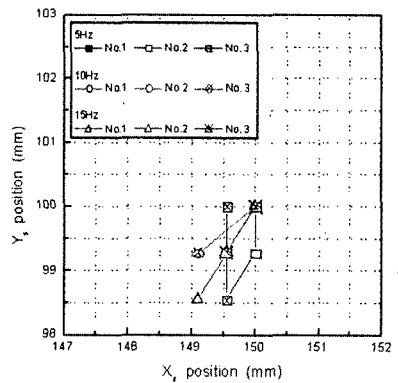


Fig. 20 Event identification ( $\alpha=75^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

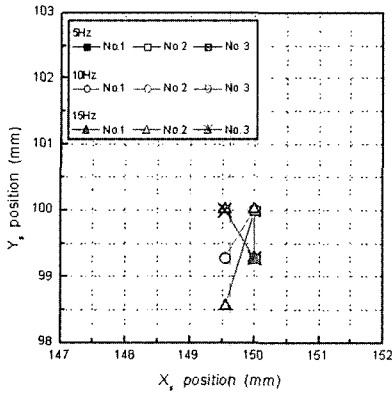


Fig. 21 Event identification ( $\alpha=90^\circ$ ,  $a=2\text{mm}$ )

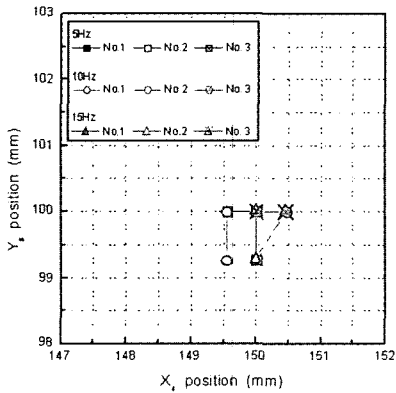


Fig. 22 Event identification ( $\alpha=90^\circ$ ,  $a=4\text{mm}$ )

의 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.

### 참고 문헌

- (1) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, Acoustic Emission Testing, ASNT.
- (2) Buttle, D. J., and Scruby, C. B., 1990, "Characterization of Fatigue of Aluminum Alloys by Acoustic Emission Part I - Identification of Source Mechanism," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 9, No. 4, pp. 243~254.
- (3) Yuki, H., and Homma, K., 1991/1992, "Analysis of Artificial Acoustic Emission Waveforms Using a Neural Network," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 10, No. 3-4, pp. 35~41.
- (4) Raj, B., and Jha, B. B., 1994, "Fundamentals of Acoustic Emission," *British Journal of NDT*, Vol. 36, No. 1, pp. 16~23.
- (5) Maie, A., Homma, K., and Yuki, H., 1999, "Acoustic Emission Source Location and Its Error Using a Neural Network Technique," *Transactions of the JSME Series A*, Vol. 65, No. 634, pp. 1187~1192.
- (6) Prosser, W. H., Gorman, M. R., and Humes, D. H., 1999, "Acoustic Emission Signals in Thin Plates Produced by Impact Damage," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 17, No. 1-2, pp. 29~36.
- (7) Yamada, H., Mizutani, Y., Nishino, H., Takemoto, M., and Ono, K., 2000, "Lamb Wave Source Location of Impact on Anisotropic Plates," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 20, pp. 51~60.
- (8) Vallen, H., and Vallen, J., 2000, "New Software Tools for the AE-Practitioner," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 20, pp. 265~271.
- (9) Ohtsu, M., 1988, "Source Inversion of Acoustic Emission Waveform," *Structural Eng. / Earthquake Eng.*, Vol. 5, No. 2, pp. 275s~283s.
- (10) Komura, Y., Hiramatsu, T., and Shintani, M., 1990,

- (1) Spot 가진에 의해 발생한 AE 음원의 위치표정결과로부터 AE법은 결함의 발생 위치, 형상, 치수 및 방위 등을 알아내는데 아주 유용한 방법임을 확인하였다.
- (2) 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.
- (3) 5Hz, 10Hz 및 15Hz의 실험조건에 대한 분석결과 10Hz의 결과값이 가장 양호했으며, 가진 위치 또한 ①



- “Basic Study of Search for a Sound Source,” *Transactions of the JSME Series C*, Vol. 56, No. 526, pp. 1420~1424.
- (11) Nakasa, H., 1994, *Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission*, Chijin Shokan Co., Ltd.
- (12) Yinf, S. P., Hamlin, D. R., and Tanneberger, D., 1974, “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.
- (13) Rhee, Z. K., 2001, *Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission*, Ph. D. Thesis, University of Incheon, Korea.
- (14) Physical Acoustics Corporation, 1995, *Spartan 2000 User's manual & Technical manual*, PAC.