

## 人工缺陷에 의한 AE發生原位置標定과 信號解析

문용식·정현규·주영상·이종포  
한국에너지연구소

1986년 3월 13일 접수

### AE Source Location and Evaluation of Artificial Defects

Y. S. Moon, H. K. Jung, Y. S. Joo, J. P. Lee

### ABSTRACT

The application and development of on-line monitoring technology of AE to surveillance of crack propagation will contribute to the structural integrity of reactor pressure vessel and piping system. This research has been performed in order to obtain the evaluation technology for source location of AE and the analysis for the AE signal of the welded specimen.

AE is detected by 4-channels AE system during pressurization in small pressure vessels. The cracking of artificial defects can be accurately located and categorized in real time.

The welded specimens have more events rate and higher amplitude than the weldless specimens, and the events rate have a peak around the yield point and just before the failure under tensile test.

#### 1. 序 論

Acoustic Emission (AE)은 應力을 받은 材料의 變形 또는 破壞시 방출되는 탄성응력과 이며, 탄성에너지의 일부가 소리 에너지로 변환전파되는 현상이다.<sup>1)</sup>

AE試驗法은 근래에 들어서면서 化學工業, 宇

宙産業 그리고 原子力産業 등 安全性이 고도로 요구되는 분야에서 파괴를 미리 예견한다든지 운전중 缺陷部位를 監視하는 등 구조적 건전성 평가에 이용하기 위해 많은 연구가 시작되었다<sup>2)</sup>

또 하나의 응용분야는 파괴역학적 研究로서 AE로 材料特性間的 관계를 연구하는 분야이다.<sup>3) 4)</sup> 특히 AE로 구조물의 결함부위를 탐지

코자하는 연구는 구조물의 전부위를 근접 조사하지 않고도 전 부위를 감시평가 할 수 있으며, 실제 작동중인 상태의 가압경계면을 連續監視하여 實時間內에서 성장하는 결함의 대략적인 위험도를 평가 규정지을 수 있다.<sup>4)</sup> 원자력 발전소에서의 AE를 이용한 연속감시가 압력용기의 수압시험, 시운전, 정상상태운전 및 운전정지 등 전상태동안 수행될 때 AE의 탐지는 압력용기 구조 상태의 완전한 history를 제공한다.<sup>5)</sup>

본 實驗은 AE信號를 이용한 缺陷位置 標定으로 소형 압력용기에 수압시험을 행하여 인공 결함부위에서 발생하는 AE波의 각 탐촉자 도달 시간차 ( $\Delta t$ )를 測定함으로써 실험실 단계로 행하여졌다. 그리고 대부분의 缺陷이 熔接部에서 발생하여 진전되기 때문에 용접부위에서 발생하는 AE의 특성을 살리기 위해 熔接部가 있는 試片과 없는 정상 試片을 준비하여 引張試驗을 수행하면서 AE 신호를 측정 조사하였다.

본 研究는 AE신호에 의한 인공결함 位置標定과 용접부위의 AE 특성 조사로서 人工缺陷의 위치결정과 缺陷의 위험도를 여러가지 AEparameter—Events Ringdown Counts, AEenergy로써 추정코자 하였다.

缺陷位置는 Zone Location System을 적용하여 결정하였고 파괴될 때까지 AE를 측정 조사함으로써 파괴예방에 관한 기초 연구를 수행하였다.

## 2. 本 論

### 1. 位置標定의 方法

橫造物에 있어서 돌발형 AE 신호를 갖는 AE Source의 位置情報는 최소 3개 이상의 探觸子에 도달하는 AE波의 시간차 計測으로 얻어진다.<sup>6)</sup> 이러한 AE標定의 目的으로는 다음의 것들이 있다.

가) 監視範圍외에서의 잡음과 범위내에서 발

생하는 AE와의 식별

나) 壓力容器등의 구조물에 있어서 AE가 발생하는 缺陷位置의 檢出

다) 缺陷의 시간적 성장의 追跡, 推定 및 危險度의 判定. AE法은 압력용기 등의 稼動前 또는 稼動中 檢査時의 靜水圧試驗에 있어서 유효한 자료를 제시할 수 있으며, 특히, 稼動中 監視에 대단히 유용한 수단이 될 수 있다.<sup>7)</sup> AE 標定の 原理는 지진의 진원지를 추정하는 것과 거의 동일하지만 探觸子의 配置에 規則性을 유지하여 다수의 AE 探觸子에 들어온 AE 신호에 대하여 統計的 處理 및 AE Energy를 측정함으로써 결함 위치의 신뢰도 증진 및 결함 부위의 결함 진전의 추정 및 위험도를 판정할 수 있다. 이러한 판정기준으로 AE Events 및 Ringdown Counts 수와 발생을 측정, AE의 총 Amplitude 합과 Energy 측정 및 AE Amplitude의 Events 수에 대한 통계적 분포를 처리함으로써 결함의 진전을 추정하게 된다.

AE 標定은 AE 신호의 각 AE 탐촉자에 대한 도달시간차( $\Delta t$ )를 Digital 計測하여 On-Line 계산기에 의하여 Real-Time으로 처리하는 것이 편리하며 Multichannel로 대형화할 수 있는 방식이 일반적으로 유리하다. 標定에 있어서 AE 探觸子는 구조물에 2차원 판상으로 전개되는 경우 정방형, 삼각형등 규칙적인 배열로 배치되는 데 4개 또는 3개의 탐촉자에 둘러싸인 基本標定單位를 Area라 하고 이 Area내에서의 AE발생원의 위치는 탐촉자에 AE신호 도달 시간차에 의한 쌍곡선의 交點으로 구하여 진다.<sup>9)</sup>

그림 1에 있는 정방형상에 배치된 4개의 AE 探觸子에 의해 Area가 구성되는 경우, X축상의 AE 탐촉자 i, k사이의 도달시간차  $\Delta T_x$ 에서 쌍곡선 1이 구해지고, Y축상의 AE 탐촉자 l, j 사이의 시간차  $\Delta T_y$ 에서 쌍곡선 2가 구해지는데, AE발생원 위치는 이 쌍곡선들의 交點으로서 標定된다.<sup>9)</sup>

실제의 경우  $i, j, k, l$ . 4개의 탐촉자 사이의 신호 도달 시간차와 각 탐촉자의 위치에 의해 X Y가 계산되는데 다음과 같다.<sup>10)</sup>

AE 신호 전파에 대한 기본식

$$\begin{aligned} V^2 t_1^2 &= (X-a_1)^2 + (Y-b_1)^2 \\ V^2 t_2^2 &= (X-a_2)^2 + (Y-b_2)^2 \dots\dots\dots ① \\ V^2 t_3^2 &= (X-a_3)^2 + (Y-b_3)^2 \\ V^2 t_4^2 &= (X-a_4)^2 + (Y-b_4)^2 \end{aligned}$$

측정된 도달시간차

$$\begin{aligned} \tau^1 &= t_2 - t_1 \\ \tau^2 &= t_3 - t_1 \dots\dots\dots ② \\ \tau^3 &= t_4 - t_1 \end{aligned}$$

①과 ②식에 의해

$$\begin{aligned} 2(a_1-a_2)X + 2(b_1-b_2)Y - 2V^2\tau_1 t_1 - V^2\tau_1^2 + a_2^2 - a_1^2 + b_2^2 - b_1^2 &= 0 \\ 2(a_1-a_3)X + 2(b_1-b_3)Y - 2V^2\tau_2 t_1 - V^2\tau_2^2 + a_3^2 - a_1^2 + b_3^2 - b_1^2 &= 0 \\ 2(a_1-a_4)X + 2(b_1-b_4)Y - 2V^2\tau_3 t_1 - V^2\tau_3^2 + a_4^2 - a_1^2 + b_4^2 - b_1^2 &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots ③$$

윗식들은 다음과 같은 형태의 식들이다.

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 t_1 + D_1 &= 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 t_1 + D_2 &= 0 \dots\dots\dots ④ \\ A_3 X + B_3 Y + C_3 t_1 + D_3 &= 0 \end{aligned}$$

X와 Y는 다음 식에 의해 구해진다.

$$X = \begin{vmatrix} D_1 & B_1 & C_1 \\ D_2 & B_2 & C_2 \\ D_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} \dots\dots\dots ⑤$$

$$Y = \begin{vmatrix} A_1 & D_1 & C_1 \\ A_2 & D_2 & C_2 \\ A_3 & D_3 & C_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} \dots\dots\dots ⑥$$

이와같이 계산에 의해 AE 발생원을 표정하는 방법외에도 표정 Area 내에 많은 Element를 잘랐을때 어떤 Element에 AE 발생원이 있다면 이 Element의 각 탐촉자에 대한 상대적인 정보는

각 탐촉자에 대한 AE 신호 도달 순서 및 도달시 간차이다. 이 방식이 그림 2에 나타나있는 정삼각형 Area에 있어서의 Table Look Up 방식이다.<sup>2)</sup>

이 Table Look Up 방식에 있어서 AE가 그림 2에 있는 3개의 탐촉자에 1, 3, 2의 순서로 도착되었을 때 AE Source는 그 정삼각형을 6등분한 sector 중의 sector 3에 있다고 推定되어지며, 다음으로 각 AE도달시간차에 대응하는 Zone Element를 표에 나타내어 10개의 zone Element의 어느 곳인가가 결정된다.

이 방법은 첫번째 sector의 Zone 표에 따라 동일한 형태인 대칭형의 전체 sector에 사용되어져서 AE 탐촉자群에 의해 둘러싸인 구조물 전체를 標定할 수 있으며, 標定의 情報處理 速度가 큰것이 장점이다. 또한, AE 탐촉자 간격의 변경, Zone의 크기 변경등 실험 중에 변경이 용이한 것이 특징이다. 그러나, 이 방법은 정확한 위치표정을 위해서는 많은 Zone Table이 필요하며 ⑤⑥ 식을 이용하여 처리하는 위치표정 방법에 비하여 정밀도가 떨어진다.

본 실험에서 사용된 AET-5000은 Table Look Up 방식의 위치표정 방법을 도입하고 있다.

AE 탐촉자 간격은 AE와 잡음의 진폭 크기의比, 즉, S/N비와 구조물의 크기 및 감쇄정도에 따라 정해지며 보통 1~5m 정도로 제한된다.<sup>5)</sup> 標定의 信賴性을 높이기 위해서는 간격을 좁히는 것이 필요하며 AE 탐촉자 수를 많이 필요로 하나 비용이 증가하기 때문에 적정 간격으로 구조물이나 압력용기에 AE 탐촉자를 부착하고 중요부위에 좁은 간격으로 배치할 수도 있다.

AE位置標定의 문제점으로는 다음의 것들이 있다.<sup>6) 9) 10)</sup>

- (1) 탐지된 AE 파형의 특성이 해석되지 않다면 AE 위치표정은 정확해 질 수 없다.
- (2) Multiple AE Events의 발생때문에 AE原의 혼돈

- (3) AE 신호의 분산 또는 Mode Conversion으로 인하여 구조물 내에 전파되는 AE 속도의 불확정성
- (4) 위치 표정 정밀도와 비용을 고려한 적절한 탐촉자 배열
- (5) 외부 잡음과 AE 신호와의 구분.

2. AE 計測裝置 및 試驗品

본 실험에 사용한 AE 裝置는 전산처리 장치가 내장되어 있는 AET-5000으로서 AE의 振幅, Events 計數 및 Ringdown Counts 計數 그리고 이에 대한 통계적 처리를 Real-time으로 실행할 수 있고, 8 Channel 까지 확장할 수 있다. 특히, 위치 표정을 위하여 Time Difference Module (TDM) 이 내장되어 있다. 그림 3은 본 실험에서 位置標定을 하기 위한 4 channel 裝置 概略圖이고 그림 4는 引張試驗시의 概略圖이다. 위치표정 실험을 실행하기 전에 部位校正方式에 의해 각 Zone Element의 구성요소를 入力하게 된다.

部位校正方式은 검사대상체가 어떤 형태든지 관계없이 位置標定에 관한 情報를 얻을 수 있다. 校正(Calibration)을 하는 동안에 검사체의 각 部位를 지시하는 境界面 Table을 만들게 되는데 이 구성요소는 탐촉자에의 AE도달순서, 도달시간차 許容範圍, 진폭범위, 部位名 등으로 되어 있다.

位置標定用 壓力容器로는 LPG Tank를 사용하였고 引張試驗片으로는 보통의 板狀炭素鋼을 썼다. LPG Tank는 총길이 60cm, 中心부분 길이 46cm, 직경 28cm $\phi$ , 두께 4mm의 炭素鋼이며 사용압력은 10kg/cm $^2$ 이하, 최대압력은 31kg/cm $^2$ 이다. 容器的 중앙부위에 인위적으로 熔接缺陷을 만들어 넣고 Hydrocell을 이용하여 약 1,000~1,200psi 까지 압력을 올림으로써 이 불량 용접 부위가 破壞되도록 하였다. (사진 1) 人工缺陷은 Cold Crack, Hot Crack, 氣孔(Porosity),

介在物(Inclusion) 등으로서 Cold Crack은 炭素와 에폭시 接着劑를 첨가하여, Hot Crack은 니켈이나 구리와 같은 融點이 낮은 금속 분말을 에폭시 접착제와 함께 첨가 하였으며, 介在物은 Al $_2$ O $_3$ 나 SiO $_2$ 와 같은 融點이 높은 분말을 에폭시 수지와 함께 넣고 그리고, 氣孔은 Fe $_3$ O $_4$  분말을 에폭시 수지와 함께 넣어 缺陷이 만들어 지도록 하였다. (그림 5)

引張試驗片은 試片가운데를 熔接한 뒤 가공한 試片과 건전한 試片을 준비하여 50 Ton급 Instron을 이용하여 引張試驗을 행하였다. 이때 引張試驗의 荷重速度는 35kg f/sec로 상온에서 실시 하였다.

引張試驗시 AE의 증폭도를 80dB로 하였고 이때 Noise는 약 80mV 정도였으며 Threshold는 0.2 Volt로 설정하여 신호처리 하였다. 壓力容器的 位置標定檢査에서는 각 channel마다 증폭도를 달리하여 같은 신호가 나오도록 보정하였고 Noise는 약 50~70mV 정도였으므로 Threshold는 0.1 Volt로 설정하였다.

III. 實驗結果 및 考察

1. 壓力容器的 人工缺陷 位置標定

축 方向 및 원주 方向으로 不良熔接된 壓力容器에 壓力를 增加시킴에 따라 不良熔接部의 降伏現象 소성변형 및 균열진전으로 인한 A E 發生位置는 각 용기에 대해 그림 6, 7, 8, 9.에 나타나 있다.

水壓試驗중의 AE發生은 크게 3 단계로 區分할 수 있다. 첫째 약 30기압까지의 초기단계, 둘째 약 60기압까지의 降伏段階, 셋째는 80기압이상까지의 破壞段階이다. 초기 단계에서의 AE發生은 壓力가 가해짐에 따라 不良熔接에 의한 결함과 용접시 熱應力에 의한 不均一變形에 따른 것이라고 생각되며 降伏段階는 내부 압력이 계속 증가함에 따라 용접부가 항복점에 到達할

때 소성변형과 균열 진전으로 인하여 나타난 AE Event 발생現狀이며 파괴단계는 缺陷이 진전하여 파열되면서 누수현상을 동반한다. 보편적으로 항복단계에서 많은 AE가 발생한다.<sup>1)</sup> 그리고, 그림 6에서 용접부의 中央보다는 양단에 AE Event가 많았다. 이것은 용접부의 양단에의 應力集中으로 인한 것으로 생각된다. 그림 10에서는 母材부분에서도 AE가 발생 하였음을 보여준다. 이는 母材의 항복 현상으로 인한 것으로 사려되는데 용접부에 비해 매우 적은 AE Event가 발생하였다.

그림 10, 11은 압력용기내의 압력증가에 따른 AE 총 Event 변화를 나타낸 것이다.

압력용기 3의 Region 2는 Notch 부분이고 압력용기 4의 Region 1, 2, 3는 Inclusion, Blow Hole Hot Crack인데 이에 대한 AE발생 상황을 보면 균열성 결함은 매우 크고 동적인 AE 거동을 보이고 돌발형의 큰 진폭 AE를 발생시킨다. 반면 Blowhole Slag Inclusion과 Lack of fusion은 큰 응력 상태에서도 적은 수와 작은 진폭의 AE가 발생된다. 이와같이 수압 파괴시험에서 보듯이 AE는 결함의 전과정도에 관계되지만 여러가지 인공 결함의 종류에 큰 관계가 없음이 이미 실험되어 평가된 바와 같이<sup>2)</sup> 입증되었다.

### 2. 引張試驗片에 대한 AE 特性

일반적으로 항복점 근처와 破壞직전에서 AE Event 發生率이 큰 것으로 알려져 있는데 본 실험에서도 같은 結果가 나타났다. AE Evgnts 發生率을 나타낸 그림 12, 13, 14를 살펴보면 용접부가 있는 시편의 항복점 근처에서 Event 發生率이 파괴직전때보다 더 크게 나타났는데 비해 용접부가 없는 정상 試片에서는 파단작전에서 더 많은 AE가 발생하였다.

또한, 熔接部가 母材보다 항복점 근처에서 더 많은 AE를 발생시키며, 延伸率이 적은 熔接部

가 소성영역에서 더 빨리 파단되므로 AE 發生시점이 더 빨리 나타나 두개의 Peak가 나타나는 現象이 나타났다. 이 두개의 Peak중의 첫번째 Peak가 용접부의 항복점을 나타내고 두번째의 Peak가 母材의 항복점을 나타낸다.

AE Peak Amplitude에 대한 AE Event 분포도인 그림 15, 16, 17을 보면 熔接部가 있는 試片에서는 振幅이 크고 Ringdown Count가 많은 AE 발생특성을 보임을 알 수 있다. 일반적으로 AE 振幅 분포는 다음 식을 따른다.<sup>3)</sup>

$$N=N_0 A^{(-n)} \dots\dots\dots ⑦$$

여기서, N= Events 수, N<sub>0</sub>= 상수

A= Amplitude

延性材보다 취성재가 더 큰 AE신호를 가지므로 n 값이 작다. ⑦식에 의해 본 실험에서의 n 값을 추정해 보면 용접부가 있는 시편은 n 값이 1.5~1.6 정도이고 건전한 정상시편은 n 값이 2 정도이므로 용접부에서 발생하는 AE를 母材의 AE와 구분할 수 있음이 입증되었다.

## IV. 結 論

不良熔接部에서 발생하는 AE의 위치표정을 수행할 수 있었으며 校正時 정해진 지역에서 發生하는 AE는 소성변형과 균열의 시작과 進展에 관한 정확한 정보와 구조물의 상태를 제시해 줄 수 있음이 입증되었다. 그러므로 변형의 시작과 파괴에 매우 민감한 AE를 연속측정 감시함으로써 압력용기와 배관계통의 구조적 건전성 평가에 AE On-Line Monitoring이 유효하게 적용될 수 있다.

용접부를 중심으로 Zone을 設定하여 실험한 결과, 건전부<sup>1)</sup>보다 熔接部位에서 AE가 많이 발생하였으며, 壓力容器 내부압력의 증가에 따라 Event 發生率, Ringdown 計數率 등은 증가하였으며, 소성영역에서 많은 AE가 발생하였 다가 破壞직전에 크게 증가하였다. 특히 균열성 결함이 AE가 크고 민감한 거동특성을 보임이 입증

되었다.

引張試驗時 용접부가 있는 試片에서 Event 發生率, Ringdown 計數率, Peak Amplitude 등이 모두 큰 AE가 나타났다. 즉, 용접부가 큰 AE 發生原으로 작용했음을 알 수 있었다. 용접부와

母材금속의 AE 특성을 동시에 관찰한 결과 AE Event 發生率이 용접부와 母材金屬의 恒복점 근처와 破壞직전에 크게 나타났으며 용접부의 AE 신호를 확실히 구분할 수 있음이 입증되었다.

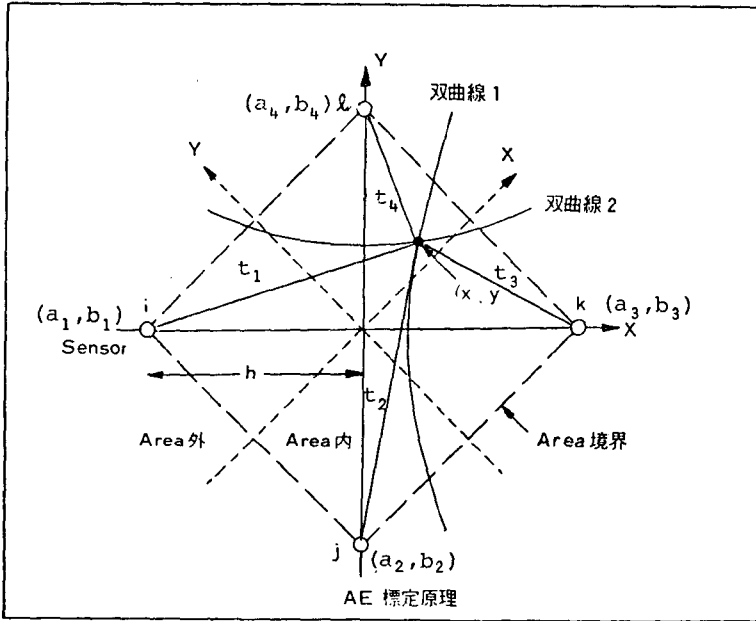


그림 1. AE 標定原理 (2 Sensor의 정방형 배치에 의한 방식의 예)

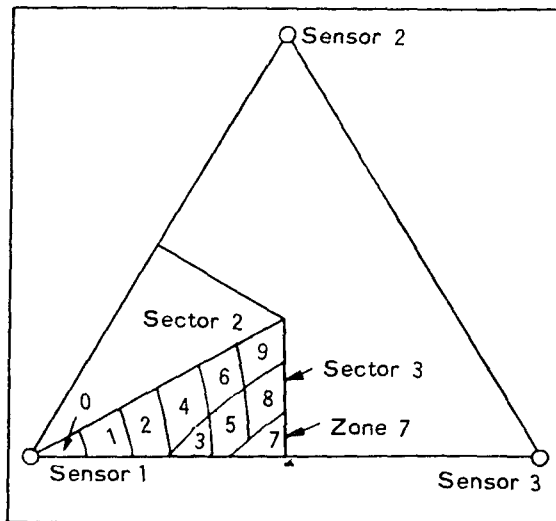


그림 2. AE 標定原理 (table look up 방식의 예)

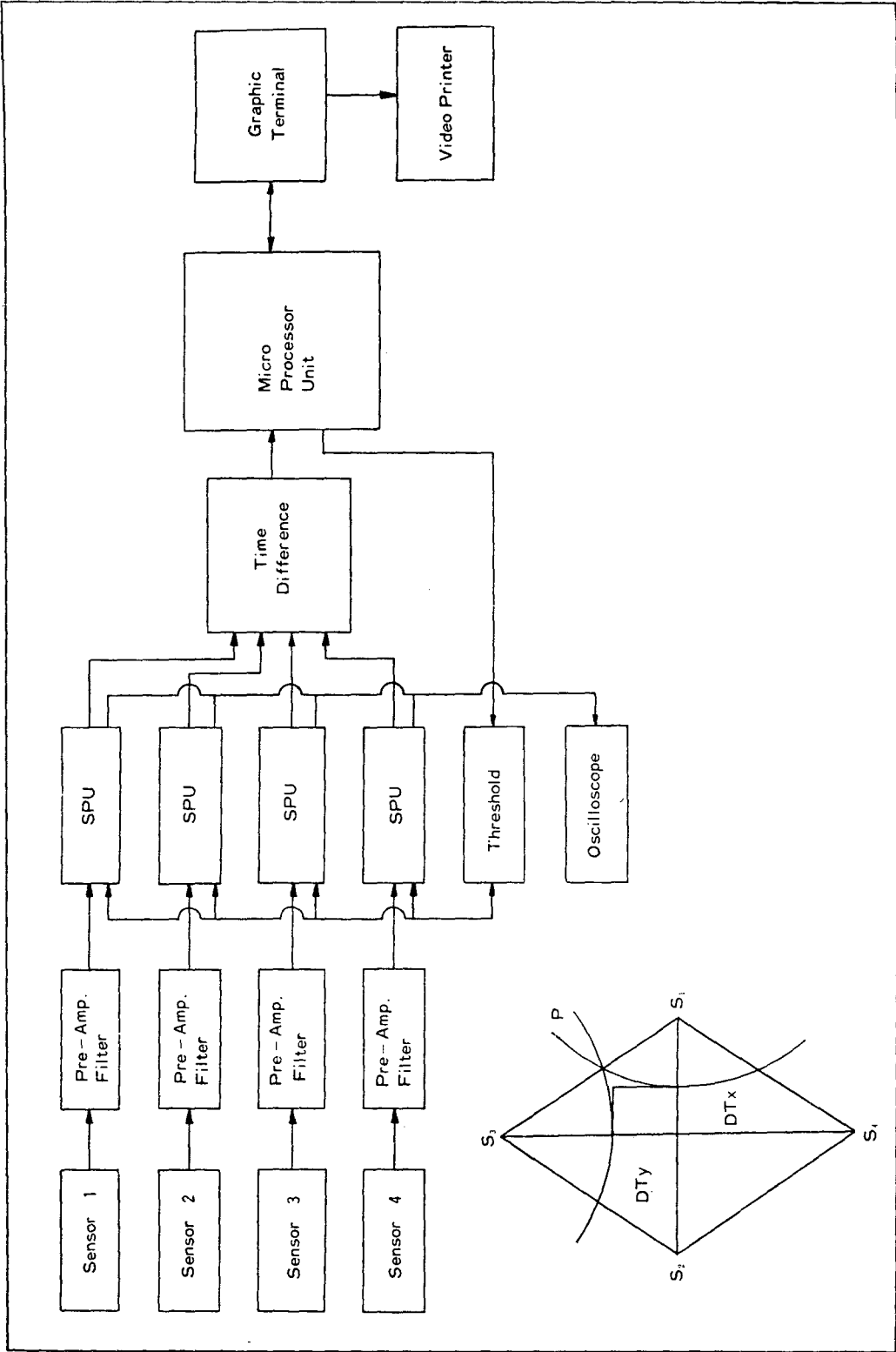


그림 3. 4 Channel의 AE 위치표정 System

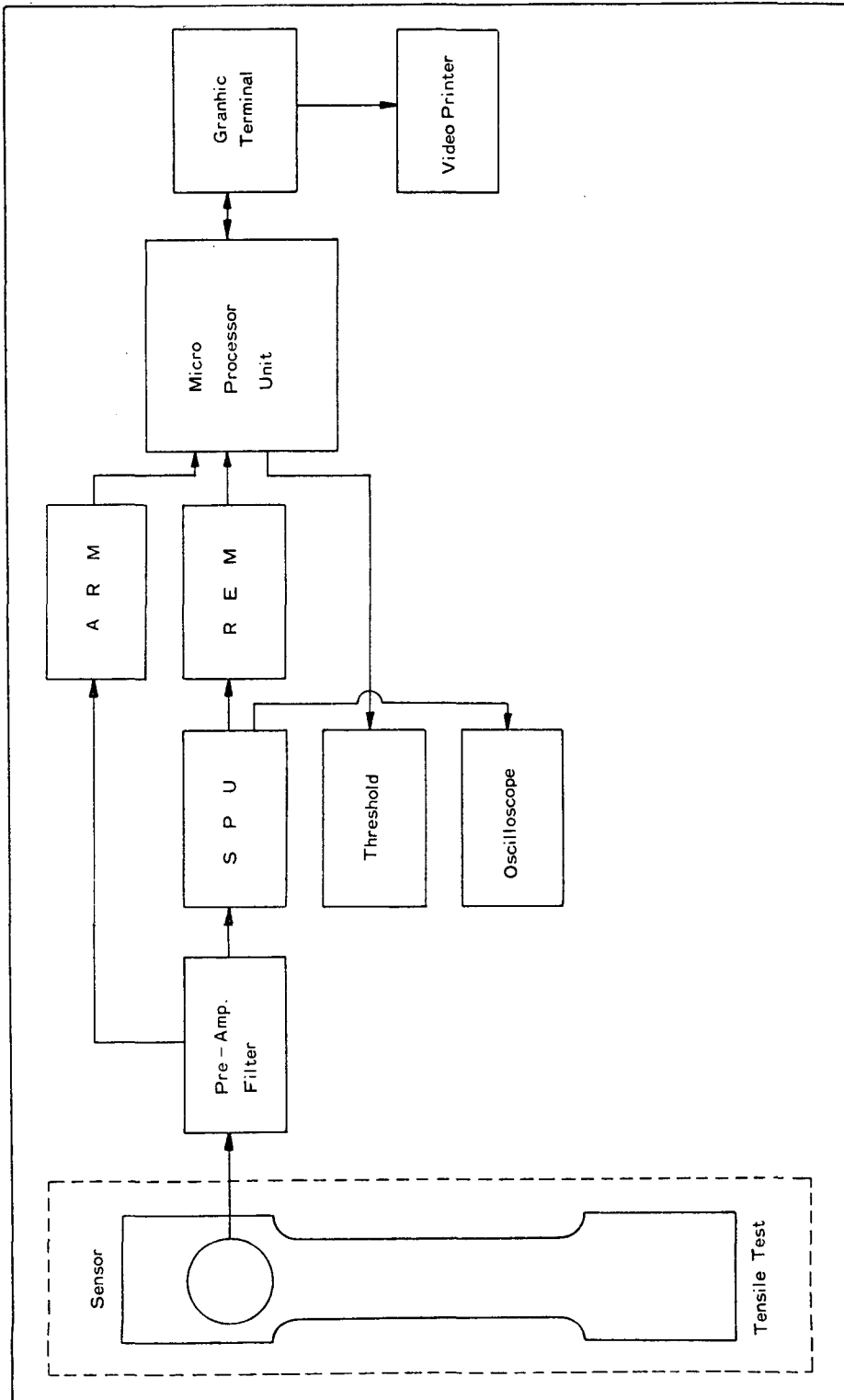


그림 4. 안장시험시의 AE 장치에 대한 개략도



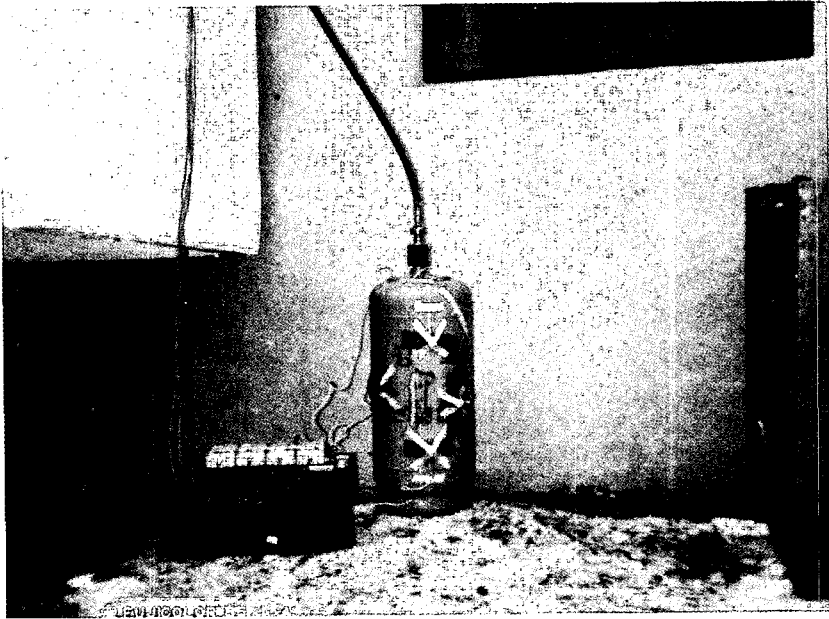
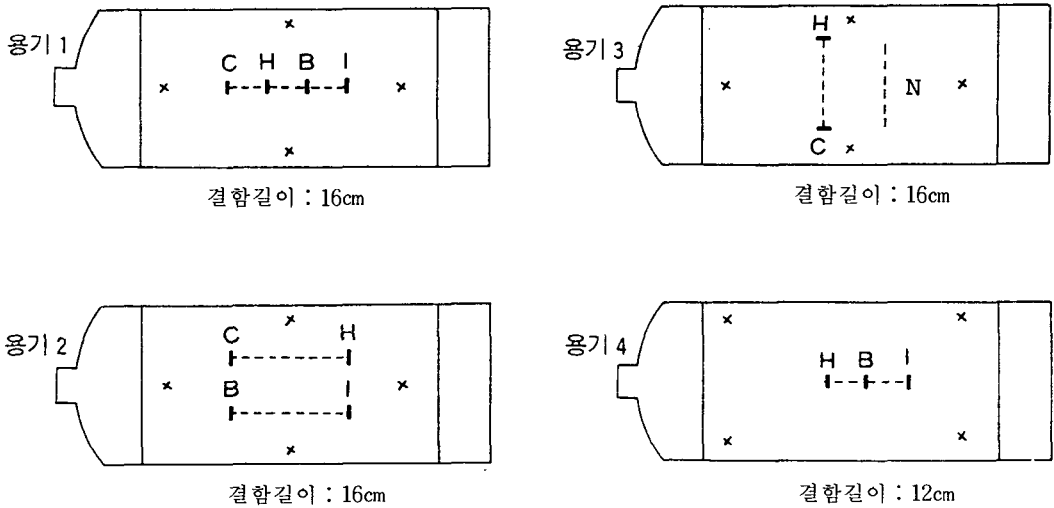


사진 1. 位置標定에 사용된 壓力容器 및 探觸子 배열



--- : 關心있는 熔接部

× : 探觸子

N : Notch

I : 人工缺陷 (C : Cold Crack, H : Hot Crack

B : Blow hole, I : Inclusion)

그림 5 용기 1, 2, 3, 4의 不良熔接部位 및 探觸子 배열

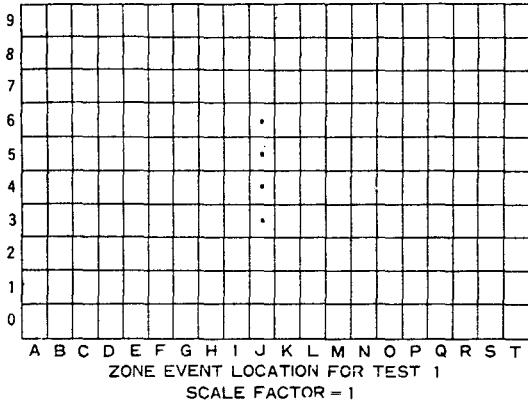


그림 6. No. 1 압력용기의 AE 발생위치

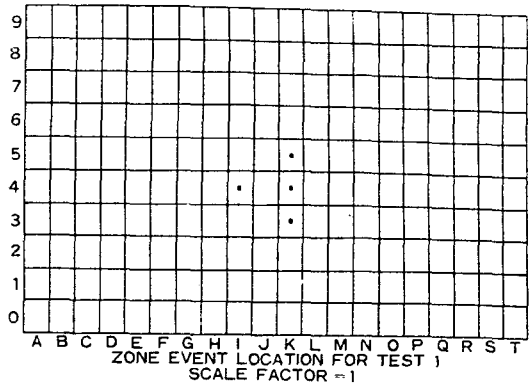


그림 9. No. 4 압력용기의 AE 발생위치

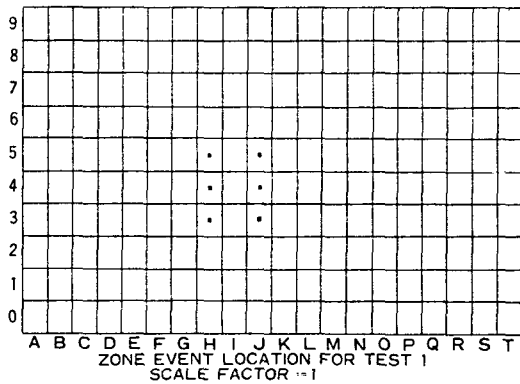


그림 7. No. 2 압력용기의 AE 발생위치

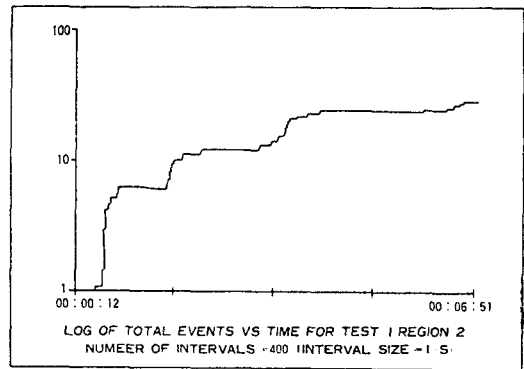


그림 10. No. 3 압력용기 Region 2의 Total event 수

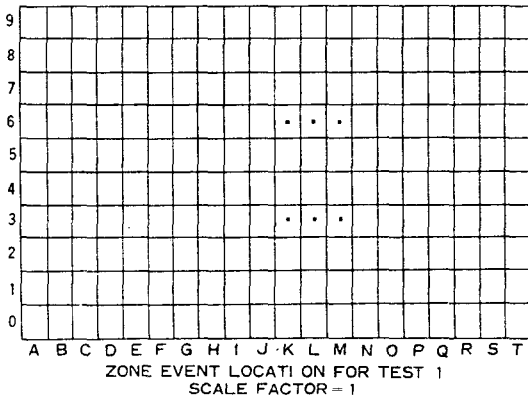


그림 8. No. 3 압력용기의 AE 발생위치

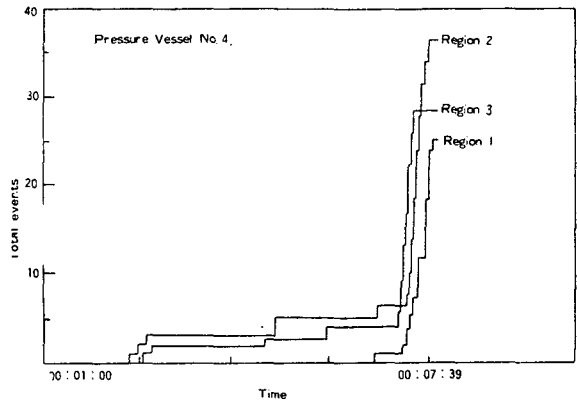


그림 11. No. 4 압력용기의 압력증가에 따른 Total event 발생률

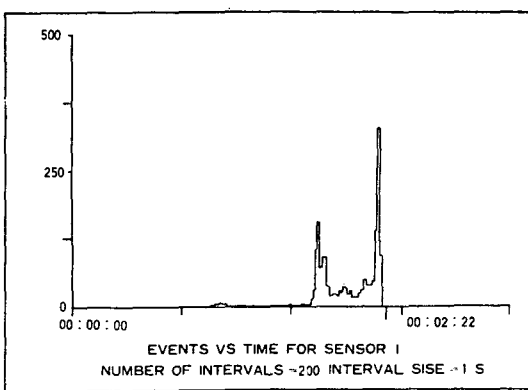


그림12. No Weld No. 2 引張試片의 event 發生率

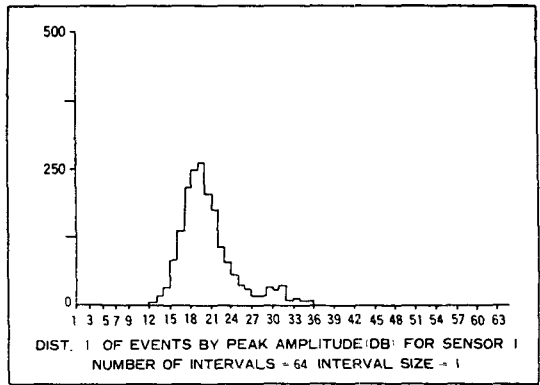


그림 15. No Weld No. 2 인장시편의 Peak amplitude에 의한 event 분포

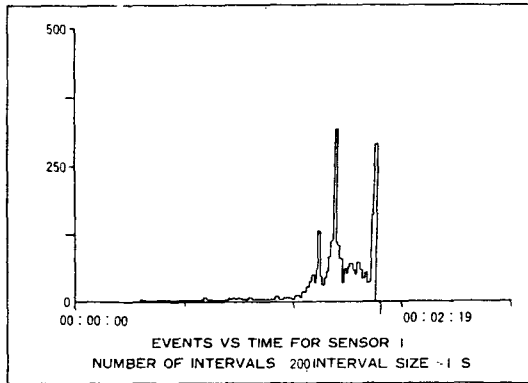


그림13. Weld No. 2 인장시편의 event 발생율

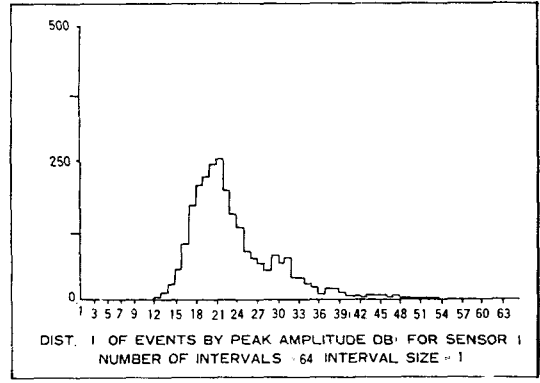


그림 16. Weld No. 2 인장시편의 peak amplitude에 의한 event 분포

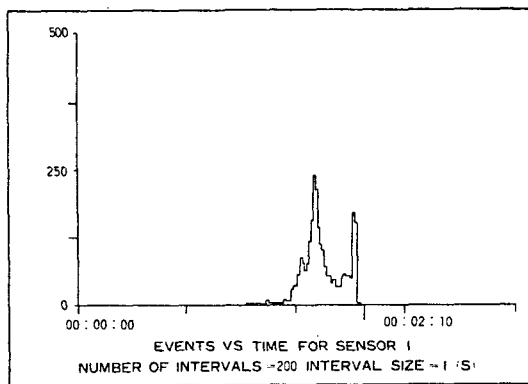


그림 14. Weld No. 3 인장시편의 event 발생율

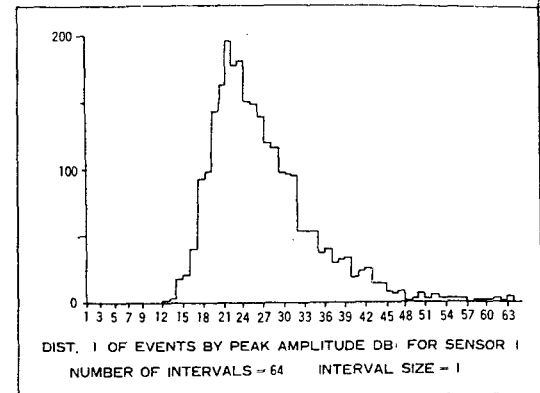


그림 17. Weld No. 3 인장시편의 peak amplitude에 의한 event 분포

## V. Reference

1. J. C. Spanner, Acoustic Emission Techniques and Applications, Intex Publishing Company, Illinois, (1974)
2. Onoe Morio et al., Acoustic Emission の基礎と 應用, コロナ社, 東京(1976)
3. H. C. Kim and R. W. B. Stephens, "AE a diagnostic tool in non-destructive Testing," Ultrasonic Testing, John Wiley and sons Ltd, p. 459-493. (1982)
4. J. C. Spanner, J. W. McElroy, Monitoring structural Integrity by AE. ASTM STP 571 (1975)
5. L. B. Robert, A Progress Report on the use of AE to Detect Incipient Failure in Nuclear Pressure Vessels, DE-74-1 DUNEGAN/ENDEV CO, (Jan, 1974)
6. A. Tobias, "AE Source Location in two dimension by an array of three Sensors Non-Destructive Testing, pp 9-12 (FE B. 1976)
7. E. Votava and P. Jax, "Inspection of Nuclear Reactors by means of AE during Hydrostatic Test," ASTM STP 697, pp. 149-164, (1979)
8. Ono K, "Amplitude Distribution Analysis of AE Signal," Material Evaluation Vol 34. No. 3 pp. 177 (Aug. 1976)
9. H. J. Rindorf, "Acoustic Emission Source Location in Theory and in Practice", The fifth International AE Symposium pp. 91-102, Tokyo. (1980)
10. 仲佐博裕, 検査 監視用 マルチチャンネル AE 計測 システムの 開発, JSNT 第2回 総合 コンファレンス 論文集, pp. 77-82 (1979)
11. M. Barsky and N. N. Hsu, "A Simple and Effective AE Source Location System", Material Evaluation vol 43, pp. 108-110, (Jan. 1985)
12. T. Watanabe, S. Hashirizaki, H. Arita, "A E Inspection during Water-pressure testing of pressure vessels", NDT International, pp. 227-232 (OCT. 1976)