

[논문] - 비파괴검사학회지  
*Journal of the Korean Society  
 for Nondestructive Testing*  
 Vol. 29, No. 5 (2009. 10)

## 원전 구조물 결함 탐지를 위한 음향방출 신호 처리 방안에 대한 기초 연구

### The Basic Study on the Method of Acoustic Emission Signal Processing for the Failure Detection in the NPP Structures

김종현\*<sup>†</sup>, 김재성\*, 이 정\*\*, 광노권\*\*, 이보영\*\*\*

Jong-hyun Kim\*<sup>†</sup>, Jae-seong Kim\*, Jung Lee\*\*, No-gwon Kwag\*\* and Bo-young Lee\*\*\*

**초 록** 열피로균열은 원자력발전소의 운영 과정에서 구조물의 수명을 결정짓는 문제로 정량적인 탐지가 어렵다. 현재 산업현장에서 구조물에 대한 건전성을 정량적으로 평가하기 위해서 radiographic 탐상 및 초음파탐상, eddy current 등 다양한 종류의 비파괴검사 기술이 사용되고 있지만 위에 열거한 비파괴탐상법의 경우 균열이 일정부분 진행된 이후에나 검출이 가능하다는 제한 사항이 있다. 이러한 이유로 구조물에 대한 연속적인 모니터링이 가능한 장점을 가진 음향방출탐상법(acoustic emission testing)이 대안적인 검사방법으로 제시되고 있다. 일반적으로 구조물이나 장비의 건전성에 영향을 미치는 모든 요인들이 음향방출 신호의 발생을 일으키기 때문에, 음향방출을 이용한 결함 탐상시 함께 발생하는 노이즈를 구분하는 일은 음향방출을 연구하는 대부분의 연구원의 주요 업무중 하나라고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 열피로 사이클 조건에서의 배관에 대한 음향방출 신호를 수집하여 유효한 균열 신호를 노이즈로부터 구분하고자 하는 목적으로 진행되었다. 그 방법으로 유사한 조건에서 실시한 결과를 이용하여 노이즈 필터링 조건을 설정하였으며, 균열의 신호를 찾아내기 위한 방법으로 음향파형(waveform) 구분법을 제시하였다. 이 실험에서 도출된 결과는 구조물의 결함을 탐지하는 실시간 연속적 모니터링 기술 개발에 대한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요용어:** 음향방출, 열피로균열, 균열진전, 원전구조물

**Abstract** The thermal fatigue crack(TFC) is one of the life-limiting mechanisms at the nuclear power plant operating conditions. In order to evaluate the structural integrity, various non-destructive test methods such as radiographic test, ultrasonic test and eddy current are used in the industrial field. However, these methods have restrictions that defect detection is possible after the crack growth. For this reason, acoustic emission testing(AET) is becoming one of powerful inspection methods, because AET has an advantage that possible to monitor the structure continuously. Generally, every mechanism that affects the integrity of the structure or equipment is a source of acoustic emission signal. Therefore the noise filtering is one of the major works to the almost AET researchers. In this study, acoustic emission signal was collected from the pipes which were in the successive thermal fatigue cycles. The data were filtered based on the results from previous experiments. Through the data analysis, the signal characteristics to distinguish the effective signal from the noises for the TFC were proven as the waveform difference. The experiment results provide preliminary information for the acoustic emission technique to the continuous monitoring of the structure failure detection.

**Keywords:** Acoustic Emission, Thermal Fatigue Crack, Fatigue Crack Growth, Nuclear Power Plant Structure

[접수일: 2009. 5. 29, 수정일: 2009. 7. 27, 게재확정일: 2009. 8. 10] \*한국항공대학교 대학원, \*\*(주)세안기술, \*\*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, <sup>†</sup>Corresponding Author: Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea, (E-mail: power77s@empal.com)

## 1. 서론

원자력발전은 그 기능상 국가 산업의 중추역할을 하는 발전 산업으로, 국내 총발전량에서 원자력발전이 차지하는 비중이 점점 증가하여 국내 발전량의 반 이상을 차지하고 있다. 그러나 국내에 건설되어져 있는 원자력발전설비들의 경우 설계수명이 다되어가고 있어 정밀 안전진단의 필요성이 높아지는 추세이다. 이에 안전사고가 발생하기 전 발전설비의 건전성을 지속적으로 실시간으로 평가할 수 있는 기술의 개발이 필요한 시점이다[1].

일반적으로 원전구조물에 대한 건전성 평가는 비파괴적인 방법을 사용하여 실시하고 있으며 국내의 경우 방사선투과검사법(RT), 초음파탐상시험법(UT), 와전류탐상법(ECT) 등이 사용되고 있다. 특히 원전의 가동중검사(in-service inspection)를 위해서는 배관부 파손의 주요 원인으로 지목되고 있는 배관 내부의 열성층(thermal stratification) 현상에 의한 열피로균열이나 용접부 루트 근방의 저면에서 불규칙적으로 발생하는 입계응력 부식균열 등 실제 기기와 유사한 형상을 갖는 모의시험편(mockup)의 기량검증(performance demonstration)을 통한 검사기술의 인증이 필요하지만, 현재까지는 인공적으로 기계가공된 모의시험편이 사용되어 왔다. 그러나 기량 검증을 위해 NDT 검사자들에게 제공되는 모의시험편은 EDM(electric discharge machine)노치(notch) 가공된 시험편으로 인공 가공된 균열의 폭이 최소 150  $\mu\text{m}$  이상이지만, 원전에 발생하는 균열 틈은 10  $\mu\text{m}$  이하로 매우 작다. 결과적으로 EDM 노치의 경우 결함의 존재를 쉽게 확인할 수는 있으나 실제 결함의 신호를 정확히 모사(模寫)할 수 없는 단점을 갖기 때문에 손상평가의 신뢰성을 고도화하는데 한계점을 갖고 있다[1-3].

이러한 원전 구조물에서의 초음파검사방법에 대한 한계점을 극복하고 실시간으로 원전구조물의 건전성을 평가하기 위해 음향방출(acoustic emission: AE) 방법을 사용한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Table 1에 현재 사용되고 있는 비파괴 검사 방법과의 비교 장·단점을 나타내었다. 음향방출시험법은 결합에 의한 구조물의 파괴 과정에서 국부적으로 형성되었던 변형 에너지가 급격히 방출하는 탄성응력파(elastic stress wave)를 감지하여 결함의 위치를 추정하는 비파괴검사(nondestructive test) 방법중 하나이다. 실시간 진단이 가능하여 파이프

Table 1 The comparison of various nondestructive testing methods

Method	Strengths	Limitations	SHM Potential
Strain gauge	Embeddable Simple procedure Low data rates	Expensive Limited info	Low power Localized results
Optical fibers	Embeddable Simple results Very conformable	Expensive High data rates Accuracy?	Requires laser Localized results
Eddy current	Surface mountable most sensitive	Expensive Complex results Safety hazard	High power Localized results Damage differentiation
Acoustic emission	Inexpensive surface mountable Good coverage	Complex results High data rates Event driven	No power Triangulation capable Impact detection
Modal analysis	Inexpensive Surface mountable Good coverage	Complex results High data rates Global results	Low power Complex structures Multiple sensor types
Lamb waves	Inexpensive Surface mountable Good coverage	Complex results High data rates Linear scans	High power Triangulation capable Damage differentiation

라인 설비, 대형저장탱크, 압력용기 등의 상태를 진단하고 안전도 평가 및 모니터링의 수단으로도 사용되고 있다[4,5]. 그러나 AE 시험에 사용되는 센서의 경우 소리에 의한 민감도가 높아 균열 발생 신호 이외에 장비, 주변 환경 등에 의한 노이즈가 많이 발생하여 실제 균열 신호를 정확히 분리하여 균열이 발생하는 초기 시점과 위치를 파악하기가 매우 어렵다.

이에 따라 본 연구는 원전 구조물에서 실제 균열이 발생하는 환경과 유사한 조건으로 열피로균열 제작할 수 있는 장치를 구성하고, 균열이 발생하는 초기 시점과 위치를 파악하기 위해 ASTM 569-02에 따라 실제 균열이 발생할 때와 유사한 신호를 발생하는 연필심 파괴시험(pencil lead break)을 통해 얻어진 음향 신호를 분석하여 냉각수에 의한 음향 노이즈를 필터링 하였다. 또한, 본 실험에서 사용한 필터링 방법을 검증하기 위해 실제 열피로균열을 제작하여 균열 발생에 대한 실시간 모니터링의 가능성을 판단하였다.

## 2. 균열 시험편 제작

### 2.1. 시험편 제작 장치

Fig. 1은 연구에서 데이터를 습득한 STS304 배관 열피로균열 제작기 사진으로 시험편을 가열하기 위한 유도가열기(induction heater, 40 kHz), 시험편에

대한 초기 압축하중을 가하기 위한 기계식 모터 및 로드셀(10 kN), 냉각수 유량 제어장치, 시험편 온도 제어를 위한 열전대 및 제어장치로 이루어져 있으며, 유도가열기 효율 제어, 냉각수 유량 시험편 온도를 제어하기 위한 I/O terminal board로 구성하였다.

Fig. 2는 피로균열 제작장치의 block-diagram을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편의 온도 조건을 설정한 후, 시험편의 온도가 설정 온도에 도달하지 못하면 I/O terminal board에서 유도 가열기의 효율을 제어하여 설정 온도에 도달할 수 있도록 제어를 하며, 냉각수 유량 또한 I/O terminal board와 상호 피드백으로 제어되도록 구성되어 있다. 시험재료는 reactor coolant system RCS의 배관재로 사용되는 오스테나이트계 STS304 파이프를 채택하였으며, 외경(OD)이 89 mm, 두께(t)가 7.6 mm인 시험편을 500 mm 길이로 절단하여 사용하였다.

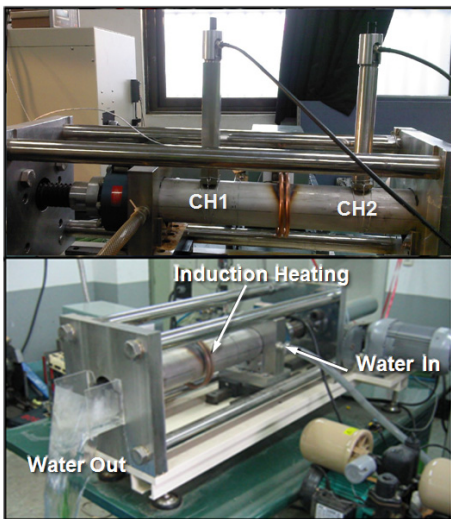


Fig. 1 Thermal fatigue crack production equipment

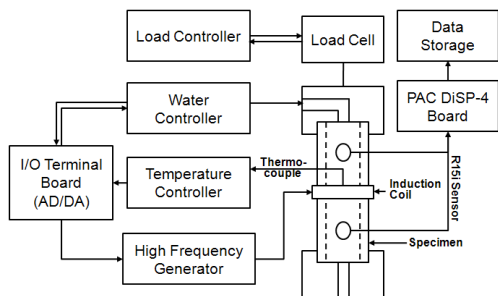


Fig. 2 Mechanism formation of thermal fatigue crack and AE system configuration

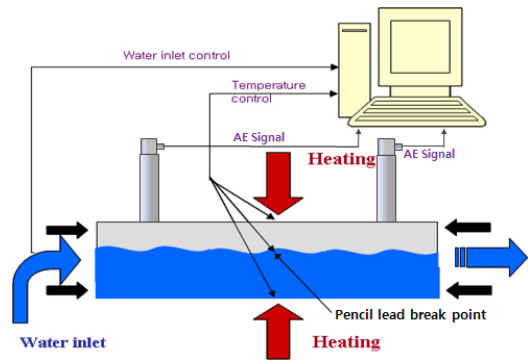


Fig. 3 The schematic of thermal fatigue crack production and AE test method

## 2.2. 열피로균열 제작

열피로균열 제작을 위한 방법으로 스테인리스 스틸 배관에 유도 가열기를 이용한 직접가열방식을 채택하였고, 실제 원전구조물에서 열피로균열이 발생하는 조건인 배관내 온도조건  $\Delta T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 되는 조건으로 실험하기 위해 가열주기 1분, 냉각주기 30초로 이루어진 열응력 주기(90초)를 구성하였다. 또한 배관내 열성층을 형성하기 위하여 배관 하부로부터 60% 지점까지 냉각수가 흐르도록 하였고, Fig. 3과 이 시험편의 중앙부 양쪽에 열응력을 집중시키기 위하여 냉각수가 배출되는 지점으로부터 약 250 mm 지점에 스테인리스 스틸 배관을 중심으로 유도 가열 코일을 위치시켜 가열하였으며, 가열 범위는 좌우 방향으로 약 50 mm 정도이다.

## 3. 음향방출 실험방법 및 결과

### 3.1. 열피로 시험편 음향방출 신호 획득

음향방출 센서를 시험중인 시험편에 부착하기 위하여 냉각수가 들어오는 지점으로부터 약 100 mm 지점과 배출되는 지점으로부터 약 100 mm 지점에 각각 웨이브가이드를 설치하고, 센서를 장착하였다. 센서는 전치증폭기(pre-amplifier)가 내장되어 있고 150 kHz의 주파수를 가지는 R15i(미국 PAC社)를 사용하였다. 또한 웨이브가이드와 센서는 접촉매질을 사용하여 압착시키고, 연필심 파괴를 이용하여 교정을 실시, 센서의 압착 및 정상작동 여부를 확인하였다. 열피로균열 제작 실험이 진행되면서 센

서로부터 획득한 음향방출 신호는 PAC社의 4 Channel DiSP AE 보드를 이용하여 전용 컴퓨터에 실시간으로 발생하는 신호를 획득하고 데이터를 저장하였다.

급격한 온도변화를 가지는 열성층에 의해 발생하는 열피로균열은 응력이 변화가 급격히 일어나는 냉각 사이클에서 균열이 발생 및 진전하므로[5-8], 가열 사이클에서 발생하는 음향 신호는 필터링 작업을 통해 우선적으로 분리하여 냉각 사이클에서의 음향 신호만 수집, 저장하였다.

### 3.2. 음향신호 데이터의 잡음 제거

냉각 사이클에서는 균열 발생에 따른 음향 신호 이외에 냉각수가 흐름에 따라 발생하는 노이즈 신호가 함께 수집된다. 이러한 노이즈 신호를 제거하기 위해 냉각수만 흐르는 경우와 냉각수가 흐를 때 균열 발생 현상을 모사하기 위한 연필심 파괴시험을 실시한 경우로 구분하여 음향 신호를 획득하였으며, 두 가지 경우의 음향신호를 비교 분석하여 냉각수에 의해 발생하는 노이즈 신호를 필터링하였다. 연필심 파괴시험을 통해 균열 발생 신호가 74 ~ 78 dB의 진폭을 가지는 것을 확인하였으며, 노이즈 제거를 위한 필터링 기준으로 균열 발생 범위보다 작은 진폭인 73 dB를 잡음 제거시 진폭기준값으로 적용하였다. 또한, 산업현장에서 사용하는 음향방출 신호 검출 기준에 따르면 10 ms 이상의 지속시간(duration)을 갖는 hit의 경우 노이즈로 간주한다. 이에 따라 본 실험에서도 10 ms 이상의 지속시간을 가지는 hit는 노이즈로 규정하고 제거하였다. 또한, 가열시 나타나는 음향 신호의 경우, 문턱값 측정방법을 Float으로 설정하여 제거하였다.

예비 실험을 통해 확인할 수 있는 음향 신호의 종류는 Fig. 4에서 보여주는 것처럼 크게 4가지 형태로 분류할 수 있다. Fig. 4(a)는 유도가열기를 이용하여 시험편 가열시 발생하는 전형적인 음향 신호로 문턱값 55 dB 이상을 갖는 사인 파형의 연속형 신호 특징을 갖는다. 이러한 신호의 경우 노이즈로 분류하였으며 결함 발생시 방출되는 돌발형 신호와 확연히 다른 특징을 갖는다. Fig. 4(b)와 같이 위의 방법으로 제거되지 않고 남아있는 노이즈를 필터링하기 위한 기준으로 절대에너지 (absolute energy)값을 사용하였다. 절대에너지값은 hit와는 독립적인 변수이며 시간에 따른 에너지의 합을 의

미하므로 연속형 신호를 모니터링하는데 유용한 파라미터라고 알려져 있다[9]. 이를 이용하여  $1.5 \times 10^6$  aJ 이상의 절대에너지값을 가지며 55 dB 이상의 높은 문턱값을 갖는 연속형 노이즈 신호를 제거하였다.

Fig. 4(c)의 경우 (a), (b)의 유형에 속하지 않으면서 연필심 파괴실험에서 나타나는 (d)의 유형과 유사한 형태를 보이며 그 중심 주파수는 168 kHz, 진폭은 80 dB로 나타났다. 일반적으로 강재의 탄·소성변형에 의해 방출되는 AE 신호의 중심 주파수는

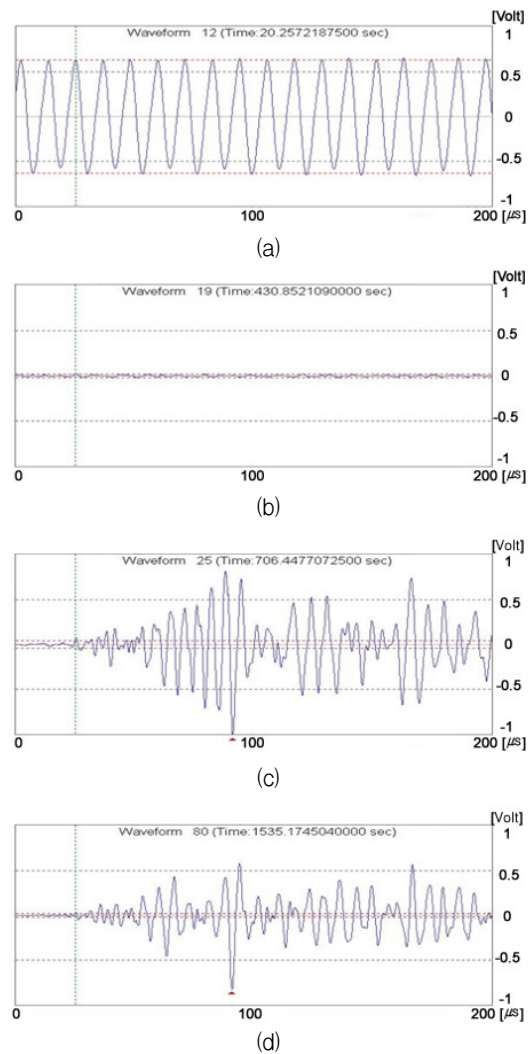


Fig. 4 (a) the characteristic waveform of induction heating noise, (b) the characteristic waveform of water flowing noise, (c) the characteristic waveform of unknown noise, (d) the characteristic waveform of pencil lead breaking

약 130 ~ 180 kHz로 알려져 있고[10], 연필심 파괴로 발생한 신호의 평균 진폭 75 dB보다 5 dB 높은 진폭이 발생한 것으로 보아 이 신호는 실험 초기에 상온이었던 시험편을 실험 온도까지 가열하는 과정에서 발생하는 시험편 조직내의 국부적인 변형특성으로 인한 노이즈 신호로 판단된다[11].

Fig. 5(a)는 잡음제거 과정을 거치지 않은 진폭 분포이며, 잡음제거를 실시한 후의 진폭 분포는 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(a), (b)의 진폭 분포의 비교를 통해서 실제 균열 신호라고 판단하고 분석이 필요한 hit의 개수가 기존의 121,313개에서 41개로 확연하게 감소한 것을 확인할 수 있다.

### 3.3. 열피로균열 AE 신호

노이즈 제거를 위한 예비 실험을 통해 확보된 음향 신호 필터링 조건을 적용하여 열피로균열을 제작하였으며, Table 2와 이 음향 신호 필터링 조건을 적용하였다.

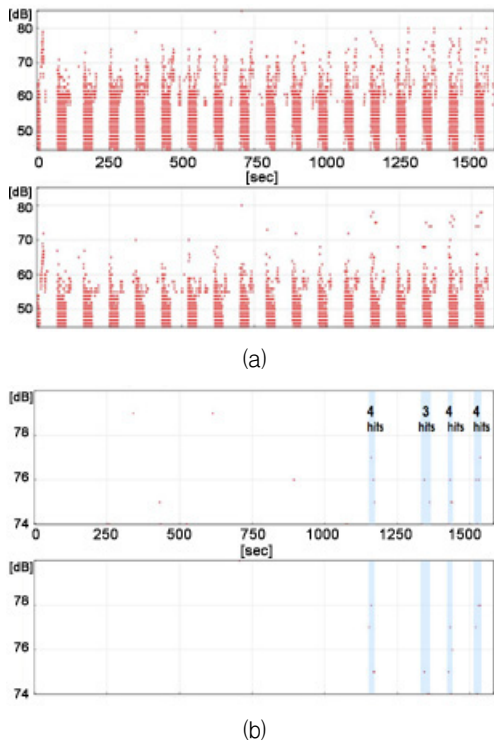


Fig. 5 (a) whole amplitude distribution without applying filtering levels (top: Ch1, bottom: Ch2), (b) amplitude distribution after applying the filtering conditions (top: Ch1, bottom: Ch2)

Fig. 6은 진폭값을 제외한 나머지 값을 동일하게 하여 실제 열피로균열 제작시 획득한 진폭의 분포를 보여주고 있다. (a)의 경우 필터링 하지 않은 음향 신호이며, (b)는 필터링을 실시한 경우의 값을 보여주고 있다.

Fig. 6(a)에서 보여주듯이 필터링을 거치지 않은 상태의 진폭의 분포에 대한 전체 hit는 7,020,558개로 모든 음향 신호의 파형을 확인하기가 사실상 불가능하며, 균열 발생 시점 또한 찾아내기 어렵다. 예비 실험 결과를 가지고 진폭에 대한 필터링을 실시하여 노이즈를 제거한 Fig. 6(b)의 경우 hit의 개수는 647개로 1/10000 이상 감소하는 것을 볼 수가 있다. 647개의 hit에 대한 음향파형 유형을 나누어보면 Fig. 7에서 보는 것과 같이 5가지로 구분할 수 있으며, 각각 해당하는 파형의 분포를 표시하였다.

Table 2 Conditions of AE test in the custom-made TFC

Threshold	Value	45dB
	Type	Fixed
Crack Production period	Hours (Cycles)	100 hours (4000 cycles)
Active Channel	1	Water outlet side

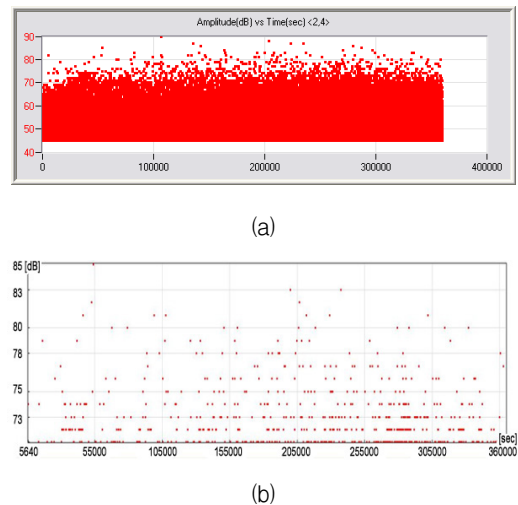


Fig. 6 (a) amplitude distribution without applying the filtering levels from the 4000 cycles specimen, (b) amplitude distribution after applying the filtering conditions for the 4000 cycles specimen

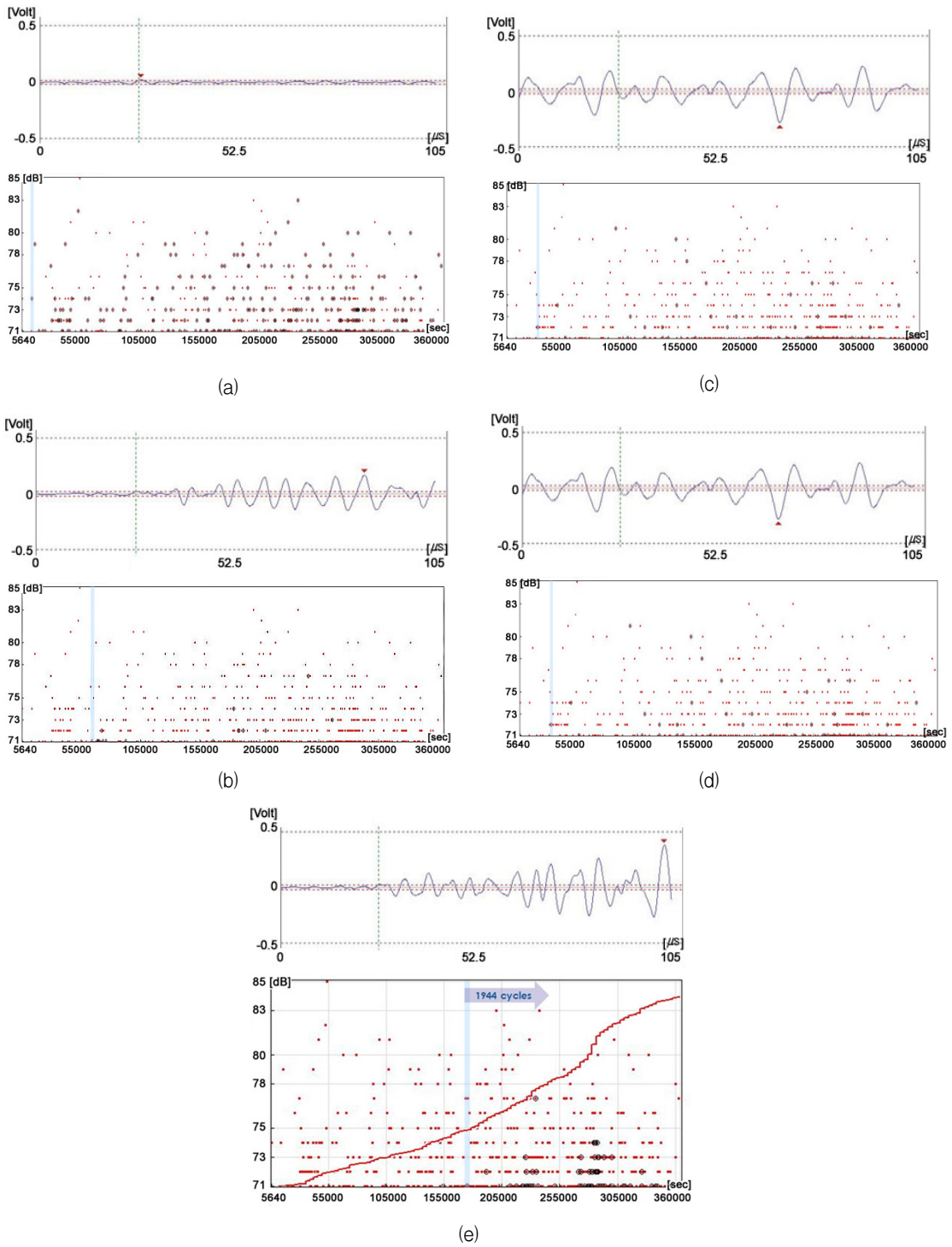


Fig. 7 (a) The characteristic waveform pattern 1 and its amplitude distribution, (b) The characteristic waveform pattern 2 and its amplitude distribution, (c) The characteristic waveform pattern 3 and its amplitude distribution, (d) The characteristic waveform pattern 4 and its amplitude distribution, (e) The characteristic waveform pattern 5 and its amplitude distribution with cumulative hit

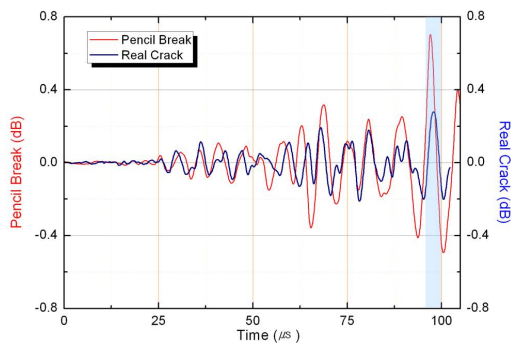


Fig. 8 Overlapped waveform of pencil lead break signal and real experiment

Fig. 7(a), (b), (c) 파형의 경우 연필심 파괴실험에서 노이즈로 제거된 신호와 유사하게 진폭 변화가 적은 연속형 신호(continuous signal) 형태의 음향 파형을 보이며, 해당 파형이 실험 초기부터 종반까지 계속하여 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(d)의 경우 예비실험 결과와 동일하게 시험편의 가열로 인한 변형에 의해 발생한 신호가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 신호의 특징으로는 결함으로 의심되는 진폭영역인 70 ~ 75 dB보다 5 ~ 10% 정도 큰 진폭을 나타내며, 실험 전체 구간에서 나타나지만 주로 실험 초기에 집중적으로 발생한다. 따라서 (d) 유형의 음향 신호는 주변 환경에 의해 생성된 노이즈라고 판단된다.

Fig. 7(e)의 음향 신호의 경우, 초반에는 검출되지 않았으나 실험 시작후 약 2000 사이클 부근 (1944 사이클)에서 발생하기 시작했다.

AE신호의 발생 빈도인 hit를 정리했을 때 나타나는 변곡점은 거시적 균열의 시작을 대변하는데 [11], (e)의 파형이 처음 관찰된 후 집중적으로 발생하는 구간 (약 220,000 ~ 240,000초, 270,000 ~ 295,000초) 사이에서 기울기의 크기가 50% 이상 증가하는 변곡점이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, (e)의 음향신호를 실제 균열이 발생할 때와 유사한 신호를 생성하는 연필심 파괴시험의 음향 신호와 중첩시켜 분석을 실시한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 두 음향 신호의 주기와 진폭 형태, 최고점 도달 시간 등이 5% 내외의 차이로 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 7(e)의 파형은 열피로균열 발생 및 진전 신호로 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원전 구조재중 배관에서 발생하는 열성층 현상을 이용하여 STS304배관에 열피로 균열을 제작하고 비파괴검사방법중 하나인 AE(음향방출탐상)를 이용하여 실시간으로 건정성을 평가할 수 있는 것을 확인하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다양한 필터링 조건을 이용하여 열피로균열 제작시 방출되는 노이즈와 인위적으로 가해진 탄성 응력파를 명확히 구분할 수 있었으며, 분석 데이터양을 획기적으로 감소시킬 수 있었다.
- 2) 열피로균열 제작기로부터 원전 환경과 동일한 조건에서 열피로균열을 제작하고 음향방출법을 이용하여 초기 균열 발생과 균열의 진전 신호를 확인할 수 있었다.
- 3) STS304 배관에서 연필심 파괴실험으로 발생시킨 인위적인 균열 신호와 실제 균열신호 사이의 유사성을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 국가지정연구실 (No. M20604005402-06B040040210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] S. Ensha, Handbook of Case Histories in Failure Analysis (1st Edition), ASM Vol. 2, pp. 363-367 (1993)
- [2] D. H. Hur, M. S. Choi, D. H. Lee and J. H. Han, "Fabrication and use of corrosion defect specimens for enhancement of ECT reliability for nuclear steam generator tubing," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 5, pp. 451-456 (2000)
- [3] Y. Kim, J. S. Kim and B. Y. Lee, "Development the technique for fabrication of the thermal fatigue crack to enhance the reliability of structural component in NPPs," Journal of KWJS, Vol. 26, No. 2, pp.

- 141-151, (2008)
- [4] J. O. Lee, W. H. Yoon, T. H. Lee and J. K. Lee, "Pre-service acoustic emission testing for metal pressure vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 3, No. 3, pp. 280-284 (2003)
- [5] J. O. Lee, J. S. Lee, U. H. Yoon and S. H. Lee, "Evaluation of adhesive bonding quality by acoustic emission," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 16, No. 2, pp. 79-85 (1996)
- [6] S. D. Kim, W. G. Jung, J. O. Lee and Y. J. Jung, "Characterization of acoustic emission signal for welding flaw and stress corrosion of SPPH steels," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 2, pp. 97-104 (2007)
- [7] L. Virkkunen, M. Kemppainen and H. Hänninen, "Residual stresses induced by cyclic thermal loads," *The Sixth International Conference on Residual Stresses, ICRS-6*, pp. 529-536 Oxford, UK. (2000)
- [8] S. A. Hänninen, H. and Hakala, J., "Pipe failure caused by thermal loading in BWR water conditions," *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, Vol. 9, pp. 445-455 (1981)
- [9] DiSP with AEwin User's Manual, Rev. 3, Chap. 1, pp. 25-31, Physical Acoustic Corp., NJ, USA (2005)
- [10] Z. K. Rhee, "A study on the wavelet transform of acoustic emission signals generated from fusion-welded butt joints in steel during tensile test and its applications," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 26-32 (2007)
- [11] M. K. Kwak and S. J. Kim, "A statistical properties of tensile behaviors of STS304 stainless steel at elevated temperature and the acoustic emission," *Proceedings of the Korea Committee for Ocean Resources and Engineering Conference*, pp. 68-74 (2002)