

AE(음향방출) 검사 시 센서 및 재료에 따른 균열 검출능에 대한 신뢰성 분석

The reliability analysis of Acoustic Emission(AE) testing for crack detectivity by sensors and materials

남 준 영† 이 상 윤* 황 웅 기* 이 보 영†
Jun-Young Nam Sang-Yun Lee Woong-gi Hwang Bo-Young Lee

요 지

AE는 다른 비파괴 검사방법과 달리 가동 상태에서 구조물의 결함이 발생 및 성장을 검출할 수 있으며, 연속 검사가 가능하다는 장점으로 인하여 대형 구조물의 안정성 평가에 널리 이용되고 있다. 하지만 AE는 20kHz부터 20MHz 사이에 발생하는 음파를 감지하기 위해 센서를 사용하며, 이 센서의 감도에 따라 결과가 달라질 가능성이 존재한다. 이에 본 연구에서는 STS 304와 SS400 강재에 인장실험을 실시하여, 강재의 균열 신호를 탐지하고자 한다. 인장실험에는 스테인리스강 및 탄소강 시편을 준비하였고, 감도가 다른 센서를 이용하여 동일한 인장실험을 실시하였다. 그리고 균열이 발생하는 13개의 신호 파라미터에 대해 군집분석을 실시하여 4가지 종류의 군집으로 분류하였다. 또한 기무가설을 이용한 통계분석을 통해 두 시험편이 다르지 않다는 것을 증명하였다. 이 결과를 바탕으로 본 실험에서 얻은 Waveform이 재료의 균열신호라는 신뢰성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : AE, 음향방출시험, 인장시험, 군집분석, 기무가설

Abstract

Unlike other non-destructive inspection method, AE Structural defects that are likely to grow in the operation status can be detected, and the advantage of being due to the continuous monitoring of large structures has been widely used to evaluate the stability. AE sensor used to detect sound wave that occurs between 20kHz to 20MHz. and Sound wave result may vary depending on sensor's sensitivity. In this paper, Tensile test conducted on STS 304 and SS400, and tries to detect the crack signal. In tensile test, specimens were conducted using different sensor sensitivity to the same tensile test condition. The crack signal parameters divided into 4 types of communities by conducting cluster analysis. It was demonstrated that crack signal of two sensor is not different by statistical analysis of null hypotheses. Based on the results, waveform of this tension test is crack signal.

keywords : AE, Acoustic emission test, Tension test, Cluster analysis, Null hypothesis

1. 서 론

원자력 발전은 국가 산업의 중추역할을 하는 발전 산업으로, 국내 총발전량에서 원자력 발전이 차지하는 비중이 점점 증가하여 국내 발전량의 반 이상을 차지하고 있다. 그러나 국내에 건설되어져 있는 원자력 발전설비들의 경우 설계수명이 다되어가고 있어 정밀 안전진단의 필요성이 높아지는 추세이다. 이에 안전사고가 발생하기 전 발전설비의 건전성을 지속적이고 실시간으로 평가할 수 있는 기술의 개발이 필요한 시점이다.

일반적으로 원전구조물에 대한 건전성 평가는 비파

괴적인 방법을 사용하여 실시하고 있으며 국내의 경우 방사능 검사법(RT), 초음파 탐상 시험법(UT), 와전류 탐상법(ECT) 등이 사용되고 있다. 하지만 위의 방법들은 균열이 발생하고 난 후에 정기적인 검사를 통해서 균열이 발생했음을 파악할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이러한 비파괴 검사방법에 대한 한계점을 극복하고 실시간으로 원전구조물의 건전성을 평가하기 위해 음향방출(acoustic emission: AE) 방법을 사용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 음향방출 시험법은 결함에 의한 구조물의 파괴 과정에서 국부적으로 형성되었던 변형 에너지가 급격히 방출하는 탄성 응력 파(elastic stress wave)를 감지하여 결함의 위치를 추정하는 비파괴 검사(non-destructive test) 방법 중 하나이다. 실시간 진단이 가능하여 파이프라인 설비, 대형저장탱크, 압력용기 등의 상태를 진단하고 안전도 평가 및 모니터링의 수단으로도 사용되고 있다. 그러

† 책임저자, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수
전화: 02-300-0177 ; Fax: 02-3158-0453
E-mail: bylee@kau.ac.kr

* 한국항공대학교 기계공학과 석사과정

나 AE 시험에 사용되는 센서의 경우 소리에 의한 민감도가 높아 균열 발생 신호 이외에 장비, 주변 환경 등에 의한 노이즈가 많이 발생하기 때문에 실제 균열 신호를 정확히 분리하여 균열이 발생하는 초기 시점과 위치 파악에 어려움이 따르며, 또한 다양한 센서제품의 감도 차이에 따른 영향으로 재료 고유의 균열신호를 확인하기가 매우 어렵다.

이에 따라 본 연구는 센서의 감도와 재료에 따른 균열의 고유 Waveform의 영향에 대한 기초 연구로, 감도가 다른 두 개의 센서를 이용하여, SS400과 STS304 재료에 대해 인장시험을 진행하였다. 인장 시험을 통해 얻게 된 SS(Stress-Strain) 곡선을 분석하여 균열이 발생한 시간을 확인하였다. 이를 이용하여 균열의 신호 파라미터를 획득하였다. 획득한 13개의 신호 파라미터를 군집분석을 통해 4 종류의 군집으로 분류하고, 2 센서의 군집에 대해 기무가설을 통해 두 센서의 신호 파라미터가 서로 다르지 않다는 것을 증명하였다. 이를 통해 AE를 통해 획득한 waveform이 균열의 고유한 신호임을 확인하였다.

2. 시험 및 결과

2.1 인장 시험의 구성 및 결과

인장시험은 Cross head speed를 5mm/min로 설정하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 시험편의 크기는 180 x 20 x 3(mm)이며, 센서의 부착 위치는 그림 1과 같다.

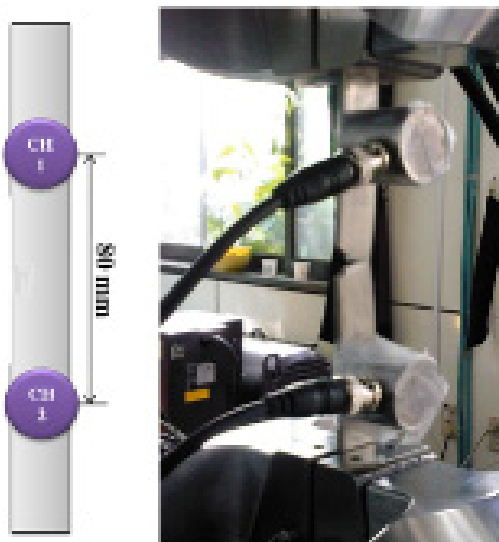


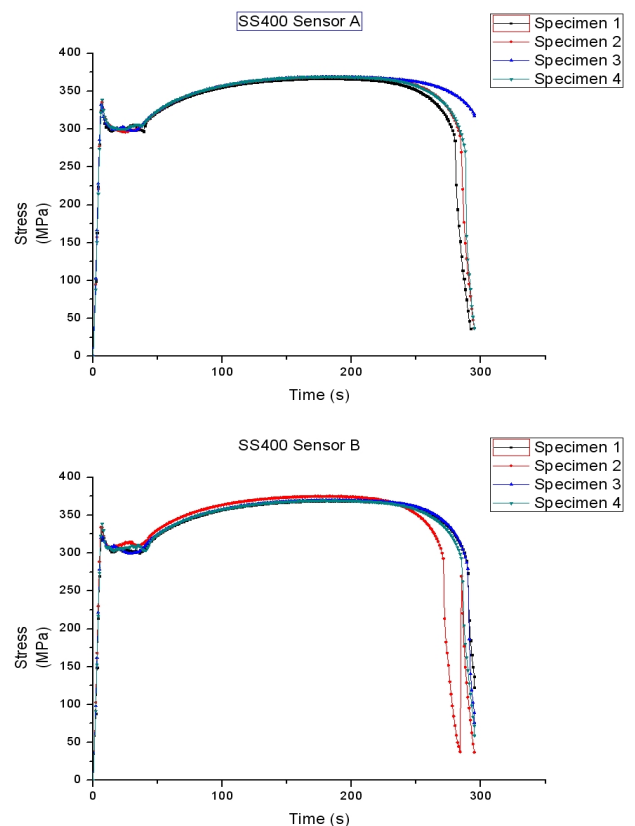
그림 1 인장 시험편과 센서의 위치

인장시험에 사용한 센서는 두 종류이며, 센서의 Spec.은 표 1과 같다.

표 1 센서 별 Spec.

	센서 A	센서 B
Case material	STS 304	STS 304
Face material	Ceramic	Ceramic
Connector	BNC	BND
Seal type	Epoxy	Epoxy
Operating Freq.	150-800kHz	200-900kHz
Resonant Freq.	125kHz	1030KHz
Preamp Gain	40dB	40dB(9-30V)

두 센서의 구성재료 및 Preamp 등에 대한 외부 조건은 모두 동일하며, 감도에 영향을 주는 Operating Freq.와 Resonant Freq.에서 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 인장 실험은 총 16회에 걸쳐 진행하였다. 재료 및 센서에 따라 4 회에 걸쳐 진행되었는데, 1, 2차 실험의 경우 SS400에 대해서 상부에 센서 A를 부착하고 4회 실험 후 상부에 센서 B를 부착하고 4회 실험을 하였다. 그림 1의 센서 하부 부착 위치는 PAC 사의 R15 센서를 부착하였다. 이는 센서의 부착 위치에 따라 AE 신호 파라미터에 영향을 주는 것을 사전에 차단하고, R15의 데이터를 분석하여 참고 센서로 사용하기 위함이다. 3, 4차 실험의 경우 시험편을 STS304로 변경하여 동일하게 진행하였다.



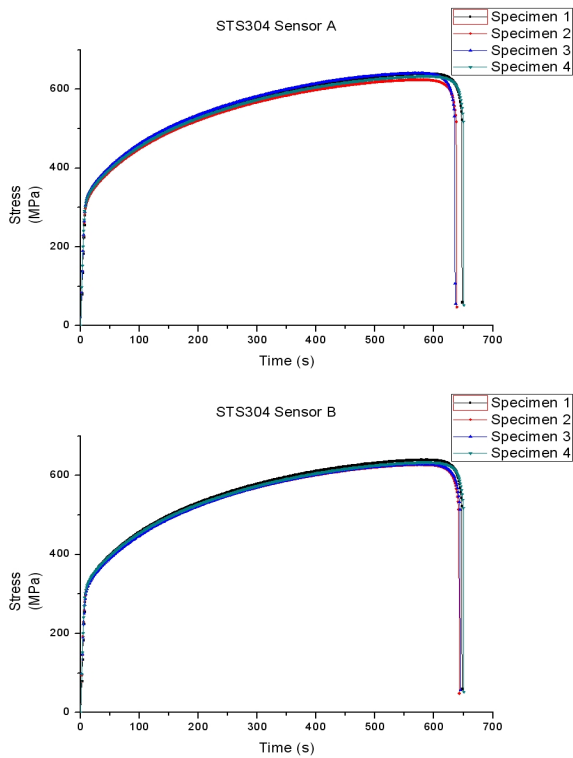


그림 2. 재료 및 센서별 Stress - Time 그래프

인장 시험의 결과로 얻은 Stress, Time, Strain 값을 분석하여 Stress-Time 그래프를 그림 2와 같이 획득하였다. 이를 이용하여, 각 인장 시험별로 파단이 일어나는 시간을 획득 하였고, 이는 표 2와 같다.

표 2 인장시험 별 균열 발생 시간

재료	센서	시험편	시간(s)
SS400	A	1	188
		2	187
		3	186
		4	180
	B	1	179
		2	180
		3	174
		4	184
STS304	A	1	588
		2	571
		3	564
		4	598
	B	1	578
		2	574
		3	562
		4	587

2.2 AE 시험의 결과

인장 시험을 통해 획득한 균열 시간을 AE 신호에 적용하였다. 이를 통해 시간에 따라 출력되는 수많은 AE 데이터에서 균열이 발생할 때 나타나는 고유의 AE 데이터

를 획득 할 수 있었다. 이 AE 데이터는 표 3과 같다.

표 3 재료 및 센서의 AE 균열 신호 파라미터

SS400,센서 A	시험편1	시험편2	시험편3	시험편4
Rise	559	350	16	11
Count	81	64	53	70
Energy	173	17	13	39
Duration	2028	568	259	373
Amp	79	79	72	79
Average-FRQ	40	113	205	188
RMS	0.0004	0.0014	0.0004	0.001
ASL	17	26	16	23
PCNTS	10	24	8	4
R-FRQ	48	183	185	182
I-FRQ	17	183	185	182
SIG_Stangth	1084000	108912	82027	247947
ABS-Energy	238481	14940	7773	74099

SS400,센서 B	시험편 1	시험편 2	시험편 3	시험편 4
Rise	27	12	23	3
Count	29	41	33	56
Energy	20	25	14	35
Duration	287	294	252	382
Amp	71	79	69	75
Average-FRQ	101	139	131	147
RMS	0.0002	0.0012	0.0024	0.0024
ASL	13	24	31	30
PCNTS	5	3	5	1
R-FRQ	92	135	122	145
I-FRQ	185	250	217	333
SIG_Stangth	128048	1623212	87953	221354
ABS-Energy	16344	48945	9316	50779

STS304,센서 A	시험편 1	시험편 2	시험편 3	시험편 4
Rise	3656	4136	1733	886
Count	1805	2088	1164	1712
Energy	36663	32375	37057	31940
Duration	20683	31679	21122	17136
Amp	99	99	99	99
Average-FRQ	87	66	55	100
RMS	0.4952	0.4504	0.5142	0.4812
ASL	76	76	77	76
PCNTS	430	620	189	200
R-FRQ	80	53	50	93
I-FRQ	117	149	109	225
SIG_Stangth	229012000	202231000	231473000	199516000
ABS-Energy	1227000000	1058000000	1322000000	1157000000

STS304,센서 B	시험편 1	시험편 2	시험편 3	시험편 4
Rise	668	230	2900	2241
Count	2471	2182	1661	1480
Energy	6933	4326	4073	3471
Duration	27682	20970	15520	13731
Amp	85	85	85	85
Average-FRQ	89	104	107	108
RMS	0.0866	0.0684	0.0678	0.0694
ASL	61	59	59	59
PCNTS	65	20	309	338
R-FRQ	89	104	107	99
I-FRQ	97	86	106	150
SIG_Stangth	43308000	27024000	25443000	21685000
ABS-Energy	38873000	23507000	23158000	18772000

2.2 AE 결과 분석

AE 균열 신호 파라미터는 표 3과 같이 Rise, Count, Energy, Duration, Amp, Average-FRQ, RMS, ASL, PCNTS, R-FRQ, I-FRQ, SIG_Strangth, ABS-Energy 등 13개이다. 이 신호 파라미터를 기무가설을 통해 센서의 감도에 따른 파단신호에 대한 영향을 분석하기에는 신호파라미터의 종류가 많기 때문에, 신호파라미터에 대해 군집분석을 진행하였다. 군집분석이란 N 개의 개체들을 대상으로 p 개의 변수를 측정하였을 때 관측한 p 개의 변수들을 이용하여 N개의 개체들 사이의 유사성 또는 비유사성의 정도를 측정하여 개체들 사이의 가까운 순서대로 군집화하는 통계 분석 방법이다. 본 연구에서는 최단연결법을 통한 계층적 군집방법을 사용하였다.

표 4 군집분석

파라미터	5군집	4군집	3군집
1:Rise	1	1	1
2:Count	2	1	1
3:Energy	2	1	1
4:Duration	3	2	1
5:Amp	2	1	1
6:Average-FRQ	2	1	1
7:RMS	2	1	1
8:ASL	2	1	1
9:PCNTS	2	1	1
10:R-FRQ	2	1	1
11:I-FRQ	2	1	1
12:SIG_Strangth	4	3	2
13:ABS-Energy	5	4	3

표 4는 3, 4, 5 군집분석의 결과이다. 표를 참고할 때 4 군집의 경우 Duration, SIG_Strangth, ABS-Energy와 나머지로 나뉘는 것을 확인 할 수 있다. 이 파라미터를 이용하여, 두 센서의 결과값들을 하나의 소집단으로 가정하고, 두 센서의 균열 신호값들이 다르지 않다는 것을 증명하기 위해 기무가설을 이용하였다.

2.3 통계 분석

모집단의 분산과 평균을 모르는 상황에서 기무가설은 다음과 같다.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

이 기무가설에 STS304의 Average-FRQ 를 적용한 결과 F_0 는 0.250이고, $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ 는 15.4392이며,

$F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ 는 0.0648이다. 따라서 기무가설 H_0 은 인정되며, 센서 A와 센서 B는 서로 다르지 않다는 것을 확인할 수 있다.

2.4 AE Waveform

기무 가설에 따라 Spec.이 다른 두 센서의 AE 균열 파라미터가 서로 다르지 않다는 것을 확인하였다. 이에 따라서 AE 균열 Waveform도 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 AE 균열 파라미터가 Waveform을 근거하여, 개별적으로 정의된 값이 출력되기 때문이다. 그림 3은 각 센서 및 재료에 따른 AE 균열 Waveform이다.

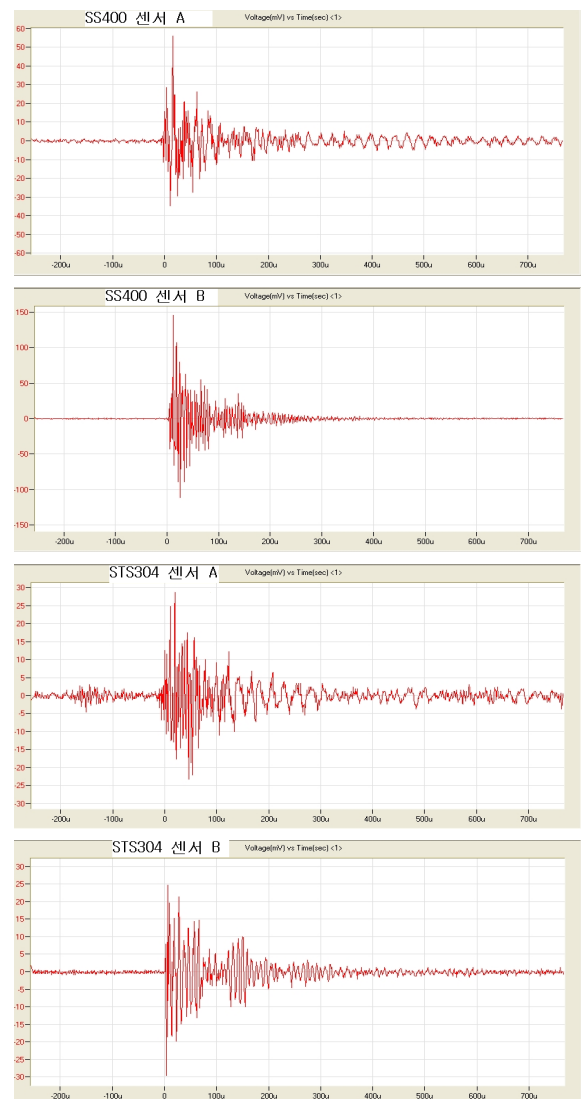


그림 3. 재료 및 센서의 AE 균열 Waveform

그림 3의 Waveform을 비교하면, 형태의 차이를 확인할 수 있는데, 이는 센서의 감도에 따른 균열 신호의 형태 차이가 아니라 단순한 노이즈에 따른 균열 신호 형태

의 차이인 것을 알 수 있다. 또한 Waveform이 센서의 감도에 따라 형태는 유사하지만 개별 값들이 차이가 난다는 사실을 알 수 있는데, 이를 해결하기 위해서 센서의 감도를 적용한 AE 균열신호 변환식이 필요함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 감도가 다른 센서를 이용하여 재료별 균열 신호에 미치는 영향을 파악하였다. 군집 분석을 통해 AE 센서에서 출력하는 신호파라미터를 4집단으로 나눌 수 있었다. 또한 기무가설을 통해 센서의 감도가 다른 경우에도 균열 신호 파라미터의 개별값에서는 차이를 보이지만, 전체 신호 파라미터의 소집단간은 다르지 않다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 앞으로 실제 현장에서 AE 기술을 접목하기 위해서는 센서의 Spec과 균열 신호 사이에 변환식의 필요성을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국가지정연구실 (No.M20604005402- 06B 040040210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Jonghyun Kim** (2010) The study on the Fracture Characteristic for the Nuclear Structural Material using Acoustic Emission,
- William W. Hines**, Probability and statistics in engineering 4th, p.267~317.
- 박성현**. SPSS 17.0 이해와 활용, p.342~378
- ASTM E1316-05**, "Standard Terminology for Non Destructive Examination", ASTM International, PA, 2005.
- M. Mukherjee, O. N. Mohanty, S. Hashimoto, T. Hojo and K. Sugimoto**, Acoustic Emission Technique to Study the Effect of Strain Rate on the Deformation Behaviour of TRIP Aided Steels with Different Matrix Microstructures, ISIJ International, Vol. 46, No. 8, pp. 1241-1250, 2006
- H.L. Dunegan**, Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Technique, Material Evaluation, Vol. 28 No. 1, pp. 221-227, 1970