

# 강재 변형과정에서 음향방출잡음제거와 신호특성에 관한 연구 Study on Filtering Method of Acoustic Emission and Characteristic of Signals for the Deformation Process of Steel

나의균 · 오석형 · 이상근  
E. G. Na, S. H. Oh and S. K. Lee

(접수일 : 2009년 5월 6일, 수정일 : 2009년 7월 1일, 채택확정 : 2009년 7월 17일)

**Key Words** : Acoustic Emission(음향방출), AE Signals(음향방출신호), Basemetal(모재), Weldment(용접재), Non-destructively(비파괴), Noises(신호잡음), Filtering(잡음제거), Plastic Deformation Behaviour(소성 변형거동), Plastic Zone Size(소성역)

**Abstract** : The purpose of this study is to show how to eliminate the noises and to obtain the data related with the relationship between AE signal characteristics and mechanical behaviors for the pressure vessel steel. Various kinds of noises are introduced into the AE data in the course of experiments. Accordingly, real AE data have to be obtained after tests. AE test was carried out under four point bending load. Among AE signals, counts and signal strength are used to find out the differences of AE characteristics between the basemetal and weldment.. After tests, this paper shows the procedures of filtering the noises against basemetal of the pressure vessel steel to obtain the real data around crack tip. Relationships between plastic zone size and cumulative AE counts are shown also. AE signals were absent within an elastic region, regardless of the specimens. Most of AE signals are produced in the process of plastic deformation. The deformation and fracture modes of basemetal and weldment are quiet different.

## 1. 서 론

음향방출기법은 금속 및 복합재료의 변형과 파괴 과정에서 균열의 발생위치, 균열의 시작점 및 파괴 기구 등을 규명하는데 유효하게 사용되어지고 있다<sup>1,2)</sup>. 파괴역학 관점에서 설계의 기본이 되는  $K_{Ic}$ 와  $J_{Ic}$ 를 정하는 도구로써<sup>3)</sup>, 압력용기의 용접성 평가<sup>4)</sup> 및 재료의 수명예측 평가<sup>5)</sup> 등에 음향방출 기법이 많이 사용되고 있다. 음향방출 신호는 하중방식, 재료의 미시조직, 재료 등에 따라 매우 다양한 신호가 발생하게 된다. 이와 관련된 연구는 그간 많이 발표되어 오고 있다.

그런데 음향방출법에 의해 비파괴적으로 재료의 변형과정을 평가할 때 문제점은 실험과정에서 많은 수의 잡음이 발생하게 되고, 데이터 쉬트 상에는 잡

음과 실 신호가 동시에 존재하게 된다는 사실이다. 이와 같은 문제점 때문에 음향방출신호법이 현장에서 사용되는 범위가 제한을 받게 된다. 그러나 최근에 음향방출 신호를 받아들이는 소프트웨어의 발달로 인해 실험 후 잡음을 제거할 수 있기 때문에 그 사용 범위가 넓어지고 있는 추세이기도 하다.

본 연구에서는 압력용기 강과 용접재를 대상으로 표준 샤르피(Charpy) 시험편을 가공하여 음향방출과 4점 굽힘실험을 행하고 난 다음, 잡음을 어떻게 제거하는 지에 대해 자세히 설명하고자 한다.

이어 모재와 용접재를 대상으로 음향방출 신호가 어떻게 다르게 나타나는지를 보이고, 균열 선단에 형성된 소성변형거동과 음향방출신호와 어떠한 관계가 있는 지를 규명해 보고자 한다.

여기서 얻어진 자료는 실제 현장에서 날카로운 균열을 갖는 재료의 변형과정을 비 파괴적으로 평가할 수 있는 유효한 도구로 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

나의균(책임저자) : 군산대학교 기계공학부  
E-mail : egna@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4719  
오석형 : 군산대학교 기계공학부  
이상근 : 한국폴리텍대학 김제캠퍼스

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 용접

본 연구에 사용된 재료는 압력용기재로서 널리 사용되고 있는 두께 38mm인 SA-516 B급 재료이다. 사용재료의 화학적 조성과 상온에서의 기계적 성질은 표 1과 같다. 용접은 두꺼운 후판용접에서 많이 사용되는 잠호용접기(submerged arc welder)를 이용하였으며, Fig. 1에서 보인 것처럼 압연방향으로 다층용접을 실시하였다. 용접을 실시하기 전에 용접부의 용접성을 좋게 하기 위해 용접 전 열처리를 하였으며, 열처리 온도는 100℃에서 10분간 유지하였다. 용접은 가접을 실시한 뒤 실시하였다.

실험에 사용된 표준 샤르피 시험편은 용접된 판의 두께방향의 중심영역에서 채취하였으며, Fig. 1과 같이 기계가공에 의해 노치를 가공하고 난 후, 용융선에 따라 예 균열(pre-crack)을 내었다. 예 균열은 3점 굽힘 하에서 응력제어 방식으로 3Hz의 반복하중을 가하였으며, 노치 선단에서 0.5mm까지 내었다.

### 2.2 굽힘 및 AE 실험

본 연구에서 택한 하중방식은 4점 굽힘실험을 동시에 실시하였으며<sup>3)</sup>, Cross head속도는 0.05mm/min로 하였다. 4점 굽힘실험의 경우 시험편의 span length는 40mm로 하였다. 음향방출의 측정은 두 개의 센서(PAC-R15)를 시험편의 양 끝에 부착하였으며, 이 때 사용된 예 증폭기는 PAC-1220A를 사용하였으며, 시험요소 중 가장 중요한 문지방 값은 40dB으로 하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

(a) Chemical compositions

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.21	0.237	1.06	0.016	0.004	0.02
Ni	Cu	Mo	Ni	V	Sol Al
0.02	0.02	Tr	Tr	0.012	0.26

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
358.7	519.5	29.0

표준 샤르피 시험편은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 용접된 판의 두께방향의 중심영역에서 채취하였다. 이 때 노치 선단의 위치는 용접부의 용융선이 위치하도록 하였다.

노치 선단에 제한하여 음향방출 신호를 얻는데 사용한 소프트웨어는 AE-win이다.

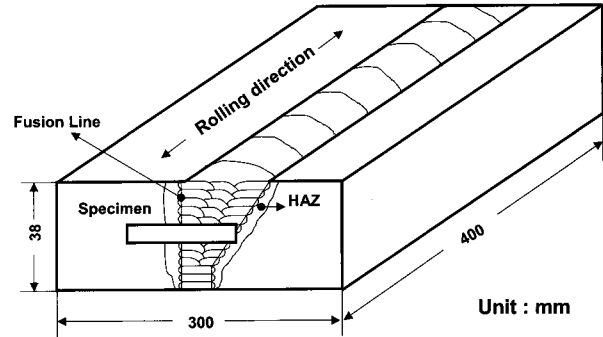


Fig. 1 Extraction of specimen from the multi-pass welded block

실험 중 실시간으로 얻어진 음향방출 신호는 AE events, rise-time, signal strength, AE energy, counts 및 amplitude 등이다.

음향방출 실험 중 필연적으로 발생하는 잡음은 주로 하중 핀과 시험편과의 마찰과 전기적인 잡음으로 구분할 수 있다. 따라서 재료 자체의 변형과 파괴과정에서 발생하는 실 신호를 얻기 위해서는 잡음을 제거할 필요가 있다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Table 2는 실험이 끝난 후 data sheet를 구한 다음, 센서 1, 2에서 각각 392.345431과 392.345439에서 얻어진 자료를 진 신호로 인정하였다. 왜냐하면 음향방출이 균열선단에서 발생되면 시험편 양 측에 센서를 부착하였기 때문에 걸리는 시간이 거의 같은 시간에 신호가 센서에 도착하기 때문이다. Fig. 2는 모재를 대상으로 여과 전과 여과 후에 얻어진 자료를 정리하여 얻은 결과이다.

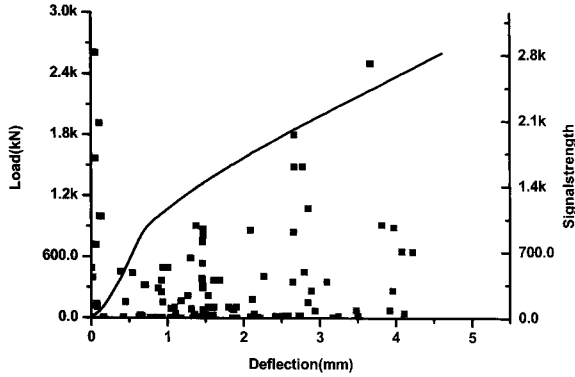
본 결과에서 확인 할 수 있듯이 여과되지 않은 데이터의 경우에는 수많은 잡음으로 구성되어 있음을 확인 할 수 있다. 실제 현장에서 음향방출 법이 활용되기 어려운 점이 바로 이와 같은 잡음 때문이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 잡음을 제거하기 위해 다음과 같은 절차를 밟았다.

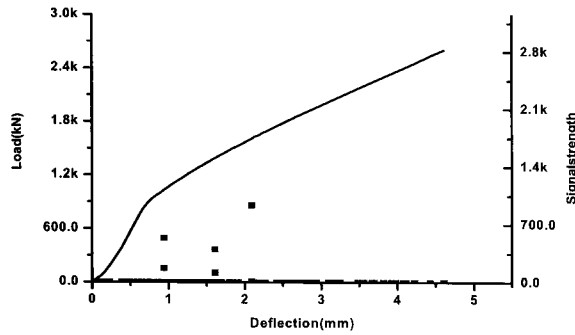
우선 양 쪽 센서에 10μs안에 도착하는 신호들을

택하고 난 다음, event분포 분석을 행하여 균열선단에서 발생하는 신호를 정하였다.

이어 최종적으로 rise-time이 3 $\mu$ s이상 차이가 나는 신호는 무시하였다. 전기적인 신호는 항상 발생하게 되지만 rise-time filtering과 counts분석을 실시하여 모두 버렸다.



(a) Before filtering



(b) After filtering

Fig. 2 Comparison between before and after filtering for the basemetal

Fig. 3은 용접재에 대해 상기에서의 여과과정을 거치고 난 후, 기계적인 인자와 음향방출 인자를 동시에 그래프에 나타낸 것이다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 여과(filtering) 후 음향방출 신호는 Fig. 4에서 Events 분포에서의 신호에 비해 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

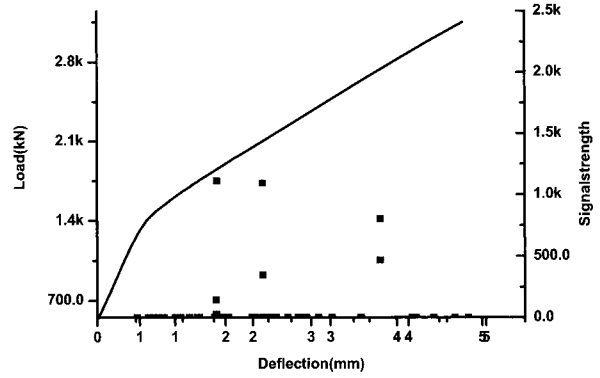
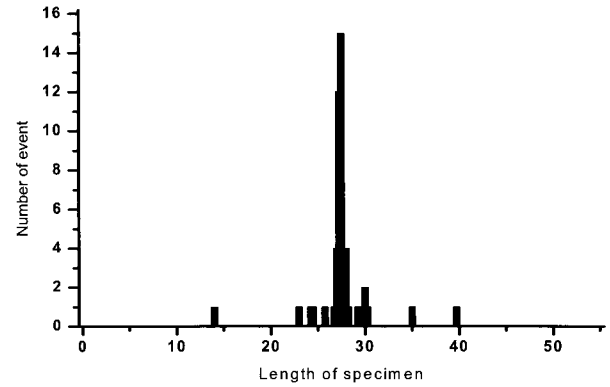
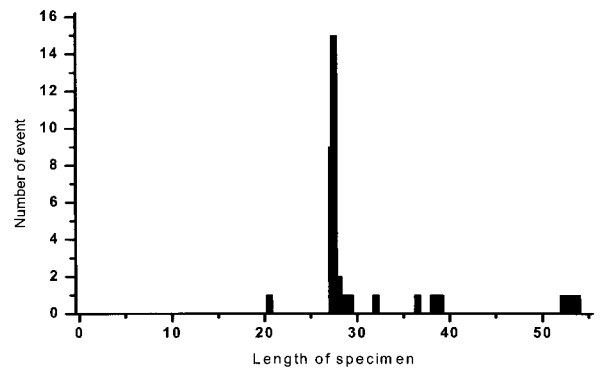


Fig. 3 Relationship between deformation and load, including AE parameter for the weldment



(a) basemetal



(b) weldment

Fig. 4 Event distribution of the basemetal and weldment before filtering

Table 2 Data sheet after AE test

Time	B	C	D	E	F	G	H	I
	Channel	Parametric 1	Risetime	Counts	Energy	Amplitude	Signal Strength	
8.715699	1	-0.010071	3	4	0	49	1729.349976	
8.71573	2	-0.010071	307	1	0	35	0	
14.821631	1	-0.012818	41	5	1	38	9387.900391	
14.821636	2	-0.012818	391.093423	1	-0.549944	0	1	0
20.387354	1	-0.01648	391.138732	2	-0.55208	5	1	0
20.387354	2	-0.01648	391.992381	2	-0.550554	4	11	0
23.165605	2	-0.020753	391.992392	1	-0.550554	7	5	0
29.389675	2	-0.02472	392.345431	2	-0.549944	7	65	2
29.389699	1	-0.02472	392.345439	1	-0.549944	10	42	2
32.60257	1	-0.025025	392.402916	1	-0.552385	0	1	0
			393.05226	2	-0.552995	7	1	2
			393.350564	2	-0.552385	7	1	2
			393.385164	2	-0.552995	7	1	0

Fig. 2와 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 시험편(모재와 용접재)에 관계없이 공히 탄성영역에서는 음향방출신호가 거의 발생하지 않았으며, 소성영역에서 시작되는 하중에서부터 신호가 발생하였다.

위에서 여과가 이루어진 음향방출신호들은 각각 파괴역학적 의미를 부여하기 위해 본 연구에서는 소성역의 크기(plastic zone size)의 크기에 따른 신호 특징을 고찰하고자 한다.

소성역의 크기를 정의하기 위해 우선 4-점 굽힘 하에서의 샤프피 시험편의 응력확대계수(stress intensity factor; K)를 정의하여야 한다. 이를 정의하는 식은 다음 식과 같다<sup>6)</sup>.

$$K_1 = \frac{3Pl}{tw^2} \sqrt{\pi a} \cdot F(\alpha), \quad \alpha = \frac{a}{w}$$

$$F(\alpha) = 1.122 - 1.121\alpha + 3.740\alpha^2 + 3.873\alpha^3 - 19.05\alpha^4 + 22.55\alpha^5$$

정의된 K값을 이용하여 소성역의 크기( $r_y$ )를 정의하면 단순 압축하중에서 이루어지기 때문에 다음 식을 이용하여 소성역의 크기를 정의할 수 있다.

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

이 식에서 용접재의 항복강도  $\sigma_y$ 는 모재의 항복강도의 1.5배 값을 적용하여 구하였다.<sup>7)</sup>

위의 음향방출신호 자료와 소성역의 크기를 이용하여 파괴적 특징을 파악하고자 용접재와 모재의 음향방출 신호와의 관계를 정리하여 보았다.

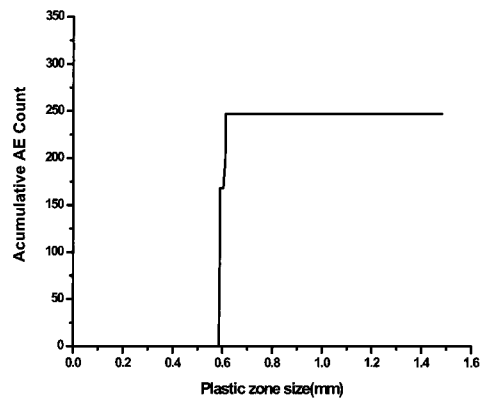
Fig. 5는 실험에서 얻어진 음향방출 신호를 파괴역학적 관점에서 관찰하기 위해 균열선단에서 소성역의 크기의 진전과정과 누적 음향방출 counts와의 관계를 표현한 것이다.

그림에서 모재의 경우, 소성영역의 크기가 0.58mm까지는 음향방출신호가 발생하지 않았으며, 소성역의 성장과 축적된 음향방출 count사이의 관계는 상당히 단순한 과정을 보였다. 용접재의 경우에는 소성역의 크기가 0.12mm까지는 음향방출신호가 감지되지 않았으며, 모재와는 다르게 다양한 단계를 거쳐 진행되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 거동을 보이는 것은 용접재는 기계적인 성질이 시험편의 두께방향에 따라 달라지며, 그에 따라 용접부의 조직 또한 다르기 때문에 나타나는 현상이라고 볼 수 있다. 용접재의 균열선단에서의 소성역의 진전은 일단 노치선단 방향에서 어떤 각도를

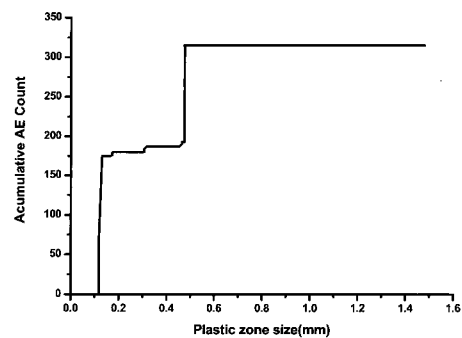
갖고 소성역이 형성되고 난 다음, 노치 선단방향으로 진행된다. 반면 모재의 경우, 소성역의 진전은 용접재와는 다르게 노치선단방향으로 곧바로 진행된다. 이와 같은 이유로 인해 이상과 같은 결과를 보이는 것으로 생각된다.

이상에서 모재 및 용접재의 예 균열선단에서 소성역의 진전거동과 음향방출특성이 서로 다르게 나타났음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 거동이 왜 나타났는지를 파악하기 위해 주사전자현미경을 이용하여 파괴기구 해석하였다.

Fig. 6은 예 균열 선단부를 대상으로 주사전자현미경을 이용하여 3,500배로 촬영한 사진이다. 사진을 촬영하기 위해 우선 굽혀진 시험편을 액체질소 분위기에서 5분 정도 담갔다가 꺼내어 곧 바로 충격하중을 가하여 시험편을 파괴시켰다. 파괴된 면 중에서 촬영 대상영역은 시험편의 정 중앙/예 균열의 선단부로 하였다. 왜냐하면 예 균열을 갖는 시험편이 하중을 받게 될 경우 시험편의 정 중앙/예 균열의 선단부는 3축 응력(tri-axial stress)상태로 되고 평면변형상태로 되며, 그 결과 그 곳에서 맨 먼저 균열이 시작되기 때문이다.



(a) basemetal

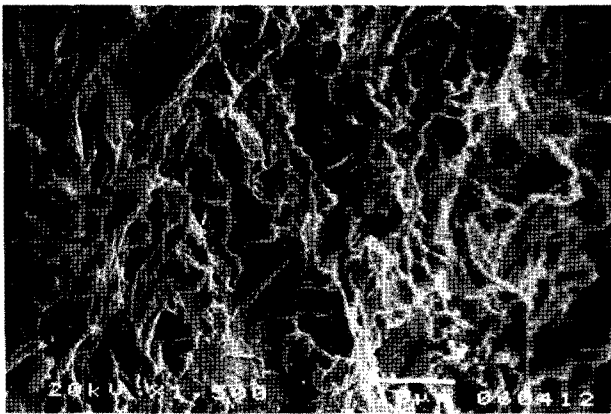


(b) weldment

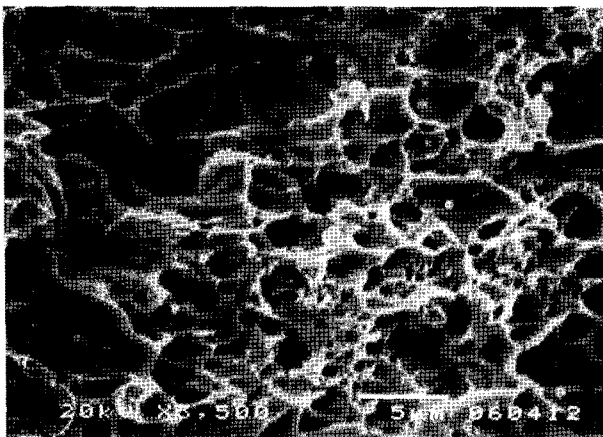
Fig. 5 Relationship between plastic zone size at crack tip and cumulative AE count for the basemetal, PWHT specimen and weldment

용접재의 파면을 살펴보면 모재와는 다르게 입자 (particles)가 깨지지 않은 상태로 파면 전반에 걸쳐 분포되어 있으며, 모재의 경우에는 입자는 거의 찾아 볼 수 없고 단순히 소성변형에 의한 파단면을 보이고 있다.

본 연구에서 음향방출을 통해 확인할 수 있었던 것은 용접부에서 파괴의 시작은 입자부근에서 시작 된다는 점이다. 따라서 사용 중 용접구조물의 안전성을 위해서는 용접을 실시하는 과정에서 산화물과 같은 입자의 발생을 최소화할 수 있는 용접공정의 개선이 필요하다고 할 수 있다.



(a) basemetal



(b) weldment

Fig. 6 Fractured surfaces for the basemetal and weldment around crack tip

#### 4. 결 론

본 연구에서는 음향방출 실험 자료 중에서 실 자료를 어떻게 구하는지를 구체적으로 보였으며, 압력 용기 강재의 모재와 용접재의 시험편 사이의 음향

방출 신호특성을 노치선단에서 발생하는 음향방출 수와 소성변형역의 관점에서 비교/고찰하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 음향방출시험 과정동안에 많은 잡음이 발생하지만, 본 연구에서는 실험 후 data sheet를 구하여 시험편 양 측에 센서 1, 2에 도착하는 시간이 거의 같은 신호만을 진 신호(real signal)로 정하였다. 시험편에 관계없이 탄성영역에서는 거의 음향방출신호가 발생하지 않았으며, 소성영역이 시작되는 하중에서부터 음향방출신호가 발생하였다.

2) 모재의 신호강도의 총 수는 5개인데 반해, 용접재의 신호강도는 6개로서 용접재가 보다 많이 발생하였으며, 신호강도의 최대값은 용접재가 모재에 비해 훨씬 큰 값을 보였다.

3) 균열선단에 소성역역성장은 모재의 경우 비교적 단순한 단계를 거치면서 이뤄지지만, 용접재의 경우에는 모재에 비해 복잡한 단계를 거치는 소성 변형거동을 보였다. 이는 용접부의 기지조직과 조직의 불연속성으로 인해 나타나는 변형거동의 차이에 기인한다.

4) 용접재의 경우 입자는 용접 시 발생하는 제 2상 화합물이거나 공기 중의 산소와 화합하여 형성되는 산화물(oxides) 때문에 기지(matrix)와 입자 사이에 분리(debonding)현상이 발생할 때 음향방출이 발생하게 되며, 모재의 경우에는 강 제조 시 발생하는 제 2상 화합물근처에서 음향방출이 발생하는 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Ono, H. B. Teoh and I. Roman, 1984, "Fracture Induced Acoustic Emission of A533B Steel Effects of Test Temperature and Fracture Mechanisms", Progress in Acoustic Emission II, pp. 105~113.
2. N. Nakamura et al., 1980, "Acoustic Emission during the Deformation of Iron Crystals", Proc. of the 5th International Acoustic Emission Symposium, pp. 318~325.
3. E. G. Na, K. Ono and D. W. Lee, 2006, "Evaluation of Fracture Behavior of SA-516 Steel Welds Using Acoustic Emission Analysis", Journal of Mechanical Science and

Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 197~204.

4. 오세규, 2002, "압력용기용 고온재의 이종재 마찰 용접과 AE평가", 한국동력기계공학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 68~73.
5. 공유식, 2002, "음향방출법에 의한 항공기용 가스 터빈 재료의 크리프 수명예측 평가", 한국동력기계공학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 55~60.
6. T. L. Anderson, 2005, "Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications-Third Edition", T&F information, pp. 61~69.
7. 유용재, 2007, "AE기법에 의한 압력용기 강 용접부의 변형거동평가에 관한 연구", 군산대학교 대학원 석사학위 논문.