

시간-주파수 해석법에 의한 J_{IC}결정에 관한 연구

남기우[†] · 안석환* · 김봉규**
(2000년 3월 21일 접수, 2001년 2월 28일 심사완료)

A Study on Determination of J_{IC} by Time-Frequency Analysis Method

Ki-Woo Nam, Seok-Hwan Ahn and Bong-Kyu Kim

Key Words: Elastic-Plastic Toughness(탄소성괴괴인성), Acoustic Emission(음향방출), Unloading Compliance(제하컴플라이언스), Signal Characteristics(신호특성), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 분석), Nondestructive Evaluation(비파괴평가)

Abstract

Elastic-plastic fracture toughness JIC can be used as an effective design criterion in elastic-plastic fracture mechanics. Among the JIC test methods approved by ASTM, unloading compliance method was used in this study. In order to examine the relationship between fracture behavior of JIC test and AE signals, the post processing of AE signals has been carried out by Short Time Fourier Transform(STFT), one of the time-frequency analysis methods. The objective of this study is to evaluate the application of characterization of AE signals for unloading compliance method of JIC test. As a result of time-frequency analysis, we could extract the AE from the raw signal and analyze the frequencies in AE signal at the same time. AE signal generated by elastic-plastic fracture of material has some different aspects at elastic and plastic ranges, or the first portion of crack growth by fracture. First of all, increased energy recorded and detected by using AE count method increase rapidly from the start of ductile fracture. The variation of main frequency range with time-frequency analysis method could be confirmed. We could know fracture behavior of interior material by examination AE characteristics generated in real-time when elastic-plastic fracture occurred in material under loading.

1. 서론

일반적으로 강도가 낮고 연성이 큰 재료에 있어서는 구조물의 파괴에 대하여 불안정파괴에 앞서 큰 소성변형이 일어날 때, 또는 설계기준으로 어느 정도의 한계까지 소성변형을 허용할 때에는 탄소성 상태의 파괴인성을 평가하는 것이 필요하

다. 이러한 대규모 항복상태에서의 파괴인성평가는 비선형적인 탄소성파괴역학에 따른 균열선단 열림변위(CTOD) 혹은 J적분으로써 표현하게 되었다. 탄소성 파괴인성 평가법은 R곡선법과 SZW 법 등과 같은 복수시험편법과 제하컴플라이언스 법 등과 같은 단일시험편법이 잘 알려져 있다.^(1~4)

가동되고 있는 구조물이나 기기와 같이 시험편의 채취 및 확보가 제한적이거나 불가능한 경우도 있기 때문에 많은 시험편을 사용하는 것은 비경제적이므로 단일시험편법으로 신뢰성 있는 정보를 얻는 것은 매우 중요하다. 따라서 ASTM E813-81규정에서는 제하컴플라이언스 법을 권장하고 있다.^(5~6)

한편 음향방출은 변형에 민감하고 동적으로 검

† 책임저자, 회원, 부경대학교 재료공학부
E-mail : namkw@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746
* 회원, 부경대학교 기계공학부
** 부경대학교 대학원

출할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 재료 강도의 연구 수단뿐만 아니라 비파괴검사의 측면에서도 새롭고 유력한 수법이 되고 있다. 음향방출은 국지적인 현상이지만 음향방출이 발생하면, 응력과 변형거동이 고체를 통하여 전파되어 고체 표면에 설치된 센서에 의해 감지될 수 있다. 이러한 음향방출 현상은 비파괴검사에서 결함부위를 찾는 데 이용되고 있으며, 탄소성 파괴인성시험법의 확립에 관한 많은 연구가 있다.^(7~11) 그러나 음향방출법에서는 누적 카운터 또는 누적 에너지에 의하여 결정하고 있으므로, 노이즈 등에 의한 누적도 포함되어 정량적인 평가에는 한계가 있다. 최근 초음파 신호와 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석하여 주파수 영역을 평가하는 방법이 시도되고 있다.^(12~14) 또한 이 해석법을 사용하여 재료의 열화도 평가 가능성도 제시하고 있다.⁽¹⁵⁾ 그러나 시간-주파수 해석법을 사용하여 파괴인성을 평가한 연구는 아직 찾아 볼 수 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Al5083합금의 파괴저항 곡선(J-R curve)을 제하컴플라이언스 법으로 평가한 후, 비파괴적 방법으로 시험시 발생하는 음향방출신호를 시간-주파수분석법으로 해석하여 파괴인성치(J_{IC})와의 상관성을 규명하였다.

2. 시험편과 실험방법

시험재료는 강도, 인성 및 내식성(내해수성)이 뛰어난 Al-Mg합금의 5000계열 알루미늄 합금인 Al5083이다. 시험재료의 화학성분과 기계적 특성을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내며, 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 시험편의 두께는 12.5mm와 25mm 두 종류로 실시하였다. 본 실험에서 피로예비균열 삽입과 탄소성 파괴인성시험은 실온 대기 중에서 실시하였다. 피로예비균열은 24mm의 기계노치에서 피로에 의해 2mm진전시켜 균열비가 $a/W \approx 0.52$ 가 되게 하였다. 이때 피로하중의 최대응력확대계수 K_{fmax} 은 $K_{fmax} \leq 11.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 하였다. 응력비는 $R=0.1$ 로 하였으며 응력확대계수폭은 $\Delta K \approx 10.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 하였다.

제하컴플라이언스 법을 이용한 탄소성 파괴인성 시험에서 초기하중을 부하하여 일정하중까지는 하중제어를 실시한 후, 변위제어로 전환하였다. 부하속도는 하중제어를 할 때는 3.43kN/min으

로, 변위제어를 할 때는 0.05mm/min으로 하였다. 그리고 변위량이 2.5~3mm까지 십수차례 반복하여 제하를 실시하였으며, 제하는 하중의 10%이내에서 실시하였다.

Table 1 Chemical compositions of Al5083 (Wt%)

Si	Mn	F	Mg	Cr	Zn
0.1	0.61	0.2	4.34	0.17	0.019

Table 2 Mechanical properties of Al5083

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
289	147	70973

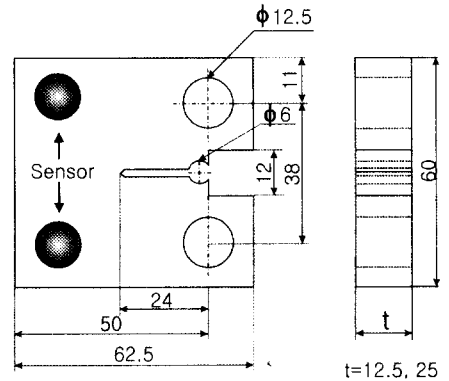


Fig. 1 Dimensions of specimen in mm

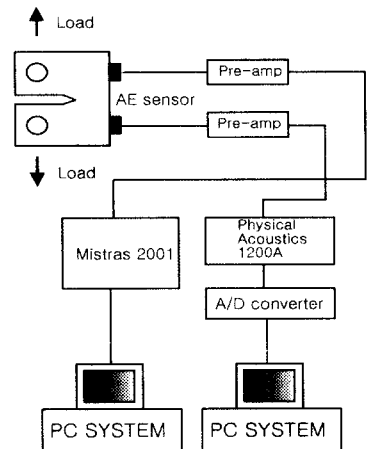
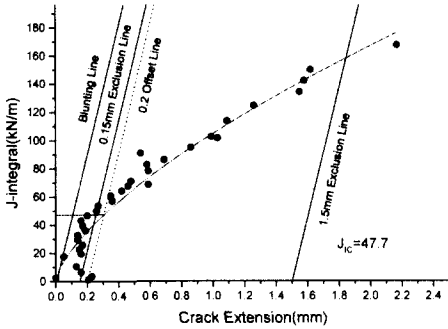
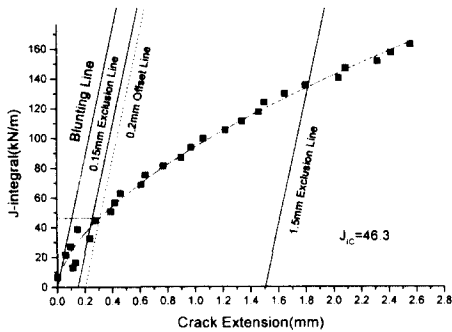


Fig. 2 Schematic diagram of AE measurement



(a) 12.5mm



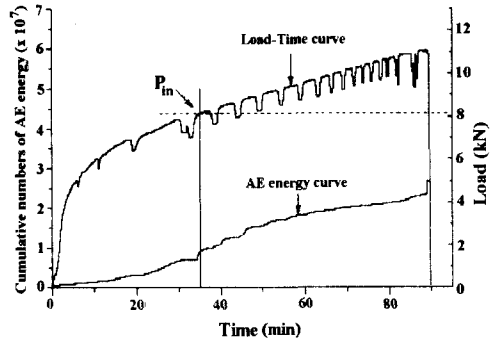
(b) 25mm

Fig. 3 J-R curve by ASTM E813-87 method

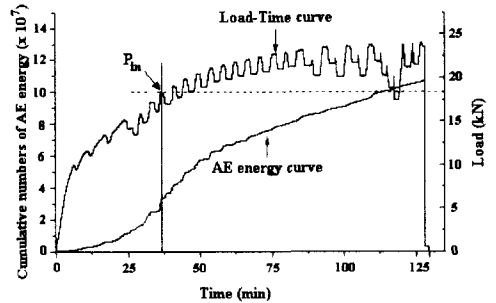
음향방출신호의 검출은 누적 값을 위한 장비는 Mistras 2001과 공진형센서(PAC, R15)이고, 음향방출 신호의 시간-주파수 해석에 사용하기 장비는 PAC의 1200A와 광대역센서(PAC, WD)이다. 두 센서는 40dB 전치증폭기를 거쳐 신호를 검출하였다. 특히 시간-주파수 해석에 사용된 음향 신호는 Gage의 CS215 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 시간-주파수 해석을 수행할 수 있는 프로그램으로 분석하였다. 두 센서가 검출할 수 있는 주파수 범위는 공진형은 50~200kHz, 광대역은 100~1000kHz이다. 두 센서의 부착 위치는 Fig. 1에 나타내었으며, 음향방출 신호의 검출도는 Fig. 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제하컴플라이언스 법에 의한 J_{IC}의 결정



(a) 12.5mm



(b) 25mm

Fig. 4 Relationship between cumulative AE energy curve and load-time curve

ASTM E813-87 법에 의한 제하컴플라이언스 법으로 J-R곡선을 구하면, 초기 균열길이가 a_0 보다 감소하게 되는 균열길이 감소현상이 나타나게 된다. 그러나 균열길이 감소 현상은 실제로 존재할 수 없는 현상으로, 실험과 해석상의 오차에 기인한다고 알려져 있다. 따라서 여러 연구자들은 제하컴플라이언스 법에 의한 균열길이 감소현상의 보정에 관하여 연구하였다.⁽⁴⁾ 그중 간편한 방법으로 둔화직선을 기준으로 최대균열길이 감소점과 둔화직선 사이의 거리만큼, 모든 데이터를 보정함으로써 균열길이 감소현상을 방지할 수 있다. 이와 같은 방법을 오프셋 방법(offset technique)이라 한다. ASTM E813-87법에서는 J_{IC} 결정에 있어 둔화직선에서 0.2mm 이동시킨 offset line과 R곡선과의 교점을 사용한다. 즉, 시험편의 균열이 0.2mm 안정성장했을 때의 값을 J_{IC}로 정의한다. Fig. 3의 (a)는 두께 12.5mm의 결과이며, (b)는 25mm의 결과이다. 이 그림에서 12.5mm와 25mm

시험편의 탄소성 파괴인성시험에 의하여 얻어진 J_{IC} 값은 각각 47.7kN/m, 46.3kN/m로서 두께 25mm 시험편의 J_{IC} 값이 낮게 나타났다. 그 이유는 두께가 두꺼운 25mm 시험편의 파괴양상은 평면응력상태보다 평면변형상태가 지배적이기 때문이라 생각된다. 그러나 이와같이 두께가 다른 시험편에서 두께의 차이가 적은 현상에 대해서는 급후 다양한 재료를 사용하여 검토할 필요가 있다.

3.2 AE 특성 평가

제하컴플라이언스 법에서 부하와 제하 할 때, 시험편 균열전단의 개구, 소성둔화 및 파괴개시에 이르기까지의 파괴거동을 살펴보기 위하여 음향방출 신호의 검출과 분석을 통한 비파괴적 특성을 조사하였다.

제하컴플라이언스 법에서의 음향방출 특성을 알아보기 위하여 두 종류의 시험편에서 발생하는 음향방출 에너지와 하중-시간 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 두께 12.5mm의 결과이며, (b)는 두께 25mm에서 얻어진 결과이다. 음향방출 에너지의 변화는 하중 또는 변위 증가에 따라 완만한 상승과 급격한 상승을 나타내었다.

그림에서 음향방출 에너지 그래프가 완만한 증가를 보이는 계단형태의 모습을 보이다가 기울기가 급격하게 상승하는 부분이 나타난다. 이 부분이 제하컴플라이언스 법에 의한 파괴인성 시험 중 균열이 진전하기 시작하는 곳으로 규정하였다. 그 때의 중첩된 하중곡선에서 두께 12.5mm는 약 8.13kN, 두께 25mm는 약 17.64kN 부근의 하중으로 관찰되었다. 이 때의 하중을 각 두께의 시험편에서 파괴개시하중(P_{in})이라고 할 수 있다. 이 하중값으로 구한 J_{IC} 값은 다음 절에서 음향방출 신호를 시간-주파수 해석하여 얻은 J_{IC} 값과 일치하는 값이다.

3.3 시간-주파수 해석에 의한 J_{IC} 결정

탄소성 파괴인성 시험에서 음향방출 에너지로서 음향방출특성을 평가하는 것은 J_{IC} 의 정확한 결정과 변화하는 소성파괴기구를 판단하는데 미흡하다. 그리고 음향방출 에너지는 특정 하중 또는 변위 지점에서 소성파괴에 의하여 균열이 진전했는지 아니면 아직 파괴진인지 구별하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 좀 더 명확히 소성 파괴기구 및 양상을 비파괴적으로 살펴보기 위하여, 음향방출 신호를 시간-주파수 분석법으로

해석하여 신호의 주요 주파수영역을 분류하였다.

탄소성 파괴인성시험시에는 정확한 결과를 얻기 위하여 시험편에 예비균열을 삽입한다. 그런데 음향방출 신호는 카이저 효과에 의하여 이미 가해진 하중이하에서는 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 예비균열 삽입 하중 이하에서 검출되는 음향방출 신호는 카이저 효과에 의하여 시험기 및 외부영향에 의한 노이즈로 분류 가능하다. 대체적으로 검출된 음향방출 신호 데이터를 시간-주파수해석에 의하여 분석하면, 낮은 하중에서 집중적으로 검출되는 0.2MHz 이하의 주파수 영역의 음향방출 신호는 시험기 또는 외부영향에 의한 노이즈로 분류할 수 있었다.⁽¹²⁾

두께 25mm 시험편의 제하컴플라이언스 시험 중 얻어진 음향방출 신호를 시간-주파수해석법에 의하여 주요주파수 영역을 분류하여 Fig. 5에 나타낸다. (a)는 시험 중에 가해지는 하중 또는 변위의 증가에 따라 소성변형이 발생하는 영역부터 주요주파수가 0.2~0.3MHz 부근으로 상승하였다. 한편, 소성변형 영역에서 신호가 발생함에 따라서 노이즈 부근의 주파수영역(0.2MHz 이하)은 검출빈도가 낮아졌다. (b)는 저하중에서 고하중 또는 변위의 전 범위에 걸쳐서 0.45MHz 부근의 신호영역을 나타내며, 검출 빈도가 많아졌다. 이 신호는 전 변위범위에서 관찰되는 것으로서 탄성영역과 소성영역 파괴기구 모두의 영향을 받는다고 생각할 수 있다. (c)는 소성변형 후 파괴개시에 따라서 고주파수 영역인 0.55MHz 부근의 주요주파수를 가진 음향방출 신호가 현격히 검출되고 있다. (d)는 0.6MHz 이상의 고주파수 등의 주요주파수를 가진 음향방출 신호가 검출된다. 이것은 연속적으로 검출되지 않는 점으로 보아 실험 중에 개재물과 편석부의 분리, 세퍼레이션 등의 시험의 여러 역학적 요인에 의해 발생한다고 할 수 있다.⁽¹⁶⁾ Table 3은 Fig. 5에서 설명한 신호의 주요주파수와 그 특징에 대하여 나타내었다.

제하컴플라이언스 법에 의해서 얻어진 J_{IC} 값과 시험편의 균열진전에 따라 검출되는 음향방출 신호의 주요주파수와 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 노이즈로 분류되는 0.2MHz 이하 주파수 영역의 신호가 낮은 J_{IC} 에서 많이 발생하고, 소성둔화와 함께 소성영역의 형성과 균열의 진전에 따라서 균열전단의 소성영역의 형성으로 0.2~0.3MHz의 신호가 진구간에 걸쳐서 발생하고 있다. 그리

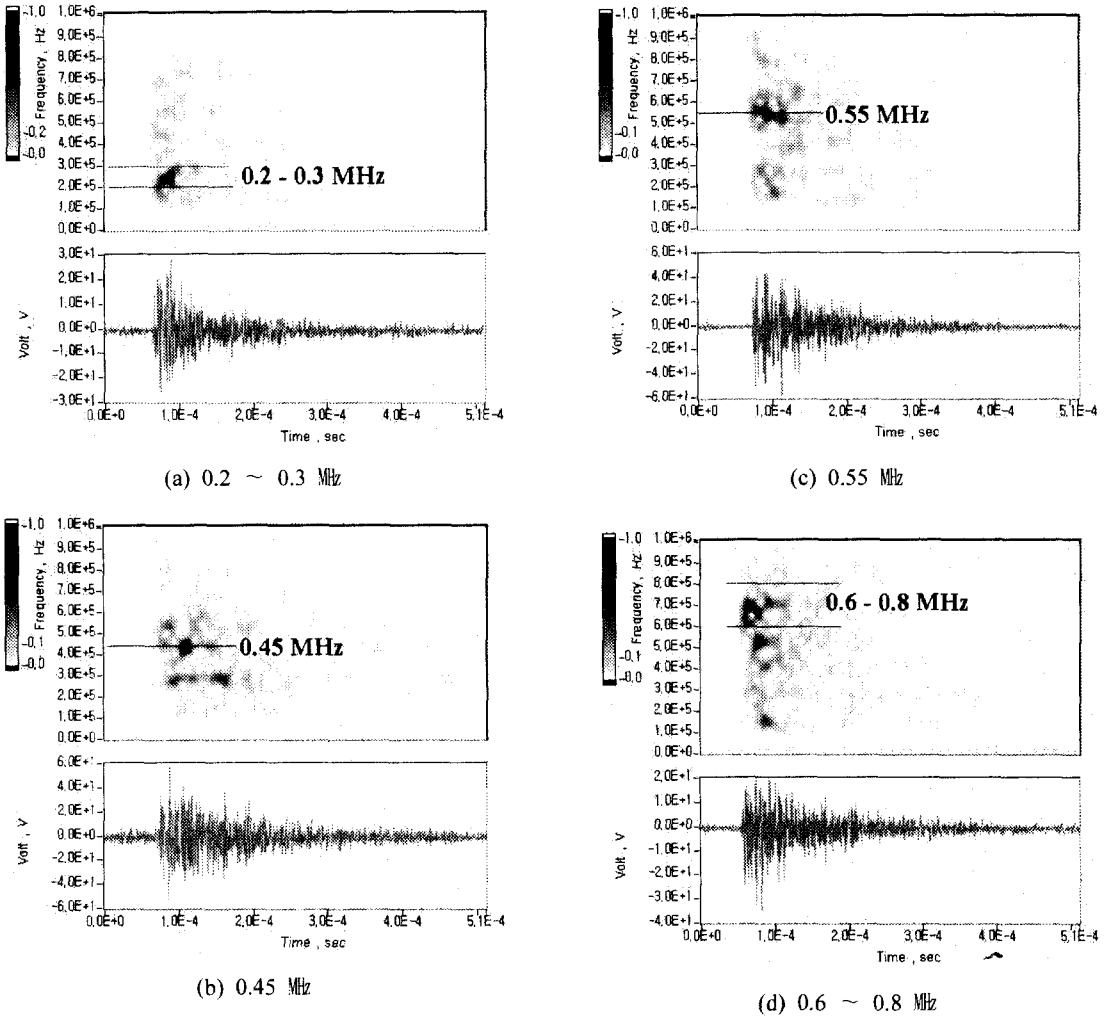


Fig. 5 Each frequency range by time-frequnc analysis of AE signals obtained from 1TCT specimen

Table 3 characteristics of AE signal and a main frequency range

Main frequency	Characteristic and mechanics
under 0.2MHz	Noise
0.2~0.3MHz	Signals from plastic deformation
0.45MHz	Signals from Elastic and plastic deformation parts
0.55MHz	Signals from crack growth
over 0.6MHz	Inclusion, separation of segregation, the other mechanics

고, 균열의 진전에 따라서 발생하는 0.55MHz의 주파수영역이 J_{IC} 값 40kN/m 진후에서 발생하여 전구간에 검출되고 있다.

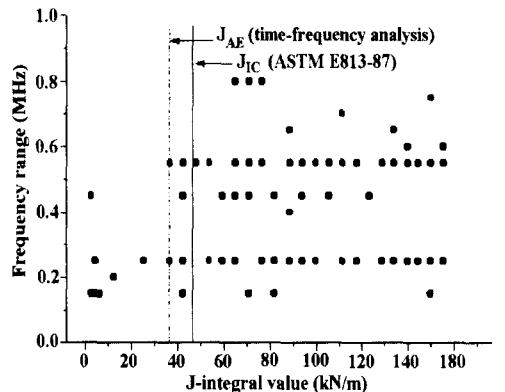


Fig. 6 Main frequency range of AE signals obtained from time-frequency analysis

이 그림에서 실선은 ASTM E813-87 규정에 의하여 구한 J_{IC} 값(46.3kN/m)이고, 점선은 Table 3에 나타내었듯이 균열진전에서 얻어진 신호를 시간-주파수 해석법에 의하여 구한 중심주파수 0.55MHz 개시점의 J_{IC} 값(36kN/m 부근)이다. 음향방출의 0.55MHz 주파수영역은 E813-87 규정에 의한 J_{IC} 값 이전부터 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것은 ASTM E813-87법에서는 J_{IC} 값을 0.2mm offset 선에서 구하고 있기 때문이라고 생각한다. ASTM E813-87 법에서는 실질상으로 시험편에 있어서 0.2mm 정도의 안정파괴는 허용되고 있으므로 J_{IC} 이전에 이미 소성파괴와 균열진전이 시작됨을 의미한다. 따라서, 음향방출법을 이용한 시간-주파수 해석법을 사용하면 구조물의 안정파괴개시점의 검출이 용이하리라 생각된다.

4. 결 론

제하컴플라이언스 법에 의하여 A15083 합금의 CT시험편을 사용하여 탄소성파괴인성(J_{IC})을 결정하고, 시험시 검출한 음향방출신호를 시간-주파수법으로 분석하여 J_{IC} 를 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제하컴플라이언스 법에서 얻어진 J_{IC} 값은 두께 12.5mm에서는 47.7kN/m, 25mm에서는 46.3kN/m였다. 그러나 시간-주파수해석법에서는 제하컴플라이언스 법에서 얻은 값보다 적은 36kN/m의 J_{IC} 값이 얻어졌다.

(2) 시간-주파수 해석법에 의하여 음향방출 신호를 분석하면, 소성파괴 개시전 노이즈 영역인 0.2MHz 이하 영역의 저주파영역에서 소성변형과 함께 0.2~0.3MHz 영역으로 상승하였고, 파괴개시와 함께 0.55MHz 부근의 고주파수가 나타나고 있다. 그리고 0.45MHz 주파수 영역이 전 하중 및 변위에 걸쳐서 나타나고, 소성파괴개시후 여러 가지 파괴기구에 의하여 0.6MHz 이상 영역의 고주파수가 나타남을 알 수 있다.

(3) 제하컴플라이언스 법에 의한 J_{IC} 결정에 음향방출 신호를 시간-주파수으로 분석할 때, 파괴개시점을 균열진전과 동시에 확인할 수 있었다. 따라서 구조물에서 방출되는 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석하면 구조물의 안전성을 실시간적으로 감시가 가능하리라 생각한다.

참고문헌

- (1) "Standard Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness," *ASTM E 813-81*.
- (2) Standard Test Method for JIC. *JSME S001*, 1981.
- (3) 원종일, 석창성, 1999, "역사이클하중이 원자력배관재료의 파괴저항곡선에 미치는 영향," 대한기계학회논문집, 제23권, 제7호, pp. 1112~1119.
- (4) 석창성, 강병구, 1999, "SA508CL.1a 탄소강 배관소재의 파괴저항특성 평가," 대한기계학회논문집, 제23권, 제7호, pp. 1147~1154.
- (5) 오세욱, 임만배, 김진선, 1995, "J적분을 이용한 원자력 압력용기강의 파괴인성치의 결정," 한국해양공학회지, 제9권, 제1호, pp. 111~119.
- (6) 석창성, 최용식, 1992, "J-R 곡선에서의 균열길이 감소현상에 대한 연구(II)," 대한기계학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 1627~1631.
- (7) Desai, J. D. and Gerberich, W. W., 1975 "Analysis of Incremental Cracking by The Stress-Wave Emission Technique," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, p.153.
- (8) Mori, Y., Kuribayashi, K., Kishi, T., Shirasuna, Y., Niitsuma, H., Takahashi, H., Yuuki, R. and Kitagawa, H., 1981, "Procedure of Round Robin Tests on Establishment of Elastic-Plastic Fracture Toughness Testing Method by Means of AE," *JSNT*, Vol. 30, pp. 837~841.
- (9) Ando, K., Obata, Y., Sakaki, M., Shimada, M., Nakano, M. and Ueyama, H., 1981, "Elastic-Plastic Fracture Toughness and Acoustic Emission of Rolled Steel for General Structure (SS41)," *JSNT*, Vol. 30, pp. 868~869.
- (10) Kobayashi, H., Takashima, N., Nakamura, H. and H. Nakazawa, 1981, "Elastic-Plastic Fracture Toughness of High-Tensile Steels (HT60, HT80) and 304 Stainless Steel," *JSNT*, Vol. 30, pp. 918~921.
- (11) Fukuzawa, Y., Nakamura, T., Ringshall, N.W. and Adachi, A., 1983, "Correlation between the Micro-fracture Behavior and AE Characteristics on Steels," *JSNT*, Vol. 32, pp. 544~553.
- (12) Nam, K. W., Lee, K. C. and Oh, J. H., 1999,

- "Application of Joint Time Frequency Analysis Methods of Nondestructive Evaluation," AMD-Vol. 234/ NDE-Vol. 17, The 1999 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 14 - 19, 1999, Nashville, Tennessee, pp. 67~74.
- (13) Allan, M. and Stuart, K., 1991, "The Time-Frequency Analysis of Ultrasonic Signals," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 10, pp. 741~748.
- (14) Malik, M. A., Jin, X. M. and Saniie, J., 1996, "Joint Time-Frequency Processing of Ultrasonic Signals," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 2089~2096.
- (15) 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석, 1999, "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴 평가," 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호, pp. 270~276.
- (16) 김현수, 강창룡, 남기우, 2000, "고강도 구조용 내화강의 피로특성 및 음향방출신호의 시간-주파수 해석," 대한금속·재료학회지, 제38권, 제11호, pp. 1478~1482.