

AE방법에 의한 Flash Butt 용접부의 파괴거동 평가

An Evaluation of the Fracture Behavior for Flash Butt Welding zone by Acoustic Emission Method

김 용 수* · 이 하 성** · 강 동 명**
Yong-Soo Kim · Ha-Sung Lee · Dong-Myeong Kang

ABSTRACT

In this study, we conducted experimental tests to evaluate fracture behaviors of fresh-butt welded metal by Acoustic Emission technique.

We selected similar welding and dissimilar welding process, the one welded for SM45C, SS41 and SUS304 of each material, the other for SM45C and SS41, SM45C and SUS304 and SS41 and SUS304.

The fracturing processes of weld metal were estimated through the fracture toughness test with compact tension specimens and fractography analysis.

In ASTM test method E-399, type I curves for materials of this study were obtained by load-cod diagram of fracture toughness test. and 5% offset load(P_5) was estimated as the estimated crack initial load(P_Q), The estimated crack initial load(P_Q) of similar welding materials generally lower than base metal, and then SM45C appeared greatly in decreasing rate of P_Q , SS41 and SUS304 appeared in order.

P_Q of dissimilar welding materials were lower than the similar welding materials. P_Q of welding of SM45C and SS41 appeared in small, SUS304 and SS41 appeared greatly in dissimilar welding materials.

In fracture toughness test, AE counts increased before the inflection point of the slope, decreased after that. It was found that increasing of AE counts were due to the microcrack formation at the crack tip near the P_5 point through AE data.

For welding materials in this study, both low and high AE amplitude appeared simulataneously. It

* 국립 서울산업대학교 산업안전공학과

** 유한전문대학 금형설계과

was confirmed that the low AE amplitude was due to formation of micro void, micro crack or micro dimple, the high AE amplitude was caused by microvoid coalescence and quasi-cleavage fracture through analyses of fractography.

1. 서 론

용접 구조물, 압력용기 및 고장력강의 사용확대에 따른 대형사고의 방지를 위해서 더욱 더 높은 안전성의 평가가 요구되고 있는 실정이다. 용접기술 발달과 더불어 용접부에 대한 파손 해석 또한 여러 연구자들에 의해 진행이 되고 있다¹⁾²⁾. 보다 근본적인 파괴거동의 해석을 위해서는 재료내의 미시적인 크랙 성장기구를 구분하고 감지하는 실험적인 기술과 재료내의 손상량을 정량화하기 위한 미시적인 파괴거동을 측정하는 것이 필요하다^{3)~7)}.

본 연구에서는 일반적으로 행해지는 동일 재료간의 접합인 동종 재료용접과 용접기술의 발달로 실용단계에 들어 서고 있는 이종 재료간의 접합인 이종 재료 용접들의 기계적 강도 특성을 규명하기 위해 AE기술(Acoustic Emission Technique)을 이용하여 재료의 기계적 성질, 균열 개시점 및 AE발생량과의 상호관계에 대하여 비교 검토하였다. 또한, 실험후 파면을 전자 주사현미경(SEM)으로 관찰하여서 AE발생원을 찾아 내고 각 재료들간의 용접상태를 규명하는데 역점을 두었다.

각 재료들간의 접합상태를 인장 및 파괴시험을 하여 재료의 기계적 성질, 균열개시점 및 AE발생량과의 상호관계를 규명하는 것은 용접구조물 설계의 자료로서 매우 중요하다고 생각되며 이러한 실험결과는 산업현장에서 용접 구조물의 안전성을 평가하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 용접 및 실험절차

실험재료는 기계구조용 강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)이며, 용접 방법은 용접시에 잔유응력 및 열영향부등의 여러가지 결함발생이 많이 생기어 이것을 최소화 시키고자 용접성이 좋은 후레쉬버트 용접으로 900℃로 예열한 w(폭), h(높이) 및 l(길이)이 각각 80mm, 80mm 및 250mm인 재료를 후레쉬버트 용접기로 전압 8volt, 전류는 후레쉬 초기 380amp., 후레쉬

말기 600amp., 업셋 압력 10,000Kg 및 업셋 길이 7.5mm로 열간에서 하였다. 후레쉬버트 용접은 동종재료 용접과 이종재료 용접의 두가지 경우에 대하여 행하였는데, 동종재료 용접은 기계구조용강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)이며, 이종재료용접은 기계구조용강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41), 기계구조용강(SM45C)과 스테인레스강(SUS304) 및 구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)의 3가지 경우이다. 용접 후 재료의 잔유응력을 제거하기 위해 950℃에서 풀림(annealing) 열처리를 하였다.

시험편으로 ASTM E399에 규정된 CT시험편을 택하였으며 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

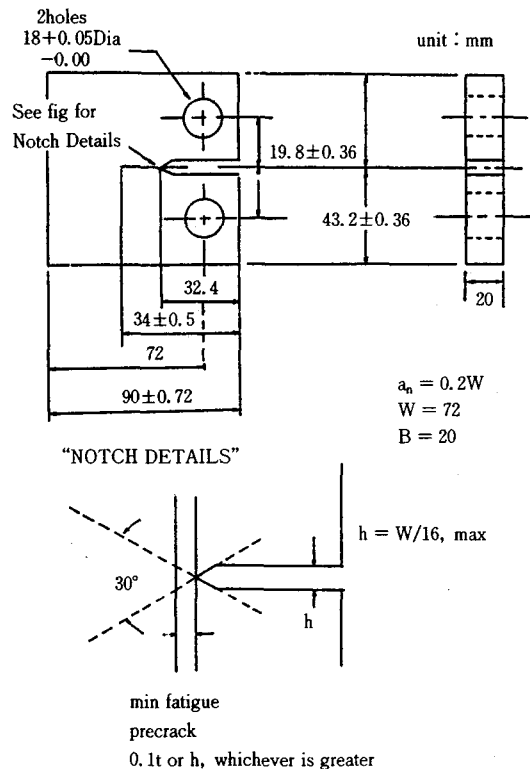


Fig. 1 Compact tension(CT) specimen

시험기로는 만능인장시험기(cap. 10ton, Toyo Baldwin, Japan)를 사용하여 인장속도를 분당 0.5mm로 실험하였으며, 하중과 균열개구변위(COD)를 X-Y기록계에 자동 기록시켰다. 하중의 변화량은 로드셀의 전압, 균열개구변위는 COD게이지(Saginomiya Co., COD-7.5-250, Japan)의 전압을 A/D변환기를 통하여 마이크로 컴퓨터에 기록하였다. 또한, AE발생 감지기로는 소형 시편의 경우 실험실에서 많이 사용되는 resonance주파수가 1MHz인 MD-1160(San Densi Co., Japan)으로 AE발생을 감지하여 pre-amp로 40dB로 증폭하고 크래킹 모니터(San Densi Co., MD-1100S Japan)에 내장된 main-amp로 40dB로 증폭시켜 전체의 gain이 80dB로 100-300KHz의 범위에서 발생한 AE를 검출하였다. 외부의 잡음을 최소화하기 위해서 시편을 시험기에 장착후 10N까지 하중을 작용시켜서 그림과 시편 사이의 잡음을 제거시켰으며, 이때 오실로스코프로 확인한 결과 그 수준이 0.05V임을 확인하였고 따라서 threshold수준을 0.08V고정하여서 실험을 하였다.

검출된 AE의 진폭을 0.2-1.6V 전압수준을 0.2V 간격으로 8등급 구분하여 개수하였고, 이 등급별로 누적 개수된 AE발생량을 GPIB인터페이스를 통해서 컴퓨터로 전송하여 Data를 기록하였다^{8)~12)}.

실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

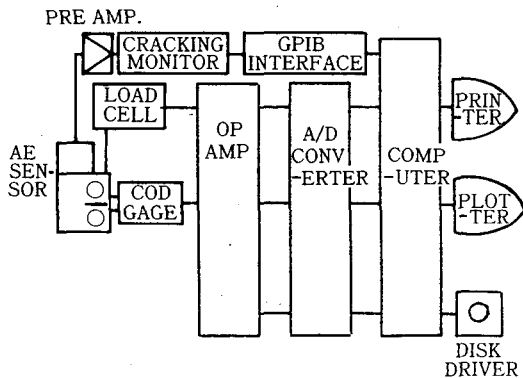


Fig. 2 Block diagrams of acoustic emission monitoring system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재(base metal)에 대한 실험

모재 용접의 피로시험은 기계구조용강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS 304)에 대하여 행하였으나, 그 중에 대표적으로 기계구조용 탄소강(SM45C)을 용접한 경우에 대한 실험결과를 다음과 같다.

기계구조용 탄소강(SM45C)의 파괴인성시험은 피로 시험기로 일정응력진폭 피로시험(constant stress amplitude fatigue test)조건하에서 P_{max} 을 20KN, P_{min} 은 4KN의 20Hz의 정현파로 예비 피로 균열을 발생시켰다.

Fig. 3은 COD의 관계를 나타낸 그림으로, P-COD의 곡선형태는 제 I형(Type I)에 속하며 5% offset한 하중(P_5)이 43.8KN이며, P_5 점이 1차적인 균열진전 개시점(P_Q)이다.

Fig. 4는 AE발생량을 COD의 변화에 따라 나타낸 그림으로 하중작용 초기에 AE발생량이 다소 많으나, 작용하중이 선형적으로 변화되는 상한점은 COD가 0.2mm이며, 이후 AE발생이 약간둔화 되다가 COD가 0.58mm부근에서 AE발생이 증가한다.

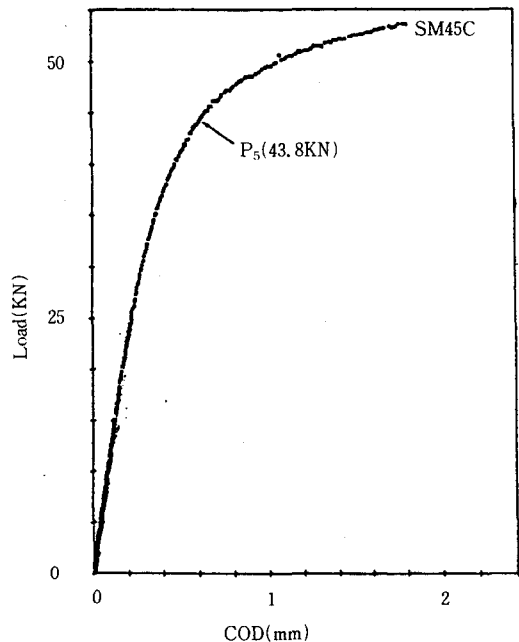


Fig. 3 Load vs. COD by compact tension test(base metals)

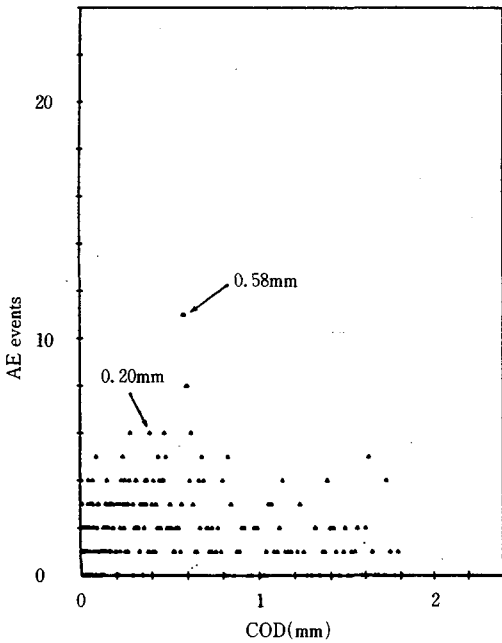


Fig. 4 AE events vs. COD by compact tension test(SM45C)

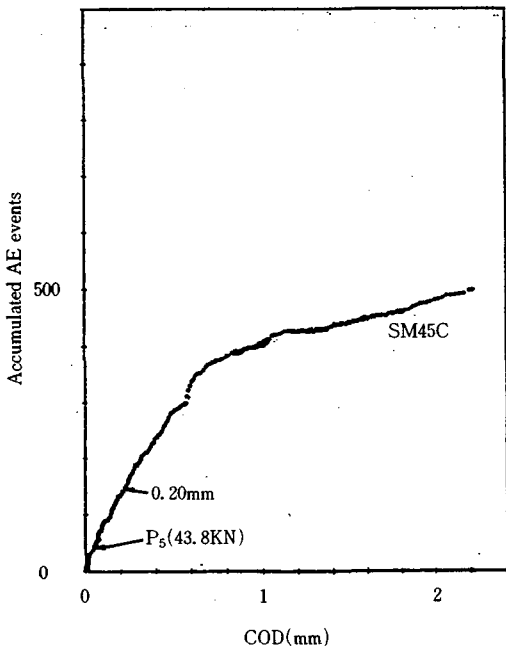


Fig. 5 Accumulated AE events vs. COD by compact tension test(base metals)

Fig. 5는 누적한 AE발생량을 COD의 변화에 따라 나타낸 것으로 누적한 AE발생량의 기울기가 변곡되는 점의 하중은 40KN으로 P_Q 인 43.8KN과 비교하여서 9%정도 낮다. 이는 Blanchette의 연구결과와 일치한다^{13),14)}.

Fig. 6은 COD의 변화에 따라 발생한 AE를 진폭을 8등급으로 나누어 각 진폭 수준마다 AE발생량을 나타낸 그림으로 COD의 변화 초기에 낮은 진폭 수준인 0.2V에서 1.6V수준에 걸쳐 AE가 발생되나 낮은 수준에서의 AE발생이 크게 나타난다.

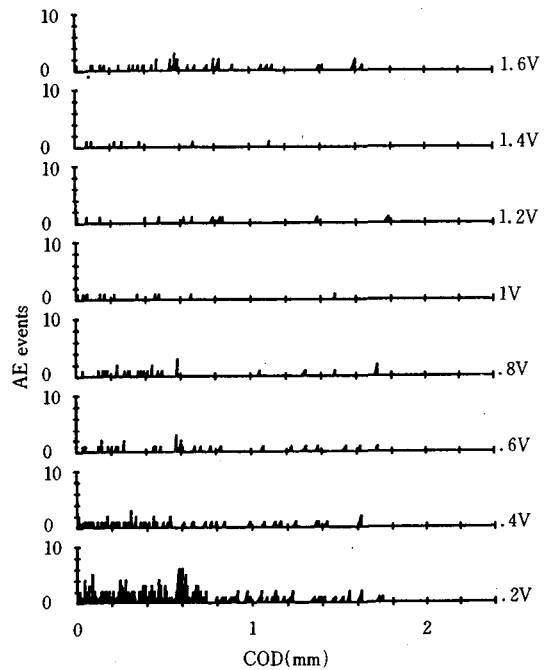


Fig. 6 Distribution of AE amplitude vs. COD by compact tension test(SM45C)

Photo. 1은 파단면을 전자주사현미경으로 관찰한 사진으로, Photo. 1-a는 피로균열부를 관찰한 사진으로 부분적으로 슬립형태가 나타나나 대부분 벽개 파단 형태가 보인다.

Photo. 1-b는 피로균열부 선단의 사진으로 벽개 파면과 섬유형태를 보인다.

Photo. 1-c는 불안전 균열성장부를 관찰한 사진으로 벽개파괴의 평탄한 부분을 이루고 있다.

이상의 실험결과를 고찰하여 보면 대체적으로 파면은 슬립과 벽개파괴에 의하여 형성되었다고 생각

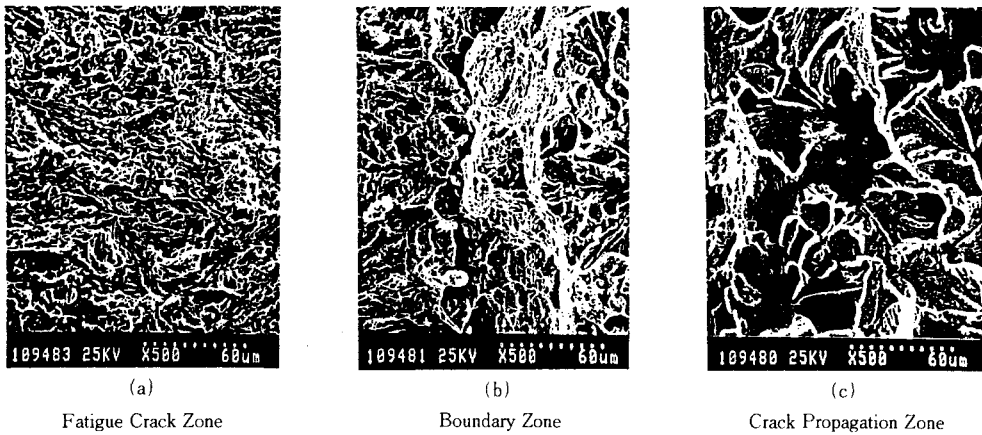


Photo. 1 Scanning electron micrograph of fractured surface by compact tension test(SM45C)

되는 평탄한 면으로 이루어져 있고, 이로 인하여 AE발생량도 작고 낮은 수준의 AE가 발생한다고 볼 수 있다. 이는 Mirable의 이론에서 취성파괴 기구는 작용응력이 조직의 벽개응력(Cleavage stress)을 넘어 서면서 미시균열이 형성되며 이 미시균열의 합체에 의해서 파괴되어 나간다는 가정을 뒷받침한다¹⁵⁾.

또한, COD가 0.58mm(43.8KN) 부근에서 AE 발생이 증가한 것은 연성파단면인 섬유조직의 증가에 기인되며, 이를 1-b의 파면사진을 통하여 확인하였고, P-COD곡선에서의 직선부의 상한계점까지는 균열선단의 블런팅(blunting)현상으로 인하여 AE가 발생하고 그 후로는 연성적으로 균열이 서서히 성장한다고 추측할 수 있다.

3.2 동종재료의 용접에 대한 실험

동종재료용접의 피로시험 역시 기계구조용강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)에 대하여 행하였으나, 그 중 대표적으로 기계구조용 탄소강(SM45C)의 경우에 대해 나타내었다.

Fig. 7은 작용하중과 COD의 관계를 나타낸 그림으로, P-COD의 곡선형태는 제 I 형에 속하며 5% offset한 하중 ($P_5 = P_Q$)이 37.50KN이다.

Fig. 8은 AE발생량을 COD의 변화에 따라 나타낸 그림으로 하중이 선형적으로 증가하는 상한점인

즉, COD가 0.23mm인 점까지 AE가 다소 많이 발생되나, 이후 AE는 서서히 감소한다.

Fig. 9는 누적한 AE발생량을 COD의 변화에 따라 나타낸 것으로 COD가 0.23mm(26KN)까지 선형적으로 증가하며 이후 기울기가 둔화되어 다시

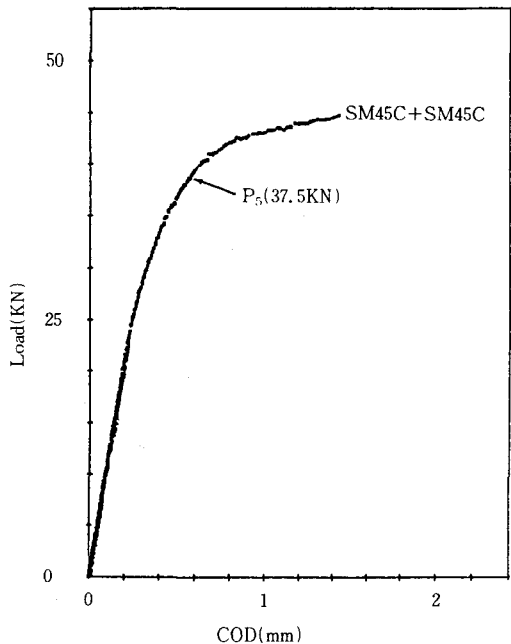


Fig. 7 Load vs. COD by compact tension test(similar welding materials)

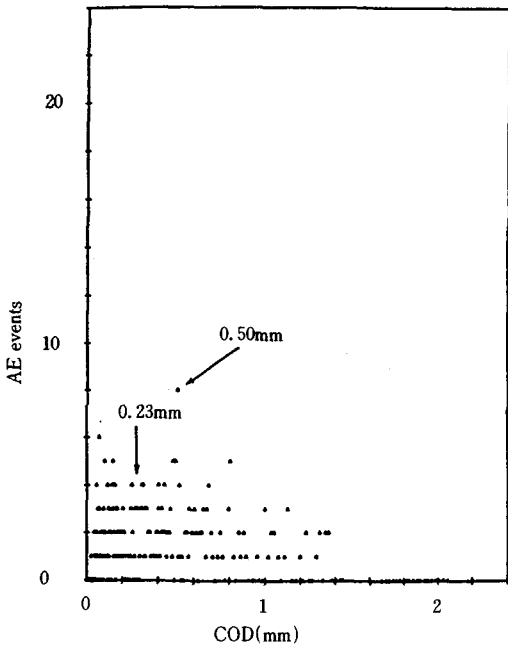


Fig. 8 AE events vs. COD by compact tension test(SM45C+SM45C)

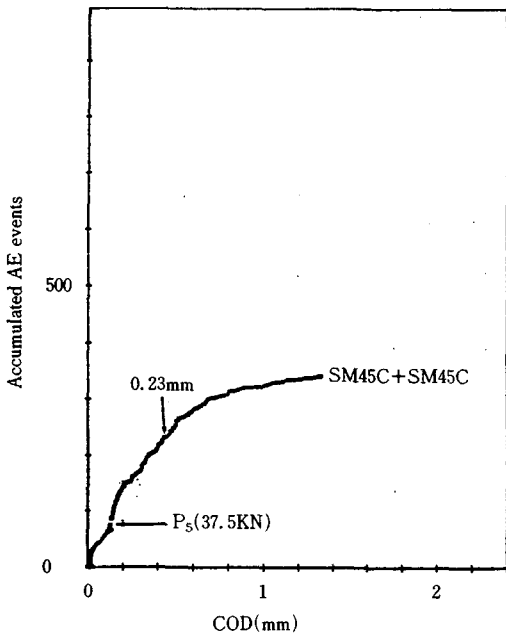


Fig. 9 Accumulated AE events vs. COD by compact tension test(similar welding materials)

COD가 0.5mm부근에서 AE발생량의 기울기가 변곡된다.

Fig. 10은 COD의 변화에 따라 발생한 AE의 진폭을 8등급으로 나누어 각 진폭수준마다 AE발생량을 나타낸 그림으로 COD의 변화 초기에 낮은 진폭수준인 0.2V에서 1.6V수준 걸쳐 AE가 발생되나 낮은 수준에서의 AE발생이 많이 나타난다.

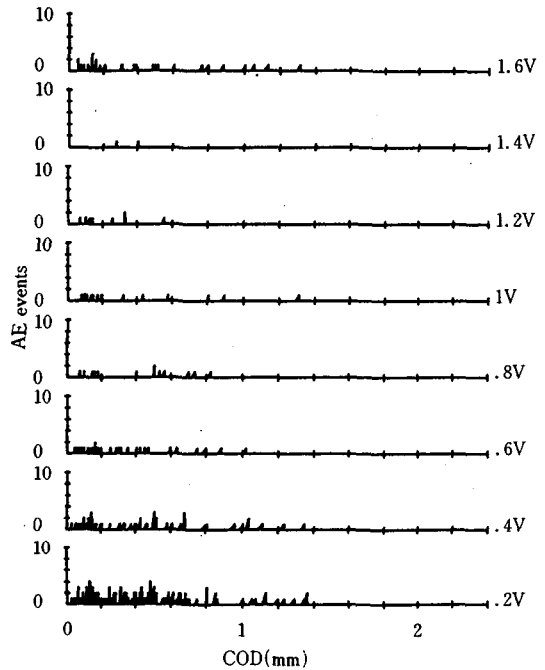


Fig. 10 Distribution of AE amplitude vs. COD by compact tension test(SM45C+SM45C)

Photo. 2는 단면을 전자주사현미경으로 관찰한 사진으로, Photo. 2-a는 피로균열부를 관찰한 사진으로 부분적으로 슬립형태가 나타나나 대부분 벽개 파단 형태가 보인다.

Photo. 2-b는 피로균열부 선단의 사진으로 벽개 파면과 섬유형태를 보인다.

Photo. 2-c는 불안전 균열성장부를 관찰한 사진으로 벽개파괴의 평탄한 부분을 이루고 있다. 일차균열개시점(P_Q)을 모재(SM45C)와 비교하여 보면 14%가량 저하되었는데 이는 용접 후 재료의 파괴인성이 저하되었음을 의미한다. 대체적으로 파면은 슬립과 벽개파괴에 의하여 형성되었다고 생각되는 평탄한 면으로 이루어져 있고, 이로 인하여 AE

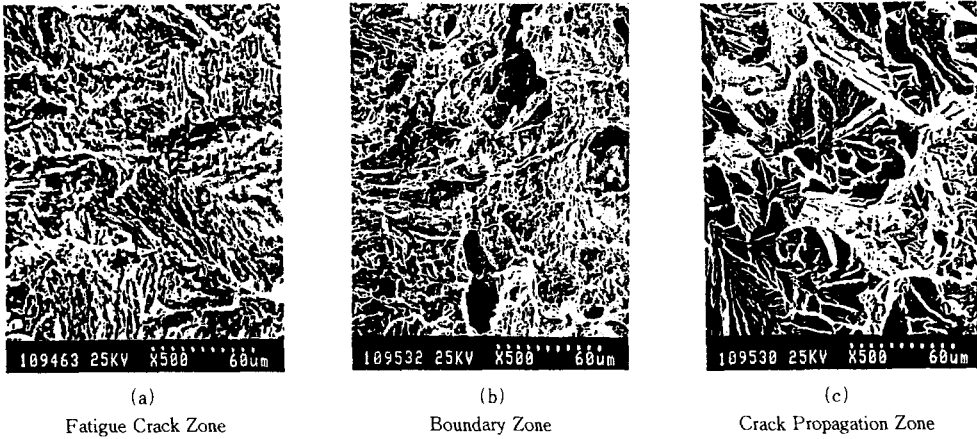


Photo. 2 Scanning electron micrograph of fractured surface by compact tension test (SM45C+SM45C)

발생량도 작고 또한 낮은 수준인 AE가 발생한다고 볼 수 있다.

3.3 이종재료의 용접에 대한 실험

이종재료용접 용접에 대한 기계구조용강 (SM45C)과 구조용 압연강(SS41), 기계구조용강 (SM45C)과 스테인레스강(SUS304) 및 구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)의 3가지 경우이며 그중 기계구조용강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41)을 용접한 재료에 대한 실험결과를 다음과 같다.

Fig. 11의 P-COD 곡선 형태는 ASTM규정의 I형에 속하며 5% Offset한 하중($P_5 = P_Q$)가 23KN이다.

Fig. 12는 COD의 증가에 따라 AE발생량을 나타낸 그림으로 COD가 0.36mm까지 AE는 선형적으로 발생되며, 0.36mm부근에서 약간 증가되고 이후에는 AE의 발생은 서서히 둔화된다.

Fig. 13에서는 COD의 증가에 따른 누적한 AE 발생량은 COD가 P_5 점인 0.36mm까지 선형적 증가하다가 이후 기울기가 둔화된다.

Fig. 14는 COD의 증가에 따라 발생된 AE의 진폭을 8등급하여서 각 진폭 수준마다의 AE발생량을 나타낸 그림으로 COD가 0.36mm까지 진폭이 0.2V와 0.4V수준의 AE가 발생 주로 발생된다.

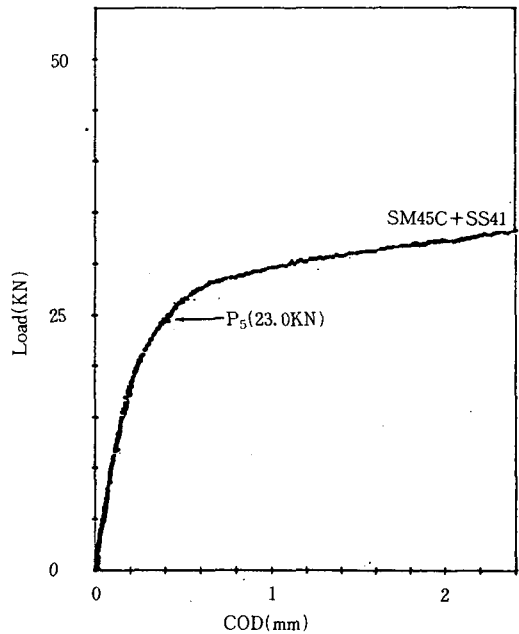


Fig. 11 Load vs. COD by compact tension test(dissimilar welding materials)

Photo. 3은 시험후 파면을 전자주사현미경으로 관찰한 사진이다.

Photo. 3-a는 피로균열부로 벽면파면과 스트라이에이션을 관찰할 수 있으며, Photo. 3-b는 피로

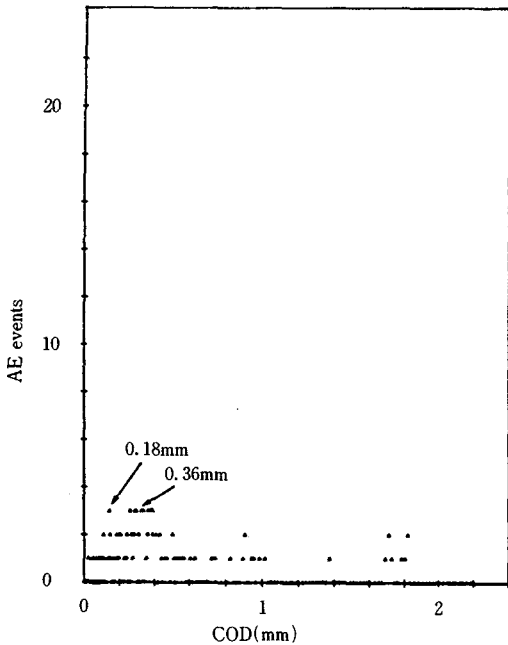


Fig. 12 AE events vs. COD by compact tension test (SM45C+SS41)

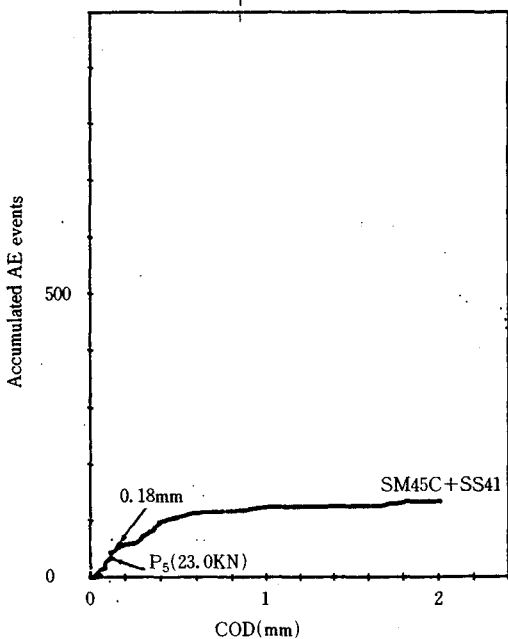


Fig. 13 Accumulated AE events vs. COD by compact tension test (dissimilar welding materials)

균열선단부이며 의벽개파단 형태와 섬유상의 파면을 볼 수 있다. Photo. 3-c는 균열진전부의 파면사진으로 의벽개파면과 섬유상 파면을 함께 관찰할 수 있다. Photo. 3과 Fig. 14의 AE 발생양상을 상호 관련시켜 고찰하여 보면 COD가 0.18mm(17.5KN)이후 균열선단부에서 의벽개파면이 생성되고 0.38mm의 부근에서는 균열선단부의 섬유상 파면이 상호 연속적으로 연결되면서 파괴에 이르렀다고 생각이 된다. 또한, 미소균열과 미소딤플에 의해 비교적 낮은 수준의 AE가 발생하며, 일차균열 개시점을 동종재료의 용접(SM45C+SM45C 및 SS41+SS41)과 비교하여 보면 즉, SM45C의 경우 39% 저하되었으며 SS41의 경우에는 비교하면 18%정도 저하되었는데 이는 이종재료의 용접(SM45C+SS41)이 동종재료의 용접에 비하여 파괴인성이 낮으며 용접성이 양호하지 못함을 뜻한다.

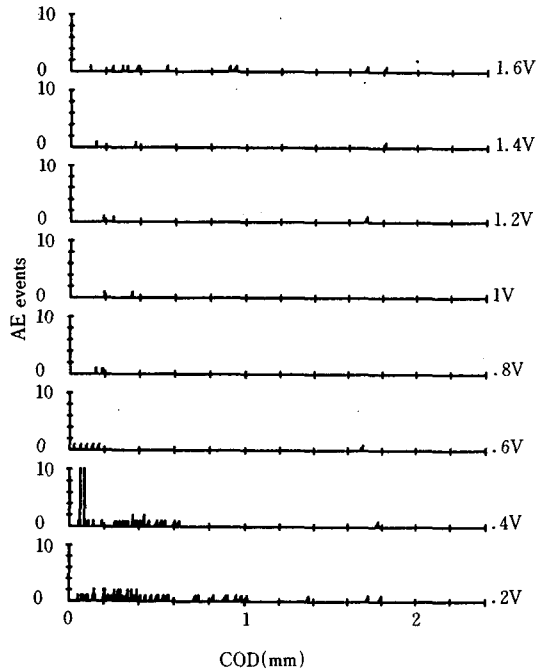


Fig. 14 Distribution of AE amplitude vs. COD by compact tension test (SM45C+SS41)

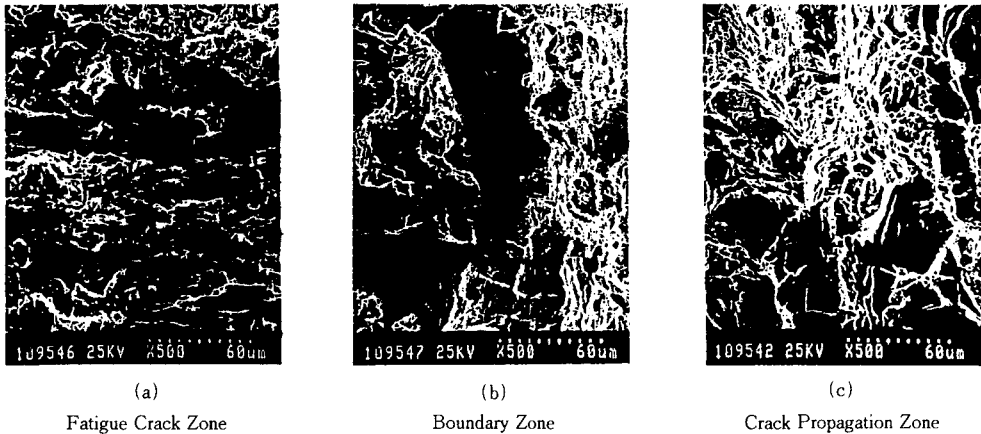


Photo. 3 Scanning electron micrograph of fractured surface by compact tension test (SM45C+SS41)

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 파괴인성시험에 있어서 하중-균열개구변위를 보면 본 연구에 사용된 재료 모두 E399에 정의된 P-COD 곡선형태가 제 I 형으로 나타났다. 기계구조용강(SM45C)의 일차균열개시점은 모재의 경우 43.8KN이며, 동종재료용접(SM45C)은 37.5KN이었다. 구조용압연강(SS41)의 일차균열개시점은 모재가 30KN이며, 동종재료용접(SS41)의 경우 28KN으로 나타났다.

스테인레스강의 경우 일차균열 개시점은 모재가 31.25KN이고 동종재료용접(SUS304)의 경우 30KN을 보였는데 SS41과 SUS304는 동종재료로 용접할 경우 일차균열개시점이 모재와 큰 차이가 없었고 용접성이 양호함을 알 수 있었다.

- 2) 이종재료용접의 경우는 SM45C와 SS41의 용접시 23KN이며 SM45C와 SUS304의 용접시에는 24.5KN으로 나타났는데, 기계구조용강(SM45C)은 SS41보다 SUS304로 용접한 경우가 파괴인성이 다소 양호한 것으로 나타났다. SS41과 SUS304의 용접시에는 26KN으로 나타났는데, 이종재료용접의 3가지 경우 일차균열개

시점을 비교하면 SS41과 SUS304의 용접이 가장 높게 나타났으며 SM45C와 SUS304의 용접, SM45C와 SS41의 용접순서를 보였다.

- 3) 파괴인성 시험시 AE발생량과 COD의 관계에서 하중작용 초기에 AE발생량이 다소 많으나, 작용하중이 선형적으로 변화되는 구간 이후 AE발생이 약간둔화되다가 일차균열개시점(P_Q)부근에서 AE발생이 증가하며, 직선부의 상한점 이후 P_S 점 구간에서 미시균열이 형성되는 구간으로 볼 수 있다.
- 4) AE발생양상은 높은수준의 AE진폭과 낮은수준의 AE진폭으로 나타났는데 대개 높은수준의 AE가 발생할 때는 미시균열이나 미소딕플의 연결에 의하여 합체될 때 발생하며, 기공의 형성 및 미시균열과 미소딕플에 의해서는 낮은 수준의 AE진폭이 발생한다.

참 고 문 헌

- 1) S. T. Rolfe and J. M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in structures. Applications of Fracture Mechanics, Prentice Hall, Inc., New Jersey, pp.1~4, 1977.
- 2) 小倉, 壓力容器. タンク類の事故例とその對策, 日本機械學會誌, 第83卷. pp.720~722, 1980.
- 3) T. Kishi, Quantitative evaluation of microcrack-

- ing in alloy and ceramics, Japan-US Joint Seminar on Materials Needs for Severe Service Conditions, Toronomon Pastal, pp.46~57, 1986
- 4) t. kishi, Microcracking and microfracture mechanisms in Metal and Ceramics, Proc. of the 2nd Conf. of APCS-86, pp.23~34.
 - 5) G. S. Pisarenko, S. I. Likhatsky, Y. Dobrovolsky, OnInterrelation of fracture mechanisms of metals and acoustic emission, Mechanics of Nondestructive Testing, Plenum Press, New York, pp.367~389, 1980.
 - 6) A. K. Maji and S. P. Shah, A study of fracture process of concrete using acoustic emission, Proc. of the 1986 SEM Spring Conf. on Exp. Mech., pp.7~15, 1986.
 - 7) P. Bhandhubanyong, M. Ito and etc., Elastic-plastic fracture toughness of cast irons and its relations to graphite morphology and pearlite content, 鑄勿, Vol.57, No.7, pp.21~27, 1985.
 - 8) H. A. Hamstad, A review : Acoustic emission as a tool for composite materials atudies, Proc. of the pp.516~526, 1985.
 - 9) W. L. Castner, L. K. Crockett and F. E. Sugg Acoustic emission monitoring of space shuttle tiles, Proc. of the 1985 SEM Spring Conf. on Exp. Mech., pp.470~472, 1985.
 - 10) F. J. Guild, M. G. phillips and B. Harris, Amplitude of distribution analysis of acoustic emission from composites : A new mothod of data presentation, J. Mater. Sci. Vol.4, pp.1375~1378, 1985.
 - 11) Y. Blanchette, J. I. Dickson and M. N. Bassim, The use of acoustic emission to evaluate critical value of K and J in 7075-T651 aluminum alloy, Eng. Frac. Mechs., Vol.20, No.2, pp.359~371, 1985.
 - 12) S. Yamaoka, K. Wakita and T. Kishi, Acoustic emission signal analysis of microfracture process in C-1/2 Mo steel, Progress in Acoustic Emission II, Proc. of the 7th Inter. Acoustic Emission Sym., pp.16~23, 1984.
 - 13) Y. Blanchettle, M. N. Bassium and J. I. Dickson, Acoustic emission associated with fracture of A 561-70 steel, Proc. of the 5th Canadian Frac. Conf. Winnipeg, Canada, pp.191~198, 1981.
 - 14) Y. Blanchettle, J. I. Dickson, and M. N. Bassium, Detection of general yieding in A 156 steel by acoustic emission, Eng. Frac. Mechs., Vol.17, No.3, pp.227~234, 1983.
 - 15) M. Mirabile, Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture, Nondestructive Testing Apr., pp.77~85, 1975.
-