

## Flash Butt 용접부의 파괴거동에 관한 실험적 연구(I) An Experimental Study on the Fracture Behavior for Flash Butt Welding Zone

김 용 수\*      신 근 하\*\*      강 동 명\*\*\*  
Yong-Soo Kim      Kuen-Ha Shin      Dong-Myeong Kang

### ABSTRACT

Objective of this research is to evaluate fracture behaviors of fresh-butt welded metal by the acoustic emission technique. The specimens used are medium carbon steel(SM45C), mild steel(SS41) and stainless steel(SUS304), which have different weldability.

The similar welding and dissimilar welding processes are considered, in the former SM45C, SS41 and SUS304 are used, in the later the following metals are used SM45C and SS41, SM45C and SUS304 and SS41 and SUS304. The characteristics of fracture in weld metal are estimated by the tension test with nominal specimens, the fracture toughness test with compact tension specimens and fractography analysis.

The results of tension test show for base metals and similar welding materials that the yield strength and ultimate strength of similar welding materials are increased, the elongation of those are decreased.

The weldability of SUS304 is better than that of SM45C and SS41 in similar welding materials.

Mechanical properties of dissimilar welding materials are lower than those of similar welding materials. In dissimilar welding materials, the weldability of SM45C and SUS304 is better than that of SM45C and SS41, and also weidability of SS41 and SUS304 is better than SS41 and SM45C.

Comparing mechanical properties with AE counts, it is found that AE conuts appeared on a small before the limit load of elasticity( $P_e$ ), and apper greatly near yield strength region in tension test.

These results could contribute to the safety analyses and the evaluation of strength for welding structure.

---

\* 正會員 : 서울산업대학 산업안전공학과

\*\* 正會員 : 아주대학교 생산자동화공학과

\*\*\* 正會員 : 서울산업대학 산업안전공학과 강사

### 1. 서 론

용접기술의 발달에 따라<sup>1-5)</sup> 각종 기계, 구조물 및 압력용기들의 활용성이 더욱 증가되고 있으나 이들의 사용시에는 예기치 못한 커다란 재해나 사고를 일으키는 수가 많다<sup>6-7)</sup>.

재료들의 파괴는 소성변형후에 생기는 연성파괴와 소성변형이 거의 생기지 않는 취성파괴 및 반복하중에 의해서 발생하는 파괴파괴로 크게 나눌 수 있다. 재료의 균열은 제조할 때 생기는 부재내에 미소한 균열과 사용중에 어떤 원인에 의해서 발생하는 미소균열이 있는데, 그 중에서도 가장 취약점이라 여겨지는 용접부의 파괴는 이러한 미소균열이 외력이나 주위의 환경에 의해서 점차로 또는 급속하게 성장하는 결과로 일어난다.

근래에는 산업의 발달에 따라 용접구조물, 압력용기 및 고장력강의 사용확대에 따른 대형사고의 방지를 위해서 더욱더 높은 안전성의 평가가 요구되고 있다. 용접부의 파괴에 대한 연구는 국내외적으로 활발히 진행되고 있으나 용접 기술의 발달에도 불구하고 아직 체계적인 규명이 되지않고 있는 실정이다.

이러한 파괴원인에 대한 해석은 기본이 되는 재료내의 미시적인 균열성장기구를 구분하고 감지하는 실험적인 기술과 재료내의 손상량을 정량화하기 위한 미시적인 파괴거동을 측정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 일반적인 용접으로 행하는 동일 재료간의 접합인 동종재료용접과 용접기술의 발달로 활발히 실용단계로 되어가고 있다. 서로 다른 재료간의 접합인 이종재료 용접을 행하였는데, 특히 용접법은 잔류응력 및 열영향부등의 여러가지 결합발생이 많이 생기어 이것을 최소화 시키고자 용접성이 좋은 후레쉬버

트 용접을 하였다.

이들 용접재에 대한 미시적인 파괴거동을 측정하기 위하여AE 기술(Acoustic Emission Technique)을 이용하였고, 용접재 시험편에 대하여 인장시험과 파괴인성시험을 하여 재료의 기계적 성질, 균열개시점 및 AE발생량과의 상호관계에 대하여 비교 검토하였다.

### 2 시편 및 실험방법

사용한 재료인 기계구조용 강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 용접은 900°C로 예열한 w(폭), n(높이) 및 l(길이)이 각각 80mm, 80mm 및 250mm인 재료를 후레쉬 버트(flash butt)용접기로 전압 8 volt, 전류는 후레쉬 초기 380 amp., 후레쉬 말기 600 amp., upset 압력 10,000kg 및 upset 길이 7.5mm로 열간에서 하였다. 후레쉬 버트 용접은 동종재료 용접과 이종재료 용접의 두가지 경우에 대하여 행하였는데, 동종재료 용접은 기계구조용강(SM45C), 구조용압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)이며, 이종재료 용접은 기계구조용강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41), 기계구조용강(SM45C)과 스테인레스강(SUS304) 및 구조용압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)으로 총 6가지 경우이다. 용접 후 재료의 잔류 응력을 제거하기 위해 940°C에서 풀립(annealing) 열처리를 하였고, 모재 또한 재료의 균질화와 용접재와의 용이한 비교를 위해 용접재와 동일한 조건에서 함께 열처리를 행 하였다.

재료의 시험편은 ASTM E8<sup>8)</sup>의 규정에 의거 시험편을 가공 하였으며 그 형상은 Flg 1과 같다. 재료의 인장시험은 만능재료시험기(tensilon, cap., 10ton,

Table 1 Chemical compositions

Steel (SM45C)	C	Mn	P	S	Si	Cu
	0.45	0.72	0.010	0.03	0.22	0.15
Steel (SS41)	C	Mn	P	Si	S	
	0.12	0.305	0.141	0.008	0.17	
Stainless steel (SUS304)	C	Cr	Ni	P	S	
	0.07	19.97	9.94	0.029	0.012	
	Mn	Si	Mo	W	V	
	0.66	0.42	0.23	3.35	0.22	

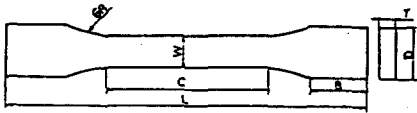


Fig. 1 Configuration of tension specimens

Japan)와 extensometer(ETM-50, Saginomiya Co., Japan)를 사용하여 분당 1mm의 인장속도로 실험을 하였다. AE 발생 감지기로는 소형 시편의 경우 실험실에서 많이 사용되는 resonance 주파수가 1 MHz인 MD-1160(San Densi Co., Japan)으로 AE발생을 감지하여 pre-amp로 40 dB로 증폭하고 크래킹 모니터(San Densi Co., MD-1100S Japan)에 내장된 main-amp로 다시 40 dB로 증폭시켜 전체의 gain 80 dB로 100~300KHz의 범위에서 발생한 AE를 검출하였다.

외부의 잡음을 최소화하기 위해서 시편을 시험기에 장착후 10 N까지 하중을 작용시켜서 그림과 시편 사이의 잡음을 제거시켰으며, 이때 오실로스코프로 확인한 결과 그 수준이 0.05V임을 확인하였고 따라서 threshold수준을 0.08V 고정하여서 실험을 하였다.

검출된 AE의 진폭을 0.2~1.6V 전압수준을 0.2V 간격으로 8등급 구분하여 개수하였고, 이 등급별로 누적 개수된 AE 발생량을 GPIB 인터페이스를 통해서 컴퓨터로 전송하여 Data를 기록하였다. Fig. 2에는 본 연구의 실험장치를 block 선도로써 나타내었다.

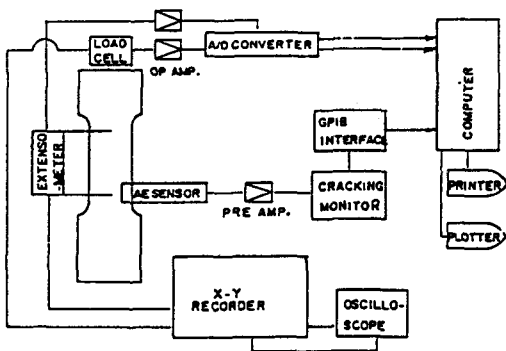


Fig. 2 Block diagram of instrumentation for acoustic emission analysis

### 3. 실험결과

#### 3-1. 모재(base metal)에 대한 실험

모재에 대한 실험은 열처리한 기계구조용 강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)에 대하여 행하였으나 그중 대표적으로 스테인레스강SUS304)에 대해 나타내었다.

Fig. 3에 스테인레스강(SUS304)의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, 항복하중은 4.50KN이고 극한하중은 14.10KN이며 연신율은 46%이다.

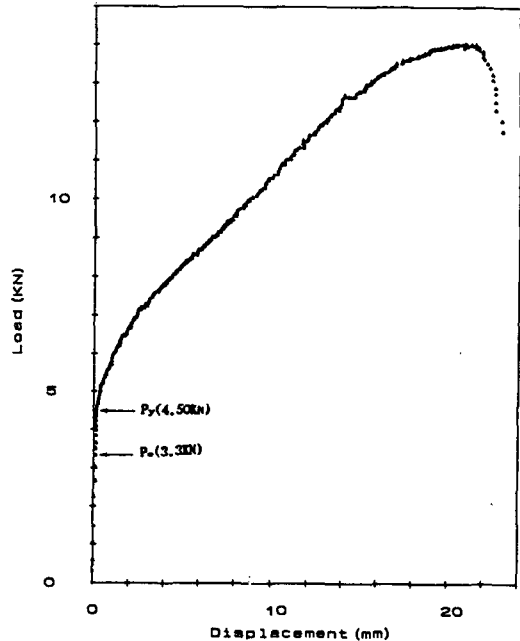


Fig. 3 Load vs. displacement by tension test (SUS 304)

Fig. 4는 변위의 증가에 따른 AE 진폭 발생분포를 나타낸 그림으로 AE는 0.2V에서 1.6V에 걸쳐 나타났다.

Fig. 5에서와 같이 하중의 변화에 따른 AE 발생량은 작용 하중 초기에 AE의 발생정도가 극히 적으며 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 3.30KN 이후 증가하여 4.50KN에서 AE의 발생량이 급속히 증가한다. AE 발생량은 4.50KN이후 12.10KN의 구간에서 AE의 발생이 감소하며, 12.10KN 이후에서는 AE의 발생량이 크게 증가하는 양상을 띠고 있다.

Fig. 6에는 AE 발생량을 하중의 변화에 따라서 누적하여 나타낸 그림으로 하중이 3.10KN에서 점차

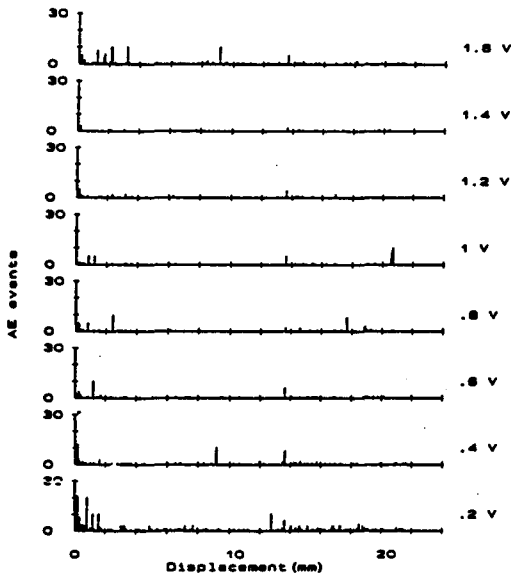


Fig. 4 Distributions of AE amplitude vs. displacement by tension test. (SUS 304)

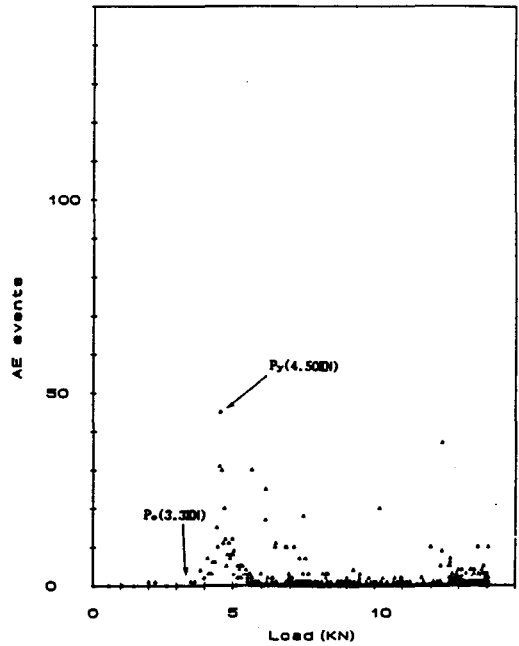


Fig. 5 AE events vs. load by tension test. (SUS 304)

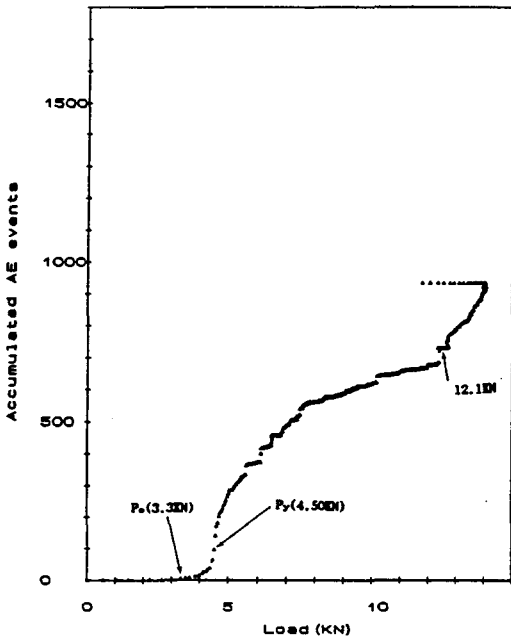


Fig. 6 Accumulated AE events vs. load by tension test. (SUS 304)

로 증가하다가 4.50KN에서 급속히 증가하며, 이 후 증가가 둔화되고 다시 12.10KN 이후 AE 발생량이 크

게 증가한다.

### 3-2. 동종재료의 용접에 대한 실험

동종재료 용접실험 역시 기계구조용 강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)에 대하여 행하였으나 그중 대표적으로 스테인레스강(SUS304)에 대해 나타내었다.

Fig. 7의 하중과 변위 곡선에서 기계적 성질은 항복 하중은 6.60KN이고 극한 하중은 14.15KN이며 연실율은 41%이다.

Fig. 8은 변위의 증가에 따른 AE 진폭 발생분포를 나타낸 그림으로 AE는 0.2V와 0.4V 및 1.6V에 걸쳐 나타났다.

하중의 변화에 따른 AE 발생량은 Fig. 9에 나타내었으며, 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 3.80KN 이후 증가하여 6.60KN에서 AE의 발생량이 급속히 증가한다. AE 발생량은 6.60KN 이후 12.30KN까지는 AE의 발생이 서서히 증가하며, 12.30KN 이후 AE의 발생량이 크게 증가하는 양상을 띠고 있다. 이러한 현상은 Fig. 10의 AE 발생량을 하중의 변화에 따라 누적하여 나타낸 그림에서 쉽게 알 수 있다.

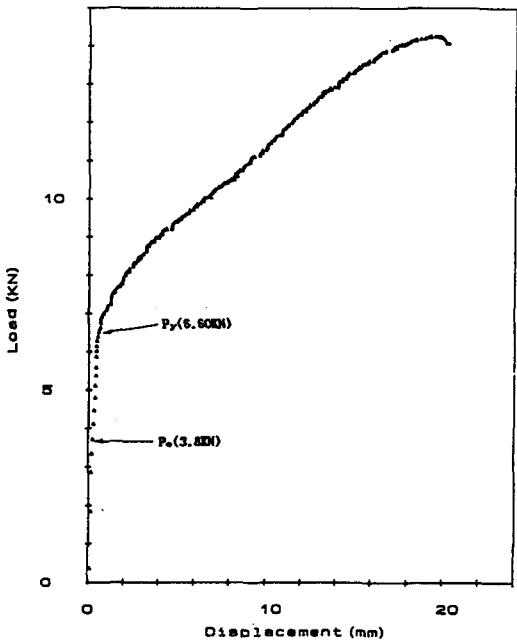


Fig. 7 Load vs. displacement by tension test. (SUS 304+SUS 304)

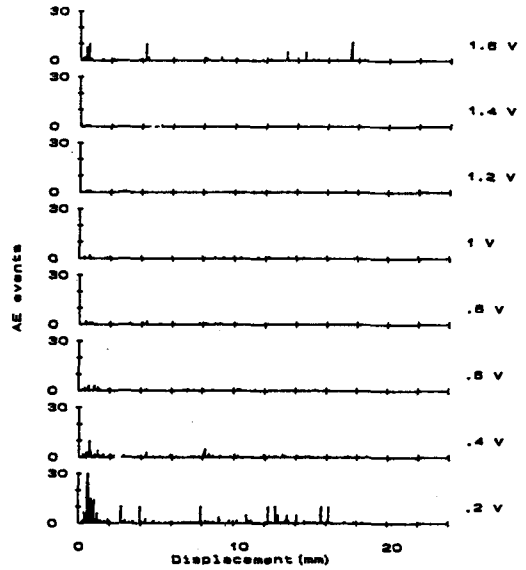


Fig. 8 Distribution of AE amplitude vs. displacement by tension test. (SUS 304+SUS 304)

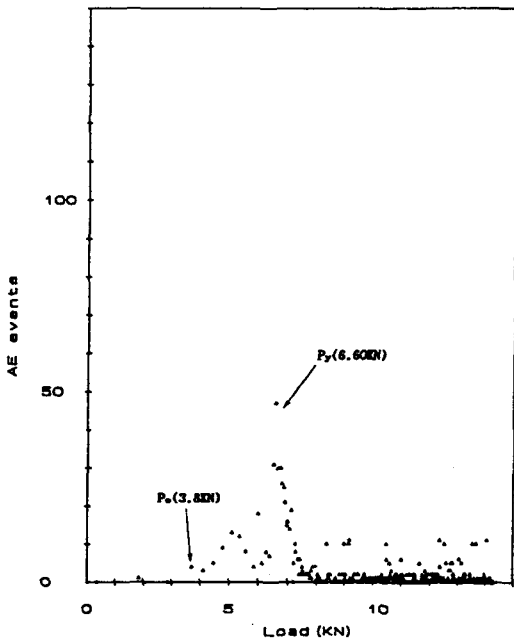


Fig. 9 AE events vs. load by tension test. (SUS 304+SUS 304)

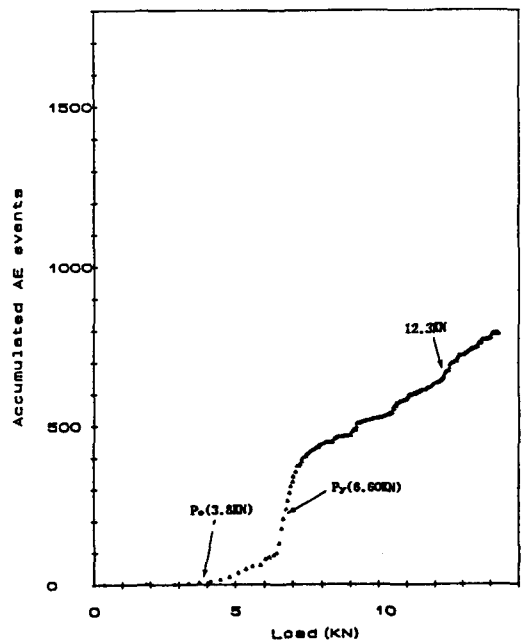


Fig. 10 Accumulated AE events vs. load by tension test. (SUS 304+SUS 304)

3-3. 이종재료의 용접에 대한 실험

이종재료 용접실험은 기계구조용 강(SMS45C)과 구조용 압연강(SS41), 기계구조용 강(SM45C)과 스테인레스강(SUS304) 및 구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)에 대하여 행하였으나 그중 대표적으로 구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)에 대해 나타내었다.

구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)을 용접한 재료에 대해 인장시험의 결과는 구조용 압연강에서 과단되었으며, 기계적 성질은 항복하중과 극한하중이 각각 3.90KN 및 6.40KN이고 연신율은 16%로써 Fig. 11에 나타내었다.

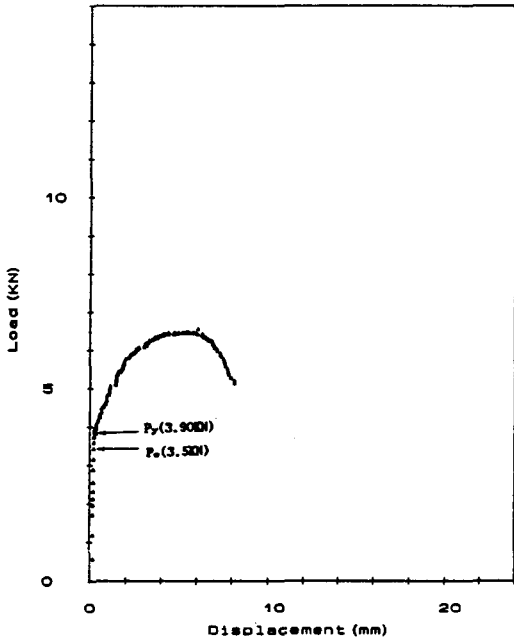


Fig. 11 Load vs. displacement by tension test. (SS 41+SUS 304)

Fig. 12는 변위의 증가에 따른 AE 진폭 발생분포를 나타낸 그림으로 AE는 0.2V에서 1.6V에 걸쳐 나타났는데 0.2V와 1.6V에서 크게 나타났다.

Fig. 13의 하중 변화에 따른 AE 발생량과 AE 발생량 누적하여 나타낸 Fig. 14 및 하중-변위 곡선 Fig. 11을 비교하면 직선부의 상한계점인 3.50KN 이

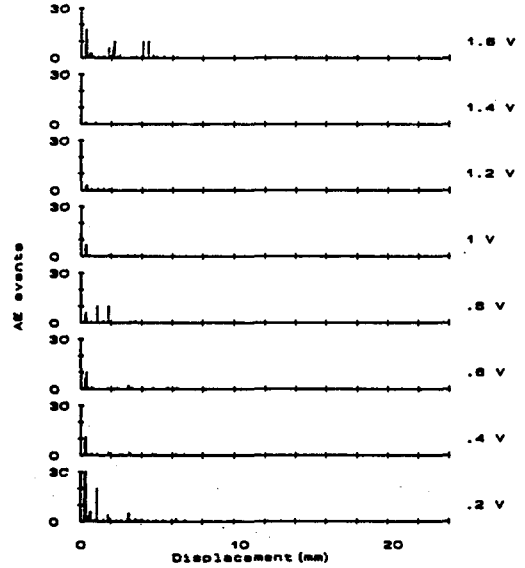


Fig. 12 Distribution of AE amplitude vs. displacement by tension test. (SS 41+SUS 304)

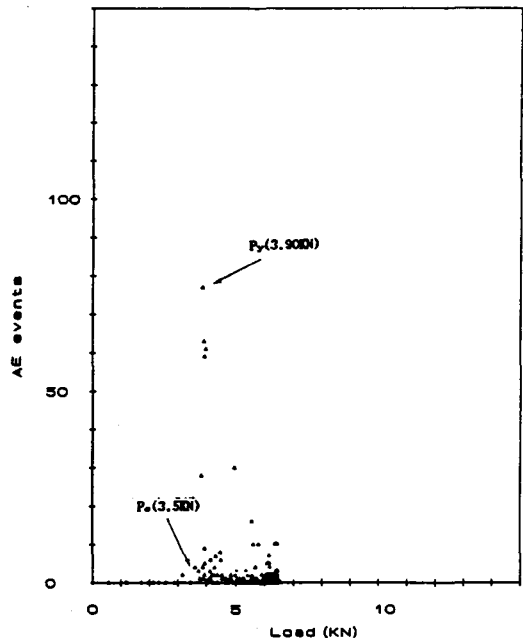


Fig. 13 AE events vs. load by tension test. (SS 41+SUS 304)

후 증가하여 3.90KN에서 AE의 발생량이 급속히 증

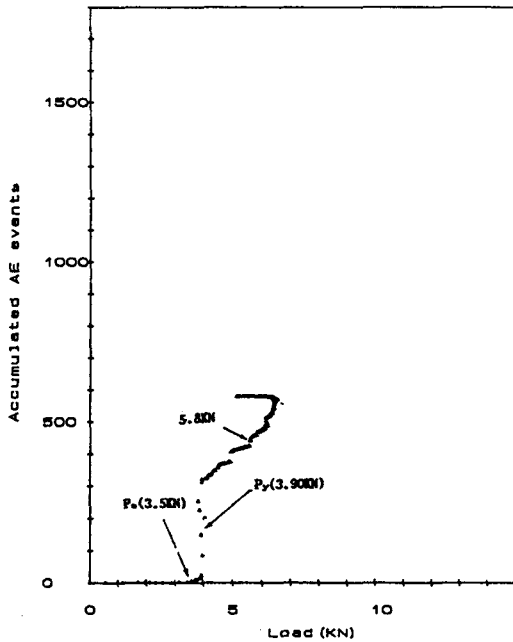


Fig. 14 Accumulated AE events vs. load by tension test. (SS 41+SUS 304)

가한다. AE 발생량은 5.0KN 이후 5.80KN까지는 AE의 발생이 서서히 둔화하며, 5.80KN 이후 AE의 발생량이 크게 증가하는 양상을 띠고 있다.

#### 4. 실험결과에 대한 고찰

기계구조용 강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)에 대하여 후레쉬 버트 용접한 경우를 동종재료용접(SM45C, SS41 및 SUS304)과 이종재료용접(SM45+SS41, SM45C+SUS304 및 SS41+SUS304)로 나누고, 이들 용접제를 AE 방법에 의한 인장시험으로 고찰을 하겠다.

인장시험의 하중 변위선도를 비교 고찰하면 기계구조용강(SM45C)을 동종재료용접(SM45C)한 경우 열처리(annealing) 모재(SM45C)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 35%와 53%로 향상된 반면 연신율은 44%가량 저하되었다.

이종재료용접의 경우 SM45C와 SS41의 이종재료용접은 SS41에서 판단되었으며, SM45C와 SUS304의 이종재료 용접은 SM45C에서 판단되었는데, 기계구조용강(SM45C)의 이종재료용접은 동종재료용접

(SM45C+SM45C) 보다 기계적 성질이 낮게 나타나지만, SS41 보다 SUS304로 이종재료용접한 경우가 기계적 성질이 양호한 것으로 나타났다.

구조용 압연강(SS41)을 동종재료용접(SS41+SS41)한 경우 열처리 모재(SS41)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 30%와 28%로 향상된 반면 연신율은 27%가량 저하되었다.

이종재료용접의 경우 SS41과 SUS304의 이종용접은 SS41에서 판단되었는데 구조용 압연강(SS41)의 이종재료용접 역시 동종재료용접(SS41)에 비해 기계적 성질이 떨어지나, 구조용 압연강(SS41)은 SM45C 보다 SUS304로 용접한 경우가 용접성이 우수한 것으로 나타났다.

스테인레스강(SUS304)을 동종재료용접(SUS304)한 경우 열처리 모재(SUS304)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 47%와 0.7%로 향상된 반면 연신율은 11%가량 저하되었다. 따라서 본 연구의 동종재료용접의 경우 스테인레스강의 용접의 경우가 앞의 기계구조용강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41)에 비하여 용접성이 우수함을 보였다.

인장시험에서 작용하중의 증가에 따라 발생된 AE는 상한계점( $P_u$ )까지 발생이 극히 적으며 이후 점차적으로 증가한다. AE는 상한계점 이후 증가하여 항복하중( $P_y$ )에서 AE의 발생량이 급속히 증가한다. 이는 탄성변형후 소형변형 상태에서는 전위 작용의 활성화에 따라 AE 발생량이 증가하는 것으로 생각되며, 항복하중에서 극한하중의 사이의 구간( $P_y < P < P_u$ )에는 AE 발생량이 완화된데 이는 재료 내부에서 가공경화의 증가에 의한 전위작용의 둔화에 따라서 AE 발생량은 감소하게 되는것으로 사료된다. 그러나 극한하중( $P_u$ ) 이전에 다시 소형변형기구가 Kóler와 Gilman<sup>9)</sup>에 의해서 제안된 multiple-cross-glide 기구로 전환되어 전이운동의 등가로 AE 발생이 증가되며 극한하중( $P_u$ )을 지나서는 새로운 동적인 전위형성등에 의해서 AE 발생량이 크게 증가됨을 보였다.

#### 5. 결 론

용접 특성이 서로 다른 기계구조용강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)을 선택하여 후레쉬 버터 용접을 한 후 용접부의 파괴거동

을 AE 방법에 의하여 조사하였다. 용접은 동종재료 용접과 이종재료 용접의 두가지 경우에 대하여 행하였는데, 동종재료 용접은 기계구조용강(SM45C), 구조용 압연강(SS41) 및 스테인레스강(SUS304)이며, 이종재료 용접은 기계구조용강(SM45C)과 구조용 압연강(SS41), 기계구조용강(SM45C)과 스테인레스강(SUS304) 및 구조용 압연강(SS41)과 스테인레스강(SUS304)으로 총 6가지 경우이다.

용접부의 시험은 인장시험을 통하여 기계적 성질을 비교 검토 하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기계구조용강(SS45C)을 동종재료용접(SM45C+SM45C)한 경우 열처리한 모재(SM45C)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 35%와 53%로 향상된 반면 연실율은 44%가량 저하되었다. 또한, 구조용 압연강(SS41)을 동종재료용접(SS41+SS41)한 경우 열처리 모재(SS41)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 30%와 28%로 향상된 반면 연실율은 27%가량 저하되었으며, 스테인레스강(SUS304)을 동종재료용접(SUS304+SUS304)한 경우 열처리 모재(SUS304)에 대한 기계적 성질의 변화는 항복하중과 극한하중이 각각 47%와 0.7%로 향상된 반면 연실율은 11%가량 저하되었다.

2) 이종재료용접의 경우 SM45C와 SS41의 용접은 SS41에서 파단되었으며, SM45C와 SM45C에서 파단되었다. 기계구조용강(SM45C)의 이종재료 용접은 동종재료용접(SM45C+SM45C) 보다 기계적 성질이 낮게 나타났고, SS41보다 SUS304로 이종재료 용접한 경우가 기계적 성질이 양호한 것으로 나타났다. SS41과 SUS304의 용접은 SS41에서 파단되었는데 구조용 압연강(SS41)의 이종재료용접 역시 동종재료 용접(SS41+SS41)에 비해 기계적 성질이 떨어지나, 구조용 압연강은 SM45C보다 SUS304로 용접한 경우가 용접성이 좋은 것으로 나타났다.

3) 인장시험에서 작용하중의 증가에 따라 발생된

AE는 상한계점( $P_u$ )까지 발생이 극히 적으며 이후 점차적으로 증가 한다. AE는 상한계점 이후 증가하여 항복하중( $P_y$ )에서 AE의 발생량이 급속히 증가한다. 이는 탄성변형후 소형변형 상태에서는 전위 작용의 활성화에 따라 AE 발생량이 증가하는 것으로 생각되며, 항복하중에서 극한하중 사이의 구간( $P_y < P < P_u$ )에는 AE 발생량이 완화되는데 이는 재료 내부에서 가공경화의 증가에 의한 전위작용의 둔화에 따라서 AE 발생량은 감소하게 되는 것으로 사료된다.

### 참고문헌

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. E. Orowan, "Energy Criteria of Fracture." Weld. Res. Sup., vol.20, p.457, 1995.
4. G. R. Irwin, "Fracture" Handbuch der Physik, vol.6, p.551, 1957.
5. P. C. Paris and G. C. Shih, "Stress Analysis of Cracks." ASTM STP 381, p.30, 1965.
6. H. M. Westergard, "Bearing Presures and Cracks." Trans., ASME, Journal of Applied Mechanics, 1939.
7. A. A. Griffith, Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics, Delft. p. 55. 1924.
8. "Standard methods of tension testing of metallic materials", Annual Book ASTM Standards, E8~91, 1991.
9. J. J. Gilman, Proc. Crack propagation Symp., Cranfield Sept., 1961.