

비파괴법에 의한 압력용기 강 다층용접부의 균열선단에서 소성변형 역성장거동 평가에 관한 연구

Study on Evaluation of Plastic Deformation Zone at Crack Tip for the Multi-Passed Weld Region of the Pressure Vessel Steel Using Nondestructive Method

나의균*[†], 이상근**

Eui-Gyun Na*[†] and Sang-Guen Lee**

초 록 본 연구에서는 비파괴법을 이용하여 압력용기 강 다층용접부에서 채취한 표준 샤르피 시험편의 균열선단에서 형성되는 소성변형 거동을 평가하였다. 모재, 후열처리재 및 용접재를 대상으로 시험편에 기계적인 노치를 가공한 후 예균열(pre-crack)을 낸 다음 4점 굽힘시험과 음향방출(acoustic emission: AE)실험을 동시에 실시하였다. 균열선단은 용접재의 후열처리재의 경우 용융선 근처에 위치하도록 하였다. 하중이 가해짐에 따라 균열선단에서 형성되는 소성영역의 크기는 응력확대계수를 이용하여 구했으며, 각 시험편에 대한 소성영역의 크기와 음향방출 특성과의 관계는 축적된 AE 에너지 관점에서 고찰하였다. 시험편에 관계없이 탄성역역에서는 거의 AE신호가 감지되지 않았으며, 대부분의 AE신호는 소성변형 과정에서 발생하였다. 또한, 용접재가 모재와 후열처리재에 비해 AE신호가 훨씬 많이 발생하였다. 모재와 후열처리재 및 용접재의 균열선단에서 소성영역 크기와 축적된 AE에너지와의 관계는 현저히 다르게 나타났으며, 용접재의 AE counts는 모재와 후열처리재에 비해 많이 발생하였다.

주요용어: 음향방출, 소성영역 크기, 균열선단, 예균열, 응력확대계수, 축적된 AE에너지, AE counts

Abstract The purpose of this study is to evaluate the behaviour of the plastic deformed zone at crack tip on the standard Charpy specimens which were taken from the multi-passed weld block of the pressure vessel steel. Notch was machined on the standard Charpy test specimens and pre-crack which was located around the fusion line was made under the repeat load. Four point bend and acoustic emission tests were carried out simultaneously. The size of plastic region at crack tip was calculated using stress intensity factor. Relationships between characteristics of acoustic emission and plastic zone size at crack tip were discussed through the cumulative AE energy. Regardless of the specimens, AE signals were absent within the elastic region almost and most of AE signals were produced at the plastic deformation region from yield point to the mid-point between yield and maximum load. More AE signals for the weldment were produced compared with the base-metal and PWHT specimen. Relations between plastic deformed zones at crack tip and cumulative AE energy for the weldment and PWHT specimen were different quietly from the base-metal. Besides, number of AE counts for the weldment was the larger than those of the base-metal and PWHT specimen.

Keywords: Acoustic Emission, Plastic Zone Size, Pre-Crack, Stress Intensity Factor, Crack Tip, Cumulative AE Energy, AE Counts

1. 서론

비파괴시험은 재료 내부의 결함을 탐지하거나 사용중 금속 및 복합재료의 변형과 파괴과정을 감지하는데 유용하게 사용되고 있다. 비파괴시험 중에서 음향방출(acoustic emission: AE)법은 하중을 받고 있는 부재내의 결함 주위에서 발생하는 탄성파를 센서로 감지하여 균열의 발생위치, 균열의 시작점 및 파괴기구 등을 규명하는데 활용되고 있다 [1,2]. 음향방출 신호는 하중방식, 재료의 미세조직, 재료 등에 따라 매우 다양한 신호가 발생하게 되며, 특히 실험과정에서 많은 수의 잡음이 발생하게 된다. 그런 이유로 실제 현장에서 음향방출기법을 활용하는데 제한적인 요소로 작용하게 된다.

그러나 신호처리를 디지털화하고, 얻어진 신호를 대상으로 신호분석을 통하면 잡음을 제거하여 실질 신호(real signal)를 구할 수 있기 때문에 최근에는 압력용기 등의 사용중 안정성 감시 등을 위해 응용의 폭이 점차 넓어지고 있다.

저자 등은[3,4] 그간 압력용기 강 용접부를 대상으로 표준 샤르피 시험편을 채취하여 기계적인 노치를 가공한 후 노치선단에서 발생하는 음향방출에 관한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 동일재료를 대상으로 샤르피 시험편에 예균열(pre-crack)을 내어 AE신호를 구하고, 이들 AE신호 특성과 균열선단에서 발생하는 소성영역의 크기 및 거동과의 관계를 평가해보고자 한다. 본 연구 결과는 산업현장에서 예리한 균열을 갖고 있는 용접부의 손상과정을 비파괴적으로 감시(monitoring)하는데 활용될 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

2. 실험 절차

2.1. 공시재 및 용접

본 실험에 사용된 재료는 압력용기 강으로서 화학적 조성과 대기중에서 기계적 성질은 Table 1과 같다.

용접은 판재(300x400 mm)의 압연방향으로 두꺼운 판재용접에 많이 적용되고 있는 잠호용접(submerged arc welding)기를 이용하여 Table 2와 같은 조건으로 실시하였다.

용접부의 층별이력은 Fig. 1과 같으며, 용접을 마친 후 용접후 열처리를 실시하였다. 열처리조건은

가열속도는 145 °C/hr, 열처리 온도는 630 °C에서 100분 동안 유지한 후 노냉하였다. 표준 샤르피 시험편은 모재의 경우에는 강판에서 압연방향과 직각 방향에서 채취하였으며, 용접재와 후열처리재는 용접된 판에서 Fig. 1과 같이 두께 방향의 정 중앙부에서 채취하였고, 용접부의 용융선 부근이 Fig. 2에서 시험편의 중앙(노치의 위치와 같음)에 위치하도록 하였다.

시험편의 형상은 Fig. 2와 같이 기계적인 노치를 두께 방향으로 2 mm까지 가공한 후, 예균열을 내었다. 예균열은 만능피로시험기를 이용하였으며, 하중 제어하에서 3 Hz로 ±1.5 kN의 반복하중을 가하여 0.5 mm를 더 내었다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of SA-516(grade11)

(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

Table 2 Welding condition (submerged arc weld)

Pass	Amphere, (A)	Voltage, (V)	Traveling speed (cm/min)
1~26	320~350	30~31	28~33

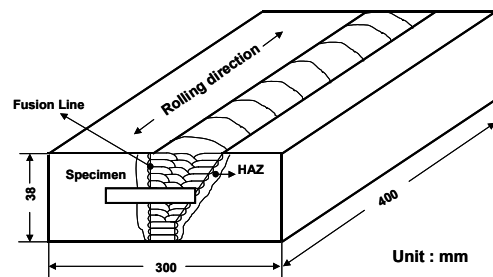
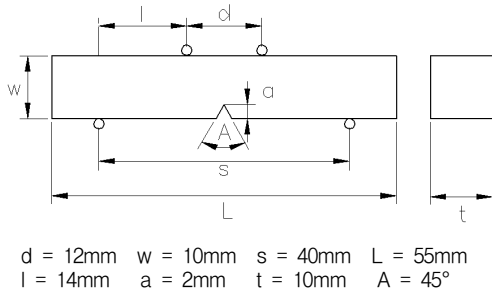
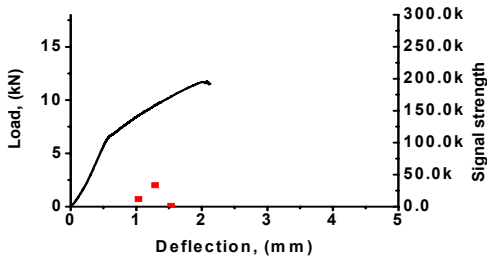


Fig. 1 History of the multi-pass weld and extraction of the standard Charpy specimen from the weld block

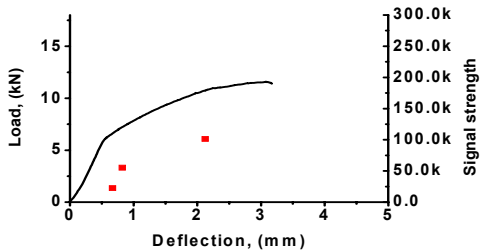


$d = 12\text{mm}$ $w = 10\text{mm}$ $s = 40\text{mm}$ $L = 55\text{mm}$
 $l = 14\text{mm}$ $a = 2\text{mm}$ $t = 10\text{mm}$ $A = 45^\circ$

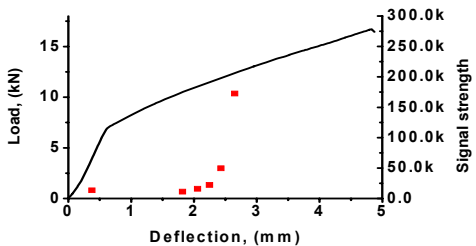
Fig. 2 Dimensions of specimen for 4-point bending test (*according to ASME: section VIII, Division. I(UG-84))



(a) basemetal



(b) PWHT specimen



(c) weldment

Fig. 3 Relations between load and deflection for the basemetal, PWHT specimen and weldment, including AE signal strength

2.2. 순수굽힘 및 AE 실험

본 연구에서 택한 하중 방식은 4점 굽힘실험을 동시에 실시하였으며, cross head속도는 0.05 mm/min로 하였다[3]. 4점 굽힘실험의 경우 시험편의 span length는 40 mm로 하였다. 음향방출신호의 측정에는 두 개의 센서(PAC-R15)를 시험편의 양 끝에 부착하였으며, 예증폭기의 모델은 기존의 실험에서와 같이 PAC-1220A를 사용하였다. 음향방출 실험에서 실험 조건으로 가장 중요한 문턱값(threshold hold)은 40 dB로 일정하게 하였으며, 실험중 AE신호는 소프트웨어 AE-win을 사용하여 실시간으로 얻어 내었다. 실험중 얻어진 음향 방출 신호의 종류는 signal strength, AE events, rise-time, AE energy, counts 및 amplitude 등이었다. AE 실험중 필연적으로 발생하는 잡음은 주로 하중 편과 시험편과의 마찰과 전기적인 잡음으로 구분할 수 있다. 따라서 시험편 자체의 변형과 파괴 과정에서 발생하는 신호를 얻기 위해서는 실험중 발생하는 잡음을 제거하여야 한다. 본 연구에서는 잡음을 제거하기 위해 다음과 같은 절차를 밟았다.

우선 양 쪽 센서에 10 μs 안에 도착하는 신호들을 택하고 난 다음, event 분포 분석을 행하여 균열선단에서 발생하는 신호를 정하였다. 이어 최종적으로 rise-time이 3 μs 이상 차이가 나는 신호는 무시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 시험편에 따라 음향방출신호의 차이점을 알아보기 위해 기계적인 하중-굽힘곡선 상에 AE 인자중의 하나인 신호강도(signal strength)를 동시에 표현하여 보았다.

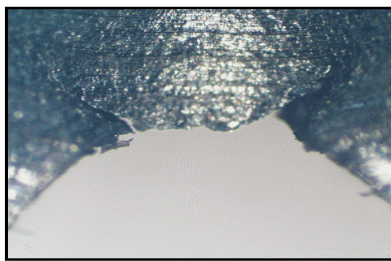
우선 시험편의 종류와 관계없이 탄성영역에서는 거의 AE신호가 발생하지 않았으며, 소성영역에서 음향방출신호가 발생하였다. 또한 항복하중과 최대 하중 중간점에서 가장 큰 신호 강도값을 보이다가 그 이후의 소성심화변형영역에서는 오히려 음향방출이 발생하지 않았다. 이와 같은 결과로부터 본 재료의 경우 소성변형이 음향방출의 발생에 크게 기여하지 않는 것으로 보이며, 이는 기존의 연구결과와 유사하였다[3].

한편, 모재의 최대 신호강도값은 45,101인데 반해, 후열처리재는 100,028 그리고 용접재는 180,296로서 용접재가 훨씬 큰 신호강도값을 보였으며, 용접재가 모재와 후열처리재에 비해 AE신호가 보다 많이 발생하였다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 용접재의 경우 용접부의 기지강도(matrix strength)가 모재와 후열처리재에 비해 훨씬 크기 때문에 나타나는 현상이라고 생각되며, 기존의 연구결과와 유사한 결과를 보였다[5].

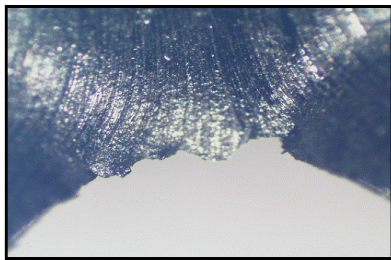
금속재료를 대상으로 음향방출에 관련된 연구를 살펴보면 대개 첫 번째 신호가 발생하는 영역(대개 항복강도에 해당하는 영역)에서 미시균열이 발생한다고 보고되고 있으나, 본 실험에서는 Fig. 4에서 보는 것처럼 항복강도와 최대하중의 중간점에서 미시적인 균열이 발생하였음을 광학현미경으로 확인할 수 있었다. 그러나 시험편의 두께가 얇고 상온에서 실험을 실시하여 연성이 풍부하기 때문에 균열의 진전은 일어나지 않았다.

Fig. 5는 모재와 후열처리재 및 용접재에 하중이 가해짐에 따라 예균열 선단에서 형성되는 소성영역의 크기와 축적된 음향방출 에너지와의 관계를 보인 것이다.

예균열 선단에서 형성되는 소성영역의 크기는 다음 식을 이용하여 구하였다[6].

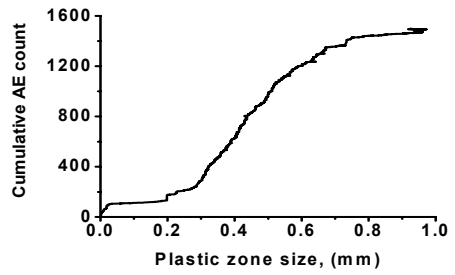


(a) basemetal

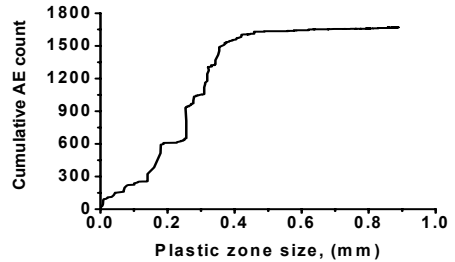


(b) weldment

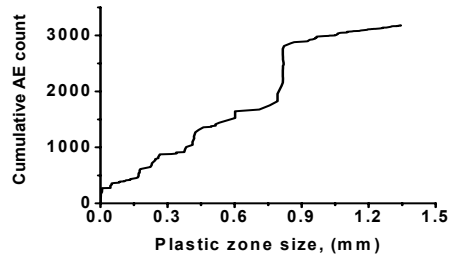
Fig. 4 Photographs of the microscope around crack tip after unloading at 1.5mm for the basemetal and 2.5mm for the weldment of deflection



(a) basemetal



(b) PWHT specimen



(c) weldment

Fig. 5 Relations between plastic zone size and cumulative AE counts for the basemetal, PWHT specimen and weldment

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

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

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

여기서 K_I 는 응력확대계수이고, P 는 가해진 하중, t 는 시험편의 두께, w 는 시험편의 폭, a 는 균열의 길이, l 은 시험편의 길이 그리고 r_y 는 균열선단에서의 소성역 크기이다.

모재의 경우 소성역의 크기가 0.2 mm 정도까지 큰 변화 없이 성장하다가 그 이후에는 소성영역이 성장함에 따라 축적된 음향방출에너지는 비교적 단순한 과정을 보이면서 증가하고 있음을 볼 수 있

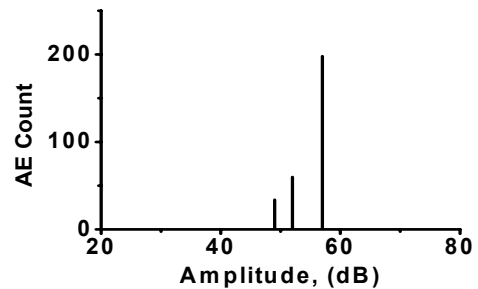
다. 반면, 용접재와 후열처리재의 경우에는 소성영역의 크기가 커짐에 따라 누적된 AE에너지 값도 증가하지만 모재와는 다르게 여러 단계를 밟고 진행되고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 거동을 보이는 것은 용접재와 후열처리재는 모재와는 다르게 기계적인 성질이 시험편의 두께방향에 따라 달라지며, 그에 따라 용접부의 조직 또한 다르기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다. 보다 구체적으로 용접재와 용접재의 경우, 균열선단에서 소성영역의 진전은 일단 노치선단 방향에서 어떤 각도를 갖고 소성영역이 형성되고 난 다음, 노치 선단방향으로 진행된다. 반면 모재의 경우, 소성영역의 진전은 용접재와 후열처리재와는 다르게 노치선단방향으로 곧바로 진행된다. 이와 같은 이유로 인해 이상과 같은 결과를 보이는 것으로 추측된다. 그러나 소성변형의 심화구역에서는 시험편에 관계없이 축적된 음향방출에너지의 변화는 거의 없었다.

한편, 용접재에서 고려해야 하는 또 다른 인자는 용접부에 존재하는 잔류응력의 존재이다. 하지만 본 연구에서는 잔류응력이 소성역과 음향방출에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 고려하지 않았다.

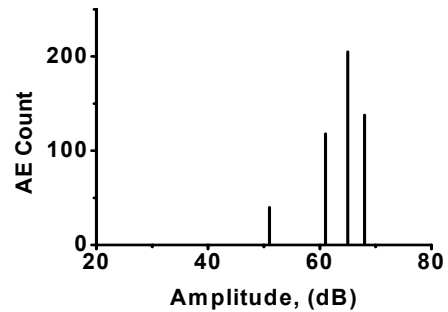
Fig. 6은 모재와 후열처리재 및 용접재의 진폭과 AE counts와의 관계를 보인 것이다.

모재와 후열처리재 및 용접재의 진폭의 범위는 각각 48.1~58.2 dB와 51~68.3 dB, 51.3~78.8 dB로서 용접재가 모재와 후열처리재에 비해 넓은 범위의 진폭값을 보였다. 이는 앞선 신호 강도값에서처럼 해당재료의 기지강도와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 용접재의 경우, 기지강도는 모재에 비해 큰 값을 보이며, 그 결과 본 실험과 같이 용접재의 AE진폭값이 모재보다 크게 나타나는 것으로 여겨진다. 또한, 그림에서 모재와 후열처리재 및 용접재의 AE counts의 총수는 각각 291개, 525개와 774개로서 용접재가 가장 많이 AE counts가 발생하였다. AE 신호중 AE counts는 재료 내부에서 발생하는 균열의 수와 밀접한 관계가 있다. 용접부 내에는 조직의 불연속성, 기공 (porosity) 및 대기중에서 용접시 발생하는 산화물 등이 존재하게 된다. 따라서 외적인 하중을 받게 되면 균열이 발생(initiation)할 수 있는 근원 (sources)이 모재에 비해 훨씬 많이 존재하게 되며, 그 결과 모재에 비해 AE counts가 많이 발생하게 되는 것으로 생각된다.

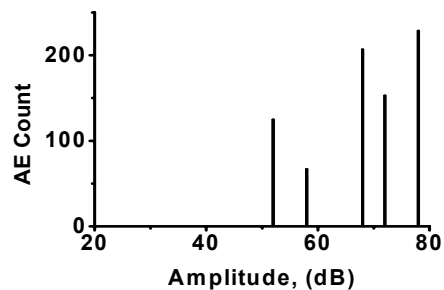
이상의 연구 결과를 종합해 볼 때, 사용중 용접에 의해 결합된 부재의 안전성을 위해서는 용접부 내에 음향방출원을 최소화할 수 있는 대책, 즉 대기중에서 용접을 실시하는 과정에서 발생하는 산화물이나 기공 등을 최소화할 수 있는 용접 공정의 개선이 요구된다. 아울러 본 연구에서는 평면응력 상태하에 있는 시험편에 대해 음향방출신호 특성을 조사하였으며, 추후 평면변형을 만족하는 두께의 시험편을 대상으로 음향방출실험을 실시하여 동일 재료에 대해 평면응력과 평면변형 사이에 음향방출 실험 결과가 어떻게 나타나는지 규명할 필요가 있다고 본다.



(a) basemetal



(b) PWHT specimen



(c) weldment

Fig. 6 Relationships between AE amplitude and counts for the basemetal, PWHT specimen and weldment

4. 결 론

본 연구에서는 압력용기 강을 대상으로 다층용접을 실시하고 채취한 후, 용접 후열처리재, 용접재와 모재의 노치선단에 예균열을 낸 후 4점 굽힘과 AE 실험을 동시에 실시였다. 이어 각 시험편 사이의 AE신호특성을 비교하였으며, 균열선단에 형성된 소성변형영역의 거동을 축적된 AE 에너지 관점에서 고찰하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 시험편의 종류에 관계없이 탄성영역에서는 AE 신호가 거의 발생하지 않았으며, 소성영역이 시작되는 점에서부터 AE신호가 발생하였다. 또한, 항복하중과 최대하중 중간점에서 가장 큰 신호 강도 값을 보이다가 그 이후의 소성심화변형영역에서는 음향방출신호가 발생하지 않았다. 용접재의 최대 신호강도값은 모재와 후열처리재에 비해 가장 큰 값을 보였다.
- 2) 모재의 경우, 균열선단에서 소성영역이 성장함에 따라 축적된 음향방출에너지는 비교적 단순한 과정을 보이면서 증가한 반면, 후열처리재와 용접재의 경우에는 소성영역의 크기와 누적된 에너지 값의 관계는 여러 단계를 거치는 경향을 보였다. 모재와 후열처리재 및 용접재의 진폭의 범위는 각각 48.1~58.2 dB와 51~68.3 dB 51.3~78.8 dB이었으며, 모재의 AE counts의 총수는 291개인 데 반해, 후열처리재와 용접재의 경우에는 각각 525개, 774개로서 용접재가 보다 많은 AE counts가 발생하였다.

참고문헌

- [1] K. Ono, H. B. Teoh and I. Roman, "Fracture induced acoustic emission of A533B steel effects of test temperature and fracture mechanisms," Progress in Acoustic Emission II, pp. 105-113 (1984)
- [2] N. Nakamura, N. Ringshall, Y. Fukuzawa and A. Adachi, "Acoustic emission during the deformation of iron crystals," Proc. of the 5th International Acoustic Emission Symposium, pp. 318-325 (1980)
- [3] E. G. Na, K. Ono and D. W. Lee, "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 (2006)
- [4] E. G. Na S. K. Koh and D. W. Lee, "AE evaluation of relationship between AE signals and fracture mechanisms for the pressure vessel steel," Advanced Materials Research, Vol. 26-28, pp. 1181-1186 (2007)
- [5] 나의균, 유효선, 김훈, "HT-60강 용접부의 SCC 및 AE신호특성에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 62-68 (2001)
- [6] D. P. Rooke and D. J. Cartwright, Compendium of Stress Intensity Factors, pp. 62-68, Her Majesty's stationary office, London (1974)