

## SA-516강 다층용접부 용접후 열처리재의 음향방출신호 특성 평가

### Evaluation of Acoustic Emission Signals Characteristics of Post Weld Heat Treated Multi-Pass Weld Block for SA-516 Pressure Vessel Steel

나의균

Eui-Gyun Na

**초 록** 본 연구에서는 SA-516 압력용강의 다층용접재와 용접후 열처리재를 대상으로 음향방출신호 특성을 평가하였다. 또한 예균열 선단에서 형성되는 소성영역의 크기와 음향방출신호와의 관계를 고찰하였으며, 실험 후 파단면을 관찰하여 음향방출원을 규명하여 용접후 열처리의 유효성을 평가하였다. 용접재 및 후 열처리재 모두 용접된 판 두께방향의 중앙부에서 표준 샤르피 시험편을 채취하여 날카로운 균열(예균열)을 내고 난 다음, 4점굽힘과 음향방출실험을 동시에 실시하였다. 후 열처리재와 용접재 공히 탄성영역에서 음향방출신호는 발생하지 않았으며, 항복하중과 최대하중 사이에서 발생하였고, 최대하중 이후의 소성 심화영역에서는 신호가 발생하지 않았다. 후 열처리재의 음향방출신호 강도는 시험편의 채취 위치에 관계없이 용접재에 비해 작았으며, 균열선단에서 소성영역의 진전형태는 용접재에 비해 훨씬 단순한 양상을 보였다. 후 열처리재의 파단면에는 용접재와는 달리 산화물의 분포가 훨씬 적었으며, 이는 열처리로 인해 용접부의 음향방출원이 감소하였다는 점에서 볼 때 열처리 효과는 있었다.

**주요용어:** 다층용접, 용접후 열처리, 음향방출, 4점굽힘, 균열선단, 소성변형영역, 음향방출신호 강도

**Abstract** In this study, evaluation of acoustic emission signals characteristics for the post weld heat treated (PWHT) multi-pass weldment and weldment was dealt. Charpy standard specimens were taken from the lowest, middle and highest regions of the weld block. Pre-crack was made using the repeated load. Four point bend and AE tests were conducted simultaneously. Regardless of the specimens, AE signals were absent within elastic region and produced in the process of plastic deformation. AE signals for all specimens were not emitted after the maximum load. Value of signal strength for the all PWHT specimens was lower than that of the weldment. Besides, relations of plastic deformation zone size and accumulated AE counts for the PWHT specimens were more simple compared with the weldment. In case of the PWHT specimen, particles on the fractured surface decreased prominently compared with the weldment due to PWHT. From these results, it can be concluded that PWHT was effective in reducing the AE sources for the weldment.

**Keywords:** Multi-Pass Weld, Post Weld Heat Treatment(PWHT), Acoustic Emission(AE), Crack Tip, Plastic Deformation Zone Size, AE Signal Strength

#### 1. 서 론

음향방출법은 실험과정에서 잡음 등이 필연적으로 발생하기 때문에 현장에 적용하기에는 제한

적인 면이 있었다. 그러나 최근에 소프트웨어의 발달로 인해 균열의 발생위치를 찾아낼 수 있는 등 사용 중 각종 구조물의 안전성을 비파괴적으로 감시하는데 사용 폭이 날로 증가하고 있다

[1,2]. 저자 등은 그간 음향방출과 관련된 연구를 수행해오고 있다[3,4]. 기존의 연구[4]에서는 압력 용기강의 다층용접재와 용접후 열처리재 및 모재를 대상으로 음향방출신호와 시험편의 노치 선단에서 형성된 소성영역의 크기와의 관계를 규명하였다. 그러나 다층용접판이 두꺼운 경우에는 후 열처리재의 두께방향에 따라 음향방출특성과 기계적 소성변형과의 관계를 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 SA-516 압력용기강의 다층용접재와 용접후 열처리재를 대상으로 4점굽힘과 음향방출실험을 동시에 실시하여 음향방출특성을 평가하고자 한다. 기존의 연구[4]에서는 균열선단을 기계가공으로 하였으나 본 연구에서는 기계가공 후 반복하중에 의해 예균열을 내어 균열선단에서 형성되는 소성영역의 진전 거동을 음향방출신호의 견지에서 고찰하였다. 끝으로 각 시험편의 파괴기구를 파악하고 열처리의 유효성을 알아보기 위해 주사전자현미경을 이용하여 파단면을 해석하였다.

2. 실험 절차

2.1. 재료 및 용접

본 연구에 사용된 재료는 압력용기 강으로서 두께 38 mm인 SA-516 재료이며, 화학적 조성과 상온에서 기계적 성질은 Table 1과 같다.

용접은 Fig. 1과 같이 압연방향으로 잠호용접을 실시하였으며, 강판의 두께가 두껍기 때문에 26번에 걸쳐 다층용접을 실시하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties in air (SA-516 steel)

(a) Chemical compositions

C	Mn	Si	P	S	Ni
0.145	0.555	0.575	0.007	0.002	0.25
Cr	Mo	V	Ti	Nb	Cu
1.41	0.61	0.002	0.001	0.004	0.014

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
354	562	30

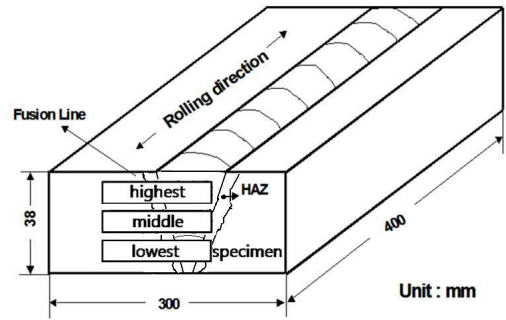


Fig. 1 Weld block and extraction locations of PWHT specimens

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties (wire)

(a) Chemical compositions

C	Mn	Si	P	S	Ni
0.08	0.65	0.58	0.010	0.010	0.12
Cr	Mo	V	Ti	Nb	Cu
1.3	0.45	-	-	-	0.20

(b) Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
490	574	25.7

용접을 실시할 때 용접부의 화학적 조성과 상온에서 기계적 성질은 Table 2와 같다.

용접후 열처리는 전기로에 용접된 판을 집어넣고 열처리온도 680 °C에서 2시간 30분 동안 유지시킨 후, 노(furnace)안에서 냉각하였다.

2.2. 시험편 제작

시험편의 규격은 표준 샤르피 표준시험편으로서 용접재 및 후 열처리 시험편을 채취하였다. 후 열처리재의 경우에는 용접된 판을 열처리를 실시한 후 Fig. 1과 같이 용접판의 맨 아래, 중앙 및 윗부분에서 3종류를 채취하였다. 두 시험편 공히 용접부의 용융선 부분이 시험편의 맨 중앙에 위치하도록 하였다. 이어 각각 3개씩 총 12개 시험편을 대상으로 v노치를 가공한 다음, 예균열(pre-crack)을 내었다. 예균열은 3점굽힘 하에서 하중제어(load control) 방식으로 하였으며, mean load는 -3 kN으로 하였다. 또한 하중진폭(load

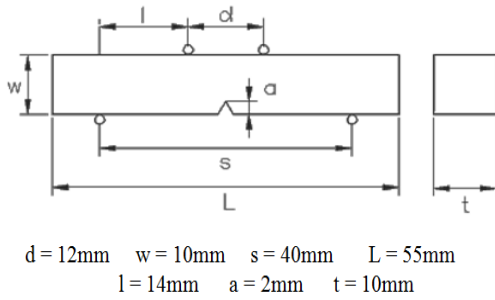


Fig. 2 Dimensions of standard Charpy specimen

amplitude)은  $\pm 2$  kN의 반복하중을 가하였고 반복 속도는 3 Hz로 하였다. 예균열의 길이는 Fig. 2에 시험편의 규격을 나타내었으며, 예균열은 노치선단에서 0.5 mm로 하였다.

### 2.3. 굽힘 및 음향방출실험

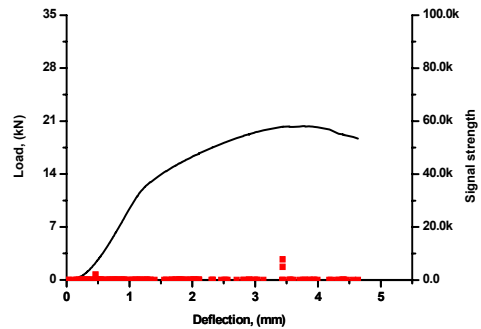
굽힘실험 시 cross head 속도는 0.002 mm/s로 하였으며, 음향방출실험과 동시에 실시하였다. 음향방출신호의 탐지를 위해 두개의 센서(PAC-R15)를 시험편의 양 끝에 부착하였으며, 이 때 사용된 예 증폭기는 PAC-1220A type으로써 40 gain으로 설정하였다. 음향방출실험을 실시하는 동안 문턱값(threshold)은 40 dB로 일정하게 하였다. 실험을 진행하는 과정에서 발생하는 각종 잡음의 제거는 기존의 연구에서 행한 절차와 같게 하였으며, 균열선단 부근에서 발생하는 음향방출신호만을 택하여 실험자료로 활용하였다[4].

## 3. 실험 결과 및 고찰

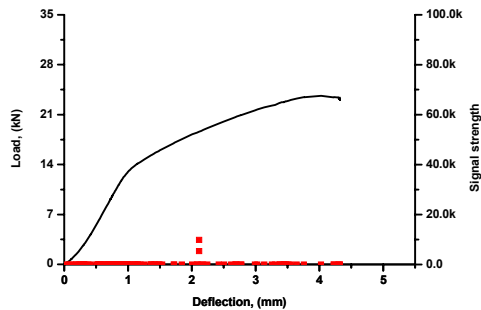
### 3.1. 시험재의 음향방출신호 특성

Fig. 3은 후 열처리재 및 용접재의 하중-굽힘량 곡선과 음향방출신호와의 관계를 보인 것이다.

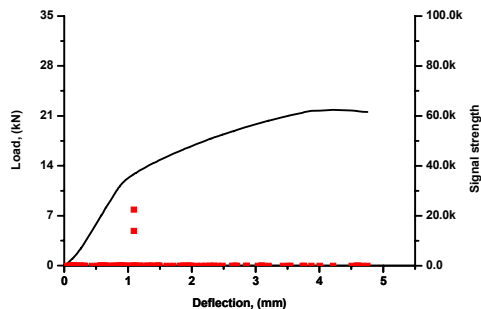
본 논문에서 얻어진 자료를 바탕으로 그래프를 작성할 때 신호강도(signal strength)를 택하였다. 신호강도는 음향방출인자의 하나로서 AE소프트웨어 상에서 지정하는 값이며, 음향진폭(AE amplitude)와 밀접한 관계가 있는 인자이다. 우선 시험편에 관계없이 탄성영역 내에서는 음향방출신호가 발생하지 않았으며, 항복강도와 최대하중



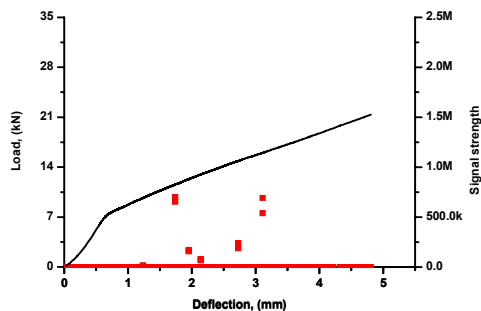
(a) Lowest region (PWHT)



(b) Middle region (PWHT)



(c) Highest region (PWHT)



(d) Weldment

Fig. 3 Relations of load and AE signal strength plotted against deflection for the PWHT specimens and weldment

사이에서 발생하다가 최대하중 이후에는 발생하지 않았다. 후 열처리재의 신호강도의 최대값은 각각 10 k(맨 아래), 10 k(중간), 22 k(윗부분)인데 반해, 용접재는 750 k로서 가장 큰 값을 보였다. 후 열처리재의 경우, 시험편의 채취 위치에 따른 신호강도의 값의 차이는 윗부분에서 가장 큰 값을 보였다. 이는 윗부분의 경우 용접이 끝난 후 공기 중에서 냉각속도가 가장 빠르게 진행되기 때문에 나타나는 현상이라고 생각한다. 용접재의 경우 가장 큰 값을 보이는 것은 후술한 바와 같이 용접부의 기지와 음향방출원(AE sources)으로 보여지는 산화물 사이의 결합력이 가장 크기 때문이라고 생각된다. 그러나 후 열처리를 실시함에 따라 결합력이 급격히 감소하게 되고 용접부가 다층용접과 열처리로 인해 연화되기 때문에 음향방출신호 강도가 저하하는 것으로 사료된다. 또한 후 열처리재의 경우 음향방출신호의 발생수가 용접재에 비해 훨씬 감소하고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 음향방출신호의 수는 재료가 외부하중을 받을 때 미시균열의 발생 수와 비례한다는 연구결과가 있다. 이와 같은 결과를 본 실험 결과와 견주어 보면 후 열처리를 실시함에 따라 음향방출원의 수가 감소하는 결과를 초래하게 되며, 그런 점에서 용접후 열처리의 유효성은 있다고 할 수 있겠다. 또 한 가지 눈여겨 볼만한 것은 일반적으로 음향방출원에 소성변형도 포함되지만 본 실험의 경우에 최대하중 이후의 소성심화영역에서는 음향방출신호가 전혀 감지되지 않았다.

### 3.2. 균열선단에서 음향방출신호 특성

외부하중이 증가함에 따라 균열선단에서 형성되는 소성영역의 진전을 음향방출법을 이용하여 비파괴적으로 평가할 수 있다면 사용 중 구조물의 안전성을 감시할 수 있다는 점에서 볼 때, 대단히 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 균열선단에서 형성되는 소성영역의 진전과 음향방출신호와의 관계를 구해 고찰해 보았다.

Fig. 4는 후 열처리재 및 용접재의 축적된 AE counts와 소성영역의 크기와의 관계를 보인 것이다. 소성영역의 크기는 아래 식을 이용하여 구하였다[5].

$$K_I = \frac{3Pl}{tw^2} \sqrt{\pi a} \cdot F(\alpha), \alpha = \frac{a}{w} \quad (1)$$

$$F(\alpha) = 1.12 - 1.12\alpha + 3.74\alpha^2 + 3.87\alpha^3 - 19.05\alpha^4 + 22.5\alpha^5$$

$$\gamma_u = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_u} \right)^2 \quad (2)$$

여기서  $K_I$ 는 4점굽힘 하에서 응력확대계수,  $P$ 는 하중,  $l$ 은 시험편의 길이,  $t$ 는 시험편의 두께이고  $w$ 는 시험편의 폭이며,  $a$ 는 균열의 길이를 나타낸다. 식(1)에서  $K_I$ 를 구한 다음 식(2)에 대입하여 소성영역의 크기를 구하였다. 또한 상기 식에서  $\sigma_u$ 는 용접부의 항복강도를 의미하며, 모재의 1.5배에 해당하는 값으로 하였다.

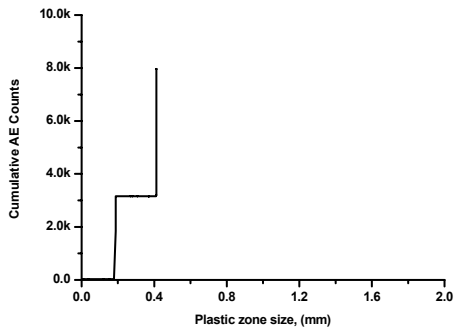
날카로운 선단에서 형성되는 소성영역의 크기와 음향방출신호와의 관계를 요약하면 다음과 같다.

- 후 열처리재의 경우에는 시험편의 채취 위치에 관계없이 용접재에 비해 보다 단순화된 소성변형 거동을 보였다.
- 시험편에 관계없이 소성변형의 심화영역에서는 누적된 음향방출신호의 값의 변화는 존재하지 않았다.
- 용접재는 후 열처리재에 비해 훨씬 복잡한 단계를 거치면서 소성변형이 진행되었다.

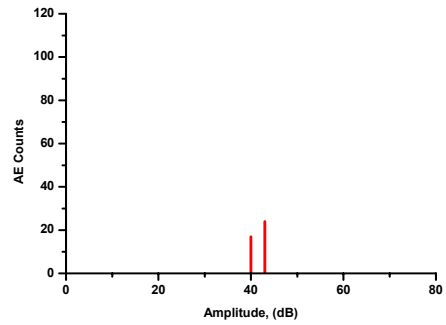
이와 같이 용접재 경우 후 열처리재에 비해 복잡한 단계를 거쳐 소성영역이 형성되는 것은 후 열처리재와 같이 균열선단에서 소성영역이 균열방향으로 진전되는 것이 아니고 용접부에 불연속적인 기계적 성질이 존재하여서 균열과 일정한 각을 이루며 소성영역이 형성되고 진전되기 때문에 비롯되는 것으로 생각된다[6]. 일반적으로 용접부에는 잔류응력이 존재하지만 본 연구에서는 잔류응력이 음향방출신호에 미치는 영향에 대해서는 고려하지 않았다.

Fig. 5는 각 시험편별로 진폭의 범위를 알아보기 위해 진폭과 AE counts와의 관계를 보인 것이다.

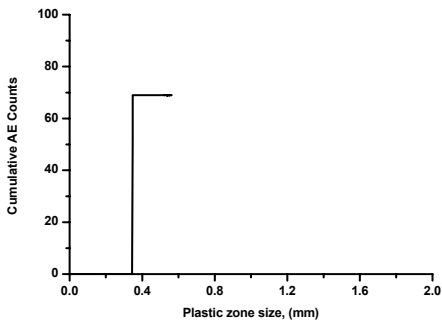
후 열처리재의 진폭은 40~42 dB(맨 아래), 88~96 dB(중양) 및 40~45 dB(윗부분)인데 반해, 용접재는 90~97.5 dB의 값을 보였다. 특히 후 열처리재의 경우에는 용접재에 비해 전반적으로 진폭의 범위가 작은 값을 보였다. 음향방출신호 중에서 진폭은 재료의 강도와 밀접한 관계가 있다는 점을 고려해 볼 때, 다층용접과 열처리로 인해 용접부가 연화되기 때문에 용접재에 비해 진



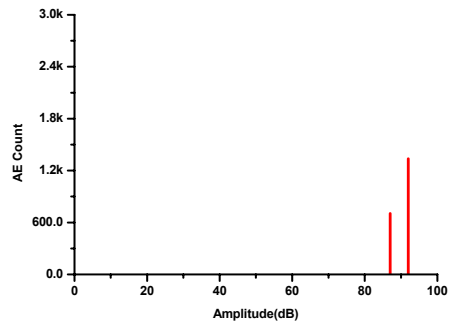
(a) Lowest region (PWHT)



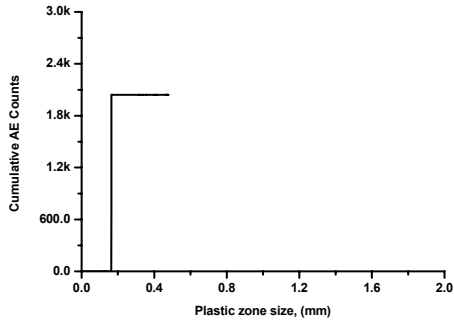
(a) Lowest region (PWHT)



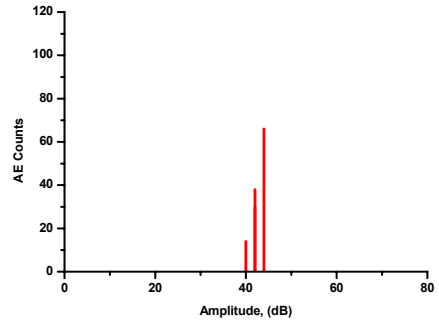
(b) Middle region (PWHT)



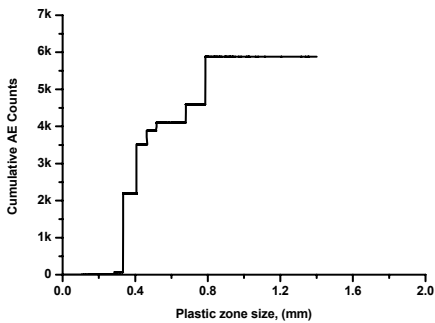
(b) Middle region (PWHT)



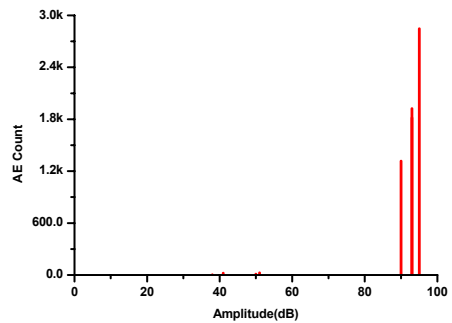
(c) Highest region (PWHT)



(c) Highest region (PWHT)



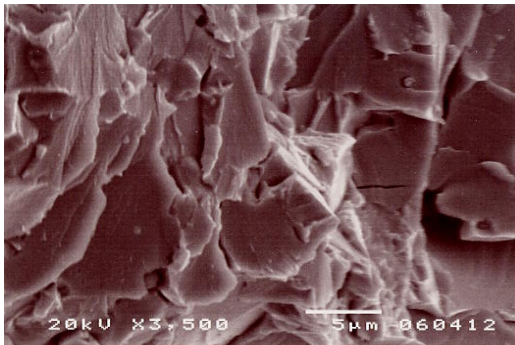
(d) Weldment



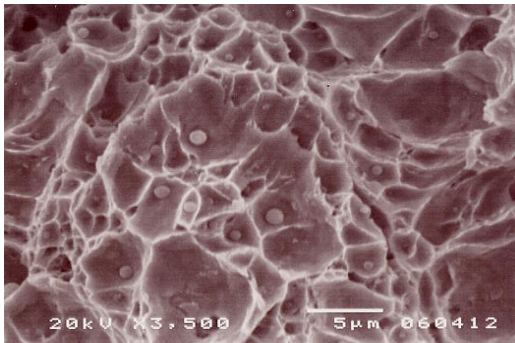
(d) Weldment

Fig. 4 Relationships between cumulative AE counts and plastic zone size at pre-crack tip for the PWHT specimens and weldment

Fig. 5 Relations of AE counts and amplitude for the PWHT specimens and weldment



(a) Middle region (PWHT) (×3500)



(b) Weldment (×3500)

Fig. 6 SEM photos of fractured surfaces for the PWHT specimen(middle) and weldment

폭의 범위가 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 각 시험편의 파단면 중에서 예균열에 따른 정 중앙부를 대상으로 주사전자현미경을 이용하여 3500배로 확대하여 촬영한 사진이다. 여기서 후 열처리재(중앙)만을 택하였는데, 이는 앞에서 보았듯이 후 열처리재의 경우 음향방출거동 결과가 크게 차이가 나지 않기 때문이다.

본 실험의 경우 시험편의 규격이 작고 연성이 풍부하기 때문에 굽힘실험 시 파단되지 않았다. 따라서 실험을 마친 후 액체질소 분위기에 약 10분정도 담근 다음 꺼내어 충격하중에 의해 시험편을 파단시킨 후 SEM사진을 촬영하였다. 우선 용접재의 경우에는 파단면 전반에 걸쳐 알갱이(particles)가 후 열처리재에 비해 보다 많이 산재하고 있는데, 이는 대기 중에서 용접 시 발생하는 산화물이라고 여겨진다. 앞선 결과에서 용접부에서 보다 많은 음향방출신호가 발생하고 있는 것은 용접부의 기지와 이들 산화물사이에 분리(debonding)가 원인이라고 사료된다. 후 열처리재의 경우 용접재에 비해 산화물의 분포가 눈에 띄

게 감소하였으며, 이로 인해 음향방출신호의 수가 급감하는 하나의 원인이라고 사료된다. 이상의 결과로부터 용접후 열처리되는 용접부의 기지와 산화물 사이의 결합력을 약화시키고, 음향방출원의 수를 줄이는데 효과적임을 본 연구를 통해 밝힐 수 있었다.

이상에서 AE법에 의해 후 열처리재와 용접재 사이의 AE특성을 고찰하였다. 일반적으로 후 열처리재는 용접재에 비해 파괴인성 값이 증가하는데 대부분의 경우 연성에 기인한다. 그러나 본 연구에서 규명한 것처럼 후 열처리를 실시함으로써 AE신호가 감소하고, 여기에 용접시 발생하는 산화물의 수가 급감하기 때문에 후 열처리재가 용접재에 비해 파괴인성이 증가하게 되는 것으로 고찰하는 편이 보다 타당하다고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압력용기강 다층용접부를 대상으로 열처리를 실시하고 후 열처리재 및 용접재를 대상으로 음향방출신호 특성 등을 고찰하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 시험편에 관계없이 탄성영역 내에서는 음향방출신호가 발생하지 않았으며, 항복강도와 최대하중 사이에서 발생하다가 최대하중 이후에는 발생하지 않았다. 후 열처리재의 신호강도의 최대값은 각각 10 k(맨 아래), 10 k(중간), 22 k(윗부분)인데 반해, 용접재는 750 k로서 가장 큰 값을 보였다. 후 열처리재의 경우 시험편의 채취 위치에 따른 신호강도의 값의 차이는 윗부분에서 가장 큰 값을 보였다.
- 2) 용접 후 열처리재의 경우에는 시험편의 채취 위치에 관계없이 용접재에 비해 보다 단순화된 소성변형 거동을 보였으며, 용접재는 훨씬 복잡한 단계를 거치면서 소성영역이 형성되었다. 아울러 시험편에 관계없이 소성변형의 심화 영역에서는 누적된 음향방출신호의 값의 변화는 존재하지 않았다.
- 3) 후 열처리재의 진폭은 40~42 dB(맨 아래), 88~96 dB(중앙) 및 40~45 dB(윗부분)인데 반해, 용접재는 90~97.5 dB의 값을 보였다. 특히 후 열처리재의 경우에는 용접재에 비해 전반적으로 진폭의 범위가 작은 값을 보였다.

4) 용접후 열처리는 용접부의 기지와 산화물 사이의 결합력을 약화시키고, 음향방출원의 수를 줄이는데 효과적이었다. 본 실험의 경우 음향방출원은 대기 중에서 용접하는 과정에서 발생하는 강도가 높은 산화물 등이 기지재와 분리되는 과정에서 발생하는 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 군산대학교 공학연구소 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 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] J. A. Baron and S. P. Ying, "Acoustic emission source location," *Acoustic Emission Testing*, pp. 64-65 (1992)
- [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 and S. G. Lee, "Study on evaluation of behaviors of plastic deformation growth at crack tip of multi-pass weldment for the pressure vessel steel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 473-478 (2009)
- [5] D. P. Rooke and D. J. Cartwright, "Compendium of Stress Intensity Factors," pp. 315 (1976)
- [6] C. U. Park, "Study on development and formation of plastic deformation at crack tip for the weldment of steel," Jeon-buk National University Graduate Course, Ph. D Thesis, (1987)