음향방출과 초음파를 이용한 TIG 용접탄소강의 미시적 손상평가

이준현* · 이진경**

*부산대학교 기계공학부

**동의대학교 기계공학과

Evaluation of Microscopic Damage to TIG Welded Carbon Steel using Acoustic Emission and Ultrasonic Test

Joon-Hyun Lee* and Jin-Kyung Lee**

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

KEY WORDS: A53 Carbon Steel A53탄소강, Weld 용접, Acoustic emission technique 음향방출기법, AE parameter 음향방출 파라미터, Events 사상수, Cumulative count 축적카운터, Amplitude 진폭

ABSTRACT: In this study, carbon steel (A53) is used as the material for the pipes in a marine plant and ship industry. Welds are necessary to join the carbon steel, and the effect of this welding on the properties of the carbon steel has been studied by many researchers. In this study, the dynamic behavior of welded carbon steel was studied using an acoustic emission (AE) technique, which is a nondestructive test. There are numerous AE parameters that can be used to analyze the damage behavior of carbon steel by external loading. The AE parameters of energy, cumulative count, amplitude, and AE event were used, and each parameter was differentiated according to the degree of damage to the carbon steel. The energy showed a high level at the elastic range of the load curve, while the amplitude had the highest value at the hardening region. The cumulative count showed a growth tendency similar to the loading curve. In addition, an ultrasonic technique and hardness test were applied to evaluate the mechanical properties according to the base zone, HAZ region, and weld zone of the weld specimen. The velocity and attenuation ratio showed little change between zones, and an evaluation of the ultrasonic waves on each zone of the specimen was found to be a useful method to clarify the mechanical properties of the carbon steel.

1. 서 론

철강재는 부식이 잘 발생하고 해양생물들의 번식이 왕성하다는 단점에도 불구하고 제작 및 설치의 용이성, 구조물의 견고성 등으로 인하여 해양구조물의 재료로써 가장 많이 사용되어지고 있다. 따라서 해양구조물 재료로써 탄소강이 광범위하게 사용되어지기 위해서 위의 단점들을 극복할 수 있는 많은 연구들이 이루어져 왔으며 (안석환 등., 2008; Mouri et al., 2001; Rao et al., 2000) 구조용 재료로 사용되어지기 위해서는 용접특성 또한 우수해야 되기 때문에 탄소강의 용접방법과 용접에 대한 강도 및 재질변화에 대한 연구도 꾸준히 이루어지고 있다.(문경만 등., 2009; Lothongkum et al., 2001; Yuri et al., 2000) 탄소강 및 스테인레스강의 용접으로 가장 많이 이용되는 방법은 TIG 용접으로 높은 용접품질을 나타내고 있다. 한편 탄소강이 사용되어지는 해양 구조물로써 H빔이 많이 이용되지만 연료 및 가스 등을 배송하는 배관도 해양구조물의 주요 부품중의 하나이다. 일반적으로 해양플랜트 및 조선 산업에서 다양한 종류의 배관이 사용되어지고 있지만 석유 및 가스배관용으로 사용되어지는 배관은 고온, 고압에서도 견딜 수 있는 재료를 사용하여야 하며

높은 신뢰성을 가지고 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 물, 기름, 가스 등의 배송에 많이 이용되어지는 A53 탄소강에 대한 TIG 용접을 실시하였으며 용접 특성 및 용접에 의한 재료의 특성변화를 평가하기 위하여 비파괴 기법의 하나인 초음파기법과 음향방출 기법을 이용하였다. 용접시편의 용접부, 열영향부(HAZ) 및 모재부분에 대한 초음파 특성을 평가하였으며 각 영역에 대한 경도변화를 관찰하여 초음파와 경도와의 상관관계에 대해 분석하였다.(Artymowicz et al., 2002; Zhao et al., 2002) 특히 원자력 및 고온고압가스 배관 등 높은 신뢰성을 요구하는 부분에 사용되어진 구조용 재료는 외부에서 가해지는 하중에 대해 실시간으로 구조물 및 재료의 상태가 평가되어야 한다.(권상우 등., 2008; Fregonese et al., 2001) 따라서 재료의 동적인 거동을 실시간으로 평가할 수 있는 음향방출 기법을 이용하여 A53탄소강이 외부로부터 하중을 받을시 용접부 및 재료내부에 발생하는 거동을 온라인 모니터링 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 A53 탄소강에 대한 용접은 3.2mm용접봉을

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up with acoustic emission system

사용하였으며 99.9%의 순알곤을 11l/min의 속도로 주입하고 200-250A의 전류 및 20-24V의 전압상태에서 15cm/min 속도로 용접하였다. 한편 배관용 강관으로 많이 이용되어지는 KS D3507 (A53) 탄소강의 외부하중에 대한 재료의 동적 거동을 평가하기 위하여 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 실험 시스템을 구성하였다. 실험에 사용된 인장시험기는 100ton의 UTS를 이용하였으며 하중이 증가할 때 시험편 내부에 발생하는 균열 및 변형을 평가하기 위하여 음향방출 시험기를 이용하였다. 시험편에 하중이 가해지면 시험편 내부로부터 발생하는 불균질에 의해 신호가 발생하면 시험편에 부착된 음향방출 센서에 의해 감시되며 감지된 신호는 아주 미약하기 때문에 프리앰프(Pre-AMP, 100-1200kHz)에서 40dB 증폭되어진다. 증폭된 신호는 음향방출 시스템에서 각종 파라미터들에 의해 분석되어진다(Ronnie K. Miller., 1987). 그리고 기계 및 전기 노이즈들을 제거하기 위하여 문턱전압값을 40dB로 고정하였으며 사용되어진 센서는 광대역 센서를 사용하였다. 한편 UTS 컨트롤 박스에서는 하중 및 변형 등의 시험조건들이 제어되며 최종 데이터를 수집한다. 시험편은 두께 5mm의 판재형을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄소강의 미시적 손상에 따른 음향방출 파라미터 특성

용접된 탄소강의 미시적 손상거동을 평가하기 위해 음향방출 기법을 이용하여 하중증가에 따른 음향방출 변화특성을 관찰하

(a) Energy vs. Load and Time

(b) Cumulative counts vs. Load and Time

(c) Amplitude vs. Load and Time

(d) AE event vs. Load and Time

Fig. 2 AE parameters change according to loading increase

였다. Fig. 2(a)에서는 하중증가에 따라 발생한 음향방출 신호의

에너지 변화특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 하중초기 시험편과 인장시험기의 그림사이의 약간의 마찰 및 슬립 등에 의해 하중곡선이 조금의 변화를 보이지만 점차 안정적으로 증가하였으며 거의 선형적으로 항복점까지 증가하였다. 그리고 상, 하 항복점이 명확히 나타나고 가공경화영역 및 소성거동 영역이 명확히 발생함을 알 수 있었다. 한편, 하중이 증가하여 재료내부의 미시적 균열발생 및 변형에 의해 발생하는 음향방출신호의 에너지의 변화는 전체적으로 2500이하의 에너지가 발생하지만 하중초기에는 5000-20000까지의 에너지를 나타내는 신호가 다수 발생하고 있으며 이러한 신호는 하중초기 시험편의 불안정과 하중에 의한 용접부내의 급격한 응력방출에 기인한다.

그리고 상항복점과 하항복점사이의 영역에서는 2000이하의 신호는 거의 발생하고 있지 않음을 알 수 있으며 다시 하중이 증가하는 가공경화영역에서는 5000이상 15000이하의 에너지를 보이는 음향방출 신호가 다수 발생하였다. 그리고 가공경화 영역이 지나 급격한 소성거동이 발생하여 넥이 발생하는 영역에서는 2000이하의 아주 낮은 에너지를 나타내는 신호가 다수 발생하고 있으며 마지막으로 시험편에 거시적 균열이 발생하여 최종파단에 도달하는 시점에서는 2500이상의 에너지를 나타내는 신호가 소수 발생하였다. 이와 같이 하중곡선에 따라 각각의 영역에서 발생하는 음향방출 신호의 에너지도 다양한 특성을 나타내었으며 에너지의 범위를 평가함으로써 시험편의 응력상태를 추정할 수 있었다.

Fig. 2(b)에서는 발생한 음향방출 신호의 카운터의 변화를 나타낸 것으로 하중초기에 급격하게 카운터의 수는 증가하다가 하중곡선의 항복점 근처에서는 증가속도가 감소한다. 그리고 가공경화영역에서는 카운터 수는 다시 급격하게 증가하며 시험편의 넥이 발생하는 지점에서는 증가속도가 급격히 둔화하여 최종파단시점까지 진행된다. 이와 같이 축적된 카운터 수의 증가 경향은 그림에서 보여주는 바와 같이 하중의 변화곡선과 거의 일치한다. 즉, 탄소영역에서는 두 곡선모두 선형적으로 급속히 증가하다가 항복점 근처에서 둔화되며 가공경화 영역에서 다시 증가하고 넥 부분에서 다시 변화하는 경향을 보인다. 따라서 음향방출 기법을 이용하여 축적된 카운터의 변화를 관찰함으로써 시험편이 어느 정도의 하중 및 응력을 받고 있는지 추측할 수 있는 가능성을 제시하였다.

Fig. 2(c)에서는 하중증가에 따른 진폭의 변화를 나타낸 것으로 하중곡선에 따라 다양한 음향방출 신호의 진폭특성을 보여주고 있다. 먼저 하중초기 60-70dB의 신호가 다수 검출되었다. 이때 발생한 신호는 앞에서 언급한 바와 같이 시험편과 시험기 그림사이의 국부적인 슬립 및 용접부위에서의 국부적인 응력해소에 의한 신호로 사료되며 상항복점과 하항복점 사이에서는 에너지의 변화와 비슷하게 거의 60dB이하의 신호만 발생하게 된다. 그리고 가공경화 영역에 도달하게 되면 60dB 이상의 신호들이 다수 발생하고 최대 95dB까지의 매우 높은 진폭을 나타내는 신호가 다수 발생하게 된다. 이와 같은 진폭의 변화는 앞의 에너지 변화와는 다른 특징을 보여주고 있다. 즉, 앞의 Fig. 2(a)의 에너지 변화에서는 하중초기의 에너지가 가공경화영역

에서 발생하는 신호의 에너지에 비하여 높은 에너지 값을 나타내었다. 반면 진폭의 변화에서는 반대로 가공경화 영역에서 발생하는 신호의 진폭이 하중초기(탄성영역)에서 발생하는 신호의 진폭에 비하여 현저히 높게 나타났다. 일반적으로 에너지가 높게 나타나게 되면 진폭도 높게 나타나는 경우와는 다른 경향을 보이므로 발생하는 음향방출 신호의 전형적인 형태가 탄성영역과 가공경화 영역에서 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 뒤의 Fig. 4(a)의 각 영역에서 발생하는 전형적인 신호의 파형을 관찰함으로써 확인할 수 있었다. 그리고 넥 부분에서 최종파단에 이르는 영역에서의 음향방출 신호는 40-70dB 정도의 광범위한 영역을 나타내었다.

Fig. 2(d)에서는 발생한 음향방출 신호의 이벤트 변화 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 하중초기에는 불균일하게 음향방출 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 안정적인 영역으로 접어들어 선형적으로 하중이 증가하는 탄성영역에서는 발생하는 신호는 다수 발생하지만 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 항복점에 도달하게 되면 이벤트 수는 급격하게 감소하고 상, 하 항복점을 지나 가공경화 영역에서는 다시 음향방출 신호의 수는 급격히 증가하여 탄성영역에서 발생하는 수와 비슷한 수준까지 증가한다. 그리고 소성영역이 급격히 발생하는 영역에서는 음향방출 신호는 점차적으로 감소하고 넥영역 이후의 영역에서는 극소수의 신호만 발생함을 알 수 있다. 그리고 최종적으로 시험편에 거시적 균열이 발생하여 완전히 파단될 때 국부적으로 신호가 다수 발생하였다.

3.2 탄소강의 손상에 따른 전형적인 파형분석

Fig. 3에서는 진폭의 변화와 탄성영역(A), 가공경화영역(B), 넥영역(C) 및 최종파단(D) 시점에서 발생하는 신호의 전형적인 파형을 보여주고 있다. 첫째, 탄성영역에서 발생하는 전형적인 신호는 그림에서 보여주는 바와 같이 연속형에 가까운 신호가 발생하고 있으며 가공경화 영역에서 발생하는 신호는 초기파의 진폭이 현저히 높고 지속시간이 짧은 돌발형 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 넥 영역에서 발생하는 신호는 진폭이 낮은 연속형 신호가 발생하고 마지막으로 최종파단시점에서 발생하는 신호는 초기파의 진폭은 조금 높은 편이지만 연속적으로 발생하는 파들의 진폭은 감소하는 연속형에 가까운 신호가 발생하고 있다. 따라서 이와 같은 각 영역에서의 파형의 변화는 앞의 음향방출 파라미터 분석에서 각각의 에너지, 진폭 등의 값과 밀접한 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에서는 탄소강의 하중증가에 따른 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 각 영역에서 발생하는 전형적인 파형과 주파수 특성을 분석한 것이다. 먼저 탄소영역(A)에서 발생하는 신호는 앞에서 언급한 바와 같이 진폭이 높은 연속형의 신호가 발생한다. 이때 발생하는 신호는 하중초기 탄성영역내에서 용접부에서의 불균질 등에 의해 발생하는 신호로써 진폭이 높은 신호가 발생하고 있음을 보여주고 있으며 가공영역에서 발생하는 신호는 진폭이 높지만 지속시간이 매우 짧은 돌발형 신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 소성거동이 급격히 진행되는 영역에서는 진폭이 매우 낮은 연속형의 신호가 발생한다. 이와

Fig. 3 Typical waveform at each region according to loading increase

Fig. 4 Typical waveform and frequency spectrum at each region of the loading

같은 신호는 연성이 많은 재료의 전형적인 신호로써 탄소강의 소성영역에서 주로 관찰되어지는 신호들이다. 마지막으로 거시적 균열이 발생할때에는 균열진전에 따라 연속형의 신호가 발생하고 진폭도 소성거동때에 비해 높은 신호가 발생함을 알 수 있다. 한편 Fig. 4(b)에서는 각 영역에서 발생한 신호의 주파수 분석을 나타낸 것이다. 탄성영역에서 발생한 진폭이 높은 연속형 신호의 주파수 영역은 665kHz 이고 430kHz와 1168kHz 사이의 광범위한 특성을 나타내었다. 반면 돌발형 신호가 발생하는 가공경화영역에서의 파형의 주파수 영역은 410kHz의 낮은 주파수 영역을 나타내었다. 이와 같은 주파수 영역은 돌발형 신호이기 때문에 기타 영역에서의 주파수 성분은 거의 발생하지 않

고 오직 하나의 주파수 성분만 나타내었다. 그리고 거시적 소성 거동에 의해 발생하는 진폭이 낮은 연속형 신호의 주파수 영역도 탄성영역에서 발생하는 신호의 주파수 영역과 비슷한 420kHz-980kHz의 주파수 영역을 나타내었다. 마지막으로 거시적 균열의 성장에 의한 주파수 영역은 약 550kHz-750kHz 영역으로 다른 영역에 비하여 좁은 주파수 영역을 나타내었다.

3.3 용접부에서의 초음파와 경도와의 관계

Fig. 5에서는 초음파를 이용하여 용접 탄소강의 각 영역(용접부, 모재, 열영향부(HAZ))에서의 속도 및 진폭을 측정하였다. 초음파 속도 측정은 10MHz의 초음파 센서를 사용하여 수침법을 이용

Fig. 5 The velocity and amplitude of ultrasonic wave according to the each region of the specimen

하였다. 시험편 두께를 버니어캘리퍼스로 정확하게 측정하고 디지털 오실로스코프를 이용하여 초음파가 시험편을 전파한 시간을 측정함으로써 용접된 시험편 각 영역에 대한 초음파 속도를 계산하였다. 모재에서의 초음파 속도는 5926m/s, 열영향부에서는 5864m/s 그리고 용접부에서는 6152m/s로 가장 높았다. 그리고 시험편 저면에서 첫 번째 반사된 신호의 진폭은 모재에서 4.25V, 열영향부에서 4.31V 및 용접부에서 5.63V로 진폭 역시 용접부에서 가장 높았다. 초음파 분석결과 각 영역에서의 진폭의 변화는 모재-열영향부-용접부 순으로 증가하였다. 반면 초음파 속도는 열영향부에서 가장 낮고 용접부에서 가장 높게 나타났다. Table 1에서는 각 영역에서의 비커스 경도와 로커웰 경도를 측정한 값을 나타낸 것이다. Table 1에서 보여주는 바와 같이 비커스 및 로커웰 경도 모두 용접부에서 가장 높게 나타났으며 모재에서 가장 낮게 나타났다. 이러한 경향은 초음파 진폭의 변화와 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 초음파 진폭의 측정으로 경도값을 추정할 수 있는 가능성을 제시하였다.

Table 1 Hardness at each region of the specimen

Region	Base zone	HAZ zone	Weld zone
Hardness			
Vickers Hardness(Hz) (0.1kgf-980.7mN)	246	284	331
Rockwell Hardness(HRB) (100kg)-ball	86	89	95

4. 결 론

본 연구에서는 A53 탄소강의 용접에 따른 기계적 특성과 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 음향방출기법 및 초음파를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) A53 탄소강의 인장강도와 항복강도의 변화를 평가한 결과 인장강도는 520N/mm² 및 항복강도는 466N/mm²를 나타내었으며 상향복점 및 하향복점이 명확히 발생하였다.

(2) 인장하중이 가해질때 용접시험편에서 발생하는 음향방출 신호를 분석한 결과 에너지, 진폭, 카운터 및 이벤트 등의 음향

방출 파라미터들이 탄성영역 및 가공경화 영역, 거시적 소성거동 영역, 최종파단 영역에서 다른 값들을 나타내기 때문에 이러한 파라미터들을 이용해 탄소강의 미시적 손상거동을 평가할 수 있는 가능성을 제시하였다.

(3) 전형적으로 발생하는 파형과 주파수 분석에서 탄성영역에서는 연속형 신호와 665kHz의 주파수 영역을 보이고 가공경화 영역에서는 돌발형 신호와 420kHz의 주파수 영역, 거시적 소성영역에서는 진폭이 낮은 연속형 신호 및 620kHz의 주파수 영역을 나타내고 시험편이 최종파단에 도달하면 연속형 신호 및 635kHz와 750kHz의 주파수 성분을 나타내었다.

(4) 초음파 속도는 용접부에서 가장 높고 열영향부에서 가장 낮은 반면 진폭은 모재, 열영향부 및 모재 순으로 증가하였으며 경도값들도 진폭의 변화와 같은 경향을 나타내었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 권상우, 공유식, 김선진 (2008). "Alloy718 마찰접합조건의 최적화와 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제22권, 제1호, pp 53-57.
- 문경만, 김윤해, 김종도, 이명훈, 김진경 (2009). "304 스테인리스강의 용접부위의 부식특성에 관한 전기화학적 평가", 한국해양공학회지, 제23권, 제4호, pp 58-63.
- 안석환, 강홍주, 남기우 (2008). "0.2% N을 첨가한 수퍼 2상 스테인리스강의 열처리 조건에 따른 특성 평가 - 제1보: 기계적 특성 및 미세조직", 한국해양공학회지, 제22권, 제4호, pp 46-50.
- Artymowicz, D., Hutchinson, B. and Nogues, M. (2002). "Effects of Crystallographic Texture on Ultrasonic wave Velocities in Steels", Materials Science & Technology, Vol 18, No 10, pp 1142-1146.
- Fregonese, M., Idrissi, H., Mazille, H., Renaud, L. and Cetre, Y. (2001). "Monitoring Pitting Corrosion of AISI 316L Austenitic Stainless Steel by Acoustic Emission Technique: Choice of Representative Acoustic Parameters", Journal of Materials Science, Vol 36, No 3, pp 557-563.
- Lothongkum, G., Viyanit, E. and Bhandhubanyong, P. (2001). "Study on the Effects of Pulsed TIG Welding Parameters on Delta-ferrite Content, Shape Factor and Bead Quality in Orbital Welding of AISI 316L Stainless Steel Plate", Journal of Materials Processing Technology, Vol 110, No 2, pp 233-238.
- Mouri, L., Mabilie, I., Fiaud, C., Amouroux, J., Catillon, G. and Gras, R. (2001). "Study of Corrosion Resistance and Surface Properties of Carbon Steel After a Duplex Plasma Treatment", Thin Solid Films, Vol 389, No 1-2, pp 153-160.
- Rao, T.S., Sairam, T.N., Viswanathan, B. and Nair, K.V.K.

- (2000). "Carbon Steel Corrosion by Iron Oxidising and Sulphate Reducing Bacteria in a Freshwater Cooling System", *Corrosion Science*, Vol 42, No 8, pp 1417-1431.
- Ronnie, K.M. (1987). *Nondestructive testing handbook*, 2nd ed., American Society for Nondestructive Testing, U.S.A.
- Yuri, T., Ogata, T., Saito, M. and Hirayama, Y. (2000). "Effect of Welding Structure and Delta-ferrite on Fatigue Properties for TIG Welded Austenitic Stainless Steels at Cryogenic Temperatures", *Cryogenics*, Vol 40, No 4-5, pp 251-259.
- Zhao, B., Liu, C.S., Gao, G.F. and Jiao, F. (2002). "Surface Characteristics in the Ultrasonic Ductile Honing of ZrO_2 Ceramics using Coarse Grits", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 123, No 1, pp 54-60.

2012년 5월 15일 원고 접수

2012년 8월 28일 심사 완료

2012년 10월 25일 게재 확정