

# 서브머지드 아크 클래딩의 실시간 품질감시를 위한 음향방출 진단 기술 Acoustic Emission Applied to Real-time Monitoring of Submerged Arc Cladding Quality

김 태 범\* · 권 오 양\*\* · Shan-Ping Lu\*\*\*

\*인하대학교 대학원 기계공학과

\*\*인하대학교 기계공학부

\*\*\*인하대학교 기계기술공동연구소

**ABSTRACT** 클래딩은 주요 산업분야에 내마모성, 내부식성의 향상을 위해 사용되고 있다. 그러나 클래딩 공정에서는 모재와 클래딩 재료의 물리적, 화학적 특성의 차이와 여러 가지 공정 변수의 영향으로 제품의 사용에 치명적인 손상을 줄 수 있는 균열, 슬래그 개재물, 기공등의 불연속이 발생하기 쉽다. 본 연구에서는 클래딩 시에 발생하는 불연속을 실시간으로 검출하는데 아주 우수한 검출 능력을 갖고 있는 비파괴 검사 방법인 음향방출시험을 적용하고 검출된 신호에 대한 주파수 분석과 2차원 위치표정을 실시하여 균열, 기공등의 불연속을 검출하였고 이를 주사전자현미경을 통하여 확인하였다. 음향방출법에 의해 클래딩부에서 발생하는 결함에 대한 실시간 평가가 가능함을 입증하였으며, 특히 다층 클래딩이나 넓은 면적의 클래딩시에 불연속을 가장 신속하게 감지할 수 있으므로 이를 생산공정에 활용한다면 클래딩 또는 용접부 품질감시를 위한 효과적인 방법이 될 것이다.

## 1. 서론

클래딩은 모재가 가지지 못한 특성을 얻기 위해 모재 표면에 다른 재료를 부착하는 것으로 정의된다. 클래딩 공정중에는 여러 가지 공정변수의 영향으로 균열, 기공등의 불연속이 발생할 수 있다. 이러한 불연속의 검출에 여러 가지 비파괴검사 방법이 적용되고 있으나 클래딩 공정과 동시에 검사를 실시하기에는 많은 어려움이 있다[1].

본 연구에서는 클래딩 시에 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 주파수분석과 위치표정을 실시함으로써 불연속의 종류와 위치를 결정하고, 이를 주사전자현미경 관찰과 비교하였다. 그리고 이의 결과를 토대로 음향방출시험법에 의한 클래딩 또는 용접부의 평가가 매우 효과적인 실시간 공정감시 방법이 될 수 있음을 보이고자 한다[2].

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 음향방출시험과 용접결함

음향방출 시험법은 재료 내에서 국부적으로 형성된 변형 에너지가 급격히 방출되어 발생된 탄성파가 재료의 표면까지 전파된 후 이를 센서로 검출한 신호에 적절한 처리를 하여 발생원의 실체를 규명하는 것으로서 실시간으로 연속적인 모니터링을 하는데 아주 적합하다[3].

음향방출 신호는 크게 돌발형 신호와 연속형 신

호로 나누어진다. 연속형 신호는 전위의 이동과 관련이 있는 것으로 알려져 있고, 돌발형 신호는 짧은 펄스 지연시간(수 $\mu$ s- 수ms)을 가지며, 주로 균열의 생성 및 성장, 국부적인 항복, 쌍정 및 성장등에 의해 발생되므로, 대부분의 용접 불연속은 이 돌발형 신호에 의해 검출할 수 있다[4].

### 2.2. 2차원 위치표정

기본적인 원리는 재료 내에서 발생하는 응력파를 다수의 센서로 감지하여 각각에 도달하는 시간차를 측정, 그 발생위치를 찾아내는 방식이다.

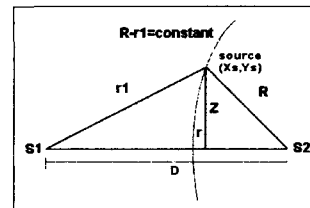


Fig. 1 Source location with two sensors on an infinite plane

무한 평판위에 Fig. 1과 같이 두 센서가 설치되어 있고 탄성파가 모든 방향으로 같은 속도를 가지고 전파된다고 가정할 때

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta} \quad (1)$$

이고 (1)은 발생원의 위치( $X_s, Y_s$ )를 지나가는 쌍곡선의 방정식이다. 센서1과 센서2를 잇는 연장선상이 아닌 위치에 센서3을 추가함으로써 또 하나의 쌍곡선을 얻을 수 있고 두 쌍곡선의 교점을 구함으로서 2차원 위치표정이 가능하다.

이를 수식으로 나타내면 입력 데이터는 3개의 센서에 도달한 hit 순서와 2개의 시간차 측정을 포함한다. 따라서

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta_3 - \theta_1)} \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta_2)} \quad (3)$$

이고 (2)와 (3)을 연립으로 풀면 두 쌍곡선의 교점에 해당하는 2차원 위치표정의 결과를 얻을 수 있다[5].

### 3. 클래딩 실험

#### 3.1. 음향방출시험 장치

음향방출시험에는 Digital Wave사의 FTM 4000을 사용하였으며 band-pass filter (100kHz-1MHz)를 사용하여 100kHz이하의 저주파수 성분과 1MHz이상의 고주파수 성분을 제거하였다. 센서에 탐지된 신호는 pre-amplifier에서 40dB를, FTM 4000에서 12dB를 증폭하였고 threshold voltage는 0.3 volt로 하였다.

#### 3.2. 시편의 준비

모재는 탄소함량 0.45%의 중탄소강인 SM45C로 두께 25mm의 판이 사용되었다. 클래딩에 사용된 재료는 Stody 105 서브머지드 아크 용접용 와이어( $\phi 3.2$ )이고 그 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Composition of Stody 105(wt%)

Element	C	Mn	Si	Fe	Cr	Mo	Other
Stody 105	0.2	2.0	1.3	Bal	2.8	0.4	<0.05

제작사에서 권고하는 예열온도는 150-260°C이지만 이 실험의 주목적이 균열의 탐지이므로 균열의 발생을 용이하게 하기 위해 예열을 생략하고 실험하였다.

### 3.3. 클래딩 실험

전압은 38V, 전류는 340A, 용접속도는 5mm/s로 하였다. Fig. 2는 시편의 크기와 클래딩부의 위치 그리고 센서의 배열을 나타내고 있다.

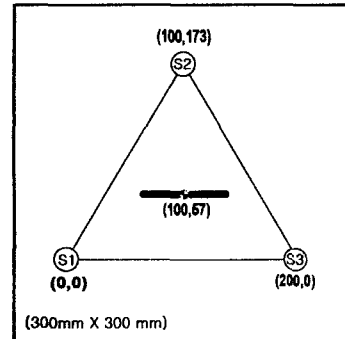


Fig. 2 A schematic of 2-D source location for cladding with three sensors

### 4. 실험결과

이상과 같이 클래딩을 실시하여 클래딩 중에 검출된 음향방출신호로 주파수 분석 및 위치표정을 실시하여 다수의 균열과 기공으로 추정되는 신호를 검출하였다. 그리고 그 결과로 Table 2와 같은 균열 및 기공을 주사전자현미경 관찰을 통하여 확인하였다.

Table 2. Location and time of discontinuities

Source	Time(s)	Predictied(mm)		Measured(mm)	
		X	Y	X	Y
기공	45	123	69	123	62
종균열	9	71	56	71	58
횡균열	61	43	47	44	48

#### 4.1. 기공의 검출

Fig. 3의 신호는 미세기공의 발생에 의한 것으로 추정되는 신호의 예이다. 이 신호는 균열의 신호보다는 진폭이 크고 복잡하며 주파수 분석의 결과도 250kHz의 성분이 매우 강하게 나타났으나 100-700kHz 주파수 대역의 성분도 넓게 분포하고 있다.

클래딩의 단부 근처에서는 클래딩이 종료되고 냉각되는 과정에서 다수의 기공들이 발생하였다. Table 2에 의하면 기공의 위치표정 결과는 다른 결합에 의한 것으로 추정되는 신호들과는 달리 다소 큰 오차가 발생하였다. 이는 다수의 기공이

모여 있지 않고 넓은 범위에 흩어져 있기 때문인 것으로 사료된다.

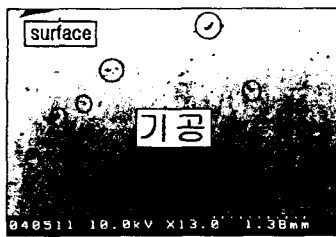
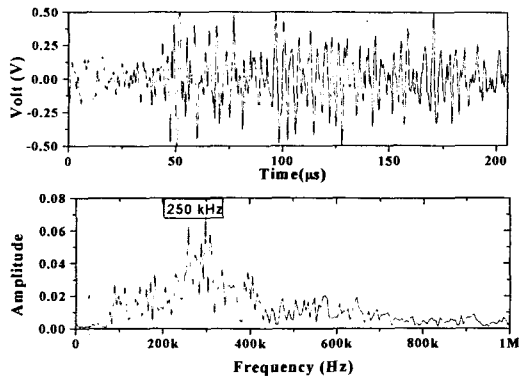


Fig. 3 AE signal, its FFT spectrum and SEM micrograph from porosity

#### 4.2. 종균열의 검출

Fig. 4의 신호는 균열에 의한 신호로 추정되는 신호의 예이다. 이 신호는 250kHz의 주파수 성분이 아주 강하게 나타나지만 120-450kHz의 주파수 범위 내에서 골고루 분포하고 있다. 이 시편에서는 Fig. 4의 균열 외에도 동일한 Y좌표의 위치에 5개의 균열을 발견하였고 이로 미루어 클래딩 방향으로 계속 연결된 종균열임을 알 수 있었으며, 또한 Table 2의 발생시간으로 미루어 고온균열임을 알 수 있다. Fig. 4의 주사전자현미경 단면사진에서처럼 종균열은 표면 바로 아래 존재한다.

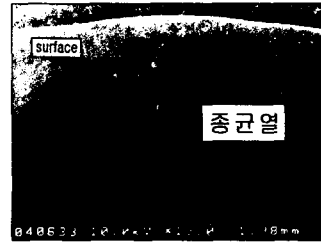
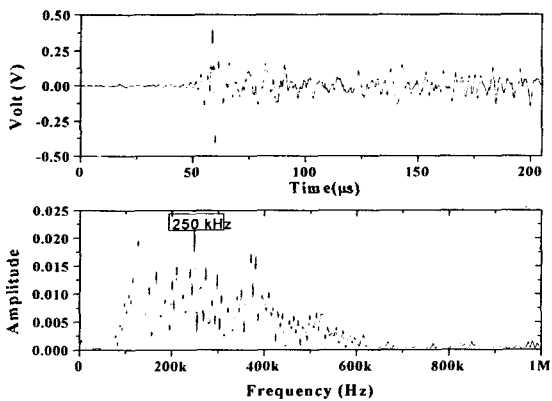


Fig. 4 AE signal, its FFT spectrum and SEM micrograph from longitudinal crack

#### 4.3. 횡균열의 검출

이 결합신호는 위의 신호와는 다른 시편으로서 overlap에 의한 영향을 알아보기 위해 3중으로 클래딩을 실시한 시편에서 검출되었다. 여기에서는 Fig. 5와 같은 신호가 검출되었고 이 신호는 250kHz부근의 중심 주파수를 갖고 있으며 150-300kHz의 비교적 좁은 범위의 주파수대에 분포하고 있다. 그리고 발생시간으로 미루어 클래딩이 종료되어 용접기와 아크에 의한 영향이 없을 때 발생하여 저온균열로 추정하였다.

액체침투탐상과 주사전자현미경 관찰을 통하여 Fig. 6과 같이 표면에 열려져 있는 횡균열을 검출하였다. 횡균열은 클래딩시에는 발생되지 않았으나 인접부위의 클래딩에 의한 재가열과 냉각에 의해 발생된 것이다.

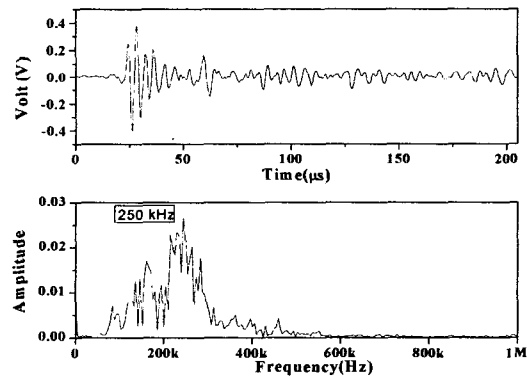
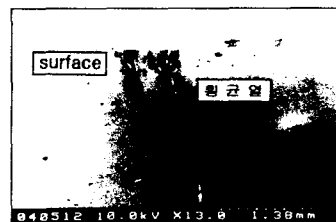


Fig. 5 AE signal and its FFT spectrum from transverse crack



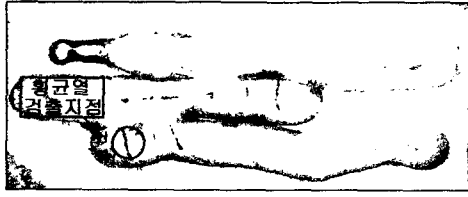


Fig. 6 Cross-sectional view and top view of transverse crack

#### 4.4. 잡음(Noise)의 제거

서브머지드아크 용접 시에 발생될 수 있는 잡음으로는 용접기 자체에 의한 잡음, arc-strike에 의한 잡음, 플럭스에 의한 잡음이 있다[6].

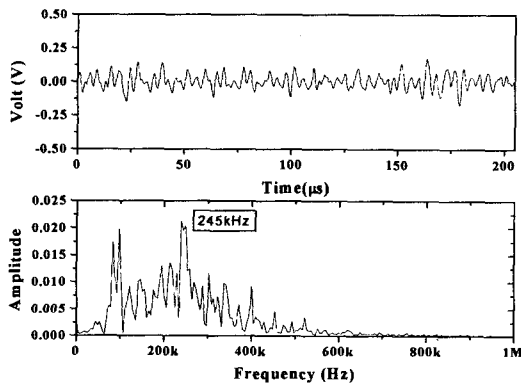


Fig. 7 Noise signal due to flux pouring and its FFT spectrum

Fig. 7은 순수하게 플럭스가 쏟아질 때 검출한 신호이며 이를 주파수 분석한 것이다. 이 신호는 연속형 신호이며 주성분이 250kHz부근에 있다. 비록 주파수 범위는 균열과 유사하지만 연속형 신호이므로 실제 균열등의 불연속에서 발생된 신호와 구별하는 것은 어렵지 않다.

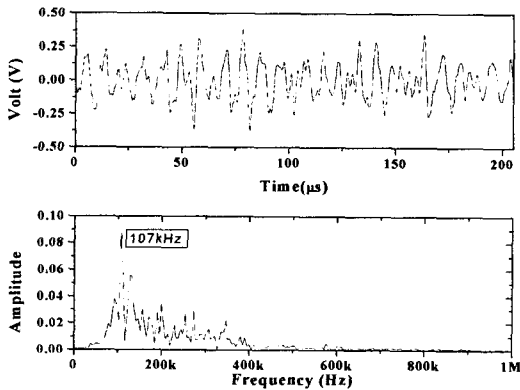


Fig. 8 Noise signal due to welding machine and its FFT spectrum

Fig. 8은 클래딩 시작 직전에 검출되었다. 이는 용접기의 고유한 잡음신호로 고려된다. 100kHz 이외의 주파수성분은 매우 작게 나타난다.

#### 5. 결론

기공으로 추정되는 신호는 균열로 추정되는 신호와 달리 500kHz이상의 고주파수 성분을 가지고 있었고 신호의 형태도 균열의 신호보다는 복잡하였다. 그리고 종균열과 횡균열로 추정되는 신호도 그 형태는 유사하였지만 주파수 분석의 결과는 2차원 위치표정의 결과와 이를 뒷받침해주는 주사전자현미경 관찰 결과, 그리고 결함의 발생시점을 종합적으로 검토함으로써 결함의 종류를 판별할 수 있었다.

플럭스가 쏟아질 때 발생하는 잡음과 용접기 고유의 잡음에 의해 발생하는 신호는 연속형 신호이므로 균열, 기공과 같은 불연속에서 발생하는 신호와는 잘 구별할 수 있었다.

이상과 같이 기공, 종균열, 횡균열에 대한 특성을 파악하여 음향방출 시험법에 의한 클래딩 또는 용접부의 실시간 품질감사가 가능함을 입증하였으며, 어떠한 품질감시 방법보다 가장 신속하게 불연속을 감지할 수 있으므로 이를 생산공정의 개선에 적극적으로 활용한다면 클래딩 또는 용접부의 품질감시를 위한 효과적인 방법이 될 것이다.

#### 6. 참고문헌

1. D. W. Morgan, Welding Problems for Nondestructive Evaluation, Weld. Journal, 70-8 (1991), pp.30-35
2. 정희돈, 권영각, 장래웅, 용접부검사방법으로서의 Acoustic Emission, 대한용접학회지, 11-2 (1993), pp.1-2
3. Oh-Yang Kwon, Kanji Ono, Kishihara and K. Yamada, Monitoring of Submerged-Arc Welding by Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission IV, The Japanese Society for NDI, (1988), pp.114-120
4. ASNT, Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed, Vol. 5, (1987), pp.287-288
5. ASNT, Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed, Vol. 5, (1987), pp.145-147
6. R. V. Willams, Acoustic Emission, (1980), pp.72-74