연구논문

웨이브렛 변환을 이용한 전자빔 용접 진단

윤 충 섭*

*한발대학교 생산가공전공

Electron Beam Welding Diagnosis Using Wavelet Transform

Choong Sup Yoon*

*Dept. of Welding and Production, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

Abstract

Wavelet transform analysis results show a spectrum energy distribution of CWT along scale factors distinguish the partial, full and over penetration in a electron beam welding by analyzing the curve of spectrum energy at small scale, middle and large scale range, respectively. Two types of signals collected by Ion collector and x-ray sensors and analyzed. The acquired signals from sensors are very complicated since these signals are very closely related the dynamics of keyhole which interact the very high density energy with materials during welding. The results show the wavelet transform is more effective to diagnosis than Fourier Transform, further for the general welding defects which are not a periodic based, but a transient, non-stationary and time-varying phenomena.

* Corresponding author : csyoon@hanbat.ac.kr (Received May 10, 2003)

Key Words : Electron beam welding, FFT(fast fourier transform), Wavelet transform, DWT(discrete wavelet transform), CWT(continuous wavelet transform)

1. 서 론

전자빔 용접은 레이저와 같은 고 밀도 에너지원을 이용하여 용접을 하지만, 레이저에 비해 용접 깊이가 상당히 깊으며 열전자로 생성된 음극전자들은 가속전압에 의해 운동에너지를 가진다. 이 운동에너지를 보존하기 위하여 공기로부터 차폐를 시키는 부가적인 장치를 제거하고는 모든 면에서 우수한 용접방법이다.

전자빔 용접은 재현성이 정확하고 용접속도가 빨라, 산업 고도화를 추구하는 방위산업, 원자력, 우주항공, 반도체 분야 등에 널리 활용되어 왔으며, 그 범위는 자동차, 정밀기계분야로 확대되어 가고 있다. 특히, 다른 용접에 비해 용접 가능 금속 범위가 넓어, 자성물체, 비자성금속, 고 융점 금속, 산화되기 쉬운 금속, 이종 재질 용접 등이 가능하다. 이러한 폭넓은 적용범위와 용접의 재현성으로 용접자동화 연구가 활발히 진행되고 있다.

자동화는 용접 중에 발생하는 신호들에 바탕을 두고 있다. 이러한 신호들은 특히 용접 대상물과 에너지원의 상호작용으로 매우 복잡한 현상을 나타낸다. 전자빔 용접의 메커니즘은 재료의 용융, 키홀 거동, 응고의 반복과정을 거치는데, 검출되는 신호 중 비교적 일정한 주기를 가지는 신호는 주로 재료의 용융 및 응고 과정에서 발생하는 신호들이고, 반면 키홀 메커니즘에서 발생하는 신호는 매우 짧고 불규칙적이다.

신호해석의 목적은 신호 변환에 의해 임의의 신호로부터 관련 정보를 얻는데 있다. 이러한 변환의 대표적인 방법들로는 선형영역에서는 푸리에(fourier)이고 비선형에서는 카오스(chaos)가 있다. 반면 웨이브렛(wavelet)은 일시적(transient), 비 안정(non-stationary), 시변(time- varying)의 작은 파를 해석하기 위한 도구를 제공한다. 이러한 신호들의 특징은 시간적으로 에너지 집중을 가지며 진동을 한다는 점이고, 이는 신호의 크기가 양과 음의 방향으로 빠르게 수렴한다는 의미이다.

푸리에 변환은 시시각각으로 변화하는 신호들의 주파수 성분들을 관찰하는 데는 부적합 하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 단시간 푸리에 변환(STFT: Short Time Fourier Transform)을 비롯하여 여러 방법이 연구되어 왔다[1]. 그러나 단시간 푸리에 변환은 신호를 일정한 크기의 해석 윈도우를 사용하여 윈도우의 크기에 따라 결정되는 극히 제한된 범위에 대한 정보만을 제공하고, 빠른 과도현상이 일어나는 신호에 대해서는 정확한 분석이 이루어지기 어렵다.

반면, 웨이브렛은 가변적인 윈도우를 사용하기 때문에 연속적으로 발생하는 신호 중 시간대역이 짧고 불규칙한 신호(주파수 영역에서 작은 리플형태로 표시)들은 선형신호처리에서는 잡음으로 처리될 수도 있지만, 시간변동을 고려한 웨이브렛에서는 의미 있는 정보들을 추출할 수도 있는 특성을 가지고 있다. 이는 시간과 주파수 영역에서 변동 크기를 갖는 기저함수를 이용하여 확대 축소할 수 있기 때문이다. 이러한 방법은 최근 디지털 신호처리 기법의 발전에 힘입어 신호의 주파수 성분들을 시간 축 상에 전개할 수 있어 시간 경과에 따른 주파수의 변화를 표시할 수 있다.

본 연구에서는 부분용입, 완전용입 및 과용입에 대해 웨이브렛 변환을 적용하여, 연속적으로 발생하는 신호 중 아주 불규칙적이며 시간 대역이 짧은 신호들로부터 의미 있는 정보들을 추출하여 이들의 상태를 구별할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환

연속 웨이브렛 변환이란 기저함수를 이용해서 분석하고자 하는 시간 영역의 신호 $x(t)$를 분할하는 과정을 말하며, 이때 사용하는 기저함수는 스케일 함수 $\phi(t)$와 웨이브렛 함수 $\Psi(t)$로 나눌 수 있다. 스케일 a와 시간b에 대응하는 웨이브렛은 다음과 같이 주어진다[2].

$$\Psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\quad a,\ b\in R,\ a\neq 0 \qquad (1)$$

여기서, a와 b는 각각 확장과 천이 변수, R은 실수, $1/\sqrt{a}$는 에너지 평균화(energy normalization)를 위한 항이고, $\Psi(t)$는 아래와 같은 성질을 가지고 있다.

$$\lim_{t\to\infty}|\Psi(t)|=0,\qquad \int_{-\infty}^{\infty}\Psi(t)\,dt=0 \qquad (2)$$

첫 번째 성질로는 웨이브렛 변환은 시간영역에서의 분해능을 높다. 두 번째로는 웨이브렛 함수는 주파수 영역에서 대역필터 성질을 가지고 있다. 위와 같은 성질의 웨이브렛은 a가 작아질수록 $\Psi(t)$는 수축되므로 신호의 고주파성분을 찾아내고, a가 커지면 $\Psi(t)$는 확장되어 신호의 저주파 성분을 분석하는데 사용된다. b을 시간 횡축, a을 종축으로 설정하고 웨이브렛 변화의 크기(스케일 및 천이된 마더(mother) 웨이브렛과의 유사성 정도, 즉 교차 상관관계(cross correlation))를 높이 축으로 표시하면 해석하고자 하는 신호를 시간-주파수 공간으로 매핑(mapping) ($L^2(R)\rightarrow L^2(R^2)$) 할 수 있다. 이러한 연속 웨이브렛 변환은 다음과 같이 기술된다.

$$W_f(a,b)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\cdot\Psi^{*}_{a,b}(t)\,dt \qquad (3)$$

여기서 *는 공액 복소수를 의미한다. 마더 웨이브렛의 형태는 Morlet, Harr, Shannon, Meyer와 Daubechies 등 만들어낸 사람들에 따라 다양하며, 각각의 마더 웨이브렛이 가지고 있는 신호분해의 특징과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를 수 있다[3-5].

연속 웨이브렛 변환에서 사용되어진 a와 b를 2의 누승이 되는 스케일을 사용하여 표현하면 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform, DWT)가 된다. $a=2^j$, $b=2^jk$, (j, $k\in R$)인 직교 웨이브렛은 아래와 같이 구성할 수 있다

$$\Psi_{j,k}=2^{-j/2}\Psi(2^{-j}t-k) \qquad (4)$$

DWT는 다음과 같이 정의된다.

$$W_f(j,k)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\Psi^{*}_{j,k}(t)\,dt \qquad (5)$$

이산 웨이브렛 변환은 연속 웨이브렛 변환에 비해 a의 변화에 따라 신호의 수가 반감하는데, 그에 따라 연산수가 감소한다. 직교 웨이브렛 함수는 신호의 저주파 성분 통과 필터 (discrete low pass filter)와 이산 고주파 성분 통과 필터(discrete high pass filter)로 구성되어 있어서 신호의 미세한 특성을 분석하는데는 고주파 필터가 사용되고(상세영역: detail), 신호의 전체적인 특징을 분석하는데는 저주파 필터가 사용되어(근사영역: approximation) 신호가 A1, D1으로 분할된다. 분할되고 반감된 신호 A1은 다시 A2와 D2로 분해하는 과정을 반복하면서 그 수는 계속 반감이 된다. 이러한 다 해상도 분석은 현재 여러 분야에서 적용되고

있으며, 다시 분해된 신호들은 직교성을 이용하여 다시 복원시킬 수 있다.

3. 키홀에서의 동적 현상 및 신호

Fig. 1은 전자빔 용접기의 원리를 보여준다. 음극에서 방출된 열전자는 음극 앞에는 전자구름을 형성하고, 양극과 음극사이에 높은 전압(가속전압)을 걸어주면 전자는 음극을 떠난다. 이 전압을 증가시키면 음극을 떠나는 전자속도는 빛 속도의 0.6배까지 가속시킬 수 있고, 전자의 양은 제어 전극에서 조절된다. 가속된 고밀도 전자들은 서로의 공간 전하력(Coulomb 척력)때문에 발산하여 비행거리와 함께 급속하게 확대된다. 확산된 전자의 운동에너지는 에너지 밀도가 작아 용접을 할 수 없게 된다. 발산된 전자빔을 수렴시킬 전자력으로는 자기렌즈의 일종인 집속(focus) 코일이 사용된다. 집속 코일에 의해 빔 에너지 밀도를 자유롭고 급속히 제어되는 것이 가능하게 되어 $10^9 W/cm^2$ 이상의 대단히 높은 에너지 밀도를 얻을 수가 있다[6,7].

매우 높은 속도 및 높은 밀도를 가지고 운동을 하는 전자들이 용접물에 충돌할 때, 전자빔 운동에너지는 복잡한 형태로 변화한다. 대부분의 에너지는 용접물의 온도를 높이는데 사용되는데, 집속된 전자빔의 단위 면적당 에너지는 현재 알려진 모든 금속의 융점보다 상당히 높아서 금속은 액체 상태의 중간과정을 생략하고, 키홀(keyhole)이라는 것을 형성하면서 기화 상태로 변화한다. 팽창된 금속증기는 키홀 형태를 유지하고 금속증기를 분출시키는데 이러한 금속증기의 분출은 매우 불규칙적으로 일어나서 키홀 형상에 영향을 주기도 하고 용접 결과에도 영향을 미친다.

분출된 금속증기는 용접물 표면 위에 금속증기(metal vapor) 구름층을 형성하고, 형성된 구름층은 전자빔 에너지를 흡수하여 플라즈마 상태로 변화되면서 사방으로 흩어지게 되는데, 이때 흡수된 에너지는 키홀에 전달되지 않는다. 고밀도 전자빔 에너지에 의해 키홀 생성, 금속증기 분출, 금속증기 구름층의 형성, 플라즈마 상태로의 변화 및 소멸 과정이 용접과정에서 반복된다. 그리고 키홀 주변에는 열전도에 의해 금속이 용융상태로 변화하고 응고한다.

위와 같이 전자빔 용접의 이론 및 실제에서 가장 근본적인 문제는 전자빔과 용접대상물의 상호작용에 의한 재료의 용융, 키홀 거동 및 응고현상이다. 이 키홀의 동적 및 정적인 성질을 규명하기 위하여 여러 가지 모델이 제시되었다. 참고문헌[8]에서는 키홀의 동적 거동을 키홀 벽의 기하학적 변화에 따른 열 동역학적 변화로 보고 접근하였다. Fig. 2[9]는 강재의 시편에 대하여 용접중 전자빔 파워를 단락한 후, 절단하여 얻은 시편 단면을 기초로 하여 얻은 그림이다. 여기서 점선은 평형상태 프로파일(profile)을 나타내는데, 용접속도와 재질에 따라 달라진다. 용융금속의 요동으로 점선보다 경사각도가 작은 곳에서 국부적으로 더 많은 단위 면적당 전자빔의 운동에너지를 받아, 높은 비율로 금속 증기를 방출하게 되어 주변을 방해한다. 이 부분을 프로젝션(projection)이라고 부른다. 반면에 국부적으로 고압의 금속 증기를 받는 부분, 즉 그 영향을 받는 곳을 디프레션(depression)이라고 부른다.

키홀의 깊이가 클수록 프로젝션과 디프레션의 개수는 증가하고 이들은 용융 층에서 외란으로 작용한다. 이처럼 금속증기의 발생은 키홀(keyhole)의 유동운동, 반력 및 동적 압력에 의해 좌우되는데 이는 용접현상에 매우 밀접한 관계가 있어 안정된 키홀을 얻는 것이 무엇보다 중요하다. 가령 후판을 용접할 경우 빔을 진동시키는 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 용접 결함을

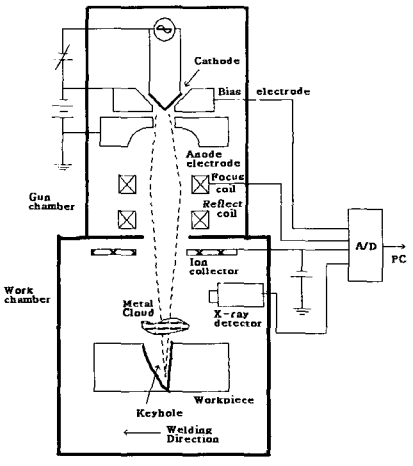


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

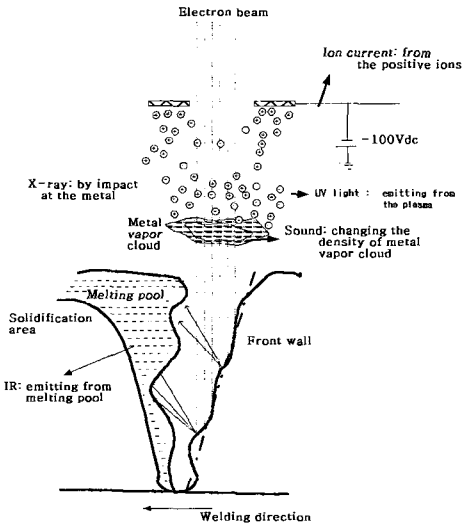


Fig. 2 The profile of the keyhole

줄일 수 있다[9-13].

전자빔과 용접물과의 상호작용으로 발생하는 현상은 다음과 같다. 첫 번째로 되 분산(back scattering) 효과에 의해 전자의 발생, 두 번째로 전자들이 금속과 충돌할 때 금속격자로부터 발생하는 x-선이 있다. 이 x-선은 일차전자들이 감속할 때 증가한다. x-선은 용접현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 세 번째로 금속증기로부터 발생하는 이온화 상태이다. 다음으로 빛이 발생하는데 플라즈마에서는 주로 자외선을 포함한 가시영역대와, 금속 용융에 의한 적외선 영역대이다. 그 외에도 열복사(heat radiation)와 음파 등이 있다.

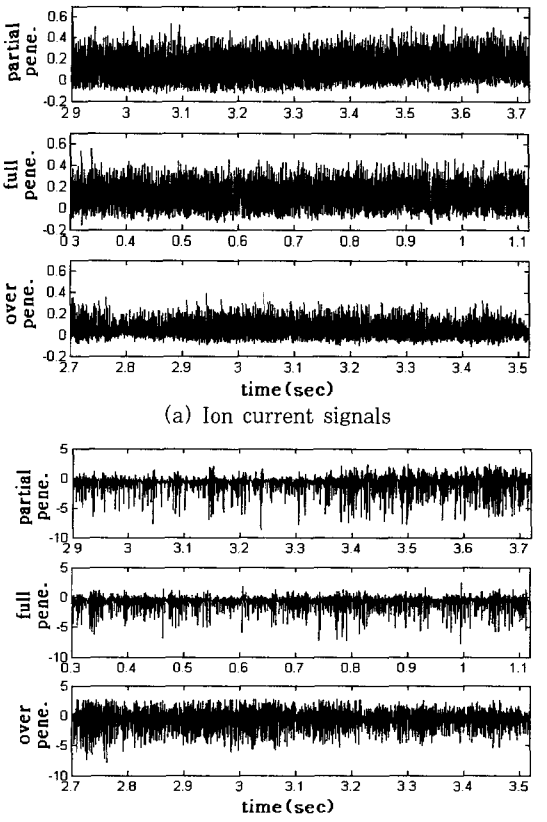
특히 이온전류는 키홀 거동과 밀접한 관계가 있어, 키홀의 거동을 실시간 관찰할 수 있다. 가령 플라즈마의 이온 전류가 빠른 속도로 진동을 하면, 전자빔과 용접 대상물간에 상호작용이 활발하여 키홀의 형성이 잘 되는 것을 의미한다[9].

4. 실험장치 및 신호해석

본 실험에 사용된 전자빔 장치는 상업용으로 60kV의 가속전압과 100mA의 전자빔 전류로 최대 6kW의 출력을 낼 수 있다. 두 종류의 센서가 사용되었는데 이온전류를 검출하기 위하여 디스크 형태의 강판을 만들어 전자총 실(gun chamber)에 전기적으로 격리시켜 설치하였다(Fig. 1). 이온전류를 검출하기 위하여 이온수집판(ion collector)에는 -80V_{dc}의 정전압을 외부로부터 이온 수집판에 전압을 걸고 공급되는 전류의 양으로 측정하였다. 반면 x-선 검출은 기존 검출장치(survey meter)를 작업실에 설치하여 신호를 검출하였다. 이외에도 전자빔 전류 및 집속코일 전류를 측정하기 위하여 전자빔 장치에 직접 연결하여 신호를 획득하였다[14].

부분용입(partial penetration)와 완전용입(partial penetration) 및 과용입(partial penetration)의 용접상태를 얻기 위해 시편의 두께를 각각 15mm, 10mm, 5mm로 하였고, 전자빔 전류는 40mA로 모두 일정하게 설정하였다. 신호 획득 주기는 10kHz로 선정하였고, 용접속도 및 가속전압은 같은 조건으로 용접하였다. 사용된 재질은 알루미늄합금 A6061이다. Fig. 3은 이온센서와 x-선 센서에서 수집된 8192개의 ADC(analog digital converter) 신호를 시간영역으로 나타낸다. 수집된 신호로 인해 과용입 신호에서 크기만 제외하고는 부분용입, 완전용입 및 과용입을 서로 구별해낼 수 있는 특징을 찾는 것은 어렵다.

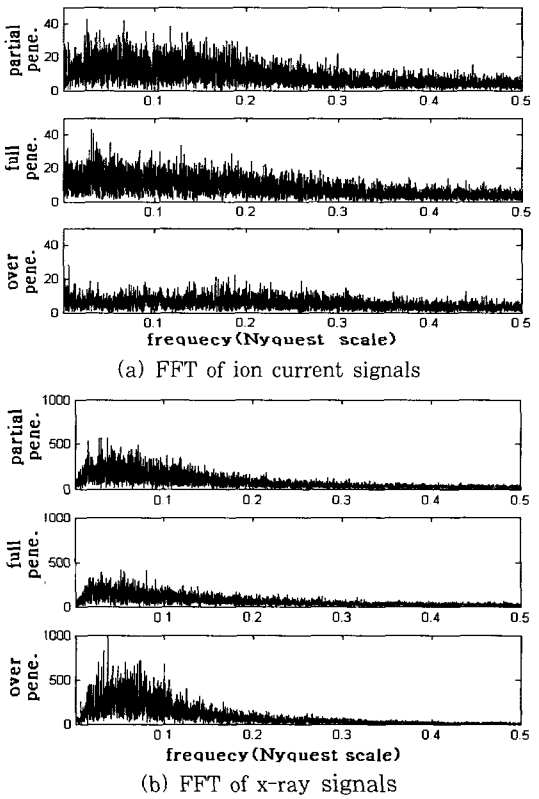
Fig. 4는 Fig. 3에 대한 FFT(Fast Fourier



(a) Ion current signals

(b) X-ray signals

Fig. 3 Ion current and x-ray signals in time space



(a) FFT of ion current signals

(b) FFT of x-ray signals

Fig. 4 Power Spectrum of ion current and x-ray in frequency domain

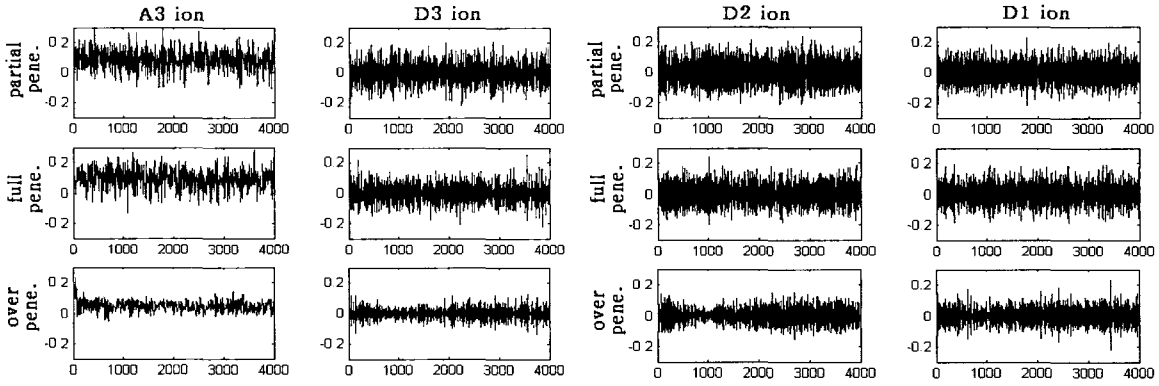
Transform)의 결과이다. 스펙트럼 분석은 가장 일반적으로 사용하는 신호 처리방법이지만 주파수 영역에서만 좋은 분해능을 갖는다. 그림과 같이 특정 피크 주파수 없이 작은 리플 성분으로 구성되어 있는 신호에서는 주파수 성분만을 관찰하는데 부적합하다. 키홀 거동은 리플 성분으로 대변하는 급격한 시변변화를 일으키는 것으로 알 수 있다. 빠르게 변화하는 부분에서는 시간의 해상도를 높이고 느리게 변화하는 부분에서는 주파수의 해상도를 높이고자 하는 방법이 웨이브렛 변화이다. 이는 시간과 주파수의 공간에서 표시될 수 있어 보다 많은 정보를 추축할 수 있다. 이를 용접상태를 진단하기 위하여 적용하였다.

Fig. 3, 4에서와 같이 본 실험 데이터는 신호의 크기가 작고, 빠른 감쇠와 짧은 지연특성, 또한 진동하는 형태의 신호이므로, 적용된 이산 웨이브렛 변환(DWT)으로는 다우비치(Daubechies, db4)이며 3레벨까지 분석하였다(Fig. 5). 그림에서 알 수 있듯이 이온 신호의 근사영역인 저주파 성분 A3와 세부영역인 고주파 성분을 D3(상대적으로 D2보다는 저주파), D2, D1들을 보면 서로를 구분할 수 있는 특성을 규명하기가 어렵다. 가령 이온전류의 D1의 경우는 원래 신호의 저주파 신호를 제거한 신호이므로 교류성분만이 나타나는데, 크기나 주기성은 비슷하다. A3의 경우는 공통적으로 크기 0.1의 직류 성분에 매우 낮은 주기성을 가지고 있고, 과용입에 있어서 크기가 차이가 있을 뿐, 그 외의 특성을 찾아내는 것은 어렵다. 반면 x-선의 경우, 과용입은 다른 용입들과 그 크기에서 구별이 가능하다. 그러나 과용입과 완전용입의 신호는 매우 유사하다.

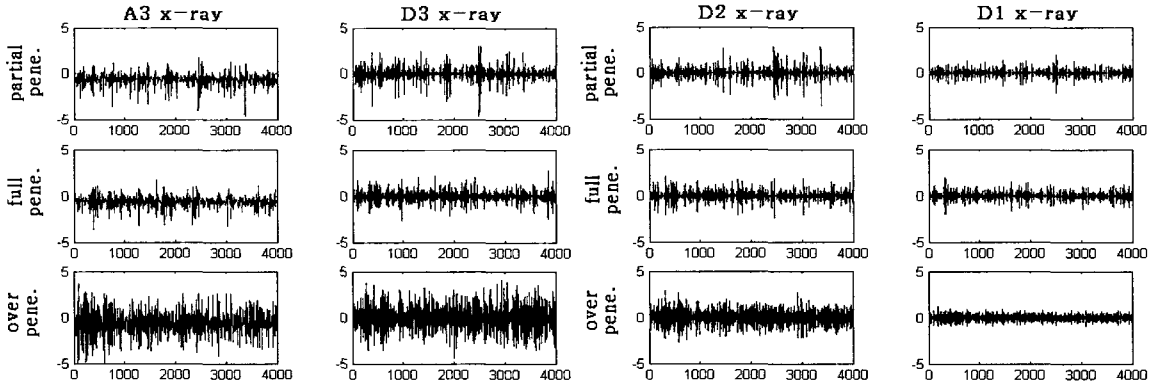
본 논문에서는 각 스케일에 대한 웨이브 스펙트럼을 제시하여 전체 에너지 경향을 비교함으로써 결함의 진단방법을 보여주고자 한다. Fig 6.에서는 연속 웨이브렛 변화에 의한 스펙트럼의 크기를 10계단 등고선으로 보여준다. 이에 대한 식은 아래와 같다.

$$W(a) = |W(a, n)|^2 \tag{6}$$

a는 스케일값, n은 시간 축을 따른 이동을 나타내며, $W_f(a, n)$은 연속 웨이브렛 변환의 결과이다. 과용입일때 이온의 변화는 다른 조건에 비하여 현격한 변화를 보임을 알 수 있지만 부분용입과 완전용입의 경우는 스케일 계수가 낮을 때(고주파)보다는 스케일 계수가 올라 갈수록 분포도에 약간의 차이를 볼 수가 있다. 반면 X-ray의 경우는 과용입의 경우는 스케일 계수가 낮

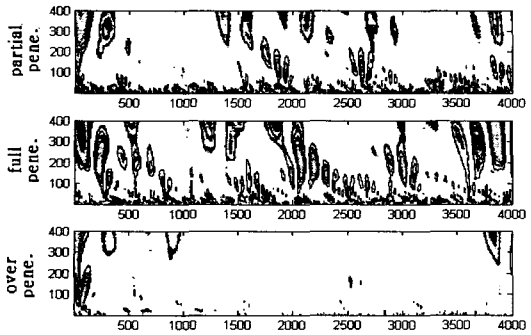


(a) Wavelet decomposition at level 3 of ion current signals

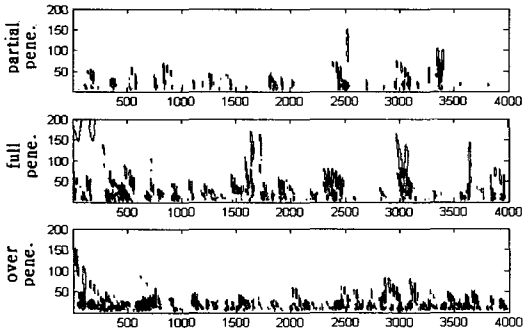


(b) Wavelet decomposition at level 3 of x-ray signals

Fig. 5 The results of DWT at level 3(A3, D3, D2, D1)

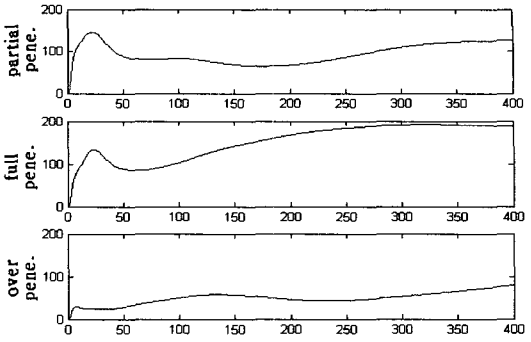


(a) Ion current signals

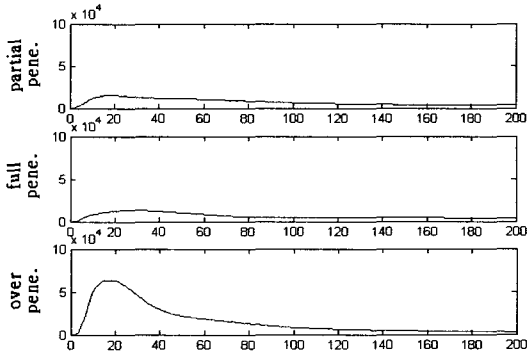


(b) X-ray signals

Fig. 6 Contour lines of CWT power spectrum



(a) Ion current signals



(b) X-ray signals

Fig. 7 Energy distribution

은 곳에서 많은 활동을 보여주는 반면 과용입과 완전용입 차이를 구별하는데 무리가 있다.

식(6)과 달리, 각 스케일에 대한 스펙트럼의 합으로 기술하면 아래와 같다.

$$W(a) = \sum_{n=1}^{N} |W(a, n)|^2 \qquad (7)$$

여기서 N은 획득된 신호의 개수이다. 식(6)은 시간과 스케일(주파수) 변화에 따른 신호의 에너지 분포를 나타내는 반면, 식(7)은 스케일 변화에 따른 에너지 분포를 나타내는 것으로 에너지가 어떻게 분포되어 있는지를 알 수 있다(Fig. 7).

Fig. 7에서 이온의 경우, 특징을 크게 세 가지로 나눌 수 있다. x축 스케일이 작은 영역(0~50), 중간 영역(50~200), 큰 영역(200~)이다. 스케일이 작은 영역에서는 부분용입이나 완전용입 경우 비슷한 양상을 보이고, 과용입의 경우는 이온의 거동이 활발하지 않다. 중간영역에서 스펙트럼 에너지는 완전용입의 경우 계속적으로 증가하고 이 증가세가 큰 영역으로 이어가고 있으며, 반면 부분용입의 경우 낮은 경사를 가지고 계속적으로 감소하며 스케일이 큰 영역 시작점부터는 점차적으로 증가 추세를 보이고 있다. 또한 부분용입과 완전용입은 중간영역 및 큰 영역에서 크기 차이를 확연히 구분할 수 있다. 금속 표면에서 발생하는 이온의 주기는 빠른 성분을 주로 이루고 키홀 안에서의 동적 특성인 프로젝션 및 디프레션의 생성/소멸 속도는 키홀 위에서 형성되는 금속증기의 주기보다 낮아 스케일이 중간 영역 및 큰 영역에서 잘 나타난다고 보여진다. 키홀이 발달될수록 매우 복잡한 형태의 신호를 획득할 수 있는데, 이는 많은 프로젝션과 디프레션이 키홀에 발생하였다는 것을 보여준다[9]. 과용입의 경우 모든 영역에서 두 경우와 전혀 다른 양상을 보이는 이유는 시편 이면의 분출에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

X-ray의 경우는 과용입 경우만 스케일이 낮은 영역에서 다른 경우와 구별이 되며, 그 외의 영역에서는 그 차이점을 찾기가 어렵다. 이는 센서로서 이온보다는 그 적합성이 낮다고 볼 수 있다.

5. 결 론

웨이브렛 변화를 이용한 전자빔 용접 진단방법의 가능성을 제시하였다. 부분, 완전, 과용입에 대한 진단방법으로 국한하였지만, 용접시 발생하는 다양한 결함은 주기적인 변화보다는 일시적, 비 안정성 또는 시변 변화에 특성을 가지고 있어 웨이브렛 변화에 의한 결함진단의 가능성을 보여주었다. 또한 스케일에 따른 스펙트

럼 에너지 진단방법은 기존의 주파수분석보다 간단하면서도 직관적으로 관찰할 수 있다.

참 고 문 헌

1. L. Cohen: Time-Frequency Analysis, Prentice-Hall (1995).
2. S.-H. Lee, D.-H. Yoon : Introduction to the Wavelet Transform, Jinhan Book Inc., (2002) (in Korean)
3. S.-H. Park : 생체 신호 처리 및 응용, Adtec(1999)(in Korean)
4. Yves Meyer : Wavelets Algorithms & Application, SIAM(1993).
5. Michel Misiti and etc : Wavelet Toolbox User's Guide for Use with MATLAB(2002).
6. S. Schiller and etc., : Electron Beam Technology, John Wiley and Sons(1982).
7. H. Schultz : Electron Beam Welding, Abington Publishing(1983).
8. J. Mesquita, H. Gouveia and Pinto : An Integrated Model for Keyhole and Temperature Calculation in Electron Beam Welding, Second European Conference on Joining Technology(1994), 777-787.
9. G.I. Leskov and V.M. Nesterenkov : Plasma Flows and Thermal and Hydrodynamic Processes in the Vapour Gas Channel in the Electron-Beam Welding of Metals, Automation Welding, **6**(1978), 20-23.
10. V.M. Nesterenkov : The Effect of Oscillations of the Electron Beam on the Nature and Intensity of Plasma Flows in the Vapour-Dynamic Channel, Automation Welding, **8**(1978), 39-40.
11. G.I. Leskov, V.M. Nesterenkov and L.I. Zhivaga : Currents of Plasma During the Electron-Beam Welding of Plate Steel Structures, Automation Welding, **4**(1980), 16-19.
12. K.O. Mauer : Relationship Between Secondary Electron Current Pulsation Frequency and Current in the Work During Electron Beam Welding and Geometry of the Weld, Automation Welding, **3**(1982), 47-49.
13. V.M. Nesterenkov : Effects of Geometries of Electron-Beam Welding on Ionic Current Parameters, Automation Welding, **3**(1982), 28-30.
14. C.S. Yoon : On-line Monitoring using SVD in a Electron Beam Welding, Journal of KWS, **18-1** (2002) 97-103 (in Korean)