

전자빔 용접에서 SVD를 이용한 온라인 모니터링

윤 충 섭*

*대전산업대학교 제어계측공학과

On-line Monitoring Using SVD in a Electron Beam Welding

Choong Sup Yoon*

*Dept. of Control and Instrumentation, Taejon National University of Technology, Taejon 305-320, Korea

Abstract

Time series analysis results show the SVD is a candidate of on-line monitoring of welding penetration when the covariance matrix of a full penetration is used as a mapping function. As the reconstructed embedding vectors from the chaotic scalar time series are manipulated by the covariance matrix, the mapped time series lie on a hyper-ellipsoid which the lengths of semi-axes are the squared eigenvalues of the covariance matrix in the case of full penetration. These visualize by two dimensional stroboscope views. The other cases like partial penetration, are different in the sense of sizes and shapes. Here we test two types of time series: the ion current and the X-ray. The ion current is better than the X-ray as an on-line monitoring signal, because the difference of the eigenvalue spectrum of the ion (between the pull penetration and partial penetration) is bigger than those of the X-ray

(Received October 19, 1999)

Key Words : SVD(Singular value decomposition), Ion, X-ray, Time series

1. 서 론

전자빔은 레이저와 같은 차수의 고밀도 에너지원 (10^7W/cm^2)을 이용하여 용접을 하지만 레이저 용접에 비해 고출력의 특성을 가지고 있어 300mm의 극후판 강재의 용접에서 0.1mm 극박판 부품 용접까지 가능하다. 또한 용접 재현성이 정확하고 용접속도가 빨라 넓은 범위로 사용되고 있는 필수적인 생산기술이다. 특히 다른 용접에 비해 용접 가능 금속범위가 넓어, 자성물질(탈자후 용접), 비자성 금속(Al, SUS 등), 고용점금속(Ta, Mo, W 등), 산화되기 쉬운 금속(Ti, Zr 등), 이종재질 용접 등이 가능하다. 이러한 특징으로 인하여 방위산업, 원자력, 우주항공 분야에 널리 활용되어 왔으며, 그 범위는 자동차, 정밀기계 분야에까지 점차 확대되어 가고 있다. 단점으로는 진공

상태에서 수행하는 용접법이고, 제살용접으로 인하여 이음부분이 정밀하게 가공되어야 하고, 용접중에 X-ray가 발생하기 때문에 차폐장치를 설치한다는 점이다. 이 때문에 다른 용접에 비해 가격이 비싸다.

산업고도화를 추구하는 국내산업에서 전자빔용접 적용은 확대되어 가고있다. 본 연구에서는 용접의 상태를 온라인으로 모니터링 할 수 있는 방법에 대하여 연구하고자 한다. 용접 상태의 대상은 완전용입과 부분용접으로 하였다. 2장에서는 전자빔의 원리, 전자빔 용접의 메카니즘이 되는 킥홀 거동 및 전자빔 용접시 획득할 수 있는 신호를 기술하였다. 신호들 중 이온전류 및 X-ray 신호를 획득하여 3장에서는 신호해석을 하였다. 여기에 적용된 신호해석은 주로 비선형의 현상을 선형으로 근사화시키기 위한 통계적 처리 기법들이 사용되었는데, 이러한 방법들은 비선형성이 가지고 있는 풍부한 동적 현상을 관찰하기에는 한계가 있고,

정량적 특징을 추출하기 어렵다는 점이다. 4장에서는 카오스를 이용한 비선형 시계열 신호분석(nonlinear time series analysis)을 통하여 온라인 모니터링 기법을 소개하고자 한다.

2. 키홀에서의 동적 현상 및 신호

Fig. 1은 전자빔 용접기의 원리는 보여준다. 음극에서 방출된 전자는 음극 앞에는 전자 구름을 형성하는데, 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 조절한다. 고출력, 고밀도 전자빔은 전자집단에 의해 큰 공간전하력(Coulomb 척력)때문에 발산하여 비행거리와 함께 급속하게 확대되며, 그 에너지 밀도는 작아져서 용접에는 도움이 되지 않는다. 이 공간 전하력을 이겨내고 수렴시킬 전자력으로는 자기렌즈의 일종인 집속(focus) 코일이 사용된다. 집속코일에 의해 빔 에너지 밀도는 자유롭고 급속히 제어되는 것이 가능하게 되어 10^9 W/cm^2 이상의 대단히 높은 에너지 밀도를 얻을 수가 있다^{1,2)}.

매우 높은 속도 및 높은 밀도를 가지고 운동을 하는 전자빔이 용접물에 충돌할 때, 전자빔 운동에너지는 복잡한 형태로 변화한다. 이 대부분은 용접물 온도를 높이는데 사용되는데, 집속된 전자빔의 단위 면적당

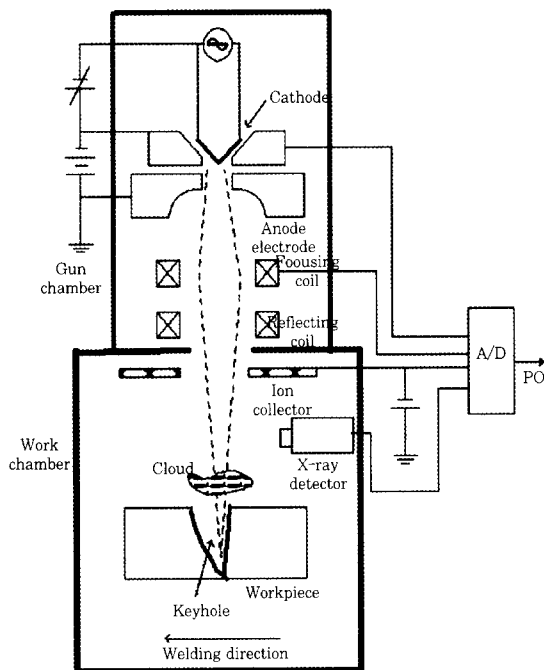


Fig. 1 Experimental setup

에너지는 현재 알려진 모든 금속의 용점보다 상당히 높아서 금속은 액체 상태의 중간과정을 생략하고, 키홀(keyhole)이라는 것을 형성하면서 기화 상태로 변화한다. 이로서 팽창된 금속증기는 키홀 형태를 유지하고 금속증기를 분출시키는데 작용된다. 이러한 금속증기의 증발은 매우 불규칙적으로 일어나서 키홀 형상에 영향을 주기도 하고 용접 결과에도 영향을 미친다. 분출된 금속증기는 용접물 표면 위에 금속증기(metal vapor) 구름층을 형성하고, 직접적으로 전자빔 에너지를 흡수하여 플라즈마 상태로 변화되면서 사방으로 흩어지게된다. 그 결과 전자총에서 출발한 전자빔은 어떠한 방해도 받지 않고 용접물에 도달한다. 또한 키홀에서 전자빔 에너지를 직접 받지 않는 부분에서는 열전도에 의해 금속이 용융상태로 변화하고 응고한다.

위와 같이 전자빔 용접의 이론 및 실제에서 가장 근본적인 문제는 전자빔과 용접대상물의 상호작용에 의한 재료의 용융, 키홀 거동, 응고이다. 이 키홀의 동적 및 정적인 성질을 규명하기 위하여 여러 가지 모델이 제시되었다. 그 중 키홀 모양을 원통형으로 보고, 키홀 깊이와 직경이 평형상태에서, 전자빔에 의해 액화된 금속 표면으로부터 외란이 발생하여 요동한다고 하여 동적인 특성을 과도 방정식을 이용하여 유도하였다³⁾. 참고문헌 4에서는 키홀 동적 거동을 키홀 벽의 기하학적 변화에 따른 열 동역학적 변화로 보고 접근하였다. Fig. 2는 강의 시편을 전자빔을 급속히 단속(shut off) 후, 절단하여 얻은 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 갯수는 증가하고 이들은 용융층에는 외란으로 작용한다. 이처럼 금속증기발생은 키홀(keyhole)의 유동운동, 반력, 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 줄일 수 있다⁵⁾.

전자빔과 용접물과 상호작용으로 발생하는 현상은

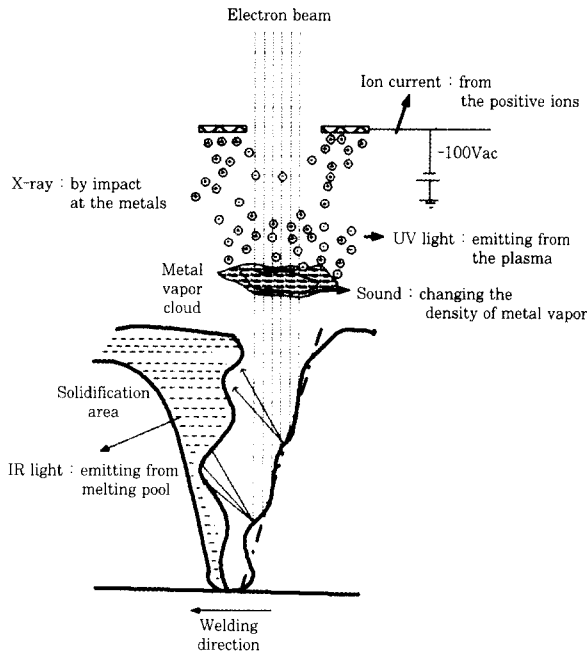


Fig. 2 The profile of the keyhole.

다음과 같다. 첫 번째로 뒤 분산(back scattering) 효과인데 다음과 같이 전자들이 발생하는 경우이다. (1) 전자들이 물체 표면에 충돌할 때 일부가 탄성 반발에 직접 반사되는 전자들과, 전자들이 내부로 전파할 때 운동에너지를 일부 손실하면서 반사되어 나오는 일차 전자(primary electrons), (2) 전자가 금속과 충돌할 때, 금속격자로부터 방출되는 이차전자(secondary electrons), (3) 열에 의한 전자의 방출(thermal electrons). 두 번째로 전자들이 금속과 충돌할 때 금속격자로부터 발생하는 X-선이 있다. 이 X-선은 일차 전자들이 감속할 때 증가한다. X-선은 용접 현상과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 세 번째로 금속 증기로부터 발생하는 이온화 상태(플라즈마)이다. 다음으로 빛이 발생하는데 플라즈마에서 발생하는 자외선 영역과 금속 용융에 의한 적외선이 있다. 그 외에도 열 복사(heat radiation), 음파 등이 있다.

특히 이온전류는 키홀 거동과 밀접한 관계가 있어, 키홀의 거동을 실시간 관찰할 수 있다. 가령 플라즈마의 이온 전류가 진동을 하면, 키홀의 평형상태에서 외란이 발생하여 불안정하다는 것을 의미한다. 이 교란되는 양이 커질수록, 용접에서 결함을 야기할 가능성은 매우 높다. 즉, 이온전류가 안정하도록 용접 변수를 설정하여야 한다. 이온전류의 교류성분, 직류성분의 변화의 특성으로 용접 결함의 형태를 추정할 수 있고^{6,7)}, 또한 이온전류의 양으로 용접침투의 양을 알아 볼 수가 있다⁸⁾. 이와 같이 이온전류의 크기 및 진동수를 측정함으로써 용접결함 및 용접조건을 찾을 수 있다.

3. 실험장치 및 신호해석

본 실험에 사용된 전자빔 장치는 상업용으로 60kV의 가속전압과 100mA의 전자빔 전류로 최대 6kW의 출력을 낼 수 있다. 두 종류의 센서가 사용되었는데 이온 전류를 검출하기 위하여 디스크 형태의 강판을 만들어 전자총 실(gun chamber)에 전기적으로 격리시켜 설치하였다(Fig. 1). 이온전류를 검출하기 위하여 이온 수집판(ion collector)에는 -80V_{dc}의 정전압을 외부로부터 이온 수집판에 전위차를 걸어 공급되는 전류의 양으로 측정한다. 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.

두 종류의 용접결과(완전 용입(full penetration)과 부분용입(partial penetration))를 얻기 위하여 시편의 두께와 전자빔 전류를 용접변수로 설정하였다. 부분용입의 경우는 5mm의 시편두께에 20mA의 전자빔 전류('C1')와 10mm의 두께에 30mA('C2')로 선정하였고, 완전용입의 경우 5mm 두께의 30mA 전자빔 전류('C3')를 용접 변수로 선정하여 신호를 획득하였다. 신호 획득 주기는 10kHz로 선정하였고, 용접속도 및 가속전압은 같은 조건으로 용접하였다. 사용된 재질은 알루미늄합금 A7051이다.

Fig. 3은 획득한 신호의 일부를 보여주고 있고, Fig. 4는 4096개의 데이터에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)이다. C1의 이온 전류의 경우, 10Hz의 주기적인 결과를 보여주고 있다. 낮은 전자빔 전류로 인하여 키홀의 깊이는 완전히 형성되지 않아 키홀에서 발생하는 금속증기 발생주기는 복잡하지 않다. 또한 형성된 금속증기는 표면 위에 구름층을 형성하면서 전자총에서 출발한 전자빔 에너지를 흡수하여

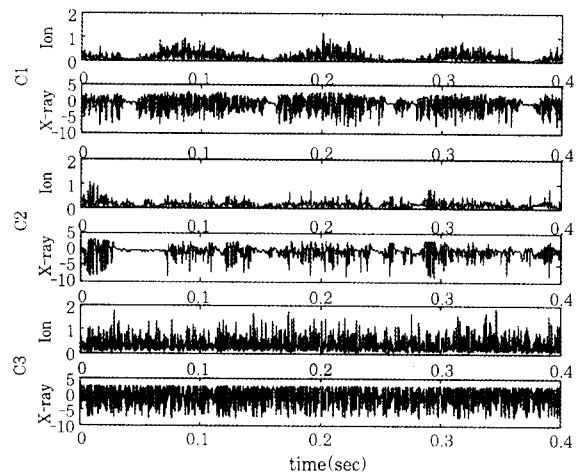


Fig. 3 Ion current and X-ray signal

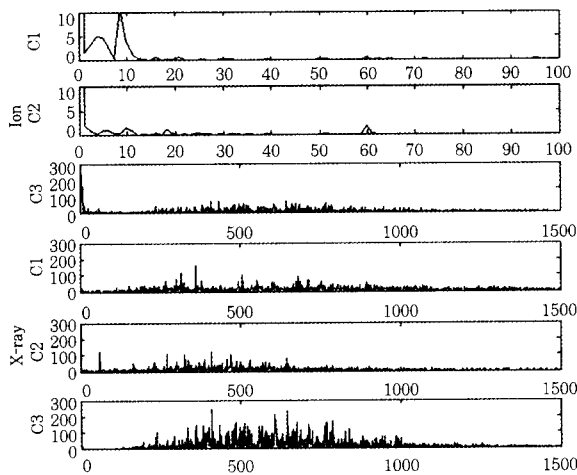


Fig. 4 Power spectrum

플라즈마 상태로 전환되면서 사방으로 흩어지게 된다. 이 동안 전자빔에너지는 시편에 전달되지 않아 키홀을 형성하지 못한다.

키홀이 발달될수록 매우 복잡한 형태의 신호를 획득할 수 있는데, 이는 많은 프로젝션과 디프레션이 키홀에 발생하였다는 것을 보여준다. 또한 많은 금속증기의 분출로 이온화 상태의 금속은 사방으로 흩어지는데 많은 부분이 전극차가 심한 전극으로 향한다. 또한 전자총 실의 진공도는 작업실보다 10^2 정도 높아 이온화 상태의 금속을 전자총 실로 이동시키는데 기여를 한다. 진공 펌프로 이온화된 금속을 충분히 배출시키지 못하면, 이온화 상태의 금속은 전극사이에 전기적으로 도통을 시키면서 아크가 발생(arc discharge)하여 순간적으로 많은 전류를 흐르게 한다. 이를 방지하기 위하여 전자빔 용접기는 전자총에 공급되는 전원을 순간적으로 차단시킨다. Fig. 5는 아크 방전 전부터 회복되기까지의 전자빔전류, 집속코일 전류, 이온전류 및 X-ray를 보여준다.

아크방전부터 원래상태로의 복귀는 1.5초가 소요되

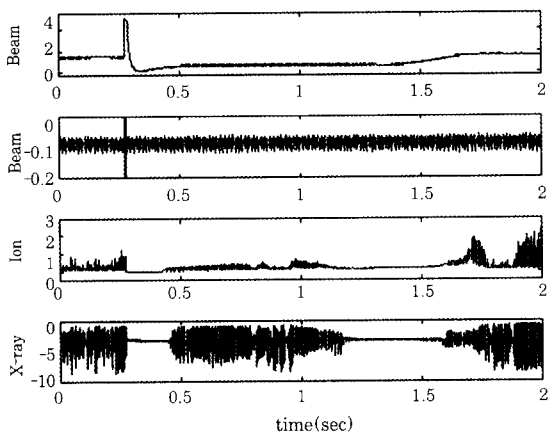


Fig. 5 The occurrence of arc-discharge

는데 이는 금속이 응고되는 시간보다 길어서 아크방전이 발생하는 부분은 용접이 되지 않는다. 이 시간은 전자빔 용접기 특성으로 전자총 전원 제어구조와 밀접한 관계가 있다. 진공관 방식의 전원장치는 이러한 단점을 보완할 수 있다.

이온전류와 X-ray 신호들의 시간 변동의 차이를 상호 상관관계함수(cross-correlation function)로 나타낼 수 있다. C3의 경우는 C1 및 C2에 비해 동일한 시간간격에 빨리 영에 접근한다(Fig. 6). 이는 C3의 변동이 급격하다는 것을 보여준다. 또한 두 신호의 선형성 의존량을 나타내는 상관계수(correlation coefficient)의 값은 C1의 경우 0.7930, C2는 0.5616, 그리고 C3은 0.4111이다. 키홀의 동적현상이 복잡할수록 상관계수의 값은 작아짐을 알 수 있는데, 이는 두 신호들의 통계적인 의존도가 작다는 것을 의미한다.

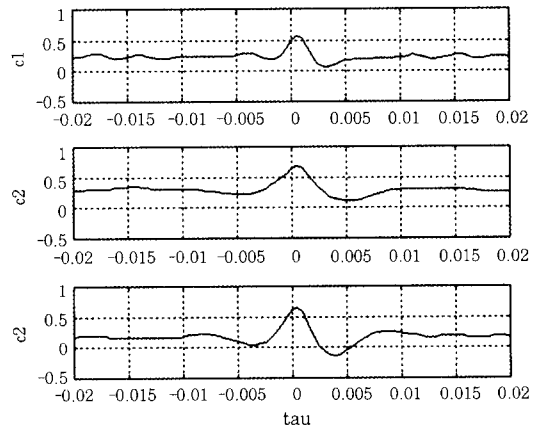


Fig. 6 The cross-correlation of the ion current and X-ray

4. 비선형 시계열 해석

카오스 시스템에서 획득하는 신호는 비선형적이고 불규칙적이다. 비선형 해석은 그 데이터가 가지고 있는 결정론적(deterministic) 규칙성을 찾아내는 특징 추출이 가능하다. 이러한 특징추출은 프랙탈 차수(fractal dimension), 엔트로피(entropy), 리아브노프 지수(Lyapunov exponent) 등이 있는데 이는 시계열 데이터를 재구성(reconstruct)함으로써 가능하다. 이 재구성은 "고차원 역학계의 궤도는 그 속에 있는 임의의 한 성분 좌표 정보만으로 재구성이 된다"라는 Tanken⁹⁾의 이론에 의한 것이다. 그 이론의 개요는 다음과 같다.

센서로부터 획득한 스칼라 신호($s(j), j=1, \dots$)를 m 의 차수와 τ 의 시간 간격(time delay)으로 재구성

할 때 재구성된 벡터($\vec{X}(i)$)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{X}(1) &= (s(1), s(1+\tau), s(1+2\tau), \dots, s(1+(m-1)\tau)) \\ \vec{X}(2) &= (s(2), s(2+\tau), s(2+2\tau), \dots, s(2+(m-1)\tau)) \\ &\dots\dots\dots \\ \vec{X}(i) &= (s(i), s(i+\tau), s(i+2\tau), \dots, s(i+(m-1)\tau)) \end{aligned} \quad (1)$$

위와 같이 재구성된 벡터는 m 차원 공간에서 한 점을 형성하고, i 를 변화시키면 궤도(trajectory)를 나타낼 수 있고 원래의 고차원 역학계(차원 l)의 궤도를 매끄럽게 변형(diffomorphism)한 것이 된다. 즉 재구성된 궤도가 끌개(attractor)를 형성하면, 스칼라 신호 상에서 변형된 끌개가 나타난다. 여기서 m 을 매입(embedding)차원이라고 하고 원래의 역학계가 이 공간으로 매입된다는 것을 의미하며 $m=2 \cdot l + 1$ 로 선정하면 충분하다는 것이 증명되었다.

재구성하기 위하여는 시간지연과 매입차원을 구하는 것이 무엇보다 중요하다. 시간지연에 따른 상관적분(correlation integral) 값을 매입차원에 대하여 구하여 첫 번째 국부 최소점이 되는 점을 시간지연으로 선정한다^{10,11)}. 상관적분은 다음과 같이 주어진다.

$$C_i(\epsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(\epsilon - |\vec{X}(i) - \vec{X}(j)|) \quad (2)$$

여기서 θ 는 step function이며 $|\vec{X}(i) - \vec{X}(j)|$ 는 어트랙트 i 와 j 번째 구성하는 두 점사이의 유클리드안 거리를 나타낸다. 즉 상관적분은 반경 ϵ 인 구를 설정하여, 구 내부점의 수를 각 점에서 반복하여 구하여 평균을 취한다. Fig. 7에 데이터 7,500개에 대한 상관적분을 보여준다. 아래부터 $m=10$ 인 경우인데, 이온 전류나 X-rays의 경우, 매입차원이 $m=6$ 까지는 첫 번째 국부최소점이 $\tau=5$ 인데 반하여, 차원이 $m=7$ 이상은 $\tau=6$ 을 얻었다.

반면에 매입차원은 참고문헌 12에서 제안한 FNN(false nearest neighbor) 방법을 적용하였다. 이 방법은 임의의 차원에서 두 끌개 점은 근접점이지만 차원을 증가시키면 두 점은 서로 근접점이 되지 않는다 점을 의미한다. 즉 FNN의 비가 0%인 차원을 매입차원으로 결정한다. Fig. 8은 $\tau=6$ 인 경우의 차원에 따른 FNN 비를 보여주는데, $m=9$ 에서 FNN 비율이 0%로 떨어진다.

전자빔 용입 깊이에 대한 카오스적 정성적(quantitative) 크기 값(프랙탈 차수, 엔트로피 리아

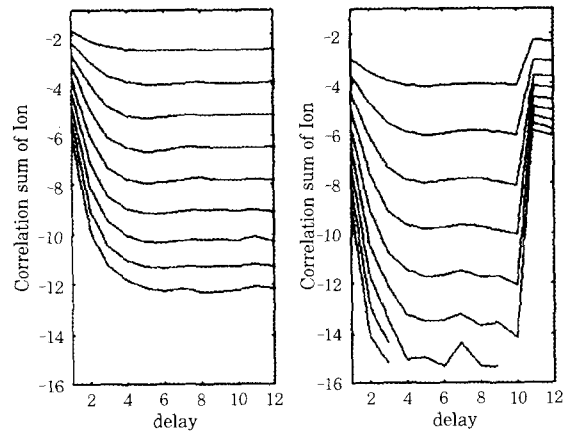


Fig. 7 The correlation integral

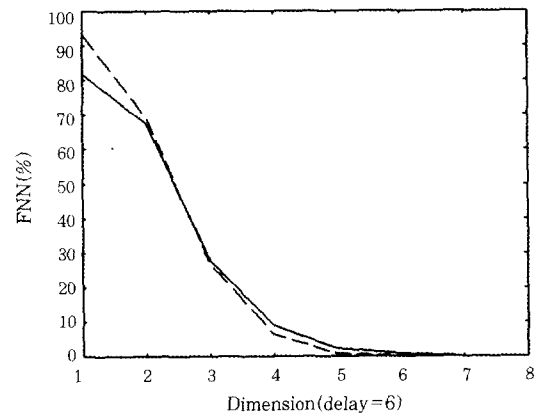


Fig. 8 The percentage of FNN (solid line : ion, dashed line: X-ray)

프노프 지수 등)을 실시간 모니터링에 적용하기에는 직관적인 판단과 많은 계산의 양을 필요로 하고 있다. 가령, 상관적분이 ϵ 에 영역에서 다음 식과 같이 축척(scaling)된다면 스케일 지수 D 를 프랙탈 차수라고 한다¹³⁾.

$$C(\epsilon) \propto \epsilon^D \quad (3)$$

위 식을 양변에 대수를 취하면 이온전류 및 X-ray에 대하여 Fig. 9와 같은 그래프가 얻어지는데 직선구간의 기울기가 프랙탈 차수가 된다. 즉 스케일 범위(가령 $\epsilon_1 \leq \epsilon \leq \epsilon_2$)에서 식(3)이 성립이 되면 자기상사성(self-similarity)이 성립된다고 할 수 있다. C3의 경우 약 3의 값을 가지고 C1과 C2의 경우는 약 2.5의 값을 가진다.

시계열 데이터에 대한 공분산 행렬(covariance matrix)은 다음과 같이 주어진다¹⁴⁾.

$$C_{ij} = \frac{1}{N-m+1} \sum_{n=1}^{N-m+1} s(n-m+i) \cdot s(n-m+j) \quad (4)$$

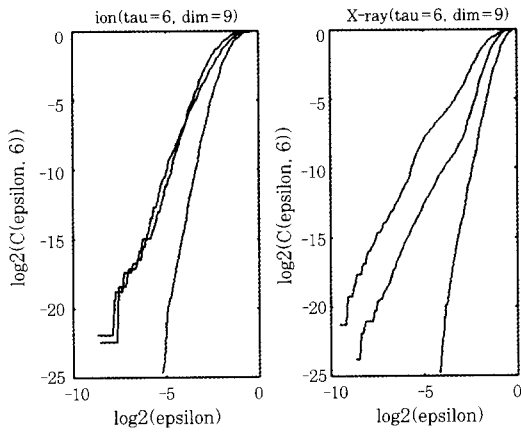


Fig. 9 Estimation of fractal dimension (left: C2, middle: C1, and right: C3)

여기서 N 은 전체 데이터의 개수를 나타낸다. 이 공분산은 대칭인 행렬이기 때문에 고유치 값은 실수이고 고유치 벡터는 서로 직교를 이룬다. 이러한 고유치 문제를 이용하여 해석하는 것을 SVD(Singular Value Decomposition)이라고 하며, PCA(Principal Component Analysis), Karhunen-Leve 변환, Empirical Orthogonal Functions 등의 다른 이름으로 불려지고 있다. 기존 SVD 해석은 비선형 필터로 사용되고 있어 시스템에 큰 영향을 주지 않는 신호(값이 작은 고유치)를 제거할 수 있다. Fig. 10은 이온전류 및 X-ray에 대한 고유치 스펙트럼을 보여준다.

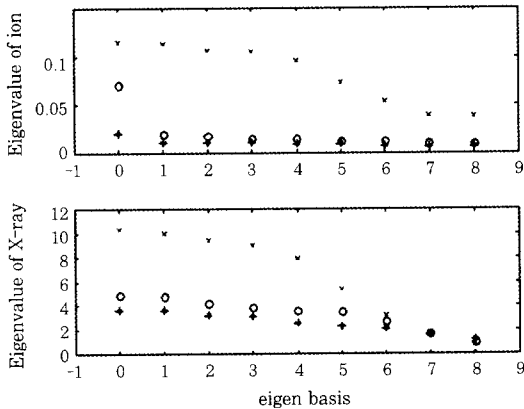


Fig. 10 Eigenvalue spectrum (o:C1, *:C2, x:C3)

본 논문에서 제시한 온라인 모니터링 기법은 다음과 같다. 우선 완전용입의 공분산 $m \times m$ 행렬을 오프라인으로 구하는데 가급적 많은 데이터를 사용하여 구한다. 다음에는 적은 데이터 갯수를 온라인으로 계속하여 주어진 시간지연과 매입차원에 따라 재구성하여 오프라인으로 구한 공분산 행렬과 곱을 한다. 여기서 공분산 행렬로 사상된 데이터가 통계적으로 초-타원(hyper-ellipsoid)모양을 가지면 완전용입을 보여주

고 분산되거나 그 모양이 작아지면 부분용접 및 그 외의 것을 나타낸다. 왜냐하면, 고유치 벡터를 직교좌표계 축으로 설정하고 고유치값의 제곱근을 반경으로 하는 초-타원을 설정하였을 때 재구성된 데이터는 이 초-타원에 가장 잘 분포되기 때문이다.

Fig. 11은 750개의 C3의 데이터에 대한 2축 스트로보 스킵을 보여주는데 삼각형의 모양으로 분포되어 있다. 반면 Fig. 12는 7500개의 C3의 데이터를 이용하여 공분산 행렬을 구한 다음에 750개의 C3 데이터와 곱을 하였을 때의 2축 스트로보 스킵을 나타낸다. 이 그림에서 x축은 고유치가 가장 큰 값에 대한 축이다. y축에 대한 고유치 값이 작아 질수록(i2, i3, ... i9) 한쪽이 길쭉한 타원의 모양을 가진다.

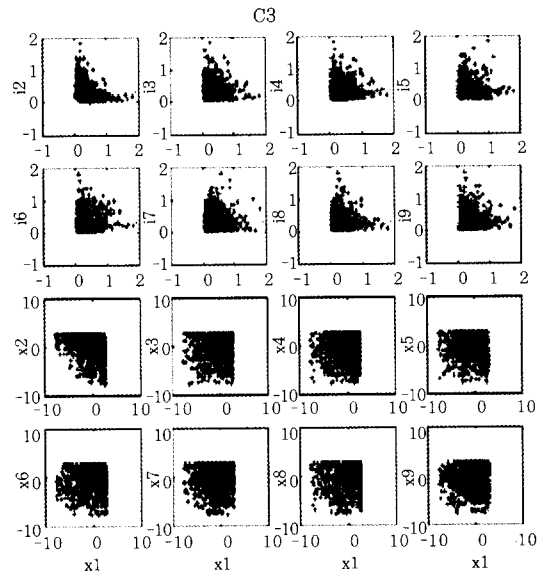


Fig. 11 The stroboscopic view of C3

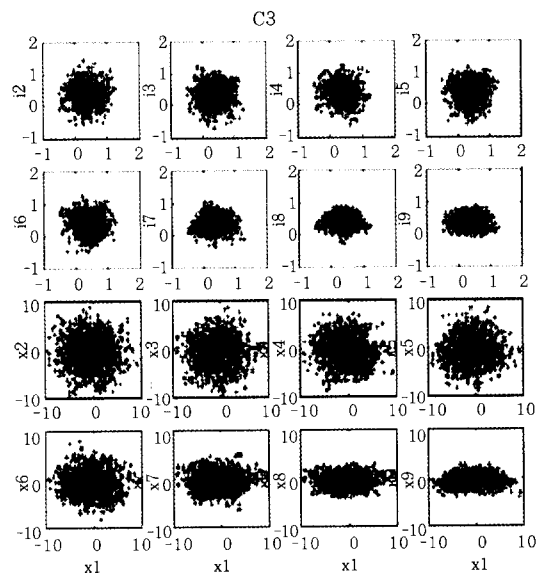


Fig. 12 Stroboscopic view of the mapped C3 (i : the state of ion, x: the state of X-ray)

Fig. 13는 750개 C2 데이터를 공분산 행렬에 사상 후의 스트로보 스크픽을 보여준다. 완전용입의 경우와 비교하여 보면 크기는 작아지고 타원의 모양을 가지고 있지 못하다. 또한 이온전류의 사상된 스트로보 스크픽은 X-ray의 것과 비교하여 그 차이점이 우월하다. 이는 C3의 이온전류 스펙트럼과 C2 및 C1의 스펙트럼 크기 변화가 X-ray의 것보다 많은 차이가 있기 때문이다(Fig. 10 참조). 센서 측면 관점에서 이온전류 센서는 X-ray 센서 보다 완전용입과 부분용입을 구별하는데 있어 더 우수하다고 판정할 수 있다.

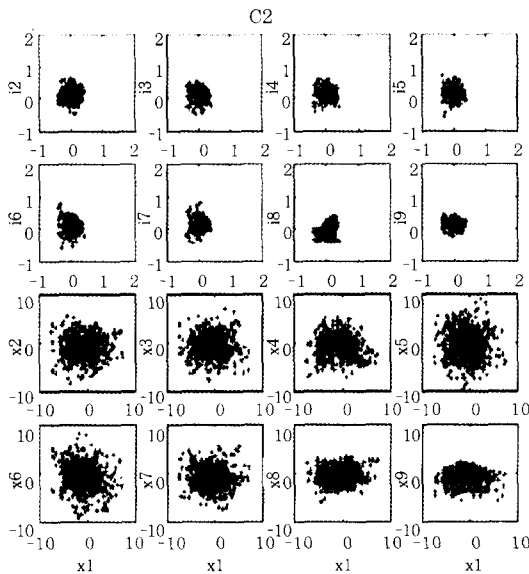


Fig. 13 Stroboscopic view of the mapped C2

4. 결 론

기존 선형적인 신호해석 기법은 비선형적인 요소를 선형적으로 근사시키므로 비선형적인 용접 현상을 기술하는데는 한계가 있었다. 본 연구에서는 카오스 해석을 통해 시계열 데이터를 재구성된 공간에 재배치함으로써 이상한 끌개의 크기 및 모양을 이용하여 완전용입과 부분용입을 구별할 수 있었다. 이러한 구별 방법은 계산 시간 및 데이터가 적어 온라인 모니터링으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 각각의 차원에 모양과 크기의 변화는 비선형적인 동적 현상을 규명할 수 있는 여지를 남겨놓았다.

참 고 문 헌

1. S. Schiller and etc., "Electron Beam Technology", John Wiley and Sons(1982)

2. H. Schultz, "Electron Beam Welding", Abington Publishing(1983)

3. 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), pp. 777-787.

4. 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, No. 6(1978), pp. 20-23.

5. 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, No. 8(1978), pp.39-40.

6. G.I. Leskov, V.M. Nesterenkov and L.I. Zhivaga, "Currents of Plasma During the Electron-Beam Welding of Plate Steel Structures", Automation Welding, No. 4(1980), pp. 16-19.

7. 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, No. 3(1982), pp. 47-49.

8. V.M. Nesterenkov, "Effects of Geometries of Electron-Beam Welding on Ionic Current Parameters", Automation Welding, No. 3(1982), pp. 28-30.

9. F. Takens, "Detecting Strange Attractors in Turbulence", Springer lecture notes in mathematics, Vol. 898(1981), pp. 366-381.

10. W. Liebert and H.G. Schuster, "Proper Choice of the Time Delay for the Analysis of Chaotic Time Series", Physics Letters A, Vol. 142, No. 2,3(Dec. 1989), pp. 107-111.

11. H. Kantz and T. Schreiber, "Nonlinear Time Series Analysis", Cambridge Nonlinear Science Series 7, Cambridge University Press(1997).

12. M. B. Kennel and etc., "Determining Embedding Dimension for Phase-space Reconstruction using a Geometrical Construction", Physical Review A, Vol. 45, No. 6 (March, 1992), pp. 3403-3411.

13. P. Grassberger and I. Procaccia, "Measuring the Strangeness of Strange Attractors", Physica 9D(1983), pp. 189-208.

14. D.S. Broomhead and G.P. King, "Extracting Qualitative Dynamics from Experimental Data", Physica 20D(1986), pp. 217-236.