

다양한 센서 측정 거리로부터 획득한 자기적 와전류 신호의 불변 변환 처리 기법

김대원*

단국대학교 공학대학 전자컴퓨터학부 멀티미디어학전공,
충청남도 천안시 안서동 산29번지 330-714

(2004년 10월 8일 받음, 2004년 12월 15일 최종수정본 받음)

전자기학의 분야에서 와전류를 이용한 응용 분야는 매우 다양하다. 예를 들면, 핵을 이용한 원자력 발전소의 증기 발생 터보 또는 비행기의 엔진이나 날개 부분의 결합 등을 자기적 특성을 이용하여 비파괴 검사를 하는 등의 일이다. 와전류의 특성을 결정짓는 가장 중요한 인자 중 하나가 바로 센서 측정 거리 (lift-off)인데 이것은 와전류를 측정한 센서와 피검사 물체간의 물리적인 공간거리를 뜻한다. 이 인자는 와전류 신호의 특성을 정확하게 분석하는데 매우 중요함에도 불구하고 실제 필드에서는 모든 경우마다 그 정확한 값을 측정해내기가 힘들 뿐더러 일정한 거리를 상시 유지하기도 어렵다. 따라서 자기적 신호의 하나인 와전류로 하여금 다양한 상황에서의 lift-off의 변화에도 영향을 받지 않고 일정한 특성을 유지하게끔 해주는 기술이 필요하다. 이 논문은 다양한 lift-off로부터 얻어진 와전류를 보상하여 일정한 성질을 유지하도록 하는 기법을 설명하고 있다. 다양한 lift-off로부터 얻어진 와전류들은 신호 획득 거리가 0인 이상적 상태의 신호들로 보상 변환되어 다음 단계인 피검사 시료상의 결합 또는 흡집의 물성이나 특성 파악에 계속해서 쓰이게 된다.

주제어 : 와전류, 불변 변환, 센서 측정 거리 (lift-off), 비파괴탐상

I. 서 론

와전류를 이용한 자기 응용 분야는 매우 다양한데 그 중에서도 전도체의 갈라진 틈이나 다른 종류의 물질과의 합성으로 인한 불균일 흡집을 인식해 내는데 쓰인다는 것은 널리 알려진 바이다. 와전류를 이용한 비파괴 검사 기법은 자기적 전도성을 이용하여 검사 시료로부터 필요한 신호를 채취해내는 자기 원리에 근거를 두고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 교류 전류가 흐르는 코일이 피검사 시료에 가까이 접근하게 되면 코일에 의해 생성된 시간 변이 자속이 와전류를 시료에 유도한다. Lenz 법칙에 의하면 앞서 발생한 와전류에 의해 생성된 2차 자장의 방향은 1차 자장의 방향과 반대가 된다. 따라서 자속은 서로 결합을 하게 되고 코일의 자기 유도 감응 계수는 감쇄하게 된다. 동시에 코일의 저항은 소실된 인덕턴스를 보상 받기 위해 증가하게 된다. 이 때 만약 시료에 불특정의 물질적 불연속 부분이 존재하게 되면 유도되었던 와전류의 흐름은 파괴 되어지고 코일 내부의 임피던스 또한 변하게 된다.

이러한 임피던스의 변화는 코일이 와전류 신호를 생성해내기 위해 시료를 탐색할 때 측정이 가능하며 불연속 부분에서 채취된 와전류는 그 부분에서의 특성을 담고 있다. 자기적 특성을 이용한 와전류 비파괴 검사의 궁극적인 목적은, 시료가 갖고 있는 결합 또는 흡집의 모양이나 크기 또는 위치 등의

모든 정보가 측정 되어진 와전류 신호를 조사하고 분석하는 과정등이 총 망라된 이른바 inverse problem의 해답을 찾는 것이라고 요약 될 수 있다. 와전류를 이용한 응용 분야에서 가장 중요한 실험 인자 중 하나라고 할 수 있는 것이 lift-off (센서 측정 거리)인데 이것은 실험용 코일과 피검사 시료 사이의 물리적 거리를 말한다. 탐촉자인 실험용 코일이 피검사 시료의 표면 위를 지날 때 생성된 와전류 신호의 성분은 lift-off를 포함한 다양한 변수들의 집합체이며 그들의 합수로 구성 되어 있다. 이러한 센서 측정 거리가 증가하게 되면 와전류 신호의 크기는 변화하게 되고 따라서 물성의 변화와 물질적 결합도를 측정하는 센서의 민감도 역시 멀어지게 된다. 비파괴탐상 분야에서는 이러한 lift-off의 실험에서의 영향을 줄이고 일정한 거리를 유지하게 하는 기법들을 많이 연구하고 있는데 GMR sensor를 이용하여 금속 내부에 존재하는 흡집을 찾아낼 때 일정한 lift-off를 유지하는 방법에 관하여[1], 또는 회전 eddy current 탐촉자를 이용하여 시료의 용접 부분을 감지할 때 균일한 lift-off를 유지하는 기법[2], 등이 있다. 또한 다양한 lift-off로부터 생기는 잡음을 최소화 하여 표면의 결합을 찾아내는 표면용 탐촉자에 관한 연구와[3], eddy current 실험에서의 다양한 lift-off를 보상하는 기법에 관한 연구[4], 등이 활발히 진행되고 있는 중이다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이, 주어진 시료에서 채취된 와전류 신호는 lift-off인 r 를 하나의 요소로 하는 합수이다. 그런데 실제로 필드에서 테스팅 및 조사를 진행하는 도중에는 탐촉자가 시료의 표면 위를 지날 때의 lift-off의 변화를

*Tel: (041) 550-3487, E-mail: dr_dwkim@dankook.ac.kr

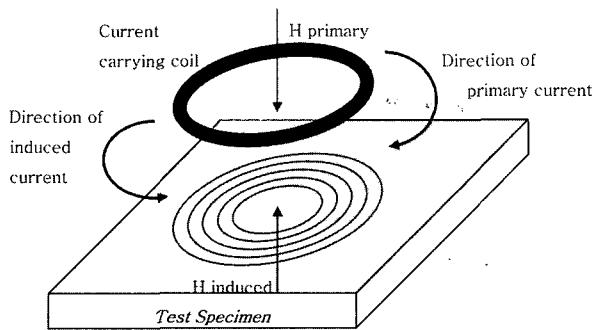


Fig. 1. Current carrying coil over a conducting test specimen, showing direction of primary and induced currents.

일일이 추적하여 기록으로 보존 하기가 힘들다. 그러므로 시험 물질에 포함된 결합의 특성을 상기한 센서 측정 거리의 변화에 상관없이 일정한 환경하에서의 성질로 형상화 시킬 수 있는 알고리즘을 개발하기 위해서는, 획득되어진 와전류 신호가 물리적인 lift-off의 변화에도 불구하고 수학적 계산을 통하여 센서 측정 거리 불변의 성질을 지닌 이상적 와전류 신호로 보상 변환 되어질 수 있는 기법이 필요하다. 상기한 바와 같이 와전류 비파괴 탐상 신호는 피검사 시료의 결합, 흡집, 모양, 크기, 위치 그리고 센서 측정 거리 등의 다양한 변수들의 결정물인데 이로부터의 역함수를 구하여 염밀해를 찾아 내는 것은 현실적으로 많은 제약이 따르게 된다. 본 논문에서는 와전류 비파괴탐상으로부터 어느 특정의 요소에 대한 불변의 특성을 획득할 수 있는 충분 조건이 구해진 상태에서 준동형 연산자와 신경망 회로 (Neural Network) 기법으로부터 근사해를 찾아내는 방법을 이용하여 센서 측정 거리의 변화에 영향을 받지 않는 불변의 특성을 가진 와전류 신호를 보상 변환의 과정을 거쳐 복원하는 기법을 소개하고 있다.

II. 센서 측정 거리 (lift-off) 불변 보상 변환

와전류 신호가 측정 되어졌을 시의 lift-off를 t 라 표현 하도록 하자. 대개 고유 주파수의 와전류는 시료의 특성을 결정 짓는 파라미터, d (결합의 깊이), l (결합의 길이), 그리고 t (시료와 센서의 물리적 거리, lift-off)에 의존하여 신호를 구성한다. 센서 측정 거리 불변 변환의 기본 아이디어는 t 에 따라서 다르게 변하는 두 종류의 측정치인 $x_A(d, l, t)$ 와 $x_B(d, l, t)$ 를 밝혀내는 것이다. 여기서 아래 식 (1)의 함수를 찾아 내야 한다.

$$f\{x_A(d, l, t), x_B(d, l, t)\} = h(d, l) \quad (1)$$

식 (1)에서 $h(d, l)$ 은 t 의 변화에도 상관없는 독립적인 불변의 특성을 뜻한다. 또한 두 개의 함수 u 와 v 가 주어졌을 때 t 의 변화에 영향을 받지 않는 불변의 신호를 획득할 수 있는

충분 조건은 아래의 식 (2)와 같이 나타내어질 수 있으며 여기서 o 은 준동형 연산자를 뜻한다[5].

$$h(d, l)ou(x_A) = v(x_B) \quad (2)$$

따라서 상기 식의 마지막 단계에서 얻고자 원하는 lift-off 불변의 성분, $h(d, l)$ 은 아래의 식 (3)에 의해 계산 되어질 수 있다.

$$h(d, l) = v(x_B)ou^{-1}(x_A) = f(x_A, x_B) \quad (3)$$

상기 식 (3)을 구현하기 위해 함수 $h(\bullet)$, $u(\bullet)$ 그리고 $v(\bullet)$ 를 지정 해야 하는데 $h(d, l)$ 은 실험자가 지정하는 함수이므로 쉽게 얻어질 수 있다. 함수 u 는 기저 함수 확장 방식에 의해 하기의 식 (4)와 같이 근사 되어질 수 있다[6].

$$u(x_{A(k)})_p = \sum_{j=1}^N w_{jp} \phi(\|x_{A(k)} - c_{A(j)}\|) \quad (4)$$

식 (4)에서 $\phi(\bullet)$ 은 적절한 기저 함수를 나타내고, $x_{A(k)}$ 는 $x_{rk} = [x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rM}]^T$ 이고 $x_{ik} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}]^T$ 일 때 $x_A = [x_{rk}, x_{ik}]$ 의 k 번째 행 벡터이다. 벡터 x_{rk} 와 x_{ik} 의 아래 첨자 첫 자인 r 과 i 는 각각 와전류 신호 임피던스의 실수 부분과 헤수 부분을 나타내며 M 은 투입 되어지는 샘플의 개수이다. 또한 $c_{A(j)}$ 는 기저 함수 $\phi(\bullet)$ 내부에 있는 클러스터의 중심 행렬인 c_A 의 j 번째 행 벡터인데 $c_{j1} = [c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1N}]^T$ 이고 $c_{j2} = [c_{12}, c_{22}, \dots, c_{2N}]^T$ 일 때 $c_A = [c_{j1}, c_{j2}]$ 로 나타내어질 수 있다. 그리고 N 은 기저 함수 중심들의 개 수이며 여기서 ($M > N$)이며, w_{jp} 는 p 가 1 또는 2인 상태에서의 확장 계수이다. 함수 v 는 주어진 데이터 조건의 장점을 극대화 하기 위해 항등 함수로 선택 하였다. 만약 와전류 신호가 채취되어 신호 공간에 벡터의 형태로 표현 되어지게 된다면 식 (4)는 다음의 식 (5)와 같이 행렬의 형식으로 나타내어 질 수 있다.

$$U = \Phi X W \quad (5)$$

식 (5)에서 U 는 $u(x_{A(k)})_1 = [u(x_{A(1)})_1, \dots, u(x_{A(M)})_1]^T$ 이고 $u(x_{A(k)})_2 = [u(x_{A(1)})_2, \dots, u(x_{A(M)})_2]^T$ 일 때 $[u(x_{A(k)})_1, u(x_{A(k)})_2]$ 로 나타내어지며 X 는 행렬의 곱셈을 뜻한다. 기저 함수의 행렬인 Φ 를 나타내기 위하여 $\phi(\bullet)$ 은 식 (6)처럼 Gaussian 래디얼 함수로 표현 되어질 수 있다.

$$\phi(\|x_{A(k)} - c_{A(j)}\|) = \exp\left(-\frac{\|x_{A(k)} - c_{A(j)}\|^2}{2\lambda^2}\right) \quad (6)$$

식 (6)에서 $x_{A(k)} = [x_{rk}, x_{ik}]^T$ 이고 $c_{A(j)} = [c_{j1}, c_{j2}]$ 일 때 $\|x_{A(k)} - c_{A(j)}\| = \sqrt{(x_{rk} - c_{j1})^2 + (x_{ik} - c_{j2})^2}$ 이며 λ 는 기저 함수의 지원 범위를 정의하는 파라미터이다. 그리고나서 Φ 는 $|x_{A(k)} - c_{A(j)}|$ 를 구성하는 ϕ_{ij} 요소들에 의하여 $(M \times N)$ 크기의 행렬로 표현되어지며 다음의 식 (7)과 같다.

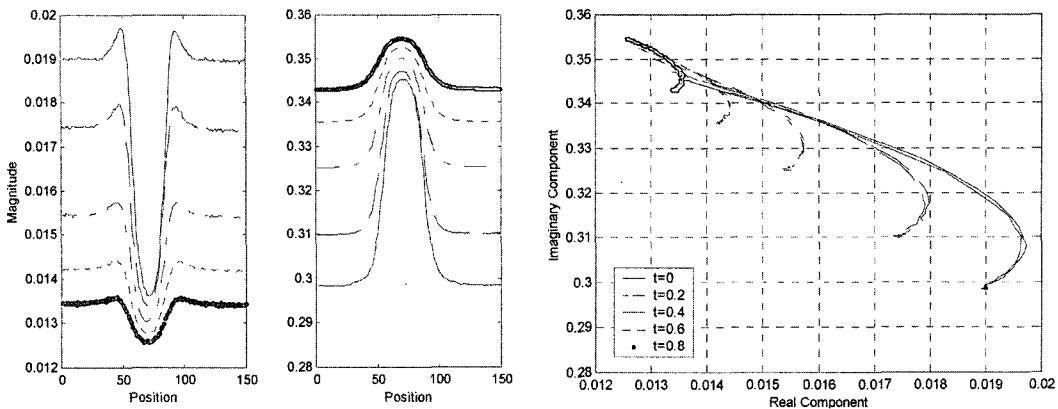


Fig. 2. Real (a) and imaginary (b) components of the eddy current signal together with impedance plane trajectory (c) as a function of lift-off [mm].

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{M1} & \phi_{M2} & \dots & \phi_{MN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한 확장 계수 행렬인 W 는 $w_{j1} = [w_{11}, w_{21}, \dots, w_{N1}]^T$ 이고 $w_{j2} = [w_{12}, w_{22}, \dots, w_{N2}]^T$ 일 때 $[w_{j1}, w_{j2}]$ 과 같다. 그러면 식 (5)는 다음의 수식 (8)과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u(x_{A(1)})_1 & u(x_{A(1)})_2 \\ u(x_{A(2)})_1 & u(x_{A(2)})_2 \\ \vdots & \vdots \\ u(x_{A(1M)})_1 & u(x_{A(M)})_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{M1} & \phi_{M2} & \dots & \phi_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \\ \vdots & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 다시 수식 (3)을 바꾸어 벡터의 형태로 표현하면

$$H(d, l) = V \diamond U^{-1} = f\{x_A(d, l, t), x_B(d, l, t)\} \quad (9)$$

을 얻게 된다. 식 (9)에서 \diamond 은 행렬 계수들의 일대일 곱셈을 뜻하고 $H(d, l)$ 은 입력 값이 $x_A = [x_{rk}, x_{ik}]$ 일 때 이에 해당하는 M 개의 목표치 출력 벡터이며 크기는 $(M \times 2)$ 인 행렬이다. 또한 V 는 v 의 행렬 형태이다. 여기서 수식 (5)를 이용하여 수식 (9)를 다시 써 보면

$$H(d, l) = f\{x_A(d, l, t), x_B(d, l, t)\} = V \diamond (\Phi \times W) \quad (10)$$

를 얻을 수 있다. 수식 (10)에서 W 는 트레이닝 벡터들의 집합에 의해 생성되어 $(N \times 2)$ 크기의 가중치 값을 나타내는 행렬이다. 이리하여 이산 데이터 점들인 (d, l, t) 를 변수로 하는 수식 (4)와 (10)에서 불변의 이상적인 lift-off 신호를 얻어내기 위해 해를 찾게 된다. Full rank를 가진 정방형 행렬은 고유의 역행렬을 가지는데 이에 반해 Φ 은 대부분 정방형 행렬이 아니다. 따라서 유사 역행렬인 Φ' 이 가중치 행렬인

W 를 계산하기 위하여 사용 되어진다[7]. 유사 역행렬은 와전류 신호들의 트레이닝 과정 중에 neural network을 통하여 생성 되어질 수 있다. 일단 트레이닝용 와전류 신호들을 이용하여 가중치 값을 가진 W 가 얻어지게 되면 시뮬레이션에 쓰인 테스트 와전류 신호의 불변 변환된 결과물이 생성되게 된다. 직접적인 시험 단계에서는 테스트 와전류 신호들을 Gaussian 래디얼 기저 커널에 적용시킴으로써 먼저 기저 커널 합수를 평가할 수 있다. 시험 단계에 쓰인 기저 합수인 Φ_{test} 는, 센서 측정 거리에 불변한 와전류 신호를 생성해 내기 위해 트레이닝 단계의 끝에서 계산되어 이에 대응하는 가중치 값인 W 와 아래의 수식과 같이 결합을 하게 된다.

$$O = \Phi_{test} \times W \quad (11)$$

수식 (11)에서 O 는 결과물인데 $V_{test} \diamond H^{-1}_{test}$ 과 같으며 이는 $W = \Phi^{-1} \times (V \diamond H^{-1})$ 이기 때문이다. V_{test} 는 조건 합수이며 H^{-1}_{test} 는 시험 단계에서의 실제 결과물인 scaling factor의 역수이다. 만약 V_{test} 가 상수라면 H_{test} 는 쉽게 얻어지게 되며 이는 간단한 스케일링 인자인 특정 계수의 행렬을 뜻한다.

III. 구현 과정과 내용

실험에 쓰일 와전류 신호를 얻기 위하여 데이터 획득 장치인 PC, 그리고 센서인 differential probe가 장착된 3차원 스캐너와 이를 위한 제어 장치가 준비 되었다. 이 실험에 쓰인 differential probe의 주파수 범위는 500KHz-1MHz (Zetec 모델 10-4803)이고 실제 사용될 와전류 신호를 생성해 내기 위해 500KHz의 고정 주파수가 선택 되었다. 실험에 쓰인 탐촉자의 형상은 Fig. 3에 측면 모양이 나타난 바와 같이 가느

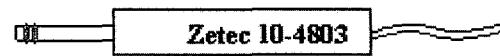


Fig. 3. Shape of the differential probe used in the experiment.

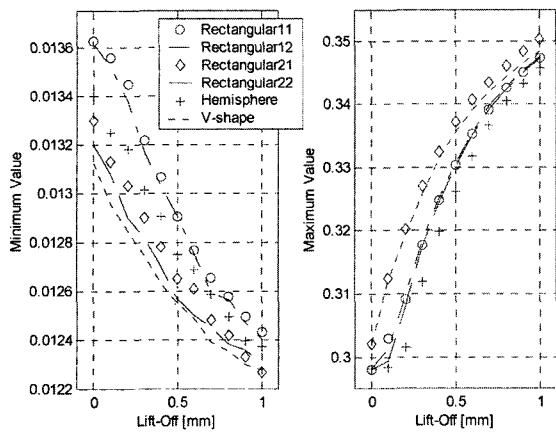


Fig. 4. Variation in minimum values of the real and maximum values of the imaginary components of the eddy current signals with respect to lift-off.

다란 원통모양의 코일 축이 그보다 굽고 긴 원통모양의 손잡이에 꽂혀져 있는 모습을 하고 있으며 코일 축의 직경은 0.28 mm이다.

또한 이 실험에 쓰인 3차원 스캐너는 probe가 피검사 시료의 결합이 있는 표면 위에서 움직일 때 일정한 lift-off를 유지할 수 있도록 해준다. 이 스캐너를 동작시키는 S/W는 스캐닝이 끝난 후 0과 255 사이의 값을 갖는 흑백 이미지를 만들어낸다. 피검사 시료의 결합 부분의 256x256크기의 복소 이미지를 얻어 내기 위해 0.1 mm부터 1 mm 사이의 공간을 두고 스캐닝이 이루어졌다. 스캐닝이 끝나면 복소 이미지의 각 행들은 와전류 probe 임피던스의 실수부와 허수부를 대표하는 x_A 와 x_B 로 표현되게 된다. 이러한 x_A , x_B 의 최대값과 최소값이, lift-off인 d 가 증가함에 따라 얻어진 모습을 t 의 함수의 형태로 Fig. 4에 나타내었다.

Lift-off인 d 가 커질수록 와전류 임피던스 실수부의 최소값은 작아지고 반면에, 와전류 임피던스 허수부의 최대값은 lift-off의 변화에 정비례하여 변하게 된다. Fig. 4는 lift-off의 함수로서 데이터 획득 장치에서 얻은 와전류 임피던스의 실수부 최소값과 허수부 최대값을 각각 P_r 과 P_i 로 표시하고 이를 좌표계에 나타낸 것이다. 여기서 하나의 현상과 그 성질을 나타내는 두개의 측정치인 P_r 과 P_i 의 변화는 lift-off인 d 에 변화에 따라 서로 다른 변화의 양상을 보여준다. 실험의 초기화 특성은 $x_A = [P_r, P_i]$ 와 $x_B^{\text{Re}} = P_r, x_B^{\text{Im}} = P_i$ 로 정의된다. 그리고 불변 변환은 다음의 수식 (12)와 (13)을 정의함으로써 와전류 임피던스 신호의 실수부와 허수부에 실행 되어졌다.

$$h_r(d, l) = f(x_A, x_B^{\text{Re}}) = \frac{v\{P_i\}}{u\{P_r, P_i\}} \quad (12)$$

$$h_r(d, l) = f(x_A, x_B^{\text{IM}}) = \frac{v\{P_i\}}{u\{P_r, P_i\}} \quad (13)$$

와전류 임피던스 신호의 실수부와 허수부의 센서 측정 거리 불변의 특성을 이용한 불변 변환의 수식은

$$Z_{r,\text{inv}} = \frac{Z_r - Z_{r,\text{min}}}{Z_{r,\text{max}} - Z_{r,\text{min}}} \times h_r(d, l) \quad (14)$$

$$Z_{i,\text{inv}} = \frac{Z_i - Z_{i,\text{min}}}{Z_{i,\text{max}} - Z_{i,\text{min}}} \times h_i(d, l) \quad (15)$$

와 같이 나타내어질 수가 있다. 상기 식 (14), (15)에서 Z_r 과 Z_i 는 와전류 임피던스의 실수부와 허수부를 나타내며 식의 뒷부분에 아래 첨자로 표시된 *max*와 *min*은 각 신호의 최대값과 최소값을 의미한다. Lift-off 불변의 변환을 다루는 기법은 3계층의 neural network을 이용하여 구현되었다. Neural network의 입력 계층은 2개의 노드를 갖고 있으며 이러한 단자들에의 입력 값은 피검사 시료의 결합을 differential probe로 스캔 하여 얻은 이미지에서 나온 와전류 1차원 신호의 최대값과 최소값을 사용한다. 중간 계층인 hidden layer는 7개의 단자를 갖고 있는데 이들은 잘 알려진 K-means 알고리즘에[8], 의해 얻어진 각각의 클러스터 센터들과 연결된다. 또한 출력 계층은 와전류 임피던스 신호의 실수부와 허수부를 위한 스케일링 factor를 계산해 내보내는 2개의 단자를 갖고 있다. Lift-off의 불변 변환 기법은 다양한 lift-off의 상태에서 얻어진 와전류 임피던스의 실수부와 허수부를 각각 이상적인 상태인 zero lift-off의 상태로 mapping 하는데 사용되는 기법이다.

IV. 결 과

이 실험에서는 알루미늄 재질로 이루어진 피검사 시료에 서로 다른 모양과 규격으로 이루어진 6개의 결합 또는 흡집들이 사용되었다. 각각의 시료에 있는 결합의 길이를 나타내는 l 은 6 mm로서 동일하지만 결합의 단면을 놓고 보면 서로 다른 형태와 규격을 가지고 있다. 4개의 시료들은 직사각형의 모양을 가지고 있고 이들은 R1, R2, R3, R4로 명명을 하였으며 각각의 넓이×깊이 규격을 가지고 있다. 다른 두 피검사 시료의 결합들은 그 단면이 각각 반구 모양과 V자 모양을 하고 있는데 이들은 각각 H5, V6로 명명 되었으며 H5는 1 mm의 직경과 1 mm의 깊이를 갖고 있고 V6는 의 넓이×깊이를 가지고 있다. 실험에 쓰인 와전류 신호는 앞서 설명 되었듯이 스캐너에 장착된 differential probe를 이용하여 lift-off 0의 위치부터 시작해서 0.1 mm의 간격으로 11개의 다른 lift-off의 위치에서 획득 되었다. 11개의 다른 위치에서 얻어진 다양한 형태의 와전류 신호들 중 5개의 신호들은 neural network의 트레이닝 단계에서 사용되었고 zero lift-off에서의 신호는 desired signal (목표치 신호)로 사용 되었으며

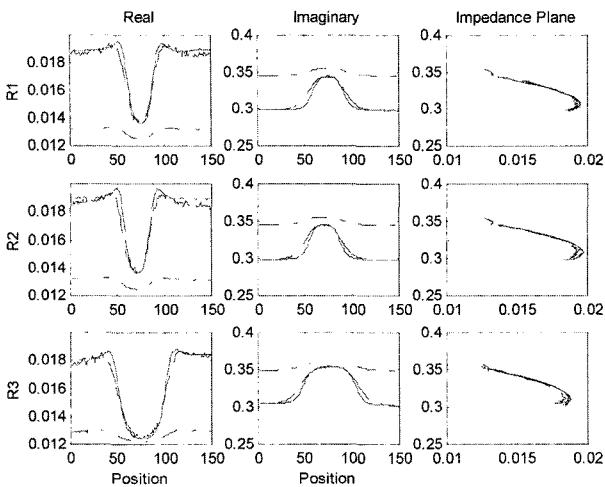


Fig. 5. Invariance transformation results for specimens R1, R2, R3, lift-off=0.9 mm. Dash-dot lines:lift-off based EC signal, Dashed lines:lift-off invariance transformed EC signal, Solid lines:EC signal at zero lift-off.

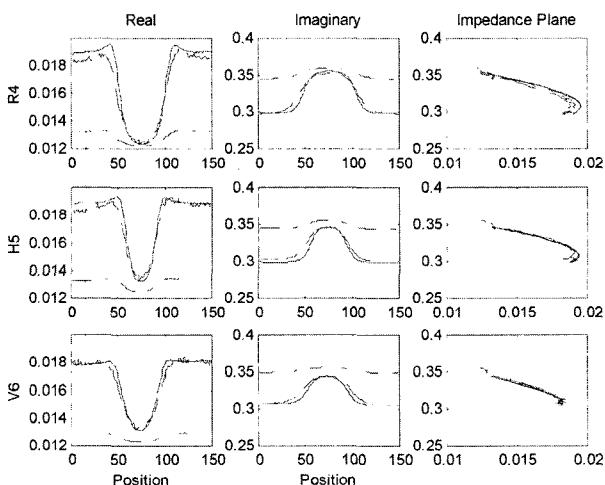


Fig. 6. Invariance transformation results for specimens R4, H5, V6, lift-off=0.9 mm. Dash-dot lines:lift-off based EC signal, Dashed lines:lift-off invariance transformed EC signal, Solid lines:EC signal at zero lift-off.

남은 5군데 위치에서의 신호들이 트레이닝의 마지막 단계에서 계산 되어진 weight factor의 검증을 위하여 testing 단계에서 쓰였다. 테스팅의 마지막 단계에서 생성된 6가지 종류의 서로 다른 결함을 나타내는 와전류 신호의 불변 변환 및 보상의 결과가 Fig. 5와 6에 보이고 있다.

이 Fig. 5와 6에서 첫번째와 두번째 열에 보이는 신호들은 와전류 코일 임피던스의 실수부와 허수부를 나타내는 것이고 3번째 열에 있는 그림은 각각의 실수부와 허수부가 결합되어 X-Y축의 임피던스 평면에서 이를 나타낸 것이다. 이 신호들에서 점과 단선이 함께 섞여 있는 신호들은 불명의 lift-off를 가진 와전류 신호를 의미하고 단선으로만 이루어진 신호들은

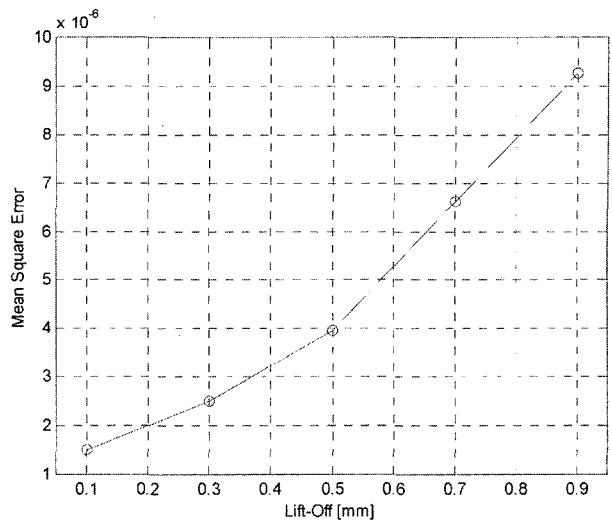


Fig. 7. Invariance transformation mean square error.

상기의 점과 단선으로 이루어진 신호들이 zero lift-off의 신호들로 변환 되어진 결과물을 의미한다. 연속선으로 이루어진 신호는 lift-off가 0인 위치에서 얻어진 와전류 신호이다. 실험에서 얻어진 weight factor의 효용성을 검증 해보고 여섯 종류 각각의 결함 모양이 한곳에 섞인 상황에서 서로 다른 모양과 규격을 가진 신호들에 어떤 영향을 미치는지 알아 보기 위해 트레이닝과 테스팅 단계를 모든 형태의 신호들이 접합된 상태에서 해보았다. 이는 특정 모양을 한 결함으로부터 얻어진 다양한 lift-off에서의 와전류 신호가 다른 모양의 규격과 크기를 가진 lift-off 신호들에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위한 것이다. 이 실험에서는 neural network을 연습시키기 위하여 입력 단자에 여섯 종류의 다른 모양을 한 와전류 신호들이 쓰였다. 실험 결과를 보인 그림은 0.9 mm의 lift-off 위치에서 얻어진 와전류 신호의 불변 변환 결과를 보인 것이다. 여기서 볼 수 있듯이 불변 변환된 신호는 zero lift-off에서의 신호와 매우 흡사하게 mapping 되었다는 것을 알 수 있다. 또한 작은 크기의 lift-off에서 얻어진 와전류 신호들의 불변 변환 결과가 큰 크기의 lift-off에서 얻어진 와전류 신호의 변환 결과보다 더 정확하다는 것을 알 수 있다.

Lift-off가 0인 상태로 불변 변환된 와전류 신호와 실제 lift-off의 크기가 0인 상태에서 얻어진 측정치와의 평균 제곱 에러가 lift-off인 t 의 함수로서 Fig. 7에 보여지고 있다. 이 그림에서 lift-off가 커지면 커질수록 전체적인 오차 또한 커진다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 자기적 성질을 이용한 와전류 임피던스 신호의 비파괴 검사 응용 시 센서 측정 거리인 lift-off를 보상

하는 과정의 기법에 대하여 논하였다. 다양한 위치의 lift-off에서 와전류 신호를 획득 해내기 위하여 3차원 스캐너를 비롯한 실험 장치를 이용하였고 그러한 신호들의 특성을 뽑아낸 후 lift-off 0의 상태인 신호들로 불변 변환 시키기 위하여 RBF (Radial Basis Function) neural network 알고리즘이 쓰였다. 이러한 센서 측정 거리 불변 변환 및 보상의 기법은 다양한 경우의 lift-off에서 얻어진 와전류 신호들이 궁극적으로 변환 되어야 할 zero lift-off인 상태의 와전류 신호들로 변환 또는 보상 되어질 수 있음을 보여주었다. 지금까지의 결과들로 미루어 볼 때 lift-off 불변 변환 기법은 매우 높은 정확성을 보여 주었고 이렇게 보상된 와전류 신호들은 결함 또는 흡집들의 프로파일 작성이나 특성의 형상화 및 구체화 등 자기적 신호처리의 다음 단계를 위하여 쓰일 수가 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. K. Na, M. A. Franklin, "Detection of subsurface flaws in metals with GMR sensors", presented at QNDE 2004 conference, Golden, Colorado, USA, July 2004.
- [2] H. Hoshikawa, K. Koyama, Y. Naruse, "Detecting weld zone

over anticorrosion painting by rotating uniform eddy current probe", presented at QNDE 2004 conference, Golden Colorado, USA, July 2004.

- [3] H. Hoshikawa, K. Koyama, M. Maeda, "A new eddy current surface probe for short flaws with minimal lift-off noise", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds, Vol. 22, American Institute of Physics, pp. 413-418, 2002.
- [4] D. Kim, L. Udupa, S. S. Udupa, "Lift-off invariance transformations for eddy current nondestructive evaluation signals", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds, Vol. 21, American Institute of Physics, pp. 615-622, 2002.
- [5] S. Mandayam, L. Udupa, S. S. Udupa and W. Lord., "Invariance Transformations for Magnetic Flux Leakage Signals", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, pp.1577-1580, 1996.
- [6] D. S. Broomhead, D. Lowe, "Multivariate functional interpolation and adaptive networks", *Complex Systems*, vol. 2, pp. 321-355, 1988.
- [7] G. Strang, "Linear Algebra and its Applications", *HBJ Inc*, 1988.
- [8] J. T. Tou, R. C. Gonzalez, "Pattern Recognition Principles", Addison-Wesley, 1974.

Lift-Off Invariance Transformations for Electromagnetic Eddy Current Nondestructive Evaluation Signals

Daewon Kim*

*Multimedia Engineering Department of Electronics and Computer Engineering
College of Engineering Dankook University
San-29, Anseo-Dong, Cheonan, Choongnam, Korea, 330-714*

(Received 8 October 2004, in final form 15 December 2004)

Eddy current (EC) testing methods are widely used in a variety of applications including the inspection of steam generator tubes in nuclear power plants, aircraft parts and airframes. A key factor that affects the EC signal is lift-off which means the physical distance between a sensor and a specimen in the testing. In practice, it is difficult to keep track of the actual value of the lift-off during a specific experiment, simulation or testing in the field, which is essential for accurate interpretation of the signal to be used in the following steps. Hence it is necessary to have a scheme to render the EC signal invariant to the effects of lift-off in spite of the changes in the real world. This paper describes a new method for compensating EC signals for variations in lift-off by acquiring an invariance feature using a homomorphic operator and neural network techniques. The signals from various lift-offs are transformed to obtain a zero lift-off equivalent signal that can be subsequently used for defect characterization in the next step.

Key words : Eddy current, Invariance Transformation, Lift-off, Nondestructive Evaluation