

압연롤 검사를 위한 다중 센서 와전류 탐상 검사 시스템 개발

이재호^a, 박태성^b, 박익근^{b*}

Development of Multi-channel Eddy Current System for Inspection of Press Rolls

Jae-Ho Lee^a, Tae-Sung Park^b, Ik-Keun Park^{b*}^a The Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|-------|------|
| Received | 27 | March | 2017 |
| Revised | 23 | May | 2017 |
| Accepted | 5 | June | 2017 |

Keywords:

Eddy current testing
Array sensor
Press roll
Surface examination
Bruise

ABSTRACT

Press rolls are constantly exposed to physical and heat stresses on their surface and are prone to crack, bruise, and spall if the accumulated stress goes beyond the critical point. Such surface phenomenon can cause them to lose their functionality and eventually lead to a halted production line. Eddy current testing can be considered a useful method to investigate the surface of the roll. The method involves the application of a high intensity magnetic field onto the surface of the roll, and thereby finding any early stage of possible defects. When the method was applied for roll inspection, the cross section of the sensor was regulated as per the overall testing speed. A smaller cross sectional area implied a better resolution but a longer testing time. In this paper, a convenient method to increase both overall system resolution and inspection speed of eddy current roll inspection is suggested by using a devised array sensor structure.

1. 서론

압연롤 생산공정에서 생산되는 제품의 품질은 압연롤의 형태에 직접적 영향을 받는다. 압연롤은 생산공정 특성상 상당한 열적 물리적 스트레스에 지속적으로 노출되고 이로 인해 생성된 결함은 지속적인 열적 물리적 스트레스와 함께 성장하게 되고 최종적으로는 압연롤의 기능 상실을 야기한다. 따라서 정기적인 압연롤 검사와 더불어 롤 표면연마를 통해 압연롤의 건전성 확보는 압연 생산 시설에서 반드시 실행되어야 하는 필수적 절차이다. 이러한 롤의 건전성 테스트는 다양한 비파괴적 검사 수단을 조합하여 진행될 수 있는데 그 가운데서도 검사의 신속성과 비접촉식 방법에 의해

다양한 결함에 대한 정보를 줄 수 있는 와전류탐상 검사기법이 초음파 검사기법과 함께 주로 많이 사용된다. 와전류 탐상검사의 경우 특히 센서의 구조와 구동 주파수를 달리하여 표면 결함의 3차원 이미지생성도 가능해 롤탐상기의 표면 근방에서 발생한 결함에 대한 유용한 정보를 확보할 수 있고 이를 토대로 크랙, 재질검사, 브루즈(bruise), 자화 등의 평가가 가능하다.

와전류탐상 검사기법을 적용하여 압연롤 검사시 센서의 크기는 검사시간과 검사결과의 분해능과 밀접한 관계를 가진다. 즉 단일 와전류 센서를 사용할 경우, 작은 직경의 센서는 상당히 정밀한 검사 결과를 만들어 낼 수 있으나 넓은 면적의 롤표면을 전부 검사하려면 그만큼 검사 시간은 늘어날 수밖에 없다. 반대로 센서의 크기

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6332

Fax: +82-2-977-4507

E-mail address: ikpark@seoultech.ac.kr (Ik Keun Park).

를 크게 하여 검사를 진행할 경우, 와전류가 흐르는 반경 또한 상대적으로 커져 측정 결과를 2차원 평면상으로 표현할 경우 실제 크기에 비하여 상대적으로 크게 평가되는 문제가 발생한다. 따라서 측정 분해능을 높이고 검사 시간을 단축하기 위해 통상적으로 여러 개의 와전류센서를 특정 형태로 배열하여 검사가 행하여지는 어레이 센서(array sensor)가 활용되고 있다^[1].

본 연구에서는 롤 탐상 검사에 적합한 어레이 구조를 가지는 센서를 설계/제작하고 특화된 하드웨어를 통해 획득된 데이터를 분석하고 그 유용성을 검증하였다.

2. 관련이론

2.1 와전류탐상검사

와전류 비파괴검사는 전도성 물질에 대해 전자기적 원리를 이용하여 국부적으로 전도도를 측정하여 피검사체의 표면에 발생하는 결함들에 대해 검사가 가능한 비파괴 검사의 한 방식이다.

Fig. 1과 같이 고주파의 교류전류가 통하는 코일을 전도성 시험체 표면에 접근시키면 전자기유도현상에 의해 전도성 시험체 내부에 와전류가 발생하게 된다. 만일 시험체의 특성(결함, 전도도, 투자율, 두께, 재질 등)이 변화하게 되면 발생된 와전류의 분포가 변하게 되고 이 변화는 전자기유도현상에 의해 전자기장의 변화를 일으키고 이러한 전자기의 변화를 센서 코일을 통해 전류의 형태로 변환하여 측정하게 되면 시험체의 특성을 평가 할 수 있다.

전도성물질에서는 이러한 변화를 현저하게 하기 위해 통상적으로 시간에 따라 변화하는 사인파를 구동 코일에 인가하여 의도적으로 강한 와전류를 생성시킨다.

와전류검사의 동작원리는 유사 정상상태 접근방법으로 정량적 모델링이 가능한데 즉 변위전류가 미세하다고 가정하고 접근하면 Maxwell에 의해 제시된 4개의 방정식으로 설명될 수 있다.

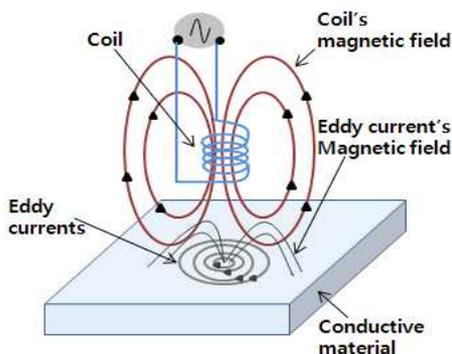


Fig. 1 Principle of eddy current testing

$$\nabla \times H = J_c + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_0 \quad (4)$$

여기서 H 는 자기장의 세기, E 는 전기장의 세기(Vm^2), B 는 자속밀도(T), D 는 전속밀도(cm^2), J 는 전류분포(Am^2) 그리고 ρ_0 는 공기에서의 전하밀도를 나타낸다.

또한 등방성의 균질의 매질에서는 다음의 관계를 갖는다.

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$D = \epsilon E \quad (6)$$

$$J_c = \sigma E \quad (7)$$

자기장은 보통 그 구성성분인 자기전압함수에 의해 식 (8)과 같이 표현될 수 있고 식 (2)로부터 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times A) = \nabla \times \left(-\frac{\partial A}{\partial t}\right) \quad (9)$$

여기서 식 (7)과 (9)을 통해

$$J_c = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (10)$$

얻을 수 있고 식 (1)에 식 (8)과 (10)을 적용하면

$$\nabla \times \nabla \times A = \mu J_s = -\mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (11)$$

이 되고 이를 다시 풀어쓰면

$$\nabla^2 A = -\mu J_s + \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (12)$$

얻는다^[2]. 여기서 J_s 는 전류원 밀도이고 $\mu \sigma (\partial A / \partial t)$ 는 유도된 와전류의 밀도와 연관된다. 자기장에 Dirichlet 경계조건, $A|_{\partial V} = 0$ 과 Neumann 경계조건, $A \times \nabla \times A \cdot \hat{n}|_{\partial V} = 0$ 을 적용하여 풀면 확산함수를 통해 전류원에 의해 유도되는 와전류의 분포를 예측할 수 있다^[3,4]. 이를 위해 식 (1)의 좌변에 벡터 항등식을 적용하여 정리하면

$$\nabla \times \nabla \times H = (-\nabla^2 H) \quad (13)$$

가 된다. 또한 (1), (6), (7)에서 $\nabla \times H = \sigma E + \epsilon (\partial E / \partial t)$ 이고 $\nabla \times E = -(\partial \mu H / \partial t)$ 이므로 결국,

$$-\nabla^2 H = -(\sigma + \epsilon \frac{\partial}{\partial t}) \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (14)$$

가 된다. 여기서 가해지는 자기장이 평면파라 가정하면,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial (H_0 e^{j\omega t} e^{-jk \cdot r})}{\partial t} = j\omega H \quad (15)$$

이다. 여기서 k 는 파수, r 은 위치벡터이다.

또,

$$\frac{\partial^2 H}{\partial^2 t} = j^2 \omega^2 H = -\omega^2 H \quad (16)$$

이다. 식 (15), (16)을 식 (14)에 대입하여 정리하면 $\nabla^2 H = (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)\mu H$ 가 된다. $k^2 = (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)\mu$ 라 하면

$$\nabla^2 H - k^2 H = 0 \quad (17)$$

이 된다. 자기장이 $x = 0$ 에서 yz 평면에 수직으로 진행하는 파라고 생각하면 식 (17)은 $(d^2 H/dx^2 - k^2 H) = 0$ 가 된다.

이 파동방정식의 해는,

$$H = H_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (18)$$

이다. $k^2 = (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)\mu$, 하면 (18)은

$$H = H_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x} e^{-j\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x} e^{j\omega t} \quad (19)$$

가 된다.

식 (1)에서 $\nabla \times H = J_e + \frac{\partial D}{\partial t}$ 은 $J_e \gg \frac{\partial D}{\partial t}$ 이므로,

$$\nabla \times H = J_e \quad (20)$$

이다. 마찬가지로, 자기장이 yz 평면에 수직으로 진행하는 파라고 가정하면 식 (20)은

$$\frac{dH}{dx} = J_x \quad (21)$$

가 된다. 식 (21)에 식 (19)를 적용하면

$$J_x = \frac{d}{dx} H_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x} e^{-j\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}x} e^{j\omega t} \quad (22)$$

가 된다. 식 (22)로부터 표면에서 일정 깊이까지의 전류 밀도가 구해져 표면에서부터 일정깊이에서의 전류량 즉, 전류분포를 알 수 있다.

통상 와전류탐상에서 전류원은 구동코일을 이용하여 사인파를

적용하여 공급하고 보다 강한 전류원 효과를 얻기 위해 투자율이 높은 코어와 turn 수를 적용하여 상대적 전류밀도를 높일 수 있다. 이로 인해 2차적으로 발생하는 와전류를 보다 강하게 할 수 있다.

이와 더불어 센서 코일을 적용하여 전류원에 의해 발생된 자기장과 와전류에 의해 발생된 자기장이 합성된 형태로 존재하는 자기장의 변화를 측정할 수 있게 된다⁵⁾.

와전류 센서를(센서코일) 회로로 표현하면 Fig. 2와 같다. 키르히호프의 전압법칙으로부터

$$L \frac{dI}{dt} + RI = V_{applied} \quad (23)$$

이다. 여기서 가해지는 AC 전류를

$$I = I_0 e^{j\omega t} \quad (24)$$

라 하면, 식 (23)에서

$$j\omega LI + RI = V_{applied} \quad (25)$$

가 된다. 검사체에 유도된 와전류의 영향은 Fig. 2의 회로에서 임피던스 $Z = R + j\omega L$ 의 변화로 나타난다.

$$Z = \frac{V_{applied}}{I} = R + j\omega L \quad (26)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (27)$$

이 임피던스의 크기변화와 각도변화를 Fig. 3과 같이 임피던스 평면에서 분석하면 서로 상호작용하는 자기장의 영향 곧 결합의 영향에 의한 신호 변화량을 확인할 수 있다.

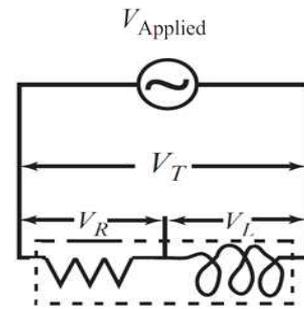


Fig. 2 Eddy current sensor

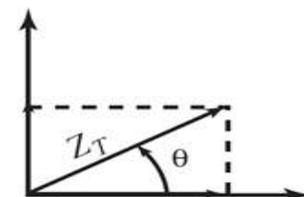


Fig. 3 Impedance plane

2.2 와전류탐상검사를 적용한 결함 검출

와전류탐상검사에 의해 검출이 가능한 결함은 표면상 또는 표면 바로 아래의 미세 균열, 흠, 이물질 등으로 피검사 대상의 전도도에 있어서 불연속적인 부분은 차동센서를 적용하여 AC 커플링을 통해 대부분 검출이 가능하다. 그러나 브루즈 결함은 전도도에서 분명 불연속점이 존재하더라도 비교적 넓은 면적을 가지는 경우 차동 센서를 적용하여 AC 커플링된 신호를 읽을 때 브루즈의 시작점과 끝점에서만 신호를 확인할 수 있어 실제 손상이 발생한 브루즈 영역을 나타내기에는 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 임피던스의 레벨값을 읽어 들여 전도도값을 확인함으로써 브루즈 결함을 판별할 수 있다.

3. 압연롤 검사를 위한 시스템 구축

3.1 결함검출을 위한 센서 설계/제작

어레이센서의 구현은 총 8개의 차동 센서를 Fig. 4와 같이 배열 하였고 1개의 드라이버 코일을 차동센서 어레이의 외곽으로 배열 하여 1개의 드라이버 코일에서 생성된 자기장이 동시에 총 8개의 차동 센서들 모두에 여기 신호를 줄 수 있도록 하였다. 이렇게 1개의 드라이버 코일로 배열할 경우 각 채널별로 구동 코일이 존재할 경우에 비해 구동코일 간의 위상차로 인해 간섭이 발생하는 문제를 해결할 수 있고 각 채널별로 들어오는 이득 값을 동일하게 조절하기가 용이하다. 또한, 제작 시 각각의 채널에 대해 구동코일을 권선하지 않아도 되므로 센서의 제작이 훨씬 용이한 장점을 가진다. 수신패턴은 적은 량의 권선으로도 높은 임피던스를 가질 수 있도록 높은 투자율을 갖는 망간아연계의 중심코어를 사용하였으며 결선은 차동법으로 하여 높은 민감도와 신호 대 잡음비를 가질 수 있도록 하였다.

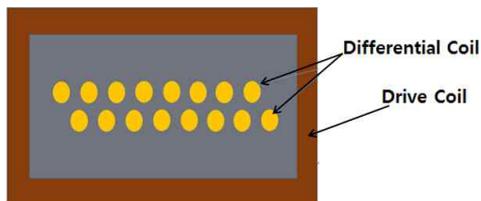


Fig. 4 Structure of array sensor



Fig. 5 3D rendering of array sensor

Fig. 5는 압연롤 검사를 위해 설계된 3D 랜더링 도면을 나타내고 있다. 어레이센서의 구조는 하단부에 센서를 내장할 수 있는 PCB와, 커넥터와 접속을 용이하게 하기 위해 고안된 PCB를 내부에 수용하고 있으며 상부에 커넥터가 케이스에 마운트 되는 형태로 구성하였다. Fig. 6은 실제 제작된 8채널용 롤 탐상용 어레이센서 모듈이다.

3.2 브루즈 검사를 위한 센서 설계/제작

롤 탐상기상의 브루즈는 국부적으로 발생한 강한 열응력에 의해 롤표면의 일부 조직이 물리적으로 변화하여 발생하므로 주변의 전도도와 롤표면의 전도도는 서로 상이한 값을 갖게 된다. 이를 감지하기 위해서는 측정된 임피던스의 크기 값을 참조하여야한다. 통상적인 균열검사의 경우 시스템은 불연속점에서 이산적 변화에 최적화되도록 설계가 되어 있는 반면에 브루즈 검사는 임피던스의 크기 값이 환경에 변화없이 신뢰성 있게 확인될 수 있도록 설계되어야 한다.

따라서 브루즈 센서 역시 온도나 습도의 변화 없이 일정한 값을 출력하도록 설계하였다. 제작된 브루즈 검사용 센서는 drive pickup absolute 타입으로 설계하였다. 코일의 turn 수와 직경은 맥스웰 방정식으로부터 전기장 및 자속밀도를 구하고 이 때 시험체 표면에 발생하는 와전류를 이론적으로 구하여 개략적인 코일의 직경과 turn 수를 구하였다⁶⁾.

이론적으로 구한 코일의 직경과 turn 수를 기반으로 제작을 수행한 뒤 실험을 통하여 최적의 구동코일의 직경 및 turn 수를 도출하였다. 이 때 도출된 구동코일의 직경은 0.5 mm, turn 수는 58이



Fig. 6 Fabricated array sensor



Fig. 7 Fabricated sensor for inspection of bruise

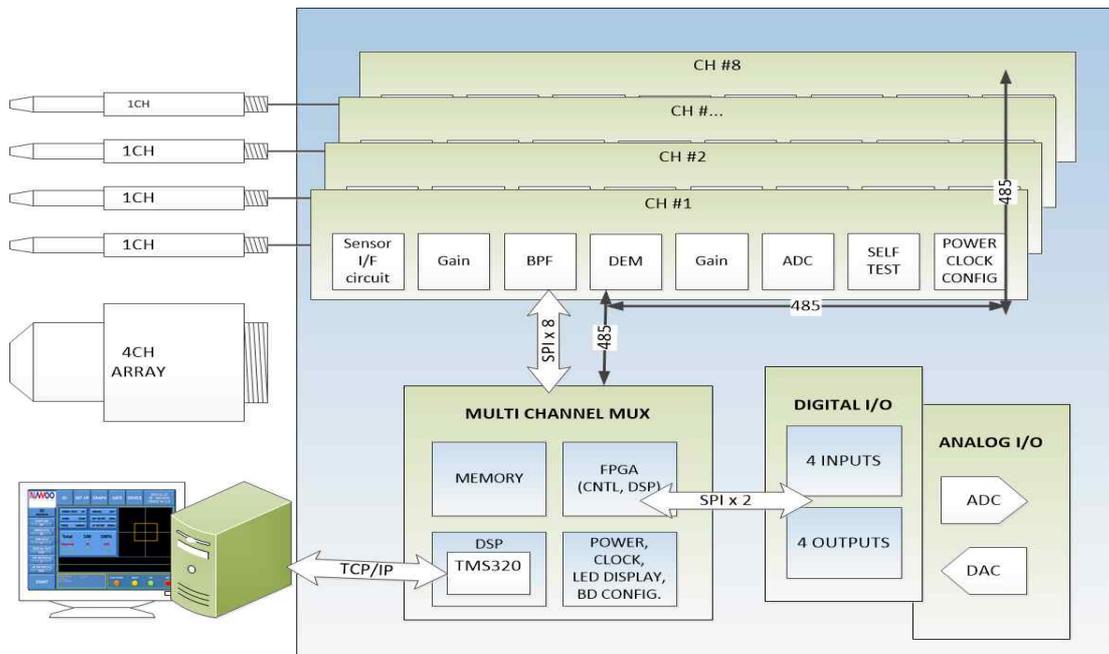


Fig. 8 Block diagram of hardware

었으며, 센싱부 코일의 직경은 0.14 mm, turn 수는 430으로서 이를 적용하여 센서 코일을 제작하였다.

3.3 어레이센서 연동 하드웨어 구성

롤 탐상용 하드웨어 시스템은 Fig. 8과 같이 어레이센서를 수용하는 8채널 보드와 브루즈 센서를 수용하는 레벨 센싱용 8채널 보드로 구성하였고 구동신호는 채널 1의 드라이브에서 받도록 연결하였다. 각 채널은 구동신호로부터 임피던스 값을 측정할 수 있도록 채널 1로부터 동기신호를 받는 구조로 구성하였다.

각각의 센서에서 수집된 신호들은 2채널의 A/D 변환기(AD7366BRUZ)를 거쳐 디지털신호로 변환되고 다시 DSP(TMS320C6516)에서 디지털 필터링을 거친 뒤 디바이스와 PC와

의 통신을 위하여 cross cable 형식의 TCP/IP를 통해 PC 프로그램에 전달되어 가상의 이차원 롤 표면 어레이에 대한 검사결과를 표현할 수 있도록 하였다.

개발된 센서와 하드웨어는 크랙 및 브루즈 평가를 위하여 Fig. 9와 같이 구성하였으며 두 종류의 센서로부터 취득된 신호를 분석하여 크랙 및 브루즈 평가를 수행하였다.

3.4 시험편 제작

롤 탐상기의 와전류비파괴검사를 위해 표준화된 시험편이 없는 관계로 Fig. 10과 같이 자체 제작한 시험편을 사용하였다. 인공결함은 길이가 모두 40 mm로 방향에 따라 크게 수평방향 결함과 사선방향 결함으로 구분되며 수평방향 결함은 각각 0.1 mm 깊이에 결함폭을 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 그리고 1.0 mm로 달리하여 방전가공하여 제작하였다. 사선결함도 마찬가지로 0.1 mm 깊이에 0.3 mm폭으로 방전가공으로 제작하였다.

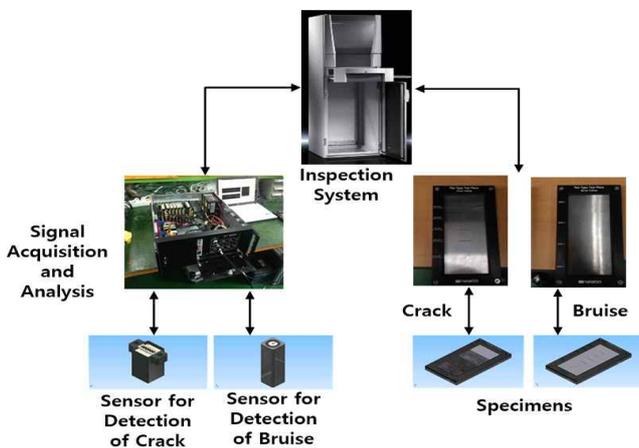


Fig. 9 Schematic diagram of roll inspection system



Fig. 10 Specimens with artificial cracks



Fig. 11 Specimen with bruise defects

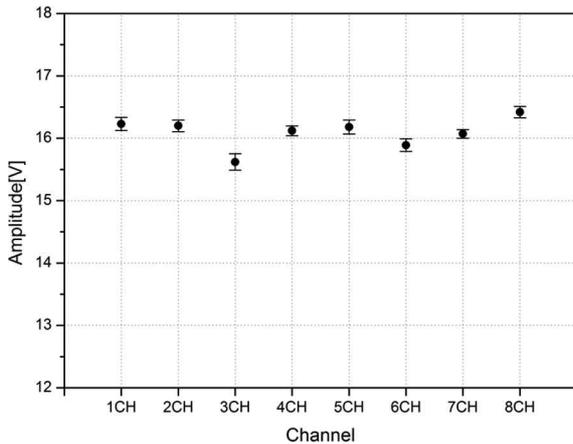


Fig. 12 Amplitude of each channel for lateral defects

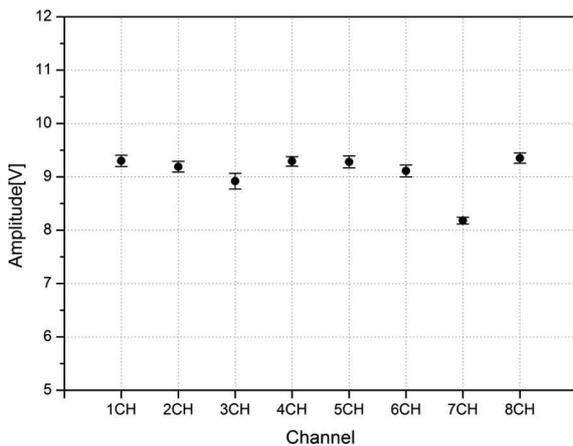


Fig. 13 Amplitude of each channel for oblique defects

브루즈 결함은 실제 압연롤 공정상에서 사용 중 브루즈가 발생한 롤과 브루즈 결함이 없는 시험편을 확보하여 시험을 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 균열 결함 검출

결함검출을 위하여 드라이버 신호는 와전류의 침투깊이를 고려하여 200 kHz로 선정하여 시험편의 인공결함을 대상으로 신호를 취득하였다. 수평방향 및 사선방향의 결함에 대하여 총 10회 반복

실험을 수행하여 각 채널별로 이득값을 측정하였다.

Fig. 12는 수평방향으로 40 mm 길이에 깊이 0.1 mm, 넓이 0.1 mm의 인공결함에서 채널별로 취득한 결함신호에서의 이득값을 나타내고 있다. 각 채널별로 동일 레벨의 결함신호가 채널별로 획득되었음을 확인할 수 있다. Fig. 13은 사선방향(45도)방향으로 가공된 길이 40 mm, 깊이 0.1 mm, 넓이 0.1 mm의 인공결함에 대해서도 채널별로 유사한 신호레벨의 결함신호를 확인할 수 있다.

일반적으로 어레이 센서를 제작 시 단일 구동코일을 적용할 경우 구동코일의 중심부에 비해 구동코일 주변으로 갈수록 자속밀도가 희박해 지며 검사대상금속에서 센서의 위치가 멀어질수록 그 차이는 더욱 심해진다. 이러한 차이를 최소화하기 위해 본 연구에서는 가능한 구동 코일을 충분히 넓게 하여 차동센서 코일들이 영향을 덜 받도록 배치함으로써 각 채널별로 거의 유사한 레벨의 신호가 측정된 것을 확인할 수 있다. 또한 사선방향(45도)으로 가공된 인공결함에 대해 동일 이득 조건하에 채널별로 취득된 신호에서 유사한 신호레벨의 결함신호가 측정되었는데 이는 방향성이 있는 결함(수평대비 45도까지의 결함)에 대해서도 결함 검출능이 좋음을 확인할 수 있다. 수평대비 결함방향이 45도 미만인 방향성이 있는 결함은 이론적으로 45도 결함에 비하여 훨씬 검출이 용이하므로 0도 이상 45도까지의 방향성 있는 결함에 대해서도 동일한 결과를 기대할 수 있다.

4.2 브루즈 결함 평가

브루즈 결함이 발생된 시험편을 검사하기 위해서 와전류의 침투 깊이를 고려하여 구동주파수는 150 kHz로 하여 실험을 진행하였다. 브루즈가 발생하지 않은 정상표면에서는 약 4.47 V의 레벨값이 측정되었으며 브루즈 결함이 있는 부위에서는 약 8.24 V의 레벨 값이 측정되었다.

일반적으로 브루즈가 발생한 부분에서는 분자간의 결합이 정상 표면부에 비하여 약해지고 동시에 전도도가 낮아진다. 전도도가 낮은 부분에서는 구동 자기장에 대해 반사되는 자기장도 낮아지게 된다. 따라서 브루즈가 발생한 영역에서는 정상표면에서보다 높은 레벨 값을 나타내게 된다.

5. 결론

롤탐상시스템에서 와류전류검사방식은 현재까지 검사속도의 신속성과 검사결과의 높은 신뢰도로 인해 초음파검사방식과 함께 주로 채용되어지는 방식이다. 본 연구에서는 검사의 속도를 높이고 결함검사의 정밀도를 높이기 위해 다채널을 가지는 어레이 센서를 설계/제작하고 어레이 센서를 구현할 수 있는 최적의 롤탐상검사

시스템을 설계/제작하고 인공 결함시험편을 제작하여 제작된 시스템의 성능 및 활용가능성을 평가하여 결론을 얻었다.

기존의 개개의 독립된 차동센서를 사용하는 어레이센서에 비하여 센서의 제조공정이 간단하여 센서 제작이 용이 하였고, 개개의 독립된 차동센서를 사용하는 어레이 센서에 비해 신호취득을 위한 하드웨어의 구성이 단순하며 구동코일간에 발생할 수 있는 위상 간섭의 문제점을 해결하였다.

단일 구동코일을 적용한 어레이센서를 통해 획득한 데이터를 통해 롤 탐상에서 발생할 수 있는 균열결함의 검출 가능성을 확인하였으며, drive pickup absolute 타입의 브루즈센서를 제작하여 브루즈가 발생한 영역의 검사가 가능함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Hurley, D. C., Hedengren, K. H., Young, J. D., 1992,

Eddy Current Arrays for Defect Detection, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 28 1137-1144.

[2] Benhadda, N., Bouchala, T., Guettafi, A., Abdelhadi, B., 2014, Study of the Influence of Conductive Defect Characteristics on Eddy Current Differential Probe Signal, Journal of Electrical Eng., 14 350-357.

[3] Stucky, P. A., 1991, Diffusion Effects in Eddy Current Nondestructive Evaluation, A Thesis for Master of Science, Iowa State University, USA.

[4] Drobne, M., Vuherer T., Samardzic, I., Glodez, S., 2014, Fatigue Crack Growth and Fracture Mechanics Analysis of a Working Roll Surface Layer Material, Metallurgy, 53:4 481-484.

[5] Theodoulidis, T. P., 2003, Model of Ferrite-Cored Probes for Eddy Current Nondestructive Evaluation, Journal of Applied Physics, 93:5 3071-3078.

[6] Upda, S. S., Moore, P. O., 2004, Nondestructive Testing Handbook 3rd Edition: Electromagnetic Testing, American Society for Nondestructive Testing.