

**자동차용 볼트의 검사를 위한 시뮬레이션에 기반한
ECT 센서 설계 및 실험적특성**임광희^{a*}, 이슬기^b, 김학준^b, 송성진^b, 우용득^a, 나승우^c, 이형호^d**Experimental Approach and Simulation-Based Design of
Eddy Current Sensors for Inspection of Vehicular Bolts**Kwang-Hee Im^{a*}, Seul-Gi Lee^b, Hak-Joon Kim^b, Sung-Jin Song^b, Yong-Deuck Woo^a,
Seung-Woo Ra^c, Hyung-Ho Lee^d^aDepartment of Mechanical and Automotive Eng., Woosuk University, 443, Samnye-ro, Wanju-gun, Jeonbuk-do, 565-701, Korea^bDepartment of Mechanical Eng., Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Changan-gu, Suwon, Kyunggi-do, 440-746, Korea^cResearch Center, Seoul Metal Co. Ltd. 483-2, Dream-ro, Seo-gu, Incheon 440-310, Korea^dResearch Center, Taesan ENG, 126, Seogam-ro 3-gil, Iksan, Jeonbuk-do, 570-300, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	6	May	2015
Revised	11	June	2015
Accepted	12	June	2015

*Keywords:*Eddy current testing
Bolts
Bobbin coil
NDE evaluation**ABSTRACT**

Oil filters for vehicular parts are used under high and low temperatures as the engine is cooled, and defects can be generated with repeated changes in the operating environment and with changes in the shape, such as very high internal losses for the bolts. Visually checking for defects inside a bolt is impossible. Nondestructive evaluation methods such as eddy current testing (ECT) are recommended as a more effective way to examine inside a bolt and detect surface defects in a short amount of time. In this study, the fit bobbin coil eddy current probe was applied to checking the bolts. The bolt parameters were calculated by using a COMSOL analysis program to obtain parameters for professional interior design and fault diagnosis.

1. 서론

자동차 산업분야에 있어서 첨단 부품 및 고성능 부품이 요구됨에 따라 오일필터, 연료펌프, 엔진블럭 및 샤프트 등의 분야에서 안정성 및 건전성이 보장된 볼트 설계·제작 및 생산관리가 요구된다^[1].

특히, 오일 필터는 엔진의 고온과 냉각을 반복하는 가동환경 특성상 오일 필터용 볼트 내부에 결함뿐만 아니라 형상 변화와 같은 내부 손실이 발생할 가능성이 매우 높다. 또한 볼트 내부에 Fig. 1과 같이 발생한 결함을 육안으로 확인하는 것이 불가능하다. 이러

한 결함은 엔진 가동 시 엔진 효율을 떨어뜨리며 초기 마모를 조기에 발견하고 더 큰 손상으로 진전되는 것을 미연에 방지하지 못하면 윤활유 속에는 다량의 마모 입자들이 존재하게 됨으로써 엔진 부품의 마모 및 손상을 가속화시킨다. 이는 차량 엔진의 수명과 효율에 영향을 미치게 되며 경제적인 문제로 이어진다. 따라서 볼트 내부에 발생한 수백 μm 표면 결함 등을 검출하기 위해 현재 대기업에서는 모든 가공된 볼트 건전성에 대한 품질보증을 원하고 있는 실정이다.

이를 위해 비파괴기법인 초음파로써 재료의 물성치 평가를 위해

* Corresponding author. Tel.: +82-63-290-1473

Fax: +82-63-291-9312

E-mail address: khim@woosuk.ac.kr (Kwang-Hee Im).

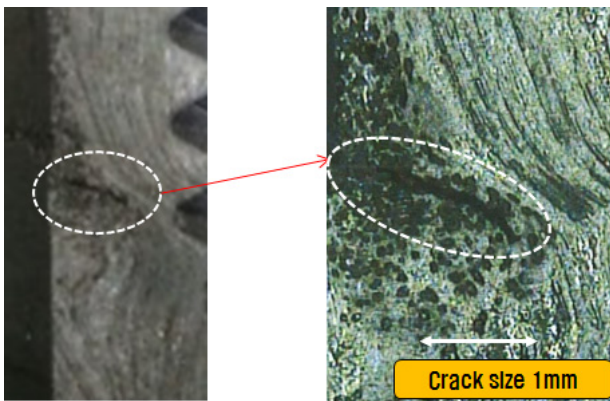


Fig. 1 Defects generated in bolts of oil filters (magnitude 1 mm)

서는 초음파 속도, 와전류탐상시험(ECT: eddy current testing), 공진(resonance) 등의 파라메타는 일반적으로 적용하는 비파괴기법이다^[2-9]. 이 중에서도 적용 가능한 비파괴평가방법들 중 와전류 탐상시험이 볼트 표면에 발생한 미세 결함을 검출하는데 가장 적합하다.

한편 산업현장에서는 파이프 원형 배관에서 발생하는 결함의 종류는 외부 부식 및 균열 등이 발생하여 이 배관의 건전성 확보가 큰 이슈로 부각되고 있다^[9]. 현재 국내에서는 파이프에 맞는 비파괴검사기법을 개발하고 있는 중이다. 특히, 결함방향이 축방향 및 원주방향을 고려하여 진행하고 있다. 사용중인 PIG 시스템에 적용하고 있는 MFL 검사기법은 배관 축방향으로 자회시켜 결함을 탐상하고 있다. 이때 자속의 방향과 수직인 방향인 원주방향으로 존재하는 결함과 배관 두께 감소 등의 결함 검출에는 우수하나, 자속 방향과 수평한 축방향의 결함과 응력부식균열의 주요 원인인 코팅 손상 등에 대한 결함 검출능이 떨어져 연구가 진행이 되고 있는 실정이다.

원통형 피스톤로드의 건전성 평가를 하기 위해 기계적인 로크웰 방법이나 ECT 기법 등이 활발히 이용이 되고 있다. 또한 열충격 주기실험후 본드 코팅층과 세라믹 탑 코팅층 사이에 발생하는 TGO 산화물층에 대한 변화 양상과 이에 대한 와전류 신호를 측정하여 TGO층 성장 거동의 비파괴적인 평가를 위한 실험을 진행하였으며 탐촉자의 전기적 특성평가를 위해 임피던스 및 공진주파수를 측정하고있는 실정이다^[10,11].

본 연구에서는 자동차부품에 적용을 하기 위해서 내삽형 바빈(bobbin) 와전류 센서를 설계 및 제작하고 이를 검증하기 위한 기초실험으로 오일 필터용 볼트를 모사한 시험편을 표준 시험편으로 제작하였다. encircling coils를 이용하여 모사 시험편의 각 결함에 대한 신호를 실험을 통하여 그 성능을 분석 및 평가하였다. 바빈 와전류 센서의 성능 평가를 통하여 표준 시험편의 결함 진단이 가능한 차동형 바빈 와전류 센서를 설계하고 실제 제작한 바빈 와전류 센서로 실험을 수행하였다. 이 결과를 이용하여 최적의

coil parameter를 선정하여 최종적으로 차동형 바빈 와전류 센서를 구현하였다.

또한 오일 필터용 볼트는 윤활측면에서 마모가 발생할 가능성이 크다. 마모의 형태는 응착, 마멸, 소착 등으로 엔진의 고온, 냉각 및 고속 주행으로 인하여 충분하지 못한 오일의 유동과 외부의 이물질과 윤활유 내 존재하는 입자들에 의해 마모가 발생할 수 있다^[1]. 따라서 볼트 표면에 발생하는 볼트의 결함으로 circumferential crack, axial crack, angular crack으로 구분하였으며 본 연구에서는 circumferential crack을 검출하는데 적용 가능한 differential bobbin eddy current sensor를 개발하는데 FEM 시뮬레이션을 기반으로 ECT 특성평가 파라메터를 구축하였다.

2. 원리

2.1 와전류 탐상시험

시간에 따라 변하는 교류전류가 흐르는 코일을 도체 시험편에 가까이 가져가면 코일에 흐르는 전류에 의해 발생한 1차 자기장이 도체에 2차 자기장을 유도한다. 이 때 코일을 움직이면 도체의 2차 자기장이 변하고 이로 인해 코일의 1차 자기장의 세기가 변하면서 코일 속에 흐르는 전류가 달라지게 된다. 교류전류로 가진한 한 개의 와전류 코일은 저항과 인덕턴스를 포함하는 A.C. 회로로 대략적으로 얻을 수 있다. 전압에서 전류의 비인 임피던스 Z를 옴의 법칙을 이용하여 얻는다. 임피던스(Z)는 다음과 같다.

$$Z = \frac{V}{I} \tag{1}$$

교류 전류가 운용 주파수(f)에서 코일의 인덕턴스(L)를 통하여 흐를 때, 코일의 임피던스는 회로의 유도 리액턴스(X_L)과 같다. 마찬가지로 운용 주파수(f)에서 저항(R)과 인덕턴스(L)인 코일을 흐르는 교류 전류에 대한 임피던스는 아래의 식과 같다.

$$Z = R + jX_L = R + wjL = R + j2\pi fL \tag{2}$$

코일의 임피던스 크기와 위상각은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[2].

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{4}$$

2.2 표준침투깊이

와전류 프로브를 시험편 위에 올려놓았을 때, 시험편 내에 전도된 와전류는 시험편 내에서 균일하게 분포하지 않는다. 와전류 밀도는 시험편 표면 근처에서 가장 밀도가 크고 시험편 아래로 깊이

Table 1 Standard depth of penetration

Frequency (kHz)	δ (mm)	2δ (mm)
1	0.6426	1.2851
5	0.2874	0.5747
10	0.2032	0.4604
15	0.1659	0.3318
20	0.1437	0.2974
30	0.1173	0.2346
40	0.1016	0.2032
50	0.0909	0.1817
100	0.0643	0.1285

가 깊어질수록 줄어들며 이러한 현상을 표피효과라 한다. 표면에서 와전류밀도가 $1/e$ 또는 37%까지 감소했을 때의 침투깊이를 표준 침투깊이라고 하며 이는 아래의 식과 같다. 여기에서 와전류 주파수(f), 재료의 투자율(μ), 전도도(σ)의 함수로 결정된다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_o \mu_r \sigma}} \quad (5)$$

식 (5)에 의하여 주파수에 따른 표준 침투깊이를 계산하였으며 Table 1과 같다^[3,6].

2.3 휘스톤브리지 제작

두 가지 일반적인 시스템을 이용하는데 전기 브릿지 회로와 필드 회로가 있다. 이 두 가지 시스템은 기본 신호와 연관된 값인 임피던스 Z 를 전기적으로 평형 상태를 맞춘다. 시스템이 실험 설정의 큰 임피던스로 평형 상태를 맞추기 때문에 측정 시스템은 변수(결합, 두께 변화, 전기전도도 등)에서 작은 편차와 관련된 신호의 작은 변화를 검출하는 것이 필요하며 휘스톤 브릿지를 실험에 이용하였다. 평형 상태의 식은 다음과 같다.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (6)$$

식 (6)에서와 같은 조건이 되면 시스템이 평형 상태 즉, 전압계가 0이 된다. 시스템이 평형 상태로 맞춰지면 정밀한 전압계로 프로브가 결합 위 등을 지날 때 평형 상태가 깨지며 발생하는 임피던스의 작은 변화를 즉시 프로브를 통하여 측정할 수 있다. 따라서 휘스톤 브릿지를 이용하여 Phase value와 amplitude 값을 측정한다^[4].

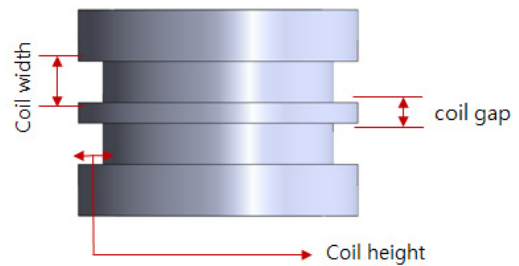
3. 실험

3.1 ECT지그

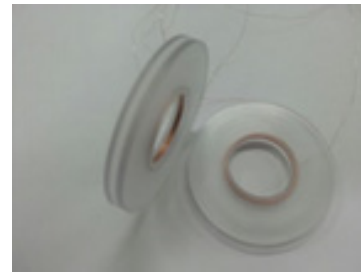
본 연구에서 최종적으로 검출하고자 하는 오일 필터용 볼트의



Fig. 2 Standard sample for detecting cracks



(a) Coil parameter



(b) Probes

Fig. 3 Differential Bobbin probes for detecting surface cracks in rods

내부에 발생하는 표면 결함은 내삽형 와전류 센서로 검출 가능하다 (Fig. 2 참조).

내삽형 와전류 센서는 Fig. 2의 모사 시험편의 외부 표면 결함을 검출하기 위한 외삽형 와전류 센서와 기구적으로 동일하다. 따라서, 설계 및 제작이 용이한 외삽형 와전류 센서를 우선 개발한 후 이를 볼트에 사용할 내삽형 와전류 센서 개발에 적용하도록 한다. 와전류 센서를 설계하는데 필요한 설계 변수에는 Fig. 3(a)에서 보인 바와 같이 coil wire diameter, coil gap, coil width, height, coil turns, lift-off, frequency 등을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 coil gap, coil width, frequency를 설계 변수로 지정하였다. coil wire diameter는 0.1 mm 직경의 코일을 사용하였고 coil turns는 100턴, lift-off는 0.5 mm로 설정한 후 나머지 설계 변수들을 고려하여 최적의 와전류 센서를 개발하였다. lift-off는 와전류 센서 설계 시 고려해야 하는 중요한 설계 변수 중 하나이다. lift-off가 작을수록 시험편에 유도되는 자기장의 세기가 커지는 반면 lift-off 값이 0이 되어 시험편에 밀착되어 움직

일 경우 마찰이 발생하는 것은 피하여야 한다. 또한 바빈(bobbin) 가공 시 사용한 재질인 PC의 특성 상 가공 가능한 최소 가공 두께가 0.5 mm인 점을 함께 고려하여 lift-off를 0.5 mm로 설정하였다.

따라서, coil 폭 및 coil gap을 변화시키기 위하여 Fig. 3(b)에서 보인 바와 같이 coil 폭이 1 mm, 2 mm인 바빈을 제작하여 각각 100턴씩 권선하였다. 바빈의 양 턱의 두께를 1.5 mm, 2 mm로 각각 다르게 하여 coil gap 실험 시 두 개의 coil을 겹쳤을 때 다른 coil 간격이 나오게끔 설계하였다.

제작한 바빈 와전류 센서를 이용하여 시험편을 axial 방향으로 이동하면서 시험편의 fully circumferential cracks의 결함 신호를 검출하였다. 실험은 시험 주파수의 변화, coil 폭 및 coil gap의 변화에 대한 실험을 수행하였다.

3.2 표준 시험편

오일 볼트용 내경 25 mm를 Fig. 2에서 보인 바와 같이 모사하여 외부 표면 결함검사를 위한 외경 25 mm, 길이 231 mm인 봉 모양의 표준 시험편을 제작하였다. 외부에서 발생 가능한 결함 종류 중 바빈으로 검사 가능한 circumferential cracks를 시험편에 폭 0.5 mm이며 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 mm 깊이인 fully circumferential cracks를 EDM 노치로 가공하여 제작하였다. 표준 시험편의 재질은 AISI 1045 Steel를 사용하였다.

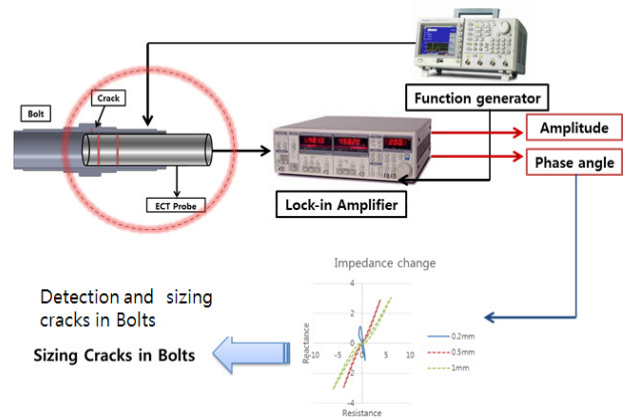
3.3 와전류 시험 및 방법

시험편 결함검출이 가능한 차동형 바빈 와전류 센서의 신호특성을 평가하기 위하여 와전류 시스템을 Fig. 4(a)와 같이 휘스톤 브릿지를 적용하여 개발하였다.

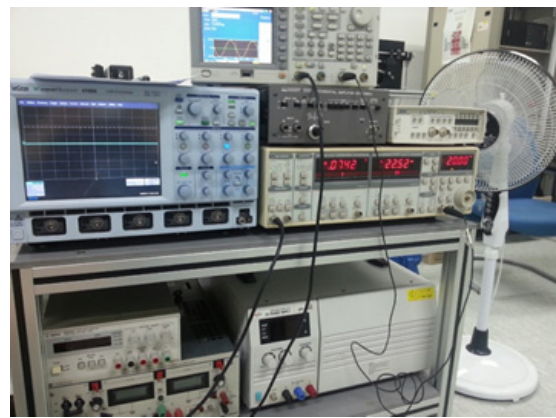
바빈 와전류 센서가 fully circumferential cracks이 있는 시험편의 결함검출 특성을 평가하기 위하여 주파수 발생 장치는 주파수 대역이 100 MHz인 Tektronix사의 함수발생기를 사용하였다. 이 함수발생기를 이용하여 코일에 주파수를 적용하였으며 모든 실험에서 동일하게 5V로 코일에 가전하였다. 그리고 와전류 센서가 시험편의 결함 위를 지날 때 결함신호 특성을 획득하고 각 결함파 사용주파수에 따른 신호 특성을 비교 분석하기 위하여 SRS사의 lock-in amplifier와 Lecroy사의 oscilloscope를 사용하였다. lock-in amplifier와 오실로스코프를 통하여 각 결함에서 amplitude 값의 변화 즉, 임피던스 크기 변화와 phase value의 변화를 얻었다. 센서 설계 및 성능평가에 사용한 실험 장치들은 위의 Fig. 4(b)와 같다.

3.4 ECT 특성 시뮬레이션 평가

본 논문에서 실험에 적용한 주파수에 대하여 Fig. 5에서 보인



(a) Eddy current testing system configuration for bobbin probe

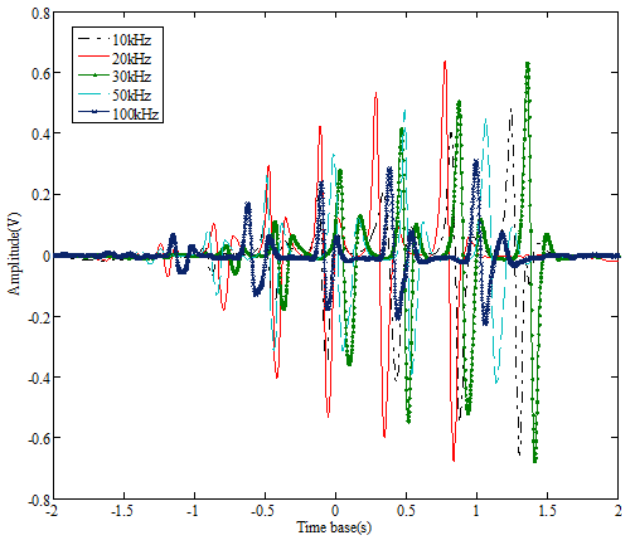


(b) Photo of ECT system

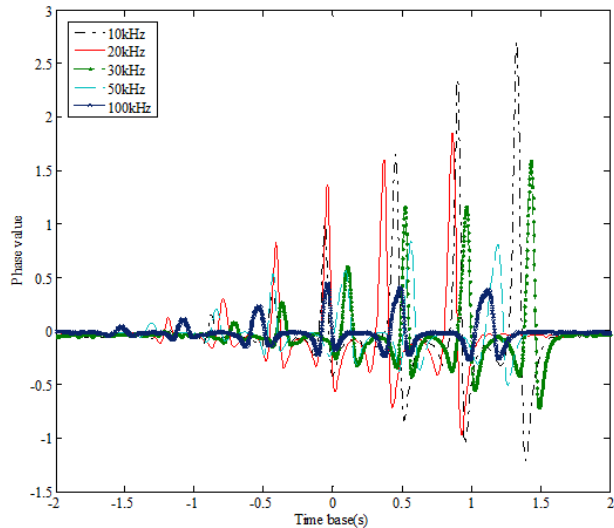
Fig. 4 Over view of Eddy current testing system

바와 같이 lock-in amplifier를 통하여 오실로스코프로 실험 결과를 amplitude와 phase value값에 대하여 구하였다. 실험은 주파수 10, 20, 30, 50, 100 kHz에 대하여 진행하였으며 amplitude와 phase value값을 아래의 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. 이 때 시험편의 결함 깊이가 깊어질수록 amplitude와 phase value가 변하는 정도가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 실험에서 사용한 주파수들을 Fig. 5(a)와 (b)에서 보인 바와 같이 중첩하여 나타내었다. Fig. 5(a)에서 20 kHz와 30 kHz가 비슷한 크기의 신호로 다른 주파수에 비하여 큰 것으로 확인하였다. 이는 Table. 1에서 주파수 20 및 30 kHz의 2 θ 의 값이 0.29 mm 및 0.23 mm로 본 연구의 검출 가능한 결함 깊이인 0.2 mm를 검출할 수 있는 주파수인 것을 알 수 있다. 결함 깊이가 깊어짐에 따라 점점 커지는 것과 달리 20 kHz와 30 kHz의 결함 신호가 주파수 100 kHz의 경우 0.1 mm 결함 이외의 나머지 결함 신호는 거의 비슷하게 나타났다.

이는 식 (5)와 Table 1에 의하여 100 kHz일 때 결함 신호가 크게 나타났음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 최소 검출 결함 깊이는 0.2 mm로 최종적으로 적용할 주파수는 20 kHz와 30 kHz로 선정하였다^[6].



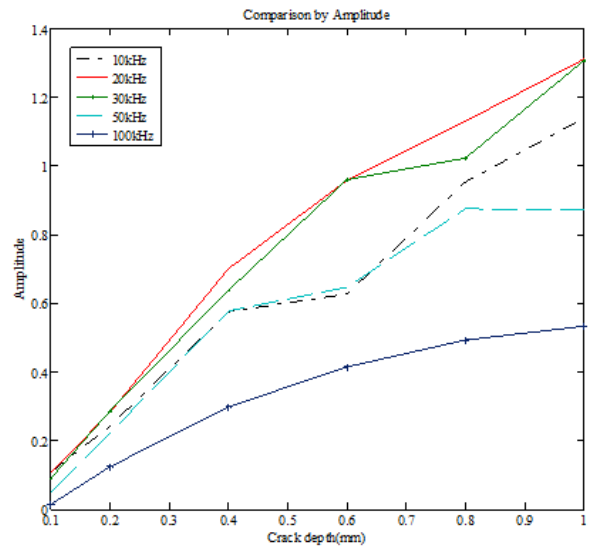
(a) Comparisons of amplitude value in frequency



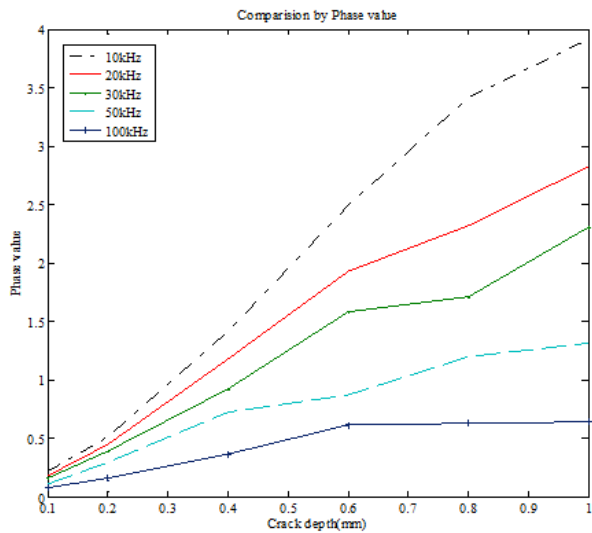
(b) Comparisons of phase value in frequency

Fig. 5 Comparisons both amplitude and phase value for the ranges of 10, 20, 30, 50 and 100 kHz on rods

본 논문에서 실험에 적용한 주파수는 10, 20, 30, 50, 100 kHz로 적용하였으며 이는 식 (5)와 Table 1을 통하여 결정된 주파수 범위이다. 주파수를 변화시키며 시험편의 표면 결함 신호를 취득하였다. Fig. 6에서 보인 바와 같이 결함 깊이가 변함에 따른 amplitude 차이와 phase value 차이를 확인하였다. 실험 결과, 50, 100 kHz의 주파수가 결함을 검출하는 신호의 민감도가 나머지 3개의 주파수 10, 20, 30 kHz에 비하여 떨어지는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)에서 20 kHz와 30 kHz가 거의 비슷한 변화 정도를 보였으며 Fig. 6(b)에서 phase value는 10, 20, 30, 50, 100 kHz 순으로 변화가 작아졌다. 10 kHz가 phase value 변화가 가장 컸으나 μm 급 결함을 측정하는데 고주파가 우수하다고 할 수 있으나 가장 민감도가 우수한 20 kHz 및 30 kHz 주파수가 적합하다고



(a) Crack depth-amplitude



(b) Crack depth-phase value

Fig. 6 Comparisons both amplitude and phase value difference of bobbin ECT sensor for the variations of frequency

판단된다^[6].

3.5 Coil Gap 따른 ECT 특성평가

20, 30 kHz 시험 주파수와 coil 폭 1 mm, 2 mm인 각각의 코일에 대하여 coil gap을 변화시키며 실험하였다. coil gap은 3 mm, 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm로 0.5 mm 단위로 변화시키면서 4가지의 coil gap에 대하여 결함 신호의 특성 변화를 Fig. 7에서 보인 바와 같이 얻을 수 있었으며 이에 대하여 분석하였다.

Fig. 8에서 보인 바와 같이 시험 주파수 20 kHz를 기준으로 비교하였을 때 coil width 1 mm와 2 mm 각각에 대하여 3.5 mm일 때 가장 크며 마찬가지로 coil width가 1 mm일 때 phase value 값이 더 큰 것을 알 수 있다.

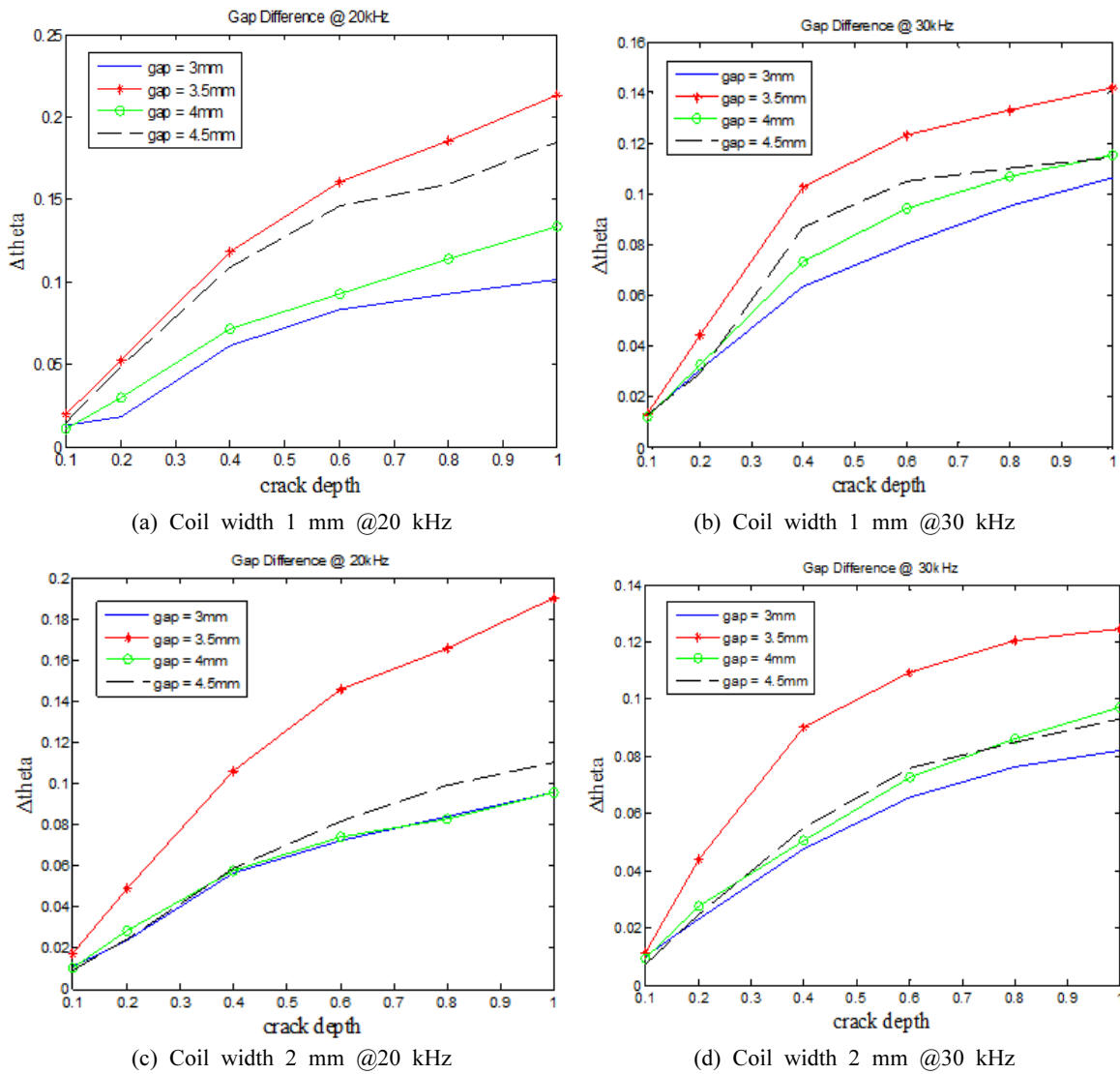


Fig. 7 Comparisons of phase value difference of bobbin ECT sensor for the variations of coil gap

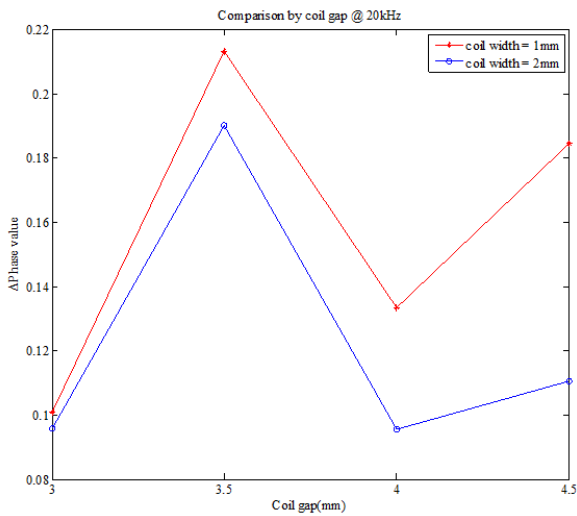


Fig. 8 Comparisons of phase values of the coil width of 1 mm and 2 mm under the defect depth of 1mm and 20 kHz

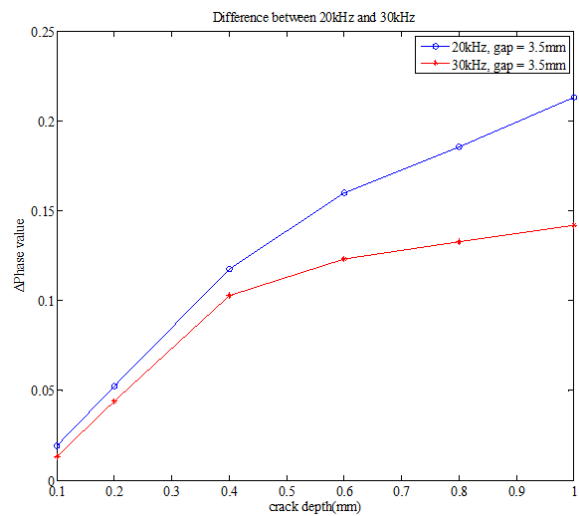


Fig. 9 Comparisons of phase values of the coil width of 1 mm and the gap of 3.5 mm under the range of 20 and 30 kHz

3.6 Coil Gap에 대한 주파수 변화에 따른 ECT 특성평가

Coil width가 1 mm, coil gap이 3.5 mm가 3.5 철에서 우수한 성능을 보였으므로 Fig. 9의 그래프를 얻을 때 3.5철에서 분석한 값을 기준으로 하였다. 주파수 20 kHz와 30 kHz 중 어떤 주파수가 더 큰 phase value 변화를 보이는지를 확인하기 위하여 Fig. 9와 같은 그래프를 얻었다. Fig. 9로부터 주파수 20 kHz가 30 kHz 보다 더 큰 phase value 변화를 보였다.

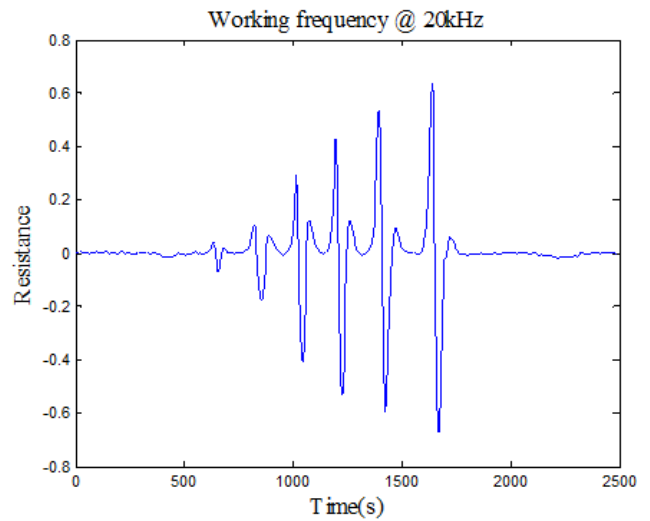
4. 바빈 외전류 결과 및 고찰

위의 실험 결과들로부터 코일 폭, gap 및 운용 주파수를 선정하였다. 선정된 파라미터들을 토대로 최종적으로 차동형 바빈 프로브를 Fig. 10에서 보인 바와 같이 설계 및 제작하였다. 이렇게 설계한 프로브를 이용하여 위의 실험에서 진행하였던 것과 동일한 실험 조건에서 설계한 외전류 센서의 성능을 검증하였다.

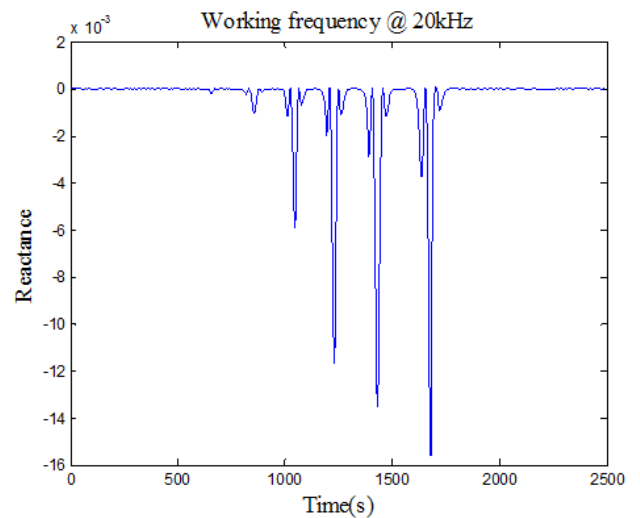
바빈 외전류 센서 성능평가 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)는 주파수 20 kHz일 때 얻은 차동형 바빈 외전류 센서의 resistance, (b)는 reactance이며 (a)와 (b)그리고 식 (2)와 (3)으로부터 그래프의 x축은 resistance, y축은 reactance로 하여 그리면 Fig. 11(c)의 impedance plane을 얻을 수 있다. Fig. 11(c)로부터 확인할 수 있듯이 임피던스 크기가 결함 크기가 커짐에 따라 임피던스도 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 위와 같은 설계 파라미터 선정과정을 거쳐 제작한 차동형 바빈 외전류 센서가 시험편의 μm 급 표면 결함을 검사하는데 있어 주파수 20 kHz일 때 적합한 것을 확인하였다.



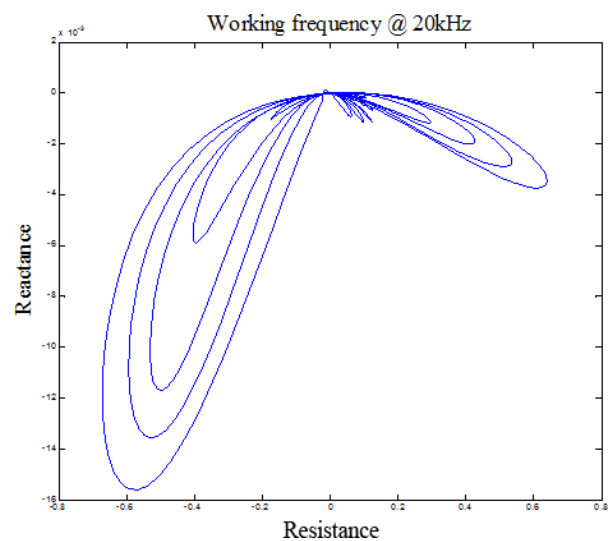
Fig. 10 Home-made ECT bobbin probes



(a) Resistance



(b) Reactance



(c) Impedance

Fig. 11 ECT signal characterization with the shape of bobbin under the frequency of 20 kHz

5. 결 론

본 연구는 시험편 표면 결함을 검출하기 위한 encircling 형태의 differential bobbin eddy current sensor를 실험을 통하여 개발하였으며 내삽형 bobbin eddy current sensor를 제작하기 위한 토대를 마련하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 외경 25 mm, 재질 AISI 1045 Steel인 표준 시험편과 코일 선경 0.1 mm, 코일 폭 1 mm, 권선 수 100턴인 차동형 바빈 프로브를 코일 gap 3.5 mm일 때 결함 깊이가 깊어질수록 phase value와 amplitude 값이 점점 커지는 것을 알 수 있다.

(2) 차동형 바빈 와전류 센서에 있어서 주파수 20 kHz가 가장 적절하였으며 그 다음으로 30 kHz가 적합한 것을 확인하였다. 또한 100 kHz는 0.2 mm보다 큰 결함에 대하여 결함 신호가 크게 나타났다.

(3) Coil 폭이 1 mm와 2 mm 중 phase value 변화가 큰 것은 1 mm였으며 coil gap은 4가지 coil gap case 중 3.5 mm가 phase value 변화가 가장 좋았다. 결함이 커짐에 따라 더 좋은 신호 특성을 보였던 주파수는 각 coil 폭 두 가지 경우 모두에 대하여 20 kHz가 민감한 것으로 확인하였다.

(4) 본 연구에서 수 μm 급 결함을 검출하는데 적합한 차동형 바빈 와전류 센서를 설계할 수 있었고 결함의 깊이가 깊어질수록 impedance plane에서 임피던스의 크기가 커지는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2014년 전북 테크노파크사업에 의해 지원 받았음.

References

- [1] Hong, H., Jeon, S. M., 1994, Cause and Diagnosis of Engine Wear and Damage, Research Center of Daewoo Automobiles, 10:1 130-131.
- [2] Rao, B. P. C., 2007, Practical Eddy Current Testing, ISNT, 1:1 24-25.
- [3] Moorer, P. O., 1986, Nondestructive Testing Handbook 3rd Edition ASNT, 5:1 130-131.
- [4] Shull, P. J., 2002, Nondestructive Evaluation : Theory, Techniques and Applications, CRC Press, New York, 317-331.
- [5] Jeong, J. A., Hsu, D. K., Im, K. H., 2011, One-sided Nondestructive Evaluation of Back-side Wedge by using Ultrasonic Sound, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 20:6 773-777.
- [6] Im, K.H., Lee, S. K., Kim, H.J., Song, S.J., Woo, Y.D., Na, S.W., Hwang, W.C., Lee, H. H., 2015, Application and Design of Eddy Current based on FEM for NDE Inspection of Surface Cracks with Micro Class in Vehicular Parts, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 32:6 529-536
- [7] Hsu, D. K., Thompson, D. O., Thompson, R. B., 1986, Evaluation of Porosity in Aluminum Alloy Castings by Single-sided Access Ultrasonic Backscattering, Review of Progress in QNDE, 5 1633-1642.
- [8] Barnard, B. J., Peters, J. J., Hsu, D. K., 2005, Towards a Generic Manual Scanner for Nondestructive Inspection, Review of Progress in QNDE, 24 1669-1676.
- [9] Cho, S. H., 2010, A Study on MFL and EMAT Techniques for Intelligent Pig System for Inspection Gas Pipelines, A Thesis for a Doctorate, Sungkyunkwan University, Republic of Korea.
- [10] Heo, T. H., Cho, Y., Lee, J. H., Oh, J. S., Lee, K. H., 2009, Evaluation of Defects of Thermal Barrier Coatings by Thermal Shock Test Using Eddy Current Testing, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 29:5 450-457.
- [11] Nam, M. W., Lee, H. J., Cho, C. H., You, H. J., 2010, Characteristics Testing of the ECT Bobbin Probe for Steam Generator Tube Inspection of Nuclear Power Plant, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 30:4 386-395.