

볼트 홀 결함 평가용 와전류 센서 설계제작 및 특성분석

The Design & Manufacture and Characteristic Analysis of Eddy Current Sensor for Bolt Hole Defect Evaluation

안연식 · 길두송 · 박상기
 Y. S. Ahn, D. S. Gil and S. G. Park

(접수일 : 2011년 02월 21일, 수정일 : 2011년 05월 06일, 채택확정 : 2011년 05월 23일)

Key Words : Eddy Current Sensor(와전류 센서), Signal Characteristic(신호특성), Standard Penetration Depth(표준 침투깊이), Resolution(분해능), Gas Turbine Rotor(가스터빈 로터), Bolt Hole(볼트 홀) Defect Evaluation(결함 평가)

Abstract : This paper introduces the special eddy current sensor and its characteristic for bolt hole defect evaluation in gas turbine rotor. In the past, Fluorescent penetration inspection method was used for qualitative defect evaluation in gas turbine rotor bolt hole. This method can detect the bolt hole defect but can not evaluate the defect size. Nowadays, eddy current method is used quantitative defect evaluation due to advanced sensor design technology. And eddy current method is more time and cost saving than the old method. We developed bolt shape eddy current sensor for the rotor bolt hole defect detection and evaluation. The eddy current sensor moves to the bolt hole guided by screw nut and detects the defect on the bolt hole. The bolt hole mock-up and artificial defects were made and used for the signal detection & resolution analysis of eddy current sensor. The results show that signal detection capability is enough to detect 0.2 mm depth defect. And the resolution capability is enough to differentiate 0.2, 0.5, 1.0 and 2.0 mm depth defect.

1. 서 론

가스터빈은 1300℃의 고온에서 운전되고 전력수요가 급격히 늘어나는 하절기에 피크 부하를 담당하는 설비로서 빈번한 기동정지로 인하여 로터는 물론 Balancing(밸런싱) 볼트, 냉각용 볼트, 체결용 볼트 및 홀에 Fig. 1 과 같이 열 피로에 의한 표면결함이 많이 발생하고 있다. 이러한 결함은 로터의 냉각기능에 문제를 초래하여 로터온도 분포를 왜곡시키고 이로 인해 진동을 유발하여 Fig. 2 와 같이 가스터빈 로터의 고장¹⁾을 일으키는 원인이 되고 있다. 그러나 지금까지는 이러한 홀 내부의 결함을 검출하는 기술과 결함의 크기를 정량적으로 평가하는 기술이 없었다. 현재까지 알려진 표면결함에 대한 정성적인 비파괴 검사방법은 형광침투 탐상검사, 자분 탐상검사 등

이 있다. 형광침투 탐상검사²⁾나 자분 탐상검사는 결함의 존재유무만을 육안으로 확인할 수 있을 뿐 결함의 크기를 알 수 없을 뿐 아니라, 볼트 홀의 경우 결함의 존재 유무마저도 육안 확인이 불가능하여 새로운 검사방법이나 장치가 필요하게 되었다. 따라서 볼트 및 볼트 홀에 발생하는 다양한 형태의 표면결함을 효과적으로 검사하고 평가 할 수 있는 방법 및 기술의 개발이 반드시 필요하다. 이러한 필요성에 따라 볼트 및 볼트 홀에 발생하는 다양한 결함을 효과



Fig. 1 Bolt Defect

안연식(교신저자) : 한전 전력연구원 원자력발전연구소
 E-mail : ysas@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5549
 박상기 : 한전 전력연구원 원자력발전연구소
 길두송 : 한전 전력연구원 원자력발전연구소



Fig. 2 Rotor blade trouble by vibration

적으로 검사하고 평가할 수 있는 와전류 센서를 개발하여 그 유효성을 검증하였으며 이번 논문에서는 볼트 홀 검사용 센서의 개발 및 특성 분석 내용을 기술하고자 한다.

2. 형광침투 검사

형광침투 검사는 Fig. 3과 검사대상체에 형광물질을 적용하면 표면결함이 있는 부위에만 형광물질이 나타나고 이를 육안으로 검사 판독한다. 이러한 검사 방법은 전처리, 침투제 적용, 유화제 적용, 침투제 제거, 건조, 현상, 육안검사 및 판독 등 7단계의 과정을 거친다. 그러므로 결함평가의 단계가 너무 복잡하고 검사시간이 많이 소요되는 것은 물론 형광물질 사용 등으로 인하여 인체, 환경유해 물질이 배출되는 등 많은 문제점을 안고 있다.

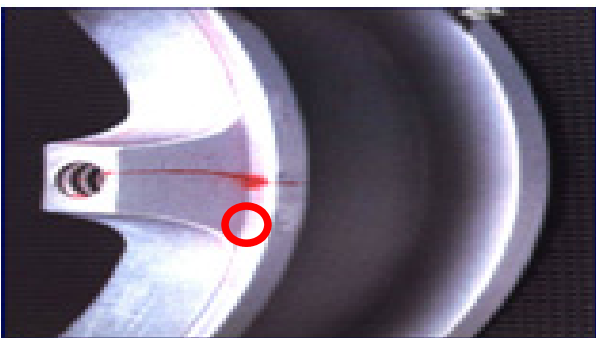


Fig. 3 Fluorescent penetration inspection

3. 와전류 검사

시간에 따라 변화하는 교류전류를 코일에 흘려보내면 코일주위에 1차 자기장(primary fields)이 발생한다. 이 1차 자기장 내에 Fig. 4와 같이 코일을 전도체(conductor)에 가져가면 전자기유도현상에 의해 도

체 내에 유도기전력이 발생하고 이 유도기전력은 렌츠의 법칙에 따라 1차 자기장을 방해하는 전류가 흐르게 되는데 이 전류를 와전류(eddy current)라 한다.⁵⁾ 이 와전류는 1차 자기장을 방해하는 2차 자기장(secondary fields)이 발생한다.³⁾ 이때 전도체의 상태, 위치, 결함, 재질 등의 변화로 와전류가 변화하여 2차 자기장의 변화를 가져오고, 2차 자기장의 변화는 1차 자기장의 변화를 가져온다. 이것은 식 (1), (2), (3) 과 같이 코일의 임피던스(Z)의 변화로 시험기기 회로의 전압(V)과 위상(θ)의 변화를 가져와 회로 값의 변화가 증폭되어 신호 모양을 판독할 수 있는 형태로 출력이 되는 것이다.⁴⁾ 여기서 코일의 임피던스는 저항(R), 리액턴스(L) 및 전류(I)에 의해 결정된다. 임피던스 변화는 전압의 크기로 나타나는데 전압의 크기에 따라 결함의 크기를 정량적으로 평가할 수 하게 된다.

$$V_T = V_R + V_L = I(R + j\omega L) \tag{1}$$

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

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \tag{3}$$

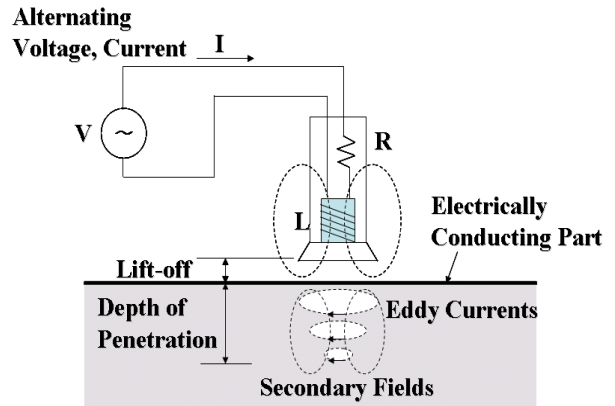


Fig. 4 Eddy current basic theory

4. 표준 침투 깊이 계산

볼트 홀은 자성체인 Ni-Cr-Mo-V소재⁵⁾의 가스터빈 로터에 존재하며 Ni-Cr-Mo-V의 와전류에 의한 침투깊이는 사용하는 와전류 주파수(f), 재료의 투자율(μ), 전도도(σ)의 함수로 결정되는데 실제검사에서는 재료의 물성은 정해져 있으므로 침투깊이는 주파수에 의해 조절된다. 또한 와전류 밀도는 표면 근처에서 최대가 되고, 내부로 들어갈수록 지수함적으로 감소하는데, 이것을 표피효과(skin effect)라 한다. 표

면에서의 와전류밀도가 1/e 또는 37%까지 줄어들었을 때의 깊이를 표준 침투깊이라 하고 식 (4)의 δ 로 나타낸다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 주파수에 따른 표준 침투깊이를 계산하여 Fig. 5에 나타냈다.⁴⁾

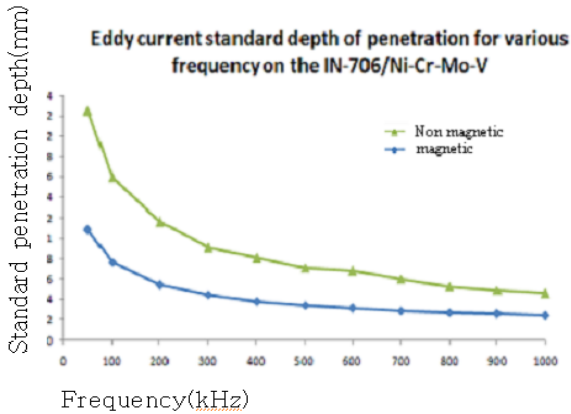
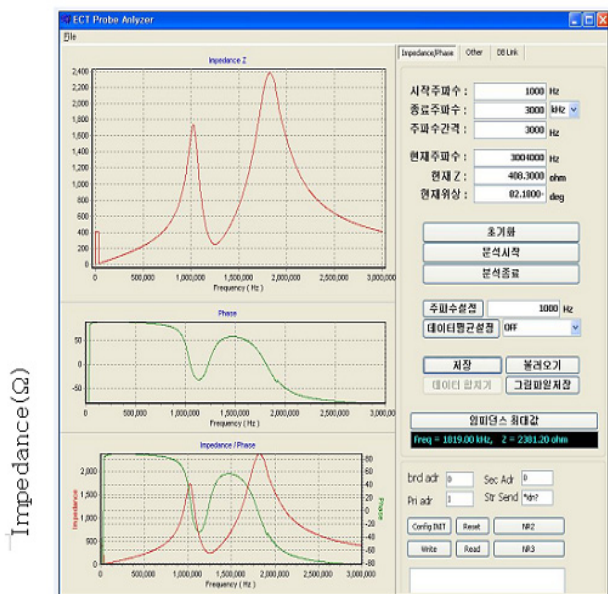


Fig. 5 Penetration depth

5. 센서 응답특성 분석

볼트 홀 검사용 센서를 설계 제작하기 전에 볼트 홀 센서의 응답특성을 알아보기 위하여 실제 적용 대상인 가스터빈 로터 Ni-Cr-Mo-V소재로 시험편을



Frequency(kHz) × 10⁻³

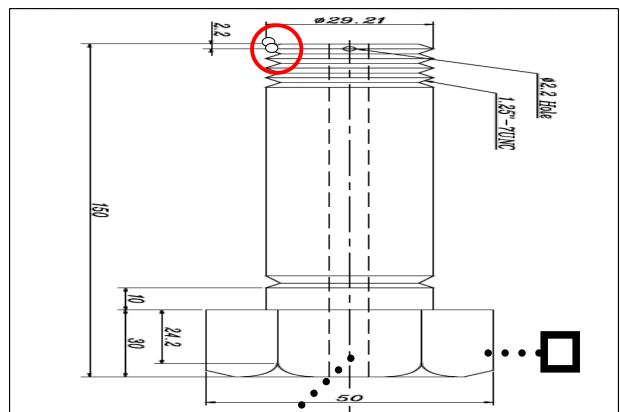
Fig. 6 Impedance vs Frequency

만들고 1 kHz에서 3,000 kHz 까지 주파수 대역에서 시험을 하고 응답특성을 분석 하였다. 시험결과 Fig 6 에서와 같이 1,000 kHz 와 1,800 kHz 부근에서 가장 좋은 응답특성을 보였다.

6. 볼트 홀 검사용 센서 설계제작

볼트 홀 검사용 센서구조는 Fig. 7 과 같으며 구성 품은 본체, 결함을 검출하는 2개 코일, 센서 이동용 나사산, 일정한 속도로 이송하기 위한 정속 모터로 구성되어 있다. 센서는 볼트 홀의 나사산을 따라 이동하면서 볼트 홀에 발생한 결함을 검출하고 크기를 평가하게 된다. 센서는 Fig. 7 및 Fig. 8 와 같이 2개가 지그재그로 설치⁵⁾어 진행방향 결함은 물론 진행 방향과 방향이 다른 결함도 쉽게 검사가 가능하게 하였다. 이 센서는 센서의 내부에 가공된 홈으로 전원을 공급받아 센서가 볼트 홀을 이송하는데 간섭이 이루어지지 않도록 하였다. 또한, 센서가 초당 1/4의 일정한 속도로 회전하도록 센서 이동용 정속 모터를 설치하고 항상 같은 접촉압력과 이동속도를 유지하도록 하여 결함평가의 일관성을 유지하게 하였으며 제작한 센서의 사양은 다음과 같다.

- Type : differential
- 사용주파수 : 1,000 kHz
- 채널 수 : 2
- 코일 크기 : 1.0 mm
- 센서이동 방법 : 정속 모터



Sensor : Cable : Motor

Fig. 7 Eddy current sensor structure



Fig. 8 Eddy current sensor

7. 볼트 홀 Mock-up 제작

설계 제작한 볼트 홀 검사장치의 유효성을 입증하기 위하여 Ni-Cr-Mo-V 강 볼트 홀 Mock-up을 Fig. 9, Fig. 10 과 같이 설계하고 31.75 mm, 38.5 mm 볼트 홀 Mock-up을 제작 하였으며 여기에 Table 1과 같이 결함을 가공 하였다. 센서의 결함에 대한 검출능력과 분해 능력을 확인하기 위하여 Mock-up 나사 홈에 0, 90, 180, 270° 방향으로 각각 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 mm 깊이 결함을 3.5 mm, 5.0 mm 길이로 가공 하였다.

Table 1 Bolt hole in part A/B

Angle	Length	Depth
0	3.0/5.0	0.2
90	3.0/5.0	0.5
180	3.0/5.0	1.0
270	3.0/5.0	2.0

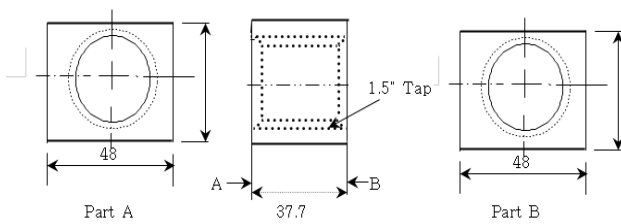


Fig. 9 Bolt hole mock-up & defect drawing

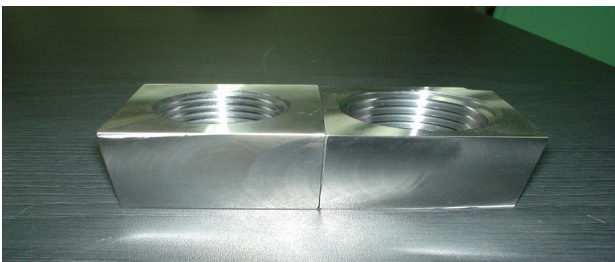


Fig. 10 Bolt hole mock-up & defect

8. 실험장치 및 신호취득 분석

실험 장치는 Fig. 11와 같이 Zetec 사의 TC - 5700 와전류탐상기로 128 Channel 까지 확장 가능한 다중채널 장비를 사용하였다. 구동 소프트웨어는 Eddy view 1.4B2로 컴퓨터와 장비 사이에는 Ethernet으로 LAN cable을 이용하여 TCP/IP로 데이터를 송수신 한다. 데이터 취득결과 Fig. 12, 13 및 Table 2와 같이 결함이 없는 부위에는 신호가 나타나지 않고 결함이 있는 부위를 센서가 지날 때에는 결함의 크기에 따라 결함의 신호가 잘 검출⁶⁾되었으며 정량적인 분석결과 31.75 mm 볼트 홀 0.2 mm 결함에서 0.16 V, 0.5 mm 결함에서 0.26 V, 1.0 mm 결함에서 0.28 V, 2.0 mm 결함에서 0.447 V의 크기의 신호가 검출 되었다. 38.10 mm 볼트 홀도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 결함검사 시 센서를 수동으로 이동함으로써 같은 결함에 대하여 신호 값이 조금씩 다르게 나오는데 이는 자동이송 모터를 사용

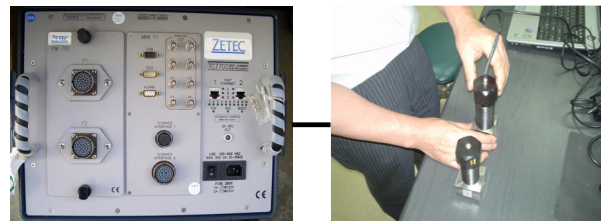


Fig. 11 Experimental apparatus & sensor

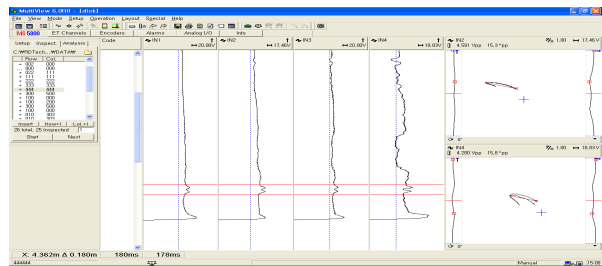


Fig. 12 Defect signal

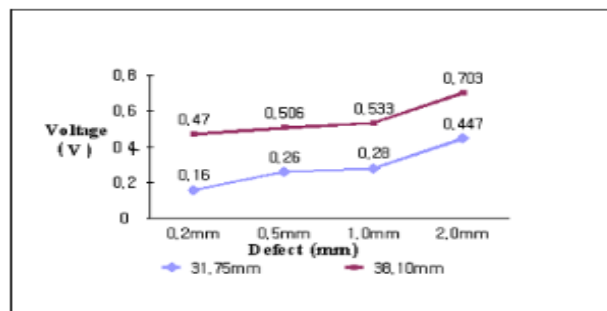


Fig. 13 Signal vs defect depth

하면 해결 할 수 있을 것이다. 신호취득 실험결과 결함의 크기에 따른 신호의 크기가 명확히 구분되는 것은 물론 결함으로 평가하는 기준인 0.2 mm부터 2.0 mm 까지 결함이 설계 제작한 와전류 센서에 의해 검출과 평가가 정량적으로 이루어 질 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 Defect data

	31.75 mm	38.10 mm
0.2 mm	0.16 V	0.470 V
0.5 mm	0.26 V	0.506
1.0 mm	0.28 V	0.533 V
2.0 mm	0.447 V	0.703 V

9. 결 론

본 연구논문은 볼트 및 볼트 홀의 결함검출 및 평가에 와전류 검사(eddy current test)방법을 적용하기 위하여 설계 제작한 와전류 센서의 성능을 평가하고 이를 소개한 것이다. 자체 설계 제작한 와전류 센서는 결함 검출이나 분해능 면에서 매우 우수한 성능을 보여 주고 있어 가스터빈 로터에 사용되는 볼트 및 볼트 홀의 결함검출 및 평가용으로 손색이 없음을 알 수 있었다. 특히, 와전류 기법을 도입하여 기존의 8단계인 검사단계를 3단계⁷⁾ 대폭 줄일 수 있어 검사시간이 단축되고 비용이 50% 절감됨을 알 수 있었다. 이번에 제안하는 볼트 및 볼트 홀 검사용 와전류센서는 가스터빈은 물론 모든 설비에 사용되는 볼트 및 볼트 홀의 결함평가에 확대하여 사용 할 수 있을 것으로 판단되며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 설계 제작한 와전류 센서는 검출 능 및 분해능 면에서 볼트 및 볼트 홀의 결함을 정량적으로 평가 하는데 적합함을 알 수 있었다.

2) 일반적인 와전류 센서와 같이 결함의 크기에 비례하여 신호의 크기도 증가함을 알 수 있었다.

3) 센서 이송용 모터 없이 수동으로 센서를 이동할 시 접촉압력이 일정하지 않아 같은 결함이라도 신호의 크기가 달라짐을 알 수 있었다.

4) 볼트 홀의 결함을 최소 0.2 mm 까지 검출 할 수 있어 결함검출 능력은 매우 우수함을 알 수 있었다.

5) 설계 제작한 센서는 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 mm 결함

을 명확하게 구분하여 평가 할 수 있어 분해능 또한 우수함을 알 수 있었다.

6) 와전류 검사기법 도입으로 기존의 형광침투 탐상검사 보다 검사단계를 대폭 단축(7단계 → 3단계) 시킬 수 있어 검사시간과 비용이 50%로 단축 되었다.

참고 문헌

1. Ahn, Y. S., Geong, G. J., 2004, "New Eddy Current Technology Development in Power Plant", pp. 110-122.
2. Lee, Y., 1988, "침투탐상 검사", 한국 비파괴 검사 학회, pp. 33-36.
3. Donald J, Hangemaier, 1990, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, pp. 43.
4. Ahn, Y. S., Park, S. G., 2010, "다중센서 신호특성 최적화를 통한 와전류 검사 신뢰성 개선연구", 한국동력공학회지, 제 14권, 제 2호, pp. 61.1.
5. "Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition, Vol.4. Electromagnetic Testing", ASNT, 1986, p. 382.
6. Ahn, Y. S., Park, S. G., 2010, "Nondestructive Technology Development in Westing House Gas Turbine Rotor, pp. 210-213.
7. ASTM, "Metal Handbook", 8th ed., 1964, Vol2, pp. 398-405.