

다중코일 와전류 센서 설계제작 및 특성분석

The Design & Manufacture of Multi-coil Eddy Current Sensor and Characteristic Analysis

안연식 · 길두송 · 박상기

Y. S. Ahn, D. S. Gil and S. G. Park

(접수일 : 2011년 01월 10일, 수정일 : 2011년 03월 22일, 채택확정 : 2011년 04월 07일)

Key Words : Multi-coil Eddy Current Sensor(다중코일 와전류 센서), Signal Characteristic(신호특성), Standard Penetration Depth(표준 침투깊이), Resolution(분해능), Gas Turbine Rotor(가스터빈 로터), Magnetic Particle Inspection(자분탐상검사),Magnetic Material(자성체)

Abstract : This paper introduces the multi-coil eddy current sensor and its characteristic in magnetic material gas turbine rotor. In the past, magnetic particle inspection method was used for qualitative defect evaluation in magnetic material gas turbine rotor. And the ultrasonic inspection method was used for quantitative defect evaluation. Nowadays, eddy current method is used in magnetic gas turbine rotor inspection due to advanced sensor design technology. We developed multi-coil eddy current sensor for the rotor dovetail inspection. At first, rotor stress is analyzed for the determination of sensor position and number. The sensor coils are designed to cover the stress concentration area of rotor dovetail. We select optimum frequency according to material standard penetration data and experiment results. The rotor mock-up and artificial defects were made for the signal detection and resolution analysis of multi-coil eddy current sensor. The results show that signal detection and resolution capabilities are enhanced in comparison to the commercialized sensor enough for the gas turbine rotor inspection. So, this developed multi-coil eddy current sensor substituted for commercialized one and it applied in real gas turbine rotor inspection.

1. 서 론

발전소 가스터빈 설비는 공기를 압축하는 압축기와 혼합가스에 의해 구동되는 터빈으로 구성되어 있으며, 압축기와 터빈은 회전하는 로터에 블레이드가 체결되어 3,600 rpm의 고속회전 상태로 운전되고 있다. 또한 잦은 기동정지와 고온 하에서 운전되기 때문에 로터는 경년변화 및 열응력으로 인하여 재질의 상태가 변하는 것은 물론이고 1,300℃의 고온에 노출되어 열 피로에 의한 결함이 자주 발생한다. 이러한 결함은 시간이 경과하면 성장을 하고 이로 인해 로터에 체결된 블레이드가 로터에서 이탈을 하게 되면 로터 전체를 손상¹⁾시켜 부품교체 및

보수에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 고장은 주로 열 피로에 의한 로터 표면결함²⁾에 의해 발생하며 이를 검사하고 평가하는 방법으로 Fig.1 과 같이 자분탐상검사 방법을 사용하여 왔다. 자분탐상검사 후 결함이 발견되면 다시 초음파검사를 수행하여 결함의 크기를 확인 하였다.⁶⁾ 그러나 최근에는 와전류 센서 기술이 발전하여 자성체라 하더라도 와전류에 의한 검사가 가능하여 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 국내에서 처음으로 시도된 표면결함 검사용 다중코일 와전류 센서의 개발내용과 특성분석 결과 그리고 이를 바탕으로 실제 가스터빈 로터 결함검사 및 평가에 활용한 사례를 소개하고자 한다.

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



Fig. 1 Magnetic particle inspection

2. 와전류 검사 원리

시간에 따라 변화하는 교류전류를 코일에 흘려보내면 코일주위에 1차 자기장(primary fields)이 발생한다. 이 1차 자기장 내에 Fig. 2와 같이 코일을 전도체(conductor)에 가져가면 전자기유도현상에 의해 도체 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.

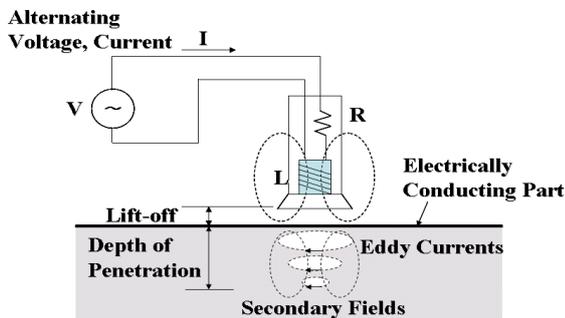


Fig. 2 Eddy current basic theory

$$V_T = V_R + V_L = I(R + j\omega L) \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \quad (3)$$

V_R : voltage element of resistance

V_L : voltage element of reactance

X_L : resistance element of impedance

3. 자성체 가스터빈 로터 특성분석

가스터빈 로터 소재⁴⁾로서 비자성체인 IN706과 자성체인 Ni-Cr-Mo-V의 와전류 침투깊이는 사용하는 와전류 주파수(f), 재료의 투자율(μ), 전도도(σ)의 함수로 결정되는데, 침투깊이는 와전류 검사의 한계를 결정하는 매우 중요한 요소로서 재료의 물성이 정해지면 침투깊이는 주파수에 의해 결정된다. 또한 와전류 밀도는 표면 근처에서 최대가 되고, 내부로 들어갈수록 지수 함수적으로 감소하는데, 이것을 표피효과(skin effect)라 한다.⁵⁾ 표면에서의 와전류 밀도가 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. 3에 나타냈다.⁶⁾

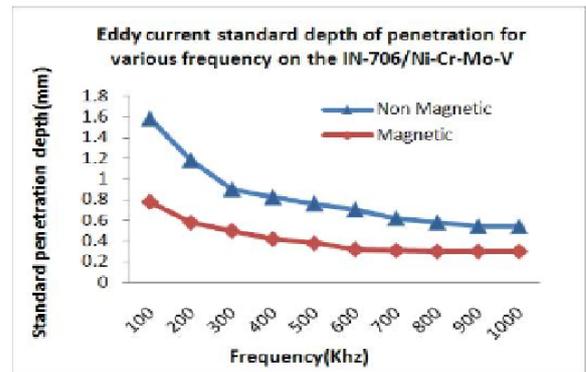


Fig. 3 Penetration depth

4. 다중코일 와전류 센서 설계제작

4.1 로터 응력해석

와전류 센서는 로터 도브테일에 발생하는 결함을 검출 할 수 있도록 설계 제작 되어야 한다. 외국에서 개발하여 사용화 되어 있는 센서는 16개 혹은 32개의 코일이 배열되어 검사대상 부분 전체를 검사할 수 있도록 설계제작 되었다. 그러나, 결함은 응

력이 집중되는 부분에서만 발생하고 있어 제작비용을 최소화 하고 검사의 효율성을 유지될 수 있도록 적절한 숫자의 코일배치가 필요하다. 이를 위하여 응력해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 로터에 대한 응력해석을 수행하였다. 응력해석 결과 Fig. 4와 같이 블레이드와 접촉하는 로터 도브테일 홈 쪽에 응력이 집중되고 있고⁷⁾ 회전방향에 영향을 받아 좌, 우(적색 표시선)의 응력에 차이가 있음을 확인하였다.

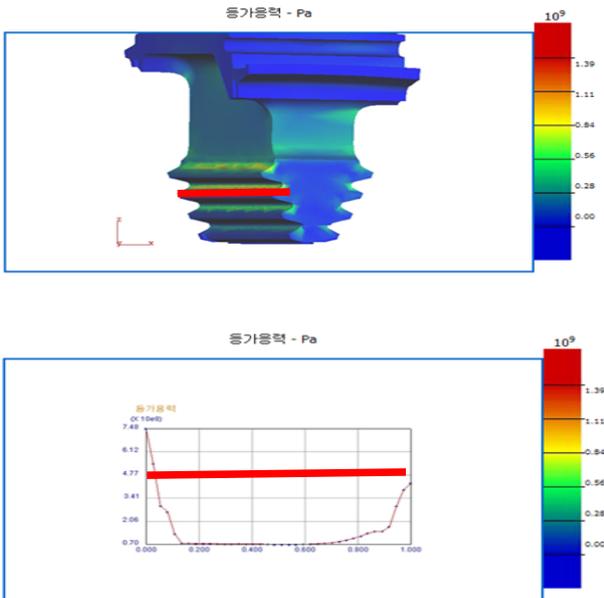


Fig. 4 Rotor stress analysis result

4.2 다중코일 와전류 센서 설계 제작

로터 응력해석결과, 고장사례, 도브테일 홈의 크기, 자성체로터 소재 표준 침투깊이 등 와전류 특성 분석 결과를 바탕으로 코일 수 4개, 코일직경 1 mm, 열 간격 1.8 mm 및 사용주파수 1,000 khz의 다중코일 와전류 센서를 Fig. 5와 같이 설계 제작하였다.⁸⁾ 개발한 센서의 특징은 센서가 일정한 접촉 압력을 유지하면서 도브테일 홈을 따라 진행 할 수



Fig. 5 Multi-coil eddy current sensor

있도록 반대쪽 도브테일 접촉부에 스프링(Spring)을 설치하였다. 이번에 제작한 센서는 최적의 코일배치로 개당 약 350만원으로 상용센서 제작비용인 5,000 만원에 비해 1/14이 소요 되었다.

5. 센서 특성분석용 Mock-up 제작 및 결함가공

다중코일 와전류 센서는 로터 도브테일의 형상에 맞게 설계 제작되어야 하며, 또한 도브테일에 발생하는 결함을 잘 검출할 수 있도록 제작 되어야 한다. 따라서, 실제 도브테일 모양, 크기 등을 반영하여 목업(mock-up)을 Fig. 6과 같이 제작하고 도브테일 홈A, B, C, D, E, F에 에 1.0 mm 깊이의 결함을 가공 하였다.

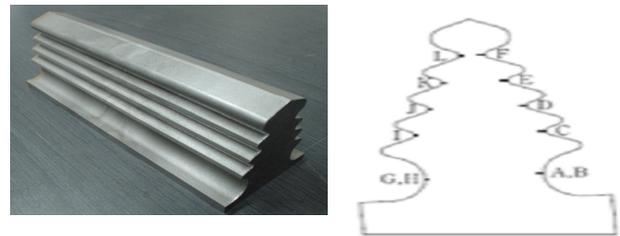


Fig. 6 Rotor mock-up & artificial defects

6. 신호취득 및 상용센서와의 신호 비교

다중코일 와전류 센서(multi-coil eddy current sensor)는 가스터빈에서 교체여부를 결정하는 기준인 1.0 mm 결함을 잘 검출할 수 있는가와 각 코일이 동일한 결함에 대하여 일정한 범위(3%)내의 편차를 가지고 있는냐가 매우 중요하다. 이러한 요구사항을 확인하기 위하여 상용센서와 설계 제작한 다중코일 와전류 센서를 이용하여 길이방향으로 가공된 1.0 mm 결함에 대하여 신호를 취득 하였다.⁸⁾ 신호취득 결과 Fig. 7과 같이 각 코일이 1.0 mm 결함에 대하여 4.8 V 전후의 매우 유사한 크기의 신호를 보여주고 있다. 가스터빈 로터에서 로터의 교체여부를 결정하는 기준인 1.0 mm 결함에 대한 검출능이 우수함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 8에서와 같이 코일 간 신호편차도 상용화된 센서에 비해 매우 우수함을 알 수 있는데, 상용 센서의 경우 편차가 최대 20%까지 발생하는 반면에 설계 제작된 센서는 2% 이내로 아주 우수함을 알 수 있다.

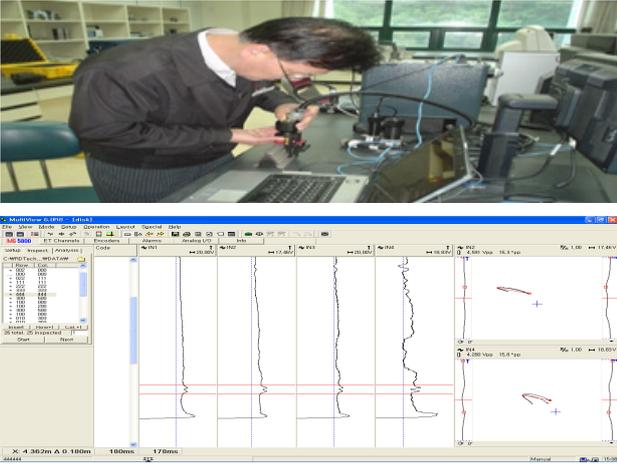


Fig. 7 Artificial defects experiment & signal

문제로 센서의 검출능이나 분해능에는 아무런 문제가 없었다.



Fig. 9 Real site application

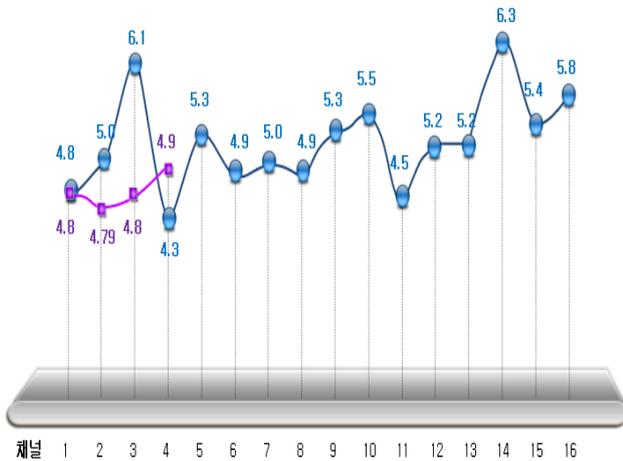


Fig. 8 Signal difference among channel

7. 현장적용 시험 결과

실제 현장 신호취득 결과 1~4번째 홈까지 신호가 잘 취득되었고 Fig. 9, 10에서와 같이 1번 센서부터 4번 코일까지 신호 중에서 가장 큰 값이 0.172V로 목업(mock-up)에서 0.2 mm 결함의 신호 크기가 1.426V 임을 감안하면 결함으로 생각할 만한 신호는 발견되지 않았다.⁸⁾ 다만 1번째 홈에서 신호가 왜곡되어 센서와 로터와의 간격(lift-off)가 일정하지 않게 나타나고 있으나 이는 센서를 도브테일 면에 접촉하는데 있어 검사자의 숙련도가 부족하여 발생한 것으로서 많은 검사를 통해 기능적으로 센서를 접촉시키는 데에 익숙해지면 해결 되는

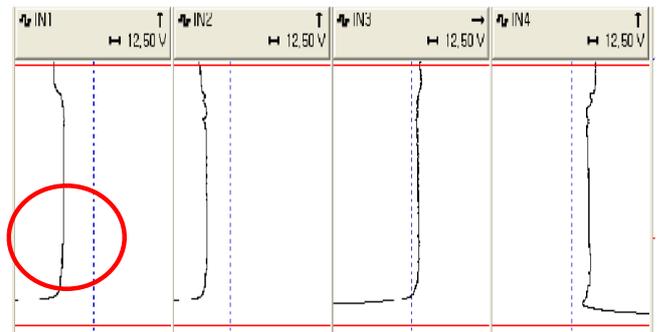


Fig. 10 Real site ECT signal

8. 결론

본 연구논문은 자성체 가스터빈 로터 결함검사 및 평가에 와전류 검사(eddy current test)방법을 적용하기 위하여 설계 제작한 다중코일 와전류 센서의 성능을 평가하고 이를 바탕으로 실제 현장에 적용한 사례를 소개한 것이다. 자체 설계 제작한 다중코일 와전류 센서는 결함 검출이나 분해능, 채널 간 신호편차 면에서 매우 우수한 성능을 보여 주고 있어 가스터빈 로터의 결함검출 및 평가용으로 손색이 없음을 알 수 있었으며 센서 설계 제작 및 특성 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 자성체 가스터빈의 경우 결함검출 한계 및 침투깊이를 고려할 때 가장 적합한 주파수는 1,000 khz 임을 알 수 있었다.

2) 응력해석 결과와 결함발생 사례 등을 감안할 때 로터의 각 홈에 센서를 배치하는 것이 적절함을 알 수 있었다.

3) 센서의 이동시 센서와 로터 도브테일 홈과의

접촉압력을 일정하게 유지 하도록 하기 위하여 스프링(Spring)을 설치하였고 센서와 로터와의 간격(lift-off)을 일정하게 유지하게 할 수 있었다.

4) 가스터빈 로터의 최소 및 최대결함 검출 한계가 0.2 mm 와 1.0 mm 임을 감안하면 설계 제작한 센서의 결함검출 능력은 매우 우수함을 알 수 있었다.

6) 목업(mock-up) 및 현장적용 시험을 통하여 설계 제작한 다중코일 와전류 센서의 유효성을 입증하였다.

7) 상용화된 센서에 채널 간 신호편차가 20%정도 이고 설계 제작한 센서의 채널 간 신호편차는 2% 이내로 매우 우수하다.

8) 제작비용도 상용센서에 비해 1/14로 매우 저렴하다.

9) 자성체 로터 검사에서 기존의 자분탐상검사를 대신하여 와전류 검사방법을 채택하면 검사절차가 단순하고 검사시간이 단축 되는 것은 물론 인체나 환경 유해물질인 자분을 사용하지 않아 친 환경적인 비파괴 검사가 가능하다.

Turbine”, pp. 214-228.

8. Ahn, Y. S., Park, S. G., 2010, “Nondestructive Technology Development in Westing House Gas Turbine Rotor”, pp. 210-213.

참고 문헌

1. G. P. Singh. R. A. Cervantes and R. L. Spinks, 1985, “Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine discs Rims” : SWRI, pp. 398-401.
2. ASTM B637, 1993, “Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service”, pp. 276-278.
3. Donald J, Hangemaier, 1990, “Fundamentals of Eddy Current Testing”, ASNT, pp. 43.
4. ASNT, 1986, “Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition, Vol.4. Electromagnetic Testing”, p 382
5. ASM, “Metal Handbook”, 8th ed.,1964, Vol2, pp. 398-405.
6. Ahn, Y. S., Geong, G. J., 2004, “New Eddy Current Technology Development in Power Plant”, pp. 110-122.
7. Ahn, Y. S., Gil, D. S., 2008, “Nondestructive Technology Development in 7FA Type Gas