

가스터빈 로터 재질에 따른 표면결함 와전류 특성연구 The Study on Eddy Current Characteristic for Surface Defect of Gas Turbine Rotor Material

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

(접수일 : 2010년 4월 27일, 수정일 : 2010년 7월 29일, 채택확정 : 2010년 8월 10일)

Key Words : Eddy Current(와전류), Eddy Current Probe(와전류 센서), Signal Characteristic(신호특성), Standard Penetration Depth(표준 침투깊이), Resolution(분해능), Gas Turbine Rotor(가스터빈 로터), Magnetic Material(자성체), Non-Magnetic Material(비자성체)

Abstract : This paper introduces the eddy current signal characteristic of magnetic and non-magnetic gas turbine rotor. In the past, Magnetic particle inspection method was used in magnetic material for qualitative defect evaluation and the ultrasonic test method was used for quantitative evaluation. Nowadays, eddy current method is used in magnetic gas turbine rotor inspection due to advanced sensor design technology. We are studying on the magnetic gas turbine rotor by using eddy current method. We prepared diverse depth specimens made by magnetic and non-magnetic materials. We select optimum frequency according to material standard penetration data and experiment results. We got the signal on magnetic and non-magnetic material about 0.2 mm, 05 mm, 1.0 mm, 1.5 mm 2.0 mm and 2.5 mm depth defects and compare the signal amplitude and signal trend according to defect depth and frequency. The results show that signal amplitudes of magnetic are bigger than non-magnetic material and the trends are similar on every defect depth and frequency. The detection and resolution capabilities of eddy current are more effective in magnetic material than in non-magnetic materials. So, the eddy current method is effective inspection method on magnetic gas turbine rotor. And it has the merits of time saving and simple procedure by elimination of the ultrasonic inspection in traditional inspection method.

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 °C의 고온에 노출되어 열 피로에 의한 결함이 자주 발생한다. 이러한 결함은 시간이 경과하면 성장을 하고 이로 인해 로터에 체결된 블레이드가 로터에서 이탈

을 하게 되면 로터 전체를 손상¹⁾시켜 부품교체 및 보수에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 고장을 방지하기 위하여 열 피로에 의한 로터 표면결함을 검사하고 평가하는 방법으로 자성체 로터는 Fig. 1 (a)와 같이 자분탐상검사 방법이 비자성체 로터는 Fig. 1 (b)와 같이 와전류 검사기법이 도입되어 사용되고 있다²⁾. 특히 자성체검사 방법은 단순히 결함의 존재여부만을 알 수 있어 결함의 크기를 정확히 평가하기 위해서는 자분탐상 검사 후에 다시 초음파검사를 수행하여야만 하였다.⁶⁾ 그러나 최근에는 와전류 센서개발 기술이 발전하여 자성체라 하더라도 와전류에 의한 검사가 가능하여 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 그 동안 연구하여 온 비자성체 로터에 대한 연구내용과 이제 본격적으로 연구개발 중인 자성체 로터에 대한 연구내용을 바탕으로 자성체 및 비자성체 가스터빈

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

로터의 와전류 검사 신호취득 분석 내용과 와전류 기술이 자성체 로터 검사에 유효한지 여부를 타진하여 보고자 한다.

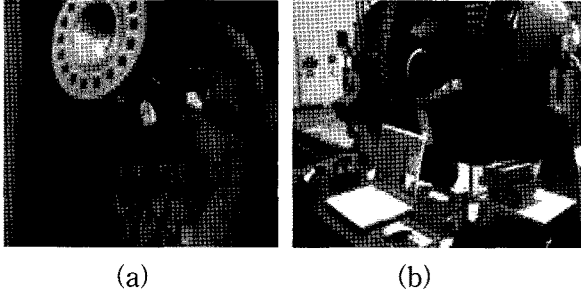


Fig. 1 Magnetic(a) & eddy current test(b)

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.^{3,7)} 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.⁸⁾ 여기서 코일의 임피던스는 저항(R), 리액턴스(L) 및 전류(I)에 의해 결정된다.

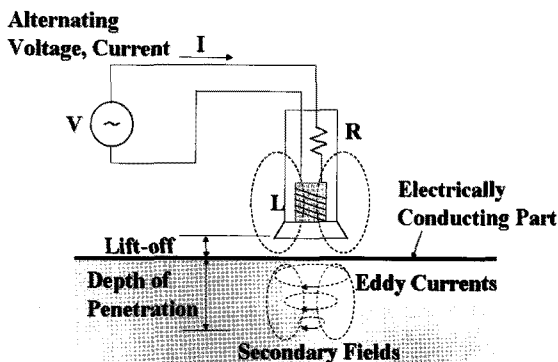


Fig. 2 Eddy current basic theory

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

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

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

3. 표준 침투 깊이 계산

가스터빈 로터 소재로서 비자성체인 IN706과 자성체인 Ni-Cr-Mo-V⁴⁾의 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.⁵⁾ 표면에서의 와전류밀도가 1/e 또는 37%까지 줄어들었을 때의 깊이를 표준 침투깊이라 하고 식 (4)의 δ로 나타낸다.

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

식 (4)에 의해 주파수에 따른 표준 침투깊이를 계산하여 Fig. 3에 나타냈다.⁶⁾

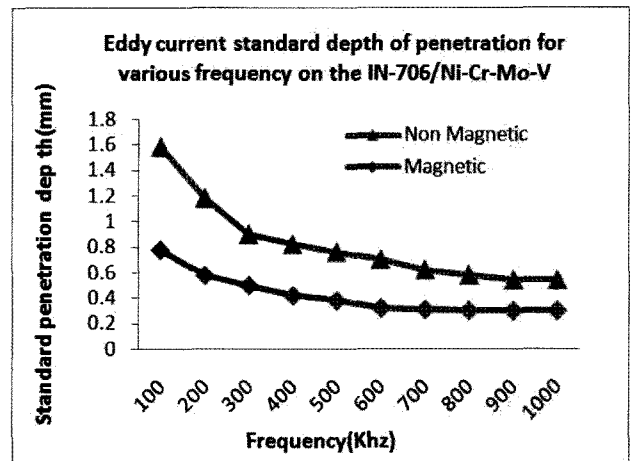


Fig. 3 Penetration depth

4. 실험 방법

4.1 실험 장치 구성

실험장치는 Fig. 4와 같이 Zetec사의 TC-5700와 전류탐상기로 128 Channel 까지 확장 가능한 다중

채널 장비를 사용 하였다. 구동 소프트웨어는 Eddy view 1.4B2로 컴퓨터와 장비 사이에는 Ethernet으로 LAN cable을 이용하여 TCP/IP로 데이터를 송수신 한다. Fig. 5는 본 논문에서 실험대상으로 선정된 국산 와전류 센서(single probe)로서 사용주파수는 100, 200, 300, 500, 1,000 kHz이다. 신호취득을 위해 사용된 시편은 Fig. 6과 같이 Ni-Cr-Mo-V 소재의 자성체 및 IN706 소재의 비자성체로서 모두 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 및 2.5 mm 깊이를 가진 수직결함 시편이다.

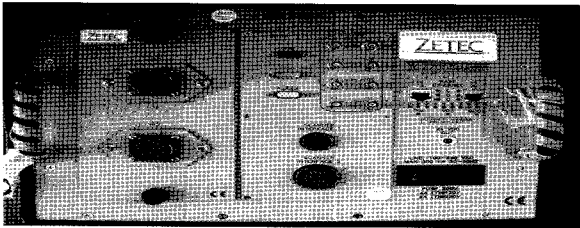


Fig. 4 TC 5700 Eddy current instrument

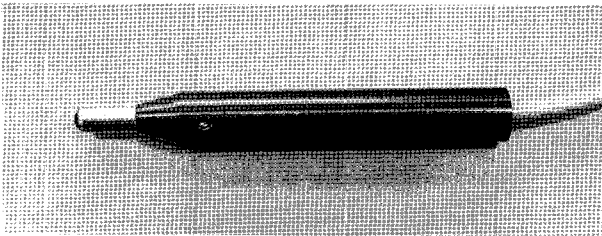


Fig. 5 Single coil probe

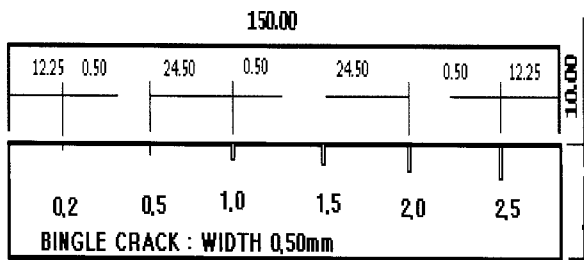


Fig. 6 Vertical depth defect specimen

4.2 신호 취득

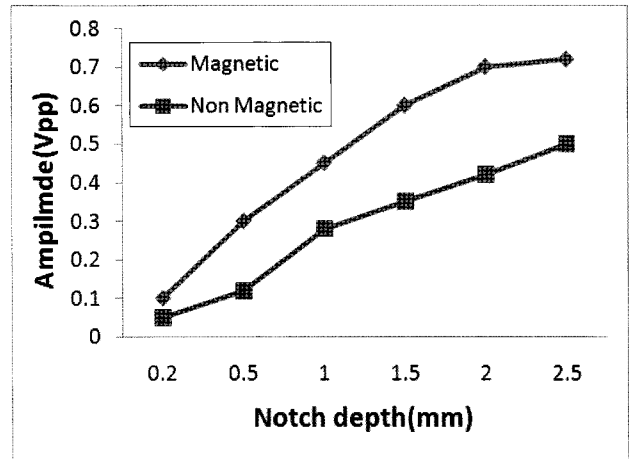
자성체 및 비 자성체 소재의 수직결함 시편 0.2 mm부터 2.5 mm 까지 결함에 대하여 Fig. 5의 Single coil probe를 사용하여 100, 200, 300, 500, 1,000 kHz에서 10번의 실험을 수행하여 출력전압 데이터⁹⁾를 수집하고 이를 평균하여 Table 1 및 Table 2에 기록 하였다. 또한, 자성체 및 비자성체 와전류 검사결과를 주파수에 따라 Fig. 7에 나타냈다.

Table 1 Output voltage data in magnetic material

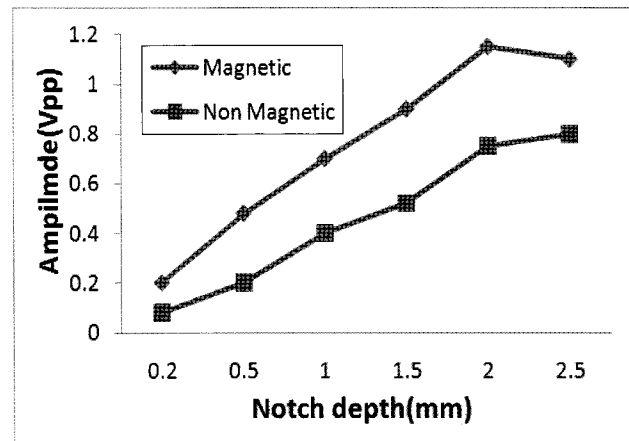
kHz	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
100	0.055	0.125	0.201	0.264	0.32	0.326
200	0.116	0.289	0.459	0.603	0.708	0.748
300	0.193	0.463	0.732	0.992	1.13	1.099
500	0.327	0.737	1.188	1.613	1.8	2.002
1,000	1.104	2.475	3.994	5.413	5.822	6.139

Table 2 Output voltage data in non-magnetic material

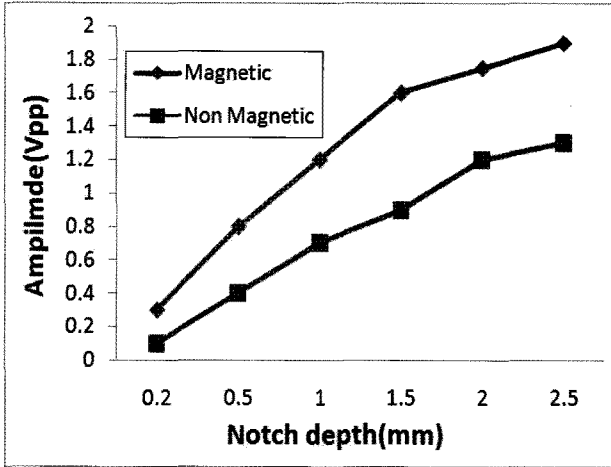
kHz	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
100	0.016	0.049	0.101	0.152	0.187	0.212
200	0.049	0.14	0.282	0.403	0.484	0.538
300	0.085	0.237	0.471	0.608	0.775	0.863
500	0.161	0.437	0.837	1.063	1.299	1.427
1,000	0.762	1.741	3.173	3.927	4.537	4.927



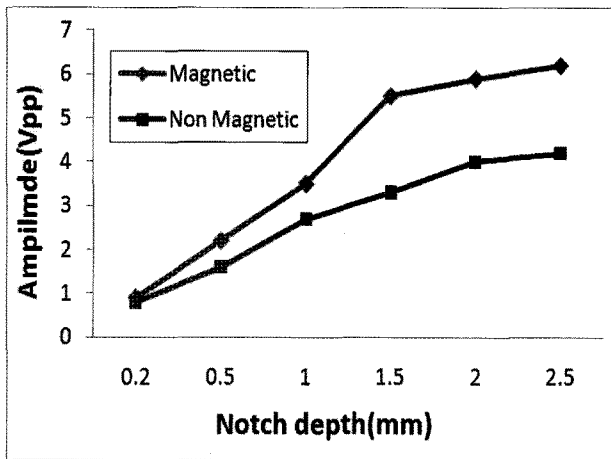
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Output voltage 200(a), 300(b), 500(c), 1,000(d) kHz

5. 실험결과 및 고찰

와전류 검사는 결함의 크기가 다를 때 이를 얼마나 잘 구분해 주는가를 나타내는 분해능과 얼마나 작은 결함을 검출하는가를 나타내는 검출 능으로 검사가 가능한지 여부를 판단하게 된다.⁶⁾ Single Probe를 이용하여 자성체 및 비자성체 재질의 0.2 mm 부터 2.5 mm 깊이의 수직결함에 대한 신호를 취득한 결과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 동일한 결함에 대하여 1,000 kHz에서 출력전압의 크기가 가장 크고 결함의 크기에 따른 신호 값의 차이도 커서 검출 능과 분해능이 가장 좋음을 알 수 있다. 따라서, 1,000 kHz를 기준으로 자성체와 비 자성체의 검출 능과 분해능을 분석해 보고자 한다. Table 1과 Table 2에서 알 수 있듯이 1.0 mm 결함의 경우 자성체는 출력전압이 3.994 V 이고 비 자성체는 3.173 V 이며, 2.0 mm 결함의 경우 자성체는 5.822 V이고

비 자성체의 경우 4.537 V 이다. 따라서, 동일한 결함에 대하여 자성체가 비자성체 보다 검출능력이 20%이상 높다는 것을 알 수 있다. 동일한 결함에 대하여 자성체의 경우 2.0 mm 결함에서 출력전압이 1.0 mm 결함의 출력전압 보다 50%정도 높고, 비 자성체의 경우 2.0 mm 결함의 출력전압이 1.0 mm 결함의 출력전압 보다 43%가 높게 나타난다. 그러므로 자성체가 비 자성체보다 분해능이 7%정도 높음을 알 수 있다. Fig. 7에서와 같이 결함의 깊이가 깊을수록 출력전압의 크기가 커지며 이는 Fig. 7의 모든 주파수 범위에서 같은 경향을 보여주고 있다. 또한 Fig. 3에서 자성체가 비 자성체보다 와전류 침투깊이가 낮다는 일반적인 이론과 달리 실제 신호취득 결과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 2.0 mm 깊이 까지는 동일한 결함에 대하여 비 자성체 보다 자성체의 출력전압이 커서 결함검출이 오히려 용이함을 알 수 있다. 특히 Fig. 7 (b)에서 2.5 mm 결함에서 출력전압이 떨어지는 이유는 전류가 표면에 집중되어 깊이가 깊을수록 전류밀도가 감소하여 오히려 출력전압이 낮아지는 경우이며, 이를 통해서 자성체의 경우 2.0 mm 와 2.5 mm 결함에서의 신호 차이가 급격히 작아지고 있어 2.0 mm 이상의 결함은 검출이나 평가가 용이하지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 가스터빈의 경우 1.0 mm 까지 결함검출을 목표로 하고 있으므로 기존의 자분탐상검사 대신 와전류 검사방법을 채택하여도 결함검출이나 평가에 전혀 문제가 없을 뿐 아니라, 검사시간을 획기적으로 단축 할 수 있어 비용을 절감하는 효과를 가져 올수 있다.

6. 결 론

본 연구논문은 자성체 가스터빈 로터 결함검출 및 평가에 적용하고 있는 자분탐상 검사(magnetic particle test)가 안고 있는 긴 검사시간과 복잡한 검사절차를 줄이고자 와전류 검사(eddy current test) 방법에 의한 시험을 수행하고 적용가능성을 제시하기 위한 것이다. 자성체의 경우 와전류검사를 위하여 전류를 인가할 시 표피효과(skin effect)에 의해 대부분의 전류가 피 검사 체의 표면에 집중되고 내부로 침투하지 못하여 표면아래의 결함검출이 불가능하다고 알려져 있었다. 그러나 본 논문의 실험결과 일정한 깊이까지는 비 자성체에 비하여 결함의 검출능이나 분해능이 오히려 뛰어나 결함검사가 가

능하다는 것을 알 수 있었고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 자성체 가스터빈의 경우 검출능과 분해능을 고려할 때 가장 적합한 주파수는 1,000 kHz 임을 알 수 있었다.
- 2) 결함의 깊이가 깊을수록 출력전압이 비례적으로 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 모든 주파수 및 결함깊이에서 2.0 mm 까지는 비 자성체 보다 자성체의 결함 검출 능과 분해능이 우수함을 알 수 있었다.
- 4) 자성체 가스터빈의 경우 분해능을 고려하면 최대 검사 깊이는 2.0 mm 이며, 가스터빈의 경우 1.0 mm 까지 결함검출이 목표이므로 와전류에 자성체 검사는 유효한 방법임을 알 수 있다.
- 5) 자성체 로터 검사에서 기존의 자분탐상검사를 대신하여 와전류 검사방법을 검사절차가 단순하고 검사시간이 단축 되는 것은 물론 인체나 환경 유해 물질인 자분을 사용하지 않아 친 환경적인 비파괴 검사가 가능할 것이다.

Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service", pp. 276~278.

9. S. G. Lee, 2008, "Study on Evaluation of Internal Leak of Turbine Control Valve in Power Plant Using Acoustic Emission Signal Measurement", pp. 68~69.

참고 문헌

1. G. P. Singh, R. A. Cervantes and R. L. Spinks, "Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine discs Rims" : SWRI, pp. 398~401.
2. Donald J, Hangemaier, 1990, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, pp. 43.
3. "Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition, Vol.4. Electromagnetic Testing", ASNT, 1986, p 382
4. ASM, "Metal Handbook", 8th ed.,1964, Vol2, pp. 398~405.
5. Y. S. Ahn and G. J. Geong, 2004, "New Eddy Current Technology Development in Power Plant", pp. 110~122.
6. Y. S. Ahn and S. G. Park, 2009, "Nondestructive Technology Development in Gas Turbine Rotor", pp. 210~213.
7. Y. S. Ahn and D. S. Gil, 2008, "Nondestructive Technology Development in 7FA Type Gas Turbine", pp. 214~228.
8. ASTM B637, "Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars,