

다중센서 신호특성 최적화를 통한 와전류검사 신뢰성 개선연구

The Study on Reliability Improvement in Eddy Current Inspection by Signal Characteristic Optimization of Multi-coil Array Probe

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

(접수일 : 2009년 12월 28일, 수정일 : 2010년 2월 26일, 채택확정 : 2010년 3월 30일)

Key Words : Eddy Current(와전류), Multi-Coil Array Probe(다중코일 배열 형 센서), Single Probe(단일 형 센서), Signal Variation(신호편차), Signal Characteristic(신호특성), Optimization(최적화)

Abstract : This paper introduces reliability improvement and time saving in eddy current inspection by signal characteristic optimization of multi-coil eddy current array probe. In the past, Multi-coil array probe and single probe were used for the gas turbine rotor surface inspection & defect evaluation. The multi-coil array probe was used for the broad area inspection. But the signal deviations among multi-coil array probe are maximum 28% in commercial probe. This differences were considered to impedance differences among coils, so it is very difficult to evaluate exact defect size. The signal deviations among multi-coil array probe are maximum 28% in commercial probe. So, single coil inspection was used for exact defect sizing. The purpose of this study is to improve signal deviations of multi-coil array probe. The introduced new technology can improve this deviation by adjusting input voltage in each coil. At first, apply same voltage in each coil and collect signal amplitude of each coil. And calculate new input voltage based on signal amplitude of each coil. If the signal amplitude deviation is within 5% among multi-coil array probe, the signal amplitude of multi-coil array probe is reliable. The proposed technology gives 2% signal deviation among multi-coil array probe. The proposed new technology gives reliability improvement and inspection time saving in eddy current 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 있다¹⁾. 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 Fig. 1과 같이 로터 전체를 손상⁸⁾시

켜 부품교체 및 보수에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 고장을 방지하기 위하여 열 피로^{2,3)}에 의한 로터 표면결함을 검사하고 평가하는 방법으로 와전류 검사기법이 도입되어 사용되고 있다^{4,5)}. 가스터빈 로터는 형상이 복잡하고 진단대상 부위가 광범위하여 한 번에 많은 면적을 검사하기 위해 보통은 16개 채널 정도의 다중코일 형 와전류 센서(multi-coil array probe)가 사용된다^{6,12)}. 그러나 이러한 다중코일의 와전류 센서는 제작 시 각 코일센서에 감기는 코일의 권수와 감긴 부위의 밀도 차이가 발생하여 결국 코일의 전기적인 특성이 달라지고⁷⁾ 이로 인해 와전류 검사 시에 동일한 결함에 대하여 16개 코일마다 신호의 크기에 차이가 발생한다. 따라서, 다중코일 와전류 센서는 짧은 시간에 넓은 면적을 검사할 수 있는 장점이 있음에도 불구하고 검사결과에 대한 신뢰성이 부족하여 결함이 발견되면 정확한 크기평가^{13,14)}를 위하여 단일 형 와전류 센서

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

로 다시 검사를 해야 하는 문제점을 안고 있다. 이로 인하여 검사시간과 비용이 과다하게 소요되고 결국은 설비의 이용률을 크게 저하 시키게 된다.

본 논문에서는 다중코일 와전류 센서의 각 코일 간의 신호차이를 최소화하는 기법을 제시하고자 하며, 기존의 검사방법과 본 논문에서 제안하는 검사방법의 시험결과를 비교분석 하고자 한다.



Fig. 1 Gas turbine rotor damage

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.¹¹⁾ 이 와전류는 1차 자기장을 방해하는 2차 자기장(secondary fields)이 발생한다¹⁰⁾. 이때 전도체의 상태, 위치, 결함, 재질 등의 변화로 와전류가 변화하여 2차 자기장의 변화를 가져오고, 2차 자기장의 변화는 1차 자기장의 변화를 가져온다. 이것은 코일의 임피던스(impedance)의 변화로 시험기기 회로의 전압(volt)과 위상(phase angle)의 변화를 가져와 회로 값의 변화가 증폭되어 신호 모양을 판독할 수 있는 형태로 출력이 되는 것이다.^{8,9)}

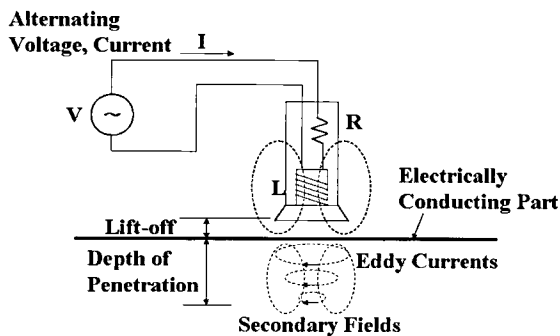


Fig. 2 Eddy current basic theory

3. 신호특성 개선기법

다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe)는 각 채널마다 코일의 감긴 턴 수나 형태가 상이하여 전압을 가했을 때 전기적인 특성이 다르고 이로 인하여 동일한 크기의 결함이라 하더라도 각 채널에서 수집한 신호의 크기가 다르게 나타난다.

따라서, 다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe)에 의해 결함신호가 검출되면 정확한 크기를 확인하기 위하여 다시 단일 코일 형 센서로 검사를 하게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 코일의 전기적인 특성(임피던스)을 일정한 범위내로 조정하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 본 논문에서는 각 센서에 가하는 전압(즉 1차코일의 전압)을 조정하여 각 센서 코일의 임피던스를 변화시키고 결국에는 각 센서의 결함신호의 크기(2차코일 전압)를 일정한 범위(결함평가 신뢰도 기준 : 3% 편차) 내에 들어오도록 조정하는 기법으로 다음과 같이 식 (1) 및 식(2)의 Algorithm을 제시한다.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\bar{X} \times V_i}{X_j} = V_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

- \bar{X} : 센서 신호크기의 평균
- 1 : 최초 입력전압
- X_j : 각 센서의 측정값
- n : 센서 수
- V_j : 선서별 새로운 입력전압

4. 실험 방법

4.1 실험 장치 구성

실험장치는 Fig. 3과 같이 Zetec사의 TC-5800 와전류탐상기로 128 Channel 까지 확장 가능한 다중 채널장비를 사용 하였다. 구동 소프트웨어는 Eddy view 1.4B2로 컴퓨터와 장비 사이에는 Ethernet으로 LAN cable을 이용하여 TCP/IP로 데이터를 송수신 한다. Fig. 4는 본 논문에서 실험대상으로 선정된 Olympus사 16채널의 다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe)로서 사용주파수는 1,000 khz이다. 신호취득을 위해 사용된 시편은 1.0 및 1.5 mm 깊이를 가진 수직결함 시편이다.

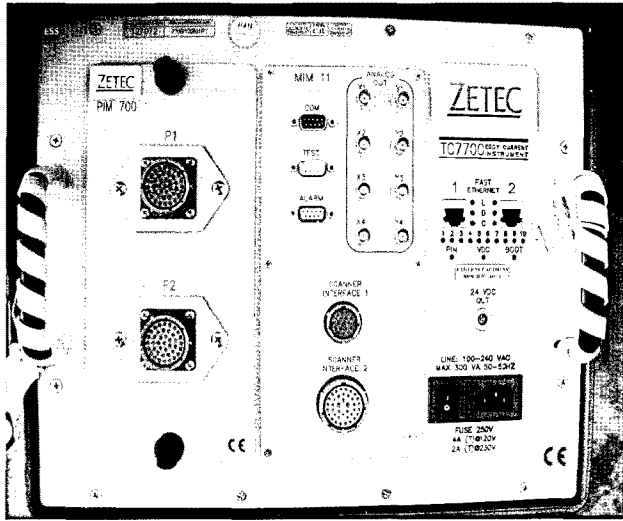


Fig. 3 TC 5700 eddy current instrument

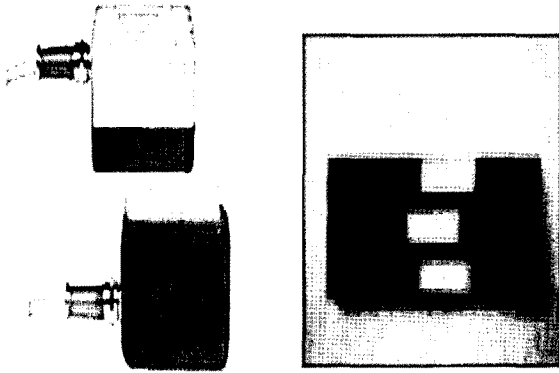


Fig. 4 Multi-coil array probe & specimen

4.2 신호 취득

수직결합 시편 1.0 mm 및 1.5 mm의 결함에 대하여 16개 채널을 갖는 다중코일 배열형 센서 (multi-coil array probe)로 1,000 kHz에서 10번의 실험을 수행하여 데이터를 수집하고 이를 평균하여 기록 하였다. 이들 데이터를 활용하여 평균과 편차를 계산하였고 이를 Table 1 및 2에 나타냈다. 표에서 편차 계산식은 (3)과 같다. 또한 Table 1에서 AVG.는 10번 실험한 값의 평균값이다.

$$d = \frac{\overline{y} - y}{y} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

- d : 채널 간 측정값의 편차
- y : 채널별 측정값
- \overline{y} : 채널별 측정값의 평균

Table 1 Multi-coil signal amplitude & deviation in 1.0mm defect

Channel	Input voltage (V)	Signal amplitude(V)	Deviation (%)
1	1.000	3.214	-10.548
2	1.000	3.365	-6.346
3	1.000	3.652	1.642
4	1.000	3.052	-15.057
5	1.000	3.156	-12.163
6	1.000	3.538	-1.531
7	1.000	3.453	-3.896
8	1.000	3.374	-6.095
9	1.000	3.692	2.755
10	1.000	3.511	-2.282
11	1.000	3.305	-8.016
12	1.000	3.818	6.262
13	1.000	3.912	8.878
14	1.000	4.053	12.801
15	1.000	4.091	13.860
16	1.000	3.876	7.876
AVG.	1.000	3.593	

Table 2 Multi-coil signal amplitude & deviation in 1.5mm defect

Channel	Input voltage (V)	Signal amplitude(V)	Deviation (%)
1	1.000	4.314	-5.629
2	1.000	4.465	-2.336
3	1.000	4.854	6.168
4	1.000	4.051	-11.371
5	1.000	4.257	-6.688
6	1.000	4.439	-2.904
7	1.000	4.554	-0.715
8	1.000	4.273	-6.517
9	1.000	4.591	0.419
10	1.000	4.500	-1.578
11	1.000	4.206	-8.006
12	1.000	4.819	5.406
13	1.000	4.610	0.849
14	1.000	5.182	13.352
15	1.000	5.190	13.355
16	1.000	4.856	6.215
AVG.	1.000	4.572	0.01

4.3 입력전압 조정 및 신호취득

식 (1) 및 (2)를 이용하여 채널신호의 평균값을 계산하고 이를 바탕으로 16개 채널의 조정된 입력 전압을 계산한 후 이를 Table 3에 나타냈다. 이러한 조정된 입력전압의 조정은 채널마다 상이한 코일의 임피던스 값을 수정하여 주는 효과가 있어 동일한

크기의 결함에 대하여 같은 신호 값을 얻을 수 있게 하여 준다.

Table 3 Adjusted multi-coil signal amplitude & deviation in 1.0/1.5 mm defect

Channel	Input voltage(V)	Signal amplitude(V)	Deviation (%)
1	1.118/1.060	3.612/5.004	0.389/0.042
2	1.068/1.024	3.606/5.005	0.222/0.011
3	1.172/1.134	3.618/4.998	0.556/-0.105
4	1.177/1.129	3.623/5.010	0.695/0.132
5	1.138/1.074	3.612/5.007	0.389/0.085
6	1.016/1.030	3.601/4.998	0.083/-0.100
7	1.041/1.004	3.599/5.007	0.028/0.070
8	1.065/1.070	3.605/5.004	0.195/-0.024
9	0.973/0.996	3.584/4.997	-0.389/-0.106
10	1.023/1.016	3.604/4.998	0.167/-0.147
11	1.087/1.087	3.613/5.011	0.417/-0.088
12	0.94/0.9491	3.584/5.010	-0.389/0.122
13	0.918/0.992	3.563/4.997	-0.973/-0.125
14	0.887/0.882	3.564/5.001	-0.945/-0.224
15	0.927/0.881	3.587/5.007	-0.306/0.065
16	1.034/0.942	3.591/5.006	-0.195/0.058
AVG.	1.037	3.598	0.056/0.002

5. 실험결과 및 고찰

기존의 검사방법에 의해 1.0 mm 및 1.5 mm 수직 결함에 대한 16개 채널의 신호를 취득하여 본 결과 각 채널별로 신호차이가 매우 크게 나타났다. 즉, 1.0 mm 결함의 경우 4번 채널에서 -15.05%의 편차가 나타났고 15번 채널에서 13.86%의 신호편차가 나타났다. 결국 1.0 mm 동일한 결함에 대하여 채널 간에 Fig 5에 나타낸 바와 같이 28% 이상의 신호편차가 난다는 것을 알 수 있다. 1.5 mm 결함의 경우에도 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 4번 채널의 경우 평균값에서 최대 -11.37%의 편차를 나타내고 있고 14, 15번 채널의 경우 최대 13.35%의 편차를 나타내고 있다. 또한, 1.5 mm 동일한 결함에 대하여 채널 간에 최대 25% 이상의 신호편차가 나는 것을 알 수 있다. 따라서, 기존의 방식에 따라 동일한 결함을 평가할 때 채널에 따라 최대 25%~28% 정도 신호 편차가 발생하여 이를 바탕으로 정량적인 결함평가를 하는 것이 사실상 불가능할 뿐 아니라, 검사결과 신뢰성도 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 반면에 본 논문에서 제시하는 방법을 적용하여 검사를 수행하면 채널 간의 편차를 Fig. 7 및 Fig. 8에서와 같이 최대 2% 이내로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서 제시하는 기법을 채택하면 기존의 검사방법에 다중코일 배열 형 센서(multi-coil array probe)를 사용하여 1차로 결함의 존재여부를 확인하고 결함이 존재하면 다시 단일 형 Probe를 사용하여 결함의 크기를 정량적으로 평가하는 복잡한 과정을 줄일 수 있다.

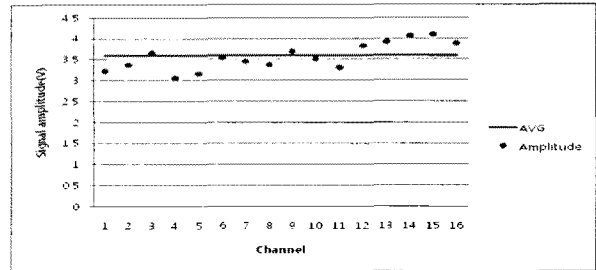


Fig. 5 Signal deviation among channels in 1.0 mm defect

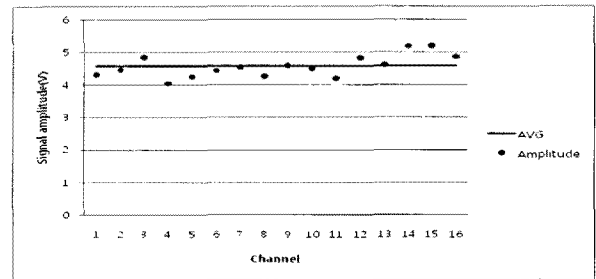


Fig. 6 Signal deviation among channels in 1.5 mm defect

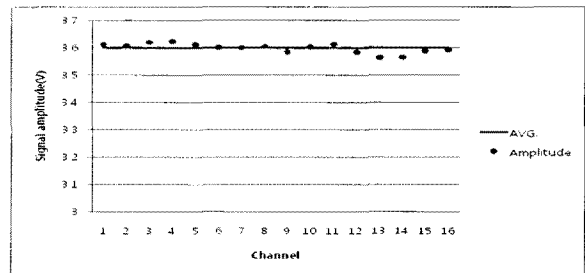


Fig. 7 Signal deviation among channel after input voltage adjust in 1.0 mm defect

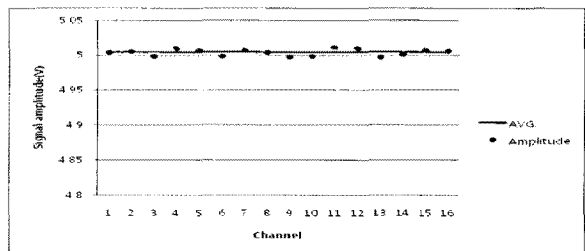


Fig. 8 Signal deviation among channel after input voltage adjust in 1.5 mm defect

6. 결 론

본 연구논문은 가스터빈 로터의 표면결함을 단시간에 검사하고 결함을 평가하기 위해 채택하고 있는 다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe)를 이용한 와전류 검사방법의 문제점을 개선하는 기법을 제시하기 위한 것이다. 즉, 다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe) 검사방법이 안고 있는 채널간의 신호편차를 개선하기 위한 방법으로 채널간의 임피던스차를 개선하는 방법을 제시 하였으며, 이를 바탕으로 기존의 검사방법과 본 논문에서 제시하는 검사방법의 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존의 검사방법에서는 1.0 mm 결함에 대하여 16개 채널 간에 최대 28%까지 신호편차가 발생하고, 1.5 mm 결함에 대해서는 최대 25%의 신호편차가 발생 하였다. 반면에 본 논문에서 제시하는 기법을 채택할 시 16개 채널 간에 신호편차를 2% 이내로 줄일 수 있어 와전류 검사의 신뢰성을 획기적으로 제고 할 수 있었다.

2) 다중코일 배열형 센서(multi-coil array probe) 검사결과의 신뢰성 제고로 기존의 방법에서 결함의 정량적인 평가를 위해 채택하는 단일 형 probe 검사과정을 생략할 수 있어 검사시간과 비용을 대폭 줄일 수 있었다.

3) 16개 채널 간의 신호편차를 개선하기 위한 기법으로 제시한 각 채널의 임피던스 개선을 위한 입력전압조정기법이 매우 유효함을 알 수 있었다.

4) 가스터빈 로터의 검사시간 단축으로 설비의 이용률이 제고되고 이로 인해 신규설비 투자비용이 절감 될 것으로 기대된다. 표면검사 뿐 아니라 열교환기 내부검사에 사용하는 배열 형 센서(Array probe)의 신호편차 개선에도 활용이 가능 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 한국기계연구원, "항공기 가스터빈 핵심재료기술 개발(III)", pp. 11, 과학기술처, 1997. 11, pp. 135~138.
2. Donald J. "Hangemaier, Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, 1990, p. 43.
3. "Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition, Vol. 4, Electromagnetic Testing",

- ASNT, 1986, p. 382.
4. ASM, "Metal Handbook", 8th ed., Vo. 12, pp. 398~405, 1964.
5. 안연식, 정계조 "발전설비 와전류 신 검사기법 개발" 최종보고서 2004. 11, pp. 125~135.
6. 안연식, 김두송 "7FA형 가스터빈 주요부품 비파괴진단기술 개발" 최종보고서 2008. 2, pp. 324~328.
7. 안연식, 박상기 "WH 가스터빈 로터 비파괴 진단기술개발" 중간보고서 2009. 8, pp. 213~215.
8. 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.
9. ASTM B637, "Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service" pp. 276~278.
10. Donald J. Hangemaier, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, 1990, p. 44.
11. ASNT, "Nondestructive Testing handbook, vol. 4", p. 89.
12. ASTM E1820, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", 1999 p. 117.
13. Lucjan Witek, "Failure analysis of turbine disc of an aero engine", Engineering Failure Analysis, 9(2002) 593~601, p. 78.
14. Myoung-gu Park, Young-Ha Hwang, Yun-Seung Choi, Tae-Gu Kim, "Analysis of a J69-T-25 engine blade fracture", Engineering Failure Analysis, 9(2002) 593~601, p. 196.