

자성체 가스터빈 로터 표면결함 와전류 평가기술

Eddy Current Evaluation Technology of Magnetic Gas Turbine Rotor Surface Defect

안연식¹, *#길두송², 박상기³

Y. S. Ahn(ysas@kepri.re.kr)¹, *# D.S. Gil(kds6801@kepri.re.kr)², S. G. Park³

¹ 한전 전력연구원

Key words : Eddy Current, Notch, Defect, Evaluation

1. 서론

비파괴검사 방법으로서 와전류 검사는 검사 속도가 빠르고 표면의 미세 결함검출에 뛰어나 산업 전 분야에서 다양하게 이용되고 있다. 발전분야에서는 주로 열교환기 계통이나 원자력발전소의 증기발생기에 대한 건전성 평가에 많이 활용되고 있으나 와전류를 이용한 가스터빈의 건전성진단은 현재 국내에서는 전무하며, 해외 제작사 에서도 불과 1-2년 전부터 적용하기 시작했다. 따라서 본 논문에서는 국내 대용량 가스터빈 설비 중 약 35%를 차지하고 있는 WH 자성체 가스터빈 로터 건전성평가에 와전류 검사기술을 적용하기 위해 자연결함 시편제작 및 신호 평가 그리고 Database 구축에 관한 연구내용을 소개 하고자 한다.

기존 가스터빈로터의 표면에 대한 비파괴 검사는 자성체 로터에 대해서는 자분탐상 검사를 실시하였다. 그러나 이러한 자분탐상 검사는 자분의 사용에 따른 환경오염을 유발시키는 원인이 되고 있고 결함의 존재유무만을 알 수 있어 건전성진단 및 평가에 필수적인 결함의 크기나 형태에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다. 와전류탐상검사 시 가장 중요한 것은 피검사체와 동일 재질의 시편편이다. 이 시편편은 일반적으로 인공결함(Notch) 즉, 이미 알고 있는 결함의 길이와 깊이에 대한 와전류의 반응을 통해 Eddy current system을 교정해 준다.

우선은 WH 가스터빈 로터와 동일 재질인 Ni계 초합금에 인공결함(Notch)을 넣은 평판 시편편을 만들어 실험적으로 와전류탐상 검사 주파수를 찾아내고, 결함의 폭, 깊이, 결함에 대한 각도를 다양하게 혹은 다중결함 등의 시편을 제작하고 전압(Amplitude, Vpp)과 위상값을 측정하여 결함에 대한 신호패턴을 분석하였다.

2. 최적 Probe 선정

가스터빈 로터 소재인 Ni계 초합금의 전기저항(Electrical resistivity, ρ)은 0.295 μΩ m(at 20℃)이며 전기전도도(Electrical conductivity, σ)는 1.75%IACS이고, 투자율(Permeability(μ) at 200 oersted, 15.9 kA/m)은 1.011이 된다. 따라서 Ni계 초합금의 와전류 표준 침투깊이(Standard depth of penetration, δ)는 1000kHz의 경우 약 0.41mm이다.

와전류 밀도는 표면 근처에서 최대가 되고, 내부로 들어갈수록 지수함적으로 감소하는데, 이것을 표피효과(Skin effect)라 한다. 표면에서의 와전류밀도가 1/e 또는 37%까지 줄어들었을 때의 깊이를 표준 침투깊이라 하고 식 (1)의 δ로 나타낸다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

여기서, 주파수(f), 투자율(μ), 전도도(σ)의 함수로 와전류의 침투깊이는 주파수에 의해 조절된다. 또한 최적의 검사 주파수를 선정하는데 중요한 값으로 사용된다. Fig.1은 Ni계 초합금의 100 ~ 1000kHz까지의 와전류의 표준 침투깊이를 보여 주고 있다. 여기서 주파수가 증가하면 표준 침투깊이가 줄어드는

것을 알 수 있다. 따라서 검출하고자하는 결함의 깊이에 맞춰 적정 주파수를 선정하는 것이 와전류검사의 중요한 인자인 것이다. 이론적인 분석 및 기본시편에 대한 시험을 통하여 국산 Probe를 설계 제작 하였다.(Fig. 2)

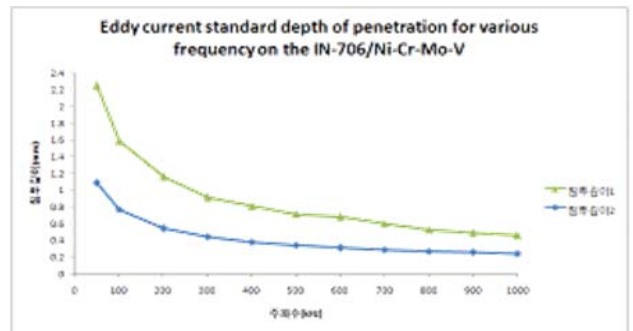


Fig. 1. Ni- Based Super-alloy Penetration Depth



Fig. 2 Eddy Current Probe

3. 인공결함 시편제작

Ni계 초합금 소재에 인공결함(Notch)을 깊이(0.2mm, 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm)와 폭(0.08mm, 0.1mm, 0.2mm)의 수직결함, 그리고 같은 깊이로 각도(15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°)를 달리한 사각결함 시편을 제작 하였다.

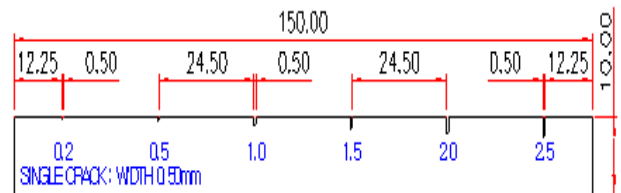


Fig. 3 Artificial Notch Specimen

4. 신호취득 및 분석

각 결함에 대한 시험을 수행하여 신호 패턴을 분석하였으며 본 논문에서는 수직결함과 사각결함에 대한 결과만을 정리 하였다.

Table 1 Vertical Notch Signal

	100Khz	200Khz	300Khz	500Khz	1000Khz
	V	V	V	V	V
0,2mm	0.064	0.162	0.274	0.446	1.426
0.5mm	0.155	0.376	0.488	0.814	2.713
1.0mm	0.254	0.596	0.828	1.374	4.835
1.5mm	0.318	0.737	1.030	1.670	5.803
2.0mm	0.367	0.851	1.092	1.794	6.701
2.5mm	0.414	0.966	1.403	2.242	7.528

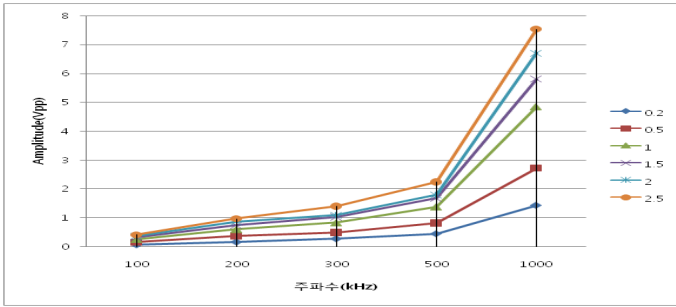


Fig. 4 Vertical Notch Signal vs Notch depth

Table 2 Angle Notch Signal

각도	100Khz	200Khz	300Khz	500Khz	1000Khz
	V	V	V	V	V
15°	0.268	0.682	1.063	1.759	3.115
30°	0.207	0.486	0.777	1.291	2.393
45°	0.189	0.441	0.695	1.131	2.012
60°	0.171	0.400	0.594	0.995	2.015
75°	0.190	0.428	0.592	0.961	1.870
90°	0.206	0.473	0.630	1.034	2.025

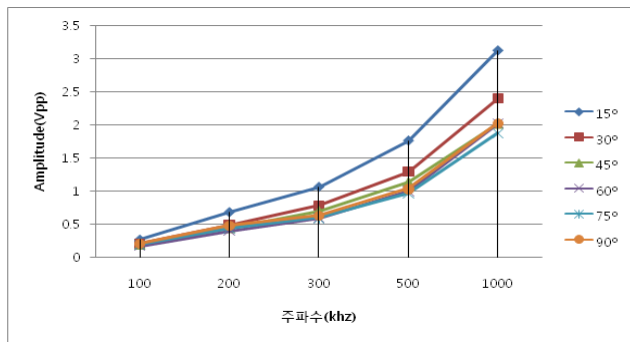


Fig. 5 Angle Notch Signal vs Notch Depth

5. 결론

본 논문은 국내에서 운영중인 WH 가스터빈 자성체 로터의 비파괴 진단기술 자립을 위한 연구를 수행한 결과의 일부로서 가스터빈 로터에서 주로 발생하는 표면결함의 검출 및 평가를 위한 와전류검사 기술개발 결과이다.

연구는 로터 재질인 Ni계 초합금에 비파괴적 특성분석, 특성분석에 바탕을 둔 와전류 Probe 선정 그리고 인공결함시편 제작, 정량적인 평가방법을 제시한 내용으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수직결함에서 결함의 깊이가 깊을수록 신호의 크기(전압값)은 커진다.

- 2) 사각결함에서 결함의 길이가 클수록 신호의 크기(전압값)은 커진다. 즉 결함의 각도가 작을수록 신호의 크기(전압값)은 커진다.
- 3) 수직 및 사각결함에서 주파수가 높을수록 신호의 크기(전압값)은 커진다.
- 4) 수직 및 사각결함에서 주파수가 증가할수록 검출능 및 분해능이 좋아진다.
- 5) 수직결함 및 사각결함 모두 검출능 및 분해능을 고려할 때 적정 주파수는 1000 KHz 가 적정하다.

후기

본 논문의 내용은 “W H 가스터빈 로터 비파괴 진단 기술 개발” 과제의 연구내용 중 일부로서 향후 연구내용은 순차적으로 발표할 예정이다.

참고문헌

1. 안연식, 정계조 “발전설비 와전류 신검사기법 개발” 최종보고서 2004.11
2. 박상기, 안연식 “배관용접부 방사선 투과검사 기술개발” 최종보고서 2005. 6
3. 조용상, 박상기 “터빈 자동초음파 검사 실용화 및 적용기술 개발” 최종보고서 2002. 10
4. Don E. Bray, Roderic K. Stanley, Nondestructive Evaluation, Revised Edition part VI Radiographic Techniques pp 431-441
5. G. P. Singh. R. A. Cervantes and R. L. Spinks : Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine discs Rims : SWRI.
6. ASTM B637, Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service
7. Donald J. Hangemaier, Fundamentals of Eddy Current Testing, ASNT, 1990, p44
8. Nondestructive Testing Handbook 2nd. Edition, Vol.4. Electromagnetic Testing, ASNT, 1986, p382
9. Donald J. Hangemaier, Fundamentals of Eddy Current Testing, ASNT, 1990, p43
10. ASNT, Nondestructive Testing handbook, vol.4
11. 한국기계연구원, 항공기 가스터빈 핵심재료기술 개발 (III), pp11, 과학기술처, 11.1997