

초음파를 이용한 18Mn-5Cr강 발전기 리테이닝 링의 신호분석에 관한 연구

Research for Signal Analysis of 18Mn-5Cr Steel Generator Retaining Ring using Ultrasonic Wave

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

(접수일 : 2009년 12월 29일, 수정일 : 2010년 3월 19일, 채택확정 : 2010년 3월 30일)

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), Generator(발전기), Retaining Ring(리테이닝 링), Signal Analysis(신호 분석)

Abstract : Retaining rings are used to support the field winding end turns from the centrifugal force by the high speed of the field and these are the overstressed parts among the generator parts. There have been several retaining failures in Europe and America, all attributable to stress corrosion cracking in 18Mn-5Cr steel. Since then, each manufacture companies have developed a good 18Mn-5Cr steel in temperature, strength characteristic and it is used in many field now. From many findings and test results, we could conformed that the failure might be grown in the overstressed condition unrelated to the moisture particle.

기호설명

- dB : 게인(Gain)
- V : 음속(m/s)
- t : 온도(°C)
- P : 압력(N/m²)
- ρ : 매질의 밀도(kg/m³)
- γ : 기체의 비열비
- C_p : 정압 몰비열(cal/K · mol)
- C_v : 정적 몰비열(cal/K · mol)
- R : 보편 가스상수
- K : 체적탄성율(N/m²)
- C : 종파의 전파속도
- E : 영률(N/m²)
- ν : 포아송 비

1. 서 론

리테이닝 링(retaining ring)은 자장(field)의 고속 회전에 의한 원심력으로부터 계자 권선의 끝단 회전부(end turn)를 지지하기 위하여 사용되며 발전기 부품 중 가장 큰 응력(stress)을 받는 부품이다. 리테이닝 링의 재질로는 자성체와 비자성체(non-magnetic) 재질이 사용되며, 비자성체는 누설 자속을 최소화하고 손실을 줄이기 위해 대용량의 발전기에 사용된다. 자성체(magnetic) 재질은 열처리에 의해 강도를 달성할 수 있는 Ni-Cr-Mo-V 합금강을 사용하며 현재 사용되고 있는 비자성체 혹은 오스테나이트(austenite) 재질은 요구된 강도를 만족시키기 위해 냉간 팽창된 Mn-Cr 합금강이다.

비자성체 리테이닝 링은 1950년대부터 단기용량이 증대함에 따라 사용되어 왔으며, 이중 18Mn-5Cr 강¹⁾은 전기적 기계적 특성이 좋아 대부분의 발전기에 채용되어 왔다. 그러던 중 리테이닝 링의 파괴사고가 구미지역에서 수차례에 걸쳐 일어났는데 18Mn-5Cr 강이 응력부식균열(SCC : Stress Corrosion Crack)에 취약하여 사고가 발생된 것으로 밝혀져 이때부터 각 제작사들은 18Mn-5Cr 강

길두송(교신저자) : 전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : kds6801@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5558
안연식, 박상기 : 전력연구원 원자력발전연구소

리테이닝 링의 검사, 평가, 유지관리 방법 및 재질 개선 등을 연구하여 응력부식균열에 강하면서도 온도, 강도특성이 좋은 18Mn-8Cr 강을 개발하여 현재 많이 사용하고 있다.^{2,3)}

본 연구에서는 리테이닝 링의 강도특성과 초음파의 이론적 배경을 바탕으로 산업체 현장에서 사용되고 있는 발전기 리테이닝 링에 대하여 현장적용 시험을 수행하고 그 신호파형을 비교분석함으로써 보다 정확한 평가가 이루어지도록 하였다.

2. 초음파 전파원리 및 이론적 메카니즘

우리가 일상생활을 하면서 들을 수 있는 20~20,000 Hz의 음파를 가청음이라고 하고, 그 이상의 주파수 대역을 가진 20,000 Hz 이상의 음파를 초음파라고 부르며, 이 초음파는 산업용에서 뿐만 아니라 산부인과에서 태아의 상태를 감별하기 위한 의료용으로도 사용되는 등 그 응용범위는 매우 다양하다. 또한, 초음파는 접촉매질의 종류 및 상태에 따라서 전파하는 속도 및 측정결과가 다르게 나타나기 때문에 정확한 측정을 위해서는 전파에 대한 이론적 메카니즘을 알 필요가 있으며, 일반적으로 사용하는 기체 중의 음속은 그 온도에 의해 크게 변화하는 것으로 알려져 있지만 압력, 진동수에 의해서도 미묘하게 변화한다. 여기에서 음속을 $V[m/s]$, 압력을 $P[N/m^2]$, 밀도를 $\rho[kg/m^3]$ 로 하면 공기 중의 음속은 식(1)과 같이 주어진다.

$$V = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (1)$$

여기에서 위 식의 γ 는 기체의 비열비를 나타내고 다음 식으로 구할 수 있다(단, C_p 는 정압 몰 비열 $[cal/K \cdot mol]$)

$$\gamma = \frac{C_p [cal/K \cdot mol]}{C_v [cal/K \cdot mol]} = 1 + \frac{R}{C_v} \quad (2)$$

또한, 식(2)에서 C_v , C_p 는 각각 정적, 정압 몰 비열 $[cal/K \cdot mol]$, R 는 보편 가스 상수이다.

하지만, (2)식은 유체 중에서의 음속의 이론식이라고 부르고, 그 매체는 액체 중뿐만 아니라 여러 가지 기체 중에도 적용된다.

$0[^\circ C]$ 의 음속과 밀도를 각각 V_0, ρ_0 로 하고, $t[^\circ C]$ 의 음속과 밀도를 각각 V_t, ρ_t 로 하면 (2)식을 아래의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_t = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho_t}} \quad (3)$$

$$V_0 = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho_0}} \quad (4)$$

로 된다. 식(3)과 식(4)에서 음속 V_t 와 V_0 의 비를 구하면 아래의 (5)식과 같다.

$$\frac{V_t}{V_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_t}} \quad (5)$$

또한, 밀도 ρ_0 는 $\rho_0 = \rho_t(1 + \frac{1}{273} t)$ 이므로 앞의 (5)식은

$$V_t = V_0 \sqrt{1 + \frac{1}{273} t} \quad (6)$$

로 되며, 근사 공식에 의하면 $-1 < x < 1$ 일 때 임의의 실수 m 에 대해서 다음의 식이 성립한다.

$$(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2 \times 1} x^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{3 \times 2 \times 1} x^3 + \dots \quad (7)$$

이때, x 가 0에 가까운 수이면 식(8)과 같이 표시될 수 있다.

$$(1+x)^m \approx 1 + mx \quad (8)$$

근사 공식 $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2} x$ 를 이용하면 앞의 (8)식은 아래와 같다.

$$V_t = V_0(1 + \frac{1}{2} \times \frac{1}{273} t) = V_0(1 + \frac{1}{546} t) \quad (9)$$

여기서, $V_0 = 331.5[m/s]$ 으로 하면 $t[^\circ C]$ 의 음속 V_t 는

$$V_t = 331.5(1 + \frac{t}{546}) = 331.5 + 0.60714t \approx 331.5 + 0.6t [m/s] \quad (10)$$

(10)식에서 온도가 일정하면 보일의 법칙에 의해 압력 P 와 밀도 $\rho[kg/m^3]$ 는 비례하므로 그 관계는 $P/\rho = constant$ 가 되고, 음속 V 는 압력 변화에 영향을 받지 않게 된다.

또한, 수중의 음속 V 는 유체 내 종파의 이론식은

(11)식과 같다.

$$V = \sqrt{K/\rho} \quad (11)$$

단, $K[N/m^2]$ 는 체적 탄성률이고 $K = \nu \cdot P$ 의 관계가 있다.

이때, 자유 내의 종파의 전파 속도 C 는

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (12)$$

다음 (13)식과 같다. 또한 자유 음장 내의 횡파의 속도 C 는

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (13)$$

으로 나타낸다. 여기에서 $E[N/m^2]$ 는 영률을 나타내고 ν 는 포아송비를 나타낸다.

3. 응력부식 균열의 발생

3.1 발생위치

권선 단부 보호환은 운전 중에 받은 강한 원심력으로부터 코일의 이탈을 방지하기 위해 회전자 단부 양단에 열박음으로 설치한다. 권선 단부 보호환은 원통형으로 되어있으며 재질은 전기적, 기계적특성이 좋은 18Mn-5Cr의 합금강을 많이 사용되며, 특성은 응력, 부식, 균열에 강하고 온도 및 강도특성을 요구한다. 리테이닝 링의 응력부식균열 발생위치는 불규칙하기는 하나 리테이닝 링 내부의 손상은 발전기 로터(rotor)의 웨지 링(tooth-wedge-ring)을 접합하는 홈에서 자주 발생한다. 또한, 각 링의 손상정도는 내, 외부가 서로 달라 링 외부에는 손상이 전혀 없는 데도 내부에 심한 균열이 발생된 경우가 있으며, Fig. 1은 리테이닝 링 점검 시 결함(crack)이 자주 발생된 위치이다.^{1,2)} 18Mn-5Cr 강은 습분 또는 부식성가스 환경에서는 부식(Corrosion) 또는 부식피팅(corrosion pitting)이 발생하며 부식과 응력이 상호작용하여 응력부식균열이 발생된 위치를 표시하였다.

18Mn-5Cr강 리테이닝 링은 운전 중은 물론 정지 중에도 항상 응력을 받고 있기 때문에 습분이 부착될 경우에 부식균열이 발생된다.

3.2 부식환경이 Crack 성장에 미치는 영향

결함(crack)의 성장률은 습분, 응력, 온도 등의 환

경변화에 따라 큰 차이가 있으며, Fig. 2는 수소가스(95% H₂ + 5% Air, 80%), 응력(Stress Intensity : 50 ~ 60 ksi√in) 상태에서 발생된 결함이 상대습도의 변화에 따른 성장상태를 나타낸 것이다³⁾.

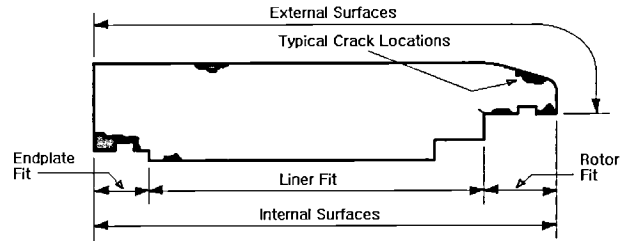


Fig. 1 Typical crack locations

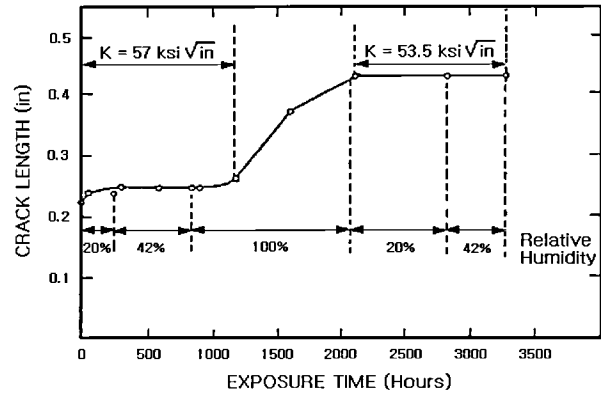


Fig. 2 Crack growth of 18Mn-5Cr steel according to relative humidity

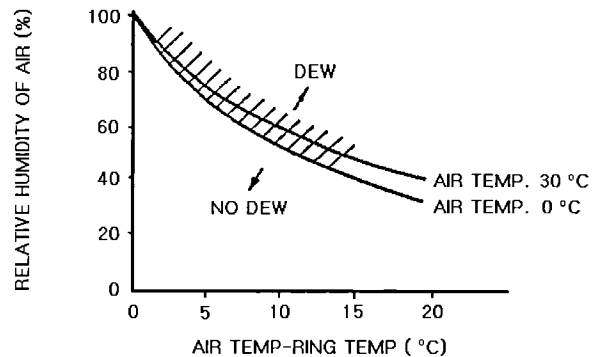


Fig. 3 Maintenance temperature of retaining ring according to relative humidity

여기서, 결함의 성장은 초기에 약간 변화한 후 상대습도 100%가 될 때 까지 거의 변화가 없으며, 잠복기를 거친 후 0.001 inch/Hour정도의 속도로 성장하다가 상대습도가 감소하면 다시 둔화된다. Fig. 2로부터 두 가지를 관찰 할 수 있으며, 습분이 없으면 결함의 성장은 거의 없다는 것과 결함이 성장울

시작하기 전에는 잠복기가 있다는 것이다.

Fig. 3은 상대습도에 따른 리테이닝 링의 유지온도를 나타낸 그래프로^{3,4)}서 로터(rotor)가 발전기 내에 있을 시는 리테이닝 링의 온도를 노점이상 높이기 위해 히터(heater)를 살리거나 코일(coil)에 전류를 가해 응축을 막는다. 로터를 취외시에는 비닐 등으로 덮개(house)를 설치하고 가열램프(heater lamp)를 사용하여 리테이닝 링의 온도를 노점보다 2 ~ 3 °C 정도 높일 필요가 있으며, 덮개는 로터에 닿지 않게 하여 적당한 통풍이 되도록 공간을 둘 필요가 있다.

실제 리테이닝 링은 계속 습분 상태가 아니며, 특히 운전상태에서는 발전기 내에 습분이 존재한다 하더라도 가스냉각 발전기 링(rotor ring)이 노점온도보다 높게 유지되기 때문에 부식이나 결함이 성장되지 않는다. 그러나 파손의 원인이 응력은 높은 주파수에서 반복적인 회전을 함으로서 결함이 발생될 수 있다는 것을 명심할 필요가 있다^{5,6)}.

리테이닝 링 바깥 표면⁷⁾의 부식을 막기 위해 과거에는 페인팅을 했으나 점검을 하기 위해 페인트를 제거할 경우엔 공기 냉각식에 한하여 습한 공기와의 접촉을 막기 위해 재페인팅 작업을 해야 한다.

4. 시스템 구성

18Mn-5Cr강 발전기 리테이닝 링의 재질은 응력에 의한 부식 환경에 놓일 경우 결함 발생율이 매우 높게 나타나는 경향이 있으므로 주기적인 점검을 필요로 하며, Fig. 4는 신호분석을 위한 대비시험편을 나타낸 그림으로서 보다 정확한 결과값을 얻기 위해서는 검사하고자 하는 대상체와 동일한 재질의 대비시험편을 갖추고 있어야 한다. 리테이닝 링은 운전 중 원심력에 의해 단면감소 부위에서 결함이 발생될 수 있으며, 이 부위에 대해 적절한 검사가 가능하도록 Fig. 5에서 보는 바와 같이 수직법(①), ②) 및 경사각법(③, ④)을 병행하여 검사를 수행하여야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

리테이닝 링은 초음파의 감쇠가 심하여 경사각 결함검사에는 2 MHz 주파수의 탐촉자를 사용하였으며, 수직결함 검사에는 4 MHz 주파수의 탐촉자를 사용하였다. 결함에 대한 검출능을 높이기 위해서는 예상되는 결함과 초음파 빔(Beam)과의 각도가 수직이 되도록 탐상법을 적용해야 하므로 단면감소 부위의 인공결함에 대해 수직으로 입사가 되는 45°와

0°의 탐상각도를 선정하여 검사를 수행하였다.



Fig. 4 Reference test piece of retaining ring

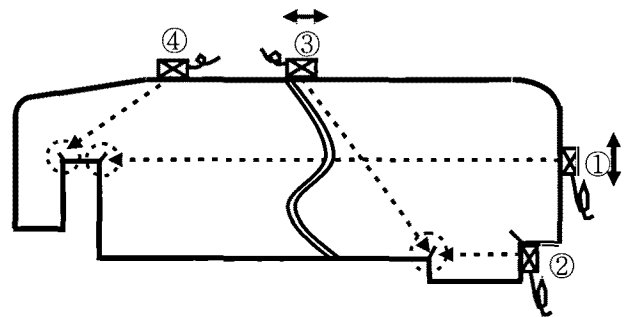


Fig. 5 Test method of retaining ring

초음파탐상의 정밀도와 정확도를 높이기 위해서는 Fig. 4의 그림에서 보는 바와 같이 재질이 동일한 시험편으로 제작된 18Mn-5Cr의 대비시험편을 사용하였으며, 대비시험편의 인공결함은 5×1.0×5 mm의 크기로 방전가공을 하여 반사신호(echo)의 높이를 80%로 설정하고 +15 dB (5×1.0×2 mm 기준)로 설정하여 검사하였으며, 20%를 초과하는 것을 검출기준으로 사용하였다.

5. 검사내용 및 결과

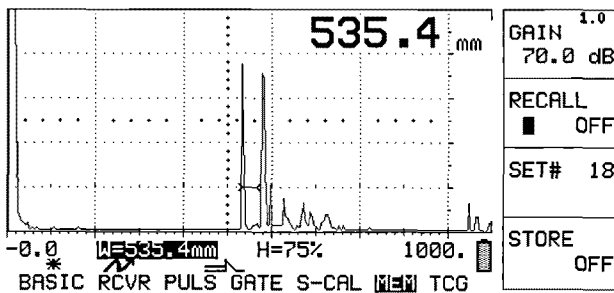
5.1 검사결과 파형분석

리테이닝 링에서는 각 단이진 부위에서 응력이 많이 걸려서 응력부식균열의 발생 가능성이 많으므로 외부 표면 전체에 걸쳐 360도 전부위에 대해서 수직법 및 경사각법을 이용하여 검사를 수행하여야 하며, Fig. 6은 Fig. 5에 따른 검사위치별 결과 파형을 나타낸 그림이다.

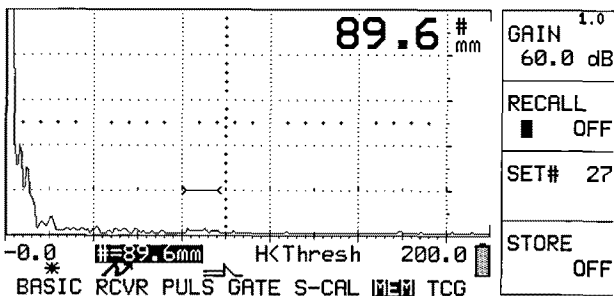
검사결과 Fig. 6의 (a)는 Fig. 5의 ①번 부위를 수직법을 이용하여 검사한 결과파형을 나타낸 그림이며, 결함발생시 두 신호파형 사이에 결함신호가 나

타나게 되는데, 결함이 없을 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 두 신호사이에 아무런 파형도 나타나지 않게 된다. 또한, Fig. 6의 (b)와 (c)는 각각 Fig. 5의 ③, ④번 부위를 경사각법을 이용하여 검사한 결과파형을 나타낸 그림이며, ③번 파형에서 결함발생시 게이트(gate) 부분에 결함파형이 발생되어야 하나 이 부분에서 반사되는 이상신호(indication)가 없으므로 화면상에는 아무것도 나타나지 않게 된다.

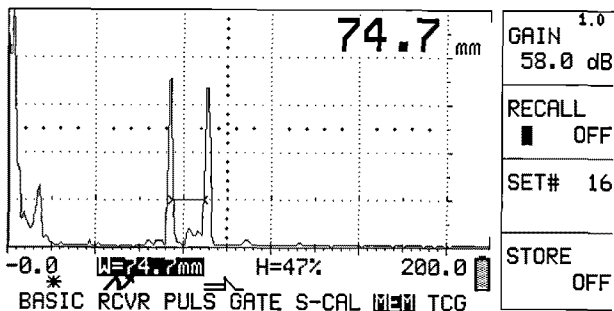
또한, Fig. 6의 (c)에서도 결함발생시에는 게이트(gate) 부분에 결함파형이 발생되어야 하나 리테이닝 벽면에서 반사되는 파형을 제외하고는 결함이 없으므로 화면상에는 아무런 이상신호가 나타나지 않게 된다.



(a) Test result signal of part ① in Fig. 5



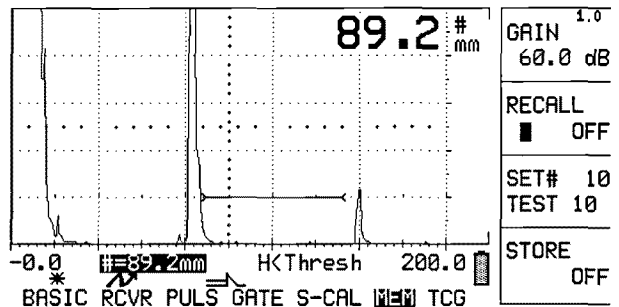
(b) Test result signal of part ③ in Fig. 5



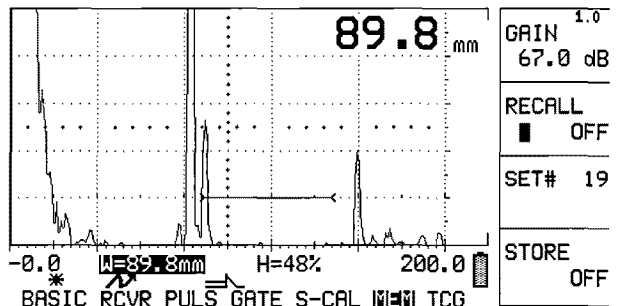
(c) Test result signal of part ④ in Fig. 5

Fig. 6 Test result of retaining ring

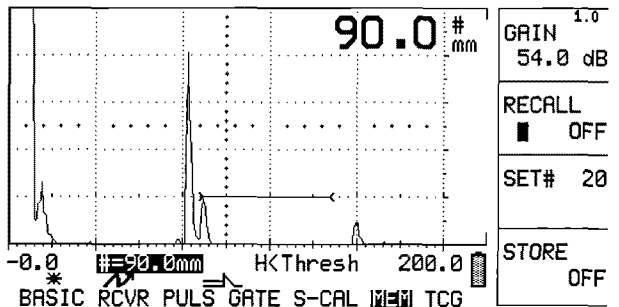
5.2 이상신호(indication) 파형분석



(a) Test result signal of part ② in Fig. 5



(b) Indication signal of part ② in Fig. 5



(c) Indication signal of part ② in Fig. 5

in case of 80% gain setting

Fig. 7 Test result signal of part ② in Fig. 5

Fig. 7의 (a)는 Fig. 5의 ②번 부위 건전신호 파형을 나타낸 그림이며, (b)는 ②번 부위 이상신호(Indication) 파형을 나타낸 그림으로서 (b)그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두 파형사이에 서 이상신호가 약 50% 정도 높이로 나타나서 원래의 기준감도인 80% 높이로 보정한 결과 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 그 높이가 약 20% 이내로서 심각한 정도가 아닌 것으로 판단되었으며, 이 부분에 결함이 있는지 재확인하기 위해 Fig. 6의 (b)에서와 같이 사각 탐촉자를 이용하여 검사한 결과 이상신호 파형이 나타나지 않아 ②번 부위는 응력부식(Stress Corrosion)에 의한 미소신호임을 추정할 수 있었다.

6. 결 론

초음파를 이용한 18Mn-5Cr강 발전기 리테이닝 링의 신호분석에 관한 연구결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 리테이닝 링에서는 각 단이 진 부위에서 응력이 많이 걸려서 응력부식균열의 발생 가능성이 많으므로 외부 표면 전체에 걸쳐 360도 전부위에 대해서 수직법 및 경사각법을 이용하여 검사를 수행하여야 하며, 검사결과 일부 단이 진 부위에서 50%가 넘는 파형이 검출되었으나, 원래의 기준감도인 80% 높이로 보정한 결과 이상신호 파형이 나타나지 않아 응력부식(Stress Corrosion)에 의한 미소신호임을 추정할 수 있었다.

2. 발전기 리테이닝 링은 조립된 상태에서 초음파 검사를 실시하도록 규정하고 있으며, 만약 이상 신호(Indication)가 발생되었을 경우 이의 확인을 위하여 형광침투탐상검사(FPT) 등 다른 비파괴시험을 통하여 확인을 해 보는 것이 보다 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

3. 운전상태에서는 발전기 내에 습분이 존재한다 하더라도 가스냉각 발전기 링(rotor ring) 이 노점 온도보다 높게 유지되기 때문에 부식이나 결함으로 성장되지는 않지만, 고응력을 받는 경우에는 습분에 상관없이 결함이 성장할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Ronald J. Zawoysky, "GE Generator Rotor Retaining Rings; Experience and Fleet Data" GE Power Systems, pp. 1~4.
2. 안연식 외 5인, 2008, "7FA형 가스터빈 주요부품 비파괴 진단기술 개발", 최종보고서, 산업자원부, pp. 418~420.
3. 임상규, 박상기, 길두송, 2007, "발전기설비초음파 검사 결과", 전력연구원, pp. 13~19.
4. 조용상, 정계조, 이인철, 2001, "다중센서방식 초음파를 이용한 TBN Blade 루트부/리테이닝 링 검사 및 베어링 C-scan 검사보고서" 전력연구원, pp. 20~23.
5. L. S. Dorfman, P. C. Riccardella, D. A. Rosario, T. P. Sherlock, 1996, "Retaining Ring Failure at Comanche Unit 2", Final Report, EPRI, pp. 1~3.

6. 황석환, 최재승, 2000, "2극 발전기의 리테이닝 링 열 박음 해석", 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 849~853.
7. 이동민, 2006, "발전기 리테이닝링/슬롯단부의 해석 및 수명평가기술", 한전기공주식회사 기술연구원, pp. 11~30.