

## 2극 발전기의 리테이닝 링 열 박음 해석

황석환\* · 최재승\*

### Analysis on retaining ring shrink-fitted on rotor body in 2-pole generator

Suk-Hwan Hwang and Jae-Seung Choi

Key Words : Shrink Fit (열 박음), Residual Stress (잔류응력), Contact Pressure (접촉 압력), Stress Corrosion Cracking (응력 부식 균열)

#### ABSTRACT

The retaining rings used to restrain the end turns of the rotor winding against centrifugal force require very careful attention during design and manufacture because they have traditionally been the highest-stressed components of the generator. In other words, the rings maintain their shrink fits during their entire service life. In this study, using finite element method, the part of shrink fits in generator was analyzed to obtain residual stresses in retaining ring and contact pressures between contact surfaces at zero, rated, and 120 rated speeds, respectively.

#### 1. 서론

금속의 열 팽창을 이용한 열 박음(Shrink Fit)은 발전기 회전자에서 리테이닝 링(Retaining Ring)과 센터링 링(Centering Ring)의 조립 또는 리테이닝 링과 발전기 회전자와의 조립 뿐만 아니라 많은 다른 종류의 기계 부품에서 폭 넓게 이용되고 있다.<sup>1),2)</sup>

끼워 맞춤량을 너무 크게 설계하면 제품의 조립 후 과도한 잔류응력이 접촉면 주위에 존재하게 되므로 이로 인해 파단이나 균열, 비틀림 등 제품에 치명적인 결함을 안겨줄 수 있다. 반대로 끼워 맞춤량을 너무 작게 설계하면 적절한 접촉 압력 이하의 값이 부품과 부품을 지지해 주기 때문에 제품의 운전 시 부품의 일탈 등과 같은 문제를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 회전자 몸체와 리테이닝 링의 열 박음을 유한요소 기법을 이용해 해석하여 결합면 사이의 접촉 압력을 도출하고 리테이닝 링에 걸리는 잔류응력을 계산하였다.

(Exciter)에서 공급되는 DC 전류가 권선(Field Winding)의 코일에 흐름으로서 전자석이 되어 자속(Flux)을 발생시키며, 전기자는 계자에서 발생한 자속의 통로를 형성하여 코어에 조립된 전기자 코일로부터 전류를 발생시킨다. 대형 발전기에서는 통상 계자가 회전하고 전기자는 정지해 있기 때문에 기계적으로 계자를 회전자(Rotor)라 하고 전기자를 고정자(Stator)라 지칭한다.

발전기는 계자의 극(Pole) 수에 따라 2극, 4극, 다극 발전기 등으로 구분되는데 일반적으로 500 MW급 이하 대형 화력 발전기는 2극이, 500 MW 이상 대형 원자력 발전기는 4극, 수력 발전기는 다극이 채용되고 있다. 국내나 대부분의 국가에서 상용 주파수가 60 Hz인 전기기기를 사용하는데 이때 회전자는 2극의 경우 3600 rpm, 4극의 경우 1800 rpm으로 회전한다. 유럽 및 일부 국가의 상용 주파수가 50 Hz인 경우에는 2극의 경우 3000 rpm, 4극의 경우 1500 rpm으로 회전한다.<sup>3)</sup> 식 (1)은 동기 속도와 극 수와의 관계를 나타낸다.

#### 2. 리테이닝 링

발전기는 전기적 명칭으로 계자(Field)와 전기자(Armature)로 크게 둘로 분류되는데 계자는 여자기

$$N = \frac{120f}{P} \quad (1)$$

여기서, N = 동기 속도(rpm)

f = 주파수(Hz)

P = 극 수

\* : 한국중공업(주) 기술연구원

이와 같이 대형 중량물이 고속 회전함에 따라 원심력에 의한 응력 해석 및 질량의 불균일 분포에 의한 진동, 밸런스 해석 등이 정밀하게 이루어져야 한다.

리테이닝 링은 회전자的高速 회전에 의한 원심력으로부터 계자권선의 단부를 지지하기 위하여 사용되는데 터빈 발전기 부품 중 가장 큰 응력을 받는 부품이기 때문에 설계와 제작 중 매우 세심한 주의가 요구되고, 이러한 응력에 견디기 위해서 고 강도, 고품질의 자성 또는 비자성 재질로 제작되어야 한다. 단부 권선(Ending Winding)의 원심력은 리테이닝 링내에 분포되어 리테이닝 링을 늘이고 비트는 후프(Hoop) 응력이 발생한다. 초기 발전기의 리테이닝 링은 회전자 몸체의 바깥쪽 스피들(Spindle)에 열 박음으로 장착되는데, 이는 단락 중 유도된 전류가 회전자 몸체로부터 리테이닝 링으로 흐르는 것을 방지한다. 이와 같이 리테이닝 링이 몸체로부터 분리됨으로써 스피들 장착형 리테이닝 링은 축의 팽창이나 스피들의 움직임에 영향을 받게 된다. 현재의 발전기의 리테이닝 링은 회전자 몸체의 끝에 열 박음 된다. 이는 정상운전에서 리테이닝 링이 원통 형태로 있도록 하며 회전자 몸체에 대하여 리테이닝 링의 독립적 움직임을 방지한다.

리테이닝 링의 재질로는 자성(Magnetic)과 비자성 재질이 사용되는데, 비자성 리테이닝 링은 누설자속을 최소화하고 손실을 줄이기 위해 대용량의 발전기에 사용된다. 자성재질은 열처리에 의해 강도를 달성할 수 있는 Ni-Cr-Mo-V 합금강을 사용한다. 현재 사용되고 있는 비자성 혹은 오스테나이트(Austenite) 재질은 요구된 강도를 만족시키기 위해 냉간 팽창된 Mn-Cr 합금강이다. 모든 단조(Forging)와 최종 정삭 가공된 리테이닝 링은 확실한 성능 보증을 위해 철저한 테스트와 검사를 수행한다. 화학 성분 분석, 기계적 특성 시험 등이 실시되며 비자성 리테이닝 링에 대하여는 투자성(Magnetic Permeability) 시험과 결정크기(Grain Size) 측정이 실시되고, 재질의 건전성을 확인하기 위하여 초음파시험(Sonic Test)을 실시한다. 리테이닝 링은 운전 중 예상되는 속도 이상에서 회전자 몸체와 밀착(Tight Fit)이 유지되도록 하기 위해 열 박음된다.<sup>4),5)</sup> 리테이닝 링의 제작, 시험 그리고 조립 중에 손상을 입지 않도록 세심한 주의가 요구되며, 조립이나 해체 시 과열(Overheating)로 인한 링의 온도를 세심하게 통제하여야 한다.

### 3. 모델링 및 경계조건

발전기 회전자 몸체와 리테이닝 링의 열 박음을 유한요소 해석하기 위한 유한요소 모델을 Fig.1에 나타내었다. 유한요소 해석은 상업용 FE 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 8,014개의 절점과 7,299개의 CPS4 요소를 사용하였다.<sup>6)</sup> 유한요소 모델은 회전자 몸체(Rotor Body), 리테이닝 링, 코일(Copper)의 세 부분으로 구성되어 있고, 각각의 물성치는 Table 1에 정리하였다.

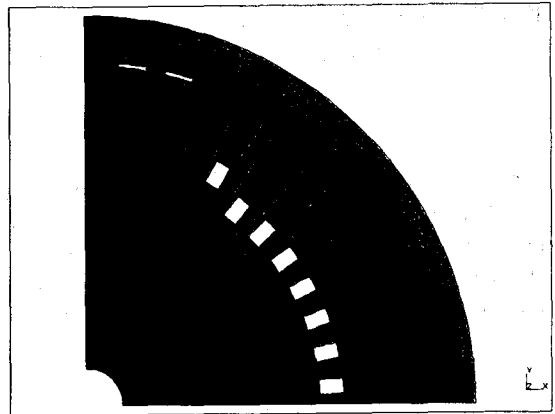


Fig.1 Finite Element Model

Table 1. Material Property

	Rotor Body	Retaining Ring	Copper
Young's Modulus (GN/m <sup>2</sup> )	207	207	117
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.35
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,833	7,833	8,940
Yield Stress (MN/m <sup>2</sup> )	552	1,179	-

모델링에 사용된 재질은 회전자 몸체가 B50A685-S3이고, 리테이닝 링이 18Mn-18Cr이며, 각각의 화학 성분을 Table 2에 정리하였다.

인장시험을 통해서 구한 회전자 몸체와 리테이닝 링의 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)을 Fig.2에 나타내었다. 리테이닝 링은 탄성-완전 소성(Elastic-Perfectly Plastic) 거동을 나타내고 있으며, 항복 강도가 회전자 몸체보다 거의 두 배 정도 크다. 회전자 몸체의 경우(Bi-linear Stress-Strain Curve), 소성 영역에서의 기울기를 나타내는 수식은 다음과 같이 표시되어 진다.

$$E_y = 0.015E$$

(2)

#### 4. 해석 결과

여기서, Tangent Modulus Fraction = 0.015

경계조건으로는 해석에 사용된 2극 발전기 로타의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 모델링하였기 때문에 그 경계 부분에 원주 방향의 구속조건을 주었다.

Table 2. Chemical Composition

	Rotor Body	Retaining Ring
	Weight Percentage	
C	0.032	0.052
Mn	19.25	19.82
P	0.023	0.027
S	0.001	0.001
Si	0.3	0.34
Cr	18.35	18.76
N	0.59	0.684
Sb	0.0003	0.001
As	0.008	0.003
Sn	0.003	0.003
Al	0.016	0.005
V	0.08	0.04

응력 부식 균열(SCC)은 재료의 입자간 구조(Intergranular Structure)에 영향을 끼친다. 응력 부식 균열이 발생하기 위해서는 두 가지 조건이 충족되어야 한다. 즉, 재료는 응력을 받고 있는 상태여야 하고, 부식 환경(물, 높은 습도, 습한 수소, 염화물)에 노출되어 있어야 한다. 정지 상태에서도 높은 잔류응력이 리테이닝 링에 나타난다. 특히, 리테이닝 링의 열 박음 면 부위에서 가장 심한 잔류응력이 발생한다. 리테이닝 링에서 높은 잔류응력의 존재는 균열이 성장할 수 있는 원인을 제공하기 때문에 제작 시에 세심한 주의를 요한다. 발전기의 빈번한 기동과 정지는 상당한 반복 응력을 야기시키고 피로에 의한 균열을 성장시킨다. 균열이 임계치(Critical Size)에 도달하면 대재앙이 발생할 수 있다. 주로 열 박음 주위에서 발생하는 응력 부식 균열을 방지하기 위해서 18Mn-18Cr과 같은 우수한 소재를 리테이닝 링에 채택하고 있지만 보다 근본적으로 잔류응력의 분포를 이해할 필요가 있다.

그러므로 본 연구에서는 회전자 몸체와 리테이닝 링의 열 박음을 유한요소 기법을 이용해 해석하여 결합면 사이의 접촉 압력을 도출하고 리테이닝 링에 걸리는 잔류응력을 계산하였다.

발전기 로타는 회전자 몸체와 리테이닝 링 사이에 열 박음 되어 있어 접촉 압력이 발생하고, 발전기가 고속 회전함에 따라 원심력에 의해 코일과 리테이닝 링 사이에도 접촉이 발생한다. 본 모델의 해석 과정을 다음과 같이 두 단계로 나누어서 해석하였다.

첫 번째 단계는 원심력을 고려하지 않은 조립 단계에서 회전자 몸체와 리테이닝 링 사이의 열 박음에 의한 접촉 압력 및 잔류응력 해석을 수행하였고(Case I), 두 번째 단계에서는 코일의 모델을 포함하여 전체 모델이 3,600 rpm(정상 운전 상태)의 고속 회전을 할 때 접촉 압력 및 잔류응력 해석을 수행하였다.(Case II) 그리고, 발전기 로타의 120% 운전 상태인 4,320 rpm(과속 운전 상태)으로 회전할 때의 접촉 압력 및 잔류응력 해석도 수행하였다.(Case III) 위의 세 가지 경우의 해석 결과인 von-Mises 응력 분포를 Fig.3부터 Fig.5까지 나타내었다. 리테이닝 링에서 최대 응력이 작용하는 부위를 살펴보면, X 축을 기준으로 해서 원주 방향으로 약 30° ~ 60° 사이에 위치한 회전자 몸체의 치부(Teeth)의 끝 단과 접하는 지점에서 큰 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다.

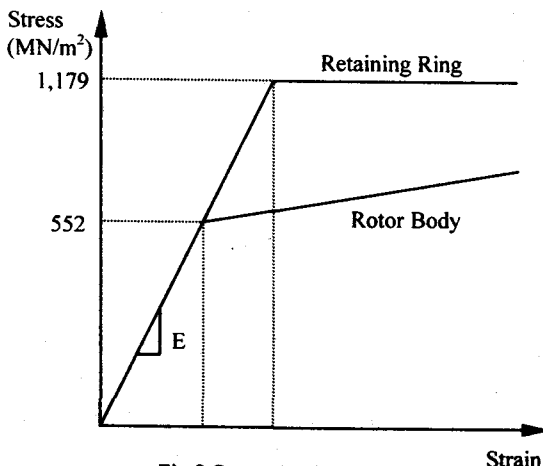


Fig.2 Stress-Strain Curve

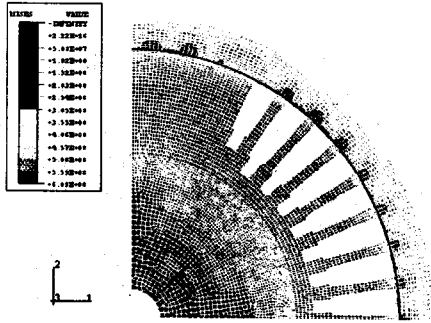


Fig.3 Distribution of von-Mises Stress (Case I)

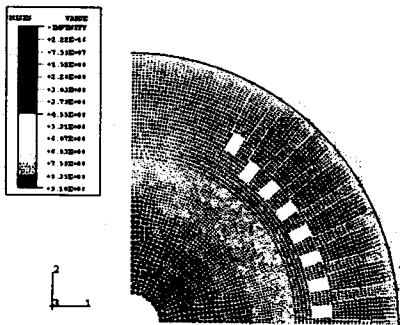


Fig.4 Distribution of von-Mises Stress (Case II)

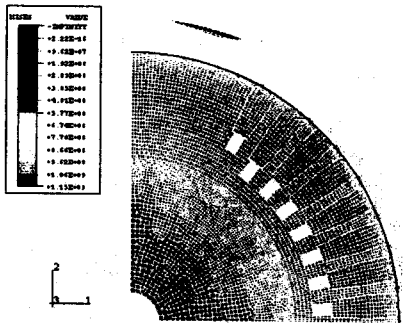


Fig.5 Distribution of von-Mises Stress (Case III)

회전자 몸체와 리테이닝 링 각각에 작용하는 최대 von-Mises 응력을 항복응력과 비교하여 Table 3에 정리하였다. 회전자 몸체의 경우 정지 상태일 때가 열 박음 양이 가장 크므로 응력도 가장 크게 작용하고 있으며, 정상 운전 상태에서는 원심력에 의해 리테이닝 링의 직경이 커지기 때문에 정지 상태보다 열 박음 양도 작고, 작용하는 응력도 작음을 알 수

있다. 반면에 리테이닝 링의 경우는 정지 상태보다 정상 운전 상태일 때 더 큰 응력이 작용하고 있는데, 이는 열 박음 양에 의한 응력보다 회전자 몸체의 원심력에 의한 응력의 효과가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Maximum Values of von-Mises Stress

Units : MN/m<sup>2</sup>

	Rotor Body	Retaining Ring
Case I (Shrink Fit)	416	609
Case II (Shrink Fit + 100% Rotation)	191	910
Case III (Shrink Fit + 120% Rotation)	346	1,150
Yield Stress	552	1,179

코일과 회전자 몸체의 회전으로 인해 리테이닝 링에 원심력이 작용하고, 이러한 불 균일(Non-uniform) 하중은 리테이닝 링의 모양을 타원 형태로 변형시킨다. 속도가 증가함에 따라 타원율은 더욱 커지고, 극 부분에서의 직경이 치부에서 보다도 더 커진다. 이는 극 부분에서 원심력이 더 크게 작용하기 때문이다.<sup>7), 8)</sup>

회전자 몸체와 리테이닝 링 사이의 접촉 압력을 분석해 보면, Case I의 경우 전체 접촉면에서 평균적으로 100~200 MPa 정도 작용하고 있으며, Case II의 경우 전체 접촉면에서 평균적으로 50~100 MPa 정도 작용하고 있다. 그러나, Case III의 경우는 극 근처에서만 적은 양의 접촉 압력이 나타나고(0~50 MPa), 치부에서는 접촉 압력이 작용하지 않는다. 만약에 회전 속도가 점점 커져서 회전자 몸체와 리테이닝 링의 이탈 속도(Separation Speed)를 초과할 때는 전체 접촉면에 걸쳐서 접촉 압력이 작용하지 않을 것이라는 결과를 쉽게 예측할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 회전자 몸체와 리테이닝 링의 열 박음을 유한요소 기법을 이용해 해석하여 결합면 사이의 접촉 압력을 도출하고 리테이닝 링에 걸리는 잔류응력을 계산하였다. 먼저 회전자 몸체와 리테이닝 링의 조립 단계로 볼 수 있는 정지 상태에서 열 박음에 의한 접촉 압력 및 잔류응력 해석을 수행하고, 원심력을 고려한 정상 운전 상태(3,600rpm)

와 120% 운전 상태(4,320rpm)에 대하여 접촉 압력 및 잔류응력 해석을 수행하였다.

회전자 몸체와 리테이닝 링에 작용하는 응력은 정상 운전 상태와 120% 운전 상태에 대하여 항복응력을 초과하지 않으므로 탄성한계 내에서 변형이 발생하며 소성변형은 일어나지 않음을 알 수 있다. 그리고 회전자 몸체보다 리테이닝 링에 더 큰 응력이 작용하므로 리테이닝 링의 재질을 회전자 몸체의 재질보다 더 강한 것으로 사용해야 한다.

회전자 몸체와 리테이닝 링 사이에 작용하는 접촉 압력은 정상 운전 상태의 경우에는 전체 접촉면에서 작용하고 있으나, 120% 운전 상태의 경우에는 극 부분 근처에서만 적은 양의 접촉 압력이 존재하고 있으며, 치부에서는 접촉 압력이 작용하지 않는다. 이러한 결과는 리테이닝 링의 타원율과 밀접한 관련이 있으며, 회전 속도가 증가함에 따라 원심력의 차이가 커지기 때문에 극 부분에서의 직경이 치부에서의 직경보다 더 커지는 현상과 일치한다. 또한, 회전자 몸체와 리테이닝 링의 이탈 속도가 정상 상태 운전 속도의 124%임을 감안할 때, 타당한 결과라 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) 서대윤, 류찬호, 이민철, 전만수, “예압된 냉간단조 금형 세트의 유한요소 해석”, 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp.791-795, 1998.
- (2) 오계훈, 이대길, 이수정, 이종수, “고온 고압용 튜브형 알루미늄 라이너에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제21권 제6호, pp.884-895, 1997.1.
- (3) Hargett, Y. S., “Large Steam Turbine-Driven Generators”, Large Steam Turbine-Generator Department, General Electric Company, 1982.
- (4) Warren C. Young, “Roark’s Formulas for Stress and Strain”, Sixth Edition, McGraw-Hill, Inc., 1989.
- (5) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, “Theory of Elasticity”, Third Edition, McGraw-Hill, Inc., 1970.
- (6) ABAQUS User’s Manual, Version 5.7, Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, Inc., 1997.
- (7) Keck, R. J., “Generator Engineering and Development”, TGE92-40, GE, 1992.
- (8) Dawson, R. N., and Miller, R., “Generator Design and Development Engineering”, TGE92-37, GE, 1992.