

## 4극 발전기 로터의 고정 링 열박음 해석

이후광\* · 황석환\* · 최재승\*

### Analysis of Shrink-Fitted Retaining Ring on Rotor Body in 4-Pole Generator

Hoo-Gwang Lee, Suk-Hwan Hwang and Jae-Seung Choi

**Key Words :** Shrink Fit(열 박음), Separating Speed(이탈 속도), Contact Pressure(접촉 압력), Residual Stress(잔류 응력)

#### Abstract

A study about the shrink fits of rotor and retaining ring in generator was performed for the cases of three radial interference. The shrink-fitted retaining ring used to restrain the end turns of the wound coils in the rotor against centrifugal force requires very careful attention during design and manufacture because it has traditionally been the highest-stressed component of the generator. The contact pressures and residual stresses were obtained by the finite element analysis for each radial interference at zero, 100% rated, and 120% rated speeds, respectively. The results of analysis show that the radial interference in use needs to be increased carefully.

속도에서의 안정성을 검토하였다.

#### 1. 서론

열 박음(shrink fit)은 금속의 열 팽창 및 수축 특성을 이용하여 다양한 기계 부품의 결합에 이용되는 체결 방법으로, 산업용 발전기에서 회전자에 고정 링(retaining ring)을 고정하는 데에도 활용되고 있다.<sup>[1]</sup> 열 박음 체결에서는 끼워 맞춤량의 크기에 따라 접촉 압력의 크기가 변화하며 이에 따라 발생하는 잔류응력으로 부품을 고정하지만, 과도한 잔류응력은 제품에 결함을 발생시킬 수 있고 응력부식균열의 원인이 될 수 있다. 따라서, 발전기 회전자의 제작에서는 목표한 성능과 발생 잔류응력 그리고 조립 및 분해 작업에 필요한 온도 조건 등을 고려하여 끼워 맞춤량을 결정한다. 특히 발전기 회전자는 극성에 따라 회전 속도가 제한되어 있으므로 설계 허용으로 설정된 이탈 속도에 대한 안정성 조건을 만족시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 4극 발전기에서 회전자에 열 박음으로 체결된 고정 링 구조에 대하여 끼워 맞춤량의 변화와 구조적 특성 변화를 파악하고 이탈

#### 2. 대형 발전기와 고정 링

발전기는 크게 여자기(exciter)에서 공급되는 직류 전류로 전자석의 역할을 수행하여 자속(flux)을 발생시키는 계자(field)와 계자에서 발생한 자속의 통로를 형성하여 권선으로부터 전류를 생산하는 전기자(armature)로 구성되며, 일반적인 대형 발전기에서는 계자가 회전하고 전기자가 고정되어 있어 각각 회전자(rotor)와 고정자(stator)로 부른다. 그리고, 발전기는 회전자의 극(pole) 수량에 따라서 2극, 4극 그리고 다극 발전기로 구분된다. Fig.1 에서는 4극 발전기 회전자에 대하여 극과 코일 영역을 단면으로 표시하였다. 일반적으로 500MW 이하의 대형 화력 발전소에서는 2극 발전기를, 500MW 이상 원자력 발전소에서는 4극 발전기를, 그리고 수력 발전소에서는 다극 발전기를 채용하고 있다. 본 연구에서 다루는 4극 발전기 회전자는 동기 속도와 극 수량과의 관계<sup>[2]</sup>에 따라 50Hz의 주파수에 대하여는 1,500rpm, 60Hz의 주파수에 대하여는 1,800rpm이 정격 회전 속

\* 두산중공업(주) 기술연구원

도로 설정된다. 발전기의 설계 단계에서는 각 정격 회전 속도의 120% 회전 속도 조건에 대하여 고정 링과 회전자체의 체결 상태 유지가 요구된다.

계자 권선은 회전자에 가공된 홈을 따라 전도체 코일을 감아 구성한다. 회전자체의 중앙부는 쐐기(wedge)를 설치하여 권선의 탈락을 방지하고 있으며 회전자체의 양 끝은 고정 링을 열 박음으로 체결하여 고속 회전에 따른 권선의 탈락을 방지한다. 따라서, 고정 링은 발전기에서 원심력에 의한 응력을 가장 많이 받는 부품으로 고강도 및 고품질의 자성(magnetic) 또는 비자성(non-magnetic) 재료로 제작되어야 한다. 근래에는 누설 자속을 줄일 수 있는 비자성 재료의 고정 링 채택이 일반적이며 Mn-Cr 합금강을 사용한다. 또한, 대형 중량물의 고속 회전이기 때문에 고정 링은 진동 및 균형 유지에 주의를 요구하고 최종 제작 후 화학 성분 분석, 기계적 특성 시험, 투자성 시험 및 초음파 검사 등의 성능 보증 시험이 필요하며 조립 및 분해 작업에서도 세심한 주의를 요구하고 있다<sup>3,4)</sup>.

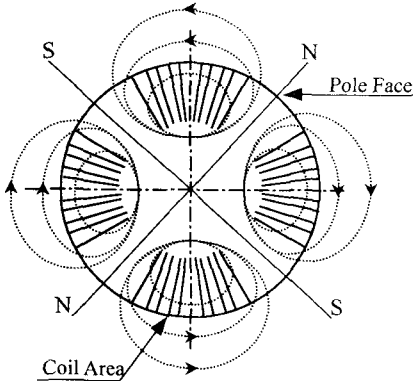


Fig.1 Magnetic fields in the 4-pole generator rotor

### 3. 유한요소해석

발전기 회전자체의 계자 권선과 고정 링에 대한 유한요소해석은 축 대칭성을 고려하여 Fig.2와 같은 회전자 몸체, 코일과 고정 링으로 구성된 1/8 단면에 대한 유한요소모델을 이용하였다. 회전자체의 각 홈에 감겨서 적층되어 설치된 코일은 편의상 하나의 연속체로 모델링하였다. 그리고, 고정 링과 회전자, 고정 링과 코일의 접촉을 상세하게 파악하기 위하여 상응하는 접촉 면의 절점 수량을 일치하도록 하였다. 범용 해석 도구인 ABAQUS

를 유한요소해석 도구로 이용하였고 CPS4 요소를 사용하였으며 절점의 개수는 7,624 개, 요소의 개수는 6,679 개이다. 이 해석 모델은 끼워 맞춤량의 변경에 따른 영향을 살펴보기 위하여 고정 링의 내경에 0.5mm 단위의 변화를 준 세 개의 모델을 만들었다. 각 모델의 끼워 맞춤량은 1.98mm(Case I), 2.48mm(Case II) 그리고 2.98mm(Case III)이고 현재 제품 제작에 이용되고 있는 수치인 Case II가 기준이다.

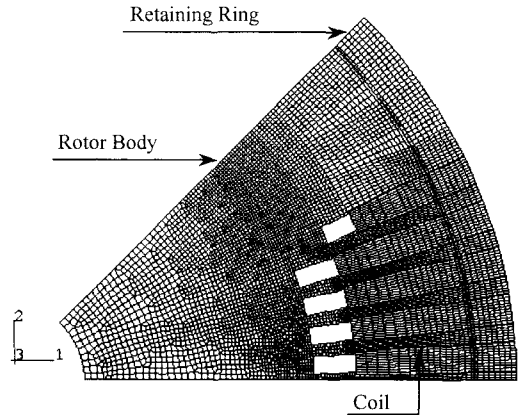
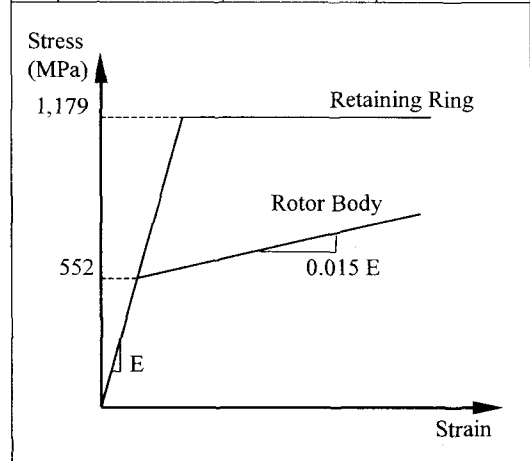


Fig.2 Finite element model

Table 1 Material properties

	Rotor Body (B50A685-S3)	Retaining Ring (18Mn-18Cr)	Coil (Copper)
E	207 GPa	207 GPa	117 GPa
$\nu$	0.3	0.3	0.35
$\rho$	7,833 kg/m <sup>3</sup>	7,833 kg/m <sup>3</sup>	8,940 kg/m <sup>3</sup>



각 모델에 사용된 재질은 Table 1에 제시하였다. 고정 링과 회전자 몸체에 대한 인장 시험 결과는 고정 링이 탄성-완전 소성 거동을 보이며 항복 응력이 회전자 몸체의 두 배에 이르고 있음을 보여 준다.

경계조건은 축 대칭을 이루고 있는 회전자와 고정 링에 대하여 원주 방향으로의 구속 조건을 적용하였고, 연질 절연체로 둘러싸여 회전자 몸체와 접촉이 없는 코일은 반경 방향으로의 움직임만을 자유롭게 하기 위하여 각 코일의 중심선에 위치한 절점에 원주 방향 구속을 적용하였다.

적용한 하중 조건은 각 Case에 대하여 먼저 SHRINK FIT 명령어를 이용하여 열 박음 체결을 묘사하였다<sup>15)</sup>. 다음으로 우리나라에서 사용하는 전류 주파수인 60Hz에 해당하는 100% 속도 및 120% 속도에 대한 원심 가속도를 모든 요소에 분포하중으로 적용하여 회전에 의한 원심력을 묘사하였다. 따라서, 세 가지 Case에 대하여 각각 정지 상태, 100% 회전 속도, 120% 회전 속도에서의 해석 결과를 구하였다.

#### 4. 유한요소해석 결과 및 분석

각 Case의 모델은 회전자와 코일의 외경을 일치하도록 하였기 때문에 첫 단계인 열 박음 해석에서 반경 방향 구속이 없는 코일은 강체 운동을 하여 회전자 중심 방향으로 회전자와 고정 링의 조정된 간격 만큼 이동한다. 이 단계에서는 Fig.3에서 보는 바와 같이 모든 Case에서 동일하게 코일의 접촉면에 대한 접촉 압력 전달은 없으며 따라서 코일은 실제 현상에서와 같이 어떠한 힘도 받지 않는다.

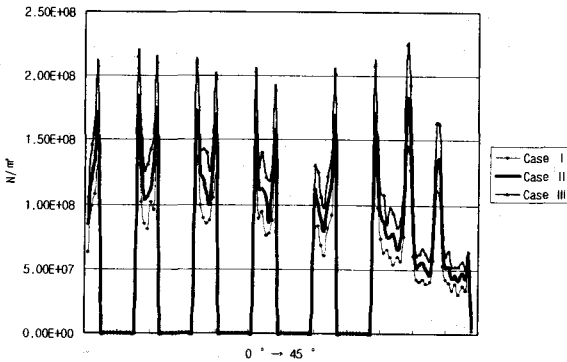


Fig.3 Contact pressure distribution along retaining ring at zero speed

접촉 부위에서 나타나고 있는 접촉 압력은 끼워 맞춤량의 증가에 따라 압력이 증가하며 각 Case에서 유사한 경향을 나타냈다. 회전자의 치부(tooth) 등에서 나타나는 접촉 압력은 양쪽 끝에서 높고 중앙 부분이 낮은 면 접촉의 전형적인 모습을 나타내지만 제한된 절점 수량과 미세하게 일치하지 않는 점으로 인하여 매끄럽지 않게 나타났다. Fig.4에서 나타난 Von Mises 등가 응력의 경향 또한 치부에서 높게 나타났으며 각 Case 별로그 수치에 차이가 있을 뿐 응력 분포 경향은 동일하다.

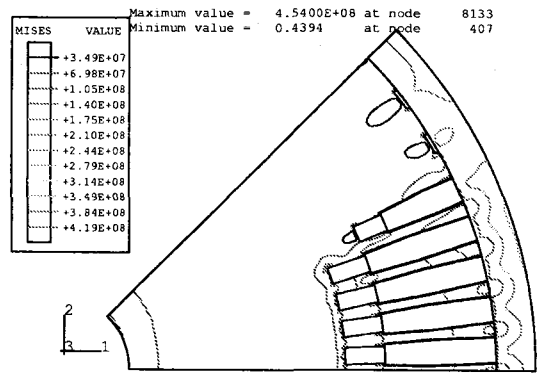


Fig.4 Equivalent stress distribution for Case I at zero speed

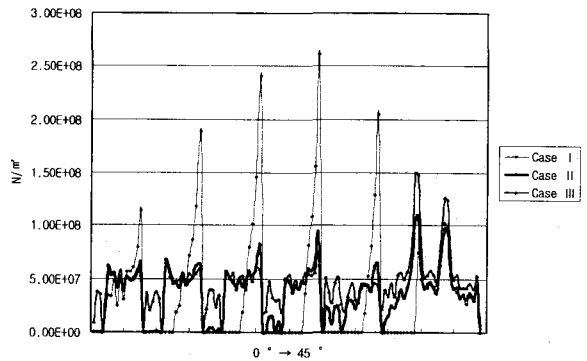


Fig.5 Contact pressure distribution along retaining ring at 100% rated speed

Fig.5에서 100% 속도로 회전자가 회전하는 경우 각 Case에서의 접촉 압력 변화를 확인 할 수 있다. 원심력에 의하여 코일과 고정 링은 중심으로부터 이탈하려는 성질을 나타내므로 고정 링과 치부의 접촉 압력 수준은 낮아지고 고정 링과 코일의 접촉 압력은 상승하게 된다. 고정 링의 형태는 0° 부근이 극 부분보다 더 늘어난 찌그러진 원 모양으로 변형되고, 각 코일은 고정 링과의 접

축 부위에서 극이 위치한 방향으로 더 큰 변형과 접촉 압력을 나타낸다.

Case I의 경우에는 이미 대부분의 회전자 치부에서 체결이 풀어지고, 극 부분의 좁은 면적에서 열 박음 해석 결과의 절반 정도로 줄어든 접촉 압력을 유지하고 있어 이탈 속도가 100% 회전 속도보다 낮게 형성되었음을 예측할 수 있다. Case II 또한 0° 부근에 위치한 치부에서는 부분적으로 체결이 해제되었다. 끼워 맞춤량이 가장 큰 Case III에서는 치부에서 감소한 열 박음 접촉압력과 코일의 원심력에 의하여 증가한 접촉 압력이 최종적으로 비슷한 수준을 유지하고 있음을 보여주고 있다.

각 Case에 대한 Von Mises 등가 응력의 경향은 Fig.6-8에 제시되어 있다.

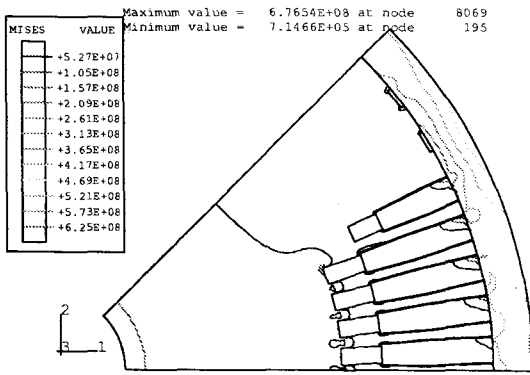


Fig.6 Equivalent stress distribution for Case I at 100% rated speed

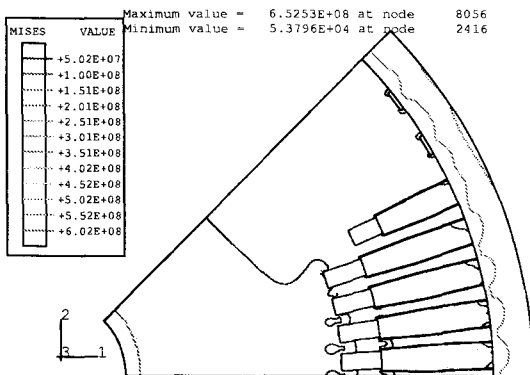


Fig.7 Equivalent stress distribution for Case II at 100% rated speed

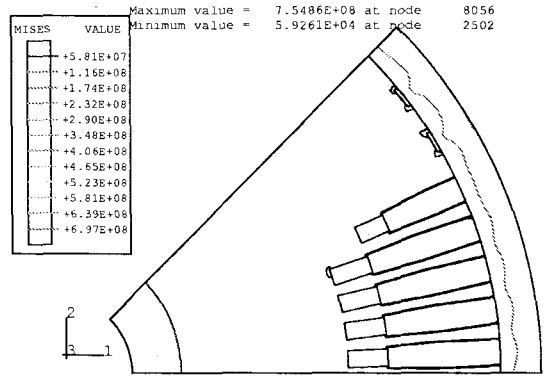


Fig.8 Equivalent stress distribution for Case III at 100% rated speed

치부에서 체결이 해제되어 코일의 접촉 압력이 급격하게 상승한 Case I의 경우에서 끼워 맞춤량이 더 크게 설정된 Case II의 경우보다 높은 응력이 발생하였다. 이는 열 박음에 의한 응력과 코일의 원심력에 의한 응력이 반대의 방향성을 갖고 있으며 치부에서 열 박음에 의한 체결이 해제되어 그에 대한 압축 잔류 응력이 해소되는 경우에는 코일의 원심력에 의한 응력이 극부적으로 급격하게 증가함을 보여준다.

120% 회전 속도의 경우에는 Fig.9에서와 같이 모든 Case의 치부에서 체결이 해제되었고 극 부분에서 체결이 유지되고 있다. 코일에서의 접촉 압력은 끼워 맞춤량의 역순으로 높게 나타나고 그 경향은 유사하였다. 등가 응력 해석 결과는 Fig.10~12에 제시하였으며 고정 링에서의 최대 응력 또한 끼워 맞춤량의 증가에 따라 줄어들고 있음을 확인할 수 있다.

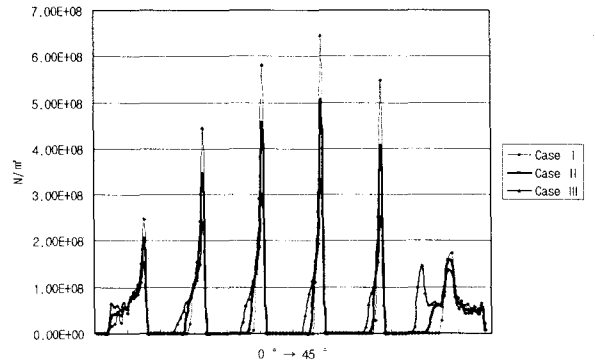


Fig.9 Contact pressure distribution along retaining ring at 120% rated speed

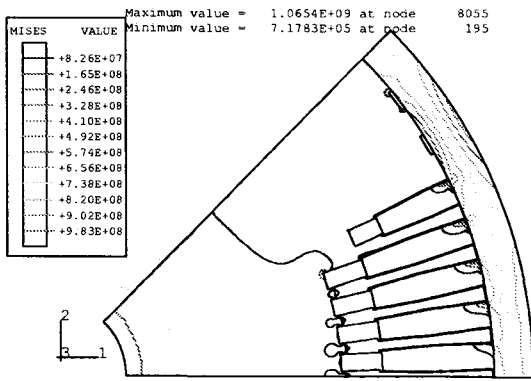


Fig.10 Equivalent stress distribution for Case I at 120% rated speed

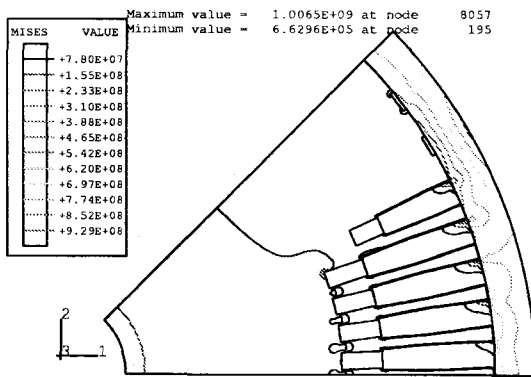


Fig.11 Equivalent stress distribution for Case II at 120% rated speed

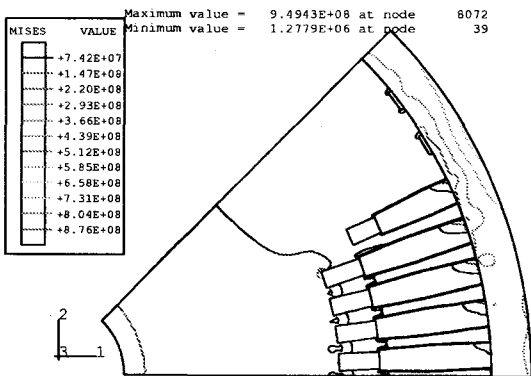


Fig.12 Equivalent stress distribution for Case III at 120% rated speed

고정 링의 전반적인 거동은 기존의 연구<sup>6,7)</sup>에 따르면 회전자 밖으로 돌출되어 C 형태로 된 권선 끝 회전 부분(coil end turn)에서 원주 방향으로 위치한 코일의 질량에 의하여 고정 링의 극 부분 타원율이 커지는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 권선이 극을 중심으로 좌우 대칭인 회전자의 홈에 감기 때문에 회전자 외곽에서 코일이 C 모양으로 연결되고, 원주 방향으로 코일이 설치되는 부분 또한 고정 링이 감싸고 있기 때문에 나타난다. 그러나, 고정 링이 회전자와 체결되는 부분은 본 연구에서 다른 해석 모델과 같이 코일이 회전자 축과 평행하게 설치되어 있다. 따라서, 본 연구의 결과와 같이 실질적인 고정 링과 회전자의 체결 부위인 열 박음 체결 부분(coil slot side)에서의 접촉 압력 변화와 응력 분포에 대한 국부적인 해석 결과에서는 코일 질량이 없는 극 부분보다는 코일 질량이 원심력으로 작용하는 치부에서 고정 링은 더 큰 타원율을 보이고 있다. 따라서 권선의 이탈을 방지하고 회전자와 체결을 유지하여야 하는 고정 링의 역할 측면에서 볼 때, 고정 링의 전반적인 거동 검토보다 고정 링과 회전자의 열 박음 처리 부분 검토가 보다 중요하다.

이상의 해석 결과로부터 끼워 맞춤량 1.98mm (Case I)에 대하여는 이탈 속도가 낮아 적용이 불가능하고 2.98mm(Case III)에서는 정격 회전 속도에서 치부에서의 접촉 압력이 필요 이상으로 높게 나타났다. 현재의 끼워 맞춤량인 2.48mm(Case II)에서는 정격 속도에 대하여 극에서 가장 멀리 있는 치부와 그 옆의 치부 일부분에서 접촉 압력이 제거되는 현상을 보이고 있다. 일부 치부에서 접촉 압력이 0으로 나타나는 경우에는 체결되어 있는 부분의 접촉 압력에 의하여 고정 링이 축 방향으로 움직이지 않을 것이지만 보다 안정적인 회전자와 고정 링의 체결 조건을 확보하기 위하여는 2.48mm 보다 좀 더 큰 끼워 맞춤량을 선택할 필요성이 있다. 120% 속도에서는 모든 조건에서 이탈 현상이 발생하였고 끼워 맞춤량이 클수록 적은 응력이 발생하기 때문에 안정성 측면에서는 끼워 맞춤량을 증가할 필요가 있다. 그리고, 끼워 맞춤량을 증가함에 따른 회전자와 고정 링 각각에서의 최대 응력을 검토한 Table 2는 각 재질의 항복 응력 보다 낮은 결과를 제시하고 있어 2.98mm 까지 끼워 맞춤량을 하는 경우에도 응력 과다 문제는 발생하지 않을 것으로 보인다. 그러나, 실 제작에 끼워 맞춤량의 상향 조정을 검토하는 경우에는 가공 및 조립과 응력 상승에 따른 피로 현상등을 종합적으로 고려하는 연구가 추가로 필요하다.

**Table 2** Maximum equivalent stresses at rotor body and retaining ring for each case

(unit : MPa)

		Case I	Case II	Case III
Zero Speed	Rotor Body	200	252	305
	Retaining Ring	454	568	683
100% Rated Speed	Rotor Body	191	147	182
	Retaining Ring	677	653	755
120% Rated Speed	Rotor Body	302	288	268
	Retaining Ring	1,070	1,007	949

- (5) ABAQUS User's Manual, Version 5.7, 1997, Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, Inc..
- (6) Keck, R. J., 1992, *Generator Engineering and Development*, TGE92-40, GE.
- (7) Dawson, R. N., and Miller, R., 1992, *Generator Design and Development Engineering*, TGE92-37, GE.

## 5. 결론

열 박음에 의한 끼워 맞춤량은 이탈 속도와 밀접한 관련이 있으나 발전기 회전자의 회전 속도는 생산 전력의 주파수에 따라 고정이 되고 이탈 속도 또한 120% 속도로 제한된다. 따라서, 적절한 끼워 맞춤량은 100% 속도에서 고른 접촉 압력을 보이고 그 접촉 압력 또한 120% 속도에서 이탈이 발생하도록 너무 높지 않게 설정되어야 한다. 본 연구에서는 현재 적용 중인 발전기 회전자와 고정링의 열 박음 조건과 이를 변화시킨 조건에 대한 해석 결과를 비교 검토하였고, 현재의 끼워 맞춤량의 상향 조정에 대한 상세한 연구가 필요함을 제시하였다.

## 참고문헌

- (1) 황석환, 최재승, 2000, "2 극 발전기의 리테이닝 링 열 박음 해석," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp.849-853.
- (2) Hargett, Y. S., 1982, *Large Steam Turbine-Driven Generators*, Large Steam Turbine Generator Department, General Electric Company.
- (3) Warren C. Young, 1989, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, Sixth Edition, McGraw-Hill.
- (4) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, 1970, *Theory of Elasticity*, Third Edition, McGraw-Hill.