

화력용 발전기 회전자 및 리테인 링의 응력해석 및 수명평가

이지문[†]

Stress Analysis and Life Evaluation of Rotor and Retaining Ring of Generator for fossil power plant

Ji-Moon Lee

Key Words : Generator(발전기), Rotor(회전자), Retaining Ring(리테인 링), shrink-fit(열박음), End Winding(엔드 와인딩), SCF(stress concentration factor)

Abstract

This paper represents that parts of a large generator operating in 1000 MW are affected by centrifugal forces due to high-speed rotation in 3600 rpm and 3D FEM Analyses are required to obtained the structural reliability of the generator. From these results, one would know the weakest locations and the stress distributions. The fatigue life is calculated in order to grasp the remaining life of generator.

2D and 3D analyses are performed to calculate stresses of the generator rotor and the retaining ring. From 2D results, we find the SCF at the slot and sub-slot of the rotor. 3D analysis is applied at the end part of generator rotor, which represents complex geometry, and rotor and retaining ring shrink thermally.

With these results, designers of rotor and retaining ring can compare with the results of design code and verify the stress distributions of generator rotor and retaining ring, and then calculate the remaining life from the low-cycle fatigue data.

1. 서 론

1000 MW 급의 대형 화력 발전기의 회전자와 리테인링의 각 부분에 발생하는 응력은 현재 사용되는 재질의 설계 제한치에 도달하였다. 이러한 사용 환경하에서 발전기의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 3 차원 유한요소해석 과 피로 수명 해석이 필수적으로 요구되고 있다. 따라서 발전기 회전자의 전체적인 해석을 통하여 취약부위를 파악하고, 상세응력을 통한 응력집중계수를 계산하여 피로수명평가에 적용함으로써 발전기 수명을 설계수명을 보장하고자 한다. 이를 위해서 발전기 회전자의 응력해석을 크게 두 부분으로 나누어 수행하였다.

첫째는 2 차원 단면을 기준으로 하는 2D 응력 해석이고, 둘째는 발전기 끝단부와 리테인링을 해석하는 3 차원 응력해석 부분으로 구분하였다. 일반적으로 2D 응력해석은 발전기 회전자 단면과 Tooth 의 응력을 계산에 적용되고, 3 차원 응력해석은 접촉과 형상이 복잡한 부분에 적용되었다. 본 연구에서 수행된 응력해석 대상은 발전기 회전자의 각각 부분으로 rotor body, tooth, retaining ring 로 구분하였다. 또한 1000 MW 발전기 개발은 500 MW 표준화력 발전기에 비해 용량격상에 따른 직경을 늘리는 방안과 발전기 회전자의 길이를 증가하는 방안으로 진행된다. 전자는 현재 개발된 발전기 회전자 재질의 설계 제한 치에 근접하는 문제가 있고, 후자는 동적 안정성에 확보하여야 하는 문제가 있다. 본 논문에서는 1000 MW 급의 대용량 발전기의 직경을 증가 시킨 경우에 대한 응력해석을 수행하였다.

[†] 두산중공업㈜

E-mail : leejm@doosanheavy.com

TEL : (055)278-3691 FAX : (055)278-8593

2. 발전기 회전자 및 리테인링 구조

2.1 발전기 회전자 구조

발전기 로터는 크게 2 극(Pole)과 4 극 형태로 구분된다. 2 극 발전기 회전자는 화력발전소에 사용되고, 4 극 발전기 회전자는 원자력 발전기 회전자에 주로 사용된다. 이러한 극(Pole)의 형태에 따라 발전기 회전자에 발생하는 응력의 분포 형태가 달라진다. 또한 극 주위의 슬롯(Slot)부에 응력이 집중하는 현상이 발생한다.

2.2 발전기 리테인링 구조

리테인링은 엔드와인딩을 유지하기 위해서 사용된다. 엔드와인딩은 원통형 회전자 몸체에 길이방향의 슬롯 끝 단부로부터 돌출되어 있다. 열박음(shrink-fit)된 링은 회전자의 회전에 의한 엔드와인딩에 의한 원심력을 유지한다.

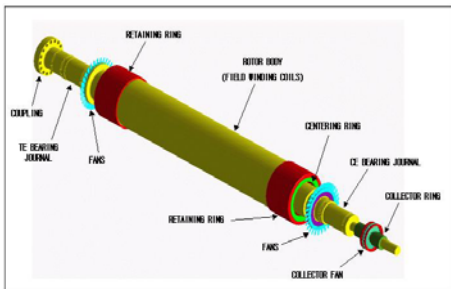


Fig. 1 Generator Rotor Structure

2.3 회전자 및 리테인링 재질

발전기 회전자는 단조강을 가공하여 만들어진다. 대부분의 모든 발전기 회전자는 ASTM 470, Class 4 로 규정되어 있다.

리테인링 재질은 18Mn-5Cr 강과 18Mn-18Cr 강으로 제작되며 응력부식균열(SCC)문제로 인하여 현재는 18Mn-18Cr 강이 주로 사용되고 있다.

3. 발전기 회전자 및 리테인링 하중

3.1 발전기 회전자 하중

발전기 회전자에 작용하는 하중은 고속회전(3600rpm)에 의한 자체 중량에 의한 원심력과 copper winding 에 의한 원심력을 주로 받는다. 발전기 회전자와 copper winding 의 형상은 아래의 Fig. 2 와 같다.



Fig. 2 Generator Rotor Geometry

3.2 발전기 리테인링 하중

리테인링은 운전중일 때 뿐만 아니라 정지시에도 원주방향과 축방향 응력을 받는다. 원주방향 응력은 열박음(shrink-fit)에 의해서 발생한다.

운전동안 원주방향 응력에는 두 가지 원인이 있다. 링 자체의 원심하중에 의해 발생하는 응력은 운전동안의 원주응력의 75% 정도로 작용한다. 링에 대해 엔드와인딩에 의해 발생한 응력은 25% 정도이다. 굽힘응력은 만약 엔드와인딩으로부터 하중이 균일하게 분포되지 않거나 리테인링이 타원(oval)형상으로 바뀌면 발생한다. 리테인링은 20% overspeed 의 원주응력이 링의 인장강도의 70% 보다 크지않게 설계한다.

리테인링의 형상은 아래의 Fig. 3 과 같고, 발생하는 하중은 아래의 Fig. 4 와 같다.

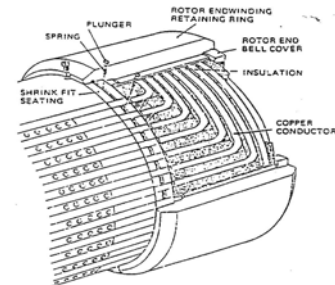


Fig. 3 Retaining Ring Geometry

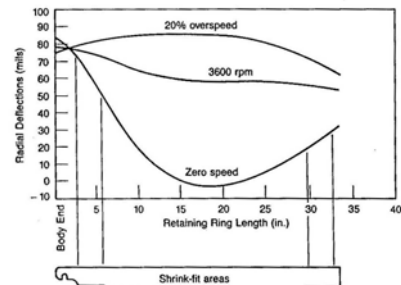


Fig. 4 Load Distribution of Retaining Ring

4. 발전기 응력해석 모델

발전기 회전자와 리테인링을 응력해석하기 위해

서 회전자는 2D 와 3D 모델을 만들고, 리테인링은 3D 모델을 생성하였다.

발전기 회전자는 2D 모델에서 회전자 몸체 모델, TOOTH 모델과 3D 모델에서 회전자 모델을 생성하였다. 리테인링은 3D 모델을 생성하여 응력해석을 수행하였다.

2 차원 단면의 발전기 회전자 형상은 Fig. 5 와 같고, 유한요소모델은 Fig. 6 에 나타내었다. 발전기 회전자에 전류를 공급하기 위해서 설치된 copper winding 이 고속 회전으로 인한 이탈을 방지하기 위해서 슬롯(slot) 가공된 tooth 의 형상과 유한요소 모델은 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다.

발전기 회전자의 끝단부의 형상 모델은 Fig. 9 과 Fig. 10 에 나타내었다.

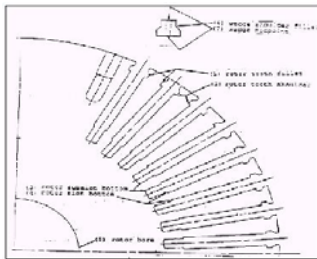


Fig. 5 2D Cross Section of Rotor

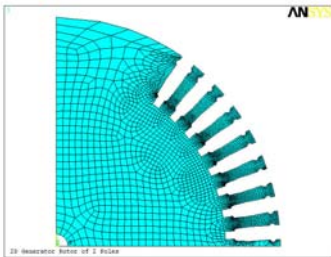


Fig. 6 2D FEM Model of Rotor

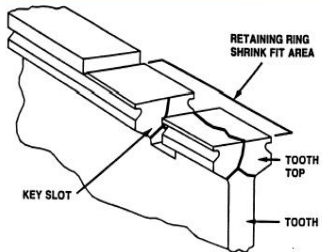


Fig. 7 Tooth Geometry of Rotor



Fig. 8 FEM Model of Rotor Tooth



Fig. 9 Geometry of Rotor and Retaining Ring

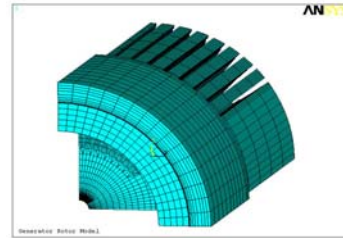


Fig. 10 FEM Model of Rotor and Retaining Ring

5. 발전기 응력해석 결과

5.1 2 차원 발전기 회전자 응력해석

발전기 회전자의 기하학적 형상은 발전기 용량에 따라 결정되며 직경, 슬롯(slot) 개수, 폴(pole) 각도 등이 설계변수로 사용된다. 아래의 Fig. 11 은 직경이 46.6 in 이고, 8 슬롯의 발전기 회전자가 운전 조건(1000,3000,3600,4320 rpm)하에서 받는 응력을 계산한 결과이다.

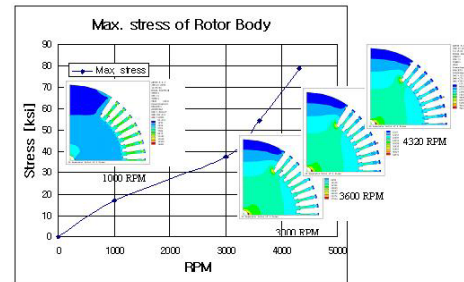


Fig. 11 2D Stress Analysis Result of Rotor

아래의 Fig. 12 은 슬롯이 8 이고, 슬롯 형상은 동일할 때 회전자의 직경을 41.94, 46.6, 56.6 in 로 변경하였을 경우의 응력해석 결과를 보여준다.

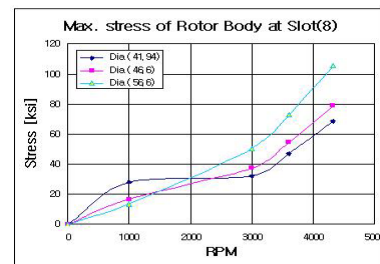


Fig. 11 2D Stress Analysis of 8 Slot Rotor

Fig. 13 의 응력해석 결과는 직경이 46.6 in 이고,

슬롯 개수를 6,8,9 로 변경하였을 때의 응력해석 결과를 나타낸다.

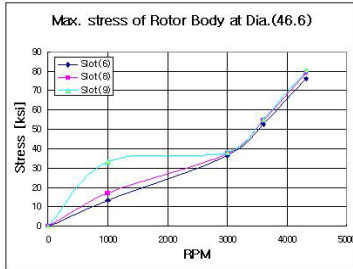


Fig. 13 2D Stress Analysis of Rotor(46.6 in)

5.2 2 차원 발전기 슬롯 응력해석

직경이 46.564 in 발전기 회전자에 대한 슬롯에 대한 응력해석 결과는 Fig. 14 과 Fig. 15 에 나타내었다.

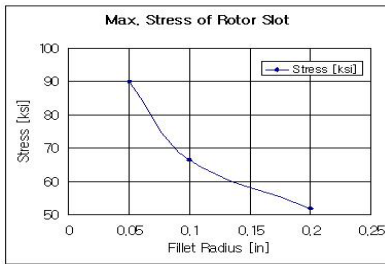


Fig. 14 Tooth Stress Analysis of Rotor

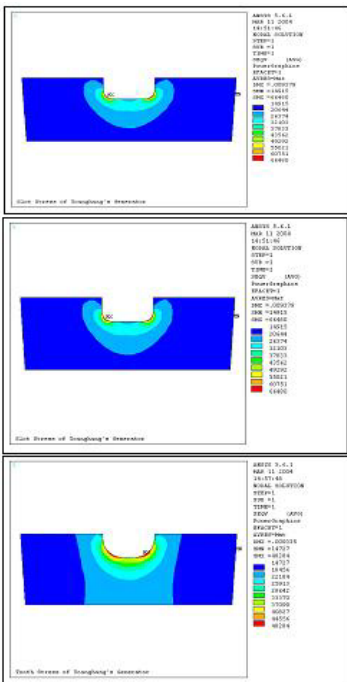


Fig. 15 Stress Analysis of Sub-Slot

5.3 3 차원 회전자 및 리테인링 응력해석

3 차원 회전자 및 리테인링 응력해석 조건은 아래의 Table 1 과 같다.

Table 1. 3D Stress Analysis Conditions

	rotor+rr	rr+cr	unit
Shrink-fit	120	75	[mils]
Contact stiffness	0.5	0.5	
Penetration tolerance	0.5	0.5	

3 차원 응력해석 결과는 Fig. 16 로부터 Fig. 24 에 나타내었다.

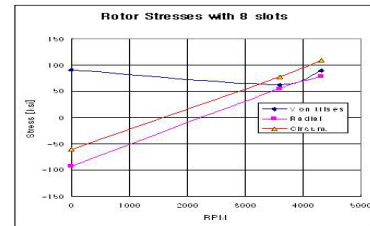


Fig. 16 3D Stress Analysis of 8 Slot Rotor

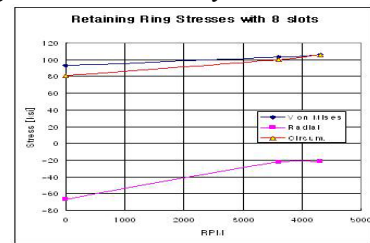


Fig. 17 3D Stress Analysis of 8 Slot Retaining Ring

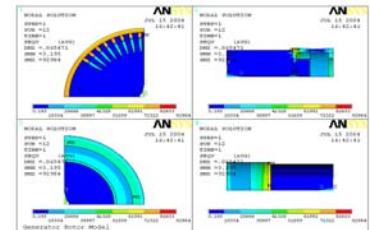


Fig. 18 3D Stress Analysis of 8 Slot Rotor in 0 rpm

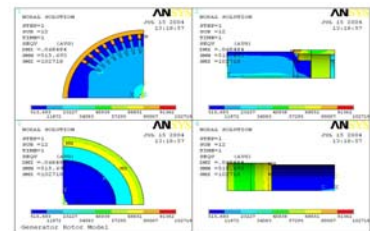


Fig. 19 3D Stress Analysis of 8 Slot Rotor in 3600 rpm

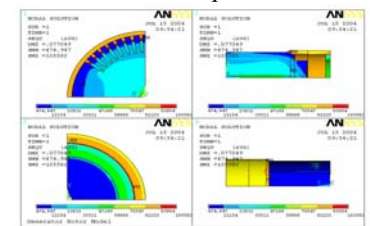


Fig. 20 3D Stress Analysis of 8 Slot Rotor in 4320 rpm

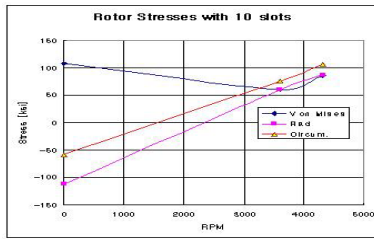


Fig. 21 3D Stress Analysis of 10 Slot Rotor

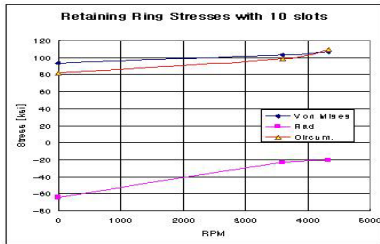


Fig. 22 3D Stress Analysis of 10 Slot Retaining Ring

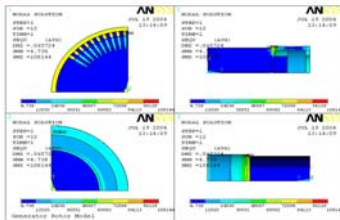


Fig. 23 3D Stress Analysis of 10 Slot Rotor in 0 rpm

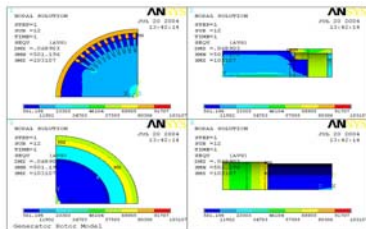


Fig. 24 3D Stress Analysis of 10 Slot Rotor in 3600 rpm

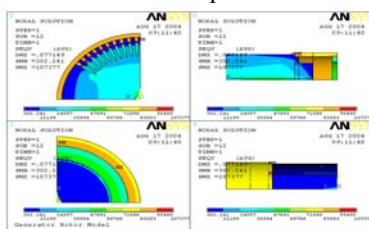


Fig. 25 3D Stress Analysis of 10 Slot Rotor in 4320 rpm

5.4 발전기 회전자 및 리테인링 설계응력

발전기 회전자에 사용되는 재질에 대한 설계제한응력은 아래의 Fig. 26에 나타내었고, 리테인링에 대한 경우는 Fig. 27에 나타내었다. 상기의 응력해석 결과를 Fig. 26와 Fig. 27의 경우와 비교하여 기하학적 형상에 대한 설계허용을 결정하게 된

다.

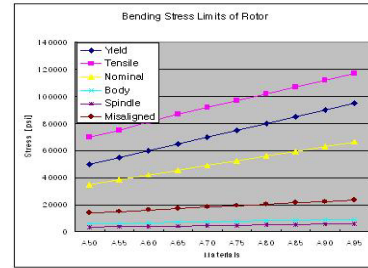


Fig. 26 Design Limit Stresses of Rotor Materials

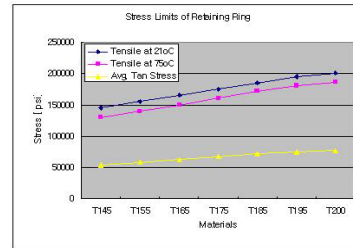


Fig. 27 Design Limit Stresses of Retaining Ring Materials

5.5 발전기 회전자 및 리테인링 피로수명

발전기가 기동정지 및 운전 모드에 따른 피로수명은 아래의 Fig. 28을 이용하여 잔여수명을 평가하게 된다. 보통 발전기 기기들은 설계수명은 40000 사이클을 기준으로 설계된다.

8 슬롯의 발전기 회전자 및 리테인링의 변형률은 Fig. 29에 나타내었고, 10 슬롯의 변형률 계산 결과는 Fig. 30에 나타내었다.

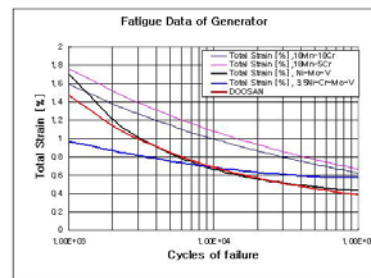


Fig. 28 Fatigue Life Curves of Generator Materials

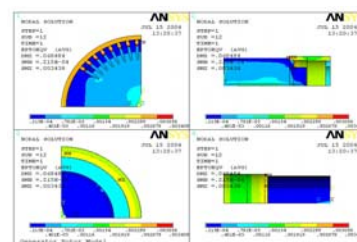


Fig. 29 3D Strain Analysis of 8 Slot Rotor in 3600 rpm

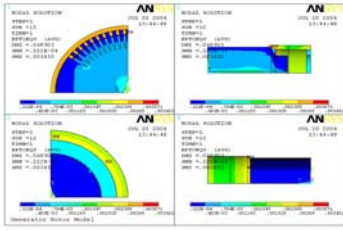


Fig. 30 10 3D Strain Analysis of 8 Slot Rotor in 3600 rpm

상기의 3 차원 해석결과 8 슬롯과 10 슬롯 모두 정상상태운전(3600 rpm)인 경우에 대해서는 40000 사이클을 만족하는 결과를 보여준다. 그러나 copper winding 의 하중과 응력집중의 영향을 포함하지 않았다. 향후 copper winding 의 불균일한 하중분포를 고려한 응력해석이 요구된다.

6. 결 론

본 논문에서는 발전기 회전자 및 리테인링에 대한 2 차원 및 3 차원 유한요소해석을 수행하였고, 피로수명을 계산하였다. 계산된 응력들이 설계제한 응력에 도달하였으나, 발전기 회전자의 Sub-slot 부에 Fillet 반경을 증가 시킴으로써 응력집중 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있었고, 피로수명을 계산한 결과, 설계수명(40000 사이클)을 만족함을 알 수 있었다.

또한 발전기 회전자와 리테인링 사이는 열박음(shrink-fit)으로 연결되는데 본 해석에서는 열영향에 의한 잔류응력은 무시하여 응력을 계산하였다. 그리고 copper winding 에 의한 불균일 하중분포는 리테인링을 타원 형상으로 변형시키는 효과를 만듦으로 불규칙한 진동을 일으키는 요소로 작용하며 추가적인 해석작업을 요구된다.

본 논문에서 수행한 응력해석 및 피로수명 해석한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) 발전기 회전자 몸체를 2D 응력해석한 결과, 발전기 극 부의 슬롯에서 응력이 집중됨을 알 수 있었고, 그 이유는 극 주위의 발전자의 중량에 의한 영향이라 생각된다.
- 2) 발전기 회전자의 TOOTH 해석을 통하여 과도한 응력집중을 막기 위해서는 5.00 mm(0.2 in) 이상의 Fillet 가공이 요구된다.
- 3) 발전기 회전자 및 리테인링 해석을 통하여 응력의 3 차원 분포를 확인할 수 있었고, Table 1 의 해석조건 하에서는 4320 rpm 하에서도 발전기 회전자와 리테인링이 이탈되지 않음을 알 수 있었다.

- 4) 피로수명을 평가한 결과 상기의 운전조건 하에서는 설계수명(40000 사이클)을 만족함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) ANSYS user's manual
- (2) Eric B Becker, Graham F. Carey, and J. Tinsley Oden, 1981, "Finite Elements, Vol I and II", Prentice-Hall
- R. Viswanathan, 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International