

고온에서 회전하는 터빈엔진 디스크의 응력해석

황수철*, 국정한**, 조재웅***, 하영민****

Stress Analysis of Rotary Turbine Engine Disc in High Temperature

Hwang Soo-chul, Kook Jeong-han, Cho Jae-ung, Ha Young-min

Abstract

This study includes thermal plasticity analyses for a turbine rotor with the simple geometry and the boundary conditions. When centrifugal or thermal stress are applied at the high temperature material of engine blade, stress distributions in material (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\tau_{r\theta}$, Mises stress) are analyzed by computer simulation(ABAQUS) as followings:

1. The maximum stress at the radial direction (σ_{rr}) is applied at the upper middle part of spline hole.
2. The maximum stress at the tangential direction($\sigma_{\theta\theta}$) is applied at the upper right boundary of spline hole.
3. The maximum shear stress ($\tau_{r\theta}$) in (-) direction is applied at the upper middle part of spline hole.
4. The maximum Mises stress is applied at the upper right boundary of spline hole. This stress is due to the critical stress by which rotor can be fractured according to elapsed time.

Keywords : 원심력(Centrifugal Force), 열응력(Thermal Stress), ABAQUS, 스플라인 구멍(Spline Hole), Mises Stress

1. 서 론

일반적으로 강도면에서 충분한 안전계수를 가지고 설계

계된 기계 또는 공학적 구조물에 있어서 급작스런 파손이 일어나는 경우가 허다하며 특히 고장력강 등과 같은 경우 의외로 고온하에서 항복응력보다 낮은 저응력하에

* 충북대학교

** 한국기술교육대학교

*** 천안공업전문대학

**** 국방과학연구소

서도 파괴가 잘 일어나는 것은 최근 여러가지 대형사고의 경우를 보아도 잘 알 수 있다.^{1),2)}

기계적인 응력을 받는 고온재료가 원자력 압력용기나 엔진의 고급재료로서 점점 더 각광을 받을 것으로 예상되어 이 분야에 대하여 보다 활발한 연구가 요청되고 있는 실정이다. 첨단 소재라 알려져 있는 고온재료들의 파괴 특성을 규명하고 이들의 연구결과가 첨단소재의 설계 데이터로 제공되어야 실제적으로 공학적인 응용도를 제고할 수 있다. 따라서 고온재료들이 파손되는 양상들을 정적인 하중하에서 규명·연구하려는 시도는 국외에는 아주 활발하게 이루어지고 있으며,^{3)~6)} 국내에서도 여러 연구자들이 관심을 가지고 연구활동을 하고 있으나 동적으로 회전하는 로터를 가진 엔진 고온재료의 열응력에 대한 연구는 드문편이다.^{7)~9)}

본 연구는 고온재료로 된 회전하는 엔진 로터 날개의 시뮬레이션을 통한 연구 결과를 얻었으며 상기 데이터의 수치해석 결과를 이용하면 고온에서 엔진 로터가 회전된 후 시간이 경과됨에 따라 로터가 파괴되는 임계응력을 판정할 수 있는 기본자료로 제시할 수 있다. 따라서 본 연구를 이용함으로써 엔진 또는 터빈 로터의 파손현상을 쉽게 규명하여 경제적인 최적 설계를 할 수 있다.

2. 유한요소법에 의한 응력전산프로그램 및 해석

2-1. 유한요소 모델 시뮬레이션

본 연구에서는 외경이 내경의 1.5배인 Rotor를 가정하였고 FEM 코드인 ABAQUS¹⁰⁾로써 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 터빈의 열응력을 해석하였다. 터빈 디스크의 경우 원심력과 열에 의한 응력을 합하여 외력으로 생각할 수 있다. 열응력해석은 유한 요소법이 적용되며 복잡하지만 단순하게 원형 모양으로 하여 터빈 디스크의 기하학적 형태와 경계조건은 Fig.1 과 같다. 실제 형상은 Fig.2와 같이 스플라인 홈을 가진 Rotor이다.

터빈 디스크의 대칭성에 의하여 날개의 한쪽만 요소를 나누고 2차원적 평면응력요소를 택하였다. Fig.1 과 같이 경계조건을 부친 절점에서는 날개의 뿌리에서 중심을 향한 반지름(r) 방향의 변위는 자유롭고 각도(θ) 방향의 변위는 고정 변위가 된다. 대표적으로 요소는 4절점, 4각형 요소인 CPE4 및

CPE4T를 사용하였고 요소의 절점번호는 시계 반대방향으로 읽는다. (γ, θ)계 좌표를 써서 좌표점의 위치를 읽어 주었으며 터빈 디스크의 두께는 10cm로 하였다. 또한 본 연구에서 사용된 시험편은 Von Mises의 등방성인 탄소성 선형 경화 재질로서 연강으로 가정한다.

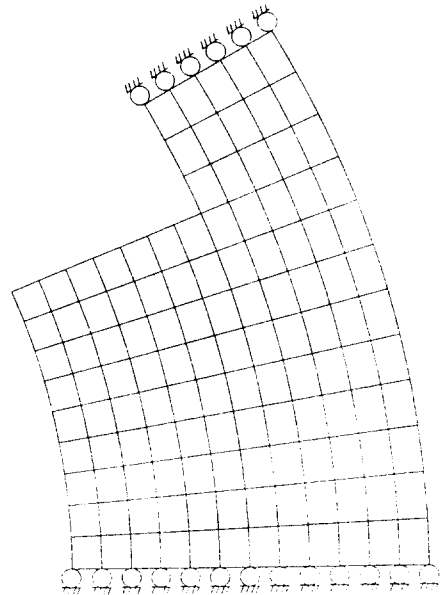


Fig. 1 Finite Element Model with Boundary Conditions

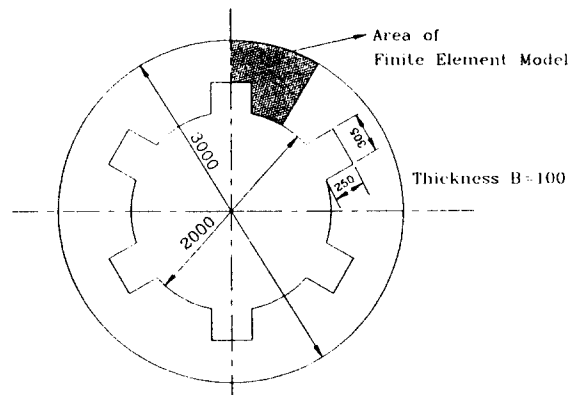


Fig.2 Configuration with Spline of Turbine Rotor

즉 Young's Modulus $E = 206 \text{ GPa}$
 Poisson's Ratio $\nu = 0.3$
 항복응력 $\sigma_y = 630 \text{ MPa}$
 밀도 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$
 열전달율은 강의 경우로서 $\lambda = 52 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 이며 응력-변형을 곡선은 Fig.3과 같다. 각 속도는 1500rpm으로써 시계 반대 방향으로 회전한다. 또한 회전 초기로부터 로터는 일정한 원심력 $[(\rho \omega^2) = 192,458,185.9 \text{ (Kg/m}^3/\text{s}^2)]$ 으로 돌고 있다고 가정한다. 비열은 강의 경우처럼 $434 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$ 이고 선팽창계수는 $7.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^\circ\text{C}^{-1}$ 이다. 로터의 외부 표면 온도는 항상 400°C 이고 내부 로터의 표면 및 내부의 온도는 초기 $t=0$ 일 때에만 100°C 를 유지하고 있다. 경과 시간은 1.2, 3.4시간의 4단계로 나누어 설정하였다.

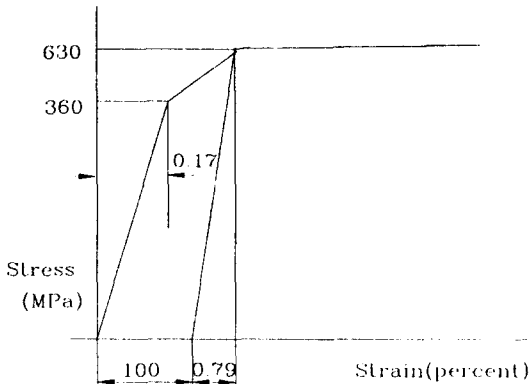


Fig. 3 Stress-Strain Curve of the Material

Mises의 등가 응력은 다음과 같이 정의된다.

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} S \cdot S}$$

여기서 S는 Deviatoric 응력 텐서이고 $S = \sigma + p$ 로 정의 된다. σ 는 응력이고, p는 등가 압력응력이다.

I는 Unit Matrix이며 Index 표기로서

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \text{ 이다.}$$

$S_{ij} = S_{ij} + pS_{ij}$ 이고
 여기서 $p = -\frac{1}{3} S_{ij}$ 이며,
 S_{ij} 는 Kronecker delta 이다.
 2-2. 해석결과

a) 원심력만 고려한 경우

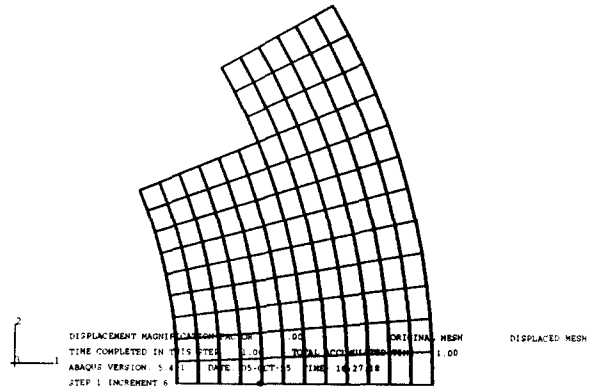


Fig. 4 Displacement Contour Line in Case of Centrifugal Force

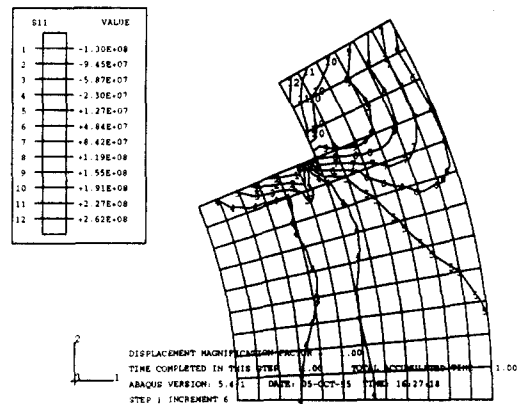


Fig. 5 σ_{rr} Contour Line in Case of Centrifugal Force

Fig.4는 변형된 결과를 보이고 있다. Fig.5에서는 반경 방향의 응력 σ_{rr} 가 스플라인의 홈의 가운데의 바로 위 부분에서 가장 크게 나타났지만 Fig.6에서는 θ 방향의 응력이 스플라인의 홈구석의 오른쪽 가장자리에서 가장 크게 나타났다. 그러나 전단응력에 해당되는 Fig.7의 $\tau_{r\theta}$ 는 스플라인 홈의 가운데 위부분에서 (-)

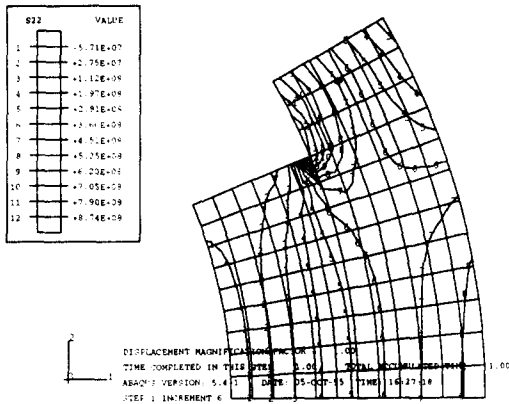


Fig. 6 $\sigma_{\theta\theta}$ Radial Stress Variation with Respect to Radial Distance Contour Line in Case of Centrifugal Force

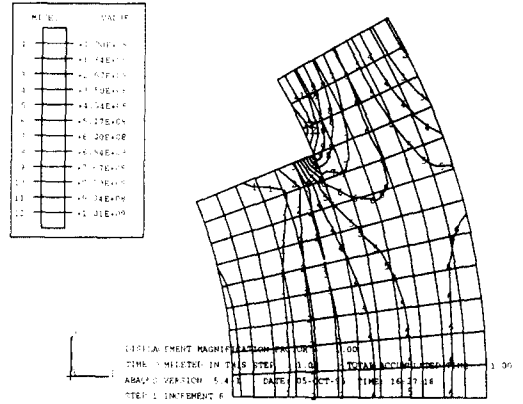


Fig. 8 Mises Stress Contour Line in Case of Centrifugal Force

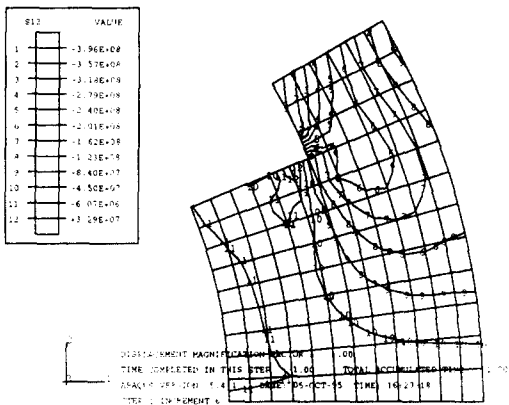


Fig. 7 $\tau_{r\theta}$ Contour Line in Case of Centrifugal Force

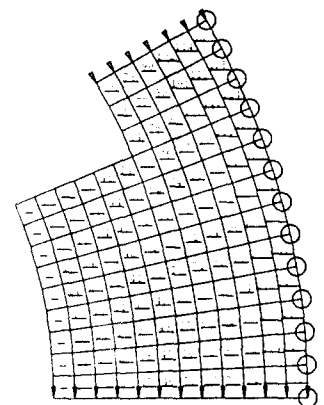


Fig. 9 Boundary Condition Mark in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress

방향의 응력이 가장 많이 나타났다. 그리고 Fig.8의 Mises 응력의 경우는 스플라인의 홈의 구석진 부분에서 응력이 가장 많음을 나타내고 있다. 이로 미루어보아

$\tau_{r\theta}$ 의 응력은 홈의 가운데 윗 부분에서 (-)방향으로 작용되기 때문에 Mises 응력은 홈의 가운데 윗부분 보다 홈의 오른쪽 구석에서 Mises 응력이 가장 많이 걸림을 알 수 있다.

Fig.9에서는 경계조건을 그렸는데 O는 온도에 대한 경계조건이다(외부 바깥 표면의 온도는 초기부터 400℃로 끝까지 고정되었다).

b) 원심력에 열에 관한 응력이 가해진 경우

Fig.10에서 보는 바와 같이 원래의 모양과 4시간 후 변형된 모양을 나타내고 있다.

또한 변형이 크게 보이는 것은 크기가 약 16배로 크게

보이게 하였기 때문이다. 샐이 작은 쪽의 스플라인 윗부분이 샐이 두꺼운 쪽보다 변형된 비율이 더 많음을 알 수 있다. 이것으로 미루어 스플라인의 윗 부분에서 응력이 많이 걸림을 알 수 있다.

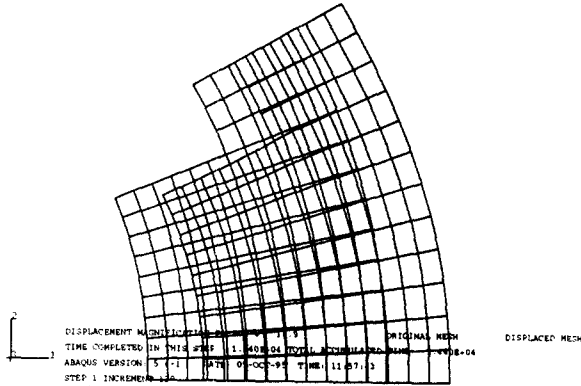


Fig. 10 Displacement Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 4 Hours(Elapsed Time)

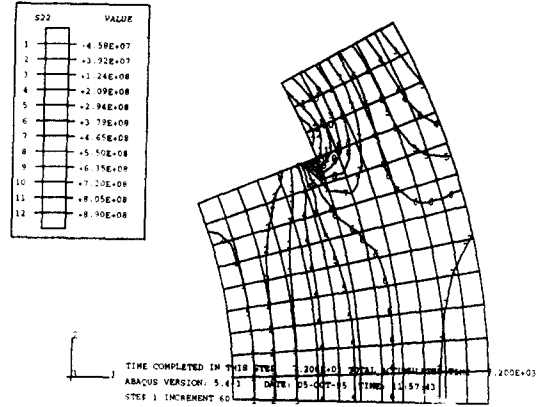


Fig. 12 $\sigma_{\theta\theta}$ Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 2Hours(Elapsed Time)

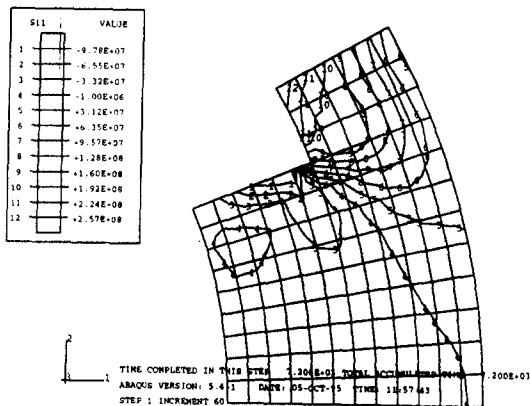


Fig. 11 σ_{rr} Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 2Hours (Elapsed Time)

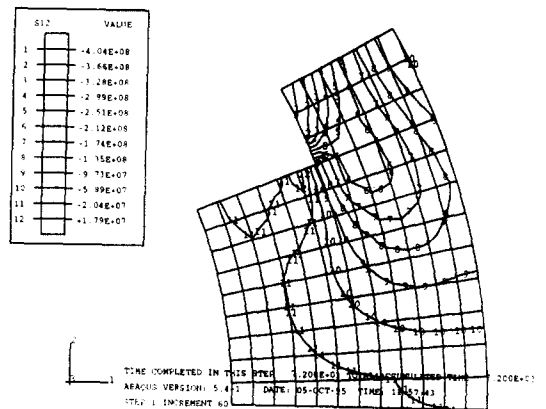


Fig. 13 $\tau_{r\theta}$ Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 2 Hours(Elapsed Time)

Fig.11~Fig.14의 2시간이 경과된 후의 응력 선도를 보면 (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\tau_{r\theta}$, Mises의 응력 선도) 원심력만 있는 경우와 비슷한 결과를 보이고 있다. Fig.15 (a), (b), (c), (d) 및 (e)에서 보는 바와 같이 초기에는 급격한 응력의 변화가 존재하고 그 시간 이후부터는

증분이 작으므로 σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\tau_{r\theta}$, Mises 응력분포는 2시간 일때의 결과를 출력하였다. Fig.16 a), b), c), d) 에서는 온도분포를(1,2,3,4 시간 까지) 각 1시간마다 출력하였다.

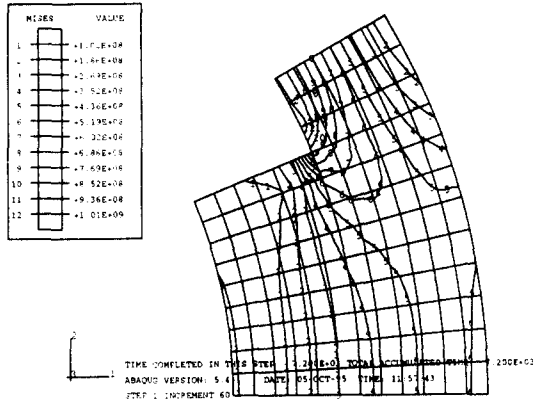
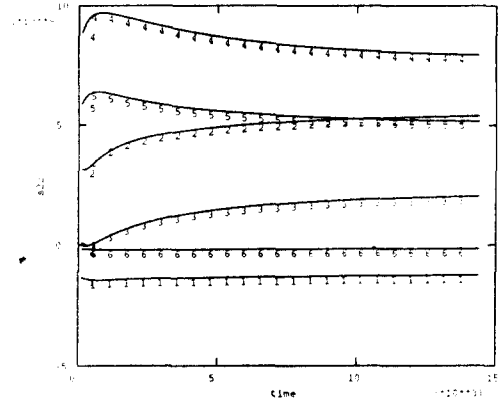
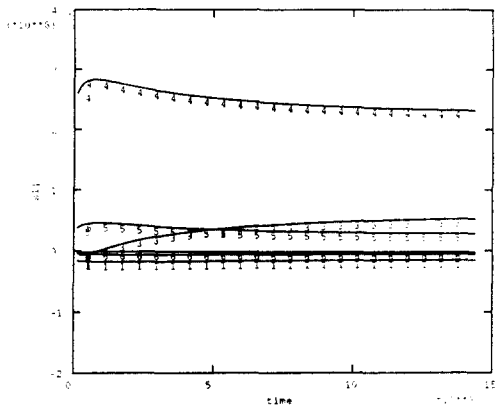


Fig. 14 Mises Control Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 2 hours(Elapsed Time)



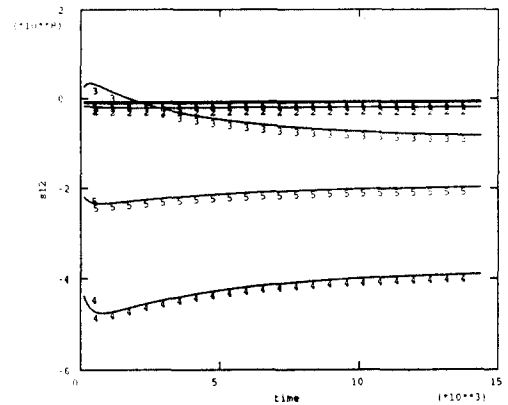
LINE	VARIABLE	SCALE FACTOR
1	el 1	+1.00E+00
2	el 115	+1.00E+00
3	el 126	+1.00E+00
4	el 66	+1.00E+00
5	el 63	+1.00E+00
6	el 9	+1.00E+00

Fig. 15 (b) $\sigma_{\theta\theta}$ History According to Elapsed Time in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress



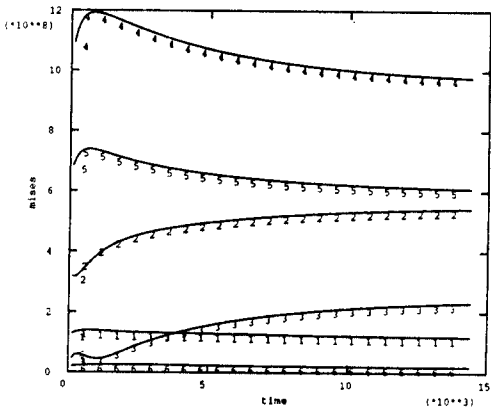
LINE	VARIABLE	SCALE FACTOR
1	el 1	+1.00E+00
2	el 115	+1.00E+00
3	el 126	+1.00E+00
4	el 66	+1.00E+00
5	el 63	+1.00E+00
6	el 9	+1.00E+00

Fig. 15 (a) σ_{rr} History According to Elapsed Time in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress



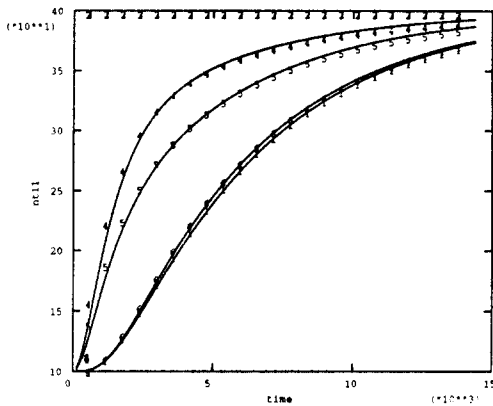
LINE	VARIABLE	SCALE FACTOR
1	el 1	+1.00E+00
2	el 115	+1.00E+00
3	el 126	+1.00E+00
4	el 66	+1.00E+00
5	el 63	+1.00E+00
6	el 9	+1.00E+00

Fig. 15 (c) $\tau_{r\theta}$ History According to Elapsed Time in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress



LINE VARIABLE	SCALE FACTOR
1 el 1	+1.00E+00
2 el 115	+1.00E+00
3 el 126	+1.00E+00
4 el 66	+1.00E+00
5 el 63	+1.00E+00
6 el 9	+1.00E+00

Fig. 15 (d) Mises History According to Elapsed Time in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress



LINE VARIABLE	SCALE FACTOR
1 el 1	+1.00E+00
2 el 115	+1.00E+00
3 el 126	+1.00E+00
4 el 66	+1.00E+00
5 el 63	+1.00E+00
6 el 9	+1.00E+00

Fig. 15 (e) Temperature History According to Elapsed Time in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress

그리고 Fig.16은 시간의 경과에 대한 온도분포를 나타내고 있는데 그 경향을 처음이나 비슷한 분포를 보이고 있다. 온도의 분포는 서서히 증가됨을 알 수 있었다. Rotor 의 외부표면 온도는 열원이 400℃로 고정되어있기 때문에 역시 외부 표면에서 거리가 멀리 떨어져 있을수록 온도는 낮아 있음을 알 수 있었다.

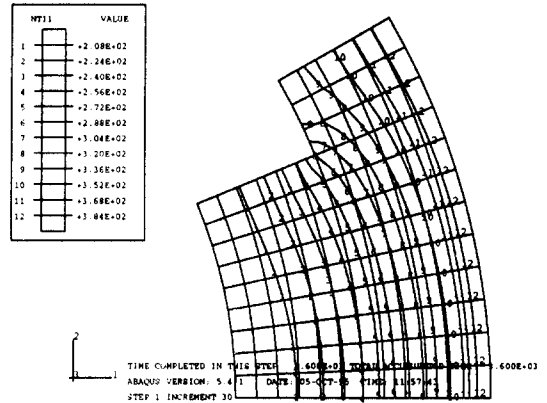


Fig. 16 (a) Temperature Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 1 Hour(Elapsed Time)

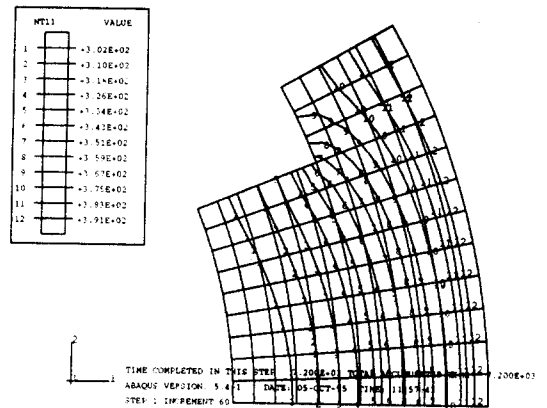


Fig. 16 (b) Temperature Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 2 Hours(Elapsed Time)

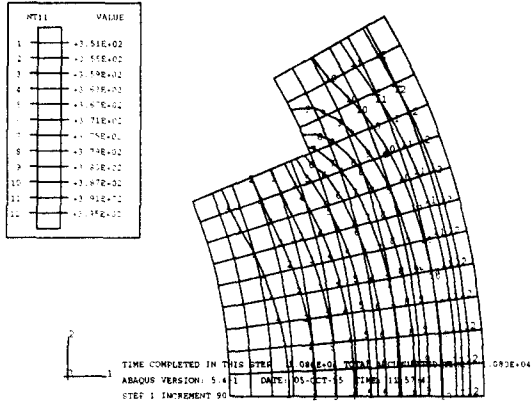


Fig. 16 (c) Temperature Contour Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 3 Hours(Elapsed Time)

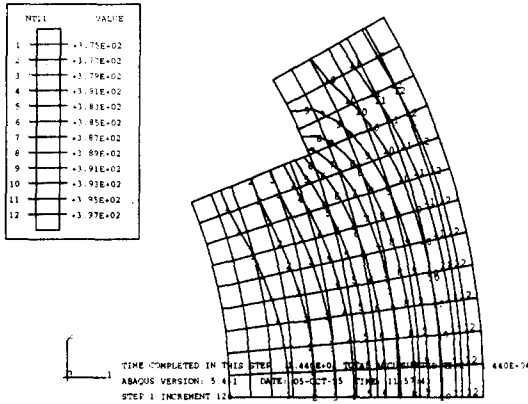


Fig. 16 (d) Temperature Control Line in Case of Centrifugal Force and Thermal Stress after 4 Hours(Elapsed Time)

2-3. 결과 및 토론

a) 원심력과 온도로 인한 열응력이 복합되어 있는 경우

Mises응력 등고선인 그림에서 보는 바와 같이 스플라인 홈의 윗쪽의 가운데 부분에서 응력이 상당히 발생되어 제일 위험한 부분이 되고 있으며 그 홈의 윗 부분이 홈이 없는 변쪽의 살보다 살두께가 작은 요인으로 보이며 로터는 시계 반대방향으로 회전함에 따라 왼쪽 부위가 오른쪽 부위보다 응력이 많이 걸림을 알 수 있었다.

또한 로터의 외부 표면온도가 비록 400℃로 가장 높지만 응력분포는 살의 두께가 작은 스플라인 홈의 바로 윗 부분 가운데에서 응력이 상당히 높음을 알 수 있다. 온도분포는 로터의 외부 표면이 역시 제일 높고 시간이 흐름에 따라 온도분포가 높은 영역이 많아짐을 알 수 있었다.

b) 원심력만 있는 경우

a)의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있으나 시간의 경과에 따라 원심력에 의한 영향이 많아져 응력이 점점 더 많이 걸림을 알 수 있다. 변형된 모델 및 원래의 모델을 비교하면 변위는 시간이 지남에 따라 내부표면이 점점 더 커져 오므라들음을 알 수 있고 외부표면 보다는 내부표면에 변형이 많이 생겼다.

3. 결 론

본 연구는 고온하에서 회전하는 엔진 로터의 파손형상을 규명한 것으로서 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 반경 방향의 응력(σ_{rr})은 스플라인 홈의 가운데 윗 부분에서 가장 많이 걸림을 알 수 있었다.

나. 각도 방향의 응력($\sigma_{\theta\theta}$)은 스플라인 홈 위의 오른쪽 가장자리 부분에서 가장 많이 걸린다.

다. 전단응력($\tau_{r\theta}$)은 스플라인 홈의 가운데 윗 부분에서 (-) 방향의 응력이 가장 많이 나타났다.

라. $\sigma_{\theta\theta}$ 의 경우와 같이 Mises응력의 경우는 스플라인 위의 오른쪽 가장자리에서 가장 많이 나타났다. 이 부근의 Mises 응력은 시간이 경과됨에 따라 로터가 파괴될 수 있는 임계응력을 산출해낼 수 있는 근거가 될 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) R.Raj, M.F.Ashby, "Intergranular Fracture at Elevated Temperature", Acta Metall, Vol. 28, pp. 653-666, 1975.
- 2) J.R.Rice, "Time Dependent Fracture of Materials at Elevated Temperatures", U.S. Department of Energy, Report Conf. 790236UC-25, p. 130, 1979.
- 3) Y.S.Lee, M.N.Gungor, T.J.Batt and P.K.Liaw, "Semi-empirical Investigation of Thermal

- Expansion Behavior of Components on a Two-phase Particle-Reinforced Metal Matrix Composite", *Material Science and Engineering*, A 145, pp. 37-46, 1991.
- 4) B.W.Rosen and Z.Hashin, "Effective Thermal Expansion Coefficients and Specific Heats of Composite Materials", *Int.J.Eng.Sci.*, Vol. 8, p. 157, 1970.
 - 5) M.J.Manjine, "Ductility Indices at Elevated Temperatures", *ASME Transaction*, Vol. 97, Series H, p. 156, 1975.
 - 6) A.M.Mayes and M.O. de la Cruz, "Strain Effects of the Thermal Stability of Rod Eutetics", *Acta Metallurgica*, Vol. 37, No.2, p. 615, 1989.
 - 7) Y.S.Lee and T.J.Batt, "The Strengthening of Power Law Creep Dispersed Particles in Elastic Matrix In High Temperature", *Westinghouse Technical Report*, 1992.
 - 8) R.A.Swalin, "Thermodynamics of Solids", *John Wiley and Sons*, New York, p. 230, 1972.
 - 9) Y.S. Lee and T.J.Batt, "An Investigantion of Void Formation on a Bonded Interface of Power Law Creep Materials Containing a Cylindrical Particle, " *Acta Mechanica*, Vol. 79, p. 183, 1989.
 - 10) ABAQUS Manual Version 4.8, *Karlsson and Sorensen Inc.*, 1989.