

회전체 원판의 원공주위의 핀홀에 의한 응력분포

한근조, 안찬우(동아대 기계공학과), 심재준,
한동섭, 이성욱, 김병진*(동아대 기계공학과 대학원)

The Stress Distribution around the Hole with Pin-hole on Rotating Disc

G. J. Han, C. W. Ahn, J. J. Shim, D. S. Han, S. W. Lee, and B. J. Kim (Dept of Mech. Eng., DAU)

ABSTRACT

This paper deals with the stress concentration of the rotating disc in detail. We studied maximum stress of rotating disc with respect to the various parameter of circular hole such as position, size, number of the hole, then the mollified effect of maximum stress due to pin-hole around circular hole, using FEM, the results are as follows:

1. The more the number of circular hole and the farther from the center, the maximum equivalent stress reduces.
2. When the pin-hole is located 60° from the x-axis, the maximum stress reduces significantly due to the effect of interference.

Key Words : centrifugal force (원심력), circular hole (원공), pin-hole (핀홀), FEM (유한요소법)

1. 서론

터보기계나 원심분리기와 같은 회전기계류의 경우는 구동부의 고속화로 인해 기계의 각부에서는 회전으로 인한 원심력의 효과가 더욱 증대된다. 그런데 이러한 고속회전으로 인하여 회전부품에 작용되는 원심력이 재료의 항복강도를 초과하게 되므로 가동중에 회전부품이 파손으로 인한 막대한 재산상의 피해와 인명손실이 초래될 수 있으며, 실제 이같은 파손사례⁽¹⁾가 다수 보고되고 있다. 고속회전하는 회전기계류 부품의 파손은 주로 원판의 bore 및 bolt 구멍과 같은 회전원판에 존재하는 원공에서의 응력 집중으로 인해 발생되고 있으며 원공주위의 핀홀을 뚫음으로써 응력집중을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 회전체 원판에 존재하는 원공과 핀홀이 회전체 내부의 응력분포에 미치는 영향을 유한요소해석을 수행하여 알아보기 위해 Timoshenko의 이론식을 통하여 계산되는 응력과 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력을 비교하여 유한요소해석의 신뢰성을 검증하고, 이를 바탕으로 원공 개수 변화에 따른 회전체 원판 내부의 응력분포 및 회전체 원판 중심에서의 원공 위치 변화에 따른 내부 응력분포와 원공 크기변화에 따른 회전체 내부의 응력분포를 알

아보고 원공주위의 핀홀에 의한 응력분포를 알아보기 위해 핀홀의 배치각도, 핀홀의 직경 및 원공과 핀홀간의 거리를 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 회전체 원판에 작용하는 이론해석

Timoshenko의 탄성학 이론으로부터 평면 응력조건 하에서 Fig. 1과 같이 각속도 ω 로 회전하는 원판에 작용하는 원주방향응력(circumferential stress) σ_θ 및 반경방향응력(radial stress) σ_r 은 다음과 같다.(3)

$$\sigma_\theta(r) = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 \left\{ R_2^2 + R_1^2 + \frac{R_2^2 R_1^2}{r^2} - \frac{1+3\nu}{3+\nu} (r^2) \right\}$$

$$\sigma_r(r) = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 \left\{ R_2^2 + R_1^2 - \frac{R_2^2 R_1^2}{r^2} - r^2 \right\} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 재료의 밀도와 프와송비이며, R_1 과 R_2 는 원판의 내반경 및 외반경이다. 식(1)과 (2)로부터 회전체원판의 전영역에서 원주방향응력(circumferential stress) σ_θ 가 반경방향응력(radial stress) σ_r 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

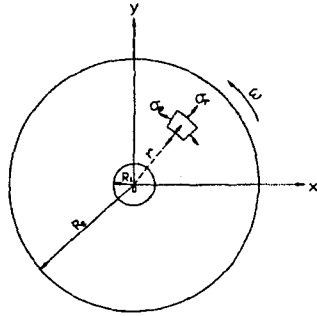


Fig. 1 Diagram of stress component of rotating disc

2.2 유한요소해석

2.2.1 회전체원판의 유한요소모델 선정

본 연구에서는 회전체 원판의 외경(R_2)가 300mm, 내경(R_1)이 50mm, 두께 10mm인 유한요소모델을 선정하였고, 원판을 300rad/s로 회전시킬 때 발생하는 응력을 확인하였다. 해석은 원공의 개수, 위치, 크기를 변화시켜가면서 수행하였고, 핀홀이 회전원판의 응력분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 원공주위에 핀홀의 배치각도, 직경, 원공과 핀홀간의 거리를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 단, 핀홀의 직경, 원공과 핀홀간의 거리변화에 대한 해석은 최대응력 감소효과가 가장 크게 나타난 핀홀의 배치각도가 60° 인 모델에서만 해석을 수행하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.7을 사용하였으며, 해석에 사용된 요소는 8절점 3자유도를 가지는 육면체 요소를 사용하였다.⁽²⁾ Fig. 2은 이론치와 해석치를 비교하기 위해 사용된 원공이 없는 원판의 메시된 형상을 나타내고 있으며, Fig. 3는 본 연구의 대상인 회전체원판의 기하학적 형상 및 메시된 형상을 나타내고 있다.

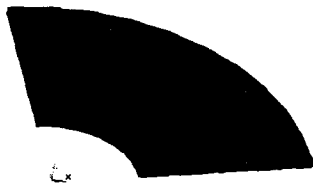


Fig. 2 Meshed shape of rotating disc without holes

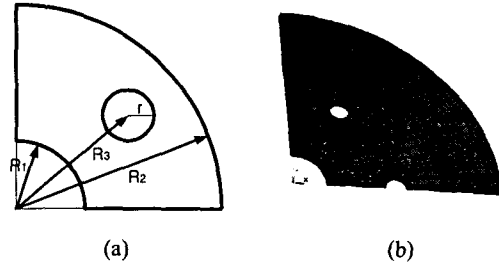


Fig. 3 Geometry and meshed shape of rotating disc with holes

Table 1은 해석에 사용된 재료인 STS 304의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1. Material properties of STS 304

Elastic modulus (MPa)	Density (Kg/mm ³)	Poisson's ratio
2.0×10^5	7.9×10^{-6}	0.3

2.2.2 경계조건 및 하중조건

해석에 적용되는 모든 모델은 전체 원판의 일부만을 모델링해서 양단의 모든 절점을 원주방향(θ)으로 움직임이 없도록 고정하였다. 단, 원공개수에 따른 영향을 확인하기 위한 모델의 경우 원공이 위치하는 지점을 중심으로 하여 $360/(2 \times \text{원공개수})$ 만큼 원판을 모델링하여 양단의 모든 절점이 원주방향으로 움직임이 없도록 고정하였다. 하중은 z축 중심으로 각속도를 작용시켜 회전에 의해 발생하는 원판에서의 응력분포와 최대응력 발생지점을 확인하였다. Fig. 4에서는 원공이 존재하는 회전체원판에 부과된 경계조건과 하중조건을 간략하게 나타내었다.

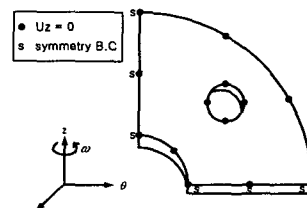


Fig. 4 Applied boundary conditions of rotating disc with holes

Table 2. Comparison of circumferential stress between theoretical solution and finite element solution

	Variation of inner radius ratio (R_2/R_1)					Variation of angular velocity (ω)				
	2	3	4	5	6	100	200	300	400	500
Theoretical solution (MPa)	55.59	54.04	53.49	53.24	53.10	5.90	23.60	53.10	94.41	147.51
Finite element solution (MPa)	55.52	54.28	53.96	53.83	53.76	5.97	23.89	53.76	95.57	149.32
Error (%)	0.13	0.44	0.88	1.11	1.24	1.19	1.22	1.24	1.23	1.23

3. 해석결과 및 고찰

3.1 이론식에 대한 유한요소해석 신뢰성 검토

원판의 내반경의 크기와 회전속도의 변화에 따라 발생하게 되는 응력의 분포를 최대응력이 발생하게 되는 R_1 지점에서의 원주방향에 대한 응력값을 FEM에 의한 결과와 이론식(1)을 이용해 구한 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2를 살펴보면 회전하는 물체에 대해 유한요소해석의 신뢰성은 상당히 높음을 알 수 있다.

3.1 원공개수 변화에 따른 응력분포

원공이 존재하지 않는 원판보다 원공이 3개 있을 경우 17.1% 증가된 최대응력이 발생되는 것을 알 수 있었고, 원공의 개수가 증가할수록 최대응력이 떨어졌으며, 원판에 원공이 15개일 경우 원공이 3개일 때보다 15.2% 감소되는 결과를 보였다.

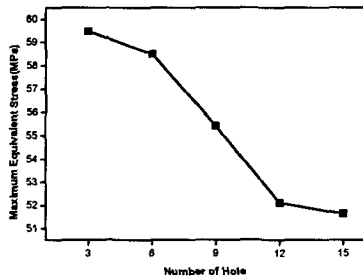


Fig. 5 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to the number of holes

3.2 원공위치 변화에 따른 응력분포

원공의 위치(R_3)가 $R_3/R_1=2$ 인 경우 원공이 없을 때보다 원공부에서 최대응력이 58.5% 증가되어 발생되었고, 원공의 위치가 중심부에서 멀어짐에 따라 최대응력이 점차 감소되었다.

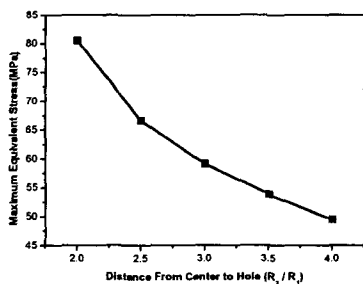


Fig. 6 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to the distance from center to hole

3.3 원공크기 변화에 따른 응력분포

원공의 크기(r)가 매우 작을 경우 원판에서의 최대응력은 원공이 존재하지 않을 때보다 0.9% 증가되어 내경부에서 발생하였지만 원공의 크기가 커짐에 따라 원판의 최대응력은 원공부에서 발생되었다. 그러나 원공의 크기가 $r/R_1=0.7$ 이상에서는 원공자체의 간섭에 의해 최대응력이 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

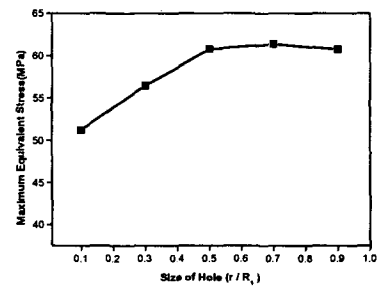


Fig. 7 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to the size of hole

3.4 핀홀의 배치각도에 따른 응력분포

30° 까지는 최대응력이 증가하였지만 30° 이후 구간에서는 최대응력이 급격히 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 60° 일 때 응력감소 효과가 최대로 나타났으며 이후에는 서서히 증가하기 시작해 180° 에 이르면 다시 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다.

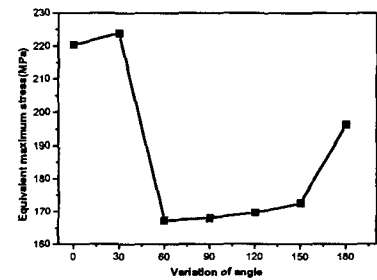


Fig. 8 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to the angle of pin-hole

3.5 원공과 핀홀간의 중심거리 변화에 따른 응력분포

d/r 이 0.6인 지점에서 최대응력이 최소가 됨을 알 수 있었고, 거리가 멀어질수록 최대응력이 증가하였다. 이는 거리가 멀어질수록 원공과 핀홀의 간섭효과가 작아져 최대응력이 증가하는 것으로 보여진다.

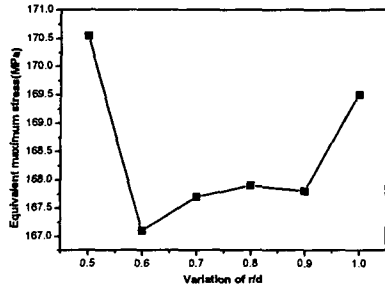


Fig. 9 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to distance between hole center and pin-hole center

3.6 핀홀의 크기변화에 따른 응력분포

핀홀의 크기가 커지면 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 핀홀의 크기가 증가하면 원공과 핀홀의 간섭효과도 증가하여 최대응력은 감소하는 것을 알 수 있다.

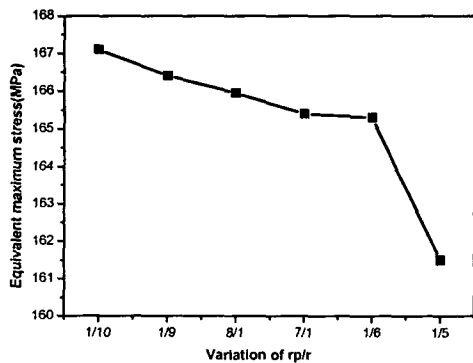


Fig. 10 Maximum equivalent stress distribution of rotating disc with respect to the size of pin-hole

4. 결론

본 연구에서는 회전체 원판에 존재하는 원공의 개수, 크기 및 중심부에서의 거리가 응력분포에 미치는 영향과 원공주위의 핀홀에 배치각도, 크기, 원공과의 거리가 응력분포에 미치는 영향을 이론 및 유한요소해석을 통해 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원공이 존재하는 회전체 원판에서 원공의 수가 증가할수록 내경부 주위에서 고응력 분포영역이 증가하며, 최대응력이 감소하였다.
2. 원공의 위치가 중심에서 멀어질수록 원판에서

발생되는 최대응력이 감소하게 되었다.

3. 원공의 크기가 커짐에 따라 원판의 최대응력은 원공부에서 발생되었고, $r/R_1=0.7$ 이상에는 원공의 자체간섭으로 인해 최대응력이 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 핀홀의 배치각도에 따라 최대응력이 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 60° 일 때 간섭효과가 최대가 되어 응력이 작게 발생하는 것을 알 수 있었다.

5. 원공과 핀홀간 거리가 멀어질수록 간섭효과가 작아져 최대응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.

6. 핀홀의 크기가 커지면 원공과 핀홀의 간섭효과도 증가하여 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년 교내 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yukawa, S., Timo, D. P. and Rubio, A., "Fracture Design Practices for Rotating Equipment," Fracture, Vol. 5, Academic Press, 1969
2. S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers," McGraw-Hill, pp. 438 ~ 472, 1998
3. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, pp. 80 ~ 83, 1982
4. 한상배, 이진호, 김영진, "회전체 원판의 볼트구멍에 존재하는 모서리균열의 유한요소해석," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, 1993
5. 오세욱, "재료역학", 동명사, pp. 416 ~ 420, 1998