

경사진 기계평면시일의 변형거동 특성 해석

Analysis characters of distortion of inclined mechanical face seal

조승현 · 고영배 · 김청균

Seung Hyun Cho · Young Bae Ko · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University, seoul, Korea

Abstracts – Heat distortion of the non-contacting mechanical face seal is affected by friction heat between primary seal and seal sheet. The fluid or gas in mechanical face seal maintains operating gap, cooling friction heat and lubricates at the face of seal. So we designed face of seal for inclined face. inclined face of seal improves fluid or gas flow at the face of seal and it increases circumferential velocity at outer radius of the seal so temperature of the seal is decreased by low heat transfer coefficient at there. In this paper, inclined face seal are analysed numerically using finite element method for proof improve inclined face seal performance. Angle of the incline face used for FEA is from 50° to 90° and for explaining the effects of inclined face in seal, we get temperature, face distortion, and stress in the seal with variable operating gap and rotating speeds. Result of analysis shows that angle of the incline face is 60° come to good thermal distortion characteristics.

KeyWord : incline face seal, Operating Gap, Rotating speed, Finite element analysis

Nomenclature

M = 모멘트, $N \cdot m$

H = 동력, $W(\text{hp})$

Q = 열량, $W(\text{J/s})$

r_o = 시일의 바깥쪽 반경, mm

r_i = 시일의 안쪽 반경, mm

μ = 점도, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

n = 회전 속도, rpm

h = 밀봉 간극, mm

V = 시일 표면에서의 회전 속도, m/s

D = 시일의 접수면 길이, mm

C_f = 마찰계수

Re = 레이놀즈 상수

Nu = 누셀 상수

ν = 동점도, $15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Pr = 프란트 상수

κ = 열전도, $\text{W/m} \cdot \text{K}$

ρ_s = SiC의 밀도, kg/m^3

c_s = SiC의 비열, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$

k_s = SiC의 열전도, $\text{W/m} \cdot \text{K}$

ρ_c = Carbon의 밀도, kg/m^3

c_c = Carbon의 비열, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$

k_c = Carbon의 열전도, $\text{W/m} \cdot \text{K}$

1. 서론

기계평면시일은 유체와 가스를 누설을 차단하기 위하여 사용되는 기계요소이다. 시일시트에 대한 주시일의 미끄럼 마찰에 의해 시일의 표면에 마찰열이 발생하는데, 액체와 가스는 시일의 표면으로 유입되어 이러한 마찰열을 냉각시키고, 시일의 윤활작용을 하게 하며, 주시일과 시일시트 사이의 간극을 일정하게 유지하게 하여 직접적인 마찰을 방지하게 한 후 다시 유입되는 사이클을 반복하고 있다. 따라서 유체나 가스의 시일의 표면으로의 유입과 유출은 시일의 기능을 유지하는데 대단히 중요한 설계기준이 된다. 기존의 기계평면시일은 주시일과 시일시트의 표면이 수직으로 만나도록 설계되어 있어 유체나 가스의 동선이 직각을 이루어 시일표면으로 유입된 유체나 가스가 시일의 회전운동에 의해 외부로 배출되는 것이 어려운 점이 있었다. 그러나 시일의 표면이 경사를 이루도록 설계되어진다면 유체나 가스의 흐름이 자연스럽게 되어 배출이 원활해질 뿐만 아니라 시일의 외경에서의 원주속도가 증가하여 대류에 의한 냉각효과를 증가시켜서 시일의 거동특성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 기계평면시일에 대한 경사진 표면을 가지고 있는 기계평면시일의 거동특성과 최적의 경사각을 설계하기 위하여 시일의 간극과 회전속도를 변수로 하여 유한요소법을 통해 해석을 수행하였다.

2. 본론

2-1. 경사표면의 장점

Fig. 1(a)에서 나타낸 것처럼 기존의 기계평면시일과 같이 접촉면이 90°로 되어있다면 기계평면시일의 내부로 유입된 액체(물)가 시일이 회전운동을 할 때 외부로 유출되는 것이 어려워 윤활유를 재활용하기가 어려웠다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 기계평면시일

의 표면이 일정한 경사각을 가지고 기울어져 있으면 유입된 액체가 원활하게 외부로 유출할 수 있을 뿐만 아니라 외경쪽의 원주속도 V_2 가 수직일 때 원주속도 V_1 보다 증가하여 원심력에 의해 외부로의 유출이 촉진된다. 시일의 경사각에 따른 원주속도의 증가는 Fig. 2에서 보여주고 있는데 회전속도 4000RPM에서 경사각이 60°인 경우는 14.64689m/s로서 표면이 수직일 때 14.24188m/s에 비해 미소하지만 2.765%가 증가한다.

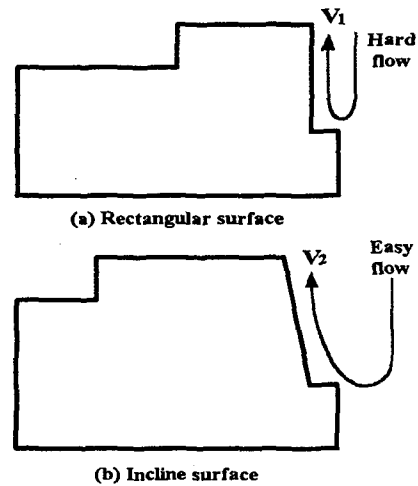


Fig. 1 Character of fluid flow between rectangular plane and incline plane

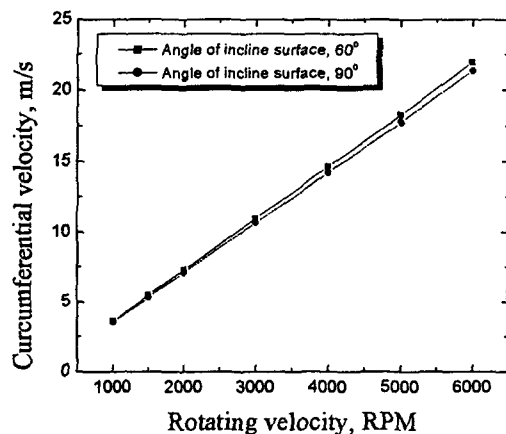


Fig. 2 Circumferential velocity for angle of incline surface as a variation of rotating speed

2-2. 소재

시일의 설계에서 가장 중요한 시일링과 시일시트의 설계에서 물성치는 시일에서 발생한 열량을 용이하게 방열시키면서 열적 뒤틀림을 방지하기 위한 낮은 열팽창 계수와 높은 열전도를 갖는 재질을 선택해야 한다. 또한, 시일 표면에서 발생된 압력분포를 균일하게 하기 위해서는 가능한 강도와 탄성계수가 높은 것을 선택해야 한다. 고속 회전에서 시일시트의 바깥쪽으로 작용하는 원심응력 (centrifugal stress)을 낮게 해주기 위해서는 낮은 밀도를 갖는 소재가 좋고, 부식에도 강해야 한다.

또한, 시일의 재료로는 건조 마찰에서 우수한 성능을 발휘해야 하는데, 이것은 시일이 회전을 시작할 때와 멈추는 순간에 밀봉간극이 좁혀지면서 마찰과 마멸이 가장 크게 발생하기 때문이다. 이러한 이유로 인하여 시일의 재료는 필요에 따라 TiC, WC, SiC 등 다양한 재료가 사용되는데, 본 논문에서는 시일 재질로 널리 사용되는 SiC 소재를 사용하였다.

SiC는 트라이블로지적 특성이 우수한 소재로서 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 뛰어나며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않고, 제작하는데 경제적이다[1]. 해석에 사용된 SiC의 물리적, 열적 특성은 Table. 1과 같다.

Table 1 Physical and thermal properties of SiC material

Module of elasticity, GPa	380
Possion's ratio	0.22
Density, Kg/m ³	3070
Thermal expansion coefficient, 1/K	5×10 ⁻⁶
Thermal conductivity, W/m·K	130
Specific heat, J/kg·K	670

2-3. 발생 열량

가스시일의 밀봉계면에서 발생된 마찰동력은 식 (1)의 모멘트로부터 유도된 식 (2)로 표현될 수 있고, 시일의 미끄럼 마찰표면에서 발생하는 열량은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$M = \int_{r_i}^{r_o} r \frac{\omega r}{h} \mu 2\pi r dr \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{\pi^3 \mu n^2 (r_o^4 - r_i^4)}{1800h} \quad (2)$$

$$Q = H \times 745.6999 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_s c_s k_s}{\rho_c c_c k_c}}} \quad (4)$$

가스시일의 밀봉간극이 3μm이고, 축의 회전속도가 4000rpm일 경우에 대한 계산된 마찰동력과 마찰열은 각각 19.139hp, 14272.4W이다. 이 때에 밀봉계면에서 발생된 마찰 열량은 식(4)에 의해 SiC와 Carbon으로 분배되는데 시일소재인 SiC로 79.282%인 11315.44W가 유입되고 나머지가 시일시트 소재인 Carbon으로 유입된다. 한편 주시일링 (primary sealing rings)으로 이동한 열량은 시일링이나 시일시트의 마찰표면에 열적 뒤틀림, 열크랙, 열탄성 마멸 등의 발생 원인으로 작용하면서 시일의 밀봉성능은 떨어지게 된다.

Fig. 3은 식(1)~(3)에 의해 계산된 값으로서 기계평면시일의 회전속도 변화에 따른 시일의 미끄럼 마찰표면에서 발생한 열량을 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극 변화에 따라서 발생된 열량의 크기를 제시한 결과이다.

회전속도가 증가할수록 시일의 표면에서 발생한 열량이 완만하게 증가하는데, 그 증가 폭은 밀봉간극 3μm 이하로 작아질수록 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 정상 상태에서 시일의 안쪽으로 유입되는 공기의 양과 시일의 표면에서 발생된 압력 분포는 두 표면 사이의 밀봉간극에 크게 의존한다. 두 표면 사이의 밀봉간극이 작게 되면 유입된 기

체의 점성 전단작용(viscous shear action)이 커져서 공기의 유입을 더욱 촉진하게 되어 결과적으로 압력의 상승을 초래한다. 이와 같은 이유로 그동안 수행되어온 많은 연구결과에 의하면 최적의 밀봉간극은 $3\mu\text{m}$ 부근임을 알 수 있다[2]. 따라서 본 해석에서는 사용된 밀봉간극은 $3\mu\text{m}$ 이고, 회전속도는 4000RPM 인 경우에 대하여 해석하였다.

2-4. 대류 열전달 계수

기계평면시일의 시일과 시일시트 사이의 간극으로 질소, 공기 또는 물과 같은 유체가 유입되어 시일축이 회전하는 동안 밀봉간극을 최적의 상태로 부상시켜서 마찰열 발생을

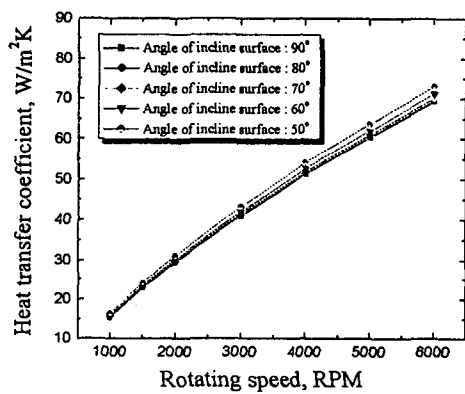


Fig. 4 Heat transfer coefficient for angle of incline surface of mechanical face seal as a variation of rotating speed

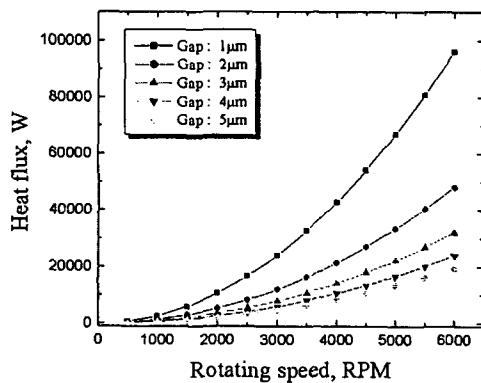


Fig. 3 Heat flux in surface of mechanical face seal as a variation of rotating speed

줄여주고, 유입된 가스의 냉각작용에 의해 기계평면시일은 밀봉 안정성을 확보하게 된다.

본 해석에서 작동유체는 공기이고, 공기에 의한 기계평면시일의 바깥쪽 밀봉된 유체면의 방열효과와 기계평면시일의 마찰면에서 냉각수의 방열효과를 고려하였다.

기계평면시일에서 공기에 의해 발생된 대류 열전달 계수는 다음 식 (5)~식 (9)로부터 계산할 수 있다[3]. 대류 열전달 계수 h 는 회전속도에 의한 원주속도에 가장 큰 영향을 받는데, 시일의 외경에서의 원주속도는 시일의 경사각이 증가할수록 증가하여 열전달계수가 증가하게 된다. 이와 같이 시일의 경사각에 따라 발생하는 대류열전달 계수를 Fig. 4에서 나타내고 있다. 본 논문에서 경사각 60° 이고, 시일의 회전속도가 4000RPM일 때 발생하는 대류열전달 계수는 $52.896\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

$$V = \frac{\pi D n}{60} \quad (5)$$

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = -0.6 + 4.07 \log_{10}(R_e \sqrt{C_f}) \quad (7)$$

$$N_u = \frac{C_l}{2} R_e P_r^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$h = \frac{N_u k}{D} \quad (9)$$

2-5. 모델링 및 해석 조건

기계평면시일의 경사면의 열거동 특성을 해석하기 위해서 본 논문에서 사용한 가정은 다음과 같다.

1. 기계평면시일에서 발생한 열량은 100% 주시일(primary seal)과 시일시트(Seal seat)의 접촉면에 수직방향으로 유입되며, 가스누설에 의한 열손실은 없다.
2. 기계평면시일에서 사용되는 가스는 20°C 공기이다.
3. 시일과 시일시트의 간극은 $3\mu\text{m}$ 로 균일하게 유지된다.

4. 유체에 의한 압력은 4.585MPa이 균일하게 시일에 가해진다.

5. 기계평면시일은 1000시간동안 작동한다.

Fig. 5는 경사면을 가지고 있는 기계평면시일의 해석 모델 및 경계조건을 보여주고 있다. 기존의 기계평면시일의 경우는 기계평면시일의 표면이 수직으로 이루어져있었으나 가스 또는 유체의 방출을 원활히 하기 위해 시일의 표면을 일정한 경사각을 가지도록 가공하였다. 최적의 경사각을 구하기 위해 본 논문에서는 50, 60, 70, 80, 90°의 경사각을 가지는 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

마찰면으로는 Fig. 3에서 제시한 열량이 유입되고, 35°C의 윤활유가 냉각작용을 하게 된다. 또한 마찰면으로는 4.5852MPa의 가스 압력이 가해진다. 한편 기계평면시일의 외경으로는 Fig. 4에서 제시한 대류열전달계수의 방열이 발생한다.

이때 시일의 최적 경사각을 구하기 위해서는 기계평면시일의 열용량을 동일하게 해야 하기 때문에 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 경사각이 증가할수록 감소하는 시일의 체적을 더해 주어 기계평면시일의 형상을 달리 하였다.

Fig. 6(a), (b)는 본 논문에서 사용한 기계평면시일의 유한요소 모델 및 해석조건을 표시한 그림이다. Fig. 6(a)는 시일링, 시일시트, 윤활구, 스프링 등으로 되어진 유체막을 갖는 기계경사면시일의 조립도이다. Fig. 5(b)의 그림에서 표시한 바와 같이 시일시트와 접촉하는 표면에 윤활유인 35°C의 물이 냉각작용을 하고, 시일이 회전하면서 공기에 의한 대류 열전달이 발생하고 있다. 또한 시일과 시일시트 사이를 일정하게 떨어져서 마멸이 발생하지 않도록 4.582MPa의 유압이 마찰면에 가해지는데 본 논문에서는 간극이 3μm이라고 가정하였고, 시일이 회전하면서 발생하는 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 열량이 시일의 마찰면에 가해진다. 본 논문에서는 위와 같은 모델을 비선형 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 해석하였다[4].

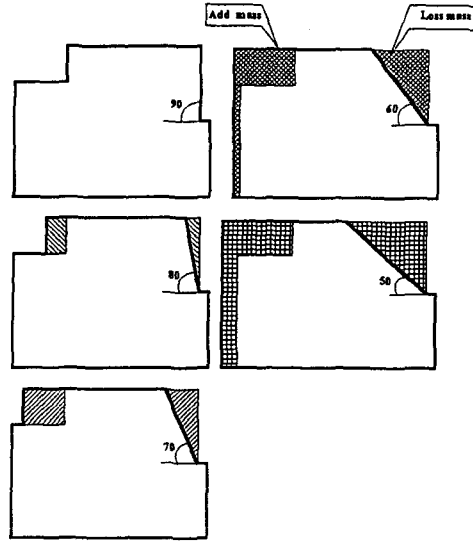
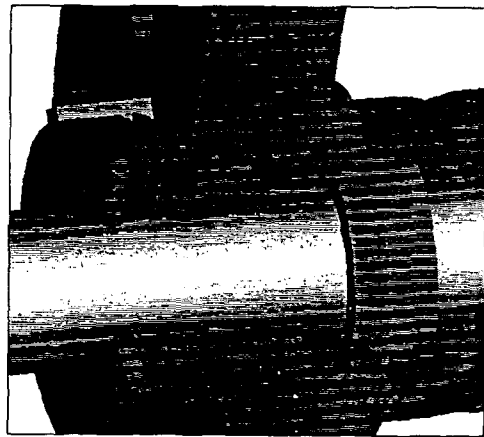
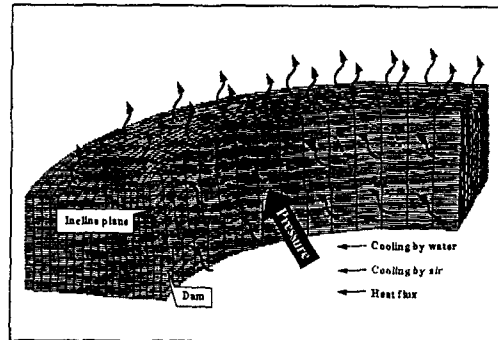


Fig. 5 Geometry of mechanical face seal as angle of incline surface



(a) Construction of inclined mechanical face seal



(b) Boundary conditions

Fig. 6 FEA model

3. 결과

기계평면시일의 경사각에 대한 효과를 검증하기 위해 본 논문에서는 경사각이 50, 60, 70, 80, 90° 일 때에 대하여 해석을 수행하였다. 해석을 한 결과 기계평면시일의 경사각이 60° 일 때가 가장 우수한 열변형 거동 특성을 나타내었는데, 경사각에 따른 열변형 거동 특성은 table 2와 같다.

접촉면의 수직방향으로 발생한 변형량은 경사각이 90° 일 때가 가장 많은 5.907 μm 가 발생하였고, 60° 일 때가 가장 작은 3.098 μm 가 발생하였다. 또한 최대 온도는 경사각이 90° 일 때가 가장 높은 357°C가 발생하였고, 60° 일 때가 가장 낮은 190.9°C가 발생하였다. 최대 응력은 마찰면의 댐(Dam)의 바로 윗부분에서 발생하는데 60° 일 때가 390.69MPa로 가장 낮게 발생하였다.

따라서 기계평면시일 표면의 경사각이 60° 일 때 가장 안정적인 열변형 거동을 보여준다는 결론을 얻게 되었다.

Fig. 7은 기계평면시일 표면의 경사각이 60° 이고 회전속도가 4000RPM이며, 시일과 시일시트 간극거리가 3 μm 일 때 표면의 수직방향으로 발생한 변형량의 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 시일의 댐부분에서 큰 변형량이 발생하는데, 최대 변형량은 해석모델의 가운데 마찰면의 댐의 끝단에서 3.098 μm 가 발생한다.

경사각이 60° 일 때 시일의 회전속도와 시

Table 2. Analysis results as a variation of incline angle of mechanical face seal

결과 각도:°	최대 변위량, μm	최대 온도, °C	최대 응력, MPa
50	4.002	214.2	431.13
60	3.098	190.9	390.69
70	3.279	211.4	452.43
80	3.281	216.3	478.93
90	5.907	357	823.86

일과 시일시트의 간극크기의 변화에 따라 기계평면시일 표면의 수직방향으로 발생하는 변위량을 나타낸 그림은 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 변위량은 시일의 회전속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는데, 시일과 시일시트의 간극이 작을수록 시일의 회전속도의 증가에 따른 증가량이 더욱 더 증가한다. 최대변위량은 시일의 회전속도에 크게 영향을 받는데 시일의 회전속도 1000RPM에서는 간극2 μm 와 5 μm 일 때의 차이가 0.6517 μm 으로 매우 작지만 회전속도 6000RPM에서는 그 차이가 5.46 μm 로 급격히 증가한다.

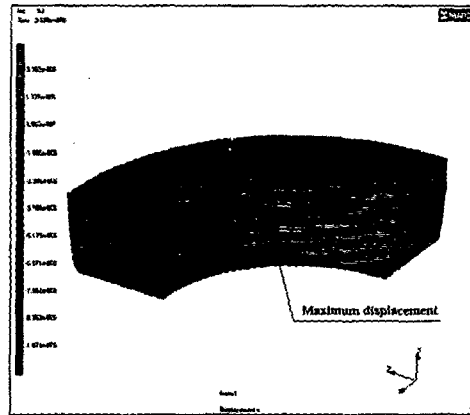


Fig. 7 Displacement distributions of mechanical face seal to the vertical direction

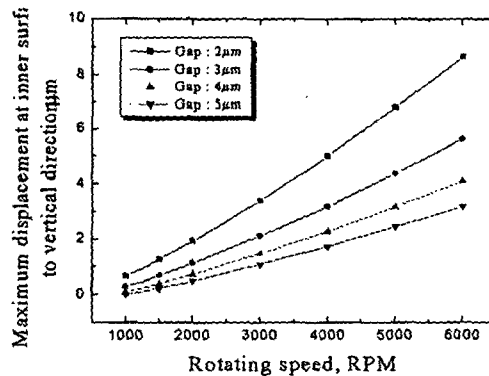


Fig. 8 Maximum displacement at inner surface to vertical direction as a variation of gap and rotating speed

본 논문에서는 시일과 시일시트의 간극 크기가 $3\mu\text{m}$ 으로 가정하여 해석을 수행하였는데 회전속도가 3000RPM에서 $2.1\mu\text{m}$ 가 발생하였고 4000RPM에서 $3.169\mu\text{m}$ 가 발생하였기 때문에 회전속도 4000RPM 이하에서 작동하는 것이 바람직하다.

기계평면시일 표면의 경사각이 60° 이고 회전속도가 4000RPM이며, 시일과 시일시트 간극거리가 $3\mu\text{m}$ 일 때 시일에서 발생한 온도분포는 Fig. 9에서 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 시일의 원주방향으로는 균일하게 분포하고 있고, 반경방향으로는 온도가 발생하고 외경에서 낮은 온도가 발생하고 있다. 최대온도는 시일의 댐부분에서 발생하는데, 해석모델의 가운데 마찰면의 댐의 끝단에서 194.7°C 가 발생한다.

경사각이 60° 일 때 시일의 회전속도와 시일과 시일시트의 간극크기의 변화에 따라 기계평면시일에서 발생하는 온도는 Fig. 10에서 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대온도는 시일의 회전속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는데, 시일과 시일시트의 간극이 작을수록 시일의 회전속도의 증가에 따른 증가량이 더욱 더 증가한다. 최대온도는 최대변위량과 마찬가지로 시일의 회전속도에 크게 영향을 받는데 시일의 회전

속도 1000RPM에서는 간극 $2\mu\text{m}$ 와 $5\mu\text{m}$ 일때의 차이가 36.3°C 였으나, 회전속도 6000RPM에서는 그 차이가 292.1°C 으로 급격히 증가한다.

기계평면시일 표면의 경사각이 60° 이고 회전속도가 4000RPM이며, 시일과 시일시트 간극거리가 $3\mu\text{m}$ 일 때 시일에서 발생한 von Mises 응력분포는 Fig. 11에서 보여주고 있는데 Fig. 8에서 온도분포와 같이 시일의 원주방향으로는 균일하게 분포하고 있고, 반경방향으로 응력차이가 발생하여 시일의 내경에서 큰 응력이 발생하고 외경에서 낮은 응력이 발생하고 있다. 시일시트와의 마찰면에서 발생하는 최대응력은 시일의 댐부분에서 408.899MPa 이 발생한다.

경사각이 60° 일 때 시일의 회전속도와 시일과 시일시트의 간극크기의 변화에 따라 기계평면시일에서 발생하는 응력은 Fig. 12에서 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시일의 마찰면에서의 최대응력은 시일의 회전속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는데, 시일과 시일시트의 간극이 작을수록 시일의 회전속도의 증가에 따른 증가량이 더욱 더 증가한다. 시일의 소재인 SiC가 견딜 수 있는 최대 압축강도는 2000MPa 이지만 최대 인장강도가 390MPa 인 것과 시일과 시일시트 사이의 간극거리를 $3\mu\text{m}$ 임을 고려

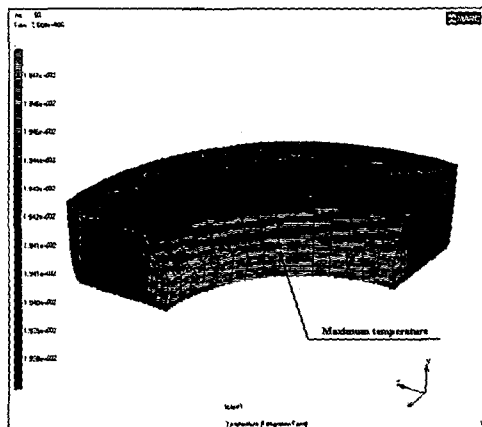


Fig. 9 Temperature distributions of mechanical face seal

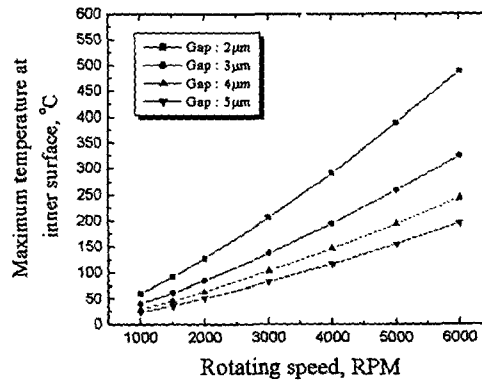


Fig. 10 Maximum temperature at inner surface of seal as a variation of gap and rotating speed

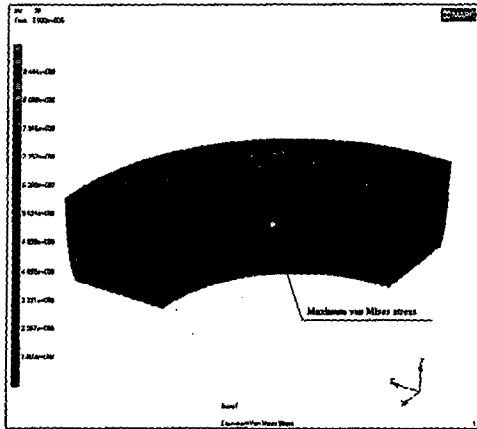


Fig. 11 von Mises stress distributions of mechanical face seal

한다면 회전속도가 3000RPM이하에서는 시일과 시일시트와의 간극거리에 상관없이 안정적이거나, 회전속도 4000RPM에서는 발생응력이 408.9MPa를 넘어서기 때문에 간극거리 $4\mu\text{m}$ 이상이 되어야 안정적이다. 또한 5000RPM에서는 $5\mu\text{m}$ 에서만 317MPa으로서 안정적이다. 이와 같은 이유로 인하여 회전속도가 6000RPM을 넘어서면 안정적이지 못하기 때문에 회전속도의 변화에 따라 시일과 시일시트 사이의 간극거리를 달리해야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 일반적인 90° 로 되어진 기계평면시일과 경사진 표면을 가진 시일이 열변형 거동특성을 비교·분석하기 위하여 시일의 회전속도가 4000RPM이고 시일과 시일시트의 간극거리가 $3\mu\text{m}$ 일 때를 기준으로 시일과 시일시트 사이의 간극거리와 시일의 회전속도에 대하여 해석을 수행하였는데, 시일 표면의 수직방향으로 발생한 최대변형량, 최대온도, 표면에서의 최대 von Mises 응력을 관찰하였다.

시일표면이 경사진 형태로 되어 있는 시일이 수직인 시일에 비하여 윤활유의 동선이 부드러워 유입과 유출이 원활하게 이루어지고, 시일의 외경에서 회전에 의한 원주속도

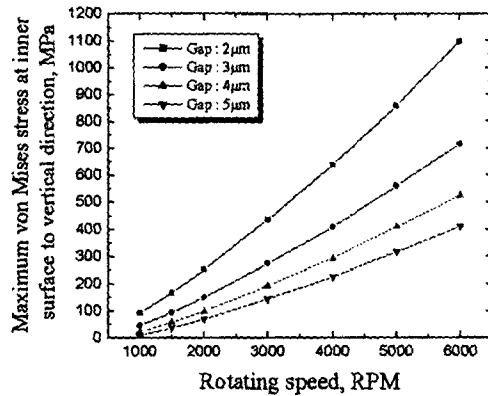


Fig. 12 Maximum von Mises stress at inner surface of seal as a variation of gap and rotating speed

가 다소 증가하기 때문에 대류열전달이 더욱 잘 되기 때문에 시일의 열변형거동 특성을 좋게 할 수 있다. 그러나 동일한 모델에서 경사각을 크게 하면 시일의 체적이 작아지게 되어 결국 열용량이 감소하는 효과가 발생하기 때문에 오히려 열변형거동 특성이 나빠지는 결과가 초래된다. 따라서 기계평면시일에서 경사진 표면의 효과를 관찰하기 위해서는 경사면 각도의 크기에 따라 열용량을 동일하게 하기 위한 모델을 변경하여야만 한다.

열변형 거동특성을 해석하기 위하여 본 논문에서는 체적이 같은 $50, 60, 70, 80, 90^\circ$ 의 5가지 모델에 대하여 해석하였는데 기계평면시일의 표면 경사각이 60° 인 경우가 시일에서 발생한 최대변위량, 최대온도, 최대 von Mises 응력이 가장 작게 발생하여 열변형 거동특성이 가장 우수한 것으로 밝혀졌다.

또한 시일과 시일시트 사이의 간극거리와 시일의 회전속도가 기계평면시일의 열변형 거동특성에 대한 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석한 결과는 다음과 같다.

1. 시일의 표면에서 발생하는 최대변위량은 시일의 댐의 끝단에서 발생하며 시일의 회전속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는데, 간격이 적을수록 급격히 증가하게 된다. 또한 동일한 시일의 회전속도에서는 시일과 시일시트 사이의 간극거리가 작아질수록 크

게 발생하는데 1000, 2000RPM에서는 기준 설계 간극거리에 비하여 발생 최대변위량이 모두 작기 때문에 안정적이지만 3000RPM에서는 3, 4, 5 μ m에서 안정적이며, 4000RPM과 5000RPM에서 4, 5 μ m, 6000RPM에서는 5 μ m에서만 기준 간극거리보다 작아서 안정적이다.

2. 시일에서 발생하는 최대온도는 최대변위량과 마찬가지로 시일의 댐의 끝단에서 발생하고 시일의 회전속도가 증가할수록 시일과 시일시트 사이의 간극거리가 작아질수록 높은 온도가 발생한다.

3. 시일의 표면에서 발생하는 최대 von Mises 응력은 시일의 댐에서 조금 떨어진 부분에서 발생하며 시일의 회전속도가 증가할수록 시일과 시일시트 사이의 간극거리가 작아질수록 높은 von mises 응력이 발생한다. 그러나 시일의 소재인 SiC의 최대 인장 응력이 390MPa인 것을 고려하면 회전속도가 증가할수록 시일과 시일시트 사이의 간극 거리를 크게 해야 안정적으로 시일이 작동할 수 있다.

참고 문헌

- [1] DR. Karl, E. Berroth, " Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Applications," Journal of STLE, pp. 770~773, 1990.
- [2] Ralph P. Gabriel, "Fundamentals of Spiral Groove Noncontacting Face Seals", ASLE Lubrication Engineering, Vol. 35, 7, pp. 367~375, 1980.
- [3] Chin-hsiu li, "Thermal Deformation in a Mechanical Face Seal", ASLE Transaction, Vol. 19, No. 2, pp. 146~152, 1975.
- [4] MARC Analysis Research Corporation, 1994, Computer Program MARC, California, U.S.A.