

# 경사진 마찰접촉면을 갖는 기계경사면시일의 거동특성에 관한 수치적 연구

김 청 균<sup>†</sup>

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## Numerical Study of Behaviour Characteristics of Mechanical Seals with Inclined Friction Faces

Chung Kyun Kim<sup>†</sup>

Tribology Research Center, Hongik University, Seoul, Korea

**Abstract** – Thermal distortion of non-contacting mechanical seals with inclined rubbing surfaces is affected by friction heat between seal ring and seal seat. The circulation fluid along the inclined rubbing surfaces maintains cooling friction heat and lubrication between the sealing surfaces of mechanical seal with an inclined surface. Mechanical seals with inclined sealing surfaces may be useful for reducing the frictional heating and power loss because of the introduction of cooling fluids to the sealing gap between seal ring and seal seat. From the FEM computed result shows that the thermal behavior and von Mises stress of sealing faces with an inclined angle 60 are much reduced in comparison of the conventional mechanical face seal with rectangular sealing surfaces.

**Key words** – incline seal face, sealing gap, inclined mechanical seal, seal ring, finite element analysis.

### 1. 서 론

펌프, 압축기, 터빈과 같은 유체기계의 회전축을 따라서 발생하는 누설을 차단하기 위해서 보통은 접촉식의 기계평면시일(mechanical face seal)을 사용한다. 기계평면시일은 시일링(seal ring)과 시일시트(seal seat)의 상대접촉 미끄럼 마찰작용에 의해 밀봉성을 확보해주는 유체기계의 핵심부품이다. 유체기계에서 회전축의 회전운동과 하중지지를 원활하게 보장하기 위해 설치된 베어링과 동일한 정도의 중요성을 갖는 시일장치는 유체기계의 송출효율이나 유체압력 형성이 큰 영향을 미친다. 시일장치의 밀봉성은 유체기계의 성능에서 중요한 비중을 차지하며, 특히 유체기계의 내구성과 유지보수 특성에서는 시일링과 시일시트 사이의 건조마찰에 의한 불안정성 때문에 항상 고장 원인으로 지목 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 기계평면시일의 미끄럼 마찰작용에 의해 발생하는 마찰열과 냉각작용을 균일하게, 그리고 안정적으로 소산시키는 문제를 해결하기 위해 시일링과 시일시트의 미끄럼 마찰면에 냉각수를 직접 유입시켜 유힬작용에 의한 마찰열 발생을 줄여주고, 발생된 마찰열은 밀봉간극을 따라서 냉각수에 의한 냉각작용이 원활하게 진행되도록 최적화 설계를 하고자 한다. 시일장치는 기본적으로 미끄럼 마찰면이 항상 건조마찰을 해야 밀봉유체의 누설을 차단할 수 있지만, 시일링과 시일시트 사이의 마찰조건이 실제로 건조마찰을 유지한다면 마찰열 발생에 의한 열변형 거동과 열탄성 마멸, 응착마멸, 스커핑이나 시저현상이 발생하면서 궁극적으로는 용융마멸에 의한 마찰면 손상이 진행되어 시일장치는 사용할 수 없게 된다. 특히 마찰면에서 발생된 마찰열 거동문제는 수치적으로 많이 다루어졌다[1,2]. 시일장치의 트라이볼로지에 연계된 문제점을 완화시키기 위해 내열내마멸 신소재의 개발, 마찰면을 통한 누설의 허용, 시일링과 시일시트 구조물에 대한

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

냉각 등의 설계방법으로 수명을 연장하고 있다.

접촉식 시일장치의 트라이볼로지 문제를 근본적으로 완화시키기 위해 본 연구에서는 미끄럼 마찰면의 밀봉 간극에 냉각수를 별도로 유입시켜 순환시킴으로써 마찰면에 대한 윤활작용과 냉각작용을 동시에 추구하여 누설방지는 물론 내구성을 안전하게 유지하고자 한다. 이것을 위해 본 연구에서는 미끄럼 마찰면의 경사도를 기존의 직각(90°)에서 다양한 경사각도를 갖는 해석모델을 설정하여 최적의 마찰면 변형거동을 확보할 수 있도록 비선형 유한요소해석을 수행하고자 한다[3]. 즉, 기계평면시일의 직각 마찰면을 경사 마찰면으로 변경하는 설계기술을 밀봉간극과 회전축의 속도변화에 대하여 유한요소 최적화 설계로 변형거동 특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 해석조건

### 2-1. 밀봉 마찰면의 형상

Fig. 1에서 보여준 시일링과 시일시트의 마찰 밀봉면은 90° 평면으로 제작되어 축방향의 밀봉유체가 반경방향을 따라서 유출하는 것을 적극적으로 차단한다. 따라서 Fig. 1의 미끄럼 마찰면을 경사지게 제작하면, 냉각수가 시일링과 시일시트의 경사 마찰면을 따라서 순환하면서 윤활작용과 냉각작용을 용이하게 달성하므로 마찰면에서 발생하는 마찰열은 크게 줄어들고, 윤활에 의한 내구성은 크게 증가하게 된다.

Fig. 2에서는 시일의 회전축 속도가 증가함에 따라서 마찰면의 경사도에 따라서 달라지는 원주속도 분포를 보여주고 있다. 즉, 밀봉 마찰면의 경사도가 회전축

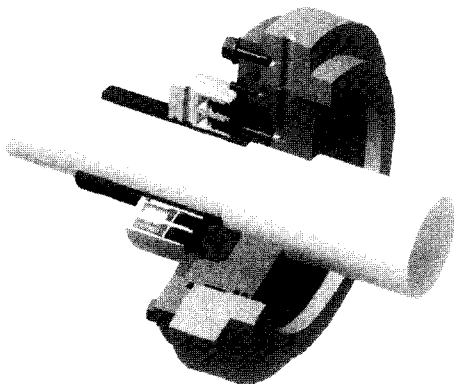


Fig. 1. Conventional mechanical face seals with a rectangular sealing surface.

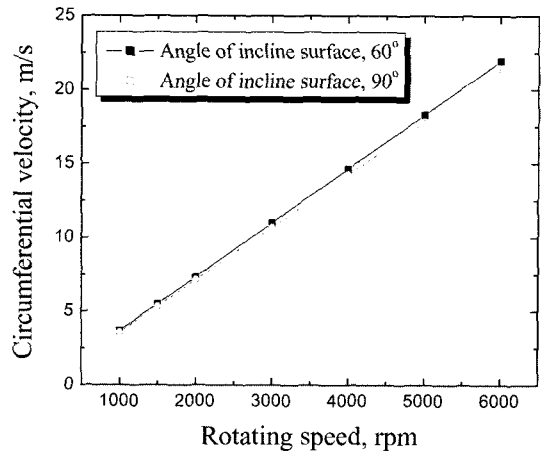


Fig. 2. Circumferential velocity for rectangular and inclined surfaces as a function of rotating speed.

에 대하여 직각을 유지하는 기존의 미끄럼 마찰형태, 90°를 유지하는 Fig. 1과 같은 경우이고, 또 다른 경우는 마찰면의 경사도가 직각이 아닌 60°에 대한 원주속도를 제시하고 있다. Fig. 2의 해석결과에 의하면 마찰면의 경사도가 60°이고, 회전속도가 4,000 rpm인 경우의 원주방향 속도는 14.7 m/s로 마찰 접촉면의 경사도가 90°인 직각 마찰면에 비하여 약 2.8%나 증가한다. 이것은 마찰면을 따라서 이동하는 순환 냉각수의 유동성을 좋게하여 마찰면의 윤활성과 냉각성을 향상시켜 주는 역할을 한다.

### 2-2. 시일링 소재

시일의 마찰면 소재로 널리 사용하는 SiC는 높은 기계적 강도를 유지하면서 우수한 내열성과 내마멸성을 갖고 있다[4]. 따라서 시일링과 시일시트 사이의 건조마찰 조건에서도 마찰열에 의한 열특성을 충분히 견디고, 내구성과 내마멸성, 내부식성 등이 다른 소재에 비하여 우수하다.

시일소재는 마찰열에 의한 열적 뒤틀림 현상이 발생되지 않도록 낮은 열팽창계수와 높은 열전도 특성을 갖는 소재를 선정하여 대류에 의한 방열조건이 우수하도록 설계해야 한다. 또한, 시일의 마찰 표면에서 발생된 응력분포를 균일하게 유지하기 위해서 가능한 기계적 강도와 탄성계수가 높은 소재를 선정한다. 회전축이 고속으로 운전함에 따라 시일이 바깥쪽으로 작용하는 원심응력(centrifugal stress)을 낮추기 위해서 저밀도의 시일소재 사용하는 것도 좋다.

**Table 1. Physical and thermal properties of SiC material**

Material Properties	Values
Modulus of elasticity, GPa	380
Poisson's ratio	0.22
Density, Kg/m <sup>3</sup>	3070
Thermal expansion coeff., 1/K	5×10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity, W/m · K	130
Specific heat, J/kg · K	670

이러한 이유로 시일소재는 사용 환경조건에 따라 TiC, WC, SiC 등과 같은 다양한 재료가 사용되는데, 본 논문에서는 열특성이 우수한 SiC 소재를 사용하였다. 일반적으로 SiC는 트라이볼로지적 특성이 우수한 소재로서 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 뛰어나며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않고, 제작하는데 경제적이다. 본 해석에 사용된 SiC의 물리적, 열적 특성은 Table 1과 같다.

### 2.3. 마찰열량

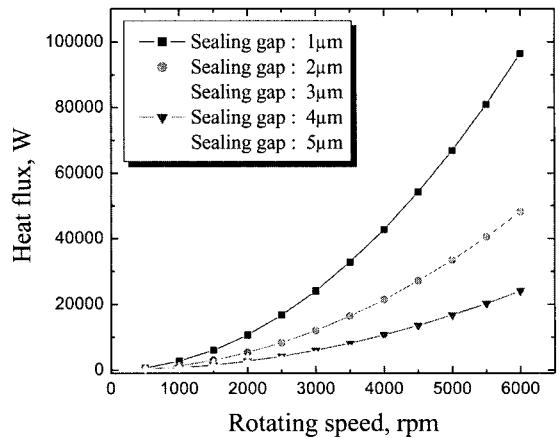
기계경사면시일의 밀봉 접촉면에서 발생한 마찰동력은 마찰 모멘트로부터 유도된 식 (1)로 표현되고, 시일의 미끄럼 마찰표면에서 발생하는 열량은 식 (2)에 의해 계산된다.

$$H = \frac{\pi^3 \mu n^2 (r_o^4 - r_i^4)}{1800 h_s} \quad (1)$$

$$Q = 745.7 \times H \quad (2)$$

마찰면의 밀봉간극이 3 μm이고, 축의 회전속도가 4000 rpm일 경우에 마찰계면에서 발생한 마찰동력과 마찰열은 각각 19.1 hp와 14272.4 W이다. 이 때에 밀봉계면에서 발생한 마찰 열량은 시일링 SiC와 시일시트 카본(carbon)으로 적절하게 분배되는데, 본 연구에서는 시일링 SiC로는 79.3%인 11315 W가 유입되고, 나머지는 시일시트 카본으로 배분된다고 본다. 특히 시일링으로 유입된 열량은 시일시트에 비하여 절대적으로 크기 때문에 마찰표면의 열적 뒤틀림, 열크랙, 열탄성 마멸 등이 발생하는 원인으로 작용하면서 시일링과 시일시트의 마찰면은 더 이상 균일하지 못하면서 밀봉유체의 누설은 진행된다.

Fig. 3은 상기식에 의해 계산된 마찰열량을 제시한 결과로, 기계경사면시일의 회전속도가 변화함에 따라



**Fig. 3. Heat flux on the rubbed sealing surface of inclined mechanical seals as a function of rotating speed.**

시일의 미끄럼 마찰표면에서 발생하는 열량을 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극 변화에 따라서 약간씩 달라지고 있음을 제시하고 있다. 시일의 회전속도가 증가할수록 시일의 마찰 표면에서 발생한 열량은 완만하게 증가하는데, 그 증가폭은 밀봉간극 3 μm 이하로 작아질수록 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 정상 상태에서 시일의 안쪽으로 유입되는 공기량과 시일의 표면에서 발생한 압력 분포는 두 표면 사이의 밀봉간극에 크게 의존한다는 것이다. 두 표면 사이의 밀봉간극이 작게 유지되면, 유입된 밀봉유체의 점성 전단작용(viscous shear action)이 커지면서 공기의 유입을 더욱 촉진하게 되어 결과적으로 압력의 상승을 초래한다. 이와 같은 이유로 그동안 수행되어온 많은 연구 결과에 따르면, 최적의 밀봉간극은 3 μm 부근임을 알 수 있다[5]. 따라서 본 해석에서 사용된 밀봉간극은 3 μm이고, 회전속도는 4000 rpm인 경우에 대하여 해석하였다.

### 2.4. 대류 열전달 계수

시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극으로 질소, 공기, 또는 물과 같은 유체가 유입되어 시일축이 회전하는 동안 밀봉간극을 최적의 상태로 부상시켜서 마찰열 발생을 줄여주고, 유입된 가스에 의한 윤활과 냉각작용이 원활하게 진행되면서 기계경사면시일은 밀봉 안정성을 확보하게 된다.

본 해석에서 사용된 작동유체는 공기이고, 공기에 의한 기계경사면시일의 바깥쪽 밀봉된 유체면의 방열효

과와 마찰면에 공급된 냉각수의 방열효과를 같이 고려하였다. 이 때에 공기에 의해 발생된 대류 열전달 계수는 식 (3)에 의해 계산될 수 있다[1]. 대류 열전달 계수  $h$ 는 시일축의 원주속도에 의해 가장 큰 영향을 받는데, 시일의 외경에 작용하는 원주속도는 시일의 경사각이 작을수록 열전달 계수는 더 증가하게 된다. 이와 같이 시일의 경사각에 따라 발생하는 대류 열전달 계수 계산결과를 Fig. 4에서 제시한다. 본 논문에서 경

사각도가  $60^\circ$ 이고, 시일의 회전속도가 4000 rpm일 때 발생하는 대류 열전달 계수는  $52.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이다.

$$h = \frac{N_u k}{D} \tag{3}$$

$$\text{여기서 } N_u = \frac{C_f R_e P_r}{2}$$

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

$$R_e = \frac{VD}{\nu}$$

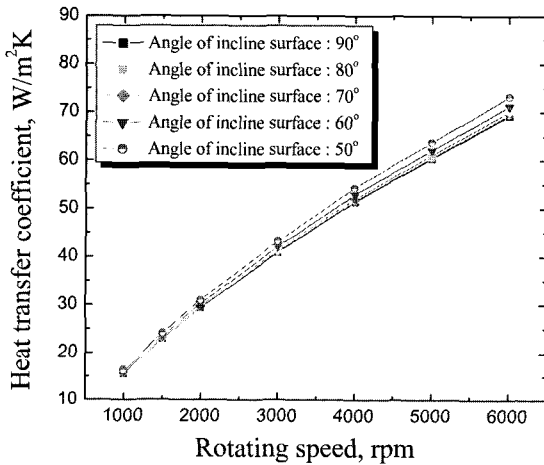
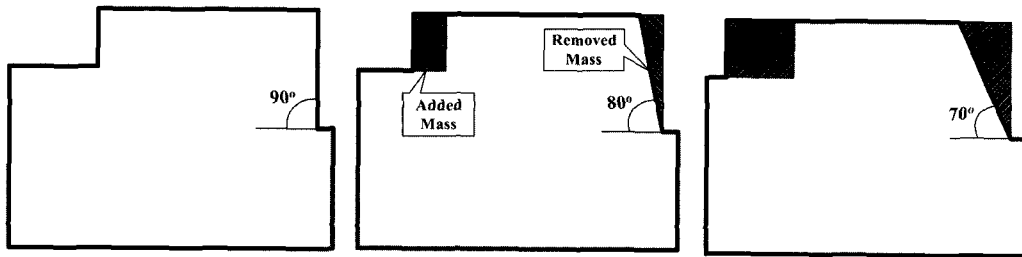


Fig. 4. Heat transfer coefficient for inclined mechanical seals as a function of rotating speed.

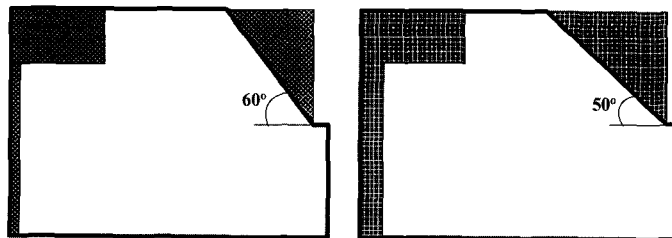
2.5. 모델링 해석조건

경사 밀봉면을 갖는 기계경사면시일의 마찰열 거동 특성 문제를 해석하기 위해 본 논문에서 사용한 가정은 다음과 같다.

- 경사 마찰면의 밀봉작용을 하는 과정에서 발생된 열량은 모두 시일링과 시일시트의 마찰 접촉면에 대하여 수직방향으로 유입되며, 밀봉가스의 누설에 의한 열손실은 없다.
- 밀봉가스로 사용한 매체는  $20^\circ\text{C}$ 의 공기이다.
- 시일링과 시일시트의 밀봉간극은  $3 \mu\text{m}$ 로 균일하게 유지된다.
- 작동가스의 밀봉압력은 4.6 MPa이고, 시일에 균일하게 작용한다.



(a) Sealing face angle :  $90^\circ$  (b) Sealing face angle :  $80^\circ$  (c) Sealing face angle :  $70^\circ$



(d) Sealing face angle :  $60^\circ$  (e) Sealing face angle :  $50^\circ$

Fig. 5. Geometry of seal rings with an inclined sealing face.

- 기계경사면시일은 1000시간의 수명을 보장한다.

Fig. 5는 시일링과 시일시트의 마찰 접촉면이 일정한 경사도를 갖는 기계경사면시일의 해석모델과 토탈 열용량 조건을 각각 보여주고 있다. 기존의 기계평면시일(Fig. 5(a)의 경우)은 마찰 접촉면이 회전축에 대하여 직각으로 제작되었으나, 본 연구에서는 밀봉유체의 밀봉 마찰면 방출을 원활하기 촉진하기 위해 시일링과 시일시트의 마찰표면을 일정한 경사각을 갖도록 설계하였다. 마찰 경사면이 시일링과 시일시트의 변형 거동 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 50, 60, 70, 80, 90°의 경사각을 가지는 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

미끄럼 마찰작용을 하는 경사면에 유입되는 열량은 회전축의 속도변화에 따라 Fig. 3에서 제시한 것과 같고, 이러한 열량은 경사 마찰면을 따라서 누설되는 35°C의 냉각수에 의해 냉각작용을 하게 된다. 또한, 미끄럼 마찰 경사면을 중심으로 밀봉가스의 압력 4.6 MPa이 균일하게 작용하고, 시일링과 시일시트의 외경을 따라서는 Fig. 4에서 제시한 대류 열전달에 의한 방열작용이 일어난다.

시일링과 시일시트의 변형거동 특성을 엄밀하게 고찰하여 최적의 경사면 각도를 구하기 위해서는 미끄럼 마찰작용 과정에서 밀봉성을 안정적으로 유지해야 하는 기계경사면시일 자체의 열용량은 동일하게 설계해야 한다. 이것을 위해 Fig. 5에서 보여주는 것처럼 마찰 접촉면의 경사각도가 줄어들수록 감소하는 시일링의 체적을 다른 곳에 더해주어 전체적인 체적은 동일하게 유지하여 열용량이 같지만, 기계경사면시일의 형상은 약간씩 달라진 해석모델을 보여주고 있다.

Fig. 6은 경사 마찰면을 갖는 시일링에 작용하는 온도와 압력을 적용한 경계조건과 유한요소해석을 위한 유한요소 메쉬를 보여주는 그림이다. 미끄럼 마찰작용

을 하면서 밀봉유체의 누설을 차단하는 밀봉면에는 마찰열이 발생하고, 경사 마찰면을 따라서 순환하면서 냉각작용을 하는 35°C의 물은 마찰 경계면에 윤활과 냉각작용을 동시에 수행한다. 여기에 시일링의 외부 표면은 대기중의 공기에 의한 대류 열전달이 원활하게 이루어진다는 가정을 한다. 시일링과 시일시트 사이의 미세 밀봉간극을 3 μm라고 가정할 경우에 경사면을 따라서 작용하는 밀봉면압은 4.6 MPa이다. 여기서 밀봉면압이 더 증가하면, 마찰면에는 경계마찰에 의한 마찰이 발생될 우려가 높으므로 최적의 조건으로 유지하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 밀봉 마찰면에 작용하는 방열량 조건은 Fig. 2에서 제시한 열량을 시일링과 시일시트에 의해 공유하는 것으로, 그리고 시일링의 경계조건은 Fig. 6에서 제시한 모델을 각각 사용하였다.

### 3. 해석결과 및 토의

기계경사면시일의 마찰면에서 발생된 마찰열과 온도 조건, 압력조건에 의한 경사면의 변형거동 특성을 해석하기 위해 본 논문에서는 50, 60, 70, 80, 90°의 경사각도 모델에 대하여 고찰하였다. Table 2에서 제시한 해석결과처럼, 기계경사면시일의 경사각도는 60°일 때가 가장 안정적인 열변형 거동특성을 나타내고 있다. 즉, 기존의 기계평면시일을 나타내는 90° 경사각도를 갖는 시일링은 수직방향으로 발생한 변형량이 5.9 μm로 가장 크게 발생하였다. 반면에 경사각도가 60°인 경사 시일링은 가장 작은 3.1 μm로 변형 거동량이 대단히 안정적으로 거동하고 있음을 알 수 있다.

또한, 마찰면에서 발생된 최고온도는 경사각이 90°일 때 가장 높은 357°C, 그리고 60°일 때는 가장 낮은 191°C가 각각 발생하였다. 이러한 온도와 하중조건

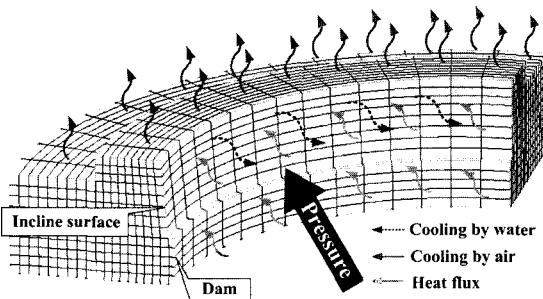


Fig. 6. Boundary conditions for FEA model.

Table 2. Computed results as a function of inclined mechanical seals

Results Angle, °	Max. Displ. μm	Max. Temp. °C	Max. Stress 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

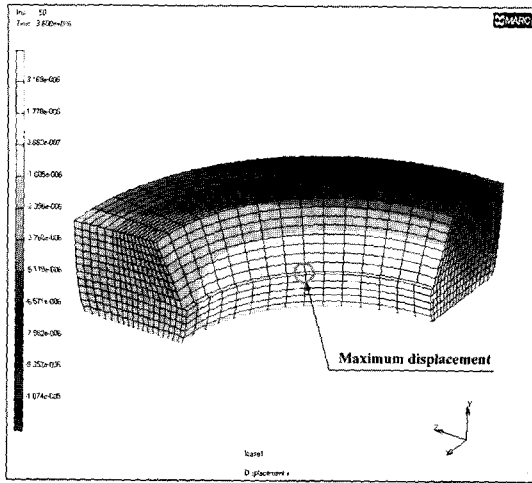


Fig. 7. Displacement distributions of inclined mechanical seals in the vertical direction.

에 의한 최대응력은 마찰면의 댐(dam)의 바로 위 부분에서 발생하는데, 경사면의 각도가 60°일 경우는 391 MPa로 가장 낮게 발생하였다. 따라서, 기계경사면시일의 미끄럼 마찰 표면의 경사각도는 60°로 설계될 때 가장 안정적인 열변형 거동을 보여준다. 이것은 기존의 90° 직각면을 갖는 기계평면시일에 비하여 경사진 마찰 운동면을 갖는 기계경사면시일이 마찰, 냉각, 윤활 등의 측면에서 보다 안정적인 설계라 할 수 있다.

Fig. 7은 시일링의 마찰면 경사도가 60°, 회전축의 속도가 4000 rpm, 시일링과 시일시트 밀봉간극이 3 μm일 때 마찰 접촉표면의 수직방향으로 발생한 변형량 분포도를 나타낸 유향요소 해석결과이다. Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 시일링의 댐(dam)부분에서 큰 변형량이 발생하는데, 해석모델의 중간부라 할 수 있는 마찰면 댐의 끝단에서 3.098 μm의 최대 변형량이 발생하였다.

경사각이 60°인 시일링에서 회전축의 속도와 밀봉간극이 변화함에 따라 시일링의 수직방향을 따라서 발생하는 변위량을 Fig. 8에서 보여주고 있다. Fig. 8에서 제시한 결과처럼 변위량은 시일의 회전속도가 증가할수록 비교적 선형적으로 증가하지만, 시일링과 시일시트의 밀봉간극이 작을수록 시일의 회전속도 증가에 따른 변위량 증가량은 크게 증가하는 현상을 보여준다. 즉, 시일링에서 발생하는 최대 변위량은 회전속도에 크게 영향을 받는데, 시일의 회전속도 1000 rpm에서는 밀봉간극 2 μm와 5 μm일 때의 차이가 0.65 μm로 대단히 작지만 회전속도 6000 rpm에서는 5.46 μm로

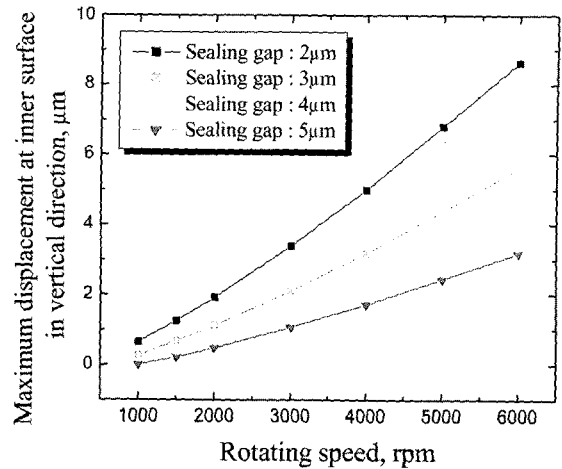


Fig. 8. Maximum displacement at inner surface of seal rings in the vertical direction as functions of sealing gap and rotating speed.

8.4배나 크게 증가한다.

본 논문에서 고려한 기준 밀봉간극은 3 μm로 가정하여 해석을 수행하였는데, 회전속도 3000 rpm에서는 2.1 μm의 수직방향 변위량, 4000 rpm에서는 3.17 μm가 각각 발생하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 해석결과에 따르면, 기준 데이터에 대한 시일의 회전속도는 4000 rpm 이하에서 작동하는 것이 바람직하다.

Figs. 7과 8의 해석결과에 의하면, 시일의 마찰면에서 발생하는 변위량은 특히 밀봉간극에 의해 큰 영향을 받는다는 것이다. 시일은 밀봉성을 강화하기 위해 필연적으로 밀봉간극을 줄이려는 초정밀 가공성을 강조하지만, 이것은 밀봉간극을 줄이려는 기술로 결국은 마찰열 증가와 변형 거동량 증가로 이어져 시일 마찰면의 손상을 일으키는 원인으로 작용하므로 시일의 회전속도를 증가하기에는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 것처럼 밀봉간극을 통하여 냉각수를 일정량 공급하는 설계기술이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 9는 시일링과 시일시트의 미끄럼 마찰작용에 따른 시일링의 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 시일링의 원주방향으로는 균일하게 온도가 분포하고, 반경방향으로는 온도차이가 발생한다. 시일링의 내경부 댐에서 특히 높은 온도가 발생하고, 외경에서 상대적으로 낮은 온도가 분포한다. 시일링 마찰면의 댐지역 끝단에서 최대온도 194.7°C가 발생한다.

Fig. 10은 시일 마찰면의 경사각이 60°일 때 시일의

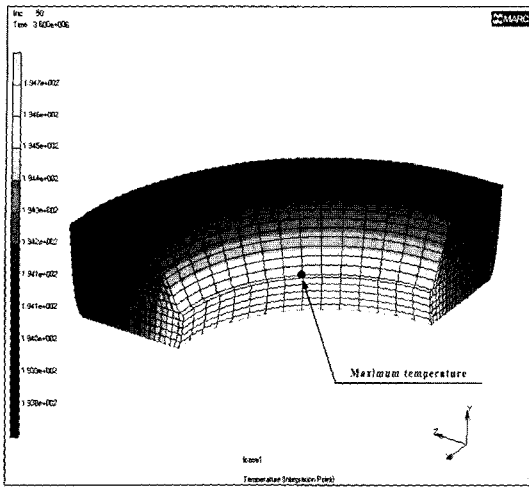


Fig. 9. Temperature distributions of inclined mechanical seals.

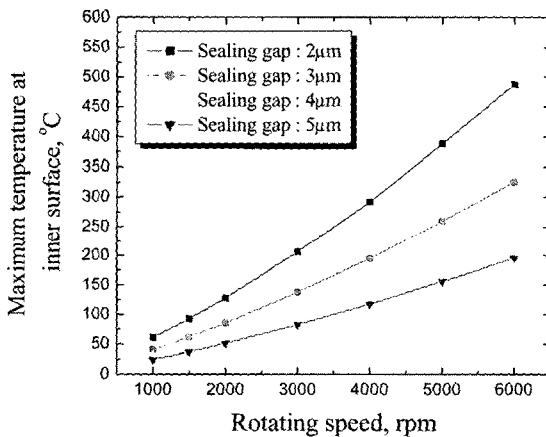


Fig. 10. Maximum temperature at inner surface of seal rings in the vertical direction as functions of sealing gap and rotating speed.

회전속도와 밀봉간극의 변화에 따라 시일링에서 발생하는 온도를 제시하고 있다. 해석결과에 의하면, 시일 마찰면에서 발생된 최고온도는 시일의 회전속도가 증가할수록 선형적으로 증가하고, 시일링과 시일시트의 밀봉간극이 줄어들수록, 그리고 시일의 회전속도가 증가함에 따라 온도 증가량은 더욱 커진다. 마찰면에 발생하는 온도는 시일의 회전속도와 밀봉간극에 큰 영향을 받는데, 시일의 회전속도 1000 rpm에서는 밀봉간극 2 µm와 5 µm일 때의 차이가 36.3°C이고, 회전속도 6000 rpm에서는 그 차이가 292.1°C으로 급격히 증가한다. 따라서, 마찰열에 의한 온도상승은 작은 밀봉간극

과 높은 회전속도에 의해 큰 영향을 받고 있다는 사실에 유의해야 할 것이다.

Fig. 11은 경사진 마찰면을 갖는 기계경사면시일에서 발생된 von Mises 응력분포를 보여주고 있다. Fig. 9의 온도분포 해석결과와 유사하게 시일링의 원주방향으로는 균일하게 분포하고, 반경방향으로는 응력차가 발생한다. 즉, 시일링의 내경에서는 응력이 크게 발생하고, 외경에서는 응력이 낮게 발생한다. 시일링에서 발생된 최대 von Mises 응력은 시일링의 댐과 경사면이 만나는 부분에서 408.9 MPa이 발생한다.

Fig. 12는 경사각이 60°인 시일링과 시일시트에서 밀

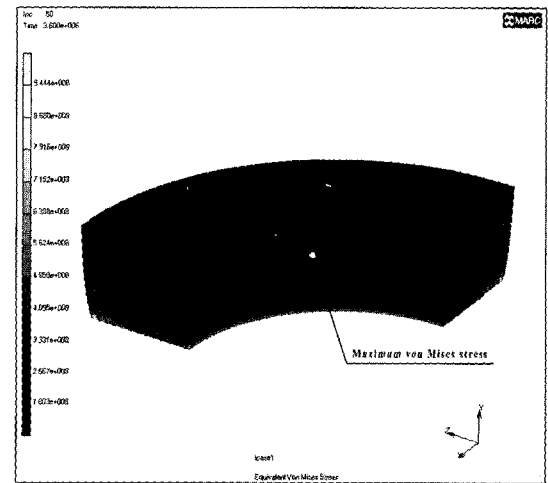


Fig. 11. von Mises stress distributions of inclined mechanical seals.

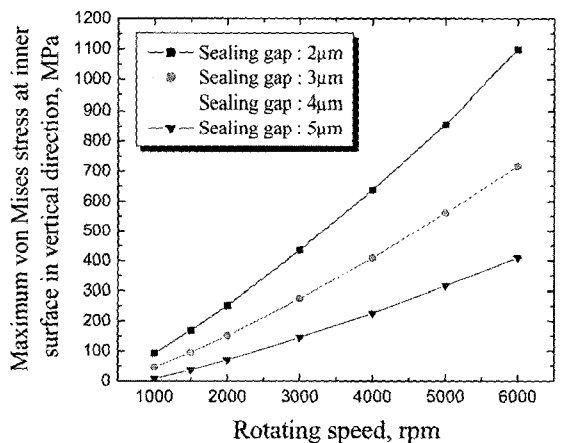


Fig. 12. Maximum von Mises stress at inner surface of seal rings in the vertical direction as functions of sealing gap and rotating speed.

봉작용이 일어나는 경우에, 시일의 회전속도와 밀봉간극이 변화함에 따라 시일링의 마찰면에서 발생된 von Mises 응력에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 시일의 마찰면에서 발생된 최대 von Mises 응력은 변위량이나 온도의 경우처럼 유사한 경향을 보여준다. 즉, 시일의 회전속도가 증가할수록 최대 von Mises 응력은 선형적으로 증가하고, 밀봉간극이 작을수록 시일의 회전속도의 증가에 따른 변동량은 크게 증가하는 현상을 보여준다.

보통 시일링의 SiC 소재가 견딜 수 있는 최대 압축강도는 2000 MPa이지만, 최대 인장강도가 390 MPa인 것과 기준 밀봉간극이 3  $\mu\text{m}$ 임을 고려한다면 회전속도가 3000 rpm 이하에서는 시일링과 시일시트와의 밀봉간극에 관계없이 비교적 안정적이다. 그러나, 회전속도 4000 rpm에서 발생된 응력은 408.9 MPa를 넘어서기 때문에 밀봉간극은 4  $\mu\text{m}$  이상이 되어야 안정적이다. 또한, 회전속도 5000 rpm에서는 5  $\mu\text{m}$  정도로 유지되어야 317 MPa로 유지할 수 있어 안정적이지만, 회전속도가 6000 rpm을 넘어서면 밀봉간극을 더 크게 설계해야 한다. 그러나 밀봉간극을 증가하면 누설이라는 또 다른 문제점에 도달하기 때문에 시일설계는 쉬운 문제가 아니다. 따라서 시일의 누설, 강도, 온도, 변위량 등에 관련된 최적의 조건을 얻기 위해서는 실제 작동조건과 수명, 내구성 등을 함께 고려하여 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극과 회전속도, 냉각조건과 같은 작동조건을 결정해야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 마찰 접촉면의 경사각도를 90°로 제작한 기존의 기계평면시일과 임의의 경사각도를 갖도록 제작된 기계경사면시일에 대한 변형량, 온도, 응력에 대한 거동특성을 비교·분석하였다.

경사진 마찰 접촉면의 경사도는 기존의 90° 보다 60°를 갖는 시일링과 시일시트로 설계하는 것이 변형 거동 측면에서 우수함을 보여주고 있다. 이것은 밀봉된 유체에 의한 윤활성과 냉각성이 밀봉계면을 따라서 효과적으로 작용할 수 있다는 측면에서 가능한 해석 데이터이다. 시일의 밀봉간극이 줄어들고, 특히 회전속

도가 증가하는 작동조건에서는 시일링의 경사면과 댄이 만나는 경계지역에서 발생하는 변위량과 응력조건은 밀봉간극에 대한 설계변경과 회전속도를 낮게 유지함으로써 극복할 수 있다. 근본적으로는 밀봉간극을 따라서 이동하는 냉각수의 유동량을 증가하여 냉각성을 확보하면 대부분의 문제는 해결될 수 있다.

#### 기호설명

$C_f$	= 마찰계수
$D$	= 시일의 마찰면 길이, mm
$h$	= 밀봉간극, mm
$H$	= 동력, W[hp]
$n$	= 회전속도, rpm
$Q$	= 열량, W[J/s]
$r_o$	= 시일외경 반지름, mm
$r_i$	= 시일내경 반지름, mm
$V$	= 시일표면의 원주속도, m/s
$N_u$	= 누설 상수
$P_f$	= 프란틀 상수
$R_e$	= 레이놀즈 상수
$k$	= 열전도 계수, W/m · K
$\nu$	= 동점도, $15.89 \times 10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /s]
$\mu$	= 점도, Pa · s

#### 참고 문헌

1. Chin-hsiu Li, "Thermal Deformation in a Mechanical Face Seal," *ASLE Transaction*, Vol. 19, No. 2, pp.146-152, 1975.
2. 김청균, 조승현, "기계평면시일의 마찰열 변형거동에 관한 수치적 연구," *한국윤활학회지*, Vol. 14, No. 2, pp.49-56, 1998.
3. MARC Analysis Research Corporation, California, USA, 1994.
4. Berroth, K. E., "Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Applications," *Journal of STLE*, pp.770-773, 1990.
5. Gabriel, R. P., "Fundamentals of Spiral Groove Non-contacting Face Seals," *ASLE Lubrication Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp.367-375, 1980.