

마찰열을 고려한 가스시일의 그루브 설계

김청균 · 조승현 · 고영배^{*} · 차백순^{**}
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
^{*} 트리보가스텍
^{**} (주)한스

Groove Design of a Gas Seal Including Friction Heatings

Chung Kyun Kim · Seung Hyun Cho · Young Bae Ko^{*} · Baek Sun Cha^{**}
Tribology Research Center, Hongik University
^{*} *TriboGasTech Co.*
^{**} *Hans Co.*

Abstracts - The noncontacting groove end face seal is one of various approaches to sealing gases with a single seal. Gas pumped into groove maintains operating gap and lubricates between primary ring and mating ring. So it removes heat and decreases face wear. In this paper, K-type and T-type grooved seals have been analyzed numerically using the finite element method. It explains the effects of groove shapes in gas seals along rotating speeds with a temperature gradient, face distortion, stress and so on. The calculated FEM results show the operating gap and rotating speed are strongly related to the leakages of a gas seal and that T-type groove seal shows a good thermal performance compared to K-type groove seal.

Key Words: Gas seal, Groove, Operating gap, Rotating speed, Finite element analysis

1. 서 론

가스시일(gas seal)은 기존의 기계평면시일과는 달리 접촉평면에 가공된 그루브에 의해 유입된 유체가 동압을 발생시키고, 이것에 의해 메이팅 링을 떨어지게 하여 비접촉

상태에서 밀봉을 하도록 설계된 핵심요소부품이다. 가스시일은 1980년대에 개발되어 정유, 화학산업을 중심으로 사용되다가 최근에는 반도체 산업의 활성화로 반도체 설비에 많이 응용되고 있는 추세이다.

가스시일이 정지하고 있는 경우는 기계평면시일처럼 접촉면의 댐에 의해 밀봉을 유지하다가 축이 회전하면서 시일링에 가동된 특별한 형상의 그루브로 유입된 유체에 의한 유체동압이 발생하게 되고, 유체막 강성도에 의해 밀봉작용이 진행된다.

가스시일은 비접촉 상태에서 밀봉작용을 하기 때문에 기존의 접촉식 시일과는 달리 마멸이나 마찰열 발생에 의한 문제점이 크게 작지만, 상승된 동압에 의한 누설을 완벽하게 차단할 수 있는 밀봉작용을 하기가 곤란하다는 사실이다. 그래서 이에 대한 연구를 제작 메이커에서는 그루브의 형상이 겹치도록(John Crane 제품), 또는 또 다른 홈 형상의 그루브(Durametallic 제품)를 추가로 설치하는 개량된 설계를 많이 개발하였다.

본 연구에서는 가스시일의 그루브 형상(K 타입과 T 타입)이 마찰 접촉열에 의한 열변형 거동 특성에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 해석하고자 한다. 이러한 열변형 거동은 가스시일의 유체동압 발생이 불안정하거나 정지시에는 마멸로 연결될 가능성이 높으므로 접촉 표면에 가공된 그루브 형상은 가스시일의 밀봉특성평가에서 대단히 중요하다.

2. 모델링 및 해석 조건

가스시일의 열-기계적 특성에 관련된 그루브 형상의 영향을 해석하기 위하여 본 연구는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 K 형태의 그루브와 T 형태의 두 가지 그루브 모델을 고려하였다. 이들 두가지 모델을 직접

적으로 비교하기가 곤란하기 때문에 이들 그루브 형상이 전체 미끄럼 마찰표면에서 차지하는 비율을 29%로 동일하다는 가정하고 모델링을 하였다.

가스시일의 형상은 축대칭이기 때문에 Fig. 2와 같이 1/4 모델을 사용하여 해석하였다. 그루브 안에는 기체의 유입에 따른 방열이 발생하고, 상대 접촉면에서는 열량이 유입된다. 그루브 내에 실제로 가해지는 압력은 그루브 안으로 유입되는 기체의 압력이 더해져서 5.12MPa이고, 그루브를 제외한 시일의 평면 및 시일의 외경과 내경에 가해지는 압력은 4.59MPa이다.

그루브의 형상이 대단히 복잡하고, 그루브에서 발생하는 기계적 하중과 마찰열을 동시에 고려해야 하는 관계로 비선형 마찰접촉 문제를 해석할 수 있는 MARC로 마찰열 거동문제를 해석하였다. K-그루브 가스시일의 접촉면에서 유한요소와 절점의 개수는 각각 1785와 1256개이고, T-그루브 가스시일에서는 1474와 1024개이다.

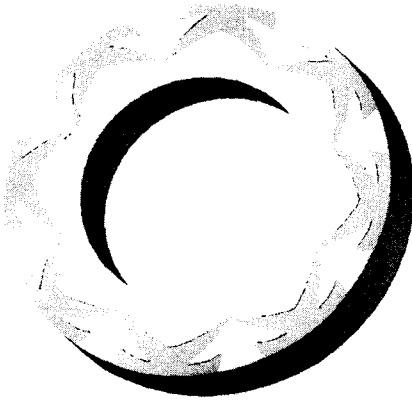
Fig. 3은 가스시일의 회전속도 변화에 따른 시일의 미끄럼 마찰표면에서 발생한 열량을 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극 변화에 따라서 발생된 열량의 크기를 제시한 결과이다.

회전속도가 증가할수록 시일의 표면에서 발생한 열량이 완만하게 증가하는데, 그 증가 폭은 밀봉간극 $3\mu\text{m}$ 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 표

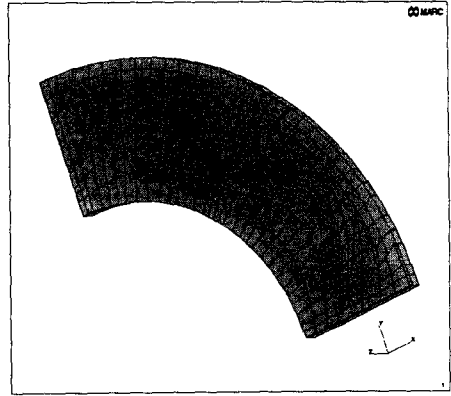
면 사이의 밀봉간극이 작게 되면 유입된 기체의 점성 전단작용(viscous shear action)이 커져서 공기의 유입을 더욱 촉진하게 되어 결과적으로 압력의 상승을 초래한다. 이와 같은 이유로 그 동안 수행되어온 많은 연구결과에 의하면 최적의 밀봉간극은 $3\mu\text{m}$ 부근임을

알 수 있다[2]. 따라서 본 해석에 사용된 밀봉간극은 $3\mu\text{m}$ 이고, 회전속도는 4000rpm인 경우에 대하여 해석하였다.

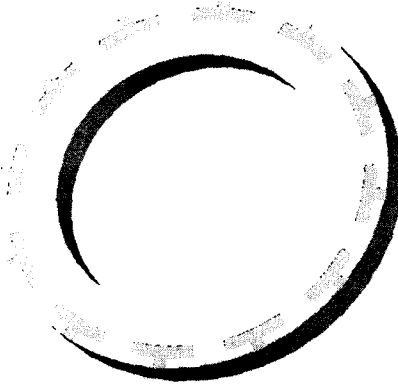
시일 설계에서 가장 중요한 시일링과 시일시트의 중요한 물성치는 시일에서 발생한 열팽창량을 용이하게 방열시키면서 열적 뒤틀림을 방지하기 위한 낮은 열팽창계수와 높은



(a) K-type groove gas seal

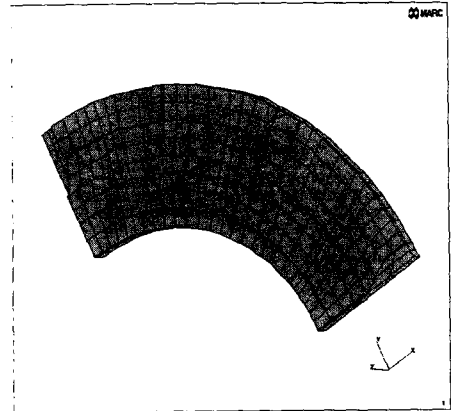


(a) K-type groove gas seal



(b) T-type groove gas seal

Fig. 1 Gas seal models



(b) T-type groove gas seal

Fig. 2 Mesh generation for seals

열전도를 갖는 재질을 선택해야 한다. 또한, 시일 표면에서 발생된 압력분포를 균일하게 하기 위해서는 가능한 강도와 탄성계수가 높은 것을 선택해야 하고, 고속회전에서 시트의 바깥쪽으로 작용하는 원심응력(centrifugal stress)을 낮추기 위해서는 낮은 밀도를 갖는 소재가 좋고, 내부식성이 우수해야 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 트라이볼로지적 특성이 우수한 소재로서 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 뛰어나며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않고, 제작하는데 경제적이다. 해석에 사용된 SiC의 물리적, 열적 특성은 Table 1과 같다[3-5].

Table 1. Physical and thermal properties of SiC material

Modulus 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

3. 해석 결과 및 토의

3-1. 온도분포

Fig. 4는 시일의 회전속도 변화에 따른 시일의 최대 온도를 두가지 그루브 모델에 대해 비교한 해석결과로서 회전 속도가 증가함에 따라 최대 온도가 선형적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 회전속도가 4000rpm에서 K-그루브와 T-그루브 형상의 가스시일 마찰면에서 발생된 온도가 각각 53.1℃, 52.6℃로서 두 모델의 온도차는 매우 작다. 이러한 해석결과는 그루브 형상에 따른 시일의 열응력 동적 특성을 파악하기 위하여 두 모델에 대한 평면의 실제접촉면적을 같도록 설계하였기 때문이다.

Fig. 5(a)와 5(b)는 K-그루브 시일과 T-그루브 시일의 마찰표면에서 발생된 온도 분포를 나타내 주는 그림이고, 시일의 밀봉댐(sealing dam)이 있는 내경부의 안쪽 접촉면 온도는 높고, 외경부의 바깥쪽 온도는 낮게 나타났다. 이러한 온도 분포로 인해 시일의

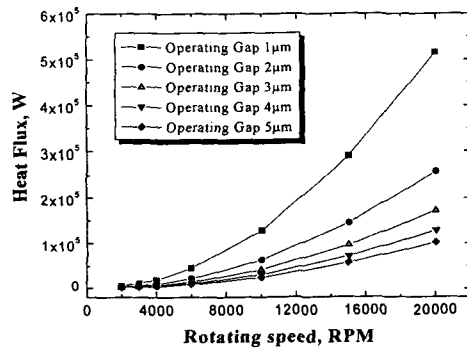


Fig. 3 Heat flux on the rubbing surface of a gas seal as a function of rotating speeds

내경부에서 열팽창이 외경부에 비하여 크게 발생하므로 시일의 마찰표면에서 발생된 열적 뒤틀림의 원인이 된다. 또한, Fig. 4에서 검게 보이는 부분은 그루브가 있는 곳으로서 공기에 의한 방열로 상대적으로 낮은 온도가 발생하지만 최고 온도와의 차이가 2°C로 거의 균일하다고 할 수 있다.

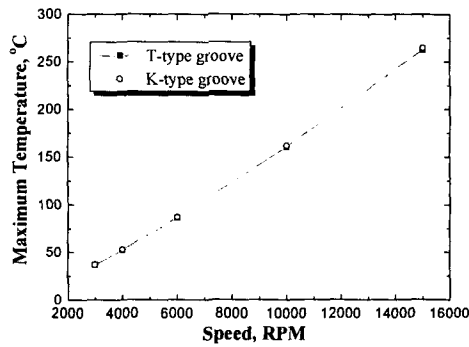


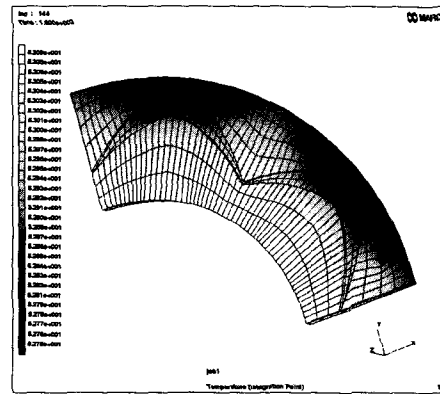
Fig. 4 Maximum temperatures of a gas seal for two groove models, T-groove and K-groove as a function of rotating speed

3-2. 열거동 해석

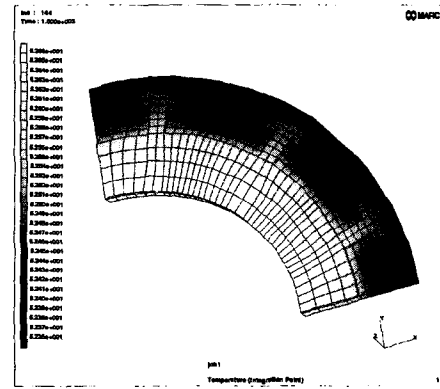
그루브가 있는 가스시일의 접촉면에는 유입된 가스에 의한 유체정압(hydrostatic pressure)과 시일링의 회전에서 발생하는 유체동압(hydrodynamic pressure)의 두가지 하중이 작용한다. 본 연구에서는 이러한 기계적 하중과 밀봉계면에서 발생된 마찰열 하중이 동시에 작용하는 실제적인 문제에 대해 열변형 거동을 해석하였다.

Fig. 6은 가스시일의 시일링 표면에서 발생한 열변형 거동을 보여주고 있다. 시일링은 작동 초기에 균일한 간극을 유지하지만,

시일링의 내경부와 외경부 사이의 불균일한 온도 분포에 의한 열적 뒤틀림이 발생한다. 이 그림에서 제시하는 것과 같이 밀봉간극이 시일링의 내경쪽에서 변형량이 크게 발생되고, 외경쪽에서는 상대적으로 작게 나타나기 때문에 시일링은 뒤틀리는 코닝 현상이 발생하게 된다.



(a) K-type groove gas seal



(b) T-type groove gas seal

Fig. 5 Temperature distributions on the rubbing surfaces of a gas seal

시일평면의 내경쪽에서 발생된 K-그루브 가스시일과 T-그루브 가스시일의 축방향 열변형 거동량은 각각 $2.08\mu\text{m}$, $2.024\mu\text{m}$ 이고, 외경부에서 발생한 열변형 거동량은 K-그루브 시일과 T-그루브 시일이 각각 $1.21\mu\text{m}$, $1.22\mu\text{m}$ 이다. 이와 같이 시일 평면의 내경측은 외경측에 비하여 각각 1.72배, 1.66배로 커다란 열변형 거동을 나타낸다. 이것은 시일 평면의 외경부에 있는 그루브에서는 유입된 공기에 의해 원만하게 방열되지만, 내경쪽에서는 시일댐에 의하여 공기의 흐름이 차단되기 때문에 방열에 의한 냉각작용을 기대하기가 어렵기 때문이다.

T-그루브 가스시일은 K-그루브 형상보다는 시일의 평면에서 발생된 열팽창 정도가 내경측과 외경측의 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 T-그루브 가스시일이 K-그루브 형상보다는 중앙부로 갈수록 단면형상이 균일하게 설계되었기 때문이다.

Fig. 7에서 표시한 각도 θ 는 시일링과 시일시트 사이의 비틀림 변형에 따른 각도를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시일의 회전축 속도에 비례하여 각도가 증가하는데, 회전 속도 4000rpm 이하의 낮은 회전 속도에서는 K-그루브 형상의 가스시일과 T-그루브 가스시일의 평면에서 발생한 각도가 0.111° , 0.115° 로 차이가 거의 없으나 회전 속도가 6000rpm 이상으로 증가할 경우는 그 차이가 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 T-그루브 가스시일은 K-그루브 가스시일에 비해 각도가 작게 나타난다는 것은 평면에서의 열변형이 균일하게 발생한다는 것을 의미한다. 이처럼 시

일의 표면이 열변형에 의해 밀봉간극이 불균일해지면 누설은 증가하게 된다. 누설은 일정한 압력하에서 시일의 회전 속도와 열변형에 의해 영향을 가장 크게 받는데, 속도는 거의 비례 관계를 나타낸다. 열변형이 발생하면 밀봉간극과 평면에서의 각도가 증가하고, 밀봉댐의 반경 길이가 짧아지게 되어 누설이 증가하게 된다.

Fig. 8은 시일의 회전 속도 변화에 따른 시일의 평면에서 발생한 축방향의 변위량을 보여준 그림이다. 회전 속도가 증가할수록 시일의 축방향 변위량은 선형적으로 증가하고, 외경쪽 평면의 증가폭이 내경쪽 표면의 증가폭에 비해 더욱 크다.

회전 속도가 4000rpm일 경우 K-그루브 가스시일의 변위량은 외경쪽 평면과 내경쪽 평면에서 각각 $2.08\mu\text{m}$, $1.206\mu\text{m}$ 로 제시되고, T-그루브 시일의 변위량은 외경쪽 평면과 내경쪽 평면에서 각각 $2.024\mu\text{m}$, $1.219\mu\text{m}$ 로서 외경쪽 평면은 K-그루브 가스시일의 변위량이 더 크고, 내경쪽 표면은 T-그루브 시일의 표면이 더 크다. 또한, 가스시일의 내경쪽 평면에서 발생하는 축방향 변형량은 간극을 줄이는 역할을 하고, 외경쪽 평면에서 발생하는 축방향 변형량은 밀봉간극을 넓히는 역할을 하기 때문에 회전 속도가 증가할수록 두 평면 사이의 비틀림 각도는 증가한다. 이와 같은 해석결과는 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 시일링과 시일시트 평면 사이의 비틀림 각도가 T-그루브 형상의 가스시일보다 더 작게 나타난다.

Fig. 9는 가스시일의 평면에서 발생한 열변형 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 X

축은 가스시일 평면의 원주방향 길이를 나타내고, Y축은 반경방향을 나타내며, Z축은 축방향의 변위량을 각각 나타낸다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 평면의 형상을 마이크로 스케일에서 보면 대단히 불균일함을 알 수 있다.

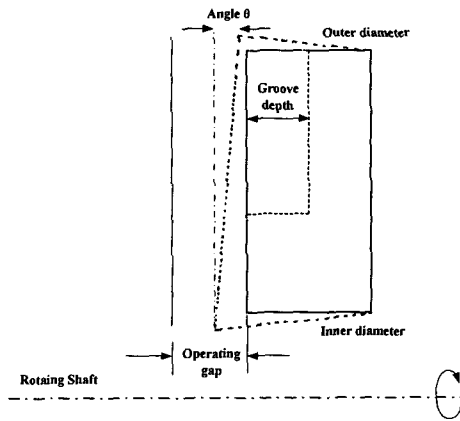


Fig. 6 Thermal deformation on the rubbing surface of a gas seal

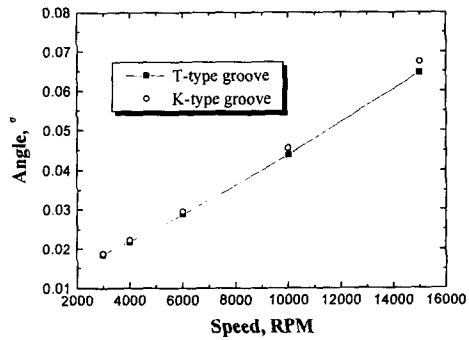


Fig. 7 Angle of the rubbing surface due to thermal deformation with two groove models, T-groove and K-groove as a function of rotating speed

즉, 이 그림에서 검게 보이는 부분이 그루브가 있는 곳으로서 공기에 의해 열이 제거되므로 특히 평면의 외경부에서 열변형이 작게 일어난다. T-그루브 형상의 가스시일 표면이 K-그루브 형상의 가스시일 표면에 비해 평면이 보다 더 균일함을 알 수 있다.

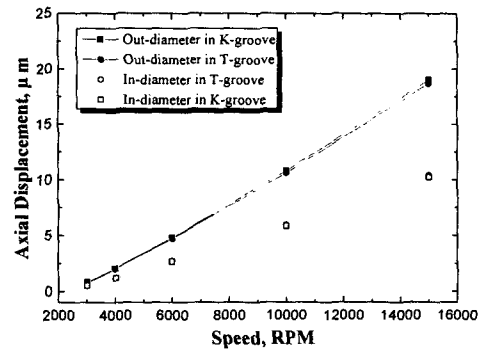
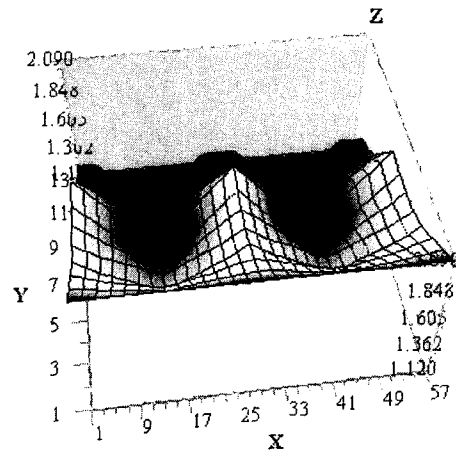
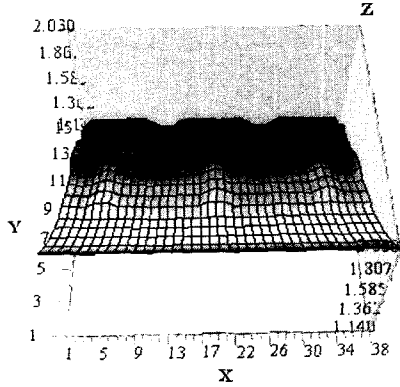


Fig. 8 Axial displacements of a gas seal with two groove models, T-groove and K-groove as a function of rotating speed



(a) K-type groove gas seal



(b) T-type groove gas seal

Fig. 9 Displacement distributions on the rubbing surface of a gas seal

3-3. 응력 해석

Fig. 10은 회전 속도의 변화에 따라 시일의 미끄럼 마찰면에서 발생한 von-Mises 응력을 보여주고 있다. 축의 속도가 증가에 따라 거의 선형적으로 응력이 증가하고 있는데, 응력의 증가폭은 4000rpm 정도의 저속에서는 K-그루브 시일과 T-그루브 시일이 거의 유사하지만 속도가 증가할수록 약간씩 벌어진다. 회전 속도 4000rpm에서 가스시일의 평면에서 발생한 응력은 K-그루브 시일과 T-그루브 시일에서 각각 52.13MPa, 48.32 MPa로서 K-그루브 형상의 가스시일이 약간 높다. 그러나 이러한 결과는 SiC의 인장 강도, 압축 강도, 탄성 계수가 각각 276MPa, 1030 MPa, 380GPa임을 고려한다면 시일의 마찰면에서 발생된 응력은 시일의 안정적인 구동에 문제가 없다고 할 수 있다.

시일의 회전수를 12000rpm의 초고속으로 운전할 경우는 시일의 평면이 주로 인장력을

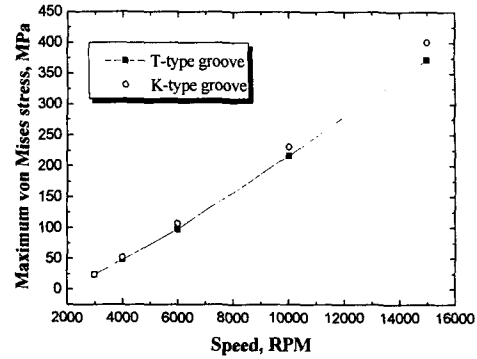
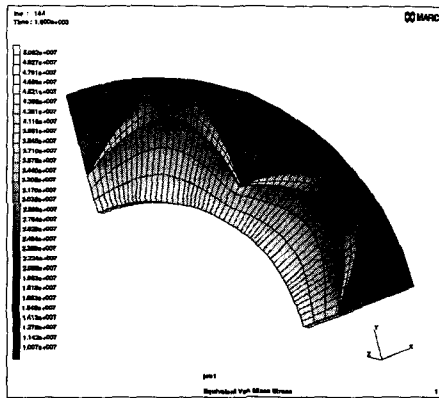


Fig. 10 Maximum von Mises stresses of a gas seal with two groove models, T-groove and K-groove as a function of rotating speed

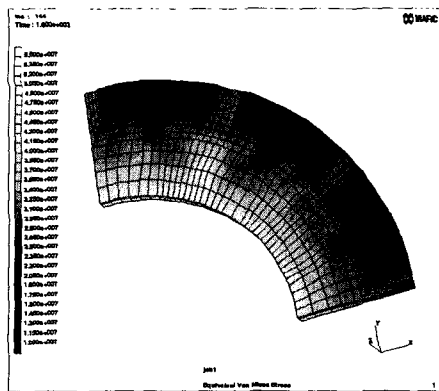
받는다라는 사실을 고려한다면 K-그루브 시일과 T-그루브 시일의 마찰표면에서 발생한 응력이 인장 강도 276MPa보다 높게 발생하기 때문에 위험할 수도 있다. 그러나 실제의 가스시일에서는 이렇게 높은 속도에서 운전되지는 않는다.

Fig. 11(a)와 11(b)는 시일의 마찰면에서 발생된 von-Mises 응력 분포를 나타낸 그림으로서 시일링의 내경쪽 평면에서 발생한 응력이 외경쪽 평면보다 응력이 높다는 것을 알 수 있다. 균일한 형상을 하고 있는 T-그루브 형상의 가스시일은 응력이 집중되는 현상이 없지만, K-그루브 가스시일은 그루브의 형상이 끝단으로 갈수록 급격하게 좁아져서 응력이 집중되는 경향이 발생하고 있다. 비록 응력이 온도에 가장 큰 영향을 받고는 있지만 온도 해석에서 설명한 바와 같이 시일의 표면에서 발생된 전체 온도차가 2°C 이내로 매우 작아서 온도의 영향보다는 시일 표면의 변형에 더 큰 영향을 받는다고 할 수

있다. 이와 같은 사실은 Fig. 12(a)와 12(b)에서 보여주는 바와 같이 탄성 변형률의 분포가 응력의 분포와 거의 유사하기 때문이다. 따라서 그루브 안에서 발생한 응력은 상대적으로 낮은 온도에도 불구하고 온도차이가 거의 나지 않기 때문에 변형에 영향을 더 크게 받아서 주변보다 높은 응력이 발생하고 있다.

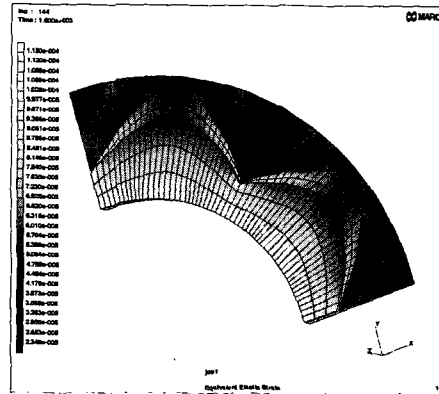


(a) K-type groove gas seal

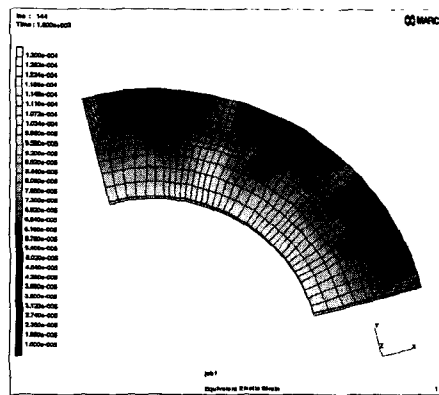


(b) T-type groove gas seal

Fig. 11 Von Mises stress distributions on the rubbing surface of a gas seal



(a) K-type groove gas seal



(b) T-type groove gas seal

Fig. 12 Elastic strains distributions on the rubbing surface of a gas seal

4. 결론

본 논문에서는 가스시일의 회전 속도 변화에 따라 발생한 온도, 변형량, 응력 등을 대표적인 두가지 그루브의 형상에 대해 비교·분하였다. 회전 속도가 증가함에 따라서 온도, 변형량, 응력값은 완만하게 증가하였는

데, K-그루브 형상의 가스시일에 대한 증가 폭이 T-그루브 가스시일에 비하여 크게 나타났다. 가스시일의 평면은 불균일한 온도 분포와 압력 분포 등에 의하여 시일은 불안 전해지고, 중국에는 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극 내경쪽 평면에서는 좁아지고 외경쪽 평면에서는 상대적으로 덜 좁아지는 코닝 현상이 발생되면서 밀봉된 유체의 누설량은 증가하고, 두 표면은 결국 직접적인 접촉이 발생하면서 마멸의 진행이라는 최악의 상태로 발전하게 된다.

그러나 4000rpm과 같은 속도에서는 초기의 밀봉간극이 $3\mu\text{m}$ 정도임을 고려한다면 직접적인 접촉은 발생하지 않으나, 10000rpm 이상의 초고속에서는 축방향의 열변형 거동량이 증가하면서 시일링과 시일시트는 직접적인 접촉을 발생하면서 마멸과 열크랙 등에 의한 손상이 진행된다.

본 연구에서 시도된 열변형 거동 측면에서만 보면 T-그루브 형상과 같이 시일 평면에 균일한 형상을 갖는 그루브를 중앙에 설치하면 열변형 거동 측면에서는 대단히 유리함을 알 수 있다.

그러나 가스시일에서는 유체동압 발생에 의한 밀봉 강성도 확보에 의한 누설방지가 대단히 중요하므로 K-그루브 형상과 같은 가스시일도 중요하기 때문에 이들 두가지 특성을 혼합한 가스시일 설계가 필요하다.

참고 문헌

- [1] MARC Analysis Research Corporation, 1994, Computer Program MARC, California, USA.
- [2] Ralph P. Gabriel, "Fundamentals of Spiral Groove Noncontacting Face Seals," ASLE Lubrication Engineering, Vol. 35, 7, pp. 367~375, 1980.
- [3] "Fundamentals of Gas Seal Technology," Burgmann, pp. 11~25.
- [4] Alan O. Lebeck, "Principles and Design of Mechanical Face Seals," A Wiley-Interscience Publication, pp. 81, 1991.
- [5] DR. Karl, E. Berroth, "Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Applications," Journal of the STLE, pp. 770~773, 1990.