

기계평면시일의 열응력 크랙에 관한 실험적 연구

김 청 균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Experimental Investigation of Thermal Stress Cracks in Mechanical Face Seals

Chung-Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract—One of the greatest dangers in mechanical face seals is the formation of heat checking and thermal stress cracks on the sliding surfaces. These thermal distortions due to non-uniform heating lead to increase the leakage of the sealed fluids and wear, and with balance of the seal can cause the seal faces to part. In this study heat checking and thermal stress cracks are investigated experimentally. These thermal distortions are explained using the thermal models of the contact geometries between the seal ring and the seal seat. To overcome these thermal problems, the thermohydrodynamic seal is presented. The newly developed mechanical seal may substantially reduce the friction torque, frictional heating which causes heat checking and thermal stress cracks, and wear.

Key words—Mechanical Face Seal, Thermal Stress Crack, Seal Ring, Seal Seat, Hot Spot, Asperity.

1. 서 론

기계평면시일(Mechanical face seals)은 회전운동을 하면서 밀봉된 유체(액체나 가스 등)의 누설을 방지하기 위하여 회전축 기계 시스템에 설치한다. 기계평면시일은 자동차의 물펌프로부터 고속용 가스 터빈에 이르기까지 광범위하게 사용되는 회전축계의 핵심부품으로 미끄럼 마찰 접촉운동을 하면서 유체의 이동을 차단해주는 역할을 한다.

펌프의 사용조건이 가혹하지 않았던 초창기에 기계평면시일에서 발생하는 누설문제는 시일 소재를 적절히 선정한다든지 또는 시일의 상대 접촉 운동면을 초정밀 가공하여 해결하려고 노력하였다. 그러나 최근에 원자력 발전소나 고속 가스 터빈에서 사용되는 기계평면시일은 작동조건이 보다 가혹해졌기 때문에 기존의 설계방법으로는 시일 시스템의 신뢰도를 보장할 수가 없다. 그래서 이와 같은 누설 문제를 해결하기

위하여 시일 시스템에 보조장치를 설치하여 누설된 유체를 밀봉 장치내로 다시 되돌려주는 순환 방식으로 해결하거나 또는 마찰열 발생이나 마멸원인을 미시적으로 해석함으로써 시일의 성능향상과 수명을 연장시킬 수 있는 새로운 밀봉 설계기술을 개발하고 있다. 즉, 최근의 기계평면시일 설계에서는 회전속도, 밀봉압력, 수명 등의 대폭적인 증가를 요구하고 있기 때문에 시일 시스템 설계는 나날이 복잡해지고 가격도 크게 상승하는 추세에 있다.

기본적으로 기계평면시일은 유연하게 지지된 시일링(Flexibly supported seal ring)과 시일시트(Seal seat) 사이에서 미끄럼 마찰운동을 하면서 밀봉작용을 해야 하기 때문에 동적으로 대단히 불안정하다. 시일의 밀봉성능 특성에 영향을 줄 수 있는 주요인으로는 밀봉된 유체의 압력, 축방향의 스프링 가압력, 회전속도, 회전축의 경사각도, 마찰 접촉면의 가공 정밀도 등이 있는데, 이들에 의한 변위량은 마이크로 단위(Micro-

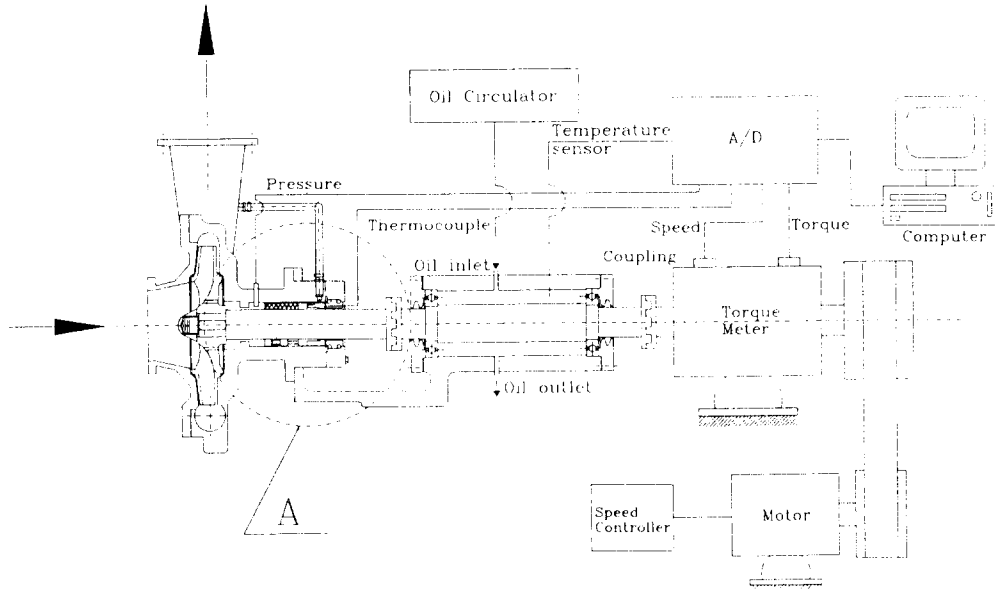


Fig. 1. Schematic of the seal test stand with associated measuring equipment.

scale)로 미세하기 때문에 실험상 어려움이 있다. 또한 시일 시스템은 시일링과 시일시트가 서로 건조 미끄럼 마찰상태를 유지하면서 밀봉작용을 하기 때문에 이들의 접촉면에서 발생하는 면압, 접촉면의 기울기 또는 코닝의 정도에 따라서는 마멸(정상 마멸이든 비정상 마멸이든 관계 없음)이 크게 진행되어 시일의 수명은 급속하게 단축된다.

기계평면시일은 밀봉성능 특성상 건조마찰 상태에서 운전해야 하기 때문에 작동중에 기계적 뒤틀림(Mechanical distortions)이나 열적 뒤틀림(Thermal distortions)이 발생하면 밀봉간극(Sealing gap)의 접촉면 형상이 변형되어 밀봉성능이 크게 떨어지게 된다[1-3]. 특히 시일의 회전속도나 접촉압력이 증가하면서 미시적 측면에서 보면 발생된 마찰열에 의한 열탄성 변형 거동문제는 대단히 중요하게 되었다[4-11]. 건조마찰 상태에서 운전해야 하는 기계평면시일이 안정성을 확보하기 위해서는 제한된 사용조건 또는 설치조건 등을 적절히 규제해야만 된다는 사실을 알게 되었다. 즉, 회전속도나 접촉면압을 증가시켜야 하는 경우는 마찰면의 정밀가공, 설치면의 진척도 유지, 냉각수(Cooling fluids) 사용 이외에도 건조마찰을 유체마찰로 전환시키는 것이 유리하다는 사실을 알게 되었지만, 혼합마찰이나 유체마찰 조건은 누설이라는 측면

에서 또다른 문제점을 제기하기 때문에 아직도 많은 연구과제로 남아 있다.

그래서 본 연구에서는 기계평면시일에 대한 각종 성능특성을 실험적으로 획득하여 해석이나 설계시 필요한 데이터를 구축하고, 미끄럼 마찰면의 작동조건 가혹화에 따른 열체킹 현상과 열응력 크랙문제를 실험적으로 규명하고, 열변형 모델을 체계화시켜서 이들을 고찰하고, 열변형 문제를 제거할 수 있는 새로운 기계평면시일을 설계하고자 한다.

2. 실험장치

기계평면시일의 미끄럼 마찰면에서 발생하는 열응력 크랙문제를 고찰하기 위하여 상용의 물펌프를 개조하여 시일성능 종합평가 장치를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 시일의 회전축은 AC 모터와 타이밍 벨트에 의하여 1,500 rpm~6,000 rpm으로 변속할 수 있도록 제작하였고, 시일시트를 축방향으로 이동시킬 수 있도록 나사를 시일커버에 설치하여 시일링과 시일시트 사이의 접촉면압을 조절할 수 있도록 하였으며, 다양한 크기의 기계평면시일에 대하여 실험할 수 있도록 회전축과 시일 하우징 사이의 공간을 크게 설계하였다. 또한 회전축을 지지해야 하는 베어링의 작동조건(마찰 토오

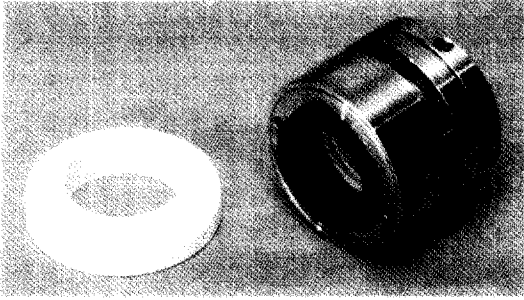


Fig. 2. Typical mechanical face seal.

Table 1. Data of mechanical face seals for water pumping service

Parameters	Values
· Shaft speed, rpm	1,750
· Initial stuffing box pressure, kg/cm ²	3
· Initial water temperature, °C	25
· Viscosity, cp	0.7
· Face outer diameter, mm	49
· Face inner diameter, mm	35.5

크, 베어링 온도, 간극 허용 오차 등)이 시일성능에 미칠 수 있는 영향을 극소화하기 위하여 윤활유 공급은 오일배스식과 오일 순환방식으로 채택함으로써 볼베어링의 작동조건을 균일하게 유지하도록 하였다.

Fig. 1의 실험장치에서는 주시일링부의 밀봉유체 압력을 측정하기 위한 압력센서, 미끄럼 마찰면의 온도를 측정하기 위하여 시일시트에 설치한 열전대, 시일의 밀봉간극으로부터 누설되는 양을 측정하기 위한 유량기구, 기계평면시일의 마찰 토크를 측정하기 위한 토크 센서를 설치하였고, 이들로부터 제공되는 전기적 신호는 A/D 변환기를 거쳐서 컴퓨터에 저장하였다. 기계평면시일 시험편은 점선원 A안에 있고, 다양한 시험편을 용이하게 교체할 수 있도록 회전축 슬리브와 글랜드 나사식으로 설계하였다.

3. 시험편 및 실험조건

기계평면시일의 열응력 크랙문제를 고찰하기 위한 시일의 형상과 사용조건은 Fig. 2와 Table 1에서 각각 주어진다. 제시된 기계평면시일 시험편은 석유화학공장에서 널리 사용하고 있는 것을 선정하였으며 기존의 원심펌프에 장착하여 실험하였다.

시험편으로 사용된 소재를 보면 시일링은 카본, 시

Table 2. Experimental results of mechanical face seal

Running time, hr	Water pressure, kg/cm ²	Water temperature, °C	Leakage
0.5	5	100	NO
1	7	125	NO
1.5	7.5	140	NO
2	8	155	NO
2.5	9	160	NO
3	11	165	NO
4	13	170	YES

일시트는 알루미늄으로 선정하였고, 미끄럼 접촉면의 가압력은 복수 스프링계(Multi-spring system)에 의하여 축방향 하중이 가해졌으며, 마찰면의 가공 정밀도는 0.05 μm CLA (표면 조도계 : Kosaga AE 3400)으로 유지하도록 하였다. 밀봉간극의 미끄럼 마찰면에서 발생하는 마찰온도를 정확하게 측정하기 위하여 열전대를 정지한 시일시트 내부에 구멍을 가공하여 삽입하였다.

펌프가 고속이나 고하중으로 운전하게 되면 미끄럼 마찰면의 접촉운동 불안정성에 의하여 열변형 크랙문제가 발생되는데, 이것을 고찰하기 위하여 주시일면에서의 접촉은 건조마찰(Dry friction) 상태를 유지하였고, 회전속 속도는 1,750 rpm에서 실험을 수행하였으며, 주시일링(Primary sealing)의 미끄럼 마찰면에 가해지는 면압력의 크기는 시일커버에 설치된 나사장치를 사용하여 가압력을 기계적으로 미세하게 조절하였다.

4. 연구결과 및 고찰

고양정과 고신뢰도를 추구하는 펌프 개발시 기계평면시일은 미끄럼 건조마찰 접촉을 해야하는 특성상 밀봉유체의 고압력, 고온도, 장수명 등에 견딜 수 있는 안정된 기계평면시일을 개발한다는 것은 어려운 문제이다.

Fig. 2의 실험장치에 기계평면시일을 장착하고 회전축을 1,750 rpm으로 운전하는 동안 시간에 따른 밀봉유체의 압력, 온도를 측정하면서 누설여부를 관찰하였으며, 이들의 실험결과를 요약하면 Table 2와 같다.

실험에 사용된 시일의 상대 접촉운동이 건조마찰 상태에서 진행되었기 때문에 펌프내의 수온이 증가하

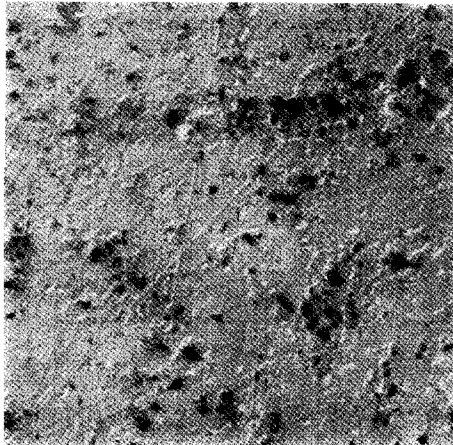
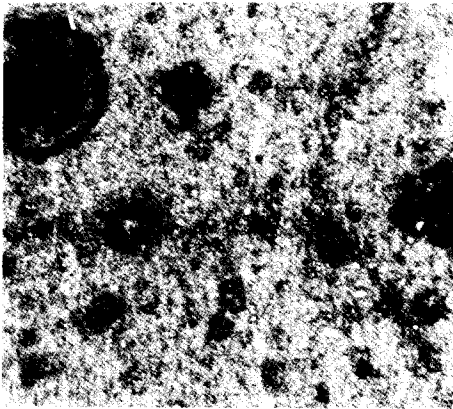
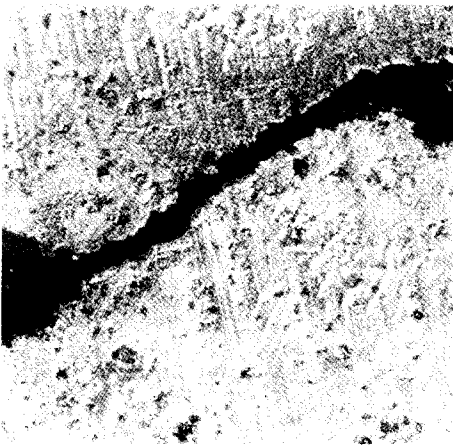
(a) Initial rubbing surface($\times 200$)(b) Heat checking($\times 100$)(c) Thermal stress crack($\times 100$)

Fig. 3. Rubbing surfaces and frictionally excited thermal distortions.

면서 미끄럼 마찰열에 의한 시일 손상이 예상보다 빨리 진행되었다. 실험 초기에는 누설량이 작기 때문에 마찰열에 의하여 증발되는 것을 관찰할 수 있었으나 주변의 수온이나 밀봉유체의 압력이 증가하여 누설이 급격히 증가하면 펌프 구동을 정지시켜서 시일 마찰면의 손상여부와 고장 원인을 열체킹이나 열응력 크랙문제와 연계하여 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 3(a)는 실험하기 전의 알루미늄 소재 시일 가공면을 보여주는 것으로 가공면의 표면 거칠기는 $0.05 \mu\text{m CLA}$ 로 비교적 균일하나 Fig. 3(b)와 3(c)에서 진행된 마멸은 $0.6 \mu\text{m CLA}$ 로 10배 이상 거칠어 졌다.

밀봉기능을 담당해야 하는 시일링과 시일시트 사이의 미끄럼 마찰면에서는 접촉상태나 작동조건 등에 따라서 마찰열을 발생하게 된다. 밀봉간극에서 발생하는 마찰열은 회전축 속도, 주시일링부의 축방향 가압력, 미끄럼 마찰조건, 밀봉유체와 시일소재의 온도, 회전축과 상대접촉 운동면과의 직각도 등에 의하여 결정된다. 이 때에 발생한 마찰열 중에서 균일한 마찰열은 스프링의 가압력을 균일하게 변화시켜 시일링과 시일시트 사이의 마찰접촉 조건을 변화시키고, 비균일 마찰열은 국부적으로 시일표면에 집중되면서 정점(Asperity)에서는 적열점(Hot spots) 현상을 일으키고, 정점사이에 있는 골(Valley) 부분에서는 Fig. 3(b)와 같은 열체킹(Heat checking) 현상이 미시적으로 발생되었다가 궁극적으로는 가공면의 요철부분에서 순간적으로 열충격(Thermal shock)이 발생하면서 열응력 파괴(Thermal stress crack)로 진행하게 된다. 여기서 미세크랙이 진행된 주변에는 국부적으로 마찰열에 의한 마멸이 크게 진행되고 있음을 보여준다. 즉, 시일의 마찰표면에서는 마찰열이 정점에서 발생되어 비균일하게 국부적으로 축적되면서 열탄성 불안정성(Thermoelastic instability)이 증가되고, 그 결과로 정점에서는 적열점 현상이 발생되며, 골에서는 마찰접촉이 직접 일어나지 않으므로 이들 사이의 온도차가 순간적으로 증가되면서 열충격 현상이 발생되어 궁극적으로는 Fig. 3(c)에서 보여주는 것과 같이 열변형 파괴로 발전하여 시일 시스템이 붕괴되면서 펌프 기능이 순식간에 정지하게 된다.

앞에서 보여준 Fig. 3의 마찰 열변형에 의한 크랙문제는 Fig. 4에서 제시한 열응력 파괴 모델로 설명될 수 있다. 즉, 기계평면시일의 미끄럼 건조마찰면은 Fig. 4(a)에서 제시하는 것처럼 하중을 받는 상태에서

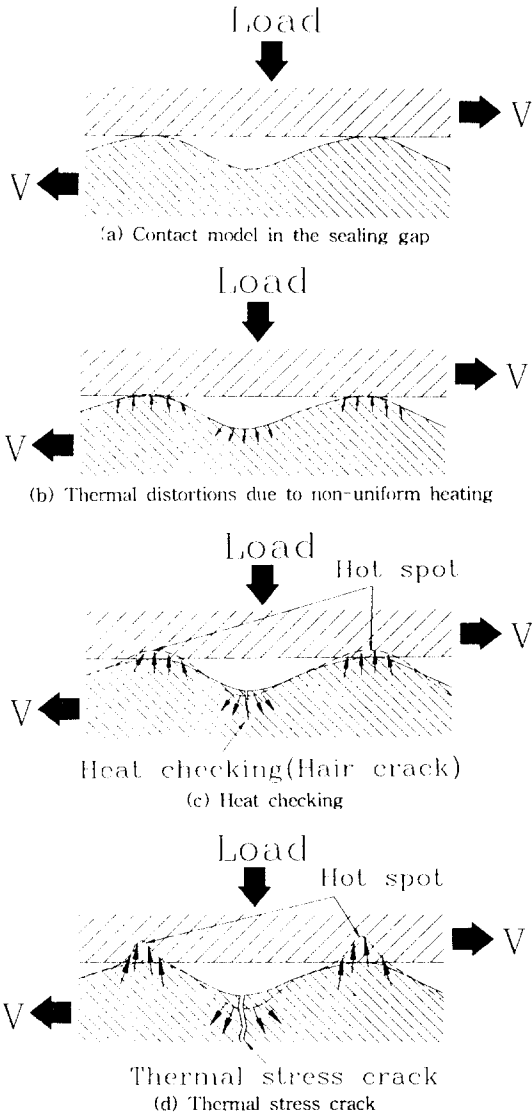


Fig. 4. Models for thermal stress crack development.

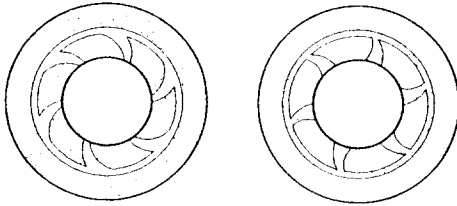
상대 접촉운동을 한다. 이 때 시일링면은 완벽한 평면이고, 시트소재는 열전도도가 불량하고 가공 접촉면은 일정한 파형 거칠기(Waviness roughness)를 갖는다고 가정한다. 밀봉간극이 작동조건에 따라서 접촉하중과 속도가 증가하는 경우 정점에서는 미끄럼 마찰운동에 의하여 발생된 마찰열이 소재내로 소산하지 않고 국소 면적에서 열축적 현상이 진행되어 열팽창이 진행되다가 급기야는 Fig. 4(b) 모델에서 제시하는 것처럼 적열현상으로 발전하게 된다. 반면에 두개의

정점사이에 있는 골부분에서는 고체간의 직접 접촉운동을 하지 않으므로 정점으로부터 이동된 열을 소재내로 전도시키게 된다. 그 결과 정점부에서는 마찰열에 의한 돌출이 발생하면서 열응력을 증대시키고, 골부에서는 열소산에 따라서 상대적으로 수축하면서 발생된 열응력 차이가 상대적으로 커지면서 열체킹 현상이 Fig. 4(c)와 같이 발생하게 된다. 시일 접촉면의 정도는 높으나 열충격(Thermal shock)에 약한 소재가 고하중과 고속회전 상태에서 건조마찰을 하게 되면 열체킹 현상이 진행되다가 순간적으로 Fig. 4(d)와 같은 열응력 파괴가 일어나게 된다.

열체킹이나 열응력 파괴문제는 미끄럼 마찰면에서 발생하는 비균일 마찰열이 원인이므로 이것을 억제하기 위한 대책이 필요하게 된다. 즉, 시일소재는 열전도도가 높거나 또는 유효성능이 우수한 소재를 선정해야 하고, 발생된 마찰열을 신속하게 소산시키기 위해서 냉각수를 순환시키든지 또는 고체간 마찰을 혼합이나 유체마찰 상태로 바꾸어 정점에서의 열축적 현상을 배제해야 한다. 그러나 시일시트 소재로 널리 사용되는 알루미늄과 같은 세라믹은 단열재처럼 열전도율이 나쁘기 때문에 접촉표면에서의 열축적 현상이 심하고, 특히 시일시트와 같이 정지된 곳에 사용되는 경우는 더욱이 열변형 문제가 발생할 위험성이 크다 [12,13].

본 연구에서는 열체킹이나 열응력 크랙문제를 해결하기 위하여 건조마찰을 혼합마찰이나 유체마찰 접촉상태로 전환시킬 수 있는 새로운 설계를 제시하였다. 새로이 개발된 기계평면시일은 미끄럼 마찰 토오크를 크게 줄이고, 또한 밀봉계면에 공급된 미량의 밀봉유체에 의하여 시일 접촉면은 약간이나마 유효와 냉각을 할 수 있게 함으로써 시일의 열체킹이나 열응력 크랙문제를 해결하게 되어 시일의 신뢰도와 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

이러한 점을 고려하여 시일의 미끄럼 마찰면에 미세한 나선형의 홈을 제작하여 새로이 개발된 Fig. 5와 같은 열유체식 기계평면시일(Thermohydrodynamic mechanical face seal)을 특허 출원하였고, 이것에 관련된 기계평면시일의 성능 및 열변형 특성에 관련된 데이터는 추후에 발표할 예정이다. 여기서 모델 I은 고속으로 회전하는 시일 마찰면의 냉각상태를 원활하도록 설계하였고, 모델 II는 중저속으로 회전하는 시일의 밀봉성능을 우선하는 경우에 마찰면의 냉각이 양호하



(a) Model I : diverging groove (b) Model II : converging groove

Fig. 5. Thermohydrodynamic mechanical face seal.

도록 설계하였다.

5. 결 론

고양정 펌프용 기계평면시일에 접촉면압을 증가시킨 상태에서 고속회전을 하게 되면 비균일 마찰열에 의한 열체킹 현상과 열응력 크랙 문제가 발생하는 것을 실험적으로 제시하였고, 또한 이와 같은 열손상 문제를 열변형 모델로 제시하여 고찰하였다.

열응력 파괴문제를 해결하기 위한 방안으로 밀봉된 유체의 압력변동에 따라서 유체가 자동적으로 미끄럼 마찰면에 유입될 수 있도록 경도가 높은 시일시트 접촉면에 나선모양의 미세한 홈을 제작하여 밀봉간극의 접촉조건을 건조마찰에서 경계마찰이나 혼합윤활 마찰상태로 바꿈으로써 마찰 토오크와 시일표면의 마멸을 감소시키고, 마찰열 발생을 크게 낮춰줌으로써 열체킹이나 열응력 크랙 문제를 제거할 수 있는 새로운 기계평면시일을 제시하였다.

후 기

본 연구는 (주)한스의 기계평면시일 시험편 지원에 의하여 연구가 진행되었으며, 이에 관계자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Nau, B. S. and Turnbull, D. E., "Some Effects of Elastic Deformation on the Characteristics of Balanced Radial-Face Seals," 1st Int. Conf. on Fluid Sealing,

BHRA, Paper D3, 1961.

2. Metcalfe, R., "End-Face Seal Deflection Effects-The Problems of Two Components Stationary of Rotating Assemblies," ASLE Trans., Vol. 23, pp.393-400, 1980.
3. Etsion, I. and Constantinescu, I., "Experimental Observation of the Dynamic Behavior of Noncontacting Coned-Face Mechanical Seals," ASLE Trans., Vol. 27, No. 3, pp.263-270, 1984.
4. Barnerjee, B. and Burton, R. A., "An Instability for Parallel Sliding of Solid Surfaces Separated by a Viscous Liquid Film," J. of Lub. Tech., Vol. 98, pp. 157-162, 1976.
5. Li, C., "Thermal Deformation in Mechanical Face Seals," ASLE Trans., Vol. 19, pp.146-152, 1976.
6. Barnerjee, B. and Burton, R. A., "Experimental Studies on Thermoelastic Effects in Hydrodynamically Lubricated Face Seals," J. of Lub. Tech., Vol. 101, pp.257-282, 1979.
7. Yih-Tsuen Wu and Burton, R. A., "Thermoelastic and Dynamic Phenomena in Seals," J. of Lub. Tech., Vol. 103, pp.253-260, 1981.
8. Snapp, R. B. and Sasdelli, K. R., "An Experimental and Theoretical Study of Pressure and Thermal Distortions in a Mechanical Face Seal," ASLE Trans., Vol. 29, pp.151-159, 1986.
9. Chung Kyun Kim, "The Effects of Thermoelastic and Wear on the Leakage of Compressible Gases in Shaft Seals," KSME J., Vol. 2, No. 2, pp.133-139, 1988.
10. Netzel, J. P. and Parmar, A., "Using Advanced Computer Tools to Optimize Seal Performance for Liquid Lubricated Services," Lub. Eng., pp.240-243, March 1995.
11. Ruiz Ayala, J. R., Lee, K. J., Rahman, M., and Barbar, J. R., "Effect of Intermittent Contact on the Stability of Thermoelastic Sliding Contact," J. of Tribology, Vol. 118, pp. 102-108, 1996.
12. Georgopoulos, E., "Thermal Convection Effects in a Thin Viscous Film," Wear, Vol. 59, pp.110-120, 1980.
13. Chung Kyun Kim, "Analysis of Wave Velocity for Temperature Propagation in a Mechanical Face Seal," J. of KSLE, Vol. 3, No. 2, pp.64-67, 1987.