

기계평면시일의 마찰열 변형거동에 관한 수치적 연구

함정윤 · 김청균

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Numerical Study of Thermal Deformations Due to Frictional Heatings in a Mechanical Face Seal

Jung-Yoon Hahm · Chung Kyun Kim

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract - The thermal deformation of the contact seal components has been analyzed using the finite element method. The temperature distributions, the thermal deformations and contact stresses are solved numerically for the contact surface with wear coning effects. The thermal deformation is always shown to distort the sealing surface along the radius of the seal ring. The results show that the deformations of inner radius side are significant compared with those of outer radius. Thus, the thermal deformation due to thermal heatings may promote the coned face wear or wear related thermal cracks at the contacting face of the seal ring component.

Key Words - Mechanical Face Seal, Thermal Deformation, Wear Coning, FEM, Contact Stress.

1. 서론

압력이 걸린 상태에서 운전해야 하는 열·유체기계인 펌프, 송풍기, 터빈 등에서는 밀봉된 유체의 누설을 방지하거나 또는 외부의 이물질 침입을 차단하기 위하여 접촉식의 기계평면시일(Mechanical Face Seal)을 많이 사용하고 있다. 기계평면시일은 밀봉장치로서의 안정성과 신뢰도 측면에서 대단히 우수하기 때문에 가정용으로부터 원자력 발전설비에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다.

접촉식의 기계평면시일은 Fig. 1에서 보여 주는 것처럼 크게 두곳에서 내부 유체의

외부 누설을 차단한다. 즉, 밀봉된 유체는 스프링에 의하여 지지된 시일링(Seal Ring)과 시일시트(Seal Seat)로 구성된 1차 밀봉부(Primary Sealing)에서 상대 접촉 미끄럼 마찰운동을 하면서 유체의 누설이 방지된다. 또한 2차 밀봉부에서는 상대 접촉속도가 대단히 작기 때문에 일반적으로 O-링이나 패킹을 사용하면 완벽하게 누설을 차단할 수 있다.

기계평면시일은 건조상태에서 미끄럼 마찰운동을 해야 하므로 작동중에 스프링의 유연성이나 회전축의 경사도에 의하여 기계적 뒤틀림이 발생하고, 마찰열에 의한 열

변형 거동의 비균일성으로 인하여 뒤틀리는 문제점을 제기하고 있다. 마찰면에서는 마멸량의 증가로 초기의 평행한 접촉조건이 변하면서 시일의 밀봉성능은 크게 떨어지고, 수명은 단축하게 된다[1-2]. 특히 시일의 회전속도와 접촉면압이 증가하면 접촉면에서의 마찰열에 의한 변형거동이나 크랙 문제가 시일의 누설성능에 가장 큰 영향을 미치게 된다[3-6]. 코닝(Coning) 파라메타[7,8]에 의한 기계적 변형, 그리고 열적변형 문제가 접촉식 시일의 마찰면 손상에 중요한 변수로 작용한다는 사실에 많은 연구를 수행하였으나 미시적 측면에서 마멸에 의한 코닝문제는 다루어진 적이 없다.

시일의 누설 방지를 위한 미끄럼 마찰면에서의 밀봉간극을 $1\mu\text{m}$ 정도로 건조마찰 상태를 유지해야 하기 때문에 시일링과 시일시트면에서는 접촉면압, 접촉면 형상, 소재특성 등에 따라서 마찰열 발생과 마멸이 지속적으로 진행된다. 접촉면에서 발생하는 마찰열에 의한 비균일 열거동 문제는 마찰 표면의 온도분포, 열응력 집중도, 거동패턴의 불안전성으로 발전하면서 궁극적으로는 시일의 수명을 급속하게 단축시키는 결과를 초래하게 된다.

시일의 접촉면 형상은 마멸에 의하여 미세한 코닝을 일으키고, 경계마찰 또는 건조마찰은 접촉식 기계평면시일의 내구성과 누설성능, 마멸이나 마찰손실에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 미시적 관점에서 마찰계면의 형상에 대해 엄밀한 수치적 해석이 필요하다.

본 연구에서는 접촉식 기계평면시일에서 발생하는 마찰열에 의한 온도분포, 접촉 열응력, 변형거동 문제를 유한요소법으로 해

석하고자 한다. 기계평면시일의 마찰면에서는 사용함에 따라서 마멸이 서서히 진행되고, 이에 따른 접촉면에서의 비균일한 접촉 상태는 시일의 변형거동 특성에 많은 영향을 주기 때문에 본 연구에서는 이러한 접촉면의 마멸 문제를 코닝(Wear Coning)의 변수로 유한요소해석에 반영하여 열적특성 문제를 고찰하고자 한다.

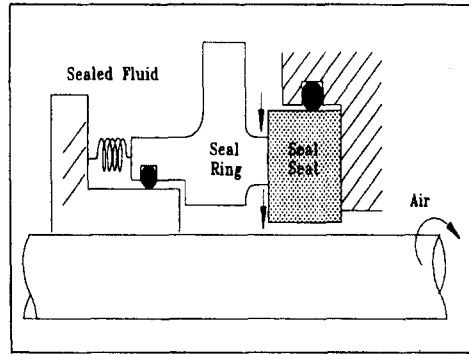


Fig. 1 Typical mechanical face seal.

2. 수치적 해석 조건

기계평면시일의 접촉부에서 발생하는 마멸로 인하여 코닝이 발생하고, 이것으로 마찰면에서는 실제의 접촉형상이 변함에 따라서 시일의 선단부에서 발생하는 마찰온도, 접촉면의 응력 및 접촉거동 특성을 해석하기 위하여 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[9]를 사용하였다.

Fig. 2는 기계평면시일의 접촉거동 특성 문제를 해석하기 위하여 사용한 유한요소 해석 솔리드 모델과 경계조건을 보여주고 있는데, 마찰 접촉면의 시일 접촉부는 미세한 메쉬로 재구성하였고, 시일링에 대해서는 406개의 축대칭 4각형 요소와 452개의 요소 절점, 그리고 시일시트에 대해서는

224개의 축대칭 4각형 요소와 248개의 요소 절점으로 각각 구성하였다.

여기서 실선으로 표시된 곳과 접촉하는 밀봉유체의 온도는 50°C의 물로 2.4517MPa의 압력을 받고 있다. 시일링의 왼쪽면은 스프링에 의하여 지지되고, 시일시트의 오른쪽면은 하우징에 의하여 고정되었다. 또한 실선으로 표시된 시일링 지역에서의 시일링의 상단부는 $h=20.393\text{KW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이고, 시일시트의 상단부는 $h=41.868\text{KW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 인 대류 열전달 계수가 각각 작용하고, 점선으로 표시된 구간에는 단열되었다고 가정한다.

시일링과 시일시트 사이의 접촉문제 해석에서 초기에 접촉되었던 절점이 하중(열하중 포함)을 받게되면 절점에서는 변형이 일어나고, 접촉하고 있던 초기의 절점이 서로 떨어지거나 관통하는 현상이 발생한다. 유한요소해석에서 이들의 절점이 서로 떨어지거나 관통하면 해석할 수 없으므로 변형된 이후의 절점간 거리가 $3\mu\text{m}$ 이내에 있다면 절점이 서로 접촉된 것으로 간주하였다.

기계평면시일에 대한 접촉거동 문제를 해석하고, 시일이 정상상태에 도달하였을 때의 응력분포 해석을 위한 소재로 시일링에는 탄소(Carbon), 시일시트에는 SiC를 사용하였고, 이들에 대한 물성치와 작동조건 및 유한요소해석을 위한 데이터는 Table 1과 Table 2에서 각각 제시하고 있다.

3. 해석결과 및 토의

3-1. 온도분포 해석

시일의 상대 미끄럼 마찰면에서 발생하는 마찰열은 시일의 회전속도, 시일의 직경

과 접촉폭이 클수록, 그리고 밀봉간극이 작을수록 많이 발생한다. 시일링과 시일시트 사이의 마찰간극에 유막이 없는 건조마찰이라고 가정할 경우에 대한 마찰열 Q 는 마찰 토오크로부터 계산된다.

$$Q = \frac{\pi \mu \omega^2}{2hJ} (R_o^4 - R_i^4)$$

여기서 ω 는 회전 각속도, h 는 평균 밀봉간극, J 는 열의 일당량, R_o 와 R_i 는 시일의 외경과 내경을 각각 나타낸다.

기계평면시일의 마찰 접촉면에서 발생한 마찰열의 대부분은 시일링과 시일시트 내부로 전도되어 소산하고, 일부는 밀봉액이 누설하면서 대류에 의한 열전달이 진행된다. 밀봉된 유체의 누설이 많으면 대류에 의한 열소산을 무시할 수 없으나 시일의 역할이 누설차단에 있다는 사실을 고려하면 누설액에 의한 대류보다는 전도에 의한 열소산이 크다.

본 연구에서 해석한 Fig. 2와 같은 모델에 대한 마찰열은 Table 1과 2에서 제시한 시일의 크기와 작동조건을 이용하여 계산하

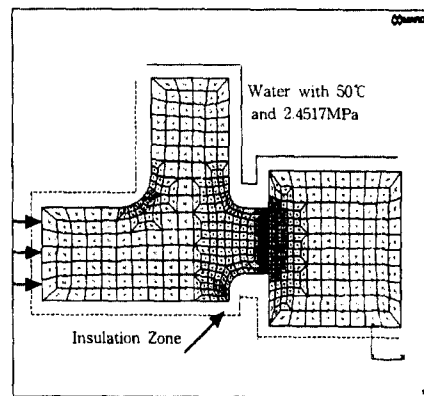


Fig. 2 FEM solid model and boundary conditions of mechanical face seals.

Table 1. Material properties of mechanical face seals.

Seal Materials	Carbon Ring	SiC Seat
Young's modulus, MPa	24,909	353,040
Poisson's ratio	0.2	0.16
Density, kg/m ³	18,000	31,000
Yield stress, MPa	54.917	245.17
Specific heat, J/kgK	6.2802×10 ³	6.6989×10 ³
Thermal conductivity W/mK	3,489	8373.6
Thermal expansion rate	4×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁶

Table 2. Simulation data for a FEM computation.

Seal Materials	Carbon Ring	SiC Seat
Number of nodes	452	248
Number of elements	406	224
Element type	4-node isoparametric quadrilateral for axisymmetric application	
Contact distance tolerance, μm	3	
Spring force, N	62	
Pressure of sealed fluids, MPa	2.4517	
Ambient temperature, °C	25	
Water temperature, °C	50	
Friction coef. at contact zone	0.1	
Mean film thickness, μm	1	
Outer radius, m	0.01219	
Inner radius, m	0.01025	
Angular velocity, rpm	5,000	

면 1701.097J이 된다. 마찰간극에서 발생된 마찰열은 시일링과 시일시트로 전도되는데, 온도분포, 접촉응력 및 열변형 거동상태는 시일의 접촉면 형상에 따라서 달라진다.

시일의 운전에 의하여 점차로 마멸이 발

생하고, 이에 따른 시일링과 시일시트간에 반경방향으로의 간극에서는 실제적인 접촉 폭의 길이가 달라지면서 마찰면에 전도되는 온도패턴 변화를 Fig. 3~Fig. 6에서 보여주고 있다. 여기서 무마멸(No wear)이란 미끄럼 마찰면에서 마멸이 전혀 발생하지 않는 초기의 가공면 그대로인 경우이고, 시간이 경과함에 따라서 시일의 내경(Inner Radius)부로부터 서서히 마멸이 진행되어 시일폭 길이 대비 20%, 40%, 60%가 각각 떨어져 나갔다고 가정할 경우, 이곳에는 세라믹 소재간의 직접 접촉이 아닌 공기와의 대류 열전달 접촉을 의미한다. 이 때에 시일의 내경부에서 발생된 마멸 깊이는 70 μm로 항상 일정하다고 가정하였다.

Fig. 3은 시일링 내경부에서 마멸이 40% 진행된 마찰 접촉부에 대한 온도분포를 보여주는 결과로 마찰접촉이 처음 시작된 내경부의 약간 위쪽에서 최고온도 85°C가 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 온도분포 해석 결과를 시일링쪽 접촉면의 마멸에 의한 코닝 발생, 즉 여러가지 접촉면 형상 변화에 따른 온도분포를 시일의 내경(비율 : 0)으로부터 외경(비율 : 1)으로 가면서 계산한 결과이다. Fig. 4의 결과에 의하면 마멸이 없는 초기의 접촉형상, 즉 마찰면의 접촉폭이 가장 큰 무마멸 코닝 모델의 경우는 시일의 내경부에서 95°C의 가장 높은 온도가 발생하고 외경부로 갈수록 온도가 완만하게 떨어지는 경향을 보여준다. 그러나 마멸이 진행되면서 실제의 마찰 접촉폭은 줄어들고(20% →40% →60%), 온도는 내경부로부터 외경부로 갈수록 급격히 증가하다가 갑자기 떨어지는 현상을 보여주고 있다. 이것은 마멸이 진행될수록

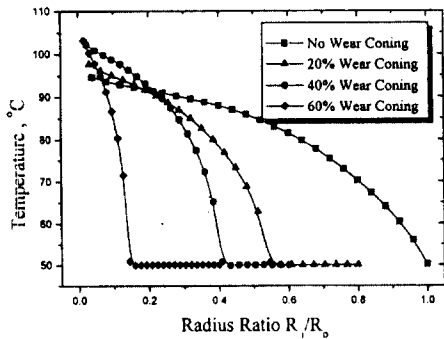


Fig. 6 Temperature profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\ \mu\text{m}$ at the outer radius.

3-2. 접촉응력 해석

Fig. 7~Fig. 10은 마찰 접촉 운동면에서의 접촉응력을 반경방향의 접촉위치에 따라서 유한요소법으로 계산한 결과를 보여주고 있다. Fig. 7은 내경부로부터 40%의 마멸이 진행되어 코닝현상이 발생한 내경부 위치에서 집중응력이 발생되고, 이 지점에서부터 열거동 문제나 열탄성 크랙 등의 문제점이 시작될 수 있다는 사실을 보여주고 있다. Fig. 8은 코닝 마멸이 내경부에서 시작된 경우에 대한 접촉응력을 나타낸 결과로 무마멸인 경우는 내경부로부터 외경부로 갈수록 접촉응력이 균일하게 감소하는 패턴을 보여주나, 20~40%의 마멸코닝이 있는 경우는 내경부로부터 처음 접촉하는 곳에서 5~15배 정도의 높은 집중응력이 국부적으로 발생하고 있기 때문에 또 다른 열응력 마멸이나 열탄성 크랙이 진행될 우려가 크다.

그러나 Fig. 9는 시일의 외경부로부터 마멸코닝이 시작된 경우에 대한 접촉응력을 계산한 결과로 접촉응력은 Fig. 7의 결과보

다도 작으면서 접촉면에서는 비교적 균일한 접촉응력 분포를 보여주고 있다. 이것은 코닝에 의한 국부적인 접촉응력과 시일 선단부의 변형거동이 서로 반대방향으로 상쇄되게 작용하기 때문에 접촉계면에서는 오히려 응력이 완화되는 방향으로 진행되고 있다. Fig. 10은 여러 가지 접촉면의 마멸코닝 효과에 따른 접촉응력을 보여준 결과로 외경부보다는 내경부로 갈수록 높게 나타났지만 균일한 변형거동을 보여주고 있다.

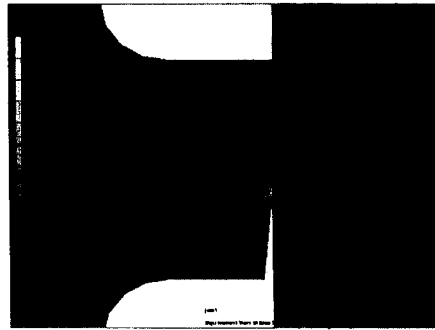


Fig. 7 Contact stress distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the inner radius of the seal with $70\ \mu\text{m}$ initial wear depth.

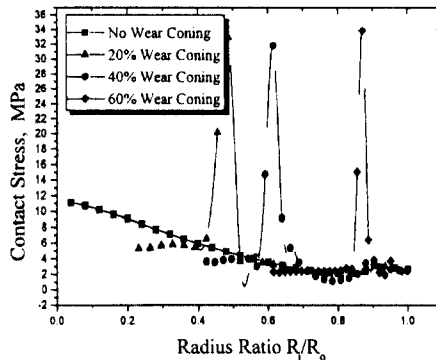


Fig. 8 Contact stress profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\ \mu\text{m}$ at the inner radius.

실제의 접촉면적이 줄어들기 때문에 시일링 하단부의 단열조건을 고려하면 그만큼 밀봉유체의 대류에 의한 냉각효과가 외경부에서 큰 영향을 미친다고 기대할 수 있다. 즉, 마멸이 진행된 내경부 위치에서는 초기의 온도가 전도효과에 의하여 크게 떨어지나 마찰면의 중심부로 갈수록 Figs. 3과 4에서 보여준 것처럼 마찰열에 의한 최고온도가 집중하는 벨형상(Bell Shape)이 나타나고, 이것은 모든 모델 코닝에 대하여 비교적 유사한 경향으로 나타나고 있다.

Fig. 5는 외경부의 마멸이 40% 진행된 마찰 접촉부에 대한 온도분포를 보여주는 결과로 마찰접촉이 처음 시작된 외경부 위치보다는 내경부 하단부에서 최고온도가 발생하고 있는데, 이것은 Fig. 2의 경계조건에서 내경부를 단열시켰기 때문에 나타난 현상임을 알 수 있다. Fig. 6은 접촉면의 마멸 코닝에 의한 여러가지 접촉면 형상 변화에 따른 온도분포를 시일의 내경(비율 : 0)으로부터 외경(비율 : 1)으로 가면서 계산한 결과이다. Fig. 6의 계산결과에 의하면 마찰면의 접촉폭이 가장 큰 무마멸 코닝 모델의 경우는 시일링의 내경부에서 가장 높은 온도가 발생하고 외경부로 갈수록 온도가 완만하게 떨어지는 경향을 보여준다. 그러나 마멸이 외경부로부터 20%, 40%, 60%가 진행되면서 실제의 접촉폭은 줄어들고, 온도는 내경부로부터 외경부로 갈수록 급격히 떨어지고 있다. 마멸 코닝부에서의 접촉면적은 줄어들기 때문에 내경부에서는 경계조건으로부터 오는 단열효과가 크게 작용하고, 또한 외경부로 전도되는 대류효과가 작용하면서 외경부로 갈수록 마찰온도는 대단히 낮게 유지된다.

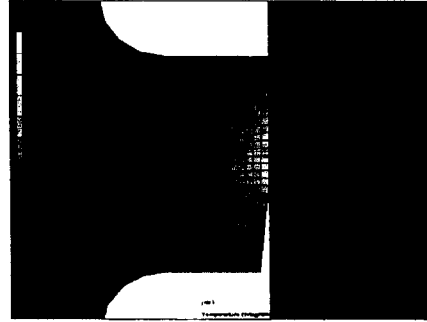


Fig. 3 Temperature distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the inner radius of the seal with $70\mu\text{m}$ initial wear depth.

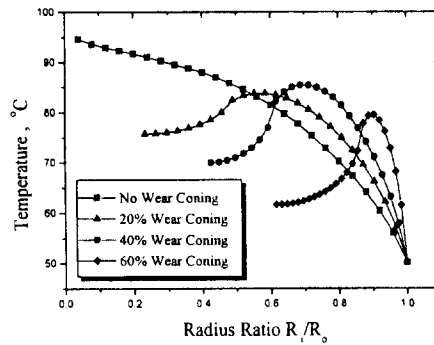


Fig. 4 Temperature profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\mu\text{m}$ at the inner radius.

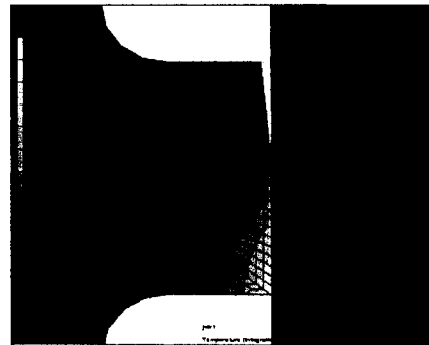


Fig. 5 Temperature distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the outer radius of the seal with $70\mu\text{m}$ initial wear depth.

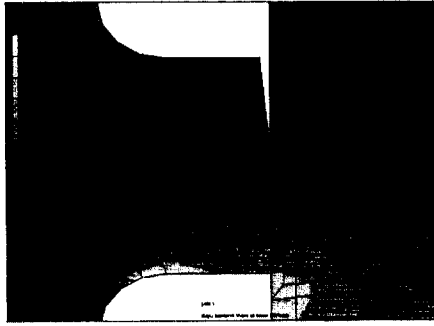


Fig. 9 Contact stress distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the outer radius of the seal with $70\mu\text{m}$ initial wear depth.

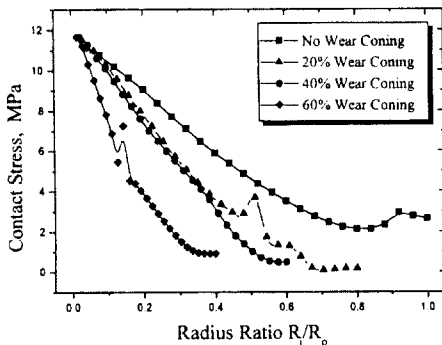


Fig. 10 Contact stress profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\mu\text{m}$ at the outer radius.

3-3. 열변형 거동 해석

접촉식 기계평면시일의 미세유막(Micro-Film), 즉 밀봉간극은 미끄럼 마찰면의 접촉형상에 의하여 직접적인 영향을 받기 때문에 시일 마찰면에서의 접촉형상은 하중 지지력이나 누설 성능에 지배적인 인자로 작용한다.

시일의 마찰면을 제작측면에서 보면 가공조건에 따른 표면의 거칠기나 파형에 의

하여 변형거동을 하게 된다. 미시적인 측면에서 이러한 가공상태나 운전조건에 의한 기계적 변형이나 열변형 문제를 누설해석 측면에서 고려할 수 있겠으나, 본 연구에서는 시일 마찰면의 접촉상태, 즉 마멸에 의한 접촉폭 코닝문제를 미시적 관점에서 열변형 거동에 연계하여 고찰하였다.

초기의 접촉상태는 시일링과 시일시트가 평행하게 전체면적에 대하여 미끄럼 접촉하지만, 시간이 경과함에 따라서 발생된 마멸량 증가(20~60%)는 시일링과 시일시트 사이의 실제 접촉폭을 줄어뜨리게 한다는 사실에 근거하여 시일의 접촉면 거동문제를 해석하였다. 이것은 시일의 마멸코닝에 의한 밀봉간극 변화가 접촉조건에 지대한 영향을 주기 때문에 마찰열, 마멸 및 거동특성에 대한 해석은 중요한 의미를 갖는다.

Fig. 11~Fig. 14는 여러가지 접촉조건에 대한 축방향의 열변형 거동량을 제시한 결과이다. Fig. 11은 40%의 마멸코닝이 내경부로부터 진행된 상태에 대한 시일링의 열변형 거동 패턴을 보여준 결과로 마멸코닝이 진행된 시일의 내경부로부터 반시계 방향으로 뒤틀림 변형이 발생하기 때문에 내경부에서는 초기의 마멸코닝 간극이 줄어들고, 접촉하고 있던 외경부에서는 초기의 밀봉간극이 오히려 벌어지고 있다. 마멸에 의하여 시일링과 시일시트가 처음 접촉하는 부근에서 마찰열이 집중되고, 이것은 시일의 접촉 선단부를 위쪽으로 변형시키기 때문이다. Fig. 12에서 접촉면 길이가 가장 큰 무마멸의 경우는 축방향 변형거동이 거의 발생하지 않는 것에 비하여 마멸에 의하여 코닝이 발생하면 실제의 접촉폭이 줄어들기 때문에 그만큼 열변형 거동은 크게

나타난다. 60%의 마멸이 진행된 시일의 내경부에서는 축방향으로 $0.7\mu\text{m}$, 외경부에서는 $0.5\mu\text{m}$ 의 가장 큰 변위가 발생하였기 때문에 실제의 접촉폭이 줄어들수록 열변형 뒤틀림 현상이 크게 발생한다는 사실을 보여주고 있다.

또한 Fig. 13은 40%의 마멸이 외경부로부터 진행된 상태에 대한 시일링의 열변형 거동 패턴을 보여준 결과로 반시계 방향으로의 뒤틀림 변형이 Fig. 11보다는 작게 발생하고 있다. 이것은 마멸에 의하여 시일링과 시일시트가 처음 접촉하는 위치와 내경부의 최하단부에서 발생되는 마찰열의 불균일성이 상대적으로 크지 않기 때문이다. 또한 시일링의 접촉 하단부에서는 마찰열에 의한 팽창 변위가 발생하고, 또한 상단부에서는 대류 열전달 효과에 의한 변형 거동이 크지 않으므로 선단부가 약간 위로 변형하기 때문이다. 즉, Fig. 11에서는 마멸이 진행된 지역과 열변형 거동 방향이 같기 때문에 열변형 거동이 크게 발생하지만, Fig. 13에서는 외경부에서 발생된 마멸코팅과 열변형 거동방향이 서로 다르므로 뒤틀림 현상이 상호간에 방해 받기 때문이다. Fig. 14에서 실제 접촉면 길이가 가장 큰 무마멸의 경우는 축방향 변형거동이 가장 작게 발생하지만, 여타의 접촉상태에서는 마멸이 발생하면서 실제의 접촉폭이 줄어들기 때문에 그만큼 열변형 거동이 크게 발생하였다. 60%의 마멸이 진행된 코닝의 경우 접촉부의 실제 접촉폭은 가장 작기 때문에 접촉면의 중심부 쪽에서 가장 큰 변위 $-0.38\mu\text{m}$ 가 발생하였다.

계산결과에 의하면 외경부에서 발생된 마멸코닝으로 인한 열변형은 내경부에서 발

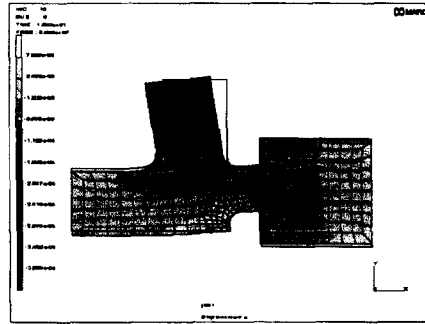


Fig. 11 Axial displacement distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the inner radius of the seal with $70\mu\text{m}$ initial wear depth.

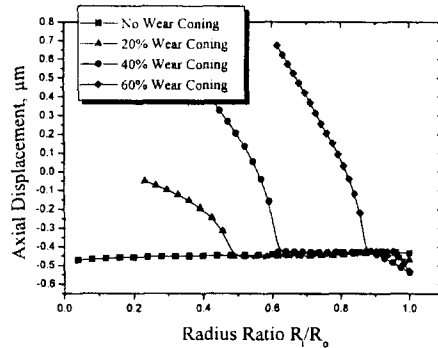


Fig. 12 Axial displacement profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\mu\text{m}$ at the inner radius.

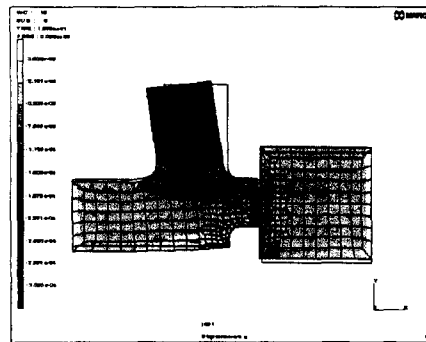


Fig. 13 Axial displacement distribution between seal ring and seal seat for wear coning effect 40%, which is initiated from the outer radius of the seal with $70\mu\text{m}$ initial wear depth.

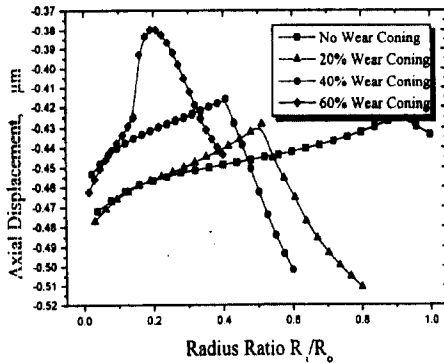


Fig. 14 Axial displacement profiles of the contacting surface for various combinations of wear coning effects with a initial wear depth of $70\mu\text{m}$ at the outer radius.

생된 코닝에 의한 열변형 문제보다 작으며, 비교적 안정된 변형 패턴을 보여주고 있다. 이러한 결과는 기존의 연구와 일치하는 열거동 패턴을 보여주고 있다[4].

4. 해석결과 요약

접촉식의 기계평면시일이 미끄럼 마찰운동에 의하여 발생하는 마찰열은 시일의 회전속도, 시일의 직경, 밀봉간극, 마찰면 형상과 마찰조건 등에 의하여 많은 영향을 받는다. 시일에 대한 열적거동 문제는 고속화와 고하중화로 갈수록 밀봉성능이나 수명에 더 많은 영향을 주게되므로 마멸과 이로 인한 미시적 측면에서 코닝문제는 시일의 접촉면 형상 변화에 따른 접촉조건을 바꾸게 되어 시일의 마찰면은 손상되므로 수명을 급속하게 단축시키는 결과를 초래한다.

마멸코닝이 시일의 내경부로부터 시작한 경우(0, 20, 40, 60%)와 외경부로부터 시작한 두가지 모델에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 계산결과에 의하면 내경부에서

마멸코닝이 진행된 경우가 외경부에서 시작한 경우에 비하여 마찰면에서의 온도, 접촉면 선단부의 열거동 및 접촉응력이 크면서도 불안정하게 발생하였다. 이것은 기존의 연구결과와 유사한 것으로[4] 마찰 접촉면의 폭길이가 같다할지라도 마찰열에 의한 열거동 특성이 마멸에 의한 코닝의 최초 접촉부가 열변형과 같은 방향으로 있으나, 또는 다른 방향으로 존재하느냐에 큰 영향을 받고 있음을 보여주고 있다.

이러한 결과를 접촉식 시일 설계에 응용하기 위해서는 외경부에 미세한 코닝($70\mu\text{m}$ 이하)을 미리 반영한다면 마찰열에 의한 변형문제는 크게 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 시일링과 시일시트 사이의 접촉조건을 평행하게 유지시킬 것으로 예상되어 밀봉성능과 수명에 긍정적인 요소로 작용할 것으로 예상된다. 실제의 기계평면시일은 회전축의 강성도에 의한 경사도(Misalignment) 때문에 접촉면의 하단부로부터 초기 코닝 현상이 발생할 우려가 크므로 이러한 연구결과를 기초로 마멸코닝을 설계에 미리 반영한다면 열변형 특성문제에서는 대단히 긍정적인 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

접촉식 기계평면시일의 접촉면에서 발생하는 마멸에 의한 코닝이 시일의 열거동 특성에 미치는 영향을 유한요소법으로 해석하였다.

접촉부의 마멸코닝이 내경부로부터 시작한 경우와 외경부로부터 시작한 두가지 모델에 대하여 열적특성 문제를 해석한 결과에 의하면 내경부에서 마멸코닝이 진행된 경우가 외경부에서 시작한 경우에 비하여

마찰면에서의 온도분포, 접촉 선단부의 열거동 및 접촉응력이 불안정하게 발생하였다. 이것은 마찰 접촉면의 폭길이가 같더라도 마찰열에 의한 열거동 특성이 마멸에 의한 코닝의 최초 접촉부가 열변형과 같은 방향으로 있느냐, 또는 다른 방향으로 존재하느냐에 큰 영향을 받고 있음을 보여주고 있다.

시일링의 외경부에 미세한 코닝($70\mu\text{m}$ 이하)을 준다면 마찰열에 의한 변형문제는 크게 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 시일링과 시일시트 사이의 접촉조건을 평행하게 유지시킬 것으로 예상되어 밀봉성능과 수명에 긍정적인 요소로 작용할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Yih-Tsuen Wu and Burton, R. A., "Thermoelastic and Dynamic Phenomena in Seals," *J. of Lub. Tech.*, Vol. 103, pp.253-260, 1981.
2. Dow, T. A. and Stockwell, R. D., "Thermoelastic Effects in an Elasto-hydrodynamically Lubricated Contact," *Wear*, Vol. 79, pp.161-168, 1982.
3. Green, I. and Scott, B., "Dynamic Response to Axial Oscillation and Rotating Seat Runout in Contacting Mechanical Face Seals," *Tribology Trans.*, Vol. 34, No. 2, pp.169-176, 1991.
4. Li, C., "Thermal Deformation in Mechanical Face Seals," *ASLE Trans.*, Vol. 19, pp.146-152, 1976.
5. 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.
6. Kim, C. K., "Experimental Investigation of Thermal Stress Cracks in Mechanical Face Seals," *J. of KSTLE*, Vol. 12, No. 3, pp.79-84, 1996.
7. Etsion, I., "The Effect of Combined Coning and Waviness on the Separating Force in Mechanical Face Seals," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 22, No. 2, pp.59-64, 1980.
8. Metcalfe, R., "Predicted Effects of Sealing Gap Convergence on Performance of Plain End Face Seals," *ASLE Trans.*, Vol. 21, 1978.
9. MARC User's Manual, Version K6.2, MARC Analysis Research Co., 1996.