

소수력 터빈용 기계평면시일의 표면마찰형상에 따른 접촉특성 해석에 관한 연구

김 청 균[†]

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Study on Contact Characteristics of Mechanical Face Seals for a Hydro-power Turbine Depending on the Rubbing Surface Geometry

Chung Kyun Kim[†]

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – In this paper, the contact behavior characteristics of a primary sealing components such as a seal ring and a seal seat has been presented for a small hydro-power turbine. Using the non-linear FEM analysis, the maximum temperature, the axial displacement, radial differences between a seal ring and a seal seat, and maximum contact normal stress have been analyzed for three optimized sealing profiles in which are designed based on the FEM analysis and Taguchi's experimental method. The three primary sealing profiles between a seal ring and a seal seat are strongly related to a leakage of a water for a hydro-power turbine and wear of a primary sealing component. The computed results show that the contact rubbing area between a seal ring and a seal seat is very important for reducing a friction heating and wear in a sealing gap, and increasing a contact normal stress in primary sealing components. Based on the FEM computation, models II and III in which have a small rubbing surface of seal rings show low dilatation of primary sealing components, and high normal contact stress between a seal ring and a seal seat. Thus, the FEM computed results recommend a short contacting width of a primary sealing component for reducing a leakage and thermal distortions, and expanding a seal life. This means that a conventional primary sealing component may be switched to a reduced sealing face of seal rings.

Key words – hydro-power turbine, mechanical face seal, sliding friction surface, seal ring, seal seat, FEM.

1. 서 론

기계평면시일(mechanical face seal)은 수력터빈이나 펌프의 회전축에 설치되어 반경방향으로 누설되는 유량을 차단하기 위해 사용하는 유체기계의 핵심부품이다. 기계평면시일은 시일링과 시일시트의 접촉표면이 건조 마찰 작동과정에서 발생하는 축방향의 접촉면압에 의해 작동유체의 통과를 차단하여 밀봉작용을 한다. 평면 접촉식의 시일장치에서 밀봉력을 증가시키기 위해 축방향으로 가하는 스프링에 의한 압축력, 작동유체 상호간의

압력차에 의해 발생하는 포아제 유동(Poiseuille flow), 시일링과 시일시트의 미끄럼마찰 운동과정에서 발생하는 유체박막의 쿠프레 유동(Couette fluid)에 의한 유막압력 등이 복합적으로 작동하면서 유체의 누설은 차단된다.

시일링과 시일시트의 마찰접촉 운동과정에서 발생하는 접촉면압이 크면 누설은 차단될 수 있지만, 시일장치가 지속적으로 작동하는 과정에서 발생한 마찰력은 마찰접촉 표면에 마찰열이 축적되도록 작용한다. 발생한 마찰열은 접촉표면의 국부적인 온도상승, 변형량 증가, 열응력 등으로 인해 열적 불안정성에 의한 마멸이 진행되어 마찰접촉 표면을 통한 누설이 발생하고, 시일링과 시일시트의 마찰표면은 특히 열적손상에 의한 고

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

장을 일으킨다[1,2]. 반면에 시일링과 시일시트 사이에 가해지는 밀봉력, 즉 접촉면압을 줄어든도록 설계하면 밀봉유체는 압력차에 의해 시일링과 시일시트의 접촉 계면을 따라서 누설이 발행하므로 시일의 누설차단 역할은 더 이상 기대할 수 없다. 따라서 우수한 기계평면시일은 작동유체의 누설을 겨우 차단할 수 있을 정도의 접촉면압을 축방향으로 가하고, 열팽창계수가 대단히 낮고 내마멸성과 윤활성이 우수한 시일소재를 선정하여 설계하는 것이 중요하다[3].

여기서는 시일의 작동조건에 적합한 최적의 시일링과 시일시트를 설계하는 것이 중요함을 고찰하고자 한다. 따라서 본 연구의 핵심은 시일링과 시일시트의 형상을 서로 다르게 설계하여 시일장치의 작동조건에 따라 달리 발생하는 마찰표면의 온도, 변형량, 응력을 FEM 해석으로 고찰한다. 여기서 제시된 FEM 해석결과는 기계평면시일장치에서 가장 적합한 시일링과 시일시트의 형상, 접촉표면의 크기를 최적의 형상조건으로 제작할 수 있다.

소수력 터빈에 설치된 기계평면시일은 순환수인 물이 외부로 누설되지 못하도록 설계하기 위해서는 산업용 기계평면시일과는 다르게 설계해야 한다. 즉, 산업용 시일은 회전축경이 작기 때문에 강도 안전성이 우수하고, 회전속도는 높기 때문에 마찰열 발생에 의한 열손상으로 많이 손상되지만, 소수력 터빈용은 축경이 크고 저속에서 운전된다는 특징이 서로 다르다. 소수력 터빈용 기계평면시일은 축경이 크고 회전축 정밀도가 상대적으로 떨어지기 때문에 회전에 따른 시일 구조물의 강도 안전성이 확보되어야 하고, 순환수에 포함된 각종 불순물에 의해 밀봉접촉 표면에서 진행되는 연삭마멸에 잘 견딜 수 있는 내마멸성과 강도를 갖춘 소재선택이 중요하다.

2. 해석조건 및 데이터

수력터빈의 완벽한 밀봉을 위해 회전축의 외측에는 물과 냉각수 사이에서 순환수의 누설을 차단할 수 있도록 하기 위해 외측시일장치를 설치하고, 내측에는 냉각수와 공기 사이에서 냉각수의 누설을 차단하기 위해 내측시일장치를 각각 설치한다.

소수력터빈은 다량의 순환수를 통과시켜 물이 보유하고 있는 운동에너지를 이용하여 큰 회전력을 얻기 때문에 가능한 회전축 직경을 크게 제작하므로 시일 구조물에 대해 강도를 높게 설계해야 한다. 소수력 터빈

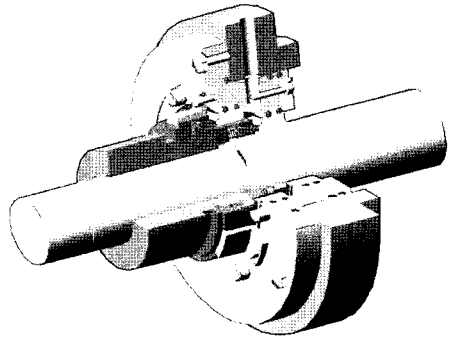


Fig. 1. Double sealing units for a hydro-power turbine.

에서 기계평면시일의 고장은 순환수가 터빈의 회전축을 타고 누설된 물이 베어링에 침투하여 유막을 파손하여 베어링의 하중지지 용량을 떨어뜨리는 것은 물론이고, 베어링의 마멸을 촉진하여 터빈의 작동을 불안정하게 한다. 시일장치의 파손 또는 기능저하로 베어링에 물이 침입하면 베어링유의 점도저하와 이에 따른 유막 강성도 약화로 인해 터빈 회전축의 원활한 작동성을 보장할 수 없게 된다. 베어링 고장의 대부분은 밀봉장치의 누설로부터 기인하기 때문에 시일장치의 접촉표면 형상에 따라 달라지는 마찰열의 생성과 냉각 정도, 접촉면의 변형 거동량, 마멸 등에 대한 FEM 연구[4]는 대단히 중요하다.

Fig. 1에서 기계평면시일을 회전축의 외측과 내측에 별도로 설치하여 소수력 터빈의 밀봉성을 완벽하게 확보할 수 있도록 이중으로 설치하였다. 여기서 외측에 설치한 시일장치는 순환수인 물에 부분적으로 잠기어 순환수와 접촉하지만, 내측에 설치한 시일장치는 베어링과 연결되어 공기와 접촉하도록 설계되어 있다.

2-1. 해석조건

외측시일장치로 설치된 시일의 한 쪽은 20°C의 물과 접촉하면서 0.2 MPa의 압력을 받고, 다른 쪽은 20°C의 냉각수와 접촉하면서 0.15 MPa의 수압을 유지하여 밀봉작용을 한다. 반면에 내측시일장치로 설치된 또 다른 시일은 0.15 MPa의 압력으로 공급한 20°C의 냉각수와 접촉을 하고, 다른 쪽에서는 0.1 MPa 대기압 상태의 25°C 공기와 접촉하면서 밀봉작용을 한다. 마찰 접촉 특성을 FEM으로 고찰하기 위해 필요한 가정을 요약하면 다음과 같다.

- 미끄럼마찰 과정에서 발행한 마찰열 모두는 시일링과 시일시트에 균등하게 소산한다.

Table 1. Operation conditions

Parameters	Values
Rotating speed, rpm	900
Sealing gap, μm	0.1
Coolant temperature, $^{\circ}\text{C}$	20
Coolant pressure, MPa	0.15
Supply speed of a coolant, m/s	3
Water pressure, MPa	0.2

- 마찰 접촉면은 항상 완벽하게 접촉할 수가 없으므로 $0.1\mu\text{m}$ 의 밀봉간극을 유지한다.
- 접촉계면의 마찰계수는 0.06으로 원활한 작동성을 보장하고, 그 이외의 마찰 접촉면에서는 0.3으로 건조마찰을 유지한다고 가정한다[1].

2-2. 작동조건 및 소재특성

시일링과 시일시트로 구성된 미끄럼마찰 접촉면에 발생하는 접촉거동 특성을 해석하기 위한 터빈축의 회전속도, 밀봉간극, 냉각수 온도 및 압력, 냉각수의 공급속도, 순환수 압력, 스프링의 반력 등에 대한 작동조건을 Table 1에서 제시한다.

건조마찰 접촉상태를 유지하면서 밀봉을 해야 하는 시일장치의 마찰접촉 표면에 작용하는 마찰력, 표면온도, 강도 등을 충분히 견딜 수 있어야 한다. 여기에 시일소재는 윤활성, 열전도성, 내마멸성, 내화학성, 저마찰성 등이 우수해야 하고, 동시에 고온마찰에 따른 열팽창성이 대단히 낮아 마찰온도 상승에 따른 변형거동이 작아야 안전하다.

Table 1과 같은 작동조건을 대체적으로 만족하는 시일소재로 TiC, WC, SiC 등이 있지만, SiC를 소수력 기계평면시일의 소재로 선정하는 경우가 많다. SiC는 높은 온도에서 사용이 가능하고, 내마멸성이 우수하고, 윤활성도 확보하고 있는 우수한 소재로 부식에 대한 저항성 또한 높고 열전도성이 우수하며, 가공성이 양호한 소재로 알려져 있다. Table 2는 본 연구에서 사용한 SiC의 기계적, 열적특성을 제시하고 있다.

3. FEM 해석모델

기계평면시일의 건조마찰 접촉면에서 발생하는 마찰 표면의 온도, 변형거동과 접촉응력 특성을 해석하기 위해 Fig. 2에서는 3가지의 서로 다른 접촉표면을 보여

Table 2. Material properties of SiC

Properties	Values
Modulus of elasticity, GPa	410
Poisson's ratio	0.17
Density, kg/m^3	3100
Thermal expansion coefficient, $1/\text{K}$	4.3×10^{-6}
Thermal conductivity, $\text{W/m} \cdot \text{K}$	160
Specific heat, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	1100

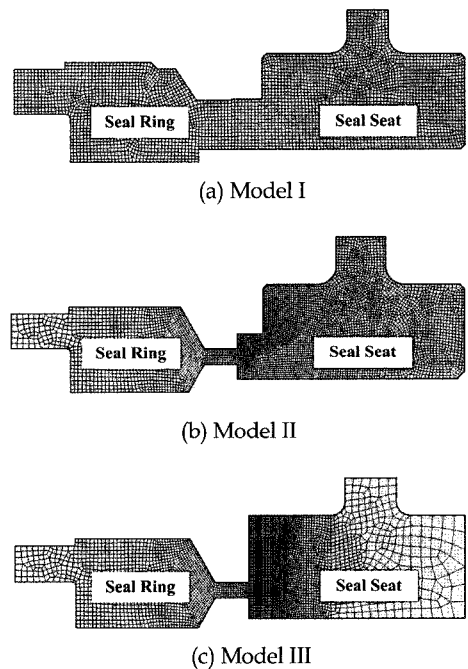


Fig. 2. Primary sealing models for a FEM analysis.

주고 있다. Fig. 2에서 제시한 접촉표면 형상을 비선형 FEM으로 마찰 접촉면에서 발생하는 최고온도, 변형량, 접촉응력을 각각 해석하여 시일장치의 내구성과 밀봉특성을 고찰하고자 한다. 즉, 마찰표면에서 발생하는 접촉특성을 고찰하여 소수력 터빈의 작동조건에 적합한 시일링과 시일시트의 접촉표면 형상을 선정하고자 한다.

Fig. 3은 외측 및 내측시일장치에 적용한 경계조건을 보여준다. 여기서 구역(zone)으로 표시한 것은 순환수인 물과 냉각수, 공기에 의해 발생하는 열전달계수를 이론적으로 계산한 결과를 시일링과 시일시트에 적용하여 FEM으로 해석하였다.

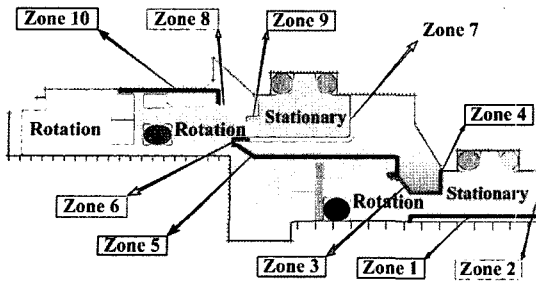


Fig. 3. Boundary conditions for a FEM analysis of mechanical face seals.

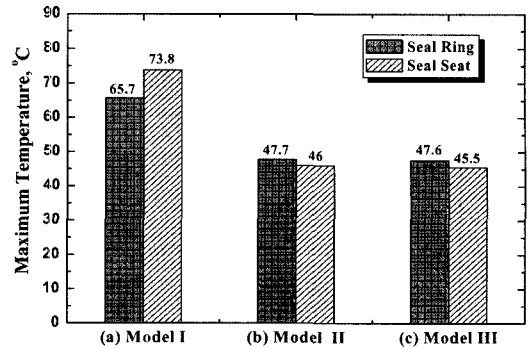
4. 해석결과 및 고찰

Fig. 2에서 제시한 3개의 유한요소 해석모델은 소수력 터빈용 기계평면시일의 핵심인 시일링과 시일시트의 접촉표면 형상으로 소수터빈의 작동조건에 가장 적합한 형상모델을 FEM으로 해석하고자 한다. 여기서 모델 I은 시일링과 시일시트의 접촉 표면적을 거의 같게 제작한 것이고, 모델 II와 III는 시일링의 접촉 표면적을 시일시트의 표면보다 대단히 작게 설계한 모델이다. 마찰 접촉면을 칼날처럼 작은 폭으로 설계한 모델 II와 III는 폭의 크기는 같지만 시일시트의 접촉면적에서 큰 차이를 나타낸 것으로, 모델 II는 대류에 의한 방열이 잘 이루어지도록 설계하였고, 모델 III는 시일시트 소재의 열용량을 증가시켜 열전도 특성을 설계에 반영한 것이다.

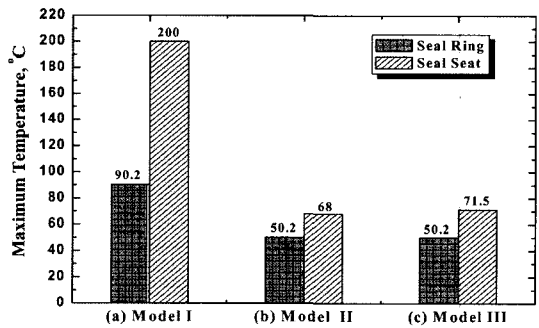
4-1. 최고온도 해석

시일링과 시일시트 상호간의 미끄럼마찰 접촉운동을 하는 동안에 발생한 마찰열은 시일링과 시일시트 소재 내부로 열전도가 1차적으로 일어나고, 나머지 열은 소수력터빈의 순환수나 시일장치의 냉각수에 의해 방열된다.

Fig. 4는 Fig. 2에서 제시한 3가지의 마찰접촉 표면 형상에 대한 시일링과 시일시트의 최고온도 결과를 제시한다. 마찰접촉면에서 발생하는 최고온도를 해석하기 위해 사용한 회전속도는 900 rpm, 마찰계수는 0.06, 밀봉간극은 0.1 μm 으로 소수력 터빈의 일반적인 작동조건이다. 시일링과 시일시트의 최고온도를 FEM으로 해석한 Fig. 4(a)는 순환수인 물과 외부에서 유입한 냉각수가 접촉하는 외측시일장치의 최고온도를 제시한 해석결과이다. 외측시일장치의 최고온도는 모델 I의 시일시트에서 73.8°C가 발생하고, 시일링에서는 약간 낮은 65.7°C로 계산되었다. 모델 I에 비하여 마찰 접촉면이 크게 줄어든 모델 II와 모델 III는 46°C 전후로 대단



(a) Outer primary sealing unit



(b) Inner primary sealing unit

Fig. 4. Maximum temperature between a seal ring and a seal seat.

히 양호한 최고온도를 제시하고, 시일링과 시일시트의 온도차는 1°C 정도로 만족할만한 해석결과를 제시한다. 여기서 제시한 외측시일장치의 시일링과 시일시트에서 발생한 최고온도는 순환수와 냉각수의 온도가 20°C로 유지되고 있음을 고려하면 대류에 의한 방열이 충분히 작동하기 때문에 기계평면시일은 만족할 정도로 안정된 최고온도를 나타낸다. Fig. 4(b)는 냉각수와 공기와 접촉하는 경우로 냉각수의 대기중 누설을 차단하기 위해 내측시일장치에서 발생하는 최고온도를 해석한 결과이다. 모델 II와 모델 III에 비하여 마찰접촉 표면적이 큰 모델 I의 경우는 시일시트에서 가장 높은 최고온도 200°C을 나타내지만, 시일링은 90.2°C로 55%나 떨어진 최고온도를 제시하는 것으로 보아 마찰열의 대부분은 정지하고 있는 시일시트로 전도된 것으로 예측할 수 있다. 반면에 모델 II는 시일시트와 시일링에서 68°C와 50.2°C, 그리고 모델 III는 71.5°C와 50.2°C로 모델 I에 비하여 크게 낮아진 최고온도를 보여주고, 시일링과 시일시트 사이의 온도차이는 낮은 것으로 나타났다. 모델 II의 시일시트의 형상은 모델 III

에 비하여 마찰운동표면 근처로 냉각수에 의한 대류 열전달 효과가 높게 나타나지만, 모델 III는 시일시트의 열용량이 높기 때문에 열전도에 의한 냉각효과가 높아 서로 다른 방열구조를 갖지만, 온도는 낮게 유지되는 같은 특징을 보여준다.

최고온도를 제시한 Fig. 4의 해석결과에 의하면, 순환수와 냉각수에 의해 방열이 잘 이루어지는 외측시일 장치의 경우는 Fig. 2에서 제시한 모델 3가지가 대부분 만족한다. 특히, 마찰접촉 표면적이 작은 모델 II와 모델 III가 상대적으로 아주 우수한 최고온도 분포를 해석결과를 제시한다. 이것은 시일링의 접촉면 두께가 상대적으로 얇아서 대류에 의한 열전달이 잘 이루어지고, 상대적으로 시일시트의 열용량을 크게 하여 열전도에 의한 소산이 원활하게 작동하기 때문에 마찰표면에서 형성된 최고온도는 낮게 나타나고 있다.

4-2. 변형거동 해석

시일장치의 미끄럼마찰 표면에서 발생하는 축방향의 변형거동에 의해 뒤틀림 정도는 시일의 마찰과정에서 먼저 접촉운동을 하기 때문에 국부적으로 접촉응력을 증가시키고, 이것은 점차 마멸을 증가시키는 원인으로 작용한다. 미끄럼 마찰표면에서 탈락된 마멸입자는 표면의 국부적인 형상 변형과 손상을 촉진하고, 이것은 누설을 촉진하는 원인으로 작용한다. 시일장치에서 열변형 거동량의 발생은 시일의 수명을 단축하기 때문에 변형거동에 대한 관심을 갖게 된다.

따라서 시일장치는 마찰열 발생을 가능한 작게 유지하고, 생성된 마찰열은 대류나 전도에 의해 외부로 균일하게 소산하는 설계기술이 중요하다. 특히 마찰열에 의한 표면의 팽창 거동량을 작게 유지하기 위해 열팽창계수가 대단히 작은 소재를 선정하는 것이 중요하다. Fig. 5는 변형특성을 해석하기 위해 필요한 축방향 및 반경방향 거동에 대한 해석기준을 제시한 것이다.

4-2-1. 축방향 변형량

Fig. 6(a)는 수력터빈의 순환수인 물과 외부에서 공급한 냉각수에 의해 외측시일장치의 시일링과 시일시트에서 발생한 축방향 변위량을 해석한 결과이다. 축방향으로 발생한 열적 변형량은 모델 I에서 시일링은 1.07 μm, 시일시트는 0.3 μm로 팽창한 결과를 각각 제시하고, 시일링은 시일시트에 비하여 3.6배나 더 늘어난 변형량을 나타낸다. 또한, 모델 II에서 시일링과 시일시트의 축방향 변형량은 0.05 μm와 0.1 μm, 모델

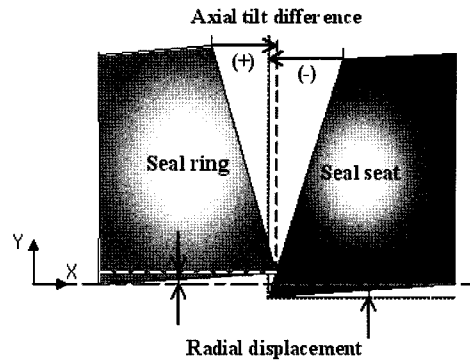
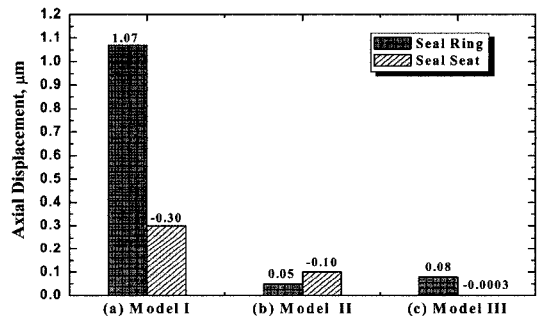
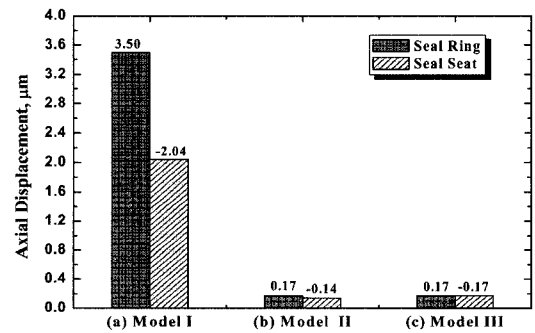


Fig. 5. Axial and radial displacements of a distorted primary sealing component.



(a) Outer primary sealing unit



(b) Inner primary sealing unit

Fig. 6. Axial tilt displacements between a seal ring and a seal seat.

III의 경우는 0.08 μm와 0.0003 μm로 모델 I에 비하여 크게 줄어든 축방향 변형량을 각각 보여준다. 마찰접촉 표면적이 줄어든 모델 II와 모델 III는 접촉면적이 상대적으로 크게 설계한 모델 I에 비하여 안정된 축방향 변형 거동량을 보여준다.

Fig. 6(b)는 시일링과 시일시트의 밀봉작용 과정에서 발생한 마찰열이 냉각수와 공기에 의해 소산되는 내측

시일장치에 대한 축방향의 변형거동을 FEM으로 해석한 결과이다. 모델 I의 시일링은 마찰표면에서 축방향으로 3.5 μm , 시일시트는 2.04 μm 를 팽창시키고, 모델 II의 경우는 0.17 μm 와 0.14 μm , 모델 III의 경우는 0.17 μm 와 0.17 μm 로 각각 늘어나는 것으로 나타났다. 최대 축방향 변위량을 나타낸 시일링 모델 I의 3.5 μm 은 모델 III의 시일링 표면에서 발생한 최대 변위량 0.17 μm 에 비하여 20.5배나 많이 팽창된 결과는 상대적으로 모델 II나 모델 III의 우수한 거동특성을 거론할 수 있다. 특히, 모델 III은 다른 모델에 비하여 시일링과 시일시트의 변형 거동량이 같은 0.17 μm 로 균일한 거동특성을 보여준다.

모델 I의 축방향 거동량은 모델 II나 모델 III에 비하여 크다는 것이 문제이다. 또한, 시일링과 시일시트 사이의 편차도 대단히 크다는 것은 시일링의 뒤틀림 변형에 의해 발생하는 문제점이 클 것이라는 것이다. 이것은 시일링과 시일시트 사이의 불균일성으로 인해 미끄럼마찰이 발생하는 접촉 계면을 통한 누설이 발생할 우려가 높을 것으로 예상된다. 반면에 마찰접촉 표면적이 작은 모델 II와 모델 III의 축방향 거동특성을 보면, 이들 두 모델은 축방향 변형량이 작다는 것도 장점이지만 시일링과 시일시트의 상대적 변형량 차이도 대단히 작다는 우수한 해석결과이다. 여기서 작은 접촉폭을 갖으면서 방열면적이 큰 모델 III의 경우는 시일링과 시일시트의 거동량이 같아 수치적으로 약간 앞선 거동특성을 보여주지만 실제로 모델 II나 모델 III의 축방향 거동량은 거의 유사한 누설 차단능력을 보여줄 것으로 예상된다.

4-2-2. 반경방향 변형량

Fig. 7(a)는 수력터빈의 물과 외부에서 공급된 냉각수에 의해 방열되는 외측시일장치에 대한 시일링과 시일시트의 반경방향 변형량을 해석한 결과이다. 모델 I의 시일링은 반경방향의 외측으로 12 μm 늘어나고, 시일시트는 내측방향으로 1.52 μm 줄어들고, 모델 II의 경우는 외측방향으로 2.94 μm 늘어나고, 내측방향으로 0.57 μm 줄어들고, 모델 III의 경우는 외측방향으로 2.86 μm 와 내측방향으로 0.82 μm 의 작은 변형량이 각각 발생되었다. 반경방향의 외측을 따라서 최대 변위량을 나타낸 시일링 모델 I의 12 μm 에 비하여 모델 III의 시일링 변형량 2.86 μm 은 4.2배나 줄어든 안정된 시일모델로 우수한 변형거동 특성을 보여주고 있다.

Fig. 7(b)는 수력터빈의 냉각수와 공기에 의해 방열

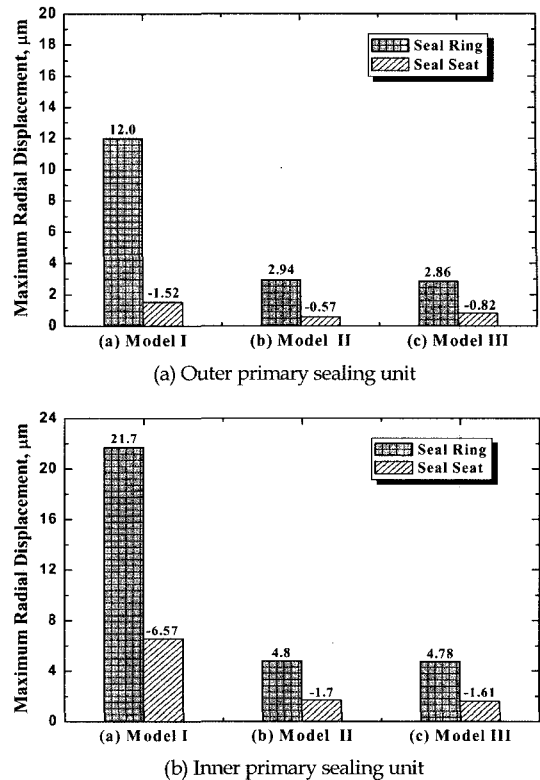


Fig. 7. Radial displacements between a seal seat and a seal seat.

되는 내측시일장치에 대한 시일링과 시일시트의 반경방향 변형량을 해석한 결과이다. 모델 I의 시일링은 반경방향의 외측으로 21.7 μm 늘어나고, 시일시트는 반경방향의 내측으로 6.57 μm 나 줄어드는 거동현상으로, 이들 사이에는 3.3배나 줄어드는 큰 차이를 나타내고 있다. 모델 II와 경우는 시일링에서 4.8 μm 늘어나고, 시일시트에서 1.7 μm 로 크게 줄어들고, 모델 III에서 시일링은 4.78 μm 늘어나고, 시일시트는 1.61 μm 로 반경방향의 변형 거동량이 크게 축소된 우수한 결과를 제시하고 있다. 해석결과는 냉각수와 대기중의 공기에 의해 방열하는 내측시일장치는 물과 냉각수에 의해 방열되는 외측시일장치에 비하여 반경방향의 거동량이 크게 발생하는 것으로 알려져 있다.

반경방향의 거동량은 마찰열이나 마멸 발생에 직접적으로 영향을 미치는 축방향의 거동량에 비하여 덜 위험하다는 측면을 고려하면, 모델 II나 모델 III의 경우는 어느 것도 문제가 되지 않을 것으로 생각된다. 즉, Fig. 7에서 보여준 반경방향의 거동량은 시일링과 시일시트가 직접적으로 만나지 않고 축방향의 변형 거

동량에 영향을 미치는 요소로 축방향의 변형 거동량처럼 마찰작동 과정에서 발생하는 마멸에 직접적으로 영향을 미치지 않는다. 여기서 해석모델 I은 마찰 접촉면의 크기가 모델 II와 모델 III에 비하여 대단히 크기 때문에 발생하는 마찰열은 높지만, 이것을 방열하기 위한 냉각수나 순환수 등과 접촉하는 면적은 상대적으로 작아 변형 거동성이 나쁘게 나타난다. 결국, 모델 II와 모델 III은 시일링과 시일시트의 마찰 접촉면 크기가 줄어들어 마찰열 발생은 작고, 방열되는 면적은 넓어서 변형거동 측면에서 유리한 마찰접촉 밀봉구조이다.

따라서 시계평면시일의 마찰부품인 시일링과 시일시트의 설계에서 모델 II나 모델 III처럼 미끄럼마찰 접촉면적의 크기를 가능한 작게 설계하고, 냉각수에 의해 방열하는 냉각을 충분히 확보하거나 시일시트의 열용량을 키우면서 열전도가 잘 일어나는 최적설계가 중요함을 알 수 있다.

4-3. 최대접촉응력

시일링과 시일시트의 마찰접촉 계면에서 발생하는 접촉면압은 작동유체인 물의 누설을 직접적으로 차단하는 중요한 설계인자이다. 마찰접촉 계면에서 발생한 최대접촉응력은 밀봉유체의 누설 차단성과 밀접하게 관련되어 있다. 즉, 접촉응력의 증가는 누설을 효과적으로 차단할 수는 있지만, 너무 높으면 접촉응력의 증가로 인해 오히려 마찰열은 증가하고, 결국 마멸발생은 크게 늘어나면서 밀봉계면을 통한 누설은 증가하기 때문에 시일의 수명은 크게 단축되는 결과를 초래한다.

Fig. 8은 내측시일장치와 외측시일장치의 미끄럼마찰

접촉표면에서 발생하는 법선방향의 최대접촉응력에 대한 FEM 해석결과를 보여준다. Fig. 8의 해석결과에 의하면, 마찰접촉 면적이 가장 큰 모델 I의 경우에 발생한 외측시일장치의 최대접촉응력은 7.95 MPa, 내측시일장치는 8.17 MPa를 각각 나타낸다. 모델 II의 경우는 외측시일장치에서 13.2 MPa와 내측시일장치에서 2.14 MPa, 그리고 모델 III의 경우는 외측시일에서 4.37 MPa와 내측시일에서 가장 높은 21.9 MPa로 계산된 결과를 각각 보여준다.

모델 II와 III의 경우는 냉각수와 공기에 의해 방열되는 내측시일장치의 마찰계면에서 21.9 MPa로 가장 높게 발생되었지만, 순환수와 냉각수에 의해 방열되는 외측시일장치는 4.37 MPa로 낮게 나타났다. 이것은 외측시일장치에서 발생하는 접촉응력이 상대적으로 작아 누설이 진행되어도 최종적으로 누설을 차단하는 내측시일장치의 최대접촉응력이 5배나 높게 나타나기 때문에 안정된 누설차단 능력을 갖게 된다. 또한 모델 II의 경우는 외측시일장치에서 13.2 MPa로 내측시일장치의 2.14 MPa보다 6배나 높게 나타났기 때문에 모델 I의 8.17 MPa의 경우보다는 안정된 밀봉작용을 하는 것으로 생각된다.

소수력 터빈에 사용하는 기계평면시일의 최적설계를 위해 제시한 시일링과 시일시트의 해석모델 3개에 대하여 수행한 FEM 해석결과를 보면, 시일링의 접촉면적 형상이 작을수록 밀봉과정에서 발생하는 마찰열은 줄어들고, 작동유체에 의한 방열성은 향상되는 것으로 계산되었기 때문에 마찰접촉 표면의 크기는 가능한 작게 설계하는 것이 바람직하다. 여기에 작동유체나 냉각수에 의한 대류 열전달이 잘 이루어지도록 방열면적을 크게 설계하는 것이 시일링과 시일시트의 마찰접촉 거동형상을 이상적으로 설계할 수 있어 기계평면시일의 누설 안전성은 높아진다는 결론에 도달한다.

Fig. 2의 시일링과 시일시트의 접촉표면 형상은 마찰접촉 표면적이 작은 모델 II와 모델 III가 마찰접촉 표면적이 큰 모델 I에 비하여 안정된 온도분포, 변형거동, 접촉응력 특성을 각각 보여준다. 같은 접촉표면을 제시한 시일링 모델 II와 모델 III는 시일시트의 크기가 약간 다르기는 하지만 전체적으로 볼 때 모델 III가 약간 우수한 거동특성을 보여준다. 그러나 시일링과 시일시트는 항상 대류에 의한 열전달과 열전도에 의한 열소산 효과가 상대적으로 우수한 작동환경과 설계조건에 의해 시일링과 시일시트의 형상치수를 결정하는 것이 합리적인 최적설계라 할 수 있다.

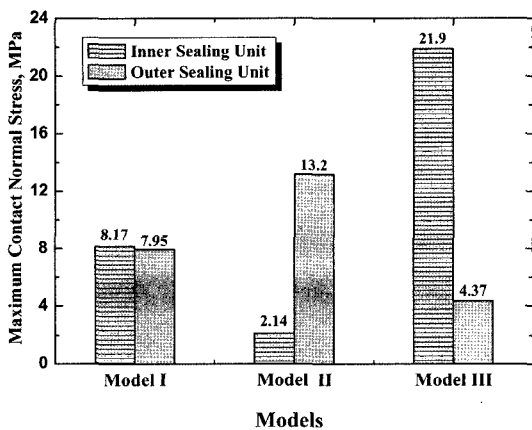


Fig. 8. Maximum contact normal stresses of inner and outer primary sealing units.

5. 결 론

소수력 터빈에 설치되어 밀봉작용을 하는 접착식의 기계평면시일에서 가장 중요한 시일링과 시일시트는 마찰접촉 운동을 하면서 밀봉작용을 하기 때문에 최적의 접촉형상을 설계하는 것은 시일장치의 누설을 차단하고, 장수명을 유지할 수 있다는 측면에서 중요하다. 따라서 본 연구는 형상이 서로 다른 3가지의 시일링과 시일시트에 대한 온도분포, 열변형 거동량, 접촉응력 등을 FEM으로 해석하였다.

시일링과 시일시트 형상을 제시한 시일모델 I은 마찰접촉 표면이 상대적으로 큰 경우로 마찰접촉 표면에서 발생하는 최고온도, 변형 거동량은 증가하여 마찰력이나 마멸량은 증가할 가능성은 높고, 상대적으로 접촉면압은 줄어들어 누설은 발생할 것으로 예상된다. 반면에 마찰운동 접촉표면이 작은 모델 II와 모델 III의 경우는 상대적으로 작은 마찰열을 발생하고 표면 거동량은 줄어 마멸은 일어나기 어렵지만 접촉표면에 걸리는 접촉면압은 오히려 증가하여 밀봉성을 강화하는 현상으로 나타난다. 이것은 미끄럼 마찰표면의 접촉면적

을 가능한 작게 설계하는 것이 유리함을 제시하는 해석결과이다. 따라서 본 연구에서 제시한 해석모델에 대한 해석결과를 바탕으로 시일링과 시일시트를 설계하면 모델 II와 III는 사용조건에 따라 선정하는 것이 바람직하고, 특히 압력차가 큰 기계평면시일 장치에 대한 최적설계를 추진하기 위해서는 법선방향의 접촉응력이 가장 큰 모델 III와 같은 시일장치를 선정하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

1. Chin-hsiu Ii, "Thermal Deformation of a Mechanical Face Seal," *ASLE Trans.*, Vol. 19, No. 2, pp.146-152, 1975.
2. 김청균, 조승현, "기계평면시일의 마찰열 변형거동에 관한 수치적 연구," *한국윤활학회지*, 제19권, 제2호, pp.49-56, 1998.
3. Berroth, K.E., "Silicon Carbide materials for High Duty Seal Application," *Journal of STLE*, pp.770-773, 1990.
4. MARC Analysis Research Corp., California, USA, 1994.