

소수력 터빈용 기계평면시일의 최적형상설계에 관한 연구

김 청균¹⁾, 김 정일²⁾, 신 인철³⁾, 임 광현⁴⁾

Optimized Sealing Profile Design of Mechanical Face Seals for a Hydro-power Turbine

Chung Kyun Kim, Jung-il Kim, Ihncheol Sihm, Kwang-Hyeon Lim

Key words : Mechanical face seal(기계평면시일), seal ring(시일링), seal seat(시일시트), Hydro-power turbine(소수력 터빈), FEM(유한요소해석)

Abstract : This paper presents computed results of FEM analysis on the tribological contact behaviors of a primary sealing components of mechanical face seals for a small hydro-power turbine. The FEM computed results present that the contact area between seal rings and seal seats is very important for a good tribological performance such as low friction heating, low wear, high contact normal stress in a primary sealing components. Based on the FEM computation, model III in which has a small sealing contact area shows low dilatation of primary sealing components, and high contact stress between a seal ring and a 1)seal seat.

1. 서 론

물(water)이 갖는 위치에너지, 운동에너지, 압력에너지를 수력 터빈에 공급하여 생산된 회전토크 에너지를 수력 터빈에 연결된 발전기에 공급함으로써 전기에너지를 생산하는 수력터빈 발전시스템은 비교적 친환경적이지만, 부분적으로는 자연 생태계를 파괴할 수도 있는 양면성을 갖고 있다. 특히, 수력 발전을 위해 대규모로 댐(dam)을 건설하는 경우는 자연 생태계를 인위적으로 바꾸기 때문에 발생하는 문제점이 많지만, 소수력 발전처럼 자연의 형태를 그대로 이용하거나 최소한의 지형 변경을 통하여 전기에너지를 생산하는 경우는 주변 생태계에 미치는 영향이 대단히 작기 때문에 계곡이나 호수가 잘 발달된 국가나 환경보호 정책을 선호하는 나라에서는 소수력 발전 비중을 높여가고 있다.

소수력 발전을 신·재생에너지 분야로 분류하여 정부의 기술개발자금, 설비투자, 전력생산 지원금 등 혜택을 다양하게 제공하는 시스템을 갖추고 있으나 다른 나라에 비해 발전 분담비율이 대단히 작고, 계곡이나 호수가 부족하기 때문에 사업성이 크게 떨어지는 것으로 알려져 있다. 이것은 원칙적으로 정부의 보조금 지원시스템에서 불합리한 측면을 우선 지적할 수 있고, 우리나라는

다 국가에 비하여 소수력 발전을 추진하기에 적합한 자연환경을 갖고 있지 못한 측면이 강하다.

수력터빈과 발전기는 소수력 전기에너지 생산의 핵심설비이나 사업성이 떨어지기 때문에 소수력 발전설비를 생산하는 국내업체를 찾아보기 어렵다. 본 연구와 직접적으로 관련된 수력터빈은 물이 갖는 위치에너지와 운동에너지를 모두 토크 에너지로 전환하기 위해 터빈 블레이드와 연결된 회전축, 이 회전축의 구동력 하중을 지지하기 위한 베어링과, 이 베어링과 블레이드 사이에 설치되어 축을 타고 외부로 누설하는 물을 밀봉하기 위한 기계평면시일(mechanical face seal) 등으로 구성된다. 여기서 순환수에 잠겨있는 기계평면시일을 통하여 물이 누설되면서 하중을 지지하는 베어링의 마찰부로 침입하면 베어링은 고장을 일으킨다. 결국 베어링으로 침입하려는 물을 완벽하게 차단하기 위해 설치된 기계평면시일은 회전축의 불안정한 요동하중이나 물에 의한 압력차를 충분히 견디면서 터빈축의 회전에 따른 건조마찰 과정에서 발생하는 열적문제를 극복해야 수력터빈은 정상적으로 작동하게 된다.

소수력 터빈에 장착되는 기계평면시일은 터빈의 축경이 대단히 크기 때문에 낮은 회전속도에

¹⁾ 홍익대학교

²⁾³⁾⁴⁾ 대양산업

서도 많은 마찰열이 발생하므로 변형에 의한 마찰면의 접촉거동이 불안정해지면서 누설이 진행되는 소수력 터빈용 기계평면시일의 특징을 나타낸다.^[1-2] 수력 터빈은 다량의 순환수를 통과시켜야 큰 회전력을 얻을 수 있으므로 가능한 회전축 직경을 크게 설계하려는 경향 때문에 시일의 직경도 따라서 증가하게 되어 특히 시일 구조물에 대해 강도를 높게 설계하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 소수력 터빈의 핵심부품인 기계평면시일의 접촉표면 형상을 최적화하여 이들의 미끄럼 마찰작용에 따라 발생하는 마찰열과 축방향의 변형거동을 최소화 줄이기 위해 시일링과 시일시트의 접촉형상을 상대적으로 비교한 FEM 해석결과를 고찰하여 소수력 발전용 시일장치의 누설차단 기능성을 강화하고자 한다.

2. 해석조건 및 해석방법

2.1 해석조건

수력터빈에 설치된 기계평면시일은 0.2MPa의 수압을 유지한 20℃의 순환수와 접촉을 하지만, 다른 쪽에서는 0.15MPa의 수압을 갖는 20℃의 냉각수와 접촉하면서 밀봉작용을 한다. 반면에 내측 밀봉장치는 0.15MPa의 압력으로 공급한 20℃의 냉각수에 접촉하고, 다른 쪽에서는 0.1MPa의 대기압 상태인 25℃의 공기와 접촉하는 밀봉조건을 유지한다. 수력터빈의 작동조건에 관련된 기계평면시일의 밀봉특성을 고찰하기 위해 FEM으로 다음과 같은 가정을 하여 해석하였다.

- 주시일링에서 발생하는 마찰열은 시일링과 시일시트에 균등하게 소산하는 것으로 가정한다.
- 주시일링 장치의 밀봉간극은 0.1 μ m로 마찰 접촉면은 완벽하게 접촉하지 않는다.
- 마찰계수는 0.06으로 원활한 작동성을 보장하지만, 그 이외의 마찰 접촉면에서는 0.3으로 비교적 높은 건조마찰을 유지한다고 가정한다.^[2]

2.2 해석데이터 및 소재특성

2.2.1 해석데이터

기계평면시일의 밀봉접촉 표면은 건조마찰 특성을 유지하는 경우에 FEM 해석을 수행할 수 있도록 하기 위해 터빈축의 회전속도, 밀봉간극, 냉각수 온도 및 압력, 냉각수의 공급속도, 순환수 압력, 스프링의 반력 등의 설계변수를 고려한다. 기계평면시일의 FEM 해석^[4]을 위해 필요한 기준 데이터(reference data)는 Table 1에서 제시한다.

Table 1 Analysis parameters

Parameters	Values
Rotating speed, rpm	900
Sealing gap, μ m	0.1
Coolant temperature, $^{\circ}$ C	20
Coolant pressure, MPa	0.15
Water pressure, MPa	0.2

2.2.1 소재특성

건조마찰 접촉상태를 유지하면서 밀봉을 해야 하는 기계평면시일의 시일링과 시일시트는 접촉표

면에서 발생하는 표면온도, 강도, 응력과 변형률 등을 충분히 견딜 수 있어야 한다. 시일장치의 작동조건을 만족하는 소재로 TiC, WC, SiC 등이 있는데, 본 연구에서는 시일재질로 가장 많이 사용하는 SiC를 소수력 기계평면시일 장치의 시일소재로 선정하였다. SiC 소재는 트라이볼로지 특성이 우수한 마찰소재로 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 우수하며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않아 가공성이 우수한 소재이다. Table 2는 SiC 소재의 기계적, 열적특성을 제시하고 있다.

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/K	4.3 $\times 10^{-6}$
Thermal conductivity, W/m \cdot K	160
Specific heat, J/kg \cdot K	1100

3. 유한요소 해석모델

Fig. 1은 소수력 발전용 터빈펌프의 밀봉을 위해 사용하는 이중 시일링 장치로 외측에 설치한 시일장치는 작동유체인 물에 잠겨 직접적으로 접촉하지만, 내측의 시일장치는 베어링에 연결되는 대기중으로 노출되어 작동한다. Fig. 1에서 보여준 두 개의 기계평면시일에서 발생하는 접촉응력과 변형거동에 대한 해석을 수행하기 위해 시일링과 시일시트의 접촉면 형상과 FEM 메쉬를 Fig. 2에서 보여주고 있다.

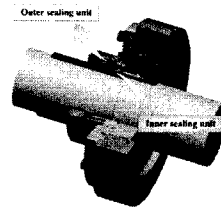
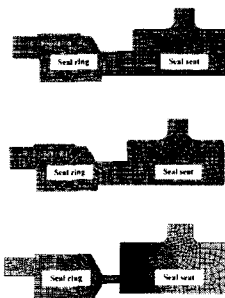


Fig. 1 Double sealing unit with seal ring and seal seat for a hydro-power turbine

Fig. 3의 기계평면시일에 적용한 대류 열전달 계수는 사용조건과 위치에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 이들 10개의 대류 열전달 계수를 계산하여 FEM에 적용하였다.



(a) FEM model I

(b) FEM model II

(c) FEM model III

Fig. 2 Primary sealing models for a FEM analysis

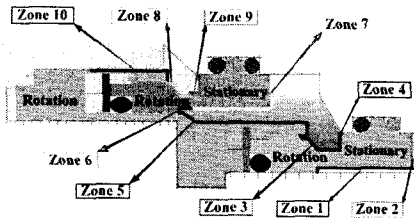


Fig. 3 Convection zone for a FEM analysis of mechanical face seals

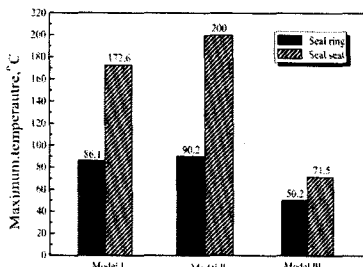
4. 해석결과 및 고찰

4.1 최고온도해석

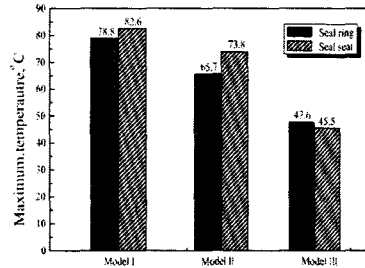
Fig. 4는 Fig. 2에서 제시한 대표적인 3가지 밀봉 접촉면 형상에 대하여 유한요소법으로 해석한 결과로, 각각의 모델에 대하여 온도분포를 상대적으로 비교한 최고온도 데이터를 제시한다.

Fig. 2의 3가지 모델에 대한 최고온도 해석결과와 Fig. 4에서 요약 제시하고 있다. 냉각수와 공기에 의해 방열되는 내측 밀봉장치 Fig. 4(a)의 경우는 마찰접촉 면적이 큰 모델 I과 모델 II에서 시일시트의 최고온도 172.6°C와 200°C의 최고온도를 발생한다. 이 때에 시일링과 시일시트의 상대적인 마찰열 발생은 2배 이상 높은 불균형을 나타내는 것으로 보아 열변형과 같은 커다란 문제점이 발생할 것으로 예상된다. 반면에 마찰접촉 면적이 작은 모델 III의 경우는 시일시트의 표면에서 71.5°C로 모델 II에 비하여 64%나 줄어든 안정된 최고온도를 나타내고, 시일링과 시일시트의 온도차가 20°C 정도로 시일링과 시일시트 사이의 온도가 비교적 균일하게 잘 소산되고 있음을 제시한다.

Fig. 4(b)는 외측 밀봉장치의 시일링과 시일시트에서 발생하는 최고온도를 3가지 모델에 대하여 제시한 결과이다. 마찰 접촉표면의 한 쪽은 순환수에 의해, 그리고 다른 쪽은 냉각수에 의해 방사되는 경우로 모델 I의 시일시트와 시일링에서 82.6°C와 78.8°C의 가장 높은 최고온도를 각각 나타내고, 마찰 접촉면 형상이 유사한 모델 II에서 안정된 73.8°C와 65.7°C로 비교적 균일한 온도분포를 제시한다. 또한, 모델 III의 경우는 시일링과 시일시트의 최고온도가 47.6°C와 45.5°C로 대단히 안정된 최고온도를 제시하는 것으로 보아, 시일링의 마찰 접촉면적을 작게 설계하는 것이 안정되고 균일한 마찰열 소산으로 인해 우수한 밀봉성능을 보여줄 것으로 예상된다.



(a) Inner primary sealing unit



(b) Outer primary sealing unit
Fig. 4 Maximum temperature between a seal ring and a seal seat

4.2 변형거동해석

본 연구에서는 Fig. 2에서 제시한 3가지의 해석모델에 대하여 Fig. 5에서 정의한 축방향의 변형 거동량을 유한요소법으로 해석한 결과를 Fig. 6에서 제시하고 있다.

Fig. 6(a)는 시일링과 시일시트의 건조마찰 작동과정에서 발생한 마찰열이 냉각수와 대기중의 공기에 의해 소산되는 내측 밀봉장치의 경우에 대한 해석결과이다. Fig. 2에서 모델 I의 시일링은 축방향으로 2.42 μm , 시일시트는 1.49 μm 를 각각 팽창시키고, 모델 II의 경우는 3.5 μm 와 2.04 μm , 그리고 모델 III의 경우는 0.17 μm 와 0.17 μm 로 각각 늘어나는 것으로 나타났다. 최대 변위량을 보여준 시일링 모델 II의 3.5 μm 에 비하여 모델 III의 시일링 0.17 μm 는 95%나 줄어드는 아주 우수한 시일모델이다.

Fig. 6(b)는 순환수와 냉각수에 의해 방열되는 외측 밀봉장치에 대한 시일링과 시일시트의 축방향 변형량으로 모델 I의 시일링은 1.81 μm , 시일시트는 0.21 μm 로 시일링에 비하여 88%나 줄어든 변형량을 나타내고, 모델 II의 경우는 1.07 μm 와 0.3 μm , 특히 모델 III의 경우는 0.08 μm 와 0.0003 μm 로 거의 무시할 정도로 크게 줄어든 축방향의 변형량을 각각 제시한다. 이들 해석결과는 내측 밀봉장치에 비하여 대단히 우수한 축방향의 거동량을 보여주지만, 모델 I이나 모델 II의 경우는 아직도 1 μm 이상으로 마멸이 충분히 진행될 범위에 들어가기 때문에 마멸에 의한 누설에 영향을 미칠 수 있다.

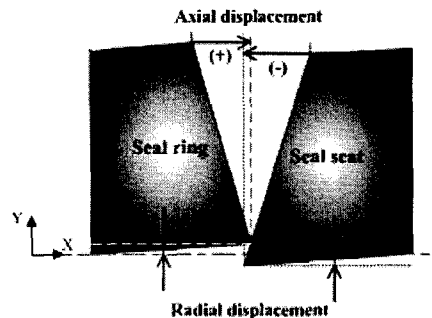
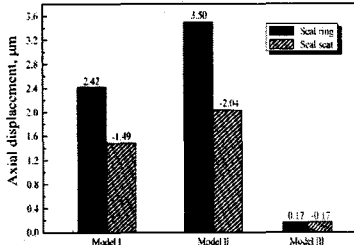
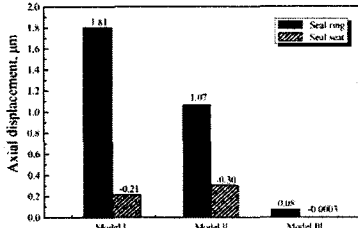


Fig. 5 Axial displacement of a deformed primary sealing component

따라서 모델 I과 모델 II의 축방향 거동은 시일링과 시일시트 사이의 변형량이 크다는 것이 문제이지만, 불균일성이 높다는 것도 누설의 원인으로 작용할 우려가 높다. 반면에 모델 III의 축방향 거동 변형량은 무시할 정도로 작지만 시일링과 시일시트의 상대적 편차도 대단히 작다는 결과를 제시한다. 따라서 접촉폭이 작은 모델 III의 축방향 거동량 해석결과를 미루어 추정할 때 누설 차단성은 우수하게 나타날 것이다.



(a) Inner primary sealing unit



(b) Outer primary sealing unit

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

4.3 최대접촉응력

Fig. 7은 내측 밀봉장치와 외측 밀봉장치의 미끄럼마찰 접촉표면에서 발생하는 법선방향의 최대접촉응력을 제시하고 있다. Fig. 7의 해석결과에 의하면 접촉면적이 가장 큰 모델 I의 내측 밀봉장치는 5.97MPa, 외측 밀봉장치는 7.45MPa로 작은 접촉응력을 나타내고, 모델 II의 경우는 내·외측 밀봉장치 모두가 대단히 유사한 8.17MPa와 7.95MPa로 각각 계산되었다. 반면에 마찰 접촉면적이 가장 작은 모델 III의 경우는 냉각수와 공기에 의해 방열되는 내측 밀봉장치에서 21.9MPa로 가장 높게 나타났지만, 순환수와 냉각수에 의해 방열되는 외측밀봉장치는 4.37MPa로 비교적 낮게 추정되었다.

상기의 FEM 해석결과에 의하면, 시일링과 시일시트에서 미끄럼마찰 접촉표면의 크기가 증가할수록 발생하는 마찰열은 크고 방열성은 떨어지기 때문에 마찰접촉 운동면적의 크기는 가능한 작게 설계하는 것이 바람직하고, 특히 열소산이 잘 이루어지도록 방열면적을 크게 설계하는 것이 기계평면시일 장치의 밀봉성을 안정적으로 유지하는 설계의 핵심 포인트이다.

현재 기계평면시일 장치에서 널리 사용하는 모델 I이나 모델 II의 경우는 바람직한 설계모델이 아니고, 모델 III처럼 마찰 접촉면의 크기가 작은 시일링과 열용량이 큰 시일시트 형상을 갖도록 설계하는 것이 바람직한 접촉식 시일장치

될 것이다. 또한 시일링과 시일시트는 주변의 유체에 의해 대류 열전달이 잘 이루어지도록 유체 접촉 방열면적을 크게 설계하는 것도 중요한 고려사항이 된다.

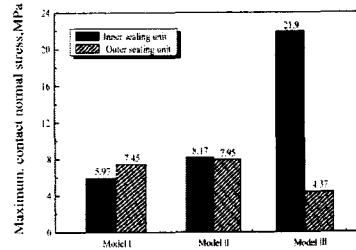


Fig. 7 Maximum contact normal stresses of inner and outer primary sealing units

4. 결론

본 연구에서는 기계평면시일에서 밀봉작용을 직접 담당하는 시일링과 시일시트 사이의 미끄럼 마찰작용에 의해 축적된 마찰열에 의해 발생하는 온도분포, 열변형 거동특성, 접촉응력 등에 대하여 유한요소법을 적용하여 서로 다른 형상을 갖는 시일링과 시일시트에 대하여 상대적으로 비교할 수 있는 평가 데이터를 제공하고자 한다.

현재 많이 사용하는 해석모델 I과 II의 경우처럼 마찰운동 접촉표면이 크면, 상대적으로 작은 마찰표면을 갖는 모델 III에 비하여 마찰열은 많이 발생하고 접촉표면의 거동량은 증가하여 마찰로 연결되는 것은 물론 시일링과 시일시트 사이의 접촉응력은 오히려 줄어들어 밀봉성에 불리한 측면이 있음을 보여준다. 반면에 마찰접촉 면적이 줄어든 모델 III의 경우는 냉각수와 순환수와 접촉하는 형상을 최적으로 설계할 경우 발생된 마찰열은 잘 소산하기 때문에 온도가 낮아지고 변형 거동량은 극히 줄어들어 마찰에 의한 위험성은 작아지고 접촉응력은 증가하여 시일장치의 밀봉성을 향상시키는 장점을 제시하고 있다.

References

- [1] 김청균, "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.
- [2] 김청균, 조승현, "기계평면시일의 마찰열 변형거동에 관한 수치적 연구," 한국윤활학회지, Vol. 19, No. 2, pp.49-56, 1998.
- [3] Chin-hsiu Li, "Thermal Deformation of a Mechanical Face Seal," ASLE Trans., Vol. 19, No. 2, pp.146-52, 1975.
- [4] MARC Analysis Research Corp., Ver.7.3, California, USA, 1999.