

## 소수력 터빈용 복수 기계평면시일의 접촉거동에 관한 유한요소해석

김청균<sup>†</sup> · 강현준

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

### Finite Element Analysis for the Contact Behavior in Double-Type Mechanical Face Seals Used for Small Hydro Power Turbine

Chung Kyun Kim<sup>†</sup> and Hyun Joon Kang

Tribology Research Center, Hongik University

**Abstract** – This paper presents the FEM analysis on the contact behavior characteristics of mechanical face seals in a small hydro-power turbine. Especially, the axial displacement and contact normal stress between a seal ring and a seal seat of a primary sealing unit have been analyzed as functions of rotating speed of a hydro-turbine, sealing gap, water and cooling fluid temperature. Those are strongly related to a leakage of water and wear between a seal ring and a seal seat. The FEM computed results present that the rotating speed of a hydro-turbine may be kept less than 800 rpm, and the sealing gap in a primary sealing unit is restricted 0.5~5. The coolant temperature in which is most influential parameter to the contact behaviors of a sealing unit may be kept less than 15°C for a safe operation of a sealing unit without a leakage and wear.

**Key words** – mechanical face seal, small hydro power, gap clearance, rotation velocity, coolant temperature, finite element method.

#### 1. 서 론

“대체에너지개발 및 이용보급촉진법시행규칙(2003. 1. 3 개정판)”에 의하면, 소수력 발전(small hydro power generation)은 물이 보유하고 있는 유동에너지를 회전동력 에너지로 변환하는 수력터빈(hydro-turbine)과 여기에 연결된 발전기(generator)에 의해 생산하는 전기에너지 용량이 10,000 kW 이하인 경우로 분류하고 있다. 그러나 발전규모가 큰 미국은 전기시설 용량을 15,000 kW, 중국은 25,000 kW로 전기용량을 높여 소수력 발전으로 분류하고 있다.

소수력 발전은 신재생에너지(new and renewable energy)의 한분야로 물이 갖고 있는 위치에너지와 운동에너지를 수력터빈과 발전기의 수력발전 시스템에 의해 전기에너지를 얻는다. 소수력 자원은 호수나 강, 저수

지 등 국지적으로 분포하는 지역의 소규모 수자원을 활용하기 때문에 비록 규모는 작지만 친환경적 전기에너지 생산시스템이다. 소수력으로 전기를 생산하는 수자원은 농업용, 하수처리, 정수처리, 공업용수 등 활용도를 다목적으로 개발하면 경제성을 더 높일 수 있다. 특히, 산과 계곡이 발달된 지형을 잘 활용하고 수자원을 시스템적으로 관리한다면 신재생에너지에 의한 에너지 자원의 다변화 및 환경보존 자원관리 측면에서 소수력 발전은 개발 잠재력이 높기 때문에 기술개발의 중요성이 항상 강조되고 있다.

소수력 터빈의 축방향 밀봉을 위해 장착하는 기계평면시일은 여타 시일장치와는 다르게 수력터빈의 회전축 직경이 크고 회전속도는 작지만, 요동회전 토크가 비교적 크다는 특징을 갖고 있다. 따라서 소수력 터빈용 기계평면시일은 미끄럼 마찰열에 의한 시일링과 시일시트 접촉면의 열적손상 및 밀봉안전성을 확보하기 위해 두개의 시일장치를 병렬로 설치한다. 시일장치는

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

수력터빈이 잠겨있는 순환수 즉, 물이 터빈의 회전축을 타고 올라와 누설되는 현상을 차단하고, 특히 누설된 물에 의해 베어링 손상을 방지하는 시일의 밀봉기능을 강조한다.

소수력 터빈에 설치된 시일장치에서 순환수인 물과 접촉하는 외측부의 기계평면시일은 시일링과 시일시트에 물과 냉각수에 의해 우수한 냉각성을 확보한 것에 비하여, 공기와 접촉하는 내측부의 기계평면시일은 냉각수와 공기에 의해 냉각되므로 상대적으로 마찰열[1,2]이 축적될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 이들 두개의 시일장치에 대해 소수력 터빈의 운전조건과 환경조건을 적용한 기계평면시일 장치의 마찰 접촉면에 대한 온도분포, 축방향 변형 거동량 및 접촉응력 등 접촉거동 특성문제를 FEM으로 해석하고자 한다.

## 2. 해석모델 및 작동조건

기계평면시일은 수력터빈의 회전축에 장착되어 순환수의 외부누설을 차단하기 위한 장치이다. Fig. 1에서 보여준 것처럼 두개의 시일장치를 병렬로 설치하고, 회전축을 따라서 누설되는 물을 차단함으로써, 하중지지 를 위해 설치한 베어링의 손상을 방지한다.

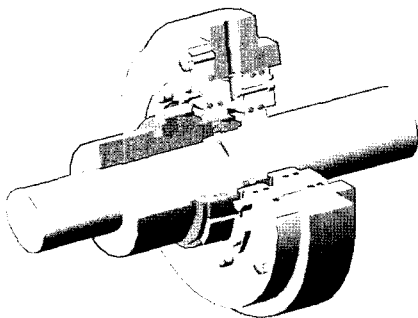


Fig. 1. Double sealing units with mechanical face seals for a hydro-power turbine.

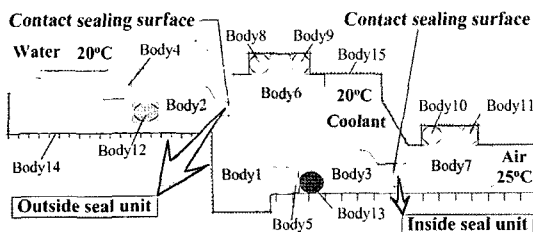


Fig. 2. Simplified model for a FEM analysis.

### 2-1. 해석조건

Fig. 2는 밀봉을 실질적으로 담당하는 시일링과 시일시트 상호간의 접촉거동 특성을 해석하기 위해 수력터빈의 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치(outside seal unit)와 공기와 접촉하는 내측부 시일장치(inside seal unit)의 구성도를 보여준다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 기계평면시일을 2차원 축대칭 모델로 가정하고 유한요소해석을 수행하였다.

수력터빈의 순환수인 물의 온도는 20°C의 상온이고, 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치에 작용하는 수압은 0.2 MPa이다. 동시에 25°C의 공기와 접촉하는 내측부 시일장치에는 0.1 MPa의 대기압이 작용한다고 가정한다. Fig. 2에서 이들 두개의 시일장치 사이에 공급되는 20°C의 냉각수가 0.15 MPa의 압력으로 순환함으로써 두개의 시일장치는 원활한 밀봉성능을 확보할 수 있도록 구성되어 있다.

### 2-2. 가정

기계평면시일에서 밀봉작용을 직접 담당하는 시일링과 시일시트 사이의 마찰 접촉면에 대한 거동특성을 해석하기 위해 필요한 가정은 다음과 같다.

- 시일링과 시일시트의 상대마찰 미끄럼 운동에 의해 발생된 마찰열 모두는 시일링과 시일시트 소재로 전달되고, 누설되는 유체에 의해 방출되는 열량은 무시한다.
- 시일링과 시일시트는 완벽한 밀봉을 위해 완전한 밀봉접촉이 이루어지는 것이 아니라 0.1 μm의 밀봉간극으로 분리되어 건조마찰 상태를 유지한다.
- 시일장치의 초기 온도를 20°C로 가정한다.
- 두개의 시일장치 사이로 공급되는 냉각수의 유입속도는 3 m/s이다.
- 터빈축의 회전속도 기준치는 900 rpm이다.
- 시일링과 시일시트 사이의 마찰계수는 0.06으로 일정하고, 그 외의 마찰계수는 0.3으로 가정한다[3].

본 논문에서는 시일링과 시일시트로 구성된 밀봉 접촉면의 거동특성을 해석하기 위해 터빈축의 회전속도, 밀봉간극, 냉각수 온도 및 압력, 냉각수의 공급속도, 순환수 압력, 스프링의 반력 등을 설계변수로 고려하고 있다. Table 1은 시일장치를 해석하기 위해 제시된 기준 데이터(reference data)이다.

### 2-3. 사용소재

건조마찰 상태를 유지하면서 밀봉을 해야 하는 기계

**Table 1. Analysis parameters**

Parameters	Values
Rotating speed, rpm	900
Sealing gap, $\mu\text{m}$	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
Reaction force of a spring, N	60

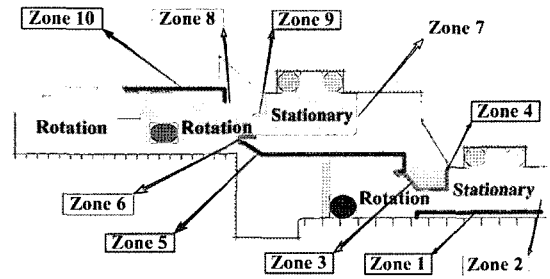
평면시일의 시일링과 시일시트는 접촉면에 작용하는 마찰력, 마찰열, 강도 등을 충분히 견디어야 한다. 여기에 시일소재는 윤활성, 열전도성, 내마멸성, 내화학성, 저마찰성 등이 우수해야 하고, 동시에 고온마찰에 따른 열팽창계수가 대단히 낮은 고온특성을 유지해야 한다. 밀봉면에 극미하게 형성되는 액체박막 또는 기체박막은 미끄럼 마찰면을 따라서 발생하는 밀봉압력 분포를 균일하게 유지하기 위해 소재의 기계적 강도와 탄성계수, 특히 열팽창계수가 높은 소재를 선정하는 것이 유리하다. 소수력 터빈은 회전속도가 높지 않기 때문에 원심력에 의한 문제는 없지만, 회전속도가 과도하게 높아질 경우 시일링과 시일시트의 소재 밀도를 낮추어 원심력에 의한 변형거동 문제를 해결한다.

상기와 같은 작동조건을 대체적으로 만족하는 시일 소재로 TiC, WC, SiC 등이 널리 사용되는데, 본 연구에서는 시일재질로 가장 많이 사용하는 SiC를 선정하였다. SiC 소재는 트라이볼로지 특성이 우수한 마찰 소재로 부식에 대한 저항이 높고 열전도성이 우수하며, 제작과정에서 응축이 발생하지 않아 가공성이 우수한 소재로 알려져 있다[4]. Table 2는 SiC 소재의 기계적, 열적특성을 제시한다.

**2-4. 마찰 열용량 및 대류 열전달 계수**

미끄럼마찰 상대접촉 운동면에서 발생하는 마찰열은 접촉운동에 따른 마찰접촉모드, 마찰소재의 특성, 접촉면의 크기, 회전축의 속도, 밀봉간극 등에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서 제시한 Fig. 2의 해석모델에 Table 1의 해석조건을 적용하여 열용량을 계산하면 공기와 접촉하는 내측부의 시일장치와 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치의 열용량은  $1,162,688 \text{ W/m}^2$ ,  $1,385,369 \text{ W/m}^2$ 으로 각각 주어진다.

Fig. 3은 Fig. 2에서 제시한 시일장치 모델을 FEM



**Fig. 3. Convection heat transfer zone.**

**Table 2. Physical and thermal properties of SiC material**

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

**Table 3. Convection heat transfer coefficient**

Zone	heat transfer coefficient, $h_i$
1	87.8343497
2	82.6194499
3	70102.2113215
4	9550.9369880
5	72563.9360168
6	74399.6703692
7	6923.1495636
8	83151.4712943
9	46485.1244892
10	84970.8756854

으로 해석하는데 필요한 유체의 대류 열전달 적용지역을 10개로 구분한 것이다. 따라서 유체에 의해 시일장치의 냉각효과는 Table 2에서 제시한 특성치를 가지고 계산된 10개 지역 각각에 대한 대류 열전달 계수를 Table 3에서 제시하고 있다.

**3. 해석 결과 및 고찰**

기계평면시일의 밀봉은 시일링과 시일시트 사이의

미끄럼 마찰운동을 하는 과정에서 축방향으로 작용하는 접촉면압에 의해 이루어진다. 이러한 밀봉작용은 특히 건조마찰 운동을 하는 동안에 마찰열이 발생하고, 발생한 마찰열의 일부는 시일링과 시일시트의 소재내부로 전달되어 소재의 강도를 약화시키고 동시에 변형 거동 에너지로 소산되지만, 나머지는 주변의 유체에 의해 방열되면서 마찰 접촉면의 열발생과 열소산이 열적 평형을 유지한다.

시일링과 시일시트 사이의 마찰거동 특성에 가장 큰 영향을 주고, 시일 설계자들이 항상 관심을 갖는 시일링과 시일시트의 형상과 재질, 그리고 이들 마찰 접촉부에서 발생하는 최고온도와 최대접촉응력, 축방향 변형 거동량(axial displacement), 실제접촉면적(real contact area) 등이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 작동 조건에 의해 발생하는 마찰 접촉면의 거동특성을 MARC[5] 유한요소 프로그램으로 해석하고자 한다.

회전마찰 운동을 하는 Fig. 3의 시일 접촉모델을 해석하기 위해 Fig. 4에서는 시일링과 시일시트의 마찰열에 의해 발생하는 마찰표면의 접촉거동에 관련된 축방향의 최대 변위량을 제시하고 있다. 즉, 미끄럼 마찰면은 상대접촉 운동을 하는 과정에서 시일소재가 갖는 열팽창 크기에 의해 하단부는 접촉을 하지만, 상단부는 벌어지는 부채꼴 형상을 보여주고 있다.

본 논문에서는 기계평면시일의 열변형을 유발하는 마찰 접촉면의 최고온도와 마멸량 발생에 직접적인 영

향을 미치는 축방향의 변위량, 밀봉된 유체의 누설을 차단하는 기준으로 사용하는 최고접촉면압을 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

### 3-1. 회전속도의 영향

#### 3-1-1. 최고온도 해석

터빈축의 속도가 700~1,100 rpm인 경우 순환수인 물과 접촉하는 외측부 시일장치의 마찰표면에서 발생하는 최고온도는 43.4°C이고, 공기와 접촉하는 내측부 시일장치의 최고온도는 75.3°C로 계산되었다. 결국 공기와 접촉하면서 밀봉작용을 하는 내측부의 시일장치는 순환수로 냉각하는 경우에 비하여 약 30°C 높은 온도상태를 유지하는 것으로 나타났고, 이것은 마찰표면의 축방향 변형 거동량이나 접촉면압을 증가시키는 원인으로 작용한다.

시일장치는 미끄럼 마찰운동을 하는 과정에 외측부 시일장치는 내측부 시일장치에 비하여 높은 마찰열을 발생함에도 불구하고 낮은 온도분포를 나타내는 것은 순환수와 냉각수에 의해 방열이 잘되는 구조를 갖기 때문이다. 마찰면에서 발생한 마찰열은 특히 축방향의 변형 거동량을 유발하고, 이것은 접촉면의 마멸을 발생시킨다. 마찰면에서 발생한 마멸현상은 시일장치의 누설을 일으키는 원인으로 작용하므로 마찰면에서 발생하는 최고온도는 시일장치의 밀봉성과 내구성에서 특별한 의미를 갖게 된다.

#### 3-1-2. 축방향 최대 변위량 해석

Fig. 5는 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치와 공기와 접촉하는 내측부 시일장치의 시일링과 시일시트 접촉면에서 발생하는 축방향의 최대 변형 거동량을 터빈축의 회전속도 향으로 제시하고 있다. Fig. 5(a)의 해석결과에 의하면 순환수인 물과 접촉하는 외측부 시일장치의 축방향 거동량은 변동폭이 대단히 작게 변하는 것으로 나타났다. 이것은 순환수와 냉각수에 의한 대류 열전달이 원활하게 진행되어 회전속도에 의한 영향이 작다는 것을 의미한다. 반면에 공기와 접촉하는 내측부의 시일장치에서 회전속도는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 특히 시일시트보다는 시일링의 축방향 변형 거동량이 큰 것으로 추정되었다. 결국 회전속도가 증가함에 따라 열용량이 작은 시일링의 변형 거동량이 증가되는 현상이 발생되고 있음을 알 수 있다.

기계평면시일에서 시일링과 시일시트의 가공정밀도는 0.5~1 μm 정도이므로 Fig. 5에서 제시한 해석결과

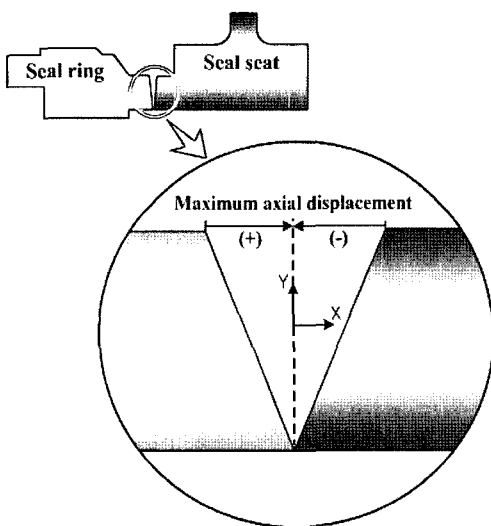
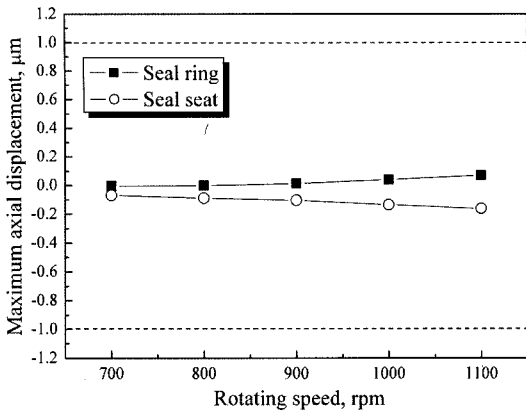
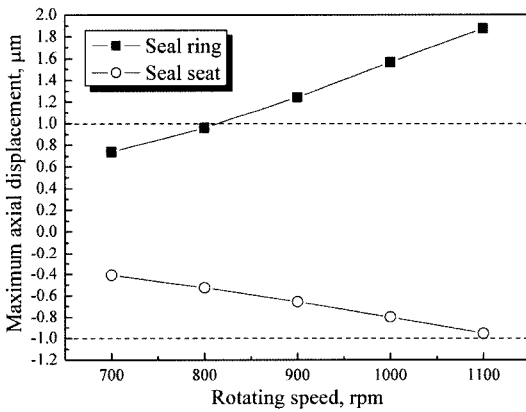


Fig. 4. Definition of axial displacement in a primary sealing component.



(a) Outside seal unit



(b) Inside seal unit

Fig. 5. Maximum axial displacement between a seal ring and a seal seat as a function of a rotating speed.

가  $\pm 1 \mu\text{m}$ 를 초과하게 되면 마찰표면에서 발생하는 축방향 변형 거동량은 문제가 될 수 있다는 것이다. 즉, 마찰표면의 열적 뒤틀림 변형량이 증가하면서 누설은 발생되고, 또한 국부적인 편마멸을 일으키면서 종국에는 누설을 더욱 조장하는 결과를 초래하게 된다.

Fig. 5(a)에서 제시한 해석결과에 의하면 순환수인 물과 접촉하는 시일링과 시일시트의 축방향 거동량은 대단히 안정적이라 할 수 있다. 그러나 공기와 접촉하는 내측부의 시일장치에 대한 Fig. 5(b)의 해석결과는 축방향 변형 거동량이 크게 발생하는 것으로 나타났고, 시일표면의 가공정밀도  $\pm 1 \mu\text{m}$ 를 고려하면 내측부 시일장치는 800 rpm 이하의 회전속도에서 작동하도록 제한하는 것이 시일장치의 누설을 차단할 수 있다는 해석결과를 제시하고 있다.

Fig. 5의 해석결과는 시일장치가 설치된 터빈 주변

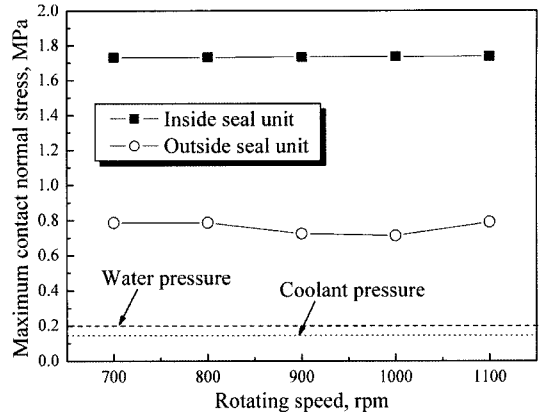


Fig. 6. Maximum contact normal stress in a primary sealing component as a function of a rotating speed.

의 순환수나 냉각수, 공기 등에 의해 전달되는 냉각조건이 시일의 변형 거동성에 큰 영향을 미치고 있음을 잘 보여주고 있다.

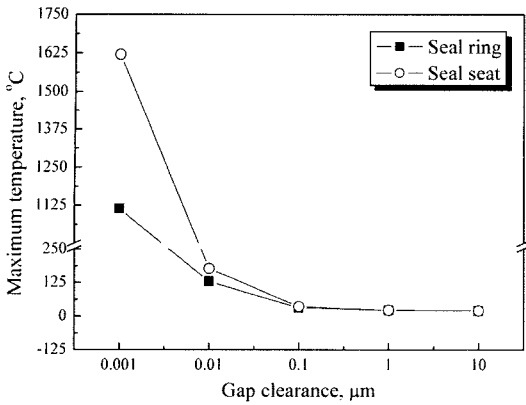
### 3-1-3. 접촉면압 해석

시일링과 시일시트가 축방향으로 밀봉작용을 과정에서 발생하는 접촉면압은 순환수의 누설과 직접적인 관련이 있기 때문에 시일의 성능 해석에서 가장 중요하게 다루는 설계인자이다. Fig. 6은 시일링과 시일시트 마찰 접촉면에서 발생하는 법선방향의 접촉응력, 즉 접촉면압을 회전속도에 대하여 제시하고 있다. 순환수와 접촉하는 외측부 시일은 0.8 MPa의 최대접촉응력으로 4배정도 안전하고, 공기와 접촉하는 내측부 시일은 1.75 MPa로 8배정도 안전한 것으로 계산되었다. 즉, 외측부 시일장치를 통하여 순환수인 물이 누설되지 않으며, 동시에 냉각수에 의한 공기측 누설도 완벽하게 차단하고 있다는 것이다. 그러나 시일장치의 접촉면압을 너무 높게 유지하면 고마찰에 의한 변형량 증가와 마멸량 발생 측면에서 오히려 불리해지고, 내구성이 떨어지는 문제점이 있다.

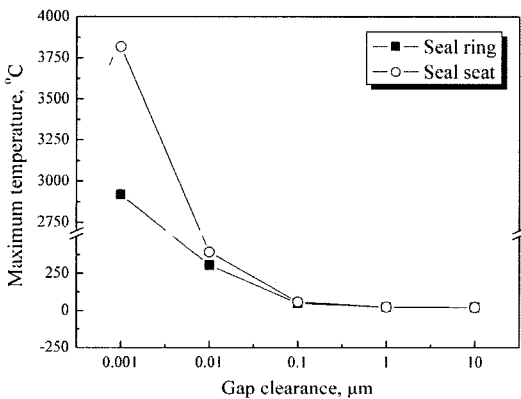
### 3-2 밀봉간극의 영향

#### 3-2-1. 최고온도 해석

Fig. 7은 시일링과 시일시트 사이의 밀봉간극이 0.001  $\mu\text{m}$ 에서 10  $\mu\text{m}$ 로 증가할 때 순환수인 물과 접촉하는 외측부 시일장치와 공기와 접촉하는 내측부 시일장치에서 발생하는 최고온도를 보여주고 있다. 밀봉 접촉면의 간극이 줄어들어 따라 미끄럼마찰 접촉면에서 발생하는 온도가 급격하게 증가하면서 외측부와 내측부 시일장치의 시일시트에는 1625°C, 3818°C로 각각



(a) Outside seal unit



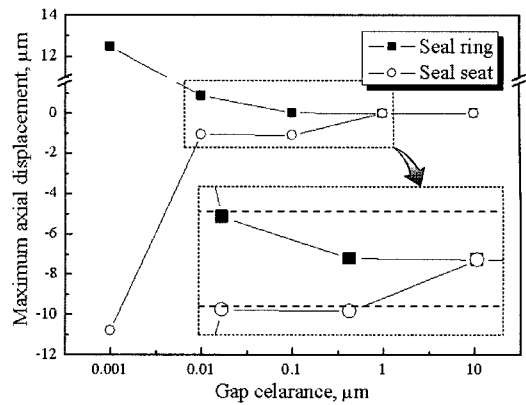
(b) Inside seal unit

Fig. 7. Maximum temperature in a primary sealing unit as a function of a gap clearance.

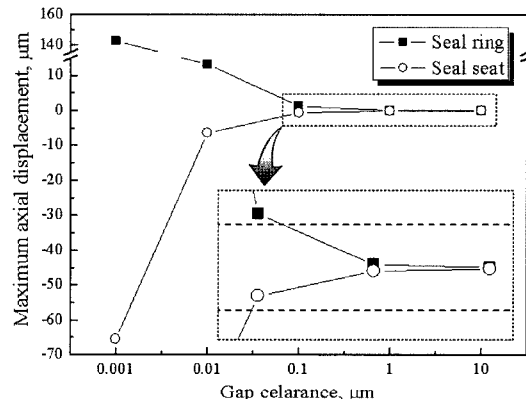
추정되고, 시일링에는 1125 $^{\circ}\text{C}$ 와 2950 $^{\circ}\text{C}$ 로 대단히 높게 계산되었지만 실제에서는 작동하기 어려운 해석결과이다. 그러나 기계평면시일의 실제 밀봉간극은 약 0.1  $\mu\text{m}$  보다 크다는 점을 감안하면 시일장치에서 발생하는 마찰열 온도는 방열작용에 의해 충분히 견딜 것이라는 해석결과를 제시하고 있다.

3-1-2. 축방향 최대 변위량 해석

Fig. 8은 기계평면시일의 밀봉간극 변동에 따른 시일링과 시일시트 사이에서 축방향으로 발생한 최대 변위량을 보여주고 있다. 밀봉간극이 줄어들수록 시일의 접촉면에서 발생하는 축방향 변위량은 급격하게 증가하는 결과를 제시하고 있다. 본 연구에서 극단적인 경우로 제시한 0.001  $\mu\text{m}$ 의 밀봉간극을 유지하는 경우는 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치에서 12.5  $\mu\text{m}$ 이 발생하고, 공기와 접촉하는 내측부 시일장치에서는 142.5  $\mu\text{m}$ 로 외측부 대비 10배 이상이나 큰 변위량을



(a) Outside seal unit



(b) Inside seal unit

Fig. 8. Maximum axial displacement between a seal ring and a seal seat as a function of a gap clearance.

발생하여 즉각적인 누설을 유발하고, 소재의 마멸을 진행하는 문제점을 제기할 것이다. 이는 순환수 또는 냉각수로 인한 대류 열전달이 공기로 인한 대류 열전달보다 훨씬 높은 냉각성능을 갖고 있기 때문에 외측부 시일장치에서 작은 변형 거동량이 도출된 것이다. 따라서 접촉식 시일장치에서 냉각성능 향상은 대단히 중요하다라는 결과를 다시 한번 보여주고 있다.

Fig. 8의 해석결과에서 제시하는 것처럼, 원활한 밀봉작용을 하는 실제구간은 0.1~1  $\mu\text{m}$  정도라는 감안하면 주시일링 장치의 마찰면에서 발생하는 Fig. 8의 축방향 변형 거동량 데이터는 안전하다는 결론에 도달하게 된다.

이러한 연구결과는 기존의 접촉식 기계평면시일에 대해 수행된 많은 연구결과[6]에서 제시한 최적의 밀봉간극이 3  $\mu\text{m}$ 라는 점을 고려하면 본 연구결과는 우수한 해석결과를 제시하고 있다.

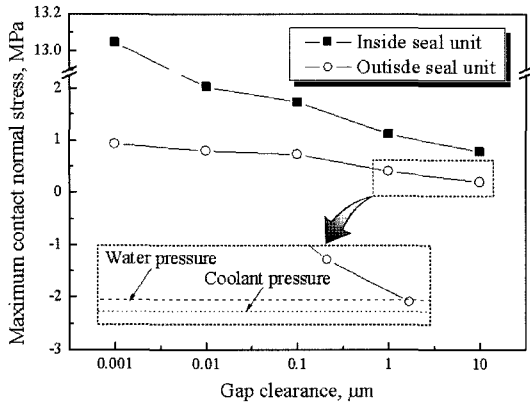


Fig. 9. Maximum contact normal stress for two sealing units as a function of a gap clearance.

3-2-3. 접촉면압 해석

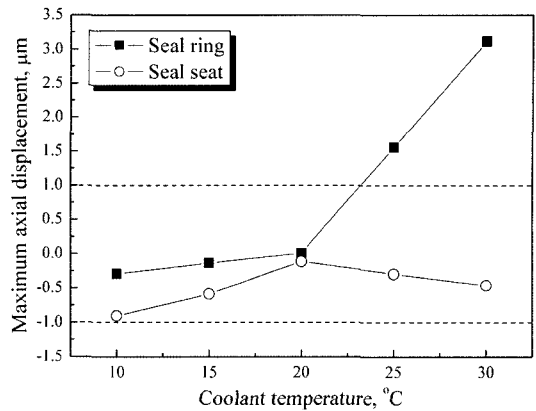
Fig. 9는 밀봉간극의 변동에 따른 시일링과 시일시트 사이에서 발생하는 최대접촉면압을 보여주고 있다. Fig. 9의 해석결과에 의하면, 밀봉간극이 증가함에 따라 마찰 접촉면에서 발생하는 최대접촉응력은 감소하는 경향을 나타내는데, 이것은 마찰접촉면에서 발생하는 열변형 거동량이 급격하게 줄어들기 때문이다. 밀봉간극이 줄어들면 마찰면에서 발생하는 접촉면압은 급격하게 증가하여 누설에는 문제가 없으나, 마찰력이나 변형 거동량의 과도한 증가로 특히 마멸발생으로 인한 누설 연계를 예상할 수 있고, 반대의 경우는 시일의 원활한 구동은 보장하지만 누설이라는 더 큰 문제점을 유발하게 된다.

Fig. 9에서 밀봉간극을 10 μm 이상으로 유지할 경우, 특히 외측부 밀봉장치에서 발생된 접촉응력은 0.197 MPa로 추정되어 순환수의 압력 0.2 MPa보다 낮아 터빈의 순환수는 외측부 시일장치로부터 누설을 예상할 수 있다. 결국 과도한 밀봉간극 설정은 시일장치의 원활한 구동을 보장할 수 있지만, 기계평면시일의 밀봉성을 확보할 수 없게 되어 시일장치는 즉시 교체되어야 한다.

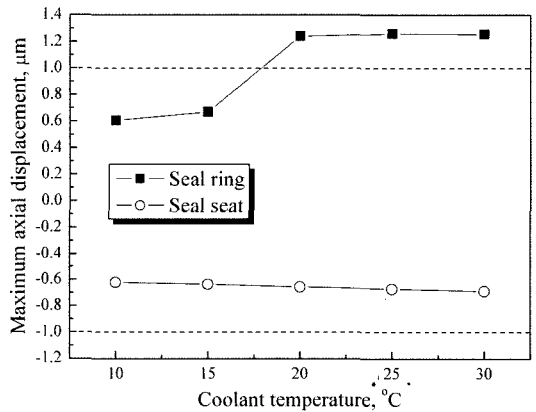
3-3. 냉각수 온도의 영향

3-3-1. 축방향 변형 거동량 해석

Fig. 10은 냉각수의 온도변화에 따른 외측부 시일장치와 내측부 시일장치에서 축방향으로 발생하는 최대 거동량 변화를 보여주고 있다. 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치의 시일링과 시일장치에서 발생하는 축방향 거동량 해석 데이터를 기준으로 볼 때 냉각수 온



(a) Outside seal unit



(b) Inside seal unit

Fig. 10. Maximum axial displacement between a seal ring and a seal seat as a function of a coolant temperature.

도를 최대 23°C 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 반면에 공기와 접촉하는 내측부 시일장치는 냉각수 온도를 18°C 이하로 유지해야 축방향 거동량이 안전한 변형거동을 유지할 수 있다는 결과를 보여준다. 이것은 온도조건이 높은 공기측은 순환수와 접촉하는 기계평면시일에 비하여 냉각수 온도조건을 더 제한해야 안정된 밀봉작용을 한다는 결과이다. 결국, 실제로 소수력 밀봉장치에 사용되는 냉각수 온도는 15°C 이하로 유지하는 것이 밀봉 거동성 측면에서 바람직하다는 해석결과이다.

3-3-2. 접촉면압 해석

Fig. 11은 냉각수의 온도변동에 따른 시일링과 시일시트 사이의 최대접촉응력을 냉각수와 접촉하는 외측부 시일장치와 공기와 접촉하는 내측부 시일장치에 대하여 제시하고 있다. 해석결과에 의하면, 순환수인 물

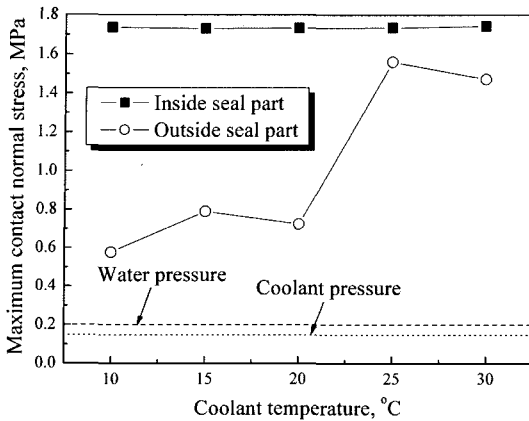


Fig. 11. Maximum contact normal stress for two sealing units as a function of a coolant temperature.

과 접촉하는 외측부 시일장치는 냉각수의 온도변동에 따른 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있으나, 내측부의 시일장치는 온도의 변동폭에 미치는 영향은 작다는 결과를 제시한다. 그러나 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치는 물과 냉각수에 의한 대류 열전달이 우수하여 낮은 최대접촉응력을 발생하지만, 공기와 냉각수에 의한 내측부 시일장치는 방열효과가 상대적으로 작아 높은 최대접촉응력을 발생시키는 것으로 생각된다. 즉, 냉각수와 공기에 의해 냉각되는 내측부 시일장치는 대류 열전달의 차이가 커서 냉각수에 의한 온도영향을 크게 받지 않지만, 순환수와 접촉하는 외측부 시일장치는 대류 열전달 차이가 거의 없는 순환수와 냉각수에 의한 냉각작용이 잘 이루어지므로 냉각수의 온도변동에 따라 민감한 변형거동을 보여준다.

Fig. 11에서 제시한 최대접촉응력은 모든 냉각수 온도조건에 대하여 최소 3배에서 최대 8배 이상을 유지하므로 소수력 기계평면시일 장치의 밀봉성은 비교적 안전하다고 생각할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 소수력 터빈에 장착된 기계평면시일

의 미끄럼마찰 접촉면에서 발생하는 최고온도, 축방향 변형 거동량, 접촉면압을 누설과 연계하여 해석하였다.

기계평면시일의 작동성능은 회전속도, 밀봉간극, 냉각수 온도에 의해 큰 영향을 받는 것으로 밝혀졌고, 이들의 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 터빈축의 회전속도를 900 rpm 이상으로 유지하면 축방향 변형 거동량이 가공정밀도  $\pm 1 \mu\text{m}$  이상으로 증가하게 되어 특히 공기와 접촉하는 내측부 시일장치는 마찰접촉면의 편마멸과 이로 인한 누설발생이 예상되어 회전속도를 800 rpm 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

(2) 밀봉간극이  $0.1 \mu\text{m}$  이하가 되면 축방향 변형 거동량이 급격하게 상승하여 마찰접촉면의 국부적인 마찰열 증가와 편마멸 발생이 예상된다. 따라서 시일장치의 밀봉간극은 0.2 MPa의 순환수 압력에 대하여 0.5~5  $\mu\text{m}$ 의 밀봉간극을 유지하도록 설계하는 것이 바람직하다.

(3) 냉각수 온도가 20°C 이상이 되면 내측부 시일장치의 축방향 거동량이  $\pm 1 \mu\text{m}$ 를 초과하게 되므로 마멸과 누설을 차단하기 위해서 냉각수 온도를 15°C 이하로 유지하는 것이 바람직하다.

#### 참고 문헌

1. Yih-Tsuen Wu and Burton, R.A., "Thermo-elastic and Dynamic Phenomena in Seals," *J. of Lub. Tech.*, Vol. 133, 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. Chin-hsiu Li., "Thermal Deformation in a Mechanical Face Seal," *ASLE Transaction*, Vol. 19, No. 2, pp. 146-152, 1975.
4. Berroth, K.E., "Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Applications," *Journal of STLE*, pp. 770-773, 1990.
5. MARC Analysis, Ver. 7.3, 1999.
6. Gabriel, R.P., "Fundamentals of Spiral Groove Non-contacting Face Seals," *ASLE Lubrication Engineering*, Vol. 35, 7, pp. 367-375, 1980.