

수차용 봉수장치의 마찰·마모특성에 관한 실험적 연구

김 청균¹⁾, 신 인철²⁾, 임 광현³⁾

홍익대학교¹⁾, 대양산업²⁾³⁾

Experimental Study on the Friction and Wear Characteristics of Contact Sealing Unit for a Water Turbine

Chung Kyun Kim, Ihncheol Sihn, Kwang-Hyeon Lim

Hongik University, Dai-Yang Industries, Co.

Key words : Water turbine(수차), Sealing unit(밀봉장치), Friction and wear(마찰 및 마모)

Abstract : This paper presents the friction and wear characteristics of contact type sealing unit for a water turbine of a small hydro-power generation, which is to stop a leakage of a circulating water from a outside of an impeller to an inside of a rolling bearing. The surface wear strongly affect to the seal life of a mechanical face seal. In this study, the hardness of a stainless steel in which is a heat-treated is 892.8 in Vickers hardness and the hardness of silicone carbide of SiC is 714.1 in Vickers hardness. The surface hardness of a heat-treated stainless steel is 25% high compared with that of a ceramic material of SiC. The contact modes of rubbing surfaces are a dry friction, a water film friction and a mixed friction that is contaminated by a dust, silt, and moistures, etc. These two factors of a contact rubbing modes and a material property are very important parameters on the tribological performance such as a friction and wear between a seal ring and a seal seat. The experimental result shows that the surface hardness of a seal material is very important on the friction coefficient and a wear volume. Thus, the results recommend higher hardness of a seal material, which may reduce a friction loss and increase a wear life of primary seal components.

1. 서 론

물이 갖고 있는 위치에너지와 운동에너지를 수차에 공급하여 회전력을 얻어 발전기를 돌려줌으로써 전기에너지를 생산된다. 이때 수차의 회전차를 안전하게 고정하는 것은 물론이고 회전력을 안정적으로 확보하기 위해 베어링을 설치한다. 동시에 회전차를 중심으로 내측과 외측의 압력차에 의해 회전축을 따라 올라오는 누수(water leakage)를 차단하기 위해 접촉식의 봉수장치, 즉 기계평면시일을 설치하여 베어링의 윤활성을 보장하는 중요한 역할을 한다[1].

수차의 회전 안정성을 확보하기 위해 마찰력이 작은 베어링을 설치하여 윤활작용을 보장하고, 봉수장치(sealing unit)를 설치하여 순환유체인 물의 외부 누설현상을 완벽하게 차단하는 것이 수차의 회전력을 가장 안전하게 확보하는 핵심기술이

다. 소수력 수차에 사용되는 봉수장치는 물의 에너지를 흡수하여 회전차를 돌릴 때 발생하는 토크를 구조적으로 담당해야 하기 때문에 대형 회전차를 구동하는데 적합한 큰 직경의 축을 사용한다.

베어링의 회전성을 안전하게 보장하기 위해서는 윤활유의 안정된 공급과 순환이 필수적인데, 수차의 회전축을 따라서 유입된 누수가 베어링에 침입하게 되면 윤활유의 점도는 저하되어 유막형성이 어려우므로 기계평면시일과 같은 접촉식 시일장치를 불가피하게 설치해야 한다.

본 실험에서는 기계평면시일을 이중으로 설치한 소수력 수차용 봉수장치에서 발생하는 마찰 및 마모특성을 실험적으로 고찰하고자 한다. 봉수장치의 시일링 소재로 널리 사용하는 SiC 세라믹과

1) 홍익대학교
E-mail: chungkyunkim@empal.com Tel: 02-320-1623
2)3) 대양산업

STS 소재[2]에 대한 마찰 및 마멸시험을 수행하여 시일소재의 누수시험, 마모시험을 통한 내구성 평가를 실시하고자 한다. 이때에 마찰접촉 운동모드는 시일링과 시일시트의 축 중심으로 하중이 가해진 상태에서 건조마찰, 수막마찰, 먼지나 작은 모래입자 등과 같은 이물질 개입마찰 등에 대한 트라이볼로지 특성에 대한 실험적 결과를 제시한다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치와 실험방법

실험에 사용된 마찰/마모 시험기는 핀-디스크 타입으로 시일시편의 상부에 설치한 스프링에 의해 지지·고정된 시편은 회전운동을 하고, 이때에 걸리는 초기의 동일한 하중이 시편에 항상 균일하게 가할 수 있도록 3점(three point)에서 접촉하도록 하였다.

마찰·마멸 실험을 위해 시편에 가한 하중은 10-30N이고, 이를 하중은 스프링에 의해 수직방향의 하중을 가하는 메커니즘으로 회전중에도 시편에는 항상 균일한 하중이 마찰표면에 고르게 작용하도록 안정된 부하조건을 보장하였다. 미끄럼·마찰운동을 하는 디스크 시편에는 0.2m/s의 안정된 회전속도를 설정하여 초기나 중기의 회전속도와 유사하도록 하였고, 상부에서 가하는 스프링의 정하중과 디스크의 회전에 따른 마찰토크는 로드 셀로 측정하여 환산한 결과를 마찰계수로 제시하고 있다. 또한, 시편의 마모량은 시험을 하기 전과 후에 변화된 시편의 무게를 초정밀 하중계(balance)로 측정하였다.

2.2 실험조건

수차용 봉수장치의 주시일링 장치인 시일링과 시일시트의 미끄럼·마찰 접촉표면에서 발생하는 마찰·마모 특성을 고찰하기 위해 마찰면의 접촉모드는 가혹한 건조마찰, 수분이나 순환수인 물이 개입된 수막마찰, 먼지나 마모입자, 모래 등이 개입된 연삭마찰의 3가지 경우에 대해 선정하였다.

미끄럼·마찰 접촉운동에 의해 발생하는 마찰계수와 마모량은 미끄럼·마찰 접촉면에 가해지는 스프링 방식의 정하중(dead weight)과 시험편의 회전속도에 의해 결정된다. 이때 시편에 가해지는 하중은 10N, 20N, 30N의 3가지이고, 각각의 하중 조건에 대하여 시일링 시편을 0.2m/s 회전속도로 운전하면 주시일링 장치의 열적 평형에 도달하는 시간은 대략 8분정도 걸린다.

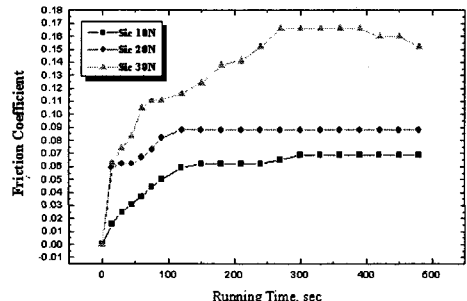
3. 실험결과

3.1 마찰특성 실험결과

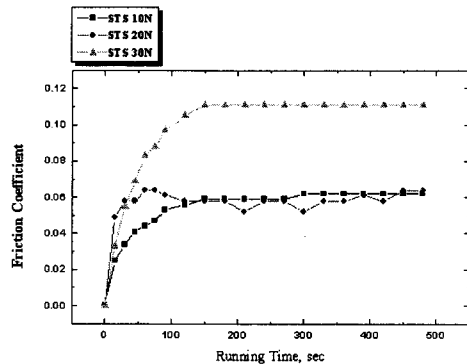
3.1.1 건조마찰접촉

Fig. 1은 건조마찰 운동을 하는 표면에 10-30N의 정하중을 가한 작동조건에서 SiC와 STS의 2가지 소재에 대한 마찰계수 결과이다. 실험결과에 의하면 미끄럼·마찰 접촉표면에 가한 하중이 증가할수록 초기의 마찰계수는 급격하게 증가하지만, 마찰운동 시간이 길어지면서 건조마찰의 안정화는 완만하게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

시일링의 미끄럼 운동조건이 건조마찰인 경우에 대해 수행한 SiC 세라믹과 STS의 미끄럼·마찰 특성결과를 보여준. Fig. 1(a)에 의하면, 정상상태의 SiC 미끄럼·마찰 특성계수는 0.07-0.16으로 Fig. 1(b)의 STS 마찰계수 0.06-0.11보다 약간 높게 나타났다. 마찰계수의 안정화 측면에서 보면, SiC 소재는 STS에 비하여 길게 나타났고, 특히 시편에 가해진 하중조건이 높을수록 SiC의 마찰특성은 불안정하기 때문에 마찰계수는 높게 나타났다.



(a) SiC specimen



(b) STS specimen

Fig. 1 Friction coefficient for a dry friction sealing mechanism

3.1.2 수막마찰접촉

Fig. 2는 봉수장치의 밀봉간극에 약간의 물을 공급하여 수막(water film)을 형성하도록 허용한 상태에서 회전·마찰 운동을 하고, 이 과정에서 발생한 마찰계수를 측정한 결과이다. 이때 미끄럼·마찰 접촉표면에 가한 수직하중은 10N, 20N, 30N이고, 사용한 소재는 SiC와 STS의 두 종류이다.

미끄럼·마찰 접촉표면에 형성된 수막은 길들이기 마찰기간이 크게 단축되는 현상을 보여주고 있다. 즉, 시일장치에 가해지는 접촉면 하중이 증가함에 따라 초기 마찰계수는 급격하게 증가하지만 수막이 빠르게 형성되면서 미끄럼·마찰 접촉표면의 마찰모드는 급격하게 안정화를 이룬다.

Fig. 2(a)는 미끄럼·마찰부위에 물이 공급되어 수막이 형성된 마찰접촉 상태에 대해 SiC 세라믹 소재에 대한 마찰계수로 0.035-0.055로 건조마찰에 비하여 20배 이상 줄어든 마찰손실을 나타낸다. Fig. 2(b)는 STS 소재에 대한 결과로, 미끄럼·마찰 표면에 가한 하중이 증가함에 따라 마찰계수

는 0.015-0.03으로 더 낮아지고 SiC 소재보다 더 안정된 마찰특성을 보여준다. 이것은 마찰접촉 수막형성이 동일한 작동조건에서 운전된다고 가정하면 SiC 세라믹과 STS 소재특성에서 오는 차이라 생각된다.

따라서 마찰접촉 운동표면에 수막을 형성하면 건조마찰 운동조건에 비하여 저마찰 특성에 따른 내구성이 획기적으로 증대되지만, 시일장치의 목적인 밀봉효과는 크게 떨어진다는 사실이다.

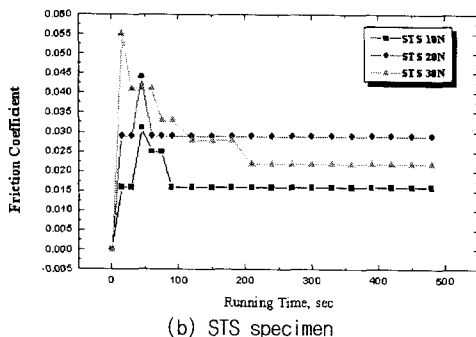
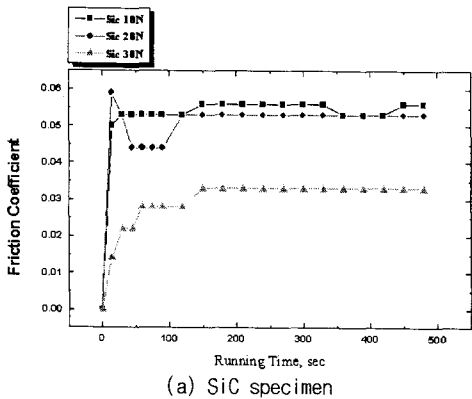


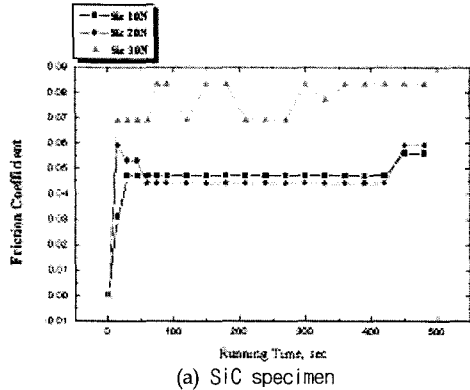
Fig. 2 Friction coefficient for a water film friction sealing mechanism

3.1.3 이물질이 혼입된 혼합마찰접촉

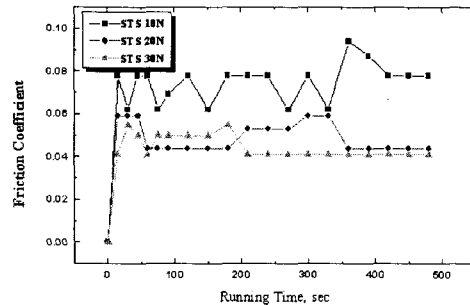
Fig. 3은 봉수장치가 작동하는 동안에 순환수를 따라서 함께 유입된 먼지, 모래와 자체적으로 발생된 마모입자가 주시일링 장치의 밀봉면에 혼입된 경우에 대한 마찰특성 결과를 제시한 것이다. 마찰 접촉면에 가한 하중이 증가할수록 초기 마찰계수는 급격히 증가하다가 공급된 물에 의해 길들이기 기간은 빠르게 안정화를 이루지만 Figs. 1과 2의 마찰특성과는 다르게 이물질에 의한 마찰모드가 불안정하다는 결과를 분명하게 제시한다.

Fig. 3의 실험결과는 밀봉간에 모래입자가 침입하여 형성된 마찰운동으로 인해 초기의 마찰계수가 급격하게 증가하는 현상은 다른 마찰접촉 환경의 특성과 유사하다. 그러나 운전시간이 지나도 미끄럼마찰 접촉면의 간극에 유입된 모래입자가 상존하므로 시일의 미끄럼마찰 접촉면은 모래나 마모입자 등에 의한 3-물체 마찰운동(3-body friction motion)으로 불안정한 마찰특성이 지속되는 현상을 보여주고 있다. 이것은 이물질이 마

찰접촉 운동표면에 개입된 경우에 흔히 발생하는 마찰계수의 불안정한 변동모드로 마찰 접촉면에 심한 스크래치 마모를 발생시켜 누수가 발생하는 것은 물론 시일의 수명을 크게 단축시킨다.



(a) SiC specimen



((b) STS specimen

Fig. 3 Friction coefficient for a mixed friction sealing mechanism with a dust, slit and wear debris

3.2 마모특성 실험결과

3.2.1 건조마찰에 의한 마모발생

Fig. 4는 SiC와 STS에 정하중을 가한 상태에서 발생된 마모량을 측정된 결과이다. 마찰계면에는 어떠한 이물질의 개입도 허용하지 않은 건조마찰에서 운전되는 경우로 소재의 경도나 마찰환경에 따라 마모량이 달라진다. SiC(경도 Hv = 714.1)와 STS(경도 Hv = 892.8) 소재는 마찰 접촉면에 작용하는 하중이 증가할수록 발생하는 마모량은 증가하고, 소재의 경도가 높을수록 마모발생이 줄어드는 현상을 관찰할 수 있다. 경도가 높은 STS 소재는 0.0001-0.0003mg으로 대단히 낮지만, 경도가 약간 낮은 SiC 소재는 0.0002-0.0004mg으로 마모가 더 많이 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 제시한 것처럼 마모 발생량은 대단히 작기는 하지만, 누수된 미량은 베어링으로 흘러들어가 베어링의 유막(oil film)을 손상하므로 베어링의 하중지지 용량을 떨어뜨리는 문제가 있다.

결국 마찰표면에서 발생하는 마모는 시일의 수명과 누설에 직접적으로 영향을 미치는 파라미터이기 때문에 봉수장치 소재는 가능한 경도가 높은 소재, 즉 열처리를 많은 상태에서 경도가 높은 소재를 선정하는 것이 마모억제에 큰 도움이 된다. 열처리를 하여 경도를 높여도 무방하나 미끄럼마

찰 접촉면의 국부적인 고온상승은 결국 열처리 효과를 떨어뜨리므로 경도저하, 즉 마모촉진을 일으키는 원인으로 작용하기 때문이다.

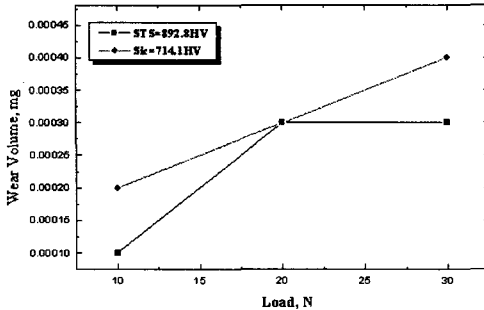


Fig. 4 Wear volume for a dry friction sealing mechanism

3.2.2 수막마찰에 의한 마모발생

Fig. 5는 미끄럼마찰 접촉계면에 물을 공급하여 형성된 수막에 의해 격리된 상태에서 발생한 마모량을 측정된 결과이다. 경도 Hv = 714.1의 SiC와 경도 Hv = 892.8의 STS 소재는 마찰 접촉면에서 작용하는 하중이 증가할수록 마모량은 증가하고, 소재의 경도가 클수록 마모 발생량이 줄어드는 현상은 Fig. 4의 건조마찰의 경우와 유사하지만, 그 발생량이 반 이하로 크게 줄어든다. 즉, STS의 마모량은 0.00001-0.0002mg으로 대단히 낮지만, SiC는 0.0001-0.0003mg으로 경도가 낮은 소재에서 마모가 더 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 마모량이 줄어드는 현상은 경도보다는 오히려 마찰계면에 형성된 수막에 의한 것으로 수막은 미끄럼마찰 계면을 원활하게 분리시키기 때문이다.

미끄럼마찰에 의해 수봉(water sealing)을 하는 경우는 마찰계면에서 발생하는 마모량이 무시할 수 있을 정도로 극히 작기 때문에 내구성에 어떠한 문제도 없으나, 수막형성에 의한 누수를 예상할 수 있으므로 밀봉작용에는 문제가 있다.

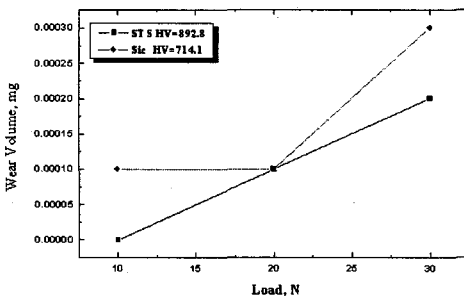


Fig. 5 Wear volume for a water film friction sealing mechanism

3.2.3 혼합마찰에 의한 마모발생

Fig. 6은 시일소재로 사용한 SiC와 STS에서 접촉계면이 먼지, 모래, 마모입자와 같은 물질이 혼입된 상태에서 마모량을 측정된 결과이다. 마찰 접촉면에 작용하는 하중이 증가할수록 마모량은 선형적으로 균일하게 증가한다. 이것은 마찰접촉면에 개입된 모래입자에 의한 스크래치 마모에 의한 것이다. 경도가 클수록 마모량이 줄어드는 현

상은 Figs. 4와 5의 마찰모드 조건과 유사하지만, 그 발생량은 선형적으로 크게 줄어든다. 경도가 높은 STS의 마모량은 0.0003-0.005mg이고, 상대적으로 낮은 SiC는 0.0005-0.0007mg으로 약 1.6배나 높게 마모가 발생한다. 이것은 밀봉계면에 혼재된 이물질 입자에 의한 스크래치에 기인한 것이다.

밀봉유체에 혼입된 이물질이 간극으로 유입하게 되면 마찰표면에서는 스크래치에 의한 마모가 증가되어 시일의 수명이 줄어드는 문제점이 있다. 수차의 순환수에 혼입된 불순물을 많을 경우는 시일표면의 마모에 의한 누수문제를 해결하기 위해 밀봉계면에 유입되는 혼탁한 순환수의 유입을 차단하고, 외부에서 깨끗한 냉각수를 공급하여 미끄럼마찰 접촉표면을 플라싱(flushing)해 주는 기술이 대단히 중요한 설계변수이다.

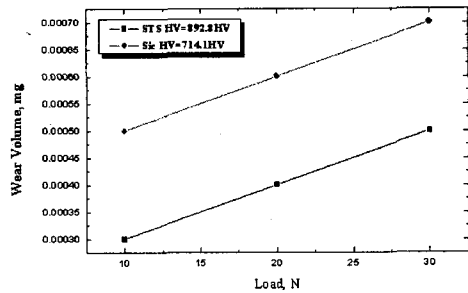


Fig. 6 Wear volume for a mixed friction sealing mechanism with a dust, slit and wear debris

4. 결론

수차용 봉수장치의 미끄럼 마찰표면에서 발생하는 마모는 시일의 수명과 누설에 직접적으로 영향을 미치는 파라미터이기 때문에 시일소재는 경도가 높은 것을 선정하고, 미끄럼마찰의 접촉모드 환경조건은 건조마찰, 수막마찰, 이물질 혼입마찰을 어떻게 조정하느냐가 대단히 중요하다. STS의 경우처럼 열처리에 의해 표면의 경도를 높여 사용하는 경우는 표면에서 발생하는 마찰열에 의한 열처리 효과의 급속한 저하로 내마모성을 유지하기가 어려우므로 SiC와 같은 세라믹을 선정하는 것이 유리하다. 건조마찰은 완벽한 밀봉을 유지할 수 있지만 마모가 급격하게 증가하므로 극미량의 습증기 유입을 허용하여 극미수막에 의한 수봉효과를 기대하는 것이 바람직하다. 수차의 순환수에 혼입된 불순물을 많을 경우는 시일표면의 마모에 의한 누수가 발생할 우려가 높으므로 가능한 밀봉계면에 혼탁한 순환수의 유입을 차단하고, 외부에서 깨끗한 냉각수를 공급하여 마찰표면을 플라싱 기술이 대단히 중요한 설계변수이다.

References

- [1] 김정균, 김정일, 신일철, 임광현, "소수력 터빈용 기계평면시일의 최적형상에 관한 연구," 한국신·재생에너지학회 2006년도 춘계 학술대회는문집, pp.499-502, 2006.
- [2] Berroth, K.E., "Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Application," J. of STLE, pp.770-773, 1990.