

마찰접촉조건에 따른 소수력 수차용 밀봉장치의 마찰 · 마멸특성 연구

김 청 균[†]

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Study on the Friction and Wear Characteristics of Contact Sealing Units for a Small Hydro-power Turbine Under Various Rubbing Conditions

Chung Kyun Kim[†]

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – In this paper, the friction and wear characteristics of contact type sealing unit for a water turbine have been presented. The sealing unit for a small hydropower generation is to stop a leakage of circulating water from an outside of an impeller to an inside of a rolling bearing. The friction heating between a seal ring and a seal seat may radically increase a surface temperature in which increase a power loss and wear on the rubbing surface. 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 in primary sealing unit. 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.

Key words – small hydro-power, water turbine, seal system, friction and wear, seal ring, seal seat.

1. 서 론

물이 갖고 있는 위치에너지와 운동에너지를 수차에 공급하여 회전력을 얻어 연결된 발전기를 돌려서 전기 에너지를 생산한다. 이때에 수차의 회전차를 안전하게 고정하는 것은 물론이고 회전력을 안정적으로 확보하기 위해 구름베어링을 설치한다. 동시에 회전차를 중심으로 내측과 외측의 압력차에 의해 회전축을 따라 올라오는 순환수인 물의 누수(water leakage) 현상을 차단

하기 위해 접촉식 봉수장치, 즉 기계평면시일을 설치하여 윤활유에 의한 베어링의 저마찰, 내구성을 보장하는 것이 중요하다[1].

수차의 회전 안정성을 확보하기 위해 마찰력이 작은 볼베어링을 설치하여 윤활작동을 보장하고, 봉수장치(sealing unit)를 설치하여 순환유체인 물의 외부 누설현상을 완벽하게 차단하는 것이 수차의 회전력을 가장 안전하게 확보하는 핵심기술이다. 소수력 수차(small hydro-power)에 사용되는 봉수장치는 물의 에너지를 흡수하여 회전차를 돌릴 때 발생하는 회전토크를 구조적으로 담당해야 하기 때문에 대형 회전차를 구동하는데 적합한

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@hanmail.net

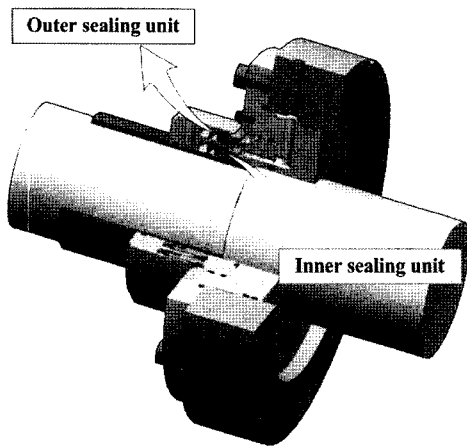


Fig. 1. Double sealing unit for a hydro-power turbine.

큰 직경의 축을 사용한다.

베어링의 회전성을 안전하게 보장하기 위해서는 적 유의 공급과 순환이 필수적인데, 수차의 회전축을 따라서 유입된 누수가 베어링에 침입하게 되면 윤활유의 점도는 저하되어 유막형성이 어려워지므로 기계평면시일과 같은 접촉식의 봉수장치를 불가피하게 설치해야 한다.

본 실험에서는 Fig. 1에서 보여준 것과 같은 이중의 기계평면시일을 설치한 소수력 수차용 봉수장치에서 발생하는 마찰 및 마멸특성을 여러 가지 마찰접촉 운동조건에 대하여 실험적으로 고찰하고자 한다. 봉수장치의 시일링 소재로 널리 사용하는 SiC 세라믹과 STS 소재[2]에 대한 마찰 및 마멸시험을 수행하여 시일소재의 누수시험, 마멸시험을 통한 내구성 평가를 실시한다. 이때에 마찰접촉 운동모드는 시일링과 시일시트의 축 중심으로 하중이 가해진 상태에서 건조마찰, 수막마찰, 먼지나 작은 모래입자 등과 같은 이물질 개입 마찰 등에 대한 트라이볼로지 특성에 대한 실험적 결과를 제시한다면 소수력 봉수장치 설계에 많은 도움이 될 것이다.

2. 실험적 연구

2-1. 실험장치와 실험방법

본 실험에 사용된 마찰/마멸 시험기는 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 핀-디스크 타입으로 시일시편의 상부에 설치한 압력스프링에 의해 고정된 디스크 시편은 회전운동을 하고, 이때에 걸리는 동일한 초기하중이 시편에 항상 균일하게 가할 수 있도록 3점접촉(three point

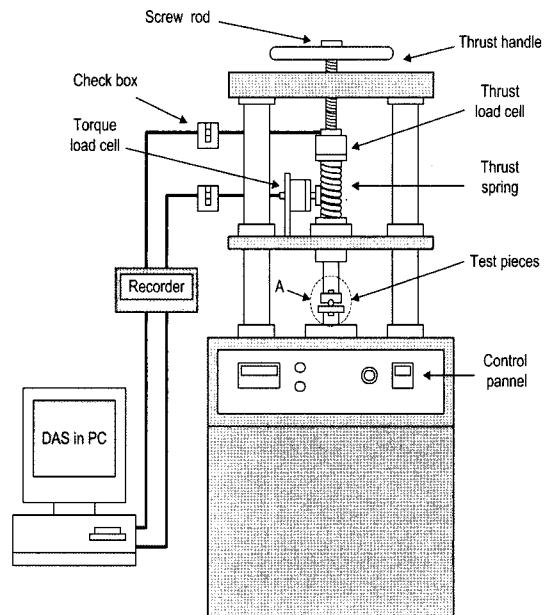


Fig. 2. Pin-on-disk type friction and wear tester.

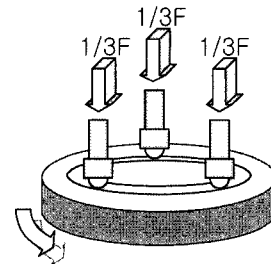


Fig. 3. Three point contact loading.

contact)을 하도록 설계하였다. 결국은 마찰평판의 접촉면이 미끄럼마찰 운동을 안정적으로 유지할 수 있도록 고안된 하중지지 접촉점은 Fig. 3과 같은 형태로 균일한 하중이 시험편에 가해져 실험동안 접촉면압이 일정해진다. 본 연구에서 수행된 실험적 연구는 신뢰성이 높은 마찰·마멸특성에 관한 것으로 마찰운동 접촉환경의 변화에 적합한 결과를 확보하기 위해 널리 사용되고 있는 실험방법중의 하나이다[3,4].

마찰·마멸특성 실험에서 디스크 형상의 시편에 가한 하중은 10~30 N이고, 이들 하중은 스프링에 의해 수직방향의 하중을 가하는 메커니즘으로 회전중에도 시편에는 항상 균일한 하중이 마찰표면에 고르게 작용하도록 부하의 안정성을 확보토록 하였다. 미끄럼 마찰운동을 하는 디스크 시편에는 0.2 m/s의 안정된 회

전속도를 설정하여 초기나 중기의 회전속도와 유사하도록 하였고, 상부에서 가하는 스프링의 정하중과 디스크의 회전에 따른 마찰 토크는 로드셀로 측정하여 환산 결과를 마찰계수로 제시하고 있다. 또한, 시편의 마멸량은 시험을 하기 전과 후에 변화된 시편의 무게를 초정밀 하중계(balance)로 측정하였다.

2.2. 실험조건

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

미끄럼마찰 접촉운동에 의해 발생하는 마찰계수와 마멸량은 미끄럼마찰 접촉면에 가해지는 스프링 방식의 정하중(dead weight)과 시험편의 회전속도에 의해 결정된다. 이때 시험편에 가해지는 하중은 10 N, 20 N, 30 N의 3가지이고, 각각의 하중조건에 대하여 시일링 시험편을 0.2 m/s 회전속도로 운전하면 주시일링 장치의 열적 평형에 도달하는 시간은 8분 정도이다.

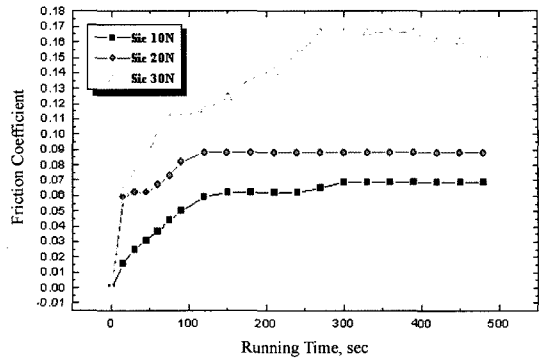
3. 실험 결과

3-1. 마찰특성 실험결과

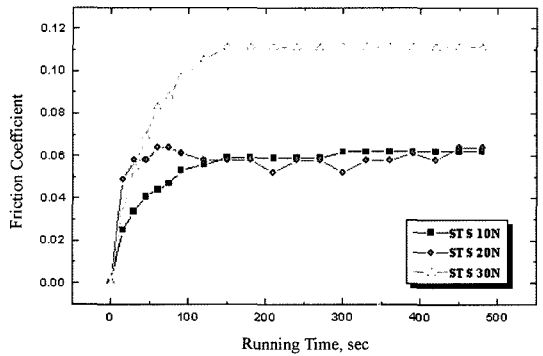
3-1-1. 건조마찰

Fig. 4는 건조마찰 접촉운동을 하는 표면에 10~30 N의 정하중을 가한 작동조건에서 시험편 SiC와 STS의 2가지 모델에 대한 마찰계수를 측정한 결과이다. 실험 결과에 의하면 미끄럼마찰 접촉표면에 가한 하중이 증가할수록 초기의 마찰계수는 급격하게 증가하지만, 마찰운동시간이 길어지면서 건조마찰운동의 안정화는 완만하게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

마찰특성을 보여준 Fig. 4는 시일링의 미끄럼 운동 조건이 건조마찰인 경우에 대해 수행한 SiC 세라믹과 STS의 미끄럼마찰 특성결과를 보여준다. Fig. 4(a)에 의하면, 정상상태의 SiC 미끄럼마찰 특성계수는 0.07~0.16으로 Fig. 4(b)의 STS 마찰계수 0.06~0.11보다 약간 높게 나타났다. 마찰계수의 안정화 측면에서 보면, SiC 소재의 안정화는 STS에 비하여 길게 계속되었고, 특히 시일시편에 가해진 하중조건이 높을수록 SiC의 마찰특성은 불안정하기 때문에 마찰계수는 높게 나타난다.



(a) SiC specimen



(b) STS specimen

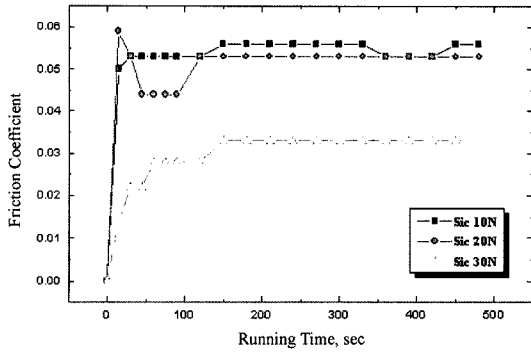
Fig. 4. Friction coefficient for a dry friction sealing mechanism.

3-1-2. 수막마찰

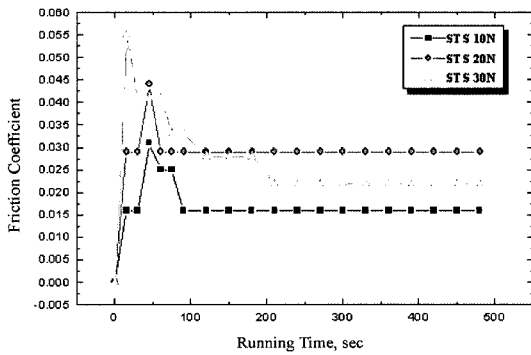
Fig. 5는 봉수장치(sealing unit)의 시일링과 시일시트 간극에 약간의 물을 공급하여 수막(water film)을 형성하도록 허용한 상태에서 미끄럼마찰 접촉운동을 하고, 이 과정에서 발생하는 마찰계수를 측정한 결과이다. 이때 접촉표면에 가한 수직하중은 10 N, 20 N, 30 N이고, 사용된 시일소재는 SiC와 STS의 두 종류이다.

수행된 실험결과에 의하면, 미끄럼마찰 접촉표면에 형성된 수막은 길들이기 마찰기간이 크게 단축되는 현상을 보여주고 있다. 즉, 시일장치에 가해지는 접촉면 하중이 증가함에 따라 초기 마찰계수는 급격하게 증가하지만 수막이 빠르게 형성되면서 접촉표면의 미끄럼마찰 모드는 급격하게 안정화를 이룬다.

Fig. 5(a)는 미끄럼 마찰접촉 부위에 물이 공급되어 수막이 형성된 마찰접촉 상태에 대해 SiC 세라믹 소재에 대한 마찰계수로 0.035~0.055로 건조마찰에 비하여 20배 이상 줄어든 마찰손실을 나타낸다. Fig. 5(b)



(a) SiC specimen



(b) STS specimen

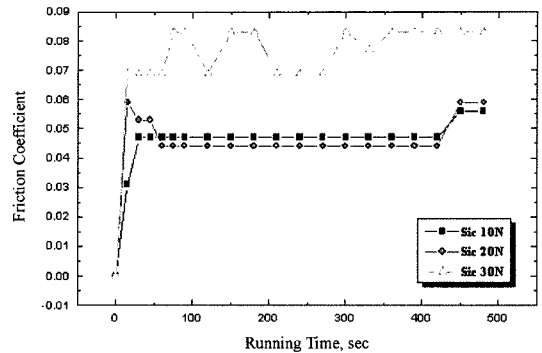
Fig. 5. Friction coefficient for a water film friction sealing mechanism.

는 STS 소재에 대한 결과로, 미끄럼마찰 표면에 가한 하중이 증가함에 따라 마찰계수는 0.015~0.03으로 더 낮아지고 SiC 소재보다 더 안정된 마찰특성을 보여준다. 이것은 마찰접촉에 의한 수막형성이 동일한 작동 조건에서 운전된다고 가정하면 세라믹과 스테인레스의 소재특성에서 오는 차이로 생각된다.

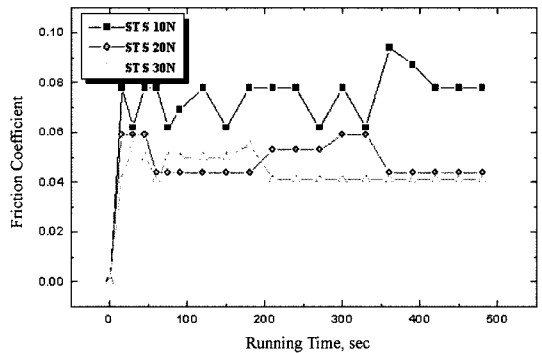
따라서 마찰접촉 운동표면에 수막을 형성하면 건조 마찰 운동조건에 비하여 저마찰 특성에 따른 내구성이 획기적으로 향상되지만, 시일장치의 고유목적인 밀봉 효과는 크게 떨어진다는 사실이다.

3-1-3. 이물질이 혼입된 혼합마찰

Fig. 6은 봉수장치가 작동하는 동안에 순환수를 따라서 함께 유입된 먼지, 모래와 자체적으로 발생된 마멸입자가 주시일링장치(primary sealing unit)의 마찰 접촉면에 혼입된 경우에 대한 마찰특성 결과를 제시한 것이다. 마찰운동 접촉면에 가한 하중이 증가할수록 초기의 마찰계수는 급격히 증가하다가 공급된 물에 의해 빠르게 길들이 기간의 안정화를 이루지만 Figs. 4와 5



(a) SiC specimen



(b) STS specimen

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

의 마찰특성과는 다르게 이물질에 의한 마찰모드가 불안정한 결과를 분명하게 제시한다.

Fig. 6의 실험결과는 밀봉간극에 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 마멸입자 등에 의한 3-물체 마찰운동(3-body friction motion)으로 항상 불안정한 마찰특성의 지속을 보여주고 있다. 이것은 이물질이 마찰접촉 운동표면에 개입된 경우에 흔히 발생하는 마찰계수의 불안정한 변동모드로 마찰접촉면에 심한 스크래치 마멸을 발생시켜 누수가 발생하는 것은 물론 시일의 수명을 크게 단축시킨다.

3-2. 마멸특성 실험결과

3-2-1. 건조마찰에 의한 마멸발생

Fig. 7은 시일링 소재 SiC와 STS에 10~30 N의 하중

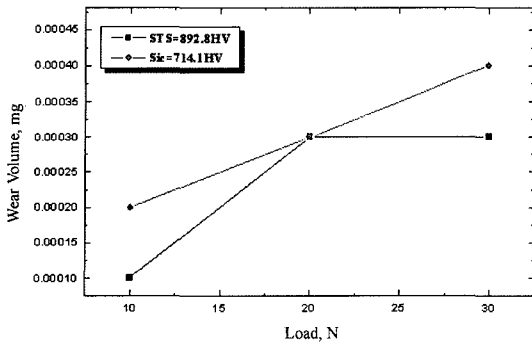


Fig. 7. Wear volume for a dry friction sealing mechanism.

을 가한 상태에서 떨어져 나간 마멸량을 측정한 결과이다. 시일링과 시일시트의 미끄럼마찰 계면에는 어떠한 이물질의 개입도 허용하지 않은 건조마찰(dry friction)에서 운전하는 경우로 특히 시일소재의 경도나 접촉조건에 따라 발생된 마멸량이 달라진다. 즉, SiC(경도 Hv=714.1)와 STS(경도 Hv=892.8) 소재는 마찰 접촉면에 작용하는 하중이 증가할수록 발생하는 마멸량은 증가하고, 소재의 경도가 높을수록 마멸 발생량이 줄어드는 현상을 관찰할 수 있다. 경도가 높은 STS 소재는 0.0001~0.0003 mg으로 대단히 낮지만, 경도가 약간 낮은 SiC 소재는 0.0002~0.0004 mg으로 마멸량이 더 많이 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 제시한 것처럼 마멸량은 대단히 작기는 하지만, 미량의 누수는 베어링으로 흘러들어가 베어링의 유막을 손상하므로 베어링의 하중지지 용량을 떨어뜨려 문제가 될 수 있다.

결국 시일링의 미끄럼마찰 표면에서 발생하는 마멸 현상은 시일의 수명과 누설에 직접적으로 영향을 미치는 파라미터이기 때문에 봉수장치 소재는 가능한 경도가 높은 소재, 즉 열처리를 않은 상태에서 경도가 높은 소재를 선정하는 것이 마멸발생 억제에 큰 도움이 된다. 열처리를 하여 경도를 높여도 무방하나 미끄럼마찰 접촉면의 국부적인 고온상승은 결국 열처리 효과를 떨어뜨리므로 경도저하, 즉 마멸을 촉진하는 원인으로 작용하기 때문이다.

3-2-2. 수막마찰에 의한 마멸발생

Fig. 8은 미끄럼마찰 접촉계면에 물을 공급하여 형성된 수막에 의해 격리된 수막접촉 마찰운동에서 발생된 마멸량 측정결과로 경도에 따라 다르게 나타난다. 즉, 경도 Hv=714.1의 SiC와 경도 Hv=892.8의 STS 소재는 마찰 접촉면에 작용하는 하중이 증가할수록 마

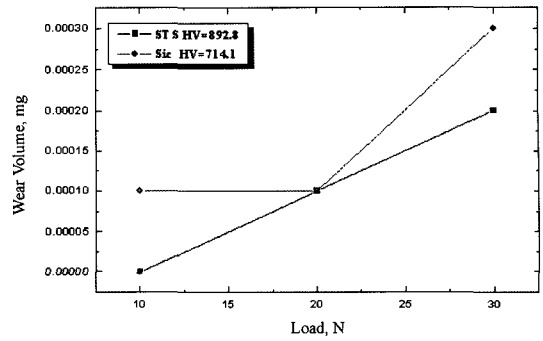


Fig. 8. Wear volume for a water film friction sealing mechanism.

멸량은 증가하고, 소재의 경도가 클수록 마멸 발생량이 줄어드는 현상은 Fig. 7의 건조마찰의 경우와 유사하지만, 그 발생량은 반 이하로 크게 줄어들어든다. 즉, STS의 마멸 발생량은 0.00001~0.0002 mg으로 대단히 낮지만, SiC는 0.0001~0.0003 mg으로 경도가 낮은 소재에서 마멸현상이 더 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이렇듯 마멸량이 줄어드는 현상은 경도보다는 오히려 마찰계면에 형성된 수막에 의한 것으로 밀봉압력을 발생시키고, 수막은 미끄럼마찰 사이의 마찰계면을 원활하게 분리시키기 때문이다.

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

3-2-3. 혼합마찰에 의한 마멸발생

Fig. 9는 시일링의 소재로 사용한 SiC와 STS에서 시일링과 시일시트의 접촉계면에 먼지, 모래, 마멸입자와 같은 각종 이물질이 혼합된 상태에서 운전된 시일

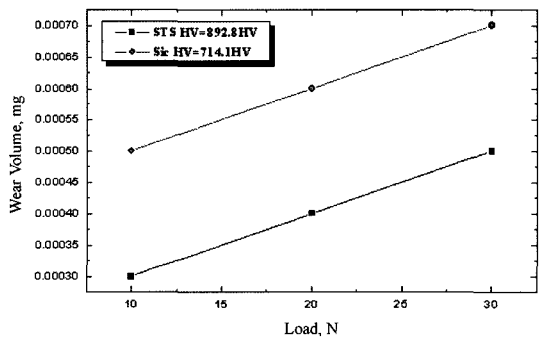


Fig. 9. Wear volume for a mixed friction sealing mechanism with a dust, slit and wear debris.

소재의 마멸량을 측정된 결과이다. 마찰 접촉면에 작용하는 하중이 증가할수록 마멸량은 선형적으로 균일하게 증가한다. 이것은 마찰접촉면에 개입된 모래입자의 연삭마멸, 즉 스크래치 마멸(scratch wear)에 의한 것이다. 소재의 경도가 클수록 마멸량이 줄어드는 현상은 Figs. 7과 8의 마찰조건과 유사하지만, 그 발생량은 선형적으로 크게 줄어든다. 경도가 높은 STS 소재의 마멸량은 0.0003~0.005 mg이고, 상대적으로 경도가 낮은 SiC는 0.0005~0.0007 mg으로 약 1.6배 이상 많은 마멸량이 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 마찰계면에 혼재된 모래나 마멸입자들에 의한 스크래치 마멸현상에 기인한 것이다.

미끄럼 마찰면에서 발생한 마멸입자나 밀봉된 유체에 혼합된 이물질들이 미세한 밀봉간극으로 유입하게 되면 시일링 마찰표면에서는 스크래치에 의한 마멸량이 크게 증가되어 시일의 수명이 급격하게 줄어드는 문제점이 있다. 앞에서 제시한 3가지의 마찰접촉 조건에 대한 시일링의 마멸량이 모두 10% 이하로 측정되었기 때문에 초정밀급으로 가공된 시일링의 마멸측면에서는 대단히 우수하다는 사실을 제시하고 있다. 따라서 수차의 순환수에 혼입된 불순물을 많을 경우는 시일표면의 마멸에 의한 누수문제를 해결하기 위해 밀봉계면에 유입되는 혼탁한 순환수의 유입을 차단하고, 외부에서 깨끗한 냉각수를 공급하여 미끄럼마찰 접촉 표면을 플러싱(flushing)해 주는 기술이 대단히 중요한 설계변수이다.

Fig. 10은 시일링의 마찰 운동면에서 발생된 마멸발생 트랙을 보여주고 있다. 이러한 마멸트랙은 정상적으로 운전하는 시일링의 접촉평면에서 불가피하게 발생되는데, 균일한 정상마멸(normal wear)가 발생되도록 회전축의 베어링 강성도를 확보해주는 것이 중요하다. 수차용 봉수장치는 회전축이 크기 때문에 수차의 회전 초기와 종기(start and stop period)에는 불가피하게 건조마찰 운동을 하므로, 특히 이 기간에 마멸입자가 발생되지 않도록 회전축의 축중심 맞추기(alignment)를 정밀하게 조정해야 한다.

4. 결 론

수차용 봉수장치의 미끄럼 마찰표면에서 발생하는 마멸현상은 시일의 성능에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 변수이다. 즉, 시일의 수명과 누설에 직접적으

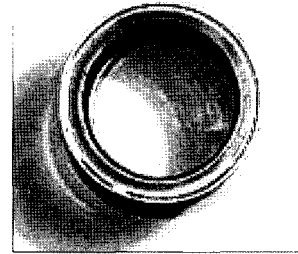


Fig. 10. Wear track of a silicon carbide.

로 영향을 미치는 파라미터이기 때문에 시일소재는 경도 높은 소재를 선정하는 것과 미끄럼마찰 접촉모드의 환경조건인 건조마찰, 수막마찰, 이물질 혼입마찰을 어떻게 조정하느냐가 대단히 중요하다. STS의 경우처럼 열처리에 의해 표면의 경도를 높여 사용하는 경우는 마찰접촉 표면에서 발생하는 마찰열에 의해 궁극적으로 열처리 효과의 급속한 저하로 내마멸성을 오랫동안 유지하기가 어려우므로 SiC처럼 경도가 높은 세라믹 소재를 선정하여 표면의 가공 정밀도를 높여 사용하는 것이 유지하다. 그리고 건조마찰을 유지하면 완벽한 밀봉효과를 유지할 수 있지만 마멸량 발생이 급격하게 증가하므로 극미량의 습증기 유입은 허용하여 극미한 수막에 의한 수봉효과를 기대하는 것이 가장 바람직하다. 또한, 수차의 순환수에 혼입된 불순물을 많을 경우는 시일표면의 마멸에 의한 누수가 발생할 우려가 높으므로 가능한 밀봉계면에 혼탁한 순환수의 유입을 차단하고, 외부에서 깨끗한 냉각수를 공급하여 마찰표면을 플러싱 기술이 대단히 중요한 설계변수이다.

참고 문헌

1. 김청균, 김정일, 신일철, 임광현, “소수력 터빈용 기계평면시일의 최적형상에 관한 연구,” 한국신·재생에너지학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp.499-502, 2006.
2. Berroth, K.E., “Silicon Carbide Materials for High Duty Seal Application,” *J. of STLE*, pp.770-773, 1990.
3. 김청균, “레일 용접부의 미끄럼 환경변화에 따른 마찰 및 마멸특성 연구,” 한국윤활학회지, 제15권 제2호, pp.178-183, 1999.
4. Jang, Sung-Tae and Lee Young Z., “Friction and Wear Behaviour of Ceramics Under Various Sliding Environments,” *J. of the KSTLE*, Vol. 11, No. 3, pp.11-23, 1995.