

Ni계 Deloro 50 합금의 고하중 Sliding 마모거동에 미치는 마모환경의 영향

최진호 · 최세종 · 김준기 · 김용덕* · 김학수* · 문주현* · 백하충* · 이덕현** · 김선진

한양대학교 재료공학과

*한국전력연구원

**한국원자력연구소

Effect of Wear Environments on the High Stress Sliding Wear Behavior of Ni-base Deloro 50 Alloy

Jin-ho Choi, Se-jong Choi, Jun-ki Kim., Yong-deog Kim*, Hak-soo Kim*, Ju-hyun Mun*,

Ha-chung Baek*, Duck-hyun Lee** and Seon-jin Kim

Dept. Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

*KEPRI

**KAERI

(1998년 8월 11일 받음, 1998년 10월 21일 최종수정본 받음)

초 록 Ni계 경면합금인 Deloro 50의 마모거동을 15ksi와 30ksi 접촉응력하의 여러 마모조건에서 조사하였다. 상온 대기중에서 Deloro 50는 15ksi 응력에서도 극심한 응착마모가 발생하는 매우 낮은 마모저항성을 보였는데 이는 fcc 결정구조를 갖는 Deloro 50 기지상의 경도와 가공경화율이 strain-induced 상변태를 이용한 hcp 결정구조의 Stellite 6보다 낮기 때문으로 생각된다. 상온 수중에서 Deloro 50는 15ksi 응력에서 Stellite 6와 비슷한 마모저항성을 보였는데 이는 물이 미세요철간의 금속간 접촉을 억제하였기 때문으로 생각된다. 그러나, 30ksi의 높은 접촉응력에서는 상온 대기중과 같은 응착마모가 발생하는 것으로 보아, 30ksi의 높은 응력에서는 물의 응착마모 억제 효과가 없었기 때문으로 생각된다. 300℃ 대기중에서 Deloro 50는 30ksi의 높은 접촉응력에서도 Stellite 6보다 우수한 마모저항성을 보였는데 이는 고온에서 마모시 생성되는 복합산화물층이 효과적으로 금속간 접촉을 방해하여 응착마모를 억제하였기 때문으로 생각된다.

Abstract The sliding wear behavior of Ni-base hardfacing alloy, Deloro 50, was investigated at the contact stresses of 15ksi and 30ksi under the various wear environments. In air at room temperature, Deloro 50 showed lower wear resistance than Stellite 6 even at 15ksi due to the occurrence of severe adhesive wear. This seems to be caused by the lower hardness and work-hardening rate of Deloro 50 than those of Stellite 6. In water at room temperature, Deloro 50 showed as good wear resistance as Stellite 6 at 15ksi. It was considered to be due to that water could effectively prevent metal to metal contact through contacting asperities. However, Deloro 50 showed severe adhesive wear at 30ksi in water at room temperature. It seems to be that the water could not suppress adhesion wear at 30ksi. At 300℃ in air, Deloro 50 exhibited higher wear resistance than Stellite 6 even at 30ksi. It was considered that the oxide glaze layers formed on wear surface during sliding, effectively prevented direct metal-to-metal contacts.

1. 서 론

원자력발전소 1차계통내 밸브의 디스크와 시트 접촉면에는 PWR (Pressurized-Water Reactor)의 경우 90℃ ~ 343℃의 고온·수중 분위기에서 약 5ksi ~ 30ksi 정도의 높은 접촉 응력이 가해지는 것으로 알려져¹⁾ 마모저항성이 우수한 Co계 Stellite 합금으로 경면처리되어 왔다.^{1,2)} 그러나, Stellite 합금의 마모와 부식으로 떨어져 나온 Co가 1차계통내 방사선장출 높이는 주요 원인중의 하나로 밝혀지면서 Stellite 합금을 Co를 함유하지 않는 Ni계나 Fe계와 같은 합금으로 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다.³⁾ Stellite 합금의 대체를 위한 대표적인 Ni계 합금인

Deloro 50는 Fe, Cr에 의한 고용강화와 Cr boride, Ni boride의 석출강화를 이용하여 우수한 마모저항성을 갖도록 하는 것으로 알려져 있으며,⁴⁾ EPRI (Electric Power Research Institute, 미국)에 의한 상온 수중과 316℃ dry steam 분위기에서 15ksi의 sliding 마모시험 결과 Deloro 50는 Stellite 6와 비슷한 마모저항성을 보이고,³⁾ 원자력발전소에서 실제 장착시험 결과 15ksi 이하의 사용조건에서 만족할 만한 성능을 보여²⁾ 1983년부터 캐나다 등의 일부 원자력발전소 1차계통에서 15ksi 이하의 중·저하중용 밸브에 사용되고 있다.^{5,10)}

일반적으로 접촉응력, 온도, 윤활제 등과 같은 인자들이 마모거동에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 특히 접촉

응력이 증가하게 되면 접촉하는 미세요철사이에 응착(adhesion)이 일어난 상태에서 상대적인 운동에 따른 전단응력에 의해 미세요철 또는 미세요철 부근의 재료가 심한 소성변형과 파괴를 일으키는 극심한 마모가 발생하며 이러한 마모거동은 응착마모(adhesion wear)로 알려져 있다.^{6,11)} 특히, 매우 높은 응력하에서는 응착마모의 극심한 경우인 galling이 발생할 수 있는데 일반적으로 galling은 육안으로도 상대시편간 재료의 이동이 관찰되는 것으로 정의되고 있다.⁶⁾ 이와 같은 galling이 밸브에서 발생하면 두 접촉면 사이가 거칠어져 누수가 발생하거나, 밸브의 고착현상이 발생하여 밸브의 작동이 불가능해질 수 있어 밸브에서 galling 저항성은 매우 중요한 특성이다.⁵⁾ 하지만, EPRI에서의 마모시험은 15ksi 이하의 중간 접촉응력에서만 수행되어 30ksi까지의 높은 접촉응력에서 밸브의 사용가능성 여부를 타진하기 위해서는 여러 마모환경 조건에서 접촉응력 증가에 따른 마모특성평가는 물론 고응력하에서의 환경인자가 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

Wang 등에⁷⁾ 의하면 288℃ 수중의 BWR(Boiling-Water Reactor) 조건에서 15ksi와 30ksi의 sliding 시험 결과 Deloro 50는 30ksi의 높은 응력에서도 Stellite 6보다 우수한 마모저항성을 나타낸 것으로 보아 마찰시 물, 온도와 같은 마모환경의 인자가 마모거동에 영향을 미쳐 우수한 마모저항성을 나타낸 것으로 생각되나, 위의 시험은 복합적인 마모환경에서 시험되어 어느 인자가 우수한 마모저항성을 나타내게 한 것인가에 대한 원인은 아직 밝혀지지 않은 상태이다. 일반적으로, 고온인 경우 용존산소량이 많은 수중분위기나 대기중 분위기에서는 마모표면 또는 마모

debris의 산화가 가속될 수 있으며,⁸⁾ 일부 Ni계 합금의 경우 낮은 접촉응력에서 표면 산화물층의 형성에 의해 우수한 마모저항성을 보인 예가 보고된 바 있다.⁹⁾ 그러나, 15~30ksi의 높은 접촉응력이 가해지는 경우에 대해서는 Deloro 50를 비롯한 Ni계 내마모합금의 마모거동에 미치는 온도 및 산화의 영향이 보고된 바 없는 상태이다.

본 연구에서는 Deloro 50와 기존의 대표적인 Co계 합금인 Stellite 6에 대하여 15ksi와 30ksi의 높은 응력에서 상온 대기중, 상온 수중에서 sliding 마모시험을 통해 하중에 따른 물의 윤활 효과를 조사하였으며, 300℃ 대기중의 마모환경에서 마모시험을 통해 시험온도가 Deloro 50의 마모거동에 미치는 영향을 Stellite 6와 비교 조사하였다.

2. 실험 방법

시편

본 실험에 사용된 Deloro 50와 Stellite 6 시편은 Deloro Stellite Co.에서 제작된 용접봉을 사용하여 두께 10mm의 304SS plate 위에 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)로 두께 3mm이상으로 EPRI에서 제시하는 최적 용접조건으로 경면처리한 후¹⁰⁾ wire cutting으로 Ø6mm × 5mm의 운동시편과 25×10×5mm의 고정시편으로 제작하였다. Wire cutting 후 각 시편의 경면 두께는 2mm 이상이었으며 경면을 ICP로 측정된 시편의 화학조성은 EPRI에서 제시하는 nominal 조성을 나타낸 표 1과 동일한 성분분포를 나타내었다. 시험전 시편의 표면은 emery paper #2000을 이용하여 Mitutoyo사의 표면조도기로 측정된 Ra값이 0.02µm가 되도록 연마하여 시편을 준비하였다.

Table 1. Chemical compositions of Deloro 50 and Stellite 6 (w.t. %)

Element \ Alloy	Ni	Cr	Fe	Si	B	C	Co	W	Mo	Mn
Deloro 50	bal.	12.31	4.14	3.62	2.04	0.6	-	-	-	-
Stellite 6	2.21	29	2.09	0.81	-	1.25	bal.	4.68	0.59	0.61

실험장치 및 마모실험

마모시험은 gate 밸브의 디스크와 시트의 sliding 작동을 모사한 block-on-block 방식으로 30ksi의 높은 응력까지 마모시험이 가능하도록 제작한 PLINT사의 TE77 sliding friction machine을 사용하여, 운동거리 9mm, 평균속도 3mm/sec로 왕복 운동을 하도록 하였다.

Sliding 마모실험은 2회 이상 수행하였으며, 상온대기중, 상온수중, 300℃ 대기중의 마모환경에서 15ksi와 30ksi의 접촉응력에서 1000cycle 까지 시험하였으며, 마모손실량이 많은 경우에는 100cycle 까지 시험하였다. 마모 cycle에 따른 마모손실량은 실험전후 운동시편과 고정시편을 아세톤에서 초음파 세척하여 각각의 무게를 측정하고, 이들의 무게손실량을 더하여 나타내었다. 마모손실량은 2회 이상의 시험에서 평균으로 나타냈고, 마모손실량의 측정편차는 100cycle까지 시험 후 무게손실량이 10mg 이상으로 많은 경우에는 약 ±5mg이하로 나타났으나, 무게손실량이

5mg이하로 적은 경우에는 ±0.5mg이하로 편차가 거의 없는 것으로 나타났다. Sliding 마모기구를 조사하기 위해 마모실험 후 마모표면을 SEM과 WDS로 분석하였다. 마모저항성에 영향을 미치는 주요 인자인 재료의 경도는 microvickers 경도기를 사용하였으며, 시편에서 석출상이 미세하여 직접적인 경도를 측정하기 곤란하여 석출상과 기지상의 전체적인 경도값은 100mgf의 vickers scale로 10회 측정하였으며, 기지상만의 경도값은 20mgf의 vickers scale로 마모시험전 시편과 마모시험후 시편에 대하여 10회 측정하여 평균으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Deloro 50와 Stellite 6 합금에 대하여 상온 대기중, 상온 수중, 300℃ 대기중의 마모환경에서 15ksi와 30ksi 응력에 대해 1000cycle까지 sliding 마모시험후 sliding 마모 cycle에 따른 무게손실량을 그림 1에 나타내었다. 상온 대

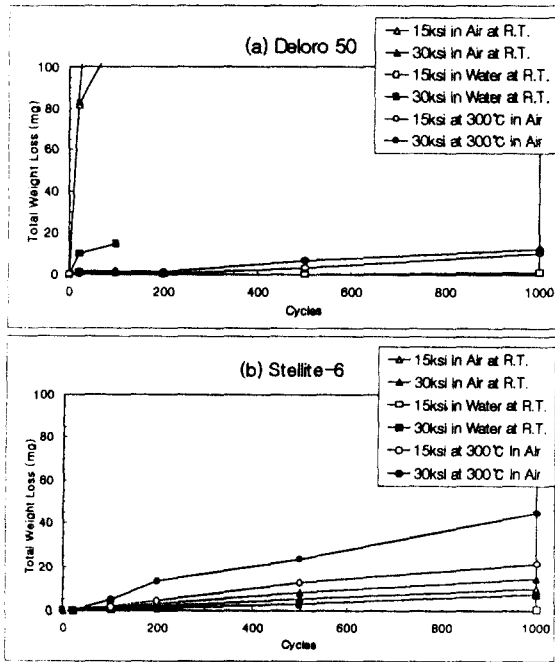


Fig. 1. Weight loss as a function of sliding cycles at various wear conditions (a) Deloro 50 and (b) Stellite 6

기중에서 Deloro 50는 galling은 발생하지 않았으나 많은 무게손실량을 보여 100cycle까지만 시험하였는데 15ksi와 30ksi 응력에서 100cycle 마모시험후 무게손실량이 각각 116.1mg과 337.6mg으로 Stellite 6의 100cycle 마모시험후의 0.9mg과 1.1mg에 비해 매우 많은 것으로 나타났다. 상온 대기중에서 Stellite 6는 15ksi에서 30ksi로 응력이 증가하여도 무게손실량의 증가가 거의 없는 우수한 마모저항성을 나타내었으나, Deloro 50는 15ksi에서 30ksi로 응력이 증가하면서 무게손실량이 크게 증가하는 낮은 마모저항성을 나타내는 것을 알 수 있다.

상온 수중의 경우에는 15ksi에서 1000cycle 마모시험후 Deloro 50의 무게손실량이 1.2mg으로 Stellite 6의 0.8mg과 비슷한 것으로 나타났지만, 30ksi로 응력이 증가함에 따라 Deloro 50의 무게손실량은 급격히 증가하여 1000cycle 마모시험후 무게손실량이 14.7mg으로 Stellite 6의 1000cycle 마모시험후 1.1mg보다 매우 많은 것으로 나타났다. 수중 분위기는 Deloro 50와 Stellite 6의 무게손실량을 상온 대기중에 비해 모두 크게 감소시키는 것으로 보아 수중분위기가 sliding 마모거동에 영향을 미치는 것으로 생각되나, Deloro 50의 경우 하중이 15ksi에서 30ksi로 증가함에 따라 1000cycle 마모시험후 무게손실량이 0.4mg에서 14.7mg으로 크게 증가하는 것으로 보아 응력이 증가함에 따라 수중분위기의 효과보다는 응력효과가 마모거동에 보다 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편 300°C 대기중의 경우에는 15ksi와 30ksi 응력에 대해 1000cycle 마모실험 후 Deloro 50의 무게손실량이 각각 10.4mg과 12.4mg으로 Stellite 6의 21.4mg과 45mg보다도 적은 무게손실량을 보이는 것으로 나타났다. 300°C에서 Stellite 6는 15ksi에서 30ksi로 응력이 증가함

에 따라 무게손실량이 증가하는 거동을 보이고 있으나, Deloro 50는 15ksi에서 30ksi로 응력이 증가하여도 무게손실량이 크게 증가하지 않는 우수한 마모거동을 보이는 것을 알 수 있다.

Deloro 50가 상온 대기중에서는 15ksi의 응력에서도 Stellite 6에 비해 매우 낮은 마모저항성을 보이지만, 300°C에서는 30ksi의 높은 응력에서도 Stellite 6 보다 우수한 마모저항성을 보이는 것으로 보아 Deloro 50의 마모저항성에 있어서 온도가 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 일반적으로 온도가 높아질수록 재료의 경도가 감소되어 마모저항성이 낮아지는 것으로 알려져 있으나,¹¹⁾ Deloro 50는 오히려 마모저항성이 증가하는 것으로 보아 시험온도가 마모거동에 큰 영향을 주었을 것으로 생각된다.

여러 시험조건에서 Deloro 50의 sliding 마모시험후 표면 SEM 사진을 그림 2에 나타내었다. 그림 2-a)의 상온 대기중 마모표면에서는 심하게 소성변형된 transfer layer의 형태가 나타나는 것으로 보아 심한 응착마모가 발생한 것을 알 수 있다. 응착마모는 미세요철 또는 미세요철 부근의 재료가 심한 소성변형과 파괴를 일으키므로 상당히 크기가 큰 마모 debris를 형성하여 많은 무게손실량을 보이는 것으로 알려져 있다.^{8,11)} 이와 같은 응착마모에는 미세요철 간의 응착을 형성하는 경향, 미세요철의 기계적 성질 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^{6,11)}

응착의 경향은 hcp 결정구조의 재료가 fcc나 bcc 결정구조의 재료보다 훨씬 적은데, 이는 hcp 결정구조의 경우에는 slip system의 수가 적어 fcc나 bcc 결정구조보다 상대적으로 연성이 낮기 때문인 것으로 알려져 있다.^{8,11)} Deloro 50는 Ni 기지상에 Cr, Fe이 고용체를 이루고 있는 fcc 결정구조를 가지고 있으나, Stellite 6의 경우에는 그림 3에서의 XRD 분석결과에서 보여지는 바와 같이 준안정상인 fcc 결정구조가 strain-induced 상변태를 통하여 안정한 hcp 결정구조로 변태되므로¹¹⁾ Deloro 50의 응착경향은 Stellite 6에 비해 클 것으로 생각된다.

또한 마모표면에서 미세요철의 변형거동에 영향을 주는 경도값을 나타낸 표 2에서 보면 Deloro 50의 석출상과 기지상을 포함한 전체적인 경도값은 627HV로 Stellite 6의 446HV보다 높은 값을 나타내었으나, 석출상을 제외한 기지상만의 경도값은 Deloro 50가 339HV로 Stellite 6의 430HV보다 낮은 것을 알 수 있다. 재료의 응착마모와 galling에는 석출상보다는 기지상이 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ Deloro 50의 경우 이러한 기지상의 낮

Table 2. Hardness of matrix and precipitate of Deloro 50 and Stellite 6

Alloy	Deloro 50	Stellite 6
Microhardness		
hard phase + matrix	627HV	446HV
matrix before sliding test	340HV	430HV
matrix after sliding test	638HV	831HV

은 경도는 기지상에서 미세요철간의 접촉시 미세요철의 변형이 쉽게 되어 미세요철간의 접촉을 증가시키므로 상대적으로 경도가 높은 Stellite 6에 비하여 응착의 경향이 높을 것으로 생각된다. 또한 표 2에 나타난 마모시험후 마모표면의 경도에서도 Deloro 50의 마모시험후 기지상의 경도는 638HV로 Stellite 6의 831HV에 비해 가공경화가 적게 된 것을 알 수 있는데, 이는 Deloro 50의 경우 마모시 가공경화에 의한 소성변형의 억제효과가 적어 마모표면에서 미세요철의 응착에 의한 소성변형이 Stellite 6에 비해 심하게 발생할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 Deloro 50가 상온 대기중에서 Stellite 6보다 매우 많은 마모손실량을 보인 것은 Stellite 6에 비해 응착의 경향이 크고, 기지상의 경도가 낮아 기지상에서의 미세요철간의 응착이 많이 이루어져 극심한 응착마모가 발생하였기 때문으로 생각된다.

그림 2-b)의 상온 수중 15ksi에서 마모시험후 Deloro

50의 마모표면에서는 상온 대기중에서와 같은 심한 이동층은 관찰되지 않고 물결 모양의 약한 응착 마모형태만이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 마모형태는 기지상의 소성 변형은 있었지만 수중에서는 재료의 마찰시 마찰표면에 수원자층의 수막의 형성으로 직접적인 금속간 접촉을 방해하여,¹³⁾ 같은 응력의 상온 대기중에 비해 미세요철간의 응착이 크게 억제되었기 때문으로 생각된다. 그림 2-b)의 30ksi 경우에는 수중이지만 상온에서와 같은 극심한 응착 마모가 발생한 것을 볼 수 있는데 이는 응력이 증가함에 따라 수막이 얇아지고,¹³⁾ 기지상의 경도가 낮은 Deloro 50의 경우 미세요철이 심하게 변형되면서 직접적인 금속간 접촉이 이루어져 상온 대기중과 같은 응착마모가 발생했기 때문으로 생각된다.

Deloro 50가 Stellite 6보다도 우수한 마모저항성을 보인 그림 2-c)의 300℃ 대기중에서는 15ksi와 30ksi 시험 표면 모두 응착마모가 발생하지 않고 미세한 연삭마모

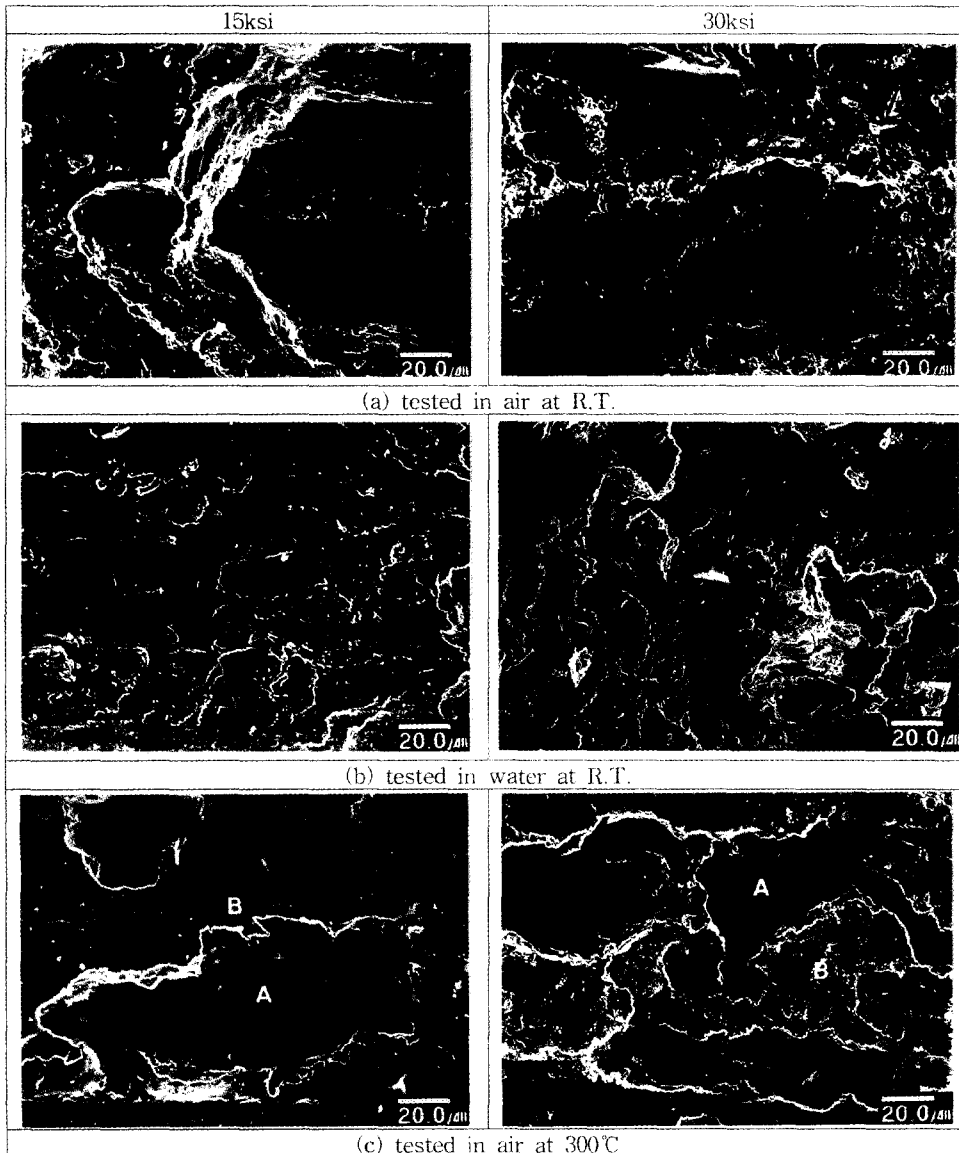


Fig. 2. SEM micrographs of sliding wear surface of Deloro 50

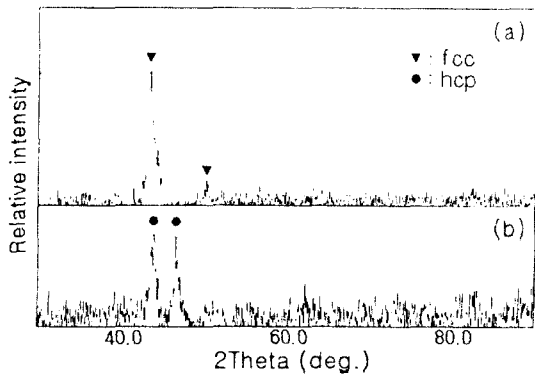


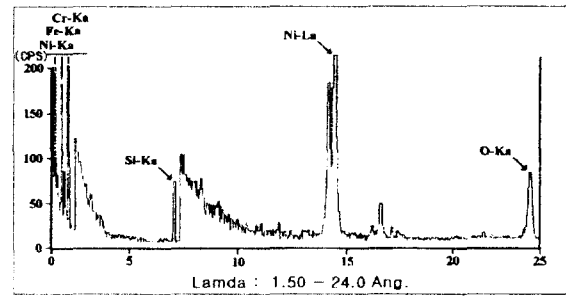
Fig. 3. XRD patterns of (a) as-welded and (b) sliding test at R. T. of Stellite 6

(abrasive wear) 형태만이 주로 나타나는 것을 볼 수 있다. 300℃ 마모표면에서는 그림 2-c)의 A와 같은 형태의 층들이 입혀진 것을 볼 수 있으며 고정시편과 운동시편 모두에서 관찰되었다. A와 같은 층 부근의 마모표면에는 debris에 의한 연삭 마모흔적이 없는 반면에 A층의 표면에서만 연삭 마모흔적이 나타나는 것으로 보아 이러한 층들이 debris 또는 반대쪽 시편에서 생성된 층들과 직접적으로 접촉하여 응력을 지탱하는 역할을 한 것으로 생각된다. 300℃ 대기중 마모표면에 생성된 층들은 그림 4에 나타낸 마모표면의 WDS 분석결과 산소가 상당량 검출되었으며, Ni, Cr, Fe, Si의 원소도 함께 검출되는 것으로 보아 복합산화물로 이루어진 것으로 생각된다.

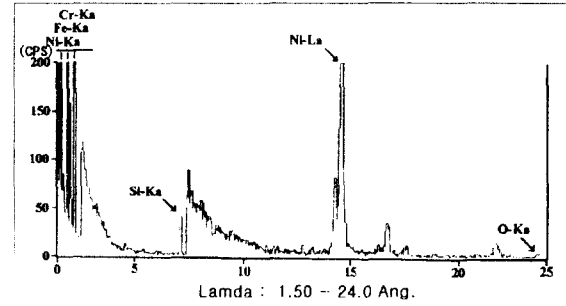
일반적으로 저하중 낮은 속도의 sliding 마모시에는 미세한 debris가 점차 산화되어 산화물 조각을 형성하고 마모표면의 groove와 같은 부분에서 응집됨으로써 산화물 cluster를 형성하며, 특히 높은 온도와 압력하에서는 debris 사이에 소결이 일어나 산화물의 glaze layer를 형성할 수 있다고 알려져 있다.^{8,9)} 이러한 glaze layer는 주위의 표면이 마모에 의해 손실되면서 반대 시편에 형성된 glaze layer 또는 마모 debris와 접촉하게 되어 응력을 지탱하므로 직접적인 금속간 접촉을 방해하여 응착마모를 억제하고 이러한 현상이 나타나는 조건에서는 재료가 매우 적은 마모손실을 보이는 것으로 알려져 있다.^{8,9)}

이러한 형태의 마모거동은 mild oxidative wear로 알려져 있으며 저온에서는 산화물의 생성속도가 느리고, debris가 마모 표면이나 debris 사이에 서로 응착하려는 경향이 낮아 마모표면에서 바로 제거되어 산화물 glaze layer를 형성하지 못해 직접적인 금속간 접촉에 의한 응착마모가 발생하지만, 고온에서는 debris 사이의 응착의 경향이 커짐에 따라 산화물 cluster를 쉽게 형성하고, 온도가 높아짐에 따라 소결이 쉽게 일어나므로 점차로 glaze layer가 형성되는 mild oxidative wear로 천이되는 것으로 알려져 있다.^{8,9)}

Deloro 50가 상온에서는 15ksi에서도 극심한 응착마모가 발생하는 낮은 마모저항성을 보였으나, 300℃의 고온에서 Stellite 6보다 우수한 마모거동을 보인 것은 고온에서 산화물 glaze layer가 형성되고 이러한 산화물 glaze layer



(a) Region A in Fig. 2-(c).



(b) Region B in Fig. 2-(c).

Fig. 4. The results of WDS analysis of sliding wear surface of Deloro 50

가 응력을 지탱하여 직접적인 금속간 접촉을 방해하여 미세요철간의 응착을 억제하였기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

1) Deloro 50는 상온 대기중에서 15ksi와 30ksi 모두 Stellite 6에 비해 많은 무게손실량을 보였는데, 이는 Deloro 50가 Ni 기지상에 Fe, Cr의 고용강화만을 이용한 fcc 결정구조를 가지므로 strain-induced 상변태를 이용한 Stellite 6보다 응착의 경향이 크고, 기지상의 초기 경도 및 가공경화 후의 경도도 Stellite 6에 비해 낮아 미세요철이 쉽게 소성변형되어 극심한 응착마모가 발생하였기 때문으로 생각된다.

2) Deloro 50는 상온 수중, 15ksi의 경우 수막에 의한 금속간 접촉이 억제되어 상온 대기중에 비해 적은 마모손실을 보였지만, 30ksi로 응력이 증가하는 경우에는 수막이 얇아지고, 경도가 낮은 기지상이 소성변형되면서 금속간 접촉이 이루어져 상온 대기중과 같은 극심한 응착마모가 발생하여 많은 무게손실량을 보인 것으로 생각된다.

3) Deloro 50는 300℃ 대기중에서 15ksi와 30ksi 모두 매우 적은 무게손실량을 보였는데, 이는 300℃ 고온에서는 상온 대기중에 비해 debris의 산화가 매우 빠르게 진행되고, debris 간의 응착 경향이 커짐에 따라 산화물 cluster를 형성하고, 소결이 일어나 산화물 glaze layer가 형성됨으로써 직접적인 금속간 접촉을 방지하여 응착마모를 억제하였기 때문으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. EPRI Reports NP-3446, Evaluation of Low-Cobalt

- Alloys for Hardfacing Applications in Nuclear Components, Aug. 1984
2. H. Ocken, Surface and Coating Technology, **76**, 456 (1995)
3. EPRI Reports TR-105816, NOREM Application Guideline, Nov. 1995
4. James B.C. Wu and James E. Redman, Welding Journal, **73**, 63 (1994)
5. EPRI Reports NP-6737, Cobalt Reduction Guidelines, Mar. 1990
6. EPRI Reports TR-103845, Galling Wear of Cobalt-Free Hardfacing Alloys, May. 1994
7. L.H. Wang and K.Y. Hsu et al, Taiwan, p. 157
8. G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, Engineering Tribology, Tribology Series 24, Elsevier 1993
9. Jiaren Jiang, F.H. Scott and M. M. Stack, Wear, **181**, 20 (1995)
10. EPRI Report NP-4993, Laboratory Evaluations of Cobalt-Free, Nickel-Based Hard-Facing Alloys for Nuclear Applications, Mar. 1987
11. Karl-Heinz Zum Gahr; Microstructure and wear of materials, Tribology Series 10. Elsevier 1987
12. S. Atamert and J. stekly, Surface Engineering, **9** (3), 231, (1993)
13. Doris Kuhlman-Wilsdorf, Wear, **200**, 8 (1996)