

## 원전 밸브용 경면처리 합금의 캐비테이션 에로전(cavitation erosion) 거동에 관한 연구

오영민<sup>†</sup> · 김윤갑 · 김선진

한양대학교 재료공학부

### The Study on the Cavitation Erosion Behavior of Hardfacing Alloys for Nuclear Power Plants

Young-Min Oh<sup>†</sup>, Yoo-Kap Kim and Seon-jin Kim

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791

(2002년 3월 23일 받음, 2002년 4월 11일 최종수정본 받음)

**Abstract** The cavitation erosion behavior of wear-resistant hardfacing alloys such as Co-base Stellite 6, Fe-base Norem 02 and new Fe-base alloy were investigated up to 50 hours by using a 20kHz vibratory cavitation erosion test equipment. The crack, initiated easily at the interfaces between matrix and hard second phase, was repressed effectively in Stellite 6 because the matrix was hardened by phase transformation. For this reason, Stellite 6 showed an excellent cavitation erosion resistance compared to Norem 02. The phase transformation also occurred in Norem 02, but the increase of volume fraction of the interfaces caused the crack to be initiated frequently, thus resulting in a large material loss. The matrix of NewAlloy was hardened effectively by  $\gamma \rightarrow \alpha'$  phase transformation and the volume fraction of the interfaces was very small compared to Norem 02. This caused the propagation of crack to the matrix to be repressed effectively. Therefore, NewAlloy showed a very excellent cavitation erosion resistance. It wasn't considered that the cavitation erosion resistance of NewAlloy was influenced the temperature of the bath filled with a distilled water up to 80°C.

**Key words**: Fe-base alloy, Cavitation erosion, Phase transformation

### 1. 서 론

원자력발전소 1차 계통내 밸브의 경면처리(hardfacing)에 사용되는 재료는 90~343°C의 고온과 5~30ksi의 높은 접촉 응력 환경에서 작동되기 때문에 우수한 마모저항성, 캐비테이션 에로전 저항성 및 내식성이 요구된다. 특히, 급격한 압력의 변화가 일어나는 환경에서 사용되는 계통수 역류방지용 스윙체크밸브 및 유량조절용 글로브밸브의 경우, 유체가 단면적이 변하는 부분을 통과할 때 압력차이에 의해 발생하는 cavity가 금속표면에서 파열됨으로써 금속표면에 충격을 가해 손실을 입히는 현상인, 캐비테이션 에로전에 의한 부품손실이 발생한다. 이러한 캐비테이션 에로전으로 인한 재료의 손실량은 게이트밸브 등에서의 슬라이딩 마모 손실량보다 많은 것으로 보고되고 있으며<sup>1,2)</sup>, 따라서 기존 원전 밸브의 주요한 손실원인으로는 마찰마모와 이러한 캐비테이션 에로전을 꼽을 수 있다. 현재 1차 계통내 밸브의 경면처리용 재료로 사용되고 있는 Co계 Stellite 합금은 낮은 마찰계수를 가지며 마모저항성, 내식성 등이 우수한 뿐만 아니라 캐비테이션 에로전에 대한 저항성도 우수해 고온, 고압의 마모 환경에서 널리 사용되고 있다.<sup>3)</sup> 그러나,

마모 및 부식에 의해 합금으로부터 떨어져 나온 Cc가 1차 계통의 방사선장을 형성하는 주요한 원소로 알려지면서 Co계 합금을 대체할 수 있는 Fe계 경면처리용 합금의 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>2)</sup> Fe계 경면처리용 합금의 개발은 적층결함 에너지(stacking fault energy)를 낮춤으로써 전위의 교차슬립을 억제하여 표면경화와 소성변형의 억제를 통하여 마모저항성을 향상시킬 뿐만 아니라 변형유기 상변태를 통해 우수한 galling 저항성을 얻으려는 방향으로 진행되고 있다. 현재까지 Stellite의 가장 유력한 대체합금으로 고려되고 있는<sup>2,4,5)</sup> Norem 02는 Cr 탄화물과 낮은 적층결함에너지를 갖는 기지상에 의해<sup>6)</sup> 60ksi까지의 상온 galling 시험에서 Stellite 합금과 동등한 galling 저항성을 보여 15ksi 이상, 약 30ksi까지의 높은 응력이 가해지는 고하중용 게이트밸브나 글로브밸브에 사용이 가능할 것으로 기대되고 있는 합금이다. 그러나, 원자력발전소 1차 계통 내의 방사선장을 효과적으로 감소시키기 위해서는 캐비테이션 에로전에 의한 손실이 발생하는 밸브에 대해서도 Stellite 합금의 대체가 이루어져야 하나 대체후합금인 Norem 02의 캐비테이션 에로전 저항성에 대한 연구는 거의 없는 상태이다.

<sup>†</sup> E-mail: cachinol@ihanyang.ac.kr

한편, 낮은 적층결합 에너지를 갖는 재료는 캐비테이션 에로전 과정에서 기포의 파열에 의한 압축응력을 변형유기 상변태(strain-induced transformation)나 쌍정에 의한 변형으로 흡수함으로써 크랙의 생성 및 전파가 억제되어 캐비테이션 에로전에 대한 저항성이 향상되는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> Co 재질의 Stellite 6의 경우에는 미세한 크기의 쌍정 생성과 함께 캐비테이션 에로전 저항성이 현저하게 증가하고 있는데, 이것은 쌍정의 형성으로 변형 에너지가 효과적으로 흡수되어 쌍정 주변에서 균열의 전파를 억제하고 기지상의 연성을 증가시키기 때문으로 보고되고 있다.<sup>7)</sup> Fe계 합금에서 페라이트 기지상은 변형유기 마르텐사이트 변태가 발생하는 오스테나이트 기지상에 비해 가공경화율이 낮고 소성변형이 용이하여 고하중에서 심한 adhesive 마모가 발생한다. 또한, Cr과 C을 포함하는 Fe계 합금에서는 이들의 함량이 공정점 이상으로 증가하면 과공정 조직이 형성되는데 과공정 조직은 초정 탄화물이 먼저 형성된 후에 오스테나이트와 탄화물로 구성된 공정조직이 형성되기 때문에 탄화물의 양이 많고 조대한 미세조직을 보이며, 냉각속도에 따른 미세조직의 차이가 크고 용접성이 저하되는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 따라서, 우수한 용접성과 변형유기 마르텐사이트 변태에 의한 우수한 마모저항성을 겸비하기 위해서는 아공정 오스테나이트계 합금이 적합할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 Stellite 6과 Stellite 합금의 유력한 대체 후보합금인 Norem 02에 대하여 원자력발전소 밸브 경면처리 재료의 가장 큰 손실원인 중의 하나인 캐비테이션 에로전 거동을 조사하였으며, 현재 개발중인 아공정 오스테나이트계 합금인 Fe계 합금의 캐비테이션 에로전 거동을 Stellite 6와 Norem 02의 캐비테이션 에로전 거동과 비교, 평가하였다. 또한, 상온뿐만 아니라 80℃에서의 Fe계 신합금의 캐비테이션 에로전 거동을 함께 조사함으로써 온도변화가 에로전 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

Norem 02 시편은 Studdy Deloro Stellite사에서 제조된 용접봉을 이용하여 200×40×12mm의 SUS 304 판에 GTA (Gas Tungsten Arc) 용접으로 경면처리하여 제작하였다. Norem 02의 GTA 용접조건은 Table 1에 나타난 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 제시한 최적조건을 따랐으며, 용접전후의 화학조성은 Table 2에 나타난 바와 같다. Stellite 6의 경우에는 GTA 용접시편과 주조시편간에 캐비테이션 에로전 거동의 차이가 거의 없는 것으로 보고되어 있어<sup>3)</sup> 시편제작이 용이한 Studdy Deloro Stellite사의 investment 주조시편을 사용하였으며, 본 연구진에 의해 개발된 경면처리용 Fe계 신합금의 경우에도

Table 1. The conditions of GTAW of hardfacing alloys.<sup>4,5)</sup>

ITEM	Condition
Shielding gas	Ar, 15-30 ft <sup>3</sup> /hr
Preheating	None
Max. Interpass Temp.	315℃
Current	125-175 Amp.
Voltage	12-18 Volts
Travel Speed	2.5-4.5 in./min

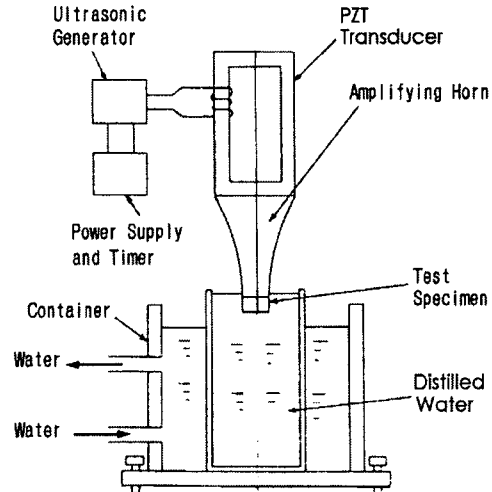


Fig. 1. Schematic representation for vibratory cavitation erosion test equipment.

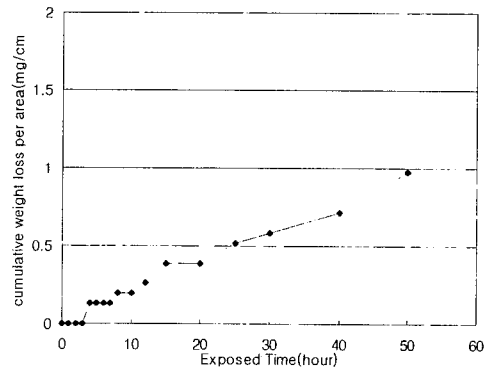


Fig. 2. Cumulative weight loss of Stellite 6 as a function of the exposure time at 25℃.

주조시편을 사용하였다. 신합금은 아르곤 분위기에서 유도로를 이용하여 제조하였다.

캐비테이션 에로전 시편은 지름 15.9mm, 높이 5mm의 규격으로 가공하였으며 시편표면은 #2000 SiC 연마지를 이용하여 표면조도(R<sub>a</sub>)가 균일하도록 연마하였다.

캐비테이션 에로전 시험은 ASTM 32-92<sup>8)</sup> 규격에 따라

Table 2. Chemical composition of Norem 02. (wt.%)

	Fe	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	C	N
nominal	bal.	22.5-26	4-5	3.7-4.2	1.8-2.2	3.0-3.5	1.1-1.35	0.02-0.18
analyzed	bal.	24.48	4.47	3.88	2.02	3.32	1.36	0.046

제작된 두 개의 vibratory type 장치를 이용하였으며 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시험장치에 사용된 초음파 진동자의 공진진동수는 20kHz이고 지수형 혼을 부착하여 증폭 되도록 하였다. 실험에 사용된 용액은 비저항이 5M $\Omega$ cm 이상인 증류수를 사용하였으며, horn의 끝 부분에 장착된 시편이 약 2mm정도 증류수 속에 잠기도록 하고 증류수의 온도가 25 $\pm$ 2 $^{\circ}$ C를 유지할 수 있도록 냉각수를 순환시켰다. 캐비테이션 에로전 시험은 시편을 horn에 부착하여 50시간까지 수행되었으며, 시험시간에 따른 무게감소량은 무게 변화를 단위 면적당 누적 무게감소(mg/cm $^2$ )로 환산하여 표시하였다. 80 $^{\circ}$ C에서의 캐비테이션 에로전 시험은 증류수의 온도를 80 $^{\circ}$ C로 유지시켜 상온 시험과 동일한 조건으로 수행되었다.

캐비테이션 에로전 시험 시작 전과 일정한 시험시간 간격으로 시편의 표면 미세조직을 광학현미경과 SEM (Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였으며, 변형유기 상변태가 캐비테이션 에로전 저항성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 시험 전후의 시편표면을 X-선 회절분석을 통해 변형유기 상변태의 발생여부를 조사하였다. 또한, 재료의 경화가 캐비테이션 에로전 저항성에 미치는 영향을 조사하기 위해 시험 전후에 기지상의 미소경도를 Vickers microhardness 측정기를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

현재 대부분의 원전 밸브용 경면처리 합금으로 사용하고 있는 Stellite 6에 대하여 캐비테이션 에로전에 의한 재료의 손실 거동은 캐비테이션에 노출된 시간에 따른 Stellite 6의 재료손실로 표현하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 일반적으로 재료의 캐비테이션 에로전은 초기에 캐비테이션 에로전에 의한 손실이 거의 관찰되지 않는 잠복단계를 보이다가 가속단계를 거쳐 손실깊이가 시간에 따라 직선적으로 증가하는 최종단계를 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 본 실험결과에서도 약 3시간의 잠복시간 후에 직선적인 재료의 손실을 나타내었으며, 50시간 동안 캐비테이션에 노출시킨 경우의 재료 누적 무게 손실량은 약 0.9740mg/cm $^2$ 를 나타내었다.

Hcp 구조를 갖는 단결정 Co의 캐비테이션 에로전 거동

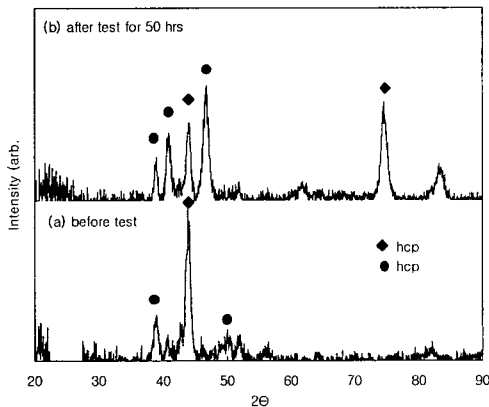


Fig. 3. XRD patterns of Stellite 6 (a) before and (b) after the exposure to cavitation at 25 $^{\circ}$ C.

Table 3. Vickers microhardness of Stellite 6 before and after the exposure to cavitation.

	before	after
matrix	403.0 Hv	420.7 Hv

을 연구한 Preece 등에 따르면<sup>7)</sup>, 캐비테이션에 노출된 영역 전체가 미세한 변형 쌍정으로서 구성된 network를 형성할 때까지 쌍정의 밀도는 계속 증가하는데, 이러한 쌍정은 기지상의 가공경화능과 연성을 동시에 향상시키고 변형에 너지의 축적에 효과적일 뿐만 아니라 변형의 완화를 쉽게 하기 때문에 우수한 에로전 저항성을 제공한다. 그러나, 캐비테이션에 노출되는 fcc 구조의 Stellite 6는 기지상에서 변형유기 상변태가 발생하기 때문에 에로전에 대한 저항성이 변화하는 것으로 알려져 있다. 즉, 상변태가 발생함에 따라 기지상의 경도가 크게 증가하기 때문에 탄화물에서 먼저 캐비테이션에 의한 손실이 시작된다. 결과적으로 쌍정의 형성뿐만 아니라 변형유기 상변태의 발생 때문에 Stellite 6는 높은 캐비테이션 에로전 저항성을 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 캐비테이션에 노출시키기 전과 50시간 노출시킨 후에 X-선 회절로 시편표면을 분석한 결과인 Fig. 3에 따르면, Stellite 6는 캐비테이션에 노출됨에 따라 fcc 구조에서 hcp 구조로의 상변태가 발생한 것으로 보인다. 한편, 캐비테이션에 노출시키기 전후의 기지상 영역의 가공경화 여부를 확인하기 위하여 미소경도를 측정한 결과를 Table 3에 나타내었다. 기지상의 경도는 캐비테이션에 노출되기 전에 약 403.0Hv를 나타내었으나, 노출 후에는 420.7Hv로 증가하였는데 이러한 기지상의 경화는 앞서 확인한 Stellite의 상변태에 기인하는 것으로 생각되며, 이것이 Stellite 6의 우수한 캐비테이션 에로전 저항성에 기여하는 것으로 생각된다.

Stellite 6에서의 상변태에 따른 기지상의 강화가 캐비테이션 노출에 따른 재료손실에 미치는 영향을 알아보기 위하여 캐비테이션에 노출된 시간에 따른 Stellite 6의 표면을 광학현미경으로 관찰하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4로부터 5시간부터 재료의 손실이 나타나기 시작하여 20시간 이후에는 재료손실 영역이 상당히 크게 증가할 뿐만 아니라 탄화물 영역에 접한 일부 기지상의 손실도 관찰할 수 있다. 일반적으로 캐비테이션에 노출되면 가장 취약한 부분인 기지상과 단단한 석출물 사이의 경계에서 먼저 크랙이 발생하기 시작한다는 것은 잘 알려진 사실로서<sup>10)</sup> 확대된 사진으로부터 재료손실이 탄화물 영역에서부터 시작하여 기지상으로 확대되는 것이 아니라, 탄화물 영역으로 계속 확장되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 것처럼 Stellite 6의 에로전 거동은 쌍정의 형성뿐만 아니라 상변태에 의한 기지상의 강화에 크게 의존하기 때문인 것으로 생각된다.

Stellite 6를 대체하기 위하여 미국의 EPRI에서 개발한 Co-free 경면처리 합금인 Fe계 Norem 02의 캐비테이션 에로전 저항성을 평가하기 위하여 앞서와 마찬가지로 캐비테이션에 노출된 시간에 따른 Norem 02의 무게감소를

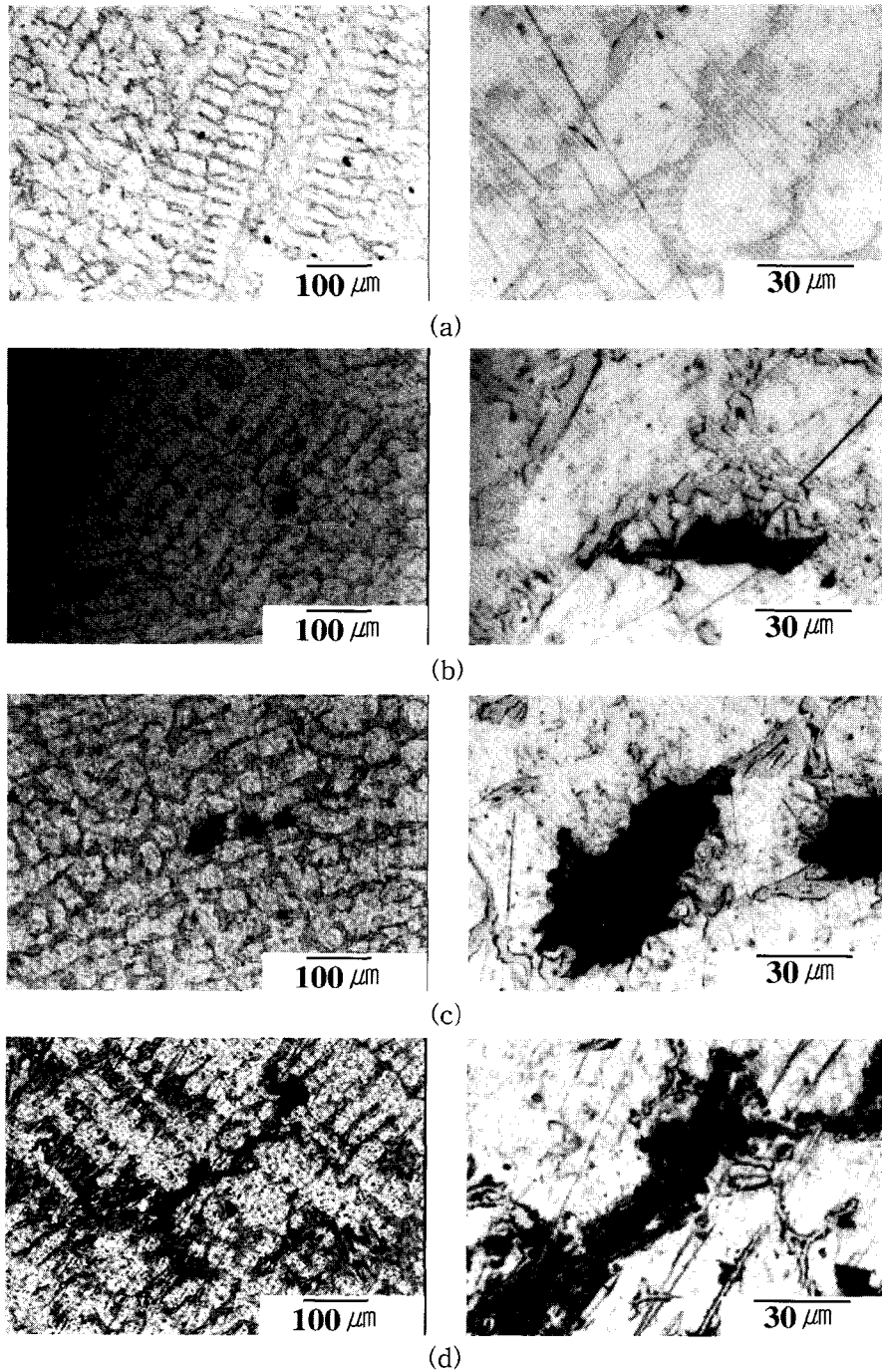


Fig. 4. Optical micrographs of cavitation erosion surfaces of Stellite 6 with the exposure time at 25°C. ; (a) 1 hour, (b) 5 hours, (c) 8 hours, (d) 20 hours

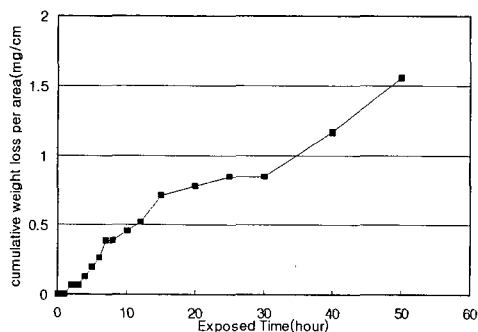


Fig. 5. Cumulative weight loss of Norem 02 as a function of the exposure time at 25°C.

Fig. 5에 나타내었다.

Stellite 6와는 달리 캐비테이션 노출시간에 따른 재료의 손실은 노출 초기부터 거의 직선적인 관계를 가지고 있었으며, 재료의 누적 무게 손실량도 크게 증가하여 50시간 동안 캐비테이션에 노출시킨 경우에 1.558mg/cm<sup>2</sup>의 재료 손실량을 나타내었는데, 이는 Stellite 6에 비하여 약 1.6배 증가한 것이다.

재료의 손실 영역을 확인하기 위하여 Fig. 6에 캐비테이션 노출 시간에 따른 Norem 02의 표면손실을 광학현미경으로 관찰한 사진을 나타내었다. Norem 02의 경우에는 2

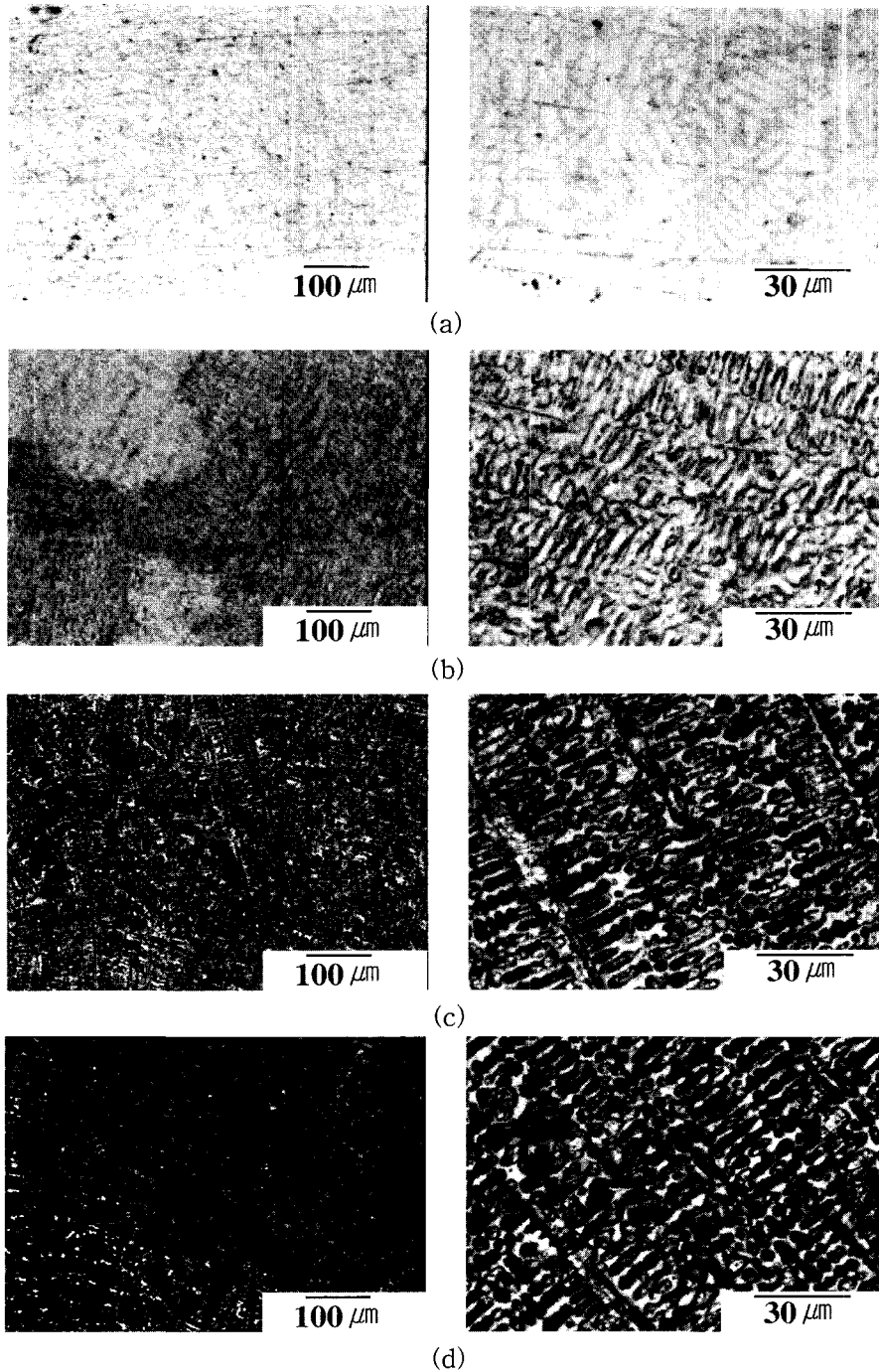


Fig. 6. Optical micrographs of cavitation erosion surfaces of Norem 02 with the exposure time at 25°C. ; (a) 1 hour, (b) 5 hours, (c) 8 hours, (d) 20 hours

시간의 노출시간부터 비교적 조대한 크랙이 나타나기 시작하였고 5시간부터는 탄화물 영역과 기지상 영역을 구분하지 않고 상당량의 재료손실이 시작되었으며, 20시간 이후에는 시편의 표면전체에서 재료의 손실이 나타났다. 특히, 위의 사진으로부터 Norem 02는 탄화물 영역과 기지상 영역의 재료손실이 구분되지 않고 발생하는 것으로 보아 기지상과 탄화물 사이의 계면에서 발생한 크랙이 Stellite 6와는 달리 기지상으로도 쉽게 확산되기 때문에 재료의 손실이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 종류의  $Cr_7C_3$  석출물을 갖는 Stellite 6와 Norem 02에 있어서

Norem 02의 기지상이 Stellite 6의 기지상에 비해 낮은 캐비테이션 에로전 저항성을 갖는다는 것을 의미한다.

Fe계 합금의 캐비테이션 에로전 저항성에 관한 Protheroe 등의 보고에 따르면<sup>(1)</sup>, hardened and tempered 마르텐사이트 강의 경우에는 에로전에 대한 저항성이 재료의 경도에 비례하고, 페라이트 강에서는 재료의 변형을 민감도에 크게 의존하지만, 오스테나이트 강의 캐비테이션 에로전에 대한 저항성은 재료의 적층결합 에너지, 상변태, 쌍정 등의 여러 요인들에 의존한다. 일반적으로 재료가 캐비테이션에 노출된 경우에 낮은 적층결합에너지를 갖

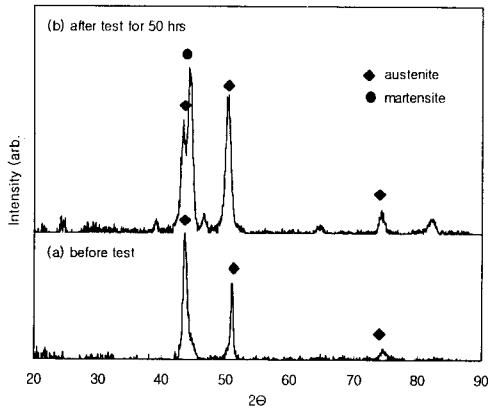


Fig. 7. XRD patterns of Norem 02 (a) before and (b) after the exposure to cavitation at 25°C.

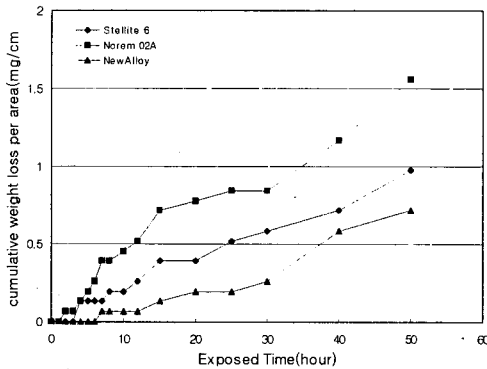


Fig. 8. Cumulative weight loss of Stellite 6, Norem 02 and NewAlloy as a function of the exposure time at 25°C.

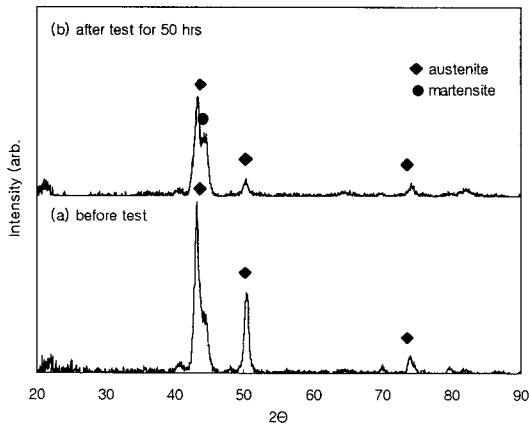


Fig. 9. XRD patterns of NewAlloy (a) before and (b) after the exposure to cavitation at 25°C.

는 재료에서의 planar 슬립은 충격응력에 저항하여 파괴에 필요한 국부응력의 형성을 지연시킴으로써 재료의 캐비테이션 에로전 저항성을 증가시키는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 따라서, 초기의 적층결합 에너지가 낮을수록 재료의 에로전에 대한 저항성이 증가하며, Stellite 6에서처럼  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태는 기계적 성질을 기초로 예상했던 것보다 우수한 에로전

저항성을 가져온다.<sup>11)</sup> 즉, 상변태에 의해 형성된 마르텐사이트는 적층결합의 교차점에서 핵생성되는데, 높은 가공경화속도를 가져오면서도 매우 높은 응력수준까지 균일한 인장을 유지하게 하여 에로전 저항성의 향상을 가져온다. 한편, 가공경화능을 향상시키는 합금원소인 Mn을 첨가한 Fe계 합금은 캐비테이션 노출에 의해 형성되는 쌍정과 tangled 전위들로 구성된  $\epsilon$  마르텐사이트에 의해 캐비테이션 에로전 저항성이 향상되는 것으로 보고되었다.<sup>12)</sup> 오스테나이트 구조인 Norem 02의 경우에도 캐비테이션 에로전에 대한 저항성은 위에서 살펴본 3가지 요인에 의해 결정되는 것으로 생각되며, 재료의 고유특성인 적층결합 에너지를 제외한  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태와  $\epsilon$  마르텐사이트의 영향을 확인하기 위하여 캐비테이션에 노출시킨 전후에 X-선 회절로 시편을 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 살펴보면, 캐비테이션에 50시간 동안 노출시킨 경우에는 초기 시편에서 관찰할 수 없었던  $\alpha'$  과 관련된 peak가 관찰되어 캐비테이션에 의한 상변태가 발생한 것으로 생각된다. 하지만, Mn을 첨가한 Fe계 합금의 에로전 저항성에 영향을 미치는  $\epsilon$  마르텐사이트와 관련된 peak는 관찰할 수 없었다. 상변태의 발생에도 불구하고 탄화물 영역과 기지상 경계에서 형성된 크랙의 전파를 상변태에 의해 경화된 기지상이 효과적으로 억제한 Stellite 6에 비해 Norem 02의 재료손실이 매우 컸으며, 이는 기지상이 크랙 전파를 효과적으로 억제하지 못했기 때문으로 생각된다.

한편, Fe계 신합금의 캐비테이션 에로전 거동을 Stellite 6, Norem 02와 비교하기 위하여 캐비테이션에 노출된 시간의 함수로 나타낸 무게감소의 그래프를 Fig. 8에 나타내었다.

신합금의 경우에는 잠복시간이 약 6시간으로 다른 합금에 비해 매우 길었으며 재료의 누적 무게 손실량을 캐비테이션의 노출시간과 거의 직선적인 관계를 가지고 있다. 절대적인 재료의 누적 무게 손실량은  $0.7143\text{mg}/\text{cm}^2$ 를 나타내어 Stellite 06의 재료 손실량의 약 73% 정도 수준이었다. 신합금의 경우에도 오스테나이트 구조를 가지고 있기 때문에 에로전 저항성에 미치는 인자로는 Norem02에서와 마찬가지로 적층결합 에너지,  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태 그리고  $\epsilon$  마르텐사이트의 형성 등을 고려할 수 있다.

적층결합 에너지는 앞서 설명한 바와 같이 초기의 캐비테이션 에로전 저항성에 크게 영향을 미치는 반면에 에로전에 노출되는 시간이 증가할수록 다른 요인들에 의해 영향이 상대적으로 감소하기 때문에 전반적인 에로전 저항성에 영향을 미치는 인자로 고려하지는 않았다. 상변태에 따른 기지상의 강화 여부와  $\epsilon$  마르텐사이트의 형성여부를 확인하기 위하여 캐비테이션에 노출시킨 전후에 X-선 회절로 신합금을 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 분석 결과에 따르면 Norem 02에서와 마찬가지로  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태의 발생은 확인하였으나  $\epsilon$  마르텐사이트의 형성은 관찰되지 않았으며, 따라서  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태나  $\epsilon$  마르텐사이트의 형성 여부가 Norem 02와 신합금에서의 캐비테이션에 대한 저항성의 차이를 설명하기에는 부족한 것으로 보인다.

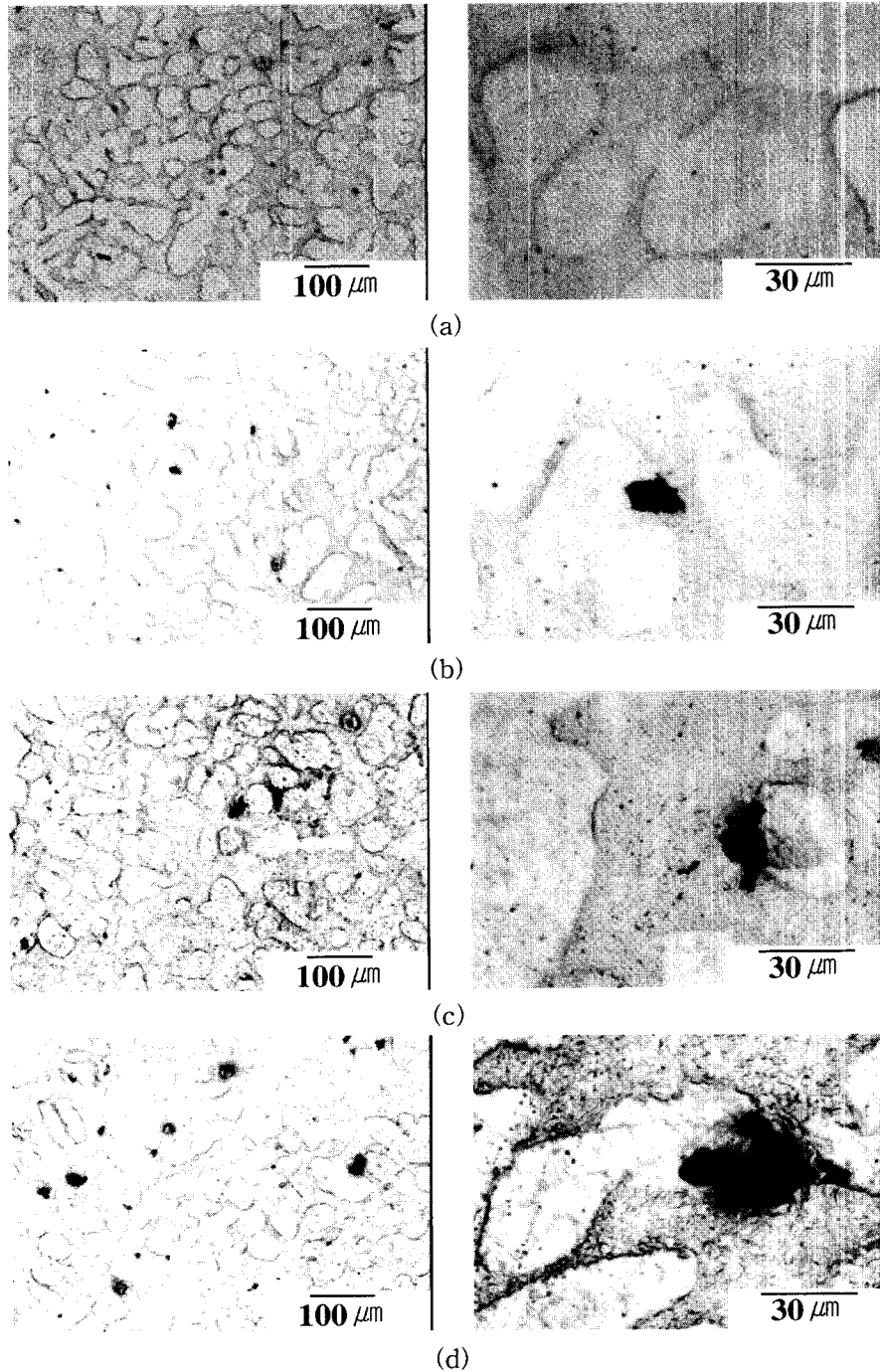


Fig. 10. Optical micrographs of cavitation erosion surfaces of New Alloy with the exposure time at 25°C. ; (a) 1 hour, (b) 5 hours, (c) 8 hours, (d) 20 hours

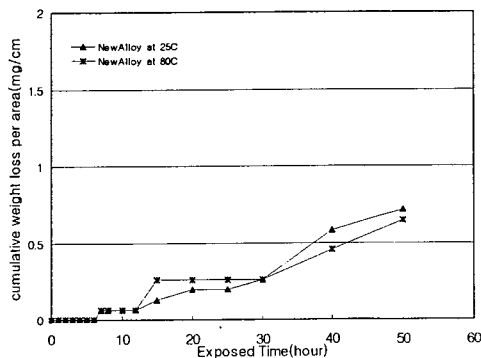


Fig. 11. Cumulative Weight loss of New Alloy as a function of the exposure time at 25°C and 80°C.

일반적으로 재료에서 단단한 석출물은 기지상에 비해 캐비테이션 에로전에 대한 저항성에 미치는 영향이 적은 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup> 하지만, Heathcock 등에 의하면<sup>9)</sup> 기지상보다 단단한 석출물은 plastic constraint에 의해 기지상을 경화시킴으로써 에로전에 대한 저항성을 증가시키는 역할을 하는 반면에 기지상과 석출물의 경도차이가 매우 큰 경우에는 기지상과 석출물의 경계에서 크랙발생이 증가하여 오히려 재료의 캐비테이션 에로전에 대한 저항성을 감소시키는 효과도 있다. 따라서, 경도차이가 큰 탄화물 영역과 기지상의 면적비율이나 크기 등과 같은 미세조직의 변화가 발



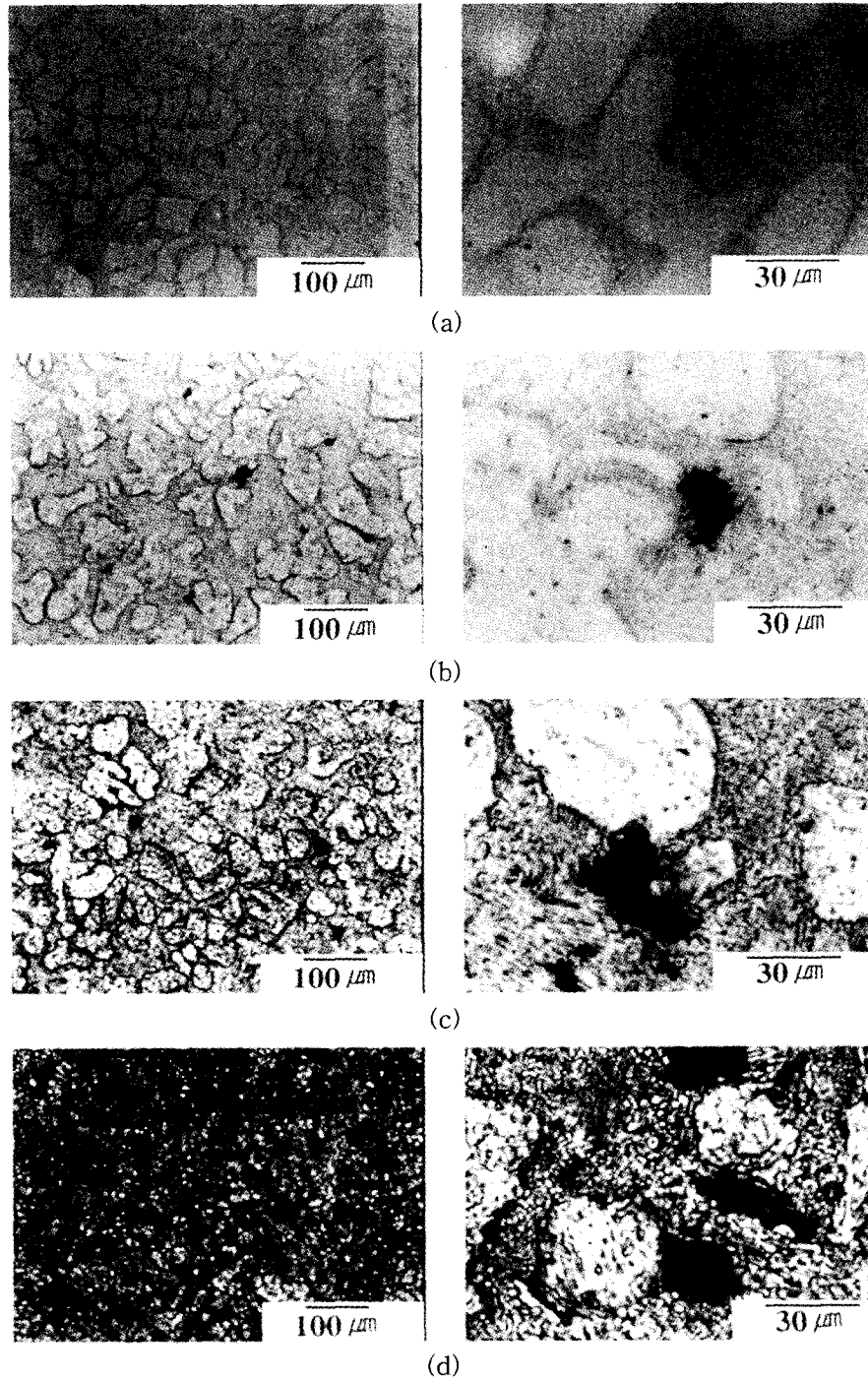


Fig. 12. Optical micrographs of cavitation erosion surfaces of NewAlloy with the exposure time at 80°C. ; (a) 1 hour, (b) 5 hours, (c) 8 hours, (d) 20 hours

생하면 탄화물과 기지상 경계의 분율이 변함으로써 에로전에 대한 저항성이 달라질 수도 있으리라 예상된다. 이를 확인하기 위하여 캐비테이션에 노출된 시간에 따른 신합금의 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Norem 02에 비하여 조대한 조직을 나타낸 신합금의 경우에는 크랙의 생성이 용이한 탄화물과 기지상 계면의 분율이 매우 작았으며, 이러한 변화 때문에 Norem 02에 비하여 신합금의 경우에 에로전에 대한 저항성이 보다 우수한 것으로 보인다.

Fig. 10에 나타난 신합금 표면의 미세조직 변화를 살펴 보면, Stellite 6에서처럼 5시간의 노출시간부터 비교적 조대한 재료의 손실을 관찰할 수 있었는데, 이러한 재료의 손실은 탄화물과 기지상 사이의 경계에서부터 시작되었다. 탄화물과 기지상 경계에서 시작된 이러한 크랙은 캐비테이션에 노출된 시간이 증가함에 따라 기지상 내부로 전파하지 않고, 탄화물 영역으로 확장되어 재료의 손실이 탄화물 영역에서만 발생함을 알 수 있다. 기지상에서의  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태 발생에 기인하여 신합금에서 기지상 경도는 캐비테이션



에 노출되기 전에 약 359.3Hv에서 노출 후에는 446.0 Hv로 증가하였는데, 이러한 경도의 증가는 Stellite 6에서의 경도 증가보다 훨씬 크다. 따라서, 이러한 기지상의 경도 증가는 기지상과 탄화물 경계에서 생긴 크랙이 기지상으로 전파하는 것을 Stellite 6보다 효과적으로 억제하여 Stellite 6보다 우수한 캐비테이션 에로전 저항성을 나타낸 것으로 생각된다. 한편 실험금의 캐비테이션 에로전 저항성에 미치는 온도의 영향을 알아보기 위해 80°C에서의 캐비테이션 에로전 거동을 상온에서의 거동과 비교하였으며, 이를 Fig 11에 나타내었다.

80°C에서 50시간까지의 캐비테이션 에로전에 따른 실험금의 누적무게 손실량은 0.6494mg/cm<sup>2</sup>를 나타내었으며, 이는 상온에서 동일한 방법으로 측정된 실험금의 누적 무게 손실량의 91%로 거의 비슷함을 알 수 있다. 캐비테이션에 노출된 시간에 따른 시편표면을 나타낸 Fig. 12를 살펴보면, 상온에서와 마찬가지로 5시간의 노출시간부터 재료의 손실이 탄화물과 기지상 사이의 경계부터 시작되어 노출 시간이 증가함에 따라 크랙이 탄화물 영역으로 확장됨을 관찰할 수 있다. 따라서, 본 실험의 온도 범위에서는 중류수의 온도가 실험금의 캐비테이션 에로전 거동에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

경면처리용 내마모 합금인 Co계 Stellite 6, Fe계 Norem 02 및 Fe계 실험금에 대하여 50시간까지의 캐비테이션 에로전 거동을 분석하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) Stellite 6는 비교적 우수한 캐비테이션 에로전 저항성을 나타내었는데, 이는 이미 알려진 바와 같이 쌍정에 의한 효율적인 변형에너지의 축적 효과뿐만 아니라 상변태에 의한 기지상의 강화가 기지상과 탄화물의 경계에서 발생한 크랙이 기지상으로 전파하는 것을 효과적으로 억제하였기 때문이다.

2) Norem 02의 경우에는 에로전 저항성에 유리한  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태가 발생했음에도 불구하고 미세한 조직으로 인하여 크랙발생이 용이한 기지상과 탄화물의 경계 분율이 증가

하였기 때문에 오히려 캐비테이션 에로전에 대한 저항성이 감소한 것으로 보인다.

3) Fe계 실험금의 경우에는  $\gamma \rightarrow \alpha'$  상변태에 따른 기지상의 경도증가가 매우 크기 때문에 기지상과 탄화물 경계에서 생긴 크랙이 기지상으로 전파하는 것을 Stellite 6보다 효과적으로 억제하여 Stellite 6보다 우수한 캐비테이션 에로전 저항성을 나타낸 것으로 생각되며, 80°C까지는 캐비테이션 에로전 저항성에 미치는 온도의 영향은 없는 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 기초연구사업 지원 하에 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

1. ASM Handbook Vol.18, ASM International, 214 (1992).
2. H. Ocken : Nuclear Tech., **68**, 18 (1985).
3. K.C. Antony : J. of Metals, Feb, **52** (1983).
4. J. Vikstrom : Wear, **179**, 143 (1994).
5. H. Ocken : Surface and Coating Tech., **76-77**, 456 (1995).
6. H. Ocken : Metall. Trans., **22A**., 983 (1991)
7. S. Vaidya, S. Mahajan and C.M. Preece : Metall. Trans.; **11A**, 1139 (1980).
8. Annual Book of ASTM Standards G-32, ASTM., 115 (1992).
9. C.J. Heathcock and A. Ball : Wear, **74**, 11 (1981-1982).
10. H.G. Feller and Y. Kharrazi : Wear, **93**, 249 (1984).
11. C.J. Heathcock and B.E. Protheroe : Wear, **81**, 311 (1982).
12. W.N. Roberts : Trans. Metall. Soc. AIME, **230**, 372 (1964).