

해양환경 하에서 Ni-Cr계 자용성 합금 코팅된 ALBC3 합금의 캐비테이션 특성 평가

이승준* · 김성종**†

*, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

Evaluation of Cavitation Characteristics for ALBC3 Alloy Coated with Ni-Cr Series Self Fluxing Alloy in Marine Environment

Seung-Jun Lee* · Seong-Jong Kim**†

*, ** Division of Marine Engineering, Mokpo Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 본 연구에서는 ALBC3 합금에 Ni계 자용성 합금으로 내마모성 및 내캐비테이션 특성을 향상시키기 위하여 용사코팅 후 열처리를 실시하여 캐비테이션 특성을 평가하였다. 본 연구 결과, 자용성 합금 코팅층이 높은 경도를 나타내어 내마모성이 우수할 것으로 판단되나, 다공질의 조직으로 인해 열악한 내캐비테이션 특성을 나타냈다. 따라서 열처리 조건의 최적화가 중요하며, 본 조건에서는 열처리 온도를 높여 자용성 합금 내 B와 Si의 유동성을 증가시킴으로써 기공이나 결함을 제거하여 특성개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : ALBC3합금, 자용성 합금, 캐비테이션, 해수, 열처리

Abstract : In this study, cavitation characteristics of a thermal spray coating were evaluated in order to improve durability and cavitation resistance. For a coating material, a Ni-based self-fluxing alloy was thermal-sprayed over a ALBC3 alloy substrate and subsequently modified by heat treatment. The resulted self-fluxing coating layer had relatively high hardness compared to the base material, and thus would be expected to exhibit good durability. However, the cavitation characteristics were deteriorated due to the intrinsic porous structure of the coating. Therefore, it is essential to optimize heat treatment condition during thermal spraying coating process for self-fluxing alloy, and in this research the increase in heat treatment temperature is thought to increase the fluidity of B and Si in the self-fluxing alloy and to remove pores or defects, leading to the characteristics enhancement.

Key Words : ALBC3 alloy, Self fluxing alloy, Cavitation, Seawater, Heat treatment

1. 서 론

동합금은 내식성과 가공성이 우수하고 다양한 열처리를 통한 특성개선이 용이하여 해양산업분야에 널리 사용된다. 그러나 우수한 특성에도 불구하고 회전체 구성 재료로 사용될 경우 캐비테이션 침식에 의한 손상으로 실제 현장에서 수명이 단축되는 사고가 빈번하게 발생하고 있다(Shalaby et al., 1995; Al-Hashem and Riad, 2002; Tang et al., 2004). 따라서

이를 개선하기 위한 다양한 방법이 시도되고 있으며, 최근에는 용사기술을 통한 표면개질 기술이 많이 응용되고 있다. 지난 수십 년간 용사기술은 항공 및 자동차 산업뿐만 아니라 제조업을 포함한 다양한 분야에서 고온산화, 마모와 부식 문제를 해결하기 위해 널리 사용되어 왔다(DeMasi-Marcin and Gupta, 1994; Rigney et al., 1997; Kamo et al., 1991). 그러나 코팅층 내에 필연적으로 포함되어 있는 기공과 산화물이 입자간 결합강도, 모재와의 접착강도 및 내마모성을 저하시킨다. 또한 부식성 환경에서는 코팅층 부식에 의한 박리로 모재 손상을 유발하기도 한다. 따라서 코팅층 성능 개선을 위한 후처리 공정이 반드시 필요하며, 이러한 방법으로 Ni-Cr

* First Author : corr-pro@mmu.ac.kr, 061-240-7200

† Corresponding Author : ksj@mmu.ac.kr, 061-240-7226

기 자용성 합금 코팅층을 열처리하면 저용점의 고용체가 계면에 확산층을 형성하여 밀착강도가 향상되고, 조직간 야금적 결합을 가능하게 한다(Kim et al., 2007). 따라서 본 연구에서는 ALBC3 합금에 Ni기 자용성 합금으로 용사코팅 후 열처리를 실시하여 캐비테이션 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금의 화학적 조성을 Table 1에 나타냈다. 특히 용사에 사용된 Ni기 자용성 합금은 내식성이 우수한 Ni이 주성분이며, B와 Si첨가로 인한 용점 감소와 유동성 증가 효과가 있어 브레이징 필러 금속(brazing filler metal)으로 오래전부터 사용되어 왔다(Knotek and Lugscheider, 1974). 시험편 제작 시 코팅층 특성 개선을 목적으로 1000 °C에서 30분 동안 열처리 후 노냉하였다. 코팅층의 횡단면은 광학현미경으로 관찰하였으며, 마이크로 비커스 경도계(HMV-112, Akashi, Japan)를 이용하여 100 gf로 5초 동안 하중을 인가하여 측면 경도를 측정하였다. 캐비테이션 실험은 압전효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였으며, 대향형 진동법으로 실험을 실시하였다. 이는 60 Hz, 220 V의 전력이 전자회로를 거쳐 20 KHz의 정격 출력으로 증폭되며, 진폭은 정진폭 자동제어 방식으로 30 μm를 유지하였다. 혼 팀은 Ti합금을 사용하였으며, 시편은 혼에 대향하도록 거치대에 고정하고 1 mm의 간격을 유지하였다. 셀은 전기화학적 부식의 영향을 피하기 위해 아크릴로 제작하였으며, 용액은 천연해수를 사용하여 20 °C로 유지하였다. 또한 매 실험 시 용액을 교체하여 탈리된 입자에 의한 시편의 손상을 최소화하였다. 그리고 실험 시작 전과 종료 후 초음파 세척기로 시험편을 세척하여 진공건조기에서 72시간 동안 건조시킨 후, 캐비테이션에 의한 표면 손상 정도를 무게 감소량과 손상으로 평가하였다. 또한 시간 경과에 따른 손상 정도를 미시적으로 분석/평가하기 위하여 주사전자현미경과 3차원 광학현미경을 이용해 표면의 손상거동을 상호 비교, 분석하였다.

Table 1. Chemical compositions of ALBC3 and self fluxing alloy (wt.%)

ALBC3	Elements	Cu	Al	Fe	Ni	Zn	Pb	Si	
	Contents	Balance	9.30	3.66	4.39	0.34	0.013	0.17	
Self fluxing alloy	Elements	Ni	Cr	Si	Fe	Cu	B	Mo	C
	Contents	Balance	15	5	5	3	3	3	0.5

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금 코팅층의 횡단면 사진과 마이크로 비커스 경도 측정 결과를 나타낸 것이다. ALBC3 합금은 평균 156 Hv를 나타낸 반면, 코팅층은 평균 450Hv로 주조제인 모재보다 3배 정도 높은 값을 나타냈다. 이러한 경도 측정을 통해 재료의 물리적 외력에 대한 저항성을 유추할 수 있으며(Kwok et al., 2000; Münsterer and Kohlhof, 1995), 경도와 내마모성 및 내캐비테이션 특성은 어느 정도 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 코팅층과 동합금의 경계면에서는 낮은 경도를 나타내어 결합력이 낮을 것으로 사료된다. 측면 관찰에서 다수의 기공이 관찰되었는데, 일반적으로 용사코팅은 가공 특성상 기공이 많고(Ruckle, 1980) 조직이 불균일하며, 모재와의 밀착성이 낮은 단점이 있다. 특히 표면에 기공이나 균열이 있는 경우 응력집중 현상이나 스플랫간 결합력을 약화시켜 기계적 특성이 저하되는 원인으로 작용한다(Buckley, 1985). 따라서 후처리를 통한 기공이나 균열 감소는 코팅층의 기계적 특성뿐만 아니라 내마모성을 향상시킨다(Zhou et al., 1999). 특히 첨가원소 중 B는 용점강화 원소로 작용하여 재용융을 용이하게 하며, Si는 코팅층의 유동성을 증가시킨다(Otsubo et al., 2000). 또한 이들 원소들은 열처리 동안 표면에 얇은 플럭스(flux)막을 형성하여 산화를 방지함으로써 모재와 코팅층간의 밀착력을 증가시키는 역할을 한다(Miguel et al., 2003). 본 연구에서는 열처리를 통해 계면 확산층이 생성되고, 코팅층 내 포함된 Fe가 일부만 합금화되고 나머지는 산화 및 용해에 의해 기공으로 나타난 것으로 판단된다(Okada et al., 1989; Kim et al., 2007).

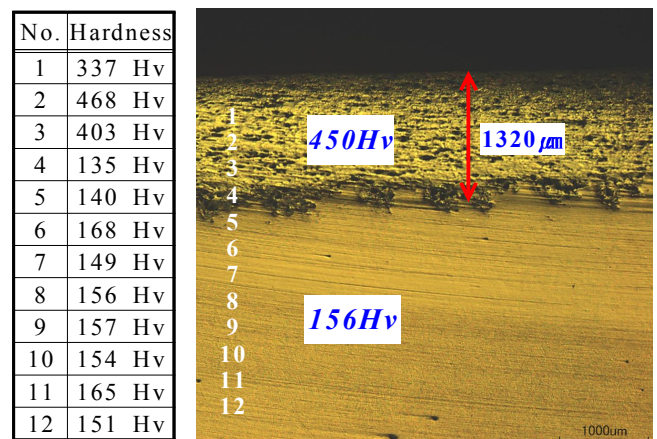


Fig. 1. Cross-section morphologies of ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.

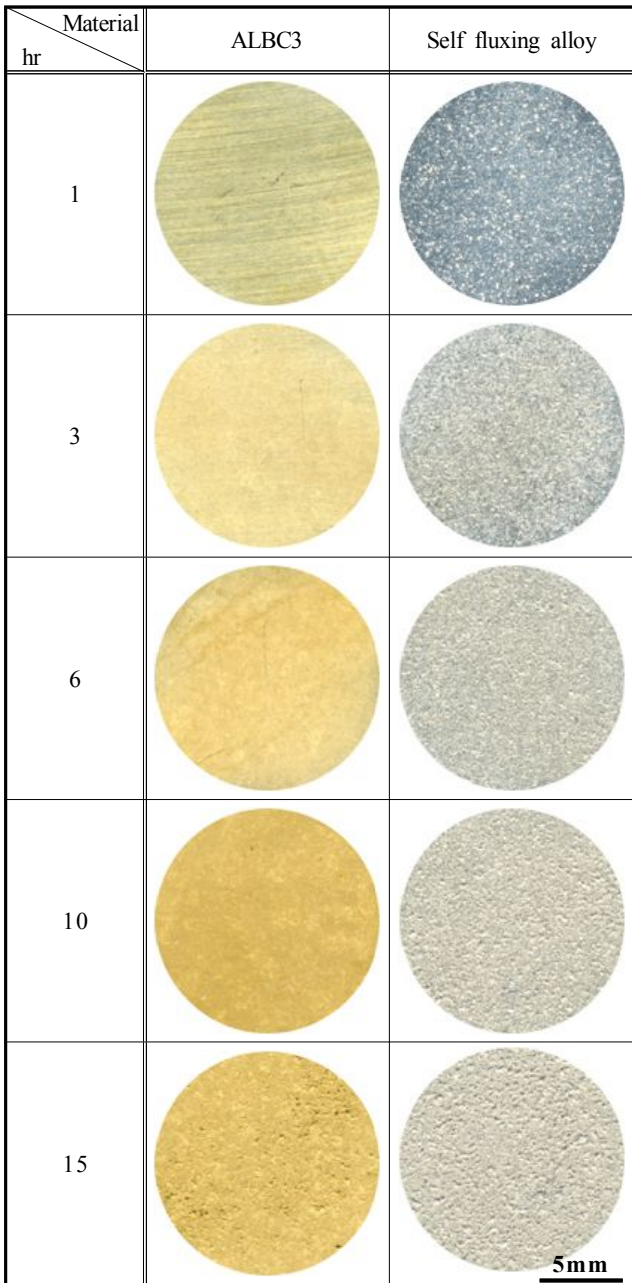


Fig. 2. Surface observation after cavitation test for ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.

Fig. 2는 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금 코팅층의 캐비테이션 실험 후 표면 손상거동을 관찰한 것이다. ALBC3의 합금의 경우 6시간까지 육안으로 관찰될만한 손상은 발생하지 않았다. 반면 10시간에는 거칠어진 표면과 함께 작은 피트들이 관찰되었다. 또한 15시간에는 피트의 수와 크기가 증가하면서 손상부가 뚜렷해지고 넓어져 육안으로도 현저한 피트가 관찰되었다. 반면 코팅층은 실험 초기부터 거친 표

면이 관찰되었으며, 시간이 경과할수록 손상이 크고 깊어지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 실험 시간 증가에 따라 초음파에 의해 형성된 캐비티가 증가하면서 시험편에 가해지는 에너지가 누적되어 손상량이 증가하였다. 캐비테이션 침식은 기포붕괴에 따른 반복적인 충격하중에 의해 발생하기 때문에 피로파괴 현상으로 알려져 있다(Bae et al., 2012; Iwai et al., 1989; Mori et al., 1998). 특히 상대적으로 높은 경도를 나타낸 코팅층의 손상이 크게 관찰되었다. 일반적으로 캐비테이션 저항성은 냉각속도와 산화물/화합물의 생성, 코팅층 치밀도와 기공 등의 영향을 크게 받는다(Münsterer and Kohlhof, 1995). 본 실험에서는 Ni, Cr, Mo 등 고경도 원소 첨가로 합금 자체의 경도는 ALBC3 합금보다 높게 측정되었다. 그러나 코팅층 내 기공이나 결함으로 인해 계속되는 캐비티 충격 시 입자(particle)가 아닌 하나의 덩어리(mass)를 이루며 탈리되어 손상이 크게 나타났으며, 계면에서의 결합력 약화에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금 코팅층의 캐비테이션 실험 후 표면손상을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 캐비테이션에 의한 손상발생 원인은 기포 붕괴에 따른 충격파와 기포 붕괴 시 발생하는 마이크로 제트가 동시에 작용하기 때문으로 알려져 있다. 따라서 이러한 충격파나 마이크로 제트가 시편 표면에 충돌하면서 내부응력이 발생하고, 이 응력이 어느 한계치를 초과하면 손상이 발생한다. 두 경우 모두 실험시간이 경과하면서 시편에 전달되는 에너지 총량 증가로 표면손상이 증대되었다. 전체적인 손상과정은 초기에 생성된 캐비티가 모재 표면에 충돌하여 압축 잔류응력을 형성시켜 소성변형을 일으킨다. 이후 피팅이 발생하고 진전되면서 크레이터형의 큰 피트(Al-Hashem et al., 2001; Vakil and Everbach, 1993)가 발생한 후 주변부로 급격히 확대되고 합쳐지면서 불규칙한 표면과 함께 더욱 넓고 깊은 손상이 시편 전체에서 관찰되었다. 이전 연구에서 캐비테이션 진폭이 커짐에 따라 캐비티의 충격압이 상대적으로 크게 작용함으로써 손상이 증대되는 결과(Lee and Kim, 2012)를 나타냈는데, 본 연구에서는 캐비테이션에 노출된 시간이 증가하면서 누적 충격량이 증가하여 손상이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 모재보다 코팅층에서 큰 손상이 관찰되었다. 이는 반복되는 캐비티의 충격에 의해 상대적으로 결합력이 약한 입자간 계면에서 크랙이 발생하여 코팅층으로부터 쉽게 탈리되었기 때문으로 판단된다. 이러한 손상거동은 스플랫 디라미네이션(splat delamination)(Hauschmann, 1992)으로 알려져 있으며, 코팅층 내 가스가 외부로 분출되면서 형성된 기공 역시 이러한 원인으로 알려져 있다(Suh, 1977).

Fig. 4는 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금 코팅층에 대한 캐비테이션 실험 후 무게감소량과 손상율을 나타낸 것이다.

해양환경 하에서 Ni-Cr계 자용성 합금 코팅된 ALBC3 합금의 캐비테이션 특성 평가

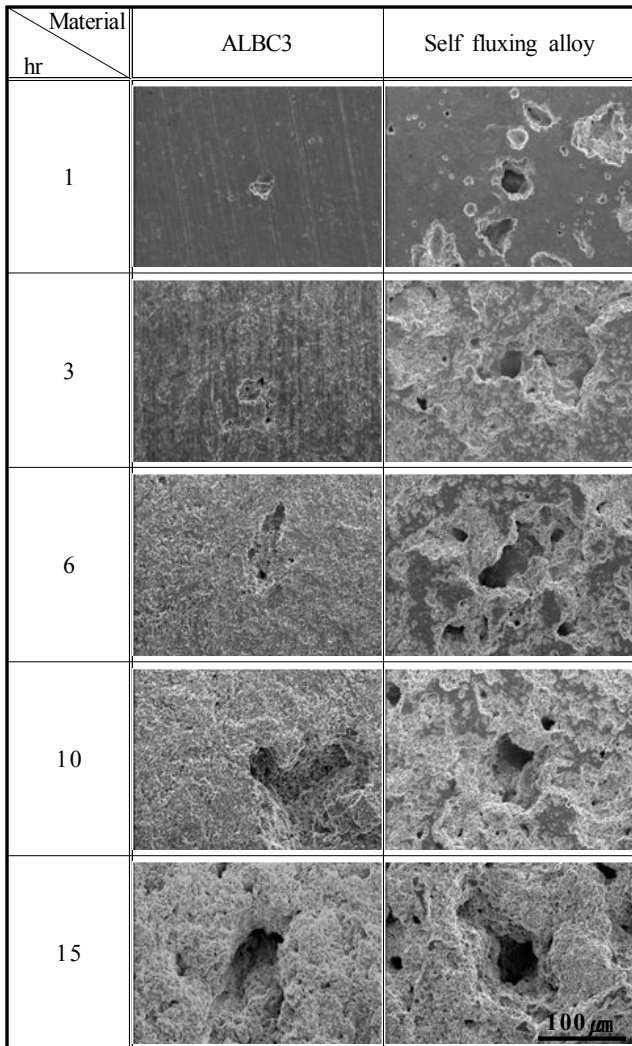
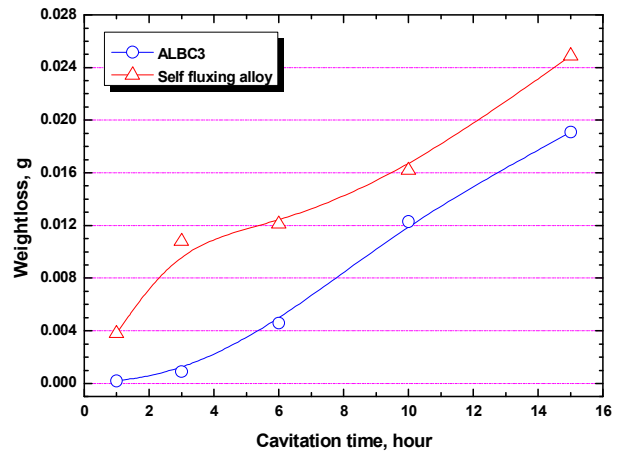
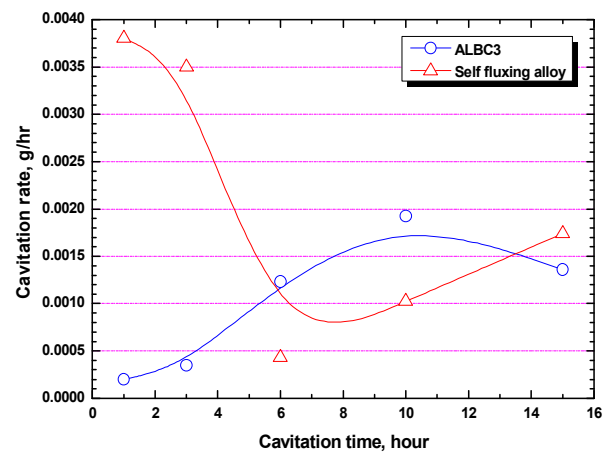


Fig. 3. SEM morphologies after cavitation test for ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.

정도의 차이는 있으나 전체적으로 시간 변화에 따라 무게감소량이 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 침식 손상은 액체의 제트 또는 액적이 고체 표면에 직접 충돌하여 발생하는 충격 침식과 기포 붕괴에 따른 충격압으로 인한 캐비테이션 침식이 동시에 발생한다. 따라서 시간 경과에 따라 물리적 외력이 누적되어 손상이 증가하지만, 재질이나 표면 상태에 따라 증가율에 차이를 나타낸다. 실험 종료 시 ALBC3 합금은 0.0191 g의 무게감소량을 나타낸 반면, 코팅층은 0.0249 g을 나타내 모재에 비해 30% 정도 높은 무게감소량을 나타냈다. 손상율 관찰에서 ALBC3 합금은 3시간까지 축적된 압축잔류응력으로 인한 일시적 경도 증가로 캐비테이션에 대한 저항성이 향상되어 손상율이 낮게 측정되었다(Lee et al., 2012). 일반적으로 단일재료의 경우 초기에 워터캐비테이션 피닝 효과(Lee et al., 2012)에 의한 압축잔



(a) Weightloss



(b) Cavitation rate

Fig. 4. Results of cavitation experiment with cavitation time for ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.

류응력 형성으로 손상율이 정체되는 잠복기 구간(Ahmed et al., 1991)이 관찰되는데, 본 실험에서는 손상율 증가가 진전되기 전인 3시간까지가 잠복기로 판단된다. 이후 10시간까지 꾸준히 증가한 손상율은 15시간에 감소하였다. 이는 표면에 발생한 피트에 흡착된 캐비티가 이후 발생된 캐비티의 모재 접촉을 차단함으로써 손상율이 감소한 것으로 판단된다. 또한 손상이 증가함에 따라 혼과 시편과의 거리가 멀어지면서 표면에 도착하는 기포수가 감소하고, 이에 따른 누적 충격량의 감소도 원인이라 할 수 있다. 반면 코팅층은 1시간에 전체적인 결정립의 탈리로 0.0038 g/hr의 가장 큰 손상율을 나타낸 후 6시간에 급격히 감소하여 0.0004 g/hr의 가장 낮은 값을 나타냈다. 이후 15시간까지 손상율이 완만하게 증가하였다. 일반적으로 손상율이 감소한 후 일정하게 유지되는 안정기를 거치나, 코팅층 내 기공과 결함으로 인해 손상율이 다시 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 5는 ALBC3 합금과 Ni기 자용성 합금 코팅층의 캐비테이션 실험 후 표면 손상을 3D 분석 현미경으로 관찰한 것이다. ALBC3 합금의 경우, 1시간에는 큰 손상없이 소성변형에 의한 거친 표면이 관찰되었다. 3시간에는 캐비티에 의해 표면에서 가장 취약한 부분이 먼저 탈리되면서 전체적으로 거친 표면형상을 나타냈다. 이는 초기 워터캐비테이션 피닝 효과로 인한 압축잔류응력이 형성되면서 내마모성이 일시적으로 증가하여 손상이 거의 발생하지 않았으나, 이후 이보다 더 큰 누적압력이 가해지면서 본격적인 손상이 발생한 것으로 판단된다. 또한 6시간 이후 피트 주위의 손상들이 모두 제거되어 비교적 매끄러운 표면과 함께 중앙에 크레이터형의 손상(Al-Hashem et al., 2001; Vakil and Everbach, 1993)이 관찰되었다. 이후 10시간에는 평탄화된 표면에 다시 손상이 발생하면서 거친 표면이 관찰되었으며, 15시간에는 피트와 피트가 합체되는 현상이 관찰되었다. 코팅층의 경우 1시간

부터 소성변형과 함께 다수의 피트가 관찰되었으며, 시간이 경과할수록 피트 수와 크기가 증가하여 15시간에는 표면층이 모두 제거되고 매우 불규칙한 형상이 관찰되었다. 전체

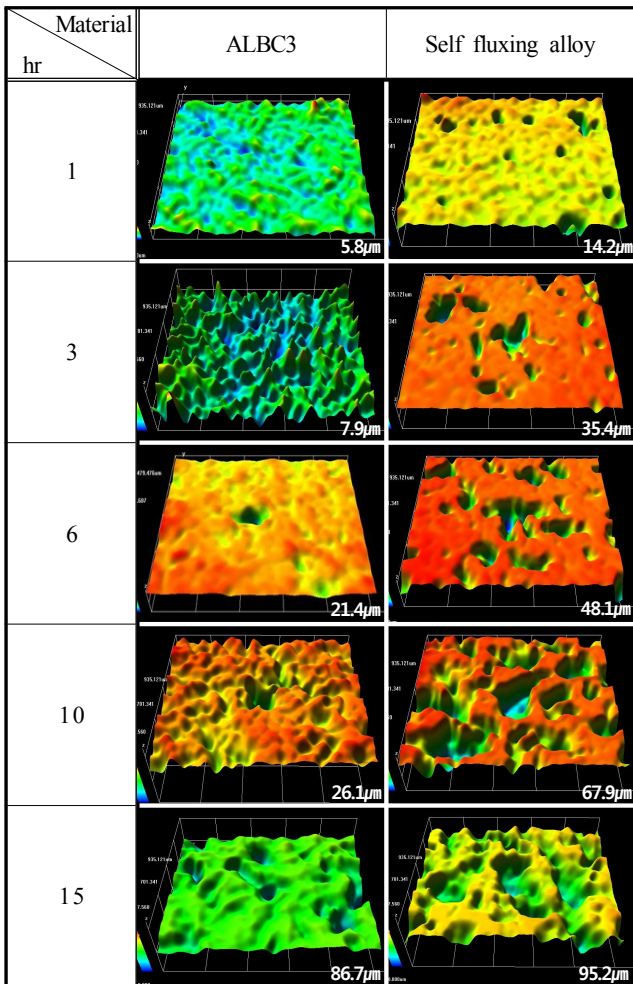
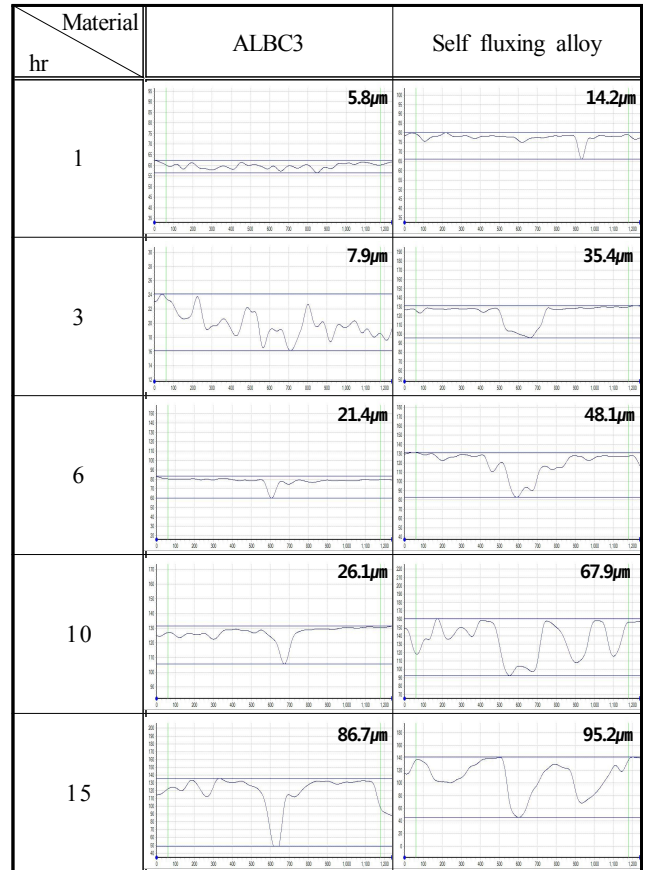
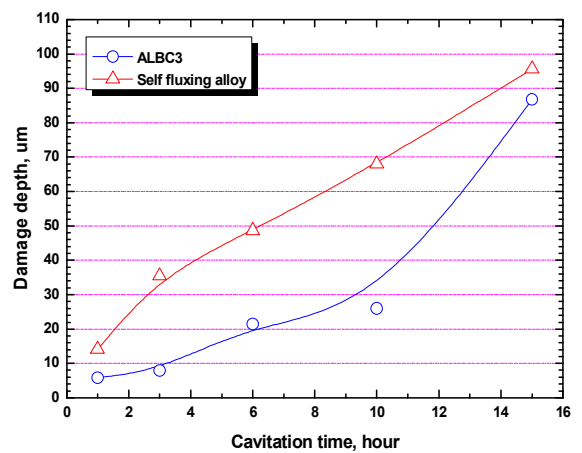


Fig. 5. 3D analysis after cavitation test for ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.



(a) Cross-section analysis



(b) Damage depth

Fig. 6. Results of cross-section analysis after cavitation test for ALBC3 and Ni base self fluxing alloy.

적으로 ALBC3 합금이 전체적으로 미세입자 탈리가 주를 이룬 반면, 코팅층은 상대적으로 결합력이 약한 계면에서 집중적으로 탈리가 진행된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 ALBC3 합금과 Ni계 자용성 합금의 캐비테이션 실험 후 손상면에 대한 단면 분석(a)과 최대 손상깊이(b)를 나타낸 그래프이다. ALBC3 합금의 경우 1시간과 3시간에 각각 5.8 μm 와 7.9 μm 의 적은 손상을 나타낸 후 10시간까지는 완만하게 증가하였다. 이후 15시간에 손상깊이가 급격히 증가하여 실험종료 시 86.7 μm 의 손상깊이를 나타냈다. 무게감소량 측정에서는 실험종료 시까지 거의 일정한 증가율을 나타냈으나, 큰 피트를 중심으로 주변이 평탄화되면서 6시간에 21.4 μm , 10시간에 26.1 μm 로 손상깊이가 낮게 측정되었다. 반면 15시간에는 피트의 깊이방향 성장이 급진전되어 손상깊이가 증가한 것으로 판단된다. 반면 코팅층의 경우는 무게감소량과 거의 유사한 경향의 손상깊이 증가율을 나타냈다. 단면분석에서도 6시간까지 피트의 손상깊이와 면적이 커지는 것을 알 수 있으며, 이후 10시간부터는 동일한 과정으로 다수의 크레이터형 피트가 발생하고 꾸준히 성장하는 것을 관찰할 수 있다. 결과적으로 시간이 경과함에 따라 최대손상깊이는 증가하였으나, 피트의 평탄화 과정과 깊이방향으로의 성장 속도가 복합적으로 작용하여 최대손상깊이의 증가율에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결론

ALBC3 합금에 Ni계 자용성 합금으로 용사코팅 후 열처리를 실시하여 해수 내 캐비테이션 실험 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

코팅층이 높은 경도를 나타냈음에도 불구하고 모든 조건에서 ALBC3 합금보다 큰 손상이 관찰되었다. 이는 코팅층의 높은 경도로 내마모성은 우수할 것으로 판단되나, 다공질의 조직으로 인해 내캐비테이션 특성에 악영향을 미친 것으로 판단된다. 열처리를 통한 재용융 과정은 코팅층 치밀화와 계면의 야금학적 결합을 통한 내마모성 및 내캐비테이션 특성 향상이 목적이다. 따라서 열처리 조건의 최적화가 중요하며, 본 조건에서는 열처리 온도를 높여 자용성 합금 내 B와 Si의 유동성을 증가시킴으로써 기공이나 결합을 제거하여 특성개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Ahmed, S. M., K. Hokkirigawa, Y. Ito and R. Oba(1991), Scanning electron microscopy observation on the incubation period of vibratory cavitation erosion, *Wear*, Vol. 142, pp. 303-314.
- [2] Al-Hashem, A., A. Abdullah and W. Riad(2001), Cavitation corrosion of nodular cast iron (NCI) in seawater Microstructural effects, *Materials Characterization*, Vol. 47, No. 5, pp. 383 - 388.
- [3] Al-Hashem, A. and W. Riad(2002), The role of microstructure of nickel-aluminium-bronze alloy on its cavitation corrosion behavior in natural seawater, *Materials Characterization*, Vol. 48, pp. 37-41.
- [4] Bae, M. W., B. H. Park and H. Jung(2012), A study on improvement of durability for run-out table roller with hot rolling by porous self-fluxing alloy coating, *The Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 276-285.
- [5] Buckley, D. H.(1985), Tribological properties of structural ceramics, *NASA*, pp. 293-365.
- [6] DeMasi-Marcin, J. T. and D. K. Gupta(1994), Protective coatings in the gas turbine engine, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 68-69, pp. 1-9.
- [7] Hauschmann, L.(1992), Plasma sprayed coatings under cyclic contact pressure on a small area, *Proceedings of the international thermal spray conference & exposition, orlando*, pp. 723-727.
- [8] Iwai, Y., T. Okada and S. Tanaka(1989), A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion part 2: Estimation of erosion from the distribution of bubble collapse pressures, *Wear*, Vol. 133, No. 2, pp. 233-243.
- [9] Kamo, L., R. Kamo and E. Valdmanis(1991), Ceramic coatings for aluminum engine blocks, *SAE911719*, pp. 175-184.
- [10] Kim, K. T., Y. S. Kim and M. S. Oh(2007), Effect of Heat Treatment Conditions on the Microstructure and Wear Behavior of Ni-based Self-flux Alloy Coatings, *Journal of the Korea society for power system engineering*, Vol. 11, No. 1, 121-126.
- [11] Knotek, O. and E. Lugscheider(1974), On the structure of Ni - Cr - B - Si hardfacing alloys and their bonding reactions, *Journal of Vacuum Science & Technology Archives*, Vol. 11, No. 4, pp. 798-801.
- [12] Kwok, C. T., F. T. Cheng and H. C. Man(2000), *Laser*

- surface modification of UNS S31603 stainless steel. Part II: cavitation erosion characteristics, *Materials science & engineering Structural materials*, Vol. 290, No. 1-2, pp. 74-88.
- [13] Lee, S. J., K. H. Kim and S. J. Kim(2012), Surface analysis of Al-Mg alloy series for ship after cavitation test, *Surface and Interface Analysis*, DOI 10.1002/sia.4953.
- [14] Lee, S. J. and S. J. Kim(2012), Evaluation of cavitation characteristics of 5083-O Al alloy with amplitude, *Corrosion Science and Technology*, Vol. 11, No. 5, pp. 205-212.
- [15] Miguel, J. M., J. M. Guilemany and S. Vizcaio(2003), Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes, *Tribology International*, Vol. 36, No. 3, pp.181-187.
- [16] Mori, H., S. Hattori and T. Okada(1998), Role of bubble collapse pressure in cavitation erosion, *JSME international journal Mechanics and material engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 96-102.
- [17] Münsterer, S. and K. Kohlhof(1995), Cavitation protection by low temperature TiCN coatings, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 74-75, No. 1-3/2, pp. 642-647.
- [18] Okada, T., Y. Iwai and K. Awazu(1989), Study of cavitation collapse pressure and erosion, Part I: A method for measurement of collapse pressure, *Wear*, Vol. 133, pp. 219-232.
- [19] Otsubo, F., H. Era and K. Kishitake(2000), Structure and phases in nickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 107-113.
- [20] Rigney, D. V., R. Viguie and D. J. Wortman and D. W. Skelly(1997), PVD thermal barrier coating applications and process development for aircraft engines, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 167-175.
- [21] Ruckle, D. L.(1980), Plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings for turbine vane platforms, *Thin Solid Films*, Vol. 73, No. 2, pp. 455-461.
- [22] Shalaby, H. M., A. Al-Hashem and H. AL-Mazeedi and A. Abdullah(1995), Field and laboratory study of cavitation corrosion of nickel aluminium bronze in sea water, *British Corrosion Journal*, Vol. 30, No. 1, pp. 63-70.
- [23] Suh, N. P.(1977), An overview of the delamination theory of wear, *Wear*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-16.
- [24] Tang, C. H., F. T. Cheng and H. C. Man(2004), Improvement in cavitation erosion resistance of a copper-based propeller alloy by laser surface melting, *Surface and Technology*, Vol. 182, pp. 300-307.
- [25] Vakil, N. and E. C. Everbach(1993), Transient acoustic cavitation in gallstone fragmentation: A study of gallstones fragmented in vivo, *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 19, No. 4, pp. 331-342.
- [26] Zhou, Z., H. Shirasawa, N. Eguchi, and A. Ohmori(1999), Microstructures and characterization of zirconia-yttria coatings formed in laser and hybrid spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 405-413.

원고접수일 : 2013년 07월 18일

원고수정일 : 2013년 09월 26일

게재확정일 : 2013년 10월 25일