

해상용 원심펌프 임펠러의 침식억제법으로 음극방식 및 재료개발에 관한 기초연구(2)

이진열* · 임우조** · 오인호*

Fundamental Study on Cathodic Protection and Material Development
as Erosion - Control Methods of Oceanic Centrifugal Pump(2)

J. Y. Lee · U. J. Lim · I. H. Oh

Key words : Weight loss rate(무게감소율), Specific resistance(비저항), Impingement erosion - corrosion(충격침식 - 부식), Weight loss(무게감소량), Protective efficiencies(억제율), Electrode potential(전극전위), Saturated calomel electrode(포화카로멜전극), Test time(실험시간), Partical - liquid 2phase(고 - 액2상류), Air - liquid 2phase(기 - 액2상류), Corrosion fatigue strength(부식피로강도), Effective current efficiency(유효전류효율)

Abstract

Recently, with the rapid development in the oceanic systems such as the oceanic structures and vessel, there occurs much interest in the impingement erosion - corrosion.

In this paper, Cu - metal was tested by using of erosion apparatus with water - jet type and was investigated under the behaviour of impingement erosion - corrosion according to various environmental conditions, and the properties of Cu - metal were evaluated through the measurement by weight loss, weight loss rate, protective efficiency. The results were compared with those obtained using Cu - metal applied to cathodic protection and Cu - alloys added to Zn or Al - metal.

As a basis of those results, the best protective efficiencies could be taken as using cathodic protection method and Cu - alloy with Al & Zn material addings, and will be suggested as the fundamental data of the anti - impingement erosion - corrosion on Cu - metal of impeller material for oceanic centrifugal pump.

* 정희원, 한국해양대학교 선박운항시스템공학과

** 정희원, 부산수산대학교 기계공학과

1. 서 론

최근 공업의 진보와 더불어 기계설비, 자동차, 항공기, 선박 및 해양구조물등은 고강도, 고속화 및 대형화되고 있으며, 이들을 구성하고 있는 기계 요소의 사용환경도 다변화되고, 더욱 가혹한 조건으로 되는 경향이 있다. 특히 액체를 취급하고 있는 기계요소에서 유속 및 기계부분의 회전속도 등이 빠르게 되면 유체충격(Liquid attack)과 정압의 저하에 따른 국부적 비등으로 인하여 침식손상이 발생하는 데, 이러한 침식손상은 액제트(Liquid jet)또는 액적이 고체표면에 충돌하여 발생하는 충격침식(Impingement erosion)과 기포의 붕괴에 따른 충격압으로 발생하는 캐비테이션 침식(Cavitation erosion)등으로 대별할 수 있다.

일반적으로 침식은 부식성 환경에서 많이 발생하는 데, 기계적인 침식과 화학적인 부식이 조합된 기계 - 화학작용(Mechano-chemical reaction)에 의한 침식 - 부식이 중첩하여 발생하는 경우는 침식과 부식이 상호간에 가속하는 상승효과때문에 기계장치의 수명에 치명적인 영향을 미친다.^{1) 4)} 특히 이러한 침식 - 부식손상중에서 해상용으로는 펌프 임펠러, 추진기인 프로펠러(Propeller), 내연기관의 냉각수축과 베어링(Bearing), 각종 공업용 수 수송배관, 밸브(Valve) 및 해양구조물등에 발생하며, 사용액체가 기 - 액계(氣-液系), 고 - 액계(固-液系)의 경우에는 더욱 가중된다.^{5) 6)}

따라서, 본 연구에서는 해상용 펌프 임펠러(Pump impeller)의 충격침식에 대한 조사를 위하여 임펠러의 기초재료인 동금속(Cu-metal)을 대상으로 하여 강전해질인 천연해수, 기 - 액2상류 및 고 - 액2상류인 환경에서 충격침식장치에 의한

무게감소량, 무게감소율 및 음극방식전위하에서의 침식 - 부식억제율을 구하고, 또한 Zn 또는 Al - 양성금속을 첨가한 동합금(Cu-alloy)에 대해서도 각종 환경분위기에서 침식 - 부식억제율을 구하여 내침식 - 부식성 실험을 하였다.

이러한 실험결과를 토대로 하여 천연해수, 기 - 액2상류 및 고 - 액2상류 환경에서의 동금속에 대한 침식 - 부식특성과 동금속에 음극방식적용 및 Zn 또는 Al - 양성금속의 첨가에 의한 동합금재에 대한 내침식 - 부식성을 연구함으로써 해상용 펌프 임펠러의 재료인 동금속에 대한 기초 설계자료로 활용하는 데 기여하고자 한다.

2. 시료 및 실험방법

2-1. 시험재료 및 시험편

시험편으로는 동금속 및 Zn과 Al-동합금으로 하였고, 시험편의 연마는 표면경화를 억제하기 위해서 고정도의 사포(Emery cloth) 및 오일 랍핑(Oil lapping)으로 하였으며, 유효노출표면을 제외한 나머지 부분은 실리콘 수지(Silicone resin)로 피복절연하였다. 시험편의 화학적인 성분 및 특성은 다음의 Table 1과 같다.

이에 의한 시험편은 동금속과 동금속에 Zn 또는 Al - 양성금속을 첨가, 주조한 동합금재로 하였는데 다소의 불순물이 첨가되어 있고, Cu - Zn과 Cu - Al합금을 각각 Zn-동합금, Al-동합금이라고 하였다.

환경으로는 천연해수(SW, 비저항 : 25Ω.cm)와 천연해수에 각각 공기, 미세 사토를 첨가한 기 - 액2상류(Air-liquid 2 phase), 고 - 액2상류(Particle-liquid 2 phase)인 환경용액으로 하였고, 노

Table 1. Chemical compositions and properties of specimens used as erosion - corrosion experiment on oceanic pump impeller.

Wt(%)	Cu	Zn	Mn	Al	Fe	Ni	Sn	C.F.S (Kg/mm ²)	S.G (60/60°F)	E.P (- mV/SCE)
Cu Metal	90.0		1.0		4.0	4.0	1.0	7	8.8	220
Cu Zn	80.3	5.0	0.7		5.0	5.0	4.0	10	8.2	620
Cu Al	80.3		0.7	9.0	5.0	5.0		18	7.6	550

** C.F.S : Corrosion Fatigue Strength, E.P : Electrode Potential, S. G. : Specific Gravity

즐, 배관 및 순환 펌프등은 시험편에 미치는 용액의 전기화학적 영향을 최소화하기 위해서 절연성인 플라스틱재로 하고 연결부의 밀봉은 실리콘으로 하였다. 또한 음극방식을 위해서는 전위차계(Potentiometer), 기준전극(포화카로멜전극 : SCE) 및 대극으로는 백금전극(Pt electrode)를 사용하였다. 또한 Photo. 1은 선박용 원심펌프 임펠러의 침식 - 부식손상면을 나타낸 사진으로 (A)는 실제의 5,000시간 해수환경에서 운전한 후의 침식 - 부식현상을 나타낸 것이고, (B)는 (A)의 일부분을 확대한 모습으로 소공(小孔)은 파형 및 해면상의 요곡과 벌집(Honeycombed)¹⁰⁾ 형태를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

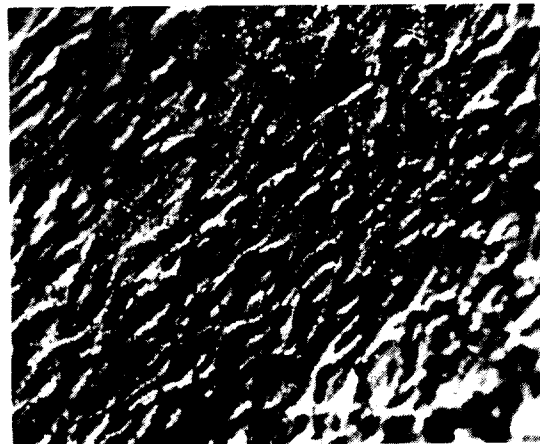
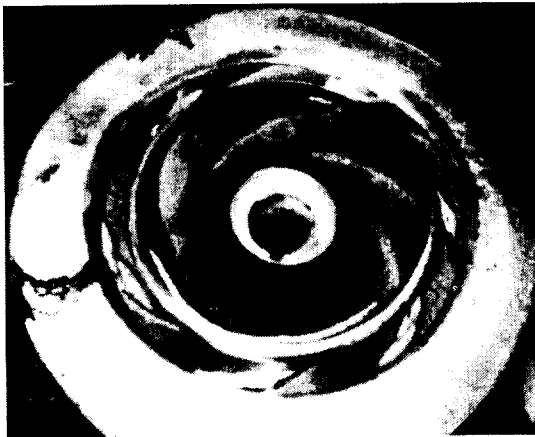


Photo. 1 Appearance of damaged surfaces in centrifugal pump impeller at sea water by erosion - corrosion.

2-2. 실험장치

Fig. 1의 수분사용 침식 - 부식실험장치는 액제트(Liquid jet)의 충격침식에 관한 규정 ASTM G73 - 82¹¹⁾에 의한 "Liquid impingement erosion testing" 및 JIS A 1452, H 8563을 참조하여 제작하였다. 즉 내경 20mm인 배관에 분사노즐(Spray nozzle)은 플라스틱재의 원형이며 노즐경은 2mm이고, 충돌 분사속도는 50m/s로 하였다. 또한 각 용액(Liquid)의 공급과 순환은 펌프로 하고 노즐선단과 시험편 사이의 간격은 40mm가 되도록 하여 용액을 시험편에 충돌시켰다. 이 때 충돌하는 시험편의 배면에는 와류(Vortex)에 의한 캐비테이션(Cavitation)이 발생하지 않도록 많은 주의를 행하였다.

여기서 시험편과 실험장치의 각 부재들 사이의 이종금속접촉에 의한 갈바닉 전지작용(Galvanic cell action)에 의한 부식작용을 억제하기 위해서 순환회로배관을 비롯한 실험장치의 부재들은 플라스틱, 아크릴 및 테프론 등의 절연성재료로 하였으며, 부식생성물에 의한 전기화학적 영향을 축소하기 위해서 펌프의 입구에는 절연성 2중 필터(Duplex filter)를 설치하였다. 그리고 기 - 액2상류 환경에서의 공기는 고압의 압력공기를 감압하여 펌프 출구에 주입하고, 고 - 액2상류 환경에서의 고체(Particle)는 토사를 0.2mm 이하의 분말가루로 분쇄하여 기른 후 혼합하였다.

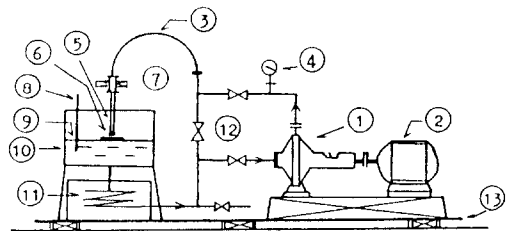


Fig. 1 Schematic diagram of impingement erosion apparatus.

- | | |
|-------------------|---------------------|
| 1. Recycle pump | 8. Temp. gauge |
| 2. Motor | 9. Acryle plate |
| 3. Flexible hose | 10. Water tank |
| 4. Pressure gauge | 11. Temp. regulator |
| 5. Nozzle | 12. By pass Valve |
| 6. Specimen | 13. Bed plate |
| 7. Fixed band | |

2-3. 실험방법

실험은 Fig. 1의 12번인 바이패스 밸브(By-pass valve)로 용액의 공급량을 조정하며, 일정 회전수를 가진 원심펌프를 사용하였다. 시험편의 무게감소량은 타이머(Timer)에 의해 일정시간 침식 후 1/1000 mg용의 디지털 저울(Digital scale)로 측정하였다. 또한 실험용액의 온도는 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 가 되도록 하였으며, 24시간마다 환경용액을 교환하고 필터 소재는 주기적으로 하였다. 특히 고-액, 기-액 2상류의 용액 중에서 침식-부식실험에 따른 시험편의 무게감소량을 측정하기 위해서는 부식생성물 및 이물질질을 청정 증류수(비저항: $15 \times 10^3 \Omega\text{cm}$)와 아세톤을 사용하여 청정하였고, 노즐에서의 용액분사각도는 기초실험의 관점에서 직각(90°)으로 하였다. 또한 무게감소량과 침식-부식억제율은 천연해수(비저항: $25 \Omega\text{.cm}$), 기-액 및 고-액2상류 용액에서 서로 비교, 관찰하기 위해서 같은 조건에서 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 동금속의 침식-부식거동에 미치는 각 환경용액의 영향

Fig. 2는 동금속(Cu-metal)에 대한 충격침식-부식에 의한 무게감소량(W_t)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 환경용액은 천연해수(Sea

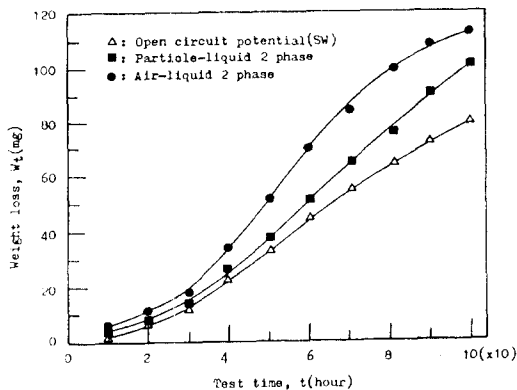


Fig. 2 Weight loss Vs test time under various environmental conditions by impingement erosion test for Cu metal.

water), 기-액 2상류(Air-liquid 2phase), 고-액 2상류(Particle-liquid 2 phase)등으로 하였다.

이에 의하면 충격침식-부식에 의한 무게감소량은 기-액2상류 > 고-액2상류 > 천연해수의 환경순으로 나타나는 데 실험시간 40시간 부터는 거의 직선적으로 변화하고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 실험시간에 따른 무게감소량을 좀 더 정량적으로 평가하기 위해서 Fig. 3은 Fig. 2의 무게감소량을 유효노출면적당 단위실험시간에 대한 누적의 무게 감소율(R)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 기-액2상류중에서의 무게감소율은 천연해수나 고-액2상류보다도 증가하는 경향을 보이고 있다.

이의 원인은 천연해수중에서는 초기에 활성화하다가 실험시간이 경과함에 따라서 $\text{Cl}(\text{OH}^-)$ 의 부동태피막 형성과 소공에 있는 액체의 완충작용(Cushion action)에 의해 안정기가 빨리 나타나지만, 기-액2상류 중에서는 공기방울의 파괴에 따른 기포의 기계적인 충격과 기포내 공기중의 산소에 의한 부식촉진작용 때문에 부동태 피막의 형성이 용이하지 않기 때문에 사료된다. 또한 고-액2상류보다도 기-액2상류에서 무게감소율이 증가하는 것은 공기중에 포함된 산소농도전지의 영향이라고 생각된다. Photo. 2는 Fig. 2, Fig. 3의 60시간 충격침식-부식실험한 후의 손상표면을 200배 SEM 사진으로 나타낸 것이다. 이에 의하면 (1)의 천연해수 환경에 비하여 (2)의 고-액2상류와 (3)의 기-액2상류에서의 소공이 크고 깊게 나타나고 있는데, 소공의 침식-부식이 강한 (3)에서는 미소균열(微小龜裂)이 소공내에 방사형(網絲

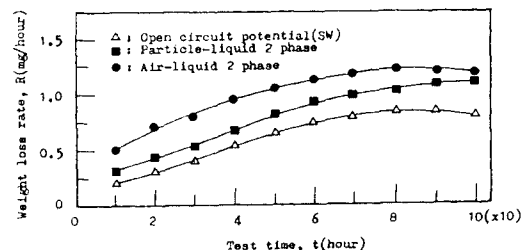


Fig. 3 Weight loss rate Vs test time under various environmental conditions by impingement erosion test for Cu metal.

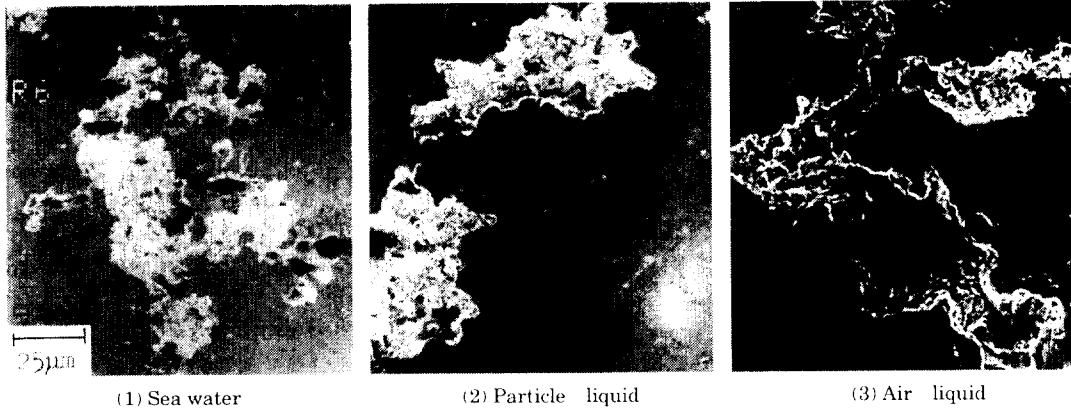


Photo. 2 Damaged surfaces of Cu metal under various environmental conditions by impingement erosion test.(Test time : 60h)

形)¹²⁾으로 퍼져 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 기포의 파괴에 따른 기계적인 침식작용과 산소농도나 Cl⁻ 이온의 집적에 의한 부식작용의 상승효과^{13) 16)} 때문이라고 생각된다.

3-2. 동금속에 대한 침식-부식억제에 미치는 음극방식의 효과

Fig. 4는 동금속(Cu-metal)에 대한 충격침식-부식억제로 음극방식(천연해수중에서의 최적방식전위 : -450mV/SCE)적용¹⁷⁾하의 무게감소량(Wt)을 실험시간(t)에 따라 정리한 것으로 환경용액은 천연해수(Sea water), 기-액 2상류(Air-liquid 2phase), 고-액 2상류(Particle-liquid 2phase) 등으로 하였다.

이에 의하면 침식-부식억제효과는 천연해수 > 고-액 2상류 > 기-액 2상류의 경향이나 실험시간이 경과하여 90시간 부터는 기-액 2상류에서 가고-액 2상류에서 보다 억제되는 경향을 보이고 있다. 또 방식전위 인가하에서의 무게감소량의 억제효과를 구체적으로 구명하기 위해서 Fig. 5는 Fig. 4의 무게감소량에 따른 침식-부식억제율(Pe %)은 무게감소량을 기준으로 하여 구한 것으로 각 환경용액에서의 음극방식효과를 평가하고 있다. 즉, 실험초기에는 35~55%의 억제율을 보이고 있는데, 실험시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 기-액 2상류에서는 실험시간이 70시간이 지난 후 부터는 억제율이

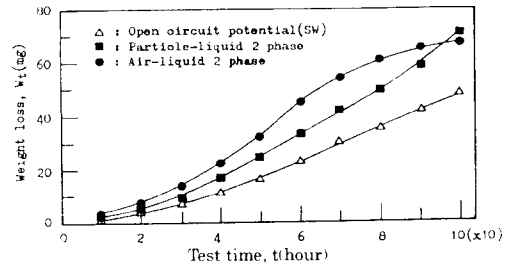


Fig. 4 Weight loss Vs test time under cathodic protection(ICM : 450mV/SCE) in various environmental conditions by impingement erosion test for Cu metal.

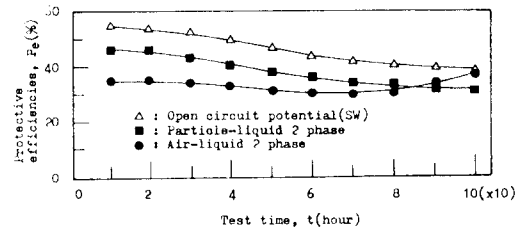


Fig. 5 Protective efficiencies Vs test time under cathodic protection(ICM : 450mV/SCE) in various environmental conditions by impingement erosion test for Cu metal.

증가하는 경향을 보여 주고 있다.

이와 같은 현상은 양극인 시험편에서의 부식전류가 음극방식에 의해 상쇄되어 시험편의 무게감소량이 억제 되기 때문이고, 실험시간이 경과함에 따라서 억제율이 감소하는 경향은 침식-부식에 의한 유효노출면적과 소공내의 미소균열의 증가

현상이 부동태 피막의 형성작용에 비하여 상대적으로 촉진되기 때문이라고 사료된다. 또한 실험시간 70시간이 경과한 후 부터 기-액2상류에서의 침식-부식억제율이 증가하는 것은 초기에는 산소에 의한 부식전류밀도가 크게 되나 실험시간이 경과하여 소공에 흡착된 공기막에 의해 부식전류밀도가 오히려 감소되는 경향과 공기의 완충작용에 의한 안정기 현상¹⁸⁾ 때문이라고 생각된다.

3-3. 충격침식-부식억제에 미치는 Zn, Al-양성금속의 특성

Fig. 6은 Zn 또는 Al-양성금속을 1-15%의 비율로 첨가한 동합금이 60시간 동안 충격 침식-부식 실험이 진행된 후의 무게 감소량 관계를 정리한 것이다.

이에 의하면 첨가비가 증가함에 따라 무게감소량은 적어지나 7% 정도에서 부터 다시 증가하는 경향을 보이고, Zn을 첨가한 것 보다 Al을 첨가한 동합금에서 무게 감소량이 적어진다.

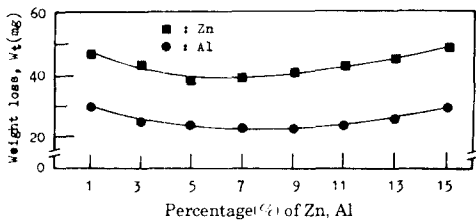


Fig. 6 Weight loss Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu-alloy at sea water by impingement erosion test. (Test time : 60h)

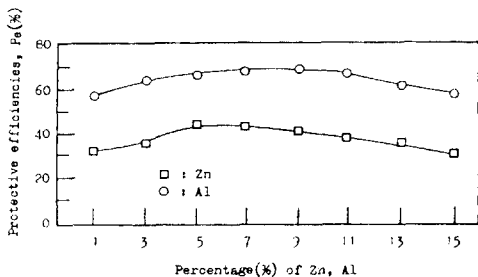


Fig. 7 Protective efficiencies Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu-alloy at sea water by impingement erosion test. (Test time : 60h)

이러한 현상을 정량적으로 평가하기 위해서 Fig. 2의 천연해수중 60시간 침식-부식실험에서의 무게감소량(70mg)을 기준으로 하여 Fig. 6의 무게 감소량을 비교,계산하여 Fig. 7의 무게 감소율을 구하였다.

이에 의하면 침식-부식억제율은 Al첨가비가 5~7%에서 68% 정도이고, Zn첨가비가 7~9%에서는 40%정도로 Al 첨가비가 더욱 우수하다. 이러한 현상은 Zn 또는 Al이 양성금속으로 동합금에 방식효과가 있기 때문인데, 특히 Zn을 첨가한 것보다 Al을 첨가한 것에서 억제율이 높은 이유는 전극전위(Electrode potential)는 Al이 -750mV/SCE, Zn이 -1030mV/SCE이고, E.C.E(Effective Current Efficiency : Ah/gr)는 Al이 1.65이고, Zn이 0.75이므로 전위는 Zn이 더 비전위이지만 자기부식율이 낮다.¹⁹⁾ 또한 Al은 대단히 강한 내식성, 내침식성을 갖고 있는 반면 Zn은 해수중에서 탈아연현상^{20,21)}이 있기 때문이고, 다량의 Zn 첨가시에는 이 현상이 더욱 심하다. Fig. 8은 고-액2상류의 환경중에서 Zn 또는 Al-양성금속을 1-15% 비율로 첨가하여 제작한 동합금이 60시간 동안 충격 침식-부식실험된 후의 동합금(Cu-alloy)에 대한 무게감소량을 정리한 것이다.

이에 의하면 양성금속의 첨가비에 따라 무게감소량은 억제되다가 7~9% 정도에서 다시 증가하는 양상을 보이고, Zn 첨가보다도 Al 첨가에서가 무게감소량의 억제효과가 강하다. 이러한 현상은 고체입자의 반복에 의한 충격응력이 강하게 시험편에 작용함으로써 시험편의 표면에 흡착된 산화보호피막의 박탈과 신생면에서의 복극작용이 미

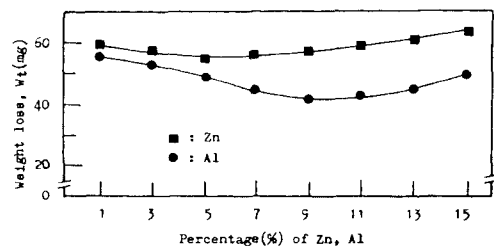


Fig. 8 Weight loss Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu-alloy at particle-liquid 2 phase by impingement erosion test. (Test time : 60h)

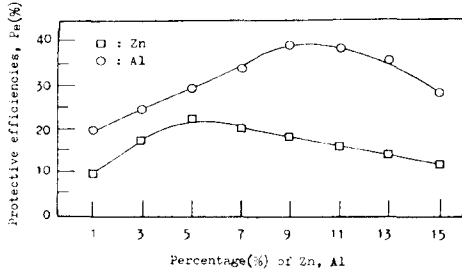


Fig. 9 Protective efficiencies Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu alloy at particle liquid 2 phase by impingement erosion test. (Test time : 60h)

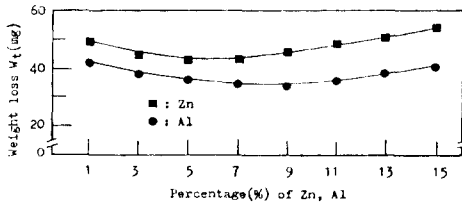


Fig. 10 Weight loss Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu alloy at air liquid 2 phase by impingement erosion test. (Test time : 60h)

약하여 전해질과의 접촉이 강하기 때문에 생각 된다. 특히 Zn첨가시에 이러한 현상이 강하게 나타나는 것은 탈아연작용(Dezincification)으로 Zn 확산층이 결여되어 고용체로서 전기화학적인 유전작용이 부족하여 보호피막형성이 불완전하기 때문에 사료된다. 이러한 Zn 또는 Al의 양성금속에 의한 무게감소량의 억제효과를 좀 더 구체적으로 정립시키기 위해서 Fig. 9은 Fig. 8의 Zn 또는 Al- 양성금속의 첨가비에 따른 무게감소량의 거동을 침식-부식억제율로 계산하여 나타낸 것이다.

이에 의하면 Al첨가비가 9%정도에서 40%의 침식-부식억제율의 효과가 있으며 5%의 Zn첨가시에 20%의 억제율을 나타내고 있다. 이와 같이 Al첨가에 비하여 Zn첨가시에 억제율이 감소하는 것은 Zn의 선택부식작용이 증가되어 시험편에 이온활성화에 의한 양극부가 증가되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 10은 기-액2상류 환경중에서 Zn 또는 Al- 양성금속의 첨가비에 따라 60시간 총격침식-부식실험 후의 동합금(Cu-alloy)에 대한 무

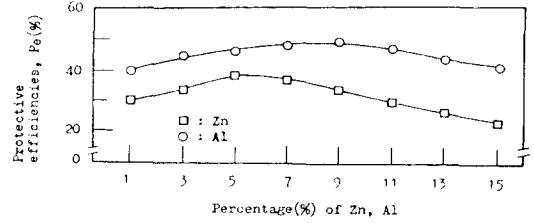


Fig. 11 Protective efficiencies Vs percentage(%) of Zn or Al adding in Cu alloy at air liquid 2 phase by impingement erosion test. (Test time : 60h)

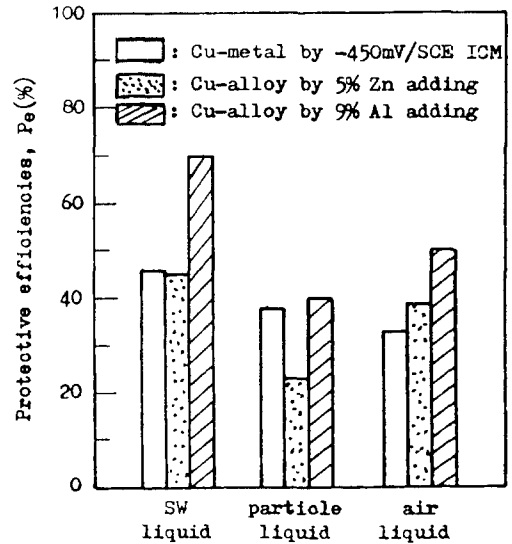


Fig. 12 Protective efficiencies Vs various environmental liquids under maximum protective conditions after 60h test.

게감소량을 정립한 것으로 첨가비가 7~9% 정도에서 무게 감소량이 크게 억제되고 있다.

이러한 현상을 구체적으로 평가하기 위해서 Fig. 11에 침식-부식억제율로 계산하여 정립한 것으로 Al첨가비가 9%, Zn첨가비가 5%에서 각각 48%, 39%정도의 억제율을 나타내고 있다.

이와 같이 침식-부식억제 효과가 불완전한 것은 Al첨가시에도 부식성환경에서 Al_2O_3 의 산화막이 발생하나 편정반응에 의한 2상의 분리로 인하여 선택부식이 발생하고, Zn첨가비가 적으면 자기부식량이 적은 반면, 많으면 시험편에서 Zn이 용해하여 탈아연작용이 강하게 발생하기 때문이라고 추정된다.

Fig. 12는 Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9 및 Fig. 11에서의 천연해수, 고-액2상류 및 기-액2상류 환경에서의 침식억제율(Pe %)을 음극방식(외부전원법: -450mV/SCE)하의 동금속과 Zn-양성금속의 5(W%) 첨가비, Al-양성금속 9(W%) 첨가비에서의 동합금재인 각 시험편에서의 최고 침식-부식억제율을 정리한 것으로 실험시간은 60시간으로 고정하였다.

이에 의하면 음극방식하에서의 억제율(%)을 각 환경에 따라 분류하면 천연해수 > 고-액2상류 > 기-액2상류이고, Al-양성금속(첨가비: 9%)의 동합금에 의한 억제율을 환경에 따라 분류하면 천연해수 > 기-액2상류 > 고-액2상류 순이며, Zn-양성금속(첨가비: 5%)의 동합금에서의 억제율도 천연해수 > 기-액2상류 > 고-액2상류의 순이다. 이와 같이 천연해수의 음극방식하에서는 고-액2상류에서 기-액2상류에서 보다 침식-부식억제효과가 우수하나 Al 또는 Zn의 양성금속 첨가에 의한 동합금에서는 기-액2상류에서 고-액2상류에서 보다 우수한 경향을 나타내는 것은 고체입자의 충격에 의해서 고용체에서의 양성금속의 확산층이 결여되어 음양극부의 활성-부동태에 의한 국부전지²³로 인하여 유전작용이 불균일하기 때문이라고 생각한다.

4. 결 론

액분사에 의한 동금속의 천연해수, 기-액2상류와 고-액2상류 환경에서 충격-부식실험을 행하고, 동금속에 음극방식적용 및 Zn 또는 Al의 양성금속을 첨가한 동합금재에 대한 내침식-부식실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충격침식-부식에 의한 무게감소량과 감소율은 기-액2상류와 고-액2상류가 천연해수중에서 보다 크게 나타나며, 음극방식하에서도 천연해수에서 기-액2상류와 고-액2상류에서 보다 상대적으로 적다.

2) Zn-양성금속을 5% 첨가한 동합금과 Al-양성금속을 9% 첨가한 동합금은 침식-부식억제율이 각 환경중에서 가장 효과적이며, Al-양성금속을 첨가한 경우가 더욱 우수하다.

3) 침식-부식억제법인 음극방식 적용과 양성금속첨가시의 억제효과는 천연해수중이 기-액2상류와 고-액2상류 환경에서 보다 양호하다.

4) 음극방식하에서는 고-액2상류가 기-액2상류에서 보다 침식-부식억제율이 우수한 반면, 양성금속 첨가시에는 기-액2상류에서 고-액2상류에서보다 양호하다.

후 기

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이 재단 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 西本榮司, "油壓系の潤滑問題", 機械の研究, 第34卷, 第1號, pp. 207-209, 1982.
- 2) Manabumi Masuko and Kazumi Okada, "Tribology of O/W Emulsion", Journal of Japanese Society of Tribologist, Vol. 36, No. 5 pp. 369-374, 1991.
- 3) Masanobu Matsumura and Yoshinori Oka, "Influence of Erosion on Corrosion", Corrosion Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 67-68, 1982.
- 4) Yoshinori Oka, Hiroyuki Kouzai and Masanobu Matsumura, "Mechanism of the Mutual Action between Erosion and Corrosion", Boshoku Gijutsu, Vol. 35, No. 6, pp. 320-321, 1986.
- 5) 渡邊豊, 高橋秀明, "炭素鋼の氣液2相流中エロジョン, コロジョンにおける電氣化學的作用", 日本防食技術, 第37卷, 第2號, pp. 69-74, 1988.
- 6) Isao Sekine and Toshiyuki Tanaki, "Erosion-corrosion Behaviour of Copper Alloy under Flowing Water Condition", Zairyo to Kankyo, Vol. 40, No. 8, pp. 527-532, 1991.
- 7) A. Thiruvengadam, "Erosion, Wear and Interfaces with Erosion on Corrosion", Boshoku Gijutsu, Vol. 31, No. 2, pp. 67-69, 1982.
- 8) 林祐助, 李鎮烈, "캐비테이션에 의한 베어링재의 腐蝕. 浸蝕舉動에 관한 研究(1)", 韓國腐蝕學會誌, 第20卷, 第4號, pp. 285-289, 1991.

- 9) 岡 良則, “固體粒子衝突 エロジョンの 材料硬度依存性” 材料と環境, 第39卷, 第11號, pp. 610 - 616, 1990.
- 10) L. L. Shreir, “CORROSION NO.1”, Butterworth Inc., pp. 8 : 126 - 8 : 132, 1979.
- 11) 日本化學工學會, “腐食試驗法”, 日刊工業新聞(株), pp. 257, 261, 1983.
- 12) Yoneo Kikuta, “Metallographic Atlas”, Japan Welding Society, pp. 73 - 74, 356 - 357, 1984.
- 13) 松村倉信, 岡 良則, “キャピテーション攻撃を受ける金屬材料の壽命豫測”, 日本防蝕技術, 第39卷, 第10號, pp. 550 - 555, 1990.
- 14) 腐食防食協會 “エロージョン・コロジヨン入門講習會テキスト(1985 - 11)”, 1985.
- 15) Jinichi Igarashi, “Oxidative Degradation of Engine oils”, Tribologist, Vol. 35, NO. 10, pp. 683 - 685, 1990.
- 16) Yoshiro Iwai, Tsunenori Okada, Takashi Nishimoto and Tadashi Morishita, “Cavitation Erosion in High Water Base Fluids(2nd) report”, tribologist, Vol. 35, No. 10, pp. 727 - 731, 1990.
- 17) 李鎮烈, 林祐助, “海上用 遠心펌프 임펠러의 浸蝕抑制法으로 陰極防蝕 및 材料開發에 關한 基礎研究 (1)”, 韓國船用機關學會誌, 第19卷, 第2號, pp. 59 - 61, 1995.
- 18) 林祐助, 李鎮烈, “베어링 合金材의 캐비테이션 腐蝕 浸蝕舉動에 미치는 乳化 潤滑油의 影響”, 韓國船用機關學會誌, 第17卷, 第3號, pp. 44 - 49, 1993.
- 19) Atausi Nishikata, Mashayuki Itakaki, Tooru Tsuru, Shiro Haruyama and Eiichiro Fujii, “Anodic Dissolution Mechanism of Copper in Alkaline Carbonate - Chloride Solution”, Soshoku Gijutsu, Vol. 39, No. 1, pp. 10 - 11, 1990.
- 20) 伊藤五郎, “機械工學全書 第6卷(腐食と防食)”, コロナ社, pp. 260 - 263, 1982.
- 21) V. Ashworth, “CORROSION”, Pergamon Press, pp. 412 - 422, 1988.
- 22) M. M. Stack, F. H. Stott and G. C. Wood, “Computer Simulation of the effect of Pre-oxidation in Erosion - Corrosion environments”, Appl. Phys, Vol. 25, pp. A170 - A176, 1992.
- 23) 吉澤四郎, 片桐晃(G. Wranglenの譯), “金屬の腐食防食序論”, 新生製本(株), pp. 64 - 66, 1974.