한국항해항만학회지 제39권 제4호
J. Navig. Port Res. Vol. 39, No. 4 : 277-283, August 2015 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2015.39.4.277

함정용 Al 및 Zn 희생양극의 효율에 미치는 첨가원소 영향

최우석* · 박경철** · 김병호***

*, **, *** 국방기술품질원

Effect of Additional Elements on Efficiency of Al and Zn Sacrificial Anode for Naval Vessels

Woo-Suk Choi · Kyung-Chul Park** · Byeong-Ho Kim****

*, **, *** Defense Agency for Technology and Quality, Jin-Ju, Korea*

요 약 : 함정에 사용되는 선체재료로는 연강, 고장력강, 고강도강, 알루미늄 합금 및 복합재료 등이 있다. 그 중 함정의 선체는 수밀과 강도의 유지 및 탑재장비의 지지 등 기본적인 기능을 위하여 철강 재료를 주로 사용하고 있다. 함정의 주 임무는 해양에서 작전을 수행하는 것이므로 해수에 의한 선체 부식이 필연적으로 발생하게 된다. 선체의 부식을 방지하기 위하여 도장 방법, 희생양극법 및 강제 전류 방식이 사용되고 있다. 특히 Al 및 Zn을 활용한 희생양극법의 경우 부식특성 개선을 위하여 인듐(In), 카드뮴(Cd) 및 납(Pb) 등의 중금속이 첨가되어 있다. 하지만 이러한 중금속은 인체 및 환경에 매우 유해하므로 전 세계적으로 사용이 점차 규제되고 있다. 이에 본 논문에서는 인체 및 환경에 무해한 미세원소(Ma, Ca, Ce 및 Sn)를 첨가하여 Al 및 Zn 합금을 제조하였다. 제조된 함정용 Al 및 Zn 희생양극의 효율 특성 측정을 위하여 SEM, XRD, 동전위 분극실험 및 전류효율 평가를 실시하였으며, 실험결과 Al-3Zn-0.6Sn 및 Zn-3Sn 합금의 양극 성능이 다른 합금 보다 효율성이 우수하였다.

핵심용어 : 함정, 희생양극, 부식특성, 미세원소, Al 및 Zn 합금

Abstract : *MS(Mild Steel), HTS(High Tensile Steel), HYS(High Yield Steel), AL(Aluminum Alloy) and Composite Materials are used for vessels. Steel Materials are mostly used for vessels because body of a ship have to perform the basic functions such as watertight, preserving the strength and supporting the equipments. The vessels primarily carry out a mission at ocean, so that body of a ship is necessarily rusted. There are several methods to protect the corrosion of vessels such as painting, SACP(sacrificial anode cathodic protection) and ICCP(impressed current cathodic protection). For the sacrificial anode cathodic protection, Al and Zn alloys are normally used. Heavy metals are added to the Al and Zn Alloys for improving the corrosion properties but they are so harmful to the human and environment. Therefore, the use of these heavy metals is strictly regulated in the world. In this paper, Al and Zn Alloys are made by adding the trace elements(Ma, Ca, Ce and Sn) which is not harmful to the human and environment. SEM, XRD, Potentiodynamic Polarization test and Current Efficiency test are conducted for evaluation of Al and Zn Alloys. As a result of the experiment, Al-3Zn-0.6Sn and Zn-3Sn Alloys are more efficient than other Alloys.*

Key words : *Naval vessels, Sacrificial anode, Corrosion properties, Trace element additions, Al and Zn alloys.*

1. 서 론

함정에 사용되는 선체재료로는 연강(Mild Steel : MS), 고장력강(High Tensile Steel : HTS), 고강도강(High Yield Steel : HYS), 알루미늄합금(Aluminum Alloy : AL) 및 복합재료(Composite Material) 등이 있다. 선체구조 재료의 선정 시에는 일반적으로 재료의 강도, 강성, 비중 등 기계적 특성과 아울러 용접성, 가공성, 보수성(Repair) 등 작업성과 내식성(Corrosion Resistance), 내화성(Fire Resistance), 경제성 등이 함께 고려된다.(SNAK, 2012)

함정의 선체는 함정 플랫폼에 요구되는 수밀과 강도의 유지 및 탑재장비의 지지 등 기본적인 기능과 함께 함정의 생존성에도 큰 역할을 하기 때문에 상기언급 된 여러 가지 선체재료 중 철강 재료를 주로 사용하게 된다. 함정의 주 임무는 해양에서 작전을 수행하는 것이므로 해수에 의한 선체의 부식이 필연적으로 발생하게 된다.

선체의 부식을 방지하기 위해 일반적으로 선체 표면에 내부식성 도료를 도장하는 방법이 사용된다. 그러나 장기적인 함정 운용으로 인해 국부적인 도료 손상이 일어나므로, 이 방법으로는 선체의 부식현상을 통제할 수 없다. 이를 보완하기 위한 방법으로, 선체 표면에 알루미늄(Al) 및 아연(Zn)과 같은

* 대표저자 : 정회원, ropy1212@dtaq.re.kr 055)734-6675
** 정회원, kcpark@dtaq.re.kr 055)279-4127
*** 정회원, kjbshh@dtaq.re.kr 055)279-4035

선체보다 갈바닉 전위가 낮은 금속을 부착하는 희생양극법과 비소모성 양극을 통해 선저 전위를 일정한 전위로 항상 유지시켜주는 강제전류 방식을 적용하고 있다. 이 중, 희생양극법은 유효전위가 제한적이며 주기적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있으나, 설치방법이 간단하고 인접장비 및 구조물과 간섭현상이 거의 없다는 장점이 있어 현재 함정에서 널리 사용되고 있다.(Kim, 1998; Park et al., 2013; Oh et al., 2004)

현재 상용으로 사용되는 희생양극은 효율을 증대시키기 위해 인듐(In), 카드뮴(Cd) 및 납(Pb) 등의 중금속을 포함하고 있다.(Song et al., 2013; Long et al., 2007; Keyvani et al., 2012; Li et al., 2009) 하지만 이러한 중금속은 유해물질로 지정되어 인체 및 환경에 악영향을 미치므로 선진국을 중심으로 점차 사용이 규제되고 있는 실정이다. 이러한 점을 극복하기 위하여 환경영향이 적은 미세원소 첨가함으로써, 전기화학적으로 낮은 부식전위를 가지는 고효율 희생양극의 개발이 요구되어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 세슘(Ce) 및 주석(Sn) 등과 같은 미세원소 첨가에 따른 알루미늄(Al) 및 아연(Zn) 함정용 희생양극의 효율 특성 변화를 분석하고 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편 준비

본 연구에서 사용된 알루미늄 및 아연 합금의 조성은 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 알루미늄 합금 주조는 약 700℃에서 순수 알루미늄(99.9%) 주괴(Ingot)의 용융을 확인한 후 고순도 아연(Zn, 99.99%), 마그네슘(Mg, 99.9%), 칼슘(Ca, 99.9%), 세슘(Ce, 99.9%) 및 주석(Sn, 99.9%)을 장입하여 목표 조성의 용탕을 제조하였다. 한편 기포결함 및 편석과 같은 주조결함을 제거한 건전한 주물을 확보하기 위해 흑연(Graphite) 봉을 사용하여 용탕교반을 실시하고, 고순도 아르곤(Ar) 가스를 용탕내부에 2회 취입하여 탈산·탈가스 처리한 후 10분 동안 진정시켰다. 출탕온도는 700℃로 하였으며, 금형 예열온도는 100℃로 하여 출탕하였다. 또한 아연 합금 주조는 420℃에서 순수 아연(Zn, 99.99%) 주괴의 용융을 확인한 후 고순도 주석(Sn, 99.9%)을 장입하여 목표 조성의 용탕을 제조하였다.

Table 1 Nominal composition of aluminum alloys

Alloys (wt%)	Al	Zn	Mg	Ca	Ce	Sn
Al	Bal.	-	-	-	-	-
Al-3Zn	Bal.	3	-	-	-	-
Al-3Zn-0.6Mg	Bal.	3	0.6	-	-	-
Al-3An-0.6Mg-0.4Ca	Bal.	3	0.6	0.4	-	-
Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce	Bal.	3	0.6	-	0.4	-
Al-3Zn-0.6Sn	Bal.	3	-	-	-	0.4

Table 2 Nominal composition of zinc alloys

Alloys (wt%)	Zn	Sn
Zn	Bal.	0.5
Zn	Bal.	1
Zn	Bal.	2
Zn	Bal.	3

2.2 정전류 실험

음극 방식을 위한 알루니늄(Al) 및 아연(Zn) 양극의 정전류 실험 및 동전위 분극 실험은 일본 부방식협회에서 제정한 JSCE S-9301의 평가방법에 준하여 실시하였다.

실험수조는 용량 1ℓ의 유리 비커를 사용하고, 음극은 두께 0.5mm 인 스테인레스강(SUS304) 판제로 만든 직경 90mm, 높이 130mm 원통으로 제작하였다. 실험수조에 음극(스테인레스강 원통)을 설치하여 음극 내부면의 중앙부에 시험편을 고정하고, 천연해수를 주입하였다.

실험수조 내 음극을 직렬로 연결하였고, 음극 내부에 시험편을 고정하였다. 정전류 실험장치의 회로배선은 실험수조내의 음극, 시험편, 직류전원장치, 직류전류계, 회로저항기 및 동전량계를 직렬 연결하였다. 회중에 사용된 동전량계는 50x50x2mm의 탈산동판(99.9%)을 알코올로 탈지시킨 후 100℃로 1시간 건조하여 공학용 전자저울(0.1mg)로 중량을 계측하였다. 양극은 그대로 사용하고 음극에 대하여는 음극면적 300mm^{2}만 남기고 나머지는 피복 절연시켜서 1000㎖의 비커내에 설치하였다. 비커내의 전해액은 [CuSO4·5H_2O(125g) + H_2SO_4(50g) + Ethyl Alchol(50g) + H_2O = 1000㎖]을 주입하였다.

2.3 동전위 분극 실험

동전위 분극 실험은 전기화학 분석 장치인 Electrochemical Interface Solartron 1287을 이용하여 측정하였다. 이때, 기준전극(Reference Electrode)은 Ag/AgCl 전극을, 상대전극(Counter Electrode)은 백금 전극(25 mm × 25mm, 60 mesh)을, 작동전극(Working Electrode)은 알루미늄 및 아연 합금을 사용하였으며 실험의 전해액은 천연해수를 사용하였다.

2.4 실험양극의 전류 효율 측정

본 연구에서의 실험양극 전류효율은 식(1)에 따라 계산 하였다.

$$\text{전류효율}(\%) = \frac{\text{유효전기량}(A \cdot hr/g)}{\text{이론전기량}(A \cdot hr/g)} \times 100 \quad (1)$$

실험양극의 이론전기량은 식(2)와 같이 실험양극의 화학성분으로부터 구해진다.

$$\text{이론전기량}(A \cdot hr/g) = \frac{1}{\text{전기화학당량}} \times 96{,}500A \cdot \sec/hr \quad (2)$$

Al의 이론 전기량은 2.980 A · hr/g, Zn의 이론전기량은 0.820 A · hr/g이다. 본 연구에서는 합금을 사용하였으므로, 식 (3)에 따라 이론전기량을 계산하였다.

$$E = \frac{(A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + \cdots)}{100} \quad (3)$$

여기서, E : 합금의 이론 전기량(A · hr/g)
A, B, C,..... : 합금성분의 무게 백분율(%)
x, y, z,..... : 합금성분의 이론전기량(A · hr/g)

식(1)의 전류효율을 구하기 위한 실험양극의 유효전기량은 다음의 식 (4) 및 (5)에 의해 산출된다.

$$\text{유효전기량}(A \cdot hr/g) = \frac{\text{전기량}}{\text{양극감량}(g)} \quad (4)$$

$$\text{양극감량}(g) = (\text{시험전양극무게}) - (\text{시험후양극무게})$$

$$\text{전기량}(A \cdot hr/g) = \frac{\text{음극중량}(g)}{\text{구리의이론전기량}(A \cdot hr/g)} \quad (5)$$

$$\text{음극중량}(g) = (\text{시험후구리음극무게}) - (\text{시험전구리음극무게})$$

구리의 이론전기량 : 1.186 A · hr/g

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 알루미늄 희생양극

3.1.1 알루미늄 합금의 미세조직 관찰

Fig. 1는 주사전자현미경으로 알루미늄 합금의 미세조직을 관찰한 사진이다. 알루미늄 합금의 주조조직은 전형적인 수지상 구조를 나타내었으며, 세슘(Ce)이 첨가되었을 때 최종응고부에 이차상이 정출됨을 확인하였다. XRD를 통한 정출된 이차상의 상분석을 실시한 결과, Fig. 2에 나타난 바와 같이 세슘(Ce)이 첨가된 Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce 합금에서는 $Al_{11}Ce_3$ 상이 새롭게 형성되었음을 확인할 수 있었다.

3.1.2 자연전위

Fig. 3는 실험용액 속에서 7일 침지 후 측정한 알루미늄 합금의 자연전위 변화 나타낸 그림이다. 통전 초기의 가장 귀한 전위는 Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce 합금으로 -970mV이며, 초기의 가장 활성적인 전위는 Al-3Zn-0.6Sn 합금으로 -1,055mV를 나타내었다. 통전 초기에 양극의 전위 변화가 크게 나타난 것은, 통전으로 인하여 양극의 용해가 시작되면서 이미 형성되어있던 산화피막이 제거되면서 발생한 것으로 판단된다. 6개의 시험편 모두 2일(48시간)이 경과하면서 전위값이 거의 일정하여 유지 되었으며, 7일(168시간)까지 미세한 전위 변동은 있었으나 최종적으로 측정한 결과 가장 귀한 전위(Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce : -1,075mV)와 가장 활성적인 전위(Al-3Zn-0.6Sn : -1,185mV)로 측정되었다. 가장 귀한 전위와 가장 활성적인 전위차는 통전 초기에는 185mV 였지만, 최종적으로 측정했을 때는 110mV로 이는 시간이 경과하면서 양극표면이 전기화학적으로 안정화 되어가는 것으로 사료된다.

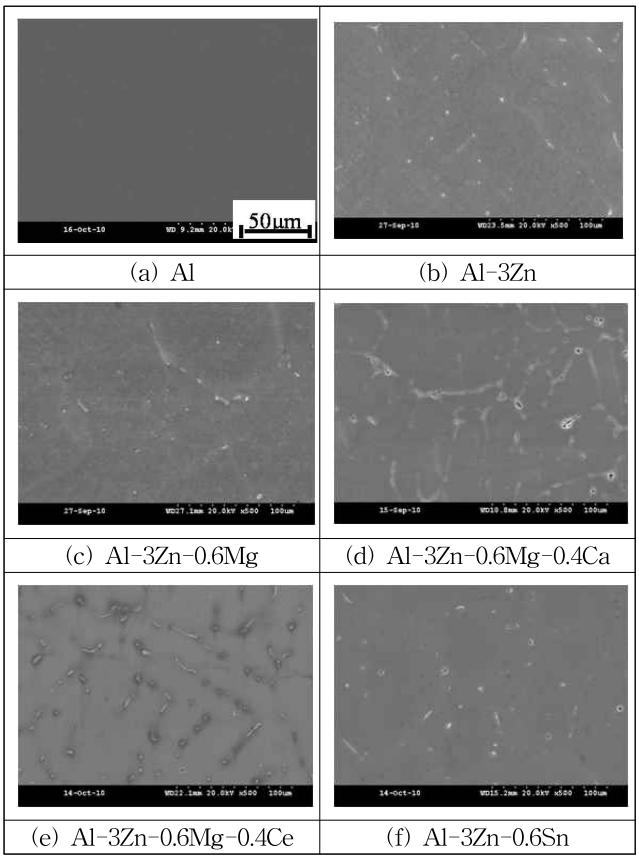

Fig. 1 Scanning electron micrographs of studied Al alloys

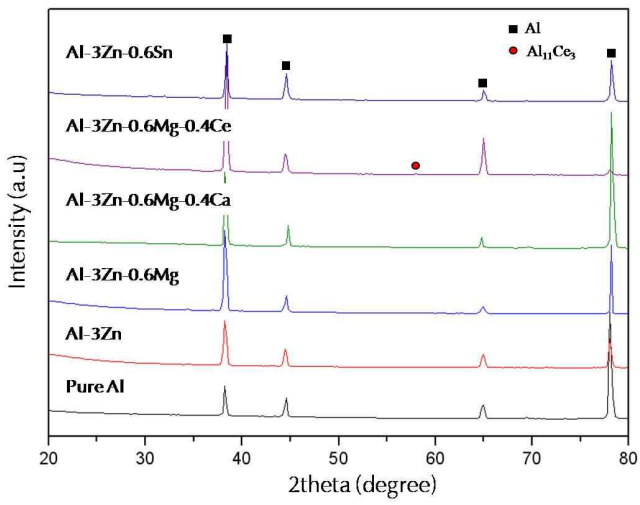

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of Al Alloys

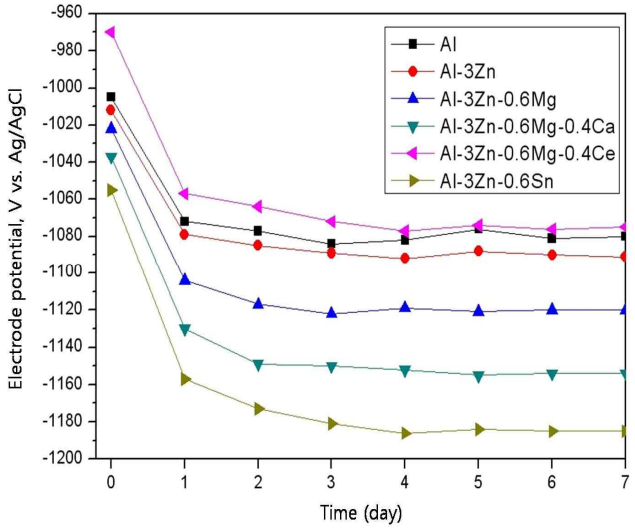

Fig. 3 Potential variation of Al sacrificial anodes for 7days

3.1.3 동전위 분극실험

Fig. 4, 5은 알루미늄 합금의 동전위 분극실험 결과를 나타낸 그림으로, Fig. 4는 각 합금의 부식 전위, Fig. 5은 각 합금의 교환전류밀도를 각각 나타낸다. Fig. 4에서 각 합금의 부식 전위는 자연전위와 거의 비슷한 값을 나타내었으며 경향성 또한 Fig. 3과 유사하였다.

그리고 교환전류밀도는 Al-3Zn-0.6Sn 합금이 28.3μA/cm^{2}으로 가장 낮았으며, Pure Al 이 77.3μA/cm^{2}로 가장 높았다. 정전류 실험 및 동전위 분극 실험 결과, 전기화학적 특성은 Al-3Zn-0.6Sn 합금이 음극 방식용 희생양극으로 가장 적합하다고 판단되어 진다.

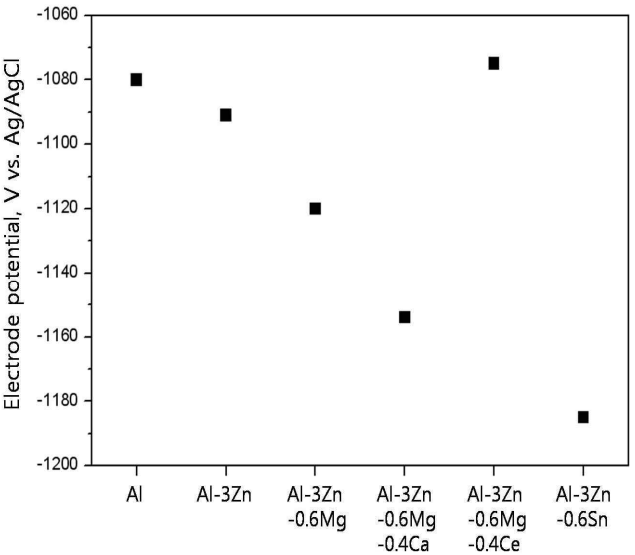

Fig. 4 Corrosion potential of each Al alloy

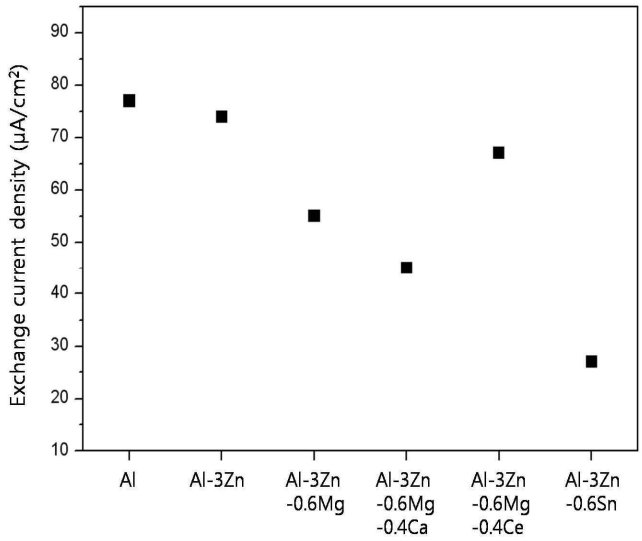

Fig. 5 Exchange current density of each Al alloy

3.1.4 알루미늄 희생양극 성능

Table 3은 알루미늄 희생양극의 전류 효율 평가 결과를 나타낸 표이다. 양극 효율 평가 결과, Pure Al 의 유효전기량이 2,298 A.h/Kg로 가장 낮게 측정되었으며, Al-3Zn-0.6Sn 합금의 유효전기량이 2,712 A.h/Kg로 가장 높게 측정되었다. 이때 효율은 약 92.5%로 아주 높은 양극 효율을 나타내었다. 알루미늄(Al)에 3wt.%Zn가 합금화됨으로 인해 약 10%이상의 효율이 향상되었으며, 마그네슘(Mg)과 칼슘(Ca) 미량 첨가에 의해 1~2%의 양극 효율이 향상되었다. 특히 0.6wt.%Sn의 미량 첨가는 매우 우수한 양극 효율을 나타내었다. 반면 세슘(Ce)이 미량 첨가된 합금에서는 Al-3Zn-0.6Mg합금에 비해 효율이 오히려 감소했는데, 이는 세슘(Ce)첨가로 인해 최종응고부에 형성된 $Al_{11}Ce_3$상이 부식이 진행될 시 국부적인 마이크로 갈바닉셀 (Microgalvanic Cell)을 형성함으로 인해, 양극의 효율을 감소시킨 것으로 사료된다.

Table 3 Quantitative results of Al anodes efficiency

Al Alloys	Effective Capacity (A.h/Kg)	Efficiency (%)
Al	2,298	77.1
Al-3Zn	2,598	87.1
Al-3Zn-0.6Mg	2,602	87.3
Al-3An-0.6Mg-0.4Ca	2,657	89.1
Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce	2,348	78.8
Al-3Zn-0.6Sn	2,712	91.0

3.2 아연 희생양극

3.2.1 아연 합금의 미세조직 관찰

Fig. 6은 아연 합금의 주사전자현미경 미세조직사진을 나타낸 그림이다. 미세조직은 전형적인 수지상 구조를 나타내었으며, 주석(Sn) 이 첨가됨에 따라 최종응고부에 이차상이 연속적으로 형성되었다.

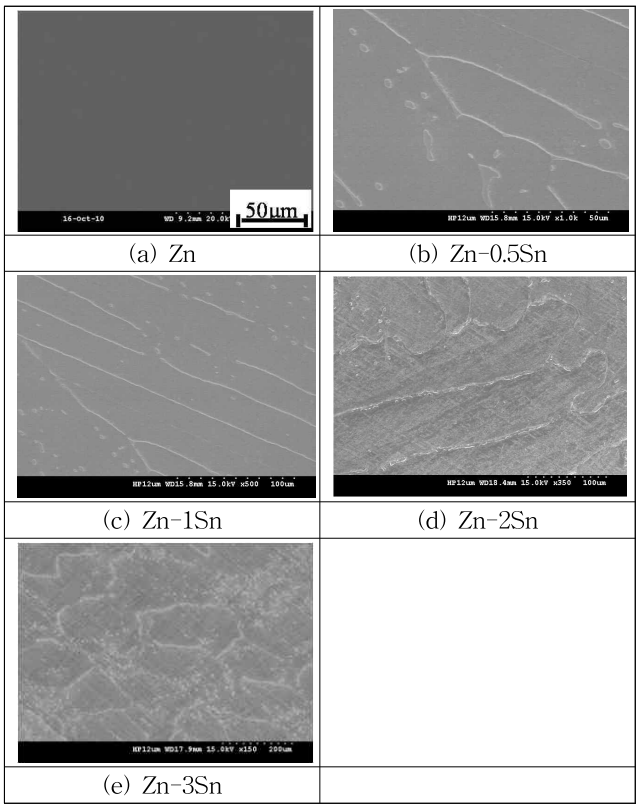

Fig. 6 Scanning electron micrographs of Zn alloys

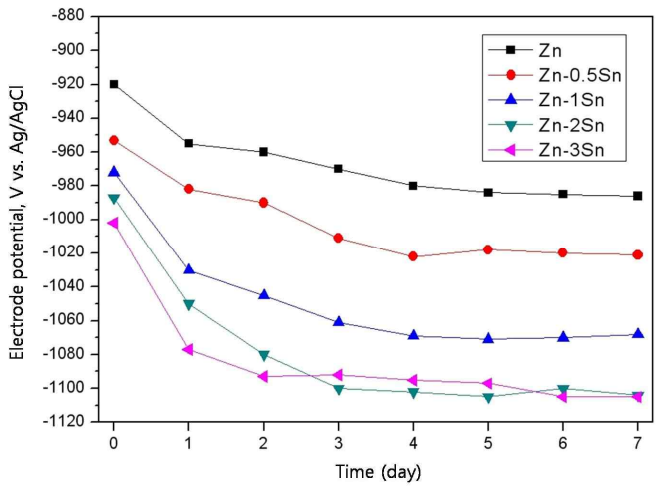

Fig. 7 Potential variation of Zn sacrificial anodes

3.2.2 자연 전위

Fig. 7은 실험용액에 침지 7일 후에 측정한 아연 합금의 자연전위 변화를 나타낸 그림이다. 통전 초기의 가장 귀한 전위는 Pure Zn 가 -918mV을 나타내었으며, 초기의 가장 활성적인 전위는 Zn-3Sn 합금이 -1,005mV를 나타내었다. 5개의 시험편 모두 2일(48시간)이 경과하면서 전위값이 거의 일정하여 유지 되었으며, 7일(168시간)까지 미세한 전위 변동은 있었으나 최종적으로 측정한 결과 가장 높은 전위(Pure Zn: 975mV)와 가장 낮은 전위(Zn-3Sn: -1,108mV)로 측정되었다.

3.2.3 동전위 분극실험

Fig. 8과 9는 아연 양극의 동전위 분극 실험 결과를 나타낸 그림으로, Fig. 8는 각 합금의 부식 전위를, Fig. 9은 각 합금의 교환전류밀도를 나타낸다. Fig. 8에서 각 합금의 부식전위는 자연전위와 거의 비슷한 값을 나타내었으며 경향성 또한 Fig. 7과 유사하였다. 교환전류밀도는 Zn-3Sn 합금이 가장 낮았으며, Pure Zn가 가장 높다. 정전류 실험 및 동전위 분극 실험 결과, 전기화학적 특성은 Zn-3Sn 합금이 음극 방식용 희생양극으로 가장 적합하다고 판단되어 진다.

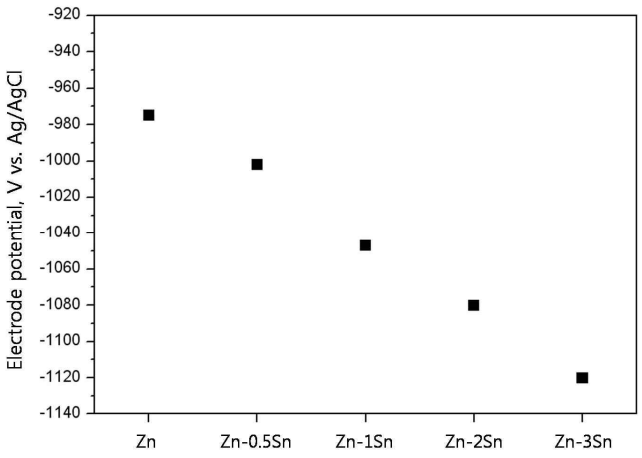

Fig. 8 Corrosion potential of each Zn alloy

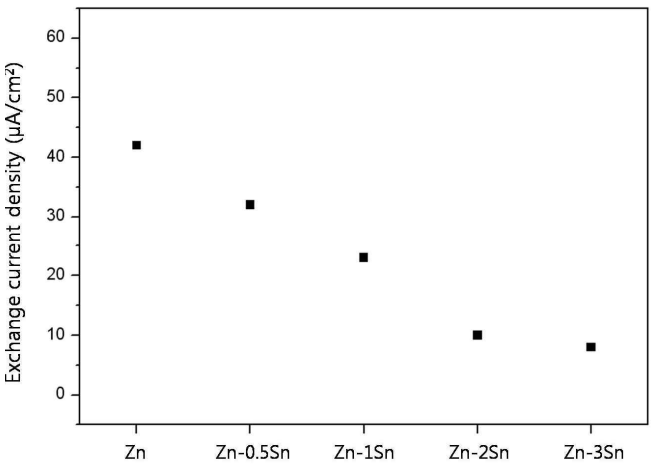

Fig. 9 Exchange current density of each Zn alloy

3.2.4 아연 희생양극 성능

Table 4는 아연 양극의 전류효율 실험 결과를 나타낸 표이다. 양극 효율 평가 결과, 주석(Sn) 첨가량이 0.5 ~ 3wt.%까지 증가함에 따라, 아연 양극 합금의 효율은 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

Pure Zn 의 유효전기량이 720 A.h/Kg로 가장 낮게 측정되었으며, Zn-3Sn 합금의 유효전기량이 801 A.h/Kg로 가장 높게 측정되었으며, 이때 효율은 약 97.6%로 아주 높은 양극 효율을 나타내었다.

Table 4 Quantitative results of Zn anodes efficiency

Zn Alloys	Effective Capacity (A.h/Kg)	Efficiency (%)
Zn	720	87.8
Zn-0.5Sn	740	90.2
Zn-1Sn	759	92.5
Zn-2Sn	786	95.8
Zn-3Sn	801	97.6

3.3 첨가원소에 따른 알루미늄 및 아연 희생양극 성능변화

본 연구에서는 순수 알루미늄(Al) 및 아연(Zn) 에 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 세슘(Ce) 및 주석(Sn) 등과 같은 미세원소 첨가함으로써 함정용 희생양극의 성능 변화를 분석하였다. 실험 결과, Al-3Zn-0.6Sn 및 Zn-3Sn 합금의 양극 성능이 가장 우수하였으며, 아연(Zn) 및 주석(Sn)은 합금화되었을 때 양극의 효율을 증가시키는 것으로 확인되었다. 이는 아연(Zn) 및 주석(Sn) 등과 같은 수소과전압이 높은 원소가 첨가원소로 사용될 시, 합금의 균일 부식 조장 및 부식속도를 감소시키는 역할을 하며, 이로 인해 양극의 유효전기량 및 효율을 향상시킨 것으로 판단된다.(Lee, 2004)

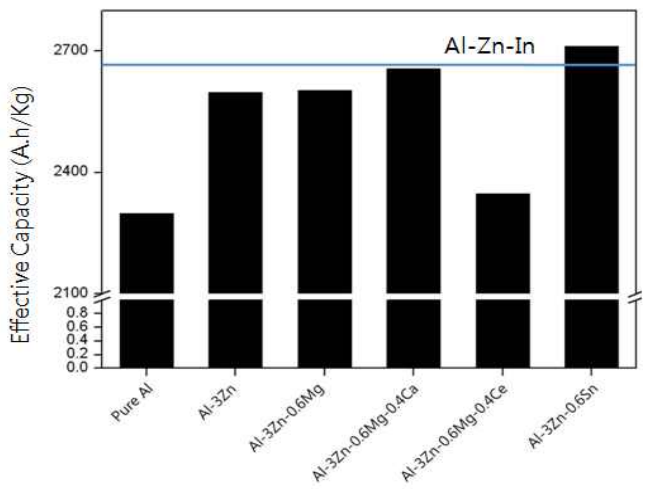

Fig. 10 Comparison of anode efficiency between commercial Al-Zn-In alloy and studied Al alloy

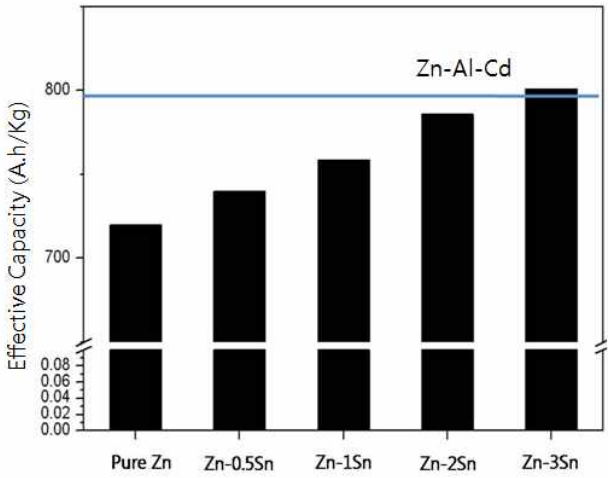

Fig. 11 Comparison of anode efficiency between commercial Zn-Al-Cd alloy and studied Zn alloy

Fig. 10과 11는 본 연구에서 개발한 희생양극용 알루미늄 및 아연 합금과 상용으로 사용되는 희생양극용 합금의 유효전기량을 비교한 그래프이다. Fig. 10에서, Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ca 합금은 상용으로 사용되는 Al-Zn-In계 합금과 거의 유사한 유효전기량을 보였으며, Al-3Zn-0.6Sn 합금은 Al-Zn-In계 합금보다 좀 더 우수한 유효전기량을 나타내었다. 또한 Fig. 11에서, Zn-3Sn 합금은 상용으로 사용되는 Zn-Al-Cd 합금보다 조금 더 우수한 유효전기량을 나타내는 것으로 보아, 아연(Zn) 및 주석(Sn) 첨가에 의해 희생양극의 특성이 개선된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 중력주조로 알루미늄 및 아연 양극 합금을 제조하였고, 상온의 천연해수분위기에서 분극 거동 및 양극 성능을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Al 합금의 미세조직을 광학현미경, 주사전자현미경 및 X-선 회절로 분석한 결과, Al-3Zn, Al-3Zn-0.6Mg, Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce, Al-3Zn-0.6Sn 합금에서는 기지재료인 Al 외에는 다른 이차상은 관찰되지 않았지만, 세슘(Ce)이 첨가된 Al-3Zn-0.6Mg-0.4Ce 합금에서는 최종응고부에 $Al_{11}Ce_3$ 상이 새롭게 형성되었음이 확인하였다.

2) 알루미늄 합금의 양극 성능실험 결과, 3wt.% Zn가 합금화됨으로써 양극 성능이 Pure Al에 비해 약 10%이상 증가하였으며, 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 주석(Sn) 미량 첨가에 의해 양극의 효율이 조금 더 향상되었다. 특히 0.6wt.% Sn 첨가에 의해 매우 우수한 양극 효율을 나타내었다.

3) 아연 합금의 양극 성능실험 결과, 주석(Sn)이 합금화됨으로써 양극 효율은 지속적으로 증가하였고, 3wt.% Sn가 합금

화되었을 때 양극 성능이 Pure Zn에 비해 약 10%이상 증가하였으며, 3wt.% Sn 첨가에 의해 기존에 상용되는 카드뮴(Cd)이 포함된 아연양극보다 조금 더 우수한 양극 효율을 나타내었다.

본 연구결과는 함정용 Al 및 Zn 희생양극의 효율에 미치는 첨가원소의 영향을 체계적으로 분석함으로서 많은 시사점을 던져줄 것으로 판단된다. 하지만 실험실 규모(Lab Scale)의 테스트라는 한계가 있으므로, 향후 본 연구결과를 바탕으로 하여 함정 적용 시 부식개선 효과 및 이에 따른 유지보수 비용절감 등의 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 국방기술품질원의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] Keyvani, A., Saremi, M. and Saeri, M. R.(2012) " Anodic behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anodes at Different Concentration of Zinc and Indium", International Journal of Materials Research, Vol. 103, No. 12, pp.1533-1538

[2] Kim, S, J.(1998), "A Study on the Sacrificial Anode for Imparting High Capabilities to Cathodic Protection", Bull. Korea Soc. Fish. Tech, Vol 34, No. 1, pp.37-42

[3] Lee, H. L.(2004), Corrosion of Metals, Yeunkyung. pp.38~57

[4] Li, W. I., Yan, Y. G., Chen, G. and Ma, L.(2009), "Electrochemical Behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anode in Low Temperature Environment", Corrosion Science and Protection Technology, Vol. 21, No. 2, pp.122-124

[5] Long, P. and Li, Q.(2007), "Study on Corrosion-mechanism of Zn-Al-Cd Anodes in Hot Seawater", Corrosion Science and Protection Technology, Vol. 19, No. 4, pp.235-238

[6] Oh, J. S. and Lee, J. Y.(2004), "A Study on the ICCP Control and Monitoring System for Ship", Journal of the Korean society of Marine Engineers, Vol. 28, No. 4, pp.667~674

[7] Park, S. W. and Lee H. M.(2013), "Design of Hull Residual Life Prediction System Considering Corrosion and Coating", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 2, pp.104-110

[8] SNAK[The Society of Naval Architects of Korea](2012), Warship, TextBooks, pp. 164~171

[9] Song, X. X., Zhang, J., Yang, D. F. and Duan, X. Z.(2013), "Effects of Microorganism on Corrosion of Zn-Al-Cd Sacrificial Anode in natural Seawater",

Journal of Materials Engineering, 2013 no.1, pp.58-63

Received 24 April 2015
Revised 17 August 2015
Accepted 20 August 2015