CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.12, No.1(2013), pp.12~26

탄소강 볼트 체결된 GECM(Graphite Epoxy Composite Material)/Al 판재 간의 갈바닉 부식 거동

김 영 식[1,†] · 박 수 진[1] · 유 영 란[2]

[1]국립안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터, 경북 안동시 경동로 1375
[2](재)포항금속소재산업진흥원 부식방식연구실, 경북 포항시 남구 지곡로 56
(2012년 10월 23일 접수, 2012년 12월 06일 수정, 2012년 12월 06일 채택)

Galvanic Corrosion Behavior between Carbon Steel Bolted GECM(Graphite Epoxy Composite Material)/Al plates

Youngsik Kim[1,†], Sujin Park[1], and Youngran Yoo[2]

[1]Materials Research Center for Energy and Green Technology, School of Advanced Materials Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdongro, Andong, Gyeongbuk, 760-749, Korea
[2]POMIA (Pohang Institute of Metal Industry Advancement), 56 Jigokro, Namgu, Pohang, 790-834, Korea
(Received October 23, 2012; Revised December 06, 2012; Accepted December 06, 2012)

This work focused on galvanic corrosion of carbon steel bolted GECM/Al plates by long-term test in tap water and NaCl solutions. Test product was carbon steel bolted between cross packed GECM and painted aluminium. Tests for the product and coupled parts determined corrosion rate in tap water and NaCl solutions. Also, using a potentiostat and salt water sprayer, galvanic test was done. In galvanic test on carbon steel bolted GECM/Al plates, corrosion of carbon steel bolt was faster in series of tap water>1% NaCl solution>3.5% NaCl solution. In galvanic couple between aluminium and carbon steel bolt, their corrosion rates were higher than those of single specimen. In galvanic couple between GECM, aluminium, and carbon steel bolt, corrosion behaviors of carbon steel bolt and aluminium were changed due to different corrosion mechanism in tap water and chloride solution.

Keywords : *Galvanic corrosion, carbon steel bolted GECM, Al, tap water, NaCl*

1. 서 론

본 연구진은 비금속복합재료와 금속 간의 갈바닉 부식에 대한 연구결과를 지속적으로 보고하여 왔다.[1-4] 또한 다양한 금속재료가 가지는 부식특성과 함께 비금속복합재료(GECM)로 epoxy 기지 중에 탄소섬유로 만들어진 재료와 갈바닉 쌍을 이룰 때 발생되는 갈바닉 부식 현상을 분위기의 부식강도 측면에서 많은 연구자들이 갈바닉 부식 특성을 보고해 오고 있다.[5-13]

최근에는 GECM과 알루미늄판재를 탄소강으로 볼트 체결된 실제 제품에서 나타날 수 있는 이종금속 재료간의 부식현상에 대하여 수도수와 염수에서의 제품의 각 부재 간 갈바닉 부식 특성을 평가하였다.[4] 주요 결과는 다음과 같다; 1) 수도수 및 염수 중에서의 GECM의 개방회로전위가 가장 귀하게 나타났고, 탄소강 볼트>Ti>Al의 순서로 비하게 나타났다. 시험 재료에 관계없이 수도수에서의 개방회로전위가 가장 귀하게 나타났으며, NaCl의 농도가 증가할수록 개방회로전위가 낮아졌다. 2) 단독시편의 침지시험 결과, 부식용액과 관계없이 Ti과 GECM의 부식손상은 관찰되지 않았다. 수도수의 경우, 볼트에서의 부식은 거의 나타나지 않았고, 염수의 경우, 1% NaCl 용액 중에서의 부식속도가 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도보다 더 크게 나타났으며, 붉은 녹이 발생하는 시점도 더 빠르게 나타났다. 알루미늄은 수도수에서도 상당한 크기의 부식이 관찰되고 있으며, 시험 초기에는 1% NaCl 중에서의 부식속도가 더 크다가 시간이 장기화되면서 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도가 더 크게 나타났다.

본 연구에서는 비금속복합재와 알루미늄판재를 탄소강으로 볼트체결된 실제 제품에서 나타날 수 있는 이종금속 재료간의 부식현상에 대하여 수도수와 염수에서의 단기간 및 장기간 시험을 통하여 제품 및 각 부재 간 갈바닉 부식 특성을 평가하였다.

† Corresponding author: yikim@andong.ac.kr

2. 연구방법

2.1 시 편

본 실험에 사용된 시편의 형상은 Cross packed GECM이 6겹으로 적층한 것과 도장된 알루미늄을 탄소강 볼트를 이용하여 서로 연결한 실제 제품이다. Ti은 Grade 2를 사용하였으며 Al은 7175-T74, 볼트는 0.4%C 아공석강이다.

2.2 침지 부식 시험

GECM과 알루미늄을 볼트 체결되어 있는 부분을 절단하여 침지 시험용 시편을 제작하였다. 알루미늄부분은 페인트로 코팅되어 있으며, 절단에 의하여 옆면은 알루미늄이 그대로 노출되어 있다. 초기 시편의 면적을 측정한 후, 증류수와 알콜에서 각각 5분 동안 초음파 세척을 하고 무게를 측정하였다. 그 뒤 수도수, 1% NaCl, 3.5% NaCl 수용액에서 침지하여 시편의 형상 변화 및 무게 감소를 측정하여 부식의 정도를 알아보았다. 한편 시편을 GECM, Bolt, 도장된 Al이 모두 나타나게 적당한 크기로 자른 다음, 안동지역의 수도수, 1% NaCl, 3.5% NaCl 수용액에 침지하여 시편의 변화를 관찰하였다. GECM이 물을 흡수하는 성질 때문에 부식속도를 측정하지 않고 각 부재에서 나타나는 부식현상을 관찰하였다. 실험은 모두 상온에서 행하였다.

2.3 갈바닉부식 시험

포텐시오스타트(Gamry DC105)를 이용하여 Al, Bolt, GECM, Ti를 서로 갈바닉 쌍으로 조합하여 갈바닉 부식 시험을 행하였다. 음극(Cathode)은 각각의 갈바닉 쌍에서 부식전위가 높은 것으로 하였고, 양극(Anode)은 부식전위가 낮은 것으로 하였으며 면적비는 모두 1:1로 하였다. 시험용액은 1% NaCl 수용액을 사용하였고, 온도는 20 ℃로 고정하였다. 기준전극은 포화감홍전극(SCE)을 사용하여 1시간 동안 갈바닉 전류와 전위를 측정하였다. 또한 전기화학적 측정이 끝난 뒤 무게 변화를 측정하여 부식속도를 구하였다.

염수-수도수 분무에 의한 갈바닉 시험을 행하였다. 염수분무시험기를 사용하여 제품시편에 대하여 100시간동안 염수를 분무한 다음, 수도수를 하루에 1시간 분무한 뒤 24시간 건조를 1 cycle로 하여 주기적으로 시편 형상의 변화를 관찰하였다. 수도수에서는 볼트 주위에 붉은 색의 부식생성물이 발생하였고, 염수에서는 볼트 주위에서 흰 색의 부식생성물이 발생하였다. 이 부식 생성물이 무엇인지 알아내기 위해 성분분석을 하였다. 성분분석은 Bolt 자체와 흰 색과 붉은 색의 부식생성물에 대해 분석하였다.

Al-GECM-Bolt를 모두 연결한 갈바닉 침지 시험을 행하였다. Al, Bolt, GECM, 모두 갈바닉 쌍으로 조합하고, 각각의 초기무게를 측정한 다음 상온의 수도수와 1% NaCl 수용액에서 침지하였다. 포텐시오스타트(Gamry DC 105)를 이용하여 10일 후 갈바닉 전류 및 갈바닉 전위를 측정하였고, 전기화학적 측정이 끝난 뒤 무게 변화를 측정하여 부식속도를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제품에 대한 침지 실험에 따른 외관 변화

그림 1은 GECM과 알루미늄을 볼트 체결되어 있는 부분을 절단하여 제작한 침지 시험용 시편에 대한 상온의 수도수 중 침지시험 전후의 외관 사진이다. 알루미늄부분은 페인트로 코팅되어 있으며, 절단에 의하여 옆면은 알루미늄이 그대로 노출되어 있다. 시험 전에는 탄소강 볼트 및 알루미늄의 색깔이 그대로 나타나 있음을 보여주고 있다. (a)는 제품의 안쪽 면 외관, (b)는 제품의 바깥쪽 면 외, (c)는 우측면, (d)는 좌측면의 외관을 보여주고 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 14일간 침지한 후의 시편 형상을 살펴보면, 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 나타나기 시작했으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 광택을 잃고 흰색 부식 생성물이 나타나기 시작하였다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 35일간 침지한 후의 시편 형상을 살펴보면, 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 심하게 관찰되며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 95일간 침지한 후의 시편 형상을 살펴보면, 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 심화되었으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 120일간 침지한 후의 시편 형상도 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 심화되었으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 145일간 침지한 후의 시편 형상도 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 심화되었으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 165일간 침지한 후의 시편 형상을 보면, 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 심화되었으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 수도수 중에서 제품 시편을 190일간 침지한 후의 시편 형상을 보면, 볼트에서는 붉은 녹이 심화되었으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 부식이 심화되고 있음을 알 수 있다.

그림 2는 GECM과 알루미늄을 볼트 체결되어 있는 부분을 절단하여 제작한 침지시험용 시편에 대한 상온의 1% NaCl 용액 중에서의 침지시험 전후의 외관 사진이다. 알루미늄부분은 페인트로 코팅되어 있으며, 절단에 의하여 옆면은 알루미늄이 그대로 노출되어 있다. 상온의 1% NaCl 중에서 제품 시편을 14일간 침지한 후의 시편 형상을 살펴보면, 수도수 중에서의 침지시험과는 달리 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 관찰되지 않고 흰색의 부식생성물이 관찰되며, 알루

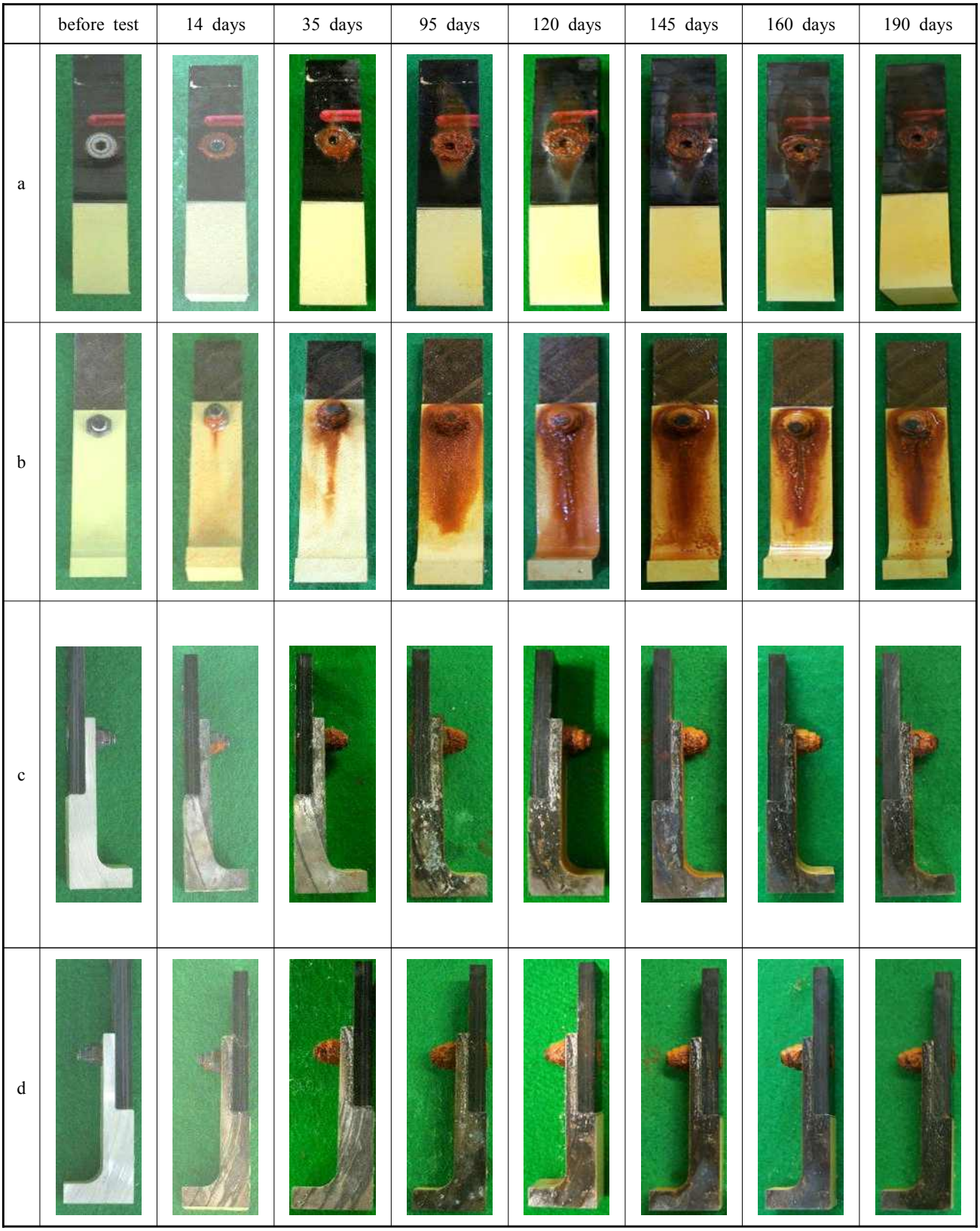


Fig. 1. Variation of surface appearance by immersion test duration in tap water at room temperature; (a) front, (b) rear, (c) right, (d) left.

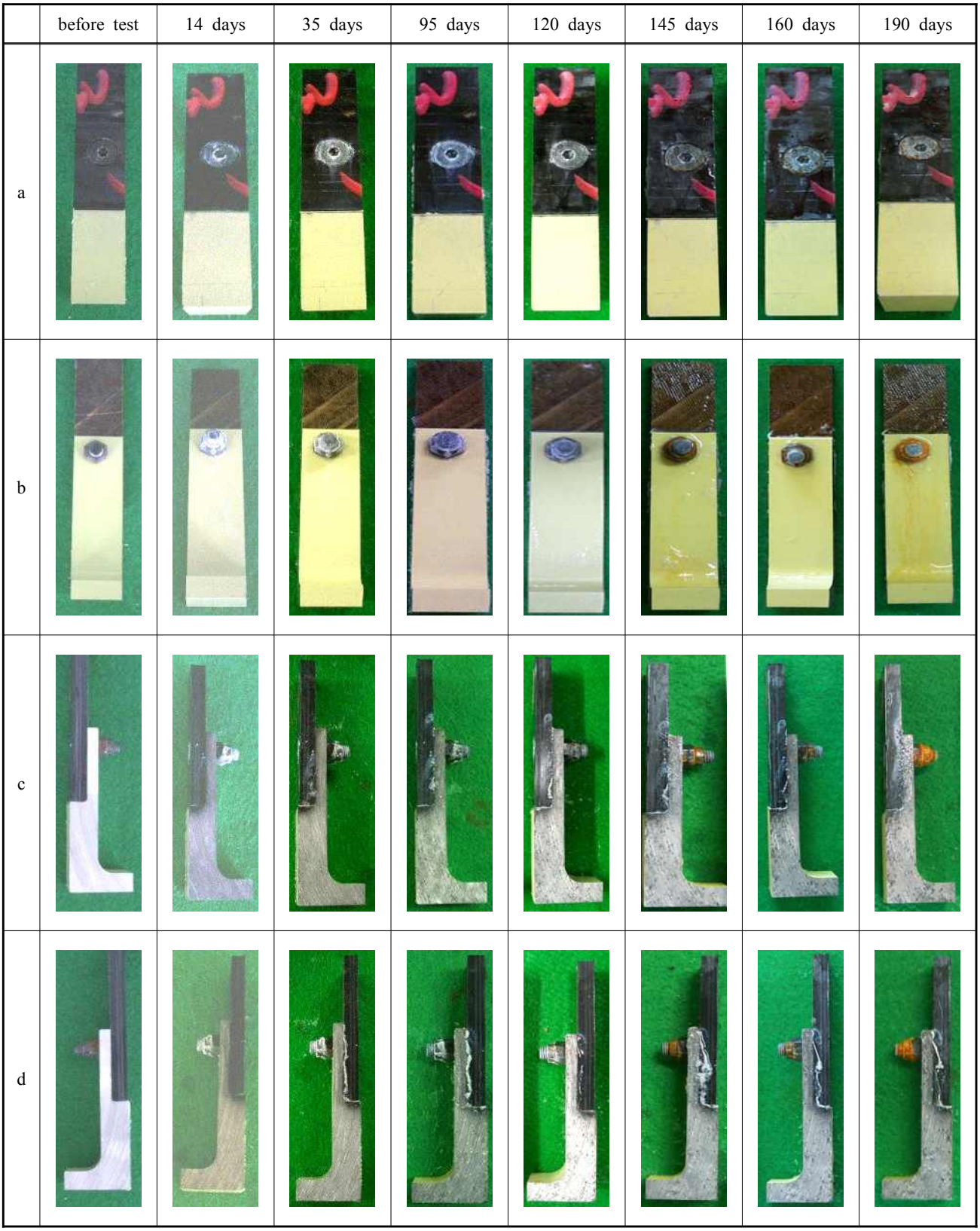


Fig. 2. Variation of surface appearance by immersion test duration in 1% NaCl at room temperature; (a) front, (b) rear, (c) right, (d) left.

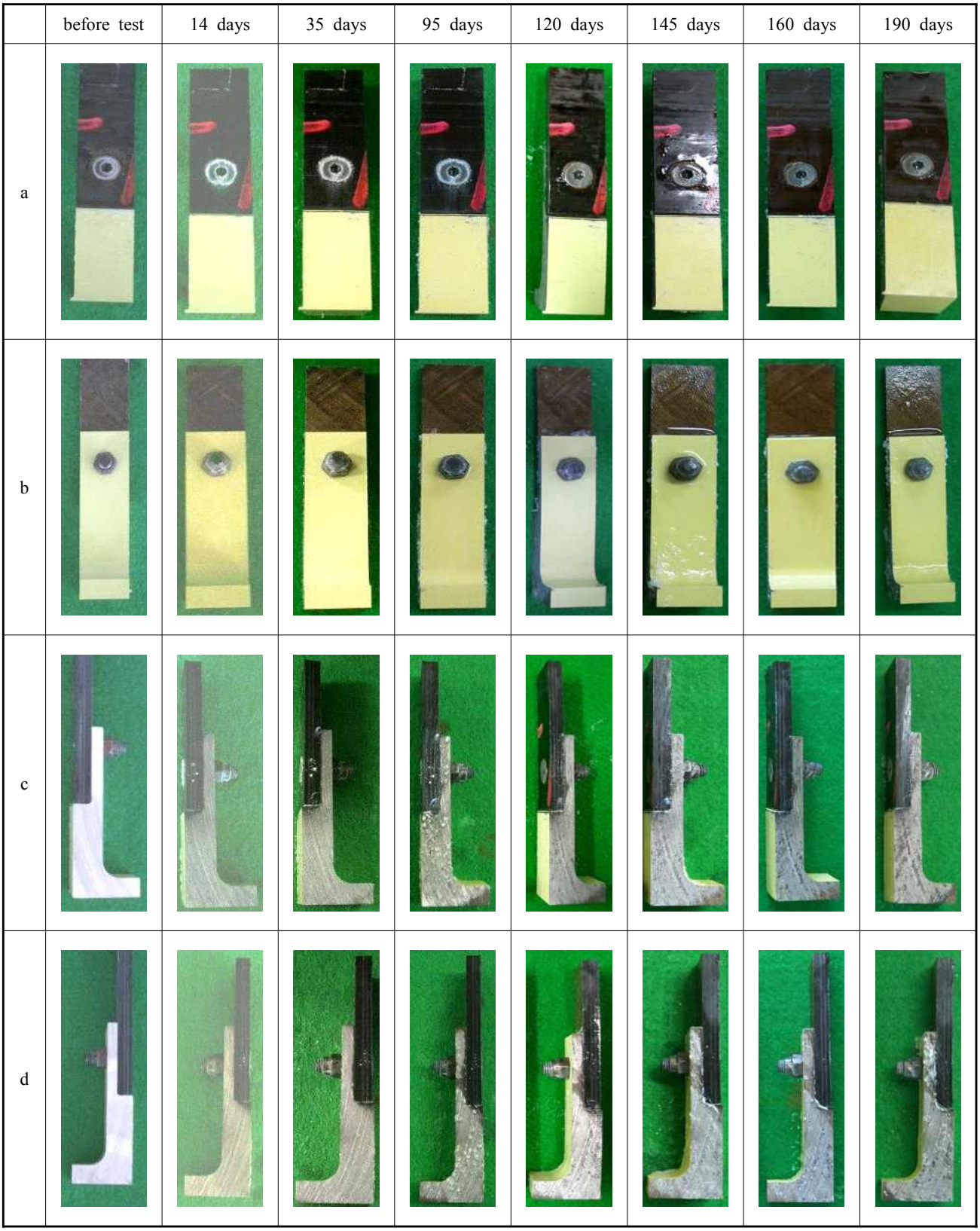


Fig. 3. Variation of surface appearance by immersion test duration in 3.5% NaCl at room temperature; (a) front, (b) rear, (c) right, (d) left.

미늄은 노출된 옆면에서 약간의 국부부식이 관찰되고 있다. 상온의 1% NaCl 중에서 제품 시편을 35일에서 120일까지 침지한 후의 시편 형상은 유사하게 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 관찰되지 않고 흰색의 부식생성물이 관찰되며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 국부부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 상온의 1% NaCl 중에서 제품 시편을 145일간 침지한 후의 시편 형상을 보면, 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 관찰되기 시작하였으며, 알루미늄은 노출된 옆면에서 국부부식이 심화되고 있음을 알 수 있다. 그 후 160일간 및 190일간 침지시험을 한 경우도 탄소강 볼트에서의 붉은 녹이 증가하고 있으며 알루미늄의 부식도 심화되고 있음을 확인할 수 있다.

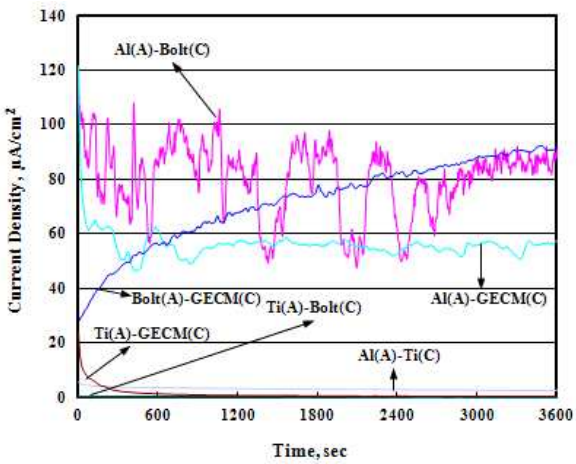
그림 3은 제품에서 GECM과 알루미늄을 볼트 체결되어 있는 부분을 절단하여 제작한 침지시험용 시편에 대하여 3.5% NaCl 용액 중에서 190일 동안 침지시험한 후의 외관 사진이다. 시험 전 알루미늄부분은 페인트로 코팅되어 있으며, 절단에 의하여 옆면은 알루미늄이 그대로 노출되어 있다. 상온의 3.5% NaCl 중에서 제품 시편을 14일간 침지한 후의 시편 형상과 190일까지 시험한 시편의 외관 상 특징은 앞의 결과와 달리 탄소강 볼트에서는 붉은 녹이 관찰되지 않고 알루미늄의 부식만 관찰되고 있는 점이다.

이상의 제품침지시험 결과를 요약하면, 수도수 중에서는 아연층이 보호하고 있음에도 불구하고 탄소강 볼트부위에서 시간의 경과에 따라서 10일 이후부터 붉은 녹이 관찰되었다. 이 결과는 단독으로 침지했을 때의 부식경향[4]과 매우 다른 결과로서 제품의 경우 볼트가 갈바닉쌍을 이루게 되어 나타난 결과로 더 빨리 탄소강 볼트가 부식된 것으로 보인다. 그러나 1% NaCl 용액에서는 145일경부터 붉은 녹이 관찰되어 침지기간이 증가할수록 부식의 정도가 심화되고 있으나, 수도수 중에서보다 붉은 녹의 발생 시점이 매우 느리며, 3.5% NaCl 용액에서는 전체 침지기간에 걸쳐서 탄소강 볼트에서 뚜렷한 붉은 녹의 발생은 없었다. 이와 같이 염수에서의 부식 경향은 단독침지에서의 1% NaCl 용액 중에서 부식속도가 더 큰 게 나타난 것[4]과 일치된 경향을 보이고 있다. 특히, 수도수 중에서의 각 부재의 부식과 다른 현상이 나타난 것은 수도수 중에서는 알루미늄의 부식이 잘 일어나지 않으므로 탄소강 볼트의 부식이 비교적 빠르게 발생되었으나, 염수 중에서는 알루미늄의 부식이 더 빠르게 발생되므로 오히려 탄소강 볼트의 부식을 억제시킨 것으로 판단된다.

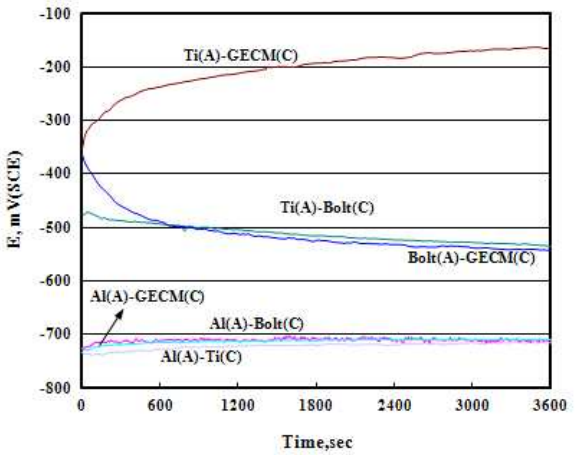
3.2 제품 구성 부재 2종간 갈바닉 시험

그림 4는 Ti, Al, GECM, 볼트시편을 연마한 뒤 20 ℃, 1% NaCl 용액에서의 갈바닉 전류밀도 및 갈바닉 전위를 측정하여 비교한 그림이다. 그림에서 (A)로 표시한 것을 측정전극으로 하고 (C)로 표시한 것을 상대전극으로 하여 측정하였다. 알루미늄과 볼트를 갈바닉 쌍으로 하여 측정한 결과, 알루미늄이 양극이 되어 다소 크고 불안정한 전류밀도를 보이고 있으며, 알루미늄과 GECM을 갈바닉 쌍으로 하여 측정한 결과, 알루미늄이 양극이 되어 다소 크며 안정한 전류밀도를 보이고 있다. 그러나 알루미늄과 Ti을 갈바닉쌍이 된 경우에는 전류밀도가 매우 작은 값을 보이고 있는데, 두 합금의 부식전위가 서로 유사하여 나타난 결과로 생각된다. 탄소강 볼트와 GECM을 갈바닉 쌍으로 하여 측정한 결과, 볼트가 양극이 되어 전류밀도가 계속 증가하고 있다. 볼트와 Ti을 갈바닉 쌍으로 하여 측정한 결과, Ti이 양극이 되고 있으나 전류밀도가 매우 작은 값을 보이고 있다. Ti와 GECM을 갈바닉 쌍으로 하여 측정한 결과, Ti이 양극이 되지만 매우 작은 전류밀도가 나타나고 있다.

이상의 결과로부터 각 갈바닉 쌍의 조합을 살펴보면, 알루미늄/볼트 갈바닉 쌍은 부식금속/부식금속 쌍이고, 알루미

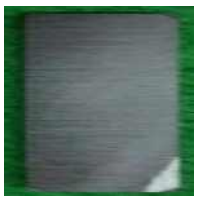
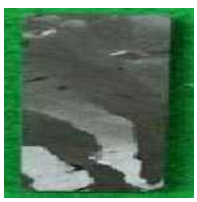


(a)



(b)

Fig. 4. (a) Galvanic current density and (b) galvanic potential between galvanic couplings in 20℃, 1% NaCl solution.

		before test	20 days	50 days	80 days
a	Ti				
	GECM				
b	Al				
	GECM				
c	Bolt				
	GECM				

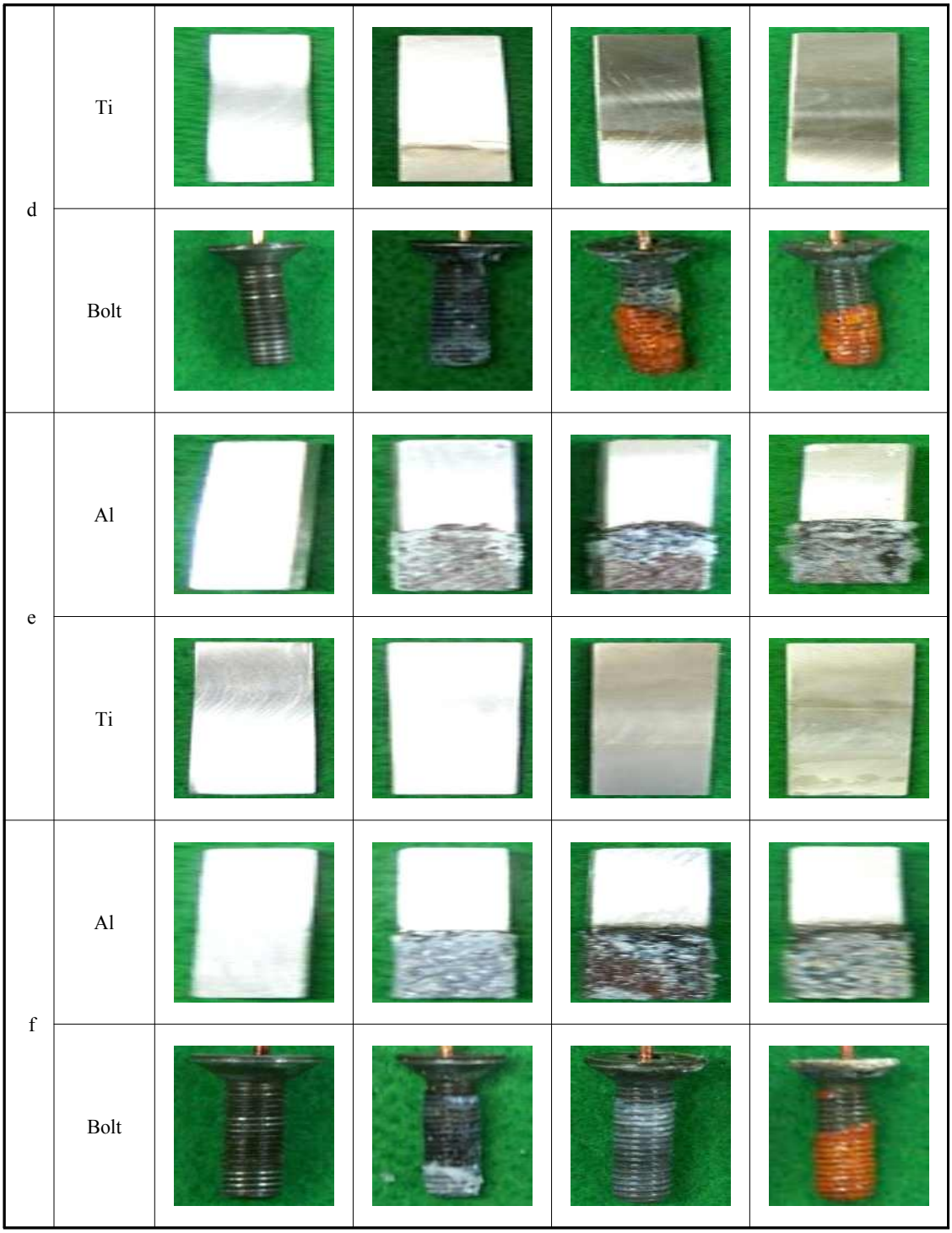


Fig. 5. Variation of surface appearance by immersion test duration of galvanic couples in 1% NaCl at room temperature; (a) Ti-GECM couple, (b) Al-GECM couple, (c) Bolt-GECM couple, (d) Ti-Bolt couple, (e) Al-Ti couple, (f) Al-Bolt couple.

늄/GECM 쌍은 부식금속/불활성 금속 쌍이며, 알루미늄/Ti 쌍은 부식금속/부동태 금속 쌍이다. 볼트/GECM 쌍은 부식금속/불활성 금속 쌍이며, 볼트/Ti 쌍은 부식금속/부동태 금속 쌍이다. Ti/GECM 쌍은 부동태 금속/불활성 금속 쌍으로서 이러한 갈바닉 경향은 갈바닉 침지시험 결과를 예측하는데 이용할 수 있다.

그림 5는 각 갈바닉 쌍에 대하여 상온의 1% NaCl 용액 중에서 갈바닉 부식시험 전후의 시편 외관을 보여주고 있다.

그림 5(a)는 상온의 1% NaCl 용액 중에서 Ti-GECM 갈바닉 쌍을 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. Ti과 GECM 시편 모두 외관 상 큰 변화가 관찰되지 않았다. 그림 5(b)는 알루미늄-GECM을 갈바닉 쌍으로 연결하여 상온의 1% NaCl 용액 중에서 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. 침지시험 후 20일에서부터 80일까지 모두 알루미늄의 부식이 관찰되며, 시험 기간이 길어질수록 알루미늄의 부식이 심화되고 있다.

그림 5(c)는 상온의 1% NaCl 용액 중에서 볼트-GECM 갈바닉 쌍을 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. GECM의 외관은 큰 변화가 없으나, 탄소강 볼트는 심하게 부식됨을 확인할 수 있다. 그림 5(d)는 상온의 1% NaCl 용액 중에서 Ti-볼트 갈바닉 쌍을 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. 20일 동안 침지한 경우에서는 탄소강 볼트에서 붉은 녹이 관찰되지 않았으나, 50일 및 80일 동안 침지시험한 경우에서는 붉은 녹이 관찰되었다. 그림 5(e)는 상온의 1% NaCl 용액 중에서 Al-Ti 갈바닉 쌍을 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. 알루미늄 시편에서는 시험기간에 관계없이 심한 부식이 관찰되었으나 Ti은 표면 색깔만 다소 변화되었다.

그림 5(f)는 상온의 1% NaCl 용액 중에서 Al-볼트 갈바닉 쌍을 20일, 50일, 80일 동안 침지한 후의 표면형상이다. 침지 후 20일째는 알루미늄의 부식이 관찰되었으나 볼트에서의 붉은 녹 발생은 관찰되지 않았다. 침지 후 50일째에서도 알루미늄의 부식이 심화되고 있으며, 볼트에서의 붉은 녹이 관찰되지 않았다. 침지 후 80일째 Al-볼트 갈바닉 쌍의 외관은 알루미늄의 부식이 심화되고 있으며, 탄소강 볼트에서도 붉은 녹이 관찰되었다.

그림 6은 그림 5의 갈바닉 침지시험 시 각 날짜 별로 (a) 갈바닉 전류밀도와 (b) 갈바닉 전위를 측정하여 측정일자별로 나타낸 그림이다. 알루미늄/GECM 쌍의 경우에는 알루미늄이 양극이 되고 큰 전류밀도가 나타났다. 알루미늄/Ti 쌍의 경우에는 알루미늄이 양극이 되나 비교적 작은 전류밀도가 나타났다. 알루미늄/볼트 쌍의 경우, 시험 초기에는 알루미늄이 음극이 되고 시험 후반에는 양극이 되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 볼트표면에 코팅된 아연의 영향이라고 생각된다. 즉, 볼트표면에 코팅된 아연이 알루미늄과 갈바닉 쌍을 이룰 때 용해되므로 초기에는 알루미늄이 음극이 되나, 시간이 경과함에 따라서 코팅된 아연이 용해되어 탄소강이 노출되므로 볼트에서는 붉은 녹이 관찰되며, 알루미늄이 양극이 되고 있다. 이러한 전위의 역전은 볼트를 연마하지 않을 경우에는 알루미늄과 유사한 전위를 보이나 볼트를 연마한 경우에는 볼트의 전위가 상승하므로 나타난 결과로 생각된다. 볼트/GECM 쌍의 경우에는 볼트가 양극이 되고 큰 전류밀도가 나타났다. 볼트/Ti 쌍의 경우에는 볼트가 양극이 되나 전류밀도가 매우 작게 나타났다. Ti/GECM 쌍의 경우에는 Ti가 양극이 되나 전류밀도는 매우 작게 나타났다. 그림 7은 그림 6에서 측정된 각 갈바닉 쌍의 부식속도를 나타낸 것이다. Ti/GECM 쌍의 경우에는 무게의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 그림 6의 결과와 일치된 경향을 보이고 있다. 알루미늄/GECM 쌍의 경우에는 알루미늄의 부식속도가 매우 크게 나타나고 있으며 그림 6의 결과와 일치된 경향을 보이고 있다. 볼트/GECM 쌍의 경우에는 볼트의 부식속도가 매우 크게 나타나고 있으며, 그림 6의 결과와 일치된 경향을 보이고 있다. 볼트/Ti 쌍의 경우에는 볼트의 부식속도가 비교적 작게 나타나고 있으며, 그림 6의 결과와 일치된 경향을 보이고 있다. 알루미늄/Ti 쌍의 경우에도 알루미늄의 부식속도가 비교적 작게 나타나고 있으며, 그림 6의 결과와 일치된 경향을 보이고 있다. 알루미늄/볼트 쌍의 경우에는 알루미늄의 부식속도가 더 크게 나타났으나 볼트(아연이 코팅된 상태)의 부식속도도 나타나고 있다. 그림 8은 그림 7의 실험에서 80일째의 부식속도를 나타낸 것이

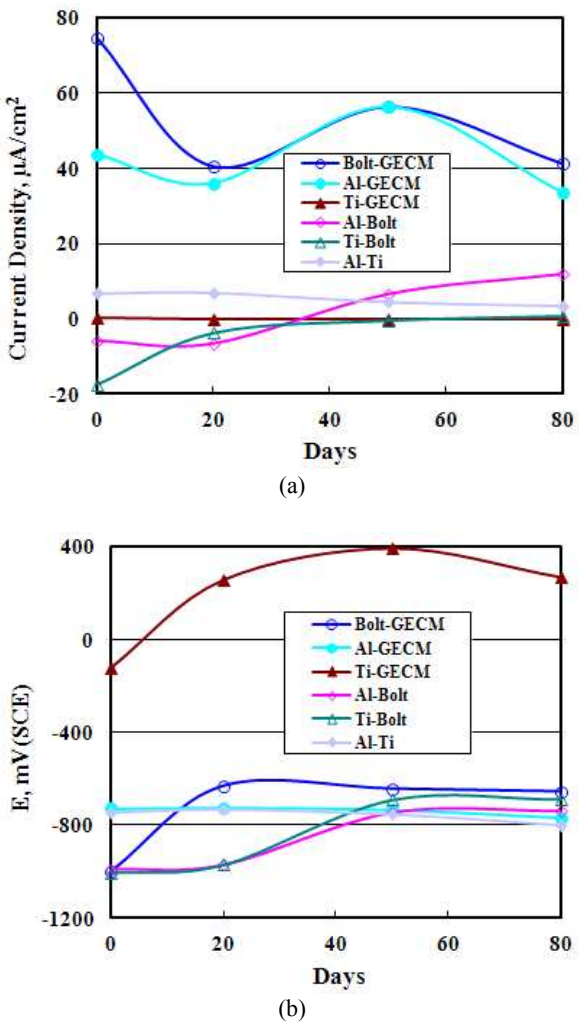


Fig. 6. (a) Galvanic current density and (b) galvanic potential between each couples in 1% NaCl at room temperature.

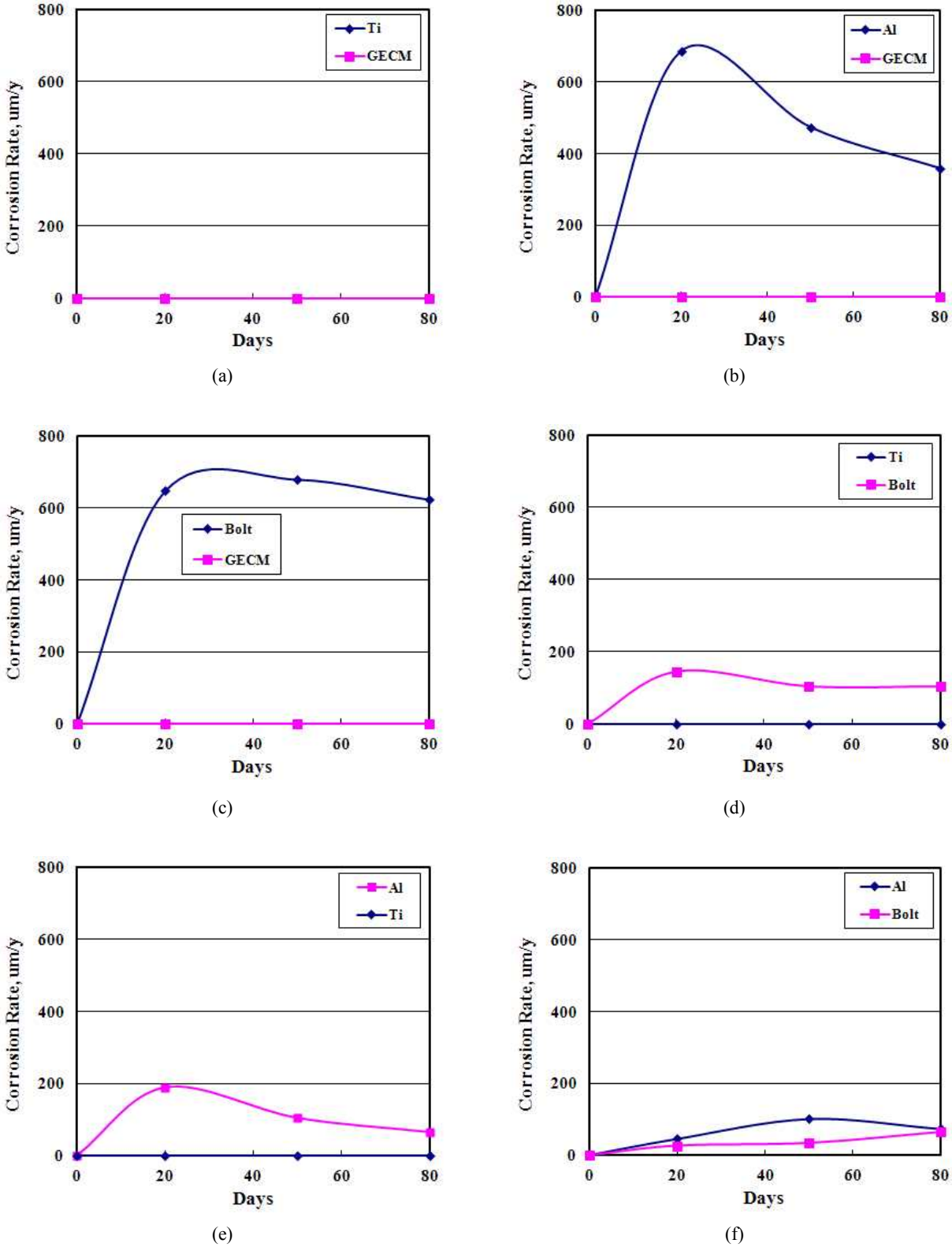


Fig. 7. Corrosion rate of each couples by galvanic test in 1% NaCl at room temperature; (a) Ti-GECM, (b) Al-GECM, (c) Bolt-GECM, (d) Ti-Bolt, (e) Al-Ti, (f) Al-Bolt.

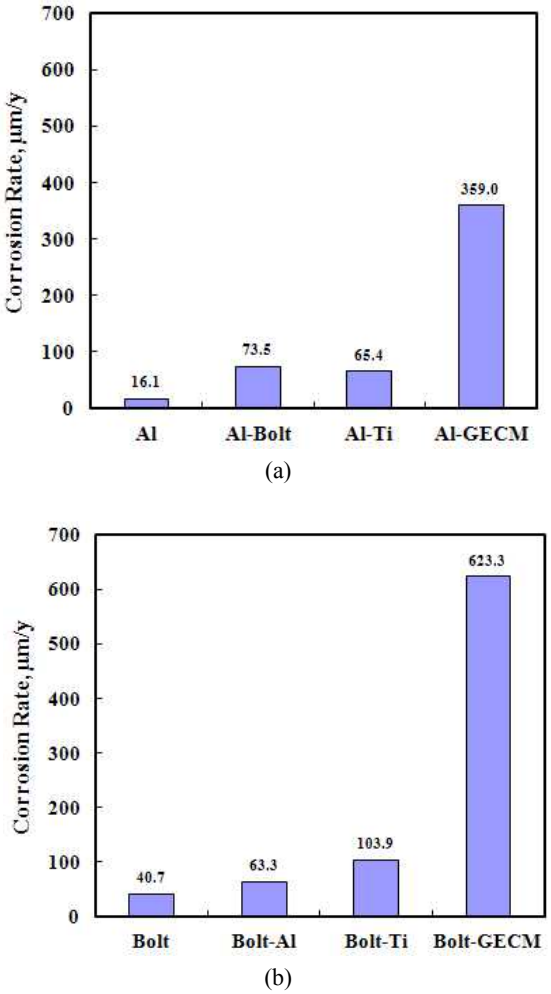


Fig. 8. Effect of galvanic couplings on corrosion rate after 80 days immersion of aluminium in 1% NaCl at room temperature.

다. GECM과 갈바닉 쌍을 이루게 되면 단독시편으로 있을 때의 부식속도보다 훨씬 큰 값으로 부식되는 것을 알 수 있다. 즉, 알루미늄은 22.3배 증가하고, 볼트는 15.3배 부식속도가 증가한다. Ti과 갈바닉 쌍을 이루게 되면 단독시편의 부식속도보다 증가하게 되나 그 정도는 비교적 작음을 알 수 있다. 즉, 알루미늄은 4.1배, 볼트는 2.6배 부식속도가 증가하고 있다. 그런데 알루미늄과 볼트를 연결하는 경우에는 단독보다 알루미늄의 경우에는 4.6배, 볼트의 경우는 1.6배 부식속도가 모두 증가하는 현상이 나타났다.

그림 9는 알루미늄, GECM, 볼트의 면적비를 1:1:1로 준비하여 모두 연결한 채로 갈바닉 시험을 행한 결과를 보여주고 있다. 상온의 수도수 중에 Al-GECM-Bolt를 모두 연결하여 10일 동안 갈바닉 시험을 행한 뒤의 표면 외관을 보면, 알루미늄의 표면은 변색이 약간 되었을 뿐 특별한 부식손상이 관찰되지 않았다. 볼트의 경우에는 붉은 녹이 관찰되지는 않았으나, 아래에 나타낸 바와 같이 82.8 ㎛/y의 부식속도

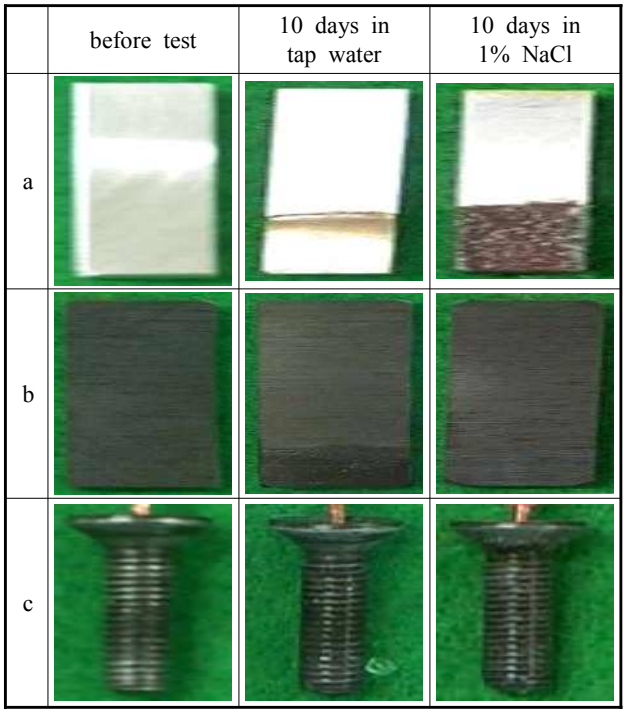
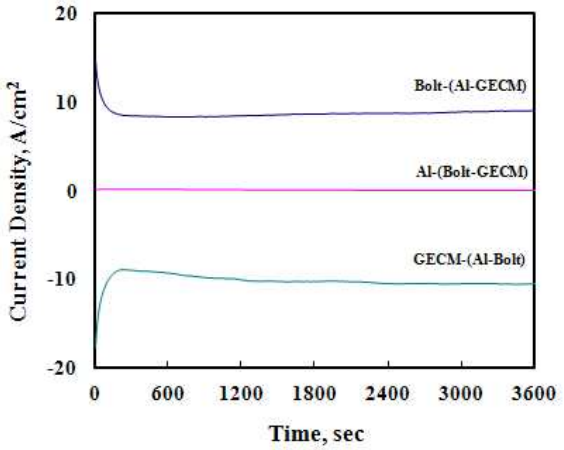


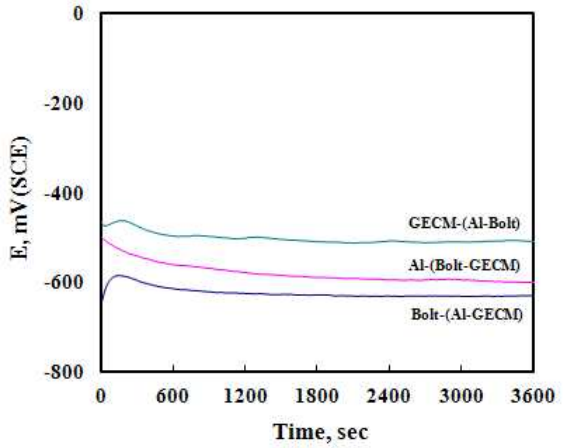
Fig. 9. Surface appearance of Al-GECM-Bolt galvanic couple in tap water at room temperature; (a) Al, (b) GECM, (c) Bolt.

를 보이고 있는데 이는 표면에 코팅된 아연의 용해 결과로 보인다. 앞의 결과와 비교하여 보면, 알루미늄 단독의 부식속도(25일째)가 5.4 ㎛/y이고, 볼트의 단독 부식속도는 0 ㎛/y를 보이고 있었다. 이와 같이 단독으로 있을 때보다 3가지 재료가 갈바닉 쌍을 이룰 때 볼트의 부식속도가 크게 증가되고 있으며, 알루미늄의 경우에는 3쌍 갈바닉 시험기간이 짧아서 부식속도가 관찰되지 않은 것으로 추측된다. 한편 상온 1% NaCl 중에 Al-GECM-Bolt를 모두 연결하여 10일 동안 갈바닉 시험을 행한 뒤의 표면외관을 보면, 알루미늄은 심하게 부식손상이 되었으며, 아래에 나타낸 바와 같이 666.7 ㎛/y의 부식속도를 보이고 있다. 볼트의 경우는 붉은 녹이 발생되지는 않았으나 270.1 ㎛/y의 부식속도를 보이고 있다. 앞에서 나타낸 바와 같이, 알루미늄 단독의 부식속도(25일째)가 28.1 ㎛/y이고, 볼트의 단독 부식속도는 35.9 ㎛/y를 보이고 있었다. 이와 같이 단독으로 있을 때보다 3가지 재료가 갈바닉 쌍을 이룰 때 볼트 및 알루미늄의 부식속도가 크게 증가되고 있다.

그림 10은 상온의 수도수 중에서 한 가지 재료를 측정전극으로 하고 나머지 두 재료를 함께 연결된 상태로 갈바닉 쌍을 이루어 나타나는 갈바닉 전류밀도와 갈바닉 전위를 측정한 결과이다. Bolt-(Al-GECM)의 경우에는 볼트가 양극이 되며, Al-(Bolt-GECM)의 경우에는 전류밀도가 거의 0에 가까운 값을 보이고, GECM-(Al-Bolt)의 경우에는 GECM이 음극이 되는 것을 알 수 있다. 그림 11은 상온의

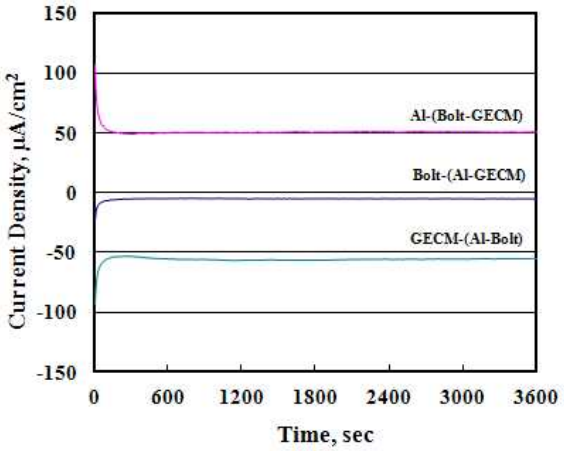


(a)

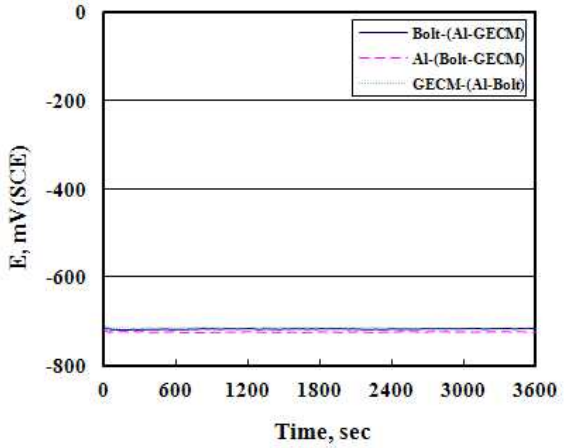


(b)

Fig. 10. Galvanic current density and potential between Al-GECM-Bolt galvanic couple in tap water at room temperature [working electrode(counter electrode)].



(a)



(b)

Fig. 11. Galvanic current density and potential between Al-GECM-Bolt galvanic couple in 1% NaCl at room temperature [working electrode(counter electrode)].

1% NaCl 중에서 한 가지 재료를 측정전극으로 하고 나머지 두 재료를 함께 연결된 상태로 갈바닉 쌍을 이루어 나타나는 갈바닉 전류밀도와 갈바닉 전위를 측정한 결과이다. Bolt−(Al−GECM)의 경우에는 볼트의 전류밀도가 매우 작은 값을 보이며 음극으로 나타나며, Al−(Bolt−GECM)의 경우에는 양극이 되어 큰 전류밀도를 보이고, GECM−(Al−Bolt)의 경우에는 GECM이 음극이 되는 것을 알 수 있다. 그림 12는 그림 10과 그림 11의 실험에서 나타난 부식속도를 구한 것이다. 수도수에서는 볼트에서만 부식속도가 나타났으며, 1% NaCl에서는 알루미늄의 부식속도가 가장 크게 나타났다. 이 결과는 앞의 제품 시편에서 나타난 부식 경향을 정량적으로 보여주는 결과로 생각된다.

그림 13은 분무시험기를 이용하여 갈바닉 부식시험을 행하기 위한 제품 시편의 형상을 보여주고 있다. 본 실험은 염분의 부착과 빗물에 의한 영향을 평가하기 위하여 1단계

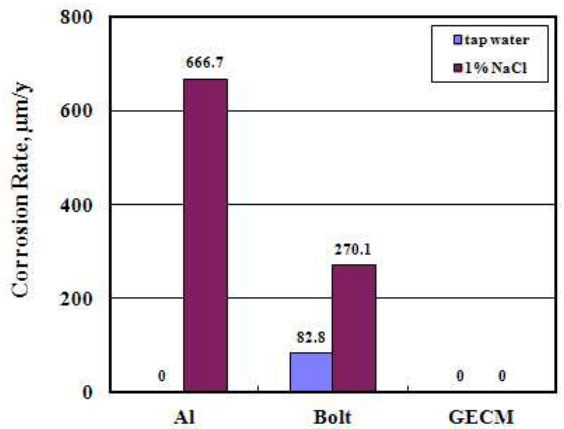


Fig. 12. Corrosion rate of each materials among Al-GECM-Bolt galvanic couple in tap water and 1% NaCl at room temperature (10 days immersion test).

	before test	After 100 hrs salt spray	1 hour/day water spray after 100 hrs salt spray	every 1 hour water spray during 20 days after 100 hrs salt spray	every 1 hour water spray during 40 days after 100 hrs salt spray
a					
b					
c					
d					

Fig. 13. Effect of salt and tap water spray on corrosion of carbon steel bolted GECM/Al product; (a) front, (b) rear, (c) right, (d) left.

Table 1. Chemical analysis by EDS on bolt, White corrosion product after salt spray, and Red corrosion product after salt and water spray

Elements, wt.%	Fe	Zn	Si	Al	Cl	O	Total
Bolt before test	19.99	66.88	2.15	-	-	10.98	100.00
White corrosion product after salt spray	-	20.83	-	21.34	4.72	53.11	100.00
Red corrosion product after salt and water spray	47.48	6.43		4.13		41.96	100.00

로 5% NaCl 용액을 100시간 동안 분무하고, 2단계는 매일 1시간 동안 수도수를 분무한 다음 24시간 건조하는 1주기 시험을 40일간 행하였다. 먼저 1단계로 25℃에서 100시간 동안 5% NaCl 용액을 분무한 후의 시편 외관을 보면, 그림에 나타낸 바와 같이, Bolt 주위에서 흰 색 부식생성물이 발생하였으나, Al의 경우에는 부식이 심하게 일어난 것을 볼 수 있다. 그 다음 100시간 동안 염수분무 한 시편에 대하여 1시간 동안 수도수를 분무한 다음 24시간 건조하는 2단계의 시험 결과는 1일, 20일, 40일간 행하여 나타내었다. 1일간 시험한 경우는 그림에서 알 수 있는 바와 같이 염수를 분무했을 때는 붉은 녹이 관찰되지 않았으나 수도수를 분무함에 따라 볼트에서 붉은 색 녹이 발생하기 시작하였고, Al의 부식은 100시간 동안 염수 분무한 시편 형상과 거의 동일하였다. 그러나 20일, 40일 간 1시간 분무 한 후 24시간 건조한 시편의 형상으로 시간이 지날수록 볼트의 부식이 점점 심해졌지만, Al의 경우는 눈으로 보이는 변화는 거의 없었다. 이러한 경향은 제품 침지시험 결과에서와 같이 수도수에 침지할 경우 볼트에서 붉은 녹이 단기간에 관찰되고 염수에 침지할 경우 알루미늄에서의 국부부식이 더 많이 관찰된 것과 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

표 1은 그림 13의 실험에 사용된 시편에 대한 EDS분석 결과를 요약한 것이다. 시험 전 볼트 자체에 대한 분석 결과는 Zn이 Fe보다 더 많이 검출되었다. 이것은 Bolt에 Zn으로 코팅하여 볼트를 보호한 것으로 생각된다. 따라서 수도수 분무시 나타난 Bolt 주위에 흰 색의 부식 생성물은 Zn이 부식된 것으로 판단된다. 그리고 염수를 분무했을 때 나타난 흰색의 부식생성물을 분석한 결과로 Al이 많이 검출 되었고, Zn과 Cl도 약간 검출 되었다. 이것은 Bolt에서 Zn이 부식된 것으로 보이고 Cl은 염수를 분무했기 때문에 검출된 것으로 보인다. 또한 붉은 색의 부식생성물을 분석한 결과, Fe가 많이 검출되었고, Al과 Zn도 약간 검출되었다. 즉, 염수에서는 Al의 부식이 그리고 수도수에서는 Bolt의 부식이 더 많이 발생한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1) GECM과 알루미늄이 탄소강 볼트체결된 제품침지시험 결과, 수도수 중에서는 볼트가 갈바닉쌍의 양극이 되어 더 빨리 탄소강 볼트가 부식되었으나, 1% NaCl 용액에서는 수도수 중에서보다 붉은 녹의 발생 시점이 매우 느리며, 3.5% NaCl 용액에서는 전체 침지기간에 걸쳐서 탄소강 볼트에서 뚜렷한 붉은 녹의 발생은 없었다.

2) 상온의 1% NaCl 중에서 2종 재료 간 갈바닉 시험 시, GECM과 갈바닉 쌍을 이루게 되면 단독시편으로 있을 때의 부식속도보다 알루미늄은 22.3배 증가하고, 탄소강 볼트는 15.3배 부식속도가 증가한다. 또한 알루미늄, GECM, 탄소강 볼트 간 3종 갈바닉 시험 시, 수도수에서는 탄소강 볼트가 더 빨리 부식되었으며(탄소강 볼트의 부식속도 82.8 ㎛/y), 염수에서는 알루미늄이 더 빨리 부식(알루미늄의 부식속도 666.7 ㎛/y)되었다. 이는 염수 중에 존재하는 염소이온의 효과로 인한 공식 민감도에 기인된 결과로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Y. R. Yoo, Y. I. Son, S. T. Shim, Y. H. Kwon, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.,* **8**, 27 (2009).
2. Y. S. Kim, H. K. Lim, Y. L. Sohn, Y. R. Yoo, and H. Y. Chang, *Corros. Sci. Tech.,* **9**, 39 (2010).
3. Y. S. Kim, H. K. Lim, Y. I. Son, Y. R. Yoo, and H. Y. Chang, *Kor. J. Met. Mater.*, **48**, 514 (2010).
4. Y. Kim, S. Park, and Y. Yoo, *Corros. Sci. Tech.,* **11,** 232 (2012).
5. D. M. Aylor and J. N. Murray, The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behavior of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals, CDNSWC-SME-92-32, Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, Bethesda, MD (1992).
6. G. Mantong and X. Changgan, Contact corrosion between carbon fiber reinforced composite materials and high-strength metals, NAIC-ID(RS)T- 0413-95, National Air Intelligence Center(China) (1995).
7. S. D. Thompson, B. L. White, and J. A. Snide, Accelerated Corrosion Testing of Graphite/Epoxy Composites and Aluminum Alloy Mechanically - Fastened Joints, AFWAL-TR-84-3115 (1985).

8. D. M. Aylor and J. N. Murray, The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behavior of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals, CDNSWC-SME-91/32, AD-A256 072 (1992).
9. F. Bellucci, A. Di Martino, and C. Liberti, *J. Appl. Electrochem.*, **16**, 15 (1986).
10. F. Lu, Q. P. Zhong, and C. X. Cao, *Acta Metall. Sin.*, **16**, 41 (2003).
11. F. Lu, X. Zhang, Z. Tang, Q. Zhong, and C. Cao, *Mater. Process*, **4**, 16 (2004).
12. F. Bellucci, *Corrosion*, **47**, 808 (1991).
13. F. Bellucci, *Corrosion*, **48**, 281 (1992).