

탄소강 볼트 체결된 GECM(Graphite Epoxy Composite Material)/ Al 판재의 구성 부재의 부식 거동

김 영 식^{1,*} · 박 수 진¹ · 유 영 란²

¹국립안동대학교 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)

Corrosion Behavior of the parts of Carbon Steel Bolted GECM(Graphite Epoxy Composite Material)/Al plates

Youngsik Kim^{1,*}, Sujin Park¹, and Youngran Yoo²

¹Materials Research Center for Energy and Green Technology, School of Advanced Materials Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdongro, Andong, Gyeongbuk, 760-749, Korea
²POMIA (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 corrosion of carbon steel bolted GECM/Al parts in tap water and NaCl solutions. In tap water and NaCl solutions, open circuit potential of GECM and its potentials in a series of carbon steel bolt>Ti>Al became active. Regardless of test materials, open circuit potentials in tap water were noble, and increasing NaCl concentration, its potentials became active. Immersion test of single specimen showed that no corrosion occur in Ti and GECM. In tap water, carbon steel bolt didn't show red corrosion product and in chloride solutions, corrosion rate in 1% NaCl solution was greater than its rate in 3.5% NaCl solution and red corrosion product in 1% NaCl solution was earlier observed than that in 3.5% NaCl solution. It seems that this behavior would be related to zinc-coatings on the surface of carbon steel bolt. On the other hand, aluminium was corroded in tap water and chloride solutions. Corrosion of aluminium in tap water was due to the presence of chloride ion in tap water by sterilizing process.

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

1. 서 론

비금속복합재료는 기존의 금속재료들보다 강도와 강성이 높고 낮은 비중으로 높은 비강도와 비강성, 내부식성을 가진다.^{1),2)} 비금속복합재료는 1960년대부터 민수용뿐만 아니라 항공우주용 1, 2차 구조물에 다양하게 적용되고 있다.^{3)~5)} 이러한 비금속복합재료는 항공기의 금속재료를 대체하여 사용됨으로써 항공기의 구조적 효율성과 가동 경제성을 크게 향상시켰다. 복합재료로 만들어진 항공 부품이 금속재료와 연결되게 되고 부식 환경에 노출됨에 따라 갈바닉 부식 문제가 대두되게 된다.^{6)~14)} 항공기 관련으로 갈바닉 부식의 관점에서 갈바닉 쌍으로 연결되는 금속재료, 면적 효과(음극/양극 면적비), 재료의 표면상태, 분위기의 부식 강도 및 온도 등 여러 가지의 인자들이 고려되어야 한다. 본 연구진은 비금속복합재료와 금속 간의 갈바닉 부식에

대한 연구결과를 지속적으로 보고하여 왔다.^{1),15)} 다양한 금속재료가 가지는 부식특성과 함께 비금속복합재료(GECM, Graphite Epoxy Composite Materials)로 epoxy 기지 중에 탄소섬유로 만들어진 재료와 갈바닉 쌍을 이룰 때 발생하는 갈바닉 부식 현상을 분위기의 부식강도 측면에서 갈바닉 부식 특성을 평가하였다¹⁾ ; 1) 1% NaCl 및 3.5% NaCl 중에 금속재료가 단독으로 존재할 때의 부식전위를 살펴보면, Type 316 > X4 > Ti > Type 304 > 탄소강 > Zircaloy-4 > Pure Zr > Al 순으로 낮아지고 있다. 그러나 전체적인 분극특성은 초내식성 스테인리스강인 X4와 Ti의 내식성이 가장 좋게 평가되었으며, 탄소강과 Al의 경우 양극 분극에 의해 급격히 부식이 진행되었다. 2) 다양한 금속재료와 GECM을 갈바닉 쌍으로 연결하고 갈바닉 부식특성을 평가한 결과, 탄소강과 Al의 경우 시간이 지남에 따라 갈바닉 전류가 증가하여 부식이 가속되나 스테인리스강과 Ti의 경우 갈바닉 전류는 감소하고 갈바닉 전위는 단독시험의 전위보다 크게 증가하였다. 이는 부동태피막의 형성으로 금속재

* Corresponding author: yikim@andong.ac.kr

료의 표면이 안정화되었기 때문이다. 3) 각각의 금속재료와 100% Graphite 및 GECCM과의 갈바닉쌍의 효과는 100% Graphite와 금속 재료가 연결되었을 때보다 GECCM과 금속 재료가 갈바닉 쌍으로 연결되었을 때 더 작은 영향을 보인다. 이는 금속재료와 연결된 면적비는 비록 같지만 GECCM의 노출 부위에 전도성을 지니는 재료인 Graphite의 면적이 작기 때문에 나타난 결과로 나타났다.¹⁾

또한 금속의 부식은 부식 환경에 침지되면 시간의 경과에 따라서 서로 상이한 거동을 보이는 경우가 많다. 즉, 부식 환경 중에 노출되는 시간이 길어질수록 부식이 감소하는 경우도 있지만 오히려 부식이 심화되는 경우도 있다. 특히, 이 중 금속 간에 연결되어 발생하는 갈바닉 부식의 경우도 그러하다. 이러한 부식의 경우 금속표면에 보호적인 부동태 피막이 생성되는가에 의해서 그 특성이 크게 변화하며, 금속의 미세조직에 의해서도 영향을 받게 된다. 따라서 여러 금속재료와 GECCM 복합재료가 갈바닉 쌍을 이룰 때 발생하는 갈바닉 부식 현상을 면적효과, 금속재료의 종류의 측면에서 평가하였다¹⁵⁾; 1) 상온 3.5% NaCl 수용액에서 GECCM과 금속 재료의 갈바닉 부식 시험 결과, 면적비에 관계없이 316 스테인리스강과 티타늄의 경우는 시험기간의 경과에 따라서 갈바닉 부식속도가 감소하고 있으나, 예민화된 316S 스테인리스강, 탄소강, 알루미늄의 부식속도는 증가하는 경향을 보였다. Ti과 STS 316 시편의 갈바닉 부식속도는 오랜 기간 동안 시험한 경우는 오히려 부식속도가 감소하는 이유는 장기간 시험 시 시편 표면에 부동태 피막을 형성시켜 더욱 안정화되어 부식속도가 작게 측정된 것으로 판단된다. 2) 갈바닉 전위순서는 티타늄>316 스테인리스강>316S 스테인리스강>탄소강>알루미늄의 순서로 낮아지고 있다. 한편 GECCM과의 면적비가 30:1일 때, 갈바닉 시험 후 무게변화로 인한 부식속도는 316 스테인리스강<티타늄<316S 스테인리스강<탄소강<알루미늄의 순서로 또한 면적비가 1:1일 때는 316 스테인리스강, 티타늄<316S 스테인리스강<탄소강<알루미늄의 순서로 부식속도가 증가하고 있으며 갈바닉 전위의 값과 대체적으로 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 3) 탄소강과 Al은 GECCM과의 면적비가 증가할수록 부식속도가 크게 높아짐을 알 수 있었으며, STS 316S는 단독으로 있을 때보다 면적비 1:1일 때 부식속도는 감소하나 면적비가 30:1일 경우 부식속도가 증가하였다. 이는 내식성이 부족한 합금의 경우, 면적비가 증가하면 갈바닉 부식효과가 크게 나타나기 때문으로 판단된다. 그러나 STS 316과 Ti는 단독으로 있을 때보다 갈바닉 쌍으로 연결되었을 때가 부식속도가 감소하고 있는데, 이는 갈바닉 쌍을 형성할 경우 GECCM과 두 재료의 부동태 영역과 만나게 됨으로써 부동태 피막을 강화시키기 때문으로 해석하고 있다.¹⁵⁾

본 연구에서는 GECCM과 알루미늄판재를 탄소강으로 볼트체결된 실제 제품에서 나타날 수 있는 이종금속 재료간의

부식현상에 대하여 수도수와 염수에서의 단기간 및 장기간 시험을 통하여 제품의 각 부재 간 갈바닉 부식 특성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 시 편

본 실험에 사용된 제품의 형상은 그림 1에 나타낸 바와 같이 Cross packed GECCM이 6겹으로 적층한 것과 도장된 알루미늄을 탄소강 볼트(내부 티타늄 슬리브)를 이용하여 서로 연결된 것이다. Ti은 Grade 2를 사용하였으며 Al은 7175-T74, 볼트는 0.4%C 아공석강이다. GECCM의 적층 형태와 조직을 관찰하기 위해 적당한 크기로 절단한 후 주사전자현미경(SEM JEOL)을 이용하여 표면을 관찰하였다. 또한 각각의 부품을 해체하여 시험에 사용하였다.

2.2 양극분극시험

제품에서 Al, bolt, GECCM으로 각각 분리하고 Ti를 적당한 크기로 절단한 다음, Al, bolt, Ti는 피복동선을 시편의 한 면에 경납을 이용하여 연결한 뒤 시편을 호마이카로 고정시켰고, GECCM의 경우 시편자체를 가지고 실험하였다. 시편 표면을 SiC 연마지로 600까지 연마한 다음 적당한 면적을 노출시킨 후 나머지 부분을 에폭시 수지로 덮어 주었다. 포텐시오스타트(Gamry DC105)를 이용하였으며, 사용한 기준전극은 포화감홍전극(SCE)를 이용하였으며, 상대전극은 고밀도 흑연봉을 이용하였다. 실험용액은 탈기를 하지 않은 안동지역의 수도수, 1% NaCl, 3.5% NaCl이었으며, 온도는 20 °C로 고정하였고, 1 mV/sec의 속도로 주사하였다.

2.3 침지 실험

Al, Bolt, Ti, GECCM을 적당한 크기로 절단한 다음 부식속도를 구하기 위해 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 GECCM, Bolt, 도장된 Al이 모두 나타나게 적당한 크기로 자른 다음, 수도수, 1% NaCl, 3.5% NaCl 수용액에 침지하여 시편의 변화를 관찰하였다. GECCM이 물을 흡수하는 성질 때문에 부식속도를 측정하지 않고 각 부재에서 나타나는 부식현상을 관찰하였다. 실험은 모두 상온에서 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시편의 형상

그림 1은 4종의 구성부재들이 체결된 제품에 대한 외관 사진이다. 그림 1의 (a)는 체결된 제품, (b)는 제품을 절단한 바깥쪽 면의 GECEM, (c)는 안쪽 면의 GECEM, (d~d''')는 절단된 면의 GECEM을 보여주고 있다. 그림 1(a)에서 상부의 검은 부분이 GECEM으로 이루어진 부재이고 아래 부분은 페인팅된 알루미늄 부재이며 이 두 부재를 탄소강 볼트로 체결하고 있는 상태이다. 그림 1(b)~그림 1(d)는 GECEM을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. 그림 1(b)는 바깥쪽 면의 GECEM을 관찰한 것으로 fiber가 종방향으로 되어 있다. fiber의 길이는 긴 것도 있고 짧은 것도 있음을 알 수 있다. 그림 1(c)는 안쪽 면의 GECEM을 관찰한 것으로 fiber가 사선 방향으로 되어 있다. fiber의 길이는 그림 1(b)에서 본 것과 마찬가지로 긴 것도 있고, 짧은 것도 있다. 그림 1(b)와 그림 1(c)를 보면, fiber의 크기는 동일하고 방향만 틀린 것으로 보아 동일한 Cross packed GECEM을 방향을 약간 틀어서 적층한 것으로 보인다. 그림 1(d)는 적층된

GECEM의 경계를 저배율(x300)로 나타낸 사진이다. 그림 1(d')에서 그림 1(d'')는 그림 1(d)의 하층 부분을 배율별로 관찰한 것이다. 충전된 GECEM 중간 중간에 구멍이 있는 것처럼 보이는데 그 이유는 fiber의 길이가 서로 틀리기 때문인 것으로 보인다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이, GECEM이 완전히 충전된 것이 아니고 어느 정도의 거리를 가지고 적층되어 있기 때문에 부식 환경에 노출될 경우, 수분을 흡수하는 현상이 나타날 가능성이 있다.

3.2 양극분극시험

그림 2는 탈기 하지 않은 20 °C, 여러 수용액 중에서의 분극거동을 나타낸 그림이다. 그림 2(a)는 수돗물 중에서의 분극곡선, 그림 2(b)는 1% NaCl 중에서의 분극곡선, 그림 2(c)는 3.5% NaCl 중에서의 분극곡선이다.

그림 2(a)의 수돗물 중에서의 분극곡선을 보면, Ti의 경우 부식전위는 -564 mV(SCE)로 매우 낮았으나 전위의 상승에 의하여 안정한 부동태를 형성하고 산소발생전위 이상에서도 전류의 증가가 보이지 않았는데 이는 Ti의 표면에 안정하고 두꺼운 산화피막이 성장함으로써 생긴 결과로 판

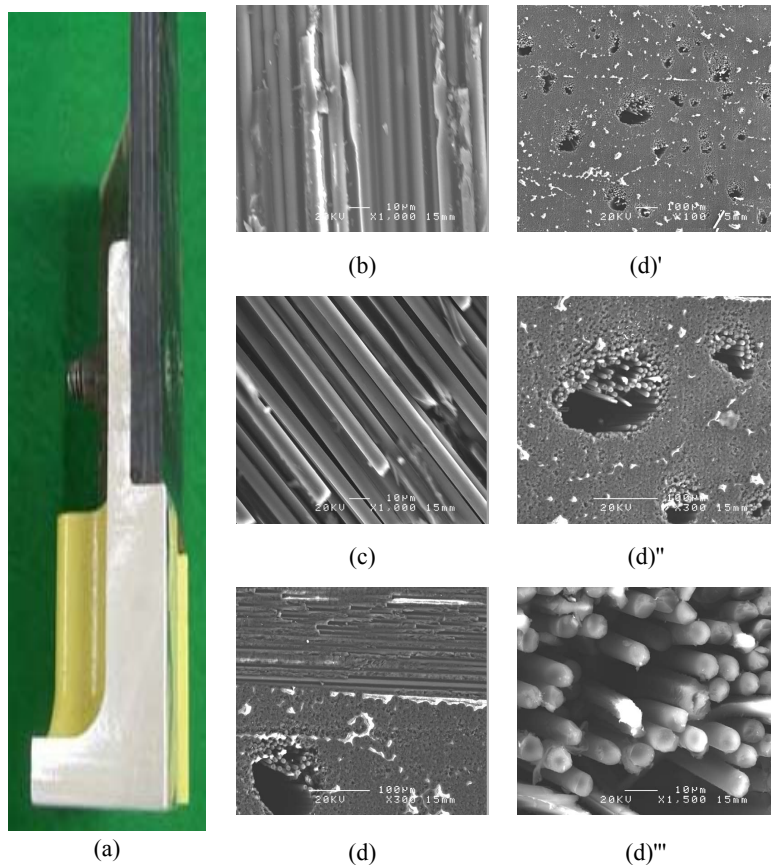


Fig. 1. Morphology of (a) carbon steel bolted GECEM/Al product, and (b) outer surface, (c) inner surface, (d~d''') cross packed sections of GECEM.

단된다. 알루미늄의 경우 부식전위가 -640 mV(SCE)이고, 전위의 상승에 의해 약간의 부동태를 보이다가 -302 mV(SCE)에서 공식이 일어나 전류가 증가하였다. 수도수에서 알루미늄의 공식이 관찰되는 이유는 수도수의 소독을 위해 사용된 염소가스로 인한 잔류염소이온이 존재하기 때문으로 생각된다. 탄소강 볼트(표면 연마 후)의 경우, 부식전위가 Al보다 높은 -309 mV(SCE)며, 부동태를 형성하다가 -160 mV(SCE)에서 공식이 일어나 전류가 증가하였다. 한편 GECM의 경우, 낮은 전위에서부터 음극분극곡선을 구하고 양극분극곡선을 함께 얻었다. GECM의 경우 개방회로전위(ocp, open circuit potential)는 -49 mV(SCE)로 시편 중에서 가장 귀한 값을 보이고 있으며 양극분극에 의하여 전류가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 부식전위는 $GECM > Bolt > Ti > Al$ 순으로 낮아지는 것으로 나타났으며, 나머지 3가지 재료에 대하여 GECM은 언제나 음극으로 작용하고 있어 이들 재료의 갈바닉 부식을 촉진시킬 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 2(b)는 탈기 하지 않은 20 °C, 1% NaCl 수용액에서의 분극거동을 나타낸 그래프이다. Al의 경우, 부식전위가 -712 mV(SCE)이고, 부식전위에서부터 부동태를 보이지 않고 전류가 급격히 증가하였다. 탄소강 볼트(표면 연마 후)의 경우, 부식전위는 -404 mV(SCE)로 Al보다 더 높은 부식전위를 보이고 있다. Ti의 경우, 부식전위는 -457 mV(SCE)이고, 수도수에서와 동일하게 매우 안정한 부동태를 형성하였다. GECM의 경우, 개방회로전위는 -113 mV(SCE)이다. 수도수에서와 마찬가지로 부식전위는 $GECM > Bolt > Ti > Al$ 순으로 낮아지는 것으로 나타났다.

그림 2(c)는 탈기하지 않은 20 °C, 3.5% NaCl 수용액에서의 분극거동을 나타낸 그래프이다. Al의 경우, 부식전위는 1% NaCl 수용액보다 낮은 -765 mV(SCE)였으며, 부식전위를 지나면서 전류가 급격히 증가하였다. 탄소강 볼트(표면 연마 후)의 경우, 부식전위는 -391 mV(SCE)이고, 부식전위를 지나면서 전류가 급격히 증가하였다. Ti의 경우 부식전위는 탄소강 볼트보다 낮은 -594 mV(SCE)였으며, 앞의 수용액에서와 마찬가지로 매우 안정한 부동태를 형성하였다. GECM의 경우 개방회로전위는 -124 mV(SCE)였다. 위 두 용액에서와 마찬가지로 부식전위는 $GECM > Bolt > Ti > Al$ 순으로 낮아지는 것으로 나타났다.

그림 3은 탈기하지 않은 수도수, 1% NaCl, 3.5% NaCl 중에서 구한 분극곡선을 재료별로 비교한 것이다. 그림 3(a)는 Al의 분극거동에 미치는 부식환경의 영향을 나타낸 그래프이다. 부식전위는 수도수에서 가장 높고 3.5% NaCl에서 가장 낮았으며, 수도수에서는 부동태 영역이 뚜렷하게 나타났으나 염수에서는 농도에 관계없이 부동태 거동을 보이지 않았다. 그림 3(b)는 탄소강 볼트(표면 연마 후)의 분극거동에 미치는 부식환경의 영향을 나타낸 그래프이다. 부식전

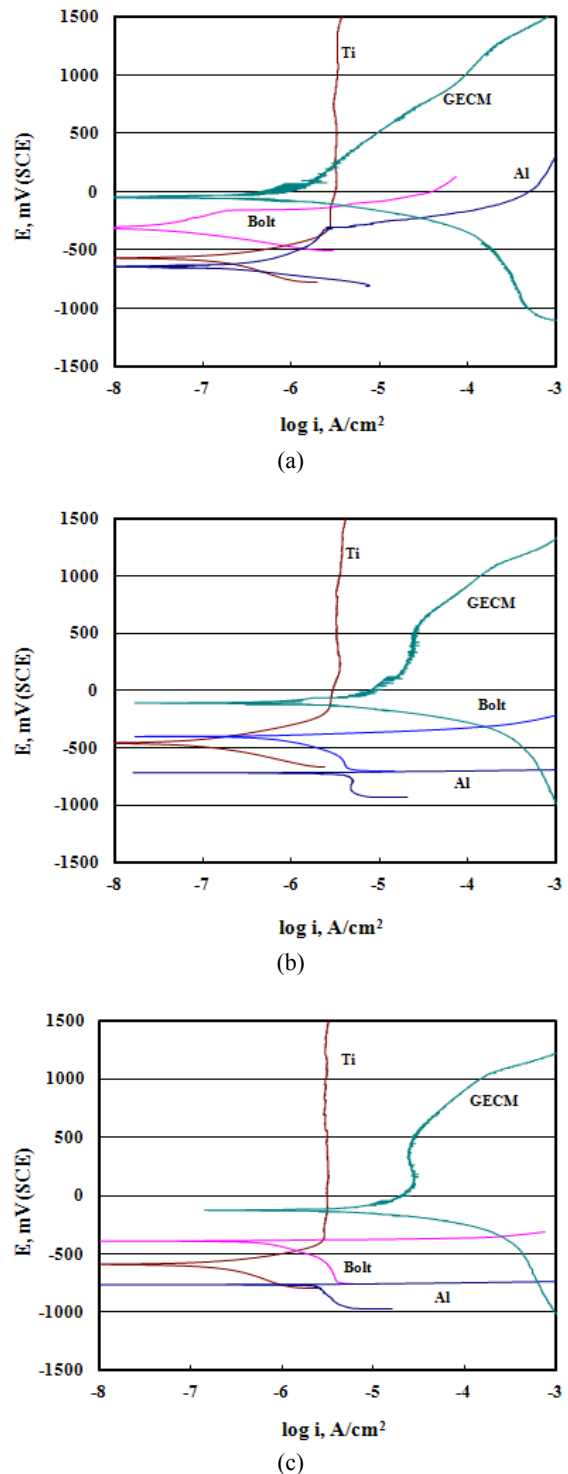


Fig. 2. Polarization curves in aerated solutions at 20 °C (Scanning rate; 1 mV/sec); (a) tap water, (b) 1% NaCl, (c) 3.5% NaCl.

위는 1% NaCl에서 가장 낮았으나 염수 중에서는 유사했으며(표면을 연마하지 않은 볼트 그 자체에 대한 1% NaCl 중에서의 분극의 경우, 부식전위가 -991 mV(SCE)로서 표면에 아연성분이 코팅된 상태이기 때문이며 나머지 거동

은 유사하게 나타났)다, 수도수에서 가장 높게 나타났다. 수도수에서는 부동태 거동을 보이거나 염수 중에서는 보이지 않았다. 그림 3(c)는 Ti의 분극거동에 미치는 부식환경의 영향을 나타낸 그래프이다. 부식전위는 1% NaCl에서 가장 높고, 3.5% NaCl에서 가장 낮았다. 세 용액에서 모두 안정한 부동태를 형성한 것을 볼 수 있다. 세 용액 모두에서 산소 발생에 의한 전류의 급격한 증가는 관찰되지 않았다. 그림 3(d)는 GECM의 분극거동에 미치는 부식환경의 영향을 나타낸 그래프이다. 개방회로전위는 거의 유사하게 나타났으나, 수도수 중에서의 전류밀도가 가장 작게 나타났고 염수 중에서는 유사하게 나타났다.

표 1은 이상의 분극시험에서 구한 개방회로전위를 요약한 것이며, 그림 4는 시편별 개방회로전위를 도표화한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, GECM의 개방회로전위가 가장 귀하게 나타났고 탄소강 볼트>Ti>Al의 순서로 비하게 나타났다. 이러한 경향은 갈바닉 시험에서의 부식경향을 예측해 볼 수

있는 중요한 자료가 될 것이다. 한편 Ti을 제외한 시편에서 수도수에서의 부식전위가 가장 귀하게 나타났으며, NaCl의 농도가 증가할수록 부식전위가 낮아지고 있음을 알 수 있다.

3.3 침지 실험

그림 5(a)는 상온의 수도수 중에 단독으로 침지한 Ti시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시

Table 1. Open circuit potentials of test materials in aerated 3 solutions

Materials	ocp (unit; mV(SCE))		
	tap water	1% NaCl	3.5% NaCl
Al	-640	-712	-765
Bolt(polished)	-309	-404	-391
GECM	-49	-113	-124
Ti	-564	-457	-594

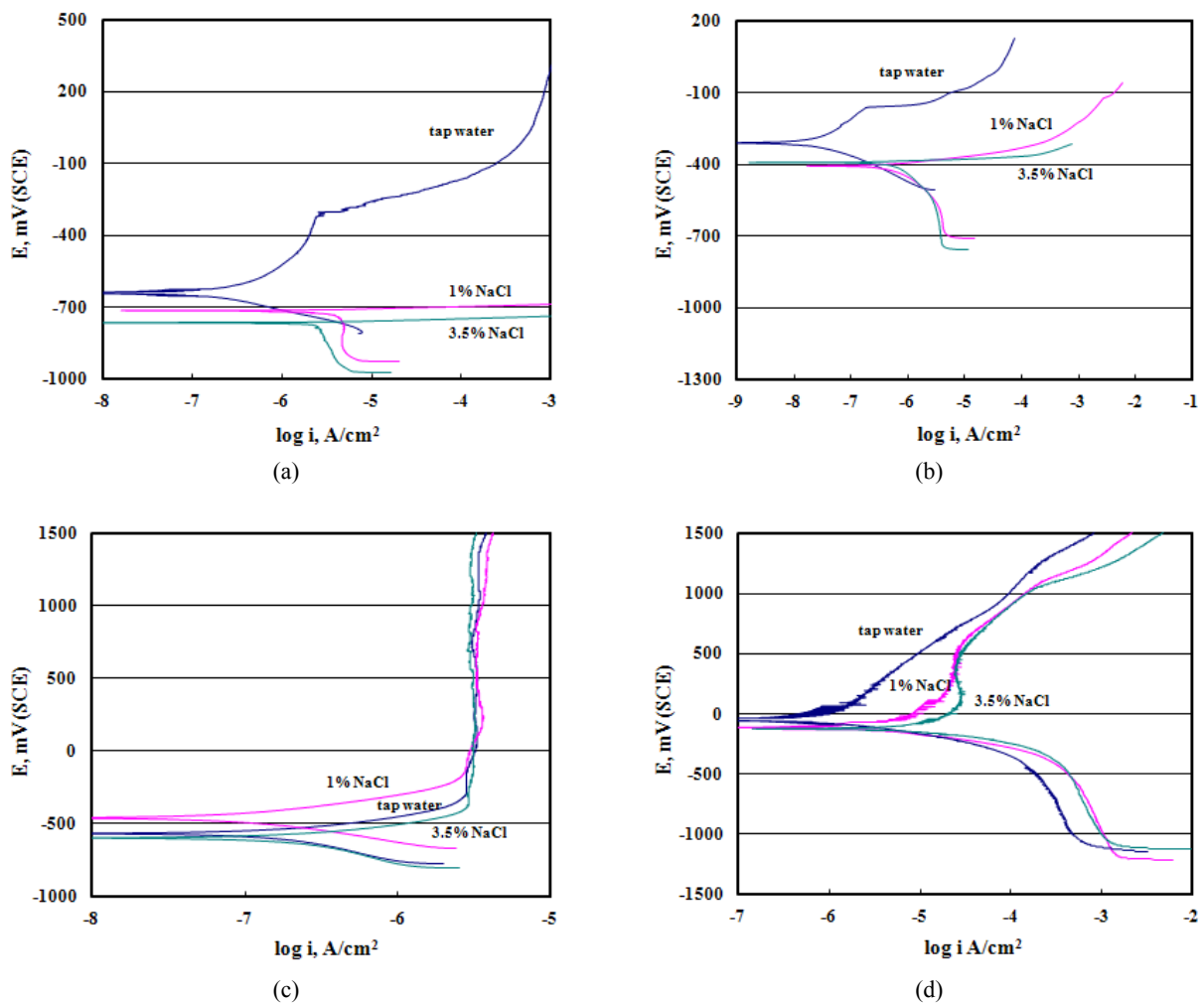


Fig. 3. Polarization curves of 4 materials at 20°C(Scanning rate; 1mV/sec); (a) Al, (b) Bolt, (c) Ti, (d) GECM.

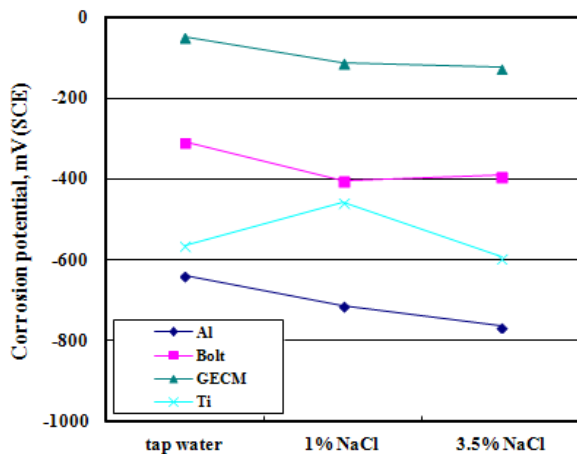


Fig. 4. Effect of test solutions on the corrosion potential of carbon steel, Al, GECM, and Ti (Test temperature ; 20°C).

험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일함을 알 수 있으며, 50일, 70일, 90일 간 침지한 경우는 표면 광택이 약간 변화된 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 상온의 수도수 중에 단독으로 침지한 GECM의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일하지만 그 이후는 매우 검게 변색되었으며 90일째는 적층된 fiber의 형상을 유추할 수 있는 모양의 외관을 보이고 있다. 그림 5(c)는 상온의 수도수 중에 단독으로 침지한 Al시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일함을 알 수 있다. 그런데 침지시간 50일의 경우는 표면에 흰색의 물질이 관찰되거나 시편 광택은 어느 정도 유지된 모양을 하고 있다. 70일간의 침지시험 후에는 표면에 흰색의 물질이 관찰되고 표면이 검게 변화되었으며 90일간 침지한 경우는 표면 광택이 검게 변화되고 흰색 물질이 표면에 많이 생성되어 있다. 흰색의 물질은 수도수 중에 들어 있는 미량의 염소이온에 의하여 알루미늄이 부식된 부식생성물로 확인되었다. 그림 5(d)는 상온의 수도수 중에 단독으로 침지한 탄소강 볼트 시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 표면에 흰색의 물질이 관찰되고 있으며, 50일, 70일, 90일 간 침지한 경우에도 유사한 외관을 보이고 있다. 주목할 점은 붉은 녹이 관찰되지 않는 점이다. 탄소강 볼트의 표면에 형성된 부식생성물을 분석한 결과, 아연이 다량 검출되었다. 따라서 탄소강 볼트의 제작 시 아연이 포함된 물질로 표면처리된 볼트임을 알 수 있다. 따라서 표면의 아연 성분 때문에 부식전위도 낮게 측정되고 침지시험 시 붉은 녹이 생성되지 않았음을 알 수 있다.

그림 6은 1% NaCl 용액 중에서의 침지시험 전후의 시편

외관을 보여주고 있다. 시험재료는 Ti, GECM, Al 및 탄소강 볼트였으며, 침지시간은 25일, 50일, 70일 및 90일 동안이었다. 그림 6(a)는 상온의 1% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 Ti시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일함을 알 수 있으며, 50일, 70일, 90일 간 침지한 경우는 표면 광택이 약간 변화된 것을 알 수 있다. 그림 6(b)는 상온의 1% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 GECM의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일하지만 그 이후는 매우 검게 변색된 외관을 보이고 있다. 그림 6(c)는 상온의 1% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 Al시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 표면에 흰색의 부식생성물이 관찰되며 침지시간이 길어질수록 그 정도가 증가하고 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이는 수도수보다 더 다량의 첨가된 염소이온에 의해서 알루미늄이 부식되고 있음을 알 수 있다. 그림 6(d)는 상온의 1% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 탄소강 볼트 시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 50일째의 외관은 표면에 흰색의 물질이 관찰되고 붉은 녹이 일부 보이나 70일, 90일 간 침지한 경우에는 붉은 녹이 형성되고 침지시간이 길어질수록 붉은 녹의 양이 더 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 탄소강 볼트 표면에 코팅된 아연 성분이 침지시험 25일까지는 탄소강을 보호하다가 그 이후의 침지시간에는 그 보호 기능이 상실되어 소지금속인 탄소강이 부식되어 붉은 녹이 생성되고 침지시간이 길어질수록 부식의 정도가 더 증가하였음을 알 수 있다.

그림 7은 3.5% NaCl 용액 중에서의 침지시험 전후의 시편 외관을 보여주고 있다. 시험재료는 Ti, GECM, Al 및 탄소강 볼트였으며, 침지시간은 25일, 50일, 70일 및 90일 동안이었다. 그림 7(a)는 상온의 3.5% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 Ti시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일함을 알 수 있으며, 50일, 70일, 90일 간 침지한 경우는 표면 광택이 약간 변화된 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 상온의 3.5% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 GECM의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 침지시험 전 시편의 외관과 거의 동일하지만 그 이후는 매우 검게 변색된 외관을 보이고 있다. 그림 7(c)는 상온의 3.5% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 Al시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 25일째의 외관은 표면에 흰색의 부식생성물이 관찰되며 침지시간이 길어질수록 그 정도가 증가하고 더 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이는 수도수 및 1% NaCl 용액보다 더 다량의 첨가된 염소이온에 의해서

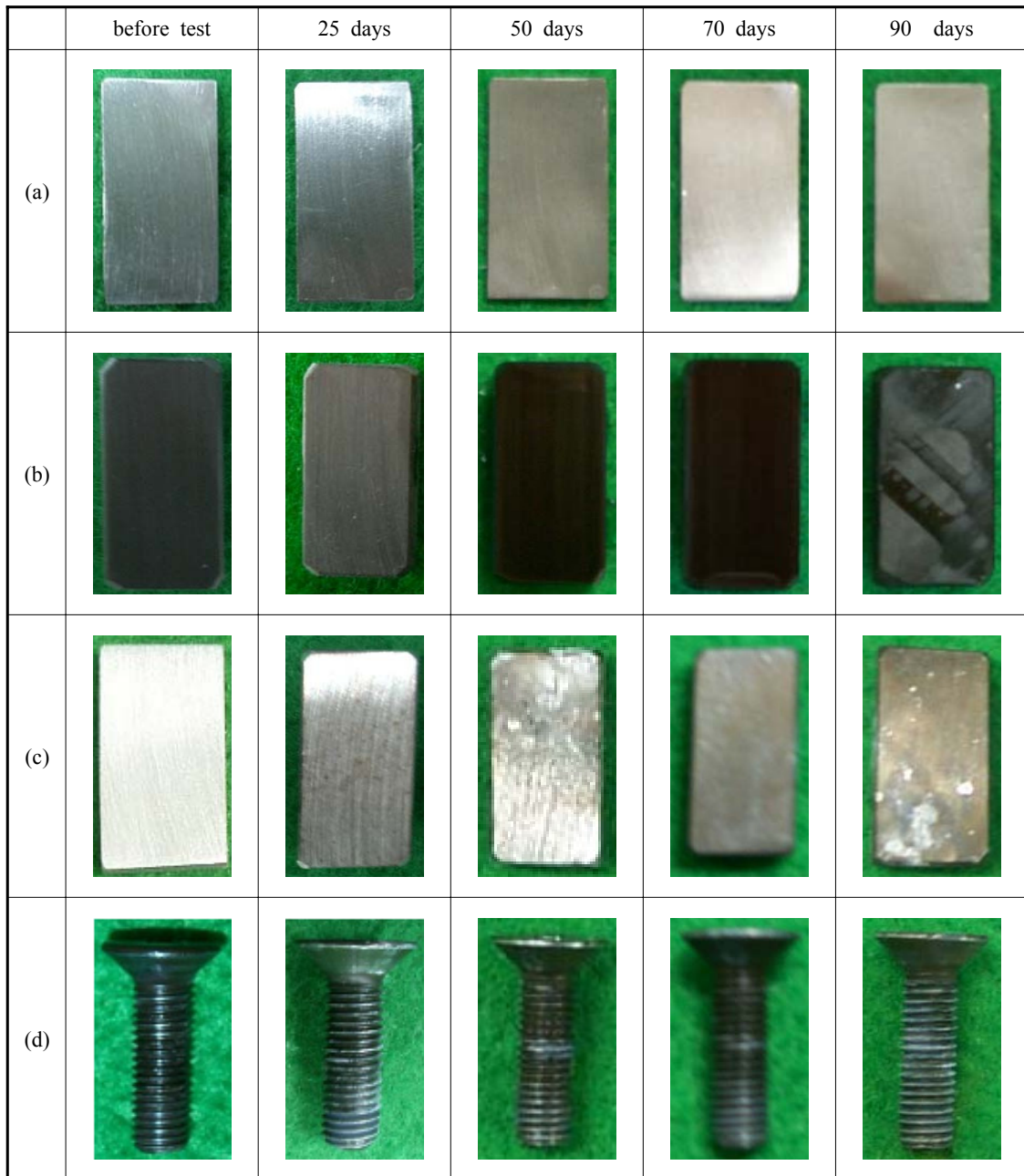


Fig. 5. Surface appearance after 0, 25, 50, 70, 90 days immersion tests in tap water; (a) Ti, (b) GECM, (c) Al, (d) Bolt.

알루미늄이 부식되고 있음을 알 수 있다. 그림 7(d)는 상온의 3.5% NaCl 용액 중에 단독으로 침지한 탄소강 볼트 시편의 외관에 미치는 침지시간의 영향을 보여주고 있다. 침지시험 후 50일째의 외관은 표면에 흰색의 물질과 붉은 녹이 관찰되고 있으나 70일, 90일 간 침지한 경우에는 붉은 녹이 형성되고 침지시간이 길어질수록 붉은 녹의 양이 더 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 탄소강 볼트 표면에 코팅된 아연 성분이 침지시험 25일까지는 탄소강을 보호하다가 그 이후의 침지시간에는 그 보호 기능이 상실되어 소지금속인 탄소강

이 부식되어 붉은 녹이 생성되고 침지시간이 길어질수록 부식의 정도가 더 증가하였음을 알 수 있다.

이상의 침지시험 결과를 요약하면, 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. 대표적으로 90일째의 부식속도를 보면, 수도수에서는 0.1 μm

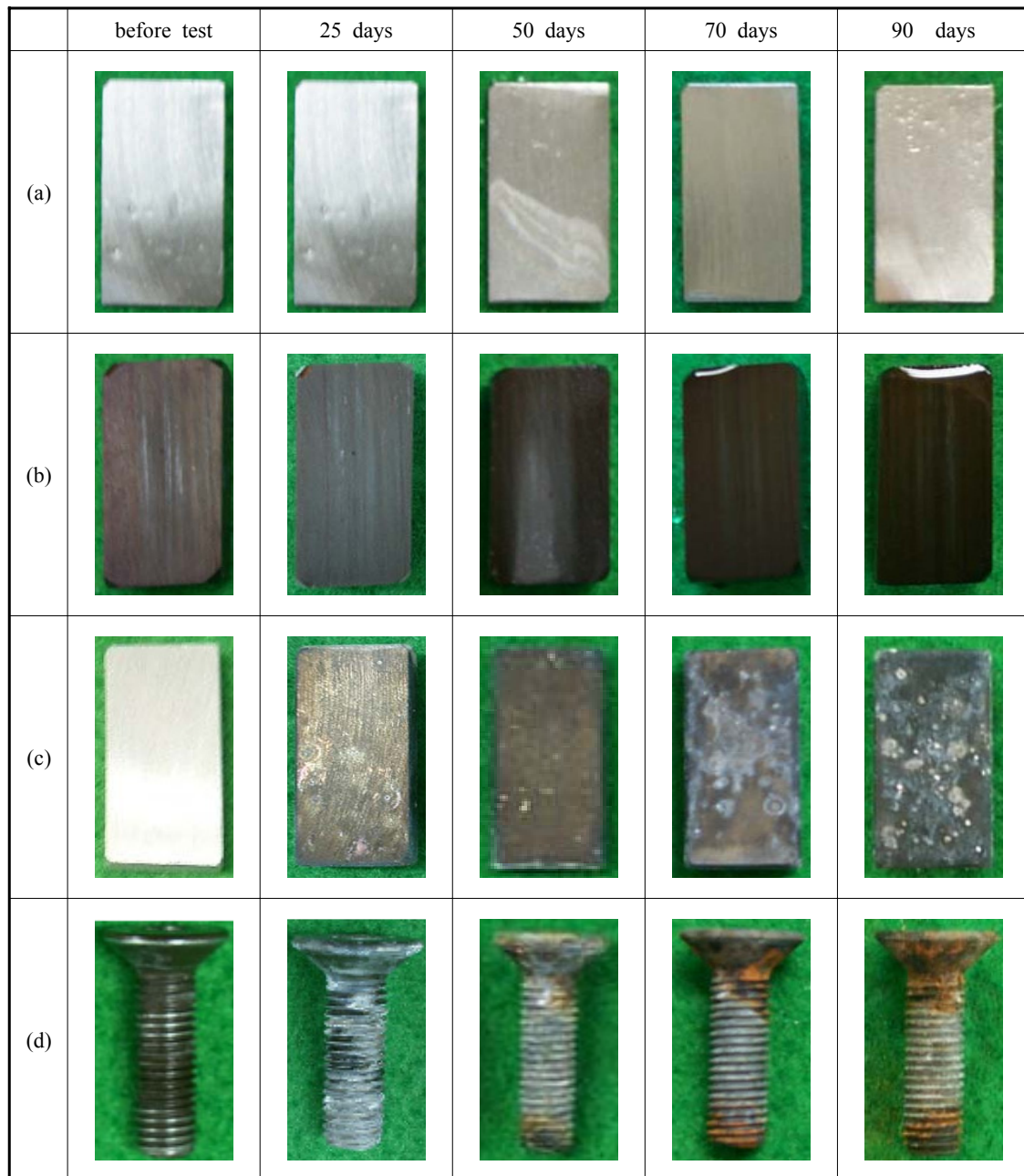


Fig. 6. Surface appearance after 0, 25, 50, 70, 90 days immersion tests in 1% NaCl; (a) Ti, (b) GECM, (c) Al, (d) Bolt.

/y, 1% NaCl 용액 중에서는 $40.7 \mu\text{m}/\text{y}$, 3.5% NaCl 용액 중에서는 $31.6 \mu\text{m}/\text{y}$ 의 속도를 보이고 있다. 알루미늄은 수도수에서도 상당한 크기의 부식이 관찰되고 있으며, 시험초기에는 1% NaCl 중에서의 부식속도가 더 크다가 시간이 장기화되면서 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도가 더 크게 나타났다. 대표적으로 90일째의 부식속도를 보면, 수도수 중에서는 $10.2 \mu\text{m}/\text{y}$, 1% NaCl 용액 중에서는 $17.0 \mu\text{m}/\text{y}$, 3.5% NaCl 용액 중에서는 $21.7 \mu\text{m}/\text{y}$ 의 속도를 보이고 있다.

그림 8은 침지 용액에 따른 Al 및 Bolt의 부식속도를 나타

낸 것이다. Al의 경우는 침지 후 50일째까지는 1% NaCl 수용액에서 침지했을 때의 부식속도가 가장 컸으나, 그 이후부터는 3.5% NaCl 수용액에서 침지했을 때 부식속도가 가장 작았다. 수도수에 침지했을 때가 실험이 끝날 때까지 부식속도가 가장 작았다. Bolt의 경우는 침지 실험이 끝날 때까지 1% NaCl 수용액에서의 부식속도가 가장 컸으며 붉은 녹이 40일째부터 나타났으나 3.5% NaCl 수용액에서는 붉은 녹이 55일째부터 관찰되었다. 한편 수도수에서의 볼트의 부식속도가 거의 나타나지 않았다.

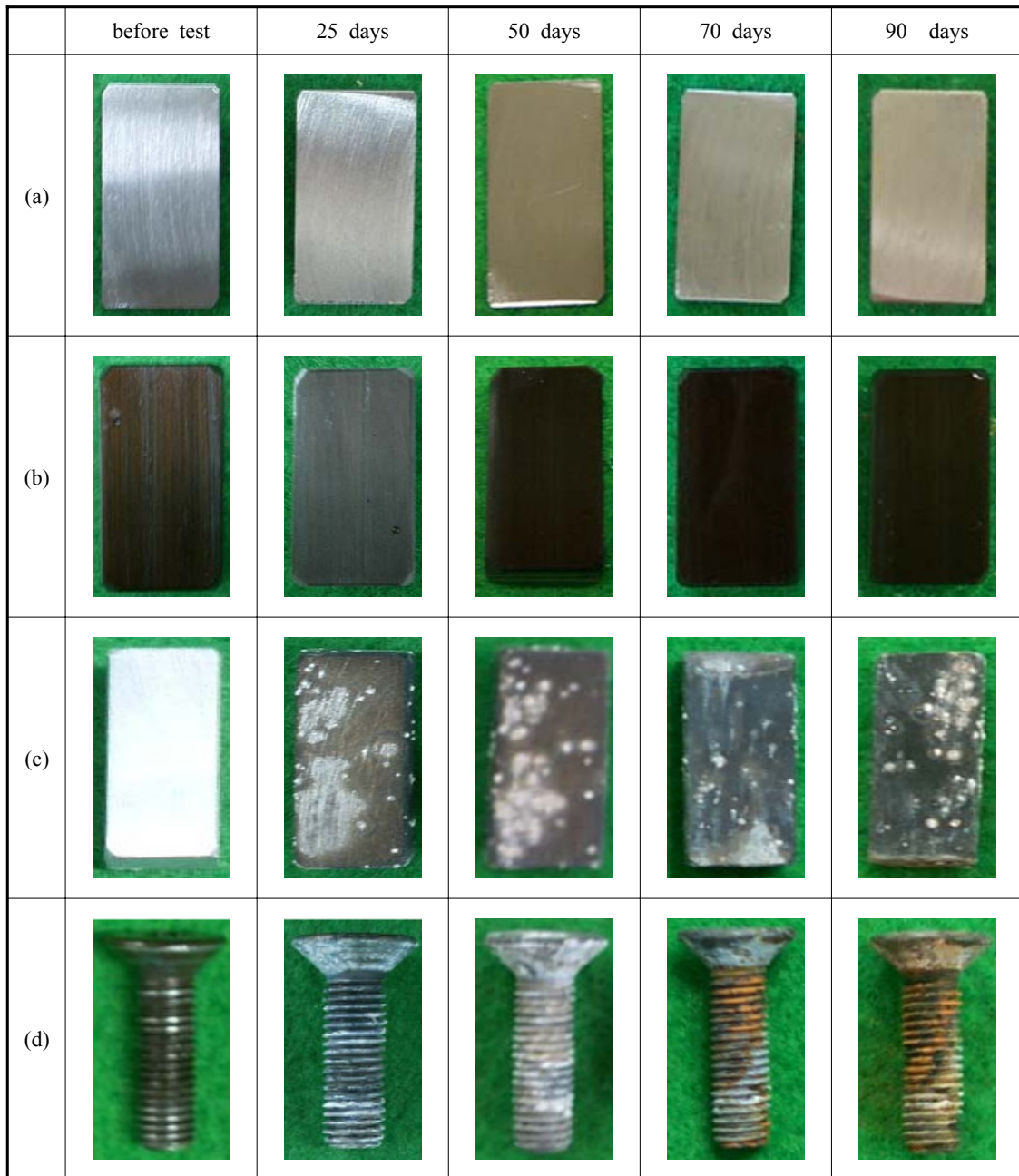


Fig. 7. Surface appearance after 0, 25, 50, 70, 90 days immersion tests in 3.5% NaCl; (a) Ti, (b) GECM, (c) Al, (d) Bolt.

이상의 결과를 요약하면, 단독시험의 침지시험 결과, 부식 용액과 관계없이 Ti과 GECM의 부식손상은 관찰되지 않았다.

볼트의 경우 수도수에서의 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. 대표적으로 90일째의 부식속도를 보면, 수도수 0.1 $\mu\text{m}/\text{y}$, 1% NaCl

40.7 $\mu\text{m}/\text{y}$, 3.5% NaCl 31.6 $\mu\text{m}/\text{y}$ 의 속도를 보이고 있다.

알루미늄은 수도수에서도 상당한 크기의 부식이 관찰되고 있으며, 시험초기에는 1% NaCl 중에서의 부식속도가 더 크다가 시간이 장기화되면서 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도가 더 크게 나타났다. 대표적으로 90일째의 부식속도를 보면, 수도수 10.2 $\mu\text{m}/\text{y}$, 1% NaCl 17.0 $\mu\text{m}/\text{y}$, 3.5% NaCl 21.7 $\mu\text{m}/\text{y}$ 의 속도를 보이고 있다.

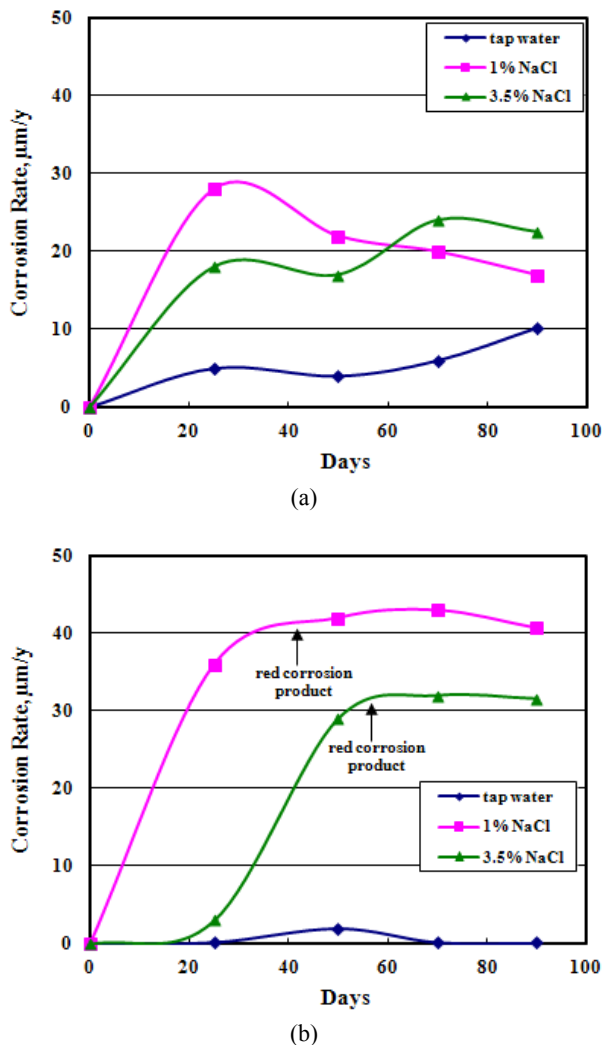


Fig. 8. Effects of immersion time and test solutions on corrosion rate of (a) Al and (b) Bolt.

4. 결 론

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) 단독시험의 침지시험 결과, 부식용액과 관계없이 Ti과 GECM의 부식손상은 관찰되지 않았다. 수도수의 경우, 볼트에서의 부식은 거의 나타나지 않았으나, 염수의 경우, 1%

NaCl 용액 중에서의 부식속도가 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도보다 더 크게 나타났으며, 붉은 녹이 발생하는 시점도 더 빠르게 나타났는데 이는 표면의 아연코팅층에 기인된 것으로 보인다. 한편 알루미늄은 수도수에서도 상당한 크기의 부식이 관찰되고 있으며, 시험초기에는 1% NaCl 중에서의 부식속도가 더 크다가 시간이 장기화되면서 3.5% NaCl 용액 중에서의 부식속도가 더 크게 나타났다. 이러한 거동은 염소이온과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Y. R. Yoo, Y. I. Son, G. T. Shim, Y. H. Kwon, and Y. S. Kim, *Corro. Sci. Tech.*, **8**, 27 (2009).
2. D. Lee, *Mechanics and Processing of Composite Materials*, Seongandang (1993).
3. T. J. Reinhart, *Composites ASM International*, p. 683m Ohio (1987).
4. H. V. Gerlach, *Composite Motor Cases of Tactical Rockets*, AIAA-88-3327.
5. A. K. Munjal, *Use of Fiber-Reinforced Composites in Rocket Motor Industry*, p. 1, SAMPE Quarterly, January (1986).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. F. Bellucci, A. Di Martino, and C. Liberti, *J. Appl. Electro. Chem.*, **16**, 15 (1986).
11. F. Lu, Q. P. Zhong, and C. X. Cao, *Acta Metall. Sin.*, **16**, 41 (2003).
12. F. Lu, X. Zhang, Z. Tang, Q. Zhong, and C. Cao, *Mater. Process*, **4**, 16 (2004).
13. F. Bellucci, *Corrosion*, **47**, 808 (1991).
14. F. Bellucci, *Corrosion*, **48**, 281 (1992).
15. Y. S. Kim, H. K. Lim, Y. I. Sohn, Y. R. Yoo, and H. Y. Chang, *Corros. Sci. Tech.*, **9**, 39 (2010).