

## 몰타르 시험편(W/C:0.4) 내부철근의 분극특성에 미치는 재령년수의 영향

문 경 만<sup>1</sup> · 원 종 필<sup>1</sup> · 박 동 현<sup>1</sup> · 이 성 열<sup>1,†</sup> · 정 진 아<sup>2</sup> · 이 명 훈<sup>2</sup> · 백 태 실<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교 공대 조선기자재공학부

<sup>2</sup>한국해양대학교 해사대학 기관시스템 공학부

<sup>3</sup>포항대학교 제철산업과

(2014년 1월 11일 접수, 2014년 2월 21일 수정, 2014년 2월 24일 채택)

## The Effect of Passing Aged Years to the Polarization Characteristics of Embedded Steel Bar of Mortar Specimen(W/C:0.4)

Kyung-Man Moon<sup>1</sup>, Jong-Pil Won<sup>1</sup>, Dong-Hyun Park<sup>1</sup>, Sung-Yul Lee<sup>1,†</sup>,  
Jin-A Jeong<sup>2</sup>, Myeong-Hoon Lee<sup>2</sup>, and Tae-Sil Baek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ. Busan Korea

<sup>2</sup>Dept. of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ. Busan Korea

<sup>3</sup>Dept. of Steel Industry, Pohang College, Pohang City, Korea

(Received January 11, 2014; Revised February 21, 2014; Accepted February 24, 2014)

The structures of reinforced concrete has been extensively increased with rapid development of industrial society. Furthermore, these reinforced concretes are easy to expose to severe corrosive environments such as sea water, contaminated water, acid rain and seashore etc.. Thus, corrosion problem of inner steel bar embedded in concrete is very important in terms of safety and economical point of view. In this study, multiple mortar test specimen(W/C:0.4) with six types having different cover thickness each other was prepared and was immersed in seawater solution for five years to evaluate the effect of cover thickness and immersion years to corrosion property of embedded steel bar. And the polarization characteristics of these embedded steel bars was investigated using electrochemical methods such as measuring corrosion potential, cathodic polarization curve, and cyclic voltammogram. At the beginning of immersion, the corrosion potentials exhibited increasingly nobler values with increasing cover thickness. However, after immersed for 5 years, the thicker cover of thickness, the corrosion potentials shifted in the negative direction, and the relationship between corrosion potential and cover thickness was not in good agreement with each other. Therefore, it is considered that the thinner cover of thickness, corrosive products deposited on the surface of the embedded steel bar plays the role as a resistance polarization which is resulted in decreasing the corrosion rate as well as shifting the corrosion potential in the positive direction. As a result, it seemed that the evaluation which corrosion possibility of the reinforced steel would be estimated by only measuring the corrosion potential may not be a completely desirable method. Therefore, it is suggested that we should take into account various parameters, including cover thickness, passed aged years as well as corrosion potential for more accurate assessment of corrosion possibility of reinforced steel which is exposed to partially or fully in marine environment for long years.

**Keywords :** reinforced concrete, corrosion potential, impedance, cover thickness, W/C

### 1. 서 론

최근 산업사회의 급격한 발전과 함께 철근 콘크리트 구조물의 사용 빈도는 날로 증가하고 있는 추세에 있다. 그리고

이러한 철근 콘크리트 구조물들은 가혹한 부식 환경인 해안 또는 해수 중에 노출되는 경우가 많으며 이 경우 구조물의 내구성 및 안전성 측면에서 콘크리트 내부의 철근의 부식 문제는 매우 중요한 문제로 대두되어 왔다<sup>1,2)</sup>. 특히 하천의 모래 고갈로 인한 해사 사용의 증대와 해양 분위기에서 해수의 침입으로 염소이온에 의한 철근의 부식은 날로 그 심각성이

<sup>†</sup> Corresponding author: sylee@kmou.ac.kr

더해가고 있는 실정이며 이에 대한 대책으로 다양한 방식법이 적용되고 있다<sup>36)</sup>. 뿐만 아니라 이러한 철근콘크리트 구조물의 부식특성에 미치는 피복두께와 W/C(물, 시멘트 비) 및 염소이온의 영향에 대한 연구도 많이 보고 되고 있다<sup>7-11)</sup>. 그러나 지금까지 상기의 실험을 위하여 실험실에서 소형의 시험편을 실험조건에 따라 다량의 개수를 제작하였으므로 각각의 시험편의 제작조건이 다를 수 있다. 따라서 좀 더 확실적인 신뢰성 있는 실험결과 도출이 용이하지 않았으며 경제적, 시간적 낭비를 초래하는 어려움이 상존해 왔다. 따라서 본 연구에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위해서 피복두께를 각각 다르게 한 복합체시험편(6개의 철근을 하나의 거푸집에 장착)을 제작하게 되었다. 즉 거푸집에 들어가는 물, 모래 및 시멘트를 균등하게 배합된 몰타르(W/C:0.4)를 동일 조건에서 타설하여 시험편을 제작하였다. 그리고 철근콘크리트의 부식특성에 미치는 재령년수(침지초기와 침지 5년후)와 피복두께의 영향을 부식전위와 음극분극곡선 및 사이클릭 볼타모그램을 측정하여 비교 고찰하였다. 따라서 복합체 시험편을 이용하여 철근의 부식특성에 미치는 재령년수와 피복두께의 영향을 전기화학적 방법으로 고찰할 실험결과는 향후 가혹한 부식환경 하에 사용되어 지는 철근구조물의 설계와 제작 및 유지관리에 좋은 참고 자료가 되리라 기대된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험편 제작

두께 1cm의 나무판자로 가로 37cm, 세로 20cm, 높이 17cm의 거푸집을 제작하고 거푸집의 가로 양측면에 대각선 방향으로 위로 부터 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm 및 12cm의 위치에 직경 1.5cm의 구멍(구멍 간격: 5cm)을 내었다. 그리고 직경 1cm, 길이 26cm의 원형 철근(KSD 3504)의 중앙 표면에 샌드페이퍼 #200에서 #2000번 까지 연마하고 아세톤 탈지 후 1cm만 남기고 나머지는 실리콘 수지로 절연 시켰다. 타설 전 상기한 철근을 거푸집의 구멍을 통하여 삽입설치하고 1cm<sup>2</sup>의 표면적이 위쪽으로 향하도록 고정 시켰다(Fig.1 참조). 그리고 거푸집에 타설한 몰타르의 모래:시멘트 비는 2:1이며 물,시멘트 비 즉 W/C는 0.4로 하였다. 사용된 시멘트는 국내 S사의 제 1종 포트랜드 시멘트를 사용하였으며 시멘트의 화학조성은 Table 1과 같다.

Table 1. The Chemical properties of ordinary portland cement

Item	Chemical Composition						Ignition Loss (ig.loss)	Insoluble Residue
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>		
Ordinary Portland Cement	21.0	4.5	2.5	36.5	0.9	1.0	0.5	0.2
	~	~	~	~	~	~	~	~
	22.5	6.0	3.5	66.0	3.3	2.0	1.3	0.9



Fig. 1. Mold box for conducting multiple test specimen and completed multiple test specimen for experiment.

그리고 사용된 골재는 건재상에서 판매하고 있는 모래를 수도수에 24시간 침지 시킨 후 충분히 세척하여 직경 1mm의 필터로 이물질을 제거하고 건조 시킨 후 사용하였다. 몰타르를 타설하고 20시간 후에 가로 33cm, 세로 12cm, 높이 10cm의 해수수조를 거푸집 몰타르의 상부에 설치 압착하여 고정 한 후 건조시켰다. 그리고 타설 5일 후 거푸집을 제거하고 10일 후 상부에 설치된 수조의 해수누수를 막기 위하여 수조와 몰타르 시험편 접촉부를 실리콘으로 실링 하였다. 타설 12일 후에 수조에 해수를 채웠다.

### 2.2 실험 조건

시험편 타설 12일 후에 완성된 복합체시험편의 상부수조에 해수를 채운 후 20일 후에 복합체시험편 옆으로 돌출된 철근에 전기화학 측정이 용이 하도록 동선을 고정시킨 후 피복두께 2cm, 4cm, 6cm, 8cm, 10cm 및 12cm 각각의 시험편에 대해 부식전위의 변화 등 전기화학적 실험을 실시하였다. 그리고 이들 각 시험편의 분극특성의 측정 시점은 침지 20일 후(이하 침지초기라 한다)와 침지 5년 후에 측정하여 피복두께와 재령 년수가 부식특성에 미치는 영향을 비교고찰 하였다. 그리고 시험편 상부 수조의 해수는 매월 2회 새로운 해수로 교환하였다.

부식특성의 측정은 해수수조 속에 기준전극과 대극(백금 전극)을 침지하여 측정하였다. 그리고 측정 시에 사용된 기준전극은 SCE전극이며 실험 장치는 Won A Tech사에서 구입한 CMS-100 프로그램이며 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

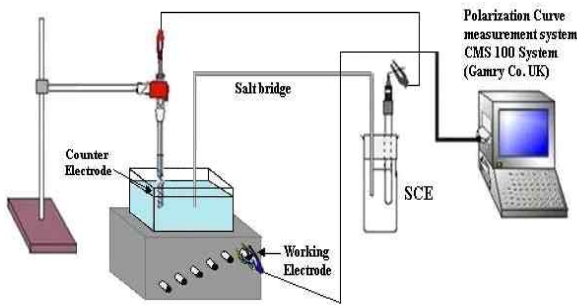


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus for measuring of polarization characteristics.

### 3. 실험 결과 및 고찰

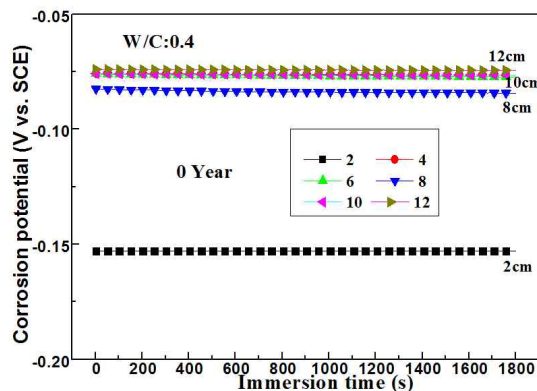


Fig. 3. Comparison of corrosion potentials with cover thickness measured in soon after immersion(0year) in natural seawater solution.

Fig. 3은 W/C 0.4의 몰타르 시험편의 경우 침지초기에 피복두께의 변화에 따른 부식전위의 변화를 나타내고 있다. 두께가 2cm인 경우 약 -0.153V의 가장 낮은 부식전위 값을 나타내었으며 피복두께가 12cm의 경우 약 -0.074V의 가장 높은 값을 나타 내었다. 그리고 Fig. 3에서 알 수 있듯이 피복 두께가 8cm의 경우 2cm에 비해서 현저하게 높은 -0.084V의 부식전위 값을 나타 내었으며 그 외의 피복두께에서는 현저한 차이를 보이지 않고 거의 같은 값을 나타 내고 있음을 알 수 있었다. 피복두께가 두꺼울수록 시험편 계면에서 철근 내부로 물과 용존산소 및 염소이온의 침투가 어렵기 때문에 시멘트의 수화반응(시멘트 + H<sub>2</sub>O → 세멘트 수화물 + Ca(OH)<sub>2</sub>)에 의해서 형성된 강 알칼리성 분위기이므로 내부 철근의 표면은 전위-pH도<sup>12)</sup>에 의하면 산화막이 형성되어 있으며 이들 산화막이 염소이온에 의해서 파괴되기 어렵기 때문에 부식전위가 높은 값을 나타 내는 것으로 생각 된다. 다만 부식전위의 측정시점이 해수에 노출 된지 불과 20일 후이므로 피복두께에 의한 극 미량의 저항분극의 영향도 배제할 수 없을 것으로 생각된다.

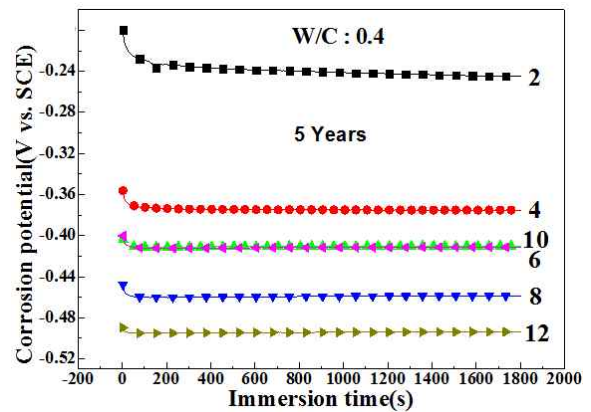


Fig. 4. Variation of corrosion potentials with cover thickness measured after immersed for 5 years in natural seawater solution.

Fig. 4는 침지 5년 후의 부식전위 변화를 나타내고 있다. 피복두께 12cm인 경우에 가장 낮은 부식전위 값을 나타 내었으며 피복두께가 2cm인 경우 가장 높은 부식전위 값을 나타 내었다. 그리고 피복두께가 4cm의 경우 두번 째로 높은 값을 나타 내었으며 10cm의 피복두께의 경우에는 8cm 보다 오히려 높은 값을 보여 주고 있음을 알 수 있다. 침지초기에는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 피복두께와 부식전위사이 좋은 상관관계를 나타내었으나 침지 5년 후에는 피복두께와 부식전위사이 상관관계가 완전히 일치하지는 않았으나, 피복두께가 두꺼울수록 오히려 낮은 값을 나타내는 경향이 있었다. 예를 들면, 피복 두께가 12cm인 경우 침지초기에는 가장 높은 값을 나타내었으나 침지 5년 후에는 가장 낮은 값을 나타내었으며 피복 두께가 2cm인 경우에는 침지초기에는 가장 낮은 값을 나타 내었으나 침지 5년 후에는 10,12cm의 피복두께보다 오히려 가장 높은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 콘크리트 내부 철근의 표면을 육안으로 직접 관찰 하는 것이 불가능하므로 ASTM C876<sup>13)</sup>에 의하면 부식 전위의 측정에 의해서 내부 철근의 부식가능성을 정성적으로 예측하는 자료를 제시하고 있다. Table 2와 Fig. 5는 상기한 자료를 바탕으로 침지초기와 침지 5년 후의 부식전위의 변화와 부식가능성에 대해서 비교 정리하였다. 침지초기에는 피복두께에 관계없이 전체적으로 높은 부식전위를 나타 내고 있으며 모든 피복두께의 부식가능 확률도 10%로 비교적 낮은 값 이었다. 그러나 침지 5년 후에는 피복두께가 2cm와 6cm인 경우 부식전위는 침지초기에 비해서 오히려 각각 27mV, 75mV의 높은 값을 나타 내었으며 피복두께가 8cm, 10cm 및 12cm의 경우에는 침지초기에 비해서 현저하게 부식전위가 낮은 값을 나타내었다. 결국 침지 5년 후에는 2, 4 및 6cm의 부식확율은 10% 그리고 8, 10 및 12cm의 경우 부식확율은 90%의 높은 값을 나타 내었다. 그리고 Fig. 5에서 알 수 있듯이 피복두께가 두꺼울수록 침지초기와 침지 5년

Table 2. Relationship between corrosion potentials and corrosion possibilities

Thick.	E <sub>cor</sub> (V)			Corro.Possib(%)	
	0 Year	5 Years	E <sub>s</sub> -E <sub>0</sub> (mV)	0 Year	5 Years
2	-0.153	-0.126	+27	10	10
4	-0.075	-0.116	-41	10	10
6	-0.076	-0.001	+75	10	10
8	-0.083	-0.450	-367	10	90
10	-0.076	-0.452	-376	10	90
12	-0.074	-0.521	-447	10	90

ASTM,C876, Ecor and Corro. Possibility  
 0~200mV : 10% -200mV~350mV : 50%  
 -350mV~500mV : 90%

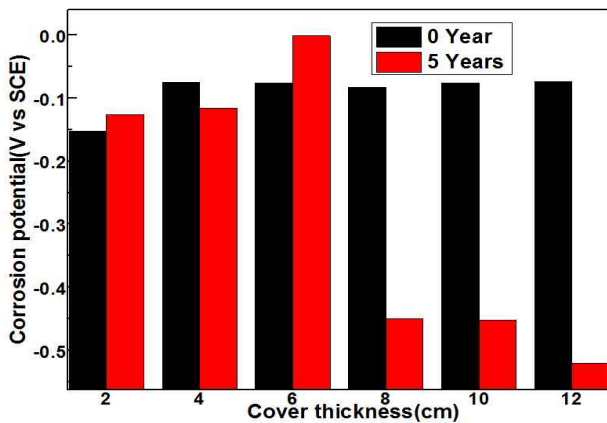


Fig. 5. Comparison of corrosion potential between 0 year and 5 years with cover thickness.

후의 부식전위의 변화폭이 피복두께가 얇은 경우보다 현저하게 큰 경향을 알 수 있다. 즉 침지 5년 후에는 피복두께가 8, 10 및 12cm의 부식전위가 2, 4 및 6cm의 부식전위보다 오히려 현저하게 낮은 값을 나타 내었음을 알 수 있었다.

일반적으로 콘크리트 내부의 철근의 부식을 억제하기 위해서 콘크리트구조물의 사용 환경 여건에 따라 피복 두께를 최소 75mm에서 최대 125mm까지 규정하기도 한다<sup>4)</sup>. 이처럼 피복두께를 달리하는 이유는 전술한 바와 같이 피복 두께가 두꺼우면 해수용액 중의 물과 용존산소 및 염소이온 등의 침투와 확산이 어려워 염소이온에 의한 철근표면의 산화막의 파괴가 억제되어 양극 분극이 증대된 분위기에서 부식전위가 형성되므로 부식전위는 높은 값을 나타내며 철근의 부식은 억제되는 것으로 생각된다. 그런데 침지초기에는 이러한 이론에 의해서 피복두께에 비례하여 부식전위는 높은 경향을 나타내었으나 침지 5년 후에는 피복 두께가 두꺼움에도 불구하고 부식전위가 낮은 결과가 관찰되었다. 따라서 피복두께에 따른 음극분극곡선의 변화를 고찰하고 동시에 부식전위 변화와 그 상호관련성에 대해서 토론 할 필요가 있다고 생각된다.

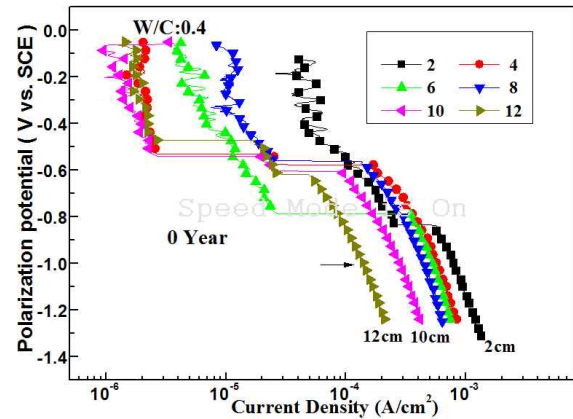


Fig. 6. Variation of cathodic polarization curves measured with a function of thickness soon after immersion in natural seawater solution.

Fig. 6은 침지초기에 피복두께에 따라 측정된 음극분극곡선이다. 12cm의 경우 음극분극곡선은 가장 왼쪽에 위치하고 있으며 피복두께가 적은 순서대로 오른쪽으로 이동하면서 2cm의 피복두께에서 측정된 분극곡선은 가장 오른쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 중성의 해수용액에서 측정되는 음극분극곡선은 용존산소의 환원반응( $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$ )에 의한 농도분극이며 확산층의 대소에 의해 확산한계전류밀도는 변하게 된다. 따라서 Fig. 6의 그래프내부에서 가로방향으로 표시하고 있는 화살표는 -1.0V의 농도분극에 대응하는 확산한계전류밀도로 간주할 수 있다. 그러므로 피복두께가 12cm인 경우 -1.0V에 대응하는 확산한계전류밀도는 가장 적은 값을 나타내고 있으며 피복두께 2cm의 경우 확산한계전류밀도는 가장 큰 값을 나타내는 것으로 생각된다. 일반적으로 확산한계전류밀도( $i_L$ )는 다음의 (1) 식으로 나타낼 수 있다<sup>15)</sup>. 즉

$$i_L = nFDC / \delta \dots\dots\dots (1)$$

- i<sub>L</sub>: 확산한계전류밀도(A/cm<sup>2</sup>)
- n: 이온가
- F: Faraday 상수(A·S/mol)
- D: 산소확산계수(cm<sup>2</sup>/S),
- C: 용존산소농도(mol/cm<sup>3</sup>),
- δ: 확산층(cm)

상기의 (1)식에 의하면 확산한계전류밀도의 변화에 영향을 미치는 변수는 확산계수와 용존산소농도 및 확산층으로 대별된다. 그런데 본 실험의 경우 침지초기에는 피복두께가 다른 모든 시험편이 같은 해수 용액에 노출되어 있으므로 확산계수와 용존산소농도는 피복두께에 관계없이 같은 값으로 간주할 수 있다. 따라서 확산층이 하나의 변수가 될 수 있으며 음극분극시에 몰타르 계면에서 내부철근의 표면까지 용존산소의 침투와 확산 그리고 철근표면에서의 용존

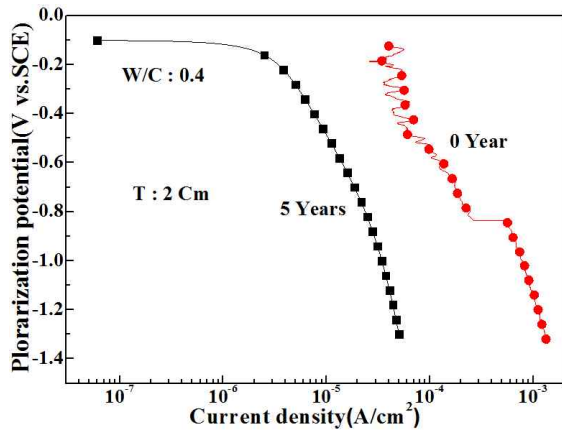


Fig. 7. Comparison of cathodic polarization curves with immersion years in the case of cover thickness at 2cm.

산소의 환원반응을 감안하면 피복두께를 확산층의 근사값으로 생각할 수 있다. 따라서 상기의 (1)식에 피복두께 12cm와 2cm를 각각 확산층으로 대입하여 구할 수 있는 확산 한계전류 밀도 값의 대소는 Fig. 6에서 -1.0V의 농도분극에 대응하는 확산 한계전류 밀도값의 대소와 일치하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 7은 피복두께가 2cm인 경우 침지초기와 침지 5년 후의 음극분극곡선을 나타내고 있다. -1.0V에 대응하는 확산한계전류밀도는 침지초기에 비해서 침지 5년 후의 경우가 현저하게 적은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8은 피복두께 10cm의 경우를 나타내고 있으며 침지초기와 침지 5년 후의 -1.0V에 대응하는 확산한계전류밀도는 거의 같은 값을 보여주고 있다. 한편 Fig. 9는 12cm의 피복두께인 경우 침지 년수에 따른 음극분극곡선 변화를 나타내고 있다.

흥미로운 사실은 피복두께가 12cm에서는 침지 5년 후의 확산한계전류밀도가 침지초기에 비해서 오히려 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 피복두께가 2cm인 경우 몰타르

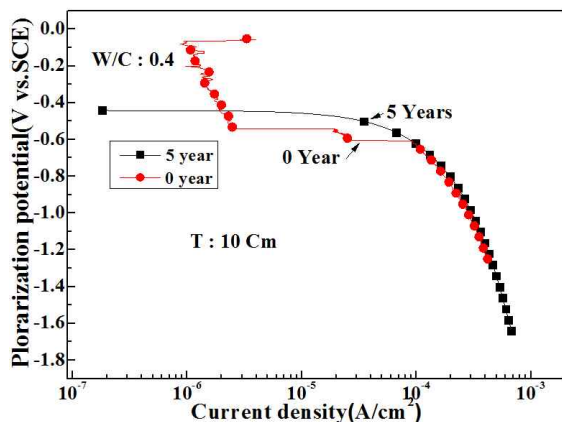


Fig. 8. Comparison of cathodic polarization curves with immersion years in the case of cover thickness at 10cm.

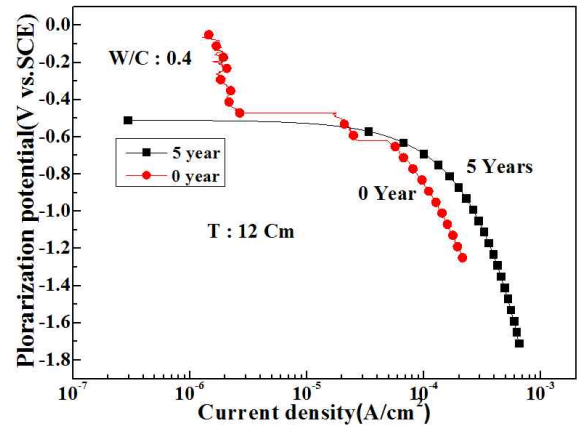


Fig. 9. Comparison of cathodic polarization curves with immersion years in the case of cover thickness at 12cm.

시험편의 표면이 해수용액에 5년간 노출되어 있었으므로 해수용액중의 용존산소와 물 및 염소이온이 시험편 내부로 침투 확산하여 전술한 바와 같이 내부철근의 표면이 부식되어 부식생성물이 축적되고 이들 부식생성물이 확산층으로 작용하여 겔보기의 확산층이 크게 되어 상기의 (1)식에 의해서 확산한계전류밀도가 감소한 것으로 추정된다. 그리고 피복두께가 10cm인 경우에는 해수용액의 침투와 확산이 억제되어 철근표면에서의 부식생성물이 확산층의 역할을 하지 못했다고 생각된다. 한편 피복두께가 12cm인 경우에는 피복두께가 두꺼우므로 내부 철근의 표면에서의 부식은 전혀 발생하지 않았으며 몰타르 표면이 해수용액과의 장기간 접촉에 의하여 중성화반응( $2NaCl + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NaOH + CaCl_2$ )이 발생하여 몰타르 계면의 강 알칼리성의 성분이 유출되어 해수용액이 중성화된 영역까지 침투하여 실제의 확산층은 피복두께보다 적게 되어 확산한계전류밀도는 오히려 크지는 것으로 생각된다. 그리고 침지 5년 후의 피복두께에 따른 음극분극곡선에서 확산한계전류밀도를 함께 비교하여 고찰할 필요가 있다고 생각된다.

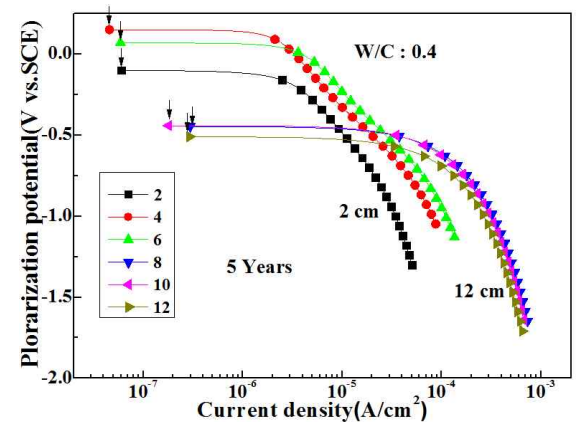


Fig. 10. Comparison of cathodic polarization curves as a function of thickness after immersed for 5 years in natural seawater solution.

Fig 10은 침지 5년 후의 전체 피복두께에 대한 음극분극곡선을 나타내고 있다. 피복두께가 2cm의 경우 -1.0V에서 확산한계전류밀도는 다른 피복두께에 비해서 가장 적은 값을 보여 주고 있으며 피복두께가 두꺼울수록 큰 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig 6의 침지초기의 결과와 반대임을 알 수 있다. 결국 피복두께가 적은 경우 내부철근의 표면에 형성된 부식생성물이 확산층에 영향을 미친 것으로 생각된다.

이러한 추측을 재확인하기 위해 피복두께 2cm인 경우 침지초기와 침지 5년 후에 측정된 사이클릭 볼타모그램의 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 침지 초기에는 화살표가 나타내는 상승곡선과 하강곡선의 폭이 크고 또한 오른쪽으로 곡선이 기울고 있음을 알 수 있다. 그런데 침지 5년 후에는 상승과 하강의 폭이 좁고 거의 수직으로 변화된 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 통상 사이클릭 곡선이 오른쪽으로 혹은 왼쪽으로 기울면 내식성은 감소 혹은 증가하는 것으로 평가된다. 따라서 침지 5년 후의 경우가 오히려 내식성이 좋은 것으로 생각할 수 있다. 이것은 Fig.

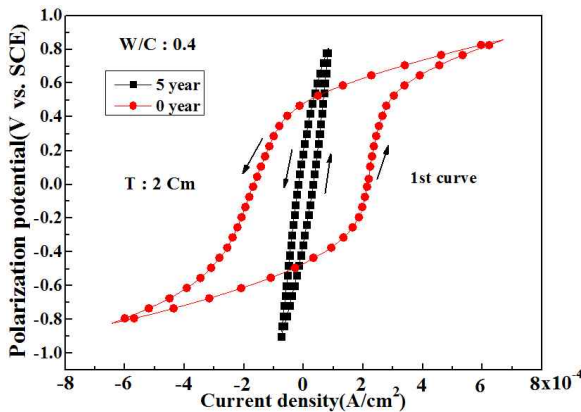


Fig. 11. Variation of 1st cyclic voltammogram curves with immersion years for cover thickness at 2cm.

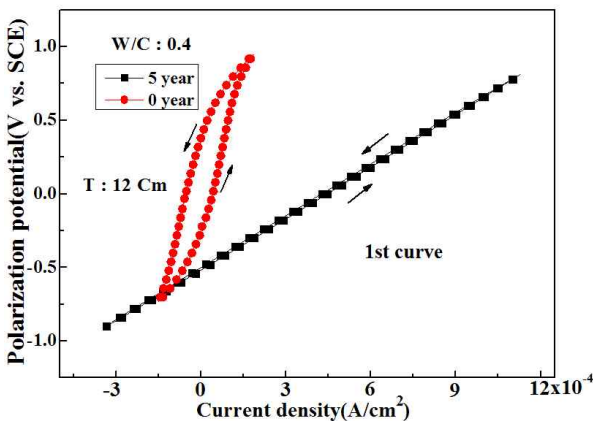


Fig. 12. Variation of 1st cyclic voltammogram curves with immersion years for cover thickness at 12cm.

7에서 피복두께가 2cm로 얇은 경우 내부철근의 부식생성물이 확산층으로 작용한 것으로 토론한 바와 같이 부식생성물이 저항분극으로 작용하여 볼타모그램 선도가 수직으로 변화된 것으로 생각된다.

Fig. 12는 피복두께 12cm의 경우 사이클릭 선도변화를 보여주고 있다. 침지 초기의 곡선의 형태는 거의 수직으로 서 있는 모습을 나타내고 있으며 침지 5년 후의 선도는 오른쪽으로 현저하게 기울고 있음을 알 수 있다. 따라서 침지 5년 후에는 전술한 바와 같이 몰타르 시험편의 표면이 중성화 반응에 의해서 피복두께에 의한 저항분극이 감소하고 또한 부식생성물에 의한 저항분극의 영향이 없어 오른쪽으로 기울 것으로 생각된다. 결과적으로 사이클릭선도만을 생각한다면 내식성이 좋지 않은 것으로 평가된다. 이처럼 침지 5년 후에 피복두께 2cm가 12cm의 피복두께보다 분극곡선의 특성 고찰에서 확산한계전류밀도가 감소하고 사이클릭선도의 외형모습의 평가에서 내식성이 오히려 좋은 것으로 평가되는 모순은 부식생성물에 의한 확산층의 증가 및 저항분극에 기인한 것으로 판단할 수 있다고 생각된다.

또한 Fig 4에서 침지 5년 후에 부식전위의 변화가 실제적으로 내부철근의 부식정도에 미치는 영향을 비교 평가할 필요가 있다고 생각된다. 일반적으로 부식전류밀도를 구하는 이론식은 음극분극의 경우 다음의 Butler-Volmer식으로 나타낼 수 있다.<sup>16)</sup> 즉

$$i = i_{cor} \{ \exp(-\alpha n F \eta / RT) - \exp(\beta n F \eta / RT) \} \dots (2)$$

상기 (1)식에서 음극의 분극전위가 -100mv 이상을 넘어서면 2차 항은 무시할 수 있다. 따라서 상기 (2)식은 다음의 (3)식으로 나타낼 수 있다.

$$i = i_{cor} \cdot \exp(-\alpha n F \eta / RT) \dots \dots \dots (3)$$

(3)식은 다시 변형하여 (4)식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = (2.3RT/\alpha n F) \log i_{cor} - (2.3RT/\alpha n F) \log i$$

$$= a + b \log i \dots \dots \dots (4)$$

(a = 2.3RT/αnF, b = -2.3RT/αnF, η < 0)

- η : 음극분극값(E - E<sub>cor</sub>)(V)
- α, β : 전이계수
- F : Faraday 상수 (C/mol)
- T : 절대온도(K)
- R : 가스상수(J/K·mol)
- n : 이온가

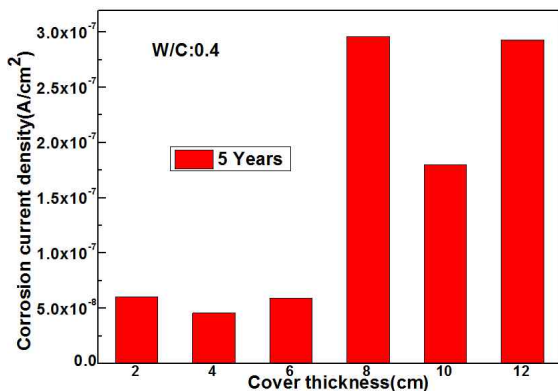
상기의 (4)식은 Tafel의 실험식과 일치한다. 따라서 음극분극곡선에서 외삽법에 의해서 부식전류밀도를 구할 수 있다.

그런데 상기의 이론식과 실험식이 일치하는 경우는 통상 나강관의 금속을 해수용액 등에 침지하여 부식전류밀도를 구하는 경우에 잘 일치하나 본 실험의 경우는 몰타르 내부의 철근에 대한 분극곡선을 측정하였다. 그러므로 전술한 바와 같이 몰타르 피복두께에 의한 저항분극과 부식생성물에 의한 저항분극이 분극곡선에 많이 포함되므로 분극곡선상에서 타겟외삽법으로 실질적인 부식전류밀도 값을 구하는 것은 다소 문제가 있다고 생각된다. 그러므로 Fig. 10의 분극곡선에서 화살표로 표시한 지점이 부식전위에서 음극분극곡선의 측정을 시작하는 전류밀도이므로 부식전류밀도의 근사값으로 간주할 수 있다고 생각된다. Table 3은 침지 5년 후 각각의 피복두께에서 음극분극곡선으로 부터 구한 부식전류밀도와 부식전위 및 부식전위에 의한 부식가능성을 정리하였다. 그리고 Fig. 12는 침지 5년 후의 부식전류밀도를 피복두께별로 나타내고 있다.

Table 3에서 알 수 있듯이 피복두께 2, 4, 6cm의 경우 부식가능성은 10%이며 8, 10, 12cm의 피복두께는 90%의 부식가능성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 13에서 피복두께가 2, 4, 6cm의 경우 부식전류밀도는 적은 값을 그리고 8, 10, 12cm의 피복두께에서 상대적으로 높은 부식전류밀도를 나타내었다. 결국 본 실험의 결과 침지 5년 후에는

**Table 3. Relationship between corrosion potentials and corrosion current densities with cover thickness**

Thick. (cm)	5 Years(W/C:0.4)		
	$E_{cor}$	Corro. possib.(%)	$I_{cor}(A/cm^2)$
2	-0.126	10	$6.03 \times 10^{-8}$
4	0.116	10	$4.58 \times 10^{-8}$
6	-0.001	10	$5.91 \times 10^{-8}$
8	-0.450	90	$2.96 \times 10^{-7}$
10	-0.452	90	$1.80 \times 10^{-7}$
12	-0.521	90	$2.93 \times 10^{-7}$



**Fig. 13. Relationship between corrosion current densities and immersion years with cover thickness.**

피복두께가 얇은 경우가 오히려 두꺼운 피복두께보다 부식전위는 높고 부식전류밀도가 적은 경향을 나타 내었다.

여기에서 주목할 점은 해수용액에 침지된 일반 나강관의 부식전위를 측정하는 것이 아니라 몰타르 내부의 철근에 대해 측정하는 부식전위이며 더우기 침지 5년 후에 측정된 부식전위임을 간과할 수 없다고 생각된다. 결국 전술한 바와 같이 침지 5년 후의 음극분극곡선과 사이클릭 볼타모그램에는 피복두께가 얇은 경우 부식생성물의 축적이 확산층 및 저항분극으로 작용하였으며 외형적으로 부식전위와 부식전류밀도에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

지금까지 피복두께를 달리한 복합체 몰타르 시험편을 해수 중에 침지한 후 침지초기와 침지 5년 후의 분극거동을 관찰하였다. 즉 침지 직후와 침지 5년 후에 몰타르 시험편 내부의 철근의 부식전위 변화와 음극분극곡선 및 사이클릭 선도 변화를 측정하고 이들의 상호관련성에 대해서 비교 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 침지초기에는 피복두께가 두꺼울수록 부식전위는 높은 값을 그리고 피복두께가 적으면 낮은 값을 나타내었으나 침지 5년 후에는 피복두께가 두꺼운 경우 오히려 부식전위는 낮은 경향을 나타내었다.
2. 침지 5년 후에는 피복두께가 적은 경우 철근표면의 부식생성물이 음극분극곡선과 사이클릭 선도의 측정시에 각각 확산층과 저항분극으로 크게 영향을 미치는 것으로 판단되었다.
3. 본 실험의 결과 침지 5년 후 부식전위와 부식전류밀도 및 부식가능성에 대한 확률은 피복두께와 서로 확실적인 상호관계를 보이지 않았다. 예를 들면 피복두께가 두꺼운 경우가 피복두께가 적은 경우보다 오히려 부식전위는 낮은 경향을 그리고 부식전류밀도는 큰 값을 나타내는 경향이 있었다.
4. 결과적으로 콘크리트 내부 철근의 부식거동에 대한 평가는 부식전위만의 측정에 의존하기 보다는 실제의 피복두께를 파악하고 이들 값의 대소와 재령 년수에 대한 영향도 함께 고려되어야 할 것으로 생각된다.

#### References

1. R. N. Swamy, S. Koyama, T. Arai, N. Kikami, *Durability of steel reinforcement in marine environment*, ACI, SP 109-7, 1614 (1989).
2. S. Ozaki, N. Sugata, *Sixty-year-old concrete in a marine environment* ACI, SP 109-26, 587 (1989).
3. D. H. Jeon, K. M. Moon, T. S. Baek, and J. H. Jong, *Corros. Sci. Tech.*, **21**, 3 (1992).

4. S. D. Hong, *Materials and Environment*, **42**, 462 (1993).
5. G. C. Jang, *J. Conc. Soc. of Japan*, **32**, 73 (1994).
6. S. D. Hong, *Corros. Tech. of japan*, **33**, 462 (1984).
7. D. H. Jeon, K. M T. S. Baek and J. H. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **21**, 11 (1992).
8. K. G. Kim, B. H. Ryou, S. J. Kim, K. J. and K. M. Moon, *J. Ocean.and Tec.*, **14**, 23 (2000).
9. N. G. Thampson, K. H. Lawson, and J. A. Beavers, *Proceeding of the Corrosion/87 Technique* 182 (1987).
10. J. A. Apostoles, D. Park, and R. A. Carello, R.A, *Proceeding of the corrosion/87 Technique* 168 (1987).
11. Y. R. Yoo, H. H. Cho, S. Take and J. G. Kim, *Met. Mater. Int.*, **12**, 255 (2006).
12. J. A. Muylder, and M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous solution* Ed by M. Pourbaix, p. 313, pergamon press. (1966).
13. ASTM C876-80, *Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete*, p. 87 (1980).
14. Concrete Society of Japan, *Protection Guide of Marine Concrete Structure*, p. 10 (1984).
15. K. M. Moon, *Practical Electrochemistry*, edited by Hyou Sung Co. Ltd., p. 110 (1999).
16. K. M Moon,, *Practical Electrochemistry*, edited by Hyou Sung Co. Ltd., p. 177 (1999).