

## 염해 및 동결융해의 복합열화 작용에 의한 부식촉진시험에 관한 연구

박상순<sup>†</sup> · 소병탁충남 천안시 동남구 상명대길 31, 31066, 상명대학교 건설시스템공학과  
(2016년 1월 9일 접수, 2016년 2월 22일 수정, 2016년 2월 22일 채택)

## A Study on Accelerated Corrosion Test by Combined Deteriorating Action of Salt Damage and Freeze-Thaw

Sang-Soon Park<sup>†</sup> and Byung-Tak SoDepartment of Civil Engineering, Sangmyung University, 31, Sangmyungdae-gil,  
Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31066, Korea

(Received January 09, 2016; Revised February 22, 2016; Accepted February 22, 2016)

In this study, the accelerated corrosion test by combined deteriorating action of salt damage and freeze-thaw was investigated. freeze-thaw cycle is one method for corrosion testing; corrosion initiation time was measured in four types of concrete samples, i.e., two samples mixed with fly ash (FA) and blast furnace slag (BS), and the other two samples having two water/cement ratio (W/C = 0.6, 0.35) without admixture (OPC60 and OPC35). The corrosion of rebar embedded in concrete occurred most quickly at the 30<sup>th</sup> freeze-thaw cycle. Moreover, a corrosion monitoring method with a half-cell potential measurement and relative dynamic elastic modulus derived from resonant frequency measures was conducted simultaneously. The results indicated that the corrosion of rebar occurred when the relative dynamic elastic modulus was less than 60%. Therefore, dynamic elastic modulus can be used to detect corrosion of steel bar. The results of the accelerated corrosion test exhibited significant difference according to corrosion periods combined with each test condition. Consequently, the OPC60 showed the lowest corrosion resistance among the samples.

**Keywords :** accelerated corrosion test, artificial seawater, relative dynamic modulus of elasticity, concrete

## 1. 서 론

우리나라의 지형적 특성과 위치적 특성으로 인해 콘크리트 구조물로 이루어진 주요 국가 기반시설들은 부식으로 인한 성능저하 및 수명단축으로 유지보수를 위해 막대한 비용을 수반한다. 이러한 부식으로 인한 경제적 손실은 구조물의 주변 노출환경과 밀접한 관계가 있다. 특히 해양콘크리트는 노출조건에 따라 해수중, 간만대, 비말대, 해상 대기 중으로 분류되어 염화물 이온의 침투확산으로 인해 철근 부식을 일으킨다. 염해환경에 노출된 구조물의 내구수명은 철근의 위치까지 염화물 이온이 침투되어 부식임계농도에 도달하는 시간으로 결정되는데, 아직까지 다공체의 염화물 침투확산 메커니즘이 명확하게 규명되지 않아 이론상의 추

정치에 불확실성이 높은 상태이다. 가장 확실한 내구수명 추정방법은 실제 해양환경에 철근콘크리트 시편을 폭로시켜 부식상태를 모니터링 하는 것이지만 소요 기간이 지나치게 길다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 1990년대 초 중반부터 국내 여러 연구자들에 의해 전기화학적 방법, 항온항습기에 의한 건습반복법, 염수순환에 의한 건습반복법 등 해외의 연구자들에 의해 수행된 시험법을 도입한 연구가 진행되어 왔다<sup>1)</sup>. 전기화학적 방법을 이용한 촉진부식시험법으로는 Faraday's Law를 기초로 한 전위차 부식촉진법이 있다<sup>2)</sup>. 전기화학적 촉진 시험법은 콘크리트 내의 철근 부식 개시시기를 단기간에 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 전기화학적 촉진 부식메커니즘이 실제 부식 환경과 크게 다르므로 실험결과의 신뢰도가 높지 않은 실정이다. 이를 보완한 시험방법은 비교적 실제 환경과 유사하고 단기간에 철근부식 개시시기를 평가할

<sup>†</sup> Corresponding author: parkss87@smu.ac.kr

수 있는 염수 건습반복법이다<sup>3)</sup>. 이 방법은 일본콘크리트 공학협회에서 제안한 방법으로 수조에 철근 콘크리트 시험체를 배치하여 적절한 순환장치에 의해 수조 내로 염수의 침지와 건조를 반복시킴으로써 콘크리트내의 철근부식을 촉진시키는 시험법이다. 전위차 부식촉진법이나 염수 건습반복법에 비해서는 많은 시험기간이 필요하지만 염수의 침투확산 특성을 반영한 시험법으로는 ASTM G 109에 기초한 염수 Ponding 시험법이 있다. 국내에서는 이 시험방법을 응용하여 NaCl의 농도를 높이고 시편의 피복두께를 변화시킨 시편을 이용해서 단위시멘트량이 다른 콘크리트 중에서의 철근부식 임계염화물량을 도출한 연구가 있었다<sup>4)</sup>. 그동안 국내 외 연구자들에 의해서 개별적으로 수행된 촉진부식시험은 한국건설자재시험연구원에서 수행한 표준화기술개발사업을 통해 산업규격으로 제정되었다<sup>5,6)</sup>. 동 연구는 그동안 개별적으로 진행되던 여러 촉진부식시험방법에 대한 연구성과가 국가표준에 반영되는데 중요한 역할을 담당하였다. 당시 전자재시험연구원에서는 표준화기술개발사업을 통해 2년간의 연구결과로서 KS F 2599-1 철근콘크리트의 촉진부식 시험방법-제1부 오토클레이브 방법(2008) 및 KS F 2599-2 철근콘크리트의 촉진부식 시험방법-제2부 건습반복법(2008)을 개발하였다. 제1부 오토클레이브 방법에 의한 촉진부식 시험방법은 주로 방청제에 의한 염해저항성능을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이 방법은 공극을 통한 외부 염화물의 침투확산에 따른 철근 부식메커니즘과는 다른 촉진 메커니즘을 가지고 있어 장기폭로시험

과의 상관성을 도출하는 것이 불가능하다. 반면 제2부 건습반복법은 외부 염화물의 침투확산에 따른 부식메커니즘을 대표하는 시험방법으로 평가할 수 있다. 그러나 이 시험방법에서 규정한 20사이클 (140일) 후 철근의 발청 여부 평가가 실제 콘크리트 구조물의 내구수명 평가에 적용되기는 어렵다. 아직까지 촉진시험조건과 실제 폭로조건과의 상관성을 유추할 수 있는 상관계수가 정립되지 못한 것이 주된 이유이다. 또한 실제 노출조건에서 고려할 수 있는 중성화나 동결융해와 같은 복합열화를 고려할 수 없는 것도 상관성을 규명하는데 어려움으로 작용한다.

따라서, 본 연구는 동일한 배합의 시편에 대한 부식 촉진 시험 및 장기폭로시험의 부식 모니터링 결과를 통해 각각의 부식 개시 시점을 도출하고, 이들 간의 상관 계수를 도출함으로써 촉진시험의 효율성을 높이고 신뢰성을 향상시키는 것을 목표로 다년간 연구를 진행하고 있다. 선행연구를 통해 실제 부식메커니즘과 유사한 조건에서 부식을 촉진시키는 다양한 방법 및 장기시험과 촉진시험의 상관성을 제안한 바 있다<sup>7-9)</sup>. 금번 연구를 통해서도 염해와 동결융해를 혼합한 복합열화부식촉진시험 조건을 정립하였다. 최근 동절기 강설량의 증대로 제빙제의 살포가 증가하면서 철근부식인자의 침투가 활발해져 염해와 동결융해에 따른 복합열화에 따른 피해가 증가하고 있는 상황이 고려되었다. 동결융해 사이클 수를 주된 변수로 부식촉진시험을 실시하였다. 철근 부식모니터링은 반전지전위법을 통한 자연전위 측정을 기본으로 하며 동탄성계수의 측정을 병행하여 부식모니터링

**Table 1. Physical properties of cement**

Specific gravity	Fineness [cm <sup>2</sup> /g]	Setting [min]		Soundness [%]	Compressive strength [MPa]		
		Initial	Final		3day	7day	28day
3.15	3,500	220	320	0.1	26.7	41.2	57.6

**Table 2. Physical properties of fine aggregate**

Aggregate	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Water absorption [%]	F.M	Unit weight [kg/m <sup>3</sup> ]	Weight of passing 0.08 mm (%)
Fine	2.6	1.5	2.5	1,597	2.1

**Table 3. Physical properties of coarse aggregate**

Aggregate	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Water absorption [%]	F.M	Unit weight [kg/m <sup>3</sup> ]	G <sub>max</sub> (mm)
Coarse	2.7	0.9	6.5	1,655	20

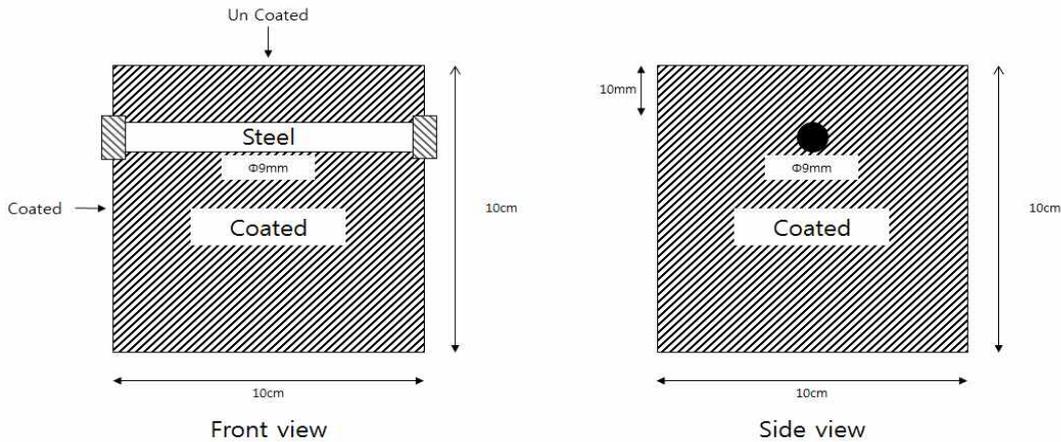


Fig. 1. Schematic diagram of test specimen.

에 상대동탄성계수적용 가능성을 함께 평가하였다. 경향분석을 위해 재령별 압축강도 및 염화물 침투저항성과 같은 역학적 및 내구적 기본특성시험도 병행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트로서 그 물리적 성질은 Table 1과 같다. 잔골재는 충남 공주 강모래, 굵은골재는 최대치수 20 mm의 쇄석골재이고 표면건조 상태로 사용하였다. 이들의 물리적 성질은 Table 2와 3과 같다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 배합설계 및 공시체

시험을 위한 공시체는 Fig. 1과 같이 100 × 100 × 100 mm 정육면체 몰드로 제작하였으며 부식을 최대한 촉진시키기 위해 피복두께는 10 mm로 하였다. 철근은 부식발생 확인을 용이하게 하기 위해 표면이 매끈한 지름 9 mm인 원형철근을 사용하였으며 철근표면에 이미 존재하는 녹 및 이물질 등을 제거하기 위해 연마지 (#180)를 이용하여 표면처리 하였다. 철근과 전선의 연결부위 및 노출예상 범위는 모두 에폭시로 코팅하였다. 재령 6일까지 수중 양생한 후 시편

6면 중 5면을 에폭시로 코팅하여 에폭시 코팅 24시간 경과 후(재령 7일)부터 동결융해 및 해수의 건습반복 등을 통해 일 방향 염화물 침투를 유도하였다. 배합은 비교분석 등을 고려하여 선행연구와 동일하며, 보통포틀랜드 시멘트를 기본으로 사용하였다. 빠른 부식을 일으키기 위해 물-시멘트 비 60 %를 기본으로 하였다. 배합은 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland Cement, 물-시멘트 비 60 %)인 OPC60, 혼화제인 플라이애시를 시멘트의 20 % 치환한 FA (Fly Ash), 고로슬래그 미분말을 시멘트의 30 % 치환한 BS (Blast Furnace Slag) 및 고강도 특성 비교를 위한 OPC35 (Ordinary Portland Cement, 물-시멘트 비 35 %) 등 4개로 구분하였으며 배합설계표는 Table 4와 같다.

#### 2.2.2 동절기 간만대 모의 부식촉진시험

동절기 간만대 환경을 모사하여 부식속도를 비교하였다. 동결융해 챔버에 의한 급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법인 KS F 2456의 B법(기중동결, 수중융해) 및 인공해수를 이용한 철근 콘크리트의 촉진부식 시험방법인 KS F 2559-2) 건습반복법을 병행 진행하였다. 진행 방법은 계획동결융해 주기(동결 2시간, 융해 2시간) 노출 후 인공해수를 이용한 건습반복법(침지 3일, 건조 4일)을 한 주기로 부식이 발생하는 시기까지 반복한다. 계획동결융해 주기수는 30, 100, 300으로 하였고, 각각 case 1, 2, 3으로

Table 4. Mix proportion of concrete

Mix	W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
		Cement	BS	FA	Water	Sand	Gravel
OPC35	35	471.4	-	-	165	840	975
OPC60	60	275	-	-	165	840	975
FA	60	192.5	-	82.5	165	840	975
BS	60	220	55	-	165	840	975

Table 5. Test condition of accelerated corrosion by freeze-thaw and wet-dry environment

Deterioration	Drying wet	Dry		Wet	
		Temperature	Humidity	Temperature	Humidity
		-18 °C	90 %	5 °C	60 %
Freeze-thaw		Freeze		Thaw	
case 1 (cycle numbers)		30			
case 2 (cycle numbers)		100			
case 3 (cycle numbers)		300			

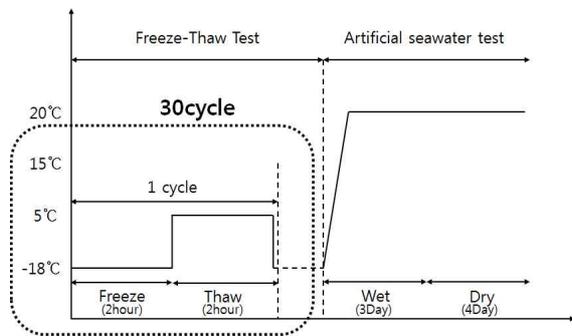


Fig. 2. Planned Freeze-thaw cycles of accelerated test (case 1, 30 cycle).

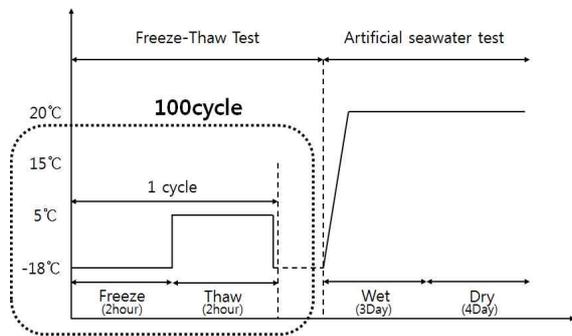


Fig. 3. Planned Freeze-thaw cycles of accelerated test (case 2, 100 cycle).

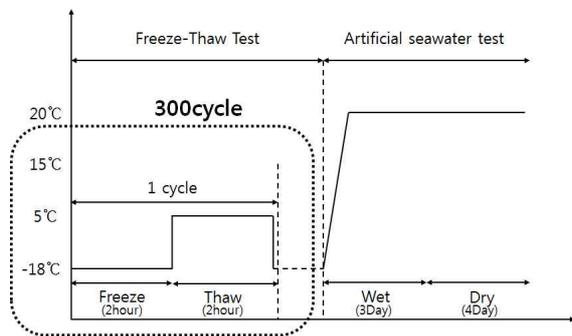


Fig. 4. Planned Freeze-thaw cycles of accelerated test (case 3, 300 cycle).

명명하였다. 부식모니터링은 반진지전위법을 활용하였으며 부식발생 시기는 선행연구결과에 기초하여 -700 mV 이하로서 전위값의 그래프상 기울기 변화가 급격하게 발생하는 시점으로 판단하였다<sup>7)</sup>. 또한 KS F 2437에서 규정한 동탄성계수 시험방법인 종진동법으로 초기 공명진동수(Hz)를 측정하고 계획 동결융해 매주기 종료 후 공명진동수를 측정하여 초기 공명진동수와와의 비로서 상대 동탄성계수를 산출한다<sup>10)</sup>. 이상과 같은 부식시험조건을 요약하면 Table 5 및 Fig. 2~4와 같다. 시험을 진행한 동결융해 챔버는 Fig. 5와 같고 인공해수는 철근콘크리트의 촉진부식시험방법인 KS F 2599에 준하여 제작하였으며, 배합비율은 Table 6과 같다.

2.2.3 동절기 침지대 모의 부식촉진시험

동절기 침지대의 환경을 모사하기 위하여 선행연구에서 진행되었던 ASTM G109에 기초한 염수 ponding (인공염못) 시험법을 응용 적용하였다<sup>8,9)</sup>. 염수 ponding 시험법은 Fig. 6과 같이 피복두께 10 mm의 100 × 100 × 100 mm 정육면체시편에 철근도출부분만 에폭시 코팅하고, 매립철근에 가까운 면에 아크릴 Pool을 설치하여 염화물 일 방향 침투를 유도하는 방법이다. 제작된 공시체는 Fig. 8과 같이 향온향습챔버에 배치하여 동결융해시험환경조건인 -18~5 °C를 적용하여 Fig. 7과 같이 동결 2시간 융해 2시간의 조건을 부식 발생시점까지 반복하였으며 case 4로 명명하였다. 염수 Ponding 공시체는 아크릴 Pool 및 인공해수 등이 포함



Fig. 5. Photo of freeze-thaw test chamber.

Table 6. Composition proportion of artificial seawater

Temperature [°C]	Artificial seawater [g/L]				
	NaCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl
Lab. temp.	24.5	11.1	4.1	1.2	0.7

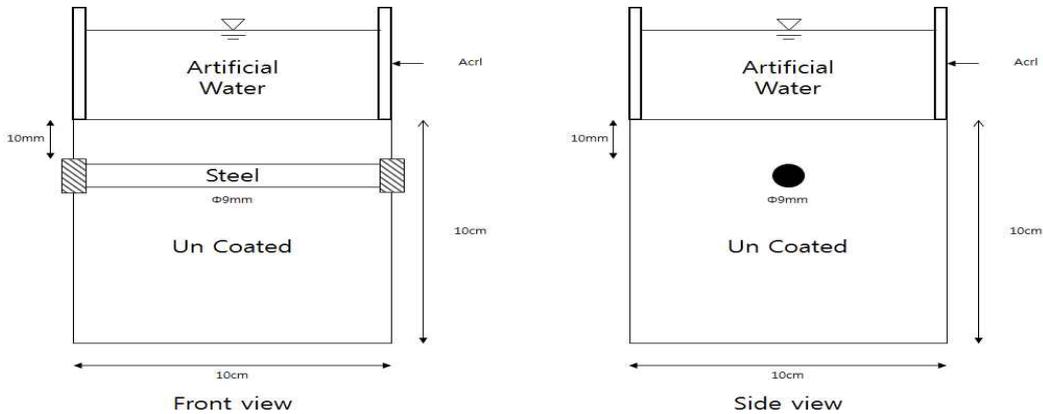


Fig. 6. Schematic diagram of ponding test specimen.

되는 구조적 특성을 가지고 있어, 공시체만의 공명진동수를 주기적으로 측정하기가 용이치 않아 동탄성계수 측정은 적용하지 않았다.

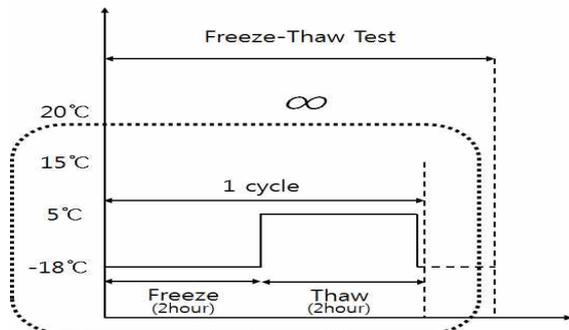


Fig. 7. Planned Freeze-thaw cycles of ponding test



Fig. 8. Photo of ponding freeze-thaw test chamber.

2.2.4 철근부식 모니터링

철근의 부식은 육안으로 관찰할 수 없으므로 철근 부식 모니터링은 비파괴 방법을 이용하여 측정하였다. 갈바닉 전류 측정법을 비롯하여 다양한 비파괴 측정법이 제안되어 사용되고 있으며, 선행연구를 통해 다양한 측정법을 적용하였다. 여러 차례의 시행착오를 거쳐 반전지전위법으로 측정하되 전위의 절대값보다는 상대적인 변화율이 보다 확실한 부식탐지 방법이라는 결론에 도달했다. ASTM에서는 자연전위가 -350 mV 이하인 경우 부식발생 확률을 90 % 이상으로 규정하고 있다<sup>13)</sup>. 그러나 선행연구에서 자연전위 -350 mV 이하인 시편을 할렬(割裂)하고 육안으로 관찰한 결과 부식이 발생하지 않았다. 일반적으로 최소 -700 mV 이하인 경우로서 자연전위 측정그래프의 기울기 급변화구간에서 부식 발생을 확인할 수 있었다<sup>7-9)</sup>. 본 연구에서도 이러한 조건을 만족하는 시점을 부식개시시점으로 판단하였다.

반전지전위법을 기본 부식모니터링 방법으로 하고 황산동 전극을 사용하여 동결융해 시기에는 측정하지 않고 건습 반복과정에서만 하루 1회 이상 자연전위를 측정하였다. 또한 상대동탄성계수의 측정으로부터 부식모니터링 가능성을 검토하고자 동탄성계수 측정도 병행하였다. 부식발생시점을 평가한 후 만능재료시험기를 통해 시편을 할렬하고 Fig. 9와 같이 전자현미경 및 육안으로 철근의 부식을 확인하였다. 공명진동수의 측정 및 자연전위 측정모습은 Fig. 10과 같다.

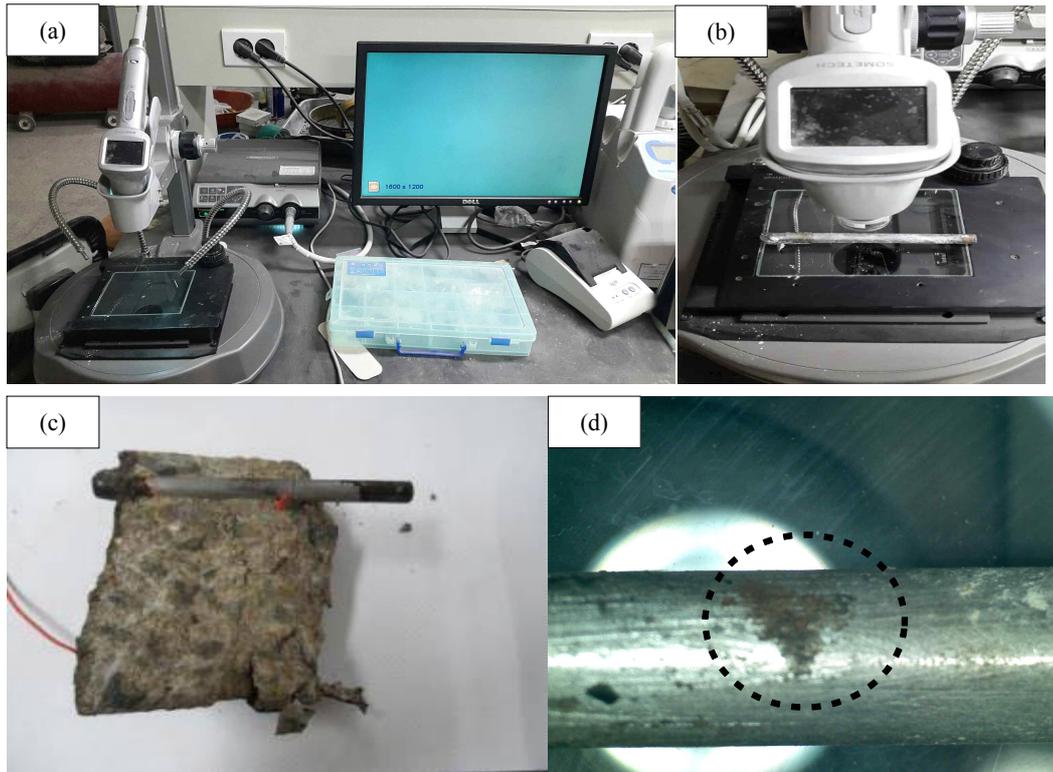


Fig. 9. Photographs of corroded of rebar: (a) Experiment equipment system of electron video microscope, (b) Measuring electron microscope to corrosion of rebar, (c) Appearance of crushed specimen after accelerated corrosion test (case 1, OPC60), and (d) Appearance of rebar after accelerated corrosion test (case 1, OPC60).

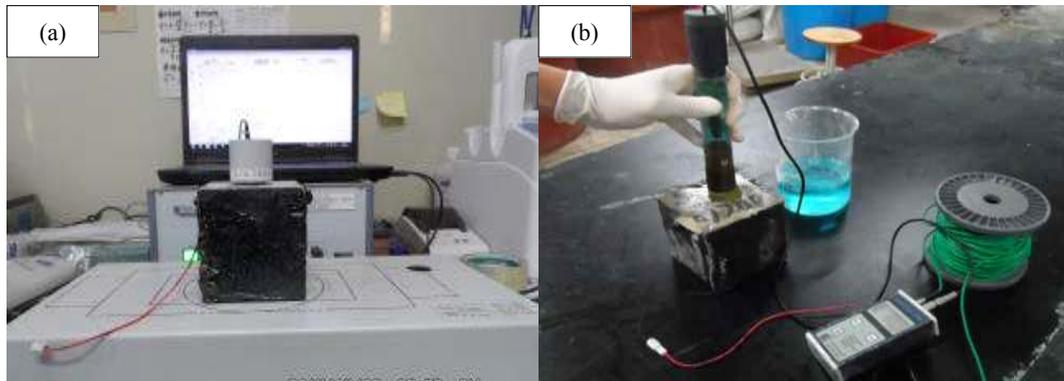


Fig. 10. Experimental set-up to measure dynamic modulus and natural potential of specimen using experiment equipment: (a) Dynamic Young's modulus meter, and (b) Half-cell potential meter using copper/Copper sulphate reference electrode.

### 2.2.5 압축강도 시험

각 배합별 재령에 따른 강도변화비를 평가하기 위하여  $\phi 100 \times 200$  mm 원주형 공시체를 제작하여 KS F 2405 “콘크리트 압축강도시험 방법”에 기초하여 재령에 따른 압축강도의 변화를 측정하였다<sup>11)</sup>.

### 2.2.6 염소이온침투저항성

각 배합별 재령에 따른 내구성 변화를 정량적으로 평가하

기 위하여 KS F 2711 “전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험” 방법에 따라 각 시편의 통과전하량을 재령에 따라 시험하였다<sup>12)</sup>. 전기장의 양극성을 활용하여 염소이온( $\text{Cl}^-$ )이 콘크리트에 침투시 발생하는 저항을 통하여 콘크리트의 차염성능 및 내부조직의 밀실한 정도를 평가하는 시험이다. 본 시험은 지름이 100이고 높이가 50 mm인 원주형 공시체를 재령 28일간 수중양생 하였으며, 시편을 시험셀에 장착한 후 전원은 60 V의 직류를  $\pm 0.1$  V

**Table 7. Penetration of Chloride ion based on charge passed**

Total passed charge (Coulomb)	Penetration
>4,000	High
2,000~4,000	Medium
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
<100	Negligible

**Table 8. Result of compressive strength with mix proportion and curing time (MPa)**

	7days	14days	28days	56days
OPC60	20.49	26.52	27.01	28.48
FA	18.45	24.42	30.71	35.17
BS	25.28	24.98	35.31	39.78
OPC35	27.31	30.33	36.45	41.04

정도로 안정적으로 공급하며, 전류의 측정은 기지의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정하였다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 Applied Voltage Cell의 (-)전극에 3.0 %의 NaCl 용액을 채우고 (+) 전극에는 0.3 N의 NaOH 용액을 채운다. 측정은 30분 간격으로 6시간 동안 저항 양단에 걸리는 전압을 측정하고 이를 전류로 환산한 후 식(1)을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

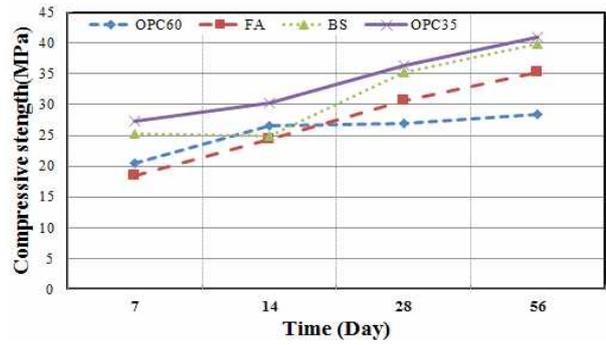
여기서,  $Q$  : 회로를 통과한 전하량(Coulomb)  
 $I_n$  : 실험 시작 후 n분이 경과했을 때의 전류(A)

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 Table 7에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온에 대한 침투저항성을 판단한다.

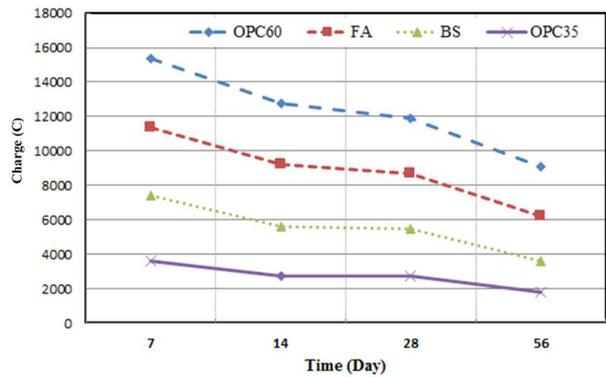
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 압축강도 및 염소이온침투저항성 시험

각 배합별 재령에 따른 압축강도의 변화는 Table 8 및 Fig. 11과 같고 염소이온침투저항성 시험결과는 Table 9 및 Fig. 12와 같다. W/C 35 %인 OPC35가 W/C 60 %인 OPC60보다 압축강도가 큰 것으로 나타났으며, W/C가 저하될수록 강도가 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 동



**Fig. 11. Comparison of compressive strength with curing time.**



**Fig. 12. Total passed charge with curing time.**

**Table 9. Total passed charge with mix proportion and curing time (coulomb)**

	7days	14days	28days	56days
OPC60	3,978	3,565	3,218	2,906
FA	3,992	3,578	3,187	2,609
BS	3,787	2,879	2,789	1,799
OPC35	3,604	2,756	2,703	1,780

일한 W/C 60 %인 BS, FA, OPC60을 비교하면 장기재령으로 갈수록 혼화재의 혼합이 강도를 증가시키는 것으로 나타났으며 플라이애시보다는 고로슬래그미분말이 강도증가효과가 컸다. 초기재령에서 FA의 강도발현이 OPC 60에 비해 다소 늦지만 장기재령으로 갈수록 압축강도는 OPC35, BS, FA, OPC60 순이며 재령이 증가할수록 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 염소이온 침투저항성은 초기재령부터 장기재령까지 OPC35, BS, FA, OPC60의 동일한 순으로 나타났으며 강도와 대체적으로 비례관계를 나타냈으며 재령이 증가할수록 통과전하량의 차가 줄어들어 가는 것을 확인하였다.

**Table 10. Time to corrosion (days) monitored from Freeze-thaw and wet-dry accelerated corrosion test**

Case	1	2	3	4
Condition	Freeze-thaw 30 Cycle	Freeze-thaw 100 Cycle	Freeze-thaw 300 Cycle	Freeze-thaw Ponding
OPC60	87	132	112	164
FA	95	135	165	201
BS	111	156	167	224
OPC35	121	158	221	232

**Table 11. Dynamic modulus of elasticity of specimens at corrosion point**

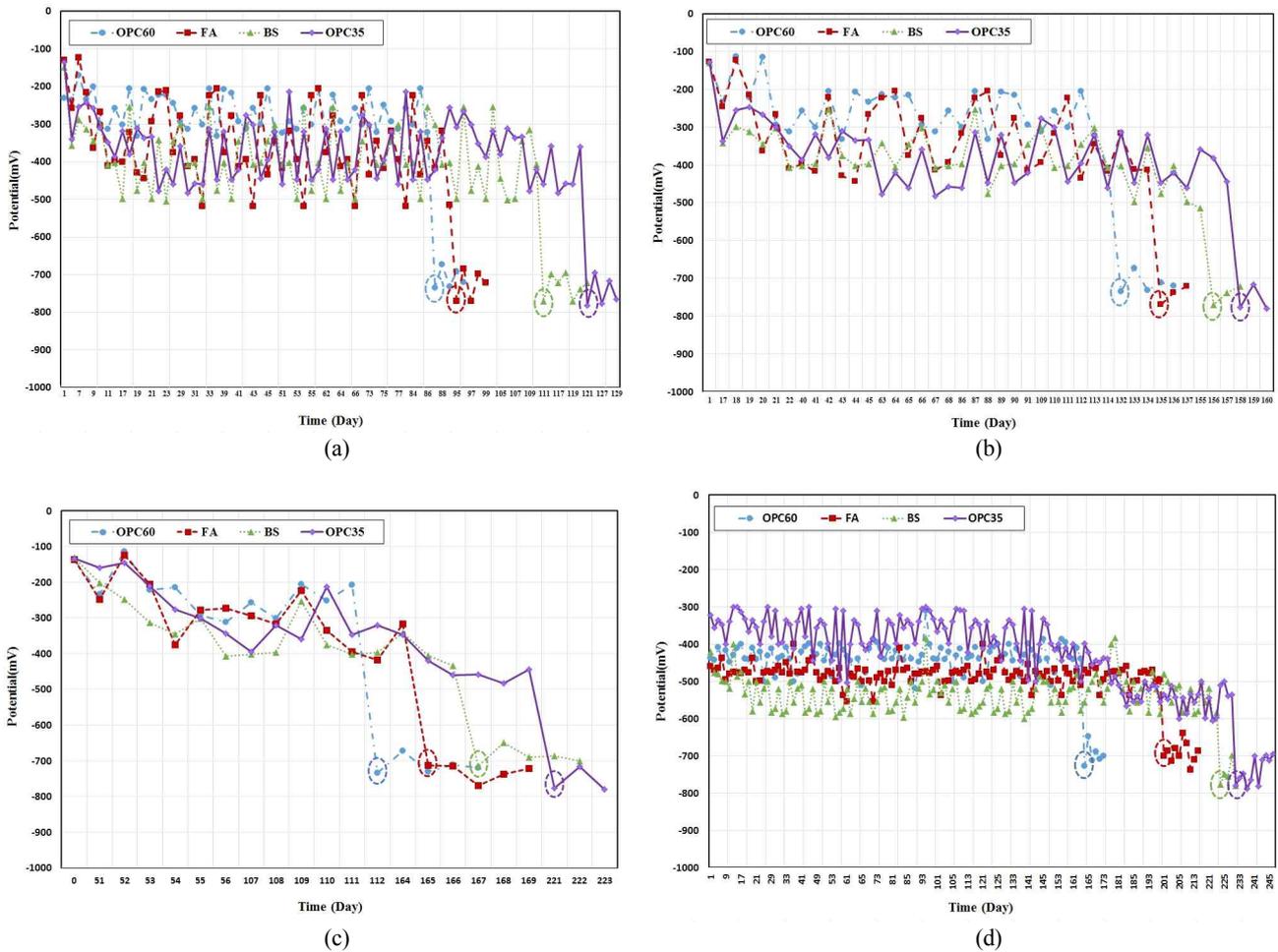
Condition	Mix	Corrosion point (day)	Dynamic modulus of elasticity (%)
case 1	OPC60	87	50.52
	FA	95	57.21
	BS	111	54.71
	OPC35	121	56.52
case 2	OPC60	132	60.24
	FA	135	50.12
	BS	156	56.14
	OPC35	158	61.41
case 3	OPC60	112	60.12
	FA	165	58.78
	BS	167	57.93
	OPC35	221	59.65

### 3.2 철근부식모니터링 결과

반전지 전위측정은 매일 측정이 가능한 case 4를 제외한 case 1, 2, 3의 모니터링은 건습반복시기(습윤 3일, 건조 4일)에만 측정을 실시하였다. 모든 case에서 부식발생은 배합별로는 OPC60, FA, BS, OPC35 순으로 나타났으며, 동결융해 주기수로는 case 1(동결융해 30주기), case 2(동결융해 100주기), case 3(동결융해 300주기) 순으로 나타났다. 각 case별 부식발생시점은 Table 10 및 Fig. 13과 같다. 상대동탄성계수는 폭로전 시험체의 초기 진동수를 측정 후 염해 및 동결융해 촉진시험 종료 후 진동수를 측정하여 산출하였다.

침지대를 모의한 case 4의 경우 부식에 필수요소인 산소 공급의 측면에서 다른 방법에 비해 확실한 장점을 가지고 있어 선행연구였던 해수 건습반복조건에서는 부식이 가장 촉진되는 것으로 나타났으나, 금번 동결융해 조건에서는 case 1보다 부식발생시점이 늦는 것으로 나타났다. 동결 조건에서는 인공해수가 동결되어 콘크리트로 원활하게 침투하지 못했기 때문인 것으로 보인다. case 1의 경우 동결융해와 인공해수 건습반복의 상호교차 횟수가 많아서 급격한 환경변화로 인해 열화의 진행과 염화물의 침투확산이 보다 유기적으로 이루어진 것이 부식을 촉진시킨 주된 원인으로 파악된다. 해당시편에서는 동결융해 열화 형태인 박락(spalling), 표면박리(scaling), 골재토출(pop out), 균열

등이 발견되었으며 이로 인해 염화물 이온의 침투속도가 촉진된 것으로 평가되었다. 모든 case에서 OPC60, FA, BS, OPC35 순으로 부식이 발생하여 강도 및 염소이온침투 저항성의 역순이었다. 강도가 크고 염소이온침투저항성이 크다는 것은 재료가 보다 치밀한 구조로 이루어져 있다는 것이다. 따라서 부식인자인 염화물의 침투확산이 지연되어 부식발생시기가 지연되는 것으로 판단된다. W/C가 35 %인 OPC35와 60 %인 OPC60을 비교하면 W/C가 낮을수록 압축강도 및 염소이온침투저항성이 증가하고 그에 따라 철근부식에 대한 저항성능도 증가하는 것으로 나타났다. 동일하게 W/C가 60 %인 BS, FA, OPC60을 비교하면 혼화재인 고로슬래그미분말과 플라이애시의 혼합이 혼화재를 미혼합한 OPC 배합에 비해 장기압축강도, 염소이온침투저항성 및 그에 따른 철근부식 저항성능이 향상되는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시보다는 고로슬래그 미분말의 혼합이 부식저항성능 향상에 더욱 효과적인 것으로 평가되었다. 반전지전위법에 의한 자연전위측정과 함께 진행한 공명진동수의 측정에 따른 상대동탄성계수 도출결과와는 Fig. 14와 같다. 상대동탄성계수는 모든 배합 및 시험조건에서 초기 100 %를 기점으로 동결융해 주기수가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 흥미 있는 사실은 Table 11과 같이 상대동탄성계수가 60 % 이하로 떨어지는 시점과 부식발생시점 사이에 어느 정도의 상관성을 가지고 있다는 것이다.



**Fig. 13.** Results of half-cell potentials with time after accelerated corrosion test combined freeze-thaw and wet-dry conditions in artificial seawater solution depending on mix proportion and the number of cycle: (a) case 1 (freeze-thaw 30 cycle), (b) case 2 (freeze-thaw 100 cycle), (c) case 3 (freeze-thaw 300 cycle), and (d) case 4 (ponding).

비록 한정된 시험조건이지만 상대동탄성계수의 측정만으로도 동결융해 조건에서 부식발생 여부를 예측할 수 있다는 가능성을 확인하였고, 향후 이 부분에 대한 연구를 추가하여 상대동탄성계수와 철근 부식과의 상관성을 보다 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

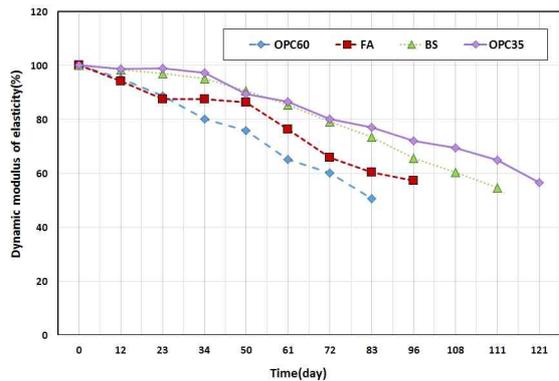
염해와 동결융해의 복합열화 부식촉진시험법에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

계획동결융해주기수의 변화를 통해 살펴본 부식속도는 30주기 단위로 동결융해와 인공해수 건습반복을 복합한 case 1이 가장 빠르게 나타났으며, 동결융해 100주기인 case 2, 300주기인 case 3 순이었으며, 인공해수 건습반복 조건에서 가장 빠른 부식속도를 보였던 해수 ponding 시험법인 case 4가 동결융해 조건에서는 가장 늦은 것으로 나타

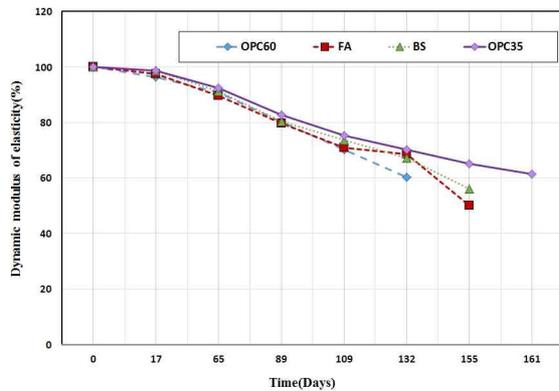
났다.

각 배합 당 압축강도시험과 염소이온침투 저항성 시험을 통해 장기재령에 접어들수록 강도와 침투저항성이 향상되는 것으로 나타났다. 특히 산업부산물을 활용한 배합인 FA와 BS는 재령 14까지는 강도 발현이 지연되어 OPC60보다 강도가 작았지만 장기재령인 56일에서는 OPC60보다 1.2 ~ 1.4배의 강도 증가효과가 있었으며, 염소이온침투저항성 시험결과 초기재령부터 수밀성이 우수하여 내구성개선효과를 기대할 수 있었다.

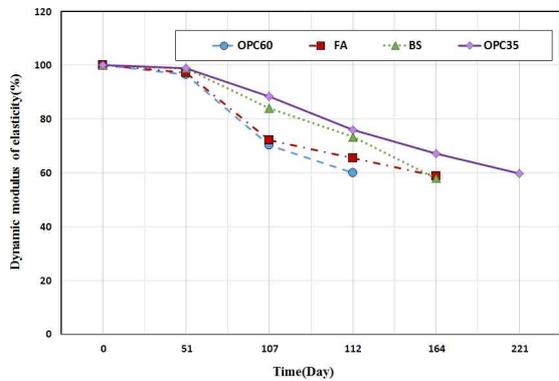
재령 56일에서의 압축강도는 OPC35, BS, FA, OPC60 순이었으며, 염소이온침투저항성도 압축강도와 비례하여 OPC35, BS, FA, OPC60 순으로 큰 것으로 나타났다. 염해와 동결융해의 복합열화 부식촉진시험에 따른 부식 발생시기도 주기수 및 건습반복 조건 등 시험조건과 무관하게 OPC60, FA, BS, OPC35순으로 빠르게 발생하였다. 즉, 압축강도 및 염소이온 침투저항성이 클수록 부식의 발생은



(a)



(b)



(c)

**Fig. 14.** Results of relative dynamic modulus of elasticity according to mix proportion after accelerated corrosion test combined freeze-thaw and wet-dry conditions in artificial seawater solution. (a) case 1 (freeze-thaw 30 cycle), (b) case 2 (freeze-thaw 100 cycle), (c) case 3 (freeze-thaw 300 cycle).

자연되는 것으로 나타났다. W/C가 낮은 OPC35가 OPC60에 비해서 압축강도와 염소이온침투저항성은 물론 철근부식 저항성까지 모두 우수하므로 낮은 물시멘트비가 철근콘크리트의 부식에 대한 저항성을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 W/C가 60 %로 동일한 BS, FA, OPC60의 세 가지 배합을 비교하면 혼화제인 고로슬래그미분말의 혼

합이 압축강도, 염소이온침투저항성 및 철근부식 저항성 모두 가장 우수했으며, 다음은 플라이애시 배합이었고 혼화제를 섞지 않은 OPC60이 가장 낮은 저항성능을 보여주었다. 이로부터 동일한 물시멘트비에서는 고로슬래그미분말이나 플라이애시와 같은 혼화제의 배합이 철근에 대한 부식저항성능을 향상시키는 것으로 평가할 수 있다.

부식 모니터링 방법에서 기존의 반전지 전위법에 의한 자연전위의 측정법외에 동탄성계수의 측정을 적용하였으며, 자연전위 측정으로 구한 부식개시 시점에서의 상대동탄성계수비가 대부분 60 % 미만으로 나타났다. 이를 통해 상대동탄성계수비로도 부식의 발생을 파악할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 이 부분에 대해서는 추가 연구를 통해 보다 명확한 규명이 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 상명대 교내연구비 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### References

1. H. W. Song, S. Velu, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **2**, 1 (2007).
2. B. H. Oh, Y. K. Cho, S. W. Cha, W. K. Chung, *J. Korea Concr. Inst.*, **8**, 201 (1996).
3. S. H. Bae, K. M. Lee, J. S. Kim, Y. S. Kim, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **27**, 771 (2007).
4. S. K. Yang, D. S. Kim, T. S. Um, J. R. Lee, K. Kono, *Journal of Korea Concrete Institute*, **20**, 415 (2008).
5. KS F 2599-1, Standard test method for the accelerated corrosion of reinforced concrete (autoclave method), Korean Industrial Standards (2008).
6. KS F 2599-2, Standard test method for the accelerated corrosion of reinforced concrete (wet-drying cycles method), Korean Industrial Standards (2008).
7. S. S. Park, J. W. Jung, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **18**, 93 (2014).
8. S. S. Park, M. W. Kim, *J. Rec. Const. Resources*, **1**, 211 (2013).
9. S. S. Park, M. W. Lee, *Corros. Sci. Tech.*, **13**, 6 (2014).
10. KS F 2437, Standard test method for dynamic modulus of elasticity, rigidity and dynamic Poisson's ratio of concrete specimens by resonance vibration, Korean Industrial Standards (2013).
11. KS F 2405, Standard test method for compressive strength of concrete, Korean Industrial Standards (2010).
12. KS F 2711, Testing method for resistance of concrete to chloride ion penetration by electrical conductance, Korean Industrial Standards (2012).
13. ASTM C 876-91, Standard Test Method for Half-cell Potentials of Un-coated Reinforcing Steel in Concrete (1999).
14. R. Romagnoli, R. O. Batic, V. F. Vetere, J. D. Sota, I. T. Lucchini, R. O. Carbonari, *Anti-Corros. Method M.*, **49**, 11 (2002).