

工學碩士 學位論文

多技能 센서를 이용한 鐵筋콘크리트 構造物의
腐蝕 및 防蝕 모니터링에 關한 研究

A Study on the Corrosion and Cathodic Protection
Monitoring for the Reinforced Concrete Structures with
Multi-functional Sensor



2013年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

機關시스템工學科

趙 圭 章

本 論文을 趙圭章의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 李 明 勳 (印)

委 員 鄭 珍 阿 (印)

委 員 趙 權 回 (印)



2012 年 12 月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

목 차

Abstract	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 부식의 정의	5
2.2 콘크리트 재료의 특성 및 구성	8
2.2.1 콘크리트의 특성	8
2.2.2 콘크리트의 구성	9
2.3 철근콘크리트의 열화	11
2.3.1 환경에 의한 콘크리트 열화	11
2.3.2 철근콘크리트의 부식	17
2.4 철근콘크리트 구조물의 부식 모니터링	20
2.4.1 부식 모니터링의 중요성	20
2.4.2 부식 모니터링 방법	20
2.5 철근콘크리트 구조물용 부식 모니터링 센서	23
2.6 철근콘크리트 구조물의 부식 방지법	25
2.6.1 외부전원법(ICCPC)	25
2.6.2 희생양극법(SACP)	27
제 3 장 실험 방법	29
3.1 시험편 및 센서	29
3.2 실험 조건	34
3.3 실험 장치	35
3.3.1 항온·항습조	35

3.3.2 멀티미터 및 기준전극	35
3.3.3 비저항 측정기	35
3.3.4 분극 실험 장치	35
3.3.5 음극방식 실험 장치	35
3.4 실험 분석 및 평가 방법	38
3.4.1 부식전위 측정	38
3.4.2 부식속도 측정	38
3.4.3 갈바닉전류 측정	40
3.4.4 콘크리트 비저항 측정	42
3.4.5 방식전위 및 방식전류 측정	43
3.4.6 4시간 복극전위 측정	43
제 4 장 실험 결과	44
4.1 콘크리트의 부식전위 측정 결과	44
4.2 콘크리트의 부식속도 측정 결과	48
4.3 콘크리트의 갈바닉전류 측정 결과	52
4.4 콘크리트의 비저항 측정 결과	54
4.5 콘크리트의 방식전위 및 방식전류 측정 결과	56
4.6 콘크리트의 4시간 복극전위 측정 결과	58
제 5 장 결 론	59
참고 문헌	60

- Table List -

Table 2.1	Typical oxide ingredients of portland cement	9
Table 2.2	Expansion rate after reacting calcium sulfate	14
Table 2.3	The probability of corrosion by amount of chloride	21
Table 2.4	Overview of recent corrosion monitoring sensors	24
Table 3.1	Environment of experiments	34
Table 3.2	The probability of corrosion by corrosion rate	39
Table 3.3	Galvanic series for seawater	41
Table 3.4	The probability of corrosion by concrete resistivity	42



- Figure List -

Fig. 1.1	View of the damaged splash & tidal zone of the marine bridge column	3
Fig. 2.1	Cycle between refining and corrosion	5
Fig. 2.2	Electrochemical model of corrosion in metal	6
Fig. 2.3	Typical polarization curve in metal	7
Fig. 2.4	Freeze and thaw disintegration	13
Fig. 2.5	Disintegration caused by sulfate attack	15
Fig. 2.6	Disintegration caused by alkali-aggregate reaction	16
Fig. 2.7	The breakdown of the passive layer and recycling chlorides	18
Fig. 2.8	Dissolved oxygen effect for concrete rebar	19
Fig. 2.9	The anodic and cathodic reactions	19
Fig. 2.10	Schematic formation of impressed current cathodic protection with MMO/Ti-mesh	26
Fig. 2.11	Typical polarization curve applying ICCP	26
Fig. 2.12	Schematic formation of sacrificial anode cathodic protection with Zn-mesh	27
Fig. 2.13	Typical Polarization curve applying SACP	28
Fig. 3.1	Schematic drawing of DMS-100 sensor	30
Fig. 3.2	Schematic drawing of GCM sensor	31
Fig. 3.3	Entire view of specimen	31
Fig. 3.4	Arrangement of GCM & DMS-100 sensor	32
Fig. 3.5	Arrange. of GCM, CorroWatch, ERE-20, diode sensors	32
Fig. 3.6	Varnishing of specimens	33
Fig. 3.7	View of specimens inside of thermo-hygrostat	33
Fig. 3.8	View of experiments	36
Fig. 3.9	View of elec. power supply & measuring experiment for	

ICCP	37
Fig. 3.10 Corrosion potential measurement of concrete	38
Fig. 3.11 Typical curve and plot by linear polarization	40
Fig. 3.12 Concrete resistivity measurement(Wenner technique)	42
Fig. 3.13 Example graph measured instant-off potential	43
Fig. 4.1 Variations of rebar potential with time at different cover thickness	45
Fig. 4.2 Variation of rebar potential with temperature	47
Fig. 4.3 Variations of CorroWatch rebar potential with time at different cover thickness	47
Fig. 4.4 Variations of corrosion rate with time in different chloride concentration	49
Fig. 4.5 Variation of corrosion rate with time at different temperature conditions	50
Fig. 4.6 Variations of corrosion rate and potential with time	51
Fig. 4.7 Variation of galvanic current with time at different cover thickness	53
Fig. 4.8 Variations of concrete resistivity at different temperature	55
Fig. 4.9 Variation of cathodic protecting potential with temperature in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems	57
Fig. 4.10 Variation of cathodic protecting current with cover thickness in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems(Log Scale)	57
Fig. 4.11 Variation of 4 hour depolarization potential with cover thickness in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems	58

A Study on the Corrosion and Cathodic Protection Monitoring for the Reinforced Concrete Structures with Multi-functional Sensor

Gyu Jang Jo

*Department of Marine System Engineering
Graduate School of Maritime industrial study, Korea Maritime University*

ABSTRACT

The reinforced concrete has been used as a constructive material and it becomes one of the most frequently utilized materials due to its cost-effectiveness and abundance nowadays. Normally, pH of concrete is 12-14 and it is a high alkaline condition. In this environment, steel is not corroded because compact passive layers are formed in the steel surface. However, the reinforced concrete structures can suffer severe corrosion problems. The major factors in corrosion of concrete are oxygen, water, chloride, and carbon dioxide. Especially, chloride is very critical element on the corrosion of concrete structures. Chloride acts as a catalyst and destroys passive layers locally.

To protect corrosion, many advanced methods have been introduced and applied related to physical, chemical, and electrochemical protection.

However, first of all, checking the initial corrosion and the application of corrosion monitoring system is desirable. By inspecting inner state regularly, it is easy to detect the initial corrosion time and it reduces cost to spend conservations. Therefore, in this study, three different kinds of corrosion monitoring sensors(DMS-100, GCM, Corrowatch, and ERE-20 sensors) were applied to detect corrosion initiation and propagation.

In addition, many corrosive conditions were simulated to verify the effectiveness of monitoring sensors. Furthermore, cathodic protection system, one of the electrochemical protection methods, was monitored with the use of monitoring sensors. Test factors were corrosion potential, corrosion rate, galvanic current, protection potential, protection current, and 4 hour depolarization potential.

Multi-functional sensors were very effect to detect the corrosion and monitor the cathodic protection and following results were obtained.

1. Corrosion potential was dropped with time and temperature in chloride conditions. Galvanic current was increased with time and it was not possible to measure until the potential difference between anode and cathode was above 150mV. In addition, closed rebar from the surface of specimen showed high galvanic current
2. Corrosion rate was increased as the amount of chloride rose. In addition, the high temperature was, the higher corrosion rate obtained.
3. The accuracy of corrosion monitoring could be enhanced, as many test factors were compared. This is because some critical error can happen even though monitoring method is very accurate.
4. Cathodic protection(CP) was also monitored with the used of multi-functional sensors. In this experiment, although sacrificial anode CP was used, 4 hour depolarization potential was higher than 600mV. This was thought that specimen was exposed to salt water and porous mortar was used.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

콘크리트는 자갈, 모래에 시멘트와 물을 함께 혼합하여 만든 복합재료로 지구상에서 인류가 물 다음으로 가장 널리 사용하는 건설재료이다. 이처럼 콘크리트가 건설재료로 많이 사용되는 데에는 콘크리트만의 특별한 이유가 있다.

첫째, 콘크리트는 물에 대한 저항력이 커서 댐, 운하, 수로관, 수조 등과 같은 구조물의 건설에 적합하다. 그리고 강도가 요구되는 바닥, 보, 기둥, 지붕, 교량, 도로포장 등에는 철근과 함께 제작되어, 압축 강도는 크나 인장 강도가 작은 콘크리트의 단점이 보완 된다. 또한 고알칼리환경(pH 12~13)의 콘크리트는 부식되기 쉬운 철근표면에 부동태피막(passive film)을 형성시켜, 철근의 내식성을 높이는 장점도 지니고 있다.

둘째, 콘크리트를 이용하여 구조물을 이루고 있는 요소들을 다양한 형태와 크기로 만들 수 있다.

셋째, 콘크리트는 외부 환경에 대한 내구성과 화재에 대한 내화성이 뛰어나며, 콘크리트의 주재료인 포틀랜드 시멘트와 골재가 비교적 값이 저렴하여 경제적이기 때문이다. 이러한 이유로 현재 국내의 연간 시멘트 소비량은 최소 7,000만톤 이상으로 추정한다^[1].

일반적으로 콘크리트 구조물은 적절한 설계와 건전한 시공이 수행된다면 그 수명이 반영구적이라고 할 만큼 내구성이 뛰어나고 유지 관리가 거의 필요하지 않다. 그러나 그 구조물은 시공 단계에서부터 시간의 경과에 따라 설계에서 예측하지 못했던 여러 가지 변화를 겪게 된다. 대표적인 사례로는 시공 중의 잦은 설계 변경 및 시공불량, 구조물 완공 후 용도변경에 따른 하중 증가, 구조물이 놓여 있는 지역의 환경 그리고 시간의 경과에 따른 재료 물성의 변화 등이 있다. 이와 같은 요인으로 인해 구조물의 내구성(durability)은 저하되는 경향이 나타난다. 따라서 콘크리트 구조물은 60~100년의 예상 수명 전에 붕괴되거나 붕괴의 위험에 처하는 경우가 대부분이다. 또한 심한 경우에는 시공 된지 수년 이내에 콘크리트 내의 철근이 부식하여 그 구조물이 심각하게 균열되는 사례가 보고되고 있다^[2]. 특히, 대기 중에 포함된 이산화탄소에 노출된 육상 구조물에서는 콘크리트 중성화로 인해 철근의 부동태

피막이 파괴되어 철근부식이 발생하고, 다습하고 염화물(chloride)이 많은 환경에 노출되어 있는 해상 교량이나 항만 구조물 같은 해양 구조물에서는 염분의 침입에 의한 철근의 국부부식(pitting corrosion)이 심하게 나타난다. 이로 인하여 철근 표면에 생긴 부식 생성물의 체적은 작게는 원래 철근의 2배 크게는 최대 10배 까지 팽창하여, 콘크리트의 균열 및 박리로 발전되어 콘크리트 내구성의 저하를 야기한다. 또한 해수의 침입에 의한 콘크리트 비저항의 저하는 콘크리트 내부의 철근 부식 손상을 더욱 가속화 시킨다. Fig. 1.1은 해상교량 교각의 철근콘크리트 구조물 수면부에서 발생한 부식손상 예를 보여준다.

사용 중인 철근콘크리트의 부식 손상을 방지하기 위해서는 콘크리트 표면에 코팅(coating), 실링(sealing) 또는 방수 막을 설치하거나 인히비터(inhibitor)를 도포하여 억제시키기도 하지만, 가장 일반적인 방법은 손상된 콘크리트 부위를 제거하고 철근을 소제한 후 모르타르(mortar)로 채우는 패칭(patching)공법이 있다. 한편 이 보수 공법은 시공이 상대적으로 용이하고 경제적이어서 관리자의 입장에서 선호하는 방법이지만 근본적으로 부식을 막을 수 있는 방식법이 되지 못한다. 즉, 이 패칭 공법을 시행하게 되면 일반적으로 보수 후 콘크리트 부위보다 보수 전 콘크리트 부위의 철근전위가 낮게 나타날 수 있다. 따라서 이 경우에는 역으로 보수 전의 콘크리트 철근 부위가 양극이 되어 갈바닉부식(galvanic corrosion)을 촉진 시키는 문제가 발생한다. 또한 프리스트레스트(pre-stressed) 또는 포스트텐션드(post-tensioned) 콘크리트의 경우에는 인장 및 압축 강도의 불균일로 인하여 내구성 문제가 발생하기도 한다. 그렇기 때문에 해상 구조물에서는 하나의 해결방안으로 음극방식(cathodic protection)을 채택하고 있다. 영국의 경우는 전체 건설비의 약 40%를 구조물의 보수 및 유지관리 비용으로 사용하고 있고, 국내의 환경과 유사한 일본의 경우에도 약 25%를 사용하고 있다. 그러나 국내의 경우 전체 건설비의 5% 수준 밖에 되지 않아 상대적으로 부족한 실정이다^[3]. 더구나 최근 더욱 더 크고, 길고, 높은 구조물을 추구하는 경향이 있는 현대사회에서는 나중에 발생할 수 있는 사고에 대한 경제 및 사회적 비용을 고려해야 하기 때문에 철근콘크리트에 대한 부식을 예측하고 방지하는 방법은 필수적으로 중요한 과제라고 사료된다.

일반적으로 부식성 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 철근에 대한 부식 예측 및 방지하는 여러 가지 부식방지 대책 중 가장 선행되어야 할 것은 부식이 진행되기 이전인 부식 발생 초기에 부식 상태를 정성적, 정량적으로 측정하는 부식 모니터링(monitors)이다.

여기서 콘크리트 구조물의 부식을 모니터링하기 위해서는 콘크리트 열화를 야기하는 물리적 또는 환경적인 인자를 감지하는 센서(sensor) 및 측정 장치가 필요하다.

또한 철근 부식의 측정 방법으로는 콘크리트 표면에서 내부 철근의 부식 상태를 측정하는 방법과 콘크리트 내부에 매립한 센서를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 그러나 지금까지 소개된 방법들과 센서들의 경우에는 측정된 데이터(data)에 의한 분석이 오관으로 이어지는 사례가 빈번히 보고되고 있고, 여러 해외 시공 사례에서도 많은 문제점들이 지적되고 있다^[2]. 그러므로 이상과 같은 콘크리트 내부 철근의 부식 측정 및 분석 방법의 오류를 개선하기 위해서는 무엇보다도 신뢰성이 높은 콘크리트용 부식 센서의 개발이 시급히 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 신뢰성 높은 부식 상태에 대한 정보는 물론 방식 기능을 효율적으로 모니터링할 수 있도록 하기 위하여 여러 가지 부식 관련 측정이 가능한 다기능센서(multi-functional sensor)를 콘크리트 시험편 내에 매립하여 다양한 부식 환경에서 노출시험하여 부식 방식 상태를 분석-평가 하였다.

즉, 여기서는 이상과 같은 시험을 통하여 철근콘크리트 구조물의 부식·방식 모니터링용 다기능센서의 적용 개발에 관한 유효한 기초적인 설계 지침을 제시하고자 하였다.



Fig. 1.1 View of the damaged splash & tidal zones in the marine bridge column^[3]

1.2 연구내용

여기서는 본 연구 목적에 따라 제작한 철근콘크리트 시험편 내 다기능센서에 의해 여러 가지 부식환경 중 부식전위(corrosion potential), 갈바닉전류(galvanic current), 콘크리트 비저항(concrete resistivity), 부식속도(corrosion rate) 및 온도를 측정하여 부식 관련 데이터를 수집하고 분석-평가 하였다.

즉, 다기능센서를 콘크리트에 매립하여 제작한 시험편은 대기환경과 3%, 5% 및 15% 염수의 4 가지로 조성한 실험 환경 중 -5℃, 10℃, 25℃, 40℃ 등의 다양한 온도 조건에서 약 400시간 동안 실험하였다. 또한 이상과 같은 부식실험 진행 중에는 음극 방식의 효과를 모니터링하기 위하여 두 개의 시험편에 각각 희생양극법(SACP, Sacrificial Anode Cathodic Protection)과 외부전원법(ICCPC, Impressed Current Cathodic Protection)을 적용하고 다기능센서에서 수집된 데이터를 통하여 부식 및 방식 거동을 비교하여 분석-정리 하였다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 부식의 정의

금속은 Fig. 2.1과 같이 자연적으로 존재하는 화합물 즉 광석에 에너지를 공급함으로써 얻어진다. 에너지를 얻은 금속 상태 보다는 화합물 상태로 존재할 때가 더 안정적이다.

부식은 공급된 에너지를 방출하여 본래 상태인 산화물로 되돌아가려는 현상으로, 부식을 정의하는 방법으로는 3가지가 있다. 첫째, 현상적으로 정의되는 부식은 금속이 주위환경과 반응하여 표면에 녹(rust)이 발생하거나, 산화(oxidation)되어 물리적 화학적 성질이 퇴화되는 현상이다. 둘째, 전기화학적(electrochemical)으로 정의되는 부식은, 전위가 낮은 양극(anode)에서는 산화반응이 일어나 금속이온이 분해되어 용액 속으로 들어가고, 전위가 높은 음극(cathode)에서는 수소가 발생하거나 산소 또는 금속이온이 환원되고 금속이 석출되는 것을 말한다. 셋째, 분극(polarization)현상으로 정의되는 부식은 전극의 전위가 주위환경과 평형을 이루기 위해 변화하는 현상으로, 전류 흐름에 의한 전위의 변화 즉 전류가 흐르지 않을 때와 흐를 때의 차이를 말한다^[4].

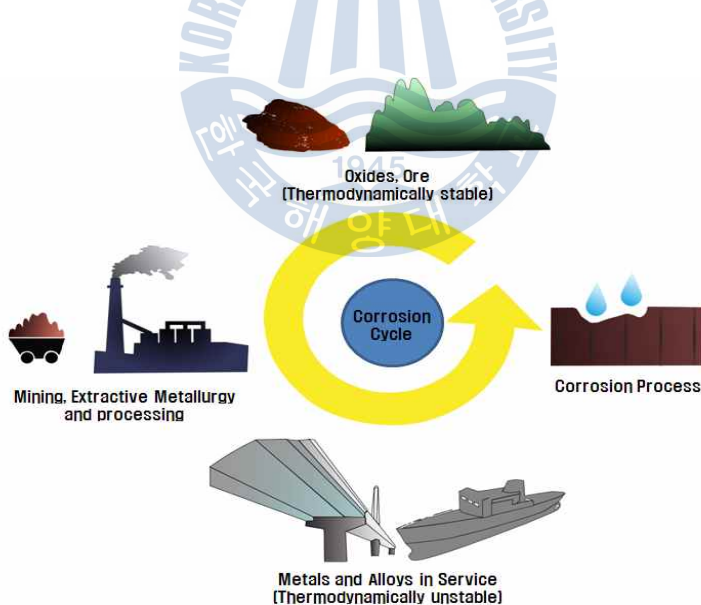


Fig. 2.1 Cycles between refining and corrosion^[3]

Fig. 2.2는 전기화학적 정의에 의한 부식 발생의 조건을 나타내는 그림이다. 부식 발생을 위해서는 양극과 음극이 존재하여 마이크로(micro) 또는 매크로(macro) 전지(cell)를 형성해야 하고, 양극과 음극이 전기적으로 접촉하여 전자의 이동에 필요한 통로를 형성해야 하며, 이온의 이동이 가능한 전해액이 필요하다. 이와 같이 부식 조건이 충족되면, 활성인 금속(양극)에서 전자가 발생하여 음극으로 전달되며, 양극에서 부식이 발생한다.

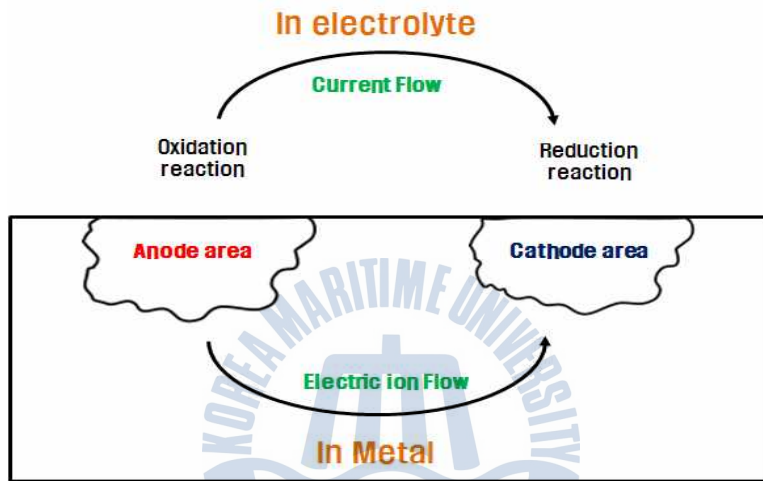


Fig. 2.2 Electrochemical model of corrosion in metal^[2]

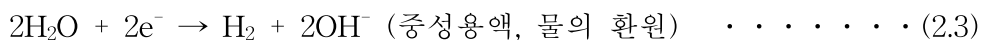
부식에 대한 전기화학식은 아래와 같다.^[5]

가) 산화반응/양극반응(oxidation reaction)

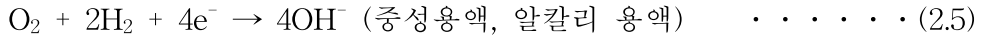
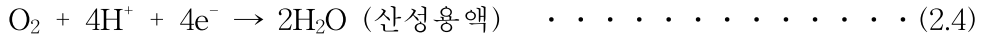


나) 환원반응/음극반응(reduction reaction)

1) 수소발생



2) 산소환원



3) 금속이온환원



4) 금속의 석출



Fig. 2.3은 부식 환경에서의 금속의 대표적인 분극도로 전류 흐름에 의한 전위의 변화($E_{\text{corr}} - E_a$)를 보여주며, 전위의 (+)화는 부식의 발생을 의미한다. 일반적으로 많은 에너지를 보유한 금속은 전위가 낮고 활성이며, 적은 에너지를 보유한 금속은 전위가 높고 안정적이다. 따라서 금속의 부식 과정에선 에너지가 방출되면서 전위가 상대적으로 상승한다.

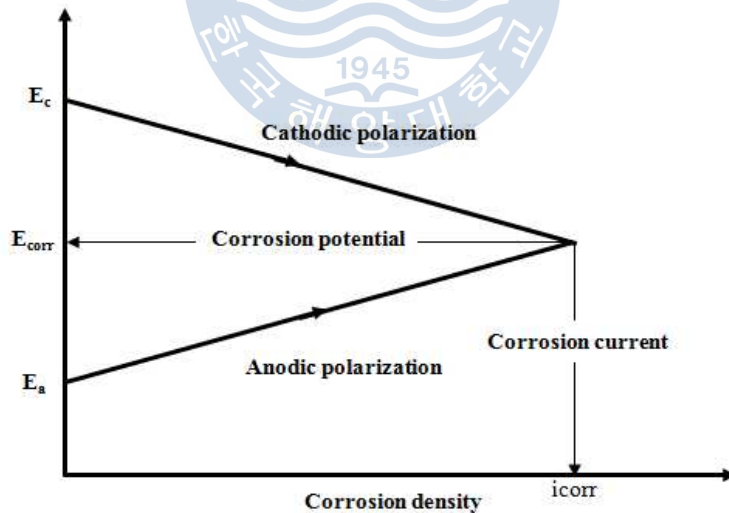


Fig. 2.3 Typical polarization curve in metal

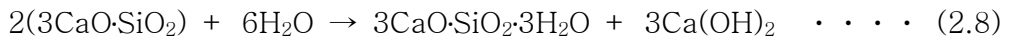
2.2 콘크리트 재료의 특성 및 구성

2.2.1 콘크리트의 특성

콘크리트는 결합재인 시멘트와 물, 자갈 모래 등의 골재 그리고 다양한 첨가물이 혼합된 복합재료로, 시멘트와 물의 화학반응에 의해 시간이 경과함에 따라 점차 단단하게 굳어지는 성질을 가진다. 일반적으로 사용되는 콘크리트 재료의 구성 성분은 용적으로 약 70%가 골재이고 나머지 약 30%가 결합재이다. 이 결합재는 굳지 않은 상태에서 골재 사이의 공극을 채우고 유동성을 유지하여 구조물의 성형을 좋게 하며, 시멘트와 물의 수화반응(hydration)으로 골재와 결합하여 요구되는 강도를 발휘한다. 또한 결합재인 시멘트의 주성분은 산화칼슘(CaO), 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 삼산화철(FeO₃) 등이며, 골재는 굵은 골재인 자갈과 잔골재인 모래로 구성되며 콘크리트의 결합력과 강도를 증가시킨다.

콘크리트의 최대 장점인 압축 강도(compressive strength)는 지속적인 시멘트의 수화반응으로 인하여 시간에 따라 증가한다. 하지만 이러한 계속되는 압축 강도 증가에도 불구하고 콘크리트의 인장 강도가 매우 낮기 때문에, 이 단점을 보완하기 위해 콘크리트 내부에 강화 철근을 삽입하여 인장 강도를 증가시킨다. 강화 철근이 삽입된 철근콘크리트는 성형성이 좋고 압축 강도와 인장 강도가 크며 철근의 부식 방지 효과도 우수하고 경제성, 내열성 및 내구성 등의 여러 장점들이 있다.

한편 콘크리트의 초기 경화과정의 시멘트 수화반응에서 시멘트 화합물 중 가장 많은 C₃S(3CaO · SiO₂) 성분은 물과 반응하여 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 규산칼슘수화물(C-S-H)을 생성한다. 이 반응의 화학식은 다음과 같다^[1].



식 (2.8)과 같이 생성된 수산화칼슘에 의한 콘크리트의 고알칼리환경(pH 12~13)은 철근 표면에 20~60 Å 두께의 부동태 피막을 생성시켜 인장강도를 증가시키기 위해 콘크리트 내부에 삽입된 강화 철근의 부식을 예방할 수 있다.

2.2.2 콘크리트의 구성

콘크리트는 시멘트, 물, 모래와 자갈 등의 골재, 그리고 콘크리트의 여러 성질을 개선시키고 향상시킬 목적으로 사용되는 혼화재료 등 다양한 재료로 구성된 복합 재료이다. 콘크리트의 재료가 구성되는 형태에 따라 크게 명칭이 구분되는데 시멘트와 물로만 구성된 것을 시멘트페이스트(cement paste)라 하고 시멘트와 물 그리고 잔골재(모래) 등으로 구성된 것을 모르타르라 한다. 그리고 콘크리트는 모르타르에 자갈 같은 굵은 골재를 포함시킨 것을 말한다.

(1) 시멘트

시멘트는 생석회, 실리카, 알루미나, 산화철 등을 혼합하여 약 1,450~1,500℃까지 가열시켜 얻은 클링커(clinker)에 석고를 가하여 미세하게 분쇄한 것이다.

포틀랜드시멘트의 클링커 고용체의 구성 성분은 알라리트(alite; C_3S), 벨라리트(belite; C_2S), 알루미네이트상(aluminate phase; C_3A), 셀라이트(celite; C_4AF)이다. 대표적인 산화물 성분 및 약식기호는 Table 2.1와 같다.

Table 2.1 Typical oxide ingredients of portland cement³

Oxide	Symbol	Composition(%)	Oxide	Symbol	Composition(%)
CaO	C	64.67	K ₂ O	K	0.61
SiO ₂	S	21.03	Na ₂ O	N	0.34
Al ₂ O ₃	A	6.16	SO ₃	\bar{S}	2.03
Fe ₂ O ₃	F	2.58	CO ₂	\bar{C}	-
MgO	M	2.62	H ₂ O	H	-

(2) 골재

콘크리트 체적의 약 70%를 차지하는 골재 중 모래 같은 잔골재는 시멘트페이스트의 압축 강도와 인장 강도를 증가시키고, 굵은 골재인 자갈은 모르타르의 압축 및 인장 강도 모두를 증가시킨다. 그리고 골재의 종류와 품질은 콘크리트의 성질에 커다란 영향을 미치기 때문에, 양질의 골재를 선택하는 것이 좋은 콘크리트를 만드는 기본이 된다.

특히 바다 모래를 세척한 해사의 경우는 염류로 인한 철근부식의 우려가 있고, 산지 쇄석의 경우 미립자로 인한 내구성 저하가 우려되며, 인공 경량골재의 경우 품질상의 문제와 표준화에 대한 문제가 있다. 따라서 이에 대한 신뢰성을 고려하여 골재를 선택해야 한다.

(3) 배합수

콘크리트 용적의 약 15%를 차지하는 배합수는 콘크리트 기본 재료중의 하나이며, 콘크리트에 적절한 유동성과 작업성을 부여하고 동시에, 시멘트와 수화반응을 일으켜 경화를 촉진시키는 역할을 한다. 적합한 배합수란 굳지 않는 콘크리트에 작업성, 응결, 강도 발현 등에 나쁜 영향을 주지 않으며, 강재를 부식시키는 물질이 유해 함량 이상 포함되지 않은 물을 뜻한다.

일반적인 배합수는 수도수, 하천수, 지하수 등이 있다. 음용수나 깨끗한 하천수, 지하수 등은 그대로 사용할 수 있으나, 생활하수, 공장 또는 농장의 오·폐수, 해안 근처의 하천수 및 지하수 등은 불순물, 염류 함량에 대한 영향을 고려하여 적부 판정을 해야 한다. 특히 해수 또는 해안근처의 지하수나 하천수의 경우는, 철근콘크리트의 철근 부식에 치명적일 뿐만 아니라, 콘크리트의 응결 경화, 강도의 발현, 체적 변화, 워커빌리티와 내구성 등을 저하시킬 수 있기 때문에, 그 사용은 극히 제한되어야 한다.

(4) 혼화재료(admixture)

혼화재료는 시멘트, 배합수, 골재 이외의 재료로, 적당량 첨가하여 콘크리트의 제 성질을 개선시키고 향상시킬 목적으로 사용되며, 굳지 않는 콘크리트의 성질을 변화시키는 특성을 가지고 있다. 우리나라에서는 일반적으로 혼화재료를 사용량에 따라 혼화제(chemical admixture)와 혼화재(mineral admixture)로 구분한다.

혼화제는 시멘트 중량에 대하여 1% 전후 첨가하는 것을 말하고, 혼화재는 5% 이상 첨가한 것을 말한다.

2.3 철근콘크리트의 열화

콘크리트 열화란, 초기에 콘크리트가 가지고 있던 성능이 물리적(하중, 열, 습도, 기상, 진동, 충격), 화학적(염분, 탄산가스) 및 물리화학적(철근의 부식) 원인에 의해서 그 원래의 성질이 저하되는 현상을 말한다.

특히 쇄석골재 및 바다 모래의 사용, 시공 중의 잦은 설계변경 및 시공불량으로 인한 구조물의 품질 저하, 구조물 완공 후의 용도변경에 따른 하중 증가, 구조물이 놓여있는 지역의 환경, 시간의 경과에 따른 재료 물성의 변화 등으로 인하여 구조물의 내구성(durability)이 저하된다. 열화의 증상은 표면붕괴, 박리, 균열 및 콘크리트 내부의 중성화로 인한 철근의 부식으로 이어지며, 이 철근부식 생성물의 팽창으로 인한 균열 및 박리현상은 철근콘크리트의 열화를 가속화 한다. 이로 인해 저하된 강도는 구조물의 내구성 저하를 야기하고, 결국은 붕괴에 까지 이르게 한다.

2.3.1 환경에 의한 콘크리트 열화

콘크리트의 양생 이후의 열화 현상은, 구조물 완공후의 용도 변경에 따른 하중 증가, 시간의 경과에 따른 재료 물성의 변화, 구조물이 놓여있는 지역의 환경 등에 의하여 발생한다. 그 결과 구조물의 내구성(durability)이 저하되는데 이 중에서 구조물이 놓여있는 지역의 환경에 의한 열화가 대 부분을 차지한다.

환경에 의한 열화의 요인은, 풍화작용(동결융해, 황산염해, 알칼리-골재반응)과 해양환경에서 염분에 의한 철근의 부식 등, 그 기구가 다양하다.

(1) 풍화(Weathering)

풍화작용은 물질의 분자나 원자의 성분이 바뀌는 화학적 풍화(chemical weathering)와, 물질의 성분 변화 없이 상태만을 변화시켜 일어나는 물리적 풍화(physical weathering)로 구분된다.

콘크리트 구조물에서는 순수한 화학적 풍화 보다는, 화학적 변화를 동반하는 물리적 변화 즉, 물리·화학적 풍화(chemical & physical weathering)가 대부분이다. 고온 다습한 지역에서는 물리·화학적 풍화가 한랭 건조한 지역에서는 물리적 풍화가 우세하게 나타난다.

가) 물리적 풍화

물리적 풍화에는 기후변화에 따른 단순 물리적 풍화와 물리적 현상을 동반하는 동결융해(freeze and thaw)와 염류(salt)에 의한 풍화가 있다.

1) 단순 물리적 풍화(General Physical Weathering)

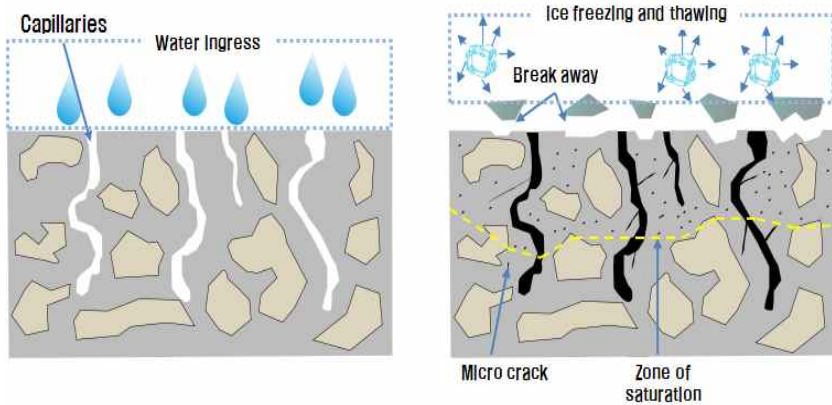
단순 물리적 풍화는, 자연적인 온도상승과 강하로 인한 팽창과 수축, 젖었다 말랐다 하는 건습현상, 비와 바람에 포함된 먼지나 모래 같은 미립자에 의해 두들겨 맞아 생기는 마모 현상 등의 영향에 의해, 구조물의 표면에서 부터 열화되는 것을 의미한다.

2) 동결융해

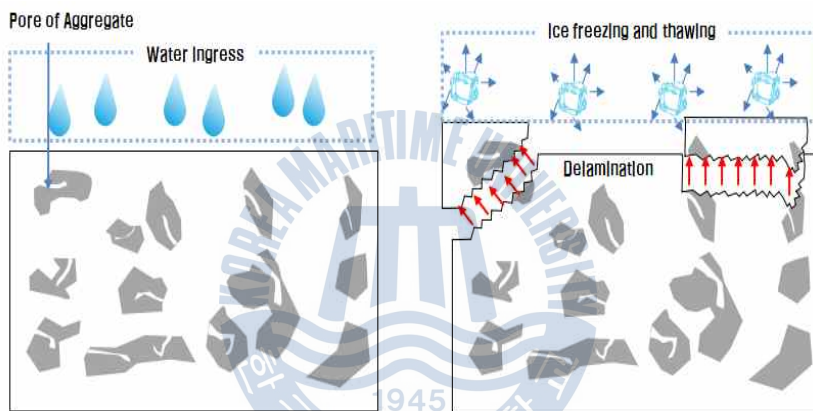
동결융해란, 콘크리트 공극에 많은 수분이 존재할 때 온도 강하로 인하여, 수분이 얼기 시작하면 얼음이 팽창(0°C 얼음의 체적; 0.917 g/cm^3 , 따라서 약 9% 부피증가)하고, 그 팽창 압력이 콘크리트의 인장 강도를 초과하면, 균열이 발생하는 것을 말한다. 이 동결융해의 일반적인 가속화 과정은 다음과 같다. 수분에 노출된 환경의 콘크리트는 외부에서 부터 냉각되므로, 먼저 표층부 모세관 내의 물이 얼게 되고, 얼음의 팽창에 의해 균열이 내부로 진행된다. 이렇게 표층부에서 부터 중심부 쪽으로 연속적으로 얼게 된 얼음은 썩기 역할을 하며, 콘크리트에 깊숙한 균열을 발생시킨다. 습기가 없을 때의 콘크리트의 동결과 융해는 단지 콘크리트 자체의 수축과 팽창만을 야기한다. 이런 팽창 압력은 수분이 존재하지 않는 공간에 흡수되어 큰 영향은 없다. 그러나 콘크리트 표면이 습기에 노출되어 있을 때는 반복되는 동결과 융해로 인하여, 균열 및 박리(delamination) 형태의 열화현상을 나타낸다. Fig. 2.4는 전형적인 동결융해 열화 과정을 보여주는 그림이다.

3) 염류(Salt)

염화나트륨(sodium chloride), 황산마그네슘(magnesium sulphate), 질산칼륨염(potassium nitrate), 염산(calcium chloride) 등의 염류는, 물에 의해 콘크리트 내부에서 용해가 이루어지고, 표면에서 물이 증발하게 되면 결정체(crystal)로 농축되어, 모세관 공극에 채워지게 된다. 이 공극에 채워진 농축된 결정체가 수분과 접하게 되면 팽창하여 인장력을 발생시키고 콘크리트의 균열을 야기한다.



(a) Pore and capillaries swelling cause micro cracks



(b) Water penetrates aggregates with high absorption

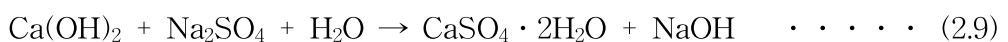
Fig. 2.4 Freeze and thaw disintegration^[3]

나) 물리·화학적 풍화

물리·화학적 풍화란, 계에서 화학적 변화를 동반하는 물리적 현상에 의해서 열화되는 현상으로, 그 원인으로는 황산염 반응과 알칼리-골재반응이 있다.

1) 황산염 반응(Sulphate Attack)

토양, 하천수, 온천수, 하수 및 각종 공장의 폐수에 포함된 황산염은, 시멘트가 수화반응 할 때, 식 (2.9)과 같이 반응하여 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 생성한다.



이렇게 생성된 석고가 시멘트 경화제 중의 알루미늄산3칼슘(C_3A ; $3CaO \cdot Al_2O_3$ /알루미네이트)과 반응하여, 불용성의 에트링가이트(ettringite; $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_2O$)라는 물질을 생성하는데, 이 같은 반응을 황산염 반응이라 한다. 이 반응에 의해 생성된 에트링가이트는 물을 흡수하여 크게 팽창하며, 이 팽창압력이 내부 구속력보다 크게 되면 콘크리트에 균열을 발생시킨다. 이 현상은 장기간 해수에 침입된 구조물에서 특히 심하다. Table 2.2는 황산염 반응에 의한 생성물과 그 부피가 팽창하는 정도를 나타낸 표이며, Fig. 2.5는 열화 과정을 보여주는 그림이다.

2) 알칼리 골재반응(Alkali Aggregate Reaction)

콘크리트의 수화 과정에서 생긴 알칼리 성분과 골재가 반응하는 것을 말하며, 이 반응 생성물이 주위 수분을 흡수하여 콘크리트내부에 국부적인 팽창압력을 가하여 균열을 발생시키는데, 그 종류는 3가지가 있다.

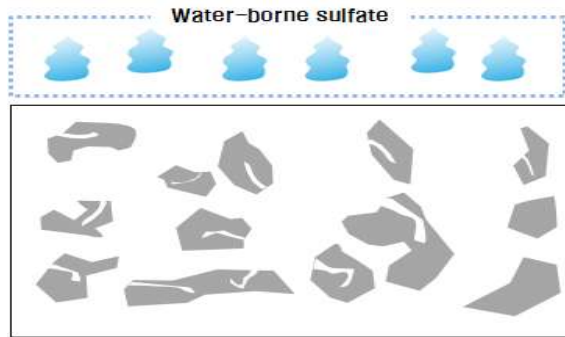
첫째, 포틀랜드시멘트 중의 알칼리성분(Na_2O)이 골재 중의 실리카(silica) 성분과 결합하여, 알칼리-실리카겔(alkali-silica gel)을 형성하는 알칼리-실리카반응이다.

둘째, 탄산기를 갖는 골재와 수산화알칼리가 반응하여, 수산화마그네슘을 생성시켜 팽창하는 알칼리-탄산염 반응이다.

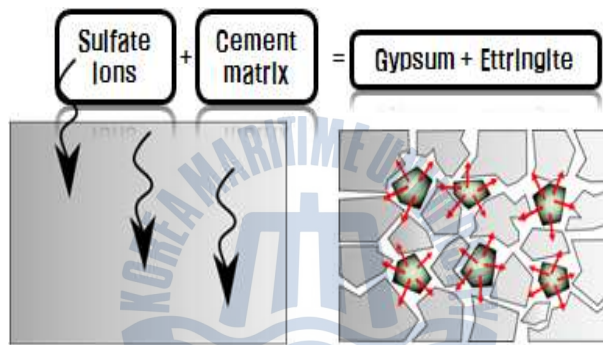
셋째, 층상의 경산염이 긴 세월동안 알칼리와 반응하여 팽창하는, 알칼리-실리케이트 반응 등이다. Fig. 2.6은 알칼리 골재반응에 의한 열화 과정을 보여주는 그림이다.

Table 2.2 Expansion rate after reacting calcium sulfate^[3]

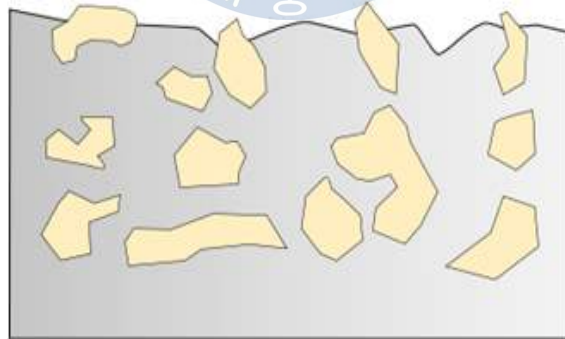
Aluminate hydrate	Product reacted with calcium sulfate	Expansion rate
C_4AH_{13}	Monosulphate	1.1
C_4AH_{13}	Ettringite	2.6
C_4AH_{19}	Monosulphate	0.8
C_4AH_{19}	Ettringite	1.9
C_3AH_6	Monosulphate	2.1
C_4AH_6	Ettringite	4.8
$Ca(OH)_2$	$CaSO_4$	2.2



(a) Water-borne sulfate penetrate into concrete

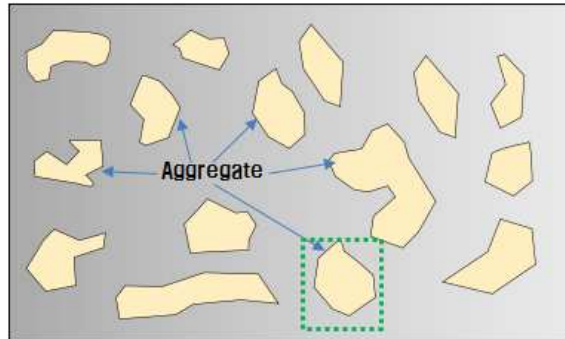


(b) Gypsum and Ettringite expand

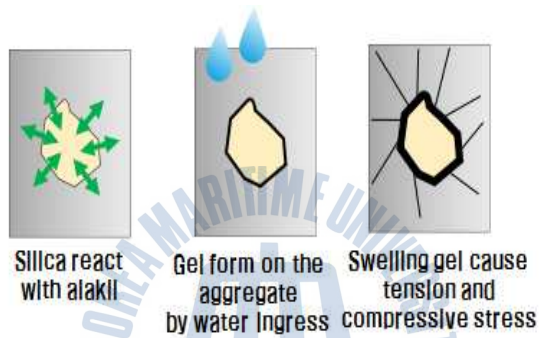


(c) Distegrating cement matrix

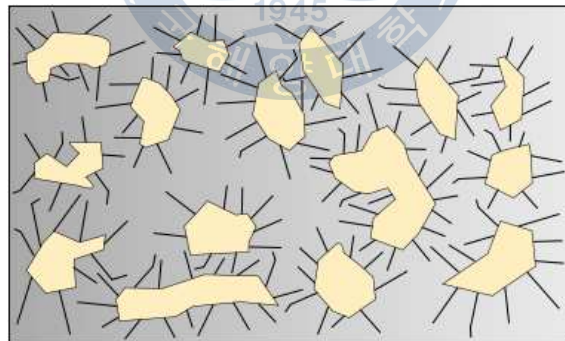
Fig. 2.5 Disintegration caused by sulfate attack^[3]



(a) At first stage of concrete



(b) Expansion mechanism



(c) Crack occur

Fig. 2.6 Disintegration caused by alkali-aggregate reaction^[3]

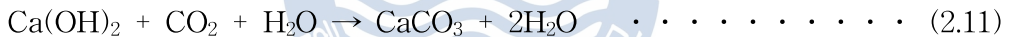
2.3.2 철근콘크리트의 부식

콘크리트의 수화반응으로 생긴 수산화칼슘과 나트륨(Na), 칼륨(K) 산화물질 등에 의한 고 알칼리 환경의 철근은, 그 표면에 형성된 20~60Å 두께의 부동태 피막으로 인하여, 부식인자인 산소와 물이 존재함에도 불구하고 부식이 쉽게 되지 않는다. 하지만 이런 부동태 피막이 파괴되어 유지될 수 없는 환경이 될 경우 콘크리트의 철근부식(이하 철근부식)이 전기화학적 반응에 의해 발생한다^[6-9].

(1) 부식에 관련된 주요 원인

가) 콘크리트의 중성화

콘크리트의 중성화란, 경화한 콘크리트가 대기 중의 탄산가스와 화합하여 pH가 저하되는 현상을 말하며, 이는 철근의 부동태 피막을 파괴하여 철근부식을 일으키는 주요 원인이다. 아래 식 (2.10)과 (2.11)은 pH 12~13인 수산화칼슘이, 대기 중의 탄산가스 또는 물에 용해된 탄산과 결합함으로써, pH 7.5~10인 탄산칼슘으로 변화하는 중성화 과정을 보여준다.



중성화 깊이가 철근 위치까지 도달하면 철근의 부식이 시작되고, 녹으로 인해 철근의 부피는 약 2.5배에서 크게는 10배까지 팽창한다. 팽창압력에 의하여 콘크리트 내부에 균열이 발생됨으로써, 철근 부착강도의 저하, 콘크리트의 박리, 철근 단면적의 감소 등의 현상이 일어난다.

나) 염화물의 영향

콘크리트 내부에 염화물이 침입하게 되는 요인은, 콘크리트 배합 시 사용되는 혼화재 및 부적절하게 세척된 해사에 의한 내적인 요인과, 도로에 뿌려지는 제설제 및 해양환경의 염분에 의한 외적인 요인으로 크게 나뉜다.

콘크리트 중 일정량 이상의 Cl⁻은 Fig. 2.7과 같이 철산화물(FeCl₂)을 생성하며, 이것은 재차 산소 및 물과 반응하여 염산(HCl)을 만든다.

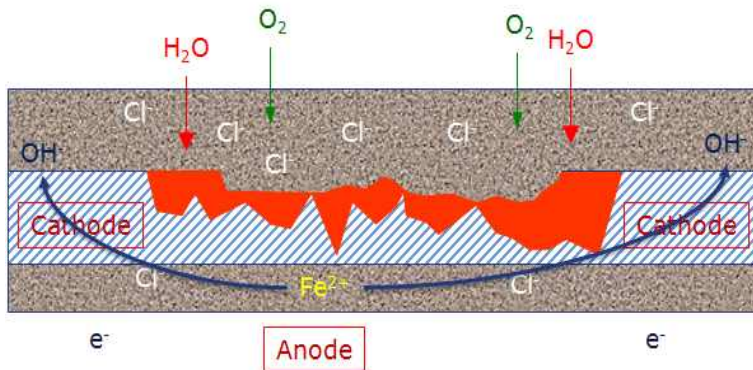


Fig. 2.8 Dissolved oxygen effect for concrete rebar^[14]

(2) 부식의 발생 기구(Corrosion Mechanism)

콘크리트의 중성화, 염화물, 용존산소의 영향을 받는 철근의 부동태 피막이 손상되면, Fig 2.9와 같이 양극에서 산화반응 음극에서는 환원반응이 나타나며 부식이 된다. 이 결과 생성된 부식 생성물은 콘크리트 내의 체적을 팽창시키고, 이 팽창으로 인한 압력이 콘크리트의 균열을 일으킨다.

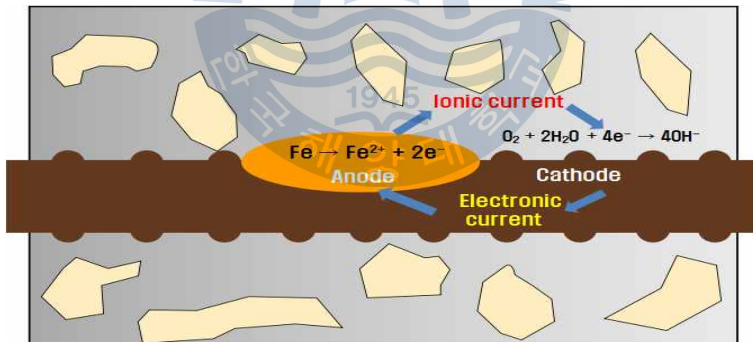
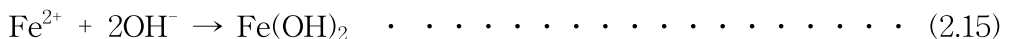
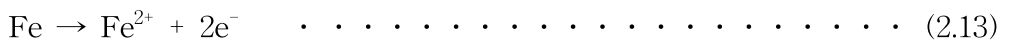


Fig 2.9 The anodic and cathodic reactions^[14]

식 (2.13)~(2.15)는 철근의 부식반응을 나타내는 기본적인 식이다.



2.4 철근콘크리트 구조물의 부식 모니터링

2.4.1 부식 모니터링의 중요성

앞에서 설명한 바와 같이, 콘크리트 구조물은 적절한 설계와 건전한 시공이 수행된다면, 그 수명이 반영구적이라고 할 만큼 내구성이 뛰어나고 유지 관리가 거의 필요하지 않다. 하지만 여러 원인으로 설계 당시의 수명을 다하지 못하고 구조물이 붕괴 또는 붕괴 위험에 처하는 경우가 많다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물은 대형 구조물이기 때문에 붕괴 사고가 발생하게 되면 그 여파는 매우 크다. 우리나라에서도 성수대교와 삼풍백화점 붕괴 등 커다란 사고를 경험한 바 있다.

콘크리트의 열화(균열, 박리, 철근의 부식)는 그 정도가 심하지 않으면 발견하기 어렵다. 특히 콘크리트의 철근부식은 노출되지 않고 서서히 진행되다가, 일정 이상 진행되면 크게 진전되기 때문에, 그 시작 및 진행 정도를 시각적으로 초기에 파악하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 콘크리트 구조물의 주기적인 부식 모니터링이, 구조물의 열화 정도를 미연에 파악할 수 있는, 가장 효과적인 방법이다.

이 주기적인 부식 모니터링은, 콘크리트 구조물의 철근의 부식 정도를 정량적으로 파악하게 할 뿐 아니라, 철근이 없는 무근 콘크리트라 하더라도 그 내부에 다기능센서를 매립함으로써 풍화(동결융해, 황산염반응, 알칼리 골재반응 등)에 의한 구조물의 균열 및 박리 등의 결함 여부를 파악하고 예측하게 하여, 그 구조물의 정비 주기 및 예상 수명을 판단할 수 있도록 한다.

2.4.2 부식 모니터링 방법

(1) 비 전기화학적 모니터링

가) 육안검사

육안검사는 모든 부식 정도를 측정하는데 있어 가장 기본적인 과정이다. 육안으로 볼 수 있는 콘크리트 표면의 녹은, 철근에 발생한 부식생성물이 액체 형태로 배어나오는 것이므로, 내부에 상당한 부식이 진행되었음을 의미한다.

하지만 이 육안검사의 경우 측정 및 판단에 대한 오차가 있을 수 있다. 구조물에 대한 육안조사를 통해 균열의 형상, 폭, 길이, 깊이와 스며나온 녹의 정도를 측정하고 도면화하여, 이 부분들에 대한 정밀조사가 필요하다.

나) 박리검사

박리검사는 해머(hammer)로 표면을 두드려 진단하거나, 초음파와 레이더를 이용하여 균열 사이의 빈 공간을 탐지하는 방법이다. 또한 적외선 카메라로 콘크리트 내부와 균열사이의 온도차를 구별하여, 박리상태를 파악하기도 한다.

다) 중성화깊이 검사

콘크리트 구조물의 표면이나 박리 또는 코어링(coring)한 콘크리트 구조물 시료에 페놀프탈레인 지시약 용액을 분무하여, 그 색의 변화로 콘크리트 표면의 중성화깊이를 측정할 수 있다. 하지만 실제 페놀프탈레인 용액이 무색을 띠는 것은 pH 9정도이며 철근표면의 부동태 피막이 파괴되기 시작하는 pH는 11정도이므로, 이를 고려한 중성화 깊이와 철근의 부식 상태 파악이 중요하다.

라) 염화물 함유량 측정법

염화물 함유량의 측정은, Quantab법이라 하는 시험방법으로 모세관 흡입 현상으로 블리딩(Bleeding)된 물을 흡입하여 중크롬산과 반응한 색의 변화를 통해 염소이온의 농도를 측정할 수 있는 방법과, 콘크리트의 표면을 떼어내거나 코어링한 시료를 분말로 하여 산(acid)으로 용해시켜 염분을 추출한 후 그 용액의 염소이온농도를 구한 후 염화물 양으로 환산하는 방법이 있다.

굳지 않고 배합 중인 콘크리트에 대해서는, 염소이온전극과 기준전극의 전위차를 이용하여 전위차에 비례하는 염소이온 농도를 계산을 통해 알 수 있는, 이온전극법을 사용하기도 한다. Table 2.3은 염화물에 따른 부식 가능성 여부를 나타낸 표이다.

Table 2.3 The probability of corrosion by amount of chloride^[3]

Chloride content of cement mass(wt%)	Chloride content of concrete mass(wt%)	Corrosiveness
< 0.2	< 0.03	Negligible
0.2 ~ 0.4	0.03 ~ 0.06	Low corrosion rate
0.4 ~ 1.0	0.06 ~ 0.14	Moderate to high corrosion rate
> 1.0	> 0.14	High corrosion rate

(2) 전기화학적 모니터링

부식은 앞의 여러 화학반응식에서 나타난 바와 같이 전기화학적 반응의 결과이다. 따라서 주기적인 전기화학적 모니터링을 통해서, 정량적으로 부식의 정도를 파악할 수 있으며, 구조물의 정비주기 및 수명 연한을 판단할 수 있다.

또한 이 방법은 비 파괴적인 검사이므로, 표면검사 및 시편 분석 검사보다 구조물의 안전에 영향을 미치지 않는 검사법이다.

가) 자연전위 측정법(Reference Electrode Potential Measurement)

전극전위는, 금속이 자연 상태에서 산화와 환원반응이 동시에 일어날 때의 금속 표면에서의 전위를 말하며, 반전지전위, 산화-환원전위, 또는 자연전위라고 한다.

이 전위의 크기를 전위차계(potentiometer) 또는 전압계(voltmeter)를 이용하여 측정하면, 어떤 물질이 산화되거나 환원되려는 경향의 세기를 알 수 있는데, 이 전위가 낮을수록 산화력이 높은 상태를 나타내며, 반대로 높을수록 환원력이 높은 상태를 나타낸다. 이 전위의 측정은 통상 기준전극을 사용하여 측정하는데, 일반적으로 해수 중 콘크리트 시험편에는 동-황산동 전극(Copper-Copper Sulfate Electrode) 및 은-염화은 전극(Silver-Silver Chloride Electrode)이 사용된다.

나) 콘크리트 비저항(Concrete Resistivity) 측정법

콘크리트 비저항은 콘크리트의 조성, 함수량, 염화물량 등에 따라 달라지며, 철근의 부식전류를 지배하는 주요 인자이다. 비저항이 낮은 구조물의 경우는 부식위험이 크나, 비저항이 높은 경우는 부식위험이 상대적으로 작다.

다) 선형분극저항법(Linear Polarization Resistance)

콘크리트 내의 철근부식은 전기화학적 반응에 의해 부식전지(corrosion cell)가 형성되고, 양극에서 음극으로 흐르는 전류에 의해 전극전위의 변화가 생긴다.

이러한 전위 변화를 분극(polarization)이라 하며 부식속도에 영향을 주게 된다. 선형분극저항법은, 철근콘크리트 구조물에서 내부 철근의 순간 부식속도를 측정하는 가장 간단한 방법으로서, 널리 사용된다.

2.5 철근콘크리트 구조물용 부식 모니터링 센서

현재까지 상용화되었거나 연구개발 단계에 있는, 콘크리트 구조물 내 철근의 부식 모니터링을 위한, 주요 부식 모니터링 센서는 Table. 2.4에서 보는 바와 같이 국외 22종, 국내 2종이 있다. 이 중 18종의 센서가 제품으로 판매되고 있고, 나머지 6종은 현재 개발 중이거나 연구단계에 있다.

부식 모니터링을 위한 센서는, 가혹한 환경에 노출되어 있는 대형 철근콘크리트 구조물(해안 구조물, 해양 구조물, 교량, 터널), 접근이 어렵거나 불가능한 지역(터널과 송수관 외벽, 기초, 교각), 그리고 특수 보호 시스템(음극 방식, 부식 억제제, 코팅)의 성능 감시 등에, 응용되어 사용되고 있다.

현재의 부식 모니터링 센서들로 측정 가능한 항목들은 다음과 같다. 하지만 하나의 센서로 아래 열거한 항목 모두를 측정할 수 있는 센서는 현재까지 개발되지 않았다^[2]

- (1) 자연전위(Reference Electrode Potential)
- (2) 부식속도: 선형분극저항법(Linear Polarization Resistance, LPR)
전기화학적 임피던스(Electrochemical Impedance Spectroscopy)
- (3) 갈바닉전류 혹은 마크로셀 전류(Galvanic Current, Macro-cell Current)
- (4) 염분농도 측정(Chloride Concentration)
- (5) 전기저항(Electrical Resistance)이나 콘크리트 비저항(Resistivity) 측정
- (6) 온도(Temperature)

Table 2.4 Overview of recent corrosion monitoring sensors

Nation	Manufacturer	Description	Application
Korea	Conclinic Inc.	DMS-100 (Corrosion Spy)	CR, CP, GC, RE, TE
Korea	KSMI	Corrosion thin film sensor	
Germany	S+R Sensortec	Anode-Ladder Expansion-Ring	CP, GC, RE, TE
Britain	BGB Projects Ltd.	LPR Probe CL Probe	CR, CP, RE, TE
		Retro-Fit Probe	CR, CP
Denmark	Force Technology	CorroWatch	GC
		CorroRisk	CP, GC
		ERE-20	CP
US	Virginia Technologies Inc.	ECI-1.	CR, CP, RE, TE, CC
Britain	C-Probe Technologies Ltd.	CP100 or CP101	CR, CP
		CP200	CR, CP
		CP80	CC
Denmark /US	German Instruments	CorroEye Mak I & II	
Britain	CAPCIS Systems Ltd.	M3 Probe C4 Probe	CR, CP, GC, RE, TE, CH
US	University of Texas at Austin	Research Prototype	<p>*Legend</p> <p>1) CR; Corrosion Rate</p> <p>2) CP; Corrosion Potential</p> <p>3) GC; Galvanic Current</p> <p>4) RE; concrete RESistivity</p> <p>5) TE; TEMperature</p> <p>6) CC; Chloride Concentration</p> <p>7) CH; Concrete Humidity</p>
US	SRI International	Smart Pebble	
US	Johns Hopkins University-Applied Physics Lab.	Smart Aggregate	
Canada	University of Waterloo	Research Prototype	
Japan	General Building Research Corporation	Minisensor	

2.6 철근콘크리트 구조물의 부식 방지법

다양한 유해 환경에 노출된 철근콘크리트의 부식을 방지하기 위해서는, 먼저 부식성 환경에서도 철근을 보호할 콘크리트 품질 향상이 필요하고, 유해 요인의 침입에도 부식의 방지를 위한 음극방식법이 병행되어야 한다.

음극방식법은 피방식체의 전위를 그것의 반전지전위 보다 낮은 전위가 되도록 유지하는 방법이다. 음극방식법에는 외부에서 정류기를 통해 적절한 전기를 철근에 인가하여 방식하는 외부전원(impressed current cathodic protection)법과, 피방식체 보다 전위가 낮은 활성인 금속을 양극으로 사용하여 활성인 금속이 부식됨으로써 피방식체를 방식하는 희생양극(sacrificial anode cathodic protection)법이 있다.

철근콘크리트의 여러 부식 환경 중에서, 특히 해수 중에 침지된 철근콘크리트의 간만대와 비말대에, 적절하게 이용하면 효과적이다.

2.6.1 외부전원법(ICC)

외부전원법은 방식전류를 외부 전원장치로부터 철근에 강제로 인가하는 방식으로, 개략도는 Fig. 2.10과 같다. 직류전원을 얻기 위해 교류를 직류로 바꿔주는 정류기(rectifier)를 포함하고 있으며, 전원장치의 (+)극에 불용성 양극을 연결하고 방식하고자 하는 철근을 (-)극에 연결하여 회로를 형성한다.

양극은, 산화반응으로 방출한 전자를 음극으로 보내, 음극의 산화반응을 억제하는 역할을 한다. 따라서 장기간 사용을 위하여 소모성이 적은 금속이나 특수 표면 처리된 금속을 사용해야 하며, 통상 티타늄(Ti), 니오븀(Nb) 또는 아크(또는 열)용사 코팅 된 티타늄 등이 많이 사용된다. 또한 구조물의 구조와 방식전류의 분포에 따라 리본형, 메쉬형, 분리형 등 다양한 형태의 양극이 적용된다.

Fig. 2.11은 외부전원법의 방식 거동을 보여주는 분극도이다. 철근이 부식될 때 철근 표면의 국부적 음극(A점)에서는 산소 환원반응이 일어나고, 국부적 양극에서는 철근의 산화반응으로 인해 전자를 잃고 용해되어 철 이온(Fe^{2+})을 용출하고 부식생성물을 형성하게 된다. 이로써 국부적 음극의 산소 환원반응은 A점으로부터 음극분극(cathodic polarization)을 일으키며 C점에 이르게 되고, 이때의 전위를 부식전위(E_{corr}) 전류밀도를 부식전류밀도(I_{corr})라 칭한다. 이때에 외부전원법을 이용하여 전류를 인가하면, C점에서의 철근의 전위가 B'점을 지나 B점까지 변화하는 동안 부식전류밀도는 감소하다가 B점에서는 제로(zero)가 된다.

반면 음극에서는 C점에서 C'점을 지나 D점에 다다르며 산소 환원반응이 증가하게 되고, 이는 C'점에서 B'점 또는 D점에서 B점 사이의 전류밀도 차에 비례하여 발생한다. 즉, $I_{C'} - I_{B'}(\Delta I'_{aDD})$ 만큼의 적은 외부전류가 흐른다면 B'의 전위까지 철근을 부분방식을 할 수 있고, $I_C - I_B(\Delta I_{aDD})$ 의 외부전류를 가하면 철은 B점의 전위까지 이르러 완전 방식이 된다^[15].

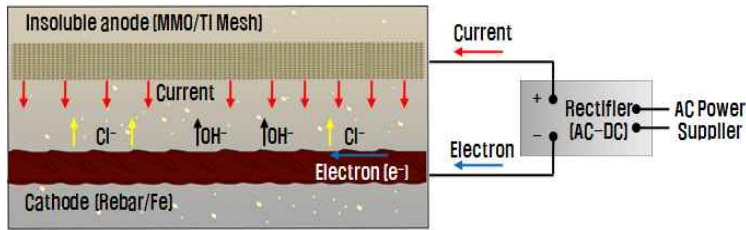


Fig. 2.10 Schematic formation of impressed current cathodic protection with MMO/Ti-mesh

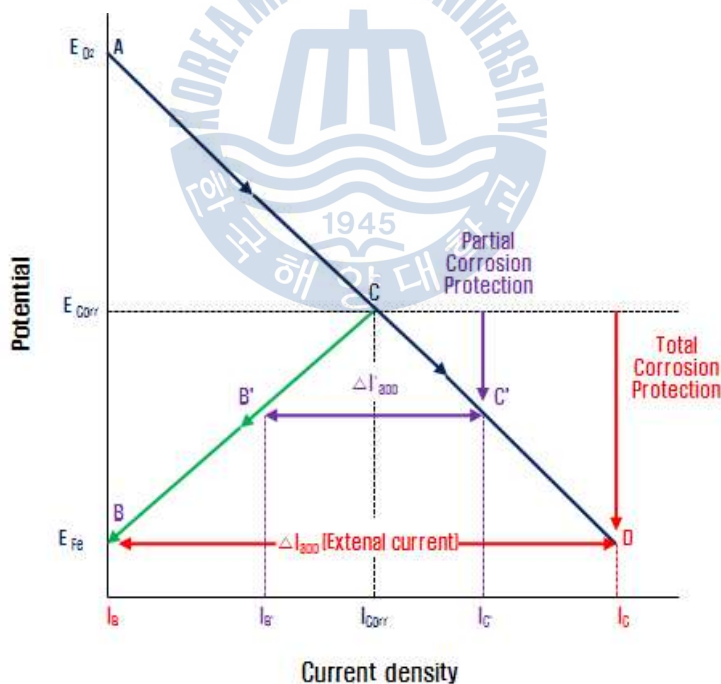


Fig. 2.11 Typical polarization curve applying ICCP

2.6.2 희생양극법(SACP)

희생양극법은, 피방식체 보다 전위가 낮은 활성인 금속을 양극으로 사용하여, 활성인 금속이 부식됨으로써 피방식체를 방식하는 방법이다.

따라서 양극은 용해되어 소모되고, 이온의 용출 시 발생한 전자는 음극인 철근으로 이동하여, 철근의 산화반응을 억제하는 역할을 하게 된다. 일반적으로 철근의 방식을 위한 희생양극으로는, 알루미늄(Al), 아연(Zn), 마그네슘(Mg) 등이 사용되고 있으며, 방식 환경과 반응 생성물에 따라 재료는 선택될 수 있다. Fig. 2.12는 희생양극법에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 콘크리트 표면에 설치된 희생양극을 철근과 전기적으로 연결함으로써, 두 금속 간의 전위차에 의해 전자가 희생양극으로부터 철근에 자발적으로 공급된다.

Fig. 2.13는 희생양극법의 분극도이다. 희생양극(Zn)이 연결되기 전에는 철근(Fe)이 B점에서 양극분극되어 C점에 이르게 되고, 철근의 국부적인 음극에서는 음극분극에 의해 A점에서 C점에 이르면, 철근의 부식전위($E_{\text{corr, Fe}}$)와 부식전류 밀도($I_{\text{corr, Fe}}$)를 형성한다. 여기에 희생양극(Zn)을 연결하면, 희생양극은 E점에서 D점으로 양극분극하게 된다. 이때 C점이던 철의 부식전위($E_{\text{corr, Fe}}$)는 D점까지 하강하게 되고, 아연 표면에서는 부식전류($I_{\text{corr, Zn}}$)가 흐르는데 반해, 철근 표면에서는 C점에서 B점으로 복극(depolarization)이 발생함에 따라 부식전류가 감소하고 철근은 방식된다^[15].

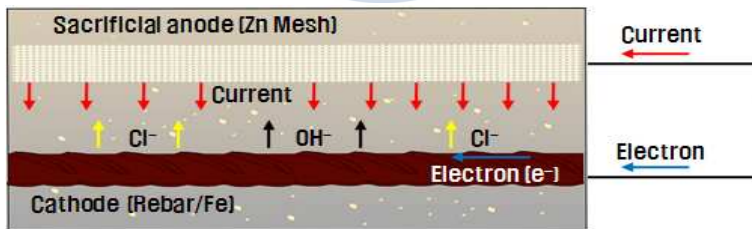


Fig. 2.12 Schematic formation of sacrificial anode cathodic protection with Zn-mesh

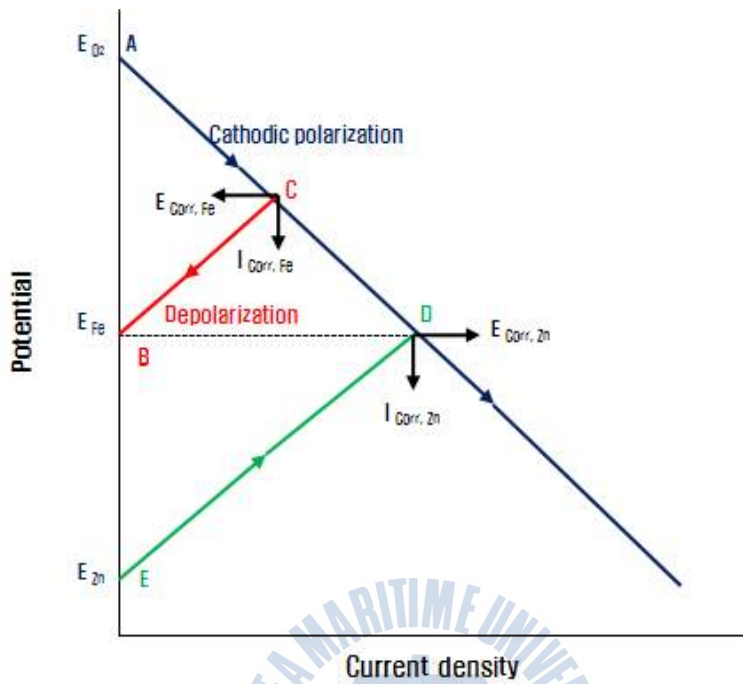
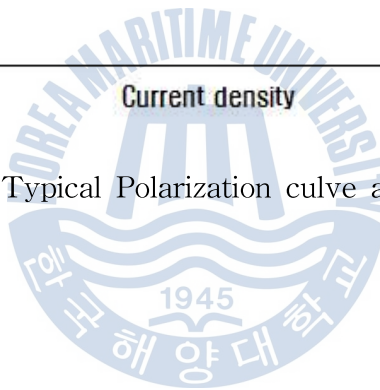


Fig. 2.13 Typical Polarization curve applying SACP



제 3 장 실험 방법

3.1 시험편 및 센서

본 연구에 적용한 다기능센서는 부식전위, 콘크리트 비저항, 부식속도, 갈바닉전류, 온도 등의 측정을 위한 DMS-100(국내 제품)센서와 자체 제작한 GCM센서이다.

자체 제작한 GCM센서는 DMS-100센서의 측정 데이터를 정확히 분석하기 위하여 부식전위, 갈바닉전류 측정용으로 활용하였다.

Fig. 3.1의 DMS-100센서와 Fig. 3.2의 GCM센서를 조합하여 Fig. 3.3과 같이 소형 콘크리트 시험편을 제작하였다. 시험편은 28 cm × 20 cm × 14 cm(가로×세로×높이)로 Fig. 3.4에서와 같이 DMS-100센서와 GCM센서를 각각 하나씩 수평으로 배치하여 제작하였다. Fig. 3.5는 콘크리트 타설 전 GCM센서, CorroWatch, ERE-20센서, 그리고 시험편 내부 온도를 감지할 수 있는 대성 E.N.G 사의 다이오드센서(diode sensor)가 배치된 것을 보여준다. GCM센서는 직경 1 cm, 길이 4 cm의 환봉(steel round bar; 이하 철근) 4개를 피복 두께 2.0 cm, 2.5 cm, 3.0 cm, 3.5 cm 깊이(콘크리트 상부 표면 기준)로 설계하였다. 이는 각 철근의 부식전위를 측정함으로써 시간의 흐름에 따른 부식 인자 침투에 대한 모니터링을 위한 것이다.

또한 12 cm x 0.5 cm x 6.5 cm(직경x두께x높이)의 투명 아크릴(acryl) 파이프에 GCM센서의 각 환봉들은 서로 겹치는 부분이 생기지 않도록 Fig. 3.4와 같이 홀(hole)을 방사형으로 가공하여 환봉이 서로 간섭하지 않도록 배치하였고, 부식이 진행되는 환봉과의 갈바닉전류의 측정을 위해 하단에는 9 cm x 9 cm (가로x세로)의 스테인리스 강판을 설치하였다. DMS-100센서는 GCM센서와 수평으로 피복 두께 7cm 깊이에 설치하였다. DMS-100센서와 GCM센서 등의 높이 및 위치는 스페이서(spacer)를 이용하여 조정하였으며, 타설 시 이동되는 것을 방지하기 위하여 3M 양면테이프를 이용하여 거푸집에 고정하였다.

스테인리스 강판 및 환봉에 전선 연결은, 용접 접합 시 전선의 산화를 방지하기 위하여 3% 은납봉(산소 용접봉)을 TIG 용접기를 이용하여 환봉에 1차로 녹여 붙인 후 그 위에 작은 용접 전류로 전선을 용접하여 연결하였다. 또한 용접 부위의 영향을 받아 실험에 오류가 생기지 않도록 열수축튜브(heat shrink tube)를 사용하여 보호 처리하였다.

배합 시 사용된 재료의 배합비는 시멘트:모래:물의 비로 1:2:0.5로 하였다. 시멘트는 일반 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 타설 시 내부에 남아있는 기포를 제거하고 균일한 배합을 돕기 위하여 바이브레이터(vibrator)를 사용하였다.

콘크리트의 타설 후 약 2주가 경과한 뒤에 거푸집을 제거하였으며, 약 4개월 동안 시험편을 양생하였다. 양생 후 시험편마다 각기 다른 부식 환경을 조성하기 위해 시험편 상부에 25 cm × 18 cm × 9 cm(가로×세로×높이) 크기의 수조를 설치하였다. 또한 수조 내부의 부식성 인자들이 콘크리트를 통하여 시험편 하부 수직 방향으로만 침투하도록, 시험편 하부를 제외한 시험편 표면에 Fig. 3.6와 같이 에나멜을 5회 반복하여 도포하였다. 외부전원식 음극방식법에 사용된 양극은 리본형 티타늄이었고, 희생양극식 음극방식법에 사용된 양극은 아연을 사용하였다.

Fig. 3.7은 항온·항습조 내에 배열한 시험편들이다. 총 여섯 개의 시험편 중 하나는 대기 상태의 환경을 그 외 세 개는 3% 염수, 5% 염수, 15% 염수 환경을 구현하기 위한 것이며, 나머지 두 개 중 하나는 외부전원법에 의한 음극방식을 나머지 하나는 희생양극법에 의한 음극방식을 적용하기 위한 것이다. 이들 모두 시험편 수조 상부를 뚜껑으로 덮어 용액의 증발 및 오염을 방지하였고, 각각의 염수를 시험편 수조 높이의 1/3까지 채웠다.

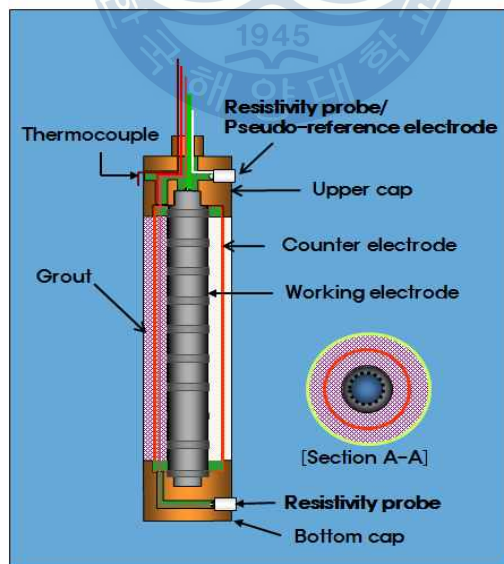


Fig. 3.1 Schematic drawing of DMS-100 sensor

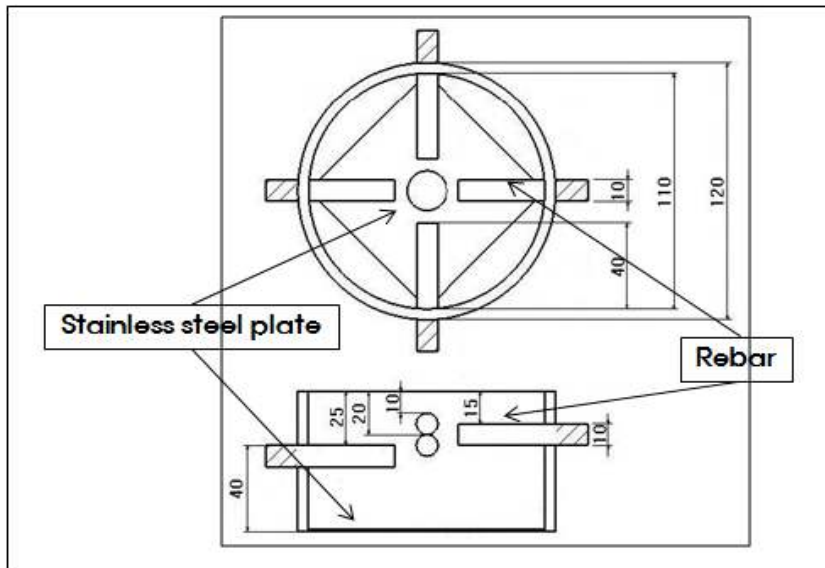


Fig. 3.2 Schematic drawing of GCM sensor

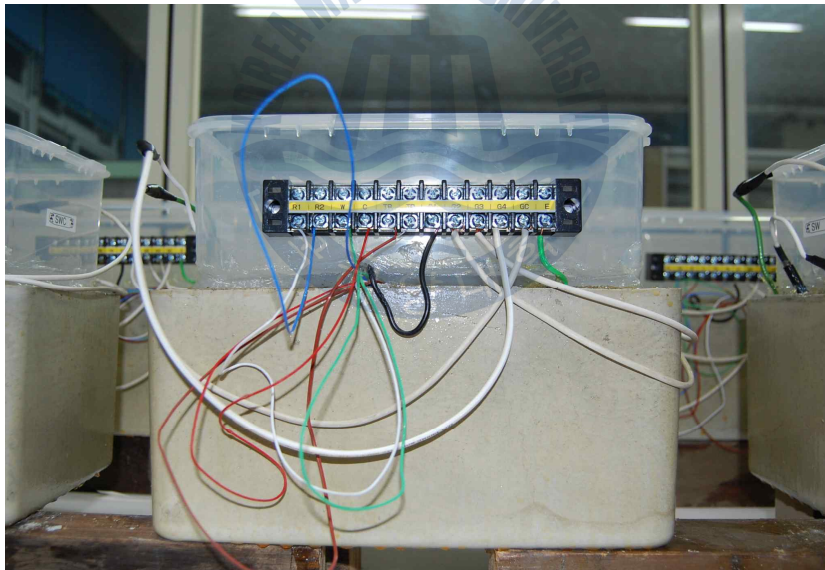


Fig. 3.3 Entire view of specimen

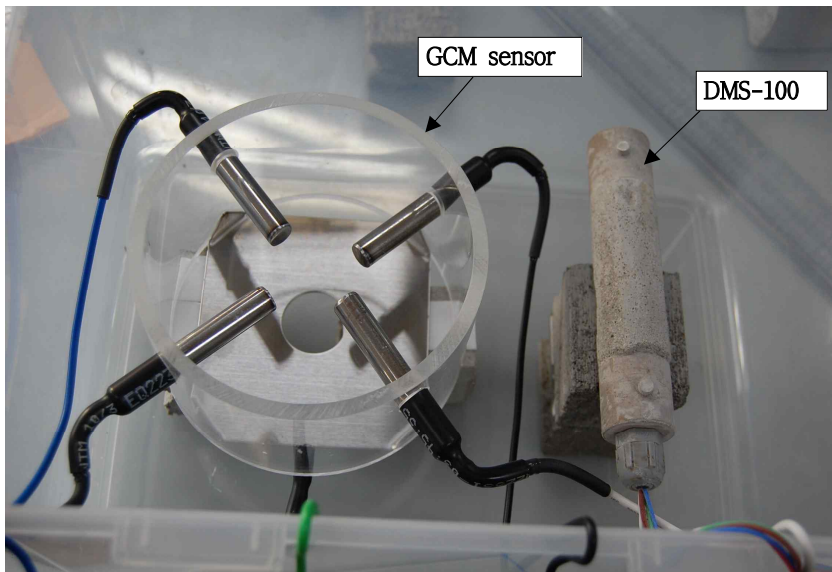


Fig. 3.4 Arrangement of GCM & DMS-100 sensor

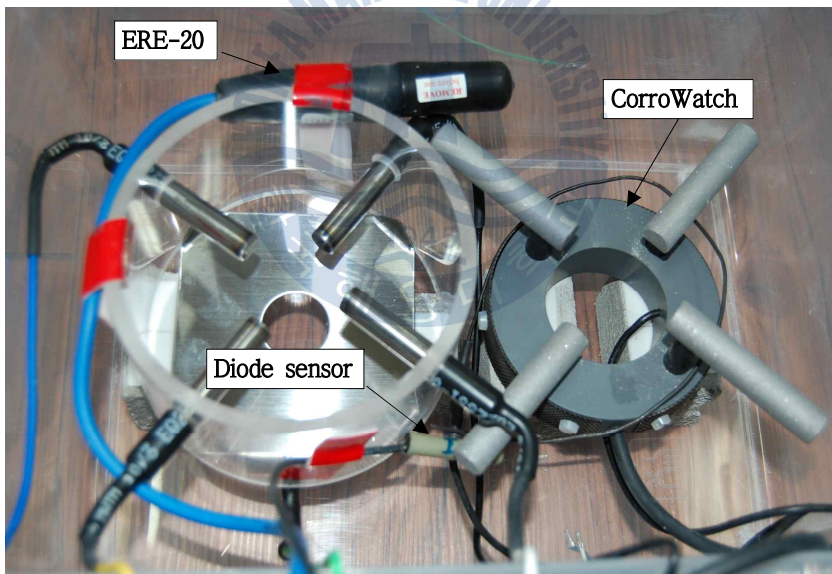


Fig. 3.5 Arrangement of GCM, CorroWatch, ERE-20, diode sensors



Fig. 3.6 Varnishing of specimens

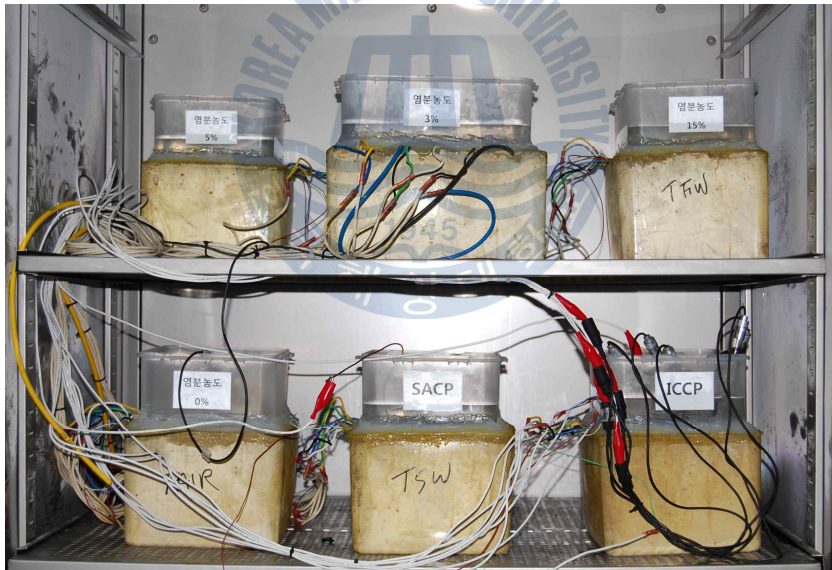


Fig. 3.7 View of specimens inside of thermo-hygrostat

3.2 실험 조건

실험 조건 중 전해질 환경은 대기, 3% 염수, 5% 염수, 15% 염수의 4가지 조건으로 하였다. 염수는 수돗물에 정제소금(NaCl)을 첨가하는 방식으로 제작하였다.

Table. 3.1은 실험 조건을 나타낸 표이다. 처음 -5°C 에서 시작하여 약 400시간 정도 부식 및 방식거동을 분석한 후 온도를 10°C , 25°C , 40°C 로 높여서 실험하였다.

Table. 3.1 Environment of experiments

Temp.	Environment	Sensor	Code
-5°C	Air	DMS-100 & GCM	Case 1
	3% salt water	GCM, ERE-20 & CorroWatch	Case 2
	5% salt water	DMS-100 & GCM	Case 3
	15% salt water	DMS-100 & GCM	Case 4
	3% salt water, ICCP	DMS-100 & GCM	Case 5
	3% salt water, SACP	DMS-100 & GCM	Case 6
10°C	Air	DMS-100 & GCM	Case 7
	3% salt water	GCM, ERE-20 & CorroWatch	Case 8
	5% salt water	DMS-100 & GCM	Case 9
	15% salt water	DMS-100 & GCM	Case 10
	3% salt water, ICCP	DMS-100 & GCM	Case 11
	3% salt water, SACP	DMS-100 & GCM	Case 12
25°C	Air	DMS-100 & GCM	Case 13
	3% salt water	GCM, ERE-20 & CorroWatch	Case 14
	5% salt water	DMS-100 & GCM	Case 15
	15% salt water	DMS-100 & GCM	Case 16
	3% salt water, ICCP	DMS-100 & GCM	Case 17
	3% salt water, SACP	DMS-100 & GCM	Case 18
40°C	Air	DMS-100 & GCM	Case 19
	3% salt water	GCM, ERE-20 & CorroWatch	Case 20
	5% salt water	DMS-100 & GCM	Case 21
	15% salt water	DMS-100 & GCM	Case 22
	3% salt water, ICCP	DMS-100 & GCM	Case 23
	3% salt water, SACP	DMS-100 & GCM	Case 24

3.3 실험 장치

Fig. 3.8 및 3.9는 본 연구에 사용된 실험 장치를 나타낸 사진이다.

3.3.1 항온·항습조

항온·항습조는 $-20^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조절이 가능하고, 30~98%(R.H) 습도 조절이 가능한 한백과학(Hanbeak Scientific)사의 HB-105LP를 사용하였다.

3.3.2 멀티미터(multimeter) 및 기준전극(reference electrode)

부식전위, 갈바닉전류, 희생양극의 방식전류 측정은 전압 0.1 mV~1000 V, 전류 0.01 $\mu\text{A} \sim 10$ A의 측정 범위를 가진 가능한 HIOKI사의 3801-50 멀티미터(multi-meter)를 사용하였다. 전위 측정을 위한 기준전극(reference electrode)으로는 DKK-TOA사의 HS-305DS 염화은전극(Ag/AgCl, silver-silver chloride electrode, 이하 SSCE)을 사용하였다.

3.3.3 비저항 측정기(resistivity meter)

비저항 측정은 0.01 $\Omega \sim 1.1$ M Ω 의 범위가 측정 가능한 NILSSON사의 Model 400 4전극(4-probe) 비저항 측정기를 사용하였다. 본 연구에서는 간이 측정 방법인 2전극(2-probe) 측정 방식으로 비저항을 측정하였다.

3.3.4 분극 실험 장치

부식속도는 (주깎리 부식 모니터링 시스템(Garmy corrosion monitoring system)의 Reference 600 Potentiostat를 이용하여, 선형분극 저항법으로 측정하였다. 이때 측정을 위하여 작업전극, 대응전극, 기준전극의 3전극 방식이 사용되었다.

3.3.5 음극방식 실험 장치

외부전원식 음극방식을 적용하기 위한 정류기로는 Fig. 3.8(f)의 코렐테크놀로지(CorRe Technology)에서 제작된 Multi Power Supply(CR-1212) 제품을 사용하였다. 본 정류기는 전류 공급뿐만 아니라 전압, 전류, 전위의 실시간 측정이 가능하게 제작되었다.



Fig. 3.8 View of experiments

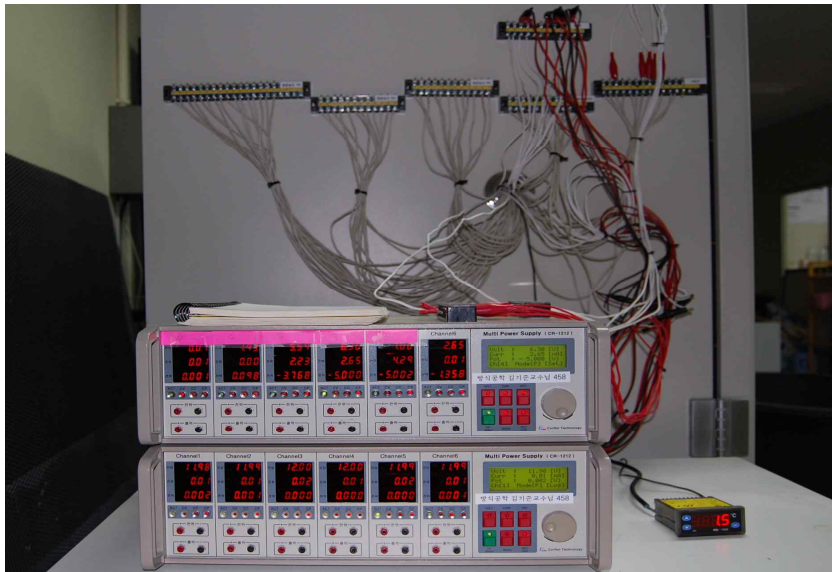


Fig. 3.9 View of power supplier & measuring experiment for ICCP



3.4 실험 분석 및 평가 방법

3.4.1 부식전위 측정

부식 전위는 Fig. 3.10과 같이 은-염화은 기준전극과 고 저항 멀티미터를 사용하여 매일 1회 동일한 시간에 측정하였다. 대기 시험편의 전위는 청수로 충분히 적신 스펀지(sponge)를 기준 전극의 끝부분에 고정시켜 전기적 회로를 양호하게 형성하여 측정하였으며, 3%, 5%, 15% 염수 조건의 시험편의 전위는 기준 전극을 수조 내 용액에 침지시켜 측정하였다. 또한 측정 오차를 최소화하기 위해 실험 초기부터 종료 시점까지 동일한 멀티미터와 기준전극을 사용하였다.

외부전원법에 의한 음극방식 시험편은 음극방식 시험 장치에 나타난 방식전위를 기록하였다.

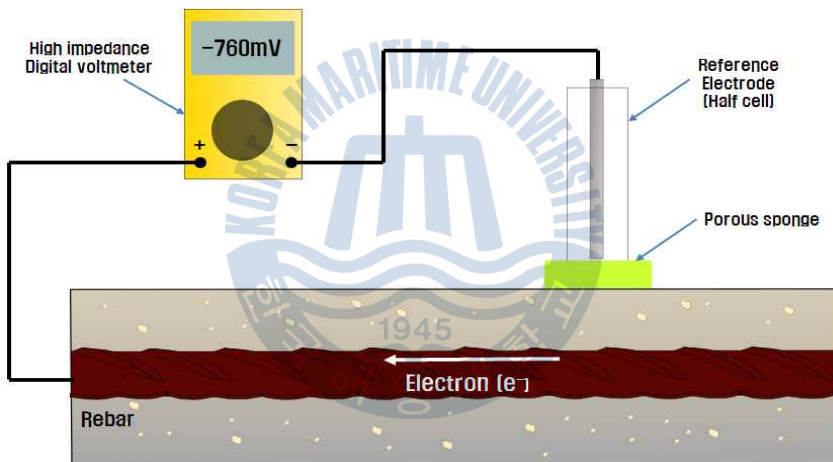


Fig. 3.10 Corrosion potential measurement of concrete^[3]

3.4.2 부식속도 측정

부식속도 측정은 DMS-100 센서를 이용하여 (주)감리 부식 모니터링 시스템으로 측정하였으며 Reference 600 선형 분극저항법(LPR method)으로 계산하였다.

선형분극저항법의 실험 조건은 센서 자체에 영향을 적게 주면서 정확한 부식속도를 측정하기 위하여 Scan Range ± 20 mV, Scan Rate 1 mV/S를 적용하였다.

또한 부식 속도 측정을 위해 인가된 전류에 의한 영향을 최소화하기 위하여 부식 속도 측정은 다른 항목들을 모두 측정한 후에 마지막으로 하였다.

선형분극저항법이란 부식전위를 중심으로 ± 10 mV 이내에서는 과전압의 변화량 ΔE 와 이때 가해진 전류의 변화량 Δi_{app} 의 비 $\Delta E/\Delta i_{app}$ 가 일정하다는 것을 이용하여 부식속도를 측정하는 방법으로 Fig. 3.12에 나타난 직선분극선의 기울기를 이용한다. 직선분극선의 기울기는 식 (3.1)과 같이 내부 철근과 콘크리트 경계면의 저항으로 정의되는 분극저항(R_p)의 관계로 표현된다. 또한 분극저항과 내부 철근의 부식 전류(I_{corr})는 서로 반비례함을 알 수 있다.

식 (3.1)의 β_a, β_c 는 양극 및 음극반응의 타펠기울기이다. 모든 부식계에 대한 β_a, β_c 의 평균값을 0.12 volt 라고 하면 아래의 식에서 간단히 부식속도(부식전류밀도)를 구할 수 있다^[4].

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{0.026}{i_{corr}} \dots \dots \dots (3.1)$$

이렇게 분극저항을 통하여 부식속도를 구하는 방법을 분극저항법 또는 선형 분극저항법이라 한다. Table 3.4를 이용하여 측정된 부식속도로 부식상태를 어느 정도 판단할 수 있다.

Table 3.2 The probability of corrosion by corrosion rate^[3]

Corrosion rate(I_{corr})	Corrosiveness
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	Passive state
$0.1 < I_{corr} < 0.5 \mu A/cm^2$	Low to moderate corrosion
$0.5 < I_{corr} < 1 \mu A/cm^2$	Moderate to high corrosion
$I_{corr} > 1 \mu A/cm^2$	High corrosion rate

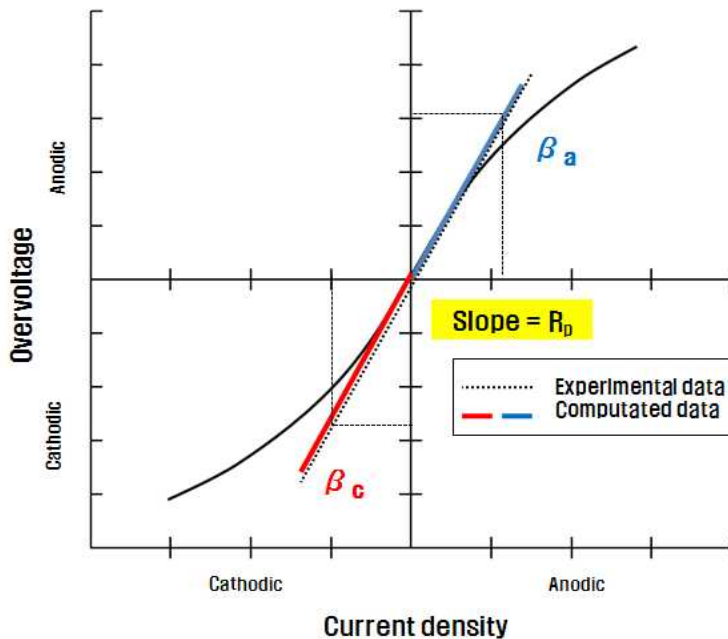


Fig. 3.11 Typical curve and plot by linear polarization^[3]

3.4.3 갈바닉전류(Galvanic & Macro-cell Current) 측정

철근 표면의 부동태 피막이 파괴되어 부식이 진행될 때 주변의 서로 다른 부식 환경 때문에 위치에 따라 다른 전위를 가진다. 이때 두 곳을 전기적으로 연결하면 부식전위가 상대적으로 낮은 곳이 매크로양극(macro-anode)이 되고 더 높은 곳이 매크로음극(macro-cathode)이 되며 도선을 통하여 음극으로부터 양극으로 전류가 흐르게 되는데 이 전류를 매크로셀 부식전류(macro-cell corrosion current)라 하고, 이 때 전위를 매크로셀 부식전위(macro-cell corrosion potential)라 한다. 또한 매크로셀 부식전류와 부식전위를 각각 갈바닉전류와 갈바닉전위라 부른다.

갈바닉전류 측정은 철근(양극)의 전위가 스테인리스 강판(음극)보다 높을 경우는 전류가 역으로 흐르기 때문에 철근과 스테인레스 강판의 전위 값을 비교한 후 측정하였다. GCM 센서의 4개의 각 철근과 스테인리스 강판의 전위를 비교하여 매일 1회 측정하였다. Table 3.2는 해수에서의 갈바닉계열을 나타낸 것이다.

Table 3.3 Galvanic series for seawater^[4]

	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
↑ Increasingly inert (cathodic)	Chlorimet 3(62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C(62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	18-8 Mo stainless steel(passive)
	Chromium stainless steel 11-30% Cr(passive)
	Inconel(passive) (80 Ni, 13 Cr, 7Fe)
	Nickel(passive)
	Silver solder
	Monel(70 Ni, 30 Cu)
	Cupronickels(60-90 Cu, 40-10 Ni)
	Bronzes(Cu-Sn)
	Copper
	Brasses(Cu-Zn)
	Chlorimet 2(66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
	Hastelloy B(60 Ni 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
	Inconel(active)
	Nickel(active)
	Tin
	Lead
	Lead-tin solders
	18-8 Mo stainless steel(active)
	18-8 stainless steel(avtive)
	Ni-Resist(high Ni cast iron)
	Chromium stainless steel, 12% Cr(active)
↓ Increasingly active (anodic)	Cast iron
	Steel or iron
	2024 aluminum(4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
	Cadmium
	Commercially pure aluminum(1100)
	Zinc
	Magnesium and magnesium alloys

3.4.4 콘크리트 비저항 측정

콘크리트 비저항은 콘크리트의 조성, 함수량, 염화물량 등에 따라 달라지며 철근의 부식전류를 지배하는 주요 인자이다. 비저항이 낮은 구조물의 경우는 부식위험이 크나 비저항이 상대적으로 높은 경우는 부식위험이 작다.

비저항은 측정은 Fig. 3.11(a)와 같이 내부 철근과의 전기적 접촉 없이 콘크리트 표면으로부터 간단하게 측정할 수 있는 Wenner 4전극(4-probe)방식이 가장 많이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 DMS-100 센서의 비저항 측정 프로브가 2곳이기 때문에 Fig. 3.11(b)와 같이 4전극 비저항계의 P1과 C1을 함께 연결하고 P2와 C2를 함께 연결하여 비저항을 측정하는 간이 측정 방법인 2전극 (2-probe)방식을 이용하였다. 비저항 측정은 전위 측정에 영향을 주지 않도록 전위 측정 후에 하였으며, 매일 동일한 시간에 1회 측정하였다. Table 3.3은 2 전극 방식으로 측정된 콘크리트 비저항과 부식 가능성과의 관계를 보여준다.

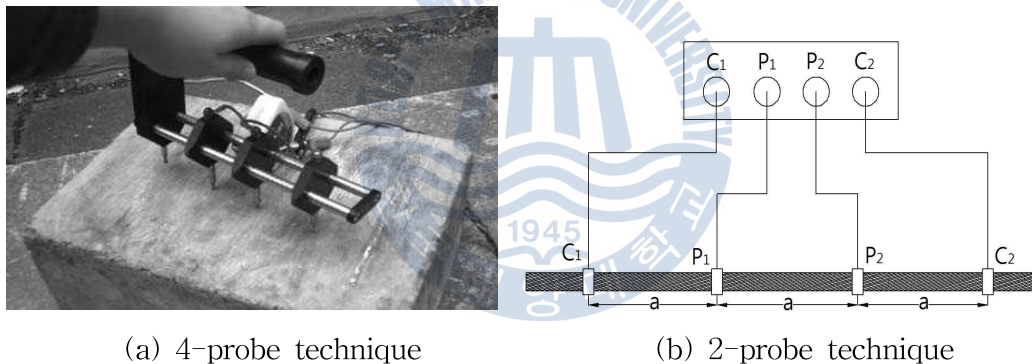


Fig. 3.12 Concrete resistivity measurements(Wenner technique)^[2]

Table 3.4 The probability of corrosion by concrete resistivity^[3]

Method	Concrete resistivity	Corrosiveness
2 probe method	$> 100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Can't distinguish between active and passive steel
	$50 \sim 100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Low corrosion rate
	$10 \sim 50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Moderate to high corrosion where steel is active
	$< 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Resistivity is not the controlling parameter

3.4.5 방식전위 및 방식전류 측정

외부전원법에 의한 음극방식의 방식전류는 임의 조정된 방식전위에 따라 장치에 나타난 값을 기록하였다. 희생양극법에 의한 음극방식의 경우는 HIOKI 사의 3801-50 멀티미터로 희생양극이 연결된 상태에서 전위를 측정하였다.

3.4.6 4시간 복극전위 측정

해당 시험편의 4시간 복극전위는 실험 환경 중 온도 조건 변화 시, 즉 -5°C , 10°C , 25°C , 40°C 로 시험편의 실험 환경을 변화시킬 때 마다, 양극과 피방식체인 철근의 연결을 끊은 후 (주)감리 부식 모니터링 시스템으로 측정하였다. NACE SP 0290의 100mV 복극전위 기준을 적용하여 방식 정도를 확인하였다 [15].

Fig. 3.13은 4시간 복극전위 측정값의 변화를 보여주는 예이다.

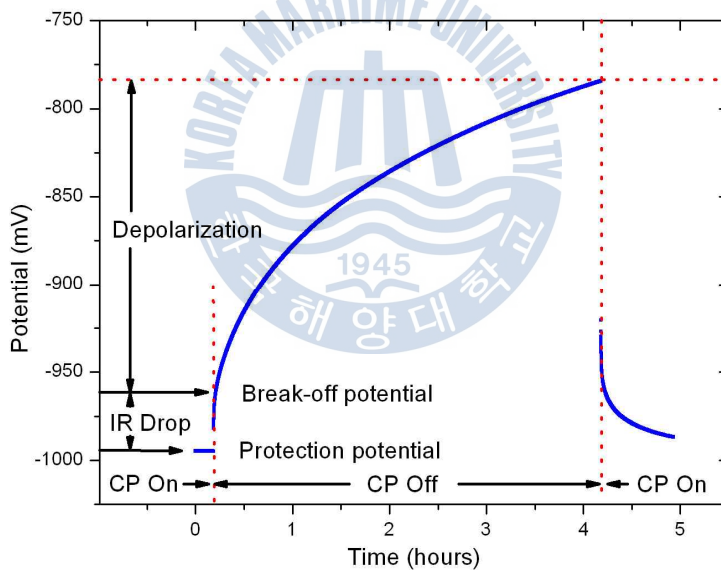


Fig. 3.13 Example graph measured instant-off potential

제 4 장 실험 결과

4.1 콘크리트의 부식전위 측정 결과

콘크리트 철근에 사용되는 철의 자연전위는 약 $-400 \sim -700$ mV/SSCE이지만 콘크리트 환경에 폭로되면 철근표면의 부동태피막에 의해 콘크리트의 자연전위는 대략 $0 \sim -100$ mV/SSCE 정도로 상승한다. 부동태피막이 잘 유지되어 측정된 전위 값이 $0 \sim -100$ mV/SSCE 범위를 유지하면 부식의 진행이 없지만 부동태 피막이 파괴되어 전위가 낮아져서 철의 자연전위에 근접하면 부식이 진행 상태에 있다고 추정한다. 또한 콘크리트는 건조한 상태보다 수분을 흡수할수록 부식 발생 가능성이 높아지나, 구조물이 완전히 수중에 침지된 경우에는 측정된 전위가 부식 영역에 있음에도 불구하고 수중부의 산소 결핍으로 인해 부식속도가 무시할 수 있을 정도로 낮거나 부식이 진행되지 않는 경우도 있다. 이는 수중에서는 용존 산소량이 적은데다가 콘크리트의 공극이 물로 포화되어 수중의 산소가 콘크리트 내 철근까지 도달하기 매우 어렵기 때문에 수분 함량이 많음에도 불구하고 산소 부족으로 부식속도가 낮은 것이다. 게다가 측정된 전위는 부식된 부위의 전위뿐만 아니고 그 주위와의 혼합 전위 값이기 때문에 이 측정값은 근본적인 오류의 소지도 지니고 있다. 이러한 이유로 부식전위 하나만으로 부식 상태를 판정하는 것은 구조물이 놓인 환경에 따라 약간의 오류가 있을 수 있다는 것을 고려해야 한다. 본 연구에서 부식전위는 각 온도, 피복 두께 및 시간에 따른 철근전위 변화를 GCM 센서를 이용하여 측정 분석하였다.

Fig. 4.1은 40°C 의 온도, 15% 염수 환경 시험편의 피복 두께에 따른 각 철근 전위의 측정값을 나타낸 그래프이다. 실험 초기에 시험편의 철근전위 값은 높은 순서대로 피복 두께 2.5 cm에서 -175 mV/SSCE, 3.0 cm에서 -195 mV/SSCE, 3.5 cm에서 -212 mV/SSCE, 2.0 cm에서 -500 mV/SSCE이었다. 그러나 약 400시간이 경과한 후의 철근전위는 높은 순서대로 피복 두께 3.5 cm에서 -250 mV/SSCE, 3.0 cm에서 -530 mV/SSCE, 2.5 cm에서 -575 mV/SSCE, 2.0 cm에서 -670 mV/SSCE 순으로 변화였다.

실험 초기의 철근전위는 철근 및 콘크리트 상태에 따라 고유의 전위를 가진다. 그러나 시간의 경과에 따라 염분이 콘크리트 내부로 침투하면 염분에 의한 부동태 피막의 파괴로 철근전위는 낮아지며 부식이 진행된다.

본 실험에서는 330시간이 경과한 후부터, 표면에서 가까운 쪽의 철근전위가 가장 낮고, 표면에서 가장 먼 철근 철근전위가 가장 높았다. 즉 실험 초기 측정값만을 가지고 부식의 경향을 파악하기는 어렵다. 따라서 지속적인 모니터링 및 측정을 통해서 부식의 경향을 파악하고, 그에 맞는 방식 대책을 수립해야 한다.

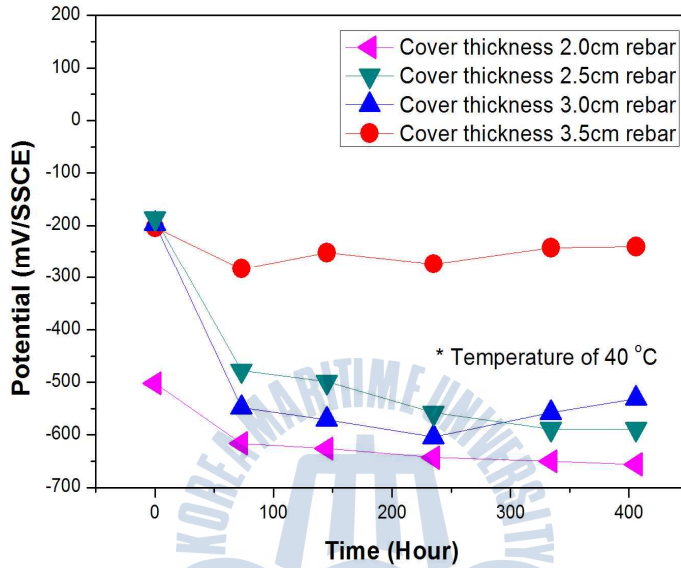


Fig. 4.1 Variations of rebar potential with time at different cover thickness

Fig. 4.2는 각 온도와 각 전해질 환경에서, 각 시험편의 깊이 2.0 cm 철근전위 값을 나타낸 그래프이다. Fig. 4.2에서 나타난 것과 같이 대기 및 3% 염수 환경 시험편의 철근은 안정된 전위를 유지한 반면, 5% 및 15% 염수 환경의 철근전위는 온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 대기환경에 노출된 시험편의 경우는 부식성 인자가 없기 때문에 일정한 전위를 유지한 것이라고 생각된다. 그러나 부식성 환경인 3% 염수 환경에 노출된 시험편의 경우에도 전위의 변화가 거의 없었다. 이처럼 3% 염수 환경의 시험편에서도 전위 변화가 없었던 이유는 실험 시간이 약 1600시간(약 66일)으로 짧았기 때문이고, 시간이 경과하여 어느 순간에 이르면 전위는 떨어질 것으로 생각된다.

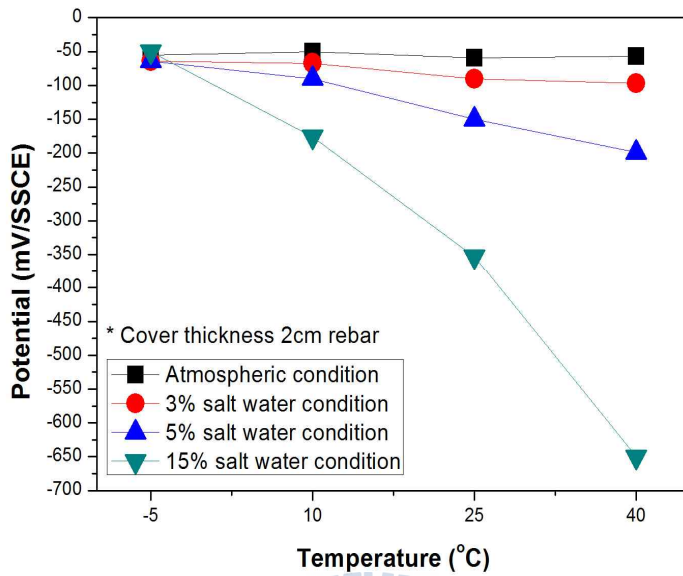


Fig. 4.2 Variation of rebar potential with temperature

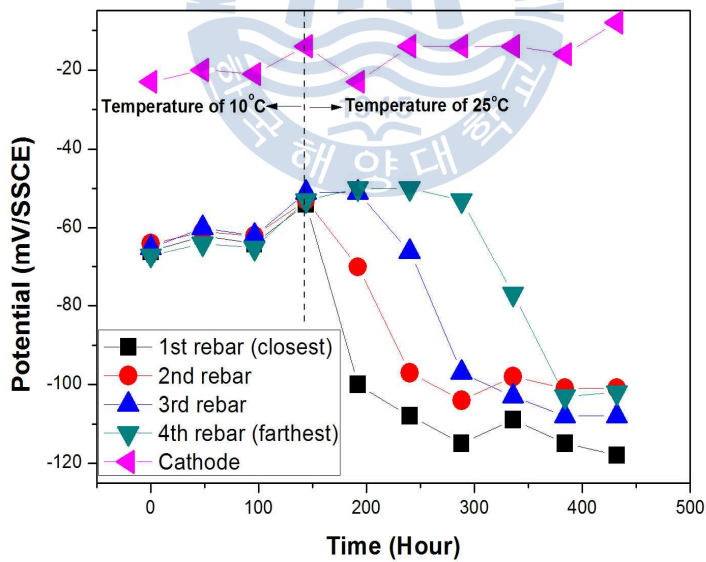


Fig. 4.3 Variations of CorroWatch rebar potential with time at different cover thickness

4.2 콘크리트의 부식속도 측정 결과

부식속도는 콘크리트 비저항, 온도, 습도 및 기타 여러 요인 등에 의해 실시간으로 변화되며, 부식속도가 낮을 때는 측정 영역이 잘 정의되지 않으면 오류를 범할 수 있다. 또한 분극저항(R_p)값에서 부식률(I_{corr})을 계산할 때도 실제 구조물의 정확한 측정 면적 및 실제 현장의 콘크리트 철근 상태를 정확하게 알기 어렵고, 몇 분 또는 몇 초 만에 얻어지는 순간적인 값이기 때문에 측정의 오차는 피할 수 없다. 따라서 평균치를 구하거나 통합적인 값을 추정하여 종합적으로 판단해야 한다^[2]. 하지만 부식속도 측정을 통하여 내부의 부식 진행상황을 수치로 얻을 수 있고 평가할 수 있기 때문에 부식속도 측정은 콘크리트 부식여부를 판단하는데 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

Fig. 4.4는 25°C 온도 조건에서 대기, 5% 염수, 15% 염수 등 3가지 환경 조건에 노출된 시험편의 부식속도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 대기 환경 시험편은 다른 시험편들에 비해 부식속도가 낮게 나타났으며, 시간이 지나도 큰 변화가 없이 일정하게 유지되었다. 그러나 5% 염수 시험편과 15% 염수 시험편을 비교해 보면, 시간 경과에 따라 부식 속도가 크게 증가함을 알 수 있다.

실험 200시간 경과 후 15% 염수환경의 시험편은 부식속도가 0.38 mpy(mils penetration per year)로 5% 염수 시험편의 0.27 mpy보다 약간 높게 측정되었으나, 실험 400시간 경과 후 15% 염수 시험편의 부식속도는 1.1 mpy로 5% 염수 시험편의 부식속도 0.6 mpy보다 약 2배 높았다. 이것은 시간에 따른 여러 부식 인자 중 염분량에 의한 부식속도의 가속화 정도를 보여 준다. 즉 시간이 경과함에 따라 염분량이 높을수록 부동태 파괴속도가 빨라지며 이에 따라 부식속도도 크게 증가함을 알 수 있다. 본 실험에서 나타난 결과는 기존에 나타난 결과와 유사했다. 이것으로 DMS-100센서의 성능에 대한 높은 신뢰도를 확인할 수 있었다.

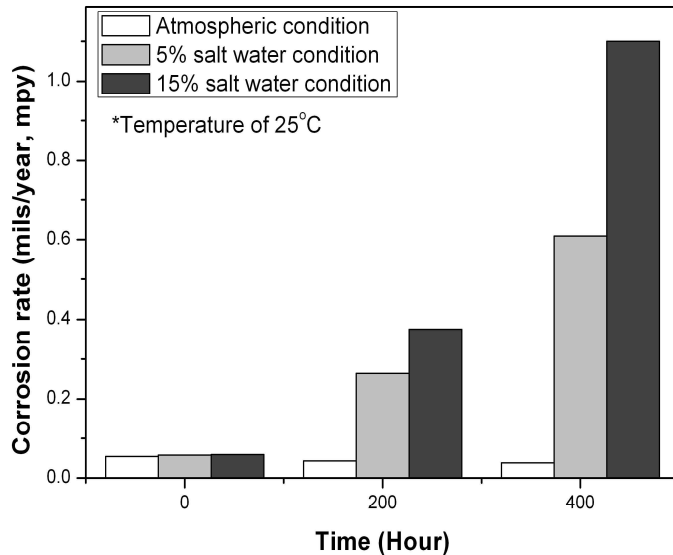


Fig. 4.4 Variations of corrosion rate with time in different chloride concentration

Fig. 4.5는 15% 염수 환경에서 25°C, 40°C 온도 변화를 주어 시험한 시험편의 부식속도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. Y축의 좌측에는 부식속도를 Y축의 우측에는 부식전위를 표시하여 부식속도와 부식전위의 상관관계를 비교하였다.

먼저 부식속도를 비교해 보면 40°C 온도 조건일 경우 부식속도는 시간이 경과함에 따라 급격하게 증가하여 30시간 경과 후에는 초기 값과 비교해서 약 7배 증가하였고 400시간 경과 후에는 약 3.5 mpy를 나타내었다. 하지만 25°C 온도 조건일 경우 부식속도 증가율은 상대적으로 낮았으며, 실험 400시간 경과 후 부식속도는 약 1.25 mpy 값을 나타내었다. 즉 온도가 높을수록 부식속도는 빠르다는 것을 의미하며 이 또한 일반적인 경향이다. 하지만 400시간 경과 후 40°C 시험편의 부식전위는 -500 mV/SSCE이고, 25°C 시험편은 -650 mV/SSCE이었다. 부식전위는 오히려 25°C에서 40°C보다 낮은 값을 나타내었다. 이 결과는 콘크리트 환경에서 부식전위가 낮으면 부식속도가 높다는 일반적인 경향을 벗어난 경우로, 부식전위 또는 부식속도 한 가지 결과만으로 부식의 정도를 판단하기 보다는 여러 요소를 고려한 부식 모니터링이 필수적이라는 것을 단적으로 보여준다.

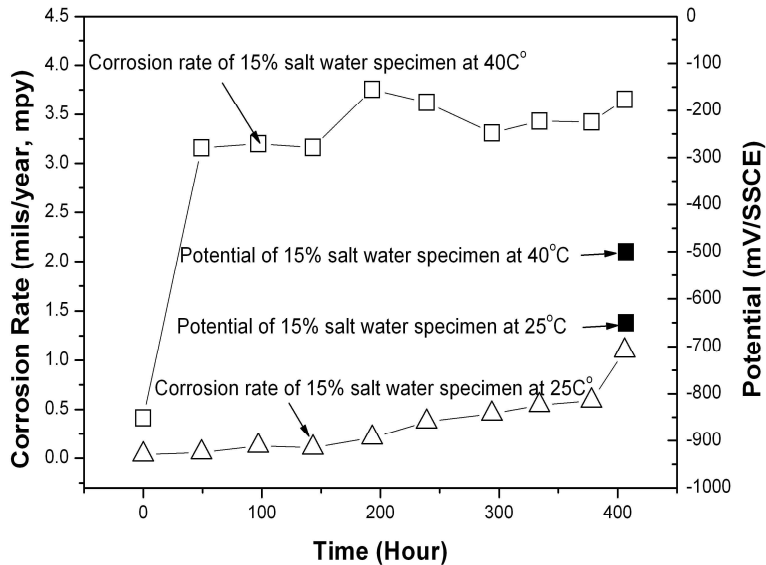


Fig. 4.5 Variation of corrosion rate with time at different temperature conditions

Fig. 4.6은 25°C, 15% 염수 환경에 폭로된 시험편의 부식속도와 부식전위를 나타낸 그래프이다. DMS-100센서 내의 철근에서 전위를 측정하였고, 센서 내의 철근, 대응전극, 기준전극의 3전극 방법을 통해 부식속도를 측정하였다.

초기에 철근의 부식속도는 0(zero)에 가까운 값이었으나 시간의 경과에 따라 철근의 부식속도는 증가하였고, 400시간이 경과한 후 철근의 부식속도는 약 1.1 mpy를 나타내었다. 철근전위의 값도 초기에는 약 -150 mV/SSCE이었으나, 400시간이 경과한 후 -500 mV/SSCE로 낮아졌다. 본 실험 결과로 부식 속도와 전위와의 상관관계를 확인할 수 있었고, 시험 초기부터 종료 시까지 부식전위가 감소함에 따라 부식속도가 증가하는 일반적인 경향이 확인되었다.

이로써 부식판단 시 한 가지 요소만 가지고 판단하는 것보다는, 여러 요소를 복합적으로 분석해야 좀 더 정확한 판단이 가능할 것으로 판단된다.

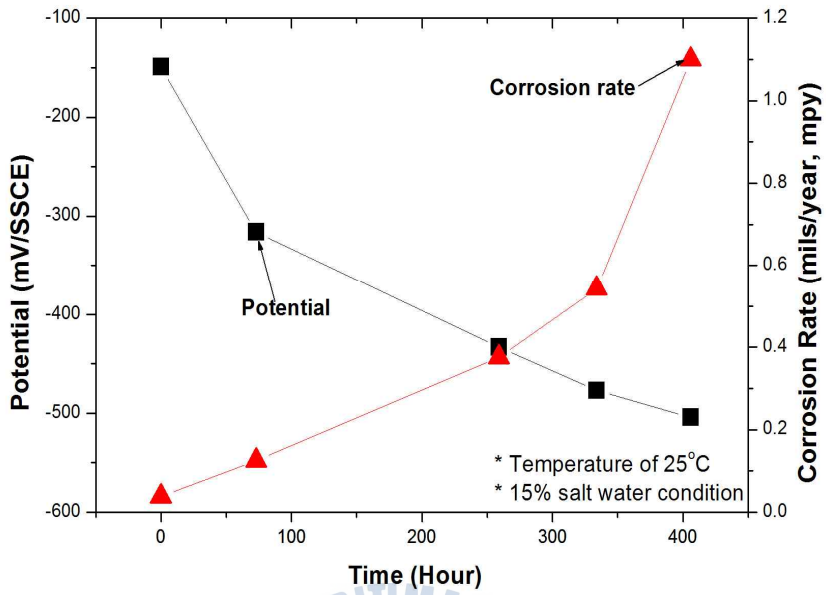
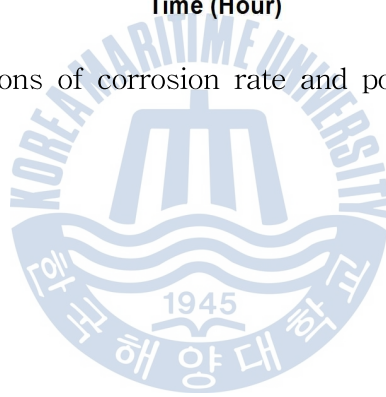


Fig. 4.6 Variations of corrosion rate and potential with time



4.3 콘크리트의 갈바닉전류 측정 결과

Fig. 4.7은 40°C, 15% 염수환경에 노출된 시험편의 시간에 따른 갈바닉전류를 나타낸 그래프이다. Fig. 4.7에서 볼 수 있듯이 염분에 가장 많이 노출된 피복 두께 2.0 cm 깊이에 폭로된 철근과 스테인리스 강판사이의 갈바닉전류는 약 40시간 후에 60 μ A로 측정되었다. 그리고 시험 시간이 경과할수록 그 값이 증가하여 약 400시간이 경과 후에는 150 μ A 까지 증가하였다. 하지만 표면에서 가장 먼 철근(피복 두께 3.5 cm)과 스테인리스 강판사이의 갈바닉전류는 350시간 이후에 측정 가능하였으며 전류값은 15 μ A로 피복 두께 2.0 cm 깊이에 폭로된 철근에 비해 낮았다. 이와같이 부식 환경에 노출된 센서의 양극과 음극 사이에 흐르는 갈바닉전류량을 주기적으로 측정하여 갈바닉전류가 미세하게 흐르는 동안에는 철근이 부동태피막을 유지하고 있어 부식이 진행되지 않는 것으로 판단하며, 어느 순간 전류량이 급격히 증가하면 철근으로 많은 염화물이나 탄산가스 등에 의해 부동태피막이 국부적 또는 전체적으로 파괴되어 부식이 진행된다는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 일반적으로 갈바닉전류량은 철근의 부식속도를 나타내는 것이 아니라, 철근 주변의 상황 및 부동태피막의 상태만을 알려준다는 것을 알아야 한다. 본 실험에서는 철근전위와 스테인리스 강판사이의 전위차가 약 150 mV 이상 되었을 때 갈바닉전류 측정이 가능하였다. 하지만 실제 환경에서는 150 mV 이상 차이가 난다 하더라도 갈바닉전류 값은 콘크리트 비저항, 용존산소 농도, 온도, 양극과 음극의 크기 및 거리 등에 따라 많은 영향을 받으므로 데이터의 분석에 주의를 기울여야 한다.

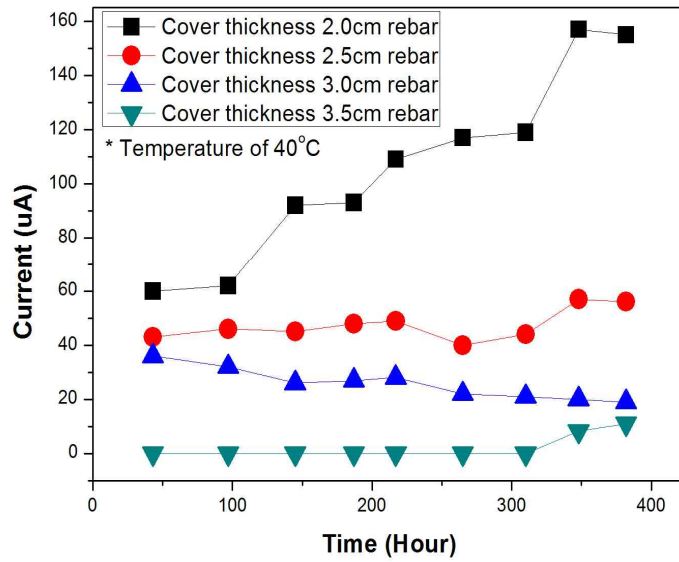
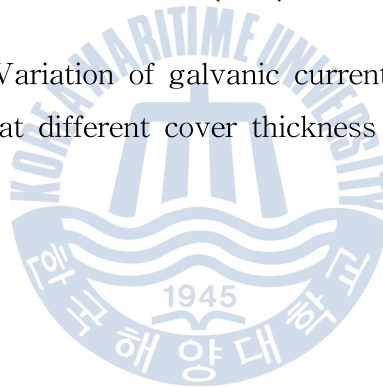


Fig. 4.7 Variation of galvanic current with time at different cover thickness



4.4 콘크리트의 비저항 측정 결과

앞서 설명한 것과 같이 비저항은 2전극방법을 이용하여 온도 환경 조건별로 매일 1회 측정하였다. Fig 4.8은 온도에 따른 콘크리트 비저항 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서는 3%, 5%, 15% 염수 환경에 폭로된 시험편의 비저항 결과를 비교 분석 하였다.

-5°C에서 비저항은 10~12 KΩ·cm로 비교적 높은 값을 나타내었다. 하지만 온도가 높아짐에 따라 비저항은 크게 감소하였다. 10°C에서 부터는 전체 시험편의 비저항이 3 KΩ·cm 이하로 크게 줄어들었다. 그리고 염분량이 높을수록 비저항이 낮게 측정되었다. 비저항을 통한 부식성 판단은 Table 3.3에 제시된 Broomfield의 실험 결과를 바탕으로 분석이 가능하다. Broomfield의 실험 결과에 의하면 2전극법을 통해 비저항을 측정한 경우 콘크리트의 비저항이 10 KΩ·cm 이하면, 콘크리트 내 철근의 부식성이 매우 높은 상태로, 철근은 콘크리트 비저항에 의해서 부식 억제력을 가지지 않는 것으로 되어있다. 그러나 본 실험 결과는 -5°C에서 15% 염수 환경의 콘크리트 비저항이 약 9.3 KΩ·cm로 10 KΩ·cm 이하지만, Fig. 4.2의 전위 결과를 보면 -5°C에서 전위는 -50 mV/SSCE로 높게 유지되어 부식이 일어나기 힘든 상태를 보이고 있다. 이러한 결과를 보인 이유는 부식속도가 콘크리트와 철근 계면 사이의 저항의 영향을 받는데 반하여, 측정되는 콘크리트 비저항은 콘크리트 자체의 저항일 뿐 콘크리트와 철근 계면 사이의 저항이 아니기 때문이다. 이로써 콘크리트 비저항은 부식 가능성에 대한 간접적인 정보는 제공하지만, 직접적인 철근 부식성의 판단에는 부적합하다는 것을 알 수 있다.

수중에서는 수분과 염화물이 풍부하여 비저항이 낮게 측정된다 할지라도, 앞서 부식전위에서 설명한 바와 같이 용존 산소의 부족으로 부동태 피막이 파괴되지 않아 실질적인 부식속도는 크지 않을 수 있다.

이러한 이유로 콘크리트 비저항은 부식성을 판단하는데 주 수단이 아닌 보조 수단으로 사용하는 것이 타당하다고 생각된다.

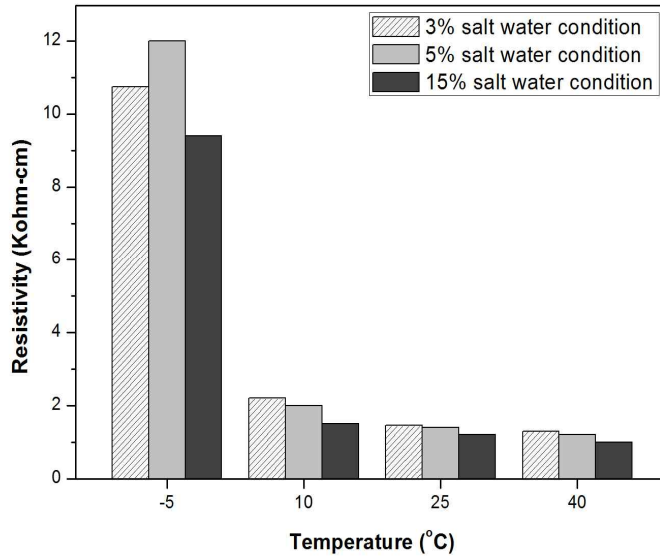
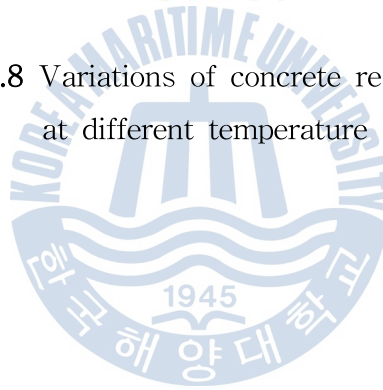


Fig. 4.8 Variations of concrete resistivity at different temperature



4.5 콘크리트 방식전위 및 방식전류 측정 결과

Fig. 4.9는 온도에 따른 희생양극 및 외부전원식 음극방식을 적용한 철근의 방식전위를 나타낸 그래프이다. 외부전원식 음극방식의 설정전위는 -860 mV/SSCE 이었고 전위는 일정하게 유지되었다. Fig. 4.9에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 희생양극식 음극방식이 적용된 철근의 방식전위는 감소하는데, 이 원인은 온도가 높아지면서 콘크리트 내 활동도가 높아지게 되고 이로 인해 희생양극에서 더 많은 방식전류를 공급하기 때문으로 생각된다. 본 실험에서는 10°C 에서 희생양극식 및 외부전원식 음극방식의 전위가 유사하였으며, 이를 바탕으로 전류밀도 및 복극전위를 비교하였고, 두 음극방식법의 방식거동을 분석하였다.

Fig. 4.10은 3% 염수 환경에서, 희생양극식 및 외부전원식 음극방식법을 적용한 시험편의 피복 두께에 따른 철근의 방식전류를 비교한 그래프이다. Fig. 4.10과 같이 두 방식법 모두 피복 두께가 작은 철근일수록 높은 전류 값을 나타내었다. 피복 두께 2.0 cm 철근에 희생양극식 음극방식을 적용한 경우의 전류는 3.8 mA로, 피복 두께 3.5 cm 철근의 전류보다 약 10배 높은 전류값을 나타내었다. 그리고 외부전원식 음극방식법을 적용한 경우 희생양극식 음극방식을 적용한 경우보다 상대적으로 높은 전류값을 나타내었다. Fig. 4.10에서 피복 두께 2.0 cm 철근의 경우 외부전원식 음극방식법을 적용한 경우가, 희생양극식 음극방식법을 적용한 경우보다 약 20배 높은 방식전류를 철근에 공급하는 것을 확인할 수 있다.

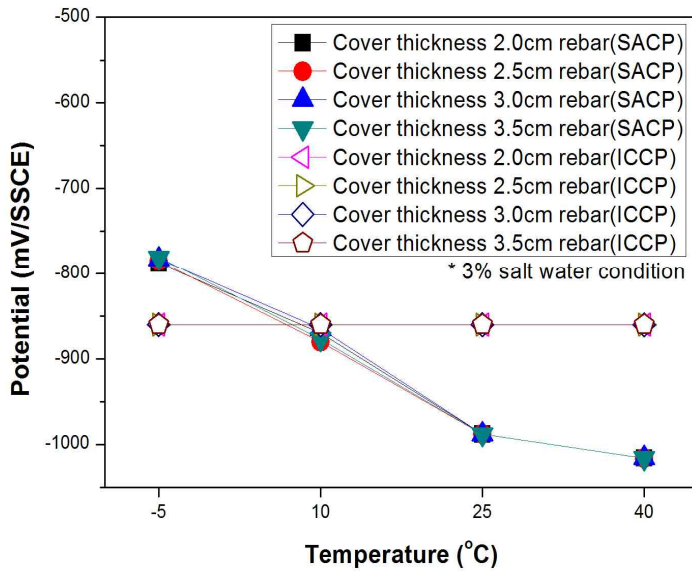


Fig. 4.9 Variation of cathodic protection potential with temperature in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems

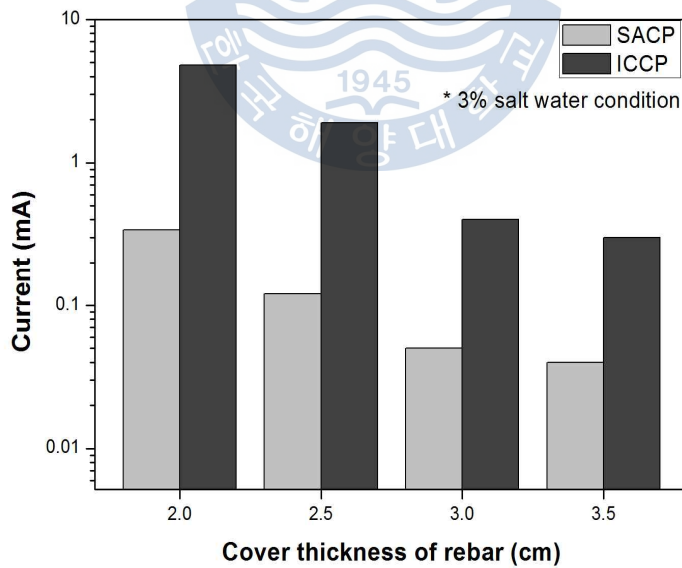


Fig. 4.10 Variations of cathodic protection current with cover thickness in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems(Log Scale)

4.7 콘크리트의 4시간 복극전위 측정 결과

Fig.4.11은 25℃, 3% 염수환경에 폭로된 시험편에 적용된 희생양극식 및 외부전원식 음극방식법의 4시간 복극전위를 비교한 그래프이다. Fig. 4.11에 나타난 것과 같이 희생양극식 및 외부전원식 음극방식법이 적용된 철근의 4시간 복극전위는 600~700 mV로 높은 값을 나타내었다. 희생양극식의 경우 외부전원식 보다 양극에서 철근으로 적은 양의 전류가 공급 되었음에도(Fig. 4.10 참조) 불구하고 높은 복극전위 값을 나타내었다. 이 이유는 시험편이 항상 비저항이 낮은 염수 용액에 침지되어 있었고, 다공성인 몰탈 시험편을 사용하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 GCM 센서를 통해 측정된 복극전위는 희생양극식 및 외부전원식 음극방식법 모두 미국부식학회 중 하나인 NACE(National Association of Corrosion Engineers)의 부식 판정 기준인 100 mV 이상 복극전위기준을 만족하였다. 위의 실험결과로 미루어 볼 때 외부전원식 음극방식법의 경우는 정류기를 사용하여 높은 전류를 공급할 수 있기 때문에 상대적으로 비저항이 높은 곳에 적용하고, 희생양극식 음극방식법은 비저항이 낮은 곳에 적용하는 것이 보다 효율적이라고 생각된다. 본 실험 결과를 통해 다기능센서를 통해서 부식의 진단뿐만 아니라 방식진단도 가능하다는 것을 확인할 수 있었고, 일반적인 방식 거동과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

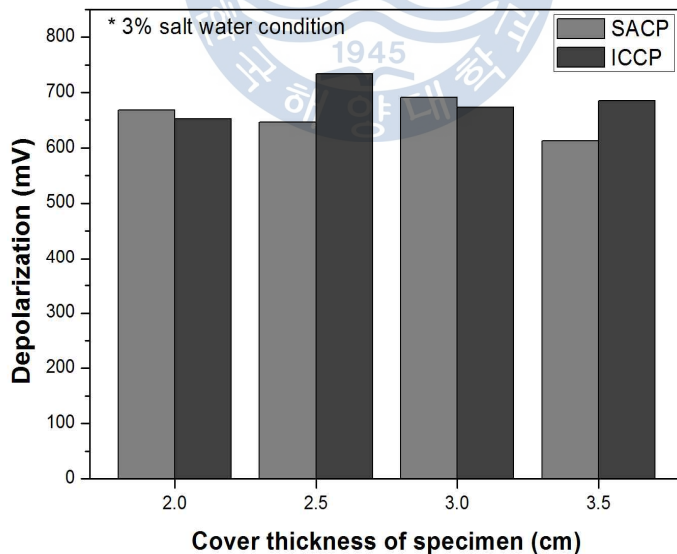


Fig. 4.11 Variations of 4 hour depolarization potential with cover thickness in 3wt% salt water for SACP & ICCP systems

제 5 장 결 론

‘다기능 센서를 이용한 철근콘크리트 구조물의 부식 및 방식 모니터링에 관한 연구’를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 부식전위의 경우는 초기에 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었지만 시간이 경과됨에 따라 시험편 표면에서 가까운 철근일수록 낮은 값을 나타내었다. 또한 이것은 온도가 높아질수록 낮은 전위를 나타내었다.
2. 본 실험에서 고안한 다기능센서를 통해서 대기, 3%, 5%, 15% 염수 순으로 부식성이 강한 환경에서 부식속도가 증가하고, 온도가 높은 환경에서 부식속도가 증가하는 일반적인 경향을 확인하였다.
3. 염수 환경에 노출된 시험편의 갈바닉전류량은 시간이 경과함에 따라 증가하였으며, 양극과 음극의 전위차가 약 150 mV이상 되었을 때 측정이 가능하였다. 또한 콘크리트의 상부 표면으로부터 가까운 철근일수록 높은 갈바닉전류 값을 나타내었다.
4. 콘크리트 비저항의 경우 대기, 3%, 5%, 15% 염수 순으로 염분량이 증가할수록, 그리고 온도가 증가할수록 비저항이 감소하는 경향을 나타내었다.
5. 여기서는 부식전위, 부식속도, 갈바닉전류, 콘크리트 비저항 및 온도조건 중에 단일 요소만 가지고 부식을 판단하는 것보다, 이들을 조합한 다기능센서를 통하여 복합적으로 분석하는 것이 부식 진단의 오류를 최소화 할 수 있다는 것을 입증할 수 있었다.
6. 본 부식실험 조건 중 음극방식한 경우에는 온도가 증가할수록 방식 효과가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 4시간 복극전위 측정 결과 희생양극법 및 외부전원법 모두 600~700 mV의 큰 복극량이 나타나는 등 양호한 방식 성능을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] 성재덕, “콘크리트 구조”, 동화기술, pp. 14-146, 2009.
- [2] 경은진, “철근 콘크리트 구조물용 다기능 멀티센서의 부식 모니터링에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 논문, 2012년 8월.
- [3] 최정인, “해수 중 Zn-mesh형 희생양극 음극방식법을 적용한 철근콘크리트 구조물의 방식성능 비교에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 논문, 2011년 8월.
- [4] 이학렬, “금속부식공학”, 연경문화사, 2004.
- [5] 박인규, “재료과학과 공학”, 시그마프레스, 제7판, 2007.
- [6] J. P. Broomfield, “Corrosion of Steel in Concrete”, 2nd Edition, Taylor & Francis, pp. 1-2, 2007.
- [7] M. Kouril, P. Novak and M. Bojko, “Threshold Chloride Concentration for Stainless Steels Activation in Concrete Pore Solutions” Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 431-436, 2010.
- [8] M. Raupach, B. Elasense and R. Polder, “Corrosion of Reinforcement in Concrete, European Federation of Corrosion Publications, 2007.
- [9] T. S. Nguyen, S. Lorente and M. Carcasses, “Effect of Environment Temperature on the Chloride Diffusion through CEM-I and CEM-V Mortars : an Experimental Study”, Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 2, p. 795-803, 2009.
- [10] O. T. D. Rincon et al, “Environmental Influence on Point Anodes Performance in Reinforced Concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 4, pp. 494-503, 2008.
- [11] A. A. Sagues and R. G. Powers, “Sprayed-zinc Sacrificial Anodes for Reinforced Concrete in Marine Service”, NACE International, Paper No. 515, pp. 1-23, 1995.

- [12] M. Funahashi and W. T. Young, "Three Year Performance of Aluminum Alloy Galvanic Cathodic Protection System", NACE International, Paper No. 550, pp. 1-16, 1997.
- [13] L. Bertolini and E. Redaelli, "Throwing Power of Cathodic Prevention Applied by Means of Sacrificial Anodes to Partially Submerged Marine Reinforced Concrete Piles : Result of Numerical Simulations", Corrosion Science, Vol. 51, No. 9, pp. 2218-2230, 2009.
- [14] G. K. Glass, A. C. Roberts and N. Davison, "Hybrid Corrosion Protection of Chloride-contaminated Concrete", Institution of Civil Engineers, Vol. 161, No. 4, pp. 163-172, 2008.
- [15] 진충국, "Tidal Water Effect of Hybrid Cathodic Protection System in Reinforced Concrete Structures", 한국해양대학교 공학석사 논문, 2012년 2월.
- [16] NACE International SP0290, "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", 2007.

