

BSPE99764-12214-2

2019. 12.

부유식 구조체의 수명연장을 위한 표면보호 기술개발

www.kiost.ac.kr

Development of Cementitious Materials for Life Time Extension of
Floating Concrete Structures

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “부유식 구조체의 수명연장을 위한 표면보호 기술개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 12.

총괄연구책임자 : 김 민 욱

참 여 연 구 원 : 한 택 희

“ : 이 진 학

“ : 박 준 길

“ : 최 성 익

“ : 원 보 림

“ : 김 성 원

“ : 백 승 미

보고서 초록

과제고유 번호	PE99764	해당단계 연구기간	2019. 06. 01. ~ 2019. 12. 31.	단계 구분	기초
연구사업명	중사업명	미래선도사업			
	세부사업명	신진연구자의 연구기반 구축 및 창의적 아이디어 지원			
연구과제명	대과제명	부유식 구조체의 수명연장을 위한 표면보호 기술개발			
	세부과제명				
연구책임자	김 민 욱	해당단계 참여연구원수	총 : 8명 내부: 3명 외부: 5명	해당단계 연구비	정부: 101,000천원 기업: 0천원 계 : 101,000천원
		총 연구기간 참여연구원수	총 : 8명 내부: 3명 외부: 5명	총 연구비	정부: 101,000천원 기업: 0천원 계 : 101,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양공학연구본부 연안개발·에너지연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수	181
<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구에서는 부유식 콘크리트 구조체의 수명연장을 위한 시멘트 모르타르 계열 보수재료개발을 목표로 실험적 연구를 수행함 ○ 표면보호재료의 성능평가를 위해서 압축, 휨강도를 측정할 수 있는 200 kN급 만능재료시험기, 부착강도를 측정할 수 있는 Pull-off 부착강도 시험장비, 염화물 침투저항성 측정을 위한 Rapid Chloride Permeability Test 장비를 구축함 ○ 구축된 실험 장비들을 사용하여 시멘트 모르타르 계열 표면보호재료의 강도와 내구성에 양생환경(수돗물과 해수), 혼화재료의 종류, 혼화재료의 치환율, 그리고 양생기간이 미치는 영향을 평가함 ○ 또한, 시멘트 모르타르 표면보호재료의 강도와 내구성이 변화하는 원인을 보다 정확히 규명하고자 미세구조분석을 실시하였으며, 개발된 표면보호재료를 부유식 콘크리트 구조체에 적용하기 위한 믹싱가이드라인과 시공방법을 제시함 ○ 추후 개발된 표면보호재료의 실구조물 적용을 위한 경제성 평가 및 장기양생 (6개월, 1년, 2년) 시험을 계획하고 있음 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	부유식 구조체, 표면보호재료, 해양환경, 내구성능, 부착강도			
	영 어	Floating structures, Surface protection, Marine environment, Durability, Interfacial bond strength			

요 약 문

I. 연구사업명: 부유식 구조체의 수명연장을 위한 표면보호 기술개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구 최종목표

- 부유식 구조체의 수명연장을 위한 고성능 표면보호재료 및 사용기술개발

2. 연구 세부 목표 및 내용

- 부유식 구조체 적용 시멘트 계열 표면보호재료 개발 및 성능평가

- 1) 양생환경이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
- 2) 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
- 3) 혼화재료의 치환율이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
- 4) 양생기간이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가

- 개발된 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험 장비 구축

- 1) 표면보호재료의 강도 평가를 위한 실험 장비 구축
- 2) 표면보호재료의 내구성능 평가를 위한 실험 장비 구축
- 3) 표면보호재료의 환경영향성 평가를 위한 실험 장비 구축

3. 연구 개발의 필요성

- 부유식 콘크리트 구조체의 경우 열악한 해양환경에 항시 노출되어 있으며 내구 성능 증진을 위한 표면처리제(Surface treatment)로 폴리우레탄, 에폭시, 실리콘 등의 재료가 사용되고 있으나 비용이 고가이며 전문 인력 투입으로 인한 인건비 증가가 발생할 수 있음
- 이러한 단점을 극복하기 위해 현재 시멘트 모르타르 계열의 표면보호재료가 개발되고 있으며, 시멘트 계열의 표면보호재료는 기존의 표면처리제보다 가격적인 면에서 매우 저렴함
- 또한, 시멘트 계열의 표면보호재료를 사용하였을 경우 전문 인력이 필요하지 않다는 장점이 있음

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 부유식 콘크리트 구조체 적용 고성능 표면보호재료 개발
 - 최적 혼화재료 결정을 위한 문헌 조사 및 최적 배합 결정
 - 개발된 시멘트 계열 복합재료의 성능평가

IV. 연구개발 결과

- 시멘트 계열 표면보호재료를 개발하기 위해서 해양구조물에 요구되는 물리적 성능과 내구성에 관한 선행연구, 기존 표면보호 재료개발에 대한 선행연구, 그리고 시멘트 모르타르에 관한 선행연구를 수집, 분석하여 본 연구에서 사용할 혼화재료를 선정하고 혼화재료의 치환율을 결정함
- 개발한 시멘트 모르타르 표면보호재료의 성능을 평가하기 위한 실험 장비를 구축함
- 시멘트 모르타르 계열 보수재료 개발을 목표로 실험적 연구를 수행한 결과, 양생환경, 혼화재료의 종류, 혼화재료의 함유량, 그리고 양생기간에 따라 강도와 내구성에 차이를 보여주었으며, Silica fume과 Metakaolin이 일반적으로 우수한 성능을 보여줌
- X-Ray Diffraction (XRD) 분석과 Thermo gravimetric Analysis (TGA)를 이용하여 개발된 시멘트 모르타르의 미세구조분석 결과, 높은 pozzolanc 반응으로 인해 더욱 조밀한 조직을 형성시킬 수 있는 dehydration of AFm의 함유가 많은 metakaolin을 사용하였을 때 높은 압축강도를 보여줌
- 기존 코팅재료인 상용 에폭시 재료 5종을 사용하여 대기, 수돗물, 그리고 해수에 노출된 에폭시 코팅재료와 콘크리트 사이 부착강도를 조사하여, 코팅재료의 부착강도는 코팅재료와 노출환경, 그리고 노출기간에 따라 큰 차이를 보여주며 부착강도는 일반적으로 노출기간이 증가하면서 감소하는 경향을 보여주었으나 밀도가 낮은 코팅재료 2와 4는 0일차의 부착강도보다 노출환경 기간이 증가하면서 수돗물과 해수에 노출된 경우, 부착강도가 증가하는 경향을 보여줌
- 마지막으로 시멘트 계열 표면보호재료를 부유식 구조체 적용할 수 있도록 작업성, 시공성에 대한 검토를 진행하고, 성능재현이 가능하도록 믹싱가이드라인을 제시하고 부유식 구조체를 시공할 수 있는 시공방안을 제시하였음

V. 연구개발결과의 활용계획 및 추후계획

- 본 연구의 결과물은 시험결과의 사실관계를 토대로 작성하였으며 이후, 1. 실험 결과의 정확한 통계적 분석 (Taguchi method, ANOVA 등), 2. 기존문헌과의 경향 및 결과 비교분석, 3. 원인 설명과 합당한 결론 도출을 위한 연구를 수행하여 SCI급 논문을 작성할 계획임
- XRD 분석결과 역시 International centre for diffraction data와의 비교를 통해 혼화재료의 종류에 따른 시멘트 모르타르의 내부구조의 상 차이를 밝혀 해수 환경에서의 휨강도 및 내구성 향상의 원인을 규명할 계획임
- 또한, 추후 장기양생 실험을 수행하고, 부유식 콘크리트 구조체의 수명연장 효과를 확인할 예정임
- 마지막으로, 본 연구결과를 실제 해양 콘크리트 구조물에 적용하기 위하여 가격 경쟁력 비교와 부유식 구조체에 적용되었을 때 발생할 수 있는 문제를 추가적으로 검토할 예정임

KEYWORDS : 부유식 구조체, 표면보호재료, 해양환경, 내구성능, 부착강도

S U M M A R Y

I. Title: Development of Cementitious Materials for Life Time Extension of Floating Concrete Structures

II. Goal and Necessity of Research

1. Goal

- Development of high performance surface protective cement based materials and application methods for life time extension of floating concrete

2. Objectives and outline of research

- Development and evaluation of surface protective cement based materials for floating concrete structures

1) Investigation of effect of curing environment on the performance of surface protective cement based materials

2) Investigation of effect of admixture types on the performance of surface protective cement based materials

3) Investigation of effect of admixture contents on the performance of surface protective cement based materials

4) Investigation of effect of curing period on the performance of surface protective cement based materials

- Construction of experimental environment to evaluate surface protective materials

1) Construction of testing machine to conduct the strength test of surface protective materials

2) Construction of testing machine to conduct the durability test of surface protective materials

3) Construction of testing machine to conduct the environment impact of surface protective materials

3. Necessity of research

- Floating concrete structures are always exposed to poor marine environment, and materials such as polyurethane, epoxy, and silicon are used as surface treatment to improve durability, but the material cost is high and labor costs might be increased due to the input of experts
- To overcome these drawbacks, cement based surface protection materials are currently being developed, and cement based surface protection materials are much cheaper than conventional surface treatment agents
- In addition, the advantage of using cement based surface protection material is that no expert personnel required

III. Contents and Scope of Research

- Development of high-performance surface protection material applied to floating concrete structure
 - Literature reviews and mixture determination for optimal admixtures
 - Investigating performance of cement based surface protection material

IV. Results

- To develop cement-based surface protection materials, it is necessary to identify previous studies on mechanical performances and durability required for offshore structures, previous studies on existing surface protection materials, and previous studies on cement mortar materials.
- Experimental equipment for evaluating the performance of cement mortar for surface protection of floating concrete structures was constructed
- To develop the cement mortar for surface protection of floating concrete structures, the effect of curing environment, type of admixtures, contents of admixture, and curing period on the mechanical performances and durability of cement mortar were investigated.
- X-Ray Diffraction (XRD) and Thermo gravimetric Analysis (TGA) were performed to investigate the causes of the effects of curing environment and the types of admixtures (SF, MK, GP) on the mechanical properties and durability of cement

mortar and high content of dehydration of AFm, which shows weight loss near 150 °C inside cement mortar, shows the high compressive strength due to the denser structure generated by high pozzolanc reaction such as MK specimen.

- The bond strength between the commercial epoxy coating materials and concrete exposed to air, tap water, and seawater was investigated in according to ASTM D 4541. In general, the bond strength of the coating material decreased as the exposure period increased. However, low-density coating materials 2 and 4 were exposed when they were exposed to tap water and seawater with an increase in the exposure environment period than the bond strength at 0 day.
- Lastly, the work and construct ability were reviewed to apply the cement-based surface protection material to the floating structure, the mixing guideline was suggested for the performance reproduction, and the construction method to construct the floating structure was presented.

V. Utilization and Future plans

- The results of this study have been prepared only by analyzing the facts of the test results. The reasonable conclusions SCI level paper is to be prepared by conducting deduction.
- The results of XRD analysis will analyze the phases identification by comparing international center for diffraction database.
- It is necessary to carry out the long-term curing test.
- Finally, in order to apply the results of this study to actual marine concrete structures, we will derive the actual application direction by comparing the price competitiveness and the problems that may occur when used in floating structures.

(KEYWORDS : Floating structures, Surface protective material, Ocean environment, Durability, Bond strength)

목 차

제1장 서론	1
1.1. 연구개발의 필요성	3
1.1.1. 연구개발 개요	3
1.1.2. 연구개발의 중요성	6
1.2. 연구 목표	7
제2장 국내외 기술개발 현황 및 선행 연구 동향	9
2.1. 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 수명에 관한 기존 연구 동향	11
2.2. 기존 표면보호 코팅재료에 관한 연구 동향	12
2.3. 시멘트 모르타르 재료에 관한 연구동향	15
2.3.1. 혼화재료의 종류 및 치환율이 시멘트 모르타르에 미치는 영향	15
2.3.2. 양생 환경 및 기간이 시멘트 모르타르에 미치는 영향	19
제3장 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험환경 구축	25
3.1. 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험 환경구축	27
3.1.1. 표면보호재료의 물리적 성능평가를 위한 장비의 종류	27
3.1.2. 표면보호재료의 압축강도 시험방법	29
3.1.3. 표면보호재료의 휨강도 시험방법	29
3.2. 표면보호재료의 내구성능평가 환경구축	32
3.2.1. 표면보호재료의 내구성능평가를 위한 장비구축	32
3.2.2. 표면보호재료의 염해침투저항성 시험방법	33
3.2.3. 표면보호재료의 투수저항성 시험방법	34
3.3. 표면보호재료의 환경영향성 평가 환경구축	35
3.2.1. 수질측정을 위한 장비구축	35
3.2.2. 수질측정 방법	35

제4장 고성능 표면보호재료의 성능평가	37
4.1. 고성능 표면보호재료의 성능평가 방안	39
4.1.1. 시험개요	39
4.1.2. 시험체 제작	43
4.2. 양생환경에 따른 표면보호재료의 성능평가	46
4.2.1. 양생환경에 따른 표면보호재료의 강도평가	46
4.2.2. 양생환경에 따른 표면보호재료의 내구성 평가	52
4.3. 혼화재료 종류에 따른 표면보호재료 성능평가	56
4.3.1. 혼화재료 종류에 따른 표면보호재료의 강도 평가	56
4.3.2. 혼화재료의 종류에 따른 표면보호재료의 내구성 평가	62
4.4. 혼화재료의 함유량에 따른 표면보호재료 성능평가	68
4.4.1. 혼화재료 함유량에 따른 표면보호재료의 강도 평가	68
4.4.2. 혼화재료 함유량에 따른 표면보호재료의 내구성 평가	77
4.5. 양생기간에 따른 표면보호재료 성능평가	83
4.5.1. 양생기간에 따른 표면보호재료의 강도 평가	83
4.5.2. 양생기간에 따른 표면보호재료의 내구성 평가	89
4.6. 고성능 표면보호재료의 환경영향성 평가	93
4.7. 결론 및 제언	94
제5장 고성능 표면보호재료의 미세구조 분석	97
5.1. 고성능 표면보호재료의 미세구조 분석방안	99
5.1.1. 실험개요	99
5.1.2. 시료(Sample) 제작	99
5.1.3. 실험방법	101
5.2. 고성능 표면보호재료의 X-Ray Diffraction (XRD) 분석 결과	101
5.3. 고성능 표면보호재료의 Thermogravimetric Analysis (TGA) 분석 결과	105
5.4. 결론 및 제언	109
제6장 에폭시 계열의 표면보호재료의 성능평가	111
6.1. 에폭시 계열의 표면보호재료의 성능평가 방안	113
6.1.1. 시험개요	113

6.1.2. 시험체 제작.....	114
6.2. 에폭시 계열의 표면보호재료의 부착 성능평가.....	117
6.2.1. 부착 시험결과.....	117
6.2.2. 노출환경이 부착강도에 미치는 영향.....	119
6.2.3. 부착파괴 양상과 부착강도의 상관관계.....	127
6.2.4. 에폭시 코팅 두께와 부착강도의 상관관계.....	131
6.3. 에폭시 코팅재료의 환경영향성 평가.....	134
6.4. 결론 및 제언.....	136
제7장 고성능 표면보호재료의 부유식 구조체 적용방안	139
7.1. 표면보호재료의 사용이 작업성, 시공성에 미치는 영향.....	141
7.2. 표면보호재료의 성능 재현을 위한 믹싱 가이드라인.....	142
7.3. 부유식 구조체의 적용을 위한 시공방법.....	143
제8장 결 론	147
제9장 참고문헌	153
제10장 부 록	161
부록 1. 고성능 표면보호재료의 시험 데이터.....	163

표 목 차

<표 2-1> 기존 표면보호재료의 장·단점.....	13
<표 4-1> 통영 연안 수질 현황.....	43
<표 4-2> 재료성분.....	43
<표 4-3> 시멘트 모르타르의 배합 무게비.....	44
<표 4-4> 모재 콘크리트의 배합 무게비 및 강도성능.....	44
<표 4-5> 시험 변수별 시험횟수.....	45
<표 5-1> XRD 분석과 TGA를 수행한 시멘트 모르타르의 배합 무게비.....	99
<표 6-1> Failure types of pull-off bond test.....	113
<표 6-2> 콘크리트 배합 무게비 및 압축강도.....	114
<표 6-3> 코팅 재료의 물성 및 무게비.....	115
<표 6-4> 에폭시 코팅재료 부착강도 시험변수.....	116
<표 6-5> 에폭시 코팅 부착강도 시험결과.....	118
<표 6-6> 에폭시 코팅을 담근 수돗물의 전기전도도의 변화.....	134
<표 6-7> 에폭시 코팅을 담근 해수의 전기전도도의 변화.....	135
<표 7-1> 시멘트 모르타르의 배합 무게비와 flow.....	141
<표 7-2> 허용 이어치기 시간간격의 표준.....	144
[표 1-A] 압축시험 결과.....	163
[표 1-B] 압축 Raw Data.....	163
[표 1-C] 휨시험 결과.....	165
[표 1-D] 휨 Raw Data.....	166
[표 1-E] 부착시험 결과.....	167
[표 1-F] 부착 Raw Data 및 파괴양상.....	168
[표 1-G] 염화물 침투 시험 결과.....	169
[표 1-H] 염화물 침투 시험 Raw Data.....	170
[표 1-I] 무게 변화 측정결과.....	171
[표 1-J] 무게 변화 Raw Data.....	172
[표 1-K] 물 흡수 시험 결과.....	175
[표 1-L] 환경 영향성 TDS 측정결과 (수돗물 양생).....	176
[표 1-M] 환경 영향성 TDS 측정결과 (해수 양생).....	176
[표 1-N] 환경 영향성 전기전도도 측정결과 (수돗물 양생).....	177
[표 1-O] 환경 영향성 전기전도도 측정결과 (해수 양생).....	177
[표 1-P] Representative failure types.....	178

그림 목 차

<그림 1-1> 해양공간계획 3

<그림 1-2> 해양 구조물 성능 저하의 메커니즘 4

<그림 1-3> 해양 구조물 성능 저하 메커니즘 4

<그림 1-4> 최근 5년간('14 ~ '18) 주체별 유지관리 투자액 5

<그림 1-5> 교통시설 노후화 현황 6

<그림 1-6> 유압식 만능시험 장비를 사용한 압축강도 시험 7

<그림 1-7> 유압식 만능시험 장비를 사용한 표면보호재료의 역학적 성능 평가 8

<그림 1-8> 개발된 표면보호재료의 내구성능 평가 8

<그림 2-1> 콘크리트 구조물의 열화 단계 11

<그림 2-2> Relation between service life, diffusion coefficient and crack depth 12

<그림 2-3> Methods of corrosion prevention in concrete structures 12

<그림 2-4> Comparison of additives in mortar mixture 15

<그림 2-5> Relationship with concrete porosities 16

<그림 2-6> Flexural strength of cement mortar with metakaolin 17

<그림 2-7> Mechanical test results of cement mortar with different additives 17

<그림 2-8> Effect of Glass Powder on the mechanical and durability properties of concrete 18

<그림 2-9> Test results of cement mortar with different Glass Powder contents 19

<그림 2-10> Test results of high strength concrete in seawater against age 20

<그림 2-11> Strength deteriorate factor at 10%, 20%, 30% and 40% cement replacement for 18 month curing 21

<그림 2-12> Average compressive strength of concrete 22

<그림 2-13> Average compressive strength of concrete 22

<그림 2-14> Flexural tensile strength of SCM of all mixes 23

<그림 2-15> 사용된 혼화재료 24

<그림 3-1> 만능재료시험기의 분류 27

<그림 3-2> 구축된 만능재료시험기 28

<그림 3-3> Pull-off 부착강도시험기의 분류 28

<그림 3-4> 구축된 Pull-off 부착강도시험기 29

<그림 3-5> 압축강도시험 셋업 30

<그림 3-6> 휨강도시험 셋업 30

<그림 3-7> Pull-off bond strength test setup 30

<그림 3-8> 부착강도 시험 모재 콘크리트의 제작.....	30
<그림 3-9> 에폭시 코팅의 부착강도 측정.....	31
<그림 3-10> 염화물 이온 침투 시험	32
<그림 3-11> 구축된 염화물 침투시험기.....	32
<그림 3-12> 물흡수성 시험.....	33
<그림 3-13> RCPT 테스트 셋업.....	33
<그림 3-14> 물흡수 시험 셋업.....	34
<그림 3-15> 구축된 수질측정 시험장비.....	35
<그림 3-16> 총 용존 고형물량 셋업.....	36
<그림 4-1> 실험역 침지 위치 - 경상남도 통영시 용남면.....	40
<그림 4-2> 실험역 침지준비 및 시험체 배치 사진.....	40
<그림 4-3> 실험역 침지 위치의 온도 변화.....	41
<그림 4-4> 시험체 제작 및 실험역 침지 과정	42
<그림 4-5> 수돗물 양생 사진.....	42
<그림 4-6> Test program and notation.....	45
<그림 4-7> 압축강도 시험 결과 (7, 28일).....	46
<그림 4-8> 압축강도 시험 결과 (56, 90일).....	47
<그림 4-9> 휨강도 시험 결과 (7, 28일).....	48
<그림 4-10> 휨강도 시험 결과 (56, 90일).....	49
<그림 4-11> 부착강도 시험 결과 (7, 28일).....	50
<그림 4-12> 부착강도 시험 결과 (56, 90일).....	51
<그림 4-13> 염화물 침투저항성 시험 결과 (7, 28일).....	52
<그림 4-14> 염화물 침투저항성 시험 결과 (56, 90일).....	53
<그림 4-15> 투수저항성 시험 결과(양생 7, 28일).....	54
<그림 4-16> 투수저항성 시험 결과(양생 56, 90일).....	55
<그림 4-17> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 압축강도.....	56
<그림 4-18> 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 압축강도.....	57
<그림 4-19> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 휨강도.....	58
<그림 4-20> 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 휨강도.....	59
<그림 4-21> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 부착강도.....	60
<그림 4-22> 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 부착강도.....	61
<그림 4-23> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 염화물 침투저항성.....	62
<그림 4-24> 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 염화물 침투저항성.....	63
<그림 4-25> 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 물 흡수 속도.....	64
<그림 4-26> 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 물 흡수 속도.....	65

<그림 4-27> 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 물 흡수 속도..... 66

<그림 4-28> 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 물 흡수 속도..... 67

<그림 4-29> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 압축강도 변화..... 69

<그림 4-30> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 압축강도 변화..... 70

<그림 4-31> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 휨강도 변화..... 72

<그림 4-32> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 휨강도 변화..... 73

<그림 4-33> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 부착강도 변화..... 75

<그림 4-34> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 부착강도 변화..... 76

<그림 4-35> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 통과전하량 변화..... 78

<그림 4-36> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 통과전하량 변화..... 79

<그림 4-37> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 물 흡수 속도..... 81

<그림 4-38> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 물 흡수 속도..... 82

<그림 4-39> 수돗물 양생기간에 따른 압축강도 변화..... 83

<그림 4-40> 해수 양생기간에 따른 압축강도 변화..... 84

<그림 4-41> 수돗물 양생기간에 따른 휨강도 변화..... 85

<그림 4-42> 해수 양생기간에 따른 휨강도 변화..... 86

<그림 4-43> 수돗물 양생기간에 따른 부착강도 변화..... 87

<그림 4-44> 해수 양생기간에 따른 부착강도 변화..... 88

<그림 4-45> 수돗물 양생기간에 따른 통과전하량 변화 89

<그림 4-46> 해수 양생기간에 따른 통과전하량 변화 90

<그림 4-47> 수돗물 양생기간에 따른 물 흡수 속도 변화..... 91

<그림 4-48> 해수 양생기간에 따른 물 흡수 속도 변화..... 92

<그림 4-49> 양생시간에 따른 전기전도도 변화..... 93

<그림 5-1> 시멘트 모르타르 분말 시료 제작 과정..... 100

<그림 5-2> Test machine for XRD and TGA..... 101

<그림 5-3> 0일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과..... 101

<그림 5-4> 7일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과..... 102

<그림 5-5> 28일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과..... 103

<그림 5-6> 90일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과..... 104

<그림 5-7> 0일차 TG, DTG 결과..... 105

<그림 5-8> 7일차 TG, DTG 결과..... 106

<그림 5-9> 28일차 TG, DTG 결과..... 107

<그림 5-10> 90일차 TG, DTG 결과..... 108

<그림 6-1> 코팅두께 측정 장비 및 측정방법..... 114

<그림 6-2> 에폭시 코팅재료 부착시험 준비..... 116

<그림 6-3> 노출환경 및 시간에 따른 부착강도의 변화.....	120
<그림 6-4> Test machine to take SEM image.....	121
<그림 6-5> Specimens to take SEM images on interface between coating and concrete substrate.....	121
<그림 6-6> 코팅재료 1과 콘크리트 사이 계면 상태.....	122
<그림 6-7> 코팅재료 2와 콘크리트 사이 계면 상태.....	123
<그림 6-8> 코팅재료 3과 콘크리트 사이 계면 상태.....	124
<그림 6-9> 코팅재료 4와 콘크리트 사이 계면 상태.....	125
<그림 6-10> 코팅재료 5와 콘크리트 사이 계면 상태.....	126
<그림 6-11> 부착시험 후 콘크리트와 돌리의 표면 파괴양상.....	127
<그림 6-12> 단기 노출기간(0 - 28일)에서 환경에 따른 파괴양상별 부착강도.....	129
<그림 6-13> 중기 노출기간(56-90일)에서 노출환경에 따른 파괴양상별 부착강도.....	130
<그림 6-14> 대기 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향.....	131
<그림 6-15> 수돗물 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향.....	132
<그림 6-16> 해수 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향.....	133
<그림 6-17> 코팅 노출기간에 따른 수질의 변화.....	136
<그림 7-1> 수경성 시멘트 모르타르 시험용 flow 테이블.....	141
<그림 1-A> 물 흡수 시험 결과 (7, 28일).....	173
<그림 1-B> 물 흡수 시험 결과 (56, 90일).....	174



제1장 서론



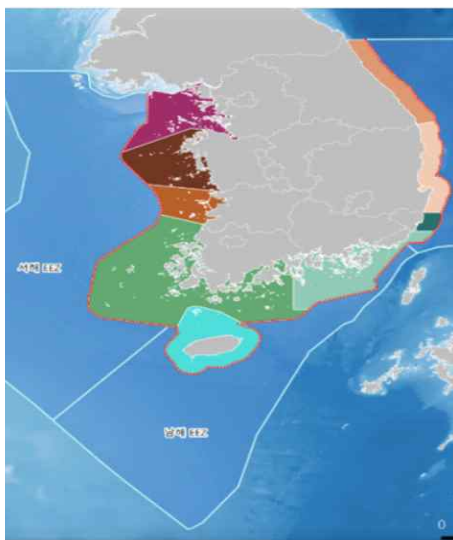
1. 서론

1.1. 연구개발의 필요성

1.1.1. 연구개발 개요

가. 해양공간 활용의 필요성 확대

- 유네스코(UNESCO)는 2030년까지 배타적 경제수역(EEZ)의 1/3이상에 대하여 해양공간계획을 수립할 것을 요구하고 있음
- 국내의 경우 해양공간계획 및 관리에 관한 법률을 2018년 4월 17일에 공포하였으며 2019년 4월 18일부터 시행하고 있음
- 보다 구체적으로는 해양공간의 지속가능한 이용개발 및 보전에 관한 계획을 수립하고, 법 집행에 필요한 사항을 정하였으며 연도별 해양공간계획을 수립하였음
- 또한, 해양수산부는 해양공간 통합관리를 위한 세부규정 지침을 2019년 6월에 제정하였으며, 제1차 해양공간 기본계획을 수립함
- 미국 메사추세츠 주는 Ocean Management Plan을 통해 해양구역을 3개의 관리지역으로 나누어 관리하도록 하였음



(a) 한국의 해양공간계획



(b) 메사추세츠의 Ocean Management Plan

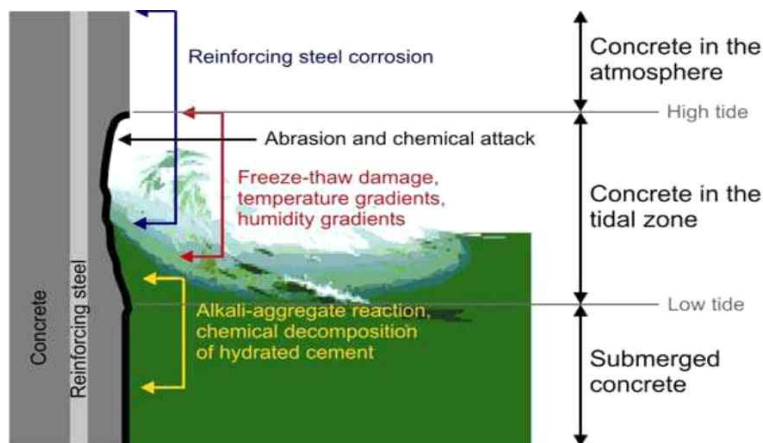
〈그림 1-1〉 해양공간계획

- 부유식 구조체는 육상공간의 부족으로 발생하는 사회적 경제적 문제를 해결하기 위한 하나의 해결책으로 여겨지고 있음
- 부유식 구조체의 경우 바다위에서 쉽게 이동이 가능하며 해안연안을 매립하는 방식보다 자연환경에 미치는 영향이 적은 것으로 알려져 있음

- 현재 전 세계에서 다양한 종류의 부유식 구조체가 설계 및 제작 되고 있으며, 국내의 경우, 서울 마리나 클럽 하우스가 부유식 구조체로는 최초로 건축허가를 승인받아 준공되었음
- 하지만 부유식 콘크리트 구조체는 해양환경에 지속적으로 노출되어, 구조물의 수명이 단축될 수 있음
- 이에 따라 해수노출이 구조물의 수명에 미치는 영향에 대하여 정확히 파악하고 악영향을 미연에 방지할 수 있는 효과적이고 경제적인 방법을 마련할 필요가 있음

나. 해양환경에 노출된 구조물의 성능 저하

- 해양환경에 위치한 콘크리트 구조물의 경우 염분 침투로 야기되는 구조물 내부의 철근 부식뿐만 아니라, 표면 박리, 해양생물(Marine organism) 부착 등 구조물의 수명을 단축시킬 수 있는 열악한 환경에 상시 노출되어 있음



〈그림 1-2〉 해양 구조물 성능 저하의 메커니즘 [Malhorta, 2000]

- 특히, 부유식 구조체의 경우 지속적으로 해수에 직접 맞닿아 있어, 내구성을 확보해야 하며, 염분의 침투로 인해 철근이 부식되지 않도록 구조물의 균열발생을 억제하여야 하고, 물리적인 침식을 견딜 재료강도가 확보되어야 함



(a) 부식균열

(b) 콘크리트 마모/ 침식

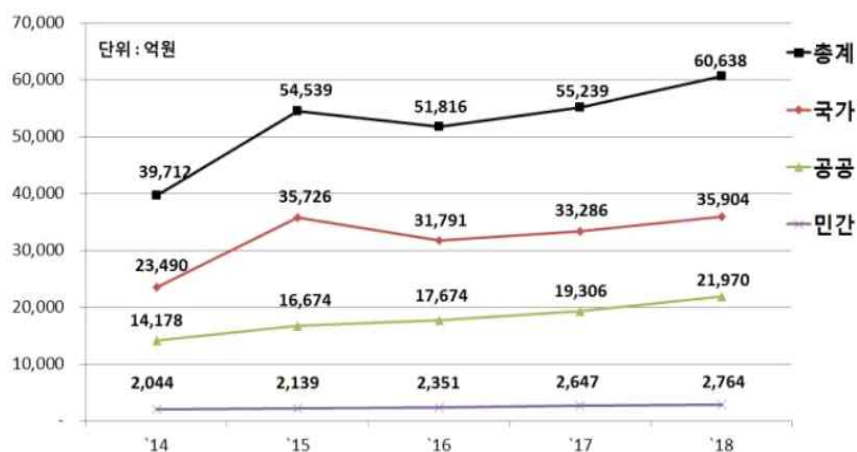
(c) 콘크리트 박리

〈그림 1-3〉 해양 구조물 성능 저하 메커니즘 [Malhorta, 2000]

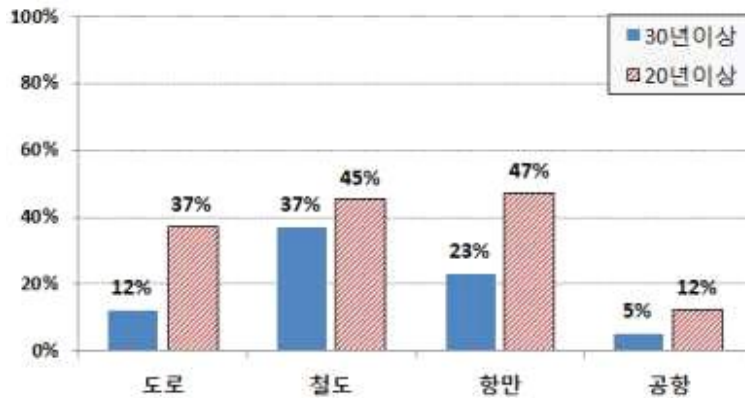
- 상기의 조건이 충족되지 않은 부유식 콘크리트 구조체는 탄성화, 철근 부식, 표면 박리 등이 발생할 수 있으며 최종적으로는 구조물 붕괴로 이어질 수 있음
- 이에 따라 부유식 구조체의 표면보호를 위한 다양한 보수공법이 개발되었으며, 이는 구조물의 균열 제어, 탄산화 방지, 내부철근 부식방지 등 구조물의 내구성에 악영향을 미칠 수 있는 요소들을 미연에 방지하는 역할을 함
- 콘크리트의 표면처리제(Surface treatment)로 폴리우레탄, 에폭시, 실리콘 등의 재료가 사용되고 있으나 비용이 고가이며 전문 인력 투입으로 인한 인건비 증가가 발생할 수 있음
- 이러한 단점을 극복하기 위해 현재 시멘트 계열의 표면보호재료가 개발되고 있으며, 시멘트 계열의 표면보호재료는 기존의 표면처리제보다 가격적인 면에서 매우 저렴함
- 또한 시멘트 계열의 표면보호재료를 사용하였을 경우 전문 인력이 필요하지 않다는 장점이 있음

다. 해양·항만구조물 유지보수 비용의 지속적인 증가

- 2019년 국토교통부가 발표한 「지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책」에 따르면 국가 SOC 중장기 안전 투자비용을 확대하고 노후시설을 적기에 개선한다고 보고하고 있음 [국토교통부 2019 보도자료]
- 해양·항만구조물의 경우 30년이 경과한 노후 시설이 23%에 육박하며, 지금으로부터 10년 후에는 약 절반가량의 항만 시설물이 노후화 시설로 지정될 예정임



〈그림 1-4〉 최근 5년간('14 ~ '18) 주체별 유지관리 투자액
 [“지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책”, 국토교통부, 2019년 보도자료]



〈그림 1-5〉 교통시설 노후화 현황
 [“지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책”, 국토교통부, 2019년 보도자료]

1.1.2. 연구개발의 중요성

- 부유식 콘크리트 구조체의 경우 열악한 해양환경에 항시 노출되어 있으며 내구성능 증진을 위해 구조물의 표면에 다양한 처리를 하지만 비용이 매우 비싸며 시공이 어려운 단점이 있음
- 따라서 본 연구개발 및 활용을 통해 숙련된 전문가 없이도 작업이 가능하며 유지보수 비용을 효과적으로 줄일 수 있음

1.2. 연구 목표

가. 연구 최종목표

- 부유식 구조체의 수명연장을 위한 고성능 표면보호재료 및 사용기술개발

나. 연구 세부 목표 및 내용

- 부유식 콘크리트 구조체 적용 고성능 표면보호재료 및 사용기술개발
 - 부유식 구조체 적용 시멘트 계열 표면보호재료 개발 및 성능평가
 - 1) 양생환경이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
 - 2) 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
 - 3) 혼화재료의 치환율이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
 - 4) 양생기간이 표면보호재료의 성능에 미치는 영향에 대한 평가
 - 개발된 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험 장비 구축
 - 1) 표면보호재료의 강도 평가를 위한 실험 장비 구축
 - 2) 표면보호재료의 내구성능 평가를 위한 실험 장비 구축
 - 3) 표면보호재료의 환경영향성 평가를 위한 실험 장비 구축

다. 연구개발 내용 및 범위 상세 기술

- 부유식 콘크리트 구조체 적용 고성능 표면보호재료 개발
 - 최적 혼화재료 결정을 위한 문헌 조사 및 최적 배합 결정
 - 개발된 시멘트 계열 복합재료의 성능평가 (압축, 휨, 부착강도 시험)



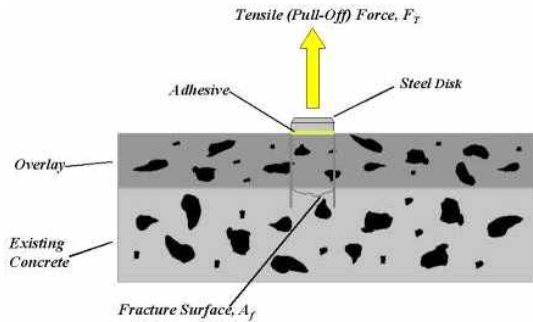
〈그림 1-6〉 유압식 만능시험 장비를 사용한 압축강도 시험

○ 역학적 성능 평가

- 개발된 고성능 표면보호재료의 역학적 성능을 평가하기 위한 압축강도, 휨강도, 부착강도측정을 수행
- 양생환경(Tap Water vs Seawater)의 차이가 역학적 성능에 미치는 영향에 대한 비교/분석



(a) 휨강도

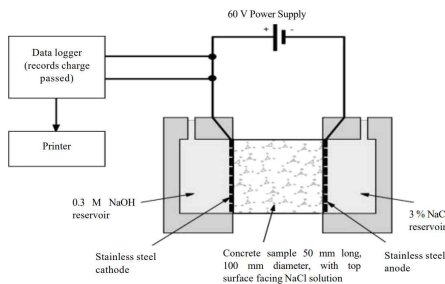


(b) 부착강도

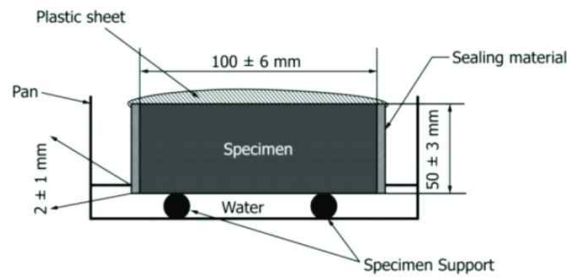
〈그림 1-7〉 유압식 만능시험 장비를 사용한 표면보호재료의 역학적 성능 평가

○ 내구성능 평가

- 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 내구성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 2가지 대표적인 내구성능시험인 염해침투저항성 및 투수저항성 시험을 실시



(a) 염해침투저항성 시험

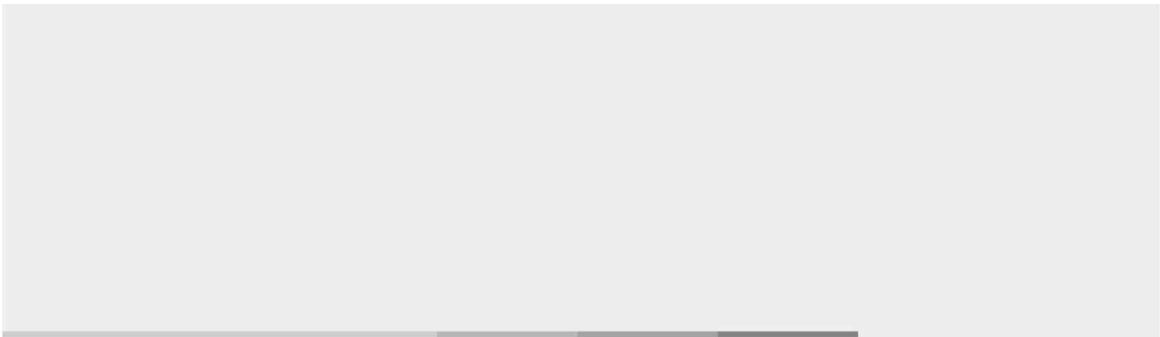


(b) 투수저항성 시험

〈그림 1-8〉 개발된 표면보호재료의 내구성능 평가


○ 환경영향성 평가

- 개발된 표면보호재료의 양생 중 발생할 수 있는 용출현상에 따른 수질의 오염도 평가
- 검출되는 오염도 및 환경영향성 평가에 따른 최종 표면보호재료 선별



⋮

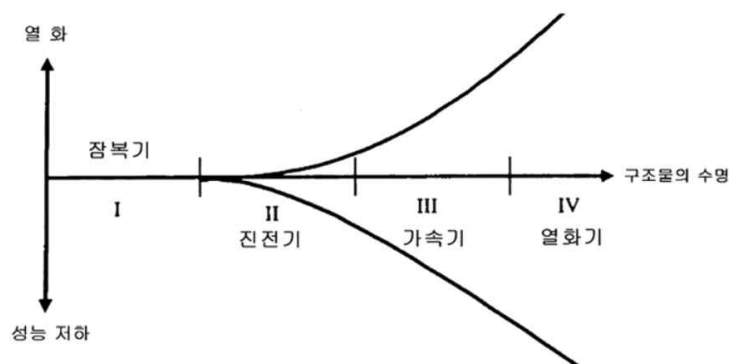
제2장 국내외 기술개발 현황 및 선행 연구 동향



2. 국내외 기술개발 현황 및 선행 연구 동향

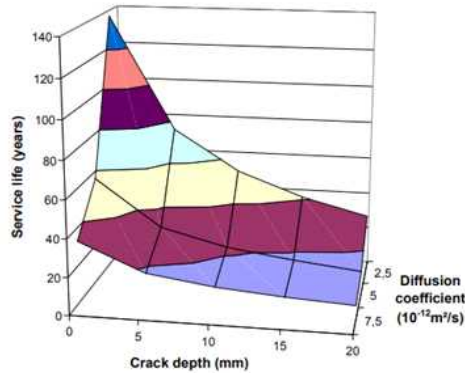
2.1. 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 수명에 관한 기존 연구 동향

- 철근 콘크리트 구조물의 경우 내부 균열, 표면 박리의 발생으로 기대수명이 저하되며, 이를 방지하였을 경우 구조물의 붕괴로 이어질 수 있음
- 특히 해양환경에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 경우 지속적인 염분과 해수의 공급으로 구조물 내부의 철근부식을 촉진할 수 있음
- <그림 2-1>에 콘크리트 구조물의 열화단계를 나타내었으며, 진전기에서 물과 산소의 공급으로 인해 가속기 이후 철근부식이 발생하게 되고, 구조물의 균열 및 철근의 단면손실로 구조물의 역학적 특성에 악영향을 미치게 됨



<그림 2-1> 콘크리트 구조물의 열화 단계

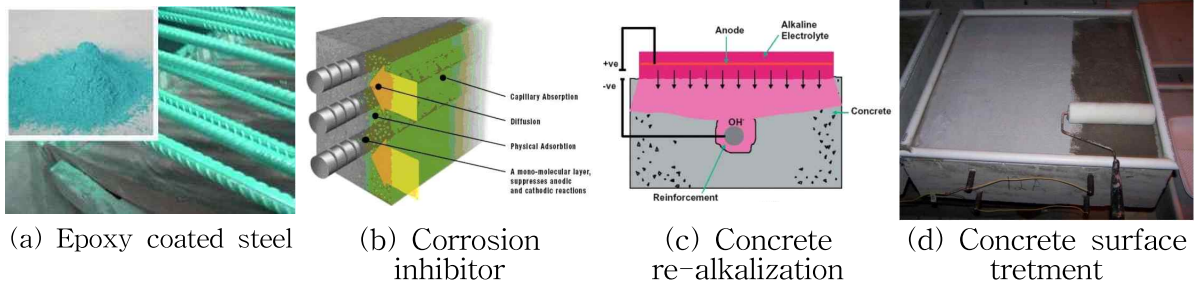
- 또한 염해 속의 알칼리 이온으로 인한 콘크리트의 탄성화로 철근의 부식속도가 빨라질 뿐만 아니라, 해양선박의 충돌, 반복적인 파도 등으로 인한 침식으로 구조물이 손상을 받게 됨
- Audenaert et al. (2009)은 균열깊이가 콘크리트 구조물의 수명에 미치는 영향을 파악하고자 시험체에 임의의 균열을 발생시켜 염화물 침투 시험을 수행하였으며, 시험체의 염화물 침투깊이를 측정하여 기대수명을 예측하였음
 - 균열 깊이가 깊어질수록 염화물의 침투 깊이 또한 증가하게 되고, 깊이가 깊어짐에 따라 콘크리트 내부의 철근에 악영향을 미치게 됨
 - 콘크리트의 균열 깊이, 염화물 확산계수, 기대수명의 관계를 <그림 2-2>에 나타내었음
- 해양 콘크리트 구조물의 성능저하를 초래하는 인자들을 사전에 차단하기 위해서 표면처리기술 개발 및 적용이 필요한 실정임



〈그림 2-2〉 Relation between service life, diffusion coefficient and crack depth [Audenaert et al.(2009)]

2.2. 기존 표면보호 코팅재료에 관한 연구 동향

- 해양환경에 인접한 콘크리트 구조물의 내구성 문제를 해결하기 위한 방법을 아래와 같이 나눌 수 있음 [Pan et al. (2017)]
 - (1) 철근에 에폭시레진 과 폴리머를 코팅
 - (2) 부식 억제제 사용
 - (3) 콘크리트 재 알칼리화 (re-alkalization)
 - (4) 콘크리트 표면 처리



〈그림 2-3〉 Methods of corrosion prevention in concrete structures [Tabatabai et al. (2009)]

- 이중 (1) 철근 코팅과 (2) 부식억제제의 사용은 상용 구조물에는 적용할 수 없으며, (3) 콘크리트의 재 알칼리화는 큰 비용을 요구하여 경제적이지 못함
- 반면, (4) 표면에 표면보호재료를 적용하는 방식은 내구성에 악영향을 미칠 수 있는 물질의 내부 침입을 효과적으로 방지할 수 있는 공법으로 널리 사용되고 있음
- (4)의 경우 3가지의 메커니즘을 기반으로 구조물의 보호함 [Levi et al. (2002)]
 - i) coating and sealers : 구조물의 표면에 얇은 막을 도포하여 물 흡수 방지

- ii) Pore-lining treatments : 소수성 물질을 통한 물 흡수 방지
 - iii) Pore-blocking treatments : 콘크리트의 공극을 채워 유해인자 흡수 방지
- 표면보호재료의 종류는 에폭시, 아크릴, 폴리우레탄 등의 폴리머가 주를 이루고 있으며, 각각의 장·단점을 아래 표에 정리함

〈표 2-1〉 기존 표면보호재료의 장·단점

Type	Advantages	Disadvantages
Epoxy resin [Zerda and Lesser (2001), Moloney et al. (1987), Chrusciel and Lesniak (2015), Reddy and Sykes (2005)]	<ul style="list-style-type: none"> • Low shrinkage • Easy to cure • Good chemical resistance • Good adhesive strength 	<ul style="list-style-type: none"> • Low fracture energy • Low impact on strength • Poor hydrophobicity • Low thermal stability • Easy to weathering • Poor resistance to the initiation and propagation of cracks
Acrylic [Carretti and Dei (2004), Sangermano et al. (2013), Kozak (2015), Chattopadhyay (2004)]	<ul style="list-style-type: none"> • High resistance to hydrolysis and ultraviolet radiation • good alkali resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Low bond strength • Poor ductility • Generally not applied for constant immersion in water or soil
Polyurethane [Toutanji et al. (2013), Awad and Wilkie (2010), Yang et al. (2001)]	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent resistance to weathering • Self-healing • no shrinkage 	<ul style="list-style-type: none"> • Poor resistance towards mechanical strains and deformation and/or degradation at high temperatures

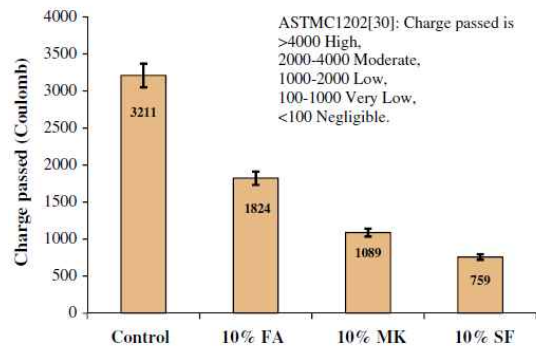
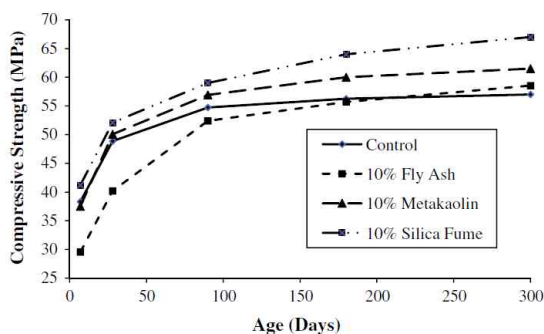
- 재료의 한계를 극복하는 방안으로 나노입자의 재료를 각각의 폴리머에 첨가하여 인장 강도, 마모저항성, 열 저항성을 개선시킬 뿐만 아니라 가스투과율을 감소시킨다고 보고된 바 있음 [Woo et al. (2008), Choudalakis and Gotsis (2009), Pavlidou and Paspaspyrides (2008)]
- 폴리머계열 코팅재료의 공기 투과율, 부착강도, 침투깊이, 그리고 균열 저항성 등은 재료의 성능을 나타내는 주요 지표임
- 일반적으로 재료의 공기투과율이 높으면 탄산화속도가 빠르게 진행되고 내부 철근의 부식을 촉진시키며, Polder et al. (1996)은 표면보호 된 콘크리트가 일반 콘크리트보다 60% 낮은 수증기를 확산시킨다고 보고함
- 반면에, 공기투과율이 일정 수준보다 낮으면, 동결융해과정에서 콘크리트 구조물에 심각한 손상을 발생시키게 됨 [De Vries and Polder (1997)]
- 공기투과율이 0에 가까운 에폭시와 폴리우레탄은 동결융해 저항성이 낮은 단점을 보이므로 이러한 재료의 선택 시에는 공기투과율을 신중히 고려하여야 함

- 콘크리트와 코팅재료 간의 부착강도는 높아야 하며, 기존 문헌들을 확인해보았을 때 적어도 1.4 MPa에서 1.75 MPa 수준의 부착강도의 확보가 필요함 [Soebbing et al. (1996)]
- 표면보호재료의 성능을 나타내는 지표 중 하나는 침투 깊이(penetration depth)이며, 침투깊이(penetration depth)는 재료의 특성, 폴리머 용매의 종류, 콘크리트의 특성, 반응시간, 그리고 반응속도 등에 영향을 받음
- 아직까지 침투깊이를 직접적으로 측정하기 어려우며, 일부 연구 결과, 침투깊이의 수치가 매우 작아 콘크리트를 보호하는 능력으로 표현하는데 어려움이 있었음 [Pan et al. (2017)]
- 균열 저항성은 콘크리트에 발생한 균열이 더 이상 진전되지 않도록 하여 콘크리트 내부의 철근 부식과 콘크리트의 탄산화를 방지하기 위해서 필요한 요소임
- 하지만, 아직까지 표면보호재료의 균열저항성에 대한 연구는 제한적인 정보만을 제공하고 있어 성능을 비교평가하기 어려운 실정임
- 현재까지, 표면보호성능을 정량화하여 나타낼 수 있는 요소는 공기투과율과 부착강도이지만, 공기투과율의 경우 적절한 기준이 없는 실정임

2.3. 시멘트 모르타르 재료에 관한 연구동향

2.3.1. 혼화재료의 종류 및 치환율이 시멘트 모르타르에 미치는 영향

- 시멘트모르타르의 물리적 성능과 내구성을 향상시키기 위해 대표적으로 사용되는 혼화재료는 fly ash, Silica Fume, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), metakaolin, Glass Powder 등이 있음 [Tikaltsky (1989), Mardani-Aghabaglou et al. (2014), Kmalı and Ghahremaninezhad (2015), Jalal et al. (2015), Du and Tan (2017), Benli et al. (2017)]
- Tikaltsky (1989)에 따르면, fly ash, Silica Fume, GGBS는 시멘트의 수화반응 생성물과 혼화재료에 포함된 silica 성분이 pozzolanic 반응으로 C-S-H 수화물을 생성하며 시멘트 조직을 안정화시키고 시멘트입자와 입자사이를 충전시켜 내부 공극을 줄임으로써 강도와 내구성 증진에 기여한다고 보고함
- Mardani-Aghabaglou et al. (2014)은 pozzolanic 반응을 하는 3종의 혼화재료 (fly ash, Silica Fume, metakaolin)을 시멘트 무게비로 10% 치환한 시멘트 모르타르를 제작하고 압축강도와 내구성을 비교 평가함
 - <그림 2-4 (a)>에 보이는 것 같이 Fly ash를 10% 치환한 시멘트 모르타르의 압축강도는 양생기간이 180일까지 혼화재료가 치환되지 않은 Control 시험체보다 감소하였으나, Silica Fume과 metakaolin이 각각 10% 치환된 시험체들은 Control 시험체보다 항상 높은 압축강도를 보여줌
 - <그림 2-4 (b)>에 보이는 것 같이, 통과 전하량은 Silica Fume이 치환된 모르타르에서 759 Coulomb으로 가장 낮았으며, Silica Fume, metakaolin, 그리고 fly ash를 치환한 순으로 control 대비 각각 76, 66, 그리고 43% 감소하였음

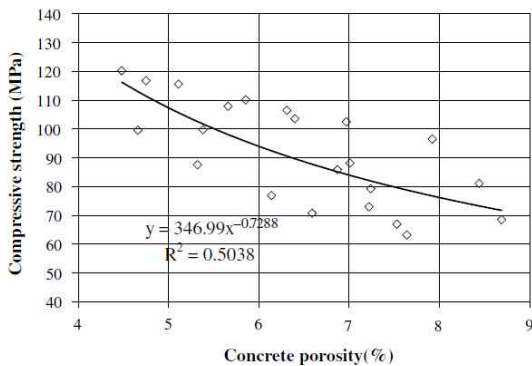


(a) Compressive strength of mortar

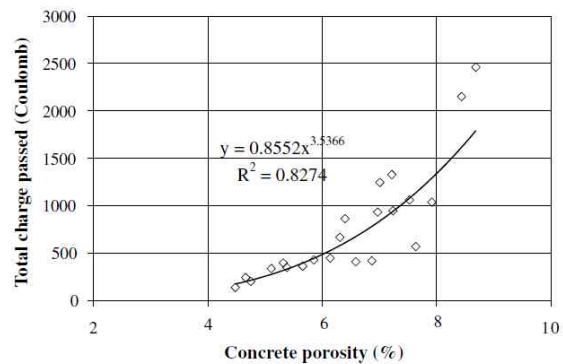
(b) Chloride ion penetration test results

<그림 2-4> Comparison of additives in mortar mixture [Mardani-Aghabaglou et al. (2014)]

- Poon et al. (2006)은 metakaolin 과 Silica Fume을 시멘트 무게 대비 5에서 10% 까지 치환하여 콘크리트의 압축강도와 염화물 침투 시험을 수행함
 - 압축강도 시험결과, metakaolin을 함유한 시험체가 Silica Fume 함유 시험체에 비해 3에서 16% 높은 압축강도를 보여주었으며, 90일 수돗물 양생 시 metakaolin은 치환율이 5에서 10%로 증가하면서, 압축강도가 66.5에서 71.6 MPa로 약 8% 증가한 반면, Silica Fume은 동일 조건에서 압축강도가 67.5에서 69.1 MPa로 약 2% 증가함
 - 염화물 침투 시험결과 역시 metakaolin을 치환한 시험체가 Silica Fume을 치환한 시험체에 비해 통과 전하량이 29에서 50% 낮았으며, 90일 수돗물 양생 시 metakolin의 치환율이 5에서 10%로 증가하면서, 통과 전하량이 29% 감소한 반면에 Silica Fume의 경우 동일한 치환율에서 15% 감소함
 - Poon et al. (2006)은 콘크리트의 압축강도와 총 통과 전하량은 <그림 2-5>에 보이는 것 같이 시멘트 페이스트와 콘크리트의 공극과 연관성이 있었으며, metakaolin을 혼화재료로 사용한 경우 Silica Fume 보다 우수한 압축강도와 내구성을 나타내었다고 보고함



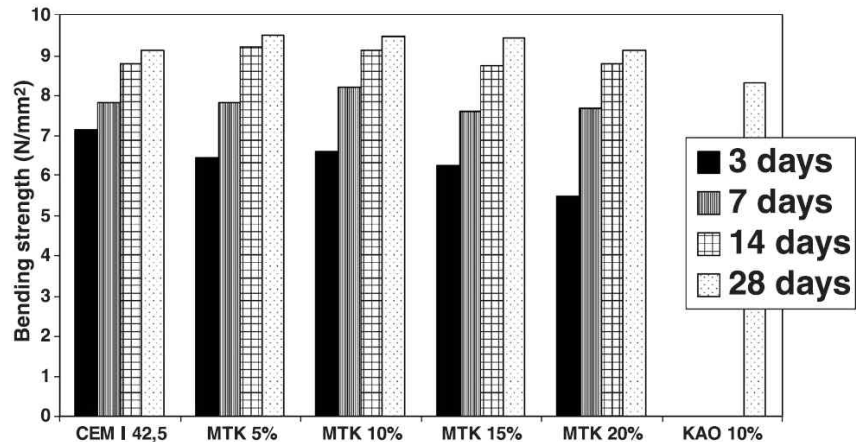
(a) Compressive strength



(b) Total charge passed

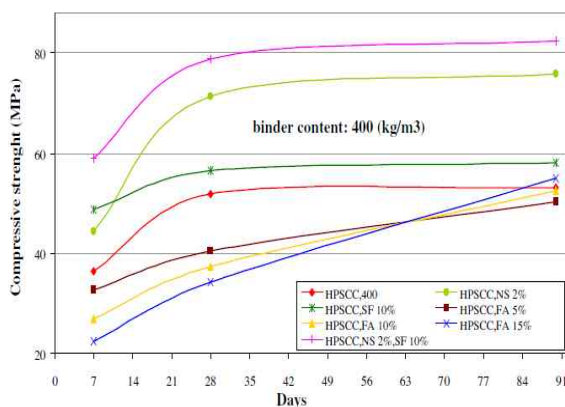
<그림 2-5> Relationship with concrete porosities

- Courard et al. (2003)은 시멘트 모르타르에 metakaolin을 시멘트 무게비로 치환하여 압축강도와 휨강도 시험을 수행함
 - Metakaolin의 치환량이 0에서 15%까지 증가하면서, 압축강도와 휨강도는 모두 증가하였으나, 치환량이 20%로 증가하면 시멘트 모르타르의 유동성이 현저히 감소하여, 15% 치환한 시멘트 모르타르보다 압축강도와 휨강도 모두 감소하였다고 보고함
 - Metakaolin의 적정 치환율은 10에서 15%로 metakaolin의 치환율 증가에 따른 유동성 저하를 유의할 필요성이 있다고 보고함

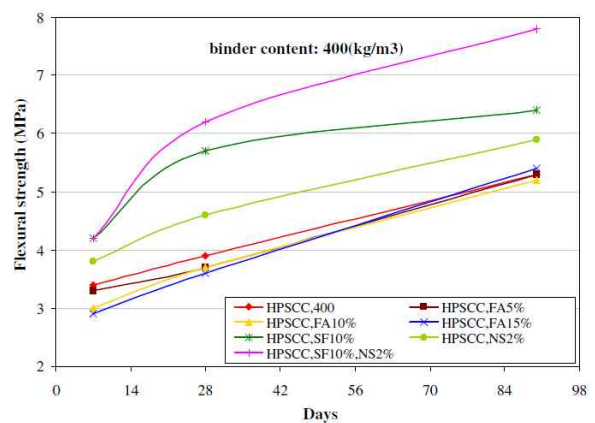


〈그림 2-6〉 Flexural strength of cement mortar with metakaolin [Courard et al. (2003)]

- Jalal et al. (2015)은 fly ash, silica fume, 그리고 nano silica를 시멘트 무게비로 치환하여 각 시멘트 모르타르의 물리적 성능을 비교 평가함
 - <그림 2-7>에서 보이는 것 같이, fly ash를 치환한 시멘트 모르타르는 초기양생기간 (7-28일)에서 치환하지 않은 일반 모르타르보다 낮은 압축, 휨강도를 보여주었음
 - 반면에 silica fume과 nano silica를 치환한 시멘트 모르타르는 양생기간과 관계없이 항상 높은 압축, 휨강도를 보여주었으며, 특히 silica fume과 nano silica를 혼용한 경우 가장 높은 강도를 보여줌
 - silica fume만을 사용하여 치환율을 증가시킬 경우, 유동성이 저하되는 문제가 발생하지만 nano silica 소량을 함께 사용하면 유동성의 저하를 방지하고 높은 강도를 보여줄 수 있다고 보고함



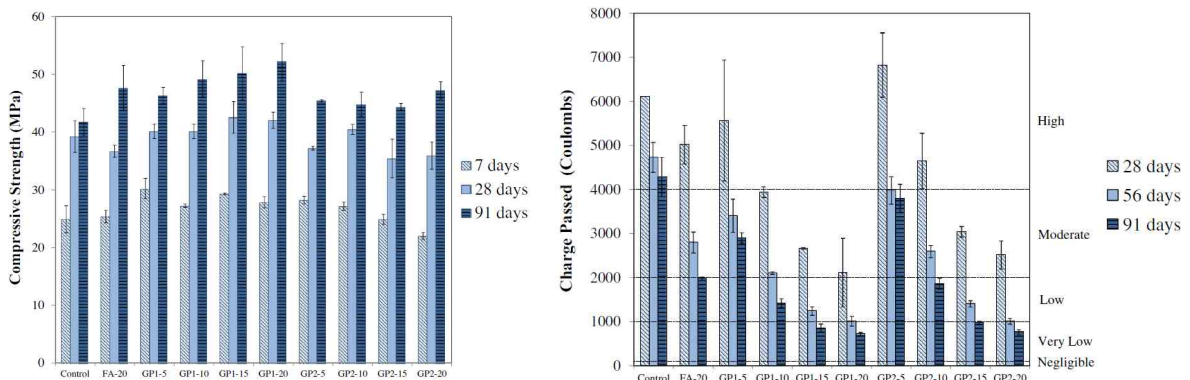
(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

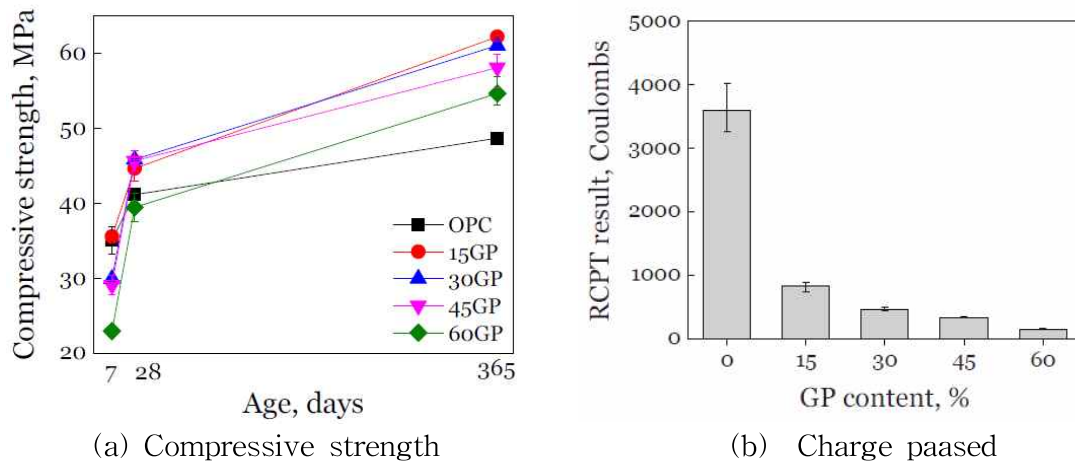
〈그림 2-7〉 Mechanical test results of cement mortar with different additives [Jalal et al. (2015)]

- Kamali and Ghahremaninezhad (2015)는 glass powder를 시멘트 무게비로 5, 10, 20%까지 치환하여 압축강도와 휨강도, 그리고 통과 전하량의 변화를 조사함
 - Glass powder를 시멘트 무게비로 치환한 콘크리트는 치환율이 증가하면서 압축강도, 휨강도가 눈에 띄게 향상되었으며, 동일한 양을 치환한 fly ash와 비교하였을 때, 유사하거나 더 높은 압축강도를 보여줌
 - 또한 glass powder를 치환한 콘크리트는 통과 전하량이 감소하는 결과를 보여주었고 치환율이 증가할수록, 염화물 통과 전하량이 감소함
 - Glass powder의 치환율이 증가할 경우, alkali-silica 반응에 의한 콘크리트 팽창을 감소시킬 뿐만 아니라 pozzolanic 반응을 활성화 시켜 C-S-H 수화량이 증가하고 공극양이 감소하여 물리적 성능과 내구성을 향상시킬 수 있다고 보고함



(a) Compressive strength (b) Rapid chloride permeability test results
 <그림 2-8> Effect of Glass Powder on the mechanical and durability properties of concrete [Kamali and Ghahremaninezhad (2015)]

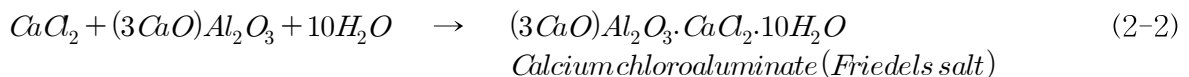
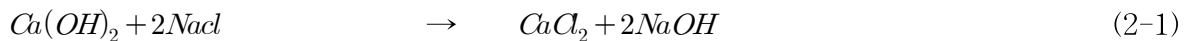
- Du and Tan (2017)는 콘크리트에 glass powder를 시멘트 무게비로 15에서 60% 치환하여 압축강도와 염화물 침투 시험을 수행함
 - 초기 7일 양생에서는 glass powder의 치환은 콘크리트의 압축강도를 감소시켰지만, 365일 양생한 경우, glass powder를 치환한 콘크리트의 압축강도는 치환하지 않은 콘크리트보다 높은 압축강도를 보여주고, 이는 glass powder의 pozzolanic 반응으로 인해 초기 압축강도 보다는 장기 압축강도에서 더욱 효과적이라 결론지었음
 - Glass powder를 함유한 콘크리트의 압축강도는 함유하지 않은 일반 콘크리트의 압축강도에 비해 증가하였으나, glass powder의 치환율이 15에서 60%로 증가하면서 압축강도는 감소하는 경향을 보여줌
 - 반면에 glass powder의 치환율이 증가할수록 통과 전하량은 지속적으로 감소하는 경향을 보고함



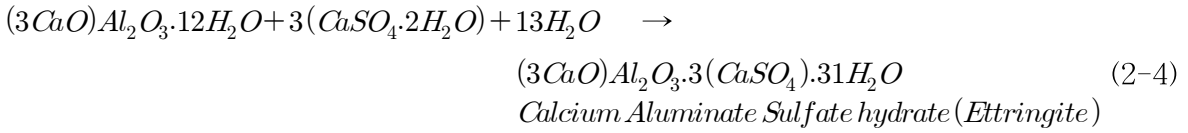
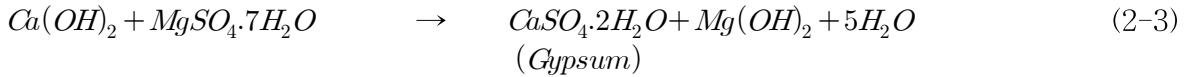
〈그림 2-9〉 Test results of cement mortar with different Glass Powder contents [Du and Tan (2015)]

2.3.2. 양생 환경 및 기간이 시멘트 모르타르에 미치는 영향

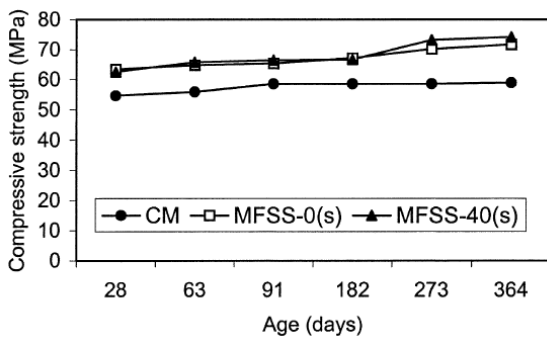
- Islam et al. (2009)는 실제 해수가 아닌 수돗물에 염분을 첨가하여 해수환경을 모사한 환경에서 염분의 증가가 시멘트 모르타르의 압축강도에 미치는 영향을 조사함
 - 시험결과 수돗물의 염분이 증가할수록, 압축강도가 감소하는 결과를 보여주었으며, 이에 대한 원인을 다음과 같이 설명함
 - 해수 내부의 $NaCl$ 이온은 수화시멘트의 $Ca(OH)_2$ 와 아래와 같은 화학반응을 통해 염화칼슘($CaCl_2$)을 형성하며 이 염화칼슘은 시멘트 모르타르에서 침출되어 시멘트 모르타르의 재료 유실을 야기하고, 이로 인해 압축강도의 감소를 유발함
 - 이 염화칼슘은 다시 $(3CaO)Al_2O_3$ 와 반응하여 Calcium chloroaluminate (Friedel's salts)를 생성하며 Friedel's salts는 콘크리트의 팽창시키게 됨



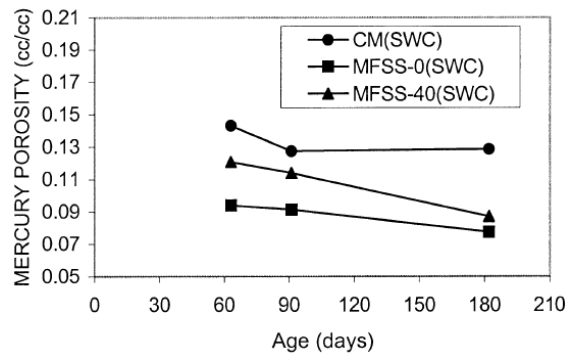
- 또한 해수 내부의 $MgSO_4$ 이온은 수화시멘트와 반응하여 ettringite를 생성하며, 이 ettringite는 시멘트 모르타르의 부피를 팽창시키게 됨
- 시멘트 모르타르의 부피를 팽창시키는 Friedel's salts와 ettringite의 생성으로 인해 시멘트 모르타르에 균열이 발생하여 압축강도와 내구성이 저하될 수 있다고 보고하였음



- 결국, 해수와 같이 Nacl 그리고 MgSO₄ 등의 염분의 함유량이 높아지면 시멘트모르타르의 부피를 팽창시키는 요소들이 증가하고, 시멘트모르타르의 부피팽창으로 미세한 균열이 발생하게 되어 결국, 압축강도가 감소한다고 보고함
- Memon et al. (2002)는 tidal zone에 노출된 해수 환경에서 3종의 혼화재료 (fly ash, ground granulated blast furnace slag, silica fume)를 함께 시멘트 무게 대비 0% (CM), 30% (MFSS-0), 그리고 70% (MFSS-40) 치환하여 압축강도 시험을 진행함
 - <그림 2-10>에 보이는 것 같이, 28일부터 364일까지 증가하면서 압축강도는 서서히 증가함
 - 혼화재료의 치환으로 인해 공극의 부피와 크기 모두 감소하여 시멘트 대비 3종의 혼화재료를 모두 사용하여 70% 치환하였을 때 가장 높은 압축강도를 나타내었다고 보고함



a) Compressive strength

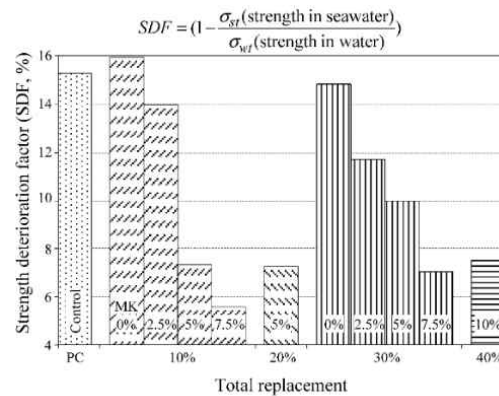


b) Total intruded volume

<그림 2-10> Test results of high strength concrete in seawater against age [Memon et al. (2002)]

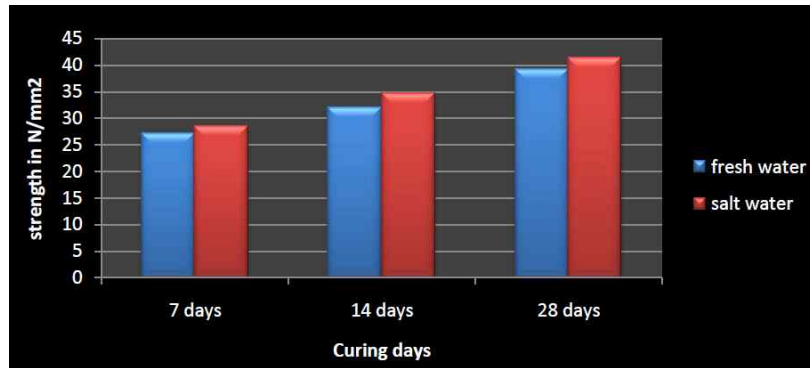
- Bai et al. (2003)은 metakaolin (MK)과 pulverised fuel ash를 시멘트 무게 대비 치환하여 제작한 콘크리트 시험체를 인공 해수에서 18개월까지 양생하고 압축강도 시험을 진행함
 - 전체적으로 해수 양생한 시험체는 수돗물 양생한 시험체에 비해 낮은 압축강도를 보임

- <그림2-11>에서 보이는 것 같이, 수돗물 양생대비 해수 양생이 압축강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 strength deterioration factor (SDF)를 아래와 같이 산출하여 나타냄
- MK의 함유량이 증가할수록 SDF가 감소하였으며, 해수 양생이 압축강도에 미치는 영향을 감소시킨다고 보고함



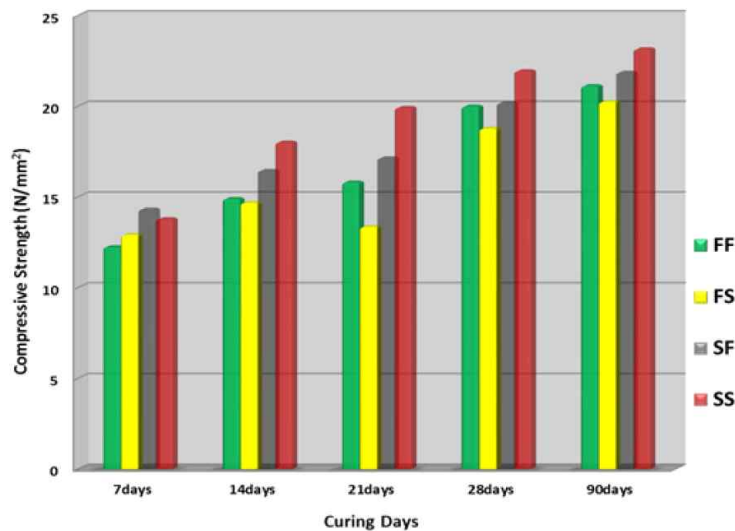
<그림 2-11> Strength deteriorate factor at 10%, 20%, 30% and 40% cement replacement for 18 month curing [Bai et al.(2003)]

- Wegian (2010)은 해수가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 콘크리트 배합수와 양생 환경을 수돗물과 해수로 변경하여 압축강도, 휨 강도, 부착 시험을 수행함
 - 단기 양생일 (7, 14일)에서 해수로 배합과 양생을 모두 진행한 시험 군이 가장 높은 압축강도, 휨강도, 그리고 부착강도를 보여줌
 - 하지만, 28일 이후에는 수돗물로 배합과 양생을 모두 진행한 시험 군이 가장 높은 압축강도, 휨강도, 그리고 부착강도를 보여줌
- Tiwari et al. (2014)는 해수의 염분을 모방하기 위해 3.5%의 소금을 수돗물에 녹인 소금물을 준비하여 배합과 양생 모두를 수돗물과 소금물로 진행하여 압축강도를 비교함
 - <그림 2-12>에 보이는 것 같이, 7, 14일 양생뿐만 아니라 28일 양생에서도 염분을 포함한 소금물을 사용한 시험 군이 항상 높은 압축강도를 보여 주었으며 소금물의 사용으로 압축강도가 증가한다고 보고함



〈그림 2-12〉 Average compressive strength of concrete [Tiwari et al. (2014)]

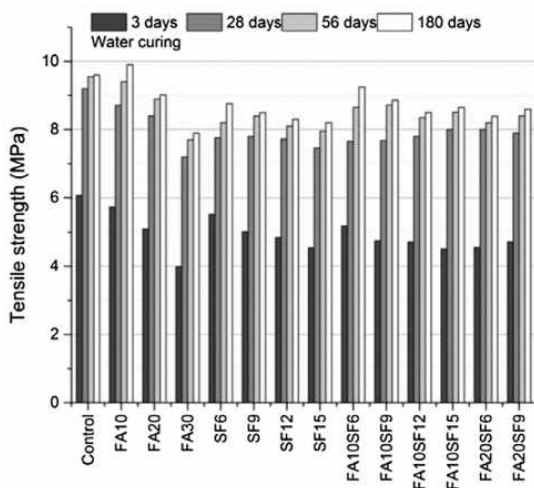
- Olutoge and Amusan (2014) 역시 배합수와 양생조건을 수돗물과 해수로 각각 사용하여 총 4가지 조건 (수돗물 배합-수돗물 양생 (FF), 수돗물 배합-해수 양생 (FS), 해수 배합-수돗물 양생 (SF), 해수 배합-해수 양생 (SS))에서 압축강도를 비교 평가함
 - 〈그림 2-13〉에서 보이는 것 같이, 양생 기간 7일을 제외한 모든 양생 기간에서 배합수와 양생에 해수를 사용한 SS가 항상 가장 높은 압축강도를 보여줌
 - 반면에, 배합수로 수돗물을 사용하고 해수로 양생을 진행한 FS는 양생기간 7일을 제외한 모든 양생 기간에서 가장 낮은 압축강도를 보여줌



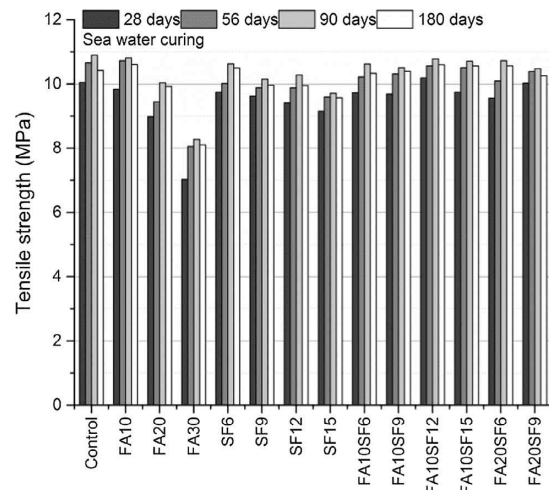
〈그림 2-13〉 Average compressive strength of concrete [Olutoge and Amusan (2014)]

- Li et al. (2015)은 metakaolin을 시멘트 무게비로 치환하고 해수를 배합수로 사용한 콘크리트 시험체의 염화 저항성을 보고함
 - Metakaolin을 치환한 콘크리트 시험체의 압축강도는 수돗물과 해수를 배합수로 사용한 모든 경우 증가하였고, 특히 NaCl을 첨가하여 양생할 경우 압축강도가 증가한다고 보고함
 - Metakaolin의 치환과 해수를 배합수로 사용하였을 때 통과 전하량이 감소하여 염화 저항성이 향상되며, metakaolin 양의 증가는 콘크리트의 공극을 채워 공극의 구조를 개선하고, Fried's salt의 형성에 의한 염화물 고정화를 통해 염화물의 유입거리가 감소하였다고 보고함

- Benli et al. (2017)은 silica fume과 fly ash을 시멘트 무게대비 치환하여 양생조건을 수돗물, 수돗물에 magnesium sulfate ($MgSO_4$)를 첨가한 소금물, 그리고 해수, 총 3가지 환경이 시멘트모르타르의 압축강도와 휨강도에 미치는 영향을 조사함
 - 압축강도의 경우, 해수 양생 시험체가 수돗물 양생 시험체보다 낮은 경향을 보였지만, 휨강도의 경우 해수 양생에서 수돗물 양생 보다 증가한다고 보고함
 - 또한 fly ash의 함유량이 증가하면 압축강도와 휨강도는 감소하는 경향을 보여줌
 - Silica fume의 함유량이 증가하면 압축강도는 상승하는 반면에, 휨 강도는 감소하였고, 해수 양생시킨 silica fume 6% 치환된 시멘트모르타르가 가장 높은 휨 강도를 보여준다고 보고함



(a) Flexural tensile strength of all mixes in water curing



(b) Flexural tensile strength of all mixes in sea water curing

〈그림 2-14〉 Flexural tensile strength of SCM of all mixes [Benli et al. (2017)]

- 시멘트 모르타르 관련 연구동향을 조사한 결과 모르타르의 물리적 성능과 내구성을 향상시키는 재료로 fly ash, silica fume, GGBS, metakaolin, glass powder, nano silica 등이 흔히 사용되고 있음
- 상기의 재료 중 fly ash와 GGBS는 다른 혼화재료와 비교하여 많은 양의 치환이 필요하고 초기 재령에서 일반 시멘트 모르타르보다 물리적 성능이 감소하는 단점을 지니고 있음
- 또한 nano silica는 nano 단위의 작은 입자크기로 인해 시멘트 모르타르의 충전 밀도를 증가시켜 물리적 성능과 내구성능을 향상시키지만, 다른 혼화재료에 비해 높은 가격으로 재료비의 증가를 가져올 수 있을 거라 판단됨
- 과거 해수 양생 혹은 해수의 사용이 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성에 미치는 영향에 관한 연구가 이루어진바 있으나, 각 연구진 마다 해수 양생 조건이 상이하고 시험 결과 또한 일관적이지 않았음
- 일부 연구는 해수를 배합 혹은 양생에 사용하여 혼화재료가 치환된 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성능에 미치는 영향을 조사하고 있으나, 제한적인 정보만을 제공하고 있으며 결과가 상이함
- 그러므로 해수 환경 및 혼화재료의 치환이 시멘트 모르타르의 물리적 성능 및 내구성에 미치는 영향을 명확히 확인하기 위해서 실험실에서 양생된 시험체를 사용하여 강도 및 내구성을 측정할 필요가 있음
- 이를 위해 기존연구에서 혼화재료가 포함되지 않은 시멘트 모르타르보다 향상된 물리적 성능 및 내구성이 보고된바 있는 Silica fume, Metakaolin 그리고 Glass powder을 치환하였고, 치환율은 0, 5, 그리고 10%로 결정함



(a) Silica fume

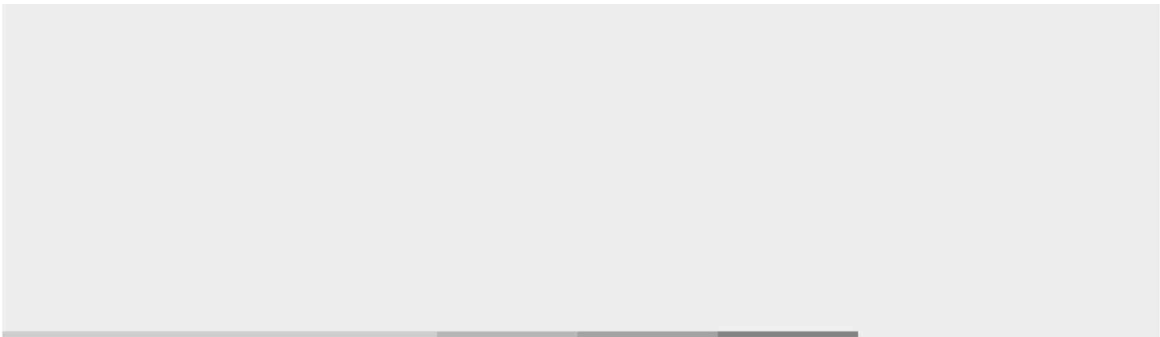


(b) Metakaolin




(c) Glass powder

〈그림 2-15〉 사용된 혼화재료



⋮

제3장 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험환경 구축



3. 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험환경 구축

3.1. 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험 환경구축

3.1.1. 표면보호재료의 물리적 성능평가를 위한 장비의 종류

- 시멘트 모르타르의 압축강도, 휨강도는 만능재료시험기(Universal testing machine: UTM)를 사용하여 측정할 수 있으며, 만능재료시험기는 크게 유압식과 기계식으로 나누어 짐



(a) 유압식 만능재료시험기



(b) 기계식 만능재료시험기

〈그림 3-1〉 만능재료시험기의 분류

- 본 연구에서는 시멘트 모르타르의 압축강도, 휨강도를 단일 장비로 측정할 수 있도록 유압식 만능재료시험기를 구축하였으며, 장비의 상세 정보는 다음과 같음
 - 최대 용량: 200 kN
 - 최소 눈금: 0.02 kN
 - 하중 감지: Load Cell
 - 전동 유압식
 - 홍진정밀(국내 제품)



<그림 3-2> 구축된 만능재료시험기

- 콘크리트에 적용된 표면보호재료의 부착강도 측정을 위해서는 <그림 3-3>과 같이 Pull-off 방식의 시험 장비가 필요하며, 본 장비 역시 유압식, 기계식으로 나누어 짐



(a) 유압식 pull off 부착시험기



(b) 기계식 pull off 부착시험기

<그림 3-3> Pull-off 부착강도시험기의 분류

- 본 연구과제에서 모르타르를 대상으로 Pull off 부착시험을 진행하기 위해서 유압식 회전형 부착시험 장비를 구축하였으며, 장비의 상세 정보는 다음과 같음
 - 최대하중: 20 kN
 - 최소 눈금: 2 N
 - 하중 감지: Load cell
 - 회전 핸들식 유압 펌프
 - 흥진 정밀(국내 제품)



〈그림 3-4〉 구축된 Pull-off 부착강도시험기

3.1.2. 표면보호재료의 압축강도 시험방법

- 압축강도는 KS L 5105 및 ASTM C 109 기준에 따라 측정하였으며, 50 mm의 입방 시험체를 제작하여 약 1000N/s 하중을 가하여 시험을 진행하였음
- 압축하중의 산출은 만능재료시험기 하부에 설치된 Load cell을 통해 얻어지며 얻어진 하중을 통해 압축강도를 아래와 같이 계산함

$$\sigma_c = \frac{P_c}{2500} \quad (3-1)$$

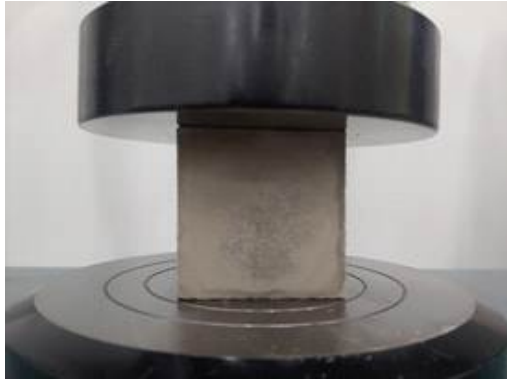
- 여기서 σ_c 는 압축강도(MPa)이며, P_c 는 최대하중(N) 임

3.1.3. 표면보호재료의 휨강도 시험방법

- 휨강도의 경우 KS L 679 및 ASTM C 348 기준에 따라 측정을 진행하였으며, 40×40×160mm의 시험체를 제작하여 시험체 중앙에 약 50N/s 하중을 가하여 시험을 진행하였음
- 아래의 식을 이용하여 휨강도가 산출됨

$$\sigma_b = \frac{1.5P_b l}{b^3} \quad (3-2)$$

- 여기서, σ_b 는 휨강도(MPa), P_b 는 최대하중(N), l 은 지간 거리(=100 mm), b 는 각기둥의 직각을 이루는 절개면의 변 (=40 mm) 임



〈그림 3-5〉 압축강도시험 셋업



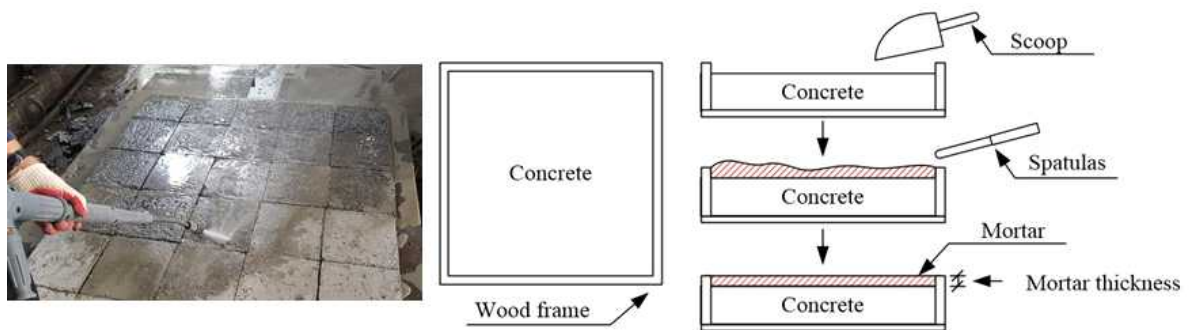
〈그림 3-6〉 휨강도시험 셋업

3.1.4. 부착강도 시험방법

- 부착강도는 기존 구조물과 새로이 도포된 표면재료 간의 부착성능(Interfacial bond property)을 확인하기 위한 지표로써, 본 연구에서는 BS EN 13687-2 규격에 따라 시험을 수행함
- 부착강도 측정셋업을 <그림 3-7>에 나타내었음



〈그림 3-7〉 Pull-off bond strength test setup

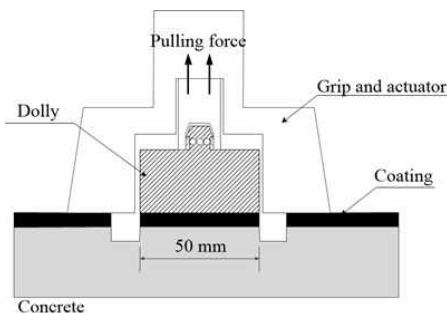


〈그림 3-8〉 부착강도 시험 모재 콘크리트의 제작

- 해수 양생이 모르타르의 부착강도에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해 시험대상면 이외의 면에는 에폭시 코팅을 통해 수분의 침투를 미연에 방지하였음
- 30 mm로 제작된 모재 콘크리트의 상부에 20 mm 모르타르를 도포하였으며, 양생일 경과 후 도포된 모르타르를 40×40 mm 단면에 깊이 30 mm로 모르타르와 모재 콘크리트의 계면 안까지 절단하여 독립된 부착면적을 확보함
- 절단된 단면위에 철판 돌리를 에폭시를 통해 접착을 진행하였으며, 에폭시가 완전히 경화되도록 일정기간 양생 후 시험을 진행하였음.
- 부착강도는 아래의 식을 이용하여 계산됨

$$\sigma_B = \frac{T}{1600} \quad (3-3)$$

- 여기서, σ_B 는 접착 강도(MPa), T 는 최대 하중(N) 임
- 실험역 환경에 노출된 에폭시 코팅의 부착성능 평가를 위해 부착강도 측정을 수행
 - 총 4종의 에폭시 코팅의 부착성능을 확인하기 위해서 ASTM D 4541 규격에 따라 부착강도를 측정하였음
 - 흡손을 이용하여 에폭시를 콘크리트 표면에 일정하게 도포하였으며 도포 직후 20℃의 실험실에서 24시간 이상 경화시킴
 - 이후, 에폭시 코팅된 시험체들을 각각의 양생환경(Tap Water or Seawater)에 노출시킨 뒤, 정해진 일정 양생기간이 경과하면 꺼내 ϕ 50 mm의 돌리를 에폭시 접착제를 사용하여 코팅 된 시험체의 표면에 부착시켰음
 - 에폭시 접착제를 24시간이상 완전히 경화시키고 <그림 3-9>에 나타난 유압식 자동 Pull-off 부착강도 시험기를 이용하여, 0.04 MPa/s의 속도로 돌리를 당겨 최대 부착강도를 측정하였음



(a) 에폭시 코팅 부착 시험 셋업



(b) 에폭시 코팅 부착 시험기

<그림 3-9> 에폭시 코팅의 부착강도 측정

3.2. 표면보호재료의 내구성능평가 환경구축

3.2.1. 표면보호재료의 내구성능평가를 위한 장비구축

- 내구성 시험의 경우 모르타르의 염해저항능력과 물 흡수량을 확인하기 위한 2종류의 시험이 진행됨
- 염해저항능력을 평가하기 위한 방법으로 2가지의 시험방법이 제시되고 있음
- ASTM C 1202 방법은 NaCl과 NaOH를 통해 시험체의 전기전도도를 측정하여 염해저항능력을 평가하는 방법임
- NT Build 492 방법은 염화이온 확산계수를 측정하여 모르타르 및 콘크리트의 염해저항능력을 평가하는 방법임



(a) ASTM C 1202



(b) NT Build 492

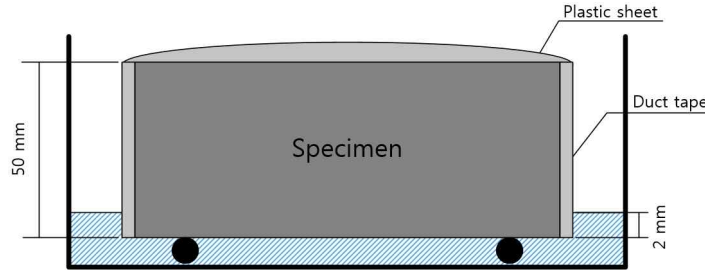
〈그림 3-10〉 염화물 이온 침투 시험

- ASTM C 1202는 염해 저항성 측정을 위해 가장 일반적으로 사용되고 있는 시험 방법이며, 측정된 값에 따라 5단계로 저항능력을 나눌 수 있음
- 본 연구에서는 ASTM C 1202 규정에 따라 개발된 표면보호재료의 염해저항능력을 측정하였음



〈그림 3-11〉 구축된 염화물 침투시험기

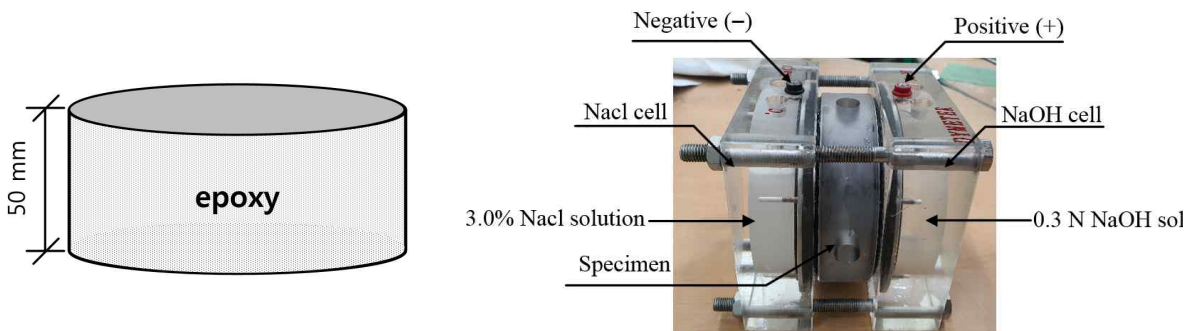
- 표면보호재료의 물 흡수량은 시험체의 무게를 이용하여 측정 되며 시간에 따른 물 흡수량의 변화에 따라 흡수성을 확인함



〈그림 3-12〉 물흡수성 시험

3.2.2. 표면보호재료의 염해침투저항성 시험방법

- 급속염화물 침투시험은 염해저항능력을 평가하는 지표중 하나로, 본 과제에서 개발된 표면보호재료의 염해저항능력을 평가하고자 시험을 수행하였음
- Ø100×200 공시체를 제작한 후 일정높이(50 mm)로 절단하여 시험체를 준비하였으며, 대상면 이외에는 에폭시를 도포하여 외부에서의 유입을 차단하였음



〈그림 3-13〉 RCPT 테스트 셋업

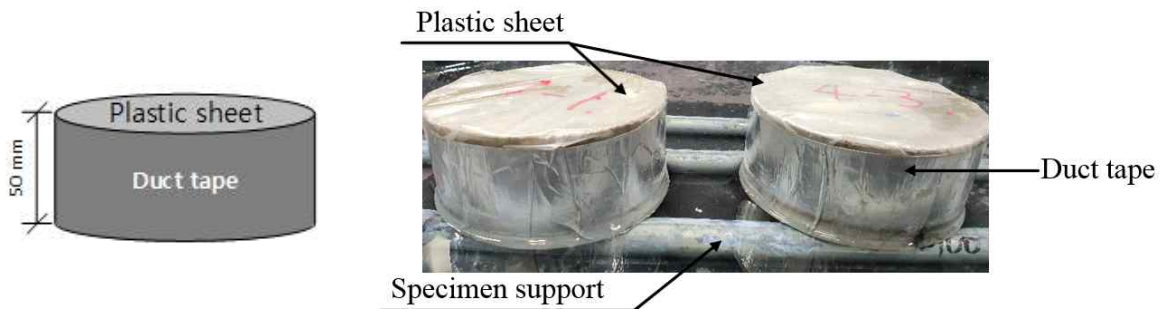
- 급속 이온침투시험의 경우 ASTM C 1202 기준에 따라 시험을 진행하였으며, 3.0%의 NaCl과 0.3 N의 NaOH를 양단의 셀에 투입하여 전압 60 V로 시험을 진행하였음
- 최종적으로 측정한 전류값을 아래의 식에 대입하여 통과 전하량을 계산하였음

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3-4)$$

- 여기서, Q 는 통과 전하량, I_0 는 즉시 전류값, I_t 는 시간 t 에 따른 전류값 임

3.2.3. 표면보호재료의 투수저항성 시험방법

- 물 흡수율 시험의 경우 개발된 표면보호재료의 차수능력을 평가하기 위한 방법으로서, 차수능력이 증가함에 따라 구조물에 악영향을 미치는 요인들을 미연에 방지할 수 있음
- 물 흡수율은 ASTM C 1585 규정에 따라 측정하였으며, 원형 공시체를 제작한 후 고속 절단기로 높이 50 mm로 일정하게 절단하여 50 °C의 환경에서 3일간 건조시켰음



〈그림 3-14〉 물흡수 시험 셋업

- 건조가 완료된 시험체는 외부로부터의 물 유입과 내부에서 발생하는 수분 증발을 방지하고자, 옆면에 덕트 테이프, 윗면은 플라스틱 시트를 통해 밀봉하였음
- 초기에는 1분, 5분, 10분, 20분, 30분, 1시간, 간격으로 측정하였으며, 1시간 이후로 6시간까지는 1시간 간격으로 측정하였음
- 또한, 6시간 이후 7일까지 1일 단위로 측정을 진행하였음
- 아래의 계산식을 사용하여 물 흡수율을 계산함

$$I = \frac{m_t}{ad} \quad (3-5)$$

- 여기서, I 는 물 흡수율, m_t 는 시간 t 에 따른 무게 변화량, a 는 물에 노출된 면적, 그리고 d 물의 밀도임

3.3. 표면보호재료의 환경영향성 평가 환경구축

3.2.1. 수질측정을 위한 장비구축

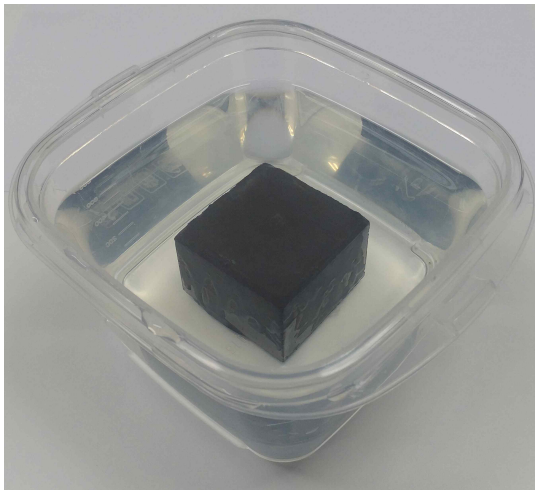
- 수질측정의 경우 전도도를 측정하여 용존 고형물을 측정하는 방법, 화학적 반응을 통해 특정 인자를 찾는 방법으로 나누어 짐
- 본 연구에서는 전체적인 용존 고형물을 측정하기 위해 전도도를 통해 측정을 진행함



〈그림 3-15〉 구축된 수질측정 시험장비

3.2.2. 수질측정 방법

- 해수에서 양생되는 모르타르가 환경에 미치는 영향성을 파악하고자 50 mm 입방 틀 수돗물과 해수 650 ml에 담가 양생되는 기간 동안의 총 용존 고형물량(Total Dissolved Solids: TDS)을 측정함
- 측정시간의 경우 56일까지 측정 진행하였으며, 그에 따른 TDS 변화량을 관측하여 변화 정도를 확인하였음
- 기존의 표면보호재료인 에폭시가 수질에 미치는 영향과 비교하기 위해 모르타르가 환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 50 mm 입방형 시험체와 동일한 시험체의 6육면을 모두 에폭시 재료로 코팅하고 1일건조후 용존 고형물량을 측정함



(a) 에폭시 코팅된 입방시험체



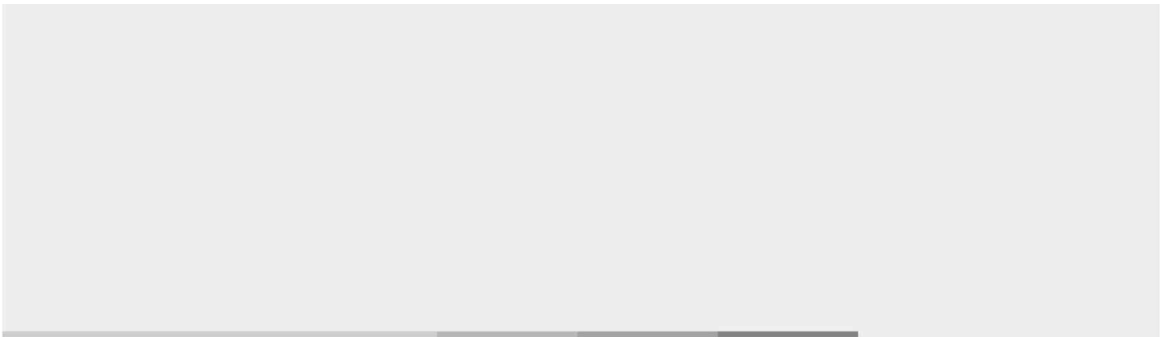
(b) 실험 셋업

〈그림 3-16〉 총 용존 고형물량 셋업

○ 수질 측정의 경우 다음과 같은 식을 통해 구해짐


$$k_{x25} (S/m) = k_{xt} / Q_t + (1 - P_t / Q_t) k_{w25} \quad (3-6)$$

- 여기서, k_{x25} 는 25°C에서의 전기 전도율(S/m), k_{xt} : 용액의 t°C에서의 전기 전도율, k_{w25} 는 순수한 물의 온도 보상계수, Q_t 는 불순물 전해질의 온도 보상 계수 임



⋮

제4장 고성능 표면보호재료의 성능평가

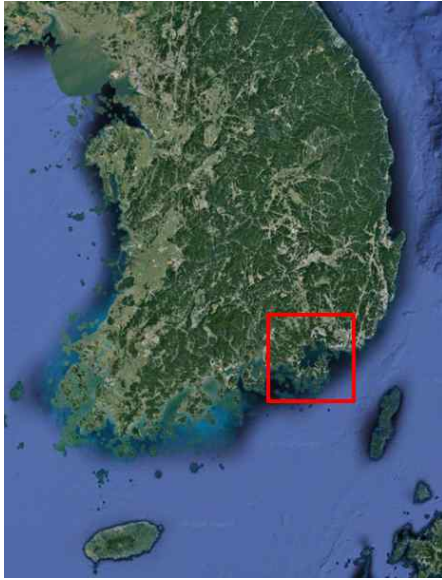


4. 고성능 표면보호재료의 성능평가

4.1. 고성능 표면보호재료의 성능평가 방안

4.1.1. 시험개요

- 본 연구에서는 부유식 콘크리트 구조체 적용을 위한 시멘트 모르타르 계열 표면보호 재료 개발을 목표로 다양한 실험적 연구를 수행하였음
- 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 실험변수는 양생환경, 혼화재료의 종류, 혼화재료의 함유량 (치환율), 그리고 양생기간임
 - 해수 양생이 시멘트 모르타르의 물리적 성능 및 내구성에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사하였음
 - 3종의 각기 다른 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 물리적 성능 및 내구성 그리고 환경영향성에 대한 평가를 수행하였음
 - 3종의 혼화재료를 시멘트 중량 대비 5%에서 10%까지 치환하여 시험체를 제작함
 - 양생기간의 경우 단기양생(7, 28, 56, 90일)과 장기양생 (6개월, 1년, 2년)으로 나누어 시험을 실시하였으며 본 보고서에서는 단기 양생한 시험체의 시험결과만을 정리하였음
- 실험역 시험은 대한민국 통영에서 실시하였으며, 구체적인 해수 양생 장소와 양생 기간 중에 측정된 온도(기온, 수온)를 다음 페이지의 그림에 나타내었음
- 통영 바다의 수온은 평균적으로 최고 29.7 °C, 최저 6.5 °C 로 측정되었음
- 세부 측정 항목은 아래와 같음
 - 물리적성능평가 (3종): 압축강도, 휨강도, 부착강도
 - 내구성능평가 (2종): 염소이온 침투저항성, 물 흡수성
 - 환경영향성평가: 해수 및 수돗물에서의 용존고형물량 (TDS) 측정



〈그림 4-1〉 실해역 참지 위치 - 경상남도 통영시 용남면
(경도:34°53'20"N 위도: 128°26'10"E)

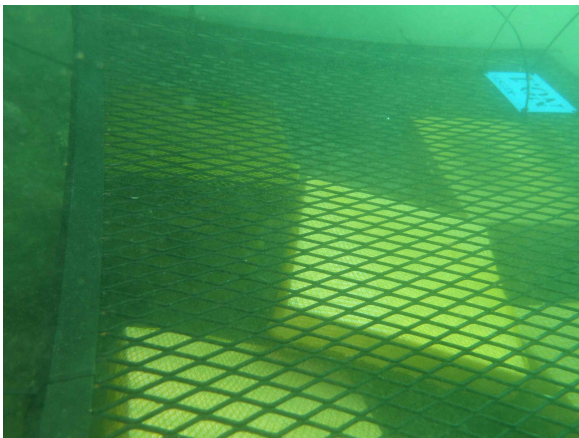
[google earth, accessed Feb, 17, 2020, <https://www.google.co.kr/intl/ko/earth/>]



(a) 시험체 및 철제 케이지



(b) 배를 이용한 시험체의 운반

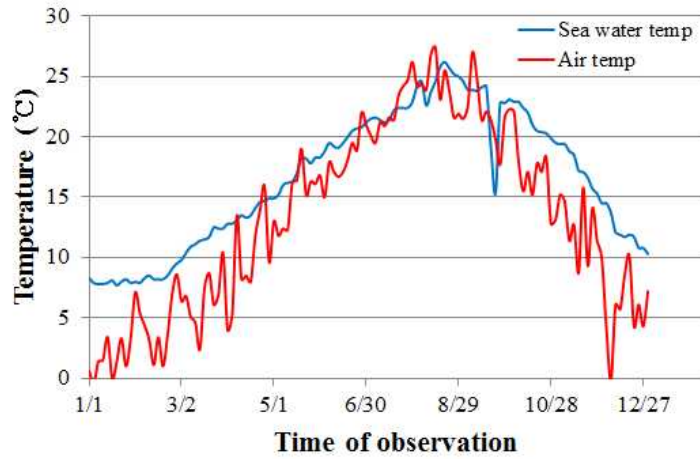


(c) 케이지 내부 시험체 배치 (수중)

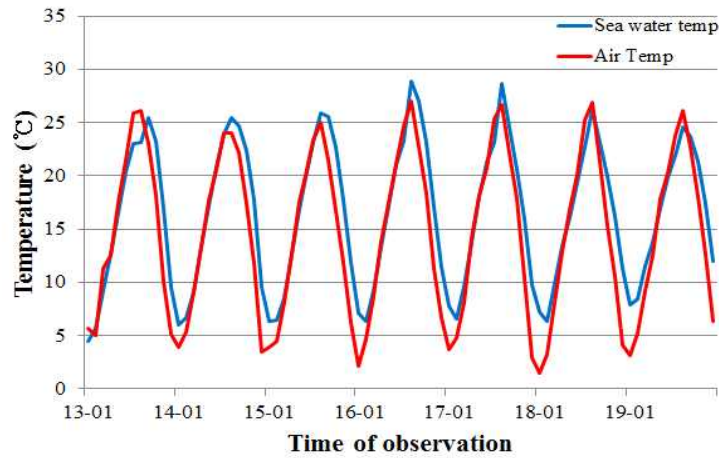


(d) 유실 방지를 위한 케이지 고정 (수중)

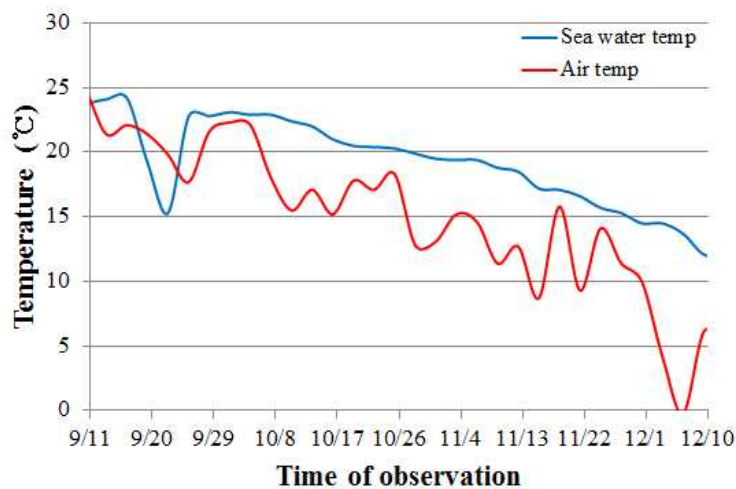
〈그림 4-2〉 실해역 참지준비 및 시험체 배치 사진



(a) 침지 위치 기온 및 수온 변화 (2019년)[국립해양조사원 2019 실시간 해양관측 연간 통계보고서]

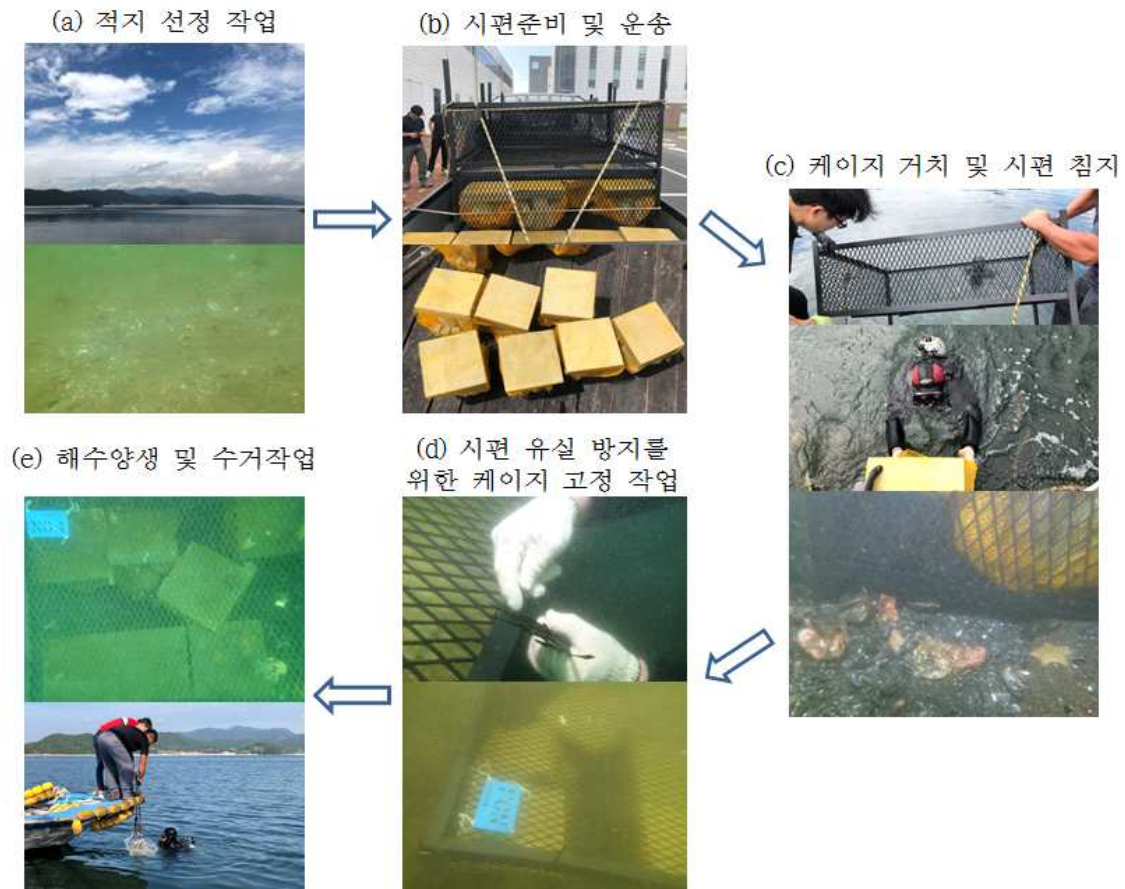


(b) 7년간 침지 위치의 월 평균 해수 및 기온[국립해양조사원 2013~2019 실시간 해양관측 연간 통계보고서]



(c) 해수 양생 동안의 해수 및 기온 (9월 11일 ~ 12월 10일) [국립해양조사원 2019 실시간 해양관측 연간 통계보고서]

〈그림 4-3〉 실해역 침지 위치의 온도 변화



〈그림 4-4〉 시험체 제작 및 실험역 침지 과정



〈그림 4-5〉 수돗물 양생 사진

- 해수 양생의 경우 KIOST 부산 본원에서 시험체를 제작하여, 실험역 시험 장소(통영) 까지 운반하였으며 해저에 케이지를 운반하여 설치한 이후 시험체 침지를 실시하였음
- 해수 양생 기간이 완료된 시험체들을 양생 완료 당일에 수거하고 KIOST 본원까지 운반하여 시험을 진행하였음
- 수돗물 양생의 경우 본원에서 시험체를 제작하여, 사전에 준비된 수조안에서 양생을 시행하였음

〈표 4-1〉 통영 연안 수질 현황〈국가통계포털 연안수질현황(2018)〉

수온	염분	수소이온농도 (pH)	규산규소 (Si(OH) ₄)	부유물질 SPM(mg/l)
17.6	33.31	8.13	287.70	6.3

4.1.2. 시험체 제작

가. 재료

- 시험체 제작에는 1종 보통 시멘트를 사용하였으며, 모래는 silica sand를 사용하였음
- 사용된 시멘트, 모래, 혼화재료의 화학적 성분을 아래의 표에 정리하였음

〈표 4-2〉 재료성분

Type	Content(%)							
	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>TiO₂</i>	<i>K₂O₂ + Na₂O</i>
Cement	20.5	5.0	3.4	62.3	3.6	2.1	-	2.4
Dry sand	99.5	0.08	0.015	0.02	0.02	-	-	-
Silica fume	93.4	-	-	-	1.0 ↑	1.0 ↑	-	0.5
Metakaolin	49.1	43.2	1.32	-	-	-	-	0.57
Glass powder	56.0	16.0	0.75	25.0	6.0	-	0.75	1

나. 시험체 제작

- <표 4-2>에 시험체 제작을 위해 사용한 배합을 무게비로 나타냄
- 3종의 혼화재료는 시멘트 중량대비 5%, 10%로 각각 치환하여 사용하였음

〈표 4-3〉 시멘트 모르타르의 배합 무게비

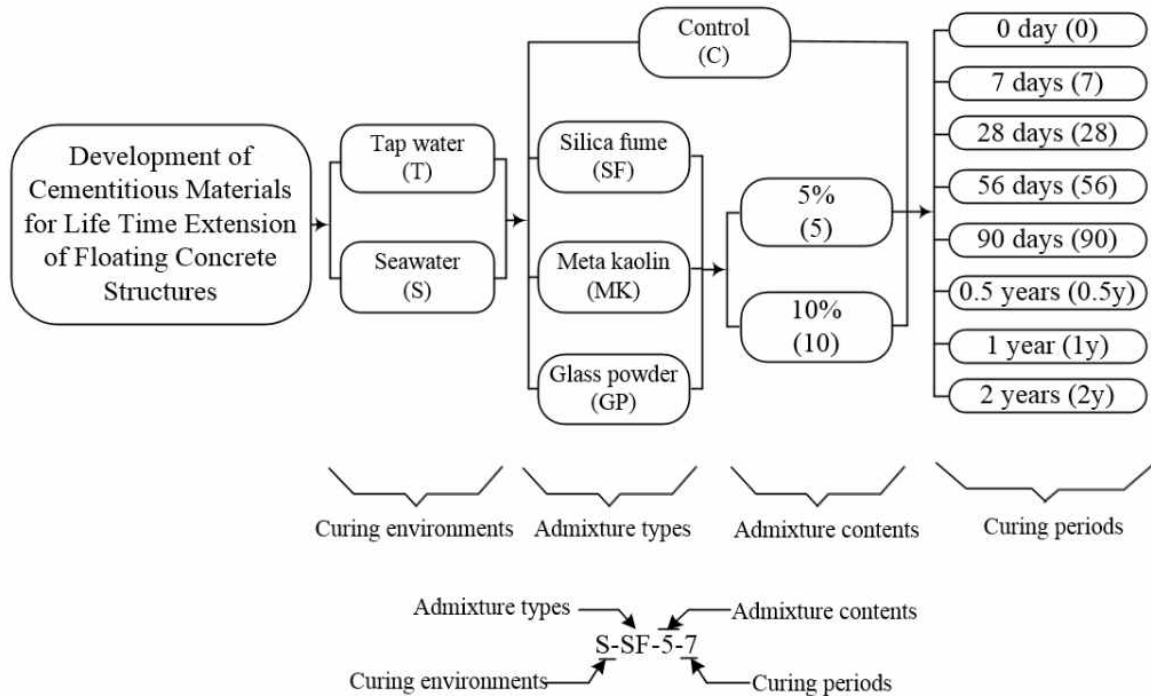
Type	W/B ratio	Cement	Silica sand	Silica fume (SF)	Meta kaolin (MK)	Glass powder (GP)	Flow (mm)		
							1 st	2 nd	Avg.
Control	0.5	1	1.1	-	-	-	244	250	247
SF-5		0.95		0.05	-	-	216	224	220
SF-10		0.90		0.1	-	-	190	203	197
MK-5		0.95		0.05	-	0.05	227	237	232
MK-10		0.90		0.1	-	0.1	221	234	228
GP-5		0.95		-	-	0.05	237	246	242
GP-10		0.90		-	-	0.1	230	237	234

- 모든 시험체는 동일한 호바트 믹서(18 L)를 사용하여 제작하였음.
- 계량된 각 재료들을 투입 후 3분간 건배합을 실시하였으며, 건배합 후 계량된 물을 나누어 투입하며 물을 다 넣은 후에는 3분 동안 추가 믹싱을 진행하였음
- 믹싱이 완료한 시멘트 모르타르를 몰드에 부어 1일 동안 건조양생 시킨 후 디몰딩 (Demoulding) 하였음
- 부착강도 시험체의 경우 모재 콘크리트의 양생 28일 경과 후, 표면에 모르타르를 도포 하였으며 모재 콘크리트의 배합표 및 강도 성능을 <표 4-4>에 표시하였음

〈표 4-4〉 모재 콘크리트의 배합 무게비 및 강도성능

W/C ratio	Cement	Sand	aggregate	Water reducing agent	Compressive strength (67 days)	Split tensile strength (67 days)
0.295	1	1.20	1.59	0.01	75.69 MPa	4.08 MPa

- 수돗물 양생 시험체의 경우 일반 수조를 사용하여 양생하였고, 해수의 경우 실향역(경상남도 통영시 용남면)에서 양생을 진행하였음
- 양생이 완료한 시험체는 표면의 이물질들을 제거한 이후 시험을 진행하였음
- 본 보고서에서 시리즈명은 아래와 같이 정의됨



〈그림 4-6〉 Test program and notation

- 대표적인 예로 상기의 S-SF-5-7에서 S는 양생환경(해수양생), SF는 혼화재료의 종류 (silica fume), 5는 혼화재료의 치환율(5%), 7은 양생기간(7일)을 의미함
- 단기양생(0, 7, 28, 56, 90일) 시험체들은 모든 시험을 완료하여 결과분석을 진행하였으며, 장기양생(6개월, 1년, 2년)의 시험체는 2019년 12월 현재도 양생을 진행 중에 있음
- 이에 따라 본 보고서에는 단기양생을 완료한 시멘트 모르타르 시험체의 시험결과만을 보고하며 장기양생 시험체는 양생이 완료되는 대로 비교분석을 수행할 예정임

〈표 4-5〉 시험 변수별 시험횟수

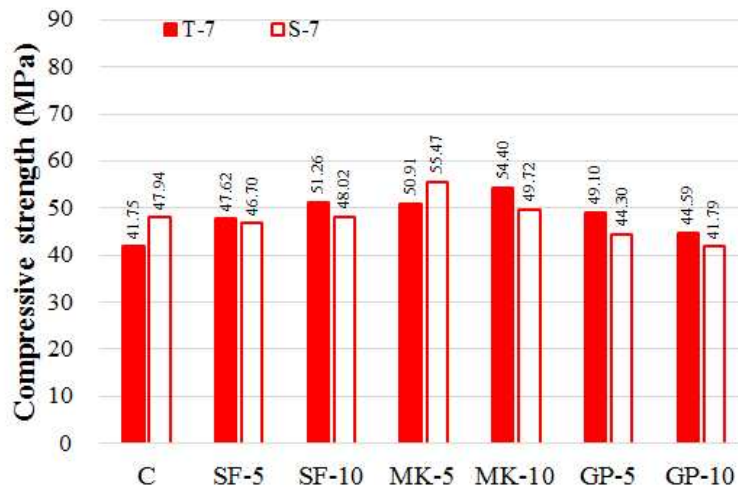
Test variables				Test types and total number of each test series	
Curing environments	Admixture types	Admixture Contents (%)	Curing periods (days) - short term		
Tap water Seawater	Control	0 5 10	0	Compression test	70
	Silica fume		7	Flexural test	70
	Metakaolin		28	Pull-off bond test	70
	Glass powder		56	Rapid chloride permeability test	70
			90	Water absorption test	56
	Total series				336

4.2. 양생환경에 따른 표면보호재료의 성능평가

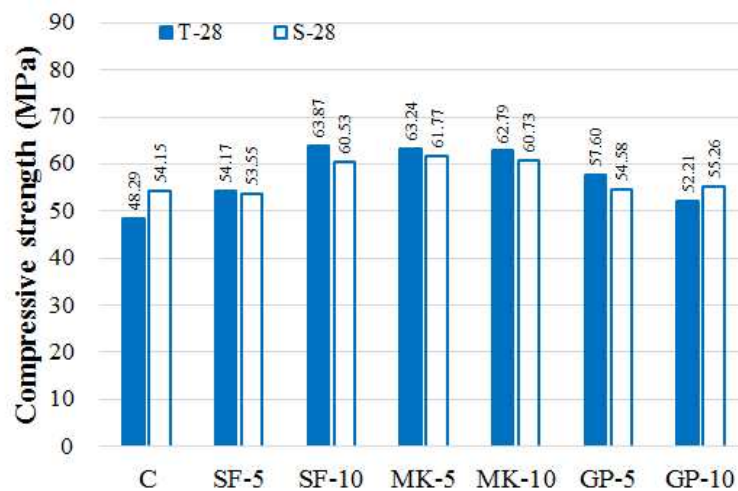
4.2.1. 양생환경에 따른 표면보호재료의 강도평가

가. 양생환경이 표면보호재료의 압축강도에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 해수 양생 시험체의 압축강도가 수돗물 양생 시험체에 비해 낮은 경향을 보였음
- 수돗물 양생 7일의 경우 MK-10 시험체가 가장 높은 압축강도(54.40 MPa)를 보였으며, 수돗물 양생 28일의 경우 SF-10 시험체가 가장 높은 압축강도(63.87 MPa)를 보임
- 해수 양생 7일의 경우 MK-5 시험체가 가장 높은 압축강도(55.47 MPa) 결과를 보였으며, 해수 양생 28일의 경우에서도 동일하게 MK-5 시험체가 가장 높은 압축강도(61.77 MPa)를 보임



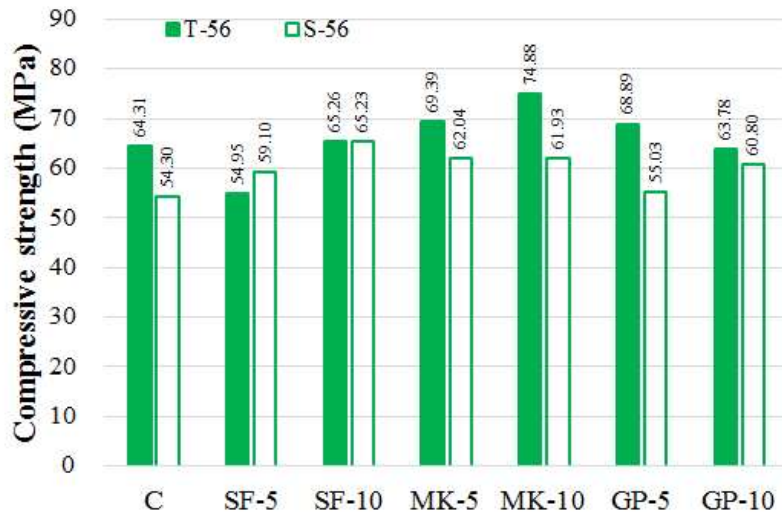
(a) 양생 7일에서의 압축강도



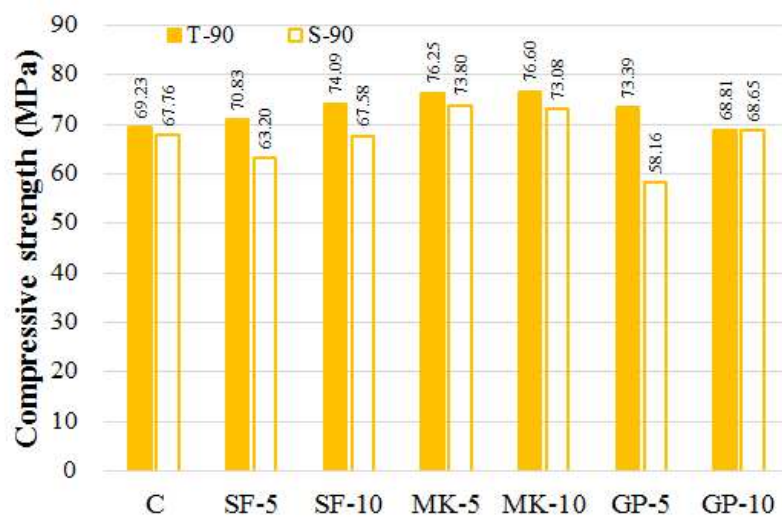
(b) 양생 28일에서의 압축강도

<그림 4-7> 압축강도 시험 결과 (7, 28일)

- 수돗물 양생 56일에서는 MK-10 시험체가 가장 높은 압축강도(74.88 MPa)를 보였으며, 수돗물 양생 90일에서도 동일하게 MK-10 시험체가 가장 높은 압축강도(76.60 MPa)를 보임
- 해수 양생 56일에서는 SF-10 시험체가 가장 높은 압축강도(65.23 MPa)를 보였으며, 해수 양생 90일에서는 MK-5 시험체가 가장 높은 압축강도(73.80 MPa)를 보임
- 해수 양생 시험체의 양생기간이 길어짐에 따라 수돗물 양생 시험체에 비해 압축강도 저하가 뚜렷해지는 경향을 보였음
- 이는 해수 양생 초기에 강도 발현 효과를 보고하였던 기존의 연구들과 상반되는 결과이며 그 원인에 대해서는 확실하지 않음



(a) 양생 56일에서의 압축강도

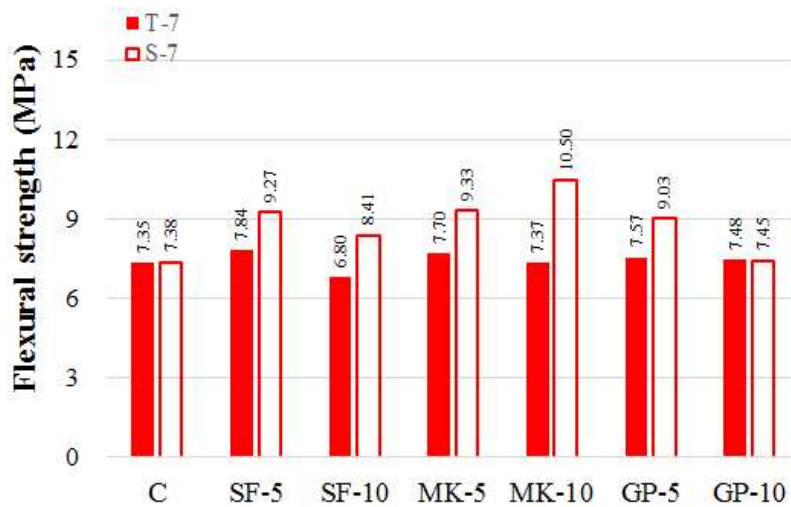


(b) 양생 90일에서의 압축강도

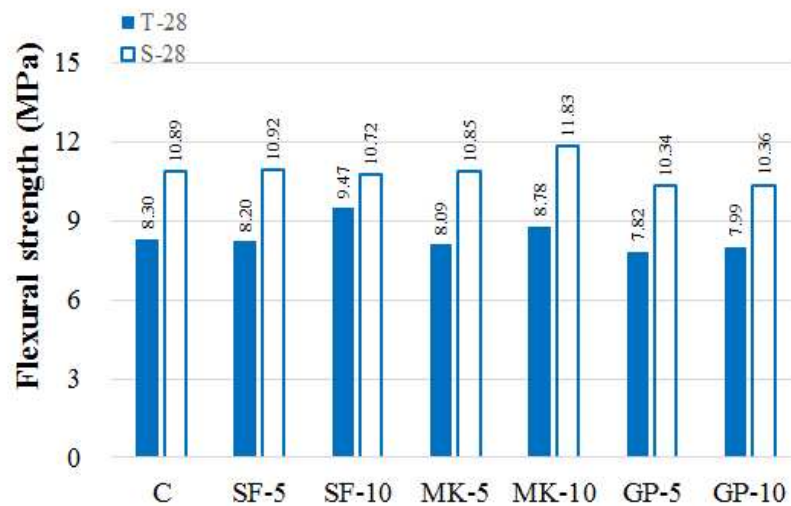
〈그림 4-8〉 압축강도 시험 결과 (56, 90일)

나. 양생환경이 표면보호재료의 휨강도에 미치는 영향

- 일반적으로 해수 양생 시험체의 휨강도가 수돗물 양생 시험체의 강도보다 높은 경향을 보임
- 수돗물 양생 7일의 경우 SF-5 시험체가 가장 높은 휨강도(7.84 MPa)를 보였으며, 수돗물 양생 28일의 경우 SF-10 시험체가 가장 높은 휨강도(9.47 MPa)를 보임
- 해수 양생 7일의 경우 MK-10 시험체가 가장 높은 휨강도(10.50 MPa)를 보였으며, 해수 양생 28일의 경우에서도 동일하게 MK-10 시험체가 가장 높은 휨강도(11.83 MPa)를 보임
- (7일과 28일 사이의) 단기양생에서는 해수 양생 시험체가 수돗물 양생 시험체에 비해 양생 기간이 길어짐에 따른 휨강도 증가가 뚜렷하게 나타났음



(a) 양생 7일에서의 휨강도

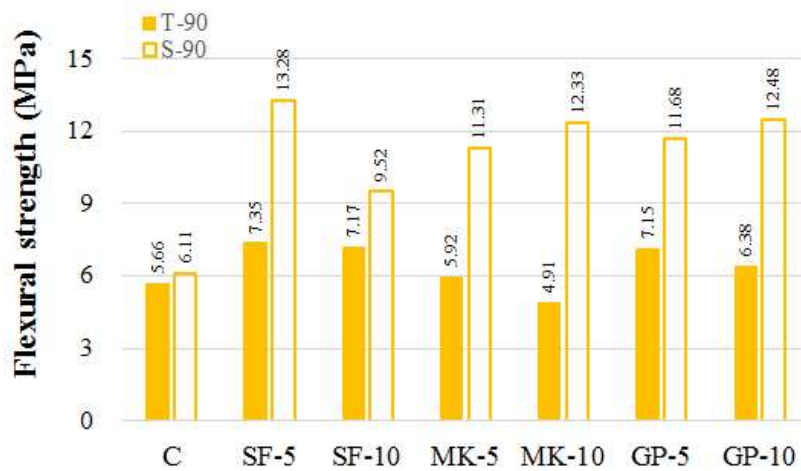


(b) 양생 28일에서의 압축강도

〈그림 4-9〉 휨강도 시험 결과 (7, 28일)



(a) 양생 56일에서의 휨강도

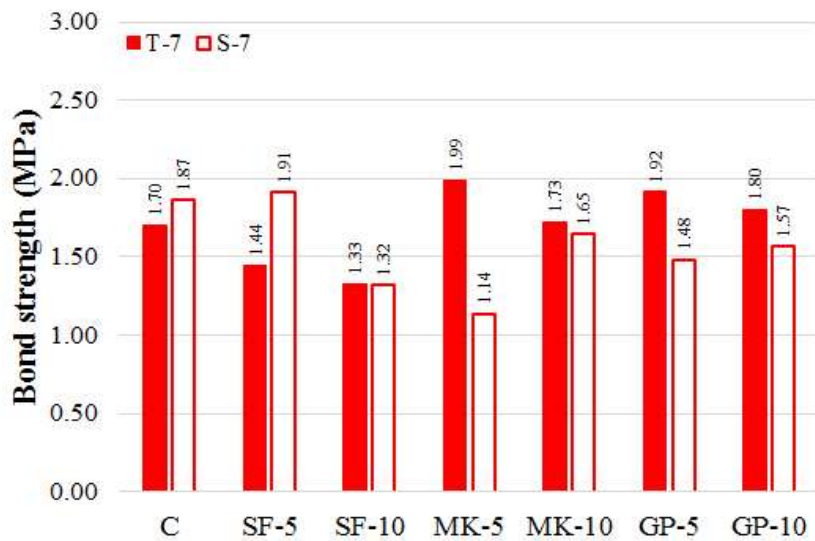


(b) 양생 90일에서의 휨강도

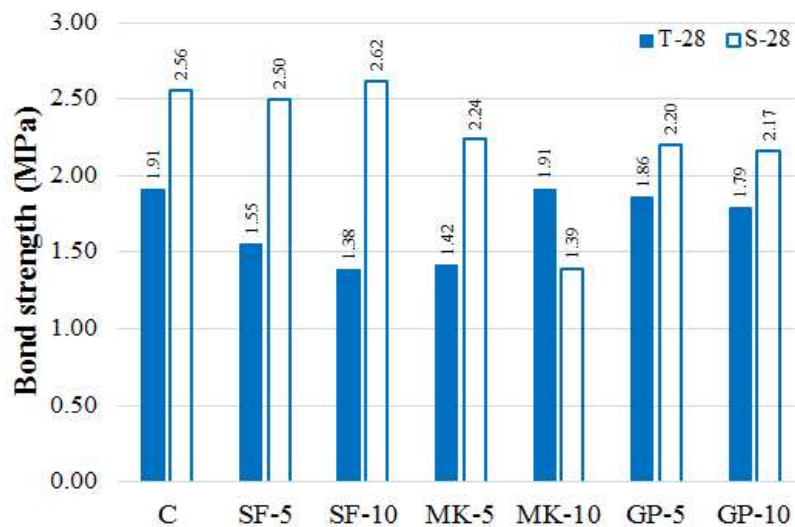
〈그림 4-10〉 휨강도 시험 결과 (56, 90일)

다. 양생환경이 표면보호재료의 부착강도에 미치는 영향

- 시험결과, 양생기간 7일을 제외하면, 해수 양생한 시험체의 부착강도가 수돗물 양생한 시험체의 부착강도 보다 높은 경향을 보였음
- 양생기간 7일의 경우, 해수 양생 시험체의 부착강도가 수돗물 양생 시험체의 부착강도에 비해 낮은 경향을 보임 (-8.24%)
- 양생기간 28일의 경우, 해수 양생 시험체의 부착강도가 수돗물 양생 시험체의 부착강도에 비해 높은 경향을 보임 (+32.54%)



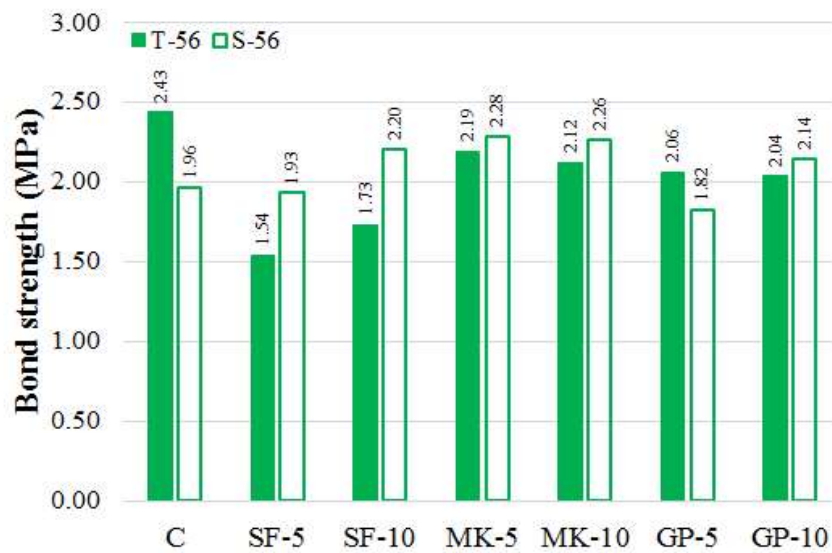
(a) 양생 7일에서의 부착강도



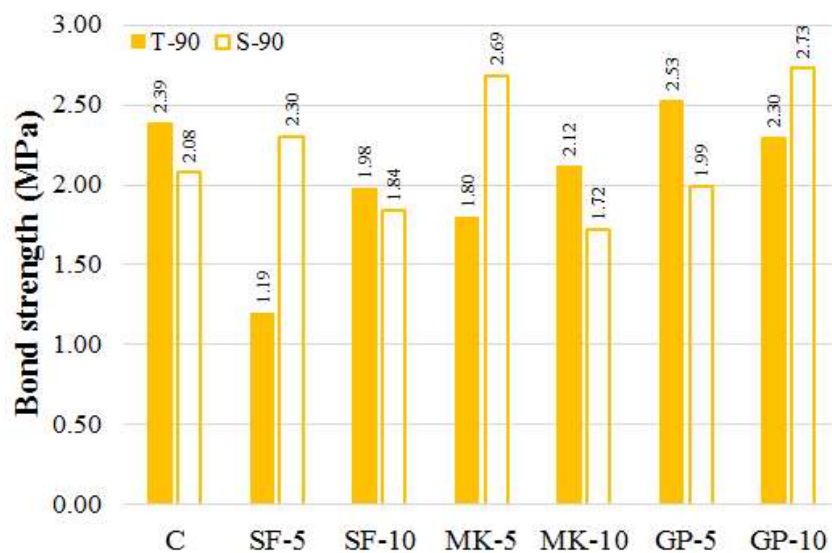
(a) 양생 28일에서의 부착강도

<그림 4-11> 부착강도 시험 결과 (7, 28일)

- 양생기간 56일의 경우, 해수 양생 시험체의 부착강도가 수돗물 양생 시험체의 부착강도에 비해 높은 경향을 보임 (+3.00%)
- 양생기간 90일의 경우, 해수 양생 시험체의 부착강도가 수돗물 양생 시험체의 부착강도에 비해 높은 경향을 보임 (+7.35%)
- 측정된 부착강도를 육안으로 정리된 시험체 계면의 파괴패턴(Failure pattern)과 관련지어 보다 상세한 비교분석을 수행할 예정임



(a) 양생 56일에서의 부착강도



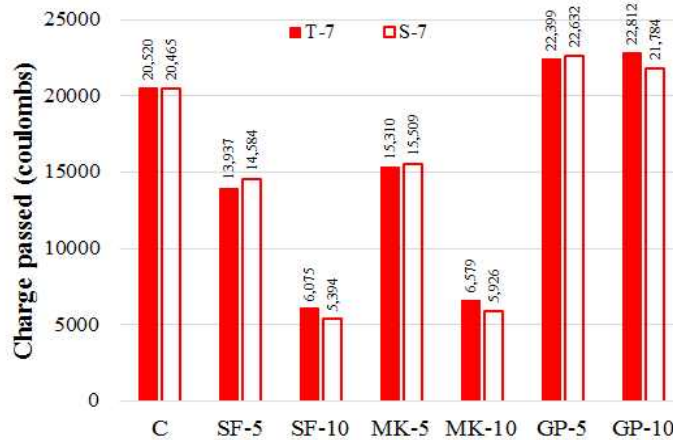
(a) 양생 90일에서의 부착강도

〈그림 4-12〉 부착강도 시험 결과 (56, 90일)

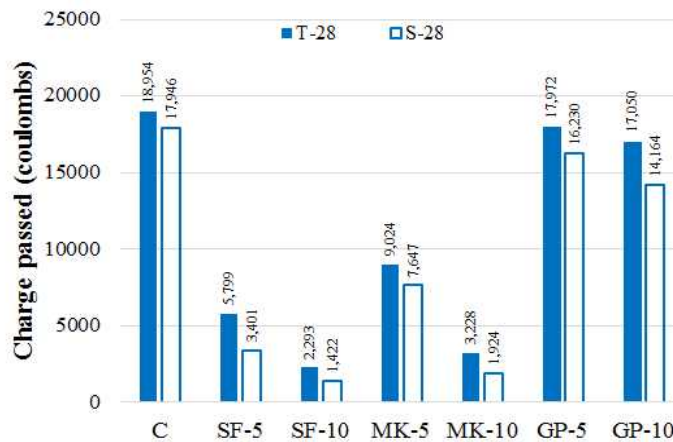
4.2.2. 양생환경에 따른 표면보호재료의 내구성 평가

가. 양생환경이 표면보호재료의 염화물 침투저항성에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 해수 양생 시험체의 통과전하량이 수돗물 양생 시험체에 비해 낮은 경향을 보였음
- 수돗물 양생의 경우 SF-10 시험체가 양생기간 7, 28, 56, 90일에서 각각 6075, 2293, 1358, 1700 coulombs로 가장 낮은 통과전하량을 보임
- 해수 양생의 경우에도 동일하게 SF-10 시험체가 양생기간 7, 28, 56, 90일에서 각각 5394, 1422, 1084, 1101 coulombs로 가장 낮은 통과전하량을 보임
- GP-5, GP-10 시험체의 경우, 양생 7일에서 C보다 높은 통과전하량을 가졌지만, 양생기간 28, 56, 90일에서는 C보다 낮은 통과전하량을 보임
- 양생 초기(7일, 28일)에는 해수 양생 시험체의 통과전하량이 수돗물 양생 시험체에 비해 감소하는 경향이 뚜렷하였으나 이후의 양생기간(56, 90일)에서는 해수 양생이 통과전하량에 미치는 영향이 감소하였음 (56일: 평균 -22.69%, 90일: 평균 -12.01%)

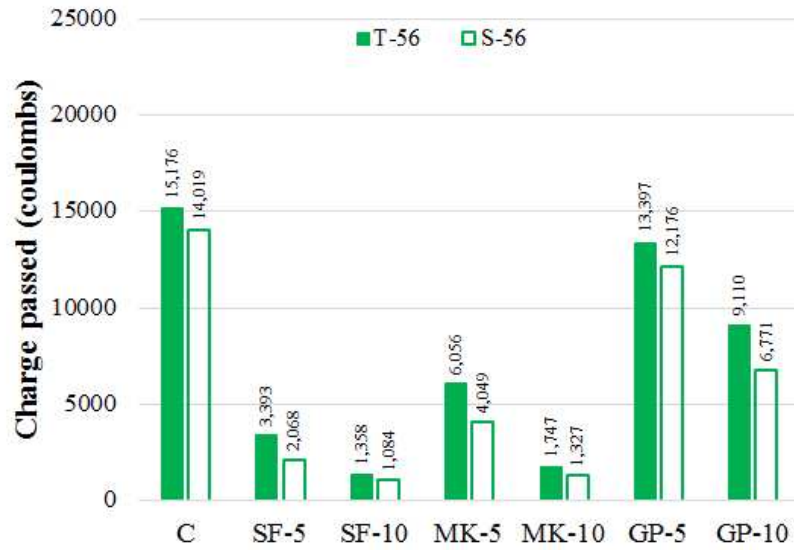


(a) 양생 7일에서의 통과전하량

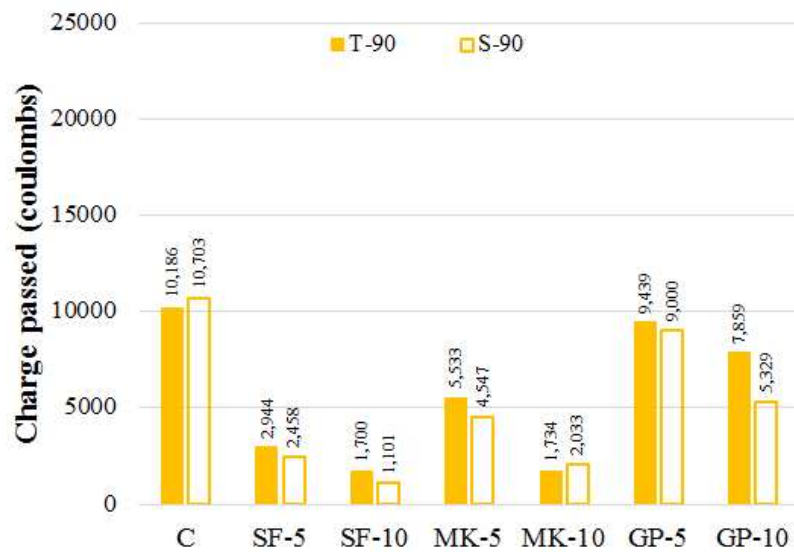


(b) 양생 28일에서의 통과전하량

<그림 4-13> 염화물 침투저항성 시험 결과 (7, 28일)



(a) 양생 56일에서의 통과전하량

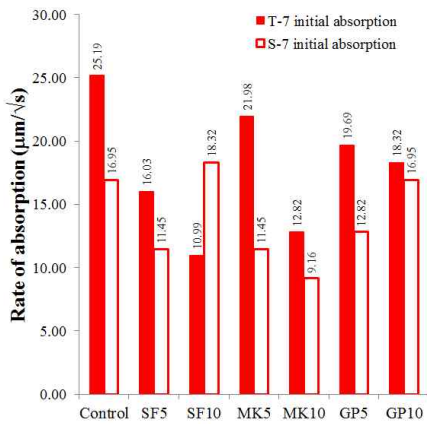


(b) 양생 90일에서의 통과전하량

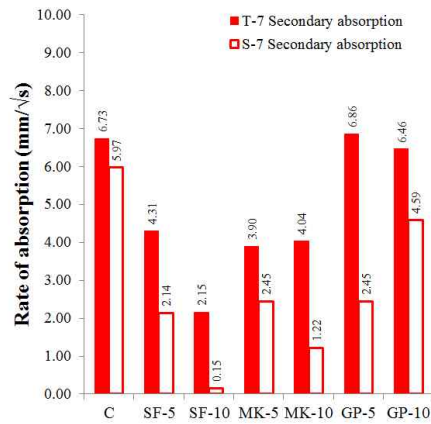
〈그림 4-14〉 염화물 침투저항성 시험 결과 (56, 90일)

나. 양생환경이 표면보호재료의 투수저항성에 미치는 영향

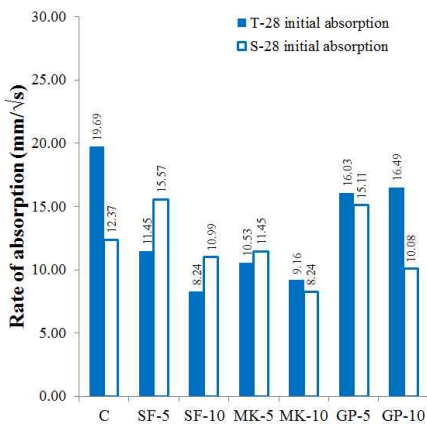
- 해수 양생 시험체의 물 흡수 속도가 수돗물 양생 시험체에 비해 낮은 경향을 보였음
- 수돗물 양생 7일의 경우, SF-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($10.99 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 수돗물 양생 28일의 경우에도 동일하게 SF-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($8.24 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 수돗물 양생 7일의 경우, SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($2.15 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 수돗물 양생 28일의 경우에도 동일하게 SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($1.21 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 해수 양생 7일의 경우, MK-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($9.16 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 해수 양생 28일의 경우 동일하게 MK-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($8.24 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 해수 양생 7일의 경우, SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($0.15 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 해수 양생 28일의 경우 SF-5 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($1.08 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임



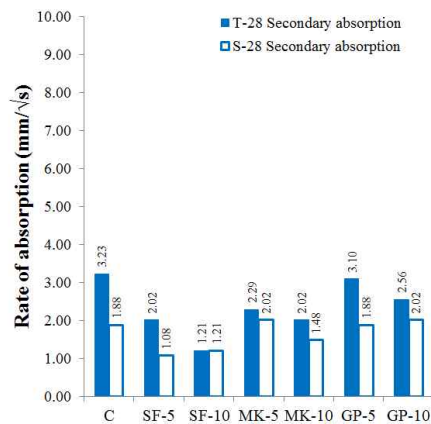
(a) 양생 7일에서의 초기 물 흡수 속도



(b) 양생 7일에서의 2차 물 흡수 속도



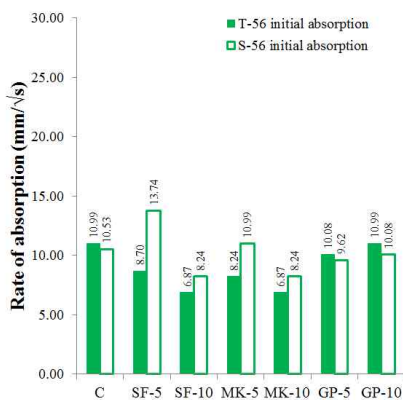
(c) 양생 28일에서의 초기 물 흡수 속도



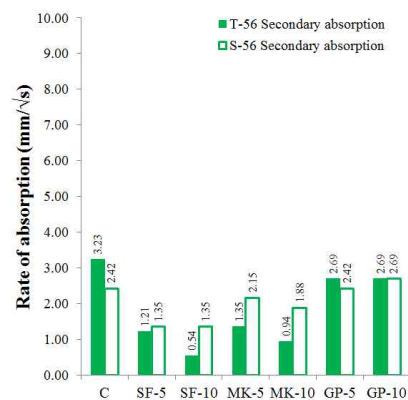
(d) 양생 28일에서의 2차 물 흡수 속도

<그림 4-15> 투수저항성 시험 결과(양생 7, 28일)

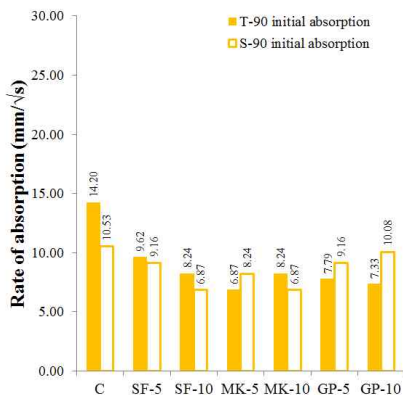
- 수돗물 양생 56일의 경우, SF-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($6.87 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 수돗물 양생 90일의 경우 MK-5 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($6.87 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 수돗물 양생 56일의 경우, SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($0.54 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 수돗물 양생 90일의 경우 SF-5 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($0.94 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 해수 양생 56일의 경우, SF-10 시험체, MK-10 시험체가 동일하게 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($8.24 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보였으며, 해수 양생 90일의 경우 SF-10 시험체가 가장 낮은 초기 물 흡수 속도($6.87 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 해수 양생 56일의 경우, SF-5 시험체, SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($1.35 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$) 결과를 보였으며, 해수 양생 90일의 경우 SF-10 시험체가 가장 낮은 2차 물 흡수 속도($0.54 \mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)를 보임
- 양생 7일차에서는 해수 양생이 수돗물 양생보다 전반적으로 낮은 물 흡수 속도(초기, 2차)를 보임
- 양생 28일차에서는 해수 양생이 초기 물 흡수 속도에 미치는 영향이 뚜렷하지 않으나, 2차 물 흡수 속도에서는 영향을 보임
- 양생 56일, 90일차에서는 해수 양생이 물 흡수 속도에 미치는 영향이 크지 않았음



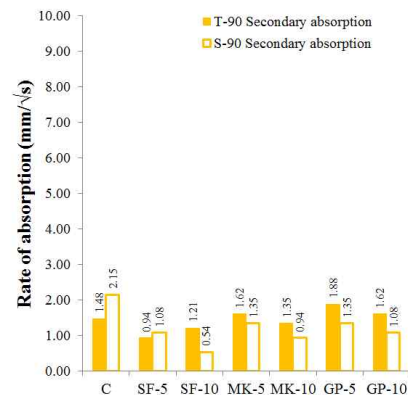
(a) 양생 56일에서의 초기 물 흡수 속도



(b) 양생 56일에서의 2차 물 흡수 속도



(c) 양생 90일에서의 초기 물 흡수 속도



(d) 양생 90일에서의 2차 물 흡수 속도

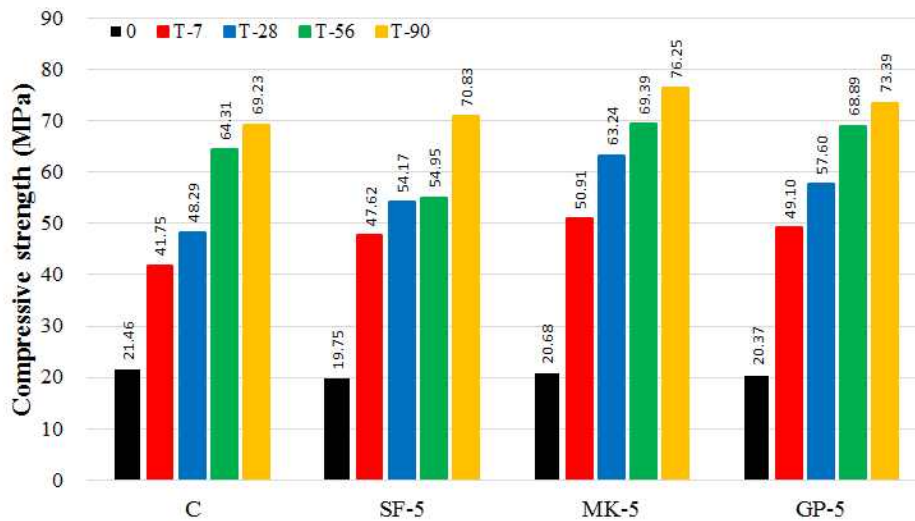
〈그림 4-16〉 투수저항성 시험 결과(양생 56, 90일)

4.3. 혼화재료 종류에 따른 표면보호재료 성능평가

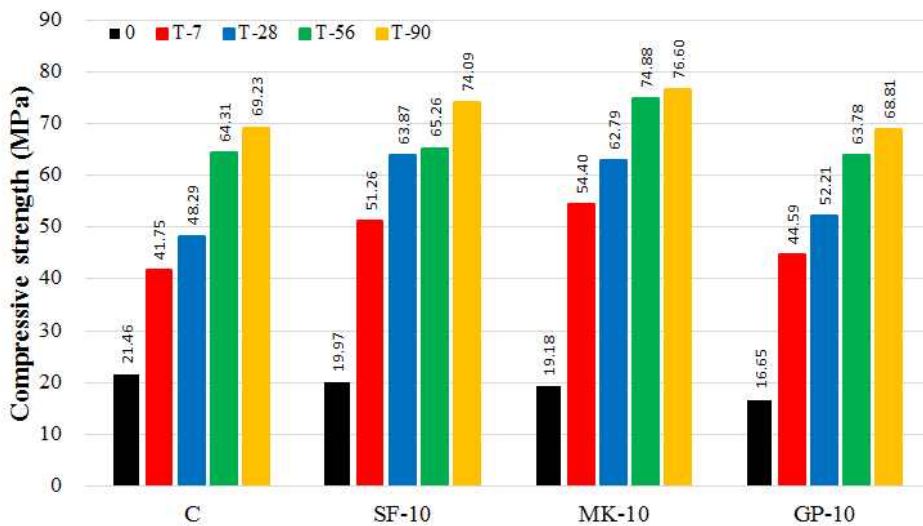
4.3.1. 혼화재료 종류에 따른 표면보호재료의 강도 평가

가. 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 압축강도에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 MK 시험체의 압축강도가 기타 시험체의 압축강도보다 높은 경향을 보였음
- 구체적으로, 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서, MK 시험체(T-MK-5)의 압축강도가 기타 시험체 대비 가장 빠르고 높은 증가량(rapid and higher increase)을 보였으며, 수돗물 양생 함유량 10%의 경우에도 동일하게 MK 시험체(T-MK-10)의 압축강도가 기타 시험체 대비 가장 높은 증가량을 보임

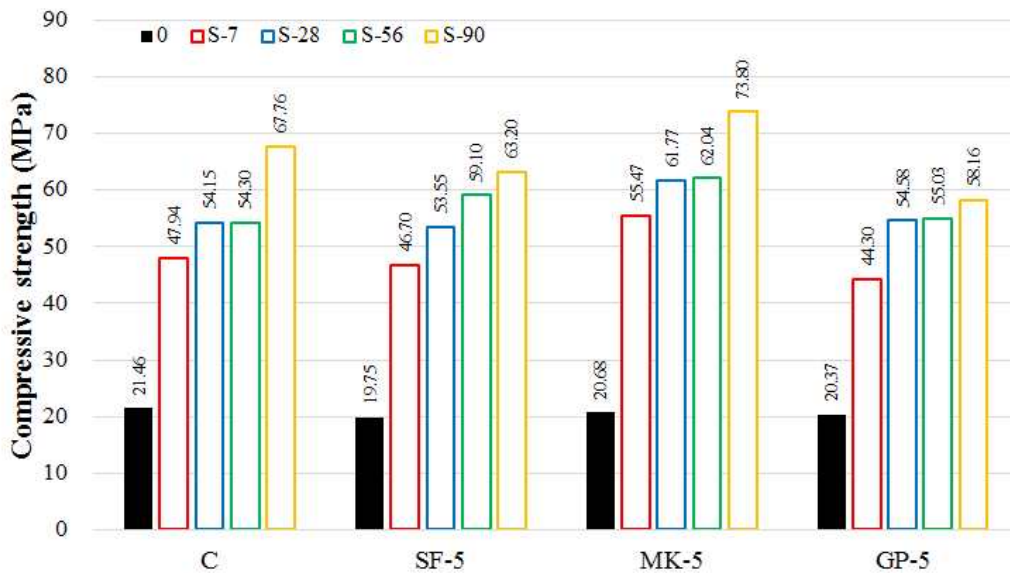


(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 압축강도

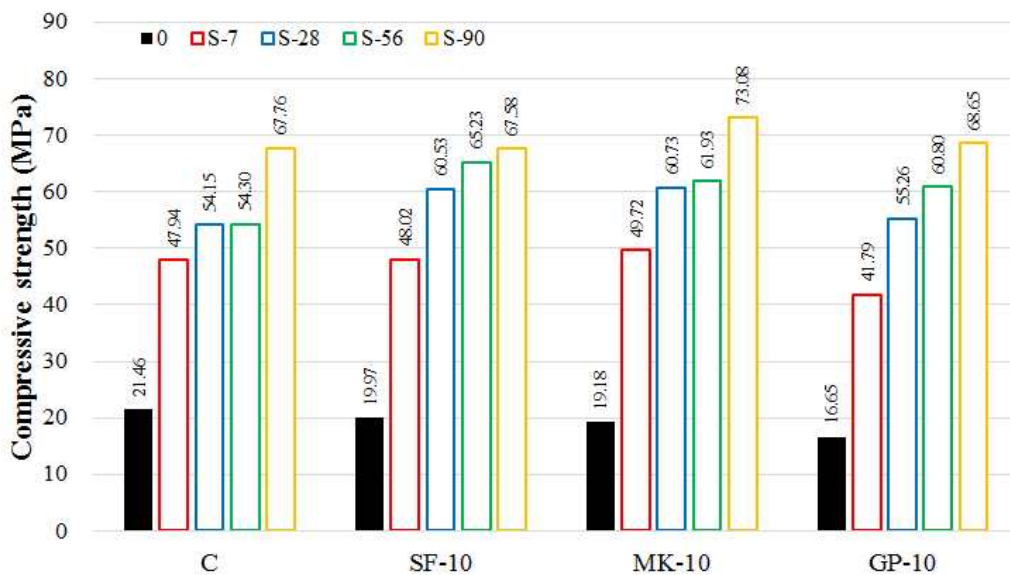


(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 압축강도
 <그림 4-17> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 압축강도

- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우에는 MK 시험체(S-MK-5)의 압축강도가 기타 시험체 대비 가장 빠르고 높은 증가량(rapid and higher increase)을 보였으며, 해수 양생 함유량 10%의 경우에도 동일하게 MK 시험체(S-MK-10)의 압축강도가 기타 시험체 대비 가장 높은 증가량을 보임



(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 압축강도

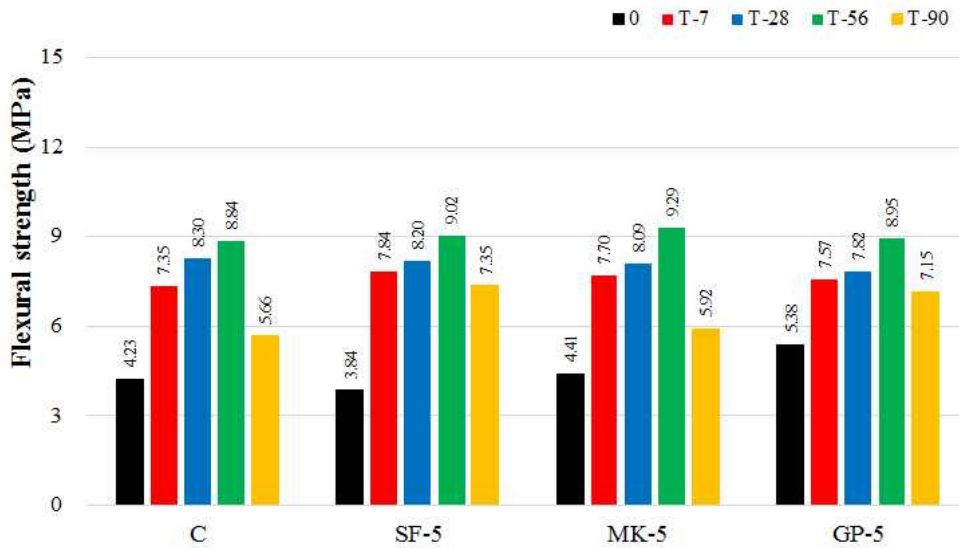


(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 압축강도

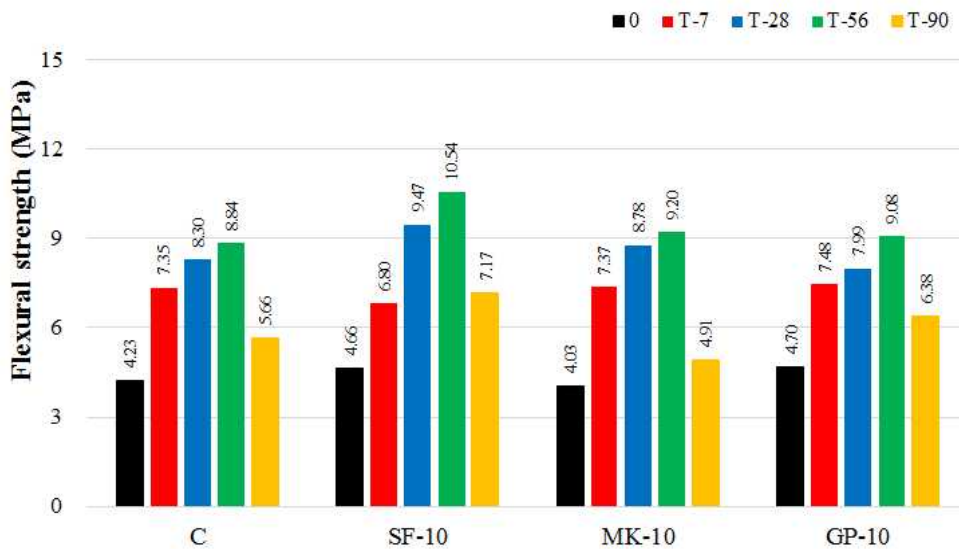
〈그림 4-18〉 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 압축강도

나. 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 휨강도에 미치는 영향

- 시험결과 혼화재료의 종류가 휨강도에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았음
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우, 혼화재료의 종류가 휨강도에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았으나, 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서는 SF 시험체가 기타 혼화재료를 함유한 시험체보다 휨 강도가 증가하는 경향을 보였음



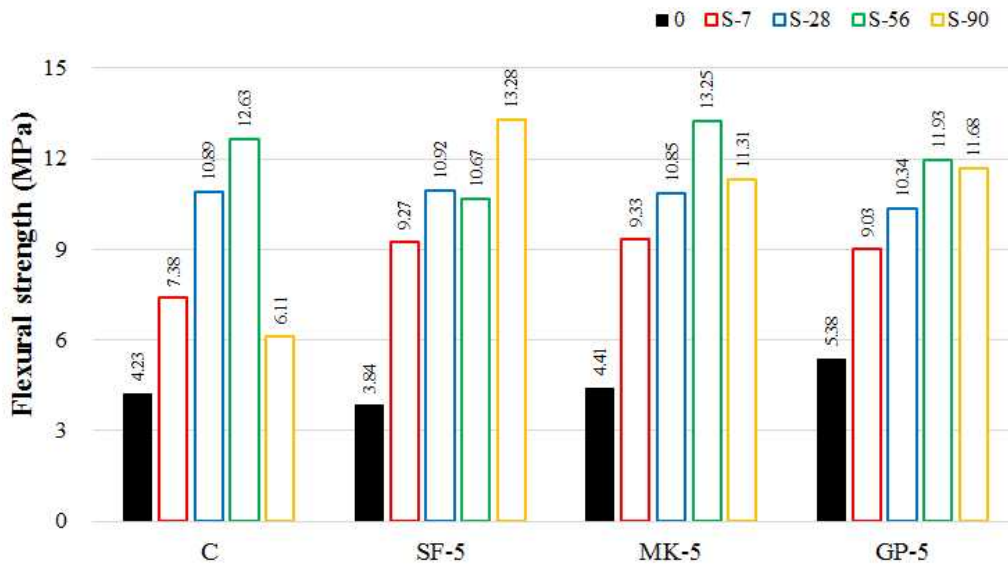
(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 휨강도



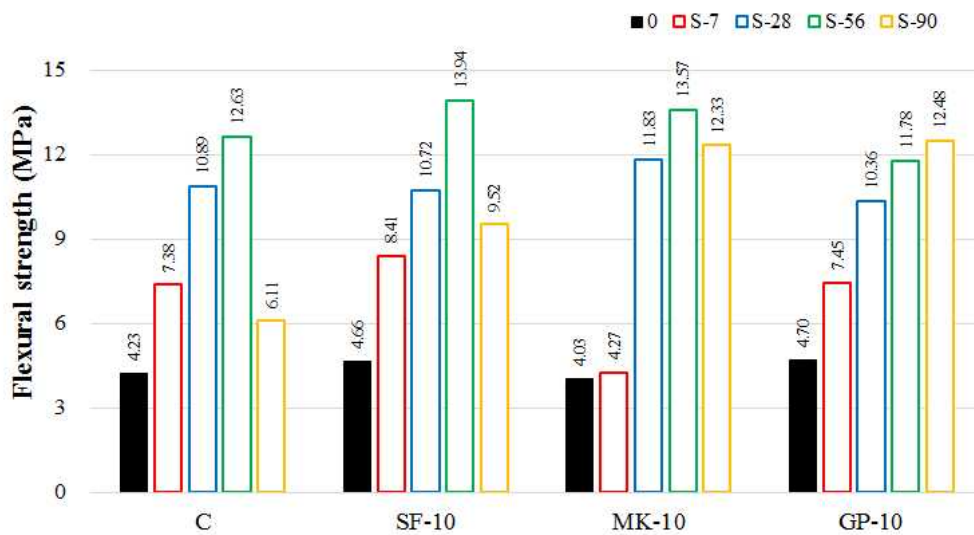
(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 휨강도

<그림 4-19> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 휨강도

- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우에는 SF 시험체의 휨 강도가 Control 대비 증가하는 경향을 보였으며, 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우에는 MK 시험체의 휨 강도가 기타 시험체 대비 높은 증가량을 보임



(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 휨강도

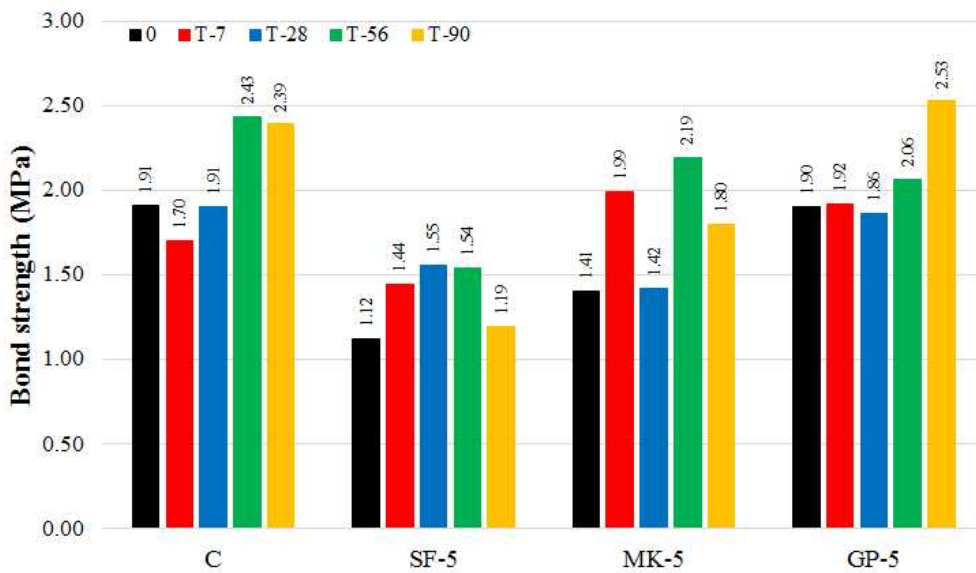


(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 휨강도

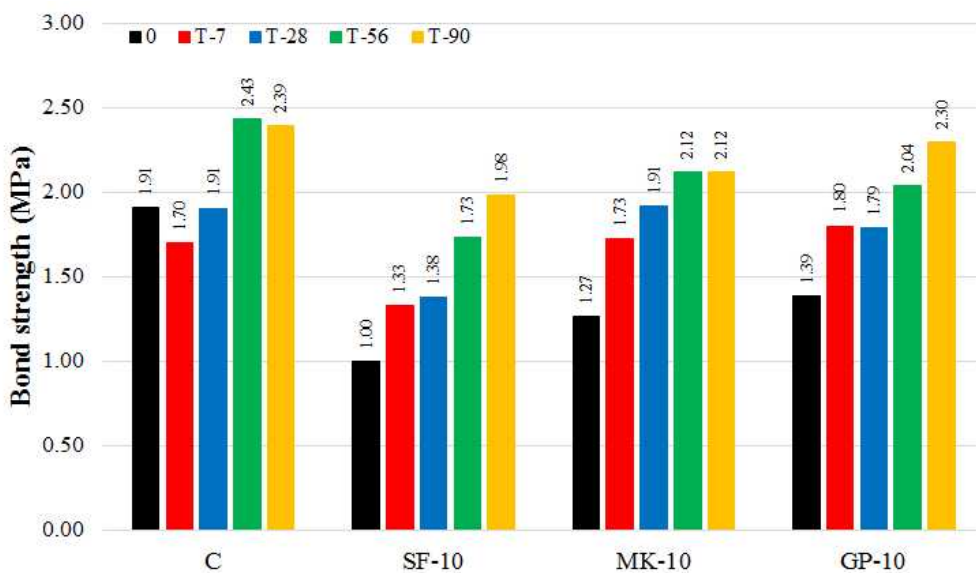
〈그림 4-20〉 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 휨강도

다. 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 부착강도에 미치는 영향

- 부착강도 시험결과, 어떤 혼화재료도 함유하지 않은 Control이 가장 높은 부착강도를 보였음
- 혼화재료를 함유한 시험체들 중에서는 GP 시험체가 가장 높은 부착강도를 보였음
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우, GP 시험체가 기타 시험체에 비해 높은 부착강도를 보였으나, Control 시험체 대비 감소하는 경향을 보임
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우도 동일하게 GP 시험체가 기타 시험체에 비해 높은 부착강도를 보였으나, Control 시험체에 대비해서는 감소하는 경향을 보임

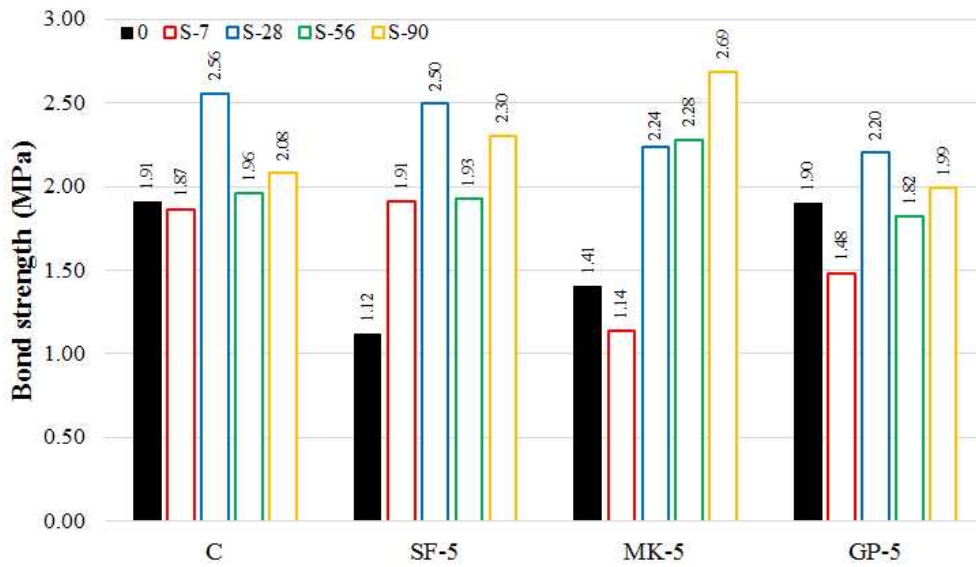


(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 부착강도

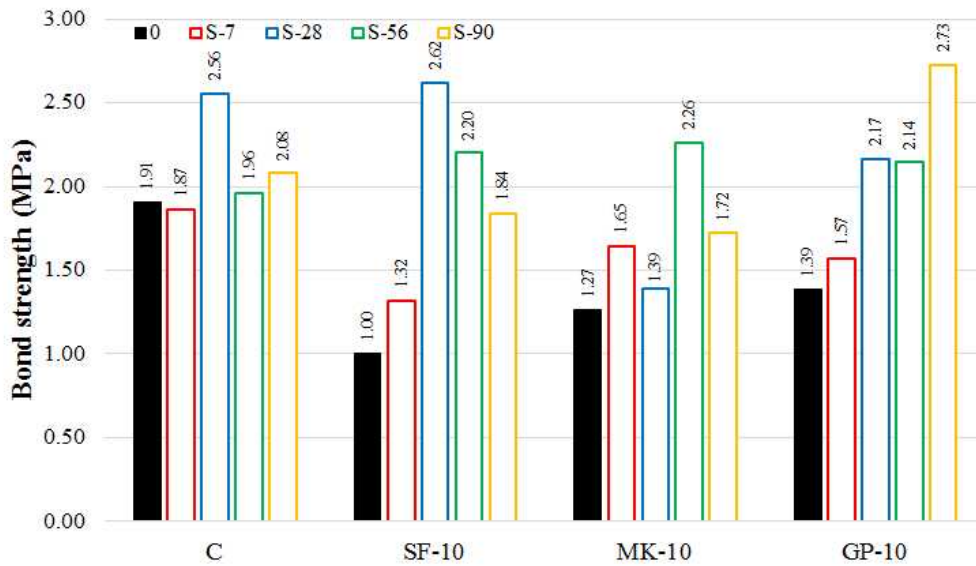


(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 부착강도
 <그림 4-21> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 부착강도

- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%, 10%의 경우에는 혼화재료의 종류가 부착강도에 미치는 영향이 뚜렷하지 않았음



(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 부착강도



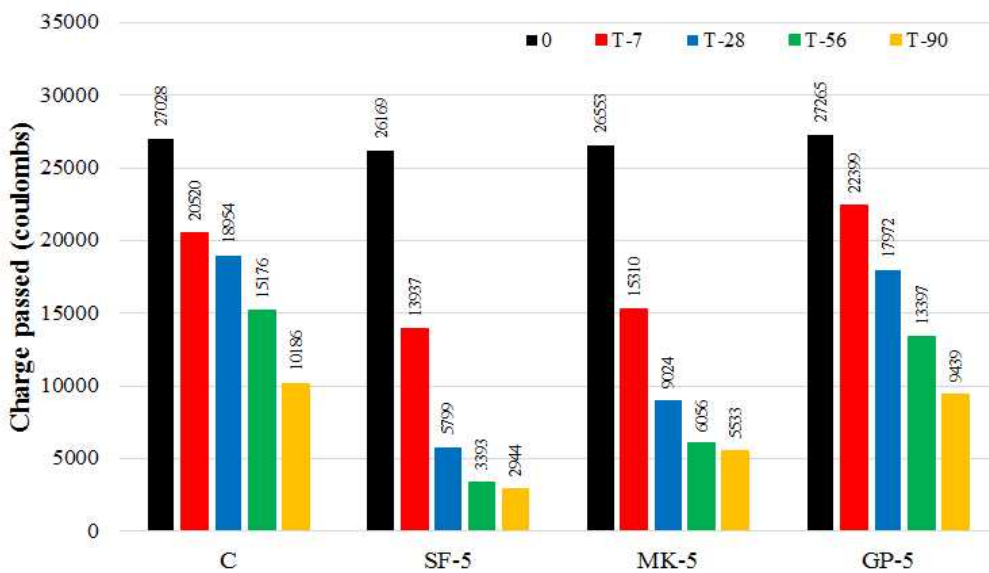
(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 부착강도

〈그림 4-22〉 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 부착강도

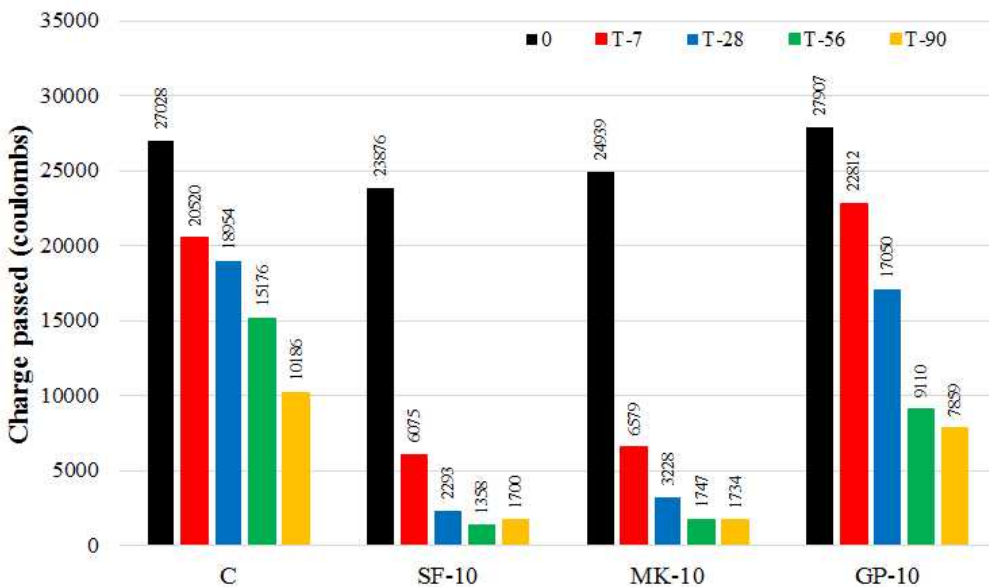
4.3.2. 혼화재료의 종류에 따른 표면보호재료의 내구성 평가

가. 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 염화물 침투저항성에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 SF 시험체의 통과전하량이 기타 혼화재료를 함유한 시험체의 통과전하량에 비해 낮은 경향을 보임
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우 SF 시험체의 통과전하량은 control 시험체 대비 평균 40.16% 감소하여 가장 높은 감소량을 보였으며, 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우 동일하게 SF 시험체의 통과전하량이 control 시험체 대비 평균 68.86% 감소하여 가장 높은 감소량을 보임



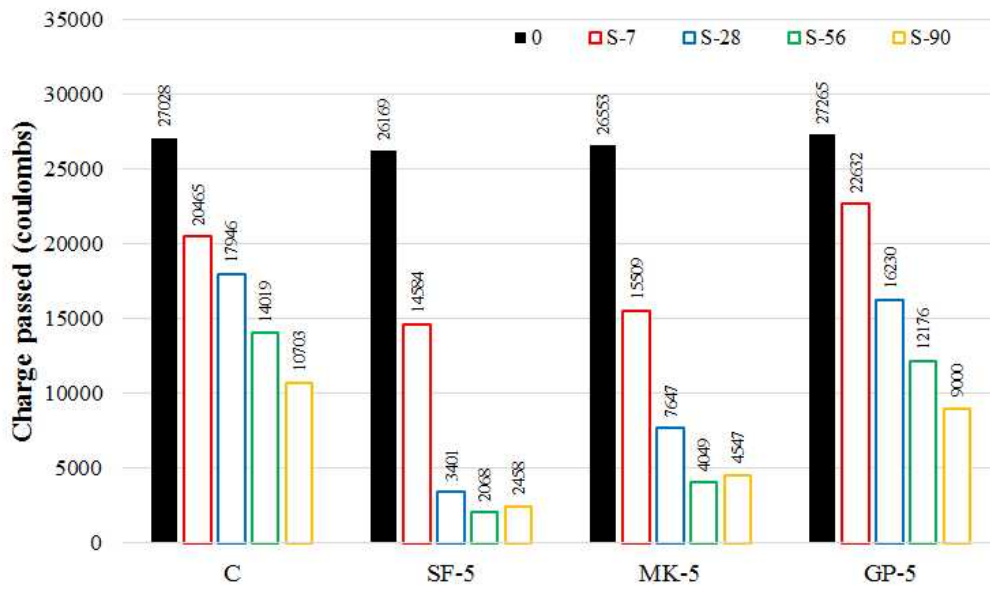
(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 통과전하량



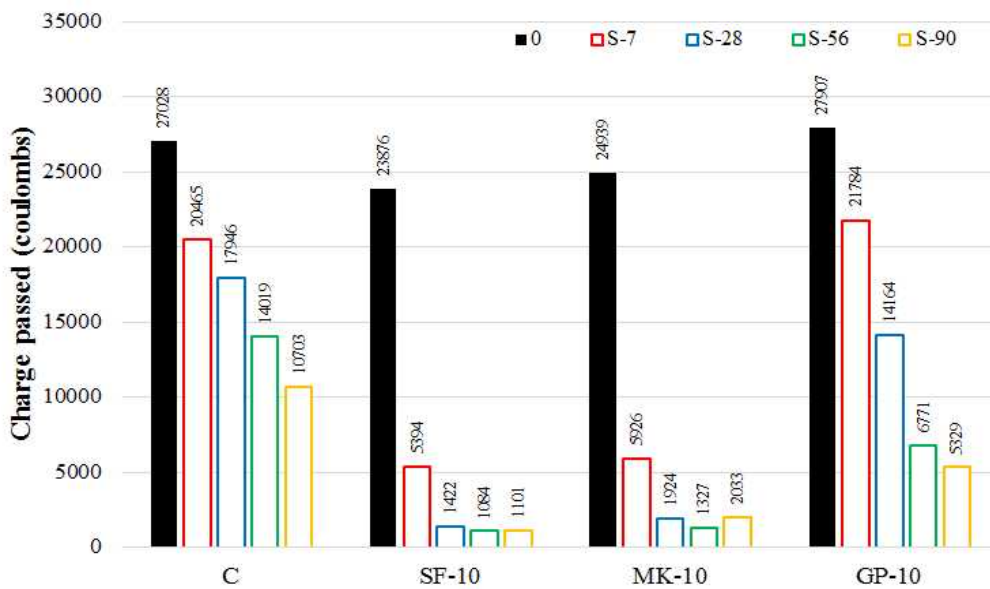
(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 통과전하량

<그림 4-23> 수돗물 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 염화물 침투저항성

- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우 SF 시험체의 통과전하량은 control 시험체 대비 평균 55.14% 감소하여 가장 높은 감소량을 보였으며, 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우에도 동일하게 SF 시험체의 통과전하량이 control 시험체 대비 평균 71.87% 감소하여 가장 높은 감소량을 보임



(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 통과전하량

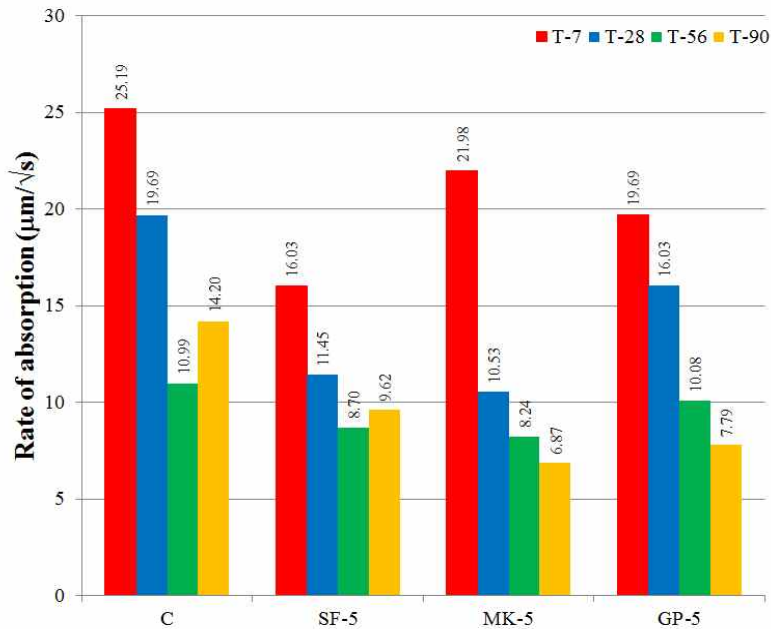


(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 통과전하량

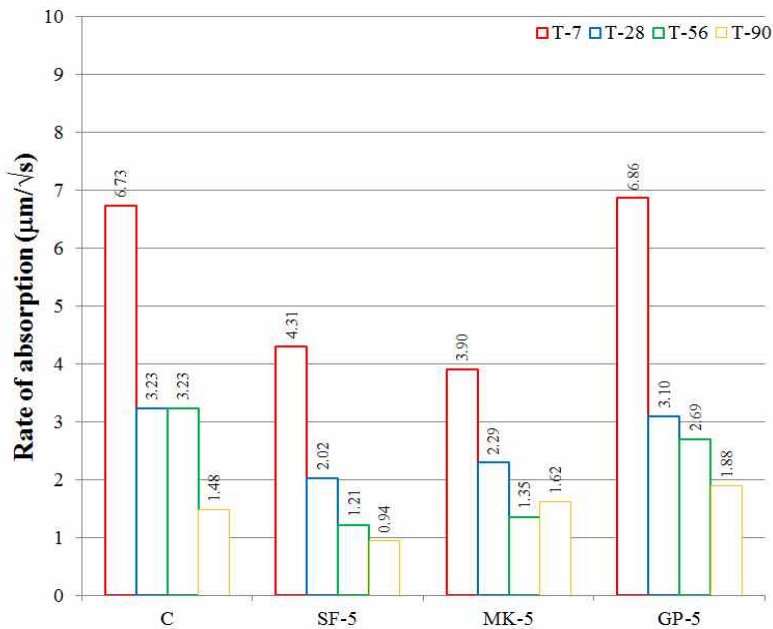
〈그림 4-24〉 해수 양생에서 혼화재료의 종류에 따른 염화물 침투저항성

나. 혼화재료의 종류가 표면보호재료의 투수저항성에 미치는 영향

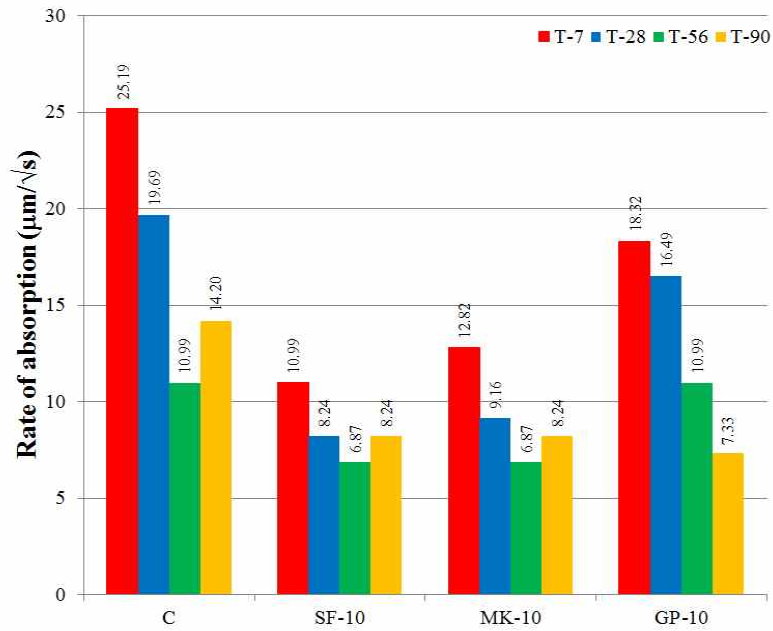
- 시험결과, 혼화재료의 종류가 초기 물 흡수 속도에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았으나, 2차 물 흡수 속도에서는 SF 시험체가 가장 낮은 속도를 보임
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우 초기 물 흡수 속도는 MK 시험체가 가장 높은 감소량을 보였으며, 2차 물 흡수 속도는 SF 시험체가 가장 높은 감소량을 보임
- 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우 초기 물 흡수 속도, 2차 물 흡수 속도 모두 SF 시험체가 가장 높은 감소량을 보임



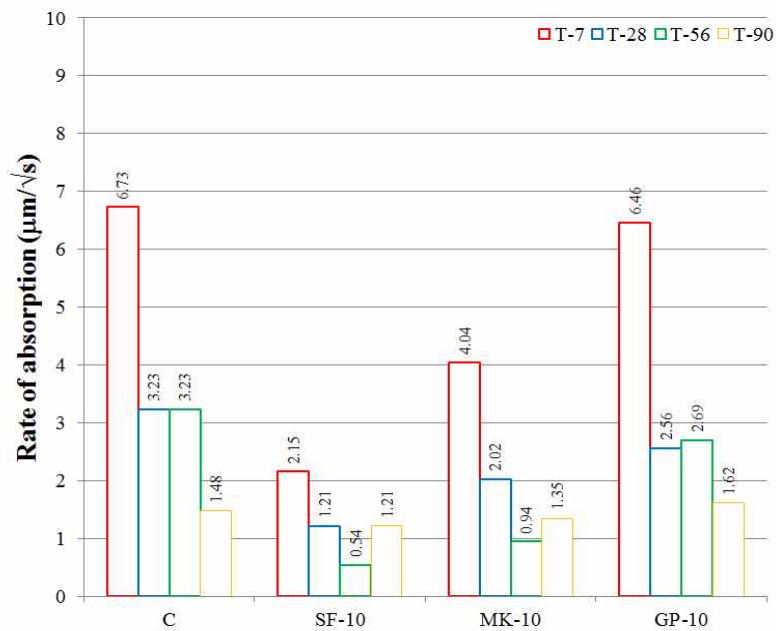
(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 초기 물 흡수 속도



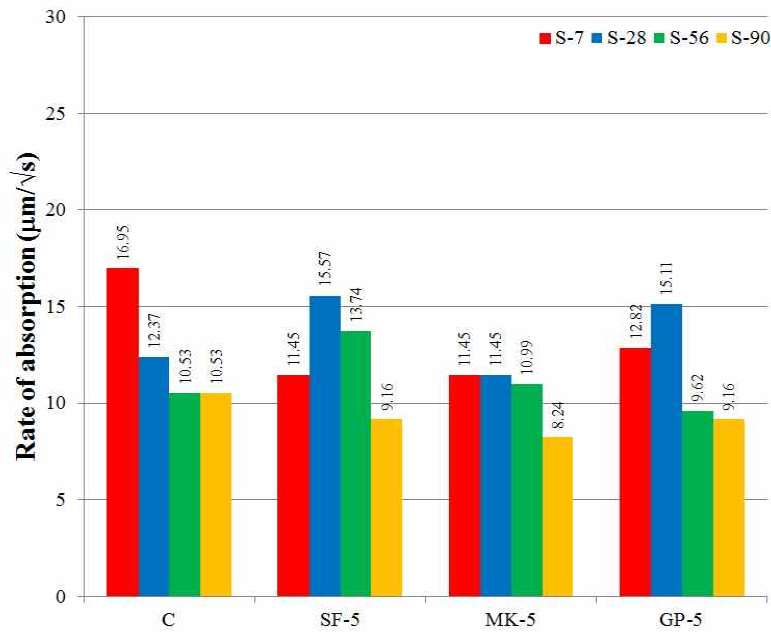
(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 2차 물 흡수 속도
 <그림 4-25> 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 물 흡수 속도



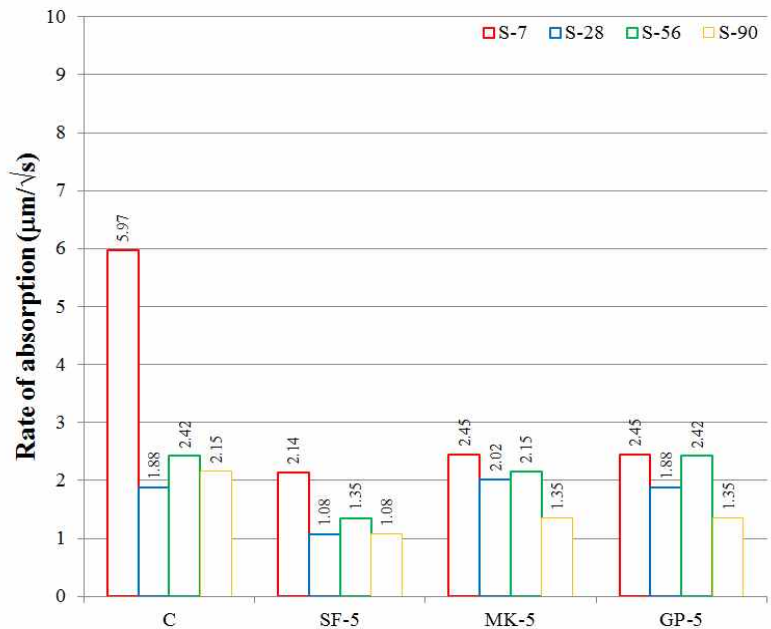
(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 초기 물 흡수 속도

(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 2차 물 흡수 속도
<그림 4-26> 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 물 흡수 속도

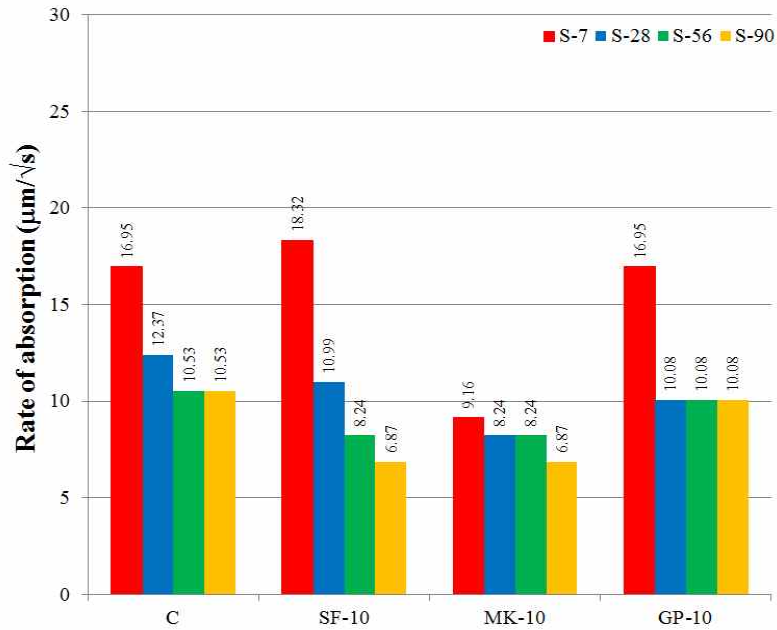
- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우, 초기 물 흡수 속도에서는 MK 시험체가 가장 높은 감소량을 보였으며 2차 물 흡수 속도는 SF 시험체가 가장 높은 감소량을 보임
- 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우, 초기 물 흡수 속도는 MK 시험체가 가장 높은 감소량을 보였으며, 2차 물 흡수 속도의 경우 SF 시험체가 가장 높은 감소량을 보임



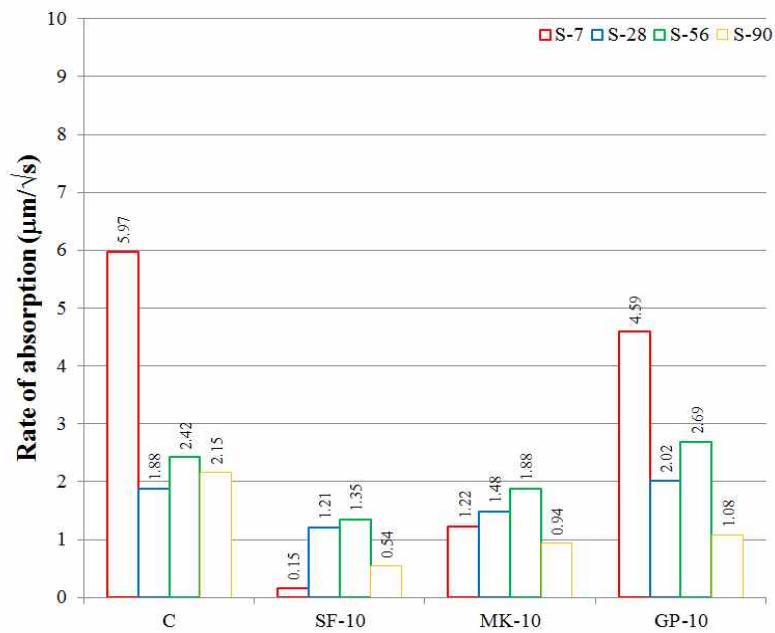
(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 초기 물 흡수 속도



(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 2차 물 흡수 속도
 <그림 4-27> 해수 양생 혼화재료 함유량 5%에서의 물 흡수 속도



(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 초기 물 흡수 속도

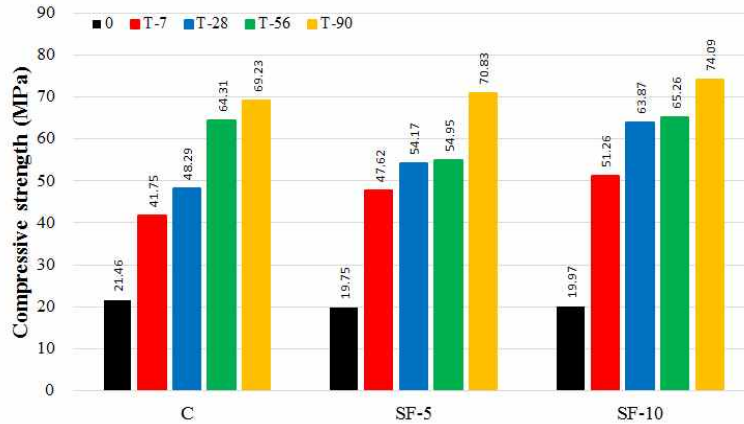
(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 2차 물 흡수 속도
(그림 4-28) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%에서의 물 흡수 속도

4.4. 혼화재료의 함유량에 따른 표면보호재료 성능평가

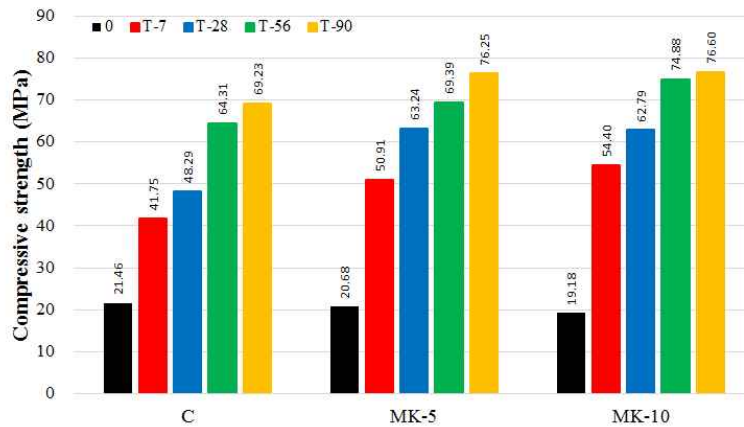
4.4.1. 혼화재료 함유량에 따른 표면보호재료의 강도 평가

가. 혼화재료의 함유량이 표면보호재료의 압축강도에 미치는 영향

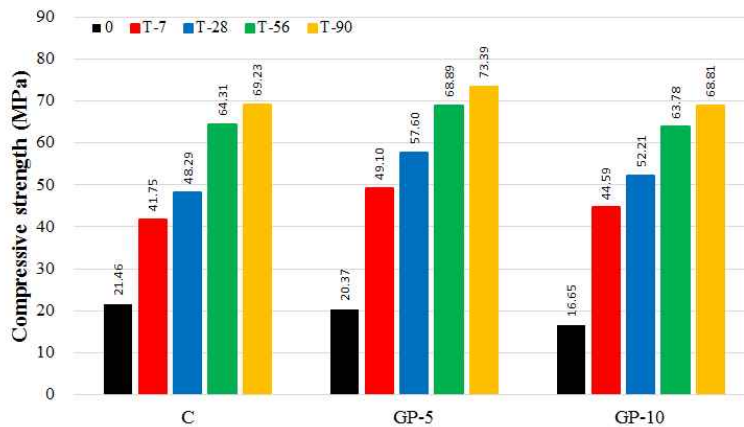
- 시험결과, 일반적으로 혼화재료의 함유량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보였음
- SF 시험체의 경우 양생환경에 관계없이 SF 함유량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였음
- T-SF-56 시험체의 경우, SF 함유량이 10%로 증가함에 따라 압축강도가 18.75%(10.31 MPa) 증가하여 가장 높은 증가율을 보임
- MK 시험체의 경우 수돗물 양생에서는 MK 함유량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하였으나 해수 양생에서는 압축강도의 변화가 보이지 않았음
- T-MK-56 시험체의 경우, MK 함유량이 증가함에 따라 압축강도가 7.91%(5.49 MPa) 증가하여 가장 높은 증가율을 보임
- 수돗물 양생한 GP 시험체의 경우, GP 함유량 5%의 경우에는 압축강도가 증가하였으나, 함유량이 10%로 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 보임
- 해수 양생한 GP 시험체의 경우, 양생 초기(7일)에는 GP 함유량 증가에 따른 압축강도 상승효과가 보이지 않았으나 그 이후의 양생기간(28, 56, 90일)에서는 압축강도가 증가하였음



(a) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 압축강도 변화

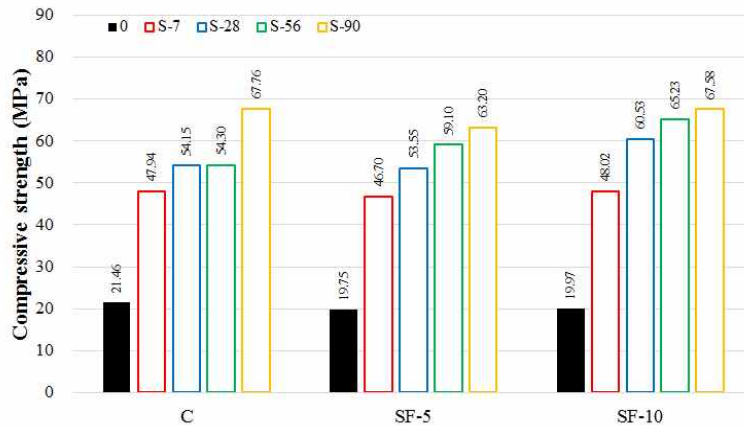


(b) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 압축강도 변화

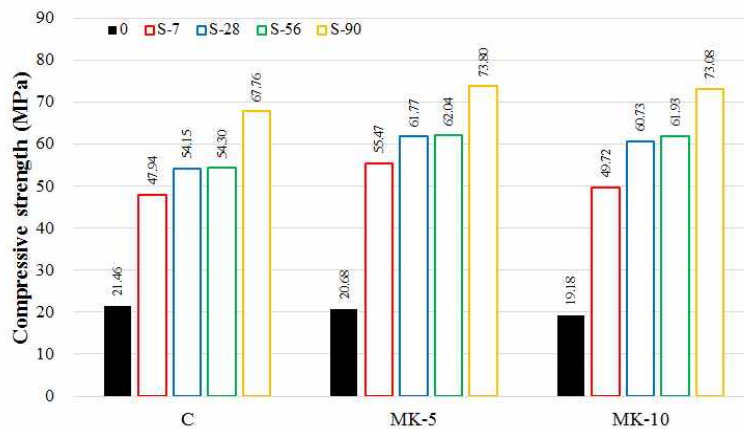


(c) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 압축강도 변화

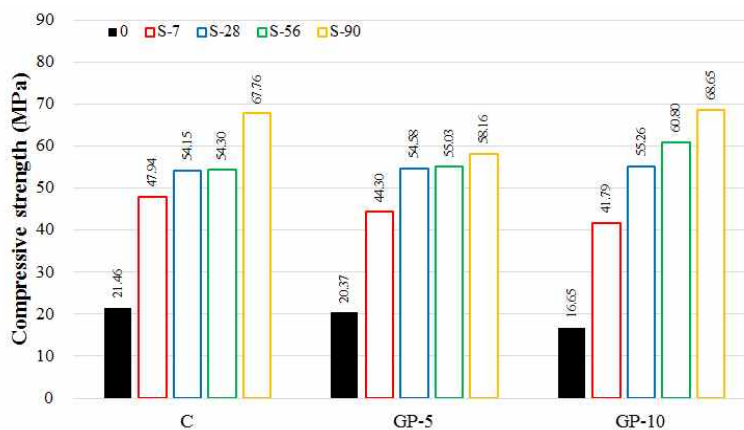
〈그림 4-29〉 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 압축강도 변화



(a) 해수 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 압축강도 변화



(b) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 압축강도 변화

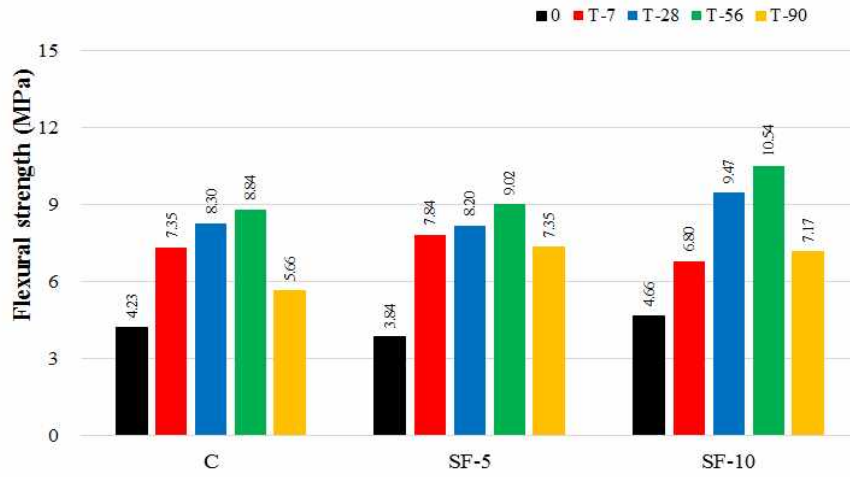


(c) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 압축강도 변화

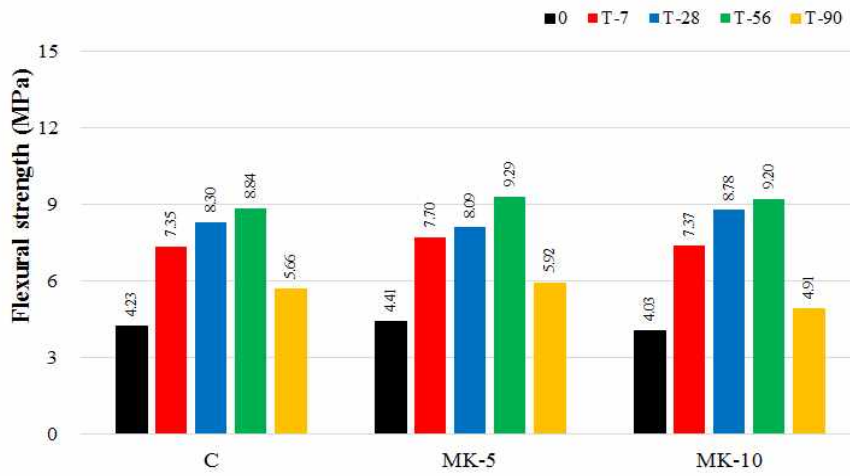
〈그림 4-30〉 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 압축강도 변화

나. 혼화재료의 함유량이 표면보호재료의 휨강도에 미치는 영향

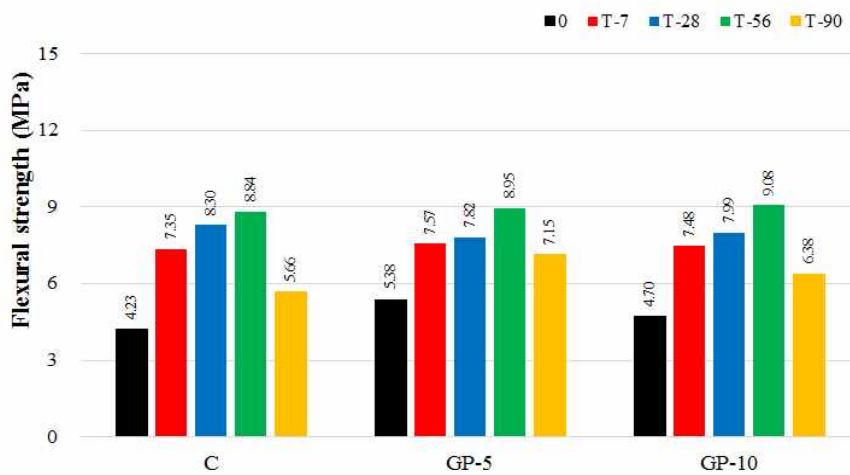
- 시험결과, 대체적으로 혼화재료의 함유량이 증가함에 따라 휨강도가 증가하는 경향을 보였음
- SF 시험체의 경우 양생기간 7일을 제외하면 SF 함유량이 증가함에 따라 휨강도가 증가하였음
- MK 시험체의 경우에도 양생기간 7일을 제외하면 MK 함유량이 증가함에 따라 휨강도가 증가하였음
- 수돗물 양생한 GP 시험체의 경우, 양생 초기(7일)에는 GP 함유량 증가에 따른 휨강도 상승효과가 뚜렷하지 않았으나 그 이후의 양생기간 (28일, 56일)에서는 휨강도가 증가하는 경향을 보임
- 해수 양생한 GP 시험체의 경우에도 양생 초기(7일)에는 GP 함유량 증가에 따른 휨강도 상승효과가 뚜렷하지 않았으나 그 이후의 양생기간 (28일, 56일)에서는 휨강도가 증가하는 경향을 보임



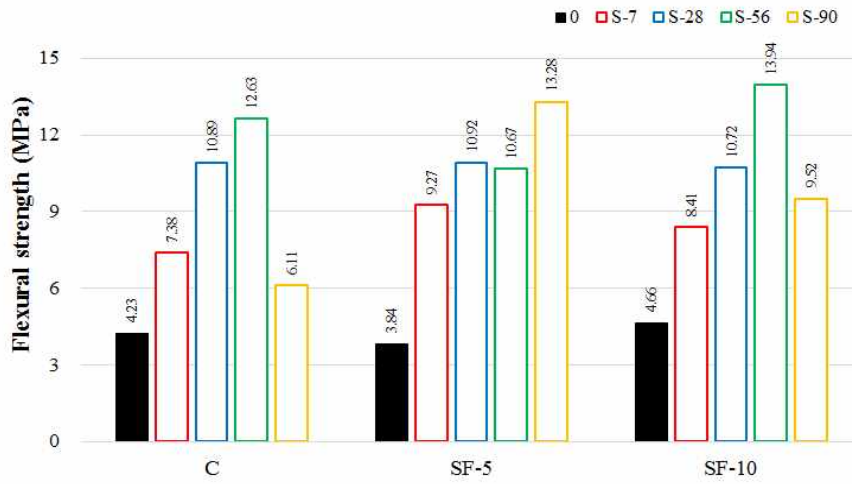
(a) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 휨강도 변화



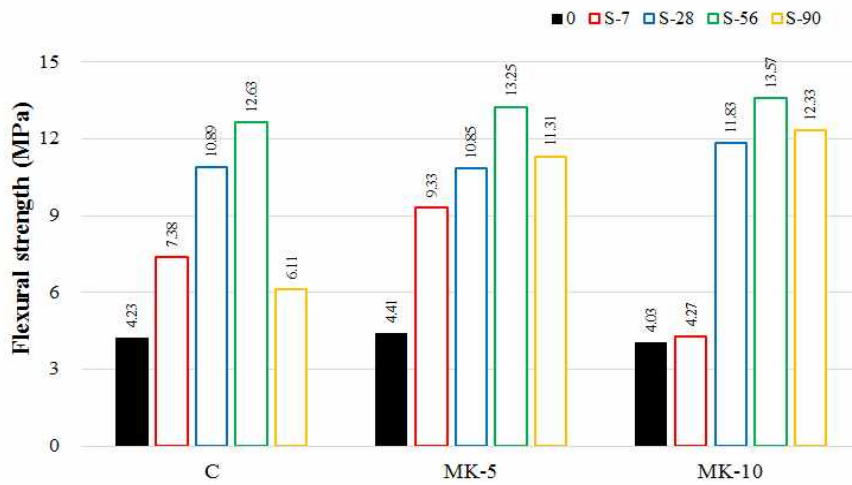
(b) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 휨강도 변화



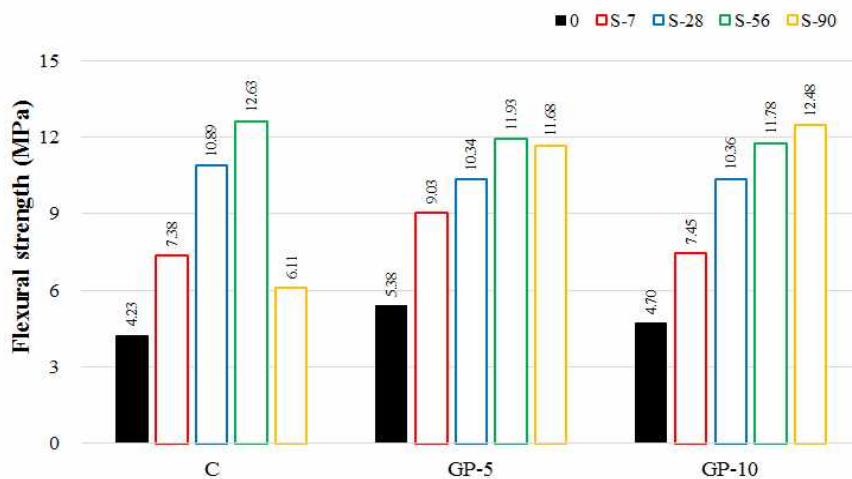
(c) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 휨강도 변화
 <그림 4-31> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 휨강도 변화



(a) 해수 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 휨강도 변화



(b) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 휨강도 변화

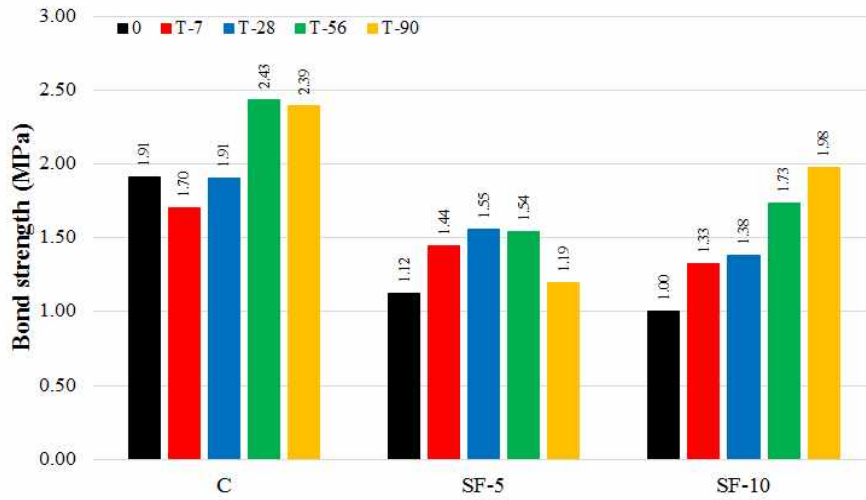


(c) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 휨강도 변화

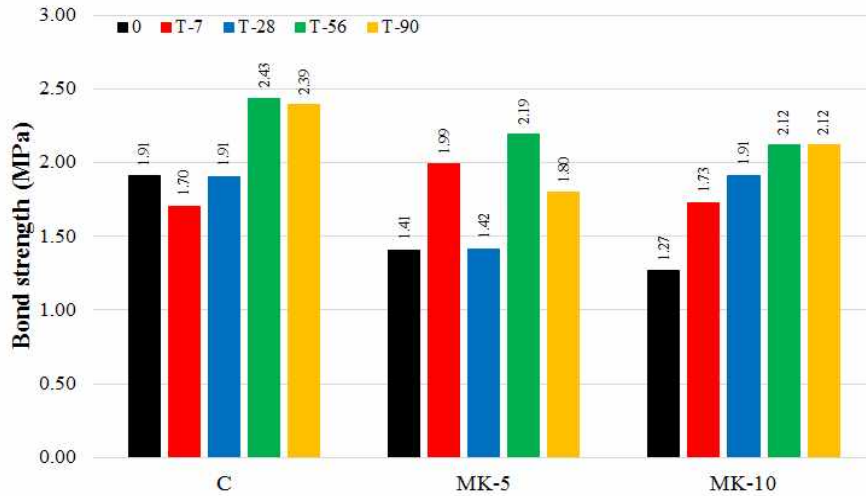
〈그림 4-32〉 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 휨강도 변화

다. 혼화재료의 함유량이 표면보호재료의 부착강도에 미치는 영향

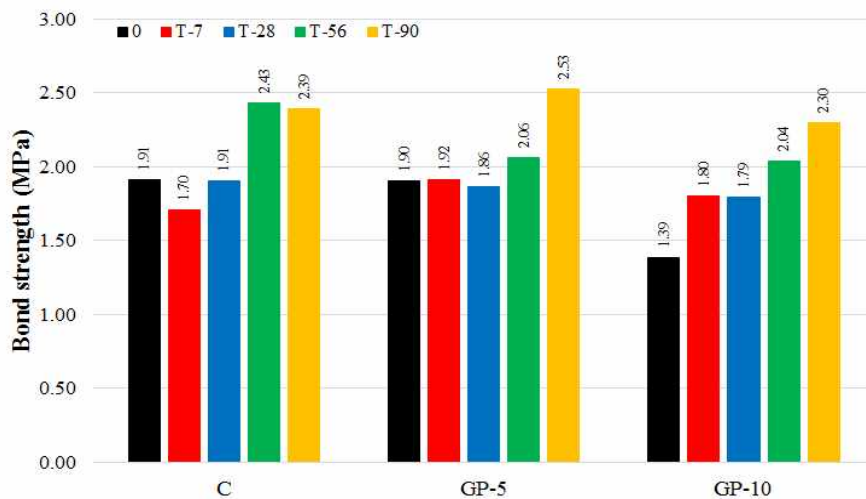
- 시험결과, 일반적으로, 혼화재료의 함유량 증가가 부착강도에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았음
- 수돗물 양생한 SF 시험체의 경우, 양생 초기(7일, 28일)에는 SF 함유량 증가에 따른 부착강도의 변화가 보이지 않았으나 이후의 양생기간(56일, 90일)에서는 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 상승하는 경향을 보임
- 해수 양생한 SF 시험체의 경우, 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 감소하는 경향을 보임 (-7.4%)
- 수돗물 양생한 MK 시험체의 경우, 양생 7일에는 MK 함유량 증가에 따른 부착강도의 변화가 보이지 않았으나 이후의 양생기간(28일, 56일, 90일)에서는 MK 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 상승하는 경향을 보임
- 해수 양생한 MK 시험체의 경우, MK 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 감소하였음 (-15.8%)
- 수돗물 양생한 GP 시험체의 경우, 양생기간에 관계없이 MK 함유량이 증가함에 따라 (모든 기간에서) 부착강도가 감소하였음
- 상기 결과와 상이하게 해수 양생한 GP 시험체의 경우, 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 증가하였음 (+14.95%)



(a) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 부착강도 변화

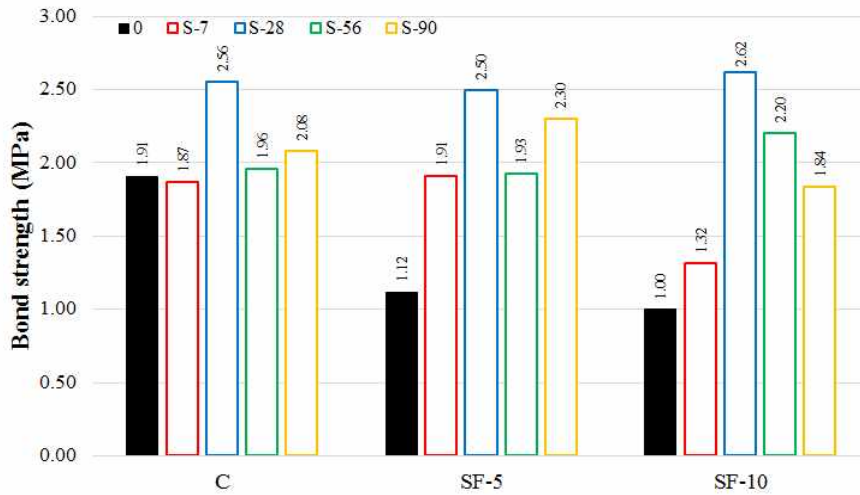


(b) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 부착강도 변화

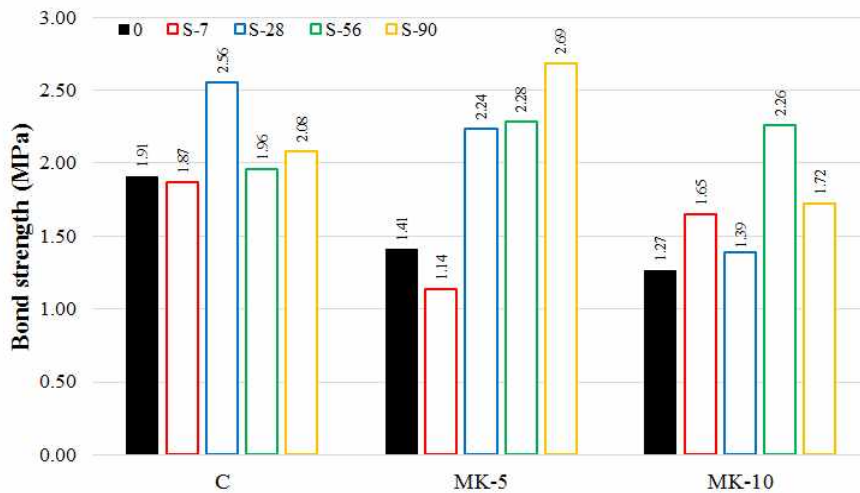


(c) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 부착강도 변화

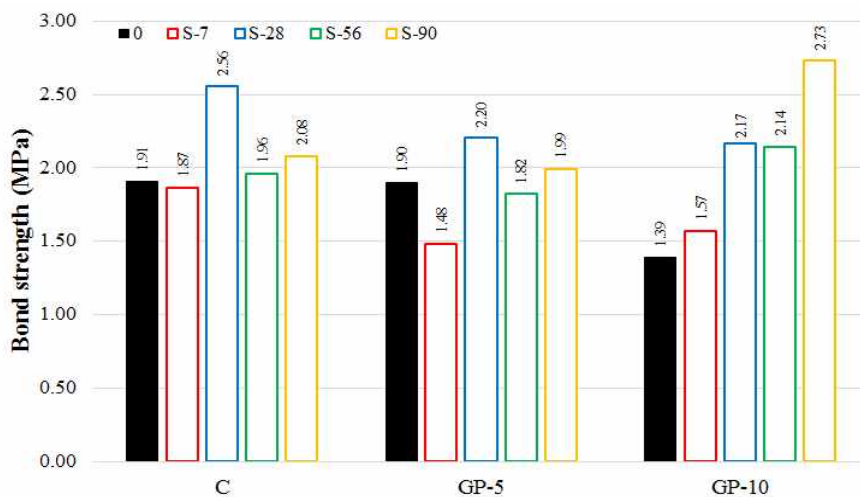
〈그림 4-33〉 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 부착강도 변화



(a) 해수 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 부착강도 변화



(b) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 부착강도 변화

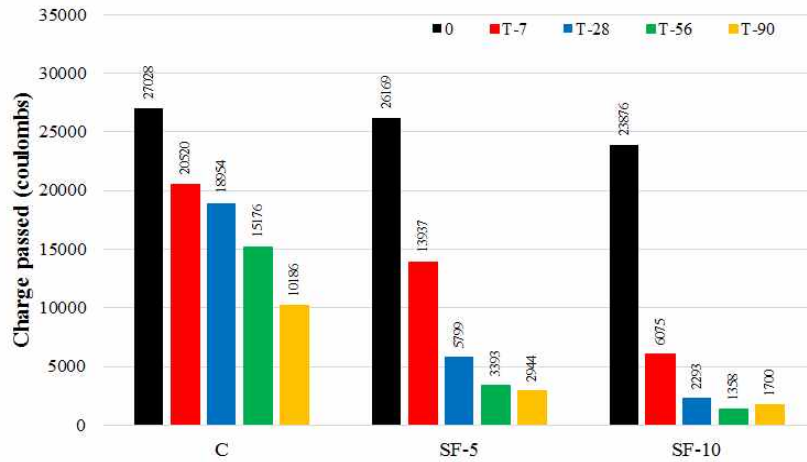


(c) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 부착강도 변화
 <그림 4-34> 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 부착강도 변화

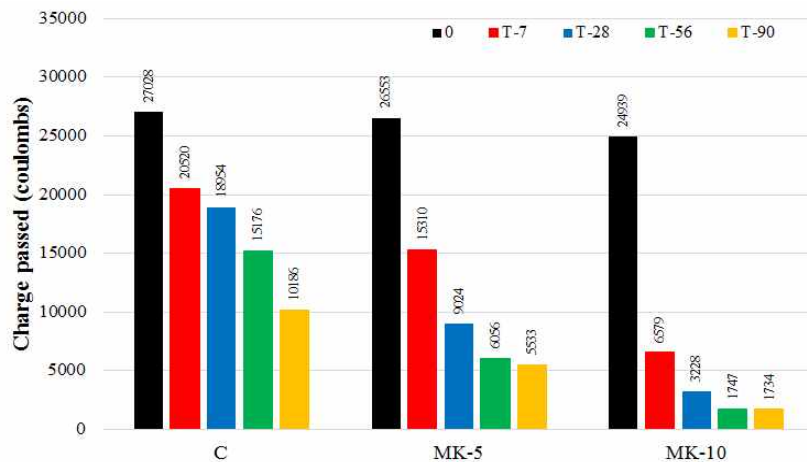
4.4.2. 혼화재료 함유량에 따른 표면보호재료의 내구성 평가

가. 혼화재료의 함유량이 표면보호재료의 염화물 침투저항성에 미치는 영향

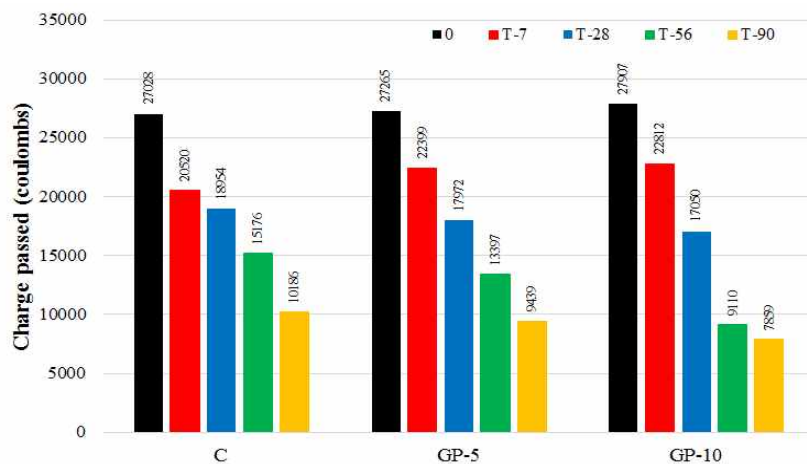
- 시험결과 일반적으로 혼화재료의 함유량이 증가함에 따라 통과전하량이 감소하는 경향을 보여줌
- 혼화재료의 함유량이 통과전하량에 미치는 영향은 해수 양생에서 더 뚜렷하게 나타났음 (더 많이 감소하였음)
- 수돗물 양생한 SF 시험체의 경우, SF 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량이 평균 59.6% 감소하였으며, SF 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 82.3% 감소함
- 해수 양생한 SF 시험체의 경우, SF 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량이 평균 64.3% 감소하였으며, SF 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 85.7% 감소함
- 수돗물 양생한 MK 시험체의 경우 MK 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 44.3% 감소하였으며, MK 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 79.4% 감소함
- 해수 양생한 MK 시험체의 경우 MK 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 49.7% 감소하였으며, MK 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 82.2% 감소함
- 수돗물 양생한 GP 시험체의 경우 GP 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 1.97% 감소하였으며, GP 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 11.90% 감소함
- 해수 양생한 GP 시험체의 경우 GP 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 4.90% 감소하였으며, GP 함유량이 10%로 증가함에 따라 통과전하량은 평균 23.89% 감소함



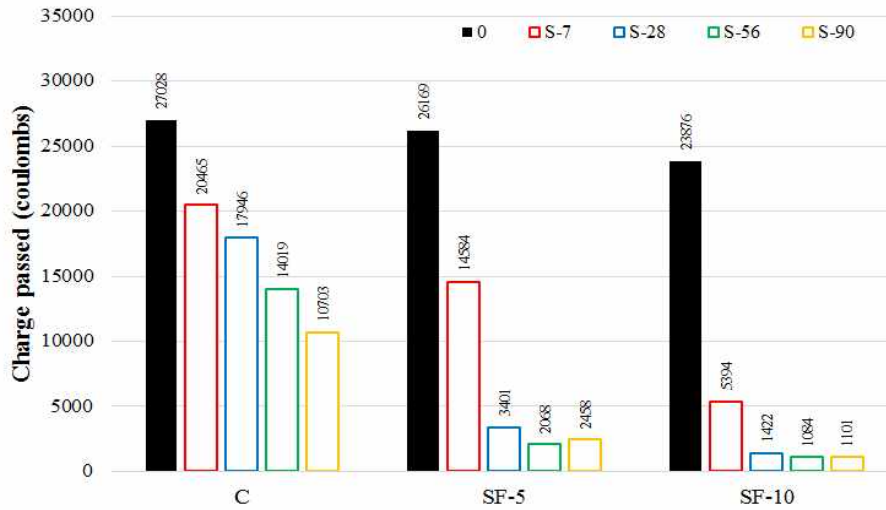
(a) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 통과전하량 변화



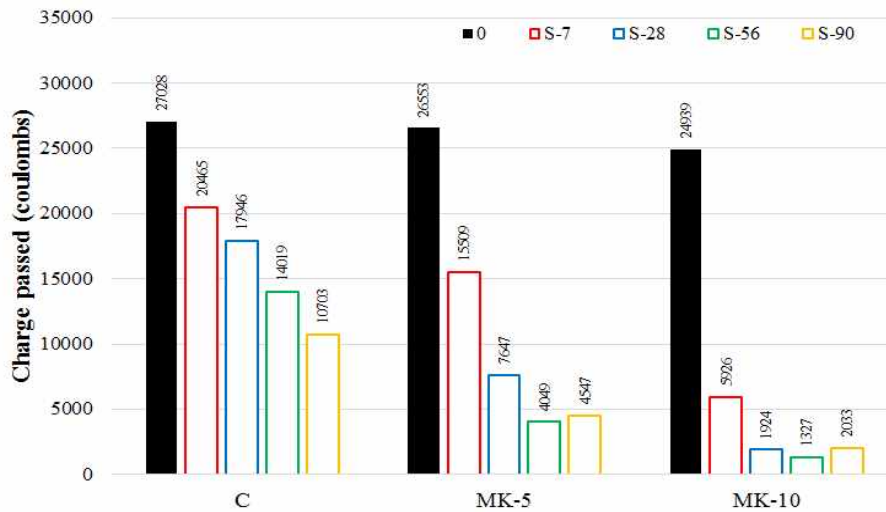
(b) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 통과전하량 변화



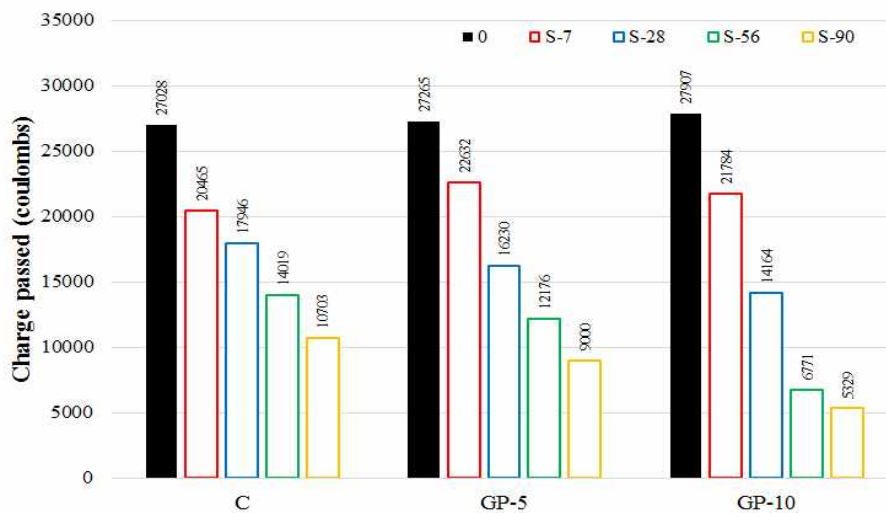
(c) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 통과전하량 변화
 <그림 4-35> 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 통과전하량 변화



(a) 해수 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 통과전하량 변화



(b) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 통과전하량 변화

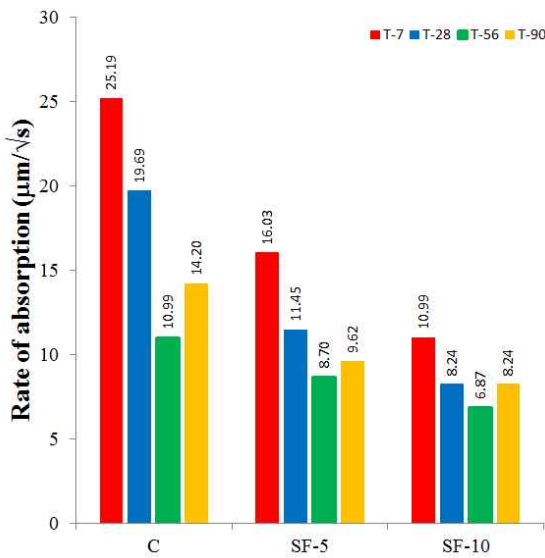


(c) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 통과전하량 변화

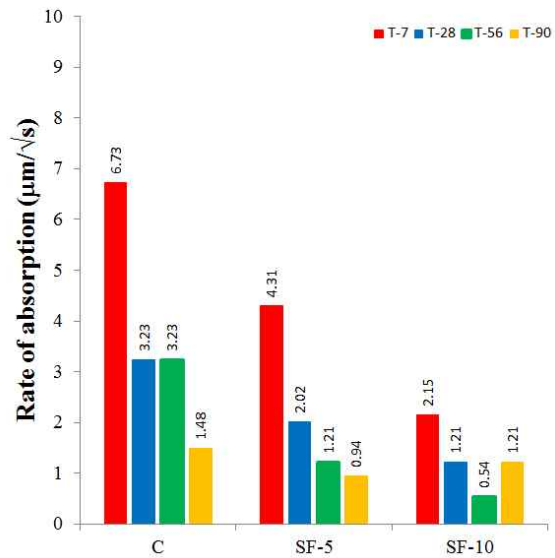
〈그림 4-36〉 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 통과전하량 변화

나. 혼화재료의 함유량이 표면보호재료의 투수저항성에 미치는 영향

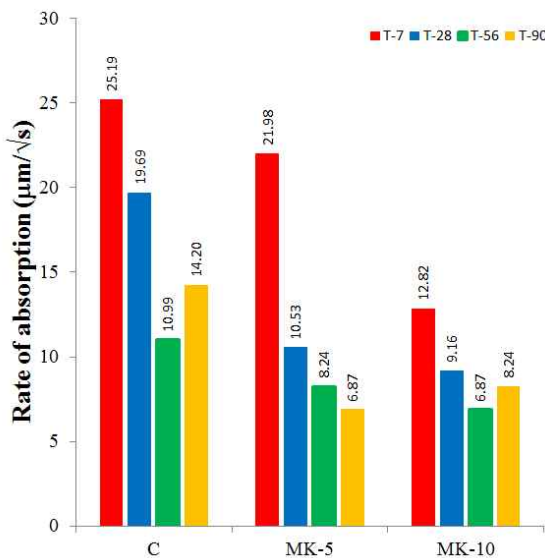
- 수돗물 양생 SF 시험체의 경우, SF 함유량이 증가함에 따라 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도 모두 감소하였음
- 해수 양생 SF 시험체의 경우에도, (7일 양생 시험결과를 제외하면) SF 함유량이 증가함에 따라 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도 모두 감소하는 경향을 보임



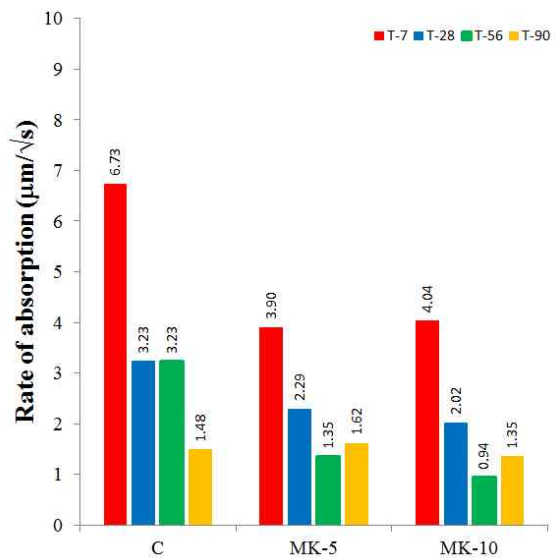
(a) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도



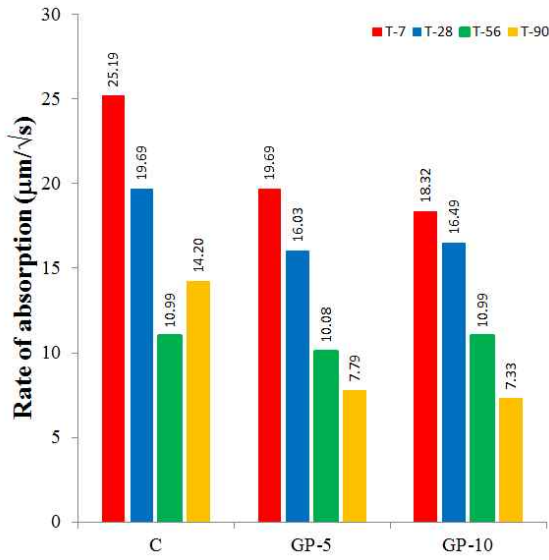
(b) 수돗물 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도



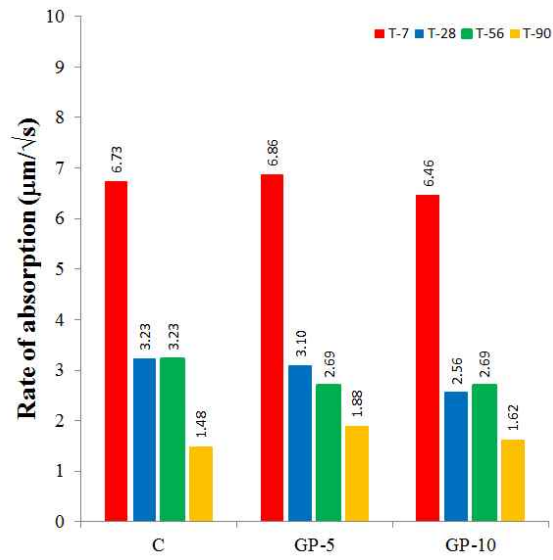
(c) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도



(d) 수돗물 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도



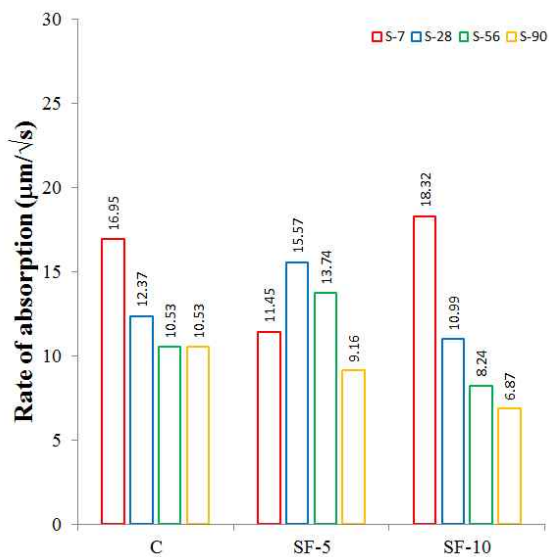
(e) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도



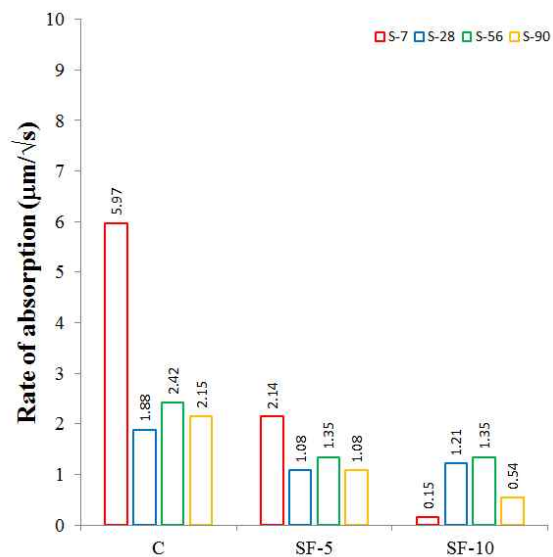
(f) 수돗물 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도

〈그림 4-37〉 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 물 흡수 속도

- 수돗물 양생 MK 시험체의 경우, MK 함유량이 증가함에 따라 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도가 대체적으로 감소하였음
- 해수 양생 MK 시험체의 경우에도, MK 함유량이 증가함에 따라 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도 모두 감소하는 경향을 보임

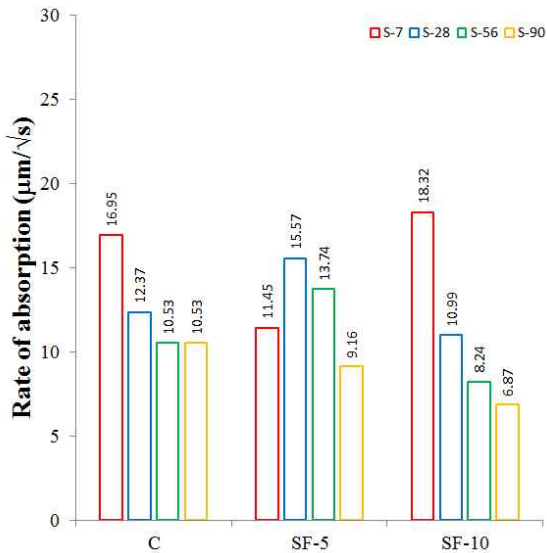


(a) 해수 양생에서 Silica Fume 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도

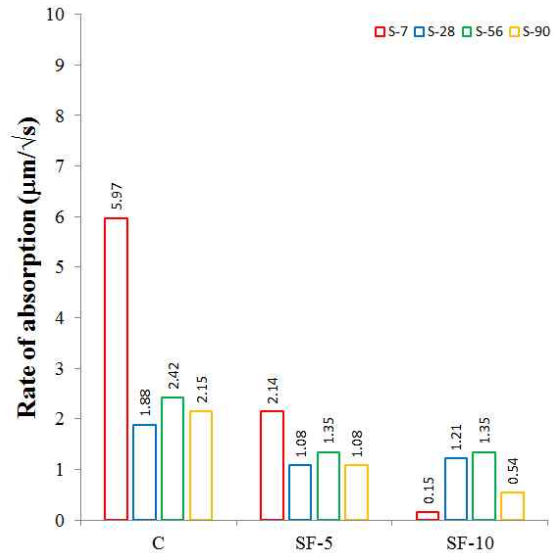


(b) 해수 양생에서의 Silica Fume 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도

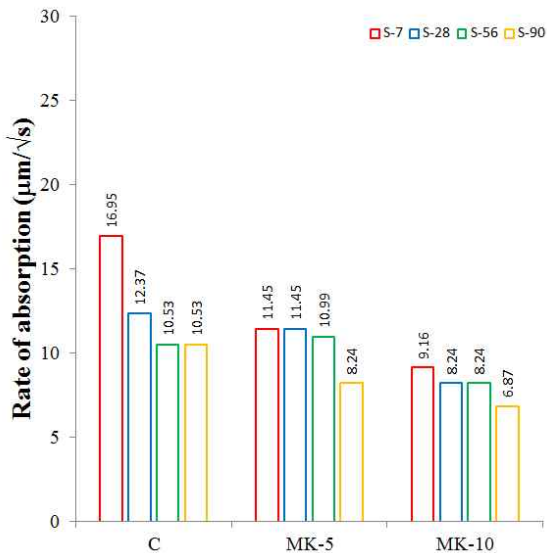
- 수돗물 양생한 GP 시험체의 경우, GP 함유량이 증가함에 따라 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도가 대체적으로 감소하였음
- 해수 양생한 GP 시험체의 경우, SF 함유량의 증가가 초기 물 흡수 속도와 2차 물 흡수 속도에 미치는 영향이 보이지 않았음



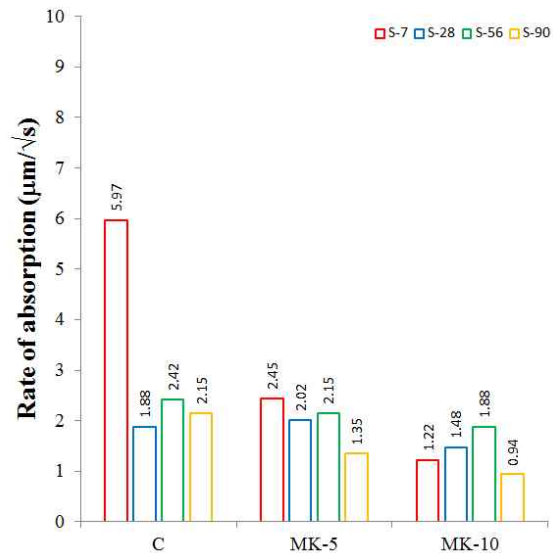
(c) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도



(d) 해수 양생에서의 Metakaolin 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도



(e) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 초기 물 흡수 속도



(f) 해수 양생에서의 Glass Powder 함유량에 따른 2차 물 흡수 속도

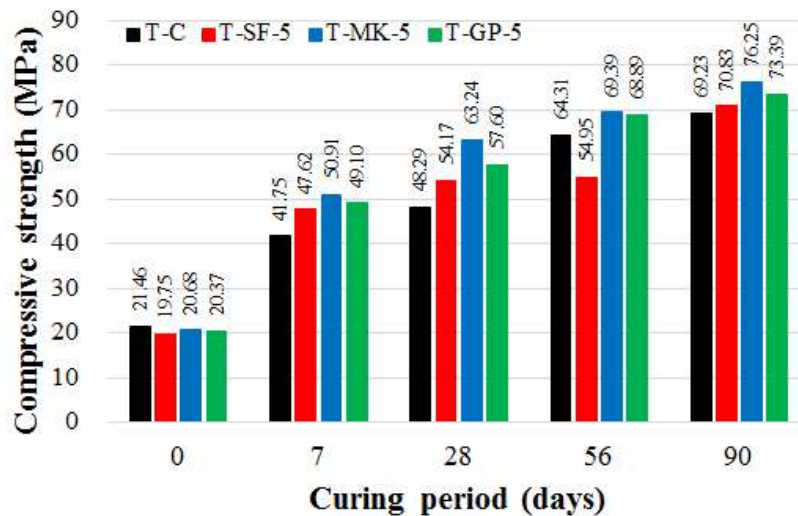
〈그림 4-38〉 해수 양생에서 혼화재료 함유량에 따른 물 흡수 속도

4.5. 양생기간에 따른 표면보호재료 성능평가

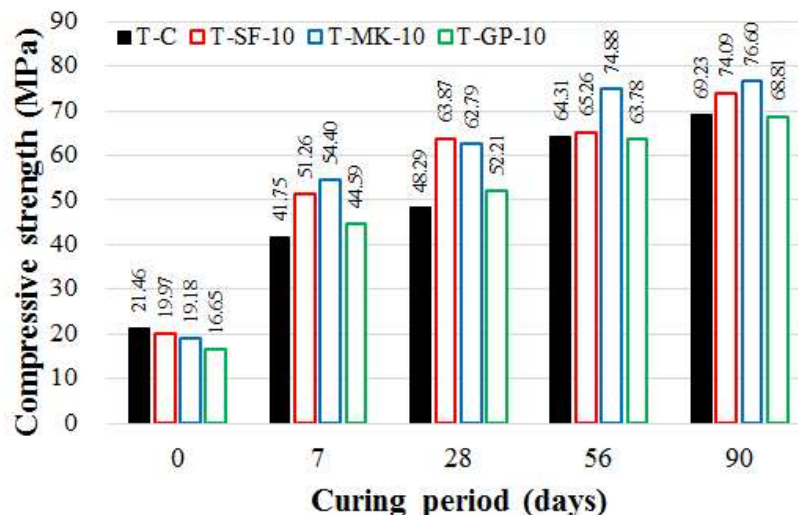
4.5.1. 양생기간에 따른 표면보호재료의 강도 평가

가. 양생기간이 표면보호재료의 압축강도에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 양생기간이 늘어남에 따라 표면보호재료의 압축강도가 증가하는 경향을 보임
- 수돗물 양생의 경우, T-MK-10-90 시험체가 가장 높은 압축강도인 76.60 MPa로 양생일 0일 대비 약 3.99배 증가하였으며, T-GP-10-90 시험체의 경우 0일 대비 90일 압축강도가 약 4.13배 증가하여 가장 높은 증가율을 보였음

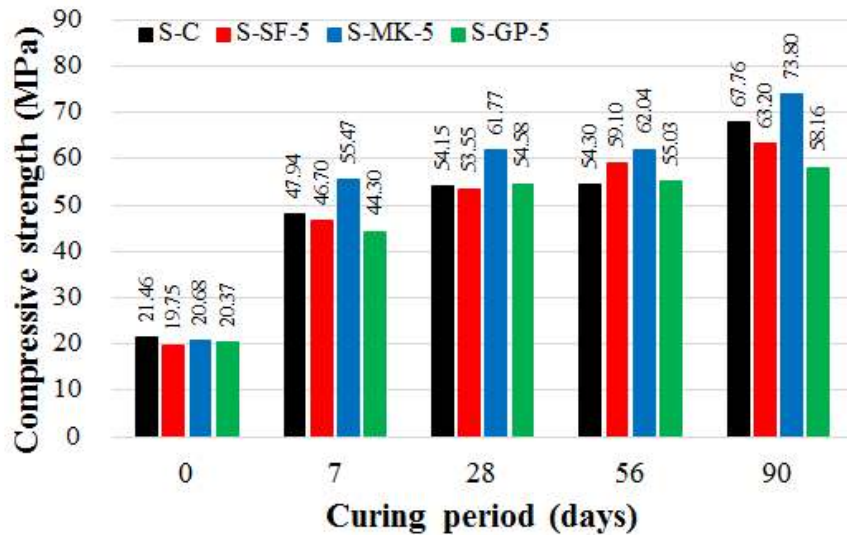


(a) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 압축강도

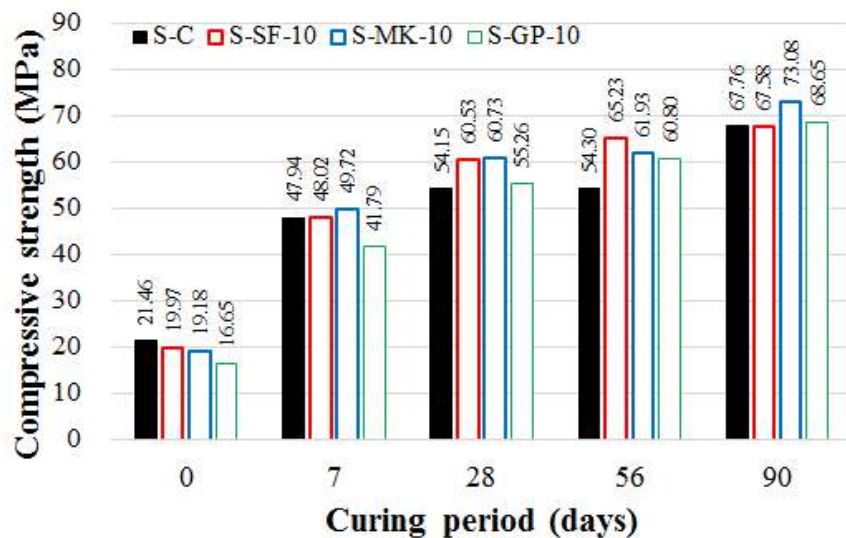


(b) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 압축강도
 〈그림 4-39〉 수돗물 양생기간에 따른 압축강도 변화

- 해수 양생의 경우, S-MK-5-90 시험체가 가장 높은 압축강도인 73.80 MPa로 양생일 0일 대비 약 3.6배 증가하였으며, S-GP-10-90 시험체의 경우 0일 대비 압축강도가 4.12배 증가하여 가장 높은 증가율을 보였음



(a) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 압축강도

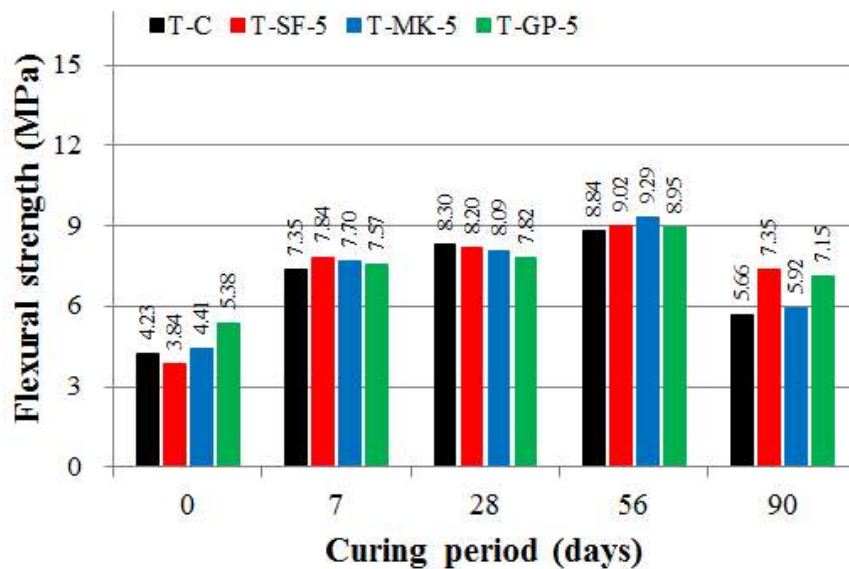


(b) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 압축강도

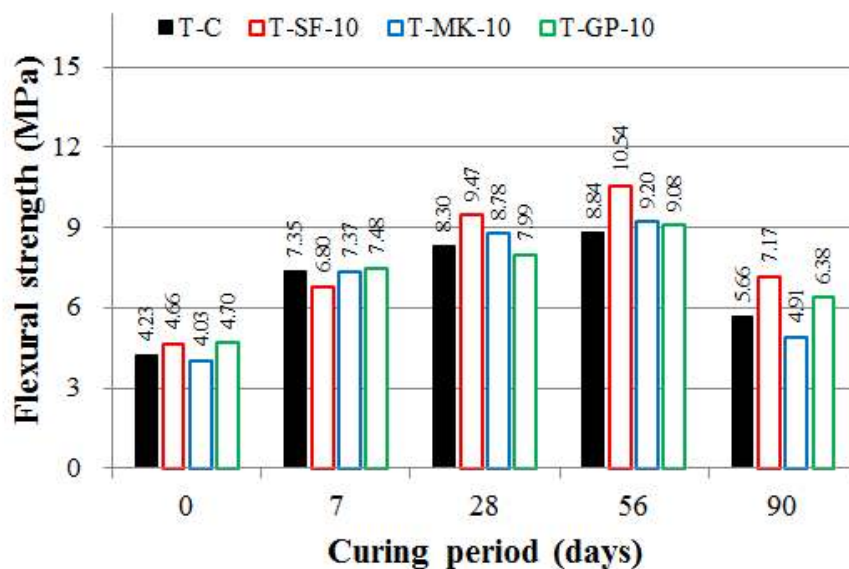
〈그림 4-40〉 해수 양생기간에 따른 압축강도 변화

나. 양생기간이 표면보호재료의 휨강도에 미치는 영향

- 시험결과 일반적으로 양생기간(0일에서 56일까지)이 늘어남에 따라 표면보호재료의 휨강도가 증가하는 경향을 보임
- 수돗물 양생의 경우, T-SF-10-56 시험체가 가장 높은 강도인 10.54 MPa로 양생일 0일 대비 약 2.26배 증가하였으며, T-SF-5-56 시험체의 경우 0일 대비 56일 강도가 약 2.35배 증가하여 가장 높은 증가율을 보였음

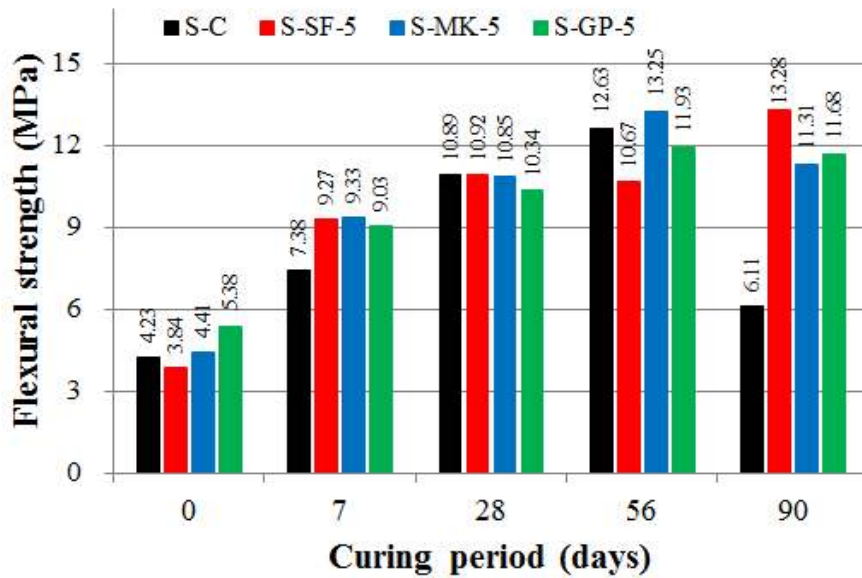


(a) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 휨강도

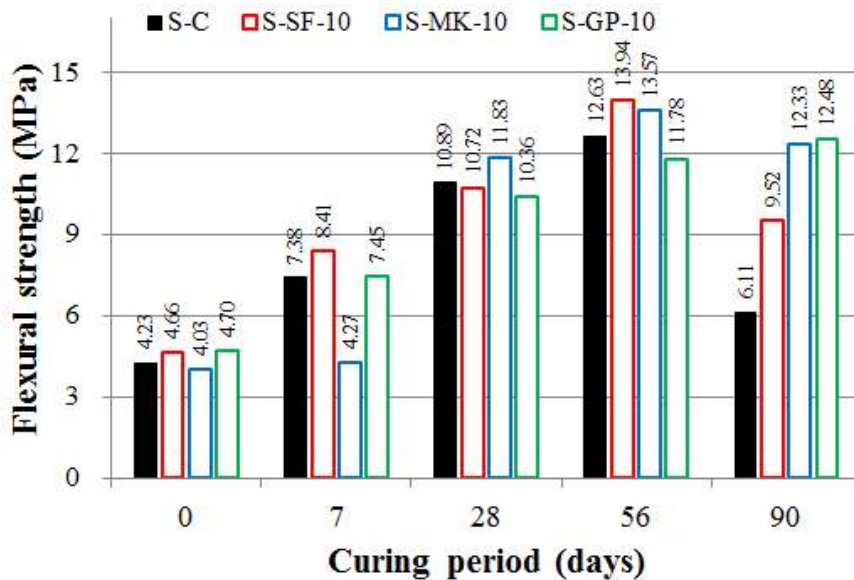


(b) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 휨강도
 <그림 4-41> 수돗물 양생기간에 따른 휨강도 변화

- 해수 양생의 경우, S-SF-10-56 시험체가 가장 높은 휨 강도인 13.94 MPa로 이는 양생일 0일 대비 약 2.99배 증가한 수치임



(a) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 휨강도

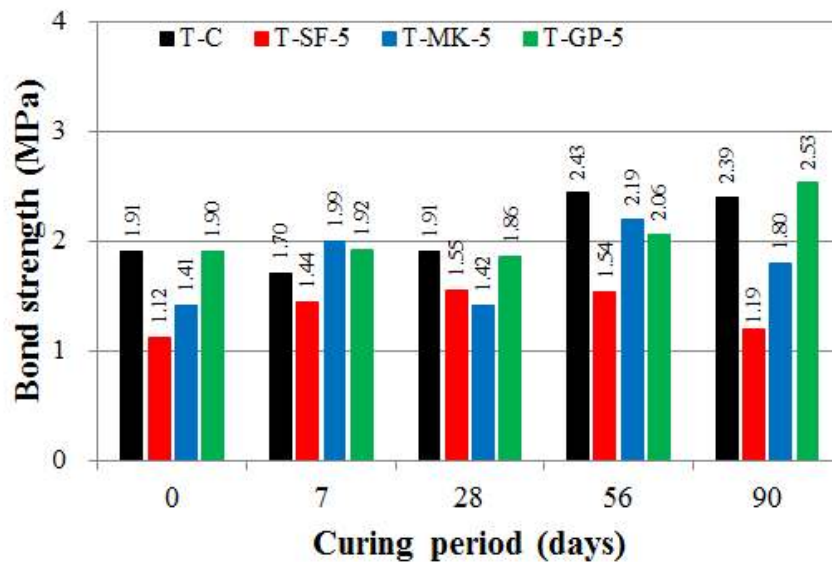


(b) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 휨강도

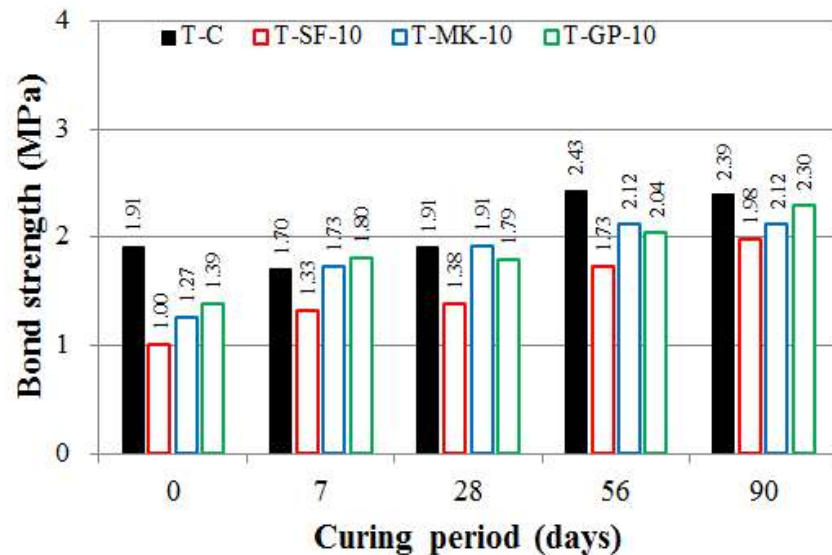
〈그림 4-42〉 해수 양생기간에 따른 휨강도 변화

다. 양생기간이 표면보호재료의 부착강도에 미치는 영향

- 시험결과 양생기간이 늘어남에 따라 표면보호재료의 부착강도가 증가하는 경향을 보였으며 이러한 경향은 각 혼화재료의 함유량이 증가함에 따라 보다 뚜렷해졌음
- 수돗물 양생의 경우, T-GP-5-90 시험체가 가장 높은 부착강도인 2.53 MPa를 기록하였으며 (앞에서도 언급한 바와 같이) GP 시험체는 표면보호재료 시험체들 중 가장 높은 부착강도를 보임
- 이러한 결과는 모르타르 Flow 측정결과와 연관이 있는 것으로 판단되며 이후 관련문헌을 수집하여 비교분석을 수행할 예정임

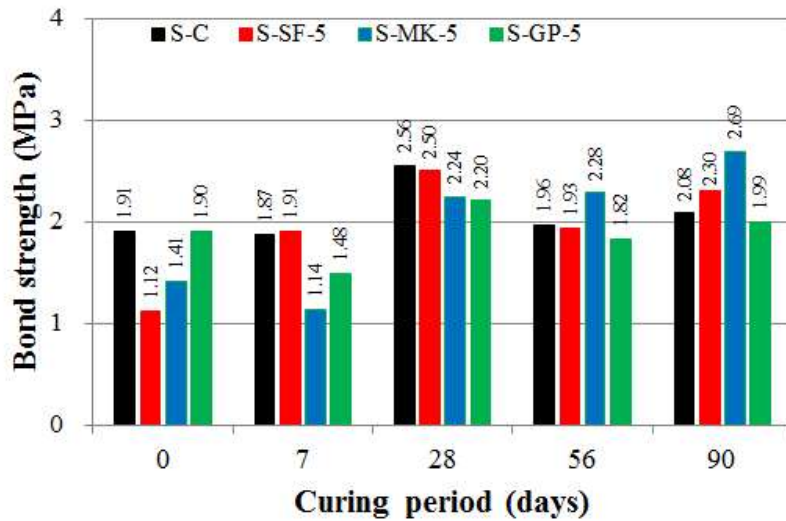


(a) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 부착강도

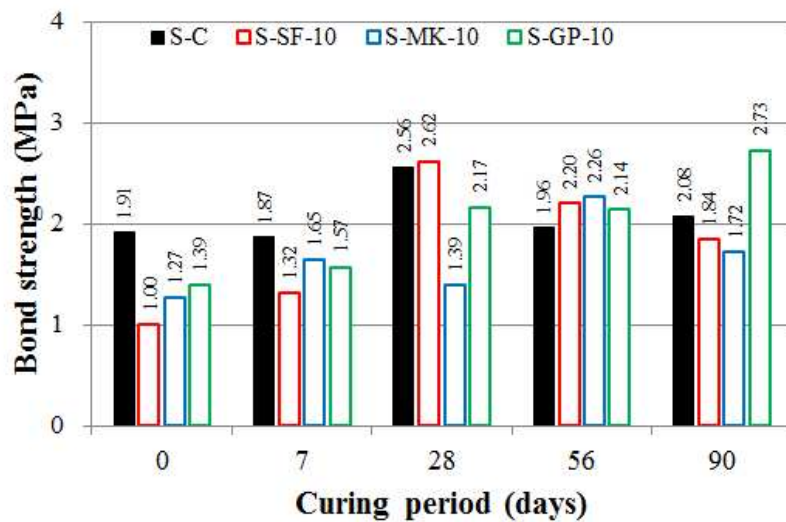


(b) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 부착강도
 <그림 4-43> 수돗물 양생기간에 따른 부착강도 변화

- 해수 양생의 경우, S-GP-10-90 시험체가 가장 높은 부착강도인 2.73 MPa를 기록하였으나 수돗물 양생 시험결과와 비교하여 그 경향이 뚜렷하지 않았음
- 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 경우, 양생기간이 증가함에 따라 MK 시험체의 부착강도가 점차적으로 증가한 반면 SF 시험체와 GP 시험체는 뚜렷한 경향을 보이지 않았음
- 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 경우, 양생기간이 증가함에 따라 GP 시험체의 부착강도가 점차적으로 증가한 반면 SF 시험체와 MK 시험체는 뚜렷한 경향을 보이지 않았음
- 상기의 상반되는 결과에 대하여 파괴양상(failure modes)과 관련지어 추가적인 비교분석을 수행할 예정임



(a) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 부착강도

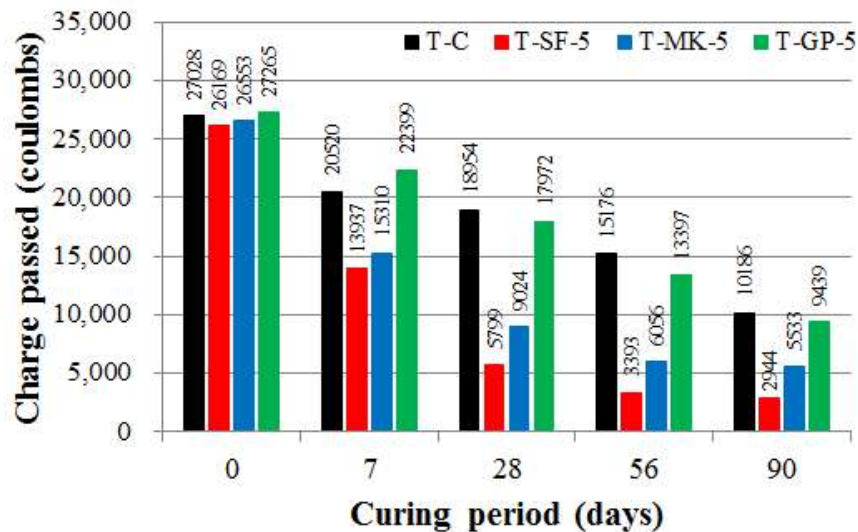


(b) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 부착강도
 <그림 4-44> 해수 양생기간에 따른 부착강도 변화

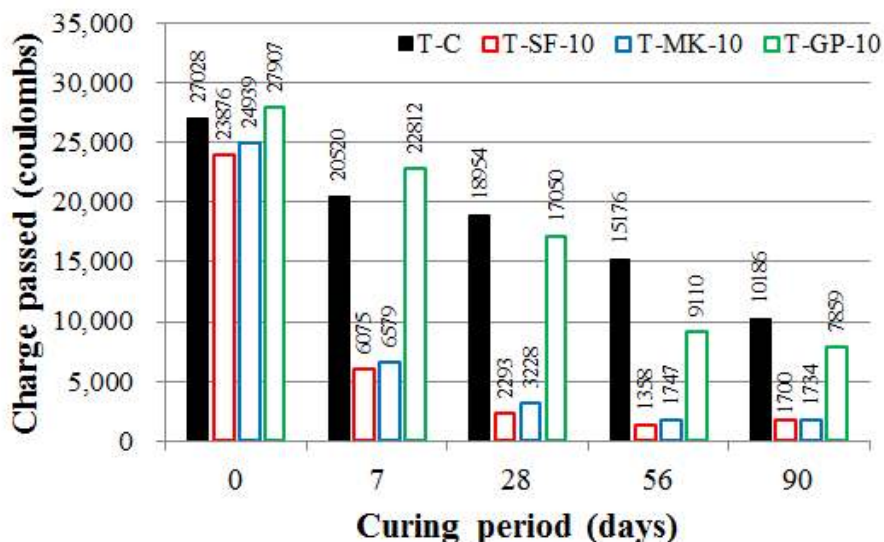
4.5.2. 양생기간에 따른 표면보호재료의 내구성 평가

가. 양생기간이 표면보호재료의 염화물 침투저항성에 미치는 영향

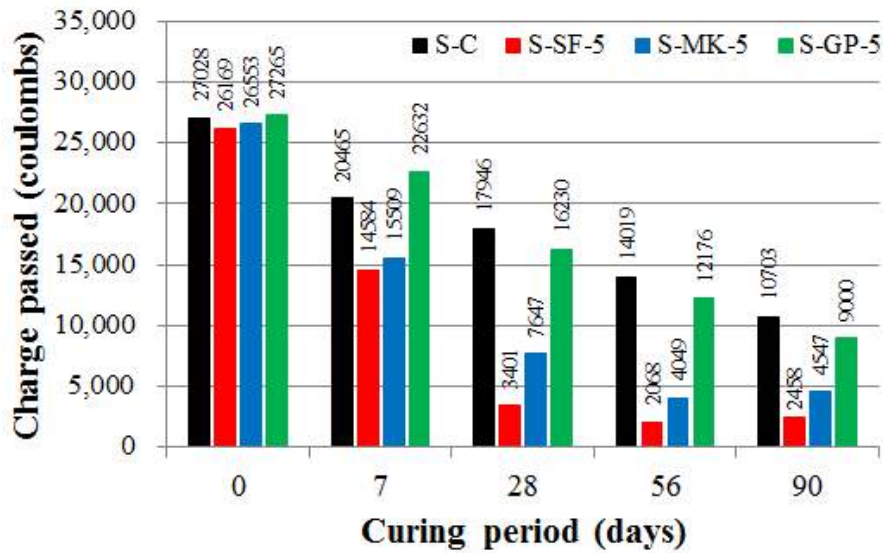
- 시험결과 양생기간이 늘어남에 따라 통과전하량이 감소하는 경향을 보였으며 이러한 경향은 각 혼화재료의 함유량이 증가함에 따라 보다 뚜렷해졌음
- 수돗물 양생의 경우, SF 시험체가 가장 빠르고 높은 통과전하량 감소를 보임



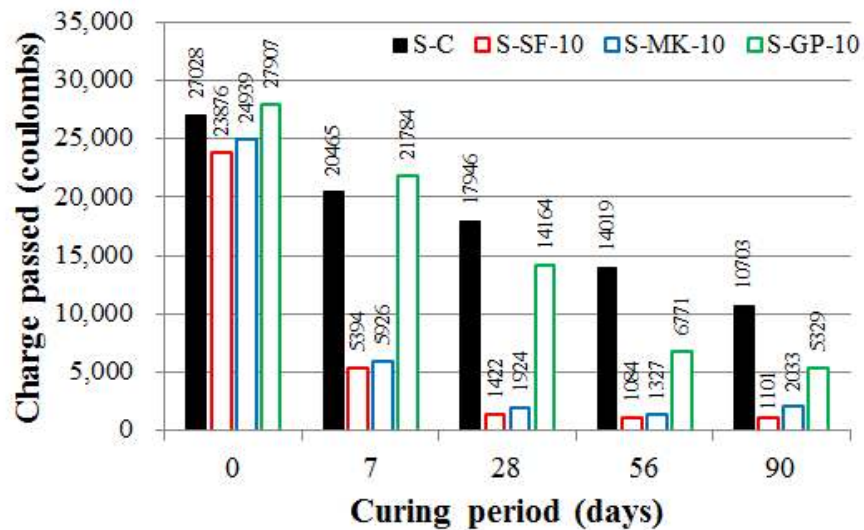
(a) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 통과전하량

(b) 수돗물 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 통과전하량
<그림 4-45> 수돗물 양생기간에 따른 통과전하량 변화

- 해수 양생의 경우에도 동일하게 SF 시험체가 가장 빠르고 높은 통과전하량 감소를 보임



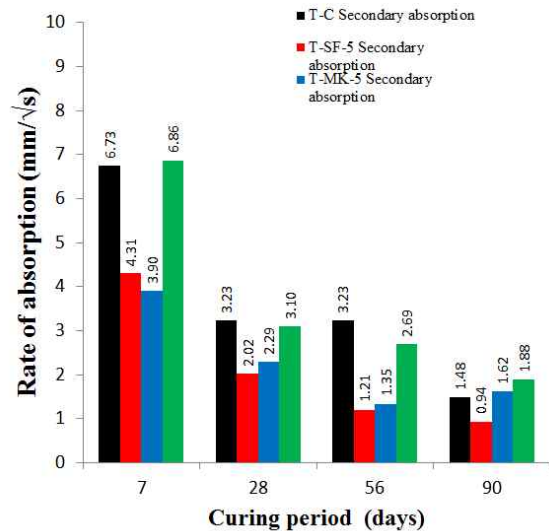
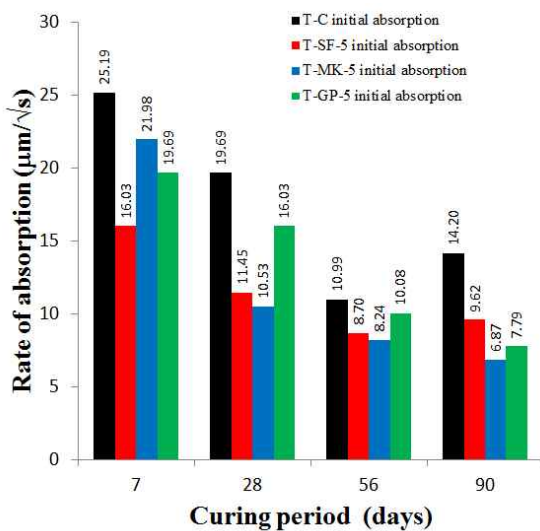
(a) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 따른 통과전하량



(b) 해수 양생에서 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 따른 통과전하량
 <그림 4-46> 해수 양생기간에 따른 통과전하량 변화

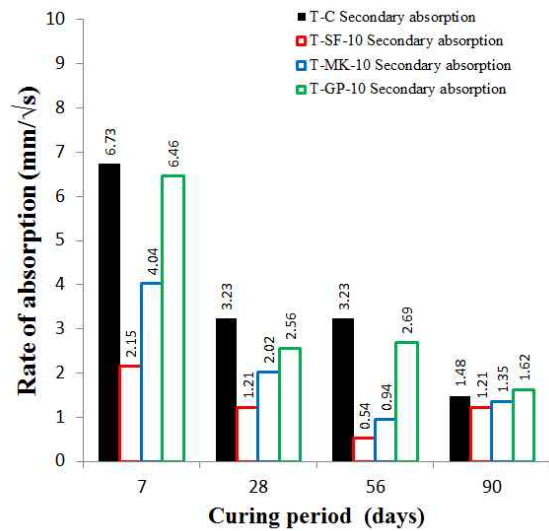
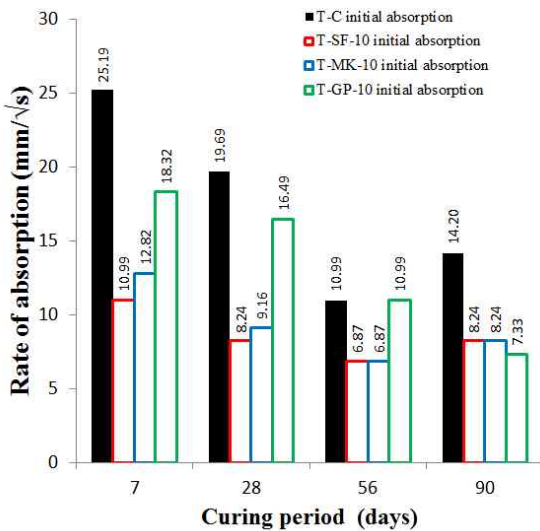
나. 양생기간이 표면보호재료의 투수저항성에 미치는 영향

- 시험결과 양생기간이 늘어남에 따라 대체적으로 물 흡수율이 감소하였음
- 수돗물 양생의 경우, 초기 물 흡수 속도에 비해 2차 물 흡수 속도에서 감소 경향이 뚜렷하게 나타났음
- 수돗물 양생의 경우, 대체적으로, SF 시험체가 가장 낮은 물 흡수속도(특히 2차 물 흡수속도)를 보임



(a) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 1차 물 흡수 속도

(b) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 2차 물 흡수 속도

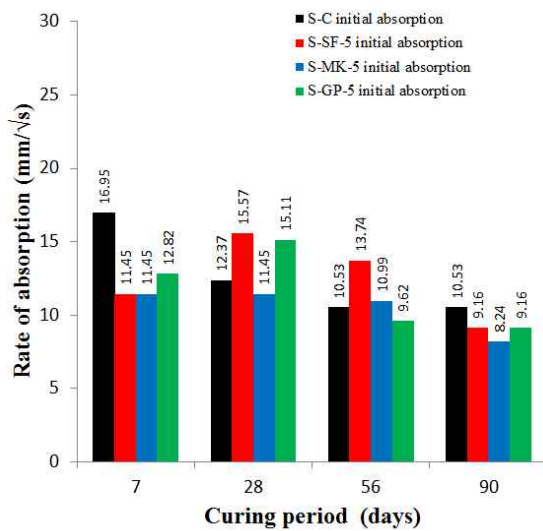


(c) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 1차 물 흡수 속도

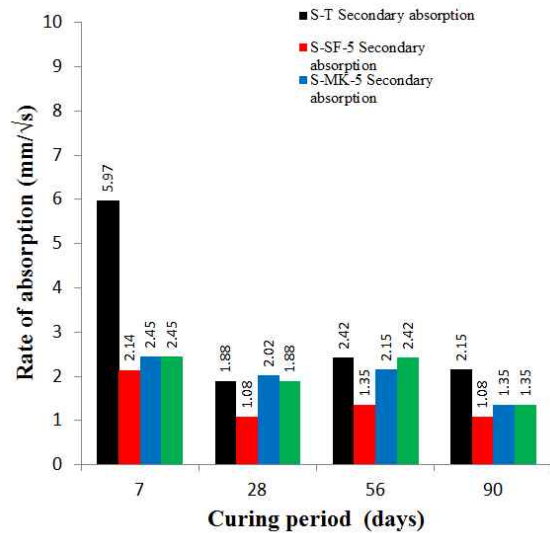
(d) 수돗물 양생 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 2차 물 흡수 속도

〈그림 4-47〉 수돗물 양생기간에 따른 물 흡수 속도 변화

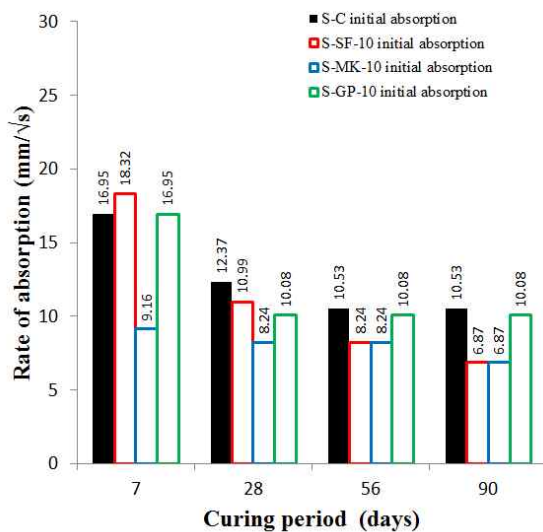
- 해수 양생의 경우에도 동일하게, 초기 물 흡수 속도에 비해 2차 물 흡수 속도에서 감소 경향이 뚜렷하게 나타났음
- 해수 양생의 경우에도 동일하게, 대체적으로, SF 시험체가 가장 낮은 물 흡수속도를 보임



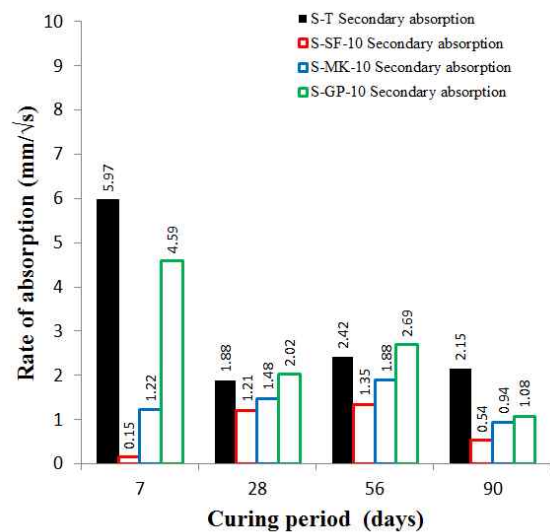
(a) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 1차 물 흡수 속도



(b) 해수 양생 혼화재료 함유량 5%의 양생기간에 2차 물 흡수 속도



(c) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 1차 물 흡수 속도

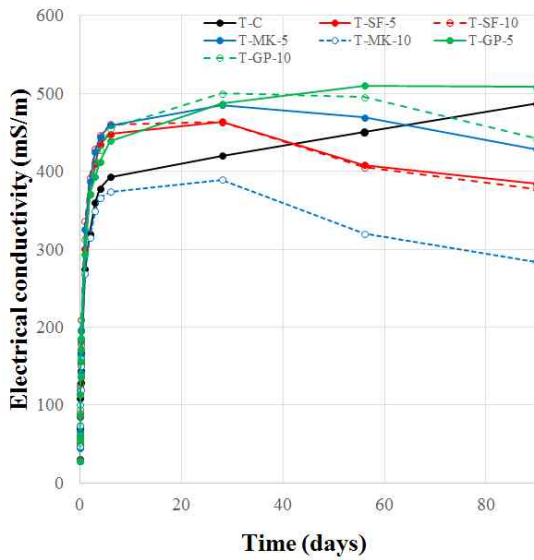


(d) 해수 양생 혼화재료 함유량 10%의 양생기간에 2차 물 흡수 속도

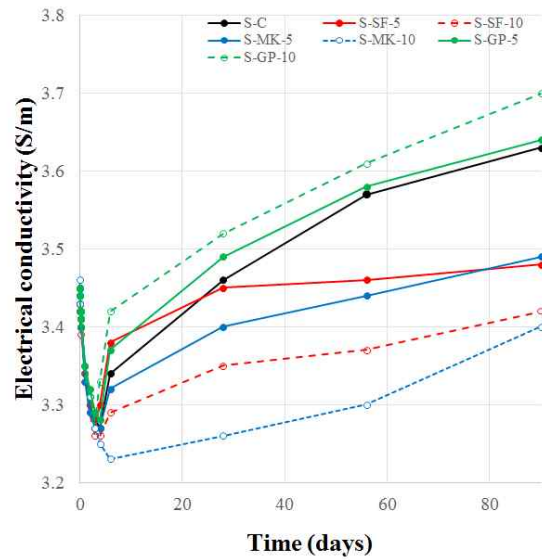
〈그림 4-48〉 해수 양생기간에 따른 물 흡수 속도 변화

4.6. 고성능 표면보호재료의 환경영향성 평가

- 환경영향성의 경우 용존 고형물량을 측정하여 모르타르에서 나오는 고형물과 흡수되는 고형물에 따른 전기전도도 변화량을 확인하고자 본 시험을 진행함



(a) 수돗물 양생



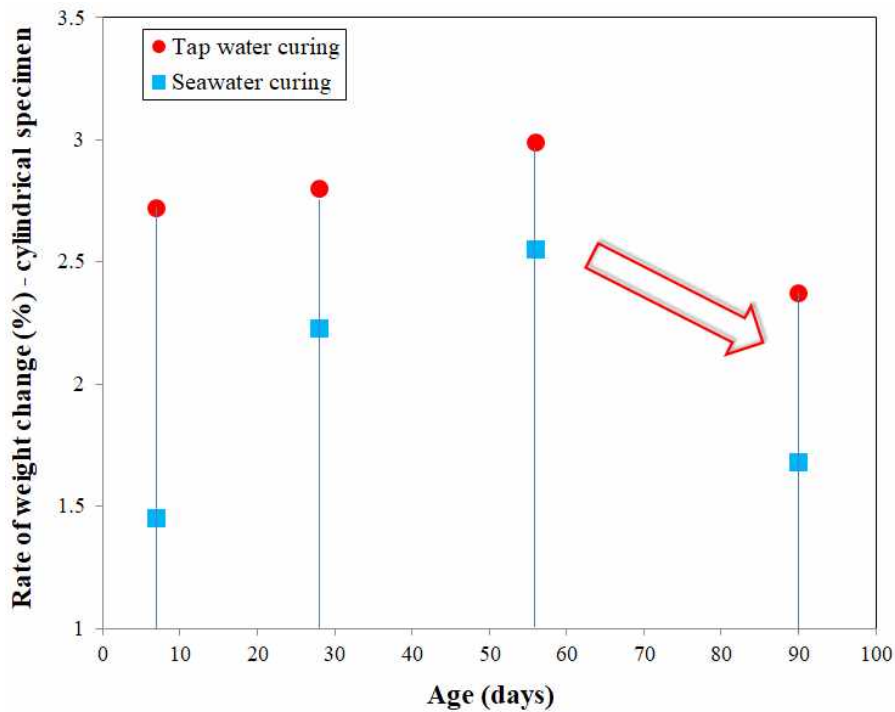
(a) 해수 양생

〈그림 4-49〉 양생시간에 따른 전기전도도 변화

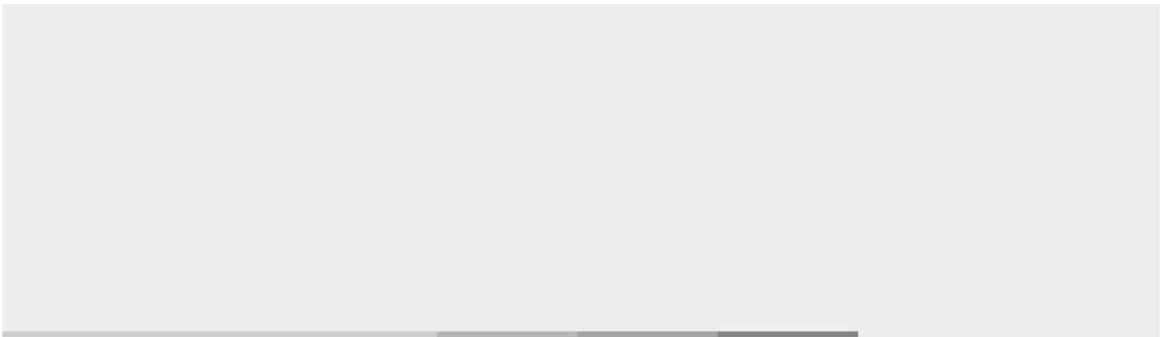
4.7. 결론 및 제언

- 본 4장에서는 부유식 콘크리트 구조체의 표면보호를 위한 시멘트 모르타르 계열 보수 재료 개발을 목표로 실험적 연구를 수행하였음
- 실험변수는 시멘트 모르타르의 양생환경(실내, 실해역 - 경남 통영시), 혼화재료의 종류(Silica fume, Metakaolin, and Glass powder), 혼화재료의 함유량(5%, 10%), 그리고 양생기간(7, 28, 56, 90 days)임
- 측정항목은 시험체의 압축강도, 휨강도, 부착강도, 염화물 침투저항성, 투수저항성, 모르타르 시험체의 무게(양생 전후), 수질(수돗물과 해수의 TDS 측정), Electrical conductivity 이며 각 실험변수가 측정결과에 미치는 영향에 대하여 사실관계를 분석하였음
- 양생환경이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 해수 양생이 수돗물 양생에 비해 긍정적인 효과를 보였으며 이러한 경향은 휨강도, 부착강도에서 뚜렷하게 나타났음
- 압축강도의 경우, 수돗물 양생한 시험체의 측정치가 소폭 상승하였고 그 결과가 휨강도, 부착강도의 측정 결과와 상이하여 원인에 대해서 분석을 수행할 예정임
- 양생환경이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 바닷물 양생한 시험체의 염화물 침투저항성과 투수저항성이 수돗물 양생한 시험체보다 높은 결과를 보여줌
- 혼화재료의 종류가 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 그 경향이 뚜렷하지 않았음
- 구체적으로, 압축강도의 경우, MK 시험체의 측정치가 가장 높았으며 휨강도는 SF 시험체가 그리고 부착강도는 Control 시험체가 가장 높은 값을 보여주었음
- 혼화재료의 종류가 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, SF 시험체가 기타 시험체보다 개선된 성능(improved performance)을 보여줌
- 혼화재료의 함유량이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 함유량이 증가할수록 압축 및 휨강도가 개선되는 효과를 보여주었으나 부착강도에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않음
- 혼화재료의 함유량이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 함유량이 증가할수록 염화물 침투저항성과 투수저항성이 상승하는 결과를 얻었음
- 양생기간이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 양생기간이 증가할수록 시멘트 모르타르의 압축, 휨, 부착강도가 모두 증가하였음

- 양생기간이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 양생기간이 늘어남에 따라 염화침투저항성과 투수저항성이 모두 증가하였으며 SF 시험체가 MK 시험체, GP 시험체보다 나은 내구성능을 보여주었음.
- 본 4장은 각 실험요인이 각 측정결과에 미치는 영향에 대한 사실관계만을 분석하여 작성하였으며 이후, 1. 실험결과의 정확한 통계적 분석(ANOVA), 2. 기존문헌과의 경향 및 결과 비교분석, 3. 원인 설명과 합당한 결론 도출을 위한 연구를 수행하여 SCI급 논문을 작성할 계획임
- 또한, 각 시험체의 내구성능과 양생시작 전후의 무게측정 결과를 상세하게 비교분석하여 아래 그림과 같은 현상이 발생하는 원인에 대하여 규명할 계획임



- 마지막으로, 본 연구결과를 실제 해양 콘크리트 구조물에 적용하기 위하여 가격 경쟁력 비교를 포함하여 추가적인 시험(장기양생)을 수행할 예정임



⋮

제5장 고성능 표면보호재료의 미세구조 분석



5. 고성능 표면보호재료의 미세구조 분석

5.1. 고성능 표면보호재료의 미세구조 분석방안

5.1.1. 실험개요

- 본 연구에서 개발한 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성능에 각 실험요인이 미치는 영향에 대한 원인을 보다 정확히 규명하기 위한 미세구조분석을 진행함
- 시멘트 모르타르의 미세구조분석을 위해 가장 흔하게 사용되는 X-Ray Diffraction (XRD)와 Thermogravimetric Analysis (TGA) 분석을 진행함
- XRD 분석은 수화되지 않은 시멘트 수화물의 양을 확인하기 위해서 사용할 수 있고, 수화물 상의 형태에 관한 정보를 확인할 수 있음
- TGA는 시멘트 재료 분야에서 널리 사용되는 기술로 시멘트와 혼화재의 반응물을 확인하기 위해 사용됨
- 그러므로 XRD 분석과 TGA를 이용하여 양생환경에 따른 혼화재의 종류에 따라 시멘트 수화물의 양, 수화물의 형태, 시멘트와 혼화재의 반응물을 확인하고자 함

5.1.2. 시료(Sample) 제작

- <표 5-1>에 나타난 Control 시험체와 3가지 혼화재 (silica fume, metakaolin, 그리고 glass powder)를 시멘트 무게비로 10% 치환한 시험체를 수돗물과 해수에서 양생(0, 7, 28, 그리고 90 일)하고 XRD 분석과 TGA를 수행함

<표 5-1> XRD 분석과 TGA를 수행한 시멘트 모르타르의 배합 무게비

Type	W/B ratio	Cement	Silica sand	Silica fume (SF)	Meta kaolin (MK)	Glass powder (GP)
Control	0.5	1	1.1	-	-	-
SF-10		0.9		0.1	-	-
MK-10		0.9		-	0.1	-
GP-10		0.9		-	-	0.1

- XRD 분석과 TGA를 위해서 압축강도 시험이후 시험체의 파편을 분말형태로 분쇄하고 그 이후 시멘트 모르타르 분말에 2-Propanol를 이용하여 수화반응을 정지함
- 이때, 시험체 파편 중 공기와 노출되는 표면부분은 제외하고 시험체 내부를 중심으로 사용하여 시멘트 모르타르의 탄산화 영향을 최소화함
- 수화반응의 정지를 위해서 시멘트 모르타르 분말이 2-Propanol에 완전히 잠기도록 하고 최소 30분 동안 시멘트 모르타르 분말 내부의 수분을 2-Propanol로 치환하여 줌
- 이후 부후너에 8 μm 의 정성여과지를 설치하고 여과펌프를 여과기에 연결하여 시멘트 모르타르 분말에서 2-Propanol를 제거하여 시멘트 모르타르에서 수분을 완전히 제거함
- 그 후 시멘트 모르타르 분말을 45 $^{\circ}\text{C}$ 의 챔버에서 30분 동안 건조한 뒤 XRD, TGA의 분석을 진행함
- <그림 5-1>은 시멘트 모르타르 분말 시료를 제작하는 과정을 보여줌



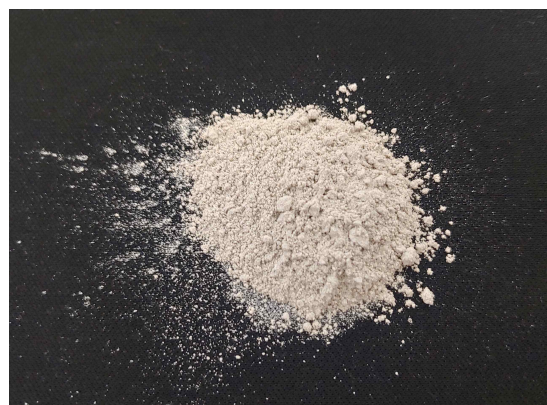
(a) 시멘트 모르타르 분쇄 작업



(b) 2-Propanol 치환 과정



(c) 수분 여과 과정



(d) 수화 정지된 시멘트 모르타르 분말 시료

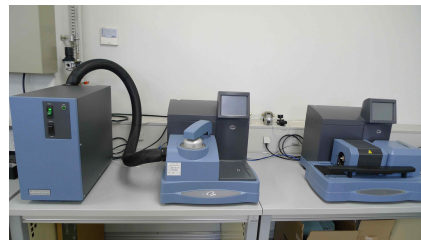
<그림 5-1> 시멘트 모르타르 분말 시료 제작 과정

5.1.3. 실험방법

- XRD 분석은 전남대학교 공동실험실습관(Chonnam Center for Research Facilities; CCRF)에서 X'Pert Pro Multi Purpose X-ray Diffractometer를 사용하여 수행되었으며, 45 KV, 200 mA에서 CuK α 방사선은 0.2초간 0.01°간격으로 5°에서 70°의 2 θ 범위에 걸쳐 사용됨
- TGA는 한국시초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute; KBSI) TA Instrument Q600을 사용하여 1000°C까지 10 K/min의 가열 속도로 N₂ 환경에서 수행됨



(a) X'Pert Pro Multi Purpose X-ray Diffractometer (in CCRF)

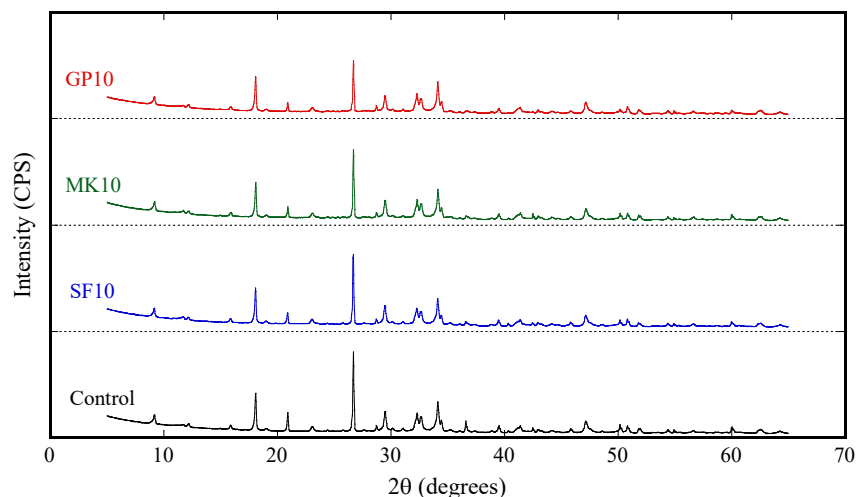


(b) TA Instrument Q600 (KBSI)

〈그림 5-2〉 Test machine for XRD and TGA

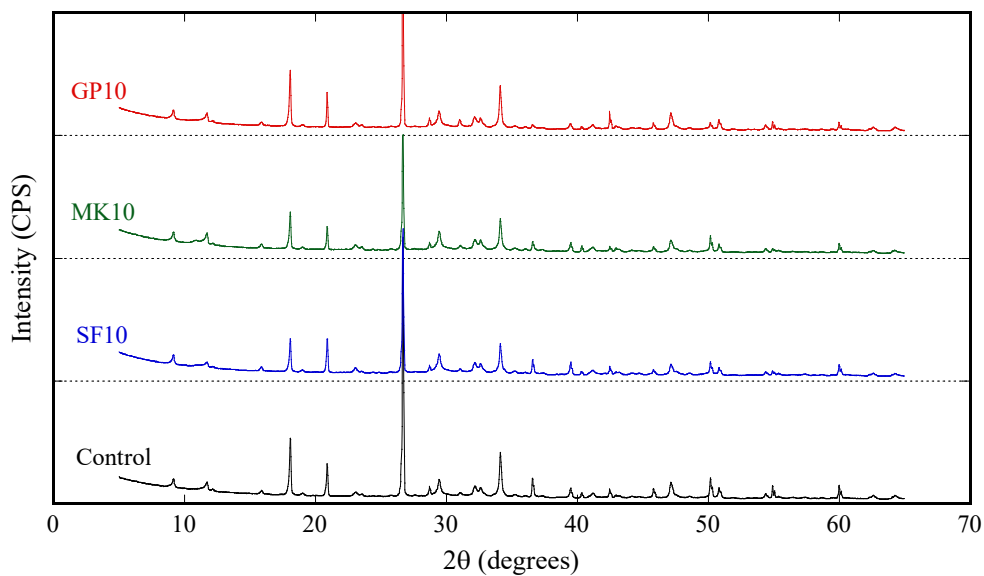
5.2. 고성능 표면보호재료의 X-Ray Diffraction (XRD) 분석 결과

- <그림 5-3>에 보이는 것 같이, 양생이 진행되지 않은 0일의 시멘트 모르타르의 XRD 분석 결과에서 3종의 혼화재가 치환되었을 때 Intensity의 변화는 크게 보이지 않았으며 가장 큰 peak 값은 26°에서 발생함

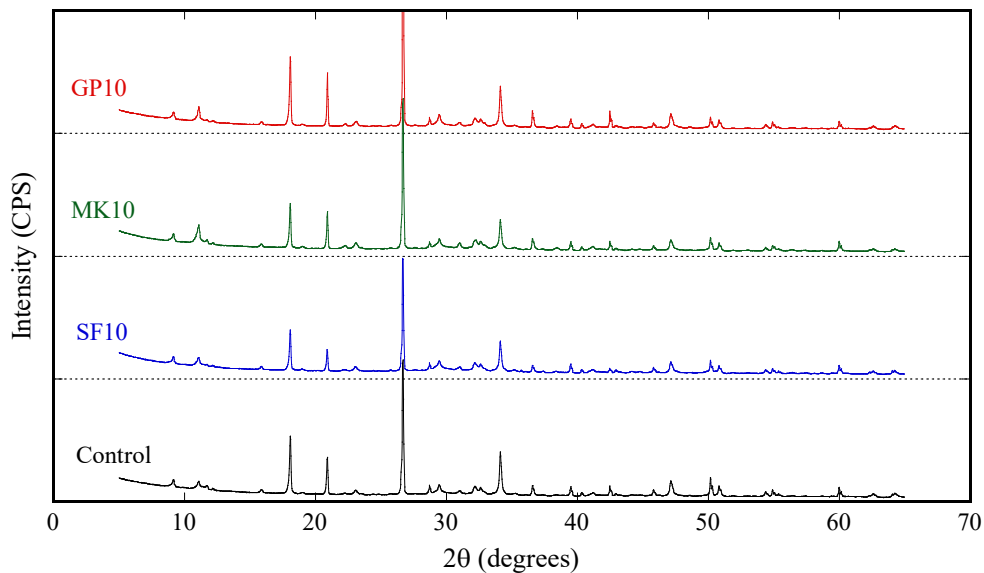


〈그림 5-3〉 0일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과

- <그림 5-4 a>에 보이는 것 같이, 수돗물에서 양생이 7일 진행된 시멘트 모르타르의 XRD 분석 결과에서 3종의 혼화재가 치환되었을 때 Intensity의 변화는 18°, 22°, 35°, 그리고 50°부분에서 차이를 보여주며, 특히 18°에서 가장 큰 변화를 보여줌
- <그림 5-4 b>에 보이는 것 같이, 해수에서 양생이 7일 진행된 시멘트 모르타르의 Intensity의 변화는 18°, 20°, 35°, 그리고 50°부분에서 차이를 보여주고 수돗물 보다 Control을 제외한 나머지 시멘트 모르타르에서 18°에서 peak 가 증가하는 경향을 보여줌



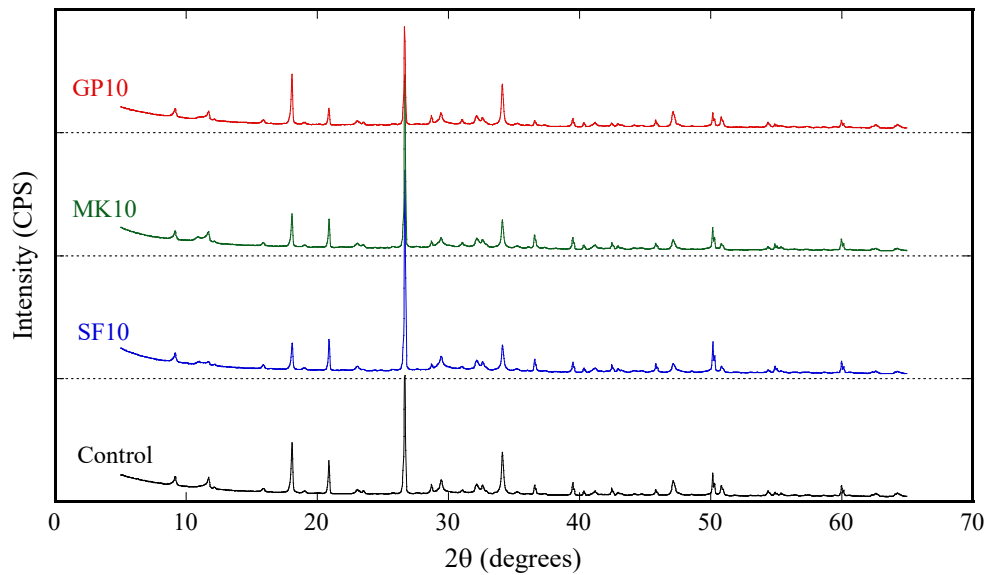
(a) 수돗물 양생



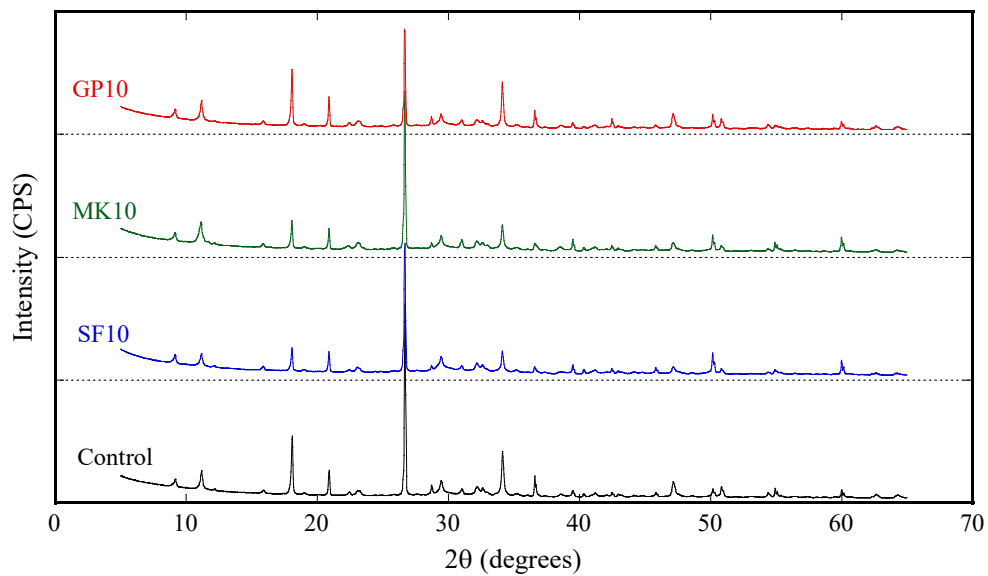
(b) 해수 양생

<그림 5-4> 7일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과

- <그림 5-5 a>에 보이는 것 같이, 수돗물에서 양생이 28일 진행된 시멘트 모르타르의 XRD 분석 결과에서 3종의 혼화재가 치환되었을 때 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35° 부분에서 차이를 보여주며, 특히 18°와 22°에서 가장 큰 변화를 보여줌
- <그림 5-5 b>에 보이는 것 같이, 해수에서 양생이 28일 진행된 시멘트 모르타르의 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35°부분에서 차이를 보여주고 수돗물에서 양생된 결과와 비교하면 18°와 22°에서 peak값의 변화가 뚜렷하게 발생함



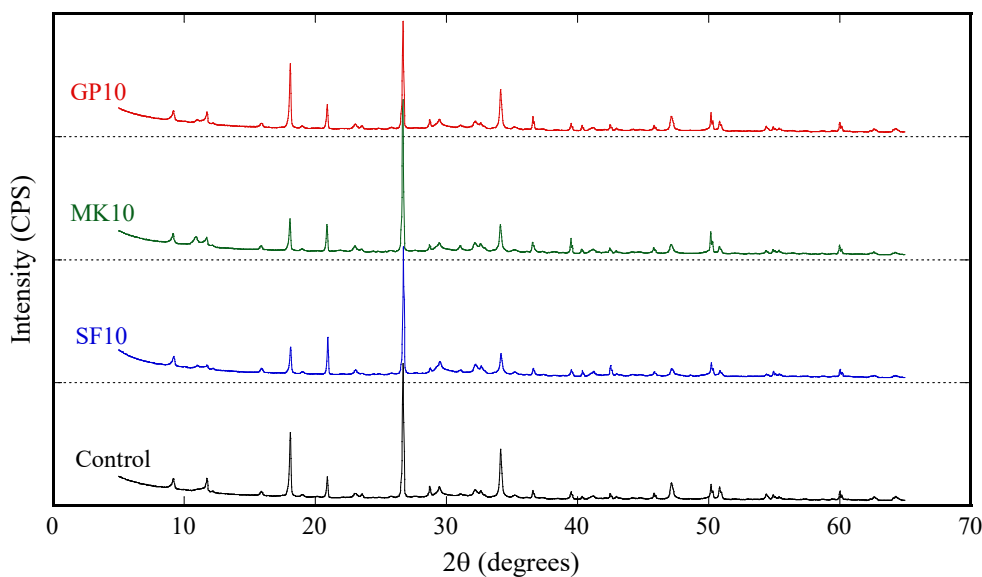
(a) 수돗물 양생



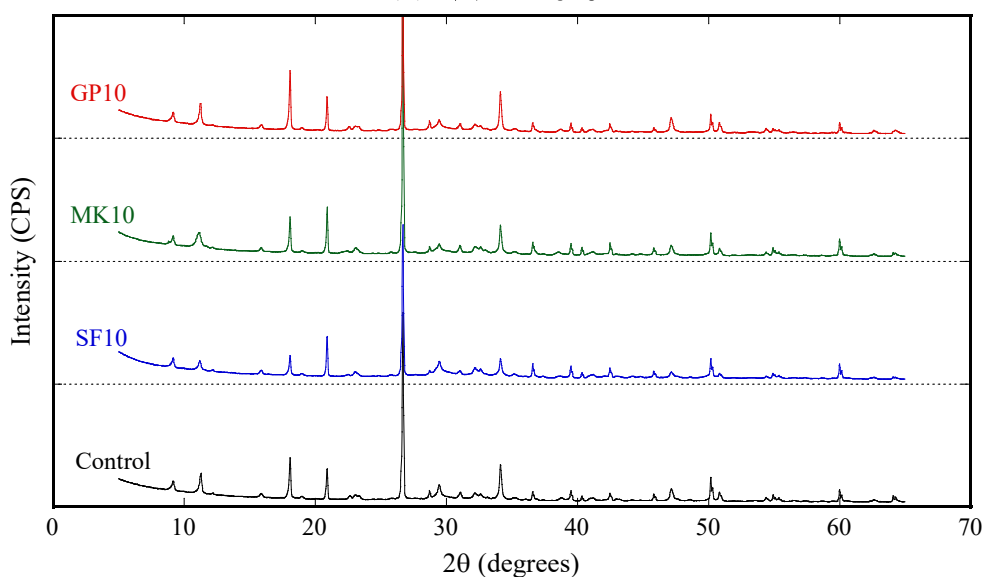
(b) 해수 양생

<그림 5-5> 28일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과

- <그림 5-6 a>에 보이는 것 같이, 수돗물에서 양생이 90일 진행된 시멘트 모르타르의 XRD 분석 결과에서 3종의 혼화재가 치환되었을 때, Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35° 부분에서 차이를 보여주며, 특히 18°와 22°에서 가장 큰 변화를 보여줌
- <그림 5-6 b>에 보이는 것 같이, 해수에서 양생이 90일 진행된 시멘트 모르타르의 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35°부분에서 차이를 보여주고 수돗물에서 양생된 결과와 비교하면 18°와 22°에서 peak값의 변화가 뚜렷하게 발생함



(a) 수돗물 양생



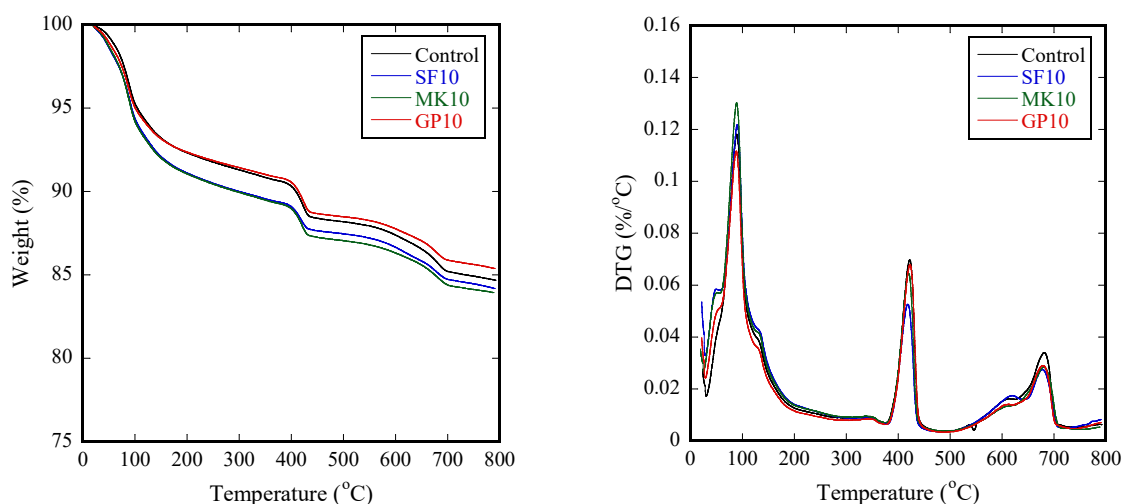
(b) 해수 양생

<그림 5-6> 90일 양생된 시멘트 모르타르의 XRD 분석결과

- 결국 양생일과 상관없이 혼화재의 치환에 따른 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35°에서 발생됨
- 그리고 양생일이 경과하면서 28°의 peak는 점점 감소하는 경향을 보여주며, 그리고 12°에서 해수와 수돗물 양생의 차이가 보임
- 추후 International centre for diffraction database를 사용하여 각 상에 대한 식별을 진행할 필요가 있음

5.3. 고성능 표면보호재료의 Thermogravimetric Analysis (TGA) 분석 결과

- <그림 5-7>에서 <그림 5-10>까지 양생일에 따른 Derivative thermogravimetry (DTG)와 TG curves를 보여줌
- DTG curve에서 100°C 근처의 weight loss는 physically bound water, dehydration of C-S-H, 그리고 ettringite의 비율을 보여주며, 70-90°C의 weight loss는 third aluminate hydrate (TAH)의 비율을 보여줌 [Pardal et al. (2012)]
- 또한 150°C 근처의 weight loss는 dehydration of AFm의 비율을 보여주며 [Dilnesa et al. (2012)], 420°C의 weight loss는 dehydroxylation of CH와 관련이 있으며, 620°C와 710°C의 weight loss는 decarbonation of CaCO₃에 의해 발생함 [Lee et al. (2018)]
- <그림 5-7>에서 0일차의 DTG를 보면, 100°C의 weight loss가 가장 낮은 GP10의 압축강도는 16.65 MPa 로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 420°C와 620°C에서 710°C사이의 weight loss가 가장 큰 Control이 가장 큰 압축강도 21.46 MPa을 보여줌

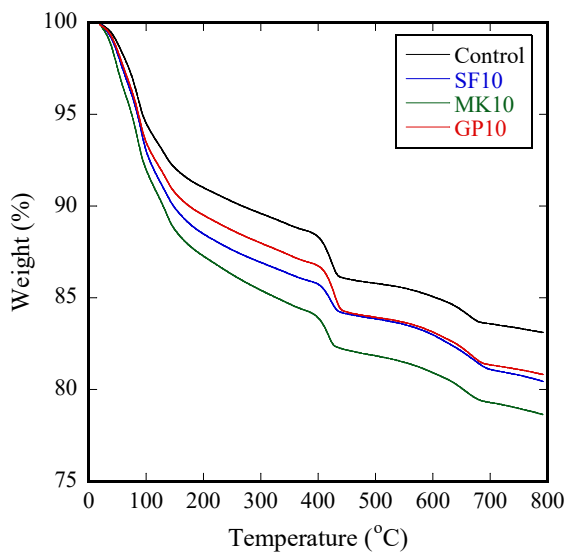


(a) TG curves

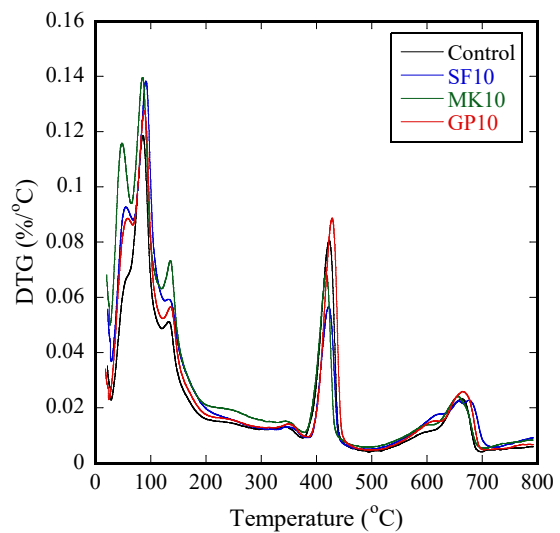
(b) DTG curves

<그림 5-7> 0일차 TG, DTG 결과

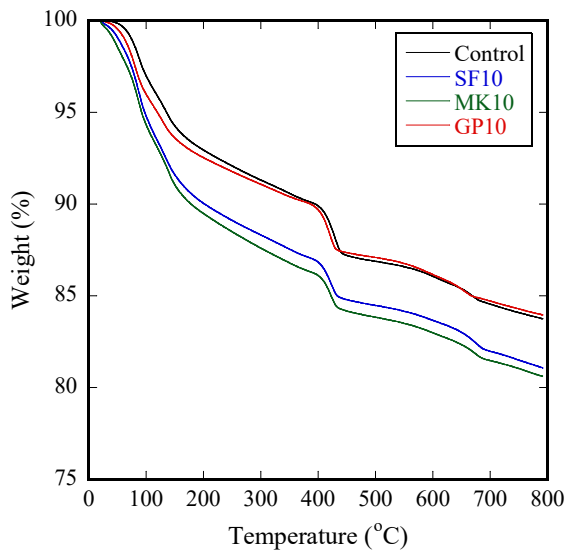
- <그림 5-8 b>에서 보이는 수돗물 7일 양생의 DTG curve를 보면, 100°C의 weight loss가 가장 작은 Control의 압축강도는 41.75 MPa 로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 100°C의 weight loss가 가장 큰 MK10이 가장 큰 압축강도 54.40 MPa을 보여줌
- <그림 5-8 d>에서 보이는 해수 7일 양생의 DTG curve를 보면, 620°C에서 710°C사이의 weight loss가 가장 작은 GP10의 압축강도 41.79 MPa 로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 150°C의 weight loss가 가장 큰 MK10이 가장 큰 압축강도 49.72 MPa을 보여줌



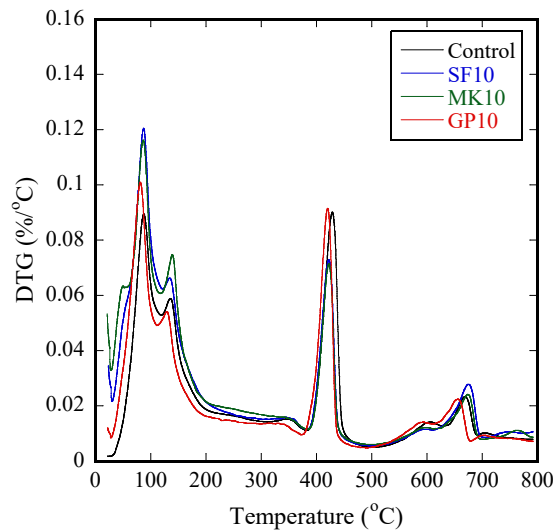
(a) 수돗물 양생 시 TG curves



(b) 수돗물 양생 시 DTG curves



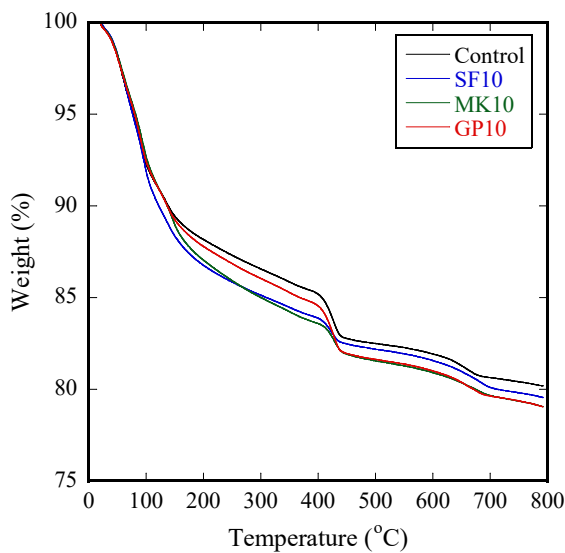
(c) 해수 양생 시 TG curves



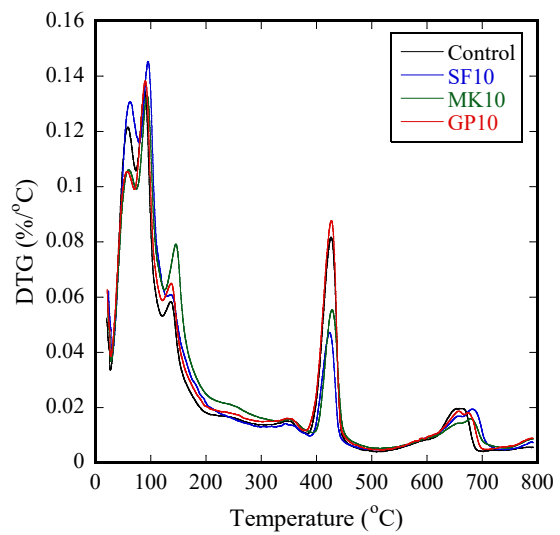
(b) 해수 양생 시 DTG curves

<그림 5-8> 7일차 TG, DTG 결과

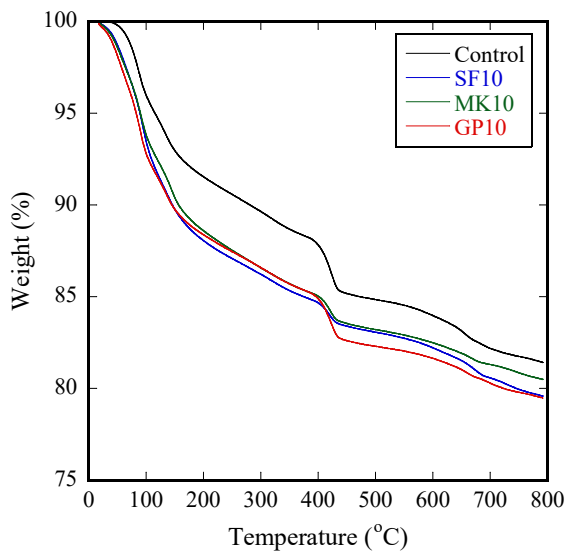
- <그림 5-9 b>에서 보이는 수돗물 28일 양생의 DTG curve를 보면, 150°C의 weight loss가 가장 작은 Control의 압축강도는 48.29 MPa 로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 100°C의 weight loss가 가장 큰 SF10이 가장 큰 압축강도 63.87 MPa을 보여줌
- <그림 5-9 d>에서 보이는 해수 28일 양생의 DTG curve를 보면, 420°C와 620°C에서 710°C사이의 weight loss가 가장 큰 Control의 압축강도 41.79 MPa 로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 150°C의 weight loss가 가장 크고 620°C에서 710°C사이의 weight loss가 가장 작은 MK10이 가장 큰 압축강도 60.73 MPa을 보여줌



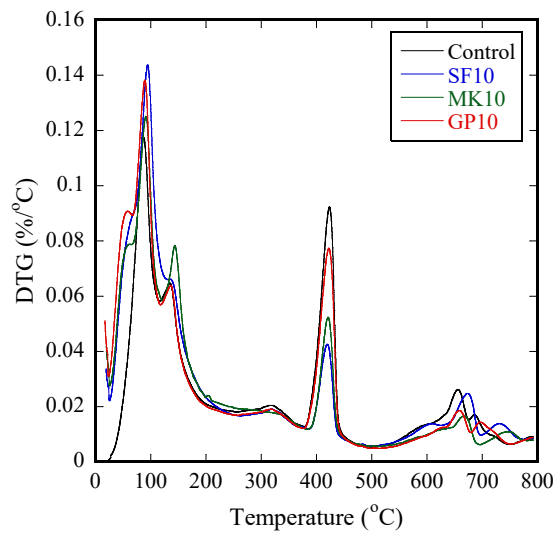
(a) 수돗물 양생 시 TG curves



(b) 수돗물 양생 시 DTG curves



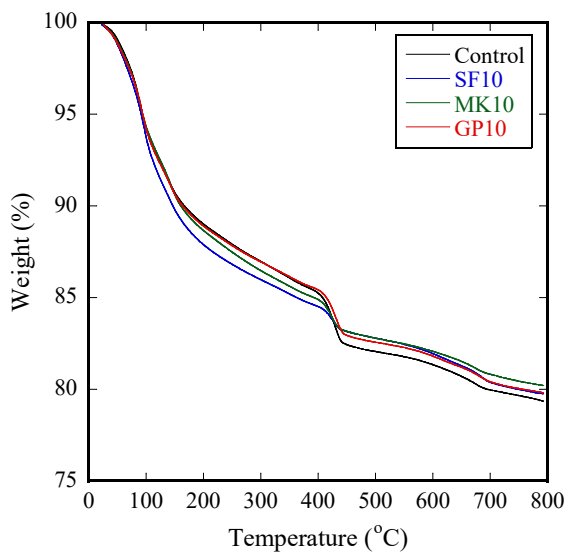
(c) 해수 양생 시 TG curves



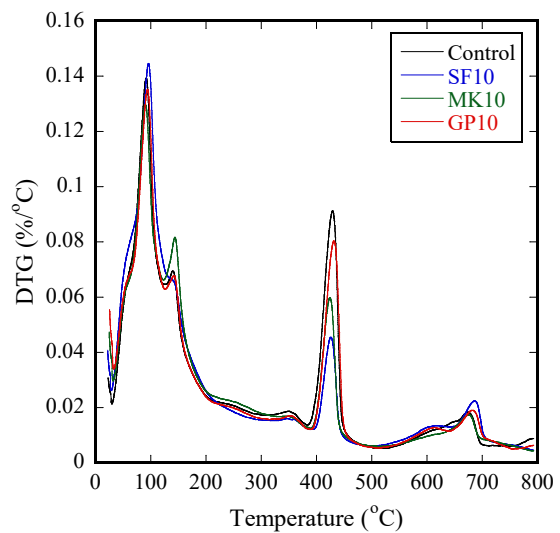
(b) 해수 양생 시 DTG curves

<그림 5-9> 28일차 TG, DTG 결과

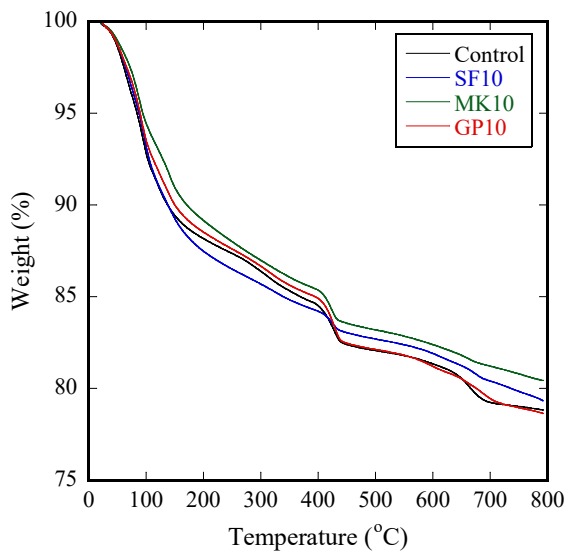
- <그림 5-10 b>에서 보이는 수돗물 90일 양생의 DTG curve를 보면, 150°C의 weight loss가 가장 작은 GP10의 압축강도는 68.81 MPa로 가장 낮은 결과를 보여주었으며, 150°C의 weight loss가 가장 큰 MK10이 가장 큰 압축강도 76.60 MPa를 보여줌
- <그림 5-10 d>에서 보이는 해수 90일 양생의 DTG curve를 보면, 70°C에서 90°C사이의 weight loss가 큰 Control과 SF10의 압축강도는 각각 67.76과 67.58 MPa로 낮은 압축강도를 보여주었으며, 150°C의 weight loss가 가장 크고 620°C에서 710°C사이의 weight loss가 가장 작은 MK10이 가장 큰 압축강도 73.08 MPa를 보여줌



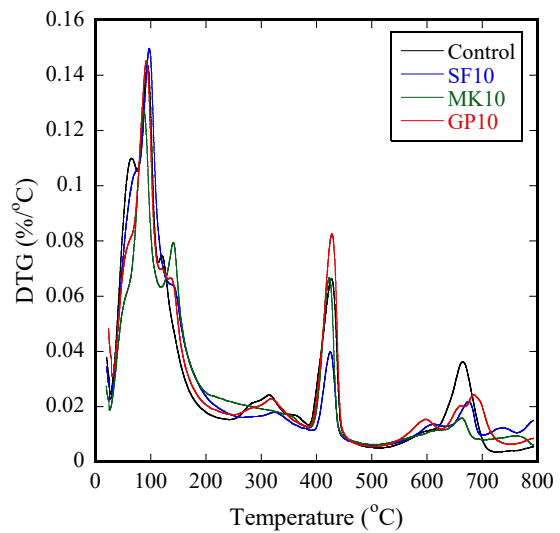
(a) 수돗물 양생 시 TG curves



(b) 수돗물 양생 시 DTG curves



(c) 해수 양생 시 TG curves



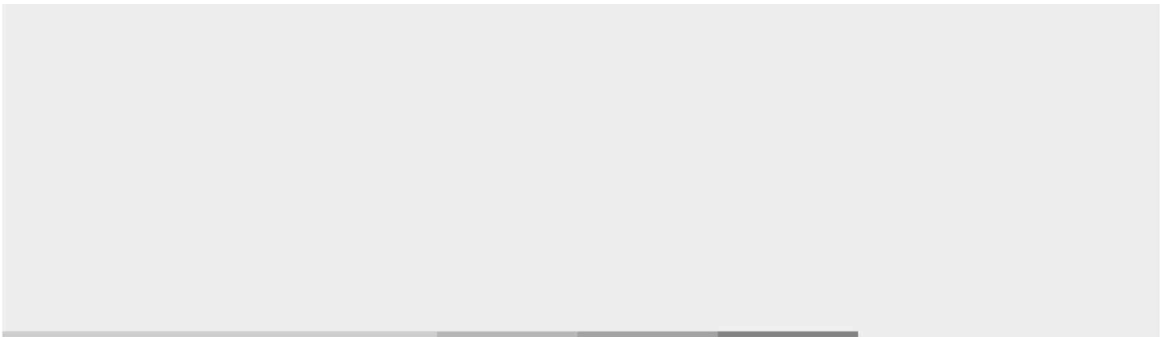
(b) 해수 양생 시 DTG curves

<그림 5-10> 90일차 TG, DTG 결과

- DTG curve는 혼화재의 종류, 양생 기간과 환경에 따라 다르게 나타났으며, 양생 기간에 따라 생성되는 시멘트 모르타르의 상에 의해 압축강도가 상이하게 나타남
- 압축강도에 기여하는 시멘트 모르타르 내부의 상중 150°C 근처의 weight loss를 나타내는 dehydration of AFm이 높은 결과를 보여준 MK10이 대체로 높은 압축강도를 보여줌
- Lee et al. (2018)은 C-S-H에서 Si에 대한 Al의 치환은 높은 포졸란 반응이 달성 될 때 나타내며, Al은 대부분 AFm에 의해 흡수됨을 보고함
- 또한 해수에서 620°C와 710°C의 weight loss를 나타내는 decarbonation of CaCO₃는 수화물과 해수의 NaCl과 반응하여 CaCl₂로 결합되고 다시 (3CaO)Al₂O₃와 반응하여 생성되는 (3CaO)Al₂O₃CaCl₂·10H₂O (Friedel's salts)에 의해 발생하는 것으로 판단됨
- 이렇게 형성된 Friedel's salts는 시멘트 모르타르에 부피를 팽창시켜 균열을 발생하여 압축강도의 저하를 야기하는 것으로 판단됨


5.4. 결론 및 제언

- 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성의 성능에 양생환경, 혼화재의 종류가 미치는 영향의 원인을 규명하기 위해서 XRD 분석과 TGA를 수행하여 시멘트 모르타르의 미세구조분석을 진행함
- XRD 분석결과 양생일과 상관없이 혼화재의 치환에 따른 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35°에서 변화가 진행되고, 양생일이 경과하면서 28°의 peak는 점점 감소하는 경향을 보여주며, 그리고 12°에서 해수와 수돗물 양생의 차이가 보임
- 추후 International centre for diffraction database를 사용하여 각 상에 대한 식별을 진행하여 시멘트 모르타르 내부의 상 분석이 필요함
- TGA를 통해 획득한 DTG curve는 혼화재의 종류, 양생 기간과 환경에 따라 다르게 나타났으며, 양생 기간에 따라 생성되는 시멘트 모르타르의 상에 의해 압축강도가 상이하게 나타남
- 높은 pozzolanc 반응으로 인해 더욱 조밀한 조직을 형성시킬 수 있는 dehydration of AFm은 150°C 근처에서 weight loss를 보여주며, dehydration of AFm의 함유가 많은 MK10이 대체로 높은 압축강도를 보여줌
- 해수에서 620°C와 710°C의 weight loss를 나타내는 decarbonation of CaCO₃는 Friedel's salts의 생성양이 증가했음을 의미하며, 이는 시멘트 모르타르에 부피를 팽창시켜 균열을 발생하여 압축강도의 저하를 야기하는 것으로 판단됨



⋮

제6장 에폭시 계열의 표면보호재료의 성능평가



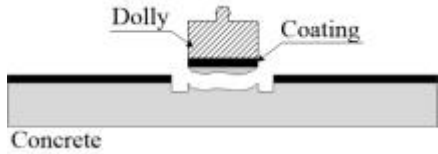
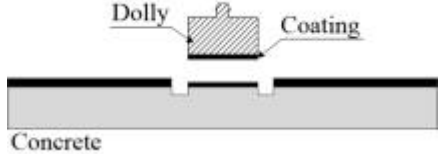
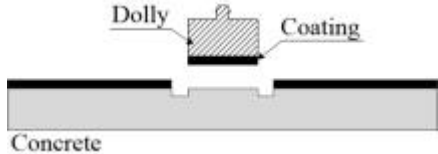
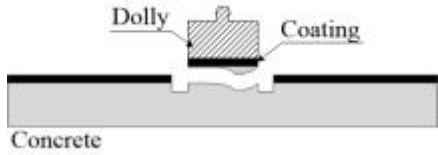
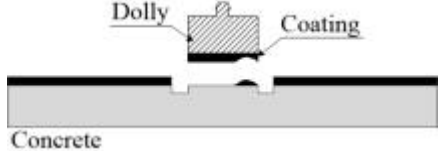
6. 에폭시 계열의 표면보호재료의 성능평가

6.1. 에폭시 계열의 표면보호재료의 성능평가 방안

6.1.1. 시험개요

- 콘크리트 구조물의 표면보호재료인 에폭시 계열의 성능을 평가하고자 기존 상용되고 있는 5종류의 에폭시 계열 코팅재료와 콘크리트 사이의 부착강도를 평가를 진행함
- 에폭시 코팅재료의 부착강도의 평가를 위해서 5종류의 코팅재료를 콘크리트에 붓을 이용하여 표면을 코팅하고 이후 3가지의 노출환경 (대기, 수돗물, 해수)에서 0일, 7일, 28일, 56일, 그리고 90일간 노출시킨 뒤 부착강도를 ASTM D 4541에 따라 수행함 (3.1.4 참조)
- 부착강도 시험 이후 <표 6-1>에 나타낸 것 같이, Liu and Vipulanandan (2005)가 제안한 파괴양상(Failure type)으로 시험결과를 정리함

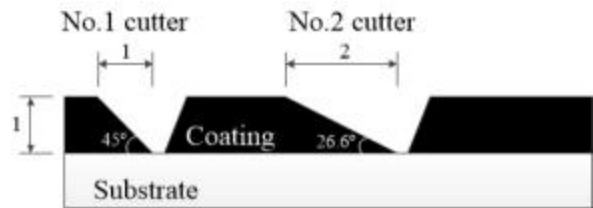
〈표 6-1〉 Failure types of pull-off bond test

Failure type	Pull off test
Type 1, Concrete failure	
Type 2, Coating failure	
Type 3, Bonding interface failure	
Type 4, Bonding+concrete failure	
Type 5, Bonding+coating failure	

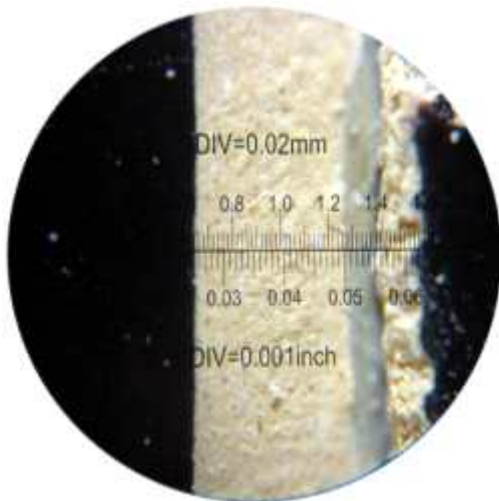
- 이후 시험이 종료된 에폭시 코팅의 두께를 확인하기 위해서 ASTM D 4138을 따라 코팅재료를 칼날로 긁어 <그림 6-1>에 나타낸 것 같이, 칼날의 기울기를 이용하여 코팅재료의 두께를 측정함



(a) Groove cutting instrument



(b) Grooves made by No.1 and No.2 cutters



(c) Typical view through microscope

<그림 6-1> 코팅두께 측정 장비 및 측정방법

6.1.2. 시험체 제작

- 서로 다른 노출환경, 노출기간, 그리고 에폭시 코팅재료가 부착강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서 사용된 콘크리트의 배합 무게비와 67일 압축강도를 표 <6-2>에 나타냄

<표 6-2> 콘크리트 배합 무게비 및 압축강도

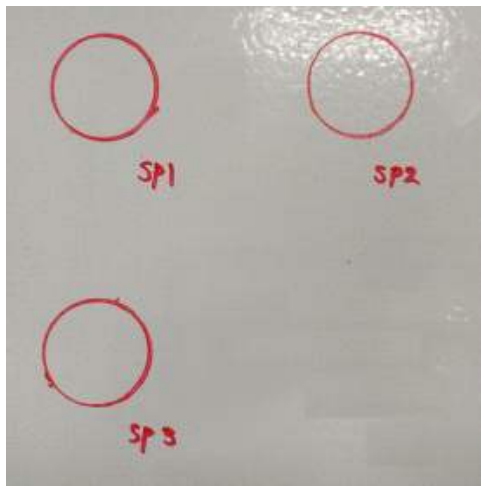
Cement	Sand	Coarse aggregate	Water	Superplasticizer	Compressive strength (MPa)
1.00	1.198	1.586	0.295	0.01	75.69

- 5종의 에폭시 코팅재료의 기본 정보와 배합 무게비는 <표 6-3>에 나타냄

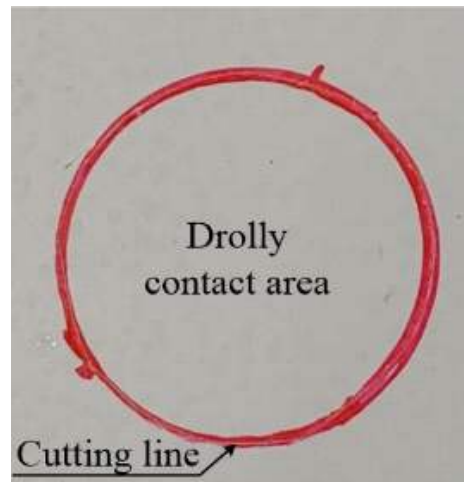
<표 6-3> 코팅 재료의 물성 및 무게비

Coating	Base	Hardener	Wight ratio (B/H)	Density (g/cm ³)
1	Bisphenol-A-	Benzyl alcohol	5.10/1.00	1.6 ± 0.1
	Epoxy resin	3-aminomethyl		
	Ethylene oxide (Oxiran)	Methylamine		
2	Bisphenol-A-	Benzyl alcohol	2.76/1.00	1.21 ± 0.1
	Bisphenol F-	Methylenebis		
	1,6-Hexanediol diglycidyl ether			
3	Zinc powder	Benzyl alcohol	5.00/1.00	1.82
	Epoxy resin	Isophoronediamine		
	Cresyl glycidyl ether	Trimethylhexamethylid iamine		
4	Epoxy resin	Benzyl alcohol	5.00/1.00	1.55
	Cresyl glycidyl ether	Isophoronediamine		
	1-methoxy-2-propanol	Trimethylhexamethylid iamine		
5	Inert mineral filler	Phenol, methylstyrenated	1.75/1.00	1.75
	Epoxy resin	Benzyl alcohol		
	Epoxy phenol novolac resin	Isophoronediamine		

- 시험체의 제작은 콘크리트 슬래브를 제작한 후 에폭시 코팅재료를 Base와 Hardener의 무게비에 맞게 계량하여 혼합한 뒤, 붓을 이용하여 콘크리트 슬래브 시험체를 코팅함
- 코팅된 시험체는 24시간 동안 실험실 내부에서 약 20℃의 온도에서 건조한 뒤 각각의 노출환경 대기, 수돗물, 그리고 해수에 노출시키고 일정기간 이후 시험을 수행함
- 노출기간이 경과된 시험체는 부착시험을 진행하기 위해서 계획된 기간 동안 노출된 시험체의 표면을 매끄럽게 #200 이상의 샌드페이퍼로 정리함
- 정리된 면에 직경 50 mm의 돌리에 맞도록 원 모양으로 <그림 6-2>와 같이 표시하여 돌리 면적 이외의 영향을 제거하기 위해서 컷터 칼을 이용해 코팅제를 커팅 함



(a) pull off 부착 시험체



(b) 돌리 부착 전 준비

〈그림 6-2〉 에폭시 코팅재료 부착시험 준비

- 이후 돌리(Dolly)를 부착하기 위해서 Araldite사에서 제조된 접착제 Standard Part A 와 Part B를 1:1의 비율로 제조하여 돌리 표면에 얇게 펴 바른 뒤 돌리를 코팅 표면에 붙이고 24시간 동안 실험실 온도(약 20℃)에서 굳힘
- 접착제가 완전히 굳은 뒤 Elcometer 510: Automatic Adhesion Gauge를 사용하여 부착된 돌리를 하중 속도 0.004 MPa/s로 pull off 시험을 진행함
- 총 시험된 변수를 <표 6-4>에 나타내었으며 총 75개의 시리즈를 준비하여 3곳 위치에서 부착시험을 진행한 뒤 평균하여 부착강도를 비교 평가함
- 여기서 노출기간 0일은 에폭시 코팅이 실험실 내부에서 약 20℃의 온도에서 24시간 건조한 뒤를 의미함

〈표 6-4〉 에폭시 코팅재료 부착강도 시험변수

Conditions	Coating material	Exposure period (days)
Air (A)	1	0
	2	7
Tab water (T)	3	28
	4	56
Sea water (S)	5	90
	Total test series	

6.2. 에폭시 계열의 표면보호재료의 부착 성능평가

6.2.1. 부착 시험결과

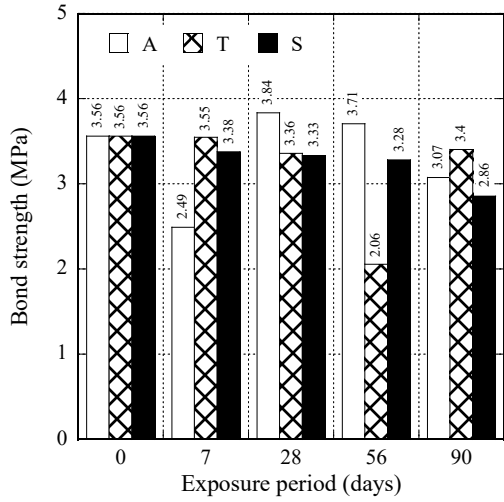
- 표 <6-5>에 부착강도 시험을 수행한 전체의 시험결과와 파괴양상을 정리함
- 본 연구의 변수인 코팅재료, 노출환경, 그리고 노출기간에 따라 부착강도와 파괴양상은 크게 변동됨
- 노출환경이 대기조건인 A에서 90일 노출된 코팅재료 5는 부착강도 4.00 MPa로 다른 코팅재료보다 높은 결과를 보여줌
- 반면에 노출환경이 수돗물인 T와 해수인 S에서 90일 노출된 코팅재료 4는 부착강도가 각각 3.78, 3.66 MPa 로 다른 코팅재료보다 높은 결과를 보여줌
- 일반적으로 노출기간이 증가하게 되면 코팅과 콘크리트 사이 부착은 서서히 저감되지만, 일부 코팅재료에서 부착강도가 일시적으로 증가하는 경향을 보여줌
- 이러한 부착강도의 향상은 콘크리트 자체의 재령일 증가로 인해 콘크리트의 강도가 상승하여 부착강도가 짧은 기간 노출된 시험군에서 0일 부착강도보다 증가하는 경향을 보여줌
- 이를 확인하기 위해서는 부착강도 시험이후 부착파괴의 양상을 확인하여 노출환경에 따라 파괴양상과 부착강도의 변화를 확인할 필요성이 있음
- 게다가, 코팅재료의 도포가 일정한 두께를 지니지 않으므로, 코팅두께가 코팅재료와 콘크리트 사이 부착강도에 미치는 영향을 파악할 필요성 있음
- 그러므로 다음 장에서부터 노출환경 및 기간, 파괴양상, 그리고 코팅 두께가 코팅재료와 콘크리트 사이 부착강도에 미치는 영향을 분석함

〈표 6-5〉 에폭시 코팅 부착강도 시험결과

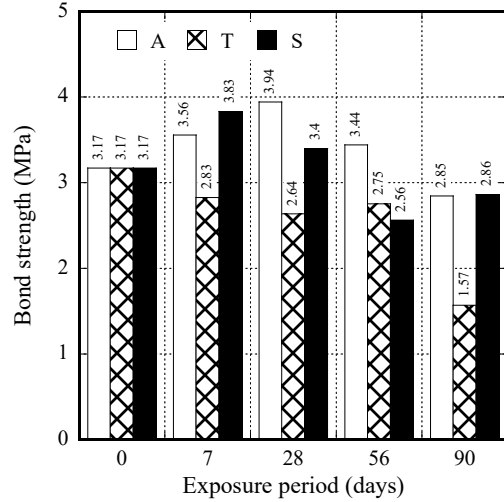
Exposure period (days)			0		7		28		56		90	
Coating	Condition	Specimen	Bond strength (MPa)	Failure type	Bond strength (MPa)	Failure type	Bond strength (MPa)	Failure type	Bond strength (MPa)	Failure type	Bond strength (MPa)	Failure type
1	A	SP1	3.130	4	1.932	5	4.000	1	3.452	5	3.535	1
		SP2	3.552	4	2.267	5	3.506	4	3.679	1	4.000	1
		SP3	4.000	1	3.276	4	4.000	1	3.990	4	1.685	5
		Average	3.561		2.492		3.835		3.707		3.073	
	T	SP1	3.130	4	3.627	1	4.000	1	2.563	3	3.890	4
		SP2	3.552	4	3.720	4	3.464	1	2.279	3	2.409	4
		SP3	4.000	1	3.291	5	2.612	4	1.330	3	3.911	1
		Average	3.561		3.546		3.359		2.057		3.403	
	S	SP1	3.130	4	3.602	1	3.268	4	3.968	1	3.305	4
		SP2	3.552	4	3.211	5	3.794	4	3.346	1	3.412	1
		SP3	4.000	1	3.317	3	2.929	4	2.535	4	1.849	3
		Average	3.561		3.377		3.330		3.283		2.855	
2	A	SP1	3.978	1	3.630	1	3.937	4	2.788	4	2.849	4
		SP2	2.824	4	3.139	1	3.884	1	3.590	4	3.650	4
		SP3	2.714	4	3.904	1	4.000	1	3.952	4	4.000	1
		Average	3.172		3.558		3.940		3.443		3.500	
	T	SP1	3.978	1	2.386	5	3.609	4	3.531	5	2.401	3
		SP2	2.824	4	2.863	3	2.262	5	1.410	3	1.020	5
		SP3	2.714	4	3.231	4	2.037	5	3.322	5	1.286	3
		Average	3.172		2.827		2.636		2.754		1.569	
	S	SP1	3.978	1	3.916	4	2.889	5	2.919	5	1.565	5
		SP2	2.824	4	3.657	3	3.863	4	2.842	5	3.017	4
		SP3	2.714	4	3.918	4	3.440	4	1.926	3	4.000	1
		Average	3.172		3.830		3.397		2.562		2.861	
3	A	SP1	4.000	1	3.651	1	3.062	3	2.066	5	4.000	1
		SP2	3.628	4	4.000	1	3.938	4	1.492	5	2.061	5
		SP3	3.928	4	3.385	3	2.364	3	3.807	4	2.884	4
		Average	3.852		3.679		3.121		2.455		2.987	
	T	SP1	4.000	1	2.953	4	3.103	1	1.271	3	3.635	4
		SP2	3.628	4	3.458	1	3.605	1	2.201	3	2.575	4
		SP3	3.928	4	2.351	5	2.616	4	2.009	3	2.884	4
		Average	3.852		2.921		3.108		1.827		3.031	
	S	SP1	4.000	1	3.806	4	2.691	4	1.685	3	4.000	1
		SP2	3.628	4	3.535	4	2.234	4	4.000	1	2.910	4
		SP3	3.928	4	4.000	1	3.688	4	3.073	3	2.331	4
		Average	3.852		3.780		2.871		2.919		3.080	
4	A	SP1	2.194	4	3.310	4	3.217	4	3.875	1	3.259	4
		SP2	4.000	1	3.537	1	4.000	1	1.418	4	3.222	4
		SP3	3.365	4	2.317	4	4.000	1	4.000	1	3.935	1
		Average	3.186		3.055		3.739		3.098		3.472	
	T	SP1	2.194	4	3.397	4	3.042	4	2.801	4	3.865	1
		SP2	4.000	1	3.163	4	1.487	5	3.026	4	4.000	1
		SP3	3.365	4	3.427	4	2.791	3	3.451	4	3.476	1
		Average	3.186		3.329		2.440		3.093		3.780	
	S	SP1	2.194	4	3.538	4	2.800	3	2.812	4	3.244	4
		SP2	4.000	1	2.339	4	2.578	5	3.929	1	3.733	4
		SP3	3.365	4	1.724	5	2.886	5	4.000	1	4.000	1
		Average	3.186		2.534		2.755		3.580		3.659	
5	A	SP1	4.000	1	2.732	4	4.000	1	4.000	1	4.000	1
		SP2	4.000	1	4.000	1	4.000	1	4.000	1	4.000	1
		SP3	4.000	1	4.000	1	4.000	1	4.000	1	4.000	1
		Average	4.000		3.577		4.000		4.000		4.000	
	T	SP1	4.000	1	3.710	1	3.165	4	2.667	1	2.813	3
		SP2	4.000	1	2.726	5	3.181	1	2.609	4	1.534	3
		SP3	4.000	1	2.981	4	3.725	4	3.793	1	1.434	3
		Average	4.000		3.139		3.357		3.023		1.927	
	S	SP1	4.000	1	3.644	4	4.000	1	3.251	4	3.440	4
		SP2	4.000	1	3.330	4	3.027	4	4.000	1	3.607	4
		SP3	4.000	1	3.230	4	3.126	4	4.000	1	3.059	4
		Average	4.000		3.401		3.384		3.750		3.369	

6.2.2. 노출환경이 부착강도에 미치는 영향

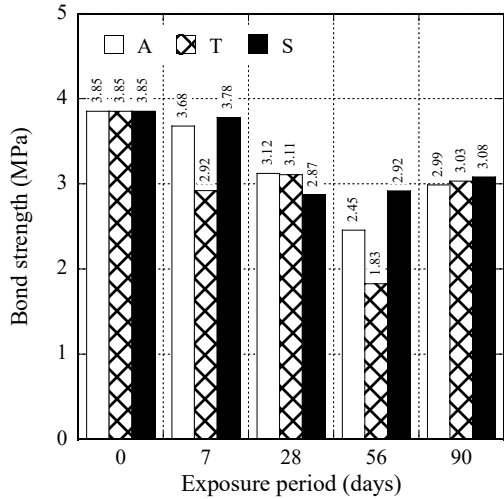
- <그림 6-3>은 노출환경과 노출기간에 따른 코팅재료별 부착강도를 보여줌
- 코팅재료 1은 대기환경에서 노출기간이 0, 7, 28, 56, 90일로 증가하면서 각각 3.56, 2.49, 3.84, 3.71, 그리고 3.07 MPa로 0일에 비해 56일까지 대체로 증가하다 90일이 되면서 부착강도가 감소하는 경향을 보임
- 수돗물과 해수에서 코팅재료 1은 90일까지 지속적으로 부착강도가 감소하며, 수돗물에서는 4.5%, 해수에서는 19.7% 감소하여, 해수에서 보다 큰 감소량을 보임
- 코팅재료 2는 대기환경과 해수에서 노출기간이 7일에서 28일까지 부착강도가 각각 24.3, 7.3% 증가하고, 이후 90일까지 지속적으로 감소하여 각각 2.85, 2.86 MPa 의 부착강도를 보여 대기와 해수에서 유사한 경향을 보여줌
- 하지만 수돗물환경에 노출된 코팅재료 2는 양생일이 증가하면서 부착강도가 지속적으로 감소하여 최종 노출기간인 90일에서 부착강도는 0일 부착강도보다 약 50% 감소하여 수돗물에서 가장 큰 부착강도의 감소를 보임
- 코팅재료 3은 노출환경과 상관없이 노출기간이 증가할수록 부착강도가 지속적으로 감소하는 경향을 보여주었으며, 최종 노출기간인 90일에서 해수, 수돗물, 그리고 대기 환경 순으로 부착강도는 각각 3.08, 3.03, 그리고 2.99 MPa이며, 해수에서 가장 높은 부착강도를 보여줌
- 코팅재료 4는 대기환경에 노출된 경우 대체로 부착강도가 증가하였으며, 최종 노출기간인 90일의 부착강도는 초기 부착강도보다 약 8.8% 증가함
- 수돗물과 해수에 노출된 코팅재료 4는 28일까지 부착강도가 각각 약 23.5, 13.8% 감소하였고, 그 이후 90일에 노출된 부착강도는 각각 3.78, 3.68 MPa 까지 증가하였음
- 코팅재료 5는 대기환경에서 노출기간 90일까지 부착강도가 4.00 MPa로 유지하였지만, 수돗물과 해수에서는 대체로 감소하는 경향을 보여줌
- 특히 수돗물 환경에서 90일 노출된 코팅재료 5의 부착강도는 52%감소하여 가장 큰 감소폭을 보여주었으나, 해수 환경에서 동일기간의 부착강도는 15.8% 감소하여 코팅재료 4를 제외하면 해수 환경에서 가장 높은 부착강도를 보여줌
- 수돗물과 해수에서 노출기간에 대한 부착강도의 경향은 크게 2가지로 ① 지속적인 혹은 소폭 증가 후 감소, 그리고 ② 소폭 감소 후 증가로 나눌 수 있음
- 수돗물 노출조건에서는 코팅재료 4를 제외하면 모든 코팅재료가 지속적인 감소를 보여주고 있음
- 반면에 해수 노출조건에서는 일정하게 감소하지는 않지만 코팅재료 4을 제외하면 모든 코팅재료가 90일 노출에서 결국 초기 부착강도 보다 감소함



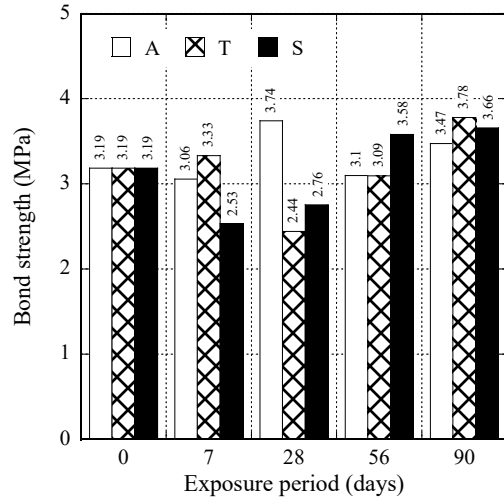
(a) 코팅재료 1



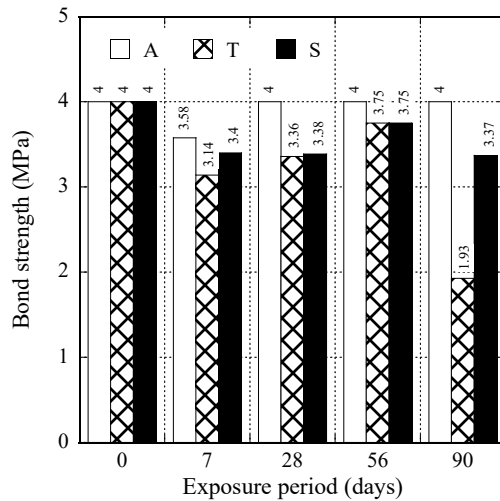
(b) 코팅재료 2



(c) 코팅재료 3



(d) 코팅재료 4



(e) 코팅재료 5

<그림 6-3> 노출환경 및 기간에 따른 부착강도의 변화

- 본 연구에서 양생환경에 따른 부착강도 감소 원인을 확인하기 위해서 Scanning electron microscope (SEM)을 이용하여 코팅재료와 콘크리트 사이 계면을 촬영함
- SEM 이미지를 촬영하기 위한 시험체를 제작하기 위해서 부착강도 시험체의 일부를 고속절단기를 사용하여 한 변의 길이가 20 mm로 절단함
- 절단된 시험체는 직경 32 mm 의 mounting cup을 사용하여 cold mounting을 수행함
- 그리고 촬영단면을 4단계의 폴리싱을 <그림 6-4 a>에 보이는 MetPrep3를 사용하여 다음과 같이 수행하여 <그림 6-5>에 보이는 시험체를 제작함: 1) 9 μm 의 연마재를 사용하여 10분, 2) 3 μm 의 연마재를 사용하여 5분간, 3) 1 μm 의 연마재를 사용하여 5분간, 그리고 4) 0.05 μm 의 연마재를 사용하여 3분간 폴리싱을 수행함

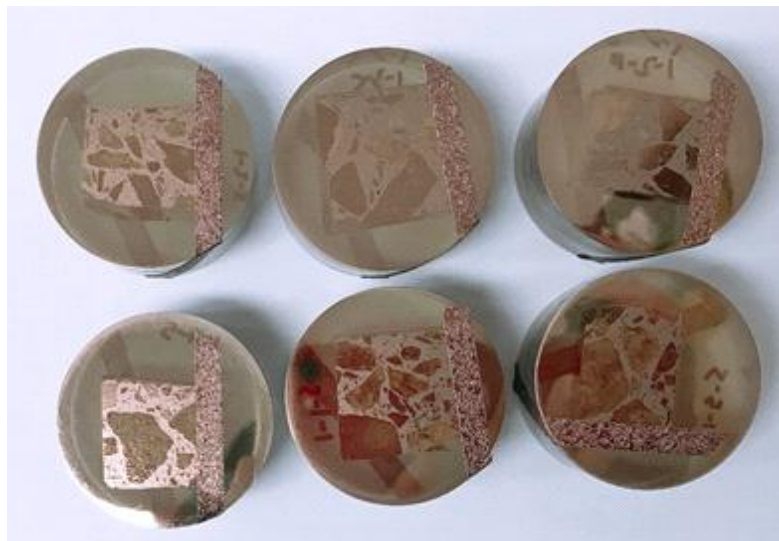


(a) Polishing machine



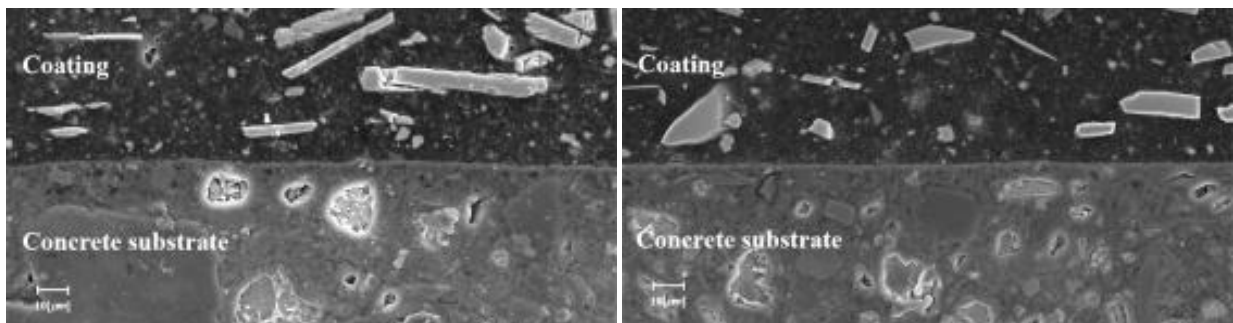
(b) COXEM EM-30AM (SEM)

<그림 6-4> Test machine to take SEM image



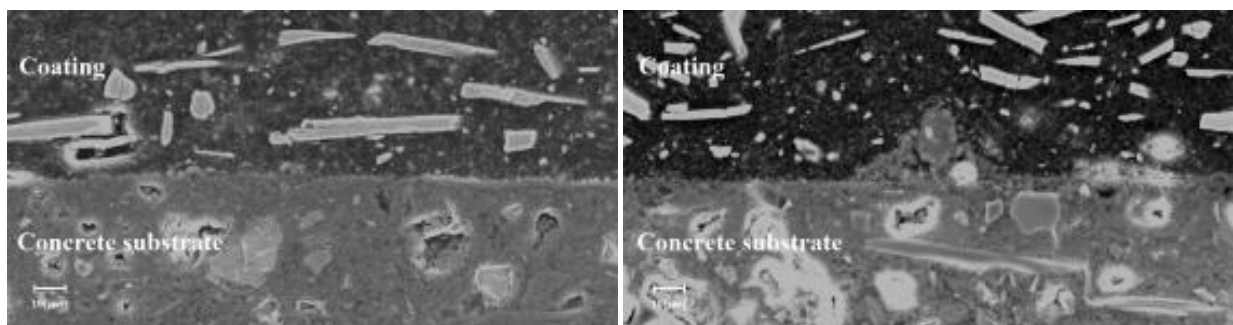
<그림 6-5> Specimens to take SEM images on interface between coating and concrete substrate

- 제작된 시험체를 COXEM EM-30AX를 사용하여 1,000배율의 이미지를 <그림 6-6>, <그림 6-7>, <그림 6-8>, <그림 6-9>, 그리고 <그림 6-10>에 코팅재료별로 나타냄
- <그림 6-6>는 7일, 90일에서 수돗물과 해수에서 코팅재료 1의 계면상태를 보여줌
- 노출환경이 수돗물인 경우, 코팅재료 1은 7일에서 90일로 노출기간이 증가하면서 계면의 상태가 변화 없이 유지되었으며 이로 인해 부착강도는 3.55에서 3.40 MPa로 약 0.15 MPa 감소함
- 반면에 해수에서는 7일에서 90로 노출기간이 증가하면서 계면에서 일부 미세균열이 발생하여 부착강도는 3.38에서 2.86 MPa로 약 0.52 MPa 감소하는 경향을 보여줌
- 결국 코팅재료 1은 수돗물보다 해수에서 계면의 손상이 발생되어 부착강도가 감소함을 확인할 수 있었음



(a) T-1-7

(b) S-1-7

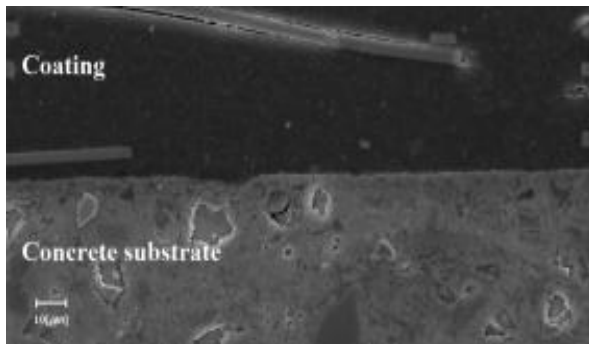


(c) T-1-90

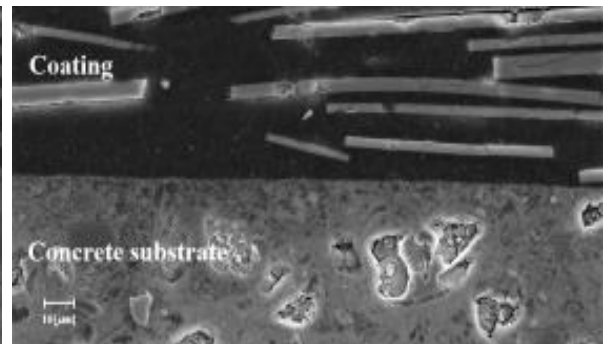
(d) S-1-90

<그림 6-6> 코팅재료 1과 콘크리트 사이 계면 상태

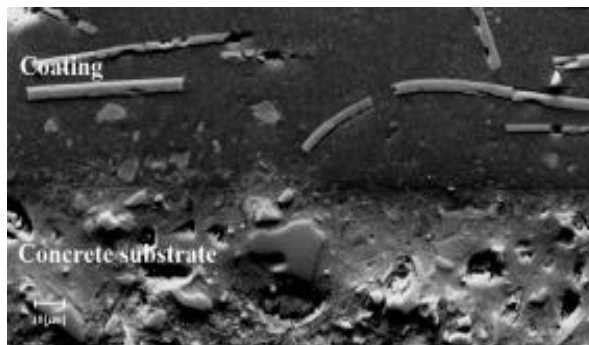
- <그림 6-7>는 7일, 90일에서 수돗물과 해수에서 코팅재료 2의 계면상태를 보여줌
- 노출환경이 수돗물인 경우, 코팅재료 2는 7일에서 90일로 노출기간이 증가하면서 계면의 상태보다 코팅재료 자체손상이 발생한 것을 확인할 수 있었으며 이로 인해 부착강도는 2.83에서 1.57 MPa로 1.26 MPa 감소하여 매우 큰 감소폭을 보여줌
- 반면 해수에서는 7일에서 90로 노출기간이 증가하면서 코팅재료의 손상은 발생하지 않았으며, 계면에서 일부 미세균열이 발생하여 부착강도는 3.83에서 2.86 MPa로 약 0.97 MPa 감소하는 경향을 보여줌
- 결국 코팅재료 2는 해수보다 수돗물에 노출되었을 때 코팅재료 자체에 손상이 발생하여 부착강도가 크게 감소함을 확인할 수 있었음



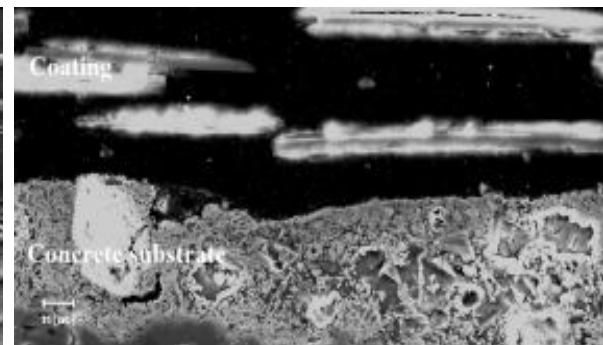
(a) T-2-7



(b) S-2-7



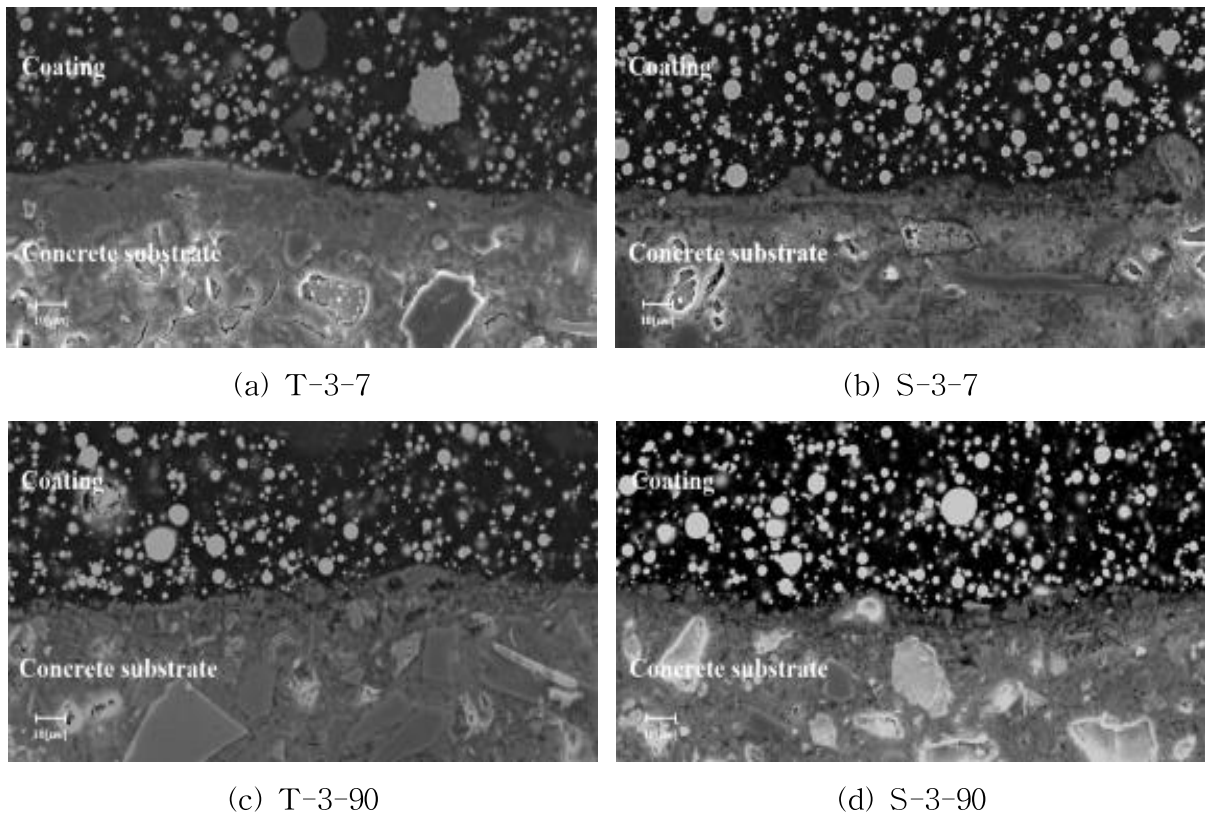
(c) T-2-90



(d) S-2-90

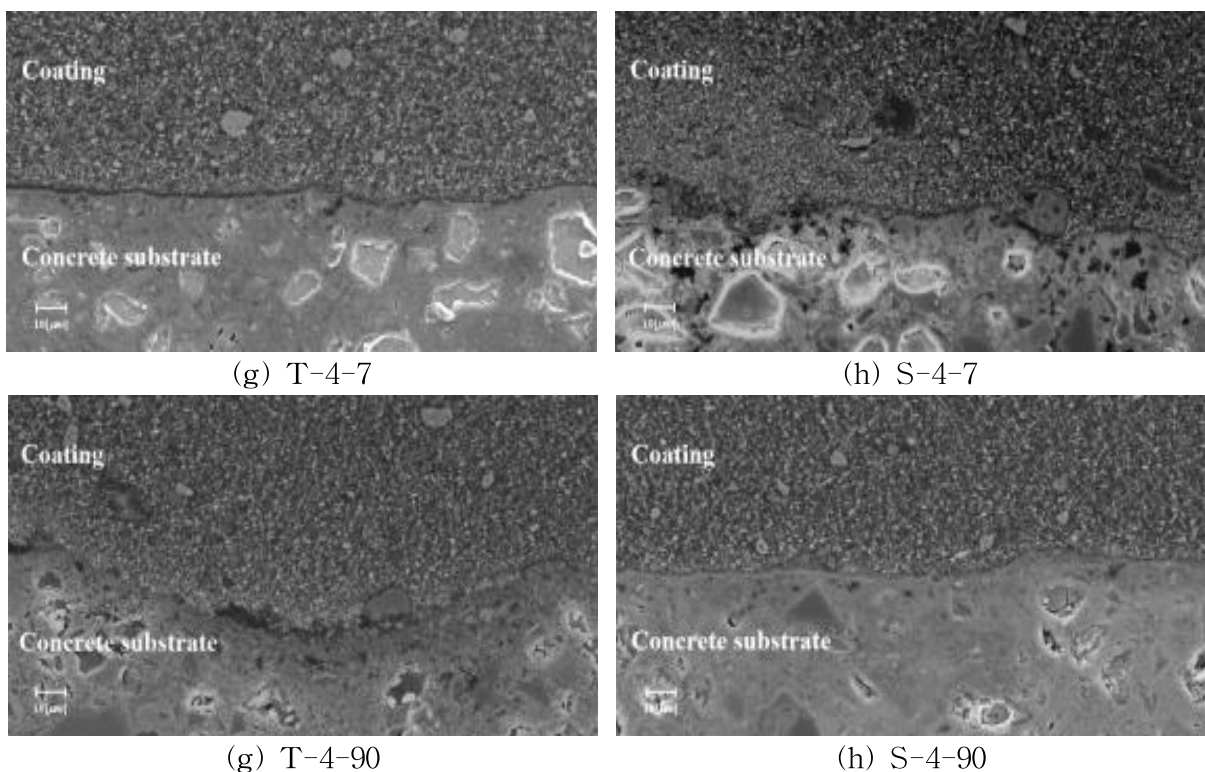
〈그림 6-7〉 코팅재료 2와 콘크리트 사이 계면 상태

- <그림 6-8>는 7일, 90일에서 수돗물과 해수에서 코팅재료 3의 계면상태를 보여줌
- 노출환경이 수돗물인 경우, 코팅재료 3은 7일에서 90일에서 모두 일부 계면의 콘크리트 손상을 확인할 수 있으나, 7일에서 90일로 노출기간이 증가하면서, 부착강도는 2.92에서 3.03 MPa로 증가하는 경향을 보여줌
- 이러한 부착강도의 향상은 콘크리트의 재령의 증가로 인해 콘크리트 자체의 강도증진으로 판단되며, 계면상태의 변화는 크지 않은 것으로 판단됨
- 그리고, 해수에서는 7일에서 90로 노출기간이 증가하면서 계면 콘크리트에 손상정도가 다소 증가하여 부착강도는 3.78에서 3.08 MPa로 약 0.7 MPa 감소하는 경향을 보여줌
- 결국 코팅재료 3은 수돗물과 해수에서 모두 대기환경보다 부착강도는 감소하였고, 노출기간 90일에서 수돗물과 해수에서 부착강도의 차이는 약 0.05 MPa로 큰 차이를 보이지 않았음



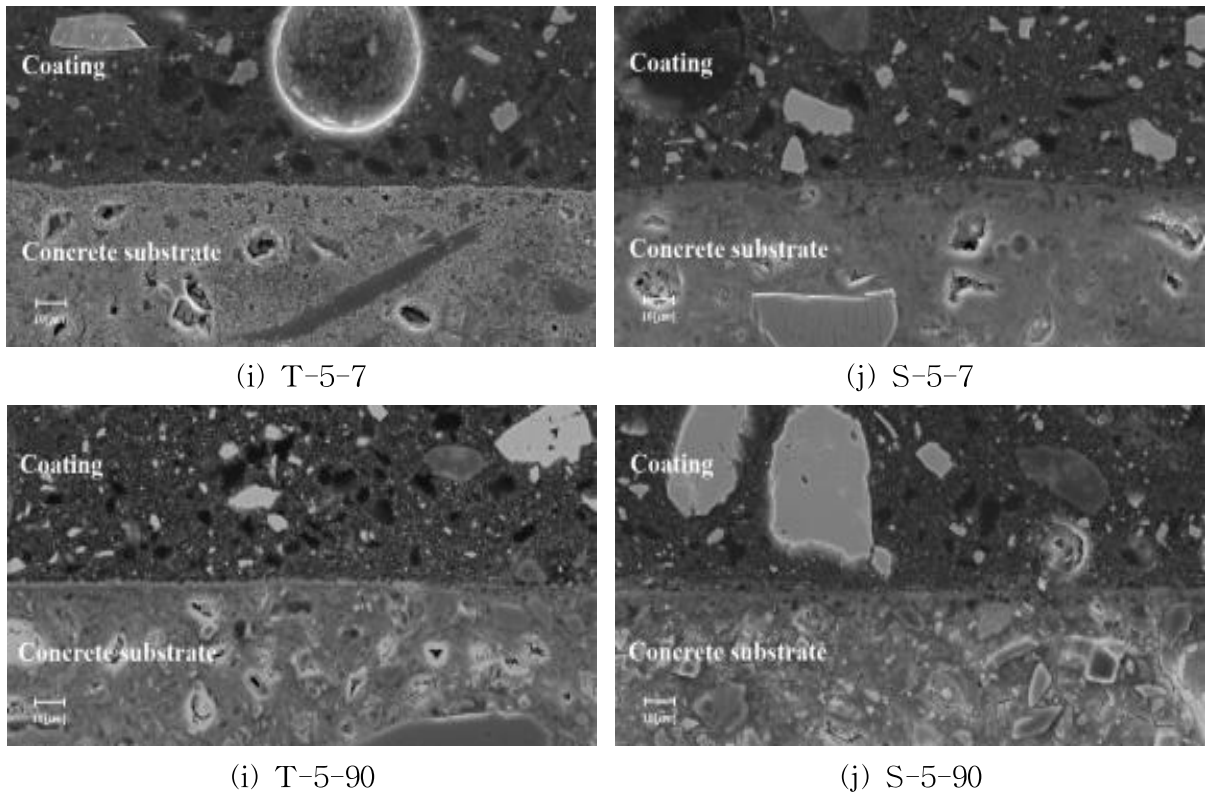
<그림 6-8> 코팅재료 3과 콘크리트 사이 계면 상태

- <그림 6-9>는 7일, 90일에서 수돗물과 해수에서 코팅재료 4의 계면상태를 보여줌
- 노출환경이 수돗물인 경우, 코팅재료 4는 7일에서 명확하게 코팅과 콘크리트 사이 계면을 따라 균열이 보이지만, 90일에서 계면과 콘크리트 사이 계면에 일부 균열이 보이고 일부 구간에서 균열이 매워진 것으로 확인됨
- 이로 인해 수돗물에 노출된 코팅재료 4의 부착강도는 노출기간이 7일에서 90일로 증가하면서 3.33에서 3.78 MPa로 0.45 MPa 증가함
- 그리고, 해수환경에서는 7일 노출된 코팅재료4는 계면을 따라 균열이 이미 발생되어 있으나, 90일 노출되면서 계면의 균열이 일부 채워져 부착강도는 2.53에서 3.66 MPa로 약 1.13 MPa 증가하는 경향을 보여줌
- 결국 코팅재료 4은 수돗물과 해수에서 모두 노출기간이 증가하면서 부착강도가 다소 증가한 것으로 확인되었으며, 이는 코팅재료 4의 밀도가 코팅제 자체의 손상을 보여준 코팅재료 2를 제외하면 1.55 g/m^3 로 가장 작아 양생일이 지나면서 콘크리트 내부에 물의 접촉을 완전히 차단하지 못한 것으로 판단되며, 이러한 수분공급으로 인해 초기 28일 노출기간동안에 수분흡수에 의해 크게 부착강도가 저하되지만 이후 수분내의 이온들이 수화물과 반응하여 장기적으로 콘크리트의 강도증진으로 인해 부착강도가 높게 나타난 것으로 판단됨



(g) T-4-7 (h) S-4-7
(g) T-4-90 (h) S-4-90
<그림 6-9> 코팅재료 4와 콘크리트 사이 계면 상태

- <그림 6-10>은 7일, 90일에서 수돗물과 해수에서 코팅재료 5의 계면상태를 보여줌
- 노출환경이 수돗물인 경우, 코팅재료 5는 7일에서 90일로 노출기간이 증가하더라도 코팅재료와 콘크리트 사이 계면에 큰 변화는 보이지 않았으나 부착강도는 노출기간이 7일에서 90일로 증가하면서 3.14에서 1.93 MPa로 약 1.21 MPa 감소함
- 그리고, 해수환경에서는 7일에서 90일로 노출기간이 증가하더라도 코팅재료와 콘크리트 사이 계면에 큰 변화는 보이지 않았고 부착강도는 3.40에서 3.37 MPa로 0.03 MPa 감소함
- 결국 코팅재료 5는 수돗물과 해수환경에서 모두 대기환경보다 부착강도는 감소하였고, 수돗물에 90일 노출된 경우, 부착강도가 대폭 감소한 것을 확인할 수 있었으며 해수 환경에서는 부착강도의 감소가 수돗물 환경에서보다 적게 발생하여 높은 부착강도를 유지할 수 있었음

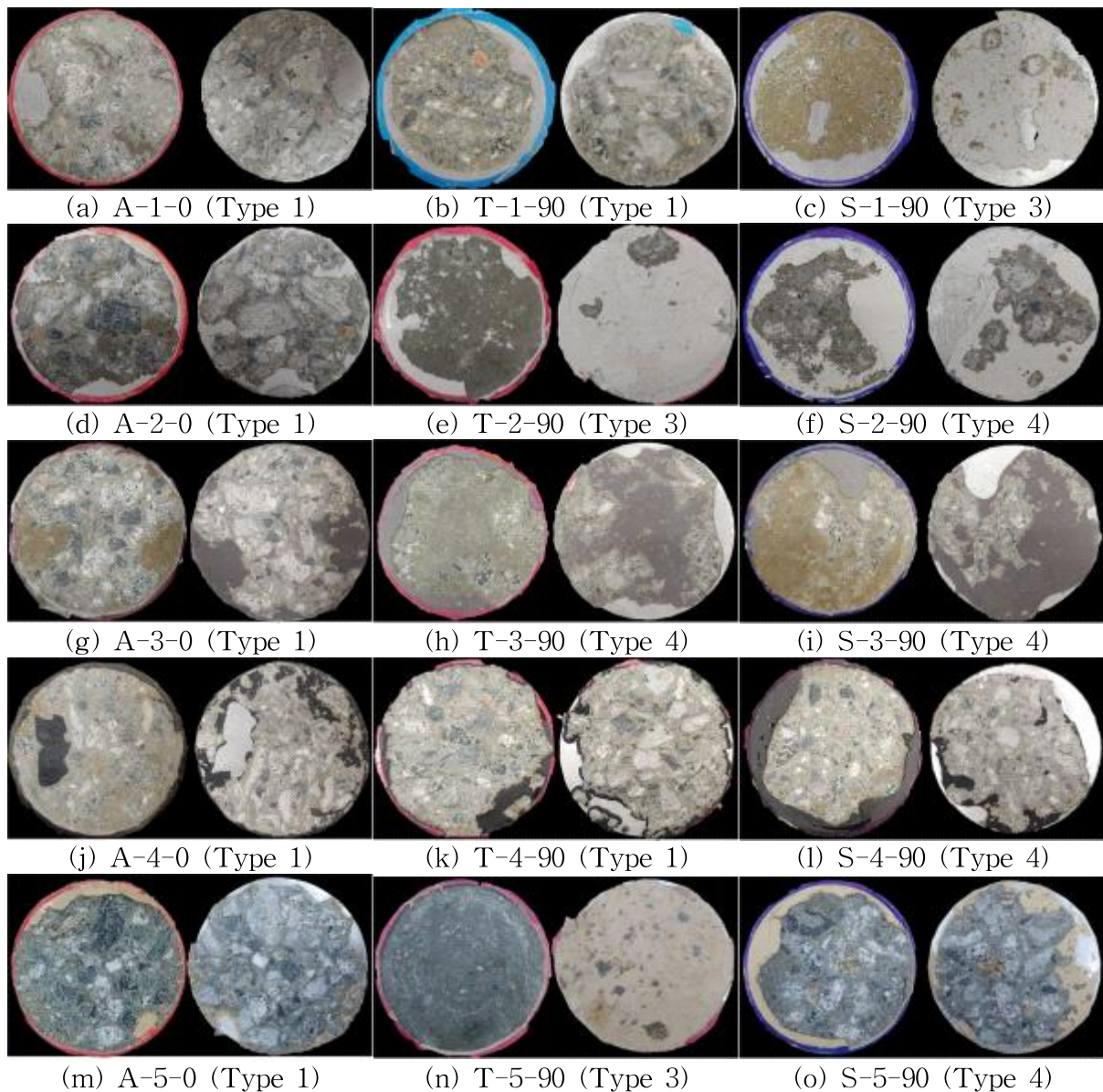


<그림 6-10> 코팅재료 5와 콘크리트 사이 계면 상태

- 요약하자면, 노출 환경이 부착강도에 미치는 영향은 코팅재료에 따라 크게 변동되었으며 코팅재료의 결정시 노출환경은 매우 중요한 요소이며, 밀도가 낮은 코팅재료 2와 4는 수돗물과 해수에서 모두 사용이 부적합한 것으로 판단됨
- 코팅재료 2와 4를 제외하면 수돗물환경에서는 코팅재료1이 해수환경에서는 코팅재료 5가 가장 높은 부착강도를 보여 노출환경에 따라 코팅재료를 선별할 필요성이 있음

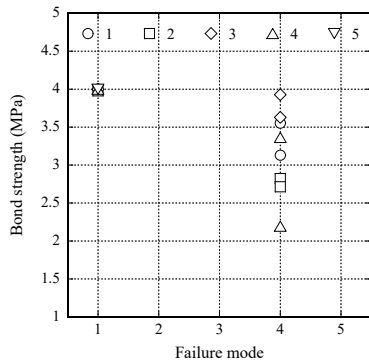
6.2.3. 부착파괴 양상과 부착강도의 상관관계

- 파괴양상의 구분은 <표 6-1>에 나타낸 Liu and Vipulanandan (2005)가 제시한 분류를 통해 진행하였으며 Type 1은 콘크리트 파괴, Type 2는 코팅재료 파괴, Type 3은 부착 계면파괴, Type 4는 부착 계면과 콘크리트 합성파괴, 그리고 Type 5는 부착 계면과 코팅재료 합성파괴임
- 코팅재료별로 발생한 부착파괴양상을 확인하기 위해서 아래 그림 <6-11>에 보이는 것 같이, 좌측에 콘크리트 파괴 면을 우측에는 돌리의 파괴 면을 보고 파괴양상을 결정함

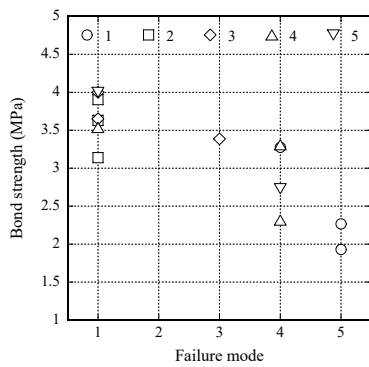


<그림 6-11> 부착시험 후 콘크리트와 돌리의 표면 파괴양상

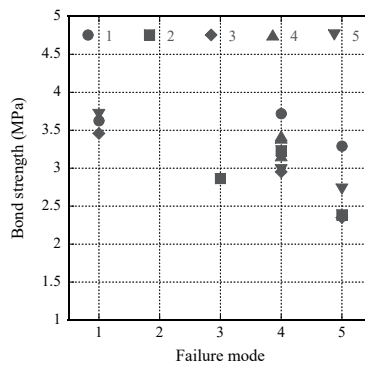
- <그림 6-12>는 단기 노출기간 (0 - 28일)에서 시험된 각 시험체의 부착강도와 파괴양상을 보여줌
- 코팅재료 1은 원, 코팅재료 2는 사각형, 코팅재료 3은 마름모, 코팅재료 4는 삼각형, 그리고 코팅재료 5는 역삼각형으로 나타내었으며, 노출 환경에 따라 대기환경은 하얀색, 수돗물 환경은 회색, 그리고 해수 환경은 검은색으로 나타냄
- <그림 6-12 a>은 노출되지 않은 0일차의 부착강도와 파괴양상을 보여주고 있으며, 모두 콘크리트 파괴가 주를 이루는 Type 1과 Type 4로 부착파괴가 발생됨
- 이후 7일 동안 대기 노출된 경우, <그림 6-12 b>에 보이는 것 같이, 콘크리트 파괴가 주를 이루는 Type 1과 Type 4의 비율이 여전히 높지만, 일부에서 완전히 계면에서 파괴되는 Type 3과 코팅과 계면의 파괴가 혼합하여 발생하는 Type 5가 발생함
- 반면에, <그림 6-12 c>에 보이는 것 같이, 7일간 수돗물에 노출된 시험체는 계면과 콘크리트의 파괴가 혼합되어 발생하는 Type 4와 계면과 코팅의 파괴가 혼합되어 발생하는 Type 5가 주로 발생함
- 그리고 <그림 6-12 d>에 보이는 것 같이, 7일간 해수에 노출된 시험체는 Type 4의 파괴가 주를 이루며 일부 Type 1, 3, 5가 발생함
- <그림 6-12 e>에 보이는 것 같이, 28일 대기 노출되면서 7일 대기 노출에서 발생한 파괴양상과 큰 차이를 보이지 않지만, 코팅재료 1에서 발생한 Type 5 파괴양상이 보이지 않았음
- <그림 6-12 f>에 보이는 것 같이, 28일간 수돗물에 노출된 경우 역시 7일 수돗물 노출되었을 때와 파괴양상이 크게 변하지 않았으나, 동일한 파괴양상에서 강도가 감소하는 경향을 보여줌
- <그림 6-12 g>에 보이는 것 같이, 28일간 해수에 노출된 경우 7일 수돗물 노출되었을 때와 파괴양상이 유사하여 큰 변화를 보여주지 않았음
- 결국 단기 노출기간 (0 - 28일)에서는 주된 파괴양상이 Type 1과 Type 4가 주를 이루며 노출기간이 증가하면서 Type 3과 Type 5가 일부 발생하였으며 특히 수돗물에서 계면과 코팅의 파괴가 증가하는 경향을 보여줌
- 결국 동일한 코팅재료에서 보았을 때, 부착강도가 높은 순으로 파괴양상을 정리하면, Type 1, Type 4, Type 3, 그리고 Type 5순으로 코팅재료 파괴가 발생하는 비율이 증가할수록 부착강도가 감소하는 양상을 보여줌



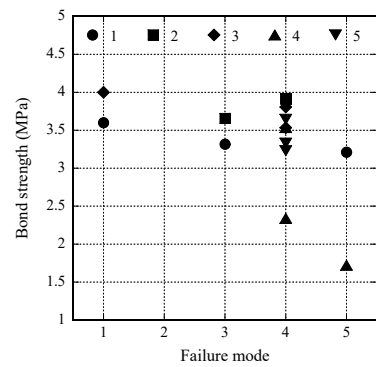
(a) 0일



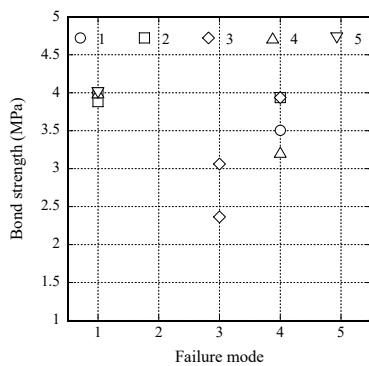
(b) 7일 대기



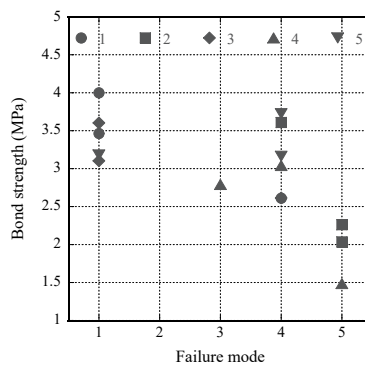
(c) 7일 수돗물



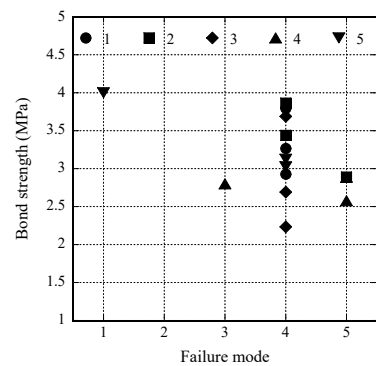
(d) 7일 해수



(e) 28일 대기



(f) 28일 수돗물

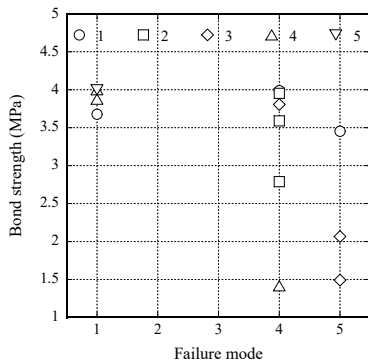


(g) 28일 해수

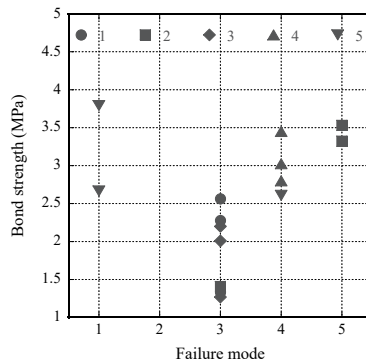
〈그림 6-12〉 단기 노출기간(0-28일)에서 환경에 따른 파괴양상별 부착강도

- <그림 6-13>은 중기 노출기간 (56 - 90일)에서 시험된 각 시험체의 부착강도와 파괴양상을 보여줌
- <그림 6-13 a>는 56일 대기 환경에 노출된 부착강도와 파괴양상을 보여주며, 주 파괴는 지속적으로 Type1과 Type 4가 주를 이루고 있으며, 부분적으로 Type 5 파괴를 보여주었고 부착강도는 다소 감소하는 경향을 보여줌
- 반면에 <그림 6-13 b>에 보이는 것 같이, 56일 수돗물 환경에 노출되었을 때, 주를 이루는 파괴양상이 Type 3로 나타났으며, 단기 노출기간과 달리 Type 3의 부착강도가 2.5 MPa 이하로 단기에서 보여준 Type 3 부착강도 보다 크게 감소한 결과를 보여줌

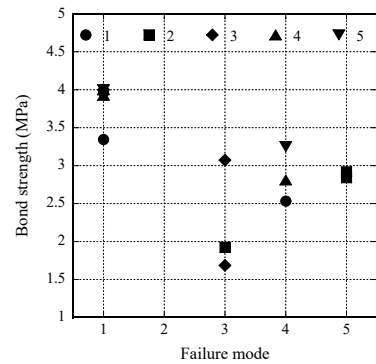
- <그림 6-13 c>에 보이는 것 같이, 56일 해수 환경에 노출된 경우에는 Type 3의 발생 비율은 다소 증가하였지만, 수돗물 환경에 노출되었을 때 보다 전체 파괴양상에서 Type 3은 낮은 비율을 차지하고 있으며, 해수 노출된 Type 3의 부착강도는 수돗물에서 보다 다소 높은 경향을 보여줌
- 90일로 노출기간이 증가하면서, <그림 6-13 d>에 보이는 것 같이, 90일 대기 환경에 노출된 경우 부착 파괴양상의 변화는 크게 발생하지 않았으며, 주요 파괴양상은 Type 1과 Type 5 임
- 반면에, <그림 6-13 e>에 보이는 것 같이, 90일 수돗물 환경에 노출된 경우 56일 수돗물 환경에 노출되었을 때와 유사한 파괴양상의 비율을 보여주었음
- <그림 6-13 f>에 보이는 것 같이, 90일 해수 환경에 노출된 경우는 주요 파괴양상이 Type 4이며, 56일에서 보다 Type 3의 발생비율이 감소하였음
- 결국, 단기노출에서 중기노출 기간으로 노출기간이 증가하면서 수돗물과 해수에서 Type 3의 발생비율이 증가하였으며, 계면 파괴 시 부착강도가 크게 감소하였으며, 수돗물 환경에서 계면파괴의 비율이 가장 크게 나타남



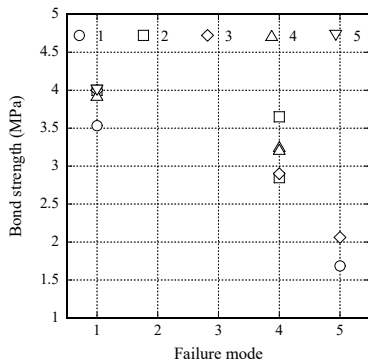
(a) 56일 대기



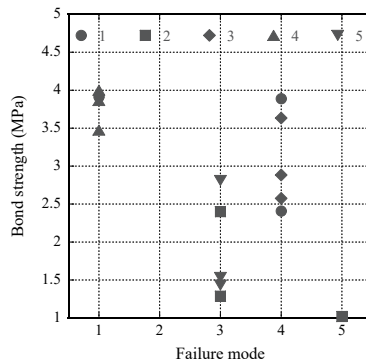
(b) 56일 수돗물



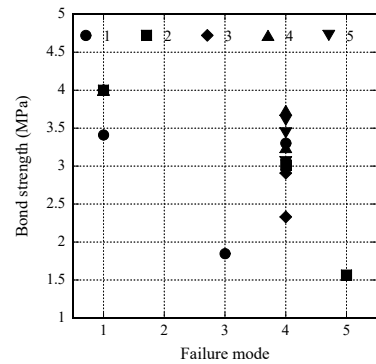
(c) 56일 해수



(d) 90일 대기



(e) 90일 수돗물

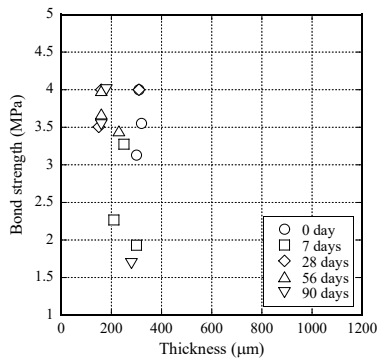


(f) 90일 해수

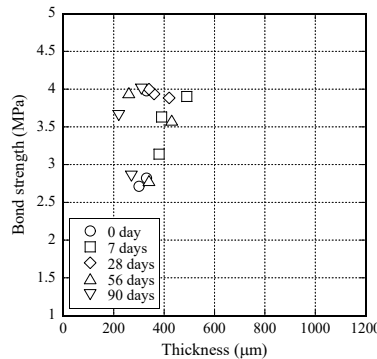
<그림 6-13> 중기 노출기간(56-90일)에서 노출환경에 따른 파괴양상별 부착강도

6.2.4. 에폭시 코팅 두께와 부착강도의 상관관계

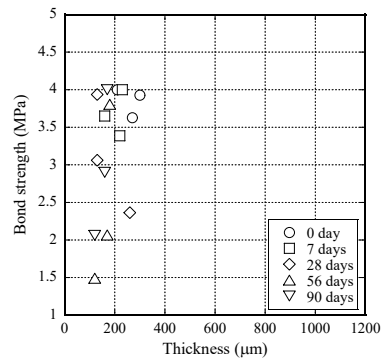
- 에폭시 코팅의 두께와 부착강도의 상관관계는 코팅 두께가 감소할수록 부착강도가 증가한다는 이전의 연구들을 통해 확인할 수 있었음 [Kim et al. (2019), Won et al. (2019)]
- 하지만, 이러한 연구들은 수중에서 강관과 콘크리트를 코팅하여 측정한 결과이며, 노출조건 역시 수돗물에 한정되어 있으므로 대기에서 코팅을 진행한 본 연구에서도 코팅두께와 부착강도의 상관관계를 파악할 필요가 있음
- <그림 6-14>는 대기 환경 노출에서 코팅재료별 부착강도와 코팅두께의 관계를 보여 주며, 원형은 0일, 사각형은 7일, 마름모는 28일, 삼각형은 56일, 그리고 역삼각형은 90 일을 나타냄
- 코팅재료와 노출기간과 상관없이, 대기 환경 노출에서는 코팅두께가 부착강도에 어떠한 영향도 미치지 않은 것으로 확인되나, 대체로 코팅두께가 500 μm이하로 나타나 명확하게 경향을 단정할 수 없었음



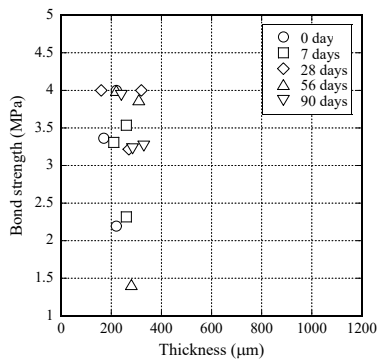
(a) 코팅재료 1



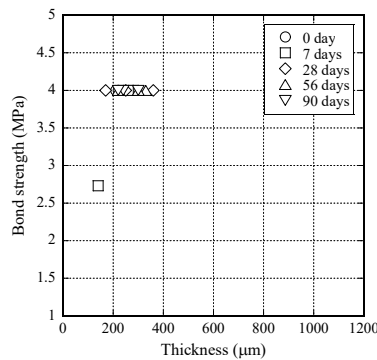
(b) 코팅재료 2



(c) 코팅재료 3



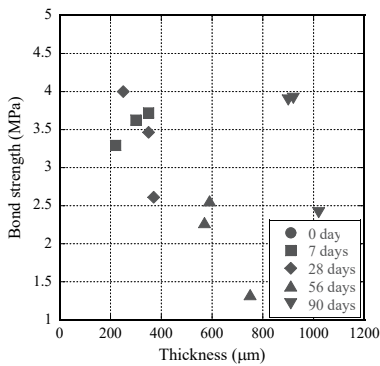
(d) 코팅재료 4



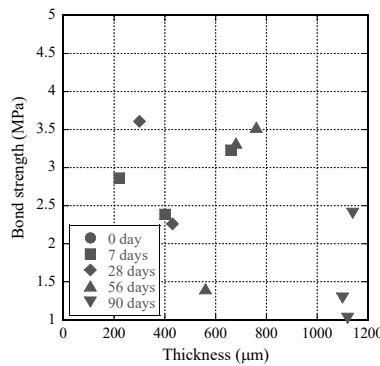
(e) 코팅재료 5

<그림 6-14> 대기 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향

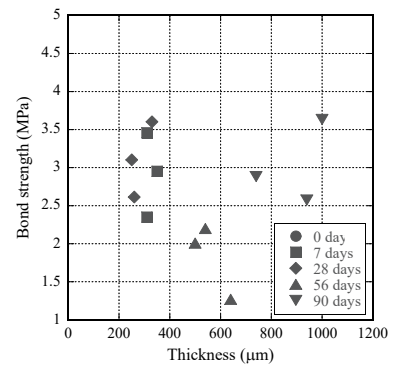
- <그림 6-15>는 수돗물 환경 노출에서 코팅재료별 부착강도와 코팅두께의 관계를 보여줌
- 일반적으로 수돗물 환경 노출에서 모든 코팅재료는 대체로 코팅두께가 증가하면서 부착강도는 감소하는 경향을 보여줌
- 코팅재료별로 약간의 차이는 나타나지만, 대체로 코팅두께가 500 μm 이상이 되면서 전체적으로 부착강도가 감소함
- 하지만 코팅재료 4는 500 μm 이상으로 코팅이 진행되지 않아, 코팅 두께가 증가할 때 부착강도가 감소하는 경향을 확인할 수 없었음



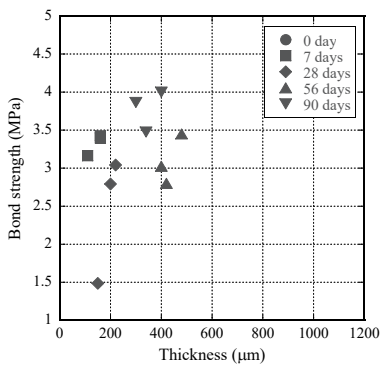
(a) 코팅재료 1



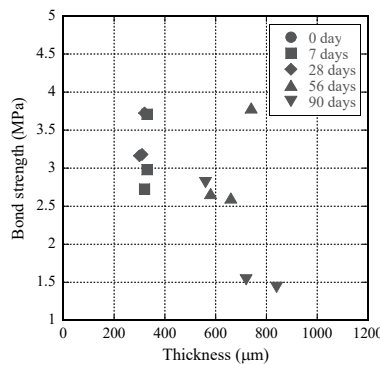
(b) 코팅재료 2



(c) 코팅재료 3



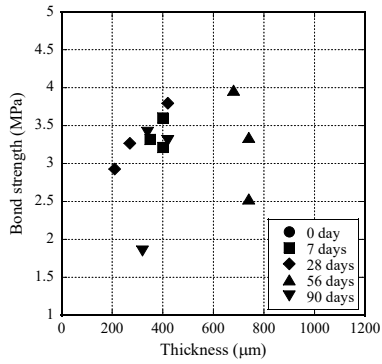
(d) 코팅재료 4



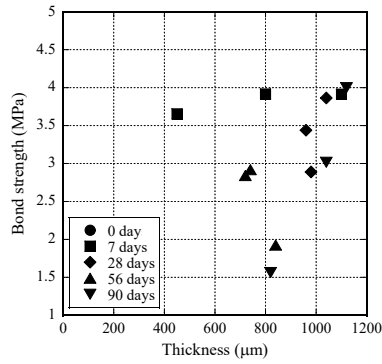
(e) 코팅재료 5

<그림 6-15> 수돗물 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향

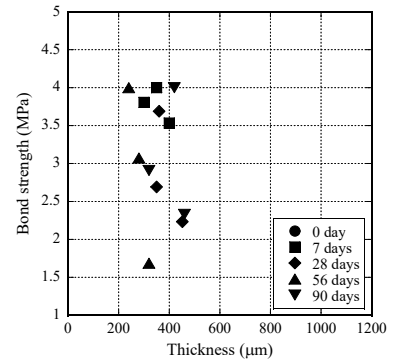
- <그림 6-16>은 해수 환경 노출에서 코팅재료별 부착강도와 코팅두께의 관계를 보여줌
- 코팅재료와 노출기간과 상관없이, 해수 환경 노출에서는 코팅두께가 부착강도에 어떠한 영향도 미치지 않은 것으로 확인됨



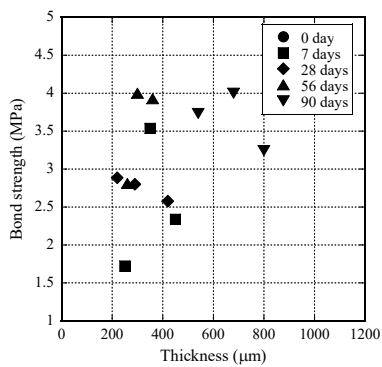
(a) 코팅재료 1



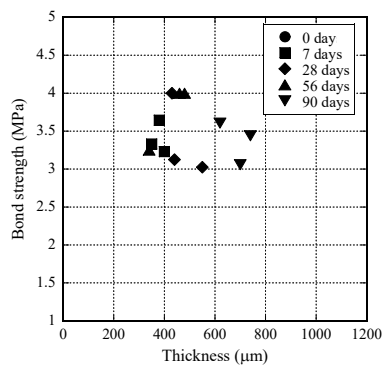
(b) 코팅재료 2



(c) 코팅재료 3



(d) 코팅재료 4



(e) 코팅재료 5

〈그림 6-16〉 해수 환경 노출에서 코팅두께가 부착강도에 미치는 영향

- 요약하자면, 수돗물 환경에서 노출된 코팅재료들은 500 μm 이상에서 코팅두께가 증가로 인하여 부착강도가 감소하는 경향을 보여주었음
- 대기조건의 경우 수돗물과 달리 500 μm 이상의 코팅두께가 확인되지 않아 두께와 부착강도의 상관관계를 명확히 확인할 수 없었음
- 하지만 해수 환경에 노출된 코팅재료들은 코팅 두께가 증가하더라도 부착강도의 감소가 발견되지 않았음

6.3. 에폭시 코팅재료의 환경영향성 평가

- 에폭시 코팅재료의 환경영향성을 평가하기 위해 각 코팅재료를 노출시킨 수돗물과 해수의 수질을 측정함 (<그림 3-16> 참조)
- 수질의 측정은 수질 측정기를 통해 수돗물 및 해수의 전기전도도(Electrical conductivity)를 측정된 결과를 각각 <표 6-6>, 그리고 <표 6-7>에 나타냄
- 측정시간은 에폭시 코팅을 담근 후 5분, 30분, 1시간, 2시간, 4시간, 6시간, 1일, 2일, 3일, 5일, 7일, 14일, 21일, 28일, 35일, 56일, 그리고 90일에 측정을 실시함
- <표 6-6>에 보이는 것 같이, 수돗물에 에폭시 코팅을 담근 전기전도도는 노출기간이 증가하면서 전기전도도가 서서히 증가하는 결과를 보임
- 앞서 4.7장에서 다룬 시멘트 계열의 전기전도도가 동일조건에서 초기 4시간 노출되었을 때 1500 mS/m까지 증가하는 반면 표면에 에폭시 코팅을 처리한 경우 전기전도도는 대략 0.2에서 1.4 mS/m 증가함

<표 6-6> 에폭시 코팅을 담근 수돗물의 전기전도도의 변화

Exposure period			Type of coatings				
			1	2	3	4	5
Min	Hour	Day	mS/m	mS/m	mS/m	mS/m	mS/m
0			29.2	28.6	28.1	28.4	28.2
5			29.8	28.6	28.6	28.7	28.3
30			30.6	28.7	28.7	28.7	28.3
60	1		30.6	28.8	28.7	28.8	28.4
120	2		30.6	28.9	28.9	28.9	28.4
240	4		30.6	28.9	29.0	28.9	28.4
360	6		30.6	29.1	29.2	29.2	28.6
1440	24	1	30.1	28.9	29.5	29.3	28.6
2880	48	2	31.6	29.0	29.9	29.4	28.5
4320	72	3	31.7	29.2	30.4	29.8	28.7
7200	120	5	32.5	29.3	31.1	30.2	28.9
10080	168	7	33.2	29.6	31.8	30.8	29.0
20160	336	14	35.0	29.7	33.8	32.4	29.0
30240	504	21	37.2	29.9	36.0	34.6	29.3
40320	672	28	39.35	30.3	37.7	37.3	29.6
50400	840	35	41.5	30.7	39.4	39.9	29.8
80640	1344	56	47.8	31.2	45.1	48.6	30.0
129600	2160	90	59.1	33.3	54.1	65.1	30.2

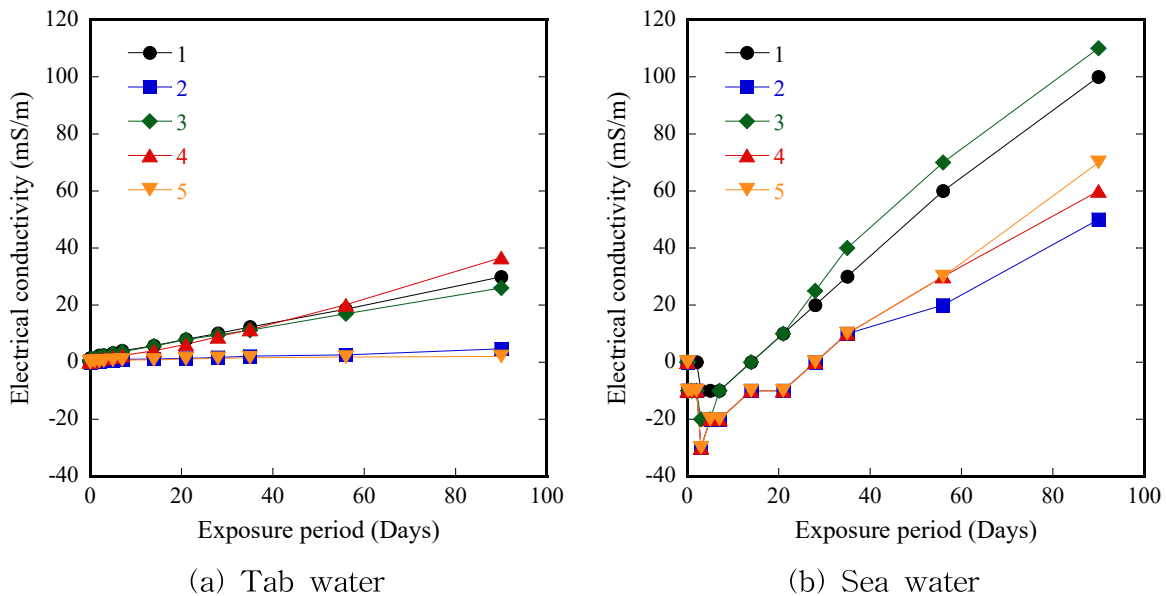
- 반면에, <표 6-7>에 보이는 것 같이, 해수에 에폭시 코팅을 담근 전기전도도는 노출 기간이 증가하면서 초기 (7에서 21일까지) 전기전도도는 약 10에서 30 mS/m 만큼 감소한 후 이후 서서히 증가하는 경향을 보여줌

<표 6-7> 에폭시 코팅을 담근 해수의 전기전도도의 변화

Exposure period			Type of coatings				
			1	2	3	4	5
Min	Hour	Day	mS/m	mS/m	mS/m	mS/m	mS/m
0			3440	3450	3450	3450	3450
5			3440	3450	3450	3450	3450
30			3440	3450	3450	3450	3450
60	1		3440	3450	3450	3450	3450
120	2		3440	3450	3450	3440	3450
240	4		3440	3440	3450	3440	3440
360	6		3440	3440	3440	3440	3440
1440	24	1	3440	3440	3440	3440	3440
2880	48	2	3440	3440	3440	3440	3440
4320	72	3	3430	3420	3430	3420	3420
7200	120	5	3430	3430	3430	3430	3430
10080	168	7	3430	3430	3440	3430	3430
20160	336	14	3440	3440	3450	3440	3440
30240	504	21	3450	3440	3460	3440	3440
40320	672	28	3460	3450	3475	3450	3450
50400	840	35	3470	3460	3490	3460	3460
80640	1344	56	3500	3470	3520	3480	3480
129600	2160	90	3540	3500	3560	3510	3520

- 수중의 전기전도도가 증가한다는 것은 수중에 이온의 농도가 증가함을 의미하며, 이러한 이온은 코팅재료가 수중에서 유출된 것으로 판단됨
- 이렇게 유출된 이온의 양을 확인하기 위해서 전기전도도의 변화량을 <그림 6-17>에 나타냄
- <그림 6-17 a>에서 보이는 것 같이, 수돗물에 이온유출은 코팅재료 4, 1, 3, 2, 그리고 5 순은 나타났으며, 90일 노출된 각 코팅재료의 부착강도는 4, 1, 3, 5, 그리고 2 순으로 각각 3.78, 3.4, 3.08, 1.93, 그리고 1.57 MPa 로 나타남
- 그러므로 수돗물 노출환경에서 코팅재료에서 침출된 이온의 농도가 증가할수록 부착강도는 높은 결과를 보여줌

- 반면에 <그림 6-17 b>에서 보이는 것 같이, 해수에 이온유출은 코팅재료 3, 1, 5, 4, 그리고 2 순은 나타났으며, 90일 노출된 각 코팅재료의 부착강도는 4, 5, 3, 2, 그리고 1 순으로 각각 3.66, 3.37, 3.08, 2.86, 그리고 2.86 MPa 로 나타남
- 그러므로 해수 노출환경에서는 수돗물 노출과는 달리 코팅재료에서 침출된 이온의 농도가 부착강도에 큰 영향을 미치지 않았음

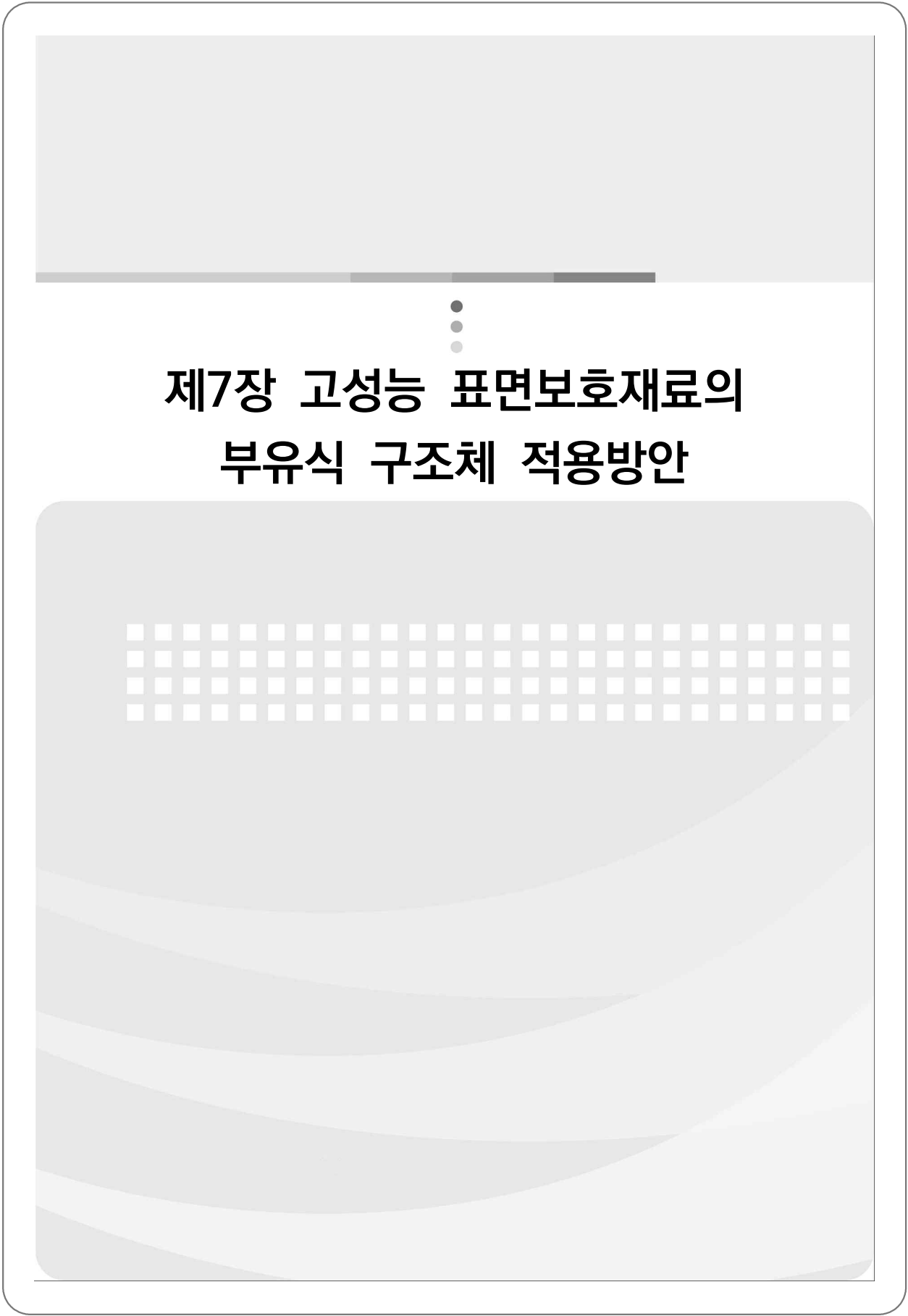


<그림 6-17> 코팅 노출기간에 따른 수질의 변화

6.4. 결론 및 제언

- 6장에서는 기존 코팅재료인 상용 에폭시 재료 5종을 사용하여 대기, 수돗물, 그리고 해수에서 7 - 90일간 노출된 코팅재료와 콘크리트 사이 부착강도를 ASTM D 4541 에 따라 조사함
- 코팅재료의 부착강도가 변화하는 이유를 확인하기 위해서 추가적으로 코팅재료와 콘크리트 사이 계면의 SEM image 촬영과 부착 파괴양상 확인, 코팅두께 측정 (ASTM D4138), 그리고 에폭시 코팅에 의한 수질의 변화를 조사함
- 코팅재료의 부착강도는 코팅재료와 노출환경, 그리고 노출기간에 따라 큰 차이를 보여 주었으며, 노출조건에 따라 코팅재료의 성능은 아래와 같이 나타남
 - 대기 환경의 경우, 90일간 노출되었을 때 코팅재료 5는 부착강도 4.00 MPa를 보여주면서 가장 높은 부착강도를 보여주어 대기 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 5가 가장 적합한 것으로 판단됨

- 수돗물 환경의 경우, 90일 간 노출되었을 때 코팅재료 4와 1의 부착강도가 3.78과 3.4 MPa 로 높은 부착강도를 보여주었으나, 코팅재료 4의 경우 낮은 밀도와 높은 이온 유출로 인해, 수돗물 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 1이 가장 적합한 것으로 판단됨
- 해수 환경의 경우, 90일간 노출되었을 때 코팅재료 4와 5의 부착강도가 3.66과 3.37 MPa 로 높은 부착강도를 보여주었으며, 이온의 침출 역시 다른 코팅재료에 비해 적은 농도로 나타났으나, 코팅재료 4의 경우 낮은 밀도로 인해, 해수 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 5의 사용이 적합한 것으로 판단됨
- 코팅재료의 부착강도는 일반적으로 노출기간이 증가하면서 감소하는 경향을 보여주었으나 밀도가 낮은 코팅재료 2와 4는 0일차의 부착강도보다 노출환경 기간이 증가하면서 수돗물과 해수에 노출된 경우, 부착강도가 증가하는 경향을 보여주어 콘크리트에 수분을 지속적으로 공급하여 콘크리트의 강도가 향상되었을 것으로 판단됨
- 그러므로 추후 에폭시 코팅 재료의 물 흡수율에 대해 상세히 조사할 필요성이 있으며, 이에 따라 콘크리트에 수분의 전달 양을 확인할 필요성이 있음



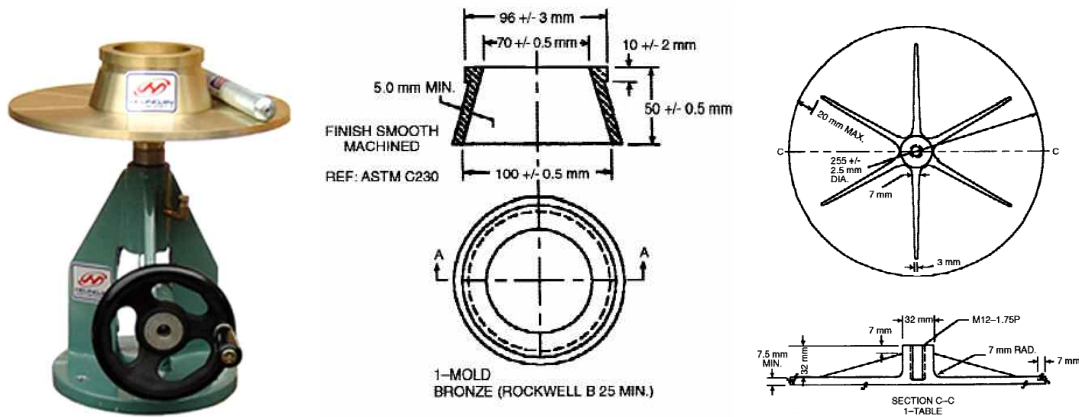
⋮

제7장 고성능 표면보호재료의 부유식 구조체 적용방안

7. 고성능 표면보호재료의 부유식 구조체 적용방안

7.1. 표면보호재료의 사용이 작업성, 시공성에 미치는 영향

- 표면보호재료의 사용이 작업성, 시공성에 미치는 영향을 확인하고자, KS L 5111과 ASTM C 230이 제시하는 수경성 시멘트 모르타르 시험용 flow 테이블을 사용하여 ASTM C 1437규정에 따라 시멘트 모르타르의 flow 시험을 수행함
- <그림 7-1>은 수경성 시멘트 모르타르 시험용 flow 테이블을 보여줌



<그림 7-1> 수경성 시멘트 모르타르 시험용 flow 테이블

- Flow의 측정은 총 2회 진행되었으며, flow mold에 배합이 종료된 시멘트 모르타르를 mold에 높이로 25 mm씩 2회에 걸쳐 타설하고 1회 타설시 20회의 다짐을 실시함
- 타설이 종료된 뒤 mold를 수직으로 들어 제거하고, 회전 손잡이를 회전시켜 테이블을 15초 동안 25회 낙하시키고 시멘트 모르타르의 직경을 측정하여 평균함
- 측정된 시멘트 모르타르의 flow값을 아래 <표 7-1>에 나타냄

<표 7-1> 시멘트 모르타르의 배합 무게비와 flow

Type	W/B ratio	Cement	Silica sand	Silica fume (SF)	Metakaolin (MK)	Glass powder (GP)	Flow (mm)		
							1 st	2 nd	Avg.
Control	0.5	1	1.1	-	-	-	244	250	247
SF-5		0.95		0.05	-	-	216	224	220
SF-10		0.90		0.1	-	-	190	203	197
MK-5		0.95		-	0.05	-	227	237	232
MK-10		0.90		-	0.1	-	221	234	228
GP-5		0.95		-	-	0.05	237	246	242
GP-10		0.90		-	-	0.1	230	237	234

- 표면보호재료 용도로 시멘트 모르타르를 적용하는 방법에 대한 규정은 아직까지 존재하지 않으며, 시멘트 모르타르의 flow 역시 명확한 기준이 없음
- 하지만, 혼화제의 치환율이 증가하면서 flow 값은 감소하였으며, flow의 값의 감소는 작업성 및 시공성이 감소함을 의미함
- “콘크리트 표준시방서 2016”은 표면보호를 위한 시멘트 모르타르 보수·보강 재료는 대상구조물에 대하여 비교적 얇은 부재에 의하여 소요의 목적을 이루는 것이기 때문에 사용하는 재료는 강도, 내구성, 수밀성이 특히 우수한 것으로 결정해야한다고 제시함
- 또한, “콘크리트 표준시방서 2016”에서는 해양콘크리트에 관하여 ‘모래입자를 포함하고 있는 유수, 모래와 자갈을 포함한 파랑 작용, 선박의 충격 등의 심한 영향을 받는 콘크리트 구조물에서는 고무 완충재, 목재, 양질의 석재, 강재 및 고분자재료 등 적당한 재료로 표면을 보호하거나 철근의 피복두께 또는 단면을 증가시켜야 한다.’고 규정하고 있으며 본 연구의 표면보호 시멘트 모르타르는 철근의 피복두께 또는 단면을 증가시키는 대책에 해당함
- 그러므로, 현재 개발된 시멘트 모르타르는 flow가 180 mm 이상 확보되어 작업성 및 시공성에 별다른 영향을 미치지 않으며, “콘크리트 표준시방서 2016”에 따라 해양 콘크리트에 대해 콘크리트 표면의 보호 및 염해방지 대책을 규정화하여 표면보호 시멘트 모르타르의 사용이 가능함

7.2. 표면보호재료의 성능 재현을 위한 믹싱 가이드라인

- 표면보호재료로 시멘트 모르타르를 사용하기 위해서는 성능 재현(Repeatability)이 가능해야함
- 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성을 재현하기 위해서는 시멘트 모르타르를 제작하는 표준화된 절차가 필요함
- KS L ISO679 “시멘트의 강도 시험 방법”에서는 시멘트, 잔골재, 그리고 배합수를 사용한 모르타르의 믹싱 절차를 제시하고 있으나, 본 연구에서 사용된 표면보호 시멘트 모르타르는 혼화제를 추가적으로 사용하고 있음
- 혼화제를 사용하는 시멘트 모르타르는 배합수에 시멘트와 잔골재를 투입하는 KS L ISO679에 방식을 사용하면 시멘트와 혼화제의 혼합이 완벽히 이루어지지 않을 수 있음
- 그러므로 KS F 2476 “폴리머 시멘트 모르타르의 시험방법”에서 제시하는 것 같이 시멘트, 혼화제, 그리고 잔골재를 건조한 상태에서 혼합하는 방식을 사용하고 아래와 같은 절차로 혼합하는 것을 원칙으로 함
 - 먼저 혼합용기에 계량한 시멘트, 잔골재, 그리고 혼화제를 투입하여 건조한 상태에서 5분간 혼합함

- 혼합을 진행하면서 물을 약 3분간 서서히 넣고 30초간 혼합을 멈추고, 그 사이에 패들과 혼합용기 표면에 붙은 모르타르를 긁어 떨어뜨림
- 다시 혼합기를 가동하여 약 5분간 혼합함
- 혼합이 완료된 시멘트 모르타르는 ASTM C 1437을 따라 flow 시험을 진행하고 상기 <표 7-1>에 나타난 flow 값과의 차이가 11% 이내가 되도록 함

7.3. 부유식 구조체의 적용을 위한 시공방법

- 콘크리트 부유식 구조체는 현장 타설보다 프리캐스트 형식으로 제작되며, 제작된 구조체의 표면을 보호하기 위해서 시멘트 모르타르를 시공할 수 있는 방식은 1) 거푸집 설치 후 타설하는 방법과 2) 뿔어 붙이기 시공방식으로 나눌 수 있음
- 본 연구에서는 뿔어 붙이기 시공방식은 다루지 않음
- 표면보호 시멘트 모르타르의 적용을 위해 사용되는 거푸집의 재료는 다음과 같이 결정되어야 함
 - 거푸집으로 사용되는 합판은 KS F 3110의 규정에 적합하여야 함
 - 흠집 및 웅이가 많은 거푸집과 합판의 접착 부분이 떨어져 구조적으로 약한 것은 사용할 수 없음
 - 거푸집의 띠장은 부러지거나 균열이 있는 것을 사용해서는 안 됨
 - 거푸집에 사용되는 합판은 내알칼리성이 우수한 재료로 표면처리된 것이어야 함
 - 금속제 거푸집은 KS F 8006의 규정에 적합한 것이어야 함
 - 형상이 찌그러지거나 비틀림 등의 변형이 있는 것은 교정한 다음 사용하여야 함
 - 금속제 거푸집의 표면에 녹이 많이 발생한 경우에는 쇠솔 또는 샌드페이퍼 등으로 제거하고 박리제를 얇게 칠하여 사용하여야 함
 - 거푸집널을 재사용하는 경우에는 콘크리트에 접하는 면을 깨끗이 청소하고 볼트용 구멍 또는 파손 부위를 수선한 후 사용해야함
 - 목재 거푸집널은 콘크리트의 경화 불량을 방지하기 위하여 직사광선에 노출되지 않도록 씌우개로 덮어두어야 함
 - 재제한 목재를 거푸집널로 사용할 경우에는 콘크리트와 접하는 면은 대패질한 후 사용함
- 거푸집 및 동바리는 콘크리트 시공 중의 하중, 콘크리트의 측압, 부어넣을 때의 진동 및 충격 등에 견디도록 하고, 콘크리트를 시공했을 때 시공허용오차를 초과 하지 않도록 거푸집을 제작 및 조립함
- 거푸집의 허용오차는 콘크리트 표준시방서 (2016)에 제2장 3.8.5.3 콘크리트 부재의 위

- 치 및 형상 치수의 검사에서 정한 허용오차 이내 이도록 함
- 콘크리트 부재의 위치 및 형상치수의 검사는 그 구조물의 특성에 적합한 별도의 규준을 정하여 실시함 [콘크리트 표준시방서 (2016)]
 - 아직까지 콘크리트 부유식 구조체에 대한 허용오차는 기준이 없으므로 부재 길이의 $\pm 0.01\%$ 로 함
 - 거푸집은 부유식 구조체가 수면과 닿는 면 전체를 대상으로 기존 구조체의 면에서 20 mm 이상 이격하여 설치함
 - 거푸집의 설치가 완료되면, 7.2절에 따라 배합된 시멘트 모르타르를 타설하며, 타설시 유의사항은 다음과 같음
 - 한 구획내의 시멘트 모르타르는 타설이 완료될 때까지 연속해서 타설하여야 함
 - 시멘트 모르타르는 그 표면이 한 구획 내에서는 거의 수평이 되도록 타설하는 것을 원칙으로 함
 - 시멘트 모르타르를 2층 이상으로 나누어 타설할 경우, 상층의 시멘트 모르타르 타설은 원칙적으로 하층의 시멘트 모르타르가 굳기 시작하기 전에 해야 하며, 상층과 하층이 일체가 되도록 시공함
 - 또한, 콜트조인트(Cold joint)가 발생하지 않도록 하나의 시공구획의 면적, 콘크리트의 공급능력, 이어치기 허용시간간격 등을 정하여야 하며, 이어치기 허용시간 간격은 <표 7-2>을 표준으로 함
 - 여기서, 허용 이어치기 시간간격은 하층 콘크리트 비비기 시작에서부터 콘크리트 타설 완료한 후, 상층 콘크리트가 타설되기까지의 시간을 의미함

<표 7-2> 허용 이어치기 시간간격의 표준 [콘크리트 표준시방서 2016]

외기온도	허용 이어치기 시간간격
25℃ 초과	2.0 시간
25℃ 이하	2.5 시간

- 시멘트 모르타르 타설 도중 표면에 떠올라 고인 블리딩수가 있을 경우에는 적당한 방법으로 이 물을 제거한 후가 아니면 그 위에 시멘트 모르타르를 타설해서는 안 되며, 고인물을 제거하기 위하여 시멘트 모르타르 표면에 흠을 만들어 흐르게 해서는 안 됨
- 높이가 높은 콘크리트 부유식 구조체에 시멘트 모르타르를 연속해서 타설할 경우에는 타설 및 다질 때 재료 분리가 될 수 있는 대로 적게 되도록 타설 속도를 조정해야 함

- 시멘트 모르타르의 타설 진행 중 내부 공극의 감소와 재료 분리를 방지하기 위해서 다지기를 아래와 같이 수행함
 - 시멘트 모르타르 다지기에는 내부진동기의 사용을 원칙으로 하나, 표면보호시공의 특성상 두께가 얇아 내부진동기의 사용이 곤란한 경우에는 거푸집 진동기의 사용을 허가함
 - 시멘트 모르타르는 타설 직후 바로 충분히 다져서 거푸집의 구석구석까지 잘 채워져 밀실한 시멘트 모르타르가 되도록 함
 - 거푸집 진동기는 거푸집의 적절한 위치에 단단히 설치함
 - 재 진동을 할 경우에는 콘크리트에 나쁜 영향이 생기지 않도록 초결이 일어나기 전에 실시 함
- 콘크리트 부유식 구조체의 표면보호 시멘트 모르타르는 시공이 불충분하거나 불량한 곳으로부터 열화가 쉽게 진행되므로 균일한 재료를 얻을 수 있도록 타설, 다지기, 양생 등에 특히 주의하여 시공해야함
- 해양에 노출되는 시멘트 모르타르는 시공 이음부를 둘 경우 내구성능 저하가 생기기 쉬우므로 될 수 있는 대로 피함
- 시멘트 모르타르가 충분히 경화되기 전에 해수에 씻기면 모르타르가 유실될 수 있으므로 직접 해수에 닿지 않도록 보호하여야 하며, 이를 위하여 시멘트 모르타르 타설 5 일 이후 해상설치를 권고함



제8장 결 론



8. 결론

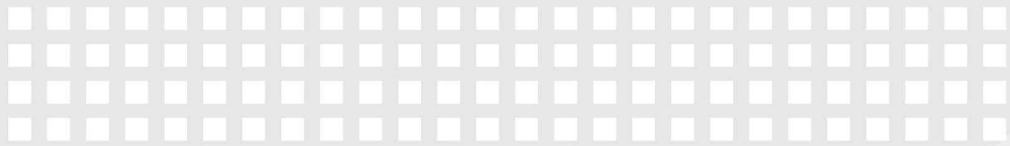
- 본 연구에서는 부유식 구조체의 수명연장을 위한 고성능 표면보호재료 및 사용기술개발을 목표로 실험적 연구를 수행하였으며, 세부 연구 목표는 1) 표면보호재료의 성능평가를 위한 실험 장비 구축, 2) 부유식 구조체 적용 시멘트 계열 표면보호재료 개발 및 성능평가임
- 먼저 시멘트 계열 표면보호재료를 개발하기 위해서 해양구조물에 요구되는 물리적 성능과 내구성에 관한 선행연구, 기존 표면보호재료에 관한 선행연구, 그리고 시멘트 모르타르 재료에 관한 선행연구를 수집하고 조사, 분석하여 실험프로그램을 설정하였음
- 부유식 콘크리트 구조체의 표면보호를 위한 시멘트 모르타르의 성능을 평가하기 위해 아래와 같은 실험 장비들을 구축함
 - 시멘트 모르타르의 압축, 휨강도를 측정할 수 있도록 최대용량 200 kN, 최소눈금 0.02 kN의 유압식 만능재료시험기를 구축하였음
 - 시멘트 모르타르와 콘크리트 모재 사이의 부착강도를 측정할 수 있도록 최대하중 20 kN, 최소 눈금 2 kN의 유압식 Pull-off 부착시험 장비를 구축하였음
 - 시멘트 모르타르의 내구성 측정을 위해서 염화물 침투 시험기를 구축하였음
 - 마지막으로 시멘트 모르타르가 수질에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 시멘트 모르타르 양생에 사용된 양생수의 전도도를 측정하여 수질을 파악할 수 있는 수질측정기를 구축하였음
- 부유식 콘크리트 구조체의 표면보호를 위한 시멘트 계열 표면보호재료 개발을 목표로 실험적 연구를 수행하였으며 주요 실험요인으로 양생환경(실내, 실해역 - 경남 통영시), 혼화재료의 종류(Silica fume; SF, Metakaolin; MK, and Glass powder; GP), 혼화재료의 함유량(5%, 10%), 그리고 양생기간(7, 28, 56, 90 days)이 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성에 미치는 영향을 조사하여 아래와 같은 결론을 도출함
 - 양생환경이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 해수 양생이 수돗물 양생에 비해 긍정적인 효과를 보였으며 이러한 경향은 휨강도, 부착강도에서 뚜렷하게 나타났음
 - 압축강도의 경우, 수돗물 양생한 시험체의 측정치가 소폭 상승하였고 그 결과가 휨, 부착강도의 측정 결과와 상이하여 원인에 대해서 분석을 수행할 예정임
 - 양생환경이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 바닷물 양생한 시험체의 염화물 침투저항성과 투수저항성이 수돗물 양생한 시험체보다 높은 결과를 보여줌
 - 혼화재료의 종류가 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을

- 분석한 결과, 그 경향이 뚜렷하지 않았음
- 구체적으로, 압축강도의 경우, MK 시험체의 측정치가 가장 높았으며 휨강도는 SF 시험체가 그리고 부착강도는 Control 시험체가 가장 높은 값을 보여주었음
 - 혼화재료의 종류가 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, SF 시험체가 기타 시험체보다 개선된 성능(improved performance)을 보여줌
 - 혼화재료의 함유량이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 함유량이 증가할수록 압축 및 휨강도가 개선되는 효과를 보여주었으나 부착강도에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않음
 - 혼화재료의 함유량이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 함유량이 증가할수록 염화물 침투저항성과 투수저항성이 상승하는 결과를 얻었음
 - 양생기간이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 분석한 결과, 양생기간이 증가할수록 시멘트 모르타르의 압축, 휨, 부착강도가 모두 증가하였음
 - 양생기간이 각 혼화재료를 함유한 시멘트 모르타르의 내구성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 양생기간이 늘어남에 따라 염화침투저항성과 투수저항성이 모두 증가하였으며 SF 시험체가 MK 시험체, GP 시험체보다 나은 내구성능을 보여주었음.
- 시멘트 모르타르의 물리적 성능과 내구성능에 양생환경, 혼화재의 종류 (SF, MK, GP)가 미치는 영향에 대한 원인을 규명하기 위해서 X-Ray Diffraction (XRD) 분석과 Thermo gravimetric Analysis (TGA)를 통하여 미세구조분석을 진행함
- XRD 분석결과 양생일과 상관없이 혼화재의 치환에 따른 Intensity의 변화는 18°, 22°, 그리고 35°에서 변화가 진행되고, 양생일이 경과하면서 28°의 peak는 점점 감소하는 경향을 보여주며, 그리고 12°에서 해수와 수돗물 양생의 차이가 보임
 - TGA를 통해 획득한 DTG curve는 혼화재의 종류와 양생 기간과 조건에 따라 다르게 나타났으며, 양생 기간에 따라 생성되는 시멘트 모르타르의 상에 의해 압축강도가 상이하게 나타남
 - 높은 pozzolanc 반응으로 인해 더욱 조밀한 조직을 형성시킬 수 있는 dehydration of AFm은 150°C 근처에서 weight loss를 보여주며, dehydration of AFm의 함유가 많은 MK10이 대체로 높은 압축강도를 보여줌
 - 해수에서 620°C와 710°C의 weight loss를 나타내는 decarbonation of CaCO₃는 Friedel's salts의 생성량이 증가했음을 의미하며, 이는 시멘트 모르타르에 부피를 팽창시켜 균열을 발생하여 압축강도의 저하를 야기하는 것으로 판단됨

- 추후 XRD 분석결과와 International centre for diffraction data의 비교를 통해 시멘트 모르타르 내부의 상 분석이 필요함
- 기존 코팅재료인 상용 에폭시 재료 5종을 사용하여 대기, 수돗물, 그리고 해수에 노출된 기존 에폭시 코팅재료와 콘크리트 사이 부착강도를 ASTM D 4541에 따라 조사하였으며, 부착강도가 변화하는 이유를 확인하기 위해서 추가적으로 코팅재료와 콘크리트 사이 계면의 SEM image 촬영과 부착 파괴양상 확인, 코팅두께 측정 (ASTM D4138), 그리고 에폭시 코팅에 의한 수질의 변화를 조사함
 - 코팅재료의 부착강도는 코팅재료와 노출환경, 그리고 노출기간에 따라 큰 차이를 보여줌
 - 대기 환경의 경우, 90일간 노출되었을 때 코팅재료 5는 부착강도 4.00 MPa를 보여주면서 가장 높은 부착강도를 보여주어 대기 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 5가 가장 적합한 재료로 판단됨
 - 수돗물 환경의 경우, 90일 간 노출되었을 때 코팅재료 4와 코팅재료 1의 부착강도가 3.78과 3.4 MPa 로 높은 부착강도를 보여주었으나, 코팅재료 4의 경우 낮은 밀도와 높은 이온 유출로 인해, 수돗물 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 1의 사용이 적합한 것으로 판단됨
 - 해수 환경의 경우, 90일간 노출되었을 때 코팅재료 4와 코팅재료 5의 부착강도가 3.66과 3.37 MPa 로 높은 부착강도를 보여주었으며, 이온의 침출 역시 다른 코팅재료에 비해 적은 농도로 나타났으나, 코팅재료 4의 경우 낮은 밀도로 인해 콘크리트 내부로 수분을 침투시킬 수 있으므로, 해수 환경에 노출되는 콘크리트를 표면보호하기 위해서는 코팅재료 5의 사용이 적합한 것으로 판단됨
 - 코팅재료의 부착강도는 일반적으로 노출기간이 증가하면서 감소하는 경향을 보여주었으나 밀도가 낮은 코팅재료 2와 코팅재료 4는 0일차의 부착강도보다 노출환경 기간이 증가하면서 수돗물과 해수에 노출된 경우, 부착강도가 증가하는 경향을 보여주어 콘크리트에 수분을 지속적으로 공급하여 콘크리트의 강도가 향상되었을 것으로 판단됨
- 본 연구를 통해 개발된 시멘트 계열 표면보호재료를 부유식 구조체에 적용할 수 있도록 작업성, 시공성에 대한 검토를 진행하였으며, 성능재현이 가능하도록 믹싱가이드라인을 제시하고 부유식 구조체를 시공할 수 있는 시공방안을 제시하였음



제9장 참고문헌



9. 참고문헌

1. Malhorta, V.M. Durability of Concrete, Corrosion Handbook Second Edition, R.W. Revie Ed., Wiley, 2000.
2. K. Audenaert, L. Marsacina, G. De Schutter, Influence of cracks on the service life of concrete structures in a marine environment, Key Engineering Materials 399 (2009) 153-160.
3. 국토교통부 “지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책”, 2019년 보도자료
4. I.J. De Vries, R.B. Polder, Hydrophobic treatment of concrete. Construction and Building Materials 11(4) (1997) 259-265.
5. H. Tabatabai, A. Ghorbanpoor, M.D. Pritzl, Evaluation of select methods of corrosion control, corrosion prevention, and repair in reinforced concrete bridges, Wisconsin Highway Research program #009-06-06 Final Report, Wisconsin Department of Transportation, 2009
6. X. Pan, Z. Shi, C. Shi, T.C. Ling, N. Li, A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms, Construction and Building Materials 132 (2017) 578-590.
7. M. Levi, C. Ferro, D. Regazzoli, G. Dotelli, Comparative evaluation method of polymer surface treatments applied on high performance concrete, Journal of Materials Science 37 (2002) 4881-4888.
8. A.S. Zerda, A.J. Lesser, Intercalated clay nanocomposites: morphology, mechanics, and fracture behavior. Journal of polymer Science, Part B Polymer Physics 39 (11) (2001) 1137-1146.
9. A.C. Moloney, H.H. Kausch, T. Kaiser, H.R. Beer, Parameters determining the strength and toughness of particulate filled epoxide resins. Journal of Material Science 22(2) (1987) 381-393.
10. J.J. Chruściel, E. Leśniak, Modification of epoxy resins with functional silanes, polysiloxanes, silsesquioxanes, silica and silicates, Progress in Polymer Science 41 (2015) 67-121. Topical Issue On Polymer Chemistry.
11. B. Reddy, J.M. Sykes, Degradation of organic coatings in a corrosive environment: a study by scanning Kelvin probe and scanning acoustic microscope, Progress in Organic Coatings 52 (4) (2005) 280-287.
12. E. Carretti, L. Dei, Physicochemical characterization of acrylic polymeric resins coating porous materials of artistic interest, Progress in Organic Coatings 49 (3) (2004) 282-289.

13. M. Sangermano, D. Foix, G. Kortaberria, M. Messori, Multifunctional antistatic and scratch resistant UV-cured acrylic coatings, *Progress in Organic Coatings* 76 (9) (2013) 1191-1196.
14. A. Kozak, Multi-criteria assessment of an acrylic coating exposed to natural and artificial weathering, *Procedia Engineering* 108 (2015) 664-672.
15. D.K. Chattopadhyay, D.B. Rohini Kumar, B. Sreedhar, K. Raju, Thermal stability and dynamic mechanical behavior of acrylic resin and acrylic melamine coatings, *Journal of Applied Polymer Science* 91 (1) (2004) 27-34.
16. H.A. Toutanji, H. Choi, D. Wong, J.A. Gilbert, D.J. Alldredge, Applying a polyurea coating to high-performance organic cementitious materials, *Construction and Building Materials* 38 (2013) 1170-1179.
17. W.H. Awad, C.A. Wilkie, Investigation of the thermal degradation of polyurea: the effect of ammonium polyphosphate and expandable graphite, *Polymer* 51 (11) (2010) 2277-2285.
18. X.F. Yang, C. Vang, D.E. Tallman, G.P. Bierwagen, S.G. Croll, S. Rohlik, Weathering degradation of a polyurethane coating, *Polymer Degradation and Stability* 74 (2) (2001) 341-351.
19. R.S. Woo, H. Zhu, C.K. Leung, J. Kim, Environmental degradation of epoxyorganoclay nanocomposites due to UV exposure: part II residual mechanical properties, *Composites Science and Technology* 68 (9) (2008) 2149-2155.
20. G. Choudalakis, A.D. Gotsis, Permeability of polymer/clay nanocomposites: a review, *European Polymer Journal* 45 (4) (2009) 967-984.
21. S. Pavlidou, C.D. Papaspyrides, A review on polymer-layered silicate nanocomposites, *Progress in Polymer Science* 33 (12) (2008) 1119-1198.
22. R.B. Polder, H. Borsje H. De Vries, Hydrophobic treatment of concrete against chloride penetration, in: *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Proceedings of Fourth International Symposium, Cambridge, 1-4 July 1996. Special Publication No 183. 1996.*
23. J. De Vries, R.B Polder, Hydrophobic treatment of concrete, *Construction and Building Materials* 11(4) (1997) 259-265.
24. J.B. Soebbing, R.R. Skabo, H.E. Michel, G. Guthikonda, A.H. Sharaf, Rehabilitating water and wastewater treatment plants, *Journal of Protective Coatings and Linings* 13 (5) (1996) 54-64.
25. P.J. Tikalsky R.L. Carrasquilo, The effect of fly ash on the sulfate resistance of concrete, Research Report 481-5, The University of Texas at Austin (1989),

26. A. Mardani-Aghabaglou, G.İ. Sezer, K. Ramyar, Comparison of fly ash, Silica Fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, *Construction and Building Materials* 70 (2014) 17-25.
27. M. Kmali, A. Ghahremaninezhad, Effect of Glass Powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials, *Construction and Building Materials* 98 (2015) 407-416.
28. M. Jalal, A. Pouladkhan, O.F. Harandi, D. Jafari, Comparative study on class F fly ash, nano silica and Silica Fume on properties of high performance self compacting concrete, *Construction and Building Materials* 94 (2015) 90-104.
29. H. D, K.H. Tan Properties of high volume Glass Powder concrete, *Cement and Concrete Composites* 75 (2017) 22-29.
30. A. Benli, M. Karatas, E. Gurses, Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/Silica Fume, *Construction and Building Materials* 146 (2017) 464-474.
31. C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and Silica Fume concrete, *Construction and Building Materials* 20 (2006) 858-865.
32. M.M. Islam, M.S. Islam, B.C. Mondal, A. Das, Strength behavior of mortar using slag with cement in sea water environment, *Journal of Civil Engineering*, 27(2) (2009) 111-122.
33. A.H. Memon, S.S Radin, M.F.M. Zain, Jean-Francois Trottier, Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 373-377.
34. J. Bai, S. Wild, B.B. Sabir, Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 353-362.
35. F.M. Wegian, Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete, *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3 (4) (2010) 235-243.
36. P. Tiwari, R. Chandak, R.K. Yadac, Effect of salt water on compressive strength of concrete, *Journal of Engineering Research and Applications* 4 (4) (2014) 38-42.
37. F.A. Olutoge, G.M. Amusan, The effect of sea water on compressive strength of concrete, *International Journal of Engineering Science Invention* 3 (7) (2014) 23-31.
38. Q. Li, H. geng, Y. Huang, Z. Shui, Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: A comparative study, *Construction and Building Materials* 101 (2015) 184-192.

39. L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1473-1479.
40. A. Benli, M. Karatas, E. Gurses, Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/Silica Fume, *Construction and Building Materials* 146 (2017) 464-474.
41. KS L 5105, 수경성 시멘트모르타르의 압축강도 시험 방법, 2017.
42. ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
43. KS L ISO 679, 시멘트의 강도 시험방법, 2016.
44. ASTM C348-19, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
45. BS EN 13687-2 : 2002, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of thermal compatibility. Thunder-shower cycling (thermal shock), British-Adopted European Standard, 2002.
46. ASTM D4541-17, Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
47. ASTM C1202-19, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
48. NT BUILD 492, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Nordtest, 1999.
49. ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
50. 국립해양조사원, 2019 실시간 해양관측 연간 통계보고서.
51. 국립해양조사원, 2013~2019 실시간 해양관측 연간 통계보고서.
52. 국가통계포털, 연안수질현황 (2018).
53. J. Liu, C. Vipulanandan, Tensile bonding strength of epoxy coatings to concrete substrate. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1412-1419.
54. ASTM D4138-07a(2017), Standard Practices for Measurement of Dry Film Thickness of Protective Coating Systems by Destructive, Cross-Sectioning Means, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

55. X. Pardal, F. Brunet, T. Charpentier, I. Pochard, A. Nonat, ^{27}Al and ^{29}Si solid-state NMR characterization of calcium-aluminosilicate-hydrate, *Inorganic Chemistry* 51 (3) (2012) 1827-1836.
56. B.Z. Dilnesa, B. Lothenbach, G. Renaudin, A. Wichser, E. Wieland, Stability of monosulfate in the presence of iron, *Journal of the American Ceramic Society* 95 (10) (2012) 3305-3316.
57. N.K. Lee, K.T. Koh, M.O. Kim, G.S. Ryu, Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research* 104 (2018) 68-79.
58. S. Kim, H. Hong, T.H. Han, M.O. Kim, Early-age time tensile bond characteristics of epoxy coatings for underwater applications, *Coating* 9(11) (2019) 757.
59. B. Won, M.O. Kim, S. Park, J.H. Yi, Effect of water exposure on the interfacial bond between an epoxy resin coating and a concrete substrate, *Materials* 12(22) (2019) 3715.
60. KS L 5111, 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블, 2017.
61. ASTM C230 / C230M-14, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
62. ASTM C1437-15, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
63. 콘크리트 표준시방서 (2016) 국토교통부.
64. KS L ISO679, 시멘트의 강도 시험 방법, 2016
65. KS F 2476, 폴리머 시멘트 모르타르의 시험방법, 2019
66. KS F 3110, 콘크리트 거푸집용 합판, 2016.
67. KS F 8006, 강제 틀 합판 거푸집, 2017.



제10장 부록



부록 1. 고성능 표면보호재료의 시험 데이터

○ 표면보호재료의 성능평가를 위한 시험결과를 아래의 표에 표시하였음

[표 1-A] 압축시험 결과

Test series	Compression test			Test series	Compression test		
	Load (kN)	Strength (MPa)	Standard deviation		Load (kN)	Strength (MPa)	Standard deviation
C-0	53.64	21.46	0.48	C-0	53.64	21.46	0.48
SF-5-0	49.37	19.75	1.29	SF-5-0	49.37	19.75	1.29
SF-10-0	49.93	19.97	0.56	SF-10-0	49.93	19.97	0.56
MK-5-0	51.70	20.68	0.76	MK-5-0	51.70	20.68	0.76
MK-10-0	47.94	19.18	0.37	MK-10-0	47.94	19.18	0.37
GP-5-0	50.92	20.37	1.14	GP-5-0	50.92	20.37	1.14
GP-10-0	41.61	16.65	0.70	GP-10-0	41.61	16.65	0.70
T-C-7	104.37	41.75	1.90	S-C-7	119.92	47.94	2.56
T-SF-5-7	119.06	47.62	2.24	S-SF-5-7	116.75	46.70	6.08
T-SF-10-7	128.14	51.26	2.56	S-SF-10-7	120.07	48.02	7.11
T-MK-5-7	127.27	50.91	3.65	S-MK-5-7	138.70	55.47	1.25
T-MK-10-7	136.00	54.40	2.32	S-MK-10-7	124.31	49.72	3.58
T-GP-5-7	122.75	49.10	2.81	S-GP-5-7	110.76	44.30	2.79
T-GP-10-7	111.48	44.59	3.16	S-GP-10-7	104.48	41.79	2.11
T-C-28	120.73	48.29	3.35	S-C-28	135.39	54.15	2.60
T-SF-5-28	135.44	54.17	6.39	S-SF-5-28	133.87	53.55	5.62
T-SF-10-28	159.66	63.87	4.07	S-SF-10-28	151.32	60.53	6.02
T-MK-5-28	158.10	63.24	5.12	S-MK-5-28	154.43	61.77	5.03
T-MK-10-28	156.97	62.79	5.06	S-MK-10-28	151.83	60.73	3.51
T-GP-5-28	144.01	57.60	2.62	S-GP-5-28	136.45	54.58	3.03
T-GP-10-28	130.52	52.21	2.18	S-GP-10-28	138.15	55.26	2.68
T-C-56	160.77	64.31	0.37	S-C-56	135.74	54.30	0.39
T-SF-5-56	137.38	54.95	2.91	S-SF-5-56	147.75	59.10	1.26
T-SF-10-56	163.14	65.26	2.60	S-SF-10-56	163.07	65.23	1.60
T-MK-5-56	173.48	69.39	1.50	S-MK-5-56	155.11	62.04	1.61
T-MK-10-56	187.20	74.88	1.58	S-MK-10-56	154.82	61.93	1.41
T-GP-5-56	172.24	68.89	1.21	S-GP-5-56	137.58	55.03	0.32
T-GP-10-56	159.44	63.78	2.93	S-GP-10-56	151.99	60.80	1.22
T-C-90	173.08	69.23	5.75	S-C-90	169.40	67.76	2.79
T-SF-5-90	177.07	70.83	0.09	S-SF-5-90	158.00	63.20	2.10
T-SF-10-90	185.21	74.09	3.25	S-SF-10-90	168.95	67.58	2.13
T-MK-5-90	190.62	76.25	0.63	S-MK-5-90	184.51	73.80	1.28
T-MK-10-90	191.50	76.60	0.38	S-MK-10-90	182.69	73.08	3.08
T-GP-5-90	183.48	73.39	0.64	S-GP-5-90	145.40	58.16	4.18
T-GP-10-90	172.02	68.81	2.63	S-GP-10-90	171.63	68.65	3.51

[표 1-B] 압축 Raw Data (압축강도 시험체 - 총 308개 (단기양생만))

Test series	Compression test						Test series	Compression test					
	Strength (MPa)							Strength (MPa)					
C-0	51.90	53.34	53.76	55.94	53.28	53.62	C-0	51.90	53.34	53.76	55.94	53.28	53.62
SF-5-0	47.20	43.50	50.04	53.60	50.80	51.10	SF-5-0	47.20	43.50	50.04	53.60	50.80	51.10
SF-10-0	51.12	48.84	49.46	47.66	50.84	51.64	SF-10-0	51.12	48.84	49.46	47.66	50.84	51.64
MK-5-0	52.10	49.54	52.02	54.50	53.00	49.04	MK-5-0	52.10	49.54	52.02	54.50	53.00	49.04
MK-10-0	49.22	48.42	48.70	46.50	47.32	47.48	MK-10-0	49.22	48.42	48.70	46.50	47.32	47.48
GP-5-0	52.66	56.16	49.58	47.86	51.02	48.22	GP-5-0	52.66	56.16	49.58	47.86	51.02	48.22
GP-10-0	41.68	38.74	43.90	43.40	40.38	41.58	GP-10-0	41.68	38.74	43.90	43.40	40.38	41.58
T-C-7	43.04	44.35	40.39	41.99	38.96	-	S-C-7	51.53	46.02	46.33	51.39	47.24	45.13
T-SF-5-7	44.85	50.48	47.78	49.66	45.35	-	S-SF-5-7	44.88	51.32	51.53	34.11	50.37	47.96
T-SF-10-7	55.13	49.06	52.03	52.21	47.86	-	S-SF-10-7	40.51	40.4	49.66	43.4	56.75	57.42
T-MK-5-7	45.87	49.18	53.46	49.62	56.4	-	S-MK-5-7	54.28	55.21	53.84	57.11	55.32	57.08
T-MK-10-7	50.95	55.99	52.77	54.79	57.50	-	S-MK-10-7	52.89	53.18	43.19	52.42	47.62	49.01
T-GP-5-7	53.48	50.38	45.11	47.44	49.10	-	S-GP-5-7	47.19	43.87	42.83	48.16	44.01	39.73
T-GP-10-7	49.06	41.50	44.97	40.66	46.79	-	S-GP-10-7	42.35	40.44	44.19	40.28	44.60	38.87
T-C-28	49.58	50.88	45.58	43.25	52.17	-	S-C-28	49.80	56.98	51.56	54.93	56.36	55.30
T-SF-5-28	57.94	45.96	47.65	56.53	62.79	-	S-SF-5-28	58.08	53.40	55.59	53.70	58.72	41.79
T-SF-10-28	63.27	56.95	69.12	63.52	66.46	-	S-SF-10-28	57.66	63.12	49.82	59.57	69.29	63.71
T-MK-5-28	64.63	65.19	56.88	58.41	71.08	-	S-MK-5-28	65.19	55.99	60.08	55.21	65.55	68.61
T-MK-10-28	58.72	54.90	65.64	67.38	67.29	-	S-MK-10-28	59.26	65.03	63.12	54.83	61.43	
T-GP-5-28	54.98	58.55	59.00	54.25	61.24	-	S-GP-5-28	59.19	53.54	54.98	49.7	57.07	53.00
T-GP-10-28	53.26	50.57	55.38	49.09	52.74	-	S-GP-10-28	51.63	59.61	57.87	54.72	53.73	54.01
T-C-56	64.42	64.70	63.80	-	-	-	S-C-56	53.91	54.15	54.83	-	-	-
T-SF-5-56	58.41	53.35	58.86	55.45	51.07	52.57	S-SF-5-56	60.78	58.79	57.73	-	-	-
T-SF-10-56	63.05	63.80	68.91	-	-	-	S-SF-10-56	66.14	64.58	67.22	62.98	-	-
T-MK-5-56	67.69	68.21	70.33	71.34	-	-	S-MK-5-56	62.91	60.70	60.32	64.25	-	-
T-MK-10-56	72.85	76.78	73.90	76.00	-	-	S-MK-10-56	61.52	60.44	63.83	-	-	-
T-GP-5-56	70.11	70.18	67.81	67.19	69.17	-	S-GP-5-56	54.72	54.90	55.50	-	-	-
T-GP-10-56	62.27	67.31	61.14	67.31	60.84	-	S-GP-10-56	59.75	60.30	62.89	60.25	-	-
T-C-90	70.73	60.79	74.82	64.46	75.36	-	S-C-90	71.03	64.20	68.04	-	-	-
T-SF-5-90	70.87	70.70	70.91	-	-	-	S-SF-5-90	64.58	64.79	60.23	-	-	-
T-SF-10-90	70.56	73.29	78.40	-	-	-	S-SF-10-90	65.26	70.40	67.08	-	-	-
T-MK-5-90	75.72	76.00	77.32	75.95	-	-	S-MK-5-90	74.42	74.87	71.62	74.30	-	-
T-MK-10-90	77.05	76.13	76.63	-	-	-	S-MK-10-90	72.23	76.99	77.34	69.74	72.44	69.71
T-GP-5-90	73.60	72.61	74.49	73.06	73.20	-	S-GP-5-90	62.72	56.76	54.55	62.16	61.21	51.56
T-GP-10-90	72.33	66.46	66.94	66.61	71.72	-	S-GP-10-90	74.14	70.80	62.74	69.55	67.05	67.62

[표 1-C] 휨시험 결과

Test series	3-point bending test			Test series	3-point bending test		
	Load (kN)	Strength (MPa)	Standard deviation		Load (kN)	Strength (MPa)	Standard deviation
C-0	1.65	4.23	0.53	C-0	1.65	4.23	0.53
SF-5-0	1.75	3.84	0.40	SF-5-0	1.75	3.84	0.40
SF-10-0	2.09	4.66	0.56	SF-10-0	2.09	4.66	0.56
MK-5-0	1.88	4.41	0.43	MK-5-0	1.88	4.41	0.43
MK-10-0	1.72	4.03	0.17	MK-10-0	1.72	4.03	0.17
GP-5-0	2.11	5.38	0.70	GP-5-0	2.11	5.38	0.70
GP-10-0	1.84	4.70	0.60	GP-10-0	1.84	4.70	0.60
T-C-7	2.98	7.35	0.27	S-C-7	2.83	7.38	1.15
T-SF-5-7	3.55	7.84	0.19	S-SF-5-7	2.99	9.27	1.10
T-SF-10-7	2.90	6.80	0.89	S-SF-10-7	2.84	8.41	0.63
T-MK-5-7	3.22	7.70	0.46	S-MK-5-7	2.87	9.33	1.00
T-MK-10-7	3.11	7.37	0.76	S-MK-10-7	1.74	4.27	0.34
T-GP-5-7	3.31	7.57	0.24	S-GP-5-7	3.02	9.03	0.31
T-GP-10-7	2.96	7.48	1.03	S-GP-10-7	2.70	7.45	0.47
T-C-28	2.73	8.30	1.51	S-C-28	4.70	10.89	0.23
T-SF-5-28	2.48	8.20	0.28	S-SF-5-28	4.35	10.92	0.44
T-SF-10-28	3.44	9.47	1.22	S-SF-10-28	4.32	10.72	0.84
T-MK-5-28	2.84	8.09	0.94	S-MK-5-28	4.09	10.85	0.43
T-MK-10-28	2.96	8.78	0.92	S-MK-10-28	4.19	11.83	0.02
T-GP-5-28	3.10	7.82	0.83	S-GP-5-28	4.09	10.34	0.53
T-GP-10-28	3.21	7.99	0.65	S-GP-10-28	4.90	10.36	0.90
T-C-56	3.77	8.84	1.29	S-C-56	2.04	5.12	1.25
T-SF-5-56	1.56	3.67	0.30	S-SF-5-56	2.82	7.54	2.06
T-SF-10-56	2.23	5.23	1.11	S-SF-10-56	2.10	5.39	0.00
T-MK-5-56	3.27	9.29	0.94	S-MK-5-56	2.75	7.46	1.17
T-MK-10-56	3.02	9.20	1.55	S-MK-10-56	2.60	5.83	0.35
T-GP-5-56	2.97	8.95	2.16	S-GP-5-56	3.44	7.07	1.34
T-GP-10-56	3.02	9.08	1.16	S-GP-10-56	2.18	5.43	0.46
T-C-90	2.42	5.66	1.60	S-C-90	2.13	6.11	0.87
T-SF-5-90	3.14	7.35	2.19	S-SF-5-90	4.68	13.28	1.24
T-SF-10-90	3.06	7.17	1.35	S-SF-10-90	3.70	9.52	0.81
T-MK-5-90	2.53	5.92	1.18	S-MK-5-90	4.22	11.31	1.18
T-MK-10-90	2.09	4.91	0.81	S-MK-10-90	4.58	12.33	1.55
T-GP-5-90	3.05	7.15	2.61	S-GP-5-90	4.60	11.68	1.02
T-GP-10-90	2.72	6.38	2.04	S-GP-10-90	4.91	12.48	0.32

[표 1-D] 휨 Raw Data (휨강도 시험체 - 총 254개 (단기양생만))

Test series	3-point bending test						Test series	3-point bending test					
	Strength (MPa)							Strength (MPa)					
C-0	4.50	4.31	3.89	4.22	-	-	C-0	4.50	4.31	3.89	4.22	-	-
SF-5-0	3.89	4.03	3.61	3.84	-	-	SF-5-0	3.89	4.03	3.61	3.84	-	-
SF-10-0	4.73	4.69	4.41	4.73	4.73	-	SF-10-0	4.73	4.69	4.41	4.73	4.73	-
MK-5-0	3.61	4.13	4.69	4.88	4.45	-	MK-5-0	3.61	4.13	4.69	4.88	4.45	-
MK-10-0	4.03	3.89	3.84	4.31	4.08	-	MK-10-0	4.03	3.89	3.84	4.31	4.08	-
GP-5-0	5.95	4.92	5.58	5.06	-	-	GP-5-0	5.95	4.92	5.58	5.06	-	-
GP-10-0	4.55	4.83	4.27	5.16	-	-	GP-10-0	4.55	4.83	4.27	5.16	-	-
T-C-7	7.27	7.22	7.31	7.88	7.08	-	S-C-7	6.19	7.64	9.14	6.56	-	-
T-SF-5-7	7.87	7.59	8.06	-	-	-	S-SF-5-7	9.47	10.5	7.83	-	-	-
T-SF-10-7	5.77	6.75	5.81	6.61	8.02	7.875	S-SF-10-7	9.14	7.59	8.48	-	-	-
T-MK-5-7	8.30	7.17	7.64	-	-	-	S-MK-5-7	10.13	7.92	9.94	-	-	-
T-MK-10-7	7.83	8.01	7.55	6.09	-	-	S-MK-10-7	4.17	4.13	3.94	4.83	-	-
T-GP-5-7	7.45	7.69	7.97	7.45	7.27	-	S-GP-5-7	8.81	8.81	9.47	-	-	-
T-GP-10-7	8.06	7.27	8.67	5.91	-	-	S-GP-10-7	7.88	6.80	7.69	-	-	-
T-C-28	8.34	10.13	6.52	-	-	-	S-C-28	10.59	10.92	11.16	-	-	-
T-SF-5-28	7.92	8.48	8.20	-	-	-	S-SF-5-28	10.31	11.02	11.53	10.83	-	-
T-SF-10-28	11.06	9.61	9.56	7.64	-	-	S-SF-10-28	9.98	12.14	10.45	10.31	-	-
T-MK-5-28	7.36	9.42	7.50	-	-	-	S-MK-5-28	11.02	11.34	10.17	10.88	-	-
T-MK-10-28	9.61	7.50	9.23	-	-	-	S-MK-10-28	11.81	11.86	11.81	-	-	-
T-GP-5-28	8.91	7.08	6.94	8.34	-	-	S-GP-5-28	9.56	10.88	10.69	10.73	9.84	-
T-GP-10-28	8.11	7.5	9.00	7.36	-	-	S-GP-10-28	9.42	9.84	10.36	11.81	-	-
T-C-56	8.39	6.70	10.64	9.33	9.89	8.06	S-C-56	12.56	13.45	13.27	13.22	11.48	11.77
T-SF-5-56	8.91	9.28	9.05	9.00	8.86	-	S-SF-5-56	10.83	10.41	10.78	-	-	-
T-SF-10-56	9.28	11.48	10.31	10.64	10.97	-	S-SF-10-56	13.73	14.53	13.55	-	-	-
T-MK-5-56	10.03	8.53	10.41	8.20	-	-	S-MK-5-56	12.61	13.27	13.88	-	-	-
T-MK-10-56	7.27	9.28	11.06	-	-	-	S-MK-10-56	13.83	13.22	12.75	14.48	-	-
T-GP-5-56	5.91	10.27	10.69	-	-	-	S-GP-5-56	10.97	12.38	12.28	11.63	12.42	-
T-GP-10-56	8.72	7.88	10.64	-	-	-	S-GP-10-56	11.63	11.34	12.09	12.05	-	-
T-C-90	4.55	5.06	4.08	4.88	8.76	6.66	S-C-90	5.16	7.27	5.91	-	-	-
T-SF-5-90	5.02	5.91	9.56	7.13	10.97	5.53	S-SF-5-90	11.53	14.25	14.06	-	-	-
T-SF-10-90	6.98	8.91	5.625	-	-	-	S-SF-10-90	8.95	10.27	8.48	10.36	-	-
T-MK-5-90	6.00	6.47	4.83	4.83	8.20	5.203	S-MK-5-90	12.84	9.98	11.11	-	-	-
T-MK-10-90	5.58	4.59	6.14	4.97	3.56	4.59	S-MK-10-90	10.17	13.73	13.08	-	-	-
T-GP-5-90	4.27	11.25	9.94	4.69	7.03	5.72	S-GP-5-90	10.59	13.08	10.83	12.23	-	-
T-GP-10-90	7.64	10.22	6.28	5.16	4.55	4.45	S-GP-10-90	12.28	12.94	12.23	-	-	-

[표 1-E] 부착시험 결과

Test series	Pull-off bond test		Test series	Pull-off bond test	
	Strength (MPa)	Standards deviation		Strength (MPa)	Standards deviation
C-0	1.91	-	C-0	1.91	-
SF-5-0	1.12	0.53	SF-5-0	1.12	0.53
SF-10-0	1.00	0.09	SF-10-0	1.00	0.09
MK-5-0	1.41	0.14	MK-5-0	1.41	0.14
MK-10-0	1.27	-	MK-10-0	1.27	-
GP-5-0	1.90		GP-5-0	1.90	
GP-10-0	1.39		GP-10-0	1.39	
T-C-7	1.70	0.16	S-C-7	1.87	0.26
T-SF-5-7	1.44	0.12	S-SF-5-7	1.91	0.29
T-SF-10-7	1.33	0.23	S-SF-10-7	1.32	0.20
T-MK-5-7	1.99	0.28	S-MK-5-7	1.14	0.06
T-MK-10-7	1.73	0.17	S-MK-10-7	1.65	0.08
T-GP-5-7	1.92	0.34	S-GP-5-7	1.48	0.33
T-GP-10-7	1.80	0.12	S-GP-10-7	1.57	0.39
T-C-28	1.91	0.07	S-C-28	2.56	0.19
T-SF-5-28	1.55	0.34	S-SF-5-28	2.50	0.25
T-SF-10-28	1.38	0.24	S-SF-10-28	2.62	0.09
T-MK-5-28	1.42	0.20	S-MK-5-28	2.24	0.44
T-MK-10-28	1.91	0.54	S-MK-10-28	1.39	0.14
T-GP-5-28	1.86	0.48	S-GP-5-28	2.20	0.12
T-GP-10-28	1.79	0.21	S-GP-10-28	2.17	0.56
T-C-56	2.43	0.54	S-C-56	1.96	0.35
T-SF-5-56	1.54	0.38	S-SF-5-56	1.93	0.34
T-SF-10-56	1.73	0.68	S-SF-10-56	2.20	0.35
T-MK-5-56	2.19	0.61	S-MK-5-56	2.28	0.94
T-MK-10-56	2.12	0.39	S-MK-10-56	2.26	0.31
T-GP-5-56	2.06	0.29	S-GP-5-56	1.82	0.24
T-GP-10-56	2.04	0.10	S-GP-10-56	2.14	0.35
T-C-90	2.39	0.13	S-C-90	2.08	0.28
T-SF-5-90	1.19	0.25	S-SF-5-90	2.30	0.44
T-SF-10-90	1.98	0.05	S-SF-10-90	1.84	0.40
T-MK-5-90	1.80	0.18	S-MK-5-90	2.69	0.41
T-MK-10-90	2.12	0.34	S-MK-10-90	1.72	0.77
T-GP-5-90	2.53	0.21	S-GP-5-90	1.99	0.99
T-GP-10-90	2.30	0.41	S-GP-10-90	2.73	0.28

[표 1-F] 부착 Raw Data 및 파괴양상 (부착강도 시험횟수 - 총 174회 (단기양생만))

Test series	Pull-off bond test						Test series	Pull-off bond test					
	Strength (MPa)			Failure mode				Strength (MPa)			Failure mode		
C-0	1.91	-	-	4	-	-	C-0	1.91	-	-	4	-	-
SF-5-0	1.65	0.59	-	2	1	-	SF-5-0	1.65	0.59	-	2	1	-
SF-10-0	0.91	1.09	-	4	1	-	SF-10-0	0.91	1.09	-	4	1	-
MK-5-0	1.54	1.27	-	4	2	-	MK-5-0	1.54	1.27	-	4	2	-
MK-10-0	1.27	-	-	2	-	-	MK-10-0	1.27	-	-	2	-	-
GP-5-0	1.90	-	-	1	-	-	GP-5-0	1.90	-	-	1	-	-
GP-10-0	1.39	-	-	3	-	-	GP-10-0	1.39	-	-	3	-	-
T-C-7	1.82	1.82	1.47	4	4	4	S-C-7	2.16	1.52	1.92	3	3	4
T-SF-5-7	1.28	1.51	1.54	4	2	3	S-SF-5-7	1.71	1.7	2.32	2	2	3
T-SF-10-7	1.03	1.6	1.35	3	4	4	S-SF-10-7	1.03	1.43	1.49	3	3	4
T-MK-5-7	1.63	2.04	2.30	2	4	3	S-MK-5-7	1.16	1.2	1.05	4	3	3
T-MK-10-7	1.55	1.95	1.68	3	2	3	S-MK-10-7	1.71	1.7	1.53	3	2	2
T-GP-5-7	1.58	2.25	-	2	2	-	S-GP-5-7	1.95	1.25	1.25	4	2	3
T-GP-10-7	1.63	1.87	1.9	3	3	3	S-GP-10-7	2.01	1.64	1.06	3	3	3
T-C-28	1.86	2.01	1.85	3	3	3	S-C-28	2.59	2.31	2.77	3	4	3
T-SF-5-28	1.33	0.96	1.78	3	3	3	S-SF-5-28	2.17	2.54	2.77	3	4	4
T-SF-10-28	1.12	1.32	1.70	2	3	3	S-SF-10-28	2.67	2.69	2.50	4	4	3
T-MK-5-28	1.26	1.09	1.58	3	3	3	S-MK-5-28	2.50	1.62	2.60	4	4	4
T-MK-10-28	2.64	1.36	1.74	4	3	4	S-MK-10-28	1.40	1.21	1.56	3	3	3
T-GP-5-28	1.51	2.55	1.54	3	3	3	S-GP-5-28	2.09	2.32	-	3	3	-
T-GP-10-28	1.49	1.99	1.89	2	4	3	S-GP-10-28	2.18	0.99	2.15	3	2	3
T-C-56	2.60	3.00	1.71	4	4	3	S-C-56	2.62	1.77	2.15	3	4	4
T-SF-5-56	1.11	2.03	1.48	3	4	3	S-SF-5-56	1.77	1.61	2.40	3	4	2
T-SF-10-56	2.59	0.94	1.67	2	3	2	S-SF-10-56	2.06	1.86	2.68	2	4	2
T-MK-5-56	2.32	1.38	2.86	4	3	3	S-MK-5-56	1.55	1.69	3.61	3	3	2
T-MK-10-56	2.52	2.25	1.59	4	3	3	S-MK-10-56	2.67	1.93	2.20	2	2	3
T-GP-5-56	2.48	1.87	1.84	4	4	4	S-GP-5-56	2.17	1.66	1.64	3	3	3
T-GP-10-56	2.03	1.92	2.16	3	3	3	S-GP-10-56	2.40	1.65	2.38	3	4	3
T-C-90	2.26	2.52	-	4	4	-	S-C-90	2.12	2.4	1.72	3	4	4
T-SF-5-90	1.55	0.98	1.05	2	3	3	S-SF-5-90	1.74	2.80	2.38	3	2	3
T-SF-10-90	1.93	2.02	-	2	2	-	S-SF-10-90	2.23	2.01	1.28	2	4	3
T-MK-5-90	1.76	1.6	2.03	2	4	2	S-MK-5-90	2.36	2.43	3.27	2	2	1
T-MK-10-90	1.64	2.36	2.35	2	3	4	S-MK-10-90	0.9	1.51	2.75	3	2	4
T-GP-5-90	2.29	2.49	2.80	2	3	2	S-GP-5-90	3.30	0.9	1.78	2	2	2
T-GP-10-90	2.88	2.03	1.98	3	2	3	S-GP-10-90	2.33	2.86	2.98	3	3	3

Failure modes, 1: Mortar failure; 2: Mortar+interface failure; 3: Interface failure, 4: Concrete+interface Failure; 5: Concrete failure

[표 1-G] 염화물 침투 시험 결과

Test series	Rapid chloride penetration test		Test series	Rapid chloride penetration test	
	Charge passed (coulombs)	Standards deviation		Charge passed (coulombs)	Standards deviation
C-0	27028		C-0	27028	935
SF-5-0	26169		SF-5-0	26169	514
SF-10-0	23876		SF-10-0	23876	682
MK-5-0	26553		MK-5-0	26553	947
MK-10-0	24939		MK-10-0	24939	311
GP-5-0	27265		GP-5-0	27265	1048
GP-10-0	27907		GP-10-0	27907	1091
T-C-7	20520	136	S-C-7	20465	336
T-SF-5-7	13937	107	S-SF-5-7	14584	491
T-SF-10-7	6075	93	S-SF-10-7	5394	175
T-MK-5-7	15310	275	S-MK-5-7	15509	906
T-MK-10-7	6579	310	S-MK-10-7	5926	286
T-GP-5-7	22399	1779	S-GP-5-7	22632	1846
T-GP-10-7	22812	398	S-GP-10-7	21784	1346
T-C-28	18954	332	S-C-28	17946	760
T-SF-5-28	5799	176	S-SF-5-28	3401	236
T-SF-10-28	2293	45	S-SF-10-28	1422	77
T-MK-5-28	9024	214	S-MK-5-28	7647	467
T-MK-10-28	3228	72	S-MK-10-28	1924	97
T-GP-5-28	17972	248	S-GP-5-28	16230	486
T-GP-10-28	17050	393	S-GP-10-28	14164	312
T-C-56	15176	329	S-C-56	14019	235
T-SF-5-56	3393	230	S-SF-5-56	2068	175
T-SF-10-56	1358	56	S-SF-10-56	1084	13
T-MK-5-56	6056	344	S-MK-5-56	4049	52
T-MK-10-56	1747	44	S-MK-10-56	1327	101
T-GP-5-56	13397	1408	S-GP-5-56	12176	879
T-GP-10-56	9110	640	S-GP-10-56	6771	243
T-C-90	10186	594	S-C-90	10703	940
T-SF-5-90	2944	364	S-SF-5-90	2458	153
T-SF-10-90	1700	406	S-SF-10-90	1101	83
T-MK-5-90	5533	942	S-MK-5-90	4547	1009
T-MK-10-90	1734	291	S-MK-10-90	2033	411
T-GP-5-90	9439	936	S-GP-5-90	9000	370
T-GP-10-90	7859	1299	S-GP-10-90	5329	331

[표 1-H] 염화물 침투 시험 Raw Data (염화물 침투 시험체 - 총 189개 (단기양생만))

Test series	Charge passed (coulombs)			Test series	Charge passed (coulombs)		
C-0	28317	26125	26642	C-0	28317	26125	26642
SF-5-0	26389	25459	56660	SF-5-0	26389	25459	56660
SF-10-0	24433	22916	24278	SF-10-0	24433	22916	24278
MK-5-0	26750	27601	25307	MK-5-0	26750	27601	25307
MK-10-0	25173	24500	25144	MK-10-0	25173	24500	25144
GP-5-0	26319	26750	28725	GP-5-0	26319	26750	28725
GP-10-0	29369	26750	27601	GP-10-0	29369	26750	27601
T-C-7	20379	20704	20476	S-C-7	20488	20865	20042
T-SF-5-7	14013	14013	13786	S-SF-5-7	15214	14017	14522
T-SF-10-7	5992	6027	6205	S-SF-10-7	5309	5638	5236
T-MK-5-7	15329	14963	15637	S-MK-5-7	14289	15781	16457
T-MK-10-7	6473	6264	7000	S-MK-10-7	5585	6284	5908
T-GP-5-7	22936	24258	20002	S-GP-5-7	24517	23254	20125
T-GP-10-7	23368	22612	22457	S-GP-10-7	23442	20145	21765
T-C-28	19391	18585	18887	S-C-28	16889	18650	18298
T-SF-5-28	6010	5580	5806	S-SF-5-28	3574	3561	3067
T-SF-10-28	2273	2355	2250	S-SF-10-28	1476	1313	1477
T-MK-5-28	8871	8875	9327	S-MK-5-28	7762	8153	7027
T-MK-10-28	3289	3269	3126	S-MK-10-28	1911	1811	2049
T-GP-5-28	18007	17653	18257	S-GP-5-28	15694	16870	16127
T-GP-10-28	17549	16589	17011	S-GP-10-28	14531	14193	13769
T-C-56	15592	14788	15148	S-C-56	14322	13987	13749
T-SF-5-56	3586	3524	3070	S-SF-5-56	1901	2309	1993
T-SF-10-56	1422	1286	1366	S-SF-10-56	1090	1065	1096
T-MK-5-56	6303	5569	6296	S-MK-5-56	4092	3976	4078
T-MK-10-56	1806	1700	1734	S-MK-10-56	1418	1187	1377
T-GP-5-56	11580	13599	15012	S-GP-5-56	13418	11587	11521
T-GP-10-56	8635	10014	8681	S-GP-10-56	6526	7102	6686
T-C-90	9822	9713	11023	S-C-90	10218	12017	9873
T-SF-5-90	2451	3321	3059	S-SF-5-90	2252	2503	2619
T-SF-10-90	1126	2017	1956	S-SF-10-90	983	1153	1167
T-MK-5-90	6045	6342	4211	S-MK-5-90	4283	5893	3465
T-MK-10-90	1349	1799	2053	S-MK-10-90	1543	2007	2548
T-GP-5-90	8127	9945	10245	S-GP-5-90	8997	9455	8549
T-GP-10-90	6021	8789	8766	S-GP-10-90	4882	5673	5329

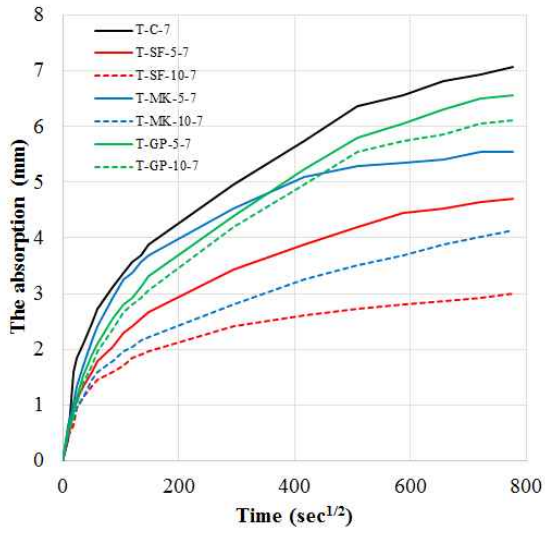
[표 1-1] 무게 변화 측정결과

Test series	Increase weight gain(%)			Test series	Increase weight gain(%)		
	Compressive specimen (cube)	Flexural specimen	Compressive specimen (cylinder)		Compressive specimen (cube)	Flexural specimen	Compressive specimen (cylinder)
T-C-7	4.60	4.18	2.98	S-C-7	2.77	2.57	1.51
T-SF-5-7	4.34	3.58	2.49	S-SF-5-7	2.82	2.55	1.45
T-SF-10-7	4.14	2.20	2.47	S-SF-10-7	2.66	4.81	1.18
T-MK-5-7	4.01	3.20	2.50	S-MK-5-7	2.82	0.44	1.35
T-MK-10-7	4.33	3.44	2.93	S-MK-10-7	2.60	0.71	1.37
T-GP-5-7	3.92	3.29	2.80	S-GP-5-7	2.43	2.28	1.49
T-GP-10-7	4.34	3.32	2.93	S-GP-10-7	2.42	1.94	1.79
T-C-28	3.50	3.69	2.70	S-C-28	4.22	3.69	2.37
T-SF-5-28	3.43	3.43	2.46	S-SF-5-28	4.24	3.30	1.64
T-SF-10-28	3.25	1.84	2.36	S-SF-10-28	4.48	3.54	1.82
T-MK-5-28	3.62	5.79	2.94	S-MK-5-28	4.34	3.66	2.17
T-MK-10-28	3.73	3.46	2.99	S-MK-10-28	4.52	3.48	2.47
T-GP-5-28	3.51	3.47	3.09	S-GP-5-28	4.70	3.51	2.76
T-GP-10-28	3.71	3.38	3.02	S-GP-10-28	4.24	3.78	2.30
T-C-56	4.72	4.63	2.84	S-C-56	5.41	3.44	2.52
T-SF-5-56	4.79	4.11	2.48	S-SF-5-56	4.96	3.42	2.18
T-SF-10-56	5.08	3.67	2.58	S-SF-10-56	4.72	3.05	1.99
T-MK-5-56	5.58	5.35	3.05	S-MK-5-56	5.07	3.51	2.50
T-MK-10-56	5.63	4.92	3.45	S-MK-10-56	5.23	3.48	2.75
T-GP-5-56	4.81	4.38	3.12	S-GP-5-56	5.20	3.65	2.86
T-GP-10-56	5.01	4.99	3.47	S-GP-10-56	5.03	3.14	3.09
T-C-90	3.99	4.15	2.38	S-C-90	4.00	2.94	2.07
T-SF-5-90	5.59	3.95	2.27	S-SF-5-90	4.05	3.58	1.48
T-SF-10-90	4.22	4.24	1.94	S-SF-10-90	3.57	2.89	1.50
T-MK-5-90	4.66	4.31	2.51	S-MK-5-90	3.96	3.54	1.76
T-MK-10-90	3.87	4.69	2.72	S-MK-10-90	3.52	3.22	1.53
T-GP-5-90	5.69	3.71	2.25	S-GP-5-90	0.57	3.42	1.61
T-GP-10-90	7.11	4.46	2.52	S-GP-10-90	2.91	2.81	1.74

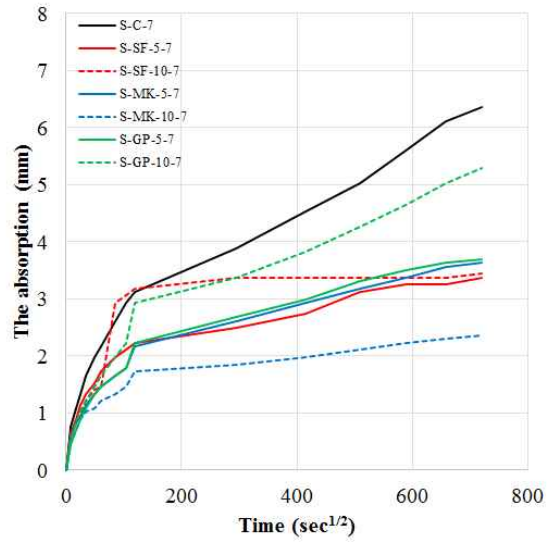
[표 1-J] 무게 변화 Raw Data

Test series	Weight (g)						Test series	Weight (g)					
	Compressive specimen (cube)		Flexural specimen		Compressive specimen (cylinder)			Compressive specimen (cube)		Flexural specimen		Compressive specimen (cylinder)	
	B.C	A.C	B.C	A.C	B.C	A.C		B.C	A.C	B.C	A.C	B.C	A.C
T-C-7	254.6	266.3	542.8	565.5	3206	3301	S-C-7	264.6	271.9	553.8	568.0	3250	3299
T-SF-5-7	255.4	266.5	540.5	559.8	3195	3275	S-SF-5-7	262.6	270.0	556.2	570.3	3242	3289
T-SF-10-7	255.3	265.9	538.8	550.7	3185	3263	S-SF-10-7	259.6	266.5	544.2	570.3	3218	3256
T-MK-5-7	254.6	264.8	536.9	554.1	3222	3302	S-MK-5-7	262.8	270.3	555.5	557.9	3258	3302
T-MK-10-7	255.8	266.9	534.9	553.3	3194	3287	S-MK-10-7	266.1	273.0	564.7	568.7	3248	3293
T-GP-5-7	253.8	263.7	526.8	544.1	3202	3291	S-GP-5-7	267.8	274.3	559.6	572.3	3253	3302
T-GP-10-7	254.1	265.1	535.0	552.8	3177	3270	S-GP-10-7	265.1	271.5	561.4	572.3	3218	3275
T-C-28	260.3	269.4	534.6	554.3	3237	3325	S-C-28	260.7	271.7	553.9	574.3	3232	3309
T-SF-5-28	259.7	268.6	536.2	554.6	3235	3315	S-SF-5-28	257.3	268.3	539.8	557.7	3193	3246
T-SF-10-28	258.6	267.0	548.5	558.6	3204	3279	S-SF-10-28	256.5	268.0	536.7	555.7	3210	3269
T-MK-5-28	257.0	266.3	523.8	554.1	3233	3328	S-MK-5-28	259.2	270.4	537.4	557.1	3206	3275
T-MK-10-28	259.8	269.5	536.4	555.0	3211	3307	S-MK-10-28	259.8	271.5	551.5	570.7	3199	3278
T-GP-5-28	259.2	268.3	540.1	558.8	3206	3305	S-GP-5-28	260.8	273.0	544.4	563.5	3188	3276
T-GP-10-28	256.3	265.8	535.3	553.3	3180	3276	S-GP-10-28	261.6	272.7	548.6	569.3	3197	3271
T-C-56	256.6	268.8	529.6	554.1	3203	3294	S-C-56	255.5	269.3	555.3	574.3	3218	3299
T-SF-5-56	254.3	266.4	533.0	554.9	3210	3289	S-SF-5-56	257.3	270.0	543.7	562.3	3195	3265
T-SF-10-56	252.1	264.9	531.8	551.3	3177	3259	S-SF-10-56	252.6	264.5	530.6	546.8	3171	3234
T-MK-5-56	252.3	266.4	539.1	567.9	3193	3290	S-MK-5-56	256.5	269.5	540.8	559.8	3195	3275
T-MK-10-56	252.4	266.6	530.6	556.7	3147	3255	S-MK-10-56	258.3	271.8	546.8	565.8	3195	3283
T-GP-5-56	254.5	266.8	523.3	546.2	3175	3274	S-GP-5-56	254.8	268.1	536.4	556.0	3183	3274
T-GP-10-56	257.3	270.2	529.3	555.8	3126	3234	S-GP-10-56	258.6	271.6	543.7	560.8	3159	3256
T-C-90	256.8	267.0	535.5	557.8	3178	3254	S-C-90	258.4	268.8	538.7	554.5	3217	3284
T-SF-5-90	254.8	269.0	530.1	551.0	3152	3224	S-SF-5-90	257.4	267.8	530.1	549.1	3219	3267
T-SF-10-90	252.8	263.5	526.3	548.7	3171	3232	S-SF-10-90	256.8	266.0	536.7	552.2	3202	3250
T-MK-5-90	256.3	268.2	533.5	556.5	3205	3286	S-MK-5-90	259.1	269.3	533.7	552.6	3239	3296
T-MK-10-90	256.7	266.6	534.8	559.8	3176	3263	S-MK-10-90	260.7	269.8	543.7	561.2	3233	3283
T-GP-5-90	255.0	269.5	549.8	570.3	3133	3203	S-GP-5-90	262.0	263.5	534.0	552.3	3202	3254
T-GP-10-90	255.3	273.4	536.7	560.6	3090	3168	S-GP-10-90	257.7	265.2	533.2	548.2	3210	3266

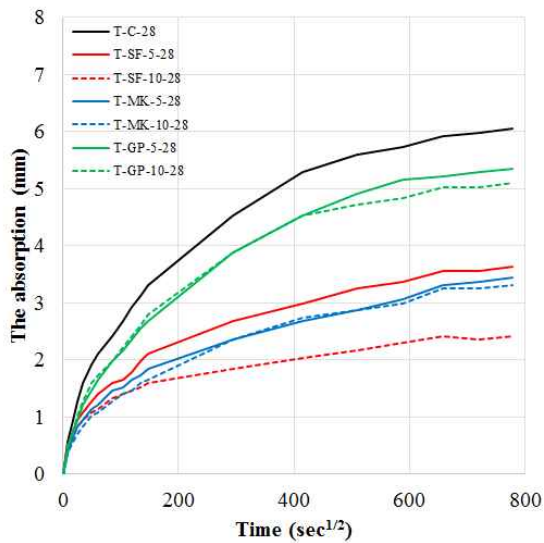
B.C: before curing A.C: After curing



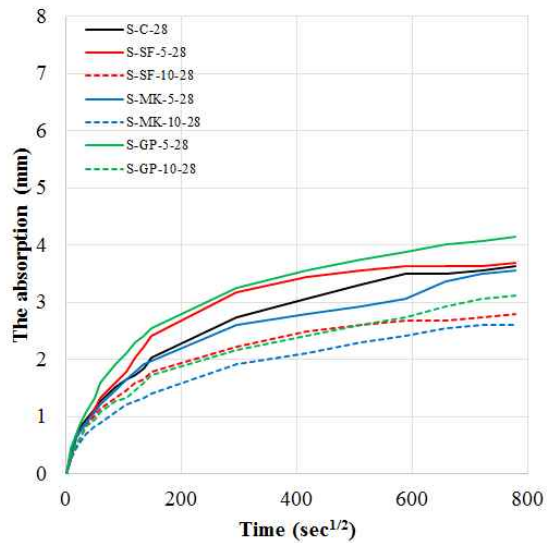
(a) 수돗물 양생 7일



(b) 해수 양생 7일

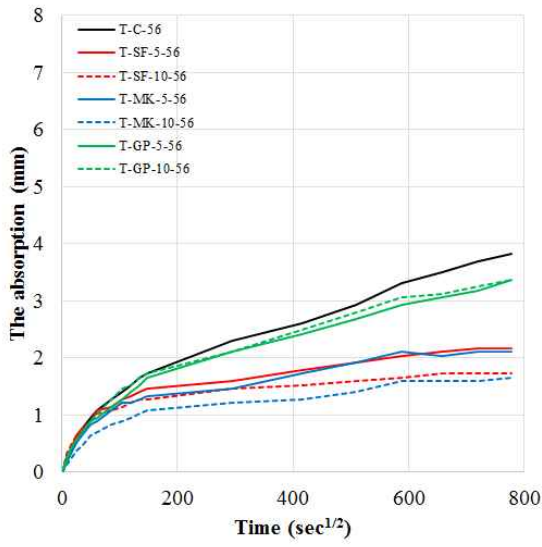


(c) 수돗물 양생 28일

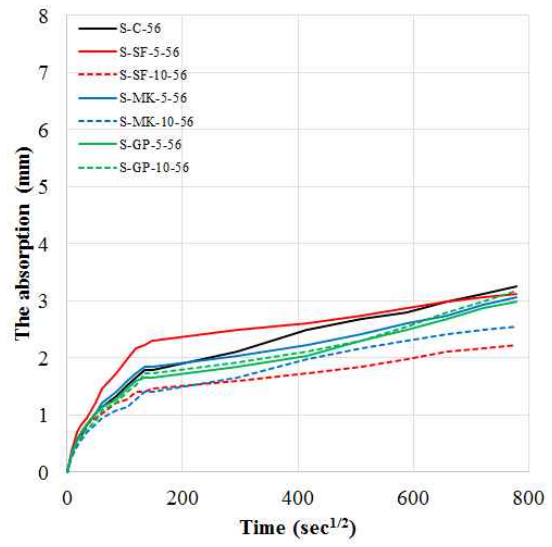


(d) 해수 양생 28일

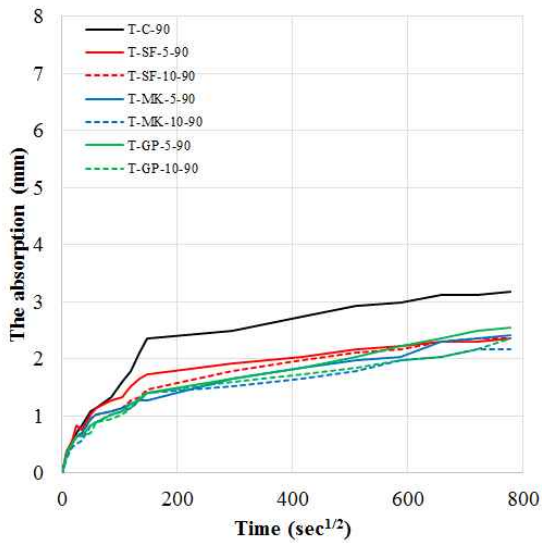
〈그림 1-A〉 물 흡수 시험 결과 (7, 28일)



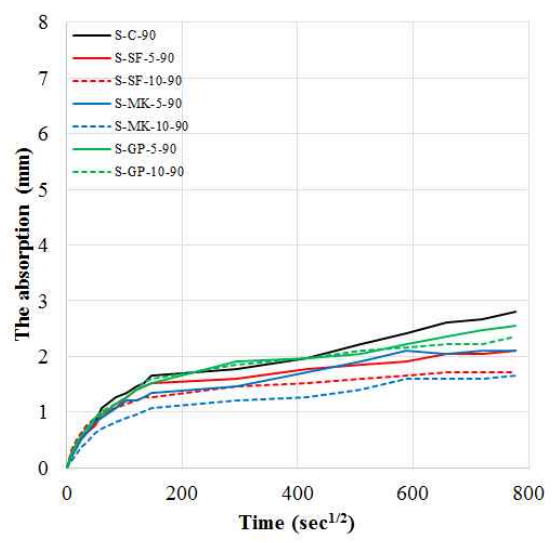
(a) 수돗물 양생 56일



(b) 해수 양생 56일



(c) 수돗물 양생 90일



(d) 해수 양생 90일

〈그림 1-B〉 물 흡수 시험 결과 (56, 90일)

[표 1-K] 물 흡수 시험 결과

Test series	Absorption test ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)		Test series	Absorption test ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)	
	Initial	Secondary		Test series	Initial
T-C-7	25.19	6.73	S-C-7	16.95	5.97
T-SF-5-7	16.03	4.31	S-SF-5-7	11.45	2.14
T-SF-10-7	10.99	2.15	S-SF-10-7	18.32	0.15
T-MK-5-7	21.98	3.90	S-MK-5-7	11.45	2.45
T-MK-10-7	12.82	4.04	S-MK-10-7	9.16	1.22
T-GP-5-7	19.69	6.86	S-GP-5-7	12.82	2.45
T-GP-10-7	18.32	6.46	S-GP-10-7	16.95	4.59
T-C-28	19.69	3.23	S-C-28	12.37	1.88
T-SF-5-28	11.45	2.02	S-SF-5-28	15.57	1.08
T-SF-10-28	8.24	1.21	S-SF-10-28	10.99	1.21
T-MK-5-28	10.53	2.29	S-MK-5-28	11.45	2.02
T-MK-10-28	9.16	2.02	S-MK-10-28	8.24	1.48
T-GP-5-28	16.03	3.10	S-GP-5-28	15.11	1.88
T-GP-10-28	16.49	2.56	S-GP-10-28	10.08	2.02
T-C-56	10.99	3.23	S-C-56	10.53	2.42
T-SF-5-56	8.70	1.21	S-SF-5-56	13.74	1.35
T-SF-10-56	6.87	0.54	S-SF-10-56	8.24	1.35
T-MK-5-56	8.24	1.35	S-MK-5-56	10.99	2.15
T-MK-10-56	6.87	0.94	S-MK-10-56	8.24	1.88
T-GP-5-56	10.08	2.69	S-GP-5-56	9.62	2.42
T-GP-10-56	10.99	2.69	S-GP-10-56	10.08	2.69
T-C-90	14.20	1.48	S-C-90	10.53	2.15
T-SF-5-90	9.62	0.94	S-SF-5-90	9.16	1.08
T-SF-10-90	8.24	1.21	S-SF-10-90	6.87	0.54
T-MK-5-90	6.87	1.62	S-MK-5-90	8.24	1.35
T-MK-10-90	8.24	1.35	S-MK-10-90	6.87	0.94
T-GP-5-90	7.79	1.88	S-GP-5-90	9.16	1.35
T-GP-10-90	7.33	1.62	S-GP-10-90	10.08	1.08

[표 1-L] 환경 영향성 TDS 측정결과 (수돗물 양생)

시간			C	SF-5	SF-10	MK-5	MK-10	GP-5	GP-10
Min	Hour	Day	Total dissolved solids (mg/L)						
0	-	-	153.8	144.4	142.7	142.2	142	142.4	142.4
15	-	-	243	238.8	258	223.6	233.8	274.3	261.6
30	-	-	340	308.1	292.5	342.1	305.5	305.6	374
60	1	-	423	423.6	450.8	427.7	368	434.2	472.2
120	2	-	546.3	572.9	619.4	594.7	502.8	565.8	636.8
180	3	-	642	677.2	755.7	710.6	597.6	688.2	793
240	4	-	721.1	769.5	889.7	821	684.5	781.9	906.5
300	5	-	781.3	858.2	976.2	922.3	752.8	859	984
360	6	-	833	918.3	1040	980.9	800.9	927.8	1044
1440	24	1	1369	1509	1681	1626	1345	1464	1567
2880	48	2	1602	1853	1964	1938	1577	1859	1858
4320	72	3	1797	2047	2137	2126	1745	1966	2034
5760	96	4	1890	2173	2231	2219	1827	2060	2134
8640	144	7	1965	2238	2299	2296	1869	2197	2274
40320	672	28	2097	2320	2312	2424	1945	2434	2501
80640	1344	56	2249	2043	2044	2346	1597	2547	2476
12960	2160	90	2431	1920	1883	2139	1420	2539	2211

[표 1-M] 환경 영향성 TDS 측정결과 (해수 양생)

시간			C	SF-5	SF-10	MK-5	MK-10	GP-5	GP-10
Min	Hour	Day	Total dissolved solids (mg/L)						
0	-	-	17240	17230	17260	17240	17240	17240	17250
15	-	-	17200	17230	17220	17250	17250	17240	17230
30	-	-	17200	17220	17200	17230	17240	17230	17180
60	1	-	17150	17170	17170	17190	17220	17210	17180
120	2	-	17100	17120	17120	17140	17140	17170	17100
180	3	-	17070	17090	17060	17100	17090	17120	17060
240	4	-	17060	17030	17000	17060	17050	17090	17030
300	5	-	16980	17010	16970	17050	17050	17040	17010
360	6	-	17010	16990	16940	17010	17020	17020	16950
1440	24	1	16730	16690	16680	16660	16740	16770	16680
2880	48	2	16530	16530	16500	16430	16510	16610	16530
4320	72	3	16380	16320	16310	16360	16340	16450	16420
5760	96	4	16360	16480	16290	16340	16260	16410	16660
8640	144	7	16670	16880	16460	16600	16130	16830	17070
40320	672	28	17280	17250	16760	16980	16300	17420	17610
80640	1344	56	17830	17320	16840	17210	16500	17910	18040
12960	2160	90	18130	17400	17110	17430	17000	18170	18510

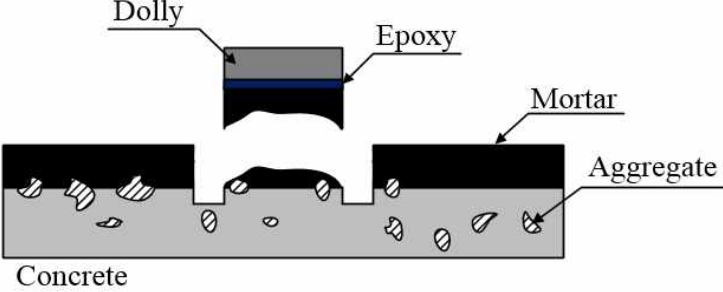


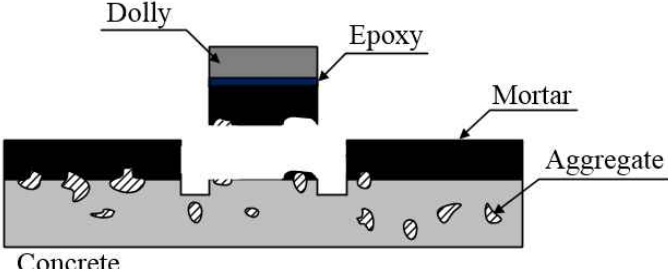


[표 1-N] 환경 영향성 전기전도도 측정결과 (수돗물 양생)

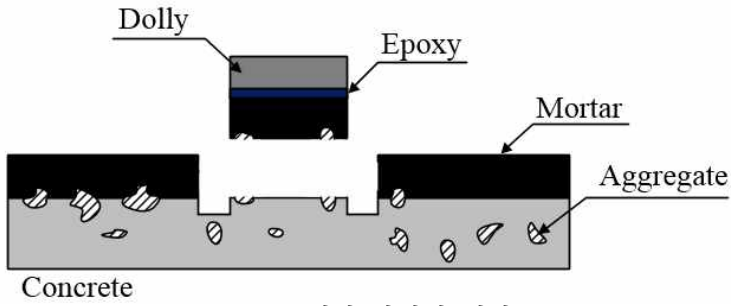


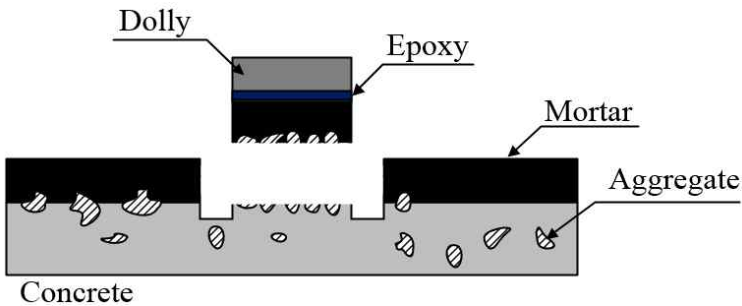


시간			C	SF-5	SF-10	MK-5	MK-10	GP-5	GP-10
Min	Hour	Day	Electrical conductivity (mS/m)						
0	-	-	30.9	28.9	28.5	28.4	28.4	28.5	28.4
15	-	-	48.8	48	52.1	44.6	47.5	55.1	52.3
30	-	-	69.7	61.8	58.4	66.6	61.1	61.2	74.8
60	1	-	84.9	85	90.3	85.7	73.6	87.3	94.4
120	2	-	109.2	114.3	123.9	118.9	100.7	113.5	127.4
180	3	-	128.5	135.4	150.9	142.1	119.5	137.7	158.6
240	4	-	144.2	153.9	177.9	164.2	136.9	156.4	181.3
300	5	-	156.2	171.6	195.2	184.5	150.6	171.8	196.8
360	6	-	166.6	183.7	209	196.1	160.2	185.6	209
1440	24	1	274	301	336	325	269	293	313
2880	48	2	320	370	392	387	315	371	371
4320	72	3	360	410	428	425	349	393	407
5760	96	4	378	435	446	444	366	412	427
8640	144	7	393	448	460	459	374	439	455
40320	672	28	420	464	463	485	389	487	500
80640	1344	56	450	408	405	469	320	510	495
12960	2160	90	487	384	377	428	284	508	442

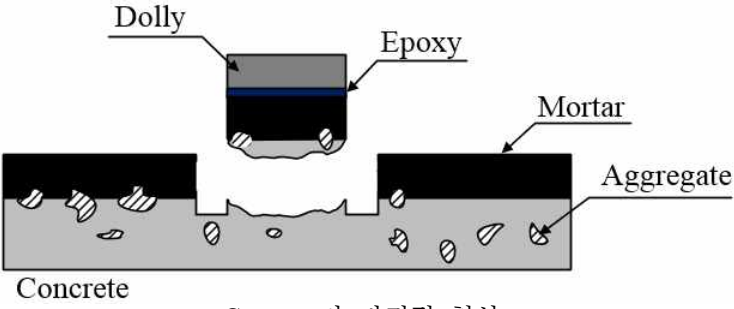
[표 1-O] 환경 영향성 전기전도도 측정결과 (해수 양생)

시간			C	SF-5	SF-10	MK-5	MK-10	GP-5	GP-10
Min	Hour	Day	Electrical conductivity (mS/m)						
0	-	-	3440	3450	3450	3450	3450	3450	3450
15	-	-	3430	3450	3450	3450	3460	3450	3450
30	-	-	3430	3440	3440	3450	3450	3450	3440
60	1	-	3430	3430	3440	3440	3440	3440	3440
120	2	-	3420	3430	3420	3430	3430	3440	3420
180	3	-	3420	3420	3410	3420	3420	3420	3410
240	4	-	3410	3410	3400	3410	3410	3420	3410
300	5	-	3400	3400	3400	3410	3410	3410	3400
360	6	-	3400	3400	3390	3400	3410	3410	3400
1440	24	1	3350	3340	3340	3330	3350	3350	3340
2880	48	2	3300	3300	3290	3290	3310	3320	3310
4320	72	3	3280	3270	3260	3270	3270	3290	3280
5760	96	4	3270	3300	3260	3270	3250	3280	3330
8640	144	7	3340	3380	3290	3320	3230	3370	3420
40320	672	28	3460	3450	3350	3400	3260	3490	3520
80640	1344	56	3570	3460	3370	3440	3300	3580	3610
12960	2160	90	3630	3480	3420	3490	3400	3640	3700

[표 1-P] Representative failure types

Failure type	Pull-off bond test	
Type I - Mortar Failure	 <p style="text-align: center;">Mortar만이 파괴된 형상</p>	
	모재면	돌리면
		
Type II - Mortar+ Interface Failure	 <p style="text-align: center;">Interface 파괴와 동시에 Mortar가 파괴된 형상</p>	
	모재면	돌리면
		

Failure type	Pull-off bond test	
Type III - Interface Failure	 <p style="text-align: center;">Interface에서 파괴된 형상</p>	
	<p style="text-align: center;">모재면</p> 	<p style="text-align: center;">돌리면</p> 
	 <p style="text-align: center;">Interface 파괴와 동시에 Concrete가 파괴된 형상</p>	
Type IV - Interface+ Concrete Failure	<p style="text-align: center;">모재면</p> 	<p style="text-align: center;">돌리면</p> 

Failure type	Pull-off bond test	
Type V - Concrete Failure	 <p style="text-align: center;">Concrete가 파괴된 형상</p>	
	모재면	돌리면
	Not Available	Not Available



- 주 의 -

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.