

17CTAP-
C114646-
02

최종
보고서



2018

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
17CTAP-C114646-02

여름철 실내온도를 2℃ 낮추며 CO₂
301,374(톤/년)를 저감 할 수 있는
콘크리트 건물용 생물학적 콘크리트 판넬
개발
최종보고서

2018. 8.

주관연구기관 / 세명대학교 산학협력단
공동연구기관 / (사)한국콘크리트학회

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

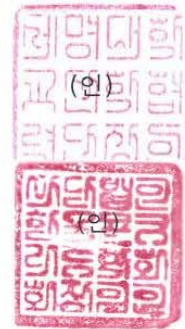
국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'여름철 실내온도를 2℃ 낮추며 CO₂ 301,374(톤/년)를 저감할 수 있는 콘크리트 건물용 생물학적 콘크리트 판넬 개발'(연구개발 기간 : 2016. 06. ~ 2018. 06.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 08.

주관연구기관명 : 세명대학교 산학협력단 (신용국)

공동연구기관명 : (사)한국콘크리트학회 (최창식)



주관연구기관책임자: 최 연 왕

공동연구기관책임자: 정 재 권

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C114646-02	해당 단계 연구 기간	2016. 06. 22.~ 2018. 06. 21.	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	여름철 실내온도를 2℃ 낮추며 CO2 301,374 (톤/년)를 저감할 수 있는 콘크리트 건물용 생물학적 콘크리트 판넬 개발			
연구책임자	최 연 왕	해당단계 참여 연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:220,000천원 기업: 0 천원 정부 외: 0 천원 계: 220,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업: 0 천원 정부 외: 0 천원 계: 400,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관기관: 세명대학교 산학협력단 최연왕 공동기관: (사)한국콘크리트학회 정재권			참여기업명: 해당없음	
국제공동연구	상대국명: 해당없음			상대국 연구기관명: 해당없음	
위탁연구	연구기관명: 해당없음			연구책임자: 해당없음	
보고서 면수	184 페이지				

요 약

이 연구과제는 여름철 실내온도를 2℃ 낮추며 CO2 301,374 (톤/년)를 저감할 수 있는 콘크리트 건물용 생물학적 콘크리트 판넬 개발을 하기 위한 목적으로 2016년 06월부터 2018년 06월(총 2년)까지 세명대학교 산학협력단이 주관으로 진행한 기초원천 연구 사업으로 연구개발 성과는 다음과 같음.

- 국내 환경에 적합한 (미)생물 선정
 - 생물학적 콘크리트 판넬에 착근 가능한 (미)생물류 조사 및 분류
 - 이끼 4종에 대한 온도, 일조량, pH 변화에 따른 생육상태 조사 및 평가
- (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 판넬용 시멘트 개발
 - 보통포틀랜드시멘트의 생물학적 수용성 조사 및 분석
 - 마그네시아 인산염시멘트의 생물학적 수용성 조사 및 분석
 - 알루미나시멘트의 생물학적 수용성 조사 및 분석
- (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 개발
 - (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 최적배합 개발
 - (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 품질특성 평가
- (미)생물 착근을 위한 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬 개발
 - (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬의 환경영향 평가
 - (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬의 규격(안) 개발

〈 국 문 요 약 문 〉

연구개발목표	여름철 실내온도를 2℃ 낮추며 CO ₂ 301,374 (톤/년)를 저감할 수 있는 콘크리트 구조물용 생물학적 콘크리트 판넬 개발					
연구개발내용	<1차 연도> ○ 국내 환경에 적합한 (미)생물 선정. - 콘크리트 착근용 (미)생물의 문헌조사 및 선정. - 콘크리트 착근용 (미)생물의 특성평가. ○ (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 판넬용 시멘트 개발. - (미)생물 착근을 위한 시멘트의 선행연구 및 사례 조사. - (미)생물 착근을 위한 시멘트의 생물학적 수용성 평가. <2차 연도> ○ (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 개발. - (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 선행연구 및 사례 조사. - (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 특성 평가. ○ (미)생물 착근을 위한 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬 개발. - (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 판넬 설계 및 특성 평가. - (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬 제시.					
연구개발성과	○ (미)생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 시멘트. ○ (미)생물이 착근된 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬.					
활용계획 및 기대효과	○ 활용계획 - 현장 적용성 평가를 통한 기술 보완 및 후속연구 수행. - 지식재산권 확보 및 기술이전을 통한 사업화의 초석 마련. - 건설 시장의 새로운 사업영역 확대 및 개척. - 건설 업종의 신규 일자리 창출에 기여. ○ 기대효과 - CO₂ 감소와 대기정화 효과. - 도시열섬 저감효과 및 국지적 홍수 예방효과. - 건축물의 냉·난방 에너지 절감효과. - 건축물의 소음차단 효과. - 건축물의 내구성 향상효과. - 도시 경관의 미적효과 및 주거자의 심리적 안정 효과.					
핵심어 (5개 이내)	(미)생물	생물학적 콘크리트	다층구조 판넬	열섬현상저감	CO ₂ 저감	

〈 Summary 〉

Purpose	Development of Biological Concrete Panels for Concrete Buildings to Reduce the Indoor Temperature of 2℃ and the CO ₂ of 301,374 (ton/year)				
Contents	<First year> ○ Selection of suitable (micro)organisms being able to root in biological concrete under a domestic environment. – Literature survey and (micro)organisms selection. – Evaluation of the characteristics of (micro)organisms. ○ Cement development for biological concrete panels to root (micro)organisms. – Literature survey for preceding researches on cement to root (micro)organisms. – Bioreceptivity evaluation of cement to root (micro)organisms. <Second year> ○ Development of biological concrete for rooting (micro)organisms. – Literature survey for preceding researches on concrete for rooting (micro)organisms. – Characteristics evaluation of concrete for rooting (micro)organisms. ○ Development of multi-layered biological concrete panels for rooting (micro)organisms and evaluation of their characteristics. – Design of multi-layered biological concrete panels. – Presentation of multi-layered biological concrete panels rooted by (micro)organisms.				
Development results	○ Cement for biological concrete panels for rooting (micro)organisms. ○ Multi-layered biological concrete panels rooted by (micro)organisms.				
Expected Contribution	○ Utilization plan – Technical supplementation and conduction of follow-up studies through field applicability evaluation. – Securing intellectual property rights and commercialization by technology transfer. – New construction market development. – Contribution to the creation of new jobs in the construction field. ○ Benefits – Reduction of CO₂ and purification atmosphere effect. – Urban heat island reduction and local flood prevention. – Indoor cooling and heating energy saving. – Noise insulation effect. – Durability improvement of concrete structure. – Aesthetic effect of urban landscape and habitants' psychological stability effect.				
Keywords	Microorganisms	Biological Concrete	Multi-Layer Panel	Reduction of Heat Island	Reduction of CO ₂

< 목 차 >

제1장	연구개발과제의 개요	1
제2장	국내·외 기술 개발 현황	15
제3장	연구 수행 내용 및 성과	23
제4장	목표 달성도 및 관련 분야 기여도	149
제5장	연구개발성과의 활용 계획	151
제6장	연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	155
제7장	연구개발성과의 보안등급	170
제8장	국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	171
제9장	연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ...	172
제10장	연구개발과제의 대표적 연구 실적	174
제11장	참고 문헌	176

제 1 장 연구개발과제의 개요

1. 연구 개발 목표

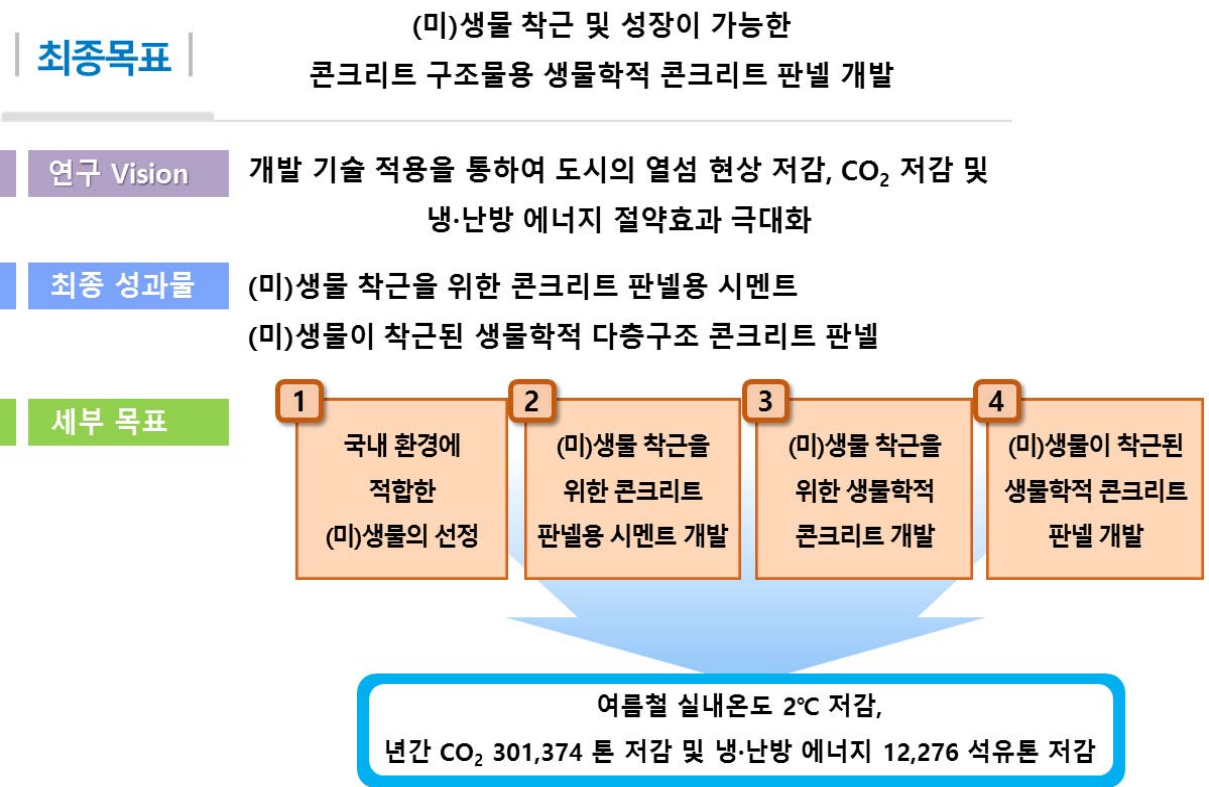
가. 최종 목표

- 개발 기술의 정의

콘크리트 구조물용 생물학적 콘크리트 판넬

국내 기후조건에 적합한 (미)생물을 생물학적 수용성이 극대화된 콘크리트 판넬 표면에 착근시켜 콘크리트 구조물에 적용함으로써 도시 열섬 현상, CO₂ 저감 및 냉·난방 에너지 절약 등을 기대할 수 있는 환경 친화적 건설 재료/자재 제조기술

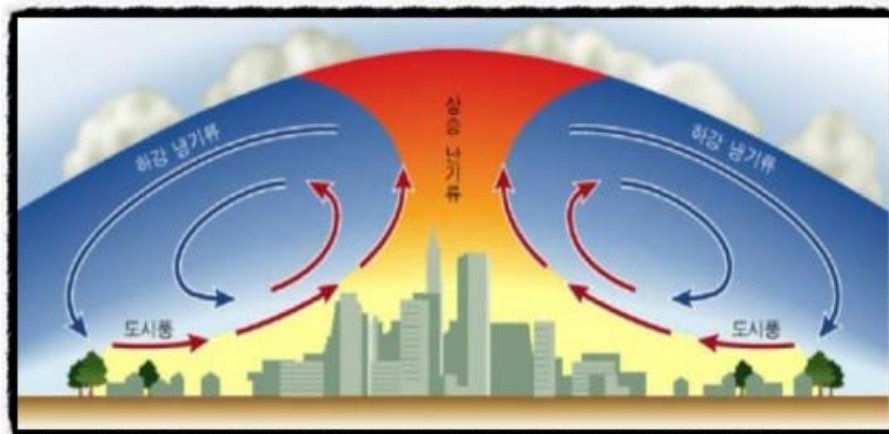
- 최종 연구 목표



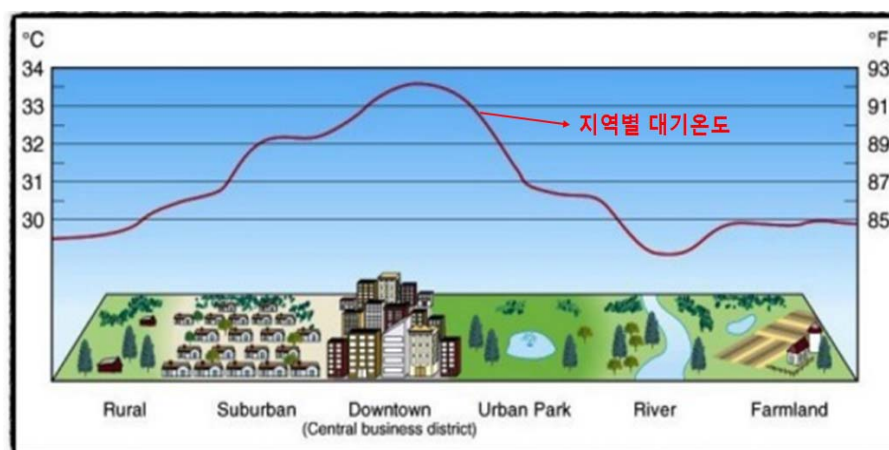
2. 연구 개발의 필요성

가. 연구 배경

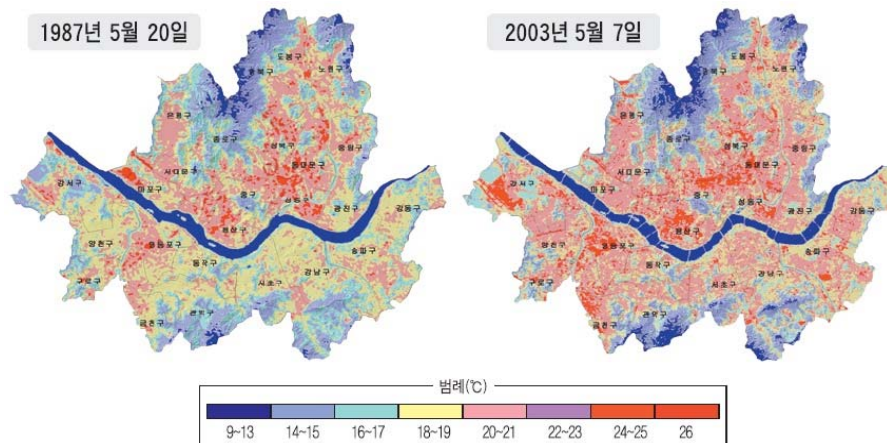
- 최근 인구의 증가, 각종 인공 시설물 및 차량의 증가 등 도시의 팽창으로 인하여 인공열의 방출과 CO₂의 배출량이 급증하고 있으며 이로 인한 온난화 및 도시 내 열섬 현상(그림 1.1)이 뚜렷해짐.
- 온도가 높은 지역이 섬과 같은 형태(그림 1.2)를 띄게 되어 지역 내 풍로가 감소함에 따라 대기 오염 및 냉방 에너지 소모의 증가를 가져오며 체감온도의 상승으로 인하여 지역주민에게 심리적 불쾌감을 조성함.
- 따라서 본 연구를 통하여 도시 열섬현상을 완화시키고 CO₂를 감소시킬 수 있는 획기적인 대안을 제시하고자 함.



[그림 1.1] 열섬현상 발생 매커니즘



[그림 1.2] 도시 밀집 지역의 열섬현상 예



[그림 1.3] 서울 지역 지표면 온도분포

▪ 기상연구소의 조사(그림 1.3)에 따르면 지난 16년간 서울지역 고층건물과 아파트 단지 밀집 지역의 지표면 온도가 크게 상승한 것으로 나타나고 있으며, 온도가 24° C 이상인 지역도 증가하는 것으로 나타남.

▪ 특히, 녹지가 거의 없는 동대문구는 20.3° C로 북한산 국립공원의 일부를 포함하는 강북구의 16.7° C 보다 3.6° C 더 높은 것으로 나타남. 이러한 원인은 서울지역의 녹지 면적이 약 12.5% 감소하고 개발 지역이 약 8.7% 증가함에 따른 원인으로 분석되고 있음. 따라서 이와 같은 열섬현상을 저감시키기 위해서는 도시의 녹지공간을 충분히 확보하여야 하나 이는 경제여건 상 어려운 실정임.

▪ 표 1.1은 서울지역에서 도시형 농업작물을 옥상과 외벽에 재배하였다고 가정하고 CO₂ 및 에너지 저감량을 산출한 결과로 에너지 저감량(외벽 제외)을 석유 환산톤(TOE: tons of oil equivalent)으로 추산할 경우 약 1352.5 TOE/년에 해당됨. 또한, 건물의 녹화면적을 인구비례에 따라 전국 단위로 확대(서울 지역의 4배) 적용할 경우 CO₂ 저감량은 301,373.8 톤/년이며 옥상 적용률을 30%에서 100%까지 확대하고 외벽을 추가적으로 적용하면 에너지 저감량이 약 12,275.5 TOE/년 수준임.

▪ 따라서 본 연구과제를 통하여 도시 밀집 지역의 열섬현상 및 CO₂ 저감을 위한 방안으로 (미)생물을 착근시킨 생물학적 콘크리트 판넬을 기존 또는 신규 구조물의 외벽과 옥상에 적용하여 감소한 녹지 면적의 재생효과를 얻을 수 있는 친환경 건설재료를 개발하고자 함.

[표 1.1] 서울 지역 건물 옥상 및 외벽 녹화시 연간 CO₂ 및 에너지 예상 저감량

유 형		건축물 녹화 가능면적(Km ²)			CO ₂ 저감량 (Kg)/년 <2>	에너지 저감량 (1천 kcal) <3>
		옥상	외벽 <1>	소계		
단독주택지		30.33	30.33	60.67	13,801,667	2,280,011
공용 주택지	4층 이하	5.10	7.65	12.75	2,900,625	794,111
	4층 이상	4.70	9.40	14.10	3,207,750	-
상업·업무 시설지		20.37	40.73	61.10	13,900,250	4,135,421
주거·상업 혼합지		50.77	101.53	152.30	34,648,250	3,532,791
공공용도지		9.53	19.07	28.60	6,506,500	2,782,998
도시부양 시설지		0.83	0.83	1.67	379,167	-
총계		121.63	209.55	331.18	75,343,450	13,525,332

※ 도시농업의 온실가스 저감효과 및 정책방안, 한국환경정책·평가연구원 참조
<1> 녹화 가능한 외벽 추정치는 옥상 면적의 1.0 - 2.0 배 값임
<2> 옥상 및 외벽 녹화시 녹화면적 1Km² 당 CO₂ 저감량/년을 227,500 (Kg)으로 가정했을 때
<3> 옥상 30% 녹화시 에너지절감 비율(%)을 4.9%로 가정했을 때

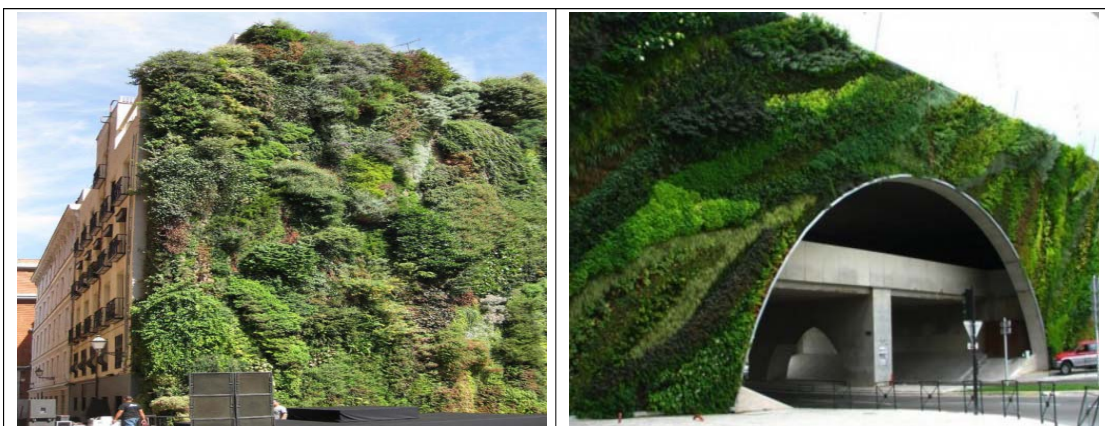
나. 기술 개발의 필요성

▪ 본 연구과제에서 제안한 생물학적 콘크리트는 친환경 기술로써, 본 기술이 개발되어 적용 될 경우 CO₂ 감소에 의한 온난화 방지 및 산소량 증가에 따른 쾌적한 대기환경을 조성할 수 있으며, 콘크리트 외벽으로부터 반사되는 열을 흡수하여 도시의 열섬 현상을 저감시킬 수 있음.

▪ 또한, 구조물의 단열 효과를 증대하여 건물 내부의 냉·난방 비용의 절감 및 소음 차단효과를 기대할 수 있음. 본 기술은 우리나라와 같이 국토면적이 협소하고 아파트가 밀집된 주거형태를 갖는 특수한 조건에 매우 적합한 것으로 판단됨(그림 1.4).



[그림 1.4] (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트의 예

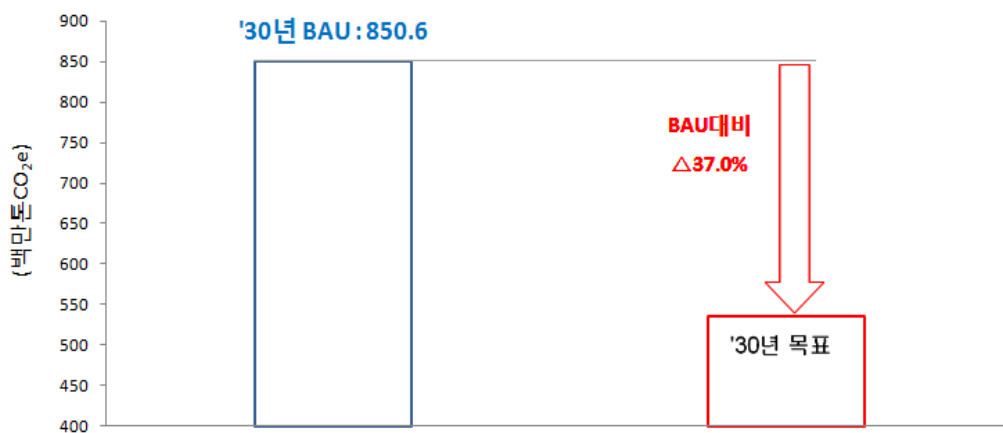


[그림 1.5] 수직 정원의 예

- 추가적으로 다양한 건물외관의 색상변화에 따라 수려한 도시경관을 확보할 수 있어 본 기술을 적용할 경우 주민들을 심리적으로 안정시키는 효과도 기대할 수 있음.
- 유사 기술인 수직정원(그림 1.5)은 방식에 따라 단가의 차이가 크지만 인공 경량 토양을 사용하여 건물외벽에 설치할 경우 1m²당 제작 및 설치비용이 약 60 만원 내외인 것으로 나타남.
- 본 연구과제의 제안 기술인 생물학적 콘크리트 판넬의 단가를 수직정원 단가의 1/4으로 산정하고 이를 서울 지역 외벽의 총 면적의 10% 에 적용한다고 가정할 경우 총 시장 규모는 약 3조 1,430억 원 수준임. 따라서 새로운 시장의 창출은 침체되어 있는 국내의 건설시장에 큰 전기를 마련하고 신 성장 동력의 역할을 할 수 있을 것으로 기대됨.

다. 정부 지원의 필요성

- 정부는 2014년 ‘국가 온실가스 감축, 2020년 로드맵’을 제시하고 이를 뒷받침하기 위해서 2020년 온실가스 배출전망치(CO₂ 기준) 7억7,600만 톤 중 30%에 해당하는 2억 3,300톤을 감축하는 것을 목표로 설정하였으며, 최근 2030년 로드맵을 통하여 BAU 대비 37% 감축하기 위한 구체적인 실천방안을 마련하는 중임(그림 1.6).
- 본 연구과제는 도시 밀집지역의 열섬현상 및 CO₂ 저감에 필요한 생물학적 콘크리트에 대한 원천기술을 확보하여 해외기술 의존도를 해소할 수 있는 계기가 될 전망이며 정부가 지향하고 있는 미래선도 창의형 연구개발에 매우 부합되는 과제임 (그림 1.7).
- 본 연구과제에서 제안하고 있는 생물학적 콘크리트의 개발은 이와 같은 요구에 적절히 부응할 수 있는 친환경적인 기술로써, 시공 중인 건축물뿐만 아니라 공용중인 건축물에도 적용이 가능하므로 경제적 가치가 매우 클 것으로 예상됨.
- 또한, 해당 기술 분야는 건설재료 외에도 타 분야 기술(조경, 도시공학 및 도시환경 분야 등)과의 융·복합이 가능한 기술이므로 타 산업간과의 연계를 통하여 사회적, 경제적, 기술적 파급효과를 창출할 수 있을 것으로 예상되며, 융합산업의 새로운 성장동력원이 될 수 있으므로 공공성 측면에서 정부 지원이 필요한 실정임.



[그림 1.6] 국내 정부의 2030년 CO₂ 감축 목표 (<http://www.greengrowth.go.kr/> 참고)

- 신규 자재의 국산화를 통하여 국가 경쟁력을 강화하고 기술적인 선점이 가능하며, 건설 분야와 융합된 기술은 미래 고부가가치 산업으로 성장할 수 있으므로 적극적인 기술개발이 필요한 시점임.

■ 추격형 연구개발 한계에 봉착

- ◆주력산업 경쟁력 약화와 ICT산업 이후 신성장산업 발굴 및 육성 지체

■ 선도형 패러다임 특성

- ◆기초연구 강조, 창의적 인력양성, 지식재산 중심R&D 전략, 개방형 기술혁신 활성화 등



[그림 1.7] 미래선도 창의형 연구개발로 패러다임 전환

라. 창의성 및 혁신성

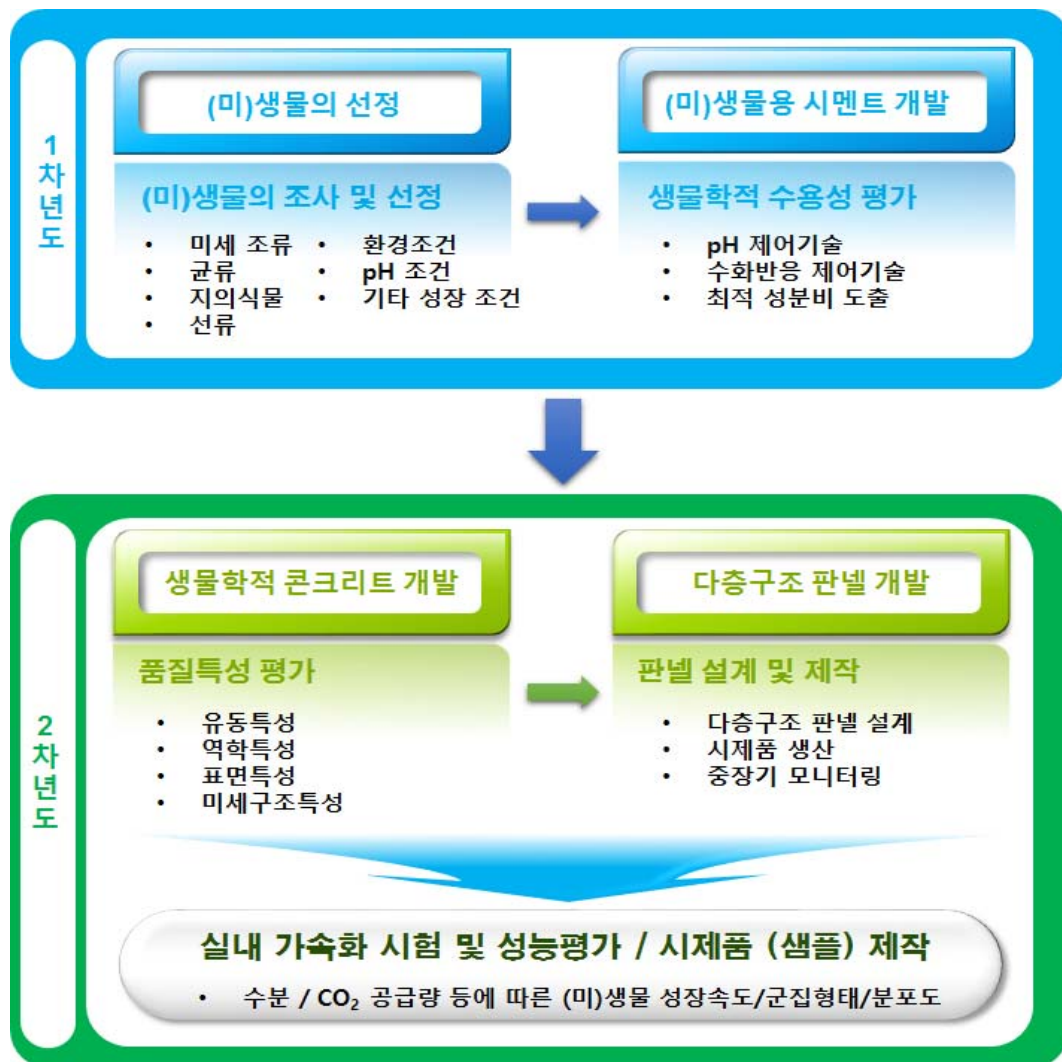
- 본 연구과제와의 중복성을 검토하기 위하여 국가과학기술정보서비스(국토해양부, 지식경제부 등)를 활용하여 유사연구 실적 분석결과 기 수행과제, 타 연구자 등록과제 및 공공 R&D 과제에서 중복된 유사과제가 없는 것으로 분석되어(그림 1.8) 본 연구과제에서 제안된 기술이 매우 창의적인 주제로 판단됨.
- 또한, 본 연구과제를 통하여 얻어진 성과물은 차후 실용화 목표를 달성하기 위한 기초연구로서 중요한 의미를 가지며 생물학적 콘크리트 개발뿐만 아니라 실내에서 가속화 시험을 통해 (미)생물을 착근시킨 생물학적 콘크리트 판넬을 제작하고 샘플을 제출하고자 함.
- (미)생물을 착근시킨 생물학적 콘크리트 판넬 개발 분야는 생물학과 재료공학 및 구조공학이 융합된 기술로써 국내의 경우 이와 관련하여 연구한 사례가 없으며 도심 열섬현상, CO₂ 저감에 필요한 건설기술에 혁신적인 개념을 도입할 것으로 판단됨.



3. 연구 개발 범위

가. 연구 개발의 최종 목표

구 분	내 용
최종 목표	(미)생물의 착근 및 성장이 가능한 콘크리트 건축물용 생물학적 콘크리트 판넬 개발
세부 목표	• 국내 환경에 적합한 (미)생물 선정 • (미)생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 시멘트 개발 • (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 개발 • (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬 개발



나. 개발 목표 및 내용

연구개발 세부목표	개발 내용 및 범위
국내 환경에 적합한 (미)생물 선정	• 생물학적 콘크리트 착근용 (미)생물의 문헌조사 및 선정 - 콘크리트에 착근 가능한 (미)생물류 조사 및 분류 - 콘크리트에 착근하여 군을 이루어 성장할 수 있는 (미)생물 선정 ※ 미세 조류, 균류, 지의식물과 선류 등 • 생물학적 콘크리트 착근용 (미)생물의 특성평가 - 콘크리트에 착근하여 군을 이루어 성장할 수 있는 (미)생물의 기초특성 평가 ※ 환경 조건, pH 조건 및 기타 성장 등
(미)생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 시멘트 개발	• (미)생물 착근을 위한 시멘트의 선행연구 및 사례 조사 - 시멘트의 화학적 특성에 따른 (미)생물의 성장 특성평가 및 (미)생물과 시멘트의 생물학적 수용성과의 연관성 검토 • (미)생물 착근을 위한 시멘트의 생물학적 수용성 평가 - 일반 포틀랜드 시멘트의 생물학적 수용성 평가 ※ pH / 수화반응 제어기술 (응결억제/촉진) ※ 첨가제 : 붕산 (H_3BO_3) / 옥살산($(COOH)_2 \cdot 2H_2O$) - 인산마그네슘 시멘트 ※ 수화반응 제어기술 ※ 산화마그네슘 / 인산2수소암모늄 / 붕사 - (미)생물 착근을 위한 시멘트 최적 성분비도출
(미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 개발	• (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 선행연구 및 사례 조사 - (미)생물의 생물학적 수용성에 영향을 미치는 콘크리트의 물리적 성질 조사 • (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트의 품질특성 평가 - 생물학적 콘크리트 배합설계 및 제조. ※ 슬럼프 / 공기량 등 - 생물학적 콘크리트의 품질특성 평가 ※ 역학적 특성 / 내구특성 / 표면특성 / 미세 구조특성 등 - 생물학적 콘크리트의 성능 도출 및 영향분석 ※ 공극률 / 투수성 / 표면 거칠기 등 - 최적 배합비 도출.
(미)생물 착근된 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬 개발	• (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬 설계 - 다층구조를 가지는 콘크리트 판넬 설계 - 각 층의 고유 기능 및 성능 검토 - 판넬 설계에 따른 성능 피드백 • (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬 제조 및 품질특성 평가 - (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬의 가속화 시험을 통한 특성 평가 ※ 수분, 빛과 CO_2의 공급량을 조절하여 착근된 (미)생물의 성장을 촉진 / 군집형성 (기울기 고려) / 성장속도 / 분포도 - (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬 중장기 성능 모니터링

다. 주요 연구 내용

<1> 1차년도 주요 연구 내용

- 국내 환경에 적합한 (미)생물 선정

: 국내 기후환경에의 적응성, 색상의 변화 및 생존 가능한 pH 등 을 고려하여 생물학적 콘크리트 판넬에 착근하여 성장할 수 있는 (미)생물을 선정하고 개발된 콘크리트의 생물학적 수용성과의 관련성을 문헌조사를 통하여 검토함.

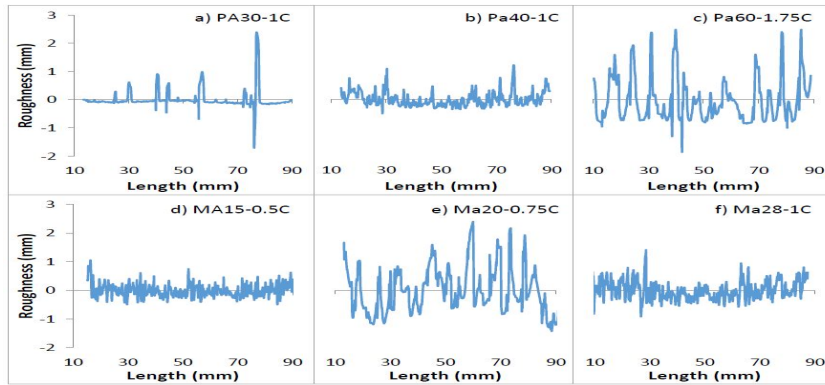
- (미)생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 시멘트 개발

: (미)생물의 착근 및 성장을 위한 필수적인 생물학적 콘크리트 층의 제작에 사용되는 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트 계열과 인산마그네슘 시멘트 계열로 구분할 수 있음. 국내 기후조건과 개발조건 등을 고려하여 시멘트의 종류를 선정한 후 배합비 및 pH 등 (미)생물의 생물학적 수용성에 영향을 미치는 주요 화학적 특성치를 결정하고 이를 반영한 시멘트를 개발하고자 함.

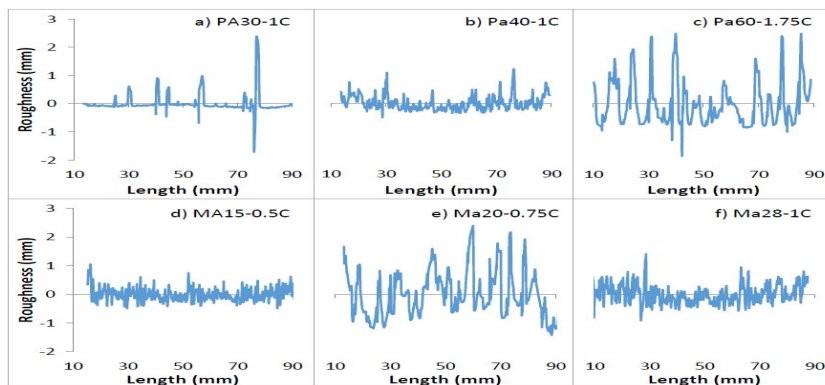
<2> 2차년도 주요 연구 내용

- (미)생물 착근을 위한 생물학적 콘크리트 개발

: (미)생물이 착근할 수 있는 콘크리트 생물학적 층의 물리적 특성치를 결정하기 위하여 콘크리트의 생물학적 수용성에 가장 큰 영향을 미치는 두 가지 요소, 즉 수분의 포집과 관련된 공극률(그림 1.9)과 영양소의 축적과 관련된 표면 거칠기(그림 1.10)에 따른 시멘트의 종류 및 배합비와의 상관성을 정립하고자 하며, (미)생물의 착근 후 성장과 밀접하게 관련된 인자인 투과성을 검토하고자 함.



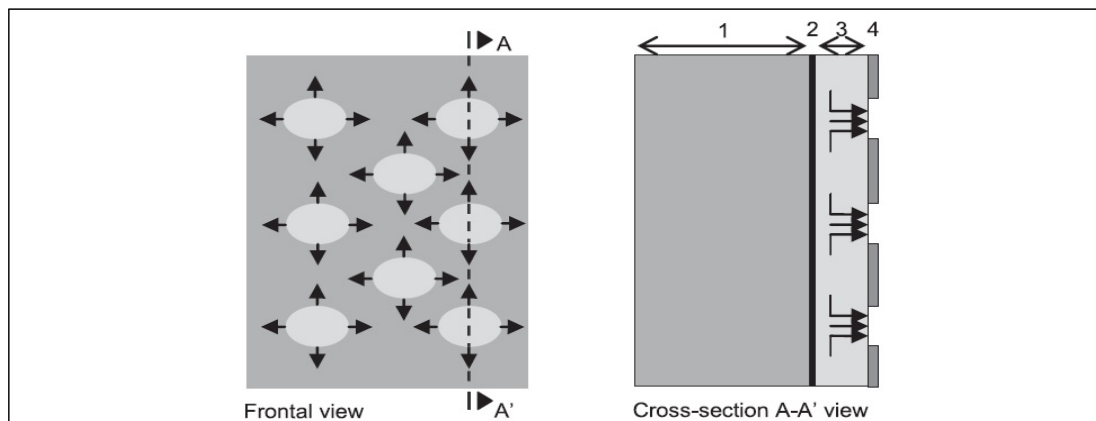
[그림 1.9] 생물학적 콘크리트의 표면 거칠기



[그림 1.10] 생물학적 콘크리트의 표면 거칠기

▪ (미)생물 착근된 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬 개발

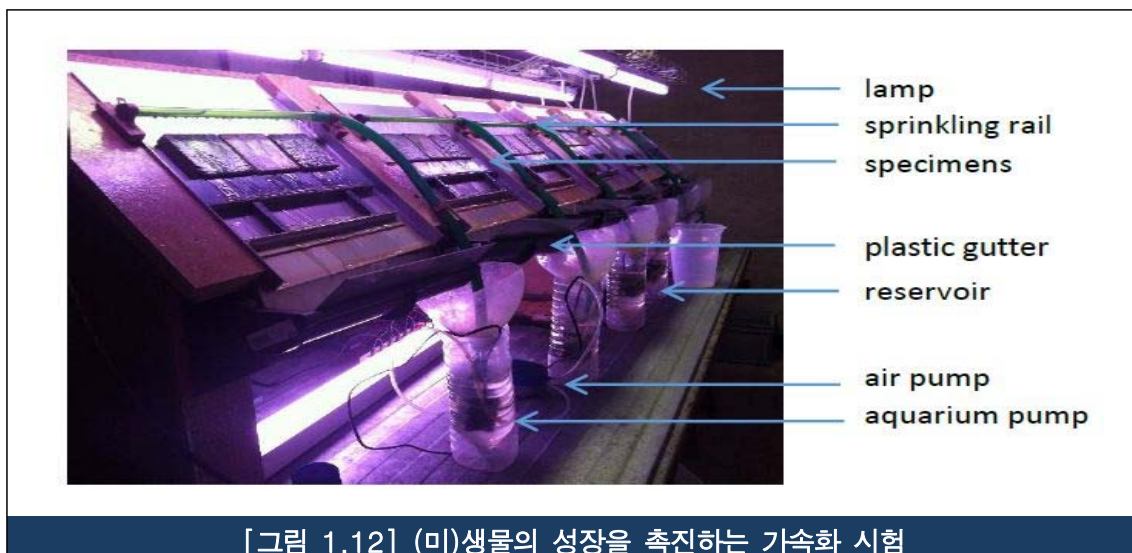
: 생물학적 콘크리트 판넬의 다층구조 판넬은 그림 1.11과 같이 일반 콘크리트 층 위에 3개의 추가적인 층으로 구성되어 있으며 아래와 같이 각 층마다 고유의 역할을 수행하여 (미)생물의 착근 및 성장을 촉진함.



[그림 1.11] 다층 구조를 가지는 생물학적 콘크리트 판넬

- (1) 일반 콘크리트 층: 구조적으로 지지하는 역할을 수행함.
- (2) 방수층: 일반 콘크리트와 생물학적 층 사이에 부착되어 있으며 스며든 빗물로 인한 콘크리트 손상을 방지함.
- (3) 생물학적 층: 방수층과 불연속 코팅 층 사이에 위치한 미세한 구조를 갖는 다공질 콘크리트 층으로 수분의 축척, 체류와 배출을 원활하게 함으로써 생물의 성장을 촉진함. 또한, 착근된 (미)생물을 지지하고 군집으로 성장할 수 있도록 도움을 주는 역할을 수행함 (구조적 역할은 수행하지 않음).
- (4) 불연속 역방수 코팅 층: 빗물의 유입은 허용하지만 수분의 증발을 억제하고 배출을 제한함으로써 일정량의 수분을 저장할 수 있는 역방수 기능을 담당함.

: 설계된 콘크리트 판넬에 (미)생물을 착근시킨 후 CO₂, 빛과 수분량을 조절한 가속화 시험(그림 1.12)을 통하여 콘크리트 판넬에 대한 (미)생물의 수용성 및 성장 속도를 관찰하며 면적 당 (미)생물의 적합한 분포도 및 판넬의 기울기에 따른 영향을 분석하고자 함.



제 2 장 국내외 기술 개발 현황

1. 연구 개발 및 기술 현황

가. 국내·외 기술 동향

▪ 친환경 또는 특수한 목적의 콘크리트 개발은 국내에서도 다양하게 이루어져 왔으나, 대부분 고강도 콘크리트나 자기치유 콘크리트 등에 집중되어 왔음. 그 밖에 원적외선 방사, 전자파 차단 등의 특수 목적을 위한 콘크리트의 개발이 산발적으로 진행되었으나 (미)생물의 착근과 성장에 필요한 생물학적 콘크리트와 관련된 연구 및 기술 개발이 시도된 사례가 전무한 것으로 나타남.

▪ 본 제안기술과 유사한 기술로는 수직정원(Vertical Garden)이 있으나 콘크리트 외벽과 일체화가 이루어질 수 없는 단점을 가지고 있으며, 복잡한 지지 구조물을 별도로 설치해야 하기 때문에 설치비와 유지관리 비용이 동일한 면적의 일반 정원과 비교하여 약 3배가량 증가하여 비경제적임. 또한, 본 기술에서 콘크리트 패널의 생물학적 층 역할을 대신하는 수직정원의 스펀지나 매트타입 또는 블록타입으로 제작된 인공 경량 토양의 경우 내구성에 문제점이 많은 것으로 나타났음.

▪ 본 기술을 선도하고 있는 국외 연구진은 대표적으로 스페인의 UPC(Universitat Politècnica de Catalunya) 대학교 구조기술그룹(Structural Technology Group)과 영국의 ULC(University College London) 대학교 건축학부가 있음. 표 2.1은 본 연구와 관련된 요소 기술로써 콘크리트 패널의 생물학적 층 개발을 위한 국외 연구현황을 나타낸 것임.

▪ (미)생물의 성장조건과 생물학적 콘크리트의 화학적·물리적 특성치는 매우 밀접하게 관련되어 있으며 그 관련성은 기후조건에 따라 상이하게 나타나므로 국외에서 개발된 기술이나 제품을 국내에 바로 적용할 수 없는 실정임. 따라서 본 연구과제에서는 외국사례를 충분히 검토하여 선진기술을 추격하고, 이를 국내 환경여건에 적합하도록 국내형 생물학적 콘크리트 패널을 연구·개발하는 과정이 반드시 필요함.

[표 2.1] 콘크리트 생물학적 층의 제작을 위한 요소 기술의 국외 연구 현황

특성치	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
화학성분	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	
pH		●		●						●		●
질감	●	●	●				●	●		●		
표면 거칠기		●		●	●	●				●	●	●
공극률	●	●	●	●	●	●		●		●	●	●
Capillary coefficient				●	●	●				●		
수분함유량			●	●	●							
부피밀도				●								
건조밀도			●									
결정밀도			●									
투수율										●		

[1] Guillitte and Dreesen (1995); [2] Tiano et al. (1995); [3] Papida et al. (2000);

[4] Prieto and Silva (2005); [5] Barberousse et al. (2006); [6] Escadeillas et al. (2007);

[7] De los Ríos et al. (2009); [8] Favero-Longo et al. (2009); [9] Giannantonio et al. (2009);

[10] Miller et al. (2006, 2009, 2010); [11] Portillo et al. (2011); [12] Tran et al. (2012).



[그림 2.1] 유사 기술 사례

나. 국내·외 유사 연구 동향

(1) 벽면녹화의 효용성

▪ 벽면녹화란 일반적으로 건축물의 벽면, 담장이나 울타리, 옹벽 및 방음벽 등의 수직벽면을 다양한 식물로 덮는 것을 의미함. 환경부(1998)는 인공적으로 만들어진 입면을 식물로 푸르게 하는 것이라고 정의하고 있으며 국내에서 법률적으로 규정하고 있는 조경기준에 따르면 벽면녹화를 건축물이나 구조물의 벽면을 식물을 이용하여 전면 또는 부분적으로 피복 녹화하는 것이라고 정의하고 있음.

▪ 해외의 경우 벽면녹화를 Vertical Greening Systems이라 정의 하고 있으며 Green facades와 Green wall systems로 구분하고 있음. Green facades는 덩굴성 식물을 이용하여 건물 표면에 직접 부착하거나 철망 또는 트렐리스(Trellis)로 고정시키는 것을 말하여 Green wall systems는 Green walls이나 Vertical gardens로 알려져 있음. 또한 토양이나 식재지반을 채워 각각의 모듈에 식재하는 것을 말함.

▪ 녹지 확보가 어려운 도시에서는 건축물의 수직 면적이 지속적으로 증가함에 따라 벽면 자체가 잠재적인 녹화대상으로서의 부각되고 있으며 녹지 공간이 가지는 경관적, 환경적 효과를 부여할 수 있음. 이에 환경부에서는 벽면녹화 기법을 등반부착형, 등반 감기형, 하수형, 등반하수병용형, 면적형, 에스펠리형(espalier) 등 으로 구체적으로 구분함으로써 벽면녹화의 확산과 적용을 권장하고 있음.

▪ 벽면녹화 효용성에 관한 국내 연구를 살펴보면 기존의 식생자료를 이용하여 덩굴식물의 수평 및 수직분포, 남한 내의 자생 덩굴식물의 종수 등에 관한 연구를 기점으로 고속도로 등의 방음시설물 및 방책 시설물의 녹화를 위하여 수목원과 고속도로에 덩굴식물 18종을 파종 및 삽목하여 방음벽 녹화를 위한 덩굴식물의 활용성을 제시하였음. 이에 따라 1990년대에는 주로 덩굴성 식물을 사용한 다양한 기술보다는 벽면녹화 자체에 중점을 두었다는 것을 알 수 있음.

▪ 이은희와 김용아(2000)는 서울시민들을 대상으로 벽면녹화에 대한 선호도, 벽면녹화 하려는 의도와 기피 이유, 선호식물 등을 설문 조사를 통하여 분석하였음. 이영무(2001)는 고층건물 벽면녹화의 사례를 조사하고 문제점을 분석하여 등반보조재와 덩굴식물을 이용한 고층건물의 벽면조경기법 및 계획의 방향을 제시하였음. 강진형(2003)은 식생블록에 적합한 식물의 선정과 식재기준을 검토하였으며 또한 도심경관에 어울리는 식재유형을 보고하였음.

▪ 강수학(2003)은 서울지역 벽면녹화 현황 및 상록성 덩굴식물의 적응성 연구를 하였으며 김선혜(2004)는 용기 및 화단형 플랜터를 중심으로 고층 건축물 입면녹화 방안을 연구하였음. 노승무(2004)는 벽면녹화 기술개발과 덩굴식물의 생장에 관한 연구를, 한승호와 김선혜(2006)는 벽면녹화의 국내·외 기술현황 및 법제도에 관한 연구를 수행하였음. 이에 2000년대에 들어서는 주로 벽면녹화에 대한 이용자의 심리, 경관성, 기법 및 계획, 관련 법과 제도 위주의 연구가 대부분인 것으로 조사되었음.

(2) 식재지반((미)생물)

▪ 도시 지역 녹화의 증대를 위한 벽면녹화는 식재지반 등의 조건이 녹화식물의 생육에 큰 영향을 미치기 때문에 양의 확보뿐만 아니라 질 또한 중요한 고려사항임. 일반적으로 벽면녹화는 수직면에 식물이 성장하기 때문에 우수에 의한 수분 공급은 기본적으로 한계가 있으며 벽면에서의 건조 증상은 필연적임. 그러나 향후 국가적인 물 부족 현상이 더욱 심화되고 에너지 절약 차원에서 벽면녹화가 대두될 경우 무관수에 의한 유지관리 방안이 요구됨.

▪ 또한 벽면녹화는 수종 선택, 식재지반, 물 공급 등의 세 가지 요인에 의하여 성패가 좌우된다고 가정 할 경우 자연 강우만으로 수분을 공급한다면 바람에 의한 과도한 증산과 건조로 인하여 식물의 생육이 저하되거나 고사하는 현상이 발생하기 때문에 식재지반이 가지는 보수력 및 보비력(保肥力)은 중요한 요인임. 따라서 식물의 유효수분 범위 내에서 식재지반의 보수성을 높여주는 첨가제의 적용이 요구됨.

▪ 또한 벽면녹화의 식재지반은 식물의 생육을 위하여 조성된 인공지반으로 토양이 연속되지 않으며 구조물에 의하여 차단되어 있기 때문에 배수환경이 불량할 경우 활착이 늦고 초기생육 불량 등의 문제가 발생할 수 있음. 따라서 식재지반의 보수성과 배수성의 중요성이 있음에도 불구하고 대부분의 연구는 온실 재배의 포트 실험에 주로 집중하고 있는 실정임.

▪ 한편 벽면녹화의 유형 중 용기형을 적용한 경우 다양한 식물의 식재가 사용가능하며 설치 및 이동이 용이할 뿐 아니라 건축물의 층수에 상관없이 조기녹화 및 경관상 다양한 녹화를 연출할 수 있음. 또한 지면의 식생공간을 차지하지 않으며 고층건물에서 식물의 생장이 가능하여 도심지 녹화에 효율적으로 적용할 수 있다는 장점이 있지만 식재지반의 용량이 제한되기 때문에 쉽게 건조되며 양분의 용탈이 쉽게 이루어지기 때문에 식재지반 차원에서 보완이 요구됨.

▪ 이를 해결하기 위하여 첨가재로써 유기질 토양 개량제를 사용할 경우 토양의 투수성, 보수력 등 물리적인 개량효과가 있을 뿐 아니라 유기물의 효과를 통하여 토양 물리성능을 개선하고 토양구조를 개선하여 부드럽고 안정적인 토양의 조성이 가능하기 때문에 벽면녹화 식재지반 첨가제로 활용 가능성이 높음.

▪ 식재지반의 보수성에 있어서는 친수성 중합체(Hydrophilic polymer)를 활용한 연구가 수행된 사례가 있음. 친수성 중합체는 수분을 흡수하지 않는 건조상태에서는 직경이 작은 분말형태로 존재하지만 수분을 흡수할 경우 건조 상태보다 수십 배의 크기로 급격히 팽창하여 짧은 시간내 흡수하여 수분을 저장할 수 있기 때문에 이러한 효과를 이용하여 토양의 보수성을 높은 상태로 유지함과 동시에 직경 증가에 따라 토양 통기성을 향상시켜 생육에 유리할 수 있다고 보고하였음(Wang, 1989).

▪ 친수성 중합체는 화학공업이 발달하면서 1970년대 초부터 식물에 이용되기 시작하였으며 토양의 보수력 증진효과가 규명되면서 토양구조 안정 및 보수력 증진에 활용되고 있음. 친수성 중합체는 플라스틱 중 물에 용해 또는 팽윤하는 친수성 수지로, 중량 1,000배의 물을 흡수하고 겔(gels)형태로 됨.(Jhurry, 1997)

- 또한 상토에 혼합할 경우 수분을 흡수하여 팽창하기 때문에 직경이 증가하여 공극률을 증가시킬 수 있으며 6~18%의 보수성 증가 효과가 있는 것으로 보고하였음. 친수성 중합체는 수분 흡수력이 뛰어날 뿐 아니라 흡수상태를 유지하는 능력이 탁월하여 관수 횟수를 감소시킬 수 있으며 미국의 관개용지의 약 800,000 ha에 침식조절과 침투관리를 위하여 이용함.
- 노영팔(1987)은 고흡수 화합물을 토양에 사용할 경우 사용량이 증가할수록 토양의 유효수분이 증가하였으며, 식물생육은 0.3% 수준에서 가장 높아 사용하지 않은 경우와 비교하여 1.2~1.8배 증가하는 것으로 보고하였음.
- Bowman et al.,(1990)은 고흡수성 수지의 혼합량을 추천량보다 2배이상 증가시켜도 상토의 물리성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고하였음. 이에 따라 식재지반에서 친수성 중합체의 활용은 관수에 대한 경제적인 대안이 될 수 있으며, 빗물을 재활용할 수 있는 기반을 제공할 수 있음.

(3) 수종 및 생육특성

- 국내의 벽면녹화를 위한 수종 및 생육특성에 관한 연구는 1990년대부터 시작되어 덩굴식물의 적용, 서울시내 벽면에 자라는 식물상을 조사하였음. 벽면녹화 수종탐색에 있어서는 덩굴성 식물의 범주를 크게 벗어나지 못하고 있으며, 1999년부터 2002년까지 서울시 벽면녹화 식재수종 현황을 살펴보면 다년생초화류 48.2%, 담쟁이덩굴 42.8%, 헤데라 4.5%로 이 세 가지 수종이 전체 수종의 94.5%를 차지함.
- 국내의 벽면녹화 수종은 몇몇 수종에 편중되어 있는 실정임. 국내의 벽면녹화에서 실제로 이용되는 식물소재는 대부분 담쟁이덩굴에 국한되어 있어 매우 한정되어 있음. 한편 관련 연구를 살펴보면 벽면녹화용 식물선정에 있어 줄사철, 담쟁이덩굴, 붉은 인동, 인동, 으름 등은 시공 후 2년 동안 무관수 조건하에서도 플랜터(planter)의 크기에 상관없이 대부분의 식물들이 좋은 상태를 보인 것으로 보고하였음.

▪ 일반인의 벽면녹화 수종에 대한 선호도는 담쟁이덩굴을 제외하고 꽃과 함께 감상할 수 있는 관상가치가 높은 수종을 선호하는 것으로 조사되었음. 강수학(2003)은 서울지역 벽면녹화 현황 및 상록성 덩굴식물의 적응성을 조사한 결과 벽면녹화에 적합한 식물은 모람, 담쟁이덩굴, 송악류, 줄사철, 마삭줄, 으름, 인동 등과 같은 덩굴성 식물들이지만 이러한 식물들로 구성된 벽면녹화는 단조롭게 보일 수 있다고 하였음. 김남춘(2003)은 식생블록을 이용한 벽면녹화에 적합한 수종 선발을, 노승무(2004)는 벽면녹화 기술개발과 덩굴식물의 생장을 검토하였음.

▪ 국외의 경우 조경 수목 중 저관리 벽면에 사용할 수 있는 식물을 제안하기 위하여 호주 멜버른에서 164종의 식물의 생존율을 측정한 결과 61%의 식물이 고사했다고 밝혔음. Perez et al(2011)은 벽면녹화에 붉은 담쟁이덩굴, 인동, 클레머티스, 아이비의 생육을 측정하여 아이비와 인동 덩굴을 적합한 식물로 평가하였음. 유럽의 경우 벽면녹화에 이용 가능한 등반식물을 300~500종이라고 하였음.(Köhler, 2008)

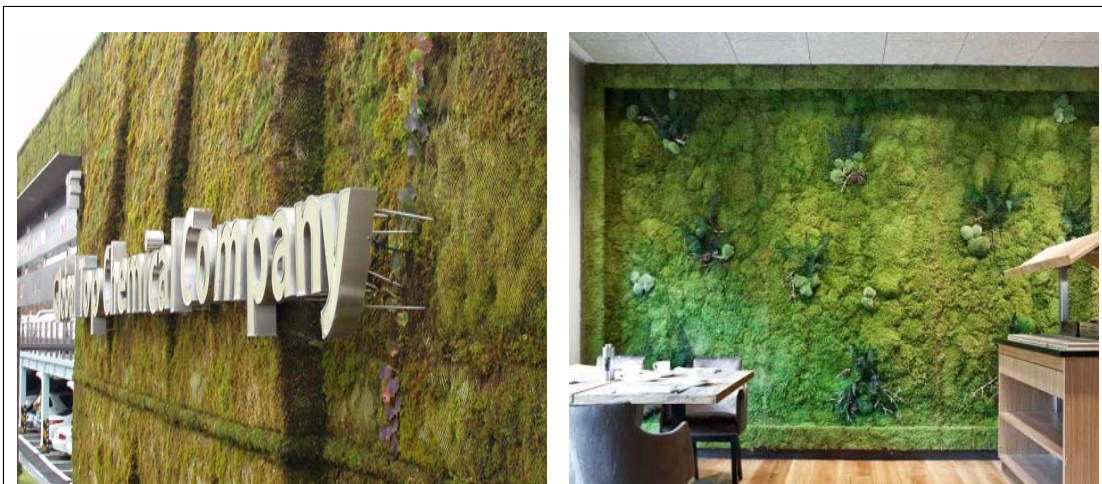
▪ 덩굴류 외의 수종의 경우 홍자단(*Cotoneaster horizontalis*)은 장미과의 반상록성 활엽관목으로 6월에 분홍색으로 개화하며 겨울에는 붉은 열매가 달리는 수종으로 관상가치가 매우 높음. 또한 내한성, 내음성, 내공해성, 내건성을 가지며 척박한 토양에도 잘 자라는 특성을 가지고 있어 벽면 환경에서 활용 가능성이 높은 것으로 보고하고 있으며 관련 사례를 찾아보기 어려움.

▪ 노랑조팝나무(*Spiraea× bumalda* 'GoldMound')는 조팝나무와 유사하나 강한 환경적응성, 내한성, 내건성, 용이한 번식 등 외부 환경에 잘 적응하는 특징을 가지고 있음. 특히 노란색의 잎과 긴 개화기를 갖는 분홍색 꽃을 가지고 있어 시각적 경관성이 요구되는 지피식재(Yan. et al., 2011)는 물론 벽면녹화 수종으로 활용 가능성이 높은 관목임. 또한 몇몇 연구에서는 노랑조팝나무가 어느 정도 내염성이 있는 것으로 알려져 있어(Yao. et al., 2009; Liu. et al., 2009) 활용 범위가 넓은 수종임을 알 수 있음. 하지만 벽면녹화 수종으로 실제 적용 평가된 연구는 매우 미흡한 실정임.

▪ 황금줄사철나무(*Euonymus fortunei* 'Emelad' n 'Gold')는 줄사철의 원예품종으로서 잎이 노란색으로 매우 화려해 관상용으로 활용되는 상록성 덩굴식물임. 특히 노박덩굴과로 겨울철 주황색 열매가 관상가치가 매우 높고 붉은색의 단풍 또한 겨울철에도 오랫동안 남아있어 겨울철 벽면의 경관성을 높일 수 있는 식물소재임.

▪ 선태류 식물종인 이끼(Moss)는 뿌리가 없어서 기질이 아닌 대기에서 영양분을 축적하며 표피세포의 가장 외피는 Waxy cutin 화합물 층이 없기 때문에 잎 세포가 공기 중 물질에 직접 노출됨. 이끼류는 다이옥신과 같은 광범위한 오염 물질에 대해 내성과 저항성을 가지며 체내 수분 저장능력도 일반적인 관엽식물보다 높은 생물임.

▪ 이끼 조직 표면 부피의 비율이 높을수록 오염물질의 축적이 촉진되며 1.0 g의 이끼 표면적은 약 1.6 m²으로 추정한 연구사례가 있으며 이끼류는 가뭄과 추운 날씨로 특징인 남극 대륙뿐만 아니라 전 세계의 다양한 서식에서 분포하고 있다는 연구결과도 있음. 이끼의 성장 속도는 매우 느리기 때문에 자연적으로 자란 이끼들은 장시간 동안 오염 물질의 대한 정보와 내성을 가지고 있어 대기 중 중금속 모니터링 시스템 측정 연구나 벽면녹화(VGS) 연구에 다양하게 활용되고 있는 실정임. 이러한 이끼의 특성은 별도의 관리가 필요하지 않아 일본과 국외 유럽지역에서는 이끼를 활용한 벽면 녹화와 옥상 녹화를 적용한 연구가 활발하게 이루어지고 있음.



[그림 2.2] 부직포를 활용한 이끼 벽 사례

제 3 장 연구 수행 내용 및 성과

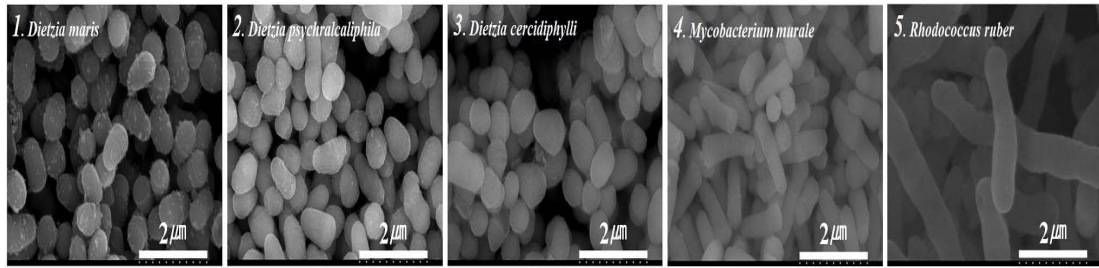
1. (미)생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 시멘트 개발 (1차년도)

가. 콘크리트 착근용 (미)생물

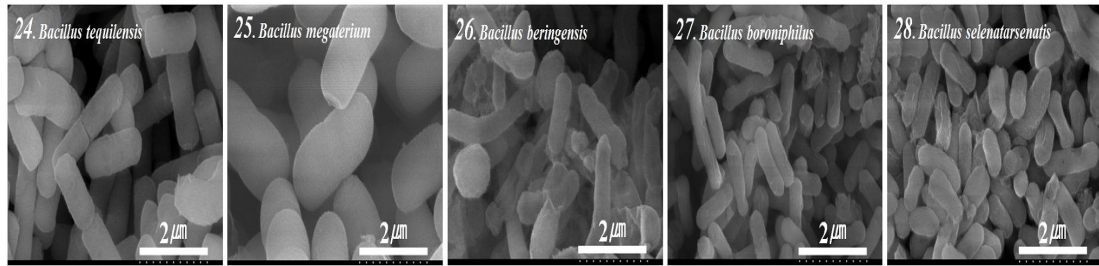
(1) 콘크리트에 착근 가능한 (미)생물류 조사

(가) (미)생물류의 종류

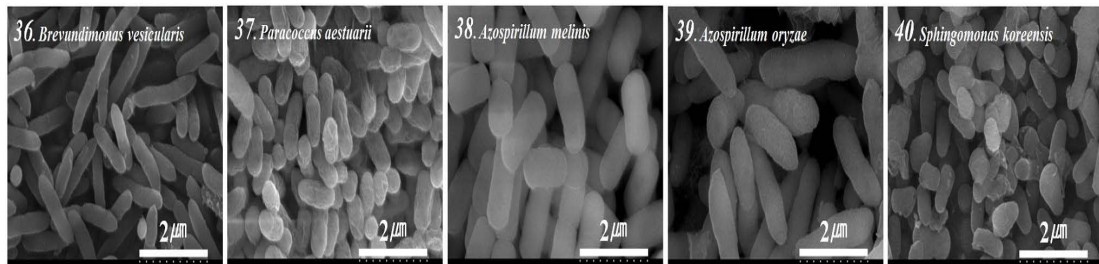
- 미생물은 일반적으로 박테리아(세균), 고세균, 원생생물, 균(곰팡이, 버섯, 효모) 이렇게 네 가지 분류로 구분됨. 세균은 세균을 둘러싸고 있는 세포벽의 구조에 따라 그람양성(Gram-positive)과 그람음성(Gram-negative)으로 크게 두 가지 분류로 나누어지는데, 그람염색을 해서 보라색으로 염색되면 그람 양성균, 핑크색으로 염색되면 그람 음성균임.
- 분류학상으로 는 좀 더 여러 종류로 분류를 함. 각각의 모양이라든가 에너지를 얻는 방식, 세포 구조나 조성성분의 특징 등에 따라 일반적으로 나뉨. 여기서 또 특징들에 따라 세분화해서 분류하는데 이는 매우 복잡함.
- 일반적으로 미생물의 다양성 평가는 순수 분리 및 배양, 동정(同定)결과에 따른 명명, 계통학적 분석을 통해 이루어지는데 본 연구에서는 콘크리트 구조물에 존재하는 미생물의 군집분포 특성은 토양환경과 상당히 비슷한 양상의 군집분포를 보이고 있음.
- 조사결과 이런 균류, 조류, 등 다양한 (미)생물들은 판넬에 착근시 심미적으로 알아보기 쉽지 않고, 온도 및 CO₂ 저감의 높은 활용성을 발휘하기 어려움. 문헌조사 결과 (미)생물중 선타류인 이끼는 연구개발 목표에 높은 활용성을 나타낼 수 있는 것을 분석하였음. 이 결과로 선타류인 이끼를 조사하였음.



[그림 3.1] 콘크리트 표면으로부터 분리, 동정된 대표적인 Actinobacteria의 SEM 이미지



[그림 3.2] 콘크리트 표면으로부터 분리, 동정된 대표적인 Bacilli의 SEM 이미지



[그림 3.3] 콘크리트 표면으로부터 분리, 동정된 대표적인 Proteobacteria의 SEM 이미지

- 그림 3.1~3.3은 콘크리트에 착근 한 (미)생물들에 사진을 나타낸 것임.
- 콘크리트에 착근 가능한 (미)생물을 선정하기 위해서는 콘크리트 표면에서도 충분히 착근이 가능할 수 있는 점착성이 있어야 하며 충분히 착근이 된 (미)생물은 콘크리트 표면 내에서 번식이 가능함.
- 일반적인 (미)생물류는 콘크리트에 착근은 가능하지만 국내기후 특성에 많은 비가 내리는 여름철에 표면에 계속 착근하기는 어려운 상황임. 이를 충분히 보완할 수 있는 뿌리를 가지고 있는 선태류에 (미)생물인 이끼를 선정하여 그에 따른 이끼류에 대하여 조사를 실시함.

- 선태류에는 이끼류(선류: moss, Musci), 우산이끼류(태류: liverwort, Hepaticae), 그리고 뿔이끼류(각태류: hornwort, Anthocerotae)가 있음. 흔히 발견할 수 있는 이끼는 솔이끼나 우산이끼로서 그 종류가 20,000여 종에 이르는 것으로 알려져 있음. 이끼는 주로 습한 지역에 서식하며 조건이 맞으면 바위나 건물의 콘크리트에도 서식.

- 녹색식물로서 클로로필 a.b를 가지며, 세포벽, 전분 등을 갖게 됨. 우리나라에서도 쉽게 관찰되는 이들 이끼는 그늘지고 습한 지역에서 친근하게 접할 수 있음. 특히 나무나 관목이 서식하는 경사가 급한 곳에서도 이끼가 서식하는 것을 볼 수 있는데, 강우시 유출수가 생겨 토양침식이 발생하더라도 이끼가 서식하는 곳은 침식이 전혀 일어나지 않는 것을 관찰할 수 있음.

(나) 생물학적 판넬용 (미)생물류- 이끼의 특성

1) 이끼의 구조

▪ 이끼의 구조는 헛뿌리 혹은 가근(rhizoid), 잎이 분화 된 경엽체로서 줄기, 그리고 잎으로 나눌 수 있음. 가근은 단지 식물체를 고정시키는 역할만 하고 고등 식물과 같이 수분흡수 기능은 거의 하지 않음. 그림 3.4는 이끼의 상세구조를 나타낸 그림임.

▪ 선태류의 성장형태는 각 개체의 성장형태와 개체군의 성장형태를 바탕으로 구분됨. 각 개체의 성장형태는 수직형(Orthotropic)과 수평형(Plagiotropic)으로 나눌 수 있음. 수직형은 줄기가 부착된 매체에 수직하게 성장하는 종류이고 수평형은 싹이 매체에 수평방향으로 성장하는 것임.

▪ 개체군의 성장형태는 단년생(annuals), 단초형(short turfs), 장초형(Tall turfs), 쿠션형(cushionpoister), 매트형(mats), 웨프트형(wefts), 꼬리형(tails), 걸이형(pendants), 팬형(fans), 가지형(dendroids)등으로 나눌 수 있음.

▪ 쿠션형은 수직방향의 아주 많은 수의 싹이 자라는 것이 특징이며, 매트형은 바위나 수피의 표면에 수평의 싹들이 가근에 의해서 단단히 고정된 종류임. 웨프트형은 개체군이 층을 이루어 직조 형태를 이루는 종류이며, 걸이형은 나뭇가지 등에 성장하여 줄기나 싹이 길게 매달려 있는 형태임.



[그림 3.4] 이끼의 구조

- 꼬리형은 걸이형에 비해 다소 짧은 싹들이 꼬리처럼 형성되는 종류이며, 팬형은 꼬리형과 유사하나 평평한 잎의 구조를 가지게 됨. 가지형은 토양에 주로 서식하며 배우체의 상부에 수평방향으로 큰 잎과 많은 싹들이 자라는 형태를 가짐.
- 이끼에는 암수딴그루와 암수한그루가 있으며, 암수딴그루는 장란기와 장란기의 착생 위치에 따라 여러 가지 모양이 알려져 있고, 이들은 미세한 것이 많으므로 포자체가 없는 것은 세밀한 관찰이 필요함.

2) 수분과 양분

- 선태류의 수분흡수는 고등식물에 비해 비교적 다양한 방법으로 이루어짐. 선태류는 완전히 건조된 상태에서도 사멸하지 않고, 수분이 공급되면 다시 급속하게 광합성을 하여 생장을 지속함. 일부는 가근을 통해서 수분을 흡수하지만 대부분의 선태식물은 식물체의 표면전체를 통해서 수분을 흡수함.
- 영양분은 수분과 유사한 방법을 통해서 흡수함. 수분전달체계에 따라서 이들은 Endohydric과 Ectohydric의 두 가지로 구별할 수 있음. Endohydric류는 수분이동이 세포와 같은 조직의 체내에서 주로 이루어지며, Ectohydric류는 조직 외부에서 모세관현상에 의해서 이루어짐.
- Endohydric류에서는 수분이 토양과 같이 바닥에서 흡수되어 잎이나 증발이 이루어지는 기관으로 이동되나 Ectohydric류에서는 수분이 식물체 전체에서 흡수되거나 소실되어 빠른 속도로 수분이동이 이루어짐. 따라서 Endohydric류는 습하고, 통기성이 좋으며 양분이 풍부한 곳에서 서식함.
- 이들은 소택지와 같은 곳에서 많이 발견되며 나지에서도 군락을 형성함. 반면에 Ectohydric류는 바위와 같이 불투수성 매체에서 많이 발견되며 토양에서 서식하더라도 토양과의 부착이 느슨함.

- 선태식물이 흡수할 수 있는 수분량은 종류에 따라서 크게 다름. 이들은 대체로 건조 중량의 50-2000%의 수분을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있음. 맑은 날 햇볕에 의해서 마른 이끼는 약 5%수준의 수분을 갖게 됨. 건조된 상태에서는 100℃이상뿐 만 아니라 -196℃의 온도에서 일정시간 경과 후에도 생존이 가능함. 아주 높은 양이온치환용량으로 인해 이끼류는 낮은 농도의 양분까지도 흡수 가능함.
- 또한 강수 중에 포함된 각종 양분을 흡수할 수 있으며, 종종, 주위에 서식하는 고등식물로부터 흘러내리는 물속의 양분까지도 흡수함. 양분의 이동은 수분의 이동과정과 거의 유사함.

3) 주변 환경과의 관계

- 선태류가 양분, 토양온도, 토양수분, 토양의 미생물활동 등의 주변 환경에 미치는 영향은 지역의 식물상의 총 생체량의 비율을 고려하면 상대적으로 높음. 특히 극지와 같은 극한 기상조건에서의 생산성은 다른 고등식물에 비해서 훨씬 높음.
- 선태식물의 생장과 관련된 주변 환경에는 낙엽이나 부엽토, 토양 미생물에 의해서 방출되는 이산화탄소, 수분, 그리고 주변의 미기상 등이 있음. 낙엽은 햇볕을 가리거나 이끼의 생장에 물리적으로 영향을 미치게 되며, 이들이 분해되면서 생성되는 각종 화학물질은 이끼의 생장을 방해할 수도 있게 됨.
- 반면에 낙엽으로부터 방출되는 양분은 이끼의 생장에 도움을 주기도 함. 이끼로 덮인 지역에서는 수목의 종자가 발아되는 조건이 좋기도 하지만, 발아 후 뿌리가 토양에 도달하지 못해 더 이상 성장하지 못할 수도 있음. 유럽의 연구에서는 일부 선태식물과 특정 종자식물과의 상호 관계를 밝힌 바도 있음.

- 이끼가 서식하는 지역의 위치에 따라서 광투과량은 개방된 지역에 비해 적게는 10-20%수준으로 낮을 수 있음. 주변에 고등식물의 식생밀도가 아주 높아서 이들에 의한 빛의 차단량이 많은 경우에는 이끼류가 받을 수 있는 광량은 더욱 낮을 수 있음.
- 대기로부터 이끼에 도달하는 수분량은 주변 식생조건에 따라서 달라지며, 식생의 종류에 따라서 도달하는 수분의 형태도 다름, 예를 들어 침엽수의 경우 위에서 떨어지는 형태의 빗물이 많고 가지나 수피를 통해 흘러내리는 빗물의 양이 적으나, 활엽수는 이와 반대임.
- 지역에 따라서는 안개나 이슬이 필요한 수분 공급원이 되기도 함. 이끼가 접하는 이산화탄소의 농도는 토양에서 생성되는 양이 다르기 때문에 지역에 따라서 크게 다를 수 있음.



오염 지표식물로 사용되는 이끼류



이끼를 이용한 실내환경 개선

[그림 3.5] 이끼를 사용한 환경 개선 사례

(다) 이끼를 활용한 벽면 녹화

1) 이끼 수종 개발의 필요성 및 특징

▪ 벽면 녹화는 다양한 장점을 가지고 있지만 4계절 유지관리가 용이한 수종에 대한 연구는 많이 부족한 실정임. 종래 벽면 녹화 기술은 대부분 덩굴성 식물을 활용한 식물로 와이어 및 메쉬를 벽면에 설치하거나 기타 기반 없이 덩굴성 식물이 자생 피복하는 방식, 포트에 식재하여 벽면에 부착하는 포트(POT)기법 등으로 이루어졌음.

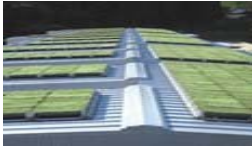
▪ 그러나 이와 같은 기술은 선택할 수 있는 수종이 한정되어 있고 겨울에는 녹화기능이 떨어지는 등 한계점이 있을 뿐만 아니라 추위에 약하여 동절기에 고사현상이 발생함. 또한 포트 사용으로 인한 열악한 식물 생육조건으로 고사가 빈번하게 발생함. 벽면 녹화를 위한 수종으로 제안된 이끼는 기존 벽면 녹화가 가지고 있는 문제점들에 대한 대안이 될 수 있음.

▪ 이끼는 혹한에 대한 적응력이 높아 4계절 녹화가 가능하며, 토양이 없어도 생육하여 부착가능한 곳 어디에서나 식생이 가능함. 탄소를 체내에 고정화하여 탄소배출량은 다른 수종에 비해 현격하게 낮으며, 낮은 광도와 온도에서도 광합성이 가능하여 일반 관다발식물과 비교하여 광합성 속도가 빠름.

2) 이끼 활용 녹화 사례

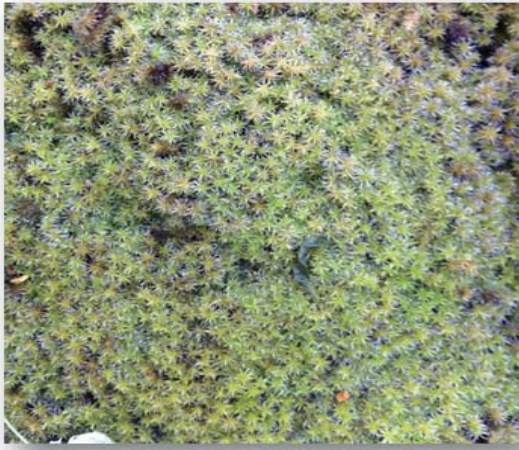
▪ 유럽지역 및 일본의 경우 일찍부터 이끼가 벽면 녹화를 위한 대안수종으로 평가 및 설치되고 있음. 유럽의 경우 심층적인 이끼수종에 대한 특성평가와 성질에 대해 파악하는 연구가 중심으로 일어나고 있으며, 일본은 특수 이끼를 이용한 벽면 녹화 및 옥상녹화 방안에 대한 개발 및 성능평가 위주의 연구가 진행되고 있음(표 3.1).

[표 3.1] 이끼 벽면 녹화 이용사례 (일본)

회사	타입	시공사진	시공방법
모스아마카타	보드		고강도 발포스티로폼과 이끼 식물을 일체화
	매트		이끼부직포, 배수매트를 재봉하여 일체화
바로루	유니트		배수트레이와 보수매트 위에 이끼를 생육한 형태
오오미업	타일		도자기질의 타일에 이끼를 클립으로 고정시키는 형태

▪ 특히 일본의 경우 모래이끼를 이용하여 벽면 녹화사업을 확장하고 있음. 벽면 녹화 역시 조경면적에 합산 되고 있기 때문에 앞으로 그 수요는 더 증가할 것으로 보임.

▪ 식재된 이끼는 국내에서 가장 많이 재배되고 있는 참깃털이끼와 깃털이끼의 혼합종임. 음지 및 반음지에 강하며 수분에 강한 수종으로 실외 일부지역과 실내에 적합함. 남측에 설치한 이끼는 일사량이 북측과 다른 것을 고려하여 양지에 잘 견딜 수 있는 모래이끼를 선택해 설치위치별 환경에 적절한 수종을 선택하였음(그림 3.6 및 그림 3.7).



- 해가 잘 비치는 장소를 좋아함
- 건조에 강함
- 흙 없이 키울 수 있음
- 더위, 추위에 강함
- 실외설치가 더 바람직

[그림 3.6] 모래이끼



- 텍스처가 다른 두 가지 수종을 믹스
- 생육방식의 차이로 이끼탈락 방지가능
- 저관수로 생육가능

[그림 3.7] 소리이끼

(라) (미)생물의 선정

▪ 생물학적 판넬 개발을 위하여 판넬에 착근이 가능한 (미)생물류 등을 조사 및 분석하였음. 국내환경과 가장 적합 가능성이 있는 (미)생물류 중에서 선택류인 이끼류를 선정 그중 모래이끼가 향후 판넬로 제작하여 착근하였을 경우 가장 적합한 (미)생물로 판단됨.

▪ 조사 및 분석을 결과로 이끼류에 대해 생물학적 수용성 평가를 고려해볼 필요가 있음. 조사 및 분석 결과를 토대로 생물학적 콘크리트 판넬에 개발방향 설정하였음.

① 이끼 4종(솔이끼, 우산이끼, 서리이끼, 모래이끼)을 대상으로 수용성 평가

② pH성능: 이끼류 4종을 대상으로 평가

③ 온도성능: 저온, 상온, 고온에 대한 생육특성 평가

④ 수분함량성능: 물주기에 대한 생육특성 평가

⑤ 착근성능: 개발된 판넬을 대상으로 각 이끼종에 대한 착근성능 평가

⑥ 착근 후 생육성능: 판넬에 이끼4종을 착근 후 시간에 따른 생육특성 평가

(2) pH 조건에 따른 (미)생물의 확보

(가) (미)생물의 선정 및 특성

▪ 본 연구에서 콘크리트 판넬 착근용 (미)생물은 선택 식물은 이끼(MOSS)류를 선정하였음. 이끼는 뿌리가 있지만 물과 양분을 흡수하지 못하고 단지 바위, 땅, 나무에 붙는데 사용함. 때문에 토양층이 없어도 살아갈 수 있는 식물임. 따라서 여러 종류의 식물을 대상으로 분석한 결과, 이끼는 생물학적 콘크리트 판넬 개발을 위한 조건 중에 가장 중요한 착근을 충족시킬 수 있는 가능성을 갖고 있음.

▪ 이끼는 물속에 사는 조류와 땅 위에 사는 육상식물의 중간모양을 가지고 있는 원시적인 식물로 잎, 줄기, 뿌리 구분이 없으며 척박한 토양에서 선구적으로 생육하는 대표적인 식물임. 또한 잎처럼 생긴 엽상체의 표면에서 대기 중의 수분을 직접 흡수하고 자기무게의 약 20배 정도의 물을 보유할 수 있으며 건조한 대기조건 하에서는 체내의 수분을 증산해서 생명을 유지함.

▪ 이끼의 보수성과 증산효과는 미기상을 완충시키는 효과가 있음. 또한 타 식물과 같이 탄소동화작용에 의해서 체내에 탄소를 고정함으로서 대기 중의 CO₂를 흡수하는 작용을 함.

▪ 이끼가 흡수할 수 있는 수분량은 종류에 따라서 크게 다름, 이들은 대체로 건조 중량의 50-2000%의 수분을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있음. 맑은 날 햇볕에 의해서 마른 이끼는 약 5%수준의 수분을 갖게 됨. 건조된 상태에서는 100℃이상뿐 만 아니라 -196℃의 온도에서 일정시간 경과 후에도 생존이 가능함. 아주 높은 양이온 치환용량으로 인해 이끼류는 낮은 농도의 양분까지도 흡수가 가능함.

▪ 열악한 대기 환경에서도 생존성이 있는 이끼종에 대하여 pH 특성에 따른 분석이 생물학적 판넬에 수용성을 높이기 위한 중요한 조건으로 판단하여 pH 농도에 따른 실험 하였음. 표 3.2는 본 연구에서 접근하기 위해 이끼의 종류를 분석 함.

[표 3.2] 이끼 생육형태의 6가지 분류

이끼의 종류	구 분		
1. 수중 또는 물에 부유하는 이끼			
2. 지상에서 직립 생육하는 이끼	수중 부유형	지상직립 생육형	지상포복 생육형
3. 지상에서 포복하는 이끼			
4. 암석위에서 자라는 이끼	암석 생육형	수간 착생형	생엽 착생형
5. 수간에 착생하여 생육하는 이끼			
6. 생엽 위에 착생하여 생육하는 이끼			

(나) 이끼 시료의 채취

■ 그림 3.8은 생육형태 6가지로 분류한 이끼종류를 채취한 장소를 나타낸 그림임. Table.1에서 1번, 5번, 6번은 생물학적 콘크리트 패널에 적합한 이끼 소재로 부적합하여 배제하였음. 2번, 3번, 4번을 대상으로 생육환경을 분석하여 이끼를 채취함.

■ 생육형태 별로 채취한 이끼 분류는 분류 기준 및 종류를 조사한 자료들과 확대경을 이용하여 몸 구조를 분석하는 방법으로 도감을 참고로 하여 이끼를 분류하였음. 분류한 결과는 4종으로 다음(표 3.3-3.6)과 같음.



[그림 3.8] 이끼 채취 장소(이끼연구소)

[표 3.3] 채취이끼 분류 A

명칭	서리이끼	
구 분	1. 수분조건: 건성이끼 2. 일조량 조건: 음지, 반음지성 이끼 3. 생육장소: 토양, 지상 4. 생육형: 지상포복형	
생육환경	해가 잘 드는 초지나 토양에 생육	

[표 3.4] 채취이끼 분류 B

명칭	우산이끼	
구 분	1. 수분조건: 건성이끼 2. 일조량 조건: 음지, 반음지성 이끼 3. 생육장소: 토양, 지상 4. 생육형: 지상포복형	
생육환경	정원이나 산지에서 군락을 형성	

[표 3.5] 채취이끼 분류 C

명칭	모래이끼	
구 분	1. 수분조건: 건성이끼 2. 일조량 조건: 양지성 이끼 3. 생육장소: 땅, 모래, 자갈밭 4. 생육형: 지상직립형	
생육환경	산지의 일조가 좋은 모래질의 땅에서 생육 직사광선이 닿는 곳에서도 군락을 형성	

[표 3.6] 채취이끼 분류 D

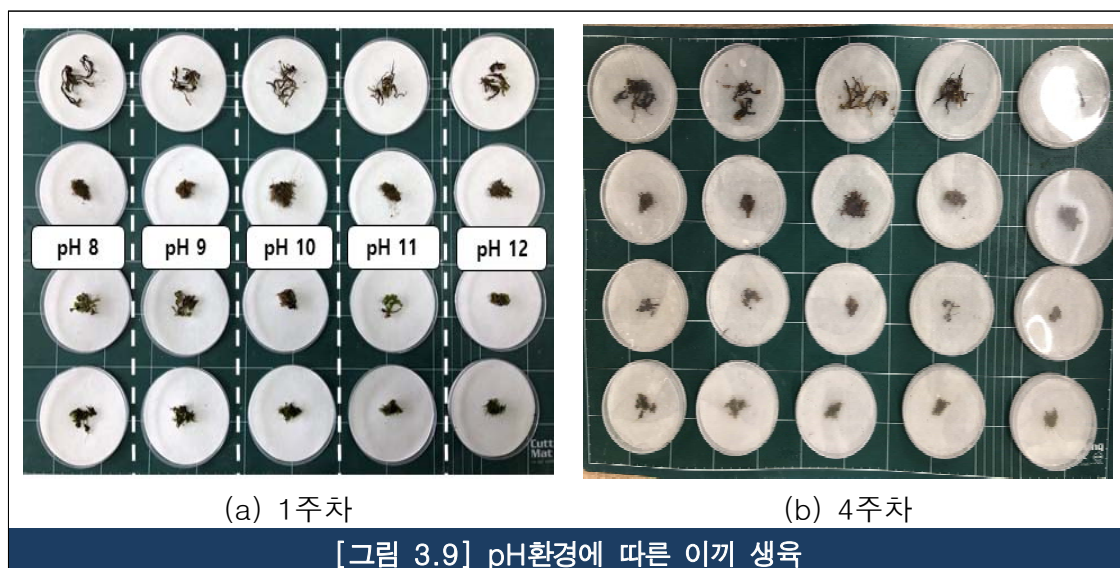
명칭	솔이끼	
구 분	1. 수분조건: 건성과 습성 2. 일조량 조건: 음지, 반음지성 3. 생육장소: 토양, 지상 4. 생육형: 지상직립형	
생육환경	토양이나 콘크리트 벽등에 군락을 형성	

(다) pH 상의 생육특성

▪ 생물학적 판넬의 pH영향을 검토하기 위하여 적합한 이끼를 검토하였음. 생물학적 판넬에 착근하기 위한 생물은 일반적으로 알려진 수종 및 생육특성을 고려하여 선택류 식물인 이끼(Moss)류 중 적합한 4종의 이끼(서리이끼, 우산이끼, 모래이끼 및 솔이끼)를 선정하였음.

▪ 선정된 이끼는 pH 환경에서 성장 특성을 평가하기 위하여 pH 농도 5수준(pH 8, 9, 10, 11 및 12)에 따라 30일간 성장 특성 변화를 관찰하였음. 그림 3.9는 pH 환경에 따른 이끼의 성장 특성 관찰결과를 나타낸 것임. 이끼류 4종은 pH 8~10의 경우 성장하는데 큰 변화가 없는 것으로 나타났지만 pH 11 이상의 강알칼리 환경에서는 서리이끼, 우산이끼 및 솔이끼의 경우 검은색과 갈색으로 갈변현상이 나타났으며, 모래이끼의 경우에만 갈변현상 없이 성장하는 것으로 관찰되었음.

▪ 이러한 결과는 선택류인 이끼의 경우 다른 수종과는 달리 생존력이 높고 환경변화에 상대적으로 영향을 덜 받기 때문에 pH가 높은 환경에서도 죽지 않고 성장하는데 문제가 없으며, 이에 따라 갈변현상이 발생하지 않은 모래이끼 외의 이끼의 경우에도 성장하는 데 큰 영향은 없는 것으로 판단됨. 이러한 결과를 통하여 생물학적 판넬에 착근시키기 위한 수종으로써 이끼류가 적합한 것으로 판단되며, 상대적으로 갈변현상이 적은 모래이끼가 pH 변화측면에서 유리할 것으로 판단됨.



(라) 온도상의 생육특성

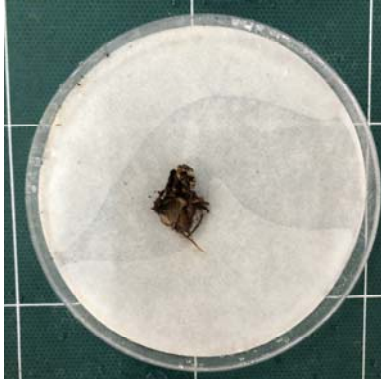
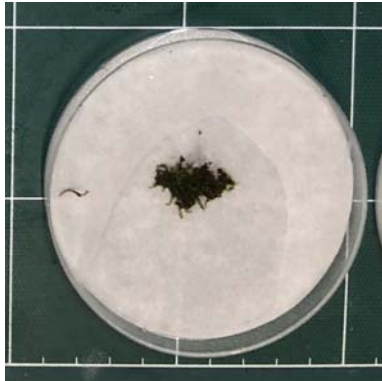
▪ 선정된 이끼류 4종(서리이끼, 우산이끼, 모래이끼 및 솔이끼)의 온도에 따른 성장 특성을 평가하기 위하여 온도 2수준(50℃ 및 -15℃)에 보관하여 관찰하였음. 기존 연구에 의하면 각지에서 서식하는 다양한 이끼류는 온도변화에 강한 성장 특성이 있는 것으로 보고되고 있으며, 본 연구에서는 실제 적용할 이끼류의 온도에 따른 성장 특성을 평가하고자 하였음.

▪ 실험은 50℃ 및 -15℃를 유지할 수 있는 건조로에 이끼를 약 한 달간 보관하여 관찰하였음. 표 3.7은 온도에 따른 이끼의 성장 특성 관찰결과를 나타낸 것임. 50℃에서 보관된 이끼의 경우 처음 1주차는 담채의 보관된 수분증발로 건조된 형태를 보였지만 2주차가 경과하였을 때 우산이끼와 서리이끼는 갈변이 시작되어 성장이 저하하는 것을 관찰할 수 있었음.

▪ 그러나 모래이끼와 솔이끼의 경우 3주이상 경과 하더라도 초기 상태와 비교하여 푸른 빛은 감소하는 것으로 나타났지만 한달 이상 시간이 경과하여도 강한 성장력을 보이는 것으로 나타남. 또한 -15℃ 환경에서 보관된 이끼의 경우 1주차에서 담채의 보관된 수분의 냉각으로 동결상태를 나타내는 것을 확인하였으며, 4주 경과 후 동결상태의 이끼를 상온에서 해동 후 관찰한 결과 우산이끼를 제외한 서리이끼, 모래이끼 및 솔이끼는 죽지 않고 생존하는 것을 관찰할 수 있었음.

▪ 이러한 결과를 통하여 50℃ 및 -15℃의 극한 환경에서도 대부분의 이끼는 성장이 가능한 것으로 판단되며, 온도 영향 측면에서는 모래이끼 및 솔이끼가 상대적으로 영향을 덜 받는 것으로 판단됨.

[표 3.7] 온도에 따른 이끼 생육

구 분	50 ℃	-15 ℃
(a) 서리이끼		
(b) 우산이끼		
(c) 모래이끼		
(d) 솔이끼		

(마) 수분에 따른 생육특성

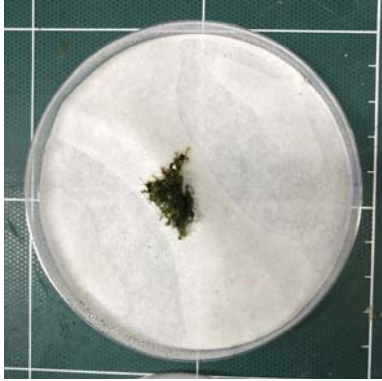
▪ 선정된 이끼(서리이끼, 우산이끼, 모래이끼 및 솔이끼)의 수분에 따른 성장 특성을 평가하기 위하여 수분을 공급하지 않은 조건에서의 이끼의 성장 특성을 평가하였음. 실험조건은 온도 20℃ 및 습도 25%를 유지할 수 있는 환경에서 약 1달간 방치하여 관찰을 실시하였음.

▪ 표 3.8은 수분에 따른 이끼 성장 사진을 나타낸 것임. 우산이끼의 경우 1주일 경과 후 즉시 갈변현상이 나타남. 이러한 결과는 우산이끼는 본래 성장 특성이 음지에서 성장하기 때문에 수분이 충분하지 못한 조건에서 갈변현상이 나타난 것으로 판단됨. 그러나 다른 3종의 이끼는 1주차에서 초기 상태를 유지하는 것을 확인하였음.

▪ 4주차 경과 후의 이끼는 수분부족에 따라 초기 상태의 모습을 모든 이끼에서 찾아 볼 수 없었으며, 특히 우산이끼의 경우 흑갈색에 가까운 색상을 나타남. 또한 서리이끼에 경우 부분적인 갈변을 확인할 수 있었으며, 모래이끼와 솔이끼에 경우 갈변현상은 발생하지 않았지만 매우 연한 녹색빛을 띄는 것을 확인하였음. 그러나 우산이끼를 제외한 나머지 이끼는 재수분 공급이후 빠르게 본래 상태로 돌아오는 것을 확인하였음.

▪ 이러한 결과를 통하여 이끼류는 수분 공급이 없더라도 대부분의 이끼는 죽지 않고 성장할 수 있는 것으로 판단되며, 수분에 따른 성장 특성을 고려할 경우 우산이끼와 서리이끼를 제외한 나머지 이끼인 모래이끼와 솔이끼가 적합한 것으로 판단됨.

[표 3.8] 수분에 따른 이끼 생육

구 분	1주	4주
(a) 서리이끼		
(b) 우산이끼		
(c) 모래이끼		
(d) 솔이끼		

(바) 이끼의 선정

▪ 생물학적 판넬용 마그네시아 복합체에 착근하기 위한 생물은 선타류 식물인 이끼(Moss) 4종을 선택하여(서리이끼, 우산이끼, 모래이끼 및 솔이끼) pH 환경에 따른 성장 특성, 온도에 따른 성장 특성 및 수분에 따른 성장 특성을 평가하여 적합한 이끼 1종을 선정하고자 하였음.

▪ 이끼류 자체의 수종은 극한 조건에서도 생존이 가능하지만 상대적으로 영향을 적게 받는 이끼를 최종 수종으로 선정하였음. 표 3.9는 성장 특성에 따른 이끼 선정을 위한 자체 특성 평가 지표를 나타낸 것임.

▪ 성능 평가 순위는 총 4수준(좋음, 보통, 기준 만족 및 기준 미달)으로 구분하여 자체적으로 특성을 분석하였음. 평가결과 모든 조건에서 상대적으로 성능이 우수하다고 판단되는 모래이끼를 생물학적 판넬용 (미)생물로 선정하였음.

[표 3.9] 생물학적 판넬용 이끼 선정 기준

구분	서식 환경		실험 환경		
	양지	음지	pH 환경 영향	수분공급 영향	온도변화 영향
솔이끼	○	●	△	○	○
서리이끼	○	●	△	△	△
모래이끼	○	●	○	○	●
우산이끼	△	●	△	×	×

※ 성능평가 순위 : ● (좋음) > ○ (보통) > △ (기준 만족) > × (기준 미달)

나. 시멘트의 생물학적 수용성

(1) 시멘트의 성분 및 생물학적 수용성과의 관계

(가) 시멘트종류에 따른 구성 성분

▪ (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 판넬에 있어서 콘크리트 판넬의 (미)생물 착근을 위한 생물학적 수용성을 크게 향상시킬 수 있는 콘크리트 판넬 제조에 관한 것으로 이에 활용되는 주요 재료인 생물학적 시멘트의 조성물에 관한 것임. 생물학적 판넬은 (미)생물 등의 착근이 쉬운 조건이어야 하며 착근이후 생존이 가능하도록 환경을 조성해야 함.

▪ 그러나 생물학적 판넬을 제조하기 위해서는 재료적 측면에서 주요건설 재료인 시멘트를 적용할 경우 높은 pH (강알칼리)를 형성하고 있기 때문에 (미)생물의 생존 및 유지기간에 부적합하며, 또한 구조적 측면의 경우 표면이 매끈하거나 치밀할 경우 (미)생물의 착근이 어려워지는 단점이 있음. 더불어 판넬에 (미)생물을 위한 영양분이나 수분공급에 따른 문제도 발생함.

▪ 식생콘크리트의 현장 실용화에 제약을 받고 있는 것은 pH 가 12~13 정도로 강알칼리라는 것임. 현재 식물을 이용한 녹화방법에서도 콘크리트 속에서는 식물이 살기 어렵기 때문에 시멘트 콘크리트 2차 제품 중앙에 흙을 메워 식물이 자랄 수 있는 환경을 만들어 시공하고 있음.

▪ 근본적으로 시멘트라는 결합재를 사용하면서 pH 를 낮추는 것은 어려운 문제인데 pH 저감을 위한 배합은 강도 및 내구성을 저하시킬 수 있기 때문임. 식생 콘크리트는 표면적이 큰 다공성으로 초기에는 알칼리 성분의 용출이 많으므로 고로슬래그 미분말이나 실리카흙 등의 혼화재를 혼합함으로써 수화중에 수산화칼슘의 생성량을 감소시키는 방법과 인산2암모늄과 같은 중화제를 이용하여 처리하는 방법 등이 많이 이용되고 있음.

[표 3.10] 포틀랜드시멘트의 평균적인 화학적, 물리적 성분

Type	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Density (g/cm ³)
OPC	61.6	4.50	19.80	3.57	3.01	3.15

▪ 생물학적 판넬 개발을 위한 일환의 기초 연구 중 하나로써 판넬의 재료적 측면의 문제를 해결하기 위한 방안으로 인산마그네슘시멘트와 알루미나시멘트를 이용하여 판넬의 모재재료로서 활용하고자 하였음. 인산마그네슘 복합체는 일반적인 시멘트와 상대적으로 pH가 낮은 영역으로 중성의 특징을 띄기 때문에 생물학적 수용성에 유리하며, 생물학적 판넬의 모재 재료로서 적합한 재료임.

1) 보통포틀랜드시멘트

▪ 일반적인 콘크리트 공사용으로 가장 많이 사용되고 있는 시멘트로서 보통포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland Cement)라고 부름. 국내에서 생산되는 대부분의 시멘트는 보통포틀랜드시멘트임. 또한 강알칼리성분으로 철근과 함께 시공에 많이 쓰이는 재료임.

▪ 표 3.10은 포틀랜드시멘트의 평균적인 화학조성 성분을 나타낸 것임. 시멘트 화합물의 표준 함유량은 C₃S 50%, C₂S 26%, C₃A 9%, C₄AF 9% 정도인데 제조 원료의 특성에 따라 약간씩 변화되고 있음. 수화반응으로 인한 높은 알칼리도를 가지고 있어 철근과 같이 시공현장에서 주로 사용되는 재료임.

2) 알루미나 시멘트

▪ 알루미나 시멘트는 보크사이트, 석회석, 점토 등이 주성분인 혼합물을 반사로, 전기로 또는 회전식 가마에서 약 1,500℃ 에서 1,600℃의 고열의 온도로 용해하여 얻어지는 것으로 가장 큰 특징은 빠른 경화성을 갖는다는 것이 특징임.

[표 3.11] 알루미나시멘트의 평균적인 화학적, 물리적 성분

Type	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Density (g/cm ³)
AC	29.4	69.5	0.5	0.5	0.6	2.90

▪ 표 3.11은 알루미나시멘트의 평균적인 화학조성 성분을 나타낸 것임. 적절한 보크사이트는 50%에서 60%의 알루미나, 25%까지의 산화철, 5%미만의 무수규산, 10%에서 30%의 수화수를 가짐.

▪ 석회석은 소량의 무수규산, 마그네시아를 포함한 것이어야 함. 알루미나 시멘트는 35%~40%의 석회, 40%~50%의 알루미나, 15%의 산화철, 6% 이하의 무수규산을 포함함. 또한 낮은 알칼리성이 특징임.

3) 마그네시아 시멘트

▪ 근래에는 사용되고 있는 인산염과 반응하는 마그네시아 시멘트는 보수제나 구조물에 긴급복구제 등으로 사용되어 왔음. 그러나 마그네시아 시멘트에 반응 메카니즘이 높은 산성도를 가진 인산염과 반응하는 원리로 이를 분석한 결과 일반시멘트보다 낮은 pH 범위를 구성하는 것을 알게 되었음.

▪ 이런 이유로 최근에는 마그네시아 시멘트를 접목시킨 생물학적 구조물용 시멘트로 국내외 연구가 집중되고 있는 상황임. Table.3은 마그네시아 시멘트의 평균적인 화학조성 성분을 나타낸 것임.

▪ 시멘트 재료로 사용되고 있는 마그네시아는 광산바닥에서 채굴되는 마그네사이드를 소성한 것과 해수로부터 분리 회수하여 소성 된 것(해수 마그네시아)이 있고, 현재 국내에서 생산되는 마그네시아의 경우 해수 마그네시아가 대부분임.

[표 3.12] 마그네시아 시멘트의 평균적인 화학적, 물리적 성분

Type	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Density (g/cm ³)
MgO	–	0.1	1.1	–	95.68	3.60

▪ 또한 마그네시아의 소성온도는 경화속도에 크게 영향을 미치고, 소성온도로부터 800 ~ 900℃로 소성된 경소 마그네시아와 1,600℃이상에서 소성되는 사소 마그네시아로 분류되고 있음. 마그네시아 시멘트에서는 저온에서 구운 경소 마그네시아가 쓰이고 있으며, 경소 마그네시아는 염화마그네슘과의 반응이 아주 늦기 때문에 사용되지 않고 있음.

▪ 단단한 사소 마그네시아는 내화재료로 사용되어 왔고, 인산염과의 혼합에서 반응하고 부정형 내화재 보수재로 이용되고 있음. 그러나 인산액과의 조합에서는 급격하게 반응하여 성형이 곤란하여 인산액으로 축합 인산염을 사용하여 중성화에 가깝게 사용하고 있음.

▪ 건축현장에서 사용하는 것은 분말이고, 시공현장에서는 물을 넣어 혼합하는 것이 바람직함. 또 하나의 주성분인 인산염은 분말로 필요함.이런 마그네시아와 제1인산암모늄을 물에 넣으면 매우 빠른 급결성을 나타냄. 그러나 이런 상태에서는 작업이 불가능하고, 시멘트로 이용할 수 없기 때문에 이 급결성을 지연시킬 수 있도록 사전에 응결 지연제를 첨가할 필요가 있음.

(나) pH 범위에 따른 수용성

- 일반적으로 (미)생물이 서식할 수 있는 환경의 pH 범위는 중성 정도에 범위 안에서 가능하다는 이론이 대부분임. 그렇기 때문에 우리가 쉽게 접할 수 있는 주변 콘크리트 건물에서는 pH가 강알칼리로 (미)생물들이 착근한 경우는 보기 힘든 상황임.
- 하지만 앞선 연구조사에서 콘크리트에 착근 가능한 (미)생물류 중 이끼류를 선정하였는데 이끼는 pH 9~10 범위에서도 생육가능성이 있어 생물학적 콘크리트 판넬의 접근이 용이한 상황임.
- pH를 낮추기 위한 세라믹계 재료를 혼합하는 단계에는, 조사한 보고에 따르면 인산염마그네슘시멘트 (미)생물류 중 이끼류가 서식할 수 있는 적정 pH 범위안에 있는 재료로 평가할 수 있음.
- 특히 인산마그네슘시멘트 복합체는 빠른 강도발현 및 시멘트 콘크리트 대비 낮은 pH특성으로 미생물을 활용한 콘크리트나 식생용 콘크리트의 재료로 그 활용 가능성이 높음. 이에 이 연구에서는 미생물을 활용한 식생토양 콘크리트의 개발을 위한 기초 연구로 인산염 종류에 따라 인산염마그네슘 복합체의 수용성 및 pH 특성을 평가할 이유가 있음.

(다) 표면 거칠기에 따른 수용성

▪ 거칠기 및 투수성 확보를 위한 화학 재료의 단계에는 알루미늄 분말, 수산화 칼슘, 탄산수소나트륨, 동물성 기포제, 식물성 기포제 중 하나 또는 그 이상을 활용하는 것을 포함하는 것을 특징으로 함.

▪ (미)생물이 생물학적 콘크리트 판넬에 쉽게 착근하기 위해서는 표면에 거칠기가 중요하게 판단됨. 이유는 기존에 식생콘크리트를 보면 다공성에 구조를 나타내고 있는 것을 알 수 있음.

▪ 다공성이 중요시 되는 이유는 식물에 성장을 유도하기 위해 식생콘크리트에 다공성 구조가 식물에 뿌리가 정착이 용이하기 위한 것으로 알 수 있음. 또한 다공성 구조를 포함하게 되면 수분에 침투가 용이하며 영양소를 축적할 수 있는 대안이 될 수 있음.

▪ 보통포틀랜드시멘트를 활용하여 다공성을 지니는 구조물들은 기존에 많은 연구 및 사례가 있는 상황임. 하지만 인산염마그네슘시멘트와 알루미나시멘트를 활용하여 기포를 이용한 다공성제품은 국내연구가 없는 상황이기 때문에 생물학적 콘크리트 판넬 개발을 위해서 인산염마그네슘시멘트, 알루미나시멘트를 활용하여 기포를 도입한 다공성 판넬 개발을 목적으로 함.



다공성 콘크리트 벽돌

다공성 콘크리트 판넬

[그림 3.10] 다공성 구조를 적용한 콘크리트 구조물

(라) 수분 함유량에 따른 수용성

- 생물학적 콘크리트 판넬을 개발하기 위하여, 각 종류에 시멘트에 따른 수분함량을 평가해볼 필요가 있음. (미)생물이 판넬에 착근하여 생육할 수 있는 조건은 일정한 수분량이 공급돼야 함.
- 시멘트는 세라믹 재료의 성질로 조밀한 구조를 가진 재료이므로 수분을 포함하는 것에 어려움이 있음. 수분함유량을 극대화시키기 위해서 기포를 이용한 공극을 도입하고, 고흡수성수지(SAP)를 첨가하여 판넬 내부에 수분을 축적하게 하는 방법을 검토할 필요가 있음.
- 수분 함유량을 향상시킬 수 있는 폴리머를 혼합하는 단계에는, 흡수성수지(absorbent polymer), 고흡수성수지(super absorbent polymer) 중 하나를 활용하는 것을 포함하는 것을 특징으로 함.



(마) 생물학적 수용성을 고려한 시멘트의 선정

▪ 생물학적 콘크리트 판넬 개발을 위하여 판넬에 (미)생물을 착근시키기 위한 생물학적 수용성을 지니는 시멘트 등을 조사 및 분석하였음. 국내 시멘트재료로 생물학적 수용성의 적합 가능성이 있는 인산마그네슘시멘트와 알루미나시멘트를 선정하여, (미)생물을 착근하였을 경우 가장 적합할 것으로 판단됨.

▪ 조사 및 분석 결과 인산마그네슘시멘트와 알루미나시멘트를 사용한 생물학적 콘크리트 판넬을 제작하여 수용성 평가를 집중적으로 분석해볼 필요가 있음. 조사 및 분석 결과를 토대로 생물학적 콘크리트 판넬에 개발방향에 반영

- ① 생물학적 수용성을 적용할 수 있는 시멘트 2종 선정(인산마그네슘, 알루미나)
- ② pH성능: 2종 시멘트의 생물학적 수용성 평가
- ③ 거칠기평가: 2종 시멘트의 거칠기를 평가
- ④ 수분함량성능: 공극을 도입한 판넬에 고흡수성수지를 적용하여 수분함량 평가
- ⑤ 강도성능: 기포와 고흡수성수지를 적용한 목표 강도 범위 도출
- ⑥ 수용성평가: 제작된 판넬에 선정된 이끼류를 착근하여 생육성능 평가

(2) 생물학적 수용성을 고려한 국내형 시멘트

(가) 생물학적 판넬 모재용 시멘트 검토

▪ 생물학적 판넬 모재료로써 사용가능한 시멘트 복합재료를 검토하고자 하였음. 생물학적 판넬에 적용하기 위한 시멘트 복합재료는 질감, 거칠기, 투수 및 수분 함유량 등을 고려하여 기포 시멘트 복합재료를 대상으로 하였음. 기포 시멘트 복합재료는 생물학적 수용성에 대하여 함께 고찰되어야 하지만 본 연구에서는 생물학적 판넬 모재용 콘크리트의 재료적 고찰을 하였으며, 생물학적 콘크리트 제조시 고려할 사항을 검토하였음.

1) 사용 재료

▪ 시멘트 복합재료(Cement Composite Materials, 이하 CCM으로 약함)는 3수준의 결합재를 사용하였음. 국내 H사의 1종보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 OPC로 약함), 국내 U사의 알루미나시멘트(Alumina Cement)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 AC로 약함), 1,500℃ 이상에서 고온 소성된 국내 D사의 사소 마그네시아시멘트(Dead Magnesia Cement(MgO), 이하 M으로 약함)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 MPPC로 약함)를 사용하였음.

▪ MPPC의 경화반응제는 제 1 인산 칼륨(Potassium Phosphate Monobasic, KH_2PO_4 , 이하 P로 약함)을 사용하였으며, 지연제로서 붕산(boric acid 99%, H_3BO_3 , 이하 R로 약함)을 사용하였음. 표 3.13은 사용된 결합재의 주요 화학성분 및 물리적 특성을 나타낸 것임.

▪ 시멘트 복합재료에 후기포 방식을 적용하여 기포 시멘트 복합재료(Formed Cement Composite Materials, 이하 FCCM)를 제조하였음. 후기포 방식은 결합재와 반응하여 기포를 발생시키는 메커니즘을 가지고 있으므로 결합재에 따라 기포 반응재료(Forming Material, 이하 FM으로 약함)를 달리하였음.

[표 3.13] 결합제의 화학성분 및 물리적 특성

Type	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Density (g/cm ³)
OPC	61.6	4.50	19.80	3.57	3.01	3.15
AC	29.4	69.5	0.5	0.5	0.6	2.90
MPPC	–	0.1	1.1	–	95.68	3.60

▪ OPC 및 AC는 알루미늄 분말과 시멘트가 수화과정에서 생성되는 수산화칼슘 성분과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 U사의 알루미늄 분말(Aluminum Powder, 이하 AI로 약함)을 MPPC는 인산염에 산성이온과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 D사의 탄산수소나트륨(NaHCO₃)을 사용하였음.

2) 실험 계획 및 방법

▪ 생물학적 판넬의 모 재료로써 적용하기 위한 FCCM의 품질특성을 평가하기 위하여 3수준의 CCM(OPC, AC 및 MPPC), W/B 3수준(35, 40 및 45%)에 대하여 플로우, 압축강도, pH, 수분함유량 및 겔보기 밀도를 측정하였음.

▪ 압축강도는 생물학적 판넬에 적용하기 위한 FCCM은 프리캐스트 방식을 적용하기 위하여 초기 강도인 1, 3 및 7일 압축강도를 평가하였으며, 요구조건은 10 MPa 이상을 기준으로 하였음. 표 3.14는 실험에 사용된 FCCM의 배합비를 나타낸 것임.

[표 3.14] FCCM 배합표

Type	W/B(%)	Binder		R	FM
		cement	P		
OPC-35	35	1	—	—	1.0% (on OPC)
OPC-40	40	1	—	—	
OPC-45	45	1	—	—	
AC-35	35	1	—	—	1.0% (on AC)
AC-40	40	1	—	—	
AC-45	45	1	—	—	
MPPC-35	30	0.5	1	3.0% (on MPPC)	1.0% (on MPPC)
MPPC-40	40	0.5	1		
MPPC-45	45	0.5	1		

3) 혼합

▪ OPC와 AC의 혼합은 각각 FM(AI)을 투입하여 약 2분간 건비빔을 하였으며, MPPC의 혼합은 P 및 R을 투입하여 약 2분간 건비빔을 실시한 다음 배합수 및 FM 투입 후 1속 1분, 2속 2분 믹싱 후 토출하였음. MPPC의 P:M은 예비시험을 통하여 적절한 P:M인 0.5를 적용하였음.

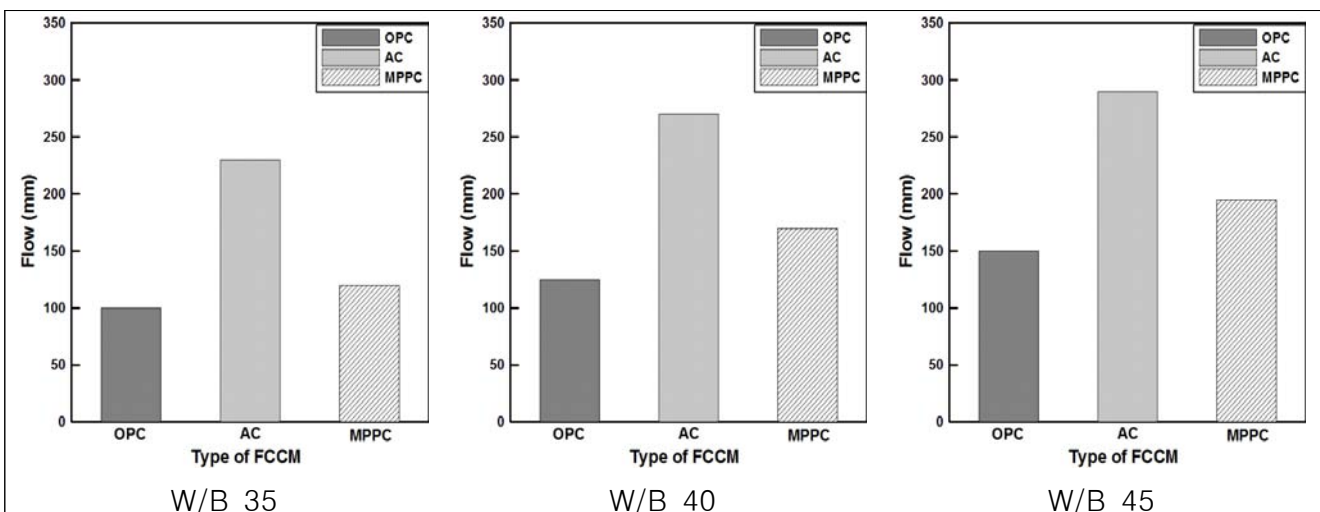
4) 플로우

▪ FCCM의 플로우는 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 플로우를 측정하였음. 15초 동안 25회, 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나가는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우 값으로 하였음.

▪ 그림 3.12는 FCCM의 W/B에 따른 플로우 측정결과 W/B에 관계없이 FCCM은 AC의 플로우가 가장 큰 것으로 나타났으며, OPC의 플로우가 가장 낮은 것으로 나타났음. 이러한 원인은 OPC의 경우 FM의 첨가와 함께 점성이 증가하는 경향이 나타나 플로우콘을 들어올렸을 때 점성이 높은 경우의 현상이 발생함에 따라 유동성이 없는 결과가 나타났음.

▪ 그러나 AC의 경우 OPC와 비교하여 재료자체의 밀도가 약 9% 낮기 때문에 혼합에 사용되는 결합재의 절대량이 감소하게 되어 상대적으로 점성이 적게 작용된 원인에 기인한 것으로 판단됨. MPPC의 경우에는 속경성인 특징을 가지는 재료이지만 급결을 방지하고 작업성을 확보하기 위하여 응결지연제가 첨가되었기 때문에 OPC와는 다르게 유동성을 가질 수 있는 것으로 판단됨.

▪ OPC의 플로는 W/B 5% 증가에 따라 약 20% 향상되는 경향이 나타났으며, MPPC의 플로우의 경우 W/B 5% 증가에 따라 약 30% 증가되는 경향이 나타났음. AC의 플로는 W/B 5% 증가에 따라 약 10% 향상되는 경향이 나타났음. 또한 W/B 증가에 따라 FCCM의 관계없이 일반적인 W/B 이론과 같이 플로우가 증가하는 경향이 나타났음. 이러한 결과를 통하여 플로우 결과만을 평가하였을 경우에는 생물학적 판넬용 모 재료의 성형시 AC가 유동성이 크기 때문에 작업성에 유리할 것으로 판단됨.



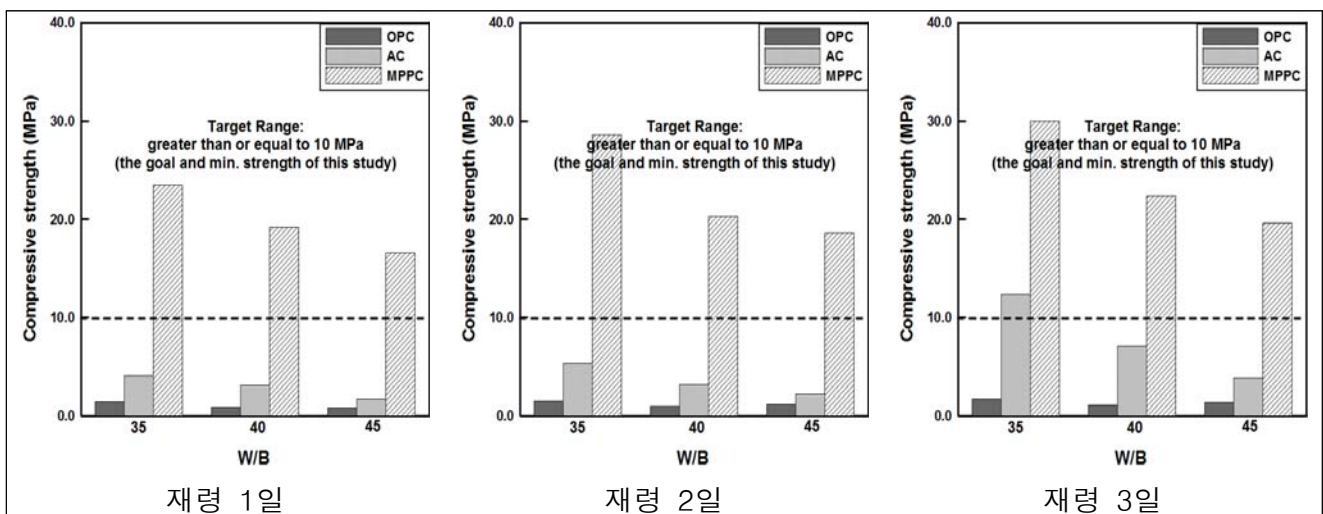
[그림 3.12] 플로우 측정 결과

5) 압축강도

▪ FCCM의 압축강도는 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 50×50×50 mm 큐브형 공시체를 제조하여 24시간 기건 양생을 실시한 다음 탈형을 실시하였으며, 재령일에 도달시점에 만능시험기(UTM)를 통하여 압축강도를 측정하였음.

▪ 그림 3.13은 FCCM의 W/B에 따른 압축강도 측정결과 W/B 35의 OPC는 재령 1일, 3일 및 7일 압축강도가 2 MPa를 상회하는 수준으로 나타났으며, W/B 증가에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타남에 따라 최소요구강도인 10 MPa를 발현하지 못하는 결과가 나타났음. 따라서 OPC의 경우 목표 강도 미달에 따라 부적합 한 것으로 판단됨.

▪ AC는 재령 1일 및 재령 3일 압축강도가 W/B 35일 경우 5 MPa를 상회하는 수준으로 나타났으며, W/B 증가에 따라 비례적으로 감소하였음. W/B 35의 경우 AC의 재령 7일 압축강도는 소요 강도 이상을 만족하는 것으로 나타났지만 W/B 40 및 W/B 45의 경우에는 소요 강도 이하인 것으로 나타나 강도기준에서 생물학적 판넬 용 모 재료를 고려할 경우에는 AC의 경우 W/B 35의 재령 7일 이상이 가능할 것으로 판단됨.



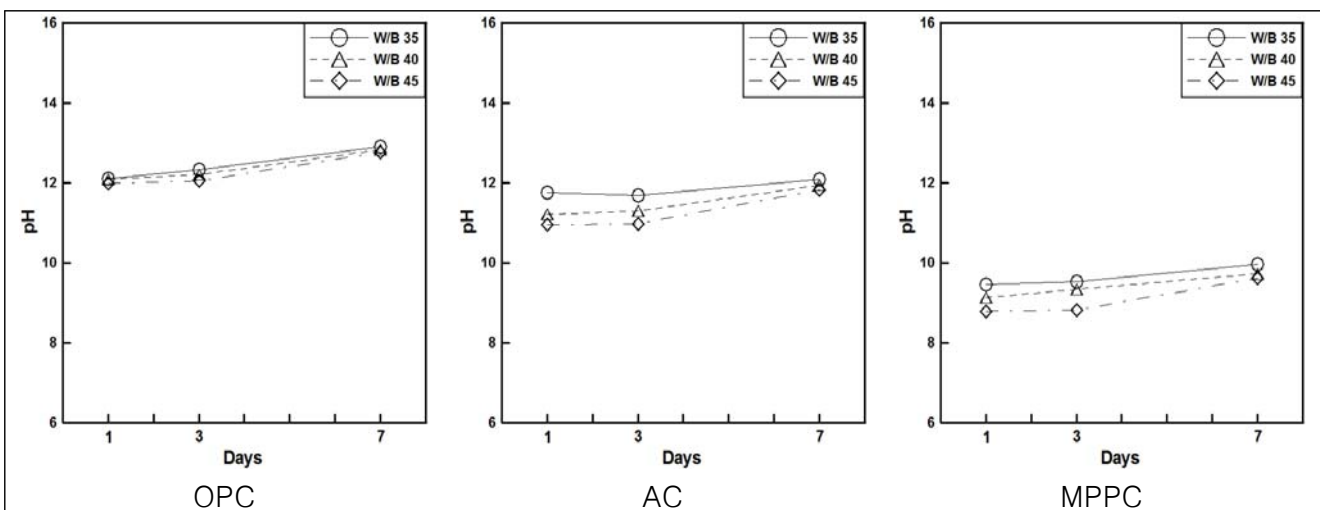
[그림 3.13] 압축강도 측정 결과

▪ 그러나 MPPC의 경우에는 재령 1일 압축강도가 W/B에 관계없이 소요 강도 이상을 만족하는 결과가 나타났으며, W/B 35 재령 7일 압축강도의 경우 최대 30 MPa를 상회하는 결과가 나타났으며, W/B 감소에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났음. 따라서 MPPC의 경우에는 강도기준에서 생물학적 판넬용 모 재료를 고려할 경우 모든 경우에서 가능할 것으로 판단되지만 플로우에 의한 작업성 및 생물학적 수용성에 대한 검토와 함께 고찰하여 적합한 혼합비를 적용하는 것이 필요할 것으로 판단됨.

6) pH

▪ FCCM의 pH 는 국내 H사의 PH Electrode모델을 사용하여 KS M 0011 “수용액의 pH 측정 방법”에 준하여 페이스트 분쇄법에 따라 시료를 가공하여 FCCM의 pH를 측정하여 FCCM의 pH 수준과 재령일에 따른 pH 수준을 검토하였음. 그림 3.14는 FCCM의 결합재에 따른 재령 1일, 3일 및 7일의 pH 측정결과를 나타낸 것임.

▪ 그림 3.14의 결과 OPC의 경우 재령이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났으며, OPC는 일반적으로 pH 12-13이상의 강알칼리 재료이기 때문에 재령이 경과할수록 pH가 약 13 강알칼리에 가까워 지는 것으로 판단됨.



[그림 3.14] pH 측정 결과

- AC의 경우 OPC의 화학성분과 비교하여 CaO 함량이 적기 때문에 반응할 수 있는 CaO 감소에 따른 Ca(OH)_2 의 저하로 OPC와 상대적으로 pH가 감소하는 것으로 판단되며, 초기 pH가 약 알칼리 영역에서 재령이 경과함에 따라 pH가 약 12에 가까워지는 경향이 나타나 알칼리 영역에 가까워지는 것으로 판단됨.

- MPPC의 pH는 초기 pH 약 8 수준에서 재령이 경과함에 따라 재령 7일 pH가 약 9 수준으로 증가하는 경향이 나타나 중성 영역에 가까운 것으로 판단됨. 생물학적 판넬용 모 재료는 이후 (미)생물 등을 착근시켜 유지하여야 하기 때문에 pH의 영향검토는 필수사항으로 판단됨.

- 강알칼리 영역에서 생존가능한 (미)생물을 선정할 경우에는 OPC를 활용 가능하지만 (미)생물의 선정 범위를 광범위하게 고려하기 위해서는 pH 범위를 넓게 선정하고 결정하는 것이 다양한 (미)생물을 선정하고 검토하는데 유리할 것으로 판단되며, 특히 구조재가 아닌 외장재로 사용되는 판넬의 경우에는 될 수 있는 한 중성에 가까울수록 생물학적 수용성에 유리하기 때문에 OPC와는 상대적으로 중성 영역에 가까운 AC 또는 MPPC의 활용이 적절할 것으로 판단됨.

7) 수분함유량

- FCCM의 함유량은 전자저울을 사용하여 KS F 2459 “기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법”에 준하여 7일간 시편을 수증양생 실시하여 습윤상태의 시편의 질량을 측정하였으며, 건조로에 넣어 건조상태의 시편의 질량을 측정하였음.

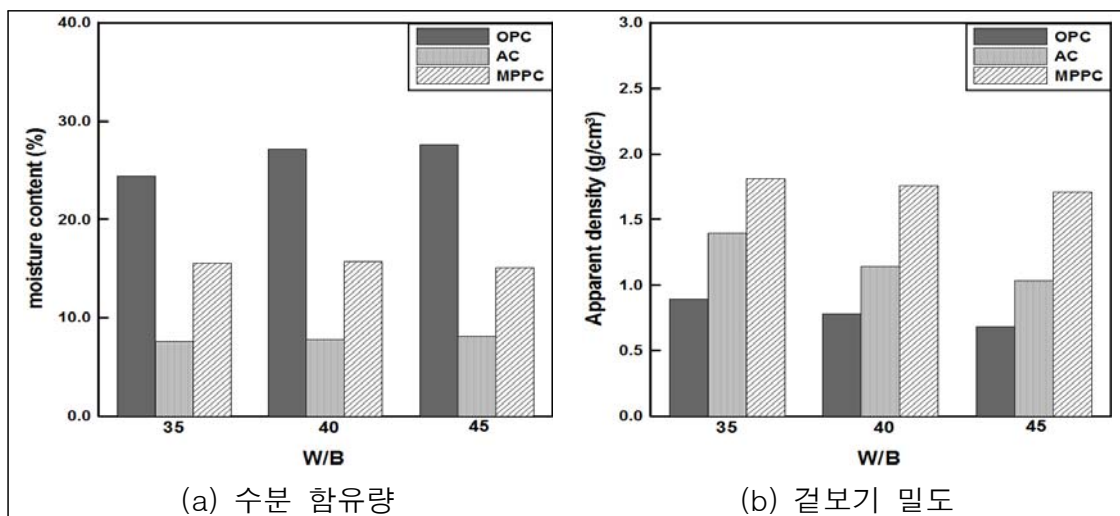
- 그림 3.15 (a)는 FCCM의 W/B에 따른 수분 함유량 측정결과를 나타낸 것임. 수분 함유량 시험은 시험편 내부에 발생된 기포의 양을 개략적으로 평가하고자 하였음. 즉, 내부의 공극이 많을수록 많은 양의 수분을 함유할 수 있다는 전제하에 정성적으로 평가하였음.

▪ 그림 3.15 (a)의 결과 OPC의 수분 함유량은 약 20% 이상인 것으로 나타났으며, AC의 수분 함유량의 경우 약 15% 정도인 것으로 나타남에 따라 OPC의 수분 함유량이 AC의 수분 함유량과 비교하여 약 1.5배 큰 경향이 있는 것으로 나타났음.

▪ 이러한 결과는 OPC와 AC는 FM으로써 동일한 알루미늄 파우더를 사용하였지만 FM이 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 수소가스 발생에 따른 기포 형성 매커니즘을 가지기 때문에 OPC보다 상대적으로 CaO 함량이 적은 AC는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 이 적어지게 되어 기포 형성량이 작아진 것으로 판단됨.

▪ 또한 OPC와 상대적으로 작은 밀도를 가지는 AC의 경우 총 분체량에서 적게 사용되는 경우가 되기 때문에 기포가 발생하는 데 영향을 미친 것으로 판단되지만 동일한 부피일 경우에는 이러한 결과가 변화할 수 있으므로 추가적인 면밀한 검토가 수행되어야 할 것으로 판단됨.

▪ MPPC의 수분 함유량은 7% 수준으로 나타나 OPC와 AC 보다 낮은 수준의 기포형성을 개략적으로 확인할 수 있었음. 또한 모든 FCCM은 W/B 증가에 따른 영향은 적은 결과가 나타났음. 이러한 결과를 통하여 생물학적 판넬용 모 재료로 활용할 경우에는 수분 함유량 또는 기포 발생량에 따른 영향을 변수화하여 소요 수분 함유량 및 기포 발생량을 결정하여야 할 것으로 판단됨.



[그림 3.15] 수분 함유량 및 겉보기 밀도 시험 결과

▪ 그러나 본 연구결과만을 고려할 경우에는 OPC의 경우 상대적으로 수분 함유량이 크기 때문에 (미)생물에 공급하기 위한 수분의 저장에 용이할 것으로 판단되지만 생물학적 판넬 제조를 위한 작업성 확보 및 소요 강도의 확보가 어렵기 때문에 AC 또는 MPPC에서 최적 혼합비를 도출하여야 할 것으로 판단됨.

8) 겉보기 밀도

▪ FCCM의 기포 발생량에 따른 품질 규정이 없기 때문에 종래의 경량 기포 콘크리트 판넬의 규정등급과 비교하고자 KS F 2459 “기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법”에 따라 겉보기 밀도를 측정하였으며, KS F 4914 “경량 기포 콘크리트 패넬”의 겉보기 밀도 규정등급과 비교하여 FCCM의 품질 수준을 자체적으로 평가하였음..

▪ 그림 3.15 (b)는 FCCM의 W/B에 따른 겉보기 밀도 측정결과를 나타낸 것임. 겉보기 밀도 시험은 수분 함유량 시험과 동일하게 시험편 내부에 발생된 기포의 양을 개략적으로 평가하고자 시험을 실시하였음. 시험편 내부의 공극이 많을수록 상대적으로 질량이 가벼울 것이라는 전제하에 정성적인 평가를 실시하였음.

▪ 그림 3.15 (b)의 결과 FCCM은 W/B가 증가할수록 겉보기 밀도는 모든 결합재가 동일하게 감소하는 경향이 나타났음. 이러한 결과는 W/B 증가에 따라 유동성이 증가하는 경향이 나타나기 때문에 기포를 발생시키는 가스가 시험편 내부에 균일하게 퍼지기 용이한 조건이 되며, 점성이 낮아지게 되어 기포 발생 조건에 유리해지기 때문에 W/B 증가에 따라 기포가 상대적으로 다량 발생되어 질량이 작아지는 것으로 판단됨.

▪ 그러나 AC는 수분 함유량의 분석결과에서는 MPPC와 비교하여 소량의 기포가 발생된 것으로 분석되었기 때문에 겉보기 밀도의 경우 MPPC의 겉보기 밀도와 비교하여 큰 값으로 나타나야 하지만 이러한 결과는 AC의 밀도가 MPPC의 밀도보다 상대적으로 작기 때문에 재료자체의 질량의 저감으로 겉보기 밀도가 작아진 것으로 판단됨.

- OPC와 비교할 경우에는 OPC의 밀도가 AC와 비교하여 큰 경우에도 수분 함유량 분석결과와 같이 내부 기포량이 약 2배 이상 나타난 것으로 보아 내부 구조적인 측면의 영향이 더 큰 것으로 판단됨.

9) 생물학적 시멘트 선정

- 생물학적 판넬용 모 재료로써 일반 시멘트를 적용할 경우에는 주요 성능인 작업성 확보와 소요 강도 확보가 어렵기 때문에 부적합한 것으로 판단됨.
- 생물학적 판넬용 모 재료에 적용하기 위한 적합한 시멘트 복합재료는 작업성 확보와 동시에 소요 강도 확보 및 pH 영역이 중성영역에 가까운 경향이 나타나는 알루미나 시멘트 및 마그네시아 시멘트가 적합할 것으로 판단됨.
- 생물학적 판넬에 적용하기 위한 기포 시멘트 복합재료는 품질제어를 위한 특성 외에 생물학적 수용성에 대한 표면 거칠기, 수분 함유 성능 등의 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단됨.
- 일반 시멘트 및 알루미나 시멘트는 생물학적 시멘트로 활용하기 위해서는 목표 강도가 상대적으로 많이 낮기 때문에 강도 확보를 위한 특수 배합비와 증기양생을 통한 방안을 적용하고자 함.
- 마그네시아 시멘트는 국·내외 연구사례를 검토할 경우 연구 기관 마다 자체적인 기준에 의하여 수행되어 참고가 어려움. 따라서 마그네시아 시멘트를 활용하기 위한 결합재 특성을 별도로 수행하였음.

(나) 일반 시멘트 및 알루미나 시멘트의 특수 배합 및 증기양생에 따른 기초특성

▪ 일반 시멘트 및 알루미나 시멘트는 생물학적 시멘트로 활용하기 위해서는 목표 강도가 상대적으로 많이 낮기 때문에 강도 확보를 위한 특수 배합비와 증기양생을 통한 방안을 적용하고자 함.

1) 잔골재 용적비(V_s/V_m)에 따른 품질

▪ 일반 시멘트의 특수 배합비는 W/B를 20% 수준까지 낮추었으며, 알루미나 시멘트의 특수 배합비는 W/B를 10% 수준까지 감소하여 적용하였음.

▪ W/B 감소에 따른 플로우 감소는 국내 H사의 폴리카보산계 고성능 감수제(SP)제를 사용하여 목표 플로우를 만족할 수 있도록 첨가하였으며, 목표 플로우를 만족하기 위한 사용량은 달리 하였음.(0.5~ 1.0%)

▪ 표 3.15는 특수 배합비를 적용한 일반 시멘트와 알루미나 시멘트의 배합비를 나타낸 것임.

[표 3.15] OPC 및 AC의 특수 배합비에 따른 배합표 (V_s/V_m)

Type	W/B(%)	V_s/V_m (%)	SP (%)
OPC	20	10	0.5~1.0 (on OPC)
	20	20	
	20	30	
	20	40	
AC	10	10	0.5~1.0 (on AC)
	10	20	
	10	30	
	10	40	

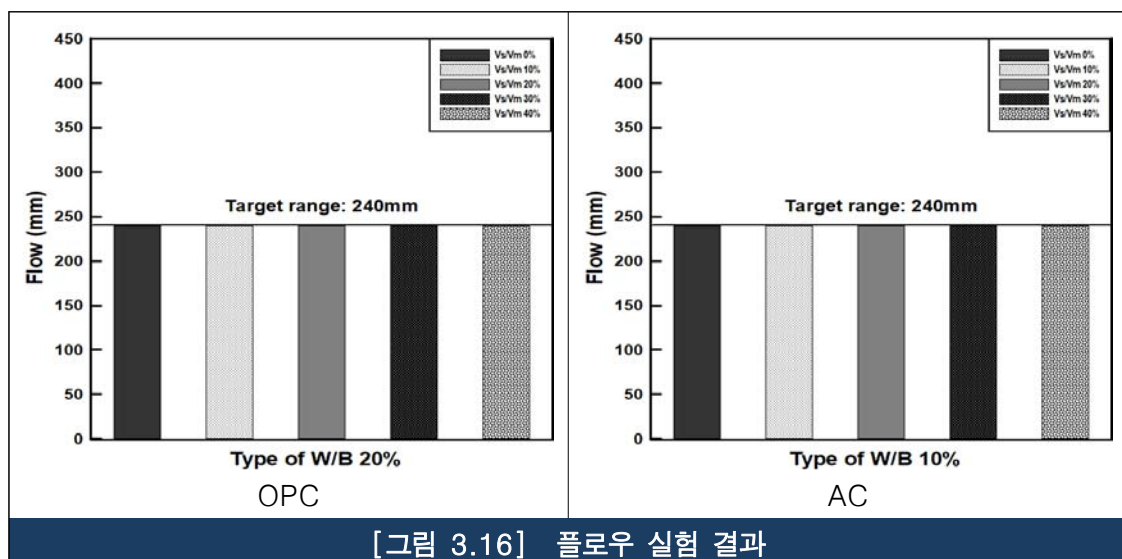
① 혼합

▪ 혼합은 6ℓ 용량의 모르타르 혼합기를 사용하여 1속으로 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 이후 배합수를 투입하여 1속 30초, 2속 1분 동안 혼합하여 배출함.

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ 특수 혼합비를 적용한 OPC 및 AC 배합의 플로우 측정결과 모든 배합이 목표 플로우인 240 mm를 만족하는 것으로 나타남. 이러한 결과는 SP를 사용하여 목표 플로우를 만족할 수 있는 것으로 판단됨.



[그림 3.16] 플로우 실험 결과

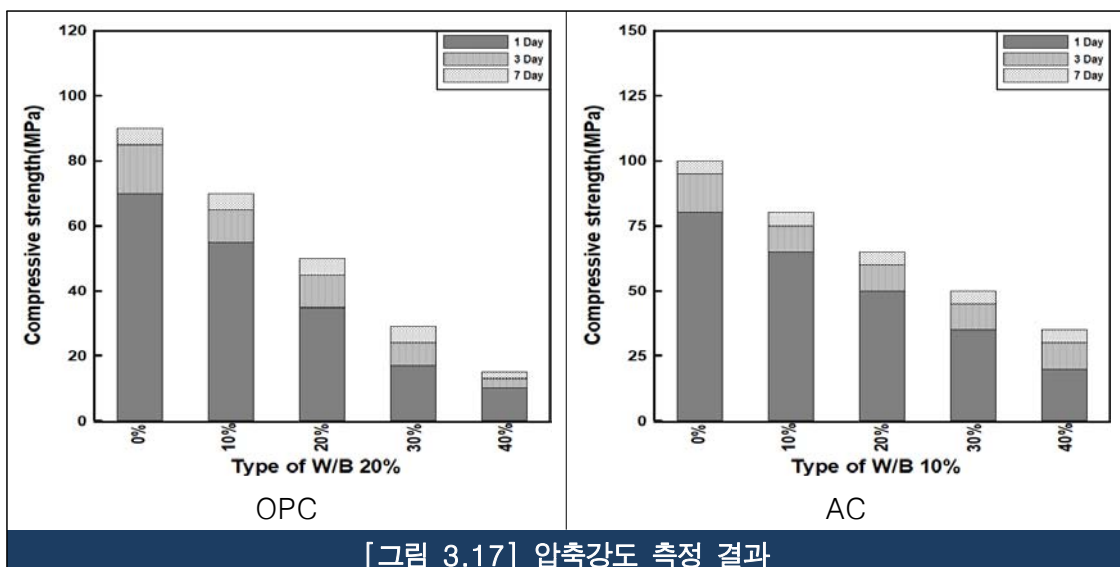
③ 압축강도

▪ 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

▪ 또한 압축강도 측정은 각 재령일 마다 3개씩 측정하였으며, 오차범위내의 결과를 평균 압축강도로 하였음.

▪ OPC 및 AC의 재령에 따른 압축강도는 모두 V_s/V_m 이 증가할수록 비례적으로 감소하는 경향이 나타났으며, V_s/V_m 10% 증가에 따라 약 10%의 압축강도가 감소하는 경향이 나타났음.

▪ 특수 배합비가 적용된 OPC 및 AC는 차후 기포제에 의한 강도 저하를 고려하여 V_s/V_m 20% 이내를 적용하는 것이 적합할 것으로 판단됨.



2) 기포제에 따른 품질

▪ 일반 시멘트의 특수 배합비는 W/B를 20% 수준까지 낮추었으며, 알루미나 시멘트의 특수 배합비는 W/B를 10% 수준까지 감소하여 적용하였음. 기포제를 적용할 경우 강도 발현이 낮아지는 경향이 있어 약 80℃가 유지되는 증기양생기에서 약 8시간 증기양생을 실시하였음.

▪ W/B 감소에 따른 플로우 감소는 국내 H사의 폴리카본산계 고성능 감수제(SP)제를 사용하여 목표 플로우를 만족할 수 있도록 첨가하였으며, 목표 플로우를 만족하기 위한 사용량은 달리 하였음.(0.5~ 1.0%)

▪ 표 3.16은 특수 배합비를 적용한 일반 시멘트와 알루미나 시멘트의 배합비를 나타낸 것임.

[표 3.16] OPC 및 AC의 특수 배합비에 따른 배합표 (기포제)

Type	W/B(%)	Vs/Vm(%)	기포제(%)	SP (%)
OPC	20	20	0.25	0.5~1.0 (on OPC)
	20	20	0.50	
	20	20	0.75	
	20	20	1.00	
AC	10	20	0.25	0.5~1.0 (on AC)
	10	20	0.50	
	10	20	0.75	
	10	20	1.00	

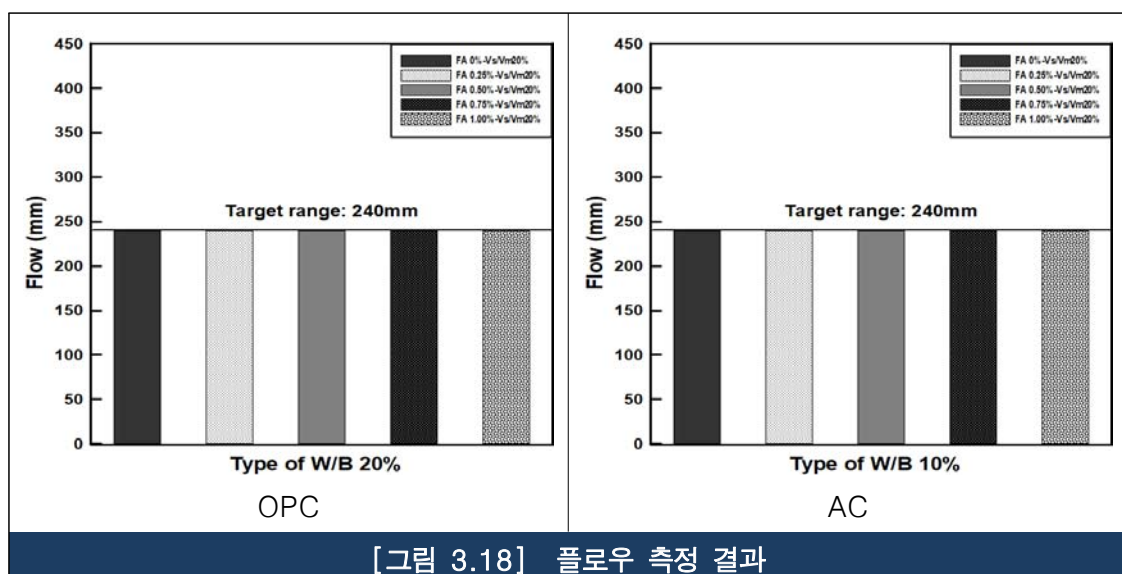
① 혼합

▪ 혼합은 6ℓ 용량의 모르타르 혼합기를 사용하여 1속으로 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 이후 배합수를 투입하여 1속 30초, 2속 1분 동안 혼합하여 배출함. 이후 기포발생을 위하여 기포제를 투입하여 1속 60초, 2속 30초 동안 혼합하여 배출하였음.

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균 값을 테이블 플로우로 하였음.

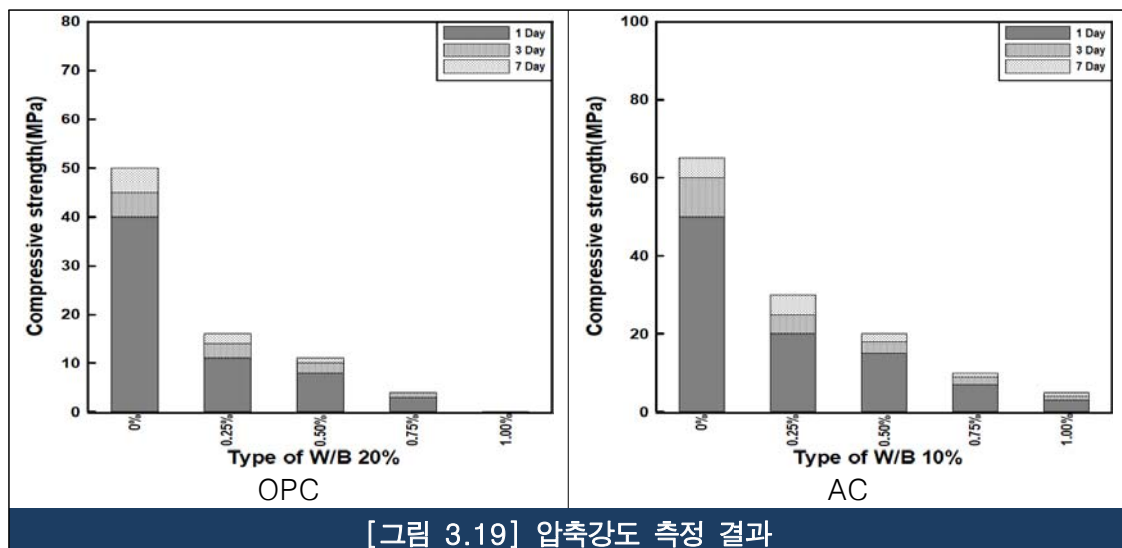
▪ 특수 혼합비를 적용한 OPC 및 AC 배합의 플로우 측정결과 모든 배합이 목표 플로우인 240 mm를 만족하는 것으로 나타남. 이러한 결과는 SP를 사용하여 목표 플로우를 만족할 수 있는 것으로 판단됨.



[그림 3.18] 플로우 측정 결과

③ 압축강도

- 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.
- 또한 압축강도 측정은 각 재령일 마다 3개씩 측정하였으며, 오차범위내의 결과를 평균 압축강도로 하였음.
- OPC 및 AC의 재령에 따른 압축강도는 모두 기포제 사용량이 증가할수록 감소하는 경향이 나타났으며, 기포제 사용량 0.25% 이후 비례적으로 감소하는 경향이 나타남. OPC의 경우 기포제 사용량 1% 경우 증기양생을 실시하더라도 경화되지 않는 것으로 나타남.
- 생물학적 수용성을 증가하기 위한 기포제의 사용량은 OPC 및 AC 모두 0.25%~0.50% 이내로 사용하여야 할 것으로 판단됨.



(다) 마그네시아 시멘트의 기초특성

▪ 생물학적 시멘트 중 마그네시아 시멘트는 관련 사례가 부족하고 참고하기 위한 자료가 한정적이기 때문에 마그네시아 시멘트의 경우 특별하게 결합재의 기초 특성을 검토하고자 함.

1) 인산칼륨과 마그네시아(P:M)에 따른 품질

▪ 마그네시아 시멘트와 제1인산칼륨을 사용하였으며, 마그네시아 복합체의 최적 배합 도출을 위한 결합재의 재료적 기초 성능을 검토하기 위하여 주요 결합재인 마그네시아 시멘트(MgO, 이하 M으로 약함)와 제 1인산칼륨(KH₂PO₄, 이하 P로 약함)의 배합비율(이하 P:M로 약함) 및 물/결합재비(이하 W/B로 약함)에 따른 결합재의 품질성능을 페이스트 수준에서 평가를 실시하였음.

▪ 본 연구에서 사용된 화학 혼화제는 지연제로써 붕사(사붕산나트륨 10수화염)를 사용하였으며, 기포제는 국내 D사의 탄산수소나트륨을 사용하였으며, 산-염기 반응에 의한 기포가스를 발생시키는 화학 반응식은 식 3.1과 같음. 표 3.5는 본 연구에 사용된 기포제의 화학성분 및 물리적 특성을 나타낸 것임.



▪ 표 3.17은 페이스트 실험 계획 및 변수를 나타낸 것이며, 표 3.18은 마그네시아 복합체의 페이스트 배합표를 나타낸 것임. P:M 4수준 및 W/B 7수준에 따른 결합재의 플로우 및 압축강도를 평가하여 최적의 결합재 비율을 도출하고자 하였음.

[표 3.17] 페이스트 실험계획 및 변수

구 분	실험 변수
P:M (vol.)	1:0.5, 1:1.0, 1:2.0, 1:3.0
W/B (%)	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60
Retarder (%)	3.0% (on M)

[표 3.18] MC의 페이스트 배합표

Type (W/B-M)	W/B (%)	P (Vol.)	M (Vol.)	R (M × %)
30-0.5	30	1	0.5	3
30-1.0			1.0	
30-2.0			2.0	
30-3.0			3.0	
35-0.5	35	1	0.5	3
35-1.0			1.0	
35-2.0			2.0	
35-3.0			3.0	
40-0.5	40	1	0.5	3
40-1.0			1.0	
40-2.0			2.0	
40-3.0			3.0	
45-0.5	45	1	0.5	3
45-1.0			1.0	
45-2.0			2.0	
45-3.0			3.0	
50-0.5	50	1	0.5	3
50-1.0			1.0	
50-2.0			2.0	
50-3.0			3.0	
55-0.5	55	1	0.5	3
55-1.0			1.0	
55-2.0			2.0	
55-3.0			3.0	
60-0.5	60	1	0.5	3
60-1.0			1.0	
60-2.0			2.0	
60-3.0			3.0	

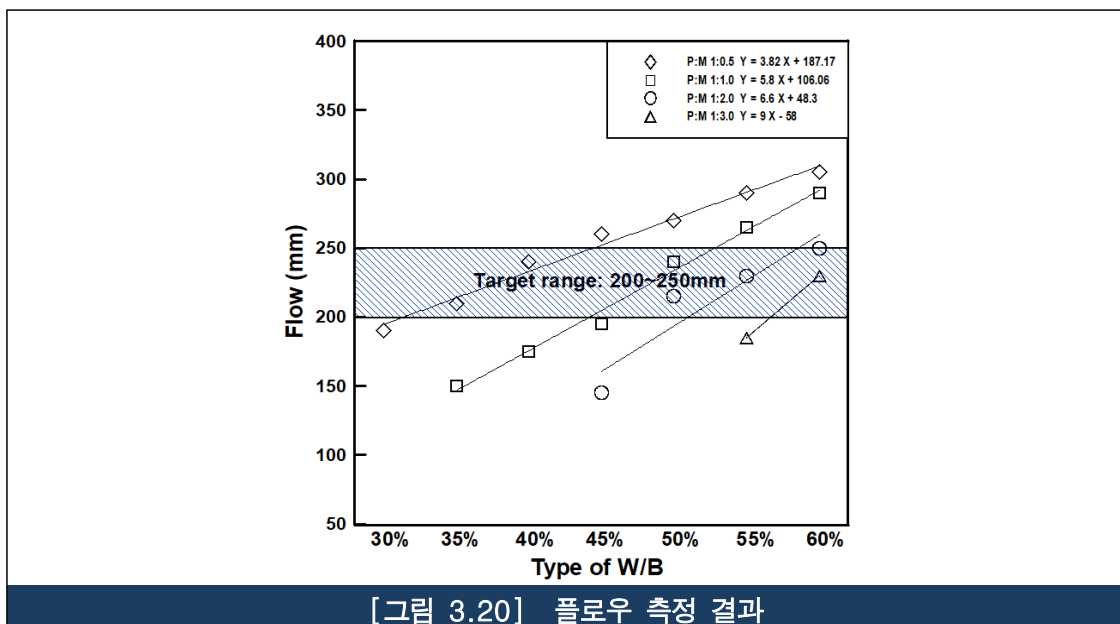
① 혼합

▪ 혼합은 6ℓ 용량의 페이스트 혼합기를 사용하여 1속으로 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 이후 배합수를 투입하여 1속 30초, 2속 1분 동안 혼합하여 배출하였다.

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ P:M(1:0.5, 1:1.0, 1:2.0 및 1:3.0)에 따른 W/B와 플로우 측정 결과 P:M이 증가할수록 플로우가 감소하는 경향이 나타났으며, 일반적인 결과와 동일하게 W/B가 증가할수록 플로우가 증가하는 경향이 나타남.



▪ 그러나 P:M(1:0.5)의 경우에는 모든 W/B의 혼합을 제조할 수 있었지만 P:M(1:1.0)의 경우 W/B 30% 배합은 급격한 경화로 유동성이 떨어져 혼합이 불가능한 결과가 나타났으며, P:M(1:2.0)의 경우 W/B 30%, 35% 및 40% 배합에서 혼합이 불가능한 결과가 나타남.

▪ 또한 P:M(1:3.0)의 경우 W/B 30%, 35%, 40%, 45% 및 50%에 혼합이 불가능하여 플로우를 측정할 수 없는 것으로 나타남. 이러한 결과는 P:M이 증가할수록 P보다 M의 실제 질량이 급격히 증가하기 때문에 지연제를 첨가하더라도 반응에 기인하는 배합수의 부족으로 유동성이 떨어져 혼합을 할 수 없는 것으로 판단됨.

▪ 또한 플로우 범위가 200 mm 이하의 경우는 작업성의 어려움이 있어 균질한 시험체를 제작하기 힘들었으며, 250 mm 이상의 경우에는 과도한 유동성으로 재료분리가 발생하였음.

③ 압축강도

▪ 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

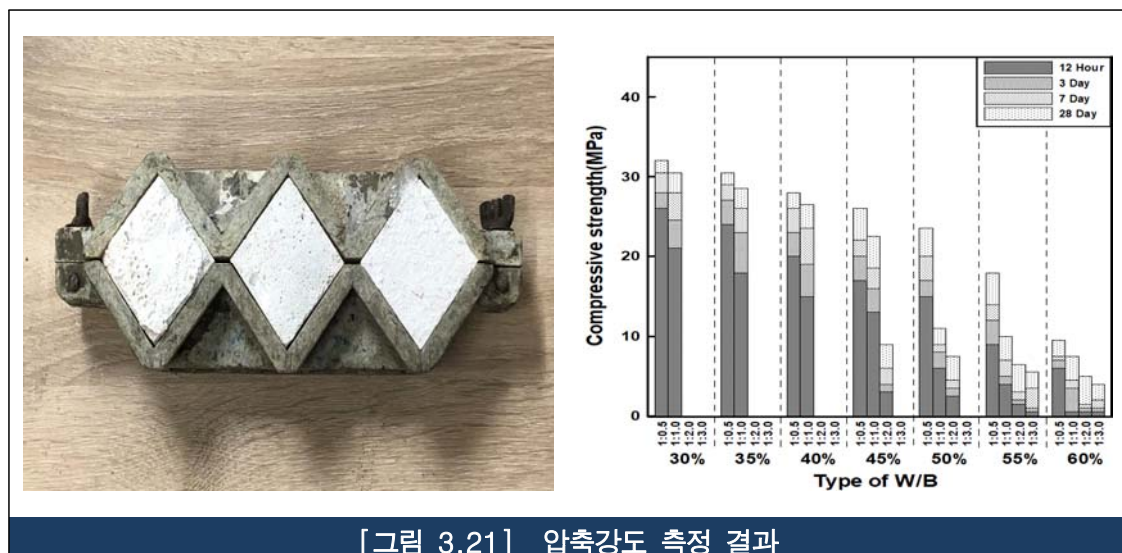
▪ 또한 압축강도 측정은 각 재령일 마다 3개씩 측정하였으며, 오차범위내의 결과를 평균 압축강도로 하였음.

▪ 재령(12시간, 3일, 7일 및 28일) 및 P:M(1:0.5, 1:1.0, 1:2.0 및 1:3.0)에 따른 W/B와 압축강도 측정 결과 혼합이 가능한 배합에 대해서만 압축강도를 평가하였으며, M이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향이 나타남.

▪ P:M 1:0.5의 압축강도는 재령 12시간 압축강도가 재령 28일 압축강도와 비교하여 약 50-70% 발현되는 결과가 나타남. 이러한 원인은 P:M 결합재의 숙경성으로 인하여 단시간 내 강도발현이 급격히 나타나는 것으로 판단되며, W/B 증가에 따른 압축강도 감소현상이 나타남.

▪ 또한 M이 증가함에 따라 일부 W/B의 배합에서 혼합이 되지 않는 결과를 나타냈으며, 이는 동일한 부피내에서 M이 차지하고 있는 부피가 커질수록 강도가 증가하여야 하는 결과가 나타나야 하지만 M이 증가할수록 밀도차에 의하여 M의 사용량이 배로 커지게 되기 때문에 P와 M이 반응할 수 있는 소요 단위수량의 절대량 부족이 원인이 된 것으로 판단됨. 이러한 결과는 최적의 P:M이 존재하는 것을 의미하는 결과이며, W/B에 따라 최적의 P:M은 달라질 수 있는 것을 의미함.

▪ 이러한 결과를 명확하게 규명하기 위해서는 P:M과 W/B의 변수 범위를 보다 세밀하게 구분하여 다수의 실험을 통한 결과분석이 이루어져야 할 것으로 판단됨.



[그림 3.21] 압축강도 측정 결과

④ 최적의 P:M 및 W/B의 범위

▪ 재령 7일에 목표 강도를 만족하는 최적의 P:M 및 W/B의 범위는 국내 E사의 minitab프로그램을 활용하여 P:M 및 W/B에 따른 최적 범위를 분석 하였음. 측정된 데이터에 대하여 다중 반응 최적법을 수행하였으며, 플로우 및 압축강도를 만족하는 최적 P:M을 도출하고자 하였음.

▪ 표 3.19는 재령 7일 압축강도의 P:M 및 W/B의 분산분석 결과를 나타낸 것임. 재령 7일 압축강도에 대한 P:M 및 W/B의 유의 수준을 살펴볼 경우 P:M과 W/B 대해서는 P-value가 0으로 매우 유의한 것으로 나타났으며, W/B에 따라 최적의 P:M이 존재하는 것을 정량적으로 확인할 수 있었음.

▪ 그림 3.22는 플로우 범위에 따른 P:M과 W/B의 예측 관계를 나타낸 것으로 목표 플로우를 만족하기 위해서는 P:M 1.3 이하 구간이 적합할 것으로 판단됨. 그림 3.23은 압축강도 범위에 따른 P:M과 W/B의 예측 관계를 나타낸 것임.

▪ 그림 3.23의 결과 본 연구에서 요구하는 목표강도를 만족시키기 위해서는 최대 30 MPa 이상을 발현하는 P:M(1:0.5) 및 W/B 30%의 구간부터 최소 10 MPa 이상을 발현하는 구간인 P:M(약 1:1.5) 및 W/B 약 60% 범위가 적합할 것으로 판단됨.

▪ 그림 3.24은 그림 3.22와 그림 3.23을 중첩한 것으로 요구 플로우 및 압축강도 범위를 만족하는 적정 P:M은 P:M 1:0.5의 범위 내 W/B 35%, 40% 및 45%의 범위에서 목표 강도를 만족할 수 있는 것으로 판단됨.

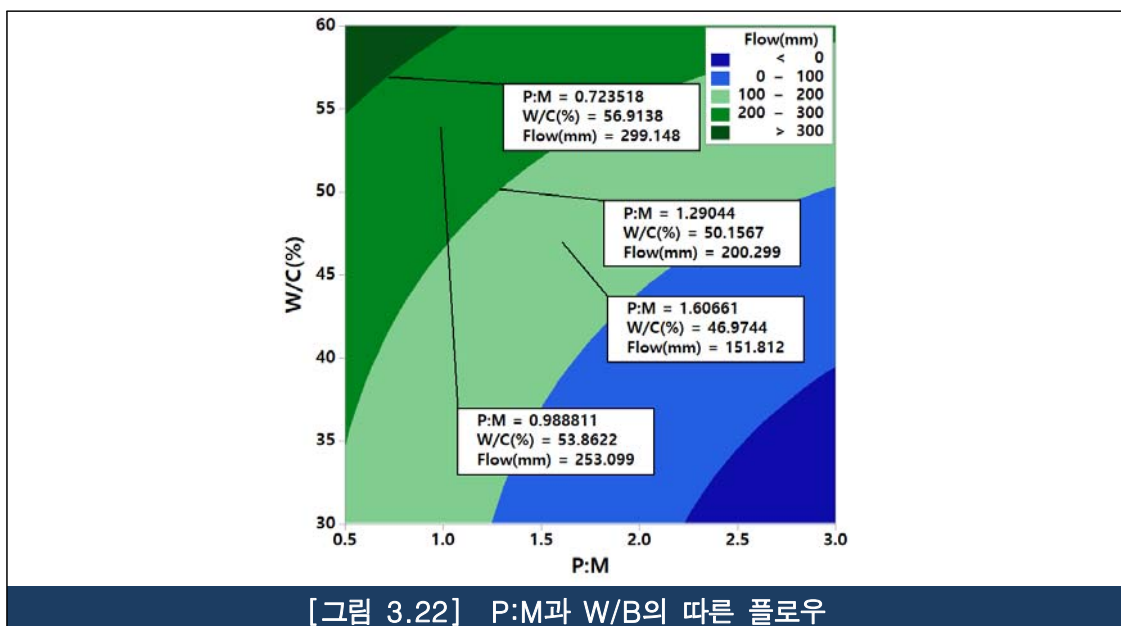
▪ 또한 P:M 1:0.5의 범위에서 W/B 35%를 적용할 경우 약 30.63 MPa로 최대강도를 얻을 수 있을 것으로 분석됨. 그러나 작업성을 고려할 경우에는 적정 플로우를 얻을 수 있는 W/B 40% 이하인 범위 내에서 배합비를 선정하여야 할 것으로 판단됨.

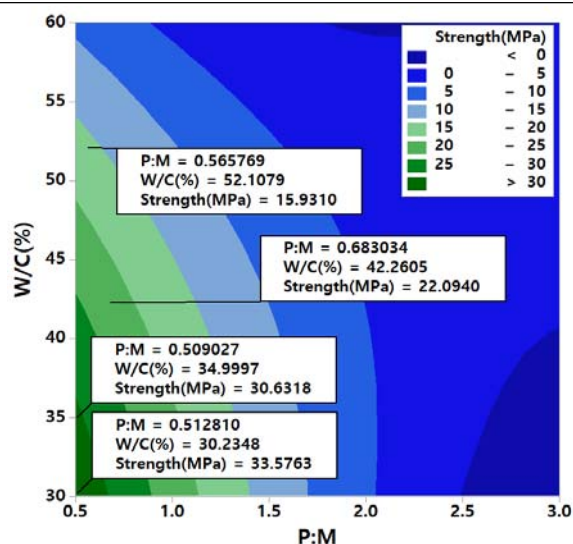
- 또한 본 연구에서는 조경설계기준에 의하여 녹화용 식생불력(벽면녹화) 강도기준인 7.64 MPa 이상인 10 MPa을 최소 목표로 설정하였으며, 생물학적 수용성 첨가제의 다른 강도저하를 고려하여 가장 높은 강도를 나타내는 비율을 선정하고자 하였음.(조경설계기준, 2016)

[표 3.19] P:M 및 W/B의 이원분산 분석결과

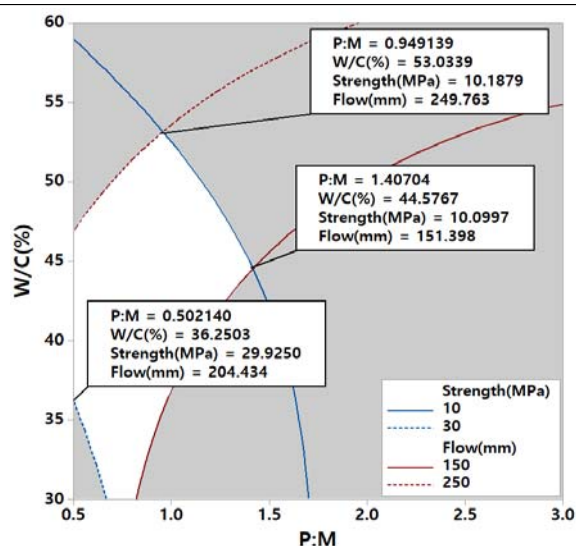
Source	df*	Sum of Squares	Mean of Squares	F	P
P:M	1	2021.86	2021.86	172.50	.000
W/B	1	257.14	257.14	21.94	.000
P:M×P:M	1	159.62	159.62	13.62	.001
W/B×W/B	1	13.16	13.16	1.12	.301
P:M×W/B	1	466.69	466.69	39.82	.000
Error	22	257.85	11.72	—	—
Corrected Total	27	3252.43		—	—

df* : degrees of freedom

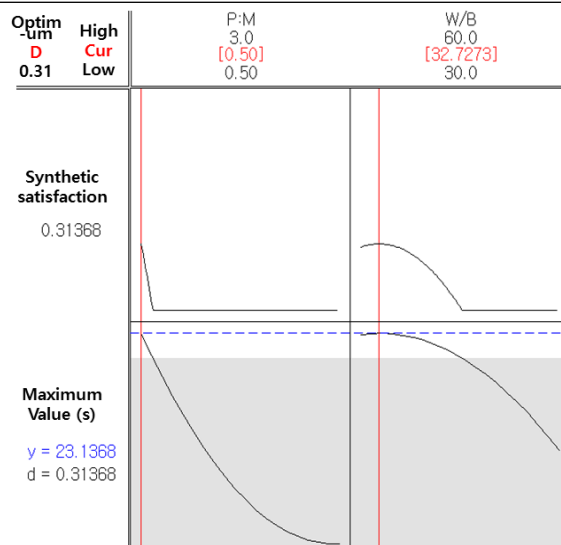




[그림 3.23] P:M과 W/B의 따른 압축강도



[그림 3.24] 목표 압축강도 및 플로우에 따른 최적 P:M과 W/B의 관계



[그림 3.25] P:M 및 W/B의 최대 압축강도를 가지는 최적 비율

2) 잔골재 용적비(V_s/V_m)에 따른 품질

▪ 마그네시아 시멘트의 결합재 혼합비는 페이스트 단계의 실험을 통하여 최적의 P:M(1:0.5)과 적합한 W/B의 범위를 선정하였음. 모르타르 단계에서는 최적의 P:M 및 적합한 W/B의 범위에 대하여 잔골재 혼합에 따른 품질성능을 검토하여 최적의 잔골재 혼합비(이하 V_s/V_m 으로 약함)를 도출하고자 하였음.

▪ 최적 P:M 1:0.5 및 적정 W/B 범위 4수준에 대하여 최적 V_s/V_m 을 도출하고자 하였음. 표 3.20은 모르타르 실험 계획 및 변수를 나타낸 것이며, 표 3.21은 마그네시아 시멘트의 모르타르 배합표를 나타낸 것임.

▪ 사용된 잔골재는 KS F 2527에서 규정한 잔골재 표준 입도 범위를 구분하여 입도 조정한 SiO_2 95% 이상의 8호 규사를 사용하였음. 8호 규사는 마그네시아 복합체의 기포 발생을 원활하게 하기 위하여 상대적으로 입도가 작은 골재를 사용하였음.

[표 3.20] 모르타르 실험계획 및 변수

구 분	실험 변수
P:M (vol.)	1:0.5
W/B (%)	30, 35, 40, 45
V_s/V_m (%)	10, 20, 30, 40

[표 3.21] MC의 모르타르 배합표

Type (W/B-Vs/Vm)	W/B (%)	Vs/Vm (%)	P (Vol.)	M (Vol.)	R (M × %)
30-10	30	10	1	0.5	3
30-20		20			
30-30		30			
30-40		40			
35-10	35	10			
35-20		20			
35-30		30			
35-40		40			
40-10	40	10			
40-20		20			
40-30		30			
40-40		40			
40-10	45	10			
40-20		20			
40-30		30			
40-40		40			

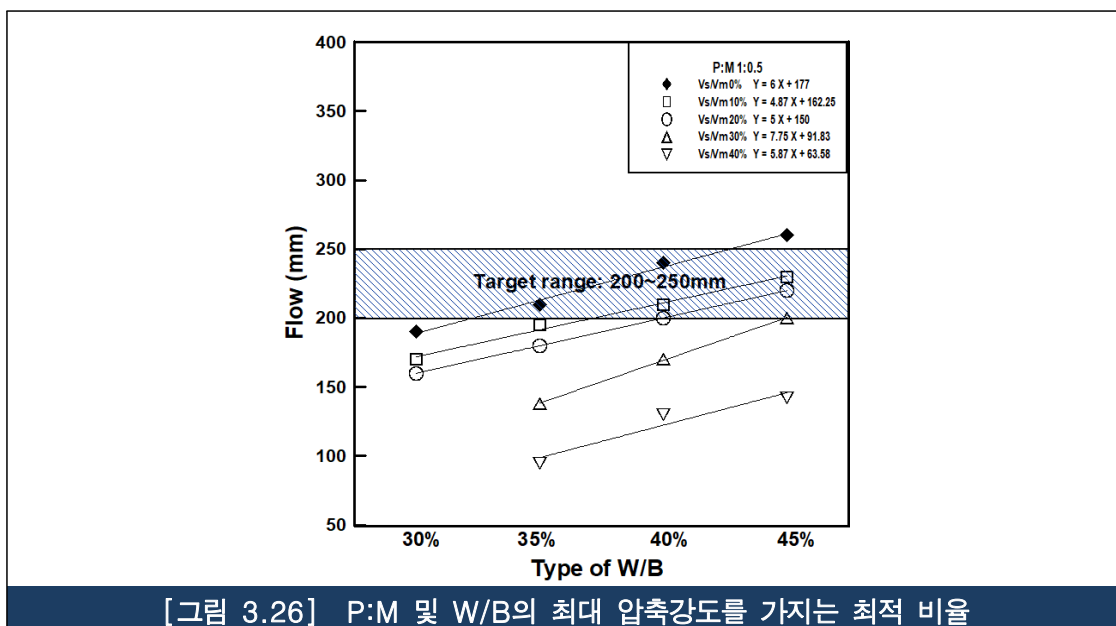
① 혼합

▪ 혼합은 6ℓ 용량의 모르타르 혼합기를 사용하여 1속으로 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 이후 배합수를 투입하여 1속 30초, 2속 1분 동안 혼합하여 배출함.

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로우는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ V_s/V_m (10%, 20%, 30% 및 40%)에 따른 W/B와 플로우 측정 결과 W/B에 따라 V_s/V_m 이 증가할수록 플로우는 감소하는 경향이 나타났으며, V_s/V_m 이 30% 및 40%의 경우 혼합이 불가능한 것으로 나타남.



- 또한 W/B 35%에 따라 V_s/V_m 이 증가함에 따라 비례적으로 플로우가 감소하는 경향이 나타났으며, V_s/V_m 10%의 플로우의 경우 약 190 mm에서 V_s/V_m 10% 증가함에 따라 플로우가 약 10% 감소하여 V_s/V_m 40%의 경우 최대 약 50% 감소하는 결과가 나타남.

- W/B 40% 및 W/B 45%의 V_s/V_m 과 플로우의 관계는 W/B 35%의 결과와 동일한 경향이 나타났으며, V_s/V_m 10%의 플로우를 기준으로 V_s/V_m 증가에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타남.

- 이러한 결과를 통하여 적정 W/B 범위(30%, 35%, 40% 및 45%)에서 제조된 모든 배합은 V_s/V_m 증가에 따라 감소하는 것으로 판단되며, 적정 V_s/V_m 의 경우 압축강도와 함께 고려하여 최적의 V_s/V_m 을 선정하여야 할 것으로 판단됨.

- 이러한 결과는 잔골재가 미분형태의 8호 규사를 사용하였기 때문에 잔골재를 혼합하지 않은 페이스트 단계의 결과와 비교하였을 경우 플로우 저감에 따른 작업성이 감소하는 결과가 나타났으며, M보다 밀도가 낮은 8호 규사혼합에 따라 배합수의 부족현상에 기인한 것으로 판단됨.

- 이에 따라 W/B 30%의 경우 작업성 측면에서 생물학적 판넬용 마그네시아 복합체에 적용 가능한 적정 V_s/V_m 은 20% 이내로 혼합하는 것이 적합한 범위일 것으로 판단된다.

③ 압축강도

- 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

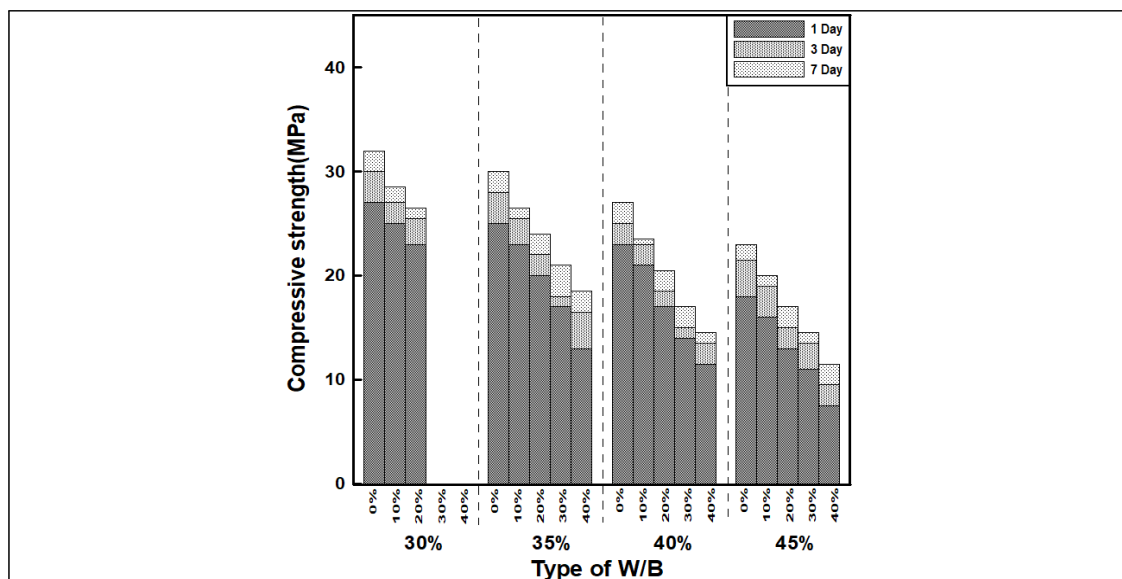
▪ 모르타르 단계의 압축강도는 페이스트 단계에서 재령 7일에 강도성능이 80% 수준을 확보할 수 있는 것으로 나타남에 따라 초기 재령인 1일, 3일 및 7일의 압축강도에 대하여 평가를 수행하였음.

▪ 재령(1일, 3일 및 7일) 및 V_s/V_m (0%, 10%, 20%, 30% 및 40%)에 따른 W/B와 압축강도 측정 결과 W/B 30%에 따라 V_s/V_m 10% 및 20%의 경우 V_s/V_m 10% 증가함에 따라 약 15% 감소하는 경향이 나타났으며, V_s/V_m 30% 및 40%의 경우 혼합이 불가능하여 압축강도 측정이 불가능하였음.

▪ W/B 35%와 V_s/V_m 증가에 따라 압축강도는 비례적으로 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 특히, V_s/V_m 40%인 시험체에 경우 시험체 표면과 모양 등이 매우 거칠게 나타남.

▪ 이러한 결과는 V_s/V_m 증가에 따라 혼합되는 잔골재가 증가하기 때문에 배합수가 상대적으로 부족하게 되며 플로우 감소로 인하여 충분한 다짐을 실시하지 못한 결과로 판단됨.

▪ W/B 40% 및 45%의 V_s/V_m 과 압축강도의 관계는 W/B 30% 및 35%의 경우와 동일한 경향으로 나타났으며, V_s/V_m 이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 것으로 나타남. 또한 동일한 V_s/V_m 에 따른 W/B의 영향은 일반적인 결과와 동일하게 W/B가 증가할수록 압축강도가 비례적으로 감소하는 경향이 나타남.



[그림 3.27] 압축강도 측정 결과

▪ 이러한 결과를 통하여 대부분의 배합은 재령 1일내 강도 발현이 가능한 것으로 판단되며, 목표 강도대비 작업성을 고려할 경우에는 V_s/V_m 20% 이내가 적정 범위인 것으로 판단됨. 재령 7일 압축강도를 기준으로 요구 조건을 만족하는 최적의 V_s/V_m 및 W/B의 범위를 통계적 분석기법을 통하여 선정하고자 하였음.

④ 최적 V_s/V_m 선정

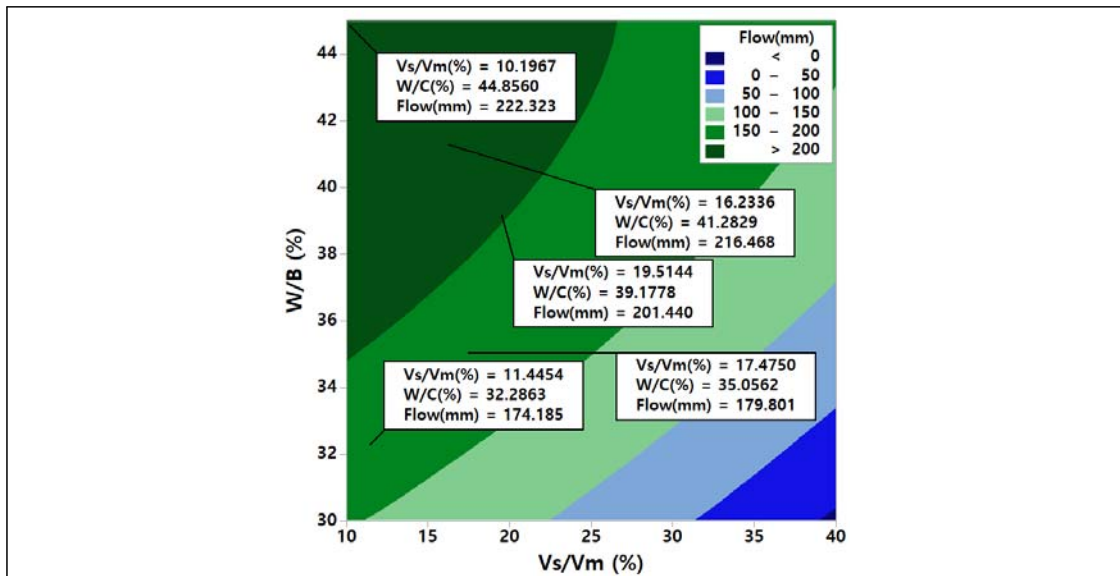
▪ 모르타르 단계에서는 E사의 minitab프로그램을 활용한 다중 반응 최적법을 적용하여 플로우 및 압축강도를 만족하는 최적 V_s/V_m 을 도출하고자 하였음. 다중 반응 최적법은 반응값이 여러개인 경우 이들을 동시에 최적화 시키는 방법으로 각각의 조건에서는 최적 값을 만족할 수 있을 수 있지만 다른 반응 값 측면에서는 최적 값과는 거리가 멀 수 있기 때문에 동시에 목표를 만족할 수 있는 요인에 대하여 조건을 찾는 방법임.

▪ 그림 3.28은 실험 데이터에 기반한 V_s/V_m 및 W/B에 따른 플로우 예측 값을 나타낸 것으로 작업성을 최대로 하기 위해서는 V_s/V_m 약 10% 영역에서 W/B 약 45 %를 적용할 경우에 최대 플로우를 얻을 수 있는 것으로 분석되었음.

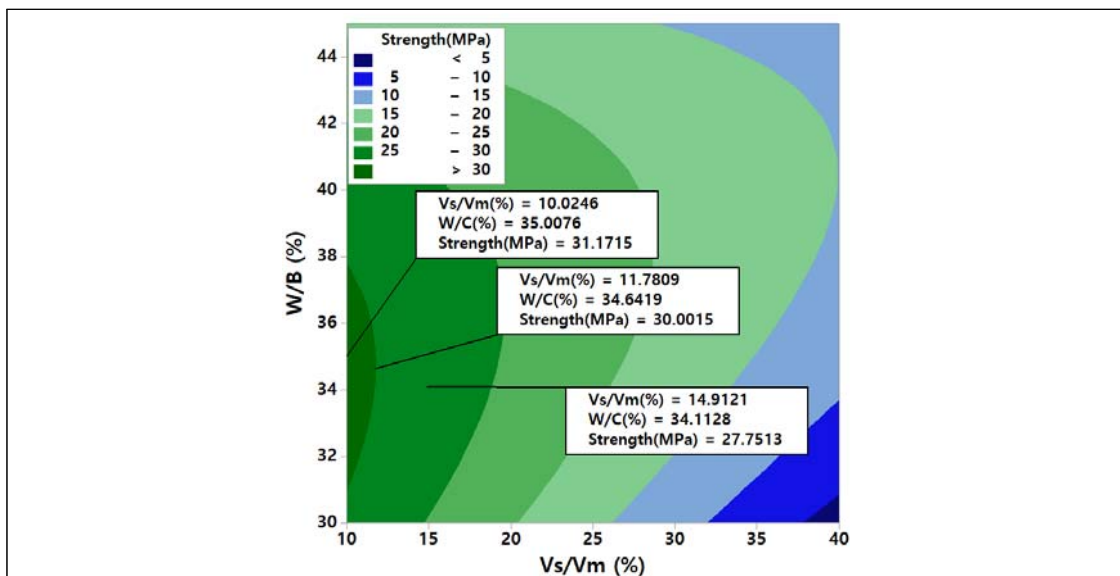
▪ 그림 3.29는 실험 데이터에 기반한 V_s/V_m 및 W/B에 따른 압축강도 예측 값을 나타낸 것으로 압축강도를 최대로 확보하기 위해서는 V_s/V_m 약 10% 영역에서 W/B 약 35%를 적용할 경우 최대 압축강도를 얻을 수 있는 것으로 분석되었음.

▪ 그림 3.30은 그림 3.28과 그림 3.29의 예측 값을 합성한 것으로 목표 플로우 최소 200 mm 이상, 목표 압축강도 최소 10 MPa을 만족하는 구간을 나타낸 것이다. 그림 4.10의 결과 두가지 조건을 만족하는 V_s/V_m 구간은 10% 영역에서 나타났으며, W/B의 경우 작업성을 고려하여 W/B 45% 적용할 경우 압축강도는 약 20 MPa로 나타남.

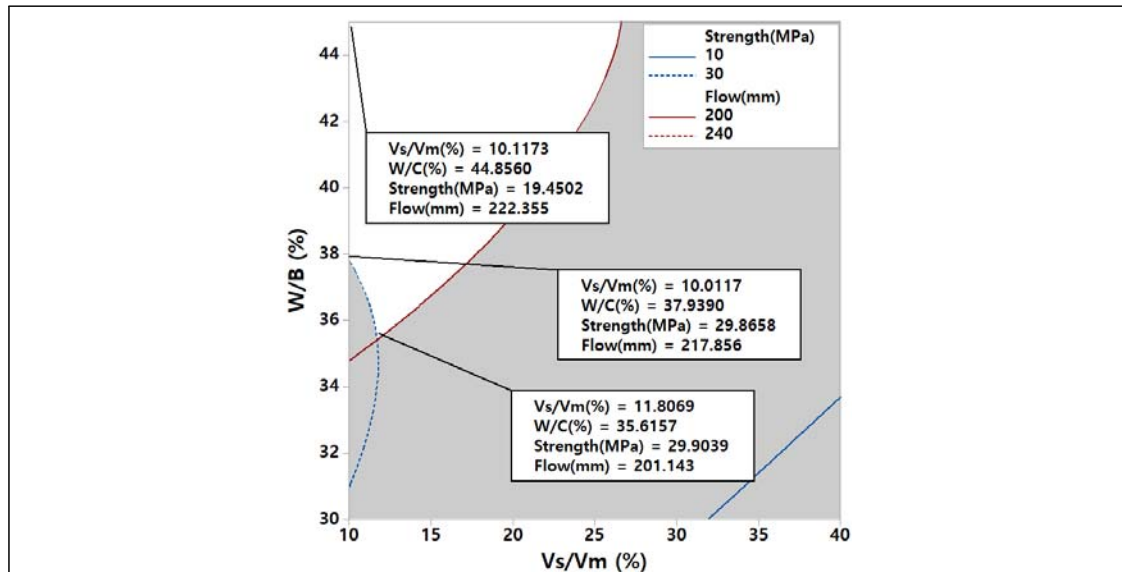
그러나 압축강도를 고려하여 W/B 35%를 적용할 경우 압축강도는 W/B 45%와 비교하여 1.5 배 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 목표 플로우와 압축강도를 만족하는 구간은 V_s/V_m 10%를 적용하는 것이 최적의 V_s/V_m 인 것으로 판단되며, 플로우와 압축강도 모두를 고려할 때 W/B 약 35~40 % 구간이 적합한 W/B 범위인 것으로 판단된다.



[그림 3.28] V_s/V_m 과 W/B의 따른 플로우



[그림 3.29] V_s/V_m 과 W/B의 따른 압축강도



[그림 3.30] 목표 압축강도 및 플로우에 따른 최적 V_s/V_m 과 W/B 의 관계

3) 기포제에 따른 품질

■ 생물학적 수용성 향상을 위하여 기포제를 첨가할 경우 플로우와 압축강도에 대한 품질이 변동되기 때문에 목표 성능을 만족할 수 있는 최적 기포의 혼합률을 도출하고자 하였음.

■ 모르타르 배합은 최적 P:M 1:0.5 및 최적 V_s/V_m 10%에 대하여 기포제 4수준을 적용하였음. 표 3.22는 기포 모르타르 실험 계획 및 변수를 나타낸 것이며, 표 3.23은 기포제를 첨가한 배합표를 나타낸 것임.

■ 사용된 잔골재는 KS F 2527에서 규정한 잔골재 표준 입도 범위를 구분하여 입도 조정한 SiO_2 95% 이상의 8호 규사를 사용하였음. 8호 규사는 마그네시아 복합체의 기포 발생을 원활하게 하기 위하여 상대적으로 입도가 작은 골재를 사용하였음.

■ 사용된 화학 혼화제는 지연제로써 붕사(사붕산나트륨 10수화염)를 사용하였으며, 기포제는 국내 D사의 탄산수소나트륨을 사용하였음.

[표 3.22] 기포 모르타르 실험계획 및 변수

Item	Experiment Variable
P:M (vol.)	1:0.5
Vs/Vm (%)	10
W/B (%)	30, 35, 40, 45
기포제 (B × %)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00

표 3.23 MC의 기포 모르타르 배합표

Type (W/B-기포제)	W/B (%)	Vs/Vm (%)	P (Vol.)	M (Vol.)	기포제 (B × %)	R (M × %)
30-0.25	30	10	1	0.5	0.25	3
30-0.50					0.50	
30-0.75					0.75	
30-1.00					1.00	
35-0.25	35				0.25	
35-0.50					0.50	
35-0.75					0.75	
35-1.00					1.00	
40-0.25	40				0.25	
40-0.50					0.50	
40-0.75					0.75	
40-1.00					1.00	
45-0.25	45				0.25	
45-0.50					0.50	
45-0.75					0.75	
45-1.00					1.00	

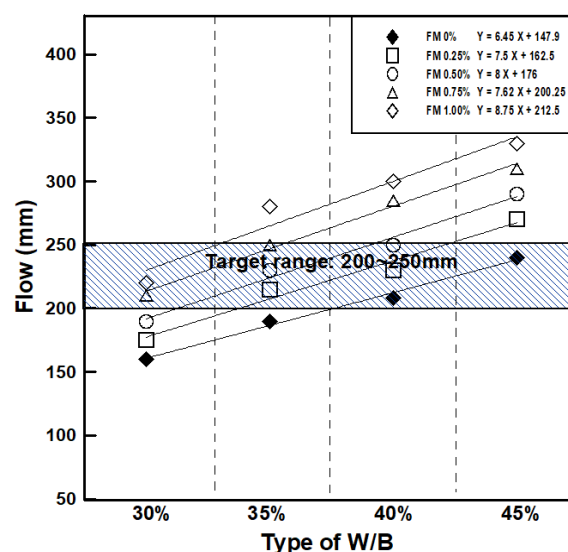
① 혼합

▪ 혼합은 6ℓ 용량의 모르타르 혼합기를 사용하여 1속으로 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 이후 배합수를 투입하여 1속 30초, 2속 1분 동안 혼합된 배합은 기포발생을 위하여 기포제를 투입하여 1속 60초, 2속 30초 동안 혼합하여 배출하였음.

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로우는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ 기포제(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%) 혼합물에 따른 W/B와 플로우 측정 결과 기포제를 혼합하지 않은 기포제 0%의 플로우와 비교하여 기포제를 첨가한 경우 플로우가 최대 10% 증가하는 경향이 나타났으며, 기포제 0.25% 증가에 따라 비례적으로 약 8% 증가하는 결과가 나타남.



[그림 3.31] 플로우 측정결과

▪ 이러한 결과는 일반적인 기포 복합체의 결과와 동등한 결과이지만 일반적인 기포 복합체의 기포 발생 매커니즘과는 달리 기포제로 사용한 탄산수소나트륨이 결합재의 산성이온과 반응하여 기포를 강렬하게 발생시키게 되며, 갇힌 기포가 아닌 열린 기포를 형성함으로써 결합재를 밀어내는 효과에 의하여 플로우가 증가하는 것으로 판단됨. W/B에 따른 영향은 W/B가 5% 증가할수록 약 15% 플로우가 증가하는 경향이 나타남.

▪ 이러한 결과를 통하여 생물학적 수용성 측면에서 고려할 경우 기포에 의하여 표면의 거칠기를 향상시킬 수 있어 생물의 착근이 용이할 것으로 판단되며, 갇힌 기포가 아닌 열린 기포이기 때문에 모재 내부로 수분유입이 유리하여 보습 성능을 향상 시킬 것으로 판단됨. 최적 기포제 첨가량의 경우 생물의 착근 성능 및 보습성능과 같은 생물학적 수용성능 검토와 함께 플로우 및 압축강도를 고려하여 최적의 기포제 혼합률을 선정하여야 할 것으로 판단됨.

③ 압축강도

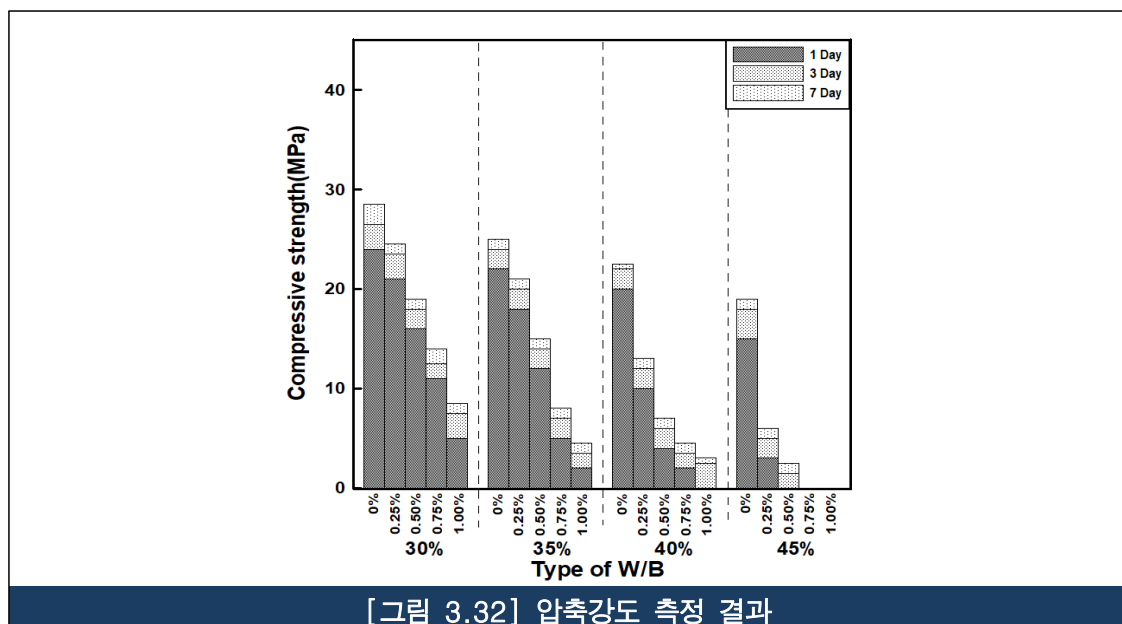
▪ 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

▪ 재령(1일, 3일 및 7일) 및 기포제(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%)에 따른 W/B와 압축강도 측정결과 W/B 30%의 경우 기포제를 첨가하지 않은 기포제 0%와 비교하여 기포제 0.25% 첨가시 약 30% 감소하는 결과가 나타났으며, 기포제 0.25% 증가함에 따라 비례적으로 약 25~40% 감소하는 결과가 나타남.

▪ 이러한 결과는 일반적인 기포 복합체의 결과와 동일한 원인에 의한 것으로 기포가 모재 내부에 발생하였기 때문에 치밀한 구조를 형성하지 못하여 강도가 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단됨. 또한 일반적인 시멘트를 사용한 기포 복합체와 비교하여 마그네시아 시멘트를 결합재료 활용한 경우 상대적으로 압축 강도의 확보가 용이한 것으로 판단됨. W/B에 따른 압축강도는 W/B가 5% 증가할 수록 비례적으로 약 15% 감소하는 경향이 나타남.

▪ 이러한 결과를 통하여 기포를 발생시키더라도 목표로 하는 충분한 강도의 발현이 가능하기 때문에 기포제 0.5% 이하로 첨가할 경우 강도저하를 최소화하고 모재의 기포에 의한 생물학적 수용성능 향상이 가능할 것으로 판단됨.

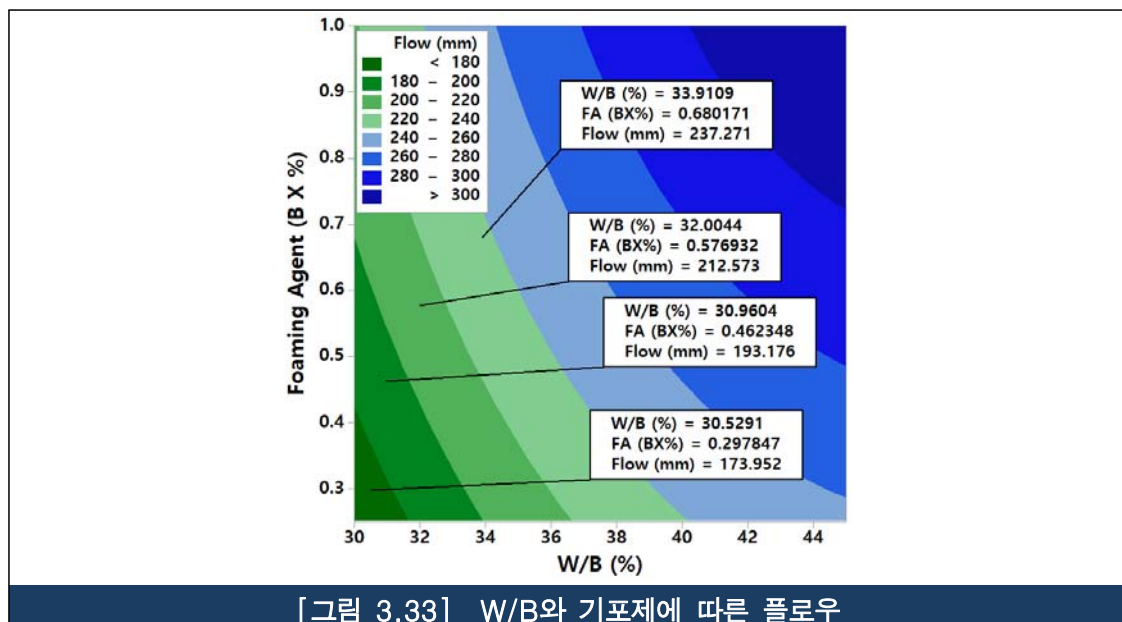
▪ 또한 기포에 의하여 모재 자체의 질량을 감소시키는 역할을 하여 목표 강도를 만족하는 경량화된 판넬 제조가 가능할 것으로 판단됨. 재령 7일 압축강도를 기준으로 요구 조건을 만족하는 최적의 기포제 및 W/B의 범위를 통계적 분석기법을 통하여 선정하였음.

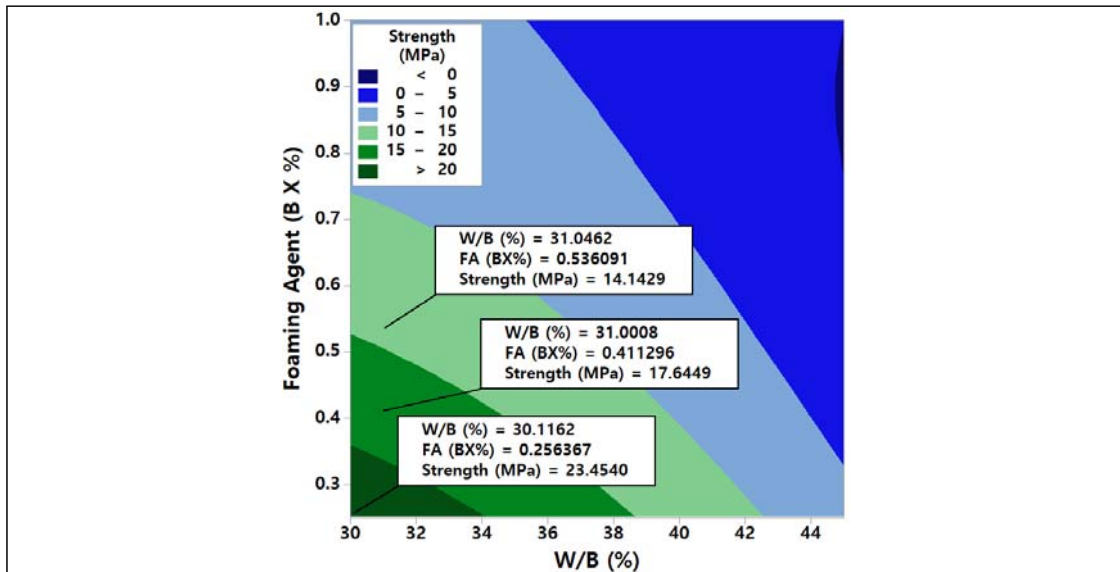


④ 기포제의 최적 첨가량

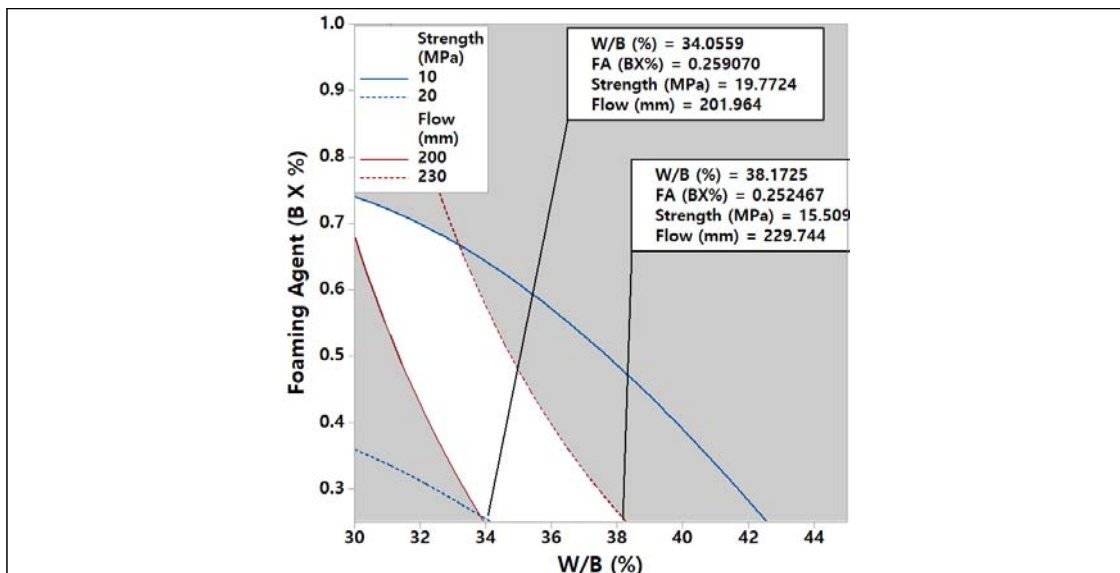
▪ 다중 반응 최적법을 통한 실험 데이터 기반 플로우 및 압축강도 예측 값을 나타낸 것임. 분석 결과 최대 작업성을 얻기 위한 조건은 기포제 1% 영역인 것으로 분석되었음. 그러나 최대 압축강도를 얻기 위한 조건은 기포제 0.25% 영역으로 분석되어 기포제의 혼합률은 플로우와 압축강도에 서로 상반되는 영향을 주는 것으로 나타남. 이에 따라 목표 플로우 및 목표 압축강도를 만족할 수 있는 최적의 기포제 첨가량은 각 성능의 최솟값을 설정하여 공통된 영역의 최적 기포제 혼합률을 도출하고자 함.

▪ 플로우와 압축강도 분석 결과를 합성하여 최소 목표 플로우 200 mm 이상, 최소 목표 강도 10 MPa를 만족하는 범위를 분석한 결과 최적 기포제 혼합률은 0.5% 영역에서 얻을 수 있었으며, 압축강도 측면에서 분석할 경우 W/B 38%의 압축강도는 W/B 34%의 압축강도와 비교하여 약 25% 감소하므로 최소 플로우를 기준으로 최대 압축강도를 확보할 수 있는 기포제 0.5% 및 W/B 35% 조건이 최적일 것으로 판단됨.





[그림 3.34] W/B와 기포제에 따른 압축강도



[그림 3.35] 목표 압축강도 및 플로우에 따른 최적 W/B와 기포제의 관계

3) 고흡수성수지(SAP)에 따른 품질

▪ 생물학적 수용성 향상을 위하여 고흡수성수지를 첨가할 경우 품질성능을 검토하여 최적 고흡수성수지 혼합율(이하 SAP로 약함)을 도출하고자 하였음. 모르타르 배합은 최적 P:M비 0.5 및 최적 Vs/Vm 10%에 대하여 SAP 4수준을 적용하였음.

▪ 고흡수성수지는 국내 L사의 흰색의 Powder type의 아크릴산 중합체-나트륨염 (Acrylic Acid Polymer, Sodium Salt)을 사용함.

▪ 표 3.24는 실험 계획 및 변수를 나타낸 것이며, 표 3.25는 SAP를 혼합한 모르타르의 배합표를 나타낸 것임.

[표 3.24] 실험계획 및 변수(SAP 혼합 모르타르)

Item	Experiment Variable
P:M (vol.)	1:0.5
Vs/Vm (%)	10
W/B (%)	30, 35, 40, 45
SAP (B × %)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00

[표 3.25] MC의 SAP 혼합 모르타르 배합표

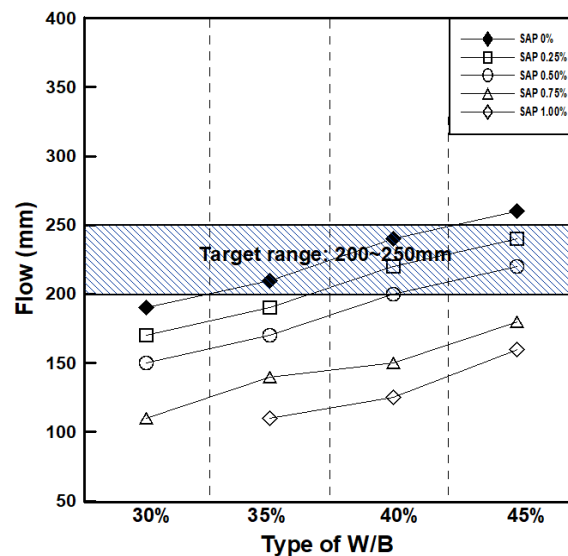
Type	W/B (%)	Vs/Vm (%)	M (Vol.)	P (Vol.)	SAP (B × %)	R (M × %)
30–0.25	30	10	0.5	1	0.25 0.50 0.75 1.00	3
30–0.50						
30–0.75						
30–1.00						
35–0.25	35					
35–0.50						
35–0.75						
35–1.00						
40–0.25	40					
40–0.50						
40–0.75						
40–1.00						
45–0.25	45					
45–0.50						
45–0.75						
45–1.00						

② 테이블 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균 값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ SAP 혼합율에 따른 플로우 측정 결과 SAP를 혼합하지 않은 SAP 0의 플로우와 비교하여 SAP를 혼합한 경우 최대 5% 감소하는 경향이 나타났으며, SAP 혼합율 0.25 증가에 따라 비례적으로 약 10% 감소하는 경향이 나타남.

▪ 이러한 원인은 마그네시아 시멘트의 급결성능 제어를 위하여 지연제를 첨가하여 충분한 작업성을 확보하였지만 SAP의 수분흡수 성능이 더 크게 작용하기 때문에 배합하기 위한 배합수의 절대량 부족으로 플로우가 감소하는 것으로 판단되며, 작업성 감소뿐만 아니라 지연효과 감소로 급결 반응이 나타남.



[그림 3.36] 플로우 실험 결과

- 이러한 결과는 마그네시아 시멘트의 경화 반응재인 제1인산칼륨과 배합수로 생긴 인산염 이온이 SAP에 흡수되어 마그네시아 시멘트와 접촉하는 면적이 급격하게 줄어들어 급결하는 것으로 판단되며, W/B에 따라서도 동일한 결과를 얻을 수 있었음.

- 이러한 결과를 통하여 충분한 작업성을 확보하기 위해서는 SAP와 관련된 기존 연구동향을 살펴볼 경우(강성훈 외, 2016) SAP가 흡수한 수량 만큼 추가 배합수를 첨가하는 방법이 있는 것으로 조사되었지만 추가 배합수의 혼합량은 작업자, 바인더 종류 및 SAP 흡수특성 등에 따라 달라지기 때문에 정량화 할 수 없는 것으로 보고하고 있음. 따라서 본 논문에서는 본 연구조건에 국한하여 적합한 추가 배합수의 혼합량을 최종 단계에서 산정하여 적용하였음.

③ 압축강도

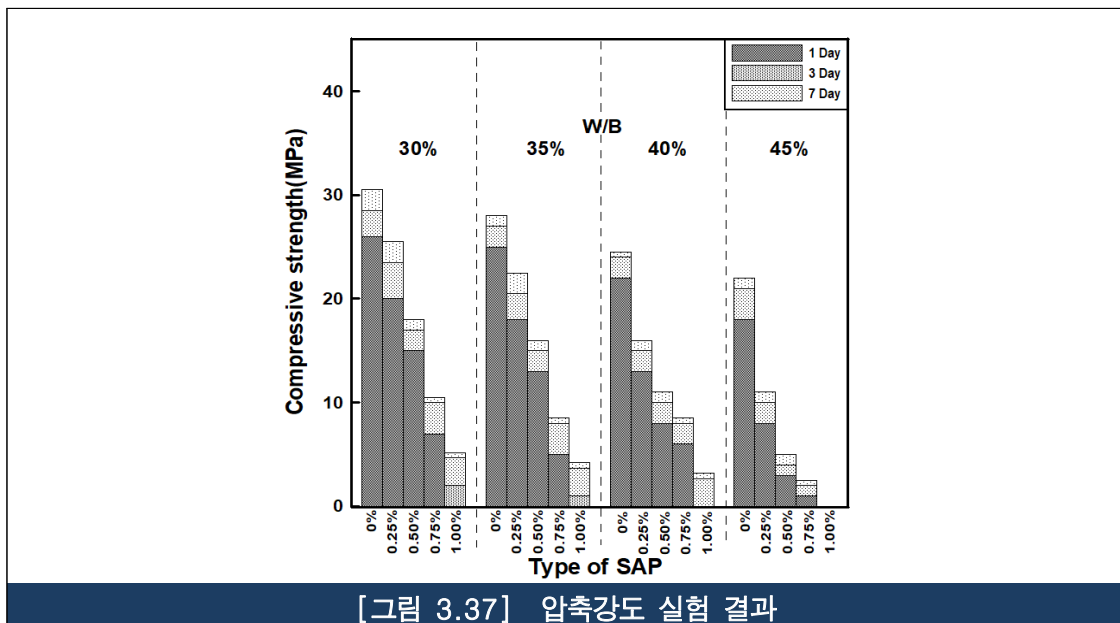
- 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

- SAP 혼합율에 따른 압축강도 측정 결과 SAP를 혼합하지 않은 SAP 0의 압축강도와 비교하여 SAP를 혼합한 경우 평균 약 10~20% 압축강도가 감소하는 경향이 나타났으며, SAP 0.5% 증가함에 따라 압축강도가 비례적으로 약 30~40% 감소하는 경향이 나타남.

- 이러한 원인은 SAP를 혼합하였을 경우 마그네시아-제1인산칼륨 반응에 필요한 배합수를 SAP가 흡수하기 때문에 특히 SAP를 1% 혼합한 경우 다량의 배합수를 빠르게 흡수하면서 충분히 반응이 일어나지 않는 것으로 판단되며, 양생 후에도 시험편 자체가 쉽게 파손되어 압축강도를 측정할 수 없는 수준으로 나타남.

▪ 기존의 SAP를 활용한 관련 연구사례를 살펴볼 경우 일반적인 보통포틀랜드 시멘트는 SAP가 수분을 흡수하여 내부양생효과에 의한 강도 증진 효과가 있다고 보고된 바 있지만(강성훈 외, 2016) 이러한 결과는 마그네시아와 시멘트와는 달리 상대적으로 장기간 강도발현을 하는 일반적인 시멘트에서만 국한되어 나타나는 현상인 것으로 분석되었음.

▪ 마그네시아-제1인산칼륨은 초기재령에서 약 80%정도 강도가 발현되고 이후 강도발현이 크지 않기 때문에 장기적인 내부양생 효과는 기대하기 어려울 것으로 판단되지만 마그네시아 시멘트의 재료적 특징인 발열에 의한 반응 및 급결로 인한 건조수축 측면에서는 SAP가 흡수한 수분을 통하여 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단됨.



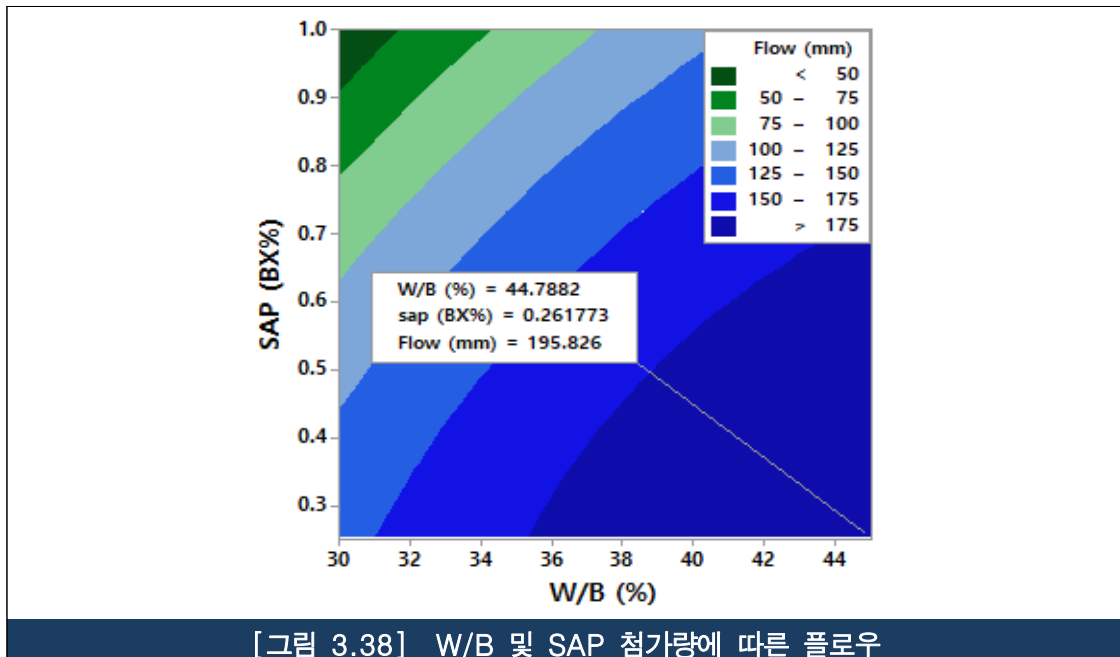
[그림 3.37] 압축강도 실험 결과

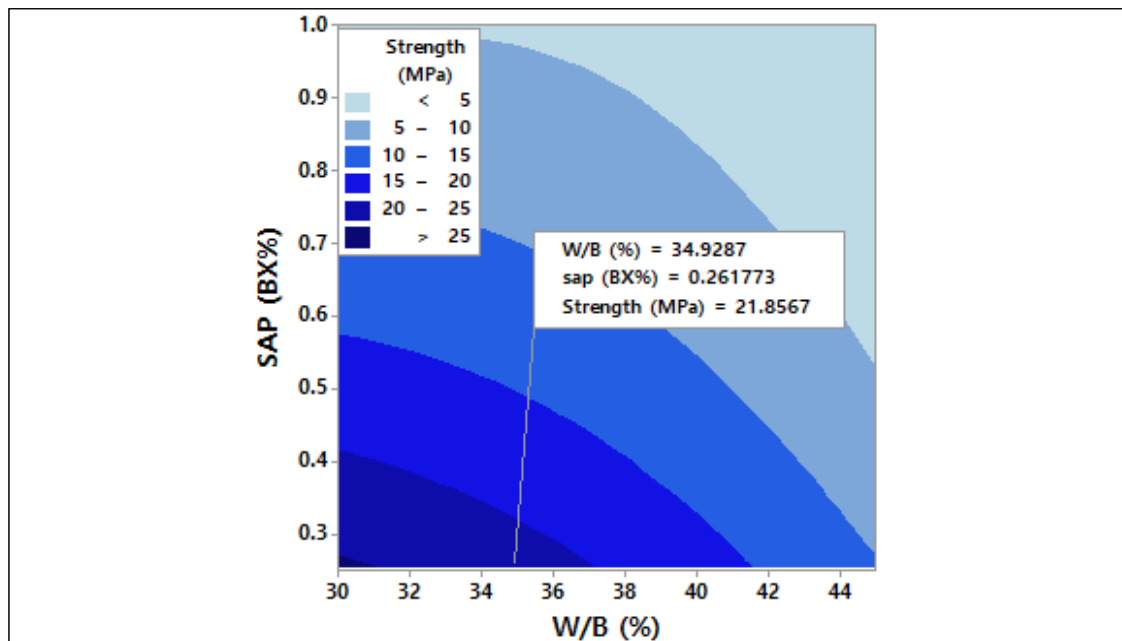
④ 고흡수성수지(SAP)의 최적 첨가량

▪ 그림 3.38 및 그림 3.39는 다중 반응 최적법을 통한 실험 데이터 기반 플로우 및 압축강도 예측 값을 나타낸 것임. 최대 작업성을 얻기 위한 SAP의 혼합량은 0.25% 영역 및 W/B 36~45% 이상인 것으로 분석되었지만 최대 압축강도를 얻기 위한 조건은 SAP의 혼합량은 0.25% 영역 및 W/B 30%인 것으로 분석되었음.

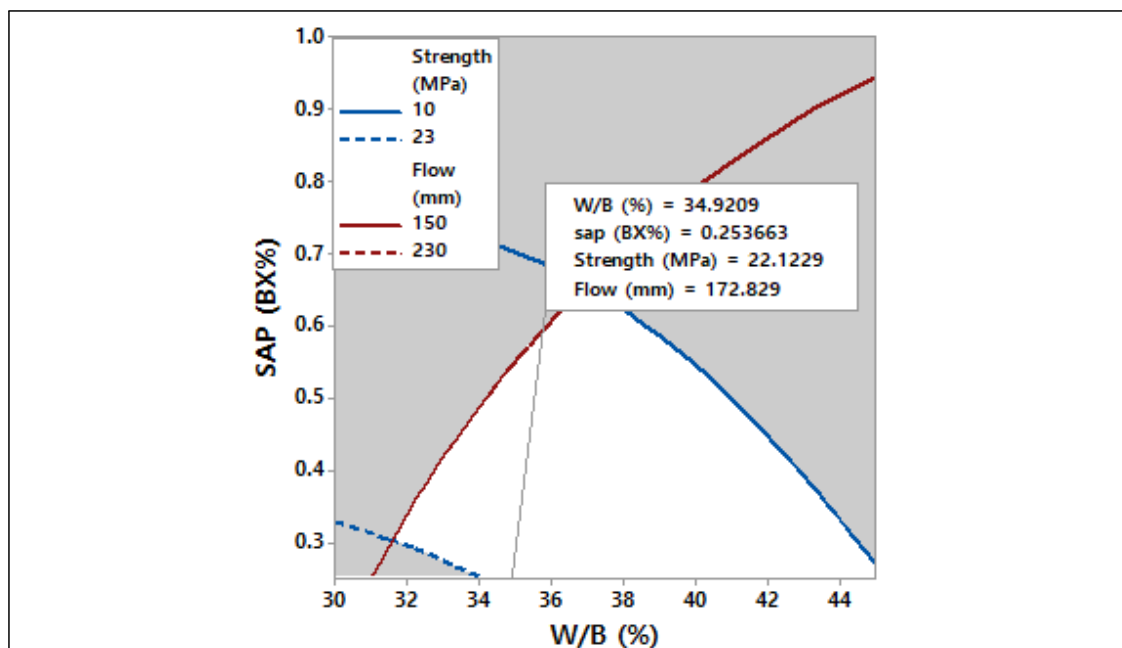
▪ 이에 따른 최적 SAP의 혼합량은 최소 목표 플로우 200 mm 및 최소 목표 압축강도 10 MPa를 만족하는 범위는 SAP 혼합량 0.25% 영역에서 W/B 35% 범위를 적용하였을 경우 얻을 수 있는 압축강도는 최대 20 MPa를 상회하는 것으로 분석되어 적합할 것으로 판단됨.

▪ 그러나 최소 목표 플로우 만족하지 못하는 결과는 SAP 혼합에 따른 배합수의 감소를 고려하지 않았기 때문에 최종단계에서 SAP의 수분흡수량 만큼 추가 배합수를 첨가할 경우 최소 목표 플로우를 만족할 수 있을 것으로 판단됨.





[그림 3.39] W/B 및 SAP 첨가량에 따른 압축강도



[그림 3.40] 목표 플로우 및 압축강도에 따른 SAP 혼합량과의 관계

2. (미)생물 착근이 착근된 생물학적 다층구조 콘크리트 판넬 개발 (2차년도)

가. 생물학적 콘크리트의 품질특성

(1) 생물학적 수용성에 영향을 미치는 콘크리트의 물리적 특성

▪ 콘크리트는 굳지않은 상태에서는 작업에 적합한 워커빌리티를 가져야 하고, 굳은 상태에서는 설계시 의도한 강도, 내구성, 수밀성 및 강재 보호성능을 가지고 있으며 균질하여야 함. 이와 같은 사항을 만족시키기 위해서는 재료, 배합방법을 적절히 선정해야 하고, 혼합, 운반, 타설, 다짐, 양생 등의 시공과정 전반에 걸쳐 철저한 관리가 필요함.

▪ 그러나 생물학적 수용성을 향상시키기 위하여 사용되는 기포제, 고흡수성수지와 같은 요소들은 콘크리트의 기본 성능인 강도를 크게 저하시키게 됨. 이러한 원인은 기포제를 사용함으로써 매트릭스 내부를 치밀하게 하지 못하고 이는 강도 저하로 이어지게 되며, 최종적으로 내구성에 문제가 발생함.

▪ 고흡수성수지의 경우에도 재료 자체가 반응하지 못하며, 내부에 불순물로 존재하기 때문에 사용량이 증가할수록 콘크리트의 물리적 성질에 영향을 미치게 됨. 따라서 생물학적 수용성을 가진 콘크리트를 제조하기 위해서는 여러 변수를 고려하여야 함.

▪ 생물학적 수용성의 대표적인 성능으로써 수분의 이동이 용이하도록 열린 공극을 형성하기 위한 발포, 표면의 거칠기를 확보하기 위한 표면에서의 기포작용, 내부로 이동된 수분이 내부에 포집되도록 첨가재의 작용, 내부에 포집된 수분이 가능한한 장기간 보습상태를 유지할 수 있는 보습작용 등을 고려하여야 함.

▪ 생물학적 수용성을 만족할 수 있으면서 콘크리트의 물리적 특성을 만족하기 위해서는 최소한의 목표 강도를 만족하는 수준에서 생물학적 수용성을 향상시킬 수 있는 요소 반영이 중요한 설계 지표임. 또한, 재료자체의 pH에 의한 영향도 중요한 요소임.

▪ 현 생물학적 판넬에 관련된 관련 규격이 없어 본 연구에서는 생물학적 판넬의 목표 강도를 조경설계기준에 의하여 녹화용 식생불력(벽면녹화) 강도기준인 7.64 MPa 이상인 10 MPa를 목표 강도로 설정하였음.

(2) 국내형 생물학적 판넬용 콘크리트 개발

(가) 생물학적 시멘트의 기초물성 검토 및 선정

▪ 기포 시멘트 복합재료로 적용 가능한 재료적 고찰을 하였으며, 후기포 방식을 적용한 시멘트 복합재료의 품질특성을 평가하였음. 시멘트 복합재료(Cement Composite Materials, 이하 CCM으로 약함)는 3수준의 결합재를 사용하였음.

▪ 국내 H사의 1종보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)를 사용 한 시멘트 복합재료(이하 OPC로 약함), 국내 U사의 알루미나시멘트(Alumina Cement)를 사용한 시멘트 복합재료 (이하 AC로 약함) 및 1,500 ° C 이상에서 고온 소성된 국내 D사의 사소 마그네시아시멘트(Dead Magnesia Cement(MgO),이하 M으로 약함)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 MPPC 로 약함)를 사용하였음.

▪ MPPC의 경화반응제는 제 1 인산칼륨(Potassium Phosphate Monobasic, KH₂PO₄, 이하 P로 약함)과 지연제로 붕산(Boric acid 99 %, H₃BO₃, 이하 R로 약함)을 사용하였음. 표 3.26은 사용된 결합재의 주요 화학 성분 및 물리적 특성을 나타낸 것임.

▪ 시멘트 복합재료에 후기포 방식을 적용하여 기포 시멘트 복합재료(Formed Cement Composite Materials, 이하 FCCM)를 제조하였음. 후기포 방식은 결합재와 반응하여 기포를 발생시키는 매커니즘을 가지고 있으므로 결합재에 따라 기포 반응재료(Forming Material, 이하 FM으로 약함)를 달리하였음.

[표 3.26] 기포 모르타르의 배합표

Type	W/B(%)	Binder		R	FM
		Cement	P		
OPC	35	1	-	-	1.0% (on OPC)
	40				
	45				
AC	35	1	-	-	1.0% (on AC)
	40				
	45				
MPPC	30	0.5	1	3.0% (on MPPC)	1.0% (on MPPC)
	40				
	45				

▪ OPC 및 AC는 알루미늄 분말과 시멘트가 수화과정에서 생성되는 수산화칼슘 성분과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 U사의 알루미늄 분말(Aluminum Powder, 이하 AI로 약함)을 MPPC는 인산염에 산성이온과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 D사의 탄산수소나트륨(NaHCO_3)을 사용하였음.

▪ OPC와 AC의 혼합은 각각 FM(AI)을 투입하여 약 2분간 건비빔을 하였으며, MPPC의 혼합은 P 및 R을 투입하여 약 2분간 건비빔을 실시한 다음 배합수 및 FM 투입 후 1속 1분, 2속 2분 믹싱 후 토출하였음. MPPC의 P:M은 예비시험을 통하여 적절한 P:M비인 0.5를 적용하였음.

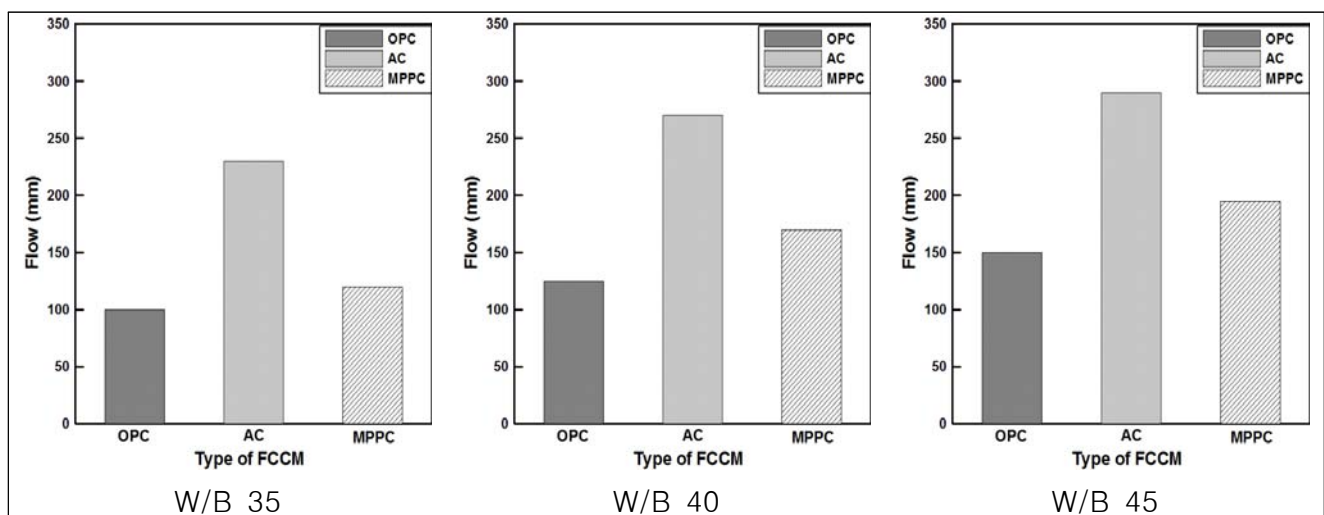
1) 테이블 플로우

▪ FCCM의 플로우는 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 플로우를 측정하였음. W/B 에 관계없이 FCCM는 AC의 플로우가 가장 큰 것으로 나타났으며, OPC의 플로우가 가장 낮은 것으로 나타남.

▪ 이러한 원인은 OPC의 경우 FM의 첨가와 함께 점성이 증가하는 경향이 나타나 플로우콘을 들어올렸을 때 점성이 높은 경우의 현상이 발생함에 따라 유동성이 없는 결과가 나타남. 그러나 AC의 경우 OPC와 비교하여 재료자체의 밀도가 약 9% 낮기 때문에 혼합에 사용되는 결합재의 절대량이 감소하게 되어 상대적으로 점성이 적게 작용된 원인에 기인한 것으로 판단됨.

▪ 그러나 MPPC의 경우에는 속경성인 특징을 가지는 재료이지만 급결을 방지하고 작업성을 확보하기 위하여 응결지연제가 첨가되었기 때문에 OPC와는 다르게 유동성을 가질 수 있는 것으로 판단됨. OPC의 플로우는 W/B 5% 증가에 따라 약 20% 향상되는 경향이 나타났으며, MPPC의 플로우의 경우 W/B 5% 증가에 따라 약 30% 증가되는 경향이 나타남. AC의 플로우는 W/B 5% 증가에 따라 약 10% 향상됨.

▪ 또한 W/B 증가에 따라 FCCM의 관계없이 일반적인 W/B 이론과 같이 플로우가 증가하는 경향이 나타남. 이러한 결과를 통하여 플로우 결과만을 평가하였을 경우에는 생물학적 판넬용 모재료의 성형시 AC가 유동성이 크기 때문에 작업성에 유리할 것으로 판단됨.



[그림 3.41] 플로우 측정 결과

2) 압축강도

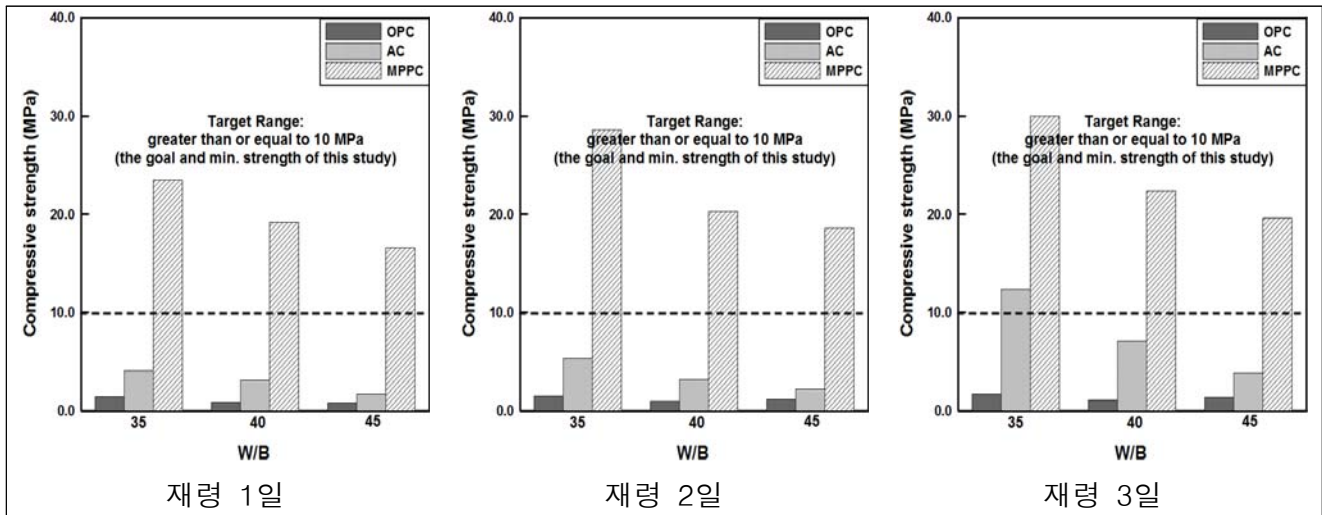
▪ FCCM의 압축강도는 “KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 50×50×50 mm 큐브형 공시체를 제조하여 24시간 기건 양생을 실시한 다음 탈형을 실시하였으며, 재령일에 도달시점에 만능시험기(UTM)를 통하여 압축강도를 측정함.

▪ 재령 1일, 재령 3일 및 재령 7일 압축강도 실험결과 결과 W/B 35의 OPC는 재령 1일, 3일 및 7일 압축강도가 2 MPa를 상회하는 수준으로 나타났으며, W/B 증가에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타남에 따라 최소 요구강도인 10 MPa를 발현하지 못하는 결과가 나타남.

▪ OPC의 경우 목표강도 미달에 따라 부적합 한 것으로 판단됨. AC는 재령 1일 및 재령 3일 압축강도가 W/B 35일 경우 5 MPa를 상회하는 수준으로 나타났으며, W/B 증가에 따라 비례적으로 감소함. W/B 35의 경우 AC의 재령 7일 압축강도는 소요 강도 이상을 만족하는 것으로 나타났지만 W/B 40 및 W/B 45의 경우에는 소요 강도 이하인 것으로 나타나 강도기준에서 생물학적 판넬용 모 재료를 고려할 경우에는 AC의 경우 W/B 35의 재령 7일 이상이 가능할 것으로 판단됨.

▪ 그러나 MPPC의 경우에는 재령 1일 압축강도가 W/B에 관계없이 소요 강도 이상을 만족하는 결과가 나타났으며, W/B 35 재령 7일 압축강도의 경우 최대 30 MPa를 상회하는 결과가 나타났으며, W/B 감소에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타남.

▪ 따라서 MPPC의 경우에는 강도기준에서 생물학적 판넬용 모 재료를 고려할 경우 모든 경우에서 가능할 것으로 판단되지만 플로우에 의한 작업성 및 생물학적 수용성에 대한 검토와 함께 고찰하여 적합한 혼합비를 적용하는 것이 필요할 것으로 판단됨.



[그림 3.42] 압축강도 측정 결과

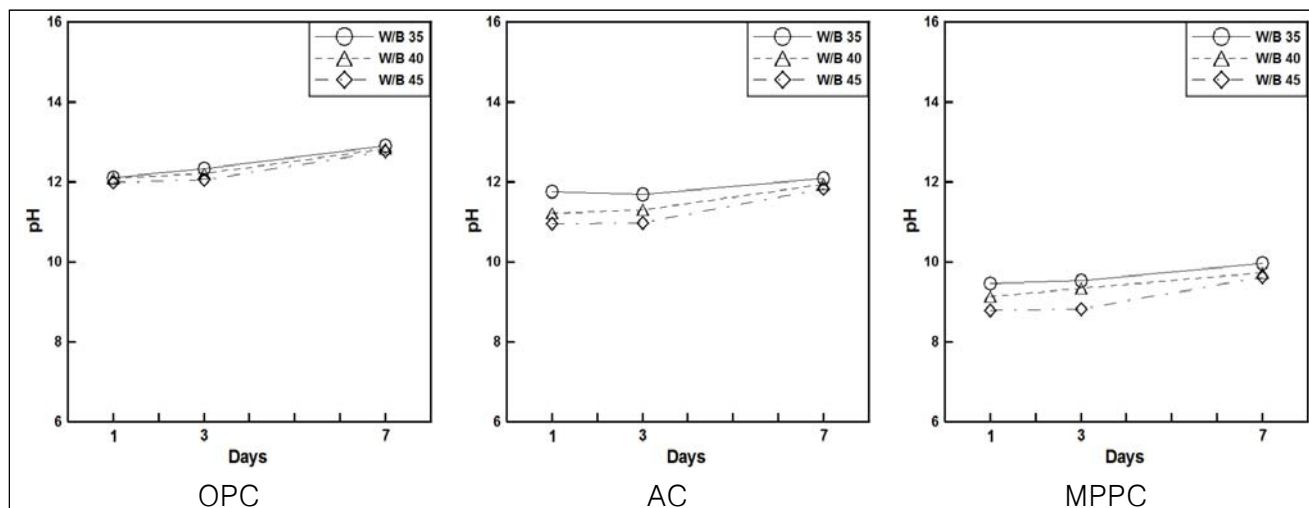
3) pH 수준

▪ FCCM의 pH는 국내 H사의 PH Electrode모델을 사용하여 KS M 0011 “수용액의 pH 측정 방법”에 준하여 페이스트 분쇄법에 따라 시료를 가공하여 FCCM의 pH를 측정하여 FCCM의 pH 수준과 재령일에 따른 pH 수준을 검토함.

▪ 재령 1일, 재령 3일 및 재령 7일의 pH 측정결과 OPC의 경우 재령이 증가함에 따라 증가하는 경향이 나타났으며, OPC는 일반적으로 pH 12-13이상의 강알칼리 재료이기 때문에 재령이 경과할수록 pH가 약 13 강알칼리에 가까워 지는 것으로 판단됨.

▪ AC의 경우 OPC의 화학성분과 비교하여 CaO 함량이 적기 때문에 반응할 수 있는 CaO 감소에 따른 Ca(OH)_2 의 저하로 OPC와 상대적으로 pH가 감소하는 것으로 판단됨.

▪ 초기 pH가 약 알칼리 영역에서 재령이 경과함에 따라 pH가 약 12에 가까워 지는 경향이 나타나 알칼리 영역에 가까워지는 것으로 판단됨.



[그림 3.43] pH 측정 결과

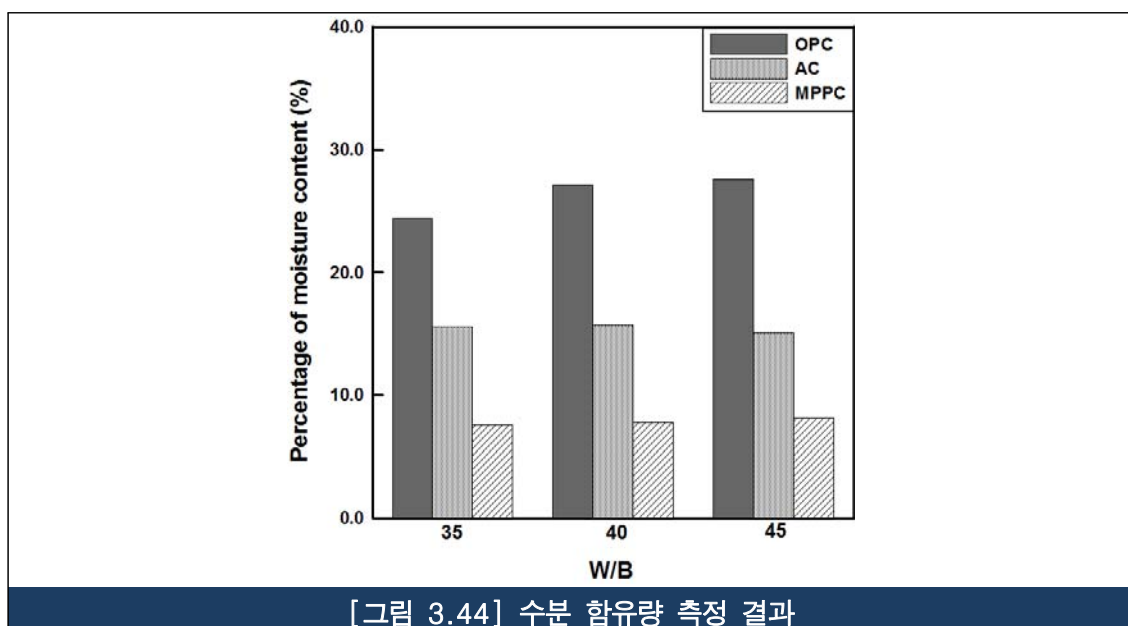
- MPPC의 pH는 초기 pH 약 8 수준에서 재령이 경과함에 따라 재령 7일 pH가 약 9 수준으로 증가하는 경향이 나타나 중성 영역에 가까운 것으로 판단됨.
- 구조재가 아닌 외장재로 사용되는 판넬의 경우에는 될 수 있는 한 중성에 가까울수록 생물학적 수용성에 유리하기 때문에 OPC와는 상대적으로 중성영역에 가까운 AC 또는 MPPC의 활용이 적절할 것으로 판단됨.

4) 수분 함유량

▪ FCCM의 함유량은 전자저울을 사용하여 KS F 2459 “기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법”에 준하여 7일간 시편를 수증양생을 실시하여 습윤상태의 시편의 질량을 측정하였으며, 건조로 넣어 건조상태의 시편의 질량을 측정하였음.

▪ 수분 함유량 시험은 내부의 공극이 많을수록 많은 양의 수분을 함유할 수 있다는 전제하에 정성적으로 평가함. FCCM의 W/B에 따른 수분 함유량 측정결과 OPC의 수분 함유량은 약 20% 이상인 것으로 나타났으며, AC의 수분 함유량의 경우 약 15% 인 것으로 나타남에 따라 OPC의 수분 함유량이 AC의 수분 함유량과 비교하여 약 2배 큰 경향이 있는 것으로 나타남.

▪ 이러한 결과는 OPC와 AC는 FM으로써 동일한 알루미늄 파우더를 사용하였지만 FM이 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 수소가스 발생에 따른 기포 형성 매커니즘을 가지기 때문에 OPC보다 상대적으로 CaO 함량이 적은 AC는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 이 적어지게 되어 기포 형성량이 작아진 것으로 판단됨.



- 또한 OPC와 상대적으로 작은 밀도를 가지는 AC의 경우 총 분체량에서 적게 사용되는 경우가 되기 때문에 기포가 발생하는 데 영향을 미친 것으로 판단되지만 동일한 부피일 경우에는 이러한 결과가 변화할 수 있으므로 추가적인 면밀한 검토가 수행되어야 할 것으로 판단됨.

- MPPC의 수분 함유량은 10% 이하로 나타나 OPC와 AC보다 적은 수준의 기포가 형성됨을 개략적으로 확인할 수 있음. 또한 모든 FCCM은 W/B 증가에 따른 영향은 적은 결과가 나타남. OPC의 경우 상대적으로 수분 함유량이 크기 때문에 (미)생물에 공급하기 위한 수분의 저장이 용이 할 것으로 판단되지만 생물학적 판넬 제조를 위한 작업성 확보 및 소요 강도의 확보가 어렵기 때문에 AC 또는 MPPC에서 최적 혼합비를 도출하여야 할 것으로 판단됨.

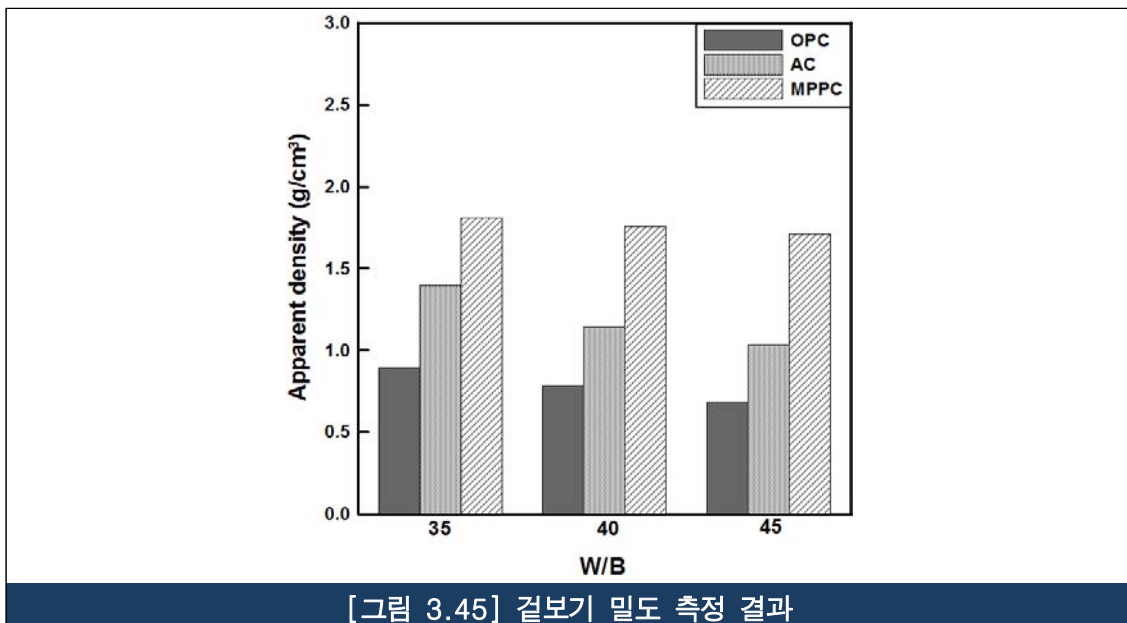
5) 겉보기 밀도

- FCCM의 기포 발생량에 따른 품질 규정이 없기 때문에 종래의 경량 기포 콘크리트 판넬의 규정등급과 비교하고자 KS F 2459 “기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법”에 따라 겉보기 밀도를 측정하였으며, KS F 4914 “경량 기포 콘크리트 패널”의 겉보기 밀도 규정등급과 비교하여 FCCM의 품질 수준을 자체적으로 평가하였다.

- FCCM의 W/B에 따른 겉보기 밀도 측정결과 W/B가 증가할수록 겉보기 밀도는 모든 결합재가 동일하게 감소하는 경향이 나타남. 이러한 결과는 W/B 증가에 따라 유동성이 증가하는 경향이 나타나기 때문에 기포를 발생시키는 가스가 시험편 내부에 균일하게 퍼지기 용이한 조건이 되며, 점성이 낮아지게 되어 기포 발생 조건에 유리해 지기 때문에 W/B 증가에 따라 기포가 상대적으로 다량 발생되어 질량이 작아지는 것으로 판단됨.

▪ 그러나 AC는 수분 함유량의 분석결과에서는 MPPC와 비교하여 소량의 기포가 발생된 것으로 분석되었기 때문에 겉보기 밀도의 경우 MPPC의 겉보기 밀도와 비교하여 큰 값으로 나타나야 하지만 이러한 결과는 AC의 밀도가 MPPC의 밀도보다 상대적으로 작기 때문에 재료자체의 질량의 저감으로 겉보기 밀도가 작아진 것으로 판단됨.

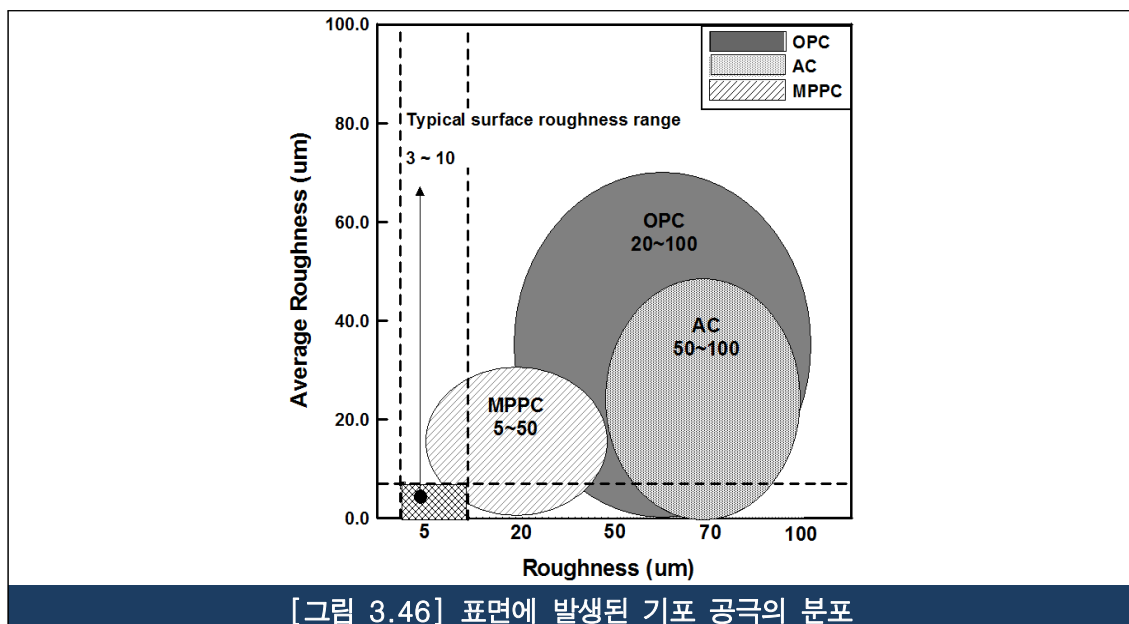
▪ OPC와 비교할 경우에는 OPC의 밀도가 AC와 비교하여 큰 경우에도 수분 함유량 분석결과와 같이 내부 기포량이 약 2배 이상 나타난 것으로 보아 내부 구조적인 측면의 영향이 더 큰 것으로 판단됨.



6) 표면 거칠기

▪ FCCM의 표면 거칠기 측정결과 OPC는 20~100 μm 범위로 평균 약 70 μm 인 것으로 나타났으며, AC의 경우 50~100 μm 범위로 평균 약 50 μm 인 것으로 나타남. 또한 MPPC는 5~50 μm 범위로 평균 약 30 μm 인 것으로 나타남.

▪ 표면 거칠기 측면에서는 OPC가 상대적으로 넓은 범위의 기포를 통하여 표면의 거칠기를 크게 할 수 있을 것으로 판단되며, AC 및 MPPC의 경우 OPC와 비교하여 좁은 범위의 기포가 발생하는 것으로 나타났으나, 기포가 발생되지 않은 표면 거칠기의 경우 약 3~10 μm 범위를 나타나기 때문에 표면의 거칠기를 크게 할 수 있는 것으로 판단됨.

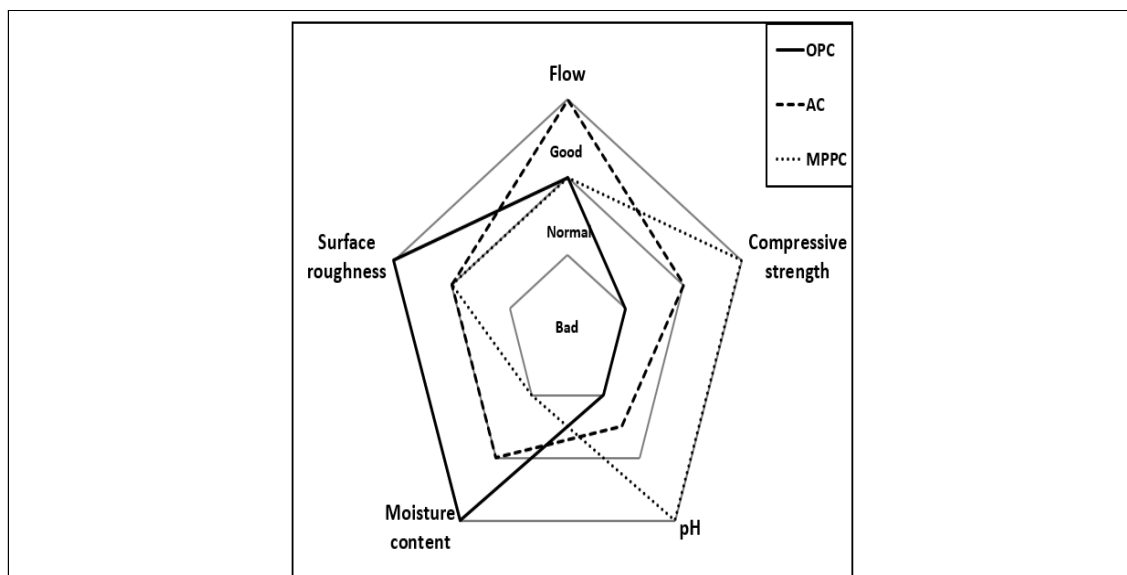


7) 생물학적 시멘트 및 배합 선정

▪ 본 연구에서 평가된 실험의 결과를 자체적인 지표를 통하여 “Good”, “Normal” 및 “Bad” 로 3단계로 구분하여 FCCM의 성능을 나타낸 것임. OPC의 경우 가장 중요한 성능인 목표 강도를 만족하지 못하는 결과가 나타남에 따라 생물학적 수용성에 요구되는 성능이 큰 결과가 나온 경우에도 생물학적 판넬의 모 재료로써 활용이 어려울 것으로 판단됨.

▪ 이러한 결과를 통하여 생물학적 판넬의 모 재료로써 활용하기 위한 FCCM은 AC 및 MPPC를 사용하는 것이 소요의 작업성, 목표 강도를 만족하는 범위에서 생물학적 수용성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨.

▪ 따라서 본 연구에서는 OPC와 AC의 경우 특수 배합비를 적용하고 증기양생을 실시하여 판넬을 제조하고자 하며, MPPC의 경우 상온양생을 실시함. 생물학적 수용성을 증대하기 위하여 목표 성능을 만족하는 수준에서 기포제와 고흡수성수지를 첨가하고자 함.



[그림 3.47] 종합 성능 분석

(나) 생물학적 판넬용 콘크리트의 품질 특성 평가

1) 사용재료

▪ 결합재는 국내 H사의 1종보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 OPC로 약함), 국내 U사의 알루미나시멘트(Alumina Cement)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 AC로 약함) 및 1,500 ° C 이상에서 고온 소성된 국내 D사의 사소 마그네시아시멘트(Dead Magnesia Cement(MgO), 이하 M으로 약함)를 사용한 시멘트 복합재료(이하 MC 로 약함)를 사용하였음.

▪ MC의 경화반응제는 제 1 인산칼륨(Potassium Phosphate Monobasic, $\text{KH}_2\text{P}_4\text{O}_4$, 이하 P로 약함)과 지연제로 붕산(Boric acid 99 %, H_3BO_3 , 이하 R로 약함)을 사용하였음. 표 3.28은 사용된 결합재의 주요 화학 성분 및 물리적 특성을 나타낸 것임.

▪ 시멘트 복합재료에 후기포 방식을 적용하여 기포 시멘트 복합재료를 제조하였음. 후기포 방식은 결합재와 반응하여 기포를 발생시키는 매커니즘을 가지고 있으므로 결합재에 따라 기포 반응재료(Forming Material)를 달리하였음.

▪ OPC 및 AC는 알루미늄 분말과 시멘트가 수화과정에서 생성되는 수산화칼슘 성분과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 U사의 알루미늄 분말(Aluminum Powder, 이하 AI로 약함)을 MPPC는 인산염에 산성이온과 반응하여 기포를 발생시키는 국내 D사의 탄산수소나트륨(NaHCO_3)을 사용하였음.

▪ OPC 및 AC는 국내 H사의 폴리카본산계 고성능 감수제(SP)제를 사용하여 목표 플로우를 만족할 수 있도록 첨가하였으며, MC는 응결 지연을 위하여 지연제(R)을 첨가하였음.

▪ 사용된 잔골재는 KS F 2527에서 규정한 잔골재 표준 입도 범위를 구분하여 입도 조정한 SiO_2 95% 이상의 8호 규사를 사용하였음. 8호 규사는 마그네시아 복합체의 기포 발생을 원활하게 하기 위하여 상대적으로 입도가 작은 골재를 사용하였음.

[표 3.27] 실험에 사용된 결합재의 물리적 특성 및 화학적 성분

Type	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Density (g/cm ³)
OPC	61.6	4.50	19.80	3.57	3.01	3.15
AC	29.4	69.5	0.5	0.5	0.6	2.90
MC	–	0.1	1.1	–	95.68	3.60

[표 3.28] 제1인산칼륨의 화학성분 및 물리적 특성

Type	Purity (%)	pH	Cl (%)	Density (g/cm ³)
KH ₂ PO ₄	99	4.3	0.005	2.34

[표 3.29] 잔골재의 물리적 특성

Type	Density (g/cm ³)	Note
Quartz sand	2.65	60 ~ 150 mesh, More than SiO ₂ 95%

[표 3.30] 붕사의 화학성분 및 물리적 특성

Type	Purity (%)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Density (g/cm ³)
Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	99	75	320	1.73

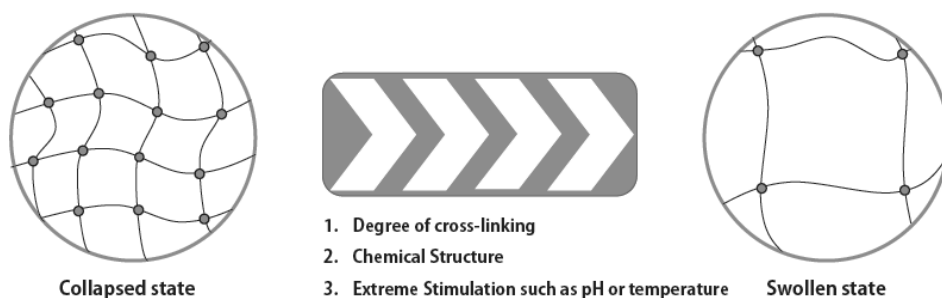
[표 3.31] 탄산수소나트륨 화학성분 및 물리적 특성

Type	Purity (%)	Cl (%)	Fe (%)	Density (g/cm ³)
NaHCO ₃	99	0.005	0.003	2.15

[표 3.32] 고흡수성수지 화학성분 및 물리적 특성

Type	Content (%)	pH	Flash point (°C)	Density (g/cm ³)
SAP	99	5.5~6.5	200	1.11

- 생물학적 판넬의 수분 함유량 및 보습성 향상을 목적으로 고흡수성수지(Super Absorbent Polymer(SAP))를 첨가하였음. 고흡수성수지는 국내 L사의 흰색의 Powder type의 아크릴산 중합체-나트륨염(Acrylic Acid Polymer, Sodium Salt)을 사용함.
- 고흡수성수지는 일반적인 친수성 물질보다 수분흡수능이 큰 재료로서 수용성 고분자 사이를 가교시킴으로 다량의 친수기를 가진 3차원 그물 구조를 가지는 고분자 재료임. 고흡수성수지의 특징은 수분을 흡수할 경우 Gel type으로 변화하여 부피가 팽창하는 특성을 가지고 있으며, 이때의 상태를 Swollen state가 됨.
- 반대로 외부압력, 외기 등에 의하여 흡수된 수분을 제거하면 입자간 그물 구조가 Collapsed state로 변화함. 고흡수성수지의 팽윤성은 입자간 가교 밀도, 고흡수성수지의 화학적 구조, 흡수된 액체의 pH, 온도 및 이온 농도 등에 따라 변화함.
- 고흡수성수지는 물에 용해될 때 고분자 이온과 다수의 저분자 대응이온으로 해리하며, 이러한 수용성 고분자를 일반적으로 고분자 전해질이라 한다. 고흡수성수지의 기본 모체인 폴리아크릴산염은 물에 용해되어 음이온성을 나타내는 대표적인 고분자 전해질임.



[그림 3.48] 고흡수성수지의 물리적 상 변화

2) 실험 계획 및 방법

- 본 연구에서는 생물학적 판넬을 제조하기 위하여 결합재 및 기포제가 생물학적 판넬용 콘크리트의 품질성능에 미치는 영향을 검토하였음. 최종적으로는 생물학적 수용성 향상을 위하여 SAP를 첨가한 배합을 최적 배합으로 도출하고자 함.
- 목표 플로우 및 압축강도를 고려하여 소요 성능을 만족하는 최적 배합비를 도출하기 위하여 주요 변수는 W/B, V_s/V_m , 기포제 첨가량 및 SAP 혼합량을 대상으로 하였으며, 복합체의 품질성능에 미치는 영향을 고려하여 배합비를 선정하였음.
- OPC의 최적배합비는 W/B 20%, V_s/V_m 20%, 기포제 0.5%를 최적 비율로 선정하였으며, AC의 최적배합비는 W/B 10%, V_s/V_m 20%, 기포제 0.5%를 최적 비율로 선정하였음. MC의 최적 배합비는 P:M 1:0.5, W/B 35%, V_s/V_m 10%, 기포제 0.5%를 최적 비율로 선정하였음.
- SAP의 경우 추가 배합수를 혼합한 배합을 검토하였음. SAP는 수분에 노출 즉시 흡수하며, 다량의 물을 흡수하기 때문에 배합수에 영향을 미침. 따라서 SAP 혼합량에 따른 추가 배합수는 사전 실험을 통하여 SAP 혼합량에 따른 추가 배합수의 혼합량을 결정하였음.
- SAP를 0.25% 혼합한 경우에는 SAP를 혼합하지 않은 배합수의 10%를 추가하여 혼합하였을 때 SAP를 혼합하지 않은 배합의 플로우와 동등한 것으로 나타났으며, SAP 0.25% 증가에 따라 약 6%의 추가 배합수를 혼합할 경우 SAP를 혼합하지 않은 배합의 플로우와 동등한 것을 확인하였음. 따라서 SAP 혼합량 4수준에 대하여 각각의 추가 배합수(Extra Water : eW)를 혼합하였음.

[표 3.33] 마그네시아 복합체 실험계획 및 변수

구 분	실험 변수
SAP (B × %)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00
eW (W × %)	SAP 0.25 = 10% SAP 0.50 = 16% SAP 0.75 = 22% SAP 0.10 = 28%

[표 3.34] OPC의 생물학적 콘크리트 배합표 (증기양생)

Type (SAP-eW)	W/B (%)	Vs/Vm (%)	기포제 (B × %)	SAP (B × %)	SP (B × %)
Plain	20	20	0.5	0	0.5~1.0
0.25-10				0.25	
0.5-16				0.50	
0.75-22				0.75	
1.0-28				1.00	

[표 3.35] AC의 생물학적 콘크리트 배합표 (증기양생)

Type (SAP-eW)	W/B (%)	Vs/Vm (%)	기포제 (B × %)	SAP (B × %)	SP (B × %)
Plain	10	20	0.5	0	0.5~1.0
0.25-10				0.25	
0.5-16				0.50	
0.75-22				0.75	
1.0-28				1.00	

[표 3.36] MC의 생물학적 콘크리트 배합표 (상온양생)

Type (SAP-eW)	W/B (%)	Vs/Vm (%)	P (Vol.)	M (Vol.)	기포제 (B × %)	SAP (B × %)	R (M × %)
Plain	35	10	1	0.5	0.5	0	3
0.25-10						0.25	
0.5-16						0.50	
0.75-22						0.75	
1.0-28						1.00	

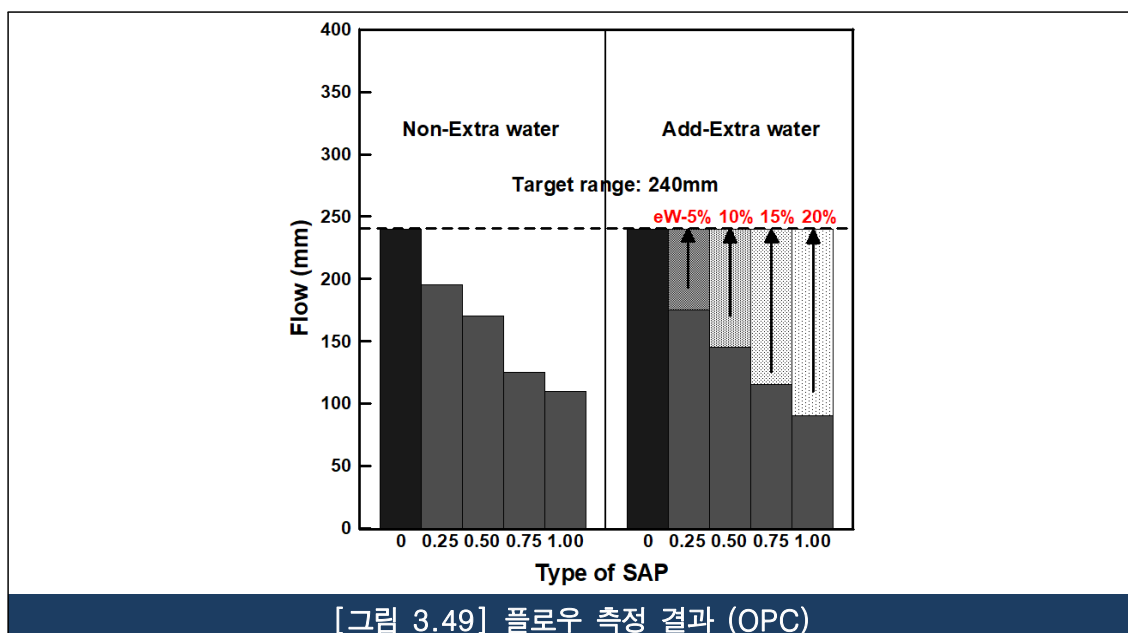
3) 일반 시멘트(OPC)를 활용한 생물학적 콘크리트의 기초 품질

① 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)에 따른 플로우 측정결과 추가수를 혼합하지 않은 경우 SAP 사용량 증가에 따라 플로우가 약 20% 감소하였으며 혼합률 0.25% 증가에 따라 약 15~30% 감소하는 경향이 나타남. SAP 혼합량 1%의 경우 최대 60% 감소하는 것으로 나타남.

▪ 추가수를 혼합한 경우에는 SAP를 혼합하지 않은 플로우와 동등수준의 플로우를 얻을 수 있었으며, 목표 플로우 범위를 만족하는 것으로 나타남.



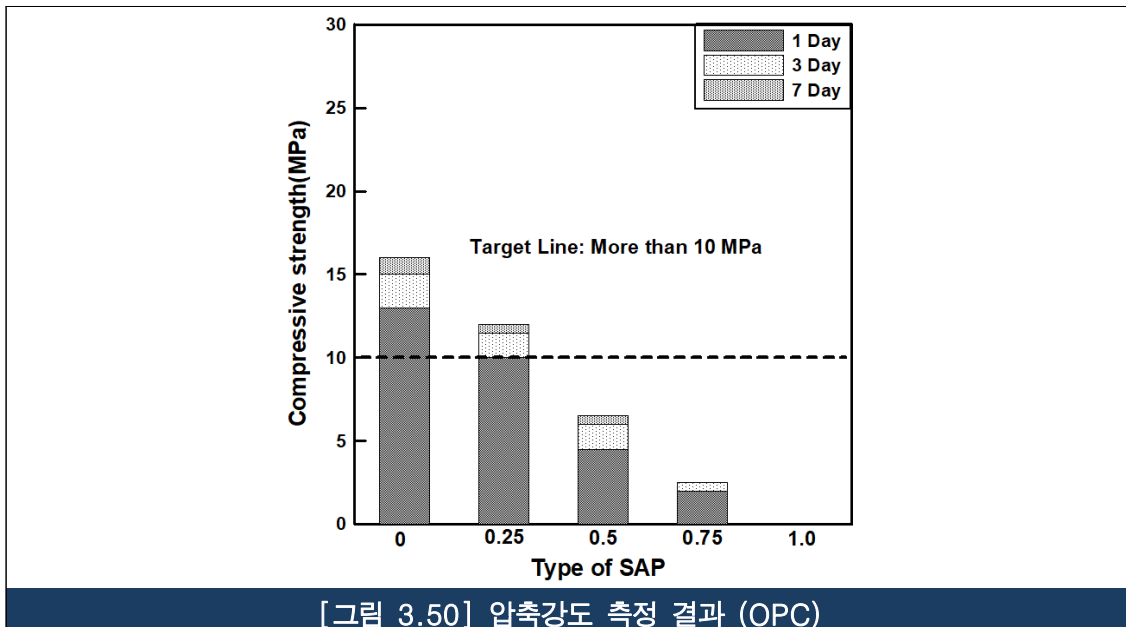
② 압축강도

▪ 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

▪ 재령(1일, 3일 및 7일) 및 SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%)에 따른 W/B와 압축강도 측정결과 SAP 0.25%의 경우 SAP 0%와 비교하여 약 15% 압축강도가 감소하는 경향이 나타남.

▪ SAP 0.25% 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 압축강도가 20~30% 감소하는 경향이 나타남. 혼합률 1%의 경우 증기양생을 실시한 경우에도 강도 발현이 불가능한 것으로 나타남.

▪ OPC를 사용한 생물학적 콘크리트는 목표 강도를 기준으로 SAP 혼합률 0.25% 이상이 적합할 것으로 판단됨.



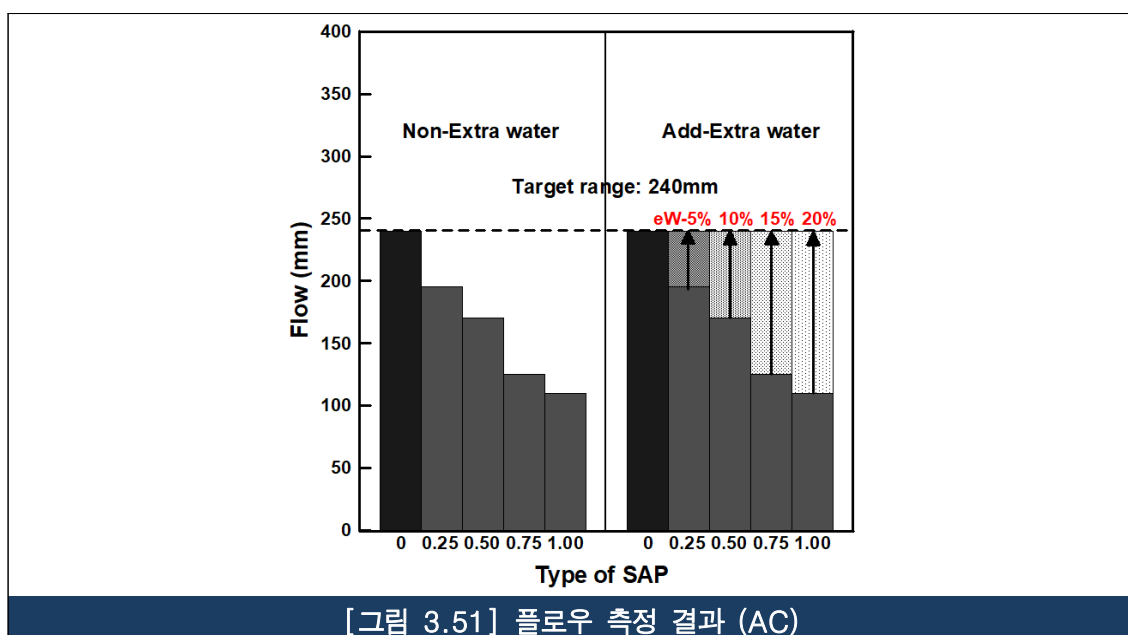
4) 알루미나 시멘트(AC)를 활용한 생물학적 콘크리트의 기초 품질

① 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)에 따른 플로우 측정결과 추가수를 혼합하지 않은 경우 SAP 사용량 증가에 따라 플로우가 약 20% 감소하였으며 혼합률 0.25% 증가에 따라 약 15~30% 감소하는 경향이 나타남. SAP 혼합량 1%의 경우 최대 60% 감소하는 것으로 나타남. 이러한 결과는 일반 시멘트와 동일한 결과가 나타남.

▪ 추가수를 혼합한 경우에는 일반 시멘트와 동일하게 SAP를 혼합하지 않은 플로우와 동등수준의 플로우를 얻을 수 있었으며, 목표 플로우 범위를 만족하는 것으로 나타남.



[그림 3.51] 플로우 측정 결과 (AC)

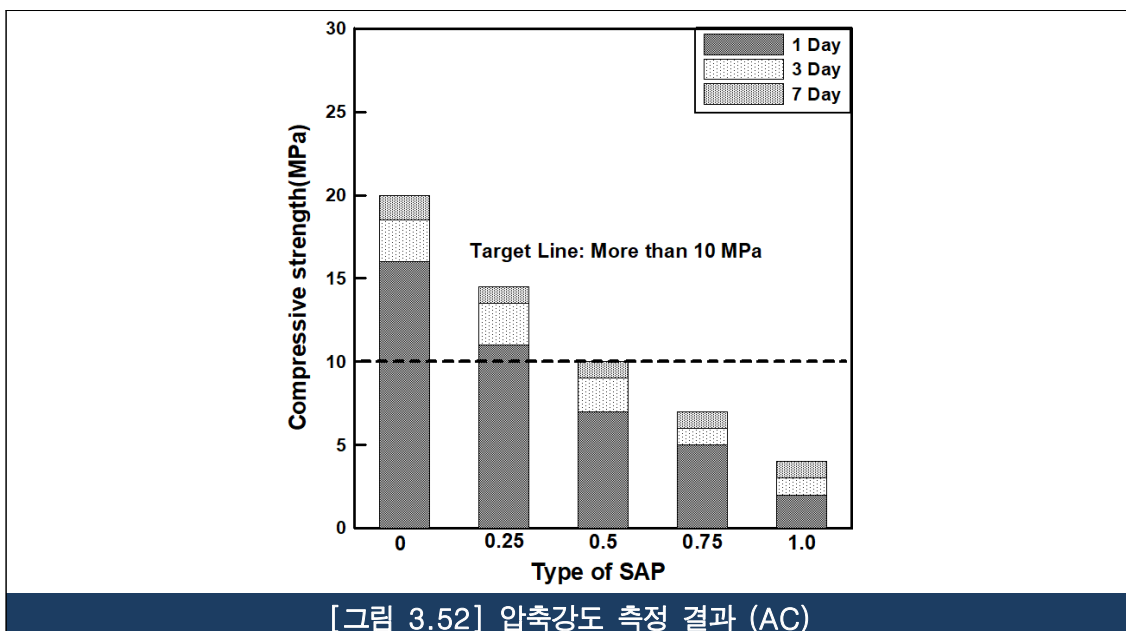
② 압축강도

▪ 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

▪ 재령(1일, 3일 및 7일) 및 SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%)에 따른 W/B와 압축강도 측정결과 SAP 0.25%의 경우 SAP 0%와 비교하여 약 30% 압축강도가 감소하는 경향이 나타남.

▪ SAP 0.25% 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 압축강도가 20~30% 감소하는 경향이 나타남. 이러한 결과는 OPC의 결과와 동일한 것으로 판단됨.

▪ AC를 사용한 생물학적 콘크리트는 목표 강도를 기준으로 SAP 혼합률 0.25 % 및 0.50%가 적합할 것으로 판단되지만 오차율을 고려할 경우 안정적인 강도 확보를 위해서는 0.25%를 적용하는 것이 적합할 것으로 판단됨.



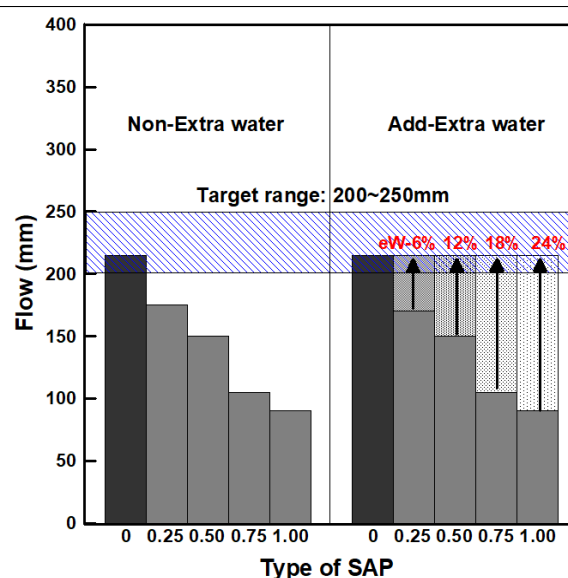
5) 마그네시아 시멘트(MC)를 활용한 생물학적 콘크리트의 기초 품질

① 플로우

▪ 테이블 플로는 “KS L 5111 수경성 시멘트 시험용 플로 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 12.7 mm의 높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였음.

▪ SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)에 따른 추가 배합수 적용과 플로우 측정결과 OPC와 AC와 동일하게 추가수를 혼합하지 않은 경우 SAP 사용량 증가에 따라 플로우가 약 30% 감소하였으며 혼합률 0.25% 증가에 따라 약 15~30% 감소하는 경향이 나타남.

▪ 이러한 원인은 마그네시아 시멘트의 급결성능을 제어하기 위하여 지연제 첨가로 충분한 작업성을 확보하였지만 SAP의 수분흡수 성능이 더 크게 작용하기 때문에 배합하기 위한 배합수의 절대량 부족으로 플로우가 감소하는 것으로 판단됨.



[그림 3.53] 플로우 측정 결과 (MC)

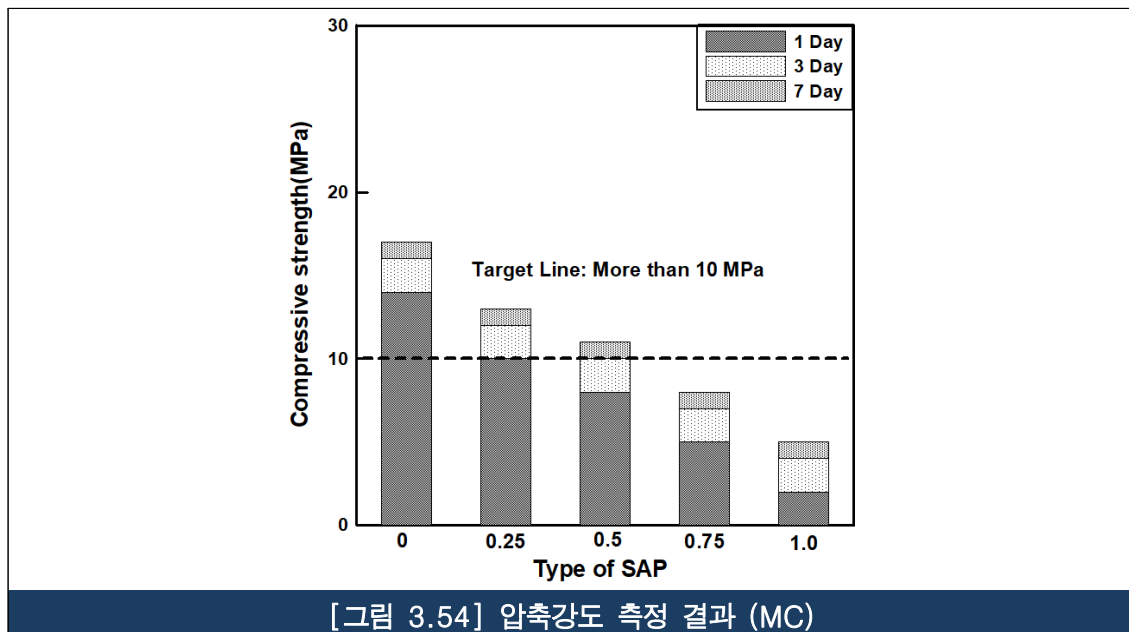
- 이러한 결과를 통하여 충분한 작업성을 확보하기 위해 SAP가 흡수한 수량만큼 추가 배합수를 첨가하는 방법이 있으며, 추가 배합수의 혼합량은 작업자, 바인더 종류 및 SAP 흡수특성 등에 따라 달라지기 때문에 정량화 할 수 없는 것으로 보고되고 있음.
- SAP 혼합률에 따른 배합수의 감소수준에 대한 보정을 위하여 추가 배합수(eW)를 사용한 플로우의 결과 추가 배합수(eW)를 사용한 경우 모든 배합은 SAP를 혼합하지 않은 플로우와 동등수준으로 목표 플로우 범위를 만족하는 것으로 나타남. 추가 배합수 분석 결과를 통하여 복합체의 플로우 측면에서 고찰할 경우 추가 배합수(eW)는 작업성 확보를 위하여 중요하지만 SAP 혼합률과 W/B 증가에 따른 압축강도를 고려하여 최적 SAP 혼합률을 결정하여야 할 것으로 판단됨.
- MC를 사용한 생물학적 콘크리트는 목표 강도를 기준으로 SAP 혼합률 0.25% 및 0.50%가 적합할 것으로 판단됨.

② 압축강도

- 압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 수증 양생을 실시하였음. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였음.
- 재령(1일, 3일 및 7일) 및 기포제(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 및 1.00%)에 따른 W/B와 압축강도 측정결과
- 재령(1일, 3일, 및 7일)에 따른 SAP(0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%)와 압축강도측정 결과 SAP를 혼합하지 않은 압축강도와 비교하여 SAP 0.25% 혼합한 압축강도의 경우 약 20% 감소하는 경향이 나타났으며, SAP 0.5% 증가함에 따라 압축강도가 비례적으로 약 15% 감소하는 경향이 나타남.

▪ 이러한 원인은 SAP가 배합수를 흡수하기 때문에 마그네시아 시멘트의 급결 현상이 유도되어 작업성이 불량하고 충분한 반응이 이루어지지 못하여 압축강도가 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단되지만 추가 배합수(eW)를 혼합하여 작업성을 확보하였기 때문에 작업성 저하로 인한 다짐불량 및 급결현상에 의한 영향보다는 SAP가 미반응성 재료로 SAP 혼합량이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향이 있는 것으로 판단됨.

▪ 이러한 결과를 통하여 목표 압축강도를 만족하기 위한 최적의 SAP 혼합률은 0.5% 이하인 것으로 판단됨. 재령 7일 압축강도를 기준으로 요구 조건을 만족하는 최적의 SAP 및 W/B의 범위를 통계적 분석을 통하여 품질 예측 모델식을 제안하였음.



③ MC의 품질 모델식

▪ 본 연구에서는 마그네시아 시멘트를 활용한 생물학적 콘크리트의 품질을 예측할 수 있는 모델식을 제시하고자 하였음. 마그네시아 시멘트를 사용한 연구사례에서는 정량화된 결과가 부재하며, 참고가 어려움. 또한 실제 제조하지 않을 경우 쉽게 예측이 불가능 하다 판단되어 실험결과를 기반으로 기초 품질 예측 모델식을 제안함.

▪ 영향요인은 W/B, Vs/Vm, 기포제 첨가율 및 SAP 혼합률에 대하여 플로우 및 압축강도를 예측하기 위한 품질성능 모델식을 본 연구 데이터를 기반으로한 경험식을 제시하였음. 표 3.37은 모든 실험군에 대한 플로우의 분산분석 결과를 나타낸 것이며, 식 3.2는 실험결과에 기반한 마그네시아 복합체의 플로우 예측 모델식을 나타낸 것임.

[표 3.37] 반응표면 분산분석 (플로우)

Source	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	P
Factor*	4	151048	37761.9	124.94	0.000
Factor of Squares	4	4252	1063.1	3.52	0.015
interaction	4	5824	1456.1	4.82	0.003
Error	39	11787	302.2	—	—
Corrected Total	51	258793	—	—	—

* Factor : W/B(%), Vs/Vm(%), 기포제(%), SAP(%)
 - Boundary condition : W/B (%) - 30~45
 Vs/Vm (%) - 10~40
 기포제 (%) - 0.0~1.0 on the binder
 SAP (%) - 0.0~1.0 on the binder

$$\begin{aligned} \text{Flow (mm)} = & -326 + 27.04 A - 8.96 B - 26.9 C - 154.3 D \\ & - 0.3316 A^2 - 0.0623 B^2 - 2.7 C^2 - 31.3 D^2 \\ & + 0.2236 AB + 2.87 AC + 2.25 AD - 126.3 CD \end{aligned} \quad (\text{식 3.2})$$

where,
 A : W/B(%), B : Vs/Vm(%), C : FA(%), D : SAP(%)

▪ 표 3.38은 모든 실험군에 대한 압축강도의 분산분석 결과를 나타낸 것이며, 식 3.3은 실험결과에 기반한 마그네시아 복합체의 압축강도 예측 모델식을 나타낸 것임. 그림 3.55는 식 4.1로부터 유도된 식에 대하여 마그네시아 복합체의 플로우 예측 결과를 W/B 35% 및 Vs/Vm 10%에 대한 기포제 0~1% 및 SAP 0~1%의 플로우 예측결과를 나타낸 것이며, 그림 3.56은 식 4.2로부터 유도된 식에 대하여 마그네시아 복합체의 압축강도 예측결과를 본 실험데이터와 비교하여 나타낸 것임.

[표 3.38] 반응표면 분산분석 (압축강도)

Source	df	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	P
Factor*	4	685.94	171.485	18.92	0.000
Factor of Squares	4	253.58	63.396	6.99	0.000
interaction	4	444.75	111.188	12.26	0.000
Error	39	353.56	9.066	—	—
Corrected Total	51	3542.85	—	—	—

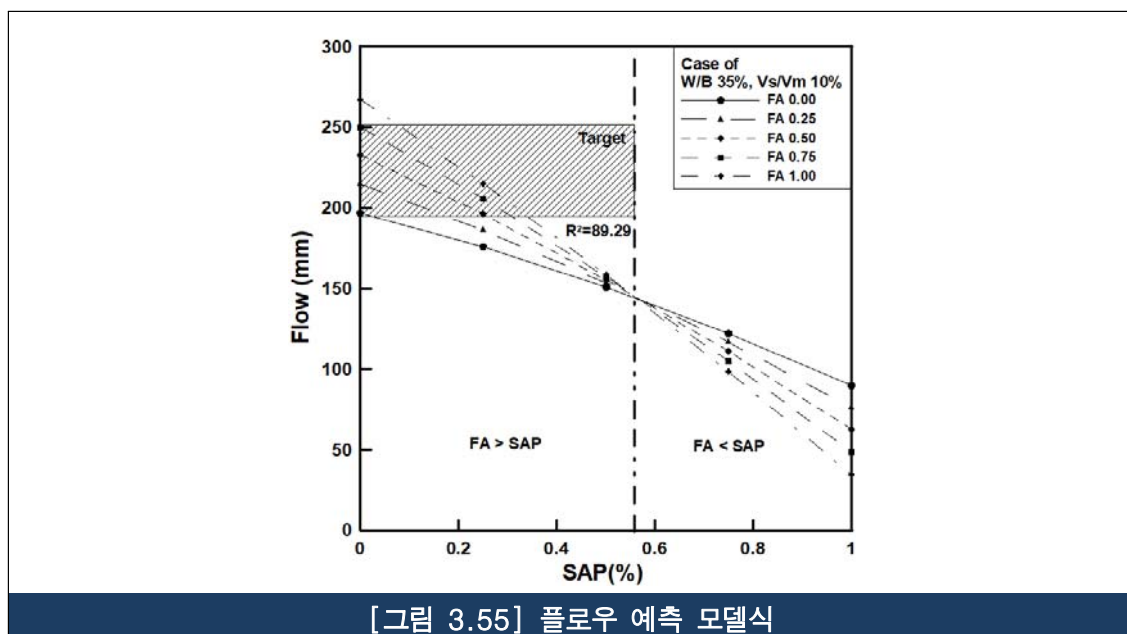
* Factor : W/B(%), Vs/Vm(%), 기포제(%), SAP(%)
 - Boundary condition : W/B (%) - 30~45
 Vs/Vm (%) - 10~40
 기포제 (%) - 0.0~1.0 on the binder
 SAP (%) - 0.0~1.0 on the binder

$$\begin{aligned} \text{Strength (mm)} = & 19.3 + 2.32A - 2.689B - 63.4C - 56.7D \\ & - 0.0517A^2 - 0.00019B^2 + 24.32C^2 + 11.47D^2 \\ & + 0.05726AB + 0.435AC + 0.581AD + 44.0CD \end{aligned} \quad (\text{식 3.3})$$

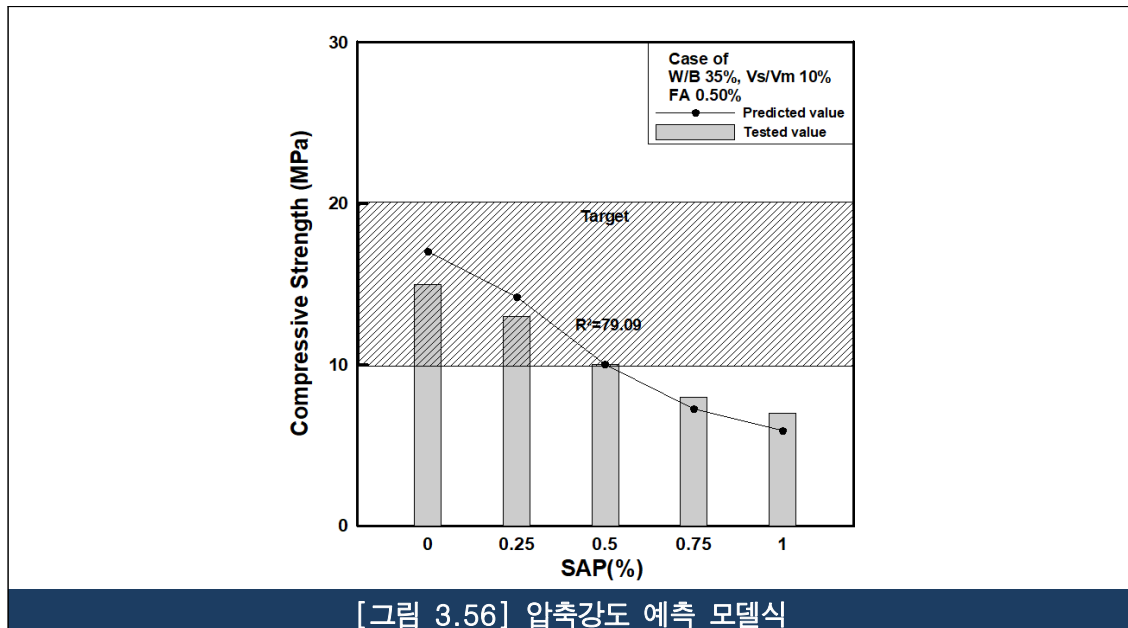
where,
 $A : W/B(\%), B : Vs/Vm(\%), C : FA(\%), D : SAP(\%)$

▪ 그림 3.55의 결과 W/B 35% 및 Vs/Vm 10% 일 경우 기포제 첨가량 및 SAP 혼합량에 따른 플로우의 예측 결과 값을 나타낸 것으로 실험 데이터 분석결과와 같이 기포제 첨가량 증가에 따라 플로우가 증가하는 결과가 나타났으며, SAP 증가에 따라 플로우가 감소하는 결과가 나타남.

▪ 그러나 예측 결과 값에 따르면 SAP 혼합량 약 $0.5\% \pm 0.05\%$ 기점으로 이후 영역에서는 기포제에 의한 플로우 영향 효과 보다 SAP에 따른 영향이 지배적으로 크게 작용하면서 상반되는 결과를 얻는 것으로 분석됨. 회귀 분석을 통한 R2 값은 약 90%로 나타남에 따라 W/B, Vs/Vm, 기포제 및 SAP의 경계조건 내에서 마그네시아 복합체의 플로우를 예측하기 예측식으로 활용 가능 할 것으로 판단됨.



■ 그림 3.56은 생물학적 판넬용 마그네시아 복합체의 최종단계 실험값을 기준으로 W/B 35%, Vs/Vm 10% 및 기포제 0.5%에 따른 SAP 혼합률 4수준의 예측값 및 실험값을 나타낸 것으로 그림 3.56의 결과 R^2 약 80% 수준에서 근사값을 얻을 수 있는 것으로 나타남.



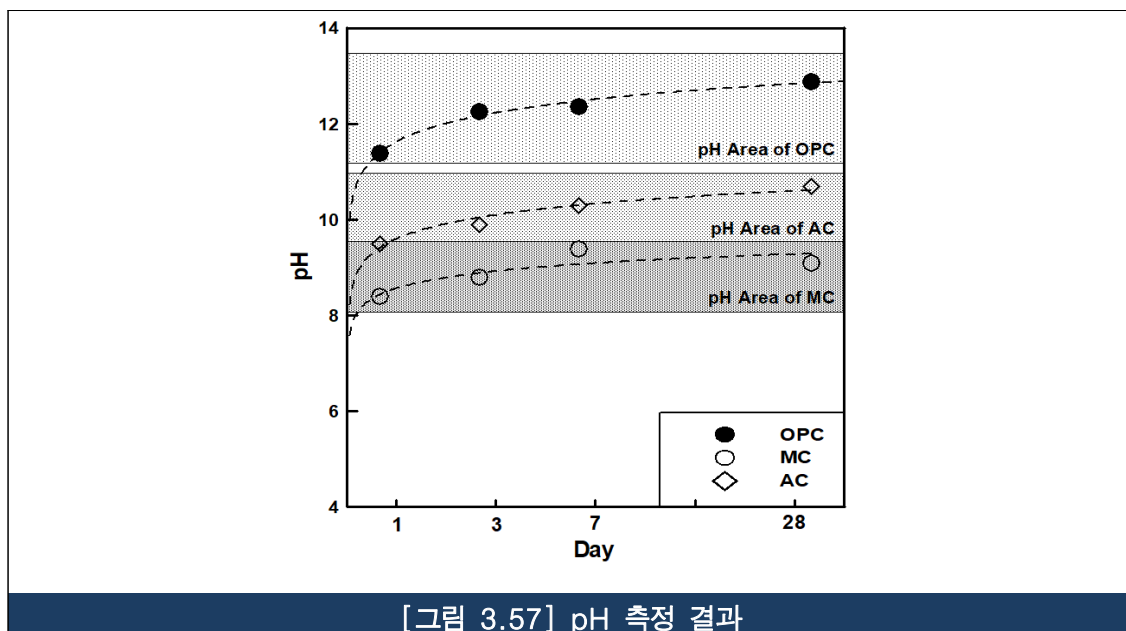
(다) 생물학적 판넬용 콘크리트의 생물학적 수용성

1) pH 특성

▪ pH는 국내 H사의 PH Electrode모델을 사용하여 KS M 0011 “수용액의 pH 측정 방법”에 준하여 페이스트를 분쇄하여 증류수에 침지후 pH를 재령일에 따라 측정하였음.

▪ 생물학적 판넬용 콘크리트(Magnesia Composites, 이하 MC로 약함)의 생물학적 특성은 최종단계에서 제시된 W/B 35%, Vs/Vm 10% 및 기포제 0.5%에 따른 SAP 0.25%에 대하여 평가를 실시하였음. 목표 플로우 및 압축강도를 만족하는 범위는 SAP 0.5%까지 사용가능한 것으로 나타났으며, 이에 따른 pH 특성 평가를 실시하였음.

▪ OPC 및 MC에 따른 pH의 측정 결과 동일한 배합조건에서 OPC의 경우 재령에 따라 pH가 증가하는 경향을 나타냈으며, pH 13에 수렴하는 결과가 나타남. 그러나 MC의 pH는 재령 7일 pH 10 수준까지 증가하는 경향이 나타났으며, 이후 점차 pH 9 수준으로 감소하여 수렴하는 결과가 나타남.



▪ 이러한 결과는 마그네시아 시멘트의 경우 사용되는 인산염의 종류에 따라 pH 7~9 수준의 값을 가지는 것으로 알려져 있으며, pH 11~12 이상을 띄는 일반적인 시멘트와는 달리 모재 자체가 상대적으로 중성영역에 가깝기 때문에 생물의 성장 환경에 미치는 생물학적 수용성에 유리한 측면이 있을 것으로 판단됨. 또한 SAP에 따라 추가 배합수(eW)가 적용되었지만 pH의 대한 변화는 크지 않은 것으로 판단됨.

▪ AC의 경우 OPC와 MC의 중간영역에 해당하는 것으로 나타났으며, OPC보다 pH 범위가 낮은 것으로 나타났지만 MC보다는 큰 것으로 나타나 약 10~11에 수렴하는 결과가 나타남.

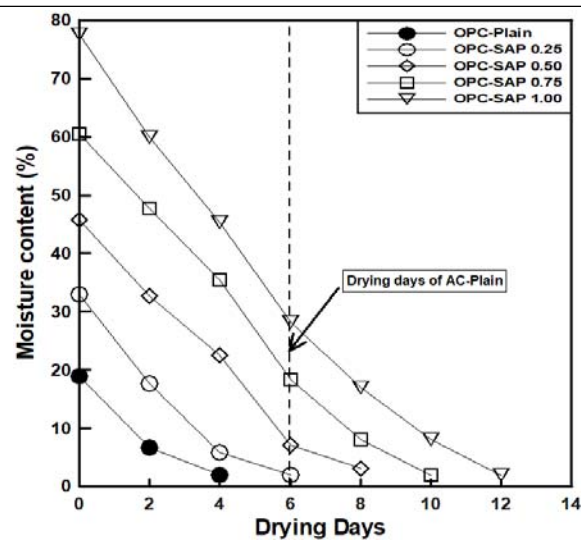
2) 보습 특성

▪ 보습 특성(수분함유량)은 KS F 2459 “기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법”에 준하여 완전 건조된 시편의 무게를 측정한 후 1일간 수중양생으로 수분포화 상태로 만들어 전자저울을 사용하여 최초 건조무게까지 도달하는 시간을 항온항습실에서 정성적으로 측정하였음.

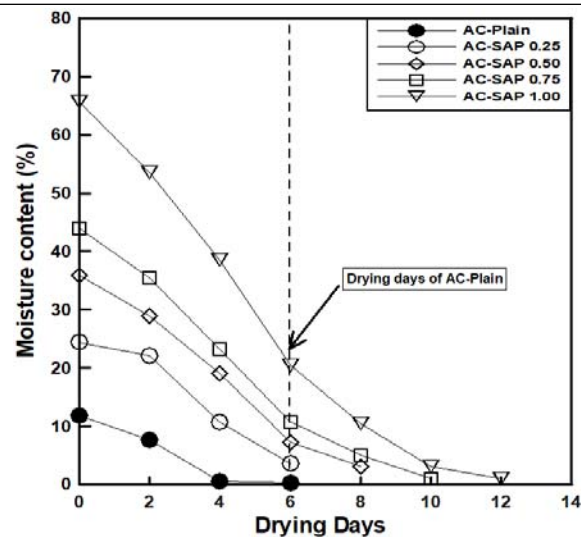
▪ 건조일과 수분 함유량 측정 결과 SAP가 혼합되지 않은 함수량은 건조질량과 비교하여 약 15% 수준인 것으로 나타났으며, 시간 경과에 따라 감소하여 5일 이후 건조상태가 되는 것으로 나타남.

▪ 그러나 SAP가 혼합된 경우에는 각각의 수분 함유량이 SAP 0.25%의 경우 약 20%, SAP 0.50%의 경우 약 25%, SAP 0.75%의 경우 약 30%, SAP 1.00%의 경우 약 40%를 상회하는 것으로 나타나 SAP의 재료적 특성에 의하여 상대적으로 많은 수분을 함유하는 것으로 판단됨.

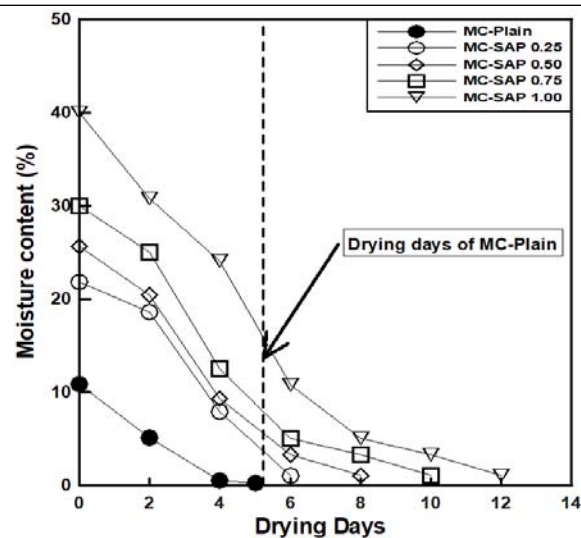
▪ 또한 MC의 경우 건조시점에 있어서 MC-Plain은 약 5일, SAP 0.25%의 경우 약 7일, SAP 0.50%의 경우 약 9일, SAP 0.75%의 경우 11일, SAP 1.00%의 경우 약 13일에 완전 건조상태와 동등수준이 되는 것으로 나타나 SAP 효과에 의하여 최소 2일~최대 8일 이상함수 상태를 유지하는 것으로 판단됨.



[그림 3.58] 수분 함수량 측정 결과 (OPC)



[그림 3.59] 수분 함수량 측정 결과 (AC)



[그림 3.60] 수분 함수량 측정 결과 (MC)

- OPC 및 AC의 차이는 크지 않은 것으로 나타나 보습성은 SAP에 지배적인 것으로 판단됨. 이러한 결과를 통하여 보습성능을 향상시키기 위하여 SAP를 사용할 경우 보습성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 대기 중 수분 및 우천환경까지 고려할 경우 보습효과 향상을 기대 할 수 있을 것으로 판단됨.

- 또한 보습성능 향상을 통하여 판넬에서 성장하는 생물의 수분공급 측면에 있어서 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단되지만 SAP의 혼합량이 증가할 경우 압축강도와 내구성에서 문제가 발생하기 때문에 소요 성능을 만족하는 수준에서 적합한 SAP의 최적량은 0.5% 이하로 혼합하는 것이 바람직 할 것으로 판단됨.

3) 표면 거칠기 특성

- 생물학적 판넬용 콘크리트의 표면 거칠기 특성은 금속과 같은 매끄러운 표면에 사용되는 surge roughness tester 0918 모델로 측정하였으며, 기포제가 들어가지 않은 배합의 시편의 표면과 상대 비교하여 측정하였음.

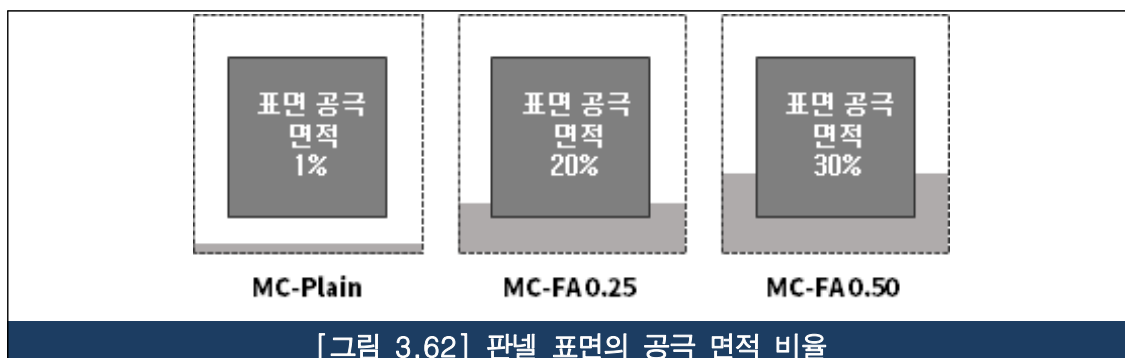
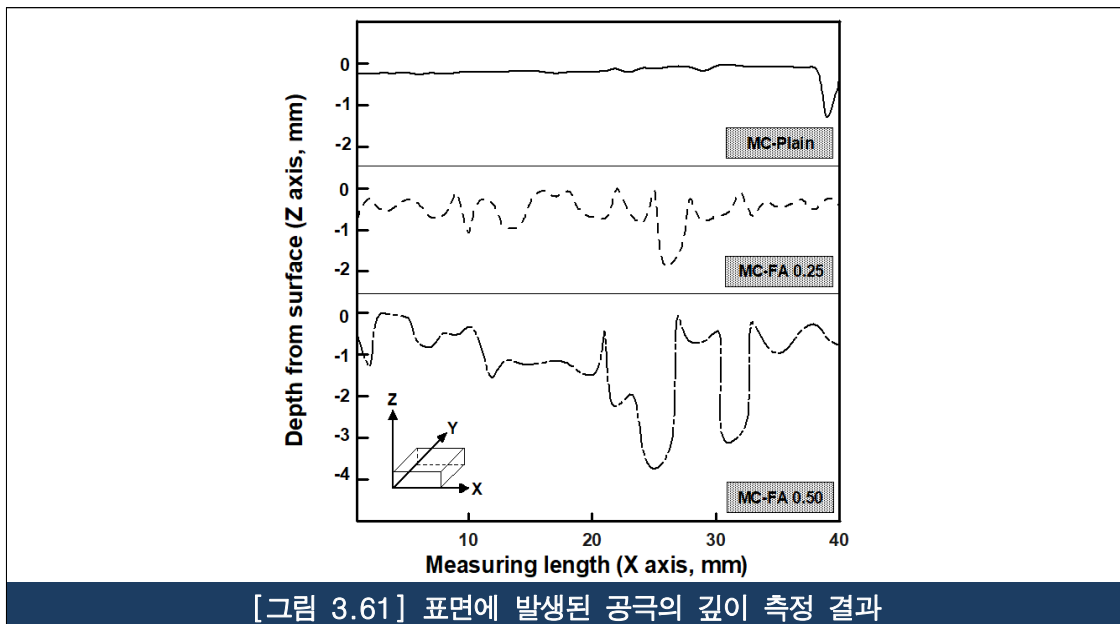
- 표면거칠기 특성은 W/B 35%, Vs/Vm 10% 및 SAP 0.25%에 따른 기포제 혼합률 3 수준(0, 0.25 및 0.50%)에 대하여 평가를 실시하였음. 목표 플로우 및 압축강도를 만족하는 범위는 기포제 0.5%까지 사용가능한 것으로 나타남에 따라 기포제 사용량 0.75 및 1.00%는 제외하였음. 또한, OPC와 AC의 표면 형태가 유사하여 MC에 국한하여 거칠기를 평가하였음.

- 그림 3.63은 판넬 표면 사진 및 이미지 처리된 공극 분포도를 나타낸 것이며, 그림 3.62는 판넬 표면의 공극 면적 비율을 나타낸 것임. 그림 3.62 및 그림 3.63의 결과 기포제가 혼합되지 않은 MC-Plain은 기포제를 0.25 및 0.50% 혼합한 경우와 비교하여 상대적으로 공극의 크기가 미세하고 표면의 총 면적에서 공극이 차지하는 비율은 약 1% 수준으로 나타남.

- 그러나 MC-Plain의 공극과 비교하여 공극의 크기가 큰 것으로 나타났으며, 표면의 총 면적에서 공극이 차지하는 총 비율은 기포제 0.25의 경우 약 20%, 0.50%의 경우 약 30%인 것으로 분석됨.

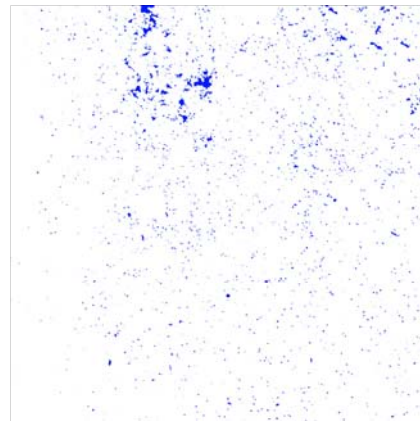
▪ 그림 3.61은 기포제에 따른 측정길이와 표면의 공극깊이를 나타낸 것임. 그림 3.61의 결과 MC-Plain의 공극의 평균 깊이는 약 0.2 mm 수준으로 나타났으며, 최대 약 1 mm의 공극 깊이가 관찰됨. 기포제 0.25%의 경우 공극의 평균 깊이는 약 0.5 mm 수준으로 최대 약 2 mm의 공극 깊이가 관찰됨.

▪ 또한 기포제 0.5%의 경우 공극의 평균 깊이는 약 1.5 mm 수준으로 최대 4 mm의 공극 깊이가 관찰됨. 이러한 결과를 통하여 기포제를 사용한 판넬은 표면층에 미세크기 이상의 공극을 다량 발생시킬 수 있으며, 닫힌 공극이 아닌 열린 공극이 형성됨에 따라 외부로 부터의 수분 공급이 용이할 것으로 판단되고, 상대적으로 거친 표면을 형성함에 따라 생물의 착근이 용이한 환경조건을 만족시킬 것으로 판단됨.





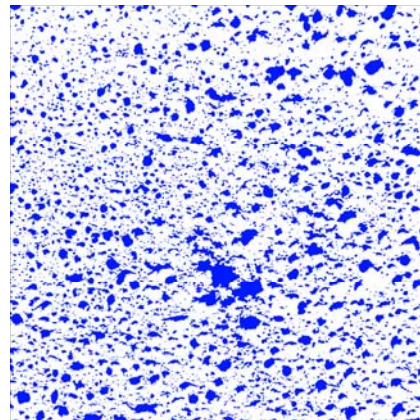
MC-Plain 판넬 표면



MC-Plain 공극 분포도



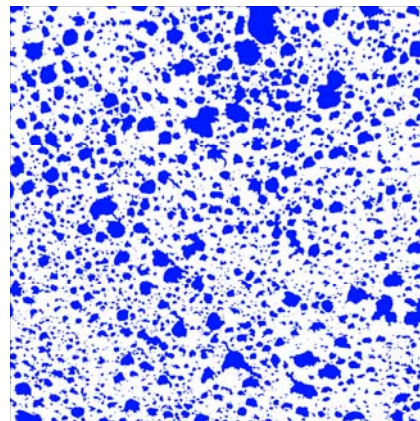
MC-0.25% 판넬 표면



MC-0.25% 공극 분포도



MC-0.50% 판넬 표면



MC-0.50% 공극 분포도

[그림 3.63] 판넬 표면 사진 및 이미지 처리된 공극 분포도

나. 판넬의 다층 구조 설계 및 제조

(1) 다층 구조 생물학적 콘크리트 판넬 설계

(가) 도면의 설명

▪ 그림 3.64는 생물학적 콘크리트의 판넬 도면형태를 나타낸 것이며, 그림 3.65는 판넬의 조립방식을 나타낸 것임. 콘크리트 판넬은 생물층, 수분층, 지지층 및 방수층으로 기본적으로 구성함.

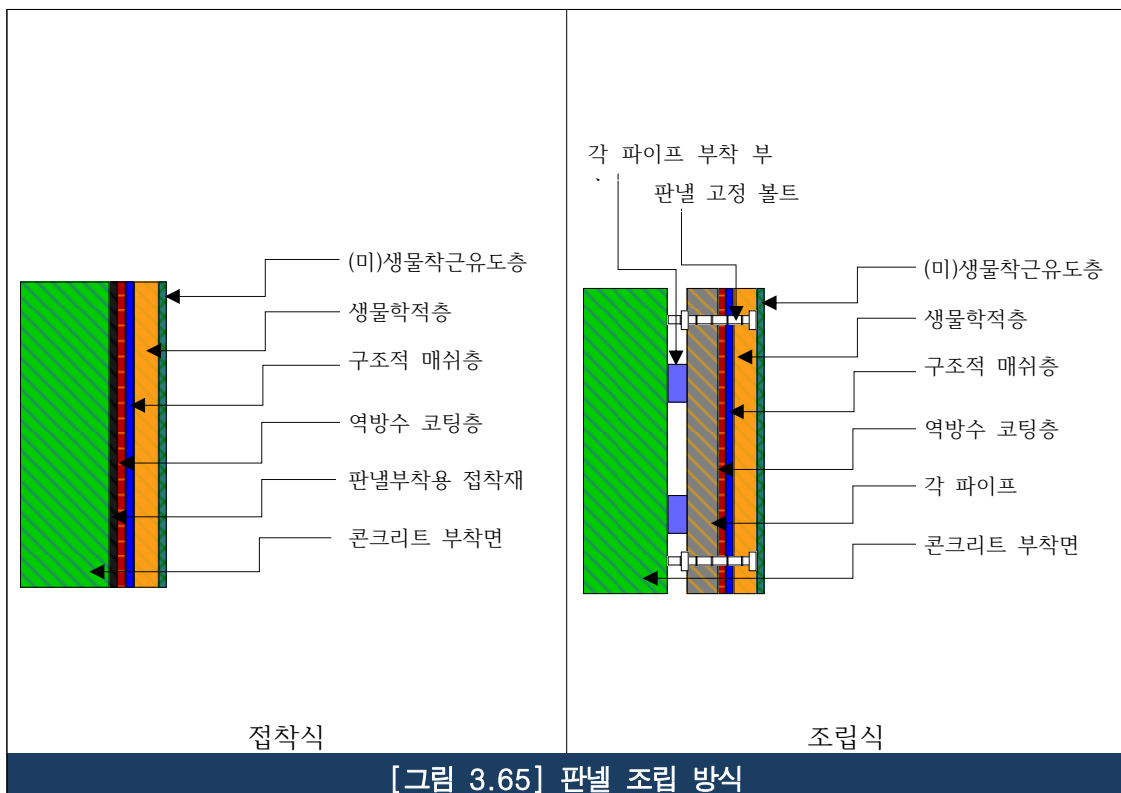
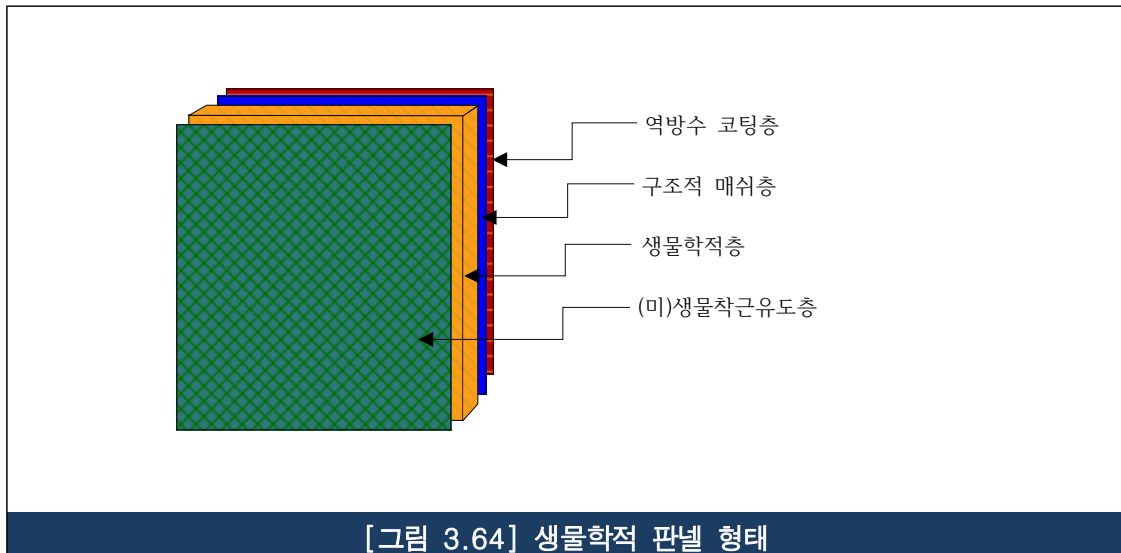
▪ 생물층은 내부에 공극이 형성되어 생물 또는 미생물의 뿌리가 착근될 수 있음. 생물층 내부에 형성된 공극을 통해 외부로부터 빗물 등의 수분 유입이 가능하며, 표면에 거칠기를 형성하고 있음.

▪ 표면에 형성된 거칠기를 통해 착근된 생물 또는 미생물의 이탈을 방지하고, 공기 중 영양분을 흡착함. 생물층 내부에 형성된 공극의 크기는 0.3mm 에서 0.5mm 사이일 수 있으며, 외부로부터 유입되는 수분을 수분층으로 전달하는 효율을 최대화할 수 있으며, 미생물의 착근을 용이하게 할 수 있음.

▪ 생물층에 세라믹계 재료와 화학 재료로 형성될 수 있으나, 이외 추가적인 재료로 형성되는 것을 배제하지 않음. 세라믹계 재료는 생물층의 pH를 낮출 수 있으며, pH를 7에서 9 사이로 유지시킬 수 있어 생물의 생존에 적합한 환경을 제공.

▪ 지지층은 방수층의 일면에 배치함. 이와 달리 지지층은 수분층과 방수층 사이에 배치할 수 있음. 예를 들어 지지층은 수분층의 일면과 방수층의 타면 사이에 배치될 수 있음.

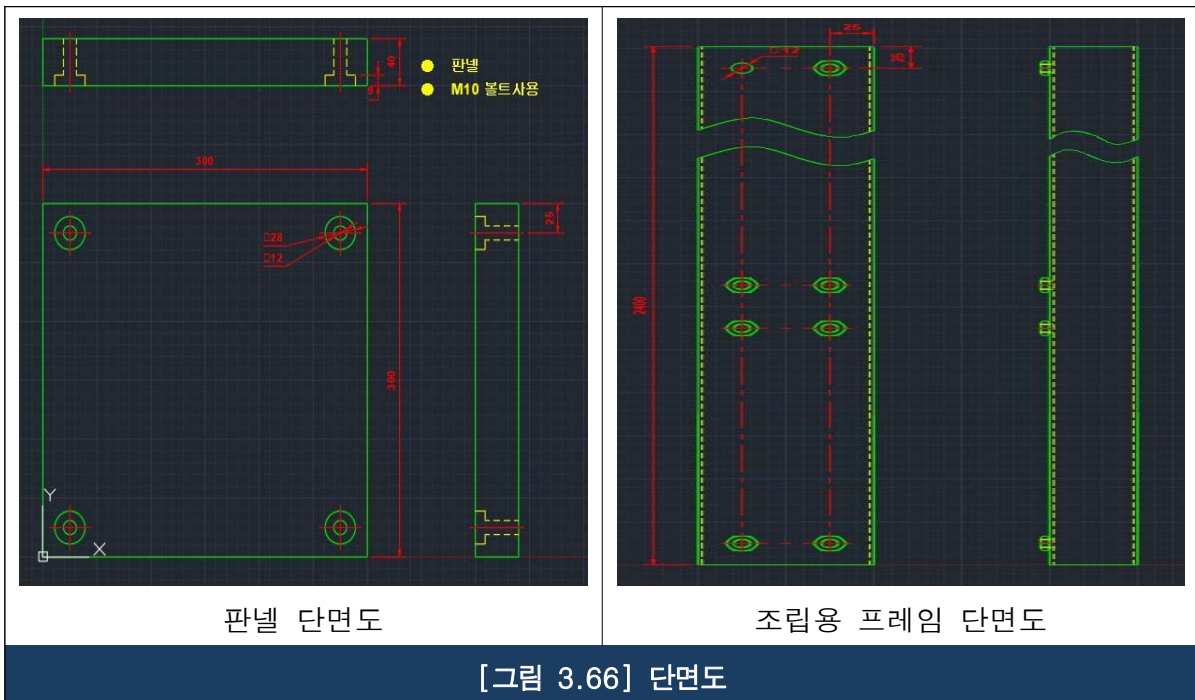
▪ 지지층은 PP(Polypropylene) 또는 PE(Polyethylene) 섬유 등을 활용하여 탄성과 내구성이 증가하고 공기 접촉으로 인한 녹의 발생을 방지할 수 있음. 또한 지지층은 콘크리트 판넬의 구조적 파손을 방지하는 역할을 수행함. 지지층은 콘크리트 판넬이 구조물에 설치되는 경우 콘크리트 판넬의 다른 구성을 지지할 수 있음.

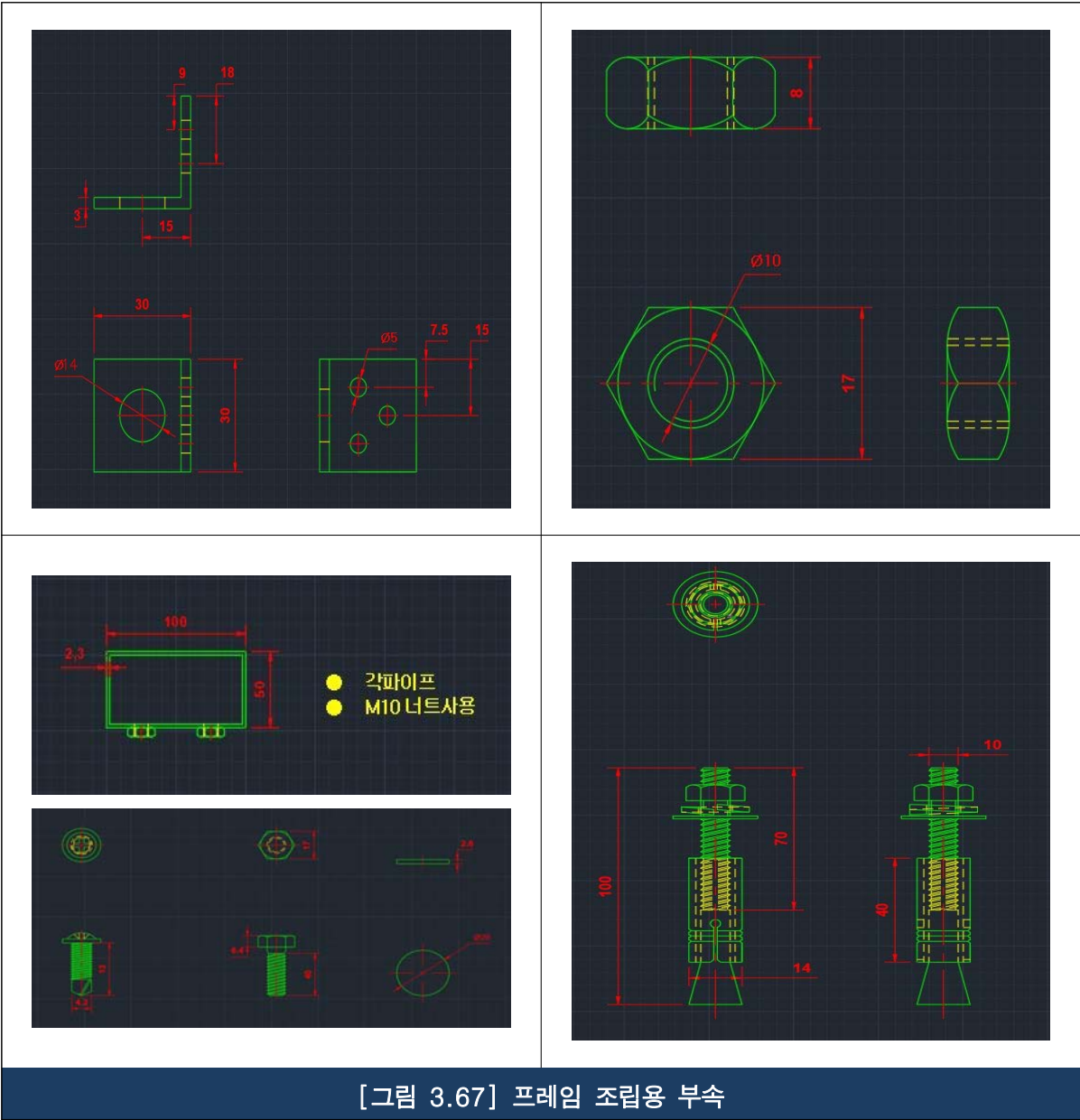


- 방수층은 수분층의 일면에 배치될 수 있으며, 수분층에 저장된 수분의 손실을 방지하는 목적으로 사용하는 것으로 규산염계 또는 규산염불소화합물계 재료로 사용하며, 반대로 콘크리트 패널이 구조물에 설치되는 경우, 방수층은 설치되는 구조물에 수분 유입 방지 역할을 함.

- 콘크리트 판넬은 일체로 형성되어 추가 시설물 및 유지관리가 필요 없으며, 기존 판넬보다 가벼운 중량을 가지기 때문에 프레임이나 못 등을 이용하여 구조물에 고정할 수 있을뿐만 아니라, 접착제를 이용하여 구조물에 고정할 수 있음.
- 콘크리트 판넬과 구조물 사이에 별도의 프레임을 배치시켜 못 등을 이용한 볼트 결합의 효율을 향상시킬 수 있음.

(나) 생물학적 판넬의 설계(안)





(다) 생물학적 판넬의 시험방법(안) : 이산화탄소 및 미세먼지

- 생물학적 판넬뿐만 아니라 일반적인 시험편의 이산화탄소 측정 및 미세먼지 측정 관련 시험 부재로 생물학적 판넬의 이산화탄소 및 미세먼지 시험방안을 제안함. (한국콘크리트학회 제규격(안))

생물학적 판넬의 이산화탄소 및 미세먼지 농도 시험방법(안)	
1. 적용범위 이 규격은 콘크리트 생물학적 판넬의 환경성능을 평가하기 위한 이산화 탄소 농도 및 미세먼지 측정 시험방법에 대하여 규정한다. 2. 인용규격 다음에 제시하는 이 규격에 인용되는 것에 따라 이 규격 규정의 일부를 구성한다. 이들 인용 규격은 최신판을 적용한다. KS M 0011 수용액의 pH 측정 방법 KS F 2459 기포 콘크리트의 결로기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험 방법 KS F 2271 건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성시험 방법 KS F 2933 실내 환기량 측정방법(이산화탄소법) KS I ISO16000-26 실내 공기 — 제26부: 이산화탄소(CO₂) 생물량 전략 3. 판넬 종류 생물학적 경량 판넬의 모체로 사용되는 시멘트 복합재료는 3종류가 있으며, 그 의 사용되는 혼합재료는 생물학적 경량 판넬의 식생이 가능한 재료가 필요하다. 생물학적 경량 판넬에 사용되는 시멘트 복합재료는 1종 보통포틀랜드시멘트, 알루미나시멘트 및 사소 마그네시아시멘트를 요구 성능에 만족하도록 복합적으로 사용하여 제작한다. 4. 용어의 정의 본 규격에서는 사용되는 주요 용어의 뜻은 다음과 같다. (a) 이산화탄소 : 부패, 부위의 기체, CO₂ 물질이 물에 연소시 발생하는 기체중 하나로 공기 중에는 약 340 PPM 함유되어 있으나 주로 화석연료의 연소로 인하여 발생 (b) 미세먼지 : 먼지는 입자의 크기에 따라 50μm 이하인 총먼지(TSP, Total Suspended Particles)와 입자크기가 매우 작은 미세먼지(PM, Particulate Matter)로 구분한다. 미세먼지는 다시 지름이 10μm보다 작은 미세먼지(PM₁₀)와 지름이 2.5μm보다 작은 미세먼지(PM_{2.5})로 나뉜다. (c) 생물학적 경량 판넬 : 생물과 일체화시킨 생물학적 경량 판넬은 생물의 착근이 쉬워야 하며 착근 이후 생물이 가능하도록 환경을 조성하여야 한다. 이러한 생물학적 경량 판넬의 모체재료에 건설재료 중 가장 경제적인 일반 시멘트를 활용할 경우 높은 pH를 형성하기 때문에 생물의 생존 및	유지기간에 부적합하며, 구조적 측면에서 표면이 매끈하거나 치밀할 경우에는 생물 착근이 어려워지는 단점이 있다. 5. 시험 5.1 시험환경 5.1.1 양생실 생물학적 경량 판넬의 모체로 양생은 절전 후 온도(20±3)℃ 및 습도(50±10)%의 상태에서 24시간 양생실에 보관하여 자연건조가 이루어지도록 한다. 5.1.2 측정시스템 (a) 이산화탄소 농도 : 특별한 지정이 없는 한 온도(20±3)℃ 및 습도(50±10)%를 유지하며 측정장치의 보시리를 실리콘으로 봉합하여 공기의 유입을 막는다. (b) 미세먼지 농도 : 특별한 지정이 없는 한 온도(20±3)℃ 및 습도(50±10)%를 유지하며 사전에 실험실의 청정한 상태로하여 측정시스템 내에 미세먼지 농도 영향을 주지 못하게 한다. 5.2 시험에 사용하는 기구 5.2.1 이크릴 챔버(chamber) 챔버의 크기는 실험실내 실험 및 보관이 가능하기 위하여 각각의 측 깊이가 300mm인 정육면체크기로 하고 투명 아크릴 재질로 제작하며 아크릴의 두께는 5±1mm 크기로 제작한다. 또한 시험체를 및 센서 장비 등을 배치하기 위하여 한 면은 재료가 가능하도록 연결장치를 챔버외부에 두게한다. 5.2.2 간이 이산화탄소 측정기 챔버내에서 발생되는 이산화탄소를 측정하기 내장형 배터리로 작동된 간이형 크기의 측정기를 사용한다. 측정기는 50,000이상의 데이터를 기록할 수 있고 이산화탄소의 측정 범위는 0 ~ 9,999 PPM이상 범위까지 측정되어야 하며, 정확도는 ± 60 PPM이내에서 까지 허용되어야 한다. 5.2.3 간이 미세먼지 측정기 챔버내에서 발생되는 미세먼지를 측정하기 내장형 배터리로 작동된 간이형 크기의 측정기를 사용한다. 측정기는 50,000이상의 데이터를 기록할 수 있고 미세먼지의 측정 범위는 0 ~ 9,999 (μg/m³) 이상 범위까지 측정되어야 하며, 정확도는 ± 50 (μg/m³) 이내에서 까지 허용되어야 한다. 5.2.4 순환팬 챔버내에서 작동하기 위하여 12 V 전전지를 전기가 공급되는 순환팬을 사용하여 순환팬으로 인한 열발생을 막기 위하여 순환팬 및 모터 사이에 충분한 윤활구리스를 바르고 작동시킨다. 일정한 회전을 공급하기 위하여 실험 전에 사용하지 않은 전전지로 교체하여 둔다.

[그림 3.68] 시험방법(안)

5.2.5 유해 공기 발생제 챔버내 유해가스(이산화탄소, 미세먼지)를 주입하기 위하여 압력조정기가 설치된 유해 공기 발생제를 사용한다.

5.3 시험에 사용하는 대상 관별 형태의 시험편

5.4 시험편

5.4.1 시험편의 크기 생물학적 경량 관별의 크기는 가로×세로×높이는 각각 100×100×50 mm하여 마이크로미터 내에 들어갈 수 있도록 제작한다.

5.4.2 시험편의 제조방법 생물학적 경량 관별은 요구성능을 만족하는 복합재를 적용하여 이끼를 작근시킬 수 있는 경량 관별을 제조한 다음 관별 상부에 모래이끼와 포자를 도포한 후 작근이 용이하도록 하기 위하여 PV접을 양을 덮어 작근 소요 시간 제감 및 이끼의 탈락을 방지한다. 관별의 하부에는 방수지를 도포하여 역양수 코팅층을 형성하여 흡수된 수분이 역방향으로 이동 및 증발이 불가능하게 하였으며, 이를 통하여 벽면의 부작된 경우 관별 내부의 수분 유출을 방지한다. 또한 내부 모래에 포함된 고흡수성수지 등을 통하여 수분을 포집하고 수분의 이동 및 증발을 억제하여 생관하는 표면으로 유도할 수 있도록 거친 표면을 통하여 이끼가 작근될 수 있는 생물학적 층을 구성한다.

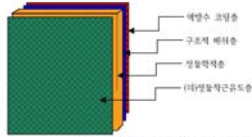


그림 1. 생물학적 경량 관별의 제작도(단)

5.5.3 시험 시험이 시작된 후 이산화탄소 및 미세먼지의 발생량을 수시로 확인하여야 하며, 기계의 오작동, 챔버내 밀실이 유지가 안 될 경우 최소 실험 상태로 하여 실험을 재 실시 한다.

5.5.4 시험종료 실험데이터를 시간경과에 따른 발생량으로 표기하여 저장된 값을 확인한다. 실험결과 확인후 챔버 개폐구를 분리하고 시험편을 꺼내어 육안상 이상여부를 확인한다. 또한 챔버 및 순환 팬들은 다른수전 등으로 담겨내고 대기에서 두어 작동시 발생한 열을 내려도록 한다

5.6 시험결과

5.6.1 이산화탄소 측정 밀폐된 시험체 챔버 내에서 생물학적 경량 관별에 의해 저장되는 이산화탄소 감소량을 간이이산화탄소 시험기에 의하여 확인할 수 있다. 이산화탄소의 측정단위는 10 ppm/sec 이상 측정하며 측정 시간은 최대 12시간 경과시까지 결과값을 얻는다. 이때 1시간 평균 이산화탄소량이 전(before)시간대보다 동일하거나 높을때는 12시간 전에 종료할 수 있다.

5.6.2 이산화탄소 평가 시험이 종료되고 생물학적 관별의 이산화탄소 저장 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 식으로 이산화탄소 감소율을 평가 하여 등급을 구분 할 수 있다.

$$CO_2 - D(\%) = \frac{CO_{2_{\text{max}}} - CO_{2_{\text{min}}}}{CO_{2_{\text{max}}}} \times 100$$

where,

$CO_{2_{\text{max}}}$: 생물학적 경량 관별 적용전 최초 대기 이산화탄소 발생량(ppm)

$CO_{2_{\text{min}}}$: 생물학적 경량 관별 적용 후 2시간후 챔버내 이산화탄소 발생량(ppm)

표. 1 이산화탄소 저장률 ($CO_2 - D(\%)$)

등급	감소율 (%)
Effect	< 40
Medium	≥ 40 ~ 60
Bad	> 60

5.6.3 미세먼지 측정 밀폐된 시험체 챔버 내에서 생물학적 경량 관별에 의해 저장되는 미세먼지감소량을 간이미세먼지 시험기에 의하여 확인할 수 있다. 미세먼지의 측정단위는 100 μg/m³ 이상 측정하며 측정 시간은 최대 12시간 경과시까지 결과값을 얻는다.

5.6.4 미세먼지 평가 미세먼지의 농도는 초미세먼지(PM₁₀) 및 보통미세먼지(PM_{2.5})의 결과값에 대한

5.5 시험방법

5.5.1 이산화 탄소 아크릴 챔버 장착

a) 시험편을 아크릴 챔버내 중앙에 위치하며 챔버 내부에는 이산화탄소 센서(온도, 습도센서 포함)를 두고 챔버 외부에는 챔버에서 일어난 신호값을 이산화탄소 결과로 환산하고 저장할 수 있는 데이터 로거를 설치한다.

b) 챔버 내부에는 순환 팬을 측정 종료시까지 작동함으로써 챔버 내 이산화탄소의 순환시키도록 하고 외부에는 챔버 상단에 이산화탄소 주입기를 통하여 이산화탄소를 약 1,000 (PPM) 주입 후 챔버를 조속한 시간에 밀폐시켰다.

(비고) 순환 팬은 회전은 500 ~ 700 rpm으로 조정하고 3개의 날개를 가진 회전체로 구성한다. 이때 순환팬의 방향은 챔버 중앙을 향하고 45°의 기울기를 유지한다.

5.5.2 미세먼지 챔버 장착

a) 미세먼지 챔버는 이산화 탄소와 동일한 위치에서 데이터 로거, 챔버, 시험편, 순환팬 및 미세먼지 가스를 위치시킨다.

b) 미세먼지 가스를 통하여 미세먼지를 약 1,000 (μg/m³) 주입 후 챔버를 조속한 시간에 밀폐시켰다. (비고) 순환 팬은 회전은 500 ~ 700 rpm으로 조정하고 3개의 날개를 가진 회전체로 구성한다. 이때 순환팬의 방향은 챔버 중앙을 향하고 45°의 기울기를 유지한다.

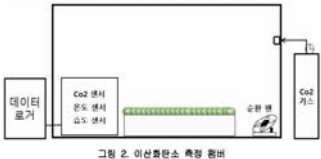


그림 2. 이산화탄소 측정 챔버

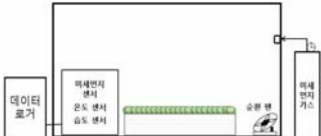


그림 3. 미세먼지 측정 챔버

미세먼지 농도 감소율에 대하여 각각 평가 하며, 다음과 같은 식으로 미세먼지 감소율을 평가 하여 등급을 구분 할 수 있다.

$$PM_{10} - D(\%) = \frac{PM_{10_{\text{max}}} - PM_{10_{\text{min}}}}{PM_{10_{\text{max}}}} \times 100, \quad PM_{2.5} - D(\%) = \frac{PM_{2.5_{\text{max}}} - PM_{2.5_{\text{min}}}}{PM_{2.5_{\text{max}}}} \times 100$$

where,

$PM_{10_{\text{max}}}$: 생물학적 경량 관별 적용 후 6시간후 챔버내 초미세먼지 발생량(μg/m³)

$PM_{10_{\text{min}}}$: 생물학적 경량 관별 적용 후 최초 대기 초미세먼지 발생량(μg/m³)

$PM_{2.5_{\text{max}}}$: 생물학적 경량 관별 적용 후 12시간후 챔버내 보통미세먼지 발생량(μg/m³)

$PM_{2.5_{\text{min}}}$: 생물학적 경량 관별 적용 후 최초 대기 보통미세먼지 발생량(μg/m³)

표. 1 미세먼지 저장률 ($PM_{10} - D(\%)$, $PM_{2.5} - D(\%)$)

등급	감소율 (%)
Effect	≥ 80
Medium	≥ 60 ~ 80
Bad	< 60

6. 보고

시험결과에 대해서는 다음의 항목을 보고하는 것으로 한다.

- (1) 시험편 크기 및 무게
- (2) 시험편 및 표준편의 개수
- (3) 적용 계층의 표준계열 및 양생기간
- (4) 시험편의 이산화탄소량 변화
- (5) 시험편의 미세먼지 변화
- (6) 이산화탄소 및 미세먼지 시험데이터 및 챔버내 사진

[그림 3.68] 시험방법(안)

(2) (미)생물이 착근된 생물학적 판넬 제작

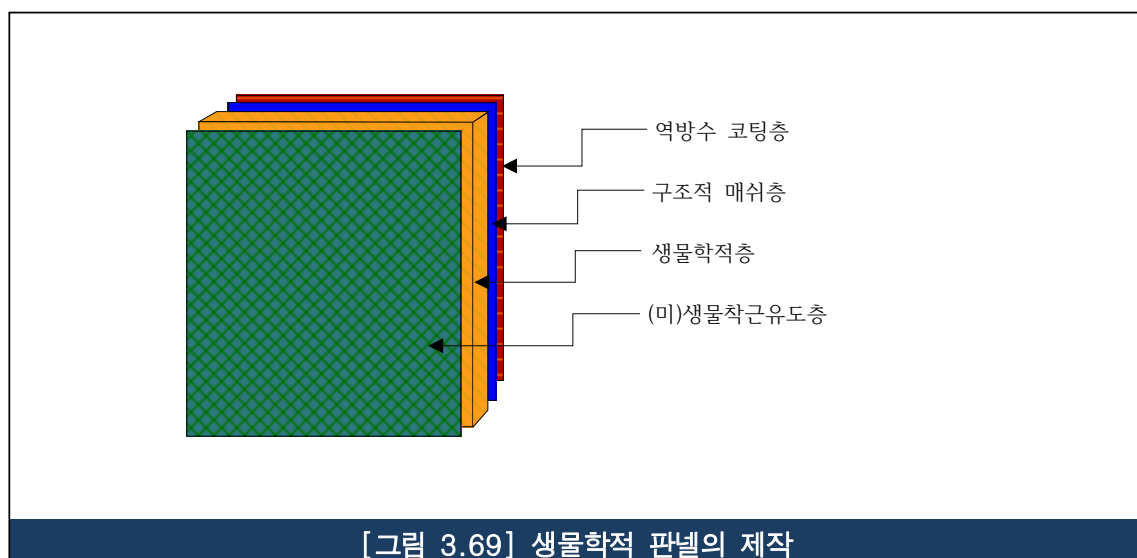
(가) 판넬의 제작

▪ 생물의 성장 특성을 검토하여 모래이끼를 선정하였으며, 이를 착근하여 생물학적 판넬을 제작하였음. 제작방법은 이끼를 착근시킬 수 있는 판넬을 제조한 다음 판넬 상부에 모래이끼와 포자를 도포한 후 착근이 용이하도록 하기 위하여 PV섬유 망을 덮어 착근 소요 시간 저감 및 이끼의 탈락을 방지하였음.

▪ 그림 3.69는 생물학적 판넬의 제작 상세도를 나타낸 것임. 판넬의 하부에는 방수재를 도포하여 역방수 코팅층을 형성하여 흡수된 수분이 역방향으로 이동 및 증발이 불가능하게 하였으며, 이를 통하여 벽면의 부착될 경우 판넬 내부의 수분 유출을 방지하였음.

▪ 또한 내부 모재에 포함된 SAP를 통하여 수분을 포집하고 수분의 이동 및 증발을 이끼가 생존하는 표면으로 유도할 수 있도록 거친 표면을 통하여 이끼가 착근될 수 있는 생물학적 층을 구성 하였음. 또한 판넬 내부는 전단 파괴를 방지하기 위하여 구조적 PV 메쉬를 사용하여 보강하였으며, 판넬의 색상을 도입하여 미관상 용이하도록 하였음.

▪ 그림 3.70, 3.71 및 3.72는 OPC, AC 및 MC를 사용한 생물학적 판넬을 나타낸 것임.





[그림 3.70] 생물학적 판넬 (OPC)



[그림 3.71] 생물학적 판넬 (AC)



[그림 3.72] 생물학적 판넬 (MC)

(나) (미)생물의 착근

▪ 생물의 성장 특성을 검토하여 모래이끼를 선정하였으며, 이를 착근하여 생물학적 판넬을 제작하였음. 제작방법은 이끼를 착근시킬 수 있는 판넬을 제조한 다음 판넬 상부에 모래이끼와 포자를 도포한 후 착근이 용이하도록 하기 위하여 PV섬유 망을 덮어 착근 소요 시간 저감 및 이끼의 탈락을 방지하였음.



[그림 3.73] 모래이끼를 착근한 생물학적 콘크리트 판넬

(다) (미)생물의 실내 가속화를 통한 성장 촉진

▪ 이끼의 성장을 촉진하기 위하여 실내 가속화 시험장비를 사용하여 이끼를 배양 및 성장 촉진을 실시하여 대량의 (미)생물을 확보하였음. 또한, 판넬에 이끼 포자를 도포하여 가속화 시험장비를 통하여 약 12주간 판넬표면에서 이끼를 성장 및 착근을 하였음.



[그림 3.74] 실내 가속화 성장 촉진 장비

(다) 장기 성장 및 착근 성능

▪ 모래이끼를 착근한 생물학적 판넬의 장기 성장 및 착근 성능을 평가하기 위하여 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬을 외부환경에서 장기간 방치한 후 이끼의 성장 특성 및 착근 성능을 평가하고자 하였음.

▪ 그림 3.75는 외부환경에 노출된 생물학적 판넬의 하절기 및 동절기 에 관찰한 사진을 나타낸 것으로 하절기에 경우 우천환경이 아닐 경우 광량이 많은 정오가 반복될수록 모래이끼의 부분적인 갈변이 일어나는 것으로 확인하였으며, 수분을 인위적으로 공급할 경우 본래 상태로 돌아오는 것을 확인 할 수 있었음.

▪ 이러한 결과는 과도한 광량과 대기상태의 수분만으로는 부족하기 때문에 갈변현상이 발생하는 것으로 판단되며, 수분이 공급되면 본래로 돌아가 다시 성장을 하기 때문에 우천환경일 경우에는 갈변현상을 저감할 수 있을 것으로 판단됨.

▪ 또한 동절기로 바뀌는 계절이 다가오면 인위적으로 수분을 공급하지 않더라도 갈변되었던 이끼가 서서히 초기 상태로 다시 회복하는 것을 확인할 수 있었음. 눈이 오는 동절기에는 큰 변화가 없는 것으로 나타남.

▪ 그림 3.76은 착근성능 향상을 위한 PV섬유 망을 보강망으로써의 설치 유무에 따른 이끼의 착근 성능을 나타낸 것으로 보강 섬유망을 설치하지 않을 경우에는 시간이 경과함에 따라 수직으로 위치한 판넬 표면의 모래이끼가 풍량, 강한 우천 등의 영향으로 부분적으로 탈락하는 것을 확인할 수 있었지만 PV섬유 망을 설치한 판넬의 경우에는 동일한 환경조건에서 장기간 경과한 이후에도 양호한 상태를 나타내는 것을 확인할 수 있었음.



하절기

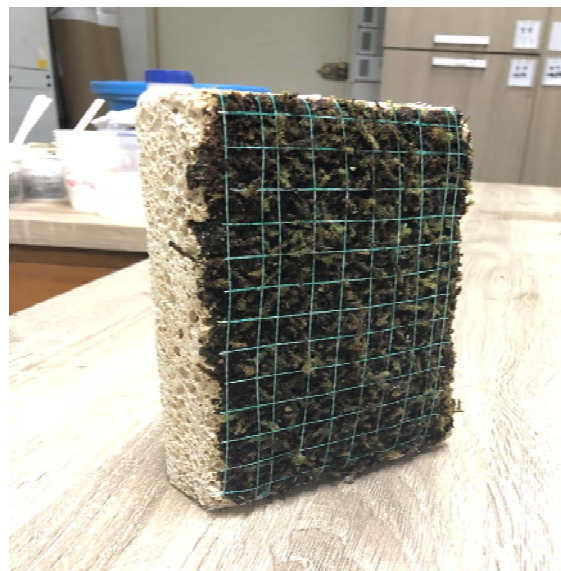


동절기

[그림 3.75] 외부환경에 장기 노출된 패널의 이끼 성장 및 착근



이끼 탈락



탈락 보강

[그림 3.76] PV섬유 망의 유무에 따른 이끼의 착근 성능

(라) 생물학적 판넬의 환경 영향 특성

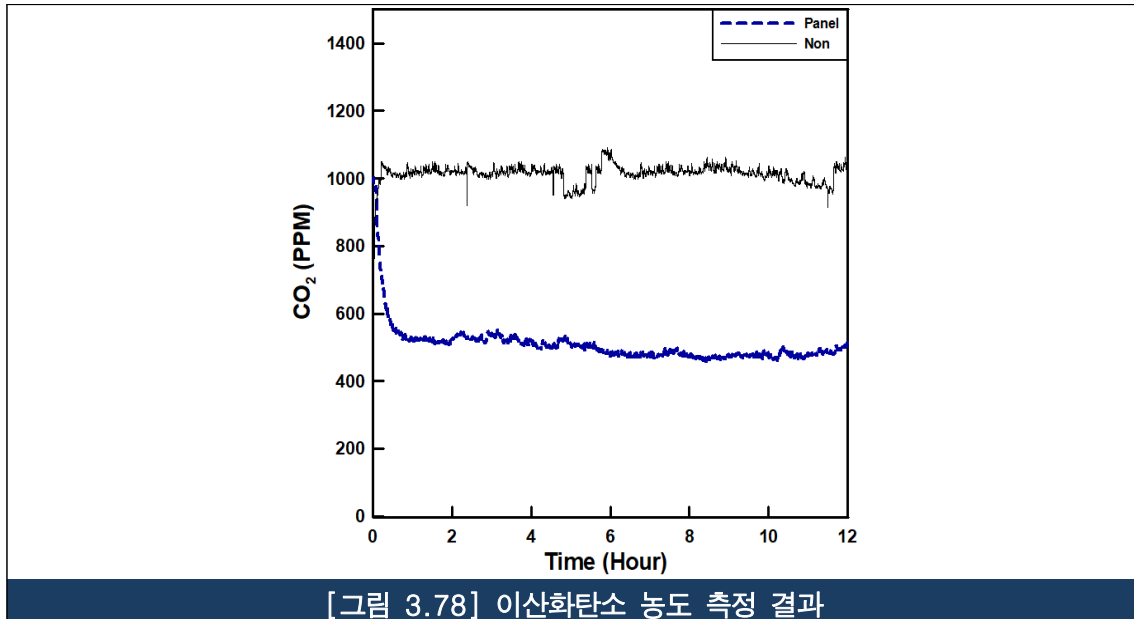
1) 이산화탄소 저감성

▪ 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬을 밀폐공간에서 시간에 따른 이산화탄소 농도변화를 평가하고자 하였음. 일반적인 관엽식물종의 이산화탄소 농도변화는 광량이 있는 오전 시간에서 광합성에 의한 반응으로 이산화탄소 농도가 감소하다가 광량이 없는 오후 시간에서는 호흡과 휴식에 의한 이산화탄소 농도가 다시 상승한다는 연구가 보고되고 있음.

▪ 그러나 이산화탄소 농도 상승량보다 식물종이 광합성에 의한 이산화탄소 저감량이 더욱 높기 때문에 이때 발생하는 이산화탄소의 발생량은 거의 고려하지 않음. 선대류 이끼종의 이산화탄소 저감능력은 탄소고정 식물종이기 때문에 이산화탄소를 발생하지 않고 저감하는 특성으로 보고되고 있으며, 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬을 밀폐형 챔버 내부의 이산화탄소를 주입하여 분석하고자 하였음.



■ 그림 3.78은 판넬에 따른 경과시간에 따른 이산화탄소 농도를 나타낸 것임. 이끼를 착근한 판넬의 경우 초기 1,000 ppm 이산화탄소 농도는 시간이 경과할수록 약 500 ppm 까지 낮아지는 경향이 나타났다. 따라서 벽면녹화용 판넬로써 넓은 면적으로 적용하였을 경우 장기적인 이산화탄소 감소 성능은 커질 것으로 판단됨.

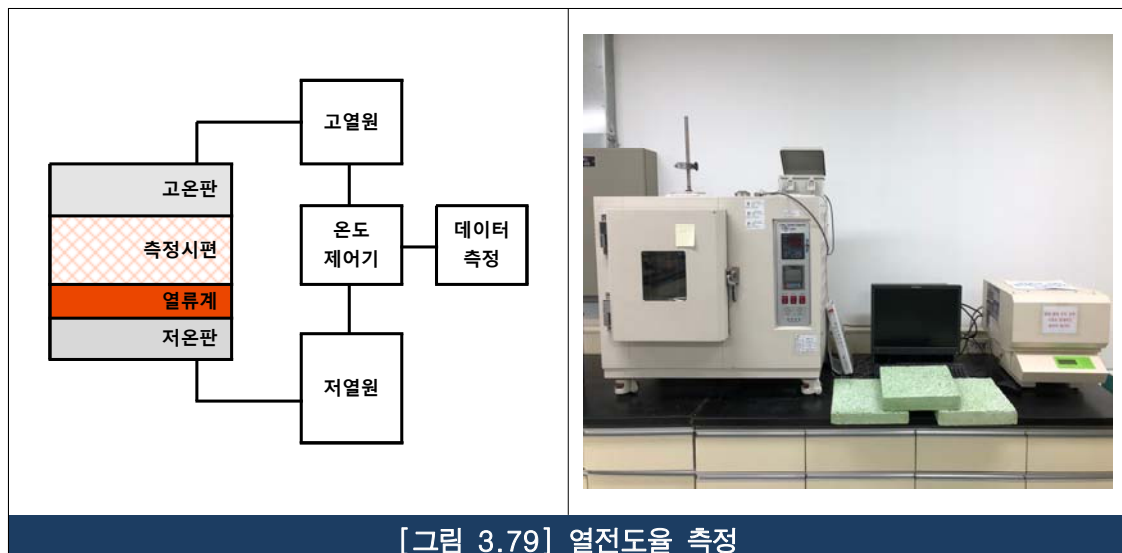


2) 단열온도 유지성

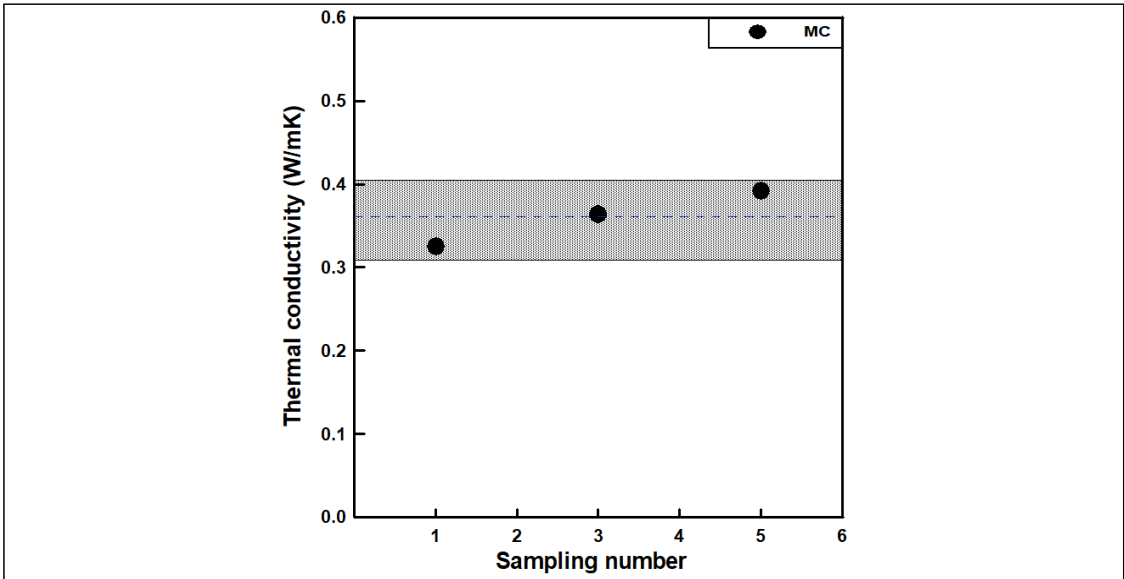
▪ 생물학적 판넬의 단열온도 유지 성능은 “KS L 9016 보온재의 열전도율 측정 방법”에 준하여 50×300×300 mm의 판넬 시험편을 성형하였으며, FOX314 모델을 사용하여 단열온도 유지 성능을 평가하였음.

▪ 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬을 벽면녹화에 적용하기 위하여 건물의 냉난방 에너지 효율을 위한 열전도율 측정 실험을 분석하고자 하였음.

▪ 시편의 열전도계수를 그림 3.80에 나타내었으며, 생물학적 판넬의 평균 열전도계수는 0.361 W/mK로 측정되었음. 열전도율 측정 결과에서 모래이끼를 착근한 생물학적 판넬의 경우 착근되지 않은 판넬보다 약 40% 정도 열전도율 낮게 측정됨. 이러한 결과를 통하여 단열성능에서 이끼를 착근한 판넬을 벽면녹화로 적용될 경우 냉난방 에너지 효율에 높을 것으로 판단됨.



[그림 3.79] 열전도율 측정



[그림 3.80] 열전도율 측정 결과

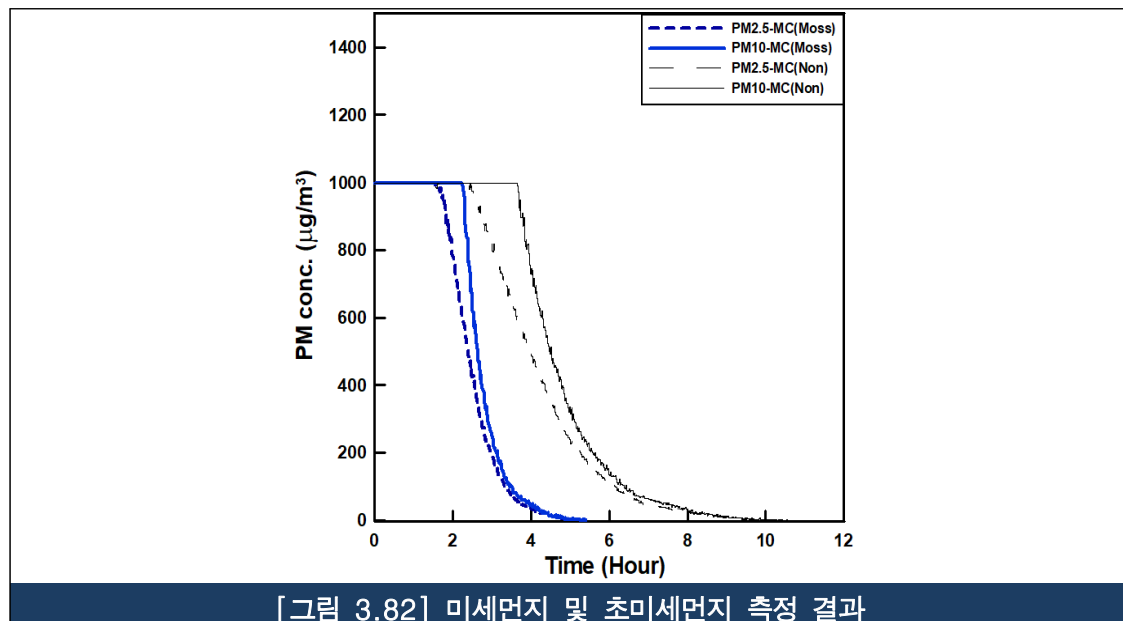
3) 미세먼지 정확성

▪ 생물학적 판넬의 미세먼지 정화 성능은 밀폐형 아크릴 챔버 내부에 제작된 생물학적 판넬, 미세먼지 측정장치(Blatn-smart-123 모델) 및 미세먼지 주입을 위한 팬을 설치하여 내부로 주입된 미세먼지를 측정하였으며, 미세먼지는 담배 1개피의 연기를 사용하였음.

▪ 그림 3.82는 경과시간에 따른 미세먼지 농도(PM2.5-초미세먼지 및 PM10-보통 미세먼지)의 관계를 나타낸 것임. 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬을 벽면녹화에 적용할 경우 대기환경의 미세먼지 흡착 가능성을 판단하기 위하여 미세먼지 농도 변화를 측정하였음.

▪ 그림 3.82의 결과 모래이끼가 착근되지 않은 판넬의 경우 시간에 따른 미세먼지 저감량은 약 분당 5% 미만으로 나타났으며, 안정권으로 돌입하는데 걸리는 시간은 약 4시간이 경과하였음. 그러나 모래이끼를 착근한 생물학적 판넬의 경우 분당 10% 이상으로 착근되지 않은 판넬보다 높은 결과를 나타냈으며, 안정권으로 돌입하는데 걸리는 시간은 약 2시간 정도로 측정할 수 있었음.





[그림 3.82] 미세먼지 및 초미세먼지 측정 결과

▪ 이러한 결과를 통하여 모래이끼가 착근된 생물학적 판넬은 대기중 미세먼지 농도를 줄일 수 있을 것으로 확인하였으며, 많은 면적으로 벽면녹화를 시행할 경우 미세먼지 정화 효과가 클 것으로 판단됨.

4) 생물학적 판넬의 환경 영향 평가 및 분석

① 실내온도 및 에너지 저감

▪ 생물학적 판넬의 단열온도 측정결과 (미)생물(모래이끼)이 착근되지 않는 판넬과 비교하여 열전도율이 약 40% 수준이 낮은 것으로 나타나 여름철 외부의 더운 공기에 따른 온도가 실내 공기로 전달이 낮을 것으로 판단됨.

▪ 또한 실내의 냉방 에너지에 따른 공기는 외부로 전달 영향이 적을 것으로 판단됨에 따라 실내 냉난방 에너지를 크게 감축가능 할 것으로 판단됨.

▪ 여름철 실내온도를 1℃ 낮추기 위해서는 약 7%의 냉방 에너지가 소모되는 것으로 알려져 있으며, 연구목표인 2℃를 저감하기 위해서는 약 14%의 냉방 에너지가 소요됨. 이러한 결과를 단편적으로 고려하면 생물학적 판넬을 외벽만 적용할 경우 2℃를 낮추기 위하여 사용되는 냉방 에너지를 약 6% 수준으로 절약할 수 있으며, 내벽까지 확대할 경우 약 3% 이하로 절약이 가능함.

▪ 동일한 공간에 동일한 냉방 에너지를 사용할 경우 실내온도는 최대 4℃ 낮출 수 있는 것으로 예상되며, 난방 에너지의 경우 동일한 결과를 얻을 수 있음.

▪ 냉·방 에너지 저감으로 냉·방 에너지 생산을 위한 CO₂ 저감에 대해서도 추가적인 효과가 있을 것으로 판단됨.

② CO₂ 및 에너지 저감

▪ 한국환경정책·평가연구원의 도시산업의 온실가스 저감 및 정책 방안 보고서에 따르면 국내 서울시를 기준으로 건물의 옥상을 현재 수준에서 약 30% 녹화할 경우 연간 27,671 톤/년 감축할 수 있을 것으로 분석하고 있음.

▪ 한국환경정책·평가연구원의 도시산업의 온실가스 저감 및 정책 방안 보고서에 따르면 국내 서울시를 기준으로 건물의 옥상을 현재 수준에서 약 30% 녹화할 경우 온실가스를 연간 27,671 톤을 감축할 수 있을 것으로 분석하고 있음.

※ 녹화면적 1Km² 당 CO₂ 저감량/년을 227,500 (Kg)으로 가정

- 외벽 녹화를 실시할 경우 온실가스를 연간 47,673 톤을 추가적으로 감축할 수 있는 것으로 분석하고 있음. 따라서 옥상과 외벽 모두 녹화할 경우 연간 75,344 톤의 온실가스 감축이 가능함.

- 전국단위로 확대하면 본 연구 목표인 연간 301,374 톤(서울시의 약 4배)을 절감할 수 있는 것으로 나타남.

- 그러나 이러한 분석결과는 외벽 녹화 면적을 옥상 녹화 면적의 1~2배를 가정하고 산출한 결과임. 국내와 같이 빌딩 숲을 이루고 있는 도심지의 경우 수직 벽의 녹화면적은 평균 10배에서 최대 20배 이상도 가능함.

- 외벽 녹화 면적 10배를 기준으로 산출할 경우 서울시에서만 연간 266,033 톤을 절감할 수 있으며, 전국단위로 확대할 경우 연간 1,064,132 톤이 절감 가능하며, 이는 연구 목표의 3배 이상의 저감량을 확대 가능함.

- 생물학적 판넬의 CO₂ 농도 측정결과 초기 1,000 ppm 이산화탄소 농도는 약 500 ppm 까지 저감하는 것으로 나타났으며, 저감시간은 1시간 이내에 50% 수준으로 저감하는 결과가 나타남.

- 따라서 생물학적 판넬을 옥상 및 외벽을 포함하여 내벽까지 확대 적용할 경우 CO₂ 저감 효과는 더욱 커질 것으로 판단됨. 생물로써 본 연구와 같이 이끼를 적용할 경우 일반적인 관엽식물과 같은 광합성 작용을 하지 않아 CO₂를 배출하지 않고 고정화하기 때문에 그 효과는 더욱 증대될 것으로 판단됨.

③ 미세먼지 및 초미세먼지 저감

- 생물학적 판넬의 미세먼지 및 초미세먼지 측정결과 판넬이 없는 경우와 비교하여 정화되는 시간이 2배 빠른 것으로 나타남. 이러한 결과는 생물학적 층에 존재하는 이끼가 공기필터와 같은 역할을 수행하여 흡착되기 때문에 대기중 먼지를 고정화가 가능.

- 고정화된 미세먼지는 씻겨나가 우천시 지반으로 배출하는 원리로 건기시 공기정화 역할을 다시 수행할 수 있어 최근 문제가 되고 있는 미세먼지 해결방안에 대안책으로 활용가능함.

제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 1차년도

핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
				질적 성과지표		목표치	측정방법	검증 방법		연구 기관
A	(미)생물 착근을 위한 콘크리트 패널용 시멘트 개발	A-1	콘크리트 착근용 (미)생물	①	콘크리트에 착근 가능한 (미)생물류 조사	1건	문헌조사 보고서	자체 평가	공동	100%
				②	pH 조건에 따른 (미)생물 확보	3종 이상	pH 대응 (미)생물 생존여부 -현미경 관찰-	자체 평가	주관	100%
		A-2	시멘트의 생물학적 수용성	①	시멘트 성분 및 생물학적 수용성의 연관성 조사	1건	문헌조사 보고서	자체 평가	공동	100%
				②	생물학적 수용성을 고려한 국내형 시멘트 개발	2건	생물학적 수용성을 극대화한 시멘트	자체 평가	주관	100%

나. 2차년도

핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						
				질적 성과지표		목표치	측정방법	검증 방법	연구 기관	달성치
B	(미)생물이 착근된 생물학적 다층구조 콘크리트 패널 개발	B-1	생물학적 콘크리트의 품질특성	①	생물학적 수용성에 영향을 미치는 콘크리트의 물리적 성질 조사	1건	문헌조사 보고서	자체 평가	공동	100%
				②	국내형 생물학적 콘크리트 개발	1건	공극률(수분포 집) 및 표면거칠기(영 양소 축적)에 따른 최적 배합	자체 평가	주관	100%
		B-2	패널의 다층구조 설계 및 제조	①	다층 구조 생물학적 콘크리트 패널 설계	1건	설계 제안서	자체 평가	공동	100%
				②	(미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 패널 샘플	1건	실내 가속화 시험을 통한 생물학적 콘크리트 패널 제작	자체 평가	주관	100%

2. 관련분야 기여도

구 분	Before (2016)	After (2018)
국외 기술수준	- 선진국의 공용중인 건축물에 적용한 사례가 일부 있음. ※ (선도기술 : 스페인의 UPC(Universitat Politecnica de Catalunya) 대학교 구조기술그룹 (Structural Technology Group)과 영국의 ULC(University College London) 대학교 건축학부)	- 수직형 녹화 시스템 (Vertical Greenery System)을 구축하고 다양한 방면에 대하여 연구 수행 중 - VGS는 도시 지역의 열섬현상을 줄일 수 있는 획기적인 대안으로 보고되고 있음. - 각 국이 단독적으로 개발되고 있어 상대적인 비교가 어려움에 따른 국가 기후 정보를 반영한 Köppen Climate Classification System 모델에 대하여 정립중.
국내 기술수준	(미)생물의 착근과 성장에 필요한 생물학적 콘크리트와 관련된 연구 및 기술 개발이 시도된 사례가 없음.	- 국내형 수직형 녹화 시스템(VGS)의 실험실 단계 기술 확보 - 실용화를 위한 기본 DB 확보
분석	- 선진국의 몇 개국에서 선도적으로 적용한 사례가 일부 있으나 찾아보기 어려우며, 실험실 단계에서 검증된 연구가 다수임. - 선진국의 기술을 국내에 도입할 경우 (미)생물의 성장조건과 생물학적 콘크리트의 화학적·물리적 특성치가 달라 바로 적용이 어려움. - 국내의 경우 유사기술로 수직정원 (Vertical Garden)이 있으나 유지 관리 및 비용이 매우 큼.	- 선진국의 개발 기술은 국내 여건과 맞지 않으며((미)생물의 종류), 국내 실정에 적합한 (미)생물의 적용이 중요. - 또한 빌딩 숲을 이루고 있는 국내 여건상 기술개발이 이루어 질 경우 적용처 및 시장성 확대 가능. - 기존의 수직정원을 전량 대체 가능. - 실용화 단계를 위한 개발이 필요할 것으로 판단됨.

제 5 장 연구개발성과의 활용 계획

1. 연구개발성과의 활용 방안

가. 새로운 시장 창출

- 생물학적 콘크리트 판넬은 아파트와 같이 공동 주거형태를 갖는 국내의 여건에 매우 적합한 기술로 우리나라는 최적의 시장조건을 가지고 있다고 할 수 있음. 본 기술은 건설 예정인 건축물뿐만 아니라 이미 완공된 건축물에도 적용이 가능하도록 콘크리트 판넬을 제작할 예정이므로 크게 위축된 건설시장에서 새롭게 사업영역을 개척할 수 있는 아이템이라고 판단됨.
- 더불어 CO₂ 저감을 위한 정부의 장기적인 친환경 정책에도 매우 부합하는 미래지향적인 기술이기 때문에 정부의 정책적 지원을 이끌어 낼 수 있는 적절한 사업 아이템이 될 수 있음. 또한 투자대비 일자리 비율이 매우 큰 건설업의 특성상 새로운 일자리의 창출에도 크게 기여할 것으로 예측됨.

나. 현장적용 및 실용화 방안

- 본 연구에서는 생물학적 콘크리트 판넬의 제작 및 성능평가는 실험실 조건에서 가속화 시험을 통해 이루어지며 최종 결과물은 실험을 위한 샘플의 제작에 초점을 맞춤.
- 본 연구로 축척된 기술을 토대로 후속 연구를 수행하여 현장적용을 위한 기술을 보완하고 적용성을 검증할 예정임.
- 본 기술의 실용화를 위해서 특허를 출원하고 시공회사에 기술이전을 추진하여 사업화의 기초를 마련할 계획임.

다. 향후 연구 방안 및 고려사항

- 본 연구의 후속 연구로써 생물학적 경량 판넬을 제조하여 구조물과 실내벽면에 적용하였을 경우 환경영향 특성에 대한 현장 검증을 추가로 분석하여야 할 것으로 판단되며, 생물학적 판넬을 적용된 구조물에 대한 장기영향 분석과 내구성 평가에 대한 구체적인 결과 및 활용방안을 제시해야 할 수 있도록 실용화 단계 수행이 필요함.
- 본 연구과제에서 제안하고 있는 생물학적 활용기술은 국내의 경우 도입한 사례가 없으며, 최근 국내 기술수준을 고려할 경우 알려진 연구사례 및 기술개발이 미흡한 실정임. 본 연구에서는 실험실 환경에서 성공적으로 원천기술을 확보한 것으로 판단되며, 원천기술의 보완 및 향상을 통하여 실용화를 위한 초석이 마련된 것으로 판단됨.
- 향후 사업성 및 활용성을 검토하기 위하여 실용화 단계에서는 판넬의 크기를 다양화하고 실제 구조물에 적용가능 하도록 판넬의 크기를 대형화하여 거주택 또는 유사형태의 실내환경을 조성하고 판넬 적용에 따른 영향 평가가 필요할 것으로 사료됨.
- 생물학적 판넬의 최초 적용방안은 건물의 외벽, 즉 외벽용 마감재이기 때문에 수분에 대한 제어가 클 것으로 사료됨. 수분은 생물학적 콘크리트의 수분층에 포집되어 존재하기 때문에 수분층에 존재하는 수분이 건축물에 직간접적으로 영향을 미치지 않도록 역방수층의 강화 및 외벽에 방수층을 형성하여 수분에 따른 악영향 방지 대안 필요.
- 또한 생물학적 판넬의 효과로써 CO2 감소와 대기정화, 열섬현상 저감, 건물의 냉·난방 에너지 절감, 소음차단뿐만 아니라 도시 경관의 미적요소 향상 및 주거자의 심리적 안정효과를 얻기 위한 디자인적 요소가 필요할 것으로 판단됨.
- 따라서 실용화 단계의 후속 연구에서는 판넬 적용에 따른 환경적 효과뿐만 아니라 미적 요소를 향상하기 위한 외적 디자인 설계를 실시하고 이에 대한 미적 효과를 주민들의 의견을 반영하여 제시하고자 함. 예로써 기존의 건축 단열재와 바이오친환경 도료 등과 함께 조화를 이룰 수 있도록 (미)생물에 대한 선입견을 해소하고자 함.
- 해당 기술 분야는 건설재료 외에도 타 분야 기술(조경, 도시공학 및 도시환경 분야 등)과의 융·복합이 가능한 기술이므로 타 산업간과의 연계를 통하여 사회적, 경제적, 기술적 파급효과를 창출할 수 있을 것으로 예상되며, 융합산업의 새로운 성장 동력원이 될 수 있으므로 미래 고부가가치 산업분야가 될 것으로 판단됨.

2. 연구개발성과의 활용 및 기대효과

가. 사회적 파급 효과

▪ CO₂ 감소와 대기정화 효과

: (미)생물은 CO₂, 질소화합물, 벤젠 등 대기 중의 유해물질을 흡수하고 산소를 방출시켜 공기를 정화시킴. 본 기술을 전국 건축물의 옥상과 외벽에 적용하고 도시형 농작물 재배와 동일한 효과를 얻는다고 가정할 경우 연간 CO₂를 약 301,373.8 톤을 흡수하는 것으로 나타남. 이는 2007년 우리나라 총 CO₂ 배출량 4억 8,870만 톤의 약 0.062%에 해당하는 수치임.

▪ 국지적 홍수 예방효과

: 서울시의 경우 지난 16년간(1987-2003년) 산림면적은 194.2 Km²에서 169.8 Km²로 24.4 Km² 줄었으며, 개발지역은 356.9 Km²에서 388.1 Km²로 31.2 Km² 늘어남에 따라 도심에서 열섬이 발생하는 일수가 꾸준히 증가하고 있는 추세임. 이 같은 현상은 여름철 서울의 강수량이 인근지역인 양평이나 이천보다 평균 20% 가량 많은 것에서도 알 수 있듯이 자연계에 불균형을 초래하여 국부적인 집중 폭우를 만드는 주요 원인 중 하나임.

▪ 도시열섬 저감효과

: 본 기술은 콘크리트에 착근된 (미)생물이 열을 흡수하여 자신의 성장에너지로 전환함으로써 도시의 온도를 낮출 수 있어(수직정원 적용의 경우 여름철 실내기준 3° C 이하) 열섬현상을 저감시키기 위한 실질적이고 기술적인 대안이 될 수 있음. 이는 도심에서 녹지면적(대지)을 확보하는 것보다 더 경제적인 방안임.

▪ 건물의 냉방 에너지 절감효과

: 여름철 서울의 경우 건물의 콘크리트 표면온도는 55° C까지 치솟고 겨울철에는 0° C 이하로 떨어져 하루 17시간 지속되는 경우가 발생하지만 녹화된 건물 옥상의 콘크리트 표면 온도는 여름철의 경우 주변보다 약 8° C 정도 낮은 것으로 나타나고 있으며 겨울철에의 경우 0° C 이하로 떨어지지 않는 것으로 나타남.

▪ 건물의 난방 에너지 절감효과

: 이는 (미)생물이 착근된 생물학적 콘크리트 또한 열전도율이 낮기 때문에 단열효과가 크며, 이에 따른 에너지 절감효과를 기대할 수 있다는 것을 의미함. 한국환경정책·평가연구원의 정책보고서의 조사를 토대로 전국 콘크리트 건물의 옥상과 외벽을 100% 녹화했을 경우 절약할 수 있는 냉·난방용 에너지를 석유로 환산하면 연간 약 12,275.5톤으로 추정할 수 있음.

▪ 소음차단 효과

: 건축물에 착근된 (미)생물은 방음효과를 기대할 수 있음. 특히, (미)생물을 성장시키기 위해 반드시 필요한 콘크리트 생물학적 층은 다공질의 콘크리트 재료로 이루어져 있어 소리를 흡수하고 파장을 단파장에서 장파장으로 변화시키는 역할을 수행함. 이는 일정 정도의 dB 이상의 소음경감 효과를 가져 올 것으로 사료됨.

▪ 건축물의 내구성 향상효과

: 생물학적 콘크리트 판넬은 (미)생물뿐만 아니라 내부에 방수층을 포함하고 있음. 따라서 산성비와 자외선이 직접 콘크리트에 접촉하는 것을 사전에 차단하고 온도변화의 영향을 줄여 콘크리트의 노화를 방지함으로써 건축물의 내구성을 향상시킬 수 있음.

▪ 도시 경관의 미적효과 및 주거자의 심리적 안정효과

: 도시의 콘크리트는 획일화된 색상과 질감으로 인하여 삭막한 느낌을 주지만 생물학적 콘크리트 외벽에 착근 가능한 (미)생물은 미세조류, 곰팡이류(균류), 지의식물 및 선류 등 매우 다양하기 때문에 이를 활용하면 다양한 종류의 색상뿐만 아니라 질감의 표현도 가능함. 따라서 자연에서 인간이 느낄 수 있는 정서적 안정감과 자연친화적인 느낌을 통하여 심리적으로 안정감을 유지할 수 있음.

나. 경제적 기대 효과

▪ 생물학적 콘트리트는 기존의 건축 단열재와 바이오친환경 도료 그리고 생체 건축 자재 시장(표 5.1)의 일부를 잠식할 수 있을 것으로 판단됨. 보수적으로 기술기여이익 총액의 약 20% 정도의 시장을 잠식할 수 있다고 가정할 경우 잠재적 시장규모를 480억 원 규모로 추정해 볼 수 있음. 이는 신규 건물을 기준으로 한 수치이며 앞서 분석한 결과와 같이 공용중인 건축물의 적용 시 그 규모는 약 3조원 규모로 매우 큰 경제적 가치가 있음.

[표 5.1] 기존의 대체 가능한 제품들의 기술가치 및 시장성 분석

기술명(제품명)	기술기여이익(백만)	기술가치산정액(백만)	비 고
Nano-pore 단열재	28,386 ~ 32,350	13,541 ~ 15,523	국내시장
바이오 친환경도료	19,505 ~ 22,506	8,884 ~ 10,384	해외포함
생체 친화형 건축자재	159,472 ~ 186,050	78,520 ~ 91,810	해외포함
합계	207,363 ~ 240,906	100,945 ~ 117,717	

제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 수직형 녹화 시스템(VGS)

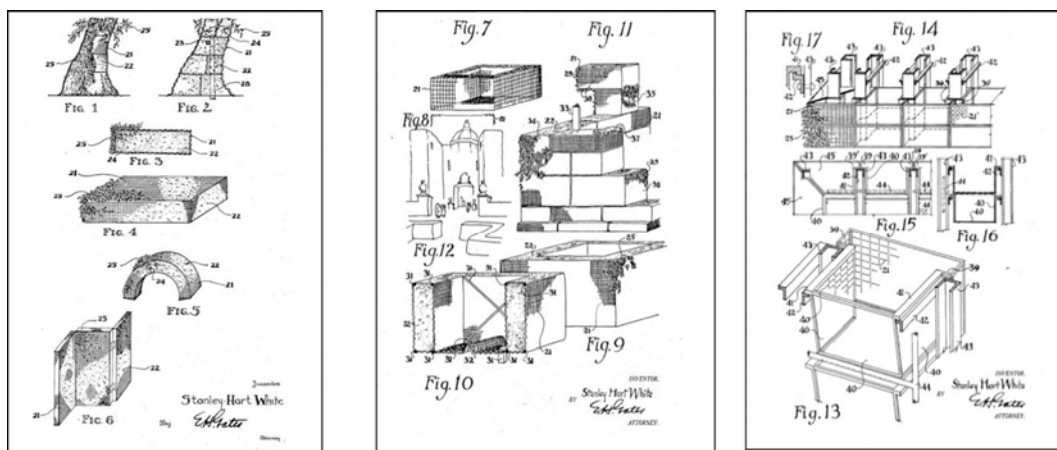
가. 수직형 녹화 시스템의 정의

- 수직형 녹화 시스템(Vertical Greenery System)은 기원전 7세기 고대세계의 7대 불가사의 중 하나로 간주되었던 바빌론의 공중정원(Hanging Gardens of Iraq)의 역사를 통하여 알려졌다.
- 고대 그리스 역사가에 따르면, 바빌론의 공중 정원은 고대 피라미드처럼 계단을 만들고 층층이 정원과 방을 만들었으며 높이가 무려 105 m 정도로 현재의 30층 빌딩 높이로 추정되고 있음. 공중 정원은 실제로 공중에 떠있는 정원이 아니라 산처럼 높은 계단식 정원에 각종 식물을 심고 물을 공급하여 울창한 정원으로 가꾸어 놓았기 때문에 멀리서 보면 마치 하늘에 떠있는 정원 같아 보여 불리게 되었음
- 공중정원의 구조는 돔이나 아치로 덮인 아치형의 테라스로 구성되어 있으며, 그림 2.1과 같이 큐브 모양의 기둥 위에 놓여있는 형식임.



[그림 6.1] 바빌론의 공중정원

- 현대의 VGS의 모델은 Stanley Hart White에 의하여 발명되었으며 1938년에 특허로 등록되었음. 그림 6.2는 Stanley Hart White의 식생 건축 구조와 시스템(The Vegetation-Bearing Architectonic Structure and System)의 모델을 나타낸 것이며, 눈으로 볼 수 있거나 노출된 건축물 표면에 영구적으로 자라는 식물을 설치할 수 있는 방법을 나타낸 것임.
- 그 이후로 Stanley Hart White 모델에서 개선된 다양한 모델들이 등장하기 시작하였지만 1980년대 패트릭 블랑(Patrick Blanc)이 식물을 건물 벽면에 통합한 VGS를 개발하는 모델과 기법을 소개함으로써 VGS의 관심을 가지기 시작하였으며, 이는 1980년대의 환경 문제와 녹색 도시로 변화시키기 위한 정책 시행에 따라 더욱 주목받게 되었음.
- 이에 따라 최근에는 VGS가 환경적으로 지속 가능하고 도시 지역의 기후 변화 영향을 완화 할 수 있는 새로운 접근 방식으로 대두되고 있으며, 국내외 적으로 점차 인식이 커지고 있는 실정임.
- 한편 건축에서 전통적인 녹화는 주로 미적인 이유로 적용되어 왔지만 최근에는 에너지 절약, 건축자재의 내구성, 도시 기후 개선 및 다양한 생물 공급 등과 같은 생태학적 및 경제적 이유가 커짐에 따라 이를 활용하기 위한 노력을 기울이고 있음.



[그림 6.2] 식생 건축 구조와 시스템(Hindle, R.L., 2012)

- VGS의 용어적 정의는 건물 내벽이나 외관에 영구적으로 부착되거나 성장하는 식물을 설치하는 모든 형태를 일컫는 일반적인 용어이며, Green space wall, Green wall technologies, Green facade, Green scaffoldings, Bio wall, Bio facade wall, Vertical garden 및 그림 2.3과 같이 Living wall과 같은 다양한 용어로도 알려져 있음.
- 그림 6.3은 VGS의 대표적인 유형을 나타낸 것이며 크게 지반 기반 시스템(Ground based system)과 벽면 기반 시스템(Wall-based system)으로 구분할 수 있음. 지반 기반 시스템은 수직으로 자라는 식물을 지반에 설치하여 녹색 정면화(Green facades) 하는 것을 말하며, 벽면 기반 시스템은 건물 벽면에 직접 부착되거나 케이블 또는 격자를 사용하여 설치된 등산 식물을 말함.
- 지반 기반 시스템의 녹색 정면화(Green facades)는 주로 Direct green facade와 Double-skin green facade로 적용한다. 벽면 기반 시스템의 녹색 벽면(green wall)은 벽면에 직접 부착한 형태인 Continuous green wall과 Modular green wall로 적용되며, 벽면에 선반을 부착한 형태인 Linear living wall로 적용하기도 함.
- 특히 벽면 기반 시스템은 대부분 성장 매체 및 관개 시스템을 적용한 연속 모듈 방식을 사용하여 설치되기 때문에 지반 시스템과 달리 다양한 식물 종을 선택할 수 있으며, 고층빌딩에 적합함.

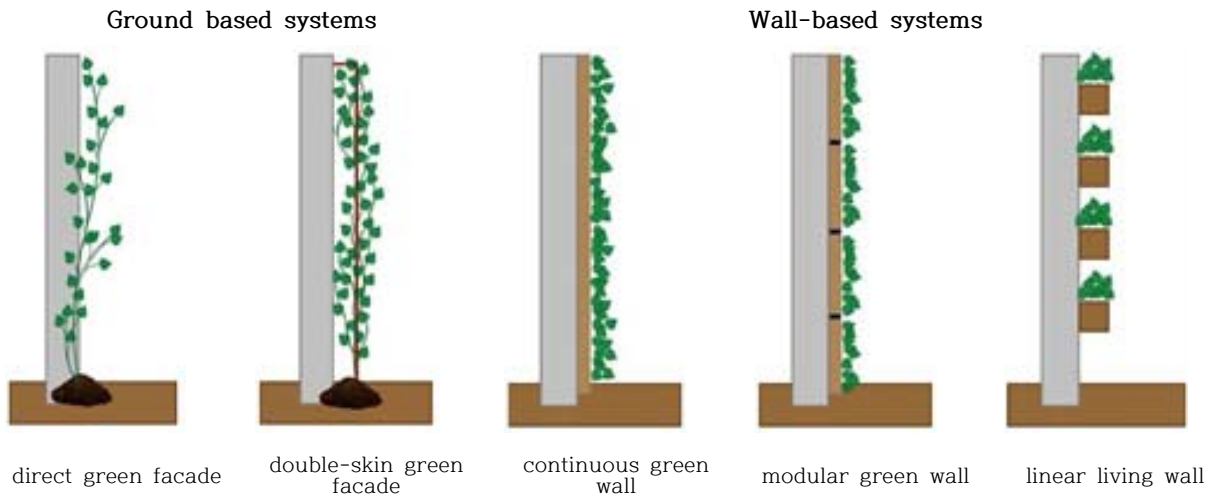


Living wall of intermark integra Tower Kuala Lumpur, Malaysia(Bakar, NIA. et al., 2013)

Living wall of 5-storey office building, Selangor, Malaysia (Jaafar. B. et al., 2013)

Living wall of gym in private home in Chennai, India (Greenroofs.com, 2017)

[그림 6.3] Living Wall을 이용한 적용 사례



[그림 6.4] 수직 녹화 시스템(VGS)의 형태에 따른 분류

▪ VGS를 위한 성장 매체는 관목을 기반으로 할 경우 중수도 시스템, 구조 프레임, 용기, 기질 및 식물 자체와 같은 요소로 구성되어 많은 비용이 소요됨에 따라 적용의 어려움이 있으며, 기후에 영향을 많이 받기 때문에 유지보수가 어려움. 그러나 넝쿨과 같은 등산 식물을 적용할 경우에는 전체 무게가 적다는 장점이 있어 대부분의 벽에 적용이 가능하지만 이 또한 성장을 위한 설비가 필요하고 관리가 어려움.

▪ 그러나 선태식물과 같은 매개체를 사용하여 벽면에 부착할 경우 상기의 설비가 필요 없으며, 기후의 영향이 적어 생존력이 크기 때문에 유지관리가 쉽고 녹화 밀도도 향상시킬 수 있다는 장점이 있음.

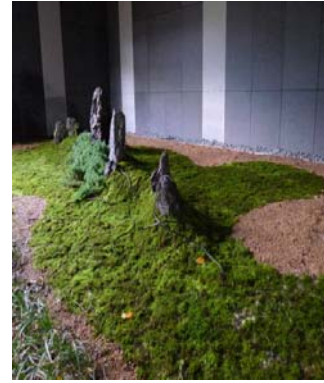
▪ 선태식물(Bryophyte, 蘚苔植物)은 선류(蘚類) 및 태류(苔類)를 포함하여 약 2만여종으로 이루어진 최초로 육상생활에 적응한 식물군으로서 흔히 이끼식물이라고 함. 분류학상으로는 양치식물에 가깝지만 특별한 통도조직은 발달해 있지 않으며 엽록체가 있어 독립영양 생활을 하기 때문에 관리가 용이함.



관목식물



등반식물

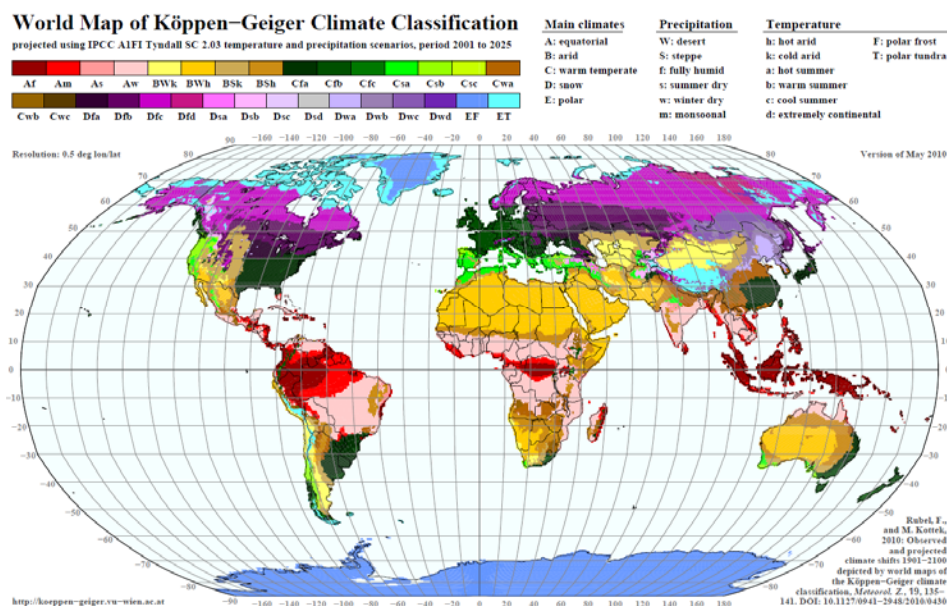


선태식물

[그림 6.5] VGS을 위한 성장 매체에 따른 분류

- VGS의 효과는 건물의 에너지 절약을 위한 수동 시스템으로써 최근 열전도에 대한 기술적인 주제와 식물에 의한 음영 효과 및 식물의 증발산에 의한 냉각 효과와 같은 연구가 수행되었음. 그러나 식물 활용에 관한 연구는 일반적으로 식물 성장에 영향을 주는 기상 조건에 대한 의존성 및 사용된 식물 종에 따라 다양하게 변하기 때문에 연구 결과를 일반화 할 수 없다는 문제점이 있음.
- 최근 연구의 공통적인 결과에 따르면 VGS는 도시 지역의 열섬현상(Urban Heat Island, UHI) 완화 및 냉각 부하 감소에 큰 가능성을 가지고 있다고 보고하고 있으며, 기존 건물의 개조 및 새로운 건물 설계에 반영 할 수 있고 조밀한 도시 지역의 부족한 지면보다 상대적으로 큰 수직 표면에 적용할 수 있기 때문에 지상에서 나무를 심기보다 더 효과 적인 방법임. VGS는 지속적으로 도시 지역의 UHI 완화에 대한 이점을 보여주는 많은 연구가 수행되어 보고되고 있으며, 열 및 에너지 성능을 향상시키는 잠재적인 기술로 평가되고 있음.
- 한편 건물 에너지의 사용량은 인류 사회 전체 에너지 사용량의 약 1/3을 차지하고 있으며, 지구 기후 변화, 도시의 온난화 및 도시 환경 악화를 촉진시키기 때문에 건물의 에너지 절감을 위한 패시브 시스템 중 하나으로써 건물의 수직 벽면의 활용은 가장 효율적인 대책이라 할 수 있음.

- 그러나 VGS는 기후 영향이 건물의 열 성능에 미치는 영향, 날씨에 따른 식물 성장 (잎 밀도, 식물 높이 등) 및 생리적 반응(증산, 잎의 위치 등)에 미치는 영향도 고려 대상임. 따라서 VGS의 열적 거동은 기상 조건에 따라 다른 결과로 나타남.
- 이러한 이유로 각 지역과 국가별로 기후 정보를 비교하기 위하여 세계 기후를 분류하여 사용되는 시스템인 Köppen Climate Classification System을 사용하는 것이 적절하다고 보고되고 있음.
- 쾨펜(Köppen) 기후 분류 카테고리는 그림 6.6과 같이 연간, 월간, 기온 및 강수량 평균을 기준으로 작성되며, 이 시스템은 5가지 주요 기후 유형을 (A)적도, (B)건조, (C)온대 기후, (D)냉대 및 (E)극지를 대문자로 분류하여 나타냄.



[그림 6.6] 쾨펜 기후 분류 지도(The Köppen Climate Classification)

나. 수직형 녹화 시스템의 조성

▪ 국내 VGS에 대한 개념은 벽면녹화로 혼용 사용되고 있으며 규정을 통한 도입을 추진하고 있다. 수직형 녹화 시스템을 조성하기 위해서는 그림 6.7과 같이 녹화 가능성을 검토하고 계획을 수립한 다음 녹화시공이 이루어져야 하며, 사후관리를 하는 과정을 중점으로 하고 있음.

1 단계	녹화가가능성 검토	녹화공간의 물리적 환경특성	바람 / 온도 일조량 / 건축물 표면상태
		식재환경 조건	식재기반 / 토양상태 관수·배수
		관리여건	사후관리
2 단계	계획 수립	녹화대상공간	건축물 벽면의 재질 건축물의 높이 식재공간 확보
		녹화식물	선정조건(녹화목적, 환경내성 등) 종류(등반양식, 상록/낙엽성 등)
		녹화기법	부착형 / 등반형 / 하수형
		비용 산출	식물특성 / 벽면의 면적 토양상태 / 1주당 가격 등반보조재
3 단계	녹화시공	식재기반	토양공간 / 식재공간
		등반보조재	설치조건 종류
		관수 및 배수설비	기초설비 유의사항
		식재	
4 단계	사후관리	전정 및 제초 / 시비 관수 / 갱신	

[그림 6.7] 수직형 녹화 시스템(벽면녹화)을 도입하기 위한 과정

다. 수직형 녹화 시스템의 대상

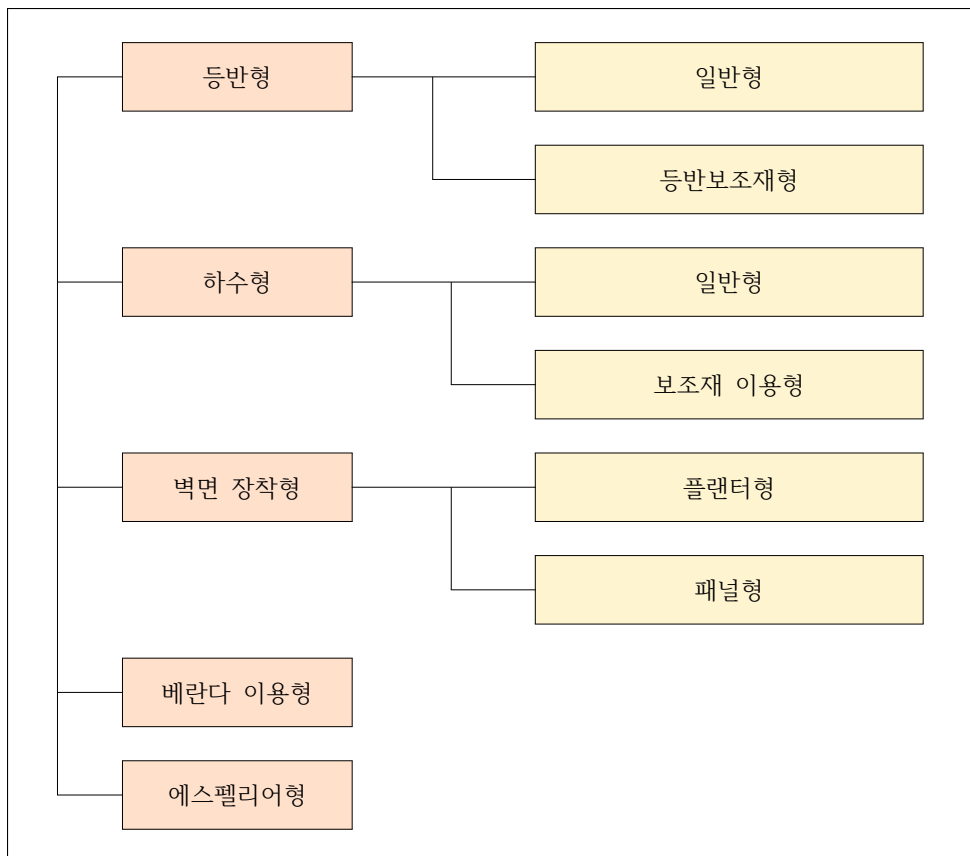
- 수직형 녹화 시스템의 대상은 표 6.1과 같이 환경부에서 지정한 건축물의 벽면, 각종 울타리, 방음벽, 콘크리트 옹벽 및 석축, 하천의 수직호안 등으로 나뉨.

[표 6.1] 수직형 녹화 시스템(벽면녹화)의 대상별 고려사항

요 소	고려사항
건축물 벽면	• 도시 내에 즐비한 건축물 벽면이 모두 녹화의 대상이 될 수 있으며, 특히 에너지 절감효과를 위해 중요함 • 벽면 기부에 흡착형 식물 또는 줄기감기형 식물을 식재하거나 건축물 옥상 또는 벽면 등에 식재용기를 설치하고 식재하여 신장하는 덩굴을 하수시키는 방법이 있음 • 건축물 설계단계부터 덩굴식물을 등반시킬 수 있도록 등반보조재를 설치토록 설계하거나 부착근형 식물을 위한 해고(다공질 섬유덩어리로서 수분을 장기간 보유하고 있음)를 설치하는 것이 바람직함 • 남쪽벽면은 낙엽성 식물이 바람직함. 낙엽성 식물은 여름철에는 태양광을 차단하며 식물의 증산작용으로 냉방효과를 거둘 수 있고 겨울철에는 낙엽이 저서 태양광을 차단하지 않음 • 북쪽, 서쪽, 동쪽벽면은 겨울에 보온효과를 위하여 상록성 식물을 가능한 한 벽면에 밀착시켜고 식물 층을 두껍게 유지하는 것이 바람직함 • 창문이 많은 경우 식물이 부착되지 않도록 하수형 녹화기법이나 격자에 유인하는 수법을 도입하는 것이 바람직하나 경관상의 이유 및 시공비 등으로 인하여 부착등반형을 사용할 경우 전정과 유인 등 관리가 필요함
각종 울타리	• 콘크리트 담장 및 회색 블록담은 경관 적으로도 보기 흉하고 맑은 날에는 햇빛의 반사도 심하여 도괴의 위험도 있으므로 녹화가 바람직함 • 담장의 기부에 담쟁이덩굴, 송악, 모란, 줄사철나무 등의 흡착형 식물을 식재하여 녹화하는 것이 가장 쉬운 방법임 • 담장 안쪽에 식재하면 식물이 자라서 바깥쪽으로 뻗어 늘어지므로 담장 안팎을 모두 녹화할 수 있음
방음벽	• 소음 차단을 위한 도로변의 방음벽은 도시경관을 저해하고 빛을 반사하여 운전자의 시력에 영향을 줌 • 콘크리트로 만들어진 방음벽은 흡착형 덩굴식물의 부착이 가능 • 금속으로 만들어진 방음벽은 표면이 매끄럽고 하계에는 대단히 고온이 되므로 덩굴식물을 감아올리기 위한 격자를 방음벽 전면에 설치하여 녹화함
콘크리트 옹벽 및 석축	• 고가구조의 도로·철도 교각 등 콘크리트 옹벽을 덩굴식물로 녹화 할 수 있음 • 옹벽의 기부에 덩굴식물을 식재하여 부착 등반시키거나 등반보조재를 이용하여 줄기감기형 식물을 식재 • 옹벽면의 군데군데 주머니모양의 식재공간을 설치하고 담쟁이덩굴 등을 식재하여 덩굴을 사방으로 부착시켜 녹화할 수 있음 • 고가도로의 교각을 녹화하는 경우 일조가 차단되어 녹화공간이 음지가 되는 경우가 많으므로 내음성이 강한 식물을 선택하여 식재 • 댐부근의 거대한 콘크리트 옹벽 등은 덩굴의 신장력이 큰 담쟁이덩굴, 등나무, 칩 덩굴 등이 용이함
하천 수직 호안	• 도시 내의 중소하천의 수직호안은 대부분 콘크리트로 만들어져 경관적으로 보기 안 좋음 • 호안의 하부가 수면을 접하고 있는 경우 상부에 덩굴 신장력이 큰 송악 등을 식재하여 덩굴을 하수시킴 • 수직호안이 직접 수면과 접하지 않고 공간이 있는 경우 담장이나 방음벽 녹화와 같이 호안 기부에 흡착형 또는 감기형 식물을 심어 덩굴을 등반시킴으로써 녹화가 가능

라. 수직형 녹화 시스템의 유형

- 수직형 녹화 시스템의 그림 6.8과 같이 등반형, 하수형, 벽면장착형, 베란다 이용형, 에스펠리어형으로 나누어짐.



[그림 6.8] 수직형 녹화 시스템(벽면녹화)의 유형분류

(1) 등반형

(가) 일반형

- 종래에 많이 이용하던 유형으로 입면의 기부에 덩굴식물을 식재하여 덩굴의 성장에 따라 벽면에 직접 부착 등반시켜 녹화하는 방법임. 등반보조재와 같은 보조시설이 필요하지 않아 비용이 저렴하고 시공이 용이하며 자연스러운 경관을 창출할 수 있음.

- 입면의 표면이 콘크리트 블록, 거친 벽돌 등 다공질의 상태나 줄눈이 있으면 부착이 쉽고 유리처럼 미끄러운 벽재나 온도가 높아질 수 있는 벽재는 타고 올라가지 못함. 모종부터 피복하는 것이 많으며 생육이 늦은 식물을 사용하면 피복에 오랜 시간이 걸림.

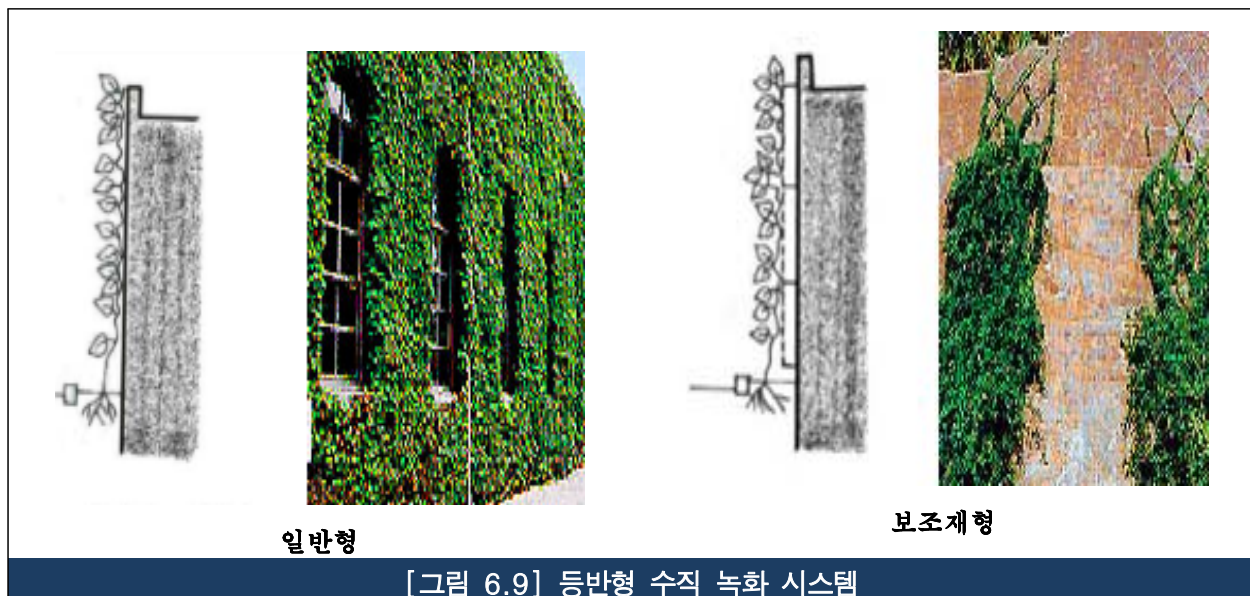
- 대부분의 중부지방에서 적용 가능한 흡착형 식물이 낙엽성이며 상록성의 경우 남부지방수종이어서 겨우살이가 어렵다는 단점을 가지고 있어 겨울철에는 경관적으로 좋지 않음. 또한 부착근이 벽면의 공극을 파고들어 고사하거나 필요에 의하여 설치면에서 제거할 필요가 있을 경우 완벽하게 제거하기가 곤란함. 그리고 벽면 전체에 무작위로 확장하므로 원하는 형태 또는 부분에 녹화하기 어렵다는 단점을 갖고 있음.

2) 보조재형

- 표 2.4는 와이어나 메쉬 등의 등반보조재를 입면에 설치하고 덩굴식물을 입면 기부에 식재하여 덩굴이 감아 올라가도록 녹화시키는 방법을 나타낸 것이임. 건물 자체에 영향을 적게 미치고 식물을 용인, 결속시킴으로서 생육을 재촉할 수 있음. 입면의 구조, 재질에 상관없이 어떤 벽면에도 녹화가 가능함. 지지대를 설치하는데 비용이 들고 설치공간이 필요함.

[표 6.2] 등반보조재형의 특징

분류	장점	단점
와이어형	• 사용범위가 넓음 • 벽면의 상황이나 식물의 생육상황에 맞게 와이어와 공정부를 자유롭게 조절가능 • 다양한 모양으로 연출 가능	• 개벽적인 와이어를 시공하는데 소요 시간 김
메쉬형	• 와이어형에 비해 시공이 간단함 • 벽면녹화를 원하는 부분의 녹화량 조절 가능	• 개구부가 있는 벽면에 사용하기 부적합함 • 일자형일 경우 식물이 수직적으로만 녹화됨



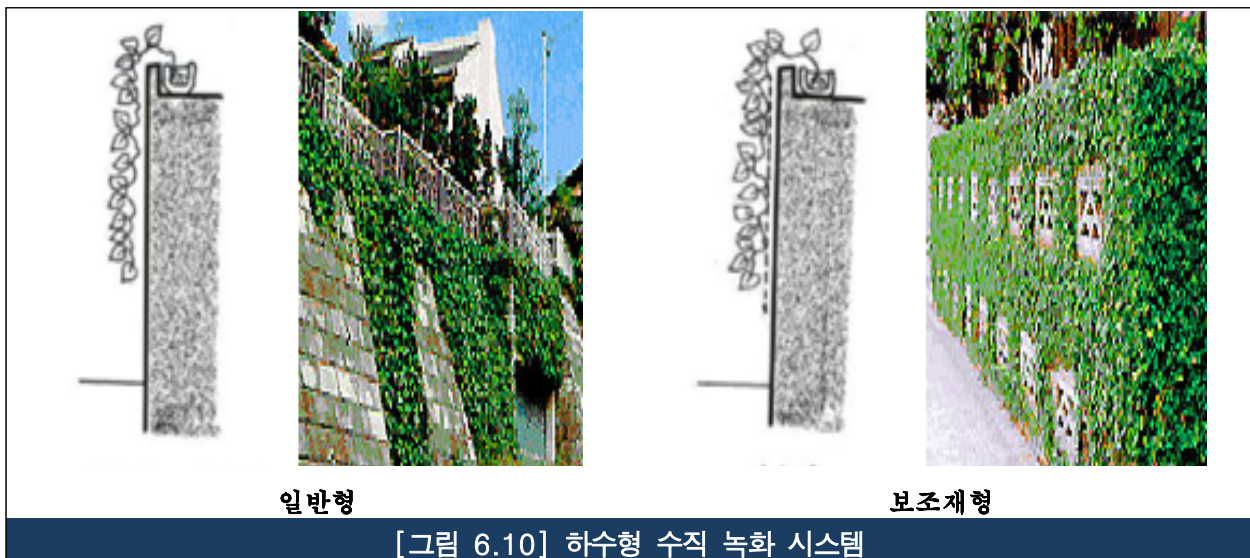
(2) 하수형

(가) 일반형

▪ 입면의 상부나 옥상 등에 식재용기를 설치하고 성장하는 덩굴을 늘어뜨려 녹화하는 방법임. 흡착근 또는 흥반이 있는 식물은 벽면재료에 따라 붙으며 늘어지는 것도 있음. 건물자체에 영향이 적고 자연스러운 경관을 창출할 수 있음. 그러나 생육기반의 설치 장소가 충분한 하중을 견딜 수 있어야하며 바람에 의한 영향으로 식물의 생육이 불량하거나 잎이 상하는 발생 할 수 있음.

(나) 보조재 이용형

▪ 벽면에 철망이나 와이어 등 아래로 늘어뜨리기 위한 지지대를 설치하여 헤데라류 등을 늘어뜨리는 방법임. 건물에 미치는 영향이 적고 생장을 재촉할 수 있음. 휘감기는 식물을 이용할 수도 있지만 자주 결속시켜 주어야 함.



[그림 6.10] 하수형 수직 녹화 시스템

(3) 벽면장착형

(가) 플랜터형

▪ 입면에 식재공간을 설치하고 식물을 심어 녹화하는 수법으로 벽면자체의 줄눈을 활용하거나 인공지반 용기를 설치하여 녹화하는 수법으로 덩굴식물, 잔디, 지피식물, 원예용 초화, 다육식물 등 식재면적에 따라 다양한 식물을 식재하여 녹화는 수법임. 다른 방법들에 비해 비용이 많이 들고 시공이 복잡하지만 미리 식재하여 설치하면 초기녹화의 효과도 충분히 기대할 수 있음.

(나) 패널형

▪ 표 6.3은 패널형은 식재된 녹화 패널을 벽면에 장착함으로서 초기 녹화 효과를 볼 수 있는 방법으로 초본, 목본, 이끼류 등 다양한 종류의 식물종의 사용이 가능하고 기업 로고 등 다양한 디자인적 효과도 낼 수 있음. 또한 벽면 전체를 패널로 덮음으로서 온도 저감효과도 높고 특정 패널의 교체도 가능하여 관리가 용이함. 그러나 관수장치의 필요 등의 초기 설치비용이 많이 들며, 급배수나 설치방법 등에 대해서 신중히 고려가 하여야 함.

[표 6.3] 벽면장착형의 특징

분류	장점	단점
플랜터형	- 고층건물에 도입이 가능 - 다양한 식물 이용가능	- 지속적인 유지관리가 필요 - 설치 비용이 높음
패널형	- 고층건에 도입이 가능 - 특정패널의 교체가 가능 - 다양한 식물을 도입가능 - 초기녹화의 효과가 좋음	- 관수시설의 도입이 필요 - 초기 설치비용이 큼

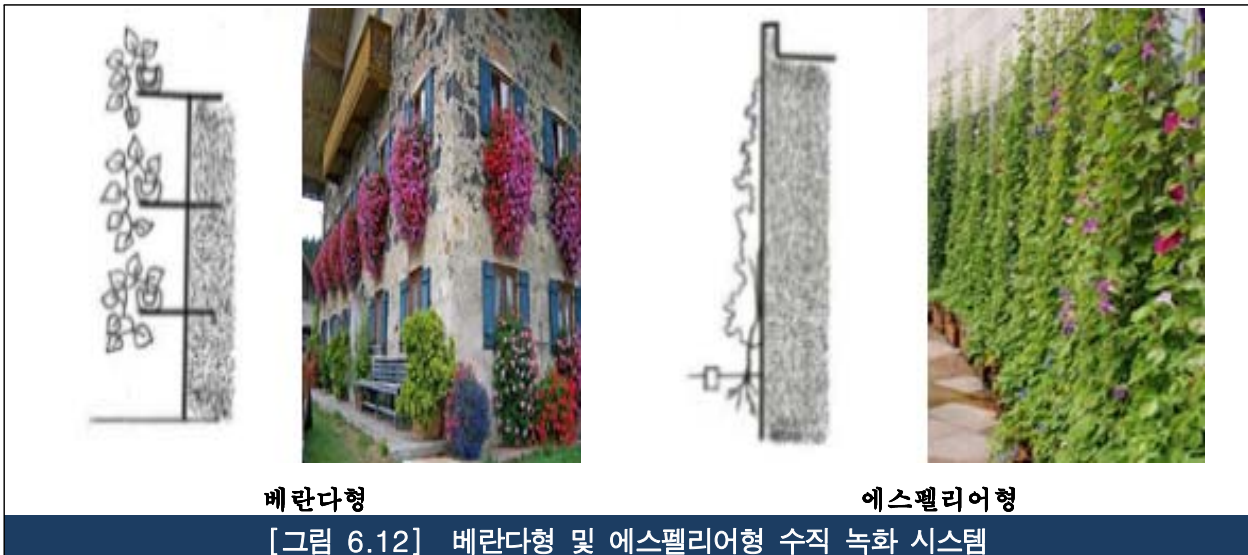
(4) 베란다 이용형

- 각층에 베란다가 있는 건물에서 식재용기를 놓아 관목, 초본 등을 식재하여 입면의 녹화경관을 도모하는 방법으로 주로 화목류, 제라늄, 베고니아, 페튜니아, 아이비 등 화단식물을 사용함.



(5) 에스펠리어형

▪ 입면아래에 조경수목, 덩굴식물 또는 과수를 식재하여 신장하는 가지 덩굴을 여러 가지 형태로 유인하여 얇고 길게 벽면에 붙여서 녹화는 방법으로 입면에 트렐리스, 펜스 등을 설치하여 나뭇가지, 덩굴을 엮거나 고정용 기구를 이용하여 녹화대상 면에 고정시키는 방법임. 경관적인 측면에서 녹화가 요구되는 공간에 적합한 방법이나 지속적인 유지관리가 필요함.



[그림 6.12] 베란다형 및 에스펠리어형 수직 녹화 시스템

제 7 장 연구개발성과의 보안등급

1. 연구과제 보안등급의 분류

보완 과제	일반 과제
	0

2. 결정 사유

- 본 연구개발사업은 [국토교통부소관 연구개발사업 운영규정] 제 7 장 연구개발사업의 보완 및 정보관리 제 47 조의 4(보완 등급 분류 기준)에 명시된 보완등급 분류에 따라 일반과제로 분류

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

※ 해당사항 없음

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전조치 이행 실적

가. 국내 관련 규정에 의거 관리체계 구축

- 연구실 안전환경 조성에 관한 법률
- 폐기물관리법, 원자력관리법, 유해화학물질관리법, 위험물질관리법, 유전자변형생물체 이용에 관한 법률 등

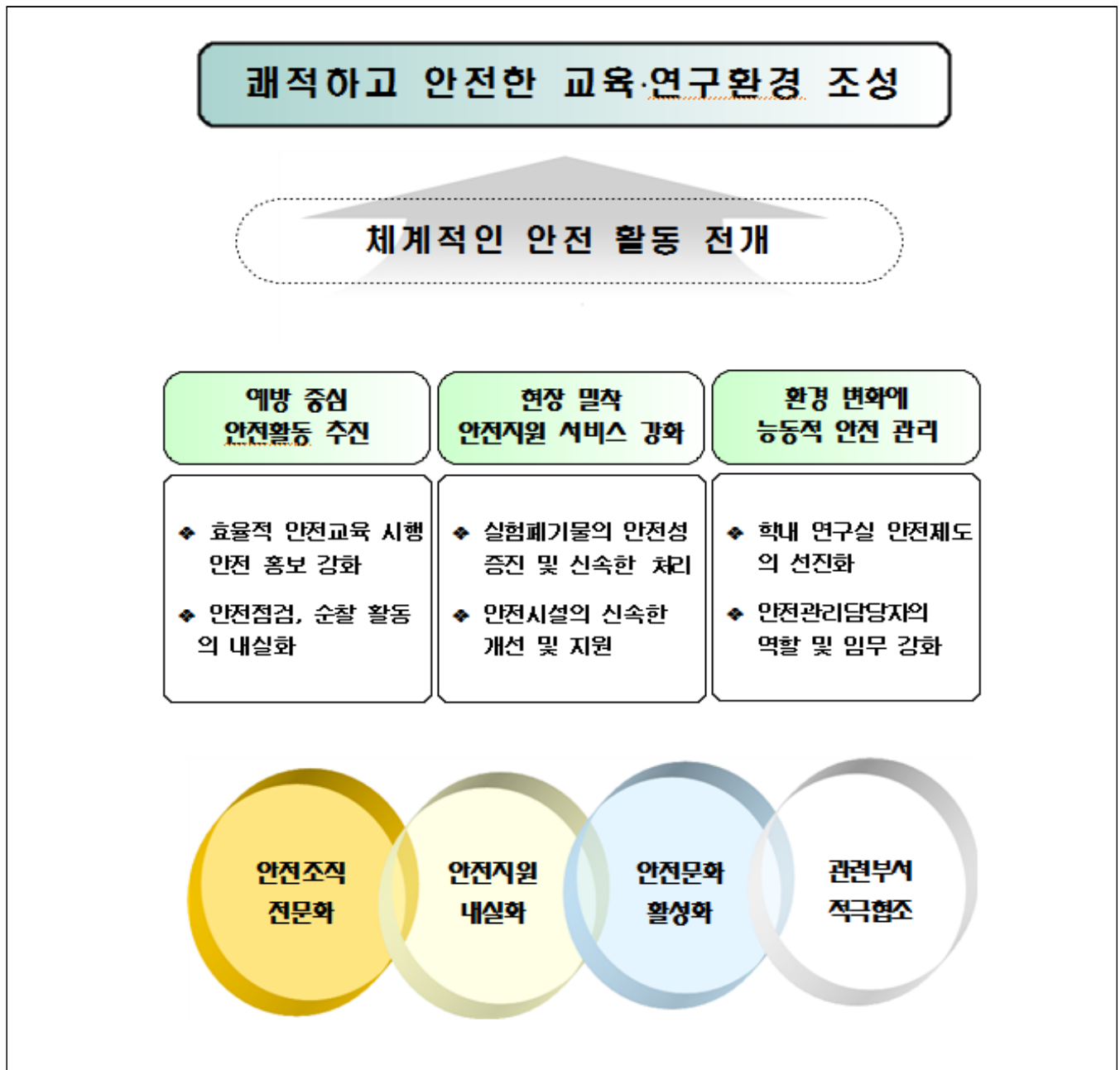
나. 내무 관련 규정에 의거 환경개선 및 대책방안 마련

- 연구실 안전관리 규정 제작 및 설치
- 실험 폐기물 관리지침 마련, 처리 절차 제정

다. 관리대상 및 절차

- 안전관리 대상자 선임 및 프로세스 구축
- 연구실 및 실험실 위험요소 분석 및 대처방안 마련
- 연구활동 종사자 장비관리 및 실험규칙 숙지 교육 수행

라. 안전관리 및 조치방법 플로우 차트



2. 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황

※ 해당사항 없음

제 10 장 연구개발성과의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	후기포 방식을 적용한 생물학적 판넬용 기포 시멘트 복합재료의 품질특성에 관한 실험적 연구	세명대학교	저자	한국 콘크리트 학회	-	2018.02.01	단독 사사	비SCI
2	논문	생물학적 판넬용 마그네시아-인산칼륨 복합체의 유동 및 압축강도 특성에 관한 실험적 연구	세명대학교	저자	한국산학 기술학회	-	2017.07.07	단독 사사	비SCI
3	논문	A Study on the Fundamental Quality of Magnesia-Phosphate Formed Mortar Composite using Super absorbent Polymer for Development of Concrete for Biological Panel	세명대학교	저자	Advances in Materials Science and Engineering	0.827	2018.01.05 (심사중)	단독 사사	SCI(E)
4	논문	A Study on the Flow Characteristics and Quality Control of Lightweight Foamed Magnesia Composite Using Super absorbent polymers as Base Material for Biological Panels	세명대학교	저자	Key Engineering Materials	-	2018-07-27 (심사중)	단독 사사	SCI(E)
5	논문	A Study on the Compressive Strength Properties and Quality Control of Lightweight Foamed Magnesia Composite Using Super absorbent polymers as Base Material for Biological Panels	세명대학교	저자	Key Engineering Materials	-	2018-07-27 (심사중)	단독 사사	SCI(E)

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
6	논문	A Study on the Quality and Biological Properties of Lightweight Foamed Mortar for Biological Panel Application	세명대학교	저자	Construction and Building Materials	-	2018-08-10 (투고중)	단독 사사	SCI(E)
7	논문	An Experimental Study on the Quality and Optimum Mixing of Magnesia Composites for Biological Panels	세명대학교	저자	Construction and Building Materials	-	2018-08-10 (투고중)	단독 사사	SCI(E)
8	논문	An Experimental Study on the Quality Properties of Lightweight Formed Magnesia Composites using Super Absorbent Polymer for Biological Panel Application	세명대학교	저자	Construction and Building Materials	-	2018-08-10 (투고중)	단독 사사	SCI(E)
9	특허	(미)생물 착근을 위한 콘크리트 패널용 생물학적 시멘트의 제조 방법 및 조성물	세명대학교	발명자	대한민국	-	2017. 05. 20.	단독 사사	출원 10-2017-00 62601
10	특허	생물 또는 미생물 착근을 위한 콘크리트 판넬용 생물학적 시멘트 조성물 및 이의 제조방법	세명대학교	발명자	대한민국	-	2017.10.27. (등록 심사중)	단독 사사	출원 10-2017-01 41173
11	특허	콘크리트 판넬 및 콘크리트 판넬의 제조방법	세명대학교	발명자	대한민국	-	2018.04.03. (등록 심사중)	단독 사사	출원 10-2018-00 38470

제 11 장 참고 문헌

- 강석표, 김재환, (2015). 마그네슘 인산칼륨 시멘트 모르타르의 배합요인이 초기재령 물성에 미치는 영향. 대한건축학회 논문집, 31(5), 61-68.
- 강성훈, 문주혁, 홍성걸, (2016). 고흡수성수지(SAP)를 이용한 내부양생이 초고성능 콘크리트(UHPC)의 수화반응, 자기수축, 내구성 및 역학적 특성에 미치는 영향. 한국콘크리트학회 논문집, 28(3), 317-328.
- 강수학, (2003). 서울지역 벽면녹화 현황 및 상록성 덩굴식물의 적응연구. 서울시립대 산업대학원 석사학위논문.
- 김남춘, 한승호, 강진형, (2003). 식생블록(그린스톤)에서의 식물생육에 관한 연구: 관수유무와 방향에 따른 생육비교를 중심으로. 한국환경복원기술학회지, 6(2), 57-70.
- 김선혜, (2004). 화단형태의 인공지반 녹화를 위한 식재토양조성 및 관수방안 연구, 한국환경복원기술학회지, 7(6), 12-18.
- 김혜란, (2015). 저관리 벽면녹화에서 식재지반에 따른 화목류의 적응성 평가. 건국대학교 대학원 박사학위논문.
- 김원태, 윤용한, 한규희, (2009). 알아야 할 벽면녹화의 Q&A. 기문당.
- 강인석, 안무영, 백민수, 임남기, 문장수, 정상진, (2007). 마그네시아 인산염 시멘트를 사용한 초속경 보수 모르타르의 기초적 특성분석에 관한 연구. 대한건축학회 논문집, 23(8), 139-148.
- 강인석, 안무영, 백민수, 정상진, (2008). 마그네시아 인산염 시멘트를 사용한 초속경 보수 모르타르의 수화특성 및 현장적용성에 관한 연구. 대한건축학회 논문집, 24(2), 79-86.
- 강진형, (2003). 식생블록을 이용한 입면녹화에 관한 연구. 단국대학교 대학원 석사학위논문.
- 국립생물자원관, (2014). 선택식물 관찰도감. 지오북
- 노승무, (2004). 벽면녹화기술개발과 덩굴 식물의 생장에 관한 연구. 진주산업대 산업대대학원 석사학위논문
- 노승무, 이정식, 김유선, (2003). 서울시내 벽면녹화지역 식물생장 및 환경분석 연구. 한국화훼산업육성협회지, 11(2), 157-165.

- 노영팔, 정연태, 정근식, 김영하, (1987). 수팽윤성 고분자 화합물의 농업적 이용에 관한 연구. 한국토양비료학회지, 20, 209-216.
- 박용진, (1997). 입면녹화용 덩굴식물의 분포 특성. 한국환경생태학회지, 11(3), 270-276.
- 변재경, (2007). 조경수에 사용되는 유기질비료의 종류 및 특성. 조경수, 100, 35-37.
- 심명선, 김영재, 이동석, 권영한, 김성식, 강우창, (2011). 벽면 및 옥상에 식재된 여러 사초류의 생육반응, 한국생물환경조절학회지, 20(2), 162-168.
- 신용습, 이지은, 연일권, 정종도, 최성용, 이기도, (2009). 보온부직포 재료가 참외의 생육 및 수량에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회지, 18(2), 101-106.
- 이경호 외, (2017). 마그네시아 인산염 복합체의 강도 및 pH에 대한 인산염 종류의 영향. 한국건축시공학회 2017년도 논문집, 17(2).
- 이은희, 김용아, (2000). 대도시 주거용 건물의 벽면녹화에 대한 인식도 및 실태조사, 한국조경학회지, 27(5), 181-190.
- 이은희, 남미아, 신상희, (2004). 관리조방적 벽면녹화용 식물선정. 한국환경생태학회지, 2004(2), 70-74.
- 이영무, (2001). 고층건물의 벽면조경기법에 관한 연구. 환경개발연구논문집, 6, 89-119.
- 이숙미, 심경구, (1994). 도시의 벽면녹화를 위한 벽면식생 조사연구: 서울시를 중심으로. 한국조경학회지, 22(1), 1121-1134.
- 윤현섭, (2016). 마그네시아-인산염 복합체를 활용한 박테리아 콘크리트 코팅재 개발 (석사 학위). 경기대학교.
- 양은경, 서항석, 태춘섭, (2010). 아파트 단지 계획에 있어서 벽면녹화의 적용 타당성 분석. 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 356-361.
- 정태건, 소재현, 이은정, 전기성, (1999). 방음벽 녹화를 위한 덩굴식물 활용성 연구. 한국환경복원기술학회지, 2(1), 72-82.
- 장봉석 외, (2011). 저온 소성한 MgO 분말을 혼입한 시멘트 복합체의 기초 물성. 한국콘크리트학회 2011년도 논문집, 23(2).
- 최종명, 왕현진, 이종석, (2005). Poly acrylic Acid Sodium Salt의 혼합률이 상토의 물리성에 미치는 영향. 원예과학기술지, 23(4), 481-48.
- 환경부, (1998). 도시건축물 입면녹화 지침.
- 한국환경과학회, (2009). 그린조경학. 문운당.

- 한승호, 김선헌, (2006). 벽면녹화 활성화를 위한 제도적 개선방안 및 조성방향에 관한 연구. 한국환경복원기술학회지, 9(2), 59-71.
- (주)한국도시녹화, (2007). 이끼의 효과와 분류, 생태학적 위치. http://www.biotope.co.kr/community/community_data.asp
- Ames, W. B., (1893). Oxyphosphates. Dent. Cosmos, 35, 869-875.
- Afshari, A., (2017). A new model of urban cooling demand and heat island Application to vertical greenery systems (VGS). Energy and Buildings, 157, 204-217.
- Amir, A.F., Yeok, F.S., Rahman, A.M., (2014). Estimation of annual carbon sequestration in Psophocarpus tetragonolobus used as biofacade in tropical environment. Paper presented at the Proceedings of International Conference on Architecture and Civil Engineering (ICAACE'14), Dubai.
- B. El-Jzairi., (1987). The Properties of Hardened MPC Mortar and Concrete Relevant to the Requirement of Repair of Concrete Pavement, Concrete Repair. 9, 25-31.
- Bakar, N. I. A., Mansor, M., Harun, N. Z., (2013). Approaching vertical greenery as public art: a review on potentials in urban Malaysia. J. Archit. Environ. 12(1), 1-26.
- Baker, N., & Steemer, K., (2000). Energy and environment in architecture: A technical design guide. E&FN Spon.
- Basher, H.S., Sheikh Ahmad, S., Rahman, A., Malek, A., Qamaruz Zaman, N., (2016). The use of edible vertical greenery system to improve thermal performance in a tropical climate. J. Mech. Eng. 13(1), 58-66.
- Bowman, D. C., R. Y. Evans, and J. L. Paul. (1990). Fertilizer salts reduce hydration of polyacrylamide gels and affect physical properties of gel-amended container media. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 115, 382-386.
- Crowell, W. S., (1927). Physical chemistry of dental cements. J. Am. Dent. Assoc, 14, 1030-1048.
- C.S.B. Grimmond, C. Souch, M.D. Hubble., (1996) Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley. Los Angeles. Clim. Res. 6(1) 45-57.
- C. Y. Cheng, K. K. Cheung, L. M. Chu., (2010) Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. Build. Environ. 45(8), 1779-1787.
- Cannone N, Convey P, Guglielmin M., (2013). Diversity trends of bryophytes in continental Antarctica. Polar Biol. 36(2), 259-71.

- Carballeira A, Fernandez JA, Aboal JR, Real C, Couto JA., (2006). Moss: a powerful tool for dioxin monitoring. *Atmos Environ.* 40(30), 5776-86.
- Charoenkit, S., Yiemwattana, S., (2016). Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: a review. *Build. Environ.* 105, 82-94.
- Chau, C.K., Qiao, F., and Li, Z., (2011). Microstructure of Magnesium Potassium Phosphate Cement. *Construction and Building Materials*, V. 25, 2911-2917.
- D. A. Hall and R. Stevens, B. E. Jazairi., (1998). Effect of Content on the Structure and Mechanical Properties of Magnesia-Phosphate Cement Mortar. *Journal of American Ceramic Society.* 81(6).
- Ding, Z., and Li, Z., (2005). Effect of Aggregates and Water Contents on the Properties of Magnesium Phospho-silicate Cement. *Cement and Concrete Composites*, V. 27, 11-18.
- Dunnet N, Kingsbury N., (2008). *Planting green roofs and living walls.* Timber Press.
- E. A. Evmorfopoulou, K. J. Kontoleon., (2009) Experimental approach to the contribution of plant covered walls to the thermal behaviour of building envelopes, *Build. Environ.* 44, 1024-1038.
- Feng, L., W., Rusong, P., Juergen, and L., Xusheng, (2005). Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 72, 325-336.
- Fleck, H., (1902). Chemistry of oxyphosphates. *Den. Items Interest*, 24, 906.
- Galsser, F. P., (1990). Cements from micro to macrostructures. *ceram. trans. J.*, 89(6), 195-202.
- Greenroof.com., (2017). The International Greenroof & Greenwall Projects Database. Retrieved from <http://www.greenroofs.com/projects/plist.php> (Accessed on 16 June 2017).
- Gaylord, E. S., (1989). Oxyphosphates. *Arch. Dent*, 33, 364-380.
- H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha., (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Sol. Energy.* 70(3), 295-310.
- Hindle, R.L., (2012). A vertical garden: origins of the Vegetation-Bearing Architectonic Structure and System (1938). *Stud. Hist. Gard. Des. L.* 32(2), 99-110.

- Huttermann, A., L. J., Orikiriza, and H., Agaba, (2009). Application of super absorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands. *Clean-Soil, Air, Water*, 37(7), 517-52.
- International Energy Agency., (2013). Technology road map. Energy efficient building envelopes.
- Jhurry, D., (1997). *Agricultural Polymer*, Food and Agricultural Research Council, Reduit, Mauritius.
- Jaafar, B., Said, I., Reba, M.N.M., Rasidi, M.H., (2013). Impact of vertical greenery system on internal building corridors in the tropic. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 105, 558-568.
- Jim, C.Y., (2015). Green wall classic cation and critical design-management assessments.
- Katia, P., O., Marc, A.L.A., Fraaji, E.M., Haas, and R., Rossana, (2011). Vertical greening system and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46, 2287-2294.
- Keever, G.J., G. S., Cobb, J. C. Stephenson, and W. J. Foster. (1989). Effect of hydrophilic polymer amendment on growth of container grown landscape plants. *J. Environ. Hort.*, 7, 52-56.
- Kottek M, et al., (2006). World map of the Koppen Geiger climate classic cation updated. *Meteorol Z. Perez G. Facanes vegetades. Estudi del s.* 15(3), 259-63.
- Krystek, L., (2010). The Hanging Garden of Babylon. Retrieved from <http://www.unmuseum.org/hangg.htm>.
- Kleiber, T., B., Markiewicz, and A., Niewiadomska, (2012). Organic substrate for intensive horticultural cultures: yield and nutrient status of plants, microbiological parameters of substrate, *Pol. J. Environ. Stud.*, 21(5), 1261-1271.
- Köhler, M., (2008). Green facade—a view back and some vision. *Urban Ecosyst*, 11, 423-436.
- Leblond S, Gombert S, Colin JL, Losno R, De Trautenberg CR., (2004). Biological and temporal variations of trace element concentrations in the moss species *Scleropodium purum* (Hedw.) Impr. *J Atmos Chem* 49(1-3), 95-110.
- Lechner, N., (2015). Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects (4th ed.). Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

- Liu, T., W., Geng, L., Li, Y., Liu, and H., Liu (2009). Effects of photosynthetic characteristics on two kinds of different resistance *Spiraea* Linn. in mixed alkali-saline stress. *Journal of Northeast Agricultura lUniversity*, 40, 32-3.
- Malcolm A, John L, Erin S., (2010). The potential value of mosses for storm water management in urban environments. *Urban Ecosystems*, September 13(3), pp 319-332.
- Mariussen E, Fjeld E, Breivik K, Steinnes E, Borgen A, Kjellberg G, et al., (2008). Elevated levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish from Lake Mjøsa. Norway. *Sci Total Environ* 390(1), 132-41.
- Masuda, T., Ogino, I., and Mukai, S.R., (2013). Optimizing the Dimensions of Magnesium Ammonium Phosphate to Maximize its Ammonia Uptake Ability. *Advanced Powder Technology*, V. 24, 520-524.
- Peat HJ, Clarke A, Convey P., (2007). Diversity and biogeography of the Antarctic flora. *J Biogeogr*, 34(1), 132-46.
- Perez, G., L., Rincon, A., Vila, J. M., Gonzalez, and L. F., Cabeza, (2011). Behaviour of green façade in mediterranean continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52, 1861-186.
- Qiao, F., Qiao, C.K., and Li, Z.. (2010). Property Evaluation of Magnesium Phosphate Cement Mortar as Patch Repair Material. *Construction and Building Materials*, V. 24, 695-700.
- Raymer, J. P., K. J., Raynor, and N. S. G., Williiam, (2010). Façade greening: a case study from melbourne, Australia, *Acta Horticultrae*, 881(25), 709-71.
- Rahman, A., Wang, C., Mohd Rahim, A., Loo, S.C., Miswan, N., (2014). Vertical greenery systems (Vgs) in urban tropics. *Open House Int.* 39(4), 42-52.
- Roastaing di Rostagni, C. S., (1878). verfahren zur darstellung von kitten fur zahnarztliche und ahnliche zwecke, bestehend von gemischen von pyrophosphanten des calciums oder bariums mit den pyrophospheten des zinks oder magneiums. German Paten 6015 (Berlin), 67-69.
- Rollins, W. H., (1979). A contribution to the knowledge of cements. *Dent. Cosmos*, 21, 574-576.
- Sojka, F., E., D. L., Biomeberg, J. A., Entry, R. D., Lentz, and W. J., Ors, (2007). Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Adv, Agron*, 92, 75-162.

- Sarkar, A. F., (1991). Hydration/dehydration characteristics of struvite and dittmarite pertaining to magnesium ammonium phosphate cement system. J. Mater. Sci, 26, 2514-2518.
- Sharp, R., (2006). Green towers and green walls, annual green roof conference: green roofs for healthy cities. Proceeding, Boston
- S. Manso, et al., (2014b). Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity. Construction & building materials. 54, 485-495.
- S. Manso, W. D. Muynck, I. Segura, A. Aguado, K. Steppe, N. Boon, N. D. Belie., (2014a). Bioreceptivity Evaluation of Cementitious Materials Designed to Stimulate Biological Growth. Journal of Science of The Total Environment. 481, 232-241.
- Sheweka, S.M., Mohamed, N.M., (2012). Green facades as a new sustainable approach towards climate change. Energy Procedia 18, 507-520.
- Skinner, E. W., (1947). Science of Dental Materials. 3rd ed.
- Soudee, E., and Pera, J., (2002). Influence of Magnesia Surface on the Setting Time of Magnesia-phosphate Cement. Cement and Concrete Research, V. 32, 153-157.
- Souder, W., and Paffenbarger, G. C., (1942). Physical Properties of Dental Materials (NatlBur. Standards (U.S.), Gaithersburg, MD, Circ. No. C433
- The Multifunctionality of Green Infrastructure. (2012). Directorate-General for the Environment. European Commission.
- Timur, O.B., Karaca, E., (2013). Vertical gardens. In: Ozyavuz, M. (Ed.), Advances in Landscape Architecture. InTech, European Union, 587-622.
- United Nations., (2016). The World' s Cities in 2016 Data Booklet (ST/ESA/SER.A/392). Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Wallace, A., G. A. Wallace, and A. M. Abouzamzam, (1986). Effect of soil conditioners on water relationships in soils, SoilSci, 141, 346-35.
- Wang, C., Er, S.S., Abdul Rahman, H., (2016). Indoor vertical greenery system in urban tropics. Indoor Built Environ. 25(2), 340-356.
- Wang, Y. T., (1989). Medium and hydrogel affect production and wilting of tropical ornamental plants, HortScience, 24, 941-944.

- Wang, Y. T., and L. T., Gregg, (1990). Hydrophilic polymerons-their response to soil amendments and effect on properties of a soilless potting mix. J, Amer. Soc. Hort. Sci., 943-94.
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., (2001). Autonomic Healing of Polymer Composites. Nature, 409(6822), 794.
- Woods, M., Woods, M.B., (2009). Seven Wonders of the Ancient World. Twenty-First Century Books, Minneapolis.
- World Maps of Koppen-Geiger climate classification. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>
- Wagh, A. S., and Jeong, S. Y., (2003). Chemically bonded phosphate ceramics: I. a dissolution model of formation. J. Am. Ceram. Soc, 86(11), 1838-1844.
- Yan, Y. Q., D. D., Che, X. C., Shi, and X. L., Liu, (2011). Effect of salt-alkali stress on active oxygen metabolism in roots of *Spiraea×bumalda* 'Gold Mound' and *Spiraea×bumalda* 'Gold Flame'. Journal of Forestry Research, 22(1), 59-6.
- Yao, S., X., Liu, and B., Shi, (2009). Study on the effect of salt-alkali mixed stress on the distribution of Na⁺ and K⁺ of *Spiraea bumalda* 'Gold Mound'. Forestry Science and Technology, 34, 60-6.
- Zhang, T., Cheesman, C.R., and Vandeperre, L.J., (2011). Development of Low pH Cement Systems forming Magnesium Silicate Hydrate (M-S-H). Cement and Concrete Research, V. 41, 493-442.
- Zilli M, Fabiano B, Ferraiolo A, Converti A., (1996). Macro-kinetic investigation on phenol up take from air by biofiltration: influence of superficial gas flow rate and inlet pollutant concentration. Biotechnol Bioeng. 49(4), 391-8.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.