



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 08월
석사학위 논문

폐플라스틱을 이용한
일반 및 초고성능 콘크리트의
물리적 성능, 화재특성 및 경제성 검토

조선대학교 대학원

건축공학과

안재성

폐플라스틱을 이용한
일반 및 초고성능 콘크리트의
물리적 성능, 화재특성 및 경제성 검토

Evaluation of mechanical properties, fire performance, and economical striation on normal and ultra-high performance concrete utilizing waste plastics.

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

건축공학과

안재성

폐플라스틱을 이용한
일반 및 초고성능 콘크리트의
물리적 성능, 화재특성 및 경제성 검토

지도교수 김 형 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 4월

조선대학교 대학원

건 축 공 학 과

안 재 성

안재성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김태훈 (인)

위원 조선대학교 교수 조창근 (인)

위원 조선대학교 교수 김형기 (인)

2022년 5월

조선대학교 대학원

<목 차>

제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 내용 및 방법	3
제2장 선행연구	5
제1절 선행연구 조사의 목적과 개요	5
제2절 친환경 골재로서 폐플라스틱 및 폐고무의 기능 및 영향 ...	6
제3절 플라스틱 및 고무 폐기물의 골재화	8
1. 플라스틱 골재	8
2. 고무 골재	9
제4절 플라스틱 및 고무 골재의 특성	11
1. 작업성	11
제5절 경화된 특성	13
1. 밀도	13
2. 압축강도	15
3. 인장 및 휨강도	16
제6절 내구성능	17
1. 흡수율	17
2. 건조수축	18
3. 동결 및 융해 저항	19
4. 염화이온 투과성	20
5. 전기 저항	21
제7절 기능적 특성	21
1. 열전도성	21

2. 흡음	23
제8절 소 결	23
제3장 모르타르에 해양 폐플라스틱 플레이크 혼입시 고려사항 : 등가강도설계에 따른 비용 및 환경 영향	25
제1절 실험개요	25
제2절 구성요소	25
제3절 배합비	27
제4절 실험방법	29
제5절 실험결과	30
1. 플라스틱 플레이크의 화학적 특성	30
2. 굳지 않은 콘크리트의 작업성	33
3. 경화된 콘크리트의 강도와 탄성계수	34
제6절 경제 및 환경 영향 평가	44
제7절 소 결	47
제4장 폐플라스틱을 혼입한 UHPC : 화재발생 이후 물 리적 성능 변화	49
제1절 실험개요	49
제2절 실험재료	49
제3절 배합비	55
제4절 실험방법	56
제5절 실험결과	58
1. 경화된 상태의 특성	58
2. 고온에서의 연소	63
제6절 소 결	69

제5장 폐플라스틱 미분을 혼입한 UHPC를 이용한 부착 성능 실험	70
제1절 실험개요	70
제2절 사용 재료 및 특성	70
제3절 배합비	72
제4절 실험방법	73
1. 부착강도 실험방법	73
2. 굳지 않은 상태의 실험방법	76
제5절 실험결과	78
1. 부착강도 실험결과	78
2. 굳지 않은 상태의 실험결과	81
제6절 소 결	81
제6장 폐플라스틱 미분을 혼입한 UHPC 외부마감 PC패널 설계	82
제1절 실험개요	82
제2절 외부마감용 PC패널 설계	82
제3절 설계 결과	84
제4절 소 결	84
제7장 결 론	85
참고문헌	87

<표 목차>

[표 1] 선행연구에 사용되는 플라스틱 골재	6
[표 2] 선행연구에 사용되는 고무 골재	7
[표 3] 고무 골재 가공 방법의 특성	12
[표 4] OPC의 XRF 산화물 조성	26
[표 5] 배합비	28
[표 6] 폐플라스틱 플레이크 샘플의 표면 C1 농도	30
[표 7] (식. 1)의 회귀 모델의 계수	34
[표 8] 폐플라스틱 사용시 시멘트 및 모래의 단위 무게, 비용 및 CO ₂ 변화	46
[표 9] 미세 플라스틱 및 인공 경량 골재의 물리적 특성	50
[표 10] OPC, 실리카 및 실리카 분말의 화학적 구성 및 물리적 특성	51
[표 11] 배합표	54
[표 12] 물리적 특성	59
[표 13] 1000 °C에서 점화 후 UHPC의 침투 저항	69
[표 14] 시멘트의 물리 및 화학적 성질	70
[표 15] 실리카폼 물리 및 화학적 성질	71
[표 16] 충전재 물리 및 화학적 성질	71
[표 17] 혼화제의 물리적 성질	71
[표 18] 대체 골재의 물리적 성질	72
[표 19] 배합비	72
[표 20] 부착강도 시험인자	73
[표 21] 부착강도 실험 결과	78
[표 22] 균지 않은 상태 측정 결과	81
[표 23] 기성품과 동일한 하중을 버티는 배합별 휨강도에 따른 최소두께	83
[표 24] 배합별 최소두께로 설계된 패널의 무게	84

<그림 목차>

[그림 1] 연삭과정 도식화	11
[그림 2] 고무분말 전처리 과정	14
[그림 3] 폐플라스틱 플레이크의 TG/DTA곡선	31
[그림 4] 폐플라스틱 플레이크의 FT-IR 스펙트럼	32
[그림 5] 폐플라스틱 플레이크의 라만 스펙트럼	32
[그림 6] 모르타르 플로우	34
[그림 7] w/c에 따른 압축강도 및 압축강도 결과 회귀 모델	36
[그림 8] w/c에 따른 휨강도 및 압축강도와 휨강도 관계	38
[그림 9] w/c에 따른 동탄성계수 및 압축강도와 동탄성계수 관계	41
[그림 10] 미세 플라스틱 및 인공 경량 골재의 체가름 결과와 콘크리트에 대한 미세 응집의 표준 입자 크기 (ASTM C33)	53
[그림 11] 골재의 밀도와 압축강도 및 휨강도 사이의 관계	62
[그림 12] 미세 플라스틱의 TGA/DTA 곡선	64
[그림 13] 고온에 노출 된 시편의 무게	68
[그림 14] CT 스캔으로 검출된 시편의 누적 공극	69
[그림 15] 배합별 부착강도 실험결과	80

<사진 목차>

[사진 1] 시멘트 페이스트에서 천연 골재 및 폐플라스틱 골재	9
[사진 2] EPS의 전자현미경 스캔	10
[사진 3] 200 μ m 와 400 배율 현미경 분석	11
[사진 4] 전자 현미경 관찰	14
[사진 5] 접촉각도 실험	14
[사진 6] 폐플라스틱 플레이크 채취 및 공정	26
[사진 7] 분쇄된 플라스틱 플레이크	27
[사진 8] 이 연구에 사용되는 마이크로 플라스틱 골재	52
[사진 9] 이 연구에 사용되는 인공 경량 골재	52
[사진 10] (a)WP, (b)P2 입자의 현미경 이미지	53
[사진 11] CT 스캔에 검출된 표본의 2D 단면 (ROI 직경: 11.50 mm)	57
[사진 12] 1000 °C 노출 후 침투 저항 테스트	57
[사진 13] 200-1000 ° C의 범위에서 온도에 노출 후 샘플	65
[사진 14] 400 °C에 노출된 미세 플라스틱을 함유한 UHPC 시편	66
[사진 15] CT로 스캔한 1000° C 노출 전, 후 시편의 모습	68
[사진 16] 거친면 시편 제작 과정	74
[사진 17] 타설 전 매끄러운면과 거친면의 모습	74
[사진 18] 부착강도 실험	75
[사진 19] 굳지 않은 상태 실험	77

ABSTRACT

Evaluation of mechanical properties, fire performance, and economical striation on normal and ultra-high performance concrete utilizing waste plastics.

An Jae Sung

Advisor : Prof. Kim Hyeong-Ki, Ph.D.

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

If waste plastic generated in the ocean can be used as a construction material, it will be very economically and environmentally advantageous worldwide. The physical characteristics, environmental characteristics, and economic analysis of general and ultra-high performance concrete using waste plastics were reviewed to compare and analyze whether existing fine aggregates could be replaced. Two types of polymer powder with components similar to waste plastic and two types of lightweight aggregates were additionally compared and analyzed, and the components of waste plastic were confirmed through chemical analysis. Various compositions were tested by varying the replacement rate of fine aggregates and the water cement ratio, and an experiment was conducted to confirm the physical performance according to various compositions. Economic efficiency and environmental characteristics were analyzed based on the equivalent strength durability design. An experiment was conducted to reduce the weight of ultra-high performance concrete by mixing waste plastic, an experiment was also conducted to be used as a repair material, and a PC panel was designed to be used as a member material. This study can be used as basic data for research to use waste plastic as a substitute for fine aggregates.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적

해양에서 발생하는 플라스틱 폐기물은 세계적으로 관심 받는 문제이다. 2014년 이후 다양한 분야에서 생산되는 플라스틱은 연간 3억 톤을 돌파했다^[1]. 2010년 192개 연안군에서 육지에서 바다로 유입되는 플라스틱 폐기물의 양은 1270만 ~ 48억 톤으로 2025년까지 최대 2억 5천만 ~ 100억 톤까지 증가할 것으로 예상된다. 해양 쓰레기 중 폐플라스틱이 60 ~ 80%를 차지한다^[2]. 특히 직경 5mm 이하의 플라스틱 플레이크는 바다에 떠 있을 뿐만 아니라 해양 동물에 의해 섭취 될 가능성이 높다^[3]. 이에 660종 이상의 해양 생물이 플라스틱 폐기물의 영향을 받은 것으로 보고된다^[4].

폐플라스틱의 재활용 비율은 각국에 따라 0 ~ 65%로 나타난다^[5-8]. 현재 해양 플라스틱 폐기물의 재활용과 효과적인 사용을 위해 다양한 사회적 및 기술적 노력이 이루어지고 있으며, 환경 측면에서 가장 효과적인 방법은 ‘플라스틱 대 플라스틱’ 재활용으로 보고 있다. 플라스틱 폐기물의 수거 및 처리를 위한 확립된 사회 시스템이 필요하며, 관련 정책 및 경제적 능력이 필요하다^[9]. 많은 개발도상국에서 플라스틱 폐기물을 효과적으로 재활용할 수 없으며, 에너지 회수 없이 매립하거나 소각될 뿐이다. 재활용 비율은 주로 육지에서 수거된 플라스틱에 의해 기여되었고, 해양에서 수거된 플라스틱 폐기물은 포함되지 않았다. 따라서 기술적, 경제적 관점에서 ‘플라스틱 대 플라스틱’으로 재활용하는 것보다 쉬운 다른 재활용 방법을 고려해야 한다^[10]. 폐플라스틱의 활용은 환경적, 사회적 문제를 줄이거나 제거할 수 있는 효과적인 방법 중 하나일 수 있다. 폐플라스틱은 제방, 구조 충전, 도로 구조물, 콘크리트 및 기타 시멘트 복합재용 토양, 모래 및 자갈과 같은 건설업의 기존 자재를 대체할 수 있다. 그 중에서도 콘크리트 및 기타 시멘트 복합재료에 플라스틱 폐기물을 필러, 골재, 섬유로 사용하는 것이 연구되고 있다^[11-12].

단단한 플라스틱과 PET(Polyethylene Terephthalate), PE(Polyethylene), PF(Phenol-formaldehyde), PC(Polycarbonate)의 플레이크는 콘크리트와 모르타르의 골재로 사용되었다.^[13-16]. 앞서 언급한 단단한 플라스틱과 유연한 플라스틱(PE 비닐 봉투와 같은 폐기물 포장재)은 다양한 모양으로 절단되어 시멘트 복합체의 필러 및 보강 섬유로 사용되었다^[17,18]. 대부분의 문헌에서 폐플라스틱의 종류와 형

태는 관계없이 플라스틱에 의해 시편의 압축 강도가 감소되었지만 새로운 혼합물의 작업성 및 공기량을 조정하여 용이하게 제어할 수 있었다. 대부분의 재활용된 플라스틱은 고품 폐기물 소각로(MSWI)에서 발생한 재와 같은 무기 폐기물과 달리 시멘트와 반응하지 않았다. 충분한 세척 및 분류를 통해 콘크리트의 성능에 플라스틱의 종류와 상관없이 플라스틱 내용물에 의해 균일하게 제어 될 수 있다고 보았다. PET의 경우 시멘트의 알칼리에 의해 표면에서 폴리머 체인의 일부 범위가 저하되었기 때문에 시멘트 복합체에서 보강 섬유로 사용하는 것은 적절하지 않았다. 시멘트 복합체의 강도가 표면 상태 보다는 기계적 특성에 의해 더 많은 영향을 받고 있기 때문에 폐플라스틱이 골재로 사용되었을 때는 중요하지 않았다^[19]. 콘크리트와 시멘트 모르타르의 내구성도 플라스틱의 사용에 의해 저하되었지만 플라스틱은 경량 콘크리트, 건식 콘크리트 또는 충전용 모르타르와 같은 낮은 설계 강도와 내구성을 요구하는 콘크리트에 사용 될 수 있었다^[20,21].

한국을 포함한 일부 지역은 모르타르, 콘크리트 및 기타 시멘트 복합체에 대한 골재 부족으로 어려움을 겪고 있으며, 폐플라스틱을 혼합골재로 활용함으로써 사회적 이익이 기대된다^[22,23]. 육지에서 모래가 부족하여 바다에서 준설된 모래가 사용되지만 이는 해안 침식, 어류의 감소, 해수질 악화와 같은 생태계 파괴를 주도한다^[24,25]. 따라서 한국에서는 2022년까지 바다 모래의 비율을 총 골재의 5%로 제한하기로 결정했다^[26]. 이러한 현실 속에서 폐플라스틱은 대체 골재 후보 중 하나이다. 시멘트 복합체에서 폐플라스틱을 실용적으로 사용하기 위해 구조적 설계, 혼합 비율 및 시공 공정에 대한 표준 코드 및 사용에 따른 경제적, 환경적 측면을 검토해야 한다. 앞서 언급한 대로 폐플라스틱을 사용한 콘크리트의 성능에 대한 많은 실험 보고서가 있다. 그러나 혼합 비율에 대한 보고가 없다. 플라스틱의 사용으로 인한 강도와 내구성의 감소를 보완하기 위해 결합재 및 시멘트 재료의 증가는 '등가 성능 기반 설계'를 기반으로 한다^[27]. 많은 연구에서 시멘트 복합체에 폐플라스틱을 사용하는 것은 천연 모래를 절약하고 폐기물의 배출을 줄이기 위한 경제적, 환경적 장점을 제공하는 것으로 언급된다^[20, 21]. 또한 시멘트 복합재료의 '등가 성능 기반 설계'를 기반하는 관점에서 고려되어야 한다.

본 연구의 목적은 골재부족 현상과 폐플라스틱 처리를 같이 해결할 수 있는 방안으로 폐플라스틱을 골재 대체로 사용하는 연구를 진행하며, 나아가 폐플라스틱을 혼합한 시멘트 복합체를 활용하여 제품화를 진행하는 것이다.

제2절 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 해양으로 부터 얻은 폐플라스틱 플레이크를 콘크리트 골재로 사용하여 콘크리트의 경량화, 경제적 및 환경적 측면에서 ‘등가 성능 기반 설계’를 기반으로 혼합 비율을 고려하여 연구를 진행하였으며, 본 연구의 내용 및 방법은 다음과 같다.

첫째, 한반도 부근 해양에서 채취한 폐플라스틱 플레이크의 화학적 특성과 플라스틱의 종류를 확인하기 위한 실험이 진행되었다. 둘째, 폐플라스틱 플레이크 외에 다양한 골재를 혼합한 모르타르를 비교하였고, 작업성 및 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 마지막으로 동등한 강도를 얻기 위한 플라스틱 플레이크와 시멘트 사이의 관계를 고려하여 재료비용과 CO₂ 발생량에 대해 논의하였다. 본 실험에 앞서 폐플라스틱을 혼입한 모르타르와 콘크리트에 대한 기초실험을 먼저 진행하였다. 이 후 부착강도 실험과 선행 실험 결과를 기반으로 UHPC의 경량화와 강도 및 혼합 비율에 대한 외부마감 PC 패널 모델링을 진행하였다.

제1장에서는 본 연구의 서론으로 폐플라스틱을 이용한 일반 및 초고성능 콘크리트의 물리적 성능, 화재특성 및 경제성 검토를 위한 본 연구의 배경 및 목적, 내용 및 방법에 대하여 서술하였다.

제2장에서는 본 연구에 들어가기 앞서 문헌 조사를 통해 폐플라스틱 및 폐고무를 친환경 골재로 사용했을 때 기능 및 영향에 대한 조사를 진행하였다.

제3장에서는 본 연구에 사용되는 폐플라스틱의 출처와 생산과정, 폐플라스틱의 화학적 특성을 알아보고 등가강도설계에 기반 하여 모르타르에 폐플라스틱을 활용할 때 고려사항에 대하여 서술하고, 실험을 통해 얻은 결과로 물리적 특성을 분석하였고, 폐플라스틱과 시멘트 사이의 관계를 고려하여 경제성과 환경성영향에 대해 분석하였다.

제4장에서는 UHPC에 폐플라스틱을 혼입하여 UHPC의 경량화를 위한 연구를 진행하고, 화재실험을 통해 얻은 결과로 구조적인 재료로 사용가능 여부에 대해 서술하였다.

제5장에서는 제4장의 결과를 토대로 보수용도로 사용할 수 있는 방안으로 폐플

라스틱을 혼입한 모르타르와 초고성능콘크리트의 부착성능에 관한 실험을 통해 얻은 결과로 보수재료 측면에서 성능을 분석하였다.

제6장에서는 경량화가 가능한 초고성능콘크리트(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)를 이용하여 성능기반설계에 기반한 PC 패널을 설계하고 배합에 따른 PC 패널을 비교 분석하였다.

제7장은 본 연구의 결론으로 위 실험들을 통해 얻은 결과를 서술하고, 페플라스틱 플레이크를 콘크리트 골재로 사용하여 콘크리트의 경량화, 경제적 및 환경적 특성을 검토하였다.

제2장 선행연구1)

제1절 선행연구 조사의 목적과 개요

일반적으로 플라스틱 폐기물은 골재 및 섬유^[186]로 사용되고, 고무 폐기물은 골재 형태로 많이 사용된다. 섬유와 골재로도 몇 가지 용도가 있다^[187]. 건설 분야에서 모르타르와 콘크리트의 특성을 개선하는 방법으로 재활용 플라스틱과 고무를 사용하여 연구했다^[12]. 예를 들어 골재로 재활용 가능한 폴리올레핀(PO) 폐기물을 사용한 콘크리트는 화재 후 기계적 성능이 더 우수해졌다^[57]. 플라스틱 섬유를 혼합시 콘크리트의 균열 부분에서 우수한 연성 및 휨강도를 보였다^[188]. 고무 골재의 사용은 도로 및 보도 블록, 충격 흡수, 방음벽, 흡음, 지진파 흡수용으로 건물의 작업성 및 압축강도 감소와 무관하게 사용 할 수 있다^[189]. 또한 플라스틱과 고무는 모르타르와 콘크리트의 밀도를 낮추고 탄성을 줄일 수 있을 뿐 아니라 단열, 방수, 방음 기능에서도 우수한 성능을 보인다^[61,91,95].

고무와 플라스틱은 모두 가볍고 흡수율과 강도 및 강성이 낮으며, 소수성 특성을 보인다. 고유 속성의 유사성에도 불구하고, 모르타르와 콘크리트의 합성 고분자 고품 폐기물 골재로서 소비 후 고무와 플라스틱의 비교는 이전 논문에서 논의되지 않았다. 따라서 본 장의 주요 목적은 플라스틱 및 고무 폐기물을 모르타르와 콘크리트 생산을 위한 친환경 골재로서 사용하는 것이다.

효과적인 사용을 위해 플라스틱 폐기물과 고무 폐기물은 재활용, 기계적, 화학적 및 에너지 회수 계획과 같은 방법으로 사용될 수 있다^[175]. 플라스틱과 고무 폐기물의 처리 방법에 따라 다양한 형태의 플라스틱과 고무를 얻을 수 있다. 플라스틱과 고무 골재의 형태, 크기 및 함량은 모르타르와 콘크리트 성능에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 이러한 요인들은 [표 1]과 [표 2]에 열거된 다양한 형태의 플라스틱과 고무 골재를 활용한 이전 자료들을 비교함으로써 연구될 수 있다. 플라스틱과 고무 폐기물을 골재 대체물로 사용하는 것이 새로운 특성, 강화된 특성 및 내구성 및 그 기능성에 미치는 영향은 다음 절에서 논의한다.

1) 본 장은 Xuemiao Li a, Tung-Chai Ling a, Kim Hung Mo (2020). Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete - A review, Construction and Building Materials 240 (2020) 117869 의 논문을 인용한 것임

제2절 친환경 골재로서 폐플라스틱 및 폐고무의 기능 및 영향

선행연구에서 사용된 플라스틱 및 고무 골재는 다음 [표 1], [표 2]와 같다.

[표 1] 선행연구에 사용되는 플라스틱 골재

Author	Type	Shape	Size (mm)	Replacement level	Aggregate replacement type
[175]	PET	Flaky	(a) 2.6 (b) 11.4	10 and 20 vol%	Fine
[108]	PET	(a) Strip (b) Square (c) Irregular	Thickness : 1	Kept at 40cm ³ by volumetric amount	Fine
[92]	EPS	Spherical	(a) < 4 (b) < 16	25, 50, 75 and 100 vol%	Fine/coarse
[3]	PS + PE	Fabriform	Length : 0.15-12 width : 0.15-4	10, 15 and 20 wt%	Fine
[85]	PS	Beads/granulous	4	20, 40, 60 and 80 vol%	Coarse
[82]	PET	Irregular	0.1-5	5 wt%	Fine
[83]	PET	Irregular	< 4	25.64 and 16.95 wt%	Fine
[110]	HDPE	Flaky	4-12	10, 15, 20 and 25 vol%	Coarse
[176]	PET	(a) Flaky (b) Cylindrical	2-16	5, 10 and 15 vol%	Coarse
[90]	PS	Irregular	< 4	10, 20 and 50 vol%	Fine
[21]	PET	(a) Lamellar and irregular (b) Cylindrical granulate	< 20	7.5 and 15 vol%	Fine/coarse
[109]	PO+PET	Irregular	< 2	10-50 wt%	Fine
[58]	Plastic bags	Annular cylindrical	< 0.01	10, 20, 30 and 50 wt%	Fine
[13]	PET	(a) Flaky (b) Regular pellet	(a) 2-11.2 (b) 1-4	7.5 and 15 wt%	Fine/coarse
[18]	EPS	Irregular	< 1	10, 30, 50 and 70 vol%	Fine
[126]	PET	(a) Flaky (b) Regular pellet	(a) 2-11.2 (b) 1-4	7.5 and 15 wt%	Fine/coarse
[42]	PET	Flaky	< 4.75	5, 10 and 15 vol%	Fine
[67]	Modified PP	Short column	Length : 1.5-4	10, 15, 20 and 30 vol%	Fine
[77]	PET	(a) Flaky (b) Regular pellet	1-4	5, 10 and 15 vol%	Fine
[177]	PET	(a) Flaky (b) Spherical	(a) 2-11.2 (b) 1-4	5, 10 and 15 vol%	Fine/coarse
[33]	PP+PE	Spherical	0.18-2	10 and 25 vol%	Fine
[57]	PO+PET	Irregular	4.75-6	10, 20 and 30 vol%	Coarse
[73]	PET	Flaky	< 4.75	5, 10 and 15 wt%	Fine
[60]	PET	Flaky	greater than 4.75	20, 30, 40 and 50 vol%	Coarse

[표 2] 선행연구에 사용되는 고무 골재

Author	Type	Shape	Size (mm)	Replacement level	Aggregate replacement type
[69]	Tires	(a) Chipped (b) Crumbed	Chipped : 5-20 Crumbed : 1-5	25, 50, 75 and 100 vol%	Fine/coarse
[52]	Tires	(a) Spheroidal-like (b) Fiber-like	Spheroid-like : 0.02-0.06/1.7-2.1 Fiber-like : 0.06-0.1/2.5-2.9	30 wt%	Fine
[63]	Tires	Angular	10-20	5, 10, 15 and 20 vol%	Coarse
[70]	Tires	Crumbed	(a) 1.18 (b) 2.36	10, 20, 30, 40 and 50 vol%	Fine
[38]	Tires	Crumbed	< 4.75	15, 25, 35 and 50 vol%	Fine
[50]	Tires	Crumbed	0.6	4, 4.5, 5 and 5.5 wt%	Fine
[80]	Tires	Crumbed	1.44-2.83	15, 25, 35 and 50 vol%	Fine
[54]	Tires	Crumbed	(a) #30 mesh (b) 1-3 (c) 2-4	5.33-21.11 vol%	Fine
[93]	Tires	Angular/flaky/elongated	(a) 0.5-1.5 (b) 2-8 (c) 5-25	2, 4, 6 vol%	Fine/coarse
[88]	Tires	Powder	< 4.75	10, 20, 30 and 40 vol%	Fine
[33]	Tires	Chips	(a) 2-4 (b) 0.8-2 (c) powder	0-20 vol%	Fine
[51]	Tires	Ground	(a) 0-5 (b) 5-10 (c) 10-20	10, 20, 40, 60, 80 and 100 vol%	Fine/coarse
[55]	Tires	Crumbed	(a) 3 (b) 0.5 (c) 0.3	20 vol%	Fine
[79]	Tires	Crumbed	(a) 0-0.6 (b) 0.84-2	10, 20, 30 and 40 wt%	Fine
[66]	Tires	Crumbed	< 4.75	40, 50 and 60 vol%	Fine
[111]	Tires	Granulated	0.5-4	10, 20 and 30 vol%	Fine
[65]	Tires	Irregular and jagged	0, 0.0063-8	10, 20, 30 and 40 wt%	Fine/coarse

[178]	Tires	Crumbed	0.075-4.75	15, 25, 50 and 100 vol%	Fine
[179]	Tires	Angular	4	10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 wt%	Fine
[180]	Tires	Powdered	(a) 0.6 (b) 0.3	5, 10, 15 and 20 vol%	Fine
[56]	Tires	Granulated	0.15-4.75	5, 10 and 15 vol%	Fine
[86]	Tires	Granulated	< 11.2	5, 10 and 15 vol%	Fine/coarse
[181]	Rubber-s hoe outsole	Granulated	< 8	10 and 30 vol%	Fine
[182]	Tires	Crumbed	0.7-5	20and 30 vol%	Fine
[183]	Tires	Angular	< 10	15 wt%	Coarse
[68]	Tires	Elongated	< 20	10, 20, 30, 40 and 50 vol%	Fine/coarse
[79]	Tires	Powder	1-4	10, 20, 30, 40 and 50 vol%	Fine
[184]	Tires	Chipped	greater than 4.75	5, 7.5 and 10 wt%	Coarse
[75]	Tires	(a) Chipped (b) Crumbed	(a) Chipped : 4.75-15 (b) Crumber : < 4.75	12.5, 25, 37.5 and 50 vol%	Fine/coarse
[185]	Tires	Irregular	< 0.045	2.5, 5, 7.5 and 10 wt%	Fine

제3절 플라스틱 및 고무 폐기물의 골재화

1. 플라스틱 골재

폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)와 버진 폴리프로필렌(PP)은 플라스틱 골재를 구성하는 주성분이다^[28]. 콘크리트 골재로 사용되기 전에 이 재료들은 세 가지 단계를 거쳐서 처리된다. 첫 번째, 라벨이나 접착제 등의 불순물은 소독제 및 세제로 세척하여 제거해야 한다. 이는 품질을 보증하는데 중요하다. 두 번째, 파쇄 단계로 플라스틱을 작은 조각으로 만든다. 마지막으로 조각난 플라스틱을 녹여 펠릿으로 압출한다. 압출은 PET를 처리하는 가장 오래되고 간단한 방법이다^[29].

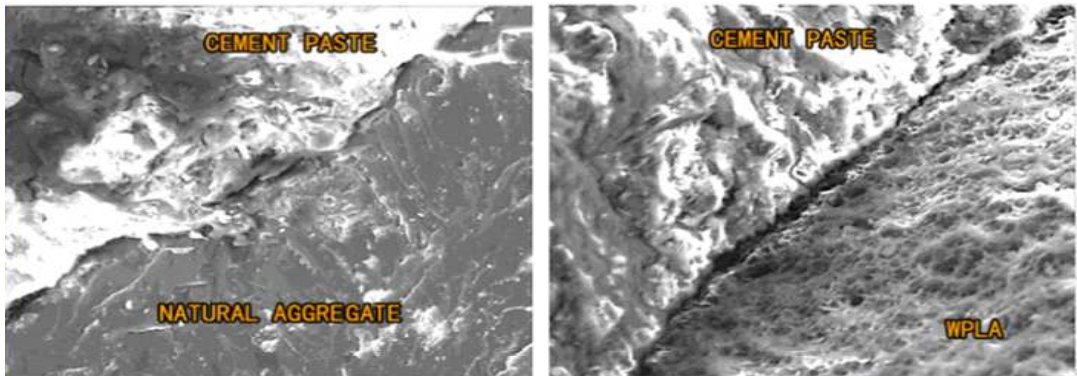
플라스틱 폐기물은 본래 밀도가 낮고 수분 흡수가 잘 안 된다. 플라스틱 쓰레기와 자연 골재의 물리적 성질은 [표 2]에서 비교된다. [사진 1]에서 볼 수 있듯이 PET와 PP입자는 천연 모래보다 표면이 매끄러워 플라스틱 골재와 시멘트 사이의 결합이 약하다. 포졸라닉 소재와 가소제는 표면 불순물로 인한 기계적 강도 손실을 보완하기 위해 일반적으로 사용된다^[30]. 또한, 표면가공 기술이나 발포 기술에 의해 플라스틱 골재의 표면을 가공하면 전반적인 성능을 상당히 향상시킬 수 있

다. 예를 들어, 가공된 폴리스티렌(EPS)^[31] 및 플라스틱^[32] [사진 2]은 거친 다공성 표면으로 더 좋은 접합력을 보여준다.

2. 고무 골재

자동차 타이어는 고무 산업의 주요 생산품 중 하나이다. 폐기된 폐타이어는 원료로 사용될 수 있는 금속, 섬유, 고무 등을 분리하여 재활용 한다. 제품의 제조에 있어 일반적으로 고무는 기계적인 방법으로 작은 입자·분말 형태로 사용될 수 있다^[33]. 재활용 과정은 3단계로 구성된다^[34,35]. 먼저 폐타이어를 분쇄하는 과정을 거친다. 이 과정에서, 연삭·롤링은 4.75 mm 이상의 고무 입자를 생산하기 위해 사용된다. 두 번째로, 거친 고무 입자는 굴림·회전 파쇄기에 의해 75 mm ~ 4.75 mm 사이 크기의 고무 입자로 변환된다. 초미세고무분말(<75 μm)이 필요할 경우 회전식 콜로이드 제분기를 사용 할 수 있다.

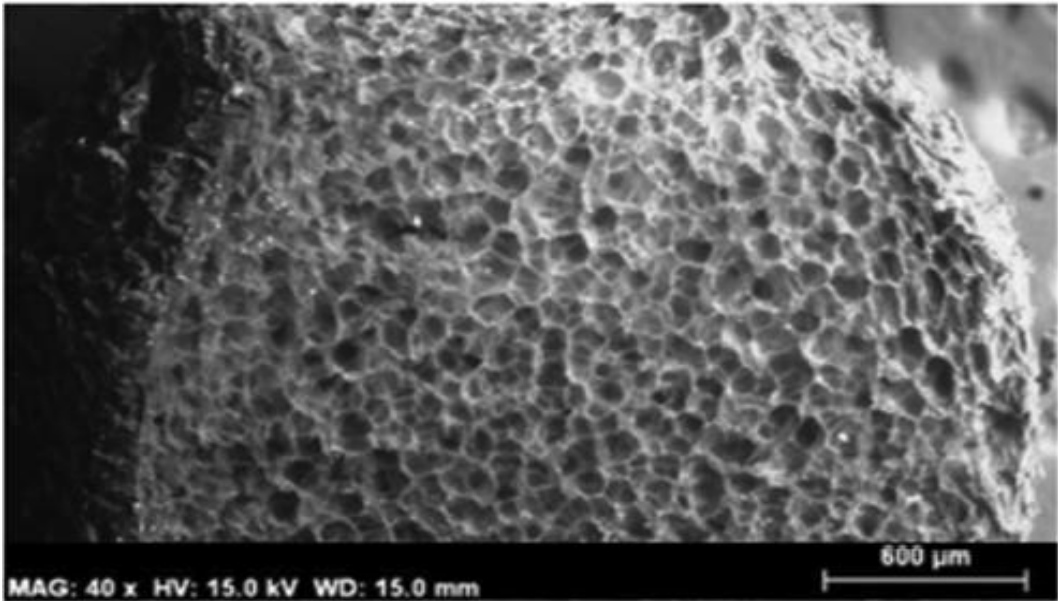
일반적으로 극저온 연삭은 고무 골재의 주된 생산 과정이다. 극저온 연삭을 통해 얻은 고무 골재는 주변 연삭법을 통해 얻은 고무 골재에 비해 표면이 부드럽다. [사진 3]은 두 가지 연삭 방법으로 얻은 고무 입자의 미세 구조를 보여준다. 연삭에서 얻은 고무는 스펀지 모양이다^[36]. 두가지 연삭 방법에 대한 자세한 과정은 [그림 2]와 [표 3]에 나와 있다.



(a) 천연골재(28일, 확대:700)

(b)WPLA(28일, 확대:700)

[사진 1] 시멘트 페이스트와 천연 골재 및 폐플라스틱 경량골재(WPLA) 사이의 다공성 천이대^[2]



[사진 2] EPS의 전자현미경 스캔 [{71}]

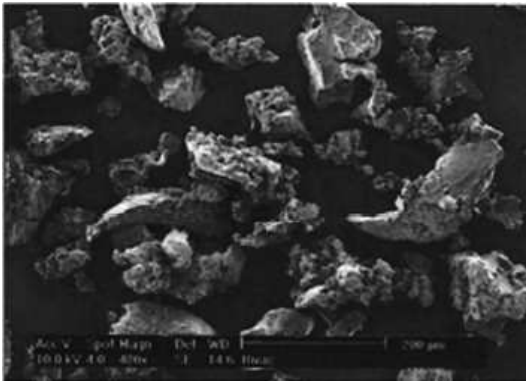
플라스틱 폐기물과 마찬가지로 고무 폐기물도 경량화로 사용할 수 있다. 고무 골재의 물리적 특성은 [표 3]을 참고한다. 플라스틱 골재와 마찬가지로 고무 입자는 상대적으로 매끄럽고 탄성 있는 표면을 가지고 있으며 [그림 4], 고무 골재와 시멘트 페이스트 사이의 표면 접합이 약해질 것으로 예상된다. 단점을 보완하기 위해 화학공법에 의한 고무 골재 전처리가 제안된다. NaOH 용액 처리는 고무 골재 주변에 약한 알칼리 상태를 만들어 수리전도도, 고무와 시멘트 사이의 수분이동, 접착면에서의 수화작용이 유리하여 고무와 시멘트 접착력을 향상시켜 주기 때문에 많이 사용된다^[37]. 또한 이 방법은 고무의 친수성을 향상시킬 수 있다. 고무 입자와 시멘트 페이스트 사이에 얇은 수분막과 다공성 천이대(Interfacial Transition Zone : ITZ)가 발생한다^[38]. NaOH 처리 방법에도 유사한 결과가 보고되었다^[39]. 그러나, 일부 연구는 NaOH 처리로 압축강도가 현저하게 향상되었지만, 물과 접촉시 고무의 소수성을 개선하지 못했다는 것을 보여주었다. 고무 표면의 각도는 90°C보다 컸다^[40]. [그림 2]에 나타낸 것 보다 진보된 전처리 방법에 의해 고무 표면에 강한 극성을 도입하여 고무와 시멘트 사이에 더 강한 화학적 결합이 형성될 수 있도록 했다^[41]. FT-IR 결과는 전처리를 통해 물막의 두께와 접촉각 [사진 5]을 크게 감소시켜 접착력이 향상되는 것으로 나타났다.

제4절 플라스틱 및 고무 골재의 특성

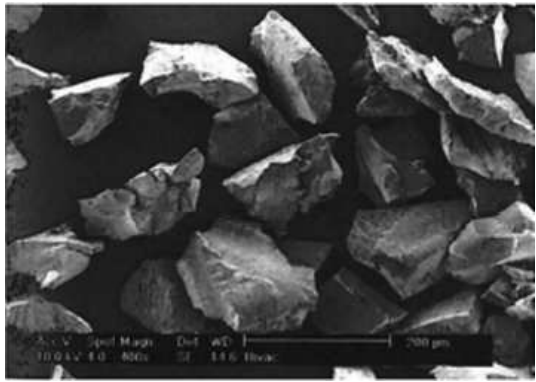
1. 작업성

(1). 플라스틱 골재의 효과

많은 연구에 따르면 플라스틱 골재는 콘크리트의 작업성이 플라스틱 형태와 함량에 의해 영향을 받고, 불규칙한 모양 입자들 사이의 마찰에 좌우 된다는 것을 보여주었다. Rahmani^[42] 등은 폐플라스틱의 모양 때문에 콘크리트의 작업성이 감소하여 콘크리트의 유동성을 저해 한다는 사실을 발견했다. 폐플라스틱 함량이 증가함에 따라 작업성이 더욱 감소했다.

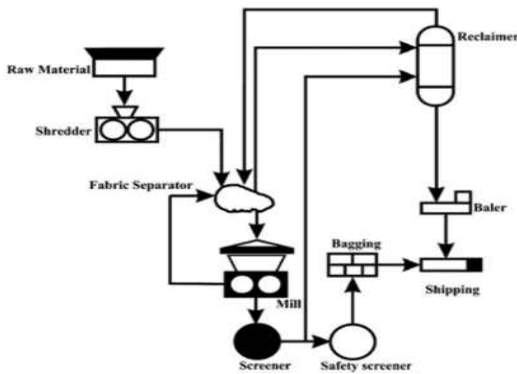


(a) 주변 연삭

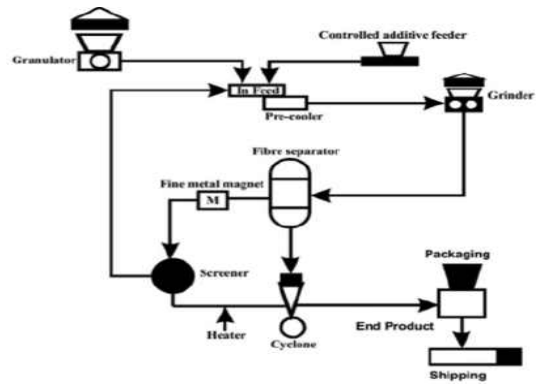


(b) 극저온 연삭

[사진 3] 200 μm 와 400 배율 현미경 분석^[43]



(a) 주변 연삭



(b) 극저온 연삭

[그림 1] 연삭과정 도식화^[44]

[표 3] 고무 골재 가공 방법의 특성

방법	과정	장점	단점
주변 연삭	기계적 힘으로 폐고무를 압축 및 절단	큰 처리 용량	고무 입자는 상대적으로 굵다
		간단한 장비	
극저온 연삭	폐고무를 유리 온도까지 냉동시킨 후 압착	첨단 기술	높은 비용
		오염 없음	높은 에너지 소비
		미세 고무 입자의 높은 산출량	

플라스틱 함량이 0%에서 15%로 증가했을 때 작업성 손실은 약 42%였다. 비슷한 발견이 Rai^[45] 외 연구진에 보고되었다. 불규칙한 모양의 플라스틱 플레이크가 사용되었을 때도 이와 유사한 발견이 보고되었다. 그러나 콘크리트를 혼합하기 전에 소량의 혼화제를 사용하거나 플라스틱 골재를 미리 넣는 것은 작업성 손실을 보완할 수 있다. Silva^[46] 등은 플라스틱 모양이 작업성에 미치는 영향에 대해 논의하였다. 세 가지 다른 모양의 폐플라스틱 골재가 콘크리트에 사용되었으며 결과는 얇은 층과 각진 모양의 골재가 작업 가능한 콘크리트를 적게 만드는 반면 구면 골재와 일반 형태의 골재는 작업성을 높여 준다는 것을 보여주었다. 이는 다양한 모양을 가진 플라스틱 골재와 시멘트 사이의 내부 마찰 차이로 설명될 수 있다. Ferreira^[47] 등은 콘크리트의 작업성이 입자 크기와 거칠기의 증가에 따라 감소하였으며, 이는 작업성을 방해하는 다공성 때문이라고 결론지었다. 마찬가지로, Coppola^[48] 등은 압출 공정에 의해 표면이 거친 플라스틱 골재를 제조하였고, 발포 플라스틱 골재의 다공성 구조가 감소하는 것을 발견했다. Ismail과 Al-Hashme^[49]는 10%와 25%의 플라스틱 골재가 포함되면서 작업성이 각각 약 13%와 27% 감소시켜도 활용성 측면에서 적합하다고 보고하였다.

(2) 고무 골재의 효과

대부분의 연구는 고무 골재를 혼입하면 고무 함량과 입자 크기에 따라 작업성이 감소한다고 했다. Bisht와 Ramana^[50]는 작은 고무 골재 함량이 5%(크기 0.6 mm)인 경우에도 콘크리트의 작업성이 감소한다고 보고했다. 더 큰 고무 골재의 함량은 입자 크기(0 ~ 20 mm)에 관계없이 작업성이 더 크게 감소했다. 고무 함량이 100%인 콘크리트의 경우 플로우가 34% 줄었다^[51]. 30%의 모래를 고무 골재로 대체하면 굳지 않은 콘크리트의 작업에 대해 충분히 작업이 가능하다고 보았다^[52]. 플라스틱 골재와 마찬가지로, 표면 거칠기와 입자 크기와 폐고무에 의한 작업성 감소는 혼

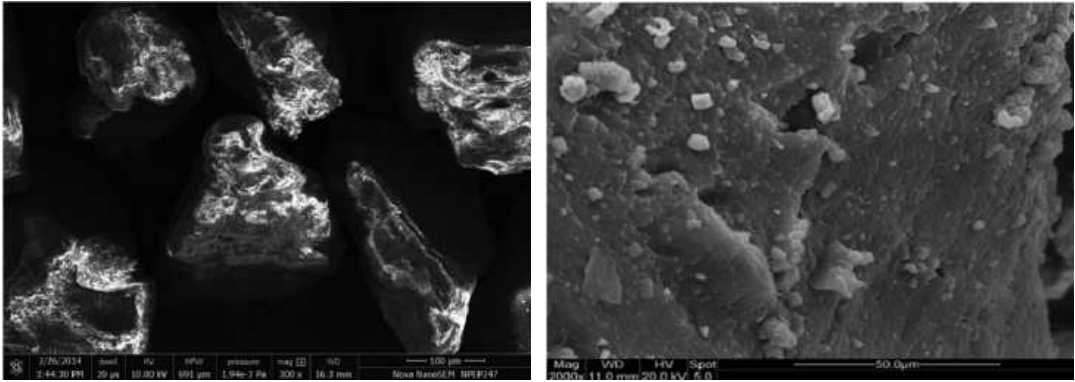
화제를 추가하여 보완할 수 있다^[53]. 그러나, 반대되는 결과를 보고한 몇 가지 연구가 있다. Mendis^[54] 등은 고무 혼입 비율이 다른 콘크리트의 작업성을 조사하였고, 고무 함량이 5 ~ 25%로 낮을 때 작업성이 증가했다. 작업성의 증가는 고무 골재의 양호한 표면과 전처리 고무의 소수성 특성으로 인해 물이 제거되고 유량이 증가했기 때문으로 추정된다^[55]. 또한 적은 양의 고무가 사용되었을 때 고무를 첨가하는 것이 모르타르의 작업성에 큰 영향을 주지 않는다는 연구도 있다^[56].

제5절 경화된 특성

1. 밀도

(1). 플라스틱 골재의 효과

Colangelo^[57] 등은 재활용된 폴리올레핀 폐기물을 천연 골재 대체물로 사용했다. 일반콘크리트(2156 kg/m^3)와 비교했을 때, 플라스틱 골재 35%를 가진 콘크리트는 약 23%의 밀도가 감소했다. 플라스틱 골재를 최대 50% 사용 시 모르타르 밀도는 37.5%로 감소했고, 벌크 밀도는 약 1500 kg/m^3 로^[58] Batayneh^[59] 등은 유사한 밀도 감소 추세를 보고했다. Islam^[60] 등은 천연 골재를 20 ~ 50%(부피기준)의 플라스틱 골재로 대체했으며, 플라스틱 골재의 밀도가 모래보다 약 70% 더 가벼웠기 때문에 밀도가 약 4%~10% 감소하는 것으로 나타났다. 플라스틱 골재의 비중은 각각 0.9 ~ 1.34 g/cm^3 으로 2.61 g/cm^3 의 모래와 비교되었다.



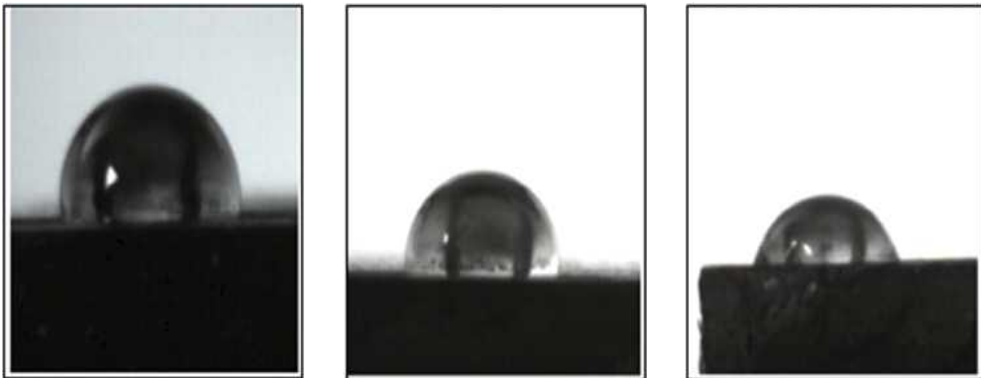
(a) 모래^[61]

(b) 고무 골재^[62]

[사진 4] 전자 현미경 관찰



[그림 2] 고무 골재 전처리 과정^[41]



(a) 일반 고무와 접촉

(b) 산화된 고무와 접촉

(c) 산화된 고무에서 1시간 경과

[사진 5] 접촉각도 실험^[41]

(2) 고무 골재의 효과

Asutkar^[63] 등은 교체된 10 ~ 30%의 고무 골재 사용으로 콘크리트의 단위 중량을 최대 28%까지 감소시켰다. 고무 골재가 20%인 콘크리트의 밀도는 1900 kg/m³으로

나타났다(일반콘크리트 2130kg/m³)^[64]. Gisbert^[65] 등은 모래 10%, 20%, 30%, 40%가 고무 골재로 대체되었을 때 밀도는 각각 약 17%, 18%, 21%, 28% 감소하는 것을 확인하였다. 밀도 감소는 모래에 비해 고무 골재의 밀도(0.51-1.2g/cm³)가 낮은 것과 관련 있었다^[66].

2. 압축강도

(1). 플라스틱 골재의 효과

플라스틱 골재의 크기, 형태 및 함량은 물론, 고유 소수성 및 비수화 특성이 압축 강도에 영향을 미치는 중요한 역할을 하였다. 플라스틱 골재 함량이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도 손실이 관찰되었다. 또한 플라스틱 골재의 혼입으로 계면부위에서 형성된 수화물 생성물이 감소하여 접합 및 압축 강도가 감소하였다^[64]. Coppola^[48] 등은 더 미세한 플라스틱 골재(크기: 0.18-2 mm)가 공극이 적고, 이로 인해 압축 강도 손실을 줄일 수 있다는 것을 보여주었다. 다만, Yang^[67] 등은 플라스틱 폐기물(길이 1.5~4mm의 짧은 기둥)이 혼입된 콘크리트는 부피가 작은 플라스틱 입자가 콘크리트의 공극을 일부 채울 수 있어 압축 강도를 20% 높였다고 보고했다. 일반적으로 압축강도의 감소를 방지하기 위해 모르타르 또는 콘크리트의 플라스틱 폐기물 양은 20% 이내로 제한되어야 한다. 플라스틱 골재의 크기 증가는 매끄러운 표면층으로 인해 압축 강도에 부정적인 영향을 미쳐 골재·매트릭스 결합을 약화시켰다. 플라스틱 골재의 형태에 대해서는, 얇은 판상모양 골재가 표면적을 증가시킬 수 있고 물 수요를 증가시킬 수 있기 때문에, 얇은 판상모양 골재들이 구형^[47,68] 골재보다 더 큰 악영향을 미쳤으며, 이는 ITZ 영역을 더욱 약화시켰다.

(2). 고무 골재의 효과

고무 골재의 강성이 낮고 강도가 낮은 것이 강도 감소의 주요 원인으로 판단된다. [사진 4]의 (a)모래, (b)고무 입자의 전자현미경 관찰과 [그림 2]의 고무 분말의 전처리 과정 [사진 5]의 (a)일반 고무와 접촉각, (b)산화 고무와 접촉각, (c)산화 고무에서 1시간 경과된 모습을 살펴볼 수 있다. 굵은 골재(크기: 12.5 ~ 20 mm)로 교체한 결과 고무 골재의 변형성과 골재 형태 거동에 의해 미세 골재(크기: 10 ~ 12.5 mm)로 사용되는 것보다 압축 강도가 더 크게 감소했다^[68]. 고무 골재를 100% 사용할 경우 7일 압축 강도가 74%나 감소했다^[69]. 고무 골재가 부스러진

경우 압축강도 감소가 더욱 두드러졌다는 결과도 있다. 부정적인 영향을 최소화하기 위해, 전처리를 통해 고무 골재의 친수성을 개선하여 고무 골재와 시멘트 사이의 결합을 개선할 수 있었다^[39]. Guo^[38] 등은 다양한 전처리 방법의 영향을 연구하여 NaOH 처리 고무와 Na₂SiO₃ 처리된 고무 골재를 사용시 코팅 처리되지 않은 고무보다 압축 강도 손실이 낮다는 것을 보여주었다. 또한 He^[41] 등은 KMnO₄ 및 NaHSO₃ 용액에 의한 고무는 콘크리트 강도에 대한 고무의 부작용을 제거시킬 수 있다는 것을 증명했다. 그 결과 4% 고무 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 용액 처리되지 않은 고무를 사용한 콘크리트의 압축 강도보다 48.7% 높았다. NaOH 처리 고무 골재 중 더 높은 비율(10 ~ 50%)을 살펴보면 7일 압축 강도가 17.7 ~ 72.2% 감소했다^[70].

3. 인장강도 및 휨강도

(1). 플라스틱 골재의 효과

압축강도에서 관찰된 추세와 유사하게, 콘크리트의 인장강도는 플라스틱 골재의 혼합에 따라 감소했다. 그러나 압축 강도에 비해 인장 강도는 입자 크기에 영향을 덜 받고 플라스틱 골재의 형태 및 교체 함량에 영향을 더 많이 받았다^[47,71]. 또한, 플라스틱 골재의 매끄러운 표면과 표면적의 증가로 인해 자유수가 축적되어 표면 부착력이 약해져 인장강도에 부정적인 영향을 끼쳤다^[72]. 플라스틱 골재 치환 비율이 높아짐에 따라 혼합물의 유연성과 가소성이 높아졌으며 플라스틱의 특성으로 인해 약한 강도의 원인이 되었다^[72]. Colangelo^[57] 등은 플라스틱 골재 교체 비율이 10%로 유지되었을 때 인장 강도가 증가했다고 보고했다. 적은 양의 플라스틱 골재가 골재 표면 사이에 가교효과를 제공하는 섬유와 같은 역할을 할 수 있다고 설명했다. 그러나 더 높은 플라스틱 골재 함량에서는 약한 골재·매트릭스 결합의 지배 효과로 인해 휨강도 감소가 더 분명하게 나타났다.

(2). 고무 골재의 효과

고무 골재는 균열에서 장벽 역할을 할 수 있을 것으로 예상됐지만 Ganjian 등은 이를 관찰하지 못했다^[73]. 대신 인장 강도의 감소가 확인되었다. 고무 함량이 20%, 30%, 40%, 50%인 시편은 각각 40.1%, 44.1%, 48.9%, 58.5%의 인장강도 손실을 보였다. 사용된 고무(1.18 mm, 2.36 mm)의 입자 크기 때문에 인장 균열을 가교하는데 효과가 없었다^[70]. 약한 ITZ가 균열 경로를 제공해 균열을 가속화했다는 설명도

나왔다. 고무 골재가 인장강도 저하로 이어진다고 볼 수 있었다^[71]. NaOH 용액을 사용하여 고무 골재를 사전 처리한 것은 인장 강도 손실을 보완할 수 있는 방법이었다. 10% NaOH 용액에서 0.5시간 동안 고무 골재를 전처리한 것은 전처리하지 않은 것에 비해 인장 강도를 약 15% 높일 수 있었다^[70]. Benazzouk^[74] 등은 고무 골재 교체비가 20 ~ 30% 사이(크기 : < 1 mm)일 때 약 18%의 인장 강도 증가를 확인했다. 이는 고무의 특성으로 인해 균열이 전파되지 않아 파단 단계가 지연되었기 때문이라고 할 수 있다. Al-Akhras와 Smadi^[75]도 이와 유사한 결과를 보고했으며, 이 결과는 고무에 의한 모래의 치환비가 2.5%, 5%, 7.5%, 10%(크기: < 150 μ m)였으며, 모든 혼합물이 휨강도가 증가하는 모습을 보였다. Uygunoglu와 Topu^[76]는 고무 골재 함량이 증가함에 따라 휨강도가 감소했다고 보고했다. 10 ~ 50%(크기: 1~4 mm). Pedro^[56] 외 연구진은 이 감소가 ITZ에서 콘크리트와 모르타르의 미세 구조적 이질성에 기인한다고 설명했다. 전반적으로 고무 골재의 경우 이러한 골재가 혼입될 때 인장 또는 휨 강도 손실을 방지하기 위해 전처리시 크기 1 mm가 바람직하고 보았다.

제6절 내구성능

1. 흡수율

(1). 플라스틱 골재의 효과

대부분의 연구에서 플라스틱 골재의 교체는 콘크리트의 다공성과 수분 흡수를 증가시켰다. Colangelo^[57] 등은 콘크리트의 다공성이 각각 10%, 20%, 30%로 약 19.5%, 31.2%, 40.1% 증가한 반면 이에 따른 흡수율은 9.0%에서 15.2%로 증가했다고 관측했다. 이는 플라스틱 골재 함량이 높아지면서 갇힌 공기가 많아지고 공극이 커졌기 때문이다. Iucolano^[77] 등은 모르타르의 다공성 증가가 플라스틱 골재의 이질적인 입자 크기와 형태에 기인한다고 설명했지만, Da Silva^[77] 등은 플라스틱 골재의 불침투성 표면으로 인해 형성된 약한 ITZ 때문이라고 설명했다. 그 외에도, 얇은 판상 모양의 플라스틱 골재는 결합이 약하기 때문에 해당 경량 골재 및 일반 골재보다 콘크리트의 물 흡수가 더 높은 것으로 밝혀졌다. 그러나 Safi^[58] 등은 반대 연구 결과를 얻었으며, 플라스틱 골재 함량이 30%(크기: 0.01 mm)일 때 충전 효과로 인해 콘크리트의 다공성 및 흡수율 감소가 보고되었다. 그러나 플라스틱 골재 함량의 증가는 콘크리트의 다공성과 흡수율을 증가시켰다.

(2). 고무 골재의 효과

플라스틱 골재와 마찬가지로 고무 골재의 크기는 콘크리트의 물 흡수에 중요한 요소였다. 고무 함량의 증가(크기: 0.7 ~ 5 mm)는 콘크리트의 물 흡수에 부정적인 영향을 미쳤다^[78]. Fadiel^[79] 등은 고무 골재의 다양한 함량과 크기를 가진 콘크리트 복합체의 흡수율을 평가했다. 고무 골재 10%와 20%를 사용한 시편은 수분 흡수가 감소된 반면, 고무 골재 함량이 30%, 40%인 시편은 고무 크기에 관계없이 수분 흡수가 더 높았다. Si^[80] 등은 35% 미만의 고무 함량(크기 : 1.44 ~ 2.83 mm)에서 수분 흡수 감소를 발견하였고, 이 수준을 넘어서는 약간의 증가가 눈에 띄었다. 반면 Pedro^[56] 등은 고무 골재 5%(크기 : < 2 mm)만 수분 흡수를 줄일 수 있는 반면 고무 골재 10%와 15%로 치환하면 높은 수분 흡수를 할 수 있다고 보고했다. Girskas와 Nagrockiene^[81]은 작은 크기의 고무가 미치는 영향은 작은 입자의 모세관 효과로 인해 콘크리트의 물 흡수율이 더 두드러졌다고 지적했다.

2. 건조수축

(1). 플라스틱 골재의 효과

연구에 따르면 모래를 플라스틱 골재로 대체하면 콘크리트의 건조수축이 일부 증가했다^[82-84]. 플라스틱 골재의 함량이 높을수록 초기경화 때 건조수축이 증가하는 것으로 나타났다. 플라스틱 골재의 20 ~ 80%를 사용한 콘크리트의 수축은 대조군 시편보다 수축이 10 ~ 85%^[85]의 범위로 비교적 컸다. 수축이 증가하는 주된 이유는 플라스틱 골재의 낮은 강성과 높은 압축성으로 인해 수축 움직임에 대해 무시할 수 없는 구속력 때문이다. Silva^[46] 등은 플라스틱 골재 함량이 15%일 때 크기(크기: 1 ~ 11.2 mm)에 관계없이 수축이 감소했음을 관찰했다. 플라스틱 골재의 탄성 계수는 낮지만, 그 감소는 수경성과 관련이 있고, 수분을 공급받을 수 있는 자유수가 많아 수축률이 낮아졌다고 보았다^[85]. 또한 판상 모양 골재가 펠릿 형상의 플라스틱 골재에 비해 더 큰 수축을 일으켰다는 사실을 증명할 수 있는데, 이는 판상 모양 골재를 사용하면 더 높은 물 수요가 발생하여 시멘트 수화에 사용할 수 있는 물이 더 적기 때문이다.

(2). 고무 골재의 효과

수축은 보통 고무 골재의 크기 및 함량과 관련이 있는 반면, 골재 형태는 수축

에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보고되었다. Bravo와 de Brito^[86]는 미세골재 교체비율 15%(크기 : 4 ~ 7 mm)에 대해 수축률이 43% 증가했고, 굵은골재 교체에 대해서는 수축률이 낮아진 것이 관찰돼 고무 골재 크기에 따라 수축이 증가한 것으로 나타났다. Sukontasukkul과 Tiamlom^[87]은 압축강도가 낮아지고 탄성계수가 낮아져 고무 골재를 함유한 콘크리트가 더 수축되는 현상이 나타났다고 보고했다. 30% 미세고무(크기 : > 4.75 mm)의 콘크리트의 수축률은 0.08%인 반면, 동일한 교체수준에서 고무(크기 : > 4.75 mm)의 수축률은 0.13%였다. 미세 고무 골재를 이용한 수축 감소는 수축 억제제를 위한 반발과 모세관 효과로 인한 것으로 분석되었다. 고무 골재의 강성이 낮아지고 유연성이 높아져 수축력이 증가했다^[76,88]. 실험 결과, 수축이 증가하는 단점이 있었고, 균열이 증가하여 고무 골재의 혼입에 따른 수축 균열의 영향이 제한되는 것으로 나타났다^[89].

3. 동결 및 융해 저항

(1). 플라스틱 골재의 효과

Wang과 Meyer^[90]는 모르타르를 생산하기 위해 폴리스티렌 골재를 사용했고 동결 융해 저항에는 아무런 영향이 없다는 것을 발견했다. 그러나 폴리스티렌 폼(eps) 형태의 플라스틱 폐기물은 동결융해 저항성을 개선하기 위해 골재로 사용되었다. Ferrándiz-Mas와 García-Alcoceba^[91]은 동결융해 저항성의 개선은 EPS가 동결시 팽창을 일부 완화시켜 모르타르 손상을 감소시켰기 때문이라고 설명했다. 표준 모르타르(0%의 EPS)의 동결융해 반복 이후 압축강도 손실은 25%인 반면, 10%와 30% EPS를 혼입한 모르타르의 강도 손실은 각각 7%와 11%에 불과했다. 다만 EPS 함량이 50% 이상일 때 강도 손실이 더 높게 관찰됐는데, 이는 작업성이 좋지 않아 동결에 의한 미세 균열 형성이 쉬웠기 때문으로 볼 수 있다. 또한 Kan과 Demirbogèa^[92]는 EPS가 골재 대신 사용될 때 동결융해의 반복에 의한 손상에 더 취약하다는 것을 발견했다.

(2). 고무 골재의 효과

이전 연구에서는 고무 골재가 동결융해 저항성과 관련하여 유익한 영향을 미쳤으며, 이는 고무 골재의 모양, 전처리 및 크기에 따라 달라진다는 점을 강조했다. Paine^[93] 등은 고무 골재를 일반 콘크리트보다 동결융해에 대한 내성이 우수하기

때문에 동결융해 저항 재료로 생각했다. 고무 골재가 6%인 콘크리트는 56주기 이후 0.1 kg/m^2 이상의 배율을 보였으며, 이는 동결융해에 매우 좋은 저항성에 해당하며, 일반 콘크리트의 경우 56주기 이후 0.3 kg/m^2 였다. 동결융해 저항성을 개선하려면 4% 이상의 고무 골재를 사용해야 한다는 점에 유의해야 한다. Al-Akhras와 Smadi^[75]는 동결융해 저항성이 높아진 것은 고무의 결합으로 인한 공기 함량이 높아졌기 때문이라고 분석했다. 또한 고무 골재는 탄성계수가 낮아 강성을 감소시켜 내부 미세균열을 감소시켰다. 특히 NaOH 처리된 고무의 경우 고무 골재를 추가하여 더 나은 동결융해 저항이 관찰되었다. 질량손실은 25% NaOH 용액 처리된 고무 골재 시편은 0.59%로 일반 시편은 0.8%였다. 이는 용액 처리된 고무 골재와 페이스트 사이의 ITZ 내 낮은 다공성과 관련이 있었다. 고무의 혼입으로 콘크리트의 강성이 크게 감소함에 따라 동결융해 손상에 대한 저항이 감소하였다. 더 나은 동결융해 저항성을 얻기 위해 25% 이하의 고무가 필요했다^[80]. 또한, Gesogglu^[94] 등은 고무(크기 : < 1 mm)를 포함한 콘크리트는 300주기 이후에 고무가 더 큰 표면적을 가지기 때문에 동결융해 손상을 방지하기 위해 공기를 더 많이 유입시키는 데 기여했다고 발표하였다.

4. 염화이온 투과성

(1). 플라스틱 골재의 효과

Kou[90] 등은 플라스틱 골재 함량이 증가함에 따라 염화물 이온 투과성에 대한 저항성이 증가했다. 대체율이 5%에서 45%로 증가했을 때 통과된 총 전하량은 (쿨롬브스에서) 36.2%에서 11.9%로 감소했다. 염화물 이온 침투가 줄어든 것은 플라스틱의 불침투적 특성이 염화물 이온의 통로를 막았기 때문이다. Silva^[46] 등은 콘크리트의 공극 증가로 인해 플라스틱 골재 함량이 증가하는 것으로 더 높은 염화물 이동이 눈에 띄었다.

(2). 고무 골재의 효과

Thomas^[61] 등은 미세골재 교체로 고무의 양이 0%에서 5%로 증가함에 따라 염화물 이온 침투율이 감소했음을 발견했다. Li^[96] 등 두 가지 측면에서 염화물 이온 침투가 감소하는 이유를 요약했다. 고무는 콘크리트에 침입하는 물의 추진력을 감소시켰다. 두 번째로, 고무 골재는 모세관 길이를 증가시킴으로써 물과 염화물이 콘크리트에 침투하는 것을 막았다. 또한 Onuaguluchi^[97] 등 테스트 결과 고무 골재가

염화물 투과성에 대한 내성을 크게 향상시킨 것으로 확인되었다.

5. 전기저항

(1). 플라스틱 골재의 효과

기존 콘크리트에 비해 플라스틱은 절연체로서 콘크리트의 전기 저항을 증가시킬 수 있다. Nili^[98] 등은 10% 플라스틱 폐기물의 교체로 인해 전기 저항률이 크게 증가하였으며, 이는 플라스틱 골재의 필러 효과로 인해 콘크리트의 밀도가 높아져 결과적으로 전도도가 증가될 수 있다고 보고하였다. 콘크리트 내 기공으로 인해 플라스틱 대체의 함량이 높을수록 전기 저항률은 감소하였으나, 여전히 기존 혼합물에 비하여 전기 저항률이 높았다. Sadrmontazi^[73] 등은 교체 비율이 전기 저항성에 영향을 미치지 않는다고 지적했다. 이 속성에 대한 데이터가 분명히 부족하고 더 많은 연구가 수행되어야 한다.

(2). 고무 골재의 효과

Guo^[38] 등은 모래를 고무 골재 15 ~ 35%로 대체함으로써 콘크리트의 전기저항이 증가했다고 보고했다. 그 결과는 고무 골재의 낮은 전도 능력과 관련이 있을 수 있다고 보고하였다. 또한 NaOH 처리된 고무 골재를 사용한 샘플은 NaOH가 사전 처리되지 않은 샘플보다 전기 저항이 더 낮았다. Mohammed^[99] 등은 고무 골재 함량이 높아지면서 전기저항이 증가했으며 비슷한 경향도 Si^[80] 등의 연구원에 의해 보고되었다. 다만 전기저항 감소를 막기 위해 배치비율이 50%를 넘지 않도록 권고했다.

제7절 기능적 특성

1. 열전도율

(1). 플라스틱 골재의 효과

일반적으로 플라스틱 골재의 효과 플라스틱의 열전도율이 낮기 때문에 열전도율에 긍정적인 영향을 미쳤다. EPS의 열전도율은 0.04 W/mK에 불과하다^[100]. Yesilata^[108] 등은 폐플라스틱으로 콘크리트의 열전도율이 현저하게 감소하여 결과

적으로 단열성능이 향상되었다고 보고했다. 그 효과는 추가된 플라스틱 골재의 기하학적 구조와 관련이 있다. 정사각형 조각, 스트립 조각 및 불규칙한 조각을 추가하여 콘크리트의 절연 개선 비율은 10.27%, 17.11%, 17.16%였다. 플라스틱은 스트립 모양이 정사각형 모양의 입자보다 절연 성능이 우수한 반면 불규칙한 모양의 조각은 절연 성능이 가장 우수한 것이 분명했다. 이는 플라스틱과 콘크리트 사이의 접착력이 다른 조각 배열보다 뛰어나서 서로 더 가깝고 더 나은 열 장벽을 만들기 때문이다. Iucolano^[109] 등은 플라스틱 골재를 사용한 콘크리트의 열전도율이 일반 모래로 제조한 콘크리트의 열전도율보다 5배 낮고, 이는 플라스틱의 전도율이 낮고 혼합물의 다공성이 높았기 때문이라고 지적했다. 유사한 결과가 Wang과 Meyer^[90]에 의해 보고되었는데, 혼합물의 공극 형성을 유도한 플라스틱의 수경성 때문에 내용물이 증가함에 따라 열전도율이 감소하는 추세를 보였다.

(2). 고무 골재의 효과

플라스틱 골재 사용과 마찬가지로 고무 골재의 혼입은 열전도율을 크게 감소시켰고, 고무의 열전도율은 0.26 W/Mk에 불과했다^[66]. 이러한 열전도도에 미치는 영향은 공극이 열전도율이 훨씬 낮았기 때문에 기본적으로 고무 골재로 인한 다공성 변화에서 비롯된다. 콘크리트의 다른 구성 요소보다 견고하고 이를 강조하기 위해 Guo^[38] 등의 연구위원은 고무 골재 함량이 증가함에 따라 콘크리트의 열전도율 저하 효과가 컸다고 보고했다. 고무함량 15%, 25%, 32.95%, 41.09%의 열전도율이 각각 약 16.28%, 25.58%, 25%, 35%, 50%씩 감소했다. 고무 골재를 사용한 콘크리트의 열전도율 감소에 관한 유사한 결론도 다른 연구자들에 의해 입증되었다^[66, 101]. 고무 골재 함량이 높아지면서 다공성이 증가한 것이 열전도율 저하의 주요 원인이었다. Benazzouk^[110] 등의 보고서에 따르면 혼화제를 첨가하지 않고 고무 함량이 0 ~ 50% 증가했을 때 공기 함량이 2%에서 17%로 증가했다. Fadiel^[79] 등은 큰 크기(크기 : 0 ~ 0.6 mm)의 고무 입자가 포함된 혼합물이 모든 수준에서 작은 크기(크기 : 0.84 ~ 2 mm)의 혼합물에 비해 열전도율이 낮다는 것을 증명하였다. 왜냐하면 큰 크기의 고무가 콘크리트에 더 많은 공기를 가둘 수 있기 때문이다.

2. 흡음

(1). 플라스틱 골재의 효과

플라스틱 골재를 사용한 콘크리트와 모르타르의 흡음 연구는 제한적이지만, 플라스틱 골재는 다공성 구조 때문에 잠재적인 흡음 물질로 사용될 수 있다는 연구 결과가 입증되었다^[42, 110]. Murugan^[102] 등의 보고서에 따르면 EPS는 미세공극의 존재로 인해 버진 폴리에틸렌에 비해 모든 주파수에서 더 나은 흡음 특성을 보였다. AsDrugbali^[103] 등은 EPS의 흡음은 기타 자연 흡음 물질과 비교했다. 흡수계수 500Hz에서 충격소음 저감 지수는 30dB, 흡수계수는 0.5로 천연 흡음재 못지않았다. Branco와 Godinho^[104] 등은 폴리스티렌 플라스틱으로 제조된 경량 모르타르가 기존의 다른 흡음재로 제조된 모르타르보다 흡음 성능이 더 뛰어나다는 결론을 내렸다. 소음 감소는 폴리스티렌의 낮은 강성과 많은 공극 때문일 수 있다.

(2). 고무 골재의 효과

콘크리트 내 고무 골재의 우수한 흡음 능력은 문헌에서 입증되었다^[105-107]. Issa와 Salem^[65, 66]는 흡음 성능을 나타내기 위해 파동의 이동 시간 값을 테스트했다. 이동 시간 값이 길수록 흡음 능력이 향상되었다. 고무 함량이 높아지면서 콘크리트의 흡음 성능이 높아진 것으로 나타났다. Grdic^[111] 등이 수행한 테스트에 대해서는 속도는 고무 골재 20%와 30%를 가진 콘크리트의 경우 각각 약 14%, 21% 감소하였다. 비슷한 결론이 Khaloo^[112] 등에 의해서도 보고되었다. Guo^[38] 등은 고무에 있는 메틸 그룹이 음파를 약화시켜 고무 골재 복합체가 더 높은 흡음률을 초래할 수 있다고 말했다.

제8절 소결

일반적으로 플라스틱과 고무를 골재로 사용하는 것은 모르타르와 콘크리트의 작업성 저하에 유사한 영향을 미치는 것으로 보인다. 또한, 골재의 혼입량이 높을수록 작업성이 더 크게 저하되는 경향이 있다. 플라스틱 골재의 경우 골재의 모양과 입자가 작업성에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 문헌상으로는 고무 골재를 사용할 경우 전처리 사용이 가능하기 때문에 작업성 측면에서 플라스틱골재에 비해 더 나은 성능을 확인할 수 있다.

플라스틱과 고무 골재의 보고된 비중은 각각 $0.9 \sim 1.34 \text{ g/cm}^3$, $0.51 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 로 서로 유사하다. 모르타르와 콘크리트에 사용되는 잔골재(2.61 g/cm^3)와 비교하여 훨씬 낮은 비중으로 플라스틱과 고무 골재가 잔골재를 대체한다면, 모르타르와 콘크리트의 밀도는 플라스틱과 고무 골재 함량의 증가에 따라 선형적으로 감소하였고, 이러한 골재를 사용하면 얻을 수 있는 모르타르와 콘크리트의 밀도가 최대 30%까지 감소한다.

압축강도로 볼 때 플라스틱과 고무 골재(Rubber Aggregate)는 모르타르와 콘크리트의 압축 강도를 감소시켰는데, 이는 매끄러운 표면과 시멘트 사이의 결합이 약하고 골재 자체의 강도가 낮으며 공극이 존재하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 플라스틱과 고무 골재의 입자 크기를 줄이면 압축 강도 손실을 어느 정도 줄일 수 있다. 화학물질로 고무 골재를 전처리하면 표면 접합이 좋아져 압축 강도를 높일 수 있다는 점을 감안하면 고무골재 사용이 더욱 효율적이다. 그러나 과도한 강도 감소를 방지하기 위해 최대 20%의 골재 치환을 권장한다. 두 골재를 사용하여 모르타르와 콘크리트의 인장 강도에 대해 유익한 효과가 관찰될 수 있다. 모세관 효과 외에도 골재의 특성은 인장 강도에 있어서 일부 개선된 인장 강도를 관찰할 수 있다.

작은 크기의 플라스틱과 고무 골재의 충전 효과는 빈 공간 채워 긍정적인 효과를 주는 것처럼 보였고, 흡수율은 감소했지만 공기량은 증가하였다. 플라스틱과 고무 골재의 낮은 강성은 모르타르와 콘크리트의 수축을 높이는 데 기여하지만, 그러한 특성은 적절한 양을 혼입하였을 때 동결융해 저항성에 도움이 될 수 있다.

플라스틱과 고무 골재의 혼입으로 모르타르와 콘크리트의 기능적 특성에 긍정적인 영향을 주는 것으로 보인다. 이런 골재를 혼입하면 다공성 천이대가 증가하기 때문에 열전도도를 낮출 수 있고, 흡음률을 효율적으로 개선할 수 있다.

제3장 모르타르에 해양 폐플라스틱 플레이크 혼입시 고려사항 : 등가강도설계에 따른 비용 및 환경 영향

제1절 실험개요

본 장에서는 해양에서 얻은 폐플라스틱의 화학적 성능을 분석하였고, 폐플라스틱을 모르타르에 혼입한 경우의 작업성 및 물리적 특성을 분석하였다. 그 다음 실험 결과를 바탕으로 강도 및 혼합 비율에 대한 회귀 모델을 구축하였고, 등가강도 기반설계를 바탕으로 폐플라스틱과 시멘트 사이의 관계를 고려하여 재료비용과 CO₂ 발생량에 대해 분석하였다.

제2절 구성요소

시멘트 복합체는 모르타르 및 미세한 골재와 거친 골재를 포함하는 시멘트 혼합물로 설계되었다. 본 실험에서 시멘트 모르타르를 준비하기 위해 일반 포틀랜드 시멘트(OPC), 천연 미세 골재 및 고성능감수제(HRWR)가 사용되었다. 특히 시멘트의 성능변화를 고려하여 ASTM C 150의 1형과 유사한 동일한 등급(한국표준(KS) L 5201)을 만족시키면서도 시멘트의 성능변화를 고려하여 시판되는 두 제조사의 OPC를 사용하였다. 두 제품 모두 약 3,100 ~ 3,300 m²/kg의 비표면적을 가지고 있다. KS L5201의 OPC는 석회암 분말을 최대 5 wt.% 외에 최대 5 wt.% 이상의 포졸란, 슬래그 및 플라이 재를 첨가할 수 있으며, 이러한 미네랄 혼화제는 각 제조사마다 다르다. X선 형광 분광법에 의한 OPC의 산화물 조성은 [표 4]에 나열되어 있다. 강모래와 부순모래를 천연혼합 미세골재로 혼합하였으며, 비중, 흡수율 및 미세계수는 각각 2.47, 3.5, 2.82이다. 폴리카르복실산계 HRWR의 고형분 함량은 32 wt.%였다.

[표 4] OPC의 XRF 산화물 조성

Oxide	OPC for Trial 1	OPC for Trial 2
CaO	59.9	60.6
SiO ₂	18.6	23.0
Al ₂ O ₃	4.7	3.4
Fe ₂ O ₃	3.1	3.1
MgO	3.7	3.7
Na ₂ O + K ₂ O	1.6	1.9
SO ₃	3.8	2.6
Cl	0.05	-
Etc	0.9	0.1
LOI	3.6	2.2

폐기물 잔해는 부산시 감지해변에서 수거해 플라스틱 폐기물 재활용 업체로 보내져 분쇄하여 플레이크 조각을 만들었다. 바다에서 나온 폐플라스틱 플레이크는 [사진 6]에 나타난다. 플레이크의 두께는 약 0.5 ~ 1.2 mm, 종횡비는 5 ~ 15 이내였다. 플레이크의 10 mm 체는 100% 통과 하였고, 1 mm 체는 0% 통과했다. 플레이크의 모양으로 인해 체가름 분석에 의한 입자 크기 분포를 제시하는 것은 의미가 없다. 따라서 재료의 미세계수는 측정되지 않았다. 플레이크의 비중은 물과 알코올로 두 번 측정되었고, 그 결과는 1.26 ± 0.30 이었다. 비중이 범위가 유사한 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)는 1.28 ~ 1.38, 폴리카보네이트(PC)는 1.20, 폴리비닐알코올(PVA)은 1.20, 이중 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)은 널리 사용된다. 이 범위보다 가벼운 폴리머 형에는 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP)이 0.98로 있다. 나일론은 1.04, 폴리염화비닐(PVC) 1.40이다. 플레이크의 흡수율과 공극은 0%로 계산되었다.



(a) 해변에서 채취중인 플라스틱



(b) 분쇄중인 플라스틱

[사진 6] 폐플라스틱 플레이크 채취 및 공정



[사진 7] 분쇄된 플라스틱 플레이크

제3절 배합비

모르타르 혼합물의 혼합 비율은 [표 5]에 요약된다. 혼합물의 물-시멘트 비 (W/C)는 0.30~0.60 사이였다. 미세 결합물의 총 부피에서 플라스틱 플레이크의 교체 비율은 0, 5, 10, 15 및 20%로 설정되었고, 혼합물 내 플레이크의 부피 비율은 약 10% 이내였다. 0.45 W/C 이하의 혼합물의 경우 HRWR이 적용되었다. HRWR의 양은 W/C에 따라 고정되었으며 플레이크에 의해 변경되지 않았다. 이것은 플라스틱 플레이크가 굳지 않은 혼합물의 작용 가능성에 미치는 영향을 확인하기 위한 것이다.

[표 5] 배합비

Mass composition (wt ratio/C)				P/(S+P) (vol. %/sand)	volume traction of plasrtic (Vp) (vol %)
W	C	S	P		
0.60	1	2.50	0.00	0	0.0
0.60	1	2.37	0.05	5	0.25
0.60	1	2.25	0.10	10	5.1
0.60	1	2.12	0.14	15	7.6
0.60	1	2.00	0.19	20	10.2
0.55	1	2.50	0.00	0	0.0
0.55	1	2.38	0.05	5	2.6
0.55	1	2.25	0.10	10	5.2
0.55	1	2.13	0.14	15	7.8
0.55	1	2.00	0.19	20	10.5
0.50	1	2.50	0.00	0	0.0
0.50	1	2.38	0.05	5	2.7
0.50	1	2.25	0.10	10	5.4
0.50	1	2.13	0.14	15	8.1
0.50	1	2.00	0.19	20	10.8
0.45	1	2.50	0.00	0	0.0
0.45	1	2.38	0.05	5	2.8
0.45	1	2.25	0.10	10	5.5
0.45	1	2.13	0.14	15	8.3
0.45	1	2.00	0.19	20	11.1
0.40	1	2.00	0.00	0	0.0
0.40	1	1.90	0.05	5	2.6
0.40	1	1.80	0.10	10	5.1
0.40	1	1.70	0.14	15	7.7
0.40	1	1.60	0.19	20	10.3
0.35	1	2.00	0.00	0	0.0
0.35	1	1.90	0.05	5	2.7
0.35	1	1.80	0.10	10	5.3
0.35	1	1.70	0.14	15	8.0
0.35	1	1.60	0.19	20	10.7
0.30	1	2.00	0.00	0	0.0
0.30	1	1.90	0.05	5	2.8
0.30	1	1.80	0.10	10	5.5
0.30	1	1.70	0.14	15	8.3
0.30	1	1.60	0.19	20	11.0

제4절 실험방법

모르타르 혼합물의 제조에 앞서 사용되는 플라스틱 플레이크의 화학적 분석이 수행되었다. 첫째, 플레이크 표면의 염화물 함량이 검출되었다. 플라스틱 플레이크는 시설에서 분리 및 분쇄 후 간단한 세척 후 운반되었기 때문에 상부 및 하부의 염화물의 양은 표면 수의 흐름으로 인해 중력 방향으로 다를 수 있다. 플레이크 100 kg에 대해 총 9개의 측정이 이루어졌다. 상부 및 하부 각각 100 g을 수집한 후, 시편은 자연 건조되었다. 완전히 건조된 샘플은 특정 양의 물과 함께 작은 수조에 침수하고 3시간 동안 수조 초음파 처리기에서 초음파 처리되었다. 수조 내의 물은 수중의 염화물 이온 함량을 은 질산염 용액으로 적정하여 측정되었다. 건조된 플레이크 샘플과 물 사이의 질량 비율을 기준으로, 플레이크 표면의 염화물 함량을 계산하였다.

둘째, 열역학/차동 열분석(TG/DTA), 푸리에-변환 적외선 분광법(FT-IR), 라만 분광법은 세척된 플레이크 샘플로 수행되어 플레이크의 화학적 구성을 평가하였다. 플레이크는 분석을 위해 미세 입자로 기계 블레이드에 의해 분쇄되었다. 이러한 화학 분석을 통해 화학결합의 종류와 플라스틱의 특성을 측정했다.

모르타르 혼합물을 준비하기 위해, 시멘트, 포화 표면 건조 상태를 가진 천연 미세 골재, 수분함량 0%인 플라스틱 플레이크를 포함한 모든 재료는 2분 동안 혼합물과 HRWR와 혼합하였다. ASTM C 1437에 따른 모르타르 흐름 관점에서 굳지 않은 혼합물의 작업성을 평가하였다. 그 후, 경화 시편의 두 가지 유형(40*40*160 mm 막대모양, 50*50*50 mm 정육면체)은 혼합물의 기계적 특성을 평가하기 위해 제작되었다. 압축 강도와 동탄성 계수는 각각 ISO 679:2009 및 ASTM C 215-19 표준에 따라 막대 시편으로 측정되었다. 혼합물의 압축 강도는 ASTM C 109 및 ISO 679:2009 표준에 따라 휨강도 검사 후 파손된 막대 시편의 절반과 정육면체 시편으로 측정되었다. 각 혼합물에 대한 정육면체 및 막대 시편의 시편 수는 각각 12개, 6개이고, $20 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 28일 동안 물에서 양생되었다. '재료'부분에서 언급 했듯이, 일련의 테스트는 다른 시멘트와 동일한 혼합 비율로 두 번 실시되었다. 두 개의 다른 제조업체에서 생산한 OPC는 동일한 테스트에 '재료1' 그리고 '재료2'로 사용 되었다.

제5절 실험결과

1. 플라스틱 플레이크의 화학적 특성

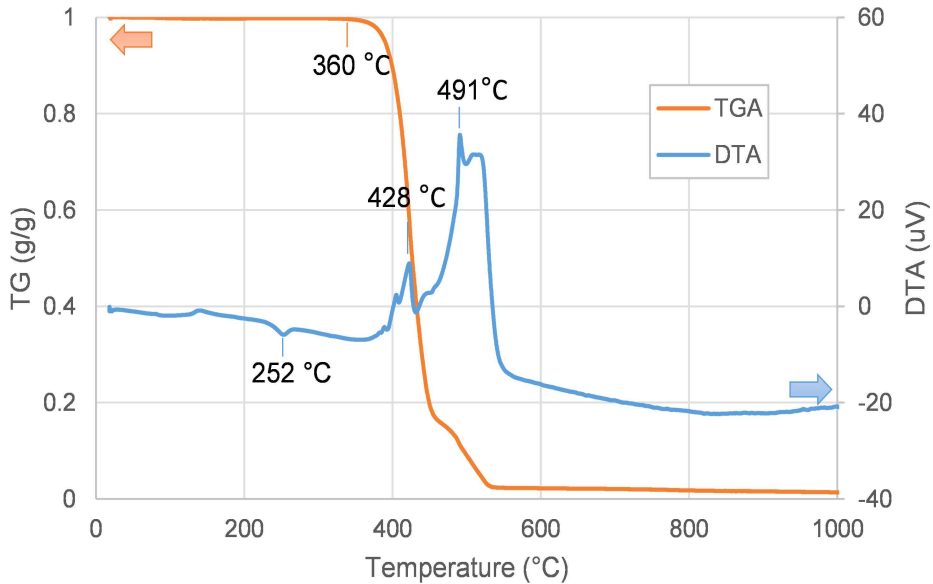
첫째, 샘플의 모든 결과는 0.1 ~ 2.0 wt.%까지 측정된 Cl 농도를 보여주기 위해 [표 6]에 나열되었다. 플라스틱 EN 12620 및 ASTM C 33을 포함한 콘크리트 및 모르타르에 대한 골재로 잘 알려진 표준 골재의 염화물 함량에 제한이 없다. 그러나 바다모래가 자주 사용되고 있는 국내에서는 일반 철근콘크리트의 골재에 염화물의 한계가 있으며, 높은 내구성이 필요한 콘크리트의 경우 0.04 wt.% 미만(KS F 4009)으로 규정되어있다. 이 실험에서 얻은 결과는 표준보다 훨씬 높았다. 이 결과는 플라스틱이 콘크리트에서 염화물 함량의 표준 제한을 위반하여 골재로 사용하기 위해 적절한 세척 공정이 필요하다는 것을 나타낸다.

[표 6] 페플라스틱 플레이크 샘플의 Cl 농도

Sample	Cl wt.%/plastic
1	0.148
2	0.134
3	0.173
4	1.456
5	1.567
6	1.481
7	0.335
8	1.547
9	2.041

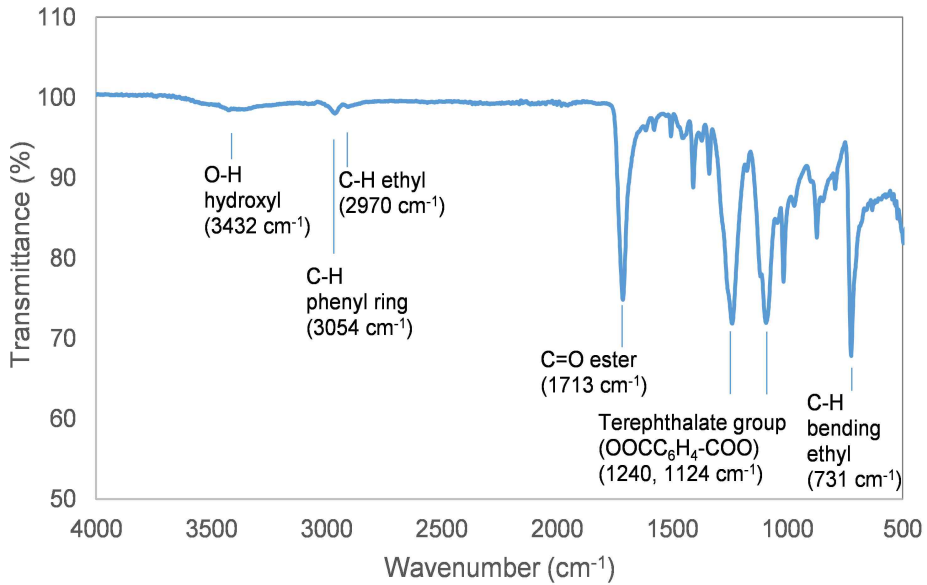
참고) 총 9개 시편(각 100 g)은 100 kg 플라스틱 플레이크에서 무작위로 수집되었다.

[그림 3]는 본 연구에서 사용되는 페플라스틱 플레이크의 TG/DTA 곡선을 나타낸다. DTA 곡선에서 변화 시작은 245 ~ 255 °C의 범위에서 측정되었으며, 연소에 의한 질량 손실을 시작하는 연소점이 약 360 °C인 것으로 나타났다^[112-114]. PC, PVA, PET의 녹는점은 각각 288 ~ 316, 228, 260 °C로 알려져 있으며, PC, PVA 및 PET의 연소점 및 녹는점은 각각 375 ~ 467, 450, 및 350 °C인 것으로 알려져 있다^[112-114].

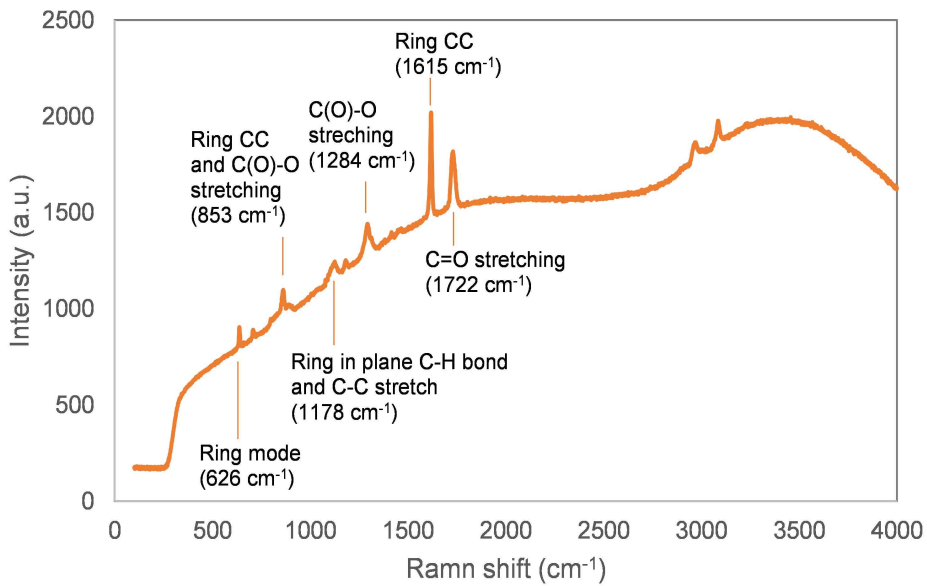


[그림 3] 페플라스틱 플레이크의 TG/DTA 곡선

FT-IR 및 라만 스펙트럼은 각각 [그림 4] 및 [그림 5]로 도시된다. FT IR과 플레이크의 라만 스펙트럼은 이전 연구에서 PET와 유사했으며 PC 및 PVA 스펙트럼과 일치하지 않았다^[34-36]. [그림 4] 및 [그림 5]에서는 측정된 피크에 대응하는 문헌에서 PET의 화학 결합이 추가되었다. [그림 4] 및 [그림 5]에서는 PC에서 발견되는 FT-IR에서 1770 cm^{-1} 및 1500 cm^{-1} 과 같은 메틸라디칼(CH3)을 가진 것들은 크게 나타나지 않았다^[115, 118, 119]. 1728 cm^{-1} , 1224 cm^{-1} 및 1018 cm^{-1} 을 포함하여 FT-IR 스펙트럼의 PVA의 주요 피크도 [그림 4]과 [그림 5]에 명확하게 표시되지 않았다^[116, 121]. PVA의 라만 스펙트럼은 CH_2 군의 원자 C-H 진동 및 C-H 결합에 해당하는 2912 cm^{-1} 및 1440 cm^{-1} 에서 두 개의 피크만 표시되었지만 여기에 나타나지 않았다^[116, 121].



[그림 4] 페플라스틱 플레이크의 FT-IR 스펙트럼

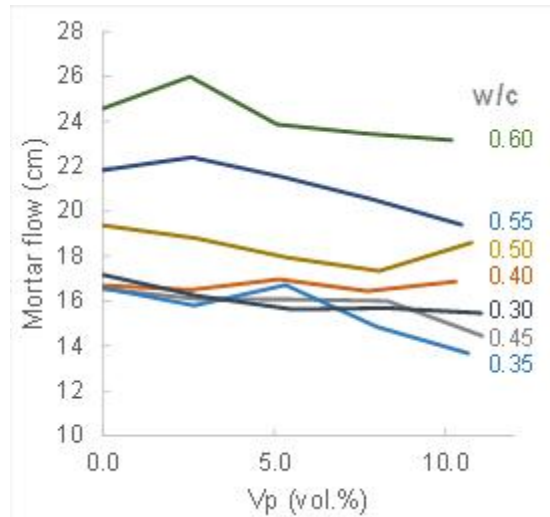


[그림 5] 페플라스틱 플레이크의 라만 스펙트럼

2. 굳지 않은 모르타르의 작업성

[그림 6]은 굳지 않은 모르타르 플로우이다. [그림 6]의 결과는 시멘트1과 2를 사용한 실험의 평균값이다. HRWR의 효과는 플라스틱 플레이크에 따라 변경되지 않았기 때문에 현재 작업에서 고려되지 않았지만 w/c에 따라 변경되었다. 모르타르 플로우에 대한 현재 작업에서 사용되는 플라스틱 플레이크의 효과는 미미한 것으로 나타났다. V_p 는 최대 10%로 미세 골재의 부피의 최대 20%가 플레이크에 의해 대체되었기 때문에, 모르타르 플로우는 w/c에 관계없이 플레이크가 없는 것에 비해 최대 25 mm 이내의 작은 감소를 보였다. 이 범위는 HRWR의 첨가에 의해 제어될 수 있다. 페플라스틱이 굳지 않은 시멘트의 플로우에 영향을 미칠 수 있는 세 가지 주요 원인이 있다. 첫째, 1 mm 미만의 미세 플라스틱 분말은 모르타르의 점도를 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 사용된 플라스틱 플레이크는 미세한 분말이 없었다. 천연 모래를 대체함으로써, 모래와 플라스틱 플레이크로 혼합된 골재에서 미세 분말 부분이 감소했습니다. 이러한 효과는 점도를 감소시킨 다음 모르타르 흐름에서 증가하였다. 둘째, 플라스틱 플레이크와 같은 모양은 혼합된 재료 사이의 마찰의 증가시켜 모르타르 흐름의 감소를 초래할 수 있다. 셋째, 플라스틱을 사용한 굳지 않은 모르타르의 밀도 감소는 경량 골재를 사용한 콘크리트의 경우 발견된 무게에 의한 슬럼프의 감소를 이끌었다^[122].

실험 결과에 기초하여, 모르타르 흐름이 두 번째와 세 번째에 의해 더 많은 영향을 받았다는 결론을 내릴 수 있다. 이 결과 PET의 소수성 특성의 효과가 있을 수 있지만, 본 실험에서는 분석되지 않았다^[123]. 이전 연구에서는 플라스틱의 미세 분말이 제거되지 않았을 때 급격한 슬럼프 감소가 발생한 것으로 보고되었다. 즉, 플라스틱을 골재로 활용하면 미분말을 제거할 필요가 있다^[124, 125].



[그림 6] 모르타르 플로우

3. 경화된 모르타르의 강도와 탄성계수

압축 강도의 시험 결과는 [그림 7]에 제시된다. 중심점과 막대는 각각 평균 및 표준 변형을 제시한다. 또한, 본 작업에서 압축 강도의 모든 테스트 결과를 가진 선형 회귀 분석이 수행되었고, 얻어진 모델도 [그림 7]에 도시되었다. CEN/TR 16639(2014)에 따른 '동등한 강도 기반 혼합 비율'의 개념을 고려할 때 "k-값 개념의 사용, 동등한 콘크리트 성능 개념 및 조합 개념의 동등한 성능", 혼합물의 압축 강도는 시멘트 대 물 비율(c/w)과 전체 플라스틱 혼합물의 부피에 의해 선형적으로 변경되었다고 가정하였다. 이 개념의 회귀 방정식은 다음과 같다.

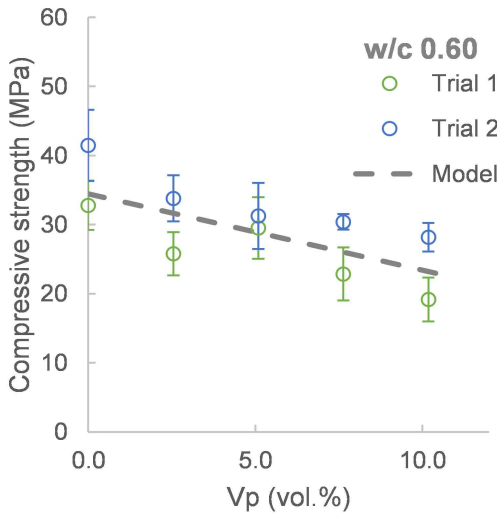
$$f_c = a_1(c/w) + a_2 V_p + a_3 \quad (\text{식. 1})$$

여기서 $a_1 \sim a_3$ 은 회귀 계수이고, f_c 는 모르타르 28일 압축 강도이다. 시험 결과로부터 얻은 (식. 1)의 회귀 계수는 [표 7]에 기재되었다.

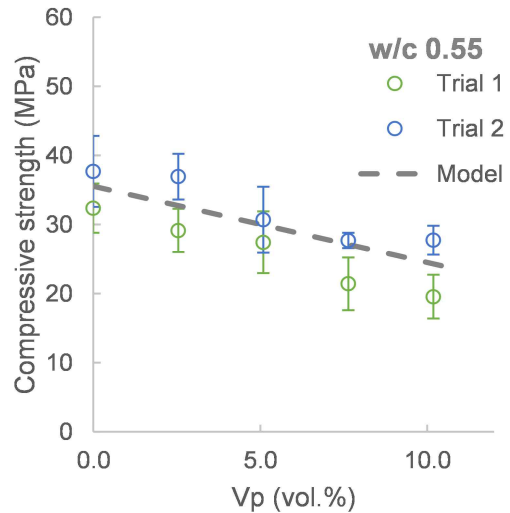
[표 7] (식. 1)의 회귀 모델의 계수

a_1	a_2	a_3	r^2
7.3	-1.1	22.3	0.62

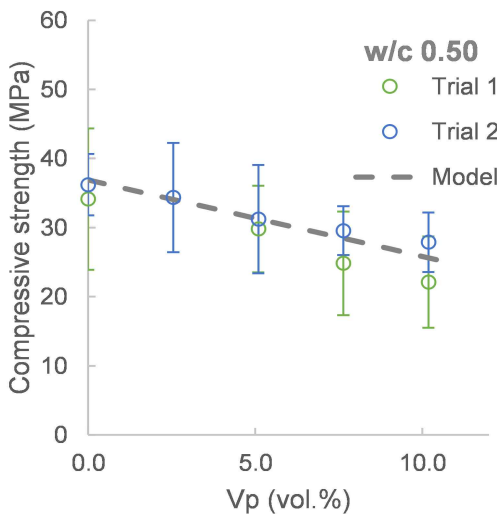
실험 및 회귀 모델의 결과는 V_p 가 최대 10 vol.% 증가하여 모든 w/c에 대한 모르타르 시편의 압축 강도가 35%까지 선형적으로 감소했다고 분석할 수 있다. 기존 연구에 따르면 V_p 의 약 30 ~ 50% 감소(=일반 콘크리트에서 모래를 약 30 vol.%, 모르타르에서 약 20 vol.% 감소시키는 것과 유사한 범위의 압축 강도 감소가 발견되었다^[124, 126, 127].



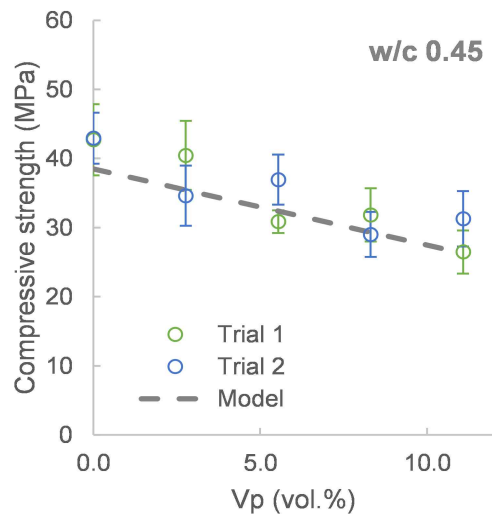
(a) w/c 0.60 압축강도



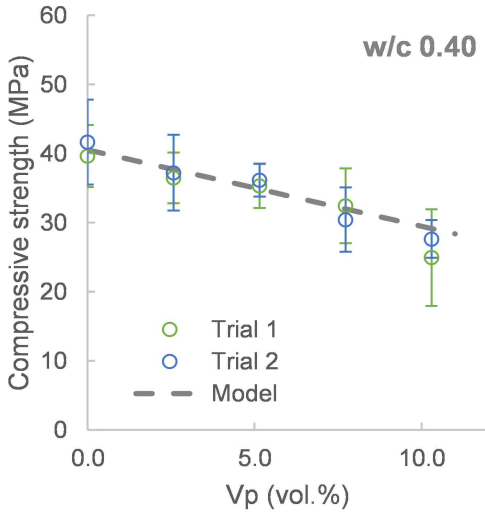
(b) w/c 0.55 압축강도



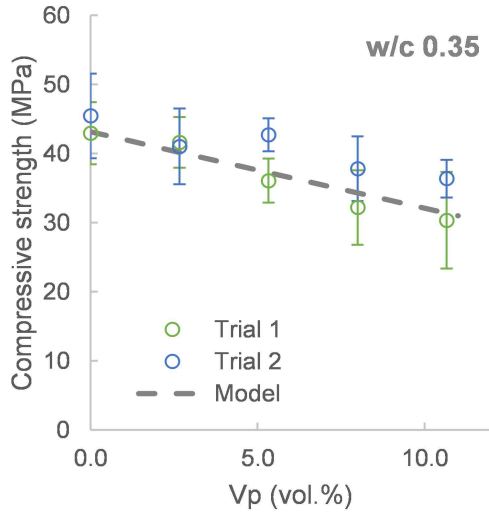
(c) w/c 0.50 압축강도



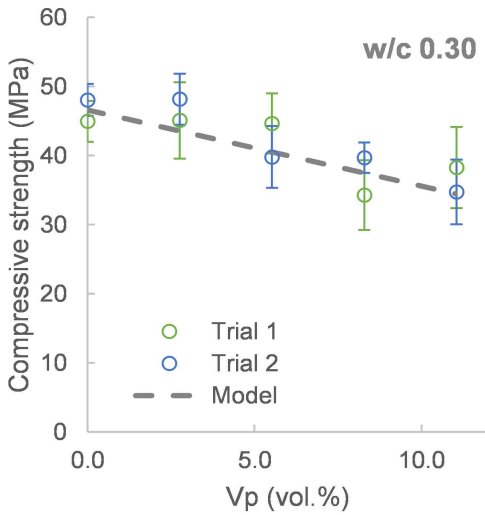
(d) w/c 0.45 압축강도



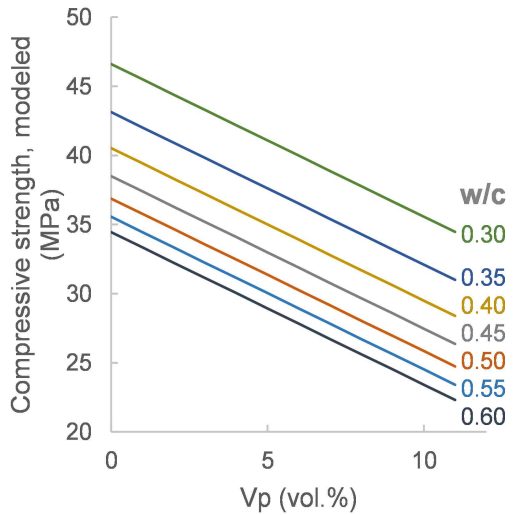
(e) w/c 0.40 압축강도



(f) w/c 0.35 압축강도



(g) w/c 0.50 압축강도



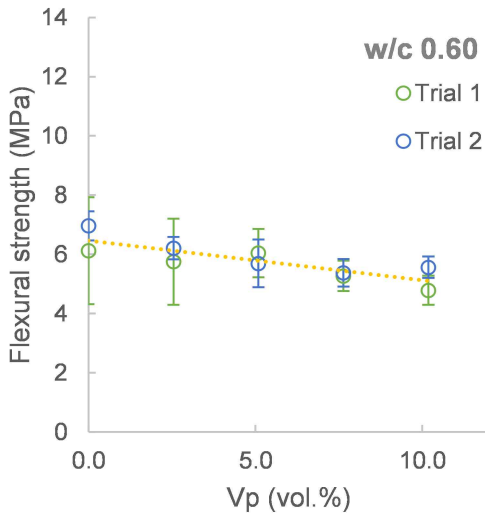
(h) 압축강도 회귀 모델

[그림 7] w/c에 따른 압축강도 및 압축강도 결과 회귀 모델

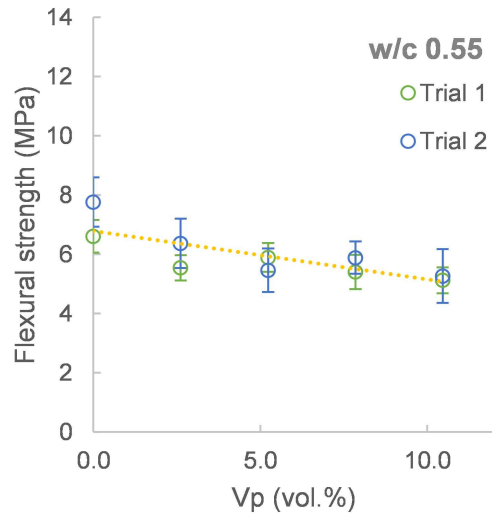
[그림 8]은 모르타르 시편의 휨강도를 나타낸다. [그림 8]의 노란색 파선은 각 w/c에 대한 Vp만을 고려하여 선형 회귀 결과이며, Vp 및 w/c 모두에서 계산되지 않으며 [그림 7]에서 압축 강도를 보여준다. Vp의 10 vol.% 증가시킴으로써 시편의 휨강도는 w/c의 모든 경우에 약 20 ~ 35%로 감소했다. 이 범위는 압축 강도와 유사했다. 실험에서 압축 및 휨강도 사이의 관계는 [그림 8]에 도시되었다. 또한,

이 관계를 분석하기 위해, 구조 설계에 대한 표준 코드에서 콘크리트의 압축 강도와 휨강도 사이의 관계에 대한 모델은 다음과 같다.

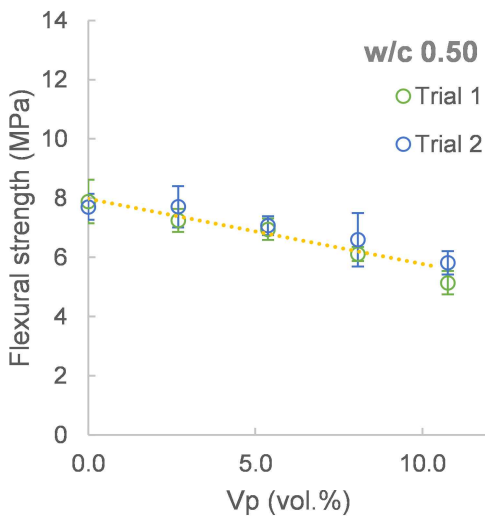
- ACI(미국 콘크리트 연구소) 318(구조 콘크리트 및 해설에 대한 코드 요구 사항)
- CEB-FIP(코미테 유로 국제 뒤 베티, 페데레이션 인터내셔널 뒤 베티) 모델 코드 2010(국제 건축 에 대한 국제 설계) 모델 코드 2010 권장 사항



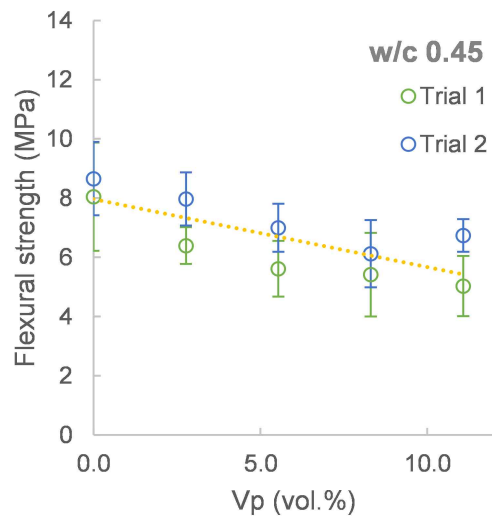
(a) w/c 0.60 휨강도



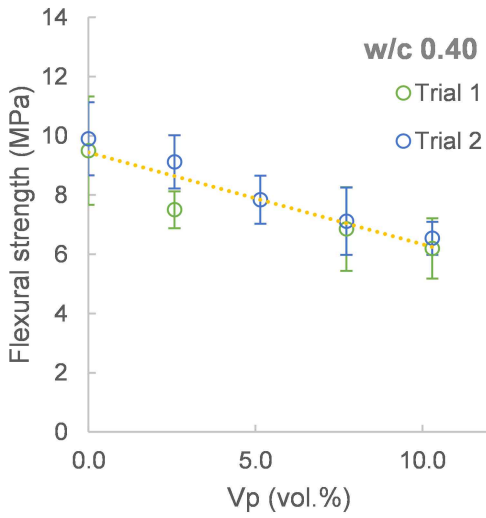
(b) w/c 0.55 휨강도



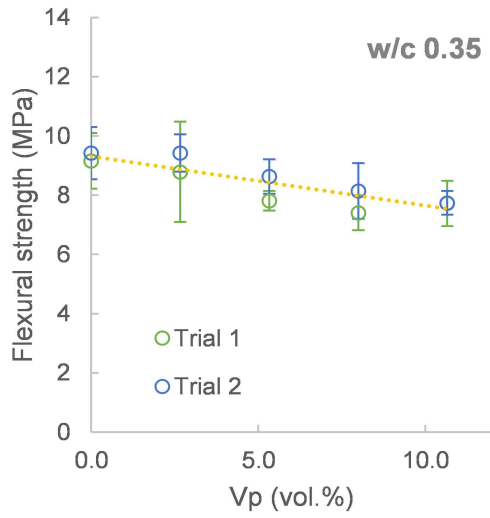
(c) w/c 0.50 휨강도



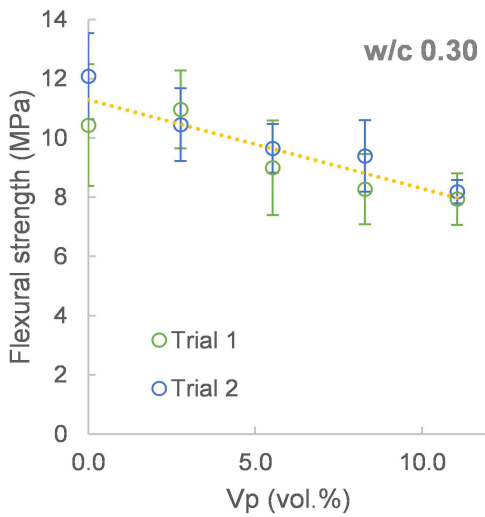
(d) w/c 0.45 휨강도



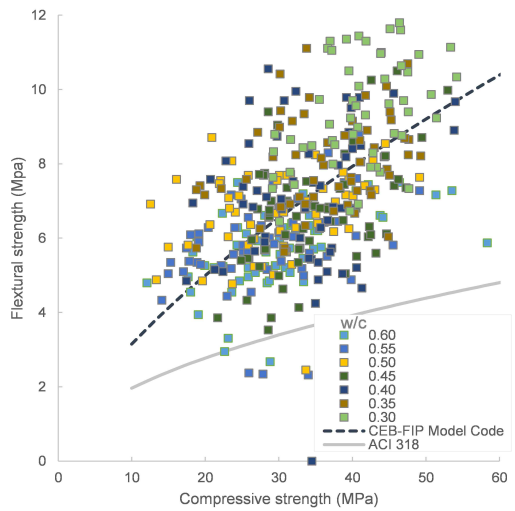
(e) w/c 0.40 휨강도



(f) w/c 0.35 휨강도



(g) w/c 0.50 휨강도



(h) 압축강도와 휨강도 관계

[그림 8] w/c에 따른 휨강도 및 압축강도와 휨강도 관계

(ACI 318)

$$f_f = 0.62 \sqrt{f_c}$$

(식. 2)

(CEB-FIP Model Code 2010)

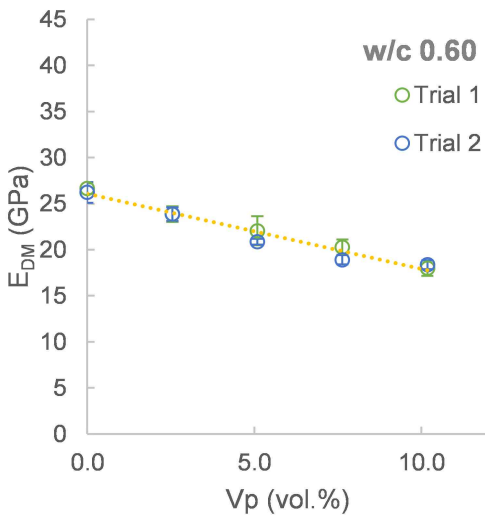
$$f_f = 0.3f_c^{2/3}/A_{fl}, \text{ where } A_{fl} = \frac{ah^{0.7}}{1+ah^{0.7}}$$

(식. 3)

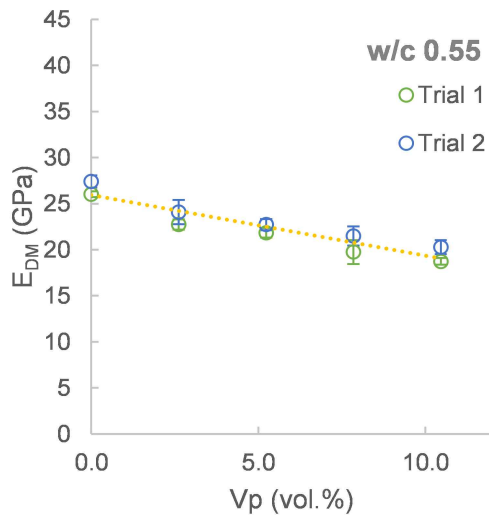
여기서, f_f 는 휨강도이고, A_{fl} 은 크기 효과에 대한 보정계수이며, α 계수 (=0.06)이며, h 는 시편의 높이이다. 이러한 방정식은 모르타르가 아닌 콘크리트에 대해 제안된다는 점에 유의해야한다. ACI 318의 모델은 크기 효과에 대해 신경쓰지 않았다. 이 방정식은 반드시 실험 결과에 만족할 필요는 없으며 지침으로만 제공된다.

[그림 9]로부터, 탄성과 압축 강도와 계수 사이의 관계가 모든 시편에 대한 상당히 일반적인 결과의 범위를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 그림에 존재할 수는 없었지만, 페플라스틱 플레이크의 첨가는 비슷한 범위의 압축 및 휨강도 모두에서 감소했기 때문에 둘 사이의 관계는 상대적으로 비례하였다.

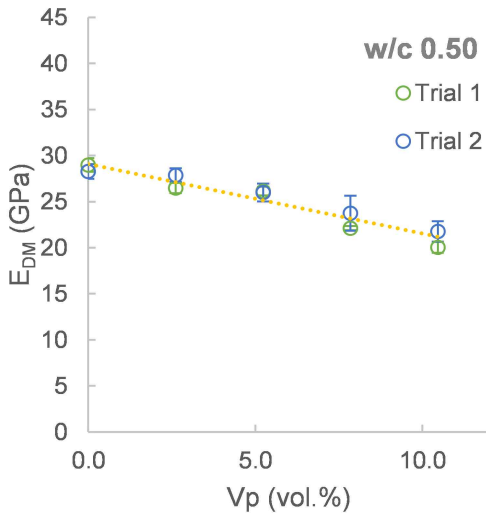
[그림 9]은 모르타르 시편의 동탄성계수를 제시한다. 최대 10 vol.% 증가와 함께 동적 계수는 약 15 ~ 35% 감소하여 압축 및 휨강도와 유사한 추세이다. 동탄성계수는 비파괴 시험이기 때문에 표준 편차는 압축 강도 및 휨강도에 비해 상대적으로 작으며 매우 정확한 선형성을 확인할 수 있었다.



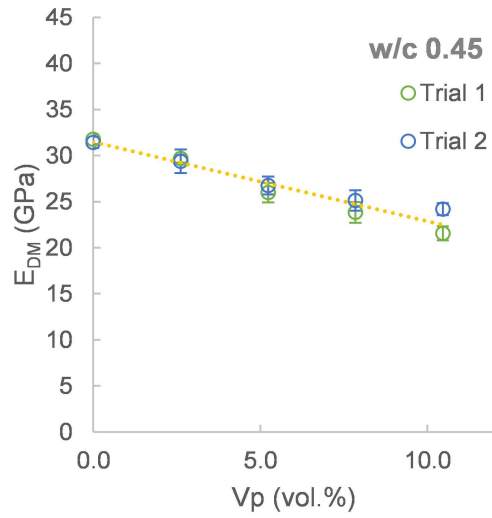
(a) w/c 0.60 동탄성계수



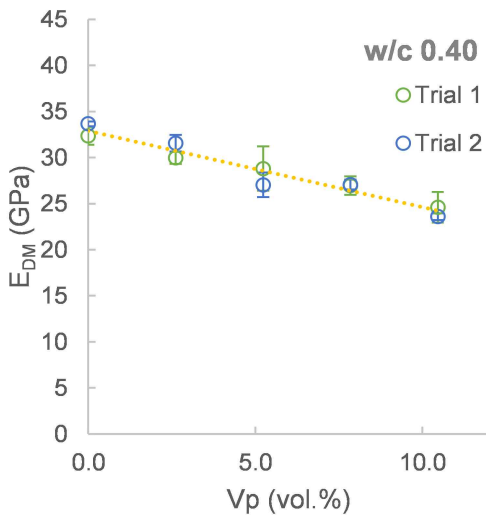
(b) w/c 0.55 동탄성계수



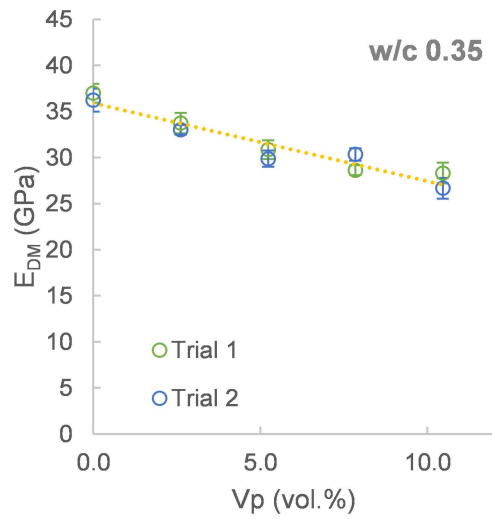
(c) w/c 0.50 동탄성계수



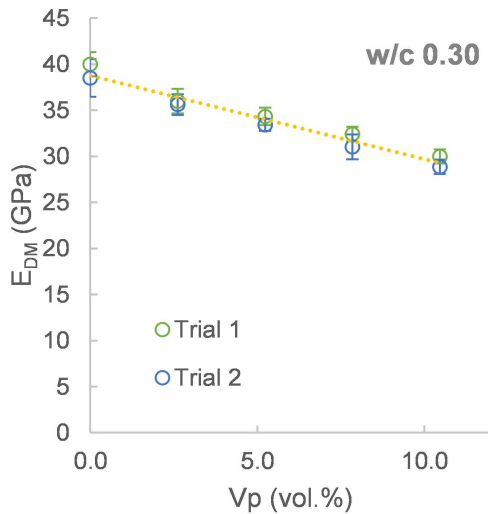
(d) w/c 0.45 동탄성계수



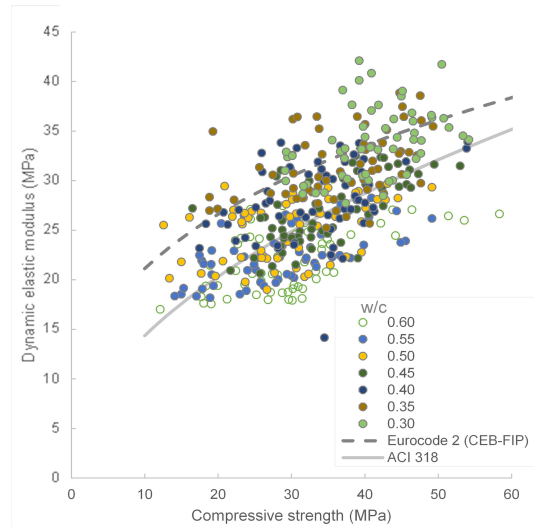
(e) w/c 0.40 동탄성계수



(f) w/c 0.45 동탄성계수



(g) w/c 0.40 동탄성계수



(h) 압축강도와 동탄성계수 관계

[그림 9] w/c에 따른 동탄성계수 및 압축강도와 동탄성계수 관계

결과를 분석하기 위해, [그림 9]에 도시된 바와 같이 압축 강도와 동탄성계수 사이의 관계가 그려졌다. 콘크리트 구조물에 대한 표준 설계 코드에서 탄성 계수와 압축 강도 사이의 관계에 대한 모델도 [그림 9]에 나타났다. 이러한 모델은 기본적으로 모르타르용 동적모듈이 아닌 콘크리트의 정탄성모듈에 관한 것이므로 관련 연구에 기초하여 수정하였다. ACI 318과 유로코드2(CEB-FIP)의 모델은 모르타르와 동적모듈에 대한 보정 함수를 추가하여 다음과 같이 수정되었다.

(ACI 318)

$$E_{SC} = 4730 \sqrt{f_c} \quad (\text{식. 4})$$

(Eurocode 2)

$$E_{SC} = 22000 \sqrt[3]{f_c / 10} \quad (\text{식. 5})$$

(Lydon & Balendran, 1986)

$$E_{DC} = 1.2E_{SC} \quad (\text{식. 6})$$

(Modified from Hansen, 1965)

$$E_{DM} = 0.8E_{DC} \quad (\text{식. 7})$$

여기서, E_{SC} 는 콘크리트의 정탄성계수, E_{DC} 는 콘크리트의 동적탄성계수, E_{DM} 은 모르타르의 동탄성계수를 나타낸다.

[그림 9]에 도시된 바와 같이, 시편의 동탄성계수는 기본적으로 휨강도와 같은 압축 강도와 직접적인 비례 관계를 보였다. 이 그림에서 표현되지는 않지만, 비례 관계는 플라스틱에 의한 강도 감소 범위가 탄성 계수와 유사하기 때문이었다.

폐플라스틱을 혼합하면 콘크리트와 모르타르의 강도를 떨어뜨릴 수 있다는 유사한 주제와 소재를 가진 이전 연구에서 이미 알려졌지만, 그 원리는 명확히 설명되지 않았다. 플라스틱을 경량 골재로 사용하는 연구가 있었지만 광물 기반 인공 경량 골재와 비교하여 플라스틱 골재는 콘크리트의 강도 감소를 초래하였다. 예를 들어, Kou et al[129]에서, 콘크리트의 골재에 의해 최대 45 vol.% PVC 골재의 사용은 밀도를 최대 20%까지 감소시키고 또한 일반 콘크리트에 비해 압축 강도를 최대 50%까지 (40 MPa에서 21.5 MPa로) 감소시켰다. 압축 강도의 감소 없이 콘크리트의 밀도 감소는 팽창 점토 또는 팽창 골재와 같은 인공 경량 골재를 사용함으로써 최대 20%까지 감소시킬 수 있었다^[130].

인공 경량 골재를 사용함으로써 콘크리트의 탄성과 휨강도의 계수 감소는 매우 명확했고 압축 강도는 크게 감소했다. 표준 설계 코드(ACI 318)에서 콘크리트의 강도 및 탄성 계수 방정식이 이미 이 점을 반영했다(즉, $E = 0.043w^{1.5}f_c^{0.5}$, w = 콘크리트밀도)^[131]. 인공 경량 골재의 경우, 골재 입자의 탄성계수는 일반 골재보다 훨씬 낮았지만, 둘 다 다공성 구조이기 때문에 시멘트 페이스트와 유사하였다. 상용화된 인공 경량 골재의 탄성계수는 12.5 ~ 19.6 GPa까지 다양한 것으로 알려졌으며, 이는 20 ~ 35 GPa범위의 시멘트 페이스트와 유사하다[131, 132]. 따라서, 응력-변형 거동에 따른 시멘트 매트릭스와 인공 경량 골재 사이의 계면에서 무시할 수 있는 응력이 존재한다^[133]. 그러나 플라스틱은 1 ~ 3 GPa로 훨씬 낮은 탄성계수를 가지고 있다^[134].

따라서 플라스틱 골재는 공극이나 공극의 일종으로 역할을 하여 표면에서 응력을 유발한다. PET를 포함한 일부 플라스틱은 시멘트 매트릭스의 고알칼리 공극 용액과 반응할 수 있으므로 플라스틱 표면에 화학 체인이 저하될 수 있다. 그러나, 플라스틱 골재의 표면 분해가 시멘트 복합체의 강도에 플라스틱의 기여가 미미하기 때문에 시멘트 복합체의 강도에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다^[135].

앞서 서술한 기계적 특성에 대한 테스트 결과로부터, 다음을 얻을 수 있다. 첫째, 문헌에서 찾을 수 없는 광범위한 w/c에 대한 플라스틱 함량을 고려하여 시멘트 복합체의 압축 강도에 대한 회귀 방정식을 얻을 수 있었다. 폐플라스틱의 종류, 크기, 모양 따라 달라질 수 있지만 이 방정식은 다음 장에서 플라스틱 골재의 경제적, 환경적 영향에 대한 정량적 분석과 다양한 분야에서 유사한 주제를 가진 관련 연구를 위한 지침에 사용될 수 있다. 그리고 다양한 혼합 비율을 조사했기 때문에, 시멘트 복합재료의 구조설계를 위한 기존 표준코드가 폐플라스틱에 적용할 수 있는지 확신할 수 있다. 플라스틱 폐기물을 첨가하여 압축강도, 휨강도, 동탄성계수의 관계가 기존의 콘크리트나 모르타르와 크게 달랐다면, 관련 방정식을 제시할 필요가 있다. 하지만 기계적 측면에서는 관련 표준의 개정이 필요하지 않은 것으로 보인다.

제6절 경제성 및 환경 영향 평가

위 실험 결과와 이전 연구 결과를 통해 플라스틱 함량의 증가에 의한 시멘트 복합체의 강도 감소는 플라스틱 폐기물의 활용을 고려할 뿐만 아니라 구조적 설계의 관점에서 이 효과를 계산해야 하는 해양 플라스틱 사용의 경제적, 환경적 영향에 의해 평가되어야 한다는 것을 확인하였다. 이러한 효과를 정량화하기 위해, (식. 1)의 회귀 모델은 CEN/TR 16639의 표준에서(수정된 2014년) 도입되었다. 이 표준에는 동등한 강도 기반 디자인과 동등한 내구성 기반 디자인이라는 두 가지 주요 설계 개념이 있음을 언급해야 한다. 전자는 콘크리트 또는 모르타르가 내구성 관련 문제가 적거나 없는 위치에 적용될 때 사용할 수 있으며, 후자는 내구성 문제를 고려해야 할 때 사용할 수 있다. 천연 골재에 비해 고유한 특성으로 플라스틱 골재는 콘크리트, 시멘트 채움 및 벽돌 단위용 충전 모르타르를 포함한 구조 콘크리트에 비해 낮은 강도와 내구성이 요구되는 비구조적인 콘크리트와 같은 제한된 경우에 사용될 수 있다. 이에 내구성은 문제가 되지 않으므로 강도 기반 설계를 기반으로 한다.

(식. 1)에서 특정 수준의 압축을 달성하기 위해 필요한 w/c 또는 c/w 는 다음과 같이 V_p 를 기반으로 계산할 수 있다.

$$c/w = f_c/a_1 - a_2 V_p/a_1 - a_3/a_1 \quad (\text{식. 8})$$

$$\Delta(c/w) = (c/w)_i - (c/w)_j = -(a_2 V_p/a_1)_i + (a_2 V_p/a_1)_j = -(a_2/a_1)\Delta V_p \quad (\text{식. 9})$$

여기서, $\Delta c/w$ 는 제1단계 j 에서 단계 i , 즉 ΔV_p 로 V_p 의 변화에 의해 동등한 강도를 달성하기 위해 c/w 의 변화이다.

(식. 3)로부터, $V_p(\Delta V_p)$ 의 증가와 함께 $c/w(\Delta c/w)$ 의 증가가 혼합물(f_c)의 압축 강도와 독립적이었다는 것을 나타냈다. 혼합비율의 과정에서 시멘트 혼합물의 강도에 거친 골재의 효과는 계산되지 않았다. 앞서 언급한 방정식은 모르타르 및 콘크리트의 복합체 모두에 적용될 수 있다.

[표 8]은 본 연구에 사용된 플라스틱 플레이크를 첨가한 복합체의 경우에 대한 정량적 분석을 요약한 것이다. 물(U_{water})의 단위 중량 175 kg/m^3 인 구조콘크리트로

가정하였으며, 이는 HRWR과 구조콘크리트를 일반적인 배합한 경우이다. ACI 211과 같은 콘크리트의 혼합 비율에 대한 일반적인 표준에서는 w/c 가 변경된 경우에도 단위 수분 함량이 고정되어 이 정량적 해석에도 고정된다.

ΔV_p 의 증가로, ΔV_p 에 대응하는 물과 $\Delta c/w$ 의 단위 중량을 곱하여 얻은 시멘트, ΔU_{cem} 의 증가 단위 중량은 다음과 같이 선형적으로 증가한다.

$$\Delta U_{cem} = \Delta(c/w) \times U_{water} \quad (\text{식. 10})$$

거친 골재의 단위 중량이 일반적으로 w/c 의 변화에 의해 크게 변화하기 때문에 시멘트, 모래의 부피의 전체 변경합계는 0으로 가정되었다. 플라스틱과 시멘트의 비율이 동시에 증가함에 따라 모래의 부피가 감소한다. 모래의 무게의 변화, ΔU_{sand} , 다음과 같이 계산되었다.

$$\Delta U_{sand}/\rho_{sand} + \Delta V_p + \Delta U_{cem}/\rho_{cem} = 0, \text{ so, } \Delta U_{sand} = -(\Delta V_p + \Delta U_{cem}/\rho_{cem})\rho_{sand} \quad (\text{식. 11})$$

이러한 계산에 기초하여, 콘크리트 1m^3 에 플라스틱 폐기물의 1vol.%를 사용하되, 플라스틱 9 ~ 13 kg은 시멘트의 약 20 ~ 30 kg을 더 첨가해야 하는 반면, 모래 중량은 감소한 것으로 나타났다.

건축 자재 비용은 국가 또는 위치에 따라 다르다. 현재 국내의 경우 OPC와 천연 모래의 비용이 각각 77원/kg 및 25원/kg이다. 혼합물에서 V_p 의 1% 증가는 콘크리트의 시멘트에 대한 추가 비용을 $2000 \text{ 원}/\text{m}^3$ 로 증가시키고 모래 비용은 $580 \text{ 원}/\text{m}^3$ 를 절약할 수 있다. 콘크리트의 1m^3 의 가격은 18 ~ 35 MPa의 설계 표준 강도에 따라 국내에서 68,000 ~ 100,000 원/ m^3 범위 내에 있다. 콘크리트 가격은 1.7 USD/ m^3 , 즉 콘크리트의 원래 비용의 약 2%를 플라스틱의 1 vol.%를 사용하여 증가시킬 수 있으며 플라스틱 1kg 당 125 ~ 150 원에 해당한다. 국내에서는 수거 및 처리 비용을 포함하여 토지에서 생산되는 플라스틱 폐기물의 처리 비용이 약 167 ~ 250 원/kg의 플라스틱으로 보고되는 것으로 알려졌다.

이 분석에서 확인할 수 있는 사항은 강도에 제한이 있는 20 MPa 이상의 강도를 가진 구조 콘크리트의 경우 폐플라스틱을 사용하는 것은 재료비용 면에서 부담스

러운 기술이다. 바다에서 폐플라스틱의 수거 및 처리 비용에 대한 보고서는 없었다 (불순물을 제거하고 염화물 함량을 줄이기 위해 분류, 클렌징 및 세척). 그러나 이것은 토지에서 발생한 폐플라스틱보다 높을 것으로 예상된다. 플라스틱을 골재 형태로 준비하기 위해서는 플라스틱 1kg당 250 원/kg 이상의 비용(=토지에서 발생하는 플라스틱 폐기물의 공정비용)이 발생하며 이는 위치에 따라 다르지만 천연골재 비용과 비슷하거나 더 높다는 것을 의미했다. 또한 콘크리트에 대한 동등한 강도를 달성하기 위해 플라스틱 1kg당 167 ~ 250 원 이상의 비용을 지불해야 한다. 따라서, 콘크리트에 대한 미세 응고로 바다에서 폐플라스틱 1kg을 활용하는 사회적 비용은 약 420 원으로 계산되었다. 이는 단순한 폐기보다 약 80% 높았다.

[표 8] 폐플라스틱 사용시 시멘트 및 모래의 단위 무게, 비용 및 CO₂ 변화

ΔV_p	ΔU_{cem} (kg/m ³)	ΔU_{sand} (kg/m ³)	ΔC_{cem} (원/m ³)	ΔC_{sand} (원/m ³)	ΔCO_2cem (kg/m ³)
1	26	-25	2000	600	24
2	53	-50	4000	1250	48
3	79	-75	6000	1800	72
4	106	-100	8000	2500	95
5	132	-125	10000	3000	119
6	159	-150	12000	3750	143
7	185	-175	14000	4300	167
8	212	-199	16000	5000	191
9	238	-224	18000	5600	215
10	265	-249	20000	6250	238

참고) ΔC_{cem} , ΔC_{sand} : 각각 175kg의 물 무게로 콘크리트의 1m³에서 OPC 및 모래의 비용 변화

a) 국내 OPC 및 천연 모래 가격은 각각 0.09 USD/kg(77원/kg), 0.03 USD/kg(25원/kg)으로 추정

b) OPC 1t당 CO₂ 등가 물량 0.9kg 고려[136].

한편, 콘크리트용 CO₂ 발자국은 환경에 미치는 영향을 평가하는 간단한 도구로 적용되었다. OPC 생산에서 CO₂ 배출의 값은 OPC의 1 t 당 690 ~ 1,000 kg이었다, 천연 모래의 경우 훨씬 낮은 모래 1t당 3 ~ 10 kg 이다^[137-139]. [표 8]에 나타난 바와 같이 OPC에 대한 CO₂ 동등한 값은 0.9 kg/kgOPC로 고정되었지만 천연 모래의 CO₂는 무시되었다^[136]. 플라스틱의 1 vol.% 첨가로 24kg의 플라스틱이 첨가되었고, 1 kg의 플라스틱을 첨가하기 위해 CO₂ 발생량은 1.1 kg으로 계산될 수 있다. FFF의 연구에 따르면, 1 kg 플라스틱의 매립 처리로 인한 환경 부담은 0.255 kgCO₂에 상응하는 것으로 계산되었다^[140]. 이 값은 주로 N₂O와 메탄의 매립 가스 배출 때문이다. 이는 동등한 강도 기반 혼합 비율을 고려하여 구조 콘크리트에 폐플라스틱을 사용하면 단순한 매립처리보다 환경영향이 높았다는 것을 의미한다.

결과적으로 구조 시멘트 복합체에 해양 폐플라스틱의 사용은 경제적, 환경적 관점에서 거의 장점이 없다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 이러한 플라스틱은 강도 기반 설계를 고려할 필요 없이 적용되어야 한다는 것을 의미한다. 그 중 하나는 경량 시멘트 채우기, 자연 토양에 비해 낮은 밀도의 지질 재료이다. 이 소재는 도보와 교량뿐만 아니라 향후 재개발 가능성을 고려하여 1 ~ 8 MPa 까지의 범위 내에서 강점을 갖도록 설계되었다^[141-143]. 경량으로 인해 지진 하중을 줄일 수 있고, 시멘트 매트릭스는 플라스틱의 가스 방출을 제어할 수 있다^[144, 145].

제7절 소 결

열역학 분석 및 FT-IR 및 라만 스펙트럼 분석의 결과, 화학 조성 플라스틱 플레이크는 PET로 판단되었고 PET 이외의 플라스틱의 종류와 양을 정확하게 평가하기가 어려웠다. 본 연구에서 사용된 플라스틱의 표면 염화물 이온 농도는 0.15 wt.%에서 2.0 wt.%로 다양하며, 이는 구조용 콘크리트의 골재에 대한 표준 규정에 비해 훨씬 높았다. 이는 플라스틱 표면에 염화물을 제거하기 위해 추가 세척 과정이 필요하다는 것을 의미했다.

플라스틱 플레이크는 0.30에서 0.60까지 원/c가 있는 시멘트 모르타르에 적용되었다. 혼합물의 총 부피당 약 10vol.%에 해당하는 20vol.% 천연 모래로 대체되었다. 신선한 혼합물의 작업성, 즉 모르타르 흐름의 약 2mm 감소에 사소한 변화를 주도했지만, 플라스틱 플레이크는 유사한 범위의 혼합물의 탄력성, 즉 혼합물의 약 20~40% 감소의 압축 강도, 굴곡 강도 및 계수를 감소시킴으로써 플레이크의 10vol.% 감소하였다. 이 사실은 이미 문학에서 분수 실험 결과에서 알려져 있다, 하지만 현재 작업에서, 압축 강도 사이의 관계 결론될 수 있다, 굴곡 강도, 혼합물의 탄력의 계수 자연 골재와 혼합물의 것과 다르지 않았다. 이것은 시멘트 페이스트와 천연 골재에 비해 플라스틱의 탄성 계수감소 때문이다.

강도기반 혼합비율 개념을 바탕으로 콘크리트에 폐플라스틱 1kg을 잔골재로 사용하기 위한 사회적 비용은 약 0.5 USD (처리시 0.3 USD, 혼합시 0.17 USD)로 계산되었다. 단순한 폐기보다 약 80% 높았다. 또한, 시멘트 복합체에 1kg의 플라스틱을 첨가하면 강도 보완과 관련된 CO₂ 배출량이 1.1kg 추가로 발생하며, 이는 단순 폐기를 위한 CO₂ 발생량보다 0.255kg 높았다.

폐플라스틱을 구조용 재료로 사용하는 것은 경제적 및 환경적 관점에서 거의 이

점이 없다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 대량 소비를 고려할 때, 이러한 플라스틱은 경량 골재와 같은 기존 재료처럼 경량 시멘트 충전재와 같은 강도기반설계를 고려할 필요가 없는 용도로 사용되어야 한다.

제4장 폐플라스틱을 혼입한 UHPC의 화재발생 이후 물리적 성능 변화

제1절 실험개요

본 장에서는 폐플라스틱을 UHPC에 경량 골재로 사용할 수 있는지 가능성을 확인하기 위해 실험을 진행하였고, 폐플라스틱과 합성고분자 분말 2종류의 플라스틱을 골재로 사용하였다. 본 장에서 사용한 폐플라스틱을 포함한 3종류의 플라스틱은 다양한 비율로 UHPC의 잔골재로 혼입되었다. 배합 시편은 상온과 고온에서 양생시킨 후 압축강도, 휨강도를 측정하였고, 실험 결과를 기반으로 압축강도 및 휨강도와 밀도 사이의 관계를 분석하였다. 이후 미세플라스틱이 혼입된 UHPC의 화재성능을 평가하기 위해 경화된 시편을 챔버에서 200 ~ 1000 °C의 높은 온도에 노출시킨 후, 노출된 시편의 내부 구조를 분석하기 위해 CT촬영을 진행하였다.

제2절 실험재료

UHPC의 밀도를 줄이기 위해 5가지 유형의 경량 소재가 사용되었다. [표 9]는 사용된 재료의 특성을 나열하고, [사진 9]는 사용된 골재들을 보여준다. 또한 체 분석 결과는 [그림 10]에 제시된다. 폐플라스틱 플레이크는 국내 지역 폐플라스틱 재활용 공장에서 공급되었다. 이 회사는 블레이드를 사용하여 약 1 mm 수준으로 세척 및 절단 후 다른 폐플라스틱과 PET를 분리했다. 플라스틱 플레이크와 혼합될 수 있는 폴리프로필렌(PP) 필름과 같은 폴리머 계열의 가벼운 입자는 이미 공급업체에 의해 제거되었다. 최근 연구에서^[146] 동일한 공장에서 1 ~ 3 mm 범위의 입자 크기를 가진 플라스틱 플레이크는 미세 골재와 같이 일반 강도 모르타르에 사용되었으며, 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR), 라만 분광법 및 X선 광전자 분광법(XPS) 분석이 플레이크 분석에서 진행되었다. 또한, 입자 크기가 다른 두 가지 유형의 합성 PP 분말이 사용되었다. 합성 분말의 상세한 화학적 특성은^[146] [표 10]에서 확인할 수 있다. 합성 분말은 원래 미끄럼 방지 및 구조 바닥 페인트에 사용되는 경량 필러로 생산되었습니다. 본 연구에서 합성 분말은 0.50 mm 보다 작은 폐플라스틱 대신 사용할 수 없었다. 3가지 유형의 미세 플라스틱의 평균 입자 크기는 각각 0.65, 0.45, 0.28 mm 였다. 이는 [사진 10]에 표시된 바와 같이 "WP", "P1" 및 "P2"로 표시되었다. WP 입자는 절단에 의해 생성되었고, 입자의 모양은 매

우 불규칙한 반면, 합성 분말 P1, P2는 구체의 형상을 가지고 있었지만, 미세입자는 정전기력에 의해 서로 끌렸다.

[표 9] 미세 플라스틱 및 인공 경량 골재의 물리적 특성

	Specific gravity (SSD*)	Mean particle size (mm)	Fine dust (passing 0.075-mm sieve) (%)	Fineness modulus	Loose bulk density (kg/m ³)	Void percentage (uncompacted) (%)	Water absorption (%)
Waste plastic flakes (WP)	1.30	0.65 (sieve analysis)	15	2.30	126	90.3	-
Synthetic polymer powder 1 (P1)	0.95	0.45 (laser diffraction)	0.7	1.96	430	54.7	-
Synthetic polymer powder 2 (P2)	0.95	0.28 (laser diffraction)	0.5	1.16	450	52.6	-
Expanded shale (ES)	2.09	2.2 (sieve analysis)	0.1	4.72	901	48.1	20.4
Sintered clay-fly ash (SCF)	1.80	0.95 (sieve analysis)	1.8	3.15	1096	35.5	6.0

*SSD: 포화 표면 건조 상태

UHPC의 성능에 플라스틱 미분의 효과를 비교하기 위해 단일 입자의 확장 세일(ES)과 넓은 입자가 있는 소결점 플라이 애쉬(SCF)를 인공 경량 골재로 사용하였다. ES는 크기 정해진 세일 볼을 팽창 및 유리화하여 제조 하였으며, 입자 크기는 약 2 mm로 압축하였다. SCF는 입자 크기 제어 없이 과립(disk-pelletized) 점토 및 플라이 애쉬에 의해 제조되었고, 크기는 0.075 ~ 3 mm의 범위에 있었다. 두 재료 모두 상업 제조업체에서 공급받았다. UHPC 제작에 시멘트, 실리카폼, 충전재, 규사, 혼화제 및 강섬유가 사용되었다. Type I 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)와 ASTM C 150 및 ASTM C 1240 표준을 각각 만족하는 실리카폼을 사용하였다. 충전재로는 충전재가 사용되었다. 블레인 비표면적 대신에, OPC, 실리카폼, 충전재의 입도 분포는 0.1 ~ 8.7 mm의 입도 범위를 가지는 ISO 13320-1에 따라 헬름 · 네온 레이저 광학계를 사용하여 측정되었다. 입도 분석 전, 모든 분말은 반데르발스 힘에 의한 응집을 방지하기 위해 알코올 용액에서 1시간 동안 초음파 처리하였다. 이들 세 분말의 산화물 조성은 X선 형광 분석에 의해 검출되었으며, 전술한 방법으로 측정된 평균 입도를 [표 10]에 정리하였다. 0.53 mm의 평균 입자 크기를 가진 규사의 유형은 미세 플라스틱이 없는 배합에만 사용되었다. 실험체의 밀도를 감소시키기 위해 폴리에틸렌(PE) 또는 폴리비닐 알코올(PVA) 섬유와 같은 합성 섬유는 강섬유

대신 사용하였다. 경우에 따라, UHPC의 인장 강도는 강섬유와 합성 폴리머 섬유 부분 교체에 의해, 크게 감소하지 않았다^[147]. 그러나 합성 폴리머 섬유는 강섬유에 비해 매우 높은 종횡비로 인해 모르타르의 유동성을 크게 감소시켰다. 이것은 기존의 미세 골재가 제거된 경우에도 배합에 미세 플라스틱을 적용하는 것을 불가능하게 한다.

[표 10] OPC, 실리카 및 충전재의 화학적 구성 및 물리적 특성

		OPC	Silica fume	Silica powder
Chemical composition (%)	CaO	60.6	0.3	0.2
	SiO ₂	23.0	95.0	97.2
	Al ₂ O ₃	3.4	0.0	0
	Fe ₂ O ₃	3.1	0.3	0.2
	MgO	3.7	0.6	0.3
	Loss on ignition	2.2	2.2	0.9
	Other oxides	4.0	2.2	1.2
Physical properties	Mean particle size (μm) ^a	16.1	0.3	3.9
	Specific gravity	3.15	2.30	2.65

Measured by the laser diffraction method in accordance with ISO 13320-1



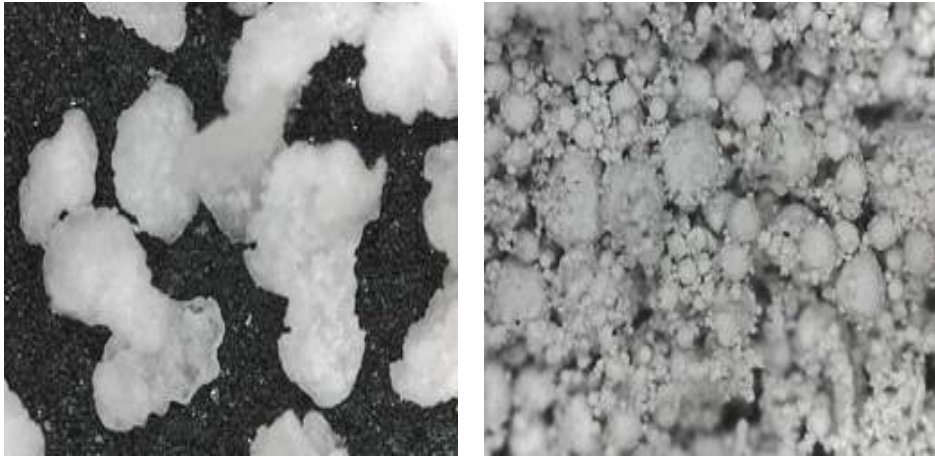
(a) 0.65mm 입자의 페플라스틱 분말



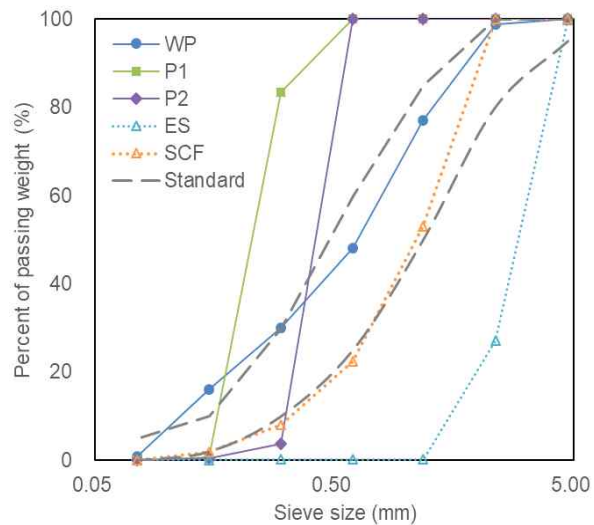
(b) 0.45mm 입자의 폴리머파우더(P1) (c) 0.28mm 입자의 폴리머파우더(P2)
 [사진 8] 연구에 사용되는 마이크로 플라스틱 골재



(a) 확장된 셰일(ES) (b) 소결점-플라이 애쉬(SCF)
 [사진 9] 이 연구에 사용되는 인공 경량 골재



(a) 0.65mm WP 입자 현미경 이미지 (b) 0.28mm P2 입자의 현미경 이미지
 [사진 10] (a)WP 및 (b)P2 입자의 현미경 이미지



[그림 10] 미세 플라스틱 및 인공 경량 골재의 체가름 결과와 콘크리트에 대한 미세
 응집의 표준 입자 크기 (ASTM C33)

[표 11] 배합표

Specimen series ^a	Proportion of mixable limit ^c (%)	Weight proportion (ratio)							
		aggregate	OPC	Silica fume	Silica powder	Silica sand	Water	Water reducer	Steel fiber
N ^b	0	0.000	1	0.25	0.30	1.10	0.21	0.06	0.20
WP	50	0.110				0.00			
	100	0.147							
P1	25	0.094							
	50	0.188							
	75	0.282							
P2	100	0.375							
	25	0.079							
	50	0.157							
ES	75	0.235							
	100	0.314							
	25	0.143							
SCF	50	0.285							
	75	0.428							
	100	0.571							
SCF	25	0.269							
	50	0.539							
	75	0.808							
	100	1.078							

- a) 시편 이름은 미세 플라스틱 또는 경량골재의 종류에 의해 정해졌다.
- b) ASTM C 230에 따라 측정된 강섬유가 없는 N 혼합물의 모르타르 플로우는 250±10mm 였다.
- c) 미세 플라스틱 또는 경량골재의 혼합 한계는 ASTM C230에 따라 결정되었으며, 이는 강섬유와 모르타르의 플로어를 110mm 이하로 제한한다.

제3절 배합비

시멘트 당 각 재료의 무게 비율은 [표 11]에 나열된다. [표 11]의 N배합은 90℃에서 3일 수중양생 후 슬럼프 220 mm(ASTM C230) 및 압축 강도가 180 MPa인 잔골재(실리카 모래)를 사용한 UHPC를 선행 연구에서 채택하였다^[148].

배합비를 결정하기 위해, 예비 배합은 실험 전에 수행되었다. 경량 소재를 혼입하기 위해 규사를 제거하고 가벼운 소재를 모르타르에 첨가했습니다. 경량 재료의 비율이 증가하면 모르타르의 유동성이 감소하고, 플로우 직경이 110 mm 미만이 될 때까지 재료를 첨가하였다. 여기서 결정된 경량 골재의 중량 비율을 혼합 가능한 한계로 정하였다. [표 11]은 혼합 가능한 한도의 25, 50, 75, 100%의 서로 다른 비율로 경량골재가 혼합되는 것을 보여준다. 페플라스틱의 경우 혼합 가능한 한도가 다른 경량골재의 절반 미만이었기 때문에 두 가지 비율(50 및 100% 혼합 가능한 한도의 100%)이 적용되었다. 혼합 가능한 한도의 값은 [표 9]에 나타난 바와 같고, 공극률에 영향을 미치는 입자의 형상 및 크기와 관련이 있다. 페플라스틱의 형상이 완전히 불규칙했기 때문에 좁은 입자 사이에 매우 큰 공극이 존재하였다.

시멘트, 실리카폼, 잔골재를 제외한 충전재의 혼합 비율은 강도 면에서 최적화되었으며, 다른 물질이 첨가되더라도 이를 바꾸기가 어려웠다. 이전 연구에서 혼합 비율에 유동화제의 추가가 모르타르의 유동성을 증가시키지 않았다는 것을 확인되었으며, 이는 재료 분리 또는 강도 감소로 이어졌다^[149].

N 배합에 대한 강섬유의 혼합 비율은 먼저 2 vol.%로 결정했다. 본 연구에서는 시멘트 당 강섬유의 중량 비율은 경량골재의 첨가에 관계없이 모든 혼합물에 대해 고정되었다.

제4절 실험방법

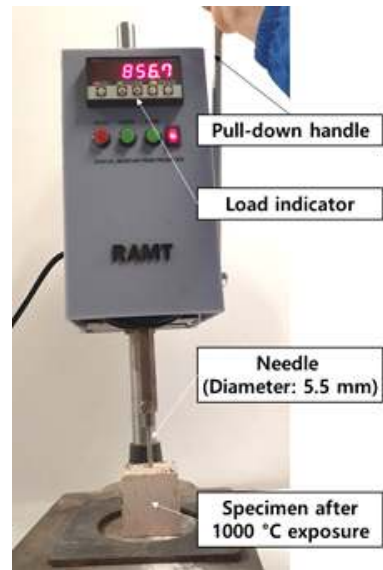
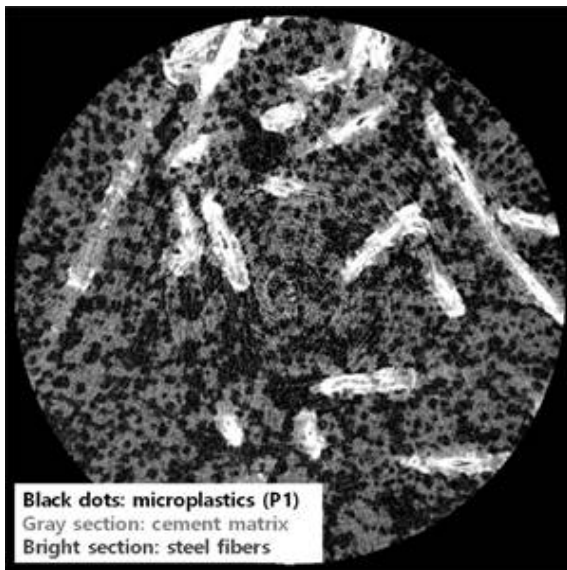
배합하기 전에, ES 및 SCF 경량골재는 포화표면건조(SSD) 조건하에서 제조되었다. 플라스틱은 흡수하지 않았기 때문에 이것은 필요하지 않았다. 10 L 믹서를 믹싱에 사용하였다. 강섬유를 제외하고 경량골재를 포함한 모든 재료는 10분 동안 먼저 건비빔을 하였다. 이어서 물과 유동화제를 첨가하고 5분 더 믹싱하였다. 마지막으로 강섬유가 첨가되었고, 추가로 5분 동안 믹싱하였다. 경량골재를 100% 혼합한 모르타르의 유동성은 약 110 mm이고, 유동성이 급격히 감소하는 것을 확인하였다.

압축 및 휨강도를 측정하기 위해 50*50*50 mm의 입방 시편과 40*40*160 mm Bar 시편을 제작했다. 상온 및 고온 수중양생 방식을 사용하였다. 시편은 제작 후 이를 동안 밀봉양생 되었다. 상온 양생의 경우 시편은 실험전까지 20 ± 0.2 °C의 수중양생을 하였다. 또한, 고온 수중양생의 경우 90 °C 수중에 3일간 노출된 다음 20 °C 물에서 양생하였다. 시편의 압축 강도는 7일 및 28일 후에 측정하였으며 시편의 휨강도는 28일 후 시험하였다. 평균 값 및 표준 편차를 얻기 위해 6개 시편을 제작하였다.

압축 강도 측정 시편과 동일한 공정으로 제조된 90 °C 수중양생 입방 시편은 30 L 드라이 오븐에서 양생되었다. 시편은 28일차에 6시간 동안 110°C에서 건조시킨 다음 10시간 이상 실온에서 자연 냉각 시켰다. 동일한 방법으로 시편을 200, 400, 600, 800, 1000 °C에 노출시키고 냉각 시켰다. 1000 °C 챔버 중심의 온도는 가열 속도를 제어하지 않고 4시간 이내에 목표 온도에 도달했다. [사진 13]의 시편은 냉각 후 무게를 측정하고 난 후의 모습이다. 추가로 시편의 동탄성계수를 측정하려 하였으나 표면 균열이 심해 측정할 수 없었다. 또한 시편의 수분을 건조하기에 충분한 지속시간 없이 매우 높은 온도에 노출되어 UHPC 파열의 원인이 될 수 있기 때문에 실제 화재의 조건은 이 시험 절차와 유사했다[150]. 많은 연구에서 UHPC 시편이 내부가 높은 온도로 가열되거나 가열 속도가 더 빠를 때 UHPC에서 폭발반응이 더 크다는 것을 입증했다.^[151,152] UHPC 시편을 높은 온도에 노출시키는 것 외에도, 소성 조건에서 플라스틱의 열역학 및 차동 열분석(TGA/DTA)을 수행하였다. 열역학 분석기(DTG-60H, Shimadzu)를 사용하였다. 시편 중량은 15 ~ 17 mg이고, 공기 유량은 50 ml/min이었으며, 가열 속도는 10 °C/min이었다.

연소 후 미세구조 및 다공성의 변화를 평가하기 위해 마이크로컴퓨터단층촬영

(CT)을 하여 1000 °C에 도달하기 전과 후에 일부 시편을 테스트하였다. CT스캐너 (SkyScan 1272, 브루커, 벨기에)가 사용되었고, X선 전압과 전류는 각각 100 kV 및 100 μ A로 조정되었다. 스캐너는 회전 단계가 0.2 ° 이고 각 위치에서 평균 2프레임, 4,000 ms의 노출 시간으로 회전 스캐닝 모드를 채택했다. 5 μ m/pixel의 해상도와 2450*2450 픽셀의 크기로 총 1471개의 단층 촬영 이미지가 얻어졌다. CT스캐너가 장착된 영상 처리 소프트웨어를 사용하여 단층 영상 상에서 모폴로지 연산을 필터링, 분할 및 수행하고, 3차원(3D) 기공 구조의 기하학적 특징인 공극 부피, 부피 등가 구경, 공극도를 계산하였다. 측정 영역의 직경은 11500 μ m였다. [사진 11]은 3D CT 스캐닝으로부터 시편의 2차원(2D) 단면을 나타낸 것이다. 1000 °C 노출 후 시편의 기계적 성능은 [사진 12]와 같이 침투저항을 측정하여 간접적으로 평가하였으며, 플라스틱을 사용한 시편 중 일부는 연소 후 잔류강도가 극히 낮아 종래의 압축강도를 측정할 수 없었다. 이러한 시편의 경우 직경 5.5 mm의 바늘을 한쪽 면에 압착하여 2 cm 깊이까지 관통시켰다. 최대 저항력을 디지털 신호로 검출하여 응력으로 계산하였다. 이러한 방법은 모르타르(ASTM C 403)의 침투저항 측정으로부터 채택되었다.



[사진 11] CT 스캔에 검출된 시편의 2D 단면 (ROI 직경: 11.50 mm)

[사진 12] 1000 °C 노출 후 침투 저항 테스트

제5절 실험결과

1. 경화된 상태의 특성

측정된 압축 및 휨강도의 평균 값 및 표준 편차는 [표 12]에 정리된다. [표 12]에 제시된 밀도는 [표 11]에 나열된 배합비율의 이론값이다. UHPC의 경우 높은 정도로 인해 배합시 제한된 양의 공기가 유입되었으며, 이론적 및 실험 값 사이에 3% 미만의 밀도 차이가 발견되었다[153]. 이전 연구에서 UHPC의 고밀도 미세구조로 인해 일반 시편과 건조 시편 사이의 밀도 차이가 약 1%(= 25 kg/m³)이기 때문에 밀도의 실험 결과가 UHPC 시편의 수분 함량에 거의 영향을 받지 않음을 확인하였다^[153, 154]. 사용된 모든 플라스틱은 단단하고, 확장된 폴리스티렌과 같은 형성된 플라스틱은 혼합 과정에서 부피가 변할 수 있기 때문에 사용되지 않았다. 따라서 혼합 과정에서 비중이 변화가 없는 것으로 확인되었다.

[표 12]의 결과는 플라스틱 미분이 UHPC의 밀도 및 압축 강도를 감소시켰음을 보여준다. 본 연구는 플라스틱 미분의 첨가에 의한 강도 감소 범위를 정량적으로 평가하기 위하여 수행되었다. 실험 결과 UHPC 내 플라스틱 미분의 최대 함량과 플라스틱 미분의 첨가로 인한 밀도 및 강도 감소 범위가 밝혀졌다. 실험 결과를 표로 정리하였으므로 수집된 데이터는 향후 연구에 사용될 수 있다.

본 실험에서 규사를 사용한 대조군 배합인 N배합의 압축강도는 20 °C에서 수중양생 후 28일째에 160 MPa, 90 °C에서 수중양생 후 7일째에 190 MPa를 초과하였다. 경량 골재를 사용한 대부분의 배합의 경우 압축강도에 대한 변수의 계수가 10%를 초과하지 않았다. 다양한 강섬유 함량을 갖는 N배합의 압축강도를 추가로 측정하여 부피비율 1.5, 1.0, 0.5, 0%에 의한 결과는 90 °C 수중양생에 대하여 각각 194.4 ± 11.6, 168.8 ± 7.4, 134.8 ± 7.9, 128.7 ± 4.7 MPa로 나타났다. 또한 20 °C에 수중양생 시 동일한 부피비를 갖는 N배합의 압축강도는 각각 168.8 ± 7.5, 149.0 ± 8.7, 105.1 ± 21.2, 103.1 ± 6.3 MPa 였다. 이에, 압축강도는 강섬유 함량의 영향을 크게 받았다. 즉, 밀도가 어느 정도 감소되더라도 플라스틱 미분으로 UHPC의 높은 강도를 얻기 위해서는 강섬유의 사용이 필수적이었다.

[표 12] 물리적 특성

Specimen series	Mixable limit (%)	V_f of plastic /LA (vol.%)	V_f of steel fiber (vol.%)	Density (kg/m ³)	Comp. Str. (MPa) - Water curing				Comp. Str. (MPa) - Heat curing				Flx. Str. (MPa) - Water curing		Flx. Str. (MPa) - Heat curing		
					7 d		28 d		7 d		28 d		28 d		28 d		
					Ave.	StDv.	Ave.	StDv.	Ave.	StDv.	Ave.	StDv.	Ave.	StDv.	Ave.	StDv.	
N	0.0	0.0	2.01	2523	123.4	8.1	168.8	7.5	196.7	3.2	194.4	11.6	50.6	3.0	60.8	2.5	
WP	50	9.2	2.74	2353	95.1	4.8	128.9	11.6	161.7	14.9	160.6	10.9	36.8	4.2	36.5	7.8	
	100	11.9	2.65	2318	77.6	22.0	104.9	4.2	143.4	19.9	150.6	5.4	29.3	0.9	43.4	5.7	
P1	25	10.5	2.69	2294	102.8	4.0	125.3	2.8	148.3	6.4	154.2	6.1	49.6	5.6	61.8	5.1	
	50	19.1	2.43	2163	91.3	2.3	110.3	2.8	120.9	7.4	119.9	2.4	42.4	6.1	46.8	1.1	
	75	26.1	2.22	2055	77.0	1.5	85.1	4.0	96.8	5.1	103.0	2.5	41.7	4.9	38.9	1.7	
	100	31.9	2.04	1965	68.4	2.1	81.6	3.5	86.1	2.0	86.5	4.7	36.9	3.7	42.5	2.4	
P2	25	8.9	2.72	2305	98.4	7.0	118.1	7.2	147.9	14.2	150.5	10.6	55.1	6.3	62.8	3.3	
	50	16.4	2.50	2191	78.1	4.6	102.9	10.1	115.4	3.5	117.4	4.7	37.1	3.6	44.8	6.3	
	75	22.7	2.30	2095	75.4	1.8	90.7	2.7	95.4	5.5	96.8	5.6	35.2	2.9	43.1	4.0	
	100	28.1	2.14	2013	68.4	2.1	76.2	3.6	86.1	2.0	91.4	2.2	35.3	3.6	45.6	2.5	
EC	25	7.4	2.75	2398	157.1	16.4	-	-	177.4	15.7	-	-	-	-	-	-	-
	50	13.8	2.56	2374	119.7	3.5			178.9	28.9							
	75	19.4	2.39	2353	124.9	11.9			141.5	20.3							
	100	24.3	2.24	2334	107.5	8.7			140.4	13.1							
SCF	25	14.9	2.51	2318	167.1	6.1	-	-	180.2	7.1	-	-	-	-	-	-	-
	50	25.9	2.18	2248	146.5	9.9			161.7	13.1							
	75	34.4	1.93	2195	147.9	5.9			154.9	7.7							
	100	41.1	1.73	2152	148.8	5.2			154.6	4.4							

Note: V_f is the theoretical volume fraction in unit volume of the mixtures, calculated from mix proportion

플라스틱 미분은 최적화된 3가지 분말(OPC, 실리카폼, 충전재)보다 크기 때문에 규사 대신 사용되었습니다. [표 11]에 제시된 혼합 가능한 한계보다 플라스틱 미분을 증가시키고 UHPC 혼합물의 밀도를 더욱 감소시키려면 물의 함량을 증가시켜야 하지만, 이는 강도를 상당히 감소시킬 수 있다. 따라서 미세 플라스틱의 혼입으로 UHPC 혼합물에 약 2000 kg/m³의 최소 밀도가 확인되었으며, 이는 최대 압축 강도 80~90 MPa에 해당한다. 그러나 혼합물의 휨강도는 일반적으로 강섬유 부피비율(1% 미만)이 낮기 때문에 6 ~ 8 MPa의 범위에 있다^[154]. 대부분의 시편의 휨강도는 UHPC의 특징인 강섬유의 때문에 매우 높았다(40 MPa 이상).

연구에 따르면 밀도 범위가 1900 ~ 2,000kg/m³인 고강도 경량콘크리트는 약 60 ~ 70 MPa의 압축 강도를 가지고 있음을 입증했다^[155-158]. 그러나 이러한 혼합물의 휨강도는 일반적으로 강섬유의 비율(1% 미만)이 낮기 때문에 6~8 MPa의 범위에 있다^[172]. 경량골재가 없는 N배합의 경우 고온양생 시편과 상온양생 시편 사이에 약 30 MPa의 압축 강도의 차이가 발생하였다. P1 및 P2의 최대 함량을 가진 배합의 경우, 다양한 양생 조건 간의 압축 강도 차이는 15 MPa 내에 있었다.

[표 11]에서 기계적 특성을 논의하기 위해, 압축 및 휨강도는 [그림 11]에 도시된 바와 같이 밀도와 비교되었다. UHPC의 밀도와 압축강도 사이의 관계는 선형이었습니다. 밀도와 압축 강도 사이의 관계를 분석하기 위해 다양한 선형 및 비선형 모델이 개발되었다.^[159,160]. 이론 모델에서 더 미세한 다공성 입자의 사용은 더 선형적인 관계로 이어질 수 있으며, 이는 경량 콘크리트의 밀도당 강도가 증가함을 의미한다^[173,174]. 강섬유는 선형성에 기여한다고 가정되었다. 다공성 또는 경량골재를 사용한 경우 골재 주변에 응력 집중이 발생하였고, 균열 발생이 발생되어 골재 주변 또는 골재에 전파되었다^[161]. 고강도 시멘트 매트릭스의 압축강도는 일반 강도 시멘트 매트릭스^[162]보다 경량골재가 혼입된 경우 더 큰 범위에서 감소할 수 있다. 그러나 강섬유는 균열의 증가를 방지하고 콘크리트 매트릭스의 응력을 재분배하는 데 도움이 될 수 있다^[163].

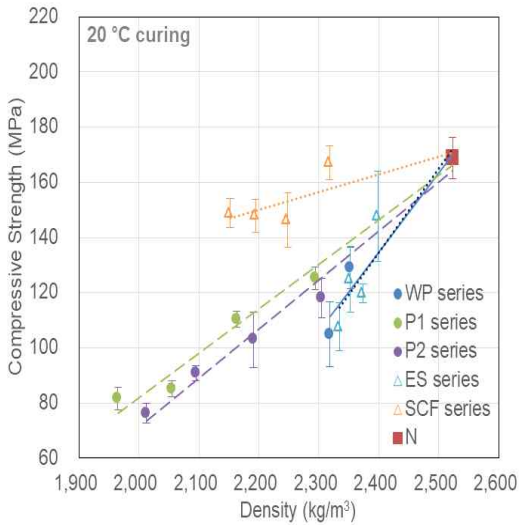
상온양생 시 WP와 ES는 P1과 P2에 비해 밀도당 압축강도가 낮은 반면 SCF는 높았다. 밀도를 고려할 때 다른 물질에 비해 WP 및 ES와의 혼합물의 강도가 크게 감소하는 것은 앞서 언급한 바와 같이 큰 입자 차이(gradation)와 상관관계가 있을 것으로 생각되었다. 고온양생 시 WP, P1, P2, ES 혼합물은 밀도당 동등한 압축 강도를 나타내었으며, SCF 또한 더 높았다. 사이즈가 약간 다른 P1 및 P2의 경우 밀도당 압축강도에 유의미한 차이는 없었다. 결과적으로, 작은 입자 크기를 갖는

플라스틱 미분은 인공 무기물 경량골재와 유사한 밀도당 강도의 범위를 달성할 수 있었다. 또한 플라스틱 미분을 사용하면 밀도를 낮출 수 있다.

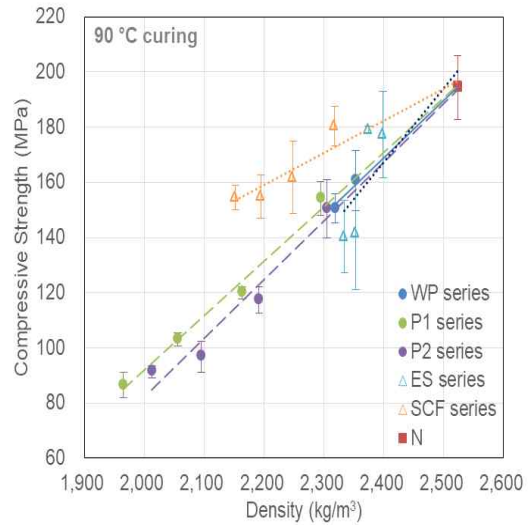
[그림 11]에는 UHPC 혼합물의 휨강도와 밀도 사이의 관계를 나타내었다. 본 연구의 핵심 소견으로, UHPC의 휨강도는 플라스틱에 의해 밀도가 감소된 경우에 한하여 일정하거나 심지어 증가할 수 있었다. 2 vol.%의 N배합의 경우, 상온 및 고온 양생에서 시편의 평균 휨강도는 각각 약 50 MPa와 60 MPa였습니다. 이는 이전 연구^[164]에서 달성한 결과와 비교할 수 있으며, 유사한 혼합 비율을 가진 다른 연구 결과^[165]보다 약간 높았다. 강섬유가 없는 배합의 휨강도는 약 20 MPa로, 2 vol.%로 약 절반이었다^[165]. [그림 11]는 플라스틱을 사용하여 2500에서 2000 kg/m³로 밀도가 약 25% 감소됨에 따라 휨강도는 약 30% 감소하였고, 시편의 압축강도는 약 50% 감소하였음을 알 수 있다.

플라스틱을 최대 사용했을 때, 상온 및 고온 양생 시편의 휨강도는 각각 30 ~ 40, 40 ~ 50 MPa범위에 있었으며, 이 값은 N배합에서 1%의 강섬유를 가진 경우와 유사했다. 강섬유의 1%의 차이가 80 kg/m³의 배합밀도의 차이임을 고려할 때, 플라스틱으로 밀도를 낮추고 이에 따른 휨강도의 감소를 강섬유로 보강하는 것이 더욱 유리했다. 이러한 결과는 강섬유의 함량이 상이하서 압축강도의 경우와 달랐다. UHPC는 지나치게 부서지기 쉬웠기 때문에 섬유 없는 시편의 휨강도는 10 ~ 20 MPa로 압축강도를 고려할 때 상당히 낮았다^[166]. 섬유 방향의 영향을 받았으나, 강섬유의 부피비율을 1.0 ~ 2.5 vol.%로 증가시킨 후 압축강도가 120 ~ 140 MPa인 UHPC의 휨강도는 15 ~ 20, 20 ~ 30 MPa로 선형적으로 증가하였다. 실험 결과에서 UHPC의 압축강도는 강섬유의 부피비율이 1.5 vol.% 이상일 때 최대에 달했다. [표 11]은 N배합의 골재가 제거되고 플라스틱이 첨가되며 모든 재료에 대하여 시멘트당 강섬유의 중량비가 고정되었음을 보여준다. [표 12]에서 보는 바와 같이, 플라스틱을 포함하는 UHPC 배합의 강섬유의 부피 비율은 N배합의 부피 비율과 동일하거나 더 높았다. 이에, 플라스틱을 제한적으로 사용하더라도 고온양생 시편의 휨강도는 60 ~ 70 MPa까지임을 확인하였고, 강섬유 혼입률은 2.7 vol.%에 도달하였다. 밀도가 약 2000 kg/m³인 P1 및 P2에서 혼합 가능한 한도가 100%인 혼합물의 경우, 강섬유의 부피비율은 N배합의 부피비율과 큰 차이가 없으나, 휨강도는 N배합의 부피비율과 동등하였다. 이 결과는 UHPC Bar 시편이 플라스틱을 사용하여 휨하중 지지 용량을 잃지 않고 최대 20%까지 자체 중량을 줄일 수 있음을 확인했다. 또한 UHPC에 플라스틱을 사용하는 것의 타당성을 연구하기 위해 향후 연구에서 강섬유의 탄성계수, 수축, 균열저항, 부식저항과 같은 다른 기계적 성질을 조사할

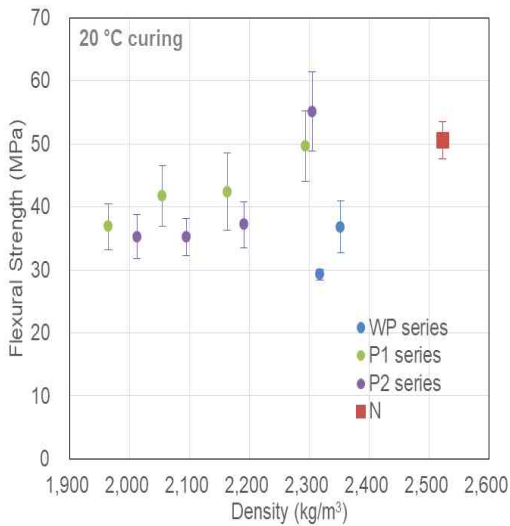
필요가 있고, 플라스틱 재료는 인공 경량 골재와 달리 공극이 없어 투과성이나 이온 침투 저항에는 큰 차이가 없을 것으로 예상된다.



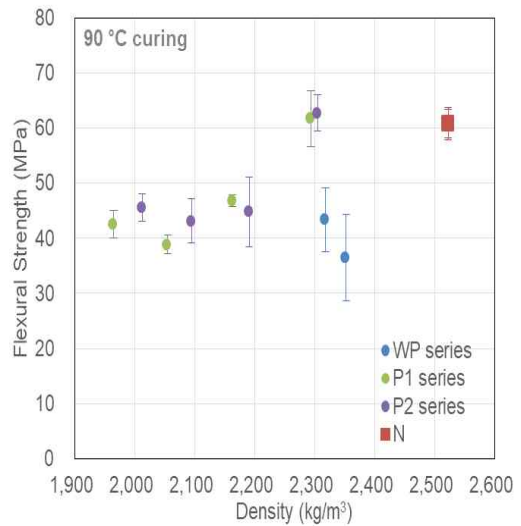
(a) 20 °C 양생 압축강도



(b) 90 °C 양생 압축강도



(c) 20 °C 양생 휨강도



(b) 90 °C 양생 휨강도

[그림 11] 골재의 밀도와 압축강도 및 휨강도 사이의 관계

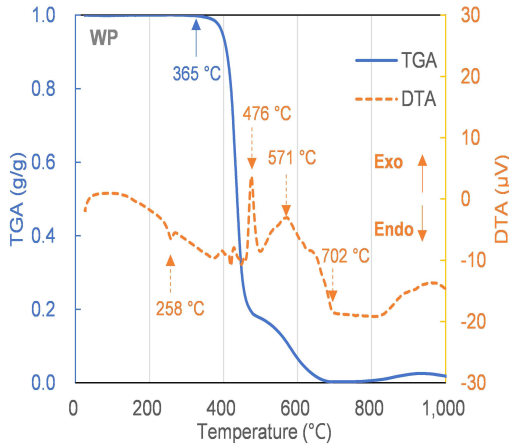
2. 고온에서의 연소

플라스틱의 단순한 열거동을 나타내는 TGA/DTA 곡선은 [그림 12]에 나타내었다. 약 360℃에서의 연소로 인해 WP의 질량 감소가 나타났다. 가장 강한 발열 피크는 476℃에서 관찰되었으며, 2차 발열 피크는 571℃에서 관찰되었다. 특히 PET의 대표적인 DTA 피크인 250℃에서 DTA 곡선에 녹는점과 관련된 흡열 피크가 나타났다^[167]. P1 및 P2의 경우 140℃ 부근의 피크와 240℃ 부근의 피크를 관찰할 수 있으며, 300℃ 이후에는 연소에 의한 질량 감소가 시작된다. 이러한 곡선은 플라스틱이 분해되기 시작하여 300-400℃에서 연소되었음을 나타낸다^[168].

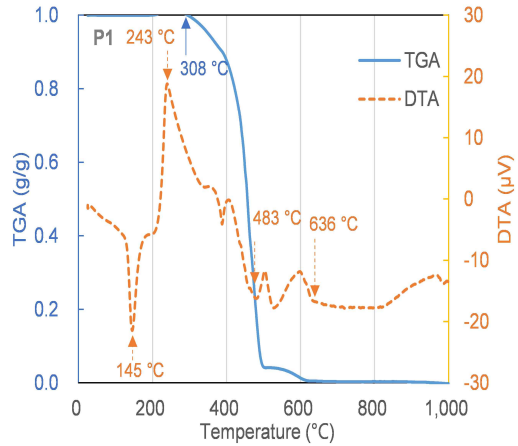
[그림 13]는 시편이 상온에서 1000℃까지 200℃ 간격으로 노출되었음을 보여준다. 시편의 종류와 노출 온도는 시편 아래에 표시한다. 먼저, UHPC가 고온을 받은 후의 열적 거동을 조사할 필요가 있다. 150 MPa 이상의 압축 강도를 가진 UHPC는 극도로 밀도가 높은 미세 구조 때문에 폭발 반응이 일어난다. 폭발 반응을 줄이려면 섬유가 혼입되어야 한다^[169]. 섬유질이 없는 UHPC 혼합물은 200℃에서 400℃에 노출된 후 거의 분말화 되었다고 보고되었다^[170,171]. 강섬유가 있는 시편의 경우 300℃까지 일정 수준의 강도가 관찰되었으나, 400℃ 이상의 온도를 받은 후에는 표면의 심각한 파괴로 인해 기계적 물성을 측정할 수 없었다^[172,173]. 본 연구에서는 강섬유가 모든 혼합물에 혼입됨에 따라 N배합 시편 표면에 일부 균열이 확인되었으나 분말화되지 않았다.

실험 파트에서 언급한 바와 같이 시편의 동탄성계수를 측정하였으나 400℃에 노출된 후 균열로 인해 측정이 불가능하였다. 또한 정량화되지는 않았지만 높은 온도에 노출된 후 플라스틱을 사용한 표본의 손상이 N배합 시편의 손상보다 더 큰 것으로 나타났다. 200℃에 노출된 시편의 경우 WP 100% 시편의 조건은 N배합 시편의 조건과 실질적으로 동일하였다. 그럼에도 불구하고 100% P1 및 P2를 함유한 시편의 경우 표면색이 급격히 변하여 강섬유가 적색으로 녹슬었다. 400℃에서 N배합 시편은 더 밝은 반면 P1 및 P2 100% 시편은 완전히 검은색이었다. [그림 12]의 TGA/DTA 곡선은 PP의 정화가 약 300℃에서 시작되었음을 보여준다. P1과 P2를 함유한 시편의 어두운 색은 불완전 연소에 의해 유발된 미연소 탄소에 의한 것이었다. 또한 PET의 경우 400℃ 이상의 온도에서 연소가 시작되었으며, 따라서 WP를 함유한 시편은 600℃에 노출된 후 어두워지는 것으로 나타났다. [사진 14]에 나타낸 것과 같이 플라스틱을 함유한 UHPC 시편은 300 ~ 500℃에서 연소하였다. 다만 800℃ 이후에는 미연소 탄소가 완전히 연소되면서 모든 시편이 상대적으로 하얗게 변했고, 1000℃ 이후에는 시편의 변화가 미미했

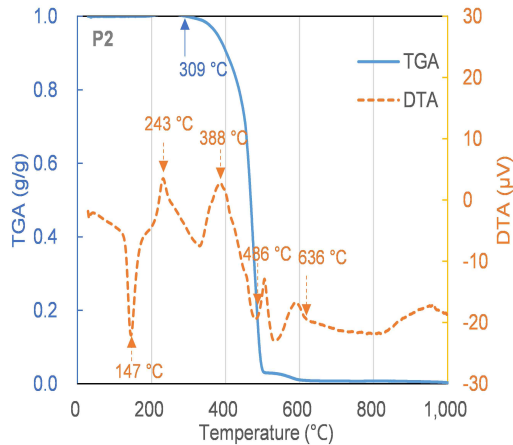
다. 연소 후 이 시편의 잔존강도를 직접 평가하기는 어려웠지만, 플라스틱을 함유한 시편은 손으로 누르는 힘으로 붕괴된 반면, N배합 시편은 손으로 쉽게 붕괴되지 않는 것을 확인하였다.



(a) WP의 TGA/DTA 곡선



(b) P1의 TGA/DTA 곡선



(c) P2의 TGA/DTA 곡선

[그림 12] TGA/DTA 곡선



Before burning	After 600 °C
After 200 °C	After 800 °C
After 400 °C	After 1000 °C

	: N
	: WP series
	: P1 series
	: P2 series

[사진 13] 200~ 1000 °C의 범위에서 온도에 노출 후 샘플



[사진 14] 400 °C에 노출된 미세 플라스틱을 함유한 UHPC 시편

온도가 높은 시편의 질량 감소는 [그림 13]에 도시된다. N배합 시편의 무게가 가장 큰 감소는 200 ~ 400 °C의 범위에서 관찰되었으며, 이는 규산칼슘 수화물 (C-S-H)의 분해와 상관관계가 있다. 또한, 400 ~ 600 °C, 포틀랜드의 분해에 대응하는 중량의 감소는 상대적으로 작아졌다. 일반적인 UHPC에서 포틀랜드는 실리카 품과 포졸라닉 반응에 의해 실질적으로 완전히 연소되었다^[174]. 플라스틱을 함유한 시편의 경우, 주요 중량 감소는 N배합 시편의 것과 유사한 200 ~ 600 °C에서 발생했다. 이 중량 감소는 C-S-H의 분해뿐만 아니라 플라스틱의 연소에서 비롯되었다. 이러한 결과는 화재시 UHPC의 임계 온도 범위가 200 ~ 600 °C 범위 내에 있는 것으로 간주되었다는 것을 나타내었으며, 특히 플라스틱 혼입에 관계없이 200 ~ 400 °C 이내였다. 다만 미세 플라스틱혼합물의 경우 강섬유의 사용에 의해 폭열반응을 방지할 수 있었지만 입자의 자연연소가 우려되었다.

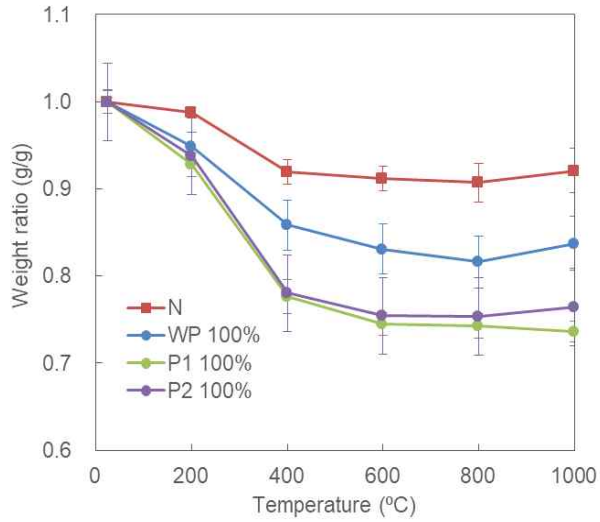
CT 스캔에 의해 검출된 고온에 노출된 후 UHPC 시편의 공극 및 균열의 3D 분포는 [사진 15]에 나타나 있으며, 열은 회색은 공극 및 균열을 나타낸다. CT 스캔을 통해 플라스틱이 UHPC 내부에 균일하게 분포되어 있음을 확인하였다. CT 스캔에 의해 검출된 일부 시료의 누적 공극률은 [그림 14]와 같다. [사진 11]과 같이 플라스틱으로 UHPC 시편에 대한 CT 스캔 데이터에서 어두운 부분의 부피를 계산하는 것은 이미지 처리의 일반적인 한계로 인해 어려웠다. 따라서 CT 스캔을 사용하여 검출된 연소 전 플라스틱으로 시료의 누적 공극 크기 분포는 언급하지 않았다.

연소 후의 UHPC 시편에서 공극률의 절대값의 차이는 크지 않았다. N배합 시편의 경우, 연소 전 및 연소 후의 공극도는 각각 약 3.5%, 5.5%였으며, 공극 크기

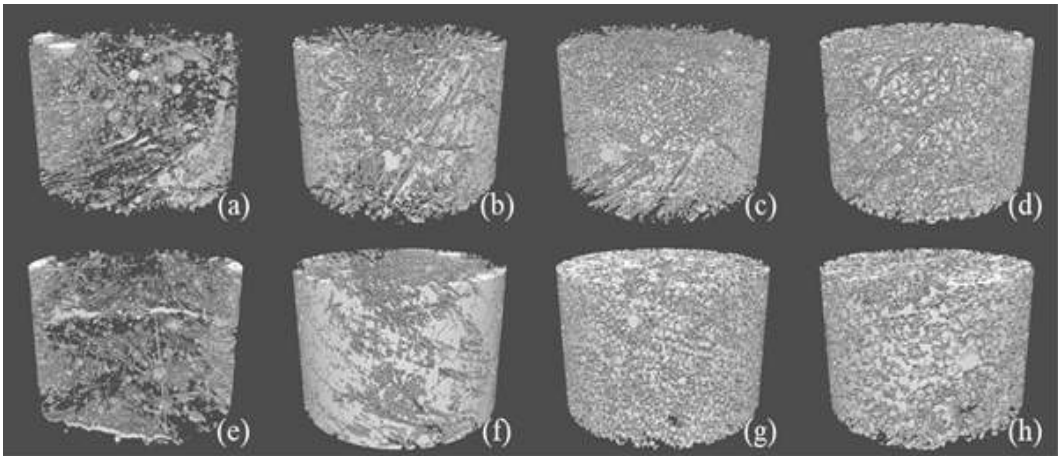
분포에는 큰 변화가 없었다. 이들 시편의 경우, 동등한 공극 부피 크기는 106 ~ 109 μm^3 범위 내였으며, 이는 102 ~ 103 μm^3 범위의 공극 크기에 해당한다. 이에 연소에 의한 미세 공극의 부피는 변화하지 않았다. 또, WP와의 혼합물에 대해서는 WP가 존재하는 106 ~ 1010 μm^3 의 범위에서 연소 후의 공극 체적 크기를 균일하게 분포시켰다. P1 및 P2와의 혼합물의 경우, 연소 후의 공극 부피 크기는 대부분 P1 및 P2의 입자 크기에 해당하는 107 ~ 108 μm^3 의 범위로 분포하였다. 연소 후, 모세관 공극인 공극의 직경 101 ~ 102 μm 에 해당하는 공극 부피 크기가 103 ~ 106 μm^3 인 미세 공극은 어느 시편에서도 발견되지 않았다. 연소 후 WP, P1, P2 100%인 시료의 공극률 값은 각각 15.99, 28.6, 31.2%인 반면, 이들 시편[표 12]의 플라스틱 부피비율은 각각 11.9, 31.9, 28.1 vol.% 였다. 두 값 사이의 차이는 4 vol.% 이 내었다. N배합 시편의 공극의 부피가 약 3%인 것을 고려하면, 이러한 격차는 미미한 것으로 간주되었다. 만약 미세 균열이 발생했다면, 시편은 연소 후 분말이 되었을 것이다. 플라스틱의 자연연소가 매트릭스에 균열을 발생시킬 수 있다고 해도, 이러한 균열은 강섬유 때문에 부피와 크기를 증가시키지 않을 것이다.

[표 13]에는 연소 후 시료의 침투 저항이 나열되어 있다. 측정 단위는 동일하지만 침투 저항은 압축 강도와 다르다. 압축강도는 시편의 초기에 얻어진 반면, 관통저항은 큰 변형 후의 잔류응력으로부터 도출되었다. 표본 N배합과 WP는 직경 5.5 mm의 바늘을 사용하여 100% 관통할 수 없었다. 기기의 가압력 용량이 약 1500 N이었기 때문에, 이들 시편은 점화 후 잔류 강도는 약 60 MPa였다. [사진 15]와 [그림 14]는 점화 후 공극률이 큰 P1 및 P2 100%의 관통 저항이 각각 8, 30 MPa임을 알 수 있다. ASTM C 403에 따라 모르타르의 초기 및 최종 설정에서의 침투 저항은 각각 3.5 및 35 MPa로 결정되었다. 따라서, 연소 후 P1 및 P2가 100%인 시편의 잔류강도는 매우 낮았다.

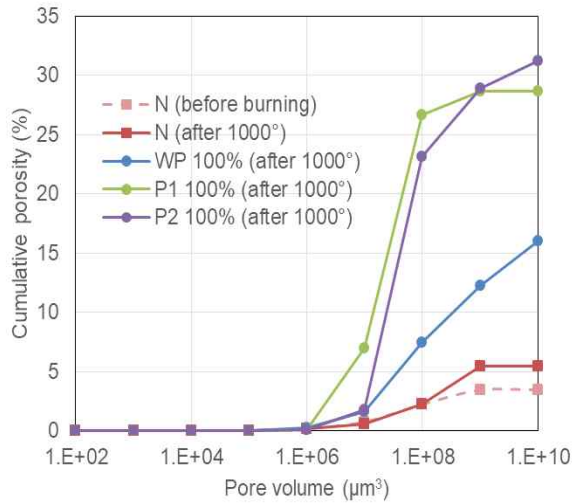
따라서 플라스틱을 UHPC에 혼입하면 200 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 자동연소가 발생할 수 있다. 플라스틱 점화 후 최대 30 vol.% 기공이 확인되어 UHPC의 상당한 저하를 초래했다. 다만, 강섬유가 충분히 혼합된 경우에는 폭열에 의한 UHPC 매트릭스의 급격한 파괴를 억제하였다. 또한 플라스틱으로 UHPC 부재의 실제 내화성을 평가하기 위해 향후 연구에서 ISO 1182 또는 ISO 5660과 같은 건축 자재의 표준 내화 시험을 수행할 필요가 있다.



[그림 13] 고온에 노출 된 시편의 무게



[사진 15] CT로 스캔한 1000° C 노출 전, 후 시편의 모습
 노출 전 : (a) N, (b) WP 100% , (c) P1 100%, (d) P2 100%
 1000° C 노출 후 : (e) N, (f) WP 100% , (g) P1 100%, (h) P2 100%
 (공극 및 균열은 밝은 회색으로 표시)



[그림 14] CT 스캔으로 검출된 시편의 누적 공극

[표 13] 1000 °C에서 점화 후 UHPC의 침투 저항

Specimen	N	WP 100%	P1 100%	P2 100%
Penetration resistance (MPa)	Could not be penetrated.		Ave. 8.5 Std. Dev.0.1	Ave. 27.9 Std. Dev.3.3

제6절 소 결

페플라스틱 미분의 최대 비율(혼합 가능한 최대)은 입자 형태에 따라 결정되었다. 이는 다른 골재와 비교하면, UHPC에서 페플라스틱 미분의 혼합 가능한 한계가 폴리머 골재의 절반 미만이었다. 이는 페플라스틱 미분의 불규칙한 입자 형태 때문이었다.

페플라스틱 미분을 사용하여 밀도가 2000 kg/m³, 압축강도와 휨강도가 각각 80 ~ 90 MPa, 30 ~ 50 MPa인 경량 UHPC를 제작할 수 있었다. 페플라스틱 미분의 혼입으로 휨강도가 감소하였으나, 감소된 강도는 강섬유의 첨가로 보완될 수 있었다. 그러나 섬유 사용으로 표본의 밀도에 거의 영향을 미치지 않았다. 페플라스틱 미분을 사용한 UHPC와 인공 경량 골재를 사용한 UHPC의 강도와 밀도 사이의 관계에는 큰 차이가 없었다.

페플라스틱을 UHPC에 혼입하면 200 ~ 600 °C의 범위에서 자연 연소가 발생했다. 페플라스틱은 연소 후 플라스틱이 차지하고 있던 공간이 공극화 되어 UHPC의 물리적 저하 발생했다. 그러나 강섬유에 의해 UHPC의 파괴를 제어할 수 있었다.

제5장. 페플라스틱 미분을 혼입한 UHPC를 이용한 부착 성능 실험

제1절 실험개요

본 장에서는 제4장의 결과를 바탕으로 구조부재로 사용하기 어렵다고 판단된 페플라스틱을 혼입한 UHPC를 보수재료로 사용하기 위해 모르타르와 UHPC에 페플라스틱을 혼입하여 부착성능에 관하여 평가하였고, 표면조건과 양생조건에 달리하여 부착성능에 영향을 주는 요소도 함께 분석하였다. 추가로 나무판자에 직접 타설하여 굳지 않은 상태에서 경화되기까지 얼마나 흘러내리는지 측정했다.

제2절 사용재료 및 특성

이 연구에서 사용되는 일반모르타르와 UHPC 모르타르를 이용하여 접합면의 부착강도 성능을 실험을 한다. 시멘트, 모래, 자갈로 구성된 콘크리트의 W/C = 0.50이고, 최대골재 치수는 10 mm이다.

1. 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 국내 유통이 원활한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 및 화학적 성질은 다음 [표 14] 같다.

[표 14] 시멘트의 물리 및 화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)			MgO (%)	SO ₃ (%)	강열감량 (%)
			초결	종결	3일	7일	28일			
2.8	2800	0.8	60	600	12.5	22.5	42.5	5.0 이하	3.5 이하	5.0 이하

2. 혼화재

본 연구에 사용한 혼화재는 실리카폼은 노르웨이산 제품을 사용하였고, 물리적 및 화학적 성질은 다음 [표 15]와 같다.

[표 15] 실리카폼 물리 및 화학적 성질

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Stability (%)	SiO ₂ (%)	Alkalies (%)	Moisture (%)	Ignition Loss (%)
2.2	2200	0.8	85.0	6.0	3.0	6.0 이하

3. 충전재

본 연구에서 사용한 충전재는 호주산을 사용하였으며, 실리카질 미분말로 평균 입자는 17 μm를 사용하고, 물리적 및 화학적 성질은 다음 [표 16]과 같다.

[표 16] 충전재 물리 및 화학적 성질

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Ignition Loss (%)	Chemical Composition(%)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
2.65	2650	0.01	99.8	0.2	0.1

4. 골재

잔골재는 밀도 2.65 g/cm³, 0.30 ~ 0.85 mm의 입도 분포를 가지는 기성 규사6호 제품을 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다.

5 혼화제

본 연구에서 사용한 혼화제는 국내 E사 제품으로 초고강도 콘크리트용 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였고, 물리적 성질은 다음 [표 17]과 같다.

[표 17] 혼화제의 물리적 성질

Sortation	Main Ingredient	Color	Form	Density (g/cm ³)	Acidity (PH)
HRWR	polycarboxylic acid series	Ivory or Light Brown	Liquid	1.1	6.5±2.0

6. 치환골재

본 연구에서 잔골재를 대체하기 위한 골재를 2가지 사용하였으며, 물리적 성질은 다음 [표 18]과 같다.

[표 18] 대체 골재의 물리적 성질

	Density (g/cm ³)	Diameter (mm)
Plastic powder	1.30	2.36 ~ 0.08
Lightweight aggregate	2.09	2.36 ~ 0.08

7. 일반 모르타르 및 보수용 모르타르

본 연구에서 사용한 모르타르는 시중에서 구매 가능한 일반모르타르와 보수용 모르타르 구매하여 사용하였다.

제3절 배합비

이 연구에서 사용한 배합비는 제시된 재료에 최적화된 것으로, 선행연구를 통해 결정되었다. 배합비는 [표 19]와 같으며, 치환골재의 치환 비율은 연구 목적에 맞게 조절하였다.

[표 19] 배합비

	OPC (g)	Silica (g)	Filler (g)	Aggregate (g)	Water (g)	Water reducer (g)
Standard Concrete	593.7	-	-	sand : 1438.5	935.0	-
				Gravels : 719.2		
UHPC	788.5	197.1	236.6	867.4	164.0	31.5~47.3
P-UHPC	788.5	197.1	236.6	116.1	164.0	31.5~47.3
L-UHPC	788.5	197.1	236.6	450.0	164.0	31.5~47.3

제4절 실험방법

1. 부착강도 실험방법

표면 조건이 매끄러운 부착강도용 실험체는 40*40*160 mm 형틀에 벽체 역학을 할 표준콘크리트 배합을 형틀의 중앙을 막아 40*40*80 mm를 채우고 1일 양생이후 [사진 17]의 (a)의 반대편에 골재별 배합에 따라 타설하여 실험체를 제작하였다. 표면 조건이 거친면인 부착강도용 실험체는 40*40*160 mm에 표준콘크리트 배합으로 제작하여 [사진 16]과 같이 외력을 가해 절반으로 나누고 나서, [사진 17]의 (b)와 같이 몰드에 반으로 갈라진 40*40*80 mm 사이즈의 거친면 시편을 넣고 반대편에 배합에 따라 추가 타설하여 거친면에 부착된 실험체를 제작하였다. 부착강도용 실험체는 재령 7일 상온양생 및 고온양생으로 양생하였다. 부착강도 시험 인자는 다음 [표 20]와 같다.

[표 20] 부착강도 시험인자

Conditions	Experimental Factor
Curing	<ul style="list-style-type: none"> - Room Temperature - High Temperature(90℃)
Surface	<ul style="list-style-type: none"> - Smooth - Rough
Material	<ul style="list-style-type: none"> - A type Mortar (Purchase) - B type Mortar (Experiment) - C type Repair mortar (Purchase) - D type UHPC mortar - E type P-UHPC mortar - F type L-UHPC mortar



(a) 거친면 제작 과정



(b) 제작한 거친면 시편

[사진 16] 거친면 시편 제작 과정



(a) 매끄러운면 타설 전



(b) 거친면 타설 전

[사진 17] 타설 전 매끄러운면과 거친면의 모습



(a) 부착강도 실험 전

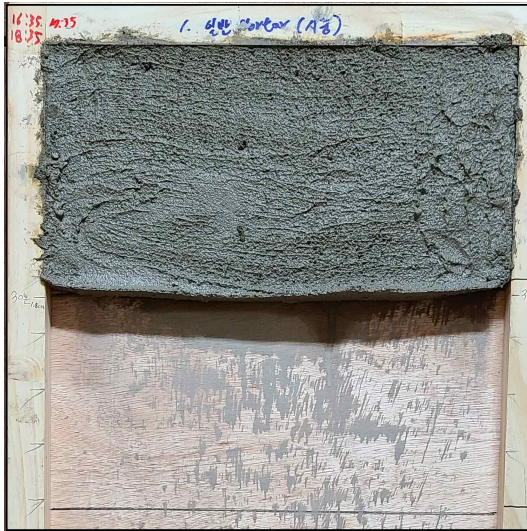


(b) 부착강도 실험 후

[사진 18] 부착강도 실험

2. 굳지 않은 상태 실험방법

각 배합의 모르타르를 주문 제작한 나무판자 형틀에 타설하여 80° 경사로 설치하고 30분 간격으로 흘러내리는 정도를 측정하였다.



(a) 모르타르(시중 구매)



(b) 모르타르(실험 배합)



(c) 모르타르(보수용)



(d) UHPC 모르타르



(e) P-UHPC 모르타르

(f) L-UHPC 모르타르

[사진 19] 굳지 않은 상태 실험

제5절 실험결과

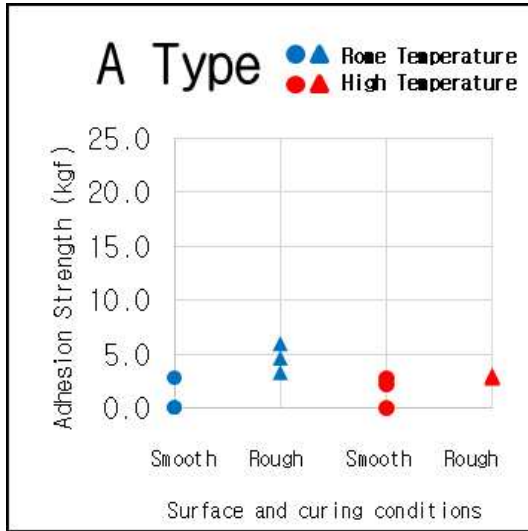
1. 부착강도 실험결과

배합은 5종류(A는 시중에서 구매한 모르타르, B는 실험 배합 모르타르, C는 시중에서 구매한 보수용 모르타르, D는 실험 배합 UHPC 모르타르, E는 플라스틱을 혼입한 UHPC 모르타르, F는 경량골재를 혼입한 모르타르) 이고, 표면조건과 양생 조건별 부착강도 측정 결과는 다음과 같다.

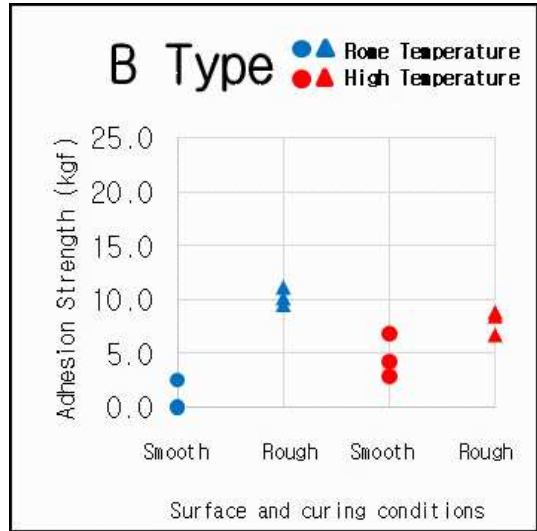
[표 21] 부착강도 실험 결과

(Unit : MPa)

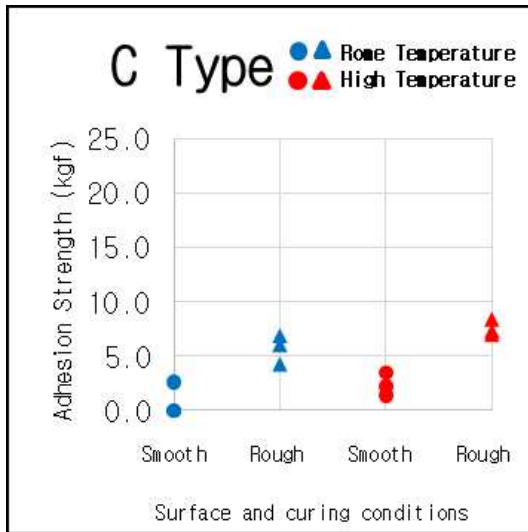
Curing Surface	Room Temperature		High Temperature(90℃)	
	Smooth	Rough	Smooth	Rough
A type - Mortar (Purchase)	2.8	3.3	2.2	2.8
	0.0	4.6	2.8	3.0
	0.0	6.0	0.0	2.9
B type - Mortar (Experiment)	2.5	9.5	2.8	6.7
	0.0	10.2	4.2	8.8
	0.0	11.1	6.8	8.5
C type - Repair Mortar (Purchase)	2.6	4.3	2.2	8.4
	0.0	6.1	3.4	7.0
	0.0	6.9	1.4	7.4
D type - UHPC Mortar	11.7	15.4	14.1	10.4
	0.0	19.0	0.0	17.5
	0.0	14.8	0.0	21.5
E type - P-UHPC Mortar	4.9	18.0	9.7	17.3
	3.6	17.3	7.0	13.0
	0.0	12.9	8.1	16.1
F type - L-UHPC Mortar	5.3	14.4	9.9	13.0
	5.9	18.2	0.0	9.7
	0.0	13.4	0.0	7.8



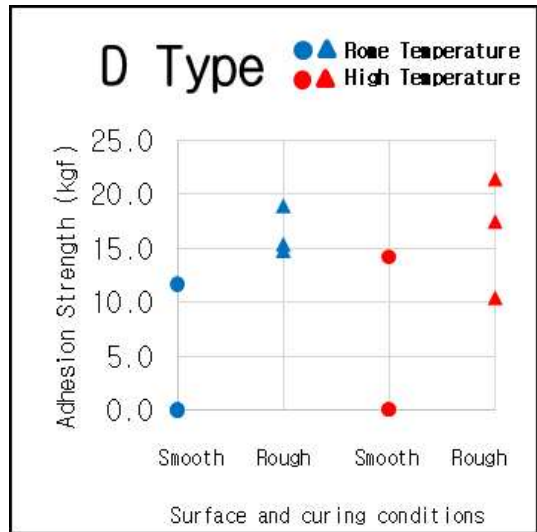
(a) A Type 부착강도



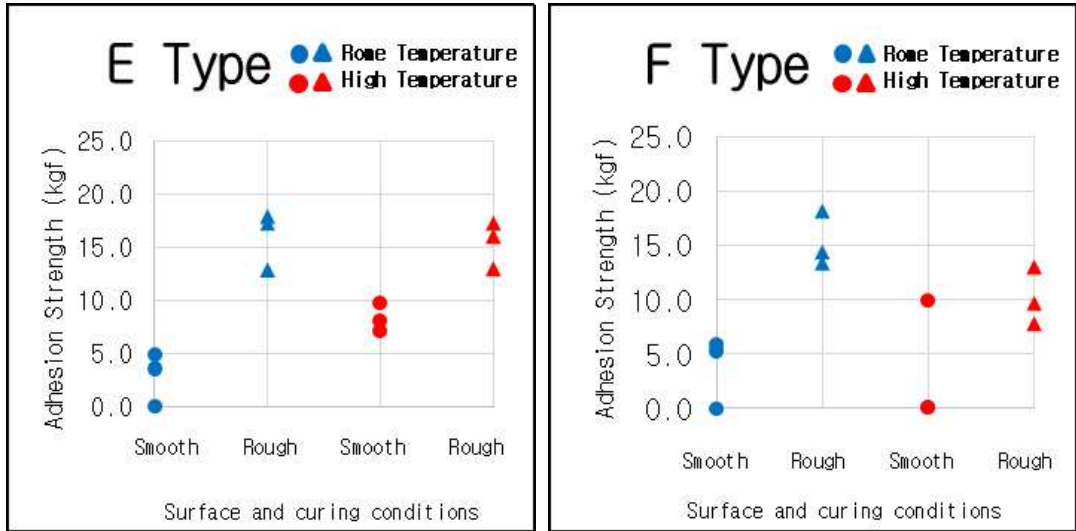
(b) B Type 부착강도



(c) C Type 부착강도



(d) D Type 부착강도



(e) E Type 부착강도

(f) F Type 부착강도

[그림 15] 배합별 부착강도 실험결과

[그림 15]과 같이 파란색은 상온양생을 빨간색은 상온 90℃ 양생을 의미하고 x축은 표면조건 y축은 부착강도를 나타내고 있다. 배합별 부착강도 실험결과 양생 조건은 부착강도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 표면 조건이 매끄러운 표면인 시편은 다소 낮은 부착력을 보였지만 다수 매끄러운 표면의 시편이 부착성능 평가를 할 수 없을 정도의 상태였다. 부착강도는 위해서 양생조건에 크게 영향을 받지 않았고, 매끄러운면 보다 거친면에서 부착력을 보이는 것으로 보아 표면조건이 부착강도에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

2. 굳지 않은 상태 실험결과

[사진 19]를 보면 굳지 않은 상태 실험은 30분 간격으로 4회 측정하였다. 실험 결과 시중에서 구매한 모르타르는 30분이 지난 상태에서 18mm가 흘러 내렸고 이후 4회차 측정까지 변화가 없었다. 실험 배합 모르타르는 변화가 없었다. 보수용 모르타르는 1회차에 4mm 정도 흘러내렸으며 이후 다른 변화가 없었다. UHPC 모르타르는 유동성이 좋아 부착하지 못하고 바로 흘러내리는 모습을 관찰 할 수 있었다. P-UHPC는 아무런 변화가 없었다. L-UHPC는 1회차 측정에서 15mm 정도 흘러내리고 이후에는 변화가 없었다.

1회 측정에서 흘러내리는 모습을 보인 일반모르타르, 보수용 모르타르, L-UHPC

는 실험시작 1회 측정인 30분까지 변화를 보이고 이후에는 경화되면서 흘러내리지 않았다.

2. 굳지 않은 상태의 실험결과

[표 22] 굳지 않은 상태 측정 결과(2시간 동안 30분마다 측정)

(Unit : mm)

	30min	60min	90min	120min
A type - Mortar (Purchase)	18	0	0	0
B type - Mortar (Experiment)	0	0	0	0
C type - Repair Mortar (Purchase)	4	0	0	0
D type - UHPC Mortar	-	-	-	-
E type - P-UHPC Mortar	0	0	0	0
F type - L-UHPC Mortar	15	0	0	0

제6절 소 결

배합별 저온양생한 거친 표면 시편의 부착강도를 비교해 보면 실험배합용 모르타르가 시중에 구매했던 모르타르와 보수용 모르타르보다 약 2배, 1.7배 높게 나타났고, 고온양생한 거친 표면 시편의 부착강도는 모르타르와 보수용 모르타르보다 2.7배, 1.05배 높은 것으로 나타났다. UHPC 모르타르의 부착강도는 저온양생한 거친 표면 시편의 경우 UHPC 모르타르 보다 P-UHPC와 L-UHPC가 0.98배, 0.95배 낮은 것으로 나타났고, 고온양생한 거친 표면 시편의 부착강도는 UHPC 모르타르 보다 P-UHPC와 L-UHPC가 0.93배, 0.65배 낮은 것으로 나타났다.

각 배합별 모르타르의 굳지 않은 상태의 UHPC 모르타르를 제외하고 많이 흘러내리지 않는 모습을 보였다. 다만 P-UHPC는 4회차 측정이 끝나는 2시간 이후에 표면에 건조 균열이 생기는 모습을 관찰할 수 있었다.

제6장 페플라스틱 미분을 혼입한 UHPC 외부마감용 PC패널 설계

제1절 실험개요

본 장에서는 페플라스틱을 혼입하여 경량화가 가능한 UHPC를 사용해 외부마감용 PC패널로 설계하기 위하여 KS F 4735 압출성형 콘크리트패널 설계를 기준으로 등가강도기반설계를 만족하는 패널을 설계하였다. 설계는 KS F 4735에 기재된 압출성형콘크리트 패널의 기성 사이즈 중 하나인 가로(1200)*세로(600)을 택하여 진행하였다. 배합별 압축강도와 휨강도 데이터를 기반으로 등가강도기반설계를 만족하는 각 배합별 기성 사이즈에 맞는 최소두께를 구한 다음, 기성 제품 패널과 하중을 비교하였다.

제2절 외부마감용 PC 패널 설계

본 연구는 KS F 4735 압출 성형 콘크리트 패널을 기준으로 등가강도기반설계를 기반으로 페플라스틱을 혼입한 UHPC로 외부마감 패널을 설계하였다. 패널의 종류는 일반용(C)이며 규격은 1200*600*60(h) mm³ 이다. 기성품 기준 최소 휨강도는 14 MPa 이므로 이를 만족해야 한다. 일반콘크리트로 제작한 기성품 휨강도 14 MPa을 이용하여 패널이 버티야하는 최소 하중을 구하고 골재별 배합에 따른 패널을 제작하기 위한 패널의 최소 두께를 구하도록 한다.

아래 (식. 14)를 사용하여 기성품이 버틸 수 있는 최소하중을 구할 수 있다. 그 다음 배합별로 패널을 만들 때 기성품과 동일한 최소하중을 버티도록 설계하고 그때 패널의 최소 두께를 확인한다.

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I}y \quad (\text{식. 12})$$

$$M = \frac{PL}{2}, \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{and} \quad y = \frac{h}{2} \quad (\text{식. 13})$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{bh^2} \quad (\text{식. 14})$$

$$f_{cr} = f_{ck} + 2.33s \quad (\text{식. 15})$$

$$\sigma_{\max} = f_{cr} \quad (\text{식. 16})$$

$$h = \sqrt{\frac{3PL}{b\sigma_{\max}}} \quad (\text{식. 17})$$

[표 23]의 σ = 휨강도는 제3장, 제4장에서 얻은 결과값을 사용하며, (식. 14)와 (식. 17)을 이용하여 최소 두께를 구한다. 기성품이 버티는 하중과 동일한 하중을 버티는 1200*600*h 패널의 최소두께를 구하면 다음과 같다.

[표 23] 기성품과 동일한 하중을 버티는 배합별 휨강도에 따른 최소두께

Type of UHPC	$\sigma_{\max}(\text{N/mm}^2)$	$h_{\min}(\text{mm})$
Standard	14.0	60.0
Mortar	5.3	97.5
UHPC	28.1	42.3
P-UHPC	15.4	57.1
P1-UHPC	21.9	49.9
P2-UHPC	21.0	49.0
L1-UHPC	23.0	46.8
L2-UHPC	24.1	45.7
EPS-UHPC	8.9	75.3

제3절 설계 결과

[표 24] 배합별 최소두께로 설계된 패널의 무게

Type of UHPC	Volume(m ³)	Density(g/cm ³)	Weight(kg)
Standard	0.043	2.4	103.7
Mortar	0.14	2.16	151.7
UHPC	0.061	2.4	73.2
P-UHPC	0.082	2.38	97.9
P1-UHPC	0.069	1.95	67.3
P2-UHPC	0.070	2.04	71.9
L1-UHPC	0.067	2.27	80.9
L2-UHPC	0.066	2.31	79.0
EPS-UHPC	0.108	1.22	130.2

[표 23]에서 콘크리트로 제작된 1200*600*60 크기의 기성제품은 8100 N을 버틸 수 있는 것을 확인하였다. 이에 최소 8100 N을 버틸 수 있어야 패널로 제작 할 수 있다. [표 24]는 [표 23]에서 얻은 최소두께 값을 토대로 배합별 PC 패널을 제작 하였을 때 얻을 수 있는 패널의 부피와 밀도로 계산한 무게를 보여준다.

제4절 소 결

외부마감 PC 패널을 만들기 위해서는 KS F 4735에서 규정하는 기성제품과 동일한 하중 8100 N을 버틸 수 있어야 하므로, 모르타르로 제작한 패널을 사용기는 어려움이 있다. 모르타르를 제외한 배합들로 패널을 제작하여 비교 분석한 결과 103.7 kg의 기성 패널에 비해 모르타르와 EPS를 제외한 골재들로 만든 패널은 무게가 감소하였고, 본 장의 목표인 경량패널 설계가 가능한 것을 확인하였다.

제7장 결 론

본 논문에서는 해양에서 얻은 폐플라스틱을 모르타르와 초고성능콘크리트의 잔골재로 혼입하여 활용할 수 있는 배합을 제안하고자 하였다. 폐플라스틱을 잔골재로 사용하기 앞서 폐플라스틱의 화학적 성능을 분석하였고, 폐플라스틱을 혼입한 모르타르와 초고성능 콘크리트의 물리적 성능을 분석하였다. 구조재료로 사용할 수 없기에 보수용자재로 사용하기 위해 부착강도 성능을 분석하였고, 부자재로 사용하기 위해 외부마감 패널을 설계하였다. 위 내용을 바탕으로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 폐플라스틱을 혼입할 경우 모르타르 및 콘크리트의 작업성 저감 시키는 것으로 보인다. 폐플라스틱의 혼입량이 높을수록 작업성이 더 크게 저하되는 경향이 있다. 플라스틱 골재의 경우 골재의 모양과 입자가 작업성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(2) 폐플라스틱 활용의 주요 이점은 모르타르 및 콘크리트의 기능적 특성으로 골재를 사용하면 공극과 다공성이 증가하기 때문에 열전도도를 낮출 수 있고, 흡음률을 증가시킬 수 있다.

(3) 열역학 분석 및 FT-IR 및 라만 스펙트럼 분석의 결과로 폐플라스틱의 화학 조성은 PET로 판단되었고 PET 이외의 플라스틱의 종류와 양을 정확하게 평가하기가 어려웠다. 본 연구에서 사용된 폐플라스틱의 표면에 염화물 이온 농도는 0.15 wt.% ~ 2.0 wt.%로 다양했으며, 이는 구조용 콘크리트 골재에 대한 표준 규정에 비해 훨씬 높았다. 이는 폐플라스틱을 사용하기 위해서는 표면에 염화물을 제거하기 위한 추가 세척 과정이 필요한 것을 확인했다.

(4) 플라스틱 플레이크의 사용으로 압축강도는 약 20~40 % 감소, 휨강도는 10 % 감소를 확인하였고, 등가강도 설계에 의해, 폐플라스틱 1 kg을 활용시 사회적 비용은 약 0.5 USD(처리에 대한 0.3 USD 및 혼합 비율에 대한 0.17 USD)로 일반 폐기보다 약 80 % 높았고, 1 kg의 플라스틱을 첨가하면 CO₂ 배출량이 1.1 kg 추가 배출되었으며, 이는 일반 폐기시 CO₂ 배출량보다 0.255 kg 높은 결과를 보였다. 결국 해양에서 채취한 플라스틱 플레이크의 사용은 경제적, 환경적 관점에서 장점이 없다는 것을 확인했다.

(5) UHPC에 혼입한 페플라스틱의 혼합 가능 최대치는 합성 폴리머와 비교해 보니 절반 미만이었다 범위가 중요했다. 이는 페플라스틱의 분쇄로 인한 불규칙한 입자 모양 때문이라고 보았다.

(6) 페플라스틱을 사용하여 밀도가 2000 kg/m^3 이고, 압축강도와 휨강도가 각각 $80 \sim 90 \text{ MPa}$, $30 \sim 50 \text{ MPa}$ 인 경량 UHPC를 제조 할 수 있었다. 페플라스틱의 첨가로 휨강도의 감소가 발생했지만 감소 된 강도는 강섬유의 첨가에 의해 보완 될 수 있는 범위 내에 있었다. 또한, 강섬유의 사용으로 표본의 밀도 감소에 큰 영향을 주지 않았다.

(7) 페플라스틱을 UHPC에 혼입하면 $200 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 자연 연소가 발생하는 모습을 관찰하였고, 페플라스틱이 연소된 후 페플라스틱이 차지하는 공간은 공극이 형성되어 UHPC의 물리적 특성을 저하시키는 모습을 보였다. 저하된 물리적 특성을 강섬유의 사용으로 일부분 보완할 수 있다고 보았다.

(8) 페플라스틱을 혼입한 일반 및 초고성능 콘크리트는 화재성능에 취약해 구조용으로 사용할 수 없다고 보았다. 보수용으로 사용하면 부착강도 실험결과는 부착면의 상태에 큰 영향을 받는 모습을 보였다. 매끄러운면은 보다 거친면에서 더 큰 부착성능을 보였다.

(9) 페플라스틱을 혼입하여 부자재로 사용하기 위해 외부마감용 PC 패널을 설계하였고, 기성품과 비교하면 페플라스틱을 혼입한 패널의 무게는 미세하게 줄어드는 모습을 보였고 두께는 30% 가량 감소하였다. 다른 배합에 따른 패널은 모르타르와 EPS를 제외하고 중량은 22% ~ 36% 감소하고, 두께는 5% ~ 30% 가량 감소했다.

이상을 종합하면 향후 페플라스틱을 혼입한 모르타르 및 초고성능콘크리트의 물리적 성능, 화재특성 및 경제성을 분석한 결과 페플라스틱을 사용함에 따라 물리적 특성이 저하되었고, $200 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 온도에서 연소된 후 자연적으로 발화되고, 이는 화재에 취약해 구조적인 재료로 사용할 수 없다. 페플라스틱을 혼입하면 페플라스틱 폐기 비용보다 80% 높고, CO_2 발생량 또한 일반 폐기보다 0.255kg 높다. 이러한 페플라스틱을 혼입했을 때 단점을 종합해 보면 페플라스틱을 주재로 연구가 진행된다면 구조적인 재료 보다는 비구조용 재료를 주재로 연구를 진행하는 것을 권장한다.

참고문헌

- [1] L.C. Lebreton, J. Van Der Zwet, J.-W. Damsteeg, B. Slat, A. Andrady, J. Reisser, River plastic emissions to the world's oceans, *Nature communications*, 8 (2017) 15611.
- [2] J.G. Derraik, The pollution of the marine environment by plastic debris: a review, *Marine pollution bulletin*, 44 (2002) 842-852.
- [3] P. Kershaw, C. Rochman, Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment, *Reports and Studies-IMO/FAO/Unesco-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP) Eng No. 93*, (2015).
- [4] S. Kühn, E.L.B. Rebolledo, J.A. van Franeker, Deleterious effects of litter on marine life, in: *Marine anthropogenic litter*, Springer, Cham, 2015, pp. 75-116.
- [5] M.M. Mian, X. Zeng, A.a.N.B. Nasry, S.M. Al-Hamadani, Municipal solid waste management in China: a comparative analysis, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19 (2017) 1127-1135.
- [6] H. Dong, Y. Geng, X. Yu, J. Li, Uncovering energy saving and carbon reduction potential from recycling wastes: A case of Shanghai in China, *Journal of Cleaner Production*, 205 (2018) 27-35.
- [7] Y.-C. Jang, G. Lee, Y. Kwon, J.-h. Lim, J.-h. Jeong, Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea, *Resources, Conservation and Recycling*, 158 (2020) 104798.
- [8] G. Bishop, D. Styles, P.N. Lens, Recycling of European plastic is a pathway for plastic debris in the ocean, *Environment International*, 142 (2020) 105893.
- [9] H. Merrild, A.W. Larsen, T.H. Christensen, Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: the importance of efficient energy recovery and transport distances, *Waste management*, 32 (2012) 1009-1018.
- [10] L. Magnier, R. Mugge, J. Schoormans, Turning ocean garbage into products-Consumers' evaluations of products made of recycled ocean plastic, *Journal of cleaner production*, 215 (2019) 84-98.
- [11] R. Sharma, P.P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete-a review, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 473-482.
- [12] N. Saikia, J. De Brito, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials*, 34 (2012) 385-401.
- [13] I.H. Alfahdawi, S. Osman, R. Hamid, A.I. Al-Hadithi, Utilizing waste plastic polypropylene and polyethylene terephthalate as alternative aggregates to produce lightweight concrete: a review, *Journal of Engineering Science and Technology*, 11 (2016) 1165-1173.
- [14] R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste management*, 28 (2008) 1835-1852.
- [15] M.J. Islam, M.S. Meherier, A.R. Islam, Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 125 (2016) 946-951.
- [16] X. Li, T.-C. Ling, K.H. Mo, Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete-A review, *Construction and Building Materials*, 240 (2020) 117869.
- [17] M. Raghatae Atul, Use of plastic in a concrete to improve its properties, *International journal of advanced engineering research and studies*, 1 (2012) 109-111.
- [18] S.B. Kim, N.H. Yi, H.Y. Kim, J.-H.J. Kim, Y.-C. Song, Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete, *Cement and concrete composites*, 32 (2010) 232-240.

- [19] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi, Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study, *Waste Management*, 78 (2018) 79–93.
- [20] F.K. Alqahtani, G. Ghataora, M.I. Khan, S. Dirar, Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate, *Construction and Building Materials*, 148 (2017) 386–397.
- [21] L. Ferreira, J. de Brito, N. Saikia, Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 196–204.
- [22] K. Kim, M. Shin, S. Cha, Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 499–507.
- [23] K.-H. Yang, H.-S. Chung, A.F. Ashour, Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties, (2008).
- [24] J.-H. Kim, S.-H. Yoo, Public perspective on the environmental impacts of sea sand mining: Evidence from a choice experiment in South Korea, *Resources Policy*, 69 (2020) 101811.
- [25] R.H. Charlier, Impact on the coastal environment of marine aggregates mining, *International journal of environmental studies*, 59 (2002) 297–322.
- [26] H.S. Kim, D.H. Lee, J.M. Kim, A study on the Possibility of Securing Alternative Aggregates to Solve the Problem of Supply and Demand of Fine Aggregate in Southeast Regionp, *Proceeding of Annual Conference of Korea Institute of Building Construction*, 18 (2018) 328–329.
- [27] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili, Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content, *Cement and Concrete Composites*, 33 (2011) 993–1000.
- [28] S. Yang, X. Yue, X. Liu, and Tong, Y, Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles, *Constr. Build. Mater.* 84 (2015) 444–453.
- [29] F. Awaja, D. Pavel, Recycling of PETEur, *Polym. J.* 41 (7) (2005) 1453–1477.
- [30] A. Sadrmomtazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, A. Sadeghi-Nik, The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 2363–2373.
- [31] R. Madandoust, M.M. Ranjbar, S.Y. Mousavi, An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene, *Constr. Build. Mater.* 25 (9) (2011) 3721–3731.
- [32] S.C. Kou, G. Lee, C.S. Poon, W.L. Lai, Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Manage.* 29 (2) (2009) 621–628.
- [33] B.S. Thomas, R.C. Gupta, V.J. Panicker, Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 504–513.
- [34] X. Li et al. / *Construction and Building Materials* 240 (2020) 117869[75] V. Torretta, E.C. Rada, M. Ragazzi, E. Trulli, I.A. Istrate, L.I. Cioca, Treatment and disposal of tyres: two EU approaches. A review, *Waste Manage.* 45 (2015) 152–160.
- [35] De, S.K., Isayev, A. and Khait, K, *Rubber recycling*, CRC Press. (2005).
- [36] Kim, J.K., Saha, P., Haponiuk, J.T., Aswathi, M.K. and Thomas, S, *Rubber Recycling: Rubber Recycling*, Royal Society of Chemistry. 59 (2018).
- rubber, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 534–545.
- [37] O. Youssf, M.A. ElGawady, J.E. Mills, X. Ma, An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 522–532.
- [38] S. Guo, Q. Dai, R. Si, X. Sun, C. Lu, Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire, *J. Cleaner Prod.* 148 (2017) 681–689.

- [39] S. Tian, T. Zhang, Y. Li, Research on modifier and modified process for rubber particle used in rubberized concrete for road, *Adv. Mater. Res.* 243 (2011) 4125-4130.
- [40] N. Segre, P.J. Monteiro, G. Sposito, Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix, *J. Colloid Interface Sci.* 248 (2) (2002) 521-523.
- [41] L. He, Y. Ma, Q. Liu, Y. Mu, Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete, *Constr. Build. Mater.* 120 (2016) 403-407.
- [42] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H.A. Beygi, H. Allahyari, I.M. Nikbin, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1302-1308.
- [43] D.L. Presti, Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 863-881.
- [44] De, S.K., Isayev, A. and Khait, K, *Rubber recycling*, CRC Press. (2005).
- [45] B. Rai, S.T. Rushad, B. Kr, Duggal 2012 ISRN Civil Engineering S.K., Study of waste plastic mix concrete with plasticizer.
- [46] R.V. Silva, J. de Brito, N. Saikia, Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 23-31.
- [47] L. Ferreira, J. de Brito, and Saikia, N, Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 196-204.
- [48] B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato, L. Di Maio, Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar, *Compos. B Eng.* 99 (2016) 75-83.
- [49] Z.Z. Ismail, E.A. Al-Hashmi, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Manage.* 28 (11) (2008) 2041-2047.
- [50] K. Bisht, P.V. Ramana, Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, *Constr. Build. Mater.* 155 (2017) 811-817.
- [51] S. Raffoul, R. Garcia, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, N.F. Medina, Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: an experimental investigation, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 391-404.
- [52] A.F. Angelin, R.C.C. Lintz, L.A. Gachet-Barbosa, W.R. Osório, The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 534-545.
- [53] O. Youssf, M.A. ElGawady, J.E. Mills, X. Ma, An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 522-532.
- [54] A.S. Mendis, S. Al-Deen, M. Ashraf, Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions, *Constr. Build. Mater.* 137 (2017) 354-366.
- [55] H. Su, J. Yang, T.C. Ling, G.S. Ghataora, S. Dirar, Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes, *J. Cleaner Prod.* 91 (2015) 288-296.
- [56] D. Pedro, J. De Brito, R. Veiga, Mortars made with fine granulate from shredded tires, *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (4) (2012) 519-529.
- [57] F. Colangelo, R. Cioffi, B. Liguori, and Iucolano, F, Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete, *Compos. B Eng.* 106 (2016) 234-241.
- [58] B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, M. Maallem, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 43

(2013) 436-442.

- [59] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Manage.* 27 (12) (2007) 1870-1876.
- [60] M.J. Islam, M.S. Meherier, A.R. Islam, Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 946-951.
- [61] B.S. Thomas, R.C. Gupta, A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54 (2016) 1323-1333.
- [62] A.E. Richardson, K.A. Coventry, G. Ward, Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content, *J. Cleaner Prod.* 23 (1) (2012) 96-103.
- [63] P. Asutkar, S.B. Shinde, R. Patel, Study on the behaviour of rubber aggregates concrete beams using analytical approach, *Engineering Science and Technology, an, Int. J.* 20 (1) (2017) 151-159.
- [64] M. Gesoglu, E. Güneysi, O. Hansu, S. Etli, M. Alhassan, Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder, *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 562-569.
- [65] A.N. Gisbert, J.G. Borrell, F.P. García, E.J. Sanchis, J.C. Amorós, J.S. Alcaraz, F.S. Vicente, Analysis behaviour of static and dynamic properties of EthylenePropylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 671-682.
- [66] J.N. Eiras, F. Segovia, M.V. Borrachero, J. Monzó, M. Bonilla, J. Payá, Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires, *Mater. Des.* 59 (2014) 550-557.
- [67] S. Yang, X. Yue, X. Liu, and Tong, Y, Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles, *Constr. Build. Mater.* 84 (2015) 444-453.
- [68] M.A. Aiello, F. Leuzzi, Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state, *Waste Manage.* 30 (8-9) (2010) 1696-1704.
- [69] M.M. Reda Taha, A.S. El-Dieb, M.A. Abd El-Wahab, M.E. Abdel-Hameed, Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 20 (10) (2008) 640-649.
- [70] O. Youssf, R. Hassanli, J.E. Mills, Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content, *J. Build. Eng.* 11 (2017) 115-126.
- [71] N. Saikia, J.D. Brito, Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete, *Mater. Res.* 16 (2) (2013) 341-350.
- [72] R. Sharma, P.P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete-a review, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 473-482.
- [73] A. Sadrmomtazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, A. Sadeghi-Nik, The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 2363-2373.
- [74] A. Benazzouk, O. Douzane, T. Langlet, K. Mezreb, J.M. Roucoult, M. Quéneudec, Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes, *Cem. Concr. Compos.* 29 (10) (2007) 732-740.
- [75] A.R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatbadi, Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Manage.* 28 (12) (2008) 2472-2482.
- [76] T. Uygunog̃ lu, I. Topçu, B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars, *Constr. Build. Mater.* 24 (7) (2011) 1141-1150.
- [77] A.M. da Silva, J. de Brito, Veiga, R, Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars, *Constr. Build. Mater.* 71 (2014) 226-236.

- [78] Kim, J.K., Saha, P., Haponiuk, J.T., Aswathi, M.K. and Thomas, S, Rubber Recycling: Rubber Recycling, Royal Society of Chemistry. 59 (2018).
- [79] A. Fadiel, F. Al Rifaie, T. Abu-Lebdeh, E. Fini, Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials, *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 7 (1) (2014) 1-11.
- [80] R. Si, S. Guo, Q. Dai, Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 496-505.
- [81] G. Girska, D. Nagrockiene, Crushed rubber waste impact of concrete basic properties, *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 36-42.
- [82] M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste Manage.* 30 (6) (2010) 1101-1106.
- [83] S. Akçaözog̃ lu, C.D. Atis, K. Akçaözog̃ lu, An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete, *Waste Manage.* 30 (2) (2010) 285-290.
- [84] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: a critical review, *Waste Manage.* 51 (2016) 19-42.
- [85] W.C. Tang, Y. Lo, A.B.I.D. Nadeem, Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 30 (5) (2008) 403-409.
- [86] M. Bravo, J. de Brito, Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance, *J. Cleaner Prod.* 25 (2012) 42-50.
- [87] P. Sukontasukkul, K. Tiamlom, Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size, *Constr. Build. Mater.* 29 (2012) 520-526.
- [88] L.J. Hunag, H.Y. Wang, Y. Wu, W. Properties of the mechanical in controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC), *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 1054-1058.
- [89] Z. Ge, R. Sun, K. Zhang, Z. Gao, P. Li, Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 81-86.
- [90] R. Wang, C. Meyer, Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene, *Cem. Concr. Compos.* 34 (9) (2012) 975-981.
- [91] V. Ferrándiz-Mas, E. García-Alcocel, Durability of expanded polystyrene mortars, *Constr. Build. Mater.* 46 (2013) 175-182.
- [92] A. Kan, R. Demirbog̃ a, A novel material for lightweight concrete production, *Cem. Concr. Compos.* 31 (7) (2009) 489-495.
- [93] K.A. Paine, R.K. Dhir, R. Moroney, K. Kopasakis, Use of crumb rubber to achieve freeze/thaw resisting concrete, *Challenges Concr. Construct.* 6 (2002) 485-498.
- [94] M. Gesog̃ lu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, S. İpek, Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 19-24.
- [95] A.M. Rashad, A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 5 (1) (2016) 46-82.
- [96] Ning Li, Guangcheng Long, Cong Ma, Fu. Qiang, Xiaohui Zeng, Kunlin Ma, Youjun Xie, Bote Luo, Properties of self-compacting concrete (SCC) with recycled tire rubber aggregate: a comprehensive study, *J. Cleaner Prod.* 236 (2019) 117707.
- [97] Obinna Onuaguluchi, Daman K. Panesar, Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume, *J. Cleaner Prod.* 82 (2014) 125-131.
- [98] Mahmoud Nili, Nader Biglarijoo, Seyed Mehdi Hosseinian, Siavash Ahmadi, Disposing waste demolition in concrete as aggregate replacement, *Int. J. Mater.* 1 (2014) 105-110.
- [99] Bashar S. Mohammed, Khandaker M. Anwar, Jackson Ting Hossain, Eng Swee, Grace Wong, M. Abdullahi, Properties of crumb rubber hollow concrete block, *J. Cleaner Prod.* 23 (2012) 57-67.

- [100] A. Sariisik, G. Sariisik, New production process for insulation blocks composed of EPS and lightweight concrete containing pumice aggregate, *Mater. Struct.* 45 (9) (2012) 1345-1357.
- [101] K.S. Kumar, K. Baskar, Effect of temperature and thermal shock on concrete containing hazardous electronic waste, *J. Hazardous Toxic Radioact. Waste* 22 (2) (2017) 04017028.
- [102] D. Murugan, S. Varughese, T. Swaminathan, Recycled polyolefin-based plastic wastes for sound absorption, *Polym. Plastics Technol. Eng.* 45 (7) (2006) 885-888.
- [103] F. Asdrubali, S. Schiavoni, K.V. Horoshenkov, A review of sustainable materials for acoustic applications, *Build. Acoust.* 19 (4) (2014) 283-311.
- [104] F.G. Branco, L. Godinho, On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission, *Constr. Build. Mater.* 45 (2013) 184-191.
- [105] P. Sukontasukkul, Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel, *Constr. Build. Mater.* 23 (2) (2009) 1084-1092.
- [106] G. Skripkiunas, A. Grinys, K. Miškinis, Damping properties of concrete with κ rubber waste additives, *Mater. Sci. (Medz ė iagotyra)* 15 (3) (2009) 266-272.
- [107] Z. Han, L. Chunsheng, T. Kombe, N. Thong-On, Crumb rubber blends in noise absorption study, *Mater. Struct.* 41 (2) (2008) 383-390.
- [108] B. Yesilata, Y. Is ĩker, P. Turgut, Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces, *Constr. Build. Mater.* 23 (5) (2009) 1878-1882.
- [109] F. Iucolano, B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, R. Cloffi, Recycled plastic aggregate in mortars composition: effect on physical and mechanical properties, *Mater. Des.* 52 (2013) 916-922.
- [110] M.M. Rahman, M.A. Islam, M. Ahmed, M.A. Salam, Recycled polymer materials as aggregates for concrete and blocks, *J. Chem. Eng.* 27 (1) (2012) 53-57.
- [111] Z. Grdic ´, G. Toplic ´ ic ´ -Curc ´ ic ´, N. Ristic ´, D. Grdic ´, P. Mitkovic ´, Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete, *Gradevinar* 66 (1) (2014) 11-20.
- [112] H.B. Zhao, Y.Z. Wang, Design and synthesis of PET-based copolyesters with flame-retardant and antidripping performance, *Macromolecular Rapid Communications*, 38 (2017) 1700451.
- [113] P. Liu, W. Chen, Y. Liu, S. Bai, Q. Wang, Thermal melt processing to prepare halogen-free flame retardant poly (vinyl alcohol), *Polymer degradation and stability*, 109 (2014) 261-269.
- [114] C.S. Wang, J.Y. Shieh, Synthesis and flame retardancy of phosphorus containing polycarbonate, *Journal of Polymer Research*, 6 (1999) 149-154.
- [115] K. Awasthi, V. Kulshrestha, D. Avasthi, Y. Vijay, Optical, chemical and structural modification of oxygen irradiated PET, *Radiation Measurements*, 45 (2010) 850-855.
- [116] I. Omkaram, R.S. Chakradhar, J.L. Rao, EPR, optical, infrared and Raman studies of VO₂⁺ ions in polyvinylalcohol films, *Physica B: Condensed Matter*, 388 (2007) 318-325.
- [117] J. Dybal, P. Schmidt, J. Baldrian, J. Kratochvil, Ordered structures in polycarbonate studied by infrared and Raman spectroscopy, wide-angle X-ray scattering, and differential scanning calorimetry, *Macromolecules*, 31 (1998) 6611-6619.
- [118] B.J. Bulkin, M. Lewin, J. Kim, Crystallization kinetics of poly (propylene terephthalate) studied by rapid-scanning Raman spectroscopy and FT-IR spectroscopy, *Macromolecules*, 20 (1987) 830-835.
- [119] T. Lippert, F. Zimmermann, A. Wokaun, Surface analysis of excimer-laser-treated polyethylene-terephthalate by surface-enhanced Raman scattering and x-ray photoelectron spectroscopy, *Applied spectroscopy*, 47 (1993) 1931-1942.
- [120] V. Resta, G. Quarta, M. Lomascolo, L. Maruccio, L. Calcagnile, Raman and Photoluminescence

- spectroscopy of polycarbonate matrices irradiated with different energy 28Si⁺ ions, *Vacuum*, 116 (2015) 82–89.
- [121] E.Y. Malikov, M.B. Muradov, O.H. Akperov, G.M. Eyvazova, R. Puskás, D. Madarász, L. Nagy, Á. Kukovecz, Z. Kónya, Synthesis and characterization of polyvinyl alcohol based multiwalled carbon nanotube nanocomposites, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 61 (2014) 129–134.
- [122] H.-Y. Wang, B.-T. Chen, Y.-W. Wu, A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC), *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 526–531.
- [123] C. Mora, A. Kwan, Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing, *Cement and concrete research*, 30 (2000) 351–358.
- [124] Z.Z. Ismail, E.A. Al-Hashmi, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste management*, 28 (2008) 2041–2047.
- [125] P. Soroushian, J. Plasencia, S. Ravanbakhsh, Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete, *Materials Journal*, 100 (2003) 203–207.
- [126] R.V. Silva, J. de Brito, N. Saikia, Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 35 (2013) 23–31.
- [127] P. Panyakapo, M. Panyakapo, Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste management*, 28 (2008) 1581–1588.
- [128] P.B. Zdenk, N. Drahomir, Proposal for Standard Test of Modulus of Rupture of Concrete with Its Size Dependence, *ACI Materials Journal*, 98.
- [129] S.C. Kou, G. Lee, C.S. Poon, W.L. Lai, Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Management*, 29 (2009) 621–628.
- [130] H.K. Kim, E.A. Hwang, H.K. Lee, Impacts of metakaolin on lightweight concrete by type of fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 719–726.
- [131] K.M.A. Hossain, S. Ahmed, M. Lachemi, Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1186–1195.
- [132] A.U. Nilsen, P.J.M. Monteiro, O.E. GjØrv, Estimation of the elastic moduli of lightweight aggregate, *Cement and Concrete Research*, 25 (1995) 276–280.
- [133] O. Kayali, M.N. Haque, B. Zhu, Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003) 207–213.
- [134] D. Saradhi Babu, K. Ganesh Babu, T.H. Wee, Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 1218–1223.
- [135] T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui, Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 448–455.
- [136] N. Mahasenan, S. Smith, K. Humphreys, – The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions, in: J. Gale, Y. Kaya (Eds.) *Greenhouse Gas Control Technologies – 6th International Conference*, Pergamon, Oxford, 2003, pp. 995–1000.
- [137] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*, 114 (2018) 2–26.
- [138] M. Fernández Bertos, S.J.R. Simons, C.D. Hills, P.J. Carey, A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂, *Journal*

of Hazardous Materials, 112 (2004) 193–205.

[139] L.K. Turner, F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, *Construction and Building Materials*, 43 (2013) 125–130.

[140] O. Eriksson, G. Finnveden, Plastic waste as a fuel – CO₂-neutral or not?, *Energy and Environmental Science*, 2 (2009) 907–914.

[141] A.M. Abdelhaleem, R.M. El-Sherbiny, H. Lotfy, A.A. Al-Ashaal, Evaluation of rubber/sand mixtures as replacement soils to mitigate earthquake induced ground motions, in: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris:[sn], 2013, pp. 3163–3166.

[142] T. Tsuchida, M. Kang, Use of lightweight treated soil method in seaport and airport construction projects, in: *Proceedings of the Nakase Memorial Symposium, Soft Ground Engineering in Coastal Areas*, 2003, pp. 353–365.

[143] T. Sakanoue, K. Yoshizaki, A Study on earthquake-resistant design for buried pipeline using lightweight backfill, in: *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, BC, Canada*, 2004.

[144] I.S. Soloaga, A. Oshiro, M. Positieri, The use of recycled plastic in concrete. An alternative to reduce the ecological footprint, *Journal of Construction*, 13 (2020) 19–26.

[145] H.-I. Liu, A. Deng, J. Chu, Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006) 331–338.

[146] M.O. Kim, H.K. Lee, H.-K. Kim, Cost and environmental effects of ocean-borne plastic flakes in cement mortar considering equivalent-strength mix design, *Construction and Building Materials*, 291 (2021) 123267.

[147] S.-T. Kang, J.-I. Choi, K.-T. Koh, K.S. Lee, B.Y. Lee, Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Composite Structures*, 145 (2016) 37–42.

[148] N.K. Lee, K. Koh, M.O. Kim, G. Ryu, Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research*, 104 (2018) 68–79.

[149] M. Tafesse, N.K. Lee, A.S. Alemu, H.K. Lee, S.W. Kim, H.-K. Kim, Flowability and electrical properties of cement composites with mechanical dispersion of carbon nanotube, *Construction and Building Materials*, 293 (2021) 123436.

[150] D. Heinz, F. Dehn, L. Urbonas, Fire resistance of ultra high performance concrete (UHPC)–Testing of laboratory samples and columns under load, in: *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel Germany, 2004, pp. 703–715.

[151] S. Bai, L. Jiang, N. Xu, M. Jin, S. Jiang, Enhancement of mechanical and electrical properties of graphene/cement composite due to improved dispersion of graphene by addition of silica fume, *Construction and Building Materials*, 164 (2018) 433–441.

[152] W. Bao, S. Meguid, Z. Zhu, M. Meguid, Modeling electrical conductivities of nanocomposites with aligned carbon nanotubes, *Nanotechnology*, 22 (2011) 485704.

[153] S. Pyo, M. Tafesse, B.-J. Kim, H.-K. Kim, Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 166 (2018) 110–117.

[154] S. Pyo, H.-K. Kim, Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete

- incorporating coal bottom ash and slag powder, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 459–466.
- [155] T. Bremner, T. Holm, High Performance Lightweight Concrete—a Review, *Special Publication*, 154 (1995) 1–20.
- [156] K.H. Mo, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, Bond properties of lightweight concrete—a review, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 478–496.
- [157] M.H. Zhang, O.E. Gjovrv, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *Materials Journal*, 88 (1991) 240–247.
- [158] M. Elshahawi, A. Hückler, M. Schlaich, Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review), *Structural Concrete*, 22 (2021) E152–E168.
- [159] E. Kearsley, P. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, *Cement and concrete research*, 32 (2002) 233–239.
- [160] E.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cement and Concrete Composites*, 28 (2006) 752–760.
- [161] L. Feo, F. Greco, L. Leonetti, R. Luciano, Mixed-mode fracture in lightweight aggregate concrete by using a moving mesh approach within a multiscale framework, *Composite Structures*, 123 (2015) 88–97.
- [162] T.Y. Lo, W. Tang, H. Cui, The effects of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment*, 42 (2007) 3025–3029.
- [163] W. Abbass, M.I. Khan, S. Mourad, Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and building materials*, 168 (2018) 556–569.
- [164] S. Pyo, T. Koh, M. Tafesse, H.-K. Kim, Chloride-induced corrosion of steel fiber near the surface of ultra-high performance concrete and its effect on flexural behavior with various thickness, *Construction and Building Materials*, 224 (2019) 206–213.
- [165] Z. Wu, C. Shi, K.H. Khayat, Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape, *Composites Part B: Engineering*, 174 (2019) 107021.
- [166] H. Huang, X. Gao, L. Li, H. Wang, Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 709–721.
- [167] J. Glanville, M. Cikaló, F. Crawford, M. Dozier, H. McIntosh, Handsearching did not yield additional unique FDG-PET diagnostic test accuracy studies compared with electronic searches: a preliminary investigation, *Research synthesis methods*, 3 (2012) 202–213.
- [168] J. Martinka, K. Balog, T. Chrebet, E. Hroncová, J. Dibdiaková, Effect of oxygen concentration and temperature on ignition time of polypropylene, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 110 (2012) 485–487.
- [169] S. Ahmad, M. Rasul, S.K. Adekunle, S.U. Al-Dulajjan, M. Maslehuddin, S.I. Ali, Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: Effects of exposure duration and fiber content, *Composites Part B: Engineering*, 168 (2019) 291–301.
- [170] Y. Li, D. Zhang, Effect of lateral restraint and inclusion of polypropylene and steel fibers on spalling behavior, pore pressure, and thermal stress in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 271 (2021) 121879.
- [171] N. Lee, K. Koh, S. Park, G. Ryu, Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (UHPC) exposed to high temperatures, *Cement and*

Concrete Research, 102 (2017) 109–118.

[172] M. Bajaber, I. Hakeem, UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review, *Journal of Materials Research and Technology*, (2020).

[173] K. Miled, K. Sab, R. Le Roy, Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling, *Mechanics of Materials*, 39 (2007) 222–240.

[175] S. Kim, N. Lee, H. Lee, S. Park, Experimental and theoretical studies of hydration of ultra-high performance concrete cured under various curing conditions, *Construction and Building Materials*, 278 (2021) 122352.

[175] C. Albano, N. Camacho, M. Hernandez, A. Matheus, A. Gutierrez, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios, *Waste Manage.* 29 (10) (2009) 2707–2716.

[176] N. Saikia, and De Brito, J, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 385–401.

[177] N. Saikia, and de Brito, J, Mechanical properties and abrasion behavior of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 236–244.

[178] C.A. Issa, G. Salem, Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 48–52.

[179] S.H. Chen, H.Y. Wang, J.W. Zhou, Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 98–103.

[180] W.H. Yung, L.C. Yung, L.H. Hua, A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 665–672.

[181] V. Corinaldesi, A. Mazzoli, G. Moriconi, Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles, *Mater. Des.* 32 (3) (2011) 1646–1650.

[182] A. Hilal, A, Effect of crumb tyres rubber on some properties of foamed concrete, *Anbar J. Eng. Sci.* 4 (2) (2011) 1–17.

[183] D.M. Hamza, R.H. Ghedan, Effect of rubber treatment on compressive strength and thermal conductivity of modified rubberized concrete, *J. Eng. Sustain. Dev.* 15 (4) (2011) 21–29.

[184] E. Ganjian, M. Khorami, A.A. Maghsoudi, Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (5) (2009) 1828–1836.

[185] N.M. Al-Akhras, M. Smadi, M, Properties of tire rubber ash mortar, *Cem. Concr. Compos.* 26 (7) (2004) 821–826.

[186] T. Gupta, S. Chaudhary, R.K. Sharma, Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume, *J. Cleaner Prod.* 112 (2016) 702–711.

[187] M. Nuzaimah, S.M. Sapuan, R. Nadlene, M. Jawaid, Recycling of waste rubber as fillers: a review, *Mater. Sci. Eng.* 368 (1) (2018) 12–16.

[188] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, Sivakugan, N, Use of macro plastic fibres in concrete: a review, *Constr. Build. Mater.* 93 (2015) 180–188. X. Li et al. / *Construction and Building Materials* 240 (2020) 117869 11

[189] R. Siddique, T.R. Naik, Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview, *Waste Manage.* 24 (6) (2004) 563–569.

감사의 글

지난 2년간의 노력이 결실을 맺을 수 있게 도와주신 분들에게 감사를 표하며 이 글을 전합니다.

먼저, 학부생 시절부터 지금까지 지도해주시고 많은 것을 가르쳐주신 김형기 교수님 감사드립니다. 교수님의 가르침과 항시 학생 입장을 생각해주시고 배려해주신 덕분에 어려움 없이 석사 졸업을 할 수 있었습니다. 교수님 밑에서 배운 지식과 지혜, 베풀어주신 은혜 잊지 않겠습니다. 항시 응원과 격려를 해주신 김태훈 교수님, 황태연 교수님, 조창근 교수님, 조규만 교수님, 최재혁 교수님 감사합니다.

처음 연구실에 든든한 말형의 역할을 해준 전상민 박사생, 백정진 석사, 어려운 일이 있으면 본인 일처럼 도와주던 박사생 아벨, 미카엘, 미뉴에 그리고 같이 고생하면서 힘이 되어준 대학원 동기인 석사생 김정은, 문길현, 김유진에게 감사의 말을 전합니다.

힘들고 지치면 응원과 격려의 말로 감싸주던 대학원 선배이면서 소중한 친구 이선주 박사생, 그리고 인생 선배로서 좋은 이야기를 해주시던 박사생 임현진, 고범석 선배님들에게 감사의 말을 전합니다.

학부생 시절부터 석사 졸업까지 항시 응원과 격려 아낌없는 지원을 해주신 친형 같은 선성현 사장님, 소중한 친구 노현지에게 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 항시 응원하고 아낌없이 지원해주시고 부족함 없이 사랑해주신 아버지, 어머니, 그리고 부모님 보다 더 사랑으로 키워주신 우리 안춘순 할머니 감사하고 사랑합니다. 이제는 받은 사랑 부모님과 할머니에게 보답하면서 살겠습니다. 멋있다고 남들에게 자랑하는 소중한 동생들 부족한 오빠이자 형을 응원해줘서 고맙습니다.

글로써 감사의 말을 전해드려 죄송합니다. 그리고 언급하지 못했지만 항시 응원해주시고 도와주셨던 모든 분들에게 다시 한번 감사의 말을 전합니다.