



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

등가 강도 및 등가 내구성 설계에
따른 바텀애쉬 잔골재 활용
콘크리트의 경제성 및 환경영향
분석

조선대학교 대학원

건축공학과

김정은

등가 강도 및 등가 내구성 설계에
따른 바텀애쉬 잔골재 활용
콘크리트의 경제성 및 환경영향
분석

Economical and environmental impact analysis of
concrete using bottom ash fine aggregate according to
equivalent strength and equivalent durability design

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

건축공학과

김정은

등가 강도 및 등가 내구성 설계에
따른 바텀애쉬 잔골재 활용
콘크리트의 경제성 및 환경영향
분석

지도교수 김 형 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 04월

조선대학교 대학원

건축공학과

김 정 은

김정은의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 부교수 김태훈 (인)

위원 조선대학교 교수 조창근 (인)

위원 조선대학교 교수 김형기 (인)

2022년 05월

조선대학교 대학원

<목 차>

제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 방법 및 범위	4
제2장 문헌 조사 및 선행연구	6
제1절 바텀애쉬	6
1. 바텀애쉬의 정의	6
2. 바텀애쉬의 물리적 특성	6
3. 바텀애쉬의 화학 성분	9
제2절 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 특성	11
1. 굵지않은 콘크리트의 작업성	12
2. 굵은 콘크리트의 압축강도	13
3. 굵은 콘크리트의 휨 강도	15
4. 굵은 콘크리트의 내구성	16
제3장 BA를 잔골재 대체제로 사용한 모르타르의 W/C 및 BA 대체율에 따른 물리적 성능 및 내구성 분석	18
제1절 실험개요	18
제2절 사용재료 및 배합비	18
제3절 실험방법	24
1. 물리적 성능 분석	24
2. 내구성 분석	25
제4절 실험결과	27

1. Mortar의 압축강도 측정 결과	27
2. Mortar의 염해 침투 깊이 측정 결과	30
3. Mortar의 탄산화 깊이 측정 결과	33
4. 소결	36

제4장 BA를 잔골재 대체제로 사용한 모르타르의 등가 강도 및 등가 내구성 설계

.....	37
제1절 실험 개요	37
제2절 사용재료 및 배합비	37
제3절 실험방법	37
제4절 실험결과	37

제5장 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 경제성 및 환경 영향 분석

.....	42
제1절 실험개요	42
제2절 실험방법	42
1. 경제성 평가	42
2. 환경 영향 평가	61
제3절 실험결과	73
1. 경제성 측면	73
2. 환경적 측면	74

제6장 결론

참고문헌79

<표 목차>

[표 2-1] 바텀애쉬의 물리적 특성	7
[표 2-2] 바텀애쉬의 화학적 성질	10
[표 2-3] 바텀애쉬가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향	11
[표 2-4] 바텀애쉬가 콘크리트의 시공성에 미치는 영향	13
[표 3-1] 바텀애쉬 및 모래의 비중 및 흡수율	19
[표 3-2] 조립률 실험 결과	19
[표 3-3] Mix ratio	21
[표 3-4] Mix proportions	24
[표 3-5] 염해 침투 깊이 측정 결과	31
[표 3-6] 탄산화 침투 깊이 측정 결과	34
[표 5-1] 기동식 건축물 개요	43
[표 5-2] 벽식 건축물 개요	44
[표 5-3] 노출 범주 및 등급	45
[표 5-4] 내구성 확보를 위한 요구조건	46
[표 5-5] 기동식 건축물 사용된 부재 단면 크기	47
[표 5-6] 기동식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (24 MPa)	49
[표 5-7] 기동식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (30 MPa)	50
[표 5-8] 벽식 건축물 사용된 부재 단면 크기	51
[표 5-9] 벽식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (24 MPa)	52
[표 5-10] 벽식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (30 MPa)	53
[표 5-11] 기동식 건축물 기존 24 MPa 물량 산출 결과표	55
[표 5-12] 기동식 건축물 변경 30 MPa 물량 산출 결과표	56
[표 5-13] 벽식 건축물 기존 24 MPa 물량 산출 결과표	57
[표 5-14] 벽식 건축물 변경 30 MPa 물량 산출 결과표	59
[표 5-15] 24 MPa의 기본 배합설계	61
[표 5-16] 30 MPa의 기본 배합설계	61
[표 5-17] 재료별 가격	61
[표 5-18] 콘크리트의 환경 하중 평가에 사용되는 LCI 데이터베이스 요약	63
[표 5-19] 기동식 건축물 CO ₂ 평가를 위한 성능평가표(24 MPa)	65
[표 5-20] 기동식 건축물 CO ₂ 평가를 위한 성능평가표(30 MPa)	67
[표 5-21] 벽식 건축물 CO ₂ 평가를 위한 성능평가표(24 MPa)	69
[표 5-22] 벽식 건축물 CO ₂ 평가를 위한 성능평가표(30 MPa)	71

[표 5-23] 대상 건축물 경제성 평가 결과74

[표 5-24] 대상 건축물 CO2 평가 결과76

<그림 목차>

[그림 1-1] 본 연구 흐름도	5
[그림 2-1] 다양한 크기의 바텀애쉬	8
[그림 2-2] Tanjung Bin 발전소에서 추출한 바텀애쉬	8
[그림 2-3] 다공성 및 불규칙한 모양의 Mae Moh 발전소 바텀애쉬	8
[그림 2-4] 100% 모래와 40% 바텀애쉬를 혼합한 FESEM 미세구조	14
[그림 2-5] 바텀애쉬가 함유된 혼합물의 휨 강도 결과	16
[그림 2-6] 다양한 혼합물의 황산염 저항 결과	17
[그림 3-1] 사용재료	20
[그림 3-2] 압축강도 측정에 사용된 몰드	24
[그림 3-3] 압축강도 측정기	24
[그림 3-4] 내구성 분석에 사용된 몰드	25
[그림 3-5] 염해 측정 과정	26
[그림 3-6] 염해 측정 후	26
[그림 3-7] 탄산화 측정 과정	27
[그림 3-8] 탄산화 측정 후	27
[그림 3-9] 상온 20℃ 양생 28일 압축강도 측정 결과	28
[그림 3-10] 저온 5℃ 양생 28일 압축강도 측정 결과	29
[그림 3-11] 91일 기준 염해 침투깊이 측정 결과	32
[그림 3-12] 180일 기준 탄산화 깊이 측정 결과	35
[그림 4-1] 선형회귀분석을 통한 압축강도 결과 비교	39
[그림 4-2] 선형회귀분석을 통한 염해 깊이 결과 비교	40
[그림 4-3] 선형회귀분석을 통한 탄산화 깊이 결과 비교	41

ABSTRACT

Economical and environmental impact analysis of concrete using bottom ash fine aggregate according to equivalent strength and equivalent durability design

Kim, Jeong eun

Advisor : Prof. Kim hyeong ki, Ph.D

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

When industrial waste is used as concrete, it will be more advantageous in terms of economic and environmental aspects if it does not affect its physical properties. Therefore, in the case of using bottom ash as a fine aggregate for concrete, the environmental and economic feasibility of this material was judged by using the 'equivalent strength and equivalent durability mixed design'. The formula was established through the compressive strength according to the water-cement ratio and bottom ash replacement rate. After that, economical and environmental impact analysis was conducted in consideration of material cost and transportation cost. Accordingly, floor ash can be used as basic data that it is suitable to be used as a substitute for fine aggregate in concrete.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적

현재 개발사업, 노후화된 건축물의 구조 변경, 증축 등을 이유로 건축자재, 특히 콘크리트에 대한 수요가 증가하고 있다. 자원의 소비가 많은 콘크리트의 제조는 환경에 부정적인 영향을 미치고 있다. 콘크리트의 수요가 증가함에 따라 잔골재와 굵은 골재와 같은 더 많은 원자재를 공급해야 한다. 전 세계적으로 골재 시장은 매년 5.2%씩 증가할 것으로 예상되고 있다¹⁾. 또한 콘크리트 재료 중 하나인 모래의 수요 또한 증가하고 있는데, 모래의 과도한 채굴은 환경과 생물에 영향을 끼친다.

국토교통부 제 5차 골재수급기본계획에 따르면²⁾, 천연자원인 골재는 보존량이 지속적으로 감소하고, 더불어 환경 규제 및 주민들의 반대로 인해 골재 채취에 어려움이 있는 상황이다. 골재는 건설사업의 기본 재료로서, 안정적인 공급이 꼭 필요하지만 수급에 어려움이 있기 때문에 이를 해결하기 위한 방안이 시급하다. 산림 및 파쇄모래 등 대안마저 부실한 점을 감안하면 모래 수급은 계속 어려워지고 이에 따른 자재단가 상승이 불가피할 것으로 보여진다. 최근 부족한 모래 자원 공급을 위해 바닷모래를 채취하여 염분을 제거하여 사용하였지만, 최근 수산업계의 반발로 인해 “남해 EEZ 골재 채취”에 큰 차질이 발생하였다. 따라서 정부는 2022년까지 천연골재 채취량을 줄이고, 골재원의 다변화를 통해 부족한 골재 공급량을 충족시키고자 한다. 이러한 문제는 현재 국내 뿐 아니라 세계 곳곳에서 이와 같은 문제들이 발생하고 있다¹⁾.

러시아의 우크라이나 침공에서 비롯된 유가 폭등과 더불어 삼표 산업의 채석강 토사붕괴 사고로 인해 시멘트 등 원자재 수급이 어려워지고 있으며 재건축 수요가 증가하면서 늘어난 공사 물량으로 인해 골재 수요 및 가격이 폭등할 것으로 예상된다. 하지만 이러한 수요에 미치지 못하는 모래 부족 문제는 모래의 사제기 현상, 레미콘 제조 시 품질 하락 등으로 부실 시공을 유발하고, 품질 문제가 발생하여 현장 사고로 이어질 수 있는 큰 문제이다.

국내의 발전 설비 중 비율이 가장 높은 발전시설은 화력발전소이다. 최근 미세먼지 문제가 이슈화되고 환경 피해 등의 우려로 화력발전소 건설이 기피되고 있으나, 화력발전을 대체할만한 신재생 에너지의 보급은 아직까지 더딘 상태이다³⁾. 국가 정책의 방향을 살펴보기 위해 “제 9차 전력수급계획”을 확인해보면⁴⁾, 2034년까지 석탄화력발전소를 60기에서 30기로 줄이기로 했고, 2050년에는 전면 폐지를 선언했다. 새 정부에서도 전체 발전량에서 재생 에너지가 차지하는 비중을 현재 7%에서 오는 2050년까지 20~30%로 높이기로 했다. 이에 따라 2050년까지의 석탄회의 발생량에 따른 대안이 필요한 것으로 보이며, 회처리장 설계 계획 없이 발전소 건설이 계획되는 경우도 발생하여 석탄회의 재활용 방안 마련이 시급한 것이 현실이다.

현재 국내에서 판매되고 있는 잔골재의 가격은 부피 당 40,000원 수준이며, 천연 골재 채취량을 줄이기 위한 정부의 방침 및 천연자원의 고갈로 인해 부피 당 45,000원까지 가격이 상승할 것으로 예상되고 있다. 천연 모래의 공급량 부족으로 인해 가격은 증가하고 있고 비용적 측면에서 보았을 때도 석탄회를 잔골재 대체재로 개발하여 저렴한 가격으로 생산이 가능하기 때문에 긍정적 효과가 나타날 것이다. 또한 기존 현장에 사용된 천연모래는 자원 고갈 및 심각한 환경 훼손을 야기하는 반면 화력 발전소 및 철강 제철소에서 발생하는 바텀애쉬를 주 원료로 하는 친환경 기술을 개발한다면 더 큰 효과를 불러올 것이라고 기대한다¹⁾.

바텀애쉬는 처리 과정 중 재활용 사업이나 매립지에 매립되는 경우일지라도 환경단체, 지역주민, 기타 이해관계자가 가지고 있는 환경적으로 안전하지 않다는 인식으로 빈번한 갈등이 지속되고 있다. 따라서 바텀애쉬의 이용 및 재활용 시 접촉되는 부위에 따라 각기 다른 지침, 사후관리 규정 제정 및 연구개발이 이루어져야 한다. 특히 바텀애쉬의 처리과정에 따른 환경영향 최소 방안으로 석탄회의 유효 이용 및 환경 관리 방안에 대한 논의 및 연구가 필요하고, 국내 바텀애쉬를 대량으로 재활용 할 수 있는 유효 이용 방안으로 다량의 바텀애쉬를 폭넓게 활용할 수 있는 기술 개발이 필요한 실정이다⁵⁾.

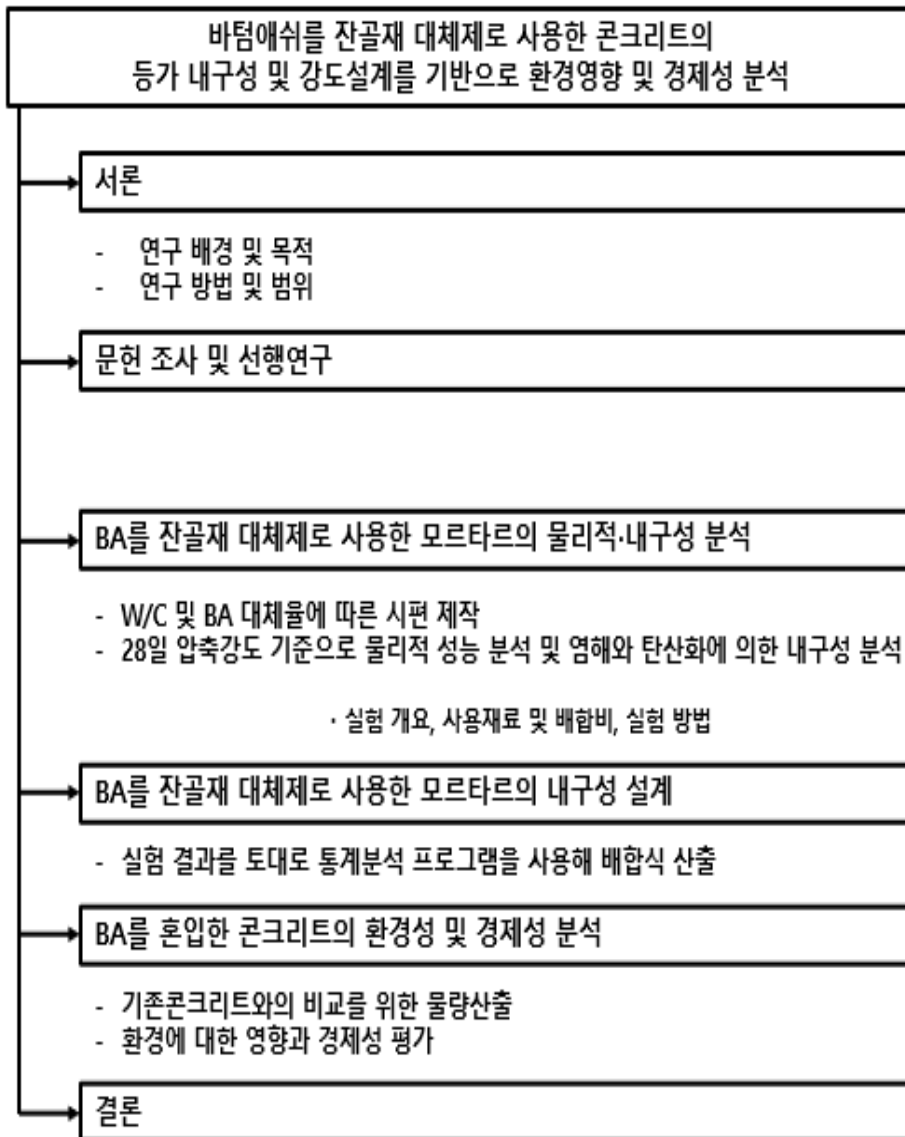
본 연구는 잔골재 치환재로 사용할 수 있는 바텀애쉬의 배합설계를 위해 등가강도 설계 및 등가내구성 설계 개념을 도입하여, 이를 통해 결정된 배합설계 관련

수식을 이용해 본 재료를 콘크리트 규모로 사용했을 시 실제 구조물의 구조설계 결과 어느 정도 재료비를 산정할 수 있는지에 대한 결과 제공한다. 또한 실제 경제성 측면에서 바텀애쉬의 활용 가능성을 평가하기 위한 지표를 제시한다. 또한 바텀애쉬 혼입 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 산업부산물 재활용 외에 긍정적 환경영향이 다소 감소할 가능성이 있다. 따라서 바텀애쉬 골재가 콘크리트의 환경영향 평가에 미치는 정량적 평가 자료는 바텀애쉬 골재의 활용을 위한 중요한 자료가 될 수 있다. 이에 따라 일반 콘크리트와 바텀애쉬 혼입 콘크리트의 CO₂ 배출량의 비교 결과 또한 제시한다. 그래서 바텀애쉬 잔골재가 콘크리트 구조물에 경제성 및 환경영향 측면을 고려하여 활용되기 위한 기초적 자료로 활용하고자 한다.

제2절 연구 방법 및 범위

본 논문에서는 여수화력발전소에서 배출된 바텀애쉬를 사용하여 실험을 진행하였으며, 분쇄한 바텀애쉬와 분쇄하지 않은 바텀애쉬, 두 종류의 바텀애쉬를 사용하였다. 이후 두 종류의 바텀애쉬의 기초물성을 검토하였다. 또한, 바텀애쉬를 사용한 모르타르의 물리적 특성 및 내구성을 평가하였고, 다음과 같은 방법을 통해 연구를 진행하였다. [그림 1-1]에 본 연구의 방법을 요약하였다.

- 1) 본 연구에서 사용된 바텀애시는 총 2종류를 사용하였다. 분쇄한 바텀애쉬와 분쇄하지 않은 바텀애쉬. 분쇄되지 않은 바텀애쉬는 체에 걸러 150 μm 미만의 재료만 선별하여 사용하였다. 이후 24시간동안 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 건조하여 실험을 진행하였다.
- 2) 분쇄한 바텀애쉬 모르타르, 분쇄하지 않은 바텀애쉬 모르타르 총 2종류 모르타르를 제조하였고, 바텀애시의 모래 치환량은 0%, 5%, 10%, 15%, 20%로 설정하였다.
- 3) 2종류 모르타르의 물리적 특성을 검토하고자 치환량을 각각 다르게 하여 비교군을 선정하였으며, 시험방법으로는 압축강도를 평가하였다. 또한, 2종류 모르타르의 내구성을 평가하기 위하여 KS F 2717에 준하여 염화물 침투량 실험을 진행하여 염소이온 확산계수를 비교·검토하였으며, KS F 2596에 준하여 탄산화 깊이 측정 실험을 진행하여 탄산화 속도계수를 비교·검토하였다.
- 4) 위의 실험 결과를 토대로 바텀애쉬의 배합설계를 위해 등가 강도 및 등가 내구성 설계 개념을 도입하여 진행하였다. 수식을 통해 본 재료를 콘크리트 규모로 사용했을 시 실제 구조물의 구조설계 결과 어느 정도 재료비를 산정할 수 있는지에 대한 결과를 도출해냈다. 이후 환경 영향 평가 및 경제성 분석을 통해 바텀애쉬의 활용 가능성을 평가했다.



[그림 1-1] 본 연구 흐름도

제2장 문헌조사 및 선행연구1)

제 1절 바텀애쉬

1. 바텀애쉬 정의

바텀애쉬(CBA)는 석탄 연소의 불연소 물질이며 석탄재의 약 10~30%를 차지한다. 석탄 화력발전소에서 석탄을 40~80 μm 정도로 분쇄하여 뜨거운 공기와 고속으로 (炉)내에 주입하면 1,500 \pm 200 $^{\circ}\text{C}$ 온도 범위에서 부유상태로 순간적으로 연소하게 된다. 석탄회는 발생장소에 따라 바텀애쉬, 신더애쉬, 이피애쉬, 중공회, 플라이애쉬로 구분된다. 바텀애쉬는 노벽, 과열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 자중에 의해보일러 하부의 호퍼에 떨어져 급냉된 후, 호퍼 하부에 분쇄기를 통해 입경 1~2.5 mm 범위로 파쇄되어 회처리장으로 이송된다⁶⁾.

화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬와 바텀애쉬를 적절하게 처리하기 위한 석탄회 처리시스템은 각 발전소별 석탄회처리 능력, 수송방법, 입지조건, 운송조건 등 여러 가지 제반 환경에 따라 구성기기 및 설비에 차이가 있다. 바텀애쉬 처리 시스템에는 기본적으로 직접 석탄회 처리방식(Direct Sluicing System), 탈수조 저장방식(Storing System in Dewatering Bin), 재순환방식(Water Recirculation System) 및 수침 기계방식(Chain Conveyer System)등으로 구분할 수 있다⁷⁾.

2. 바텀애쉬의 물리적 특성

바텀애쉬는 배열이 균일하지 않은 스폰지 질감의 각지고 불규칙한 형태이다⁸⁾. [그림2-1]은 다양한 질감과 크기의 바텀애쉬를 보여준다⁹⁾. 바텀애쉬는 내부에 공극이 많아 모래보다 가볍고 부서지기 쉽다. [표2-1]은 바텀애쉬의 물리적 특성을 보여주며, 바텀애쉬의 비중은 1.39에서 2.60까지 다양하다. 이러한 값은 바텀애쉬 내부에 공극이 존재하기 때문이며⁸⁾ 이는 석탄 연소 방법에 따라 달라진다¹⁰⁾. 이러한 특성은 약 11.61에서 32.23%의 높은 흡수율로 이어진다. [그림2-2]와 [그림

1) 이 장은 Muthusamy, K., Rasid, M. H., Jokhio, G. A., Budiea, A. M. A., Hussin, M. W., & Mirza, J. (2020)의 Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review. 논문의 내용을 인용한 것임.

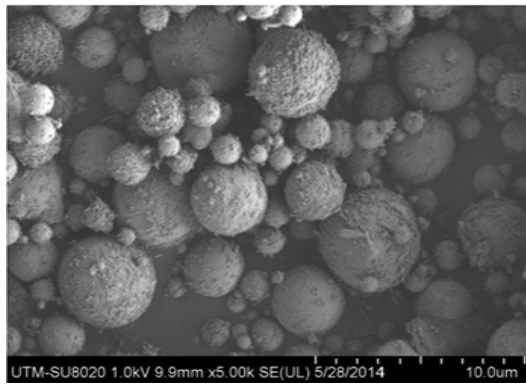
2-3]은 각각 다른 발전소에서 추출한 바텀애쉬의 FESEM을 보여준다.

[표 2-1] 바텀애쉬의 물리적 특성

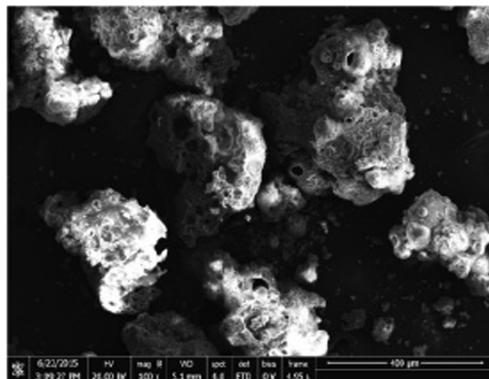
비중	미세도 계수	흡수율 (%)
1.50 ¹¹⁾	-	30.40
1.39 ¹²⁾	-	12.10
1.39 ¹³⁾	-	6.10
2.09 ¹⁴⁾	-	13.60
1.39 ¹⁵⁾	-	12.10
1.87 ¹⁶⁾	2.36	5.45
1.39 ¹⁷⁾	1.37	31.48
- ¹⁸⁾	-	11.17
2.22 ¹⁹⁾	2.71	20.15
1.88 ²⁰⁾	3.44	11.61
2.28 ²¹⁾	-	32.23
1.87 ²²⁾	2.34	5.46
2.33 ²³⁾	2.09	-
1.80 ²⁴⁾	-	2.77
2.08 ²⁵⁾	1.50	6.80



[그림 2-1] 다양한 크기의 바텀애쉬⁹⁾



[그림 2-2] Tanjung Bin 발전소에서 추출한 바텀애쉬²⁰⁾



[그림 2-3] 다공성 및 불규칙한 모양의 Mae Moh 발전소 바텀애쉬²³⁾

3. 바텀애쉬 화학성분

다른 나라 연구원들의 연구에 따른 바텀애쉬의 화학적 구성은 [표 1-2]에 제시되어 있다. 바텀애쉬의 화학적 함량은 석탄의 원산지와 소각 방법에 따라 다르다. 바텀애쉬는 실리카, 알루미나, 철의 비율이 전체 화학조성의 70 ~ 92%에 이르는만큼 높다. 굵은 크기의 CBA는 포졸란 반응성을 가지고 있으며 이것을 더 미세한 크기로 만들면 규소와의 반응성을 높일 수 있다²⁶⁾. 기존 연구원들은 에너지 절약과 사용 편의성을 증가시키는 과정없이 자연 상태에서 CBA를 활용, 콘크리트 재료로서 사용성을 높이는 연구를 한 것으로 보인다.

[표 2-2] 바텀애쉬의 화학적 성질

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	SO3	LOI	SiO2+ Al2O3 + Fe2O3
41.70 ²⁷⁾	17.10	6.63	22.50	4.91	1.38	0.40	3.83	-	0.42	1.13	65.43
61.80 ¹¹⁾	17.80	6.97	3.19	1.34	0.95	2.00	0.88	0.20	0.79	3.61	86.57
57.90 ¹³⁾	22.60	6.50	2.00	3.20	0.08	0.60	-	-	-	2.40	87.00
60.70 ²⁸⁾	18.30	6.56	3.25	1.28	0.89	2.12	0.95	-	0.82	4.13	85.56
56.00 ²⁹⁾	26.70	5.80	0.80	0.60	0.20	2.60	1.30	-	0.10	4.60	88.50
54.80 ³⁰⁾	28.50	8.49	4.20	0.35	0.08	0.45	2.71	0.28	-	2.46	91.79
57.76 ³¹⁾	21.58	8.56	1.58	1.19	0.14	1.08	-	-	0.02	-	87.90
47.53 ³²⁾	20.69	5.99	4.17	0.82	0.33	0.76	-	-	1.00	-	74.21
52.10 ¹⁸⁾	18.34	11.99	6.61	4.85	2.43	1.57	0.87	-	-	4.13	82.43
62.32 ¹⁹⁾	27.21	3.57	0.50	0.95	0.70	2.58	2.15	-	-	-	93.10
45.30 ²⁰⁾	18.10	19.84	8.70	0.69	-	2.48	3.27	-	0.30	0.10	83.24
55.10 ²¹⁾	28.10	8.30	1.10	0.30	-	1.50	-	-	0.30	3.90	91.50
58.70 ³³⁾	20.10	6.20	9.50	1.60	0.10	1.00	-	1.00	0.40	0.80	85.00
52.20 ³⁴⁾	27.50	6.00	5.90	1.70	0.13	0.60	1.53	0.74	-	1.80	85.70
34.00 ²²⁾	36.00	16.80	2.40	-	-	5.90	3.80	-	-	-	86.80
48.00 ³⁵⁾	20.10	8.77	7.11	3.13	-	-	1.11	-	-	8.10	76.87
59.82 ³⁶⁾	27.76	3.77	1.86	0.70	1.61	0.33	-	-	1.39	4.69	91.35
52.50 ⁹⁾	17.65	8.30	4.72	0.58	-	-	2.17	-	-	4.01	78.45
50.49 ²⁴⁾	27.56	10.93	4.19	1.24	0.57	0.82	2.23	0.24	0.10	1.11	88.98
66.90 ²⁵⁾	17.70	6.50	1.56	0.51	-	-	-	-	-	2.65	91.10
47.10 ³⁵⁾	23.10	5.70	7.80	1.50	0.70	5.30	1.20	-	1.50	2.52	75.90
44.10 ³⁷⁾	9.21	24.30	13.00	1.88	-	1.25	-	-	-	-	77.61

제 2절 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 특성

[표 2-3] 바텀애쉬가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향

CBA 대체율 (%)	결과		
	압축강도	휨 강도	미세도 계수
0, 20, 30, 40, 50 ³⁸⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	-
0, 10, 15, 25, 30 ³⁹⁾		10% 대체 증가	
25, 50, 75, 100 ⁴⁰⁾	모든 대체 감소		
0-100 ¹¹⁾	30% 대체 증가	-	-
20-50 ⁴¹⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	-
10-50 ¹³⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	-
25, 75, 100 ⁴²⁾	75% 대체 증가	-	-
0-25 ⁴³⁾	10% 대체 증가	10% 대체 증가	-
0-100 ⁴⁴⁾	25% 대체 증가	-	-
0-100 ³⁰⁾	모든 대체 감소	-	-
0-100 ¹⁵⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	모든 대체 감소
10-50 ³⁰⁾	모든 대체 감소	-	-
10-50 ⁴⁵⁾	모든 대체 감소	-	-
25-100 ¹⁶⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	모든 대체 감소
0-20 ⁴⁶⁾	10% 대체 증가	-	-
0-30 ³¹⁾	모든 대체 감소	-	-
10-50 ⁴⁷⁾	20% 대체 증가	30% 대체 증가	-
0-100 ³²⁾	모든 대체 감소	-	모든 대체 감소
5-30 ⁵⁰⁾	10% 대체 증가	-	-
10-50 ⁴⁹⁾	모든 대체 감소	모든 대체 감소	모든 대체 감소
0, 30, 50, 75, 100 ¹⁷⁾	최대 75%까지 사소한 차이	-	-
10-40 ⁵⁰⁾	30% 대체 증가	-	-
0-100 ²⁰⁾	50% 대체 증가	50% 대체 증가	-
10-30 ⁵¹⁾	10% 대체 증가	10% 대체 증가	-
0-50 ⁵²⁾	20% 대체 증가	20% 대체 증가	-
0-20 ⁵³⁾	15% 증가	-	-

[표 2-3]은 콘크리트의 기계적 특성에 영향을 미치는 바텀애쉬를 요약한 것이다. 콘크리트의 압축 강도, 휨 강도, 탄성계수는 CBA를 잔골재 치환으로 사용할 때 영향을 받는다.

1. 굳지않은 콘크리트의 작업성

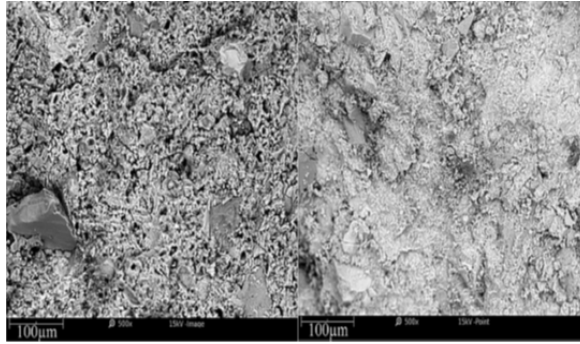
콘크리트 혼합 성분으로서의 바텀애쉬 사용은 [표 2-4]의 작업성에 영향을 미친다. 건조된 CBA를 사용했을 시 바텀애쉬의 양이 증가함에 따라 슬럼프가 계속 감소한다고 연구한 연구원들은 보고했다⁽⁵⁴⁾⁽³²⁾⁽¹⁶⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁴¹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵³⁾. 또한 바텀애쉬가 10~30%로 사용되면 시공성이 높은 콘크리트의 슬럼프 플로우와 유동성이 떨어지게 된다. 이것은 바텀애쉬 내부의 공극에 혼합수를 저장하여 슬럼프가 감소하게 되기 때문이다⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾. 바텀애쉬의 물리적 특성, 불규칙한 모양, 표면 질감 또한 혼합물의 작업성을 낮추는 원인이다. 입자 크기가 300mm 미만인 CBA를 사용하면 모래에 비해 표면적이 넓어져 작업성이 감소한다⁽⁴¹⁾⁽⁵³⁾. 반면, 표면 건조 내부 포화 상태의 바텀애쉬를 사용하게 되면 작업성이 향상된다는 이야기도 있다⁽²⁰⁾. 모든 연구자들은 CBA의 특성에 따라 작업성에 영향을 미친다는 것에 동의하고 있다.

[표 2-4] 바텀애쉬가 콘크리트의 시공성에 미치는 영향

CBA 대체율 (%)	크기	효과
0,30,50,70,100 ⁵⁶⁾		작업성 증가
0,30,50,70,100 ¹¹⁾	5mm 체 통과	작업성 증가
0,30,50,70,100 ⁵⁷⁾		작업성 증가
0-50 ⁴¹⁾	75um 체 통과	작업성 감소
10,20,30 ⁵⁶⁾		작업성 감소
0,25,50,75,100 ³⁰⁾	5mm 체 통과	작업성 증가
25,50,75,100 ¹⁶⁾	4.75mm 체 통과	작업성 감소
0,25,50,75,100 ¹¹⁾	4.75mm 체 통과	작업성 25% 향상 작업성 50,75,100%감소
0,10,15,20,25,30 ³¹⁾	5mm 체 통과	작업성 감소
0,25,50,75,100 ²⁰⁾	4.75mm 체 통과	작업성 25% 향상 작업성 50,75,100%감소
0,5,10,15,20 ⁵³⁾	600um 체 통과	작업성 감소

2. 굵은 콘크리트의 압축강도

일반적으로 바텀애쉬가 모래를 부분적으로 대체할 때 콘크리트 하중 지지력에 영향을 미치며 이는 적정량의 바텀애쉬 비율이 콘크리트 강도를 향상시킨다고 많은 논문은 보고한다. 일반 콘크리트의 잔골재를 CBA로 10% 대체하면⁴³⁾⁴⁸⁾ 압축강도가 증가하고⁵¹⁾ 15%를 더 미세한 크기의 CBA를 사용하면 다른 대체제에 비해 최적의 함량으로 압축강도를 증가시킬 수 있다⁵³⁾. 또한 건조된 CBA가 모래를 100% 대체하면 콘크리트의 작업성이 일정하게 유지되기 때문에 압축강도가 증가하는 결과를 가져온다¹¹⁾. [그림 1-4]와 같이 내부의 백백함을 유지하기 위해서는 적정량의 CBA를 사용하는 것이 중요하다²⁴⁾. 전반적으로, 물리적, 화학적 특성을 고려하여 적절한 양의 바텀애쉬를 사용하면 콘크리트의 강도를 높일 수 있다.



[그림 2-4] 100% 모래와 40% 바텀애쉬를 혼합한 FESEM 미세구조²⁴⁾

바텀애쉬의 사용은 장기적으로 콘크리트의 강도 증가를 일으킨다¹⁷⁾²⁰⁾³²⁾⁴²⁾⁴⁹⁾⁶⁰⁾. CBA를 혼입한 콘크리트의 강도는 28d가 되면 일반 콘크리트보다 낮지만, 이후 180일이 되면 CBA가 50%, 80%로 대체된 콘크리트의 강도가 일반 콘크리트보다 높아진다³²⁾. 하지만 CBA의 대체율이 높아지면 더 많은 수의 공극이 형성되어 강도가 떨어지게 된다. 이것은 포졸란 반응을 일으키는 성분이 내부에 있기 때문인데, 포졸란 반응은 초기 강도 발현을 억제하고 불충분한 CSH 겔 형성과 높은 다공성을 유발해 콘크리트 강도에 악영향을 미치게 된다. 모래의 무게로 바텀애쉬를 대체하면 일반 콘크리트 강도와 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 강도가 감소한다는 사실을 연구한 몇몇 연구자들이 있다. 이것은 콘크리트에서 물 시멘트비는 동일하지만 30%, 50%, 70%, 100%의 대체율로 모래를 건조된 CBA로 대체했을 때, 콘크리트 혼합물의 물 감소로 인해 강도가 낮아졌다는 사실로 알 수 있다. 또한, CBA 입자는 공극이 많고 일반 골재보다 더 큰 하중을 견딜 수 없는 것도 강도 저하를 일으키는 요인 중 하나이다¹³⁾.

그러나 고성능 감수제를 사용하여 CBA를 콘크리트 혼합물에 사용하는 것은 또 다른 결과를 가져온다¹⁶⁾⁵⁰⁾⁶⁰⁾. 고성능 감수제를 사용하여 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 모래 양의 절반이 바텀애쉬로 대체되더라도 큰 영향을 받지 않았다¹⁶⁾. CBA를 50%로 대체하고 고성능 감수제와 함께 사용하면 일반 콘크리트보다 강도가 더 높은 콘크리트가 생성된다⁶⁰⁾. 또한 바텀애쉬는 약 49MPa의 강도를 가진 강섬유 콘크리트를 생산하기 위한 잔골재 대체제로 사용될 수도 있다⁴⁵⁾. 이것은

고성능 감수제는 시멘트 입자를 분산시키고, 혼합과 압축 과정을 용이하게 하여 콘크리트를 잘 압축시키기 때문이다.

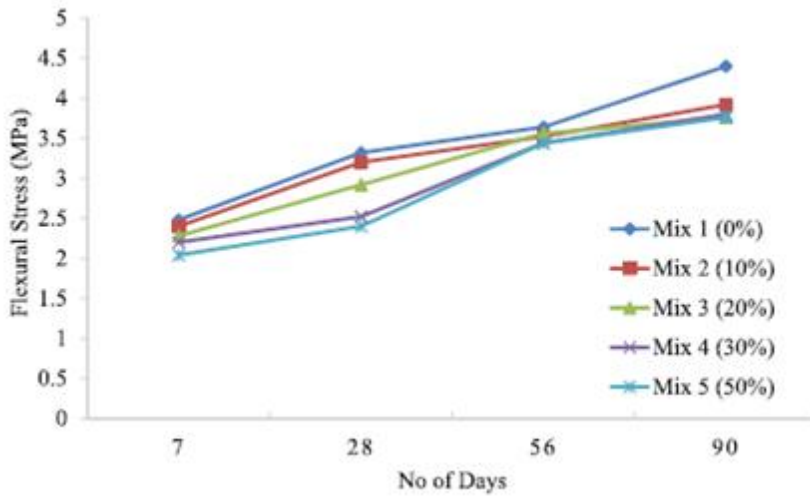
바텀애쉬가 함유된 콘크리트의 성능은 바텀애쉬 대체율, 바텀애쉬의 물리적 특성, 고성능 감수제 사용, 물-시멘트비 비율 등에 영향을 받는 것으로 문헌 연구 결과 나타났다. 미세한 크기의 바텀애쉬를 적절한 대체율로 혼입하면 포졸란 반응과 필터 효과를 통해 콘크리트 강도를 높일 수 있다. 다공성이며, 표면적이 거친 재료이기 때문에 많은 양이 대체될수록 물의 양이 증가하여 작업성이 감소되어 압축과정에서 어려움을 겪게 되고 이는 결국 높은 공극과 낮은 강도의 콘크리트가 생성되게 된다. 다만 대체되는 비율을 증가시키며 슬럼프를 조절하는 방식은 만족스러운 결과를 가져온다.

3. 굳은 콘크리트의 휨 강도

바텀애쉬를 혼입한 콘크리트는 압축강도와 마찬가지로 휨 강도의 발달에도 유사한 경향을 보인다. 향상된 휨 강도 성능은 CBA의 대체율이 10%, 20% 및 25%에서 보고되었다. 긴 양생 기간은 강도 발현을 돕는 CSH 겔의 더 많은 생성으로 포졸란 반응을 일으키게 한다. 모래를 최대 50%까지 바텀애쉬로 대체하면 18시간 양생 후 강도가 향상된 콘크리트가 생성된다⁴⁴⁾.

공극이 있는 바텀애쉬의 내부 구조는 시멘트 페이스트를 약하게 하여³²⁾ 콘크리트의 휨 강도에 영향을 준다. 28일 양생 시 바텀애쉬를 30%, 40% 대체율로 혼합하면 [그림 2-5]에서와 같이 일반 콘크리트에 비해 각각 81%, 86%의 강도를 갖는 콘크리트가 된다. 바텀애쉬의 대체율이 40%를 초과하면 강도에 부정적인 영향을 미친다¹³⁾.

따라서, 바텀애쉬로 모래 전체를 대체하면 기존 콘크리트보다 강도가 24% 낮은 콘크리트가 생성된다¹⁶⁾. 연구 결과들의 차이는 바텀애쉬의 크기와 규소 함량의 차이, 그리고 다른 혼화제의 사용 때문이다. 시멘트 내에서 바텀애쉬의 반응을 판단하기 위해서는 바텀애쉬가 서로 다른 환경에서 콘크리트의 장기 휨 강도 시험이 필요하다.



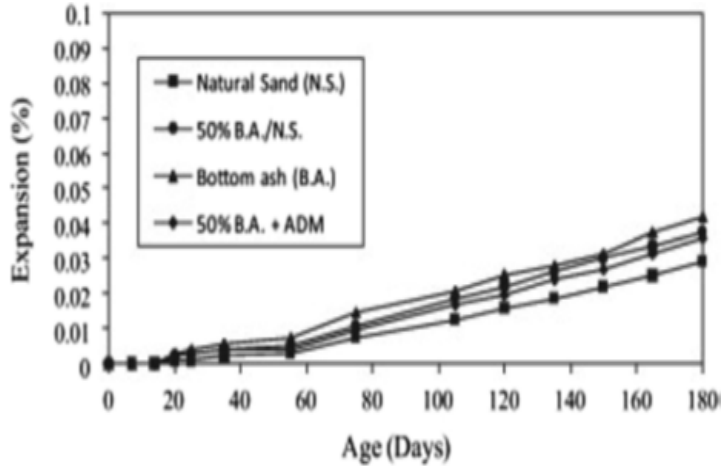
[그림 2-5] 바텀애쉬가 함유된 혼합물의 휨 강도 결과¹⁶⁾

4. 굳은 콘크리트 내구성

지속 가능한 자재를 활용하여 내구성 콘크리트를 개발하는 것은 건설 산업의 필수적인 요소가 되었다⁵⁹⁾. 이와 관련하여 바텀애쉬를 함유한 콘크리트로 시공된 구조물은 황산염 및 산성과 같은 불리한 환경 조건에 노출되기도 한다. 이 분야에서 이용할 수 있는 연구는 한정되어 있지만 바텀애쉬를 재료로 사용할 경우 콘크리트의 내구성 성능에 어떤 영향을 미칠지는 지속적으로 연구해야 할 분야이다.

가. 황산염에 대한 저항성

다른 연구자인 Rafieizonooz 외 연구진⁶⁰⁾은 바텀애쉬가 혼합된 콘크리트가 황산 마그네슘 용액에 최장 210일동안 양생하였을 때 질량 손실을 보이지 않았다고 보고했다. Ghafoori와 Bucholc의 또 다른 연구에서는 바텀애쉬가 혼합된 콘크리트와 일반 콘크리트가 황산염 양생을 동일하게 진행하였을 때 유사한 경향을 보였다. 1년 후 동일한 연구원들⁶⁰⁾은 [그림 2-6]과 같이 바텀애쉬가 혼합된 콘크리트가 일반 콘크리트보다 높은 질량 증가가 발생한 것을 발견했다. 포졸란 반응은 수산화 칼슘을 감소시키고 CSH 겔의 증가를 통해 밀도가 높은 콘크리트를 생성한다.



[그림 2-6] 다양한 혼합물의 황산염 저항 결과⁶⁰⁾

나. 산성에 대한 저항성

바텀애쉬가 혼합된 콘크리트가 최대 60일까지 산성 환경에서 양생되었을 때의 질량 손실은 일반 콘크리트보다 높았다⁶¹⁾. 또 다른 연구에서는 바텀애쉬가 혼합된 콘크리트를 염산 용액에 60일간 양생했을 때 바텀애쉬의 대체율이 10~50%로 증가할수록 강도 감소가 더 크다. 콘크리트의 공극은 모래가 바텀애쉬로 대체될수록 더 커진다¹²⁾. 콘크리트 내부에 공극이 존재하게 되면 산성용액이 스며들어 열화과정을 촉진하게 된다.

그리고 다른 연구자⁶²⁾는 바텀애쉬가 혼합된 콘크리트와 일반 콘크리트가 다른 장소에서 동일한 산성 환경에서 양생되었을 때 질량 감소가 거의 동일하다고 보고했다. 최근 또 다른 연구자⁶⁰⁾는 플라이애쉬가 혼합된 콘크리트가 산 환경에 노출되었을 때 CBA로 100% 대체하였을 때 더 높은 내구성을 보였다고 보고했다. 바텀애쉬는 포졸란 반응을 통해 수산화칼슘을 감소시켜 콘크리트의 투과성을 감소시켜 산성에 대한 내구성을 높이는 것으로 알려져있다⁶³⁾. 연구 결과의 차이는 사용된 바텀애쉬의 특성 때문일 수 있다. 크기가 더 미세한 바텀애쉬⁶⁴⁾에 비해 크기가 더 큰 바텀애쉬를 사용하면 공극이 더 큰 콘크리트가 생성되어 다른 물질의 흡수에 더 취약할 것으로 예상된다.

제 3장 BA를 잔골재 대체제로 사용한 모르타르의 W/C 및 BA 대체율에 따른 물리적 성능 · 내구성 분석

제 1절 실험 개요

본 장에서는 일반 포틀랜드 시멘트에 모래를 대체할 대체제로 분쇄한 바텀애쉬와 분쇄하지 않은 바텀애쉬를 혼입한 경우 각각의 물리적 성능 및 내구성을 조사하고 분석하였다. 바텀애쉬를 0%, 5%, 10%, 15%, 20%의 대체율로 잔골재를 대체하여 배합하였다. 이에 따라 상온 양생과 저온 양생에 따른 물리적 성능을 알아보고자 하였고, 양생 환경을 염해와 탄산화로 각각 다르게 하였을 때의 내구성도 분석하고자 한다. 따라서 실험 배합의 전체 시편들을 28일 압축강도 실험을 실시하고, 염해 및 탄산화 양생의 양생일수 또한 7일, 14일, 28일, 56일, 180일로 하여 각각 분석하였다.

제 2절 사용 재료 및 배합비

본 연구에서는 결합재로 사용한 재료는 총 4종류이다. 1종 포틀랜드 시멘트, 모래(Sand), 바텀애쉬(Bottom Ash) 2종류를 사용하였다. 바텀애쉬 2종류의 경우 아래와 같다. 분쇄한 바텀애쉬와 분쇄하지 않은(크기가 큰) 바텀애쉬. 모래는 1ton bag을 통해 운반 후 사용하였고 바텀애시 2종류는 여수 화력발전소에서 가져와 상온에서 마대에 포장된 상태로 저장되어 있다가 사용하였다. 모래와 바텀애쉬는 재료 그대로 비중 및 흡수율 실험과 조립률 실험을 진행했다. [표 3-1]은 모래와 바텀애쉬 2종의 비중 및 흡수율 실험 결과이다. 모래의 비중은 2.61이며 바텀애쉬의 비중은 각각 1.89, 1.99이다. [표 3-2]는 조립률 실험의 결과이다.

[표 3-1] 바텀애쉬 및 모래의 비중 및 흡수율

	진 비중	표건상태 비중	겉보기 비중	흡수율 (%)
BA 1	1.75	1.89	2.33	13.88
BA 2	1.66	1.99	2.18	5.07
모래	2.53	2.61	2.78	3.57

[표 3-2] 조립률 실험 결과

BA 1	BA 2	모래
1.59	4.16	3.07

[그림 3-1]은 본 실험에 사용한 사용 재료이다. [표 3-3]은 Mortar의 배합비로서, BA 0, BA 5, BA10, BA15, BA 20은 모래 대비 바텀애쉬를 0, 5, 10, 15, 20% 치환한 숫자이고, 0.55, 0.5, 0.45, 0.40, 0.35는 물시멘트비를 나타낸 숫자이다. [표 3-4]는 비중 및 배합비에 기반한 최종 배합표이다. 본 연구에서 사용되는 모래와 바텀애쉬의 경우 완전 건조하여 함수량 0%의 상태로 사용하였고, 모든 실험의 경우 동일한 유동성으로 배합을 진행하였다.



(a) 1종 포틀랜드 시멘트



(b) 모래



(c) 분쇄한 바텀애쉬



(d) 분쇄하지 않은 바텀애쉬

[그림 3-1] 사용재료

[표 3-3] Mix ratio

Mixture	Weight composition			
	Water	Cement	Sand	Bottom ash
BA0-0.55	0.55	1	2.5	0
BA5-0.55	0.55	1	2.375	0.090
BA10-0.55	0.55	1	2.25	0.180
BA15-0.55	0.55	1	2.125	0.271
BA20-0.55	0.55	1	2	0.361
BA0-0.50	0.5	1	2.5	0
BA5-0.50	0.5	1	2.375	0.090
BA10-0.50	0.5	1	2.25	0.180
BA15-0.50	0.5	1	2.125	0.271
BA20-0.50	0.5	1	2	0.361
BA0-0.45	0.45	1	2.5	0
BA5-0.45	0.45	1	2.375	0.090
BA10-0.45	0.45	1	2.25	0.180
BA15-0.45	0.45	1	2.125	0.271
BA20-0.45	0.45	1	2	0.361
BA0-0.40	0.4	1	2.5	0
BA5-0.40	0.4	1	2.375	0.090
BA10-0.40	0.4	1	2.25	0.180
BA15-0.40	0.4	1	2.125	0.271
BA20-0.40	0.4	1	2	0.361
BA0-0.35	0.35	1	2.5	0
BA5-0.35	0.35	1	2.375	0.090
BA10-0.35	0.35	1	2.25	0.180
BA15-0.35	0.35	1	2.125	0.271
BA20-0.35	0.35	1	2	0.361

[표 3-4] Mix proportions (BA 1) (계속)

Factor	W/C	Unit weight(g/m ³)			
		W (g)	C (g)	SA (g)	BA (g)
BA0-0.55	0.55	271.7	494.1	1235.1	0
BA5-0.55				1173.4	44.5
BA10-0.55				1111.6	89.1
BA15-0.55				1049.9	133.6
BA20-0.55				988.1	178.2
BA0-0.50	0.50	254.0	508.0	1270.0	0
BA5-0.50				1206.5	45.8
BA10-0.50				1143.0	91.6
BA15-0.50				1079.5	137.4
BA20-0.50				1016.0	183.2
BA0-0.45	0.45	235.2	522.8	1306.9	0
BA5-0.45				1241.5	47.1
BA10-0.45				1176.2	94.3
BA15-0.45				1110.8	141.4
BA20-0.45				1045.5	188.5
BA0-0.40	0.40	215.4	538.4	1346.0	0
BA5-0.40				1278.7	48.5
BA10-0.40				1211.4	97.1
BA15-0.40				1144.1	145.6
BA20-0.40				1076.8	194.2
BA0-0.35	0.35	194.2	555.0	1387.5	0
BA5-0.35				1318.1	50.0
BA10-0.35				1248.7	100.1
BA15-0.35				1179.3	150.1
BA20-0.35				1110.0	200.2

[표 3-4] Mix proportions (BA 2)

Factor	W/C	Unit weight(g/m ³)			
		W (g)	C (g)	SA (g)	BA (g)
BA0-0.55	0.55	271.7	494.1	1235.1	0
BA5-0.55				1173.4	46.9
BA10-0.55				1111.6	93.8
BA15-0.55				1049.9	140.7
BA20-0.55				988.1	187.6
BA0-0.50	0.50	254.0	508.0	1270.0	0
BA5-0.50				1206.5	48.2
BA10-0.50				1143.0	96.5
BA15-0.50				1079.5	144.7
BA20-0.50				1016.0	192.9
BA0-0.45	0.45	235.2	522.8	1306.9	0
BA5-0.45				1241.5	49.6
BA10-0.45				1176.2	99.3
BA15-0.45				1110.8	148.9
BA20-0.45				1045.5	198.5
BA0-0.40	0.40	215.4	538.4	1346.0	0
BA5-0.40				1278.7	51.1
BA10-0.40				1211.4	102.2
BA15-0.40				1144.1	153.3
BA20-0.40				1076.8	204.5
BA0-0.35	0.35	194.2	555.0	1387.5	0
BA5-0.35				1318.1	52.7
BA10-0.35				1248.7	105.4
BA15-0.35				1179.3	158.1
BA20-0.35				1110.0	210.8

제 3절 실험 방법

1. 물리적 성능 분석

가. Mortar의 압축강도 측정

본 실험을 위한 배합은 10L 믹서를 통해 2분간 배합하였다. 압축강도 측정을 위해 [그림 3-2]와 같은 5x5x5 사이즈 몰드를 사용하였다. 배합 후 시편과 몰드를 랩으로 감쌌다가 종결시간을 측정한 이후부터 탈형하여 수중양생하였다. 각각의 배합은 재령 14일, 28일, 56일, 91일로 나누어 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정의 경우 압축강도 측정기를 사용하였고, 각 일차별로 6개씩 압축강도를 측정하였다.



[그림 3-2] 압축강도 측정에 사용된 몰드



[그림 3-3] 압축강도 측정기

2. 내구성 분석

콘크리트의 내구성능 평가항목으로는 탄산화 저항성 및 염해 저항성을 검토하였다. 내구성 분석을 위해 [그림 3-4]와 같은 두가지 크기의 몰드를 사용하였다. 염화물 침투 깊이 측정을 위해서는 (a) 사이즈의 몰드를, 탄산화 깊이 측정을 위해서는 (b) 사이즈의 몰드를 사용하였다. 염해저항성 검토를 위해서 촉진 염화물 침투 확산 시험 방법인 NT Build 492의 시험방법으로 재령 14일 28일과 56일 91일 시험체에 대하여 염소침투깊이를 측정하여 비교하였다. 마지막으로 탄산화 저항성의 경우 KS F 2584에 준하여 탄산화 농도 3%의 시험조건에 촉진한 후 규정된 시기에 침투깊이를 측정하였다.



(a) 5*5*5 몰드



(b) 4*4*16 몰드

[그림 3-4] 내구성 분석에 사용된 몰드

가. Mortar의 염해에 대한 저항성

염해 침투 깊이를 측정하기에 앞서, [그림 3-5]의 a와 같이 1면 침투를 위해 한 면 제외 실리콘으로 모두 도포한 후 하루정도 굳힌 뒤 자연침지를 활용해 실험을 진행하였다. [그림 3-5]의 b와 같이 농도는 10%의 소금물에 양생하였고, KS F 2737에 따라 질산은 용액을 만들어 [그림 3-6]과 같이 재령 14일, 28일, 56일, 91일에 염화물 침투 깊이를 측정하였다.

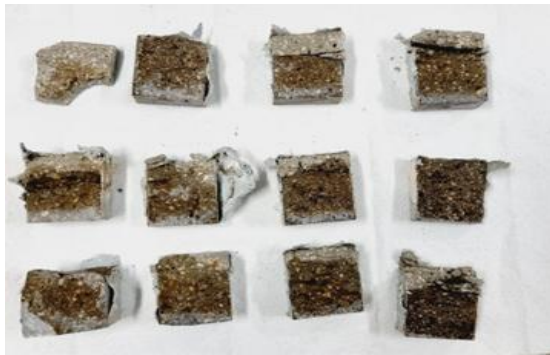


(a) 실리콘 바른 시편



(b) 소금물 양생

[그림 3-5] 염해 측정 과정



[그림 3-6] 염해 측정 후

나. Mortar의 탄산화에 대한 저항성

탄산화 침투 깊이를 측정하기에 앞서, 염해와 동일하게 [그림 3-7]의 a와 같이 실리콘으로 시편의 네 면 모두 도포한 후 하루정도 굳힌 뒤 실험을 진행하였다. 1면 침투를 위해 실험을 진행할 때는 절반으로 시편을 잘라 진행하였다. [그림 3-7]의 b와 같이 농도 3%로 탄산화 챔버를 사용하였고, KS F 2596에 따라 시약을 만들어 [그림 3-8]과 같이 재령 14일, 28일, 56일, 180일에 탄산화 침투 깊이를 측정하였다.

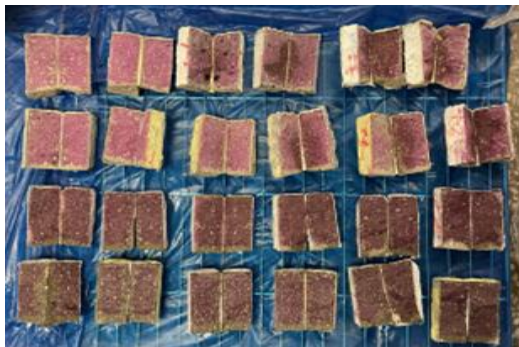


(a) 실리콘 바른 시편



(b) 탄산화 양생

[그림 3-7] 탄산화 측정 과정

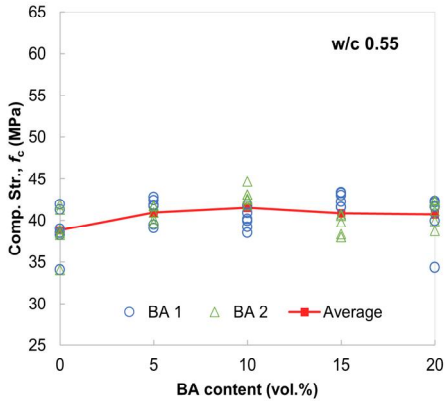


[그림 3-8] 탄산화 측정 후

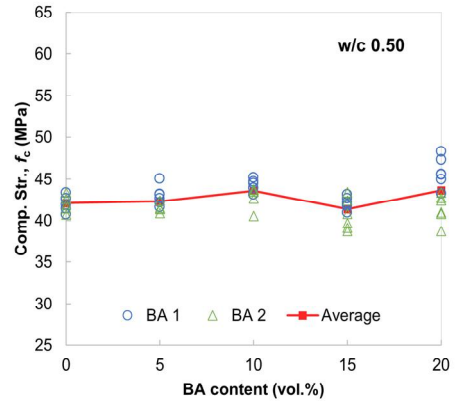
제 4절 실험 결과

1. Mortar의 압축강도 측정 결과

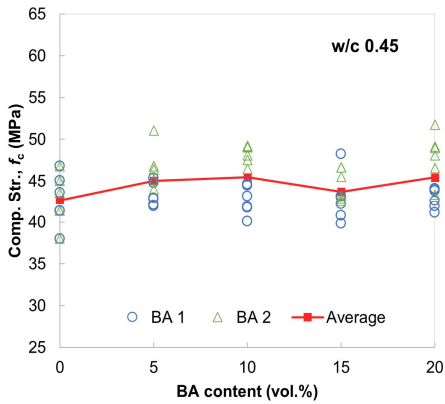
바텀애쉬 대체율에 따른 모르타르의 강도특성을 파악하기 위해 압축강도를 검토하였다. [그림 3-9]는 바텀애쉬 2종을 사용한 모르타르의 압축강도 결과이다. 그림 [3-9]의 a는 물시멘트비 0.55, b는 물시멘트비 0.50, c는 물시멘트비 0.45, d는 물시멘트비 0.40, e는 물시멘트비 0.35의 28일 압축강도 측정결과이며, 압축강도 측정결과와 기준 콘크리트 대비 강도 발현율을 살펴보면 바텀애쉬의 치환률 0%와 최대 치환율인 20% 압축강도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.



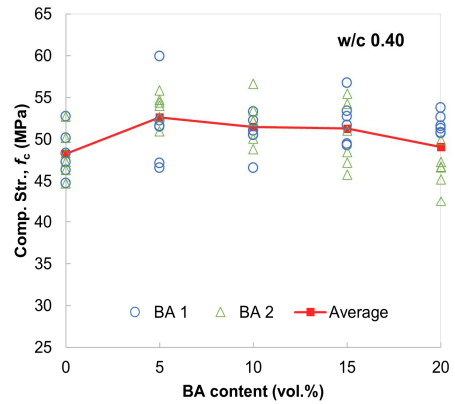
(a) W/C 0.55



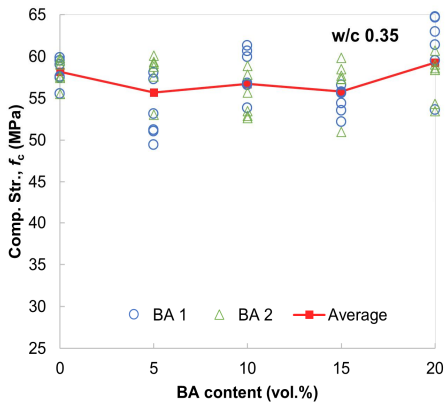
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45

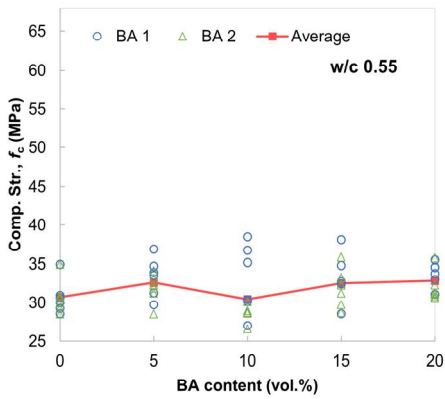


(d) W/C 0.40

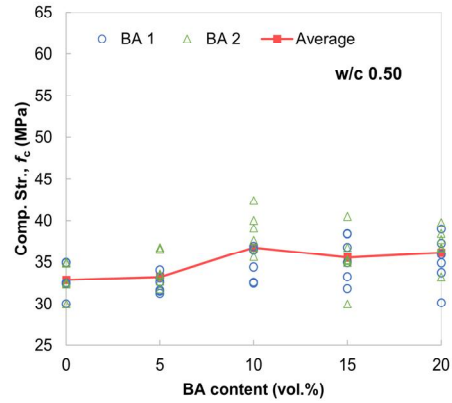


(e) W/C 0.35

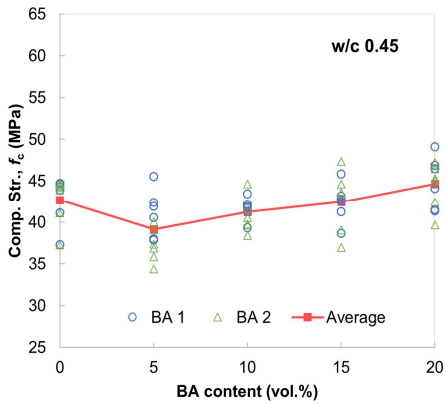
[그림 3-9] 상온 20°C 양생 28일 압축강도 측정 결과



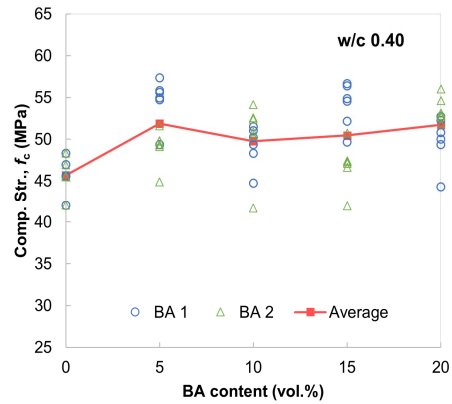
(a) W/C 0.55



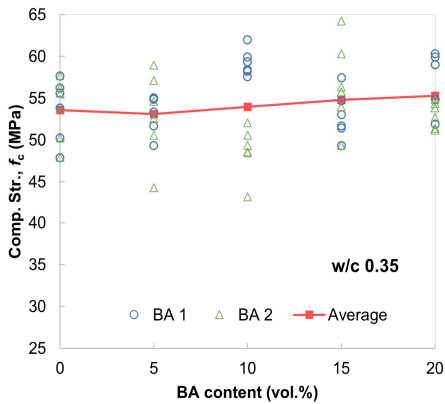
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45



(d) W/C 0.40



(e) W/C 0.35

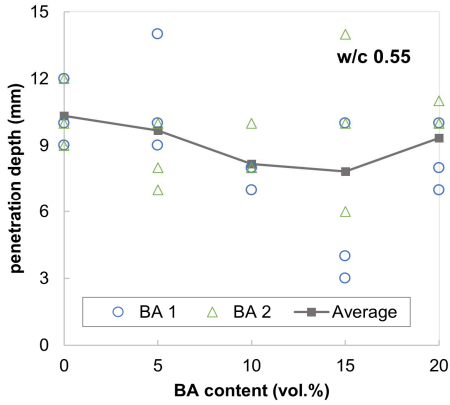
[그림 3-10] 저온 5°C 양생 28일 압축강도 측정 결과

2. Mortar의 염해 침투깊이 측정 결과

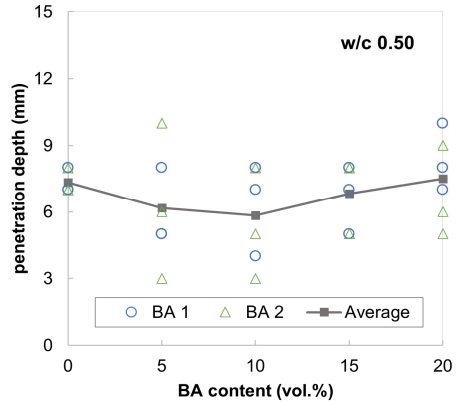
바텀애쉬 대체율에 따른 모르타르의 염해에 대한 저항성을 검토하였으며, 염해 침투 깊이 측정은 재령 14일, 28일, 56일, 91일로 측정하여 그 결과는 [표 3-5]에 나타내었다. [그림 3-10]은 재령 91일의 바텀애쉬 2종의 염해 침투 깊이를 나타낸 것이다. [표 3-5]를 보면 56일까지 염해 깊이가 증가하다가 91일 측정에서는 감소한다. 이러한 결과는 56일 이후 포졸란반응과 CSH겔의 충전으로 인한 기공의 연속성 방해 때문으로 판단된다. 장기침지 시험 결과를 나타낸 [그림 3-10]에 나타난 바와 같이 바텀애시 혼입에 따른 염해 침투깊이는 큰 차이를 보이지 않았다. 최종적으로 약 10 mm까지 염소이온이 침투된 것으로 보이며, 염해 침투깊이 측정결과와 같이 장기시험에서 바텀애시 혼입에 따른 차이는 크지 않았다.

[표 3-5] 영해 침투 깊이 측정 결과

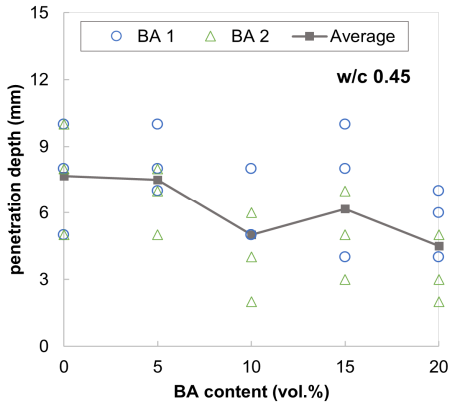
case	침투 깊이 (mm)			
	14 d	28 d	56 d	91 d
WB55-BA0-SA100	7.67	13.67	9.67	10.33
WB55-BA5-SA95	10.83	13.00	7.50	9.67
WB55-BA10-SA90	7.17	8.67	9.00	8.17
WB55-BA15-SA85	6.67	11.67	7.33	7.83
WB55-BA20-SA80	9.58	12.50	9.83	9.33
WB50-BA0-SA100	7.00	7.00	12.33	7.33
WB50-BA5-SA95	10.42	6.67	11.50	6.17
WB50-BA10-SA90	9.00	7.17	10.50	5.83
WB50-BA15-SA85	5.50	7.00	11.00	6.83
WB50-BA20-SA80	5.00	7.42	8.50	7.50
WB45-BA0-SA100	5.67	9.00	12.67	7.67
WB45-BA5-SA95	4.67	8.58	10.67	7.50
WB45-BA10-SA90	5.50	9.00	13.33	5.00
WB45-BA15-SA85	13.33	14.00	9.33	6.17
WB45-BA20-SA80	7.83	14.33	11.17	4.50
WB40-BA0-SA100	12.00	13.67	11.67	6.33
WB40-BA5-SA95	5.83	10.83	11.83	6.67
WB40-BA10-SA90	5.83	6.50	11.83	7.17
WB40-BA15-SA85	13.92	7.33	11.67	7.50
WB40-BA20-SA80	8.67	6.67	10.67	7.17
WB35-BA0-SA100	9.33	7.33	10.67	5.00
WB35-BA5-SA95	9.17	6.33	11.17	5.00
WB35-BA10-SA90	10.17	8.17	8.17	4.17
WB35-BA15-SA85	6.67	5.67	8.00	5.00
WB35-BA20-SA80	5.83	6.00	8.33	3.00



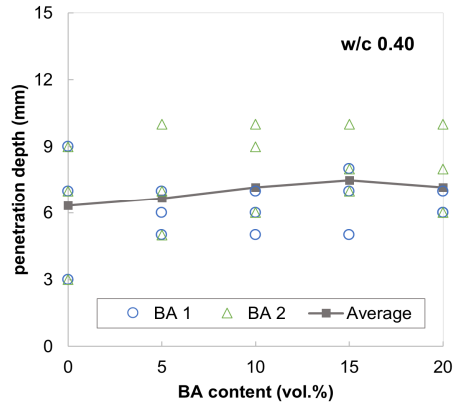
(a) W/C 0.55



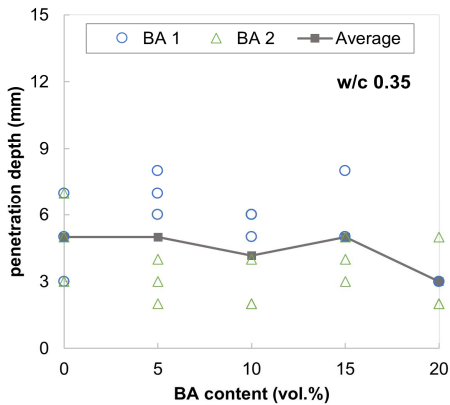
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45



(d) W/C 0.40



(e) W/C 0.35

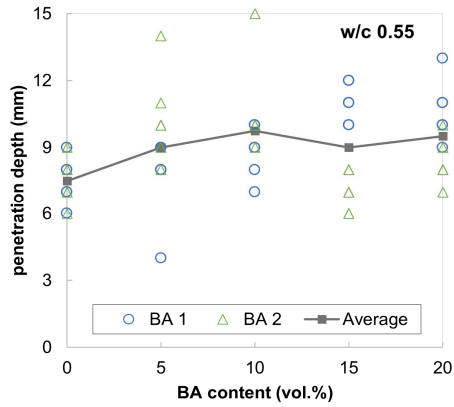
[그림 3-10] 91일 기준 염해 침투깊이 측정 결과

3. Mortar의 탄산화 깊이 측정 결과

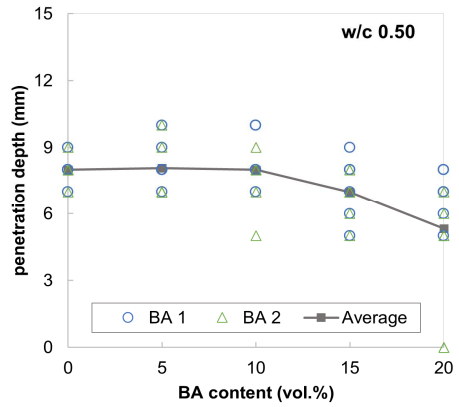
바텀애쉬 대체율에 따른 모르타르의 탄산화에 대한 저항성을 검토하였으며, 탄산화 침투 깊이 측정은 재령 14일, 28일, 56일, 180일로 측정하여 그 결과는 [표 3-6]에 나타내었다. [그림 3-11]은 재령 180일의 바텀애쉬 2종 탄산화 침투 깊이를 나타내었다. [표 3-5]를 보면 180일까지 침투깊이가 다소 증가하는 추세를 보인다. [그림 3-11]에 나타난 바와 같이 바텀애쉬 혼입에 따른 탄산화 침투깊이는 큰 차이를 보이지 않았다. 최종적으로 약 15 mm까지 탄산화가 된 것으로 보이며, 탄산화 침투깊이 측정결과와 같이 장기시험에서 바텀애쉬 혼입에 따른 차이는 크지 않았다.

[표 3-6] 탄산화 침투 깊이 측정 결과

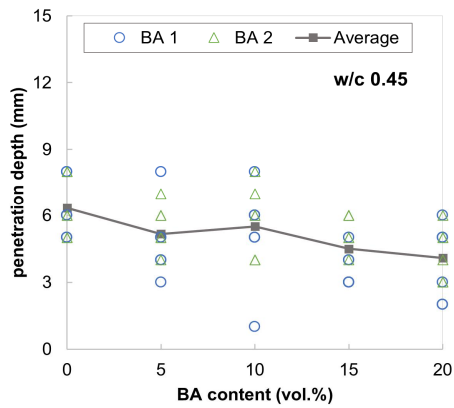
case	침투 깊이 (mm)			
	14 d	28 d	56 d	180 d
WB55-BA0-SA100	0.00	1.75	2.92	7.50
WB55-BA5-SA95	0.50	4.25	4.33	9.00
WB55-BA10-SA90	0.75	3.40	5.00	9.75
WB55-BA15-SA85	0.40	3.83	4.50	9.00
WB55-BA20-SA80	0.83	4.33	6.42	9.50
WB50-BA0-SA100	0.00	2.75	3.67	8.00
WB50-BA5-SA95	0.00	2.50	4.58	8.08
WB50-BA10-SA90	0.00	1.83	3.58	8.00
WB50-BA15-SA85	0.00	2.67	3.42	7.00
WB50-BA20-SA80	0.00	2.58	3.17	5.33
WB45-BA0-SA100	0.00	1.00	2.67	6.33
WB45-BA5-SA95	0.00	1.00	1.25	5.17
WB45-BA10-SA90	0.00	1.00	1.33	5.50
WB45-BA15-SA85	0.00	1.33	1.17	4.50
WB45-BA20-SA80	0.00	1.56	1.00	4.08
WB40-BA0-SA100	0.00	1.00	1.10	7.00
WB40-BA5-SA95	0.00	1.00	1.36	5.50
WB40-BA10-SA90	0.00	1.00	2.00	6.75
WB40-BA15-SA85	0.00	0.40	1.00	5.67
WB40-BA20-SA80	0.00	1.00	1.50	5.08
WB35-BA0-SA100	0.00	0.00	1.00	2.33
WB35-BA5-SA95	0.00	0.00	1.00	4.83
WB35-BA10-SA90	0.00	0.00	1.00	4.08
WB35-BA15-SA85	0.00	0.00	1.00	4.50
WB35-BA20-SA80	0.00	0.00	1.00	3.67



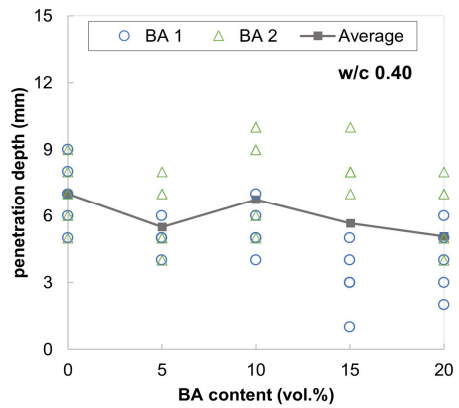
(a) W/C 0.55



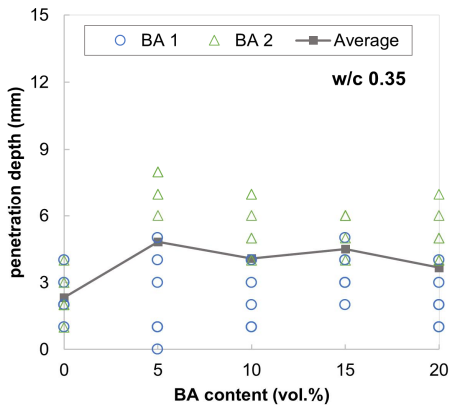
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45



(d) W/C 0.40



(e) W/C 0.35

[그림 3-11] 180일 기준 탄산화 깊이 측정 결과

4. 소결

본 연구에서는 바텀애쉬를 콘크리트 재료 중 잔골재로 사용한 콘크리트의 압축 강도를 측정하고 염소이온침투 및 탄산화 저항성 특성을 검토하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압축강도 측정결과 바텀애쉬 혼입량이 증가함에 따라 재령28일 결과 큰 차이가 보이지 않았다. 그래서 이후 단계에서는 바텀애쉬의 치환율을 최대 20%로 설정해도 콘크리트 특성에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 분석을 진행한다.

2) 내구성 검토항목 중 염해저항성 검토 결과 바텀애쉬 혼입에 따른 염해 침투 깊이가 차이가 보이지 않는 것으로 나타났고, 탄산화의 경우도 바텀애쉬 혼입량 증가에 따라 탄산화 깊이가 차이가 미미하여 바텀애쉬를 콘크리트용 잔골재로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4장 BA를 잔골재 대체제로 사용한 모르타르의 등가 강도 및 등가 내구성 설계

제 1절 실험개요

본 장에서는 등가 강도 및 등가 내구성 설계를 통해 본 연구의 실험 결과가 연구적으로 사용 가능한지의 여부를 알아보고자 한다. 제 3장에서 도출된 결과를 토대로 실험을 진행했으며 바텀애쉬의 비중 및 조립율과 대체율에 따른 강도 및 염해와 탄산화 침투 깊이 사이의 영향을 파악하고자 한다.

제 2절 사용재료 및 배합비

본 장에서의 사용 재료는 위에서 사용한 재료이며, 또한 배합비의 경우에도 같은 배합비를 사용하였다.

제 3절 실험방법

등가 강도 및 등가 내구성 설계를 위해 통계분석 프로그램인 SPSS를 이용하여 분석을 진행하였다. 분석에 사용된 데이터 중 종속변수는 각각 압축강도, 염해 깊이, 탄산화 깊이이며 독립변수는 BA Contents (바텀애쉬 대체율), 바텀애쉬 조립율, 바텀애쉬 비중, 물-시멘트 비로 설정하여 분석을 진행하였다. BA Contents는 대체율 그대로 0, 5, 10, 15, 20을, 물-시멘트 비는 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35의 데이터를 사용하였다.

제 4절 실험결과

28일 압축강도를 기준으로 선형회귀분석을 진행한 결과 설계식은 식 (1)과 같다. R제곱 값은 0.766이며, 바텀애쉬 대체율에 따른 강도 변화는 [그림 4-1]에 나타내었다. 실제 실험값과 설계식이 비슷한 추세를 보이며 범위 안에 있는 것으로

보인다.

$$f_{ck} = (-82.744 \times W/C) + (0.065 \times BA_r) + (1.968 \times BA_s) + n \quad (1)$$

여기서, f_{ck} 는 28일 압축강도 값(MPa)이며, W/C 는 물-시멘트 비로, BA_r 는 바텀애쉬의 대체율(%)이며, BA_s 는 바텀애쉬의 비중이며, n 은 ANOVA 분석을 통한 산출된 상수 값이다.

염해의 경우 ANOVA 분석의 설계식은 식 (2)와 같다. R제곱 값은 0.272이며 바텀애쉬 대체율에 따른 염해 깊이는 [그림 4-2]에 나타내었고, 실제 실험값과 설계식이 비슷한 추세를 보이며 설계식이 실험값의 범위 안에 있는 것으로 보인다.

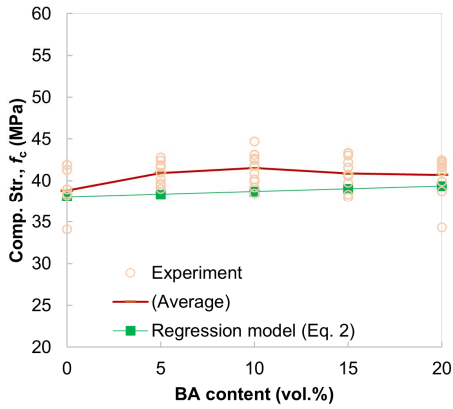
$$X = (18.067 \times W/C) - (0.051 \times BA_r) + n \quad (2)$$

여기서, X 는 염해 깊이(mm)이며, W/C 는 물-시멘트 비로, BA_r 는 바텀애쉬의 대체율(%)이며, n 은 ANOVA 분석을 통한 산출된 상수 값이다.

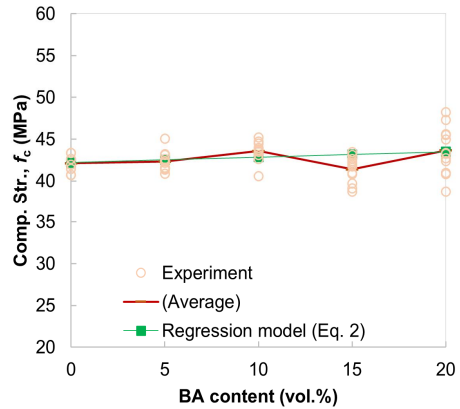
탄산화의 경우 배합식은 식 (3)과 같다. R제곱 값은 0.397이며 바텀애쉬 대체율에 따른 탄산화 깊이는 [그림 4-3]에 정리되었으며 설계식과 실제 실험값의 차이가 크게 없는 것으로 보여진다.

$$C = (22.833 \times W/C) - (0.036 \times BA_r) + n \quad (3)$$

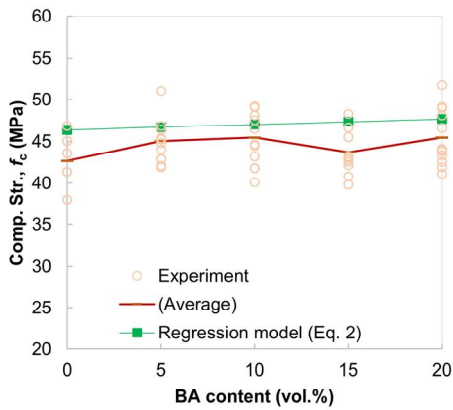
여기서, C 는 탄산화 깊이(mm)이며, W/C 는 물-시멘트 비로, BA_r 는 바텀애쉬의 대체율(%)이며, n 은 ANOVA 분석을 통한 산출된 상수 값이다.



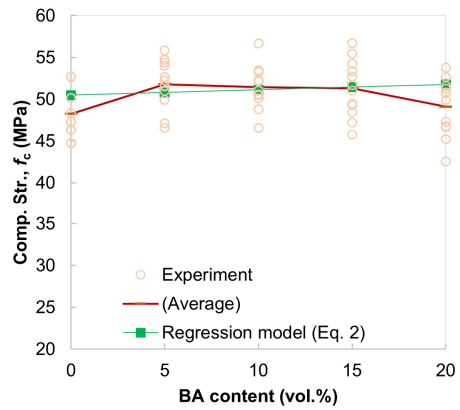
(a) W/C 0.55



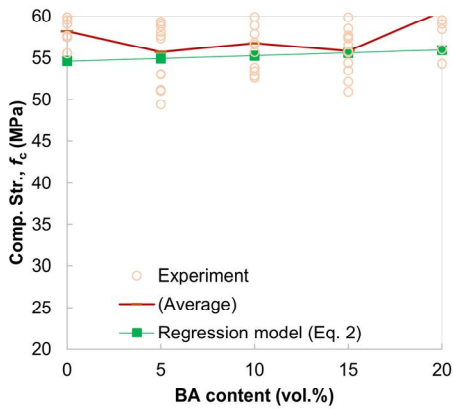
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45

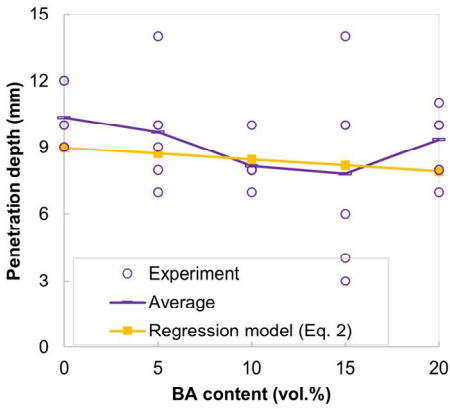


(d) W/C 0.40

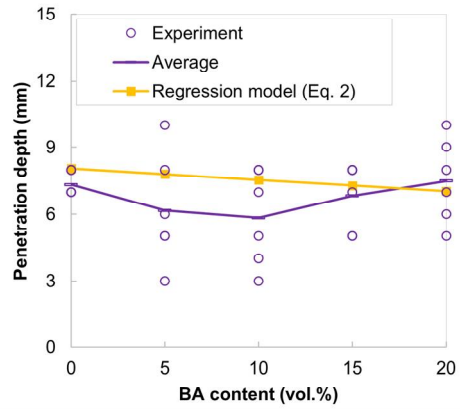


(e) W/C 0.35

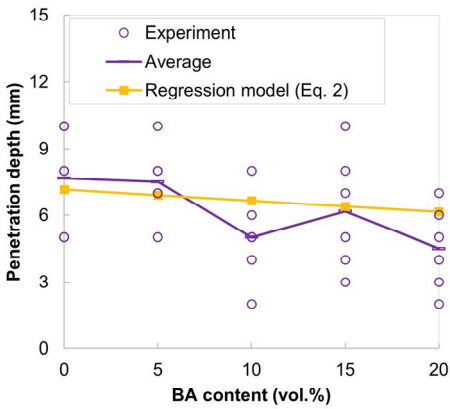
[그림 4-1] 선형회귀분석을 통한 압축강도 결과비교



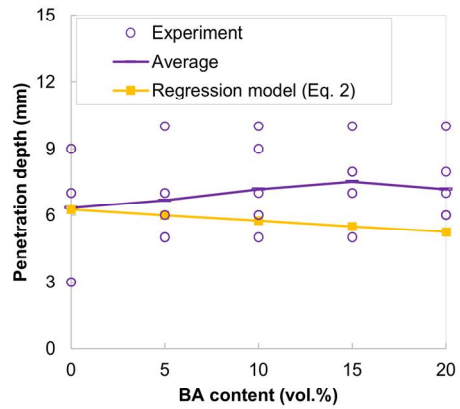
(a) W/C 0.55



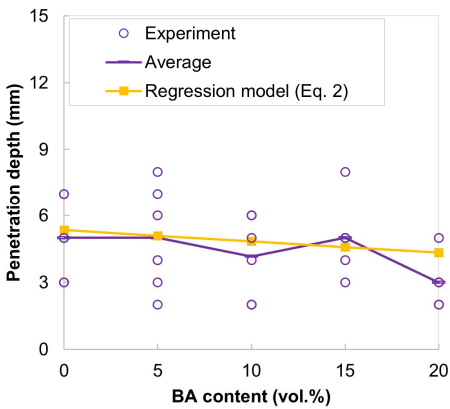
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45

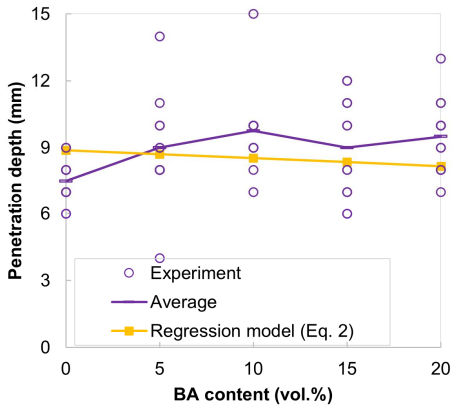


(d) W/C 0.40

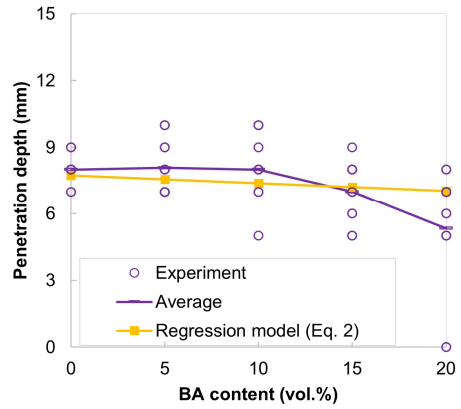


(e) W/C 0.35

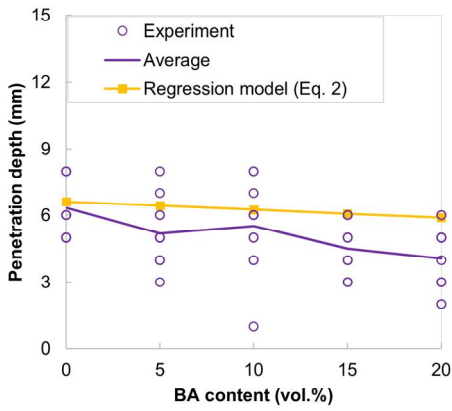
[그림 4-2] 선형회귀분석을 통한 염해 깊이 결과 비교



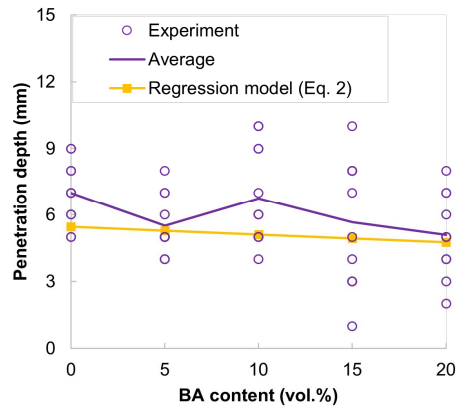
(a) W/C 0.55



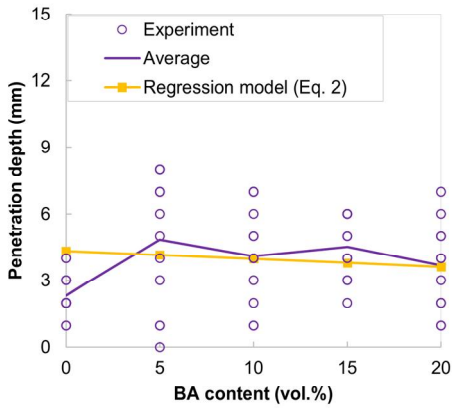
(b) W/C 0.50



(c) W/C 0.45



(d) W/C 0.40



(e) W/C 0.35

[그림 4-3] 선형회귀분석을 통한 탄산화 깊이 결과 비교

제 5장 바텀애쉬를 혼입한 콘크리트의 경제성 및 환경영향 분석

제 1절 실험개요

현장에서 바텀애쉬의 사용을 촉진하기 위해서는 환경적 측면 및 경제적 측면에서의 검토가 필요하다⁶⁵⁾. 본 연구에서는 모르타르 형식으로 실험을 진행하였고, 그 결과 바텀애쉬를 최대 20%까지 잔골재 대체제로 활용해도 콘크리트 특성에 영향을 미치지않고 대체가 가능한 것으로 판단된다. 이에 본 재료를 콘크리트 규모로 사용할 시 사용성을 비교하기 위해 대상 건축물 2개를 선정했다. 기동식 구조물과 벽식 구조물을 선정했다. 현장에서의 사용성을 높이기 위한 원가 절감 및 안전 등의 이유로 기존 24 MPa 강도에서 30 MPa의 강도로 상향 조정하여 적용하였다. 이후 강도에 적합한 단면 조정을 시행했으며, 구조해석 프로그램을 이용하여 구조 안전성 평가 후 적합하다는 결과 하에 기존 배합설계 기준 경제성 분석을 실시하였다. 하지만 바텀애쉬 골재의 재활용의 환경적 장점에 대한 정량적인 데이터는 매우 미흡한 편이며, 바텀애쉬 골재가 콘크리트의 환경에 미치는 영향평가자료는 바텀애쉬 골재의 재활용을 위한 중요한 가치가 있을 수 있다. 콘크리트 환경영향 평가절차는 ISO 14044(ISO 2017)의 전 과정 평가 프로세스를 기반으로 하였다. 환경영향 평가크기는 “한국형 환경영향 평가지수 방법론(ME 2003)”에 근거하여 산정하였다⁶⁶⁾. 바텀애쉬 배합에 대한 기존 실험자료들을 분석하고 CO₂ 배출량을 구하여 경제성 분석을 실시한 대상 건축물 2개에 적용하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

제 2절 실험방법

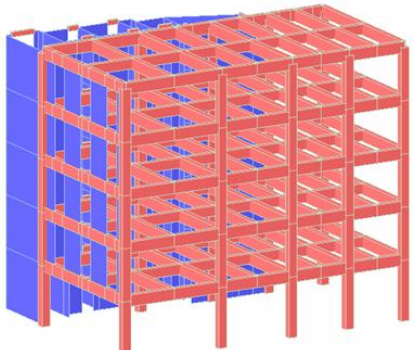
1. 경제성 평가

제 3장과 4장에서는 본 연구에서 제안한 바텀애쉬를 잔골재 대체제로 사용해도 콘크리트 특성에 영향을 미치는지 확인하기 위하여 모르타르 형식으로 실험을 수행하였다. 실험은 바텀애쉬의 대체율을 0 ~ 20 %로 설정한 후 배합을 진행하였으며 물리적 및 내구성 성능을 알아보기 위해 실험을 진행하였다. 이에 본 재료를 콘크리트 규모로 사용할 시 물량 및 경제성 비교를 위해 구조해석을 진행하였다.

가. 대상 건축물 선정

바탕애쉬의 대체율을 최대 20%로 설정한 후 대상 구조물 2개를 선정하여 진행하였으며, [표 5-1 ~ 2]와 같이 대상 구조물은 기동식 구조물과 벽식 구조물 두 개의 구조물로 선정하였다. 대상 구조물 2개 모두 기존 24 MPa의 강도를 기준으로 설계된 구조물로, 더 나아가 강도를 30 MPa로 높게 설정한 후 단면크기도 감소시키는 방안으로 방향을 설정하였다. 변경된 단면 크기에 대한 구조 안전성을 구조 해석 프로그램인 MIDAS GEN을 통해 평가하였으며, 이후 기본 배합설계를 기준으로 경제성 비교를 수행하였다.

[표 5-1] 기동식 건축물 개요

	구분	내용
	용도	근린 생활 시설
	층수	지상 5층, 21.6 m
	건축구조	철근 콘크리트 구조
(a) 기동식 건축물	건물 위치	광주광역시 남구 00동

[표 5-2] 벽식 건축물 개요

	구분	내용
	용도	공동주택
	층수	지상 17층, 61.2 m
	건축구조	철근 콘크리트 벽식구조
(b) 벽식 건축물	건물 위치	전라남도 순천시 00동

나. 단면크기 조정 및 구조 안전성 평가

기동식 구조물은 기존 24 MPa의 강도를 기준으로 설계되었는데, 이에 본 연구에서는 구조물에 사용되는 콘크리트의 적절한 내구성 확보를 위해 콘크리트 표준 시방서에 명시되어있는 사항인 노출등급의 표[표 5-3]를 참고하여 강도를 상향 조정하였다. [표 5-3]에 따라 건축물들은 내구성 확보를 위한 요구조건에서 내구성 기준압축강도[표 5-4]를 만족하여야 하는데, 본 연구에서는 탄산화를 고려하여 30 MPa의 강도로 상향 조정하여 분석을 진행하였다. 또한 각 대상건축물에 사용된 단면크기는 [표 5-5]에 나타내었다.

[표 5-3] 노출범주 및 등급

범주	등급	조건
일반	E0	<ul style="list-style-type: none"> 물리적 , 화학적 작용에 의한 콘크리트 손상의 우려가 없는 경우 철근이나 내부 금속의 부식 위험이 없는 경우
EC (탄산화)	EC1	건조하거나 수분으로부터 보호되는 또는 영구적으로 습윤한 콘크리트
	EC2	습윤하고 드물게 건조되는 콘크리트로 탄산화의 위험이 보통인 경우
	EC3	보통 정도의 습도에 노출되는 콘크리트로 탄산화 위험이 비교적 높은 경우
	EC4	건습이 반복되는 콘크리트로 매우 높은 탄산화 위험에 노출되는 경우
ES (해양환경, 제설염 등 염화물)	ES1	보통 정도의 습도에서 대기 중의 염화물에 노출되지만 해수 또는 염화물을 함유한 물에 직접 접하지 않은 콘크리트
	ES2	습윤하고 드물게 건조되며 염화물에 노출되는 콘크리트
	ES3	항상 해수에 침지되는 콘크리트
	ES4	건습이 반복되면서 해수 또는 염화물에 노출되는 콘크리트
EF (동결융해)	EF1	간혹 수분과 접촉하나 염화물에 노출되지 않고 동결융해의 반복작용에 노출되는 콘크리트
	EF2	간혹 수분과 접촉하고 염화물에 노출되며 동결융해의 반복작용에 노출되는 콘크리트
	EF3	지속적으로 수분과 접촉하나 염화물에 노출되지 않고 동결융해의 반복작용에 노출되는 콘크리트
	EF4	지속적으로 수분과 접촉하고 염화물에 노출되며 동결융해의 반복작용에 노출되는 콘크리트
EA (황산염)	EA1	보통 수준의 황산염 이온에 노출되는 콘크리트
	EA2	유해한 수준의 황산염 이온에 노출되는 콘크리트
	EA3	매우 유해한 수준의 황산염 이온에 노출되는 콘크리트

[표 5-4] 내구성 확보를 위한 요구조건

항목	노출범주 및 등급															
	일반	EC (탄산화)				ES (해양환경, 제설염 등 염화물)				EF (동결융해)				EA (황산염)		
	E0	EC1	EC2	EC3	EC4	ES1	ES2	ES3	ES4	EF1	EF2	EF3	EF4	EA1	EA2	EA3
내구성 기준 압축강도 fcd (MPa)	21	21	24	27	30	30	30	35	35	24	27	30	30	27	30	30
최대 물 - 결합재비	-	0.60	0.55	0.50	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40	0.55	0.50	0.45	0.45	0.50	0.45	0.45
최소 단위 결합재량 (kg/m ³)	-	-	-	-	-	KCS 14 20 44 (2.2)				-	-	-	-	-	-	-

[표 5-5] 기동식 건축물 사용된 부재 단면 크기

부재 명칭	24MPa ($b_w \times h$)(mm)	30MPa ($b_w \times h$)(mm)
C1	700 × 600	500 × 400
C2	700 × 600	550 × 450
G1	900 × 500	900 × 500
G2	900 × 400	750 × 250
B1	900 × 400	800 × 300
B2	800 × 400	700 × 300
W	200	160

사용된 부재는 크기별로 C1, C2, G1, G2, B1, B2, W 로 대표적인 부재를 선정하였고 이에 부재별로 구조해석 프로그램을 이용하여 구조 안전성을 평가하였다.

첫 번째, 기동 부재인 C1과 C2의 경우는 기존 사용된 부재 단면은 폭(b_w)과 높이(h) 700 mm × 600 mm이며, 변경된 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 500 mm × 400 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 550 mm × 450 mm이다.

두 번째, 보 부재인 G1과 G2는 기존 사용된 부재 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 900 mm × 500 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 900 mm × 400 mm이다. 변경된 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 900 mm × 500 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 750 mm × 250 mm이다. B1과 B2는 기존 사용된 부재 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 900 mm × 400 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 800 mm × 400 mm이다. 변경된 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 800 mm × 300 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 700 mm × 300 mm이다.

세 번째, 벽 부재인 W의 경우 기존 사용된 부재 두께는 200 mm이며, 변경된 단

면 두께는 160 mm이다. 단면크기 조정 후 강도별 부재 구조 안전성 평가 결과는 [표 5-6 ~ 7]에 나타내었다. C1은 하중비 0.904, 휨모멘트 내력비 0.901, 전단 내력비 END와 MIDDLE은 약 0.5이다. C2는 하중비 0.912, 휨모멘트 내력비 0.923, 전단 내력비 END와 MIDDLE은 약 0.7이며 기둥 부재 모두 부재 내력비 1.0 이하로 구조적으로 안전하다는 것을 알 수 있다. G1은 휨모멘트 약 0.9, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 0.9, 약 0.8이다. G2은 휨모멘트 END와 MIDDLE은 약 0.8, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 0.96, 약 0.97이다. B1은 휨모멘트 약 0.87, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 약 0.7, 0.4이다. B2은 휨모멘트 약 0.9, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 0.3, 약 0.7이며 보 부재 모두 안전율 1.0이하로 구조적으로 안전하다는 것을 알 수 있다. W은 하중비 0.503, 휨모멘트 내력비 0.509, 전단 내력비는 0.138이며 벽 부재 또한 안전율 1.0이하로 구조적으로 안전하다는 것을 알 수 있다.

[표 5-6] 기동식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (24 MPa)

부재	축력 (KN)		전단력 (KN)						
			END		MIDDLE				
			강축	약축	강축	약축			
C1	5677.93		346.465	319.383	347.588	320.527			
C2	5983.57		351.368	404.968	352.491	406.112			
	축방향 하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
					END		MIDDLE		
					강축	약축	강축	약축	
C1	0.872		0.866		0.613	0.132	0.611	0.131	
C2	0.837		0.848		0.712	0.055	0.710	0.054	
부재	휨모멘트 (KN·m)						전단력 (KN)		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
G1	758.67	631.16	574.22	220.98	767.16	596.89	326.68	284.72	320.50
G2	335.88	346.70	266.76	262.03	341.20	351.96	438.49	455.46	462.83
B1	399.15	412.95	397.58	163.29	396.19	95.18	202.23	165.50	174.06
B2	345.30	114.39	280.05	50.65	289.98	129.73	138.30	150.43	170.78
	휨모멘트 내력비						전단 내력비		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
G1	0.9591	0.8968	0.9343	0.6987	0.9698	0.9712	0.9014	0.7856	0.8844
G2	0.8119	0.8380	0.8495	0.8344	0.8247	0.8507	0.9666	0.9629	0.9785
B1	0.9648	0.9982	0.9640	0.5200	0.9576	0.3031	0.6975	0.5708	0.6004
B2	0.9563	0.4166	0.7756	0.1845	0.8031	0.4725	0.5252	0.5712	0.6485
부재	축력 (KN)		휨모멘트 (KN·m)		전단력 (KN)				
	강축	약축	강축	약축					
W	71.8355	71.8355	-27.180	0	10.0638				
	축방향 하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
	강축	약축	강축	약축					
W	0.102	0	0.101	0	0.083				

[표 5-7] 기동식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (30 MPa)

부재	축력 (KN)		전단력 (KN)						
			END		MIDDLE				
			강축	약축	강축	약축			
C1	3556.61		223.620	181.421	224.190	182.012			
C2	4638.76		257.585	227.687	258.304	228.428			
	축방향 하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
					END		MIDDLE		
					강축	약축	강축	약축	
C1	0.904		0.901	0.466	0.143	0.465	0.142		
C2	0.912		0.923	0.710	0.039	0.708	0.038		
부재	휨모멘트 (KN·m)						전단력 (KN)		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
G1	1045.9	554.03	826.98	196.16	1053.1	547.64	349.42	307.46	342.95
G2	246.84	224.07	203.12	148.82	251.13	253.91	317.08	329.79	335.02
B1	309.77	418.32	309.77	193.14	309.03	31.75	177.49	99.94	60.21
B2	358.59	151.90	301.69	71.36	342.09	122.93	63.33	148.65	79.05
	휨모멘트 내력비						전단 내력비		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
G1	0.9822	0.8911	0.9266	0.6167	0.9889	0.8808	0.8910	0.7992	0.8745
G2	0.7778	0.9112	0.8260	0.8689	0.7913	0.8001	0.9612	0.9764	0.9744
B1	0.8762	0.9715	0.8762	0.7054	0.8741	0.1714	0.7684	0.4284	0.2581
B2	0.9721	0.9464	0.9919	0.4446	0.9276	0.7659	0.2977	0.6909	0.3716
부재	축력 (KN)		휨모멘트 (KN·m)		전단력 (KN)				
	강축	약축	강축	약축					
W	10.2436	10.2436	-36.375	0	13.5791				
	축방향 하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
	강축	약축	강축	약축					
W	0.503	0	0.509	0	0.138				

벽식 구조물 또한 기존 24 MPa의 강도를 기준으로 설계되었고, 기둥식 구조물과 같이 30 MPa의 강도로 상향 조정된 뒤 단면크기를 조정하였다. 사용된 단면크기는 [표 5-8]에 나타내었다.

[표 5-8] 벽식 건축물 사용된 부재 단면 크기

부재 명칭	24 MPa ($b_w \times h$)(mm)	30 MPa ($b_w \times h$)(mm)
B1	550 × 200	400 × 200
B2	450 × 200	350 × 200
B3	400 × 180	400 × 180
B4	600 × 200	400 × 200
W1	120	120
W2	150	120
W3	180	150
W4	200	180

사용된 부재는 크기별로 B1, B2, B3, B4, W1, W2, W3, W4 로 대표적인 부재를 선정하였고 이에 부재별로 구조해석 프로그램을 이용하여 구조 안전성을 평가하였다.

첫 번째, 보 부재인 B1과 B2는 기존 사용된 부재 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 550 mm × 200 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 450 mm × 200 mm이며, B3과 B4는 기존 사용된 부재 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 400 mm × 180 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 600 mm × 200 mm이다. 변경된 단면은 각각 폭(b_w)과 높이(h) 400 mm × 200 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 350 mm × 200 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 400 mm × 180 mm, 폭(b_w)과 높이(h) 400 mm × 200 mm이다.

두 번째, 벽 부재인 W1, W2, W3, W4의 경우 기존 사용된 부재 두께는 각각 120mm, 150 mm, 180 mm, 200 mm이며, 변경된 단면 두께는 각각 120 mm, 120 mm, 150 mm, 180 mm이다. 단면크기 조정 후 각 부재별 구조 안전성 평가 결과는 [표 5-9 ~ 10]에 나타내었다.

구조안전성 평가 결과 B1의 휨모멘트 END와 MIDDLE은 각각 약 0.01, 0.02이며, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 약 0.09, 0.03이다. B2의 END와 MIDDLE은 각각 약 0.007, 0.02이며, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 약 0.08, 0.04이다. B4의 END와 MIDDLE은 각각 약 0.02, 0.13이며, 전단력 END와 MIDDLE은 각각 약 0.18, 0.15이다. 보 부재 모두 안전율 1.0이하로 구조적으로 안전하다는 것을 알 수 있다. W4는 하중비 0.652, 휨모멘트 내력비 0.643, 전단 내력비는 0.104이며 벽 부재 또한 안전율 1.0 이하로 구조적으로 안전하다는 것을 알 수 있다.

[표 5-9] 벽식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (24 MPa)

	휨모멘트 (KN·m)						전단력 (KN)		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
B1	480.401	234.65	1068.13	0	249.969	200.299	134.67	52.74	935.168
B2	275.365	199.738	1022.42	0	270.481	190.413	116.78	61.18	109.82
B4	929.423	228.745	852.092	1136.41	1666.65	614.658	396.06	362.89	286.24
	휨모멘트 내력비						전단 내력비		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
B1	0.0078	0.0381	0.0174	0	0.0041	0.0326	0.0920	0.0360	0.0639
B2	0.0057	0.0413	0.0211	0	0.0056	0.0394	0.0869	0.0455	0.0817
B4	0.0136	0.3358	0.1251	0.1668	0.2447	0.0902	0.2571	0.2356	0.1858
	축력 (KN)		휨모멘트 (KN·m)		전단력 (KN)				
	강축	약축	강축	약축					
W4	9.704	9.704	36.275	0	20.126				
	축방향하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
	강축	약축	강축	약축					
W4	0.622	0	0.622	0	0.099				

[표 5-10] 벽식 건축물 각 부재별 구조 안전성 결과 (30 MPa)

	휨모멘트 (KN·m)						전단력 (KN)		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
B1	444.78	228.64	1015.6	0	235.18	190.12	130.24	50.89	884.02
B2	265.47	195.59	997.93	0	260.92	184.76	114.05	59.59	107.07
B4	863.83	124.97	533.21	553.13	916.58	587.35	246.07	212.89	199.56
	휨모멘트 내력비						전단 내력비		
	END-I		MIDDLE		END-J		END-I	MIDDLE	END-J
	+	-	+	-	+	-			
B1	0.0105	0.0541	0.0240	0	0.0056	0.0450	0.0957	0.0374	0.0650
B2	0.0074	0.0548	0.0279	0	0.0073	0.0517	0.0899	0.0470	0.0844
B4	0.0204	0.2955	0.1261	0.1308	0.2167	0.1389	0.1808	0.1564	0.1466
	축력 (KN)		휨모멘트 (KN·m)		전단력 (KN)				
	강축	약축	강축	약축					
W4	9.056	9.056	38.130	0	21.149				
	축방향하중비		휨모멘트 내력비		전단 내력비				
	강축	약축	강축	약축					
W4	0.652	0	0.643	0	0.104				

나. 물량산출

각 부재별 단면 조정 후 구조 안전성 검토한 결과, 구조적으로 안전하다는 결론이 나와 이후 기존 24 MPa와 변경 30 MPa 단면 사용의 물량을 계산하였다. 기동식 건축물의 물량 산출 결과는 [표 5-11 ~ 12]에 나타내었고, 벽식 건축물의 경우 [표 5-13 ~14]에 나타내었다. 기동식 구조물의 기존 24 MPa 사용 시 1층부터 5층까지의 총 물량은 [표 5-11]과 같이 콘크리트 단위중량 2.4 t/m³을 곱한 1530.55 m³이며, 동일한 방법으로 30 MPa의 1층부터 17층까지 물량을 합한 총 물량은 [표 5-12]과 같이 1064.56 m³이다. 그 결과, 기존 콘크리트와 비교했을 때 약 30 %

(465.99 m³)정도 물량이 감소한 것을 알 수 있다. 벽식 구조물의 경우 [표 5-13]을 보면 기존 24 MPa의 1층부터 17층까지의 총 물량은 콘크리트 단위중량 2.4 t/m³을 곱한 11711.4 m³이며, 동일한 방법으로 30 MPa의 1층부터 17층까지 물량을 합한 총 물량은 [표 5-14]의 10294.3 m³이다. 그 결과, 기존 콘크리트와 비교했을 때 약 12% (1417.1 m³)정도 물량이 감소한 것을 알 수 있다.

[표 5-11] 기동식 건축물 기준 24 MPa 물량 산출 결과표

1F						2~5F					
	가로	세로	높이	개수	SUM		가로	세로	높이	개수	SUM
C1	0.6	0.7	4.8	6	12.10	C1	0.7	0.6	4.2	6	10.58
C2	0.6	0.7	4.8	4	8.064	C2	0.7	0.6	4.2	4	7.056
G1	0.9	0.5	11.1	3	14.99	G1	0.9	0.5	11.1	3	14.99
G2	0.9	0.4	1	2	0.72	G2	0.9	0.4	1	2	0.72
	0.9	0.4	11.1	2	7.992		0.9	0.4	11.1	2	7.992
G3	0.9	0.4	15.3	1	5.508	G3	0.9	0.4	15.3	1	5.508
	0.9	0.4	4.1	1	1.476		0.9	0.4	4.1	1	1.476
G3A	0.9	0.4	10.6	1	3.816	G3A	0.9	0.4	10.6	1	3.816
G4	0.9	0.4	7.7	1	2.772	G4	0.9	0.4	7.7	1	2.772
G4A	0.9	0.4	7.7	1	2.772	G4A	0.9	0.4	7.7	1	2.772
B1	0.9	0.4	11.7	3	12.64	B1	0.9	0.4	11.7	3	12.64
B2	0.8	0.4	23.8	1	7.616	B2	0.8	0.4	23.8	1	7.616
B3	0.9	0.4	11.7	1	4.212	B3	0.9	0.4	11.7	1	4.212
B0	0.4	0.2	2	2	0.32	B0	0.4	0.2	2	2	0.32
	0.4	0.2	0.9	2	0.144		0.4	0.2	0.9	2	0.144
	0.4	0.2	1	1	0.08		0.4	0.2	1	1	0.08
	0.4	0.2	1.14	1	0.091		0.4	0.2	1.14	1	0.091
WB1	0.6	0.2	1	1	0.12	WB1	0.6	0.2	1	1	0.12
W	0.2	0.5	4.8	3	1.44	W	0.2	0.5	4.2	3	1.26
	0.2	4.8	4.8	1	4.608		0.2	4.8	4.2	1	4.032
	0.2	2.2	4.8	4	8.448		0.2	2.2	4.2	4	7.392
	0.2	3.2	4.8	1	3.072		0.2	3.2	4.2	1	2.688
	0.2	1.7	4.8	1	1.632		0.2	1.7	4.2	1	1.428
	0.2	3.4	4.8	1	3.264		0.2	3.4	4.2	1	2.856
	0.2	1.86	4.8	1	1.786		0.2	1.86	4.2	1	1.562
	0.2	0.6	4.8	1	0.576		0.2	0.6	4.2	1	0.504
	0.2	5.76	4.8	1	5.529		0.2	5.76	4.2	1	4.838
	0.2	0.27	4.8	1	0.259		0.2	0.27	4.2	1	0.227
	0.2	0.3	4.8	1	0.288		0.2	0.3	4.2	1	0.252
	0.2	4.4	4.8	1	4.224		0.2	4.4	4.2	1	3.696
	0.2	5.8	4.8	1	5.568		0.2	5.8	4.2	1	4.872
	0.2	2.4	4.8	1	2.304		0.2	2.4	4.2	1	2.016
	0.2	1	4.8	1	0.96		0.2	1	4.2	1	0.84
	0.2	0.8	4.8	1	0.768		0.2	0.8	4.2	1	0.672
	0.2	2.3	4.8	1	2.208		0.2	2.3	4.2	1	1.932
	0.2	0.7	4.8	1	0.672		0.2	0.7	4.2	1	0.588
	0.2	1.5	4.8	1	1.44		0.2	1.5	4.2	1	1.26
	= 134.466 m ³						= 125.816 m ³				
총 물량 (물량 합산) = (134.466 m³ + (125.816 m³ × 4) × 2.4 = 1530.55 m³											

[표 5-12] 기동식 건축물 변경 30 MPa 물량 산출 결과표

1F						2~5F					
	가로	세로	높이	개수	SUM		가로	세로	높이	개수	SUM
C1	0.5	0.4	4.8	6	5.76	C1	0.5	0.4	4.2	6	5.04
C2	0.55	0.45	4.8	4	4.752	C2	0.55	0.45	4.2	4	4.158
G1	0.9	0.5	11.1	3	14.99	G1	0.9	0.5	11.1	3	14.99
G2	0.75	0.25	1	2	0.375	G2	0.75	0.25	1	2	0.375
	0.75	0.25	11.1	2	4.163		0.75	0.25	11.1	2	4.163
G3	0.75	0.25	15.3	1	2.869	G3	0.75	0.25	15.3	1	2.869
	0.75	0.25	4.1	1	0.769		0.75	0.25	4.1	1	0.769
G3A	0.75	0.25	10.6	1	1.988	G3A	0.75	0.25	10.6	1	1.988
G4	0.75	0.25	7.7	1	1.444	G4	0.75	0.25	7.7	1	1.444
G4A	0.75	0.25	7.7	1	1.444	G4A	0.75	0.25	7.7	1	1.444
B1	0.8	0.3	11.7	3	8.424	B1	0.8	0.3	11.7	3	8.424
B2	0.7	0.3	23.8	1	4.998	B2	0.7	0.3	23.8	1	4.998
B3	0.75	0.25	11.7	1	2.194	B3	0.75	0.25	11.7	1	2.194
B0	0.3	0.1	2	2	0.12	B0	0.3	0.1	2	2	0.12
	0.3	0.1	0.9	2	0.054		0.3	0.1	0.9	2	0.054
	0.3	0.1	1	1	0.03		0.3	0.1	1	1	0.03
	0.3	0.1	1.14	1	0.034		0.3	0.1	1.14	1	0.034
WB1	0.5	0.1	1	1	0.05	WB1	0.5	0.1	1	1	0.05
W	0.16	0.5	4.8	3	1.152	W	0.16	0.5	4.2	3	1.008
	0.16	4.8	4.8	1	3.686		0.16	4.8	4.2	1	3.226
	0.16	2.2	4.8	4	6.758		0.16	2.2	4.2	4	5.914
	0.16	3.2	4.8	1	2.458		0.16	3.2	4.2	1	2.150
	0.16	1.7	4.8	1	1.306		0.16	1.7	4.2	1	1.142
	0.16	3.4	4.8	1	2.611		0.16	3.4	4.2	1	2.285
	0.16	1.86	4.8	1	1.428		0.16	1.86	4.2	1	1.250
	0.16	0.6	4.8	1	0.461		0.16	0.6	4.2	1	0.403
	0.16	5.76	4.8	1	4.424		0.16	5.76	4.2	1	3.871
	0.16	0.27	4.8	1	0.207		0.16	0.27	4.2	1	0.181
	0.16	0.3	4.8	1	0.230		0.16	0.3	4.2	1	0.202
	0.16	4.4	4.8	1	3.379		0.16	4.4	4.2	1	2.957
	0.16	5.8	4.8	1	4.454		0.16	5.8	4.2	1	3.898
	0.16	2.4	4.8	1	1.843		0.16	2.4	4.2	1	1.613
	0.16	1	4.8	1	0.768		0.16	1	4.2	1	0.672
	0.16	0.8	4.8	1	0.614		0.16	0.8	4.2	1	0.538
	0.16	2.3	4.8	1	1.766		0.16	2.3	4.2	1	1.546
	0.16	0.7	4.8	1	0.538		0.16	0.7	4.2	1	0.470
	0.16	1.5	4.8	1	1.152		0.16	1.5	4.2	1	1.008
	= 93.688 m ³						= 87.469 m ³				
총 물량 (물량 합산) = (93.688 m³ + (87.469 m³ × 4) × 2.4 = 1064.56 m³											

[표 5-13] 벽식 건축물 기준 24 MPa 몰량 산출 결과표 (계속)

1F						가로	세로	높이	개수	SUM	
	가로	세로	높이	개수	SUM						
						0.18	0.86	3.6	1	0.56	
B1	0.2	0.55	3.6	3	1.19	0.18	2.45	3.6	1	1.58	
B2	0.2	0.45	3.6	8	2.59	0.18	2.72	3.6	2	3.53	
B3	0.18	0.4	3.6	15	3.89	0.18	2.14	3.6	3	4.16	
B4	0.2	0.6	3.6	11	4.75	0.18	3.33	3.6	2	4.32	
W1	0.12	2.05	3.6	2	1.77	0.18	2	3.6	5	6.48	
	0.12	1.79	3.6	2	1.55	0.18	1.8	3.6	2	2.33	
	0.12	2.84	3.6	3	3.68	0.18	3.02	3.6	1	1.96	
	0.12	1.42	3.6	3	1.84	0.18	0.5	3.6	1	0.32	
	0.12	0.18	3.6	4	0.31	0.18	2.03	3.6	1	1.32	
	0.12	0.12	3.6	2	0.10	0.18	1.21	3.6	2	1.57	
	0.12	0.55	3.6	2	0.48	0.18	2.34	3.6	2	3.03	
	0.12	0.5	3.6	4	0.86	0.18	1.53	3.6	1	0.99	
	0.12	2.62	3.6	2	2.26	0.18	1.86	3.6	3	3.62	
	0.12	1.97	3.6	1	0.85	0.18	2.38	3.6	2	3.08	
	0.12	1.23	3.6	1	0.53	0.18	2.16	3.6	2	2.80	
	0.12	1.87	3.6	1	0.81	0.18	1.26	3.6	2	1.63	
	0.12	1.19	3.6	2	1.03	0.18	2.56	3.6	1	1.66	
	0.12	3.25	3.6	2	2.80	0.18	3.02	3.6	1	1.96	
	0.12	1.26	3.6	2	1.09	0.18	2.50	3.6	1	1.62	
	0.12	0.69	3.6	1	0.30	0.18	2.58	3.6	1	1.67	
	W2	0.15	8.67	3.6	2	9.36	0.18	3.32	3.6	1	2.15
		0.15	1.63	3.6	3	2.64	0.18	2.1	3.6	1	1.36
0.15		2.25	3.6	1	1.26	0.18	4.55	3.6	1	2.95	
0.15		0.34	3.6	1	0.18	0.18	1.82	3.6	1	1.18	
0.15		1.99	3.6	2	2.15	0.2	10.2	3.6	1	7.35	
0.15		1.79	3.6	2	1.93	0.2	9.15	3.6	3	19.8	
0.15		0.89	3.6	1	0.48	0.2	1.05	3.6	3	2.27	
0.15		2.23	3.6	1	1.20	0.2	1.5	3.6	1	1.08	
0.15		1.99	3.6	1	1.07	0.2	10.4	3.6	1	7.47	
0.15		2.56	3.6	2	2.77	0.2	1.97	3.6	1	1.42	
0.15		1.07	3.6	1	0.58	0.2	2.27	3.6	1	1.63	
0.15		2.66	3.6	1	1.44	0.2	0.96	3.6	4	2.77	
0.15		3.11	3.6	1	1.68	0.2	0.7	3.6	2	1.01	
0.15		1.68	3.6	4	3.63	0.2	2.8	3.6	1	2.02	
0.15		8.57	3.6	1	4.63	0.2	4.7	3.6	2	6.77	
0.15		3.79	3.6	1	2.05	0.2	0.83	3.6	2	1.20	
0.15		1.86	3.6	1	1.00	0.2	2.19	3.6	2	3.15	
0.15		0.14	3.6	1	0.08	0.2	1.51	3.6	2	2.17	
0.15	17.8	3.6	1	9.58	0.2	1.21	3.6	1	0.87		
0.15	0.33	3.6	1	0.18	0.2	0.10	3.6	2	0.14		
0.15	0.7	3.6	1	0.38	0.2	2.2	3.6	1	1.58		

[표 5-13] 벽식 건축물 기준 24 MPa 물량 산출 결과표

1F														
W4						W4								
가로	세로	높이	개수	SUM	가로	세로	높이	개수	SUM	가로	세로	높이	개수	SUM
0.2	2.6	3.6	2	3.74	0.2	2.15	3.6	1	1.55	0.2	2.15	3.6	1	1.55
0.2	6.91	3.6	1	4.97	0.2	3.65	3.6	1	2.63	0.2	3.65	3.6	1	2.63
0.2	1.48	3.6	1	1.07	0.2	4.77	3.6	1	3.43	0.2	4.77	3.6	1	3.43
0.2	0.29	3.6	1	0.21	0.2	1.26	3.6	1	0.91	0.2	1.26	3.6	1	0.91
0.2	2.99	3.6	1	2.15	0.2	6.58	3.6	1	4.74	0.2	6.58	3.6	1	4.74
0.2	5.9	3.6	1	4.25	0.2	7.05	3.6	1	5.08	0.2	7.05	3.6	1	5.08
0.2	1.82	3.6	1	1.31	0.2	2.03	3.6	1	1.46	0.2	2.03	3.6	1	1.46
0.2	2.12	3.6	2	3.05	0.2	1.59	3.6	1	1.15	0.2	1.59	3.6	1	1.15
0.2	1.32	3.6	2	1.89	0.2	1.3	3.6	1	0.94	0.2	1.3	3.6	1	0.94
0.2	0.59	3.6	2	0.85	0.2	1.04	3.6	1	0.75	0.2	1.04	3.6	1	0.75
0.2	0.55	3.6	6	2.38	0.2	3.51	3.6	1	2.53	0.2	3.51	3.6	1	2.53
0.2	4.32	3.6	2	6.22	0.2	0.5	3.6	2	0.72	0.2	0.5	3.6	2	0.72
0.2	3.2	3.6	2	4.61	0.2	2.57	3.6	1	1.85	0.2	2.57	3.6	1	1.85
0.2	8.14	3.6	1	5.86	0.2	3.96	3.6	1	2.85	0.2	3.96	3.6	1	2.85
0.2	3.68	3.6	1	2.65	0.2	0.76	3.6	1	0.55	0.2	0.76	3.6	1	0.55
0.2	0.26	3.6	2	0.37	0.2	0.9	3.6	1	0.65	0.2	0.9	3.6	1	0.65
0.2	0.61	3.6	2	0.87	0.2	10.4	3.6	1	7.46	0.2	10.4	3.6	1	7.46
= 287.045 m ³														
총 물량 (물량 합산) = (287.045 m³ × 17) × 2.4 = 11711.4 m³														

[표 5-14] 벽식 건축물 변경 30 MPa 몰량 산출 결과표 (계속)

1F						가로	세로	높이	개수	SUM	
	가로	세로	높이	개수	SUM	0.15	0.86	3.6	1	0.46	
B1	0.2	0.4	3.6	3	0.86	0.15	2.45	3.6	1	1.32	
B2	0.2	0.35	3.6	8	2.02	0.15	2.72	3.6	2	2.94	
B3	0.18	0.4	3.6	15	3.89	0.15	2.14	3.6	3	3.47	
B4	0.2	0.4	3.6	11	3.17	0.15	3.33	3.6	2	3.60	
W1	0.12	2.05	3.6	2	1.77	0.15	2	3.6	5	5.40	
	0.12	1.79	3.6	2	1.55	0.15	1.8	3.6	2	1.94	
	0.12	2.84	3.6	3	3.68	0.15	3.02	3.6	1	1.63	
	0.12	1.42	3.6	3	1.84	0.15	0.5	3.6	1	0.27	
	0.12	0.18	3.6	4	0.31	0.15	2.03	3.6	1	1.10	
	0.12	0.12	3.6	2	0.10	0.15	1.21	3.6	2	1.31	
	0.12	0.55	3.6	2	0.48	0.15	2.34	3.6	2	2.53	
	0.12	0.5	3.6	4	0.86	0.15	1.53	3.6	1	0.83	
	0.12	2.62	3.6	2	2.26	0.15	1.86	3.6	3	3.01	
	0.12	1.97	3.6	1	0.85	0.15	2.38	3.6	2	2.57	
	0.12	1.23	3.6	1	0.53	0.15	2.16	3.6	2	2.33	
	0.12	1.87	3.6	1	0.81	0.15	1.26	3.6	2	1.63	
	0.12	1.19	3.6	2	1.03	0.15	2.56	3.6	1	1.38	
	0.12	3.25	3.6	2	2.80	0.15	3.02	3.6	1	1.63	
	0.12	1.26	3.6	2	1.09	0.15	2.50	3.6	1	1.35	
	0.12	0.69	3.6	1	0.30	0.15	2.58	3.6	1	1.39	
	W2	0.12	8.67	3.6	2	7.49	0.15	3.32	3.6	1	1.79
		0.12	1.63	3.6	3	2.11	0.15	2.1	3.6	1	1.13
		0.12	2.25	3.6	1	0.97	0.18	1.82	3.6	1	1.18
		0.12	0.34	3.6	1	0.15	0.18	10.2	3.6	1	6.62
0.12		1.99	3.6	2	1.71	0.18	9.15	3.6	3	17.8	
0.12		1.79	3.6	2	1.55	0.18	1.05	3.6	3	2.04	
0.12		0.89	3.6	1	0.38	0.18	1.5	3.6	1	0.97	
0.12		2.23	3.6	1	0.96	0.18	10.4	3.6	1	6.72	
0.12		1.99	3.6	1	0.86	0.18	1.97	3.6	1	1.28	
0.12		2.56	3.6	2	2.21	0.18	2.27	3.6	1	1.47	
0.12		1.07	3.6	1	0.46	0.18	0.96	3.6	4	2.49	
0.12		2.66	3.6	1	1.15	0.18	0.7	3.6	2	0.91	
0.12		3.11	3.6	1	1.34	0.18	2.8	3.6	1	1.81	
0.12		1.68	3.6	4	2.90	0.18	4.7	3.6	2	6.09	
0.12		8.57	3.6	1	3.70	0.18	0.83	3.6	2	1.08	
0.12		3.79	3.6	1	1.64	0.18	2.19	3.6	2	2.84	
0.12		1.86	3.6	1	0.80	0.18	1.51	3.6	2	1.96	
0.12		0.14	3.6	1	0.06	0.18	1.21	3.6	1	0.78	
0.12		17.7	3.6	1	7.66	0.18	0.10	3.6	2	0.12	
0.12		0.33	3.6	1	0.14	0.18	2.2	3.6	1	1.43	
0.12	0.7	3.6	1	0.30	0.18	2.6	3.6	2	3.37		

[표 5-14] 벽식 건축물 변경 30 MPa 물량 산출 결과표

1F														
W4						W4								
가로	세로	높이	개수	SUM	가로	세로	높이	개수	SUM	가로	세로	높이	개수	SUM
0.18	6.91	3.6	1	4.47	0.18	3.65	3.6	1	2.37	0.18	4.77	3.6	1	3.09
0.18	1.48	3.6	1	0.96	0.18	1.26	3.6	1	0.82	0.18	6.58	3.6	1	4.26
0.18	0.29	3.6	1	0.19	0.18	7.05	3.6	1	4.57	0.18	2.03	3.6	1	1.32
0.18	2.99	3.6	1	1.94	0.18	1.59	3.6	1	1.03	0.18	1.3	3.6	1	0.84
0.18	5.9	3.6	1	3.82	0.18	1.04	3.6	1	0.67	0.18	3.51	3.6	1	2.27
0.18	1.82	3.6	2	2.35	0.18	0.5	3.6	2	0.65	0.18	0.5	3.6	2	0.65
0.18	2.12	3.6	2	2.74	0.18	2.57	3.6	1	1.67	0.18	2.57	3.6	1	2.57
0.18	1.32	3.6	2	1.70	0.18	3.96	3.6	1	2.57	0.18	0.76	3.6	1	0.49
0.18	0.59	3.6	2	0.77	0.18	0.9	3.6	1	0.58	0.18	10.4	3.6	1	6.71
0.18	0.55	3.6	6	2.14	0.18	4.55	3.6	1	2.95					
0.18	4.32	3.6	2	5.60										
0.18	3.2	3.6	2	4.15										
0.18	8.14	3.6	1	5.27										
0.18	3.68	3.6	1	2.39										
0.18	0.26	3.6	2	0.34										
0.18	0.61	3.6	2	0.78										
0.18	2.15	3.6	1	1.39										
												= 252.312 m ³		
총 물량 (물량 합산) = (252.312 m³ × 17) × 2.4 = 10294.3 m³														

다. 경제성 비교

위에서 계산된 물량 산출 결과를 토대로 기본 배합설계 기준 적산을 진행하였다. 기존 24 MPa의 기본 배합설계는 [표 5-15]에 나타내었고, 변경 30 MPa의 배합설계는 [표 5-16]에 나타내었다. 재료별 가격은 기사자료를 참고하여 선정하였고 [표 5-17]에 나타내었다. 본 재료들의 가격은 먼저 시멘트는 톤 당 98,000 원이며, 모래와 자갈의 가격은 톤 당 25,000 원, 바텀애쉬의 가격은 톤 당 40,000 원으로 책정했다. 이후 바텀애쉬를 사용하지 않은 일반 콘크리트와 바텀애쉬 혼입 최대 20%의 바텀애쉬 혼입 콘크리트 두 case의 적산을 진행하였고, 이후 경제성 비교를 실시했다.

[표 5-15] 24 MPa의 기본 배합설계

콘크리트 종류	Mix proportion (kg/m ³)					
	일반 콘크리트	W/C	Water	Cemenet	Sand	Coarse
	0.40	179	407	746	996	
바탕애쉬 혼입 콘크리트	W/C	Water	Cemenet	Sand	BA	Coarse
	0.401	179	407	597	149	996

[표 5-16] 30 MPa의 기본 배합설계

콘크리트 종류	Mix proportion (kg/m ³)					
	일반 콘크리트	W/C	Water	Cemenet	Sand	Coarse
	0.40	185	486	694	964	
바탕애쉬 혼입 콘크리트	W/C	Water	Cemenet	Sand	BA	Coarse
	0.40	185	486	555	139	964

[표 5-17] 재료별 가격

Cost for raw material (원/kg) 2)					
W/C	Water	Cemenet	Sand	Bottom ash	Coarse
-	0	98	25	40	25

2. 환경 영향 평가

바탕애쉬 활용 콘크리트의 전 과정 평가(life-cycle assessment, LCA) 목적은

2) 재료별 가격은 기사 및 보고서에서 참고하였음

<http://www.conslope.co.kr/news/articleView.html?idxno=72719>

<https://www.ajunews.com/view/20220321153444330>

https://biz.chosun.com/real_estate/real_estate_general/2022/04/17/EGD4Y54ADRCF5GPBBCAE2PH274/

바텀애쉬 골재를 사용한 콘크리트의 생산 및 운반 단계에서의 환경영향을 평가하고 비교하는 것이다. LCA의 절차는 ISO 14044(ISO 2017)에 기반하여⁶⁷⁾ 수행하였고, 각 구성재료들의 운반단계에서 가정한 생산지를 동일하게 적용하였다. 콘크리트 생산지인 레미콘 공장의 위치는 광주광역시 광산구로 가정하였다. 바텀애쉬 전 과정 평가절차를 요약하면 다음과 같다. 운반단계에서 고려된 시멘트, 천연골재, 혼화제 및 바텀애쉬 골재의 생산지는 각각 광주 광산구, 광주 광산구, 경기 평택 및 전남 여수이다. 상수도를 통해 조달되는 물의 운송단계에서의 투입물, 배출물은 무시했다. 운송수단으로서 시멘트는 벌크 트레일러를, 골재는 12t 트럭을, 감수제와 같은 혼화제는 1t 트럭을 적용했다. 생산된 콘크리트는 레미콘 트럭에 의해 현장까지 운반되는데, 이때의 운반거리는 각각 20 km, 100 km로 가정하였다.

전 과정 목록(life-cycle inventory, LCI) 분석은 시스템 경계에서 포함되는 재료와 운송수단들의 투입물과 배출물을 고려하여 제시한 환경부 Korea LCI DB(KEITI 2017) 자료를 이용하였다⁶⁸⁾. 시스템 경계는 콘크리트 구성 재료 및 운반 단계, 그리고 콘크리트 생산단계를 포함한다. 각 콘크리트 구성재료 및 운송수단들의 LCI 데이터를 [표 5-18]에 요약하였다. 바텀애쉬 골재는 석탄발전소에서의 포집단계를 고려하여 Chun(2007)이 제시한 LCI 데이터를 이용하였다⁶⁹⁾. 바텀애쉬 골재의 CO₂ 원단위는 1.09E-03 CO₂-kg/kg으로서 8.06E-04 CO₂-kg/kg인 천연모래보다 약 35% 높으며, 4.29E-03 CO₂-kg/kg인 파쇄 굵은 골재보다 약 75% 낮다. 콘크리트 배합을 위한 레미콘 설비와 레미콘 트럭은 탄소 연구단 LCI G-seed M LCI DB(KEITI 2018)를 이용하였다⁷⁰⁾.

[표 5-18] 콘크리트의 환경 하중 평가에 사용되는 LCI 데이터베이스 요약⁶⁹⁾

Item (FU)	Inventory for each environment load (kg/FU)								
	CO ₂	CO	SOX	NOX	NH ₃	Hard coal	Soft coal	Natural gas	Crude oil
OPC (kg)	9.31E-01	8.90E-02	0.00E-00	1.03E-03	4.36E-07	7.44E-03	1.80E-01	7.99E-03	2.42E-02
Gravel (kg)	4.29E-03	5.52E-06	1.42E-05	1.08E-05	9.78E-09	5.64E-08	2.87E-08	1.97E-04	2.00E-04
Natural sand (kg)	8.06E-04	1.67E-06	1.12E-08	1.03E-05	1.88E-11	4.94E-07	6.74E-07	1.04E-05	2.41E-04
Water - reducing agent (kg)	2.50E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Bottom ash (kg)	1.09E-03	1.98E-07	6.05E-06	2.65E-06	4.74E-09	4.55E-04	6.43E-06	2.73E-05	9.74E-05
Mixer (2.5m ³) (m ³)	7.10E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Trans- mixer truck (m ³ /km)	6.60E-01	2.13E-03	4.30E-08	7.87E-03	1.06E-08				

[표 5-11]에 나타낸 LCI 데이터를 이용하여 무생물 자원고갈, 지구온난화, 광화학산화물 생성, 산성화, 부영양화 및 인간독성 등의 각 범주에서 콘크리트의 환경영향 크기 (WI_i)는 식(4)을 이용하여 정량화하였다⁷⁰⁾.

$$WI_i = \frac{CI_i}{N_i} w_i = \frac{\sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j})}{N_i} w_i \quad (4)$$

여기서, CI_i 는 영향범주 i 에 포함된 모든 목록 항목(j)들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 번째 목록의 환경부하량이며, $eqv_{i,j}$ 는 영향범주 i 에 속한 j 번째 목록의 특성화 계수 값이다. N_i 는 영향범주 i 의 정규화 기준 값이며, w_i 는 영향범주 i 의 가중치 값이다.

콘크리트의 배합조건을 고려한 CO_2 를 포함한 환경부하요소들의 배출량은 [표 5-15 ~ 16]을 이용하였다. [표 5-19 ~]에는 성능평가표를 이용하여 강도별 바텀애쉬 활용 콘크리트의 CO_2 배출량 평가 예를 나타내었다. [표 5-12 ~ 13]은 기동식 건축물에 사용된 콘크리트의 CO_2 배출량을 산정하기 위해 사용하였고, [표 5-14 ~ 15]는 벽식 건축물에 사용된 콘크리트의 CO_2 배출량을 산정하기 위해 사용하였다. 오일 등의 자원소모 및 CO , NO_x , SO_x 등의 환경부하 물질들도 성능평가표에서 [표 5-18]에 나타낸 LCI 데이터를 대입하여 산출될 수 있다.

[표 5-19] 기동식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (24 MPa) (계속)

일반 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	407	9.31E-01	3.79E+02	130	5.92E-07	3.13E-02
Sand	746	8.06E-04	6.01E-01	30	1.14E-06	2.55E-02
Coarse	996	4.29E-03	4.27E+00	30	1.14E-06	3.41E-02
Water	179	1.12E-04	2.00E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	0	1.09E-03	0.00E+00	0	1.14E-06	0.00E+00
SUM			3.84E+02	SUM		9.09E-02
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	20	6.60E-01	2.64E+01
Total = 397.81 CO₂·kg/m³						

[표 5-19] 기동식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (24 MPa)

바탕애쉬 혼입 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	407	9.31E-01	3.79E+02	130	5.92E-07	3.13E-02
Sand	597	8.06E-04	4.81E-01	30	1.14E-06	2.04E-02
Coarse	996	4.29E-03	4.27E+00	30	1.14E-06	3.41E-02
Water	179	1.12E-04	2.00E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	149	1.09E-03	1.62E-01	130	1.14E-06	2.21E-02
SUM			3.84E+02	SUM		1.08E-01
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	20	6.60E-01	1.32E+01
Total = 397.87 CO₂·kg/m³						

[표 5-20] 기동식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (30 MPa) (계속)

일반 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	486	9.31E-01	4.52E+02	130	5.92E-07	3.74E-02
Sand	694	8.06E-04	5.59E-01	30	1.14E-06	2.37E-02
Coarse	964	4.29E-03	4.14E+00	30	1.14E-06	3.30E-02
Water	185	1.12E-04	2.07E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	0	1.09E-03	0.00E+00	0	1.14E-06	0.00E+00
SUM			4.57E+02	SUM		9.41E-02
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	20	6.60E-01	1.32E+01
Total = 471.19 CO₂·kg/m³						

[표 5-20] 기동식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (30 MPa)

바텀애쉬 혼입 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	486	9.31E-01	4.52E+02	130	5.92E-07	3.74E-02
Sand	555	8.06E-04	4.47E-01	30	1.14E-06	1.90E-02
Coarse	964	4.29E-03	4.14E+00	30	1.14E-06	3.30E-02
Water	185	1.12E-04	2.07E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	139	1.09E-03	1.52E-01	130	1.14E-06	2.06E-02
SUM			4.57E+02	SUM		1.10E-01
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	20	6.60E-01	1.32E+01
Total = 471.24 CO₂·kg/m³						

[표 5-21] 벽식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (24 MPa) (계속)

일반 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	407	9.31E-01	3.79E+02	130	5.92E-07	3.13E-02
Sand	746	8.06E-04	6.01E-01	30	1.14E-06	2.55E-02
Coarse	996	4.29E-03	4.27E+00	30	1.14E-06	3.41E-02
Water	179	1.12E-04	2.00E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	0	1.09E-03	0.00E+00	0	1.14E-06	0.00E+00
SUM			3.84E+02	SUM		9.09E-02
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	100	6.60E-01	6.60E+01
Total = 450.61 CO₂·kg/m³						

[표 5-21] 벽식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (24 MPa)

바텀애쉬 혼입 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	407	9.31E-01	3.79E+02	130	5.92E-07	3.13E-02
Sand	597	8.06E-04	4.81E-01	30	1.14E-06	2.04E-02
Coarse	996	4.29E-03	4.27E+00	30	1.14E-06	3.41E-02
Water	179	1.12E-04	2.00E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	149	1.09E-03	1.62E-01	130	1.14E-06	2.21E-02
SUM			3.84E+02	SUM		1.08E-01
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	100	6.60E-01	6.60E+01
Total = 450.67 CO₂·kg/m³						

[표 5-22] 벽식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (30 MPa) (계속)

일반 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	486	9.31E-01	4.52E+02	130	5.92E-07	3.74E-02
Sand	694	8.06E-04	5.59E-01	30	1.14E-06	2.37E-02
Coarse	964	4.29E-03	4.14E+00	30	1.14E-06	3.30E-02
Water	185	1.12E-04	2.07E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	0	1.09E-03	0.00E+00	0	1.14E-06	0.00E+00
SUM			4.57E+02	SUM		9.41E-02
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	100	6.60E-01	6.60E+01
Total = 523.99 CO₂·kg/m³						

[표 5-22] 벽식 건축물 CO₂ 평가를 위한 성능평가표 (30 MPa)

바탕애쉬 혼입 콘크리트						
Material phases						
Functional unit (FU) : m ³	Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	kg/FU	CO ₂ ·kg/kg	CO ₂ ·kg/FU	Distance (km)	CO ₂ ·kg/kg·km	CO ₂ ·kg/FU
OPC	486	9.31E-01	4.52E+02	130	5.92E-07	3.74E-02
Sand	555	8.06E-04	4.47E-01	30	1.14E-06	1.90E-02
Coarse	964	4.29E-03	4.14E+00	30	1.14E-06	3.30E-02
Water	185	1.12E-04	2.07E-02	0	-	-
Bottom ash coarse aggregate	0	-	-	0	-	-
Bottom ash fine aggregate	139	1.09E-03	1.52E-01	130	1.14E-06	2.06E-02
SUM			4.57E+02	SUM		1.10E-01
Production phase for fresh concrete						
	Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)		
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E
	FU	CO ₂ ·kg/m ³	CO ₂ ·kg/m ³	km	CO ₂ ·kg/m ³ ·km	CO ₂ ·kg/FU
Facilities	1 m ³	7.10E-01	7.10E-01	100	6.60E-01	6.60E+01
Total = 524.04 CO₂·kg/m³						

제 3절 실험 결과

1. 경제성 측면

바텀애쉬 활용 측면에서 경제성은 반드시 고려되어야 할 부분이다. 생산비용 측면에서 바텀애쉬 골재는 거의 모든 경우 잔골재에 비해 가격이 고가이다. 일반 잔골재는 강이나 석산, 혹은 바다에서 채취한 후 간단한 체가름, 혹은 일부의 경우 세척만 하면 납품이 가능하다. 그러나 바텀애쉬의 경우 공극률 감소와 입형의 개선을 위해 약간이라도 파쇄 혹은 분쇄 과정을 거치는 것이 필요하며, 그렇지 않을 경우 콘크리트 품질관리를 위해 별도의 비용이 발생할 가능성이 높다. 바텀애쉬 발생량을 고려하였을 때, 바텀애쉬를 콘크리트에 공학적 성능에 문제가 생기지 않을만큼 골재로 최대 20%만 사용하는 것이 가장 효과적 및 현실적이라고 생각한다⁶⁵⁾.

본 분석에서 진행한 경제성 비교 결과 기존 24 MPa의 일반 콘크리트의 가격은 1 m³당 83,436 원이며 바텀애쉬 혼입 콘크리트의 가격은 1 m³당 85,671 원이다. 변경 30 MPa의 일반 콘크리트 가격은 1 m³당 89,078 원이며 바텀애쉬 혼입 콘크리트의 가격은 1 m³당 91,163 원이다. 이를 대상 건축물에 적용하였고 그 결과는 다음과 같다. 먼저 기동식 구조물의 경우 24 MPa의 강도 사용 시 일반 콘크리트의 가격은 127,702,970 원이다. 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 본 건물의 바텀애쉬 사용량은 244,888 kg이며, 콘크리트 가격은 131,123,749 원이다. 이 경우 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 경제성 측면에서 약 2.68 % 증가(3,420,779 원)하게 된다. 30 MPa 사용 시에는 일반 콘크리트 가격이 94,828,876 원이다. 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 바텀애쉬 사용량은 170,330 kg이며, 콘크리트 가격은 97,048,483 원이다. 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 경제성 측면에서 약 2.34 % 증가하게 되고, 24 MPa와 30 MPa의 두 가지 경우 모두 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 경제성 측면에서 증가하게 되지만, 이는 바텀애쉬를 사용함으로써 기대하는 긍정적인 효과가 더 크기 때문에 사용하는 것이 더 좋은 방향으로 이끄는 것이라고 생각한다. 벽식 구조물의 경우도 동일하게 적산을 진행하였고, 24 MPa의 강도 사용 시 일반 콘크리트의 가격은 977,152,370 원이다. 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 본 건물의 바텀애쉬 사용량은 1,815,267 kg이며, 콘크

리트 가격은 1,003,327,349 원이다. 30 MPa 사용 시에는 일반 콘크리트 가격이 916,995,655 원이다. 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 바텀애쉬 사용량은 159,617 kg이며, 콘크리트 가격은 938,459,271 원이다. 24 MPa과 30 MPa의 두 가지 경우 모두 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 경제성 측면에서 약 2.68 % 상승하게 되지만, 이는 바텀애쉬를 사용함으로써 기대하는 긍정적인 효과가 더 크기 때문에 사용하는 것이 더 좋은 방향으로 이끄는 것이라고 생각한다.

[표 5-23] 대상건축물 경제성 평가 결과

구조형식	설계강도	콘크리트 종류	물량(m³)	원/m³	가격(원)
기동식	24 MPa	일반 콘크리트	1530.55	83,436	127,702,970
		바텀애쉬 혼입 콘크리트	1530.55	85,671	131,123,749
	30 MPa	일반 콘크리트	1064.56	89,078	94,828,876
		바텀애쉬 혼입 콘크리트	1064.56	91,163	97,048,483
벽식	24 MPa	일반 콘크리트	11711.4	83,436	977,152,370
		바텀애쉬 혼입 콘크리트	11711.4	85,671	1,003,327,349
	30 MPa	일반 콘크리트	10294.3	89,078	916,995,655
		바텀애쉬 혼입 콘크리트	10294.3	91,163	938,459,271

2. 환경적 측면

미국의 ACI 229R-13의 CLSM에 대한 성능규정에서도 바텀애쉬의 대량 활용을 적극 권장하고 있으나, 우리나라와 마찬가지로 환경 기준에 대한 언급은 없다. 일반적인 부산물 활용 시 복잡한 자원 활용 관련 법률체계하에서 행정적으로 활용이 매우 어려운 경우가 많으나 바텀애쉬의 경우 다른 부산물에 비해 환경적 문제가

없기 때문에 상대적으로 행정적인 장벽이 낮을 수 있다. 뿐만 아니라, 바텀애쉬를 콘크리트에 활용함으로써 얻어지는 환경적 이득, 즉 기존의 야적 폐기 혹은 지반노출재로서 활용되었을 때 발생하는 환경문제의 제어, 그리고 동시에 일반골재와 같은 천연자원의 보존이 발생한다. 실제 바텀애쉬 사용으로 인한 천연 자원보호 및 바텀애쉬 폐기 시 발생할 환경적 비용을 통합적으로 고려한 환경영향성 평가 사례는 확인할 수 없었다. 물론, 일반적으로 시멘트나 천연 모래와 자갈 모두 지역 및 국가에 따라 생산 시 발생하는 환경비용이 다르긴 하지만, 대략적으로 바텀애쉬를 잔골재로 사용하는 것은 플라이애쉬를 시멘트와 치환하는 것에 비해 이산화탄소 배출량 등의 환경영향성 측면에서 이득이 적다고 예상된다. 일반적으로 바텀애쉬는 플라이애쉬와 달리 콘크리트에의 사용을 위해 체가름하거나 세척, 혹은 파쇄해야 하는 점, 그리고 일반골재에 비해 바텀애쉬가 재료 생산처에서 골재 처까지의 운반 거리가 길 경우가 많다는 점 때문이다⁶⁵⁾.

가. CO₂ 배출량 평가

바텀애쉬 골재를 활용한 콘크리트의 CO₂ 배출량을 평가하였다. 이 분석에서는 바텀애쉬 재활용 측면에서의 바텀애쉬 활용 콘크리트의 환경영향 평가에 중점을 두었으므로 바텀애쉬 활용 콘크리트의 압축강도 및 내구성 등의 기술적인 측면은 분석에서 고려하지 않았다. 콘크리트 구성재료 단계에서의 CO₂ 배출량에 대한 바텀애쉬 골재 양의 영향은 [표 5-19 ~ 22]에서 나타낸 바와 같이 약 0.1% 이하로 매우 미미하다. 기동식 건축물과 벽식 건축물 각각에 사용된 콘크리트의 CO₂ 배출량을 평가한 성능평가표를 살펴보면, 먼저 기동식 건축물에 사용된 24 MPa 기준 일반 콘크리트의 CO₂ 배출량은 1 m³당 397.81 CO₂·kg이고, 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 배출량은 1 m³당 397.87 CO₂·kg이다. 30 MPa 기준 일반 콘크리트의 CO₂ 배출량은 1 m³당 471.19 CO₂·kg이며, 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 배출량은 1 m³당 471.24 CO₂·kg이다. 마찬가지로, 벽식 건축물에 사용된 24 MPa 기준 일반 콘크리트의 CO₂ 배출량은 1 m³당 450.61 CO₂·kg이고, 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 발생량은 1 m³당 450.67 CO₂·kg이다. 30 MPa 기준 일반 콘크리트의 CO₂ 배출량은 1 m³당 523.99 CO₂·kg이며, 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 발생량은 1 m³당 524.04 CO₂·kg이다. 기동식과 벽식 건축물 모두 강도 기준으로 보았을 때 CO₂

발생량에 큰 변화는 없지만 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용했을 때에는 일반 콘크리트를 사용했을 때보다 CO₂ 발생량이 약 0.01 % 증가하는 것을 알 수 있다.

이에 대상 건축물에 적용한 결과는 [표 5-24]와 같다. 기동식 건축물의 경우 동일 강도에서 콘크리트 종류로 CO₂ 배출량을 비교했을 때에는 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 배출량이 약 0.02 %(92 CO₂·kg) 증가하지만 동일 재료 측면에서 보았을 때는 각각 약 17.62 % 감소하는 것을 알 수 있다. 벽식 건축물의 경우도 동일 강도에서 콘크리트 종류로 CO₂ 배출량을 비교했을 때에는 바텀애쉬 혼입 콘크리트 사용 시 CO₂ 배출량이 약 0.01 %(703 CO₂·kg) 증가하고 동일 재료 측면에서 보았을 때도 약 2.21 %(116,836 CO₂·kg) 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 본 평가에서는 대상 건축물 모두 30 MPa 강도의 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 CO₂ 배출량 측면에서 유리한 것으로 보인다.

[표 5-24] 대상건축물 CO₂ 배출량 평가 결과

구조 형식	콘크리트 종류	24 MPa			30 MPa		
		물량(m ³)	CO ₂ /m ³	총 CO ₂ 배출량 (CO ₂ ·kg)	물량(m ³)	CO ₂ /m ³	총 CO ₂ 배출량 (CO ₂ ·kg)
기동식	일반 콘크리트	1530.55	397.81	608,868	1064.56	471.19	501,610
	바텀애쉬 혼입 콘크리트	1530.55	397.87	608,960	1064.56	471.24	501,663
벽식	일반 콘크리트	11711.4	450.61	5,277,274	10294.3	523.99	5,394,110
	바텀애쉬 혼입 콘크리트	11711.4	450.67	5,277,977	10294.3	524.04	5,394,625
	일반 콘크리트	11711.4	450.61	5,277,274	10294.3	523.99	5,394,110

제 6장 결 론

본 연구에서는 바텀애쉬를 잔골재 대체제로 활용한 모르타르의 물리적 및 내구성 성능, 그리고 활용에 대한 경제적, 환경적 측면에 대해 연구하고 분석해보았다. 이러한 내용을 바탕으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 국내 천연골재의 절대적 부족으로 인해 무분별한 석산개발과 바닷모래 채취로 인해 환경파괴가 큰 사회적인 문제로 대두되고 있는 반면에, 시멘트 등 원자재 수급에 어려움이 생기고, 재건 수요가 증가하면서 늘어난 공사물량으로 인한 모래 부족 문제가 발생되고 있다. 또한 정부는 환경오염에 큰 영향을 주는 화력발전소의 수를 줄이겠다 선언했지만, 2050년까지 가동되는 화력발전소의 부산물의 처리에 대해서도 반드시 생각해야 할 문제이다. 천연모래의 공급량 부족 및 심각한 환경훼손을 야기하는 화력발전소에서 생성되는 바텀애쉬를 활용할 수 있는 방안을 마련한다면 부족한 골재 시장 및 환경에 긍정적인 영향을 가져올 것이라고 기대하고 있다.

- 2) 본 연구에서는 바텀애쉬를 콘크리트의 잔골재 대체제로 활용하기 위한 기초적인 자료로 활용하기 위해 실험을 진행했다. 바텀애쉬 2종(분쇄/미분쇄)을 사용하여 모르타르 형식으로 실험을 진행했으며, 물리적 성능 및 내구성 분석을 통해 바텀애쉬 최대치환율을 판단하였다. 실험결과, 바텀애쉬의 대체율에 따른 압축강도 및 염해와 탄산화 깊이 변화가 미미한 것으로 나타나, 바텀애쉬를 최대 20%까지 대체하여 사용해도 콘크리트 특성에 영향을 미치지 않고 사용이 가능할 것으로 판단했다. 이에 본 재료를 콘크리트 규모로 사용했을 때 경제성 및 환경영향 비교를 위해 대상 건축물 2개를 선정해 분석을 진행했다. 내구성 기준 만족(탄산화) 및 안전 등의 이유로 기존 24 MPa와 30 MPa 사용 시 단면 조정 후 두 case를 분석하였다. 경제성 비교 결과, 강도설계기반으로 보았을 때는 가격이 약 25.74 %(32,874,094 원) 감소하였고, 재료 측면에서 보면 가격이 약 2.68 %(3,420,779 원) 증가하지만 이는 바텀애쉬를 사용함으로써 긍정적인 효과가 더 크기 때문에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보여진다. 이후 환경영향 평가를 진행한 결과 일반 콘크리트를 사용

했을 때보다 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하면 CO₂ 발생량이 약 0.02 % 미미하게 상승했다. 벽식 건축물의 경우에는 강도를 높여 사용한다면 CO₂ 발생량이 약 2.2 % 증가하는 경향을 보였지만, 기동식 건축물은 강도를 높여 사용한다면 환경영향 측면에서 약 17.62 % 감소하는 매우 긍정적인 결과가 나왔다. 경제성 및 환경영향을 다 고려한다면 30 MPa의 일반 콘크리트를 사용하는 것이 가장 좋지만, 골재 부족 문제 및 환경훼손 문제까지 고려한다면 30 MPa의 바텀애쉬 혼입 콘크리트를 사용하는 것이 좋을 것이라고 판단된다.

참고문헌

- 1) 국토교통부 국토과학기술진흥원, 고로스래그 및 바텀애쉬를 이용한 상온 경화형 인공 잔골재 개발 최종 보고서, pp1-6
- 2) 지식경제부, 제 5차 전력수급기본계획 (2010-2024)
- 3) Ministry of Trade, Industry and Energy. (2015). Seventh Electricity Supply Plan.
- 4) 산업통상자원부, 제 9차 전력수급기본계획 (2020-2034)
- 5) Meng, J.H., Kim, T.Y., Cho, H.N., Kim, E.Y. (2015). Minimizing Environmental Impact of Ash Treatment in Thermal Power Plants(II), Korea Environment Institute [in Korean].
- 6) Park, S. G., & Kim, J. M. (2012). Present status and recycling technology for bottom ash in Korea. Magazine of RCR, 7(1), 9-12.
- 7) 김형무(2006), 바텀애쉬를 활용한 콘크리트의 강도 특성에 관한 연구, 부산대학교, 석사학위논문.
- 8) M. Singh, R. Siddique, Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, Resour. Conserv. Recycl. 72 (2013) 20-32.
- 9) S.A. Mangi, M.H. Wan Ibrahim, N. Jamaluddin, M.F. Arshad, R. Putra Jaya, Short-term effects of sulphate and chloride on the concrete containing coal bottom ash as supplementary cementitious material, Eng. Sci. Technol. Int. J.22 (2019) 515-522.
- 10) A. Marto, C.S. Tan, Properties of coal bottom ash from power plants in Malaysia and its suitability as geotechnical engineering material, J. Teknol. 78 (2016) 1-10.
- 11) Y. Bai, F. Darcy, P.A.M. Basheer, Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate, Constr. Build. Mater. 19 (2005) 691-697.
- 12) I. Yüksel, T. Bilir, Ö. Özkan, Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate, Build Environ. 42 (2007) 2651-2659.
- 13) I. Yuksel, A. Genc, Properties of concrete containing nonground ash and

- slag as fine aggregate, *ACI Mater. J.* 104 (2007) 397-403.
- 14) T.R. Naik, R.N. Kraus, Y.M. Chun, S.O. Nageotte, 2007, Coal-Combustion bottom ash for reducing shrinkage of concrete made with Portland cement and sulfoaluminate cement.” Report No CBU-2006-22 REP-621; 1-13.
 - 15) I.B. Topcu, T. Bilir, Effect of bottom ash as fine aggregate on shrinkage cracking of mortars, *ACI Mater. J.* 107 (2010) 48-56.
 - 16) H.K. Kim, H.K. Lee, Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregate in high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1115-1122.
 - 17) M. Singh, R. Siddique, Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate, *J. Clean Prod.* 91 (2015) 269-278.
 - 18) B. Zhang, C.S. Poon, Use of furnace bottom ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties, *J. Clean. Prod.* 99 (2015) 94-100.
 - 19) E. Baite, A. Messan, K. Hannawi, F. Tsobnang, W. Prince, Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger), *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 919-926.
 - 20) M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. Hussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Constr. Build. Mater.* 116 (2016) 15-24.
 - 21) E. Aydin, Novel coal bottom ash waste composites for sustainable construction, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 582-588.
 - 22) H.K. Kim, J.H. Jeon, H.K. Lee, Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal- and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 249-256.
 - 23) A. Abdulmatin, W. Tangchirapart, C. Jaturapitakkul, An investigation of bottom ash as a pozzolanic material, *Constr. Build. Mater.* 186 (2018) 155-162.
 - 24) S.S.G. Hashemi, H. Mahmud, C.G. Tan, B.C. Ang, C. Kuenzel, N. Ranjbar, Safe disposal of coal bottom ash by solidification and stabilization techniques, *Constr. Build. Mater.* 197 (2019) 705-715.

- 25) N. Singh, M. Mithulraj, S. Arya, Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self-compacting concrete blended with metakaolin, *Resour. Conserv. Recycl.* 144 (2019) 240-251.
- 26) C. Jaturapittakul, R. Cheerarot, Development of bottom ash as pozzolanic material, *J. Mater. Civ. Eng.* 15 (2003) 48-53.
- 27) N. Ghafoori, J. Bucholc, Properties of high-calcium dry bottom ash concrete, *ACI Mater. J.* 94 (1997) 90-101.
- 28) S.C. Kou, C.S. Poon, Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2877-2886.
- 29) L.B. Andrade, J.C. Rocha, M. Cheriaf, Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 609-614.
- 30) M.S.H.M. Sani, F. Muftah, Z. Muda, The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement, *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.* 1 (2010) 65-76.
- 31) R. Siddique, Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1444-1450.
- 32) M. Singh, R. Siddique, Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 246-256.
- 33) S. Oruji, N.A. Brake, L. Nalluri, R.K. Guduru, Strength activity and microstructure of blended ultra-fine coal bottom ash-cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 317-326.
- 34) C. Argiz, M.A. Sanjuan, E. Menendez, Coal bottom ash for Portland cement production, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 1 (2017) 1-7.
- 35) N.M. Sigvardsen, L.M. Ottosen, Characterization of coal bio ash from wood pellets, low-alkali coal fly ash and use as partial cement replacement in mortar, *Cem. Concr. Comp.* 95 (2019) 25-32.
- 36) X.X. Ge, M. Zhou, H. Wang, Z. Liu, H. Wu, X. Chen, Preparation and

- characterization of ceramic foams from chromium slag and coal bottom ash, *Ceramics Int.* 44 (2018) 11888-11891.
- 37) M. Shahbaz, S. Yusup, A. Inayat, M. Ammar, A. Pratama, Cleaner production of hydrogen and syngas from catalytic steam palm kernel shell gasification using CaO sorbent and coal bottom ash as a catalyst, *Energy Fuels*. 31 (2017) 13824-13833.
- 38) N. Jamaludin, A.F. Hamzah, M.H. Wan Ibrahim, R. Putra Jaya, M.F. Arshad, N.E. Zainal Abidin, N.H. Dahalan, Fresh properties and flexural strength of selfcompacting concrete integrating coal bottom ash, *MATEC Web Conf.* 47 (2016) 1-6. 010102016.
- 39) P. Onprom, K. Chaimoon, R. Cheerarot, Influence of bottom ash replacements as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 8 (2015).
- 40) H. Kurama, I. Topcu, C. Karakurt, Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 767-773.
- 41) A. Sachdeva, G. Khurana, Strength evaluation of cement concrete using bottom ash as a partial replacement of fine aggregates, *Int. J. Sci. Eng. Technol.* 3 (2015) 189-194.
- 42) I. Yuksel, R. Siddique, Ö. Özkan, Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 967-972.
- 43) H. Kurama, M. Kaya, Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1922-1928.
- 44) H.K. Lee, H.K. Kim, E.A. Hwang, Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete, *Waste Manage.* 30 (2010) 274-284.
- 45) A.U. Abubakar, B. Khairul Salleh, Properties of concrete using tanjung bin power plant coal bottom ash and fly ash, *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Tech.* 3 (2012) 56-69.
- 46) D. Kumar, A. Gupta, S. Ram, Uses of bottom ash in the replacement of

- fine aggregate for making concrete, *Int. J. Curr. Eng. Technol.* 4 (2014) 3891-3895.
- 47) P.U. Aswathy, M.M. Paul, Behaviour of self-compacting concrete by partial replacement of fine aggregate with coal bottom ash, *Int. J. Innovat. Res. Adv. Eng.* 2 (2015) 45-52.
- 48) A.F. Hamzah, M.H. Ibrahim, N. Jamaluddin, R. Putra Jaya, M.F. Arshad, N.E. Zainal Abidin, E. Abd Manan, N.A. Omar, Nomograph of self-compacting concrete mix design incorporating coal bottom ash as partial replacement of fine aggregates, *J. Eng. App. Sci.* 11 (2016) 1671-1675.
- 49) M.S. Kiran Kumar, K.S. Harish, M. Ramesh, Experimental study on partial replacement of fine aggregate by bottom ash in cement concrete, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 5 (2018) 1-5.
- 50) K. Muthusamy, M.H. Rasid, F. Mat Yahaya, M.A. Sulaiman, S.M. Syed Mohsin, N.N. Tukimat, R. Omar, S.C. Chin, Compressive strength performance of OPS lightweight aggregate concrete containing coal bottom ash as partial fine aggregate replacement, *IOP Conf. Ser Mater. Sci. Eng.* 342 (2018).
- 51) T. Balasubramaniam, G.S. Thirugnanam, An experimental investigation on the mechanical properties of bottom ash concrete, *Indian J. Sci. Technol.* 8 (2015) 992-997.
- 52) T. Bakoshi, K. Kohno, S. Kawasaki, N. Yamaji, Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate, *ACI Spec. Publ.* 179 (1998) 159-172.
- 53) R. Kasemchaisiri, S. Tangtermsirikul, Properties of self-compacting concrete incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate, *Sci. Asia* 34 (2008) 87-95.
- 54) M. Singh, R. Siddique, Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 620-630.
- 55) P. Aggarwal, Y. Aggarwal, S.M. Gupta, Effect of bottom ash as

- replacement of fine aggregates in concrete, Asian J. Civil Eng. (Build. Hous.) 8 (2007) 49-62.
- 56) Y. Bai, P.A.M. Basheer, Influence of furnace bottom ash on properties of concrete, Struct. Build. 156 (2003) 85-92.
- 57) P.A.M. Basheer, Y. Bai, Strength and durability of concrete with ash aggregate, Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build. 158 (2005) 191-199.
- 58) A.F. Hamzah, 2017. Durability of self-compacting concrete with coal bottom ash as sand replacement - Material under aggressive environment. PhD Thesis UTM.
- 59) N. Ghafoori, Y. Cai, Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: part-I-mechanical properties, ACI Mater. J. 95 (1998) 121-130.
- 60) M. Rafieizonooz, M. Razman, J. Mirza, M.W. Hussin, Toxicity characteristics and durability of concrete containing coal ash as substitute for cement and river sand, Constr. Build. Mater. 143 (2017) 234-246.
- 61) N. Thomas, N.N. Thaickavil, P.M. Wilson, Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, J. Build. Eng. 19 (2018) 349-365.
- 62) S. Cheng, Z. Shui, T. Sun, R. Yu, G. Zhang, Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials, Constr. Build. Mater. 171 (2018) 44-53.
- 63) A. Wongsas, Y. Zaetang, V. Sata, P. Chindaprasirt, Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates, Constr. Build. Mater. 111 (2016) 637-643.
- 64) H.K. Kim, J.G. Jang, Y.C. Choi, H.K. Lee, Improved chloride resistance of high strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing, Constr. Build. Mater. 71 (2014) 334-343.
- 65) 김형기. (2020). 총설: 콘크리트 및 모르타르를 위한 석탄 바텀애시의 활용. 한국건설순환자원학회논문집, 8(3), 333-348.
- 66) 지구배, 김희재, & 양근혁. (2019). 바텀애시 골재 콘크리트의 CO₂ 배출량

- 및 환경영향 평가. 콘크리트학회 논문집, 31(5), 485-492.
- 67) ISO/TC 207/SC 5 (2017) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines - Amendment 1 (ISO 14044:2006/AMD 1:2017). Switzerland, Geneva: International Organization for Standardization (ISO). 1-3.
- 68) Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI) (2017) Ministry of Environment. 5 January 2017.
<http://www.epd.or.kr/lci/lciDb.do>. Accessed 3 March 2019.
- 69) Chun, H. P. (2007) A Study on the Application Method of Life Cycle Assessment to Evaluate Environmental Impact in Construction. Doctoral Thesis. Seoul National University. (In Korean)
- 70) Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI) (2018) Ministry of Land LCI. 17 August 2018.
<http://www.g-seed-m.org>. Accessed 3 March 2019.
- 71) Yang, K. H., and Seo, E. A. (2014) A Model for Lifecycle CO2 Assessment of Building Structures Considering the Mixture Proportions of Concrete. Journal of the Korea Concrete Institute 26(2), 201-210. (In Korean)
- 72) Park, J.Y. (2014). Assessing determinants of industrial waste reuse: The case of coal ash in the United States, Resources, Conservation and Recycling, 92, 116-127.

감사의 글

지난 2년간의 노력이 결실을 맺을 수 있게 도와주신 분들에게 감사의 글을 전합니다.

먼저, 2년간 저를 지도해주시고 많은 것을 가르쳐주신 김형기 교수님께 감사드립니다. 교수님 덕분에 석사졸업이라는 큰 일을 해낼 수 있었던 것 같습니다. 교수님께 배운 지식과 베풀어주신 은혜 절대 잊지 않고 사회에 나가서도 멋진 건축인이 되겠습니다. 항상 응원해주시고 따뜻하게 격려의 말씀 아끼지 않으신, 황태연 교수님, 김태훈 교수님, 조규만 교수님, 조창근 교수님, 최재혁 교수님, 김주욱 교수님 감사드립니다.

저에게 연구실 생활은 즐거움과 두려움이었지만 잘 적응할 수 있게 도와주신 이효경 박사님, 전상민 오빠, 구서경, 말은 잘 안통하지만 도움이 필요할땐 항상 흔쾌히 도와준 아벨, 미뉴에, 미카엘, 저와 함께 같이 고생하고 도와주며 석사과정을 잘 마무리할 수 있게 된 안재성 석사생, 사소한 도움이라도 주고싶어했던 연구실 멤버들 김유진 언니, 이정익, 홍수빈, 많은 양의 실험을 함께하고, 1년동안 동고동락했던 강민성 오빠, 김태균 오빠, 김형진 오빠, 김지성 오빠, 신여진, 대학교 4년 친구이자 대학원 동기로서 언제나 힘이 되주고 든든한 내 편인 문길현, 논문 쓰는 내내 많은 도움을 준 RC 연구실 최용준 오빠, 이선주 오빠, 김효주, 조명현, 장수현, 김정우, 문선영, 옆에서 항상 할 수 있다며 열심히 서포트해준 자존감 지킴이 차현호, 제 대학생활의 전부이며, 항상 든든한 친구들인 문길현, 박준상, 장민호, 심보욱, 이도현, 신홍래, 김정길, 김도엽, 김진혁, 박영태에게도 감사하다고 전하고자 합니다. 마지막으로 사랑하는 우리 아빠, 엄마, 동생, 항상 응원해주시고 지원해주셔서 정말 감사드립니다.

제가 힘들 때 응원해주시고 격려해주신 모든 분들께 감사드리며 모든 분들을 적을 수 없기에 너그러운 마음으로 이해해주시길 바라며 다시 한번 감사의 말 드립니다.