

Global Report

건설용 신규 친환경 재료인 지오폴리머 콘크리트

1. 개요
2. 소개
3. 재료와 방법
4. 결과 및 분석
5. 결론

1. 개요

오늘날 환경의 건강함은 가장 중요한 관심 주제로 취급받고 있다. 이산화탄소 및 기타 유해가스가 대기 중으로 배출되는 것은 심각한 문제이면서 환경변화의 근본적 원인이 되고 있다. 한편 자원의 불가용성 문제와 대량의 탄소 발자국으로 인하여 시멘트의 제조는 꾸준히 감소하고 있다. 이러한 모든 문제들을 극복하기 위하여 이산화탄소 저방출 재료 및 알루미늄 실리케이트가 풍부한 재료가 보통 시멘트 대신에 결합재로 사용되고 있다. 이 보고서에서는 강도와 내구성을 향상시키기 위해 다양한 배합의 결합재와 첨가재를 넣은 지오폐리머 콘크리트의 물리적 및 기계적 특성을 연구하기 위해서 많은 연구진들에 의해 이루어진 최근의 실험결과를 검토코자 한다. 콘크리트의 개발에 다양한 산업부산물의 사용이 권장되었으며 지오폐리머 콘크리트에 대한 시공연도, 온도변화에 따른 영향, 혼화재, 섬유재의 사용 및 물결합재 비율 등이 조사되었다. 연구결과 단부 갈고리형 강섬유 보강 지오폐리머 콘크리트의 압축강도가 관리기준 배합 지오폐리머 배합의 강도에 비해 더 높았다.

2. 소개

단량체 분자들과 반응성 화학물질 사이에서 반응과정이 일어나 3차원 사슬을 이루는 것을 일반적으로 중합(polymerization)이라고 한다. 지오폐리머는 알루미늄과 실리카가 풍부한 기본물질이 매우 강한 알칼리 용액과 반응(“지오폐리머 화”라 불림)할 때 형성되는 무기질 재료이다. 따라서 요약하자면 지오폐리머 콘크리트는 일반 콘크리트 재료의 지속 가능한 대체재로 표현될 수 있다. 지오폐리머 콘크리트라는 용어는 1974년에 Davidovits에 의해 처음으로 명명되고 분석되었다. 최근 IMMT Bhubaneswar 전국 대회에서 지구상의 석회석 보존량이 나날이 감소하고 있는 것으로 밝혀지고 있다. 그러므로 석회석의 부족은 시멘트의 원료이므로 시멘트의 생산에 치명적으로 영향을 미치게 될 것이다. 이러한 최악의 상황을 극복하기 위하여 많은 과학자와 연구진들은 콘크리트 속의 시멘트 함유량을 부분 또는 전체적으로 대체하거나 시멘트와 같은 포졸란 특성을 지닌 폐 산업부산물을 이용하는 다양한 방법과 기회들을 찾게 되었다. 시멘트를 대체해야 하는 또 다른 심각한 이유로는 전 세계적으로 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 줄여야 하는 것이 있다.

시멘트의 제조 과정에서의 탄소 배출량은 15억톤으로 이는 일년 동안 전 세계적으로 총 이산화탄소 배출량의 5~7%에 해당하며 환경오염에 가장 크게 기여하는 것으로 기록되고 있다. 따라서 이산화탄소 배출이 적은 결합재가 메타카올린, GGBSFS(고로슬래그, Ground Granulated Blast Furnace Slag), 팜유 연료 재(Palm Oil Fuel Ash), 소성점토(calcinated clays), 왕겨 재(Rice Husk Ash) 및 일부 천연 제올라이트와 같은 실리카 및 알루미늄이 풍부한 산업부산물에서 추출되고 있다. 이산화탄소 배출은 지오폐리머 콘크리트 제조 시 60% 정도 감소하는 것으로 알려져 있다. 메타카올린은 모든 다른 결합재 가운데에서 가장 우수한 것으로 입증되었으며 메타카올린 지오폐리머는 지속성을 특징으로 하고 있다. 그러나 많은 물을 필요로 하는 특성은 일부 심각한 유동성 부여 오류(rheological errors)로 인해 과한 유동성이 발생하는 경우도 있다. 따라서 연구자들에 의해 다른 재료가 고려되어야 하는 것이 아닌지 문제 제기도 되었다. 최근 몇 년 동안 지오폐리머 콘크리트에 대한 연구는 국제적인 차원으로 높이 평가되고 있는데 과학자들과 연구자들에게 그 혁신을 배가하도록 장려되고 있다. Zhang et al.(2018)은 상온과 고온 모두에서 샘플의 접착 특성 변화를 파악하기 위해 다양한 직경의 철근으로 보강된 90개의 지오폐리머 콘크리트 큐브를 가지고 실시한 시험결과를 조사하였다. 플라이애시 기반의 지오폐리머 콘크리트는 상온 양생한 것에 비하여 고온 양생한 것이 가장 좋은 압축강도를 발현하였다. 또한 지오폐리머 콘크리트의 접착강도는 섭씨 300도를 초과하는 고온의 경우 그 강도가 감소하는 것으로 연구가 되었다.

3. 재료와 방법

3.1 재료

결합재(binder) : 앞서 살펴본 바와 같이 산업 폐기물은 과학자와 연구진들에 의해 크게 권장되고 있는데 그 이유는 이 산업 폐기물이 환경에는 유해하지만 접합성이 기존 시멘트를 대체할 정도로 우수하고 저탄소 발자국에도 기여하기 때문이다. 대부분의 연구자들은 지오폴리머 콘크리트의 제조에 OPC의 주요 대체재로서 플라이애시를 사용하였다. 그들 중 일부는 기계적 특성에 다양한 변화를 연구하기 위하여 지오폴리머 콘크리트 배합에 다양한 비율의 플라이애시와 GGBS(고로슬래그)를 사용하였다. 마찬가지로 OPC를 대체하는 결합재로서 GGBS만을 가지고 연구한 경우도 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 그러나 2017년 J. Venkateswararao, K. Srinivasa Rao and K. Rambabu는 유리섬유 보강 지오폴리머 콘크리트의 성능을 연구하기 위하여 한정된 비율로 플라이애시, GGBS 및 OPC를 사용하였다. 종이 슬러지 재(Paper sludge ash), 메타카올린(Metakaolin), 고마그네슘 니켈 슬래그(High Magnesium Nickel Slag - HMNS) 등도 연구 목적으로 사용될 수 있다.

골재 : IS기준에 일치하는 세골재가 실험목적으로 사용되었다. 세골재에 대한 시험은 IS 2386 (Part III)-1963에 일치되어야만 한다. 세골재 입자의 크기는 2mm를 초과해서는 안 된다. 지오폴리머 콘크리트의 경우 조골재의 규격은 10~20mm가 선호된다. 경우에 따라 단부 갈고리 모양 강섬유, 재활용 고무조각 또는 부스러기, 화강암 분쇄석, 가공된 공랭식 구리 슬래그와 같은 조골재의 부분 대체재가 실험목적으로 기타재료로 고려되기도 한다.

알칼리용액(Alkaline solution) : 일반적으로 수산화 나트륨 또는 수산화 칼륨 펠렛을 물에 용해시켜 발열반응이 일어나는 용액을 만든다. 수산화 나트륨 또는 수산화 칼륨을 첨가한 후 그 혼합물을 고체 펠렛이 물에 완전히 용해되도록 2분 정도 저어준다. 그런 다음 규산나트륨 또는 규산칼륨 용액이 다양한 비율로 거기에 첨가된다.

섬유(Fibers) : 섬유질 재료는 그 물리적 및 기계적 특성을 연구하기 위하여 많은 연구자들에 의해 다양한 형태로 지오폴리머 배합에 도입되었다. 지오폴리머에 사용된 섬유는 강섬유, 유리섬유, 천연섬유 등이 있다. 면섬유는 지오폴리머 콘크리트를 강화시켰으며 시험결과 비교적 높은 압축강도를 발휘하였다. Srinivas et al. (2019)은 직경 0.6mm, 길이 30mm의 단부 갈고리형 저탄소 강섬유를 사용하였는데 그 인장강도는 1450MPa에 달하였다. 그는 일정한 물농도의 알칼리 용액을 사용한 재령 7일 및 28일의 샘플에 대한 압축강도는 강섬유의 용적비 증가 시 강도도 증가하는 것을 확인하였다. 지오폴리머 콘크리트에 유리섬유를 포함시키면 생콘크리트 상태의 슬럼프 값이 감소하며, 유리섬유 용적비율을 증가시키면 압축강도는 감소하는 것을 확인하였다. 반면에 쪼갬 인장강도와 휨강도는 상승하는 것으로 나타났다. 어떤 경우에는 고무 부스러기를 사용한 지오폴리머 콘크리트에 대한 조사가 수행되었다. Aly et al.(2019)은 비중 0.45의 자동차 및 트럭 스크랩 타이어에서 수집한 고무 부스러기를 사용하였는데 결합재로서 슬래그를 사용하여 그 성능을 조사하였다. 그는 시험결과 슬럼프 값은 감소하지만 압축강도는 10% 정도 약간 증가하는 것을 확인하였다. 압축강도도 큰 규격의 골재와 NaOH 또는 Na₂SiO₃을 사용할 경우 증가하는 것을 확인하였다.

알칼리 용액 활성화(Alkaline solution activation) : 지오폴리머 콘크리트용 알칼리 용액은 아주 중요한 고려사항이다. 일반적으로 강알칼리에 해당하는 순도 99% 이상의 수산화나트륨 또는 수산화칼륨의 펠렛을 사용하여 만들어진다. 이 알칼리 비율은 몰(molar)농도로 취급된다. 리뷰에 따르면 14M와 18M

사이의 몰농도가 가장 우수한 강도를 나타낸다고 한다. Yacobet al. (2019)은 3종류의 수산화나트륨 몰농도 8M, 14M, 16M을 사용하여 플라이애시 기반의 지오폴리머 보강 콘크리트의 전단강도를 연구하였다. Cao et al.(2018)은 10M, 12M, 14M을 사용하였다. 규산나트륨 또는 K_2SiO_3 가 고체 결정을 물에 용해시키거나 또는 알칼리 용액과 함께 준비된 용액에 직접 사용하여 반응을 완료시킨다. 물과 혼합할 때 NaOH 또는 KOH는 완전히 용해되도록 제어주어야만 하며, 이렇게 하는 동안 그 용액은 발열반응 상태로 들어간다는 점이 고려되어야 한다. 용액이 준비된 후 섭씨 75도의 온도로 12시간 동안 뜨거운 오븐에 보관되어야 하며, 그 후 24시간 동안 실온에서 냉각되어야 한다. 최상의 결과를 얻으려면 사용 전 24시간 앞서서 준비될 필요가 있다는 것을 알아야 한다. 알칼리 용액은 본질적으로 발열성이므로 적절한 예방조치와 안전이 유지되어야만 한다.

3.2 배합설계 및 양생

먼저 세골재 및 조골재를 포함한 모든 건조 상태의 재료들이 균일한 질감을 얻기 위하여 함께 혼합되어진다.

혼합이 된 후에 필요한 몰농도(molarities)의 알칼리 용액을 준비하여 넣은 후 그것들과 같이 계속해서 혼합한다. 필요한 경우 여분의 물을 추가할 수 있다. 어떤 경우에는 작업성과 강도를 향상시키기 위하여 혼합물이 첨가되기도 한다. 많은 연구자들과 일부 어떤 연구자들은 구조적 및 기계적 거동과 내구성 등에 다양한 변화를 연구하기 위하여 콘크리트에 고무 부스러기, 단부 갈고리형 강섬유, 유리섬유 등과 같은 일부 여분의 섬유질 재료를 사용하였다. 콘크리트를 적절히 혼합한 후 100mm x 100mm x 100mm 또는 150mm x 150mm x 150mm 규격의 큐브, 실린더, 빔, 기둥 또는 슬래브 형태로 다짐 작업하여 제작되었으며 최소 24시간 양생되었다. 24시간 후 콘크리트 부재들은 탈형 되었으며 고온양생을 위해 미리 가열된 오븐에 넣어지거나 실온 양생이 이루어졌다.

3.3 지오폴리머 콘크리트에 알칼리 활성화제 비(Alkali Activator Ratio - AAR), 물 결합재 비(W/B Ratio) 및 AAR/Binder 비율이 미치는 영향

알칼리 활성화제 비율은 지오폴리머 콘크리트의 압축강도에 큰 영향을 미친다. 수산화나트륨(NaOH)은 콘크리트의 시공연도를 향상시키는 핵심이지만 수산화나트륨을 감소시키면 규산나트륨(sodium silicate)의 영향을 받게 되고 NaOH/ Na_2SiO_3 비율이 증가하면 지오폴리머 콘크리트의 시공연도는 감소하며 압축강도는 증가한다. AAR이 증가함에 따라 기계적 특성은 향상된다. 압축강도 뿐 만 아니라 적절한 응결시간을 달성하는 것은 적합한 AAR을 선택하는데 필수적이다. 물 결합재 비율(w/b ratio)이 높을수록 압축강도는 크게 감소한다. 결합재에 대한 AAR의 비율이 7.5% 정도로 일정하게 유지되면 슬럼프 값이 감소되는 것으로 나타났다.

3.4 미세구조(Microstructure)

재료의 미세구조는 강도, 인성, 연성, 경도, 온도영향 및 내마모성과 같은 요소들에 큰 영향을 미친다. Bharadwaj와 Kumar는 재령 28일의 콘크리트 샘플에 대하여 SEM 이미징 장비를 사용하여 플라이애시와 GGBS의 미세구조를 연구하였다. Noushiniet al. (2018)은 히타치 S-3400 N SEM 장비를 사용하여 플라이애시에 대한 미세구조 분석을 실시하였다. 그런데 그 샘플은 에폭시 수지로 콜드 마운팅(cold mounting)하였으며 탄소로 코팅 처리한 후 고온 샌드페이퍼로 연마한 것이었다.

4. 결과 및 분석

4.1 생콘크리트 시험

슬럼프 시험 : 슬럼프 시험은 생콘크리트 상태에서 콘크리트의 시공연도를 식별하기 위하여 요구되는데 필요한 경우 약간의 물이 추가되기도 한다. 슬럼프 시험에서 X축 및 Y축 양방향 흘러내림 치수 측정과 흘러내림 직경이 500mm에 도달하는 시간이 기록된다. 지오폐리머 콘크리트는 슬럼프 시험결과가 122mm ~ 145mm인 경우 가장 큰 시공연도에 도달한다.

4.2 양생 이후 시험

압축강도 시험 : Zhang et al.(2019)은 2018년에 지오폐리머 콘크리트의 접합강도에 온도가 미치는 영향을 연구하였다. 연구결과 그는 온도가 섭씨 300도에 이르게 될 때까지 압축강도가 불규칙적으로 변화하고 그 이후에는 지속적으로 압축강도가 감소한다는 것을 알게 되었다. AS1012.9 기준에 따라 20 ± 2 MPa/min의 하중을 가하는 속도로 유니버설 시험기계를 사용하여 재령 3, 7 및 28일 상태의 원파트 하이브리드 지오폐리머 콘크리트 샘플의 압축강도가 실시되었다. 압축강도 시험결과는 일반 OPC 큐브의 경우 낮았고, 반면에 하이브리드 지오폐리머 콘크리트 큐브의 경우 더 큰 것으로 확인되었다. 알칼리 활성화 슬래그 지오폐리머 콘크리트의 압축강도가 다른 종류의 지오폐리머 콘크리트 배합의 압축강도에 비하여 더 우수하였다.

쪼갠인장강도 : S. Jena and R.Panigrahi(2019)에 따르면 14M의 지오폐리머 콘크리트 시편의 쪼갠 인장강도는 우수하며 8M에서 14M 사이의 수산화나트륨 농도가 증가하면 쪼갠 인장강도도 증가한다고 하였다. 그러나 14M에서 18M에서는 그 강도가 감소한다. 재령 28, 90 및 365일에서 IS : 5816-1999 기준에 따른 F등급 플라이애시 지오폐리머 시편에 대한 STS 시험결과는 5.34~5.49MPa에 달한다.

휨강도시험 : 3점 하중시험이라고도 하는 휨강도시험은 많은 연구자들에 의해 조사되었다. Aly et al.(2019)은 고로슬래그(GGBS)로 대체된 OPC의 휨강도를 조사하였는데 관리기준 배합설계에 대한 휨강도가 재활용 고무 부스러기를 함유하는 다른 종류의 배합설계 지오폐리머 콘크리트에 비하여 더 크다는 결론을 내렸다.

Luharet al. (2019)은 고무 부스러기를 함유한 지오폐리머 콘크리트의 강도와 내구성을 연구하였는데 그 휨강도가 6.45~9.97MPa로 다양하다는 결론을 내렸다. 그는 지오폐리머 콘크리트의 휨강도가 일반 OPC 콘크리트와 비교하여 더 크며 모든 배합설계의 경우 재령에 따라 증가한다고 하였다.

4.3 내구성

지오폐리머 콘크리트의 내구성은 다양한 방법으로 많은 연구자들에 의해 조사되었다. 염화물 확산에 대한 지오폐리머 콘크리트의 저항성은 ASTM C1556의 기준을 사용하여 조사되었는데 저칼슘 플라이애시 기반의 지오폐리머 콘크리트가 염화물 공격에 저항성이 떨어지는 것으로 밝혀졌다. 연속적인 동결융해의 반복은 중량 감소, 표면박리 및 흡수성 감소로 이어진다. 또한 샘플의 압축강도도 감소한다. 지오폐리머 콘크리트는 일반적인 노출 환경에서는 OPC 콘크리트에 비하여 황산염 공격에 더 저항성이 크다. 그러나 재령 28일에서는 강도 손실이 관찰되었다.

5. 결론

이 보고서에서는 지오폐리머 콘크리트의 기계적 및 물리적 특성에 미치는 영향과 구조적 역량 측면에서 지오폐리머 콘크리트 연구를 수행하였다. 이번 연구에서는 각종 산업 폐기물에서 유입된 알루미늄

실리케이트 재료와 일반적인 OPC 콘크리트 간의 비교 연구가 이루어졌다. 무엇보다도 F급 플라이애시 재료가 알루미늄 실리케이트의 공급원으로 대폭 사용되었고 경우에 따라 약간의 비율로 OPC(보통 포틀랜드 시멘트)를 대체하는 재료로 사용되었다. 그 연구결과 중 일부는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- a) OPC를 사용하는 콘크리트에 비해 지오폴리머 콘크리트가 보다 효율적인 것으로 밝혀졌다. 연구진들은 OPC를 사용하는 것에 비해 압축강도가 훨씬 향상되는 결과를 득하였다.
- b) 고무가 들어간 지오폴리머 콘크리트는 고무조각이 들어간 양에 따라 강도가 떨어지며 600도 이상의 고온에 노출되어도 강도가 떨어진다. 물 결합재 비(waterbinder ratio)의 증가할 경우 휨강도의 감소가 관찰되었다.
- c) 지오폴리머 콘크리트는 적정 온도에서의 압축강도 보다 고온에서의 압축강도가 더 크게 발현된다.
- d) 프와송비를 제외한 모든 요소들은 물 결합재 비가 증가하면 감소한다.
- e) 지오폴리머 콘크리트의 접착력은 결합재와 골재 사이의 우수한 접착특성으로 인하여 OPC를 사용한 것에 비해 더 크다.
- f) 지오폴리머 콘크리트에 형성된 균열은 OPC에 비하여 작고 그 양도 적다.
- g) 나노 실리카를 사용하면 압축강도는 약간 감소한다. 반면에 유리 섬유 또는 강 섬유를 혼합하면 압축강도는 증가한다.

<원문제목> Experimental Study on Lightweight Polystyrene Sandwich Blocks for Replacement of Bricks
<원문출처> Civil Engineering Department, St. Peters University