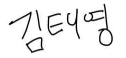
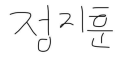


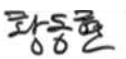


2023년 청소년 과학프로젝트 발표대회 최종보고서

동아리명 : GLOBE

프로젝트명 : 시멘트의 탄산화양생 효율 증진 연구

| | | |
|------------------|-----|---|
| 지도교사 : 경기북과학고등학교 | 김태영 |  |
| 학생 1 : 경기북과학고등학교 | 정지훈 |  |
| 학생 2 : 경기북과학고등학교 | 최진혁 |  |
| 학생 3 : 경기북과학고등학교 | 최유성 |  |
| 학생 4 : 경기북과학고등학교 | 황동현 |  |

이 보고서를 2023년 청소년 과학프로젝트 발표대회
최종보고서로 제출합니다.

2023년 8월 1일

청소년 과학프로젝트 발표대회 참가자 윤리 서약서

지도교사 : 김태영

김태영

소속학교 : 경기북과학고등학교

동아리 참여학생 : 정지훈, 최진혁, 최유성, 황동현

상기 본인은 한국과학창의재단의 ‘청소년 과학프로젝트 발표대회’ 사업을 수행함에 있어 과학 탐구활동의 객관성과 신뢰성, 프로젝트 결과의 공익성과 진실성을 확보하기 위하여 아래와 같이 연구윤리를 준수했음을 약속합니다.

첫째, 과학 탐구활동 과정에서 객관적인 자세를 가지고 철저한 기록을 통해 결과의 검증이 가능하도록 노력했습니다.

둘째, 결과에 중대한 영향을 미칠 수 있는 데이터 및 분석 결과를 왜곡 또는 조작하지 않으며 결과발표는 진실되고 공정한 마음으로 임했습니다.

셋째, 유사 중복된 프로젝트를 지양하며 연구자원을 투명하고 효율적으로 사용하도록 노력했습니다.

넷째, 타인의 연구개발 과정과 결과를 존중하며, 위조, 변조, 표절 등 지적 재산을 도용하는 부정행위를 하지 않았습니다.

2023년 8월 1일

한국과학창의재단 이사장 귀중

목차

I. 프로젝트 및 사회문제 배경

- 가. 프로젝트 배경
- 나. 해결할 사회문제

II. 이론적 배경

- 가. 시멘트와 탄소 배출
- 나. 탄산화 양생(탄산칼슘의 침전반응)
- 다. 시멘트 첨가제
- 라. 내구도 측정법

III. 프로젝트 수행 내용

- 가. 조건에 따른 탄산화 양생 비교 실험
- 나. 시멘트 첨가물 첨가 시멘트의 내구성 비교 실험

IV. 프로젝트 결과

- 가. 조건에 따른 탄산화 양생 비교 결과
- 다. 시멘트 첨가물 첨가 시멘트의 내구성 비교 결과

V. 결론 및 기대효과

- 가. 결론
- 나. 기대효과

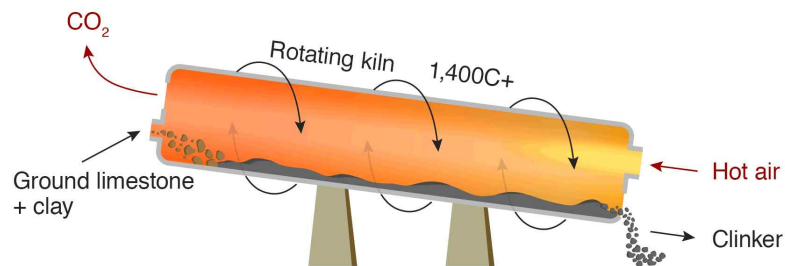
VI. 참고문헌

I. 프로젝트 및 사회문제 배경

가. 프로젝트 배경

우리가 주변에서 흔히 접할 수 있는 물질 중 하나는 콘크리트로, 건물이나 도로 등에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 하지만 콘크리트를 이루는 주성분인 시멘트는 탄소 중립 실천에 있어 큰 방해 요소라 할 수 있는데, 공정 과정에서 시멘트 1톤당 1톤의 이산화탄소가 방출되기 때문이다. 이렇듯 시멘트 산업은 전 세계에서 매년 28억 톤의 이산화탄소를 방출하며, 이 수치는 인간의 연간 이산화탄소 배출량의 4~8%에 달한다.

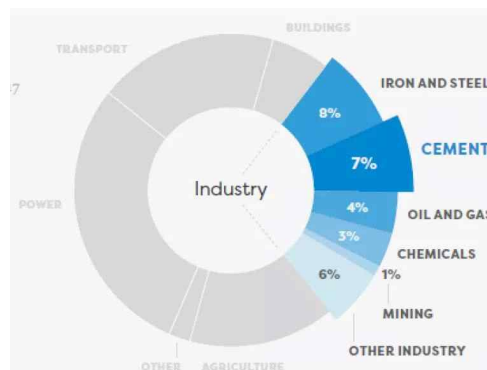
How cement is made



Source: Carbon Brief, Chatham House

BBC

[그림1] 시멘트의 생산과정 모식도



[그림2] 산업 종류에 따른 이산화탄소 배출량 비교

이산화탄소 배출량에서 상당한 비율을 차지하는 시멘트 산업의 공정 과정에서 이산화탄소를 흡수하고 공업적인 목적도 발전시킬 수 있다면 관련 환경 문제를 해결하는 데 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 이에 본 동아리는 ‘탄산화 양생’ 중심의 화학적 반응을 이용한 이산화탄소 저장 기술을 개발하고, 보다 효과적으로 발전시키는 ‘시멘트의 탄산화 양생 효율 증진 연구’ 프로젝트를 진행하여 배출량 감소 및 활용방안 모색을 할 예정이다. 이 연구를 통해 시멘트 제작 단계서부터 이산화탄소를 더 효율적으로 포집하여 시멘트 산업의 온실가스 배출량을 유의미하게 감소시킬 수 있을 것이다.

또한, 포집 과정에서 형성되는 탄산칼슘을 통해 시멘트의 경도 증가 및 공업적

특성 변화를 탐구하면서 시멘트의 수명을 증가시킬 수 있다면 시멘트의 자체의 사용량이 감소하는 효과도 기대할 수 있다.

나. 해결할 사회문제

본 연구에서 해결할 사회적 문제는 ‘지구 온난화’로, 본 연구와 관련한 구체적인 정보는 다음과 같다.

지구촌의 인류 사회는 산업혁명 이후 수많은 부를 축적함으로써 문명을 발전하고 안정한 삶을 추구해왔다. 반면 그에 대한 반작용으로 온실가스의 배출 및 불안정한 환경이라는 그릇된 산물을 낳았고 현대에 들어서서는 기후 위기를 초래하고 있다. 지구 온난화의 주요 원인은 이산화탄소의 배출이다. 대기 중의 온실 기체는 지구 내로 입사한 복사 에너지가 방출될 때 이를 재흡수함으로써 지표면을 보온하는데, 이를 ‘온실효과’라 한다. 온실효과는 지구의 온도를 약 15°C 정도로 적정하게 유지해주므로 기후 시스템상에서 중요한 구실을 한다. 그러나 앞서 언급된 바와 같이 다량으로 배출된 온실가스는 지구의 온도를 과도하게 증가시키는데, 이것이 바로 ‘지구 온난화’이다.

이렇게 발생한 지구 온난화는 악순환의 반복을 초래한다. 온실기체 양이 증가하여 기온이 상승하고, 이로 인한 냉방 기구 사용이 증가함에 따라 더 많은 온실기체가 배출되는 경향이 바로 그 예시이다. 본 연구에서는 이러한 환경 문제가 더는 지구촌을 위협하지 않게 하려고 지구 온난화의 주요 요인인 이산화탄소의 대기 중 농도를 감소시키는 효과적인 방법을 제시하고자 한다.

II. 이론적 배경

가. 시멘트와 탄소 배출

시멘트는 석회석과 점토, 규석, 철광석 등으로 만들어지는 가장 기본적인 건설 소재이다. 각 원료의 비율과 처리 방법을 통해 시멘트의 품질과 특성에 영향을 준다. 이 광물들을 용광로에 넣고 약 1,500°C~2,000°C의 열을 가하면 서로 녹아서 작은 덩어리로 뭉치게 되는데 이것을 곱게 만들면 시멘트 가루가 되는 것이다. 보통 이 시멘트 가루에 모래와 자갈을 섞어서 강도를 높여서 콘크리트나 몰탈을 만들어 사용한다.

이렇게 만들어진 시멘트 가루에 물을 부어 시멘트 가루가 수화반응을 일으키며 응결 및 경화 과정을 거쳐 단단해지게 된다. 시멘트가 안정적으로 굳으려면, 시멘트 화합물의 조합에 따라 다를 수 있지만, 보통은 시멘트 무게의 약 40%에 달하는 양의 수분이 필요하다. 물의 양이 너무 많으면 물이 증발한 자리가 구멍이 되어서 강도 저하를 일으킬 수 있고, 반대로 물이 너무 적으면 혼합이 힘들고 작업 효율성이 떨어질 수 있기 때문이다.

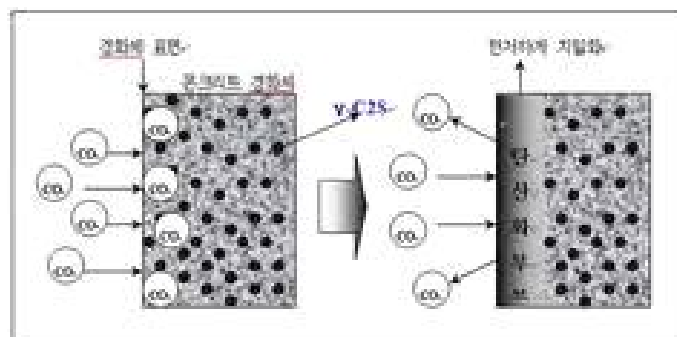


[그림3] 포클랜드 시멘트(OPC)의 경화 과정 및 모습

대표적인 시멘트 유형 중 하나는 “포틀랜드 시멘트(OPC)”는 주로 석회암과 국소 석회 성분을 함유한 석탄재를 소성하고 분쇄하여 제조된다. 시멘트의 주 재료인 클링거의 구성성분인 CaCO_3 가 고온에서 소성될 때 탈탄소화가 진행되면서 이산화탄소를 내뿜게 된다. 화학반응식은 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 으로 이 과정에서 이산화탄소 기체가 배출되게 된다.

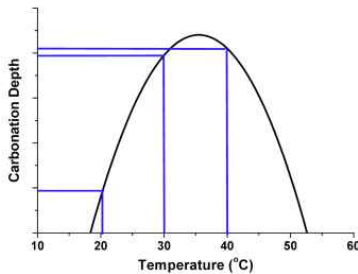
나. 탄산화 양생(탄산칼슘의 침전반응)

탄산화 양생이란 콘크리트 구조물이 노출된 환경에서 이산화탄소와 반응하여 칼슘 및 마그네슘 탄산화물을 형성하는 과정이다. 시멘트 내 성분인 수산화칼슘은 이산화탄소와 반응하려 대기 중 이산화탄소를 수집하고 반응하여 탄산칼슘과 물을 생성한다. 이 반응에서 이산화탄소가 포집되면서 시멘트 제조 중 배출한 이산화탄소를 다시 흡수하여 배출량이 낮춰질 수 있다. 또한, 생성된 탄산칼슘은 시멘트 내부구조를 치밀하게 하여 강도를 증가시킬 수 있다. 화학반응식은 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 으로 이는 비가역반응이며 세공용액 중 알칼리 금속 이온 농도와 수산화 이온 사이 평형을 유지하기 위해 수산화칼슘이 분해되는 것이다. 이 반응이 진행될수록 시멘트 경화체의 pH는 감소한다.

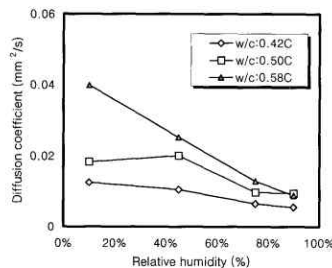


[그림4] 탄산화 양생 과정 도식화

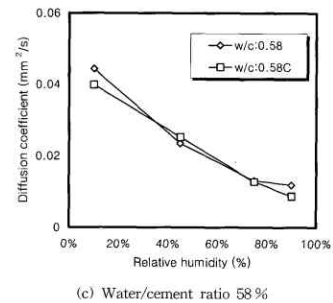
이러한 탄산화 양생은 대기 중의 CO₂를 흡수하기 때문에 환경친화적이며 (칼슘, 마그네슘) 탄산화물을 형성해 콘크리트 구조물을 보호하고 내구성을 높일 수 있다는 장점이 있다. 반면, 탄산화 양생이 되는 데 시간이 오래 걸리고 초기에는 보호 효과가 미미하다는 단점이 있다. 또한 탄산화 양생은 특정 온도, 습도, CO₂ 농도 등에서만 탄산화 양생 효과를 발휘할 수 있다. 온도에 따른 탄산화 양생을 살펴보면 온도가 20~30℃로 증가하면 탄산화의 깊이, 즉 시멘트 표면에서부터 탄산화가 진행된 깊이가 많이 증가하지만, 30~40℃로 증가하면 탄산화의 깊이가 거의 증가하지 않는다.¹⁾ 습도의 경우, 탄산화 양생에 가장 적합한 상대습도는 50% 이상으로 보통 60±5% 조건에서 탄산화 양생이 잘 일어난다고 한다.²⁾



[그림5] 온도에 따른 탄산화 양생 깊이



[그림6] 상대습도와 물/시멘트비에 따른 탄산화 양생 속도 비교



다. 시멘트 첨가제

1. 촉진탄산화

촉진 탄산화는 콘크리트 화합물에서 시멘트의 경화(수화)를 가속하기 위해 사용되는 화학 혼입법이다. 이는 콘크리트가 더 빠르게 수화되고 강도를 향상시킬 수 있도록 돕는다. 일반적으로 ‘촉진제’로도 알려져있는 이 혼화제에는 주로 알칼리 금속 탄산염인 탄산 칼륨(K₂CO₃) 또는 탄산 나트륨(Na₂CO₃)가 사용된다.

탄산 칼슘은 시멘트 속에서 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 반응을 통해 공기 중의 이산화탄소를 포집하고 칼슘 탄산화물을 생성함으로써 탄산화 양생을 촉진시킨다. 또 $\text{NaHCO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 반응을 해서 공기 중의 이산화탄소를 포집을 돕는 역할도 한다.

허나 과도한 촉진제의 사용은 콘크리트이 거품 형성이나 화강암 현상을 유발

1) 한상훈.(2010).항만콘크리트 구조물의 탄산화에 미치는 온도의 미세구조적 영향.한국해안·해양공학회논문집,22(4),272-278.

2) 오병환,정상화,이명규.(2003).콘크리트 중의 이산화탄소 확산계수에 대한 상대습도 영향 연구.한국콘크리트학회,15(6),778-784

할 수 있으며, 그로 인해 콘크리트의 내구성이 저하될 수 있다는 문제점이 있다.

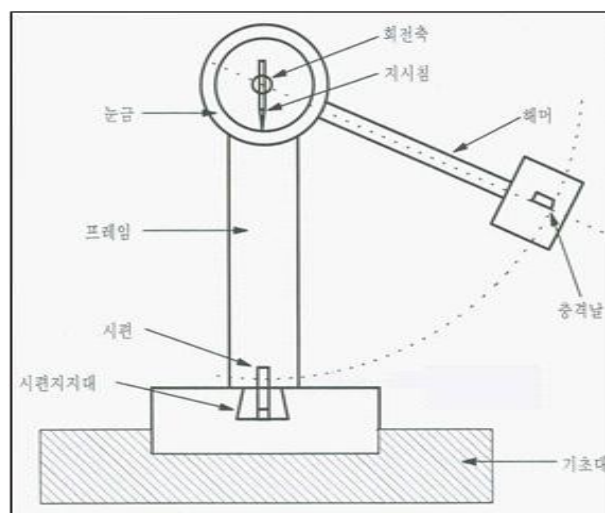
2. CO₂ 반응물

탄산화 양생과는 관계없이 스스로 공기중의 이산화탄소와 반응하는 물질들이다. 가장 대표적으로 MgO가 있다. MgO는 $\text{Mg(OH)}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 의 반응을 일으켜 대기중의 이산화탄소를 포집할 수 있다.³⁾ 생성물을 생성시킴에 따라 밀도가 감소하고 부피가 증가하며 강도가 증가하지만 50℃ 이상의 온도에 노출 시, 불안정한 $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg(OH)}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 등의 상태로 변형된다. 이러한 원리를 바탕으로 상온하에 시멘트계 재료에 혼입 후 CO₂ 양생을 실시하면 $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 뿐 아니라 시멘트의 CO₂ 양생으로 인하여 생성된 Calcite계 CaCO_3 와 Mg^{2+} 이 결합된 Mg-calcite가 형성된다. 이에 따라 비CO₂ 양생 시와 비교하여 미소경도와 압축강도 향상 효과를 기대할 수 있으며 이러한경향은 치환율이 증가할수록 현저해진다.

라. 내구도 측정법

건축 자재의 내구도를 측정하는 방식은 다양한 종류가 존재한다. 그중 본 연구에서 차용한 방식은 아래의 반복 충격 시험법(Repeat Impact Test)이다.

반복 충격 시험법은 축구공, 금속 자재 등 제품의 안정도를 확인하기 위해서 사용되는데, 하중이 적은 일정한 타격력을 일정한 주기로 반복적으로 자재에 가해서 파괴되는 데까지 걸리는 타격횟수로 충격 특성을 파악한다. 대표적으로 그림1과 같은 샤르피(Charpy) 충격시험기가 있다. 이 시험기의 경우 회전축을 기준으로 해머의 상승 각도를 하나로 결정하는 방식으로 타격력을 일정하게 유지한다.



[그림7] Charpy 충격시험기의 단면도

3) 성명진, 류화성, 신상현, 이한승. (2014). CO₂ 양생을 이용한 시멘트계 재료의 압축강도 발현에 관한 실험적 연구

III. 프로젝트 수행 내용

가. 조건에 따른 탄산화 양생 비교 실험

1. pH 조건

탄산화 양생 반응이 일어나면, 시멘트의 pH가 변한다는 선행논문의 내용을 확인했다. $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 화학식에 르샤틀리에의 원리를 적용할 수 있는데, 약염기인 Ca(OH)_2 의 농도를 바꾸기 위해서 처음 시멘트를 반죽하는 용액의 pH를 다르게 하면 반응의 진행 방향이 달라져 탄산화 양생 반응 정도도 달라질 것으로 생각해볼 수 있다. 본 실험에선 시멘트를 물과 반죽할 때, 물의 pH를 다르게 해 반응 정도를 비교할 것이다. 반죽에 쓰이는 용액을 독립변인으로 해 증류수(pH 7), pH 4 용액, pH 10 용액, pH용액 속 이온 성분들의 영향을 파악하기 위해 pH 4 용액과 pH 10 용액을 섞어 만든 pH 7 용액을 실험군으로 할 것이다. 반응 정도는 반응에 기체가 참여하여 질량이 변화하게 되는 탄산화 양생 반응 특징상, 시멘트가 굳기 전후 질량 변화로 탄산화 양생 반응 정도를 나타낸다.

1. 원형 플라스틱 그릇에 알루미늄 포일을 감싸 굳힐 틀을 준비한다.
2. 증류수, pH 4, pH 10, pH 7 용액을 준비한다. pH 7 용액은 pH 4와 pH 10를 섞어가며 pH 미터기로 pH 7을 맞춘다.
3. 시멘트 가루를 100g씩 재어 준비한다.



[그림8] 시멘트 가루의 질량 측정 모습

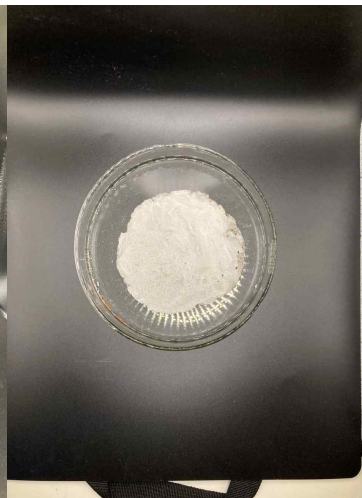
4. 준비된 틀에 100g의 시멘트 가루를 붓고, 22mL의 용액과 유리막대로 섞어가며 반죽한다.
5. 비커 밑면으로 반죽을 눌러 다진다.
6. 반죽한 직후 반죽을 포함하여 틀의 무게를 잰다.
7. dry oven에서 50도 환경으로 24시간 동안 시멘트를 굳힌다.

8. 24시간 후 시멘트를 포함하여 틀의 무게를 잰다.

9. 각 실험군에 시멘트의 굳기 전후 무게를 비교해 탄산화 양생 정도를 비교한다.



[그림9-1, 9-2] 용액을 섞기 전과 후 시멘트 실험군



[그림10-1, 10-2] 24시간이 지난 시멘트



[그림11] 건조된 시멘트의 질량

2. 시멘트 첨가물 첨가 여부 조건

탄산화 양생 시에 적절한 양의 탄산화 촉진제를 첨가한 경우 탄산화 양생 정도를 증진한다는 선행 논문의 내용을 확인하였다. 본 실험에서는 시멘트의 탄산화 양생을 진행할 때 촉진제나 CO_2 반응물과 같은 첨가물을 추가하여 그 결과를 비교하고자 한다. 우선 CO_2 반응물로 잘 알려진 MgO 의 첨가 유무에 따라 A그룹과 B그룹으로 나눌 것이다. 이후 각 그룹에 대하여 증류수만 넣은 대조군, 그리고 촉진제로 알려져 있는 탄산나트륨과 탄산칼륨을 넣어 총 6개의 페트리접시에 첨가물을 달리하며 실험할 예정이다. 앞서 서술한 바와 같이 탄산화 양생 반응 정도는 시멘트의 굳기 전후 질량 변화를 기준으로 비교한다.

1. 플라스틱 페트리디쉬 6개를 준비하고 A그룹과 B그룹으로 나눈다. 이때 A그룹은 MgO 를 첨가하지 않을 실험군 3개, B그룹은 MgO 를 첨가할 실험군

3개로 이루어진 그룹이다.

2. B그룹의 페트리디쉬에 각각 MgO 2.4g을 넣는다.



[그림12] 실험에서 사용된 2.4g의
MgO 분말

3. A그룹의 페트리디쉬에는 각각 시멘트 50g을, B그룹의 페트리디쉬에는 각각 MgO 47.6g을 넣는다.

4. 증류수 12mL에 탄산나트륨 2g, 탄산칼륨 2g을 넣고 녹인 용액을 각각 2개씩 제작한다.



[그림13] 제작된 용액들 (증류수, 탄산나트륨 용액, 탄산칼륨 용액)

5. A그룹과 B그룹의 첫 번째 실험군에는 증류수 12mL를 넣고 반죽한다.

6. A그룹과 B그룹의 두 번째 실험군에는 탄산나트륨 용액 12mL를 넣고 반죽한다.





7. A그룹과 B그룹의 세 번째 실험군에는 증류수 12mL에 탄산칼륨 용액 12mL를 넣고 반죽한다.

8. 반죽한 직후 틀을 포함한 실험군들의 무게를 잰다.

9. 실내 상온 환경에서 48시간 동안 시멘트를 굳힌다.

10. 48시간 후 틀을 포함한 실험군들의 무게를 잰다.

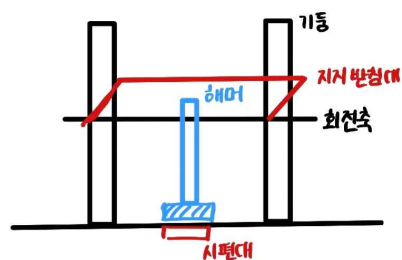
11. 각 실험군의 시멘트의 굳기 전후 무게를 비교해 탄산화 양생 정도를 비교한다.

| | | | |
|-----|---|--|---|
| A그룹 |  |  |  |
| B그룹 |  |  |  |

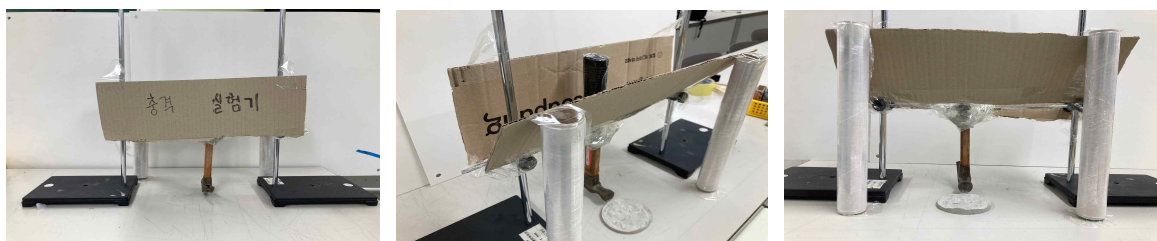
[표1] 첨가제의 종류를 달리한 실험군들의 반죽 직후 무게

나. 시멘트 첨가물 첨가 시멘트의 내구성 비교 실험

본 실험에서는 샤르피 충격시험기의 구조를 본따 간이 충격시험기를 제작하였다. 해머, 지지받침대, 중심축, 기둥, 시편대로 이루어져 있으며, [그림8]의 설계를 기반으로 제작하였다. 지지받침대는 해머가 이동하는 각도를 고정하는 역할로, 시편에 가해지는 충격력을 일정하게 유지한다. 실험군의 강도 측정을 위해 반복 충격 실험법을 선택한 이유는 실험군이 실제 건축물처럼 두껍게 제작되지 않았으므로 높은 하중을 한 번에 가하는 압축 강도 실험법 등이 부적절하다고 판단하였기 때문이다.

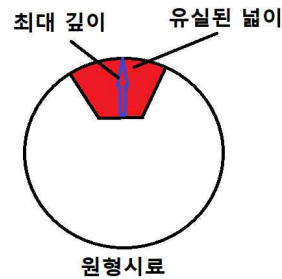


[그림14] 충격시험기 설계



[그림 15-1, 15-2, 15-3] 충격시험기의 앞 / 옆 / 뒤

1. 간이 충격시험기를 제작한다. 해머 이동 각도는 45° 로 한다.
2. 틀에서 시멘트를 분리하여 시편대에 고정시킨다.
3. 시멘트를 해머로 500회 타격한다. 이때 시멘트 시편이 파괴되면 파괴되기까지의 횟수를 기록한다.
4. 나머지 실험군들에 대해서도 같은 과정을 반복한다.
5. 지오지브라를 이용해 각 실험군에서 파손된 부분의 최대 깊이와 유실된 넓이를 측정하고 그 정도를 비교한다.



[그림16] 내구도 정량 평가법

IV. 프로젝트 결과

가. 조건에 따른 탄산화 양생 비교 결과

1. pH 조건

| 실험군 | 경화 전 (g) | 경화 후 (g) | 질량 백분율(%) |
|-------|----------|----------|-----------|
| 증류수 | 180.9 | 164.6 | 91.0 |
| pH 4 | 178.2 | 164.6 | 92.4 |
| pH 7 | 174.6 | 163.9 | 93.9 |
| pH 10 | 174.9 | 163.7 | 93.6 |

[표2] pH에 따른 질량 및 질량 백분율 변화

경화하기 전 무게를 측정할 때 반죽 상태에서 질량을 측정했기 때문에 경화한 후 dry oven에서 물이 증발해 4개의 실험군 모두 질량이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 질량 백분율, 경화 전과 경화 후의 질량 백분율을 살펴보면 여러 사실을 알 수 있다.

우선 증류수와 pH 7의 백분율을 비교해보면 약 2.9% 정도 차이가 발생함을 알 수 있다. 질량 변화율이 모두 10% 미만이기 때문에 이 차이는 무시할 수 없다. 따라서 pH 4와 pH 10을 섞어서 만든 pH 7 용액 속 금속 성분이 탄산화 양생을 유발했다는 것을 알 수 있다.

금속 성분의 영향을 제거하고 pH만 비교하기 위해선 pH 4, pH 7, pH 10을 비교해야 한다. 여기서 우리는 pH가 낮은 용액, 즉 산성 용액으로 시멘트 반죽을 해서 탄산화 양생을 하면 중성(pH 7) 용액으로 반죽을 만드는 것보다 탄산화 양

생이 잘 일어나지 않는다는 사실을 알게 되었고, 반대로 pH가 높은 용액, 염기성 용액에선 탄산화 양생이 중성 용액일 때보다 더 잘 일어났음을 알 수 있다.

결론적으로 pH 용액 속 금속이 탄산화 양생이 더 잘 일어나게 하며, pH가 높을수록 탄산화 양생이 잘 일어나는 경향이 있다는 사실을 알게 되었다.

2. 시멘트 첨가물

| A그룹 | 대조군(%) | Na ₂ CO ₃ (%) | K ₂ CO ₃ (%) |
|-----|--------|---|--|
| | 90.125 | 94.671 | 93.835 |
| B그룹 | MgO(%) | MgO + Na ₂ CO ₃ (%) | MgO + K ₂ CO ₃ (%) |
| | 89.908 | 95.250 | 95.264 |

[표3] 첨가제에 따른 질량 백분을 변화

대조군이라고 볼 수 있는 A그룹의 증류수만 넣은 것과 비교하면 첨가물에 따른 탄산화 양생 결과를 비교할 수 있다. 대조군을 제외한 대부분의 실험군에서 대조군과 비교하면 탄산화 양생이 활발하게 일어났음을 알 수 있다. 이로써 본 실험에서 사용한 탄산화 촉진제인 탄산나트륨과 탄산칼륨은 이론적 배경을 지지한다고 볼 수 있다.

또한, CO₂ 반응물인 MgO에 증류수만을 사용했을 때, 즉 CO₂ 반응물만을 첨가했을 때에는 대조군과 비교하면 탄산화 양생이 비교적 덜 진행되었다는 점을 알 수 있다. 그러나 MgO에 탄산화 촉진제를 넣었을 때는 전체 실험군 중에서 가장 높은 활성을 띠므로, 위 두 사실을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. CO₂ 반응물만을 첨가했을 때에는 탄산화 양생에 큰 영향을 끼치지 못하지만, CO₂ 반응물과 탄산화 촉진제를 함께 첨가하면 탄산화 양생을 더욱 활성화한다.

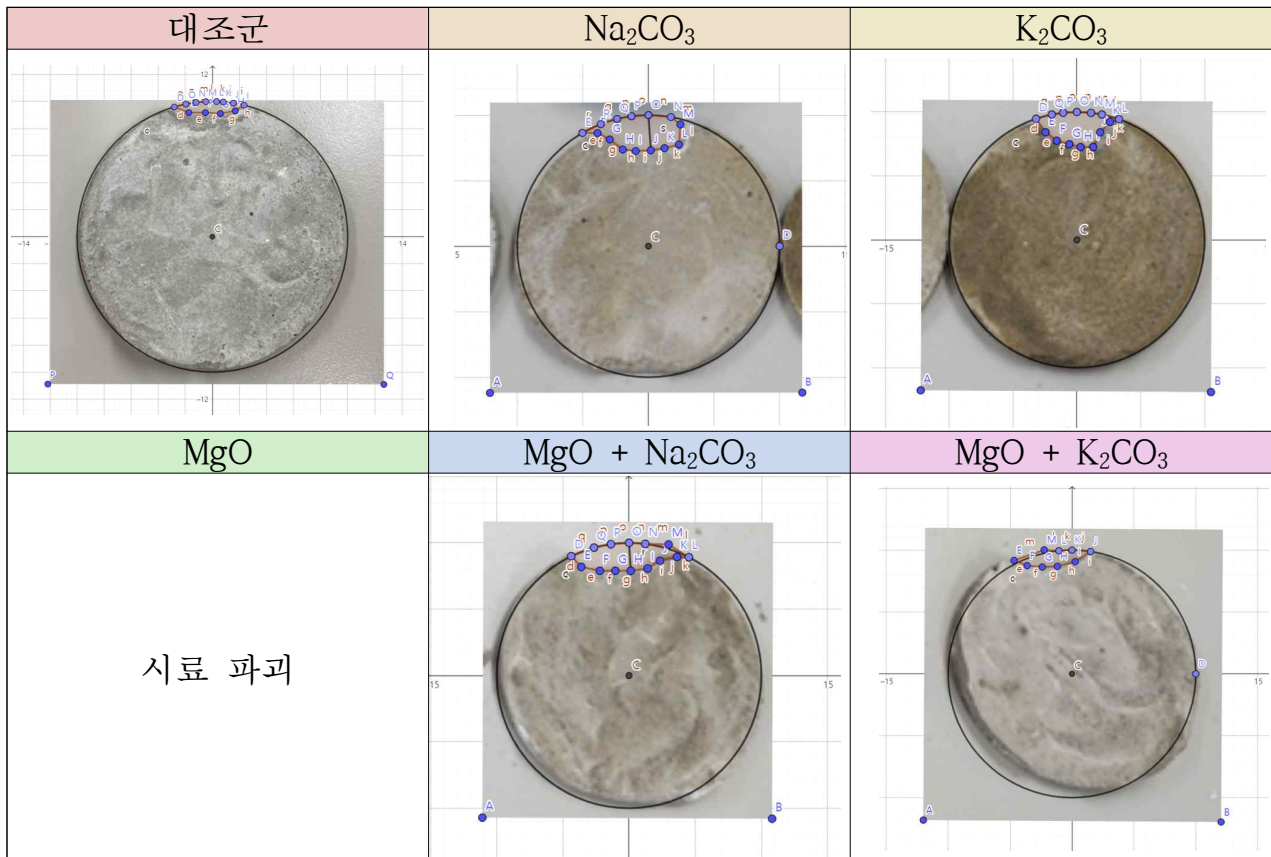
나. 실험군의 내구성 비교 측정

각 실험군의 500회 타격 이후 모습은 다음과 같다.



[그림17] 실험군 별 타격 후 모양

그림5에서 보이듯 MgO만 첨가한 4번째 실험군을 제외하고는 모두 국소적인 파손만 일어난 것을 확인할 수 있다. MgO만 첨가한 실험군은 158회 타격 후 두 개의 파편으로 쪼개져 파괴되어 취약한 내구성 때문에 건축 자재로서 부적합하다는 결론이 나와 넓이 비교와 파손 깊이 측정에서는 제외하였다. 이후, 실험군들의 유실된 넓이비와 최대 파손 깊이를 비교하기 위해 각 시료의 사진을 지오지브라로 옮긴 후 계산하였다.



[표4] 실험군을 좌표평면에 고정 한 모습

이로써 대조군의 내구도가 가장 강하지만 촉진제 등 첨가물을 넣었을 때보다 MgO를 추가할 때 더 내구도가 강하다고 판단할 수 있다.

내구도 결과 : 대조군 > $\text{MgO} + \text{K}_2\text{CO}_3 \approx \text{MgO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{K}_2\text{CO}_3 \approx \text{Na}_2\text{CO}_3$

| | 파괴까지 걸린 횟수(회) | 넓이비(%) | 최대 깊이(cm) |
|---------------------------------------|------------------|--------|-----------|
| 대조군 | – | 1.01 | 0.93 |
| Na ₂ CO ₃ | – | 4.41 | 2.69 |
| K ₂ CO ₃ | – | 3.55 | 2.76 |
| MgO | 158 | – | – |
| MgO + Na ₂ CO ₃ | – | 2.04 | 2.11 |
| MgO + K ₂ CO ₃ | – | 1.75 | 1.7 |

[표5] 실험군별 정량 평가 데이터

MgO만 추가한 실험군을 제외하고 전반적으로 국소적인 파손만 일어난 것으로 보아 첨가물에 의해서 내구도가 크게 변하는 것은 아니나, 탄소 포집을 위해 첨가물을 추가한 실험군들 중에선 MgO와 촉진제를 동시에 넣은 경우가 좀 더 단단한 것으로 보아 내구도 측면에서 탄산화 양생을 위해 배합 시 MgO를 추가하는 것이 유리하다고 판단된다.

V. 결론 및 기대효과

가. 결론

본 프로젝트에서는 시멘트의 생산 과정에 의한 막대한 이산화탄소 배출을 줄이기 위해 시멘트의 탄산화양생 과정 중 이산화탄소를 포집량을 늘리는 조건을 탐구하고, 생성된 시멘트가 실제 건축 자재로 사용가능한지 적합한가에 대한 실험을 진행하였다.

pH에 따른 시멘트 탄산화양생 실험 결과, 르샤틀리에 원리에 따라 염기성 환경에서 탄산화양생이 촉진되는 것을 알 수 있었다. 더 나아가 이산화탄소를 흡수한다고 알려진 CO₂ 반응물과 탄산화양생 반응을 촉진하는 촉진제를 시멘트 가루에 섞어 시멘트를 제작한 결과, CO₂ 반응물과 촉진제를 함께 넣었을 때 일반 시멘트보다 반응 전후 질량비가 5.1%p 증가하며 가장 활발한 탄산화양생 반응을 보였다. 이로써 두 물질은 함께 시멘트에 첨가해 사용했을 때 추가의 효과를 내는 시너지효과를 낸다는 것을 알 수 있다.

시멘트 첨가물을 함유한 시멘트가 과연 건축 자재로서 적합한지 반복 충격 실험을 통해 내구도를 시험한 결과, 시험 도중 파괴된 CO₂ 반응물만을 추가한 실험군을 제외하면 전부 파괴되지 않아 기본적인 내구도는 갖추었다고 볼 수 있었다. 실험군들은 모두 대조군인 일반 시멘트에 비해서는 조금 약한 강도를 보였으며 실험군들 중에서는 CO₂ 반응물과 촉진제를 함께 넣은 시멘트, 그중에서도

탄산칼륨을 촉진제로 사용한 시멘트가 가장 내구도면에서 강했다.

종합적으로 비교한 결과, CO₂ 반응물과 촉진제를 같이 넣고 반죽한 시멘트가 탄산화양생 반응을 가장 활발히 일으키고 내구성도 일반 시멘트와 비슷한 우수한 친환경 시멘트임을 알 수 있었다.

나. 기대효과

이 프로젝트로 얻은 시멘트 가공법은 최근 문제가 되고있는 지구온난화의 주범인이라 할 수 있는 이산화탄소를 줄일 수 있는 기술이다. 사람이 만드는 이산화탄소중 많은 부분을 시멘트가 차지하고 있지만, 시멘트는 인간의 발전에 반드시 필요한 건축자재다. 이러한 시멘트를 지금보다는 좀 더 친환경적으로 생성되고 사용될 수 있게 돕는 기술이다.

탄산화 양생을 잘 일어나서 대기중의 CO₂ 를 잘 포집하고 강도와 내구성은 더 좋아지거나 유지된다면, 지금보다 조금 더 친환경적인 시멘트를 보급할 수 있게 되고, 시멘트 산업의 규모를 생각하면 온실가스 배출량을 줄여 탄소 중립 사회에 한발짝 더 가까워질 수 있을 것으로 예상된다.

VII. 참고문헌

가. 한상훈.(2010).항만콘크리트 구조물의 탄산화에 미치는 온도의 미세구조적 영향.한국해안·해양공학회논문집,22(4),272-278.

나. 오병환,정상화,이명규.(2003).콘크리트 중의 이산화탄소 확산계수에 대한 상대습도 영향 연구.한국콘크리트학회.15(6).778-784

다. 장정국, 김광목, 박솔피, 이행기.(2016).시멘트계 재료의 탄산화 양생을 이용한 이산화탄소의 활용 및 격리.한국콘크리트학회.28(4).40-45

라. 성명진,류화성,신상헌,이한승.(2014).CO2 양생을 이용한 시멘트계 재료의 압축강도 발현에 관한 실험적 연구

이 프로그램은 과학기술진흥기금 및 복권기금의 재원으로 수행하며, 우리나라 과학기술발전과 저소득·소외계층의 복지 증진에도 기여하고 있습니다.