

석탄 부산물인 경석을 잔골재로 사용한 콘크리트의 특성

Characteristics of Concrete Using Coal-By-product as Fine Aggregate

양인환^{1*} · 정승태² · 박근우³ · 최경민³In-Hwan Yang^{1*} · Seung-Tae Jeong² · Geun-Woo Park³ · Gyeong-Min Choi³

(Received January 17, 2024 / Revised January 31, 2024 / Accepted February 1, 2024)

In this paper, an experimental study on the strengths and material properties of concrete manufactured by using coal gangue, as a fine aggregate was conducted. Experimental parameters included coal gangue aggregate contents as a replacement of fine aggregate by 50 % and 100 % (by volume) and fly ash contents. The water-binder ratio was fixed at 0.38. In addition, 30 % of the OPC binder was replaced with fly ash in some mixtures. Test of the unit weight, compressive, split tensile, and flexural tensile strength of concrete were performed and test results were analyzed. Unit weight, compressive strength, split tensile strength, and flexural tensile strength decreased as the coal recycled aggregates increased. In addition, TGA and SEM experiments, which are microstructure experiments, were conducted to analyze thermogravimetric analysis and ITZ by section.

키워드 : 석탄 부산물, 천연 잔골재, 플라이애시, 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨인장강도

Keywords : Coal by-product, Natural fine aggregate, Fly ash, Compressive strength, Split tensile strength, Flexural tensile strength

1. 서론

콘크리트는 현재 가장 큰 건축 자재이며, 기반시설 공사에서 가장 중요한 재료이다. Rafieizonooz et al.(2016)에 따르면, 콘크리트의 필요량은 2050년까지 약 180억 톤 정도 증가할 것으로 예상된다. 이와 같이, 매년 콘크리트 필요량 수요가 증가함에 따라 콘크리트 제작에 활용되는 강모래, 석회암 및 자갈 등 천연자원의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 천연자원의 막대한 소비로 인해 수많은 환경과 자원 고갈의 문제가 발생 되고 있으며, 이는 생태계 환경을 손상시키는 주요 원인 중 하나로 손꼽히고 있다. 이로 인해, 콘크리트 재료로 사용되는 천연재료의 고갈은 전 세계적으로 해결해야 하는 과제 중 하나로 남아있다(Yu et al. 2022).

석탄은 세계에서 가장 중요한 에너지 원료 중 하나로서 중국의 경우 대규모의 석탄 자원을 보유하고 있다. 또한, 중국 통계에 따르면 석탄 부산물 중 하나인 경석이 수년에 걸쳐 약 60~70억 톤이 축적 되어 있으며 매년 2억 톤씩 증가하고 있다고 알려져 있다.

석탄을 폐기물로서 처리하는 과정에서 생성되는 석탄 부산물인 경석은 전체 석탄 생산량의 약 10~15 %를 차지하며, 유럽 전체적으로 17억 톤의 경석 부산물이 축적되어 있다. 우리나라의 경우 석탄 채굴 시 발생 되는 경석은 강원도의 태백 광업소 등 폐광지역에 약 2억 톤 정도의 규모로 축적되어 있다고 알려져 있다(Bang et al. 2022). 이러한 요인으로 인해 경석은 막대한 토지 점유, 심각한 환경오염, 대기오염 및 지질 재해를 초래하는 원인으로 대두되고 있다. 이에 따라, 석탄 부산물인 경석을 효과적으로 활용하는 방안이 필요하며 동시에 기술 개발이 필요한 실정이다(Dong et al. 2015; Gao et al. 2021).

화력 발전소의 플라이애시는 2018년에 약 186만 톤의 발생량을 보였으며 이 중 60 % 정도는 재활용되었는 반면 나머지 40 %는 매립되어 있다고 보고 되었다. 이에 따라, 플라이애시에 관한 연구는 현재까지도 활발하게 진행중이다. 플라이애시는 인공 포졸란 특성을 가지고 있는 콘크리트 혼화재로 주로 석탄 화력 발전소에서 발생하는 폐기물로 알려져 있다. 플라이애시는 포졸란 반응에

* Corresponding author E-mail: ihyang@kunsan.ac.kr

¹군산대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

²군산대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

³군산대학교 토목공학과 석사과정 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea)

유리하며, 이는 초기강도에 비해 장기강도 발현에 큰 영향을 끼친다. Jung(2021)에 따르면, 플라이애시는 콘크리트 내부 구조를 개선할 수 있다는 연구 결과를 나타내었다. Qiu et al.(2021)은 골재 재료로써 석탄 부산물을 사용하고, 플라이애시의 치환률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 분석하였다. 이를 통해, 본 연구에서는 플라이애시 혼입률에 따른 콘크리트 강도 변화를 분석하였다. 또한, 추후 연구에서 장기 재령에서의 플라이애시와 경석을 활용한 콘크리트의 강도 특성에 대한 비교 분석을 위해 표준 재령에서의 연구분석을 선행적으로 진행하였다.

경석은 주로 시멘트 첨가제로 사용되는 경석 분말, 강모래를 대체하여 잔골재로 사용되는 경석 잔골재, 천연 자갈을 대체하여 굵은 골재로 사용되는 경석 굵은 골재로 활용된다. 이를 통해, 주로 시멘트 대체재 또는 골재 대체재로써 경석을 활용한 모르타르나 구조용 콘크리트를 제작하는 연구가 진행되고 있다.

Yu et al.(2022)는 천연 잔골재를 석탄 부산물 잔골재로 대체하고, 경화 시간 및 물-바인더 비를 각각 다르게 하여 기계적 특성과 미세구조에 미치는 연구를 진행하여 실험 결과를 분석하였다. Li et al.(2021)은 천연 굵은 골재를 석탄 부산물 굵은 골재로 일정하게 치환하였을 때, 플라이애시 함량에 따른 실험을 진행하여 역학적 특성을 연구하였다. 그러나 인위적인 한계와 충분하지 못한 기술적 방법으로 인해 경석 콘크리트에 대한 기술적 조사는 실현되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 바인더로써 시멘트 대비 플라이애시를 0%와 30% 사용하였으며, 천연 잔골재 대비 석탄 부산물 골재를 0, 50 및 100% 사용하였다. 이를 통해, 동일한 플라이애시 함유량일 때, 경석 치환률에 따른 콘크리트 강도 특성을 분석하였다. 또한, 동일한 경석 치환률일 때, 플라이애시의 영향에 따른 실험결과 분석을 진행하였다.

2. 실험 시편 제작 및 실험 방법

2.1 사용재료 특성

석탄 부산물 골재는 통상적으로 두 가지로 구분된다. 한 종류는 석탄 선별 작업 중 버려지는 석탄분이 다량 함유되어 있는 골재이며, 또 다른 종류는 석탄 채굴을 위한 굴진 과정에서 나오는 열에너지 효율이 낮아 버려지는 석탄분이 소량 함유되어 있는 골재이다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 그림과 같이 천연 잔골재와 석탄분이 소량 함유되어 있는 석탄 부산물 골재를 사용하였다.

석탄 부산물 골재를 활용하기 위해 각 골재의 종류에 따른 기본 물성 실험을 진행하였다. Table 1와 Fig. 2는 천연 잔골재와 석탄



(a) Sand

(b) Coal gangue

Fig. 1. Aggregate used

Table 1. Sieve test of sand and coal gangue

Nominal diameter (mm)	Percent of passing weight (%)	
	Sand	Coal gangue
10	100.00	100
5	98.55	95.95
2.5	82.49	72.04
1.2	58.16	14.60
0.6	34.39	0.09
0.3	34.39	0.07
0.15	14.48	0.06
pan	0.00	0.00
F.M	3.08	4.17

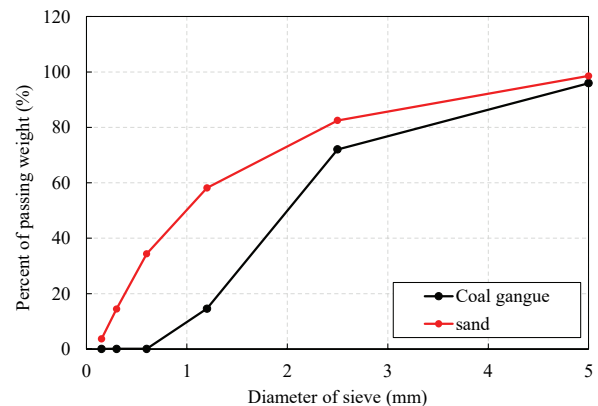


Fig. 2. Sieve test of sand and coal by-product

부산물 잔골재의 입도 분포 결과를 나타냈다. 콘크리트 배합 재료로서 천연 잔골재와 경석 잔골재의 사용 가능성을 파악하기 위해 KS F 2502 규정에 따라 체가름 실험을 진행하였다.

천연 잔골재의 조립률(F.M)은 3.08로 잔골재 조립률의 적정 범위인 2.3~3.1의 값에 만족하는 결과를 나타냈다. 또한, 석탄 부산물 잔골재의 조립률은 4.17로 나타났다. 이는, 석탄 부산물 잔골재가 1.2 mm 체에서 천연 잔골재보다 잔류량이 많아 조립률에 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 2는 석탄 부산물 잔골재와 천연 잔골재의 밀도 흡수율 실험 결과를 나타냈다. KS F 2529 규정에 따라 표면 건조 포화상태의 석탄 부산물 잔골재와 천연 잔골재를 제작하여 KS F 2504 규정에 따라 밀도 및 흡수율 실험을 진행하였다.

천연 잔골재의 표준 밀도는 2.65 g/cm³로 천연 잔골재의 표준 밀도인 2.0~2.65 g/cm³ 범위 안에 만족하는 값을 나타냈다. 또한, 흡수율은 0.59 %로 천연 잔골재의 흡수율 조건인 3 % 이하를 만족하였다. 석탄 부산물 잔골재의 표준 밀도는 2.71 g/cm³, 흡수율은 0.63 % 값으로 밀도와 흡수율 모두 천연 잔골재보다 높은 값을 나타냈다.

Table 2. Physical properties of the sand and coal gangue

Aggregate	SSD Density (g/cm ³)	Oven dry Density (g/cm ³)	Absorption (%)
Sand	2.66	2.65	0.59
Coal gangue	2.71	2.70	0.63

Table 3은 천연 잔골재와 석탄 부산물 잔골재의 XRD 실험결과를 나타냈다. XRD 실험은 X선이 분석하려는 시료 결정에 부딪혀 반사된 파장의 각도 및 강도를 분석하여 결정성 물질의 종류를 파악하는 실험으로 각 피크지점에 나타나는 결정상의 조성, 결정 구조 물질을 분석하였다.

XRD 분석결과에 의하면, 석탄 부산물 골재는 천연 잔골재와 유사하게 Quartz, Calcite, Amesite, Muscovite 성분을 포함한다. 그 중 Quartz는 각 골재의 40 % 이상 나타나는 것을 알 수 있다. Quartz는 콘크리트 강도 증진에 영향을 미치는 주요 성분으로 석탄 부산물을 골재로 재활용하여 콘크리트를 제작할 때, 콘크리트의 강도 발현에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

Table 3. Chemical properties of sand and coal gangue

Component	Sand (%)	Coal gangue (%)
Quartz	40.9	47.4
Calcite	4.6	22.4
Amesite	0.9	15.1
Muscovite	18	14.7
Dolomite	2	-
Albite	33.6	-
Zeolite	-	0.4
Total	100	100

Fig. 3은 골재의 TGA 실험을 통해 각 온도 범위로 구간을 구분하여 중량 감소율을 분석하였다. 0~150 °C의 TGA 분석 온도 범위에서 천연 잔골재 및 석탄 부산물 잔골재의 중량은 각각 0.32% 및 0.24 % 감소하였으며, 이는 골재 내부의 수분 증발에 의한 것으로 판단된다. 또한, 450~650 °C 열중량 분석 온도 범위내에서는 0.64 % 및 1.66 % 감소하였으며, 이는 C-S-H젤(시멘트 페이스트의 50 % 이상을 차지하는 규산칼슘 수화물), CaO, SiO₂, H₂O의 화학적으로 결합 된 물의 탈수에 의해 감소 된 것으로 판단된다. 600~800 °C의 온도범위에서는 각각 2.69 % 및 7.58 %로 온도 범위 중 가장 큰 중량 감소율을 보였다. 이는 주요 CaCO₃가 CaO+CO₂로 분해되어 탄산칼슘의 탈탄산으로 인해 중량감소가 이뤄졌다고 판단된다.

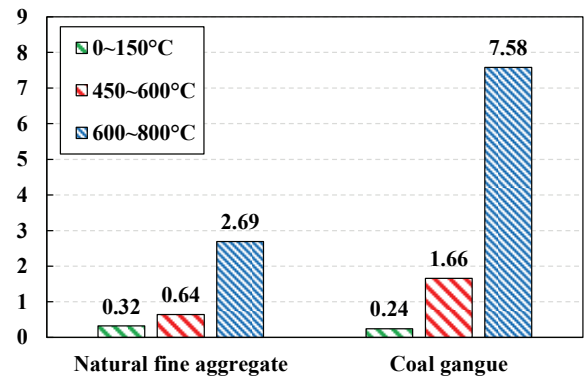


Fig. 3. Sieve test of sand and coal gangue

Fig. 4은 SEM 실험을 진행하여 천연 잔골재와 석탄 부산물 잔골재 표면을 관찰하여 기존 연구 사례와 비교분석 하였다. 천연 잔골재의 표면은 전반적으로 균질하고 평평한 상태를 나타내지만, 경석의 표면은 천연 잔골재와는 반대로 거칠고 층상 구조를 보이고 있다. 이를 통해, 경석 골재를 활용한 콘크리트 제작 시, 시멘트 페이스트와 경석 골재간 계면 결합 생성으로 인해 천연 잔골재를 사용한 콘크리트에 비해 낮은 강도값을 나타낼 것이라 판단된다.

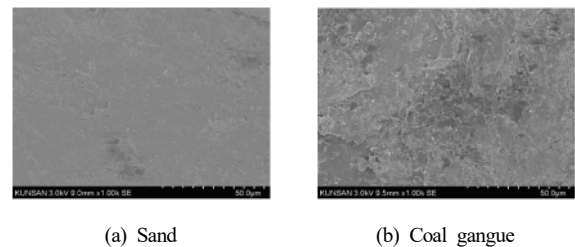


Fig. 4. SEM of aggregate surface

2.2 경석 콘크리트 배합 및 제조

Table 4는 석탄 부산물을 사용한 콘크리트의 배합표를 나타냈다. 본 실험의 콘크리트 배합에서는 석탄 부산물 골재의 함유량과 플라이애시 바인더의 함유량을 주요 실험 인자로 고려하였다. 먼저, 콘크리트 배합 간 변수를 줄이기위해 물-바인더 비를 0.38로 설정하였으며, 배합수의 단위중량을 170 kg/m³으로 일정하게 유지하여 배합설계를 진행하였다. 또한, 천연 잔골재의 50 %와 100 % (부피기준)를 경석 잔골재로 치환하였으며, 일부 배합에서는 OPC 바인더 대비 30 %를 플라이애시로 치환하였다.

시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 콘크리트의 작업성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 바인더 중량의 1.2 % 사용하였다. 배합에 사용되는 석탄 부산물 잔골재는 강원도 태백에 소재하는 폐석산의 석탄 부산물 골재를 조 크러셔로 분쇄한 후 사용하였다. 제작이 완료된 콘크리트는 외부적 요인이 콘크리트의 양생에 미치는 영향을 최소화하기 위해 28일 동안 수중양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

콘크리트 배합 직후 굳지 않은 콘크리트의 작업성을 판단하기 위해 슬럼프 시험을 진행하였으며, 슬럼프 측정은 KS F 2402를 참조하여 밑면 안지름 200 mm, 윗면 안지름 100 mm, 높이 300 mm 슬럼프 콘을 이용하여 실험을 수행하였다.

천연 잔골재와 석탄 부산물 잔골재를 활용한 콘크리트의 모든 실험은 한 배합당 3개 이상의 시편으로 실험을 진행하였으며, 실험 평균값을 계산하여 결과를 도출하였다.

석탄 부산물 콘크리트의 단위질량은 원주형 공시체 (직경 100×높이 200 mm)으로 측정하였으며, 실험 시편은 기건 상태에서 실험을 진행하였다. 시편의 기건 중량(*W*), 부피(*V*)를 측정하여

식 (1)을 통해 단위질량을 계산하였다.

$$\text{단위중량 } (\gamma) = \frac{W}{V} = \frac{W}{\left(\frac{\pi \times d^2}{4}\right) \times h} \quad (1)$$

석탄 부산물 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405에 따라 Ø 100 X 200 원주형 시편으로 측정하였다. 압축강도(*f_c*) 실험은 만능시험기(UTM)에 변위 제어를 장착하여 0.6 mm/min로 변위 제어를 설정하여 정밀한 하중 값(*P*)을 산출하였다. 산출된 값은 식 (2)를 통해 압축강도를 계산하였다.

$$\text{압축강도 } (f_c) = \frac{P}{A} \quad (2)$$

석탄 부산물 콘크리트의 쪼갬인장강도는 KS F 2423에 따라 Ø 100 X 200 원주형 시편으로 측정하였다. 쪼갬인장강도 실험에서 측정되는 최대하중 (*P*)와 시편의 지름(*d*) 및 공시체의 길이(*l*)를 산출 하였다. 산출된 값은 식 (3)를 통해 쪼갬인장강도를 계산하였다.

$$\text{쪼갬인장강도 } (f_{sp}) = \frac{2P}{\pi dl} \quad (3)$$

석탄 부산물 콘크리트의 휨인장강도(*f_r*)는 100×100×400 mm의 프리즘 시편을 활용하여 4점 하중재하 방식으로 만능시험기(UTM)의 변위 제어를 0.3 mm/min로 설정하여 하중 값(*P*)을 산출 하였다. 휨인장강도 실험은 시편의 지간을 300 mm로 지정하고 지간(*l*)을 삼등분하여 4점을 설정하였다. 이를 통해, 프리즘 시편 상부에 중앙 단면을 기준으로 양쪽으로 50 mm 거리에 2개의 가력 점을 산정하였다.

Table 4. Mixing proportions of concrete

W/B	Unit weight (kg/m ³)						Water reducer
	Water	Binder		Aggregate			
		OPC	F.A	Sand	Coal gangue	Gravel	
0.38	170	550	-	679.4	-	928.2	6.6
		550	-	339.7	346.1	928.2	6.6
		550	-	-	692.2	928.2	6.6
		385	165	679.4	-	928.2	6.6
		385	165	339.7	346.1	928.2	6.6
		385	165	-	692.2	928.2	6.6

Note: OPC: Ordinary portland cement; F.A: Fly Ash; HWRA Water reducer: High water reducing agent;

$$\text{휨인장강도 } (f_r) = \frac{Pl}{bh^2} \quad (4)$$

3. 실험 결과 및 분석

Table 5는 콘크리트 시편의 단위질량, 압축강도 및 쪼갬인장강도, 휨인장강도의 시험 결과를 나타냈다.

Table 5. Test results of concrete containing sand and coal gangue

W/B	FA content (%)	Coal Gangue content (%)	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Split tensile strength (MOa)	Flexural strength (MPa)
0.38	0	0	2,473	57.4	4.63	6.19
		50	2,463	56.2	4.23	5.81
		100	2,453	54.8	4.12	5.18
	30	0	2,408	52.0	4.42	5.10
		50	2,402	50.5	4.10	4.91
		100	2,396	49.9	3.80	4.71

3.1 단위질량

Fig. 5는 콘크리트의 바인더가 OPC 또는 플라이애시 치환률 30 % 일 때, 잔골재 대비 경석 치환율에 따른 단위질량 결과를 그래프로 나타내었다.

Fig. 5에서 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 단위질량은 감소한다. OPC 바인더를 사용한 시리즈는 석탄 부산물 함유량 0 % 대비 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 % 일 때, 콘크리트의 단위질량은 각각 0.41 % 및 0.79 % 감소한다. 또한, OPC 대비 플라이애시 30 %를 치환한 시리즈의 경우 석탄 부산물 함유량 0 %인 콘크리트에 비해 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 % 콘크리트의 단위질량은 각각 0.18 % 및 0.48 % 감소하였다. 이는, 석탄 부산물 골재의 치환률이 증가함에 따라 석탄 부산물 골재의 공극률이 높아져 단위질량이 감소 되는 것으로 판단된다.

바인더를 OPC와 OPC 대비 플라이애시 치환률 30 % 일 때, 각각 석탄 부산물 치환률 0 %, 50 % 및 100 %의 경우, 단위질량은 각각 2.51 %, 2.63 % 및 2.72 % 감소한다. 이는, 플라이애시가 30 % 함유되어 있는 콘크리트가 OPC만 사용된 콘크리트보다 단위질량이 감소하는 것을 나타냈다. 이는 플라이애시의 단위질량이 보통 포틀랜드시멘트(OPC)의 단위질량보다 작으며 플라이애시 미분말의 유동성 때문이라 판단된다.

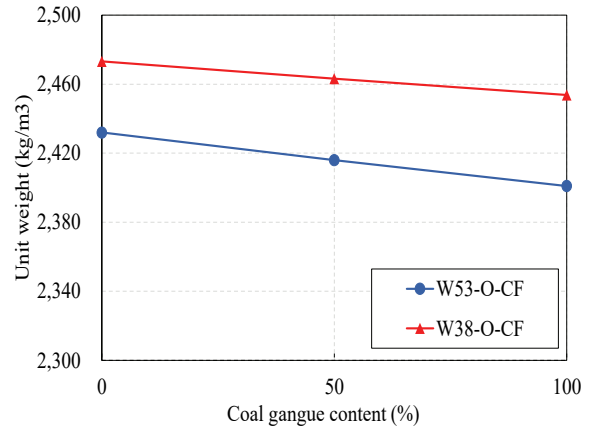
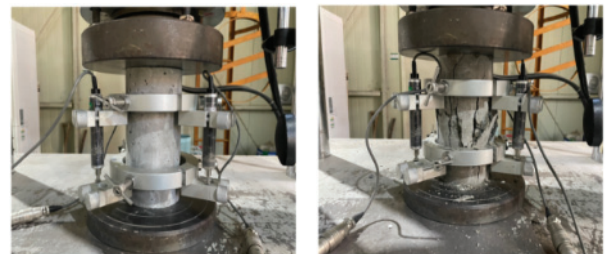


Fig. 5. Unit weight test results

3.2 압축강도

압축강도의 모든 시편은 양생기간 28일 일 때의 시편으로 실험을 진행하였다. Fig. 6은 석탄 부산물 콘크리트의 압축강도 실험과 파괴 형상을 나타내었다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 두 개의 시리즈 모두 석탄 부산물 골재와 시멘트 페이스트 사이의 ITZ의 파괴로 인한 파괴 형상을 보여주고 있다.



(a) Test setup (b) Failure pattern

Fig. 6. Compressive strength test

Fig. 7는 콘크리트의 바인더가 OPC 또는 플라이애시 치환률 30 % 일 때, 잔골재 대비 석탄 부산물 치환율에 따른 압축강도 결과를 그래프로 나타내었다.

석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 압축강도는 감소한다. OPC를 사용한 시리즈는 석탄 부산물 함유량 0 %에 비해 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 압축강도는 각각 2.14 % 및 4.51 % 감소하였다. 또한, OPC 대비 플라이애시 바인더 30 %를 치환한 시리즈의 경우, 석탄 부산물 함유량 0 %에 비해 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 압축강도는 각각 2.97 % 및 4.31 % 감소하였다. 압축강도 실험결과는 석탄

부산물의 함유량이 증가할수록 감소하는 결과를 나타냈다. 이는, 골재 표면 SEM 실험 결과에 나타난 바와 같이 다공성이며 거칠고 표면을 갖고 있는 석탄 부산물 골재로 인해 시멘트 페이스트와 골재 사이의 계면 결합(ITZ)의 파기가 나타나며, 이로 인해 석탄 부산물 함유량이 증가함에 따라 강도는 감소하는 결과가 나타난다고 판단된다.

바인더를 OPC와 OPC 대비 플라이애시 치환률 30 % 일 때, 각각 석탄 부산물 치환률 0 %, 50 % 및 100 %의 경우, 압축강도는 각각 10.38 %, 11.29 % 및 9.82 % 감소하였다.

플라이애시 치환률 30%의 경우, SiO₂가 포졸란과 반응을 유발하여 콘크리트 강도 증진을 촉진시켜, 장기강도 발현에 기여함으로써 시간이 지남에 따라 강도는 점차 증가 될 것이라 판단된다.

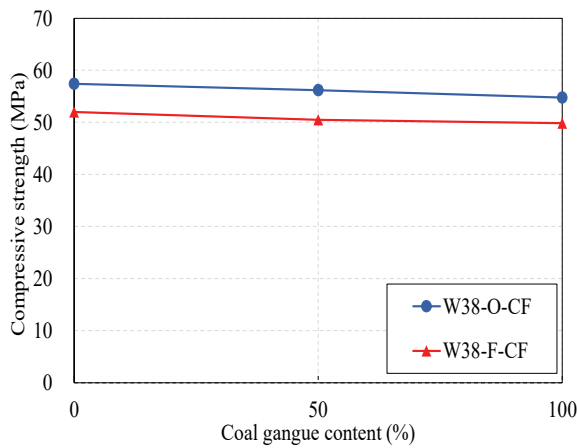
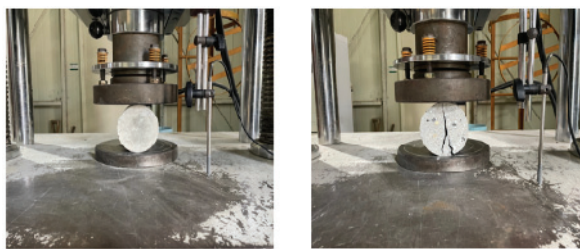


Fig. 7. Compressive strength test results

3.3 쪼갬인장강도

쪼갬인장강도의 모든 시편은 양생기간 28일 일 때의 시편으로 실험을 진행하였다. Fig. 8은 만능시험기(UTM)를 통한 쪼갬인장강도 실험 전경과 쪼갬인장강도 실험 종료 후 파괴 형상을 나타냈다.



(a) Test setup

(b) Failure pattern

Fig. 8. Split tensile strength

Fig. 9는 콘크리트의 바인더가 OPC 또는 플라이애시 치환률 30 % 일 때, 잔골재 대비 석탄 부산물 치환율에 따른 쪼갬인장강도 결과를 나타내었다. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 쪼갬인장강도는 감소하는 결과를 나타냈다. OPC 바인더를 사용한 콘크리트의 경우, 석탄 부산물 함유량 0 % 대비 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 쪼갬인장강도는 각각 7.36 % 및 13.22 % 감소한다. 또한, OPC 대비 플라이애시를 30 % 치환한 콘크리트의 경우, 석탄 부산물 함유량 0 % 대비 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 쪼갬인장강도는 각각 6.1 % 및 10.43 % 감소하였다.

석탄 부산물 함유량이 각각 0 %, 50 % 및 100 % 일 때, OPC 바인더를 사용한 콘크리트 대비 플라이애시를 30 % 치환한 콘크리트의 쪼갬인장강도는 각각 4.75 %, 2.97 % 및 13.81 % 감소하는 결과를 나타냈다.

쪼갬인장강도 실험 결과의 전체적인 경향을 보았을 때, 압축강도 실험 결과와 동일하게 석탄 부산물의 치환율이 증가할수록 쪼갬인장강도는 감소하는 경향을 나타낸다. 압축강도 실험과 많은 연관성을 가지고 있는 쪼갬인장강도의 경우 석탄 부산물 골재와 시멘트 간의 화학 작용을 통해 양생기간에 따라 강도는 증가할 것이라 판단된다.

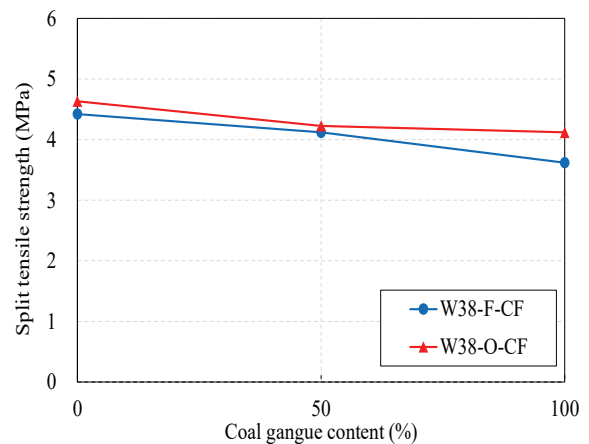


Fig. 9. Split tensile strength test results

3.4 휨인장강도

휨인장강도의 모든 시편은 양생기간 28일 일 때의 시편으로 실험을 진행하였다. Fig. 10은 휨인장강도 실험 전경과 휨인장강도 실험 종료 후 파괴 형상을 나타내었다.

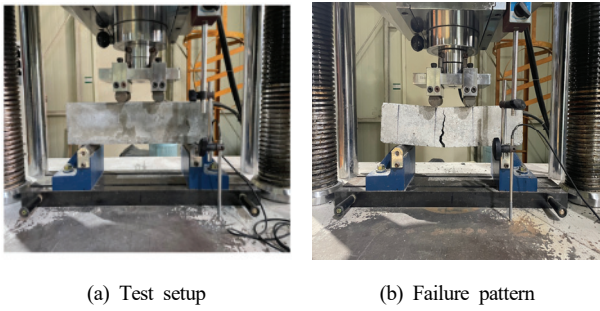


Fig. 10. Flexural strength test

Fig. 11은 콘크리트의 바인더가 OPC 또는 플라이애시 치환율 30 %일 때, 천연 잔골재 대비 석탄 부산물 치환율에 따른 휨인장강도 결과를 그래프로 나타내었다. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 휨인장강도는 감소하는 결과를 나타냈다. OPC 바인더를 사용한 콘크리트 일 때, 석탄 부산물 함유량이 0 %에 비해 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 휨인장강도는 각각 6.54 % 및 19.61 % 감소하였다. 또한, OPC 대비 플라이애시 바인더 30 %를 치환한 콘크리트의 경우, 석탄 부산물 함유량이 0 %에 비해 석탄 부산물 함유량이 50 % 및 100 %인 콘크리트의 압축강도는 각각 6.1 % 및 10.43 % 감소하였다.

석탄 부산물 함유량이 각각 0 %, 50 % 및 100 % 일 때, OPC 바인더를 사용한 콘크리트 대비 플라이애시를 30 % 치환한 콘크리트의 휨인장강도는 각각 21.37 %, 18.33 % 및 14.86 % 감소하였다. 결과적으로 석탄 부산물의 함유량이 증가할수록 휨인장강도 실험결과는 감소하였다.

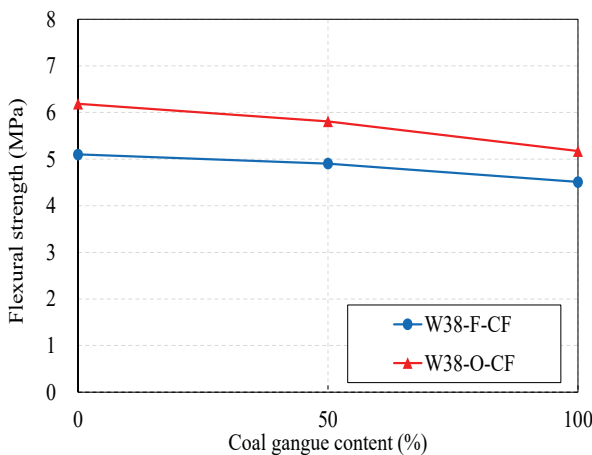


Fig. 11. Split tensile strength test results

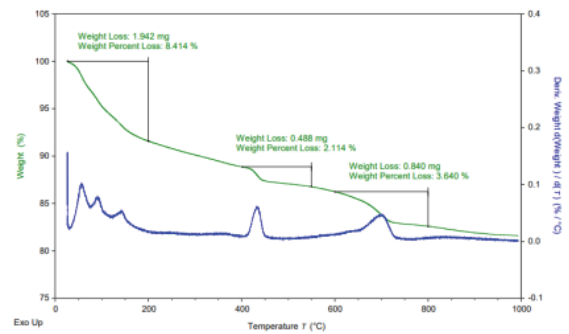
4. 미세구조 분석

4.1 석탄 부산물 콘크리트 TGA 분석

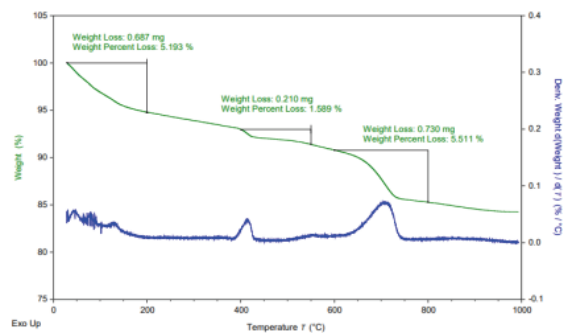
본 실험은 0.078 mm 이하의 천연 잔골재와 석탄 부산물을 함유한 콘크리트의 파우더를 최대온도 1,000 °C 승온 속도 10 °C/min 조건으로 실험을 진행하였고, 가장 큰 중량감소를 나타낸 0~200 °C, 400~550 °C 및 600~800 °C의 온도 범위로 구간을 구분하여 중량감소율을 분석하였다. Fig. 12는 OPC 바인더를 사용하였을 때, 석탄 부산물 함유량에 대한 TGA 분석 결과를 나타내었다.

석탄 부산물 함유량이 0 %와 50 %일 때, 0~200 °C 온도 범위에서의 콘크리트 중량감소는 각각 8.41 %와 5.19 %로 나타내었다. 이는, 공극 및 콘크리트 표면의 수분이 증발하면서 나타내었다고 판단된다. 400~550 °C 온도 범위에서의 콘크리트 중량감소는 각각 2.11 %와 1.59 %로 나타내었다. 이는, Ca(OH)₂가 분해되면서 CaO와 물을 만들면서 중량감소가 일어났다 판단된다. 600~800 °C 온도 범위에서의 콘크리트 중량감소는 각각 3.64 %와 5.51 %로 나타내었다. 이는 주요 CaCO₃가 CaO+CO₂로 분해되어 탈탄산화로 인한 중량 감소율을 보였다.

Yu et al.(2022)에 따르면, 석탄 부산물 함유량이 증가할수록



(a) Coal gangue content (0 %)



(b) Coal gangue content (50 %)

Fig. 12. TGA results of coal gangue concrete

400~450 °C 온도범위에서 분해되는 CH의 중량 감소율이 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 450~700 °C 온도 범위에서는 석탄 부산물 함유량이 증가함에 따라 해당 온도범위에서 분해되는 CSH의 중량 감소율이 증가하는 경향을 나타냈다.

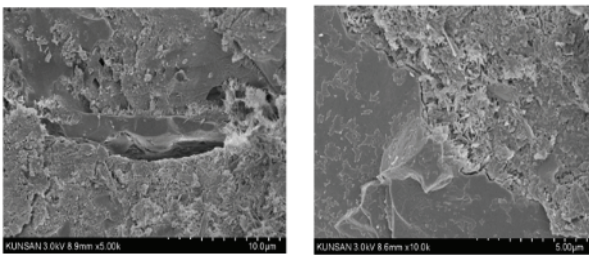
본 연구 실험결과는 참고 논문과 유사한 온도범위인 400~550 °C와 600~800 °C에서 석탄 부산물 함유량이 증가할수록 각각의 중량감소율은 동일한 경향을 나타낸다. 구체적으로, 석탄 부산물 함유량이 0 %에서 50 %로 증가할수록 400~550 °C 온도 범위에서 중량 감소율은 2.11 %에서 1.59 %로 약 0.52 %p 감소하였다. 반면에, 600~800 °C 온도 범위에서 석탄 부산물 치환률이 0 %에서 50 %로 증가함에 따라 중량 감소율은 3.64 %에서 5.51 %로 약 1.87 %p 증가하였다.

4.2 석탄 부산물 콘크리트 SEM 분석

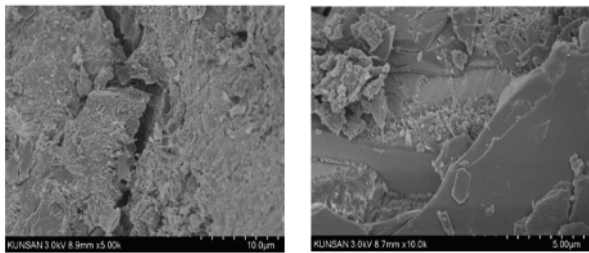
본 실험에서는 천연 잔골재와 석탄 부산물과 시멘트 페이스트 사이의 계면 파괴 및 콘크리트 수화물을 관찰하기 위해 SEM 촬영을 하여 관찰하였다. 실험은 공시체를 약 2x2 cm²로 제작하여 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 결합 ITZ(Interfacial Transition Zone)을 중심으로 SEM 촬영을 진행하였다.

Fig. 13은 석탄 부산물 치환률 0 %와 100 % 콘크리트 시편의 SEM 사진을 나타냈었다.

콘크리트 수화물은 양생 기간이 지남에 따라 AFT, C-S-H겔



(a) Coal gangue = 0 %



(b) Coal gangue = 100 %

Fig. 13. SEM test result

등 콘크리트 강도 증진에 도움이 되는 수화물을 형성한다. 이는, 균질한 슬러리 시멘트 구조를 만들고 골재와 시멘트 페이스트 사이의 기공 구조를 강화하여 강도를 증진시킬 수 있다. Fig. 13(a) 경우, 콘크리트와 시멘트 페이스트 사이의 수화물이 활발하게 생성되어있는 것을 확인할 수 있다. 반면에, Fig. 13(b) 경우, 석탄 부산물을 0 % 함유한 콘크리트보다 수화물이 적게 나타나있음을 확인할 수 있다. 이는, 골재의 표면 차이로 석탄 부산물의 표면이 거칠고 층상 구조를 가지고 있어 시멘트 구조를 형성하기 어렵기 때문이라 판단된다.

ITZ는 콘크리트 강도에서 가장 약한 부분으로 기공과 미세 균열이 크고 수산화칼슘의 함량이 높다. 시멘트의 수화과정에서 거친 표면을 가진 석탄 부산물 골재 표면에 물의 일부가 흡수되어 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 활성 부분의 강도가 낮아졌다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 석탄 부산물인 경석을 잔골재로 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험 연구를 수행하였으며, 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 골재 SEM 실험 결과 천연 잔골재의 표면은 전반적으로 균질하고 평평한 상태를 나타냈다. 반면에 석탄 부산물 골재의 표면은 거칠고 일부 단층 구조를 보이는 특성을 나타냈다.
2. 석탄 부산물 골재 함유량이 증가할수록 슬럼프는 감소하였다. 이는 석탄 부산물의 흡수율이 천연 잔골재의 흡수율보다 높고, 골재 표면이 거칠고 일부가 단층 구조로 이루어져 있어 배합 시 작업성이 낮아지기 때문으로 판단된다.
3. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 석탄 부산물 콘크리트의 단위질량은 약 2.5~2.72 % 감소하여 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다. 이는 천연 잔골재와 석탄 부산물 골재의 밀도가 각각 2.66 g/cm³ 및 2.71 g/cm³로서 큰 차이가 나타나지 않기 때문으로 판단된다.
4. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 콘크리트의 압축 강도는 약 9.3~11.3 % 감소한다. 이는 석탄 부산물 골재가 거칠고 다공성인 표면에 의해 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면(ITZ) 파괴에 기인하기 때문이다.
5. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 석탄 부산물 콘크리트의 쪼갬인장강도는 약 3.0~13.8 % 감소한다. 이는, 압축 강도의 실험 결과의 경향과 동일하게 석탄 부산물 자체의 특

성으로 인해 석탄 부산물의 함유량이 증가함에 따라, 쪼갬인장강도 또한 감소하는 결과가 나타났다고 판단된다.

6. 석탄 부산물 골재의 함유량이 증가할수록 석탄 부산물 콘크리트의 휨인장강도는 약 14.9~21.3 % 감소한다. 이는 석탄 부산물 골재와 시멘트 페이스트간의 ITZ 특성으로 인해 압축강도와 쪼갬인장강도 실험 결과의 경향과 유사하게 휨인장강도는 감소한다고 판단된다.

Conflicts of Interest

None.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부의 지역특화산업육성(1423369998)의 지원에 의한 연구입니다.

References

- Bai, G., Yan, F., Liu, H. (2021). Experimental study on the seismic performance of coal gangue concrete frame columns, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, **768(1)**, 012076.
- Bang, J.W., Kwon, D.S., Kim, B.C. (2022). Physical characteristics of concrete using pumice sand, Proceedings of Korea Concrete Institute, **34(1)**, 371–372.
- Chen, B.P. (1994). Feasibility of applying coal gangue to the aggregate, J. Huaqiao Univ.(Nat. Sci.), **15**, 181–184.
- Dong, Z., Xia, J., Fan, C., Cao, J. (2015). Activity of calcined coal gangue fine aggregate and its effect on the mechanical behavior of cement mortar, Construction and Building Materials, **100**, 63–69.
- Frías, M., De Rojas, M.S., García, R., Valdés, A.J., Medina, C. (2012). Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement, Cement and Concrete Composites, **34(5)**, 678–683.
- Gao, S., Zhao, G., Guo, L., Zhou, L., Yuan, K. (2021). Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete, Construction and Building Materials, **268**, 121212.
- Hasim, A.M., Shahid, K.A., Ariffin, N.F., Nasrudin, N.N., Zaimi, M.N.S. (2022). Properties of high volume coal bottom ash in concrete production, Materials Today: Proceedings, **48**, 1861–1867.
- Jung, H.W. (2021). Strength and Thermal Properties of Concrete Containing Coal Bottom Ash as Fine Aggregate, Master's Thesis, Gunsan University [in Korean].
- Li, Y., Liu, S., Guan, X. (2021). Multitechnique investigation of concrete with coal gangue, Construction and Building Materials, **301**, 124114.
- Liu, H., Bai, G., Yan, F., Gu, Y., Zhu, K. (2022). Effects of coal gangue coarse aggregate on seismic behavior of columns under cyclic loading, Buildings, **12(8)**, 1170.
- Qiu, J., Zhou, Y., Guan, X., Zhu, M. (2021). The influence of fly ash content on ITZ microstructure of coal gangue concrete, Construction and Building Materials, **298**, 123562.
- Qiu, J., Zhu, M., Zhou, Y., Guan, X. (2021). Effect and mechanism of coal gangue concrete modification by fly ash, Construction and Building Materials, **294**, 123563.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M.R., Hussin, M.W., Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, Construction and Building Materials, **116**, 15–24.
- Sun, Y.X., Li, X.D. (2011). Development and design of coal gangue concrete filling material, Advanced Materials Research, **295**, 1198–1201.
- Salguero, F., Grande, J.A., Valente, T., Garrido, R., De la Torre, M.L., Fortes, J.C., Sánchez, A. (2014). Recycling of manganese gangue materials from waste-dumps in the Iberian Pyrite Belt – application as filler for concrete production, Construction and Building Materials, **54**, 363–368.
- Wang, Q., Li, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Zhou, M., Fang, Y. (2020). Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete, Journal of Building Engineering, **32**, 101748.
- Wang, S., Abdulridha, A., Bravo, J., Naito, C., Quiel, S., Suleiman, M., Oztekin, A. (2023). Thermal energy storage in concrete: review, testing, and simulation of thermal properties at relevant ranges of elevated temperature, Cement and Concrete Research, **166**, 107096.
- Yao, Z., Fang, Y., Kong, W., Huang, X., Wang, X. (2020). Experimental study on dynamic mechanical properties of coal gangue concrete, Advances in Materials Science and Engineering, **2020**, 1–16.
- Yu, L., Xia, J., Xia, Z., Chen, M., Wang, J., Zhang, Y. (2022). Study on the mechanical behavior and micro-mechanism of concrete with coal gangue fine and coarse aggregate, Construction and

Building Materials, 338, 127626.

Zhou, M., Dou, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, B. (2019). Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete, Construction and Building

Materials, 220, 386–395.

Zhu, Y., Zhu, Y., Wang, A., Sun, D., Liu, K., Liu, P., Chu, Y. (2021). Valorization of calcined coal gangue as coarse aggregate in concrete, Cement and Concrete Composites, 121, 104057.

석탄 부산물인 경석을 잔골재로 사용한 콘크리트의 특성

본 논문에서는 석탄 부산물인 경석을 잔골재로 사용하여 제작한 콘크리트의 강도 및 물성 실험 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 석탄 부산물 골재 함유량과 플라이애시 함유량을 실험변수로 고려하였다. 천연 잔골재의 50 %와 100 % (부피 기준)를 석탄 부산물로 치환하였고 물-바인더 비는 0.38로 고정하였다. 또한, 일부 배합은 OPC 바인더의 30 %를 플라이애시로 치환하여 콘크리트 시편을 제작하였다. 단위질량, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 휨인장강도를 실험을 진행하고 실험결과 분석을 수행하였다. 플라이애시 바인더가 함유되고 천연 잔골재 대비 석탄 부산물 골재의 치환율이 증가할수록 콘크리트 단위질량, 압축강도, 쪼갬인장강도 및 휨인장강도는 감소하였다. 또한, 미세구조 실험인 TGA와 SEM 실험을 진행하여 구간별 열중량분석과 ITZ를 분석하였다.