

# 석회석 폐석을 이용한 폴리머 콘크리트의 역학적 성질

## Mechanical Properties of Polymer Concrete Using Waste Lime Stone

연구석\*      유능환\*      민경원\*\*      주명기\*\*\*      최동순\*\*\*  
Yeon, Kyu Seok    Ryu, Neung Hwan    Min, Kyung Won    Joo, Myung Ki    Choi, Dong Soon

---

### Abstract

This study evaluated mechanical characteristics of polymer concrete produced using waste lime stone aggregate. Study results showed that compressive strength, flexural strength, split tensile strength and fracture toughness were very high. Therefore, it was concluded that waste lime stone could be used as aggregate in polymer concrete production through appropriate processing.

---

### 1. 서 론

콘크리트에서 골재가 차지하는 비중은 용적비로 약 70% 이상이며, 최근의 급속한 경제성장과 건설 물량의 증가로 인한 수요가 급격히 증대되고 있으나, 양질의 콘크리트용 골재 부족현상을 초래하고 있어 골재의 양적인 문제와 함께 질적인 해결이 중요한 당면과제로 제기되고 있다. 이렇듯 부족한 골재의 수요를 충당하기 위하여 골재의 수입, 대체골재의 개발, 폐석재자원의 재활용이 검토되고 있는 실정이다.

우리나라에는 석탄광, 일반광 등이 많이 있어 이들 광산으로 부터 폐석이 발생되고 있으며, 산업구조의 변화에 따라 상당수의 광산들이 폐광됨으로써 탄광지역이 황폐화되고 있다. 그간 폐석 적치로 인해 임야의 훼손은 물론 폐광으로 인한 환경적 피해가 속출하고 있다. 따라서 본 연구는 석회석 광산지역에 부존하는 폐석을 폴리머 콘크리트용 골재로 활용함으로써 폐석 재 자원의 부가가치를 증대시킬 목적으로 수행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 강원도 석회석 광산지역에 다량으로 산재되어 있는 석회석 폐석을 골재로 사용하여 고강도이며 내구성이 우수한 폴리머 콘크리트를 제조하고 이에 대한 역학적 특성을 실험적으로 구명코저 한다.

---

\* 정희원, 강원대 농공학과 교수  
\*\* 강원대 자원공학과 교수  
\*\*\* 정희원, 강원대 농공학과 석사과정

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용재료

#### 가. 불포화 폴리에스터 수지

사용한 불포화 폴리에스터 수지는 올소타입(ortho type)으로서 성질은 표 1과 같다.

표 1 사용된 불포화 폴리에스터 수지의 성질

비중(25℃)	점도(25℃, poise)	산가	스틸렌 함량(%)
1.138	3.0	20.0	40

### 2.2 충전재

본 연구에서는 충전재로 중질 탄산칼슘을 사용하였으며, 그 성질은 표 2와 같다.

표 2 사용된 중질 탄산칼슘의 성질

비 중	흡수율 (%)	수 분 (%)	p H	평균입경 ( $\mu\text{m}$ )	325번체 잔분(%)
0.75	0.20	0.3이하	8.8	13	0.03

### 2.3 골 재

#### 가. 강모래

강모래는 석회석 폐석을 이용한 폴리머 콘크리트의 입도보정 및 워커빌리티 조절을 위해 사용되었으며, 물리적 성질은 표 3와 같다.

표 3 사용된 강모래의 물리적 성질

비중	흡수율 (%)	단위용적중량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	200번체 통과율 (%)	조립율
2.60	0.75	1,500	0.68	2.73

#### 나. 석회석 폐석

사용된 석회석 폐석에 대한 물리·역학적 성질에 대한 시험값은 표 4와 같다.

표 4 사용된 석회석 폐석의 물리·역학적 성질

흡수율 (%)	탄성과 속도 ( $\text{m}/\text{sec}$ )	인장강도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	압축강도 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	포아슨 비	탄성계수 $\times 10^5(\text{kg}/\text{cm}^2)$
0.08	5,850	57.3	1010	0.30	3.67

### 2.4 배합비 결정

폴리머 콘크리트의 배합비는 사용 목적, 수지의 종류, 골재의 형상 및 입도, 작업 조건 등에 따라 달라지므로 최적 배합비의 결정은 실험에 의해 구하는 것이 바람직하다. 특히 파쇄된 석회석 폐석은 미

립자가 많은 관계로 천연골재를 사용하여 제조된 시험배합을 통해 수지, 수축감소제, 충전재, 굵은 골재량을 결정하고 잔골재양만을 변경시켜 표 5과 같이 배합비를 결정하였다.

표 5 사용된 배합비

배합종류	수지	수축감소제	필러	굵은골재 (석회석폐석)	잔 골 재		석 회 석 폐 석 함 량 (%)
					석회석폐석	강 모 래	
A	10	2	10	39	0	39	50
B					11.7	27.3	65
C					19.5	19.5	75
D					27.3	11.7	85
E					39	0	100

## 2.5 시험체 제작

강도시험 및 탄성계수 시험용 시험체는 KS F 2419(폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법)에 규정된 방법에 의하여 제작하였으며, 시험체 제조시 콘크리트의 혼합은 콘크리트용 강제식 믹서로 하였다.

파괴 시험용 시험체의 크기는 Technical Committee 89-FMT의 연구 보고서를 참조하여 9×12×52 cm(지간 48cm)로 하였고, 초기균열치는 0.3으로 하였다. 시험체는 25℃±3℃인 항온기에서 7일간 양생시킨 후 시험에 사용하였다.

## 2.6 시험방법

### 가. 압축, 휨, 인장강도 특성

압축강도 시험은 KS F 2481(폴리에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 규정된 방법에 의해 수행하였고, 휨강도 시험은 KS F 2482(폴리에스테르 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법)에 규정된 방법에 따랐으며, 인장강도는 KS F 2480(폴리에스테르 레진 콘크리트의 인장강도 시험방법)의 규정된 방법에 의해 실시하였다.

### 나. 탄성계수 및 포아손비

탄성계수 및 포아손비는 KS F 2438(콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아손비 시방법)에 규정된 2가지 방법 중 와이어 스트레인 게이지(wire strain gauge)를 사용하여 파괴하중의 40%까지 반복적으로 가해 얻어진 응력-변형을 곡선의 기울기로 부터 얻어진 세컨트계수(secant modulus)로 구하였다. 시험체의 치수는  $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$  이며, 사용된 스트레인 게이지의 크기는 30mm 였다.

### 다. 파괴인성

파괴시험에 있어서는 3점 휨 실험을 행하였으며, 파괴강도 및 처짐을 측정하기 위하여 영국 ELE사의 50kN 용량의 디지털 응력 측정기로 하중을 재하하였으며, LVDT를 Data Logger에 연결하여 처짐을 측정하였다. 하중은 1초당 0.01kN씩 일정한 속도를 유지하면서 시편이 파괴에 이를때 까지 가해졌다.

표 6 압축강도 시험 결과

배합종류	석회석 폐석함량 (%)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )			
		시험치			평균
A	50	847,	814,	818	826
B	65	828,	858,	852	849
C	75	974,	925,	962	954
D	85	1,152,	1,139,	1,177	1,156
E	100	1,094,	1,125,	1,003	1,074

표 7 휨강도 시험 결과

배합종류	석회석 폐석함량 (%)	휨강도 (kg/cm <sup>2</sup> )			
		시험치			평균
A	50	226,	218,	219	221
B	65	242,	229,	246	239
C	75	253,	256,	223	244
D	85	293,	295,	287	291
E	100	277,	270,	279	275

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 압축, 휨, 활열인장 강도

본 연구에서는 석회석 폐석의 함량이 폴리머 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 구명하기 위해 석탄폐석 함량을 전체 골재량의 50, 65, 75, 85, 100 wt%로 변화시켜 시험 하였던 바, 표 6, 7 및 8과 같다.

석회석 폐석 함량에 따른 압축강도 발현 특성을 표 6에서 살펴보면 대체적으로 석회석 폐석 함량이 증가할수록 압축강도는 증가하였으며, 이는 85%를 정점으로 다시 감소하는 경향을 보였으나, 그 차이는 크지 않았다. 즉 7일 압축강도는 1,100 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로서 강모래를 혼입하지 않아도 높은 강도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

한편 석회석 함량에 따른 휨강도 및 활열인장강도 발현특성을 표 7 및 8에서 살펴보면 압축강도의 발현특성과 비슷한 경향임을 알 수 있다. 즉, 석회석 폐석의 함량이 증가할수록 강도는 증가하는 것으로 나타나 강모래를 11.7 wt%정도만 넣거나 강모래를 넣지 않아도 높은강도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 탄성계수 및 포아슨비

석회석 폐석을 사용한 폴리머 콘크리트의 탄성계수 및 포아슨비의 산출결과는 표 9와 같다.

표 8 활열 인장강도 시험 결과

배합종류	석회석 폐석함량 (%)	활열 인장 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
		시험치	평균
A	50	113, 110, 114	112
B	65	119, 115, 113	116
C	75	129, 123, 122	125
D	85	134, 144, 140	139
E	100	133, 131, 126	130

표 9 탄성계수 및 포아슨비 시험결과

배합종류	석회석 폐석함량 (%)	탄성계수 ( $\times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup> )	
		시험치	평균
A	50	1.88, 1.90, 2.01	1.93
B	65	1.95, 1.95, 2.07	1.99
C	75	2.01, 2.03, 2.08	2.04
D	85	2.52, 2.49, 2.79	2.60
E	100	2.10, 2.07, 2.43	2.20

  

배합종류	석회석 폐석함량 (%)	활열 인장 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
		시험치	평균
A	50	1.30, 0.29, 0.31	0.30
B	65	0.28, 0.29, 0.30	0.29
C	75	0.27, 0.25, 0.26	0.26
D	85	0.21, 0.24, 0.22	0.22
E	100	0.25, 0.25, 0.22	0.24

이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 탄성계수는  $1.93 \sim 2.60 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>이고 포아슨비는 0.22~0.30으로서 시멘트 콘크리트의 압축강도가 700~900kg/cm<sup>2</sup> 일때 탄성계수가  $4.5 \times 10^5$ kg/cm<sup>2</sup> 이고, 보통 시멘트 콘크리트의 포아슨비가 0.08~0.16 인 것과 비교한다면 탄성계수는 작고 포아슨비는 크다는 것을 알 수 있다.

이마이 극한변형도는 대체적으로 0.0035~0.0082의 범위로서 보통 시멘트 콘크리트의 극한변형도는 0.003~0.004이고, 고강도 시멘트 콘크리트의 극한 변형도가 0.002~0.003 정도인 것과 비교해 볼 때 약 2배 정도 높게 나타났다.

이와같은 결과로 부터 석회석폐석 폴리머 콘크리트는 강도가 높으면서도 높은 변형도를 수반함으로

써 시멘트 콘크리트, 특히 고강도 시멘트 콘크리트 보다 취성이 작음을 알 수 있는데, 이러한 경향은 석회석폐석의 함량이 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다.

### 3.3 파괴인성

콘크리트의 유효균열모델(ECM)을 임계응력확대계수 (파괴인성:Fracture toughness,  $K_{Ic}$ ) 계산에 이용하였다. 이것은 Griffith의 관계식에 근거하여 개발되어 취성재료 균열전방 프로세스 지역의 비선형 거동을 고려하도록 수정된 것이다(Karichloo and Nallathabi 1989).

이 방법에서 제시된 식 (1)이 3점 재하 보 시험으로부터  $K_{Ic}$  를 계산하기 위하여 사용되었다.

$$K_{Ic} = 1.138 \sigma_n \sqrt{a_e} F_1(\alpha_e)$$

여기서,  $\sigma_n$ 은 공칭 휨응력으로  $3SP_{max}/(2BW^2)$ 이고,  $\alpha_e = e/W$ 로써 유효균열 대 보 높이 비이며, 교정함수  $F_1(\alpha_e)$ 는 다음과 같다.

$$K_2(\alpha_e) = \int_0^{\alpha_e} \alpha F_1^2(\alpha) d\alpha$$

여기서,  $F_1(\alpha) = A_0 + A_1\alpha + A_2\alpha^2 + A_3\alpha^3 + A_4\alpha^4$ 이며 계수  $A_i (i=0, 1, \dots, 4)$  는 K arihaloo and Nathambi (1989)에 제시되어있다.

이 계수는  $S/W = 4$  와 8에 대한 것이며 선형 보간이 허용된다. 유효균열 길이  $e$ 는 최대 하중 시까지 진전된 균열의 길이이다. 이것은 균열길이 0를 가진 감소된 강성과 같은 강성( $E$ 에 비례)을 갖는 한 균열길이  $e$ 를 가진 가상의 보를 도입함으로써 계산할 수 있다고 가정한다. 즉, 최대하중시의 처짐  $\delta P_{max}$ 는

$$\delta P_{max} = \frac{P_{max}}{4BE} \left(\frac{S}{W}\right)^3 \left[ 1 + \frac{5wS}{8P_{max}} + \left(\frac{S}{W}\right)^2 (2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_{max}}) - 0.84 \left(\frac{S}{W}\right)^3 \right] + \frac{9}{2} \frac{P_{max}}{BE} \left(1 + \frac{wS}{2P_{max}}\right) \left(\frac{S}{W}\right)^2 F_2(\alpha_e)$$

이며, 여기서  $E$ 와  $w$ 는 각각 탄성계수와 보의 단위길이당 중량이다.

위의 식 (1)~(3)을 풀기 위하여 개발된 컴퓨터 프로그램에 시험데이터를 입력시켜 얻어진 결과는 표 10과 같다.

표 10 파괴인성 시험 및 산출결과

석회석 폐석함량 (%)	50	65	75	85	100
$K_{Ic}$	2.68	2.69	2.84	3.01	2.86

이 결과에서 보면 파괴인성치는 석회석폐석의 함량 증가에 따라 증가됨을 알 수 있다.

어떤 재료의 파괴인성치는 그 재료가 급속파괴(fast fracture)에 대하여 견디는 능력을 나타내는 지수이므로, 이 결과로 볼 때 석회석폐석 함량의 증가는 파괴저항력의 증가를 가져오는 것으로 판단된

다. 특히 동일한 조건의 일반 시멘트 콘크리트의 파괴인성이 약  $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  인 것과 비교해 보면 석회석 폐석 폴리머 콘크리트의 파괴인성은 2~3배 정도로 크게 나타나 높은 강도와 함께 역학적 특성이 우수함을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

이 연구는 석회석 폐석을 이용한 폴리머 콘크리트용 골재의 역학적 특성을 실험적으로 구명한 것으로서 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강도는 석회석폐석의 함량이 증가할수록 증가하며, 85wt%에서 최대치를 보였는데 재령 7일에서 압축강도  $826 \sim 1,156 \text{ kg/cm}^2$ , 휨강도  $221 \sim 291 \text{ kg/cm}^2$ , 할열인장강도  $112 \sim 139 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다.
- 2) 압축에 의한 응력-변형도 시험결과 석회석폐석 함량이 증가함에 따라 탄성계수는 커졌으며, 포아슨비는 작아지는 경향을 보였다. 그러나 탄성계수는  $1.93 \sim 2.60 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ , 포아슨비는  $0.22 \sim 0.30$ 으로서, 이는 고강도 시멘트 콘크리트에 비해 탄성계수가 작고, 포아슨비가 큼을 나타내는 것으로서 인성확보에 있어서 유리한 결과라고 하겠다.
- 3) 파괴인성은 석회석폐석 함량이 증가할수록 증가하였으며, 85wt%에서 최대치를 보였는데 이는 일반 시멘트 콘크리트의 약 2~3배 정도 높은 값으로 석회석폐석을 이용한 폴리머 콘크리트의 파괴인성이 매우 높음을 알 수 있다.

#### ● 참고문헌 ●

1. Aguado, A., Martinez, A., and Salla, J. M., "Effects of Different Factors in Mixing and Placing of Polymer Concrete", Proceedings of the 4th ICPIC, Darmstadt, Germany, 1984, pp. 299-303.
2. 出村克宣, "建築用レジコンクリートの開發に關する研究", 日本大學博士學位論文, 1983.
3. Haddad, M. U., Fowler, D. W. and Paul, D. R., "Factors Affecting the Curing and Strength of Polymer Concrete", ACI Journal, Vol. 80, No. 5, 1983, pp. 369-402.