

## 석탄폐석을 이용한 콘크리트의 역학적 거동

이 봉 학\*

### Mechanical Behavior of Coal Mine Waste Concretes

Bong-Hak Lee\*

---

#### ABSTRACT

This paper presents coal mine waste (CMW) for use in concrete manufacture as a replacement of normal aggregates. The CMW in this study was collected from Sabook, Jungson-kun, Kangwon-do. Fine and coarse aggregates from CMW were prepared by crushing it in a jaw crusher and separating debris with #4 sieve. CMW aggregates showed good physical and mechanical properties with having specific gravity over 2.65, absorption less than 1%, and abrasion ratio below 20%, but particle shape of CMW was long or flat, which caused a poor workability in mixing. Therefore, to make workability better, a 1/4 of CMW coarse aggregate was replaced with normal aggregate which had a good particle shape, and a superplasticizer was added to the mix. Compressive strength and other mechanical properties of CMW concrete was very good. In conclusion, characteristics of CMW concrete was acceptable for use as a concrete structural material.

---

#### 1. 서론

본 연구는 석탄 폐광석 중 콘크리트용 골재로서 대체될 수 있는 폐광석을 선정하고 이로부터 제조되는 골재 및 콘크리트의 강도 특성을 비교 고찰함으로써 폐광석을 이용한 콘크리트의 개발 가능성을 확인하

는 것을 목표로 하고 있다. 현재 국내에서는 사회 간접 자본 시설 확충에 따라 각종 건설 공사가 활발하여지면서 콘크리트용 골재 수요가 많아짐으로서 국내의 골재 자원이 점차 고갈되어 가고 있는 실정이다. 따라서, 河床에서의 천연 자갈 등이 부족하여지면서 점차 쇄석골재로 대체되었으며, 잔골재도 천연 모래는 매우 구하기 힘들고 구입 비용이 비싸 쇄석모래를 사용하기 시

---

\* 강원대학교 토목공학과 교수

작하였고 또한 바닷모래까지도 이용되기에 이르렀다. 앞으로 쇄석 골재의 사용 비중은 점차 더 커질 것으로 예측되며, 또한 수요량은 급속히 증가하고 있는 반면 매장량의 제한과 운송 거리의 제약 등으로 인하여 지역적 수급 불균형이 곧 나타날 것으로 전망된다.

이에 대한 해결 방법의 하나로 자원 리사이클링을 들 수 있는데 폐기물을 재활용하므로써 최근 심각하게 대두되고 있는 환경 문제를 해결하게 되고, 산업 부산물을 재처리하므로써 얻는 경제적 이득 때문에 폐기물의 재활용이 근래에 와서 적극 추진되고 있다. 따라서 본 연구에서는 광산 지역에서 버려지는 석탄 폐석을 콘크리트의 골재로 활용하는 점에 착안하여 연구를 수행하였다. 특히 강원 지역에는 막대한 량의 광산 폐기물이 폐광 지역에 적치되어 있다. 기존 골재 자원의 고갈에 따른 대체 자원의 개발이 절실한 시점에서 이 광산 폐석은 새로운 골재 자원의 하나로 그 가능성이 매우 크게 인정되고 있다. 그러므로 기존 골재 자원의 대체물로 그간 소홀히 취급되어 왔던 석탄폐석의 활용에 대한 연구는 매우 큰 의미를 지니게 된다. 이는 기존 골재 자원의 대체물로 이용되는 것 뿐 아니라 막대한 폐석들을 처분함으로써 현재 적체되어 있는 폐자원을 처분하여 환경을 개선하는 역할을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 석탄 폐석을 골재로써 제조하여 그 특성을 조사하고 배합설계를 통하여 제조한 폐광석 콘크리트의 여러 가지 특성을 시험을 통하여 측정하고 이를 일반 콘크리트와 비교 검토하여 실용성 여부를 검토하였다. 특히 구조용 콘크리트로 사용하기 위하여 압축강도는 물론 파괴인성 등도 고찰하여 일반골재 대치용으로 사용할 수 있을지의 가능성을 고찰하였다.

## 2. 연구 동향

유럽의 여러 국가 및 일본, 미국에서는 1970년대 초부터 골재의 수요 공급 관계 및 골재 대체물을 이용한 콘크리트의 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 특히 이들은 천연골재 고갈에 따른 각종 폐자원을 이용한 콘크리트의 개발로 폐콘크리트를 재활용한 재생 콘크리트, 유리 및 플라스틱 등 각종 산업 부산물을 이용한 콘크리트, 고강도의 광산폐석을 이용한 콘크리트에 대한 개발 등을 수행하여 왔다.

하지만 국내에서는 선진국에서와 같은 골재의 고갈에 대한 우려도 1980년대 중·후반전까지는 별로 없었다. 따라서 광산 폐석의 활용은 물론 골재 대체물의 개발에 관한 연구도 1990년대에 이르기까지 거의 전무한 상태였다. 이와 같은 무관심 추세는 1990년대 초반 200만호 주택 건설을 정부에서 추진하면서부터 급변하기 시작하였다. 또한 이와 거의 동시에 부각되기 시작한 환경에 대한 국민 의식의 고조는 그간 폐기물로 취급되어 왔던 각종 재료들을 재활용하는데 눈을 뜨게 했다.

즉, 근래에 들어 국내 각 건설 업체 및 콘크리트 제조 업체들은 최근 정부의 산업 폐기물 재활용 조치에 따라 폐자원을 이용한 콘크리트의 개발에 관심을 집중시키고 있다.

한편 지금까지 알려진 국내에서의 연구는 매우 적은 편이다. 강원대학교의 연구석, 김광우 교수 등이 건설폐재를 이용한 연구를 많이 수행하였으며 충남대학교의 김무한 교수도 유사한 연구를 많이 수행하여 왔다.<sup>[2,6,7,8,9,12]</sup> 또한 본 필자는 일부 연구진과 함께 산업 폐기물 재활용에 관심을 가지고 콘크리트 폐기물의 재활용에 대한 몇몇 연구를 수행하여 왔으며, 그 결과를 국내외에 여러 학회 등을 통하여 발표하여 왔다.<sup>[1,3,4,5]</sup> 따라서 이러한 폐기물의 재활용 일환으로 광산 폐기물의 하나인 폐 광석을 콘크리트용 골재로 재활용하는 방안에 대한 본 연구를 제안하기에 이르렀다.

### 3. 재료 및 실험방법

#### 3.1 재료

본 연구에서 사용된 석탄폐석은 강원도 정선군 사북 탄전 지대에 방치되어 있는 석탄폐석을 무작위로 채취한 후 실험실용 소형 조크리서로 파쇄하여 25mm 이하의 골재를 만들고, 이를 다시 #4 체로 체가름하여 잔골재와 굵은골재로 분리하였다. 파쇄에 따른 잔골재와 굵은골재의 량은 중량비로 약 1 : 4로 굵은골재가 훨씬 더 생산되었다. 얻어진 석탄폐석 잔골재 및 굵은골재에 대한 물리적 성질은 표 1과 같다. 석탄폐석과 혼합용으로 강원도 춘천 산 쇄석 굵은골재와 천연 잔골재를 사용하였다. 이에 대한 각각의 체가름 시험 결과는 그림 1과 같다. 작업성(Workability)의 향상을 위하여 유동화제를 시멘트 량의 1%를 사용하였는데 이것은 국내의 S사 제품으로 그 성질은 표 2와 같다.

Table 1. Physical properties of coal mine waste aggregates

Aggregate type	Max. size (mm)	Specific gravity		Absorption (%)	Abrasion (%)	Color	F.M.
		Apparent	SSC				
Fine	4.75	2.75	2.72	0.60	-	Black	3.10
Coarse	25.0	2.76	2.71	0.90	18.6	Black	-

Table 2. Chemical and Physical Properties of Plasticizer

Solid Intensity	SO <sub>4</sub> -2 Intensity	pH	Cl- Intensity	Ion	Solubility
>41%	<1.2%	8.0	<500ppm	Negative	Dissolved in Water

#### 3.2 실험 방법

석탄폐석을 이용하기 위한 배합설계에서

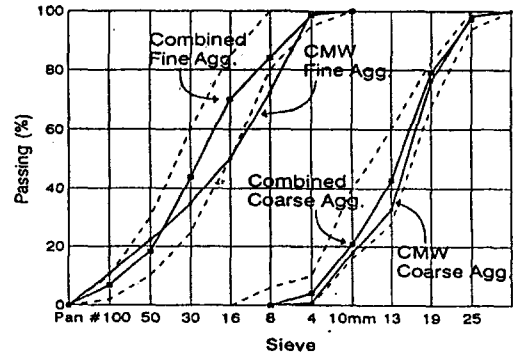


Fig. 1. Gradation of fine aggregate for asphalt-sand mixture

는 일차적으로 굵은골재를 모두 석탄폐석으로, 그리고 잔골재를 천연 잔골재와 일반잔골재를 반반씩 표 3과 같이 혼합하여 혼화재료 없이 예비 배합설계를 수행하였다. 이때 목표 슬럼프를 10cm로 설정하고 목표 압축강도는 250kg/cm<sup>2</sup>로 하여 콘크리트 표준 시험방식의 쇄석골재 배합 방법을 이용하였다. 슬럼프 값의 향상을 위하여 수차레의 예비 시험 결과 일반 쇄석골재를 25%, 유동화제는 1% 혼합기로 최종 결정하였다 (표 4).

콘크리트의 강도는 압축강도, 할렬인장강도, 및 파괴인성을 실험하였다. 압축강도 및 인장강도용 공시체는 직경 15cm x 높이 30cm의 원통형 공시체를 제작하였으며 파괴 인성용 공시체는 폭 (B) 9cm x 깊이 (W) 12cm x 길이 (L) 52cm의 공시체에 초기 균열(notch)을 만들고, 모두 25°C 수중에서 28일 간 양생시켰다. 초기 균열의 깊이 (a<sub>0</sub>)는 약 36mm로 a<sub>0</sub>/W 비가 0.3이 되도록 하였으며, 파괴인성 측정용 하중 재하는 그림 2에 나타난 바와 같이 3점 휨시험 방법으로 수직 정하중을 보의 중심에 초당 2.6kg의 속도로 가해지게 하였다.

콘크리트의 유효 균열 모델 (Effective crack model: ECM)을 임계응력 확대계수 (파괴인성: Fracture toughness, K<sub>IC</sub>) 계산에 이용하였다. 이 방법은 Griffith의 관계식에 근거하여 개발되어 준 취성재료의 프

Table 3. Trial Mix Design for Coal Mine Waste Concrete

Max. Size of Coarse Aggregate	Designed Slump	W/C	S/a	Unit Weight (Kg/m <sup>3</sup> )			
				Water	Cement	Fine Aggregate <sup>+</sup>	Coarse Aggregate
25mm	10cm	0.483	43.6 (%)	188	389	390/390	1,030

+ 50% 하천 잔골재, 50% 석탄 폐석 잔골재

Table 4. Final Mix Design for Coal Mine Waste Concrete

Max. Size of Coarse Aggregate	Designed Slump	W/C	S/a (%)	Unit Weight (Kg/m <sup>3</sup> )				
				Water	Cement	Fine Aggregate <sup>+</sup>	Coarse Aggregate <sup>++</sup>	Plasticizer
25mm	15cm	0.510	43.3	198	389	390/390	772/250	38.9

+ 50% 하천 잔골재, 50% 석탄 폐석 잔골재 사용

++ 25% 일반 쇄석 굵은골재, 75% 석탄폐석 굵은골재 사용

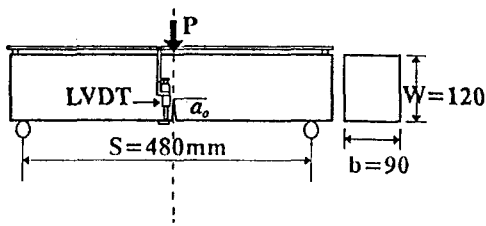


Fig. 2. Instrumentation of 3-Point Bending Test

로세스 지역(그림 3)의 비선형 거동을 고려하도록 수정된 것이다.<sup>[8,10]</sup>

이 방법에서 제시된 다음의 식이 3점 재하 보 시험으로부터  $K_{IC}$ 를 계산하기 위하여 사용되었다.

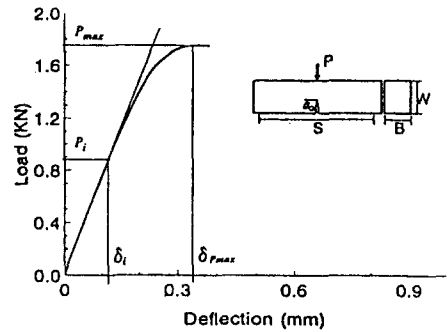


Fig. 3. Schematic Illustration of Effective Crack Length, Process Zone and Stress Intensity near the Tip of the Notch

$$K_{IC} = 1.138 \sigma_n \sqrt{a_e} F(\alpha_e) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_n$ 은 공칭 휨응력으로  $3SP_{max}/(2BW^2)$ 이며 S, B, W는 그림 2에 정의되어 있다. 또한  $\alpha_e = a_e/W$ 는 유효 균열 대 보 높이 비이며, 교정 함수  $F(\alpha_e)$ 는 다음과 같다.

$$F(\alpha_e) = \int_0^{\alpha_e} \alpha F^2(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

여기서  $F(\alpha) = A_0 + A_1\alpha + A_2\alpha^2 + A_3\alpha^3 + A_4\alpha^4$ 이며 계수  $A_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 는 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} A_0 &= 0.0075 S/W + 1.90 \\ A_1 &= 0.080 S/W - 3.39 \\ A_2 &= -0.2175 S/W + 15.40 \\ A_3 &= 0.2825 S/W - 26.24 \\ A_4 &= -0.145 S/W + 26.38 \end{aligned} \quad (3)$$

이 계수는  $S/W=4$ 와  $8$ 에 대한 것이며 선형 보간이 허용된다. 유효 균열 길이  $a_e$ 는 최대 하중 시까지 진전된 균열의 길이이다(그림3). 이것은 균열 길이  $a_o$ 를 가진 감소된 강성과 같은 강성(E에 비례)을 띠는 한 균열 길이  $a_e$ 를 가진 가상의 보를 도입함으로써 계산할 수 있다고 가정한다. 즉, 최대 하중 시의 처짐  $d_{Pmax}$ 는

$$d_{Pmax} = \frac{P_{max}}{4BE} \left(\frac{S}{W}\right)^3 \left[ \frac{1+5wS}{8P_{max}} + \right.$$

$$\left. \left(\frac{W}{S}\right)^2 \left(2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_{max}}\right) - 0.84 \left(\frac{W}{S}\right)^3 \right]$$

$$+ \frac{9}{2} \frac{P_{max}}{BE} \left(1 + \frac{wS}{2P_{max}}\right) \left(\frac{S}{W}\right)^2 F_2(\alpha_e) \quad (4)$$

이며 여기서 E와 w는 각각 탄성계수와 보의 단위 길이 당 중량이다.

$\alpha_e$ 는 식 (4)를 푸는 과정에서 시산 법에 의하여 계산된다. E의 초기 치는 식 (4)로부터  $\alpha_e$ 에  $\alpha_o = a_o/W$ 를 이용하고  $P_{max}$ 와  $d_{Pmax}$ 를  $P_i$ ,  $d_{P_i}$ 로 대입한 후 양변에 E를 곱하고  $d_{P_i}$ 로 나누어 구한다.

그리고 실험으로부터 얻은  $P_{max}$ ,  $d_{Pmax}$ 와 E 그리고 식 (2)로 구한  $F(\alpha_e)$ 를 식 (4)에 넣고 새로운 E(즉,  $E_1$ )를 구한다. 시산 과정은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 균열 길이 증가 비를  $\Delta\alpha = 0.001$  만큼씩 증가시키며  $E_1 = E \pm \varepsilon (=0.005\%)$  될 때까지 계속한다. 그래서 최종  $\alpha$  값을  $\alpha_e$ 로 취하고 이때의 균열 길이  $a_e$ 를 유효 균열 길이라 한다. 이  $a_e$ 와  $F(\alpha_e)$  그리고  $\sigma_n$ 을 이용하여 파괴인성을 식(1)로 계산한다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 굳지 않은 석탄 폐석 콘크리트의 특성

석탄 폐석콘크리트의 작업성(Workability) 및 유동성(Consistency)은 같은 물-시멘트 배합의 일반 쇄석골재 콘크리트보다 훨씬 나빴다. 이는 석탄폐석의 입형이 납작하거나 긴 것이 많고 입자들이 예리한 각으로 파쇄되어 혼합시 서로 맞물려, 움직임이 매

우 어려운 것에 기인한다고 보고, 따라서 비교적 입형이 좋은 쇠석골재를 25% 섞고 유동화제를 시멘트 량의 1%를 첨가한 결과 Workability가 비교적 좋은 15cm 정도가 얻어졌다. 그러므로 석탄 폐석 콘크리트는 물-시멘트비를 일정 수준으로 유지하여 강도를 유지하려면 유동화제의 사용이 필수적이라고 보여진다. 하지만 파쇄기를 개선하여 입형이 좋은 골재를 생산할 수 있다면 석탄폐석의 비중이 높고 흡수율이 매우 낮은 점을 고려한다면 같은 물-시멘트비라도 유동성은 훨씬 좋아지리라 생각된다.

#### 4.2 석탄폐석 콘크리트의 강도 특성

할렐 인장강도 (Split Tensile Strength) 시험은 KS F 2423에 따라서, 압축 탄성계수(Compressive Elastic Modulus) 및 압축강도(Compressive Strength) 시험은 KS F

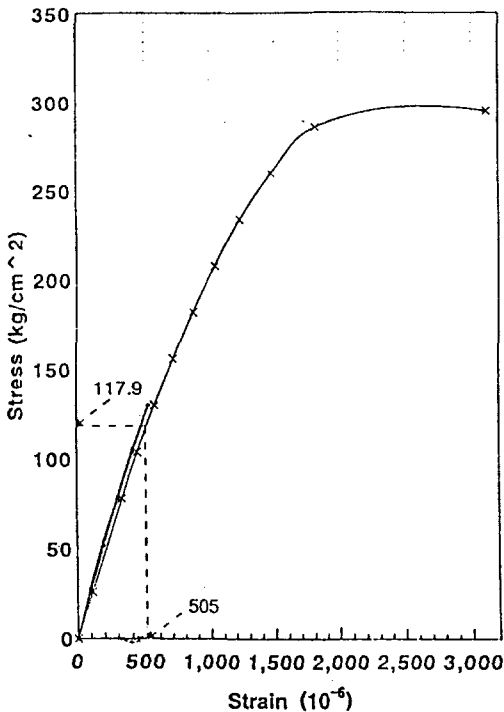


Fig. 4. Stress-Strain of a Coal Mine Waste Concrete

2438에 따라 수행되었다. 압축강도의 시험 시 파괴 하중의 약 40%를 구하여 선형 부분의 응력-변형을 곡선에서 탄성계수를 구하였고, 이를 그림 4에 나타내었다.

시험 배합으로부터 제조한 석탄폐석 콘크리트 공시체의 7일 압축강도는 299 kg/cm<sup>2</sup>로 매우 우수하였다.

한편 유동성 및 작업성을 향상시키기 위하여 조정한 배합설계(표4)에 의해 제조한 콘크리트의 압축강도 및 할렐 인장강도는 표 5와 같다.

이 표에서 보듯이 석탄폐석 콘크리트의 28일 강도는 300kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 양호하였으며 일반 콘크리트의 탄성계수를 200,000 kg/cm<sup>2</sup> 정도로 보므로 탄성계수도 또한 우수하게 나타났다. 그리고 인장강도 대 압축강도의 비는 약 9.1%로 나타났다.

Table 5. Strengths of Coal Mine Waste Concrete (Unit: Kg/cm<sup>2</sup>)

Concrete	Compressive Strength		Split Tensile Strength	Compressive Elastic Modulus	
	at 7 days	at 28 days	at 28 days	at 7 days	at 28 days
Coal Mine Waste Concrete	281.7	314.8	29.0	233,513	248,400

석탄폐석 콘크리트의 파괴인성(K<sub>IC</sub>)을 조사하기 위하여 초기 균열을 낸 보에 대하여 파괴인성을 측정된 결과를 표 6에 나타내었으며, 그림 5는 3개 공시체의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 각 공시체 모두 급속파괴모드(Catastrophic Fracture Mode)를 보이며 극한 하중에 도달하는 순간 파괴되어 절단되었다.

어떤 재료의 파괴인성은 그 재료가 급속 파괴에 대하여 견디는 능력을 나타내는 지수이다. 일반 콘크리트의 파괴인성이 약 1.0 MPa · m<sup>1/2</sup> 정도인 점과 비교해 볼 때 석탄폐석 콘크리트의 파괴인성은 다소 낮은 편이나 그리 크게 차이가 나지는 않았다. 또한 휨강도는 45 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 비교적 양호한 편으로 나타났다.

Table 6. Fracture Toughness Test Results of Coal Mine Waste Concrete

Beam	Width (mm)	Depth (mm)	$a_0$ (mm)	$P_{0f}$ (KN)	$d_i$ (mm)	$P_{max}$ (KN)	$d_{max}$ (mm)	Flexural Strength ( $Kg/cm^2$ )	KIC ( $MPa \cdot m^{1/2}$ )
1	90.54	120.0	33.73	1.62	0.160	4.05	0.326	44.78	0.865
2	89.57	120.0	38.69	1.76	0.135	4.49	0.243	56.48	1.077
3	88.00	120.0	38.69	1.35	0.176	3.38	0.321	40.87	0.785
Mean								47.38	0.909

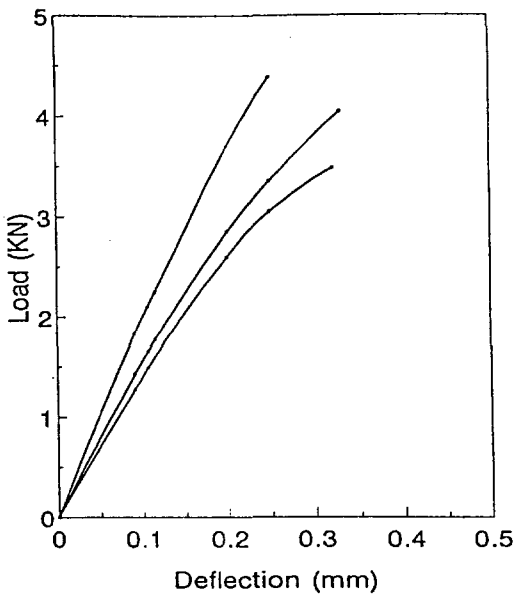


Fig. 5. Load-Deflection Curves for Coal Mine Waste Concrete

#### 4.2 기타 특성

석탄폐석 콘크리트 공시체를 파괴한 후 그 단면으로부터 석탄폐석 굵은골재와 모르타르와의 부착 여부를 검사한 결과 석탄폐석 굵은골재가 많이 파괴된 점으로 보아 모르타르와 접착이 잘되는 것으로 보여졌다. 따라서 본 연구에 사용된 석탄폐석 골재를 콘크리트에 사용하는 것은 큰 문제가

없을 것으로 보여진다.

석탄폐석 콘크리트는 일반 콘크리트보다 훨씬 검은빛을 띠는데 이는 석탄폐석 자체의 색깔이 검은것에 기인하는 것이다. 따라서 도로포장용 콘크리트로 사용할 경우 운전자의 시야를 좋게 할 것으로 보여진다.

#### 5. 결론

석탄폐석을 골재화하여 콘크리트 제조에 사용하기 위한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 석탄폐석 잔골재 및 굵은골재는 모두 비중, 흡수율 및 마모율이 우수하였다.
2. 굵은골재 입도는 양호하였고, 잔골재의 입도는 천연 잔골재를 사용하여 보정이 가능하였다.
3. 하지만 석탄폐석 골재는 결에 따라 파쇄되어 입형이 불량한 골재가 많았다. 이는 결국 콘크리트 혼합물의 Workability를 매우 불량하게 하여 일부의 굵은골재를 입형이 좋은 일반 쇄석골재로 대체하여야 하였다. 그리고 실용화를 위해서는 배합 설계 방법을 일부 개선하여 Workability의 향상을 기해야 할 것으로 보여진다.
4. 석탄폐석 골재를 이용한 콘크리트의 강도는 설계한 대로 충분한 강도를 내었다.

## 후 기

본 연구는 강원대학교 학술진흥재단의 '96년도 연구년 교수 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Kim, K. W., Lee, B. H., Park, J. S. and Doh, Y. S. "Performance of Crushed Waste Concrete as Aggregate in Structural Concrete," *Proceedings, ASCE Convention-Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*, New York, NY., 1992
- [2] 김광우, 연규석, 이병덕, "Problems in Strength Characteristics of Recycled Concrete," *한국콘크리트학회 학술발표회 논문집*, 충남대학교, 1992
- [3] 김광우, 이봉학, 도영수, "재생콘크리트의 동결융해 저항성과 변형특성," *한국콘크리트학회 논문집 제4권 4호*, 1992
- [4] 김진영, 김광우, 이봉학, 박제선, "Fly Ash를 사용한 구조용 재생콘크리트의 강도특성," *한국콘크리트학회 학술발표회 논문집*, 제6권 2호(통권 11집), 동국대, pp229-234. 1994
- [5] 이봉학, 김광우, 박제선, 김진영, "재생 폐콘크리트의 성능 향상에 관한 연구," *한국콘크리트 학회지*, 제 7권 2호, pp136-145, 1995
- [6] 김광우, 김주인, 김기성, "재생콘크리트의 휨변형과 파괴특성," *한국농공학회 논문집 제 37권 4호*, pp90-98, 1995
- [7] 김광우, 도영수, 김진영, 박용철, "콘크리트 폐기물을 재활용한 콘크리트의 제조 및 품질특성 연구," *동아그룹 창립 50 주년기념 동아 건설논문상 수상 논문집*, pp1-35, 1995
- [8] 김광우, 유능환, 김주인, 박용철, 최상용, 최영규, "농촌도로 포장재료로 폐콘크리트의 재활용에 관한 연구," *한국농공학회 학술발표회 논문집*, 전남대학교, pp137-142, 1995
- [9] 김광우, 최영규, 박용철, "페타이어 고무 아스팔트 콘크리트의 배합설계," *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 중앙대학교, pp503-506, 1995
- [10] 박영진, 박원철, 박은영, 최영훈 "도로 성토재료로써 폐콘크리트의 활용성 연구," *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 중앙대학교, pp516-519, 1995
- [11] "건설폐기물의 재활용 기술," 제2세부 연구과제 보고서, 동아건설산업 주식회사, 1995
- [12] 김무한, "건설산업 폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술개발에 관한 연구," 충남대학교 산업기술연구소, 1995