

석탄폐석을 이용한 콘크리트의 특성 연구

Evaluation for Characteristics of Coal-mine Waste Concrete

김 광 우* · 도 영 수** · 이 상 범***
Kim, Kwang W. · Young S. Doh · Xiang Fan Li

Abstract

This study deals with coal-mine waste (CMW) for use in concrete as a replacement of normal aggregates. The CMW was collected from Sabuk region, Gangwon-do. Fine and coarse aggregates from CMW were prepared by using a 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%. However, particle shape of CMW was poor because of non-isotropic nature of matrix which causes particles to be long or flat. Since irregular particles caused a poor workability, to make workability better, a 1/4 of coarse aggregate was replaced with normal aggregate together with a superplasticizer. Compressive strength and other mechanical properties of CMW concrete were very good. Color of the concrete was darker than normal concrete due to black color of CMW. In conclusion, characteristics of CMW concrete was acceptable for use as a structural concrete material.

I. 서 론

본 연구는 석탄 폐광석 중 콘크리트용 골재로서 대체될 수 있는 폐광석을 선정하고 이로부터 제조된 골재로 제조한 콘크리트의 강도 특성을 비교·고찰함으로써 폐광석의 콘크리트용 골재로 활용 가능성을 확인하는 것을 목표로 하고 있다. 현재 국내에서는 각종 건설 공사의 활성화에 따라 골재 자원이 점차 고갈되어 가고 있다. 따라서, 河床에서의 자갈 등은 이미 쇄석골재로 대체되었으며 잔골재도 천연 모래는 매우 구하기 힘들어 부순모래

를 사용하기 시작하였고 또한 해사가 이용되기도 한다.

천연골재의 주를 이루는 하천골재의 비중은 전체 골재 수급량의 54.2% (88년)에서 28.4% (97년, 추정)로 저하되어 가고 있는 반면 산림 등에서 생산하는 골재 (쇄석)는 같은 기간 26.5%에서 41.8%로 개발이 활발해지고 있다. 이러한 현상은 점차 심화될 것으로 예측되며 또한 수요량에 있어서도 1988년 9,800만³에서 1993년에는 약 2배인 18,500만³로 까지 급속히 증가하고 있다. 이와 같은 증가 추세에 의하면 현재 확보된 약 40억³의 가채

* 강원대학교 농업공학부

** 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터(박사후연구원)

*** 강원대학교(박사과정 수료)

키워드 : 석탄폐석, 유동화제, 파괴인성

배장량은 약 10년 분 정도에 불과하며, 운송 거리의 제약 등으로 인한 지역적 수급 불균형은 5년을 전후하여 나타날 것으로 전망된다.⁽¹⁾

따라서 국내에서의 이러한 인식과 아울러 현실적으로 심각하게 대두되는 환경적 문제 때문에 골재 대체물로서 뿐 아니라 환경 훼손의 방지 차원에서 건설 폐기물 등의 재활용이 근래에 와서 적극 추진되고 있다. 따라서 일부 건설 업체들은 폐자원을 이용한 콘크리트의 개발에 관심을 집중시키고 있으며 값비싼 골재를 저렴한 골재로 대체하면서도 성능상 뒤지지 않는 콘크리트를 개발하는데 관심을 가지고 많은 연구가 수행되었다.⁽²⁻¹²⁾ 따라서 이러한 폐기물 재활용의 일환으로 본 연구팀은 광산 폐기물의 하나인 석탄폐석을 콘크리트용 골재로 재활용하는 방안에 대한 연구를 수행하였다.

특히 국내에는 막대한 량의 광산폐석이 폐광 지역에 적치되어 있다. 기존 골재 자원의 고갈에 따른 대체 자원의 개발이 절실한 시점에서 광산폐석은 새로운 골재 자원의 하나로 그 가능성이 매우 크게 인정되고 있다. 그러므로 그간 소홀히 취급되어 왔던 석탄폐석의 활용에 대한 연구는 기존 골재 자원의 대체 뿐만 아니라 현재 적체되어 있는 폐석을 치분하는 환경 개선 역할을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 석탄폐석을 골재로 제조하여 그 특성을 조사하고 배합설계를 통하여 제조한 석탄폐석 콘크리트의 기본 특성을 시험을 통하여 측정하고 이를 일반 콘크리트와 비교 검토하여 실용성 여부를 확인하였다. 특히 구조용 콘크리트로 사용을 위해서 압축강도는 물론 파괴인성 등도 고찰하여 일반 골재의 대체용으로 사용할 수 있을지의 가능성을 포괄적으로 점검하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재 료

본 연구에서 사용된 석탄폐석은 강원도 정선군 사북읍 탄전지대에 방치되어 있는 석탄폐광석에서

무작위로 채취한 것이다. 이를 실험실용 소형 조크러셔로 파쇄하여 25mm 이하의 골재를 만들었다. 폐석은 비교적 잘 파쇄되었으며 이를 다시 #4 체로 체가름하여 산골재와 굵은골재로 분리하였다. 파쇄된 폐석의 굵은골재는 Fig. 1과 같고 잔골재는 Fig. 2와 같다. 파쇄에 따른 산골재와 굵은

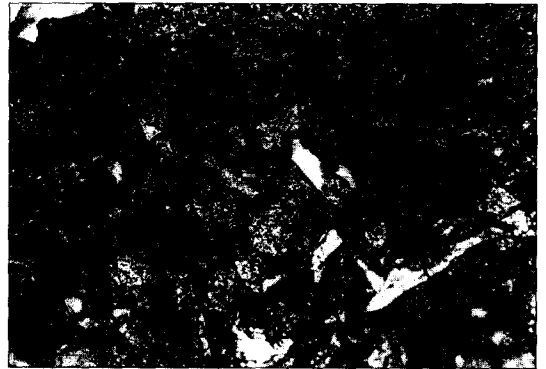


Fig. 1 Coal-mine waste coarse aggregate (Max. size 25mm)

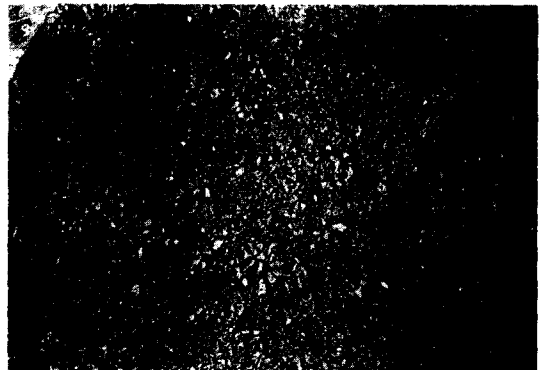


Fig. 2 Coal-mine waste fine aggregate (Passing #4 sieve)

Table 1 Physical properties of coal-mine waste aggregates

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

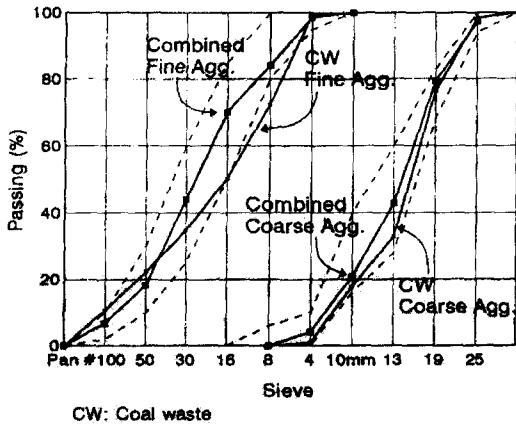


Fig. 3 Gradation of aggregates used

Table 2 Chemical and physical properties of plasticizer

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

Table 3 Trial Mix Design for Coal-mine Waste Concrete

Max. size of coarse aggregate (mm)	Designed slump (cm)	W/C	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)			
				Water	Cement	Fine aggregate*	Coarse CMW aggregate
25	10	0.48	43.6	188	389	390/390	1,030

* 50% 하천 잔골재, 50% 석탄폐석 잔골재 사용

Table 4 Final mix design for coal-mine waste concrete

Max. size of coarse aggregate (mm)	Designed slump (cm)	W/C	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)				
				Water	Cement	Fine aggregate*	Coarse aggregate**	Super-plasticizer
25	15	0.51	43.3	198	389	390/390	772/255	3.89

* 50% 하천 잔골재, 50% 석탄폐석 잔골재 사용

** 25% 일반쇄석 굵은골재, 75% 석탄폐석 굵은골재 사용

골재의 량은 중량비로 약 19.6 : 80.4로 굵은골재가 훨씬 많이 생산되었다. 얻어진 석탄폐석 잔골재 및 굵은골재에 대한 물리적 성질은 Table 1과 같다. 석탄폐석과 혼합용으로 일반 쇄석 굵은골재와 천연 잔골재를 사용하였다. 이에 대한 각각의 체가름 시험 결과는 Figure 3과 같다. 작업성 (Workability)의 향상을 위하여 유동화제를 사용하였는데 이것은 국내의 S사 제품으로 그 성질은 Table 2와 같다.

2. 시험 방법

석탄폐석을 이용하기 위한 배합설계에서는 일차적으로 굵은골재를 모두 석탄폐석으로 그리고 잔골재를 천연 잔골재와 석탄폐석 잔골재를 반반으로 Table 3과 같이 실험용 드럼 믹서로 혼합하여 혼화재료없이 예비 배합을 수행하였다. 이때 목표

슬럼프를 10cm로 설정하고 목표 압축강도는 250kgf/cm²로 하여 콘크리트 표준시방서의 쇄석골재 배합방법을 이용하였다. 슬럼프 시험 결과 슬럼프 치가 3cm 이하로 나타나 재배합을 수행하여야 했다. 특히 슬럼프 값의 향상을 위하여 두 가지 면에서 조정을 시도하였다. 첫째는 석탄폐석 굵은골재에 비교적 입형이 좋은 일반 쇄석골재를 일정량 첨가하는 것이고, 둘째는 유동화제의 첨가였다. 수차례의 예비시험 반복 결과, 일반 쇄석골재 25%, 유동화제 1%를 혼합키로 최종 결정하였다 (Table 4).

콘크리트의 강도 특성으로는 압축강도, 조깅인장강도 및 파괴인성을 측정하였다. 압축강도 및 인장강도용 공시체는 직경 15cm×높이 30cm의 원통형 공시체를 제작하였으며, 파괴인성용 공시체는 폭 (B) 9cm×깊이 (W) 12cm×길이 (L) 52cm에 중앙 하단에 초기균열(Notch)을 넣은 보

공시체를 만들었다. 초기균열의 깊이 (a_0)는 약 36mm로 a_0/W 비가 0.3이 되도록 하였으며 하중 재하 지간의 길이 (S)는 48cm로 보 깊이 W의 4 배가 되도록 하였다. 제조된 공시체는 모두 25°C 에서 28일 동안 수중 양생시켰다. 파괴인성 측정 용 하중 재하는 3점 휨 시험 방법으로 수직 정하중을 보의 중심에 초당 2.6kgf의 속도로 재하하였으며 이에 대한 상세한 내용을 Fig. 4에 그리고 이로부터 얻어지는 하중-처짐 곡선의 주요 값의 정의를 Fig. 6에 나타내었다.

콘크리트의 유효 균열 모델 (Effective crack model : ECM)을 임계응력확대계수 (파괴인성 : Fracture toughness, K_{IC}) 계산에 이용하였다. 이 방법은 Griffith의 관계식에 근거하여 개발되어 준 취성재료의 프로세스 지역 (Fig. 5)의 비선형 거동을 고려하도록 수정된 것이다.^(13,14) 이 방법에서 제시된 다음의 식이 3점 휨 시험으로부터 K_{IC} 를 계산하기 위하여 사용되었다.

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

여기서 σ_n 은 공칭 휨응력으로 $3SP_{max}/(2BW^2)$ 이며 S, B, W는 Fig. 4에 정의되어 있다. 또한 $a_e = a_0/W$ 는 유효 균열 길이 대 보 높이 비이며, 교정 함수 $F(a_e)$ 는 다음과 같다.

$$F(a_e) = \int_0^{a_e} a F^2(a) da \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $F(a) = A_0 + A_1 a + A_2 a^2 + A_3 a^3 + A_4 a^4$ 이며 계수 $A_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 는 다음과 같다.⁽¹³⁾

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

이 계수는 $S/W=4$ 와 8에 대한 것이며 선형 보 간이 허용된다. 유효 균열 길이 a_e 는 최대 하중 시 까지 진전된 균열의 길이이다(Fig. 5). 이것은 균열 길이 a_0 를 가진 감소된 강성과 같은 강성 (E에 비해)을 띠는 한 균열 길이 a_e 를 가진 가상의 보를 도입함으로써 계산할 수 있다고 가정한다. 즉, 최대 하중 시의 처짐 δ_{Pmax} 는

$$\begin{aligned} \delta_{Pmax} &= \frac{P_{max}}{4BE} \left(\frac{S}{W}\right)^3 \left[\frac{1+5wS}{8P_{max}} + \left(\frac{W}{S}\right)^2 (2.70 + 1.35 \frac{wS}{P_{max}}) - 0.84 \left(\frac{W}{S}\right)^3 \right] \\ &+ \frac{9}{2} \frac{P_{max}}{BE} \left(1 + \frac{wS}{2P_{max}}\right) \left(\frac{S}{W}\right)^2 F_2(a_e) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

이며 여기서 E와 w는 각각 탄성계수와 보의 단위길이 당 중량이다.

a_e 는 식 (4)를 푸는 과정에서 시산법에 의하여 계산된다. E의 초기치는 식 (4)로부터 a_e 에 $a_0 = a_0/W$ 를 이용하고 P_{max} 와 δ_{Pmax} 를 P_i, δ_i (Fig. 6)로 대입한 후 양변에 E를 곱하고 δ_i 로 나누어 구한다. 그리고 실험으로부터 얻은 P_{max}, δ_{Pmax} 와 E 그리고 식 (2)로 구한 $F(a_e)$ 를 식 (4)에 넣고 새로운 E(즉, E1)를 구한다. 시산 과정은 컴퓨터 프로그램을 이용하여 균열 길이 증가비를 $\Delta a = 0.001$ 만큼씩 증가시키며 $E1 = E \pm \epsilon (\epsilon = 0.005\%)$ 될 때까지 계속한다. 그래서 최종 a 값을 a_e 로 취하고 이때의 균열 길이 a_e 를 유효 균열 길이로

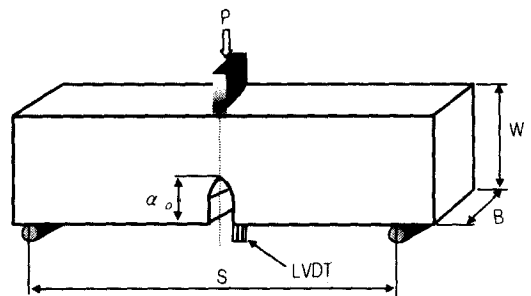


Fig. 4 Schematic diagram of a notch beam in 3point bending test setup

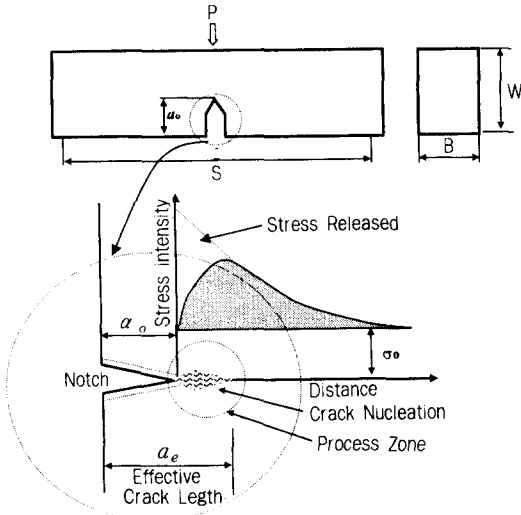


Fig. 5 Schematic illustration of effective crack length, process zone and stress intensity near the tip of the notch

정한다. 이 a_e 와 $F(a_e)$ 그리고 σ_n 을 이용하여 파괴인성을 식 (1)로 계산한다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 굳지 않은 콘크리트의 특성

석탄폐석 콘크리트의 작업성 및 유동성(Consistency)을 확인하기 위하여 슬럼프를 측정하였다. 석탄폐석 콘크리트의 작업성 및 유동성은 같은 물-시멘트 배합의 일반 쇄석골재 콘크리트보다 훨씬 나빴다. 즉, 기존 배합설계 방법의 쇄석골재 사용 조건으로 수행한 배합설계 결과 손 비빔이 매우 힘들었고 목표 슬럼프 치의 30%도 채 나오지 않았으며, 일반 쇄석골재를 일부 첨가한 경우도 유동화제 없이는 작업 가능한 슬럼프 값을 얻을 수 없었다.

이는 석탄폐석의 입형이 납작하거나 긴 것이 많고 입자들이 예리한 각으로 파쇄되어 혼합시 서로 맞물려 움직임이 매우 어려운 것에 기인한다. 따라서 비교적 입형이 좋은 일반 쇄석골재를 25%

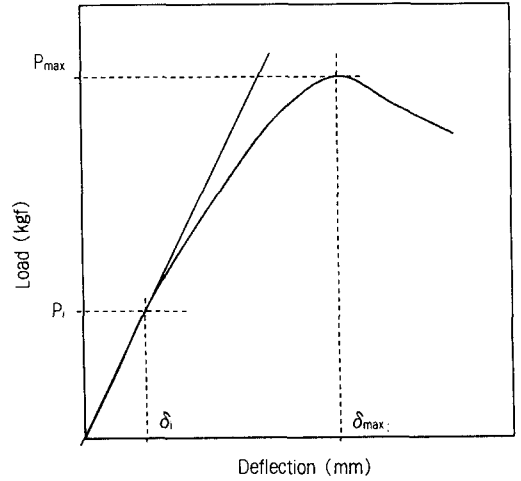


Fig. 6 Illustration of P_{max} , $\delta_{P_{max}}$, P_i , δ_i in a load-deflection curve

섞고 유동화제를 시멘트 량의 1%를 첨가한 결과 작업성 (Workability)이 비교적 좋은 슬럼프 15cm 정도가 얻어졌다. 그러므로 석탄폐석 콘크리트는 물-시멘트 비를 일정 수준으로 유지하고 강도를 유지하려면 유동화제의 사용이 필수적으로 보여진다. 하지만 파쇄기를 개선하여 입형이 좋은 골재를 생산할 수 있다면 같은 물-시멘트 비라도 작업성은 훨씬 좋아지리라 생각된다.

2. 석탄폐석 콘크리트의 강도 특성

쪼갠인장강도 (Split tensile strength) 시험은 KS F 2423에 따라서, 압축 탄성계수(Compressive elastic modulus) 및 압축강도(Compressive strength) 시험은 KS F 2438에 따라 수행되었다. 압축강도의 시험시 파괴하중의 약 40%를 구하여 선형 부분의 응력-변형률 곡선에서 탄성계수를 구하였다. Fig. 7은 두가지 콘크리트의 응력-변형률 선도를 보여준다.

시험 배합으로부터 제조한 석탄폐석 콘크리트 공시체의 7일 압축강도는 299kgf/cm^2 로 매우 우수하였다. 따라서 물-시멘트 비를 조금 높이고 유동성 및 작업성을 향상시키기 위하여 조정된 배합

Table 5 Strengths of coal-mine waste concrete
(Unit : kgf/cm²)

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

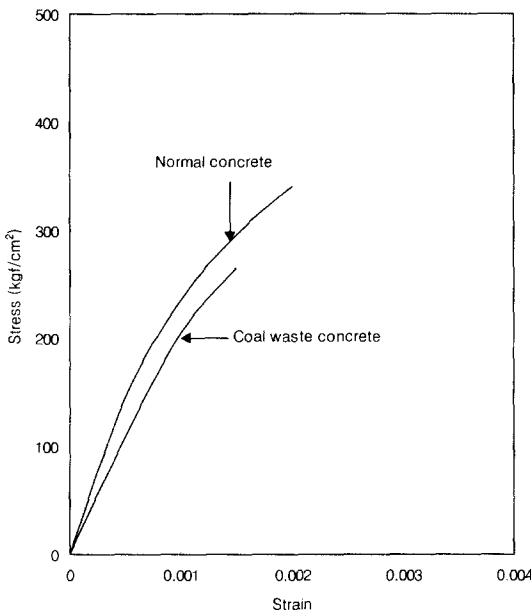


Fig. 7 Stress-strain of a coal-mine waste concrete

에서 보듯이 석탄폐석 콘크리트의 7일 및 28일 압축강도는 280kgf/cm² 및 300kgf/cm² 이상으로 양호하였으며 탄성계수는 248,000kgf/cm² 이상으로 나타났다. 그러나 일반 콘크리트에 적용되는 식에 의해 계산된 $E = 10,500\sqrt{314.8} + 70,000 = 256,000$ kgf/cm² 보다는 다소 낮았다. 그리고 인장강도 대 압축강도의 비는 약 9.1%로 나타났다.

석탄폐석 콘크리트의 파괴인성(K_{IC})을 조사하기 위하여 초기균열이 있는 보에 대대한 3점 휨 시험 결과로부터 얻은 데이터를 식 (1) ~ (4)에 대입하여 계산한 파괴인성 측정 결과를 Table 6에서 보여준다. 각 공시체 모두 급속 파괴 모드(Catastrophic fracture mode)를 보이며 극한 하중에 도달하는 순간 파괴되어 두동강이 되었다.

어떤 재료의 파괴인성은 흙으로 인하여 그 재료가 어떤 하중에서 급속 파괴가 일어나는 것에 대하여 견디는 능력을 나타내는 지수라 할 수 있다. 따라서 이 값의 크기는 구조재료로서의 중요한 성질이다. 한편 일반 콘크리트의 파괴인성이 약 1.0 MPa·m^{3/2} 전후인 점^(6,13) 과 비교해 볼 때 석탄폐석 콘크리트의 파괴인성은 1.1 MPa·m^{3/2} 정도로 다소 높은 편이라 보여진다. 또한 휨강도도 45 kgf/cm² 이상으로 비교적 양호한 편으로 나타났다.

3. 기타 특성

석탄폐석 콘크리트 공시체를 파괴한 후 그 단면으로부터 석탄폐석 굵은골재와 몰탈과의 부착 여

Table 6 Fracture toughness test results of coal-mine waste concrete

Beam	Width (mm)	Depth (mm)	a ₀ (mm)	P _i (kN)	δ _i (mm)	P _{max} (kN)	δ _{Pmax} (mm)	Flexural strength (kgf/cm ²)	K _{IC} (MPa·m ^{3/2})
1	90.54	120.0	33.73	1.650	0.106	4.047	0.329	44.78	1.1000
2	89.57	120.0	38.69	1.834	0.091	4.394	0.249	55.25	1.2068
3	88.00	120.0	38.69	1.490	0.105	3.477	0.321	42.02	1.0506
Mean								47.35	1.1191

설계 (Table 4)에 의해 제조한 콘크리트의 압축강도 및 조깅인장강도는 Table 5와 같다. 이 Table

부를 검사한 결과 석탄폐석 굵은골재가 많이 파괴된 점으로 보아 몰탈과 접착이 잘되는 것으로 보



Fig. 8 Close-up picture of failed face of coal-mine waste concrete

여졌다.(Fig. 8) 따라서 본 연구에 사용된 석탄폐석 골재를 콘크리트에 사용하는 것은 큰 문제가 없을 것으로 보여진다.

또한 석탄폐석 콘크리트는 일반 콘크리트보다 훨씬 검은빛을 띠었다. 이는 석탄폐석 자체의 색깔이 검은 것에 기인한 것이라고 하겠다. 따라서 색상 면에서 본다면 검은빛을 띠고 있으므로 도로 포장용 콘크리트로 사용할 경우 차선이나 노면위 물체를 잘 보이게 하여 운전자의 시력을 덜 피로하게 할 것으로 보여지며 겨울철 빙하수포 포장체의 온도를 올려 보다 제빙(설) 효과가 좋을 것으로 추정된다.

IV. 결 론

본 연구는 탄광 지역에 적치되어 처분은 물론 지역의 생활 환경오염에까지도 문제가 되고 있는 석탄폐석을 골재화 하여 제조한 콘크리트의 특성을 규명하기 위하여 수행되었다. 본 연구에 사용된 석탄폐석으로부터 제조한 골재의 특성 및 제조된 콘크리트의 여러 가지 특성을 조사·연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 석탄폐석 산골재 및 굵은골재는 모두 비중, 흡수율 및 마모율 등 골재로서의 물리적 성질들이 우수하였다. 굵은골재 입도는 양호하였고, 산골재의 입도는 천연 잔골재를 사용하여 보정이 가능하

였다.

2. 하지만 석탄폐석 골재는 원석의 곁에 따라 파쇄되어 입형이 불량한 골재가 많으므로 콘크리트 혼합물의 작업성을 매우 불량하게 하여 일부를 입형이 좋은 일반 쇄석골재로 대체하여야 하였다. 따라서 실용화를 위해서는 입형이 좋게 생산할 수 있는 크러셔를 선정해야 할 것으로 보여진다.

3. 석탄폐석 골재를 이용한 콘크리트의 압축강도는 설계강도 이상의 충분한 값이 얻어져 일반 콘크리트와 큰 차이가 없었다. 탄성계수의 경우는 다소 낮게 나타났는데 그 차이가 그리 크지 않았으며 파괴인성은 우수하였고 쪼갬인장강도 및 휨강도도 적정 범위 내인 것으로 나타나 충분히 구조용 콘크리트용 골재로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

4. 향후 실용화를 위해서는 입형 개선 방안 연구, 배합설계 수정 연구 및 현장 타설을 통한 장기강도 연구 등이 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김광우, 박제선, 민경원, 진호일, 안경애, 조희원, 정규동, 이상범, "아스팔트 콘크리트 포장용 골재의 품질 향상에 관한 연구(II)," 한국도로공사 위탁연구 최종보고서, 강원대학교 석재복합 신소재 연구센터, 1996
2. 金光宇, 延圭錫, 이병덕, "Problems in Strength Characteristics of Recycled Concrete," 한국 콘크리트 학회 학술발표회 논문집, 충남 대학교, 1992
3. 金光宇, 李奉學, 都永洙, "재생콘크리트의 동결용해 저항성과 변형 특성," 韓國콘크리트학회論文集 제4권 4호, 1992
4. 김진영, 金光宇, 李奉鶴, 박제선, "Fly Ash를 사용한 구조용 재생콘크리트의 강도 특성," 한국 콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제6권 2호(통권 11집), 동국 대학교, 229-234, 1994
5. 이병학, 김광우, 박제선, 김진영, "재생 폐콘크리트의 성능 향상에 관한 연구," 콘크리트 학

- 회지, 제 7권 2호, 136-145, 1995
6. 김광우, 김주인, 김기성, "재생콘크리트의 휨 변형과 파괴 특성," 한국 농공학회 논문집 제 37권 4호, 90-98, 1995
 7. 김광우, 도영수, 김진영, 박용철, "콘크리트 폐기물을 재활용한 콘크리트의 제조 및 품질 특성 연구," 동아 그룹 창립 50주년 기념 동아 건설 논문상 수상 논문집, 1-35, 1995
 8. 김광우, 유능환, 김주인, 박용철, 최상용, 최영규, "농촌 도로 포장 재료로 폐콘크리트의 재활용에 관한 연구," 한국 농공학회 학술발표회 논문집, 전남 대학교, 137-142, 1995
 9. 박영진, 박원철, 박은영, 최영훈, "도로 성토 재료로써 폐콘크리트의 활용성 연구," 대한 토목 학회 학술발표회 논문집, 중앙 대학교, 516-519, 1995
 10. "건설 폐기물의 재활용 기술," 제2세부 연구 과제 보고서, 동아 건설 산업 주식회사, (1995)
 11. 김무한, "건설 산업 폐기물의 리사이클링 시스템 및 재활용 기술개발에 관한 연구," 충남 대학교 산업기술연구소, 1995
 12. 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
 13. "Fracture Mechanics Test Methods for Concrete" Report of Technical Committee 89-FMT, RILEM, Ed. by Shah and Carpinteri, Chapman Hall, London, pp. 1-86, 1991
 14. Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P., "An Improved Effective Crack Model for the Determination of Fracture Toughness of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 603-610, 1989