Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.17, No.2, pp. 255 ~ 261, April 2005

석탄회 재활용 건설신소재 개발을 위한 파괴특성에 관한 실험적 연구

조병완[1)*] · 박종빈[1)] · 구자갑[1)]

[1)] 한양대학교 토목공학과

(2004년 5월 20일 원고접수, 2005년 1월 31일 심사완료)

Experimental Study for Fracture Characteristic of New Building Materials with Recycled Ash

Byung-Wan Jo[1)*], Jong-Bin Park[1)], and Ja-Gab Koo[1)]

[1)] Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791. Korea

(Received May 20, 2004, Accepted January 31, 2005)

ABSTRACT

Immense quantities of coal combustion by-products are produced every year, and only a small fraction of them are currently utilized. The purpose of this study is to investigate reused techniques of coal ash in the construction field, which may contribute to the savings of building materials and conservation of environment. From the results of the compressive strength test, the elastic modulus was experimentally proposed. Also, based on the three-point-bending test, the fracture parameters - notch sensitivity, fracture energy, and initial compliance were experimentally proposed. As a result, the strength and fracture characteristics were lower than those of concrete or mortar. Also, the study showed that the deflection at a fracture decreased as the age increased and as the notch depth rate decreased. However, it was judged that its use as a building material could be expected if further research is carried out.

Keywords : fracture, fracture energy, coal-ash, notch, three points bending test

1. 서 론

최근 고도의 경제성장 및 활발한 국가기간 산업의 확충으로 파생된 산업폐기물 및 생활폐기물의 환경오염이 심각한 가운데 해양투기 및 매립이 금지되어 폐기물의 처리 및 재활용 대책에 대한 연구가 국가적인 차원에서 시급한 실정이다. 또한 석탄회의 양도 날로 증가하여 1996년에 320만 톤, 2000년도에는 443만 톤이 생산되었으며, 2005년에는 572만 톤이 발생될 것으로 추정된다. 이 중 2000년도의 경우 재활용 양은 242만 톤으로 생산량의 약 55% 정도이다. 석탄회의 70~85%를 차지하고 있는 fly ash는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 상온에서 반응하여 포졸란반응을 하기 때문에 활용성이 높다. 이에 폭넓은 연구가 세계각지에서 수행되면서, 기존의 시멘트 재료나, 매립재, 비료 등의 재활용 한계를 극복하고, 콘크리트 재료, 건축재료, 토양개량재, 어초, 인공골재 등 다양한 방면으로 재활용하기 위한 연구가 수행되고 있으며, 국내에도 플라이애쉬를 재활용을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한 bottom ash의 경우도 비록 플라이애쉬보다 발생량이 적고, 연구가 아직 미진하나, 앞으로 연구가 충분히 이루어지면 사용도가 많을 것이라고 본다.

이에 본 연구에서는 환경오염을 줄이고, 인공골재 및 프리캐스트 제품 등으로의 재활용을 위한 연구의 일환으로 석탄회 고형물의 파괴특성을 얻어내어 건설자재 재료로서 사용가능성을 확보하기 위한 기초적인 연구자료를 제시하고자 한다.

2. 파괴인자

본 연구에서는 휨하중을 받는 시험체의 하중전달능력을 알아보고, 취성적 파괴에 대한 저항능력을 검토하기 위해 3점 휨하중 시험에서 얻은 하중-균열개구변위의 관계를 이용하여 파괴거동의 특성을 파괴에너지 개념을 도입하여 평가하였다. 또한 하중전달능력의 감소를 나타내는 노치민감성을 평가하여 석탄회 고형물의 파괴특성을 분석하여 토목 구조용 재료로서의 사용 가능성을 조사하였다.

*Corresponding author
E-mail : joycon@hanmail.net
©2005 by Korea Concrete Institute

2.1 하중(P)-균열개구 변위곡선(CMOD)

콘크리트 휨부재의 파괴거동 특성을 거시적으로 검토하기 위하여 하중-하중점 변위 혹은 하중-균열개구 변위의 관계를 이용하는 경우가 일반적이다.

그러나 하중-하중점 변위의 관계는 지점부와 접촉하는 콘크리트 면의 파손과 침하 등에 의한 이상변위의 발생이 관찰되고 있으며, 이는 파괴 하중-균열개구 변위의 관계는 전술한 이상변위의 발생요인의 영향을 받지 않아 비교적 파괴인자들의 평가결과가 정확한 것으로 알려져 있다[8]. 따라서, 본 연구에서는 제 4장의 휨 실험체와 실험방법에 의해 수행된 파괴실험에서 총 용량 37.5 mm의 COD 게이지를 이용하여 얻는다.

2.2 파괴에너지

일반적으로 3점 휨 시험법으로 결정하는 파괴에너지는 균열이 발생하는데 필요로 하는 에너지의 량으로 정의되어진다. 3점 휨 시험법에 의해 결정된 에너지는 하중에 의한 에너지뿐만이 아니라 자중의 효과 또한 포함되기 때문에 자중의 영향을 배제하기 위해 보의 길이를 순 지간의 길이의 2배로 하거나 지점 양단에 추를 설치하여 자중에 의한 모멘트를 상쇄시킴으로 자중의 영향을 배제한다. 파괴에너지를 구하는 식은 다음과 같다.

$$G_f = \frac{A}{b(d-a)} \tag{1}$$

여기서, A : 하중처짐곡선의 면적

a : 노치의 깊이, b : 보의 폭, d : 보의 깊이

Fig. 1에서 자중의 영향으로 인한 부분 A_2와 δ_0(최종파괴가 일어나기까지의 변위)이후의 면적 A_3는 연구결과 A_2와 같은 $\frac{Mg\delta_0}{2}$로 나타났다. 따라서 자중의 영향을 고려할 경우의 파괴에너지는 다음과 같다.

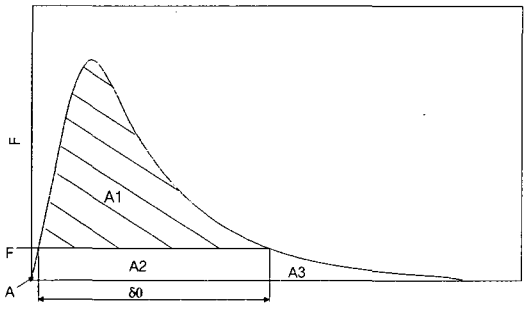

Fig. 1 Load-deflection curve by 3 point bending test

$$G_f = \frac{A_1 + Mg\delta_0}{b(d-a)} \tag{2}$$

2.3 노치 민감성

일반적으로 콘크리트는 모든 형태의 하중하에서 미세균열이 발생되고 그 미세균열 끝에서 응력집중이 일어나 균열은 곧바로 전진하고 주균열로 성장되어 파괴에 이른다. 따라서 인위적인 노치의 존재는 훨씬 낮은 하중에서 큰 응력집중 효과로 인하여 하중전달능력이 감소하는데 이러한 노치민감성 형상은 노치의 존재에 따른 재료의 실제 유효단면의 깊이 $(d-a_0)$ 만을 고려한 경우와 노치가 없는 휨부재에 휨이론을 적용하여 산정된 휨강도를 비교함으로써 검토될 수 있다.

$$\text{노치 민감도} = \frac{(P_{\max,d-a_o}) \cdot d^2}{(P_{\max,d}) \cdot (d-a_o)^2} \tag{3}$$

여기서, $P_{\max,d-a_o}$ 는 초기노치길이가 a_o 인 휨실험체의 최대하중을 나타내며, $P_{\max,d}$ 는 노치가 없는 실험체의 최대하중을 나타낸 것이다.

3. 석탄회 고형화 실험

3.1 실험개요

석탄회는 일반 콘크리트와 달리 정형화된 실험 방법이 없기 때문에 본 실험을 행하기 앞서 석탄회를 이용한 고형화 기술은 콘크리트의 실험방법을 기준으로 첨가물들의 함량을 변화시켜가면서 배합비 및 양생방법을 결정하였다. 최종적인 배합비의 결정은 50×50×50(mm)크기의 각주형 실험체의 압축강도(KS L 5105)를 기준으로 설정하였다.

3.2 사용재료

3.2.1 석탄회

1) 플라이애쉬

플라이애쉬는 석탄을 연료로 하는 화력발전소에서 미분탄을 약 1400~1500 ℃의 고열로 연소시켰을 때, 탄분이 융해되어 고온의 연소가스와 더불어 이를 급격히 냉각시키면 표면장력에 의해 구형으로 생성되는 미세한 분말이다. 이러한 플라이애쉬는 포졸란 반응성이 극히 크며 입자의 비표면적이 시멘트와 거의 같기 때문에 시멘트 대체재, 장기강도 확보, 내구성 증진 및 수화열 감소 등에 좋은 재료로 알려져 있다. 본 연구에서는 보령화력발전소에서 생산된 KS L5405 규정에 적합한 제품을 사용하였고, 그 물리·화학적 특성은 다음과 같다. Table 2에서 보는 바와

같이 CaO 함량이 6% 미만이고 LOI(loss on ignition)가 최대 12% 미만인 F급 플라이애쉬를 사용하였다.

2) Bottom ash

Bottom ash는 노벽, 고열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 자중에 의해 보일러 바닥으로 떨어지며 입경은 1~2.5mm 정도로 석탄회 발생량의 15~20% 정도가 된다. 본 연구에서는 보령화력발전소에서 생산된 bottom ash를 이용하였으며, 미연탄소분말을 제거하기 위해 No.8체를 통과하고 No.200체에 남는 Bottom ash를 사용하였고, 그 화학적 특성은 다음의 Table 3과 같다.

3.2.2 혼화제

혼화제로는 이산화망간, 보통포틀랜드 시멘트, 수산화나트륨 그리고 물유리 등을 사용하였다. 수산화나트륨은 플라이애쉬와 $Ca(OH)_2$의 반응성을 증가시키고 플라이애쉬에서 silica의 용해속도를 증가시키기 위한 첨가제로사용되었으며, 금속산화제를 이 반응의 촉매제로 사용을 하였다. 또한 물유리를 사용하여 자체경화 및 플라이애쉬 반응성 증가를 통한 강도증진을 유도하였다. 강도증진제로 사용한 보통포틀랜드 시멘트는 KS F 5201 규정에 만족하는 S사의 보통포틀랜드 시멘트로서 비중은 3.15, 분말도는 3150 g/cm^{3}인 제품을 사용하였다.

3.3 배합비[7]

3.3.1 실험 배합비 결정

실험배합비는 혼화제 양 및 fly ash와 bottom ash의 혼합비율에 대하여 예비실험을 거쳐 결정하였다. 혼화제의 적정 배합비를 알아보기 위해 플라이애쉬의 양을 고정한 후, 혼화제 양을 변화시켜가면서 배합비를 결정하였다. 혼화제 변화량에 따른 배합비는 Table 4와 같다. 또한 혼화제의 양을 압축강도실험을 통하여 결정한 뒤, bottom ash를 첨가하여 이번 연구에서 사용될 적정 배합비를 찾았다. Tables 5, 6에서 보는 바와 같이 fly ash : bottom ash의 비와 양생방법을 변수로 하고 재령 7일 압축강도(5×5×5 mm)를 측정하여 결정하였다.

3.3.2 예비 실험 결과분석

석탄회를 고형화하여 콘크리트 대체 가능성 여부를 연구하기 위한 일환으로 고형화 적성 배합비와 양생조건을 도출하기 위한 예비 실험 결과는 다음과 같다.

1) 적정배합비는 플라이애쉬 중량비 67%의 bottom ash, 10%의 보통포틀랜드 시멘트와 수산화나트륨, 5%의 금속산화물, 15%의 물유리 배합이 가장 양호하였다.
2) 양생방법은 적절한 습도와 50 ℃로 유지한 건조로에서 24시간 양생 후 공기중(18 ℃)에서 양생한 경우의 양생이 가장 양호한 것으로 나타났다.
3) 위의 결정된 배합비와 양생방법을 이용하여 제작된 공시체의 재령 7일 압축강도(건조양생법)는 평균 26.72 MPa로 측정되었다.

Table 1 Physical characteristics of fly ash

Gravity	Fineness	Wetting	Loss on ignition	Unit
2.34	3,70 cm^2/g	0.13 %	3.07 %	99 %

Table 2 Chemical characteristics of fly ash

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
57.09 %	24.66 %	10.50 %	2.58%	1.37 %	0.94 %

Table 3 Chemical characteristics of bottom ash

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
49.91 %	22.54 %	11.37 %	5.84 %	1.25 %	0.87 %	0.39 %

Table 4 Mixing table (wt% of FA)

Specimen	FA	W/FA	Cement	NaOH	MnO_2	Water-glass
F-C1-N1-S1	100	30	5	5	5	5
F-C1-N1-S2						10
F-C1-N1-S3						15
F-C1-N2-S1				10		5
F-C1-N2-S2						10
F-C1-N2-S3						15
F-C2-N1-S1			10	5		5
F-C2-N1-S2						10
F-C2-N1-S3						15
F-C2-N2-S1				10		5
F-C2-N2-S2						10
F-C2-N2-S3						15

※ Specimen code : x-y-z-w
x = F : Fly ash, y = C1 : Cement 5 %, C2 : Cement 10 %
z = N1 : Na(OH) 5 %, N2 : Na(OH) 10 %
w = S1 : Water-glass 5 %,S2 : Water-glass 10 %, S3 : Water-glass 15 %

Table 5 Mixing teble of fly ash and bottom ash (unit:% of fly ash weight)

Specimen	BA	FA	W/FA	Cement	NaOH	MnO_2	Water-glass
B5-F5-C2-N2-S3	100	100	30	10	10	5	15
B6-F4-C2-N2-S3	67	100					

Table 6 Curing test

Curing method	Test
Water curing	Curing at 15 ℃ and 46 ℃ for 96 hr in the water temperature. Air curing at 46 ℃ fir each 24, 48,76,96 hr
Air curing	Curing at 18 ℃ for 7 days
Dry curing method	Curing for 96 hr under 50 ℃ in the oven after curing at 18 ℃ for 24, 48, 72, 96 hr

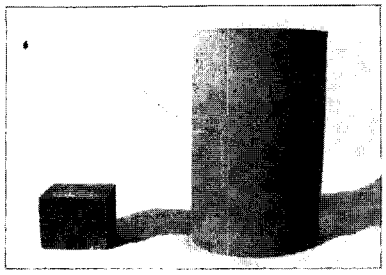

Fig. 2 Specimen for compressive test

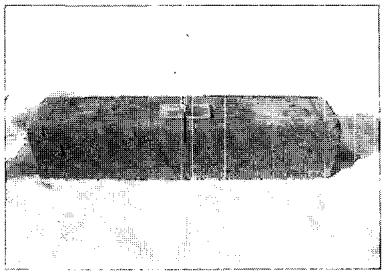

Fig. 3 Specimen for bending test

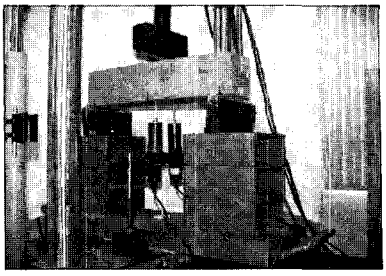

Fig. 4 Photo of bending test

4. 실험개요

본 연구에서는 석탄회를 비소성 고형화한 재료의 파괴특성을 연구하기 위하여 기존 수행된 연구에서 도출된 적정 배합비 및 양생방법을 이용하여 시편을 제작하였으며, 압축강도를 이용한 탄성계수의 측정 및 초기 노치를 가진 3점 휨을 받는 시편에 대한 파괴실험을 수행하였다. 변수로는 재령(28일, 56일, 96일)과 노치비(0, 0.3, 0.5)로 하였다.

4.1 압축강도

압축강도용 시험체를 제작하기 위하여, 강제식 믹서기를 이용하여 28일, 58일, 96일 강도를 측정을 위한 Φ10×20 mm 의 압축강도 실험체를 각각 9개씩 총 27개를 제작하였으며, 이들 압축강도를 이용하여 할선탄성계수를 구하였다. 압축강도실험에서는 실험변수별 압축강도와 탄성계수를 산정하기 위하여 측점길이 100 mm인 2개의 축방향 변위계를 이용하여 응력-변형률 곡선을 측정하였으며, 안정적 실행을 위하여 2.45 kg/cm^2/sec를 유지하면서 하중 제어하였다.

4.2 휨파괴실험

본 연구에서는 석탄회를 고형물의 파괴특성을 연구하기 위하여 초기 노치를 가지고 자중의 영향을 고려한 3점 휨 파괴실험을 수행하였다. 압축강도 시험체 제작시 동시에 제작되었으며, 시험체는 예비실험을 통해 도출된 적정 배합비와 양생방법을 이용하여 제작하였고, 변수로는 재령(28일, 56일, 96일)과 노치비(0, 0.3, 0.5)로 하였다. 100×100×450 mm(순지간 400 mm)의 휨실험체를 제작하였으며, 안정적인 균열성장을 유도하기 위하여 CMOD 변위제어법을 이용하였다. 변위제어시 CMOD량의 변화속도는 1.0 mm/min.로 휨하중이 영이 될 때까지 실험을 연속적으로 수행하였으며, CMOD를 측정하기 위하여 37.5 mm 용량의 스트레인게이지 형식의 COD 변위계를 부착하여 하중-균열개구 변위곡선을 MTS의 closed-loop servo-controlled testing machine으로 자동 검출하였다. 처짐은 보 시편 중앙부의 양 끝단에서 측정하였다.

5. 실험결과

5.1 압축강도

Φ100×200 mm의 압축강도 실험체를 28일, 58일, 96일 재령별 압축강도는 Fig. 5와 같다. 결과에서 보듯이 28일의 평균 압축강도는 27.49 MPa이 나왔고, 56일 경우에는 32.1 MPa, 96일 경우에는 34.38 MPa이 측정되었다. 28일에서 56일까지는 약 16.7 %의 강도의 발현이 일어났으나, 56일 이후 90일까지는 7.14 %의 강도 발현이 되면서 점차 둔화되어지는 경향을 볼 수 있었다. 하지만 본 실험에서 사용된 주재료인 플라이애쉬는 포졸란반응에 의하여 초기강도의 발현율이 낮은 특성을 지니고 있기 때문에 장기강도에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되어졌다.

5.2 탄성계수

이번 연구에 사용한 재활용 석탄회에 대한 탄성계수를 측정하기 위해서 100×200 (mm)의 공시체를 재령별로 3개씩 제작하여 구하였다. 그 결과 아래의 Table 7에서 보는 바와 같이 탄성계수는 재령 28일에서는 15.06 GPa이 측정되었으며, 재령 56일에는 21.31GPa, 96일에는 23.15 GPa의 탄성계수가 측정이 되었다. 이는 콘크리트의 탄성계수(28일, 약 24.5 GPa)와 비교해 61.5 %에 해당하는 값이다. 탄성계수의 값은 강성과 밀접하므로 강성

Table 7 Elasticity modulus by various (GPa)

Speciemen	Elasticity modulus	Average value
FB_28_1	13.33	15.06
FB_28_2	16.55	
FB_28_3	15.34	
FB_56_1	21.9	21.31
FB_56_2	19.92	
FB_56_3	22.11	
FB_96_1	23.42	23.15
FB_96_2	22.14	
FB_96_3	23.88	

의 증진에 대한 앞으로의 연구가 계속 진행되어 진다면 충분히 콘크리트와 비슷한 탄성계수의 값을 얻을 수 있을 것이라고 판단되었다.

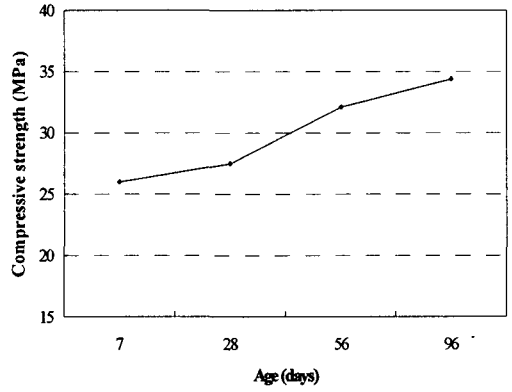

Fig. 5 Compressive strength by age

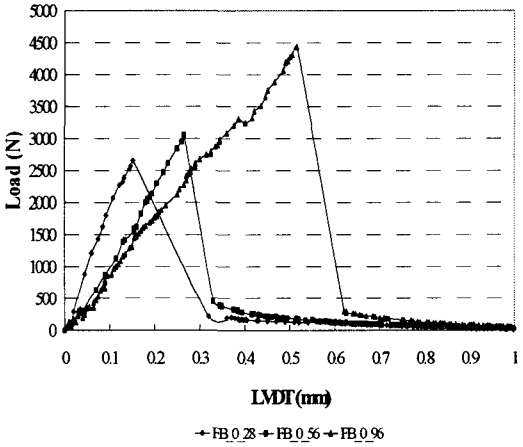

Fig. 6 Load-displacement curve of no notch specimen by age

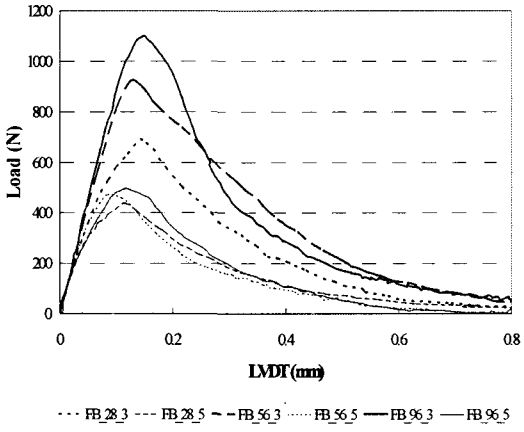

Fig. 7 Load-displacement curve of notch specimen by age

5.3 하중-변위 및 하중-균열개구변위

하중-변위곡선 그래프와 하중-균열개구곡선 그래프의 재령 및 노치비에 대한 결과는 Figs. 5~7과 같다. 두 경우 모두 압축강도가 클수록 최대하중 값 또한 큰 것으로 나타났으며, 높은 파괴강도를 갖는 시편일수록 파괴시의 처짐은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 변위가 약 0.1 mm 되는 지점에서 최대하중점이 됨을 볼 수 있었다.

재령에 따른 경우, 노치비가 0.3인 경우 최대하중은 28일에서는 690.9 N, 56일 경우에는 920.22 N, 96일에는 1099.56 N 이였고, 노치비가 0.5일 경우에는 28일과 56일 각각 437.08 N 및 471.38 N, 96일은 495.88 N으로 재령이 증가할수록 더 높은 하중에서 견디어 내고 있음을 알 수 있었다. 또한 노치비가 0.3인 경우 28일과 96일을 비교하였을 때 최대하중이 약 59 % 증가한 반면, 노치비가 0.5일 경우에는 약 13 %의 증가를 보여주고 있다. 따라서 비록 재령이 길어짐에 따라 강성이 높아지고 있기는 하나, 노치비에 따라 그 차이가 많음을 알 수 있었다. 그리고 재령이 증가되어질수록 최대하중 이후의 감소 기울기가 급해지는 경향을 보여주었는데, 이는 강도가 증진되어지면서 취성적인 경향이 강해짐으로 인해 나타나는 현상으로 판단되어진다. 따라서 이러한 취성적인 경향은 대한 보완연구가 검토되어져야 한다고 판단된다.

5.4 파괴에너지 (G_F)

석탄회를 이용한 고형물의 노치비 및 재령별 파괴에너지의 변화추세를 Fig. 9에서 나타내었다. 전반적으로 노치비가 작을수록, 재령이 커질수록 파1괴에너지의 값은 커지는 경향이 있었다. 재령에 따른 파괴에너지의 변화에서 파괴에너지는 재령이 증가할수록 점차 증가함을 보임으로써 휨부재에 에너지 흡수 능력이 증대되어지고 있음을 알 수 있다.

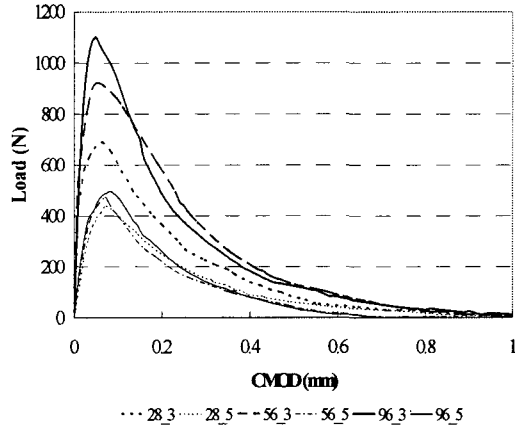

Fig. 8 Load-CMOD curve of notch specimen by age

무 노치의 경우 28일과 96일을 비교하면, 약 3배의 파괴에너지가 증가하였고, 노치 깊이가 30 mm, 50 mm의 경우에 대한 각각 28일과 96일을 비교하여 보면, 각 2배와 1.7배정도의 파괴에너지 증가를 보였다. 또한 노치비에 증가함에 따라 점차 파괴에너지가 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이번 연구에서 구해진 28일 양생의 노치비가 0.5의 경우 25.44 N/m으로 같은 조건의 일반 모르타르(28일 양생, 76~87 N/m)와 비교하여 보았을 때 일반 모르타르의 약 33.5 %에 해당되어지는 것으로 측정되었다.

5.5 노치민감도

본 연구에서는 초기 노치비 및 재령을 변수로 수행된 실험결과를 토대로 노치의 존재에 따른 휨강도의 변화를 비교·검토 하였으며 Fig. 10에 노치민감도 분석 결과를 나타내었다. 그래프에서 보듯이 28일과 56일인 경우 노치비가 0.3에서 0.5로 증가함에 따라 노치 민감도는 감소함을 보여주고 있고, 또한 재령이 작을수록 노치민감도는 감소하는 모습을 볼 수 있었다. 이는 인위적인 노치의 존재는 훨씬 낮은 하중에서 큰 응력집중 효과로 인하여 하중 전달능력이 감소하는데 노치비가 클수록 또한 재령이 작을수록 강도는 감소됨에 따라 하중 전달능력이 떨어짐을 반영하고 있다. 이에 따라 노치 민감도가 낮아지는 것으로 판단된다. 하지만 96일인 경우에는 오히려 56일보다 노치비가 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 5.3절 결과에서 보여주는 바와 같이, 56일 이후 전체적으로 최대하중이 증진하는 현상을 보여주기는 하였으나, 노치가 0 mm 일 때 약 45 % 최대하중 증가에 비해 30 mm, 50 mm인 경우 약 20 %와 5 %의 작은 최대하중의 증가로 인한 것으로 판단되었다.

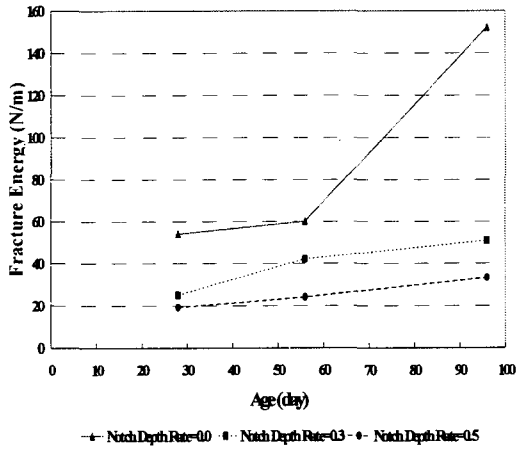

Fig. 9 Fracture energy by Notch depth ratio & age

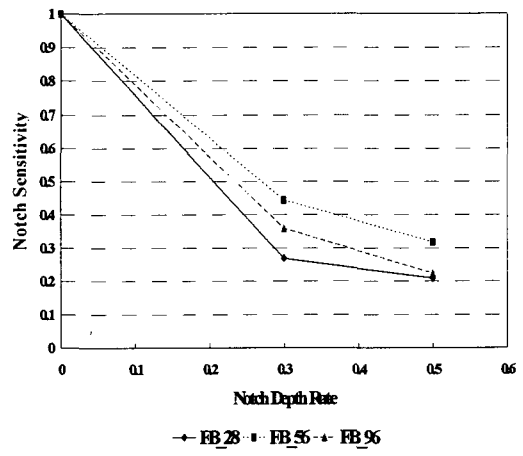

Fig. 10 Notch sensitivity

6. 결 론

본 연구는 석탄회 고형물의 파괴에 대한 일반적인 파라메타를 구하기 위한 자중을 고려한 3점 휨 시험중 가장 일반적인 형태인 mode I에 대해 재령과 노치비에 따른 파괴특성을 구한 것으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 28일의 평균 압축강도는 27.49 MPa이 나왔고, 56일 경우에는 32.1 MPa, 96일 경우에는 34.38 MPa이 측정되었다. 따라서, 일반 콘크리트와 비교할 경우, 우수한 압축강도의 특성을 보여주고 있는 것으로 판단되었다. 한편, 초기재령에 비해 재령 56일 이후 재령에서의 강도증진이 적은 것으로 나타났으나, 플라이애쉬는 포졸란재료이므로 장기강도에 대한 검토가 필요한 것으로 생각된다.
2) 탄성계수의 경우 재령 28일에서는 15.06 GPa이 측정되었으며, 재령 56일에는 21.31 GPa, 96일에는 23.15 GPa이 측정이 되었다. 하지만 이는 콘크리트의 탄성계수(28일, 약 24.5 GPa)와 비교해 61.5 %에 해당하는 값이다. 탄성계수의 값은 강성과 밀접하므로 강성의 증진에 대한 앞으로의 연구가 계속 진행되어 진다면 충분히 콘크리트와 비슷한 탄성계수의 값을 얻을 수 있을 것이라고 보여진다.
3) 하중-변위곡선 곡선 및 하중-균열개구변위의 곡선에서노치비가 작을수록, 재령이 증가할수록 균열개구변위의 값의 변동의 폭이 최대하중이후 작았으며, CMOD 변위가 약 0.1 mm 되는 지점에서 최대하중점이 됨을 볼 수 있었다. 또한 재령이 증가되어질수록 최대하중 이후의 감소기울기가 급해지는 경향을 보여주는데 이는 강도가 증진되어지면서 취성적인 경향이 강해진 것으로 판단되었다.
4) 노치의 깊이와 파괴에너지값과의 관계는 노치비가 커질수록 재령이 작아질수록 파괴에너지(G_F)의 값이 감소하는 경향이 있었다. 이는 파괴에너지가 강도발현의

영향을 크게 받고 있는 것으로 판단되어진다. 한편 노치비가 0.5일 때 평균 25.44 N/m의 파괴에너지가 측정되었다. 한편 노치 민감도는 전반적으로 재령이 증가할수록, 노치비가 작을수록 커지는 경향을 볼 수 있었다.

본 실험에서 구한 인자들에 대한 평가 결과, 측정값이 기존 시멘트 모르타르 또는 콘크리트와 비교하였을 때, 압축강도는 우수하였으나, 탄성계수 및 휨파괴 특성 등의 파괴·역학적 특성이 낮은 것으로 보여주고 있으며, 이를 통하여 현재까지의 석탄회 고형물은 비구조용 재료로의 사용이 가능할 것으로 보이지만, 콘크리트와 비슷한 강도를 지니면서도 콘크리트에 비하여 연성의 재료임을 고려하여 앞으로 계속 연구가 진행되어진다면 충분히 건설용 구조재료로도 사용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 오병환, "콘크리트 파괴역학의 이론과 실제응용", 콘크리트학회지, 5권 1호, 1993. 3, pp.22~37.
2. 김경수, "강섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향", 콘크리트학회지, 6권 1호, 1994. 2, pp.131~141.
3. 최신호, "J-적분과 콘크리트 파괴거동에 관한 연구" 콘크리트학회 논문집, Vol.12, No.2, 2000, pp.185~190.
4. Zhang, D., "Fracture Process Zone of Notched Three-Point-Bending Concrete Beams", *Cemet and Concrete Research*, Issue 29, 1999, pp.1887~1892.
5. Qian Jueshi and Luo Hui, "Size Effect on Fracture Energy of Concrete Determined by Three-Point-Bending," *Cement and Concrete Research*, Issue 27, 1997, pp.1031~1036.
6. 손영현, "강섬유보강 고강도콘크리트의 파괴특성에 관한 연구", 한양대학교 대학원, 1999, pp.14~36.
7. 산업자원부, "석탄회를 이용한 환경친환건자재의 개발", 산업자원부, 2002. 1.
8. 김석기, "콘크리트균열개수 변위와 하중방향변위 관계", 콘크리트 학회지, Vol.9, No.1, 1997, pp.183~194.

요 약

본 연구에서는 매년 많은 양의 석탄회 발생으로 인한 환경오염을 줄이고 천연자원의 채취와 고갈로 인한 문제를 극복하기 위해, 산업 폐기물의 건설재료로서의 재활용 가능성을 확보하기 위한 기초적인 연구자료를 제시하였다. 압축강도실험을 통하여 재료에 대한 탄성계수값을 측정하였으며, 3점 휨파괴시험으로부터는 파괴에너지, 초기노치비, 노치민감도등을 평가함으로써 파괴역학적 파라메타를 제안하였다. 실험 결과, 초기강도는 콘크리트에 비해 낮으나 장기강도에서는 비슷함을 볼 수 있었다. 하지만 파괴강도가 증가함에 따라 취성적인 경향을 보이면서 파괴에너지값은 낮음을 알 수 있었다. 또한 하중-변위곡선과 하중-균열개구변위곡선의 형태는 모두 비슷한 형태를 띠고 있었으며, 재령이 증가할수록, 노치비는 작을수록 최대하중값이 커지면서 파괴시의 처짐은 감소함을 알 수 있다. 하지만 파괴강도가 커지면서 취성적인 경향으로 최대하중이후의 연화구간의 기울기가 급해짐을 볼 수 있었다. 따라서 연성의 확보에 대한 추가적인 보완연구가 진행되어진다면 충분히 건설재료로 사용 가능할 것으로 판단되어진다.

핵심용어 : 파괴, 파괴에너지, 석탄회, 노치, 3점 휨시험