

# 석탄회 고형물의 파괴특성에 관한 실험적 연구

## Experiment Study for Fracture Characterist of the Ash solid

조병완\*      박종빈\*\*      김효원\*\*\*  
Jo, Byung Wan      Park, Jongg Bin      Kim, Hyo Won

### ABSTRACT

By the recently, Environmental pollution is serious by the highly economic growth and expansion of lively country basic industry. Especially, in case of industrial waste and life waste leaped into a pollution source.

Also, research for processing of waste and recycling countermeasure is a pressing question on national dimension because it is prohibited an ocean disposal and reclamation.

In this study, it looked for fracture characteristic value of recycling a coal ash to decrease environmental pollution by picky and exhaustion of natural resources and to reduce self-weight to prepare for a tall building and earthquake. So a coal ash examined to be possible to do as construction material. It achieved compressive strength test and three points bending test with initial notch depth rate and age for variables to show a basic research data. From the basis of the three points bending test, the fracture parameters - notch sensitivity, fracture energy, initial compliance were experimentally proposed.

From the results of the compressive strength test, the elastic modulus was experimentally proposed. Also on the basis of the three points bending test, the fracture parameters - notch sensitivity, fracture energy, initial compliance were experimentally proposed. The results that the strength and fracture energy value are lower than concrete or mortar is described in this paper. Also, it shows that the deflection at fracture decreases as the age increases and the notch sensitivity decrease. However, it is judged to be available to construction material if research is continuously gone forward.

**Key Word : 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 320만톤, 2000년도에는 443만톤이 생산되었으며, 2005년에는 572만톤이 발생될 것으로 추정된다. 이 중 2000년도의 경우 재활용 양은 242만톤으로 생산량의 약 55% 정도이다.(한전산업개발, 2000) 석탄회의 70~85%를 차지하고 있는 Fly ash는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 상온에서 반응하여 포졸란 반응을 하기 때문에 활용성이 높다. 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 Fly ash를 재활용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 Bottom ash의 경우도 비록 Fly Ash보다 발생량이 적고, 연구가 아직 미진하나, 앞으로 연구가 충분히 이루어지면 사용도가 많을 것이라고 본다.

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

\* 정회원 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원 한양대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 비회원 한양대학교 토목공학과 석사과정

## 2. 파괴인자

본 연구에서는 일반콘크리트에 대한 규정을 따라 3점 휨시험을 이용하여 다음의 인자를 구해 석탄회 고품물의 파괴특성을 알아보고 토목구조물의 사용재료로서의 사용 가능성을 알아보았다.

### 2.1 하중(P)-균열개구변위곡선(CMOD)

콘크리트 휨부재의 파괴거동 특성을 거시적으로 검토하기 위하여 하중-하중점변위 혹은 하중-균열개구변위의 관계를 이용하는 경우가 일반적이다. 그 중 하중-균열개구변위의 관계는 전술한 이상변위의 발생요인의 영향을 받지 않아 비교적 파괴인자들의 평가결과가 정확한 것으로 알려져 있다(김석기, 1997). 따라서, 본 연구에서는 제 3 장의 휨실험체와 실험방법에 의해 수행된 파괴실험에서 총 용량 37.5 mm의 COD 게이지를 이용하여 얻는다. 콘크리트 휨부재의 파괴거동은 비교적 안정적인 변위제어법에 의해 측정된 하중-균열개구변위의 관계에서 초기 컴플라이언스를 산정함으로써 검토되어질 수 있다. 컴플라이언스의 개념은 Irwin(1958)에 의해 처음 도입되었는데, 장(1999)에 의하면 균열을 갖는 시험체의 경우 시험체의 강성은 낮아져서 변형하기 쉬우므로 컴플라이언스(C)는 증가한다.

$$C = \alpha \left( \frac{a_0}{d} \right) = \frac{w}{P} \left( = \frac{1}{K} \right) \quad (2.1)$$

### 2.2 파괴에너지의 결정

일반적으로 3점 휨 시험법으로 결정하는 파괴에너지는 균열이 발생하는데 필요로 하는 에너지의 량으로 정의되어진다. 3점 휨 시험법에 의해 결정된 에너지는 하중에 의한 에너지뿐만 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.

$$G_f = \frac{A}{b(d-a)} \quad (2.2)$$

여기서, A : 하중처짐곡선의 면적    a : 노치의 깊이    b : 보의 폭    d : 보의 깊이

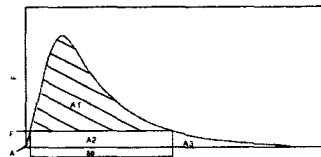


그림 1 3점 휨시험에 의한 하중-처짐곡선

위의 그림1에서 자중의 영향으로 인한 부분  $A_2$  와  $\delta_0$ (최종파괴가 일어나기까지의 변위)이후의 면적  $A_3$ 는 연구결과  $A_2$ 와 같은  $\frac{Mg\delta_0}{2}$  로 나타났다. 따라서 자중의 영향을 고려한 파괴에너지는 다음과 같다.

$$G_f = \frac{A_1 + Mg\delta_0}{b(d-a)} \quad (2.3)$$

### 2.3 노치 민감성 특성 평가

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 응력집중효과로 인하여 하중전달능력이 감소하는데 이러한 노치민감성 현상은 노치의 존재에 따른 재료의 실제 유효단면의 깊이 ( $d-a_0$ ) 만을 고려한 경우와 노치가 없는 휨부재에 휨이론을 적용하여 산정된 휨강도를 비교함으로써 검토되어질 수 있다. 본 연구에서는 초기 노치비를 변수로 하여 수행하였다.

$$\text{노치 민감도} = f_{\text{cracked}} / f_{\text{uncracked}} = \frac{(P_{\text{max}, d-a_0}) \cdot d^2}{(P_{\text{max}, d}) \cdot (d-a_0)^2} \quad (2.4)$$

여기서,  $P_{\text{max}, d-a_0}$  는 초기노치길이가  $a_0$  인 휨실험체의 최대하중을 나타내며,  $P_{\text{max}, d}$  는 노치가 없는 실험체의 최대하중을 나타낸 것이다.

## 3. 석탄회 고품화 실험

### 3.1 실험 개요

석탄회는 일반 콘크리트와 달리 전형화된 실험 방법이 없기 때문에 본 실험을 행하기 앞서 석탄회를 이용한 고품화 기술은 콘크리트의 양생방법을 기준으로 첨가물들의 함량을 변화시켜가면서 배합비 및 양생방법을 결정하였다. 최종적인 배합비의 결정은 5×5×5(cm)크기의 각주형 실험체의 압축강도 (KS L 5105)를 기준으로 설정하였다.

### 3.2 사용 재료 및 배합설계

#### 3.2.1 석탄회

##### 1) Fly ash

본 연구에서는 보령화력발전소에서 생산된 KS L 5405 규정에 적합한 제품을 사용하였고, 그 물리·화학적 특성은 다음과 같다.

표 1 Fly ash의 물리적 특성

비중	분말도	습분	간열간량	단위수량비
2.34	3.70 cm <sup>2</sup> /g	0.13%	3.07 %	99 %

표 2 Fly ash의 화학성분

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
57.09 %	24.66 %	10.50 %	2.58%	1.37 %	0.94 %

##### 2) Bottom ash

본 연구에서 사용한 Bottom ash는 보령화력발전소에서 생산된 제품을 사용하였고, 그 화학적 특성은 다음과 같다

표 3 Bottom ash의 화학성분

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
49.91	22.54	11.37	5.84	1.25	0.87	0.39

### 3.2.2 첨가제

첨가제로는 시험체의 강도증진을 위한 금속산화물 및 강도증진제와 석탄회의 고품화를 위해 결합을 도와주는 결합제, 그리고 점결재등을 넣어 사용하였다.

### 3.2.3 사용배합비

첨가제의 최적의 배합비를 알아보기 위해 Fly ash의 양을 고정한 후 첨가제들을 변화시켜가면서 배합비를 결정하였다. 첨가제 변화량에 따른 배합비는 표4와 같다.

### 3.3 배합비 결정

표 5, 표 6에서 보는 바와같이 Fly ash : Bottom ash의 비와 양생방법을 변수로 하고 다른 첨가물은 같은 양을 사용하여 재령별 압축강도시험을 해보았다.

표 4 Fly ash : Bottom ash 혼합물 배합표  
(단위:Flyash함량에 대한 백분율)

공시체 번호	BA	FA	W / FA	강도 증진제	결합제	금속산화물	점결재
B5-F5-C2 -N2-S3	100	100	30	10	10	5	15
B6-F4-C2 -N2-S3	67	100					

표 5 양생방법

양생방법	실험 방법
수중 양생법	15℃와 46℃의 수온에서 96시간동안 양생하고 46℃의 수온에서는 24시간, 48시간, 72시간, 96시간마다 꺼내어 공기 중에서 양생
기건 양생법	실온(18℃)에서 7일간 양생
건조 양생법	온도를 약 50℃로 유지한 건조로에서 96시간동안 양생하였고, 24시간, 48시간, 72시간, 96시간 후에 각각 꺼내어 실온에서 양생

### 3.4 예비 실험 결과분석

석탄회를 고품화하여 콘크리트 대체 가능성 여부를 연구하기 위한 일환으로 고품화 최적 배합비와 양생조건을 도출하기 위한 예비 실험 결과 석탄회 고품물의 7일 강도는 Fly ash 중량비 67%의 Bottom ash, 10%의 결합제와 강도증진제, 5%의 금속산화물, 15%의 점결재를 배합하여 적절한 습도와 50℃로 유지한 건조로에서 24시간 양생 후 공기중(18℃)에서 양생한 경우의 양생이 가장 양호한 것으로 나타났으며, 그 압축강도는 평균 352.67kgf/cm<sup>2</sup>내외로 측정되었다.

## 4. 휨 파괴 실험

본 연구에서는 석탄회를 고품물의 파괴특성을 연구하기 위하여 초기 노치를 가진 3점 휨파괴실험을 수행하였다. 시험체는 예비실험을 통해 도출된 최적의 배합비와 양생방법을 이용하여 제작하였고, 변수로는 재령(28일, 56일, 96일)과 노치비(0, 0.3, 0.5)로 하였다. 100×100×450mm(순지간 400mm)의 휨 실험체를 제작하였으며, 안정적인 균열성장을 유도하기 위하여 CMOD 변위제어법을 이용하였으며, 휨 하중이 영이 될 때까지 실험을 연속적으로 수행하였다.

## 5. 실험결과

### 5.1 하중-변위 특성 평가 및 하중-균열개구변위 특성 평가

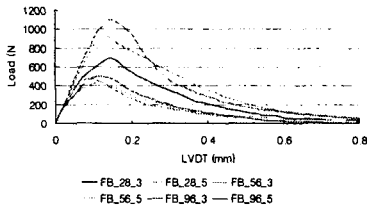


그림 2 하중-변위곡선

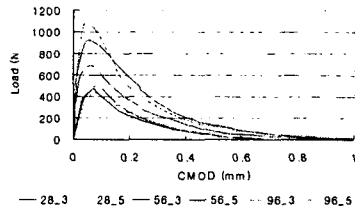


그림 3 하중-균열개구변위곡선

하중-변위곡선 그래프와 하중-균열개구곡선 그래프의 재령 및 노치비에 대한 결과는 그림 2 및 3과 같다. 두 경우 모두 노치비가 작을수록, 재령이 증가할수록 최대하중 이후의 균열개구변위가 더 작음을 보여주었고, 변위가 약 0.1mm 되는 지점에서 최대하중점이 됨을 볼 수 있었다. 그리고 재령이 증가되어질수록 최대하중 이후의 감소 기울기가 급해지는 경향을 보여주는데 이는 강도가 증진되어지면서 취성적인 경향이 강해짐으로 인해 나타나는 현상으로 판단되어진다. 따라서 이러한 취성적인 경향은 대한 보완연구가 검토되어야 한다고 생각되어진다.

## 5.2 파괴에너지 ( $G_F$ )

그림 4에서 보듯이 노치비가 작을수록, 재령이 커질수록 파괴에너지의 값은 커지는 경향이 있었다. FB\_0\_28과 FB\_0\_96을 비교하여 보면 약 3배의 파괴에너지가 증가하였고, FB\_3\_28과 FB\_5\_28을 FB\_3\_96과 FB\_5\_96와 비교하여 보면 각 2배와 1.7배 정도의 파괴에너지 증가를 보였다. 또한 노치비에 증가함에 따라 점차 파괴에너지가 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이번 연구에서 구해진 28일 양생의 노치비가 0.5의 경우 25.44N/m으로 일반 모르타르(28일 양생, 76~87N/m)와 비교하여 보았을 때 일반 모르타르의 약 32%에 해당되어지는 것으로 측정되었다.

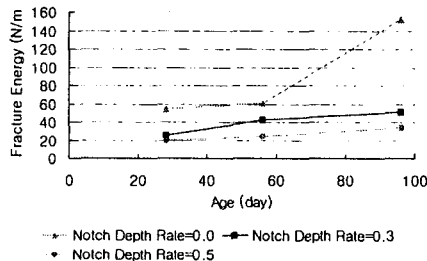


그림 4 재령에 따른 노치별 파괴에너지

## 5.3 노치민감성 특성

노치 민감도는 재령과 노치비에 따라 다음과 그림 5와 같이 보여진다. 그래프에서 보듯이 28일과 56일인 경우 노치비가 0.3에서 0.5로 증가함에 따라 노치민감도는 감소함을 보여주고 있고, 또한 재령이 작을수록 노치민감도는 감소하는 모습을 볼 수 있었다. 이는 인위적인 노치의 존재는 훨씬 낮은 하

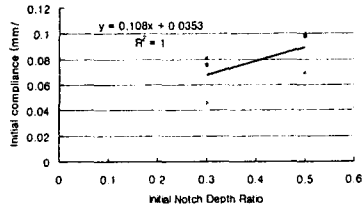


그림 5 초기노치비와 초기  
컴플라이언스 관계

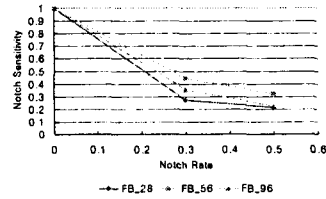


그림 6 노치 민감도

중에서 큰 응력집중효과로 인하여 하중전달능력이 감소하는데 노치비가 클수록 또한 재령이 작을수록 강도는 감소됨에 따라 하중전달능력이 떨어진다. 이에 따라 노치민감도가 낮아지는 것으로 판단되어진다. 하지만 96일인 경우에는 오히려 56일보다 노치비가 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 56일 이후 전체적으로 최대하중이 증진하는 현상을 보여주는 하였으나, 노치가 0cm 일 때 약 45% 최대하중 증가에 비해 3cm, 5cm인 경우 약 20%와 5%의 작은 최대하중의 증가로 인한 것으로 판단되어진다.

## 6. 결 론

본 연구는 석탄회 고품질의 파괴에 대한 일반적인 파라메타를 구하기 위한 3점 휨 시험중 가장 일반적인 형태인 mode I 에 대해 동일한 배합하에 재령과 노치비에 따른 파괴특성을 구한 것으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 하중-변위곡선 곡선 및 하중-균열개구변위의 곡선에서 노치비가 작을수록, 재령이 증가할수록 균열개구변위의 값의 변동의 폭이 최대하중이후 작았으며, 변위가 약 0.1mm 되는 지점에서 최대하중점이 됨을 볼 수 있었다. 또한 재령이 증가되어질수록 최대하중 이후의 감소 기울기가 급해지는 경향을 보여주는데 이는 강도가 증진되어지면서 취성적인 경향이 강해진 것으로 판단되어진다.

2. 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  $N/m$ 의 파괴에너지가 측정되었다. 한편 노치 민감도는 전반적으로 재령이 증가할수록, 노치비가 작을수록 커지는 경향을 볼 수 있었다.

3. 본 실험에서 구한 인자들에 대한 평가를 한 결과 대부분의 측정값이 모르타르 또는 콘크리트와 비교하였을 때 약간의 차이는 보이고 있지만 앞으로 계속 연구가 진행되어진다면 충분히 건설용 재료로도 사용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 오병환, "콘크리트 파괴역학의 이론과 실제응용," 콘크리트학회지, 제5권 1호, 1993. 3. pp.22~37.
- 김경수, "강섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향," 콘크리트학회지, 제6권 1호, 1994. 2. pp.131~141.
- 최신호, "J-적분과 콘크리트 파괴거동에 관한 연구," 콘크리트학회논문집, 2000, pp.185~190.
- D.Zhang, "Fracture process zone of notched three-point-bending concrete beams," Cement and Concrete research 29, 1999, pp.1887~1892.
- Qian Jueshi and Luo Hui, "Size Effect on Fracture Energy of Concrete Determined by Three-point-bending," Cement and Concrete research vol.27, 1997, pp.1031~1036.
- 손영현, "강섬유보강 고강도콘크리트의 파괴특성에 관한 연구," 한양대학교 대학원, 1999, pp.14~36.