

## 역해석으로 도출된 경량콘크리트의 파괴에너지 특성 분석

이경배<sup>1</sup>, 권민호<sup>2\*</sup>, 서현수<sup>3</sup>, 김진섭<sup>4</sup>, 조재영<sup>5</sup>

### Lightweight Concrete Fracture Energy Derived by Inverse Analysis

Kyeong-Bae Lee<sup>1</sup>, Min-Ho Kwon<sup>2\*</sup>, Hyun-Su Seo<sup>3</sup>, Jin-Sup Kim<sup>4</sup>, Jae-Young Cho<sup>5</sup>

**Abstract:** Modern structures is the tendency of being increasingly taller and larger. The concrete with large weight has the disadvantage of increasing the weight on the structure. therefore, the method of carrying out the weight saving of the concrete is required. one of such method is to use a lightweight aggregate. However, studies on structural lightweight concrete, lacking for the recognition of the lightweight concrete, so also is lacking. therefore it is necessary to study on the physical characteristic value of the lightweight concrete. In this study, in order to investigate the tensile properties of lightweight concrete, Crack mouth opening displacement (CMOD) experiments were carried out. the fracture energy of the lightweight concrete subjected to inverse analysis were derived from the CMOD experimental results.

**Keywords:** Lightweight concrete, Crack mouth opening displacement, Inverse Analysis, Fracture energy

## 1. 서 론

콘크리트는 오랜 옛날부터 현대까지 가장 널리 알려진 구조물의 재료로 구조물의 형상과 치수에 제약을 받지 않는 장점 등이 있다. 그러나 강도에 비해 질량이 크기 때문에 구조물의 자중을 증가시키는 문제점을 가지고 있어 콘크리트 구조물의 초고층화, 대형화가 되어 가고 있는 추세에 맞는 콘크리트의 경량화가 필요한 실정이다. 콘크리트의 경량화의 방법 중 하나가 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트이다. 경량골재의 사용은 콘크리트의 경량화, 단열 및 차음성능 향상 등 콘크리트의 다기능성을 가져온다. 그리고 구조물의 자중경감 효과로서 하부구조에 대한 부담이 경감되고, 구조 부재와 단면적 감소, 그로 인한 내부 공간 확대 및 투입 재료량 감소 등으로 경제적인 측면에도 이점을 가져 올 수 있을 것이다 (Kwon, 2012). 그러나 국내에서는 경량골재의 비싼 가격과 강도 부족 등으로 인하여 경량골재 콘크리트에 대한 인식이 부족해 대부분 구조용 경량골재 콘크리트 보다는 방음이나 단

열효과 같은 비구조용 경량골재 콘크리트로만 사용되고 있다. 경량골재 콘크리트는 콘크리트 표준 시방서(KCI, 2009)에 1종 및 2종으로 분류하고 기본적인 물리적 특성에 대한 연구가 진행되고 있으나 구조재료로 사용하기 위한 설계절차에서 필요한 경량골재 콘크리트의 특성에 관한 자료는 부족한 실정이다. 경량골재 콘크리트는 사용되는 경량골재의 고유성능으로 인한 강도 및 탄성계수 저하, 내구성능 감소의 문제가 지속적으로 보고되고 있기 때문에 경량골재 콘크리트의 실용화를 위해서는 사용되는 경량골재의 품질에 따라 콘크리트의 물성 및 강도 등에 대한 전반적인 검증작업이 필요하다 (Shin, 2012). 국내의 경우 구조용 경량골재 콘크리트에 관한 연구 및 활용은 기초적인 단계로 재료적 측면에서의 고강도화 및 경량화에 대한 연구로는 화력발전소의 석탄연소과정에서 발생하는 인공 포졸란의 일종인 플라이 애쉬를 잔골재의 일부로 치환한 콘크리트의 강도 특성을 규명한 연구 등이 있다. 국외에서는 구조용으로 사용되는 경량골재 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행중이며 특히 경량골재의 다공성에서 기인하는 수분의 이동에 대한 연구가 많이 진행되고 있다 (Park, 2010).

그러나 국내에서 경량골재 콘크리트에 대한 연구는 기본적인 물리적 성질이나 강도개선을 위한 연구가 대부분이며 경량골재 콘크리트의 시편 크기가 다를 때의 파괴특성 변화에 대한 실험이나 이를 역해석한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 보통골재와 경량골재를 사용하여 만든 콘크리트에 인장균열파괴실험을 수행하여 하중-균열개구변위

<sup>1</sup>정회원, 경상대학교 토목공학과 석사

<sup>2</sup>정회원, 경상대학교 토목공학과 공학연구원 교수, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, 경상대학교 토목공학과 박사수료

<sup>4</sup>정회원, 텍사스알링턴주립대학교 연구원

<sup>5</sup>정회원, GS건설 인프라해양연구팀 선임연구원

\*Corresponding author: kwonm@gnu.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

특성을 구해서 역해석을 하여 최적의 매개변수를 도출하고 파괴에너지를 구하는데 목적을 두었다.

## 2. 파괴에너지와 역해석

### 2.1 응력과 균열개구의 관계와 파괴에너지

선형탄성파괴역학에 의하면 재료 내부의 균열선단에서의 응력은 무한대라고 볼 수 있다(Shah et al., 1995). 그러나 무한대로 큰 응력은 실제 재료내부에 존재 할 수 없어 균열선단의 일정한 구역에는 비탄성구역이 존재한다. 콘크리트가 파괴될 때 인장균열선단 주위에서 파괴진행영역(Fracture process zone)이 형성되며(Bazant and Planas, 1996), 응력과 균열개구의 관계를 나타내는 인장연화곡선은 파괴진행영역의 형성과정과 관계가 있다. 콘크리트는 여러 가지 재료들로 구성된 불균질한 재료이기 때문에 균열선단 주위의 파괴진행영역은 매우 복잡한 매커니즘의 지배를 받게 된다. Fig. 1은 콘크리트의 파괴진행영역을 나타낸 것이고, Fig. 2는 파괴진행영역과 인장연화곡선의 관계를 계략적으로 나타낸 것이다(Nomura et al., 1991). 인장을 받는 콘크리트는 내부에 미세균열들이 형성되고 인장응력이 인장강도에 도달함에 따라 미세균열은 서로 이어져 하나의 주균열을 형성하기 시작한다. 균열 변형

은 미세균열이 연결되는 부위에 집중되고 이 부분이 주 균열로 발전하게 된다. 응력과 균열개구변위의 관계를 나타내는 연화곡선은 여러 가지 형태로 제안할 수 있으며 CEB-FIP modelcode 1990(Tomas, 1990; Telford, 1993)에서는 Fig. 3과 같이 인장연화곡선의 형태를 2선형(bilinear) 형태로 가정하였다. 미세균열들이 하나의 주균열을 형성할 때 까지 균열면의 응력과 균열개구의 관계는 연화곡선의 첫 번째 직선으로 나타낼 수 있다. 하나의 주균열이 형성된 후에도 균열면에 위치한 골재의 가교 작용(bridging effect)에 의하여 균열면에 응력 전달효과가 생긴다. 이때 균열면의 응력과 균열개구의 관계는 연화곡선의 두 번째 직선으로 나타낼 수 있다. Fig. 3에서 연화곡선은 4개의 파라미터들로 구성되었으며,  $f_t$ 는 콘크리트의 인장강도,  $w_c$ 는 최대균열개구변위를 나타내고,  $f_1$ 와  $w_1$ 는 각각 연화곡선의 변곡점에서 균열면의 응력과 균열개구변위를 나타낸다.

Fig. 4는 3선형 인장연화곡선을 나타내고 있으며, 본 실험에서는 더 정확하게 인장연화곡선을 역해석 하기 위해 3선형 인장곡선을 사용하였다.

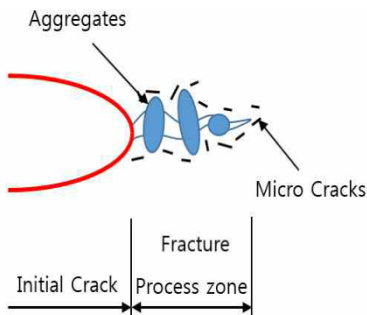


Fig. 1 Fracture process zone

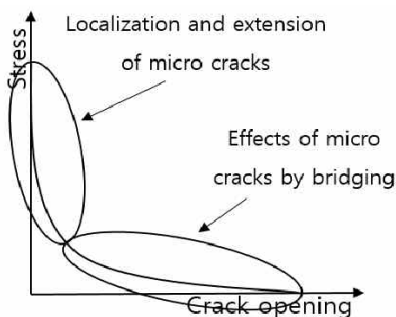


Fig. 2 Correlation of softening curve and development of fracture process zone

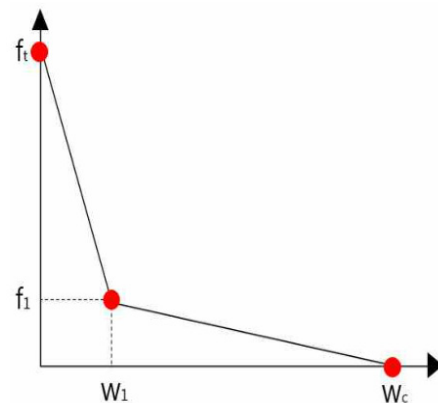


Fig. 3 Bilinear softening curve

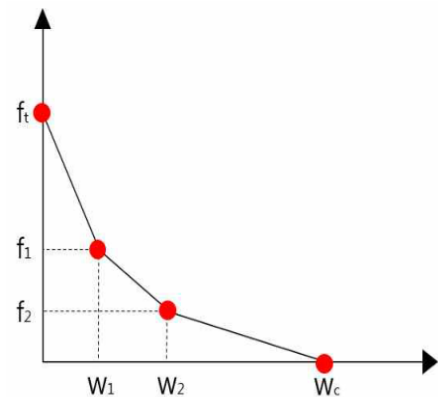


Fig. 4 3linear softening curve

## 2.2 역해석(Inverse Analysis)

### 2.2.1 하중-CMOD곡선의 최소화

콘크리트의 파괴에너지를 도출하기 위하여 인장균열과 파괴 실험에서 나타난 하중-CMOD곡선에 대한 역해석을 수행하여 최적의 매개변수를 찾아야 한다. 다만, 인장균열과 파괴 실험에서 도출된 하중-CMOD곡선을 그대로 역해석에 사용하기에는 측정값의 수가 너무 많기 때문에 실험결과를 대표할 수 있는 최소의 측정값을 사용하여 역해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용하는 최소의 측정값은 하중-CMOD곡선을 최적으로 모사하는 다중선형함수를 찾아 역해석에 사용될 20개의 측정값, 처음부터 Peak Load까지 7개, Peak Load에서 Max CMOD까지 13개의 포인트를 추출하였다(Choi, 2010).

### 2.2.2 역해석 알고리즘

Fig. 5는 역해석 알고리즘을 나타낸 것이다. 연화곡선을 구성하는 매개변수를 조정하면서 인장균열과 파괴 실험에서 측정된 하중-CMOD곡선과 역해석에서 도출된 하중-CMOD곡선이 일치할 때까지 반복수행하여 인장균열과 파괴 실험 결과를 최적으로 모사하는 연화곡선을 나타내는 매개변수를 찾는다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 3선형 인장연화곡선을 사용하였다.

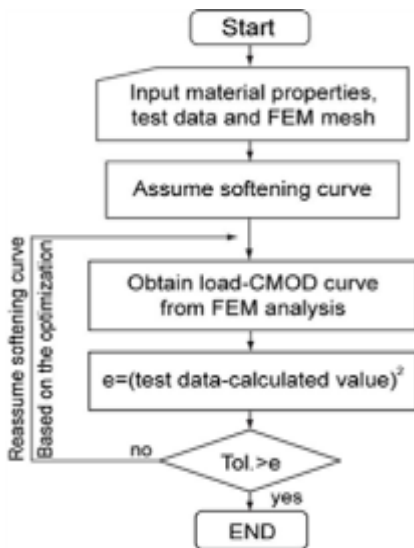


Fig. 5 Inverse Analysis algorithm

### 2.2.3 모델링

본 연구에서 역해석을 수행하기 위해 사용한 해석 프로그램은 유한요소 상용프로그램인 아바쿠스(ABAQUS)이며, 요소 격자망은 차후 실제 구조해석에서 유용하게 적용할 수 있도록 아바쿠스가 지원하는 방법으로 격자망을 생성하였다. 요소 형상은 2차 함수(quadric), 알고리즘(algorithm)은 ‘mapped meshing’을 이용하는 요소 격자망을 생성하였다. 실험과 동일한 경계조건을 부여하였으며, 중앙 상단부에 집중하중이 가력되도록 하였다. 사용된 요소는 8절점 평면응력 요소이며, 시편과 동일한 요소두께를 부여하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 계획

본 연구에서는 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트를 Table 1과 같이 배합하였다. 배합표에서 W는 물, C는 시멘트, F/A는 플라이애쉬, S/F는 실리카 흙, S는 잔골재, G는 굵은 골재, SP는 첨가제를 의미한다. 압축강도 실험을 위해 KS F 2403에 의거해 제작하고, 인장균열과 파괴 실험을 위해 Fig. 6과 Table 2와 같이 경량골재 콘크리트를 7개씩 제작하다. 노치는 시편 하단 중앙부에 시편의 높이의 0.4배로 만들었다. 인장균열과 파괴 실험용 시편은 7개씩 제작하여 최저 및 최고치를 제외한 5개의 실험 결과를 평균하여 나타내었다.

### 3.2 실험 재료

본 연구에서 사용된 재료는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트와 잔골재, 굵은 골재, 플라이 애쉬(Fly ash), 실리카 흙(Silica

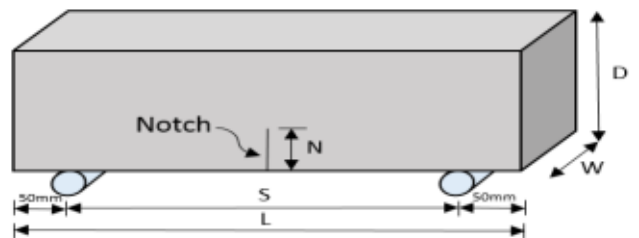


Fig. 6 Shape specimen

Table 1 Concrete mix

Specimen	Unit Mass (Kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	F/A	S/F	S	G	SP
Normal Concrete	165.17	549.00	61.00	0	701.42	902.42	7.32
Lightweight Concrete	155.00	531.25	63.00	44.75	681.00	518.75	7.68

**Table 2** Size of specimen

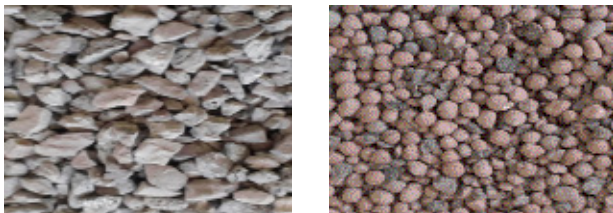
No.	W (mm)	D (mm)	S (mm)	L (mm)	N (mm)
1010		100	400	500	40
1015	100	150	600	700	60
1020		200	800	900	80
1030		300	1200	1300	120
2010		100	400	500	40
2015	200	150	600	700	60
2020		200	800	900	80

**Table 3** Cement physical properties

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial set	Final setting	3-Day	7-Day	28-Day
3.15	3400	230	390	above 12.5	above 15.0	above 32.5

**Table 4** Aggregate physical properties

Aggregate	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Unit volume weight (g/cm <sup>3</sup> )	Aggregate maximum size (mm)
Normal aggregate	2.68	1.52	15
Lightweight aggregate	1.75	0.71	8



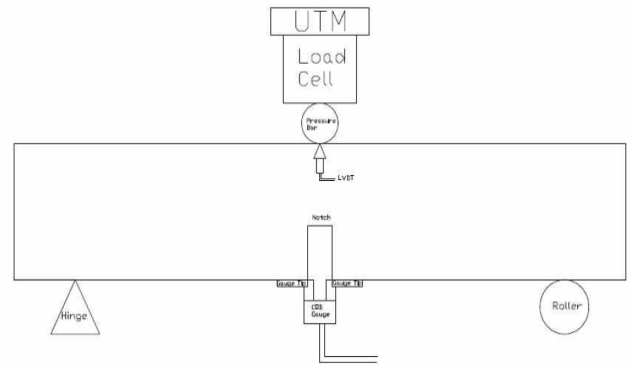
Normal aggregate                      Lightweight aggregate

**Photo 1** Shape of the aggregate

fume), 혼화제이다. 잔골재는 인천산 세척사를 사용하였으며, 굵은 골재는 국내산 보통골재와 외국산 경량골재를 사용하였다. 시멘트의 특성은 Table 3과 같고 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 4, 형상은 Photo 1과 같다.

### 3.3 실험 방법

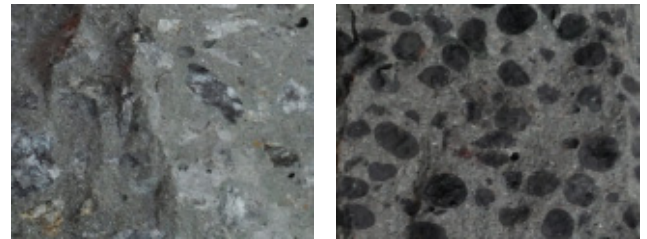
본 연구에서는 압축강도실험 시편은 KS F 2405에 의거해 수행하였다. 인장균열파괴실험은 30t UTM 실험기의 하중가력장치에 로드 셀을 설치하여 가력되는 하중을 측정하였다. 그리고 로드 셀 하단에 가압 봉을 설치하여 시편 중앙부에 하



**Fig. 7** Concrete tensile fracture test picture

**Table 5** Compressive Strength

	Normal concrete	Lightweight concrete
Compressive strength (MPa)	59.3	44.21
	61.2	43.61
	60.8	41.18
Average compressive strength (MPa)	60.4	43.00



Normal concrete                      Lightweight concrete

**Photo 2** Compression fracture section

중을 가하였고 가압봉의 양 옆에 50 mm의 LVDT를 설치하여 하중-변위를 측정하였다. 시편의 밑부분의 양 끝단에서 50 mm씩 거리를 두고 힌지 및 롤러를 설치하고 노치 양 옆으로 Gauge Tip을 부착하고 최대 용량 5 mm의 COD Gauge를 설치하였다. 0.01 mm/min의 속도로 변위제어로 하중을 가력하였다. 인장파괴실험 구상도는 Fig. 7과 같다.

## 4. 실험결과

### 4.1 압축강도 실험 결과

Table 5는 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 나타내고 있다. 그리고 콘크리트의 파괴단면은 Photo 2와 같다. 보통중량 콘크리트 시편의 경우 파괴된 단면에 있는 굵은 골재가 대부

본 파괴되지 않고 형상을 유지하고 있었다. 반면에, 경량골재 콘크리트의 시편의 경우에는 균열이 진전되어 파괴된 단면에 있는 굽은 골재들이 전부 파괴되었다. 이것은 보통골재와 경량골재의 강도 차이에 의한 것으로 보통중량 콘크리트에서는 균열 발생 후 굽은 골재의 파괴 보다는 모르타르의 파괴에 따라서 균열 진전이 이루어져 파괴단면을 형성하지만 경량골재 콘크리트의 경우 균열이 진전되는 구간에 있는 경량 굽은 골재가 압축하중을 견디지 못하고 파괴되면서 파괴 단면이 형성되어진다.

#### 4.2 인장균열파괴실험 결과

본 실험에서 측정된 시편별 5개의 하중-CMOD의 데이터를 평균하여 나타내었다. Fig. 8은 보통중량 콘크리트, Fig. 9는 경량골재 콘크리트의 인장균열파괴실험에서 도출된 하중-CMOD곡선을 나타내고 있으며, Table 6은 보통중량 콘크리트, Table 7은 경량골재 콘크리트의 인장균열파괴실험 결과를 나타내고 있다. Peak Load는 시편의 최대하중을 의미하며 Peak CMOD는 최대하중 일 때의 CMOD를 나타내고 있다. 그

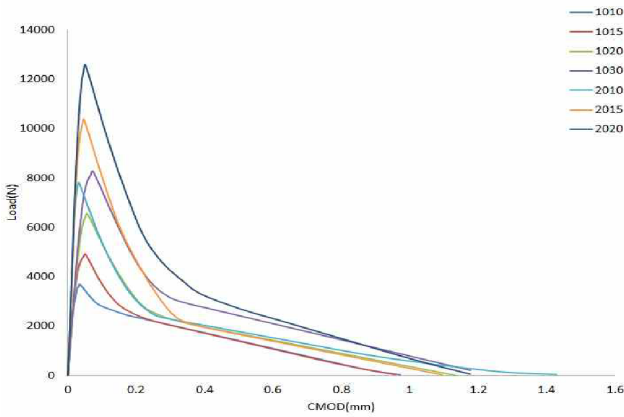


Fig. 8 Normal concrete Load-CMOD curve

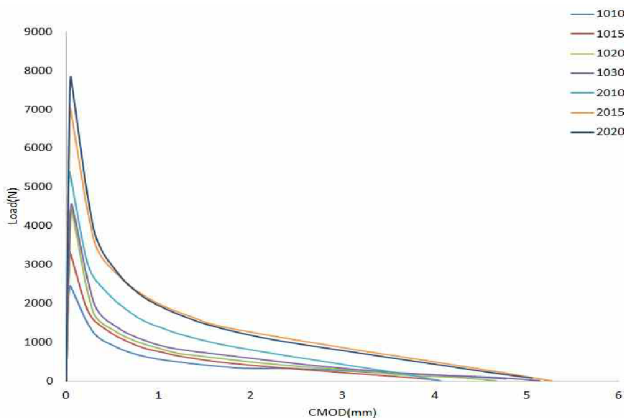


Fig. 9 Lightweight concrete Load-CMOD curve

Table 6 Normal concrete results of tensile cracks fracture tests

Specimen	Peak Load (N)	Peak CMOD (mm)	Max CMOD (mm)
1010	3692.31	0.0351	0.8777
1015	4918.95	0.0514	0.8667
1020	6553.91	0.0569	1.0238
1030	8268.91	0.0733	1.0672
2010	7811.91	0.0322	1.2882
2015	10372.00	0.0469	0.9898
2020	12582.54	0.0514	1.0640

Table 7 lightweight concrete results of tensile cracks fracture tests

Specimen	Peak Load (N)	Peak CMOD (mm)	Max CMOD (mm)
1010	2460.78	0.0440	4.7741
1015	3320.24	0.0403	4.0409
1020	4433.52	0.0575	4.6660
1030	4548.18	0.0617	5.1391
2010	5395.88	0.0368	4.0693
2015	7031.50	0.0443	5.2743
2020	7835.10	0.0496	5.0584

리고 Max CMOD는 실험이 끝났을 때의 CMOD를 의미한다. 보통중량 콘크리트의 경우 골재의 가교작용이 상대적으로 조금 더 일찍 작용하지만 파괴까지 도달되는 최대 CMOD가 작게 나타나 취성적인 거동을 나타냈으며, 경량골재 콘크리트의 경우 골재의 가교작용이 조금 더 늦게 작용하지만 파괴까지 도달되는 최대 CMOD가 크게 나타났다. 일반적으로 고강도의 재료가 취성적인 거동이 나타나며, 경량골재 콘크리트가 보통중량 콘크리트에 비해 취성적인 거동이 나타난다. 본 연구에서 사용된 경량골재 콘크리트의 취성적인 거동보다는 고강도에 의한 취성적인 거동이 더 큰 것으로 판단된다.

## 5. 역해석 결과

Fig. 10은 보통중량 콘크리트의 1015시편의 역해석 결과를 나타내고 있으며, Fig. 11은 파괴에너지를 나타내고 있다. Table 8은 보통중량 콘크리트의 역해석에서 도출된 매개변수와 파괴에너지를 나타내고 있다. 실험과 역해석에서 도출된 하중-CMOD곡선의 결과가 일치하고 있으므로, 역해석으로 도출된 매개변수는 타당성이 있다고 볼 수 있다. 보통중량 콘크리트의 파괴에너지의 경우 시편의 높이나 폭이 커짐에 따라 파괴에너지는 커지는 경향이 나타났다.



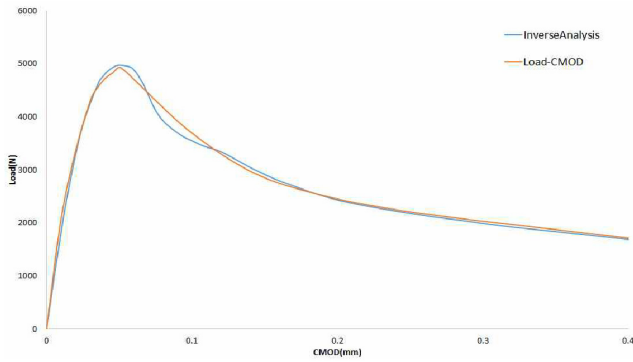


Fig. 10 Normal concrete 1015 Result of Inverse Analysis

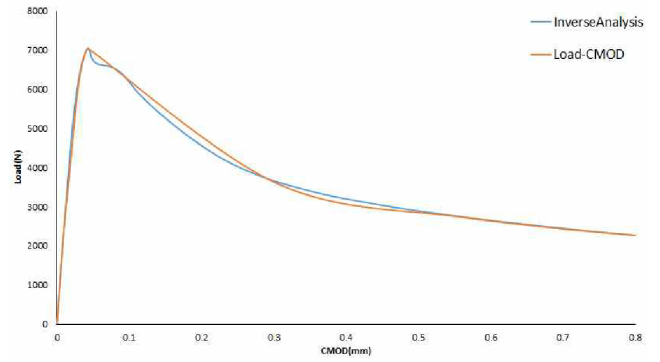


Fig. 12 Lightweight concrete 2015 Result of Inverse Analysis

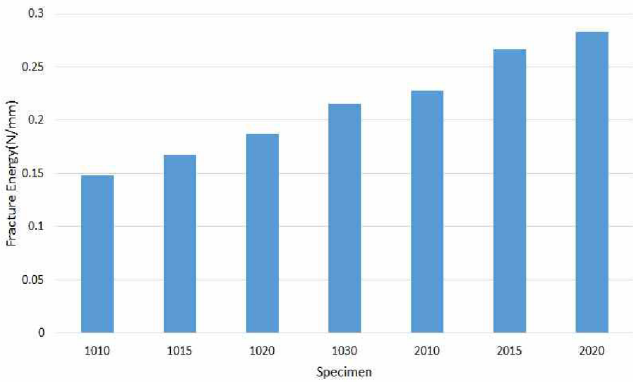


Fig. 11 Normal concrete fracture energy

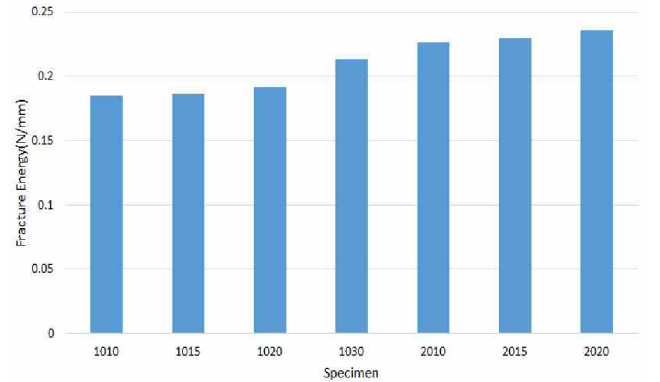


Fig. 13 Lightweight concrete fracture energy

Table 8 Parameters and fracture energy of normal concrete

Specimen	ft	fl	f2	w1	w2	wc	Fracture Energy (N/mm)
1010	4.70	1.60	1.15	0.0085	0.0800	0.1200	0.1481
1015	4.00	3.00	0.91	0.0066	0.0137	0.3000	0.1672
1020	7.28	2.79	0.47	0.0332	0.0250	0.6000	0.1868
1030	5.00	2.30	0.45	0.0055	0.0198	0.8000	0.2153
2010	7.07	2.58	0.57	0.0026	0.0376	0.6000	0.2280
2015	4.00	3.41	0.26	0.0020	0.0400	1.500	0.2669
2020	7.00	2.00	0.35	0.0047	0.0400	1.300	0.2831

Table 9 Parameters and fracture energy of lightweight concrete

Specimen	ft	fl	f2	w1	w2	wc	Fracture Energy (N/mm)
1010	3.20	1.22	0.48	0.0070	0.1100	0.4500	0.1846
1015	3.50	1.11	0.39	0.0052	0.1000	0.6300	0.1864
1020	3.00	0.43	0.30	0.0150	0.1000	1.0000	0.1918
1030	2.10	0.63	0.20	0.0100	0.0750	1.8000	0.2131
2010	3.20	1.30	0.61	0.0080	0.0980	0.5000	0.2266
2015	3.50	1.38	0.59	0.0552	0.0650	0.6000	0.2294
2020	3.00	0.95	0.29	0.0070	0.0800	1.3000	0.2360

Fig. 12는 경량골재 콘크리트의 2015시편의 역해석 결과를 나타내고 있으며, Fig. 13은 파괴에너지를 나타내고 있다. Table 9는 경량골재 콘크리트의 역해석에서 도출된 매개변수와 파괴에너지를 나타내고 있다. 실험과 역해석에서 도출된 하중-CMOD곡선의 결과가 일치하고 있으므로, 역해석으로 도출된 매개변수는 타당성이 있다고 볼 수 있다. 경량골재 콘크리트는 같은 폭을 가진 시편은 높이가 증가하면 파괴에너지가 증가하였으나 증가폭이 크지 않고 비슷하게 나타났고, 시편의 폭이 커질 경우에는 파괴에너지가 증가하였다.

Table 10 Average, standard deviation, coefficient of variation for fracture energy

Specimen	Average	Standard deviation	Coefficient of variation
Normal concrete	0.2136	0.0501	0.2344
Lightweight concrete	0.2097	0.0219	0.1043

Table 10은 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 파괴에너지에 대한 평균, 표준편차, 변동계수의 값을 나타낸 표

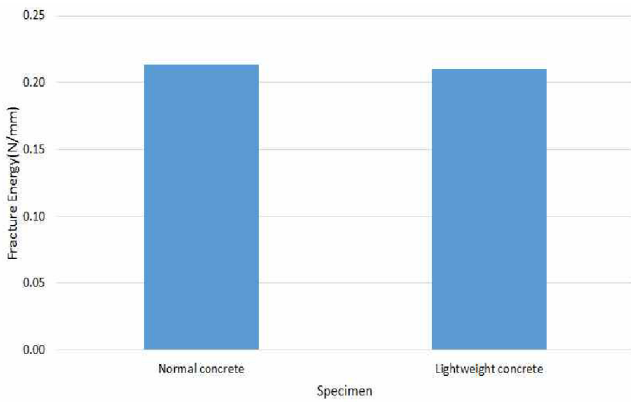


Fig. 14 Average fracture energy

이다. 표준편차와 변동계수는 보통중량 콘크리트가 더 크게 나타났다.

Fig. 14는 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 7종류 시편의 파괴에너지를 평균하여 나타낸 것이다. 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 파괴에너지가 유사한 값으로 나타났다.

## 6. 결론

1. 압축파괴에 있어 보통중량 콘크리트는 굵은 골재의 파괴보다는 계면을 따라 파괴되었으나, 경량골재 콘크리트는 굵은 골재가 파괴되었다. 이는 굵은 골재 자체의 강도 차이로 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 일반적인 압축 파괴 특성이다.
2. 보통중량 콘크리트의 파괴에너지는 시편의 크기가 커짐에 따라 증가하였다. 시편의 높이에 의해서도 파괴에너지는 영향을 받지만, 시편의 폭에 대해 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.
3. 경량골재 콘크리트는 시편의 높이가 증가하면 파괴에너지가 증가하지만, 증가폭이 미미하여 일정하다고 볼 수 있으나, 시편의 폭이 증가하였을 때는 파괴에너지가 증가하였다. 이는 경량골재 콘크리트의 파괴에너지가 시편의 높이 변화에는 영향을 거의 받지 않지만 시편의 폭에 의한 영향은 크게 받는 것으로 판단된다.
4. 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 평균 파괴에너지는 비슷한 결과를 나타냈다. 경량골재 콘크리트의 최대 CMOD가 보통중량 콘크리트보다 약 4.6배 정도 크게 나타나 경량골재 콘크리트의 파괴에너지가 더 크게 나타나야 된다고 볼 수 있다. 그러나 최대하중이후의 곡선에서 첫 번째 변곡점이 시작하는 지점, 즉, 콘크리트의 골재가 가교작용을 하는 시점의 CMOD에서 보통중량 콘크리트가 경량골재 콘크리트보다 작은 것을 생각하면, 보통중량 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 파괴에너지가 비슷하다고 판단된다.

5. 보통중량 콘크리트의 경우 골재의 가교작용이 상대적으로 조금 더 일찍 작용하지만 파괴까지 도달되는 최대 CMOD가 작고, 경량골재 콘크리트의 경우 골재의 가교작용이 조금 더 늦게 작용하지만 파괴까지 도달되는 최대 CMOD가 크다고 볼 수 있다. 고강도 재료일수록 취성적 파괴를 나타낸다는 점을 볼 때, 보통중량 콘크리트가 경량골재 콘크리트보다 고강도이기 때문에 파괴까지 도달하는 최대 CMOD가 작다고 판단된다.

6. 차후 시편의 종류를 늘려 실험을 수행하여 시편크기에 대한 파괴에너지의 특성 분석을 좀 더 명확하게 할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 미래산업선도기술 개발사업(No. 10042556)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## References

1. Kwon, D. S. (2011), A Study on the Physical characteristics of Lightweight Aggregate Concrete applied Pressure by Containing Moisture Condition in Lightweight Aggregates, Konkuk University master thesis.
2. Shin, J. K. (2012), Physical Properties and Durability of Lightweight Concrete by Grading and Shape of Artificial Lightweight Aggregates, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No.10, pp.105-112.
3. Park, S. W. (2010), Mix proportion and shrinkage evaluation of lightweight concrete for high strength, Konkuk University master thesis.
4. Shah, S. P., SwartzandC, S. E., Ouyang, S. (1995), *Fracture Mechanics of Concrete*, Jonh Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Bazantand, Z. P., Planas, J. (1998), *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi brittle Materials*, CRC Press, New York.
6. Nomura, N., Mihashi H., Izumi, M. (1991), Correlation of fracture process zone and tensions of tening behavior in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 4, pp.545-550.
7. Thomas, (1990), Telford, (1993), ComitéEuro-International du Béon, CEB-FIP Model Code.
8. Choi, K. (2010), Variation of Cracking Resistance of Self-Consolidating Concrete According to Ages, Myongji University Mix proportion and shrinkage evaluation of lightweight concrete for high strength.
9. Song, B. H., Han, B. C., Sung, S. Y., Yun, H. D., Choi, C. S.,

Chung, S. Y. (2000), Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Beams using Fly Ash Artificial Lightweight Aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 12, No. 2, pp.123-128.

10. Jo, B. W., Park, S. K. (2004), The Mechanical Properties of Lightweight Concrete Using The Lightweight Aggregate Made with Recycled-plastic and high carbon fly ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.16, NO. 1, pp.640-643.

11. Yang, W. J., Lee, W. H., Jee, S. W., Lee, H. S. (2009), Reinforcement Effect and Capacity of Punching Shear on Flat Plate Slab-Column Connections Using Eco Lightweight Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 8, pp.53-60.

12. Kim, J. I., Choi, Y. H., Kim, J. H. (2003), An Experimental Study on high Strength Lightweight Concrete Using Compound Materials, *Journal of The Korea society of industrials application*, Vol. 6, No. 2, pp.115-122.

13. Jo, B. W., Park, S. K., Park, J. B., Daniel C, J. (2004), The Fractural-Mechanical Properties and Durability of lightweight Concrete Using the Synthetic lightweight Aggregate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 1, pp.19-25.

14. Jung, I. H., Lee, J. W., Lee, J. S., Kang, Y. W., Yang, W. J., Lee, W. H. (2007), Performance Evaluation of Punching Shear on Flat Plate Slab-Column Connections Using Eco Lightweight Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 1, pp.227-230.

15. Zhao, Z., Kwon, S. H., Shah, S. P. (2008), Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part 1. Experiments and fracture energy, *Cement and Concrete Research* Vol. 38, pp.1049-1060.

Received : 11/25/2014

Revised : 01/06/2015

Accepted : 06/17/2015

---

**요 지** : 현대의 구조물은 고층화, 대형화 되어가는 추세이다. 보통중량 콘크리트는 강도에 비해 질량이 크기 때문에 구조물의 자중을 증가시킨다는 단점이 있다. 그러므로, 추세에 맞는 콘크리트의 경량화가 필요한 실정이다. 콘크리트의 경량화 방법 중 하나가 경량골재를 사용한 경량골재 콘크리트이다. 하지만, 국내에서는 경량골재 콘크리트에 대한 인식부족으로 인하여 구조용 경량골재 콘크리트에 대한 연구가 부족한 실정이다. 경량골재 콘크리트에 사용되는 경량골재의 품질에 따라 콘크리트의 물성 및 강도에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 보통골재와 경량골재를 사용한 콘크리트를 제작하고 인장균열파괴실험을 통해 하중-CMOD곡선은 얻고, 이를 역해석하여 파괴에너지를 도출하였다.

**핵심용어** : 경량골재 콘크리트, 균열개구변위, 역해석, 파괴에너지

---