

# 동적하중을 받는 콘크리트 보의 파괴거동

## The Fracture Behavior in Concrete Beam Subjected to Dynamic Loading

강성후\* 김 우\*\* 박선준\*\*\*

Kang, Sung Hoo Kim, Woo Park, Sun Joon

### 요 약

본 연구는 정적 및 동적하중 재하상태에서 배합조건을 달리한 콘크리트의 파괴특성을 조사하고자 3점 휨 실험을 실시하였다. 실험은 물-시멘트비를 일정하게 유지한 상태에서 슬럼프 값을 변화시키는 경우와 슬럼프 값을 일정하게 유지하면서 물-시멘트비를 변화시키는 경우로 구분하여 배합비를 달리한 6가지 배합형태의 무근콘크리트 시편 54개를 제작하였다. 실험결과에 의하여 콘크리트의 파괴에너지( $G_f$ )와 특성길이( $l_{ch}$ )를 구한 후 이를 강도특성( $f'_c, f_{sp}, E_c, f_t$ )과의 상관관계를 규명하고 파괴에너지를 이용한 배합설계의 타당성을 검토하였다.

### Abstract

In this study, fracture energy was obtained by acting three-point bend test recommend by RILEM Committee 50-FMC. Six concrete mixtures were studied : for instance when varying the water-to-cement ratio, the slump value should be kept constant and vice versa. This investigation involves the static loading test and the dynamic loading test with the constant amplitude. Using test results, fracture energy and characteristic length of concrete was obtained, and then the relation between those and all kind of strengths( $f'_c, f_{sp}, E_c, f_t$ ) was studied.

**Keywords :** fracture energy, characteristic length, concrete, water-to-cement ratio, strength, static loading, dynamic loading.

### 1. 서 론

콘크리트의 파괴거동은 균열선단에서의 응력 및 변형도의 분포를 고려하여 파괴역학 개념을 이용해 규명할 수 있다. 특히 동적하중하에서 콘크리트 보의 파괴거동은 하중의 조건, 진폭의 변화 등이 다양하여 명확한 파괴규준이 설정되지 못하

고 있다. Hillerborg<sup>1)</sup>는 파괴역학을 이용하여 콘크리트 구조물의 파괴거동을 규명하기 위하여 파괴에너지( $G_f$ )를 구하는 방법을 제시하였다.

Kang and Monteiro 등은<sup>3)</sup> 재령 28일인 습윤양생 무근 콘크리트를 정적 재하 조건하에서 압축강도( $f'_c$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고, 파괴에너지( $G_f$ )를 구하고 상호간의 역학적 특성을 규명하여 효과적

\* 정회원, 동신대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*\* 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*\*\* 동신대학교 대학원 토목공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

인 콘크리트 배합 설계도(mix design diagram)를 제안하였다.

본 연구는 정적 및 동적하중 재하상태에서 배합 조건을 달리한 콘크리트의 파괴특성을 조사하고자 3점 휨 실험을 실시하였다. 파괴에너지( $G_f$ )를 계산하기 위한 방법으로 RILEM 50-FMC 위원회에서 제정한 파괴에너지( $G_f$ ) 실험법<sup>2)</sup>을 채택하였다. 실험을 위한 콘크리트 시편의 배합은 물-시멘트비를 0.5로 일정하게 유지시킨 상태에서 슬럼프값을 변화시키는 경우와 반대로 슬럼프값을 일정하게 유지시킨 상태에서 물-시멘트비를 변화시키는 경우로 구분하였다. 실험에 사용된 재령이 80일인 시편은 파괴에너지( $G_f$ )와 휨강도( $f_f$ )를 얻기 위한 초기 균열( $a_0=5\text{cm}$ )을 가진 단순보 시편( $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 84\text{cm}$ )과 강도특성( $f'_c, f_{sp}, E_c$ )을 얻기 위한 원통형 공시체( $10\text{cm}\times 20\text{cm}$ )를 사용하였다.<sup>(1,2,3,4)</sup> 하중재하 조건은 정적하중과 일정진폭을 가진 동적하중으로 구분하였다.<sup>5)</sup> 실험의 결과를 이용하여 콘크리트의 파괴에너지( $G_f$ )와 특성길이( $l_{ch}$ )를 구한 후 이를 강도특성( $f'_c, f_{sp}, E_c, f_f$ )과 비교하여 상관관계를 규명하고 파괴에너지( $G_f$ )를 이용한 배합설계의 타당성을 검토하였다.<sup>6)</sup>

## 2. 기초이론

### 2.1 파괴에너지( $G_f$ )

초기노치를 가진 시편이 파괴될 때까지 가해진 하중은 에너지 전체를 방출시키는데 사용된다. 균열이 발생하는데 필요한 에너지의 양을 파괴에너지라 정의하며  $G_f$ 로 표기한다.<sup>1,2)</sup> 흡수된 총 에너지의 합(시편의 자중에 의해 발생된 에너지 포함)을  $W_f$ 라 하면, 파괴에너지( $G_f$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 1).

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

여기서  $A_{lig}$ : 인장력을 받는 면적 $\{b(d-a_0)\}$  (Fig.2)

$$W_f: W_0 + W_1 + W_2$$

$W_0$ 는 외력에 의해서 발생하는 에너지로서

$$W_0 = \int_0^{\delta_0} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

$W_1$ 은 외력이 "0"이 될 때 보의 자중에 의해서 발생하는 에너지이다.

$$W_1 = \frac{1}{2} mg\delta_0 \quad (3)$$

Hillerborg<sup>1)</sup>는 보의 자중이 없을 경우 처짐이 무한히 계속된다고 가정하고 여기에서 발생하는 에너지를  $W_2$ 로 정의하였다. 먼저 Fig. 1에서  $W_1=1/2mg\delta_0=F_0\delta_0$ ,  $\delta_0$  이후의 하중-처짐곡선  $F(\delta)=c/\delta^2$ 라고 하면

$$W_2 = \int_{\delta_0}^{\infty} F(\delta)d\delta = \frac{c}{\delta_0} = \frac{c}{\delta_0^2} \cdot \delta_0 = F_0$$

$$\delta_0 = \frac{1}{2} mg\delta_0$$

$$\therefore W_2 = W_1 = \frac{1}{2} mg\delta_0 \quad (4)$$

따라서 파괴에너지( $G_f$ )는 다음과 같이 된다.

$$G_f = \frac{1}{b(d-a_0)} \left\{ \int_0^{\delta} F(\delta)d\delta + mg\delta_0 \right\} \quad (5)$$

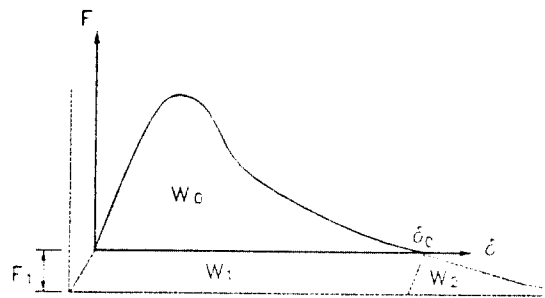


Fig. 1 Load-deflection curve(three-point bend test)

### 2.2 특성길이( $l_{ch}$ )

콘크리트가 가지고 있는 취성은 파괴역학을 통해 그 크기를 측정할 수 있다. 비선형 파괴모델의

거의 대부분에서 재료의 취성은 구조물 혹은 시편의 치수와 파괴진행대의 변형에 영향을 받는 인자들과 관련지을 수 있다. Hillerborg<sup>1)</sup>는 특성길이( $l_{ch}$ )를 다음과 같은 식을 이용하여 나타내었다.

$$l_{ch} = \frac{E_c G_f}{f_{sp}^2} \quad (6)$$

콘크리트에 있어서 특성길이( $l_{ch}$ )가 작아지면 작아질 수록 재료는 더 취성적 성질을 갖는다. 또한 Fig. 1의 곡선 기울기가 급할수록 더 취성적인 성질을 가진 재료로 판단할 수 있다.<sup>(1,2,3)</sup>

### 3. 실험재료 및 방법

#### 3.1 재료 및 시편

배합설계에 사용된 각 재료에 대한 품질시험값은 Table 1과 같다. 3점 휨 시험에 사용된 시편의 치수와 지지조건을 Fig. 2에 나타내었다. 굵은 골재는 전남 나주지역 석산에서 생산된 쇠석골재이고 잔골재는 전남 나주시 영산강 유역에서 채취한 강모래이다.

Table 1 Material properties

property type	specific gravity	agg. size (mm)	F.M	unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	water absorption (%)	reference
coarse agg. (A)	2.58	9.5	6.74	17.26	0.34	((B+C)/(A+B+C)) = 0.58(constant)
fine agg. (B)	2.46	-	2.63	16.37	1.45	
cement (C)	3.15	portland cement				

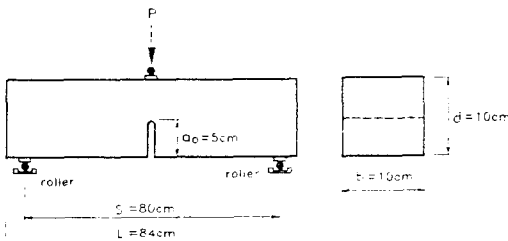


Fig. 2 Testing configuration and geometry of specimen

모든 배합은 중량배합으로 이루어졌으며 제작된 시편은 탈형을 위하여 1일간 기건 양생후 80일간 15로 수중양생을 하였다. 6가지의 다른 형태로 배합한 배합설계표는 Table 2와 같다.

Table 2 Mixture proportions for fresh concrete

(unit : kN/m<sup>3</sup>)

Mix. type	cement	water	fine agg.	coarse agg.	entrapped air(%)	m	w/c ratio	slump (cm)	unit weight
Mix.1	4.68	1.92	7.50	8.84	0.09	3.49	0.41	5±1	22.92
Mix.2	3.90	1.95	8.49	9.02	0.76	4.49	0.50	5±1	23.18
Mix.3	3.22	1.94	9.10	8.96	0.63	5.59	0.60	5±1	23.08
Mix.4	3.00	1.94	9.56	8.93	0.51	6.69	0.70	5±1	23.08
Mix.5	3.03	1.50	10.03	9.42	0.57	6.50	0.50	<1	23.80
Mix.6	4.74	2.37	7.07	8.58	0.65	3.30	0.50	20±3	22.61

• m = (coarse agg. + fine agg.) / cement

#### 3.2 실험방법

모든 보의 실험은 변위제어실험으로 실시하였고, 하중재하장치는 25 ton 용량의 구조용피로시험기(Servo-hydraulic fatigue test machine : Instron 社, U.S.A)를 사용하였다. 파괴에너지( $G_f$ )의 실험은 RILEM 50-FMC 위원회에서 제정한 파괴에너지( $G_f$ ) 결정 실험법<sup>2)</sup>에 의거하여 얻어진 하중과 변위곡선의 면적을 구한 후 파괴에너지( $G_f$ )를 결정하였다.

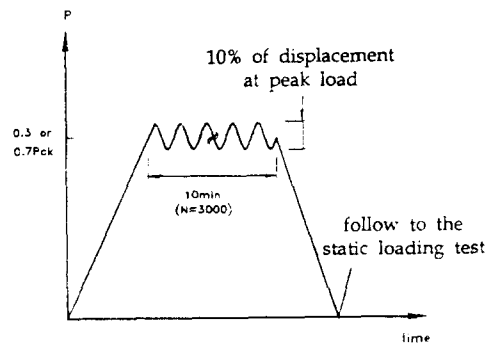


Fig. 3 Loading history(dynamic loading test)

동적재하실험은 먼저 실시한 정적재하실험에서 얻어진 최대하중의 70%와 30% 까지를 미리 재하시킨후 최대하중이 작용할 때까지 발생한 변위의

±5%를 동적변위로하여 300cpm의 Sine파로 10분 동안 총 3000회의 반복하중을 가하였다. 그 다음은 정적재하실험과 동일하게 실험을 실시하였다. 압축강도( $f_c$ )는 KS F 2405, 인장강도( $f_{sp}$ )는 KS F 2423의 기준에 의거 실험하였으며, 탄성계수( $E_c$ )는 공시체에 콘크리트용 strain gauge를 부착한 후 정적변형을 측정장치(System 4000 : M/M社, U.S.A)를 사용하여 구하였다. 휨강도( $f_f$ )는 3점 휨실험에서 얻어진 최대하중을 사용하여 계산하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

이와같이 실험을 통하여 얻은 콘크리트의 압축강도( $f_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ), 휨강도( $f_f$ ), 파괴에너지( $G_f$ ) 그리고 특성길이( $l_{ch}$ )는 Table 3과 같다.

##### 4.1 파괴에너지( $G_f$ )와 강도특성( $f_c, f_{sp}, E_c, f_f$ )과의 관계

Fig. 4~Fig. 7은 콘크리트의 파괴에너지( $G_f$ )와 강도특성( $f_c, f_{sp}, E_c, f_f$ )과의 관계로서 압축강도( $f_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고 휨강도( $f_f$ )가 증가됨에 따라 파괴에너지( $G_f$ ) 또한 증가하는 상관관계를 보이고 있다. 정적재하 실험의 경우 파괴에너지( $G_f$ )와 압축강도( $f_c$ )의 관계는 재령 28일인 시편에 대하여 CEB-FIP Model Code 1990의 제안식에 의하면 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$G_f = G_{f0}(f_c / f_0)^{0.7} \quad (7)$$

여기서  $G_{f0} = 30 \text{ N/m}$ ,  $f_0 = 10 \text{ MPa}$ 이다.

위의 제안식의 값과 본 연구의 실험결과를 비교한 결과 본 연구에서 얻은 파괴에너지( $G_f$ )의 값이 (7)식의 결과보다 다소 크게 나타났다. 이러한 이유는 (7)식에 대한 표본의 양생기간이 28일인 반면 본 연구에 사용된 시편의 재령이 80일일 뿐만 아니라, 시편의 치수의 크기, 양생방법 그리고 골

재의 물리적 특성에 기인한 것으로 추정된다. 또한 동적해석 결과는 아직까지 연구결과가 비교하기가 어려운 실정이므로 생략한다.

동적하중을 재하한 경우에는 정적하중을 재하한 경우보다 강도증가에 대한 파괴에너지( $G_f$ )의 증가율이 더 둔화됨을 본 실험결과로 알 수 있었다. 이러한 현상은 일단 반복하중에 의해서 손상을 입은 콘크리트 구조물이나 시편은 파괴에 대한 저항력이 어느정도 감소됨을 의미한다. 특히 파괴에너지( $G_f$ )와 휨강도( $f_f$ )의 관계에 대한 비교는 정적실험의 경우 회귀곡선의 신뢰가 높은 반면 동적실험은 먼저 실시한 정적재하실험에서 얻어진 최대하중의 70%와 30% 까지를 미리 재하시킨후 최대하중이 작용할 때까지 발생한 변위의 ±5%를 동적변위로하여 300cpm의 sine파로 10분 동안 총 3000회의 반복하중을 가한후 다시 reloading한 후에 얻어진 실험 결과로 파괴에너지( $G_f$ )와 휨강도( $f_f$ )를 구하였으므로 정적실험 결과보다 상대적으로 값이 적으므로 한쪽으로 치우쳐 있어 다소 신뢰성이 결여되었다. 또한 동적하중을 재하한 경우가 정적하중 재하시의 경우보다 결과치가 분산되었다.

Table 3 Test result values( $f_c, f_{sp}, E_c, f_f, G_f, l_{ch}$ )

Mix. type		$f_c$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$f_f$ (MPa)	$G_f$ (N/m)	$l_{ch}$ (mm)
Mix.1	static	31.70	3.38	26.80	4.32	124.33	292.08
	dy.(30%)				2.90	91.07	213.96
	dy.(70%)				2.44	79.84	187.56
Mix.2	static	28.23	3.10	26.14	3.60	115.44	314.02
	dy.(30%)				2.63	83.50	227.12
	dy.(70%)				2.34	66.84	181.80
Mix.3	static	24.59	2.71	24.34	2.67	94.15	312.02
	dy.(30%)				2.18	80.69	267.41
	dy.(70%)				1.97	71.08	235.58
Mix.4	static	19.65	2.52	22.78	2.51	88.92	318.97
	dy.(30%)				2.27	74.97	268.93
	dy.(70%)				2.07	63.99	229.56
Mix.5	static	28.70	2.87	26.90	3.65	108.26	353.55
	dy.(30%)				3.03	77.94	254.54
	dy.(70%)				2.55	68.01	222.11
Mix.6	static	27.58	2.95	25.55	2.98	109.69	322.06
	dy.(30%)				2.73	96.95	284.65
	dy.(70%)				2.30	87.02	255.50

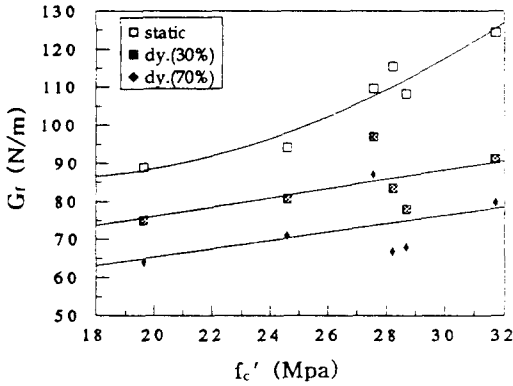


Fig. 4 Relationship between fracture energy( $G_r$ ) and compressive strength( $f_c$ )

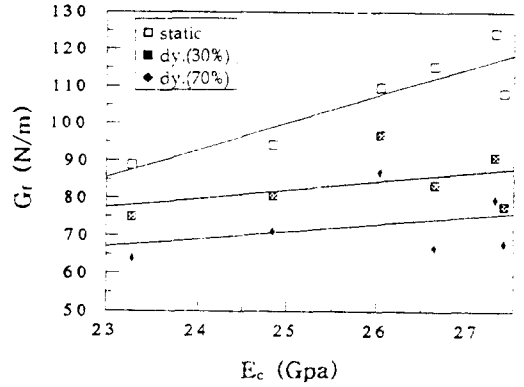


Fig. 6 Relationship between fracture energy( $G_r$ ) and modulus of elasticity( $E_c$ )

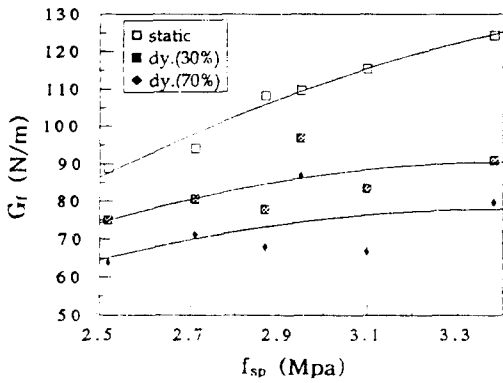


Fig. 5 Relationship between fracture energy( $G_r$ ) and tensile strength( $f_{sp}$ )

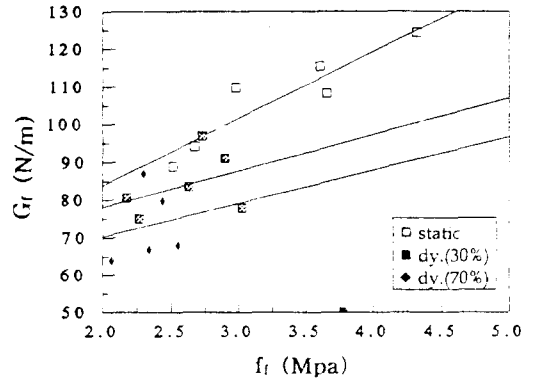


Fig. 7 Relationship between fracture energy( $G_r$ ) and flexural strength( $f_i$ )

#### 4.2 특성길이( $l_{ch}$ )와 강도특성( $f_c, f_{sp}, E_c, f_i$ )과의 관계

Fig. 8~Fig. 11에서는 특성길이( $l_{ch}$ )와 콘크리트의 압축강도( $f_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고 휨강도( $f_i$ )와의 상관관계를 나타내었다. 콘크리트의 압축강도( $f_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고 휨강도( $f_i$ )가 증가될 수록 특성길이( $l_{ch}$ )는 감소하는 경향을 보이고 있다. 정적재하 실험의 경우 특성길이( $l_{ch}$ )와 압축강도( $f_c$ )의 관계는 재령 28일인 시편에 대하여 CEB-FIP Model Code 1990의 제안식에 의하면 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$l_{ch} = l_{ch,0} (f_c / f_0)^{-0.3} \quad (8)$$

여기서  $l_{ch,0} = 300 \text{ mm}$ ,  $f_0 = 10 \text{ MPa}$  이다.

위의 제안식의 값과 본 연구의 실험결과를 비교한 결과 본 연구에서 얻은 특성길이( $l_{ch}$ )값은 이 (8)식의 결과보다는 다소 작으나 유사한 경향의 값을 나타냈다. 동적하중을 재하한 경우에는 정적하중을 재하한 경우보다 강도증가에 대한 특성길이( $l_{ch}$ )의 감소율이 더 크게 나타났다. 이것은 강도증가에 의한 취성의 증가로 인해 특성길이( $l_{ch}$ )가 감소하고, 반복하중에 의해 1차적으로 손상을 입

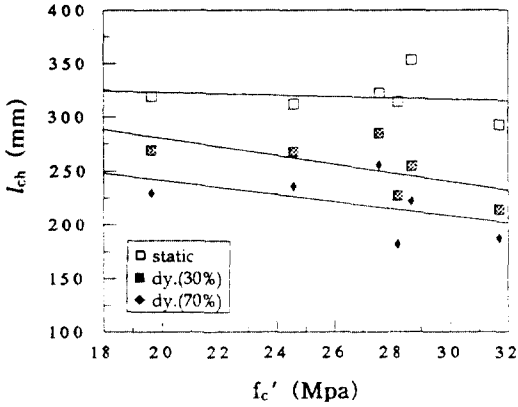


Fig. 8 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and compressive strength( $f_c$ )

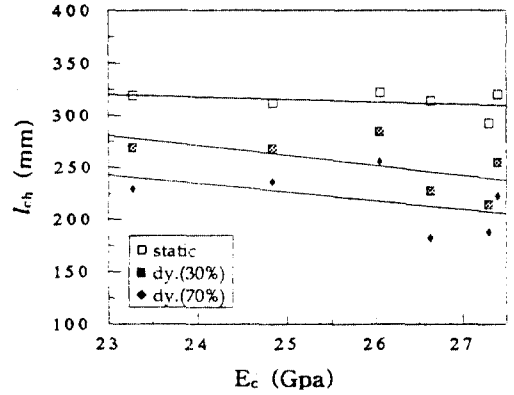


Fig. 10 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and modulus of elasticity( $E_c$ )

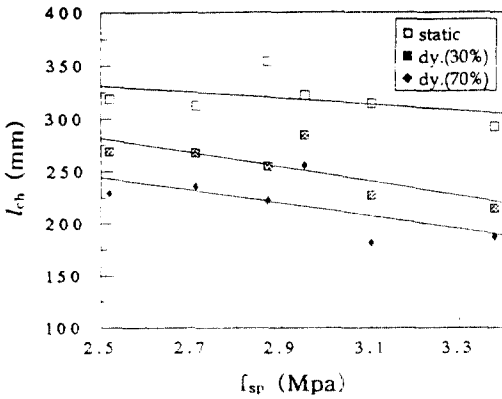


Fig. 9 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and tensile strength( $f_{sp}$ )

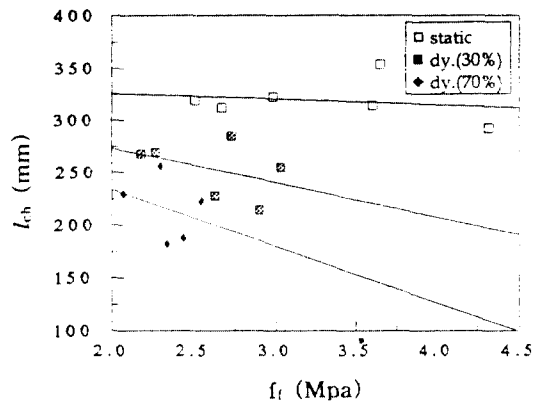


Fig. 11 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and flexural strength( $f_r$ )

은 콘크리트의 구조물이나 시편내부의 저항력이 어느 정도 손실되어 파괴에 대한 저항력이 감소되었음을 의미하고 있다. 또한 특성길이( $l_{ch}$ )와 휨강도( $f_r$ )의 관계에 대한 비교는 정적실험의 경우 회귀곡선의 신뢰가 높은 반면 동적실험은 먼저 실시한 정적재하실험에서 얻어진 최대하중의 70%와 30% 까지를 미리 재하시킨후 최대하중이 작용할 때까지 발생한 변위의  $\pm 5\%$ 를 동적변위로하여 300cpm의 sine파로 10분 동안 총 3000회의 반복하중을 가한후 다시 reloading한 후에 얻어진 실험결과로 특성길이와 휨강도를 구하였으므로 정적실험 결과보다 상대적으로 값이 적으므로 한쪽으로 치우쳐 있어 다소 신뢰성이 결여되었다.

### 4.3 파괴에너지( $G_f$ )에 대한 배합인자(m 및 시멘트량)의 영향

Fig. 12는 m(시멘트량에 대한 골재의 혼합비율)이 증가되면 파괴에너지( $G_f$ )는 감소하였다. 이러한 결과는 정적 및 동적하중을 재하한 모든 경우에 대해서 유사하게 나타났다. 따라서 시멘트량에 대한 골재의 혼합비율이 높아지면 파괴에 대한 저항성은 더 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 13에서는 시멘트량의 증가는 강도의 향상과 더불어 파괴에너지( $G_f$ ) 값이 증가되는 결과를 나타내고 있다. Fig. 12와 Fig. 13은 슬럼프 값을 일정하게 유지하면서 물-시멘트비를 변화시키는

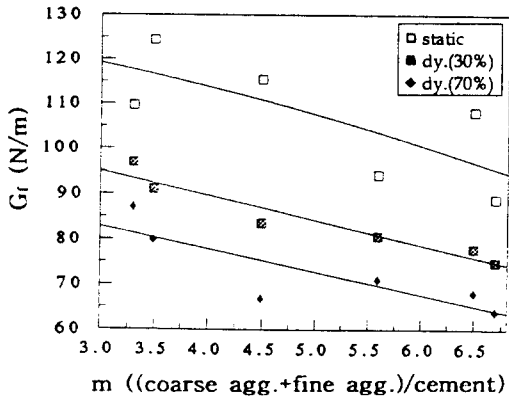


Fig. 12 Relationship between fracture energy( $G_f$ ) and  $m$  (aggregate/ cement)

배합형태(Mix.1, Mix.2, Mix.3, Mix.4)와 물-시멘트비를 일정하게 유지한 상태에서 슬럼프 값을 변화시키는 배합형태(Mix.2, Mix.5, Mix.6)로 구분하여 비교한 경우에도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4.4 특성길이( $l_{ch}$ )에 대한 배합인자( $m$ 및 시멘트량)의 영향

Fig. 14는  $m$ (시멘트량에 대한 골재의 혼합비율)이 증가해 감에 따라 특성길이( $l_{ch}$ )도 증가해 가는 것을 보여주고 있다. 정적하중을 가하여 얻은 결과와 동적하중을 가하여 얻은 결과 모두 동일한 경향을 보이고 있다.  $m$ 이 증가되면 특성길이

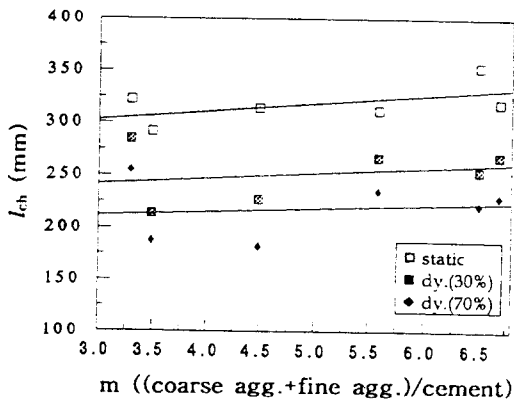


Fig. 14 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and  $m$ (aggrgate/ cement)

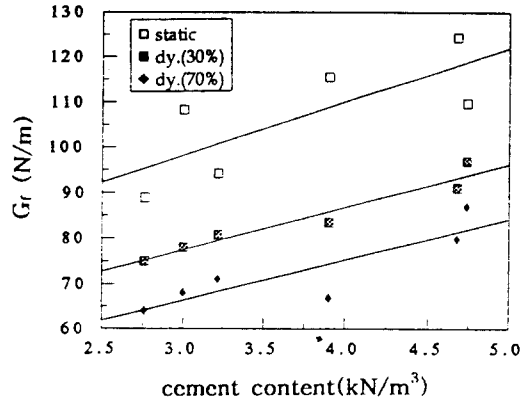


Fig. 13 Relationship between fracture energy( $G_f$ ) and cement content

( $l_{ch}$ )도 증가해 어느 정도의 취성을 억제하는 역할을 하는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 특성길이( $l_{ch}$ )와 시멘트량과의 관계를 나타내고 있다. 콘크리트의 배합에 있어서 시멘트량의 증가는 파괴에너지( $G_f$ )를 어느정도 증가시키기는 하지만 특성길이( $l_{ch}$ )를 감소시켜 보다 더 취성적인 성질을 갖게 하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구는 정적 및 동적 하중을 받는 콘크리트 배합설계시 일정한 슬럼프값의 조건하에서 물-시멘트비를 변화시키는 경우와 일정한 물-시멘트비의 조건하에서 슬럼프값을 변화시킨 경우에 대해

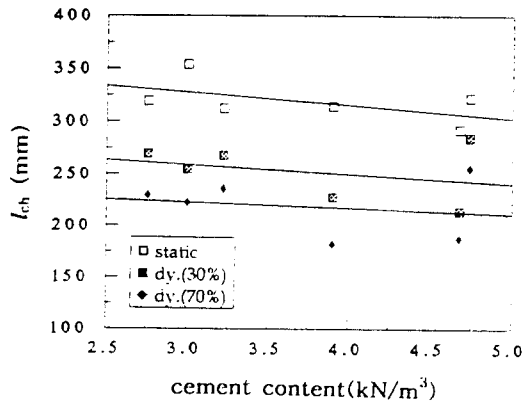


Fig. 15 Relationship between characteristic length( $l_{ch}$ ) and cement content

콘크리트의 파괴거동 및 파괴에너지( $G_f$ )를 이용한 배합설계의 타당성을 연구하였다. 본 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트의 압축강도( $f'_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고 휨강도( $f_f$ )가 증가됨에 따라 파괴에너지( $G_f$ ) 역시 증가하였다. 동적하중을 재하한 경우에는 정적하중을 재하한 경우보다 강도증가에 대한 파괴에너지( $G_f$ )의 증가율이 더 둔화되는 것으로 나타났다. 일단 외부하중에 의해서 손상을 입은 콘크리트 구조물이나 시편은 파괴에 대한 저항력이 감소됨을 알 수 있었다.
- 2) 콘크리트의 압축강도( $f'_c$ ), 인장강도( $f_{sp}$ ), 탄성계수( $E_c$ ) 그리고 휨강도( $f_f$ )가 증가될수록 특성길이( $l_{ch}$ )는 감소하였다. 따라서 강도증가에 의한 취성의 증가로 인해 특성길이( $l_{ch}$ )는 감소하고, 반복하중에 의해 1차적으로 손상을 입은 콘크리트의 구조물이나 시편은 내부의 저항력이 어느 정도 손실되어 파괴에 대한 저항력이 감소됨을 알 수 있었다.
- 3)  $m$ (시멘트량에 대한 골재의 혼합비율)의 증가는 파괴에 대한 저항성을 감소시키고 특성길이( $l_{ch}$ )를 증가시켜 취성을 억제하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 정적 및 동적하중을 재하시킨 하중조건에 대해서 모두 유사하게 나타났다.
- 4) 시멘트량의 증가는 강도의 향상과 더불어 파괴에너지( $G_f$ ) 값을 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 특성길이( $l_{ch}$ )를 감소시켜 더 취성적인 성질을 갖게 하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 1993년 한국과학재단의 목적기초연구사업(핵심전문과제 : KOSEF 931-1200-082-2) 연구비로 수행된 일부 연구로서 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Hillerborg, A., "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy  $G_f$  of concrete", Materials and structures, Vol.18, No. 106, 1985, pp. 291-296.
2. RILEM 50-FMC Committee, "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams Draft Recommendation", Materials and structures, Vol.18, No.106, 1985, pp. 285-290.
3. Kang, S.H., Monteiro, P.J.M., and Helene, P. R.L., "Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy", Materials and structures, Vol.26, No.162, pp. 443-452, 1993.
4. Javier Malvar, L., and Warren, George E., "Fracture energy for three-point bend test on single edge notched beams : Proposed evaluation", Materials and structures, Vol. 20, 1987, pp. 440-447.
5. 강성후, "동적하중하에서 배합비를 달리한 콘크리트의 균열성장예측", 전남대학교 대학원 박사학위논문, 1989.
6. Bazant, Z.P., and Cedolin, L., "Fracture mechanics of concrete", Journal of Engineering Mechanics Div., Vol.106, No. EM6, December, 1980, pp. 1247-1306.
7. Hillerborg, A., "Concrete fracture energy test performed by 9 laboratories according to a Draft RILEM Recommendation", Report No. TVBM-3015, Lund, Sweden, 1983.
8. 강성후, 김 우, 박선준, "동적하중을 받는 콘크리트보의 파괴거동", 봄 학술발표회, 한국콘크리트학회, 제7권 1호, 1995.5.13, pp. 257-262.
9. Müller, H.S., Hilsdrff, H. K., "Constitutive relations for structural concrete in CEB-FIP Model Code 1990", CEB, 1990.

(접수일자 : 1995. 12. 22)