

# 콘크리트의破壊에너지 결정을 위한 修正試驗方法

## A Modified Test Method for Determining the Fracture Energy of Concrete

文 濟 吉\* · 金 瑩 俊\*\*  
Moon, Je Kil · Kim, Young Jun

### Abstract

RILEM proposed three point bend test to determine the fracture energy of concrete, but there is discrepancy between the theoretical and the experimental fracture energy of concrete by the influence of self-weight of concrete. This paper presents four point bend test using proving ring in order to take into account the influence of self-weight of concrete. The initial notch to beam depth ratio was varied from 0.2 to 0.6 in order to investigate the variation of fracture energy of concrete according to the variation of initial notch depth. The proposed four point bend test using proving ring was verified to be superior to three point bend test.

### 要 旨

RILEM에서는 콘크리트의 파괴에너지를 결정하기 위하여 3점휨시험 방법을 제시하였으나, 콘크리트의 자중의 영향으로 인하여 이론치와 실험치가 잘 일치하지 않는 경향이 있다. 본연구에서는 콘크리트의 자중의 영향을 고려하기 위하여 완전탄성체지대로서 proving ring을 이용한 4점휨시험을 제시하였으며, 인조균열길이의 변화에 따른 콘크리트의 파괴에너지 변화를 알아보기 위하여 보의 높이에 대한 인조균열길이의 비를 0.2부터 0.6까지 변화시켜 실험을 실시하였다. 본 연구에서 제안된 4점휨 시험을 통하여 콘크리트의 파괴거동을 보다 쉽게 파악할 수 있었으며, 4점휨시험이 3점휨시험보다 파괴역학이론에 잘 들어맞는 것을 알 수 있었다.

### 1. 序 論

콘크리트의 引張強度는 콘크리트의 性質로 인하여 直接引張強度試驗이 불가능하고 또, 間接引張強度試驗인 割裂引張強度試驗에 의하여 구한 引張強

度는 壓縮強度에 비하여 매우 작고 收斂性도 낮다. 그리하여 콘크리트의 引張強度는 휨強度 設計 때에는 무시하고 있는 반면에, 剪斷強度 設計에는 默示의으로 인정하고 있는 실정이다.

\* 正會員 · 建國大學校 教授

\*\* 正會員 · 建國大學校 大學院 博士課程

더구나 引張應力을 받는 콘크리트의 경우, 微細龜裂이 충분히 발달한 후, 主龜裂이 발생하여 破斷에 이르므로 強度概念 만으로는 破壞舉動을 충분히 설명할 수가 없으므로 破壞力學을 적용시켜 해석함이 합리적이다.

그러나 破壞力學이란 Griffith<sup>(1)</sup>가 線形彈性的인 舉動을 하는 材料에 적용시킨 線形彈性破壞力學 (Linear Elastic Fracture Mechanics)의 理論을 기초로 하여, 剪斷破壞 (Shear Fracture)의 형태에 가까운 破壞舉動을 일으키는 金屬에 알맞게 변형시킨 것으로서, 破壞에 이르는 樣相이 金屬의 경우와 다른 콘크리트에 破壞因子를 직접 적용시켜 콘크리트의 破壞舉動을 糾明한다는 것은 쉽지 않다. 특히 金屬은 龜裂이 성장할 때 塑性領域 (Plastic Zone)이 작고 균열끝이 예리하여 破壞因子를 구하는데 필수적인 균열의 성장 길이를 정확하게 측정하거나 예측할 수 있는데 반하여, 콘크리트는 龜裂進行帶 (Fracture Process Zone)가 크고, 더우기 微細龜裂과 主龜裂의 혼동으로 인하여 정확한 균열길이를 측정하거나 예측하기가 어렵다.

그러나 1980년 이후 Hillerborg<sup>(2)</sup>가 가상균열모델 (Fictitious Crack Model)을 Bazant<sup>(3)</sup>가 균열띠모델 (Crack Band Model)을 각각 제시하여 콘크리트의 破壞舉動을 설명하고, 나아가 콘크리트의 破壞韌性を 나타내는 파괴에너지를 구하는 公式를 제시하였다. 특히 RILEM위원회는 Hillerborg가 제시한 3점휨시험 (2등분점 휨시험)에 의한 파괴에너지를 확정<sup>(4)</sup>, 발표하기에 이르러 많은 사람들이 이 理論에 따라 實驗을 해보았으나 시편의 크기 및 무게, 굽은 골재 최대치수, 시험기의 강성 등의 제한에도 불구하고 콘크리트의 自重의 영향으로 인하여 정확한 파괴에너지를 구할 수가 없었다.<sup>(4, 5)</sup>

이에 따라 본 논문에서는 3점휨시험을 통한 破壞에너지의 결정에 대한 補完策으로, 먼저 에너지概念을 정립하고, 나아가 에너지平衡概念에 따라 完全彈性體를 이용한 4점휨시험 (3등분점 휨시험)을 통하여 自重의 영향으로 인하여 발생하는 에너지를 포함한 破壞에너지 결정에 관한 試驗方法을 제시하고, 실험을 통하여 3점휨시험과 완전탄성체를 이용한 4점휨시험에 의한 파괴에너지를 각각 구하여 비교하고자 한다.

그리고 본 논문에서는 치수효과 (Size Effect)로

인하여 시편의 크기가 破壞에너지에 미치는 영향은 排除하고 있다.

## 2. 콘크리트의 破壞舉動

콘크리트에는 外部에서 荷重을 가하지 않더라도 内部에 微細한 龜裂 (Internal Cracks and Flaws)이 內在하고 있는데 콘크리트의 内部에 微細龜裂이 발생하는 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.

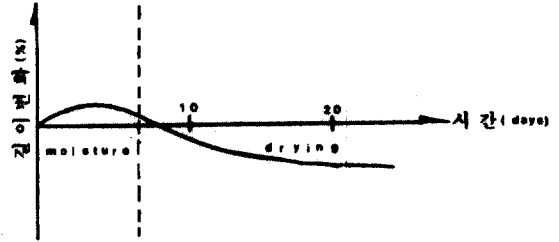


그림 1. 콘크리트의 팽창과 수축

먼저 그림 1에 나타난 바와 같이 시멘트가 물과 水和反應을 일으키는 동안 시멘트水和物의 中間生成物이며 팽창작용을 일으키는 ettringite로 인하여 콘크리트에는 팽창현상이 일어난다. 그러나 水和反應이 계속 진행됨에 따라 ettringite는 최종생성물질인 monosulfo aluminate로 바뀌면서 수축현상이 일어나며, 여기에다 건조수축 (Drying shrinkage)작용까지 동반하게 되어 결국에는 水和反應이 진행되는 동안 콘크리트는 팽창과 수축과정을 겪게된다. 그리고 시멘트와 물과의 水和反應으로 인하여 水和熱도 발생하게 된다.

水和反應이 진행되는 동안 발생하는 팽창, 수축현상과 水和熱은 재료분리현상인 블리딩에 의해 주로 골재 밑부분에 생긴 공극과 그리고 시멘트水和物과 골재의 彈性係數와의 차이 및 열팽창계수와의 차이로 인하여 시멘트水和物과 골재와의 界面에 附着龜裂 (Bond Cracks)을 발생시킨다.

이렇게 콘크리트의 内部에 龜裂이 內在하고 있기 때문에 콘크리트에 壓縮應力을 가하더라도 콘크리트는 그림 2와 같이 應力이 커짐에 따라 이 微細龜裂이 성장하여 마침내 破壞에 이르는 것을 알 수 있다.

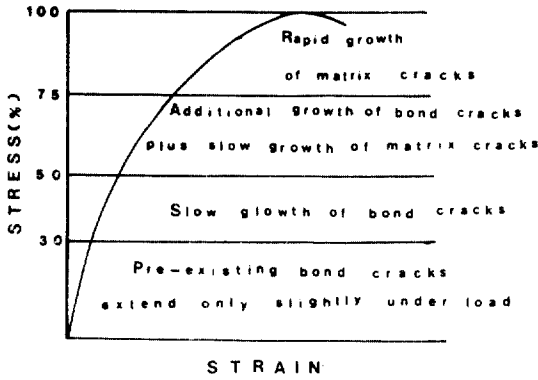


그림 2 콘크리트의 압축응력과 변형율과의 개요도

콘크리트의 破壞舉動을 좀더 자세히 알아보기 위하여 이제 材料的인 측면에서 콘크리트의 舉動을 살펴보기로 한다. 고체재료(이하 재료라고 함)는 일반적으로 原子, 分子, 結晶體 및 骨材로 구성되어 있으며 構成要素 상호간에 結合력이 작용하여 일정한 형태를 유지하고 있다. 이러한 재료에 應力이 가해질 경우 재료에 발생하는 應力이 結合력을 넘어서면, 재료의 破壞가 일어난다.

그리고 재료의 破壞는 그림 3에 나타난 바와 같이 劈開 파괴(Cleavage Fracture)와 剪斷 파괴(Shear Fracture) 들중 어느 하나의 형태로 일어난데, 대표적인 예로 常溫에서 유리의 경우 벽개 파괴가 일어나나 高溫에서 금속에는 전단파괴가 일어난다.

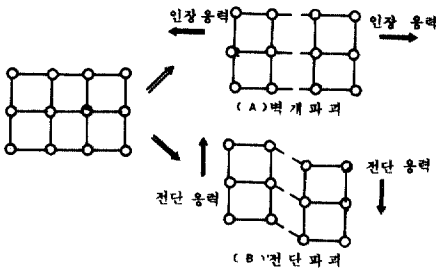


그림 3 재료의 파괴

특히 微細龜裂이 內在하고 있는 콘크리트의 경우 應力의 증가와 더불어 미세균열의 성장이 항상 동반되므로 벽개파괴에 가까운 형태 즉 균열에 의해 破壞가 일어난다고 할 수 있다.

### 3. 理論的 背景

#### 3.1 3점휨시험

Hillerborg를 중심으로 한 RILEM의 소위원회<sup>(2)</sup>에서는 3점휨시험을 통한 콘크리트의 破壞에너지를 다음과 같이 제안하였다. 3점휨시험에서는 안정된 균열성장을 위하여 Servo Controlled Type의 Test machine을 사용하여 보의 처짐속도를 일정하게 한다.

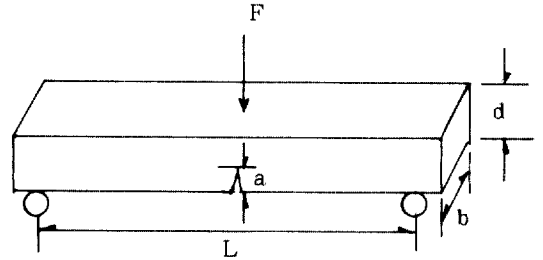


그림 4. 3점휨시험(2등분 재하시험)의 개요도

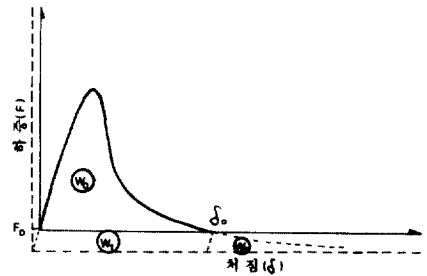


그림 5. 하중-처짐곡선(3점휨시험)

$$G_f = \frac{W_0 + W_1 + W_2}{b(d-a)} \quad (1)$$

여기서  $b$ 는 보의 폭,  $d$ 는 보의 높이,  $a$ 는 초기인조 균열길이,  $G_f$ 는 파괴에너지이며  $W_0$ 는 외력에 의해 발생하는 에너지로서

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

$W_1$ 은 외력이 제로가 될때 보의 自重에 의해 발생하는 에너지로서

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

$W_2$ 는 보의 自重이 없을 경우 처짐이 무한히 계속된다고 가정하여 Hillerborg는 다음과 같이 제안하고 있다.

먼저 그림 5에서  $W_1 = \frac{1}{2}mg\delta_0 = F_0\delta_0$ ,  $\delta_0$ 이 후의 하중-처짐곡선  $F(\delta) = \frac{c}{\delta^2}$ 라고 하면

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{\delta_0} F(\delta) d\delta \\ &= \int_0^{\delta_0} \frac{c}{\delta^2} d\delta \\ &= -\frac{c}{\delta} \Big|_0^{\delta_0} \\ &= F_0\delta_0 \\ &= \frac{1}{2}mg\delta_0 \\ \therefore W_2 &= W_1 = \frac{1}{2}mg\delta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 파괴에너지는 다음과 같이 된다.

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

그러나 실제로 實驗을 통하여 외력이 재료가 되는 처짐  $\delta_0$ 를 쉽게 구할 수 없어, Hillerborg는 自重의 영향으로 인하여 보의 낙하속도가 빨라지기 시작할 때의 처짐량을  $\delta_0$ 로 하는 방법을 제안하고 있으나, 주로 굽은골재의 맞물림현상(Interlocking)으로 인하여 정확한 파괴에너지를 구할 수가 없었다<sup>(4, 5, 6)</sup>.

### 3.2 에너지平衡概念

어떤 物體가 外力를 받아 運動을 할 때 발생하는 總에너지는 항상 일정하다는 것이 에너지平衡概念이다.

$$E_t = E_p + E_m = \text{一定} \quad (6)$$

여기서  $E_t$ 는 총에너지

$E_p$ 는 포텐셜에너지

$E_m$ 은 운동에너지

그리고 물체가 외력을 받아 운동을 할 때 발생되는 포텐셜에너지와 운동에너지는 각각 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} E_p &= \int_{r_1}^{r_2} F(r) dr + mgh \\ E_m &= \frac{1}{2}mv^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서  $r_1, r_2$ 는 물체가 이동을 할 때의 각각의 좌표,  $F(r)$ 은 물체가 이동을 하는 동안의 힘의 변화량,  $m$ 은 물체의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $v$ 는 각 좌표에서의 물체의 이동속도,  $h$ 는 중력가속도 방향으로의 물체이동거리이다. 그런데 실제로 물체가 외력을 받아 이동을 할 때는 손실에너지가 발생하므로 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$E_t = E_p + E_m + E_i = \text{一定} \quad (8)$$

여기서 첨자  $i$ 는 물체가 운동을 할 때의 각 좌표를

나타내며,  $E_i$ 는 손실에너지로서 물체의 운동속도와 관계가 깊다.

### 3.3 완전탄성체를 이용한 4점휨시험

(3등분점 재하시험)

앞에서 살펴본 바와 같이 RILEM에서 추천한 3점휨시험을 통한 파괴에너지는 이론값과 실험값이 매우 큰 차이를 보이고 있어, 여기서는 완전탄성체 지지대를 이용하여 4점휨시험을 통한 파괴에너지를 구하고자 한다.

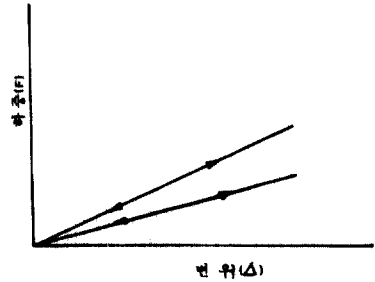


그림 6. 완전탄성체의 하중-변위 곡선

먼저 완전탄성체의 성질로서, 그림 6에 나타난 바와 같이 어떠한 변위속도에서도 하중-변위곡선이 선형적이며 탄성적인 거동을 하여야 한다. 그리고 보가 완전히 둘로 갈라진 이후에도 보의 무게를 지탱할 수 있을 정도의 강성을 가지고 있어야 한다.

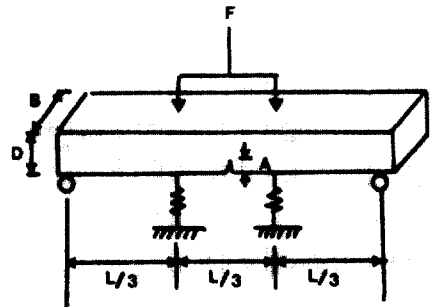


그림 7. 완전탄성체 지지대를 이용한 4점휨시험

완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험의 장점은 첫째, 보가 완전히 둘로 갈라진 이후의 보의 거동은 완전탄성체의 거동과 비슷하므로 보의 중앙점에서의 최종처짐을 쉽게 구할 수 있다. 둘째, 균열의 안정성장, 즉 처짐속도를 보가 완전히 둘로 갈라질 때까지 일정하게 할 수 있다.

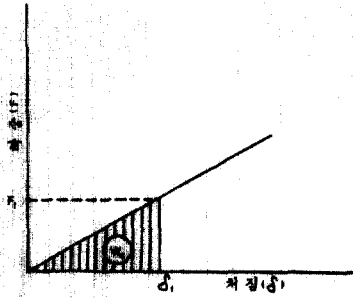


그림 8. 완전탄성체 지지대의 하중-처짐곡선

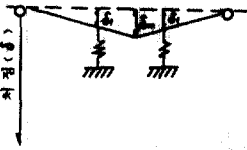


그림 9. 처짐곡선(4점 휨시험)

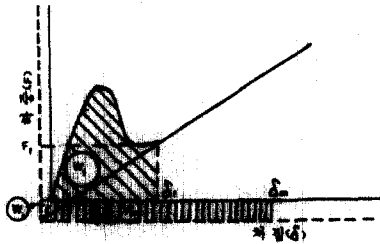


그림 10. 하중-처짐곡선(4점 휨시험)

이제 에너지평형개념에 따라 파괴에너지를 구해보면

$$E_t = E_{v1} + E_{m1} + E_{d1} = E_{v2} + E_{m2} + E_{d2} \quad (9)$$

그런데 물체가 운동을 시작하려고 할때의 운동속도  $v_1$ 이 0이므로 운동에너지  $E_{m1}$ 은 제로가 된다. 또 손실에너지란 물체가 운동을 함으로서 발생하는 에너지이므로  $E_{d1}$  역시 제로가 된다. 그리고 운동을 마치는 위치에서의 이동거리는 0이므로 포텐셜에너지  $E_{p2}$ 도 제로가 되어 결국 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$E_{p1} = E_{m2} + E_{d2} \quad (10)$$

표 1. 콘크리트의 배합

종류	$G_{ras}$ (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				혼화제(유동화제) (g/m <sup>3</sup> )
						W	C	S	G	
A	25	7.2	4.1	53	41.8	159	300	775	1,080	15
B	25	8.1	3.8	38.2	38.9	159	416	685	1,075	208

완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험에 식(10)을 적용시킬 경우 손실에너지  $E_{d2}$ 는 콘크리트의 균열에너지와 완전탄성체의 변형에너지  $W_e$ 로 구성되며 포텐셜에너지  $E_{p1}$ 은 그림 8과 그림 10에 나타난 바와 같이 외력에 의해 발생하는 에너지  $W_1$ 와 자중에 의해 발생하는 에너지  $W_m$ 으로 구성되어 식(10)은 다음과 같이 바뀐다.

$$W_1 + W_m = \frac{1}{2}mv^2 + G_r b(d-a) + W_e \quad (11)$$

그런데 보가 완전히 들로 갈라질 때까지 처짐속도를 일정하게 제어하였으므로 운동에너지  $\frac{1}{2}mv^2$ 은 콘크리트의 균열에너지나 완전탄성체의 변형에너지에 비하여 매우 작으므로 무시해도 관계가 없다. 또 외력이 작용하기 전의 공액에너지  $W_1$ 는  $W_m$ 에 비하여 매우 작으므로  $W_m$ 속에 포함시키기로 한다. 따라서 파괴에너지는 다음과 같이 된다.

$$G_r = \frac{1}{b(d-a)} (W_1 + W_m - W_e) \quad (12)$$

여기서  $W_1 = (\int_0^{\delta_1} F(\delta) d\delta)$

$$W_m = \frac{1}{2}mg\delta_m$$

$$W_e = \frac{1}{2}F_1\delta_1$$

#### 4. 實驗概要

콘크리트의 破壞實驗을 위하여 압축강도 200kg/cm<sup>2</sup>, 슬럼프값 8±1cm의 콘크리트와, 압축강도 300kg/cm<sup>2</sup>, 슬럼프값 8±1cm의 콘크리트를 목표로 각각 배합하였으며 배합표는 표 1과 같다. 압축강도 및 인장강도 시험용 위하여  $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형물트를 사용하여 제조 1일후 시멘트풀로 캡핑하고 하루가 지난후 탈형하여 26일동안 수중양생하였으며, 휨강도 시험용 공시체는 15×15×55cm와 15×15×60cm의 직사각형 물트를 재령 2일후 탈형하여 26일 동안 수중양생하였다.

휨시험용 공시체의 인조균열은 콘크리트 타설전에 두께 2mm의 강판을 설치한 후 파괴시험 직전에 빼내는 방법을 사용하여 만들었으며, 인조균열길이의 변화에 따른 콘크리트의 파괴에너지 변화를 알아 보기 위하여 보의 인조균열과 높이의 비를 0.2, 0.4, 0.6이 되도록 했다.

콘크리트의 인장강도시험은 KS F 2423의 규정에 의하여 활렬인장강도시험을 실시하였으며, 압축강도시험은 KS F 2405의 규정에 의하여 실시하였다.

2등분점 재하시험 및 3등분점 재하시험은 Instron을 이용하여 재하속도(cross head Speed) 0.2mm/min로 실시하였다.

## 5. 實驗結果

4점휨시험에 사용될 완전탄성체지지대로는 사진 1과 같이 Proving Ring을 특별히 제작하였으며, Proving Ring의 하중-처짐곡선은 그림 11에 나타난 바와 같다.

3점휨시험 및 4점휨시험에 따른 하중-처짐곡선은 그림 12와 그림 13에 나타난 바와 같다. 콘크리트의 압축강도 및 인장강도시험에 의한 결과는 표 2에 나타난 바와 같다.

## 6. 實驗結果에 대한 考察

콘크리트의 破壞舉動을 자세히 알아보기 위해 proving ring을 이용한 4점휨시험의 대표적인 하중-처짐곡선을 살펴보기로 하자.

그림 14에 나타난 바와 같이 콘크리트의 破壞는 크게 5단계를 거치는 것을 알 수 있다. 먼저 OA구간에서는 일차적인 주균열의 생성이전에 미세균열의 발생 및 성장이 진행되고 있다. AB구간에서는 일차적인 주균열이 생성되고, BC구간은 이차적인 주균열의 생성이전의 미세균열의 발생 및 성장이 진행되고 있다. CD구간은 2차적인 주균열의 성장을

표 2 콘크리트의 압축강도와 인장강도

종 류	강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	압축강도	인장강도
A	2094	19.04
B	3288	22.04



(a) 3점휨시험(2등분점 재하시험)



(b) 4점휨시험(3등분점 재하시험)

사진 1. 휨시험

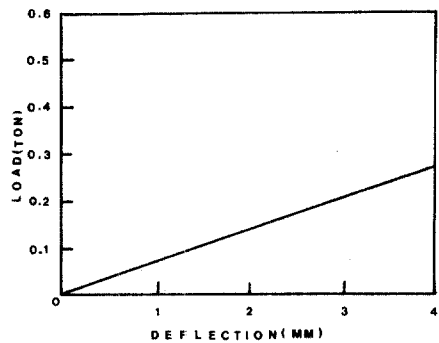
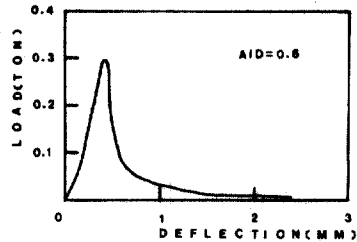
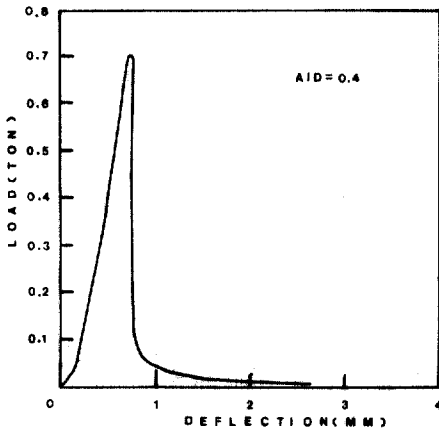
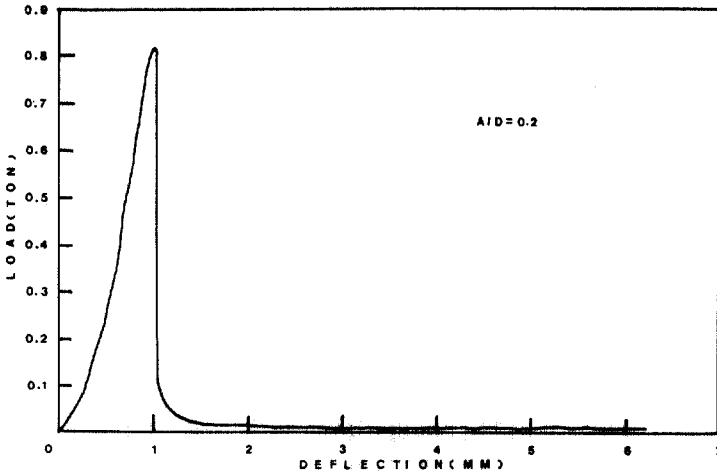
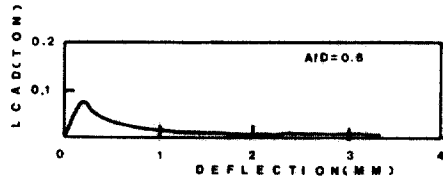
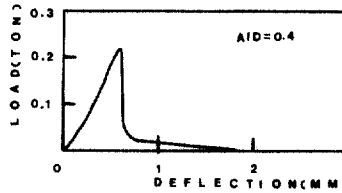
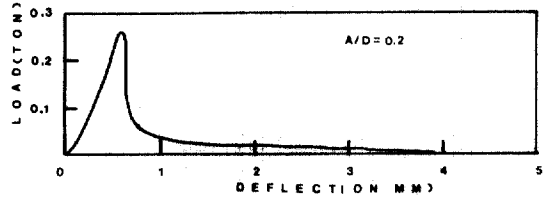


그림 11. 하중-처짐곡선(Proving Ring)



(b) B콘크리트



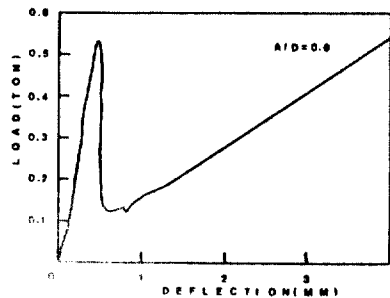
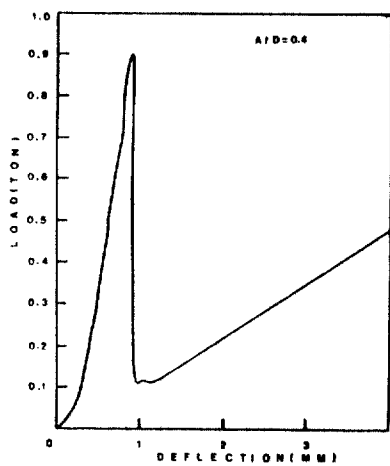
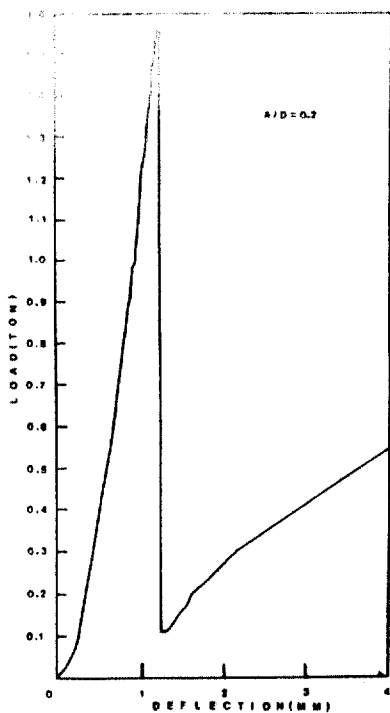
(a) A콘크리트

그림 12 하중-처짐곡선(3점휨시험)

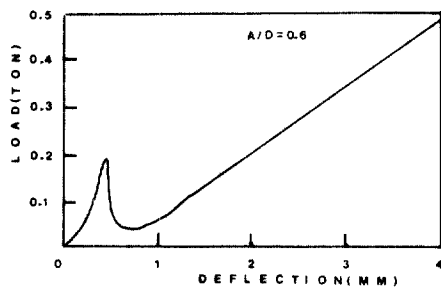
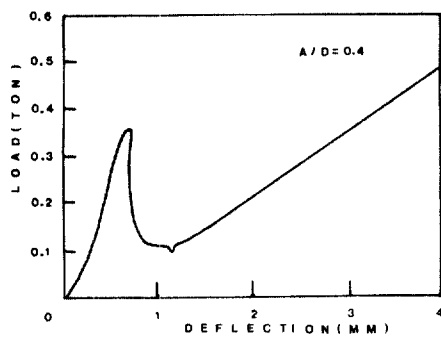
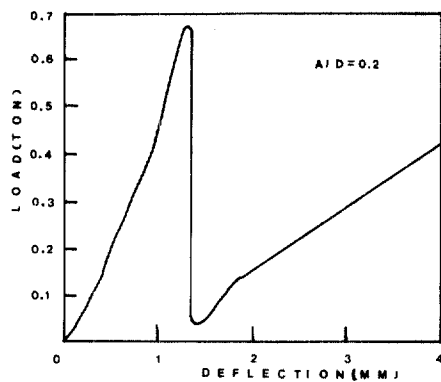
나타내고 있다. 그리고 DE구간에서는 주균열이 완전히 발달된 후 주로 굵은 골재의 맞물림현상(Interlocking)에 의하여 부가적인 에너지방출 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 마지막으로 EF구간은 proving Ring의 하중-처짐곡선으로 귀결된다.

파괴역학이론에 의하면 비선형 파괴거동을 나타내는 재료의 경우 인조균열길이가 증가 함

에 따라 파괴에너지가 작아지며, 적절한 인조균열길이 이후에는 일정한 파괴에너지를 나타낸다고 한다. 그러나 인조균열길이가 너무 클 경우 균열이 성장할 부분이 작아 파괴진행대가 충분히 발달되지 못함으로써 파괴에너지가 작게 된다. 따라서 적절한 인조균열길이를  $a/d=0.5$ 로 제안하고 있다<sup>(3, 7, 8)</sup>.



(b) B콘크리트



(a) A콘크리트

그림 13. 하중-처짐곡선(4점휨시험)



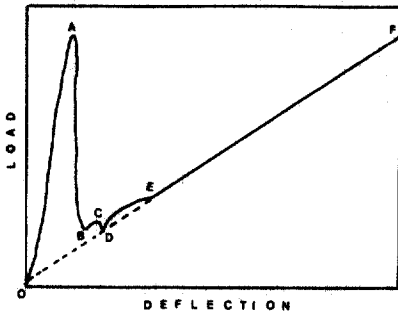
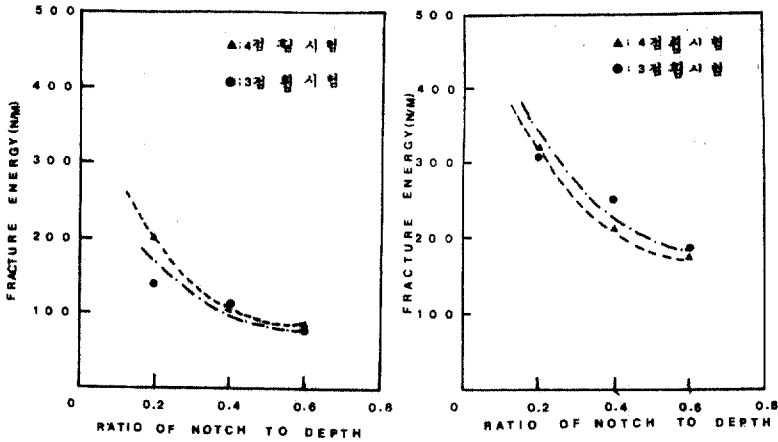


그림 14. 하중-처짐곡선(4점휨시험)

그림 15는 콘크리트의 인조균열길이에 대한 파괴 에너지의 변화를 나타낸 것으로 proving ring을 이용한 4점휨시험이 3점휨시험보다 파괴역학이론에 잘 맞는 것을 알 수 있다.

표 3 콘크리트의 파괴에너지

종류	파괴에너지(N/m)	
	3점휨시험	4점휨시험
A	85	95
B	205	170



(a) A콘크리트

(b) B콘크리트

그림 15. 콘크리트의 인조균열길이에 대한 파괴에너지의 변화

그리고 표 3에 나타난 바와 같이 보의 높이에 대한 인조균열길이의 비가  $a/d=0.5$ 에서 3점휨시험은 4점휨시험보다 A콘크리트의 경우 파괴에너지가 작으나, B콘크리트의 경우에는 크게 나타났다.

## 7. 結 論

RILEM에서 제안한 3점휨시험을 통한 콘크리트의破壊에너지는 自重의 영향으로 인하여 이론치와 실험치에 상당한 차이가 생기기 때문에 자중의 영향을 제거하기 위하여 완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험법을 고안하였으며, 실험을 통하여 3점휨시험과 4점휨시험에 의한 콘크리트의 파괴에너지를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험은 3점휨시험보다 파괴역학 이론에 잘 들어맞는 것을 알

수 있었다.

2. 완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험에 의하여 콘크리트의 파괴거동을 보다 자세히 파악할 수 있었다.

3. 완전탄성체지지대를 이용한 4점휨시험에 의한 콘크리트 파괴에너지는 압축강도,  $209\text{kg/cm}^2$ 의 경우  $95\text{N/m}$ ,  $329\text{kg/cm}^2$ 의 경우  $170\text{N/m}$ 였다.

## 謝 辭

本 研究는 1990年度 建國大學校 自體學術研究助成費에 의한 것임을 밝히며 깊은 謝意를 表한다.

供試體 製作을 도와주신 佑林콘크리트工業(株)의 徐立圭社長님을 비롯한 試驗室의 여러분 그리고 試驗機를 使用할 수 있도록 도와주신 KAIST의 南壽祐博士님께 감사를 드린다.

또한 勞苦를 무릅쓰고 實驗을 도와준 建國大學校 大  
學院生 황성도군에게도 아울러 謝意를 表한다.

### 참 고 문 헌

1. Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", *Phil Trans. Royal soc. of London*, A221, pp. 163~197, 1921.
2. Hillerborg, A., "The Theoretical Basis of a Method to determine The Fracture Energy  $G_f$  of Concrete", *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 106, pp. 25~30, RILEM, 1985.
3. Bazant, Z. P., and Oh, B. H., "Crack Band Theory of Fracture of Concrete", *Materials and Structures*, Vol. 16, No. 93, May-June, pp. 155~177, 1983.
4. Hillerborg, A., "Concrete Fracture Energy Tests Performed by 9 Laboratories According to a Draft RILEM Recommendation", Report to RILEM TC 50-FMC, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund sweden, 1983.
5. Hillerborg, A., "Additional Concrete Fracture Energy Tests Performed by 6 Laboratories According to a Draft RILEM Recommendation", Report to RILEM TC 50-RMC, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund sweden, 1984.
6. 오병환, "콘크리트의 파괴거동 규명과 等價龜裂 길이 理論確立에 관한 研究", *大韓土木學會論文集* 第7卷 第2號, 1987年 6月, pp. 59~68.
7. Petersson, P. E., "Fracture Energy of Concrete ; Nethod of Determination", *Cement and concrete Research*, Vol. 10, 1980, pp. 78~89.
8. Petersson, P. E., "Fracture Energy of Concrete ; Practical Performance and Experimental Results", *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, 1980, pp. 91~101.

(接受 : 1989. 11. 29)