

## 콘크리트의 쪼갬인장 피로실험방법 제안 및 적용성 평가

김동호<sup>1)</sup> · 이주형<sup>2)</sup> · 정원경<sup>1)</sup> · 윤경구<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 강원대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 한국철도기술공사

(2003년 12월 15일, 2003, 원고접수, 2003년 12월 1일 심사완료)

### Evaluation of Split Tension Fatigue Test Method for Application in Concrete

Dong-Ho Kim<sup>1)</sup>, Joo-Hyung Lee<sup>2)</sup>, Won-Kyong Jeong<sup>1)</sup>, and Kyong-Ku Yun<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

<sup>2)</sup> Korean Railroad Technical Corporation, Kwan-Ak-Gu, Seoul, 150-080, Korea

(Received May 15, 2003, Accepted December 1, 2003)

#### ABSTRACT

Most of concrete fatigue tests currently used are flexural tension or compression methods to investigate the tensile or compressive properties, respectively. However, the concrete pavement or concrete slab is actually subjected to a combined stress condition such as biaxial or triaxial. The split tension test may result in similar stress condition to biaxial stress condition. The purposes of this study were to evaluate the split tension fatigue test method for application in concrete. These were done by a finite element analysis and experimental series. The results were as follows: The optimum configuration of split tension fatigue test was a cylinder of 15cm in diameter and 7.5cm in thickness, which had a little different thickness compared to the KS standard cylinder of  $\phi 15 \times 30$ cm. The concrete stress ratio of compressive against horizontal from FEA was 3.1, while that from theory was 3.0. The stress distributions of mortar and steel were almost similar at different thicknesses. The measured static split tensile strengths of concrete and mortar were quite similar at 30cm and 7.5cm thickness cylinders. The measured stress-strain relationship showed their consistency at all specimens regardless of thickness, and confirmed the results from FEA. As a results, the concrete split tension specimen, cylinder of 15cm in diameter and 7.5cm in thickness, could be used at fatigue test because of its accuracy, simplicity and convenience.

**Keywords :** fatigue test, biaxial stress, split tension, finite element analysis

#### 1. 서 론

지금까지 국내·외 콘크리트의 피로실험은 대부분 압축 응력이나 휨응력을 받는 일축응력 경우에 대하여 연구되어 왔다. 그러나 교량이나 도로 포장체는 순수 휨응력을 받기 보다는 압축응력과 인장응력을 동시에 받게 되는 2축 응력상태의 조합응력을 받게 된다. 이러한 상태를 재현할 수 있는 실험방법이 쪼갬인장 피로실험 방법이며, 이는 교량 혹은 포장콘크리트의 피로거동을 이상적으로 모사할 수 있고 파괴모드가 유사한 이점을 가지고 있다. 또한, 실험의 간편성 및 현장에서 코어 채취를 통해 실험이 가능하므로 콘크리트의 피로수명이나 피로강도의 예측, 잔존수명 평가에 기여할 수 있는 장점을 지니고 있어 최근 콘크리트에 적용하려는 시도<sup>1,2)</sup>가 이루어지고 있는 단계이다.

현재 콘크리트의 쪼갬인장 정적 강도 평가는 KS 규정에 의거하여  $\phi 15 \times 30$  cm의 시편을 사용하고 있다. 이러한 이유는 KS 규정에 따라 공시체의 제작을 직경의 2배로 제한하고 있지만 보통 직경 15cm의 경우 길이는 20cm가 적당한 것으로 알려져 있다<sup>3)</sup>. 그러나, 이러한 시편 크기로 쪼갬인장 피로실험을 수행할 경우 실험조건의 제약, 시편 제작 및 현장 코어 채취 등에 많은 어려움을 갖게 된다. 따라서, 본 연구에서는 실험의 효율성 및 간편성을 극대화하기 위하여 쪼갬인장강도 시편 규정을 응용,  $\phi 15 \times 7.5$  cm의 형상을 갖는 시편의 쪼갬인장 피로실험방법 가능성을 연구하고 실험방법의 제안 및 적용성을 평가하고자 하였다.

본 연구에서 콘크리트는 반복하중을 받게 되는 대표적 구조물로서 국내 고속도로 포장에 사용되는 재료를 실험 대상으로 하였다. 이에 대한 검증은 시험편의 제원변화에 따른 응력변화의 유한요소 해석 및 검증실험을 수행하여 비교 분석 하였으며, 비교 대상으로 모르타르 및 강재의 시편을 제작하여 적용성을 평가하고자 한다.

\* Corresponding author

Tel : 033-250-6240 Fax : 033-255-6241

E-mail : dhkim1327@korea.com

## 2. 쪼갬인장 피로실험의 이론적 고찰

Fig. 1은 도로 포장체의 경우 차륜하중에 의해 발생되는 응력 상태를 나타낸 것으로 차륜의 이동에 따른 응력 변화는 그림과 같은 이축응력상태가 된다. 수직응력은 압축응력을 받게 되며, 수평응력은 인장응력을 나타낸다. 교량이나 포장재료가 휨을 받는 경우 인장에 의해 파손되기 때문에, 반복 인장응력 또는 변형에 의한 재료의 인장 특성 및 거동은 중요하다. 따라서, 본 연구에서 제시하고자 하는 쪼갬인장 피로실험방법은 2축 응력을 받게 되는 상태로 교량이나 도로 포장체의 거동을 모사할 수 있는 장점을 갖고 있다.

이러한 응력 모사의 장점을 검증하고자 실험에 앞서 유한요소 해석을 실시하였다. 유한요소 해석결과는 기존의 쪼갬인장강도를 결정하는 이론식과 동일한 결과를 보여주는지에 대한 검증과 시험체의 크기에 대한 결과분석을 위하여 수행한 것이다. 또한, 변형률 게이지를 이용하여 응력-변형률 관계를 분석하고 유한요소 해석결과와 비교하여 해석 결과의 적합성이나 실험 결과와의 근접성 등을 고찰하고자 하였다.

Kennedy<sup>6)</sup> 등은 아스팔트 재료에 대하여 Fig. 2와 같이 하중가압판(loading strip)을 사용하여 직경 4in. 와 두께 2in. 인 시험체의 간접 인장 피로실험을 수행하였다. 이 가압판은 일정한 하중 영역을 유지하기 위해서 사용한 것이며, 스테인레스 강재를 이용하여 시험편의 하중 재하면에 맞게 폭은 0.5in. 의 곡선형으로 제작하여 실험하였다.

이러한 하중조건과 응력상태에 대하여 Porter<sup>7)</sup>는 식(1)과 식(2)와 같이 간접 인장응력과 압축응력을 계산하여 해석하였으며, Fig. 3과 같이 이축응력상태로서 압축응력을 인장응력의 약 3배로 보았다. 이때, 시험편에 작용하는 수직방향과 수평방향의 응력상태는 Fig. 4와 같으며, 아래의 식에서  $f_t$ 는 간접 인장응력(psi)을,  $f_c$ 는 간접 압축응력(psi)을 각각 나타내는 것이다.

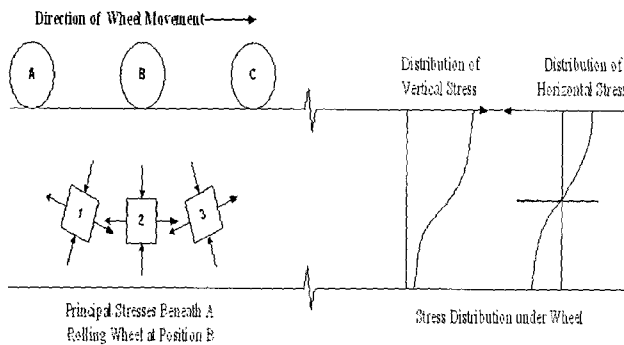


Fig. 1 Stresses in pavement caused by a moving wheel load

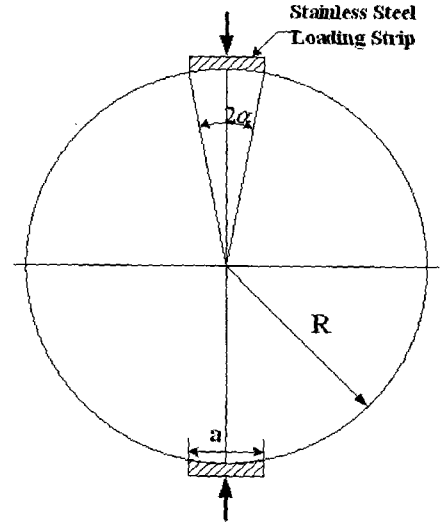


Fig. 2 Split tension test used by Kennedy<sup>6)</sup>

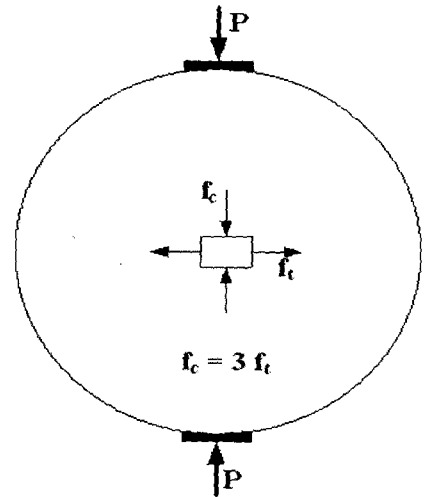


Fig. 3 Element showing biaxial state of stress for the split tension test

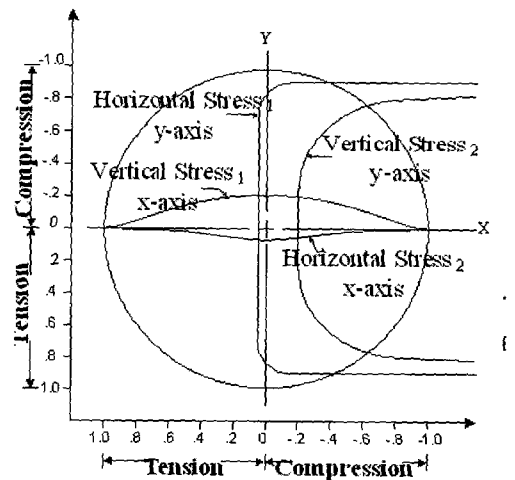


Fig. 4 Stress distributions for the split tensile test

$$f_t = \frac{2P}{\pi ah} \left( \sin 2\alpha - \frac{a}{2R} \right) \quad (1)$$

$$f_c = -\frac{6P}{\pi ah} \left( \sin 2\alpha - \frac{a}{2R} \right) \quad (2)$$

여기서,  $P$  = 시험체에 적용된 하중(pound)  
 $a$  = 하중 재하 strip의 너비(inches)  
 $h$  = 시험체의 두께  
 $R$  = 시험체의 반경(inches)

또한, Frocht<sup>8)</sup>는 이상화된 탄성 고체에 대하여 수평상태에서 응력은 식(3)~식(5)와 같으며,

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi td} \left[ \frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad (3)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi td} \left[ \frac{4d^2}{d^2 + 4x^2} - 1 \right] \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (5)$$

수직 상태에서는 식(6)~식(8)과 같다고 제시하였다.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi td} = Constant \quad (6)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left[ \frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right] \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (8)$$

여기서,  $P$ =하중,  $t$ =시험체의 두께,  $d$ =시험체의 직경

대부분의 공학적 재료의 파괴는 식(6)에 따른 인장과피에 의해 지배되므로 재료의 인장강도  $f_t$ 는 다음의 식(9)를 보편적으로 사용하고 있다.<sup>4,5)</sup>

$$f_t = \frac{2P_{max}}{\pi td} \quad (9)$$

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 F.E.M 모델

본 연구에서 쪼갠인장 피로실험방법은 기존의 쪼갠인장 강도 실험방법에 규정된 시편 형상을 응용하여 적용한 것이다. 따라서, 시험체의 제원에 대한 적용성 등을 검증하기 위하여 쪼갠인장 강도측정과 피로실험에 사용되는 시험체의 제원 변화에 대하여 강재와 콘크리트 및 모르타르를 대상으로 유한요소 해석을 실시하여 응력-변형률 관계를 고찰하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 FEA사의 LUSAS를 사용하여 선형 유한요소 해석을 실시하였다<sup>9)</sup>. 해석 모델에 사용된 요소는 LUSAS

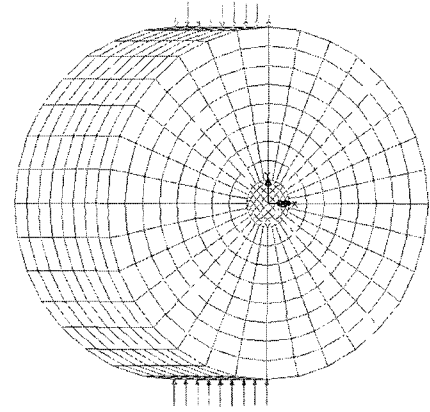


Fig. 5 Modeling of split tensile specimen for F.E.M analysis

에서 제공하는 3차원 연속체 요소인 HX8M 요소를 사용하였으며, 해석에 사용된 모델링은 Fig. 5와 같다.

선형유한요소해석에 있어서 고려되는 재료특성은 탄성계수와 포아슨비를 사용하므로 모델링에 적용한 재료적 특성은 강재에 있어 각각 200,000 Mpa과 0.3을 적용하였다. 모르타르 및 콘크리트의 재료적 특성은 압축강도를 측정 후 탄성계수를 추정하여 각각 31,523 MPa과 34,728 MPa을 적용하였으며 포아슨비는 0.17로 동일하게 적용하였다. 또한, 하중의 재하는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 시험체 상단에 등분포 하중으로 재하 하였으며, 하단의 경계 조건은 하중이 재하되는 방향으로의 절점 변위가 발생하지 않도록 고정하여 시험체 크기(Ø10×5 cm, Ø10×20 cm, Ø15×7.5 cm, Ø15×30 cm)에 따라 모델링 하였다. 이렇게 모델링하여 해석된 결과는 시험체의 중앙에서의 응력과 변형률을 알아내어 이를 시험체의 길이에 따라 도시하여 고찰하였다.

#### 3.2 해석결과 및 고찰

Table 1은 강재, 모르타르 및 콘크리트의 유한요소 해석결과를 시험체내의 중앙점에서 X축, Y축 및 Z축에 대한 응력과 변형률로 나타난 것이며, Fig. 6~8은 수평방향과 수직방향의 응력-변형률 선도를 도시한 것이다. 하중은 시험체가 Ø10×5cm와 Ø15×7.5cm인 경우 각각 30 kN과 60 kN을 재하 하였으며 Ø10×20 cm과 Ø15×30 cm의 시험체는 각각 120 kN과 240 kN을 재하시킨 결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, 시험체 형상의 변화에 상관없이 모든 경우에서 수직방향의 압축응력은 수평방향의 인장응력에 약 3.1배로 나타나 이론치와 근사한 것으로 나타났다. 수평방향에 대한 수직방향의 변형률은 강재의 경우 약 1.8배, 모르타르와 콘크리트의 경우 약 2.1배 크게 나타났다. Z축에 대한 응력은 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다.

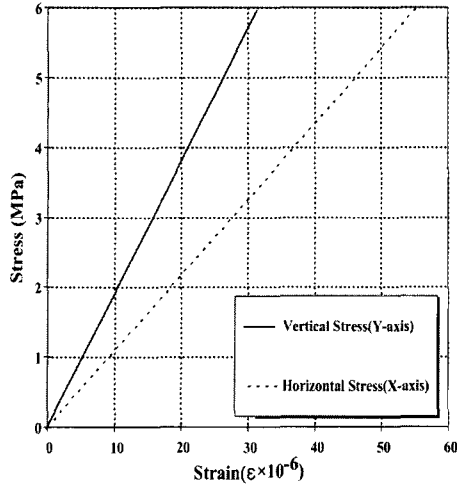


Fig. 6 Finite element analysis results of Ø10x5 cm steel

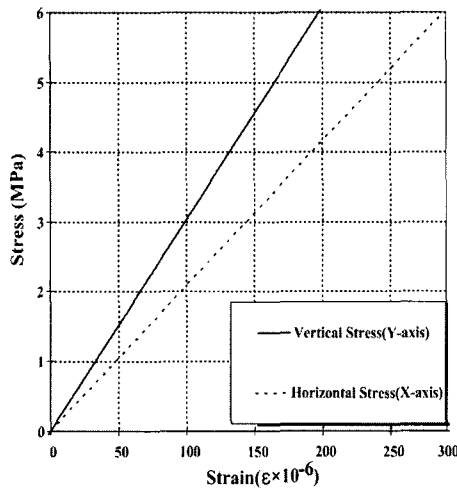


Fig. 7 Finite element analysis results of Ø10x5 cm mortar

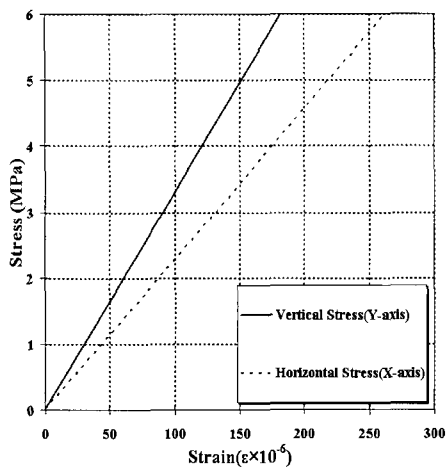


Fig. 8 Finite element analysis results of Ø15x7.5 cm concrete

Table 1 Finite element analysis results for specimen

	Size (cm)	Load (tonf)	Stress (MPa)			Strain ( $\epsilon \times 10^{-6}$ )		
			X	Y	Z	X	Y	Z
Steel	10x5	3.0	3.57	-11.2	0.038	33.0	-58.6	11.1
		6.0	7.13	-22.5	0.076	65.9	-117	22.3
	10x20	12.0	3.76	-11.4	0.011	34.2	-59.9	11.0
		24.0	7.52	-22.9	0.022	68.5	-120	22.1
Mortar	10x5	3.0	3.68	-11.3	0.019	178	-380	41.9
		6.0	7.36	-22.7	0.037	356	-760	83.8
	10x20	12.0	3.80	-11.5	0.005	182	-384	41.5
		24.0	7.60	-22.9	0.01	365	-768	83.0
Con'c	15x7.5	3.0	1.63	-5.05	0.006	71.6	-153	16.9
		6.0	3.26	-10.1	0.012	143	-307	33.8
	15x30	12.0	1.69	-5.1	0.0	73.5	-155	16.7
		24.0	3.37	-10.2	0.0	147	-310	33.5

※ (-) : compression, (+) : tension

Table 2 Comparison of F.E.M analysis with theory

Distance (cm)	Horizontal stress for Y-Axis (MPa)		Vertical stress for Y-Axis (MPa)	
	Theory	F.E.A	Theory	F.E.A
7.500	3.00	-30.100	$-\infty$	-65.80
6.688	3.00	-2.960	-55.58	-52.20
5.875	3.00	0.561	-28.07	-31.20
5.063	3.00	1.89	-19.05	-20.20
4.250	3.00	2.36	-14.68	-15.00
3.438	3.00	2.62	-12.20	-12.20
2.625	3.00	2.76	-10.68	-10.60
1.813	3.00	2.83	-9.75	-9.70
0.750	3.00	2.89	-9.13	-8.98
0.500	3.00	2.87	-9.06	-8.94
0.250	3.00	2.87	-9.02	-8.92
0.000	3.00	2.88	-9.01	-8.92
-0.250	3.00	2.87	-9.02	-8.93
-0.500	3.00	2.87	-9.06	-8.95
-0.750	3.00	2.89	-9.13	-8.98
-1.813	3.00	2.83	-9.75	-9.69
-2.625	3.00	2.76	-10.68	-10.70
-3.438	3.00	2.62	-12.20	-12.30
-4.250	3.00	2.37	-14.68	-15.20
-5.063	3.00	1.91	-19.05	-20.50
-5.875	3.00	0.58	-28.07	-31.70
-6.688	3.00	-2.95	-55.58	-53.10
-7.500	3.00	-30.5	$-\infty$	-66.90

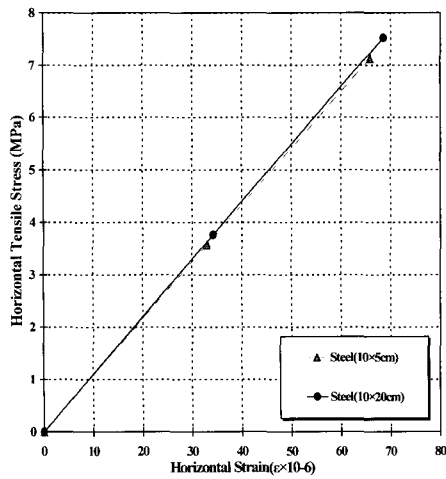


Fig. 9 Finite element analysis results of steel for specimen size

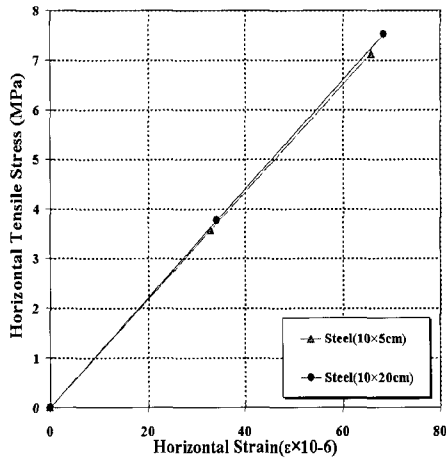


Fig. 10 Finite element analysis results of mortar for specimen size

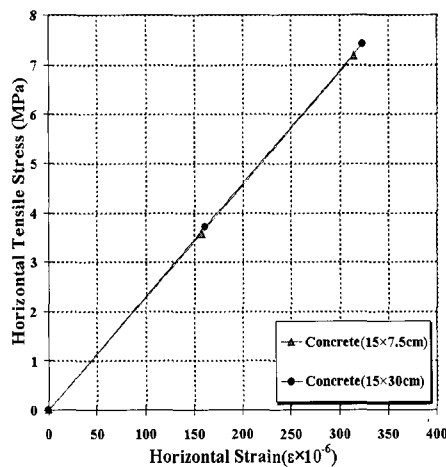


Fig. 11 Finite element analysis results of concrete for specimen size

Fig. 9 ~ 11은 강재, 모르타르 및 콘크리트의 시험체 길이에 따른 유한요소 해석결과를 나타낸 것이다.

강재와 모르타르의 경우 직경과 길이를 각각  $\varnothing 10 \times 5 \text{ cm}$ 와  $\varnothing 10 \times 20 \text{ cm}$ 이고 콘크리트의 경우  $\varnothing 15 \times 7.5 \text{ cm}$ 와  $\varnothing 15 \times 30 \text{ cm}$ 로 하였을 때 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 유한요소 해석결과에서 시험체 길이의 변화에 따라 발생하는 응력-변형률 관계는 거의 유사하게 나타나 시험체 길이의 변화가 해석결과에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 또한, Fig. 12, 13은 피로실험에 적용할  $\varnothing 15 \times 7.5 \text{ cm}$  콘크리트 시험체의 응력분포를 각각 X축과 Y축에 대하여 나타낸 것이다. 6tonf의 하중을 수직방향으로 재하한 경우에 대한 결과로서 Fig. 8의 수평방향에 대한 응력분포도는 Y축에 대하여 대칭되는 결과를 나타냈으며, Fig. 9의 수직방향에 대해서도 거의 대칭되는 응력분포를 나타내었으나 하중이 재하되는 부분의 압축응력이 지지되는 하면에 비하여 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 이론치와 유한요소 해석치를 비교하고자 콘크리트 시험체의 길이가 7.5cm인 경우에 대하여 Y축에 대한 요소의 절점에 따라 인장응력과 압축응력을 알아내어 도시하고 이론치를 계산하여 나타낸 것이 Table 2이다.

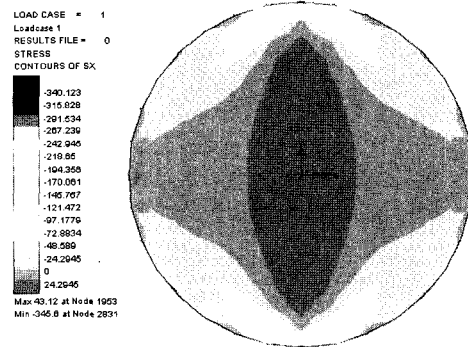


Fig. 12 Stress contours of x-axis for concrete specimen

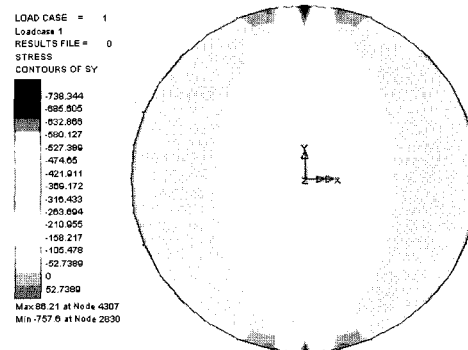


Fig. 13 Stress contours of y-axis for concrete specimen

Table 2는 Y축에 대한 수평방향의 인장응력과 수직방향에 대한 압축응력을 식(6)과 식(7)로 계산한 이론치와 유한요소 해석결과를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 14는 이를 다시 응력분포도로 도시하여 나타낸 것이다.

시험체의 중앙에서 Y축에 대한 수평방향의 인장응력은 이론치가 3.00 MPa를 나타내며 동일한 하중을 작용시켰을 때 유한요소 해석결과는 2.88 MPa를 나타내어 일정거리내에 분포되는 인장응력이 균등함을 확인할 수 있었으며 비교적 이론치와 해석치가 유사한 결과를 나타내었다. Y축에 대한 수직방향의 압축응력은 이론치에서 인장응력의 약 3배가 되는 9.00 MPa를 나타내었으며 유한요소 해석결과는

8.92 MPa으로 거의 근접한 결과를 나타내어 이론적으로 계산된 결과가 유한요소 해석결과와 거의 동일하게 나타났다. 또한, Fig. 15는 시험체의 길이 변화에 따른 인장응력의 변화를 고찰하고자 시험체의 길이를 5, 7.5, 10, 20, 30 cm로 변화시키고 시험체의 중앙에서 발생하는 인장응력이 식(6)에 의하여 이론적으로 3.0 MPa가 되도록 하중을 재하시켰을 때 시험체 길이에 따른 유한요소 해석결과를 도시한 것이다. 시험체의 길이가 30 cm인 경우 2.98 MPa로서 이론치와 가장 근접하게 나타났으며, 5 cm의 최소길이에서도 2.96 MPa으로 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 적용한 7.5 cm의 길이에서는 이론치에 비하여 근소한 차이를 나타내었으나, 전반적으로 시험체의 길이에 따라 결과에 미치는 영향이 크게 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다.

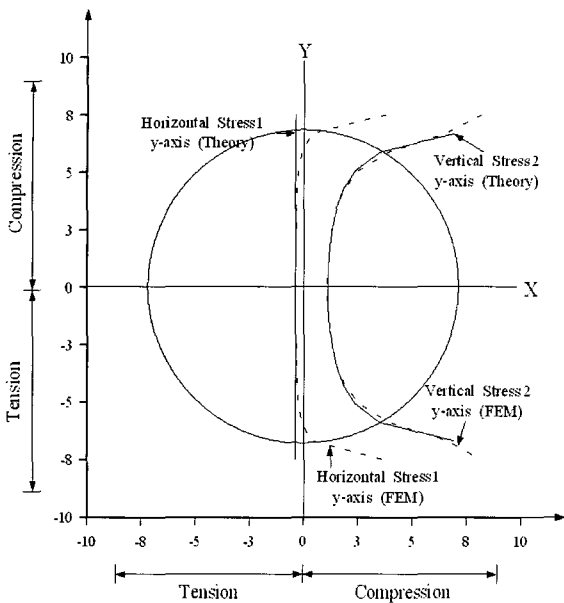


Fig. 14 Comparison of y-stress distributions from F.E.A results and theory

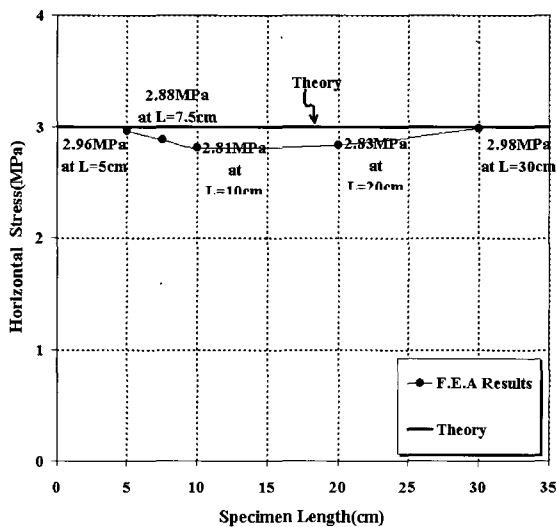


Fig. 15 Comparison horizontal stress distributions from F.E.A results and theory

## 4. 실내 검증실험 및 결과 고찰

### 4.1 사용재료 및 배합설계

유한요소 해석결과를 기초로하여 실내 검증실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 S사 1종 보통포틀랜드 제품을 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다. 굵은골재의 최대치수는 32 mm로서 골재의 입도분포가 표준입도에 맞지 않아 32 mm의 골재와 19 mm 골재를 약 55% : 45%의 비율로 혼합하여 사용하였다. 콘크리트 배합에 사용된 혼화제는 국내 S사 제품의 표준형 AE감수제 (LIGACE-UA)로서 첨가량은 시멘트 중량의 0.15%를 사용하였다.

콘크리트의 배합은 국내의 고속도로 콘크리트 포장에 사용되는 시방배합표를 기준으로 하였으며, 콘크리트 배합 전 골재의 입도와 함수상태를 보정하여 현장배합으로 환산한 후 실험하였다.

Table 3 Physical properties of cement

Time of setting		Compressive strength (MPa)			Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Ig. loss (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	S.G
T1 (m)	T2 (h:m)	3 day	7 day	28 day					
250	06:30	20.8	29.7	37.9	3,379	1.5	2.7	1.7	3.14

Table 4 Physical properties of aggregates

Type	Max. (mm)	Abrasion (%)	Specific gravity	Absorption (%)	Weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine Aggregate	<5	-	2.573	1.50	1,542
	19	16.5	2.703	0.72	1,626
Coarse Aggregate	32	12.2	2.737	0.78	1,646

Table 5 Mix proportions of concrete (unit : kg/m<sup>3</sup>)

W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	G		AE (g)
					G <sub>1</sub> (32mm)	G <sub>2</sub> (19mm)	
42.3	37.7	144	340	682	660	532	510

또한, 콘크리트의 제조에서 재료의 투입순서는 굵은골재와 잔골재 및 시멘트를 믹서내에 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하고 혼화제를 배합수에 희석하여 투입한 후 1분간 배합하여 배출하였다. Table 5는 실험에 사용된 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

### 4.2 실험

조깅인장 피로실험에 있어 시험체 제원에 대한 타당성 검증은 위해 강재, 모르타르 및 콘크리트를 대상으로 적용성 검증실험을 수행하였다. 강재와 모르타르 시험체의 제원은 직경과 길이가 각각 Ø10×5cm와 Ø10×20cm를 사용하였으며, 콘크리트 시험체는 Ø15×7.5cm와 Ø15×30cm로 제작하여 실험하였다. 실험은 시험체의 중앙에 수평방향으로 변형률 게이지를 부착하여 하중과 변형률을 측정하고 이로부터 응력-변형률 선도를 도시하여 이를 분석하고 고찰하였다. 또한, 모르타르와 콘크리트는 정적 조깅인장강도를 측정하여 시험체의 제원에 따른 정적 강도 측정결과를 분석하였다.

Fig. 16은 검증실험에 사용된 강재, 모르타르 및 콘크리트의 시험체를 나타낸 것이다. 강재는 직경 10cm의 강봉을 5cm와 20cm로 절단하여 실험에 사용하였으며, 모르타르는 KS L 5105의 제작방법에 의하여 제조되 표준사 대신 본 실험에 사용한 잔골재를 이용하였다.

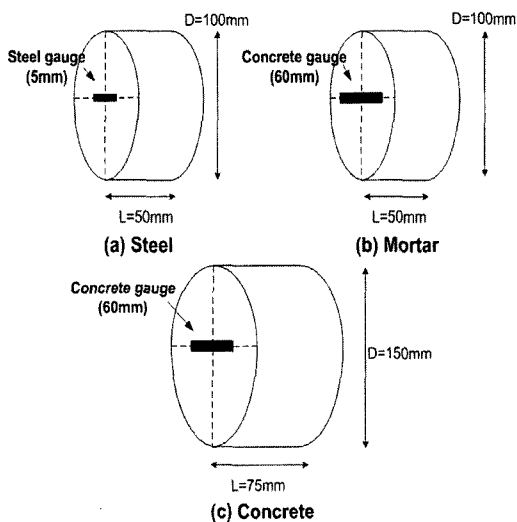


Fig. 16 Geometry of split tension specimens

Table 6 Split tensile strength for mortar and concrete

Material	Size (cm)	Split tensile strength(MPa)				
		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean	S.D
Mortar	Ø10×5	3.78	4.08	4.18	4.01	0.21
	Ø10×20	* 3.34	4.11	4.12	3.86	0.45
Con'c	Ø15×7.5	4.35	4.23	4.44	4.34	0.11
	Ø15×30	4.25	4.41	4.48	4.38	0.12

콘크리트는 피로실험에 동일한 배합표와 재료를 이용하여 제작하였다. 변형률의 측정은 강재의 경우 길이 5mm의 Tokyo Sokki 제품 모델 FLA-5-11-1L의 철근용 게이지를 사용하였으며, 모르타르 및 콘크리트는 길이 60mm의 Tokyo Sokki 제품 모델 PL-60-11-1L의 콘크리트용 게이지를 사용하여 게이지 부착면을 표면처리제로 처리한 후 중앙점에서 수평방향의 변형률을 측정하였다. 이때, 하중은 로드셀을 이용하여 측정하고 로드셀로부터 측정된 데이터와 변형률은 데이터로거를 이용하여 수집하였다.

### 4.3 검증실험결과

Table 6은 모르타르와 콘크리트에 대한 정적 조깅인장강도의 측정결과를 나타낸 것으로 정적 인장강도는 식(9)에 따라 계산하였다. Table 6의 결과를 살펴보면, 모르타르의 경우 표준편차가 크게 나타난(\* 표시) Ø10×20cm의 specimen 1 시험편의 데이터를 제외하면 Ø10×5cm와 Ø10×20cm의 조깅인장강도는 거의 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 콘크리트의 경우 실험결과는 Ø15×7.5cm와 Ø15×30cm에서 각각 4.34MPa와 4.38MPa로서 거의 동일한 결과를 나타내어 조깅인장 피로실험에서 Ø15×30cm의 시험편을 Ø15×7.5cm로 절단하여 사용하는 것은 실험결과에 크게 영향이 없을 것으로 판단되었다.

또한, Fig. 17 ~ 19는 강재, 모르타르 및 콘크리트의 실험결과와 유한요소 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 18에서 모르타르의 경우 변형률이 140µε까지는 Ø10×20cm와 Ø10×5cm가 거의 동일하게 나타나 이 범위가 탄성범위로 여겨진다. Fig. 19의 콘크리트의 경우에서도 변형률이 70µε까지는 Ø15×30cm와 Ø15×7.5cm가 동일한 거동을 나타냈으나 점차 차이를 보이고 있다. 그러나, 모르타르와 콘크리트의 실험결과와 해석결과는 비교적 근접하게 나타났다.

그러나 Fig. 17에서 강재의 실험결과는 Ø10×20cm와 Ø10×5cm의 응력-변형률 관계가 차이를 나타내었으며 해석결과도 차이를 보였다. 일반적으로 강재는 응력-변형률 관계가 대략 항복점까지 거의 선탄성 재료이므로 모르타르와 콘크리트의 실험결과에 비하여 차이가 없을 것으로 예상하였다. 그러나 이러한 결과는 강재에 사용된 변형률

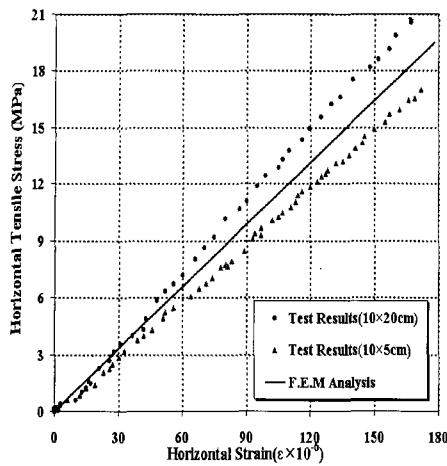


Fig. 17 Comparison of experimental results with F.E.A for steel

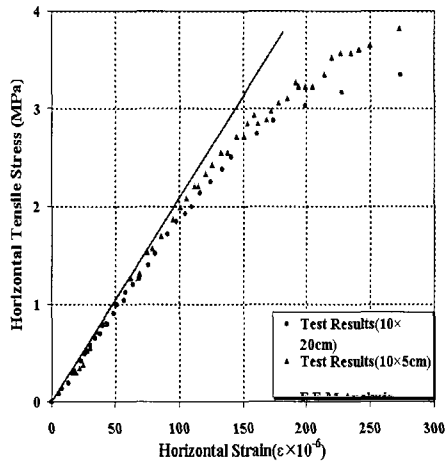


Fig. 18 Comparison of experimental results with F.E.A for mortar

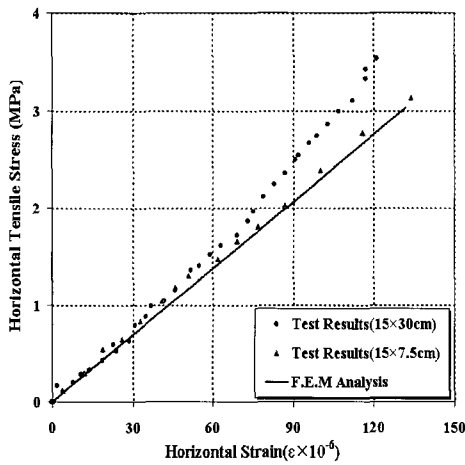


Fig. 19 Comparison of experimental results with F.E.A for concrete

게이지 길이가 5mm로서 모르타르나 콘크리트에 사용된 60mm의 변형을 게이지에 비하여 상당히 작기 때문에 게이지의 부착과정이나 시험체의 장착과정에서 정확한 수평을 맞추기가 어렵기 때문에 이러한 영향에 의한 실험오차로 판단된다. Table 2의 정적 강도측정 결과에서도 나타났듯이 실험과정에서 정확도를 고려하고 변형을 게이지 길이의 영향이나 측정오차 등을 감안하면 근접한 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 피로실험방법을 이축응력을 받는 상태의 쪼갬인장 피로실험방법을 제안하고 이에 대한 적용성 검증을 수행하고자 유한요소 해석, 정적 강도측정 및 검증실험을 통하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 유한요소 해석결과, 시편 길이에 따른 수직방향의 압축 응력과 수평방향의 인장응력은 모든 경우에 있어 약 3.1배로 나타나 이론치의 3.0배에 근접한 결과를 나타내었다. 또한, 모르타르 및 강재의 응력-변형을 관계는 거의 유사하게 나타나 시험체 길이의 변화에 따른 영향은 아주 미소한 것으로 나타났다.
- 2) 콘크리트 시편의 시험체의 길이에 따른 인장응력변화를 유한요소 프로그램을 이용하여 고찰한 결과, 30cm인 경우 2.98 MPa로 이론치의 가장 근사하게 나타났으며, 5cm인 경우에도 2.96 MPa를 나타내어 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트의 정적 쪼갬인장 강도 측정결과는 Ø15×7.5cm와 Ø15×30cm 시험체가 거의 유사하게 나타났으며, 모르타르의 경우에서도 실험데이터의 편차가 크게 나타난 데이터를 배제하면 유사한 결과를 나타내어 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 시험체의 중앙에 변형을 게이지를 부착하고 로드셀을 이용하여 측정된 데이터를 응력과 변형률 선도로 나타내어 실험한 결과에서는 모르타르의 경우 시험체의 제원에 관계없이 거의 차이를 나타내지 않으며 유한요소 해석결과와도 비교적 근접성을 나타내었다. 콘크리트에서도 이러한 경향은 대체로 유사하게 나타났으며 Ø15×7.5cm 시험체의 응력-변형을 관계는 유한요소 해석결과와 일치하는 것으로 나타나 시험편의 제원에 따른 영향은 없는 것으로 판단되었다.

이상의 결과는 콘크리트 강도, 골재의 크기, 물-시멘트 비 등에 따라 다소의 영향을 받을 것으로 사료되므로 향후 좀더 많은 실험을 통하여 이러한 요인에 대한 검증이



추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그러나 현재까지의 연구결과를 종합할 때 쪼갬인장 피로실험방법은 이축응력상태를 받게 됨으로서 실제 콘크리트 포장체의 거동을 모사할 수 있을 뿐만 아니라 파괴모드가 이와 유사하고 실험의 간편성 등 여러 가지 장점을 내재하고 있어 향후 교량이나 포장콘크리트의 피로실험방법으로 활용 가치가 클 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 김동호외 3인, “쪼갬인장 반복하중을 받는 콘크리트의 파괴확률 모델”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회, 서울대학교, 2003, pp.311~314.
2. 김동호외 3인, “확률론적 개념을 이용한 일정진폭 쪼갬인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로 해석”, 대한토목학회 학술발표회, 2002, 부산 BEXCO, pp.110~121.

3. 이용구, 박근배, “신편 콘크리트 공학”, 구미서관, 2001, 206pp.
4. 김진근, 김윤용, “고강도 콘크리트의 피로거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 연구집, 제5권 4호, 1993, pp.179~187.
5. 김진근, 김윤용, “콘크리트의 피로균열 성장거동에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 제9권 3호, 1997, pp.127~135.
6. Cowher, C. E. and T. W. Kennedy, “Cumulative Damage of Asphalt Materials Under Repeated-Load Indirect Tension,” *Center for Highway Research*, Research Report 183-3, 1975, pp.37~46.
7. Porter, B.W. and T.W.Kennedy, “Comparison of Fatigue Test Methods for Asphalt Materials,” *Center for Highway Research*, Research Report 183-4, 1975, pp.11~15.
8. 위성동, “포장공학원론”, 엔지니어즈, 2001, pp.331~334.
9. LUSAS, “*LUSAS Theory Manual 2*,” Ver.13.4, FEA Ltd., U.K, 2002, pp.101~124.

#### 요 약

지금까지 콘크리트에 대한 피로실험과 연구는 대부분 압축응력, 휨응력을 받는 경우에 대하여 연구를 진행하였으나 실제 교량이나 도로 포장콘크리트 구조물은 이축응력상태의 조합응력을 받게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 콘크리트 구조체가 받게 되는 이축응력 상태를 이상적으로 재현할 수 있는 쪼갬인장 피로실험방법을 제안하고 적용성을 평가 하고자 하였다. 실험은  $\varnothing 15 \times 30$  cm를 사용한 KS 규정을 응용하여  $\varnothing 15 \times 7.5$  cm의 시편을 제작하고, 쪼갬인장 피로실험에 적용하기 위한 타당성 검증을 수행 하였으며, 이상적 탄성재료인 강재와 고체의 비교를 위하여 모르타르 시편을 제작하여 검증실험을 수행하였다. 또한, 이론적 고찰과 유한요소 해석을 수행하여 이론치와 해석치의 비교 고찰 하였으며 정적 강도측정 및 게이지 부착실험을 수행하여 타당성을 입증하고자 하였다. 실험결과, FEA 결과, 수평응력과 압축응력의 비는 3.1로 나타나 이론치 3.0과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 수평응력은 시편의 길이가 30cm일 경우 이론상 3MPa이지만, 본 연구에서는 시편의 길이가 30cm와 5cm일 때 각각 2.98MPa와 2.96MPa로 나타났다. 쪼갬인장 피로실험방법은 유한요소 해석, 정적 강도측정 및 게이지 부착실험 모두에서 충분한 타당성을 나타내었으며, 이 방법은 실제 응력 모사, 실험의 간편성, 현장 시편 이용 가능성 등 많은 장점을 가지고 있는 것으로 판단되어 향후 교량이나 도로포장 구조물에 사용되는 콘크리트의 피로거동을 모사하는데 적합한 실험방법으로 사료된다.

**핵심용어** : 피로실험, 2축응력, 쪼갬인장, 유한요소해석