

## 환경하중을 이용하는 콘크리트 포장 슬래브 피로모형의 개선

### Improvement of Fatigue Model of Concrete Pavement Slabs Using Environmental Loading

박주영	Park, Joo Young	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 (E-mail : pjy0704@naver.com)
임진선	Lim, Jin Sun	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사 후 연구원 · 공학박사 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
김상호	Kim, Sang Ho	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · STX건설 기술영업팀장 · 공학석사 (E-mail : midasksh@onestx.com)
정진훈	Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

#### ABSTRACT

Concrete slab curls and warps due to the uneven distribution of temperature and moisture and as the result, internal stress develops within the slab. Therefore, environmental loads must be considered in addition to the traffic loads to predict the lifespan of the concrete pavement more accurately. The strength of the concrete slab is gradually decreases to a certain level at which fatigue cracking is generated by the repetitive traffic and environmental loadings. In this study, a new fatigue regression model was developed based on the results from previously performed studies. To verify the model, another laboratory flexural fatigue test program which was not used in the model development, was conducted and compared with the predictions of other existing models. Each fatigue model was applied to analysis logic of cumulative fatigue damage of concrete pavement developed in the study. The sensitivity of cumulative fatigue damage calculated by each model was analyzed for the design factors such as slab thickness, joint spacing, complex modulus of subgrade reaction and the load transfer at joints. As the result, the model developed in this study could reflect environmental loading more reasonably by improving other existing models which consider  $R$ , minimum/maximum stress ratio.

#### KEYWORDS

concrete pavement, slab, environmental loading, fatigue life, cumulative fatigue damage, regression model

#### 요지

온도와 수분의 불균일한 분포로 인하여 콘크리트 슬래브는 컬링과 와핑 거동을 하고 슬래브에는 항상 응력이 도입되어 있다. 따라서 교통하중 외에도 환경하중을 고려해야만 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 콘크리트 포장에 반복적으로 재하되는 교통하중과 환경하중에 의해 콘크리트 슬래브의 강도는 지속적으로 감소하고 응력 이하로 낮아지게 되면 피로균열이 발생한다. 본 연구에서는 기존에 수행된 연구들로부터 피로실험 결과를 수집하고 피로 회귀모형을 개발하였다. 개발된 모형을 검증하기 위하여 모형개발에 사용되지 않은 실내 휨피로실험 결과를 예측하고 기존 모형으로 예측된 결과와 비교하였다. 콘크리트 포장 누적 피로손상 해석 프로그램을 개발한 후 본 연구에서 제안된 모형과 기존 모형들을 적용하고 예측 결과를 비교 및 평가하였다. 피로모형 별로 슬래브 두께, 줄눈간격, 복합 지지력계수, 그리고 하중전달률에 따른 누적 피로손상의 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 개발된 모형이 최소-최대응력비  $R$ 을 고려하는 기존 모형들의 경향을 개선하여 환경하중을 더욱 합리적으로 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 핵심용어

콘크리트 포장, 슬래브, 환경하중, 피로수명, 누적 피로손상, 회귀모형

#### 1. 서론

콘크리트 포장의 수명은 기층의 종류, 길어깨의 종류,

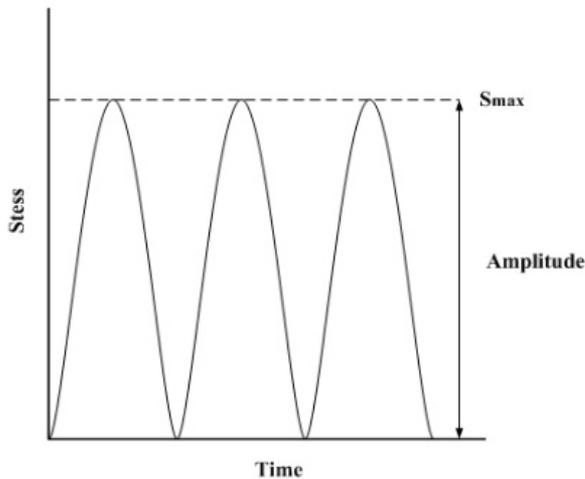
포장의 두께, 교통하중의 크기와 빈도, 그리고 기상조건에 의한 포장의 온도 및 습도의 변화 등 다양한 인자들

에 영향을 받는다. 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력은 교통하중과 환경하중에 의한 것으로 대개 콘크리트의 강도보다 훨씬 낮은 수준으로 발생한다. 하지만 이러한 교통 및 환경하중이 장기간 반복되면서 콘크리트 슬래브에 미세균열이 생성되어 결국 피로파손으로 진전된다. 반복적으로 재하된 동적하중에 의한 응력과 정적강도의 비(응력-강도비  $S$ )와 콘크리트가 파괴될 때까지 가해진 하중 재하횟수(피로수명  $N_f$ )의 관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 관계를 나타낸 그래프를 Wöhler의 곡선 혹은 S-N선도(Curve)라고 한다(Dater 1977; Roesler 1998; Asgari 2004).

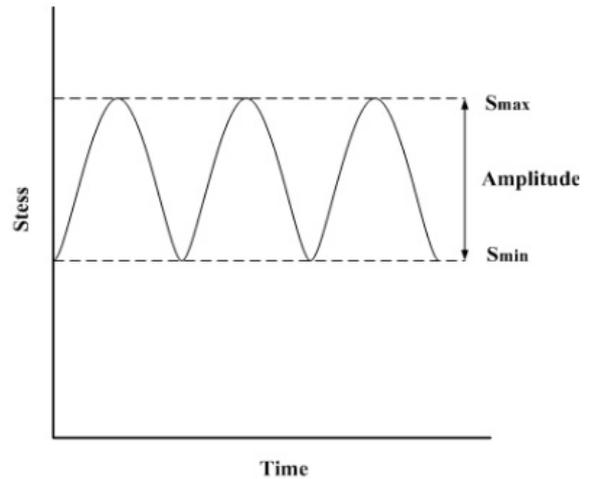
$$S = \frac{\sigma}{f} = a + b \log N_f \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 동적하중에 의한 응력과 정적강도의 비,  $f$ 는 정적강도(MPa),  $\sigma$ 는 동적하중에 의한 응력(MPa),  $N_f$ 는 피로수명(회), 그리고  $a$ 와  $b$ 는 실험을 통해 결정되는 계수이다.

대부분의 콘크리트 피로모형들은 그림 1(a)와 같이 최소응력은 고려하지 않고 최대응력만을 사용하여 개발되었다. 그러나 실제 콘크리트 포장 슬래브에는 온도와 습도 등의 환경하중에 의한 응력이 도입된 상태에서 교통하중에 의한 응력이 추가로 도입된다. 따라서 콘크리트 포장의 피로모형을 합리적으로 개발하기 위해서는 그림 1(b)와 같이 최소응력 도입 후 추가 응력을 도입하여 최대응력에 도달하게 하는 논리의 피로모형이 필요하다. 하지만 미국의 MEPDG를 포함한 거의 모든 설계방법에서는 이를 고려하지 못하고 있다(Asgari 2004).



(a) No Environmental Loading Consideration



(b) Environmental Loading Consideration

그림 1. Loading Condition in Fatigue Test

Murdock과 Kesler(1958)는 최소응력이 콘크리트 피로수명에 미치는 영향을 최초로 보고하였으며, Aas-Jakobsen(1970) 및 Tepfers와 Kutti(1979)는 식(2)와 같이 최소-최대응력비  $R$ 를 사용하여 모형을 개발하였다.

$$S = 1 - \beta(1 - R) \log N_f \quad (2)$$

여기서,  $R$ 은 최소-최대응력비이고  $\beta$ 는 재료계수이다.

최소-최대응력비  $R$ 은 콘크리트 포장이 시공된 후 교통하중이 재하되기 전 온도 및 습도에 의한 환경하중에 의해 슬래브에 도입된 응력  $\sigma_{min}$ 과 이 상태에서 교통하중이 추가로 재하되면서 발생된 응력  $\sigma_{max}$ 의 비  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ 로 정의될 수 있다. Shi 등(1993)은 등가피로수명법과 생존확률계수를 사용하여 식 (3)과 같은 모형을 개발하였으며, Tepfers와 Kutti(1979)가 예측한 것과 매우 유사한 결과를 보여 주었다. 생존확률계수는 Weibull 확률함수를 사용하여 신뢰성 분석을 통해 결정되었다.

$$S = AN_f^{\beta(1-R)} \quad (3)$$

여기서,  $A$ 는 확률계수이다.

Tepfers와 Kutti(1979)의 모형과 Shi 등(1993)의 모형은  $R$ 에 따라 S-N 선의 기울기를 변하게 한다. 이들 모형은 실험자료의 범위에서는 비교적 정확한 결과를 예측하지만 실험 범위에서 벗어날 경우에는 피로수명을

(그림 계속)

매우 과대하게 예측한다(Söerqvist 2006). 그림 2는 Shi 등의 모형에 의해 피로수명을 예측한 것으로 여러 연구자들이 기존에 수행한 실험자료의 범위에서는 모형이 대체로 잘 맞았으나 범위를 벗어나  $R$ 이 커지고  $S$ 가 작아질수록 피로수명은 기하급수적으로 길어졌다. 일반적으로 슬래브 두께 300mm의 콘크리트 포장에 대해서 공용수명 20년 동안 8.2t의 ESAL이  $27 \times 10^6$ 회 재하되는 것으로(AASHTO 1986) 설계된다. 뒤에서 언급되겠지만 본 연구에서는 가장 큰 차량하중에 의해 계산된 응력-강도비  $S$ 와 최소-최대응력비  $R$ 이 각각 0.51과 0.72이었다. 이 경우 그림 2의 범위를 벗어날 만큼 비현실적으로 매우 큰 피로수명( $N_f$ )을 갖게 된다. 따라서 이러한 기존 모형들이 역학적-경험적 포장설계 로직에 사용되면 매우 긴 피로수명과 매우 낮은 피로손상을 예측할 수밖에 없다(Asgari 2004).

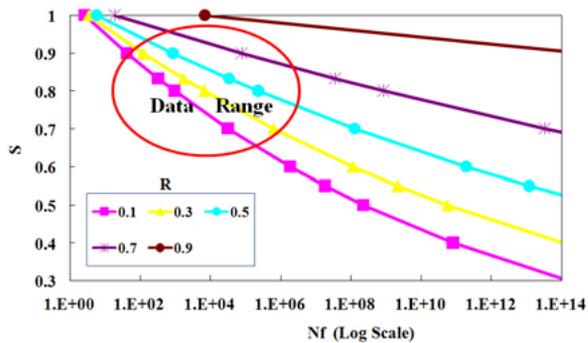


그림 2. Fatigue Life with R(Shi et al. 1993)

따라서 본 논문에서는 기존 연구자들의 피로실험 자

료를 수집하고 다중회귀분석을 수행하여  $N_f$ 를 종속변수로 하고  $S$ 와  $R$ 을 개별적인 독립변수로 하는 기존과 다른 유형의 회귀모형을 개발하였다. 개발된 피로모형으로 예측된 결과를 기존 모형들로부터 예측된 결과와 비교하였다. 또한 다양한 포장단면과 재료, 기상, 교통하중 등을 입력변수로 사용하는 콘크리트 포장 누적 피로손상 해석 프로그램을 개발하고 새 피로모형을 적용하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 교통량이 가장 많은 구간 중 하나인 서울외곽순환도로 학의JCT~판교JCT 8km 구간의 피로손상을 예측하였다. 예측된 결과를 선행연구자들의 피로식을 프로그램에 대입하여 얻은 결과와 비교하였다.

## 2. 모형의 개발

교통하중이 재하되기 전 콘크리트 포장에 이미 재하되어 있는 환경하중을 합리적으로 고려하는 피로모형을 개발하기 위하여, 박병희(1984), 원대연(1988), 김동호 등(2005), 그리고 Shi 등(1993)이 실시한 피로실험 자료를 수집하였다. Tepfers와 Kutti(1979)가 제시한 압축, 쪼갬, 그리고 힘 피로실험 결과 간의 관계를 사용하여 서로 다른 종류의 피로실험 결과를 힘 피로실험 결과로 통일하였다. 그리고 실험에 따라 상이한 하중재하 빈도는 Zhang 등(1996)의 연구를 참고하여 보정하였다. 표 1은 보정된 각 피로실험의 결과를 하나의 표로 나타낸 것이며 표 안의 값들은 시편이 파괴될 때까지 가해진 반복하중 재하횟수(피로수명)  $N_f$ 이다.

표 1. Collected and Calibrated Bending Fatigue Test Results

$N_f$	$s=0.9$	$s=0.85$	$s=0.8$	$s=0.75$	$s=0.7$	$s=0.65$	$s=0.6$	$s=0.55$
$R=0$	110	-	1,175	-	85,114	257,040	-	-
	132	-	1,380	-	158,489	676,083	-	-
	339	-	4,266	-	186,209	1,148,154	-	-
$R=0.08$	6	33	-	-	7,413	34,674	154,882	4,897,788
	-	49	-	-	8,511	93,325	263,027	5,011,872
	-	51	-	-	15,488	95,499	331,131	-
	-	100	-	-	15,849	109,648	478,630	-
	-	107	-	-	31,623	117,490	524,807	-
	-	155	-	-	35,481	120,226	660,693	-
	-	269	-	-	37,154	123,027	1,479,108	-
	-	-	-	-	51,286	125,893	1,548,817	-
	-	-	-	-	52,481	141,254	1,995,262	-
	-	-	-	-	54,954	151,356	-	-
	-	-	-	-	57,544	-	-	-
	-	-	-	-	60,256	-	-	-
	-	-	-	-	72,444	-	-	-
-	-	-	-	74,131	-	-	-	

(표 계속)

R=0.1	457	-	4,365	-	229,087	-	-	-
	182	-	9,772	-	281,838	-	-	-
	708	-	11,749	-	295,121	-	-	-
	71	-	3,631	-	107,152	-	-	-
	72	-	6,457	-	173,780	-	-	-
	117	-	14,125	-	239,883	-	-	-
	195	-	15,136	-	512,861	-	-	-
	224	-	18,197	-	549,541	-	-	-
	457	-	21,380	-	707,946	-	-	-
	537	-	23,988	-	724,436	-	-	-
513	-	-	-	-	-	-	-	
R=0.2	98	-	661	15,136	69,183	263,027	-	-
	575	-	1,023	-	269,153	398,107	-	-
	1,175	-	1,072	-	234,423	436,516	-	-
	47	-	912	-	23,442	1,412,538	-	-
	-	-	3,162	-	28,840	1,698,244	-	-
	-	-	4,169	-	-	-	-	-
R=0.3	-	-	5,888	-	-	-	-	-
	1,000	6,918	58,884	-	-	-	-	-
	2,754	16,982	95,499	-	-	-	-	-
	4,266	11,220	102,329	-	-	-	-	-
	562	-	35,481	-	-	-	-	-
	1,698	-	45,709	-	-	-	-	-
	2,455	-	58,884	-	-	-	-	-
3,631	-	141,254	-	-	-	-	-	
-	-	457,088	-	-	-	-	-	
R=0.5	851	38,019	3,090	1,584,893	83,176	-	-	-
	5,888	70,795	3,715	2,754,229	186,209	-	-	-
	117,490	83,176	45,709	-	660,693	-	-	-
	5,248	933	257,040	-	-	-	-	-
	13,183	1,820	301,995	-	-	-	-	-
	9,550	2,239	602,560	-	-	-	-	-
	1,995	16,218	229,087	-	-	-	-	-
	2,512	-	501,187	-	-	-	-	-
	3,467	-	549,541	-	-	-	-	-
	3,467	-	741,310	-	-	-	-	-
	4,898	-	912,011	-	-	-	-	-
	79	-	33,884	-	-	-	-	-
	229	-	51,286	-	-	-	-	-
	302	-	64,565	-	-	-	-	-
	741	-	446,684	-	-	-	-	-
1,950	-	446,684	-	-	-	-	-	
R=0.8	832	-	5,248	-	-	-	-	-
	1,349	-	26,915	-	-	-	-	-
	19,953	-	97,724	-	-	-	-	-

본 연구에서는 표 1의 피로실험 결과를 사용하여 식 (4)와 같이  $\log(N_f)$ 를 종속변수로 하고,  $S$ 와  $R$ 을 각각 독립변수로 하여 단계회귀법(stepwise regression)으로 다중회귀분석을 실시하였다. 여기서 단계회귀법이란 종속변수에 영향을 주는 변수들만 골라 회귀식의 독립변수로 사용하는 방법을 말한다. 진입변수는 0.05, 제거변수는 0.1로 입력하였으며, 유의수준을 0.05로 설정하였다.

$$\log N_f = A + B \times S + C \times R \quad (4)$$

여기서,  $A$ ,  $B$ , 그리고  $C$ 는 회귀계수이다.

표 2에서 보듯이 모형의 상관계수( $R$ )와 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.852와 0.726였으며, 72.3%의 적합성을 나타내었다. 그리고 Durbin-Watson이 2보다 작은 0.821로 잔차들 간의 상관관계가 없어 회귀모형이 적합함을 알 수 있었다. 그림 3의 히스토그램에서 보듯이 회

표 2. Model Summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Analysis of variance					Durbin-Watson
				R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
0.852	0.726	0.723	0.678	0.726	229.009	2,000	173,000	0.000	0.821

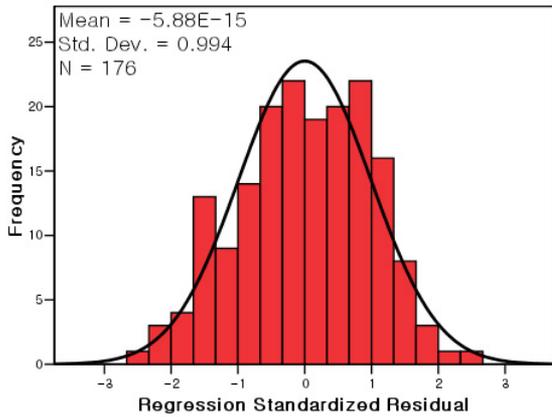


그림 3. Histogram of Regression Standardized Residual

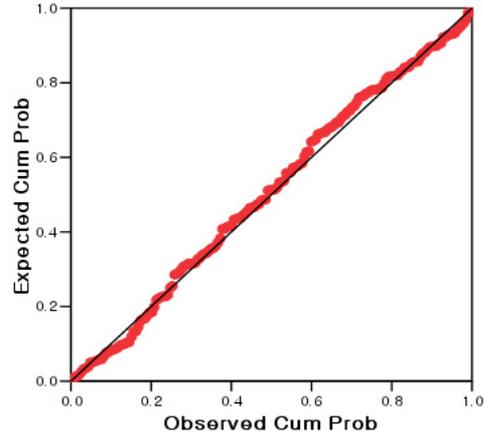


그림 4. Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

표 3. Regression Analysis of Model Coefficients

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
(Constant)	13.291	0.432	-	30.788	0.000	12.439	14.143	-	-	-	-	-
S	-12.431	0.581	-0.946	-21.398	0.000	-13.578	-11.285	-0.761	-0.852	-0.852	0.811	1.234
R	2.677	0.278	0.426	9.643	0.000	2.219	2.129	0.015	0.591	0.384	0.811	1.234

Dependent Variable : Fatigue Life

귀 표준화 잔차의 빈도가 정규분포를 나타냈으며, 그림 4의 회귀 표준화 잔차의 P-P도에서 관측누적확률과 기대누적확률이 거의 일치하게 나타나 잔차항도 정규성을 갖는 것으로 나타났다. 이를 통해 회귀모형의 예측값이 매우 합리적임을 확인하였다.

표 3에서는 편회계수 추정치 P-value가 0.000으로 나타나 독립변수인 S와 R이 종속변수인  $\log(N_f)$ 에 합리적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 공선성 통계량인 분산팽창인수(VIF)가 기준치 10보다 훨씬 작은 1.234로 나타나 독립변수들 간의 상호 영향을 나타내는 다중공선성의 가능성이 거의 없는 것으로 분석되었다. 모형계수 A, B, 그리고 C를 결정하고 t검정을 통해 각 독립변수의 유의수준을 검토한 결과 모두 0.05 미만으로 나타나 각 계수에 대한 유의성이 확보되었다. 이를 통해 개발된 회귀모형은 식 (5)와 같다.

$$\log N_f = 13.291 - 12.431S + 2.677R \quad (5)$$

그림 5는 표 1에 보인 피로실험을 식 (5)의 피로모형으로 예측한 것이다. 그림 2의 Shi 등의 모형은 R이 커지고 S가 감소할수록  $N_f$ 는 기하급수적으로 증가하도록

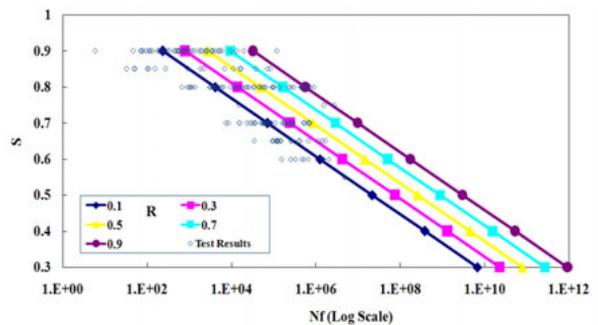
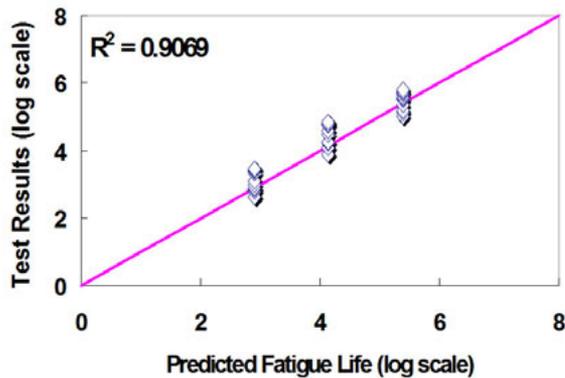


그림 5. Predicted Test Results Using Proposed Model

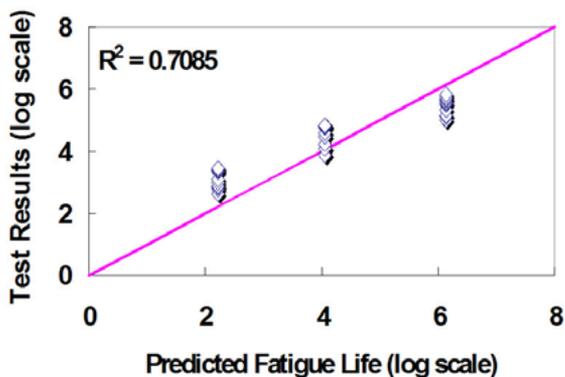
예측하였지만 본 연구에서 개발된 식 (5)의 모형은  $R$ 과는 상관없이  $s$ 와  $N_f$ 가 거의 일정한 기울기의 관계를 나타냈다.

### 3. 모형의 검증

본 연구에서 회귀분석으로 개발된 모형을 검증하기 위해 본 연구에서 제안된 피로모형과 Shi 등(1993)의 피로 모형으로 예측된 결과를 윤경우 등(2003)의 실내 휨 피로실험 결과와 비교하였다. 위 실험 결과는 본 연구의 모형개발에는 사용되지 않은 자료이다. 실험은 28일 수중 양생 후 56일까지 공기양생 된  $150 \times 150 \times 550\text{mm}$ 의 각 주형 공시체 45개에 대해 최소응력 0 근처에서  $s$ 를 0.9, 0.8 그리고 0.7로 변화시키면서 ASTM C78에 따라 수행되었다. 그림 6(a)는 본 연구에서 제안된 모형으로 실험 결과를 예측한 것이며, 그림 6(b)는 Shi 등의 모형으로 실험 결과를 예측한 것이다. 본 연구에서 제안된 모형의 결정계수가 0.9069로 Shi 등의 모형보다 높게 나타났다.



(a) Proposed Model



(b) Existing Model(Shie et al. 1993)

그림 6. Comparison of Predictions between Proposed and Existing Models

### 4. 누적 피로손상 해석 프로그램 개발

도로의 공용 이후 특정한 시점까지 포장에 손상을 준 정도를 알기 위하여 정해진 시간 간격마다 발생한 도로포장의 손상을 계산하고 누적한 것이 누적 피로손상이다. AASHTO 2002 설계법(NCHRP 2004)과 한국형 포장 설계법(건설교통부 2004)의 논리를 참고하여 그림 7의 역학적 방법에 의한 누적 피로손상 산정과정을 제시하였다. 그림에 보인 것과 같이 크게 교통 모듈과 환경 모듈, 포장체 모듈, 구조해석 모듈, 그리고 피로해석 모듈로 구분하여 단위시간 별 상향균열과 하향균열에 대한 피로손상을 각각 산정하였다. 계산된 피로손상을 특정한 공용기간 동안 누적시키는 방법으로 콘크리트 포장의 누적 피로손상을 산정하였다.

#### 4.1. 교통하중

통합 차종분류에서는 국내 고속국도와 일반국도를 통행하는 모든 차량을 12종으로 분류하고 있다. 본 논문에서는 고속국도 차종 별 축하중 분포(건설교통부 2006)를 참고하여 교통하중을 결정하였다. 12종 각 대표차량의 축 별 하중분포에서 상위 90%에 해당하는 하중을 찾아내고 대표 축하중으로 선정하였다. 교통량정보시스템(국토해양부 2007)의 교통량 통계연보에서 2000년부터 2007년까지의 차종 별 교통량 자료를 수집하여, 콘크리트 포장 구간 중 가장 큰 교통량을 나타낸 서울외곽순환도로 학의 JCT~판교 JCT 8km 구간을 대상구간으로 선택하였다. 대상구간의 일교통량과 차종별 분포를 표 4에 나타내었다. 방향계수 및 차로계수는 안지환 등(2002)의 연구결과를 참고하여 각각 0.55로 결정하였다.

표 4. Proportions of Traffic Volume by Vehicle Class (국토해양부, 2007)

AADT	185,080
class 1	69.823%
class 2	3.370%
class 3	11.419%
class 4	8.209%
class 5	2.330%
class 6	1.460%
class 7	1.050%
class 8	0.430%
class 9	0.060%
class 10	1.550%
class 11	0.060%
class 12	0.240%

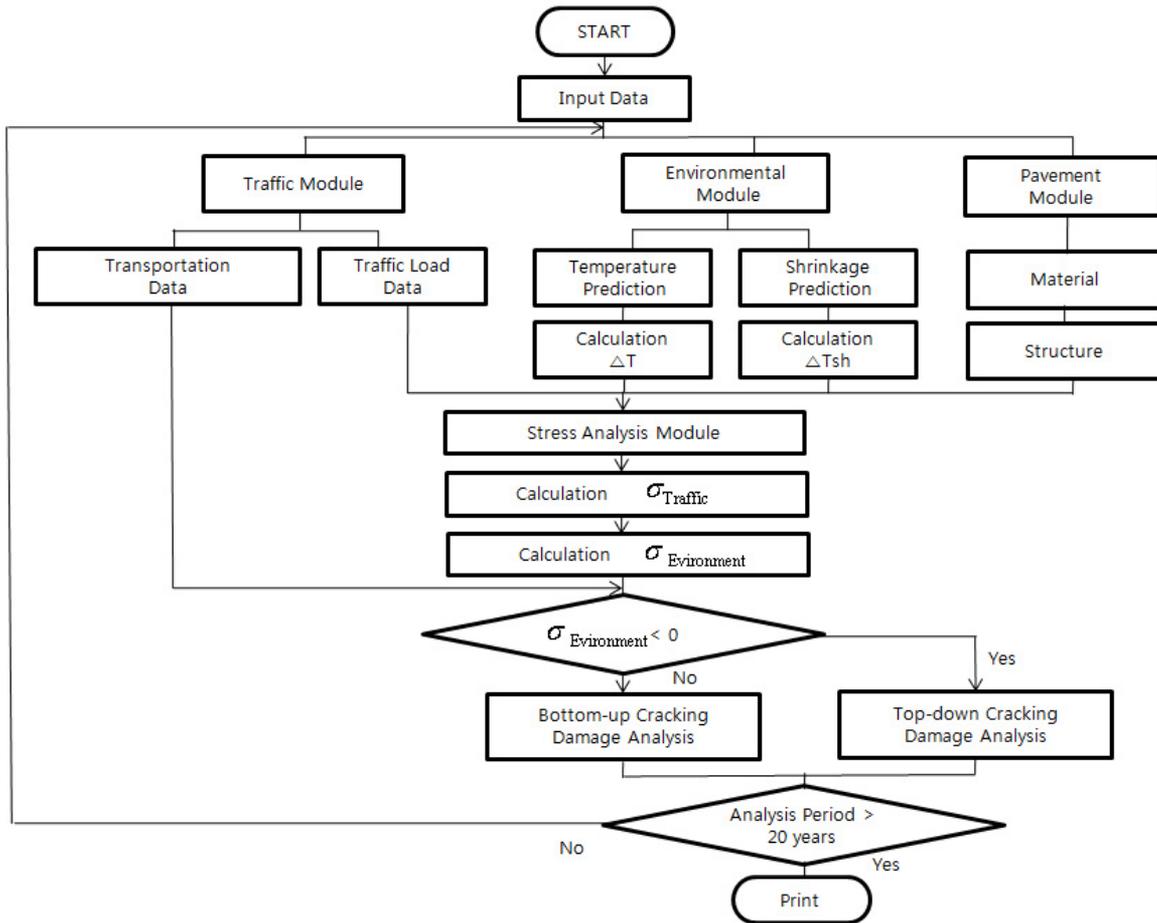


그림 7. Flow Chart of Cumulative Fatigue Damage Prediction

## 4.2. 환경하중

온도하중에 의한 슬래브의 컬링응력을 계산하기 위해서는 슬래브 상하부 간 온도차이를 알아야 한다. 이를 얻기 위하여 국내 76개 축후소의 기상자료를 데이터베이스로 갖고 있는 베타버전의 한국형 포장설계 프로그램을 사용하였다. 설계 프로그램 내에는 포장온도 예측 프로그램(안덕순 등 2004)이 서브 프로그램으로 포함되어 슬래브 온도를 월별 및 시간별로 깊이에 따라 비선형으로 예측한다. 식 (6) 및 식 (7)의 모형(Mohamed 등 1996)으로 비선형 온도분포에 의해 발생한 것과 동일한 슬래브 거동을 유발하는 선형의 온도분포를 찾고 이에 따른 슬래브 상하부 간 등가선형 온도차이를 계산하였다.

$$\Delta T = A + Bz + Cz^2 + Dz^3 \quad (6)$$

여기서,  $\Delta T$ 는 비선형 온도차이(°C),  $A, B, C, D$ 는 비선형 온도분포에 대한 3차방정식의 회귀계수, 그리고  $z$

는 위쪽은 (-)이고 아래쪽은 (+)로 정의된 슬래브 깊이 중앙으로부터의 거리(mm)이다.

$$\Delta T_{eq} = -12 \left( \frac{Bh}{12} + \frac{Dh^3}{80} \right) \quad (7)$$

여기서,  $\Delta T_{eq}$ 는 등가선형 온도차이(°C),  $h$ 는 슬래브 두께(inch), 그리고  $B$ 와  $D$ 는 3차방정식의 회귀계수이다. 슬래브 상하부 간 부등건조수축을 추가로 고려하기 위하여 현장실험 결과를 기초로 ACI 209R-92 건조수축 모형을 참고하여 Jeong 등(2010)이 제안한 식 (8)의 부등건조수축 등가 온도차이 모형이 사용되었다.

$$\Delta T_{sh} = \frac{ah}{\alpha_T} \epsilon_{st} \quad (8)$$

여기서,  $\Delta T_{sh}$ 는 부등건조수축 등가 온도차이(°C),  $a$ 는 콘크리트 건조수축 계수(= 0.00395),  $\alpha_T$ 는 콘크리트 열팽창 계수(/°C), 그리고  $\epsilon_{st}$ 는 콘크리트 건조수축

변형률(ACI 209R-92)이다. 건조수축과 동시에 유발되는 응력감소(Relaxation)는 박정우 등(2009)이 제시한 식 (9)의 모형을 사용하여 부등건조수축 등가 온도차이 모형에 반영하였다.

$$\Delta T_{sh-cr} = \Delta T_{sh}(1-\Phi) \quad (9)$$

여기서,  $\Delta T_{sh-cr}$ 는 크리프가 고려된 부등건조수축 등가 온도차이(°C)이고  $\Phi$ 는 응력감소율( $= a\frac{1}{t} + b$ ,  $a = -1.775$ ,  $b=0.6$ ,  $t = \text{time(days)}$ )이다.

### 4.3. 구조해석

콘크리트 포장의 누적 피로 손상을 구하기 위해서는 환경하중과 교통하중에 의하여 슬래브에 발생하는 최대 응력을 결정하여야 한다. 하향컬링이 발생하거나 컬링이 발생하지 않는 경우에는 종방향 단부 중앙에 작용하는 차륜하중으로 인하여 슬래브 하부에 최대 인장응력이 발생한다. 반대로, 상향컬링 발생 시에는 슬래브 횡방향 줄눈 양쪽에 재하된 축하중으로 인하여 슬래브 상부에 최대 인장응력이 발생한다(NCHRP 2004). 본 연구에서는 정길수 등(2008)이 유한요소 해석을 반복 수행하여 개발한 식 (10)에서 식 (12)의 콘크리트 슬래브 응력 회귀모형을 사용하여 최대 인장응력을 구하였다. 식 (10)은 온도하중에 의해 발생한 슬래브 인장응력의 회귀모형이고 식 (11)은 상향컬링이 일어나 슬래브 양쪽 줄눈의 길어깨 측 우각부에 조향축 하중과 단륜 구동축 하중이 동시에 작용하여 슬래브 상부에 발생된 최대 인장응력의 회귀모형이다. 그리고 식 (12)는 컬링이 발생하지 않았거나 하향컬링이 일어난 길어깨 측 슬래브 모서리 중앙부에 축하중이 재하되어 슬래브 하부에 발생된 최대 인장응력의 회귀모형이다.

$$\sigma = tb_1 \times \alpha \times g \times k^{tb_2} \times E^{tb_3} \times T^{tb_4} \times L^{tb_5} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ 는 콘크리트 열팽창계수(/°C),  $g$ 는 슬래브 온도구배(°C/cm),  $k$ 는 복합 지지력계수(MPa/m),  $E$ 는 콘크리트 탄성계수(N/m<sup>2</sup>),  $T$ 는 슬래브 두께(m),  $L$ 는 슬래브 길이(m), 그리고  $tb_1$ 에서  $tb_5$ 까지는 회귀모형 상수이다.

$$\sigma = ld_1 \times k^{ld_2} \times P_1^{ld_3} \times P_2^{ld_4} \times E^{ld_5} \times T^{ld_6} \times LTE^{ld_7} \times L^{ld_8} \times AXL^{ld_9} \quad (11)$$

여기서,  $P_1$ 은 단륜 단축 하중(kN),  $P_2$ 는 단륜 복축 하중(kN),  $LTE$ 는 하중전달률(%),  $AXL$ 은 축간 거리(m),  $ld_1$ 에서  $ld_9$ 까지는 회귀모형 상수이다.

$$\sigma = b_1 \times k^{b_2} \times P^{b_3} \times E^{b_4} \times T^{b_5} \quad (12)$$

여기서,  $P$ 는 축하중(kN)이고  $b_1$ 에서  $b_5$ 까지는 회귀모형 상수이다.

해석에 있어서 기본값으로는 횡방향과 종방향으로 각각 2개와 3개, 총 6개의 슬래브를 사용하였고 슬래브의 두께, 폭, 그리고 길이는 국내 고속도로 콘크리트 포장에 일반적으로 사용되는 300mm, 3.6m 그리고 6m를 각각 선택하였다. 린 콘크리트 기층, 보조기층, 노상의 두께는 각각 150mm, 300mm, 1,000mm로 정하였다. 콘크리트의 탄성계수는 구조해석에 일반적으로 사용되는 28GPa로 결정하고 시간에 따른 탄성계수의 증가는 고려하지 않았다. 열팽창계수는  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 사용하였으며, 콘크리트의 휨강도는 Rigid Pavement Design Manual(FLDOT 2009)에서 제시하는 4.38MPa로 결정하였다. 또한 하중전달률은 Shoukry(2005)의 연구 결과를 참고하여 85%로 정하였고, 하중전달률의 변화는 고려하지 않았다. 슬래브 하부의 복합 지지력계수는 AASHTO Guide(1993)에 의하여 각 층의 두께와 물성을 사용하여 417.90MPa/m로 계산되었으며, 계절에 따른 지지력의 변화는 고려하지 않았다. 구조해석에 사용된 주요 포장 구조와 물성은 표 5와 같다.

표 5. Geometric Shape and Material Properties Used in Program

Geometric Shape	Slab	Number : 6 (2x3) Thickness : 300mm Width : 3.6m Length : 6m
	Base	Thickness : 150mm
	Subbase	Thickness : 300mm
	Subgrade	Thickness : 1000mm
Material Properties	Slab	Elastic Modulus : 28GPa Poisson's Ratio : 0.2 Coefficient of Thermal Expansion : $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ Bending Strength : 4.38MPa
	Base	Elastic Modulus : 15GPa Poisson's Ratio : 0.2
	Subbase	Elastic Modulus : 200MPa Poisson's ratio : 0.2
	Subgrade	Elastic Modulus : 50MPa
	Complex Modulus of Subgrade Reaction	417.90MPa/m
	LTE	85%

#### 4.4. 누적 피로손상 산정

앞에서 설명한 환경, 교통, 포장 구조 및 물성 등을 정길수 등(2008)이 개발한 회귀모형에 입력변수로 사용하여 정해진 시간 간격마다의 최대 인장응력을 구하고 응력-강도비를 피로모형에 대입하여 피로수명을 구하였다. 본 연구에서는 피로수명의 역수를 피로손상으로 정의하고 Miner(1945)의 이론에 따라 식 (13)과 같이 중첩하는 방법으로 20년 동안 피로손상을 누적하였다.

$$D_{total} = \sum_l \sum_k \sum_j \sum_{i=1}^{24} \frac{1}{N_{f_{i,j,k,l}}} \quad (13)$$

여기서,  $D_{total}$ 은 누적 피로손상,  $N_{f_{i,j,k,l}}$ 은 각 경우의 피로수명,  $i$ 는 차종,  $j$ 는 시간,  $k$ 는 월,  $l$ 은 년을 의미한다.

#### 5. 피로모형 별 누적 피로손상 비교

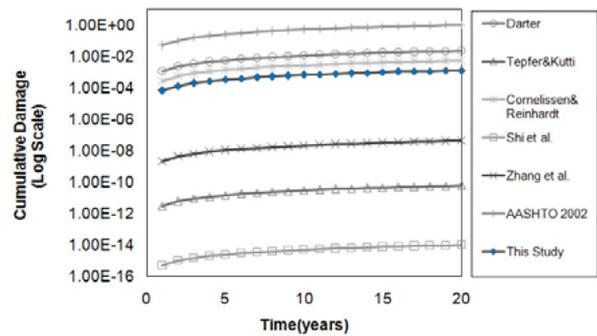
앞에서 설명한 콘크리트 포장 누적 피로손상 해석 프로그램을 사용하여 본 연구에서 제안된 식 (5)의 피로모형과 기존에 제안된 피로모형들에 의해 누적 피로손상을 계산하고 비교하였다. 해석에 사용된 피로모형들을 정리하면 표 6과 같다. Shi 등(1993)의 모형의 A는 생존확률 50%일 때의 계수이고 AASHTO 2002(NCHRP 2004) 모형의 P는 파괴확률 50%일 때의 계수이다.

표 6. Fatigue Models Used in Cumulative Fatigue Damage Prediction

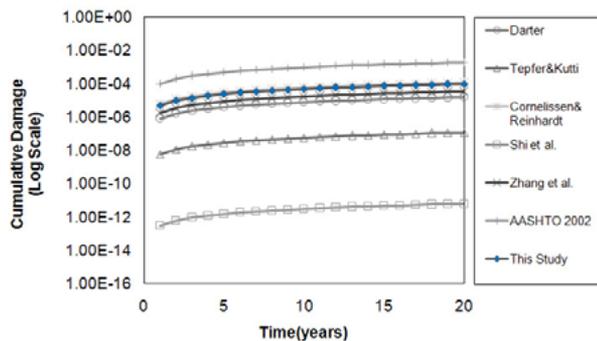
Darter(1977)	$\log N_f = 17.61 - 17.61S$
Tepfer Kutti(1979)	$S = 1 - 0.0690(1-R) \log N_f$
Cornelissen and Reinhardt(1984)	$\log N_f = 14.81 - 14.52 \frac{\sigma_{max}}{f_c} + 2.79 \frac{\sigma_{min}}{f_c}$
Shi et al.(1993)	$S = AN_f^{-0.0422(1-R)}$ where, A is Survival Probability Level
Zhang et al.(1996)	$S = 1.107[1 - 0.087(1-R) \log N_f]$
AASHTO 2002 (NCHRP 2004)	$\log N_f = [-S^{-5.367} \log(1-P)/0.0032]^{0.2276}$ where, P is Failure Probability Level
This Study	$\log N_f = 13.291 - 12.431S + 2.677R$

표 6에 보인 모형들을 본 연구에서 개발된 누적 피로손상 해석 프로그램에 적용하여 공용기간 20년 동안의 누적 피로손상을 계산하였다. 상향굴림에 의하여 슬래브 상부로부터 진전되는 하향균열에 대한 누적 피로손상이 상향균열보다 Log 스케일로 약 3 가량 크게 계산

되었다. AASHTO 2002 모형이 누적 피로손상을 가장 크게 예측한 반면 Shi 등의 모형은 가장 작게 예측하였다. 본 연구에서 제안된 모형은 Cornelissen과 Reinhardt가 제안한 모형과 가장 유사한 결과를 나타냈는데, 상향균열의 경우에는 거의 일치하는 결과를 보였고 하향균열의 경우에는 약간 작게 예측하였다. Tepfer와 Kutti의 모형 및 Shi 등의 모형은 앞에서 언급한 것과 같이  $R$ 이 커지고  $S$ 가 감소함에 따라  $N_f$ 는 기하급수적으로 증가하게끔 예측하였다. 따라서 모형개발을 위해 수행된 실험 조건의 범위를 벗어날 정도로  $R$ 이 크거나  $S$ 가 작은 경우에는 피로수명이 지나치게 크게 예측되고 이에 따라 누적 피로손상은 매우 작게 계산되었다.



(a) Top-down Cracking



(b) Bottom-up Cracking

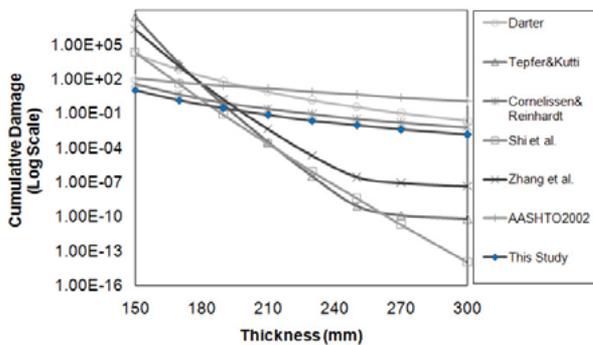
그림 8. Cumulative Fatigue Damage Predicted by Models

#### 6. 피로모형 별 민감도 비교

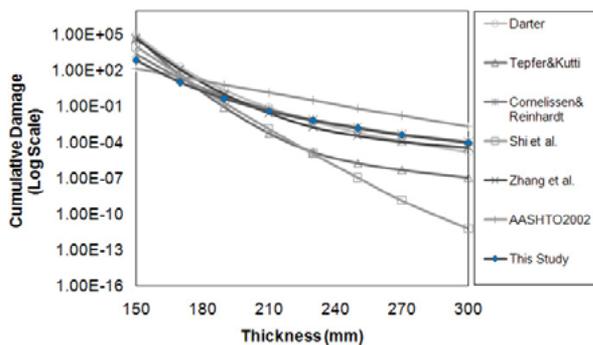
콘크리트 포장의 누적 피로손상에 비교적 큰 영향을 미치는 슬래브 두께, 줄눈간격, 복합 지지력계수, 그리고 하중전달률을 변화시키며 표 6에 보인 피로모형들에 의해 예측된 재령 20년의 누적 피로손상을 비교하였다. 슬래브 두께 0.3m, 줄눈간격 6m, 복합 지지력계수 417.90MPa/m, 그리고 하중전달률 85%를 기준으로 정하고 민감도 분석을 수행하였다.

## 6.1. 슬래브 두께에 따른 민감도

슬래브 두께를 150mm에서 300mm까지 변화시키면서 재령 20년의 누적 피로손상을 그림 9와 같이 계산하였다. 하향균열을 유발하는 누적 피로손상의 경우, 본 연구에서 제안된 모형은  $R$ 을 고려함에도 불구하고  $R$ 을 고려하지 않는 AASHTO 2002, Dater, 그리고 Cornelissen과 Reinhardt의 모형과 같이 슬래브 두께에 크게 민감하지 않았다. 이와는 달리, Zhang 등, Tepfer와 Kutti 그리고 Shi 등의  $R$ 을 고려하는 다른 모형들은 슬래브 두께에 매우 민감한 경향을 보였다. 따라서 슬래브 두께가 커질수록 이들 모형 간 누적 피로손상의 차이는 커지는 경향을 나타냈다. 상향균열을 유발하는 누적 피로손상의 경우에도 하향균열의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 약 200mm의 두께까지는 모든 모형들이 유사한 누적 피로손상을 나타냈지만 슬래브 두께가 그 이상으로 커지면 Zhang 등, Tepfer와 Kutti, 그리고 Shi 등의 모형이 훨씬 더 민감하게 변화하였다. 그 결과, 슬래브 두께가 커질수록 모형들 간 누적 피로손상의 차이는 점점 커졌다.



(a) Top-down Cracking



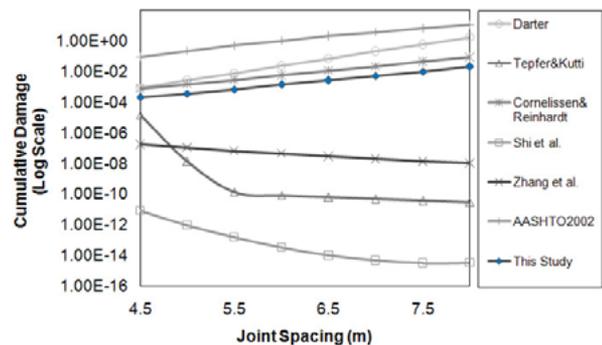
(b) Bottom-up Cracking

그림 9. Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage by Slab Thickness

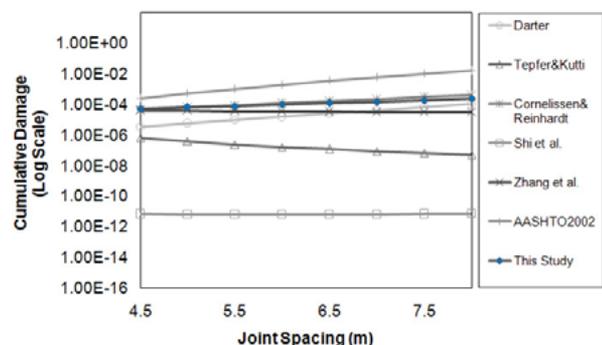
## 6.2. 줄눈간격에 따른 민감도

줄눈간격을 4.5m에서 8m까지 변화시키면서 재령 20

년의 누적 피로손상을 그림 10과 같이 계산하였다. 하향균열의 경우, 본 연구에서 제안된 모형은  $R$ 을 고려함에도 불구하고  $R$ 을 고려하지 않는 AASHTO 2002, Dater, 그리고 Cornelissen과 Reinhardt의 모형과 같이 줄눈간격이 넓어짐에 따라 누적 피로손상이 약간씩 증가하는 결과를 나타냈다. 이와는 달리 Zhang 등, Tepfer와 Kutti, 그리고 Shi 등의  $R$ 을 고려하는 다른 모형들은 줄눈간격이 넓어짐에 따라 누적 피로손상이 감소하는 경향을 보였다. 구조해석 시 줄눈간격이 넓어지면 환경하중에 의한 응력은 교통하중에 의한 응력보다 훨씬 크게 증가한다. 이 경우 응력-강도비와 최소-최대응력비  $R$ 이 함께 증가하는데  $R$ 이  $S$ 보다 크게 증가하고 그림 2에서 보듯이  $R$ 이  $S$ 보다 피로수명에 더 민감하다. 결과적으로 줄눈간격이 넓어짐에 따라  $R$ 을 고려하는 Zhang 등, Tepfer와 Kutti, 그리고 Shi 등의 모형에 의해 예측된 피로수명은 증가하고 누적 피로손상은 감소하게 된다. 하지만 이 결과는 줄눈간격 증가가 슬래브에 발생하는 응력을 증가시켜 누적 피로손상을 가속화하리라는 일반적인 기대와는 상반된다. 본 연구에서 개발된 모형은  $R$ 을 고려함에도 불구하고 기존의  $R$ 을 고려하는 모형들과는 달리 줄눈간격이 넓어짐에 따라 누적 피로손상이 증가하는 경향을 나타냈다. 상



(a) Top-down Cracking



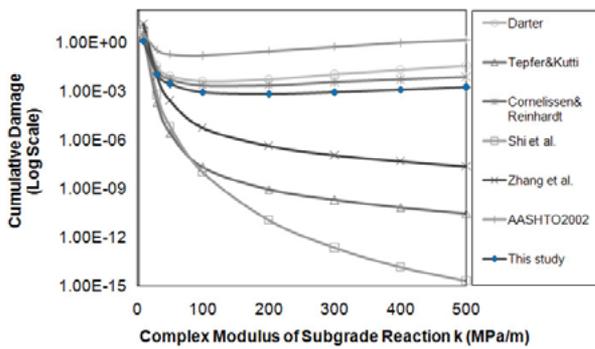
(b) Bottom-up Cracking

그림 10. Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage by Joint Spacing

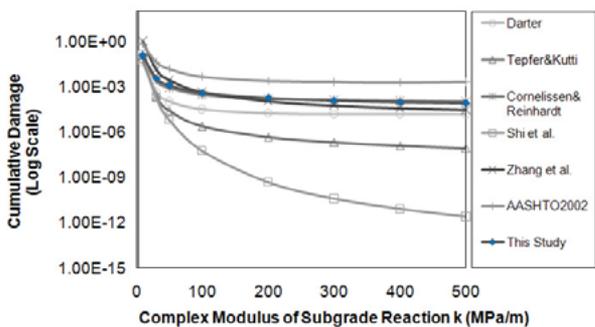
향균열을 유발하는 누적 피로손상의 경우, 본 연구에서 제안된 모형은 AASHTO 2002, Dater, Cornelissen과 Reinhardt, 그리고 Zhang 등의 모형과 비교적 유사한 경향을 나타냈다. Shi 등의 모형은 매우 작은 누적 피로손상을 나타냈으며 줄눈간격에 따른 변화가 거의 없었다.

### 6.3. 복합 지지력계수에 따른 민감도

복합 지지력계수를 10MPa/m에서 500MPa/m까지 변화시키면서 재령 20년의 누적 피로손상을 그림 11과 같이 계산하였다. 하향균열의 경우, 본 연구에서 제안된 모형의 누적 피로손상은  $R$ 을 고려하지 않는 AASHTO 2002, Dater, 그리고 Cornelissen과 Reinhardt의 모형과 같이 약 100MPa/m의 복합 지지력계수까지 급격히 감소하다가 그 이후부터 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. 복합 지지력계수 100MPa/m까지는 지지력이 증가할수록 환경하중에 의한 응력 증가보다 교통하중에 의한 응력 감소가 더 컸으나 그 이후로는 환경하중에 의한 응력 증가가 더 컸기 때문으로 판단되었다. 이와는 달리 Zhang 등, Tepfer와 Kutti 그리고 Shi 등의  $R$ 을 고려하는 다른 모형들은 지지력이 증가함에 따라 누



(a) Top-down Cracking



(b) Bottom-up Cracking

그림 11. Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage by Complex Modulus of Subgrade Reaction

적 피로손상이 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 Shi et al. 모형은 매우 민감한 경향을 나타냈다. 상향균열을 발생시키는 누적 피로손상의 경우에는 모든 모형들에서 지지력에 따라 누적 피로손상이 조금씩 점차 감소하거나 일정하게 유지되는 경향이 나타났으며, 특히 Shi 등의 모형의 민감도가 매우 컸다.

### 6.4. 하중전달률에 따른 민감도

상향균열의 경우, 차륜하중을 슬래브 종방향 단부 중앙에 재하하고 그 위치의 슬래브 하부에 발생된 최대응력을 찾으므로 줄눈의 하중전달률에 크게 영향을 받지 않는다. 하지만 하향균열의 경우에는 축하중을 슬래브 줄눈 근처에 재하하여 최대응력을 찾기 때문에 하중전달률에 크게 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 하향균열에 한해서 하중전달률을 30%에서 100%까지 변화시키면서 재령 20년의 누적 피로손상을 그림 12와 같이 계산하였다. 하중전달률이 증가할수록 모형들의 누적 피로손상은 조금씩 감소하는 경향을 나타냈다. Shi 등의 모형은 가장 민감한 경향을 보였다.

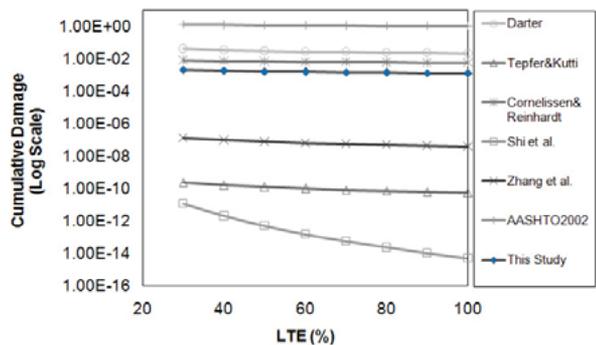


그림 12. Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage by LTE

## 7. 결론

기존에 수행된 실내 휨피로실험 결과를 수집하여 다중회귀분석을 수행하고 환경하중의 영향을 고려하는 새로운 형태의 피로모형을 개발하였다. 개발된 피로모형은  $S$ 와  $R$ 에 대해 민감도가 지나치게 큰 기존 모형들의 단점을 개선하였으며 모형개발에 사용되지 않은 휨피로실험의 결과를 예측한 결과 기존 모형보다 높은 결정계수를 나타냈다. 이 외에도 콘크리트 포장 누적 피로손상 해석 프로그램을 개발한 후 본 연구에서 제안된 모형을 비롯한 기존 피로모형들을 적용하여 누적 피로손상을 계산하고 비교하였다. 본 연구에서 제안된 피로모형으

로 국내에서 시공되는 폭 3.6m, 줄눈간격 6m, 두께 300mm 슬래브의 누적 피로손상을 해석한 결과, 하향 균열의 누적 피로손상이 상향균열 보다 Log 스케일로 약 3정도 크게 계산되었다. AASHTO 2002 모형이 누적 피로손상을 가장 크게 예측한 반면 Shi 등의 모형은 가장 작게 예측하였다. 본 논문에서 제안된 모형은 최소-최대응력비  $R$ 을 고려함에도 불구하고  $R$ 을 고려하지 않는 기존 모형들처럼 두께에 따른 민감도가 작게 나타났다.  $R$ 을 고려하는 기존 모형들은 줄눈간격이 넓어짐에도 누적 피로손상이 감소하는 비정상적인 경향을 보였으나 개발된 모형은 줄눈간격 증가에 따라 누적 피로손상도 함께 증가하는 합리적인 경향을 나타냈다. 또한  $R$ 을 고려하지 않는 기존 모형들처럼 복합 지지력계수가 어느 정도에 이를 때까지는 누적 피로손상이 감소하다가 그 이후로는 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. 피로모형들의 하향균열에 대한 누적 피로손상은 하중전달률의 증가에 따라 조금씩 감소하는 경향을 나타냈다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구와 인하대학교의 연구비 지원으로 수행되어 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- 건설교통부. (2004). "콘크리트 포장 설계법 개발, 한국형 포장 설계법 1단계 3차년도 최종 보고서", 건기연 15-83, 한국건설기술연구원.
- 건설교통부. (2006). "교통량 조사 차종 분류 가이드", 건설교통부.
- 국토해양부 (2007) 교통량 통계연보, 교통량정보제공시스템, <http://www.road.re.kr>
- 김동호, 최성용, 윤경구 (2005) "등가 피로수명에 의한 콘크리트의 피로해석 및 모델", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 25권, 제 3A호, 505-510.
- 박병희 (1984). "콘크리트의 피로강도 해석을 위한 수정 Goodman 도표의 실험적 도출" 석사학위 논문. 연세대학교.
- 박정우, 정영도, 임진선, 정진훈 (2009) "콘크리트 슬래브 건조수축응력 감소에 관한 초기 연구", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 11권, 제 4호, pp. 87~94.
- 안덕순, 박희문 (2004) "현장 계측자료를 이용한 포장체 온도예측모델 개발 연구", 한국도로학회 2004 학술발표대회 논문집, 제 6권, 17-20.
- 안지환, 권수안, 김현욱, 김연복 (2002) "차로 및 방향분배계수 산정 연구", 한국도로학회 2002년도 학술발표회 논문집, 한국도로학회, pp. 41-52.
- 윤경구, 김동호, 홍창우 (2003) "실험방법에 따른 포장 콘크리트의 피로수명", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 5권, 제 3호, pp. 11-20.
- 원대연 (1988). "환경인자가 무근콘크리트의 피로특성에 미치는 영향" 석사학위 논문. 연세대학교.
- 정길수, 김인태, 류성우, 조윤희 (2008) "유한 요소법을 이용한 줄눈 콘크리트 포장 응력식 개발", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 10권, 제 2호, pp. 167-181.
- AASHTO (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- Aas-Jakobsen, L. (1970). "Fatigue of Concrete Beams and Columns." Bulletin No.70-1, Division of Concrete Structures, NTH, Trondheim.
- Asgari, A. (2004) "Evaluation of concrete pavement service life using three-dimensional nonlinear finite element analysis and nonlinear fatigue damage model.", Ph.D. Thesis, Purdue University.
- Cornelissen, H.A.W. and Reinhardt, H.W. (1984) "Uniaxial Tensile Fatigue Failure of Concrete Under Constant-Amplitude and Programmed Loading.", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No. 129, pp. 216-226.
- Darter, M.I. (1977). "Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Volume 1: Development of Design Procedures.", Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-77-III.
- FLDOT (2009). "Rigid Pavement Design Manual." Florida Department of Transportation Pavement Management Office, Florida, 2009.
- Jeong, J.H., Lim, J.S., Sun, R.J., and Zollinger, D.G. (2010) "Modeling of Differential Shrinkage for Pavement Design" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, in press
- Miner, M.A. (1945). "Cumulative Damage in Fatigue", American Society of Civil Mechanical Engineers, Transactions, Vol. 67.
- Mohamed, A.R. and Hansen, W. (1996) "Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling stress in Concrete Pavement", *Transportation Research Record 1568*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 65-71.
- Murdock, J.W. and Kesler, C.E. (1958) "Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams" *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.30, No.2, pp. 221-231.
- NCHRP (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.", Final Report. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC.

- Roesler, J.R. (1998). "Fatigue of Concrete Beams and Slabs.", Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Shi, X.P., Fwa, T.F., and Tan, S.A. (1993) "Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete", ACI Material Journal, Vol. 90, No. 5, pp. 435-440.
- Shoukry, S.N. (2005). "Evaluation of Load Transfer Efficiency Measurement.", Final Report, Mid-Atlantic Universities Transportation Center
- Söerqvist, J. (2006) "Design of concrete pavements : design criteria for plain and lean concrete." Licentiate Thesis. Stockholm University.
- Tepfers, R. and Kutti, T. (1979) "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete" *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 76, No. 5, pp. 635-652.
- Zhang, B., Phillips, D.V., and Wu K. (1996) "Effect of Loading Frequency and Stress Reversal on Fatigue Life of Plain Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 177, pp. 361-375.

접 수 일 : 2011. 10. 13

심 사 일 : 2011. 10. 14

심사완료일 : 2011. 11. 11