

콘크리트 포장 슬래브 피로 균열 회귀모형의 개선

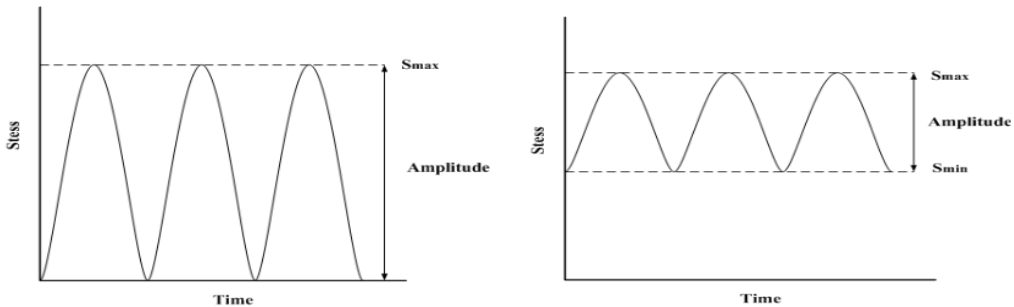
Improvement of a Regression Model for Concrete Pavement Slab Fatigue Cracking

박주영* · 임진선** · 이창준*** · 권수안**** · 정진훈*****

Park, Joo Young · Lim, Jin Seon · Lee, Chang Joon · Kwon, Soo Ahn · Jeong, Jin Hoon

1. 서론

콘크리트 포장의 수명에는 기층의 종류, 길어깨의 종류, 포장의 두께 그리고 기후조건에 의한 포장의 온도 및 습도의 변화 등 다양한 인자들이 영향을 미친다. 줄눈 콘크리트 포장에 발생하는 응력은 교통하중과 환경하중에 의한 것으로 대개 콘크리트의 항복응력보다 훨씬 적은 수준이 발생하지만, 충분한 강도발현 이전에 발생한 콘크리트 포장의 초기 균열 및 미세균열이 장기적인 진전에 의해 파괴된 주된 요인은 교통 및 환경하중의 반복에 의한 피로파손이라 할 수 있다. 기존 연구에 의한 대부분의 무근 콘크리트 피로모형은 그림 1(a)와 같이 최소응력을 고려하지 않고 최대응력만을 발생시키면서 개발되었으므로 기존에 도입되어있는 하중에 의한 영향을 고려할 수 없었다. 하지만, 실제 콘크리트 포장은 환경하중에 의한 응력이 도입된 상태에서 교통하중에 의한 응력이 추가로 도입된다. 때문에 피로모형을 합리적으로 개발하기 위해서는 최소응력 고려되어 그림 1(b)와 같이 최소응력을 도입한 후 추가의 응력을 도입하여 최대응력에 도달하게 하는 논리의 피로모형이 제시되어야 한다.



(a) 최소응력(S_{min})이 고려되지 않은 하중재하

(b) 최소응력(S_{min})이 고려된 하중재하

그림 1. 환경하중을 고려하기 위한 피로시험의 하중재하 개념도 (임진선 2009)

Murdock과 Kesler(1958)에 의해 최소응력이 무근콘크리트 피로수명에 영향을 최초로 보고하였으며, Aas-Jakobsen(1970) 및 Teffers와 Kutti(1979)는 다음 식 1과 같이 최소응력의 영향을 최소응력과 최대응력의 비 R로 정하여 모형화 하였다. 그리고 Shi 등은 등가피로수명법을 이용하여 식 2와 같이 모형화하였다. Shi의

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332(E-mail: pjy0704@naver.com)
 ** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail: coreplay@hanmail.net)
 *** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 · 연구원 · 031-910-0649(E-mail: cjlee4@kict.re.kr)
 **** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로시설연구실 · 책임연구원 · 031-910-0434(E-mail: sakwon@kict.re.kr)
 ***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수공학박사 · 032-860-7574(E-mail: jhj@inha.ac.kr)



모형은 Tepfers와 Kutti(1979)의 모형의 예측 결과와 비교하였을 때 매우 유사하지만, 확률계수를 가지는 특징이 있다.

$$S = 1 - \beta(1 - R) \log N_f \quad (\text{식 1})$$

$$S = A N_f^{\beta(1-R)} \quad (\text{식 2})$$

여기서, S = 응력/강도, R = 최소응력/최대응력, N_f = 피로수명, β = 재료계수, A = 확률계수

국내에서도 이와 유사한 연구가 박병희 (1984), 원대연 (1988), 전성일 (2002), 김동호 등(2005), 임진선 (2009)등에 의해 연구되었다. 하지만 대부분 Tepfers와 Kutti의 모형 혹은 Shi의 모형을 기반으로 실험결과를 모형화 하여 실험 영역에서는 유사한 결과를 도출하지만 그 조건을 벗어나는 경우에는 결과가 매우 과대하게 예측하는 경향이 있고, 모형 민감도가 너무 과대한 성향을 지녀 역학적-경험적 포장설계로직에 모형을 적용시켰을 때, 매우 낮은 Damage를 예측하여 합당한 결과를 도출하는데 한계가 있었다. 본 연구에서는 기존 연구자들의 피로시험 결과를 수집하였고, 이를 S, N_f , R에 대하여 다중회귀분석을 하였으며 기존의 모형과 비교 분석하였다.

2. 모형개발

콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 도입되어 있는 환경하중의 영향을 합리적 수준으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위하여, 박병희(1984), 원대연(1988), 김동호(2005), 그리고 Shi 등(1994)이 실시한 피로실험 결과를 수집하였고 결과는 다음 표 1과 같다. 서로 다른 실험 조건에 대해서는 임진선(2009)이 제시한 방법으로 보정하였으며 표 안의 값들은 피로수명(횟수) N_f 를 로그화한 값이다.

표 1. 휨 피로시험 자료

$\log(N_f)$	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		
R=0.1			4,365		229,087			
	457		9,772		281,838			
	182		11,749		295,121			
	708		3,631		107,152			
	71		6,457		173,780			
	72		14,125		239,883			
	117		15,136		512,861			
	195		18,197		549,541			
	224		21,380		707,946			
	457		23,988		724,436			
537								
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					
			5,888					
R=0.3	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					

기존 연구에서는 Wöhler가 제안한 S-N 도표를 기준으로 하여 식1 및 식2와 같이 응력-강도비 S를 종속 변수로 피로수명 N_f 를 독립변수로 하여 회귀분석 하였으며, N_f 의 모형계수와 최소응력에 관한 인자인 R을 서로 영향을 받는 것으로 정의하였다. 실제 시험에서 실험변수는 응력-강도비 S와 최소응력과 최대응력비 R이며, 이에 대한 응답으로 피로수명, 즉 파괴까지의 반복하중횟수인 N_f 가 얻어진다. 본 연구에서는 위 표 1의 결과를 $\text{Log}(N_f)$ 를 종속변수로 하고, S와 R을 각각 독립변수로 취해 다음 식 3과 같이 모형화 하여 다중 회귀분석을 실시하였다. 각 독립변수의 계수 및 모형의 유의수준은 0.05로 결정하였다.

$$\text{Log}(N_f) = A + B \times (S) + C \times (R) \quad (\text{식 3})$$

여기서, A, B, 그리고 C 는 회귀계수

회귀분석 결과 표 2와 같이 상관계수가 0.852, 결정계수는 0.726이었으며, 유의수준 0.05에 대한 모형의 가설이 성립함을 알 수 있었다. 그림 2는 표준화 잔차의 확률분포를 나타낸 것으로 비교적 좌우 대칭인 정규성을 나타낸 결과를 보였으며, 그림 3은 모형에 대한 표준화 잔차에 대한 P-P도를 도시한 것으로 기대누적확률이 직선위에 균집한 결과를 보였다. 이를 통해 회귀모형의 예측결과가 비교적 높은 상관성을 지님을 확인하였다.

표 2. 다중회귀분석 결과 요약

R	R 제곱	수정된 R 제곱	추정값의 표준오차	통계량 변화량					Durbin-Watson	
				R 제곱 변화량	F 변화량	자유도 1	자유도 2	유의확률 F 변화량	유의확률 F 변화량	
0.852	0.726	0.723	0.678	0.726	229.009	2.000	173.000	0.000	0.821	

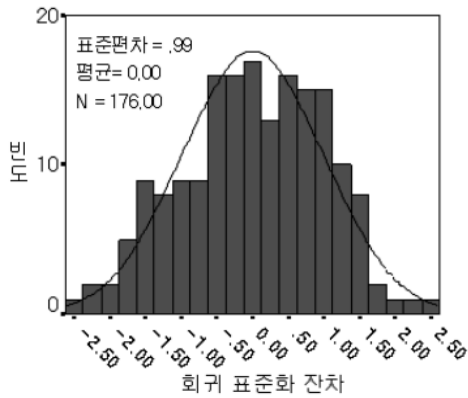


그림 2. 회귀 표준화 잔차의 정규분포

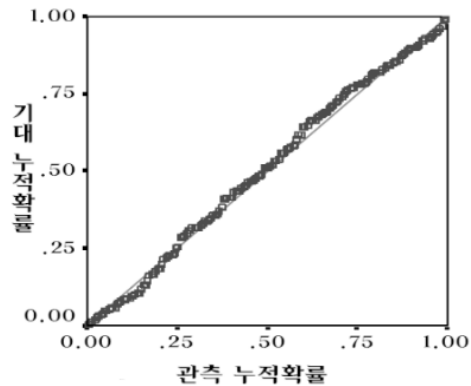


그림 3. 종속변수(피로수명)에 대한 표준화 잔차의 P-P도

회귀분석 결과를 통해 모형계수 A, B, 그리고 C를 아래 표 3과 같이 결정되어 식 4와 같이 모형을 개발하였으며, t검정을 통해 각 독립변수의 유의수준을 평가한 결과, 유의수준 0.05에 대한 모형의 가설이 성립함을 알 수 있었다. 또한 공선성 통계량인 분산팽창인수(VIF)를 검토한 결과, 독립변수들 간의 영향, 즉 다중공선성의 가능성이 거의 없음을 확인하였다.

$$\text{Log}(N_f) = 13.291 - 12.431(S) + 2.677(R) \quad (\text{식 4})$$

표 3. 모형계수에 대한 회귀 분석 결과

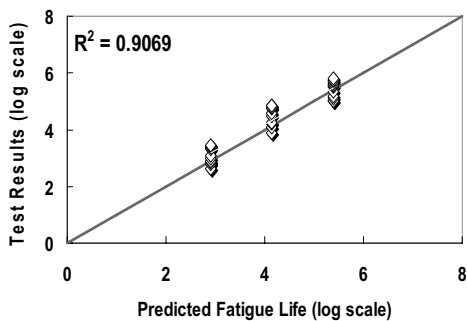
	비표준화 계수		표준화 계수	t	유의 확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	VIF
	계수	표준 오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차 한계	
(상수)	13.291	0.432	-	30.788	0.000	12.439	14.143	-	-	-	-	-
S	-12.431	0.581	-0.946	-21.398	0.000	-13.578	-11.285	-0.761	-0.852	-0.852	0.811	1.234
R	2.677	0.278	0.426	9.643	0.000	2.129	3.224	0.015	0.591	0.384	0.811	1.234

종속변수: 피로수명

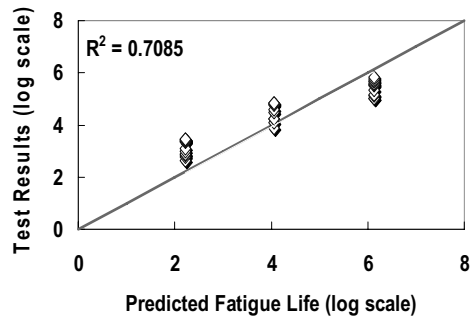
3. 모형의 검증 및 기존 모형과 비교

회귀분석을 통해 제안된 모형의 검증을 위해 한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3

차년도(2004)에서 수행된 실내 횡피로시험 결과와 제안된 모형의 예측결과를 비교하였다. 실내시험은 150X150X550mm의 각주형 공시체를 28일 수중양생 시킨 후 56일까지 공기 중 양생 시킨 후 KS F2408규정에 따라서 INSTRON 8506을 사용하여 3점 재하방식으로 정적강도를 측정하였고, 동일한 공시체에 대하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 S가 0.9, 0.8 그리고 0.7인 조건에서 총 45개 공시체에 대해 수행하였다. 하지만 위 실내시험은 최소응력에 대한 영향을 크게 고려하지 않았다. 다음 그림 4(a)는 제안 모형의 예측결과와 실내시험결과를 비교한 것이며, 그림 4(b)는 Shi 모형 형태의 기준에 제시된 모형(임진선 2009)과 실내 시험결과를 비교한 것으로, 본 연구를 통해 제안된 모형의 결정계수가 0.9069로 기존 모형보다 더 높게 나타났다. 본 연구에서 제안된 모형은 임진선(2009)의 모형은 같은 자료를 기반으로 모형을 개발하였으나 분석 방법 및 모형 형태에 따라 예측결과가 달라짐을 알 수 있었다.



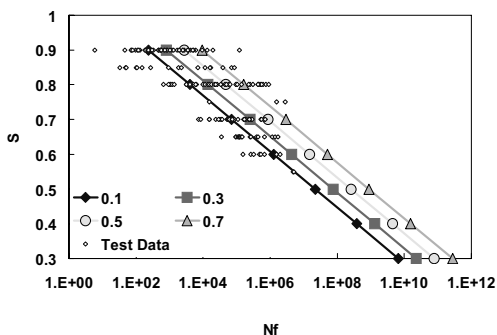
(a) 제안모형



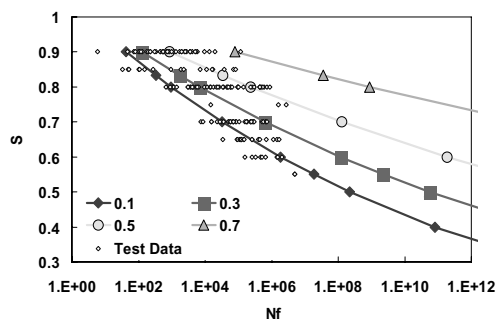
(a) 기존모형(임진선 2009)

그림 4. 실내시험결과와 예측모형간의 비교

다음 그림 5는 표 1에서 보여준 횡피로 시험결과, 본 연구에서 제안한 모형의 예측결과, 그리고 임진선(2009)의 모형의 예측결과를 서로 비교한 것으로 두 모형 모두 R이 0에 가까운 경우 즉 최소응력이 거의 없는 경우에는 유사한 결과를 보였으나 R이 커지면 기존 모형은 예측결과가 매우 민감하게 변하는 반면 제안 모형은 크게 민감하게 변하지 않았다. 표 4는 S가 0.6일 때, R의 변화에 따른 모형 간의 예측 결과를 나타낸 것으로 앞에서 언급한 것과 같이 R이 0에 가까운 경우에는 큰 차이가 없으나 R이 0.7인 경우 $\log(N_f)$ 의 차가 약 11.1까지 차이가 남을 알 수 있었다.



(a) 제안모형



(a) 기존모형(임진선 2009)

그림 5. R에 따른 예측모형간의 민감도 비교



표 4. 모형간 예측 결과 비교

	Log(N_f), S=0.6			
	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7
기존모형	6.3	8.1	11.3	18.8
제안모형	6.1	6.6	7.2	7.7
모형 간 차이	0.2	1.4	4.1	11.1

5. 결 론

콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 도입되어 있는 환경하중의 영향을 합리적 수준으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위해, 본 연구에서는 여러 선행 연구자들의 피로실험 결과를 수집하였고, 회귀분석을 실시하였다. 그 결과를 통해 제안된 모형계수를 결정하였고, 개발된 모델이 응력-강도비 S, 그리고 최소응력과 최대 응력의비 R이 전 범위에 걸쳐 예측 피로수명이 실내 실험결과와 유사하게 모사되었으며, 기존의 R을 고려하는 모형과 비교 시 인자에 대한 민감도가 기존보다 적음을 확인하였다. 그리고 한국형 포장 설계법 일환으로 실시한 횡인장 피로시험 결과값과 비교해 본 결과 거의 유사한 경향이 나타났으며, 0.90의 매우 높은 결정계수(R^2)값을 나타내었다. 향후 본 연구에서 개발된 모형을 역학적-경험적 설계 로직에 적용하여 누적피로파손의 결과와 기존 연구자들의 모형의 적용 결과와 비교 분석하여 합리적인 피로파손모형을 개발할 예정이다.

참고 문헌

Aas-Jakobsen, L. (1970). "Fatigue of Concrete Beams and Columns." *Bulletin No.70-1*, Division of Concrete Structures, NTH, Trondheim.

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, 221-231.

Shi, X. P., Fwa, T. F., and Tan, S. A. (1993). "Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete.", *ACI Material Journal*, Volume 90, No 5.

Tepfers, R. and Kutti, T. (1979). "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete." *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 76, 635-652.

건설교통부. (2004). "콘크리트 포장 설계법 개발", 한국형 포장 설계법 1단계 3차년도 최종 보고서, 15-83.

건설교통부. (2004). "아스팔트 포장 설계법 개발", 한국형 포장 설계법 1단계 3차년도 최종 보고서, G1 29-60.

김동호, 최성용, 윤경구(2005). "등가 피로수명에 의한 콘크리트의 피로해석 및 모델.", *대한토목학회 논문집*, 제 25권, 제 3A호, 505-510.

박병희 (1984), 콘크리트의 피로강도 해석을 위한 수정 Goodman 도표의 실험적 도출, 석사학위 논문, 연세대학교.

원대연 (1988), 환경인자가 무근콘크리트의 피로특성에 미치는 영향, 석사학위 논문, 연세대학교.

임진선 (2009), 환경하중 및 차량빈도를 고려한 확률론적 콘크리트 포장 피로모형의 개발, 석사학위 논문, 인하대학교

전성일 (2002), *Fatigue Analysis of Pavement Concrete by Split Tension Fatigue Test*, 석사학위 논문, 강원대학교.