



고속도로 장기 공용성 조사에 의한 줄눈 콘크리트 포장의 스폐링 모형 개발

Development of a Spalling Model of Jointed Concrete Pavement by Investigating Long-Term Highway Pavement Performance

정진훈* 유태석** 심종성***
Jeong, Jin Hoon Yoo, Tae Seok Sim, Jong Sung

Abstract

A spalling model for jointed concrete pavements(JCP) was developed using the data of distresses, climates, and materials at the sections of long-term pavement performance(LTPP) investigation. The total of forty-four spalling distress data was collected at twenty-two JCP LTPP sections in 1999 and in 2004. In addition, the data of climates, geometric shapes of the slabs, and material properties was also collected at those times. Factors significantly influencing the spalling distress were found by a sensitivity analysis for the data. Consequently, a spalling model was developed by a multi-regression analysis for the factors. The model showed reasonable trend of the spalling development comparing to other foreign models.

Keywords : jointed concrete pavement, spalling, long-term pavement performance, multi-regression analysis

요 지

국내 고속도로 장기공용성 조사구간의 파손자료와 기후자료 및 포장물성 자료를 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 스폐링 모형이 개발되었다. 줄눈 콘크리트 포장 장기공용성 조사구간 22개소의 스폐링 파손 상태가 1999년과 2004년에 각각 조사되어 총 44개의 스폐링 파손 자료가 수집되었으며 각 위치에서의 기후자료 및 포장의 형태 및 물성 자료 또한 수집되었다. 수집된 자료들의 민감도 분석을 통하여 스폐링 발생에 영향이 큰 인자들을 찾아내었으며, 그 인자들을 다중 회귀분석하여 스폐링 파손 모형이 개발되었다. 개발된 스폐링 모형은 외국의 모형과 비교할 때 합리적인 스폐링 발생 추이를 보였다.

핵심용어 : 줄눈 콘크리트 포장, 스폐링, 포장 장기공용성, 다중 회귀분석

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 책임연구원 · 공학박사
** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 포장연구그룹 연구원 · 공학박사
*** 정회원 · 한양대학교 건설교통공학부 교수 · 공학박사



1. 서론

도로의 포장은 목표수명동안 적절한 수준의 사용성을 제공하도록 계획·설계된다. 하지만 실제로는 포장의 공용기간 중 과도한 교통하중 및 환경하중이 작용하는 등 설계에서 고려하지 못했던 여러 가지 요인 때문에 설계 수명 이전에 사용성이 소멸될 수도 있으며 설계 수명기간이 지나서도 양호한 사용성을 유지하기도 한다. 현재 개발되고 있는 한국형 포장 설계법은 포장의 사용성에 영향을 미치는 인자를 파악하고 이에 따른 공용기간 중 사용성의 변화와 사용 한계 시점을 예측함으로써 포장을 설계하는 개념을 사용하고 있다.

스폴링은 포장의 균열이나 줄눈에서 콘크리트가 떨어져 나가는 파손으로 다른 파손과 비교해서 우리나라의 콘크리트 포장에 많이 나타나는 파손 유형이다. 스폴링을 비롯하여 피로균열과 평탄성 등 콘크리트 포장의 사용성 저하에 영향을 미치는 인자들을 예측하는 것은 콘크리트 포장설계법을 개발하기 위한 필수작업이다. 따라서, 콘크리트 포장의 구조해석에 기본적으로 널리 사용되는 입력변수인 포장의 형태와 물성, 그리고 시공현장의 기상조건만으로 스폴링 파손상태를 예측하는 모형을 개발하여 설계에 사용하도록 하는 연구가 수행되었다. 본 논문에서는 스폴링 파손에 영향을 미치는 인자들을 파악한 후 그 인자들을 변수로 하여 시간에 따른 스폴링 파손 발생의 예측 모형을 개발하고 기존의 모형과 비교 및 검증하는 일련의 과정을 서술하였다.

2. 기존 연구를 이용한 스폴링 파손 영향인자 분석

스폴링이란 줄눈 또는 균열의 단부에서 콘크리트의 일부가 떨어져 나가는 파손으로 정의된다. SHRP에서는 스폴링 파손의 정도에 따라, 스폴링의 폭이 75mm 이내인 경우를 하급, 75~150mm의 범위인 경

우를 중급, 150mm를 초과하는 경우를 상급 스폴링으로 분류하고 있다.¹⁾ 스폴링은 표 1에 보인 원인에 의하여 비압축성 물질의 침투, 콘크리트 재료의 성능 저하, 하중전달기구의 문제, 줄눈에서의 급작스러운 중하중에 의한 인장응력 발생 등에 의해 발생하는 것으로 알려졌으며 이상과 같은 지식을 이용하여 모형을 구축하기 위한 노력이 계속되어 왔다.

본 연구에서는 어떠한 인자들이 어떻게 결합되어 스폴링 파손이 예측되는지를 알아보기 위하여 외국에서 개발된 스폴링 모형들을 조사하였다. 표 1에서 SHRP 모형²⁾은 1994년에 Simpson 등에 의해 개발된 모형으로 스폴링이 발생한 줄눈(모든 등급)의 비율을 재령과 연평균 동결융해 주기로 표현한 것이다. LTPP 모형³⁾은 1999년 Titus-Glover 등에 의해 개발된 것으로 스폴링이 발생한 줄눈의 비율(모든 등급)을 교통 및 환경응력으로 발생된 손상, 일평균 온도범위, 건설당시의 일평균 상대습도, 연평균 동결융해 주기로 표현한 모형이다. CTL 모형⁴⁾은 1993년 Darter 등에 의해 개발된 것으로 스폴링이 발생한 길이의 비율을 염화물의 존재여부, 포장표면 76mm 아래에서의 동결융해의 예측 누적반복횟수, 적절히 다짐이 이루어진 시료의 공기량 및 28일 압축강도로 표현한 모형이다. RPPR 모형⁵⁾은 1998년 Yu 등에 의해 개발된 것으로 스폴링이 발생한 줄눈의 비율을 재령, 다우웰 바의 부식가능성, 평균 가로균열 간격, 실린트의 종류, 연평균 동결지수 및 온도가 90°F 이상인 날의 수로 표현한 모형이다. 마지막으로 FHWA 모형⁶⁾은 2000년 9월에 FHWA-RD-00-130에 소개된 모형이며 LTPP와 CTL의 179개 자료를 이용하여 개발되었다. 모형에서 스폴링은 전체 줄눈 가운데 스폴링이 발생한 줄눈의 비율로 정의되었고 교통하중보다는 재령과 환경이 스폴링 발생에 더 큰 영향을 미치는 형태로 구성되어 있다.

다음의 식은 표 1에서 보인 FHWA 모형으로 기존의 모형들에 대한 평가를 통하여 개발되어 가장 합리적인 형태의 스폴링 모형으로 인정받고 있다.



표 1. 줄눈 콘크리트 포장의 스폐링 발생에 영향을 미치는 인자²⁾

변 수	SHRP P-020 ³⁾	LTPP ⁴⁾	CTL ⁵⁾	RPPR ⁶⁾	FHWA ²⁾
재령	○	○	○	○	○
80-kN (18-kip) 등가단축하중		○		○	
연간 기온 범위		○			
연평균 동결융해 주기	○	○	○*		○
슬래브의 온도 구배		○			
대기 상대습도		○			
동결지수				○	
염분의 유무			○		
연평균 최고 기온 32℃ 이상인 날의 수				○	
가로줄눈의 간격		○		○	
가로줄눈 실린트의 형태		○		○	○
실린트 재료의 높이		○			
슬래브 두께		○			○
콘크리트의 탄성계수		○			
콘크리트의 공기량			○		○
콘크리트의 압축강도			○		○
콘크리트의 간접 인장 강도		○			
콘크리트의 온도팽창 계수		○			
노상 지지력 계수		○			
보조기층의 마찰계수		○			
다우웰의 부식 저항성				○	
콘크리트의 물/시멘트 비					○

* CTL 모형의 경우 공기의 동결융해주기가 아닌 포장 하부에서의 동결융해 주기임

$$\%SPALL = \left[\frac{AGE}{AGE + 0.01} \right] \left[\frac{100}{1 + 1.005^{(-12 \times AGE + SF)}} \right]$$

(회귀분석 결과 N:179, R²:0.78, SEE:6.8%의 줄눈)

여기서,

- %SPALL: 스폐링이 발생한 줄눈의 비율 (중급 및 상급)
- AGE: 건설된 이후의 시간, 년
- SF: 지역, 설계, 그리고 기후 관련 변수에 근거한 조정계수

$$SF = -1400 + 350 \times AIR\% \times (0.5 + PREFORM) + 43.4 \times f_c^{0.4} - 0.2 \times (FTCYC \times AGE) + 43 \times h_{pcc} - 536 \times WC_{Ratio}$$

여기서,

- AIR%: 콘크리트의 공기량, %
- AGE: 건설이후의 시간, 년
- PREFORM: 성형 실린트가 존재하는 경우 1, 다른 형태의 실린트나 실린트가 없는 경우 0
- f_c: 콘크리트의 압축강도, psi
- FTCYC: 연평균 동결융해 주기
- h_{pcc}: 콘크리트의 슬래브 두께, inch
- WC_{Ratio}: 콘크리트의 물/시멘트 비

민감도 분석 결과, 콘크리트 공기량, 압축강도, 슬래브의 두께가 증가할수록 스폐링 발생비율은 감소



하였고 동결융해 횟수 및 물/시멘트 비가 증가할수록 스폐링의 발생비율은 증가하는 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 우리나라의 고속도로에 사용되는 품질관리 기준에 따라 단면두께 30cm, 공기량 4%, 물/시멘트 비 0.44, 휨강도에서 역으로 추정한 압축강도 512 kg/cm²을 기본 상수로 하여 스폐링에 대한 연간 동결융해 주기의 민감도를 분석하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 재령 10년까지는 스폐링 발생에 대한 동결융해의 영향이 작았으나 그 이후부터는 동결융해가 스폐링의 발생에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

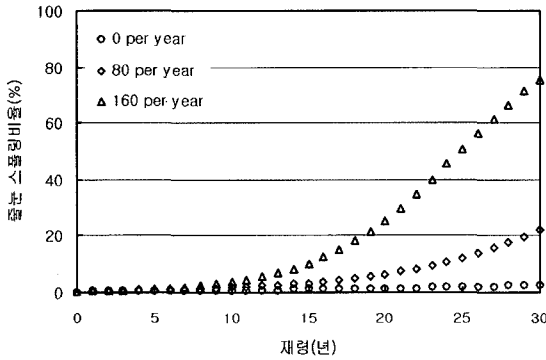


그림 1. 동결융해 주기별 스폐링 발생비율의 차이

3. 모형의 개발을 위한 자료 수집

스폴링 모형은 스폐링 발생과 상관성이 높은 인자들에 대한 민감도분석을 수행하여 스폐링 발생비율과 연관시키는 경험적 방법을 사용하여 개발하였다. 모형의 개발에는 국내 고속도로 콘크리트 포장의 장기공용성 조사구간을 이용하였다. 고속도로 줄눈 콘크리트 포장 장기공용성 조사 구간은 현재 22개소로 각 구간의 길이는 약 200m이며 6m의 줄눈간격을 갖는 33개의 슬래브로 구성되어 있다. 본 연구에서는 기존의 연구 결과를 토대로 스폐링 파손에 영향을 미칠 것으로 판단되는 재령, 수경동결지수, 콘크리트 쪼갬인장강도, 연평균 강수량, 연평균 습도, 연평균 풍속, 연평균 적설량을 변수로 선택하고 이 가운데

민감도가 높은 변수들을 재선정하여 최종적인 모형을 만드는 방법을 채택하였다.

3.1. 모형에 사용될 변수의 선정

스폴링 모형의 개발을 위해서 사용된 조사구간은 표 2에서 보듯이 중부선 2개소, 경부선 5개소, 남해선 4개소, 호남선 2개소, 제 2경인선 1개소, 서해안선 2개소, 영동선 4개소 88선 2개소로 총 22개소이다. 스폐링 모형의 개발에는 위의 구간에 대해서 1999년도와 2004년도에 조사한 자료 44개를 사용하였다. 스폐링 파손의 정량화는 위에서 언급한 SHRP의 스폐링의 구분방법을 사용하였고¹⁾ 모형의 정량화에는 외국의 모형에서 주로 사용하는 방법인

표 2. 줄눈 콘크리트 포장 장기공용성 조사구간

노선	행선	시점(km)	종점(km)
중부선	남이방향	348.7	348.5
	남이방향	346.9	346.7
경부선	서울방향	72.40	72.60
	서울방향	72.90	71.10
	부산방향	66.15	65.95
남해선	순천방향	42.40	42.20
	순천방향	46.90	46.70
	부산방향	5.900	6.100
	순천방향	14.00	13.80
호남선	순천방향	39.05	38.85
	천안방향	19.05	19.25
제2경인선	안양방향	18.35	18.55
서해안선	목포방향	318.0	317.8
	인천방향	312.05	312.25
영동선	이천방향	127.8	127.6
	이천방향	136.0	135.8
	강릉방향	127.8	128.0
	강릉방향	135.8	136.0
88선	고서방향	121.5	121.3
	고서방향	57.50	57.30
경부선	부산방향	236.6	236.4
	부산방향	235.6	235.4



중·상급 스폐링이 발생한 줄눈의 비율을 사용하였다. 하나의 줄눈에 여러 등급의 스폐링이 발생하는 경우에는 이중 가장 심한 등급의 스폐링 하나가 발생한 것으로 판단하였다. 재령, 수정동결지수, 콘크리트 쪼갬인장강도, 연평균 강수량, 연평균 습도, 연평균 풍속, 연평균 적설량 등 관련문헌의 조사를 통하여 스폐링에 영향을 미칠 것으로 판단되는 인자들에 대하여 민감도를 분석하였으며, 그 중 스폐링 파손과 상관성이 높은 재령, 동결지수, 콘크리트의 쪼갬인장강도, 연평균 강수량, 슬래브 두께를 스폐링 모형의 변수로 선정하였다.

3.2. 스폐링 파손에 미치는 각 변수의 영향

스포링 모형의 개발에 사용된 변수는 아래와 같은 절차에 의하여 조사 및 수집되었다. 각 변수와 스폐링 파손 비율의 관계는 그림 2에서 그림 6까지의 분포를 나타내며 표 3과 같이 정리된다.

3.2.1. 재령

재령은 포장의 개통 이후부터 스폐링 파손 조사 시점까지로 계산하였고 누적 18kips 환산 교통하중과 더불어 스폐링 발생에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 평가되었다. 그러나, 민감도 분석 결과, 재령이 교통량보다 더 큰 영향을 갖는 것으로 조사되었으며 두 변수간에 상관관계가 큰 것을 고려하여 본 모형에서는 재령만을 변수로 이용하기로 하였다. 재령에 따른

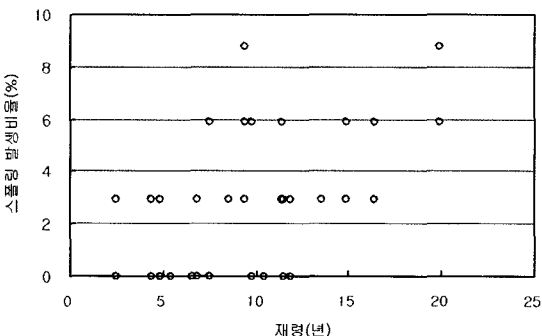


그림 2. 재령에 따른 스폐링 발생비율

스포링 발생비율은 그림 2와 같다.

3.2.2. 연평균 강수량

줄눈에 침투하는 우수에 의한 슬래브 줄눈부의 열화와 수분의 이동에 기인하는 슬래브의 와핑(Warping) 현상⁷⁾ 때문에 발생하는 슬래브 내부에서의 전단응력 발생 등이 스폐링 파손에 영향을 미칠 것으로 판단되었으며 포장 공용기간동안의 연간 누적 강수량을 평균하여 구하였다. 연평균강수량과 스폐링 발생 비율의 관계는 그림 3과 같다.

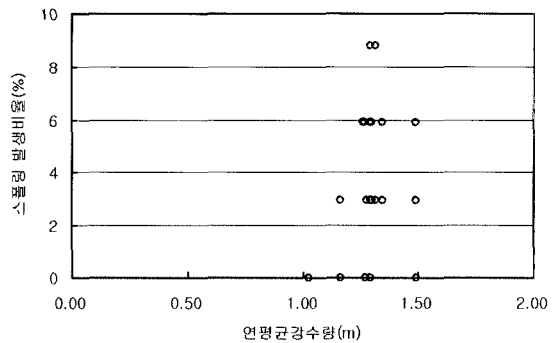


그림 3. 연평균 강수량에 따른 스폐링 발생비율

3.2.3. 수정동결지수

콘크리트 포장의 스폐링 파손이 동결융해작용에 많은 영향을 받는다는 기존의 연구에 기초하여 새롭게 적용되고 있는 수정동결지수를 조사구간별로 산정하여 변수로 적용하였다.⁹⁾ 수정동결지수와 스폐링 발생비율의 관계는 그림 4와 같다.

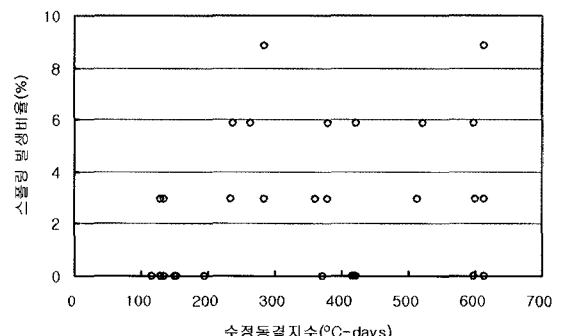


그림 4. 수정동결지수에 따른 스폐링 발생비율

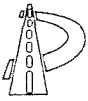


표 3. 스폐링 모형의 개발에 사용된 자료

스프링비율 (%)	재령 (years)	연평균강수량 (m)	수정동결지수 (°C · days)	쪼갠인장강도 (MPa)	슬래브두께 (m)
0.0	6.8	1.16	371	2.98	0.302
2.9	6.8	1.16	361	2.83	0.311
0.0	6.5	1.03	151	2.69	0.279
0.0	6.5	1.03	152	3.00	0.282
2.9	8.5	1.27	133	2.51	0.288
2.9	4.8	1.34	378	3.16	0.312
2.9	2.5	1.49	236	2.90	0.306
0.0	2.5	1.49	194	2.97	0.267
0.0	5.4	1.49	129	2.70	0.326
0.0	6.5	1.49	116	2.09	0.390
0.0	6.5	1.49	135	2.51	0.313
0.0	6.5	1.49	128	2.87	0.230
2.9	11.4	1.30	514	3.28	0.294
5.9	11.4	1.30	522	3.20	0.298
0.0	4.8	1.27	417	3.05	0.310
0.0	4.8	1.27	421	2.33	0.299
2.9	4.4	1.29	600	2.53	0.295
0.0	4.4	1.29	598	2.49	0.329
0.0	4.4	1.29	613	2.63	0.361
2.9	4.4	1.29	612	3.19	0.299
0.0	11.8	1.16	371	2.98	0.302
2.9	11.8	1.16	361	2.84	0.311
0.0	11.5	1.03	151	2.68	0.279
0.0	11.5	1.03	152	3.00	0.282
2.9	13.5	1.27	133	2.51	0.288
5.9	9.8	1.34	378	3.15	0.312
0.0	9.8	1.27	417	3.05	0.310
5.9	9.8	1.27	421	2.33	0.299
0.0	10.4	1.49	129	2.70	0.326
0.0	11.5	1.49	116	2.09	0.390
0.0	11.5	1.49	135	2.51	0.313
2.9	11.5	1.49	128	2.87	0.230
5.9	19.9	1.27	262	2.63	0.301
8.8	19.9	1.31	284	2.12	0.298
2.9	9.4	1.29	600	2.53	0.295
5.9	9.4	1.29	598	2.49	0.329
8.8	9.4	1.29	612	3.20	0.299
8.8	9.4	1.29	613	2.62	0.361
2.9	16.4	1.30	514	3.28	0.294
5.9	16.4	1.30	522	3.21	0.298
5.9	7.5	1.49	236	2.90	0.306
0.0	7.5	1.49	194	2.97	0.267
5.9	14.9	1.27	262	2.63	0.301
2.9	14.9	1.31	284	2.13	0.298



3.2.4. 쪼갬인장강도

조사구간에서 채취한 코어에 대하여 쪼갬인장강도 시험을 실시한 후 28일 쪼갬인장강도로 환산하여 스펀링 모형의 변수로 사용하였다. 각 구간에서 3개씩의 코어를 채취한 후 스펀링에 영향을 받는 위치인 슬래브 상부 표면 아래 3cm에서부터 10cm의 길이로 절단하여 시험하였으며 쪼갬인장강도와 스펀링 발생비율의 관계는 그림 5와 같다.

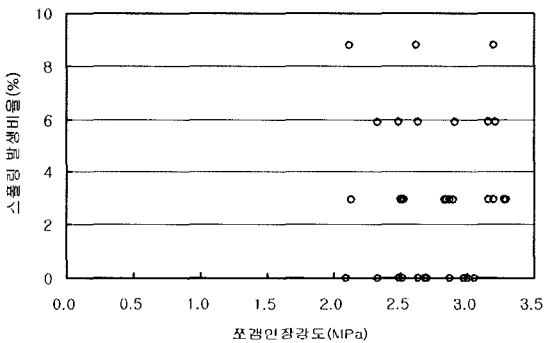


그림 5. 쪼갬인장강도에 따른 스펀링 발생비율

3.2.5. 슬래브 두께

슬래브 두께는 조사구간에서 채취한 코어의 길이를 측정하여 구하였다. 고속도로 콘크리트 포장은 대부분 28cm와 30cm의 두께로 건설되지만 현장조건에 따라 두께가 달라지는 경우가 많으므로 실측을 통해 자료를 산정하였다. 슬래브의 두께와 스펀링 발생비율의 관계는 그림 6과 같다.

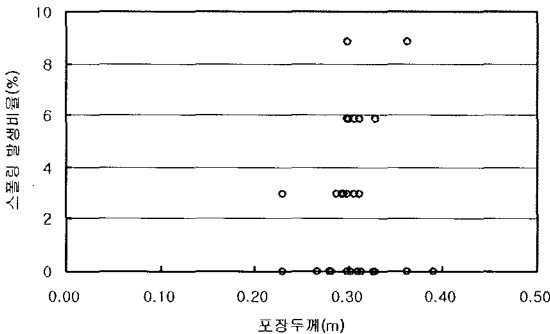


그림 6. 포장두께에 따른 스펀링 발생비율

4. 모형개발 및 민감도 분석

4.1. 스펀링 모형의 개발

콘크리트 포장 장기공용성 조사구간에서 수집된 자료를 이용한 민감도 분석으로 스펀링과 각 인자에 선형적인 관계가 있음을 확인 후 Microsoft Excel®을 이용한 다중 회귀분석을 실시하여 아래와 같은 모형을 얻을 수 있었다. 회귀분석에는 총 44개의 자료가 사용되었고 상관계수는 0.459로 나타났다. 모형에 포함된 각 변수의 대표값과 변동크기를 알아보기 위하여 평균값, 최대값 및 최소값을 표 4와 같이 정리하였다.

$$y = 0.74778x_1 + 8.7498x_2 + 0.0178x_3 - 0.5983x_4 - 16.413x_5 - 15.1679$$

(회귀분석 결과 N:44, R²:0.459)

표 4. 스펀링 모형에 사용된 변수의 특성

변 수 명	평균값	최대값	최소값
x ₁ 재령 (years)	9.3	19.9	2.5
x ₂ 연평균강수량(m)	1.31	1.49	1.03
x ₃ 수정동결지수(°C-days)	333	613	116
x ₄ 쪼갬인장강도(MPa)	2.76	3.28	2.09
x ₅ 슬래브두께(m)	0.304	0.390	0.230

스폴링 모형을 통하여 예측된 스펀링 발생비율을 실제로 조사된 스펀링 발생비율과 비교하여 그림 7의 결과를 얻었다. 그림에서 보는 바와 같이 조사된 스펀링의 발생비율은 4가지로 구분되어 분포하는데 이는 모든 조사구간의 길이가 200m이고 줄눈간격이 6m이므로 줄눈의 갯수가 34개로 동일하여 1개의 줄눈이 파손이 되는 경우 2.9%, 2개의 줄눈이 파손되는 경우 5.9%, 3개의 줄눈이 파손되는 경우 8.8%로 계산되기 때문이다. 개발된 모형의 적합성을 평가하기 위하여 회귀진단을 수행하였으나 만족스러운 결과를 얻을 수 없었다. 하지만, 수집 가능한 자료를 모두 이용하여 모형을 개발하였기 때문에 이에 대한 수정은 현재로서는 불가능하며 향후 추가적인 자료

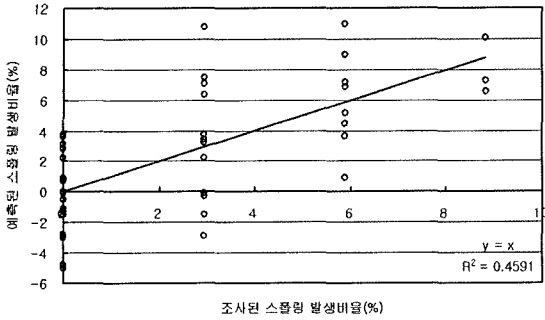


그림 7. 예측된 스펠링 발생비율과 조사된 스펠링의 발생비율의 관계

의 수집과 분석을 통하여 이를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

우리나라 각 지역의 동결융해 주기가 30일에서 130일 사이에 분포하며 평균 65일 내외인 것을 감안하여⁹⁾ 65일의 동일한 동결융해 주기에서 FHWA 모형과 본 연구에서 개발된 모형의 스펠링 예측값을 비교하였으며, 그림 8과 같이 개발된 모형에 의하여 예측된 비율이 재령에 따라 약간 더 큰 것으로 나타났다.

그림8에서 개발된 모형과 FHWA 모형에 공통적으로 입력된 자료는 재령, 강도 및 포장의 두께로서, 강도의 경우 휨강도 45kg/cm²를 기준으로 압축, 휨 및 조갠인장강도의 관계식을 이용하여⁹⁾ 환산하여 적용하였고(압축강도 7.282psi, 조갠인장강도 3.944MPa),

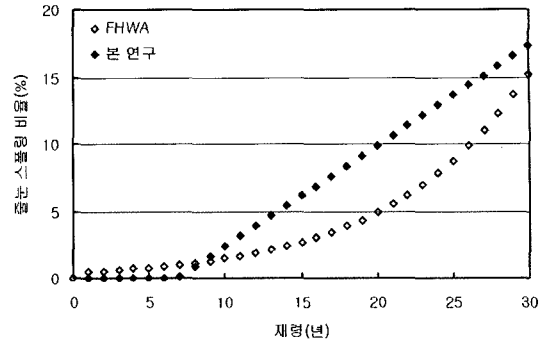


그림 8. 개발된 모형과 FHWA모형의 비교 (동결융해 주기 65일)

포장두께는 30cm를 사용하였다. 나머지 인자에는 품질관리에 사용되는 값을 넣거나(FHWA공식) LTPP구간에서 얻은 평균값을 사용하였다.

4.2. 개발된 모형을 이용한 스펠링의 민감도 분석

개발된 스펠링 모형의 변수별 민감도를 조사하였다. 조사방법은 먼저 표 4에서 보인 조사 자료의 평균값을 사용하여 예측 스펠링을 구한 후 변수별로 평균값에서 20%의 변화를 주었을 때 스펠링 발생비율의 변화를 비교하였다. 평균값을 사용하여 예측된 스펠링은 2.53%였으며 이는 조사된 스펠링의 평균값 2.5%와 거의 동일하였다. 다음 단계로 모든 변수를

표 5. 스펠링 모형의 민감도 분석결과

재령 (years)	연평균 강수량 (m)	수정 동결지수 (°C-days)	조갠 인장강도 (MPa)	슬래브 두께 (m)	예측된 스플링비율 (%)	상대변화 (%)
11.2	1.31	333.0	2.76	0.304	3.919	55.0
7.4	1.31	333.0	2.76	0.304	1.138	-55.0
9.3	1.57	333.0	2.76	0.304	4.820	90.6
9.3	1.05	333.0	2.76	0.304	0.237	-90.6
9.3	1.31	399.6	2.76	0.304	3.714	46.9
9.3	1.31	266.4	2.76	0.304	1.343	-46.9
9.3	1.31	333.0	3.31	0.304	2.199	-13.0
9.3	1.31	333.0	2.21	0.304	2.858	13.0
9.3	1.31	333.0	2.76	0.365	1.530	-39.5
9.3	1.31	333.0	2.76	0.243	3.527	39.5

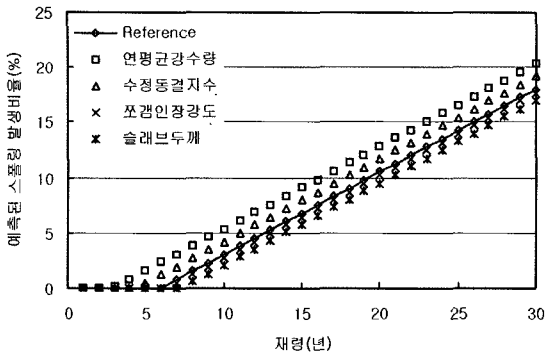


그림 9. 각 변수값의 20% 증가시 스폴링 발생 비율

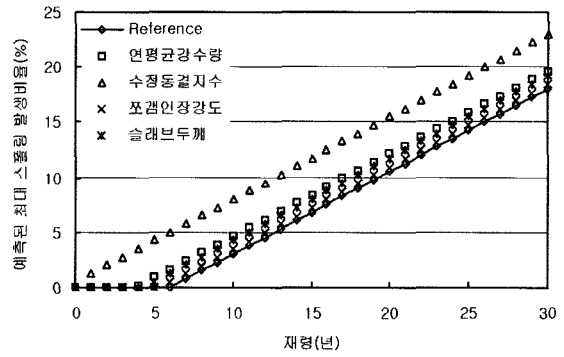


그림 10. 측정된 최대/최소 변수값에 의한 최대 스폴링 발생 비율

고정하고 한 개의 변수에 대해서만 0.8과 1.2를 곱한 값을 스폴링 모형에 적용하였으며 그 결과는 표 5와 같다. 표에서 보듯이 연평균 강수량, 재령, 수정동결지수, 슬래브 두께, 또갸인장강도의 순으로 모형의 민감도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

각 변수가 스폴링 발생비율에 미치는 영향의 크기를 비교하기 위해서 각 변수의 평균값을 20% 증가시킨 후 슬래브 발생비율을 재령에 따라 비교하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 그림에서 연평균 강수량과 수정동결지수가 증가하면 스폴링 발생 비율은 증가하는 것으로 나타났고 슬래브 두께와 또갸인장강도가 증가하면 스폴링 발생비율은 감소하는 것으로 나타났다.

표 4와 같이 각 변수의 실제 변화율이 서로 다른 것을 고려하여 조사된 각 변수의 최대 혹은 최소 값을 스폴링 모형에 입력하여 스폴링의 발생비율을 계산하였으며 그 결과는 그림 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 수정동결지수를 대입하는 경우에 스폴링의 발생가능성이 가장 크게 나타났고 연평균 강수량, 슬래브두께 및 또갸인장강도 순으로 최대 스폴링 발생비율이 예측되었다.

5. 결론

본 연구는 국내 고속도로 장기공용성 조사구간에서 수집된 스폴링 파손상태와 물성, 환경조건 등의

자료를 이용하여 줄눈 콘크리트 포장의 스폴링 파손 모형을 개발하기 위해서 수행되었다. 조사대상 구간은 22개소로 1999년도와 2004년도에 수집된 44개의 자료를 회귀분석하여 모형을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스폴링 모형의 개발을 위하여 장기공용성 조사구간에서 수집된 자료에 대하여 민감도 분석을 수행하여 재령, 연평균강수량, 수정동결지수, 또갸인장강도, 슬래브두께를 변수로 선정한 후 회귀 분석을 실시하였다. 총 44개 자료에 대하여 다중 회귀분석을 실시하여 상관계수 0.459의 스폴링 모형을 구할 수 있었다. 개발된 모형은 외국의 모형과 비교하였을 때 합리적인 경향을 보였으며 우리나라의 고유의 기상, 교통, 재료 등의 조건을 잘 반영할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 모형에 포함된 각 변수의 평균값을 기본 입력값으로 사용하고 각 변수값의 크기를 20%씩 증가시키면서 스폴링 발생 비율의 변화를 조사하는 방법으로 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석 결과, 연평균 강수량, 재령, 수정동결지수, 슬래브 두께, 또갸인장강도의 순으로 모형의 민감도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 연평균 강수량과 수정동결지수의 증가에 따라 스폴링 발생비율이 증가하였고 또갸인장강도와 슬래브 두께가 증가함에 따라 스폴링 발생비율은 감소하는 것으로 나타났다.



3) 조사된 각 변수의 최대/최소값을 이용하여 현실적으로 각 변수가 실제로 변화할 수 있는 범위 내에서 스폐링 발생 비율에 미치는 영향을 비교한 결과, 수정동결지수에 의한 스폐링의 발생 비율이 가장 크게 변화하는 것으로 나타났고 연평균 강수량, 슬래브두께 및 쪼갬인장강도 순으로 스폐링 발생 비율의 변화에 영향이 큰 것으로 조사되었다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부의 국책과제인 “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 결과로서, 본 연구가 성공적으로 수행되도록 지원하여 준 건설교통부에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. SHRP (1993), “Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project,” Final Report, SHRP-P-338, Strategic Highway Research Program.
2. Hoerner, T. E., M. I. Darter, L. Khazanovich, L. Titus-Glover, and K. D. Smith (2000), “Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-Related Specifications,” Final Report, FHWA-RD-00-130, Vol. 1, Federal Highway Administration.
3. Simpson, A. L., J. B. Rauhut, P. R. Jordahl, E. Owusu-Antwi, M. I. Darter, and R. Ahmad (1994), “Early Analysis of LTPP General Pavement Studies Data, Volume III : Sensitivity

Analysis for Selected Pavement Distresses,” Report SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program.

4. Titus-Glover, L., E. B. Owusu-Antwi, and M. I. Darter(1998), “Design and Construction of PCC Pavements, Volume III : Improved PCC Performance,” FHWA-RD-98-113, Federal Highway Administration.
5. Darter, M. I., M. Abdelrahman, P. A. Okamoto, and K. D. Smith (1993), “Performance-Related Specifications for Concrete Pavements: Volume I - Development of a Prototype Performance-Related Specification,” FHWA-RD-93-042, Federal Highway Administration.
6. Yu, H. T., K. D. Smith, M. I. Darter, J. Jiang, and L. Khazanovich (1998), “Performance of Concrete Pavements, Volume III : Improving Concrete Pavement Performance,” FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration.
7. Jeong, J. H., and N. Kim (2004), “Moisture Effects on Delamination and Spalling Distress Mechanisms of Early-Age Concrete Pavements,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 2, March, pp. 197-204.
8. Wang, C. K. and Salmon, C. G. (1992), “Reinforced Concrete Design-5th Edition,” HarperCollins Publishers Inc.
9. 이경하, 옥창권, 김인수 (2003), “동결지수 적용기준에 관한 연구,” 도로교통PA-03-08, 한국도로공사.

〈접수 : 2005. 1. 5〉