



줄눈 콘크리트포장의 슬래브 컬링이 평탄성에 미치는 영향에 관한 연구

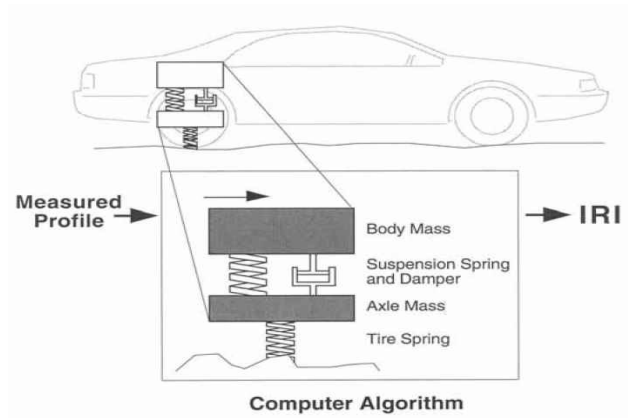
Effect of curling on International Roughness Index of Jointed Concrete Pavements

전범준* 이승우** 문성호***
Chon Beom Jun Lee Seung Woo Mun Sung Ho

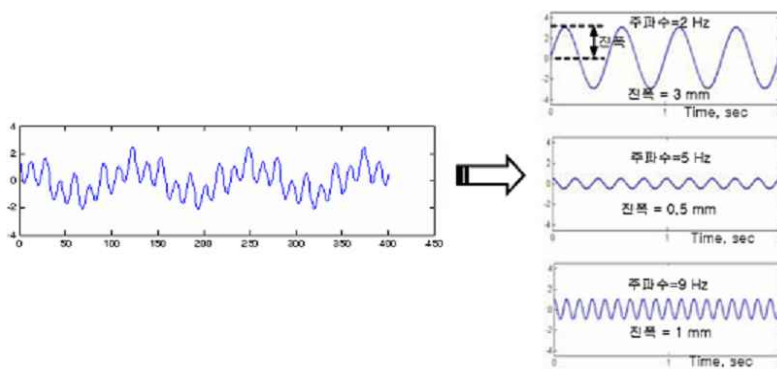
1. 서론

도로 표면의 요철(Roughness)은 종횡방향의 3차원의 요소로 이루어져 있으나 일반적으로 주행 시 가장 영향을 많이 받는 종단 방향에서의 상하 변위에 대한 요철을 가장 많이 고려한다. 노면 요철은 차량 주행 시 주행자의 승차감과 요철에 의한 차량의 충격하중에 의한 파손에 영향을 주는 중요한 요소가 되며, 도로공학에선 노면요철을 많은 표현방법으로 표현하였다. 도로 평탄성 지수로서 International Roughness Index(ARI), Profile Index(PrI), Ride Number(RN), Root Mean Square Vertical Acceleration (RMSVA)등을 들 수 있다. 각각에 대하여 간단하게 살펴보면, PrI는 캘리포니아 프로파일미터(7.6m)와 같은 다륜식 직선 정규형 평탄성 기록기로 측정된 노면 요철 기록결과를 가지고 평탄성 지수를 산정한다. 그리고 RN의 경우는 PrI를 이용한 이론적 접근으로 다음의 식 $RN=5e^{-160 \times PrI}$ 으로 표현하고 있다. RMSVA는 노면 경사변화를 평균 제공하여 노면을 나타낸 방법으로 데이터를 샘플링 하는 간격에 따라 민감하게 반응하는 지수라 할 수 있다. 마지막으로 근래 가장 많이 사용하고 있는 평탄성 지수로서 IRI를 들 수 있다. 과거 브라질에서 국제도로 평탄성 실험(IRRE, International Road Roughness Experiment)을 수행하여 각기 다른 측정기를 통해 얻어진 평탄성 자료에 대하여 측정장비간에 상관관계가 가장 잘 성립되는 국제 표준 평탄성 지수인 IRI (International Roughness Index)를 개발하였으며, IRI는 <그림 1>에서 보이는 바와 같이 쿼터가 시스템을 적용하여 주행 중 운전자가 느끼는 노면의 요철을 표현할 수 있는 지수로서 제안하였다. 도로의 중요한 요소가 되는 노면 요철을 지수로 나타내기 위하여 요철 이력(Profile Data)을 측정하여 보면 노면의 종단 방향에서의 요철은 <그림 2>에서 볼 수 있는 바와 같이 각기 크기가 다른 파장(Wave Length)을 갖는 무수히 많은 파형의 조합으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 이 중 주행 시 영향을 주는 파장은 보통 0.1 ~ 100m, 진폭은 0.1~10cm의 범위를 갖는다.(도로공사,1991) 도로 포장 중 시멘트 콘크리트 포장중 줄눈 콘크리트 포장의 경우 일정 줄눈간격의 슬래브가 존재하며 각각의 슬래브는 온도 및 습도의 영향에 의해 컬링(Curling) 및 와평(Warping) 현상이 발생하게 된다. 이러한 슬래브의 굴곡발생 현상은 <그림 2>의 여러 파장의 조합중 하나의 파장에 속하게 되며 평탄성 지수에 영향을 미치게 된다. 이러한 슬래브 컬링 변화는 온도 습도 영향에 받으며 동일구간에 대하여 시간, 계절에 따라서 IRI 값이 변화할 수 있으며 이로 인하여 포장 품질 관리시 정확한 IRI 평가가 이루어지기 힘든 문제점을 가지고 있다. 이에 컬링현상이 IRI에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

* 정회원 강릉대학교 토목공학과 박사과정생 (najunya@gmail.com)
** 정회원 강릉대학교 토목공학과 부교수(swl@kangnung.ac.kr)
*** 정회원 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원(smun@ex.co.kr)



〈그림 1〉 쿼터카 모델 개요



〈그림 2〉 도로 노면이력의 구성의 예

2. 슬래브 컬링현상과 평탄성(IRI) 상관관계

2.1. 줄눈콘크리트 포장에서 IRI에 대한 슬래브 휨 영향 분석

줄눈콘크리트 포장 슬래브의 깊이 방향으로 온·습도 차이에 의해 슬래브의 형상변화가 발생한다. 컬링 형상의 경우 야간에 대기의 온도가 슬래브 하부의 온도보다 낮은 경우 슬래브 상하부 온도차에 의해 슬래브 하부에선 인장이 상부에선 압축이 발생하여 상향으로 슬래브가 휘는 형상을 보이게 된다. 그리고 상향 컬링현상과는 반대의 현상으로 대체로 낮에 발생하며 슬래브의 표면온도가 하부보다 높을 경우 상부에선 인장이 하부에선 압축이 발생하여 슬래브가 아래방향으로 휘는 하향 컬링이 발생하게 된다.

이러한 슬래브의 컬링은 줄눈콘크리트 포장의 공용성에 중요한 영향을 미치며 “구조적으로 컬링발생과 함께 교통하중이 복합적으로 작용할 경우 슬래브 중앙상부에 과도한 응력이 발생하여 top-Down 균열이 발생하게 되며 반대의 경우로 하향컬링 작용시 코너부 균열이 발생하게 된다.(Hansen,2002) 줄눈 콘크리트포장의 프로파일 데이터는 랜덤한 파장의 데이터로 수많은 파장과 진폭의 파들이 조합된 데이터라 할 수 있다. 이러한 프로파일 데이터에서 줄눈 콘크리트 포장의 슬래브 휨 형상을 분리하여 분석하기 위해선 푸리에변환, 파워스펙트럼 분석과 특정 주파수 추출, 역푸리에 변환등의 기법이 이용되어야 하며 이를 통해 컬링의 변화가 포장의 평탄성에 영향을 미치는지 확인할 수 있으며 이를



고려한 평탄성 지수를 산정할 수 있다.

(Hossain, 2004)은 줄눈콘크리트 포장의 켈링 변화가 도로평탄성 지수중 IRI를 기준으로 20~50%의 영향을 주고 있다고 하였다. 또한 IRI가 40% 까지도 차이가 나게 측정되는 경우도 보고된바 있다. (Felker, 2003) PSD 분석을 통해 측정구간의 Profile 데이터에서 줄눈간격의 영향을 나타내는 특정 주파수대를 추출하고 난후 제거 하였다. 현장의 줄눈간격의 경우 6m로 일정하여 이로 인해 PSD 분석시 특정 주파수대의 값에 대한 분석이 가능하며 이를 통해 켈링영향을 분리하고자 하였다.

2.2. 슬래브 휨 형상변화가 도로 평탄성에 미치는 영향

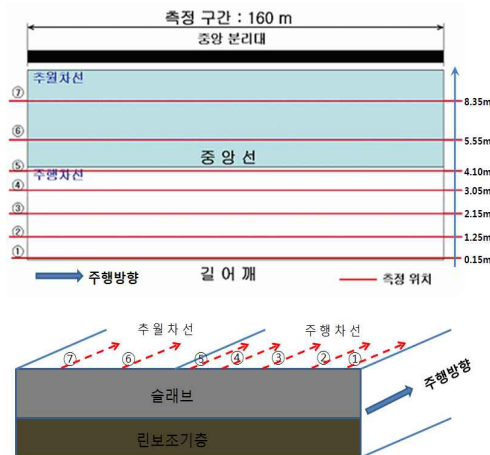
중부내륙시험도로 줄눈 콘크리트포장 구간에서 측정한 데이터들에 대해 PSD 분석을 실시한 결과 5.7~6.3 m/cycle 의 분포를 보임을 확인하였다. 켈링 영향을 제어/제거하기 위해 5.7~6.3 m/cycle 파장대의 특정 주파수 대역을 분리하여 제거한 후 이를 다시 원래의 프로파일 데이터로 복원하여 평탄성 지수를 산정하여 비교분석하였다. 도로 주행시 승차감에 영향을 주는 파장의 범위는 0.1~100m이다. (G Awasthi, 2003) 그리고 도로 주행시 사람, 자동차 종류, 주행속도, 운전습관 등에 따라 평탄성의 영향이 틀릴 수 있으나, 일반적으로 차멀미나 주의력 감소등의 영향을 유발하는 진동의 주파수가 2~15Hz이며, 이는 도로노면 요철의 경우 자동차가 80km/h의 속도로 주행시 1.5~11m 범위에 속하는 요철이 된다. (한국도로공사, 1992) 이렇듯이 슬래브의 켈링(줄눈간격 6m)에 의해 발생하는 진동 주파수가 평탄성에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있으며 이에따라 슬래브의 켈링과 평탄성과의 관계를 알아보았다.

3. 결과 분석

3.1. 측정개요

국내 줄눈 콘크리트포장의 켈링변화에 대한 분석을 위해 중부내륙고속도로 여주-충주 구간 하행선에 7.7km에 위치한 시험도로에서 본 연구를 위한 프로파일 데이터를 측정하였다. 2007년 7월 26일~27일 양일간 3회와 10월 23일 하루 동안 3회에 걸쳐 <그림 3> 에서 보는바와 같이 측정 구간에서 종단(길이) 방향으로 총 7 포인트의 위치에서 프로파일 데이터를 측정하였다.

각각의 위치에서 160m 구간에 걸쳐 측정된 프로파일 데이터의 경우 <그림 3>의 점선 화살표의 위치에서 측정하였으며, 실험을 통해 획득한 데이터를 분석하여 줄눈 콘크리트 포장의 슬래브 켈링 휨 형상에 대하여 알아보고 이를 통해 측정구간의 도로 평탄성에 있어 켈링의 영향에 대하여 알아보았다.



<그림 3> 데이터 측정 위치

3.2. 프로파일 데이터 분석

중부내륙 시험도로의 프로파일 데이터로부터 각 측정 위치별 슬래브의 켈링 영향을 추출한 후 켈링영향을 배제한 프로파일 데이터를 이용하여 도로의 평탄성을 산정하여 <표 1>에 나타내었다. <표 1>의 경우 2007년 7월의 1차 실험의 프로파일 데이터들로 주행차로에 대한 결과만을 나타내고 있으며, 켈링 제거 전 후의 IRI 감소율이 17.5~28% 까지 분포함을 보여주고 있다. <표 2>의 경우 2007년 10월의 2차 실험에 대한 결과로서 15.1~21.3%의 분포로 IRI가 감소함을 나타내고 있다. <표 1>, <표 2>에서의 IRI의 1,2차 프로파일 데이터의 IRI 산정값의 경우 휴대용 프로파일러를 이용하여



측정자가 직접 측정을 하게 되어 측정시 포장면의 종방향 선상에 대한 동일 구간으로의 측정이 이루어지기 힘든 문제에 기인한다. 또한 이로 인하여 측정구간의 컬링 영향에 대한 변위 값도 차이를 보이며 또한 계절이 변화함에 따라 포장체의 상하부 온도상태가 달라지게 되어 컬링 변위량의 변화에도 영향을 받아 평탄성지수(IRI)가 틀린 결과 값을 나타내는 것으로 판단된다. 하지만 이러한 변수들을 고려하여도 명확히 결과를 보이는 것은 콘크리트포장의 컬링 현상이 포장의 평탄성 지수에 영향을 미치고 있으며 이에 대한 컬링 영향을 제거할 경우 평탄성 지수가 변화함을 확인 할 수 있다.

시험도로 줄눈콘크리트 포장 슬래브에서 측정한 프로파일 데이터를 이용하여 <표 3>과 <표 4>에 컬링 추출 기법을 통해 산정한 슬래브 컬링량을 표시하였다. 컬링현상이 온도에 영향을 받음에 따라 컬링 변화량과 슬래브 상하부 온도차에 대하여 Built-In temperature를 표시하여본 결과 <그림 4>와 같이 Built-In temperature 차가 5℃임을 확인할 수 있다.

<표 1> 7월 26-27일 중부내륙 시험도로 프로파일 데이터에 대한 분석 결과

구분	컬링제거전 IRI(m/Km)			컬링제거후 IRI(m/Km)			IRI 감소율(%) (컬링 영향률)			
	온도차	-1.45	8.9	3.4	-1.45	8.9	3.4	-1.45	8.9	3.4
측정시기	아침	오후	저녁	아침	오후	저녁	아침	오후	저녁	
주행차로	길어깨(No1)	2.84	3.02	2.91	2.29	2.49	2.33	19.4	17.5	19.9
	오른쪽 휠패스(No2)	2.67	2.67	2.61	2.18	1.95	2.02	18.4	27.0	22.6
	중앙(No3)	2.71	2.9	2.46	1.95	2.23	1.95	28.0	23.1	20.7
	왼쪽휠패스(No4)	2.47	2.72	2.4	1.89	2.13	1.92	23.5	21.7	20.0
	엣지(No5)	2.34	2.39	2.45	1.85	1.84	1.94	20.9	23.0	20.8

<표 2> 10월 23일 중부내륙 시험도로 프로파일 데이터에 대한 분석 결과

구분	컬링제거전IRI(m/Km)			컬링제거후IRI(m/Km)			IRI 감소율(%) (컬링 영향률)			
	온도차	-3.25	5.9	1.55	-3.25	5.9	1.55	-3.25	5.9	1.55
측정시기	아침	오후	저녁	아침	오후	저녁	아침	오후	저녁	
주행차로	길어깨(No1)	2.73	2.79	2.64	2.58	2.26	2.12	-	19.0	19.7
	오른쪽 휠패스(No2)	2.41	2.48	2.31	1.9	1.99	1.87	21.2	19.8	19.0
	중앙(No3)	2.35	2.56	2.57	1.88	2.08	2.13	20.0	18.8	17.1
	왼쪽휠패스(No4)	2.62	2.37	2.08	2.2	1.97	1.67	16.0	16.9	19.7
	엣지(No5)	2.09	2.16	1.95	1.69	1.7	1.58	19.1	21.3	19.0
추월차로	오른쪽 휠패스(No6)추월차로	2.5	2.07	2.19	2.06	2.06	1.86	17.6	-	15.1
	왼쪽휠패스(No7)추월차로	2.27	2.27	2.48	1.9	1.82	2.23	16.3	19.8	-

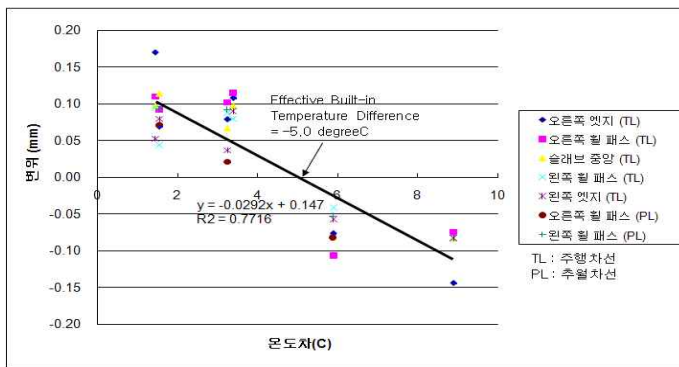
<표 3> 7월 26-27일 측정 데이터의 슬래브 휨 변형 값

구분	슬래브 휨 형상 변위(mm)		
	7월 27일		7월 26일
	아침	오후	저녁
길어깨(1)	0.1693	-0.1445	0.1074
오른쪽휠패스(2)	0.1096	-0.0755	0.1148
중앙(3)	0.0971	-0.0829	0.0974
왼쪽휠패스(4)	0.095	-0.0818	0.0797
엣지(5)	0.0521	-0.083	0.0898



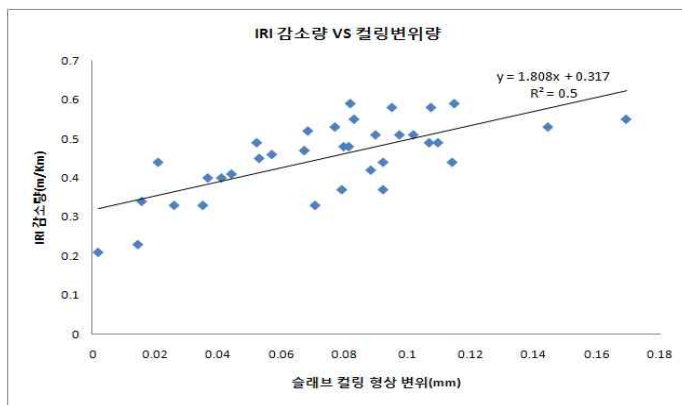
〈표 4〉 10월 23일 측정 데이터의 슬래브 휨 변형 값

구 분	슬래브 휨 형상 변위(mm)		
	10월 23일		
	아침	오후	저녁
길어깨(1)	0.0783	-0.077	0.0683
오른쪽휨패스(2)	0.1018	-0.107	0.0922
중앙(3)	0.0672	-0.081	0.1141
왼쪽휨패스(4)	0.0883	-0.041	0.0441
엣지(5)	0.0366	-0.057	0.0791
오른쪽휨패스(6)	0.0208	-0.082	0.0706
왼쪽휨패스(7)	0.0922	-0.053	0.0926



〈그림 4〉 컬링 vs 온도차 관계

〈표 1〉~〈표 4〉의 값을 통해 컬링현상이 평탄성 지수에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며 〈그림 5〉는 이러한 컬링의 영향이 실제 평탄성 지수의 감소에 어떠한 영향을 미치고 있는지를 보여주는 그래프로써 슬래브의 컬링 변위량이 증가할수록 평탄성 지수 감소량이 증가함을 보여주고 있다. 이는 줄눈 콘크리트 포장에서의 슬래브 컬링 현상이 실제 동일 구간 내에서도 평탄성 측정 시기에 따라 컬링 변위가 변화하고 이에 따라 측정시기 및 기간별로 다른 평탄성 지수값을 보일 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.



〈그림 5〉 컬링영향 vs IRI 감소량 관계



4. 결론

본 연구를 통하여 줄눈콘크리트 포장의 컬링현상이 도로 평탄성에 미치는 영향에 대하여 다음의 결과를 도출할 수 있었다.

첫째, 여름(7월) 및 가을(10월)에 중부내륙시험도로에서 측정된 프로파일 데이터에서 추출한 슬래브 컬링 변위량이 -0.1445~0.17mm의 값의 범위를 나타내었다. 온도영향에 의한 컬링의 일 변화량 또는 계절별 변화량에 대해 이를 제거한 후 평탄성 지수를 산정하여 본 결과 기존 평탄성 지수 보다 15.1~28% 감소함을 확인하였다.

둘째, 슬래브 컬링 변위량의 증가에 따라 평탄성 지수 감소량이 증가함을 확인할 수 있으며, 실제 동일 구간에서도 평탄성 측정 시기에 따라 컬링 영향이 다르게 작용하여 다른 평탄성 지수값을 보일 수 있음을 확인하였다. 따라서 평탄성 산정에 있어 컬링의 영향을 고려할 수 있는 개선된 평탄성 지수 모형이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구 결과의 경우 시험도로의 자료만을 이용한 결과로서 좀 더 다양하고 많은 실험구간의 데이터 추가가 요구되며 이에 따라 향후 중부, 호남선등의 줄눈콘크리트 포장의 프로파일 데이터 및 환경인자 데이터를 수집 및 측정하여 추후 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 한국도로공사 도로교통연구원의 공동연구영역으로 “포장의 기능 및 구조적 평가기법 개발을 통한 사용성 및 내구성 진단” 연구의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 한국도로공사 도로연구소(1992), “포장의 평탄성 특성연구(II), 포장의 미끄럼 저항특성연구(III)”, 한국도로공사, 도로연 92-13-10.
2. G Awasthi, T Singh, Dr A Das(2003), "On pavement roughness indices", Journal of the Institution of Engineers, vol 84, pp 33-37.
3. Hansen, W. Smiley, D. Peng, Y. Jensen, E(2002), “Validating Top-down Premature Transverse Slab Cracking in Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP).” Transportation Research Board 1809, pp.52-59.
4. Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas(1996), "Interpretation of road roughness Profile Data", Federal Highway Administration.
5. Michael W. Sayers, Steven M. Karamihas(1998), "The little book of profiling", Univ Of Michigan.
6. Hassen, R., Mc Manus, K.J., and holden, J(1999). "Predicting pavement deterioration modes using wave-band analysis", Transportation Research Board, pp. 181-187.
7. Victoria Felker, Mustaque Hossain, and Yacoub Najjar(2003), "Roughness Progression Model on Kansas PCC Pavements", 2003 Mid-continent Transportation Research Symposium.
8. Zahidul Siddique, Mustaque Hossain, Ph.D., P.E., and John J. Devore, Ph.D.(2004), “Investigation of the effect of curling on As-constructed smoothness and ride quality of KDOT Portland Cement Concrete(PCC) pavements”, KANSAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, KSU-01-7