



평탄성 지수 IRI와 PrI의 상관관계에 관한 연구

A Study on the Relation between IRI and PrI

김 국 한* · 이 병 덕** · 최 고 일*** · 양 성 철****

Kim, Kook-Han · Lee, Byung-Duck · Choi, Go-Il · Yang, Sung-Cheol

Abstract

Road roughness, as the key factor influencing not only drivers' ride quality and safety but also pavement deterioration, is one of the most important pavement performance indicator to be evaluated by users' subjective assessment. For this reason, a specific number of the pavement roughness has been adopted to monitor the condition of a road for pavement management systems and to evaluate the quality of newly constructed sections, however, none of the unified methodology was internationally accepted.

In Korea highway network, road roughness has been used mainly to evaluate newly placed pavement by using 7.6m CP (California Profile meter) to calculate PrI (Profile Index). But this instrument is manually operated to measure road profiles by traffic closure and their interpretation depends on personal bias. Therefore, problems arisen from the manually operated instrument will be overcome by using the APL (Longitudinal Profile Analyzer) which can be operated in the speed of 80km per hour.

A study was conducted to correlate the relation from both concrete and asphalt pavement between IRI (measured by APL) and PrI (measured by 7.6m CP). Test results showed that there was a good correlation between IRI and PrI.

Keywords : road roghness, PrI, IRI, concrete pavement, APL, 7.6m CP

요 지

포장의 평탄성은 자동차 주행시의 승차감, 안전성 및 포장 파손의 직접적인 영향인자로서, 도로 이용자 입장에서 도로상태를 평가하는 가장 중요한 사항이다. 이러한 포장의 평탄성은 포장 공용성 평가요소 중 가장 중요한 사항으로서 포장의 품질관리나 유지관리시에 중요하게 다루어져야 하나, 국가별로 각기 고유의 측정장비나 계산방법이 사용됨으로 인해 국제적으로 통일된 관리기준이 확립되어 있지 않은 실정이다.

국내의 경우 신설포장에 대해 포장평탄성의 관리기준을 적용하고 있으며, 관리기준값은 7.6m CP 장비를 이용한 PrI를 사용하고 있는 실정이다. 그러나 이 장비는 수동식으로서 현장조사시 교통차단이 불가피하며, 측정 및 계산을 인력에 의존하고 있기 때문에 시간이 많이 소요되고 개인오차가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 80km의 속도로 평탄성을 측정할 수 있는 자동식 평탄성 장비인 APL에서 IRI 값을 도입하여 수동식 장비의 문제점을 해결코자 하고 있다.

본 연구에서는 기존의 PrI 관리기준을 이용하여 IRI 관리기준을 정립하기 위해, 7.6m CP에 의한 PrI와 APL에 의한 IRI의 상관관계를 시험을 통해 규명하였다. 시험결과 분석에 따르면 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장 모두는 신뢰할 만한 상관관계가 나타남을 알 수 있었다.

핵심용어 : 평탄성, 국제평탄성지수, 아스팔트 포장, 시멘트 콘크리트 포장, APL, 7.6m CP

* 정회원 · 한국도로공사 기술관리실 기술정보과장 · 공학박사
 ** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사
 *** 정회원 · 한국도로공사 동해건설사업소장 · 공학박사
 **** 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 조교수 · 공학박사



1. 서론

포장의 공용성을 평가하는 항목으로 포장의 종횡 방향 평탄성, 미끄럼 및 지지력 등이 있다. 이 중에서도 포장의 평탄성은 주행시 승차감 뿐 아니라, 주행 중인 자동차의 충격하중을 유발시켜 포장 파손을 가속시킬 수 있는 결정적인 요소가 된다. 이와 같은 포장의 평탄성으로 인한 문제점을 예방하고 포장 공용성을 증진시키기 위해, 국내외의 여러 기관에서 평탄성에 관한 관리기준을 도입하여 건설시나 유지관리시에 활용하고 있는 실정이다.

그러나 세계각국에서 실시하고 있는 포장 평탄성 측정장비와 계산방법이 매우 다양하여, 세계적으로 통일된 평탄성 관리기준이 정립되어 있지 않는 실정이다. 그리하여 세계적으로 통일된 기준을 마련하기 위한 시도로서 1982년에 세계은행(IBRD)의 후원으로 미국을 포함한 서방 5개국이 참여한 가운데 국제도로 평탄성 연구(IRRE)사업을 시행하였다(Sayers, 1982). 여기에서 국제 평탄성 지수(IRI, International Roughness Index)라는 통일된 평탄성 계산 방법을 정립하였고, 각국에서 생산되는 자동식 평탄성 측정장비에서 IRI를 계산할 수 있도록 하였다.

국내의 경우 1984년 호남고속도로 확장공사 시행 당시부터 수동식 다륜형 평탄성 측정기인 7.6m CP(California Profile meter)장비를 이용하여 PrI(Profile Index)를 포장의 평탄성 기준으로 사용하고 있는 실정이다. 그러나 CP장비의 경우 수동식으로서 측정 및 결과계산을 인력에 의존하기 때문에 시간이 많이 소요되고 현장조사시 교통차단이 불가피하며, 평가자에 따라 개인오차가 발생하는 등의 문제점이 있다. 따라서 1994년 80km의 속도로 평탄성을 측정할 수 있는 자동식 평탄성 장비인 APL(Longitudinal Profile Analyzer)에서 IRI 값을 도입하여 상용화하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 PrI 관리기준을 이용하여 IRI 관리기준을 정립하기 위해, 7.6m CP에 의한 PrI와 APL에 의한 IRI의 상관관계를 실험을

통해 규명하였다.

2. 평탄성 측정원리 및 계산방법

2.1 7.6m CP와 APL의 측정원리

포장의 종방향 평탄성을 측정하는 방법은 나라별로 고유의 측정장비를 개발해서 사용하고 있다. 포장의 평탄성 측정장비를 측정원리의 관점에서 크게 세가지로 분류하면 정적, 동적 및 광선측정방법이다(최고일 외, 1992). 7.6m CP장비는 수동식 동적 측정방법에 속하며, 기존에 사용하던 전후 2륜형 측정기의 측정오차인 바퀴에서의 노면요철 영향을 최소화하기 위해 다륜형 측정기의 형상을 가진다. 즉 그림 1과 같이 측정기 바퀴를 힌지가 달린 여러개의 바퀴로 만들어 노면상의 요철이 힌지에 의해 흡수될 수 있도록 하였다.

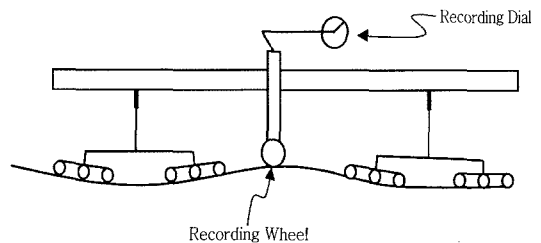


그림 1. 7.6m CP장비의 형상

APL 평탄성 측정기는 프랑스의 교량 및 포장연구소(LCPC)에서 개발한 견인식 트레일러형 장비로 트레일러에 센서가 위치하여 포장의 평탄성을 측정한다. 트레일러의 구성은 그림 2와 같으며, 구성원리는 차량의 진동을 힌지(L)로 일단 흡수한 후 트레일러 쇼바와 코일스프링을 이용하여 트레일러 골조(M)가 매우 유연하게 움직일 수 있도록 설계되었다. 따라서 트레일러바퀴(R)의 움직임에도 상관없이 트레일러 골조(M)에는 진동이 거의 발생하지 않도록

0.5

제작되었다. 포장의 요철이 있으면 트레일러바퀴(R)가 상하로 진동하게 되므로 견인용팔(B)에 경사가 발생하게된다. 견인용팔에서 발생한 경사는 수평추(P)사이 에 부착된 변위계이지에 의해 포장의 평탄성을 측정하게된다.

따라서 수평추는 트레일러의 진동이 발생하더라도 항상 평행을 유지할 수 있어야 하며, 이를 위해 특수 고안된 십자형 브레이드를 이용한다. 수평추의 측정원리상 모든 파형의 요철을 감지할 수 없으며, 수평추에 포함된 스프링과 댐퍼를 이용하여 0.5~20Hz 범위의 파형을 감지할 수 있도록 하였다(Paterson, 1985).

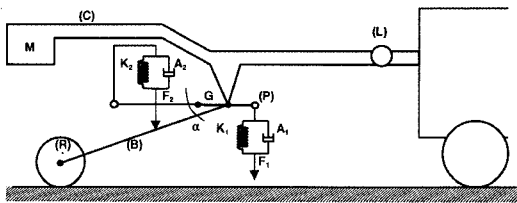


그림 2. APL장비의 트레일러 구성도

2.2 PrI와 IRI 계산방법

PrI(Profile Index)는 7.6m CP장비로 측정된 기록결과를 이용하여 평탄성의 일차적인 물리적 의미인 요철높이를 이용하는 일종의 평탄성 지수이다. PrI의 계산은 그림 3과 같이 측정된 노면의 profile에 일정폭(5mm)의 blank band를 그린 다음 밴드 밖으로 벗어난 상하의 모든 profile을 식 (1)과 같이 mm 단위로 합산하여 계산한다. 이때 profile의 높이

가 1mm이하이고 폭이 2mm이하인 요철은 노면의 잡물이나 장비의 순간진동에 의한 것으로 간주하여 합산 대상에서 제외한다.

$$PrI = \frac{\sum(h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n)}{\text{측정거리}} \quad (1)$$

국제 평탄성 지수 IRI의 계산방법은 다소 복잡하며, 1982년에 국제도로 평탄성 연구(IRRE)사업에서 IRI 계산방법을 정립하여 각국에서 생산되는 자동차 평탄성 측정장비에서 IRI를 계산할 수 있도록 하였다. 계산원리는 일정간격으로 읽어들이는 포장의 profile에서 개별 정류경사(요철높이/측정거리)를 계산한 후 이들을 평균한 평균정류경사(Average Rectified Slope)를 IRI라 한다.

IRI의 계산순서는 먼저 그림 4와 같이 25cm 간격으로 노면의 profile을 측정한 후, 식 (2)와 같은 형태로 *i* 번째 위치에서의 4개의 변수값 ($\{z_i, z_{i-1}, z_{i+1}, z_{i+2}\}$)을 구하며, 첫번째 변수값은 식 (3)과 같이 가정한다. 앞에서 계산된 값을 이용하여 식 4를 통해 *i* 번째의 정류경사를 구한다. 측정구간에서의 평탄성 지수인 IRI는 식 (5)와 같이 전 구간의 평균값으로 계산한다.

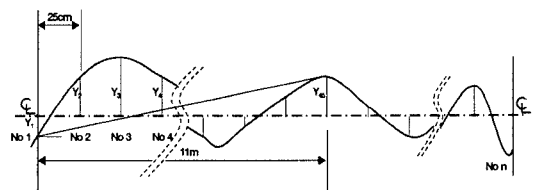


그림 4. IRI 계산원리

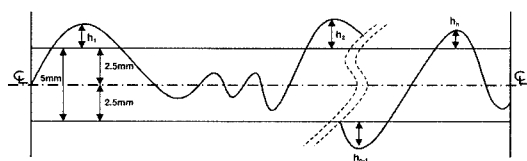


그림 3. PrI 계산방법

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & p_1 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & p_2 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & p_3 \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & p_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ Y \end{pmatrix}_{i-1} \quad (2)$$



여기서, $\dot{Y} = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{dx}$, ($i = 2, \dots, n$), s_{jk} 및 p_j 는 상수

$$(z_1, z_2, z_3, z_4)_1 = \left(\frac{Y_{45} - Y_1}{11}, 0, \frac{Y_{45} - Y_1}{11}, 0 \right) \quad (3)$$

$$RS_i = |z_3 - z_1|_i \quad (4)$$

$$IRI = \frac{1}{n-1} \int_{i=2}^n RS_i \quad (5)$$

3. 실험방법 및 실험변수

PrI와 IRI의 상관관계 분석을 위해 남해고속도로 확장공사구간의 시멘트 콘크리트 포장과 호남고속도로 아스팔트 덧씌우기 공사구간에서 실험을 실시하

였으며, 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장 모두 신설포장에 대하여 실험을 실시하였다. 평탄성 조사구간에 대한 개요는 표 1과 같으며, 아스팔트 포장의 총조사길이는 20.3km이며 시멘트 콘크리트 포장의 총조사길이는 13.9km이다.

PrI와 IRI의 상관관계를 정확히 분석하기 위해 CP장비와 APL장비는 동일선상에서 측정이 되어야 하므로 차량진행방향의 오른쪽 차선에서 80cm 떨어진 위치에서 평탄성을 측정하였다. 또한 주행방향으로의 거리오차를 없애기 위해 100m 간격으로 정밀측량을 실시한 후 APL장비의 주행시에 각 위치를 표시하여 주었다. APL장비의 측정속도는 평탄성 측정 권장속도인 80km로 주행하였으며, 7.6m CP장비는 진동을 최소로 하기 위해 보속 이하로 실시하였다.

표 1. 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장의 평탄성 조사구간

포장형태	노 선	위 치 (km)	행 선	연 장 (km)	조 사 횟 수	
					PrI	IRI
아스팔트	호 남 선	123.5~125.5	서울방향, 추월선	2.0	2회	2회
		127.7~129.5	서울방향, 주행선	1.8	2회	2회
		128.0~129.5	서울방향, 추월선	1.5	2회	2회
		150.0~153.0	서울방향, 주행선	3.0	1회	2회
		160.0~163.0	서울방향, 주행선	3.0	2회	20회
		160.0~168.0	서울방향, 추월선	8.0	2회	3회
	나주비행장 활주로	-	-	1.0	1회	10회
시 멘 트 콘크리트	남해선 확장	1공구	순천방향, 주행선	1.8	1회	3회
		1공구	부산방향, 추월선	2.6	1회	3회
		2공구	순천방향, 추월선	1.0	1회	4회
		2공구	부산방향, 주행선	2.4	1회	4회
		3공구	부산방향, 추월선	2.4	1회	2회
		7공구	부산방향, 주행선	1.6	1회	6회
		7공구	순천방향, 주행선	2.1	1회	4회



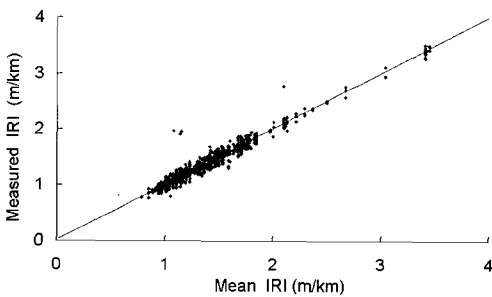
4. 시험결과 분석

4.1 측정오차 분석

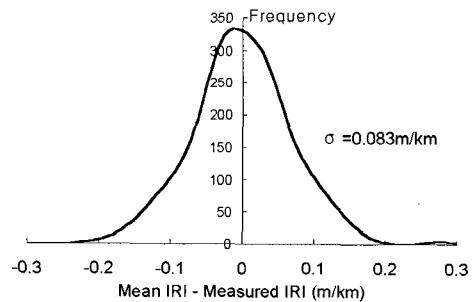
IRI 및 PrI의 측정을 정확히 하기 위해 동일구간의 측정을 여러 차례 실시하여 이들의 평균값을 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 아스팔트 포장의 경우 IRI를 계산하기 위해 표 1에서 알 수 있듯이 구간에 따라 2회에서 20회까지 시험을 실시하였고, PrI 시험은 2회 실시하였다. 시멘트 콘크리트 포장의 경우 IRI를 계산하기 위해 2회~6회까지 시험을 실시하였다. 이와 같이 동일구간의 시험을 여러 차례 실시하는 첫째 목적은 측정값을 정확히 구하기 위한 것이

며, 둘째 목적으로 이들 시험법의 측정오차를 검토하기 위한 것이다.

아스팔트 포장에서 실시한 IRI 측정값과 이들 평균값과의 상관관계 및 측정오차의 범위를 나타낸 것은 그림 5와 같다. 그림 5(b)의 측정오차 분포도가 정규분포를 보이고 있을 뿐 아니라, 표준편차도 0.083m/km으로 본 시험의 아스팔트 포장 IRI 평균값인 1.39m/km의 6%정도에 불과한 매우 작은 값을 보인다. 이는 본 시험에서 실시한 아스팔트 포장에서의 IRI 측정 및 계산과정에 발생할 수 있는 오차는 매우 작았음을 알 수 있다. 그리고 아스팔트 포장에서 PrI 측정오차에 대한 분석결과는 그림 6과 같으며, 그림 6(b)의 측정오차 분포도는 정규분포가

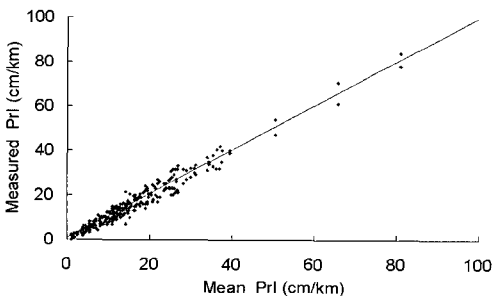


(a) 측정값과 평균값의 상관도

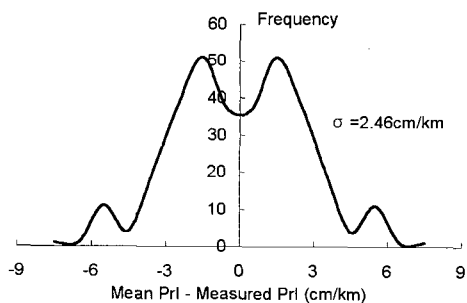


(b) 측정오차 분포도

그림 5. 아스팔트 포장에서 APL 장비의 측정오차 분석

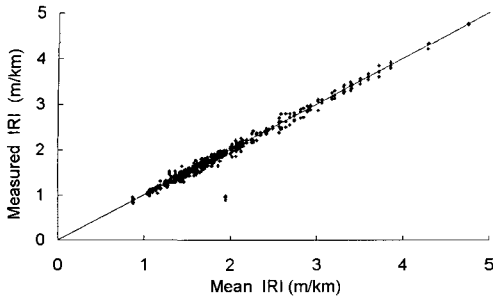
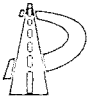


(a) 측정값과 평균값의 상관도

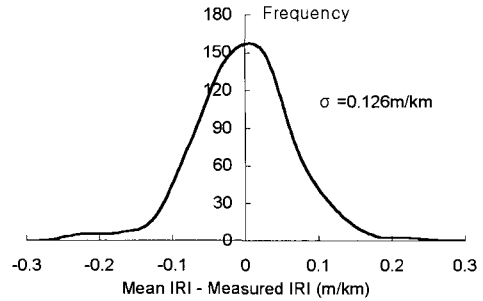


(b) 측정오차 분포도

그림 6. 아스팔트 포장에서 7.6m CP 장비의 측정오차 분석



(a) 측정값과 평균값의 상관도



(b) 측정오차 분포도

그림 7. 시멘트 콘크리트 포장에서 APL 장비의 측정오차 분석

아니며, 표준편차도 2.46cm/km로 본 시험의 아스팔트 포장 PrI 평균값인 15.47cm/km의 16%정도로서 측정 및 계산과정에 발생할 수 있는 오차가 다소 크다는 것을 알 수 있다. 시멘트 콘크리트 포장에서 IRI 측정오차에 대한 분석결과는 그림 7과 같으며, 그림 7(b)의 측정오차 분포도는 아스팔트 포장 IRI의 측정결과와 마찬가지로 정규분포로 나타났다. 표준편차도 0.126m/km로 본 시험의 시멘트 콘크리트 포장 IRI 평균값인 1.95m/km의 6.4%정도에 불과한 매우 작은 값을 보였다.

이와 같은 IRI 및 PrI의 측정오차 분석결과를 통해 알 수 있는 것은 포장의 종류에 상관없이 IRI의 측정오차가 PrI의 측정오차보다 훨씬 작음을 알 수 있었다. 이는 IRI의 측정 및 계산과정이 자동식인 반면 PrI의 경우 모든 과정이 수동으로 실시되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 포장의 종류에 따른 IRI의 측정오차를 분석해 보면, 시멘트 콘크리트 포장이나 아스팔트 포장에 대한 측정오차는 비슷함을 알 수 있었다. 따라서 평탄성의 측정오차는 포장의 종류에 영향을 받기보다는 측정장비의 종류에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

4.2 PrI와 IRI의 상관관계 분석

아스팔트 포장 20.3km 구간에서 실시한 PrI와

IRI의 측정결과를 이용하여 회귀분석을 그림 8과 같이 실시하여 IRI를 이용한 PrI를 예측할 수 있는 상관식을 구하였다. 그림 8(a)에서 처럼 아스팔트 포장에서의 상관식에 의한 예측값과 실측값의 상관계수(γ)는 0.93으로 비교적 높은 정확도를 보임을 알 수 있었다. 그림 8(b)의 측정오차 분포가 톱니바퀴와 같은 파형을 보이는 이유는 PrI 측정오차로 인한 것이다. 또한 시멘트 콘크리트 포장 13.9km 구간에서 실시한 PrI와 IRI의 측정결과를 이용하여 회귀분석을 그림 9와 같이 실시하여 IRI를 이용한 PrI를 예측할 수 있는 상관식을 구하였다. 그림 9(a)에서 알 수 있듯이 시멘트 콘크리트 포장에서의 상관식에 의한 예측값과 실측값의 상관계수(γ)는 0.89로 아스팔트 포장보다는 다소 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 그림 9(b)의 측정오차 분포의 톱니바퀴 형상도 아스팔트 포장보다 훨씬 복잡함을 알 수 있었다. 이는 시멘트 콘크리트 포장의 PrI 측정오차가 아스팔트 포장 보다 큰 것을 의미한다.

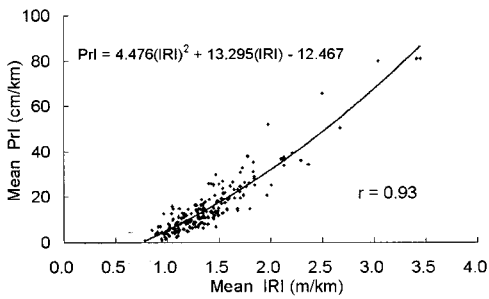
그림 8 및 그림 9, 표 2를 통해 포장종류에 따라 PrI와 IRI의 상관관계를 분석해본 결과 아스팔트 포장과 시멘트 콘크리트 포장 모두에서 비교적 높은 정확도의 상관관계식을 식 6 및 식 7과 같이 구할 수 있었으나, 시멘트 콘크리트 포장의 PrI 산정오차가 아스팔트 포장보다 훨씬 큰 것을 알 수 있었다. 그리고 본 연구에서 구한 상관식에 일정한 IRI 값을 이용

하여 PrI를 산정한 결과 아스팔트 포장의 PrI 산정 값이 시멘트 콘크리트 포장보다 큰 것을 알 수 있었다. 이와 같은 이유는 포장종류에 따라 요철의 파형이 다르며 PrI와 IRI의 계산원리가 다르기 때문이

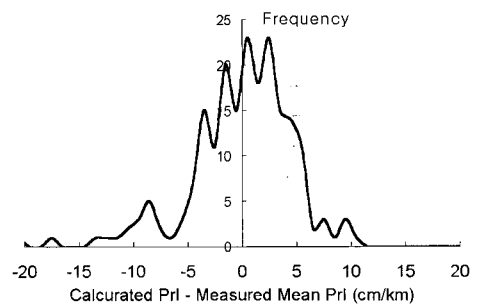
다. 즉 아스팔트 포장의 경우 중·장파가 많고 시멘트 콘크리트 포장의 경우 단파가 많다. 따라서 동일 정류경사일 경우 아스팔트 포장의 진폭이 높아지게 되며, 이로 인해 PrI의 산정값이 커지게 된다.

$$PrI = 4.476(IRI)^2 + 13.295(IRI) - 12.467 : \text{아스팔트 포장} \quad (6)$$

$$PrI = 5.3026(IRI)^2 - 7.4348(IRI) + 5.3141 : \text{시멘트 콘크리트 포장} \quad (7)$$

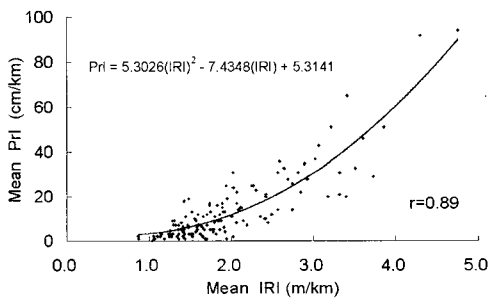


(a) PrI와 IRI의 상관관계

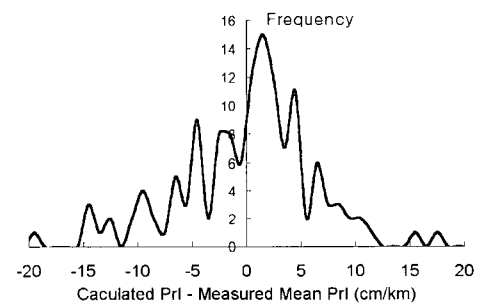


(b) 상관식과 실측값의 측정오차 분포도

그림 8. 아스팔트 포장의 상관관계 분석



(a) PrI와 IRI의 상관관계



(b) 상관식과 실측값의 측정오차 분포도

그림 9. 시멘트 콘크리트 포장의 상관관계 분석

표 2. PrI와 IRI의 상관관계 분석표

포장 종류	PrI 산정오차	65% 신뢰구간	95% 신뢰구간	비 고
아스팔트		4.68cm/km	9.36cm/km	그림 8
시멘트 콘크리트		7.11cm/km	14.22cm/km	그림 9



5. 결론

본 연구를 통해 신설포장 구간의 평탄성 측정에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째로, IRI 및 PrI의 측정오차 분석결과를 통해 알 수 있는 것은 포장의 종류에 상관없이 IRI의 측정오차가 PrI의 측정오차보다 훨씬 작음을 알 수 있었다. 이는 IRI의 측정 및 계산과정이 자동식인 반면 PrI의 경우 모든 과정이 수동으로 실시되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 포장의 종류에 따른 IRI의 측정오차를 분석해 보면, 시멘트 콘크리트 포장이나 아스팔트 포장에 대한 측정오차는 비슷함을 알 수 있었다. 따라서 평탄성의 측정오차는 포장의 종류에 영향을 받기보다는 측정장비의 종류에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 둘째로, 포장종류에 따라 PrI와 IRI의 상관관계를 분석해본 결과 아스팔트 포장과 시멘트 콘크리트 포장 모두에서 비교적 높은 정확도의 상관관계식을 구할 수 있었으나, 시멘트 콘크리트 포장의 PrI 산정오차가 아스팔트 포장보다 훨씬 큰 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Michel W. Sayers, "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurement", *The World Bank Technical Paper 46*, 1982.
2. OECD Scientific Expert Group, "Road Surface Characteristics", Orientation for Economic Cooperation and Development, 1986.
3. *Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method*, ASTM E 1364-90.
4. William D. D. Paterson, "International Roughness Index : Relationship to Other Measures of Roughness and Riding Quality", *TRR 1084*, 1985, pp 49~59.
5. 최고일, 김재형, 김국한, "포장의 평탄성 특성 연구", 한국도로공사 1992년 연구보고서, 1992, page 106.

〈접수 : 2002. 8. 14〉