

## 고속도로 콘크리트 포장에 대한 품질평가지수 평가인자의 적정성 검토

이승우\* · 김경일\*\* · 고동식\*\*\* · 홍승호\*\*\*\*

Lee, Seung Woo\* · Kim, Gyung il\*\* · Ko, Dong Sig\*\*\* · Hong, Seung Ho\*\*\*\*

### Feasibility Study the Assessment Factor of Quality Performance Index in Expressway Concrete Pavement

#### ABSTRACT

Traffic volume increases according to highway expansion and industrial development which causes repetitive defect and durability degradation on pavement. The research of quality assurance system used abroad has introduced Korea. Korea Expressway Corporation (KEC) has developed a Quality Performance Index (QPI) that quantitatively assesses the level of quality of the final product, and practical applications. Assessment factor on concrete pavement consisted of pavement thickness, compressive strength, IRI and spacing factor. Assessment factor on concrete pavement is determined by empirical evaluation factor from abroad. In this study, analysis of evaluation factors of concrete pavement by using pavement life prediction simulation and measured data were evaluated with consideration of feasibility of the assessment factor. Pavement life, performance and durability are affected by pavement thickness, compressive strength, IRI and spacing factor in assessment factor on concrete pavement, QPI.

**Key words :** Concrete pavement, Pavement thickness, Compressive strength, IRI, Spacing factor, Quality Performance Index (QPI)

#### 초 록

고속도로의 확충과 산업발전에 따른 물동량 증가로 인하여 도로 구조물의 내구성 저하와 취약구간의 반복적인 하자가 발생하고 있다. 따라서 국외에서 사용하는 품질보증제도 도입방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우 한국도로공사는 점검위주의 품질관리에서 목적물의 품질성능 위주의 품질관리 체계로의 전환을 위하여 목적물의 품질 수준 측정이 가능하도록 정량적 평가 지수인 품질성능지수(QPI : Quality Performance Index)를 개발하여 적용하고 있다. 품질성능지수에서 콘크리트포장 평가인자는 포장두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수로 구성되어 있다. 콘크리트 평가인자의 경우 국외에서 경험적 판단에 의해 자체적으로 선정된 인자를 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 포장 평가인자를 수명예측 시뮬레이션 및 실측 자료를 활용하여 분석하고 평가인자의 적정성을 검토하였다. QPI의 콘크리트포장 평가인자인 포장두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수는 포장수명, 공용성 및 내구성을 적절하게 판단할 수 있는 인자로 사료된다.

**검색어 :** 콘크리트 포장, 품질성능지수, 포장두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수

\* 종신회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · swl@gwnu.ac.kr)

\*\* 한국도로공사 품질환경처 처장 (Korea Expressway Corporation · hoya4@ex.co.kr)

\*\*\* 한국도로공사 품질환경처 부장 (Korea Expressway Corporation · kds0016@ex.co.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구전략팀 책임연구원 (Korea Expressway Corporation · hsh373@ex.co.kr)

Received September 23, 2016/ revised October 13, 2016/ accepted December 6, 2016

## 1. 서론

경부고속도로 개통 이후 지속적인 고속도로의 확충과 산업발전에 따른 물동량 증가로 인하여 도로 구조물의 내구성 저하와 취약구간의 반복적인 하자가 발생하고 있다. 그러나 구조물의 품질을 결정하는 시공과정에서의 품질관리는 완성된 구조물의 품질보다는 시공과정상의 단계적인 품질관리에 집중되어 지속적인 하자가 발생되고 있는 실정이다. 이에 따라 도로포장을 비롯한 건설 분야에서는 성능보증 계약제도를 도입하기 위한 연구가 진행되고 있다. 유럽 및 미국 등 선진국에서는 1990년대부터 최저가낙찰방식 운영에 따른 품질문제를 해결하고자 성능중심의 보증 제도를 운영하고 있으며, 이를 통해 공사 시행시 발생하는 있는 하자 발생 위험을 발주처와 시공사가 균형 부담하고 품질에 대한 책임을 명확히 하여 품질을 향상시키고 있다. 국내의 경우 국토부에서는 성능중심의 건설기준 표준화 연구를 수행하여 지불규정제도, 성능보증제도와 같은 선진 품질보증제도 도입방안을 제시하였고 보증제도에 필요한 각종 법규 개정 및 기준에 대한 연구가 진행하였다(Kwon et al., 2011). 또한 한국도로공사의 경우 그간의 점검위주의 품질관리에서 목적물의 품질성능 위주의 품질관리 체계로의 전환을 위하여 목적물의 품질 수준 측정이 가능하도록 정량적 평가 지수인 품질성능지수(QPI : Quality Performance Index)를 개발하여 적용하고 있다(Lee et al., 2011).

유럽은 약 40년 전부터 도로, 교량 건설공사를 대상으로 보증계약 운영하고 있다. 이는 도로 건설 후 유지관리 문제를 해결하기 위한 방안으로 성능보증 계약제도를 운영하기 시작하였으며 도로 건설 계약에 있어 필수적인 계약제도가 되고 있다. 또한 유럽의 건설산업은 목적물의 품질을 가장 중요한 가치로 인식하고 품질 향상 유도를 목적으로 건설제도를 발전시켜 왔다. 유럽의 성능보증 제도는 다양한 계약방식으로 적용 가능하였으나, 계약자의 책임이 증가되면서 장기간동안 한 업체가 환경적, 정치적, 사회적 문제가 변화함에 따른 잠재적인 상황에 대한 리스크까지 부담하게 된다(Kim, 2012).

미국은 1990년대 유럽과 마찬가지로 목적물의 품질 향상 및 생애주기 비용 절감을 목표로 FHWA는 기존 계약방식의 대안으로 혁신적인 계약방식인 성능보증제도에 관한 잠정규정을 수립하였고 시범사업을 통하여 구체화 시켰다. 또한 아스팔트포장과 콘크리트 포장에 대하여 지불규정제도를 운영하고 있다. 지불규정제도는 목적물의 성능에 미치는 영향이 가장 큰 인자를 중심으로 품질성능을 평가하여 그 수준에 따라 공사비를 차등 지급하거나 보수, 재시공과 같은 조치를 규정하기 위한 수단으로 사용된다. 평가인자의 경우 각 주마다 서로 상이하게 적용되고 있다. 현재 미국에서 지불규정제도의 운영은 전체 51개주 중 43개주가 지불규정제도를 시행하

고 있으며 압축강도, 포장두께, 바인더 함량과 같은 공용성에 큰 영향을 미치는 인자를 지불규정 평가 대상 인자로 선정하고 있다. 따라서 각각의 지불규정 인자별 기준에 대한 허용한도 및 한계치는 각 주마다 상이하며, 지불규정인자가 다르게 적용하는 이유는 지불규정을 각 주가 경험적 판단에 의해 자체적으로 개발하고 이를 수정해 왔기 때문이다(FHWA, 2003).

국내의 경우 도로포장의 하자보증 제도는 포장의 종류, 입찰 및 계약, 공법 등과 상관없이 단일 보증기간(2년)과 하자보증금률(3%)을 적용하고 있다. 이를 개선하기 위하여 한국도로공사의 경우 그간의 점검위주의 품질관리에서 목적물의 품질성능 위주의 품질관리 체계로의 전환을 위하여 목적물의 품질 수준 측정이 가능하도록 정량적 평가 지수인 품질성능지수(QPI : Quality Performance Index)를 적용하고 있다. QPI에서 제시한 콘크리트 포장의 품질평가항목의 경우에는 유럽과 미국의 대부분 주에서 공통적으로 압축강도, 두께, 평탄성 3가지의 지불규정 인자를 사용하고 있으며, 국내 특성상 포장표면의 제설제 살포 및 동결융해에 의한 스플링 파손이 주를 이루어 내구성 증진의 목적으로 3가지 공통인자에 추가적으로 기포간격계수의 평가인자가 사용되고 있다. 콘크리트 포장 평가인자의 경우 국외에서 경험적 판단에 의해 자체적으로 선정하고 개발된 인자를 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 한국도로공사에서 적용하고 있는 품질성능 지수인 QPI에서 콘크리트 포장에 적용하고 있는 인자 포장두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수에 대한 적정성에 대한 검토를 실시하였다.

## 2. 국내·외 품질성능인자 검토

국외의 품질보증제도에서 평가인자로 콘크리트 포장 두께, 콘크리트 압축강도 또는 휨강도, 평탄성, 공기량 등을 들 수 있다. 서봉교 연구에서 Table 1과 같이 미국의 25개주의 콘크리트 포장에 대한 조사 결과 콘크리트 포장의 지불규정 항목의 경우 포장 두께, 평탄성(IRI or PI), 압축강도, 휨강도, 공기량, 물/시멘트비, 시멘트량으로 구성되어 있다(Seo, 2009). Fig 1과 같이 조사된 콘크리트 포장의 지불규정(Pay Factor) 항목별 사용 비율(%)은 포장 두께 100%, 평탄성 56%, 강도 52%(압축+휨 강도), 공기량 12%, 물-시멘트비 및 시멘트 함유량이 각각 4%의 비율로 적용되고 있다. 또한 각각의 지불규정 인자별 기준에 대한 허용한도 및 한계치는 각 주마다 상이하며, 지불규정인자가 다르게 적용하는 이유는 지불규정을 각 주가 경험적 판단에 의해 자체적으로 개발하고 이를 수정해 왔기 때문이다.

콘크리트 포장두께는 텍사스를 비롯한 9개의 주에서 두께 손실량 5.1 mm 이하의 범위에 100% 지불규정이 적용되며, 다양한 정량화된 수치 범위로 비율별 등급을 적용하고 있다. 또한 손실량에

Table 1. Using of Each Parameter for Pay Factor in 25 States of US (Seo, 2009)

Status	Thickness	IRI	Compressive strength	Flexural strength	Air-void	W/C (Water/ Cement ratio)	Cement content
Alabama	0	0	0				
Indiana	0	0		0	0		
California	0						
Virginia	0						
Massachusetts	0						
Connecticut	0	0					
Michigan	0						
Texas	0	0		0			
Washington	0	0	0		0		
Georgia	0		0				
Illinois	0	0					
Kansas	0		0				
Iowa	0			0			
North Carolina	0			0			
Oregon	0	0	0				
Wisconsin	0			0			
Pennsylvania	0		0		0		
Arkansas	0						
Nebraska	0	0	0				0
Louisiana	0	0	0				
Mississippi	0	0					
Idaho	0	0					
North Dakota	0	0					
Montana	0	0					
Minnesota	0	0				0	
Total	25	14	8	5	3	1	1
Percentage (%)	100	56	32	20	12	4	4

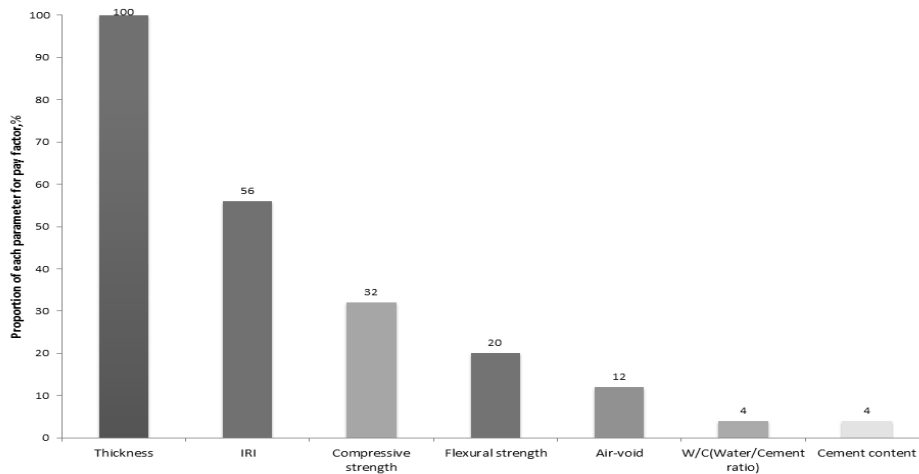


Fig. 1. Proportion of Each Parameter for Pay Factor in 25 States of US

대하여 일정 비율로 일정 금액을 삭감하는 방식으로 적용되고 있으며 포장두께의 10%이상 손실이 있을 경우에는 재시공을 하도록 기준을 정해 놓고 있다. 평탄성의 경우 미국의 워싱턴 주가 1.11 m/km, 인디애나 0.65 m/km, 루이지애나 0.94 m/km의 기준을 적용하고 있다. 다수의 주에서는 압축 또는 휨 강도를 인자로 선정하여 적용하였고, 네브라스카 주에서는 설계 압축강도에 대한 비율을 기준으로 사용하지만, 루이지애나 주는 27.6 MPa 이상의 압축강도를 기준임을 확인하였다. 또한, 휨 강도를 적용하는 인디애나, 아이오와 주는 각각 3.93 MPa 이상, 4.30 MPa 이하를 기준으로 한다. 물-시멘트비, 시멘트 함유량은 미네소타, 네브라스카 2개의 주에서만 다른 지불규정 인자들과 분리되어 적용되지만, 배합 설계 시 고려되는 요인으로 현장 여건별로 시멘트량이 상이하므로 강도와 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다. 이외의 지불규정 인자인 공기량은 인디애나를 비롯한 3개의 주에서 PWL과 같은 통계적 기법이나 실제 공기량을 측정된 값의 기준에 따라 지급 금액을 삭감하는 방식으로 적용되고 있다(Indiana DOT, 2006; Wisconsin DOT, 2006; Nebraska DOT, 2007; Illinois DOT, 2002; Louisiana DOT, 2006; Iowa DOT, 2007; Texas DOT, 2004; Minnesota DOT, 2005; Washington DOT, 2006).

국내의 경우 품질성능지수(QPI : Quality Performance Index)는 한국도로공사의 경우 그간의 점검위주의 품질관리에서 목적물의 품질성능 위주의 품질관리 체계로의 전환을 위하여 목적물의

품질 수준 측정이 가능하도록 정량적 평가 지수를 적용하고 있다. QPI의 경우 토공, 배수공, 교량공, 포장공, 터널공, 부대공으로 이루어져 있으며, 모든 공정에서 각각의 배점을 나누어 점수를 산정한다. 모든 공정을 합하여 총 100점을 기준으로 산정된다. Table 2와 같이 QPI에서 제시된 콘크리트 포장에서는 32점을 기준으로 압축강도, 기포간격계수, 포장두께, 평탄성 순서로 9, 9, 7, 7점의 배점으로 이루어져 있다. 압축강도의 경우 휨강도 4.5 MPa를 기준으로 휨강도비(1/6~1/8) 활용하여 하한 기준 100% 등급인 27 MPa를 기준하여 상한기준 36 MPa으로 선정되어있으며, 총 4개 등급으로 나누어져 있다. 기포간격계수의 경우 ACI에서 제시한 0.2 mm이하를 100% 등급기준으로 0.15 mm이하, 0.25 mm 이하와 0.25 mm이상의 4개의 등급으로 구성되어 있다(Kim et al., 2008). 포장두께의 경우 설계두께 기준 -1%이내를 100% 등급기준으로 -3%이내, -5%이내, -5%이상의 4등급으로 구성되어 있다. 평탄성은 국제 평탄성 지수인 IRI값을 기준으로 1.6 m/km를 100%기준하여 0.4 m/km, 1.0 m/km, 1.6 m/km이상으로 구성되어 있다. QPI에서의 포장두께의 등급은 설계두께를 기준으로 -1%이내를 100%로 환산하여 적용하고 있다. 미국의 경우는 포장 두께의 일정 기준의 손실량으로 범위에서 따라 공사비를 차등 지급 및 재시공을 위한 한계치가 있으나, QPI의 경우에는 점수로 평가하고 있다. 또한 평탄성의 경우 100% 기준이 1.6 km/m를 적용되며, 기준 이상의 값의 경우 105%은 1.0 m/km, 110%는 0.4 m/km로 가산점을 부여하고 있다. 미국의 경우에도 약 0.6~1.1 m/km 범위에서 나타내며, 기준 이상의 값의 경우 추가적으로 보너스를 지급하고 있다. 루이지애나 주의 압축강도는 27.6 MPa로 QPI의 100% 등급 값과 유사한 것을 알 수 있다.

Table 2. Assessment Factor of QPI for Concrete Pavement

Factor	Weight	Value of grade
Compressive strength	9%	Compressive strength (MPa)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 110% : over 36 MPa</li> <li>• 105% : over 31 MPa</li> <li>• 100% : over 27 MPa</li> <li>• 70% : Not applicable</li> </ul>
Spacing factor	9%	Air spacing
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 105% : below 0.15 mm</li> <li>• 100% : below 0.20 mm</li> <li>• 95% : below 0.25 mm</li> <li>• 70% : Not applicable</li> </ul>
Pavement thickness	7%	Thickness
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100% : -1% of design thickness or higher</li> <li>• 90% : -3% of design thickness or higher</li> <li>• 80% : -5% of design thickness or higher</li> <li>• 70% : Not applicable</li> </ul>
IRI	7%	IRI (m/km)
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 110% : below 0.4 m/km</li> <li>• 105% : below 1.0 m/km</li> <li>• 100% : below 1.6 m/km</li> <li>• 70% : Not applicable</li> </ul>

### 3. 품질평가지수의 평가인자 적정성 검토

콘크리트 포장 평가인자의 경우 콘크리트 압축강도 및 포장두께는 구조물의 수명에 영향을 미치는 주요인자, 기포간격계수는 동경용해 저항성 평가를 위한 인자, 평탄성(IRI)는 공용성에 영향을 미치는 인자로 판단하여 선정되어 있다. 그러나 QPI의 평가인자의 경우 국외에서 경험적 판단에 의해 자체적으로 선정하고 개발된 인자를 사용하고 있는 실정이다. 콘크리트 포장 평가인자를 신뢰성을 확보하기 위하여 포장수명 예측 시뮬레이션 및 실측 자료를 활용하여 분석하고 평가인자의 적정성을 검토하였다.

#### 3.1 콘크리트 포장두께

콘크리트 포장두께와 구조물에 영향을 확인하기 위하여 포장설계 프로그램인 KPRP (Korea Pavement Research Program)을 사용하였다. KPRP의 경우 설계수명은 IRI (m/km)과 균열율(%)

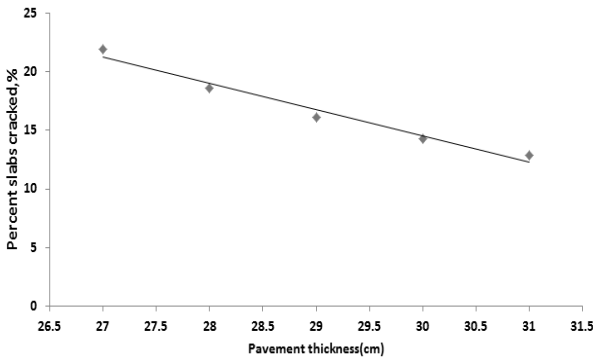


Fig. 2. Comparison between Pavement Thickness and Percent Slabs Cracked

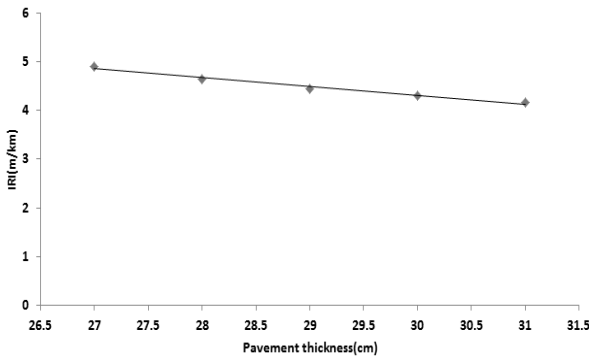


Fig. 3. Comparison between Pavement Thickness and IRI

을 기준으로 평가한다. 콘크리트 포장의 설계수명은 IRI 또는 균열율이 기준이상 높이면, 파괴되는 것으로 판단한다. KPRP의 입력변수의 경우에는 대전지역을 선정하였고, 일일교통량의 경우 60,000을 기준으로 설정하였다. 콘크리트 포장의 경우 QPI에서 제시한 등급에 따라서 31, 30, 29, 28, 27 cm를 설정하여 분석을 실시하였다.

KPRP에서의 콘크리트 포장수명은 균열율이 20%이상 발생하였을 때 포장이 파괴된 것으로 판단한다. 콘크리트 포장이 30년이 지난 시점에서의 포장두께와 균열율을 평가하였다. Fig. 2와 같이 포장두께가 증가할수록 균열율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 균열율이 20%이상 발생한 경우는 포장두께가 27 cm일 때이며, 약 28 cm 이상에서는 포장이 30년이 지난 시점에서도 포장파괴가 발생하지 않았다.

콘크리트 포장이 설계수명 30년을 기준으로 포장두께와 IRI를 평가하였다. 콘크리트 포장 수명을 평가하기 위해서는 포장두께와 평탄성 지수(IRI)에 대하여 분석을 실시하였다. 초기 평탄성의 경우 IRI 값이 1.2 m/km를 기준으로 공용기간이 지날수록 IRI 값이 4.0 m/km이상일 때 포장의 기능적 측면에서 수명을 다했다고 판단한다. Fig. 3과 같이 포장두께가 증가할수록 IRI값이 감소하는 것을 알 수 있으며, 모든 포장두께에서 IRI이 4.0 m/km이상 값을

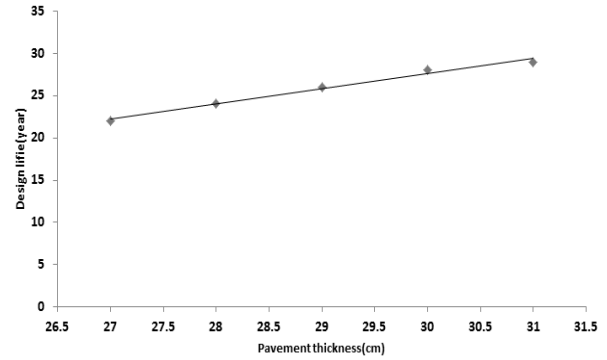


Fig. 4. Comparison between Pavement Thickness with Design Life

나타내고 있으며, 설계수명 30년 이전에 콘크리트 포장의 기능적 측면에서의 수명이 다했다고 판단된다.

콘크리트 포장두께에 따라서 포장수명을 판단하기 위하여 균열율과 평탄성을 비교하여 포장수명을 예측하였다. Fig. 4와 같이 포장두께 27 cm에서 포장수명 22년, 30 cm에서 29년으로 선형적으로 증가되는 경향을 나타내고 있다. 콘크리트 포장 두께가 1 cm가 증가하면 포장수명은 약 2년이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 콘크리트 포장두께가 증가할수록 수명이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 콘크리트 포장두께가 포장수명에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 포장두께는 QPI의 평가인자로 적당하다고 판단된다.

### 3.2 압축강도

QPI의 콘크리트포장 압축강도의 적정성을 평가하기 위하여 미국의 설계 프로그램인 MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)을 이용하여 분석을 하였고, 입력변수의 경우 국내의 기후 및 환경조건을 고려하여 중부지방을 선정하였다. MEPDG의 설계수명 평가는 IRI (m/km)와 단차(Faulting) 및 균열율(%)로 이루어지며 압축강도의 경우 QPI에서 제시한 등급에 따라서 36, 31, 27, 24 MPa 설정하여 분석하였다.

MEPDG에서도 콘크리트 포장의 수명 평가는 균열율이 20%이상 발생하였을 때 포장이 파괴된 것으로 판단한다. Fig. 5와 같이 압축강도가 증가할수록 균열율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 균열율이 20%이상 발생한 경우는 압축강도가 34 MPa이상의 경우 포장수명 30년에서도 포장파괴가 발생하지 않을 것을 알 수 있다.

평탄성을 분석하기 위하여 초기 평탄성의 경우 IRI 값이 1.2 m/km를 기준으로 공용기간이 지날수록 IRI 값이 4.0 m/km이상일 때 포장의 기능적 측면에서 수명을 다했다고 판단한다. 콘크리트 포장이 30년이 지난 시점에서의 포장두께와 평탄성을 평가하였다. Fig. 6과 같이 압축강도가 증가할수록 IRI이 감소하는 경향을 알 수 있다.

콘크리트 압축강도에 따른 포장수명을 평가하기 위하여 설계수명과 평탄성을 비교하여 분석하였다. Fig 7과 같이 압축강도 24 MPa에서 포장수명 10년이며, 36 MPa에서는 35년으로 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 콘크리트 포장의 압축강도가 1 MPa가 증가하면 포장수명은 약 2년이 증가하는 경향을 나타내고 있다. QPI의 콘크리트 포장의 압축강도가 증가할수록 포장수명이 증가하

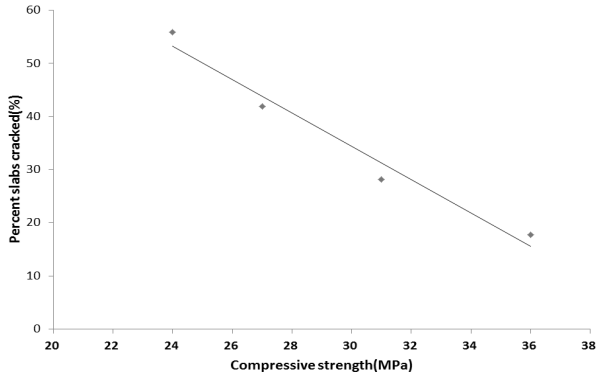


Fig. 5. Comparison between Pavement Compressive Strength and Percent Slabs Cracked

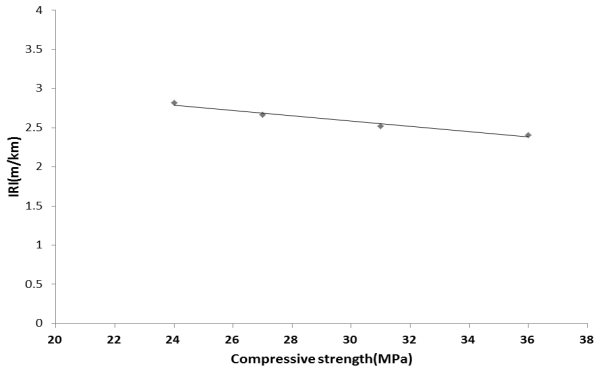


Fig. 6. Comparison between Pavement Compressive Strength and IRI

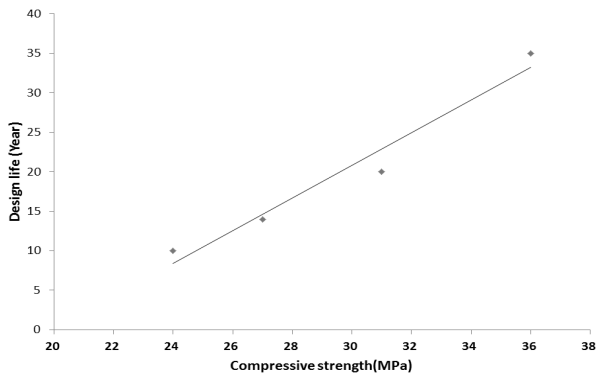


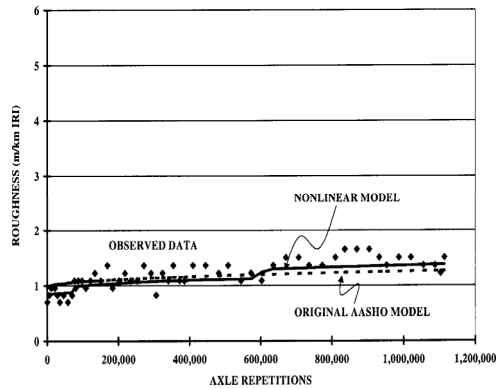
Fig. 7. Comparison between Pavement Compressive Strength and Design Life

는 것을 확인할 수 있다. 따라서 콘크리트 압축강도는 QPI의 평가인자로 적정하다고 판단된다.

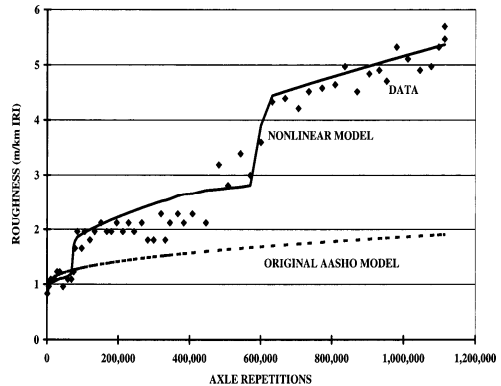
### 3.3 평탄성(IRI)

평탄성은 기능성지표로 사용되어 지며, 도로안전과 쾌적성 및 공용성을 확보하기 위한 가장 중요한 인자이다. 또한 좋은 콘크리트 포장에서 포장 설계수명에 큰 영향을 미치므로 미국의 대부분의 주는 공통적으로 평탄성을 QA인자로 사용 중에 있다. Prozzi 연구에서 제시된 Nonlinear model과 AASHO의 Linear model의 예측식을 통해 공용중인 포장에 교통량이 증가하면서 포면의 파손이 증가하므로 IRI값은 증가하는 경향을 나타내며 IRI값의 증가는 포장수명에 큰 영향을 미치므로 QPI 평가인자의 기능성 지표로서 적정함을 나타낸다(Prozzi et al., 2004). 또한 세계은행(IBRD) 포괄적인 평탄성 지수에 대해 포장도로와 비포장도로를 구분하여 각각의 대응되는 IRI 정도를 Fig. 9와 같이 정의하였다(Sayers et al., 1986).

국내의 평탄성 예측 모델을 통한 예측인자의 비교 분석을 위해 평탄성 영향인자들을 비교하였다. 2002 AASHO에서는 JCP



(a) 6,000 lbs Single Rear Axle



(b) 24,000 lbs Tandem Rear Axle

Fig. 8. Variation of IRI According to Vehicle Loads (Prozzi et al., 2004)

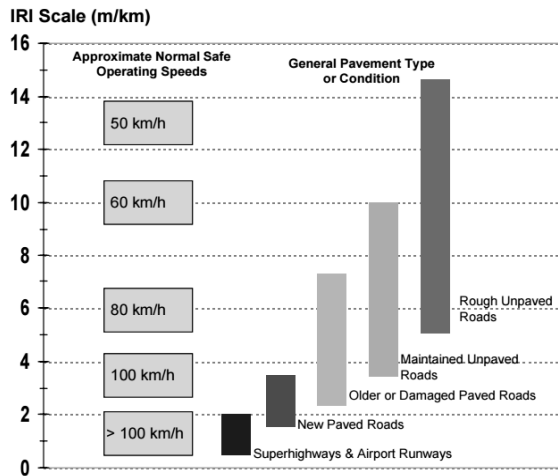


Fig. 9. The IRI Interpretation Scale (Sayers et al., 1986)

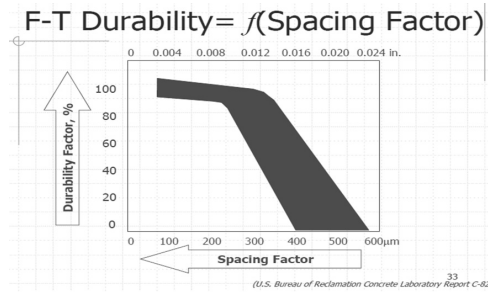
평탄성 모델의 영향인자로 균열, 평균줄눈단차, 스폐링, 누적줄눈단차, 지역계수, 동결지수, 재령, 노상재료의 비율 등 다양한 인자들을 고려하고 있다(AASHTO, 2002).

$$IRI = IRI_0 + 0.013CRACKED + 0.007\%SPALL + 0.001TFAULT + 0.03SITE \quad (1)$$

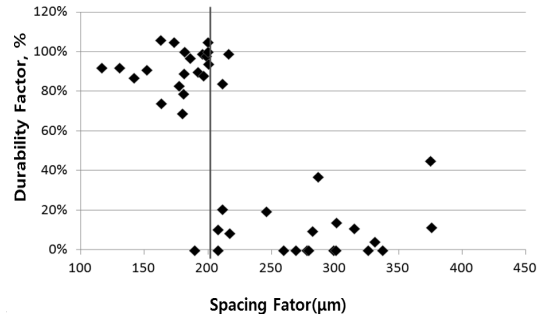
여기서,  $IRI_0$  : 초기 IRI, m/km, %CRACKED : 가로 피로균열에 기인한 균열이 발생한 슬래브의 비율, FAULT : 줄눈당 평균 줄눈 단차, in, %SPALL : medium과 high severities의 스폐링이 발생한 줄눈의 비율, TFAULT : km당 총 누적 줄눈 단차, mm, SITE : 지역계수이다. Eq. (1)과 같이 평탄성의 경우 다양한 파손으로 인하여 평탄성이 증가되며, 이를 활용하여 포장수명을 평가하고 있다. KPRP 평탄성모델(강릉원주대)은 초기평탄성, 스폐링비율, 균열율, 기층종류 등의 인자에 대한 고려가 이루어지고 있다.

$$IRI = IRI_0 + 0.0235AGE + 2.17Spalling(\%) + 1.88Cracking(\%) + 0.811Base \quad (2)$$

여기서,  $IRI_0$  (초기 평탄성) = 1.41 m/km, Spalling (%) = 스폐링율, Cracking (%) = 균열율, Base = 기층종류(린기층 : 0, 쇄석기층 : 1)으로 나타낼 수 있다. 따라서, 국내에서 제시한 평탄성 모델에서도 평탄성은 중요한 인자로 판단된다. 국외 2002 AASHTO와 국내 KPRP JCP 평탄성 모델을 비교한 결과, 평탄성에 영향을 주는 인자들이 각기 다르지만 초기평탄성 주요 인자인 것을 확인하였다. 따라서, QPI에서 적용하고 있는 평탄성은 포장수명에 영향을 미치는 인자이며, 평가인자로 적절하다고 판단된다.



(a) Durability Factor Versus Spacing Factor (Backstrom, 1956)



(b) Durability Factor Versus Spacing Factor (Hong, 2013)

Fig. 10. Relationship between Durability Factor and Spacing Factor (Backstrom, 1956; Hong, 2013)

### 3.4 기포간격계수

콘크리트 포장에 QPI 평가 인자인 기포간격계수의 경우 국내 포장표면은 제설제 및 동결융해 작용에 의한 스폐링 파손이 주를 이루며 이를 방지하기 위해 2013년 내구성 지표인 기포간격계수 0.22 mm 기준을 도입하였다. 동결융해 저항성 확보를 위해서는 기포간격계수 0.2 mm 이하로 요구되며, 높은 내구성 지수를 나타내야 한다. 홍승호 연구에 Backstrom의 연구를 바탕으로 국내에서 기포간격계수 연구를 진행하였으며, 연구결과 기포간격계수가 0.2 mm를 기준으로 내구성지수의 차이가 큰 것으로 보아 기포간격계수 0.2 mm이하의 내구성 향상을 위해 매우 중요한 품질관리 사항을 검증하였다(Backstrom, 1956; Hong, 2013).

기포간격계수가 콘크리트 포장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 고속도로 10개 구간에서 콘크리트 포장의 QPI 평가인자 데이터를 수집하여 분석을 실시하였다. 수집된 기포간격계수와 스폐링 비율은 Table 3과 같이 수집하였고 이를 활용하여 기포간격계수와 스폐링 파손율을 상관관계 분석을 실시하였다.

기포간격계수의 내구성을 평가하기 위해서 기포간격계수와 파손율에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 11과 같이 기포간격계수와 파손율이 높은 상관관계를 나타내며 기포간격계수가 증가할수록 파손율이 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 공용연수가 동일한 구간에서도 기포간격계수 크기에 따른 파손율이 큰 차이를 나타내고 있다. 기포간격계수가 증가할수록 파손율이 증가함을

Table 3. Collection of Data on Expressway

Section	Construction date	Measurement date	Air spacing (mm)	Spalling rate (%)	Spalling rate/year (%)
1	200811	201106	0.32	2.71	1.08
2	200811	201106	0.26	0.76	0.30
3	200712	201106	0.40	7.18	2.10
4	200910	201106	0.44	7.57	4.53
5	200905	201106	0.33	0.24	0.12
6	200905	201106	0.32	0.93	0.45
7	201009	201106	0.34	1.93	2.57
8	200911	201106	0.32	1.15	0.73
9	200711	201106	0.29	0.76	0.23
10	200612	201106	0.33	2.45	0.54

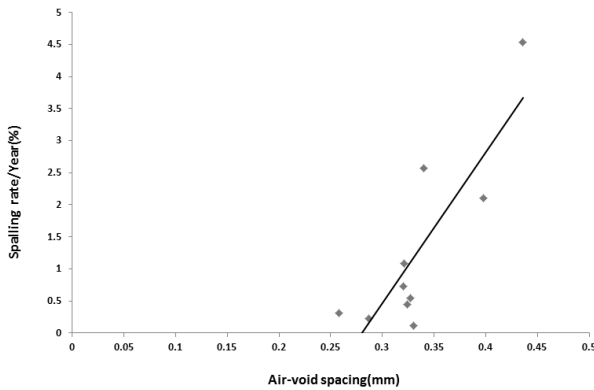


Fig. 11. Relationship between Spalling Rate/Year and Air Spacing

알 수 있으며 초기에 발생하는 스폐링 파손율의 원인은 기포간격계수의 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서, 기포간격계수는 스폐링 및 내구성에 영향을 미치는 인자로 판단되며, 콘크리트포장 평가인자로써 적정하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 한국도로공사에서 개발하여 적용하고 있는 QPI의 콘크리트 포장에 평가인자인 포장두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수에 대한 적정성을 검토하기 위하여 포장수명 예측 시뮬레이션과 실측자료를 활용하여 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 포장두께와 압축강도의 경우 포장수명 예측 시뮬레이션 분석결과 포장두께 및 압축강도가 증가할수록 포장수명을 증가하는 것을 알 수 있었으며, 포장두께와 압축강도는 포장수명에 영향을 미치는 인자로 확인하였다. 따라서 포장두께와 압축강도는 QPI의 평가인자로 적합한 인자로 판단된다.

- (2) 평탄성의 경우 포장수명 예측 시뮬레이션에서 포장수명의 공용성을 판단하는 인자로 적용되며, 국내·외의 평탄성 예측 모델에서 포장수명에 영향을 미치는 인자로 판단된다. 기포간격계수의 경우 스폐링 발생율과 기포간격계수를 분석 결과 기포간격계수가 증가할수록 스폐링 발생이 증가하는 것을 알 수 있으며, 국내·외 연구결과 기포간격계수가 내구성 및 스폐링에 영향을 미치는 인자로 확인할 수 있다. 따라서 평탄성 및 기포간격계수 또한 QPI에 적합한 인자로 판단된다.

QPI의 콘크리트 포장 평가인자인 포장 두께, 압축강도, 평탄성, 기포간격계수는 포장수명, 공용성 및 내구성에 영향을 미치는 인자이며 품질성능을 평가하는 적합한 인자로 판단된다.

#### References

American Association of State Highway and Transportation Officials (2002). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2002). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO.

Backstrom, J. E. (1956). U.S. Bureau of Reclamation, Concrete Laboratory, Report No. C-824, Denver 1956.

Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes, C. S. and Hill, H. S. (2003). "Optimal procedures for quality assurance specifications." Report FHWA-RD-02-095, Civil Engineering Department of Clemson University.

Federal Highway Administration (2003). "Summary report of the asphalt pavement warranties technology and practice in europe." Washington D. C.

Hong, S. H. (2013). "Concrete durability testing and analysis reports for feedback of quality control." Korea Expressway Corporation (in Korean).



- Illinois Department of Transportation (2002). Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Illinois Department of Transportation.
- Indiana Department of Transportation (2006). Standard Specifications, Indiana Department of Transportation.
- Iowa Department of Transportation (2007). Standard Specifications, Iowa Department of Transportation.
- Kim, D. S. (2012). "A study on quality control efficiency of expressway concrete pavement using quality performance index." Master's Thesis, Kyung Hee University (in Korean).
- Kim, J. H. and Oh, G. J. (2008). "A study on rebar detection depending on various factors by using electronic induction method and electromagnetic wave rader method." *In Proc. of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 12, No. 4, pp. 179-186.
- Kwon, S. A. et al. (2011). "Development of an warranty specification and its contract for road pavement." Report 06-A01, KAIA.
- Lee, C. and Jang, G. Y. (2011). "A study on quality assessment of expressway construction utilizing QPI." *Korean Society of Civil Engineers Monthly Magazine*, Sep. 2011, pp. 35-41 (in Korean).
- Louisiana Department of Transportation (2006). Standard Specifications for Roads and Bridges, Louisiana Department of Transportation.
- Minnesota Department of Transportation (2005). Standard Specifications for Construction, Minnesota Department of Transportation.
- Nebraska Department of Roads (2007). Standard Specifications for Highway Construction, Nebraska Department of Roads.
- Prozzi, J. A. and Madanat, S. M. (2004). "Development of pavement performance models by combining experimental and field data" *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 9-22.
- Seo, B. K. (2009). "Preliminary investigation of pay adjustment development for improvement of concrete pavement quality and performance." Master's thesis, Kyung Hee University (in Korean).
- Seo, B. K. (2009). "Preliminary investigation of pay adjustment development for improvement of concrete pavement quality and performance." Master's thesis, Kyung Hee University (in Korean).
- Texas Department of Transportation (2004). Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges, Texas Department of Transportation.
- Washington Department of Transportation (2006). Standard Specifications for Road, Bridge, and Municipal Construction, Washington Department of Transportation.
- Wisconsin Department of Transportation (2006). Standard Specifications, Wisconsin Department of Transportation.