

지방도 도로교 노면조도의 스펙트럼

정태주* · 차봉기**

Chung, Tae Ju*, Cha, Bong Ki**

Spectra of Road Surface Roughness on Bridges of Minor Road

ABSTRACT

The power spectral density (PSD) for the road surface roughness on the bridges of minor roads in Wonju city and Hoengseong-gun, Gangwon-do is presented. To obtain the PSD, the road surface roughness on 18 different bridges with various superstructure type and span is measured by GPS at every 10 to 30cm interval. Assuming the PSD as the stationary normal probability process with zero mean value, the PSD of measured road surface roughness is obtained by applying the Maximum Entropy Method (MEM). A simple formula in evaluating the PSD of RC slab bridge, Rahmen bridge and PSC I-girder bridge which is applicable to the dynamic response analysis of bridges considering the road surface roughness is proposed. Using the calculated PSD curves, the road surface conditions on the 18 bridges are evaluated. The statistical relationship between the PSD and the IRI is presented by applying linear regression and correlation analysis.

Key words : Road surface roughness, PSD, MEM, IRI

초 록

본 연구에서는 강원도 원주·형성 부근의 지방도 및 군도에 위치한 18개의 지방도 도로교에 대한 노면조도의 PSD를 제시하였다. 18개 대상교량에 대하여 GPS 측정기를 사용하여 교량의 노면조도를 10~30 cm의 간격으로 직접 측정하였다. 노면조도의 PSD는 평균값이 영인 정상확률분포로 가정하고 측정된 노면조도를 사용하여 MEM으로 구하였다. 도로교의 동적응답 연구에 적합한 노면조도의 PSD 값을 계산할 수 있는 식을 RC 슬래브교, 라멘교 및 PSC거더교 등 교량형식별 및 전체 교량에 대하여 제안하였다. 그리고 대상교량의 노면조도를 평가하고 IRI와 노면조도계수 사이의 관계를 분석하였다.

검색어 : 노면조도, 파워스펙트럼밀도, 최대엔트로피법, 국제평탄성지수

1. 서론

도로교는 차량하중을 주로 받는 구조물로서 차량이 교량을 통과할 때 발생하는 차량의 동적하중으로 인하여 동적거동을 하게 된다. 도로교의 동적거동에 영향을 미치는 요소로는 교량의 동적특성, 차량의 동적특성 및 교량 진입부의 단차와 교량 바닥판의 노면조도 등이 있다. 이러한 요소 중에 차량이 교량을 통과할 때 차량의 진동 원인이 되는 도로교의 노면조도는 도로교의 동적거동에 매우 많은 영향을 미치는 요소이다. 그리고 도로의 평탄성을 나타내는 도로의 노면조도는 차량의 승차감, 노면의 유지관리 및 보수방법 등을 결정하는데도 매우 중요한 요소이다.

도로의 노면조도는 도로 노면의 시공기면으로부터의 수직변위로 각기 다른 파장을 갖는 무수히 많은 파형의 연속으로 구성되어

* 중신회원·교신저자·한라대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author·Halla University·tjchung@halla.ac.kr)

** 한라대학교 정보산업대학원 토목공학과 석사과정 (Halla University·bongki78@korea.kr)

Received March 10, 2016/ revised July 17, 2016/ accepted September 23, 2016

있다고 볼 수 있다. 이러한 파장의 유형은 수 mm의 매우 짧은 것에서부터 수백 m까지 그 폭이 매우 넓으나, 주행차량에 영향을 미치는 파장의 길이는 보통 0.1~100 m 정도이고, 진폭은 일반적으로 0.1~10 cm 정도의 범위로 볼 수 있다(Dodds and Robson, 1973). 도로의 평탄성에 크게 영향을 미치는 것은 진폭으로 진폭이 크면 도로의 평탄성이 그만큼 불량하다고 말할 수 있다.

19세기 초반부터 교량의 동적거동에 대한 이론적 및 실험적 연구가 체계적으로 진행되어 왔으며 특히, 교량의 노면조도가 교량에 미치는 영향에 대한 연구는 1980년대 이후에 들어서야 본격적으로 시작되었다. Blejawas et al. (1979)은 교량의 노면조도를 사인파 형태로 모델링하여 사용하였으며, Gupta (1980)는 교량의 진입부에 있는 범프(bump)가 교량의 동적응답에 미치는 영향을 연구하였다. Hwang (1990) 및 Wang and Huang (1992)은 교량 노면조도의 PSD를 사용하여 교량의 노면조도를 인공적으로 생성시켜 단순교의 동적응답에 관한 연구에 사용하였다. 국내에서도 Chung (1994)는 여러 가지 종류의 도로에 대한 PSD를 사용하여 인공적으로 생성시킨 노면조도를 사용하여 단순 강도교의 충격계수에 관하여 연구하였으며, Kim (1994)은 경기도 일대 국도상의 21개 교량을 대상으로 직접 레벨로 측정하여 구한 노면조도의 PSD를 제안하고 차량의 제동하중으로 인한 도로교의 동적응답을 연구하였다.

교량의 동적해석을 실시할 때 사용되는 교량의 노면조도는 직접 측정하는 방법과 교량의 노면조도를 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 PSD로 나타내는 방법이 있다. 교량의 노면조도는 직접 측정하여 사용하는 것이 가장 바람직하나, 도로 및 교량의 형식에 따라 노면조도가 다르므로 여러 가지 도로 및 교량형식에 대한 노면조도를 직접 측정하는 데는 많은 어려움이 있다. 따라서 교량의 동적해석을 실시할 때 사용되는 교량의 노면조도는 교량 노면조도의 PSD를 사용하여 인공적으로 생성시킨 노면조도를 사용하는 것이 일반적이다.

Dodds and Robson (1973)은 노면 조도계수를 사용하여 여러 가지 종류의 도로에 대한 도로의 분류표를 제안하였다. 이 방법에서는 여러 가지 종류의 도로에 대한 노면조도를 PSD로 나타내어 노면 조도계수를 구하고 이들 노면 조도계수에 따라 도로의 종류를 분류하는 방법이다. 또한, 이 방법은 노면조도의 PSD를 사용하여 인공적으로 노면조도를 생성시킬 수 있는 장점이 있다. 그리고 도로 노면의 평탄성을 평가하는데 많이 사용되는 국제평탄성지수(International Roughness Index, IRI)는 노면 평탄성 측정단위에 대한 국제 표준화를 도모하기 위하여 1982년 브라질에서 수행된 국제도로평탄성실험(International Road Roughness Experiment, IRRE)에서 채택되었다. 이러한 측정단위는 일정 구간에 대한 노면 요철의 크기를 평균치로 나타내기 때문에 상대적 비교에는 편리하고 재현성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Sayer and Karamihis,

1998). 그러나 IRI의 값으로는 인공적인 노면조도를 생성시킬 수 없다.

도로교의 동적응답을 연구하는데 교량의 노면조도는 매우 중요한 요소이나 이에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 교량의 노면조도에 대한 연구는 Honda et al. (1982)이 56개 교량의 84개 차선에 대한 교량의 노면조도를 레벨로 직접 측정하여 도로교에 대한 노면조도의 PSD 함수식을 제안하였다. 국내에서는 Kim (1994)이 경기도 일대 국도상의 21개 교량을 대상으로 직접 레벨로 측정하여 구한 노면조도의 PSD를 제안하였고, Park et al. (1999)이 고속도로 상에 위치한 25개의 교량에 대하여 광파측량기(intelligent total station)을 사용하여 교량의 노면조도를 10~30 cm 간격으로 직접 측정하여 도로교에 대한 노면조도의 PSD를 교량형식별로 제안하였을 뿐 지방도 및 군도의 도로교에 대한 노면조도의 PSD에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않은 실정이다.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015)의 도로교량 및 터널현황에 의하면 2014년 현재 우리나라의 도로교의 전체 개수는 29,896개이며, 도로의 종류별로는 고속국도 8,493개, 일반국도 7,346개, 특별광역시도 1,173개, 국가지원지방도 1,233개, 지방도 3,693개 및 시군구도 7,958개이다. 이 중에 지방도와 시군구도의 도로교는 11,651개로 39%를 차지하고 있다. 이와 같이 우리나라 전체 도로교 중 지방도와 시군구도의 도로교가 차지하는 비율은 39%로 매우 높으나, 이들 도로교에 대한 노면조도의 연구가 전혀 이루어지고 있지 않은 실정므로 이에 대한 연구가 매우 필요하다.

따라서 본 연구에서는 강원도 원주형성 부근의 지방도 및 군도에 위치한 18개 대상교량의 노면조도를 직접 측정하고 MEM을 사용하여 구한 대상교량 노면조도의 PSD 함수식을 토대로 RC 슬래브교, 라멘교 및 PSC 거더교 등 교량형식별 및 전체 대상교량의 노면조도의 PSD 함수식을 제안하고자 한다. 그리고 대상교량에 대하여 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 노면조도의 PSD로부터 노면 조도계수를 계산하여 Dodds and Robson (1973)이 제안한 도로 분류표에 따라 대상교량의 노면상태를 평가하고, 측정된 노면조도로부터 구한 IRI와 노면 조도계수 사이의 관계를 분석하였다.

2. 대상교량 및 노면조도의 측정

2.1 대상교량

본 연구에서는 강원도 원주형성 부근의 지방도 및 군도에 위치한 18개의 도로교를 대상교량으로 선정하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 대상교량은 교량의 형식 및 기간 등을 고려하여 RC 슬래브교 9개, 라멘교 5개 및 PSC 거더교 4개를 선정하였으며,

도로포장은 모두 아스팔트 포장이다.

2.2 노면조도의 측정방법

도로 노면의 평탄성을 측정하는 방법에는 그 종류와 기법이 매우 다양하나 정적측정방법, 동적측정방법 및 광선을 이용한 측정 방법으로 대별할 수 있으며, 이를 간단하게 요약하면 다음과 같다.

정적측정방법에는 직선자를 이용하는 방법과 수준 측량기를 이용하여 노면의 종단면도를 측량하는 방법이 있다. 직선자를 이용하는 방법은 3~4 m 길이의 직선자를 노면에 올려놓고 육안으로 노면의 요철을 측정하는 방법으로 포장공사 현장에서 널리 이용되고 있는 방법이고, 노면의 종단면도를 측량하는 방법에는 일반적으로 널리 사용하는 수준측량인 레벨 측량법, 필요한 지점에 반사프리즘을 설치한 후 망원경의 초점을 맞춰 반사 프리즘을 시준하면 거리와 각도를 자동으로 측정할 수 있는 광파측량기, TRRL (Transport and Road Research Laboratory)에서 개발한 길이 3m의 알루미늄 빔의 양 끝에 높이를 조절할 수 있는 받침대를 장착하여 수평을 맞춘 후 노면조도를 측정하는 TRRL beam, 인력으로 끌거나 밀고 나가면서 노면의 평탄성을 측정하는 이동식 직선정규형측정기 및 상부에 부착된 GPS 수신기와 인공위성과의 수신을 통해 현재 위치의 3차원 좌표를 측정할 수 있는 GPS 측정기 등이 있다.

Table 1. Measured Bridges

BRG. No.	Bridge Type	Span Length (m)	Pavement	Design Load
1	2-Span RC Slab	2@7=14.0	Asphalt	DB-18
2	3-Span RC Slab	3@11=33.0	Asphalt	DB-18
3	3-Span RC Slab	3@14=42.0	Asphalt	DB-18
4	3-Span RC Slab	3@12=36.0	Asphalt	DB-24
5	3-Span RC Slab	3@10=30.0	Asphalt	DB-18
6	3-Span RC Slab	3@13=39.0	Asphalt	DB-18
7	4-Span RC Slab	4@15=60.0	Asphalt	DB-24
8	2-Span RC Slab	2@14=28.0	Asphalt	DB-24
9	4-Span RC Slab	4@12.5=50.0	Asphalt	DB-24
10	2-Span Rahmen	2@11=22.0	Asphalt	DB-18
11	Simple Rahmen	12.0	Asphalt	DB-24
12	Simple Rahmen	14.0	Asphalt	DB-24
13	2-Span Rahmen	2@10=20.0	Asphalt	DB-24
14	Simple Rahmen	12.5	Asphalt	DB-24
15	Simple RC Beam	15.0	Asphalt	DB-24
16	2-Span PSC I-Girder	2@32=64.0	Asphalt	DB-24
17	Simple PSC I-Girder	21.0	Asphalt	DB-24
18	2-Span PSC I-Girder	2@31=62.0	Asphalt	DB-18

동적측정방법은 일반 차량의 주행속도와 같은 속도로 주행하면서 자동으로 노면의 평탄성을 측정하는 방법으로 반응형 측정기와 종단도 기록식 측정기가 있으며 짧은 시간에 많은 양을 측정할 수 있는 장점이 있으나 측정기의 가격이 고가이다. 반응형 측정기는 노면의 요철에 의해 발생하는 차축과 차체 사이의 변위로 노면의 평탄성을 나타내는 방법이고, 종단 기록식 측정기는 차량에 설치한 센서의 신호를 받아 주행 중 일정한 간격의 자료 점에 대한 기준선으로부터의 높이를 환산하여 자료 점의 높이를 연결하여 노면의 종단면도를 그리는 방법이다.

광선을 이용한 평탄성 측정방법은 차량에 설치한 광학 측정시스템에 의한 백열광이나 레이저광선의 반사 특성을 감지하여 노면조도를 측정하는 방법이다.

2.3 본 연구에서의 노면조도 측정

본 연구에서는 Table 1에 나타난 18개의 대상교량에 대한 노면조도를 측정하기 위하여 정적측정방법 중 하나인 GPS 측정기를 사용하였다. GPS 측정기는 KOSEKO에서 개발한 Hi-Target V30로 기기 상부에 부착된 GPS 수신기와 인공위성과의 수신을 통해 현재 위치의 3차원 좌표 측정이 가능하고 별도의 콘트롤러와 블루투스 기능을 통해 측정자료를 저장하여 정리할 수 있는 최신의 장비로 정밀도는 ±2.5 mm이다. GPS 측정기를 사용하여 노면조도를 측정하는 경우 측정의 정확도는 기존의 정적측정방법과 유사하나 짧은 시간에 많은 양을 측정할 수 있고 혼자서도 노면조도를 측정할 수 있어 비용을 절감할 수 있다. Fig. 1에는 이 장비의 전경 및



Fig. 1. View of GPS

각 부위 명칭을 나타내었다.

노면조도의 측정위치는 차량의 진행방향으로 볼 때 차량의 좌측과 우측 바퀴가 통과하는 부분을 측정하였으며, 노면조도의 측정 길이는 교량의 시점에서부터 약 15 m 전부터 교량의 종점을 지나 약 7 m까지를 10-30 cm 간격으로 측정하였다. 그리고 신축이음장치 부분은 일반적으로 불연속적인 노면상태를 갖고 있으므로 전후 1.5 m씩 약 3.0 m 구간은 10 cm 간격으로 세밀하게 측정하였다.

3. 노면조도의 스펙트럼 해석

도로교의 노면조도는 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 PSD를 사용하여 나타낼 수 있다. Dodds and Robson (1973)은 도로 노면조도의 PSD를 Eq. (1)과 같이 지수함수의 형태로 나타내었으며 노면 조도계수에 따른 도로 분류표를 Table 2와 같이 제안하였다.

$$S(\gamma) = \begin{cases} L(\gamma_o) \left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)^{-W_1}, & \gamma \leq \gamma_o \\ L(\gamma_o) \left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)^{-W_2}, & \gamma \geq \gamma_o \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $S(\gamma) = PSD(m^2/cycle/m)$

$L(\gamma_o) =$ 조도계수 ($10^{-6} m^3/cycle$)

$W_1, W_2 =$ 조도지수

$\gamma =$ 파수 (wave number)

$\gamma_o = \frac{1}{2\pi} (cycle/m)$

Table 2. Classification of Roads Based on Road Spectra Presented by MIRA(Dodds and Robson, 1973)

Road Class		$L(\gamma_o)$ Range ($10^{-6} m^3/cycle$)	W1		W2	
			mean	σ	mean	σ
Mortorways	Very Good	2~8	1.945	0.464	1.360	0.221
	Good	8~32				
Principal Roads	Very Good	2~8	2.05	0.487	1.440	0.266
	Good	8~32				
	Average	32~128				
Minor Roads	Poor	128~512	2.28	0.534	1.428	0.263
	Average	32~128				
	Very Poor	512~2048				

MIRA : Motor Industry Research Association

Dodds and Robson (1973)은 Eq. (1)에서와 같이 조도지수를 파수가 $1/(2\pi)$ 보다 작을 때와 클 때를 구분하여 나타내었으나, 본 연구에서는 식을 단순화시키기 위하여 Eq. (2)와 같이 나타내었다.

$$S(\gamma) = L(\gamma_o) \left(\frac{\gamma}{\gamma_o}\right)^{-W} \quad (2)$$

교량의 노면조도를 고려한 주행차량에 의한 교량의 동적응답을 연구할 때 사용하는 교량의 노면조도는 평균값이 영인 정상확률분포로 가정한 PSD를 사용하여 인공적으로 생성시킨 인공 조면조도를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 현장에서 직접 측정한 교량의 노면조도에는 교량의 종단구배가 포함되어 있기 때문에 평균값이 영인 교량의 노면조도를 구하기 위해서는 측정한 노면조도에 포함된 교량의 종단구배를 제거시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 그래픽 전문 프로그램인 GRAPHER를 이용하여 측정한 노면조도를 1차 선형식 또는 2차 이상의 다항식으로 Curve Fitting하여 교량의 종단구배를 구한 후, 교량의 종단구배를 제거한 교량의 노면조도를 구하였다. 예로서 Fig. 2에는 측정한 교량의 노면조도 및 Curve Fitting하여 구한 교량의 종단구배를 나타내었으며, Fig.

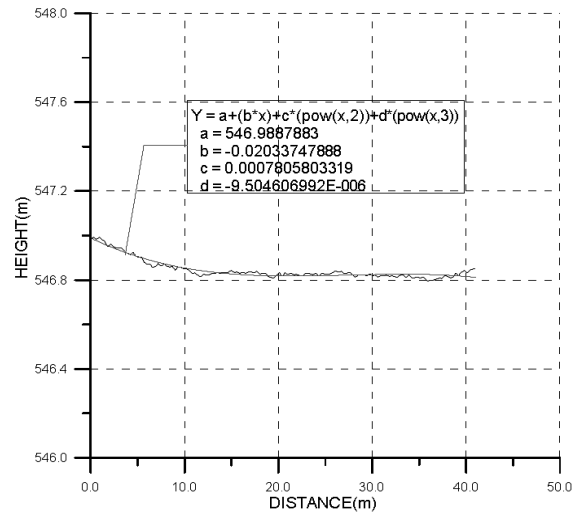


Fig. 2. An Example of Measured Road Profile

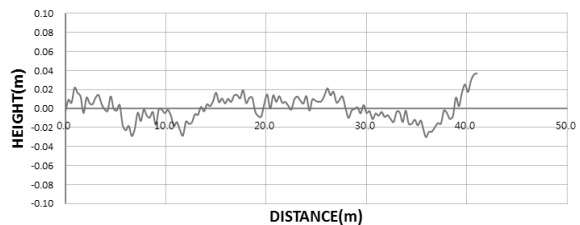


Fig. 3. An Example of Road Profile Obtained Through Setting the Fitted Curve in Fig. 2 as a Datum

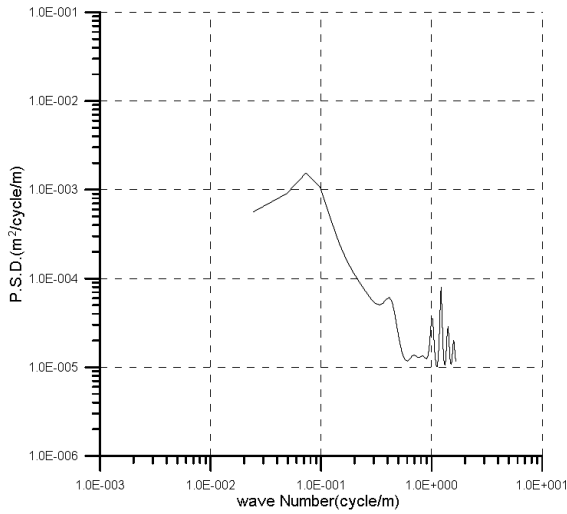


Fig. 4. PSD of the Curve in Fig. 3

3에는 Fig. 2로부터 구한 평균값이 영인 교량의 노면조도를 나타내었다.

Fig. 3에 나타난 측정된 교량 노면조도의 PSD는 FFT (Fast Fourier Transform) 또는 MEM을 사용하여 계산할 수 있으나, 본 연구에서는 Burg (1967)에 의해 제안된 MEM을 사용하여 노면조도의 PSD를 구하였다. MEM은 짧은 자료로부터의 스펙트럼 추정이 가능하고 또한 분해능력이 높은 안정된 스펙트럼을 구할 수 있는 특징이 있는 것으로 알려져 있다. MEM의 결과식은 Eq. (3)과 같으며, 본 연구에서는 Eq. (3)을 사용하여 측정된 노면조도의 PSD를 계산하였다.

$$P(f) = \frac{P_m}{2f_N} \frac{1}{\left| 1 + \sum_{k=1}^m \gamma_{mk} \exp[i2\pi f_k \Delta t] \right|^2} \quad (3)$$

여기서, f_N 은 Nyquist 주파수, γ_{mk} 는 m 점 예측오차 여과함수이고, P_m 은 $m+1$ 점 예측오차 여과함수로부터의 평균출력을 나타낸다.

Fig. 4에는 Fig. 3에 나타난 교량 노면조도의 PSD를 MEM을 사용하여 구한 예를 나타내었다.

4. 노면조도의 PSD 계산 결과 및 분석

4.1 교량형식별 노면조도의 PSD

각 교량의 노면조도의 PSD는 Eq. (3)의 MEM을 사용하여 구하였다. Eq. (3)에서 m 의 값을 결정하는 합리적인 기준은 없으나, 최적의 지연(lag)은 $m = (2 \sim 3) \sqrt{N}$ 의 범위에 있을 때인 것으로 알려져 있다. 여기서 N 은 자료의 전체 개수이다.

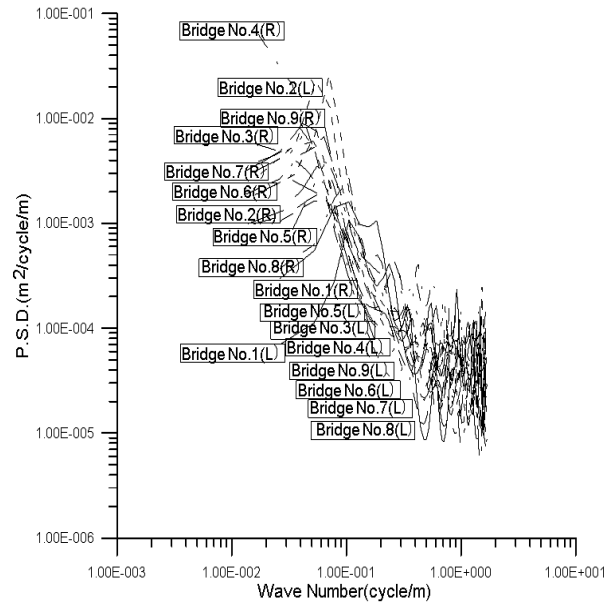


Fig. 5. PSD of RC Slab Bridges

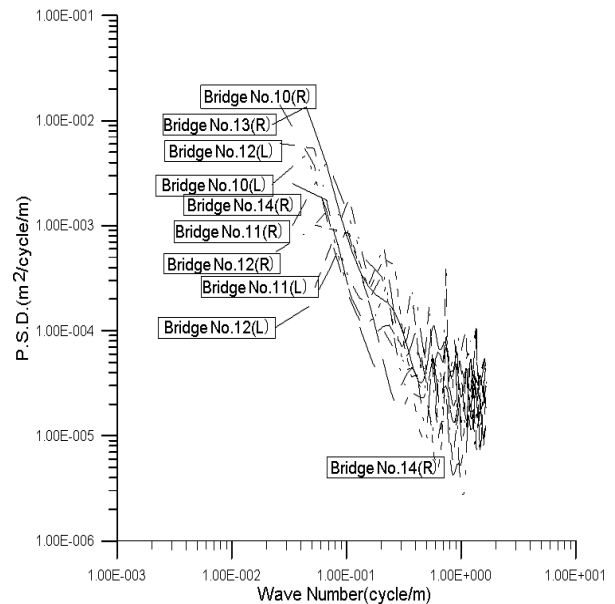


Fig. 6. PSD of Rahmen Bridges

Figs. 5~7에는 MEM을 사용하여 계산한 RC 슬래브교, 라멘교 및 PSC 거더교에 대한 노면조도의 PSD를 각각 나타내었다.

4.2 노면 조도계수 $L(\gamma_0)$ 와 조도지수 W 의 계산

각 교량에 대하여 계산한 노면조도의 PSD는 Eq. (2)와 같이 근사화할 수 있으며, Eq. (2)에서 노면 조도계수 $L(\gamma_0)$ 와 조도지수 W 는 지수함수에 대한 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

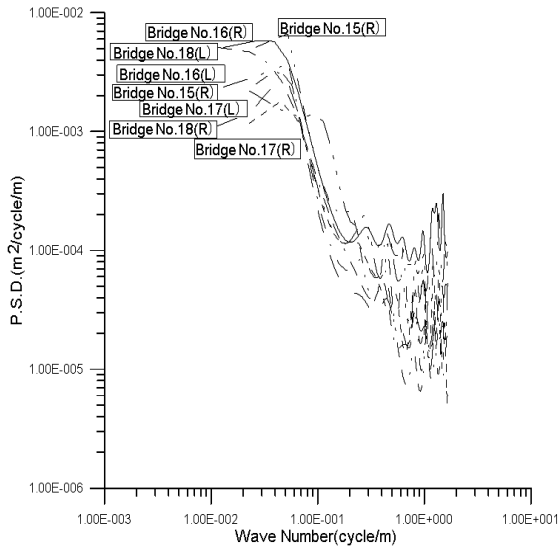


Fig. 7. PSD of PSC I-girder Bridges

Eq. (2)에서 $L(\gamma_0)(1/\gamma_0)^{-W} = \alpha$, $W = \beta$, $\gamma = x$ 로 가정하고, $y = ax^\beta$ 의 지수함수에 대해 양변에 자연로그 ln을 취하면 다음 식과 같이 된다.

$$\ln y = \beta \ln x + \ln \alpha \quad (4)$$

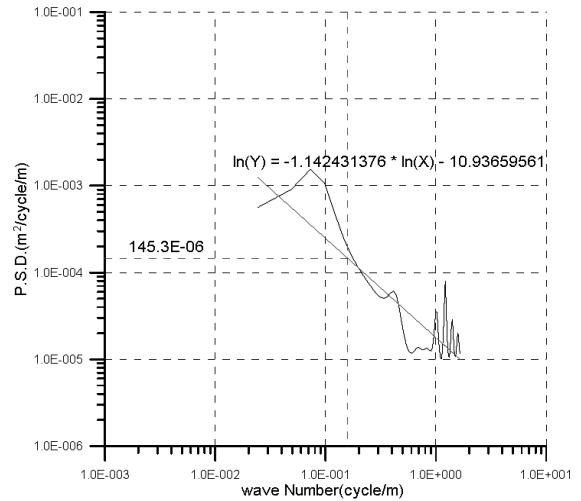


Fig. 8. $L(\gamma_0)$ and W Obtained from the PSD Curve in Fig. 4

Eq. (4)의 값은 각 교량에 대하여 Eq. (3)을 사용하여 계산한 노면조도의 PSD로부터 전문 프로그램인 GRAPHER를 이용하여 구하였다. 회귀분석 결과인 Eq. (4)로부터 불연속 주파수 $\gamma_0 = 1/(2\pi)$ 일 때의 PSD 값인 노면 조도계수 $L(\gamma_0)(10^{-6} m^3/cycle)$ 를 구하고, β 값은 W 에 해당하는 PSD의 조도지수가 된다. Fig. 8에는 노면조도의 PSD를 Eq. (2)와 같이 근사화시킨 스펙트럼 및 노면 조도계수

Table 3. Roughness Coefficient($L(\gamma_0)$) and Roughness Exponent (W) for Road Surface of 18 Bridges

BRG. No.	Left side			Right side		
	$L(\gamma_0)^*$	W	ISO classification	$L(\gamma_0)^*$	W	ISO classification
1	259.7	-0.667	Poor	198.0	-0.991	Poor
2	904.6	-1.325	Very poor	422.7	-1.157	Poor
3	227.0	-0.982	Poor	235.1	-1.286	Poor
4	420.5	-0.796	Poor	627.7	-1.062	Very poor
5	306.4	-0.914	Poor	355.3	-1.445	Poor
6	267.0	-0.942	Poor	313.9	-1.056	Poor
7	198.9	-0.946	Poor	162.8	-0.928	Poor
8	320.0	-0.963	Poor	279.2	-0.789	Poor
9	306.7	-1.100	Poor	195.9	-1.337	Poor
10	465.2	-1.071	Poor	375.4	-1.280	Poor
11	380.4	-0.986	Poor	222.5	-1.096	Poor
12	290.7	-1.294	Poor	223.7	-1.115	Poor
13	155.3	-0.911	Poor	145.3	-1.142	Poor
14	298.7	-0.962	Poor	338.5	-1.488	Poor
15	248.7	-1.294	Poor	189.1	-1.396	Poor
16	411.9	-0.651	Poor	334.9	-0.575	Poor
17	153.4	-1.206	Poor	164.8	-1.029	Poor
18	107.2	-1.168	Average	107.6	-0.910	Average

* $L(\gamma_0)$ measured units $10^{-6} m^3/cycle$

와 조도지수의 예를 나타내었다. 그리고 Table 3에는 18개 대상교량에 대한 노면 조도계수와 조도지수를 나타내었다.

4.3 대상교량의 노면상태 평가

도로의 노면상태는 Table 2에 나타난 ISO 규정에 따라 불연속 주파수 $\gamma_o = 1/(2\pi)$ 일 때의 PSD 값인 노면 조도계수를 사용하여 평가할 수 있다. 본 연구에서는 Table 3에 나타난 각각의 대상교량의 좌우 라인에 대한 노면 조도계수 $L(\gamma_o)$ 와 Dodds and Robson (1973)이 제안한 도로 분류표인 Table 2에서 지방도(minor roads)에 상응하는 노면 조도계수를 서로 비교하여 대상교량의 노면상태를 평가하였다. Table 3에서 전체 대상교량의 조도계수는 $(107.2 \sim 904.6) \times 10^{-6} m^3/cycle$ 의 범위에 분포되어 있으며, 표준편차는 152.0이다. 그리고 조도지수는 0.575~1.488의 범위에 분포되어 있으며, 표준편차는 0.222이다.

Table 3에 나타난 바와 같이 대상교량의 노면 조도계수와 Table 2의 도로 분류표에서 지방도에 상응하는 값을 서로 비교한 결과를 교량형식별로 살펴보면, 노면 조도계수가 $(107.2 \sim 411.9) \times 10^{-6} m^3/cycle$ 의 범위에 분포되어 있는 PSC 거더교가 가장 양호하며, 라멘교의 노면 조도계수가 $(145.3 \sim 465.2) \times 10^{-6} m^3/cycle$, RC 슬래브교의 노면 조도계수가 $(162.8 \sim 904.6) \times 10^{-6} m^3/cycle$ 의 범위에 분포되어 있다. 그리고 Table 4에는 교량형식별 노면 조도계수의 표준편차와 분산을 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 18개 대상교량의 좌우측 36개 라인에 대한 노면상태는 2개 라인이 보통의 노면상태(average)를 나타내고 1개 라인이 매우 불량한 노면상태(very poor)를 나타내며 나머지 33개 라인이 불량한(poor) 노면상태를 나타내고 있으며, 대상교량의 평균 노면 조도계수는 $225.1 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 로 불량한 노면상태를 나타내고 있다.

한편, 기존의 연구인 고속도로 상의 25개 교량에 대한 Park et al. (1999)의 연구에서는 교량의 평균 노면 조도계수가 54.7

$\times 10^{-6} m^3/cycle$ 로 보통의 노면상태를 나타내고, 국도 상의 21개 교량에 대한 Kim (1994)의 연구에서도 교량의 평균 노면 조도계수가 $75.0 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 로 보통의 노면상태를 나타내고 있다. 그러나 지방도 및 군도 상의 18개 교량에 대한 본 연구에서는 교량의 평균 노면 조도계수가 $225.1 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 로 불량한 노면상태를 나타내며 고속도로 및 국도 상의 교량에 비해 노면상태가 매우 불량함을 알 수 있다.

4.4 교량형식별 노면 조도계수와 조도지수

RC 슬래브교, 라멘교 및 PSC 거더교에 대한 노면조도의 PSD를 나타낸 Figs. 5~7로부터 교량형식별 평균 노면 조도계수 및 조도지수를 구한 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 RC 슬래브교에 대한 값은 Fig. 5에 나타난 9개 교량의 좌우측 18개 라인에 대한 전체 노면조도의 PSD, 라멘교에 대한 값은 Fig. 6에 나타난 5개 교량의 좌우측 10개 라인에 대한 전체 노면조도의 PSD, PSC 거더교에 대한 값은 Fig. 7에 나타난 4개 교량의 좌우측 8개 라인에 대한 전체 노면조도의 PSD 그리고 전체 교량에 대한 값은 18개 교량의 좌우측 36개 라인에 대한 전체 노면조도의 PSD를 각각 Curve Fitting하여 구한 값이다.

4.5 노면조도의 PSD

본 연구에서는 Eq. (2)를 사용하여 노면조도의 PSD를 나타내었다. 이 경우 파수가 영인 경우에는 노면조도의 PSD가 무한대로 발산하게 되므로 본 연구에서는 교량의 동적응답에 관한 연구에 적합한 노면조도의 PSD 함수식 $S(\gamma)$ 을 다음 식과 같은 형태로 제안하고자 한다.

RC 슬래브교 :

$$S(\gamma) = 266.5 \times 10^{-6} \left(\frac{\gamma}{\gamma_o} \right)^{-1.06}, \gamma_a \leq \gamma < \gamma_b \quad (5)$$

라멘교 :

$$S(\gamma) = 181.4 \times 10^{-6} \left(\frac{\gamma}{\gamma_o} \right)^{-1.12}, \gamma_a \leq \gamma < \gamma_b \quad (6)$$

PSC 거더교 :

$$S(\gamma) = 180.4 \times 10^{-6} \left(\frac{\gamma}{\gamma_o} \right)^{-0.90}, \gamma_a \leq \gamma < \gamma_b \quad (7)$$

전체 대상교량 :

$$S(\gamma) = 225.1 \times 10^{-6} \left(\frac{\gamma}{\gamma_o} \right)^{-1.04}, \gamma_a \leq \gamma < \gamma_b \quad (8)$$

Table 4. STDEV and Variances for Bridge Types

Bridge Type	RC Slab	Rahmen	PSC I-Girder	Total
STDEV	179.7	103.6	109.8	152.0
Variance	32,301.2	10,735.7	12,060.2	23,102.8

Table 5. Average Roughness Coefficient ($L(\gamma_o)$) and Roughness Exponents (W) for Bridge Types

Bridge Type	Line No.	$L(\gamma_o)$ $10^{-6} m^3/cycle$	W
RC Slab	18	266.5	-1.06
Rahmen	10	181.4	-1.12
PSC I-Girder	8	180.4	-0.90
Total	36	225.1	-1.04

Eqs. (5)~(8)에서 노면조도의 PSD의 값은 파수 γ 가 γ_a 보다 작은 경우에는 일정한 값으로 가정하고, 파수 γ 가 γ_b 보다 큰 경우에는 γ 의 역으로 가정하였다. Fig. 9에는 교량형식별 노면조도의 평균 PSD 값을 그림으로 나타내고, Fig. 10에는 전체 교량에 대한 평균 노면조도의 PSD 값을 나타내었다. 그리고 위의 식에서 $\gamma_a = 0.02$ 이고, $\gamma_b = 2.0$ 이다.

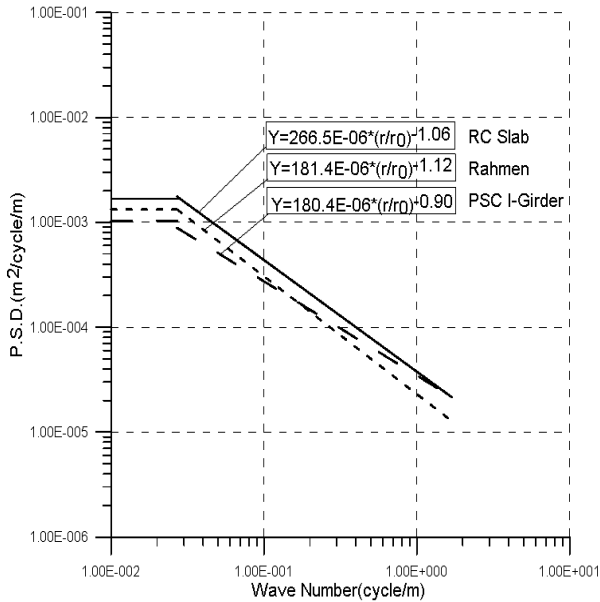


Fig. 9. Average PSD for Bridge Types

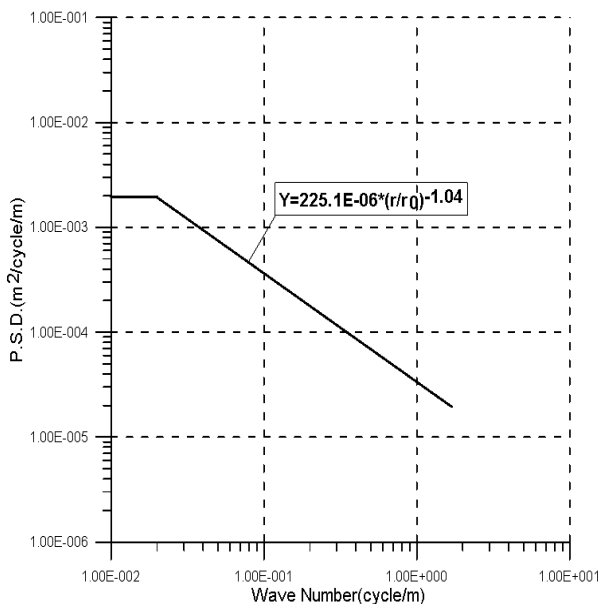


Fig. 10. Average PSD for Total Bridges

5. 노면조도의 IRI의 계산

IRI는 측정된 노면조도와 측정용 차량을 모사하여 계산할 수 있다. Fig. 11에는 1/4 차량모델인 “Golden Car”라고 불리는 IRI 계산용 차량모델을 나타내었다. IRI는 차량이 도로를 주행할 때 발생하는 차량의 동적반응인 4개의 변수 Z_1, Z_2, Z_3 및 Z_4 를 계산하여 구할 수 있다. Fig. 11에 나타난 1/4 차량모델에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_s \ddot{Z}_1 + c_s (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_3) + k_s (Z_1 - Z_3) = 0 \quad (9a)$$

$$m_u \ddot{Z}_3 - c_s (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_3) - k_s (Z_1 - Z_3) = -k_t (Z_3 - Y) \quad (9b)$$

여기서, m_s = 차체의 질량

m_u = 차축의 질량

K_s, C_s = 현가장치의 현가스프링 강성 및 현가장치의 감쇠 계수

K_t = 타이어의 스프링 강성

Z_1, Z_2 = 차체의 수직변위

Z_3, Z_4 = 차축의 수직변위

슬랙 변수로 $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$ 와 $\dot{Z}_3 = \dot{Z}_4$ 를 도입하면 Eq. (9)는 다음 식과 같다.

$$m_s \dot{Z}_2 + c_s (Z_2 - Z_4) + k_s (Z_1 - Z_3) = 0 \quad (10a)$$

$$m_u \dot{Z}_4 - c_s (Z_2 - Z_4) - k_s (Z_1 - Z_3) = -k_t (Z_3 - Y) \quad (10b)$$

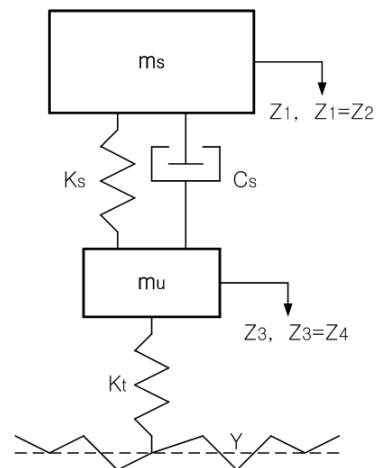


Fig. 11. Quarter Car Model

Eq. (10)을 행렬식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\{\dot{Z}\} = [A]\{Z\} + \{B\}Y \quad (11)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_s/m_s - c_s/m_s & k_s m_s & c_s/m_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_s/m_u & c_s/m_u & (k_s + k_t)/m_u & -c_s/m_u \end{bmatrix}$$

$$\{B\}^T = \{0 \ 0 \ 0 \ k_s/m_u\}, \{Z\}^T = \{Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4\}$$

Eq. (11)으로부터 Z에 대한 2차 및 3차 미분치를 구하고 측정 x에 대한 샘플간격 증분을 Taylor 급수로 전개하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \{Z(x+dx)\} &= \{Z(x)\} + ([A]\{Z(x)\} + \{B\}Y(x))dx \\ &\quad + ([A]^2\{Z(x)\} + [A]\{B\}Y(x))\frac{dx^2}{2!} \\ &\quad + ([A]^3\{Z(x)\} + [A]^2\{B\}Y(x))\frac{dx^3}{3!} + \dots \\ &= [ST]\{Z(x)\} + \{P\}Y(x) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$[ST] = [I] + [A]dx + [A]^2\frac{dx^2}{2!} + \dots$$

$$\{P\} = \left([I]dx + [A]\frac{dx^2}{2!} + \dots \right), \{B\} = [A]^{-1}([ST] - [I])\{B\}$$

Eq. (12)에서 dx는 샘플증분을 나타내고, 차량의 주행속도는 80 km/hr이다. [A]는 차량의 특성으로 $m_s = 1$, $m_u = 0.15$, $k_s/m_s = 63.3$, $k_t/m_s = 653$ 및 $c_s/m_s = 6$ 이고(Sayer and Karamihas, 1998), {B}는 차량의 특성을 나타내는 벡터이다. 그리고 Y(x)는 임의의 측정과 그 다음 측정간의 노면조도의 차이를 샘플간격 dx로 나눈 기울기의 입력 값이다.

따라서 각 위치에 대한 차량의 변위성분 [Z]는 이전 단계에서의 변위와 Eq. (12)를 사용하여 구할 수 있으며, 정류경사도(rectified slope)는 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$RS_i = |Z_3 - Z_1| \quad (13)$$

IRI는 전체 길이에 대한 RS의 평균값으로 다음 식과 같고, 단위는 mm/m이다.

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^n RS_i \quad (14)$$

Fig. 12에는 IRI와 사람이 느끼는 주관적인 평가등급 및 그에 따른 노면의 상태 비교를 나타내었다.

Table 6에는 본 연구에서 측정된 노면조도를 사용하여 구한 대상교량의 IRI를 나타내었다. Table 6에 나타난 바와 같이 전체

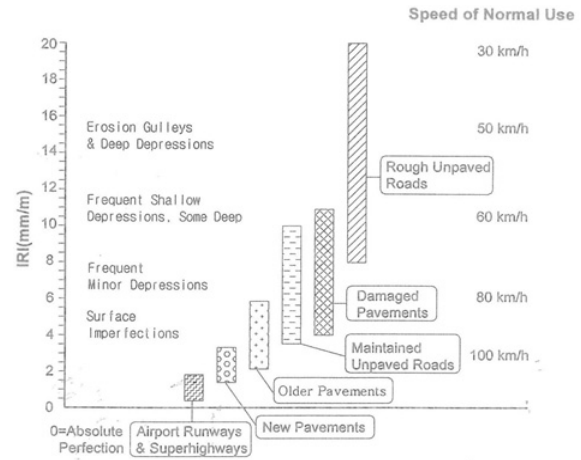


Fig. 12. IRI Ranges Represented by Different Classes of Road (Sayer and Karamihas, 1998)

Table 6. IRI for 18 Measured Bridges

Bridge No.	IRI (mm/m)		Remarks
	Left Side	Right Side	
1	4.163	4.253	
2	8.491	8.101	
3	3.836	5.199	
4	6.654	12.544	
5	4.231	4.739	
6	6.277	5.492	
7	5.020	5.078	
8	4.620	4.841	
9	4.041	5.144	
10	4.410	7.084	
11	4.836	4.105	
12	5.631	7.130	
13	2.373	3.256	
14	4.090	4.745	
15	4.295	5.574	
16	5.077	6.821	
17	4.513	3.646	
18	4.397	3.653	

대상교량의 좌우측 라인에 대한 IRI는 2.373에서부터 12.544까지 분포되어 있고, Fig. 12에 나타난 IRI 평가기준과 비교하여 보면 대상교량의 노면상태는 오래된 포장상태에서부터 손상된 포장상태까지 분포하고 있다. 이는 차량의 주행속도가 80 km/hr일 때 차량의 흔들림이나 진동을 심하게 느끼는 것으로 나타났으나, 지방도 및 군도의 경우 차량의 설계속도가 60 km/hr 정도인 점을 감안하면 차량의 운행에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

6. IRI와 조도계수 사이의 관계

IRI는 노면의 평탄성을 정량적으로 평가하기 때문에 노면의 평탄성을 상대적으로 비교하는 경우에는 편리하지만, 주행차량의 동적하중을 계산하는데 필요한 노면조도를 재현할 수 없는 단점이 있다. 그러므로 이동차량이 통과하는 도로교의 동적응답을 연구할

때 사용되는 노면조도의 PSD와 IRI 사이의 관계를 파악하고 있으면 IRI를 사용하여 노면조도의 PSD를 추정할 수 있다.

따라서 18개 대상교량 좌우측 라인에 대한 IRI 와 조도계수 사이의 관계를 알아보기 위하여 회귀분석과 상관분석을 실시하였다. 본 연구에서 회귀분석은 그래픽 전문 프로그램인 GRAPHER를 이용하였다. Fig. 13에는 IRI와 조도계수 사이의 산포도를 나타내었다.

Fig. 14에는 IRI와 조도계수 사이의 관계를 선형으로 가정하고 회귀분석을 통해 선형회귀식 및 선형회귀식에 대한 90% 신뢰구간을 산정하여 나타내었다. 또한 Fig. 15에는 선형회귀식을 통하여 구한 예측치와 실측치 사이의 잔차 분포도를 나타내었다. 그리고 선형회귀분석의 타당성을 검증하기 위하여 잔차에 대해 계급구간을 나누고 해당하는 도수를 나타낸 점포도를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 회귀식의 잔차는 대체적으로 정규분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 IRI의 값이 증가하면 조도계수도 선형적으로 증가함을 나타낸다. 따라서 IRI와 조도계수 사이의

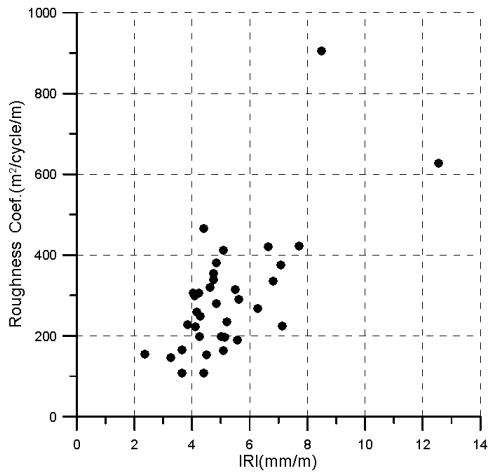


Fig. 13. Diagram of Relation between IRI and Roughness Coefficient

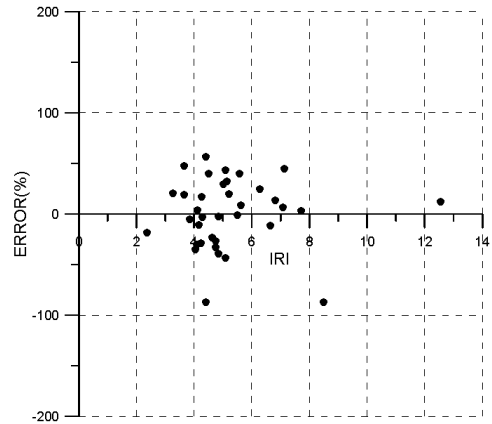


Fig. 15. Diagram of Residual between IRI and Roughness Coefficient

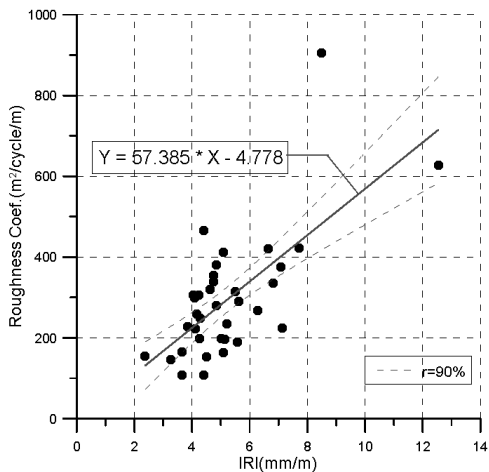


Fig. 14. Regression Line and 90% Confidence Curves between IRI and Roughness Coefficient

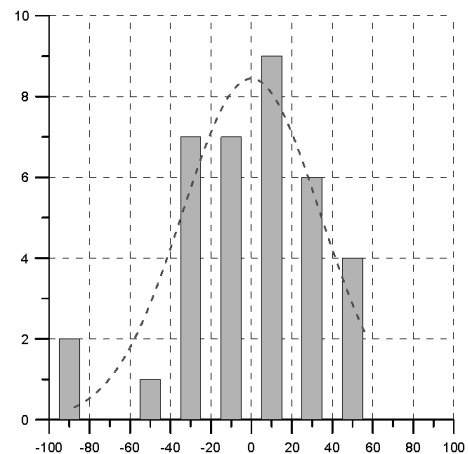


Fig. 16. Histogram of Residual between IRI and Roughness Coefficient

관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = 57.385X - 4.778 \quad (15)$$

여기서, $X=IRI(mm/m)$ 이고 $Y=조도계수(m^3/cycle)$ 이다.

7. 결론

본 연구에서는 강원도 원주횡성 부근의 지방도 및 군도에 위치한 18개 대상교량의 노면조도를 직접 측정하고 MEM을 사용하여 대상교량 노면조도의 PSD를 구하였다. 노면조도의 PSD로부터 구한 노면 조도계수를 Table 2에 나타낸 도로분류표와 비교하여 노면상태를 평가하였으며 측정한 노면조도로부터 구한 IRI와 노면 조도계수 사이의 관계를 분석하였다. 이들 결과로부터 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지방도 및 군도에 위치한 기존 도로교에 대한 노면조도의 PSD를 지수함수 형태로 나타내어 구한 교량형식별 및 전체 교량에 대한 노면조도의 PSD 식을 제안하였다.
- (2) 대상교량의 형식별 노면상태는 평균 조도계수가 $180.4 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 인 PSC 거터교가 가장 양호하고 다음으로 평균 조도계수가 $181.4 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 인 라멘교, 평균 조도계수가 $266.5 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 인 RC 슬래브교의 순서로 나타났다.
- (3) 전체 대상교량의 노면상태는 평균 조도계수가 $225.1 \times 10^{-6} m^3/cycle$ 로 불량한 노면상태를 나타내며 보통의 노면상태를 나타내는 고속도로 및 국도 상의 교량에 비해 노면상태가 매우 불량함을 알 수 있다.
- (4) 대상교량에 대한 IRI와 조도계수 사이의 관계는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 선형관계임을 알 수 있으며, 이는 도로교의 노면 상태가 불량하여 IRI가 증가하면 조도계수가 증가함을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 한라대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

References

- Blejwas, T. E., Feng, C. C. and Ayre, R. S. (1979). "Dynamic Interaction of moving vehicles and structures." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 67, No. 4, pp. 513-521.
- Burg, J. P. (1967). "Maximum entropy spectral analysis." Paper presented at the 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys., Oklahoma City, Okla.
- Chung, T. J. (1994). *Dynamic analysis of steel highway bridges in consideration of road surface roughness using 3-D. vehicle model*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Myong-Ji (in Korean).
- Dodds, C. J. and Robson, J. D. (1973). "The description of road surface roughness." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, No. 2, pp. 175-183.
- Gupta, R. K. (1980). "Dynamic loading of highway bridges." ASCE, Vol. 106, No. EM2, pp. 377-394.
- Honda, H., Kajikawa, Y. and Kobori, T. (1982). "Spectra of road surface roughness on bridges." ASCE, Vol. 108, No. ST9, pp. 1956-1966.
- Hwang, E. S. (1990). *Dynamic Load for Girder Bridges*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Michigan.
- Kim, K. C. (1994). *Dynamic analysis of highway bridges under the passing and braking of vehicles*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2015). *Road bridge and tunnel statistics in korea* (in Korean).
- Park, Y. S., Chung, T. J., Shin, D. K., Lee, W. T. and Cho, S. W. (1999). "A study on the spectra of road surface roughness on highway bridges." *Journal of korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. I-1, pp. 67-78 (in Korean).
- Sayer, M. W. and Karamihas, S. M. (1998). *The little book of profiling : Basic information about measuring and interpreting road profiles*.
- Wang, T. L., Huang, D. and Shahawy, M. (1992). "Dynamic response of multi-girder bridges." ASCE, Vol. 118, No. ST8, pp. 2222-2238.