

통계적 방법을 이용한 복층 저소음포장의 소음저감효과 분석

An Analysis on Noise Reduction Effects of Two-Layer Low Noise Pavements using Statistical Methods

이상혁	Lee, Sang Hyuk	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : sanghyuklee8612@gmail.com)
한대석	Han, Dae Seok	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : handaeseok@kict.re.kr)
유인균	Yoo, In Kyoon	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 (E-mail : ikyoo@kict.re.kr)
이수형	Lee, Soo Hyung	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : shlee1@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to compare noise reduction quantities between before/after two-layer low noise pavement implementation using equivalent noise level analysis and to analyze the noise reduction effects of the two layer low noise pavement with a statistical method such as the Anderson-Darling Test.

METHODS : In order to compare and to analyze noise reduction effects between before/after two-layer low noise pavement implementation, data acquisition as noise levels on a roadside and an apartment rooftop was conducted in the study area. The equivalent noise level was estimated in order to compare noise reduction quantities and the Anderson-Darling Test was carried out for estimating noise reduction effects of the two-layer low noise pavement.

RESULTS : The equivalent noise levels of before/after two-layer low noise pavement implementation for the roadside during the daytime are 65.355 dB and 63.520 dB and during the nighttime are 62.463 dB and 59.088 dB. The equivalent noise levels for the apartment rooftop during daytime are 57.301 dB and 59.088 dB and during the nighttime are 54.616 dB and 52.464 dB. Also two-layer low noise pavement decreased the noise reduction effects estimated with the statistical method as the Anderson-Darling test for the roadside during the daytime by around 66.68% and decreased noise reduction effects on the roadside during the nighttime by 0.70%. Moreover it reduced noise reduction effects in the apartment rooftop during the daytime and nighttime by 0% and 96.32%, respectively.

CONCLUSIONS : Based on the result of this study, two-layer low noise pavement can positively affect noise reduction during both the daytime and nighttime according to the results of estimating the equivalent noise levels and the Anderson-Darling test.

Keywords

two-layer low noise pavement, noise reduction effects, equivalent noise level, Anderson-Darling test

Corresponding Author : Lee, Soo Hyung, Senior Researcher
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0144 Fax : +82.31.910.0749
E-mail : shlee1@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Jun. 22, 2017 Revised Aug. 08, 2017 Accepted Nov. 02, 2017

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 1970년대 이후 경제활동이 증가하면서 도시지역을 중심으로 도로네트워크가 확장되고, 자동차

등록대수의 폭발적인 증가로 인해 도시지역의 교통정체 발생, 통행시간 증가 등의 교통문제가 발생하고 있다. 더욱이 최근 들어 자동차 운행대수와 운행시간 증가로 인해 대기오염 증가와 소음공해 발생과 같은 환경문제가 사회적 이슈로 대두되고 있다. 이는 최근 강조되고 있는 인간의 삶의 질 향상과는 상반된 현상으로 이를 해결하기 위한 여러 가지 정책과 방법이 제시되고 있다.

환경문제 중 대기오염과 미세먼지 등은 오염물 배출 감소를 위한 규제와 신기술을 적용한 장치개발 등으로 인해 일정 수준까지 감소시킬 수 있다. 반면 소음공해의 경우 주간과 야간의 소음 규제기준은 있지만 도로소음을 저감시키기 위한 방안은 방음벽과 방음터널 설치 이외 다른 대안이 없는 실정이다. 또한, 방음벽과 방음터널은 철제를 소재로 한 구조물로 시공비와 유지관리비가 높음에도 불구하고 소음저감효과가 제한적이라는 단점을 가지고 있다(Kang et al., 2014).

도로에서 발생하는 소음은 차량엔진소음, 공기저항소음, 그리고 타이어 마찰소음으로 구분할 수 있으며, 실제 소음발생원인 중 약 60%가 타이어와 노면의 마찰에 의해 발생하는 소음이다(Kim, 2014). 이에 최근 들어 노면에서 발생하는 소음을 저감하기 위하여 저소음포장을 개발하고 적용하는 도로구간이 도심지 주거지역을 중심으로 증가하고 있다. 저소음포장은 다공성 재료를 이용하여 20% 정도의 공극률을 갖게 하는 포장으로 일반적인 아스팔트 포장의 공극률인 4%보다 공극률을 더 확보하여 소음원의 음압레벨을 저감하는 도로포장이다. 일반적인 저소음포장인 단층 저소음포장은 일반적인 아스팔트 포장에 비해 소음저감효과가 높은 것으로 인정받고 있다. 하지만 단층 저소음포장에 비해 복층 저소음포장은 포장의 상층과 하층의 골재 크기를 달리 시공하여 소음저감효과가 높은 것이 특징이다(Kang et al., 2014; Jo et al., 2013; Lee et al., 2012).

복층 저소음포장의 경우 일반포장에 비해 시공비와 유지관리비가 높은 단점을 가지고 있다. 또한 복층 저소음포장의 소음저감효과를 평가하는 기준이 마련되어 있지 않아 소음저감의 경제성 검증에 어려움을 겪고 있다. 소음저감효과는 교통량과 차량속도를 기초로 한 등가소음도를 기준으로 판단할 수 있다. 등가소음은 일정시간 동안 통과한 교통량이 발생시킨 소음을 평균하여 산출하는 방식으로 교통량 중 대형차량비율과 기타 외부영향으로 인해 일정한 값을 산출하지 못하는 단점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 복층 저소음포장의 소음저감효과

를 효과적으로 분석하기 위하여 복층 저소음포장 시공 전·후의 소음을 측정하고 통계학적 접근방식인 Anderson-Darling 테스트를 통해 소음측정 데이터의 분포를 산출하여 각 분포에서 기준이 되는 소음정도보다 높게 발생하는 소음빈도(확률)를 산정하여 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하였다. 지금까지 소음관련 연구에서는 통계학적 방법을 이용한 소음저감효과분석이 시행된 사례가 없어 새로운 분석방안을 제안하는 것이 본 연구의 목적이다.

1.2. 연구의 범위 및 내용

본 연구에서는 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하기 위하여 경기도 내 기존 단층 저소음포장에서 복층 저소음포장으로 시공한 구간을 대상으로 복층 저소음포장 시공 전과 후의 주간·야간의 도로소음을 측정하였다. 도로변 소음발생은 ‘소음·진동 공정시험기준’ (Ministry of Environment, 2015)에서 제시하는 방법을 이용하여 측정하였으며, 주거지역 소음특성을 분석하기 위하여 도로변 소음측정 지점과 동일선상에 위치한 아파트(27층) 옥상에서 ‘소음·진동 공정시험기준’의 방법으로 소음을 측정하였다.

수집된 데이터는 기계적 오류로 인한 이상치(Outlier)를 제거한 후 분석에 활용하였으며, 소음도 분석은 ‘소음·진동 공정시험기준’에서 제시하고 있는 분석절차에 따라 10분 등가소음도를 이용하였다.

복층 저소음포장의 소음저감효과는 등가소음도의 단점을 보완하기 위하여 통계학적 분석방법인 Anderson-Darling 테스트를 이용하여 소음발생빈도를 확률분포로 산정하여 복층 저소음포장의 소음저감효과를 단층 저소음포장과 비교하여 분석하였다.

2. 기존연구

Moon and Shon(2013)은 교통소음의 특성을 분석하기 위하여 쇄석매스틱아스팔트(Stone Mastic Asphalt)와 밀입도아스팔트(Dense Grade Asphalt)를 대상으로 승용차와 덤프트럭의 타이어와 도로의 마찰소음을 NCPX(Noble Close Proximity) 방법을 이용하여 측정하였다. 소음측정은 차량주행속도 40, 60, 80, 100km/h로 나누어 측정하였으며 ANC(Active Noise Cancellation) 시스템을 적용하여 도로소음특성을 분석하였다.

Kim et al.(2013)은 서울시 관내의 아스팔트와 콘크

리트 포장의 소음을 측정하고 포장재료별 소음정도를 분석하기 위하여 최근 서울시의 소음민원이 많이 발생하는 지역 6군데를 대상으로 소음을 측정하고 분석하였다. 소음측정방법은 NCPX를 적용하였으며 측정된 소음의 디지털 신호는 CPB(Constant Percentage Bandwidth) 분석을 통하여 소음의 정도를 분석하였다. 분석결과, 통행속도가 높은 지역일수록 소음이 높게 나타났으며 포장재료별로 비교하면 콘크리트포장이 아스팔트포장에 비해 소음이 높은 것으로 나타났다.

Jo et al.(2013)는 방음벽과 저소음포장의 소음감소 효과를 예측하고 이를 이용하여 소음편익을 고려한 경제성 분석을 통해 효과적인 저감방안을 선정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 CPX(Close Proximity) 방식을 이용하여 소음을 측정 후 KHTN(Korea Highway Traffic Noise Prediction) 프로그램을 이용하여 소음감소효과를 분석·저감방안을 도출하고 생애주기비용분석을 통해 소음저감의 최적의 대안을 선정하였다. 분석결과, 고층 건물 밀집지역의 경우 방음벽만으로 충분한 소음감소효과를 얻기 어려우며 방음벽과 저소음포장을 동시에 적용하는 방법이 효과적인 것으로 분석되었으며, 경제성 분석에서는 저소음포장이 방음벽에 비해 25%의 비용이 절감하는 것으로 분석되었다.

Kang et al.(2014)은 복층 저소음포장의 경제적 편익을 산정하기 위하여 방음벽이 설치된 일반포장과 복층 저소음포장의 소음측정을 기준으로 소음을 예측하고 이를 이용하여 경제성 분석을 시행하였다. 소음측정은 5분 등가소음도 측정방식으로 소음을 측정하였으며, 소음저감 효과분석은 KHTN 프로그램을 이용하였다. 또한, 경제성 분석은 교통시설 투자평가지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013)에서 제시한 소음가치 평균 원단위를 적용하여 분석하였다. 분석결과, 복층 저소음포장은 방음벽이 설치된 일반포장에 비해 20년간 약 1.2억원의 비용절감효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

Kim et al.(2013)은 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하기 위하여 복층 저소음포장, 단층 저소음포장, 일반포장을 대상으로 5분 등가소음도를 측정하여 분석·비교하였다. 포장형태별 소음발생을 분석한 결과, 복층 저소음포장의 소음발생은 64.0~68.6 dB로 일반포장에 비해 평균 약 9.7 dB, 단층 저소음포장에 비해 평균 약 3.2 dB 저감되는 것으로 나타났다.

Lee et al.(2014)는 선진국과 개발도상국의 도시지역

은 도로소음이 심각해져 도시에 거주하는 시민의 건강에 영향을 미친다는 연구결과를 모티브로 도시지역의 교통량과 도로소음 및 진동에 대한 상관관계를 규명하기 위하여 미국의 주요 3개 도시를 대상으로 소음을 측정하고 분석하였다. 연구대상 주요도시는 Atlanta, Los Angeles, 그리고 New York으로 연구대상 도시별 다운타운을 중심으로 20~26개 지점을 선정하여 10분 등가소음도를 측정하고 Metropolitan Planning Organization(MPOs)을 통해 교통량 데이터를 수집하여 분석을 시행하였다. 도로소음분석은 Federal Highway Administration(FHWA)에서 제공하는 Traffic Noise Model(TNM)을 이용하였는데 본 모형은 도심지 도로소음을 평가하기 위해 개발된 모형으로 모형에 교통량 인자를 포함하고 있는 것이 특징이다. 분석결과, 교통량과 도로소음의 상관관계는 Atlanta 78%, Los Angeles 58%, New York 62%로 비교적 높게 나타나 도로소음을 저감하기 위하여 교통량에 대한 대책을 함께 고려해야 된다는 결론을 도출하였다.

Ock et al.(2010)은 배수성과 소음저감 효과를 위하여 저소음 포장용 골재입도를 19mm, 13mm, 10mm, 8mm로 개발하여 시험시공을 통해 소음감소 효과, 미끄럼 저항성, 투수성능을 장기적으로 평가하여 저소음포장, 배수성포장, 밀입도포장, SMA 포장 및 콘크리트 포장의 장기 공용성을 평가하였다. 특히 소음저감효과를 분석하기 위하여 시험구간을 대상으로 시공시점 직후 CPX와 5분 등가소음도를 각각 측정하였으며, 공용기간 4년, 7년을 대상으로 소음을 측정하여 다른 포장구간과 비교분석하였다. 분석결과, 골재크기가 작을수록 소음저감 효과가 큰 것으로 나타났으며, 저소음포장 시공직후와 공용 후 4년이 경과된 시점에서 측정된 소음을 일반포장과 비교하면 본선에서는 8.7 dB의 소음감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, 갓길에서는 8.1 dB의 소음감소 효과가 있는 것으로 나타나 공용에 따른 소음감소 효과는 비슷한 것으로 분석되었다.

3. 이론적 배경 및 분석방법론

3.1. 도로소음발생 기준 및 구조

소음은 「소음·진동관리법」에 기계, 기구, 시설, 그 밖의 물체의 사용 또는 특정 장소에서 사람의 활동으로 인해 발생하는 강한 소리로 정의되어 있으며, 도로소음은 도로상을 통행하는 차마 등의 교통으로 인해 발생하는 소음으로 정의되어 있다. 소음 기준은 「환경정책기본법

시행령」에서 주거지역 도로변의 경우 낮(06시~22시)은 Leq 65 dB, 밤(22시~06시)은 Leq 55 dB로 정해져 있으며, 이를 기준으로 소음저감방안 등을 마련하는 근거로 활용되고 있다.

도로소음은 차량에서 발생하는 소음, 공기저항으로 발생하는 소음 그리고 타이어/노면 사이에서 발생하는 소음 등으로 구분할 수 있으며, 특히 타이어/노면 사이에서 발생하는 소음이 도로소음에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Morgan, 2006). 타이어/노면 사이에서 발생하는 소음은 차종, 주행속도, 타이어 종류, 공기압, 차량중량, 노면상태, 기온 등의 영향을 받으며 소음발생 원리는 다음과 같다.

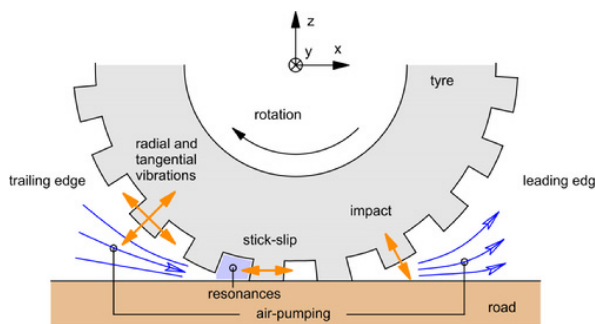


Fig. 1 Mechanisms of Pavement Noise Generations (Schutte, 2011)

- 에어펌핑음(air-pumping) : 타이어가 도로노면과 접촉했을 때, 타이어 트레드(tread)의 홈과 도로노면에 끼인 관 모양의 공기가 트레드 홈의 변형 및 진동으로 공명하면서 발생하는 소음
- 타이어 가진음(source) : 타이어 트레드 부분이 도로노면과 충돌했을 때의 충격 때문에 타이어 측벽이 진동해서 발생하는 소음
- 접지마찰음(horn effects) : 타이어와 도로노면이 접촉할 때의 충격음과 차량 제동 시 혹은 핸들 조작 시에 타이어에서 발생하는 마찰음

3.2. 복층 저소음포장

저소음포장은 원래 일반포장의 배수성을 높이기 위해 아스팔트 포장의 공극률 약 4% 대신 공극률 약 20%를 가지도록 개발되었으나, 이러한 배수성포장이 소음저감효과가 있는 것으로 나타나면서 최근 들어 도로소음의 대책의 일환으로 고려되고 있다. 저소음포장은 포장의 공극을 통해 공기 투과성을 높여 타이어와 도로노면 사이에서 발생하는 에어펌핑음을 감소시키고, 타이어 가진음과 접지마찰음을 포장의 넓은 공극사이로 흡

수하여 저감시키는 메커니즘을 가지고 있으며, 저소음포장은 일반 아스팔트 포장에 비해 약 3~6 dB(A)의 소음저감효과가 있는 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2014; Jo et al., 2013).

최근 들어 우리나라에서는 저소음포장의 공용성과 소음저감효과를 높이기 위하여 복층 저소음포장을 도입하고 있다. 복층 저소음포장은 약 50mm 두께의 표층을 최대 입경이 다른 혼합물을 이용하여 2개의 층(2-layers)으로 포설하는 공법으로, 국내에서는 상부층에 최대입경 8mm의 혼합물을 사용하며 하부층에는 최대입경 13mm의 혼합물을 사용하고 있다. 복층 저소음포장의 소음저감효과는 단층 저소음포장에 비해 약 2 dB의 소음저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 복층 저소음포장은 단층 저소음포장에 비해 초기 소음저감효과가 높고 공용기간 경과에 따른 소음저감효과 감소가 비교적 낮은 것으로 분석되고 있다(Kang et al., 2014; Jo et al., 2013; Jung et al., 2016).

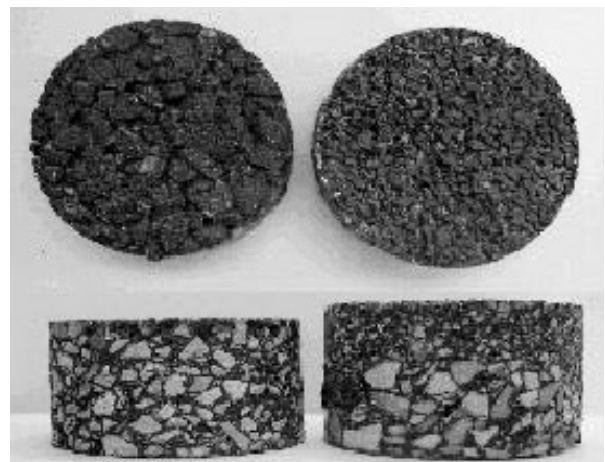


Fig. 2 Cores of 1&2-layer Pavement (Jo et al., 2013)

3.3. 소음측정 방법

도로에서 발생하는 소음을 측정하는 방법은 측정 목적에 따라 여러 가지 방법을 고려할 수 있다. 도로소음 측정방법은 국제기준으로 ISO(International Standardization Organization)에서 제시하는 SPB(Statistical Pass-By Method, ISO 11819-1)방식과 CPX(Close Proximity method, ISO 11819-2)방식이 있으며, 국내기준으로는 환경부의 '소음·진동 공정시험기준'의 도로교통 소음관리기준 측정방법이 있다(ISO, 2017; Ministry of Environment, 2015).

SPB 방식은 소음측정 대상도로의 특정지점에 소음측정 대상 차선을 중심으로 7.5m 이격된 도로변에 마이크 로폰을 설치하여 소음을 측정하는 방법으로 일정차량대

수가 측정지점을 통과할 때 발생하는 모든 소음(차량소음, 도로노면마찰소음, 공기역학적 소음 등)을 측정하는 방법이다(Kim et al., 2013). SPB 방식은 도로 주변 환경에 따른 영향이 크고 통행차량 및 주변 환경의 변화에 따라 측정결과가 달라질 수 있는 단점을 가지고 있지만 동일한 장소에 대한 저소음포장 시공 전과 후의 비교는 가능한 방법으로 이용되고 있다.

CPX 방식은 차량에 특정 타이어를 설치하고 타이어 주변에 마이크를 설치한 상태에서 조사대상구간을 운행하면서 타이어와 도로노면과의 마찰소음을 측정하는 방법이다. CPX 방식은 도로주변 환경변화에 따른 영향이 적고 측정 시 소음의 편차가 없어 측정에 대한 신뢰성이 높은 것이 장점이다. 하지만 CPX 방식은 타이어와 도로노면 사이에서 발생하는 소음만 측정하여 실제 도로에서 발생하는 소음과는 다르다는 것이 단점이다. CPX 방식은 소음측정계, 분석 프로그램, 소음 교정기, 기준 타이어, 기온, 풍속 등에 대한 ISO 기준에 부합하도록 측정하여야 하며 이를 통해 도로포장 종류 또는 공용기간에 따른 소음발생을 측정하고 분석할 수 있는 방법이다.

‘소음·진동 공정시험기준’에서 제시하는 도로교통 소음관리기준 측정 방식은 도로에서 발생하는 소음의 10분 이상의 등가소음도를 측정하는 방식으로 도로에서 발생하는 모든 소음을 측정하는 방법이다. 측정 방법은 소음의 피해가 발생될 것으로 예상되는 지점에 풍향과 장애물이 없는 장소를 택하여 지면의 1.2~1.5m 높이에 마이크를 설치하여 소음을 측정하는 방법이다. ‘소음·진동 공정시험기준’에서 제시하는 도로교통 소음관리기준 측정 방식은 동일한 환경이 조성되어 있는 여러 구간에 대한 소음조사가 어려우므로 동일구간의 전과 후의 비교분석에 주로 이용되고 있는 방법이다.

3.4. Anderson-Darling 테스트

복층 저소음포장의 소음저감효과는 복층 저소음포장과 단층 저소음포장에서 발생하는 소음을 측정하여 소음기준치(주간 Leq 65 dB, 야간 Leq 55 dB)를 초과하는 정도를 추정하여 분석할 수 있다. 복층 저소음포장의 소음저감효과를 추정하기 위하여 복층 저소음포장 시공 전과 후의 도로소음을 측정하고, 도로소음이 소음기준치를 얼마나 초과하는지를 비교하여 분석할 수 있다. 이를 위해 복층 저소음포장 시공 전과 후의 도로소음을 10분 등가소음도로 측정·수집한 후, 수집된 데이터를 통계학적 추론방법을 통하여 각 데이터가 어떠한 확률

분포를 따르는지 분석하고 각 확률분포에서 소음기준치를 초과하는 소음발생확률을 확률밀도함수를 통하여 산정할 수 있다.

복층 저소음포장 시공 전과 후의 도로소음이 소음기준치를 초과하는 소음의 확률분포를 산정하기 위하여 측정된 소음 데이터로부터 얻어지는 경험적 빈도분포와 가정한 확률분포가 얼마나 잘 부합되는지 판단하는 적합도 검증방법을 이용할 수 있다(Shin et al., 2010). 본 연구에서는 적합도 검증방법으로 Anderson-Darling 테스트를 이용하여 복층 저소음포장 시공 전과 후의 도로소음 측정 데이터에 적합한 확률분포를 산정하였다.

Anderson-Darling 테스트는 Anderson and Darling (1952)에 의해 통계학적 과정에서의 오차를 감소시키기 위한 기준으로 처음 제시된 통계학적 적합도 검증 방법으로, 수집된 데이터가 특정분포와 얼마나 잘 부합되는지 검증하는 방법으로 Anderson-Darling 테스트의 기본식은 다음과 같다(Lee et al., 2015).

$$Q_n = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - F(x)]^2 \omega(x) dF(x) \quad (1)$$

여기서,

$F_n(x)$: 경험적 누적분포함수

$F(x)$: 분석을 위해 선택된 분포함수

$\omega(x)$: 가중치함수(Weighting Function)

기본식에서 $\omega(x) = [F(x)(1-F(x))]^{-1}$ 인 경우 AD 통계량이라고 하며, 일반적으로 Eq. (2)와 같이 A_n^2 으로 표시한다(Shin et al., 2010).

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)(1-F(x))} dF(x) \quad (2)$$

일반적으로 수치적인 계산의 편의를 위하여 Eq. (2)를 대신해 Eq. (3)을 사용할 수 있다.

$$A_n^2 \approx - \sum (2i-1) \left[\frac{\log(F(x_{(i)}))}{1 + \log(1-F(x_{(n+1-i)}))} \right]^{-n} \quad (3)$$

Anderson-Darling 테스트에서 데이터와 특정분포와의 적합도가 높을수록 AD 통계량은 작아진다. 또한, 여러 가지 분포 중 데이터가 어느 분포와 적합한지를 결정하기 위하여 p-값을 사용하게 되는데 만일 p-값이

선택한 유의수준인 0.05보다 작을 경우 데이터는 특정 분포와 적합도가 떨어지는 것으로 판단할 수 있다(Lee et al., 2015).

4. 도로소음저감효과 분석

4.1. 복층 저소음포장 시공 전·후 소음측정

복층 저소음포장의 소음저감효과를 비교·분석하기 위하여 공용중인 단층 저소음포장 구간 중 복층 저소음포장의 시공이 계획되어 있는 구간을 대상으로 복층 저소음포장의 시공 전과 후의 도로소음을 측정·수집하였다. 도로변 소음측정은 복층 저소음포장 시공 전과 후를 대상으로 측정 대상구간 중 교통신호와 지장물 등으로 인한 주변 환경의 영향을 받지 않고 구간의 중간에 위치한 지점에서 ‘소음·진동 공정시험기준’ 방식을 통하여 소음을 측정하였다. ‘소음·진동 공정시험기준’ 방식은 차량이 도로변에 설치된 마이크로폰 앞을 통과할 때 발생하는 소음레벨을 측정하는 방식으로, 소음으로 인한 피해가 예상되는 지점 중 소음도가 높은 것으로 예상되는 지점에서 소음을 측정하는 방식이다. 또한, 주거지역에 대한 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하기 위하여 복층 저소음포장 시공 전과 후를 대상으로 도로변 소음측정지점과 동일 선상에 위치한 아파트 옥상에서 ‘소음·진동 공정시험기준’에서 제시하는 방식을 통해 소음을 측정하였다.

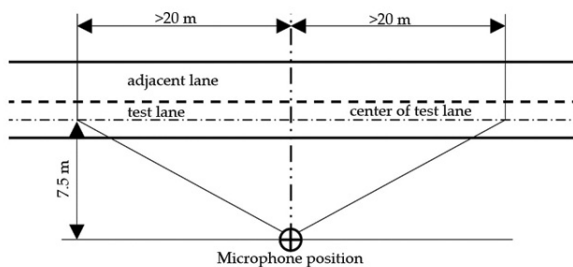


Fig. 3 The Concept of Data Acquisition (SPB Method)

연구대상구간은 경기도 신도시내 기존 단층 저소음포장이 시공되어 있는 구간으로, 2015년 10월 대상구간 중 일부구간(3km)에 복층 저소음포장이 시공되어 있는 구간이다. 복층 저소음포장 구간 중 교통신호, 교통안전시설 그리고 방음시설 등으로 인해 소음측정의 왜곡이 발생할 수 있는 구간을 제외하였으며, 직선구간을 택하여 복층 저소음포장의 시공 전과 후의 소음을 측정하였다.

소음측정은 복층 저소음포장 시공 전인 2015년 7월 15일과 시공 후인 2015년 11월 20일 2회에 걸쳐 소음

측정 지점에 마이크로폰을 설치하고 오후 12시부터 오후 10시까지 주간 10시간과 오후 10시부터 오전 12시까지 야간 2시간 동안 소음을 측정하였으며, 측정된 소음은 10분 등가소음도로 환산하여 분석에 활용하였다.

소음측정 대상구간은 왕복 6차로로 전반적으로 양호한 지반특성을 가지고 있으며 도로 동쪽으로 아파트(총층수: 27층)가 위치해 있으며, 서쪽으로 산악지형, 북쪽으로 고속도로, 남쪽으로 일반주거지역이 위치해 있는 개방형 공간에 위치해 있다. 대상구간의 교통특성은 단속류 구간이지만 교통신호에 영향이 최소화되는 지점을

Table 1. Characteristics of Data Collections

Items	Contents
Conditions	-Before: Single layer low noise pavement -After: 2-layer low noise pavement
Number of lanes	3 / Each direction
Characteristics of traffic flow	-Interrupted traffic flow -Traffic volume : 128 vehicles/10min -Rate of heavy vehicle : 17% -Average of vehicle speed : 57km/h
Land usage	Residential area
Date of repaving	October 2015 (2-layer low noise pavement)
Specifications of device for data collection	- Brand : Brüel & Kjær sound & vibration - Microphone unit : Type 4189-A-021 - Combined sensitivity : -26.3 dB re 1V/Pa - Valid at Temperature : 23°C Ambient static pressure : 101.3 kPa Relative humidity : 50% Frequency : 251.2 Hz
Date of noise survey	- Before repaving : July 15 2015 - After repaving : November 20 2015



Data collection

선정하여 소음을 측정하였으며, 교통량은 평균 128대/10분, 차량평균속도 57km/hr, 대형차량통과비율은 약 17%로 지방의 일반국도와 비슷한 교통특성을 가지는 것으로 나타났다.

4.2. 복층 저소음포장의 소음저감효과 분석

복층 저소음포장의 소음저감효과를 정성적으로 분석하기 위하여 복층 저소음포장 시공 전과 후의 주간·야간 소음발생량을 측정하고, 소음측정기록지를 이용하여 헬리콥터 소음, 오토바이 보도 주행소음 등 이상치(outliers)를 제거한 후 연구대상구간을 통과하는 차량에서 발생하는 소음을 확률적으로 분석하여 복층 저소음포장의 시공 전과 후를 비교·분석하였다.

본 연구에서는 복층 저소음포장의 시공 전과 후 차량 통행으로 인한 소음발생패턴이 어떠한 확률분포를 따르는지 분석하기 위하여 적합도 검증방법 중 Anderson-Darling 테스트를 이용하였다. Anderson-Darling 테스트에서 주로 이용되고 있는 분포는 정규분포(normal distribution), 와이블분포(Weibull distribution), 로그정규분포(log-normal distribution), 그리고 지수분포(exponential distribution) 등이 있으며, A-D 통계량(A-D statistics)과 p-값을 기준으로 복층 저소음포장 시공 전과 후에 발생하는 소음에 적합한 확률분포를 산정할 수 있다.

Anderson-Darling 테스트 분석결과, Table 2에서 보는 것과 같이 연구대상구간의 복층 저소음포장 시공

전 주간 도로변 소음발생분포의 A-D 통계량은 0.416 (p-값=0.317)으로 정규분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 야간 소음발생분포의 A-D 통계량은 0.541 (p-값=0.129)로 로그정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 또한 복층 저소음포장 시공 후 주간 도로변 소음발생분포의 A-D 통계량은 0.604 (p-값=0.120)로 와이블분포를 따르며, 야간은 A-D 통계량 0.277 (p-값=0.623)로 로그정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.

연구대상구간의 복층 저소음포장 시공 전 주간과 야간 아파트 옥상 소음발생분포의 A-D 통계량은 각각 0.728 (p-값=0.053)과 0.424 (p-값=0.313)로 로그정규분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 복층 저소음포장 시공 후 주간과 야간의 아파트 옥상 소음발생분포의 A-D 통계량은 각각 0.609 (p-값=0.087)과 0.223 (p-값=0.804)로 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다.

Anderson-Darling 테스트를 통해 산정한 확률분포를 이용한 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하기 위하여 각 확률분포의 확률밀도함수(probability density function)를 산출하고 확률밀도함수에서 「환경정책기본법 시행령」의 소음기준치인 주간 Leq 65 dB, 야간 Leq 55 dB를 넘는 도로소음의 확률을 산정하여 복층 저소음포장의 소음저감효과를 분석하였다.

연구대상구간의 복층 저소음포장 시공 전과 후 주간·야간시간의 소음발생의 확률밀도함수를 살펴보면, 시공 전 주간 도로변의 경우 Leq 63.0~66.8 dB 사이에서 소음이 발생하는 것으로 나타났으며, 시공 후 주간 경우 Leq 57.9~67.3 dB 사이에서 소음이 분산하여 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 복층 저소음포장의 시공 전 야간 도로변의 경우 Leq 60.7~65.6 dB 사이에서 소음이 발생하는 것으로 나타났으며, 시공 후 야간의 경우 Leq 52.9~63.2 dB 사이에서 소음이 발생하는 것으로 나타났다.

복층 저소음포장 시공 전 주간 아파트 옥상의 경우 Leq 55.2~60.0 dB 사이에서 소음이 발생하는 것이 분석되었으며, 시공 후 주간 경우 Leq 52.3~61.6 dB 사이에서 소음이 분산하여 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 복층 저소음포장의 시공 전 야간 아파트 옥상의 경우 Leq 52.9~56.0 dB, 시공 후 야간의 경우 50.6~54.6 dB 사이에서 소음이 발생하는 것으로 분석되었다.

확률밀도함수를 이용한 소음발생 분석결과, 복층 저소음포장 시공 전 주간시간대 도로변 도로소음이 Leq 65 dB를 초과하는 도로소음발생확률은 64.22%로 나타났으며, 복층 저소음포장 시공 후의 경우 Leq 65 dB를

Table 2. Results of Anderson-Darling Test in Study Area

Classification		Roadside					
		Before construction of 2-layer low noise pavements		After construction of 2-layer low noise pavements			
		Daytime	Nighttime	Daytime	Nighttime		
A-D statistics	Normal	0.416	0.551	2.260	0.309		
	Log-normal	0.436	0.541	2.527	0.277		
	Weibull	0.461	0.762	0.604	0.886		
	Exponential	17.828	5.289	49.929	10.843		
p-value		0.317	0.129	0.120	0.623		
Classification		Apartment rooftop					
		A-D statistics	Normal	0.762	0.533	0.609	0.223
			Log-normal	0.728	0.424	0.613	0.225
			Weibull	1.333	3.680	0.688	0.353
			Exponential	17.531	49.990	5.273	10.983
p-value		0.053	0.313	0.087	0.804		

* Bold characters mean A-D statistics of accepted distributions

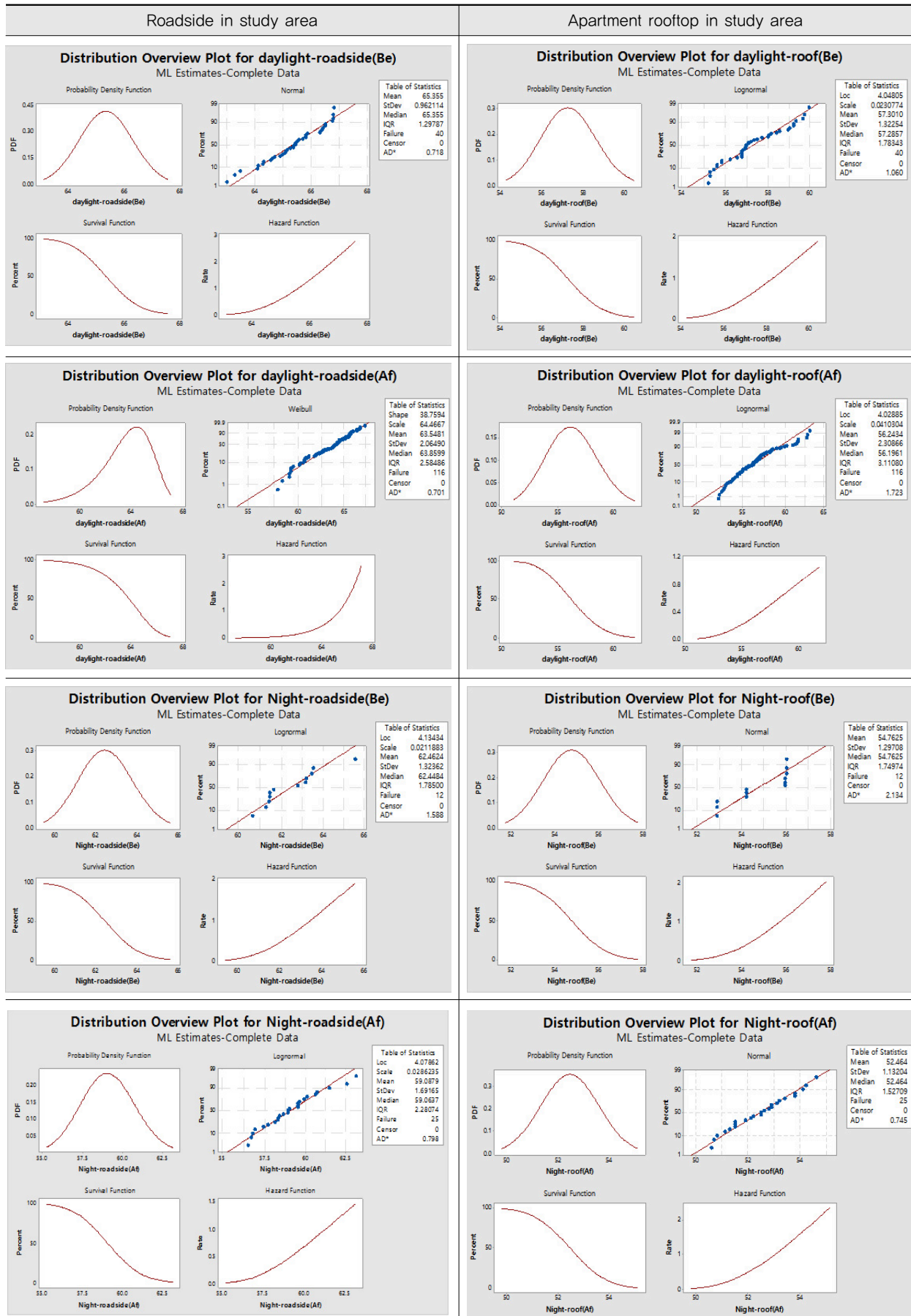


Fig. 4 Probability and Probability Density Function of Anderson–Darling Test

Table 3. Analysis Results of Noise Reduction Effects of 2-Layer Low Noise Pavement

Classification		Roadside						
		Number of data	Mean	Standard deviation	MAX	MIN	Distribution	Area from probability density function
								Probability of exceeded noise standard
Daytime	Before construction of 2-layer low noise pavements	40	65.355	0.974	66.80	63.00	Normal	64.22%
	After construction of 2-layer low noise pavements	116	63.520	2.080	67.30	57.90	Weibull	25.25%
Improvement of noise reduction								+ 60.68%
Nighttime	Before construction of 2-layer low noise pavements	12	62.463	1.393	65.58	60.65	Log-normal	100.00%
	After construction of 2-layer low noise pavements	25	59.088	1.739	63.20	56.50	Log-normal	99.30%
Improvement of noise reduction								+ 0.70%
		Apartment rooftop						
Daytime	Before construction of 2-layer low noise pavements	40	57.301	1.344	59.98	55.24	Log-normal	0.00%
	After construction of 2-layer low noise pavements	116	55.842	1.815	61.60	52.30	Log-normal	0.00%
Improvement of noise reduction								-
Nighttime	Before construction of 2-layer low noise pavements	12	54.616	1.258	56.02	52.90	Normal	38.00%
	After construction of 2-layer low noise pavements	25	52.464	1.155	54.60	50.60	Normal	1.40%
Improvement of noise reduction								+ 96.32%

초과하는 도로소음발생확률은 25.25%로 나타나 도로 소음저감효과가 60.68% 있는 것으로 분석되었다.

반면 복층 저소음포장 시공 후 야간시간대 도로변 도로소음이 Leq 55 dB를 초과하는 도로소음발생확률은 99.30%로 복층 저소음포장 시공 전의 100.00%에 비해 비교적 높지 않은 것으로 분석되었다. 이는 연구대상지역의 지역적 특성인 야간 통행량 감소와 야간시간대 소음측정 자료의 부족으로 인해 야간시간의 복층 저소음포장의 소음저감효과가 주간시간에 비해 높지 않은 것으로 판단된다.

또한, 아파트 옥상의 소음발생확률을 살펴보면 복층 저소음포장 시공 전과 후 주간시간대 도로소음이 Leq 65 dB를 초과하는 도로소음발생확률은 각 0.00%로 큰

차이가 없는 것으로 분석되었으며, 복층 저소음포장 시공 전과 후 야간시간대 도로소음이 Leq 55 dB를 초과하는 도로소음발생확률은 각각 38.0%와 1.4%로 나타나 도로소음저감효과가 96.32% 있는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 복층 저소음포장의 도로소음저감효과를 분석하기 위하여 복층 저소음포장의 시공 전과 후 주간·야간의 소음발생을 측정·수집하고 수집된 데이터에 대한 통계학적 검증 방법인 Anderson-Darling 테스트를 통해 소음저감효과를 분석하였다.

복층 저소음포장의 소음발생특성을 분석해보면 복층

저소음포장 시공 전과 후 주간 도로변의 등가소음도가 각각 65.355 dB과 63.520 dB로 복층 저소음포장의 소음저감효과가 다소 있는 것으로 나타났으며, 시공 전과 후 야간 도로변의 등가소음도의 경우 각각 62.463 dB과 59.088 dB로 소음저감효과가 약 3 dB 있는 것으로 나타났다.

복층 저소음포장 시공 전과 후 주간 아파트 옥상의 등가소음도는 각각 57.301 dB과 59.088 dB로 나타났으며, 시공 전과 후의 야간 아파트 옥상의 등가소음도의 경우 각각 54.616 dB과 52.464 dB로 소음저감효과가 각각 2 dB 정도인 것으로 분석되었다.

또한, 복층 저소음포장의 도로소음저감효과를 정성적으로 분석하기 위하여 도로소음발생에 대한 확률분포를 Anderson-Darling 테스트를 통해 산정하여 복층 저소음포장 시공 전과 후를 비교·분석하였다. 분석결과, 복층 저소음포장 시공 전과 후 주간 도로변의 도로소음저감효과는 60.68% 감소하는 것으로 분석되었으며, 복층 저소음포장 시공 전과 후 야간 도로변 도로소음저감효과는 0.70% 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 복층 저소음포장의 도로변 도로소음저감효과는 야간에 비해 주간에 감소효과가 우수하다는 것을 의미한다. 또한, 복층 저소음포장 시공 전과 후 주간 아파트 옥상의 도로소음저감효과는 통계학적으로 없는 것으로 분석되었으며, 반면 야간 아파트 옥상의 도로소음저감효과는 96.32% 감소하는 것으로 나타나 야간시간대 복층 저소음포장의 소음저감효과가 우수한 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 분석대상구간이 신도시 내로 한정되어 있어 복층 저소음포장의 소음저감효과를 일반화하기에 한계가 있다. 또한 소음저감효과의 비교대상인 단층 저소음포장에 대한 투수성 시험, 공용성 분석, 공용기간에 대한 정보가 미흡하여 향후 다양한 지역과 구간을 대상으로 복층 저소음포장 시공 전과 후의 소음도를 측정하고 포장상태에 대한 기초분석을 시행한 후 통계학적 분석을 통해 소음저감효과를 분석하여 복층 저소음포장의 소음저감효과의 표준화를 통해 효과분석의 정밀도를 높일 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울산업진흥원의 '도심 주거지역 도로교통소음 저감 기술 고도화 및 가이드라인 개발' 연구를 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

Anderson, T. W., and Darling, D. A. (1952). "Asymptotic theory of

certain 'goodness of fit' criteria based on stochastic processes" *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 23, No. 2. pp.193-212.

International Organization for Standardization(ISO) (2017). *ISO 11819 Acoustics-Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise*.

Jo, S. H., Jang, J. S., Kim, W. S., and Kim, N. S. (2013). "A study on noise reduction of quiet pavement through the noise level prediction and the economic analysis" *J. of the Korean Society of Civil Engrs.*, Vol. 33, No. 3. pp.1143-1151 (in Korean).

Jung, J. S., Sohn, J. R., Lee, S. H., and Yang, H. S. (2016). "A case study on noise reduction effect of two-layer porous asphalt pavement in an urban area" *Int. J. of Highway Engrg.*, Vol. 18, No. 5. pp.49-56 (in Korean).

Kang, H. V., Park, K. S., and Kim, N. S. (2014). "Economic analysis of two-layer quiet asphalt pavement considering noise cost benefits" *J. of the Korean Society of Civil Engrs.*, Vol. 34, No. 5. pp.1581-1587 (in Korean).

Kim, C. H. (2014) "Countermeasures and problems of highway noise" *J. of Korean Society of Noise and Vibration Engrg.*, Vol. 24, No. 2. pp.7-10 (in Korean).

Kim, D. W., Kwon, S. A., Bae, Y. S., and Mun, S. H. (2013). "An analysis of the asphalt/concrete road noise in Seoul" *Seoul Studies*, Vol. 14, No. 2. pp.193-209 (in Korean).

Kim, Y. S., Kim, B. J., Kim, K. S., and Park, J. S. (2013). "Highway traffic noise reduction methods using double layer pavement structure" *Proc. of Symposium and Conference of the Korean Society of Environmental Toxicology*, pp.325-327 (in Korean).

Lee, S. H., and Cho, H. J. (2015). "An analysis of safety impacts of variable message sign as functions of road curve radius" *Int. J. of Highway Engrg.*, Vol. 17, No. 5. pp.47-56 (in Korean).

Lee, S. Y., Kim, I. T., Mun, S. H., and Kwon S. A. (2012). "Study on the functional evaluation of permeable asphalt concrete pavement in Seoul city" *Int. J. of Highway Engrg.*, Vol. 14, No. 3. pp.33-39 (in Korean).

Lee, Y. E., Jerrett, M., Ross, Z., Coogan, F. P., and Seto, Y. W. E. (2014). "Assessment of traffic-related noise in three cities in the United States" *Environmental Research*, Vol. 132. pp.182-189.

Ministry of Environment (2015). *Noise and Vibration Process Test Standard* (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013). *Guidelines for Assessing Investment in Transportation Facilities*.

Moon, H. R., and Shon, J. G. (2013). "A study on the characteristics of applicability in the active noise cancellation system and measurement of the road noise for traffic calming" *The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engrs.*, Vol. 62P, No. 3. pp.111-116 (in Korean).

Morgan, P. (2006). *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*. FEHRL Report 2006/02. FEHRL, Brussels, Belgium.

Ock, C. K., Kim, J. H., and Lee, J. S. (2010). "Noise reduction of asphalt concrete pavement: techniques and their performance evaluation" *Int. J. of Highway Engrg.*, Vol. 12, No. 1. pp.29-37. (in Korean)

Schutte, A. (2011). *Numerical Simulation of Tyre/Road Noise*, Ph.D. Dissertation, University of Twente, Netherlands.

Shin, H. J., Sung, K. M., and Heo, J. H. (2010). "Derivation of modified Anderson-Darling test statistics and power test for the gumbel distribution" *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 9. pp.813-822 (in Korean).