

서울시 내 아스팔트/콘크리트 도로 소음 측정 및 분석에 대한 연구*

김도완** · 권수안*** · 배윤신**** · 문성호*****

An Analysis of the Asphalt/Concrete Roads Noise in Seoul*

Do Wan Kim** · Soo-Ahn Kwon*** · Yoon-Shin Bae**** · Sungho Mun*****

요약 : 최근 서울시가 소음저감을 위하여 많은 대책을 세우고 시행함에도 불구하고, 도로 주변 주거지역에서의 소음민원은 증가하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구의 목적은 서울시 내의 아스팔트/콘크리트 도로에서 발생하는 소음의 크기를 공학적으로 측정 및 분석하는 것이다. 소음 측정 방법으로 NCPX(Noble Close ProXimity)를 적용하였으며, 차량의 타이어 인접위치에 부착된 표면마이크로폰으로 노면과 타이어 사이의 마찰음을 측정하였다. 이러한 방법으로 측정된 소음의 디지털신호는 CPB(Constant Percentage Bandwidth)분석을 통하여 총 음압레벨로 산출되었다. 측정결과, 구간별 소음 레벨에 차이가 있었으며, 일부 구간에서는 소음레벨이 높게 조사되었다. 또한, 콘크리트 포장도로가 아스팔트 포장도로보다 높은 소음레벨을 보였으며, 전반적으로 측정지역의 소음레벨이 상당히 높아 보행자에게 직접적인 피해를 줄 가능성이 있었다.

주제어 : NCPX(Noble Close ProXimity), CPB분석(Constant Percentage Bandwidth), 음압레벨, 금속푸리에변환, 디지털신호처리

ABSTRACT : Although the Seoul city government has taken and implemented countermeasures to decrease the noise, the noise complaints in urban residential area continue to increase. In this study, to decrease the noise appeals, the noise level occurred at the road was measured and analyzed. The measurement method of the noise is NCPX(Noble Close ProXimity) method, which is the tire/pavement interaction noise measurement by attaching the microphone at the proximity location of tire. The digital signal measured by NCPX was analyzed by CPB(Constant Percentage Bandwidth) analysis to determine the total SPL(Sound Power Level). Some regions showed higher noise levels than others. In addition, the noise levels generated from Portland cement concrete pavement were higher than those from asphalt concrete pavement. Hence, the findings of this study suggest that the noise generated from Portland cement concrete pavement can cause harmful effects on people

* 본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “도로소음 모델링 및 도로위치별 교통 소음저감 기술개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

** 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학부 대학원생(Graduate Student, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

*** 한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구위원(Senior Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

**** 서울연구원 안전환경연구실 부연구위원(Associate Research Fellow, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute)

***** 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학부 조교수(Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology), 교신저자(E-mail: smun@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-9014)

on the sidewalks.

Key Words : NCPX(Noble Close ProXimity), CPB(Constant Percentage Bandwidth) analysis, sound power level, FFT(Fast Fourier Transform), DSP(Digital Signal Processing)

I. 서론

2011년 4월에 서울시에서 실시한 ‘조용한 서울 만들기’에 대한 대책 수립 및 2012년 3월에 ‘환경영향평가’제도 및 ‘GIS포털사이트를 통한 도로소음 개선 방안’ 도입 등 많은 시책을 실행한 결과, 서울시 내 도로주변 주거지역의 소음관련 민원이 8.8% 감소하였다. 또한, 소음민원에 대한 대책을 마련함으로써 도로 주변 주거지역에 대한 전체적인 소음 크기를 0.2~16데시벨(dB) 감소하는 결과를 보였다.

그러나 이러한 시책 및 노력에도 불구하고 도로변 거주 지역에 대한 소음민원이 계속 접수되고 있으며, 전반적으로 서울시 내의 도로변 소음 문제가 해소되지 않고 남아 있는 실정이다.

이와 관련하여 본 연구의 목적은 이미 서울시 내에 포장되어 있는 아스팔트 도로, 또는 콘크리트 도로에서 발생하는 소음을 측정하고 이에 해당하는 측정 데이터를 종합하여 분석하는 것이다.

연구 내 소음측정의 방법은 일반적으로 사용하는 DSLM(Digital Sound Level Meter) 측정 및 Pass by 형태의 도로주변 전체적 소음을 측정하는 방법보다 타이어에 근접한 특정 위치에 표면마이크로폰을 설치하여 타이어와 도로의 노면 사이에서 발생하는 마찰 소음을 측정하는 NCPX(Noble Close ProXimity) 측정방법을 원칙으로 하였다.

본 연구의 이론은 기본음향이론(Basic Sound Wave Theory)과 디지털신호처리(DSP: Digital

Signal Processing)에 입각하여 실시하였으며, 결과치 분석 이론으로는 주파수분석 시, 이산푸리에 변환(DFT: Discrete Fourier Transform) 및 고속푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 사용하여 분석하였으며, 데시벨분석 시, CPB(Constant Percentage Bandwidth)분석방법을 적용하여 전체적인 음향을 분석하였다.

이러한 분석방법으로 얻어지는 데이터는 각 소음측정지역에 대한 소음의 크기 및 특성, 원인을 파악하는 자료로 활용될 수 있다. 소음을 저감시키기 위한 대책으로는 방음벽 및 방음터널 설치, 과속방지턱 설치, 저소음 포장시공, 제한속도 저감, ANC(Active Noise Control)기법 활용 등의 많은 방법이 존재한다. 하지만 기본적으로 도로의 특성, 시의 예산, 주변 환경 등의 많은 고려사항이 있기 때문에 해당지역에 대한 소음 대책이 다르게 수립된다고 판단된다.

II. 연구방법

도로에서 발생하는 소음은 크게 세 가지 측정방법으로 데시벨(dB)화 할 수 있다. 또한, 이러한 방법들은 모두 기본음향이론이 동일하며 측정방법에 따라 결과 수치가 다소 달라진다. 주행 중인 차량에서 발생될 수 있는 소음은 기계적 소음에 의한 엔진소음, 배기소음, 냉각소음이 있으며, 도로포장표면에서 차량의 이동에 따른 소음 주요원인인 타이어-도로포장면의 마찰소음, 공기에 의한 매질전달 소음, 차량의 진동소음이 있다.

이러한 소음을 측정하는 방법 중 하나는 DSLM (Digital Sound Level Meter) 측정으로 도로주변에서 소음원에 대해 디지털장비를 이용하여 측정하는 방법이며, 두 번째 방법으로 Pass by 측정은 차량교통에 따른 소음을 도로주변 지정위치에서 마이크로폰으로 측정하는 방법으로 대상 구간을 통과하는 차량에 대한 소음도를 측정한다. 마지막 방법으로 NCPX(Noble Close Proximity) 측정은 차체의 바퀴와 아스팔트 또는 콘크리트 도로포장 노면 사이에서 마찰에 의해 발생하는 소음원을 측정하는 방법이다.

과업을 수행하기 전에 이러한 측정방법 중 데이터 수집 방법과 측정방법의 특성을 파악해본 결과, 신뢰도, 적합성 및 과업의 목적에 맞는 차량과 노면사이의 마찰에 의한 소음을 측정하기에 가장 적합한 방법인 NCPX 계측 방법을 선정하여 측정하였다.

1. DSLM(Digital Sound Level Meter) 계측 방법

DSLM 측정방법은 도로변의 소음뿐만 아니라 대부분의 소음을 측정할 수 있는 일반적인 방법으로 디지털 소음계를 사용한다. 이러한 장비는 시중에서 쉽게 구매가 가능하며, 이 장비로 소음을 측정할 경우, 소음원에 대한 정확한 정보를 얻지 못한다는 단점이 있지만 쉽게 측정이 가능하다는 장점이 있다.

측정방법으로는 도로주변의 사람이 직접 디지털 소음계를 들고 차량이 지나가는 순간에 맞추어 측정을 실시하는 방법이다. 이는 도로에서 발생하는 소음과 외부 소음을 함께 측정하기 때문에 해당 지역에 대한 전반적인 소음을 측정하는 장비라고 할 수 있다.

이러한 측정방법은 디지털화로 비교적 간단

하게 소음원에 대한 최대치를 측정하는 것이 가능하지만 외부의 다른 소음원을 함께 측정하기 때문에 한 소음원에 대하여 소음을 측정하는 것이 곤란하며 정밀 데이터분석에서 정확성이 상당히 떨어진다는 단점이 있다.

2. Pass-by 계측 방법

Pass by 측정방법은 한 지점에 마이크로폰을 설치한 후 컴퓨터로 음향신호를 가져오는 방법이다. Pass by 측정방법은 ISO 규정으로 채택된 공신력 있는 소음측정 방법이라는 장점을 가지고 있다. 하지만 이 방법은 차량과 도로포장노면 사이에서 발생하는 소음뿐만 아니라 차량에 대한 공역학적 소음 등의 다른 소음원을 함께 측정한다. 이러한 이유 때문에 측정거리 및 환경 조건에 따른 음향의 매질에 의한 전달에 있어서 회절 및 감쇠를 고려하여 음향파워레벨(Sound Power Level)식을 산정하므로 다른 방법에 비해 비교적 복잡하다는 단점이 있다. 또한 소음도를 계측하는 과정에서 차량과 포장노면 사이 마찰 이외 소음을 포함하므로 마찰소음에 대한 데이터를 구축하는 것이 곤란하다는 단점도 있다. 결국 Pass by 측정방법으로는 타이어와 노면 사이에서 발생하는 순수한 마찰소음의 계측 결과에 대한 신뢰도가 떨어진다.

3. NCPX(Noble Close Proximity) 계측 방법

NCPX 측정방법은 ISO/CD 11819-2(2000)에서 규정하고 있는 차량에 특정 타이어를 설치할 경우에 대해 소음측정을 수행하는 것을 원칙으로 한다. 이러한 NCPX 계측방법에 대한 신뢰성 판단은 기존의 연구에서 판명하였기 때문에 자세한 연

급은 하지 않도록 한다(Cho and Mun, 2008a, 2008b, 2008c; Mun and Cho, 2009). 이 연구에서 성능을 검토한 결과, 사용 마이크로폰으로 소음에 대한 측정을 실시한 경우, 500Hz 이하에서는 바람의 영향을 약간 받기는 하지만 500Hz 이상에서는 바람에 대한 소음계측에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

III. 연구이론

1. 기본음향이론(Basic Sound Wave Theory)

기본음향이론에서는 소음원을 중심으로 매질인 공기를 따라 모든 방향으로 파동이 전달되며 이러한 매질은 기본적으로 공기로 본다. 이때 소리의 파동은 매질입자의 운동방향이 전달방향과 같은 경우 종파(Longitudinal Wave)라고 하며 압력의 변화정도를 음압(Sound Pressure), 매질을 타고 음이 진행되는 입자의 속도를 입자속도(Particle Velocity)라 한다. 이러한 파동은 주기 함수와 진폭의 신호로 표현되며, 이러한 소음원의 전파는 음향파위이론(Wave Power Theory)으로 정의된다.

또한 기본음향이론에서 음압레벨(SPL, Sound Pressure Level)은 음압의 데시벨 척도로 나타낸 것으로 순시음압의 실효치를 음압이라고 하며, 기본적으로 파스칼(pa)의 단위를 사용한다. 여기서 대상 소음의 압력과 일반 성인의 최소 가청음압(20×10^{-6} pa)을 기본적으로 사용하며 매질 역시 공기이다.

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_o} \quad (1)$$

이러한 기본 음향이론은 NCPX 측정방법에 적

용되는데, 기본적으로 소음원에서 소음이 퍼져나가는 경우 자유공간, 반자유 공간임에 따라 음향의 파워레벨이나 세기레벨이 달라지며 이러한 이유는 파의 퍼져나가는 공간이 다르기 때문이다. <표 1>과 같이 음의 파워레벨은 전파공간에 따라 달라지며 이러한 파의 소음원은 사실 한 곳에서 발생하지 않고 여러 위치에서 발생할 수 있기 때문에 파의 중첩이나 파의 회절 및 굴절이 발생할 수 있다. 따라서 파의 합성과 이 파들의 공학적 수치가 필요하기 때문에 음압레벨의 합 L은 다음과 같이 표현된다.

<표 1> 공간에 따른 SPL

구분		SPL
점음원	자유공간	$PWL - 10 \log(4\pi r^2)$
	반자유공간	$PWL - 10 \log(2\pi r^2)$
선음원	자유공간	$PWL - 10 \log(2\pi r)$
	반자유공간	$PWL - 10 \log(\pi r)$

$$L = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{W_o} \right) \\ = 10 \log \left(10^{\frac{SPL_1}{10}} + 10^{\frac{SPL_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{SPL_n}{10}} \right) \quad (2)$$

여기서 역시 i부터 n까지는 주파수대 영역의 수이며, W는 각 주파수대의 음향파위를 나타낸다. 결론적으로 파는 합성에 의해 전체 음향레벨 수치를 도출하게 된다.

2. 신호입력

NCPX 측정방법은 위에서 언급한 것처럼 소음의 영향중 타이어/도로노면포장 사이의 소음을 보다 정확히 측정할 수 있는 방법이다. <그림 1>과 같은 표면마이크로폰을 <그림 3>과 같이 타이어 인접위치에 부착한 후, 마이크로폰과 펄스

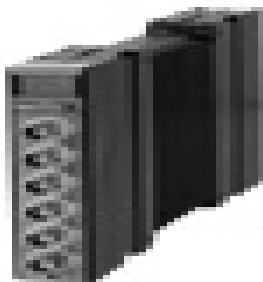
장비를 연결하여 펄스장비에서 분석한 데이터를 컴퓨터에서 디지털 신호화하여 정형화시켜 주는 방식으로 측정이 진행된다. 표면마이크로폰의 설치깊이 및 높이는 차량바퀴의 높이에 따라 약간씩 달라진다. 이러한 장비들은 <그림 4>와 같이 휴대용 배터리에 의해 전력을 공급받는다.

이 과정을 거쳐 처리되는 신호는 위에서 설명한 기본음향이론에 의해서 데시벨(dB)화 되며 음향파위의 수치화 모델에 대한 데이터를 컴퓨터로 모니터 할 수 있다.

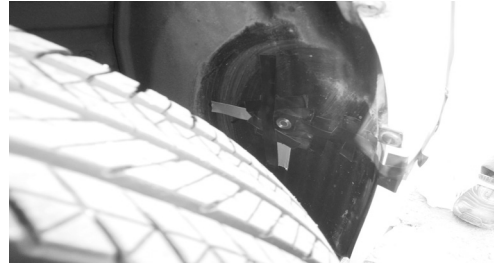
NCPX 측정방법에 사용되어진 마이크로폰은 B&K사의 4949 표면마이크로폰이며, 이 마이크로폰의 사양은 <표 2>와 같다.



<그림 1> 표면마이크로폰



<그림 2> B&K 펄스 장비



<그림 3> 표면마이크로폰 설치



<그림 4> 소음측정장비 동력기구

<표 2> B & K 4949 표면마이크로폰 사양

Dynamic range	30dB to 140dB
Frequency range	5Hz to 20kHz
Diameter	20mm
Height	2.5mm
Weight	2.0g

3. 디지털신호처리 및 분석(DSPA: Digital Signal Processing and Analysis)

일반적으로 소음에 대한 계측 결과를 공학적으로 쉽게 판단하기 위해서 데시벨(dB)이라는 단위를 사용한다. 또한, 대부분의 소음측정 장비 역시 소음에 대한 결과치를 데시벨화 하고 정량적인 데이터로 구축하여 모니터 할 수 있다. 그러나 정확한 소음의 특성을 분석하기 위해서는 주파수 분석 수행과정이 필요하다.

본 연구에서 측정된 소음데이터는 기본적으로

시간에 대한 디지털신호의 변화를 결과치로 분석한다. 이러한 결과데이터를 모니터 하면 시간에 대해 상당히 복잡한 그래프로 도시화하기 때문에 시간과 소음크기의 변화곡선을 간단하게 하기 위해 RMS(Root Mean Square)방법, 평균방법, CF(Crest Factor)방법, Weighting방법 등을 적용하여 소음에 대한 주파수와 데시벨 크기 해석을 수행하였다.

또한 소음에 대한 주파수영역대의 정밀한 분석을 수행하기 위해 이산푸리에 변환(DFT: Discrete Fourier Transform)방법 및 급속푸리에변환(FFT: Fast Fourier Transform)방법, CPB(Constant Percent Bandwidth)방법을 적용할 것이다. 이러한 주파수 분석을 하는 이유는 모든 음향은 고유의 주파수를 가지고 있으므로 주파수해석을 통하여 소음의 특성을 정확하게 판단할 수 있으며, 랜덤신호가 아닌 경우 외부소음을 제어 가능하게 해주기 때문이다.

1) 디지털신호 분석(Digital Signal Analysis)

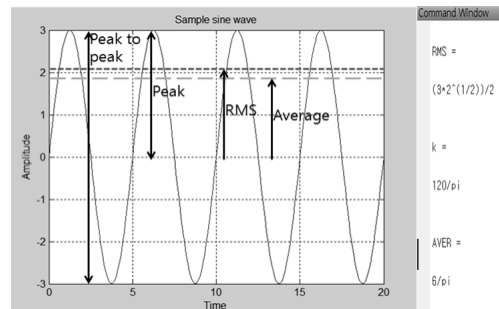
시간-디지털신호를 분석하기 위해 RMS방법, 평균방법, CF방법을 사용할 것이다. 디지털신호 처리이론에서 음향은 진폭과 주기를 갖는 디지털 신호로 정량화되도록 되어있고 이러한 진폭의 크기는 음과 양의 수를 반복하는 것으로 모니터 된다. RMS방법은 이러한 진폭의 크기를 양의 수로 표현하기 위해 제곱화(Squaring)한 뒤, 이에 대한 평균화(Averaging), 루트화(Rooting)과정을 거쳐 주기함수에 대한 해석을 가능하게 한다. 첫번째 식은 RMS화 하는 과정의 식이며 T는 전체측정 시간, a는 시간에 대한 디지털신호의 진폭을 의미한다. 평균방법은 시간영역대에 대한 적분으로 진폭을 평균화한 것을 의미하며, CF방법은 가장 높은 진폭의 크기를 시간대의 RMS값으로 나누어준 값을 의미한다. 이 방법들에 대한 식은 다음

과 같다. <그림 5>는 신호처리에 대한 예이다. 신호가 일반적인 사인파의 형태인 경우에 MATLAB으로 구현을 한 것이며, 왼쪽 그림은 위의 해석방법은 적용시킨 결과이고 오른쪽 그림은 MATLAB 적용 결과이다. <그림 5>와 같은 방법으로 진폭에 대한 해석을 수행한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

$$Average = \frac{1}{T} \int_0^T |a(t)| dt \quad (3)$$

$$Crest\ Factor = \frac{Peak}{S}$$



<그림 5> 진폭해석의 예

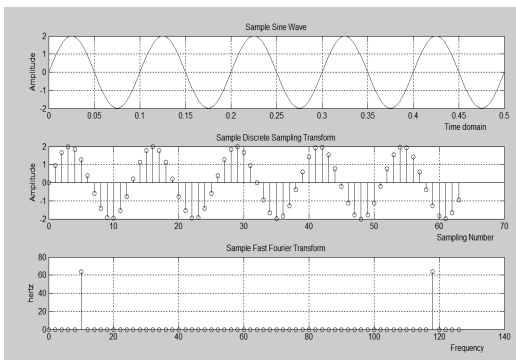
2) 주파수 분석(Frequency Analysis)

‘주파수-데시벨’ 해석을 하기 위해서 이산푸리에 변환과 고속푸리에변환 방법을 사용할 것이다. 두 가지 방법은 푸리에급수와 같은 원리로 모든 주기와 진폭을 가지는 함수는 사인과 코사인의 주기함수 합과 진폭의 크기로 표현될 수 있다는 이론이다. 수행과정에서 우함수의 신호는 오직 코사인신호로 판단하며, 기함수의 신호는 사인신호로만 판단한다. 이러한 주파수해석 중 DFT해석을 사용하는 이유는 기본적인 음향이론에서 시간영역(time domain)으로 음향을 표현하지만, 실제

음향은 다양한 소리를 생성하기 때문에 한 지점에서 생성된 음향이 특정한 주파수를 가지고 있다면 이러한 음향을 주파수로 표현하여 분석이 가능하기 때문이다. 또한 FFT해석을 사용하는 이유는 아래의 DFT함수식의 경우, N개의 sampling 값을 갖고 있는 신호를 해석하기 때문에 주기에 해당하는 함수의 연산이 반복된다. 이러한 알고리즘을 빠르고 간단하게 해석하기 위해 사용된다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-2\pi i k n / N} \quad (4)$$

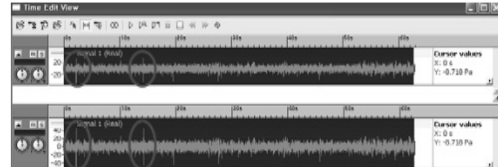
〈그림 6〉은 주파수해석에 관한 예이다. 첫 번째 그림은 일반적인 진폭이 2를 갖는 사인파의 형태이며, 아래 그림은 샘플링작업 수행에 따른 결과와 FFT분석을 마친 결과이다. 아래 그림을 보면 알 수 있듯이, FFT 방법을 통하여 주파수에 대한 음향의 특성을 알 수 있으며, 일반 해석에 비하여 해석결과를 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한 DFT해석의 결과는 이론상 FFT이론과 같기 때문에 예에서 제외하였다.



〈그림 6〉 주파수분석의 예

IV. 현장 소음 측정

초기 소음의 크기는 진폭을 갖는 디지털 신호로 처리된다. 이러한 소음에 대한 디지털신호는 그대로 사용될 수 없기 때문에 FFT분석이나 CPB분석 등을 거쳐 해석되어야 한다. 디지털신호 분석에서 〈그림 7〉과 같이 갑자기 진폭이 크게 급변하는 그래프의 경우, 외부의 다른 소음이 측정되었기 때문에 이를 포함하지 않는 구간에서 분석해야 하지만, 이러한 신호의 급격한 변화들은 A-Weighting(신호처리 중 가중치방법)의 개념을 사용하여 잡아주며, RMS(Root mean Squaring)과정을 통하여 분석되므로, 외부적인 소음 역시 환경소음의 일환으로 판단하여 분석을 수행하였다.



〈그림 7〉 소음의 디지털신호에 대한 예

1. 서울시 내 아스팔트/콘크리트 도로 소음 측정

측정 횟수는 정확도를 높이기 위하여 한 차선에 대해 최소 2회 수행하는 것을 원칙으로 하였다. 차선마다 차량의 이동속도가 상이한 지역은 각 차선마다 2회씩 수행하였으며 차량의 속도는 해당 도로의 제한속도에 맞춰서 진행되었다. 또한, 안전을 고려하여 낮에 측정이 이루어졌으며, 갑자기 교통량이 증가한 경우나 사고로 인하여 제한속도에 도달하지 못하는 경우에는 제한속도에 대해 1회 측정이 이루어진 경우도 존재한다.

소음측정은 서울시 내의 총 6곳의 장소에서 수

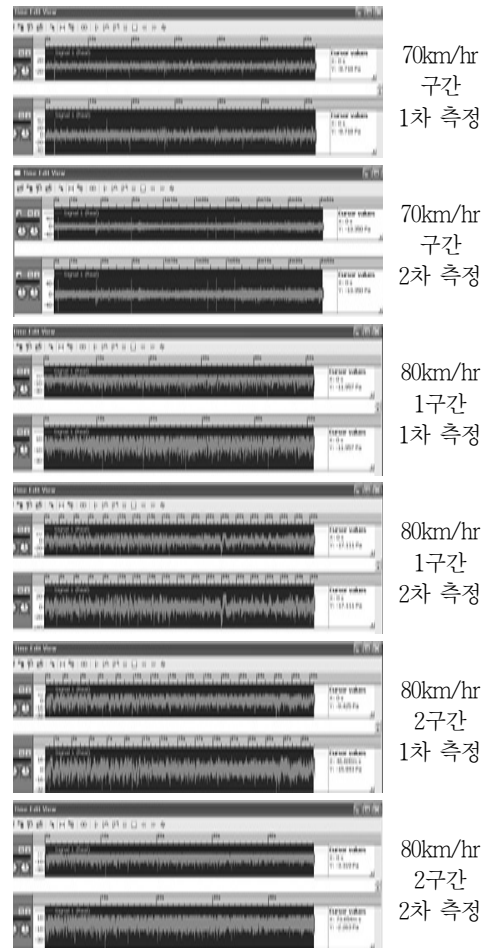
행되었다. 이러한 구간들은 최근 소음관련 민원이 발생한 지역, 기업의 저소음포장이 예정되어 있는 지역, 소음민원 발생률이 높을 것(도로변 주거지역이 많이 존재하는)으로 예상되는 지역으로 선정한 것이다. 서울시의 내부순환로 내에서는 마장램프와 사근램프 사이의 구간, 성산로 구간, 연희동 근처 구간에서 이루어졌으며, 외부순환고속도로 내의 측정은 불암산 톨게이트 근처, 일반도로의 측정은 누원초교 앞, 봉화산역 근처에서 이루어졌다.

1) 내부순환로(마장램프-사근램프) 소음측정

마장램프와 사근램프 사이 구간에서 제한속도가 70km/hr와 80km/hr의 두 구간이 존재하며, 제한속도가 80km/hr의 구간은 2km 이상의 긴 주행거리를 갖기 때문에 측정구간 역시 2구간으로 나누어 측정이 이루어졌다. <그림 8>에 적색 점선으로 표시된 구간에서 소음측정을 실시하였으며 이를 디지털신호로 처리한 결과는 <그림 9>와 같다.



〈그림 8〉 내부순환로
(마장램프-사근램프 소음측정구간)



〈그림 9〉 마장램프-사근램프 구간 디지털 신호 결과

2) 내부순환로(성산로) 소음측정

내부순환로 중 성산로에서는 총 3개 구역에 대한 4번의 소음측정을 실시하였다. <그림 10>에서 볼 수 있듯이 성산램프의 내리막길, 오르막길, 내부순환 성산로의 3구간으로 나누었으며, 지속적으로 속도를 유지하기 쉬운 성산로의 경우에는 2회 측정을 하였고 램프를 통과하는 내리막, 오르막길에서는 각 1회씩만 측정하였다. 성산로 근처의 내부순환로는 제한속도를 80km/hr로 지정하였기 때문에 측정 속도 역시, 주행속도를 80km/hr로 적용하였다. <그림 10>은 측정 구간을 나타내며, <그림

11)은 성산로 근처 소음측정에 대한 디지털신호의 결과를 나타낸다.

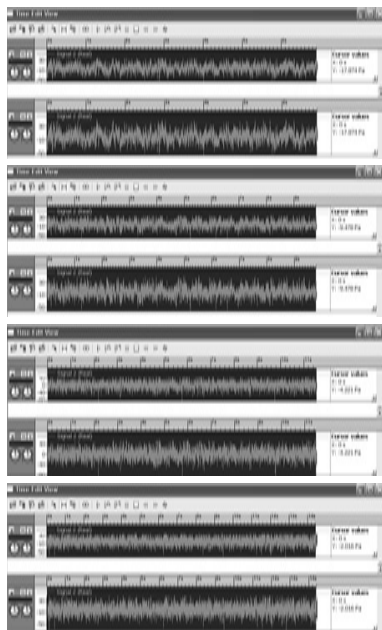


〈그림 10〉 내부순환로(성산로) 소음측정 구간

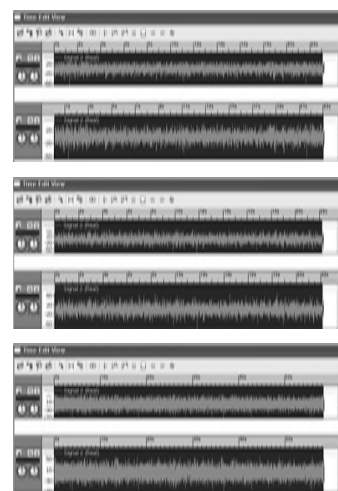
내며, 〈그림 13〉는 구간내의 소음측정에 대한 디지털신호 결과를 나타낸다.



〈그림 12〉 내부순환로(연희동 근처) 소음측정 구간



〈그림 11〉 내부순환 성산로 구간 디지털 신호 결과



〈그림 13〉 내부순환로 연희동 구간 디지털 신호 결과

3) 내부순환로(연희동) 소음측정

연희동 근처 내부순환로는 속도를 80km/hr로 제한하고 있으며, 이 구간에서 제한속도를 유지하기 양호한 상황이었기 때문에 측정은 3회에 걸쳐서 이루어졌다. 〈그림 12〉는 측정 구간을 나타

4) 서울외곽고속도로(불암산 톨게이트 근처) 소음 측정

불암산 톨게이트 근처에서 이루어진 소음측정은 고속도로라는 특징을 가지고 있기 때문에 측정하기 불리한 지역에 속한다. 톨게이트에서 불과 300~400m 떨어진 구간부터 측정이 시작되기 때문에 제한속도를 유지하는 것이 까다롭고 시작 지점부터 짧은 거리 내에서 측정속도까지 내는

것이 곤란하다. 속도가 빠를수록 톨게이트 근처에서 속도를 갑자기 줄이는 것이 불가능하기 때문에 80km/hr 속도에서의 측정은 1회만 이루어졌다. 또한 다른 측정지역과 다른 점은, 이 측정도로의 상태는 아스팔트도로가 아닌 콘크리트도로라는 점이다. <그림 14>는 소음측정 구간을 나타내며, <그림 15>는 소음측정에 대한 디지털 신호 결과를 나타낸다.



<그림 14> 서울외곽고속도로(불암산 TG 입구 근처) 소음측정 구간



<그림 15> 서울외곽고속도로 불암산 TG 입구 구간 디지털 신호 결과

5) 일반도로(봉화산역 근처) 소음측정

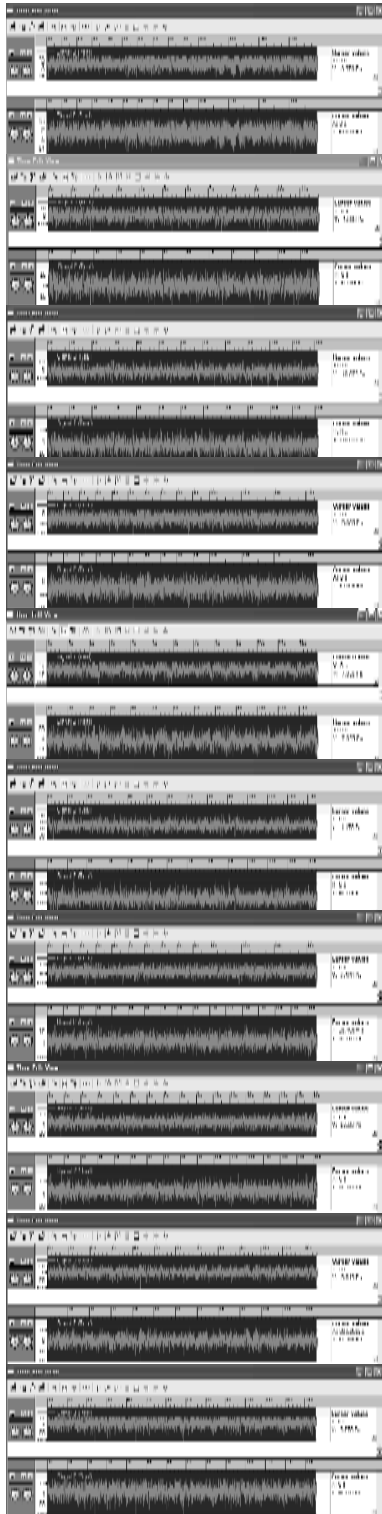
봉화산역 근처 일반도로의 경우 60km/hr의 속도제한이 있기 때문에 50km/hr와 60km/hr의 속도로 나누어 측정이 실시되었으며, 이 구간의 경우, 일반도로에 대해서 3차선으로 나누어 측정을 실시하였다. <그림 16>은 일반도로 내의 소음측정 구간을 나타내며, <그림 17>은 소음측정에 대한 디지털신호의 결과를 나타낸다.



<그림 16> 일반도로(봉화산역 근처) 소음측정 구간

6) 일반도로(누원초등학교 근처) 소음 측정

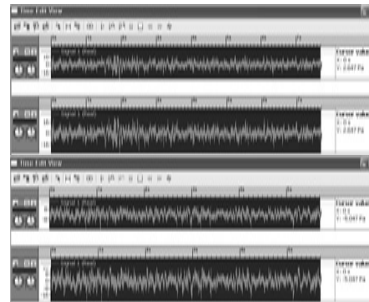
누원초등학교 근처 일반도로의 경우 50km/hr의 속도제한이 있으며, 학교 앞에서는 30km/hr의 속도로 서행하도록 되어 있다. 따라서 이 경우 최대속도인 50km/hr로 측정이 진행되었다. 또한 2차선이기 때문에 1차선에 대한 측정이 2회에 걸쳐 진행되었다. <그림 18>은 누원초등학교 근처 일반도로의 소음측정 구간을 나타내며, <그림 19>는 소음측정에 대한 디지털 신호의 결과를 나타낸다.



〈그림 17〉 봉화산역 근처 일반도로 구간 디지털 신호 결과



〈그림 18〉 일반도로(누원초등학교 근처) 소음측정 구간



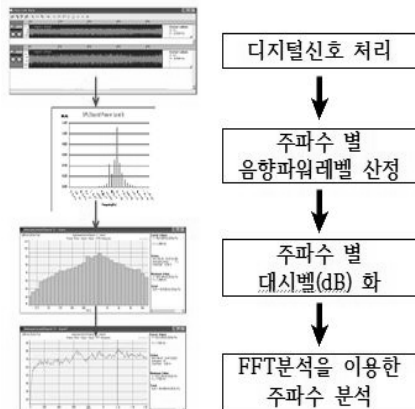
〈그림 19〉 누원초등학교 근처 일반도로 구간 디지털 신호 결과

2. 측정 결과 분석

소음측정에 의해 도출된 소음의 디지털신호를 이용하여 음향을 분석한다. 소음에 의해 만들어진 디지털신호는 FFT분석방법, CPB분석방법을 이용하여 소음 크기를 분석하고, 이러한 CPB분석결과를 연속적으로 확인하기 위해 엑셀을 이용하여 모델링을 한다. 만약 주파수별 특성을 파악해야 할 경우 CPB분석보다 FFT방법을 적용하여 주파수분석을 수행한다.

소음측정에 대한 음향 분석 순서는 〈그림 20〉와 같다. 즉, 소음측정에 의한 디지털 신호를 A-wighting과 RMS방법을 적용하여 조정한다. 조정된 신호를 CPB분석과정을 거쳐 총 음압레벨

및 소음데시벨을 산정한다. 그 후, CPB분석에 대한 값을 각 주파수별 소음의 크기로 재차 확인하기 위해 EXCEL로 모델링을 한다. 또, 소음에 대한 음향의 특성을 분석하기 위하여 FFT분석을 진행하면서 주파수분석 및 데시벨신호 분석을 수행한다.

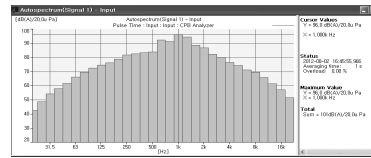


〈그림 20〉 음향모델 분석 순서

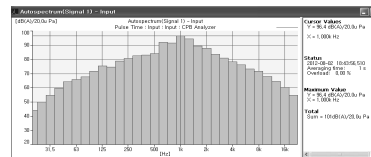
〈그림 20〉에 나온 결과를 분석하는 경우 CPB 분석방법으로 인하여 해당지역의 소음의 크기를 쉽게 판단할 수 있다. 그러나 FFT방법에 의한 주파수 분석은 타이어와 노면 사이에서 측정되는 음향이 랜덤신호를 만들어 내기 때문에 소음에 대한 정도를 분석하는 목적의 사용이 적합하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 주파수 별 음향파워레벨 산정 및 FFT분석 결과는 생략하며, CPB분석 결과만을 이용하여 소음 결과를 살펴보도록 한다.

1) 내부순환로(마장램프-사근램프) CPB 분석 결과

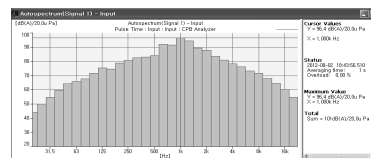
신호분석 결과, 제한속도 70km/hr인 경우의 소음은 평균 101dB, 제한속도 80km/hr의 첫 번째 구간에서는 평균 102dB, 두 번째 구간에서는 104dB의 결과를 나타내었다.



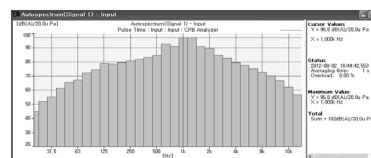
70km/hr 구간
1차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
96 dB
- Total dB:
101 dB



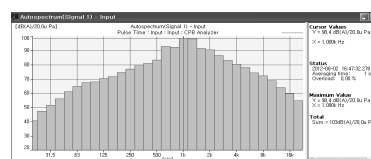
70km/hr 구간
2차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
96.4 dB
- Total dB:
101 dB



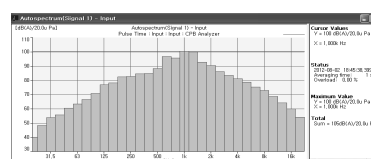
80km/hr 1구간
1차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
97.5 dB
- Total dB:
102 dB



80km/hr 1구간
2차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
96.8 dB
- Total dB:
102 dB



80km/hr 2구간
1차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
98.4 dB
- Total dB:
103 dB



80km/hr 2구간
2차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
100 dB
- Total dB:
105 dB

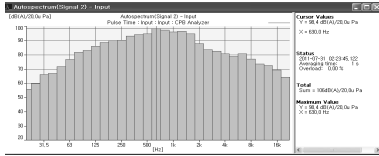
〈그림 21〉 내부순환로(마장램프-사근램프) CPB분석 결과

2) 내부순환로(성산로) CPB 분석 결과

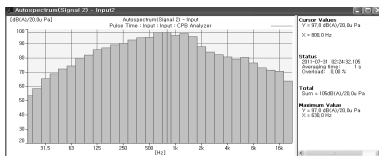
내부순환 성산로의 경우 소음의 평균 데시벨은 105.5dB로 측정되었으며, 성산램프 내리막 길에서는 107dB, 오르막 길에서는 107dB로 측정되었다.

3) 내부순환로(연희동 근처) CPB 분석 결과

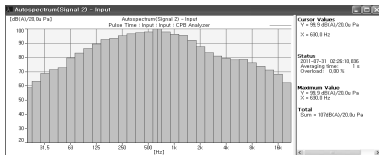
연희동 근처 내부순환로에서 소음측정 결과 평균 데시벨은 104.7dB로 확인되었다.



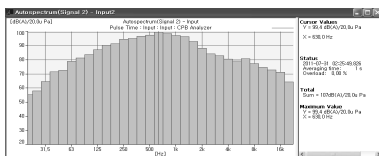
내부순환로 내
성산로 1차 측
정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
98.6 dB
- Total dB:
106 dB



내부순환로 내
성산로 2차 측
정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
97.8 dB
- Total dB:
105 dB

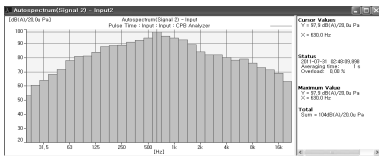


성산램프 내리
막길 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
99.9 dB
- Total dB:
107 dB

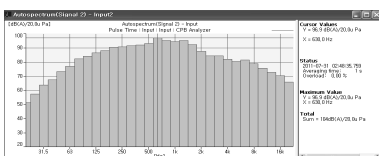


성산램프 오르
막길 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
99.4 dB
- Total dB:
107 dB

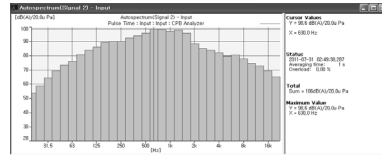
〈그림 22〉 내부순환로(성산로) CPB분석 결과



내부순환로 연희
동 근처 1차 측
정 결과
- 주파수 대 최
대 dB:
97.9 dB
- Total dB:
104 dB



내부순환로 연희
동 근처 2차 측
정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
96.9 dB
- Total dB:
104 dB

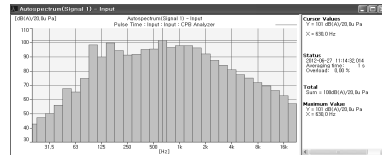


내부순환로 연희
동 근처 3차 측
정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
98.6 dB
- Total dB:
106 dB

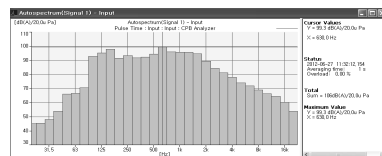
〈그림 23〉 내부순환로(연희동 근처) CPB분석 결과

4) 서울외곽고속도로(불암산 통게이트 근처) CPB 분석 결과

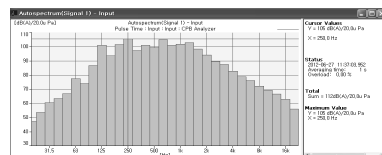
불암산TG근처 서울외곽고속도로에서 측정한 결과, 60km/hr로 주행중 평균소음의 데시벨 크기는 107dB로 측정되었으며, 80km/hr로 주행중에는 112dB까지 측정되었다.



불암산 TG 앞
서울외곽고속
도로 60km/hr
도로 주행 중
1차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB:
101 dB
- Total dB:
108 dB



불암산 TG 앞
서울외곽고속
도로 60km/hr
속도 주행 중
2차 측정 결과
- 주파수 대
최대 dB :
99.3 dB
- Total dB:
106 dB



불암산 TG 앞
서울외곽고속
도로 80km/hr
속도 주행 중
측정 결과
- 주파수 대
최대 dB :
105 dB
- Total dB:
112 dB

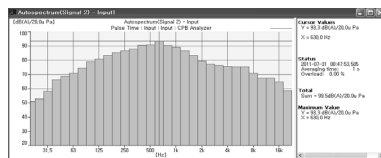
〈그림 24〉 서울외곽고속도로(불암산 TG 앞) CPB분석 결과

5) 일반도로(봉화산역 근처) CPB 분석 결과

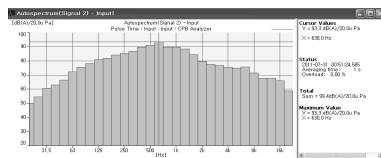
봉화산역 근처 소음측정 결과, 1차선 평균소음 데시벨 크기는 99.5dB이며, 2차선을 50km/hr로 주행한 경우 96.2dB, 60km/hr로 주행한 경우 99.5dB, 3차선을 50km/hr로 주행한 경우 96.5dB, 60km/hr로 주행한 경우 98.5dB로 측정되었다.

6) 일반도로(누원초등학교 근처) CPB 분석 결과

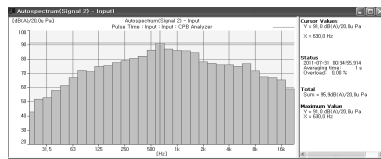
누원초등학교 근처 일반도로에서 소음을 측정 한 결과 50km/hr로 주행한 결과, 평균소음이 94.4dB로 측정되었다.



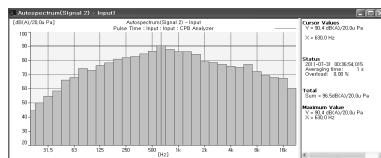
봉화산역 근처 일반
도로 1차선 60km/hr
주행 중 소음 1차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 99.3 dB
- Total dB: 99.5 dB



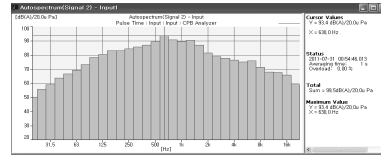
봉화산역 근처 일반
도로 1차선 50km/hr
주행 중 소음 2차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 93.3 dB
- Total dB: 99.4 dB



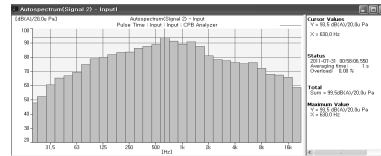
봉화산역 근처 일반
도로 2차선 50km/hr
주행 중 소음 1차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 91 dB
- Total dB: 95.9 dB



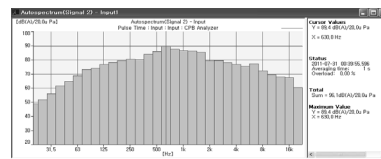
봉화산역 근처 일반
도로 2차선 60km/hr
주행 중 소음 2차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 90.4 dB
- Total dB: 96.5 dB



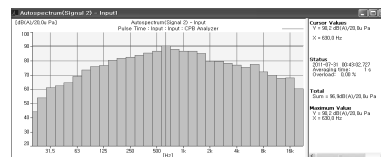
봉화산역 근처 일반
도로 2차선 60km/hr
주행 중 소음 1차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 93.4 dB
- Total dB: 99.5 dB



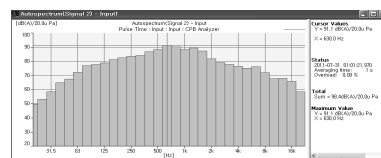
봉화산역 근처 일반
도로 2차선 60km/hr
주행 중 소음 2차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 93.5 dB
- Total dB: 99.5 dB



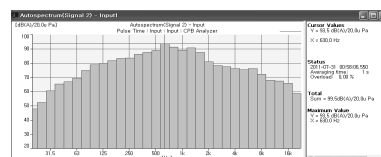
봉화산역 근처 일반
도로 3차선 50km/hr
주행 중 소음 1차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 89.4 dB
- Total dB: 96.1 dB



봉화산역 근처 일반
도로 3차선 50km/hr
주행 중 소음 2차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 90.2 dB
- Total dB: 96.9 dB

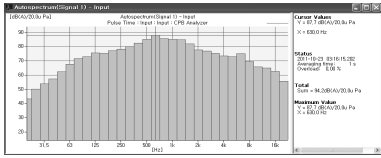


봉화산역 근처 일반
도로 3차선 60km/hr
주행 중 소음 1차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 91.1 dB
- Total dB: 98.4 dB

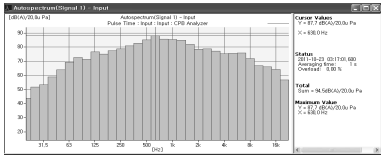


봉화산역 근처 일반
도로 3차선 60km/hr
주행 중 소음 2차
측정 결과
- 주파수 대 최대
dB: 91.9 dB
- Total dB: 98.6 dB

〈그림 25〉 봉화산역 근처 일반도로 CPB분석 결과



누원초등학교 근처 일반도로 1차 측정 결과
- 주파수 대 최대 dB: 87.7 dB
- Total dB: 94.2 dB



누원초등학교 근처 일반도로 2차 측정 결과
- 주파수 대 최대 dB: 87.7 dB
- Total dB: 94.5 dB

〈그림 26〉 누원초등학교 근처 일반도로 CPB분석 결과

V. 결론 및 고찰

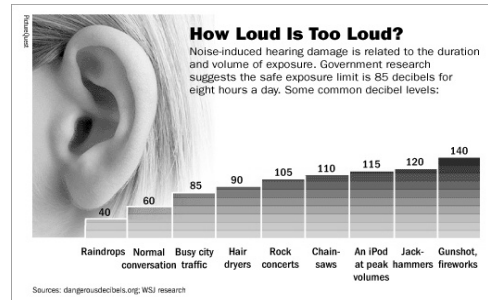
소음측정결과 같은 지역 내에서 측정하여도 속도가 빠를수록 높은 소음 데시벨 수치를 나타내었으며, 아스팔트도로에 비하여 콘크리트 도로에서 발생하는 소음이 더 큰 것으로 나타났다. 기존 FFT분석 과정 및 결과를 생략한 이유는 음향자체에 차량과 노면 사이 마찰에 의한 소음만 측정되었다고 판단하였기 때문이며, 이렇게 분석된 결과는 랜덤신호이기 때문에 외부음향의 제어 및 분석 과정이 의미가 없게 되었다. 서울시 내의 모든 소음측정구간에서 인간의 최대 안정 소음 데시벨 크기인 85dB 이상으로 분석되었기 때문에 서울시내의 소음에 대한 문제가 심각하다는 잠정적인 결론을 내렸다.

소음에 대한 데시벨 크기와 소음이 인간의 삶에 미치는 영향은 〈그림 27〉과 같다. 소음에 대하여 현재까지 연구된 논문이나 서적에서는 인간이 느끼는 데시벨의 안정적 최대 수치를 85dB로 제시하며, 〈표 3〉과 같이 연방임미시온(Immission) 집행법규 제2조 제1항 제1호에서는 지역의 종류와 소음원의 거리와 상관없이 해당지역에서 측정되는 소음에 대한 한계치를 제시하고 있다. 〈표 3〉은 내부순환로, 외부순환고속도로와 같은 도로주변

주거·상업지역에서의 소음 한계치를 의미하고 일반도로와 같이 도로에 근접한 위치에 보도가 존재하는 경우 본 과업에서 실시한 NCPX계측방법에 의한 소음결과를 직접적으로 적용 가능할 것으로 판단한다.

〈표 3〉 민법 임미시온의 주거지역 소음관련 집행법규 (제 2조 제 1항 제 1항)

장소	주·야	소음도(dB)
병원·학교·요양원·양로원	주간	57
	야간	47
주거지역	주간	59
	야간	49
중심가·촌락·복합지역	주간	64
	야간	54
상업지역	주간	69
	야간	59

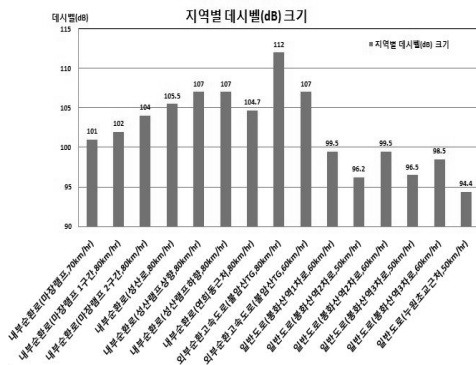


출처: <http://www.hearingcarecentre.co.uk>

〈그림 27〉 소음 데시벨이 인간에게 미치는 영향

공해 또는 음향, 진동 등에 대한 피해를 규정하는 한국의 민법은 독일의 임미시온을 따르고 있다. 이러한 민법을 영미법에서는 생활방해(nuisance), 프랑스법에서 근린폐해(近隣妨害: troubles de voisinage)로 일컫는다. 지역에 대한 소음문제는 한국 민법 기준으로 법적 처리한다. 이러한 점에서 NCPX계측방법으로 측정된 소음은 소음원의 근접지점에서 소음도를 측정하기 때문에 주거지역에서의 직접적

소음도를 의미하지는 않는다. 본 과업에서 측정된 소음도는 노면과 타이어 근접위치에서 발생하는 소음도에 대한 측정이며 주변 주거 지역으로 방사, 회절될 경우 음향의 증폭이나 저감현상이 발생할 가능성이 있다. 본 과업 측정에 대한 결론은 <그림 28>에 제시하였다.



<그림 28> 구역별 소음 데시벨 크기

소음측정 결과 모든 측정구역이 소음에 상당히 취약한 것으로 판단되었다. 특히 <그림 28>의 측정구역 중 불암산 톨게이트 앞 외부순환고속도로에서 소음이 가장 심각하였으며, 일반도로를 제외한 모든 도로에서 95dB를 넘는 심각한 소음수치를 나타냈다. 또한 일반도로에서는 본 과업에서 제시한 소음도 결과가 그대로 보도를 이용하는 보행자에게 직접적인 피해를 미칠 가능성이 있기 때문에 그 피해가 클 것으로 판단한다. 식 (5)는 거리감쇠를 나타내는 식으로 SPL_o 는 관측되는 소음레벨, SPL_g 는 발생하는 소음레벨, d 는 발생하는 소음지점과 관측되는 소음지점 간의 거리, d_0 는 1m를 의미한다.

$$SPL_o = SPL_g - 10 \log_{10} \frac{4\pi d^2}{d_0^2} \quad (5)$$

방음벽 등의 소음저감 시설물이 없다고 가정하고 식 (5)를 이용하면, 도로에서 발생하는 95dB 소음은 각각 10m, 20m, 30m 이격된 거리에서 보행자들에게 개략적으로 64dB, 58dB, 54dB의 소음으로 전달될 수 있다.

참고문헌

- 김명룡, 2000, “도로교통소음의 법적 규제방안(道路交通騒音의 法的 規制方案)”, 『법제논단』, 67~74, 법제처.
- 김재수, 2007, “음향이론”, 『소음진동학』, 13~28, 세진사.
- 류윤선 · 김윤석, 2012, “Pass-by Noise에 대한 Intake 소음의 기여해석”, 『한국소음진동공학회 2012년 춘계 학술대회논문집』, 296~297, 한국소음진동공학회.
- 문성호 · 이광호 · 조대승, 2011, “포장표면과 타이어간의 마찰음 분석을 통한 교통소음예측 소프트웨어 개발”, 『한국도로학회 논문집』, 13(2): 67~74, 한국도로학회.
- 윤영로 · 송태경 · 임재중, 2000, 『디지털신호처리』, 39~63, 76~106, 110~141, 272~300, 사이텍미디어.
- 이상엽 · 김인태 · 문성호 · 권수안, 2012, “서울시 배수성 아스팔트 포장의 기능적 평가 연구”, 『한국도로학회 논문집』, 14(3): 33~39, 한국도로학회.
- 이상엽 · 진정훈 · 문성호 · 문학룡, 2012, “서울시 내부순환도로 교면포장 형식에 따른 소음특성 연구”, 『한국도로학회 논문집』, 14(2): 19~27, 한국도로학회.
- Cho, D-S. and Mun, S., 2008a, “Determination of the Sound Power Levels Emitted by Various Vehicles Using a Novel Testing Method”, *Applied Acoustics*, 69: 185~195.
- _____, 2008b, “Study to Analyze the Effects of Vehicles and Pavement Surface Types on Noise”, *Applied Acoustics*, 69: 833~843.
- _____, 2008c, “Development of a Highway Traffic Noise Prediction Model That Considers Various Road Surface Types”, *Applied Acoustics*, 69: 1120~1128.

- Finch, Robert D., 2005, *Introduction to Acoustics*, 1816~1824,
279~320, 328~342, 536~568, Pearson.
- Kreyszig, Erwin, 2006, *Advanced Engineering Mathematics*, 9th edition, 477~529, WILEY.
- Mun, S. and Cho, D-S., 2009, "Noise Measuring Technique and Field Evaluation Based on the Effects of Vehicles and Pavement Types", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36: 57~60, 504~513, Springer.
- Rossing, Thomas D., 2007, *Handbook of Acoustics*, 57~60, 504~513, Springer.
- 원 고 접 수 일 : 2013년 2월 20일
1차심사완료일 : 2013년 3월 5일
최종원고채택일 : 2013년 4월 18일