

음질을 기초한 교통소음의 척도화에 관한 연구

A Study of the Evaluation Scale of Traffic Noise base on Sound Quality Index

허덕재† · 조경숙*

Hur Deog-Jae and Jo Kyoung-Sook

Key Words : Traffic noise(교통소음), Noise assesment(소음평가), Annoyance scale(불쾌척도), Sound quality(음질), Noise dose(소음폭로)

ABSTRACT

This paper describes the methodology for environmental assessments of traffic noise sources. An attempt is made to establish evaluation scale relationships between noise quality parameters and subjective degrees annoyance. Subjective experimental was conducted to determine the subjective degrees annoyance that scaling score compare with reference and varieties noise source about modified traffic noises with 40~85dB. Also a correlation analysis between noise rating index and satisfactory percentage of the noise dose response curves varied with response was conducted. As a result of study, subjective annoyance degree has not correlation of proportional linearity to the A weight noise level, but has correlation of proportional linearity to the index composed to loudness and tonality. It is suggested to be resonable level 4.9 (equivalence about 53dB) index on the out door noise limits for traffic noise and to be 6 step scale base on the linearity for evaluation traffic noise.

기 호 설 명

SQM : Sound Quality Matrics, ZL : Zwicker Loudness
FS : Fluctuation Strength, Ton : Tonality

1. 서 론

소음이 사람에게 미치는 영향으로써 가장 기본적인 요인은 소음원의 크기이다. 그러나 소음원의 크기만으로 지각자의 감성적 요인을 반영할 수 없다. 즉, 불쾌감의 경우 다양한 소음의 특성들이 반영되어 나타난다. 불쾌한 소음에 대한 정신음향학적 요인은 소음의 물리적 특성에 의하여 발생하는 청음감각들의 조합에 의해 설명되어진다. Zwicker 와 Fatal[1]은 이러한 요소를 정신음향학적 불쾌감이라 불렀다.

과거에는 육체적인 반응으로부터 작업환경의 방해 등과 같은 연구를 중심으로 환경소음의 분류와 평가의 척도를 구

성하는 것이 대부분이었다.[2] 그러나 최근에는 환경소음에 대한 감성 특성을 고려한 연구가 활발히 진행되고 있다. Hiramatsu 등은 환경소음의 종류와 성분에 대하여 크기, 시끄러움, 불쾌감 등에 대한 연구 결과로 백색잡음의 경우에는 음압에 따른 감성적 영향이 선형적으로 나타났고, 환경소음에 있어서는 같은 크기의 소리라도 불쾌도가 다르게 나타난다고 밝히고 있다.[3] 또한 국내에서도 주거환경 및 사무실 그리고 교통소음에 대한 감성 연구가 진행되고 있다. 그러나 dBA, LeqA 등 기존 평가법에서 사용되고 있는 물리량을 기준으로 연구가 수행되고 있는 실정이다. 또한 이들의 연구는 소음평가 척도화로 진전되어 연구가 진행되고 있다. 국내에서 전진용[4] 등은 청감실험을 통한 생활소음의 평가척도 및 기준설정 등에 대한 연구 결과가 발표되고 있다. 이들의 내용은 평가척도의 기준을 dBA를 근간으로 하고 있다.

본 연구에서는 교통소음에 대한 음질 물리량을 분석하고 불쾌도를 예측할 수 있는 예측 식의 유도와 교통소음에 대한 척도화 연구 내용을 기술하였다. 그림 1과 같이 도로 및 도심교통소음원에 대한 주관평가를 수행하여 불쾌도를 고찰하고 평가할 수 있는 인덱스를 개발하였다. 이로부터 척도화할 수 있는 방법으로 불쾌도에 대한 인지의 정도를 측정하는 실험을 수행하고 선형적 관계성과 불쾌의 정도의 관계를 분석 하고 이를 척도화 하였다.

† 고등기술연구원 제품기술연구센터 NVH&Design팀
E-mail : djhur@iae.re.kr
Tel : (031) 330-7436, Fax : (031) 330-7116

* 고등기술연구원 제품기술연구센터 NVH&Design팀

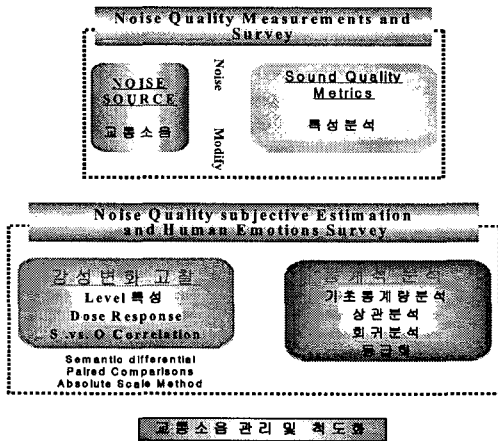


그림 1 연구수행 절차

2. 도로 및 도심교통소음의 평가 인덱스

본 절에서는 도로 및 도심교통소음원에 대한 음원의 물리적인 특성과 평가자의 불쾌도에 대한 주관적 감성 반응 실험을 실시하고 물리량과의 회귀분석으로 평가 인덱스를 개발하는 내용에 대하여 기술하였다.

2.1 평가음원 및 평가 방법

평가는 쌍대비교법을 사용하여 건강한 20-40대 산업 안전보건공단 규정 중 순음청력검사지침에 의거 정상청력을 가진 남녀 42명을 대상으로 도로 및 도심 교통소음원에 대한 불쾌도에 대한 주관적 감성반응 실험을 하였다. 평가실험에 대한 시간적인 구성은 각각 8초의 음원쌍을 16초간 들은 후 평가 및 휴지기로 구성하여 1개의 평가 시간이 약 1분이 소요되고 총 평가 시간은 18분 정도이다. 따라서 총 청취시간은 충분한 휴지기를 줌으로써 청각피로를 최소화 하였다. 음원의 선정은 각기 다른 음원의 6개 구간을 표본 추출하여 음원으로 6개를 선정하였다. 또한 음원평가의 방법인 쌍대비교법은 2점 척도를 사용하였다.

2.2 실험 결과 및 분석

(1) 음원의 주관 평가검정과 음질 물리량 분석

도로 및 도심교통소음은 42명의 평가자가 답한 내용을 검증하였다. 95% 신뢰도(5% 위험률)로 일치성의 χ^2 검증을 한 결과 도로교통소음의 경우 $\chi_0^2 = 106.4$ 이고 $\chi^2 = 26.8$ 로 나타나고, 도심은 $\chi_0^2 = 263.9$ 이고 $\chi^2 = 32.2$ 로 나타나 $\chi_0^2 > \chi^2$ 이므로 평가자의 판단이 일치한다고 간주 할 수 있다. 즉, 평가자의 평가경향이 일관성 있음을 알 수 있다.

(2) 음원의 물리적 특성 분석

평가 음원의 SQM 분석한 23개 metrics 값과 불쾌도 점

수와의 상관분석을 통해 불쾌도에 영향을 미치는 중요한 SQM를 표 1에 정리하였다. CR은 상관분석 결과이다. 도로 교통소음원의 불쾌도 평가와 연관성 있는 SQM은 Linear SPL, ZL(sone), Ton이고, 도심교통소음은 Average Kurtosis, ZL(sone), Roughness, FS, Ton가 영향을 미치는 중요 변수임을 확인하였다. 또한 도로 및 도심 교통소음원에 공통적으로 영향을 크게 미치는 인자는 ZL(sone), Ton로 나타나고 있음을 알 수 있다,

표 1. 도로교통소음의 sound quality metrics

SQM	종류	S1	S2	S3	S4	S5	S6	CR
Linear SPL	도로	79.30	80.70	76.40	78.10	76.10	75.60	*0.86
	도심	81.80	87.80	84.80	85.40	84.40	81.90	-0.53
A-weighted SPL	도로	74.60	75.00	74.80	75.20	74.80	74.70	0.63
	도심	73.70	76.00	72.50	73.10	76.80	78.80	0.73
Zwicker Loudness	도로	36.80	39.80	36.00	37.50	32.00	33.40	*0.82
	도심	39.00	49.40	37.90	40.30	48.50	35.70	*0.83
Sharpness	도로	1.23	1.21	1.30	1.28	1.32	1.30	-0.72
	도심	1.24	1.17	1.15	1.15	1.21	1.31	-0.518
Roughness	도로	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.30	0.28
	도심	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.30	*-0.98
Fluctuation Strength	도로	0.20	0.16	0.16	0.14	0.27	0.17	-0.29
	도심	0.12	0.11	0.13	0.17	0.13	0.34	*0.97
Tonality	도로	0.04	0.11	0.03	0.09	0.02	0.02	*0.93
	도심	0.03	0.08	0.08	0.05	0.07	0.28	*0.98

(3) 불쾌도 분석

평가 음원의 불쾌도는 쌍으로 구성된 평가 결과를 불쾌로 선택된 음원을 '1' 로하는 행렬 매트릭스로 바꾸고 빈도 분석 하였다. 그리고 불쾌도 점수를 득점의 누적으로 계산하여 결과를 분석하였다.

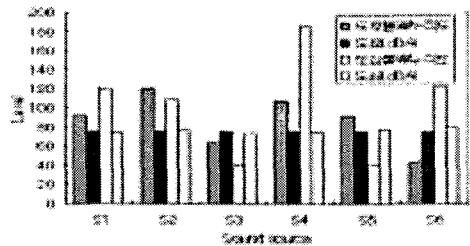


그림 2 교통소음의 불쾌도

그림 2는 교통소음의 불쾌도 평가 누적치를 비교한 결과이다. 교통소음의 음원의 dB 및 dBA 변화율과는 다르게 음원에 불쾌도 정도가 확실히 구분되고 있다. 따라서 교통소음원의 불쾌도는 소음의 크기 이외의 다른 평가 기준에 의해 평가되었음을 짐작 할 수 있다.

2.2 회귀분석에 의한 인덱스 추출

도로 및 도심교통소음에 대한 불쾌도를 정량화하기 위한 연구의 일환으로 소음원에 대한 반응실험 및 분석하였다. 그 결과 교통소음원에 대한 불쾌도를 평가할 수 있는 ZL(sone)

와 Ton는 불쾌도 예측에 매우 중요한 요인임을 알 수 있다.

도로교통소음의 회귀분석결과 불쾌도는 ZL(sones)값과 Ton값이 증가하면 불쾌도가 증가하는 형태로 나타나고 있으며 결정계수값(R)이 0.995와 평가표준오차(Std. Error of the Estimate)가 1.8로 나타나고 있어 상당히 높은 예측식임을 알 수 있으며, 평가식은 다음과 같다.

$$Y = 0.344 * ZL(\text{sones}) + 42.118 * \text{Ton}$$

도심의 경우도 유사한 형태로 나타나며 수정 결정계수값이 0.947이고 평가표준오차가 약간 높은 7.0로 나타나고 있으나 분산분석의 유의치가 0.01로 99%의 신뢰를 얻는 상당히 높은 예측식임을 알 수 있으며, 평가식은 다음과 같다.

$$Y = 0.347 * ZL(\text{sones}) + 24.553 * \text{Ton}$$

3. 도로 및 도심 교통소음의 만족도 기준

3.1 평가방법

정상청력을 지닌 20-30대 남녀를 대상으로 교통소음에 대한 불쾌도 반응을 실험하였다. 평가는 불쾌도 평가와 만족도 평가 두 가지로 구분하였으며 참여인원은 불쾌도 평가 43명과 만족도 평가 96명이 평가를 수행하였다. 불쾌도 평가는 소음 청취 후 불쾌도 점수를 평가자 개인이 원하는 간격과 점수로 표현할 수 있으며 척도의 한계를 주지 않고 평가하였으며 불쾌도 감각량 증감에 초점을 두었다. 평가 결과는 100점 척도로 환산한 결과를 비교 분석 하였다.

만족도 평가는 덴마크의 J.H.Rindel[5]는 교통소음원 자극에 대한 반응의 관계가 S자 곡선으로 나타난다고 제안하였다. 본 연구에서는 자극과 반응의 관계를 Fair 구간을 제외한 Good, Poor의 2단계로 분류하여 만족과 불만족으로 분류하였다. 실험은 이들의 불쾌 정도를 나타내기 위하여 랜덤하게 조합된 소음을 듣고 감각을 5단계 표현 어휘로 판정하였다. 어휘는 "전혀 신경쓰이지 않는다(1), 소리는 들리지만 방해되지 않는다(2), 소음으로 인식된다(3), 사고 및 행위에 방해가 되고 거슬린다(4), 도저히 참을 수 없을 정도로 불쾌하다(5)"로 구성되었다. 분류는 척도 3의 '소음으로 인식된다'를 기준으로 1점과 2점 평가는 'Good', 그리고 3점부터 5점까지는 'Poor'로 해석하여 만족도 비율을 분석하였다. 두 번째는 1점부터 5점까지 소음 레벨 변화에 따른 불쾌도 느낌을 평균점수로 득점 정도를 비교하였다.

3.2 평가 음원

평가에 사용된 음원은 각각의 교통소음을 15초 길이로 샘플링 하고, 소음의 Linear SPL(dB)를 기준으로 37.5dB부터 3dB 간격으로 14단계 레벨로 음원을 제작하였다. 표 2는 평가음원의 dB 레벨 변화 6dB에 따른 Linear SPL(dB), ZL(s) 그리고 Ton의 결과 및 인덱스 값을 정리하였다. ΔdB는 음원 레벨의 저감량을 의미하고, ΔdB=0 구간 소음은

실제 측정된 음원이며, 평가의 기준음원으로 사용하였다.

표 2 평가 음원의 물리량 및 인덱스 점수

구분	도로				도심				
	ΔdB	SPL	ZL	Ton	Index	SPL	ZL	Ton	Index
42	37.3	1.60	0.047	2.530	43.4	2.70	0.053	2.238	
36	43.3	3.00	0.048	3.054	49.4	4.50	0.054	2.887	
30	49.3	4.80	0.048	3.673	55.4	7.20	0.054	3.824	
24	55.3	7.60	0.047	4.594	61.4	1.01	0.052	5.094	
18	61.3	11.6	0.047	5.970	67.4	16.5	0.050	6.953	
12	67.3	17.2	0.045	7.812	73.4	24.3	0.049	9.635	
6	73.3	25.3	0.044	10.56	79.4	35.5	0.047	13.47	
0	79.3	36.8	0.042	14.43	85.4	51.5	0.047	19.02	

4. 실험 결과 및 분석

4.1 만족도 분석

만족과 불만족의 관계 분석은 전체 집단을 100%로 보고 두 개 반응의 교차곡선으로 분석하였다. 표 3은 소음의 만족도 평가 결과를 dB 레벨과 만족도 비율(%) 그리고 인덱스 점수로 비교 정리하였다. 각 소음의 만족도 평가 결과에서 만족과 불만족에 대한 비율이 교차되는 50% 지점을 등감점으로 정의하고, 등감점과 만족/불만족의 100% 구간을 비교 하였다. 도로교통소음의 등감점 소음 레벨은 56.7dB 이고 만족과 불만족이 100%인 지점은 46.3dB 와 64.3dB 이다. 그리고 도심교통소음의 등감점 레벨은 60.8dB 이고 100% 지점은 46.4dB, 70.4dB로 나타났다. 그림 3은 도로와 도심교통소음의 만족도 비율을 비교한 그래프이다.

표 3 교통소음의 만족도 비율 및 인덱스

구분	도로교통소음			도심교통소음		
	dB	비율%	Index	dBA	비율%	Index
만족	46.3	100	0	46.4	100	0
등감점	56.7	50	50	60.8	50	50
불만족	64.3	0	100	67.9	0	100

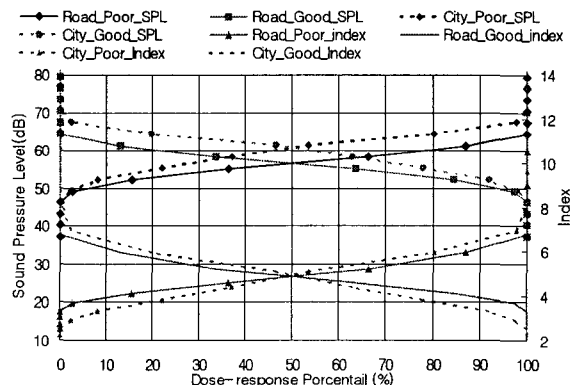


그림 3 SPL 및 Index 따른 교통소음의 만족도

소음의 만족도 비율을 인덱스 점수로 비교한 결과 도로교통소음의 등감지점의 인덱스 값은 4.88, 도심교통소음 4.94로 계산되었다. 그리고 만족/불만족 최대 반응 구간은 도로교통소음 3.05/2.5, 도심교통소음 6.79/8.2 이다. 즉 교통소음 인덱스 값을 기준으로 도로교통소음 3.05 이거나 도심교통소음이 2.5 정도의 소음 수준이라면 거주민의 100%가 정온한 환경으로 인식할 수 있으며, 그 이상의 소음 노출이 발생하게 되면 불쾌도 반응이 점차 발생되면서 약 5점 수준을 초과하게 되면 불쾌도 반응 비율이 더 높게 나타나는 것으로 평가되었다. 소음 허용 한계치인 최대 불쾌도 반응 구간은 도로교통소음 6.79, 도심교통소음 8.2 이상의 범위에 해당하며, 이 때 소음에 노출된 모든 거주자가 불쾌감을 끼는 것을 알 수 있다.

그리고 만족에서부터 등급점까지의 간격을 비교한 결과 도로교통소음 만족도가 높은 구간은 2.4이고 불만족도가 높은 구간은 6.0 으로 불만족 구간의 상승률이 높게 나타났다. 도심교통소음은 만족도가 높은 구간이 2.8, 불만족 구간은 2.7로 두 구간의 불쾌도 반응 변화가 유사하게 평가되었다.

도로교통소음과 도심교통소음의 등감점을 비교하면 도심교통소음이 도로교통소음 보다 0.06만큼 높게 평가되었으나 소음 노출 환경에 대한 평가는 유사한 수준으로 볼 수 있다. 그러나 인덱스 값이 점차 높아져서 불만족 비율이 100%가 되면 도심교통소음에 대한 인덱스 값이 도로교통소음 보다 약 1.4정도 높은 8.2가 되고 이때의 소음 레벨도 70.4dB로 도로교통소음 보다 높게 조사되었다. 따라서 도심소음에 대한 불쾌도 허용 범위가 더 넓은 것을 알 수 있다.

4.2 물리적 평가치와 심리적 반응과의 관계

다음은 불쾌도 평가 결과를 소음 레벨과 인덱스 점수로 비교하였다. 그림 4는 dB 레벨 변화에 따른 불쾌도 반응을 비교하였다. 소음 레벨이 등간격으로 증감할 때 불쾌도 감각은 비선형적으로 반응하며, 소음레벨 증가에 따른 불쾌감은 점차 큰 폭으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 제2절에서 소개된 불쾌도 평가 예측식을 이용하여 인덱스 값에 따른 불쾌도의 변화는 그림 5와 같이 선형적 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 도로와 도심교통소음의 불쾌도 평가 기준은 등급화의 인덱스를 바탕으로 하는 것이 바람직하다. 불쾌도에 대한 척도는 절대적 값을 100점 척도화한 것으로 등감점 관계를 적용하였다. Re_도심교통소음은 도로와 도심교통소음의 불쾌도 등감 지점을 동일한 불쾌도 감각량으로 보정한 결과이다. 그 결과 표 4에서 도심교통소음의 만족도 비율이 100% 되는 인덱스 범위가 도로교통소음에 비해 0.5 정도 좁게 평가되며, 도로교통소음에 대한 불쾌도 반응이 더 빠르게 상승되고 있다.

교통소음의 불쾌도 평가 결과

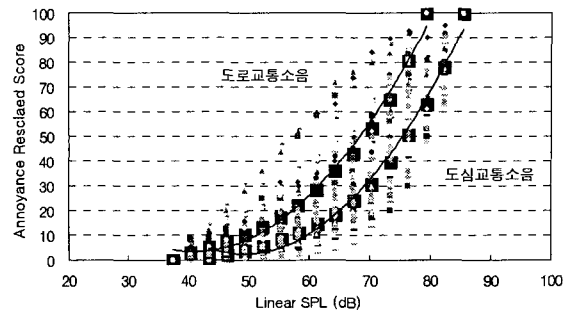


그림 4 dB 에 대한 불쾌도 반응

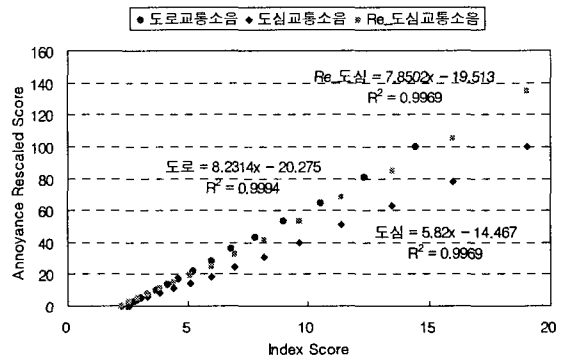


그림 5 교통소음의 인덱스 점수에 대한 불쾌도 반응

이상의 연구 결과에 따라 불쾌도와 강한 선형성을 갖고 불쾌도 반응을 예측 할 수 있는 인덱스 척도에 대하여 등간격 등급화를 추진하는 것이 적합하다고 판단된다.

5. 교통소음의 불쾌도 척도화 분석

도로 및 도심교통소음을 1등급부터 6등급까지 총 여섯 등급으로 척도화 하였으며 그 결과는 표 4와 같다. 각 등급에 해당하는 dB 레벨과 인덱스 값을 최대·최소값으로 구간을 표현하고 만족도 비율을 해당 등급범위에 나타내었다. 각 등급과 만족도 비율 구간을 비교하면 두 소음 모두 2,3,4 등급에 포함되어 있다. 거주 환경 및 생활에 방해가 되기 시작하는 5등급의 인덱스 값을 비교하면 도로교통소음은 10.56으로 도심교통소음 11.38보다 낮게 평가 되었으며 소음 레벨도 약 3dB 정도 낮게 측정되었다. 인덱스 값이 약 7점 정도가 되면 소음에 노출된 모든 사람들에게 심각한 불쾌감을 줄 수 있다. 그러나 실제 조사된 소음은 4등급 및 5등급의 범위에 속하고 있어 소음 발생 및 거주환경이 매우 심각한 상태임을 알 수 있다. 또한 등감점에서 오차는 SPL 6.7%, Index 1.3% 이므로 Index를 사용하여 등급화를 수행하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

따라서 인덱스 척도를 활용하여 교통소음 등급화 하였으며 표 5와 같이 제안하고자 한다. 등급별 인덱스 지수는 3점부터 7점까지 1점 단위로 등급화 하여 소음 민감도를 평가하였다. 각 등급에 해당하는 소음 레벨 간격을 비교한 결과

표 4 교통소음 불쾌도 어휘 평가 결과

도로			도심		
SPL	Index	어휘평가	SPL	Index	어휘평가
37.3	2.530	1.07	43.4	2.238	1.08
40.3	2.736	1.15	46.4	2.540	*1.27
43.3	3.054	*1.55	49.4	2.887	1.62
46.3	3.329	1.80	52.4	3.338	1.98
49.3	3.673	1.83	55.4	3.824	2.40
52.3	4.120	2.03	58.4	4.390	2.45
55.3	4.594	2.33	60.8	4.942	2.54(등급)
56.7	4.876	2.52(등급)	61.4	5.094	2.57
58.3	5.213	2.75	64.4	5.971	3.17
61.3	5.970	2.85	67.4	6.953	**3.52
64.3	6.788	**3.07	70.4	8.168	3.70
67.3	7.812	3.65	73.4	9.635	3.97
70.3	9.008	3.78	76.4	11.38	4.08
73.3	10.56	4.23	79.4	13.47	4.78
76.3	12.30	4.58	82.4	15.97	4.92
79.3	14.43	4.72	85.4	19.02	4.97

*만족도 100%구간의 척도, **불만족도 100%구간의 척도

표 5 감성을 고려한 교통소음 평가 기준 제안

등급	1	2	3	4	5	6
Index기준치	3이하	3-4	4-5	5-6	6-7	7이상
소음민감도	-	경미	중간	높음	매우높음	-

6. 결론

교통소음에 대한 불쾌도 반응을 연구하고 음질을 기초한 교통소음의 척도화를 구축하기 위하여 불쾌도 만족도와 등급화 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 불쾌도 평가 Index를 개발하였으며, 관련 S_{PL}은 ZL(sones), Tonality로 표현이 충분함을 알 수 있었다.
2. 소음 레벨 변화에 따른 불쾌도 변화는 비선형적으로 반응하여 레벨이 높아질수록 불쾌도 상승률이 높게 나타났다. 따라서 소음 레벨의 등간격을 기준으로 등급을 결정할 경우 불쾌감을 충분히 반영하지 못하게 되므로, 감성을 고려한 새로운 평가 기준이 필요하다고 판단된다.
3. 소음 레벨과 인덱스 척도에 대하여 불쾌도 점수를 분석한 결과 인덱스 결과와 선형적인 반응을 보임으로써 불쾌도 등급화는 인덱스 척도를 등급화 하는 것이 유용함을 확인하였다.
4. 교통소음 노출 레벨에 대한 만족과 불만족 등감지점인 50% 지점을 분석한 결과 도심교통소음에 대한 허용 레벨

이 높게 나타났으나 인덱스값에서는 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있었다.

5. 감성을 고려한 교통소음의 평가 기준을 제안하기 위하여 불쾌도 평가 어휘 5단계 척도 평가를 수행하였으며, 만족도 비율과 인덱스 값을 기준으로 소음 민감도를 6단계 등급화 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) E. Zwicker, H. Fastl, Psychoacoustics Fact and Models, Springer,1999
- (2) Joseph Sataloff, Robert Thayer Sataloff, Hyman Menduke et al. Hearing loss and Intermittent noise exposure. Journal of Occupational Medicine 1984 ;26(9): 649-656. Sep.
- (3) Hiramatsu, K., 1988, " A Rating Scale Experiment on Loudness, Noisiness and Annoysnce of Enviromental Sounds," J. Sound and Vibration, Vol. 127, pp. 467~473.
- (4) J. K. Ryu, J. Y. Jeon, H. S. Kim, "Development of Noise Annoyance Scale and Criteria of Residential Noises through Auditory Experiments" The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(8), pp.904~910, 2005.
- (5) Jens Holger Rindel, "Acoustic Quality and Sound Insulation Between Dwellings", Journal of Building Acoustics, vol. 5, No. 4, 1999.
- (6) S. W. Kim, J. Y. Lee, M. J. Song, G. S. Jang, "A Study on the Indoor Noise Limits of Apartment Houses from the Road Traffic Noise", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 15(9),2005.