

교통소음의 모노와 스테레오 재생에 대한 성가심 반응 비교 Comparison of annoyance response for transportation noise by monaural and binaural reproduction

김재환*·정원태*·임창우*·홍지영*·이수갑**·정완섭***

Jaehwan Kim, Wontae Jung, Chang Woo Lim, Jiyoung Hong, Soogab Lee and Wansup Jung

Key Words : Microphone (마이크로폰), Monaural (모노), Dummy head (더미헤드), Binaural hearing (양이 청음), annoyance (성가심, 불쾌감), %HA (매우 높은 수준의 불쾌감 비율)

ABSTRACT

Measurement of noise is not only to know the information of acoustic pressure but to assess human response for noise. Provided that want to find human response for transportation noise, we will have to reproduce the measured noise. The method of reproduction is largely divided into monaural and binaural reproduction techniques. Human fundamentally hears sound through both ears, which is binaural hearing. And binaural technique includes the more information of physical phenomena like acoustical reflection and deflection. So, binaural reproduction is more suitable for assessment of the psychoacoustical and physiological response for transportation noise exposures.

기호설명

- P : 음압
- P_n : n 번째의 홀극에 대한 음압
- P_L : 왼쪽 귀에서의 음압
- P_{Ln} : n 번째의 홀극에 대한 왼쪽 귀에서의 음압
- t : 시간
- r : 소음원에서 측정지점까지 거리
- N : 홀극의 총 개수
- a : 홀극 강도(monopole strength)의 시간변화율
- c : 음속
- ρ_0 : 공기 밀도
- H_L : 왼쪽 귀에 대한 HRIR
- H_R : 오른쪽 귀에 대한 HRIR
- τ : 국부적 시간
- θ : 홀극 음원의 방위각
- ϕ : 홀극 음원의 고도각

1. 서론

소음의 측정은 단순히 음압 레벨이나 음의 강도를 알아보기 위해 사용될 뿐만 아니라 음을 녹음하여 사람에게 들려주는 임상 실험을 통하여 인간의 심리적 반응을 알아보고 또 평가하는 목적에 이용

된다.

지금까지 대부분의 측정방식은 한 방향 지향성의 마이크로폰을 가지고 측정하였다. 이 방법은 소리의 객관적인 물리량을 알고자 할 때는 무리가 없지만 소리의 주관적 평가를 목적으로 할 때는 부적절할 것으로 예상되며, 스테레오 재생을 가능하게 하는 더미헤드(Dummy head : binaural measurement and simulator)를 사용해야 한다.

양이 메커니즘을(Binaural mechanism) 통하여 그 이유를 알아보자.[5],[6]

첫째, 사람의 머리, 귓바퀴, 어깨 등은 일종의 방향성 필터(Directional filter) 역할을 하므로, 마이크로폰 측정으로는 현장감 있는 음 재현이 불가능하다.

둘째, 기본적으로 인간의 귀는 2 개 채널 입력시스템으로 음의 공간분포를 느낄 수 있으나 1 개 채널 입력인 마이크로폰으로는 공간 지각이 불가능하다.

셋째, 사람의 청감은 단순히 음압 레벨의 효과뿐만 아니라 심리음향학적 요인들에게도 많은 영향을 받는다. 더미헤드는 사람 머리의 물리적 특성과 음향학적 특성을 고려한 음향 측정장치이므로 소음 평가 목적에 충분히 부합된다고 할 수 있다.

넷째, 사람의 머리에 의한 'shadow' 때문에 양 귀에 들리는 소음도가 다르며 귓바퀴 효과에 의해 사람이 듣는 소리는 마이크로폰만으로 녹음한 소리의 소음도와는 차이가 있다.

마지막으로 앞에서 언급한 네 가지 이유로 인해 좌우 귀에서 들리는 음압과 한 개의 마이크로폰에 들어오는 신호의 음압은 차이가 있을 것이며, 그 음압레벨을 계산하는 방법도 다르다.

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : kjh03@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7382, Fax : (02) 875-4360

** 서울대학교 기계항공공학부 교수

*** 한국 표준과학 연구원

한 예로, 마이크로폰과 더미헤드 주위에 n 개의 홀극(monopole)을 놓고 각각의 경우에 대해서 음압을 구하는 식은 다음과 같다.[4]

1 개의 마이크로폰과 n 개의 홀극(monopole)이 있다면 음압은 식(1)과 같이 계산될 수 있다.

$$P(t) = \sum_{n=1}^N p_n(t) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\rho_0}{4\pi r_n} \right) a_n \left(t - \frac{r_n}{c} \right) \quad (1)$$

그러나 더미헤드와 n 개의 홀극(monopole)이 있다면, 각각의 주파수별 방위각 (θ) 과 고도각 (ϕ) 에 따른 더미헤드의 응답특성을 나타내고, 머리중심에 의 음압에 대한 막혀있는 외이도 입구에서의 음압의 비로 표현되는 HRTF (Head Related Transfer Function) [7],[8],[9]의 역푸리에 변환을 통해 얻어지는 HRIR(Head Related Impulse Response)와 N 개의 홀극 간의 컨볼루션(Convolution)을 취하면 좌우 귀에 들리는 음압을 얻을 수 있다. 그것을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

먼저, n 번째 홀극에 의한 왼쪽 귀에서의 음압은

$$P_{Ln}(t) = \int_0^t H_L(\theta_n, \phi_n, \tau) P_n(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

식(2)와 같고 이를 이산화된 형태로 바꾸면,

$$P_{Ln}[i] = \sum_{j=0}^{M-1} H_L[\theta_n, \phi_n, j] P_n[i - j] \quad (3)$$

가 된다.

따라서 왼쪽 귀에 들리는 음압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_L = \sum_{i=1}^N P_{Ln}[i] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{M-1} H_L[\theta_n, \phi_n, j] P_n[i - j] \quad (4)$$

오른쪽 귀에서의 음압도 같은 방법으로 구해질 수 있다.

이처럼 양이 메커니즘(Binaural mechanism)은 사람이 귀를 통하여 듣는 소리에 대한 음향학적인 특성을 잘 반영하고 있으므로 소음에 대한 주관적 반응을 평가하는 목적에 잘 부합 될 것이라 생각된다.

본 연구에서는 실험을 통해 모노 방식과 스테레오 방식에 대한 사람들의 정신적, 심리적 반응 차이를 알아보고자 하며, 몇 가지 인자들을 예측해서 그것들이 정신적, 심리적 반응에 어느 정도 기여를 하는지 확인해 보고자 한다.

우리는 소음에 대한 사람의 정신적, 심리적 반응의 지표로 환경소음 분야에서 주로 많이 쓰이는 성가심, 불편감, 불편함 정도(Annoyance)를 택하였고, 그 크기를 0~10 까지 나누어 8~10 까지를 매

우 성가심(Highly annoyed)으로 정의 하여 특정 조건의 피실험자 중에 8~10 을 선택한 사람의 백분율로 나타내었다.

2. 표본음 측정

2.1 측정장치

본 연구에서는 비정상소음 중 음압레벨의 변화가 비교적 완만한 변동소음인 교통소음을 주 연구 대상으로 한다.

현재 소음측정의 기반은 ISO 환경소음 측정 및 평가에 대한 표준안들[1], [2], [3]에 기초를 두고 있다.

(1) 측정장치의 구성

표본음 구축을 위한 Monaural/Binaural 측정장치는 마이크로폰(Type 4190, B&K) 와 HATS (Type 4100, B&K)를 사용하였고 측정에 앞서 캘리브레이터(Type 4231, B&K)을 이용하여 보정을 하였다.

마이크로폰과 HATS 를 통하여 소음원에서 나오는 신호를 받았고 이 신호를 프리엠프(Type 2669, B&K)로 증폭시켰다. 증폭된 신호를 펄스(Type 3560C, B&K)에 확인할 수 있었으며 펄스 소프트웨어(Type 7705, B&K)를 이용하여 최종적으로 PC 로 저장 하였다. 장치 구성도는 아래의 그림 1 과 같다.

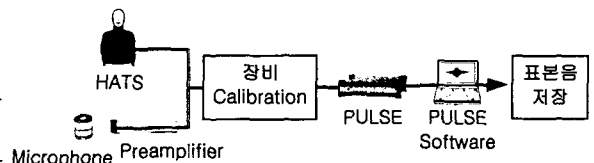


Fig. 1 측정 장치 구성도

신호는 가청범위인 20~20000 Hz 까지의 정보를 알 수 있도록 하기 위해 샘플링 레이트(Sampling Rate)을 64 kHz 로 하였으며, 같은 시각 같은 장소에서 Monaural 신호와 Binaural 신호들 동시에 받을 수 있다.

(2) 측정 조건

측정 시 마이크로폰과 HATS 의 상대적 위치는 약 80cm 로 거의 차이를 둘 수 없으며 측정 높이는 사람의 키 높이를 고려 170cm 이다.

<그림 2>는 측정장치간의 상대적 위치와 높이를 나타낸 것이다.

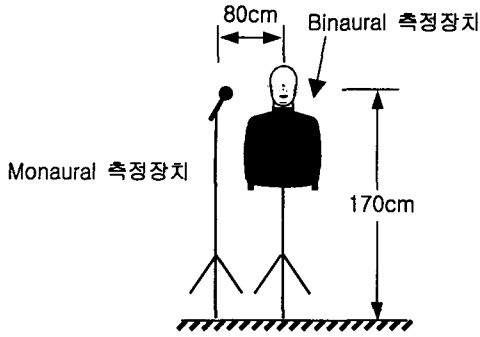


Fig. 2 측정장치의 상대적 위치 및 측정높이

소음원별 측정위치와 소음원 간의 거리는 민간 항공기와 군용항공기의 경우 비행경로나 고도를 정확히 알 수가 없었으므로 자세한 수치는 알 수 없었지만, 기차와 도로소음은 가까운 쪽의 철로와 도로 끝을 기준으로 약 10m 정도 거리에서 측정하였다.

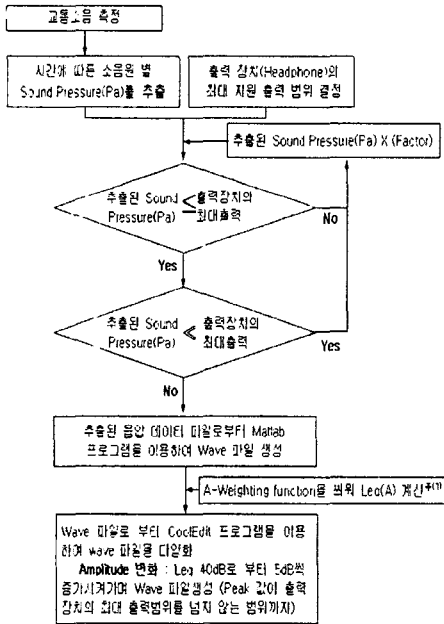


Fig. 3 표본음 구축 절차

2.2 표본음 구축

측정을 통하여 얻어진 음압 데이터를 Matlab 을 이용하여 Wave file 을 생성하였고, 각 소음원의 Lmax 값이 출력장치(Sennheiser HD25)의 최대 출력 범위를 넘지 않는 범위 내에서 소음원별 표본음을 Leq(A) 40dB 에서 5dB 씩 증가시켜 가면서 만들었다.

자세한 표본음 구축 절차는 <그림 3>에 나와 있다.

3. 측정 신호 분석

3.1 민간 항공기

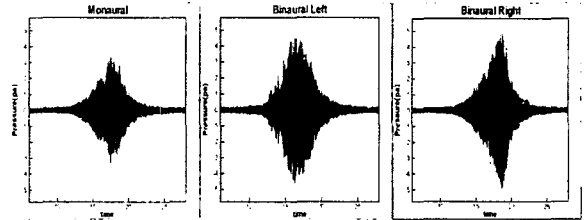


Fig. 4 민간 항공기 소음

Table 1 민간 항공기의 등가 소음도

	Monaural	Binaural Left	Binaural Right
Leq (flat)	79.8 dB	82.7 dB	82.0 dB
Leq (A-weighting)	73.5 dB	81.2 dB	79.9 dB

위의 <그림 4>는 마이크론과 더미헤드 양쪽 귀에서 측정된 민간 항공기 소음이다. 같은 시각 같은 장소에서 측정된 것이지만 보는 것과 같이 서로 다른 음이 들어오고 있다. Binaural 의 경우가 서론에서도 언급했듯이 Monaural 신호에 비하여 상대적으로 컸고 Binaural 의 양쪽 신호의 Peak 값이 되는 시간 차이가 확실히 구분이 되므로 음원에 대한 방향성을 느낄 수 있다.

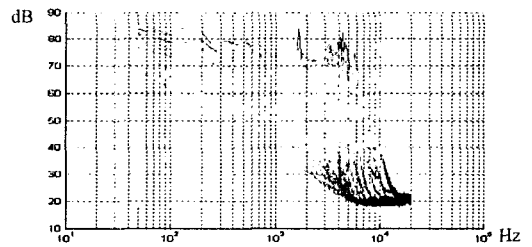


Fig. 5 민간 항공기 소음의 시간에 따른 주파수 특성

민항기의 주파수 특성은 크게 팬 소음과 젯 소음으로 구분된다. 비교적 높은 주파수 대역에 걸쳐 광대역 소음의 특징을 가지고, 3000~6000Hz 대역에서 팬 블레이드와 매질의 상호작용에 의한 터보 팬 tonal 성분이 두드러지게 나타남을 <그림 5>를 통해 알 수 있다.

3.2 군용 항공기

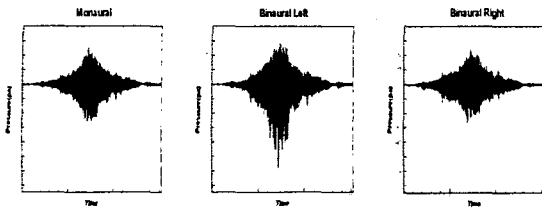


Fig. 6 군용 항공기 소음

Table 2 군용 항공기의 등가 소음도

	Monaural	Binaural Left	Binaural Right
Leq (flat)	81.4 dB	83.3 dB	81.2 dB
Leq (A-weighting)	74.5 dB	79.4 dB	74.4 dB

<그림 6>과 <그림 7>은 각각 F-5 전투기 착륙시의 신호와 주파수 특성이다. 여기서도 Monaural 신호에 비해 Binaural 신호(특히 Left Signal)가 현저하였다. 4000Hz 대역까지의 광대역 켈 소음 특성을 가짐을 알 수 있고 민항기에 비해서는 저 주파 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

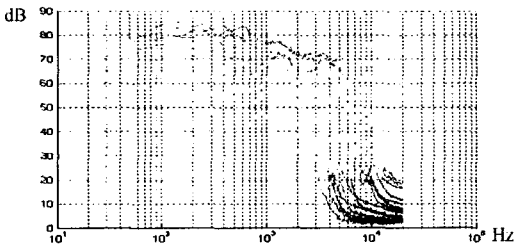


Fig 7 군용 항공기 소음의 시간에 따른 주파수특성

3.3 기차

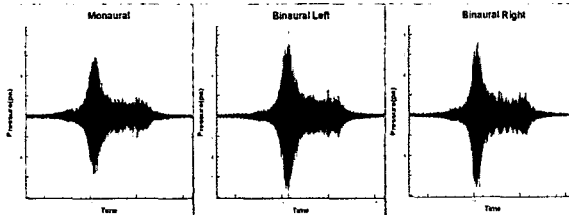


Fig. 8 기차 소음

앞의 민항기와 전투기에서의 소음도 분석과 마찬

가지로 Binaural 신호의 음압이 높았다. 기차의 주파수 특성은 1000Hz 이하의 저주파 특성을 가지지만 측정위치 가까이에 도달 했을 때는 4000Hz까지의 고주파 성분이 강하게 나타남을 알 수 있다. 철로에서 약 10 미터 떨어진 곳에서 기차 소음 sample 을 채취 하였다. 평균적으로 사람이 기차 소리를 듣는 거리에 비해 측정거리가 너무 가까워서 고주파 성분이 감쇄되지 않은 것 같다.

Table 3 기차의 등가 소음도

	Monaural	Binaural Left	Binaural Right
Leq (flat)	83.9 dB	84.9 dB	84.1 dB
Leq (A-weighting)	75.8 dB	81.3 dB	79.9 dB

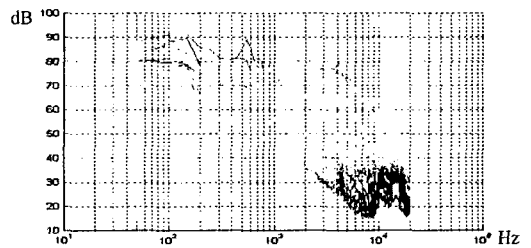


Fig. 9 기차 소음의 시간에 따른 주파수 특성

3.4 자동차

귓바퀴 효과에 의해 Binaural Signal 이 더 크게 탐지되는 전체적인 경향성에 순응하는 결과를 <그림 10>과 <표 4>를 통해 알 수 있다.

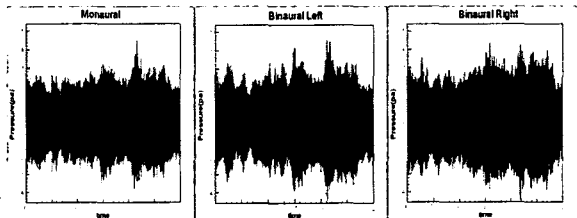


Fig. 10 자동차 소음

Table 4 자동차의 등가 소음도

	Monaural	Binaural Left	Binaural Right
Leq (flat)	85.57 dB	86.2 dB	86.6 dB
Leq (A-weighting)	79.14 dB	82.0 dB	82.6 dB

<그림 11>에서 나타난 자동차의 주파수 특성은 1000Hz 이하 특히 200~600Hz 정도의 저주파 특성이 강하게 나타났다.

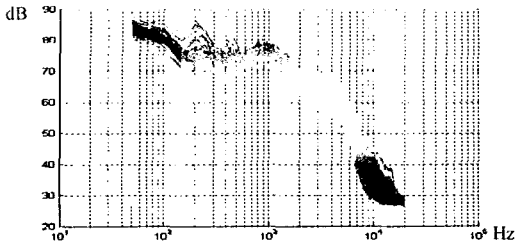


Fig. 11 자동차 소음의 시간에 따른 주파수 특성

4. 청감 반응 실험

4.1 실험장치 구성

아래의 <그림 12>는 청감 반응 실험의 장치구성도이다. PC의 사운드 카드와 앰프를 통해 헤드폰으로 출력이 되고 또한 거기에 펄스와 더미헤드를 연계시켜서 출력되는 음압의 가시화 및 보정이 가능하도록 하는 페루프 제어시스템을 구성하였다.

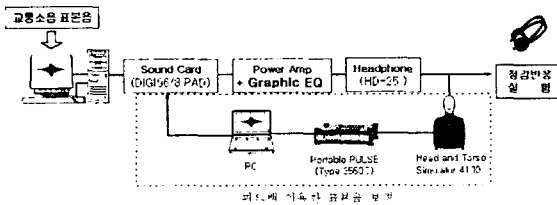


Fig. 12 음 재현장치 구성도

또한, 청감 반응 실험에 사용될 표본음을 재생을 위하여 사용된 장비들은 비교적 주파수 특성이 평탄한 것들이지만 아래의 음 재현장치를 통하여 재생된 음은 실제 측정을 통해 얻은 표본음과 주파수 특성이 조금 다르게 나타났다. 그 차이를 그래픽 이퀄라이저로 보정해 주어서 실제 표본음과 거의 유사한 주파수 특성을 가지게 하였다.

4.2 실험 장소 및 방법

실험은 기본적으로 무향실에 하는 것을 원칙으로 하였고, 무향실 제원은 <표 5>에 나와있다. 피 실험자는 각각의 소음원별로 다양한 음압레벨을 가지는 표본음을 듣고 Annoyance Scale 0~10(<표 6> 참조)에 표시하도록 하였다. <그림 3>에서 보인 과정을 통해 만들어진 표본음은 총 6개 세트의 1개 세트당 20개 음으로 구성된다.

Table 5 무향실 제원

Size	4100 X 4100 X 3200 (mm)
Test Section	3200 X 3200 X 2100 (mm)
Cutoff Frequency	200 Hz
Material	Urethane Foam
Purpose	Far Field Noise Measurement

Table 6 Annoyance Scale

Not at all											Extremely	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		

5. 데이터 분석 결과 및 결론

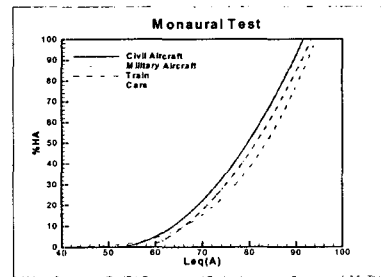


Fig. 13 Monaural 방식의 소음원에 따른 반응비교

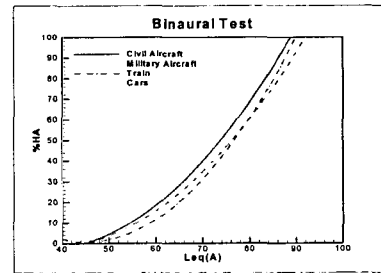


Fig. 14 Binaural 방식의 소음원에 따른 반응비교

<그림 13>, <그림 14>는 여러 교통소음원에 대한 피검자의 Monaural, Binaural 음 재현에 대한 반응 특성을 나타낸 것이다. 대체로 높은 주파수 특성을 가지는 소음원에 대한 성가심 정도가 높았지만, 군용기 소음에 대한 성가심이 가장 높을 것이라는 일반적인 예측과는 달리 그림을 살펴보면 소음에 따른 피실험자들의 성가심(annoyance)은 민항기, 기차, 군용기 및 자동차 순으로 나타났다.

보통 사람들은 군용 항공기가 가장 시끄럽다고 생각하는 경향이 있다. 이번엔 실험을 하면서 이러한 결과를 얻기 전 까지 우리의 예측 또한 그러했다. 하지만 일반적인 예측과는 달리 민간 항공기가

더 높은 %HA(Highly Annoyed) 값을 가졌다. <그림 4>, <그림 6>에서 보듯이 최초 소음이 감지되는 순간부터 최대값이 될 때까지 Rising Time 이 군용 항공기가 더 길고 신호의 기울기도 민간 항공기에 비하여 더 완만하다. 이는 등가 소음도가 같은 조건이라면 Lmax 값은 민간 항공기가 더 크다는 것을 말해준다. 그리고 실측된 민간 항공기의 Peak 값은 약 4 Pa 이고 군용 항공기의 Peak 값은 약 35 Pa 이다. 이처럼 실제 운용되는 민간 항공기와 군용 항공기의 소음도 차이가 매우 크기 때문에 일반적으로 생각하는 시끄러움의 정도는 군용 항공기가 크다고 생각 할 수밖에 없다. 하지만 본 실험은 실제 일상생활에서 운용되는 조건과는 상관없이 음 재현 장치를 사용하여 같은 실험조건에서 실험을 수행하였다. 따라서 등가 소음도(LAeq)가 같은 조건에서는 상대적으로 Lmax 값이 큰 민간 항공기의 성가심 정도(%HA)가 더 높게 나온 것이라 예측된다.

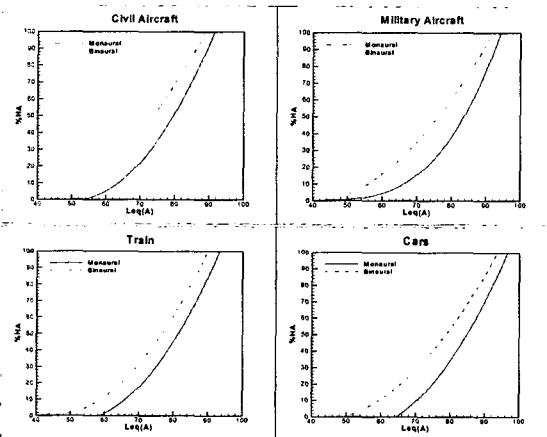


Fig. 15 Monaural/Binaural 방식의 소음원별 반응 비교 (민항기:좌상, 전투기:우상, 기차:좌하, 자동차:우하)

사람의 감성 반응에 작용하는 요인들은 소음도와 주파수 이외에도 우리가 알지 못하는 수많은 인자들이 존재할 것이다. 본 연구에서는 Monaural 방식과 Binaural 방식에 대한 반응이 어떻게 다른지에 대해 연구하였다. 그 결과 Monaural 방식이나 Binaural 방식 모두 각 소음원에 따른 %HA의 변화는 거의 비슷한 경향성을 띄고 있음을 확인할 수 있었지만, Monaural 방식의 성가심/불쾌감 정도에 비해 Binaural 방식이 훨씬 더 크게 나타났다.

따라서 우리는 실제 현상에 대한 정보를 더 많이 포함하고 있는 Binaural 방식을 택하는 것이 타당할 것 같다. 더 나아가 사람의 감성반응에 영향을 주는 인자들 즉, Loudness, Sharpness, Roughness 등의 심리음향적 파라미터로의 접근이 이루어져야 하겠다.

후 기

연구가 원활히 수행되어 본 논문이 발행되기까지 재정적 지원을 해 주신 환경부와 산하 환경진흥원 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) ISO 1996-1: 1982, Acoustics - Description and measurement of environmental noise - Part 1: Basic quantities and procedures.
- (2) ISO 1996-2 Amd. 1: 1998, Acoustics - Description and measurement of environmental noise - Part 2: Acquisition of data pertinent to land use. Amendment 1.
- (3) ISO 10843: 1997, Acoustics - Methods for the description and physical measurement of single impulses and series of impulses.
- (4) Marty E. and Aimee L., Ferdinana W., Steghen A., Brenda M., 2003 "Development of an efficient binaural simulation for the analysis of structural acoustic data.", VIII International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics. Southampton, UK
- (5) Markus Bodden, "The importance of binaural hearing for noise validation 1.", 6th Oldenberg Symposium on Psychological Acoustics.
- (6) J.Robert Stuart, "The Psychoacoustics of Multichannel Audio", Tutorial paper
- (7) Kistler, D.J. and Wightman, 1992, "A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction", J. Acoust. Soc. Am., 91, pp. 1637-1647
- (8) Blauert J. 1983, "Spatial Hearing", MIT Press
- (9) 이수갑, 임창우, 2003, "Annoyance 의 정량적 평가방법 (Short term exposure)", 서울대학교, CENVR-2003-05
- (10) 조문재, 이용봉, 서재갑, 1996, "한국인의 표준 HATS 제작과 머리전달함수 측정 연구", 한국 표준과학 연구원, KRISS-96-124-IR
- (11) 조문재, 서재갑, 1997, "더미헤드의 머리전달함수 측정 연구", 한국 표준과학 연구원, KRISS-97-107-IR,