



방향성을 가진 회전체 소음의 청각계 인지 특성

서강원*

(쌍용자동차 기술연구소)

1. 머리말

차량 실내에서 운전자가 음질 측면에서 성가심 유발 인자로 고려하는 회전체 소음 성분이 그림 1에서 볼 수 있듯이 방향성 θ 을 가지고 음향 공간과 머리전달 함수 특성에 의해 청각계 좌측과 우측이 서로 다른 음질 특성을 가지는 것으로 인지되는 경우, 소음 계측 조건에 따라 토널리스(tonalness)의 고평가 또는 저평가 가능성의 존재와 정속감에 대한 주관적 감성 평가 결과를 토대로 NVH 개선 연구 과정 중에 정량적 평가 오류의 가능성으로 이어질 수 있음을 실험적으로 확인하고 향후 개선안 연구의 필요성을 제기하는 것이다. 예를 들어 한 개의 무지향성 마이크로폰을 운전자 머리 우측에 설치하고 그림 1과 같이 좌측 방향으로 방향성 θ 을 가지고 있는 소음원이 존재하는 경우, 시험 평가 과정 중에 현장에서 직접 인지한 음질 특성과 측정된 소음 신호를 별도의 청취 시스템을 통해 인지한 음질 특성이 과연 동일하다고 할 수 있을까? 라는 의문을 가질 수 있으며 좌우 두 개의 임펄스 응답 특성의 크기와 위상이 서로 다른 예시를 통해 인지된 음질 특성이 다를 수도 있다는 막연한 예상도 해 볼 수 있다. 이와 같은 차이는 음향 공간과 머리전달 함수 특성에 기인하며 이 연구를 시작하게 된 계기가 되었다. 이와 같은 문제 의식을 토대로 이번 연구

는 다음과 같은 내용으로 구성되어 수행되었다. 우선, 그림 2에서 볼 수 있는 토널 요소의 과도 레벨 ΔL 에 대한 머리전달 함수의 영향성에 대해 공개된 머리전달 함수 자료를 기초로 정량적으로 분석을 하고 발생 가능한 과도 레벨 ΔL 의 모호성을 방향성에 따라 정리하였다. 그리고 주관적 감성 평가를 수행하는 과정에서 필요한 모든 소음 신호를 실험적으로 재현하여 측정하는데 어려움이 존재하기 때문에 정속 주행 중 측정된 실내 소음에 머리전달 함수의 영향성을 반영하여 순음 성분을 합성하였다. 즉, 방향성을 가진 회전체 소음 성분이 존재는 과도 레벨 특성에 영향을 줄 것이고 이러한 특성은 NVH 연구 개발 과정 중에 반복적으로 겪게 되는 토널리스의 고평가 또는 저평가 문제와 깊은 연관을 가진다고 판단이 되며 주관적 감성 평가를 수행하기에 앞서 음질 요소 모델들의 정량적 계산 결과를 기초로 인지 반응 특성을 대략적으로 예측하고 이를 근거로 평가 방향성을 설정하였다.

2. 머리전달 함수 기반의 회전체 소음 평가

심리 음향 측면에서 성가심 유발의 가능성에 대한 회전체 소음의 영향성은 일반적으로 식 (1)과 같이 공통적으로 개별 토널 요소의 너비 Δz , 중심 주파수 f_c , 과도 레벨 ΔL 의 함수로 정의된다.

* E-mail : nooree65@smotor.com / Tel : (031) 610-3573

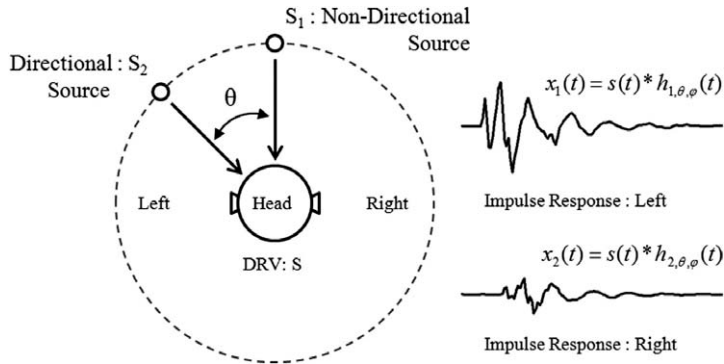


그림 1 청각계 인지 특성에 대한 방향성 소음의 영향

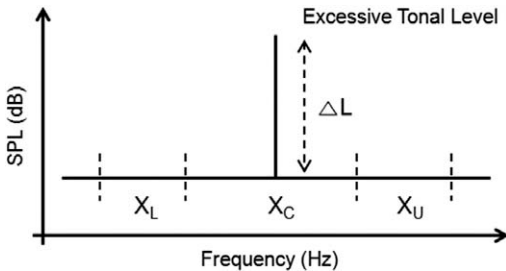


그림 2 인지된 톤러티에 대한 과도레벨의 정의

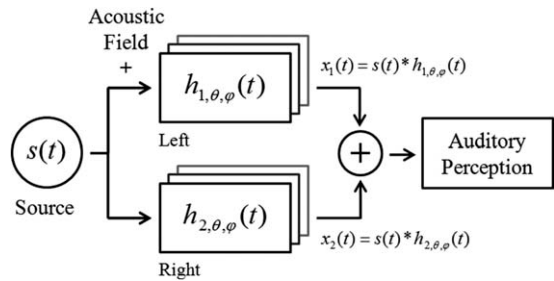


그림 3 방향성 소음의 인지 특성 개념도

$$\text{Tonalness} = f(\Delta z, f_c, \Delta L, \theta) \quad (1)$$

그리고 개별 모델의 물리적 의미상 차이는 존재하지만 톤러티에 대한 과도레벨 ΔL 의 상대적인 관계성을 기반으로 음향공간과 머리전달함수 특성의 영향성은 그림 3과 같이 도시적으로 정의된다. 여기에서 $s(t)$ 는 임의의 방향성 θ 을 가진 소음원, $h_i(t)$ 는 좌우 경로에 대한 각각의 머리 전달함수를 의미하며 청각계를 통해 인지되는 $x_i(t)$ 는 식 (2)와 같이 $s(t)$ 와 $h_i(t)$ 의 컨볼루션(convolution) 형태로 정의된다.

$$x_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h_i(t - \tau)d\tau = s(t) * h_i(t), \quad i \in \{1,2\} \quad (2)$$

방향성 θ 을 가진 소음원이 그림 1과 같이 존재하는 경우 1000 Hz에서의 음향 공간과 머리전달함수 특성은 그림 2에서 인접한 배경 소음과의 상대적인 관계를 기초로 정의된 과도 레벨 ΔL

에 $\pm 5\text{dB}$ 범위 내에 영향이 존재함을 MIT Media Lab.의 W. Gardner의 연구 결과를 토대로 확인하였다. 그림 4와 표 1은 전방 입사인 0를 기준으로 보정된 머리전달함수의 민감도 특성을 보여주며 이를 근거로 회전체 소음의 평가 모델에서 식 (1)과 같이 방향성 θ 의 영향성을 추가적으로 고려할 필요가 있다. 여기에서 흥미로운 점은 좌측 90° 보다 30° 영역에서 청각계 좌우의 민감도 차이가 최대 값을 가진다는 것이며 이번 연구에서 우려하는 계측 오류의 가능성이 가장 높은 영역으로 가정하였고 향후 추가 연구를 통해 좌우 민감도 차이의 영향성을 명확히 할 필요가 있다.

3. 실내 소음 계측 및 합성 신호 제작

주관적 감성 평가를 위해 필요한 평가용 소음 신호의 조건에 따라 재현성이 확보되지 않는 경우가 존재하기 때문에 그림 5와 같이 정속 주행

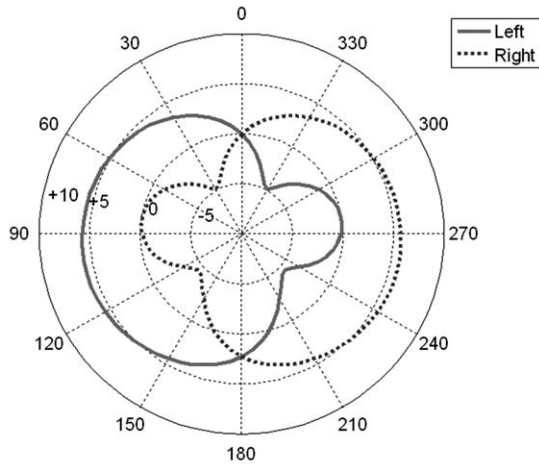


그림 4 머리전달함수 민감도의 방향성 특성(1000 Hz)

표 1 머리전달함수 민감도의 방향성 특성(1000 Hz)

Theta	Left(dB)	Right(dB)	Δ (dB)
0°	0.00	0.00	0.00
15°	2.04	-2.93	4.96
30°	3.46	-4.86	8.32
45°	4.43	-2.96	7.39
60°	5.09	-1.20	6.30
75°	5.50	-0.17	5.68
90°	5.74	-0.16	5.90

중 차량 실내에서 측정된 실내 소음을 배경 소음 성분 $b_i(t)$ 으로 정의하고 주요 관심 대상인 임의의 합성된 회전체 소음 $A_i \cdot \sin(f_0 \cdot t)$ 에 머리전달함수 특성 $h_i(t)$ 을 반영하여 합성 소음 신호 $x_i(t)$ 를 제작하였다.

$$x_i(t) = b_i(t) + A_i \cdot \sin(f_0 \cdot t) * h_i(t), \quad i \in \{1, 2\} \quad (3)$$

우선, 배경 소음은 자사 SUV 차량을 사내 주행로에서 기어 4단, 2000 rpm으로 정속 주행 중 HEAD acoustics사의 SQuadriga와 BHS-I를 사용하여 샘플링 48 ks로 약 20초간 운전석 위치에서 실내 소음을 여러 차례에 걸쳐 측정하였고 외부 환경 소음 및 노면 충격 소음의 영향이 작고 음질의 일관성이 확보된 5초 구간을 배경 소음 $b_i(t)$

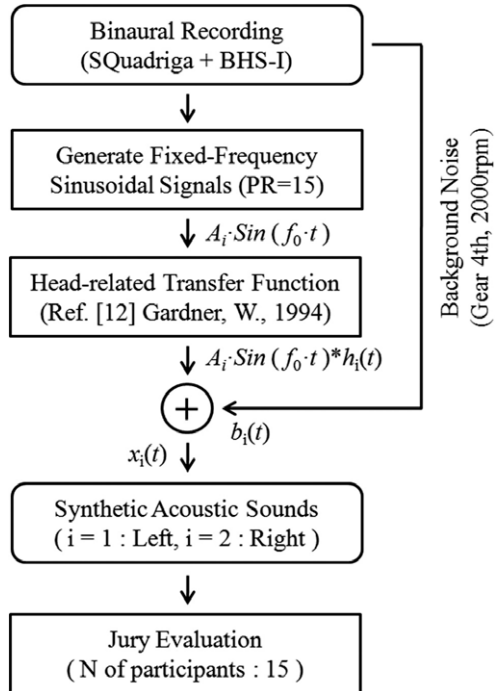


그림 5 방향성 소음의 주관적 감성 평가를 위한 합성 소음 제작 과정

선정하였다. 그리고 합성된 회전체 소음은 방향성 θ 가 0°인 경우를 기준으로 표 1에서 청각계 좌우 민감도 차이가 최대가 되는 좌측 30°와 비교 분석하는 것에 초점을 맞추었고, 방향성 0°에 대해 1000 Hz 순음 성분 소음이 배경 소음 중 인접한 임계대역에 대해 돌출률(prominence ratio)가 15 dB의 값을 가질 수 있도록 순음 성분의 크기를 의미하는 A_i 가 적응형 알고리즘을 통해 0.1% 오차 범위 내에서 결정되었다. 다음으로 좌측 30°에 대한 머리전달함수의 영향성은 표 1의 1000 Hz 방향성 소음의 민감도 특성을 참고하여 좌측 +3.46 dB, 우측 -4.86 dB를 반영하였다.

표 2와 표 3은 합성된 소음 신호의 배경 성분과 방향성에 따른 음질 특성 차이를 보여준다.

4. 주관적 감성 평가

합성 소음 신호의 정량적 특성값에 대비하여 청각계 인지 특성이 부합하는지 여부를 확인하기

표 2 배경 소음 신호의 음질 특성

SQ factor	Left	Right
Loudness	13.672	13.065
Sharpness	1.473	1.492
Roughness	0.150	0.186
Fluctuation strength	0.244	0.310

표 3 방향성 소음의 토널리스 차이

Theta	Left(tu)	Right(tu)	Δ (tu)
0°	0.047	0.044	0.003
30°	0.075	0.022	0.053

표 4 방향성 소음의 주관적 감성 평가 결과

Group	Rating #1	Rating #2
0° binaural	0.00	0.00
30° binaural	-1.17	-0.36
30° left	-1.64	-1.47
30° right	+0.53	-0.91

위해 방향성 θ 에 대한 주관적 감성 평가를 수행하였다. 방향성 θ 에 대해 0°와 30°에 대한 binaural 타입의 2개 평가 소음과 함께 계측 조건과 청음 평가 과정에서 발생 가능한 오류 조건이 고려하여 추가적으로 30°에 대한 binaural 타입의 평가 소음이 각 방향 별로 분리되어 2개의 monaural 타입의 평가 소음이 생성되고 총 4개의 평가 소음으로 구성되어 있다. 총 4개의 평가 소음은 음질 측면에서 정속감에 대해 SDM(semantic differential method) 평가 방법을 기초로 -2점과 +2점 사이에 0.2점 간격으로 평가되었다. 평가 대상에 대한 사전 지식으로 인한 비음향 요인의 부정적 영향을 고려하여 NVH 개발팀 연구원이 아닌 외부 그룹에 속한 8명의 평가 결과를 포함하였고 총 15명(남자: 12명, 여자: 3명)이 참여하였다.

그림 6과 표 4는 두 번째 평가 그룹의 평가 결과를 보여준다. 표 2와 표 3의 결과를 기초로 좌우 배경 소음의 차이로 인해 30° 우측 소음에 대해 엇갈린 반응이 존재함이 확인이 되었고 이에 따라 두

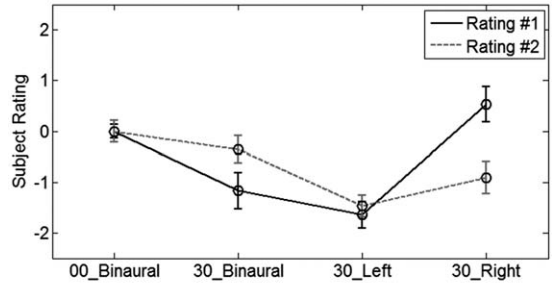


그림 6 방향성 소음에 대한 주관적 감성 평가 결과

개의 소그룹으로 분류되었다. 특히, 토널 요소의 강도는 가장 작지만 배경 소음의 크기 변동 특성이 두드러지게 인지되어 일부 평가자들에게 매우 부정적으로 인식되었다. 결과적으로 0°와 30° 사이에 민감도 차이가 존재하며 30°에 대한 세 경우의 결과를 근거로 동일한 소음원에 대해 monaural 타입의 계측 조건과 청음 평가를 통해 평가 대상이 지닌 정보를 왜곡하여 받아 드릴 가능성이 존재함을 주관적 감성 평가를 통해 확인하였다.

5. 맺음말

이번 연구와 같이 합성 소음 신호 제작, 정량적 음질 요소 분석, 주관적 감성 평가를 통해 방향성을 가진 회전체 소음의 청각계 인지 특성에 대한 영향성 평가를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) 음향 공간과 머리전달함수의 영향으로 회전체 소음의 방향성에 따라 과도 레벨 ΔL 은 $\pm 5\text{dB}$ 범위 내에서 토널리스가 고평가 또는 저평가 될 가능성이 존재하고 판단의 모호성을 야기한다. (2) 입사각 30° 좌우의 소음을 monaural 타입의 청음 평가 과정 중에 동일한 조건의 소음원에 대한 전혀 다른 정량적 평가와 정보 왜곡의 가능성이 존재함을 주관적 감성 평가를 통해 확인하였다. (3) 결론적으로 방향성에 의해 인지된 소음 정보 왜곡의 가능성을 정량적, 주관적 평가 절차를 통해 확인하였고 향후 연구에서는 현업에서의 활용을 위한 응용 연구를 수행할 예정이다. **KSNVE**