

〈논 문〉 SAE NO. 97370039

반무향실내에서의 가속 주행 소음 예측 방법

Passby Noise Prediction in Semi-anechoic Chamber

박 순 흥*, 김 양 한**, 고 병 식***
S. H. Park, Y. H. Kim, B. S. Ko

ABSTRACT

We investigated passby noise measurement method in a small-sized semi-anechoic chamber satisfying the American based SAE J1470 Recommended Practice to facilitate the measurements.

We have tried two passby noise prediction methods. One is line array microphone method in which the free space sound field is decomposed into its eigenfunctions in the spherical coordinates and rearranged according to the order of the spherical Hankel function. However, due to the characteristics of the spherical Hankel function, it is impossible to distinguish the function's characteristics according to the order in farfield. Consequently it can be applied in the transient region of the nearfield and the farfield.

The other method is nearfield acoustic holography(NAH). Although measuring hologram for the several operational engine speeds by conventional scanning method is time-consuming work, we can greatly reduce the measuring time by selecting the appropriate engine speed through pre-experimental knowledge. To verify this method we experimented with the outdoor passby noise measurements and the passby noise prediction in the small-sized semi-anechoic chamber for the identical passenger vehicle and obtained reasonable and acceptable results.

주요기술용어 : Passby noise(가속 주행 소음), Semi-anechoic chamber(반무향실), Line array microphone(선형 마이크로폰 어레이), Nearfield acoustic holography(근접 음향 홀로그래피), Spherical Hankel function(구형 한켈 함수),

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, 대우자동차 기술연구소

1. 서 론

차량이 가속하면서 주행할 때 발생하는 가속 주행 소음(passby noise)은 환경 소음 문제와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 차량의 형식 승인에 있어서 주요한 시험 항목 중의 하나이다. 이러한 가속 주행 소음은 그 보편성을 인정받기 위하여 국내외에서 공인된 시험 방법들에 의하여 측정하는 것이 일반적이며, 이중 주로 사용되어 지는 방법은 SAE J1470¹⁾에 규정된 방법이다. 이 규정은 측정 조건으로서 반경 10m내의 콘크리트 또는 아스팔트 등의 단단한 바닥면을 요구하며, 반경 50m내에 반사면이 없는 넓은 공간을 요구하고 있다. 또한 진입 차량의 속도를 50km/h로 규정하고, 가속 상태 또한 구체적으로 지정하고 있는 점이 그 특징이다. 그러나, 위와 같은 측정 조건을 만족하는 시험장(test site)을 갖추는 것이 쉬운 일이라 할 수 없을 것이다.

본 연구에서는 규정된 측정 조건을 실질적으로 만족시킬 수 있는 실내 측정 방법, 즉 실내에서의 가속 주행 소음의 측정 방법을 제시하고 그 타당성을 검증함과 동시에 전용 측정 시스템을 구현하려 한다. 즉 50m 내에 반사면이 없어야 한다는 조건을 반무향실로 대신하고 이곳에서의 음장의 측정을 통한 가속 주행 소음 예측 방법의 가능성을 살펴본다. 또한 이 방법을 실제 대상 차량에 적용하여 방법론의 검증은 하려 한다.

이 예측 방법은 기본적으로 가속중인 차량의 위치별 RPM과 속도 분포가 알려져 있을 때 이를 어떻게 물리적으로 반무향실내 등가계(equivalent system)로 구현할 수 있는가에 본 방법의 적용 여부가 달려있다. 간단한 구현 방법은 무향실내에서 차량의 RPM을 변화시키면서 마이크로폰을 이용하여 가속중 해당 RPM발생시의 거리에서 측정을 하고 이 측정된 데이터를 이용하여 가속 주행 소음 예측을 할 수 있을 것이라 상상할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가설이 성립될 수 있는 조건과 응용 가능성에 대해서 이론적인 검증은 물론 실험적인 검증은 시도하였다.

구체적인 방법을 살펴보면 첫번째로는 선형 마이크로폰 어레이(line array microphone)를 이

용하여 음압을 예측하는 방법으로서 이 방법은 음장을 고유함수(eigenfunction)의 급수 전개를 이용하여 나타내고 고유함수의 모드 계수를 측정 음압을 통하여 구함으로써 음장의 예측이 가능한 방법이다. 그러나, 이용되는 고유함수가 구형 한켈 함수(spherical Hankel function)로써 원거리 음장(farfield)에서는 차수에 따른 분별력이 없어지게 되고 따라서 근접장(nearfield)의 측정에만 적용될 수 있었다. 두 번째로는 키르히호프-헬름홀츠 적분 방정식(Kirchhoff-Helmholtz integral equation)에 근거한 근접 음향 홀로그래피(nearfield acoustic holography) 방법^{2),3)}으로 선형 마이크로폰 어레이를 이용하는 방법보다 측정에는 많은 노력이 기울여지나, 신뢰할 만한 오차의 범위 내에서 좋은 예측 결과를 얻을 수 있었다. 이를 검증하기 위하여, 동일 차량을 대상으로 야외에서의 가속 주행 소음 측정과 반무향실내에서의 가속 주행 소음 예측 실험을 수행하였다.

2. 반무향실내에서의 가속 주행 소음 예측 방법

2.1 야외 가속 주행 소음 측정 방법(SAE J1470)과 거리 제한이 없는 반무향실내의 측정 방법

반무향실 내에서의 가속 주행 소음 측정 방법을 구현하기 위하여 실제 야외에서의 가속 주행 소음 측정 방법에 대하여 알아볼 필요가 있다. 야외에서의 가속 주행 소음의 측정 방법은 공인된 시험 방법으로 ISO362 standard, SAE J1470의 규정이 있는데 본 연구에서는 SAE J1470에 규정된 방법을 이용하였다. 이 규정에 따르면 측정은 차량이 20m의 거리를 가속하여 주행하는 동안 주행 거리의 정중앙의 위치로부터 7.5m의 거리와 1.2m의 높이에 설치된 마이크로폰으로 A가중치를 적용한 음압을 측정하여 최대 음압을 얻음으로써 수행된다.(Fig.1) 이때 연속적인 두 번의 측정을 통하여 최대 음압치의 차가 2dB이하인 경우에 그 측정치가 유효하며 최대값이 측정 결과가 된다. 그리고, 차중별로 차량의 운전

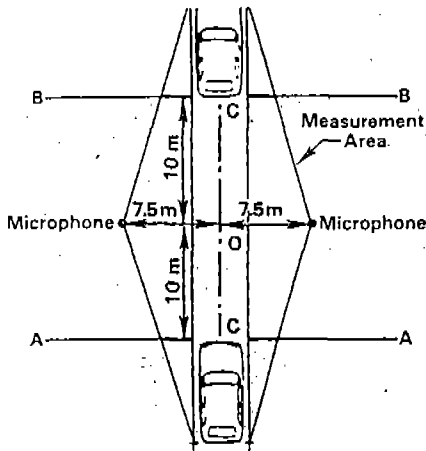
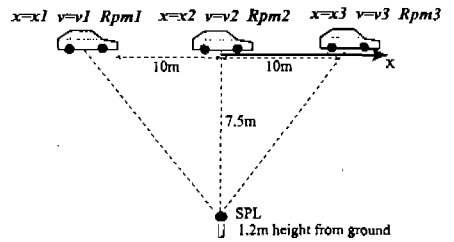


Fig.1 Microphone position for passby noise measurements(outdoor) and measurement distances

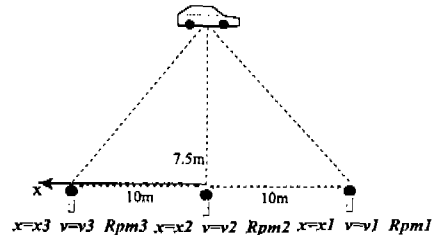
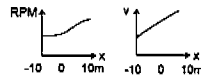
상태가 명시되어 있는데, 특히 4540kg이하의 4단 이상의 기어를 장착한 188마력 이하의 일반 승용차의 경우에는 2단과 3단 기어 상태에서 각각 측정 후 그 측정음압치를 평균한 결과로서 측정 결과를 산출한다.¹⁾

차량의 운전 상태를 반무향실내에서 모사하기 위해서는 차량이 20m를 이동하는 동안 차량 이동 거리에 대한 차량의 RPM 및 속도가 측정되어야 한다. 만일 반무향실이 충분히 커서 야외 가속 주행 소음 측정시의 차량과 음압 측정위치간의 거리를 확보할 수 있다면 Fig.2와 같이 차량과 음압 측정 위치를 서로 바꾸어서 야외 가속 주행 소음 측정 상황과 동일한 상황을 구현할 수 있다.

이를 구체적으로 설명해 보면, 반무향실내에서 차량을 야외 가속 주행 시험시 얻은 차량 이동 거리 20m에 대한 해당 RPM으로 운전하고 야외 측정시의 차량과 음압 측정 위치간의 거리에 해당하는 위치에서 음압을 측정하는 과정을 통하여 무향실내에서의 가속 주행 소음 측정을 수행할 수 있다. 그런데, 실제 가속 주행소음 측정 상황은 음압 레벨 지시계(sound level meter)가 음압을 측정하기 위한 시간동안 차량이 이동하므로 위 과정과 동일하다 할 수 없다. 따라서 차량



(a)



(b)

Fig.2 (a) Outdoor passby noise measurement (b) its equivalent situation of passby noise measurements in and unlimited sized semi-anechoic chamber

의 이동에 의한 영향인 도플러 효과(Doppler effect)에 대한 고려가 필요하나 가속 주행소음 측정시 차량의 속도는 50km/h에서 60km/h의 범위에 있으며, 이 경우 마하수(Mach number)는 0.04에서 0.048의 범위이고, 이동하는 음원에 의한 측정 음압은 정지한 음원에 의한 측정 음압보다 마하수의 제곱에 비례하는 항이 더해지는 형태이므로 반무향실내에서 가속 주행 소음 측정을 수행하는 경우에는 도플러 효과에 의한 음압 변화는 무시 가능한 값임을 알 수 있다. 그리고, 도플러 효과에 의한 주파수의 변화는 주파수 대역별로 A 가중치를 적용해야 한다는 점에서 고려되어야 하지만 주파수의 최대 변화치가 마하수와 주파수의 곱의 값 정도를 가지고, 차량의 주 소음원이 500Hz 이하의 저주파수 대역에 있는 점을 고려해 본다면 그 변화량이 크지 않아 고려

하지 않아도 결과에는 큰 영향을 주지 못할 것임을 알 수 있다.

2.2 거리 제한이 있는 반무향실내에서의 가속 주행 소음 측정 방법

앞서 거리 제한이 없는 경우에 반무향실내에서의 가속 주행 소음 측정방법을 고찰해 보았다. 그러나, 가속 주행 소음 측정 시스템을 구축하고자 하는 대상이 거리의 제한이 있는 반무향실인 경우에는 음장을 측정한 후 이를 이용하여 가속 주행 소음 측정 조건을 만족시키는 위치에서의 음압을 예측할 수 있는 음압 예측 방법이 필요하다 할 수 있다.

2.2.1 가장 단순한 시스템

음압 예측이 가장 용이한 경우는 음원이 흡사 단극음원과 유사한 성질을 가지는 경우로서 이때는 단 한 점에서의 측정으로 모든 위치에서의 음압을 예측할 수 있다.

이를 토대로, 가속 주행 소음의 반무향실내의 예측을 위한 가장 단순한 측정 방법은 Fig.3과 같은 형태의 마이크로폰 어레이를 이용한 음압 예측 방법이라 볼 수 있다. 이 방법은 앞서 언급된 거리 제한이 없는 반무향실내에서, 음압 측정이 가능한 위치(Fig.3의 measurement line)에서 음압을 측정한 후 동일 방향상의 원하는 위치에서의 음압을 예측하는 방법으로서 임의의 음원에 의한 방사패턴(radiation pattern)이 거리에

무관하고 방향에만 의존하는 경우에 적용될 수 있다.

그러나, 차량의 주소 소음원이 엔진, 타이어, 배기구인 점을 감안한다면 음원 모델로서 적합한 모델은 분포된 음원의 형태이어야 하며 따라서 앞서 제시한 방법의 실용성이 의문시 됨은 쉽게 이해할 수 있다. 예로서 두개의 단극음원에 의해 형성된 음장의 경우에서조차도 원거리 음장이 아닌 곳에서는 방사 패턴이 거리에 의존함을 볼 수 있다. 즉, 반무향실에 적용하는 경우 음압 측정을 수행하는 위치가 원거리 음장에 해당되지 않는 경우이므로 제안된 측정 시스템으로는 음압 예측을 수행할 수 없다. 또한 제안된 측정 시스템은 선형 마이크로폰 어레이를 이용하여 한 선상의 음압만 측정하는 것이므로 이 음압 정보를 이용하여 음압예측을 하려는 시도도 불가능하다. 이는 키르히호프-헬름홀츠 적분식에 의해 임의의 한 위치에서의 음압을 예측하기 위해서는 그 점을 둘러싸고 있는 평면에서의 음압 정보나 속도 정보를 알아야 가능하기 때문이다.

2.2.2 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 음압 예측 방법

반무향실내에서 가속 주행 소음 예측을 위한 음압 예측 방법으로선형 마이크로폰 어레이를 이용하는 방법과 평면에서의 음압 측정(홀로그래피)을 통한 음향 홀로그래피 방법의 두 가지를 생각해 볼 수 있다. 선형 마이크로폰 어레이를 이용하여 음압을 예측하는 방법은 음향 홀로그래피 방법에 비하여 측정 시스템이 단순한 점에 큰 장점이 있다.

선형 마이크로폰 어레이를 이용하여 음압을 예측하는 방법을 간략하게 요약해 본다면 관심 영역을 자유 공간(free field)으로 가정하고 파동방정식을 변수 분리 방법으로 풀면 그 해는 구좌표계에서의 모드 합으로 표현 가능하다. 즉, 고유함수는 제1종 구형 한켈 함수(spherical Hankel function), 부 르장드르 함수(associated legendre function), 그리고, 삼각 함수가 된다. 이들과 각 모드에 해당하는 모드 계수 P_{mn} 의 합으로 음장을 표현한 후 Fig.4에서처럼 음압 예측 위치에 해당하는 방향으로 마이크로폰 어레이

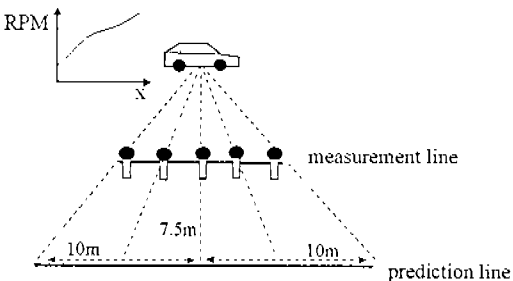


Fig.3 The simplest measurement configuration not feasible because the noise sources of vehicle cannot be assumed as monopole in the nearfield

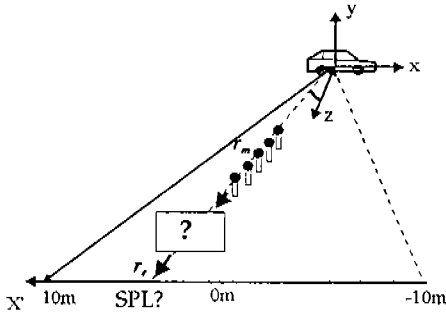


Fig.4 The measurement configuration of sound pressure estimation method using line array microphones

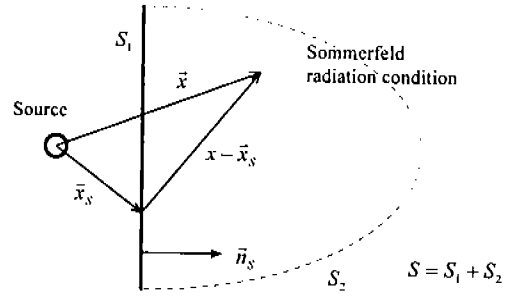


Fig.5 Concerning region and boundary surfaces for prediction of sound pressure by Kirchhoff-Helmholtz integral equation

를 설치하여 그 측정 음압으로부터 고유함수인 구형 한켈 함수(spherical Hankel function)의 모드 계수를 구해서 음압 예측을 수행할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}
 p(\vec{r}, \omega) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m \widehat{P}_{mn} Y_{mn}(\theta, \phi) h_m^{(1)}(kr) \\
 &= \sum_{m=0}^{\infty} A_m h_m^{(1)}(kr) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, $Y_{mn}(\theta, \phi) = P_m^n(\cos\theta)e^{in\phi}$: 부 르장드 르 함수와 삼각 함수로 표현되는 구형 하모닉스(Spherical harmonics)

$h^{(1)}(kr)$: 차수 m의 제1종 구형 한켈 함수

A_m : θ, ϕ 좌표가 상수 값을 가질 때 \widehat{P}_{mn} 과 구형 하모닉스의 조합으로 표현되는 복소 계수

이 방법은 고려하는 구형 한켈 함수의 차수만큼의 마이크로폰으로 음압 예측을 시도할 수 있으나 구형 한켈 함수가 근접장에서만 차수에 따른 분별력이 있음을 감안하면 음압 측정 위치가 근접장인 경우에만 이용 가능함을 알 수 있다. 그리고, 음압 측정 위치가 원거리 음장인 경우에는 구형 한켈 함수의 차수에 따른 분별력의 상실

로 측정 오차 및 수치 계산 오차에 매우 민감한 단점을 지니고 있다.

2.2.3 음향 홀로그래피 방법에 의한 음압 예측^{2), 3)}

근접 음향 홀로그래피 방법은 1980년대 중반 J. D. Maynard 등에 의해 체계적으로 정립된 이론으로써 홀로그래피라 불리는 임의의 한 평면에서 측정된 음압 분포를 이용하여 측정 음장을 공간 푸리에 변환(spatial Fourier transform)에 의한 평면파의 중첩으로 해석하여 모든 평면상에서의 음압, 입자속도, 인텐시티 등을 얻어낼 수 있는 방법이다.

즉, 이 방법은 다음 키르히호프-헬름홀츠 적분식에 근거하고 있는데,

$$\begin{aligned}
 P(\vec{x}) &= -\frac{1}{4\pi} \int_S (G(\vec{x} | \vec{x}_s) \nabla P(\vec{x}_s) \\
 &\quad - P(\vec{x}_s) \nabla G(\vec{x} | \vec{x}_s)) \cdot \vec{n}_s dS \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 P 는 음압, \vec{x} 는 예측점의 위치 벡터, \vec{x}_s 는 경계면의 위치벡터를 나타내며 \vec{n}_s 는 경계면에서의 법선벡터를 나타낸다.(Fig.5 참조) 그리고 $G(\vec{x} | \vec{x}_s)$ 는 그린 함수로 다음의 비동차 헬름홀츠 방정식

$$(\nabla^2 + k^2)G(\vec{x} | \vec{x}_s) = -4\pi\delta(\vec{x} - \vec{x}_s) \quad (3)$$

를 만족하는 임의의 해다.

이 키르히호프-헬름홀츠 적분식은 거리가 무한대가 될 때 음압과 입자 속도가 0이 된다는 좀머펠트 방사 조건(Sommerfeld radiation condition)과 음원면 S₁의 경계 조건, Dirichlet 경계 조건을 만족하는 그린 함수가 알려지면 음압 예측이 가능함을 보여 주고 있다. 이때 홀로그램이라 불리는 측정 평면에서의 음장 측정을 통하여 임의의 위치에서의 음압을 구할 수 있다. 즉, xy 평면에서 홀로그램을 측정한 후 이를 2차원 공간 푸리에 변환을 이용하여 k_xk_y영역에서 평면파의 합으로 표현할 수 있다. 여기서 k_x는 x방향의 파수, k_y는 y방향의 파수를 나타내며 z방향의 파수를 k_z라 할때 파수 k와는 k²=k_x²+k_y²+k_z²의 관계가 있다. 이 평면파들을 측정 평면까지 그린 함수를 이용하여 진행시킨 후 다시 2차원 공간 역푸리에 변환을 이용하면 다음과 같이 임의의 위치에서의 음압을 얻을 수 있다.

$$P(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{P}(k_x, k_y, z_H)}{G'(k_x, k_y, z_H - z_i)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (4)$$

여기서,

$$G'(k_x, k_y, z) = \begin{cases} e^{iz\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} & k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \quad (\text{진행파}) \\ e^{-z\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}} & k_x^2 + k_y^2 > k^2 \quad (\text{감쇠파}) \end{cases}$$

$$\tilde{P}(k_x, k_y, z_H) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y, z_H) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

P(x, y, z_H) : 홀로그램 평면에서의 음압 측정치

위의 설명으로부터 알 수 있듯이 실제 적용하기 위해서는 무한 평면상의 음장 분포를 알아야 하나, 이는 현실적으로 불가능하며 이산화된 측

정점들에서 유한한 크기의 홀로그램을 얻을 수 밖에 없다. 즉, 유한한 측정 구경과 이산화된 측정점들에 의한 공간상의 분해능의 제약과 주파수 한계 및 예측 오차의 발생을 가져올 것이다.

즉, 이산화된 측정점에 의해 공간상의 에일리어싱(spatial aliasing)이 나타나게 되는데, 이 효과를 감소시키기 위해서 측정점 사이의 간격은 최소한 관심 파장의 1/2이하로 선택되어야 하며 좋은 음압 예측 결과를 얻기 위해서는 그보다 더 작은 1/4이하로 선택하여야 한다.

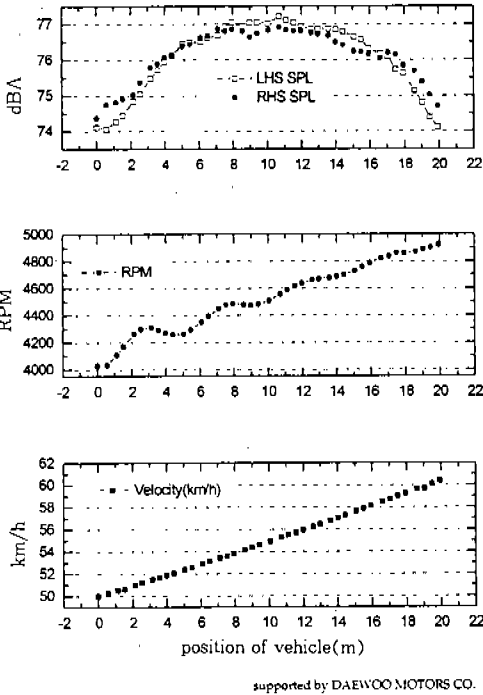
그리고, 한정된 측정 구경 크기(aperture size)는 파수영역상의 분해능을 결정하는데 측정 구경이 음원을 충분히 감싸안지 못할 경우 측정하지 못하는 음압 손실 성분으로 인하여 정확한 예측을 할 수 없게 된다. 또한 가속 주행 소음 예측과 같은 전방 음장 예측 문제의 경우에는 이산 푸리에 변환시 한정된 크기의 구경에 의해 무한 평면상에서 가상의 음원들이 반복되어 나타난다. 즉, 이러한 랩어라운드 오차(wraparound error)에 의해 예측 평면이 홀로그램 평면으로부터 멀어질수록 실제 음원뿐만 아니라 이 가상의 음원들에 의한 영향으로 예측 음압에 오차를 발생시킴을 쉽게 생각해 볼 수 있다. 따라서, 가상의 음원들에 의한 영향을 최소화 할 필요가 있으며 이를 위한 방법으로 측정된 홀로그램 외부에 0을 두어 이산 푸리에 변환 및 역변환 후 나타나는 가상의 음원을 실제 음원으로부터 멀리 떨어지게 하는 효과를 줄 수 있는 제로 패딩(zero padding)방법을 이용하였다.⁴⁾

3. 가속 주행 소음 예측 실험

3.1. 야외 가속 주행 소음 측정 및 엔진 회전수(RPM) 선택을 위한 예비 실험

차량의 운전 상태를 반무향실내에서 모사하기 위해 측정 거리 20m를 이동하는 동안의 차량과 음압 측정 위치간의 거리, 차량의 속도와 RPM의 정보를 해당 차량의 야외 시험을 통하여 알고 있어야 한다. 실제 차량을 대상으로 가속 주행 소음을 측정한 결과가 Fig.6에 나타나 있는데 차량의 오른쪽면에서 측정한 결과를 살펴보면 2단

Passby noise measurement(outdoor), M/T 2nd gear



Passby noise measurement(outdoor), M/T 3rd gear

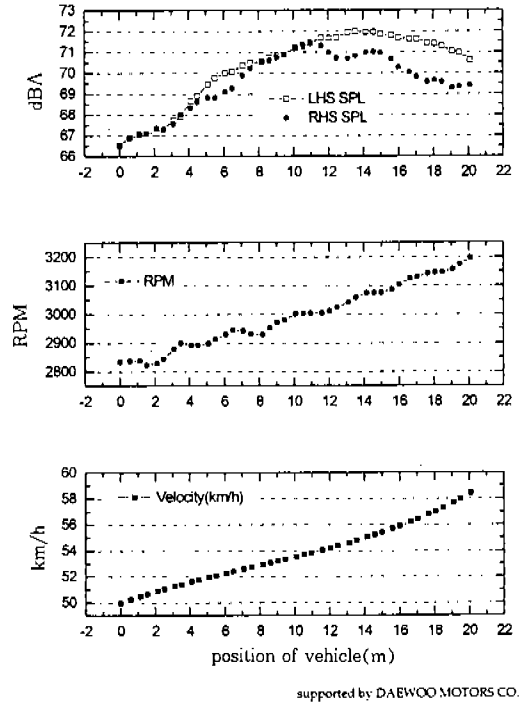


Fig.6 (a) The results of outdoor passby noise measurements(2nd gear, manual transmission)

Fig.6 (b) The results of outdoor passby noise measurements(3rd gear, manual transmission)

기어의 경우 10.7m의 위치에서 76.9dBA의 최대 음압, 3단 기어의 경우 10.7m의 위치에서 71.47dBA의 최대 음압을 나타내고 있다.

반무향실내에서의 가속 주행 소음 예측은 20m의 측정 거리동안 차량의 위치에 해당하는 엔진 회전수(RPM)들로 차량을 동작시키고 이에 대해 각각 홀로그래름을 측정하여 음압 예측을 수행한 후 최대 음압 레벨을 얻어내는 과정이라 할 수 있는데, 이와 같이 측정할 하는 경우 매우 많은 시간이 소요됨을 예상할 수 있다. 즉 가속 주행 소음 측정이 최대 음압 레벨(maximum A-weighted overall sound pressure level)만을 얻어내는 과정임을 고려한다면 최대 음압 레벨을 발생시키는 엔진 회전수를 선택하여 불필요한 측정을 생략하는 과정이 반드시 필요함을 알 수 있다.

그러므로 차량을 반무향실내에서 작동시키기

위한 엔진 회전수를 결정하는 실험을 먼저 수행하였다. 가속 주행 소음 측정시에는 엔진 회전수와 차량과 음압 측정 위치간의 거리가 모두 변화하므로 엔진 회전수에 따른 소음 크기를 측정하기 위해, 반무향실내의 고정된 한 점에서 음압 레벨 지시계(sound level meter)를 이용하여 엔진 회전수를 변화시켜가면서 음압 레벨을 측정하였다.(Fig.7)

결과를 살펴보면, 3단 기어의 경우 100RPM 간격으로 차량을 작동시켜 우측면으로부터 3.2m 떨어진 위치에서 측정한 음압 레벨은, 실제 가속 주행 소음 측정시 차량과 측정 위치간의 거리가 가장 가까운 곳에서의 엔진 회전수인 3000RPM에서 72.3dB, 가장 먼 거리에 해당하는 엔진 회전수인 3200RPM에서는 73.0dB로서 0.7dB의 차이를 나타내고 있다. 한편 실제 가속

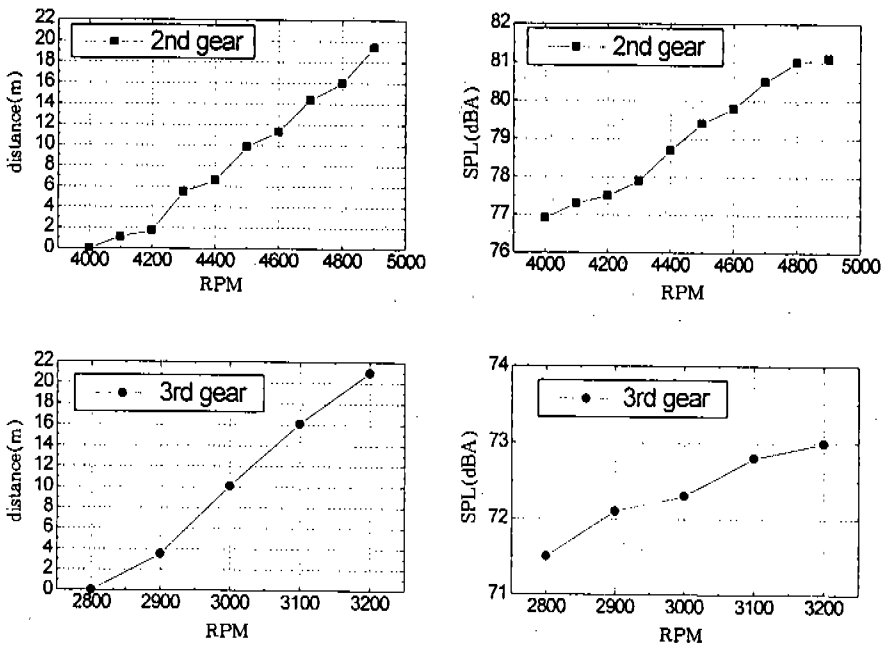


Fig.7 The results of pre-experiment; operating engine speed selection for pass-by noise measurements in semi-anechoic chamber

주행 소음 측정시 엔진 회전수 3000RPM에 해당하는 차량과 측정 위치간의 거리는 7.5m이고 3200RPM에 해당하는 거리는 12.5m이므로, 차량을 단극 음원과 유사하다고 가정할 수 있는 실제 가속 주행 소음 측정의 경우, 거리에 따른 음압은 4.4dB이상의 차이를 보일 것이다. 즉, 엔진 회전수에 따른 음압 변화보다 차량과 측정 위치간의 거리에 따른 음압 변화가 더 크므로 반무향실내에서 차량을 작동시키는 엔진 회전수는 차량과 측정 위치간의 거리가 최소가 되는 위치에서의 엔진 회전수로 선택하는 것이 타당하며, 이는 Fig.6의 실제 가속 주행 소음 측정 결과로부터도 알 수 있다. 예비 실험을 토대로 2단에서의 엔진 회전수는 4500RPM, 3단에서의 엔진회전수는 3000RPM으로 선택할 수 있다.

3.2 실험 장치 및 실험 방법

반무향실내에서의 가속 주행 소음의 예측을 위한 실험은 Fig.8과 같이 차량 우측면에서 마이크로폰 어레이를 이동하면서 홀로그래를 측정하였

다. 실험에 이용한 장비로는 32채널 신호분석기인 HP3566A와 30개의 PCB 마이크로폰(acoustical 130A), 그리고 기준 음압 신호 측정용으로는 B & K 마이크로폰(type 4134)과 B & K 음압 레벨 지시계(type 2232)를 이용하였으며 음압 레벨 보정기로 실험 전후 음압 보정을 수행하였다.

측정에 이용한 마이크로폰은 모두 31개로 30개의 PCB 마이크로폰은 0.1m 간격으로 채널1에 채널15까지 15개의 마이크로폰이 한 선형 어레이를 구성하며 채널16에서 채널30까지의 다른 선형 마이크로폰 어레이와 0.1m간격으로 고정시켜 한 선형 마이크로폰 어레이로 측정하는 경우보다 측정 시간을 줄일 수 있도록 하였다. 이를 이용하여 측정된 홀로그램은 측정점 간격이 0.1m가 되는데 이는 차량의 주된 소음원이 1kHz이하에 있는 점을 감안하여, 이 영역에서 공간상의 에일리어싱을 피할 수 있게 선택한 측정점 간격이다. 한편 나머지 1개의 B & K 마이크로폰은 채널32에 연결하여 차량의 전방의 한 위

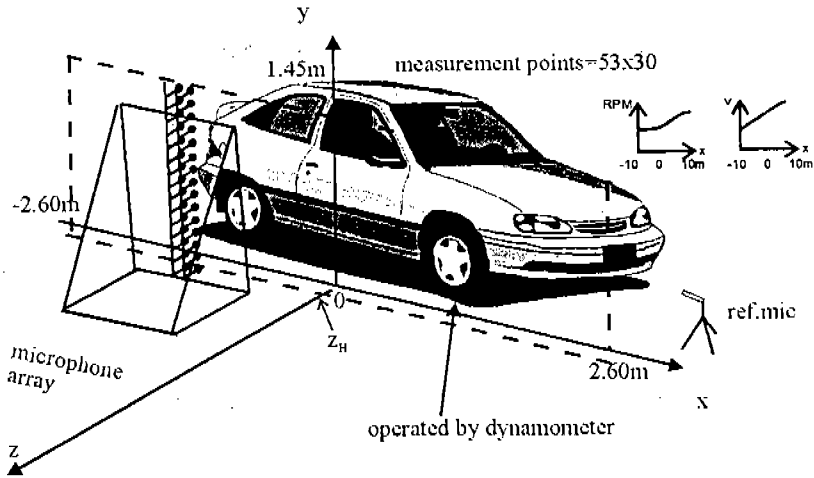


Fig.8 Experimental setup for passby noise measurements in semi-anechoic chamber

치에 고정시켜 기준 마이크로폰으로 사용하였다.

한편 측정 구경은 차량의 길이가 약 4.3m인 점과 반무향실내에서 차량을 고정시키기 위한 장치들에 기인한 어레이 이동거리의 제한을 고려하여 5.2m로 하였다. 따라서 차량 길이 방향으로의 측정점은 53점이 되고, 차량 높이 방향의 측정점은 실제 측정점의 두배인 30점이 된다. 이는 홀로그래피 방법이 자유공간에서 측정과 음압 예측이 이루어지므로, 바닥에 의한 반사가 존재하는 반무향실내에서의 측정 음압은 바닥에 의한 반사 계수가 1에 가까우므로 거울상(mirror image)를 이용한다면 자유 공간에의 측정으로 치환 가능하기 때문이다. 그리고, 차량의 옆면과 홀로그램면 사이의 거리는 2단 기어의 경우 0.565m이고 3단 기어의 경우 0.575m이다.

3.3 음압 예측 결과 및 야외 가속 주행 소음 측정 결과와의 비교

앞서 수행한 예비 실험을 통하여 선택된 엔진 회전수로 차량을 동작시키는 상황에서 홀로그램을 측정된 후 차량의 우측 벽면으로부터 3.54m 떨어진 관측위치(monitoring position), 즉 (0m, 1.2m, 3.54m)의 위치에서 B&K 마이크로폰을 이용하여 파워 스펙트럼(power spectrum)을 측정하였고 아울러 음압 레벨 지시계로 A 가중된

음압 레벨(A weighted sound pressure level)을 측정하였다. 이는 반무향실내에서의 가속 주행 소음 측정 상황이 후륜에 의한 타이어 소음은 고려할 수 없는 등 실제 가속 주행 소음 측정 상황과 동일한 상황이 아니므로, 음향 홀로그래피 방법으로 음압 예측 후, 그 주파수별 예측 결과와 이로부터 계산되는 A가중된 음압 레벨의 예측 결과를 실측치와 비교하기 위함이다.

전체적인 음압 레벨을 계산하기 전에 주파수별 음압 예측을 시도하였고 동일 위치에서 측정된 파워 스펙트럼의 값과 비교해 보았다.(Fig.9) 랩 어라운드 오차의 영향을 줄이기 위해서 제로 패딩을 적용하여 음압 예측을 수행하였고, 파수영역에서의 필터링은 이용하지 않았다. 결과를 살펴보면 700Hz정도까지는 3dB미만의 예측 오차를 가지는 결과를 얻었으며 그 이상의 주파수 영역에서는 그 이상의 예측 오차를 가진다. 이 결과는 측정점 사이의 간격으로 결정되는 Nyquist 파수의 1/2에 해당하는 $14.6m^{-1}$ (800Hz)이상의 파수에서는 파수 영역에서 에일리어싱이 발생하며, 제한된 측정 구경으로 인해 주요 소음원을 측정 구경에 충분히 포함하지 못하여 구경 외부의 음압 분포를 무시할 수 없었기 때문에 주파수별 예측 오차를 감소시키기 위해서는 측정점 사이의 간격을 더 줄여서 Nyquist 파수를 크게

SPL estimation results at a monitoring position

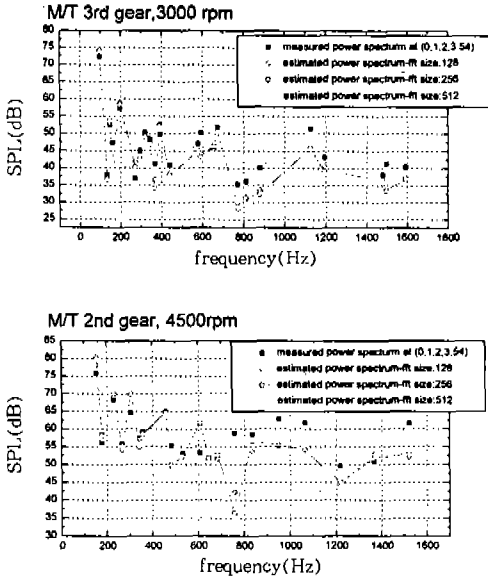


Fig.9 The sound pressure level estimation results by acoustic holography at the monitoring position(0m, 1.2m, 3.54m)

하고 측정 구경을 늘여야 한다. 그러나, 원하는 결과는 전체적인 음압 레벨(overall sound pressure level)이므로 위의 주파수별 예측 오차는 최종 결과에 큰 영향을 주지는 못한다.

이 주파수별 예측 결과로부터 전체적인 음압 레벨을 얻기 위해서는 주파수 대역별 음압 계산과 이에 A 가중치를 고려하는 과정이 필요한데, 주파수 대역별 음압 계산을 위한 주파수 대역은 A 가중치를 적용할 수 있는 1/3 옥타브 대역(1/3 octave band)을 선택하였다.⁹⁾

1/3 옥타브 대역에서 평균 제곱 음압치를 계산할 때 상관 함수(coherence function) 값이 낮은 주파수 성분들은, 첫째로 차량의 소음에 기인한 주파수 성분들로 볼 수 없는 배경잡음(background noise)으로 간주하는 경우와 둘째, 소음이 측정어레이 방향으로만 방사되고 기준 마이크로폰쪽으로는 방사되지 않는 두 가지 극한 상황으로 생각할 수 있다.

먼저(0m, 1.2m, 3.54m)의 관측 위치에서 전

체적인 음압 레벨을 계산하기 위해 상관 함수값이 낮은(0.8이하) 주파수 성분들을 배경 잡음으로 생각하는 경우 평균 배경 잡음치는 관측 위치에서 얻은 파워 스펙트럼에서 구할 수 있다. 이때 4500RPM에서는 47.1dB, 3000RPM에서는 40.6dB이었다. 그리고, 상관 함수값이 낮은 주파수 성분들을 위 가설의 두 번째 경우로 생각하는 경우 이 주파수들에 대해서도 음압 예측을 수행하였다. 한편 상관 함수값이 높은 주파수 성분(0.8이상)에 대해서는 위 두 경우에 대해 음압 예측을 수행하였다.

그리고, 가속 주행 소음 예측시 상관 함수값이 낮은 주파수 성분들을 배경 잡음으로 가정하는 경우는 이 가정에 이미 차량에 기인한 소음이 아니라는 전제가 포함되어 있으므로 비록 야외 가속 주행 소음 측정시의 배경 잡음과 동등하지는 않지만 큰 차이를 보이지 않을 것이라 가정하고 이 배경 잡음치를 사용하여 가속 주행 소음 예측을 수행하였다.

위의 과정을 통하여 관측 위치에서 음압 레벨 지시계로 실측한 값과 음압 예측값, 그리고 실제 가속 주행 소음 측정 결과와 가속 주행 소음 측정 위치에의 예측값을 비교해 보았다.(Table. 1)

결과를 살펴보면 상관 함수값이 낮은 주파수 성분을 어떻게 고려하느냐에 따라 음압 예측 결과가 다소 변화한다. 그러나, 본 방법의 타당성을 확인하기 위해 수행한 관측 위치에서 실측한 측정치와는 1dBA 이하의 오차로 음압 예측이 가능함을 알 수 있다. 이를 다시 가속 주행 소음 측정 결과에 적용하면 그 이상의 오차를 보이는데 이는 실제 가속 주행 소음 측정 방법의 상황과는 다른 실험 환경으로 인해 나타나는 결과로 생각할 수 있으며 비교적 차량에 기인한 소음의 피크치가 두드러지는 4500RPM의 경우에는 2dBA미만의 오차를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 야외 측정 방법인 가속 주행 소음 측정의 반무향실내에서의 모사 측정 가능성을 제시하고 실험을 통하여 그 실제적인 가능성

Table 1. 음압레벨 예측 결과

기어(RPM) 예측 위치	낮은 상관함수 값을 가 지는 주파수 처리 방법	예측 음압 레벨(dBA)	측정 음압 레벨(dBA)	예측 오차 (dBA)
2 nd (4500) monitoring position	배경잡음 47.1dB	79.62	78.5	+1.12
2 nd (4500) monitoring position	processing all frequency components	78.89	78.5	+0.39
2 nd (4500) passby noise prediction	배경잡음 47.1dB	78.66	76.91	+1.75
2 nd (4500) passby noise prediction	processing all frequency components	75.11	76.91	-1.80
3 rd (3000) monitoring position	배경잡음 40.6dB	71.59	71.30	+0.29
3 rd (3000) monitoring position	processing all frequency components	70.94	71.30	-0.36
3 rd (3000) passby noise prediction	배경잡음 40.6dB	71.35	71.47	-0.12
3 rd (3000) passby noise prediction	processing all frequency components	65.15	71.47	-6.32

과 적용성을 확인할 수 있었다.

음압 예측 방법으로는 음향 홀로그래피 방법을 이용하였으며 근접장에서의 측정시 음압 예측 가능한 선형 마이크로폰 어레이를 이용한 방법도 시도되었으나 구형 한켈 함수의 특성으로 근접장에서만 적용 가능하였다. 주파수별 음압 예측 방법인 음향 홀로그래피 방법을 이용하여 반무향실 내에서 실제 차량을 대상으로 가속 주행 소음 예측 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 전체적인 음압 레벨을 예측하였다. 가속 주행 소음 예측 결과는 상관 함수값이 낮은 주파수의 고려 방법에 따라 다소 측정 오차를 보이는 경우도 있으나, 비교적 실측치에 근접한 예측 결과를 얻었다.

후 기

본 연구를 지원하여 준 대우자동차(주)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. The Vehicle Sound Level Committee-Light Exterior Sound Level Subcommittee, Measurement of noise emitted by accelerating highway vehicles, SAEJ1470, OCT84, 1984
2. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography : I. Theory of generalized holography and the development of NAH", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 78(4), pp. 1395~1412, 1985
3. A. Veronesi and J. D. Maynard, "Nearfield acoustic holography(NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81(5), pp. 1307~1322, 1987
4. 권휴상, "음향 홀로그래피를 이용한 방사음장의 전방예측", KAIST Ms Thesis, 1992.
5. D. Irwin and E. R. Graf, *Industrial Noise and Vibration Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, chap.2, 1979