

## 회전하는 바퀴 주위의 유동소음원

권오섭\*·장근정\*\*·이승배\*\*\*

### Source Localization of Induced Noise from a Rolling Wheel of Ground Vehicle

Oh-Sub Kwon\*, Keun-Jeoung Jang\*\* and Seungbae Lee\*\*\*

**Key Words :** Turbulence(난류), Anechoic Wind Tunnel(무향풍동), Rolling Belt(이동벨트), Tire Noise(타이어 소음), Radiated sound(방사 소음)

#### Abstract

Automobile aeroacoustics is a developing area of technology where experimental and theoretical tools are being continuously refined to understand, analyze and modify the noise-generating mechanisms in the vehicle flow. Main sources of ground vehicle exterior noise are the tires (tire/road interaction) and the unsteady flow field around the vehicle. In this study, the sound source localization of a rolling tire was applied to the measurement of radiated sound by using an acoustic mirror system. A possible flow pattern that develops is suggested based on detailed wind tunnel investigations with a rotating wheel in contact with a moving belt.

#### 1. 서론

생활수준의 향상으로 쾌적하고 조용한 주거환경에 대한 요구가 커지고, 각종 소음 배출원에 대한 규제도 강화되고 있다. 산업시설의 확충, 자동차, 항공기 등 수송기계 사용량의 비약적인 증가와 사무용기기 및 가전기기 사용량의 증대 등 소음 배출원의 수와 소음출력의 불가피한 증가로 주거 및 작업 환경에서의 소음 실태는 더욱 악화되고 있다. 이러한 소음 중 유체 흐름의 동적 거동에 의한 공력소음(Aerodynamic noise)은 난류유동과 밀접한 관계를 가지며 이러한 항공기나 자동차에서의 유동소음의 저감은 무향 풍동을 통한 실험적인 연구를 요구한다.

자동차에서의 공력소음은 크게 엔진, 트랜스미션, 기어 박스 등의 파워 트레인(power train) 소음, 사시의 유동박리 영역, 외부 후시경, 와이퍼, 라디오 안테나, 루프랙, 창과 차체의 틈 등에서 발생하는 강체 혹은 진동체의 차체 소음 및 HVAC 소음, 그리고 탄성체인 타이어에서 발생하는 소음으로 분류할 수 있다<sup>[1],[2],[3]</sup>. 또한 차속이 빨라지면 엔진 소음과 같은 다른 소음보다 타이어 소음이 훨씬 큰 비중을 차지하며 시속 110km 이상의 속도가 되면 공력소음이 거의 대부분의 소음을 일으키는 요인이 된다고 한다<sup>[4]</sup>.

주행하는 차체에서 나는 소음 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 타이어 소음이라 말할 수 있다. 타이어에 의한 탄성 소음은 주행 중 회전하는 타이어와 노면사이의 상호작용에 의한 것으로 타이어 자체의 진동에 의한 것과 공기공명기구에 의해 발생되는 것 두 가지로 크게 구분될 수 있다. J Hald<sup>[5]</sup>는 Slick 타이어를 마이크로폰 어레이를 이용한 TDH(Time Domain Holography) 방법으로 방사 소음 현상을 측정하였으며, 그 결과 타이어 가장자리의 전단(leading edge)과 후단(trailing edge)부분에서 중요한 소음원(noise source)을 형성하며 대부분의 소음은 타이어의 전단(leading edge)면과 트레드(Tread) 주변에서 발생한다고 보고한 바 있다. 또한 Sakamoto<sup>[6]</sup>는 타이어 모델을 이용하여 Rib수의 변화에 따른 Sound Intensity 측정으로 소음원의 위치를 파악하는 실험을 하였다.

본 연구에서는 타이어의 공력소음의 이론적 및 수치적 연구를 보완하고 검증하기 위해서 실험 모형을 만들어 실험을 수행하였다. 무향 풍동 내에 설치된 이동하는 벨트 위에서 회전하는 실린더에 의한 공력 소음원을 주파수별로 국소화(localization)하였다.

#### 2. 실험 장치 및 방법

본 연구의 실험을 수행한 무향풍동은 인하대학교 내에 설치된 Fig. 1과 같은 폐쇄형 무향풍동으로 400mm(H)×400mm(W)×500mm(L)의 시험부를 가지며 유동이 없을 때의 암 소음 레벨 20dB를 유지한다.

\* 인하대학교 대학원, seskos@hanmail.net

\*\* 인하대학교 대학원, kj8565@hamail.net

\*\*\* 인하대학교 기계공학과, sbaelee@inha.ac.kr

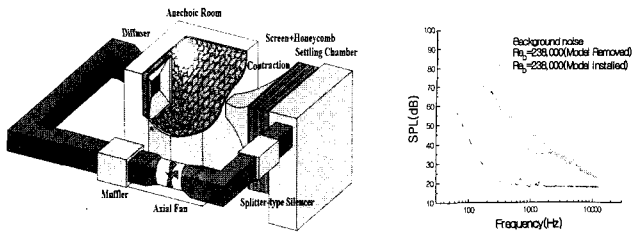


Fig.1 Schematics of closed-type, anechoic wind tunnel.

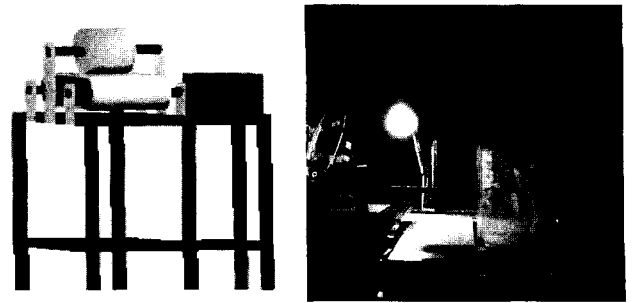


Fig.2 Rolling Road and Rotating Wheel System

최대 풍속 0~30m/sec까지 연속적인 유동속도 변화가 가능하며 난류강도는 0.25%를 유지한다.

타이어의 공력소음 및 난류유동 가시화의 실험적 연구를 수행하기 위해 무향풍동 내 Rolling Road 장치(Fig. 2)를 설치한 후 Rolling Road 위에서 이차원 실린더 Side Wall에 의한 방사소음을 측정하였다. Rolling Road 장치는 폭200mm, 길이 500mm의 벨트를 구동할 수 있는 장치로 이차원 모형 실린더를 임의의 속도로 회전시킬 수가 있다. 모형 실린더의 크기는 지름이200mm, 폭이 200mm의 강체(steel)로 제작되었으며, 실린더를 구동시키기 위해 지름 17mm의 축으로 중심에서 모터까지 연결시켰다. Rolling Road 에 사용된 모터는 BS Servo 모터로서 최대 회전속도 N=4000rev/min이며, 1rpm까지 제어가 가능하다. 모터에서 발생하는 자체소음은 흡음물질인 유리섬유를 사용해 최대한 줄였으며, 베어링과 Roller의 마찰 소음 또한 가능한 최소화하였다. Rolling Road 장치의 벨트 앞전 부분에 유동이 균일하게 흐를 수 있도록 길이 200mm, 폭 600mm, 두께 10mm의 평판을 아크릴로 제작하여 설치하였다.

유동장 내에 놓인 소음원 방사 음장을 효과적으로 측정하기 위해 방향성이 큰 마이크로폰을 사용하여 소음원의 분포를 구하였다. 본 연구에서는 음향거울(Acoustic mirror) 시스템이라고 알려진 장치를 이용하여 방사 소음을 측정한 후 주파수별 유동 소음원을 국소화시켜 비교 분석하였다. 음향거울시스템은 직경 240mm, 초점거리 500mm를 갖는 두께 5mm의 아크릴 반사판에 1/2" 마이크로폰(B&K4190)을 설치하여 제작되었고, 측정에 사용되어진 음향거울(Acoustic mirror)은 이승배등<sup>[7]</sup>에 의해서 그 성능이 검증되어진 것이며 유동장 내에서 발생하는 음원은 유동장의 영향에 의해서 회절 현상이 발생함으로 이 영향을 고려해야 한다. 본 실험에 사용된 음향 거울의 성능 계수는 1.05로 식(1)과 같은 성능 식을 갖는다<sup>[8]</sup>.

$$\Delta x = 1.05 \times y_T \frac{U_0}{a_0} \quad (1)$$

$y_T$ 는 소음원으로부터 유동의 경계면까지 거리이다. 즉, 8m/s의 유동장에서 방사소음 측정은 측정 포인트 위치보다 대략 0.61cm 후류 쪽에서 수행하였다.

방사 소음 실험을 하기 위한 풍동 자유유동 속도는 8m/sec로 하였으며, 풍속 8m/sec에서 발달하게 될 경계층에 대응하도록 모형 실린더의 회전속도는

N=1018rev/min으로 설정하였다.

회전하는 실린더의 Side wall에는 1/50mm까지 정밀 자동이송이 가능한 이송장치를 이용하여 실린더의 중심에서 상·하·좌·우 25mm간격으로 143개 초점의 방사소음을 음향 거울 시스템을 이용하여 측정하였고, SRS사의 신호 분석기(model SR780)를 통하여 저장한 후에 분석되었다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 방사소음 실험 측정 결과

무향 풍동내의 회전하는 실린더 Side Wall에서 143개의 초점(Fig. 3)에 대한 방사 소음을 음향거울(Acoustic mirror) 시스템을 이용하여 측정후 소음원을 국소화하였다. 주파수 대역은 63Hz~4kHz 구간으로 1/3 옥타브 밴드를 이용하여 데이터를 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 주파수 5Hz~6.4kHz까지 방사 소음 측정 결과를 신호분석기 신호로 데이터를 받아 평균한 결과이다. 여기서 B, C는 회전 실린더의 벨트와 닿는 부분의 전단(leading edge), 후단(trailing edge)이고 D, E는 중심, F, G는 윗부분에서의 전단과 후단을 나타낸다.

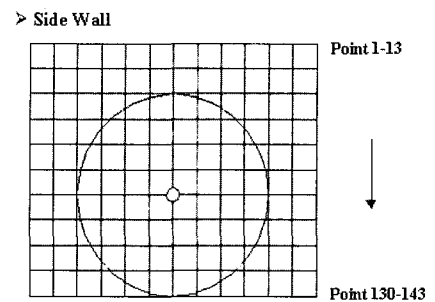


Fig.3 Measuring points of localized sources.

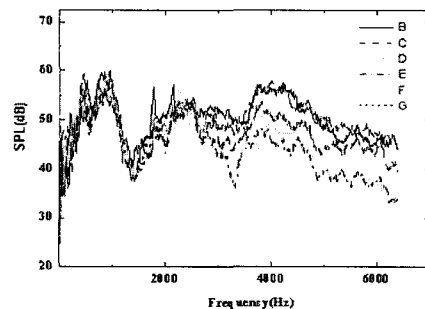


Fig.4 Sound spectra from rotating cylinder side wall.

주파수가 2000Hz 이상의 구간에서 각 위치별 데시벨(dB) 값의 차이가 10 데시벨 정도까지 난다. B, C 부분은 벨트와 트레드 면이 닿는 부분으로 전단과 후단 부분에 지배적인 소음이 나타남을 Fig. 5의 고주파수 Map에서 잘 알 수가 있다.

회전하는 실린더에 의해 발생하는 원심력에 의해 반경 방향으로 가속되어 나가는 유동의 운동이 주 유동과 합쳐지면서 실린더의 중심위치 전단(leading edge) 부분에 주 유동과 부딪치며 복잡한 와동(vortex)이 형성 된다. 그로 인해 방사 음압이 주위보다 높아져 나타남을 알 수 있다. 반면 고주파수인 2000Hz, 4000Hz인 경우, 바닥위치의 전단(leading edge)과 후단(trailing edge) 부분에 지배적인 소음이 발생하는 것으로 나타났다. 이부분에서 발생하는 끝단 와동(tip vortex)은 트레드 주변 유동과 복잡한 간섭을 일으키기 때문이다.

Fig. 5는 주파수 대역인 63Hz~4kHz 구간에서 1/3 옥타브 밴드를 이용하여 데이터를 얻어, 중요 주파수 별 Contour map으로 나타낸 결과이다. 저주파수인 63Hz인 경우 Map에서 나타난 것과 같이 실린더의 중심 전단(leading edge)부분에서 높은 데시벨 값이 나타났으며, 500Hz인 경우 중심 윗면 Side Wall 부분에서 높은 데시벨 값이 나타났다.

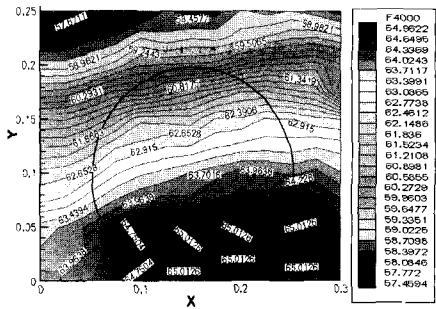
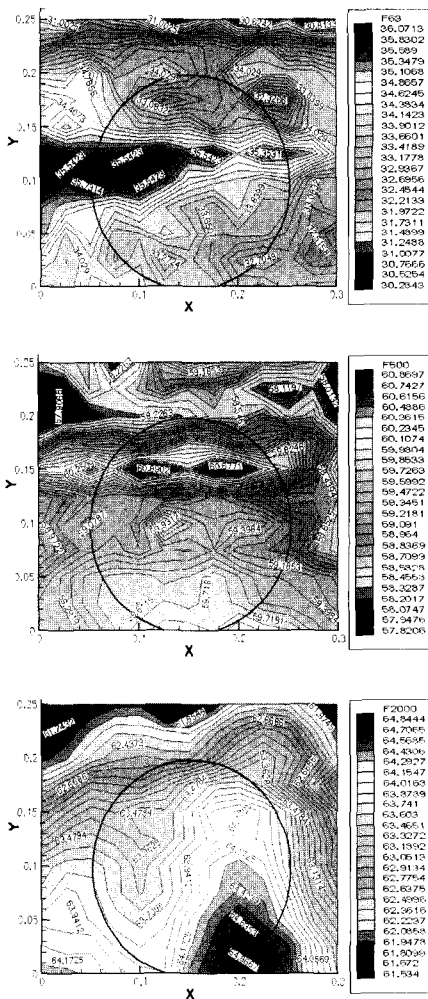


Fig.5 Radiated sound contour maps at four different frequencies

### 3.2 Side Wall에서의 속도 분포

회전하는 실린더의 Side Wall에서 주위보다 높은 음압을 갖는 부분과 그 전·후 단면에서 경계층 프로브(probe)를 이용하여 속도 분포를 측정 하였다.

아래 Fig. 6은 전·후 단면과 Side Wall에서의 주유동방향 경계층 속도 분포를 나타낸 것 이다. Fig. 6-a는 전단(leading edge)면과 주유동이 부딪치며 복잡한 와동(vortex)이 형성되는 부분에서의 속도 분포를 측정한 결과이다. 전단면과 부딪치는 면에서는 속도가 증가하다 어느 순간 감소하며 다시 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이런 현상은 전단면의 전반부에서 발생한다. 이 부분에는 주유동과 실린더의 회전 속도로 인해 비균일 난류장이 형성되며, 박리(Separation)가 발생한다. Fig. 6-d는 Line1 위치의 속도 분포를 나타낸 것으로 속도가 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있고, Line1 위치에서는 대부분 비슷한 형상의 속도 분포가 나타난다. 실린더 중심 뒤쪽 Fig. 6-b,d의 Line2와 후단(trailing edge)면에서는 매우 불규칙한 평균 속도 분포를 나타내고 있다.

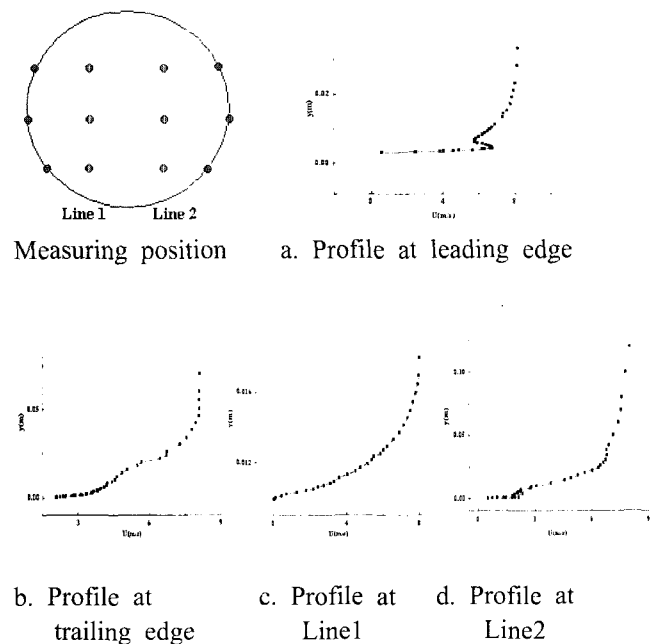
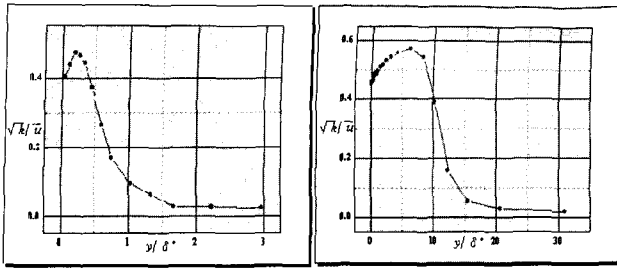


Fig.6 Boundary layer profiles on the side wall of rotating wheel



a. Profile at leading edge      b. Profile at Line1

Fig.7 Turbulence intensities on the side wall of rotating wheel

### 3.2 Side Wall에서의 난류 강도(Turbulence Intensity) 측정

Side Wall 중심 윗면에 높은 데시벨 값이 나온 부분에서 난류 강도(Turbulence Intensity)를 측정 하였다. 난류 강도 측정은 DANTEC사 제품(Probe Type55-P61)인 X자형 열선 유속계(X-hot-wire probes)를 사용하여 실시하였고, 열선 유속계의 검정은 피토크를 이용하여 풍동내 시험부에서 직접 이루어 졌다. 전압(voltage)과 속도의 검정식은 4차 다항식을 이용하여 구하였다. 측정된 아날로그 신호는 신호분석기(Hot-wire Anemometer 모델 TFC M101)를 거쳐 A/D 변환기를 통해 디지털 값들로 바뀌며 이 값은 노트북으로 저장 된다. 측정으로 얻어진 두 전압 값을 이용하여 주 방향의 속도 성분  $u$ 과 수직 방향의 속도 성분  $v$ 을 이용하여 각 위치에서의 난류 강도를 얻을 수 있었다. Fig. 7은 side wall의 전단(leading edge), Line1에서의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 여기서  $y$ 축의  $\sqrt{k}$ 는  $u$ 과  $v$ 의 RMS(root mean square)제곱의 평균이고, 주방향 평균속도로 무차원 하였다.  $x$ 축은 Side wall에서 수직한 거리를 배체두께(displacement thickness)로 무차원 하여 나타낸 것이다. Fig. 7에서와 같이 박리(Separation)의 영향으로 전단(leading edge)부분에선 난류 강도 0.4 ~ 0.5정도 까지 일정하게 증가하다 감소하는 현상이 나타났고 Side Wall 중심 윗면 높은 음압을 갖는 Line1 부분에선 0.45~0.57까지 증가하다가 감소하는 결과를 관찰 하였다.

### 4. 결과

본 연구는 타이어의 회전으로부터 발생하는 비정상 와동을 가시화하고 방사 소음을 분석, 국소화하는 실험적 연구로서 Rolling Road 위에서 회전하는 실린더의 방사소음(Radiated sound)을 주파수 별로 국소화(localization)하였다. 이 실험에서 저주파수에서는 중심 전단 부분과 윗면 Side wall 부분에서 주 유동과 실린더의 부딪침으로 발생하는 박리(Separation)에 의한 와동(vortex)에 의해 주위 보다 높은 음압이 나타났고, 고주파수에서는 실린더 회전 시 벨트와 실린더 트레드 면이 접촉되는 전단(leading edge)과 후단(trailing edge)부분에서 지배적인

소음이 발생하는 것을 실험을 통해 알 수가 있었다. 그러나 실제 타이어에서는 그 부분이 소음원 위치라고 단정할 수는 없다. Oshino<sup>[9]</sup>는 트레드의 모양 변화에 따라 소음원이 위치가 변한다는 것을 음향세기(Sound intensity) 측정을 통해 주장한 바가 있다.

Side Wall에서의 속도 분포 측정 실험을 통해 주유동과 실린더 회전 속도의 상호 작용에 의해 비균일 난류장이 형성되며 박리(Separation)와 후류(Wake)가 발생하는 것을 전단(leading edge)면의 속도 분포와 후단(trailing edge)면의 불규칙한 속도 분포를 통해 알 수 있었다. 또한 500HZ부분 가장 높은 데시벨 값을 갖는 영역에서 높은 난류 강도가 두꺼운 영역에서 나타나며 서로 상관이 높음을 알 수가 있다.

### 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] K. K. Ahuja, J. Matin, B. Miller, X. Gu, "On automobile antenna and roof rack noise control," AIAA 93-4398, 1993.
- [2] A. R. George, J. R. Callister, "Recent advances in understanding automobile aerodynamic noise," CEAS/AIAA95-004, 1995.
- [3] R. L. Panton, J. M. Miller, "Excitation of a Helmholtz resonator by a turbulent boundary layer," J. the Acoustical Society of America, 1975, Vol. 58, pp. 800-806.
- [4] 이수갑, 김재현, "자동차에 있어서의 공력 소음," 자동차공학회지, Vol. 19, No. 2, 1997. pp. 17-24.
- [5] E.-U. Saeman, J. Hald "Transient Tyre Noise Measurements Using Time Domain Acoustical Holography," S.A.E. paper 972050, , 1997, pp. 3234-3241.
- [6] I. Sakamoto, T. Tanaka, T. Miyake, "Investigation of noise source identification accuracy by acoustic holography model tire," Technical Notes, JSAE Review, Vo. 17, 1996, pp. 191-212
- [7] 이승배, 권오섭, 이창준, "난류 유동장 내에 놓인 탄성을 갖는 박판의 방사소음에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, Vol. 25, 제10호, 2001, pp. 1327-1336.
- [8] F.-R., Groche, H. Stiewitt, B. Binder, "Acoustic wind-tunnel measurements with a highly direction microphone," AIAA. J. Vol. 15, No.11, 1977, pp.1590-1596.
- [9] Y. Oshino, H. Tachibana, "Noise source identification on rolling tires by sound intensity measurement," INTRO90, Gothenburg, Sweden, 1990, pp. 31-36