

CFD/Kirchhoff 적분 방법을 이용한 자동차 타이어의 Air-Pumping 소음 예측

CFD/Kirchhoff Integral Method for the Prediction of the Air-Pumping Noise by a Car Tyre

김 성태* · 이 수갑**

Sungtae Kim, Soogab Lee

Key Words : tire(타이어), Air-pumping noise(에어 펌핑 소음), monopole theory(단극자 이론), Kirchhoff method(키르코프 방법)

ABSTRACT

The monopole theory has long been used to model air-pumped effect from the elastic cavities in car tire. This approach models the change of an air as a piston moving backward and forward on a spring and equates local air movements exactly with the volume changes of the system. Thus, the monopole theory has a restricted domain of applicability due to the usual assumption of a small amplitude acoustic wave equation and acoustic monopole theory. This paper describes an approach to predict the air-pumping noise of a car tyre with CFD/Kirchhoff integral method. The tyre groove is simply modeled as piston-cavity-sliding door geometry and with the aid of CFD technique flow properties in the groove of rolling car tyre are acquired. And these unsteady flow data are used as a air-pumping source in the next CFD calculation of full tyre-road geometry. Acoustic far field is predicted from Kirchhoff integral method by using unsteady flow data in space and time, which is provided by the CFD calculation of full tyre-road domain. This approach can cover the non-linearity of acoustic monopole theory with the aid of using Non-linear governing equation in CFD calculation. The method proposed in this paper is applied to the prediction of air-pumping noise of modeled car tyre and the predicted results are qualitatively compared with the experimental data.

1. 서 론

최근의 과학 기술의 발달은 엔진이나 다른 기계적인 소음 요소의 감소를 이루어냈으며, 이로 인하여, 타이어/노면 소음의 중요성을 더욱 크게 부각시키고 있다. 50 km/h 이상으로 운행하는 승용차나 80 km/h 이상으로 운행하는 트럭의 원거리 소음의 가장 큰 부분은 타이어 소음이 차지하며(1), 특히 차량이 가속운동을 하고 있는 경우, 타이어/노면 소음은 엔진 소음 다음으로 가장 큰 비율을 차지한다(2).

일반적인 경우, 차량 타이어의 소음 발생 미케니즘은 진동 미케니즘과 공기역학적 미케니즘으로 크게 분류된다. 진동 미케니즘에는, 타이어 옆벽의 반경방향과 접선방향 진동

모드에 의한 소음과 트레드 블록(tread block)과 노면의 접촉으로 인한 트레드 진동 소음 등이 속하며, 타이어 트레드의 홈에서 발생하는 파이프 공진 소음, 타이어 홈과 접지면 사이에서의 헬름홀츠 공진 현상에 의한 소음, 그리고 타이어가 구름운동을 하면서 타이어 홈에 갇힌 공기의 압축 효과에 의한 에어 펌핑 소음 등은 공기역학적 소음에 속한다.

이 중에서 에어 펌핑 소음에 관해서는, 타이어 홈이 지면에 접촉하면서 발생하는 공동체 부피의 변화를 이용하여 소음원을 모델링하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 이들 연구에서는, 타이어의 홈 내부의 공기가 타이어와 지면의 접촉에 의한 홈의 변형에 의하여 밀려 나가고, 다시 지면에서 떨어지면서 원상태로 회복할 때 빨려 들어오는 과정으로 에어 펌핑 현상을 모사하여, 단극자가 소음을 발생하는 미케니즘으로 모델링하여 공동체 부피의 이계도함수와 원음장과의 관계를 나타내었다(3). 단극자 모델링에 의한 소음 해석을 통한 많은 연구들이 진행되었으며, 이들 연구들이 충분히 가치가 있음을 여러 실험적 조사에 의하여 입증되었다(4).

그러나 이러한 단극자 모델링은 단순히 시스템의 부피

* 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yelorei7@snu.ac.kr
Tel: (02) 880-1902, Fax: (02) 875-4360

** 서울대학교 기계항공공학부

변화를 공기의 운동과 동일시함으로써 많은 문제점을 내포하고 있다. M. J. Gagen의 연구에 의하면(5), 타이어와 지면의 접촉 과정에서 타이어 홈의 압착 과정은 0.2ms 이내의 빠른 주기를 갖게 되며, 공기의 압축성 효과로 인해 타이어 홈 내부의 공기는 미처 다 빠져나가지 못하게 된다. 빠져나가지 못한 타이어 홈 내부 공기들은 홈의 부피 변화로 인해 압축이 이루어지며, 이 때 발생하는 섭동 성분들의 크기는 선형화를 시킬 수 있을 정도로 작지 못하다. 그로 인해 섭동 성분이 매우 작다는 단극자 모델링의 가정에 위배되며, 이렇게 섭동 성분이 큰 상황에서는 단극자 모델링으로써는 에어 펌핑 효과를 충분히 모사할 수 없게 된다. 또한, 이러한 비선형 효과를 무시할 경우, 타이어 홈의 너비에 의해 발생하는 소음장의 변화를 표현할 수 없게 된다. 따라서, 본 연구에서는, 에어 펌핑 소음원에 대하여 CFD(전산유체역학)와 음향 상사에 기초한 Kirchhoff 방법을 복합적으로 적용하여 소음 해석을 수행함으로써 에어 펌핑 소음원의 비선형성, 타이어와 접지면 사이의 기하학적 형상과 타이어 외부 유동에 의한 소음 전파 특성이 고려된 소음장을 예측하였다.

2. 에어 펌핑 소음원 모델링 및 소음 예측 기법

단극자 이론은 타이어 홈 내부 부피의 이계도함수를 알아낼 수 있으면, 선형화된 간단한 수식으로 소음 해석을 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 섭동 성분의 크기가 증가하여 비선형성이 증가하는 경우, 음장 해석의 오차가 증가하게 된다. 그러므로, 에어 펌핑 과정에서 발생하는 압착 효과를 적절히 모델링하기 위해서는 소음원의 비선형성을 고려하는 새로운 모델링이 필요하다. 이처럼 비선형성이 강한 현상을 수학적으로 간단하게 모델링하는 것은 어려움이 크다. 그러나, 소음원 근접장에 대한 직접적인 수치 해석을 통하여 어느 정도 어려움을 극복할 수 있다.

본 연구에서는 에어 펌핑 과정을 통한 타이어 홈과 노면의 압착과정을, 미닫이문 형태의 덮개와 피스톤 운동을 하는 밀면을 가지는 직육면체 공동을 통하여 모사하였다. 에어 펌핑 과정 시의 타이어 홈의 부피 변화는 공동 밀면의 피스톤 운동을 통하여 고려되었으며, 타이어 회전에 의하여 노면이 타이어 홈의 공기 출입구를 좁히는 과정은 미닫이문 형태의 공동 윗면이 공동 밀면의 피스톤 운동과 같은 주기를 가지며 닫혔다가 열리는 과정을 통해 모사되었다.

위의 모델링에 대하여 선형화하지 않은 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하여 소음원의 비선형성을 고려하였으며, 피스톤 속도를 공기의 속도로 대체하지 않고 직접적인 에어 펌핑 소음원의 유동 데이터를 얻어내어, 단극자 이론에서 발생할 수 있는 오차요인을 감소시켰다.

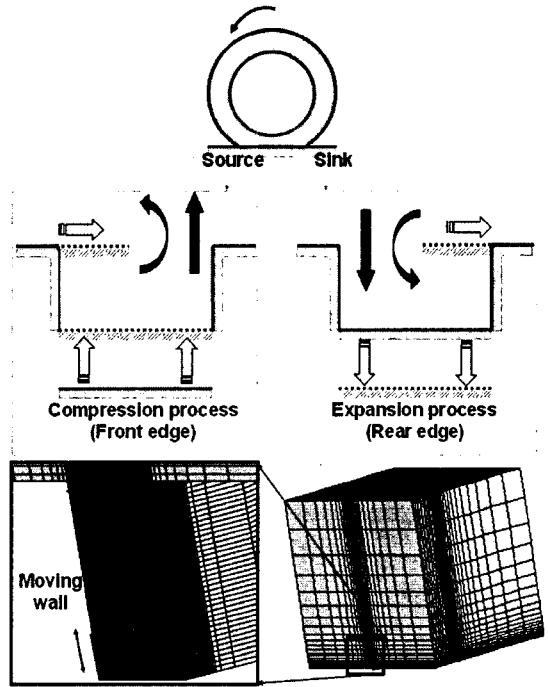


그림 1. 피스톤-공동-미닫이문 모델링의 모식도 및 계산 영역

에어 펌핑 소음원 모델링에 대한 수치 해석을 통하여 타이어 홈 출구에서의 유동 정보를 얻을 수 있으며, 이를 통해 얻어진 데이터들을 이용하여 타이어와 지면이 포함된 전체 영역에서의 유동 해석을 재차 수행하였다. 이 때 타이어 홈 출구에서의 유동 정보는 전체 영역에 대한 유동 해석에서 소스항으로 포함되어, 타이어와 접지면 사이의 기하학적 형상에 의한 소음원의 회절, 간섭 등의 효과를 모두 포함하는 음장 해석을 가능하게 한다.

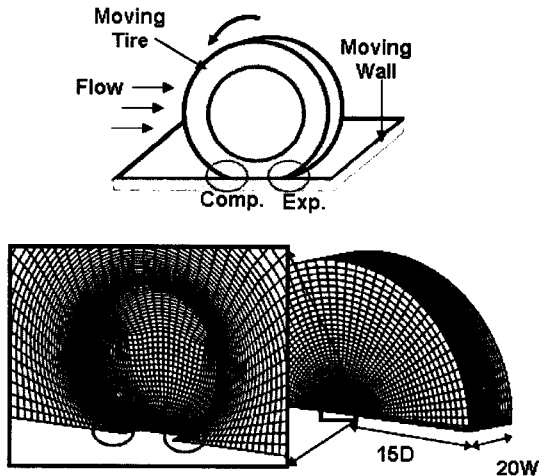


그림 2. 타이어와 노면을 포함한 전체 계산 영역

두 번에 걸친 수치 해석을 통하여 얻어진 유동장 데이터를 이용하여, 적분면을 구성한 후, 음향 상사법에 기초한 키르코프(kirchhoff) 적분 방법을 적용하면 원음장에서의 에어 펌핑에 의한 소음을 예측할 수 있다.

또한, 타이어와 접지면 사이의 기하학적 형상을 고려한 수치 해석을 수행하는 경우에, 타이어 외부 유동효과를 고려하면, 타이어 외부의 유동에 의한 에어 펌핑 소음의 전파 특성의 변화를 고려할 수 있다.

3. 수치 기법

피스톤-미닫이문-공동 모델링을 통한 에어 펌핑 과정에서 타이어 홈 내부의 유동장 해석과 타이어와 접지면이 고려된 전체 영역에서의 유동 해석 시에는 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 사용하였으며, 공간 차분 기법으로는 QUICK 기법을, 시간 적분 기법으로는 완전 내재적 기법을 사용하였으며, PISO 알고리즘을 이용하여 비정상 계산을 수행하였다.

본 연구에서는, 움직이는 타이어의 에어 펌핑에 의한 원음장에서의 소음 예측을 위하여 선형 키르코프 방법을 적용하였다(5). 전산공력음향학을 통하여 얻어진 근접장에서의 유동 정보는 키르코프 방법의 input 값으로 사용되어 진다. 소음원을 포함하는 적분면 S 에 의한 공간상의 한 점, \vec{x} 에서의 음압 p 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{4\pi} \oint_S \left[\frac{p}{r_0^2} \frac{\partial r_0}{\partial n_0} - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial n_0} + \frac{1}{cr_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{\partial r_0}{\partial n_0} - M_\infty \frac{\partial x_0}{\partial n_0} \right) \right] dS \quad (1)$$

여기서, \vec{n} 은 적분면 S 의 법선 벡터 이며, 아랫첨자 0 은 변수의 Prandtl-Glauert 변환을 의미하며,

$$x_0 = x, y_0 = \beta y, z_0 = \beta z, \text{ and } \beta = \sqrt{1 - M^2} \quad (2)$$

Prandtl-Glauert 변환은 일정한 속도를 가지는 유동장에서 음파의 전파 경로를 보정해 준다.

주어진 관측 시간, t 에서 모든 변수들은 지연 시간, $t_r = t - t_a$ 에서 계산되며, 여기서 t_a 는 음파가 관측자까지 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다.

$$t_a = \frac{r_0 + M(x - x_s)}{c\beta^2} \quad (3)$$

또한, r_0 는 Prandtl-Glauert 좌표계에서 소음원과 관측자 사이의 거리를 나타낸다.

$$r_0 = \sqrt{(x - x_s)^2 + \beta^2[(y - y_s)^2 + (z - z_s)^2]} \quad (4)$$

식 (1)에서 대괄호 안의 첫 번째 항은 기하학적 형상에 의한 음파의 확장을 나타내며, 두 번째와 세 번째 항은 음파의 파형을 나타낸다. 또한 일정한 속도를 가지는 외부 유동에 의한 음장의 변화는 세 번째 항에서 표현된다.

4. 결과 및 토의

회전하는 타이어의 에어 펌핑 소음을 예측하기 위하여 60 km/h 의 속도로 움직이는 원형 타이어를 고려하였다. 타이어의 반경은 30 cm 폭은 18 cm 라고 가정하였다. 이때 타이어는 횡 방향 그루브(groove) 형태의 트래드 패턴을 가지는 것으로 가정하였으며, 깊이는 7 mm 길이는 5 mm, 너비는 타이어의 폭과 같은 18 cm 이고 그루브는 옆면이 모두 닫힌 공동 구조의 형상을 가진다고 가정하였다. 따라서 타이어 회전에 의한 압착 과정에서 트래드 홈 내부의 공기는 공동 윗면을 통하여만 빠져 나갈 수 있는 포켓 타입(transverse pocket type)으로 가정하였다. 타이어의 원 주 방향을 따라 같은 트래드 패턴이 100번 반복된다고 가정할 때 에어 펌핑 과정이 일어나는 주기는 1.44×10^{-3} (s) 가 되며, 이 시간 중에 3.01×10^{-4} (s) 동안에는 타이어 홈의 압착 과정이 일어나게 된다. 따라서 타이어의 운동 시 진행 방향에서는 위의 시간 동안에 트래드 홈 내부의 부피가 10 % 감소하는 압축 운동을 하게 되며, 반대 방향에서는 줄었던 부피가 다시 증가하는 팽창 과정을 겪게 된다. 이 때 공동의 윗면에서는, 지면 효과를 고려하기 위하여 미닫이문 형태의 움직이는 벽면이 피스톤 운동의 주기와 같은 시간 동안에 진행 방향 쪽에서는 닫힌 운동을 반대 방향 쪽에서는 열림 운동을 하게 된다.

위에서 구해진 유동 정보를 이용하여 타이어와 접지면을 고려한 전체 영역에서 유동 해석을 수행하였다. 타이어 형태는 실린더 형상의 벽면으로 모사하였으며, 타이어 진행 속도에 따른 각속도를 가지고 회전하는 벽면 조건을 주었으며, 노면을 고려하기 위해 아랫면에 타이어 진행 속도와 같은 속도를 가지는 움직이는 벽면 조건을 주었다.

일반적으로 실험적 방법에 의하여 에어 펌핑 미케니즘을 연구할 경우, 회전하는 드럼 위에 타이어를 놓고 측정을 수행하게 되므로, 실제 차가 주행하는 경우 발생하는 외부 유동장에 의한 효과는 배제된다. 따라서, 본 연구에서는 외부 유동 속도를 주지 않고 정지된 외부 유동 조건 하에서 소음 예측을 수행하여 실험값과 정성적으로 비교 연구를 수행하였으며, 또한 타이어 주행 속도와 같은 외부 유동 속도를 주어 타이어 외부의 유동장에 의한 에어 펌핑 소음의 전파 특성을 비교하였다.

그림 3.에서 타이어의 회전축을 따라 타이어의 직경의 15 배에 해당하는 거리만큼 떨어져 있는 지점에서의 음압의 시간에 대한 변화를 그래프로 나타내었다. 타이어의 트래드 홈이 압착과 팽창 과정을 거쳐 다음 압착, 팽창 과정까지 도달하는 한 주기 동안에 음향파는 두 주기를 가지게 됨을 알 수 있다. 또한, 타이어 형상에 의한 외부 유동이 있는 경우와 없는 경우 기본적으로 같은 주파수를 가짐을 알 수 있다. 그러나, 외부 유동이 존재하는 경우에는 외부 유동에 의하여

음압 크기가 40 % 정도로 감소함을 알 수 있으며, 실린더 형상의 타이어에 의하여 평균값이 음(-)압을 가짐을 알 수 있다.

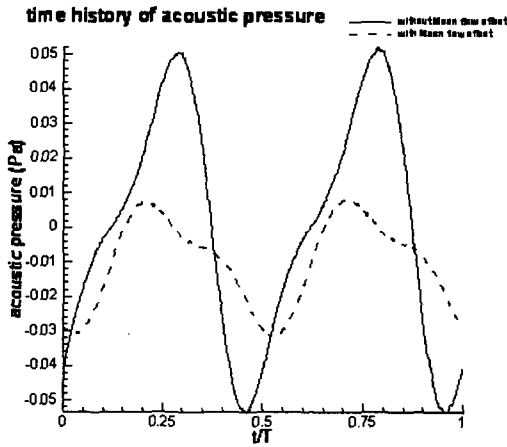


그림 3. 타이어 회전 축 방향으로 15 D 거리에 위치한 지점에서의 음압 변화

그림 4.에서 위의 음압의 변화를 푸리에 변환한 결과를 이용하여 실험값과 비교하였다. 실험은 Ejsmont et al. 에 의하여 1984년에 행해진 것으로 실험실에서 safety walk surface를 장착한 드럼 위에서 행해진 것으로 주행 속도는 70 km/h 로 설정되었다(3). 약 2500 Hz까지의 저주파수 영역에서는 예측값이 실험값에 비해 약 20 dB 정도의 오차를 보이는데, 이는 일반적인 차량 속도와 타이어 소음 음압 레벨의 상관관계를 고려할 때 속도 차에 기인하는 것이라 판단할 수 있다. 또한 고주파수의 경우 자동차의 공력 소음의 주된 주파수 영역은 약 2~3 kHz 이므로 크게 문제시 되지 않는 것으로 판단된다.

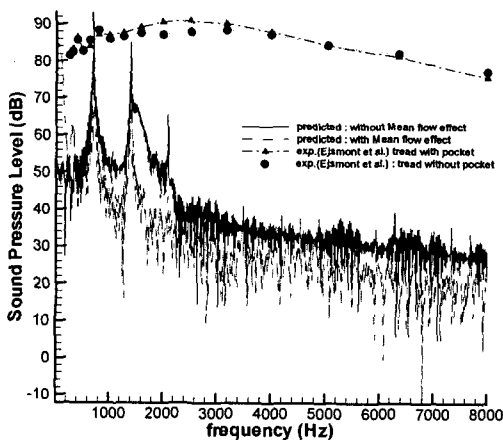


그림 4. 실험값과 예측값의 주파수 성분 비교

포켓 타입을 가지는 실험값과 외부 유동 효과가 고려되지 않은 예측값을 정성적으로 비교해 보면, 두 결과 모두 트레드 패턴에 의하여 생기는 주파수 외에 1~2 kHz 영역의 주파수 성분의 음압 레벨이 크게 나오는 것을 확인할 수 있으며, 이는 일반적으로 에어 펌핑 소음의 특성 주파수 영역으로 알려져 있다.

외부 유동이 존재하는 경우에는 2 kHz 근방의 주파수 성분의 음압 레벨을 감소시키는 경향을 볼 수 있는데, 이는 타이어와 노면의 기하학적 형상에 의하여 발생하는 확장관 효과가 외부 유동에 의하여 감소하기 때문에 나타나는 현상이라 판단된다.

4. 결론

회전하는 타이어에 의한 에어 펌핑 소음을 예측하기 위하여 전산유체역학과 키르코프 적분 방법을 이용한 소음 예측 방법을 제안하였다. 이 방법에 의하여 단극자 이론이 가지고 있는 한계를 극복할 수 있으며, 에어 펌핑 메커니즘의 비선형성이 고려된 소음 예측을 수행할 수 있다. 본 방법은 실험적 방법에 비하여 비용과 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있으며, 보다 정교한 격자를 사용할 경우 타이어 뿐만이 아닌 전체적인 차량 형상에서의 소음 예측이 가능하여 저소음 디자인에도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 특정기초연구사업 R01-2001-000-00401-0 에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) M. Heckl, 1986, "Tyre noise generation", Wear 113, pp. 157~170.
- (2) Ulf Sandberg and Jerzy A. Ejsmont, 2002, Tyre/Road Noise Reference Book, INFOMAX, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden.
- (3) R. E. Hayden, 1971, "Roadside noise from the interaction of a rolling tire with road surface", Proceedings of the Purdue Noise Conference, pp.62~67.
- (4) K. Plotkin, W. Fuller, and M. Montroll, 1979, "Identification of tire noise generation mechanisms using a roadwheel facility", International Tire/Road Noise Conference, pp.127~141.
- (5) M. J. Gagen, 1999, "Novel acoustic sources from squeezed cavities in car tires", J. Acoust. Soc. Am. 106(2), pp. 794~801.