

# 자동차 타이어의 Air-pumping 소음 예측을 위한 수치적 기법 Numerical Method for Prediction of Air-pumping Noise by Car Tyre

김 성 태\* · 정 원 태\*\* · 정 철 응\*\*\* · 이 수 갑†

Sungtae Kim, Wontae Jeong, Cheolung Cheong and Soogab Lee

(2005년 2월 1일 접수 : 2005년 6월 8일 심사완료)

**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. 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 Non-linear governing equation in CFD calculation. The method proposed in this paper is applied to the prediction of air-pumping noise of simply modeled car tyre and through the predicted results, the influence of nonlinear effect on air-pumping noise propagation is investigated.

## 1. 서 론

일반적인 경우, 차량 타이어의 소음 발생 메커니즘은 진동 메커니즘과 공기역학적 메커니즘으로 크게 분류된다. 진동 메커니즘에는, 타이어 옆벽의 반경방향과 접선방향 진동모드에 의한 소음과 트래드 블록

(tread block)과 노면의 접촉으로 인한 트래드 진동 소음 등이 있으며, 트래드의 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 속하며, 이중 헬름홀츠 공진 소음과 파이프 공진 소음은 에어-펌핑 소음의 특별한 경우로 분류할 수 있다.<sup>(1)</sup>

에어-펌핑 소음에 관해서는, 타이어 홈이 지면에 접촉하면서 발생하는 공동체 부피의 변화를 이용하여 소음원을 모델링하는 연구가 많이 이루어져 왔다.<sup>(2)</sup> 이들 연구에서는 단극자가 소음을 발생하는 메커니즘으로 에어-펌핑 소음을 모델링하여 공동체 부피의 이

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : solee@plaza.snu.ac.kr

Tel : (02) 880-7384, Fax : (02) 876-4360

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\* 정희원, 한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동실

계도함수와 원음장 음압과의 관계를 나타내었다. 지금까지 단극자 모델링에 의한 소음 해석을 통한 많은 연구들이 진행되었으며, 이들 연구들이 충분히 가치가 있음이 여러 실험적 조사에 의하여 입증되었다.<sup>(3,4)</sup>

그러나 이러한 단극자 모델링은 타이어 홈의 압축 과정에서 발생하는 타이어 홈 내부 공기의 섭동 성분이 매우 작다는 가정 하에 선형화된 지배 방정식을 사용하며, 단순히 시스템의 부피 변화를 공기의 운동과 동일시함으로써 인해 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러므로 에어-펌핑 과정에서 발생하는 압착 효과를 적절히 모델링하기 위해서는 소음원의 비선형성과 지면과 타이어에 의한 소음의 반사, 회절 등을 적절히 고려하는 새로운 모델링이 필요하다.

따라서, 이 연구에서는 에어-펌핑 소음원에 대하여 CFD(전산 유체 역학)와 음향 상사에 기초한 키르코프(Kirchhoff) 적분 방법<sup>(5)</sup>을 복합적으로 적용하여 에어-펌핑 소음원의 비선형성, 타이어와 접지면 사이의 기하학적 형상에 의한 소음 전파 특성을 고려할 수 있는 소음 예측 기법을 제안하였다. 또한, 제안된 기법에 의한 예측 결과와 선형 소음원 모델링을 통한 결과를 비교함으로써 에어-펌핑 소음의 비선형성에 대하여 살펴보았다.

## 2. 에어-펌핑 소음원 모델링 및 소음 예측 기법

### 2.1. 에어-펌핑 소음원 모델링

Hayden(1971)<sup>(2)</sup>에 의해 제안된 에어-펌핑 이론에서는, 타이어 홈이 노면에 접촉하는 순간 타이어 홈의 압착으로 인하여 타이어 홈 내부의 부피가 감소하여 내부의 공기들이 순간적으로 타이어 홈 외부로 유출되며, 타이어와 노면과의 접촉이 해제되는 순간 타이어 홈 내부의 부피 증가로 인해 타이어 외부의 공기가 타이어 홈으로 다시 유입된다. 이러한 일련의 과정을 거치는 동안의 공기의 유출·입은 타이어/노면 소음의 한 소음원으로 작용하게 된다. 한편, 고전 음향학 이론에서 구의 지름보다 매우 작은 진폭을 가지며 박동(pulsating)하는 표면을 갖는 구에 의해 발생하는 원음장은 다음과 같이 표현된다.

$$p(\vec{x}, t) = \frac{a^2}{r} \rho_0 \frac{\partial u_a}{\partial t} (t - \frac{r-a}{c}) \quad (1)$$

여기서,  $a$ ,  $r$ ,  $u_a$ 는 각각 구의 반지름과 관측자의

위치, 구 표면에서의 반경 방향 속도를 나타내며 구의 반지름은 관측자의 위치에 비해 매우 작다고 가정한다. 이 때 구의 부피 변화율은  $\frac{\partial V}{\partial t} = 4\pi a^2 \frac{\partial a}{\partial t} = 4\pi a^2 u_a$ 이 되므로, 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi r} \rho_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} (t - \frac{r-a}{c}) \quad (2)$$

식 (2)는 단극자 소음원에 의하여 발생하는 음압과 단극자 부피의 이계도함수와의 관계를 표현한다. Hayden에 의하여 제안된 단극자 이론에서는 식 (2)를 이용하여 타이어 홈의 부피 변화를 통하여 에어-펌핑에 의한 원음장을 해석한다.

그러나 Gagen<sup>(6)</sup>의 연구에 의하면, 타이어 홈의 압착 과정에서 0.2 ms 정도의 짧은 시간에 10% 정도의 부피 감소를 하면 타이어 내부의 공기는 11% 정도의 밀도 상승을 나타내며, 50% 정도의 부피 감소를 보이면 밀도는 2 배로 증가한다. 이러한 밀도 변화는 고전 음향학에서 사용하는 섭동 성분이 매우 작다는 가정에 위배되며 선형화된 지배 방정식을 사용할 수 없게 하며 이로 인해 선형화된 파이프 공진 소음 이론 및 Hayden의 에어-펌핑 이론은 타당성을 잃게 된다. 단극자 이론에서는 에어-펌핑으로 인한 타이어 홈 내부의 공기 유출·입 과정을 공동 내부의 피스톤이 움직이는 과정으로 모사한다<sup>(7)</sup>. 하지만, 단극자 모델링에서의 피스톤은 공동 내부의 부피 변화를 주기 위한 장치로써, 공동 내부의 공기 압축에는 기여하지 않는다. 이는 단극자 이론에서 피스톤의 운동에 의하여 발생하는 공기의 속도 성분을 부피 변화를 주기 위해 움직이는 피스톤의 속도로 대체하기 때문에 발생한다. 피스톤 내부의 공기들은 피스톤 움직임에 대하여 즉각적인 반응을 나타내지 않으며, 피스톤 움직임에 대해 시간 지연을 가지며 움직이게 된다. 이는 공기의 압축성에 기인하는 것으로 일반적인 피스톤 유동에서 잘 나타난다.

이러한 비선형성을 고려하기 위하여 Gagen의 연구에서는 타이어 그루브(groove)를 모사하기 위하여 파이프 형태를 가지는 직육면체 형상의 홈을 가정하였으며, 선형화하지 않은 지배 방정식을 통하여 유도된 압축성 음파 방정식(squeezed acoustic wave equation)을 통해 근사해를 제시하였다. 또한 이를

수치해와 비교하여 에어-펌핑 메커니즘에서의 압축성 효과는 선형화된 지배 방정식을 통해 근사화할 수 없으며 에어-펌핑 메커니즘이 강한 비선형성을 가지고 있음을 보였다. 이를 통해 선행 연구자들의 실험 결과<sup>(3)</sup>에서 보고된 타이어 그루브의 넓이의 변화에 따른 에어-펌핑 소음의 비선형성은 에어-펌핑 과정의 비선형적인 압축에 기인한다고 주장하였다.

그러나 Gagen의 연구에서도 타이어 홈 에어-펌핑 과정에서의 지면 효과는 고려되지 않았다. 이는 피스톤 운동에 의하여 압착된 타이어 홈 내부의 공기가 외부로 나가는 유출·입구의 면적 변화가 고려되지 않는 형상을 가정하여 에어-펌핑 과정을 모사하였기 때문에 발생한다. 그러나 실제 에어-펌핑 과정에서는 타이어 홈이 지면과 접촉을 하면서 타이어 홈의 부피 변화와 함께 타이어 홈 외부로의 유출·입구 면적이 감소하게 되며, 다시 지면과의 접촉이 떨어지는 팽창 과정의 경우에는 유출·입구의 면적이 늘게 된다. 이러한 경계 조건의 변화가 전체 유동장의 물성치 변화에 근본적인 영향을 미친다는 것은 자명한 일이다. 일부 연구자<sup>(4,8)</sup>들은 이 현상을 헬름홀츠 공진 현상으로 보고 에어-펌핑과 다른 카테고리에서 연구를 수행

하고 있다. 이들 연구에서는 헬름홀츠 공진 현상을 타이어 트래드의 진동이나 타이어 주위의 난류 유동 소음 그리고 에어-펌핑 소음등에 의하여 발생된 트래드 홈 내부 공기의 유동이 mass-spring-damping 시스템을 형성하는 것으로 모델링하고 있다. 그러나 압축성 유동 특성을 고려한 모델링을 사용하는 경우에는, 외부 경계 조건의 변화로 인한 내부 유동의 유동 특성 변화가 에어-펌핑 과정에서 발생하는 소음장에 지배적인 역할을 할 것이며, 헬름홀츠 공진 현상을 에어-펌핑 과정에서 분리시킬 수 없게 된다. 따라서 이 논문에서는 비선형성을 고려한 에어-펌핑 소음의 발생 메커니즘에 대한 연구를 수행하기 위하여 에어-펌핑 메커니즘에서 파이프 공진 현상은 배제시켰으며 헬름홀츠 공진 현상은 에어-펌핑 과정에 포함하였다.

이 연구에서는 에어-펌핑 과정을 통한 타이어 홈과 노면의 압착과정을 미닫이문 형태의 뒷개와 피스톤 운동을 하는 밀면을 가지는 직육면 공동을 통하여 모사하였으며 수치 해석을 통하여 에어-펌핑 과정 시의 타이어 홈 내부의 유동 정보를 예측하였다. Fig. 1에서 나타냈듯이 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 모사하였다.

타이어 홈이 압축 과정을 거쳐 지면에 완전히 압축된 이후에는 타이어 홈 내부의 부피 변화는 더 이상 발생하지 않으며 타이어 홈이 지면에서 떨어지게 되는 순간 이후에 타이어 홈 내부의 부피는 다시 원래대로 돌아가는 과정을 겪는다. 따라서 피스톤의 압축과 타이어 홈 윗단의 벽면 경계 조건은 압축과 미닫이문의 닫힘 동작을 수행한 후 타이어 회전 속도에 따라 일정 시간 정지해 있는 상태를 유지시켰으며 다시 팽창과 미닫이문의 열림 동작을 수행하였다.

## 2.2 CFD/Kirchhoff 방법을 이용한 소음 예측 기법

에어-펌핑 소음원 모델링에 대한 유동 해석을 통하여 얻어진 유동 변수값들은 타이어와 지면이 고려된 전체 음장에서의 유동 해석 과정에서의 입력값으로 사용되어진다. 피스톤의 압축 과정에서의 유동 변수값들은 타이어 접지면 앞전의 타이어 그루브의 부피 감소 과정에서의 소음원에 의한 섭동 성분으로 고려

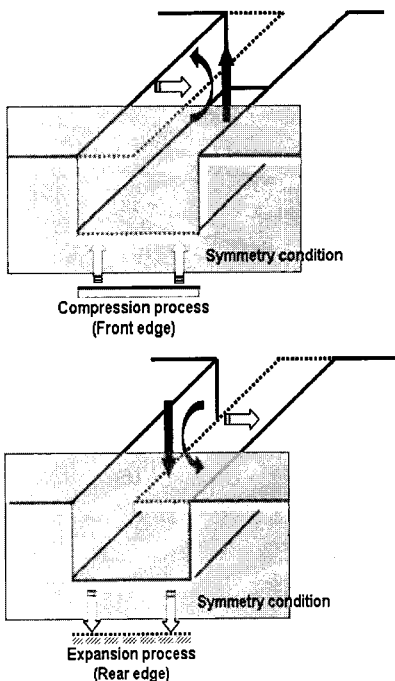


Fig. 1 Schematic diagrams of the piston-cavity-sliding door model and B.C.s of numerical simulation

되며, 팽창 과정 시의 유동 변수값들은 타이어 접지면의 뒷전 타이어 그루브의 부피 회복 과정에서의 섭동 성분으로 고려된다.

Fig.2에서 타이어와 지면이 고려된 전체 유동장 해석에 대한 격자 시스템의 모식도를 나타내었다. 타이어는 가상적인 실린더로 가정하였고 타이어의 회전에 따른 실린더 벽면의 회전 조건을 주었으며, 실린더의 상대 좌표 체계 입장에서 아래 노면은 타이어

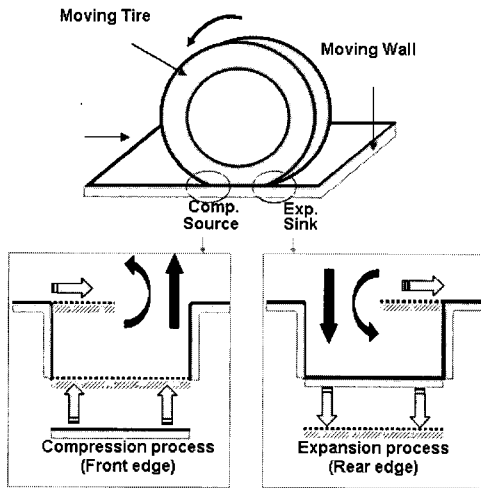


Fig.2 Schematic diagrams of full domain grid system and B.Cs of numerical simulation

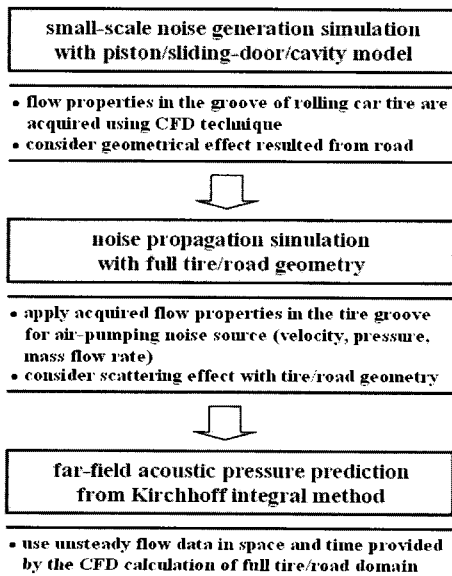


Fig.3 Flow chart of CFD/Kirchhoff method for the prediction of the air-pumping noise

진행 방향과 반대 방향으로 움직이는 벽면을 고려하였다. 이 때 타이어와 지면과의 접촉이 일어나는 셀 (cell)에서 소음원 모델링 해석 시에 계산된 유동 변수값을 소스(source)항으로 추가하여 질량 유량과 속도항을 계산 과정에서 고려하였다.

위의 같이 비선형 피스톤-공동-미닫이문 모델을 이용하여 수치적인 방법을 통해 에어-펌핑 소음을 예측하는 경우, 타이어와 지면 효과가 포함된 계산 영역에서 주행하는 타이어의 유동 조건을 고려함으로써 에어-펌핑 메커니즘에 의하여 발생하는 소음을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 소음의 전파 과정에서 일어나는 회절과 반사, 확장관 효과 등을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다. 타이어와 지면이 고려된 전체 유동장에서의 유동 해석을 통해 얻어진 유동 변수값들은 타이어에 의하여 발생하게 되는 에어-펌핑 소음, 확장관 효과, 타이어 외부의 난류 유동에 의한 소음 등이 고려된 근접장 결과로써 사용할 수 있다. 따라서, 위의 유동 해석 결과를 이용하여 키르코프 적분면을 구성하여 키르코프 적분 방법을 사용하여 원 음장에서의 에어-펌핑 소음의 전파 특성을 살펴볼 수 있다. Fig.3에서 예측 기법의 플로우 차트(flow chart)를 나타내었다.

### 3. 주행하는 타이어의 에어-펌핑 소음 예측

실제 자동차가 주행하는 동안 타이어를 기준으로 하는 상대 좌표계를 적용하는 경우, 타이어를 향해 자동차 주행 속도와 같은 속도를 가지는 균일한 속도의 유동장을 고려해야 한다. 그러나 타이어의 외부 유동은 타이어 주위에 난류 유동장을 형성하여 새로운 소음원으로 작용하게 되므로, 난류 소음원과 에어-펌핑 소음원의 분리를 위하여 타이어 외부 유동이 소음 전파에 미치는 영향은 고려하지 않았다.

극자 이론을 통해 에어-펌핑 소음을 예측하는 경우, 타이어와 노면에 의해 발생하는 방사 패턴을 구할 수 없다. 따라서 단극자 이론의 가정에 따라 타이어 그루브의 부피 변화가 그대로 타이어 그루브 내부의 공기 유동으로 나타나는 선형 모델링을 통한 예측값을 구하여 제안된 비선형 에어-펌핑 소음원 모델링의 결과와 비교하였다. 피스톤-미닫이문-공동 모델링을 통한 에어-펌핑 과정에서의 타이어 홈 내부의 유동장 해석과 타이어와 접지면이 고려된 전체 영역

에서의 유동 해석 시에는 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 사용하였으며,  $k-\epsilon$  난류 모델링을 사용하였다. 공간 차분 기법으로는 QUICK 기법을, 시간 적분 기법으로는 완전 내재적 기법을 사용하였으며, PISO 알고리즘을 이용하여 비정상 계산을 수행하였다.

### 3.1 비선형 에어-펌핑 소음원 모델링 수치 해석

주행하는 타이어에 의한 에어-펌핑 소음을 예측하기 위하여 60 km/h의 속도로 움직이는 원형 타이어를 고려하였으며 타이어의 반경(0.5 D)은 30 cm, 폭(W)은 18 cm라고 가정하였다. 이 때 타이어는 횡 방향 그루브 형태의 트래드 패턴을 가지는 것으로 가정하였으며, 깊이(d)는 7 mm, 길이(L)는 5 mm, 너비는 타이어의 폭과 같은 18 cm이고 그루브는 옆면이 모두 닫힌 공동 구조의 형상을 가진다고 가정하였다. 이러한 포켓 타입(transverse pocket-type) 형태의 적용은 파이프 공진 현상을 배제시켜 헬름홀츠 공진 현상이 포함된 비선형 에어-펌핑 소음 발생 메커니즘을 분리시키는 동시에 타이어 옆면으로 공기의 유출·입을 줄임으로써 에어-펌핑 메커니즘의 비선형 효과를 연구하기에 유리하다.

선형 연구<sup>(9)</sup>에 의해 보고된 바에 따라 에어 펌핑 과정에서 타이어 홈 내부의 부피는 전체 부피의 10%만큼 감소하며 타이어 홈의 부피 변화는 조화함수 형태라 가정하였다. 선형 단극자 이론을 적용하여 공기의 압축성 효과를 배제하는 경우에는 타이어 그루브로 모사한 직육면 공동의 아래 바닥면의 피스톤 운동은 즉각 타이어 그루브 내부의 공기 유동으로 전파되는 비압축성 유동의 성질을 가지게 된다. 따라서 일반적인 선형 단극자 이론의 에어-펌핑 모델링은 피스톤 운동에 의한 바닥면의 속도를 타이어 홈 내부의 공기 유동의 속도로 정의하여 모델링하였다. 그러므

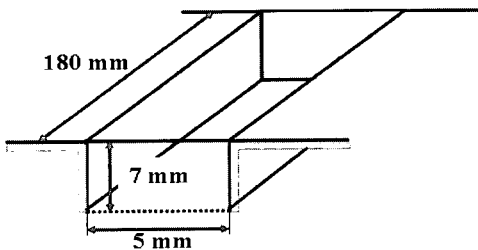


Fig. 4 Schematic diagram of the tire groove geometry

로 선형 단극자 이론을 적용하여 타이어와 지면 효과가 고려된 전체 유동장에서의 유동 해석 과정에서의 경계 조건은 피스톤 운동에 의하여 구해진 속도를 통해 이론적으로 구하여지며 모델링에 대한 유동 해석은 수행할 필요가 없다. Table 1에서 적용된 가정 및 계산 조건을 정리하였다.

Fig. 5에서 계산에 사용된 격자 시스템을 나타내었다. 계산에 사용된 전체 격자의 노드(node) 개수는 406,172 개이며, 셀(cell) 개수는 384,000 개이다. 외부 유동을 고려하지 않았으므로 원방 경계 조건은 대기압의 압력 경계 조건을 사용하였으며, 타이어와 지면이 고려된 전체 유동장 해석 시에 타이어의 대칭면을 따라 대칭 경계 조건을 사용하였으므로, 소음원 모델링의 경우에도 대칭 경계 조건을 적용하여 타이어 그루브의 절반만 해석하였다.

Fig. 6에서 3차원 비선형 피스톤-공동-미닫이문 모델링의 대한 유동 해석 결과를 나타내었다. 각각의 단면은 타이어 그루브의 중심면으로부터 각각 20, 40, 60, 80 mm 떨어진 XY 평면(대칭면)과 평행한 면에서의 압력 섭동 분포를 나타낸 것이다. 피스톤이 압축하면서 미닫이문이 타이어 홈 내부 공기의 유출·

Table 1 Assumptions and computational conditions

Tire radius	0.3 m
No. Of tread pitch	78
Car speed	60 km/h
Tread passing freq.	690.1 Hz
Cavity comp./exp. Period ( $T_p$ )	$3.000 \times 10^{-4}$ s
Air-pumping period ( $t$ )	$1.449 \times 10^{-3}$ s
Total volume change	$7 \times 5 \times 180 \times 0.1 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup>
Variation of cavity depth in compression process	$d - d \times 0.1 \times \left\{ \frac{1}{2} \times (1 - \cos(\pi t / T_p)) \right\}$

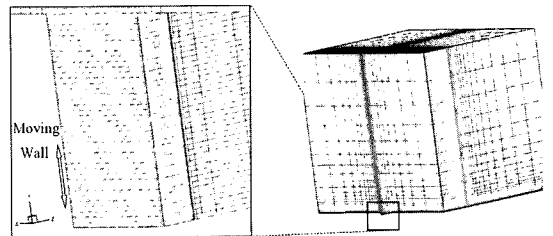
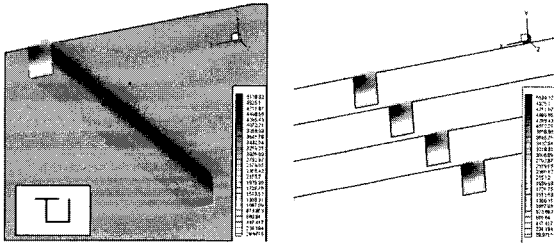


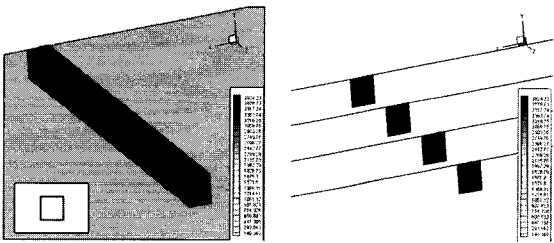
Fig. 5 Computational mesh for air-pumping source model simulation

입구 면적을 줄이므로, 일반적인 피스톤-공동 모델링에 비하여 더 강한 압축이 일어난다. 그리고 출구 방향으로 편중되어 내부 공기가 빠져 나가게 되므로 유동의 대칭성이 깨어지며 미닫이문 방향으로 강한 와류 유동이 발생하게 된다. 이는 실제 타이어의 에어-펌핑 과정에서는 지면에 의하여 발생할 수 없는 방향의 와류 유동이므로 단순히 모델링 자체만을 보면 에

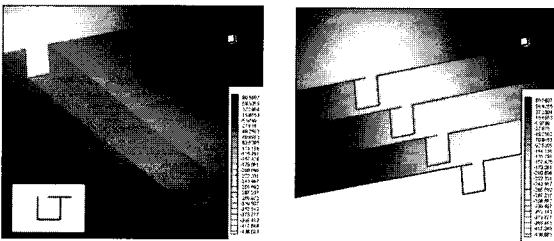
어-펌핑 소음원 모델링으로는 적합하지 않을 수 있으나 타이어와 지면을 계산 영역에 고려하여 다시 수치 계산을 수행하는 경우에는 이러한 와류 유동의 발생이 노면으로 고려된 벽면 경계 조건에 의하여 제거될 수 있으며, 실제 타이어의 에어-펌핑 과정에서도 이와 유사한 형태의 거동을 보인다. 또한 3차원 타이어 그루브에 의한 효과도 나타난다. 우선 압축 과정에서는 타이어의 폭 방향의 압력 분포는 거의 일정함을 보이지만 팽창 과정에 있어서는 Fig.6(c)~(d)에서 보듯이 팽창 초기에 타이어 그루브 끝단에서 강한 와류가 발생하였으나 팽창을 계속 수행하면서 타이어 대칭면 쪽에 강한 와류가 발생하게 된다. 이는 타이어 그루브 양 끝단에서의 벽면 경계 조건에 의하여 발생하며 이러한 소음원의 거동은 타이어 폭 방향의 그루브 길이에 따른 에어-펌핑 소음원의 비선형성을 설명해 줄 수 있는 것으로 판단된다.



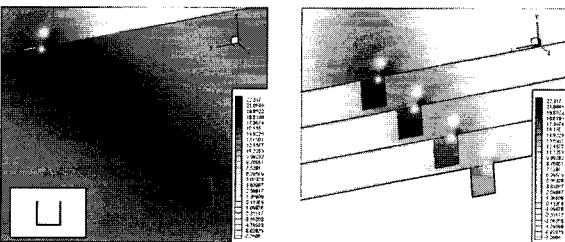
(a) Pressure perturbation contour at  $T_p/2$ : compression process



(b) Pressure perturbation contour at  $T/2$



(c) Pressure perturbation contour at  $T_p/2$ : expansion process



(d) Pressure perturbation contour at  $T$

Fig. 6 Numerical result of nonlinear source model simulation

### 3.2 타이어와 지면이 고려된 전체 유동장의 수치 해석

비선형 피스톤-공동-미닫이문 모델링 수치 해석을 통해 얻어진 데이터는 타이어와 지면이 고려된 유동장 계산 과정 중 일종의 지배 방정식에서의 source와 sink로 적용되어 에어-펌핑 소음원으로 모델링된다. Fig. 2에서 나타내어진 바와 같이 타이어 접지면의 앞전 부분에서는 타이어 그루브의 압축에 의한 부피 감소가 이루어지므로 source의 역할을 하며, 타이어 접지면의 뒷전 부분에서는 반대로 sink의 역할을 하게 된다. 선형화 가정의 단극자 이론을 모델링한 선형 모델링의 경우 타이어 그루브의 부피 변화는 그대로 타이어 그루브 내부의 공기 유동으로 나타난다고 가정하였다. 따라서 타이어 그루브 내부의 밀도는 대기압 밀도로 일정하고 부피 변화에 따른 질량유량  $\dot{m}$

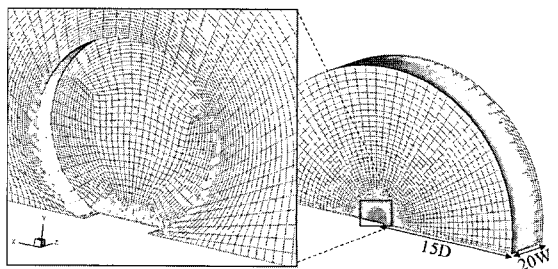


Fig. 7 Computational mesh for full domain simulation

과 이에 해당하는 속도  $u$ 를 구하여 전체 유동장 해석 시에 경계조건으로 적용하였다. 제안된 비선형 피스톤-공동-미닫이문 모델링의 경우에는 에어-펌핑 소음원 수치 해석을 통해 얻어진 공동 출구에서의 속도, 질량 유량을 구하여 경계 조건으로 대입하여 유동 해석을 수행하였다.

계산에 사용된 전체 격자의 노드 개수는 250, 650개이며, 셀 개수는 240,044개이다. 타이어의 주행 방향을 따라 타이어 지름의 15배에 해당하는 거리에 원방 경계 조건을 적용하였으며, 타이어의 폭 방향으로 타이어 폭의 20배에 해당하는 거리에 원방 경계 조건을 적용하였다. 타이어의 대칭면을 따라서는 대칭 경계 조건을 적용하여 전체 도메인의 절반에 대해 해석을 수행하였다.

Fig. 8~9에서 타이어와 지면이 고려된 전체 유동장에서의 유동 해석 결과를 선형 소음원 모델링(case1)과 비선형 소음원 모델링(case2)의 두 가지 케이스에 대해 나타내었다. 그림을 보면 선형 단극자 이론과 비선형 피스톤-공동-미닫이문 모델링에 의한 에어-펌핑 메커니즘에서의 유동장의 차이가 극명하게 나타난다. 우선 case1의 경우 타이어 폭 방향의 압력 분포는 거의 일정한 형태로 나타나며 타이어 옆면에서의 압력 섭동은 그리 크게 나타나지 않지만, case2의 경우에는 타이어 옆면에도 강한 압력 분포를 가지는 영역이 타이어 그루브와 인접한 지역에 존재한다. 이는 Fig. 6의 에어-펌핑 소음원 근접장의 압력 섭동 분포에서도 알 수 있듯이 타이어 그루브의 압축, 팽

창 과정에서 타이어의 폭 방향 끝단의 벽면 경계 조건과 미닫이문의 열림과 닫힘 동작에서 발생하는 유동의 비대칭성으로 인한 것으로, 부피가 감소하는 부분으로의 강한 와류 유동에 의하여 생기는 압력 분포이다. 이로 인해 압력 섭동의 방사 패턴이 단극자의 방사 형태와 유사한 case1과는 달리 타이어 옆면으로 굴절하게 됨을 알 수 있다. 또한 소음원에 의하여 발생한 압축파의 형상이 지면에서 멀어지면서 지면과 평행한 방향으로 굴절됨을 알 수 있다. 이는 진행 축 방향으로의 소음원에 의한 직접적인 압축파가 방사하지만 지면에서 멀어지면서 타이어와 지면에 의하여 반사된 압력 섭동 성분이 전파하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 case2의 경우에서 보다 뚜렷하게 나타나는데 이는 비선형 소음원 모델링에 의한 압축이 더 강하게 발생하기 때문일 것이다. 이와 같은 압축파의 굴절로 인해 원음장에서의 소음 전파는 선형 소음원 모델과 비선형 소음원 모델링이 차이를 보일 것이며, 이는 타이어 그루브 주위의 와류 유동에 의한 소음 전파의 방사 패턴의 차이로 나타날 것이다.

### 3.3. 에어-펌핑 소음 예측

위에서 구해진 에어-펌핑 소음원 모델링에 의한 타이어와 지면이 포함된 전체 유동장에서의 유동 데이터를 이용하여 키르코프 적분면을 구성한 후 키르코프 적분 방법을 적용하면 원음장 소음을 예측할 수 있다. 소음원을 포함하고 있는 근접장 영역에서는 강

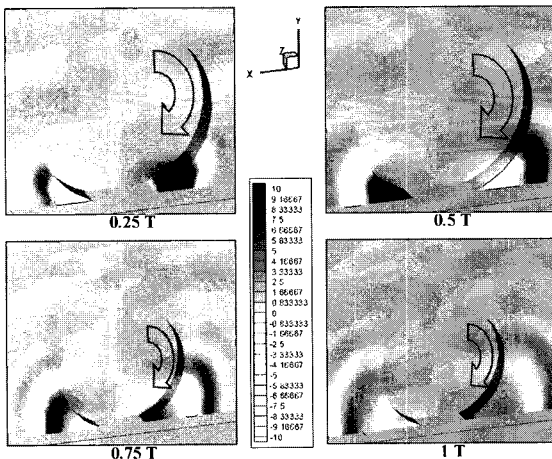


Fig. 8 Pressure perturbation contour of full domain simulation with linear source model (case1)

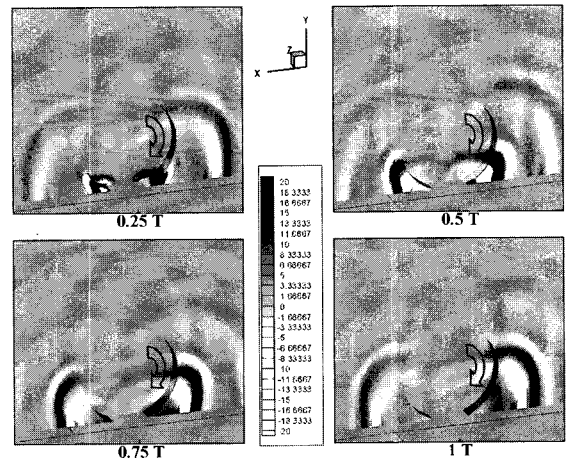


Fig. 9 Pressure perturbation contour of full domain simulation with nonlinear source model (case2)

한 비선형성을 포함하고 있으므로 일반적인 선형 이론을 통해 소음 예측을 수행할 수 없다. 따라서 비교적 선형성이 보장되는 영역에서 키르코프 적분면을 구성해야 하며 이 연구에서는 타이어 지름의 5배가 되는 영역에서 타이어 형태와 닳은꼴의 실린더 형상의 키르코프 적분면을 구성하여 키르코프 적분 방법을 적용하였다. 이 때 타이어의 주행에 의한 외부 유동을 고려하지 않았으므로 외부 유동이 없는 선형 키르코프 적분 방법을 적용하여 예측을 수행하였다.

Fig. 10에서 각각의 소음원 모델링에 대해 ISO 362<sup>(10)</sup>의 측정 방법에서 제안된 관측자 위치인 타이어

로부터 7.5 m 원방 거리에 관측자를 두어 타이어 진행 축에서의 진행 방향으로부터 타이어 접지면의 뒷전 방향까지 45° 각도에 따라 시간에 따른 음압의 변화를 나타내었다. 가장 크게 차이가 나는 것은 타이어 회전축 방향(90°)에서의 음압인데 case2의 경우에는 타이어 회전축 방향으로의 소음 방사가 지배적인데 반해 case1의 경우 이 방향으로의 소음 전파는 거의 존재하지 않는다. case2의 경우 근접장 유동 해석 결과에서 나타난 바와 같이 타이어 그루브의 압축·팽창 과정에서 타이어 그루브 끝단의 벽면 경계 조건과 미닫이문의 열림·닫힘 동작에서 발생하는 유동의 비대칭성, 타이어 접지면의 앞전과 뒷전 소음원의 비대칭적 거동으로 인해 회전축 방향으로의 소음 방사가 뚜렷하다. 반면, case1의 경우 타이어의 접지면의 앞전과 뒷전의 소음원의 거동이 크기가 같고 위상이 반대이므로 같은 지연 시간(retarded time)을 가지는 타이어 회전축 방향으로의 소음이 거의 전파하지 않는다. 또한 타이어 진행축 방향(0°, 180°)에서의 음압도 case2의 경우 더 크게 나타나는데 이는 피스톤과 미닫이문에 의한 타이어 홈 내부 공기의 압축으로 인해 보다 강한 압력 섭동이 발생하였기 때문이다.

고전적 단극자 이론에 의하여 제안된 식 (2)와 Table 1에서 주어진 계산 조건을 이용하여 같은 관측자 위치에서의 음압을 계산하여 보면,

$$p(x, t) = \frac{1}{4\pi r} \rho_0 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \left( t - \frac{r-a}{c} \right) \approx 0.4476 \cos(3322.26t + \phi) \text{ Pa}$$

이며 case2에서 예측된 타이어 회전축 방향 음압인 약 0.32 Pa 보다 크게 나온다. 이는 단극자 이론에서 타이어와 지면에 의한 회절, 반사 등의 영향을 고려하지 않으며 에어-펌핑 소음원을 단극자 특성을 가지는 하나의 점음원으로 가정하여 원음장을 예측하기 때문에 타이어 전방과 후방의 반대 위상적 성격을 띠는 에어-펌핑 소음원의 거동을 고려하지 않기 때문이다.

고전적 단극자 이론을 이용하여 소음 예측을 수행하는 경우, 에어-펌핑 소음의 방사 패턴에 대한 예측은 수행할 수 없다. 그러나 앞서 수행된 소음원 근접장 유동 해석 결과에서 보인 소음원 거동의 차이와 타이어와 지면에 의한 경계 조건의 고려는 에어-펌핑 소음의 방사 패턴에 영향을 미칠 수 있음을 직관할 수 있다. 따라서 단극자 이론과 같은 선형 이론에 근거한 case1과 case2의 결과에 대하여 방사 패턴을 살

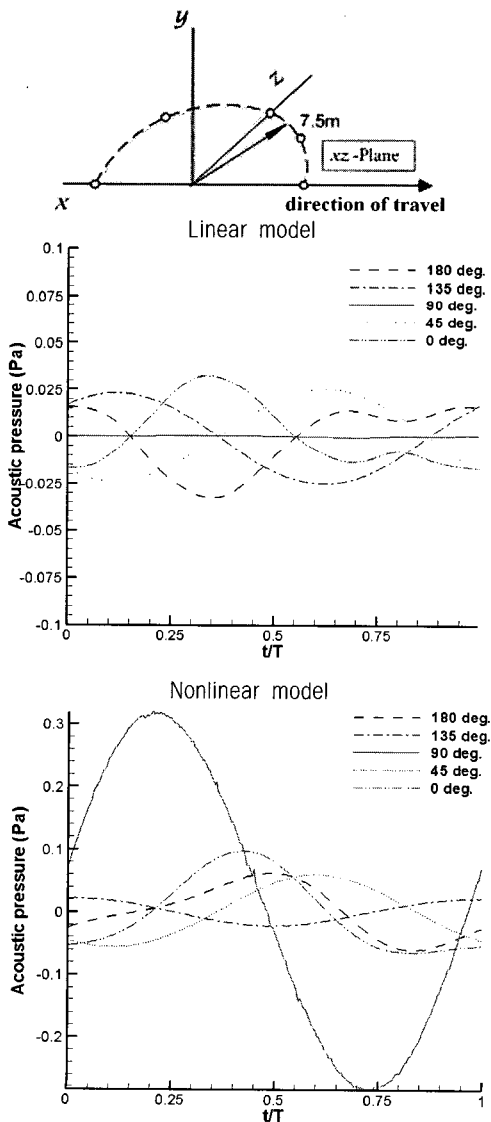


Fig. 10 Time history of predicted acoustic pressure at  $z = 7.5$  m far-field



펴보았다.

Fig. 11에서 7.5 m 반경을 가지는 구면에서 예측된 에어-펌핑 소음의 한 주기 동안의 음압 분포를 나타

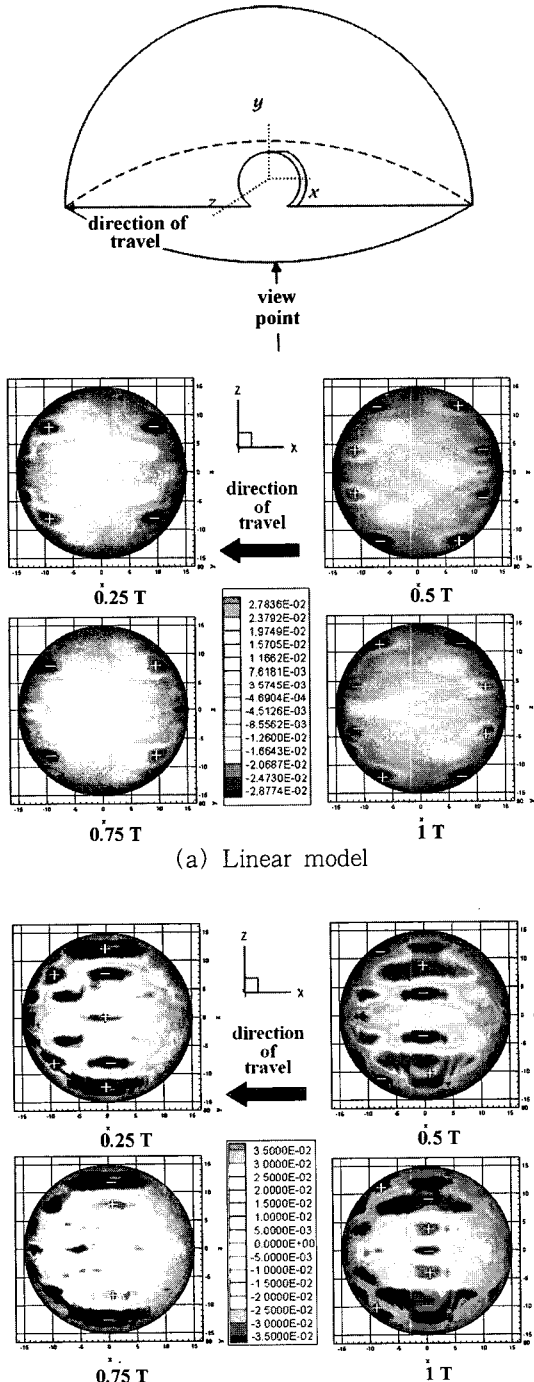


Fig. 11 Air-pumping noise distribution

냈다. case1의 경우 타이어 회전축을 기준으로 위상이 반대인 좌우대칭 형태의 방사패턴을 보인다. 이 결과는 Fig. 10에서도 확인할 수 있으며 이를 통해 선형 에어-펌핑 소음원의 모델링을 통한 타이어와 지면이 고려된 음장 내에서의 소음 전파는 타이어의 회전축을 포함하는 면을 따라 대칭적으로 발생하며 타이어의 전방과 후방 모두 같은 방향성을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 소음원 모델링에 의하여 발생하는 것으로 단극자 이론에서 제안한 소음원 모델링과 타이어와 지면 경계조건을 통하여 예측하는 경우에도 같은 결과가 나올 것을 예상할 수 있다.

그러나 case2의 경우에는 타이어 회전축 방향으로의 소음 전파가 두드러지게 나타나며 또한 타이어 회전축을 기준으로 타이어 진행 방향에서의 음압이 반대방향보다 더 크게 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10에서도 이를 확인할 수 있으며 이는 폴란드의 TUG(technical university of gdansk)에서 실험한 타이어 소음의 국소화 연구 결과<sup>(10)</sup>에서 에어-펌핑의 주된 주파수 영역이라 알려져 있는 1~4 kHz의 소음 성분이 타이어 진행 방향쪽에 더욱 크게 분포하는 것과 일치하는 결과이다.

Fig. 12에서 각 모델링을 통한 에어-펌핑 소음 예측값의 주파수 분석 결과를 나타내었다. 주파수 분석은 일반적으로 도로 소음 측정 시에 사용되는 A-weighting을 적용한 1/3 octave band의 결과를 이용하여 수행하였다. 두 경우 모두 트레드 passing frequency인 기본 주파수에 영향을 받는 저주파 성분에서 극대점을 보이며 고주파로 가면서 음압 레벨은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 다른 방향과는 달리 타이어 회전축 방향에서는 2~4 kHz 성분의 음압 레벨이 고주파 성분에 비해 증가하는 경향을 보인다. 또한 case1의 경우에는 case2와 같은 경향을 보이나 타이어 회전축 방향의 음압 레벨이 워낙 작으므로 전체 소음의 기여도는 매우 낮다. 따라서 에어-펌핑 소음은 주로 타이어 회전축 방향으로 전파함을 알 수 있다.

Ejsmont<sup>(3)</sup> 등은 실험 연구를 통해 포켓 타입 그루브에 ventilation을 가하는 경우, 저주파의 소음 레벨은 거의 변화하지 않으면서 1~4 kHz의 주파수 대역에서 소음 레벨의 감소가 지배적으로 이루어짐을 보였으며 이를 통해 에어-펌핑 메커니즘의 주된 주파수 대역이 1~4 kHz임을 밝히고 있다. 따라서 이 연구

결과의 비선형 모델링을 통한 2~4 kHz 대역의 상대적으로 강한 소음 레벨은 에어-펌핑 소음 발생 메커니즘의 비선형성을 보여주는 결과이다.

또한 case1의 결과 중 음압 레벨이 매우 작은 타이어 회전축 방향으로의 전파 소음을 제외하고는 두 번째 극대값이 타이어 진행 측에 가까울수록 강하게 분포함을 알 수 있다. 이는 case2의 결과에서 더욱 잘 나타나며, 타이어 회전축 방향 즉 90°의 경우 180°나 0° 위치보다 음압 레벨이 큼에도 불구하고 두 번째 극대값은 증가하지 않는다. Kropp 등<sup>(11)</sup>에 의한 확장관 효과(horn effect) 연구 결과에 따르면 실린더 형상의 타이어와 노면에 의한 기하학적 형상에 의해 발생하는 확장관 효과는 타이어 주행 방향으로부터 주행 방향과 수직인 방향으로 감에 따라 감소한다. 타이어 폭과 타이어 반지름의 함수인 증폭계수는 이 연구와 다를 수 있으나 각도에 따른 경향성은 동일하다

고 판단할 수 있으며 정성적 비교가 가능하다. 따라서 위의 결과는 타이어와 지면에 의한 확장관 효과로 인해 나타나는 결과로 판단되며, 제안된 에어-펌핑 소음 예측 기법을 통해 확장관 효과가 고려된 에어-펌핑 소음 예측이 가능함을 보여주는 결과이다.

### 5. 결 론

회전하는 타이어에 의한 에어-펌핑 소음을 예측하기 위하여 전산 유체 역학과 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. 또한 타이어와 지면을 직접 고려함으로써 타이어와 지면에 의한 소음의 반사와 회절, 확장관 효과 등이 고려된 에어-펌핑 소음 예측이 가능하다. 이 방법은 실험적 방법에 비하여 비용과 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있으며, 보다 정교한 격자를 사용할 경우 타이어뿐만이 아닌 전체적인 차량 형상에서의 소음 예측이 가능하여 저소음 디자인에도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) Heckl, M., 1986, "Tyre Noise Generation", *Wear* 113, pp.157~170.
- (2) Hayden, R. E., 1971, "Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with Road Surface", *Proceedings of the Purdue Noise Conference*, pp.62~67.
- (3) Ejsmont, J. A., Sandberg, U. and Taryma, S., 1984, "Influence of Tread Pattern on Tire/road Noise", *Transactions of the Society of Automotive Engineers*, pp.1~9.
- (4) Jennewein, M. and Bergmann, M., 1985, "Investigations Concerning Tyre/road Noise Sources and Possibilities of Noise Reduction", *Proc. Inst.*

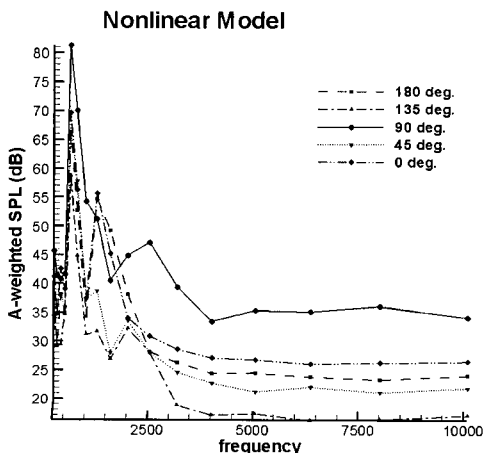
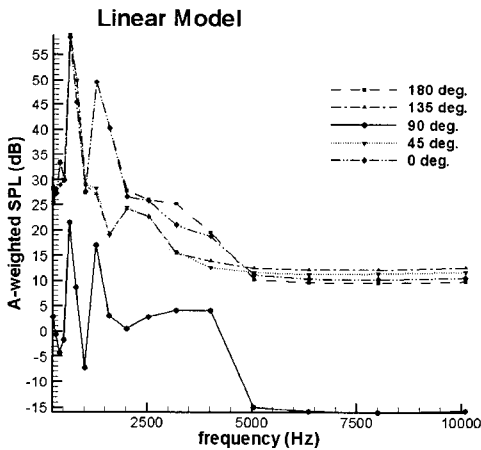


Fig. 12 Predicted air-pumping noise spectra

Mech. Eng., Part C: Mech. Eng. Sci. 199, pp.199~205.

(5) 이수갑, 윤태석, 1996, "CFD와 Kirchhoff 방법의 결합을 이용한 로터의 고속충격음 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 6 권, 제 5 호, pp.607~616.

(6) Gagen, M. J., 1999, "Novel Acoustic Sources from Squeezed Cavities in Car Tires", J. Acoust. Soc. Am. 106(2), pp.794~801.

(7) Hamet, J. F., Deffayet, C. and Pallas, M. A., 1990, "Air-pumping Phenomena in Road Cavities," International Tire Noise Conference 1990, Gothenburg, pp.19~30.

(8) Nilsson, N. A., 1979, "Air Resonant and

Vibrational Radiation-possible Mechanisms for Noise from Cross-bar Tires", International Tire/Road Noise Conference 1979, pp.93~109.

(9) Jerzy, A. Ejsmont, Ulf Sandberg, 1993, "Tyre Load and Vehicle Geometry Specifications in Measurement Standards for Tyre/road Noise", VTI Notat No. 10~93, Swedish National Road and Transport Research Institute, Sweden.

(10) Ulf Sandberg and Jerzy A. Ejsmont, 2002, Tyre/Road Noise Reference Book, INFOMAX, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden.

(11) Kropp, W., Becot, F. X. and Barrelet, S., 2000, "On the Sound Radiation from Tyres", Acta Acustica, Vol.86, pp.769~779.