

< 논문 >

차량 속도에 따른 타이어 수막현상의 특성 연구

손정삼* · 이홍우* · 조진래† · 우중식**
(2005년 1월 31일 접수, 2005년 9월 5일 심사완료)

Characteristic Study of Tire Hydroplaning Phenomenon to Vehicle Velocity

Jeong-Sam Son, Hong-Woo Lee, Jin-Rae Cho and Jong-Shik Woo

Key Words: Hydroplaning Analysis(수막해석), Contact Force(접촉력), Hydrodynamic Force(동수력), 3-D Patterned Tire Model(3차원 패턴 타이어 모델), Vehicle Velocity(차량속도)

Abstract

The most important factor of the traffic accident on the wet road is a tire slip caused by hydroplaning. Meanwhile, hydroplaning characteristics are influenced very greatly by the vehicle velocity, so it is very important to reveal the relation between hydroplaning and the vehicle velocity. Since the experiment study is considerably limited, recently the numerical simulation using finite element method(FEM) and finite volume method(FVM) is widely adopted. In this paper, the effect of the vehicle velocity on the hydroplaning characteristics is investigated through the hydroplaning analysis using MSC/Dytran.

1. 서 론

타이어는 자동차의 구동력 및 제동력을 지면에 전달하는 역할을 수행하는 자동차 부품으로, 자동차의 승차감과 안정성에 크게 영향을 미친다. 이러한 타이어는 초기에 고무만으로 만들어진 통고무 타이어를 사용하다가 1845년 스코틀랜드의 Thomson에 의해서 공기주입식 타이어가 처음으로 개발되었다. 그 뒤 비드부분에 강철을 사용하였으며, 1915년에는 먼 코드를 이용하여 타이어의 구조적 결함을 해결하고자 하였다. 1958년에 현재 적용되고 있는 레이디얼 타이어가 개발된 후, 타이어역학(tire mechanics)에 관한 독립적인

연구가 이루어졌고 타이어의 성능은 지속적으로 향상되어 왔다.

그러나, 최근까지의 실험적이고 경험에 의존한 타이어 연구는 그 한계성이 있으며, 특히 타이어의 성능을 평가하기 위해서 주로 사용되었던 전문 레이서들의 주관적인 판단은 동일 제품에 대한 실험이라도 실험 환경과 측정자의 상황에 따라서 쉽게 바뀔 수가 있으므로 타이어 제품의 신뢰성을 떨어뜨릴 수도 있다. 또한, 기존의 방법으로 타이어를 설계하고 시제품을 만들어서 타이어 해석 및 평가를 수행한 뒤 양산 또는 피드백(feedback)시키는 과정에서 소모되는 시간적, 경제적 손실도 매우 크다고 할 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 유한요소법을 기반으로 하는 해석용 틀을 이용하여 타이어를 해석하고 분석하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 최근에는 컴퓨터와 비선형 해석프로그램들의 발달에 힘입어 더욱 빠른 시간내에 정량적인 데이터 산출이 가능하게 되었으며 이로 인해서 타이어 연구의 정확도 및 신뢰성을 보다 향상시

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과
† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : jrcho@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640
** (주) 금호타이어 R&D Center

키고 있다.

최근 타이어분야에서 가장 중점적으로 연구되는 것으로 빗길에서의 주행특성에 관한 연구를 들 수 있다. 빗길, 즉 젖은 노면에서의 자동차 주행은 마른 노면에서보다 더욱 큰 위험을 수반하게 되는데, 이것의 가장 큰 원인이 수막현상(hydroplaning)이다. 수막현상이란 자동차가 젖은 노면을 빠른 속도로 달릴 때 타이어와 지면 사이에 얇은 물의 막(film)이 생기게 되고 이 막에서 발생하는 동수압(hydrodynamic pressure)이 타이어를 지면으로부터 밀어 올리는 현상으로, 자동차의 제동성능 저하 혹은 심각한 경우 조정성 상실로 인한 안전사고를 초래할 수 있다.

일반적으로 수막현상은 차량의 속도에 가장 크게 영향을 받는데, 차량이 시속 60km/h 이하일 경우에는 타이어와 지면이 전면 접지가 일어나 수막현상이 거의 발생하지 않는다. 그러나 시속 70~80 km/h 에서는 물이 썩기모양으로 지면과 타이어 사이에 끼기 시작하고, 시속 80km/h 이상의 속도에서는 물이 타이어를 부상시키기 시작한다. 하지만 이런 데이터들은 패턴의 상태와 차체의 무게 등과 같은 변수들에 의해서 변할 수가 있기 때문에 타이어를 연구하는 업체에서는 더욱 정확한 데이터를 산출할 수 있는 해석기법이 필요한 실정이다.

이런 이유로, 본 연구에서는 보다 정확하게 수막현상을 구현할 수 있는 기법을 제시하고자 하였으며, 이 기법을 활용하여 차량의 속도에 따른 수막특성을 분석하려 한다. 이를 위해서 3차원 패턴타이어를 모델링하였으며, 10~80km/h의 차량 속도를 10km/h 간격으로 총 8번으로 나누어서 각각의 속도에 대한 수막해석을 수행하였다. 그리고 수막해석을 통해서 산출된 타이어와 지면사이의 접촉력(contact force)과 동수력(hydrodynamic force)을 분석하여 차량속도와 동수력과의 관계를 정량적으로 도출하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 수막현상의 메커니즘

빗길에서의 주행중에 물과의 충돌로 인한 타이어와 지면의 박리는 타이어의 기본적인 성능을 저하 혹은 상실시키며 이로 인해서 인명 피해까지 야기할 수 있기 때문에 그 개념 및 메커니즘

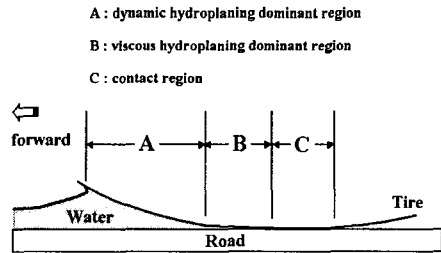


Fig. 1 Three regions about hydroplaning

을 명확히 규명하고 억제 방안을 강구하는 것은 타이어 설계에 매우 중요하다. 수막현상은 Fig. 1과 같이 3가지 영역으로 구분하여 이해할 수 있다. 그림의 A영역에서는 타이어와 지면사이에서 유체가 침투한 상태를 나타내며, 이 영역의 물에 동수압이 발생하고 타이어를 밀어 올리게 된다. B 영역은 얇은 수막이 타이어와 지면사이에서 존재하는 상태이며, 이 영역을 수막해석에서 고려할 경우 지면과 타이어 사이의 마찰계수를 수막의 영향을 고려하여 수정해야 한다. 마지막으로 C 영역은 타이어와 지면이 완전히 접촉되는 상태이며, 수막의 영향을 받지 않는다.

한편, 수막현상은 발생 메커니즘에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 첫 번째는 동수막(dynamic hydroplaning)으로서 타이어가 빠른 속도로 두꺼운 유막위에 진행할 때 유체의 관성에 의해 동수압이 발생하여 타이어가 유체위에 부유하는 현상이다. 두 번째는 점성수막(viscous hydroplaning)으로서 타이어가 매우 얇은 유막 위를 진행할 때 발생하며, 이 경우 유체의 관성보다는 점성에 의한 유희의 영향이 더 커진다.

본 연구에서는 비교적 두꺼운 유막에서 유체의 관성만을 고려한 동수막에 중점을 두고 해석을 수행한다.

2.2 동해석 기술편

본 연구에서 수행하는 유체-구조물 연계와 같이 해석 영역과 경계가 강한 시간의존성을 보이는 초기치-경계치 문제의 경우에는 기본적으로 다음의 세 가지 수치적 접근방법이 사용된다.

- 1) 라그랑지(Lagrange) 기술편
- 2) 오일러(Euler) 기술편
- 3) ALE(Arbitrary Lagrange Eulerian) 기술편⁽¹⁾

Fig. 2(a)에 나타낸 라그랑지 기술법에서 운동 경계는 질점의 운동과 정확하게 일치하며, 이에 따라 경계를 정의하기 위한 별도의 노력은 필요하지 않지만 경계에서 과도한 격자 변형이 있을 경우 해석비용의 증가 및 해석 정도의 저해는 심각하다. Fig. 2(b)의 오일러 기술법에서는 격자영역은 공간상에 고정되며, 실제 물질 영역보다 넓게 정의된다. 운동경계는 체적분율 함수 등과 같이 적절한 특성함수를 통해 지역적으로 정의되어야 한다. 따라서, 정확한 경계 지정을 위해서는 지역적으로 조밀한 격자 구성이 필요하나, 매우 극심한 영역의 변형을 쉽게 해석할 수 있는 장점이 있다. 마지막으로 Fig. 2(c)의 ALE 방법은 이전의 두 기법들의 수치해석 상의 장점들을 수용하기 위해 격자의 운동을 임의로 부여하여 대변형에 의한 격자 품질을 유지하고 경계에서의 격자의 운동은 질점의 운동과 동일하게 하였다. 하지만 이 방법 역시 과도한 영역 경계의 변형에서는 여전히 어려움을 내포하고 있다. 따라서, 자유표면을 가지는 유체와 같이 과도한 격자 변형이 예상되는 문제의 해석은 오일러 기술법에 의한 정식화가 적용되어야 한다.

2.3 오일러 기법에 의한 Navier-Stokes 방정식

오일러 기술법에서의 Navier-stokes 방정식은 물질속도 v_i 를 대입하여 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j v_{i,j} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij,j} + f_i, \quad in \quad \Omega_F^t \quad (1)$$

$$v_{i,j} = 0, \quad in \quad \Omega_F^t \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

여기서, Ω_F^t 는 시간 t 에서 유체가 차지하는 공간상의 영역이며, ρ_F 는 유체의 밀도, f_i 는 중력가속도를 나타낸다. 또한, σ_{ij} 는 유체내의 전체 응력 텐서를 나타낸다. 그리고 p 는 압력을 μ 는 유체의 점성계수를 의미한다.

시간이산화를 위해 오일러 시간적분 기법을 사용한다. 압력항의 계산을 위해 반복적 분리기법을 채용하면, 중간단계의 속도장 \tilde{v}_i^E 을 식 (1)의 운동방정식으로부터 구할 수 있다.

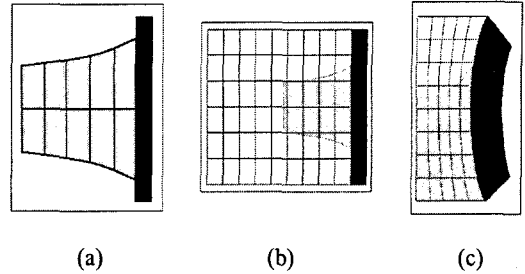


Fig. 2 The three numerical approach methods of dynamic analysis (a) Lagrange method (b) Eulerian method (c) ALE method

$$\frac{\tilde{v}_i^E - v_i^n}{\Delta t} = -v_j^n v_{i,j}^n + \frac{\mu}{\rho_F} (v_{i,j}^n + v_{j,i}^n) + f_i \quad (4)$$

$$\tilde{v}_i^E = \bar{v}_i, \quad on \quad \partial \Omega_I^t \quad (5)$$

계산된 중간단계 속도장 \tilde{v}_i^E 는 연속방정식을 만족하지 않으므로 다음 식을 이용하여 압력장을 보정한 후 최종단계의 속도장 v_i^E 를 얻을 수 있다.

$$\frac{v_i^E - \tilde{v}_i^E}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_F} p_{,i}^E \quad (6)$$

$$v_{i,i}^E = 0 \quad (7)$$

$$p_{,ii}^E = \frac{\rho_F}{\Delta t} \tilde{v}_{i,i}^E \quad (8)$$

여기서, 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$p^E = 0, \quad on \quad \partial \Omega_{FS}^t \quad (9)$$

$$p_{,i}^E n_i = 0, \quad on \quad \partial \Omega_I^t \quad (10)$$

오일러 기술법에서의 격자는 공간상에 고정되어 있으므로 물질의 운동만을 정의하면 된다. 지배방정식의 해법에 있어서는 오일러 기술법에 의한 계산이 효율적일 수 있으나, 앞 절에서 언급한 바와 같이 오일러 기술법에 의한 정식화는 매 단계마다 영역을 전개하기 위한 추가적인 방정식을 따로 풀어야 한다. 일반적으로 영역을 정의하기 위한 기법으로 MAC(Marker and Cell),⁽²⁾ VOF (Volume of Fluid)⁽³⁾ 방법이 대표적으로 사용되어

지고 있다.

2.4 유체-구조물 연계해석

유체-구조물의 연계(fluid-structure interaction)는 대표적인 연성해석의 한 분야이다. 연성해석이란, 서로 다른 물리적 특징을 가지는 두 가지 이상의 장(field)이 결합할 경우에 전체를 하나의 시스템으로 정의하여 상호작용에 의한 영향을 고려한 해석을 의미한다. 이러한 연성해석이 필요한 이유는 서로의 운동특성이 강하게 상호작용하여 독립적으로 존재할 때의 응답과는 전혀 다른 특성을 보이기 때문이다. 본 연구에서 수행하는 수막해석의 경우에도 지면 위에 분포된 물의 운동이 구조물인 타이어의 응답에 영향을 미치기 때문에 하나의 시스템만을 독립적으로 해석하게 되면 정확한 응답 특성을 얻을 수 없게 된다.

MSC/Dytran은 구조물 해석에 대해서는 라그랑지 기술법을 적용한 유한요소법을 사용하고, 유체의 경우 오일러 기술법을 적용한 유한체적법을 사용한다. 여기서, 유한체적법은 전산유체역학분야에서 집중적으로 다루어지는 수치해석 기법으로 단순히 미분방정식을 근사화하는 유한차분법과는 달리 검사체적내의 적분이 지배방정식을 만족하도록 하는 배열법(collocation method)의 일종이다.

MSC/Dytran에서는 유체-구조물 연계를 위해 Fig. 3(a)에 도시한 일반 연계(general coupling)와 Fig. 3(b)에 도시한 ALE 연계(ALE coupling)를 제공하고 있다. 먼저, ALE 연계의 경우 일반 연계에 비해 계산시간에 있어 상당한 이점이 있으며, 적은 수의 오일러 격자라도 충분한 해석이 가능하다. 그러나, 구조물의 변형이 완만하여 오일러 격자가 구조물의 운동을 충분히 따라갈 수 있어야 하며, 오일러 격자/ALE 연계면/라그랑지 격자의 절점들을 서로 공유해야 하는 제약이 있기 때문에 해석모델의 형상이 단순해야 한다. 이러한 특징에서 알 수 있듯이 형상이 단순하고 연계면의 변형이 그다지 심하지 않은 경우의 문제에 한정적으로 사용할 수 있다.

반면 일반 연계법의 경우 연계면은 임의 형상과 움직임을 가질 수 있으며, 라그랑지 격자는 오일러 격자의 경계로서의 역할을 담당한다. ALE 연계와는 달리 라그랑지 격자와 오일러 격자는 절점을 공유할 필요가 없으며, 오일러 영역

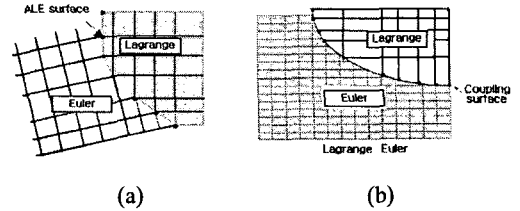


Fig. 3 Two coupling methods (a) ALE coupling (b) general coupling

내부에 라그랑지 격자가 겹쳐서 존재하는 특징을 가진다. 반면, 연계면은 반드시 폐공간(closed volume)을 이루어야 하므로 연계면의 생성시 주의의 필요로 한다. 한편, 연계면이 오일러 요소 상을 움직임에 따라 검사체적의 일부분만이 해석 영역에 포함되는 경우가 발생할 수 있다.

3. 수막해석 및 해석 결과

3.1 타이어 모델링 및 해석 방안

3차원 타이어의 수막해석을 위해서 상용 소프트웨어인 MSC/Dytran을 이용하였다. MSC/Dytran은 구조물과 유체 및 상호간의 혼합 구조에 대한 동적, 비선형 거동을 해석하는 3차원 해석프로그램으로, 외연적 시간적분(Explicit time integration)을 기반으로 한다.

MSC/Dytran을 이용하여 수막해석을 수행하게 될 타이어(P205/60R15)모델은 비대칭의 패턴 형상을 포함하고 있기 때문에 모델링하기가 쉽지 않다. 또한, 수막해석을 위한 MSC/Dytran 입력 파일을 생성하는 것 역시 MSC/Patran 및 MSC/Dytran에 대한 전문적인 사용지식이 있어야 가능하기 때문에, 이들 문제점을 보완하기 위해서 PCL(Patran Command Language) 프로그램을 개발하였다.⁽⁴⁾

보통 타이어의 구름 해석시 사용되는 방법에는 Fig. 4와 같이 두 가지가 있는데 하나는 타이어와 지면의 마찰력을 이용하여 지면을 타이어 진행 반대방향으로 잡아당기는 방법이고, 다른 하나는 지면은 고정시키고 타이어에 각속도를 부여하여 타이어를 직접 회전시키는 방법이다.⁽⁵⁾ 전자의 경우 타이어의 회전운동만 있고 병진운동이 없기 때문에 유체의 범위를 제한할 수 있어서 해석시

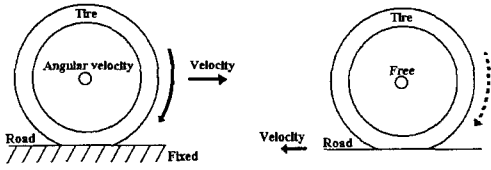


Fig. 4 Two types for tire-rolling analysis

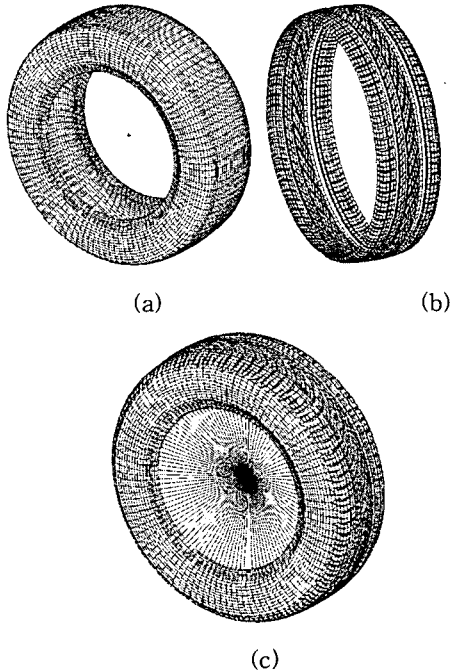


Fig. 5 3D patterned tire (a) tire body (b) pattern (c) coupling surface

간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만 수막현상이 발생하여 타이어가 부유하게 되면 지면과 타이어 사이의 마찰력이 감소하게 된다. 그래서 타이어의 회전 속도 역시 감소하게 되고 이로 인해서 정확한 타이어 회전을 구현하기가 어렵다.

후자의 경우에는 타이어가 직접 회전 및 병진 운동을 하기 때문에 유체는 타이어의 이동거리를 고려해서 생성시켜야 하기 때문에 유체의 격자수가 전자의 경우보다 많이 증가하여 해석시간이 길어진다는 단점이 있다. 하지만 수막현상이 발생하더라도 타이어는 그대로 회전을 하기 때문에 속도별 수막특성을 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수막현상을 구현하기 위해 후자의 방법을 적용하도록 한다.

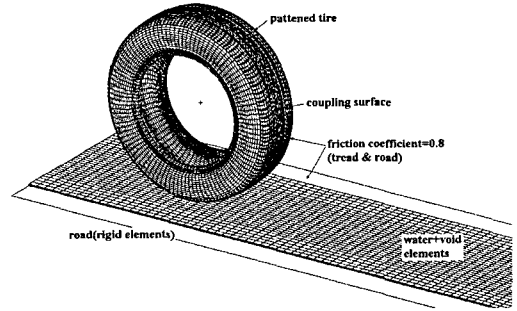


Fig. 6 Patterned tire and fluid model

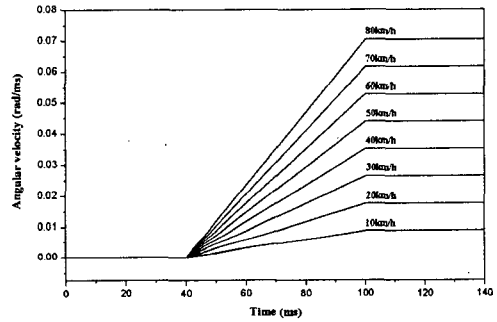


Fig. 7 Angular velocities of tire

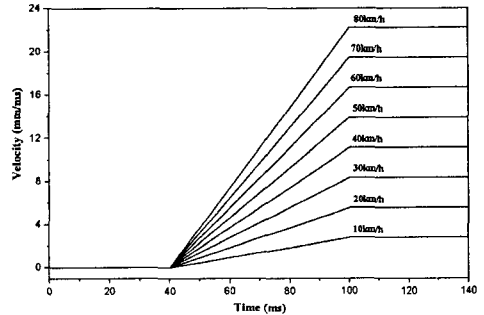


Fig. 8 Velocities of tire

앞에서 언급한 PCL 프로그램에 의해서 생성된 패턴 타이어의 부분별 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 패턴 타이어의 경우 패턴과 타이어 몸체를 각각 모델링하여 강체연결(rigid connection)시키는 방법을 이용하였으며, 그림은 패턴과 타이어 몸체, 그리고 유체와의 연계를 위해 타이어 몸체를 감싸고 있는 연계면(coupling surface)을 나타낸다. Fig. 6은 패턴 타이어 모델과 유체, 그리고 지면을 결합시켰을 때의 최종 형상이다.

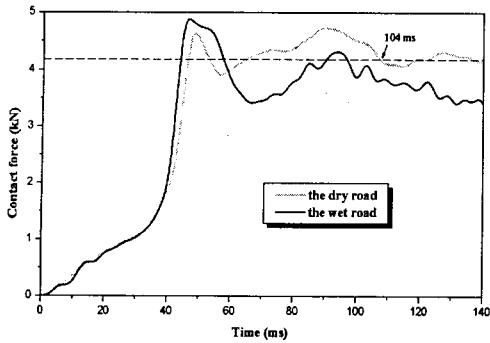


Fig. 9 Contact forces at the wet road and the dry road

패턴 타이어는 46,719개, 유체영역은 21,000개 (물:9000개, 빈 영역:12,000개)의 격자로 이루어져 있으며, 유체의 사이즈는 $300 \times 2,000 \times 25$ mm이다. 여기서 물의 이는 10mm이고, 빈(void) 영역의 깊이는 15mm이다. 보통 수막해석을 위해 설정된 물의 높이를 3mm로 사용하는데 반해서 본 논문에서 10mm로 설정한 것은 차량의 속도에 따른 수막특성을 보다 뚜렷하게 관찰하기 위해서이다. 즉, 물의 깊이를 깊게하여 동수력의 절대크기를 증가시키고자 하였다.

타이어 내부에 부여한 압력은 200kPa이며, 차량의 하중으로 4.2kN을 타이어 휠부분에 부여하였다. 그리고 본 연구에서는 차량의 속도별 수막특성을 알고자 하였기 때문에, 휠 중앙에 각 차량의 속도(mm/ms)와 해당 속도에 해당하는 타이어의 각속도(rad/ms)를 계산하여 동시에 부여하였다. 차량의 속도는 10km/h에서부터 80km/h까지 10km/h간격으로 총 8개로 나누어서 적용하였으며, Fig. 7, 8에는 타이어 휠에 부여한 속도 및 각속도를 시간에 따라 각각 나타내었다.

3.2 해석 결과

3.2.1 수막현상의 분석

속도별 수막특성을 분석하기에 앞서, 젖은 노면과 마른 노면에서의 자동차의 주행특성이 어떻게 다른지 먼저 알아보도록 한다. 이를 위해서 차량 속도를 60km/h로 설정한 뒤, 젖은 노면과 같은 조건으로 마른 노면에서 타이어 구름해석을 수행하였다. Fig. 9는 마른 노면과 젖은 노면에서 지면이 받는 접촉력을 시간에 따라 도시한 것이

다. 마른 노면에서는 104ms까지의 과도구간이 지난 후에 지면의 접촉력이 차량하중인 4.2kN에 수렴해가는 것을 볼 수 있는데 반해서, 젖은 노면에서는 접촉력이 거의 선형적으로 감소해가는 것을 볼 수 있다. 따라서 젖은 노면에서의 차량주행시 타이어는 수막에서 발생하는 동수압의 영향을 받게 된다는 사실을 접촉력의 수치를 통해서 알 수 있다.

3.2.2 차량속도별 수막특성 분석

차량의 속도별 수막특성을 파악하기 위해서 수막해석은 각 속도별로 총 8번을 수행하였으며, 평균적으로 한 번의 수막해석을 하는데 38시간의 해석시간(펜티엄4 1.8Ghz, 메모리 512MB 컴퓨터 이용)이 필요하였다. Fig. 10에는 총 8번의 수막해석결과들 중에서 시속 80km/h에서의 타이어 회전 변위를 나타내었다. 타이어의 회전 변위를 알기 쉽게 하기 위해서 후처리 과정에서 타이어의 옆면에 홈을 뚫으며, 홈의 이동경로를 통해서 140ms까지 해석할 동안 타이어는 240° 정도 회전하였음을 알 수 있었다.

Fig. 11는 시속 80km/h에서의 유체의 체적분율(volume fraction)을 위쪽에서 본 것과 아래쪽에서 본 것으로 구분하여 시간별로 도시한 것이다. 그림으로부터 타이어가 구른 후의 물의 흔적을 뚜렷하게 관찰할 수 있으며, 타이어 주위의 물의 흐름이 타이어 진행방향의 왼쪽에서 더욱 크게 확장되는 것을 확인할 수 있다.

이것은 타이어 패턴 형상의 비대칭에 기인하는 것으로 왼쪽 패턴의 홈이 오른쪽보다 더욱 넓게 파져있기 때문으로 판단된다. 즉, 타이어와 부딪힌 물은 패턴이 상대적으로 넓은 쪽으로 많이 유입되기 때문에, 배수되는 물의 양 역시 그쪽에서 많아지게 된다. 그래서 왼쪽부분의 물이 긴 꼬리 모양으로 넓게 배출되게 되는 것이다. 위의 결과로부터 패턴의 배수기능을 가시적으로 관찰할 수 있었다.

Fig. 12는 시속 40km/h, 60km/h 그리고 80km/h에서 지면이 받는 접촉력(contact force)을 시간에 따라서 도시한 것이다. 앞에서 언급하였듯이 유체의 깊이를 10mm로 깊게 하였기 때문에 수막에 의한 영향을 보다 잘 관찰할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 0ms에서 100ms까지는 두 번의 진동(oscillation)이 발생하게 되는데 이것은 매우 짧은 시간에 타이어를 과도하게 회전시키기 때문

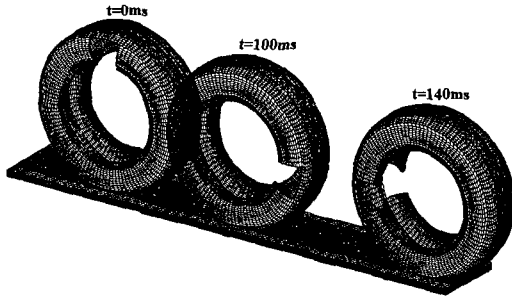


Fig. 10 Deformations of tire at 80km/h

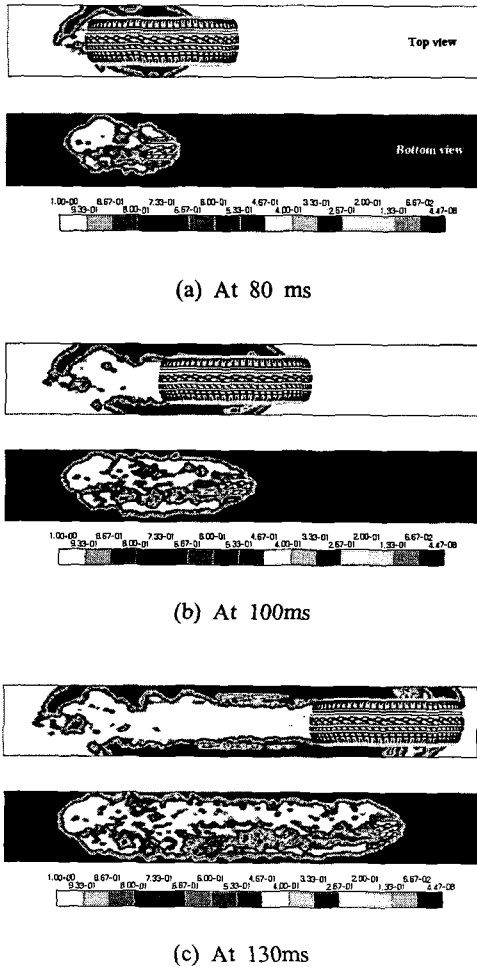


Fig. 11 Volume fraction of fluid at 80km/h

로 판단된다. 따라서, 속도별 수막특성을 분석하기 위해서는 100ms 이후의 접촉력을 이용하였다.

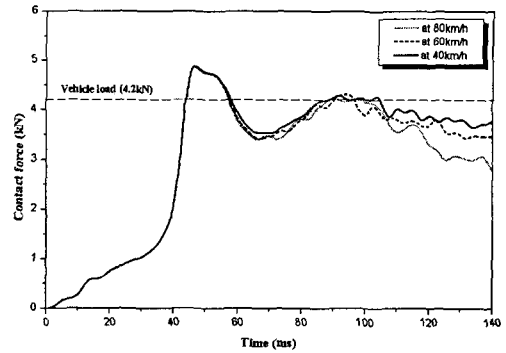


Fig. 12 Contact forces at 40, 60 and 80km/h

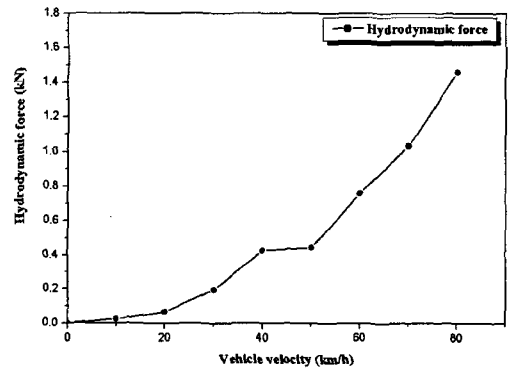


Fig. 13 Velocity dependence of hydrodynamic force

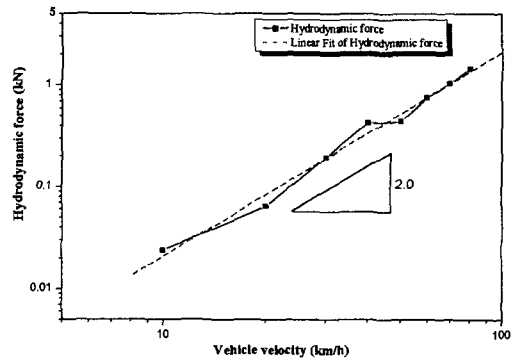


Fig. 14 Velocity dependence of hydrodynamic force (log-log scale)

그림을 통해서 100ms 이후부터 각각의 차량속도에 대한 타이어의 접촉력은 비교적 선형적으로 감소하게 되며, 차량의 속도가 빠를수록 접촉력의 감소폭이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 접촉력의 감소는 그 만큼의 동수압이 증가한다는

것을 의미한다.

각각의 차량속도에 대한 접촉력을 출력한 후 아래의 식에 적용하여 동수력을 산출해낼 수 있다.

$$F_h = F_v - F_c \quad (11)$$

여기서, F_h 는 동수력을, F_v 는 차량 하중(4.2kN), F_c 는 접촉력을 나타낸다.

Fig. 13은 위의 식을 통해서 구한 동수력을 이용하여 각 속도별로 동수력의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 동수력은 속도에 따라 점점 증가함을 볼 수 있는데, 특히 10~50km/h사이의 동수력 증가폭보다 50~80km/h사이의 동수력 증가폭이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 즉, 특정속도(50km/h) 이상에서는 조금만 속도를 올려도 수막의 영향을 크게 받을 수 있다는 것을 의미한다. 그리고, 로그 스케일(log-scale)로 전환되어 나타낸 Fig. 14를 통해서 동수력이 거의 차량속도의 제곱에 비례한다는 것도 알 수 있다.

지금까지 타이어의 수막특성을 대표적으로 나타내는 동수력을 산출하였고, 이 동수력을 차량속도와 연계시켜 분석하였다.

4. 결론

본 연구에서의 속도별 수막해석을 수행한 후 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수막현상이 발생했을 때의 자동차의 주행특성을 파악하기 위해서 같은 속도조건에서 마른 노면과 젖은 노면에서의 타이어 구름해석을 수행하였고, 이 결과를 통해서 수막현상 발생시 동수압이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

(2) 차량속도별 수막특성을 파악하기 위해서 총 8번의 수막해석을 수행하였다. 그 결과로부터 타이어에 의해 지면에서 받게되는 접촉력을 출력하였다.

(3) 출력된 접촉력을 이용하여 속도별 동수력을 산출하여, 차량속도와 동수력간의 관계를 도출하였다.

(4) 동수력의 경우 속도의 제곱에 비례하며, 또한 적정속도(50km/h) 이상에서의 차량속도에서는

동수력의 증가폭이 상대적으로 커진다는 것을 알 수 있었다.

수막현상에 대한 그 동안의 연구는 시험자의 주관에 의해 많이 좌우되었기 때문에 신뢰성에서 한계를 가지고 있었다. 따라서, 보다 정확하고 신뢰될 수 있는 수막현상의 구현을 위하여 유한요소법 및 유한체적법을 기반으로 하여 본 연구를 시작하게 되었으며, 이 연구에서 적용한 수막해석 방안 및 결과가 향후에는 빗길에서의 제동특성 연구와 같이 좀 더 구체적이고, 실용적인 연구의 발판이 되기를 기대해 본다.

후 기

본 연구의 일부는 (주)금호타이어의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Donea, J., Giuliani, S. and Halleux, J. P., 1982, "An arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Transient Dynamic Fluid-Structure Interactions," *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, Vol. 33, pp. 689~723.
- (2) Tome, M. F., Filho, A. C., Cuminato, J. A., Mangiacavacchi, N. and McKee, S., 2001, "GENSMAC3D: a Numerical Method for Solving Unsteady Three-Dimensional Free Surface Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 37, pp. 747~796.
- (3) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstructing Volume Tracking," *Journal of Computational Physics*, Vol. 141, pp. 112~152.
- (4) Son, J. S., 2005, "Development of GUI-Based Program for Generating MSC/Dytran's Input File for the Hydroplaning Analysis," Master's Thesis, Pusan National University.
- (5) Olatunbosun, O. A. and Burke, A. M., 2002, "Finite Element Modelling of Rotating Tires in the Time Domain," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol. 30, No. 1, pp. 19~33.