(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0017927
(43) 공개일자 2015년02월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 19/00 (2011.01)
(21) 출원번호 10-2013-0094165
(22) 출원일자 2013년08월08일
심사청구일자 2013년08월08일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
정현용
서울특별시 강남구 삼성로 151 선경아파트 10동 206호
정재용
서울특별시 구로구 디지털로32가길 46-6 비젼밸리301
(74) 대리인
특허법인명인

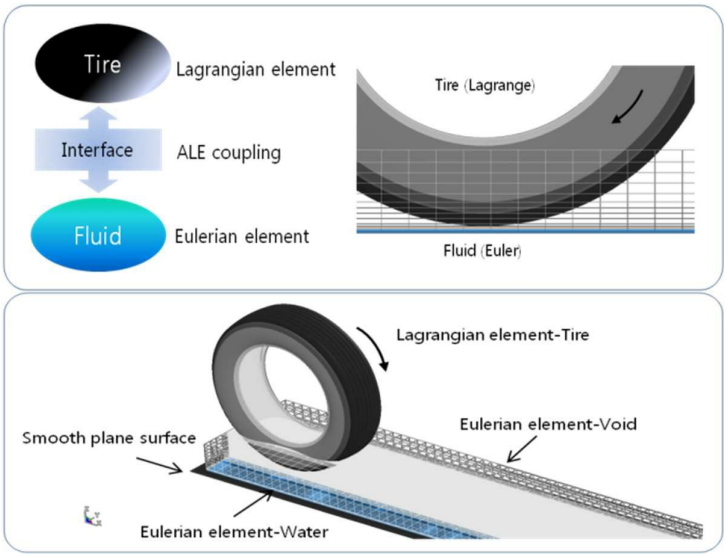
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법**

(57) 요 약

본 발명은 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량을 쉽고 빠르게 얻을 수 있도록 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법을 제공하는 것이 그 기술적 과제이다. 이를 위해, 본 발명의 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법은, 타이어와 수막에 대한 유한 요소 모델을 이용하여 제1 구간에 있는 적어도 2개의 수막 두께에 대한 주행속력 별 해석 물리량을 각각 얻는 단계; 상기 각각의 해석 물리량을 점근법을 통한 커브 피팅으로 수막 두께와 주행속력의 지수함수를 얻는 단계; 및 상기 지수함수를 이용하여 제2 구간에 있는 적어도 하나의 수막 두께에 대한 주행 속력 별 예측 물리량을 획득하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

타이어와 수막에 대한 유한 요소 모델을 이용하여 제1 구간에 있는 적어도 2개의 수막 두께에 대한 주행속력 별 해석 물리량을 각각 얻는 단계;

상기 각각의 해석 물리량을 점근법을 통한 커브 피팅으로 수막 두께와 주행속력의 지수함수를 얻는 단계; 및

상기 지수함수를 이용하여 제2 구간에 있는 적어도 하나의 수막 두께에 대한 주행 속력 별 예측 물리량을 획득하는 단계

를 포함하는 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 2

제1항에서,

상기 지수함수는 식(1)에 의해 정의되고,

상기 식(1)은

$force = ch^{a}v^{b}$ 이고,

상기 식(1)에서, force는 물리량의 하나인 힘이고, h는 수막 두께이고, v는 주행 속력이고, a, b 및 c는 최소 자승법에 의해 결정되는 상수인 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 3

제2항에서,

상기 타이어가 상기 수막 위를 회전하는 타이어 롤링 모델일 경우,

상기 해석 및 예측 물리량은 부력(lift force)이고,

상기 예측 물리량은 상기 식(1)에 의해 계산되며, 그리고

상기 예측 물리량이 부력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 부력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정되는 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 4

제2항에서,

상기 타이어가 상기 수막 위에서 미끄러지는 타이어 슬라이딩 모델일 경우,

상기 해석 및 예측 물리량은 견인력(traction force) 또는 항력(drag force)이고,

상기 견인력 또는 항력은 상기 식(1)에 의해 계산되고,

상기 예측 물리량이 견인력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 견인력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정되며, 그리고

상기 예측 물리량이 항력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 항력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정되는 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에서,

상기 수막 두께의 상기 제1 구간은 5㎜ 이상 이고,

상기 수막 두께의 상기 제2 구간은 5㎜ 미만인 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 6

제1항에서,

상기 예측 물리량을 획득하는 단계는,

상기 예측 물리량으로 부력(lift force), 견인력(traction force) 및 항력(drag force)을 획득 한 후, 상기 부력, 상기 견인력 및 상기 항력을 이용하여 미끄럼 저항 값을 계산하는 단계를 포함하는 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 7

제6항에서,

상기 지수함수는 식(1)에 의해 정의되고,

상기 식(1)은

$force = ch^{a}v^{b}$ 이고,

상기 식(1)에서, force는 물리량의 하나인 힘이고, h는 수막 두께이고, v는 주행 속력이고, a, b 및 c는 최소 자승법에 의해 결정되는 상수이고,

상기 부력, 상기 견인력 및 상기 항력은 각각 상기 식(1)에 의해 획득되며,

상기 부력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 부력에 대한 예측 솔루션의 상수이고,

상기 견인력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 견인력에 대한 예측 솔루션의 상수이며, 그리고

상기 항력인 경우, 상기 식(1)의 a, b 및 c는 항력에 대한 예측 솔루션의 상수인 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 8

제6항 또는 제7항에서,

상기 미끄럼 저항 값은 식(2)에 의해 계산되고,

상기 식(2)는

$$SN_v = 100 \times \frac{F_x}{F_z}$$ 이고

상기 식(2)에서, SN_v는 미끄럼 저항 값이고, F_x은 타이어에 작용하는 수평 저항력으로 상기 견인력과 상기 항력의 합과 같고, F_z은 수직 하중으로 타이어와 노면 사이의 접촉력과 부력의 차이와 같은 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

청구항 9

제8항에서,

상기 주행속력이 증가할수록 상기 타이어와 상기 노면 사이의 미끄럼 마찰계수를 감소시키는 수막현상에 대한 물리량 획득 방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량을 획득하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 이전 연구자들에 의해 확인된 수막현상을 야기하는 주요 매개변수는 타이어의 패턴 형상, 내부압력, 타이어의 구조와 같은 타이어 관련 변수와 노면의 상태, 배수율 등을 고려한 지면 관련 변수, 그리고 물의 깊이와 밀도에 따른 유체 관련 변수 등으로 알려져 있다(Horne and Dreher, 1963; Horn et al., 1986; Huebner et al., 1986).

[0003] 이러한 수막현상 매개변수를 찾는 연구는 1960년부터 나사(NASA)의 랑글리 리서치 센터(Langley Research Center)에서 항공기 착륙 트랙을 이용하여 수막현상에 대한 여러 현상들을 실험을 통해 규명하면서 본격적으로 다루어졌다. 이후 노면의 일부에 강화 유리를 설치하고 일정한 두께의 수막 위를 주행하는 타이어를 고속 촬영하여 타이어 접지 면의 형상과 유체의 거동을 연구하고 있다(Suzuki and Fujikawa, 2001). 더 나아가, 주행 속력, 타이어 종류, 타이어 트레드 형상, 차륜 하중, 노면의 표면특성, 노면 구조(texture) 그리고 노면 위의 수막 두께와 같이 수막현상과 밀접한 관련이 있는 인자들에 의해 영향을 받는 미끄럼 저항에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Rose and Gallaway, 1977; Anderson et al., 1998).

[0004] 그러나 실험적인 방법은 실험장비를 제작해야 하고 별도의 시험장을 필요로 하기 때문에 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서, 해석적인 방법의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Saal, 1936; Martin, 1996; Eshel, 1967; Grog-ger and Weiss, 1996; ZminDak and Grajcia r, 1997; Nakajima et al., 2000; Okano and koishi, 2001; Koishi et al., 2001; Oh et al., 2008; Ong and Fwa, 2010).

[0005] 이러한 연구 중 그로거(Grogger)와 웨이스(Weiss)는 전산 유체 역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)를 이용한 해석 방법을 처음 소개했다(Grogger and Weiss, 1996). 또한, 즈민닥(Zmindak)에 의해 유한요소법(FEM; Finite Element Method)을 이용한 수막현상의 해석 방법이 처음 소개되었다(ZminDak, 1997). 이후 나카지마(Nakajima), 오카노(Okano) 및 코이쉬(Koishi)는 상용 유한요소법(FEM) 코드인 엠에스씨. 다이트란(MSC. Dytran)을 이용하여 10mm 이상의 수막 두께에 대하여 수막현상을 해석하였지만(Nakajima et al., 2000), 물의 점성의 영향이 큰 10mm 이하의 수막 두께에 대한 해석이 요구되었다. 따라서 오카노(Okano) 및 코이쉬(Koishi)는 또 다른 상용 코드(code)인 엘에스-다이나(LS-DYNA)를 이용하여 물의 점성을 고려한 수막현상 시뮬레이션을 수행하였다(Okano and koishi, 2001).

[0006] 그러나, 많은 수의 타이어 대한 라그랑지안(Lagrangian) 요소와 물에 대한 율러리안(Eulerian) 요소가 사용되고, 수막 두께 변화에 대하여 여러 번 시뮬레이션을 수행하기 때문에 오랜 해석시간이 소요된다. 따라서, 해석 시간을 줄일 수 있는 방법으로 수리모델(mathematical model)과 유한요소모델(FE model)을 이용하여 수막현상과 미끄럼 저항성을 연구하는 새로운 시뮬레이션 방법이 제안되었다(Oh and Jeong, 2008; Kim and Jeong, 2010; Ong and Fwa, 2010).

[0007] 특히, 오(Oh) 및 정(Jeong)은 브라운(Browne)의 수리적 모형(mathematical formulations)(Browne,1975)을 기초로 개발한 유한 차분법(FDM; Finite Difference Method) 코드와 유한 요소 타이어 모델(FE tire model)을 이용하여 수막현상 시뮬레이션 방법을 처음으로 제안했다.

[0008] 이러한 수리적 모형(mathematical formulation)은 수막 두께가 얇을 때 특이행렬(illconditioned matrix)이 되기 때문에 점근(asymptotic) 방법을 제안하여 압력 분포(pressure distribution)와 부력(lift force)를 얻을 수 있었다. 또한, 엘에스-다이나(LS-DYNA)의 완전 유한 요소 시뮬레이션(full FE simulation) 방법을 이용하여 수막현상 시뮬레이션을 실시하고, 두 가지 시뮬레이션 방법에 대하여 비교하였다.

[0009] 하지만, 유한 차분법 코드(FDM codes)를 이용한 해석방법의 경우 수리적 프로그래밍(mathematical programming)이 요구되기 때문에 복잡하고 일련의 반복적인 과정이 필요하다. 또한, 엘에스-다이나(LS-DYNA)를 이용한 시뮬레이션 방법에서 음의 부력(lift force)이 발생하는 비정상적인 경우가 발생하였고, 심한 진동(oscillation)으로 인하여 속력에 대한 수직항력을 명확하게 정의할 수 없었다.

[0010] 이와 같이 여러 가지 방법을 이용하여 수막현상에 대한 해석적 연구가 진행되었다.

[0011] 하지만 위에서 언급한 해석적 연구의 대부분은 5mm 이상의 수막 두께에 대한 연구결과이므로 점성의 영향이 지배적인 매우 얇은 수막 두께(1mm 미만)의 영역을 고려하지 못한다. 특히, 엘에스-다이나(LS-DYNA)와 같은 상업적 익스플리시트 코드(commercial explicit code)를 이용한 외연적 해석 방법의 경우 물에 대한 많은 수의 율러리안(Eulerian) 요소가 사용될 뿐만 아니라, 1mm 미만의 수막 두께에 대한 매우 작은 요소 크기 때문에 상당한 해석 시간이 소요된다. 또한, 김(kim)과 정(Jeong)의 연구와 같이 복잡한 패턴 타이어(pattern tire)를 사용할 경우 물의 요소가 트레드 패턴(tread pattern) 보다 작은 크기를 가져야 하기 때문에 더 많은 해석시간이 소요되어 1mm 미만의 매우 얇은 수막 두께를 고려하여 해석결과를 얻기는 매우 어려운 일이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명의 기술적 과제는, 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량을 쉽고 빠르게 얻을 수 있도록 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0013] 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 실시예에 따른 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법은, 타이어와 수막에 대한 유한 요소 모델을 이용하여 제1 구간에 있는 적어도 2개의 수막 두께에 대한 주행속력 별 해석 물리량을 각각 얻는 단계; 상기 각각의 해석 물리량을 점근법을 통한 커브 피팅으로 수막 두께와 주행속력의 지수함수를 얻는 단계; 및 상기 지수함수를 이용하여 제2 구간에 있는 적어도 하나의 수막 두께에 대한 주행 속력 별 예측 물리량을 획득하는 단계를 포함한다.

[0014] 상기 지수함수는 식(1)에 의해 정의될 수 있고, 상기 식(1)은 $force = ch^{a}v^{b}$ 일 수 있다. 상기 식(1)에서, force는 물리량의 하나인 힘이고, h는 수막 두께이고, v는 주행 속력이고, a, b 및 c는 최소 자승법에 의해 결정되는 상수이다.

[0015] 상기 타이어가 상기 수막 위를 회전하는 타이어 롤링 모델일 경우, 상기 해석 및 예측 물리량은 부력(lift force)일 수 있고, 상기 예측 물리량은 상기 식(1)에 의해 계산될 수 있으며, 그리고 상기 예측 물리량이 부력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 부력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정될 수 있다.

[0016] 상기 타이어가 상기 수막 위에서 미끄러지는 타이어 슬라이딩 모델일 경우, 상기 해석 및 예측 물리량은 견인력(traction force) 또는 항력(drag force)일 수 있고, 상기 견인력 또는 항력은 상기 식(1)에 의해 계산될 수 있고, 상기 예측 물리량이 견인력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 견인력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정될 수 있고, 상기 예측 물리량이 항력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 항력에 대한 예측 솔루션의 상수로 최소 자승법을 이용하여 결정될 수 있다.

[0017] 상기 수막 두께의 상기 제1 구간은 5㎜ 이상 일 수 있고, 상기 수막 두께의 상기 제2 구간은 5㎜ 미만일 수 있다.

[0018] 상기 예측 물리량을 획득하는 단계는, 상기 예측 물리량으로 부력(lift force), 견인력(traction force) 및 항력(drag force)을 획득 한 후, 상기 부력, 상기 견인력 및 상기 항력을 이용하여 미끄럼 저항 값을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0019] 상기 부력, 상기 견인력 및 상기 항력은 각각 상기 식(1)에 의해 획득될 수 있으며, 상기 부력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 부력에 대한 예측 솔루션의 상수일 있고, 상기 견인력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 견인력에 대한 예측 솔루션의 상수일 수 있으며, 그리고 상기 항력인 경우 상기 식(1)의 a, b 및 c는 항력에 대한 예측 솔루션의 상수일 수 있다.

[0020] 상기 미끄럼 저항 값은 식(2)에 의해 계산될 수 있고, 상기 식(2)는

[0021] $$SN_v = 100 \times \frac{F_x}{F_z}$$ 일 수 있다. 상기 식(2)에서, SN_v는 미끄럼 저항 값이고, F_x은 타이어에 작용하는 수평 저항력으로 상기 견인력과 상기 항력의 합과 같고, F_z은 수직 하중으로 타이어와 노면 사이의 접촉력과 부력의 차이와 같다.

[0022] 상기 주행속력이 증가할수록 상기 타이어와 상기 노면 사이의 미끄럼 마찰계수를 감소시킬 수 있다.

발명의 효과

[0023] 이상에서와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법은 다음과 같은 효과를 가질 수 있다.

[0024] 본 발명의 실시예에 의하면, 유한 요소 모델을 이용하여 제1 구간에 있는 수막 두께에 대해 획득한 수막 현상에

대한 해석 물리량으로부터 지수 함수를 얻은 후 이 지수 함수를 이용하여 제2 구간에 있는 수막 두께에서의 예측 물리량을 얻는 기술구성을 가지므로, 지수 함수를 통해 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량을 쉽고 빠르게 얻을 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법 중 수막현상 시뮬레이션을 위한 유한 요소 모델을 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 2는 해석 시간을 늘리지 않으면서도 가압, 하중, 가속의 과정을 조절하여 개선된 거동을 나타낸 시간에 대한 그래프이다.

도 3은 수막 두께에 대한 주행속력 별 부력(Lift force)을 나타낸 그래프이다.

도 4는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 부력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 부력과 지수함수를 통한 예측에 의해 부력을 비교한 그래프이다.

도 5a는 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력(Traction force)을 나타낸 그래프이다.

도 5b는 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력(Drag force)을 나타낸 그래프이다.

도 6a는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 견인력과 지수함수를 통한 예측에 의해 견인력을 비교한 그래프이다.

도 6b는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 항력과 지수함수를 통한 예측에 의해 항력을 비교한 그래프이다.

도 7a는 0.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력을 나타낸 것으로 지수함수를 통한 예측에 의한 견인력을 나타낸 그래프이다.

도 7b는 0.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력을 나타낸 것으로 지수함수를 통한 예측에 의한 항력을 나타낸 그래프이다.

도 8a는 주행 속력에 대한 미끄럼 저항 값(SN)을 나타낸 것으로, 장비를 통해 측정된 미끄럼 저항 값과 마찰계수의 변화를 고려하지 않은 상태에서 식을 통해 계산된 미끄럼 저항값을 비교한 그래프이다.

도 8b는 주행 속력에 대한 미끄럼 저항 값(SN)을 나타낸 것으로, 장비를 통해 측정된 미끄럼 저항 값과 마찰계수의 변화를 고려한 상태에서 식을 통해 계산된 미끄럼 저항값을 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 이하, 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.

[0027] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법 중 수막현상 시뮬레이션을 위한 유한 요소 모델을 개략적으로 나타낸 도면이고, 도 2는 해석 시간을 늘리지 않으면서도 가압, 하중, 가속의 과정을 조절하여 개선된 거동을 나타낸 시간에 대한 그래프이다.

[0028] 도 3은 수막 두께에 대한 주행속력 별 부력(Lift force)을 나타낸 그래프이고, 도 4는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 부력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 부력과 지수함수를 통한 예측에 의해 부력을 비교한 그래프이다.

[0029] 도 5a는 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력(Traction force)을 나타낸 그래프이고, 도 5b는 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력(Drag force)을 나타낸 그래프이다.

[0030] 도 6a는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 견인력과 지수함수를 통한 예측에 의해 견인력을 비교한 그래프이고, 도 6b는 2.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력을 나타낸 것으로 유한 요소 모델을 통한 해석에 의한 항력과 지수함수를 통한 예측에 의해 항력을 비교한 그래프이다.

[0031] 도 7a는 0.5㎜의 수막 두께에 대한 주행속력 별 견인력을 나타낸 것으로 지수함수를 통한 예측에 의한 견인력을

나타낸 그래프이고, 도 7b는 0.5mm의 수막 두께에 대한 주행속력 별 항력을 나타낸 것으로 지수함수를 통한 예측에 의한 항력을 나타낸 그래프이다.

[0032] 도 8a는 주행 속력에 대한 미끄럼 저항 값(SN)을 나타낸 것으로, 장비를 통해 측정된 미끄럼 저항 값과 마찰계수의 변화를 고려하지 않은 상태에서 식을 통해 계산된 미끄럼 저항값을 비교한 그래프이고, 도 8b는 주행 속력에 대한 미끄럼 저항 값(SN)을 나타낸 것으로, 장비를 통해 측정된 미끄럼 저항 값과 마찰계수의 변화를 고려한 상태에서 식을 통해 계산된 미끄럼 저항값을 비교한 그래프이다.

[0033] 이하, 도 1 내지 도 8을 참조하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 유한요소와 예측방법을 이용하여 얇은 수막에서의 수막현상에 대한 물리량 획득 방법을 상세히 설명한다.

[0034] 최근 미끄럼 저항 관련 연구에서는 5mm 미만의 수막 두께 변화에 대한 미끄럼 저항 값의 변화는 5mm에서 10mm 사이의 수막 두께보다 더 큰 변화를 보이고 있다(Ong and Fwa, 2010). 또한, 많은 나라에서 사용하고 있는 미국재료시험협회(ASTM; American Society for Testing and Materials, 이하 "ASTM"이라 함) E274 시험방법의 경우 1mm 이하의 수막 두께를 갖는 물의 양을 사용하여 미끄럼 저항 시험을 수행하고 있다.

[0035] 따라서, 본 발명에서는 엘에스-다이나(LS-DYNA)를 이용한 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 5mm, 7.5mm, 10mm 의 수막 두께에 대하여 수막현상 시뮬레이션을 수행하고, 오 등(Oh et al.)이 제안한 점근(asymptotic) 방법을 이용하여 2.5mm 의 얇은 수막 두께에 대한 주행 속력 별 부력(lift force)를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻은 결과를 2.5mm 의 수막 두께에 대하여 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 얻은 결과와 비교함으로써 점근(asymptotic) 방법의 정확성을 검증하였다.

[0036] 게다가, 엘에스-다이나 타이어 슬라이딩 모델(LS-DYNA tire sliding model)을 이용한 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 1mm 미만의 매우 얇은 수막 두께에 대하여 미끄럼 저항을 예측하였다. 따라서, ASTM E274 미끄럼 저항 측정 방법을 모사하기 위해 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 통해 타이어와 노면 사이의 접촉면에서 발생하는 견인력(traction force)과 물의 동압에 의해 타이어에 발생하는 항력(drag force)을 얻을 수 있었다. 즉, 주행속력이 증가할수록 타이어와 노면 사이의 마찰력이 점차적으로 감소하는 해석 결과를 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 결과를 차륜 하중으로 나누어 미끄럼 저항 값인 스키드 넘버(SN; Skid Number)을 구하였고, ASTM E274 장비를 이용한 시험결과와 비교하였다. 이하, 상술한 물리량 획득 방법에 대해 보다 상세히 설명한다.

[0037] 1. 엘에스-다이나(LS-DYNA, 이하 "LS-DYNA"라 함)를 사용한 방법론

[0038] LS-DYNA를 이용하여 수막현상을 시뮬레이션하기 위해 타이어는 라그랑지안 요소(Lagrangian elements)로 이루어진 유한요소법(FEM; Finite Element Method)으로 모델링되었고, 수막은 율러리안 요소(Eulerian elements)로 이루어진 유한체적법(FVM; Finite Volume Method)으로 모델링되었다. 따라서, 두 종류의 요소 사이에 변형과 압력을 전달하기 위한 결합 함수(Coupling function)가 필요하다. 본 발명에서는 타이어와 유체의 결합 함수(coupled problem)를 다루기 위해 LS-DYNA 의 다중-물질 에이엘이 모형[Multi-material ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) formulations]을 사용하여 수막현상을 시뮬레이션하였다(Olovsson and Souli, 2000; Okano and Koishi, 2001).

[0039] 1.1. 수막현상 시뮬레이션의 유한 요소 모델(FE model of hydroplaning simulation)

[0040] 본 발명에서 사용된 수막현상 시뮬레이션 모델은 도 1에서 보여지듯이 강체(rigid body)로 모델링되고 제로 마이크로 질감(zero micro texture)를 가진 매끄러운 평면(smooth plane surface)과 ASTM E501-08 미끄럼 저항 시험 표준 리브 타이어(Rib tire)를 기초로 모델링된 타이어 모델을 사용하였다. 따라서, 수막현상 시뮬레이션 타이어 모델은 G78-15 튜블리스 타입(tubeless type)으로 모델링 되었고, 내압이 가해졌을 때 148.6mm의 타이어 트레드(tread) 폭과 393.7mm의 횡단면 반지름(cross sectional radius)으로 이루어져있다. 또한, 타이어 모델은 각각 16.8mm를 갖는 일곱 개의 플레인 리브(seven plain ribs)와 5.08mm를 갖는 여섯 개의 스트레이트 그루브(six straight grooves)를 가지고, 각각의 그루브(groove)는 9.8mm의 스키드 깊이(skid depth)와 2.5mm의 언더-트레드 두께(under-tread thickness)를 가진다(ASTM E501-08).

[0041] 타이어는 벨트, 카카스(carcass), 트레드, 비드 등의 다양한 부분으로 구성된 복합재료이고, 이들 중 벨트는 높

은 탄성율(high elastic modulus)을 가지며 얇은 복합재료이다. 만약 이것을 연속 요소(continuum element)를 사용하여 모델링 한다면, 시간-증분(time-increment)를 감소시켜 해석시간을 증가시키게 된다. 따라서, 벨트와 같이 얇은 복합재료는 다중 층 쉘 요소(multi-layered shell elements)를 이용하여 모델링 하였다. 그리고 비드 코어(bead core)도 높은 탄성율을 갖고 있기 때문에 해석 시간을 단축시키기 위해 강체로 모델링 하였고, 비드 코어(bead core)의 참조 노드(reference node)에 타이어가 진행하는 방향과 그것의 수직방향으로 각각 속력과 수직하중을 적용하였다.

[0042] 수막 모델은 노면 위에 유동 가능한 범위에 8-노드 솔리드 요소(8-nodes solid elements)를 사용하여 율러리안 요소(Eulerian elements)를 만든 후, 원하는 수막 두께만큼을 선택하여 물의 물성을 주고, 나머지 부분은 "보이드(Void)" 라고 불리는 비어 있는 요소로 구성하여 물이 유동할 수 있도록 모델링 하였다. 물의 밀도(density)와 점도(viscosity)는 각각 998 kg/m^3, 1.002 × 10^{-3} Ns/m^3 이라고 가정하였다.

[0043] 수막 모델은 수치상 정확도(numerical accuracy)를 높이고 해석 시간을 줄이기 위해, 타이어와 접촉하는 부분의 요소는 균등하게 작은 크기로 분할하였고, 접촉면에서 멀어질수록 요소의 크기가 증가하도록 모델링하였다. 타이어 부분과 만나는 가장 작은 크기의 수막 요소는 진행방향으로 40mm, 폭 방향으로 2mm, 높이 방향으로 2.5mm 이다. 타이어에 사용된 총 요소수는 30,800 개이고, 수막 모델에 사용된 총 요소 수는 143,400 개이다.

[0044] 1.2 수막현상 시뮬레이션 방법 [타이어 롤링 모델(tire rolling model) 및 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)]

[0045] 몇 개의 지난 연구에서 타이어는 제자리에서 회전하고 물과 노면이 타이어 진행 반대방향으로 흘러 들어오는 모델을 이용하였다(Okano and Koishi, 2001; Oh et al., 2008). 이러한 수막현상 시뮬레이션 모델을 사용할 경우, 물의 요소 수가 감소하여 해석 시간을 크게 줄일 수 있다. 하지만 실제 현상과 다르게 타이어의 속력이 물과 노면의 속력과 동일하기 때문에 타이어와 노면 사이의 마찰력을 제대로 고려할 수 없다. 따라서, 본 발명에서는 타이어가 수막이 깔린 노면 위를 수막 속력이 발생할 때까지 주행하는 시뮬레이션 모델을 사용하였다(Nakajima, 2000; Huebner et al., 1986; Janajreh et al., 2001). 본 발명에서는 이 모델을 타이어 롤링 모델(tire rolling mode) 이라고 명명하였다.

[0046] 하지만, ASTM E274(Pavement Friction Tester)인 미끄럼 저항 측정장비의 시험 결과와 비교하기 위해서는 타이어의 회전을 구속한 상태에서 타이어가 노면 위에 미끄러지는 것을 허용하는 모델(model)을 사용해야 한다. 즉, ASTM E274 장비의 측정원리는 주행하는 트레일러(trailer)의 타이어에 일정한 양의 물을 분사시키면서 제동을 주어 타이어와 노면 사이의 마찰력을 얻고, 이를 유효 차륜 하중으로 나눈 후 여기에 100을 곱하여 미끄럼 저항인 스키드 넘버(SN; skid number)값을 결정한다.

[0047] 따라서, 본 발명에서는 두 가지 수막현상 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 즉, 비드 코어(bead core) 요소의 참조 노드(reference node)에 타이어가 진행하는 방향으로 속력을 부여하고 물이 있는 노면 위를 회전하여 주행하는 타이어 롤링 모델(tire rolling model)과 타이어의 회전을 구속하여 노면 위를 미끄러지면서 주행하는 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 사용하였다.

[0048] 타이어의 회전을 구속하여 주행하는 타이어 슬라이딩(tire sliding) 해석 모델은, 일시적인 제동을 주어 노면과의 접촉면에서 발생하는 마찰력을 측정하는 ASTM E274(Pavement Friction Tester) 장비의 시험방법과 동일하게 해석할 수 있다.

[0049] 1.3 하중 및 속력 시간 히스토리(Loading and speed time histories)

[0050] 10mm 수막 두께에 대하여 수막현상 시뮬레이션을 수행할 경우, 시간 증분(time increment)은 대략 1 × 10^{-6} sec 이다. 따라서, 수막현상 시뮬레이션은 상당히 긴 해석 시간을 소요하기 때문에 효율적으로 해석을 수행하기 위해서는 아주 짧은 시간 안에 타이어에 내압을 가하고, 하중을 주고 가속을 하도록 설정할 수 밖에 없다(Oh et al., 2008). 이러한 과정에서 타이어가 상당히 요동치게 되는데 도 2에 나타낸 것과 같이 해석시간을 늘리지 않으면서 가압, 하중, 가속의 과정을 적절히 조절하여 개선된 거동을 얻을 수 있었다.

[0051] 이 때 사용한 내압과 수직하중은 각각 165kPa, 4826N(ASTME274)이며, 타이어의 주행속력은 0~140km/h까지 일정하게 증가시켰다. 하나의 수막 두께에 대한 해석에는 3.06GHz CPU speed and 12GB memory 컴퓨터로 약 23 시

간이 소요된다.

[0052] 2. 예측 방법(Estimation Method)

[0053] LS-DYNA를 이용하여 수막현상 시뮬레이션(simulation)을 수행할 경우 많은 수의 타이어에 대한 라그랑지안(Lagrangian) 요소와 물에 대한 율러리안(Eulerian) 요소가 사용된다. 특히, 실제 현상을 잘 모사할 수 있는 타이어 롤링(tire rolling) 방법은 물을 모델하기 위한 많은 수의 율러리안 요소가 사용되기 때문에 오랜 해석 시간이 소요된다.

[0054] 또한, 1mm 미만의 매우 얇은 수막 두께에 대하여 완전 유한 요소(Full FE) 수막현상 시뮬레이션을 실시할 경우 매우 작은 율러리안 요소를 사용해야 하기 때문에 대략 150 시간 이상의 해석 시간이 소요된다. 게다가, 수막 두께가 다를 경우 각각의 수막 두께에 대한 시뮬레이션 모델이 필요하고, 여러 번 시뮬레이션을 수행해야 하기 때문에 해석시간을 줄일 수 있는 합당한 방법이 절실히 필요하다.

[0055] 따라서, 본 발명에서는 오(Oh) 및 정(Jeong)의 연구에서 처음으로 제안한 점근(asymptotic) 방법을 적용하여 타이어의 수막 해석시간을 단축할 수 있었다(Oh and Jeong, 2008).

[0056] 우선, LS-DYNA를 이용하여 5mm, 7.5mm 그리고 10mm 의 3 가지 수막 두께에 대하여 수막현상 시뮬레이션을 수행한 후 주행속력 별 부력(lift force)을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 부력(lift force)을 도 3에 나타낸 것과 같이 커브 피팅(curve fitting)하여 식 (1)과 같이 수막 두께와 속력의 지수함수로서 부력(lift force)을 나타내는 것이 가능하다.

[0057] $$Lift\ force = ch^a v^b \quad (1)$$

[0058] 여기서 h는 수막 두께고, v는 주행속력이다. 수직항력에 대한 예측 솔루션(Estimation solution)의 상수 a, b, c는 최소 자승법을 이용하여 쉽게 결정할 수 있는데, 각각 0.576, 1.98, 0.182이다. 하지만, 이 상수들은 도로, 타이어의 구조와 형상에 따라 다르다. 따라서, 식 (1)을 이용하여 2.5mm의 수막 두께에 대한 부력(lift force)을 쉽게 얻을 수 있었다. 그 결과를 LS-DYNA 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법을 이용하여 2.5mm 수막 두께에 대하여 얻은 부력(lift force)과 비교, 검증하기 위해 도 4에 나타내었다. 점선은 예측 방법(Estimation method)을 이용하여 얻은 예측결과이고, 실선은 완전 유한 요소 시뮬레이션(full FE simulation) 방법으로 얻은 해석결과이다. 두 결과는 주행 속력이 증가할수록 부력(lift force) 값의 변화가 매우 유사하여 예측 방법(Estimation method)을 이용하여 얻은 부력(lift force)이 합당한 결과라는 것을 알 수 있다.

[0059] 또한, 정량적으로 해석결과와 예측결과의 정확성을 알아보기 위해 자승화 비[Ratio of sum of squares (R2)]로 나타내었고, 0.952의 (R2)를 얻을 수 있었다. R2가 1에 매우 가깝기 때문에 예측 방법(Estimation method)을 이용하여 얻은 예측결과는 해석 결과와 매우 유사하다고 말할 수 있다. 그러므로, 수막 두께와 주행속력의 지수함수로 나타낸 예측 방법(Estimation method)을 이용하여 다양한 수막 두께, 특별히 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation)을 수행할 경우 많은 해석시간이 요구되는 매우 얇은 수막 두께(예를 들어 1mm 혹은 그 이하) 또는 다양한 주행 속력에 대하여 부력(lift force)을 쉽게 예측할 수 있다.

[0060] 3. 시뮬레이션 결과(Simulation Result)

[0061] ASTM E274(Pavement Friction Tester) 시험 방법은 주행속력 65km/h에서 물 분사량 600mL/min.mm 를 규정하여 0.5mm의 수막 두께를 사용한다(ASTM E274, Ong and Fwa, 2010). 또한, 차량에 분사되는 살수층 너비의 mm 당 물의 양은 주행속력에 정비례하기 때문에 주행속력 변화에 관계없이 일정한 수막 두께를 유지한다(ASTM E274). 따라서, 본 발명에서는 임의의 주행속력에서 측정 바퀴에 제동을 걸었을 때 타이어와 노면의 마찰력을 얻기 위한 방법으로 0.5mm 일정한 수막 두께에서 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 이용하여 미끄럼 저항 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 예측(Estimation) 방법을 이용하여 40km/h, 60km/h, 80km/h의 주행 속력 변화에 대한 미끄럼 저항값 SN(Skid Number)의 변화를 확인해보았다.

[0062] 우선, 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 5mm, 7.5mm, 10mm의 수막 두께에 대하여 타이어와 노면 사이에서 발생하는 견인력(traction force)과 물의 동압에 의해 타이어에 발생하는 항력(drag forc

e)을 얻을 수 있었다. 이 해석 모델에 사용된 타이어와 노면 사이의 동 마찰계수는 특정한 젖은 도로표면에서 ASTM E274(Pavement Friction Tester) 장비를 이용하여 40km/h, 60km/h, 80Km/h의 속력에서 얻어진 평균 동 마찰계수 0.51을 사용하였다(Lee, 2010). 이렇게 얻은 결과를 도 5a 및 도 5b와 같이 에러(error)가 최소가 되도록 커브 피팅(curve fitting)하여 주행속력과 수막 두께의 함수로 나타낼 수 있다.

[0063] 도 6a 및 도 6b는 수막 두께 2.5mm 에 대한 견인력(traction force) 과 항력(drag force)을 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 얻은 해석결과와 예측(Estimation) 방법으로 얻은 예측결과를 비교한 것이다. 이 때 사용된 예측 솔루션(Estimation solution)의 상수 a, b, c는 견인력(traction force)에 대하여 0.545, 1.82, 0.150 이고, 항력(drag force)에 대하여 0.937, 1.24, 0.223이다. 따라서, 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 이용한 견인력(traction force)과 항력(drag force)은 타이어 롤링 모델(tire rolling model)의 부력(lift force)과 동일하게 주행속력과 수막 두께의 지수함수로 잘 나타낼 수 있다.

[0064] 도 7a 및 도 7b는 예측(Estimation) 방법을 이용하여 0.5mm 의 매우 얇은 수막 두께(h)에 대하여 견인력(traction force)과 항력(drag force)을 예측한 결과이다. 따라서, ASTM E274(Pavement Friction Tester) 장비의 측정 방법과 같이 0.5mm의 수막 두께가 일정하게 유지될 때, 주행 속력(sliding speed) 변화 40km/h, 60km/h, 80km/h에 해당하는 견인력(traction force)과 항력(drag force)을 쉽게 얻을 수 있다.

[0065] 이렇게 얻은 결과로부터 각각의 주행 속력(Sliding speed)에서 미끄럼 저항 값을 식 (2)와 같이 계산하였다.

[0066]
$$SN_v = 100 \times \frac{F_x}{F_z} \qquad (2)$$

[0067] 여기서 Fx는 타이어에 작용하는 수평 저항력(horizontal resistance force) 이고, Fz는 수직하중이다. 즉, 수평 저항력(Horizontal resistance force) Fx는 견인력(traction force)과 항력(drag force)의 합과 같고, 수직하중 Fz는 타이어와 노면 사이의 접촉력(contact force)과 부력(lift force)의 차이와 같다(Ong and Fwa, 2010).

[0068] 표 1은 LS-DYNA의 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 이용한 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측(Estimation) 방법으로 얻은 견인력(traction force)과 항력(drag force)을 각각 주행속력변화에 대하여 정량적인 값으로 나타내었다.

표 1

[0069]

Speed (km/h)	40	60	80
Traction force (N)	2434.27	2333.03	2202.83
Drag force (N)	-12.67	-20.79	-29.57

[0070] 그 결과를 살펴보면 일정한 수막 두께에서 주행 속력이 증가할수록 타이어와 노면 사이의 수평 방향의 힘인 견인력(traction force)은 감소하고, 물의 동압에 의해 타이어에 발생하는 항력(drag force)은 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 주행속력이 증가할수록 물의 동압에 의한 부력(lift force)이 발생하기 때문에 타이어와 노면 사이에 작용하는 견인력(traction force)은 점차적으로 감소한다. 반면 주행속력이 증가할수록 주행방향과 반대방향으로 타이어에 작용하는 유체의 저항력(water drag force)은 증가하게 된다. 따라서, 견인력(traction force)과 항력(drag force)의 합으로 나타낼 수 있는 마찰력은 0.5mm의 매우 얇은 수막 두께에서 주행 속력이 증가할수록 감소한다.

[0071] 이렇게 얻은 결과를 식 (2)와 같이 SN(Skid Number)을 계산하고, 그 결과를 도 8a에 나타내어 시험 결과와 비교하였다. 여기서, 도 8a의 부호(symbol) ㅅ는 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation)과 예측 방법(Estimation Method)으로 얻은 예측결과이고, 박스 영역(box plot)은 ASTM E-274(Pavement Friction Tester) 장비를 사용하여 4 구간의 도로 표면에서 8 번씩 미끄럼 저항 값을 측정하고, 이를 주행속력 40km/h, 60km/h, 80km/h에 대하여 나타낸 시험결과이다. 총 4 구간에서 각각의 구간마다 8 번씩 측정한 시험결과에서 얻은 평균 미끄럼 저항 값(SN)은 40km/h, 60km/h, 80km/h에 대하여 각각 52.97, 48.05, 43.99이며, 예측결과는 50.13, 47.91, 45.03이다. 참고로, 도8a 및 도 8b에 나타난 SN(40)R은 40Km/h, SN(60)R은 60Km/h, SN(80)R은 80Km/h을 의미한다.

[0072] 도 8a의 결과에서 알 수 있듯이, 예측(Estimation) 방법을 이용하여 얻은 예측결과와 ASTM E274(Pavement

Friction Tester)장비를 이용한 시험 결과에서 주행속력이 증가할수록 미끄럼 저항 값(SN)이 낮아지는 동일한 경향을 나타낸다. 즉, 시험 결과의 평균 미끄럼 저항값(SN)은 주행속력 20km/h씩 증가할 때마다 각각 4.92, 4.06의 차이로 거의 일정하게 감소한다. 그와 마찬가지로, 예측결과의 미끄럼 저항값(SN)도 각각 2.22, 2.88의 일정한 차이로 감소하는 것을 알 수 있다.

[0073] 하지만, 예측결과의 미끄럼 저항 값은 주행속력에 따라 시험결과의 평균 미끄럼 저항 값과 다소 차이를 보인다. 즉, 예측결과는 주행속력이 증가할수록 미끄럼 저항 값의 감소량이 시험결과의 평균 미끄럼 저항 값 보다 작게 나타났다. 이는 LS-DYNA를 이용한 해석결과로부터 예측(Estimation) 방법을 이용하여 얻은 예측결과는 주행속력이 증가할수록 타이어와 노면 사이의 미끄럼 마찰계수에 대한 변화를 고려하지 못하기 때문이다.

[0074] 일반적으로, 마른 노면에서 주행속력이 증가할수록 타이어와 노면 사이의 미끄럼 마찰계수는 감소하게 된다(McLean AJ, et al 1994). 따라서, 본 발명에서는 주행속력이 증가함에 따라 미끄럼 마찰계수 변화를 고려하기 위해 3 가지의 마찰계수 변화에 대한 추가적인 해석을 진행하였고, 그 결과를 도 8b에 나타내었다. 여기서 '+'는 마찰계수 0.55, '*'는 마찰계수 0.48 그리고 '×'는 도 8a의 예측결과로써 0.51 의 마찰계수를 사용하여 얻은 미끄럼 저항 값이다.

[0075] 위의 결과에서 알 수 있듯이, 3 가지의 마찰계수 변화에 대한 미끄럼 저항 값은 모두 주행속력이 증가할수록 동일한 경향으로 감소한다. 만약, 주행속력이 증가함에 따라 타이어와 노면 사이의 미끄럼 마찰계수의 감소를 고려한다면 물의 동압에 의한 영향만으로 예측한 결과보다 더 큰 차이의 미끄럼 저항 값을 얻을 수 있을 것이다. 즉, 위의 예측결과에서 알 수 있듯이, 주행속력 40km/h, 60km/h, 80km/h에서 각각 0.55, 0.51, 0.48의 미끄럼 마찰계수가 변화한다고 가정하면 미끄럼 저항 값의 감소 양이 시험결과의 평균 미끄럼 저항 값과 동일한 감소 양을 나타내고, 그 값의 차이는 주행속력 40km/h, 60km/h, 80km/h에서 각각 1.42, 0.14, 1.26의 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다.

[0076] 따라서, LS-DYNA를 이용한 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 견인력(traction force)과 항력(drag force)을 수막 두께(h)와 주행속력의 지수함수로 나타낼 수 있기 때문에 쉽게 미끄럼 저항 SN의 변화를 확인할 수 있다.

[0077] 게다가, LS-DYNA 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 0.5mm의 한 가지 수막 두께에 대한 모델을 해석할 경우 150시간 이상의 해석시간이 소요되는 문제점을 해결할 수 있다. 즉, 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법으로 5mm, 7.5mm, 10mm의 3가지 수막 두께에 대하여 해석을 수행할 때 소요되는 해석시간은 각각 21, 23, 26이다. 이렇게 얻은 결과를 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 예측하는데 소요되는 시간은 데이터 정리 시간을 포함하여 1시간 미만이다. 따라서, 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 0.5mm 의 매우 얇은 수막 두께에 대한 결과를 얻기까지 총 71시간이 소요되기 때문에 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법만으로 결과를 얻는 것 보다 2배 이상 해석시간을 단축시킬 수 있다.

[0078] 또한, 본 발명에서 제안한 방법을 사용하여 예측 솔루션(Estimation solution)을 얻게 되면, 더 이상의 해석을 수행할 필요 없이 다양한 수막 두께에 대한 부력(lift force) 또는 미끄럼 저항 값 SN(Skid Number)을 쉽고 빠르게 얻을 수 있다.

[0079] 4. 결론

[0080] 본 발명에서는, LS-DYNA를 이용하여 물의 점성을 고려할 수 있는 세 개의 수막 두께(5mm, 7.5mm, 10mm) 대하여 완전 3차원 유한 요소 시뮬레이션(Full 3D FE simulation)을 수행하였다.

[0081] 이를 통해 수막 두께에 대한 주행속력 별 부력(lift force)을 얻을 수 있었고, 이것을 수막 두께와 주행 속력의 함수로서 나타낼 수 있는 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 2.5mm 의 얇은 수막 두께에 대한 부력(lift force)를 쉽게 예측할 수 있었다.

[0082] 이렇게 얻은 예측결과는 동일한 수막 두께 2.5mm에 대하여 타이어 롤링 모델(tire rolling model)을 이용한 완전 유한 요소 시뮬레인션(Full FE simulation) 방법의 해석결과와 매우 유사했다. 즉, 주행 속력이 증가할수록 부력(lift force)의 변화양상도 동일하게 증가하기 때문에 정성적으로 합당할 뿐만 아니라, 자승화 비[ratio of sum of squares (R2)]를 계산하여 얻은 정략적인 결과 값인 0.952으로부터 예측결과와 해석결과의 정확성을 알 수 있었다.

[0083] 따라서, LS-DYNA 타이어 롤링 모델(tire rolling model)을 이용한 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 다양한 수막 두께, 특별히 완전 유한 요소 시뮬레이션(full FE simulation)을 수행할 경우 많은 해석시간이 요구되는 매우 얇은 수막 두께(예를 들어 1mm 혹은 그 이하) 또는 다양한 주행 속력에 대하여 예측이 가능하다.

[0084] 더 나아가, LS-DYNA 타이어 슬라이딩 모델(tire sliding model)을 이용하여 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)으로 0.5mm 의 매우 얇은 수막 두께에 대한 견인력(traction force)과 항력(drag force)을 얻을 수 있었다.

[0085] 그 결과를 미끄럼 저항값(SN)으로 나타내었으며, ASTM E274(Pavement Friction Tester) 장비를 사용한 시험 결과와 비교하였다. 시험 결과와 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 모두 주행 속력이 증가할수록 타이어와 노면 사이의 마찰력이 감소하여 미끄럼 저항 값(SN)이 감소하는 동일한 경향을 얻을 수 있었다.

[0086] 하지만, 해석적 방법으로 얻은 예측결과는 주행속력이 증가함에 따라 감소하는 미끄럼 마찰계수를 고려하지 못하기 때문에 미끄럼 저항 값의 감소량이 시험결과의 평균 미끄럼 저항 값보다 작게 나타났다. 따라서, 주행속력이 증가함에 따라 미끄럼 마찰계수의 감소를 모사하여 미끄럼 저항 값의 감소량을 확인해보았고, 시험결과의 평균 미끄럼 저항값과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

[0087] 따라서, 해석적 방법의 예측결과에서 주행속력이 증가함에 따라 미끄럼 마찰계수의 변화를 고려할 수 있다면 시험결과와 동일한 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 또한, 완전 유한 요소 시뮬레이션(Full FE simulation) 방법과 예측 방법(Estimation Method)을 이용하여 미끄럼 저항 시뮬레이션을 수행할 경우, 완전 유한 시뮬레이션(요 Full FE simulation) 만을 이용한 것 보다 2배 이상의 해석 시간을 단축할 수 있다.

[0088] 따라서, 본 발명에서 제안한 방법을 이용하여 예측 솔루션(Estimation solution)을 얻게 되면, 더 이상의 해석을 수행할 필요없이 다양한 수막 두께에 대한 물리량 즉, 부력(lift force), 견인력(traction force), 항력(drag force)을 쉽고 빠르게 얻을 수 있고, 이를 이용하여 타이어와 노면 사이의 미끄럼 저항값의 변화를 확인할 수 있다.

[0089] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

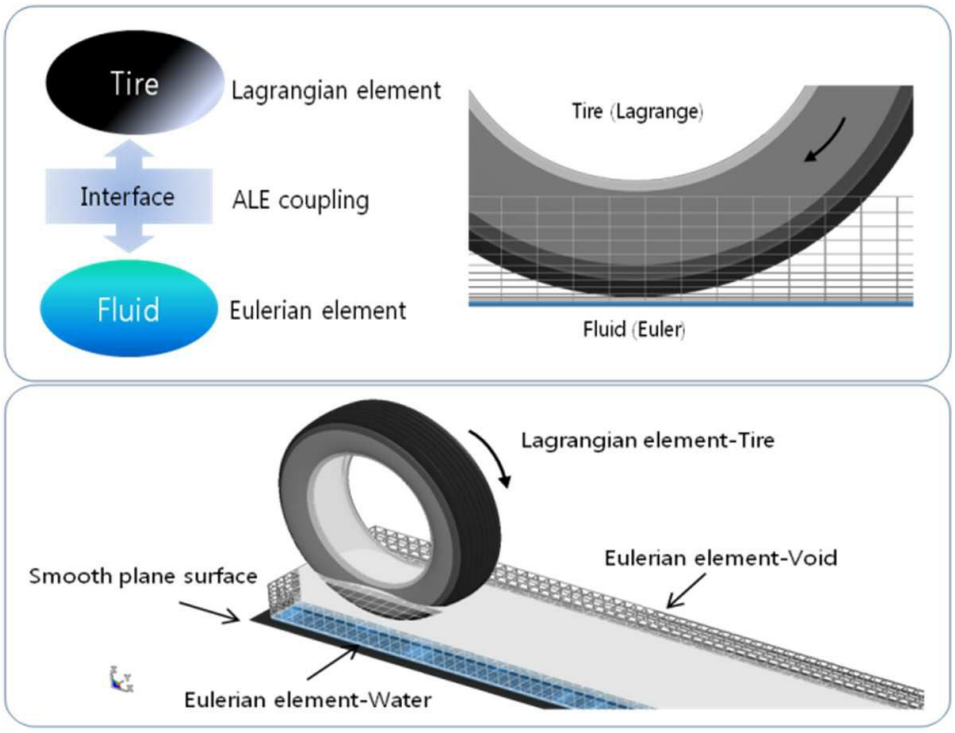
부호의 설명

[0090]

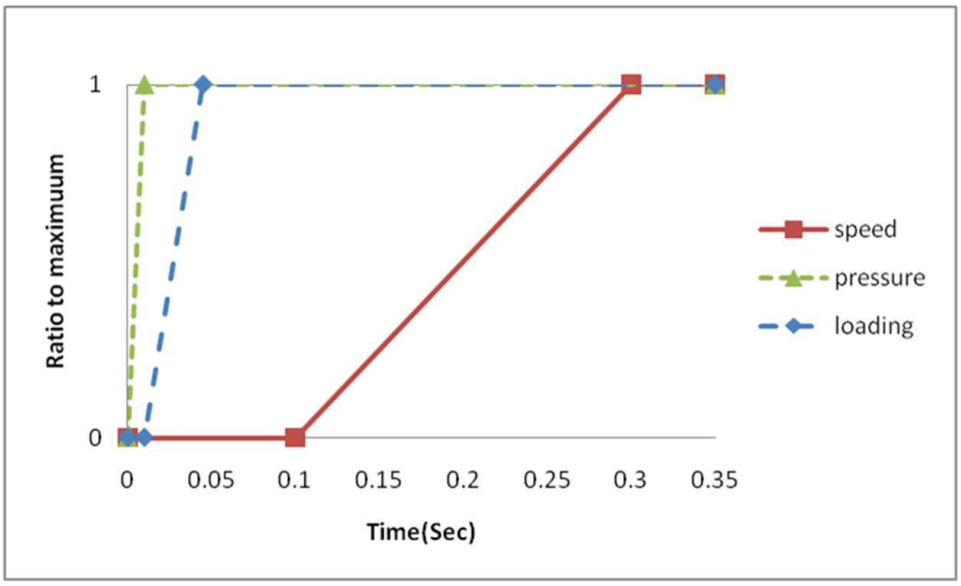
Lift force: 부력	h: 수막 두께
FE simulation: 유한 요소 시뮬레이션	
Estimation: 예측	Traction force: 견인력
Drag force: 항력	SN: 미끄럼 저항값

도면

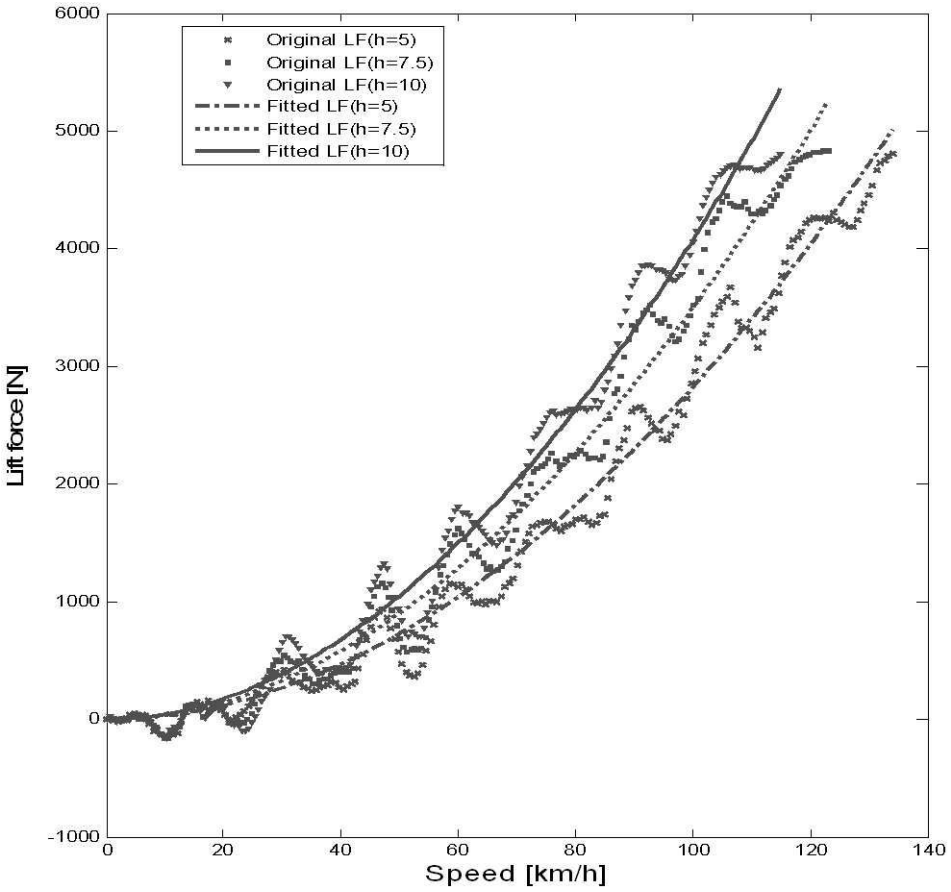
도면1


Tire
Lagrangian element
Interface
ALE coupling
Fluid
Eulerian element
Tire (Lagrange)
Fluid (Euler)
Lagrangian element-Tire
Smooth plane surface
Eulerian element-Void
Eulerian element-Water

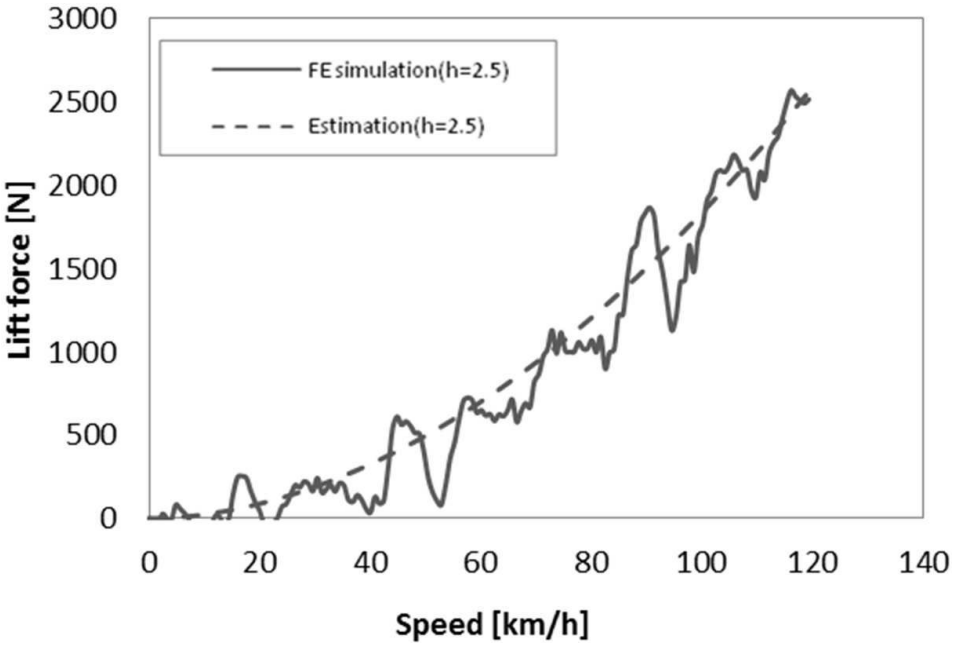
도면2


1
0
Ratio to maximuum
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
Time(Sec)
speed
pressure
loading

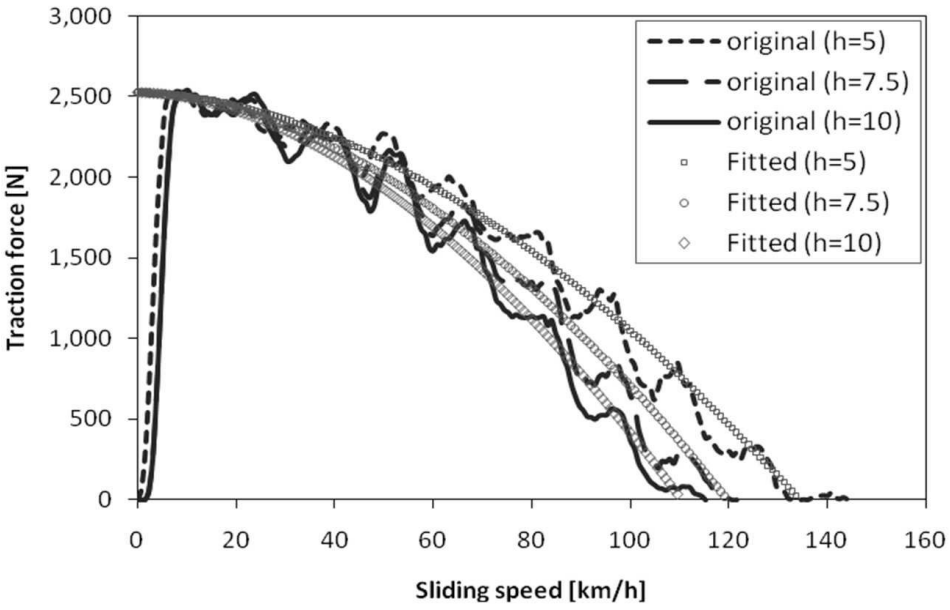
도면3


Original LF(h=5)
Original LF(h=7.5)
Original LF(h=10)
Fitted LF(h=5)
Fitted LF(h=7.5)
Fitted LF(h=10)
Lift force [N]
Speed [km/h]
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
-1000
0
20
40
60
80
100
120
140

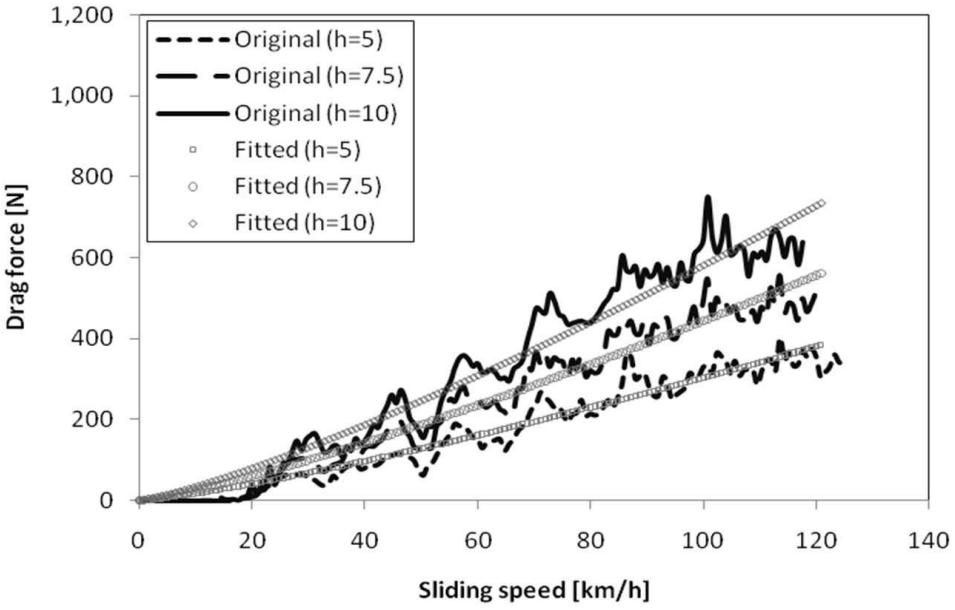
도면4


FE simulation(h=2.5)
Estimation(h=2.5)
Lift force [N]
Speed [km/h]
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
20
40
60
80
100
120
140

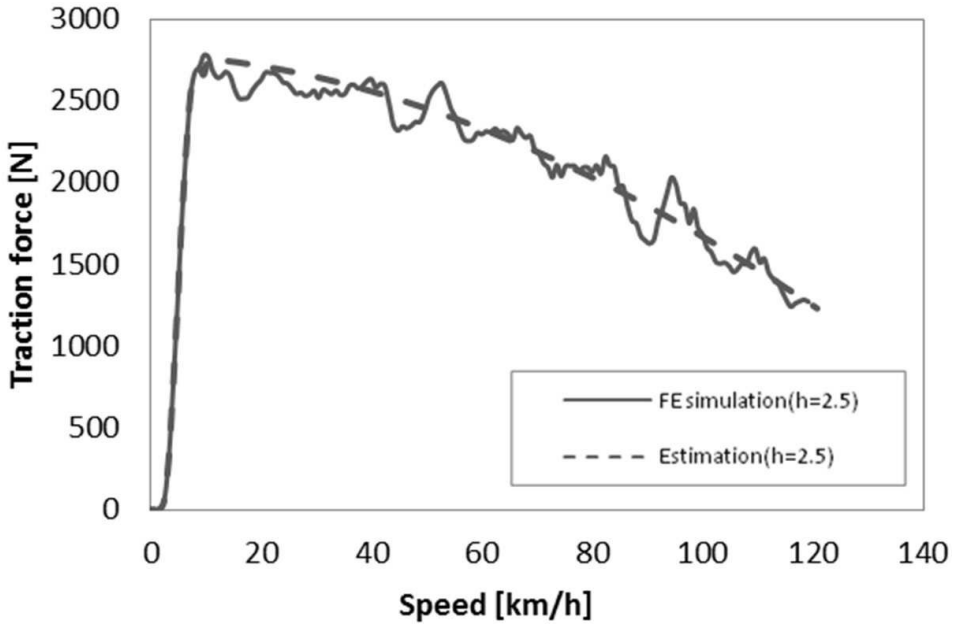
도면5a


3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
500
0
Traction force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
160
Sliding speed [km/h]
original (h=5)
original (h=7.5)
original (h=10)
Fitted (h=5)
Fitted (h=7.5)
Fitted (h=10)

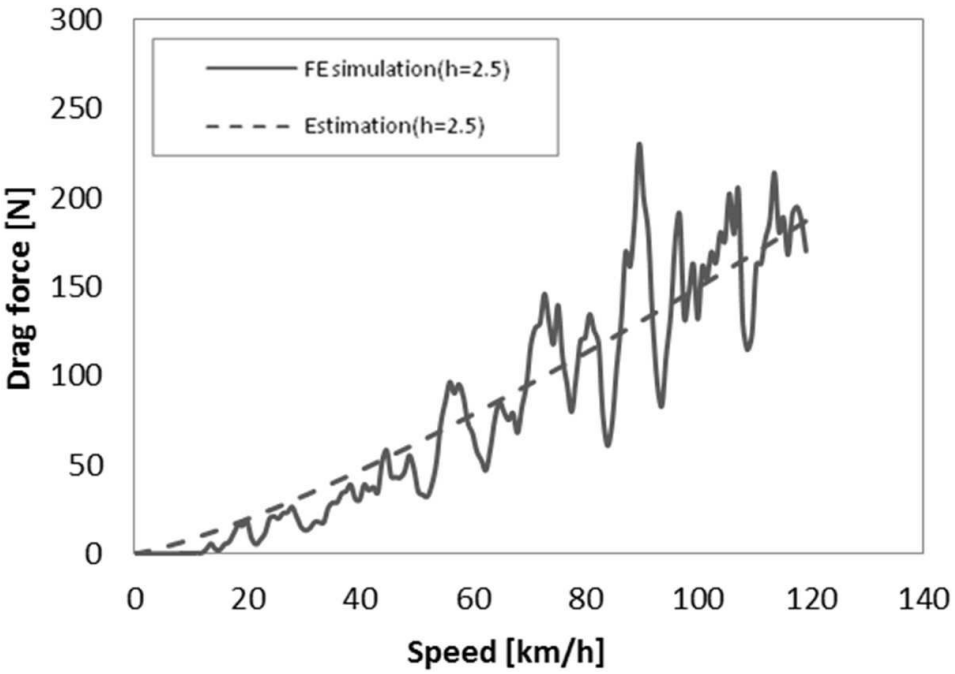
도면5b


1,200
1,000
800
600
400
200
0
Drag force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
Sliding speed [km/h]
Original (h=5)
Original (h=7.5)
Original (h=10)
Fitted (h=5)
Fitted (h=7.5)
Fitted (h=10)

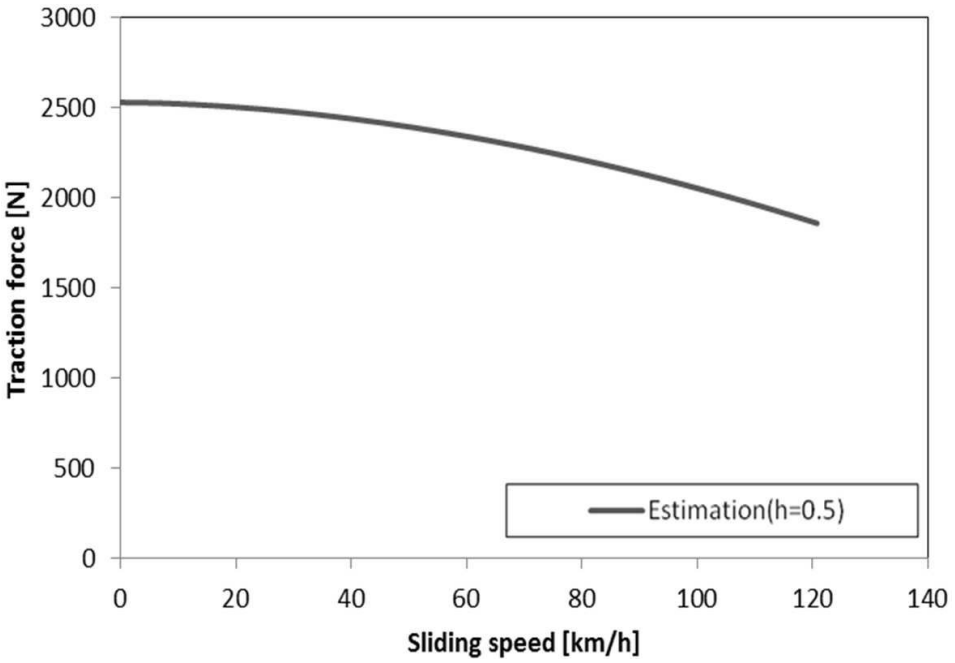
도면6a


3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Traction force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
Speed [km/h]
FE simulation(h=2.5)
Estimation(h=2.5)

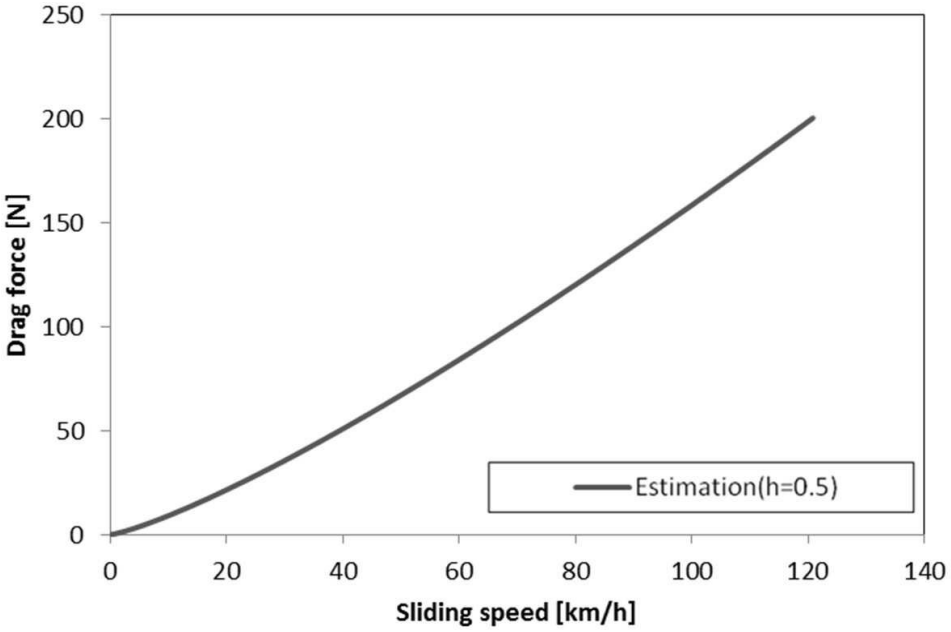
도면6b


300
250
200
150
100
50
0
Drag force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
Speed [km/h]
FE simulation(h=2.5)
Estimation(h=2.5)

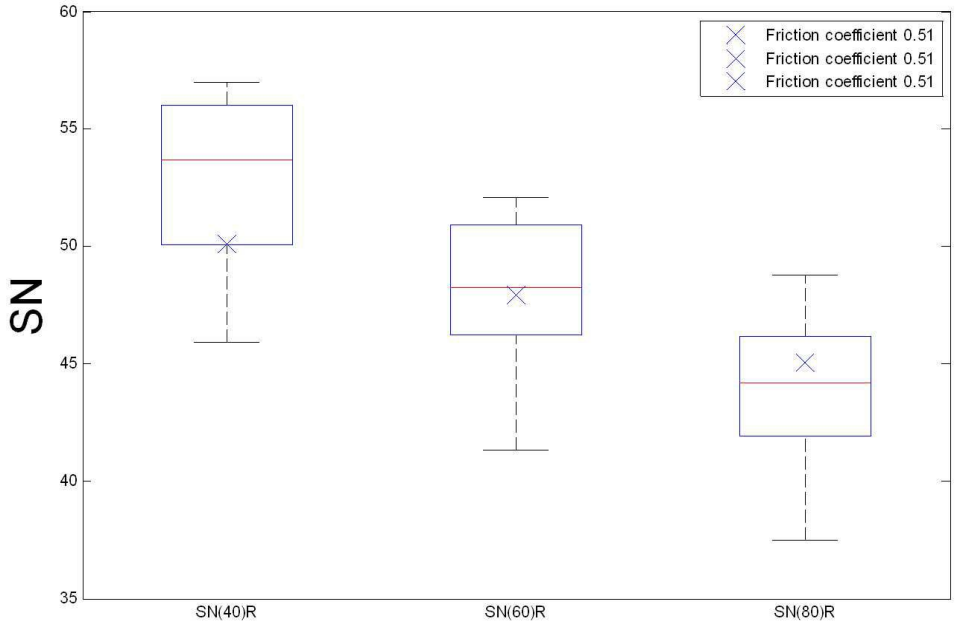
도면7a


3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Traction force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
Sliding speed [km/h]
Estimation(h=0.5)

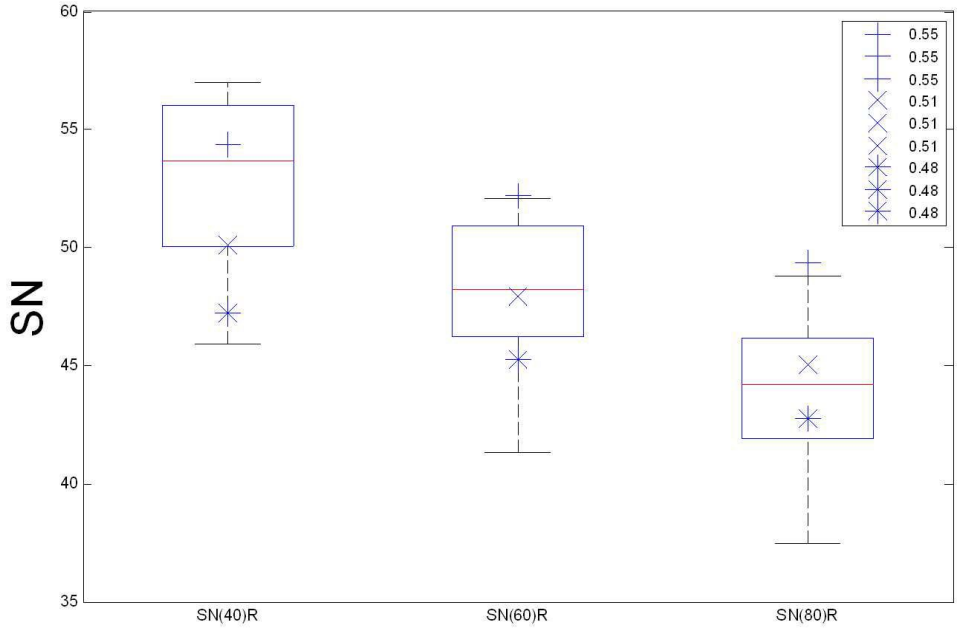
도면7b


250
200
150
100
50
0
Drag force [N]
0
20
40
60
80
100
120
140
Sliding speed [km/h]
Estimation(h=0.5)

도면8a


Friction coefficient 0.51
Friction coefficient 0.51
Friction coefficient 0.51
SN
60
55
50
45
40
35
SN(40)R
SN(60)R
SN(80)R

도면8b


0.55
0.55
0.55
0.51
0.51
0.51
0.48
0.48
0.48
SN
60
55
50
45
40
35
SN(40)R
SN(60)R
SN(80)R