

## 코드섬유-고무 복합재료의 물성치에 대한 계면의 영향

임현우\* · 김종국\* · 염영진\*\*

\* 울산대학교 기계자동차공학부

### Effect of Interface on the Properties of Cord-Rubber Composites

Hyun-Woo Lim\*, Jong-Kuk Kim\* and Young-Jin Yum\*\*†

\* School of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan

(Received December 7, 2009 ; Revised March 20, 2010 ; Accepted March 22, 2010)

**Key Words** : Cord-Rubber Composite(코드섬유-고무 복합재료), Effective Elastic Constant(유효탄성계수), Neo Hookean Function(네오 후크함수)

**초록**: 고무의 비선형성과 대변형으로 인해 코드-고무 복합재료의 정확한 거동을 파악하기는 어렵다. 코드와 고무 사이에 제 3의 상을 가정해서 세 가지 상에 대한 모델링을 하기도 하지만 코드-고무 복합재료 계면의 두께와 물성을 결정하기 힘들다. 본 연구에서는 2 차원 일반화된 평면변형률요소와 평면변형률요소를 사용한 유한요소법을 적용하여 여러 가지 계면 두께를 갖는 코드-고무 복합재료의 유효탄성계수와 무차원 탄성계수를 구하였다. 고무물성은 네오-후크 모델을 적용하였고 여러 가지 하중상태와 몇 가지 계면 물성치에 대한 고찰을 하였다. 그 결과 계면 물성치와 계면 두께는 코드-고무 복합재료의 비선형성과 유효탄성계수에 영향을 미침을 알 수 있었다.

**Abstract**: The nonlinearity and high deformability of rubber make accurate analysis of the behavior of cord-rubber composites a challenging task. Some researchers have adopted the third phase between cord and rubber and have carried out three-phase modeling. However, it is difficult to determine the thickness and properties of the interface in cord-rubber composites. In this study, a two-dimensional finite-element method (2D FEM) is used to investigate the effective and normalized moduli of cord-rubber composites having interfaces of various thicknesses; this model takes into account the 2D generalized plane strain and a plane strain element. The neo-Hookean model is used for the properties of rubber, several interface properties are assumed and three loading directions are selected. It is found that the properties and thickness of the interface can affect the nonlinearity and the effective modulus of cord-rubber composites.

### 1. 서 론

1845년 R.W.Thomson이 처음으로 고안한 공기압 타이어는 1888년 J.B.Dunlop에 의해 발전되어 대중화되기에 이른다. 이는 고무가 초탄성, 점탄성 각각의 특성으로 인해 낮은 하중에서도 대변형 성질을 띠며, 우수한 진동 감쇠 능력 및 에너지 흡수력, 낮은 소음 특성을 가지기 때문이다. 이러한 고무의 특성을 기술하기 위해서는 변형률 에너지 밀도 함수를 사용하지만, 고무에 대한 정확한 기계적 거동을 분석하는 것은 현실적으로 제한이 많다.<sup>(1)</sup> 타이어는 고무와 섬유, 그리고 여러 강선이 꼬여진 강철코드 등 서로 다른 재료 특성을 가진 재료들로 구성되어 있어, 재료비선형효과가

나타나며, 기능적으로 대변형을 일으키는 복합재료이다. 이러한 타이어는 다른 구조물에서 보기 어려운 요소들이 많아 수학적 연구에는 한계가 있어 기계적 거동을 해석하기 위해 유한요소법이 가장 널리 사용되고 있다.<sup>(2)</sup>

여러 학자들에 의해 타이어에 관한 연구가 진행되어왔다. Walter<sup>(3)</sup>는 코드섬유-고무복합재료가 탄성 거동을 유지한다는 가정 하에 코드섬유-고무 복합재료의 유효탄성계수를 얻기 위한 연구를 수행하였다. Pidaparti<sup>(4,5)</sup>는 코드섬유-고무 복합재료에 대표체적요소 개념을 도입하여 유한요소해석을 통해 유효탄성계수를 구하였고, 꼬여있는 코드섬유가 삽입된 코드섬유-고무 복합재료의 3차원 모델링을 통한 재료의 물리적 특성을 파악하고 꼬임 효과, 비원형 코드섬유의 응력분포를 분석하였다. Rao와 Daniel<sup>(6)</sup>은 꼬여있는

† Corresponding Author, yjyum@ulsan.ac.kr

스틸 와이어가 포함된 코드섬유-고무 복합재료의 연구를 통하여 전체 재료의 기계적 특성 및 파괴 특성을 분석하고 연관된 코드섬유 사이의 각도가 변화함에 따른 재료물성과 실험값을 비교하였다. Paris와 Costello<sup>(7)</sup>는 원통 셀을 적용한 코드 복합재료가 축 하중을 받을 때 인장과 비틀림에 대한 연계효과가 어떻게 나타나는지 연구하였다. 한편, 타이어는 굴신운동에 대한 피로강도와 인장강도가 높아야 한다. 이는 타이어가 차량의 하중을 지탱하고 제동력 및 구동력을 지면에 전달하며 노면으로부터 오는 충격과 진동을 흡수하고 주행 중 차량의 방향전환 및 방향유지의 기능을 담당하기 때문이다. 그러므로 타이어를 설계할 때는 타이어 코드에 작용하는 인장력과 코드섬유를 감싸고 있는 고무에 작용하는 전단응력이 최소화 되면서 적절히 분포되도록 해야 한다.<sup>(8)</sup> 따라서 이를 고려하기 위한 모델링이 필요하다. 공학자들은 이러한 복합재료의 계면의 효과를 정확히 구현하기 위한 모델링을 도입하였다. Christensen<sup>(9)</sup>은 복합재료의 유효 전단계수를 얻기 위해 계면을 새로운 상으로 가정한 3가지 상을 가지는 구형(3-phase sphere) 모델을 채택하였다. Hashin<sup>(10)</sup>은 두 매개체를 가진 복합재료 내의 정확한 전도 효과를 분석하기 위하여 두께가 얇은 계면을 새로운 상으로 도입하였다. Bertoldi<sup>(11)</sup>는 미세구조 복합재료의 계면의 물성을 얻고 그에 따른 기계적 거동을 알아내기 위해 계면을 다양한 기법으로 모델링하였다. 더불어, 이러한 모델링기법을 이용하여 복합재료 내의 계면의 효과를 입증하기 위한 공학자들의 연구도 계속되었다. G.Romesh<sup>(12)</sup>는 콘크리트 재료를 3가지 상을 가지는 모델로 가정하여 계면의 부피비와 탄성계수의 변화에 따른 효과를 조사하고, 탄성계수를 결정하기 위한 방법을 제시하였다. Turhan<sup>(13)</sup>은 콘크리트 재료에 3가지 상을 가지는 모델을 적용하는 것이 정당하다는 것을 혼합물의 범칙과 H-S bound를 사용하여 입증하였다. 복합재료의 계면의 결정과 두께에 관한 연구도 계속 되었다. H.K.Lee<sup>(14)</sup>는 섬유-금속 복합재료를 5가지까지 가정하고, 각기 다른 경계조건을 적용하여 재료의 거동을 연구하였다. Hashin<sup>(15)</sup>은 3가지 상을 지닌 복합재료에서 계면의 두께 별로 재료의 기계적 특성을 분석하고 불완전한 계면과 얇은 탄성 계면의 효과를 비교, 분석 하였다. 또한, W.Stephen Fulton<sup>(16)</sup>은 타이어 내 코드섬유-고무 복합재료 접합 조건에 따른 계면의 미세구조분석을 하였다. 본 연구의 저자들도 앞선 연구에서 전체 타이어를 모델링하지 않고, 2차원이면서 계면을 형상화 시킨 세 가지 상을 가진 코드섬유-고무 복합재료의 대표체적요소들에 대한 유한요소해석을 하여 유효탄성계수를 구하고,

전단응력분포에 대하여 조사하였다. 또한, 코드섬유-고무 복합재료는 콘크리트 재료와 달리 계면의 관찰이 어렵다. 따라서, 계면의 두께 또한 정확하게 규정하는 데 어려움이 있다. 이번 연구에서는 계면의 두께를 3가지로 분류하여 계면의 물성치의 변화에 따른 효과를 분석하려고 한다.

## 2. 유한요소해석 및 결과

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여, 타이어 내 코드섬유-고무 복합재료의 대표체적요소들에 대하여 코드와 고무 사이의 계면의 두께와 물성 변화에 따른 유한요소해석을 실시하였다. 2차원 단위 셀로 모델링 되었고, 코드섬유와 고무, 그 사이 계면으로 구성되었다(Fig. 1). 요소는 길이방향 하중( $E_{33}$ )일 경우 8절점 일반화된 평면변형률요소 (8-node generalized plane strain element), 가로방향 하중( $E_{11}$ )과 전단방향 하중( $G_{12}$ )일 경우 8절점 평면변형률요소 (8-node plane strain element)를 사용하였다.

경계조건은 길이방향 인장의 경우는 일반화된 평면 변형률요소 이므로 특별한 구속은 없다. 가로방향 인장의 경우는 한쪽 모서리의 x방향을 구속한 뒤, 반대쪽 모서리에 일정한 변위를 적용하였고, 단순전단의 경우는 아래쪽 모서리를 고정시킨 뒤 일정한 전단 변위를 적용하였다. 해석에 사용된 물성치를 Table 1에 나타내었다. 계면의 물성치는 측정이나 예측하기 힘들기 때문에 계면의 탄성계수는 고무의 탄성계수의 1/10, 1, 10, 100배로 가정하였다. 또한, 계면의 두께에 따른 효과를 분석하기 위하여 계면의 부피비<sup>(15)</sup>를 0.3%, 1.8%, 5.2%로 나누어 유한요소해석을 수행하였다. 타이어에서의 변형률은 일반적으로 코드 섬유는 높은 강성으로 인하여, 20% 내외로 나타난다. 20% 이내에서는 Mooney-Rivlin 함수와 Neo Hookean 함수는 근사한 거동을 보인다.<sup>(17)</sup> 그러한 이유로 그 변형률 구

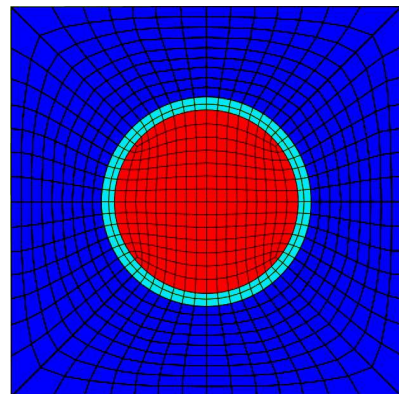


Fig. 1 FE model of cord-rubber composite

간 내에서 고무의 거동을 만족하는 가장 간단한 변형을 에너지 밀도 함수인 Neo Hookean 함수를 적용하였다. 각 경우에 따른 선형 유한요소해석을 수행하였다.

실험 데이터<sup>(18)</sup>와 해석으로 계산된 유효탄성계수와 길이 방향, 가로방향, 전단방향에 따라 결과값들을 Table 2~4에 비교하였다. 유효탄성계수는 동일한 변형률에 부과된 모서리에서의 평균 변형률과 평균 응력으로 계산을 수행하였다. 식은 다음과 같다.

**Table 1** Mechanical properties used in this study

	Cord	Interface	Rubber
Elastic modulus(MPa)	4780	0.883-883	8.83
Poisson`s ratio	0.45	Neo Hookean	Neo Hookean
Volume fraction	17.1%	0.3%, 1.8%, 5.2%	82.6%, 81.1%, 77.7%

**Table 2** Effective elastic constants for the interface modulus ( $\Delta t=0.01$ )

Interface modulus(MPa)	E <sub>33</sub>	E <sub>11</sub>	G <sub>12</sub>
0.883	825	12.3	2.95
8.83	825	12.5	2.95
88.3	825	12.5	2.95
883	828	12.5	2.95
Experimental data <sup>(18)</sup>	841	13.4	3.45

**Table 3** Effective elastic constants for the interface modulus ( $\Delta t=0.05$ )

Interface modulus(MPa)	E <sub>33</sub>	E <sub>11</sub>	G <sub>12</sub>
0.883	825	12.0	2.95
8.83	825	12.4	2.95
88.3	826	12.6	2.95
883	840	12.6	2.95
Experimental data <sup>(18)</sup>	841	13.4	3.45

**Table 4** Effective elastic constants for the interface modulus ( $\Delta t=0.1429$ )

Interface modulus(MPa)	E <sub>33</sub>	E <sub>11</sub>	G <sub>12</sub>
0.883	824	11.7	2.95
8.83	825	12.5	2.95
88.3	829	13.0	2.95
883	871	13.1	2.95
Experimental data <sup>(18)</sup>	841	13.4	3.45

$$\text{Effective elastic constant} = \sigma_{\text{average}} / \varepsilon_{\text{average}} \quad (1)$$

계면의 두께비를 Interface thickness ratio( $\Delta t$ )라고 하고, 식은 다음과 같다.

$$\Delta t = \text{Interface thickness} / \text{cord radius} \quad (2)$$

계면의 부피비 0.3%, 1.8%, 5.2%는 순서대로  $\Delta t$ 가 0.01, 0.05, 0.1429인 경우에 해당된다.

결과를 보면 3가지 경우 모두 전단탄성계수의 변화는 없다.  $\Delta t=0.01$ 일 경우 길이방향과 가로방향의 경우 또한 변화가 거의 없다.  $\Delta t=0.05$ 일 경우부터 길이방향과 가로방향 경우에 유효탄성계수의 증가가 확인된다.  $\Delta t=0.1429$ 일 경우에 유효탄성계수의 변화의 증가 정도가 가장 크다.

다음으로, 고무의 초탄성에 대한 성질을 알기 위하여, Neo Hookean 함수를 적용하여 비선형 해석을 수행하였다. 선형 해석의 경우와 경계조건은 동일하게 적용하였다. Normalized modulus는 비선형 유한요소 해석에서의 유효탄성계수를 선형 유한요소해석에서의 유효탄성계수로 나눈 값이다. 각  $\Delta t$ 에 따른 응력-변형률 선도의 전반적인 개형은 비슷하다. 그와 관련하여 계면의 물성치가 변할수록 코드-고무 복합재료의 강성이 어떻게 변하는지 분석하였다.

길이방향의 경우 계면의 물성치가 높아짐에 따라 전체적인 유효탄성계수의 상승효과가 점점 커짐을 알 수 있다. 하지만, 가로방향과 전단방향의 경우 강성이 증가는 하지만 그 효과는 점점 줄어들음을 알 수 있다.

고무의 초탄성 성질로 인해서 길이방향 인장 시에는 부과된 변형률에 따라 Normalized modulus는 감소하였고, 계면의 물성치가 클수록 Normalized modulus가 증가하고, 그에 따른 효과도 커진다. 가로방향 인장 시에서는 부과된 변형률에 따라 고무의 초탄성 성질에 의해 Normalized modulus는 감소하고, 전체 Normalize modulus 또한 계면의 물성치가 클수록 더욱 감소하지만, 그 효과는 점점 줄어든다. 반면에, 전단방향에서는 부과된 변형률에 따라 Normalized modulus는 증가하고 계면의 물성치가 커질수록 그 값의 변화는 매우 작다.

길이방향일 경우, Normalized modulus의 변화가 다른 2가지 경우와 달리 비선형적이지 않고 대략적으로 선형적임을 보여준다. 이는 축 하중이 부과되는 경우에는 코드 섬유가 코드-고무 복합재료 내에서 더 큰 역할을 하기 때문에 그에 따른 효과가 반영되어 고무의 초탄성 성질이 잘 나타나지 않기 때문이다. 가로방향 인장 시의 결과는 Pidaparti<sup>(4)</sup>의 연구결과와 상반된 결과를 보인다. 그 원인에 대해 분석하였다. 고무는 초탄성 성질에 의해 Neo Hookean 함수를 적용하여

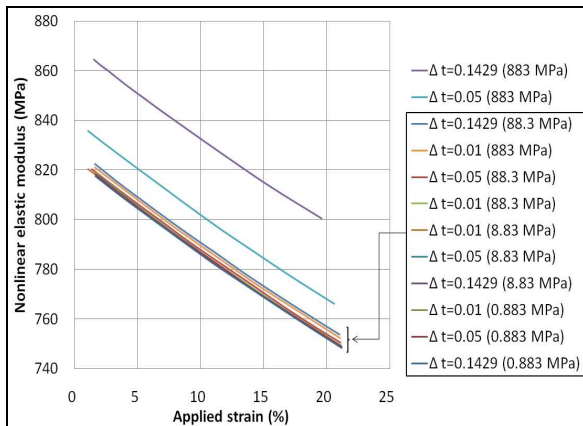


Fig. 2 Comparison of effective elastic modulus for longitudinal direction

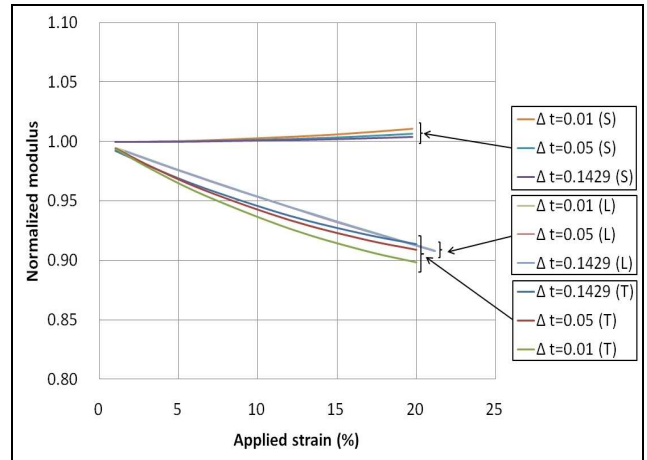


Fig. 5 Comparison of normalized modulus for interface modulus 0.883MPa

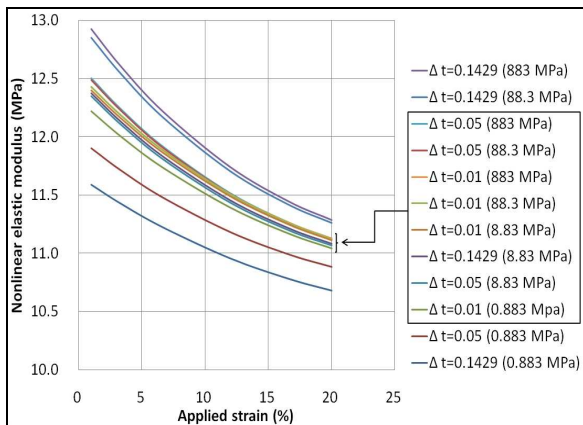


Fig. 3 Comparison of effective elastic modulus for transverse direction

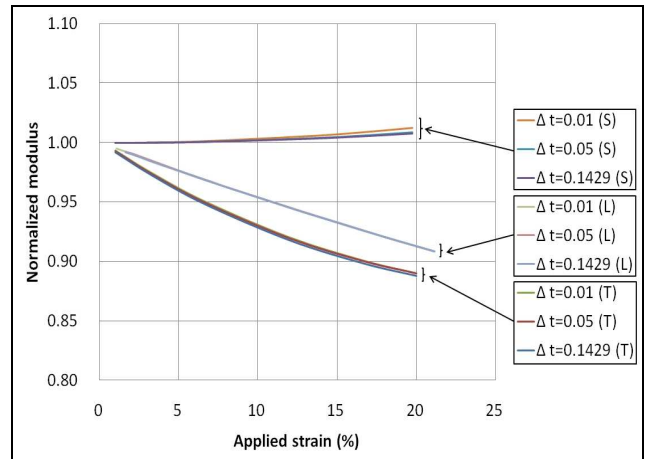


Fig. 6 Comparison of normalized modulus for interface modulus 8.83MPa

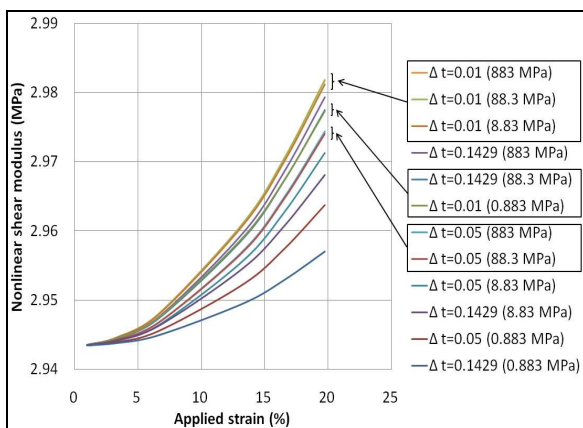


Fig. 4 Comparison of effective elastic modulus for shear direction

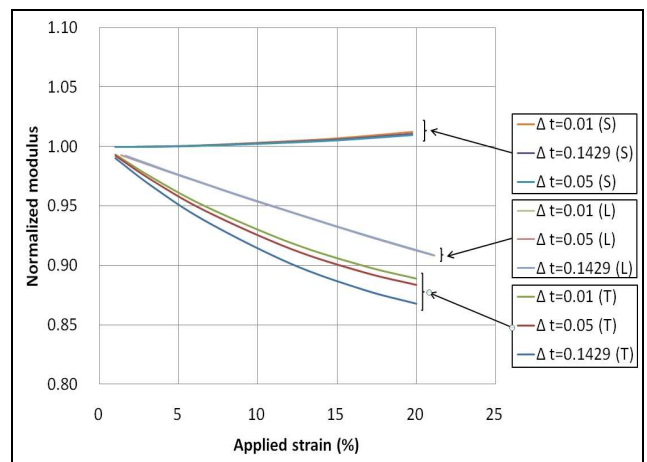


Fig. 7 Comparison of normalized modulus for interface modulus 88.3MPa

비선형 유한요소해석을 수행하였을 때 변형률이 증가할수록 선형 유한요소해석의 경우보다 탄성계수의 값이 낮게 나타난다. 이는 Neo Hookean 함수를 적용한 비선형 유한요소해석의 경우 변형률이 증가함에 따라 재료의 탄성계수는 감소하지만, 선형 유한요소해석의

경우에는 재료의 탄성계수가 일정하기 때문이다. 단 순전단의 경우는 Neo Hookean 함수에서

$$\tau = G\gamma \quad (3)$$

식 (3)이 적용된다.<sup>(17)</sup> 이는 선형해석과 이론적으로 동일하다. Normalized shear modulus의 값은 증가하지만, 그 값이 1에 근사함을 확인할 수 있다. 약간의 차이는 한 가지 재료가 아니기 때문에 재료 사이의 인장력과 전단력 등에 의해 나타나는 것으로 추측된다.

Fig. 2~4는 계면의 물성치와 두께에 따른 유효탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 길이 방향의 경우 계면의 물성치가 883MPa일 때 유효탄성계수의 변화가 커짐이 확인되고,  $\Delta t=0.01$ 일 때는 계면의 물성치가 변해도 유효탄성계수의 변화가 거의 없다. 가로 방향의 경우 계면의 두께가 얇아질수록 증가폭은 점점 감소한다. 또한 계면의 물성치가 고무의 물성치 보다 작을 때에는 계면의 두께가 얇을수록 재료의 유효탄성계수가 증가하지만, 고무의 물성치 보다 클 때는 계면의 두께가 두꺼울수록 유효탄성계수가 증가한다. 전단 방향일 경우는 계면의 물성치와 두께에 따라서 재료의 유효전단계수가 변화하긴 하나, 그 값의 변화가 매우 작다.

Fig. 5~8은 계면의 물성치와 두께에 따른 Normalized modulus의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 Normalized modulus는 유효탄성계수를 선형인 경우의 탄성계수로 나눈 값이다. 길이 방향(L)일 경우 계면의 물성치가 883MPa일 때, 두께에 따른 Normalized modulus의 변화가 확인되고, 나머지 경우는 두께에 따른 Normalized modulus의 변화가 거의 없다. 가로 방향(T)일 경우 계면의 물성치가 고무의 물성치 보다 작을 때는 계면의 두께가 얇을수록 재료의 Normalized modulus는 감소하고, 고무의 물성치보다 클 때는 계면의 두께가 얇을수록 Normalized modulus는 증가한다. 이는 유효탄성계수의 그래프 특성과 반대되는데, 선형 탄성계수의 값의 변화 때문인 것으로 판단된다. 전단방향(S)의 경우는 유효탄성계수 그래프 특성과 마찬가지로 그 값의 변화가 매우 작다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 코드섬유-고무 복합재료에 대해서 DSC(Differential Scanning Calorimetry)측정을 통하여 유리전이온도( $T_g$ )를 측정하였다. 계면과 고무기지에서의 유리전이온도는 각각  $-64^\circ\text{C}$ ,  $-68^\circ\text{C}$ 이었다. 이 차이로 계면과 고무기지에서의 폴리머 사슬의 움직임이 차이가 있음을 알 수 있고, 그에 따라 계면의 기계적 거동이 차이가 있음을 예측하였다.<sup>(19)</sup> 이런 이유로 코드섬유-고무복합재료의 물성치에 대한 정확한 예측을 위해 3가지 상을 갖는 모델링을 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

Fig. 10은 Nylon66 코드와 천연고무로 이루어진 복합재료에 대한 SEM(Scanning Electron Microscopy -

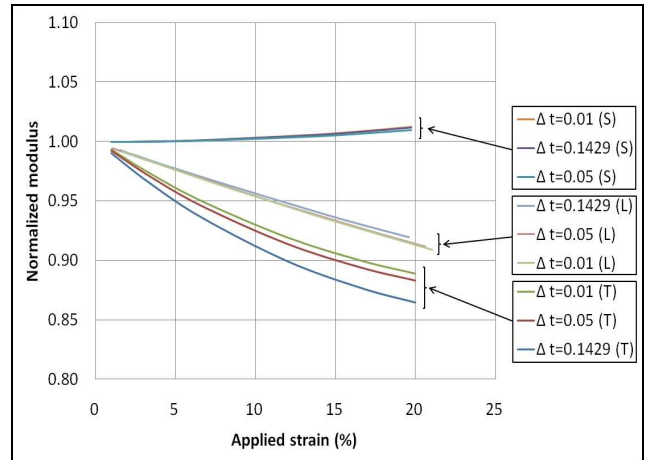


Fig. 8 Comparison of normalized modulus for interface modulus 883MPa

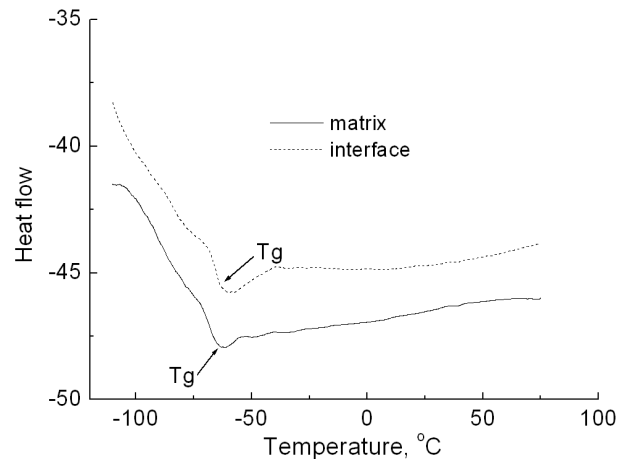


Fig. 9 Differential Scanning Calorimetry traces of rubber at matrix and interface

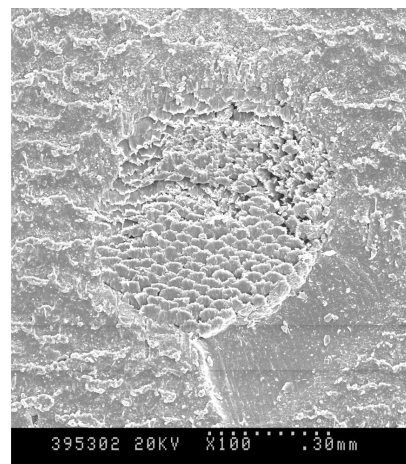


Fig. 10 A SEM photograph of the cord-rubber composite

JSM-6700F) 사진이다. 이 사진을 통해 알 수 있듯이 코드섬유-고무 복합재료는 계면의 두께를 명확하게 결정하는 것은 어려운 문제이다. 이것이 본 연구에서

계면의 두께를 3가지 경우로서 가정하여 그에 따라 코드섬유-고무 복합재료의 기계적 거동이 어떻게 변하는가 분석한 이유이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 타이어에서의 코드섬유-고무 복합재료의 3가지 상을 갖는 대표체적요소를 채택하여 고무의 초탄성을 고려하기 위한 Neo Hookean 함수를 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과를 이용하여 계면의 물성변화와 두께변화에 따른 코드섬유-고무 복합재료의 기본적인 기계적 특성을 분석하였다.

본 연구를 통하여, 계면의 물성치(0.883~883MPa)가 클 수록, 그리고 계면의 물성치가 고무의 물성치(8.83MPa)보다 클 경우 계면의 두께가 두꺼울 수록 고무의 초탄성 성질로 인하여 가로방향 인장 시 코드섬유-고무 복합재료의 Normalized modulus의 변화가 커짐을 확인하였다. 다만, 길이방향 인장 시와 단순전단의 경우에는 Normalized modulus의 변화가 적다.

이와 같이 계면의 물성치와 두께에 따라서 코드섬유-고무 복합재료의 기계적 거동에 변화가 나타난다. 하지만, 더욱 정확하고 정밀한 경계면 효과를 구명하기 위해서는 코드섬유-고무 복합재료에 대한 더 많은 실험과 계면의 물성치와 두께를 좀 더 정밀하게 확립할 필요가 있을 것이다.

### 참고문헌

- (1) Kim, Y.W., Kim, J.G., 2002, "Measurement of Mechanical Material Properties of Rubber Compounds Sampled from a Pneumatic Tire," *Proceedings of the KSMTE 2002 Spring Annual Meeting*, pp.404~409.
- (2) Kim, Y.W., Kim, J.G., 2003, "F.E. Analysis of the Radial Tire Inflation Using the Hyperelastic Properties of Rubber Compounds Sampled from a Tire," *Transactions of KSME*, Vol.11, No.4, pp.123~134.
- (3) Walter, J.C., 1978, "Cord-rubber Tire Composites: Theory and Application," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 51 pp. 524~576.
- (4) Pidaparti, R.M. and May, A.M., 1996, "A Micromechanical Analysis to Predict the Cord-Rubber Composite Properties," *Composite Structures*, Vol. 34, No. 4, pp. 361~369.
- (5) Pidaparti, R.M. and Jayanti, S., Henkel, J., El-Mounayri, H., 2001, "Design Simulation of Twisted Cord-Rubber Structure Using ProE/ANSYS," *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 287~294.
- (6) Rao, S., Daniel, I.M. and Gdoutos, E.E., 2004, "Mechanical Properties and Failure Behavior of Cord/Rubber Composites," *Applied Composite Materials*, Vol. 11, pp. 353~375.
- (7) Paris, A.J., Costello, G.A., 2000, "Bending of Cord Composite Cylindrical Shells," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 67, No. 1, pp. 117~127.
- (8) Curtiss, W.W., 1973, "Principles of Tire Design," *Tire Science and Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 77~98.
- (9) Christensen, R.M. and Lo, K.H., 1979, "Solutions for Effective Shear Properties of Three-Phase Sphere and Cylinder Models," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 27, pp. 315~330.
- (10) Hashin, Z., 2001, "Thin Interphase/Imperfect Interface in Conduction," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 4, pp. 2261~2267.
- (11) Bertoldi, K., Bigioni, D. and Drugan, W.J., 2007, "Structural Interfaces in Linear Elasticity. Part 1: Nonlocality and Gradient Approximations," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 55, No. 1, pp. 1~34.
- (12) Ramesh, G., Sotelino, E.D. and Chen, W.F., 1996, "Effect of Transition Zone on Elastic Moduli of Concrete Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 611~622.
- (13) Ilker Bekir Topcu and Turhan Bilir, 2009, "Analysis of Rubberized Concrete as a Three-phase Composite Material," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 11, pp. 1251~1263.
- (14) Pyo, S.H. and Lee, H.K., 2009, "An elastoplastic Damage Model for Metal Matrix Composites Considering Progressive Imperfect Interface Under Transverse Loading," *International Journal of Plasticity*, Vol. 26, Issue 1, pp. 25~41.
- (15) Hashin, Z., 2002, "Thin Interphase/Imperfect Interface in Elasticity with Application to Coated Fiber Composites," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, pp. 2509~2537.
- (16) Stephen Fulton, W., 2004, "Interfacial Microanalysis of Rubber-Tyre-Cord Adhesion and the Influence of Cobalt," *Applied Surface Science*, Vol. 221, pp. 69~86.
- (17) Macosko, C.W., 1994, "Rheology: Principles, Measurement and Application," *VCH Publishers*, ISBN 1-56081-579-5.
- (18) Walter, J.C. and Patel, H.P., 1978, "Approximate Expressions for the Elastic Constants of Cord-Rubber Laminates: Theory and Applications," *Journal of Rubber Chemical and Technology*, Vol. 51, No. 3, pp. 710~724.
- (19) Yum, Y.J, Son, J.H., Xie, Z. and Youshan, W., 2007, "Mechanical Properties of Three-Phase Cord-Rubber Composite," *11th International Conference on Mechatronics Technology*, Ulsan, Korea, Nov.5-8.