



고무 성형 공정에서 금형 형상에 따른 고무 흐름의 컴퓨터 모사

이단비 · 이민아 · 최성현* · 류민영 †

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과

*한국타이어 중앙연구소

접수일(2014년 7월 29일), 수정일(2014년 8월 12일), 게재확정일(2014년 8월 25일)

Computer Simulation of Rubber Flow for Mold Profile in Rubber Shaping Process

Dan Bi Lee, Min A Lee, Sung Hyun Choi*, and Min-Young Lyu †

Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School, Seoul National of Univ. of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

*Hankook Tire Central R & D Center, Jang-dong, Yusung-gu, Daejeon, S. Korea

(Received July 29, 2014, Revised August 12, 2014, Accepted August 25, 2014)

요약 : 자동차 타이어의 트레드는 노면과 직접적으로 접촉하며 제동력, 구동력, 소음 등 중요한 역할을 한다. 트레드는 많은 그루브로 이루어져 있는데 고무의 형상을 형성하는 가류 공정에서 불량이 발생하게 되면 트레드의 기능이 저하되어 자동차 성능의 문제로 이어지게 된다. 본 논문은 CAE 해석을 통하여 가류 공정 중 구체적인 고무의 흐름을 분석하였다. 트레드 형상에 따라 고무 흐름의 편차가 발생하기 때문에 형상에 따른 트레드의 고무가 금형에 접촉되는 순서와 속도 그리고 고무의 흐름을 관찰하였다. 트레드의 형상에 따라서 고무가 금형에 안착되는 양상이 다르게 나타났으며 고무의 흐름에 큰 변화를 주는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT : The tire tread is contacted with road surface directly. It gives significant effect on the breaking conditions, traction, noise and so on. The tread having grooves with complex geometry is molded by shaping process. The flow behavior of tread rubber in a mold affects the quality of the tread and it leads to the running performance of automobile. In this study, the flow behavior of rubber in shaping process has been investigated by computer simulation. The objective of flow simulation is the design of tread shape based on the contact of rubber on the mold surface and flow behavior of rubber. Different sequences of contact of rubber on the mold surface and flow behavior of rubber are observed according to the shape of tread on the mold surface. It was verified that the shape of tread gives significant effect on the flow behavior of rubber. Different flow behaviors of rubber and sequential contact of rubber to the mold surface were observed according to the shape of tread on the mold surface. Therefore, we have identified that the shape of tread give a change in the flow behavior of rubber.

Keywords : tire tread, rubber flow, curing process, green tire, tread shape

I. 서론

자동차의 타이어는 자동차 부품 중 지면과 직접적으로 접촉하는 유일한 부품이다. 자동차의 하중을 지지하고 노면에서 발생하는 충격을 완화하며 엔진의 동력, 제동력 등을 노면에 전달하여 자동차의 진행방향 및 전환유지 등 자동차의 운동을 유지하는 작용을 한다. 타이어 표면의 형상은 노면의 상태에 따라 다양하며 매우 복잡하여 타이어 성형 시 많은 불량이 생기게 된다.¹ 자동차용 타이어는 배합 고무를 생산하는 정련 공정, 타이어의 반제품을 만드는 압출, 압연, 비드 공정, 반제품들을 순차적으

로 조립하는 성형 공정 마지막으로 반제품들이 조립된 그린 타이어(Green Tire)를 고온과 고압을 가해 가황 반응을 시켜 완성시키는 가류 공정을 거쳐 제조된다. 마지막 공정 단계인 가류 공정은 자동차용 고무 내부에 부착되는 블래더(Bladder)에 고온과 고압을 가하게 된다. 고온, 고압을 가하게 되면 블래더가 계속 팽창하게 되는데 복잡하고 독특한 무늬를 가진 금형 내에서 고무의 흐름이 진행되어 민 무늬의 그린 타이어에서 금형과 동일한 무늬를 가진 타이어로 완성하게 된다.

자동차용 타이어는 트레드, 사이드월, 컴포지트 등 10개 이상의 층으로 구성되어 있다. 그 중 트레드는 노면과 접촉하는 중요한 부분이며 큰 홈의 메인 그루브(Main groove), 서브 그루브(Sub groove), 얇은 홈의 커프(Kerf) 등 많은 그루브로 이루어

† Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

져 복잡한 형상의 무늬를 가지고 있다. 이러한 트레드는 노면과의 마찰력에 의하여 제동력, 조종성능 및 구심력 등을 충분히 발생시킨다.^{2,3} 트레드는 가류 공정 시 타이어나 함께 성형되면서 복잡한 단면을 가지는데 공정 중 금형에 트레드 고무의 흐름이 원활하지 않아 트레드의 볼륨 및 강성에 문제가 생기게 되고 조종성, 제동력, 소음 등 전반적인 자동차 성능에 문제가 발생한다. 따라서 가류 공정 중 트레드의 고무 흐름을 파악하는 것이 매우 중요하다. J.K. Lee와 D.-M. Kim등은 주행 시 접지면에서 타이어의 트레드에 대한 마찰과 타이어가 받는 응력을 분석하는 연구를 하였다.^{4,5} K.-W. Kim 과 B. S. Kim등은 주행 중 트레드가 물결치는 스탠딩 웨이브 현상을 트레드의 패턴을 고려하여 연구하였고, 트레드에 있는 그루브 배열에 따른 소음에 대하여 연구를 하였다.^{6,7} 본 논문에서는 타이어의 제조 공정 중 최종 공정인 가류 공정에서 트레드의 형상에 따른 고무 흐름 현상을 분석하였다. 일반적으로 컴퓨터 해석을 통해 자동차 타이어의 기능에 맞게 트레드를 설계하고 이의 형상 따라 고무를 성형하기 때문에 본 연구에서 수행한 결과는 성형성을 고려한 트레드의 형상 설계에 중요한 정보를 제공해 줄 것으로 판단된다.

II. 컴퓨터 모사

1. 타이어의 가류 공정

Figure 1은 가류 공정의 단면도를 나타내고 있다. 가류 공정은 반제품들이 조립된 그린 타이어가 가류기 안으로 들어오면 금형이 완전히 닫히게 되는데 블래더가 수축, 팽창하면서 이동한다. 블래더를 통하여 2차레에 걸쳐 고압이 가해지는 Blow 공정이 진행된다. Blow 공정을 마치면 타이어의 성형이 완료되어 취출된다. 이러한 가류 공정을 모사하기 위하여 블래더에 2차 압이 가해지는 Blow 공정 시점에서 모델링을 하고 경계조건을 설정하였다.

2. 해석 모델링 및 경계 조건

해석소프트웨어는 고분자 및 고무 등 Non-newtonian 유체와

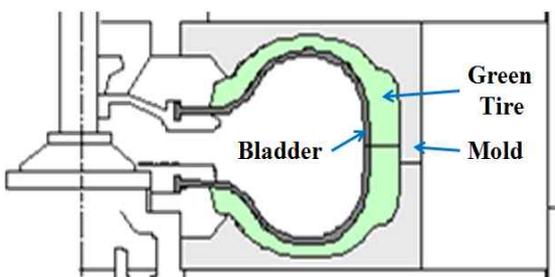


Figure 1. Schematic drawing of shaping process.

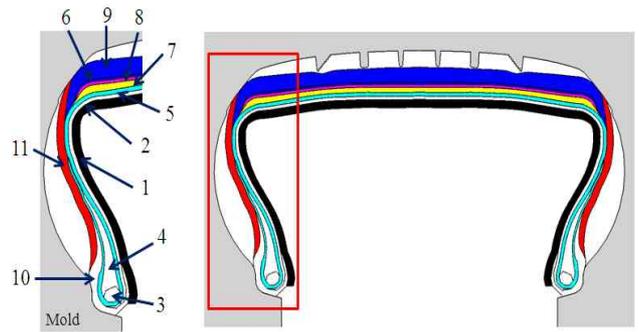


Figure 2. Simulation model for shaping process.

관련된 분야에서 사용되는 Fluent사의 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 Polyflow를 사용하였다.

해석에 적용한 타이어 모델은 Figure 2에 나타나 있으며, 축대칭으로 해석을 진행하였다. 가류 공정에서 시간에 따른 고무의 흐름 및 타이어 형상 변화를 분석하기 위하여 Time-dependent problem 해석을 수행하였다. 해석 모델링은 타이어의 다양한 반제품들을 고려하여 모델링을 하였다. 타이어의 반제품들을 총 11개의 층으로 하여 모델링을 하였다.

Figure 3은 Mesh의 형성을 보여주고 있으며, 해석에 적용된 Viscosity model은 Bird-Carreau law를 적용하였다. Table 1은 각 층별 점도를 나타내고 있다. RPA를 이용하여 전단변형률에 따른 점도를 측정 후 영 전단점도를 구하였다. 가장 바깥쪽 트레드는 1번 층이다. 모든 반제품의 밀도는 1.15 g/cm³이다.

경계조건은 Figure 4에 나타나있으며, 자유표면에서 금형과 접촉하는 최외곽 면은 Contact 조건을 부여하였다. 층간의 경계 면에는 Moving interface를 적용하였다. 맨 안쪽 면에는 압력이 작용되므로 압력조건을 현장에서 사용하는 25kgf/cm²로 적용하였다.

가류 공정 시 자동차용 타이어의 트레드 형상에 따른 영향도를 분석 하기 위하여 주어진 금형의 형상에서 트레드 형상이 평평한 Flat 형상, V 모양인 V-Groove 형상 그리고 U 모양인 U-Groove 형상으로 변경하여 해석을 진행하였다. Figure 5에

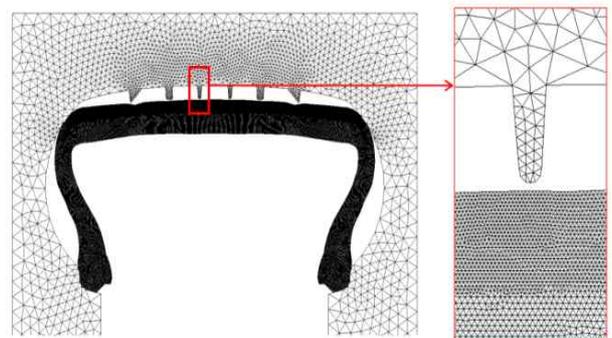


Figure 3. Mesh of rubber and mold for simulation.

Table 1. Material Property for Each Layer.

Layer	Viscosity
1	$\eta_0 = 683,630 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
2	$\eta_0 = 24,447 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
3	$\eta_0 = 1\text{E}+9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
4	$\eta_0 = 47,844 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
5	$\eta_0 = 8\text{E}+5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
6	$\eta_0 = 1\text{E}+7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
7	$\eta_0 = 2\text{E}+5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
8	$\eta_0 = 28,107 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
9	$\eta_0 = 53,986 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
10	$\eta_0 = 33,590 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
11	$\eta_0 = 27,407 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

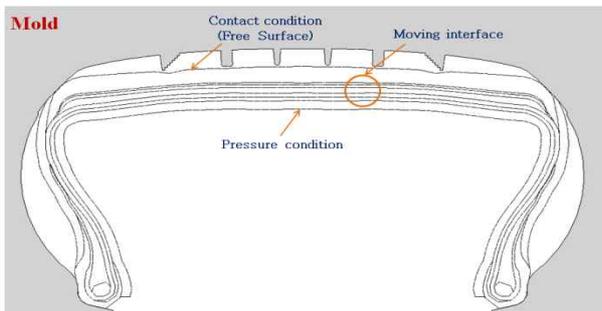


Figure 4. Boundary conditions for simulation of shaping process.

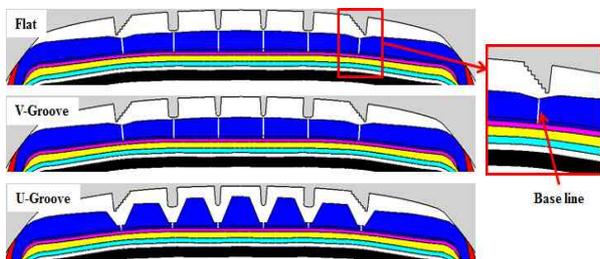


Figure 5. Various profiles of tread.

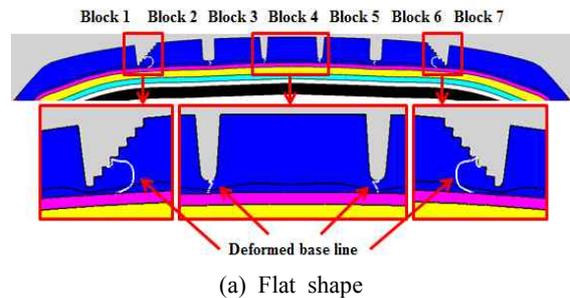
트레드의 형상에 따른 모델이 나타나있다. 고무의 흐름을 상세하게 관찰하기 위하여 Figure 5에 나타난 것처럼 트레드 고무의 groove에 기준선을 삽입하여 기준선의 이동을 관찰하였다. 형상별 트레드의 각 Block의 볼륨은 동일하다.

III. 결과 및 고찰

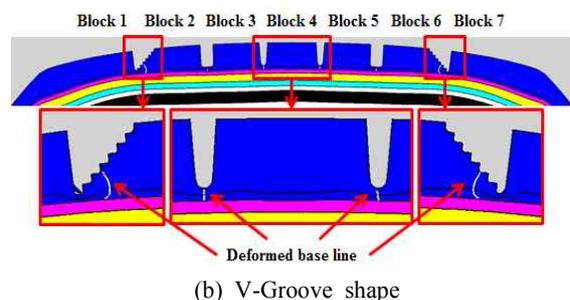
Figure 6은 Flat 형상, V-Groove 형상, 그리고 U-Groove 형상의 해석 결과를 나타내었다. Figure 6의 모든 형상에서 트레드

의 Block 1, 2와 Block 6, 7사이의 기준선 변화가 크에 따라 고무가 금형에 안착 시 흐름이 클 것으로 판단된다. 또한 Flat 형상에서 기준선의 변화가 가장 크며, V-Groove 형상, U-Groove 형상 순으로 변화가 작아지는 것으로 나타났다. U-Groove 형상의 고무가 금형에 빠르게 안착되고, 고무의 흐름 변화가 적는데 U-Groove 형상과 금형의 형상이 서로 유사하여 U-Groove 형상에서 고무의 안착속도가 빠르고 흐름의 변화가 적은 것으로 나타났다고 판단된다. Block 2, 3, 4, 5, 6 사이의 기준선의 변화는 작았다. 즉 Block 2 ~ Block 6 사이로 고무의 Block 이동은 거의 없다고 보여진다. 그러나 Block 1의 모서리 부분에서 미충전이 관찰되었다.

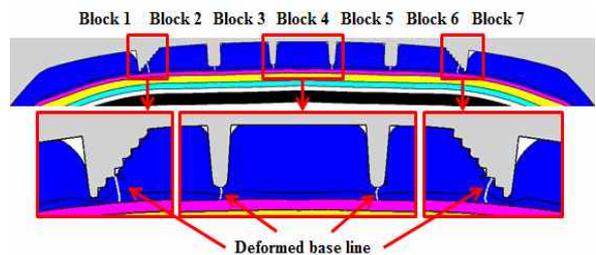
Figure 7은 고무가 금형에 안착 될 때의 Flat 형상, V-Groove 형상 그리고 U-Groove 형상의 속도 벡터를 보여주고 있다. 파란색 부분의 속도는 0이며, 초록색에서 노란색에 가까워질수록 속도가 빠름을 나타낸다. 모든 형상에서 Block 4는 block 내의 중앙을 기준으로 고무의 흐름이 ① 방향으로 양분됨을 알 수 있었다. 또한 트레드의 고무가 금형에 안착되면서 금형의 groove에 의하여 고무가 일정한 속도로 양분되었다. Block



(a) Flat shape



(b) V-Groove shape



(c) U-Groove shape

Figure 6. Deformed base lines for tread profile after shaping process.

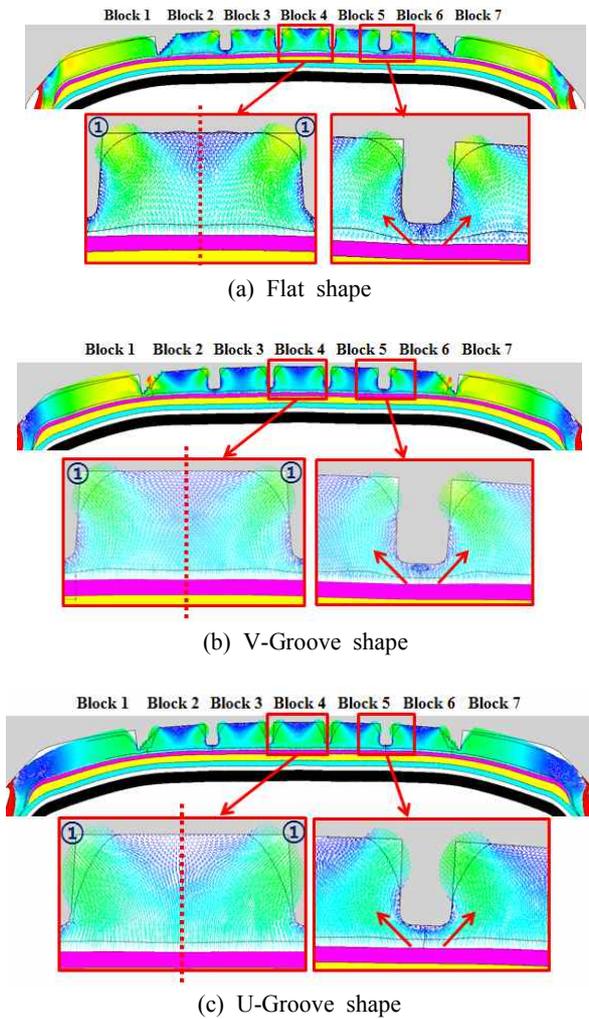


Figure 7. Velocity vectors of rubber during shaping process.

의 모서리에는 고무가 가장 늦게 안착이 되는데 이는 고무가 미 충전이 되거나 Air trap이 발생할 수 있음을 의미한다. 그러므로 block의 모서리에 Air vent의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

Figure 8은 고무가 금형 좌우 끝의 계단형 groove에 안착될 때 Flat 형상, V-Groove 형상 그리고 U-Groove 형상에서 속도 벡터를 나타내었다. Flat형상에서 Block 6, 7사이의 고무 흐름은 계단 모양의 금형에 의하여 속도가 변하면서 ② 부분에 고무가 먼저 안착된 후 ①에 안착되었다. 그러나 V-Groove 형상과 U-Groove 형상에서는 Flat 형상과 다르게 Block 6, 7사이의 고무 흐름이 안쪽 모서리 ①에 먼저 안착된 후 ②에 안착하였다. 이는 V-Groove 형상과 U-Groove형상에서 트레드 하단의 고무의 양이 적어서 ② 부분이 가장 늦게 채워지는 것으로 판단된다. 이는 트레드의 형상이 고무의 흐름에 크게 영향을 주고 있음을 의미한다.

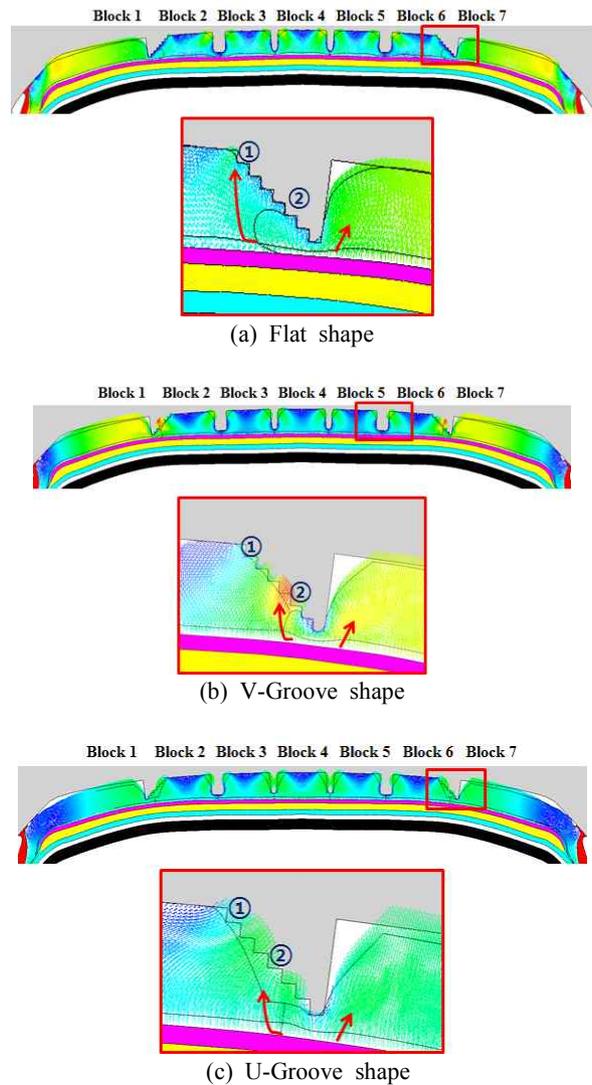


Figure 8. Velocity vectors at declined shape of groove.

IV. 결론

본 논문에서는 타이어 제조 공정 중 트레드를 형성하는 가류 공정에서 고무가 금형에 안착 시 고무의 흐름에 대해 연구하였다. 해석을 통하여 고무가 금형에 안착되는 현상을 모사하였으며 고무의 흐름 현상에 대한 관찰을 통하여 고무의 미 충전 및 Air trap의 설치 위치를 예측할 수 있었다.

또한 트레드의 Flat 형상, V-Groove 형상, U-Groove 형상에 따른 고무의 흐름 해석한 결과 고무의 흐름이 Flat 형상, V-Groove 형상 그리고 U-Groove 형상 순으로 고무 흐름이 크게 일어나는 것으로 나타났다.

고무가 금형에 안착되는 순서, 속도 등 트레드 형상에 따라 금형에 고무가 안착되는 현상이 달랐으며, 금형의 모양에 따라 적합한 트레드 형상이 존재하는 것을 확인하였다.

본 연구는 가류 공정 중 고무 흐름을 이해할 수 있었으며 연구에서 수행한 컴퓨터 모사 방법은 향후 트레드 형상 설계와 금형 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국고무학회의 신양장학금의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

1. James E. Mark, BurakErman, Frederic R. Eirich, "The science and technology of rubber", Elsevier, London (2005).
2. J. K. Lee, D. J. Lee, "A Study on the Friction of Tire Tread Rubber using High-Speed Friction Test Machine", *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, **30**, 622 (2013).
3. D.-M. Kim, Y.-C. Kwon and D.-Y. Shin, "A Study on Stress Analysis of Tire Tread Block", *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **25**, 1225 (1997).
4. K.-W. Kim, H.-S. Jeong, "Finite Element Analysis on Standing Wave Phenomenon of a Tire Considering Tread Pattern", *Trans. KSAE*, **14**, 76 (2006).
5. B.-S. Kim, "Tire Tread Pitch Noise Control System by Random Arrangement of Circumference Direction Straight Type Groove", *J. Korean Soc. Prec. Eng.*, **11**, 98 (1994).
6. J. H. Kim, J. S. Hong, S. H. Choi, H. J. Kim and M.-Y. Lyu, "Computer Simulation of Die Extrusion for Rubber Compound Using Simplified Viscoelastic Model", *Elast. Compos.*, **46**, 54 (2011).
7. Wu. J, Liu. Q and Y. S. Wang, "Finite Element Simulation on Tire Rubber Extrusion Process", *Adv. Mater. Res.*, **683**, 548 (2013).
8. M.-Y. Lyu, D. M. Park, H. J. Kim and J. R. Yoon "Computer Simulation of Viscoelastic Flow in a Capillary Die for Rubber Compounds", *Elastomers*, **41**, 223 (2006).
9. K. W. Kim, H. S. Jeong, J.-R. Cho and Y. S. Yang, "Finite Element Analysis on Residual Aligning Torque and Frictional Energy of a Tire with Detailed Tread Blocks", *Trans. Korean Soc. Autom. Eng.*, **12**, 173 (2004).
10. Y. Jin, "Characteristics of Vehicle Tire Tread Pattern and its Application in Forensic Science", *Adv. Mater. Res.*, **706/708**, 1241 (2013).