

## 가교 조건이 NR/BR 블렌드 고무 가황물의 가교 형태와 밀도 그리고 물성에 미치는 영향

이상윤 · 손채은\* · 홍익석 · 이기석 · 최성신\*<sup>†</sup>

현대자동차 재료분석팀, \*세종대학교 화학과

(2018년 7월 18일 접수, 2018년 8월 6일 수정, 2018년 8월 6일 채택)

## Influence of Cure Condition on Crosslink Types and Densities and Physical Properties of NR/BR Blend Rubber Vulcanizate

Sangyun Lee, Chae Eun Son\*, Uiseok Hong, Kisuk Lee, and Sung-Seen Choi\*<sup>†</sup>

Materials Technology & Analysis Team, Hyundai Motors Company, Hwaseong-Si 18280, Korea

\*Department of Chemistry, Sejong University, Seoul 05006, Korea

(Received July 18, 2018; Revised August 6, 2018; Accepted August 6, 2018)

**초록:** 가교 조건에 따른 타이어용 사이드월 고무 복합재(NR/BR 블렌드)의 특성을 분석하였다. 가교 온도는 실제 타이어 생산 온도 중 낮은 온도(160 °C)와 높은 온도(180 °C)를 선택하였고, 가교 시간은 레오커브의 최대 토크 시간으로 선정하였다. 고무 가황물의 황가교 형태와 밀도를 측정하였고, 고무 가황물에 있는 잔류 가교제 성분과 첨가제를 가스 크로마토그래피/질량분석법(GC/MS)으로 분석하였다. 저온 가교 가황물의 총 가교밀도와 다황 가교밀도는 고온 가교 가황물보다 높았다. 고온가교 시 잔류 가황촉진제의 함량이 많은 것을 확인하였다. 저온 가교 가황물의 인장물성(모듈러스, 신율, 그리고 인장강도)은 고온 가교 가황물보다 높았다. 저온 가교 가황물의 저장탄성률과 손실탄성률은 고온 가교 가황물보다 높았으나, 저온 가교 가황물의  $\tan \delta$  값은 전 온도 구간에서 고온 가교 가황물보다 작았다. 가교 조건에 따른 고무가황물의 물성의 차이를 가교 형태와 밀도의 차이로 설명하였다.

**Abstract:** Characteristics of sidewall composite (NR/BR blend) of tire were analyzed. Low and high temperatures (160 and 180 °C, respectively) of real manufacturing temperatures of tire were selected as the cure temperatures, and the cure times were the times at the maximum torques of the rheocurves. Crosslink types and densities of the vulcanizates were measured, and residues of curing agents and organic additives in the samples were analyzed using gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). Total and polysulfidic crosslink densities of the low temperature-cured sample were greater than those of the high temperature-cured one. It was found that amount of the cure accelerator remained in the high temperature-cured sample was larger than that in the low temperature-cured one. Tensile properties such as moduli, elongation, and tensile strength of the low temperature-cured sample were greater than those of the high temperature-cured one. Storage and loss moduli of the low temperature-cured sample were greater than those of the high temperature-cured one, but  $\tan \delta$  values of the low temperature-cured sample were smaller than those of the high temperature-cured one. Differences in the physical properties according to the cure conditions were explained by differences in the crosslink types and densities.

**Keywords:** NR/BR blend vulcanizates, cure condition, crosslink type, density, physical properties.

## 서 론

최근 지구온난화가 지속됨에 따라 각종 기후변화가 야기되고 있다. 이산화탄소는 지구온난화에 영향을 미치는 주요 온

실가스로 전세계적으로 이산화탄소 배출량에 대한 규제가 강화되고 있다. 국내에서도 자동차 온실가스 배출량에 대한 기준을 제정하고 2012년부터 승용차와 승합차에 대해 이산화탄소 배출량을 관리하고 있다.<sup>1</sup> 자동차의 이산화탄소 배출량을 저감하기 위해서 자동차 업계에서는 친환경 자동차 개발 뿐만 아니라 타이어를 포함한 구동/회전계 부품의 성능향상에 대한 연구가 이루어지고 있다. 다양한 구동/회전계 부품 중 타이어는 자동차의 구동력을 지면에 전달하는 역할을 하

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
sschoi@sejong.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-5844-024X  
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

고 있다. 자동차가 구동할 때 타이어는 지면과 맞닿으면서 자동차의 하중에 의해 변형된다. 타이어의 회전운동으로 인해 타이어는 변형과 복원이 반복되고 이로 인해 에너지의 손실이 발생한다. 타이어와 지면과의 마찰에 의해 발생하는 저항을 구름저항(rolling resistance)이라고 하며 주행 시 발생하는 이산화탄소의 약 20% 정도가 구름저항으로부터 기인한다고 알려져 있다.<sup>2,3</sup>

타이어의 구름저항을 낮춰 연비성능을 개선하기 위해 타이어 재료 개발이 이루어지고 있다. 특히 지면과 접촉하는 부위인 트레드에 대한 연구가 주로 선행되었다. 하지만, 트레드의 경우 구름저항, 젖은 노면의 제동성능, 그리고 마모성능은 트레이드 오프(trade-off) 관계이므로, 타이어의 다양한 성능을 만족하는 소재의 개발이 쉽지 않다. 따라서 최근 타이어의 전체적인 성능을 향상시키기 위해 트레드 외 케이싱부에 대한 소재 연구가 활발히 진행 중이다.<sup>4</sup>

케이싱부는 타이어의 구조를 이루는 부분으로 주로 사이드월, 카커스, 비드, 이너라이너 등을 일컫는다. 사이드월은 주행 중에 지속적으로 굴곡운동을 하며 타이어 구름 저항에 기여를 한다고 알려져 있으며 최근 타이어의 구름저항을 개선하기 위해 사이드월의 소재에 대해 연구하고 있다.<sup>5</sup>

사이드월은 탄성이 우수한 천연고무(NR)를 단독으로 사용하거나 부타디엔 고무(BR)와 혼합하여 사용한다. NR은 이소프렌(isoprene)이 반복되는 구조로, 반복 단위 당 알릴(allyl) 구조( $\sim\text{CH}_2\text{-C}(\text{CH}_3)=\text{CH-CH}_2\sim$ )를 갖고 있다. 알릴 수소는 주사슬에 위치한 이중결합의 파이 전자와 공명을 이루므로 결합에너지가 낮아 알릴 수소가 주로 가교 반응에 참여한다. NR은 타이어에 주로 사용되는 다른 고무(BR, SBR)에 비해 알릴 수소의 수가 많다. 따라서 동일 가교 조건 아래 NR의 가교 속도가 BR이나 SBR에 비해 빠르고 가교 속도에 영향을 미치는 가교 온도에 의해 가교 구조가 많은 영향을 받는다.<sup>6,7</sup>

고무물성은 고무의 가교 구조와 직접적인 연관이 있다. 일반적으로 고무 소재는 가황 후 고무 사슬간 황이 연결되어 가교되며, 단황가교(-S-), 이황가교(-S-S-), 다황가교(-S<sub>x</sub>-, x=3~8)로 구성된 황가교 구조를 이루고 있다. 이러한 단황, 이황, 다황 가교 구조의 함량과 총 가교밀도에 따라 고무 탄성 특성과 인장물성 등이 달라지게 된다. 따라서 고무 소재의 성능향상을 위해서는 목적에 따라 촉진제 등 배합제 성분을 조절하여 가교 구조를 선택하고 제어하는 것이 필요하다. 또한 가교 온도와 시간 등 가교 조건이 바뀌면 고무 내부 가교 구조의 변화가 생기고, 고무물성이 변하게 된다. 가교 조건에 따른 고무 가황물의 물성과 가교 구조와의 상관성을 파악하기 위해서는 황결합구조의 분석이 우선적으로 필요하다. 그리고 가교 후 가황물 내에 잔류하는 촉진제 등 가교제와 다른 배합제의 변화와 함량에 대한 고찰도 필요가 있다.

본 연구에서는 타이어 사이드월에 적용되는 NR과 BR의

블렌드 고무 배합물의 가교 조건에 따른 황가교 구조와 물성의 변화를 연구하였다. 타이어 제조 시 공정 효율을 높이기 위해 가교 온도는 160 °C 이상으로 비교적 높은 온도에서 가교 공정을 실행한다. 본 연구에서는 가교 온도를 상대적으로 저온인 160 °C와 고온인 180 °C로 선정하였다. 일반적으로 고무 가황물의 가교 시간은 레오커브에서 나타나는 최대 토크 시간( $t_{\max}$ ) 혹은 이 보다 좀 짧은 시간을 가교 조건으로 설정한다.

가교 조건과 고무 가황물의 황가교 구조와의 연관성을 파악하기 위해 화학적 습식방법으로 황가교 구조를 분석하였다. 또한 인장물성과 동적점탄성 특성을 측정하여 비교하였다. 가교 후 고무 가황물에 잔류하는 유기물 성분과 함량은 노화 특성에 중요한 영향을 미치므로, 고무 가황물에 잔류하는 유기물 성분을 추출하여 가스 크로마토그래피/질량분석법(GC/MS)로 분석하였다. 인장물성과 동적점탄성 특성을 가교 형태와 밀도와 연관시켜 고찰하였다.

## 실 험

**고무 배합물 준비.** NR(SVR 3L, 두만)과 BR(BR 01, 금호석유화학)의 블렌드 고무 배합물을 준비하였다. NR과 BR의 배합비는 NR:BR=4:6이다. 카본블랙(N550, OCI) 30 phr, 가황촉진제(TBBS, *N-t*-butyl-2-benzothiazole sulfenamide) 0.5 phr, 가교지연제(*N*-(cyclohexylthio)phthalimide, PVI) 0.25 phr, 황 2.0 phr을 사용하였다. 이외에 가교활성제(스테아린산과 산화아연)와 노화방지제를 혼합하여 배합물을 준비하였다. 노화방지제로는 2,6-di-*t*-butyl-4-methyl phenol(BHT), *N*-1,3-dimethylbutyl-*N'*-phenyl-*p*-phenylenediamine(HPPD), 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline(TMQ)을 사용하였다.

**고무 가황물 제조.** 실제 타이어 제조에서 사용하는 가교 온도 범위 160-180 °C 중, 저온인 160 °C와 고온인 180 °C를 가교 온도로 설정하였다. 레오 커브를 조산한 결과, 가교역전(reversion) 현상이 거의 나타나지 않아 가교 온도는  $t_{\max}$ 로 설정하였다. 160과 180 °C의  $t_{\max}$ 는 각각 4분과 11분 정도로 이를 가교 시간으로 설정하였다. 시험편은 압축 몰드(140×140 mm<sup>2</sup>, 두께 2 mm)를 사용하여 제조하였다.

**잔류 유기물 분석.** 가황고무 시험편에 잔류하는 유기물을 속슬렛 장비를 사용하여 추출하였다. 고무 0.2 mg에 150 mL 클로로포름 용매를 사용하여 50 °C에서 5시간 동안 추출하였다. 내부 표준물질로 1,2-dichlorobenzene을 사용하였다. 추출물은 GC/MS(Agilent사)로 분석하였다. 시료 주입량은 1 mL이다. 컬럼은 DB-1MS를 사용하였고, GC 오븐 조건은 70 °C에서 3분 유지한 후 승온속도로 10 °C/min로 300 °C까지 올렸다.

**가교 형태와 밀도 분석.** 가교밀도는 팽윤법을 이용하여 분석하였다. 시험편은 0.5×0.5 cm<sup>2</sup>의 크기로 잘라 사용하였다.

시험편에 존재하는 잔류 유기물은 tetrahydrofuran(Aldrich사)과 *n*-hexane(Aldrich사)을 이용하여 각각 3일과 2일 동안 상온에서 추출하여 제거한 후, 상온에서 2일간 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 건조 시험편을 팽윤 용매인 toluene(Aldrich사)에 2일간 팽윤시킨 후 무게를 측정하였다. 팽윤비( $Q$ )는 식 (1)로 계산하였다.<sup>8</sup>

$$Q = (W_s - W_u) / W_u \quad (1)$$

여기서,  $W_s$ 는 팽윤 시험편의 무게,  $W_u$ 는 팽윤 전 건조 시험편의 무게이다. 실험은 3회 측정하여 평균으로 구하였고, 가교밀도( $X_c$ )는 Flory-Rehner 식(2)을 이용하여 계산하였다.<sup>8,9</sup>

$$X_c = -[\ln(1 - v_2) + v_2 + \chi v_2^2] / [V_1(v_2^{1/3} - v_2/2)] \quad (2)$$

여기서,  $v_2$ 는 팽윤된 고무의 부피분율,  $\chi$ 는 고무-용매 상호작용계수,  $V_1$ 는 용매의 몰부피이다. NR과 톨루엔간의  $\chi$  값은 0.393이고 BR과 톨루엔간의  $\chi$  값은 0.34이다.<sup>10,11</sup> 본 연구에서 사용한 시험편의 고무 혼합 비율인 NR/BR=40/60을 적용하여,  $\chi$  값은 0.361로 사용하였다.  $v_2$ 는 식 (3)에서 구한다.

$$v_2 = (m_2/\rho_2) / [(m_2/\rho_2) + (m_1/\rho_1)] \quad (3)$$

여기서,  $m_1$ 은 고무의 무게,  $m_2$ 는 팽윤 용매의 무게,  $\rho_1$ 은 고무의 밀도,  $\rho_2$ 는 팽윤 용매의 밀도이다.

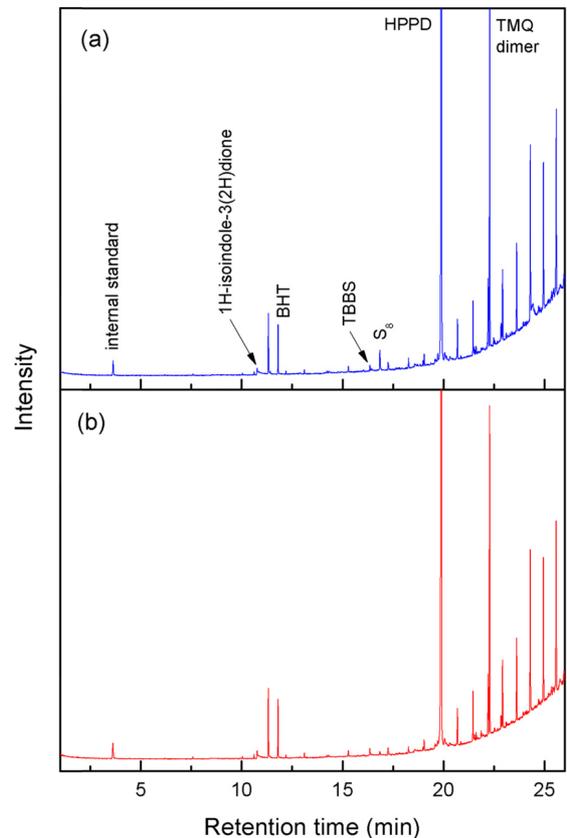
고무의 단황, 이황, 다황 가교의 가교밀도를 측정하기 위해서 다음과 같은 방법으로 다황가교 혹은 다황가교와 이황가교를 분해한 후 가교밀도를 측정하였다.<sup>12-14</sup> 다황가교를 분해하기 위해 propane-2-thiol과 *n*-hexylamine을 혼합한 용매(DS1)를 사용하였다. 다황가교와 이황가교를 동시에 제거하기 위해 hexanethiol과 *n*-hexylamine을 혼합한 용매(DS2)를 사용하였다. 톨루엔에 충분히 팽윤된 시험편을 DS1을 이용하여 6시간 동안 반응시켜 다황가교를 제거하였다. 톨루엔에 담가 시험편에 남은 DS1을 제거한 후, 새로운 팽윤 용매에 1일간 담근 후 팽윤 시험편의 무게를 측정하였다. 동일한 방법으로, 다황가교와 이황가교를 제거하기 위해 시험편을 48시간 동안 DS2 용액에 담근 후, 잔류 DS2를 제거한 후 팽윤시켜 무게를 측정하였다. 위의 과정에 의해 측정된 결과를 토대로 단황, 이황, 다황가교의 가교밀도를 구하였다.

**물성 측정.** 인장 물성은 인장시험기(Zwiss/ROELL사)를 이용하여 측정하였다. 아령 7호의 시험편을 사용하였고, 총 4회 측정하여 평균값을 구하였다. 동적점탄성 특성은 동적기계분석기(Qualimeter Eplexor, GABO사)를 이용하여 측정하였다. 측정 조건은 ASTM D2231-87을 준수하였다. 측정 온도는 -50~-80 °C이며, 11 Hz로 측정하였다.

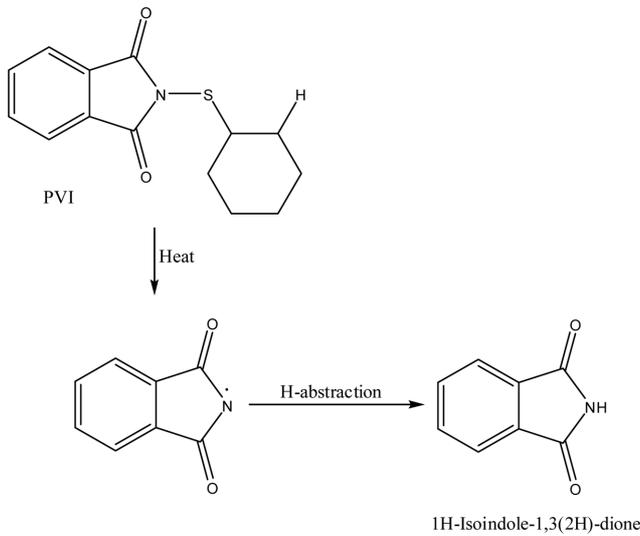
## 결과 및 토론

**잔류 유기물 분석 결과.** Figure 1은 가황물에서 추출한 유기물의 GC/MS 크로마토그램이다. 가황물에는 다양한 유기물이 존재함을 알 수 있다. 노화방지제 3가지(BHT, HPPD, TMQ dimer)는 잘 검출되었으며, 가교제와 그 부산물도 검출되었다. 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione은 PVI 반응생성물로 그 분해 메커니즘을 Scheme 1에 제시하였다. PVI의 N-S 결합이 끊어져 생성된 라디칼들이 수소를 취하여 중성화된다. 그 중 아민 라디칼 부분이 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione가 된다. 흥미로운 것은 가황촉진제 TBBS와 황의 검출이다. 잔류 유기물의 상대적 함량을 Table 1에 정리하였다.

가교 온도가 높기 때문에 가교 과정을 거치면 일부 유기물이 기화되어 사라진다. 저온 가교 시간은 고온 가교 시간의 3배 정도로 긴대도 불구하고, 고온 가교 가황물보다 저온 가교 가황물에서 더 많은 양의 유기물이 검출되었다. 이는 고온 가교 공정에서 유기물 손실이 더 많다는 것을 의미한다. 소재의 내열성 등 내구성능을 감안하면 노화방지제의 손실이 적은 저온에서 가교시키는 것이 유리할 것으로 생각된다. 분



**Figure 1.** GC/MS chromatograms of the extracts of the rubber vulcanizates cured at (a) low temperature; (b) high temperature.



**Scheme 1.** Decomposition mechanism of PVI.

**Table 1. Relative Intensity Ratios of Organic Residues in the Rubber Vulcanizates. The Reference is the Internal Standard**

Retention time (min)	Component	Cure condition	
		160 °C/11 min	180 °C/4 min
10.8	1H-Isoindole-1,3(2H)-dione	0.5	0.4
11.8	BHT	2.0	1.9
16.4	TBBS	-	0.4
16.9	S <sub>8</sub>	1.3	0.3
19.9	HPPD	255.0	211.0
22.3	TMQ dimer	14.5	11.5

자량이 큰 유기물일수록 그 차이는 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 노화방지제 BHT, HPPD, TMQ dimer의 분자량은 각각 220.4, 268.4, 그리고 344.5 g/mol이다.

가황촉진제는 가교 과정 중에 대부분 반응하여 사라지거나 다른 형태로 변하며, 가교 온도가 높을수록 그리고 가교 시간이 길수록 미반응 함량이 줄어드는 것이 일반적이다. 저온 가교 가황물에서는 TBBS가 거의 검출되지 않았으나, 고온

가교 가황물에서는 TBBS가 검출되었다. 이는 흥미로운 결과이다. 황은 오히려 저온 가교 가황물에서 더 많이 검출되었다. PVI의 반응생성물인 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione은 가교 조건에 상관없이 비슷한 양으로 검출되었다. 종합적으로 보면, 저온 가교 가황물이 가교 시간이 훨씬 긴대도 불구하고 가교제 관련 성분의 함량이 더 많았다. TBBS와 황과 같은 가교제 성분은 가교반응에 참여할 수 있으므로, 시험편에 가교제 관련 성분이 더 많이 있다는 것은 열노화에 의해 가교 밀도가 증가할 가능성이 높다는 것을 의미한다.

**황가교 구조와 밀도 분석 결과.** Table 2에 가교 형태에 따른 가교밀도 측정 결과를 정리하였다. 저온 가교 가황물의 총 가교밀도가 고온 가교 가황물보다 높다. 이는 저온 가교 시험편은 가교시간이 충분하여 황과 결합한 가교가 고온 가교 시험편보다 많이 생성된 것으로 판단된다. 하지만, 단황과 이황의 가교밀도는 저온 가교 가황물이 오히려 낮다. 가교 형태에 따른 가교밀도의 비율을 보면, 저온 가교 가황물의 경우 다황 가교와 단황+이황 가교의 비율이 약 80:20 정도인 반면, 저온 가교 가황물의 경우에는 70:30 정도로 저온 가교에서 다황 가교의 형성이 우세하게 나타났다. 이는 가교 온도가 높아지면 황의 길이가 긴 황가교가 쉽게 분해될 수 있기 때문으로 해석할 수 있다. Table 1에서 보듯이 잔류 황 함량이 고온 가교 가황물에서 저온 가교 가황물보다 더 낮게 나타났는데도 불구하고, 고온 가교 가황물의 총 가교밀도가 저온 가교 가황물보다 낮다. 이는 고온 가교 공정에서 고리형 황결합에 참여한 황이 많았을 가능성을 의미한다.

**인장물성 측정 결과.** 인장 물성 측정 결과를 Table 3에 정리하였다. 신율(elongation)을 제외한 인장 물성에서 저온 가교 가황물이 더 우수하게 나타났다. 이는 저온 가교 가황물의 총 가교밀도가 고온 가교 가황물보다 높기 때문이다. 일반적으로 모듈러스(modulus)는 가교밀도가 증가할수록 직선적으로 증가하는 반면, 신율은 감소한다. 가교밀도가 증가함에 따라 인장강도(tensile strength)는 증가하다 감소하는 경향을 보인다. 따라서 저온 가교 가황물의 인장강도는 최대점을 지난 것으로 판단된다.

저온 가교 가황물의 총 가교밀도가 고온 가교 가황물보다 1.4% 높다. 저온 가교 가황물의 100, 200, 300% 모듈러스는

**Table 2. Results of Crosslink Densities of the Rubber Vulcanizates**

Cure condition		160 °C/11 min	180 °C/4 min
Crosslink density (10 <sup>-5</sup> mol/cm <sup>3</sup> )	Total	17.75 ± 0.24	16.91 ± 0.18
	Mono- and disulfides	3.85 ± 0.07	5.10 ± 0.06
	Monosulfide	Not measured	Not measured
Ratio (%)	Monosulfide	< 1.0	< 1.0
	Disulfide	< 21.7	< 30.2
	Polysulfides	78.3	69.8

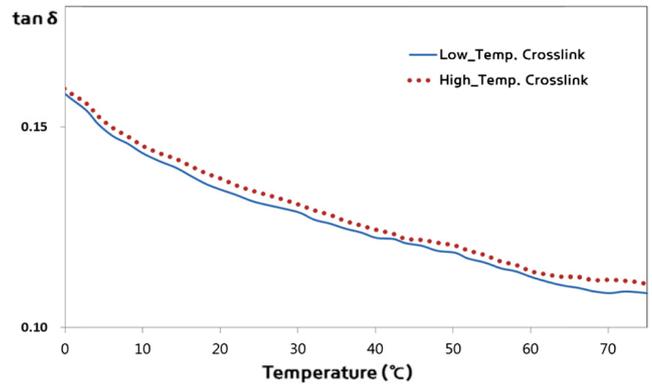
**Table 3. Mechanical Property of the Rubber Vulcanizates**

Cure condition	160 °C/11 min	180 °C/4 min
100% Modulus (MPa)	2.86	2.58
200% Modulus (MPa)	6.06	5.41
300% Modulus (MPa)	9.99	8.92
Elongation (%)	431.3	420.2
Tensile strength (MPa)	15.51	13.53

고온 가교 가황물보다 각각 9.7, 10.7, 10.7% 높다. 신율은 저온 가교 가황물이 고온 가교 가황물보다 2.6% 높은 반면, 인장강도는 저온 가교 가황물이 고온 가교 가황물보다 12.8% 높다. 모든 인장 물성이 가교밀도 증가분에 비해 더 크게 변했다. 인장강도에서 더 큰 차이가 났는데, 그 이유는 모듈러스의 증가와 신율의 증가 모두가 인장강도 증가에 영향을 미쳤기 때문으로 설명할 수 있다.

**점탄성 특성 측정 결과.** Figure 2는 온도에 따른 저장탄성률(storage modulus,  $E'$ )과 손실탄성률(loss modulus,  $E''$ )의 변화를 보여준다.  $E'$ 와  $E''$  모두 온도가 증가할수록 감소하며, 저온 가교 가황물의  $E'$ 와  $E''$  모두가 고온 가교 가황물보다 높게 나타났다. 이는 저온 가교 가황물의 가교밀도가 고온 가교 가황물보다 높기 때문이다.  $E'$ 의 차이가  $E''$ 의 차이보다 더 크게 나타났다. 이는 가교밀도 증가에 따른 모듈러스의 증가 폭이 더 크게 상승한 것과 관련있는 것으로 파악된다.

Figure 3에 온도에 따른  $\tan \delta (=E''/E')$ 의 변화를 보여준다. 저온 가교 가황물의  $\tan \delta$  값이 전 온도 구간에서 고온 가교 가황물보다 낮게 나타났다. 이는 저온 가교 가황물의 총 가교밀도가 높고 다황가교 비율도 높아 반발 탄성이 증가하였기 때문으로 해석할 수 있다. 0 °C  $\tan \delta$  값이 높을수록 젖은 노면 접지력(wet grip)이 우수한 것으로 해석하고, 60 °C  $\tan \delta$  값이 낮을수록 구름저항이 낮아 자동차 연비 효율이 우수한 것으로 해석한다. 젖은 노면 접지력은 고온 가교 가황물



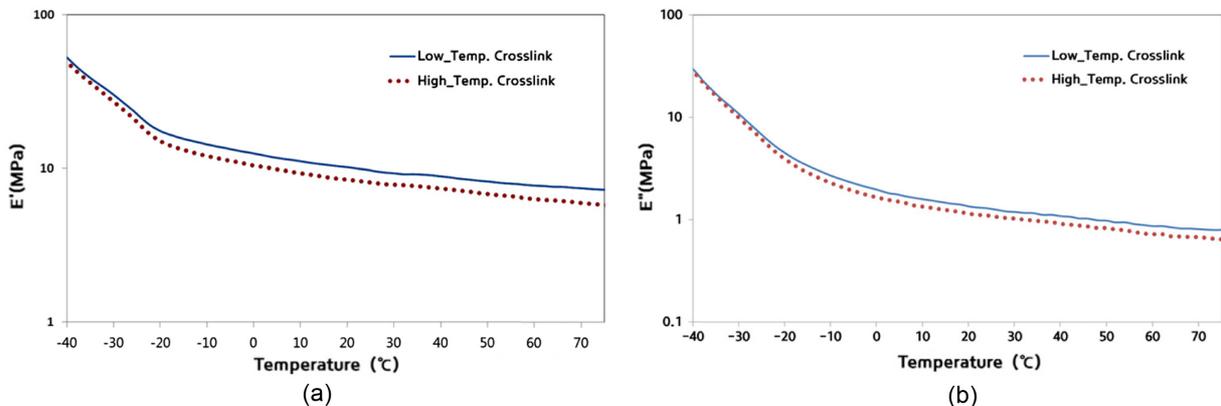
**Figure 3.** Variation of  $\tan \delta$  with the temperature.

이 더 우수하게 나타났고, 구름저항은 저온 가교 가황물이 더 우수하게 나타났다. 이도 역시 가교밀도와 다황가교 비율 그리고 반발 탄성으로 설명된다.

이번 연구를 통해 동일 배합의 타이어 케이싱 재료를 적절한 공정조건에서 고온보다 저온에서 가교시킬 경우, 기계적 물성의 향상과 동시에 구름저항이 낮아져 연비를 향상시킬 수 있었다.

## 결론

고무 가황물에서 추출한 유기물을 GC/MS로 분석한 결과, 노화방지제들은 많은 양이 그대로 있었으며 가교제와 그 부산물도 검출되었다. PVI는 분해산물인 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione의 형태로 검출되었다. 고온 가교 가황물보다 저온 가교 가황물에서 더 많은 양의 유기물이 검출되었으며, 이는 고온 가교 공정에서 유기물 손실이 더 많다는 것을 의미한다. 분자량이 큰 유기물일수록 잔류 함량의 차이는 더 크게 나타났다. 저온 가교 가황물에서는 TBBS가 거의 검출되지 않았으나 고온 가교 가황물에서는 TBBS가 검출되었으며, 황은 오



**Figure 2.** Dynamic mechanical analysis results of (a) storage modulus ( $E'$ ); (b) loss modulus ( $E''$ ).

히려 저온 가교 가황물에서 더 많이 검출되었다. 저온 가교 가황물의 총 가교밀도가 고온 가교 가황물보다 높다. 하지만, 단황과 이황의 가교밀도는 저온 가교 가황물이 오히려 낮다. 모든 인장 물성은 저온 가교 가황물이 더 우수하였다. 물성의 차이는 가교밀도의 차이로 설명된다. 가교밀도의 차이에 비해 인장물성의 차이가 더 크게 나타났다. 특히 인장강도에 서 더 큰 차이가 나타났다. 저장탄성률과 손실탄성률은 저온 가교 가황물보다 더 높게 나타났다. 저온 가교 가황물의  $\tan \delta$  값이 전 온도 구간에서 고온 가교 가황물보다 낮았다. 가교 조건에 따른 고무 가황물의 점탄성 특성의 차이는 가교밀도와 다황가교 비율 그리고 반발 탄성으로 설명할 수 있다. 저온 가교조건에서 연비 및 기계적 물성이 동시에 향상되는 결과를 얻었다. 이번 연구 결과는 타이어 연비 및 물성을 동시에 향상시킨 친환경 소재개발에 기초자료가 될 것으로 기대한다.

**감사의 글:** 이 논문은 2017년도 현대자동차 산학협동연구와 세종대학교 연구장학기금 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

1. Enforcement decree of the framework act on low carbon, green growth (2018).
2. The tyre – Rolling resistance and fuel savings, *Michelin internal report* (2003).
3. S. H. Lee and J. M. Ko, *Trans. KSAE*, **26**, 402 (2018).
4. B. W. Moon, Y. S. Kim, N. G. Jun, J. M. Koo, C. S. Seok, U. S. Hong, M. K. Oh, and S. R. Kim, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **41**, 629 (2017).
5. S. J. Lee and H. S. Kang, *J. KSNVE*, **21**, 21 (2011).
6. S. H. Chough and D. H. Chang, *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 449 (1996).
7. N. J. Morrison and M. Porter, *Rubber Chem. Technol.*, **57**, 63 (1984).
8. P. J. Flory, *J. Chem. Phys.*, **18**, 108 (1950).
9. S. G. Kim and S. H. Lee, *Polym. Korea*, **18**, 172 (1994).
10. A. J. Marzocca, A. L. R. Garraza, and M. A. Mansilla, *Polym. Test.*, **29**, 119 (2010).
11. H. Nabil, H. Ismail, and A. R. Azura, *Polym. Test.*, **32**, 385 (2013).
12. C. W. Nah, J. M. Rhee, C. H. Yoon, Y. I. Huh, and S. C. Han, *Elastomer*, **35**, 173 (2000).
13. S.-S. Choi and E. H. Kim, *Polym. Test.*, **42**, 62 (2015).
14. S.-S. Choi and Y. Y. Chung, *Polym. Test.*, **66**, 312 (2018).