



고무 공기 스프링용 CR/Nylon 6 코드 고무 슬리브에 대한 연구

서재찬 · 김대진* · 박해윤 · 서관호[†]

경북대학교 고분자공학과

*경북대학교 산학협력선도대학사업단

접수일 (2014년 10월 20일), 수정일 (2014년 12월 2일), 게재확정일 (2014년 12월 3일)

Research on CR/Nylon 6 Cord Rubber Sleeve of Rubber Air Spring

Jae-Chan Seo, Dae-Jin Kim*, Hae-Youn Park and Kwan-Ho Seo[†]

Department of Polymer Science & Engineering, Kyungpook National University,
Daegu 702-701, Korea

*Agency of LINC, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Received October 20, 2014, Revised December 2, 2014, Accepted December 3, 2014)

요약 : 고무 공기 스프링 (rubber air spring)은 자동차, 철도차량 등 수송기기의 서스펜션 장치로 사용되고 있다. 고무 공기 스프링은 고무 에어백의 압축과 팽창을 통한 탄성효과로 스프링의 역할을 한다. 고무 공기 스프링의 주요 구성요소 중 하나가 고무 슬리브 (rubber sleeve)이다. 고무 슬리브는 주요 구성성분인 클로로프렌 고무와 나일론 6 코드 간의 접착이 매우 중요하다. 본 연구에서는 첨가제의 영향을 고려한 고무 슬리브의 최적 배합조성과 조건을 찾기 위해 다양한 물성시험을 하였다. 또한, 보강섬유의 최적 배향을 선정하기 위해 유한요소해석법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 고무 공기 스프링을 제조하여 실제 차량에 장착하여 기초물성과 피로수명 및 기밀성을 시험하였다.

ABSTRACT : Rubber air spring (RAS) is a special suspension device for the industries of automobile, railroad car and other transportation. A RAS serves as a spring component with the elastic effect of compression and expansion of air in a composite rubber bag. The main component of RAS is the rubber sleeve. Rubber sleeve is the composite which is made up of combination of chloroprene rubber (CR) and nylon 6 cord, and the adhesive strength between CR and nylon 6 cord is very important. In this study, considering the effects of additives in rubber sleeve, various physical properties were tested to find the optimal combination of composition and conditions. Further, in order to select the optimum orientation of the reinforcing fibers, numerical analysis was performed using the finite elements method. After assembling all components of RAS, it was mounted on an actual vehicle, and then it was tested air leakage, fatigue life and fundamental properties.

Keywords : rubber sleeve, air spring, nylon cord, adhesion

I. 서론

고무는 우수한 탄성복원 특성과 함께 방진, 방음, 완충의 특성을 잘 나타낼 수 있고 고무발포체로 만들어진 부품은 자동차 내에서 정숙함과 안락함을 최대로 만족시키므로 현재 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 자동차부품으로서 탁월한 피로특성이 요구되며, 고무 자체의 피로성 개량 또는 변위량을 적게 하기 위하여 형상설계 단계에서 유한요소 해석방법이 도입되고 있다.¹

우리나라의 고무 산업은 고무 소비량 규모에서는 2005년

714,000 톤으로 세계 6위를 기록한 이래로 줄곧 세계 5-6위권에 이르고 있으나,² 관련된 기술 수준은 선진국에 비해 낙후되어 제품의 품질 및 내구성이 열등하며, 특히 신뢰성 보증이 어려워 대외경쟁력 저하의 요인으로 작용하고 있다.

본 연구의 대상으로 삼은 고무 공기 스프링 (rubber air spring, 이하 RAS)은 2차 현가장치 부품 중의 하나로 차량 운동에 수반되는 제반 진동소음 및 전달 하중 등의 진동충격의 전달방지 및 흡진 또는 완충 목적과 더불어, 차량의 주행 안정성 및 승차감 향상에 중요한 역할을 수행하는 부품이다.¹

RAS는 현재 철도차량의 2차 현가장치로 널리 사용되고 있지만, 더욱 많은 사람들이 이용하고 대중화되어 있는 자동차 용으로는 그 사용 범위가 아직 미비한 실정이며, 사용되는 부

[†] Corresponding Author. E-mail: khseo@knu.ac.kr

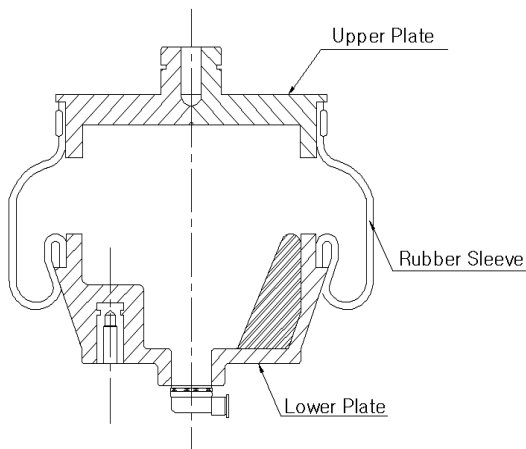


Figure 1. Sleeve typed rubber air spring.

품의 경우도 국내기술이 아닌 수입품이 대부분을 차지하고 있다.

RAS를 사용할 경우, 지면충격완화 성능은 타금속 스프링에 비해, 기계적 충격감쇠가 아니기에, 그 어느 현가장치보다 우수하여 승차감이 향상되며, 상면 지상고를 일정높이로 유지하여 안정성이 향상된다. 그리고 지면과 접지면의 증가로 제동 성능이 향상되며, 코너링 시 차량 기울임 방지로 코너링 성능이 향상되고, 좌우 흔들림을 방지하여 차량안정성 및 승차감이 향상된다.

Figure 1은 슬리브형 RAS의 구조이다. RAS는 고무 재질을 모재로 하고 있는 고무 슬리브(rubber sleeve)의 비선형 탄성재질과 비압축성의 특징을 가지게 되며, 에어백의 소재로 고무 모재의 내부에 보강섬유가 함침된 복합재료를 사용하므로 RAS는 고무와 보강섬유와의 연결방향과 접착력에 따라 이방성과 비선형성을 가지게 된다. 또한 대변형에 의한 기하학적 비선형성을 가지게 된다.³

본 연구에서는 이러한 공기 스프링의 특성을 고려해 내부공기의 변압, 외부충격수용 등 외부환경에서 일정수명을 보증할 수 있도록 배합설계, 보강재로서 섬유와의 접착 및 동적 피로에 대한 내구력을 향상시킨 공기 스프링용 고무 슬리브를 개발하고자 한다. 이는 고무가 보유에너지가 가장 크며, 주철에 비해 약 40,000 배 이상이며, 목재에 비해서도 약 120 배 이상이다.⁴ 따라서 에어 스프링은 이러한 고무 소재의 장점을 충분히 활용한 고무 슬리브를 주소재로 제작된 에어백이다. 공기의 압축과 확장운동을 반복하여 금속성의 스프링 기능을 대신한다. 고무 슬리브에 사용되는 고무와 보강섬유의 선택, 배합, 제조 기술, 접합기술의 개발 및 각 부품 간의 기밀성 유지 등에 대한 최적화 설계가 요구된다. 또한, 차량의 수명에 부합하는 내구성을 갖기 위해 신뢰성 확보가 필수적이다.⁵

이를 위하여 먼저 첨가제의 영향을 고려한 고무배합 실험을 통해 최적의 고무 배합조건을 도출하였다. 본 연구를 위하여

합성고무 중에서 내유성과 내후성의 두 가지 특성을 동시에 만족시키고, 기계적 강도, 내굴곡피로도, 희석된 산과 염기에 대한 저항성이 가장 우수한 클로로프렌 고무(chloroprene rubber, CR)를 사용하였다.⁶ 고무 슬리브의 제조에 앞서 보강섬유의 최적 배향을 선정하기 위해 유한요소해석법을 이용한 수치해석을 수행하였다.⁷ 해석결과를 고무 슬리브 제조 과정에 반영하여 고무 슬리브 시제품을 제조하였으며, 접착력과 기계적 특성을 시험하여 성능을 평가하였다. 마지막으로 개발제품의 실제 적용 검증을 위하여 새로운 고무 슬리브를 사용하여 RAS를 제조하여 실차량에 장착하여 기초물성과 피로수명 및 기밀성을 시험하였다.

II. 실험

1. 재료

본 실험에서 사용된 CR은 내굴곡피로에 대한 저항성이 뛰어난 Denka사의 M-40을 사용했다. 사용한 CR의 무늬점도는 (ML1+4, 100°C)는 50, 스코치 시간은 $t_5(121^\circ\text{C})$ 에서 23분이다.⁸ 나일론 코드는 효성의 Nylon 6 (Nylon 6 dipped tire cord fabric 840 D/2 52ENDS(26EPI))를 사용했으며, breaking tensile strength N/END는 140.2이고, adhesion (H-Test) N/END는 124이며, 수분함유량은 0.5%였다. 나일론 코드의 기본접착제 처리는 resorcinol formaldehyde latex(R.F.L.)를 베이스로 하고 CR과의 접착강화를 위하여 미국 Lord 사의 Chemlok #220을 도포하였다. Chemlok #220은 열과 물, 기름 및 화학물질에 강한 내성을 가지고 있다. 기본 성분은 고분자 혼합물과 유기화합물 및 유기 용제 시스템 안에서 분산된 무기물 충전제 등이다.⁹ 가교제로 사용된 산화아연(ZnO)은 삼보의 ZnO, 산화마그네슘(MgO)은 Kyowa의 MgO #150을 사용하였다. 가교촉진제는 NA-22(강신산업, ethylene thiourea)를 사용하였다. 충전제인 카본블랙은 OCI의 SRF N774를 사용하였다.

2. 고무배합 설계

기존 제품의 분석결과를 통해 얻어진 원료 고무 및 배합 조성비와 일반적인 클로로프렌 고무 제품들의 배합표를 바탕으로 RAS용 고무 배합표를 연구하고 첨가제 영향을 고려하여 시험을 실시하였다. 이에 대한 구체적인 내용은 결과 및 고찰에 설명하였다.

3. 고무 슬리브(rubber sleeve)의 제조

고무와 나일론 코드의 합포는 성형조건을 전제한 2 plied-cord + CR 외내피를 총두께 2.2 - 2.3 mm로 합포시켰다. 이는 솔리드 블래더(solid bladder, EPDM 코어금형)와 성형시 고무



Figure 2. Process of building prototyped rubber sleeve.

의 열팽창이 금형보다 15배 정도 이상 커서, CR과 나일론 코드 층에 충분한 성형압력을 전달하여, 최종 1.9 - 2.0 mm의 두께로 맞추었다.

3.1 혼합

혼합은 ASTM D 3182 규격¹⁰에 의거, 시험실용 2 롤 오픈 밀(450 mm × 100 mm)에서 수행했으며, 마찰비는 1 : 1.25였으며, 온도는 60℃를 유지하며, 롤 간의 간격은 0.6 mm였으며, 전체 밀링시간은 30분이었다.

3.2 코드(cord) 접착제 처리

나일론 코드의 기본접착제 처리는 R.F.L을 베이스로 하고 CR과의 접착강화를 위하여 Chemlok #220을 도포하였다. Formaldehyde와 resorcinol간의 화학반응은 아주 빠르고 강력하여, novolac form에서 합성되어야 한다.¹¹ R.F.L은 고무산업에서 고무소재와 나일론 및 폴리에스터의 접착소재로 주요하게 사용되어지고 있으며, 전처리작업이 필요하다. Chemlok #220은 열과 수분, 화학물질 및 기름 및 유기용제에 대한 저항성이 강하다.⁹

3.3 토폴링(topping) 및 접합(doubling)

이미 개발된 배합고무를 캘린더에서 나일론 코드지에 연속 압착하여 0.5 ± 0.05 mm의 두께로 얹었다.

이렇게 만든 나일론 코드의 한쪽 면에 편축하여 동일 배합고무를 0.6 ± 0.05 mm 두께의 시트를 캘린더에서 접합하였다.

4. RAS 제작

4.1 캘린더링과 전성형

나일론 코드와 배합고무를 접합시킨 시트를 코어금형의 외경원주길이에 맞게 절단하되, 섬유조직의 방향은 금형 길이방향으로 경사, 위사가 각각 45도로 배향되도록 하고, 제품의 내부압에 대한 응력의 분산을 최대화하도록 평행사변형의 형태로 재단하였다. 과정은 Figure 2에 상세히 나타내었다.

4.2 가황 및 조립

재단된 동일한 두 시트를 코어금형에 조립 시 한 장을 먼저 조립하고, 나머지 한 장은 사선이 서로 교차하도록 반대편으로 붙여 조립한다.

조립된 코어금형을 원통형의 금속금형에 삽입하여 조립하고, 금형의 각 부분들을 완전히 체결한 후, 오븐에 넣어 성형한다. 조립된 공기 슬리브가 성형되기 이전부터 오븐의 온도는 185℃로 일정하게 유지시키고, 성형조건은 185℃에서 60분으로 하였다.

성형된 고무 슬리브를 나일론코드 사출물인 플레이트와 피스톤에 준비된 스테인레스 링을 매개로 상하단부에 코킹(calking)하였다.

4.5 열노화 지연을 위한 표면처리

고무 소재의 표면 부식은 열피로와 산소에 의한 것으로, RAS가 밀폐된 공간이나 열원이 있는 환경에 장착되는 바, 이러한 환경은 분자들 간의 운동을 증진시키게 되고, 이는 궁극적으로 전자의 이동을 유발시켜 파단의 근본적 원인을 제공한다.¹² 따라서 표면부식을 방지하기 위해서는 소재 내부에 발생하는 열의 발산을 원활하게 하기 위해 표면적을 극대화하여 표면부식 방지에 의한 제품의 내구도를 높일 수 있기 때문에 가교 성형 공정에서 실시하였다.

고무 슬리브의 요구물성에 대해서는 고무 자체의 Mooney-Rivlin 계수와 순수 전단시험을 나일론 코드와 별개 분석함으로 각 소재의 최적조건과 코드의 배향각도를 최적 설계하였다.¹³

일본 Bridgestone 사의 실제제품에 대한 초기 내부압에 따른 변위량과 히스테리시스의 정특성과 실사용 조건에 근거한 동적내구시험기를 전문업체와의 협의 하에 공동 설계 제작하여 검증을 실시하였다.

5. 물성 시험

RAS의 재료물성과 성능을 평가하기 위하여 인장시험, 내구도 시험, 실차량 테스트 등을 실시하였다. 주요 시험방법은

Table 1. Testing Method of each Criterion

Testing criteria	Unit	Testing Method	Remark
Hardness	IRHD	IRHD ASTM D2240-05	
Elongation	%	ASTM D412-06ae2	
Tensile strength	MPa	ASTM D412-06ae2	
Calking clamping force	MPa	To swage rubber sleeve with S/S band, and test the breakage force or slippage between two materials.	Swaging machine
Pressure leakage	%	Input 1 bar pressure into rubber sleeve by air compressor and measure any pressure leakage during 50,000 cycles of compression and expansion. When the inside pressure goes down below 0.9 bar, it is judged as failure.	Real installment on the vehicle
Anti-fatigue	Cycle	Compress air spring by -20 mm at 210 kg (1.0 bar x section area of cylinder) pressure with the compression speed of 2.5 s/cycle. Compress 500,000 cycles and find any crack on the sleeve surface and breakage on calking area and assembled area. This test can be usefully used to predict the life expectation.	and NASM 1312-16 (MIL-STD-1312-16A)

Table 1에 요약하여 나타내었다. 몇 가지 실험에 대한 세부적인 실험방법은 아래에 자세히 기술한다.

5.1 접착력 테스트

최적 배합으로 설정된 AS-2로 만들어진 배합물을 에어 스프링 제품으로 만들 경우, 나일론 코드와 잘 접착이 되어야한다. 따라서 CR과 나일론 코드를 접착한 시편을 제작하여 접착력 테스트를 시행하였다. 시험방법은 표준 접침 전단 시편(lap shear specimen)을 사용했으며, 상세한 시험방법은 ASTM D1002을 참고하였다.¹⁰

먼저 단순히 프레스 작업을 통해 고무와 나일론을 압력만으로 접착한 경우와 나일론 코드에 Chemlok #220 처리를 한 후, 같은 방법으로 실험하였다.

5.2 단축 인장시험

단축 인장시험은 단축 압축, 순수 전단시험과 더불어 고무 물성을 획득하는데 있어 매우 중요한 시험이다. 단축 인장시험을 위한 시편은 길이 100 mm, 너비 25 mm, 두께 2 mm, 표점거리 20 mm인 KS 규격의 아령형 3호형을 사용하였으며 시험 시 인장 속도는 500 mm/min로 하였다.¹²

5.3 순수 전단시험

순수 전단시험을 위한 시편은 가로 100 mm, 세로 10 mm, 두께 1 mm의 시편을 이용하였다. 인장할 때 시편의 양쪽 면에서 순수 전단 변형모드가 되지는 않지만 시편의 폭이 높으면 10배 이상이면 응력-변형률 곡선에 주는 영향이 크지 않은 것으로 알려져 있다.

5.4 실차량 반복피로 하중시험

RAS는 복합소재들 간의 물리적 및 화학적 결합을 통해 만들어진 고무가 제품이고, 이러한 고난이도 제품의 품질을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이를 위해서 반복피로하중시험을 통한 기밀성 확보에 대한 고찰을 하였다.

본 연구에서 제작된 RAS를 먼저 내구시험기에서 총 3회의 반복피로하중시험을 실시하여 목표로 한 기밀성(반복하중이 5만 주기 반복되는 동안에 압력손실이 10% 이내일 조건)과 피로수명(50만 주기 동안 크랙 또는 파손이 발생하지 않을 조건)이 만족되는 것을 확인한 후에 도로주행에서 나타나는 제반 특성을 시험하기 위하여 실제 차량에 장착하여 시험을 실시하였다. 실제 RAS는 2차 스프링으로 사용하나, 제작된 스프링의 성능의 가속 시험을 위해 운전석 의자를 개조하여 운전자의 전체 하중을 하나의 공기 스프링이 수직방향으로 받도록 하였다. 즉, 차량에 있는 기존의 의자의 서스펜션을 제거하고 의자의 가장자리에 가이드 실린더를 설치하여 의자 하부의 중심에 위치한 에어스프링이 전체 하중을 지탱하도록 구조를 변경하였다.

개발 제원을 초과하는 공압이 발생하였으나, 본 연구의 정량적 평가 항목인 기밀성과 피로수명 실측을 위한 목적으로 차량 운행 중 내부압력 변화 및 반복하중 중의 고무에어스프링의 크랙 발생이나 파손 여부를 관찰하였다. 불규칙적인 운행과 도로특성 중에 반복되는 주기 수를 측정하기 위해 주기 측정용 카운터를 구비하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 고무배합에 있어서 첨가제의 영향

1.1 산화마그네슘(MgO)의 영향

클로로프렌 고무 배합에 있어서 MgO의 일반적인 특징은

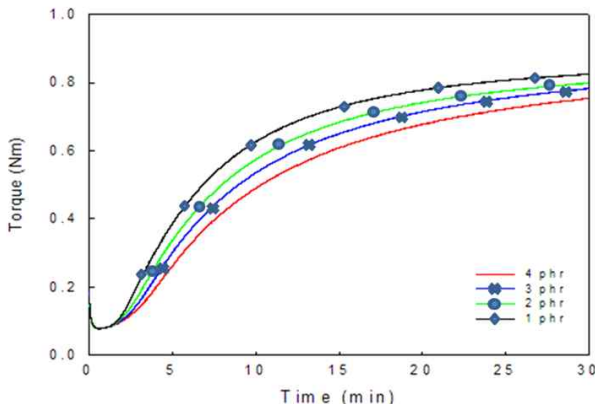


Figure 3. MgO content effect in vulcanization.

Table 2. Recipe and Its Properties of MgO Content Effect in Vulcanization

	AS-1	AS-2	AS-3	AS-4
CR(M-40)	100	100	100	100
CB(SRF N774)	30	30	30	30
Stearic acid	1	1	1	1
Octamine	1	1	1	1
MgO	1	2	3	4
ZnO	5	5	5	5
A-2 Oil	20	20	20	20
NA-22	0.5	0.5	0.5	0.5
Hardness	47±1	49±1	49±1	49±1
Sp. gr.(g/cm ³)	1.310	1.310	1.316	1.320
T90 (min)	16.82	18.43	19.84	20.81
Tear strength (kgf/cm)	54.5	61.3	62.4	54.9
Tensile strength (kgf/cm ²)	169.1	168.7	155.2	146.7
M100 (kgf/cm ²)	10.0	13.0	11.5	12.6
M300 (kgf/cm ²)	56.4	61.0	53.9	57.9
Elongation (%)	530	520	490	470

가공온도에서는 안정제로 되어 저장 안정성을 좋게 하여 스크치 방지제로 되고, 소련 시의 고무 가소화를 촉진시킨다. 또한 가공온도에서는 가교제 역할을 하며, 가교 시 발생하는 염화수소의 수용체로서 작용한다.¹⁴

이러한 MgO의 가교 거동에 대한 영향을 oscillating disk rheometer (ODR)로 측정하여 Figure 3에 나타내었다. MgO의 첨가량 증가에 의해 가교속도가 지연되어 가공 안정성이 촉진

됨을 알 수 있다. 이는 클로로프렌 고무 배합에 있어서의 전형적인 MgO 특성이다.

Table 2에 나타낸 것과 같이 이 실험을 통하여 MgO 1 - 4 phr 정도는 경도에 크게 영향을 미치지 않으나 신장률은 MgO 첨가량이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 신장률이 감소하는 것은 가교제의 특성으로, MgO의 양이 증가할수록 가교도는 증가하게 된다. 하지만 일정 가교도 이상의 높은 가교도에서는 분자사슬운동이 제약되는 경직된 망상구조를 이루게 된다. 이러한 경직된 망상구조는 외부의 힘에 의한 변형이 일어났을 때 받은 에너지의 많은 양을 발산하지 못하게 됨으로 낮은 신장에서도 파괴되는 것이다.¹⁵

이 실험을 바탕으로 목표치(경도: 50 이상, 신장률: 500% 이상)에 근접하는 MgO 2 phr을 선택하여 다른 첨가제의 양을 변화시키면서 목표치를 맞추고자 하였다.

1.2 가교촉진제의 영향

전술한 실험에서 나타난 낮은 경도를 개선하기 위하여 가장 일반적인 클로로프렌 고무의 촉진제이고, 내열성이 뛰어난 NA-22를 사용하였다. 이 가교촉진제의 첨가량(0.5 - 0.9 phr)에 따른 영향을 Table 3과 Figure 4에 나타내었다. 가교촉진제 양을 0.5 phr에서 0.9 phr로 늘림에 따라 가교도가 증가하여 경도는 상승하였다. 그러나 가교촉진제의 증가에 따른 신장률의 저하가 두드러졌다. 이는 앞서 설명하였듯이 가교현상에 있어서 일반적인 현상으로, 높은 가교도에서는 분자사슬운동이 제약을 받는 경직된 망상구조를 생성하게 되므로 파괴물성은 최대점을 지나 다시 감소하는 경향이 나타나기 때문이다.

1.3 카본블랙의 영향

경도를 조금 떨어뜨리는 대신 신장률을 올리고 그 이후, 다른 첨가제의 양을 변화시켜 경도를 올리고자 하였다. 즉, 카본블랙에 의한 경도 보강효과를 조금 줄이고자 하였다.

카본블랙에 의한 고무 물성 보강효과는 페놀, 카복실, 퀴논 그리고 락톤과 같은 극성을 띠는 활성기가 카본블랙 표면에 존재하고 있기 때문에 나타난다. 이런 카본블랙 표면의 극성기들이 고무와의 결합을 강하게 해 주는 것이다. 본 실험에서는 이러한 카본블랙의 첨가량을 변화시켜 물성의 변화, 특히 신장률의 변화를 확인하였다.

Table 4에 나타낸 것처럼, 카본블랙이 20 phr일 때 신장률이 상당히 좋아짐을 알 수 있었다. 이는 일반적으로 알려져 있는 카본블랙의 보강성 경향(신율에 있어 입경이 큰 것이 좋음; 배합량을 줄이면 증가; high-structure를 가하면 현저히 저하)을 잘 나타내어주는 것이다.¹⁶

1.4 적정 함량의 카본블랙 조성 하의 가교촉진제의 영향

앞선 실험들에 의하여 카본블랙 함량이 20 phr일 때 신장률이 좋음을 확인하였고, 가교촉진제에 의해 경도와 신율 조절

Table 3. Recipe and Its Properties of Curing Agent Content Effect in Vulcanization (carbon black SRF N774 : 30 phr)

	AS-5	AS-6	AS-7
CR(M-40)	100	100	100
CB(SRF N774)	30	30	30
Stearic acid	1	1	1
Octamine	1	1	1
MgO	2	2	2
ZnO	5	5	5
A-2 Oil	20	20	20
NA-22	0.5	0.7	0.9
Hardness	49±1	52±1	52±1
Sp. gr.(g/cm ³)	1.310	1.314	1.313
T90 (min)	18.43	16.38	15.27
Tear strength (kgf/cm)	61.3	50.4	54.4
Tensile strength (kgf/cm ²)	168.7	149.6	152.2
M100 (kgf/cm ²)	13.0	13.2	14.6
M300 (kgf/cm ²)	61.0	80.1	85.7
Elongation (%)	520	435	425

Table 4. Recipe and Its Properties of Carbon Black Content Effect in Vulcanization

	AS-8	AS-9	AS-10
CR(M-40)	100	100	100
CB(SRF N774)	30	25	20
Stearic acid	1	1	1
Octamine	1	1	1
MgO	2	2	2
ZnO	5	5	5
A-2 Oil	20	20	20
NA-22	0.5	0.5	0.5
Hardness	49±1	45±1	44±1
Sp. gr.(g/cm ³)	1.310	1.300	1.278
T90 (min)	18.43	18.79	18.68
Tear strength (kgf/cm)	61.3	56.4	55.9
Tensile strength (kgf/cm ²)	168.7	162.7	171.8
M100 (kgf/cm ²)	13.0	10.0	10.9
M300 (kgf/cm ²)	61.0	46.9	40.1
Elongation (%)	520	570	595

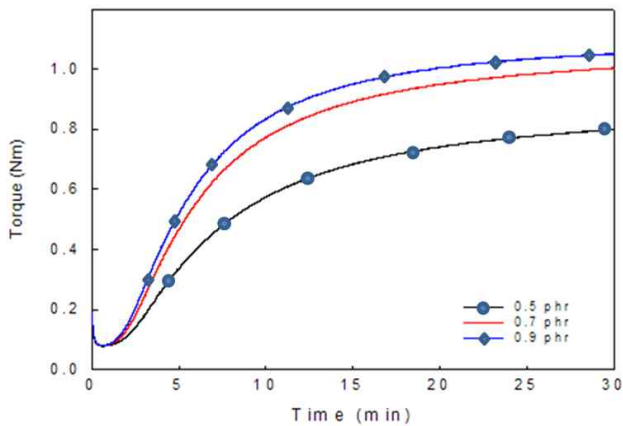


Figure 4. Cure accelerator content effect in vulcanization (carbon black SRF N774 : 30 phr).

이 가능함을 확인하였다. 따라서 AS-10 배합에 가교촉진제를 이용하여 경도를 올리려고 가교촉진제 NA-22를 0.5 - 0.8 phr로 변화시키며 물성변화를 확인하였다.

Table 5와 Figure 5에 나타난 것처럼, 가교촉진제의 첨가량이 증가함에 따라 가교도의 증가로 인하여 경도는 조금씩 증가하지만 신장률에 있어서는 상대적으로 급격하게 저하되었다.¹⁷ 따라서 가교촉진제만으로는 목표치를 만족하는 배합을 얻을 수 없어서 가교에 영향을 미치는 다른 첨가제를 변량하여 그

Table 5. Recipe and Its Properties of Curing Agent Content Effect in Vulcanization (carbon black SRF N774 : 20 phr)

	AS-11	AS-12	AS-13	AS-14
CR(M-40)	100	100	100	100
CB(SRF N774)	20	20	20	20
Stearic acid	1	1	1	1
Octamine	1	1	1	1
MgO	2	2	2	2
ZnO	5	5	5	5
A-2 Oil	20	20	20	20
NA-22	0.5	0.6	0.7	0.8
Hardness	44±1	45±1	47±1	48±1
Sp. gr.(g/cm ³)	1.278	1.278	1.288	1.288
T90 (min)	18.68	17.98	17.79	16.70
Tear strength (kgf/cm)	55.9	63.3	52.3	65.6
Tensile strength (kgf/cm ²)	171.8	161.6	164.2	152.6
M100 (kgf/cm ²)	10.9	11.6	13.6	12.3
M300 (kgf/cm ²)	40.1	46.4	50.1	50.7
Elongation (%)	595	540	520	500

영향을 확인하고자 하였다.

1.5 산화아연(ZnO)의 영향

전술한 실험들 중에서 경도와 신장률이 목표치(경도: 50이

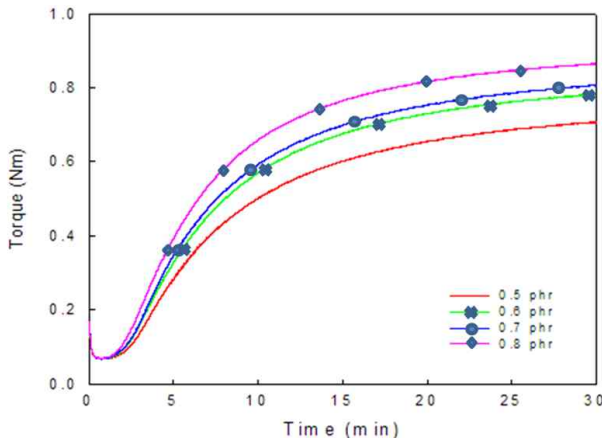


Figure 5. Cure accelerator content effect in vulcanization (carbon black SRF N774 : 20 phr).

Table 6. Recipe and Its Properties of ZnO Content Effect in Vulcanization

	AS-15	AS-16	AS-17	AS-18
CR(M-40)	100	100	100	100
CB(SRF N774)	20	20	20	20
Stearic acid	1	1	1	1
Octamine	1	1	1	1
MgO	2	2	2	2
ZnO	5	6	7	8
A-2 Oil	20	20	20	20
NA-22	0.7	0.7	0.7	0.7
Hardness	47±1	48±1	48±1	49±1
Sp. gr.(g/cm ³)	1.288	1.295	1.298	1.307
T90 (min)	17.79	17.84	17.77	17.96
Tear strength (kgf/cm)	52.3	52.4	48.8	54.4
Tensile strength (kgf/cm ²)	164.2	151.3	162.5	154.7
M100 (kgf/cm ²)	13.6	13.5	13.6	12.4
M300 (kgf/cm ²)	50.1	48.5	48.3	54.1
Elongation (%)	520	520	530	530

상, 신장률: 500이상)에 근접하는 AS-13배합을 선택하여 본 실험에서는 산화아연의 영향을 살펴보았다. ZnO는 클로로프렌 고무의 적정가교를 할 때 필요하고, 동시에 초기가교의 촉진, 내열, 내노화성을 향상시킨다. MgO와 마찬가지로 ZnO 또

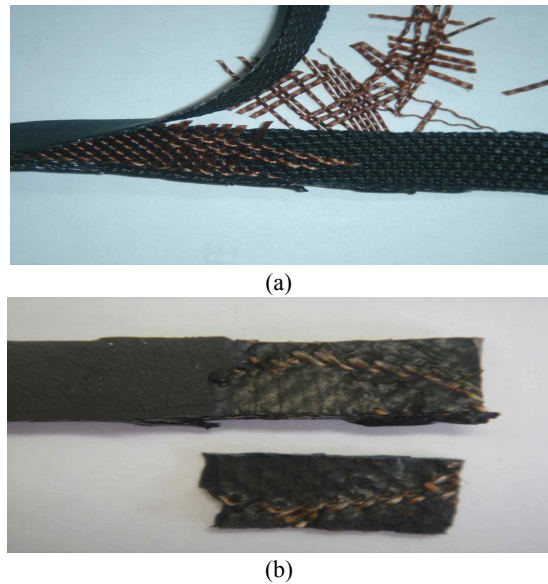


Figure 6. Adhesive testing between CR and (a) nylon cord (b) nylon cord using adhesive agent, Chemlok #220.

한 가교제이므로 고무 분자량을 증가시키고 가지사슬 분자를 생성시킨다. 이렇게 생성된 가지 분자들이 사슬풀림을 어렵게 하여 강도가 증가하게 되는 것이다. 그러나 ZnO는 다른 첨가제와는 달리 가교 시 탄성저하에 있어 가장 영향을 미치지 않는 첨가제이다. 즉, 고경도와 고탄성을 요하는 가교에 사용된다.

따라서 본 실험에서는 신장률이 500%를 초과하고 경도가 상대적으로 가장 높은 AS-13 배합에 아연산화의 양을 늘려 경도를 목표치까지 올리고자 하였다. 가교제인 ZnO의 양이 증가함에 따라, 가교도가 조금씩 증가하여 경도가 높아짐을 Table 6에서 확인할 수 있다. 또한 앞서 설명하였듯이 신장률에 있어서는 저하 없이 오히려 상승하는 경향을 보였다.¹⁸

1.6 최적 배합 선택

모든 실험 결과를 목표 물성치와 비교하여 목표치에 근접하는 AS-2와 AS-18의 배합을 얻었다. 이 두 배합으로 만들어진 시편으로 Demattia 굴곡 테스트(상온, 10만회)를 시행하였다. 그 결과, AS-2 배합에서는 전혀 크랙이 발생하지 않은 반면, AS-18 배합에서는 소량의 크랙이 관찰되어, 고무 슬리브 재료에서의 기밀성보장 및 내굴곡성 저항을 위해서는 AS-2 배합이 더 좋을 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 최적 배합을 AS-2로 결정하였다.

AS-2 배합에서 경도(hardness)는 IRHD 49±1, 파열강도(tear strength)는 60 kgf/cm 이상, 인장강도(tensile strength)는 150 kgf/cm² 이상, 신장율(elongation)은 500% 이상으로 목표치를 만족하는 결과를 보였다.

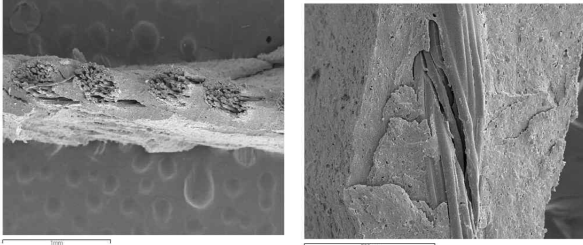


Figure 7. Bonding status between CR and nylon 6 (SEM 40 and 100 times).

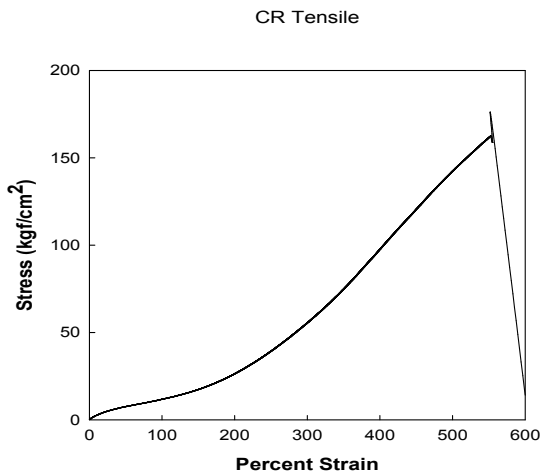


Figure 8. Stress-strain curve in tensile strength.

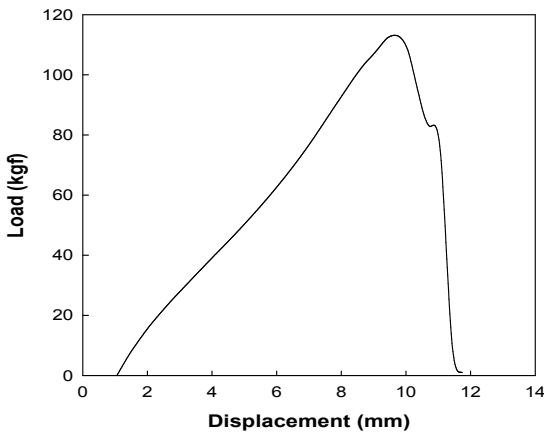


Figure 9. Stress-strain curve in shearing.

2. 고무 슬리브 물성

2.1 접착력

최적 배합으로 설정된 AS-2로 만들어진 배합물이 에어스프링 제품으로 만들어질 경우, 나일론 코드와 잘 접착되어야 한다. 먼저 단순히 프레스 작업을 통해 고무와 나일론을 압력만으로 접착한 경우는 Figure 6-(a)에서 보는 것처럼 고무와 나일

론은 외부 힘에 의해서 쉽게 떨어진다.

Figure 6-(b)에 나타난 접착 강화제 처리 후의 접착력 테스트 실험 결과를 보면, 고무와 나일론 코드의 강한 접착력에 의하여 고무와 나일론 코드의 접촉면에서 떨어지는 것이 아니라 고무 자체의 파단이 일어남을 알 수 있다. 접착이란 점착액이나 점착체를 만들기 위한 분자들 간의 결합이자 동시에 분자를 만들기 위한 원자들 간의 결합의 상호인력의 결과를 물리적으로 표현된 현상으로 정의하는데, 이를 통해서 새로운 화학적 구조 이상의 안정된 결합력을 가진 새로운 물질을 만들어 내는 개념이다.¹⁹

Figure 7에서 보는 것처럼, 고무와 나일론 코드의 강한 접착력에 의하여 고무와 나일론 코드의 접촉면에서 떨어지는 것이 아니라 고무 자체의 파단이 일어남을 알 수 있다. 고무가 나일론의 표면을 잘 감싸고 있어서 파단 후에도 고무와 나일론의 분리가 일어나지 않고 보강 효과를 나타낸 것으로서 이는 두 복합소재 간의 원자 및 분자 간 상호인력이 작용하고 있다고 판단된다.²⁰

RAS의 탄성거동을 해석하기 위해 단축 인장시험과 순수 전단시험의 결과가 필요하다. 따라서 최적 배합으로 결정된 AS-2 배합에 의해 만들어진 시편으로 물리적 특성시험을 수행하였다.

2.2 단축 인장 및 순수 전단시험

단축 인장시험은 단축 압축, 순수 전단시험과 더불어 고무 물성을 획득하는데 있어 매우 중요한 시험이다. 단축 인장시험에서는 154.1 kgf/cm²였으며 신장율은 548%였다. 이 결과를 Figure 8에 나타내었고, 이는 다른 고무소재와 비슷한 커브를 보여주었다.

순수 전단시험의 대표적인 결과를 Figure 9에 나타내었는데, CR과 나일론 코드 간의 화학적 결합에 의한 일체화된 복합소재의 파괴현상을 보여주는 커브가 관찰되었다.

3. RAS 성능특성

제작된 RAS에 대한 성능특성시험의 결과를 Table 7에 나타내었다. 코킹의 형상을 기존의 원치형 대신 스웨징 방법으로 변경함에 따라 이 부분의 체결이 완벽하게 보장되게 되어 평가항목 중 코킹강도가 무의미할 뿐만 아니라 측정이 불가능하므로 측정을 실시하지 않았다. 코킹강도는 코킹부위의 기밀성을 위한 설계파라메타 중의 하나이다.

기밀성은 입력압력을 1 bar로 설정한 후, 5만회 단위로 압력 손실 여부를 지속 관찰한 결과, 최종 평균압력이 0.91 bar로 나타나 약 9%의 압력손실로 나타났다. 내구시험기에서 총 3회의 반복피로하중시험을 실시하여 목표포로 한 기밀성(반복하중이 5만 주기 반복되는 동안에 압력손실이 10% 이내일 조건)과 피로수명(50만 주기 동안 크랙 또는 파손이 발생하지 않을

Table 7. Test Results of All Properties

Evaluation criteria	Unit	Research target	Testing result	Evaluation method
Hardness	IRHD	50 ± 5	50 ± 3	IRHD Hardness Gage(Digital)
Elongation	%	500	548	UTM
Tensile strength	kgf/cm ²	120	154.1	UTM
Clamping force	kgf/cm ²	29.5	29.5	UTM
Pressure leakage	ΔP%	10	9.1	Pressure leakage measurement each 50,000 cycles
Anti-fatigue	Cycle	500,000	512,028	Anti-fatigue machine and real installment on a vehicle.

Table 8. Test Results of Durability

Cycle (x1000)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
17 days (cycle: 505,498)										
Pressure	0.91	0.92	0.93	0.91	0.92	0.92	0.90	0.91	0.91	0.90
Crack	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Burst	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
18 days (cycle: 512,548)										
Pressure	0.93	0.92	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.92	0.91	0.90
Crack	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Burst	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
18 days (cycle: 507,594)										
Pressure	0.93	0.93	0.92	0.91	0.92	0.92	0.91	0.90	0.91	0.90
Crack	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Burst	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

조건)이 만족되는 것을 확인한 후에 실차량시험을 실시하였다.

시험 시작 직전과 매 50,000 주기마다 압력을 1 bar로 설정하였고, 매 50,000 주기마다 압력과 표면 크랙의 발생여부 및 파손여부를 관찰하였다. 그 결과는 Table 8에 나타냈으며, 파손이나 크랙이 전혀 발생하지 않았다.

4. 실차량 반복피로하중시험

연구 목표를 초과하는 공압이 발생하였으나, 연구의 정량적 평가 항목인 기밀성과 피로수명 실측을 위한 목적으로 차량 운행 중 내부압력 변화 및 반복하중 중의 RAS의 크랙 발생 여부를 관찰하였다. 불규칙적인 운행과 도로 특성 중에 반복되는 주기 수를 측정하기 위해 주기 측정용 카운터를 구비하였다. RAS는 주요 부품인 고무 슬리브와 이들을 일정한 형태로 코킹한 조립품질과 그리고 내구수명을 위한 정적 특성치(내부압에 대한 기밀성, 하중에 대한 변위량)와 동적피로시험 등이 중요하다. 실차량 장착은 운전자의 하중과 의자 자체의 하중에 에어 스프링 위에 수직방향으로 전달되도록 브라켓을 제작하여 의자를 견고히 장착시켰다.

본 RAS 제작품은 사용자가 운전 지형이나 개인 선호도에 따라 에어스프링 내의 압력을 조절할 수 있다. 한번 설정된 압력은 다음 조정 시까지 압력이 소실되지 않아야 만족도를 높일 수 있다.

내구도의 확보를 위해 선진국의 보증 운행거리인 최소 200,000 km에 준하는 50만 주기 시험을 실차량의 시험조건으로 하여 시험을 실시하였다. 실차량시험에서 실시한 반복하중 실험에서도 슬리브나 조립부품의 파열이 없이 512,028 주기까지 진행되어 피로수명 목표치도 달성되었다.

5. 유한요소해석 검증

고무 슬리브 제조에 앞서 RAS 제조시 고무 슬리브 보강섬유의 배향이 변형과 강도에 미치는 영향을 분석하고, 최적 배향을 선정하기 위해 유한요소해석법(finite element method)을 이용한 수치해석을 수행하였다.²¹

5.1 RAS의 해석

일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타내지만, RAS의 주재료인 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성 특성을 지닌다.

이러한 고무재료의 거동은 변형률에너지함수로 표현할 수 있는데 그 양상이 고무재료에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 시험으로부터 구한 하중-변형 관계를 가장 적절히 표현하는 변형률에너지함수를 구하는 것이 중요하다 하겠다. 본 연구의 해석에서는 연신률 불변량의 함수로 표시되는 리블린(Rivlin)의 다항식 형태의 Mooney-Rivlin 함수를 사용하였다.¹²

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

Table 9. Testing Comparison of All Analysis Criteria

Cord volume	10%			15%			20%		
Cord angle	35°	45°	55°	35°	45°	55°	35°	45°	55°
Analysis criteria	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9

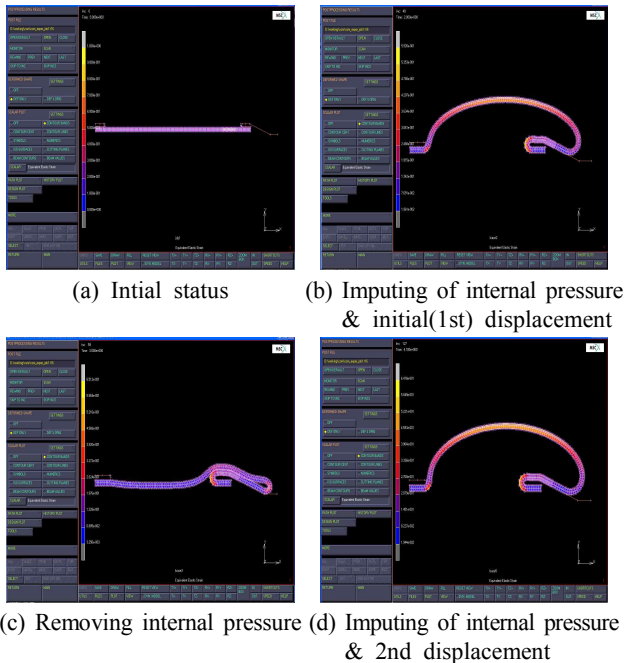


Figure 10. Deformation of each process of axial symmetry.

보강코드는 RAS의 특성을 좌우하는 주요 설계변수로 알려져 있으나 정량적으로 어느 정도의 영향을 끼치는지 단순한 수식으로 표현되어 있지 않다. 보강코드의 주요 설계변수는 탄성계수, 직경 및 성형각도 등인데 이들의 영향을 여러 가지 해석을 통하여 분석·검토하였다. 코드의 함량은 부피분율로 10%, 15%, 20%의 3가지를 선택하고 각각의 성형각도를 35°, 45°, 55°의 3가지로 나누어 Table 9와 같이 총 9가지 경우로 분류하였다.

본 연구에서는 각 경우에 대해 해석을 수행하여 최대 Von-Mises stress와 최대 변형률이 적고 응력분포가 완만한 조건을 찾아가 하였다.

고무의 단축 인장시험과 순수 전단시험을 통하여 얻은 값을 MARC에서 커브 피팅을 통하여 적용하고 정확한 변형이 일어나도록 하였다. 비선형 해석에서는 컨택(contact)조건이 아주 중요한데 상부와 하부 플레이트와 슬리브는 항상 붙어 있는 글루(glue) 조건을 부여하고 링과 슬리브는 부드럽게 접촉할 수 있도록 접촉 조건을 부여하였다.

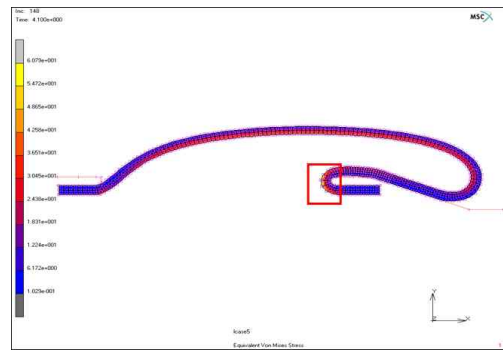


Figure 11. Maximum stress appeared area.

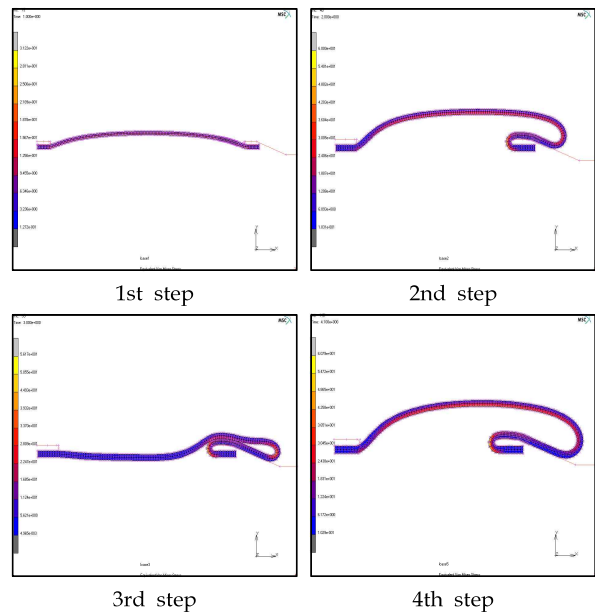


Figure 12. The Von-Mises stress distribution according to code angle (35° max).

RAS의 해석은 크게 3단계로 이루어진다. 첫번째 단계는 내부 압력이 가해지면서 상부에서 힘이 가해지는 가공단계이며, 두번째 단계로 내부 압력을 제거했다가 다시 가해주는 장착 단계, 그리고 마지막으로 탑승자의 무게와 진동이 가해지는 주행 단계로 나누어진다. Figure 10에 축대칭 모델을 이용한 단계별로 변하는 모습을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 해석 결과는 실제 스프링의 변형 양상과 동일한 거동을 보였다.

5.2 Von-Mises 응력(stress)에 대한 해석

RAS의 주요 설계변수로 알려져 있는 보강코드의 각도에 따라 고무슬리브의 최대 Von-Mises stress가 발생하는 부분과 해석의 단계에 따라 최대 Von-Mises stress의 변화를 분석·검토 하였다.

실제 에어스프링이 구동하고 있는 마지막 해석 단계에서

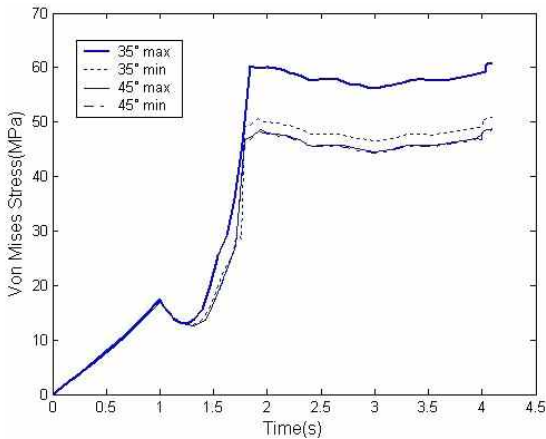


Figure 13. Change of Von-Mises stress by analysis gradation of maximum stress node.

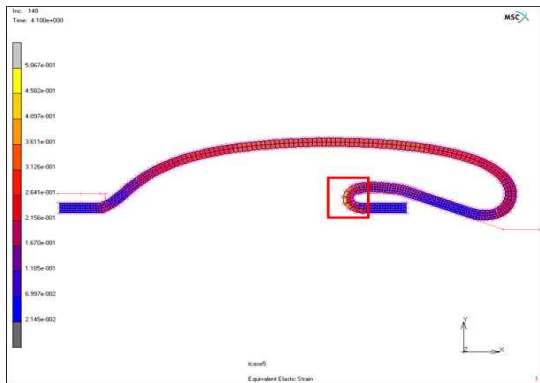


Figure 14. Maximum strain appeared area.

최대 Von-Mises stress가 발생하는데 그 부위는 RAS의 하판과 접해 있는 부위로 고무 슬리브의 모양이 가장 많이 변화하는 곳에서 발생한다. 이는 RAS의 파괴가 일어나는 부위를 예측할 수 있다. Figure 11은 최대 Von-Mises stress가 발생하는 부분을 나타낸다.

Figure 12에서는 코드의 각도 35°에 따른 각 해석 단계에서의 최대 Von-Mises stress 결과를 보여주는 그림이다. 성형각도가 45°와 55°인 경우에 대해서도 해석을 수행한 결과 35°인 경우와 비슷한 양상을 보였다. 따라서, 여기에는 최적값을 보인 35°인 경우만 나타내었다.

코드의 각도가 커지면 탄성계수가 감소하였고 최대 응력 값은 작아진다. Figure 13은 최대 응력이 발생하는 절점의 해석 시간의 흐름에 따른 Von-Mises stress 값의 변화를 보여준다.

5.3 탄성 변형(elastic strain)에 대한 해석

RAS의 최대 탄성 변형은 최대 Von-Mises stress가 발생하는 부분과 같은 곳에서 일어나는데 최대 Von-Mises stress와 같이 해석의 마지막 단계에서 일어난다. 최대 Von-Mises stress의

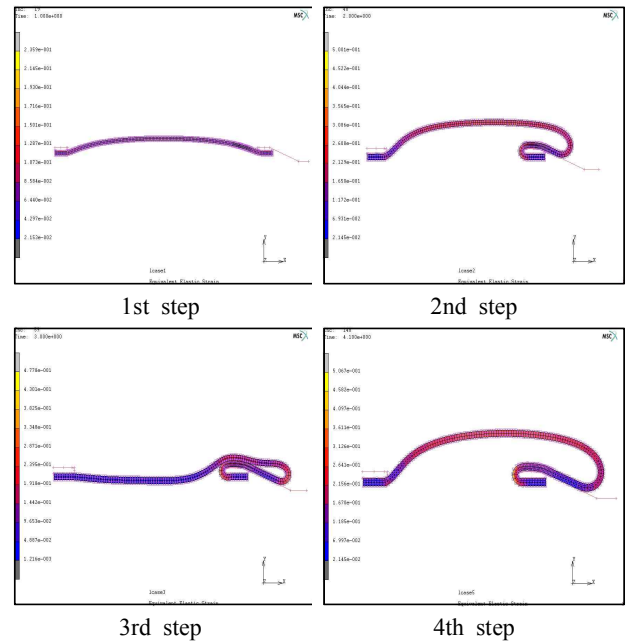


Figure 15. The elastic strain distribution according to code angle (35° max).

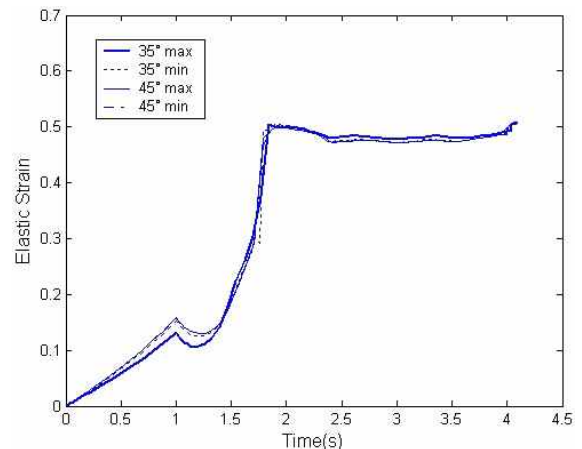


Figure 16. Change of elastic strain by analysis gradation of maximum strain node.

분포경향과 마찬가지로 코드의 각도가 커지면 최대 탄성 변형도 작아진다. 그러나 그 값의 차이는 매우 작다.

Figure 14는 최대 탄성 변형이 생기는 부분을 나타내고, Figure 15는 코드 각도 35°에 따른 각 해석 단계에서의 최대 탄성 변형 결과를 보여주는 그림이다. Figure 16은 최대 탄성 변형이 발생하는 절점의 해석 시간의 흐름에 따른 탄성 변형 값의 변화를 보여준다. 유한요소해석법을 통해 해석한 결과는 부피 분율이 15%이고 성형각도가 45°인 Case 5가 가장 좋은 결과를 나타내었다.

IV. 결론

본 연구에서는 고무 슬리브(rubber sleeve)의 개발을 위해, 클로로프렌고무의 최적배합을 연구했다. 또한, 이를 보강사인 나일론 6의 계면 접착력 향상을 위한 연구를 수행했으며, 유한요소해석법을 통한 보강섬유의 배향 각도에 따른 변이를 연구하였다. RAS를 제작 후, 실제적인 물성평가, 실차량 시험을 통한 성능 및 신뢰성 확보 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고무 슬리브용 CR의 최적 배합을 연구하여 시험한 범위에서 MgO는 2 phr, 가교촉진제(NA-22)는 0.5 phr, 카본블랙 SRF N774는 30 phr, ZnO는 8 phr일때 가장 좋은 물성을 나타내었다.
2. CR과 nylon-6 코드에 접착을 위해 R.F.L을 베이스로 하고, Chemlok #220을 사용하였을때 열과 물, 기름 및 화학물질에 강한 내성을 보였으며, 접착력 테스트에서도 우수한 결과를 나타내었다.
3. RAS의 유한요소해석에 있어서 2차원 축대칭 요소를 갖는 고무와 나일론이 결합된 solid composite으로 모델링하면 실제 RAS의 거동을 잘 추정할 수 있다. Nylon 6의 코드 부피분율과 코드 배향각도는 유한요소해석을 통해서 15°와 45°에서 최대 stress 및 응력분포가 완전한 결과가 도출되어, 이 조건이 가장 좋은 것으로 판단되어진다.
4. 유한요소해석 결과, 보강코드의 각도가 증가함에 따라 탄성계수는 작아지고, 슬리브에 발생하는 최대 Von-Mises stress도 작아지는 경향을 보였다. 슬리브에 최대 Von-Mises stress가 발생하는 부분은 슬리브의 형상 변화가 가장 크게 일어나는 하판과 결합되어있는 부분으로 최대 탄성 변형이 발생하는 부분과 일치하였다.
5. 내부공기의 변압, 외부충격수용을 외부환경(열충격 등) 등의 지속적 굴곡피로 하에서 시험실 시험 및 실제 필드 테스트 결과 기밀성을 10% 이내로 유지하고 슬리브 표면에 크랙이 발생하지 않았다.

References

1. 김진국, “자동차 고무부품”, 미래컴, 2005.
2. 한국고무학회, “고무학회 40년사”, 한국고무학회, 2006.
3. Nojin Jeong, Chungwoon Kim, and Byeongsoo Kim, “Prediction and Evaluation of Characteristics of Air Spring for Commercial Vehicle Using the Non-linear Finite Element Method”, *KSAE*, 7, 38 (2007).
4. 한국고무학회, “고무재료와 가공기술”, 한국고무학회, 2008.
5. Yang Wei-min, Chen Can-hui, Chen Ya-ling, and Ren Yan-sha, “Finite element Analysis of an Air Spring for Automobile Suspension”, *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 31, 105 (2004).
6. Robert F. Ohm, *The Vanderbilt Rubber Handbook*, ed. by Robert F. Ohm, 3rd Ed, R. T. Vanderbilt Company Inc., Norwalk, 1990.
7. J. N. Reddy, “An Introduction to the Finite Element Method”, ed. by J. N. Reddy, 1st Ed, Mcgraw-Hill College, New York, 1984.
8. 日本電氣化學工業株式會社, *Denka Chloroprene Handbook*, ed. 日本電氣化學工業株式會社, 1st Ed, 剛信産業, Korea, 1990.
9. Lord Corporation, “Chemlok #220 Adhesive”, Lord technical data, Lord Corporation, 2008.
10. Annual Book of ASTM Standards, Designation: D3182 Vol. 09.01, ASTM International, Pennsylvania, 1995.
11. A. V. Pocius, “Adhesion and Adhesives Technology”, ed. by A. V. Pocius, 2nd Ed, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2002.
12. Khairi Nagdi, “Rubber as an Engineering Material : Guideline for Users”, ed. by Khairi Nagdi, 1st Ed, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1993.
13. H. R. Allcock, F. W. Lampe and J. E. Mark, “Contemporary Polymer Chemistry”, ed. by H. R. Allcock, F. W. Lampe and J. E. Mark, 3rd Ed, Prentice Hall, New York, 2003.
14. Alan N. Gent, “Engineering with rubber : How to design Rubber Components”, ed. by Alan N. Gent, 2nd Ed, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2001.
15. I. Franta, “Elastomers and Rubber Compounding Materials : Manufacture, Properties and Applications”, ed. by I. Franta, 1st Ed, Elsevier Science Publishers, New York, 1989.
16. J. A. Brydson, “Rubbery Materials and their Compounds”, ed. by J. A. Brydson, 1st Ed, Springer, New York, 1988.
17. 김준수, 고무配合데이터 핸드북, 도서출판 기술, 2002.
18. M. Morton, “Rubber Technology”, ed. by M. Morton, 3rd Ed, Springer, New York, 1987.
19. D. H. Kaelble, “Physical Chemistry of Adhesion”, ed. by D. H. Kaelble, 1st Ed, John Wiley & Sons Inc, New York, 1971.
20. Gerhard Gierenz and Werner Karmann, “Adhesives and Adhesive Tapes”, ed. by Gerhard Gierenz and Werner Karmann, 1st Ed, Wiley-VCH, New York, 2001.
21. Kurt Miller, “Laboratory Characterization of Elastomers for Finite Element Analysis”, Physical Testing Service Conference, Axel Product, 2001.