

< 논문 >

## 단섬유 강화고무의 파열특성 연구

이 동 주<sup>†</sup> · 류 상 렬<sup>\*</sup>

(2005년 9월 16일 접수, 2006년 2월 27일 심사완료)

### A Study on Bursting Properties of Short-Fiber Reinforced Chloroprene Rubber

Lee Dong-Joo and Ryu Sang-Ryeoul

**Key Words:** Bursting Properties(파열특성), Reinforced Rubber(강화고무), Interphase(계면상), Fiber Aspect Ratio(섬유 종횡비), Fiber Content(섬유 함유량)

#### Abstract

The bursting properties under various conditions were investigated to ascertain the optimum conditions to yield the best properties. Fiber aspect ratio (AR: length of fiber/diameter of fiber), interphase condition and fiber content were considered as variables which impact the bursting pressure, bulge constant, torsional rigidity ratio. The bursting pressure of reinforced rubber increases up to 8.73 times compared to the virgin material. The better interphase condition shows the higher bursting pressure at given AR and fiber content. The bulge constant and torsional rigidity highly decrease with increasing AR and better interphase condition at same fiber content. The bulge constant and torsional rigidity reveal the minimum of 11% and 0.6% of the matrix, respectively. The bursted shape after test shows the different patterns between unfilled and reinforced rubbers. The case of virgin rubber shows a radiating shape while that of reinforced rubber shows a fluctuating straight line. Overall, it was found that the fiber AR and interphase condition have an important effect on bursting properties.

#### 1. 서 론

연속섬유 강화고무에 대해서는 잘 알려져 있지만, 이러한 보강 방식은 타이어나 벨트, 호스 등에 국한되어 사용되고 있고, 복잡한 형태의 제품 제조에는 많은 문제점을 안고 있다. 그에 비해서 단섬유 강화고무(SFRR)는 별도의 혼합 설비 없이도 우수한 물성을 얻을 수 있고 압출이나 이송성형, 사출성형 등을 이용해 복잡한 형태의 제품을 쉽게 제작할 수 있는 특징이 있다.<sup>(1)</sup>

단섬유 강화고무의 기계적 성질에 영향을 미치

는 주요한 인자(factor)로는 섬유 종횡비(AR: 길이/직경), 섬유 함유량, 섬유 분산, 섬유 배향 그리고 섬유와 기지의 접촉 등이다. 강화 섬유로서는 nylon, rayon, polyester, armide 등이 사용되며, 갖추어야 할 요건으로는 섬유 종횡비가 100~200, 기지와 접착력 우수, 배합공정에서 파단 되지 않을 정도의 유연성이 있을 것 등이다. 고무로서는 모든 종류의 고무에 대해서 적용할 수 있으나, NR과 EPDM, NBR 등이 많이 이용되고 있다. 단섬유 강화 고무 단섬유 강화고무가 갖는 주요한 특징은 탄성을 향상, 높은 섬유 함유량에서 강도 향상, 파단시 신장을 감소, 경도 증가, 절단 및 인열저항 증가, 파괴인성치 증가 등이다.<sup>(2-5)</sup>

저자들은 단섬유 강화고무에 대한 여러 실험적 연구를 수행하였는데, 항복강도나 탄성률, 경도, 파괴인성치 등의 기계적 성질이 섬유 종횡비와

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부  
E-mail : djlee@yu.ac.kr  
TEL : (053)810-2469 FAX : (053)810-4627  
<sup>\*</sup> 회원, 영남대학교 기계공학부 연구원

함유량 증가에 따라 크게 향상됨을 확인하였고, 동일한 섬유 중량비에서도 섬유 표면의 계면상 조건에 따라 기계적 성질이 다르게 나타남을 확인한 바 있다.<sup>(3-5)</sup>

이러한 강화고무는 호스나 벨트, 다이어프램, 가스켓 그리고 타이어 등의 일부 상업용 제품에 사용되고 있거나 기존의 보강방식과 혼용되고 있다.<sup>(2)</sup> 호스나 벨트 등은 이미 잘 알려진 연속 섬유 보강방식의 강화고무이고, 가스켓의 경우 단섬유는 파열에 저항하는 강도를 부여하고 팽창을 감소시키며, 평면으로 배향되면 씬(seal) 성능을 증가시킨다. 다이어프램에서 단섬유는 강성을 증가시키고 신장율을 감소시키며 배향에 따른 특성을 얻을 수 있다. 자동차나 트럭용 타이어에서 단섬유는 다음과 같은 부분에 응용이 가능하다. 먼저 이너라이너(innerliner)에서 코드 웨딩을 줄일 수 있으며, 비드 필러의 강성을 높이며, 체퍼 스트립에 대해 마모 저항을 향상시키며, 트레드의 절단 저항성을 증가시킨다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 섬유 중량비를 150~550까지, 섬유 함유량을 10~30phr까지 증가시켜, 섬유 중량비와 섬유 함유량 그리고 5가지 계면조건이 단섬유 강화고무의 파열(bursting) 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 상기와 같은 제품들에 단섬유 강화고무가 응용될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료 및 제조

실험에 사용된 기지고무(matrix) 및 단섬유, 그리고 단섬유강화고무(SFR)의 제조는 이전의 연구와 동일하다.<sup>(4)</sup> 기지고무의 인장강도와 신장율, 그리고 경도는 19.65MPa, 450%, 55Hs 였고, 강화 nylon66섬유(롱프랑사)의 인장강도, 탄성률, 연신율, 그리고 지름은 600MPa, 2.0GPa, 30%, 15 $\mu$ m 이었다.

강화섬유의 표면처리는 Chemlok402(이하 402)를 사용하였고, 처리 방법은 접촉제 1에 툴루엔 1의 비율로 희석하여 섬유를 3분간 침적하였으며, 실온에서 건조 후 150 $^{\circ}$ C Chamber에서 5분간 유지하였다. 또한 기지고무 2에 툴루엔 3의 비율로 교반한 고무 용액을 제조하여 402와 동일하게 침적식으로 표면을 도포하였으며, Fig. 1과 같이

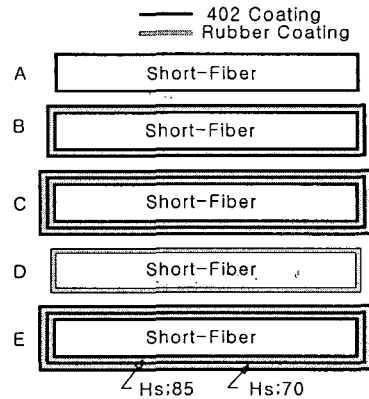


Fig. 1 Schematics of coated short-fiber surface

각각의 경우에 대해 "A", "B", "C", "D" 그리고 "E"로 구분하였다. 계면상 모델 "E"의 경우는 "C"와 동일하게 고무용액과 402를 두번씩 도포한 경우이지만, "E" 경우는 계면상의 경도를 카본블랙의 함유량을 다르게 하여 기지고무에 비해 높게 관리하였다. 이는 단섬유 강화 복합재료의 파단이 계면에서의 응력 집중에 의해 발생하므로 이를 감소시키고자 하였다.

배합고무의 제조는 ASTM D3182와 D3190을 따랐으며, 원료고무(S-40V)와 카본블랙(N550)의 중량 편차는  $\pm 1g$ 이며, 기타 다른 원료들은  $\pm 0.1g$  이내로 하였다. 혼합용 Roll은 지름이 203.2mm(8") 길이가 406.4mm(16")의 개방형을 사용하였고, 혼합 후 파열 시험편 제작을 위해 압축성형기(80 tons)를 사용하였으며 성형중의 압력은 14MPa, 열판 및 금형의 온도는 170 $^{\circ}$ C, 시간은 가류특성시험으로부터 얻은 적정가류시간( $tc_{90}$ )의 1.5배를 하였다. 시험편을 만들기 위한 고무판의 크기는 240mm  $\times$  160mm  $\times$  1mm(t)이며, 수축을 고려해서 만든 금형을 사용하였다.

### 2.2 실험방법

Fig. 2는 파열 시험의 개요를 보여준다. 시험편의 크기는  $\phi 75mm \times 1mm(t)$ 이다. 시험편을 다이와 홀더 사이에 놓고 4곳에서 M10 볼트를 이용 고정한다. 다이의 위쪽에 비드가 3곳 있으며 이는 파열 시험 시에 시험편의 미끄러짐을 방지하기 위한 것이다. 공기 펌프와 시험치구를 연결하고 그 사이에 공기의 흐름을 차단 할 콕(cock)을 설치하였고, 콕과 시험치구 사이에 파열시 압력을 측정 할 압력 게이지를 부착하였다. 실온에서 유체 압력에

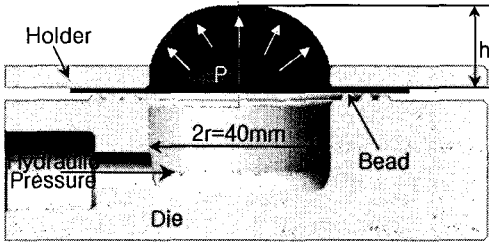


Fig. 2 Schematics of burst testing device

의한 강화고무의 파열시 최대압력과 정점의 높이  $h$ 를 기록하였다. 파열 시험 후 접착제 처리 유무에 따른 강화고무의 파단면을 관찰하였으며, 기지고무와 강화고무의 파열 길이와 형상을 비교하였다. 실험의 시료는 시편 4개 이상을 사용하였으며, 얻어진 결과는 이들을 산술평균 하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 파열압력

Fig. 3은 섬유 중량비가 265일 때, 계면상 조건과 섬유 함유량 증가에 따른 기지고무와 강화고무의 파열압력(계이지 압력) 시험결과를 나타냈다. 기지고무(7.5kPa)에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 파열압력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 크게 증가함을 알 수 있다. 이전의 계면상<sup>(6)</sup> 관련 연구에서 최대점도의 증가와 가류지연 효과로 강화고무의 보강 효과를 확인하였으며, 계면상 조건에 대해서는  $D < A < B < C < E$ 의 순서로 보강효과가 크게 나타남을 확인하였다.

기지고무에 단섬유가 보강되면 변형시의 결정화 거동을 촉진하여 결정성을 높일 수 있다.<sup>(7)</sup> 결정성 고무 구조가 외부 하중을 받게 되면 무정형 속에 존재하는 결정부분이 하중의 작용에 저항하기 때문에 탄성률이 비결정성 구조에 비해 크게 증가한다. 이에 단섬유가 강화됨에 따라 고무 속에 분포하는 섬유와 섬유 사이의 길이가 감소되어 상대적으로 고무 분자의 길이가 짧아지게 되고 신장율은 떨어지는 반면에 단섬유의 규칙배열의 정도가 증가하여 그에 따른 저항으로 탄성률은 증가하게 된다. 이는 섬유 함유량이 증가할수록 섬유와 계면의 접촉조건이 우수할수록 크게 증가한다. 따라서 파열압력도 크게 증가하였으며 섬유 함유량 30phr, 계면조건 "E"에서 최고 6.8배

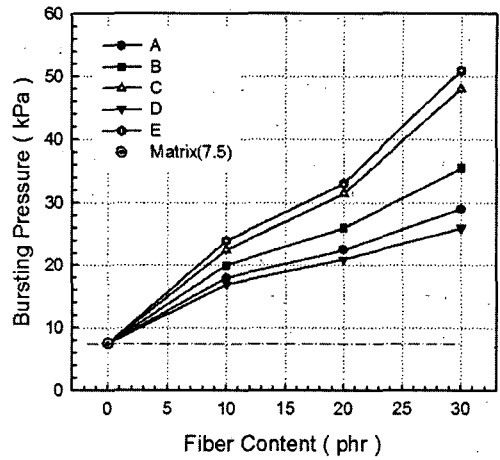


Fig. 3 Effects of interphase and fiber content on bursting pressure(AR=265)

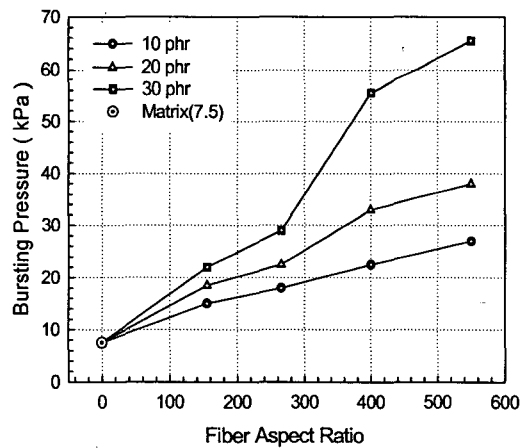


Fig. 4 Effects of fiber AR and fiber content on bursting pressure(interphase "A")

증가하였다.

Fig. 4는 계면상 조건이 "A" 즉, 접착제 402만을 도포한 경우에 대해 섬유 중량비와 함유량 증가에 따른 파열압력을 비교하였다. 기지고무에 비해 섬유 중량비의 증가에 따라 강화고무의 파열압력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 중량비가 클수록 크게 증가함을 알 수 있다. 섬유 중량비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 최고 8.73배 증가하였다.

일축 인장시험에서 탄성률과 인장강도는 섬유 중량비 약 300범위에서 최고 값을 보였고, 각 섬유

유 함유량별 중횡비 400이상에서 감소 추세를 보였다.<sup>(3)</sup> 그렇지만 본 연구에서는 섬유 중횡비가 550까지 크게 증가함을 보였다. 전자의 경우는 일축 인장시험이며 시편의 형상이 아령형이고 하중을 받는 부분의 폭이 5mm이므로 섬유의 중횡비가 300 이상에서는 시편 준비 과정에서 섬유의 파손이 많을 것으로 판단된다. 그에 비해 본 연구는 근사적인 등2축 인장상태가 되며 고무판 성형 후  $\phi 75\text{mm}$ 로 절단하므로 시편 준비 과정에서 섬유가 파손될 가능성은 없다고 본다.

### 3.2 벌지계수

일반적으로 금속의 판재 성형성(formability)이란 재료가 국부 넥(localized neck) 또는 파단을 발생시키지 않고 소성 변형할 수 있는 능력 정도를 나타내는 것을 의미한다. 그것을 평가하는 계수가 벌지계수(K)로 K가 클수록 장출성이 양호함을 의미한다. 본 연구에서도 유사하게 파열 시험시 Fig. 2의 최대 h값을 다이 반경(r)으로 나누어 구하였다.<sup>(8)</sup>

기지고무(2.25)에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 벌지계수는 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 크게 감소함을 알 수 있다(Fig. 5). 계면조건 "D" 섬유 함유량 10phr 일 때 K가 0.45로 기지고무의 20%, 계면조건 "E" 섬유 함유량 30phr 일 때 K가 0.26으로 기지고무의 12%정도를 나타냈다. Fig. 6은 계면상 조건이 "A"인 경우에 대해 섬유 중횡비와 함유량 증가에 따른 벌지계수를 비교하였다. 기지고무에 비해 섬유 중횡비의 증가에 따라 강화고무의 벌지계수는 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 중횡비가 클수록 크게 감소함을 알 수 있다. 섬유 중횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 K가 0.24로 기지고무의 11%정도를 나타냈다. 벌지계수는 재료의 경도 또는 탄성률과 반비례, 연신율과는 비례 관계가 있다. 앞 절에서도 언급하였지만, 단섬유가 강화됨에 따라 고무 속에 분포하는 섬유와 섬유 사이의 길이가 감소되어 상대적으로 고무 분자의 길이가 짧아지게 되므로 그에 따른 저항으로 신장율은 감소하면서 탄성률은 크게 증가하게 된다. 따라서 섬유 함유량이 증가할수록, 계면상 조건이 우수할수록, 섬유 중횡비가 증가할수록 벌지계수가 크게 감소하였다.

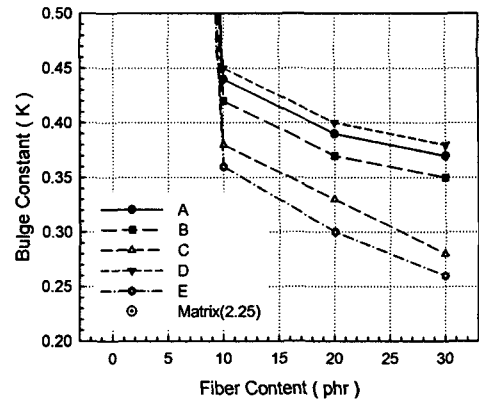


Fig. 5 Effects of interphase and fiber content on bulge constant(AR=265)

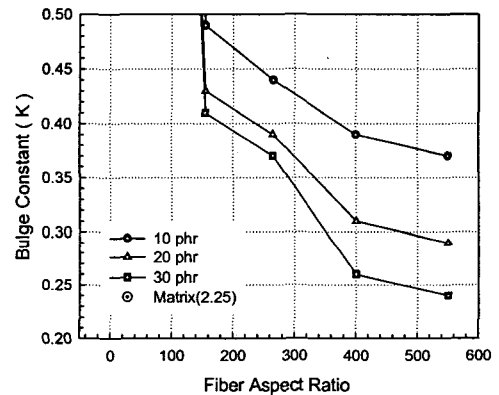


Fig. 6 Effects of fiber AR and fiber content on bulge constant(interphase "A")

### 3.3 파열형상

파열시험 후 파열형상과 파열된 부분의 길이를 Image Processing하여 비교하였다. 기지고무의 파열형상은 Fig. 7의 (a)와 같이 최대 신장이 일어나는 중심부에서 파손이 시작되어 4~5갈래로 크랙이 진행되는 방사형을 나타낸다. 그에 비해 단섬유 강화고무는 중앙부에서 파손이 시작되어 양쪽으로 진행되는 일자 형태를 나타낸다. 이는 Roller를 이용하여 기지고무에 단섬유를 배합하는 공정에서 Roller의 회전 방향으로 단섬유가 배합하기 때문인 것으로 보인다. 또한 Fig. 7의 (b)→(c)→(d)에서 보듯이 동일한 섬유 중횡비에서 섬유 함유량이 증가할수록 파열된 길이가 크게 나타났으며, 파손 형태도 단순한 일자 형태를 보이

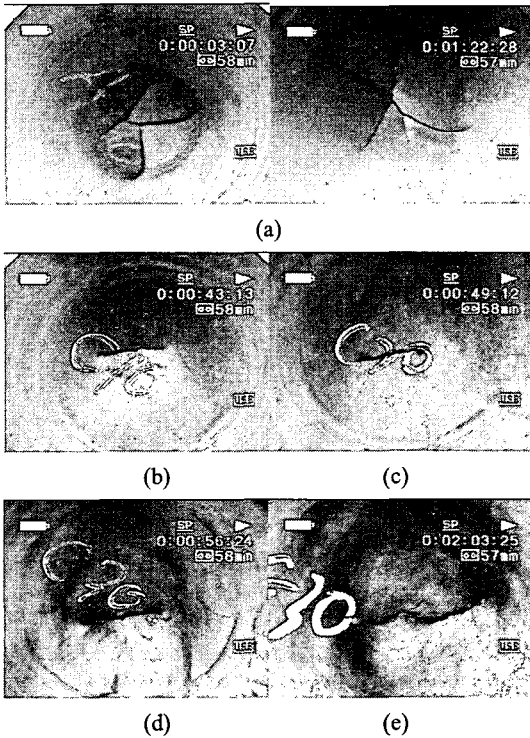


Fig. 7 The photographs of bursting pattern for matrix and reinforced rubber

는 것이 아니라 기복이 많은 일자 형태를 보인다. (d)와 (e)는 섬유 함유량 30phr 일 때 종횡비를 비교한 것으로, AR=265인 경우 보다 AR=550인 경우가 파열된 길이가 길고 복잡함을 알 수 있다.

Fig. 8은 섬유 종횡비가 265일 때, 계면상 조건과 섬유 함유량 증가에 따른 기지고무와 강화고무의 파열된 길이를 나타냈다. 기지고무(64mm)에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 파열 길이는 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 파열된 길이는 작았다. 계면상 조건이 우수한 경우 단섬유 주위에 기지고무가 강하게 결합되고 크랙 진전에 크게 저항하기 때문에 파열길이가 작은 것으로 보인다. Fig. 9는 계면상 조건이 "A"인 경우에 대해 섬유 종횡비와 함유량 증가에 따른 파열 길이를 비교하였다. 기지고무에 비해 섬유 종횡비의 증가에 따라 강화고무의 파열길이는 약간 증가하였고, 같은 섬유 종횡비에서도 섬유 함유량이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 이는 섬유 함유량

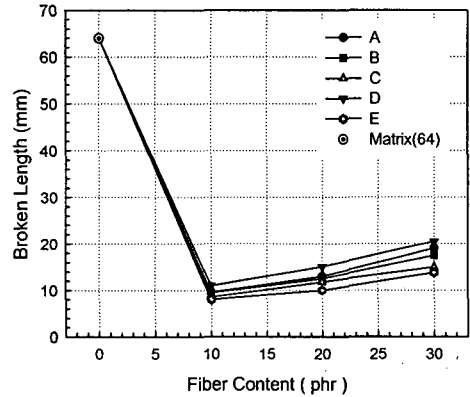


Fig. 8 Effects of interphase and fiber content on broken length(AR=265)

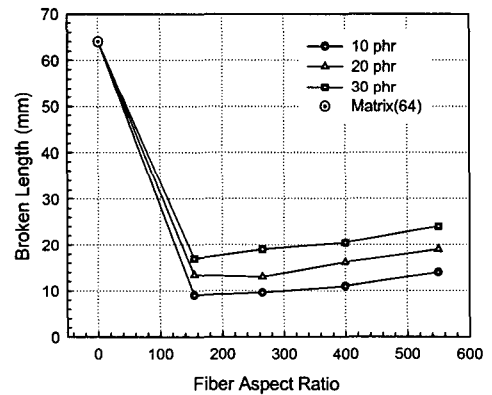


Fig. 9 Effects of fiber AR and fiber content on broken length(interphase "A")

이 증가할수록 단섬유끼리의 겹침이나 엉김 등이 많이 일어난다. 따라서 파손이 일어날 때, 파열 길이가 큰 것으로 사료된다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 섬유 함유량이 20phr일 때, 실험결과가 가장 낮은 "D"와 가장 우수한 "E"의 파단면 사진(50X)이다. (a)의 경우 화살표 표시부와 같이 단섬유의 접촉층이 분리되어 파단면에 섬유들이 노출되어 있고, (b)의 경우 섬유 표면에 도포 하였던 계면층의 접촉효과로 화살표 표시부와 같이 섬유들이 드러나 있지 않고 외부 하중에 저항하다 중간이 파단된 경우라 할 수 있다.

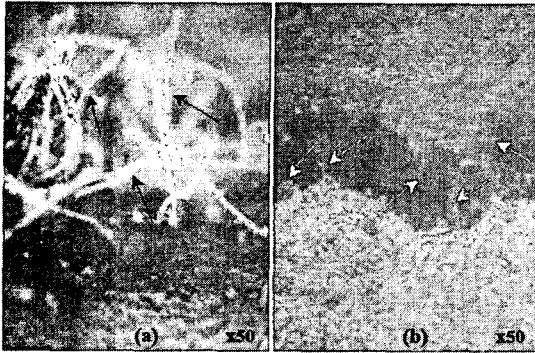


Fig. 10 The photographs of fracture surface for case "D"(a) and "E"(b) at fiber content 20phr

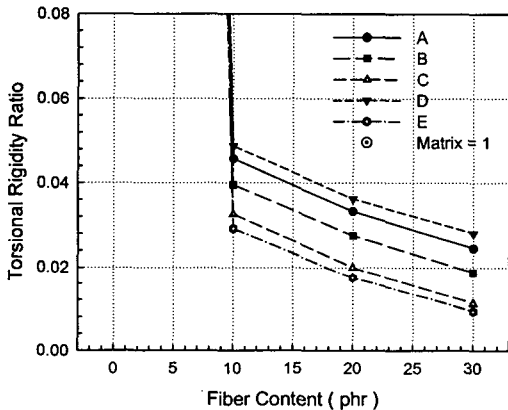


Fig. 11 Effects of interphase and fiber content on torsional rigidity ratio(AR=265)

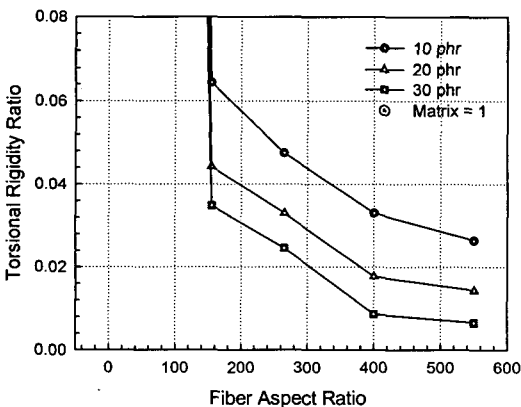


Fig. 12 Effects of fiber AR and fiber content on torsional rigidity ratio(interphase "A")

3.4 비틀림 강성

비틀림 강성(C)은 비틀림 모멘트(M<sub>t</sub>)를 단위 길이당 비틀림 각(θ)으로 나누어 계산한다. 또한 비틀림과 막 문제 사이에는 유사성이 존재하며, 여러 실험 기법의 기초로서 사용된다. 비틀림의 2×θ는 막 문제의 내압 p와 비틀림 모멘트 M<sub>t</sub>는 막 문제의 2×V(막 아래의 체적)와 유사함<sup>(9)</sup>으로 이를 근거로 근사한 비틀림 강성을 계산할 수 있다. Figs. 11~12는 기지고무에 대한 단섬유 강화고무의 비틀림 강성 비를 나타낸다. 이 그림들은 Figs. 5~6와 유사한 경향을 보이는데, 벌지계수 K는 파단시의 높이 h와 밀접한 관계가 있고, h는 내압과 내압에 의해 변형된 고무 막의 체적과 관계가 있기 때문이다.

기지고무에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 비틀림 강성은 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 크게 감소함을 알 수 있다(Fig. 11). 계면조건 "D" 섬유 함유량 10phr 일 때 C가 기지고무의 5%, 계면조건 "E" 섬유 함유량 30phr 일 때 C가 기지고무의 0.9%정도를 나타냈다. Fig. 12는 계면상 조건이 "A"인 경우에 대해 섬유 중횡비와 함유량 증가에 따른 비틀림 강성을 비교하였다. 기지고무에 비해 섬유 중횡비의 증가에 따라 강화고무의 비틀림 강성은 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 중횡비가 클수록 크게 감소함을 알 수 있다. 섬유 중횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 C가 기지고무의 0.6%정도를 나타냈다.

4. 결 론

합성 chloroprene 고무에 nylon66 단섬유를 강화한 재료의 파열특성에 관한 실험적 연구 결과 계면상 및 섬유 중횡비, 섬유 함유량이 중요한 인자임을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기지고무에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 파열압력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 크게 증가하였다. 섬유 함유량 30phr, 계면조건 "E" 일 때, 최고 6.8배 증가하였다. 또한 섬유 중횡비의 증가에 따라 강화고무의 파열압력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 중횡비가 클수록 크게 증가하였다. 섬유 중횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 최고 8.73배 증가하였다.

(2) 기지고무의 파열형상은 4~5갈래의 방사형을 나타냈고, 강화고무는 단섬유의 배향관련 기복 있는 일자 형태를 보였다. 섬유 함유량이 증가할수록 섬유 종횡비가 커질수록 파열된 길이가 길고 복잡한 형태를 보였다.

(3) 단섬유 강화고무의 벌지계수(K)와 비틀림강성(C)은 섬유 함유량의 증가에 따라 크게 감소하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록, 섬유 종횡비가 클수록 크게 감소하였다. 섬유 종횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 K는 기지고무의 11%정도를 나타냈고 C는 0.6%를 나타내, 단섬유 강화고무의 경우 C가 K에 비해 민감하다고 본다.

(4) 단섬유는 파열에 저항하는 강도를 부여하고 강성을 증가시키므로 팽창을 감소시키고 배향에 따른 특성을 얻을 수 있다. 따라서 가스켓이나 보강재를 필요로 하는 다이어프램 그리고 타이어의 이너라이너, 비드필러, 트레드부 등에 단섬유 강화 고무의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 지역혁신인력양성사업의 연구비 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Coran, A. Y., Boustany, K. and Hamed, P., 1974, "Short-Fiber Rubber Composites," *Rubber Chem. Technol.*, Vol. 47, p. 396.
- (2) Goettler, L. A., 1988, *Hand Book of Elastomers*, Marcel Dekker, Inc., pp. 216~244.
- (3) Lee, D. J. and Ryu, S. R., 1999, *ICCM12*, Paris, No. 226.
- (4) Ryu, S. R. and Lee, D. J., 2000, "The Influence of Interphase Condition on Mechanical Properties of Short-fiber Reinforced Rubber," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 24, No. 3, pp. 625~633.
- (5) Ryu, S. R. and Lee, D. J., 2001, "Effects of Short-fiber End Shape on Tensile Properties of Reinforced Rubber," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 25, No. 6, pp. 1023~1030.
- (6) Ryu, S. R. and Lee, D. J., 1999, "The Influence of Interphase Condition and Fiber Content on the Tensile Properties of Short-fiber Reinforced Rubber," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting '99*, pp. 172~177.
- (7) Ryu, S. R. and Lee, D. J., 1998, "The Influence of Aspect Ratio on Tensile and Tear Properties of Short-fiber Reinforced CR", *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting '98*, pp. 90~95.
- (8) Abdel-Rahman A. F. R. and Salah Eldin A. B., 1999, *Engineering Solid Mechaincs*, Florida, CRC Press, pp. 749~754.
- (9) Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 2003, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 4th Edition, Prentice Hall, pp. 251~253.