
論文

단섬유 강화고무의 관통 특성 연구

류상렬*, 이동주**+

A Study on Puncture Properties of Short-fiber Reinforced Rubber

Sang Ryeoul Ryu*, Dong Joo Lee**+

ABSTRACT

The puncture properties under various conditions were investigated for 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 puncture force and friction force. The puncture force of short-fiber reinforced rubber increases up to 3.4 times compared to the virgin material. The better interphase condition shows the higher puncture force at given fiber AR and fiber content. The friction force of the matrix and reinforced rubber with a fiber AR below 155 does not exist. The friction force of the reinforced rubber with the good interphase condition and high fiber AR is higher than puncture force of matrix. Overall, it was found that the interphase condition, fiber AR and fiber content have an important effect on the puncture properties.

초 록

다양한 조건 하에서 최상의 관통 특성을 발휘하기 위한 최적 조건에 대해 연구하였다. 섬유 종횡비(AR: 섬유 길이/섬유 직경), 계면 조건 그리고 섬유 함유량을 관통 저항력과 마찰력에 지대한 영향을 미치는 변수들로 고려하였다. 단섬유 강화고무의 관통 저항력은 기지에 비해 최대 3.4배 증가하였다. 동일한 섬유 종횡비와 섬유 함유량에서 계면 조건이 우수할수록 더 높은 관통 저항력을 보였다. 기지와 섬유 종횡비가 155이하인 일부 단섬유 강화고무의 마찰력은 존재치 않았다. 우수한 계면과 높은 섬유 종횡비를 갖는 단섬유 강화고무의 마찰력은 기지의 관통 저항력보다도 더 높았다. 전체적으로 계면 조건과 섬유 종횡비 그리고 섬유 함유량이 단섬유 강화고무의 관통 특성에 지대한 영향이 있음을 확인하였다.

Key Words : 단섬유 강화고무(short-fiber reinforced rubber), 섬유 종횡비 및 함유량(fiber aspect ratio and volume fraction), 계면조건(interphase condition), 관통 특성(puncture properties)

1. 서 론

관통 저항(puncture resistance)은 고무 막 형태의 다
이아프램이나 타이어, 보호용 장갑 등에 있어서 매우 중요

* 영남대학교 기계공학부 연구원

**+ 영남대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail: djlee@yu.ac.kr)

한 물성 중의 하나다. 그럼에도 불구하고 이런 재료들의 관통저항을 제어하는 기본적인 파라미터에 대해서는 아직 알려지지 않은 실정이다. Termonia[1]는 바늘 관통에 저항하는 섬유 직물의 저항을 제어하는 요소들의 연구를 위한 포괄적인 모델을 제시하였다. 관통은 4가지 단계로 진행되며, 복층 구조의 직물에서는 최대 하중이 직물을 관통 후 바늘과 직물의 마찰부분에 일어남을 알아냈다. Stevenson[2] 등은 파괴역학을 이용한 실험 및 이론적인 고무의 관통에 대한 연구에서, 압입 치구의 모서리 R값이 예리($10\mu\text{m}$)하며 직경이 작은($\phi 1.5\text{mm}$) 경우가 실험적으로 얻어진 관통 에너지 값과 이론적으로 계산한 값이 유사함을 밝혔다. Nguyen[3] 등은 압입 치구의 원추각에 따른 고무 막의 관통에 대해 연구하였으며, 최대 관통 저항력은 고무와 압입 치구 사이의 표면 접촉에 의존함을 알아냈다.

단섬유 강화고무(SFRR, short-fiber reinforced rubber)는 직경 $10\sim 20\mu\text{m}$ 정도의 단섬유를 보강재로 사용한 복합재료로 섬유 길이가 $1.5\sim 4.5\text{mm}$ 정도, 기지(고무)와 접착력 우수, 유연성 등이 있어야 한다. 이 같은 SFRR는 별도의 혼합 설비가 없어도 우수한 물성을 얻을 수 있고 압축이나 압출성형, 이송성형, 사출성형 등을 이용해 복잡한 형태의 제품을 쉽게 제작할 수 있는 특징이 있다[4]. SFRR의 기계적 특성에 미치는 주요한 변수들은 섬유 중량비(AR, 단섬유 길이/직경), 섬유 함유량, 섬유 배향, 섬유의 기지 내 분산상태 그리고 섬유와 기지의 접착력 등이고, 이들 항목은 섬유 및 기지의 종류, 섬유와 기지의 결합제의 유무, 기타 첨가제 등의 영향을 받는다[5].

저자들은 지금까지 SFRR에 대한 여러 실험적 연구[6-8]를 수행하였는데 파열압력과 인장 탄성율, 항복강도, 경도, 파괴인성치 등의 기계적 성질이 섬유 중량비와 함유량 증가에 따라 크게 향상됨을 확인하였고, 같은 섬유 중량비에서도 섬유 표면의 처리 조건에 따라 기계적 성질이 다르게 나타남을 확인한 바 있다.

SFRR를 타이어나 다이아프램, 가스켓 등에 적용하기 위해서는 마모나 마찰, 감쇠, 파열, 관통 등 여러 특성을 검토해야 한다. 이미 파열특성[6]과 감쇠특성[9-10]에 대해서 검토를 한 바 있으며, 본 논문에서는 관통특성에 대해 검토하고자 한다. 이를 위해 Chloroprene 고무를 기지로 하고 섬유 중량비를 $150\sim 550$ 까지, 섬유 함유량을 $10\sim 30\text{phr}$ (parts per hundred grams of rubber)까지 증가시켜, 섬유 중량비와 섬유 함유량 그리고 5가지 계면조건이 SFRR의 관통 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 상기와 같은 제품들에 SFRR가 응용될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 제조

실험에 사용된 기지(matrix) 및 단섬유, 그리고 SFRR의 제조는 참고문헌[7,10]과 동일하다. 기지의 인장강도와 신장율, 그리고 경도는 각각 19.65MPa , 450% , 55Hs 였고, Nylon66 단섬유(통프랑사)의 인장강도, 탄성률, 연신율, 그리고 지름은 각각 600MPa , 2.0GPa , 30% , $15\mu\text{m}$ 이었다. 강화 단섬유의 표면처리는 Chemlok 402TM과 고무용액을 제조하여 침적식으로 표면을 도포 하였으며, Fig. 1과 같이 각각의 경우에 대해 "A", "B", "C", "D" 그리고 "E"로 구분하였다. 계면상 모델 "E"의 경우는 "C"와 동일하게 고무용액과 Chemlok 402TM를 두번씩 도포한 경우이지만, "E" 경우는 계면상의 경도를 카본블랙의 함유량만을 다르게 하여 기지고무에 비해 경도를 높게 관리하였다. 이는 단섬유 강화 복합재료의 파단이 계면에서의 응력 집중에 의해 발생하므로 이를 감소시키고자 하였다. Fig. 1의 Chemlok 402TM과 고무용액의 도포 상태는 이상적이라 할 수 있으며, 각각의 도포 전후의 무게를 측정하여 도포 두께를 환산 해 보면 Chemlok 402TM는 약 150nm 고무용액은 약 540nm 였다.

단섬유가 포함된 혼합고무를 배합 후, 관통 실험용 시험편 제작을 위해 80톤 압축성형기를 사용하였으며, 성형중의 압력은 14MPa , 열판 및 금형의 온도는 170°C , 시간은 가류특성시험으로부터 얻은 적정가류시간(t_{c90})의 1.5배를 하였다. 시험편을 만들기 위한 고무판의 크기는 $240\text{mm}\times 160\text{mm}\times 1\text{mm}$ (t)이며, 수축을 고려해서 만든 금형을 사용하였다.

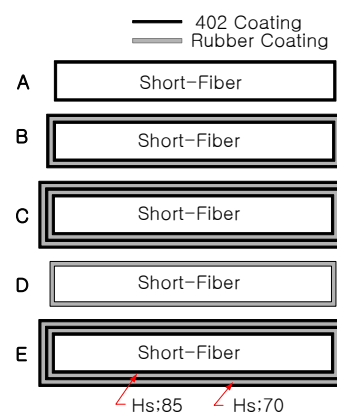


Fig. 1 Schematics of coated short-fiber surface

2.2 실험방법

Fig. 2는 관통 실험의 개요를 보여준다. 실험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 Autograph(Model AG-5000E)이며, 상부에 관통 치구(probe)를 하부에는 다이와 시편, 홀더를 고정시켰다. 시편의 크기는 $\phi 40\text{mm} \times 1\text{mm(t)}$ 이고 시편을 다이와 홀더 사이에 놓고 3곳에서 M6 볼트를 이용하여 고정한다. 다이의 위쪽에 비드가 3곳 있는데, 이는 관통 실험시 시편의 미끄러짐을 방지하기 위한 것이다. 관통(압입) 치구는 Fig. 3과 같이 3가지로 구분하였다. 원추각은 30° 로 모두 동일하며 끝단의 크기를 $\phi 1$, $\phi 2$ 그리고 $\phi 3\text{mm}$ 로 하였다. 참고문헌의 경우 대부분 크기가 작았지만, 본 논문에서는 SFRR를 타이어나 다이아프램 등에 적용할 경우 외부의 충격에 의해 파손된 경우를 고려하여 크게 하였으며, 원추각 30° 도 일반적인 나사못의 크기를 고려하여 결정했다.

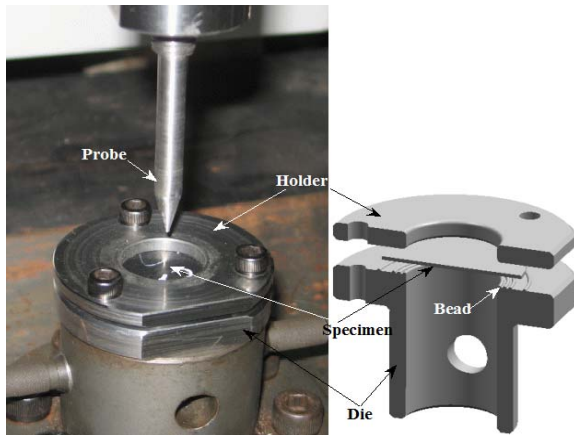


Fig. 2 Schematics of puncture testing device

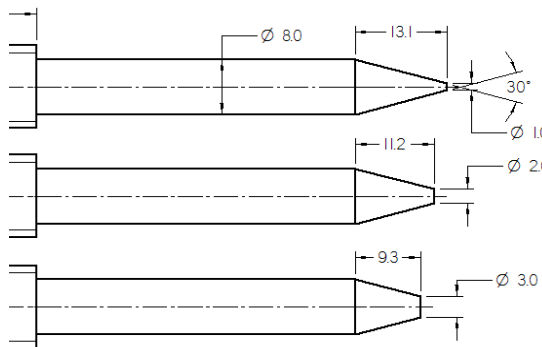


Fig. 3 Schematics of probe for puncture test

실온($22 \pm 2^\circ\text{C}$)에서 시험속도는 분당 5mm 로, 시험기로부터 매 0.04mm 변위당 하중 값을 얻는다. 관통 실험 후 계면 조건과 섬유 종횡비, 섬유 함유량 변화에 따른 SFRR의 관통면을 비교 관찰하였다. 실험의 시료는 시편 4개 이상을 사용하였으며, 얻어진 결과는 이들을 산술평균 하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 하중-변위 선도

Fig. 4는 압입 치구가 $\phi 1$ 인 경우, 기지와 계면 모델 "A"가 강화된 SFRR의 관통 실험시 얻어지는 하중-변위 선도이다. 기지의 경우 단순 2축 인장시험[7]과 유사한 경향을 보였으며, SFRR는 단섬유 함유량이 증가함에 따라 변위가 크게 감소되고 저변위 영역에서 하중이 크게 증가하는 특성을 보인다. 기지와 SFRR 모두 변위의 증가가 시작되면서 1차 변형에 의한 하중의 증가를 보이며, 변위를 계속 증가시켜 하중이 최대점에 이르면 시험편이 관통된다. 이 때를 관통 저항력(puncture force)이라 부른다. 최대 하중점을 지나면 하중이 급격히 감소하며 기지나 섬유 함유량이 낮은 SFRR 혹은 섬유 종횡비가 155이하인 SFRR는 즉시 파단에 이른다. 그러나 계면 조건이 우수하거나 높은 섬유 함유량, 섬유 종횡비가 큰 SFRR는 즉시 파단에 이르지 않고 관통 치구의 원추면에 의해 하중이 지지되는데, 이를 마찰력(friction force)이라 부른다. 계속해서 변위를 증가시키면 마찰력 부분을 지나서도 하중이 다시 증가하는 2차 변형을 보인다.

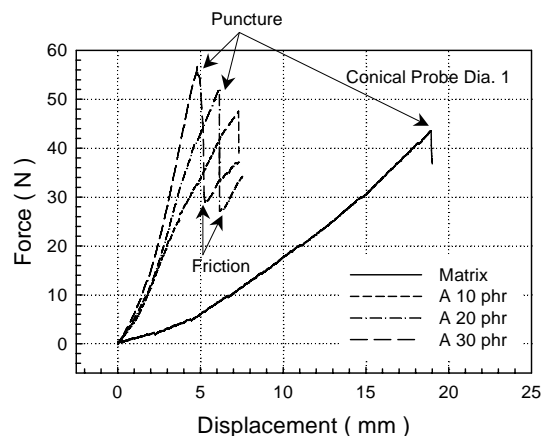


Fig. 4 Force-displacement curves of matrix and SFRR with "A"

3.2 관통 저항력

Fig. 5는 기지와 섬유 종횡비가 265일 때, 계면상과 섬유 함유량 증가에 따른 SFRR의 관통 저항력 값을 나타냈다. 기지($\phi 1$: 43.5N, $\phi 3$: 73.5N)에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 SFRR의 관통 저항력이 크게 증가하였고, 동일한 섬유 함유량에서도 계면 조건이 $D < A < B < C < E$ 의 순으로 증가함을 알 수 있다. 기지 속에 단섬유가 결합되어 있을 때, 외력을 받게되면 단섬유는 기지보다 훨씬 강하므로 변형이 적어, 기지 전체의 변형을 감소시키는 역할을 한다. 특히 단섬유 근처에서 그 경향이 뚜렷하며, 단섬유와 기지의 계면을 통해 기지의 변형을 억제하고 있기 때문이다. 따라서 복합재료의 강도는 단섬유와 기지의 계면 접착강도에 의존하며, 강한 계면은 단섬유의 효율을 증가시킨다. 또한 섬유 함유량이 증가하면 기지 속에 분포하는 단섬유와 단섬유 사이의 길이가 짧아진다. 따라서 신장율은 감소하는 반면에 단섬유의 규칙배열이 증가하여 결국 탄성율이 증가하게 된다. SFRR의 탄성율[7]은 관통 저항력과 유사하게 섬유 함유량이 증가할수록 계면 조건이 우수할수록 크게 증가함을 확인 한 바 있다. 섬유 함유량 30phr, 계면 조건 "E"에서 압입 치구가 $\phi 1$, $\phi 3$ 인 경우 관통 저항력은 기지에 비해 각각 2.1배, 3.4배 증가하였다.

Fig. 6은 계면 조건이 "A"인 경우에 대해 섬유 종횡비와 함유량 증가에 따른 관통 저항력을 비교하였다. 기지에 비해 섬유 종횡비의 증가에 따라 SFRR의 관통 저항력은 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 종횡비가 클수록 크게 증가함을 알 수 있다. 계면 조건과 더불어 섬유 종횡비가 SFRR의 기계적 성질에 미치는 영향이 지대하다[8]. 섬유 종횡비를 고려한 고분자 복합재료의 인장탄성율을 예측하는 모델 중에 Halpin-Tsai의 식[11]을 이용하여 단섬유의 불규칙 배향된 강화재료의 탄성율을 예측할 수 있는데, 섬유 종횡비의 증가에 따라 탄성율이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6에서와 같이 동일한 섬유 함유량에서도 섬유 종횡비의 증가에 따라 관통 저항력 값이 증가함을 알 수 있다. 섬유 종횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때, 압입 치구가 $\phi 1$, $\phi 3$ 인 경우 관통 저항력은 기지에 비해 각각 2.05배, 2.7배 증가하였다.

압입 치구의 크기 증가($\phi 1 \rightarrow \phi 2 \rightarrow \phi 3$)에 따라 접촉 면적의 증가로 관통 저항력이 크게 증가하며, 동일한 조건에서도 계면조건이 우수한 "E"의 경우가 "A"에 비해 크게 증가한다. 또한 압입 치구의 크기가 커질수록 섬유 종횡비가 증가할수록 관통 저항력이 크게 증가하고, 동일한 조건에서 섬유 함유량이 30phr인 경우가 10phr인 경우에 비해

크게 증가한다. 이러한 압입 치구의 크기 증가에 따른 각 조건별 관통 저항력 증가 기울기를 Fig. 7에 나타냈다. 기지의 기울기는 15.0이었고, 섬유 함유량 증가에 따라 SFRR의 기울기는 크게 증가하였다. 섬유 함유량 30phr, 섬유 종횡비 265일 때, 계면 조건 "A", "E"에서 기울기는 각각 2.5배, 5.4배 증가하였다. 또한 계면 모델이 "A"인 경우, 섬유 종횡비 증가에 따라 관통 저항력 기울기가 증가하였으며, 동일한 종횡비에서도 섬유 함유량이 높은 경우가 크게 증가하였다. 섬유 종횡비 550일 때, 섬유 함유량 10phr과 30phr의 관통 저항력 증가 기울기는 기지에 비해 각각 2.0배, 3.6배 증가하였다.

Figs. 8-9은 SFRR의 관통 저항력 값과 파열압력 값[6], 인장 탄성율[7-8]값을 동일한 시편 제조 조건에서 기지에 대한 비(ratio)로 나타냈다. 동일한 섬유 종횡비($AR=265$)와 동일한 계면 조건에서 SFRR의 물성 증가율은 다르게 나타남을 알 수 있다(Fig. 8). 여기서는 계면 조건 "C"와 "E"에 대해서만 비교하였는데, 인장 탄성율과 파열압력 그리고 관통 저항력은 섬유 함유량의 증가에 따라 크게 증가하였다. 특히 인장탄성율의 경우는 기지에 비해 약 33배 증가하였으며, 파열압력과 관통 저항력은 각각 6.8배, 3.4배 증가하였다. Fig. 9는 섬유 함유량 30phr, 계면조건 "A"에 대해 섬유 종횡비 증가에 대한 SFRR의 물성비를 나타냈는데, 섬유 종횡비의 증가에 따라 SFRR의 물성이 크게 증가함을 알 수 있다. 인장 탄성율은 섬유 종횡비가 265인 경우에 약 26배로 가장 큰 값을 보였고, 이후 섬유 종횡비의 증가에 따라 감소하였다. 그에 비해 파열압력과 관통 저항력 또한 섬유 종횡비의 증가에 따라 증가하였고, 각각 최대 8.7배, 2.7배 증가하였다. 동일한 조건의 시편일 지라도 이와 같이 증가율이 다르게 나타나는 것은 시편의 형상과 하중상태 등이 다르기 때문으로 판단된다. 인장 시험(KS M 6782, 3호)에 사용된 시편은 두께 2mm의 아령형으로 하중을 지지하는 부분은 폭이 5mm에 불과하다. 따라서 섬유 종횡비가 400이상의 경우는 시편 가공시 단섬유 크기가 감소될 가능성이 매우 높다. Fig. 8에서 섬유 종횡비가 400 이상에서 인장탄성율이 오히려 감소한 것은 시편의 형상에 기인한다고 판단된다. 파열압 시험과 관통 시험의 하중 상태는 근사적인 등2축인장상태가 되며, 하중을 받는 시편크기는 두께 1mm의 각각 $\phi 40$ 과 $\phi 25$ 였다. Figs. 8-9에서와 같이 동일한 조건에서 비교했을 때, 파열압력 비가 관통 저항력 비보다 크게 증가함을 알 수 있다. 파열압력의 경우는 시험편의 $\phi 40$ 에 해당되는 면적이 동일한 하중을 받는데 비해, 관통 저항력의 경우는 크기가 $\phi 1 \sim \phi 3$ 인 압입 치구의 끝에 하중이 집중되므로 시험편이 국부적인 변형을 받게된다. 그러므로 동일한 조건의

시험편 일지라도 증가 비율이 다르게 나타난다고 본다. 따라서 파열압력[6]의 경우 계면 조건보다는 섬유 중형비가 큰 영향을 미치고, 관통 저항력의 경우 섬유 중형비 보다는 계면 조건에 민감하다고 본다. 이는 압입 치구 크기와 단섬유 길이에 밀접한 관계가 있다고 본다. 압입 치구의 크기가 단섬유 길이(fiber AR 550, 8.25mm)에 비해 작기 때문에 단섬유와 단섬유 공간이 넓고 402 접착제만 도포한 경우이므로 증가율이 낮은 것으로 판단된다. 그에 비해 단섬유 길이(fiber AR 265, 4.0mm)가 작은 경우는 단섬유와 단섬유 공간이 좁고 계면조건이 가장 우수한 경우이므로 증가율이 다소 높다고 판단된다.

SFRR의 물성비에 대한 고찰로부터 단섬유 강화고무에 대한 단순 인장시험은 시험제조 과정에서 단섬유의 길이가 파손되어 정확한 물성의 측정이 어렵다고 판단된다. 따라서 시험 형상을 변경하거나 등2축상태의 시험을 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

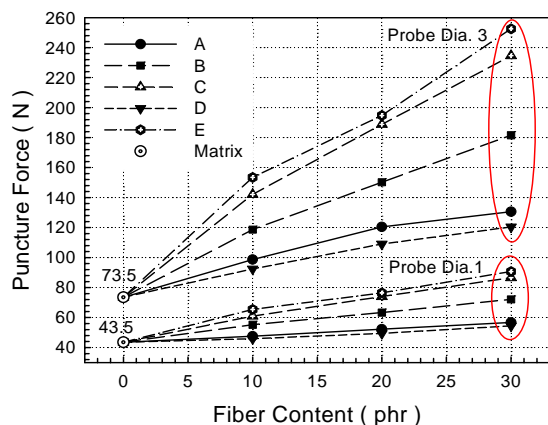


Fig. 5 Effects of interphase and fiber content on puncture force

3.3 마찰력

3.1 절에서 언급한 바와 같이, 하중-변위 곡선에서 계면 조건이 우수하거나 섬유 함유량과 중형비가 높은 SFRR는 압입 치구에 의해 시험편이 관통 후에도 즉시 파단에 이르지 않고 치구의 원추면에 의해 하중이 지지된다. 이러한 치구의 원추면과 SFRR의 접촉에 의해 지지되는 하중을 마찰력(friction force)이라 한다. Fig. 10은 섬유 중형비가 265일 때, 계면상과 섬유 함유량 증가에 따른 SFRR의 마찰력 값을 나타냈다. 기지와 치구의 크기가 $\phi 1$ (계면 조건이며 "D", "A", "B"이며, 섬유 함유량 10phr) 인 경우의 SFRR는 마찰력 항목이 존재하지 않는다. 그에 비해 압입 치구의 크기가 $\phi 2$ 와 $\phi 3$ 은 모든 경우에 마찰력

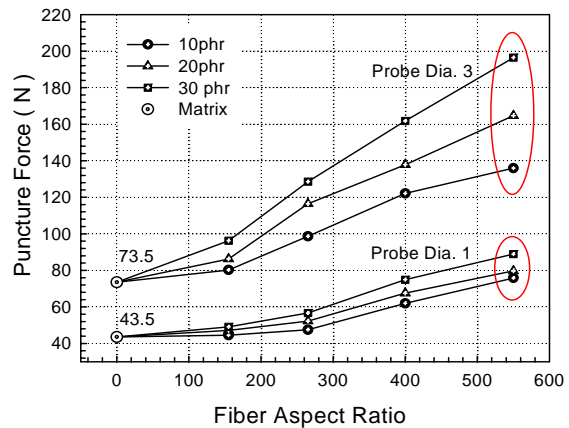


Fig. 6 Effects of fiber AR and fiber content on puncture force

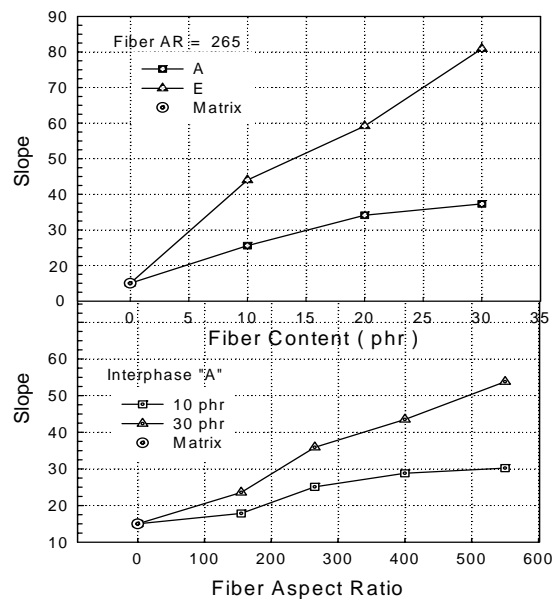


Fig. 7 Effects of interphase, fiber AR and fiber content on slope

이 존재했다. 특히, 계면 모델 "C"와 "E", 섬유 함유량 30phr인 $\phi 1$, 계면 모델 "B"와 "C", "E"인 $\phi 2$, 모든 계면 조건의 $\phi 3$ 은 기지의 관통 저항력보다도 높은 값을 보였다. 계면 모델 "E", 섬유 함유량 30phr일 때, 마찰력 값은 치구 $\phi 1$ 일 때 58.6N, $\phi 2$ 일 때 85.6N, $\phi 3$ 일 때 129.5N이었다. Fig. 11은 계면 조건이 "A"인 경우에 대해 섬유 중형비와 함유량 증가에 따른 마찰력을 비교하였다. 압입 치구의 크기에 관계없이 섬유 중형비가 155 이하인 경우는 마

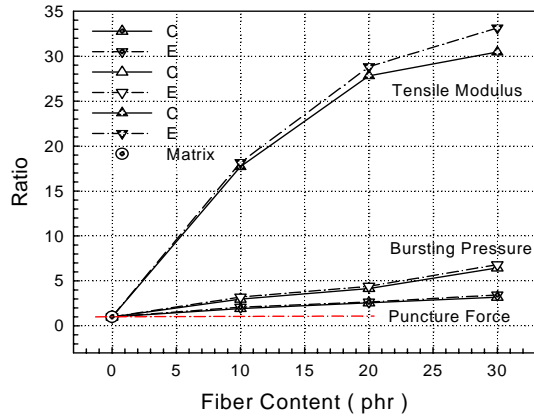


Fig. 8 Effects of fiber content on properties ratio

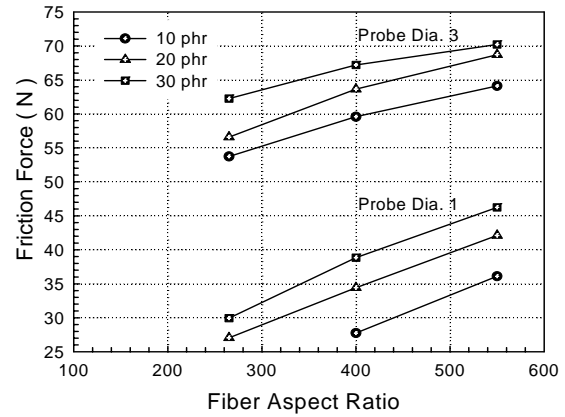


Fig. 11 Effects of fiber AR and fiber content on friction force

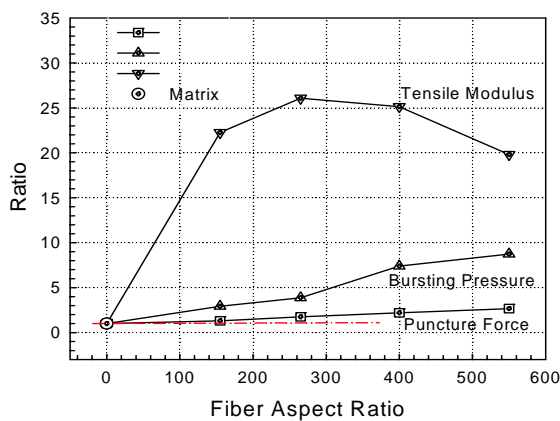


Fig. 9 Effects of fiber AR on properties ratio

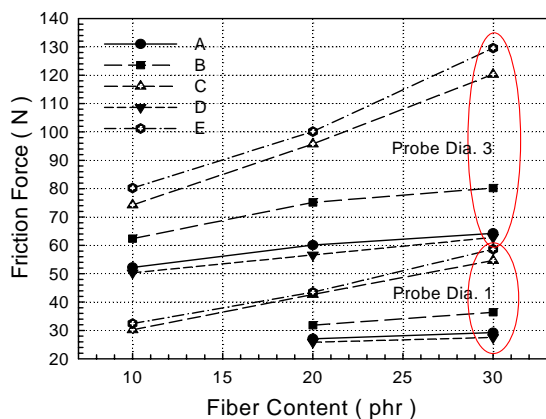


Fig. 10 Effects of interphase and fiber content on friction force

찰력이 존재치 않으며, 섬유 종횡비가 265일지라도 치구가 $\phi 1$ 이며 섬유 함유량 10phr인 경우도 존재치 않았다. 섬유 종횡비 550, 섬유 함유량 30phr인 $\phi 1$, 섬유 함유량 20phr 이상인 $\phi 2$, 모든 섬유 종횡비의 $\phi 3$ 은 기지의 관통 저항력 보다는 높은 값을 보였다. 섬유 종횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때, 마찰력 값은 치구 $\phi 1$ 일 때 46.3N, $\phi 2$ 일 때 56.8N, $\phi 3$ 일 때 70.2N이었다. 관통 저항력과 유사하게 섬유 종횡비 보다는 계면조건이 마찰력에 민감하게 작용함을 알 수 있다.

위 실험결과로부터 일부 조건의 SFRR를 타이어 등에 적용한다면, 나사못 등에 의해 손상을 입어도 즉시 파단되지 않고 어느 정도의 하중을 유지할 수 있는 특징이 있다고 판단된다.

3.4 관통 형상

관통 시험 후 시험편의 밑 부분을 Image Processing하여 비교하였다. Fig. 12의 (a)는 기지를 크기가 $\phi 1$ 인 압입 치구로 관통 시험한 시험편을 보여주고 있으며 다소 굴곡 있는 일자 형태를 보였다. 이러한 형태는 압입 치구의 크기에 관계없이 유사한 형태를 보였다.

SFRR는 압입 치구의 크기에 따라 관통부의 형상이 다소 다른 패턴을 보인다. 계면 조건이 좋지 않은 경우는 치구의 크기 증가에 관계없이 Fig. 12의 (b)와 같은 형상 ("D"에 30phr)을 보인다. 관통 부분이 명확하지 않으며, 그 주위에 많은 미세 크랙과 단섬유와 기지가 분리된 구멍, 그리고 노출된 단섬유를 볼 수 있다. 계면조건이 우수하거나 섬유 종횡비가 큰 경우에 대해 치구가 $\phi 1$ 인 경우 그림 (c)와 같이 일자와 반원 모양이 혼합된 형태의 크랙

이 발생하였으며, 단섬유와 기지가 분리된 흔적과 노출된 단섬유의 수도 적어 그림 (b)와 대조를 이룬다. 치구의 크기가 증가함에 따라 계면조건이 우수하거나 섬유 종횡비가 큰 경우는 치구 선단 형상의 영향으로 명확한 반원 형태의 크랙을 보였다. 그림 (d), (e), (f)는 섬유 종횡비가 550이고 섬유 함유량이 30phr인 SFRR을 각각 $\phi 1$, $\phi 2$, $\phi 3$ 의 치구로 관통한 사진이다.

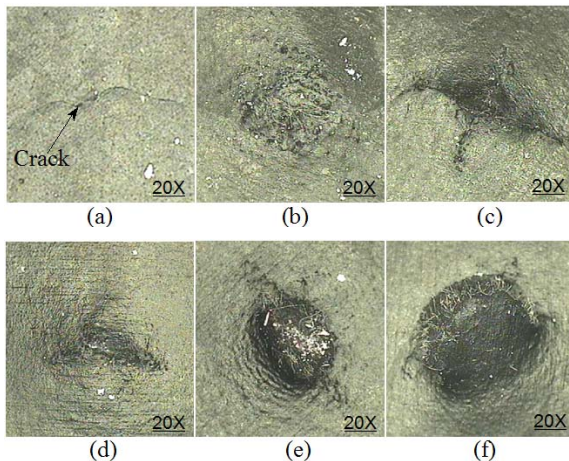


Fig. 12 The photograph of punctured surface for matrix and SFRR with puncture probe

4. 결 론

합성 Chloroprene 고무에 Nylon66 단섬유를 강화한 재료의 관통 특성에 관한 실험적 연구 결과에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 기지에 비해 섬유 함유량의 증가에 따라 강화고무의 관통 저항력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 계면상 조건이 우수할수록 크게 증가하였다. 섬유 함유량 30phr, 계면조건 "E" 일 때, 최고 3.4배 증가하였다. 또한 섬유 종횡비의 증가에 따라 강화고무의 관통 저항력은 크게 증가하였고, 같은 섬유 함유량에서도 종횡비가 클수록 크게 증가하였다. 섬유 종횡비 550, 섬유 함유량 30phr일 때 최고 2.7배 증가하였다.

② 관통 후 마찰력은 기지나 섬유 종횡비 155이하 인 단섬유 강화고무에서 존재치 않으며, 일부는 기지의 관통 저항력보다도 더 높은 마찰력 값을 보였다. 계면 조건 "E", 30phr에서 압입 치구 $\phi 3$ 일 때, 마찰력은 129.5N이었다.

③ 계면 조건이 좋지 않은 강화고무는 관통 부분 주위에 미세 크랙과 구멍, 노출된 단섬유를 볼 수 있지만, 계면

조건이 우수하거나 섬유 종횡비가 큰 경우는 치구가 커질수록 반원형의 크랙이 발생하며, 노출된 단섬유와 섬유와 기지의 분리 흔적이 거의 없음을 알 수 있다.

④ 단섬유 강화고무는 기지보다 높은 관통 저항력과 마찰력을 나타내는 특성이 있다. 이런 특성을 응용하면 다이아프램이나 타이어 등에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지역혁신인력양성사업의 연구비 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Termonia Y., "Puncture resistance of fibrous structures", Inter. J. of Impact Eng., Vol. 32, 2006, pp. 1512-1520.
2. Stevenson A. and Ab Malek K., "On the puncture mechanics of rubber", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 67, 1994, pp. 743-760.
3. Nguyen C. T., Vu-Khanh T. and Lalra J., "Puncture characterization of rubber membranes", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 42, 2004, pp. 25-33.
4. Coran, A. Y., Boustany, K. and Hamed, P., "Short-Fiber Rubber Composites," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 47, 1974, p. 396.
5. Goettler, L. A., Hand Book of Elastomers, Dekker., Inc., 1988, pp. 216-229.
6. 이동주, 류상렬, "단섬유 강화고무의 파열특성 연구", 대한기계학회논문집, Vol. 30, No. 5, 2006, pp. 543-549.
7. Ryu, S. R. and Lee, D. J., "Effects of an Interphase Condition on the Tensile and Fatigue Properties of Short-Fiber Reinforced Rubber", International J. of Polymeric Materials, Vol. 52, No. 5, 2003, pp. 415-429.
8. Ryu, S. R. and Lee, D. J., "Effect of Fiber Aspect Ratio, Fiber Content, and Bonding Agent on Tensile and Tear Properties of Short-fiber Reinforced Rubber", Int. J. of KSME, Vol. 15, No. 1, 2001, pp. 35-43.
9. 류상렬, 이동주, "계면상 조건과 단섬유 함유량이 강화고무의 동적특성에 미치는 영향", 한국복합재료학회지, Vol. 13, No. 3, 2000, pp. 30-37.
10. 류상렬, 이동주, "단섬유 강화 Chloroprene 고무의 동적특성 연구", 한국복합재료학회지, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 45-50.
11. Krishan, K. C., Composites Materials, Springer-Verlag, 1987, p. 185.