

論文

시편 크기 및 시험속도가 단섬유 강화 클로로프렌 고무의 관통 특성에 미치는 영향

류상렬*, 이동주**+

Effects of Specimen Size and Testing Velocity on Puncture Properties of Short-fiber Reinforced Chloroprene Rubber

Sang Ryeoul Ryu*, Dong Joo Lee**+

ABSTRACT

The puncture properties of short-fiber reinforced rubber were investigated as functions of fiber aspect ratio(AR: length of fiber/diameter of fiber), fiber content, specimen size and testing velocity. The puncture stresses of the matrix and short-fiber reinforced rubber decreased with specimen size, and increased with testing velocity at same specimen size. As the fiber AR increased the puncture stress at given fiber content also increased. The problem of the specimen shape was investigated by the comparison of the tensile strength with puncture stress. The forces acting in the membrane wall of the matrix and the short-fiber reinforced rubber showed a similar data regardless of specimen size. And those increased with testing velocity at same specimen size. As the fiber AR increased the force acting in the wall at given fiber content also increased. Overall, it was found that the specimen size, testing velocity had an important effects on the puncture properties.

초 록

단섬유 강화고무의 관통 특성에 대해 섬유 종횡비(AR: 섬유 길이/섬유 직경), 섬유 함유량, 시편 크기 그리고 시험속도를 변수로 하여 연구하였다. 기지와 단섬유 강화고무의 관통 저항은 시편 크기의 증가에 따라 감소하였고, 동일한 시편 크기에서 시험 속도의 증가에 따라 관통 저항력은 증가하였다. 각각의 섬유 함유량에서 섬유 종횡비가 클수록 높은 관통응력 값을 보였다. 인장강도와 관통응력의 비교를 통해 시편 형상의 문제점에 대해 고찰하였다. 기지와 단섬유 강화고무의 막에 작용하는 힘은 시편의 크기에 관계없이 유사한 값을 보였고, 동일한 시편 크기에서 시험속도의 증가에 따라 증가하였다. 각각의 섬유 함유량에서 섬유 종횡비가 클수록 막에 작용하는 힘은 크게 나타났다. 전체적으로 시편 크기, 시험속도가 단섬유 강화고무의 관통 특성에 지대한 영향을 미침을 확인하였다.

Key Words : 관통특성(Puncture Properties), 강화고무(Reinforced Rubber), 섬유 종횡비(Fiber Aspect Ratio), 섬유 함유량(Fiber Content)

1. 서 론

고무 막 형태의 다이아프램이나 타이어, 보호용 장갑 등에 있어서 매우 중요한 물성 중의 하나는 관통 저항(puncture

resistance)이다. 국내의 고무류 관련 관통 특성에 관한 연구는 전무한 실정이며, 국외의 연구동향을 정리하면 다음과 같다. Termonia[1]는 바늘 관통에 저항하는 섬유 직물의 저항을 제어하는 요소들의 연구를 위한 포괄적인 모델을 제시하였고,

* 영남대학교 기계공학부 연구원

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

관통은 4단계로 일어남을 확인하였다. Stevenson[2] 등은 파괴 역학을 이용한 실험 및 이론적인 고무의 관통에 대한 연구에서, 압입 치구의 모서리 R값이 예리하며 직경이 작은 경우가 실험적으로 얻어진 관통 에너지 값과 이론적으로 계산한 값이 유사함을 밝혔다. Nguyen[3] 등은 관통 치구의 원추각에 따른 고무 막의 관통에 대해 연구하였으며, 최대 관통 저항력은 고무와 압입 치구의 표면 접촉 상태에 의존함을 알아냈다.

단섬유(短纖維) 강화고무(SFRR, short-fiber reinforced rubber)는 직경이 10~20 μ m이고 길이가 1.5~4.5mm 정도의 짧은 섬유를 보강재로 사용한 복합재료를 의미한다[4]. 단섬유 강화고무는 고가의 카렌더 장비나 섬유의 복잡한 절차처리 장치 등 별도의 설비가 없이도 우수한 물성을 얻을 수 있고 압축성형, 압출성형, 이송성형, 사출성형 등 다양한 방법을 이용해 복잡한 형태의 제품을 쉽게 제작할 수 있는 특징이 있다[4]. 단섬유 강화고무의 기계적 특성에 미치는 주요한 변수들은 섬유 종횡비(Fiber AR, 단섬유 길이/직경), 섬유 함유량(phr, parts per hundred grams of rubber), 섬유 배향, 섬유의 분산 상태 그리고 섬유와 기지의 접착력 등이고, 이들은 섬유 및 기지의 종류, 접착제 처리 방법, 기타 배합 약품 등의 영향을 받는다[5].

저자들은 지금까지 단섬유 강화고무에 대한 여러 실험적 연구[6-8]를 수행하였는데 파열압력과 인장탄성율, 항복강도, 경도, 파괴인성치 등의 기계적 성질이 섬유 종횡비와 함유량 증가에 따라 크게 향상됨을 확인하였고, 동일한 섬유 종횡비에서도 계면상 조건에 따라 기계적 성질이 다르게 나타남을 확인한 바 있다. 또한 단섬유 강화고무를 타이어, 공기 스프링, 다이어프램 등에 응용하기 위해서 파열특성[6], 감쇠특성[9], 압입 치구의 크기에 따른 관통 특성[10]에 대해서 검토를 한 바 있다.

본 논문에서는 클로로프렌(Chloroprene) 고무를 기지로 하고 섬유 종횡비를 3가지(265, 400, 550), 섬유 함유량을 3가지(10, 20, 30phr)로 구분하여 단섬유 강화고무를 제조하였고, 시편 크기 및 시험속도 변화에 따른 단섬유 강화고무의 관통 특성에 대해 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 제조

실험에 사용된 기지(matrix) 및 단섬유, 그리고 단섬유강화고무(SFRR)의 제조는 이전의 연구와 동일하다[8]. 기지(CR)의 인장강도와 신장율, 그리고 경도는 19.65MPa, 450%, 55Hs였고, 강화 단섬유(Nylon66, 롱프랑사)의 인장강도, 탄성률, 연신율, 그리고 지름은 600MPa, 2.0GPa, 30%, 15 μ m 이었다.

강화 단섬유의 표면처리는 침적법을 사용하였다. 접착제(Chemlok 402) 1에 톨루엔 1의 비율로 희석하여 단섬유를 3분간

침적하였으며, 실온에서 건조 후 150 $^{\circ}$ C에서 5분간 유지하였다.

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 시편 제작을 위해 압축성형기(80 tons)를 사용하였으며 성형중의 압력은 14MPa, 열판 및 금형의 온도는 170 $^{\circ}$ C, 성형시간은 가류특성시험으로부터 얻은 적정가류시간(tc90)의 1.5배를 하였다. 시편을 만들기 위한 고무판의 크기는 240mm \times 160mm \times 1mm(t)이며, 수축을 고려해서 만든 금형을 사용하였다.

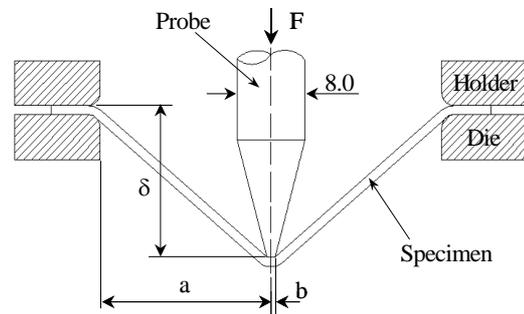


Fig. 1 Schematics of Puncture Test.

2.2 실험방법

Fig. 1은 관통 실험의 개요를 보여준다. 실험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 Autograph(Model AG-5000E)이며, 상부에 관통 치구(probe)를 하부에는 다이와 시편, 홀더를 고정시킨다. 시편의 두께(t_0)는 1mm이고, 홀더와 홀더 사이의 거리는 $\phi 25mm$, $\phi 40mm$, $\phi 55mm$ 3가지였다. 시편을 다이와 홀더 사이에 놓고 3곳에서 M6 볼트를 이용하여 고정하였다. 다이의 위쪽 3곳에 비드를 설치하여 관통 실험 시 시편의 미끄러짐을 방지하기 위한 것이다. 관통(압입) 치구는 끝단의 지름을 $\phi 1mm$, 원추각은 30 $^{\circ}$ 로 하였고, 시험속도는 5mm/min, 100mm/min, 200mm/min의 3가지로 하였다. 관통 치구의 형상은 나사못과 유사하며 타이어나 다이어프램 등에 외부의 충격에 의해 파손된 경우를 고려하여 결정했다. 각 실험의 시료는 시편 4개 이상을 사용하였으며, 얻어진 결과는 이들을 산술평균 하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 하중-변위 그래프

관통 실험시의 기지 및 SFRR의 하중-변위 그래프는 이전의 연구[10]에서 고찰한 바와 같이 기지는 단순 2축 인장시험[8]과 유사한 경향을 보인다. SFRR는 단섬유 함유량과 종횡비가

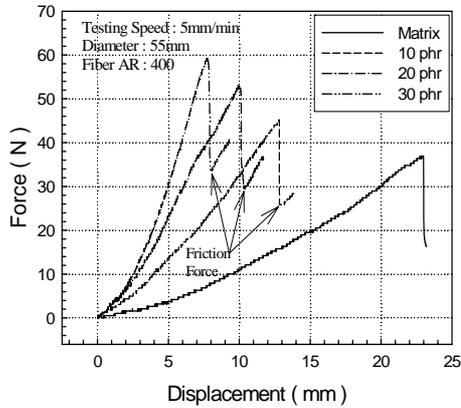


Fig. 2 Force-displacement Curves of Matrix and SFRR with Fiber AR 400.

증가함에 따라 변위가 크게 감소되고 하중이 크게 증가하는 특성을 보인다. 변위의 증가가 시작되면서 1차 변형에 의한 하중의 증가를 보이며, 최대 하중점에 이르면 시편이 관통된다. 관통 시의 하중 값을 관통 저항력(F , puncture force)이라 부르며, 관통 후 즉시 파단에 이르지 않고 치구 원추면의 마찰에 의해 하중을 지지하는 마찰력(friction force)을 나타낸다.

기지의 경우 관통 실험 시 시편의 크기 증가에 따라 하중을 받는 면적이 증가하므로 관통 저항력과 증가 기울기가 다소 낮게 나타난다. 또한 시편 크기가 동일한 경우에 시험속도 증가에 따라 하중과 증가 기울기가 크게 증가하는 경향을 보인다. Fig. 2는 시험속도 5mm/min, 시편 $\phi 55$ mm, 섬유 중량비 400인 SFRR의 섬유 함유량 증가에 따른 하중-변위 그래프다. 섬유 함유량 증가에 따라 최대 하중과 기울기가 크게 증가하며, 모든 섬유 함유량에서 마찰력이 존재하였고 마찰력의 크기도 섬유 함유량 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.

3.2 관통응력

Fig. 1과 같이 관통 시험에서 시편에 발생하는 응력은 등2축 인장응력(equal biaxial tension stress) 상태가 된다.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \sigma_3 = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda, \quad \lambda_3 = \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

또한, 관통 저항력이 최대인 점에서 시편이 파손되며, 이때의 관통응력(σ_p)과 변형률(λ_p)[11]은 다음의 식으로 구한다.

$$\sigma_p = \frac{F}{2\pi b t_0} \quad (3)$$

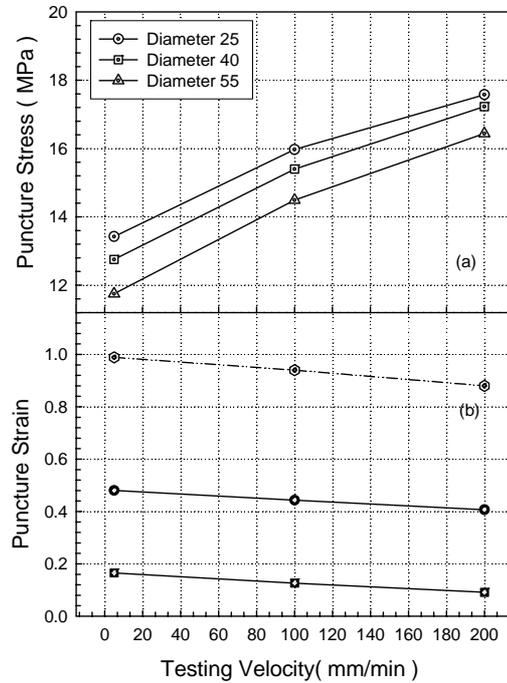


Fig. 3 Effects of Testing Velocity and Specimen Size on Puncture Stress(a) and Strain(b) of the Matrix.

$$\lambda_p = \frac{(a+b)a + b^2}{a^2} - 1 \quad (4)$$

$$\text{여기서, } a = \sqrt{\delta^2 + (a-b)^2}$$

Fig. 3은 기지의 시편 크기 및 시험속도에 따른 기지의 관통응력(a)과 변형률(b) 값을 보여준다. 동일한 시험 속도에서 시편의 크기 증가에 따라 관통응력 값이 감소하는 경향을 보였다. 이는 시편의 크기가 증가할수록 변형을 받는 부분이 커지거나 치구에 의한 집중하중에 의한 것으로 보인다. 시편 크기가 $\phi 25$ mm에서 $\phi 55$ mm로 증가함에 따라 5mm/min에서 12.5%, 100mm/min에서 9.3%, 200mm/min에서 6.4% 정도 관통응력 값이 감소하였다. 또한 동일한 시편 크기에서 시험속도의 증가에 따라 관통응력 값이 증가하는 경향을 보였다. 시험속도 5mm/min에서 200mm/min으로 증가함에 따라 시편 크기 $\phi 25$ mm에서 30.9%, $\phi 40$ mm에서 35.1%, $\phi 55$ mm에서 40.0% 정도 증가하였다. 일반적으로 고무의 인장속도가 빠르게 되면 인장강도가 증가하고 반대로 느리면 감소한다[12]. 기본적으로 고무 분자들이 외부 하중을 받게 되면 외부하중에 저항하는 저항력을 갖게 되고, 거기에 동일한 하중 일지라도 변형을 가하는 속도가 커질수록 저항에 의한 반발력이

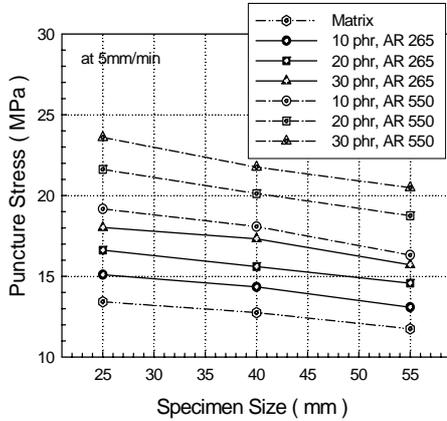


Fig. 4 Effects of Specimen Size, Fiber Content and Fiber AR on Puncture Stress of the SFRR.

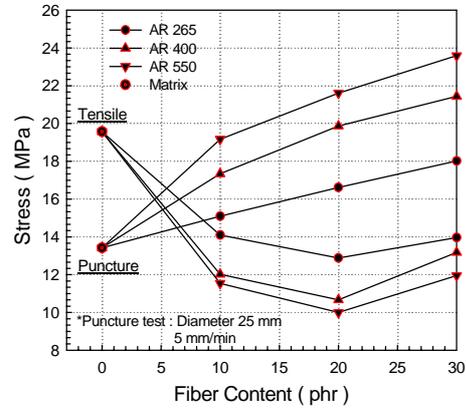


Fig. 6 Effects of Fiber Content and Fiber AR on Tensile Stress and Puncture Stress of the SFRR.

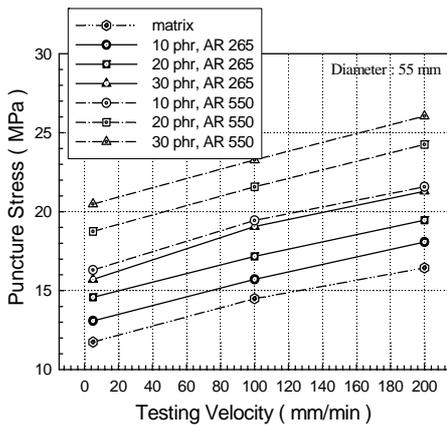


Fig. 5 Effects of Testing Velocity, Fiber Content and Fiber AR on Puncture Stress of the SFRR.

더해지므로 인장하중은 증가하게 된다. 시험속도의 증가에 따른 관통시의 변형률(b)은 감소하였으며, 시편 크기의 증가에 따라 크게 감소하였다. 일반적으로 시편의 크기가 증가하면 변형률이 증가하는데, 관통 시험의 경우는 관통 치구의 원주 모서리에 따라 다른 경향을 보인다. 이번 연구의 경우 원주 모서리는 기계 가공 후 발생하는 날카로운 버(bur)만 제거한 상태로 현미경 측정 결과 모서리 반경 값은 0.25mm 정도였다. 관통 치구의 모서리가 날카로운 관계로 시편의 크기가 25mm에서 1.6배($\phi 40$ mm), 2.2배($\phi 55$ mm) 증가하였음에도 파단시의 변위는 각각 1.04배, 1.11배 증가하였다. 따라서 파단시의 변형률 값은 시편 크기 증가에 따라 크게 감소하는 것으로 보인다.

단섬유 강화고무(SFRR) 또한 시편의 크기와 시험속도에 영향을 받는데, Fig. 4는 시험속도가 5mm/min일 때, 시편 크기와 섬유 함유량, 섬유 중형비(AR)가 관통응력에 미치는 영향을 나타내었다. 각각의 시편 크기에서 섬유 함유량이 증가할수록

관통응력이 크게 증가하였고, AR이 클수록 더 크게 증가함을 알 수 있다. 시편 크기 $\phi 25$ mm, 30phr, AR 265의 SFRR는 기지에 비해 1.34배 증가하였고, $\phi 25$ mm, 30phr, AR 550의 SFRR는 기지에 비해 1.76배 증가하였다. 시편 크기 $\phi 25$ mm에서 $\phi 55$ mm로 증가함에 따라 기지는 12.5% 감소하였고, 30phr, AR 265의 SFRR는 12.8%, 30phr, AR 550의 SFRR는 13.2% 감소하였다. 기지에 비해 시편 크기의 증가에 따라 SFRR의 관통응력 감소 기울기가 다소 커짐을 알 수 있다. Fig. 5는 시편 크기가 $\phi 55$ mm일 때, 시험속도와 섬유 함유량, 섬유 중형비가 관통응력에 미치는 영향을 나타내었다. 섬유 중형비가 증가할수록 관통응력 값이 크게 증가하였고, 동일한 섬유 중형비에서도 섬유 함유량이 증가할수록, 시험속도가 빠를수록 크게 증가함을 알 수 있다. 시험속도 5mm/min에서 200mm/min으로 증가함에 따라 기지의 관통응력 값은 1.40배 증가하였고, SFRR의 경우는 섬유 중형비 550에서 10phr, 20phr, 30phr일 때 각각 1.32배, 1.29배, 1.27배 정도 증가하였다. SFRR이 기지 보다 증가율이 떨어지는 것은 단섬유 함유량이 증가함에 따라 정도는 증가하는 반면에 탄성이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 한편 Fig. 4와 5에서 섬유 중형비가 400의 경우는 265와 550 경향의 중간 정도 값을 보였다.

Fig. 6은 기지 및 SFRR의 섬유 함유량 증가에 따른 중형비별 파단시의 인장강도와 관통응력 값을 나타냈다. Nguyen[3] 등은 니트릴(Nitrile), 천연고무(Natural Rubber), 네오프렌(Neoprene) 등에 대해 단순 인장시험, 관통시험 등을 실시하였는데, 3종류 모두 인장강도의 경우가 높게 나타났다. 본 연구에서도 기지에 대해서는 인장강도 값이 관통응력 값에 비해 높게 나타나 유사한 경향을 보였지만, SFRR의 경우는 전혀 다른 결과를 보여준다. 먼저 SFRR의 인장강도는 섬유함유량 증가에 따라 오히려 고무에 비해서 감소하였으며, 중형비가 클수록 크게 감소하는 희석효과[7-8]를 보인다. 그에 비해 등2축 인장상태인 관통응력은 희석효과를 보이지 않았으며, 섬유함유량 증가에 따라

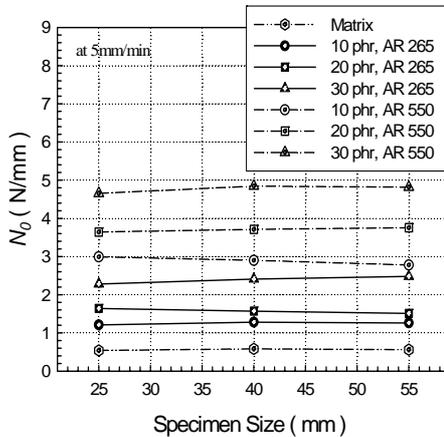


Fig. 7 Effects of Specimen Size, Fiber Content and Fiber AR on N_0 of the SFRR.

기지에 비해 증가하였다. 또한 동일한 섬유함유량에서도 종횡비가 클수록 크게 증가함을 알 수 있다. 섬유 함유량 30phr, 종횡비 550인 SFRR의 관통응력은 기지에 비해 1.8배 증가하였다.

동일한 조건으로 제조된 시편일지라도 이와 같이 경향이 다르게 나타나는 것은 시편의 형상과 하중상태 등이 다르기 때문으로 사료된다. 인장시험(KS M 6782, 3호)의 경우 시편은 두께 2mm의 아령형으로 하중을 지지하는 부분은 폭이 5mm이다. 따라서 섬유 종횡비가 400이상의 경우는 시편 절단시 단섬유 길이가 감소될 가능성이 매우 높다. 게다가 절단면에 단섬유가 노출되거나 뿔린 부분이 있어 인장하중 시 적절한 하중 전달을 하지 못하므로 인장강도가 감소되는 것으로 판단된다. 관통시험의 시편도 절단공정을 거치지만, Fig. 1에서와 같이 절단면이 홀더와 다이 사이에 고정되므로 시편절단에 의한 변수는 없다고 할 수 있다.

3.3 고무 막에 작용하는 힘

관통 시험은 축 대칭을 이루는 대표적인 예로, 고무 막에 직접 하중(F)을 가하는 경우 대해 고무 막에 작용하는 힘을 근사적으로 해석 할 수 있다. Fig. 1과 같이 관통 시험시의 응력-변형을 거동에 대한 하중-변위 관계의 선형 관계는 다음 식과 같이 주어진다[13].

$$\delta = \frac{F}{2\pi N_0} \ln \frac{a}{b} \quad (5)$$

여기서, N_0 : 고무 막에 작용하는 힘(N/mm)

위 식에 실험에서 얻어진 데이터를 대입하고 시험 조건에 따른 N_0 의 변화를 비교해 보면 Figs. 7-8과 같다. Fig. 7은 시험

속도가 5mm/min일 때, 시편 크기와 섬유 함유량, 섬유 종횡비가 N_0 에 미치는 영향을 나타내었다. 기지와 SFRR 모두 시편의 크기 변화에 관계없이 유사한 값을 보였다. 기지의 경우 평균 0.56N/mm였고, 섬유 함유량이 증가할수록 N_0 가 크게 증가하였고, AR이 클수록 더 크게 증가함을 알 수 있다. 섬유 함유량 30phr, AR 265의 SFRR는 기지에 비해 4.3배 증가하였고, 섬유 함유량 30phr, AR 550의 SFRR는 기지에 비해 8.5배 증가하였다. Fig. 8은 시편 크기가 55mm일 때, 시험속도와 섬유 함유량, 섬유 종횡비가 N_0 에 미치는 영향을 나타내었다. 섬유 종횡비가 증가할수록 N_0 값이 크게 증가하였고, 동일한 섬유 종횡비에서도 섬유 함유량이 증가할수록, 시험속도가 빠를수록 크게 증가함을 알 수 있다. 기지의 경우 시험속도 5mm/min에서 200mm/min으로 증가함에 따라 N_0 값은 1.5배 증가하였다. SFRR의 경우는 섬유 종횡비 550에서 30phr일 때 시험속도 5mm/min에서는 기지에 비해 8.5배, 200mm/min에서는 9.1배 증가하였다.

Fig. 7에서 시편의 크기에 관계없이 N_0 값이 유사하게 나타나는 것은 고무 막에 작용하는 힘을 나타내는 재료 상수라 할 수 있다. 앞 절에서 고찰한 바와 같이 SFRR의 물성을 평가하는 방법 중에 인장시험의 경우 아령 모양의 시편을 가공하는 공정 중에 단섬유가 파손된다. 따라서 섬유 종횡비가 비교적 큰 SFRR의 정확한 물성의 측정에 문제가 있다고 사료된다. 그에 비해 관통 시험[10] 혹은 파열압 시험[6]을 이용하는 경우는 단섬유의 손상 없이 좀더 정확한 물성을 측정할 수 있을 것으로 보인다.

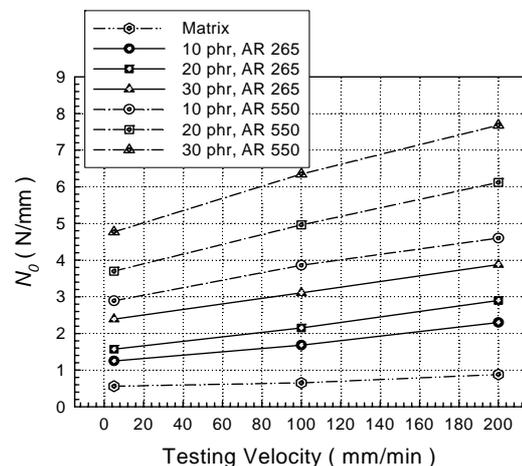


Fig. 8 Effects of Testing Velocity, Fiber Content and Fiber AR and on N_0 of the SFRR.

4. 결론

합성 Chloroprene 고무에 단섬유(nylon66)를 강화한 재료의

관통 특성에 관한 연구 결과, 섬유 중량비, 섬유 함유량 등의 주요 인자 외에도 시험속도 및 시편 크기의 변화도 중요한 인자임을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 기지 및 단섬유 강화고무의 관통응력은 시편의 크기 증가에 따라 감소하였고, 동일한 시편 크기에서 시험속도가 증가할수록 증가하였다. 이는 제품의 설계 및 제작에 응용이 가능할 것으로 사료된다.
- ② 실험에 얻은 값을 이용 고무 막에 작용하는 힘(N_0)을 근사적으로 해석 할 수 있었고, 이 값은 시편의 크기에 관계없이 유사하였다.
- ③ 단섬유 강화고무에 대한 인장강도와 관통응력 비교를 통해 시편 형상에 대한 문제점을 고찰하였고, 단순 인장 시험보다는 등2축 인장상태의 관통 시험으로 하는 것이 좀 더 정확한 물성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.
- ④ 또한 단섬유 길이와 인장시험 시편의 폭에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

- 9) Ryu, S. R. and Lee, D. J., "A Study on Dynamic Properties of Short-fiber Reinforced Chloroprene Rubber," *J. of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 45-50.
- 10) Ryu, S. R. and Lee, D. J., "A Study on Puncture Properties of Short-fiber Reinforced Rubber," *J. of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 16-22.
- 11) Murphy, V. P. and Koerner, R. M., "CBR strength (Puncture) of geosynthetics," *Geotechnical testing Journal*, No. 3, 1988, pp. 167-172.
- 12) The Rubber Society of Korea, *The Basic Rubber Technology*, 1983, p. 335.
- 13) Williams J. G., *Stress Analysis of Polymers*, 2nd(revised) Edition, Ellis Horwood limited, 1980, pp. 243-244.

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. 216-244.
- 6) Lee, D. J. and Ryu, S. R., "A Study on Bursting Properties of Short-fiber Reinforced Chloroprene Rubber," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, 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., "The Fracture Toughness and Crack Propagation behaviour of Short-fiber Reinforced Rubber," *KSME Annuals Spring Conferences*, 2000, pp. 85-90.