

論文

단섬유 강화 Chloroprene 고무의 동적특성 연구

이동주^{*,+}, 류상렬^{*}

A Study on Dynamic Properties of Short-fiber Reinforced Chloroprene Rubber

Dong-Joo Lee^{*,+}, Sang Ryeoul Ryu^{*}

ABSTRACT

The dynamic properties of short-fiber reinforced chloroprene rubber with different interphase conditions and fiber contents have been studied as functions of frequency, amplitude and temperature. The loss factor(LF) slightly increased more than 1.33% of strain and the dynamic ratio(DR) rapidly decreased with increasing strain amplitude. The LF rapidly decreased with increasing frequency especially more than 50Hz. The DR showed the lower when it compared to virgin material with increasing frequency. The LF showed the maximum at 65°C and rapidly decreased after that temperature. The DR showed the lower when it compared with virgin rubber with increasing temperature. Generally, the better interphase condition showed the lower LF and DR at the same testing condition. Therefore, the short-fiber reinforced rubber could have the better isolation when the frequency ratio is more than $\sqrt{2}$ compared with frequency ratio less than $\sqrt{2}$.

초 록

계면상 조건과 섬유 함유량 변화에 따른 단섬유 강화 CR의 동적특성에 대해 주파수, 진폭 그리고 온도를 함수로 실험적 고찰을 하였다. 진폭 변형률 증가에 따라 LF는 1.33% 이상에서 약간 증가하였고, DR은 크게 감소하였다. 주파수 증가에 따라 LF는 특히 50Hz 이후 크게 감소하였고, DR은 기지고무보다 낮은 값을 보였다. 온도 증가에 따라 LF는 65°C에서 최대 값을 나타내고 이후 크게 감소세를 보였다. DR은 온도가 증가에 따라 기지고무 보다 낮은 값을 보였다. 일반적으로 동일한 시험 조건에서 계면상이 우수할수록 LF와 DR이 낮은 값을 보였다. 따라서 단섬유 강화고무는 진동 수비가 $\sqrt{2}$ 이하보다는 $\sqrt{2}$ 이상에서 더 큰 진동절연 효과가 있다고 할 수 있다.

Key Words : 계면상(interphase), 섬유 함유량(fiber content), 손실계수(loss factor), 동배율(dynamic ratio), 주파수(frequency), 진폭(amplitude)

1. 서 론

고무란 물질은 금속과 달리 고무 자체가 내부 마찰에 의한 에너지를 소산시킬 수 있기 때문에 여러 산업 분야에서 충격 흡수, 제진, 방진, 내진 그리고 완충 재료로서 널리 사용되고 있다. 이러한 성질을 나타내는 것이 손실계수(loss factor, LF)와 동배율(dynamic ratio, DR)로 점탄성 재료의 동적특성을 나

타내는 중요인자라 할 수 있다. 자동차의 엔진을 비롯한 변압기, 송풍기, 모터 등의 각종산업 장비에 필요한 동력원에서 발생하는 진동, 소음 등으로 인해 구조물이 피로현상을 받게 된다. 이를 적게 할 수 있는 진동제어 대책으로서 동력기계의 진폭을 작게 하거나 진동 전달율을 작게 함으로써 가능하다. 진동절연은 광의로 진동원으로부터 인접한 기계요소로의 진동이 전달되는 진동 통로를 절연, 차단, 격리시키는 일체의

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

* 영남대학교 연구원

기법으로 정의된다. 또 협의로는 기계로부터 지지바닥에로의 전달율을 감소시키는 방법을 의미한다. 일반적으로 다른 조건들이 고정되었을 때 절연체의 탄성효과가 작을수록, 기계의 주파수가 높을수록 절연효과가 크다. 최근 자동차 엔진 등의 기계류에 대한 경량화와 비용절감, 소형화, 고효율 등의 요인으로 인한 가혹한 조건에서 손실계수와 동배율을 높이기 위한 노력들이 계속되고 있다[1].

단섬유 강화의 경우는, 연속섬유 보강이나 직물 형태의 보강 방식에 비해 크기(형상)면에서 일반 배합제와 같이 취급할 수 있을 정도로 작기 때문에, 일반 고무 배합제와 성형 프레스 외는 별도의 설비가 필요치 않다는 것이 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 이러한 단섬유 강화고무의 기계적 특성에 미치는 주요한 변수들은 섬유의 종횡비, 섬유 함유량, 섬유 배향, 섬유의 분산상태 그리고 섬유와 기지의 접착력 등이고, 이들 항목은 섬유 및 고무의 종류, 결합제의 유무, 기타 첨가제 등의 영향을 받는다[2]. 지금까지 단섬유 강화고무에 대한 동적특성 연구는 거의 없는 실정이며, 이전의 연구[3]에서 진동수 비가 $\sqrt{2}$ 이상에서 진동절연 효과가 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 기지인 chloroprene 고무에 Nylon66 단섬유를 보강한 강화고무를 제작하여 주파수, 진폭 및 온도 변화에 따른 동적 특성에 대해 비교하였다. 여기서 단섬유는 interphase 모델 5가지, 섬유 함유량 3가지를 고려하였다.

2. 고무의 동적성질

고무의 동적성질[4]은 Hysteresis 현상에 대한 값으로부터 손실계수와 스프링상수, 동배율 등을 구할 수 있다. 하중-변위 곡선에서 Fig. 1과 같이 하중-변위에 외접하는 장방형을 그린다. 이 장방형의 면적 $2W(\triangle ABC + \triangle ACD)$ 와 하중-변위 곡선에 주위 부분의 면적 ΔW (loop 면적)를 측정한다.

여기서 스프링상수와 손실계수(LF), 동배율(DR) 등을 산출한다.

$$\text{절대스프링상수 } k^* = \frac{F_0}{X_0} = \sqrt{(k_1^2 + k_2^2)} \tag{1}$$

$$\text{손실계수 (LF), } \tan\delta = k_2/k_1 = \epsilon \tag{2}$$

여기서, 저장스프링상수(SSC) $k_1 = |k^*| \cos\delta$

$$\text{손실스프링상수 } k_2 = |k^*| \sin\delta$$

$$\text{동배율 (DR), } DR = k_1/k_2 \tag{3}$$

여기서, k_s ; 정적스프링상수

$$\text{진동전달률 (Tr), } Tr = \frac{F}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + \epsilon^2}{[1 - (f/f_n)^2]^2 + \epsilon^2}} \tag{4}$$

여기서, F ; 상부에 전해지는 힘

F_0 ; 상부로부터의 강제력

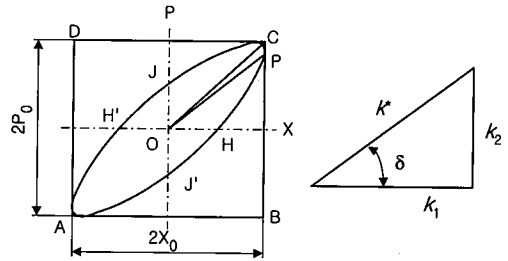


Fig. 1 Schematic diagram of the load-displacement relation

가류 고무의 동적특성은 이상과 같이 k_1 와 k_2 그리고 $\tan\delta$ 등으로 기술할 수 있지만, 이들 값은 사용 온도, 진동수, 변형 진폭에 따라 변화하고, 또한 폴리머의 종류, 가류 조건 등에 따라 상이하다[5]. 따라서 고무 재료의 해석이나 부품 설계시에 동적특성의 데이터가 부족한 것이 사실이며, 정확한 해석과 설계를 위해 다양한 변수에 따른 데이터의 확보가 선행되어야 한다. 일반적으로 LF값이 0.05보다 큰 경우를 방진재료라 하며, 자동차 방진부품의 경우 0.1전후의 값을 요구하고 있다.

일반적으로 주파수와 진폭을 일정하게 하고 온도를 내리면 SSC가 급격히 상승한다. 이 온도 영역을 전이영역 (transition region, $-50 \sim -60^\circ\text{C}$ 정도)이라 하며, 이 영역에서 손실계수는 최대치가 된다. 이는 고무상태에서 glass 상태로의 전이로서 진동수가 높을수록 전이영역은 고온측으로 이동한다. 방진고무의 적절한 온도 범위의 하한치는 이 전이영역이 되고, 이 전이영역은 폴리머의 선정으로 거의 결정된다. 그에 비해 방진고무의 온도 범위 상한치는 산화에 의한 망목구조의 파단으로 결정된다. 또한 사용하는 계질이나 환경에 따라 진동특성이 크게 달라지기 때문에 충분한 주의를 해야한다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

실험에 사용된 기지고무(matrix) 및 단섬유, 그리고 단섬유 강화고무(SFRR)의 제조는 참고문헌[3]과 동일하다.

강화섬유의 표면처리는 Chemlok402(이하 402)를 사용하였고, 처리 방법은 접착제 1에 톨루엔 1의 비율로 희석하여 섬유를 3분간 침적하였으며, 실온에서 건조 후 150°C chamber에서 5분간 유지하였다. 또한 기지고무 2에 톨루엔 3의 비율로 교반한 고무 용액을 제조하여 402와 동일하게 침적식으로 표면을 도포하였으며, Fig. 2와 같이 각각의 경우에 대해 "A", "B", "C", "D" 그리고 "E"로 구분하였다. 계면상 모델 "E"의 경우는 "C"와 동일하게 고무용액과 402를

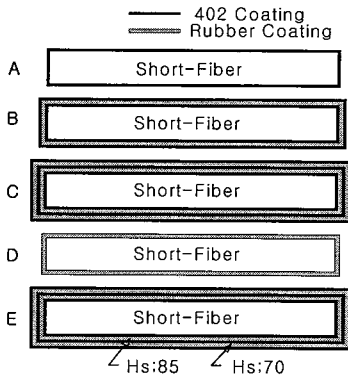


Fig. 2 Schematics of coated short-fiber surface.

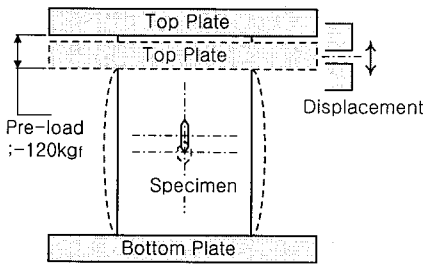


Fig. 3 Schematics of dynamic testing device.

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.

3.2 실험방법

동적특성시험(KS M 6604)의 시험편 형상과 시험기는 참고 문헌[3]과 동일하다. 단, 시험 조건은 120kgf의 pre-load를 가한 후, 진동수(5Hz~200Hz)와 진폭(0.2mm~2.0mm) 그리고 온도(25℃~105℃)를 변화시키면서 값을 얻는다. Pre-load 값은 승용차의 엔진마운트 러버 1개가 받는 하중과 유사하게 하였다. 모든 실험의 시료는 시험편 4개 이상을 사용하였다.

4. 실험결과 및 토의

이전의 연구[6]에서 최대점도(M_H)의 증가와 가류지연효과로 강화고무의 보강 효과를 확인하였으며, 계면상 조건에 대해서는 D < A < B < C < E의 순(順)으로 보강효과가

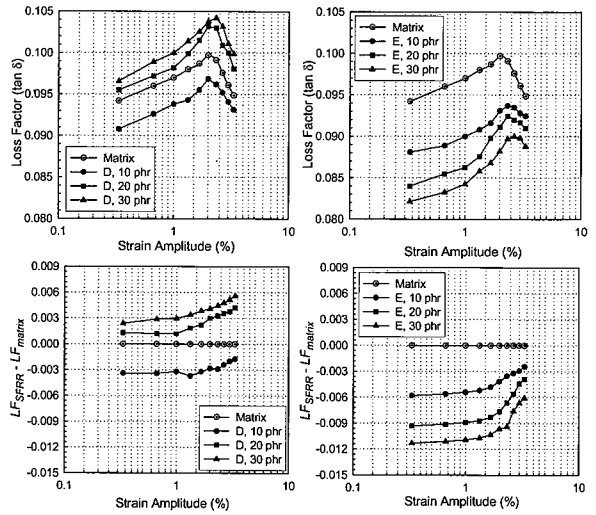


Fig. 4 Effects of strain amplitude, interphase and fiber content on the LF.

크게 나타났다. 따라서 강화고무의 동적특성은 “D”가 배합되면 손실특성이, “E”가 배합된 경우는 탄성특성이 강하게 나타남을 예상할 수 있다.

4.1 진폭 의존성

진폭 의존성 실험은 실온에서 주파수 10Hz로 진폭을 0.2mm에서 2.0mm까지 변화시키면서 실시하였다. 진폭 변형률(진폭/시편높이×100) 변화에 따른 LF의 변화는 Fig. 4에 나타났다. 손실계수(LF)는 진폭 변형률 증가에 따라 2%까지는 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 기지고무에 비해 LF는 진폭 변형률 증가에 따라 “D”와 “E” 모두 1.33% 이상에서 0.003정도 증가하였다. “D”의 경우 10phr에서 기지보다 적은 값을 보였고, 섬유 함유량 증가에 따라 증가하였다. 이렇게 10phr 정도의 소량 일 때는 내부 마찰의 양이 적고 섬유 자체의 탄성에 의한 SSC의 증가 때문이며, 함유량이 증가함에 따라 내부 마찰의 증가로 LF가 증가하는 것으로 보인다. “E”는 계면상 조건이 우수한 경우이므로 섬유 함유량 증가에 따라 SCC의 증가로 LF가 감소함을 알 수 있다. “D”의 30phr일 때와 “E”의 30ph일 때의 LF는 0.012 정도 차이를 보였다.

식 (4)에서 진동 전달률은 진동수비와 손실계수의 함수임을 알 수 있다. 외력의 진동수(f)와 계의 진동수(f_n)가 일치하는 경우, T_r 이 무한대가 되어 공진이 일어나게 된다. 그리고 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상 일 때, 진동절연이 일어난다. 진동절연 측면에서 가류 고무에 의한 진동 전달률은 손실계수와 동배율이 반대의 관계가 있다. 즉, 진동수비가 낮은 영역($\sqrt{2}$ 이하)에서는 손실계수가, 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상인 경우는

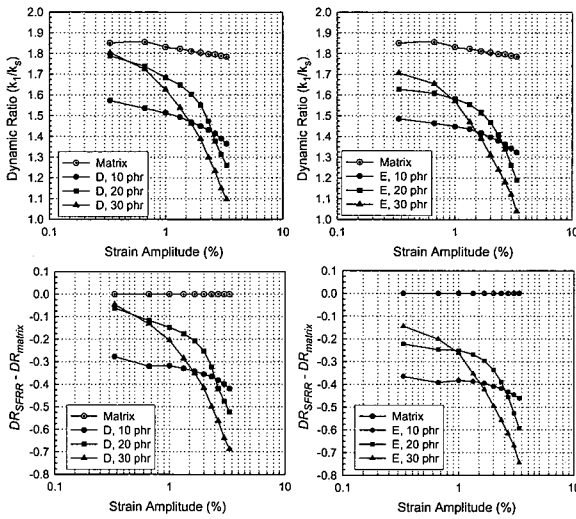


Fig. 5 Effects of strain amplitude, interphase and fiber content on the DR.

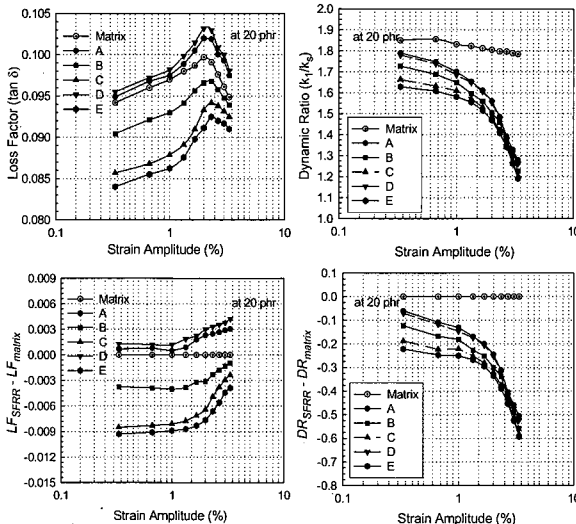


Fig. 6 Effects of strain amplitude, interphase on the LF & DR at 20phr.

동배율(DR)이 유용한 파라메타가 된다[1,7].

Fig. 5는 계면상 모델 “D”와 “E”에 대해 섬유 함유량별로 DR의 변화를 나타냈다. 진폭 변형을 증가에 따라 “D”와 “E” 모두 크게 감소하였고, 계면상이 우수할 수록 더 작은 값을 보였다. 이는 진폭 변형을 증가에 따른 SSC의 급격한 감소가 주된 원인이며, “D”의 경우가 “E”의 경우에 비해 각 함유량별 변화가 큼을 알 수 있다. “D”의 30phr에서 변화량은 0.65, “E”의 30phr에서의 변화량은 0.58이었다. 일반적으로 진동시스템을 설계 할 때에 공진을 방지하기

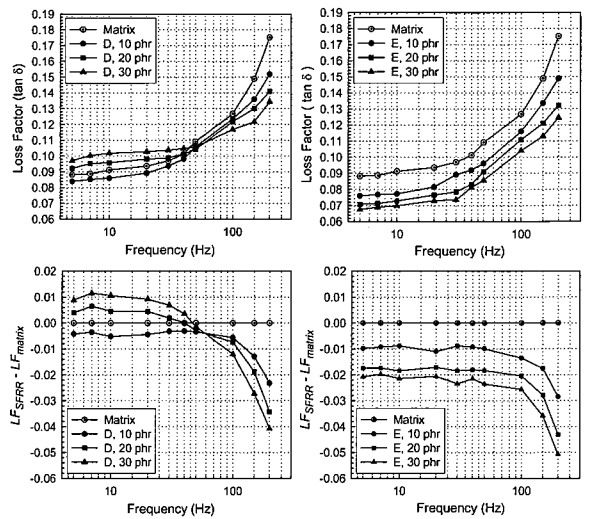


Fig. 7 Effects of frequency, interphase and fiber content on the LF.

위하여 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상의 영역을 고려한다. 따라서 동배율이 낮을수록 진동 절연에 유리하므로, 단섬유 강화고무는 특히 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상인 경우에 효과적이라 할 수 있다. 동일한 조건에서 진폭 변형을 증가에 따라 계면상과 섬유 함유량을 제어한다면 원하는 $\tan\delta$ 값을 얻을 수 있다고 본다. Fig. 6은 섬유 함유량 20phr에서 계면상 모델별로 LF와 DR을 나타냈다. 비교한 결과 A<B<C순으로 “D”와 “E” 사이의 값을 보임을 알 수 있다.

4.2 주파수 의존성

주파수 의존성 실험은 실온에서 진폭을 0.05mm로 고정하고, 주파수를 5Hz에서 200Hz까지 변화시키면서 실시하였다. 주파수 변화에 따른 LF와 DR의 경향을 검토하였고, Fig. 7은 LF의 실험 결과를 나타냈다. 강화고무는 주파수 증가에 따라 지지고무에 비해 50Hz 이하에서는 LF의 변화가 적었지만, 이후 크게 감소함을 알 수 있다. “D”의 30phr의 경우 0.05, 10phr에서 0.02정도의 변화를 보였고, “E”의 경우는 0.015~0.02 정도 감소하였다. 이는 주파수가 증가할수록 순간적으로 가해지는 하중이 커지는 것에 기인하고 “D”가 “E”보다 정도가 높기 때문에 높은 값을 보였다. 두 경우 모두 섬유 함유량이 증가할수록 큰 변화를 보였다. 특히 계면 모델 “D”의 경우는 50Hz 이하, 섬유 함유량 20phr 이상에서는 고무 내부 마찰의 영향으로 지지보다 높은 값을 보였고, 50Hz 이상에서는 지지보다 낮은 값을 보였다.

Fig. 8에 계면상 모델 “D”와 “E”에 대한 섬유 함유량별로 DR 변화를 나타냈다. 진폭 의존성과 유사하게 단섬유 강화고무가 기지에 비해 작게 나타났고, 계면상이 우수할 수록

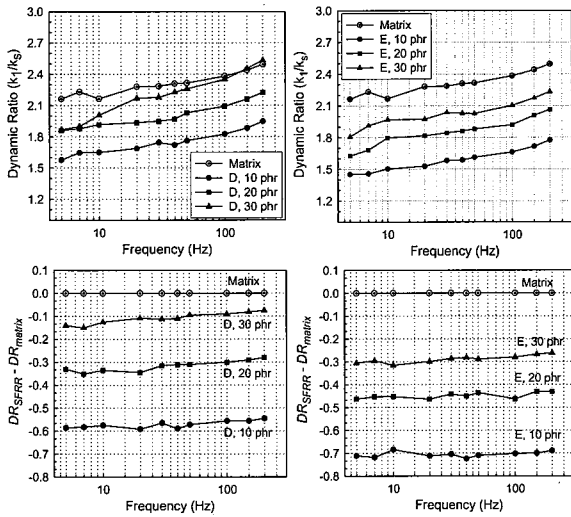


Fig. 8 Effects of frequency, interphase and fiber content on the DR.

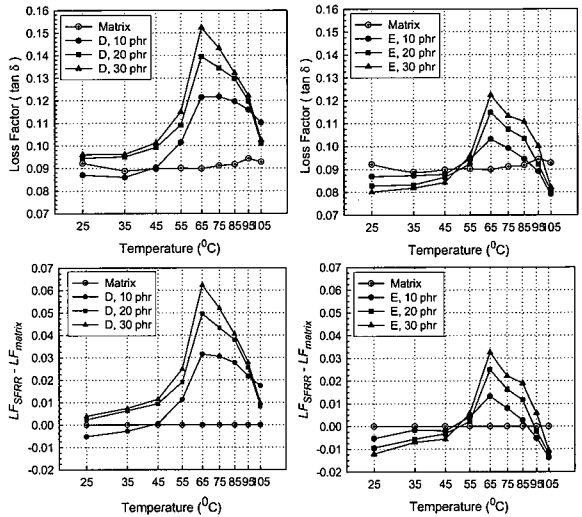


Fig. 10 Effects of temperature, interphase and fiber content on the LF.

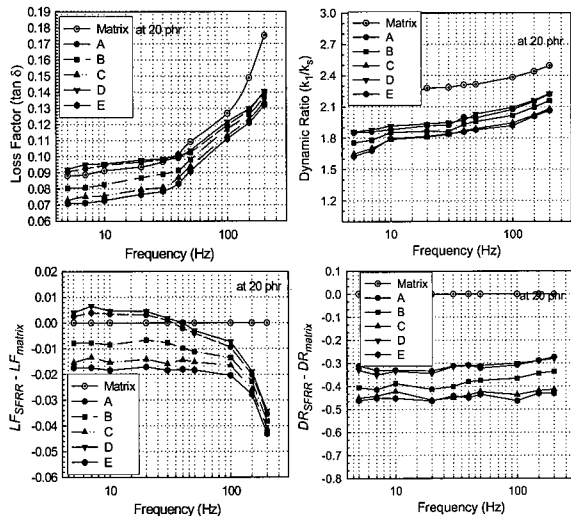


Fig. 9 Effects of frequency and interphase on the LF & DR at 20phr.

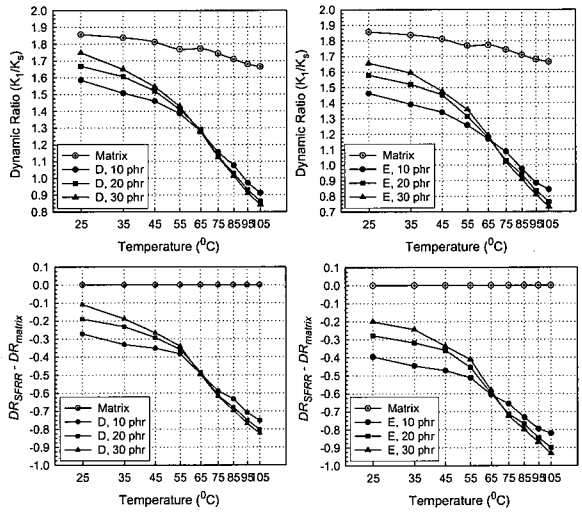


Fig. 11 Effects of temperature, interphase and fiber content on the DR.

낮은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 “D”와 “E”의 비교에서 섬유 함유량이 30phr일 때, 0.2, 20phr일 때, 0.15, 10phr일 때, 0.1정도 “E”가 낮게 나타났다. 따라서 진폭 의존성의 경우처럼 단섬유 강화고무가 기지보다 낮은 DR 값을 보이고, 계면상이 우수할수록 더 낮은 값을 보이므로 강화고무는 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상인 경우에 진동절연이 효과적이라 할 수 있다.

Fig. 9는 주파수 증가에 따른 섬유 함유량 20phr일 때, 각 계면상 모델에 대한 LF와 DR의 변화를 나타냈다.

4.3 온도 의존성

온도 의존성 실험은 주파수를 10Hz, 진폭을 0.1mm로 고정하였고, 온도를 25~105°C까지 변화시키면서 실시하였다. 온도 의존성 실험을 위해 동적특성 시험기에 고온 chamber을 설치하였다. 적외선 온도기를 이용 시험편 표면의 온도를 측정하였고, 희망 온도에 도달 후 40분간 유지 후 시험을 실시하였다. Fig. 10은 온도 증가에 따른 LF 변화를 나타냈다. “D”와 “E” 모두 기지고무에 비해 45°C이후 큰 증가세를 보이며, 65°C에서 최대 값을 나타내고 이후 크게 감소세를 보였다. 65°C에서 최대를 보인 것은 시험편과 시험조건에

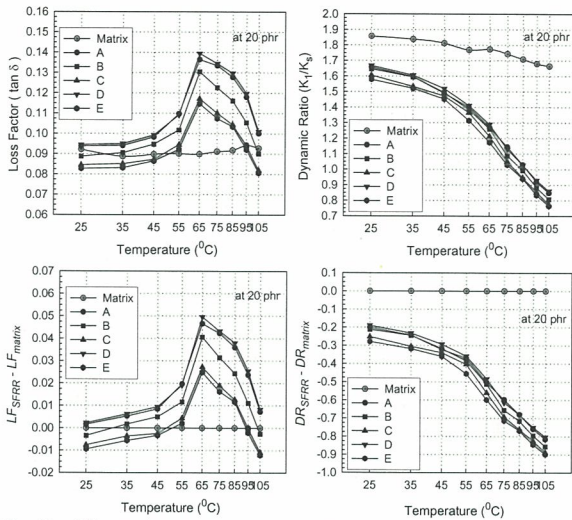


Fig. 12 Effects of temperature and interphase on the LF & DR at 20phr.

따른 공진 부분으로 보인다. 대체적으로 “D”가 “E”보다 높은 값을 보여 계면상이 좋지 않은 것을 알 수 있다. “D”의 30phr의 경우 0.06, “E”의 30phr 경우는 0.045의 변화를 나타냈다.

Fig. 11에 계면상 모델 “D”와 “E”에 대한 섬유 함유량별 DR 변화를 나타냈다. 두경우 모두 기지 보다 낮은 값을 보였고, 온도가 증가할수록 감소 경향을 보였다. 또한 계면상이 우수한 “E”의 경우 “D”의 경우에 비해 0.1정도 더 낮게 나타났다. 따라서 진폭 의존성이나 주파수 의존성과 유사하게 단섬유 강화고무는 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상의 고주파 영역에서 진동절연에 효과적이라 할 수 있다.

Fig. 12는 주파수 증가에 따른 섬유 함유량 20phr일 때, 각 계면상 모델에 대한 LF와 DR의 변화를 나타냈다.

5. 결론

Nylon66 단섬유 강화 CR의 동적특성에 대한 실험적 연구에서 계면상 조건과 섬유 함유량이 중요한 인자임을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모든 시험 조건에서 진폭 변형을 증가에 따라 LF는 1.33% 이상에서 약간 증가하였고, DR은 모두 크게 감소하였다. 주파수 증가에 따라 LF는 50Hz 이후 크게 감소하였고, DR은 기지보다 낮은 값을 보였다. 온도 증가에 따라 LF는 “D” “E” 모두 65°C에서 최대 값을 나타내고 이후 크게 감소세를 보였고, DR은 두경우 모두 기지 보다 낮은 값을 보였다. 일반적으로 동일한 시험 조건에서 LF와 DR은 계면상이 우수할 수록 작은 값을 보였다.

- (2) 동적특성을 나타내는 항목들이 섬유 함유량과 계면상 조건에 따라 큰 차이를 보였다. 따라서 사용조건(진폭, 주파수, 온도)에 맞추어 계면상과 섬유 함유량을 제어한다면 원하는 손실계수와 동배율 값을 얻을 수 있다고 본다.

모든 실험결과를 종합해 보면, 주파수 변화가 진폭이나 온도에 비해 큰 동적특성 변화(LF 최대 0.025, DR 최대 0.35)를 보였다. 동일한 조건에서 손실계수는 계면상에 의한 변화(0.01~0.025)가, 동배율은 섬유함유량에 의한 변화(0.18~0.35)가 큰 영향을 미쳤다.

- (3) 손실계수와 동배율의 관계로부터 자동차나 산업장비 등의 엔진마운트 러버나 bush류, stopper 등에 단섬유 강화 고무를 적용한다면 진동절연 측면뿐만 아니라 높은 강성에 의한 내구적인 측면에서도 효과적인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원(KRF-2002-041-D00007)의 연구비 및 BK21의 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) 윤정식, “고무의 방진, 제진 및 완충 특성,” 고무학회지, Vol. 31, No. 4, 1996, pp. 281-290.
- 2) Goettler L.A., *Hand Book of Elastomers*, Dekker., Inc., 1988, pp. 216-229.
- 3) 류상렬, 이동주, “계면상 조건과 단섬유 함유량이 강화고무의 동적특성에 미치는 영향,” 한국복합재료학회지, Vol. 13, No. 3, 2000, pp. 30-37.
- 4) 최재운, “고무의 동적성질과 시험방법,” 고무학회지, Vol. 18, No. 3, 1983, pp. 105-106.
- 5) Sharma M.G., *Vibration and Acoustic Measurement Hand Book*, Spartan Books, 1974, pp. 207-214.
- 6) 류상렬, 이동주, “계면상 조건이 단섬유 강화고무의 기계적 성질에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집(A), Vol. 24, No. 3, 2000, pp. 625-633.
- 7) Kim J.H., Kim K.S., “자동차 진동 소음 저감을 위한 방진고무의 응용(1),” 자동차공학회지, Vol. 7, No. 4, 1985, pp. 41-42.