

탄소섬유직물/페놀 복합재료의 압축 특성

박동창*, 김성수*, 김병철*, 이대길**

Compressive Characteristics of Carbon Fabric-Phenol Composites

Dong Chang Park*, Seong Su Kim*, Byung Chul Kim*, Dai Gil Lee**

Abstract

In this work, the carbon fabric reinforced phenolic composite is applied for heavy-duty journal bearings. The through thickness compressive strength (TTCS), which is one of the most important characteristics for the bearing material, is measured and analyzed with respect to the stacking sequence and composite thickness. Also, the coefficient of thermal expansion (CTE) and thermal conductivity of the composite in the thickness direction were measured with respect to stacking sequence.

Key Words: through thickness, compressive strength, carbon, rayon, phenol, composites, bearing

1. 서 론

탄소섬유직물 강화 페놀 복합재료는 페놀수지의 우수한 내열특성과 탄소섬유의 자체 윤활특성의 장점 때문에, 높은 면압이 작용되는 무윤활 베어링에 사용될 수 있다. 따라서 최근에는 선박용 저널베어링 [1]과 군 계도차량용 구면베어링 등과 같이 기존의 금속 베어링 사용시에 문제점이 노출되었던 부분에 사용이 확대되고 있는 추세이다. 이와 같이 탄소/페놀 복합재료를 heavy-duty 베어링에 적용하고자 하는 필요성이 대두되고 있으나, 탄소/페놀 복합재료 베어링 설계에 필요한 기계적인 물성 데이터는 국내외에 매우 부족한 실정이다. 특히 특수목적 복합재료 베어링용 소재로 많이 사용되는 탄소섬유직물 강화 페놀 복합재료의 두께방향 물성 데이터는 더욱 부족한 상태이다.

Zhang [2]은 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료의 두께방향 압축강도가 시편의 폭에 따라 171 MPa ~ 194 MPa 범위 내의 값을 가지며, [0/90]_n으로 적층한 평판의 경우에는 두께방향 압축강도가 1,000 MPa로 증대되는 것을 관찰하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 시편과 압축시험 치구 사이의 마찰계수에 따라 층간 전단응력이 크게 달라짐을 보이고, 이 것이 시편의 압축강도에 큰 영향을 미치는 것을 밝혔으나, 섬유직물강화 복합재료에 대한 연구는 수행하지 않았다. Laramee [3]는 탄소섬유직물/페놀 복합재료의 두께방향 압축강도가 0 °C에서 500 MPa 정도임을 밝혔으나, 적층각도는 언급하지 않았다. Sims [4]는 적층각도는 명시하지 않고, 유리섬유직물/에폭시 복합재료의 두께방향 압축강도가 509±22 MPa 라고 하였다. Goeke [5]는 유리섬유강화 폴리에스테르, 탄소섬유와 케블라섬유의 하이브리드 강화 폴리에스테르, 그리고 직교 적층된 일방향 유리섬유/에폭시 복합재료의 두께방향 압축강도에 영향을 미치는 몇 가지 인자에 대하여 실험적으로 연구하였다. 그는 시편의 두께가 일정할 때, 시편의

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

폭이 달라져도 두께방향 압축강성과 강도가 달라지지 않는다고 하였다. 또한 케블라섬유직물/폴리에스테르 복합재료의 경우에 두께방향으로 강화된 (Stitched) 복합재료의 두께방향 강성은 강화되지 않은 복합재료와 비슷하나, 두께방향 압축강도는 강화되지 않은 시편의 압축강도보다 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 Goeke [5]도 섬유직물 강화 복합재료에서 적층각을 달리하였을 때 압축특성이 달라지는 것에 대한 연구는 수행하지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 두께방향 압축강도는 탄소섬유직물/페놀 복합재료를 베어링에 사용함에 있어 중요한 특성 중의 하나이나 이에 대한 연구는 충분히 이루어져 있지 않은 것으로 조사되었다. 특히 PAN계 탄소섬유 복합재료와 비슷한 내마모 특성을 보유하고 있고, 평면내 열팽창계수와 두께방향 열팽창 계수의 차이가 작아서 금속/복합재료 하이브리드 베어링 제작에 용이한 장점이 있으나, 압축강도가 상대적으로 낮은 레이온계 탄소/페놀 복합재료의 두께방향 압축특성에 대한 연구가 매우 필요한 실정이다. 탄소섬유직물/페놀 복합재료의 적층각등의 변화에 의하여 압축강도를 향상시키는 것은 이 재료를 베어링 재료에 사용하는데 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 탄소섬유직물/페놀 복합재료의 적층각에 따른 압축강도 변화를 정량적으로 평가하여 탄소/페놀 복합재료 베어링 설계에 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 레이온계 탄소섬유직물강화 페놀 복합재료로서, 직조형태는 Twill Weave 구조이다. 두께방향 압축시편 제작을 위해 상기한 재료를 각각 56 플라이를 적층하였으며, Autoclave에서의 경화온도와 압력은 각각 155 °C, 6.2 기압으로 설정하였다. 경화된 적층판은 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 직육면체 형태의 시편으로 가공하였다. 시편 가공시에는 절삭면에 발생할 수 있는 균열을 최소화하기 위하여 다이아몬드 휠 커터에 의한 1회 절삭깊이가 최대 0.5 mm를 초과하지 않도록 하였으며 충분한 냉각수 공급이 이루어지도록 하였다. 기본 시편의 크기는 ASTM D695에 준하여, 가로와 세로는 각

각 12 mm, 두께는 24 mm로 정하였다. 시편 제작에 사용된 재료별 적층각도와 약어는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Stacking sequences and designations

Material	Stacking sequences	Designations
Rayon	[0] ₅₆	RZ
Carbon/Phenol	[-45/0/45/90/45/0/-45] ₈	RB

가공된 시편은 Fig.1에 나타낸 바와 같은 시험치구위에 올려놓고 가압하여 두께방향 압축강성 및 압축강도를 측정하였다. 본 연구에 사용된 시험치구는 BS2728에 준하여 설계하였으며, 칼라 (Collar)와 강철구 사이에는 그리스를 도포하여 원활한 회전운동을 유발시켜서, 시편에는 압축하중만이 전달될 수 있도록 하였다. 시험기의 압축 속도는 ASTM D695에 따라 1.3 mm/min으로 설정하였다.

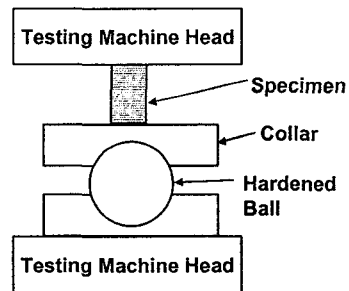


Fig.1 Test fixture for compressive tests

3. 실험결과

3.1 마찰계수의 영향

재료 종류 및 적층각에 따른 탄소/페놀 복합재료의 압축특성을 측정하기 이전에, 시편과 칼라 사이의 마찰계수가 압축 강도에 미치는 영향을 살펴보기 위한 시험을 수행하였다. 시험에는 레이온계 탄소섬유직물/페놀 프리프레그를 [0]₅₆와 [-45/0/45/90/45/0/-45]₈으로 적층하여 가공한 시편, 즉 RZ와 RB 시편을 사용하였으며, 마찰계수의 변화를 위하여 시편과 칼라 사이에 그리스를 도포하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 시

험을 수행하였다. 두 경우의 압축강도를 평균±3x표준편차의 형태로 나타내면, 그리스를 적용하지 않은 경우의 압축강도가 RZ는 249±96, RB는 321±57, 그리스를 적용한 경우의 값이 RZ는 258±71, RB는 329±72 이었다. 그리스를 적용한 경우의 압축강도가 그렇지 않은 경우에 비해 근소하게 큰 것으로 나타났으나, 그 차이가 표준편차의 1/3 수준으로 작으므로, 탄소섬유직물/페놀 복합재료의 경우에는 칼라와 시편사이의 마찰계수가 압축강도에 크게 영향을 미치는 요소가 아님을 알 수 있었다. 그러나 실제 베어링에서 탄소/페놀 복합재료의 압축조건이 윤활조건에 가깝고, 그리스를 도포하는 것이 압축시험 시에 시편을 장착하기에 편리하므로, 본 연구에서는 모든 시험의 경우에 시편과 칼라 사이에 그리스를 적용하였다.

3.2 Rayon계 탄소/페놀 복합재료의 압축특성

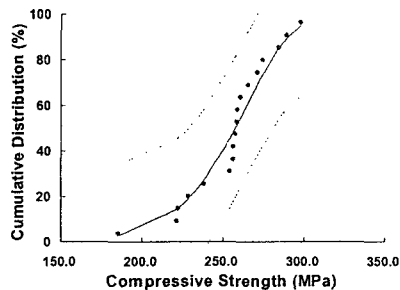
적층각도를 달리한 두가지 시편, 즉 RZ와 RB의 두께방향 압축강도에 대한 시험결과와 적합성검정결과를 Fig.2에 나타내었다. 유의수준을 5%로 설정한 Kolmogorov-Smirnov Test에 의한 적합성검정결과에 의하면, 압축강도의 시험결과는 Weibull 분포를 따르는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 적층각에 따른 압축강도의 크기를 상대적으로 비교하기 위하여 신뢰도 평가기법을 활용하였다. 시험결과가 Weibull 분포를 따르는 것으로 판명되었으므로, 확률밀도함수는 아래 식(1)과 같이 나타내진다. 따라서 RZ의 압축강도를 t , RB의 압축강도를 S 로 나타냈었을 때, "RB의 압축강도가 RZ의 압축강도보다 크다."라는 판단에 대한 신뢰도, R 은 아래 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta} e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\beta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

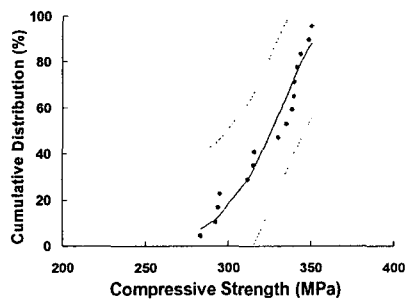
$$R = 1 - \int_0^{\infty} f_t(t) \left[\int_0^t f_s(S) dS \right] dt \quad (2)$$

위와 같은 방법으로 구한 Weibull 분포의 매개변수와 신뢰도 평가기법에 의한 적층각에 따른 압축강도의 비교결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 압축강도의 평균과 표준편차는 Weibull 분포의 매개변수를 이용하여 구하였다. 위와 같은 Weibull 분포를 이용한 신뢰도평가기

법 활용을 통하여, "RB의 두께방향 압축강도가 RZ의 압축강도에 비해 크다"라는 판단에 대한 신뢰도는 약 96%임을 알 수 있었다.



(a) RZ



(b) RB

Fig. 2 Compressive characteristics of rayon based carbon fabric-phenol composites

Table 1 Parameters of Weibull distribution and reliability analysis

Lay-up	RZ	RB
Mean, μ	254.1	323.0
Standard deviation, σ	30.58	25.16
Scale parameter, θ	267.1	334.0
Shape parameter, β	9.99	15.77
Reliability analysis of comparison	RZ < RB 96.1%	

3.3 적층각에 따른 압축강도 차이발생 원인분석

압축시험후에 파손된 시편의 형상을 보이면서 아래 Fig. 3과 같으며, 수평분리 (horizontal splitting)와 경사분리 (angular splitting)에 의해

파단이 이루어졌음을 볼 수 있다.

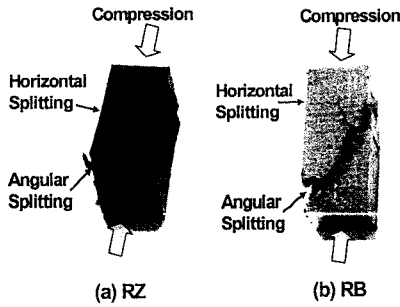
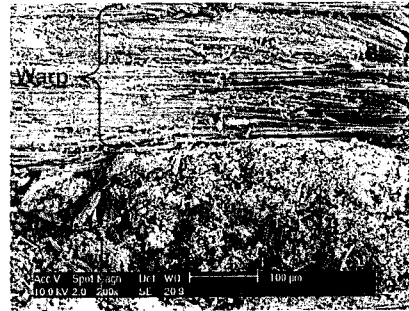


Fig. 3 Failed specimen after compression tests

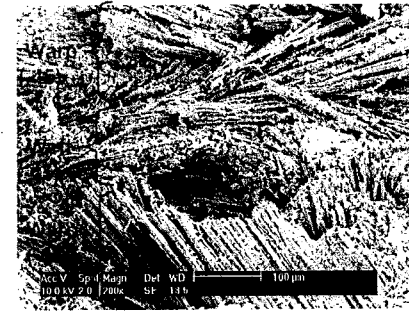
파단면을 주사전자현미경 (SEM)으로 관찰해 본 결과, 수평분리는 섬유파단을 포함하지 않는 층간분리에 의한 것이며, 경사분리는 섬유파단을 동반함을 알 수 있었다. 또한, 경사분리면을 관찰해 본 결과, Fig. 4 에서와 같이 RZ 적층판에서는 날실 (warp) 에서는 수지파괴면이 발생하고 섬유는 손상되지 않았으며 씨실 (weft)에서만 섬유들만이 파단된 반면에, RB 적층판에서는 날실과 씨실 모두에서 섬유의 파단이 발생하고 층간에서 발생한 균열의 진전이 섬유로 인해 방해받아서 균열진전의 우회 발생을 볼 수 있다. 이러한 이유로 Fig.3에서 볼 수 있는 바와 같이 RB 적층판의 균열경로길이 (crack path length)가 RZ 보다 길게 되고, 그 결과로 적층각에 따른 두께방향 압축강도의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구의 실험결과에 의하면, 레이온계 탄소 섬유 직물/페놀 복합재료의 경우에 적층각도를 $[0]_{56}$ 에서 $[-45/0/45/90/45/0/-45]_8$ 으로 변화시키는 것만으로, 두께방향 압축강도를 평균 30% 가량 증대시킬 수 있었으며, 신뢰도 분석결과에 의하면 $[-45/0/45/90/45/0/-45]_8$ 적층판의 압축강도가 $[0]_{56}$ 보다 크다는 사실에 대한 신뢰도는 약 96% 인 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 탄소 섬유 직물/페놀 복합재료를 이용한 베어링 설계에 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) RZ



(b) RB

Fig. 4 SEM photos of failed specimen

참고문헌

- 1) Seong Su Kim, Dai Gil Lee, Dong Chang Park, "Characteristics of Carbon Fiber Phenolic Composite for Journal Bearing Materials," 12th ICCS, Melbourne, Australia, 2003.
- 2) Zhang, C. etc., "Through-the-thickness compressive strengths of graphite/ epoxy laminated composites," Science and engineering of composite materials, Vol.9 no.4, 2000.
- 3) Laramee etc. al, *Engineered Materials Handbook: Composites*, p.389, ASM, 1987.
- 4) G.D. Sims and W.R. Broughton. *Comprehensive composite materials*, Vol.2, p.179, Elsevier Science Ltd., 2000.
- 5) Goeke, E. C., "Compression of Thick Composites: Two Test Methods," *Composite Materials: Testing and Design*, Vol. 11, ASTM STP 1206, ASTM, pp. 90-102, 1993.