

論文

고분자 필름 제조 공정용 복합재료 롤러의 개발

방경근* · 이대길**

Development of Composite Rollers for Polymer Film Processing

Kyung Geun Bang* and Dai Gil Lee**

ABSTRACT

The pressing roller was designed and manufactured with high modulus carbon fiber composite material to exploit the high specific stiffness of the composite material. The optimal stacking sequence for the pressing roller was obtained from the FE analysis and the shape of the rubber coating layer was determined based on the calculated deflection for the uniform pressure on the film along the axial length of the pressing roller. Then the static deflection of the manufactured composite pressing roller was experimentally evaluated in comparison with analysis result and dynamic characteristics were measured through vibrational test.

초 록

고강성 카본 섬유 복합재료의 높은 비강성을 이용하여 가압 롤러를 설계·제작하였다. 롤러 제작을 위한 최적의 적층 순서는 유한요소해석을 통해 얻어졌으며, 고무코팅층의 형상은 롤러의 축 길이를 따라 필름에 가해지는 균일 압력에 대해 계산되어진 변형에 근거하여 결정하였다. 제작된 가압 롤러의 정적 변형을 해석결과와 실험적으로 비교하였으며, 그것의 동적 특성은 진동 시험을 통하여 측정하였다.

1. 서 론

필름, 직물, 알루미늄 호일 등과 같이 연속생산 공정을 통하여 생산되는 제품은 일반적으로 여러 개의 롤러에 의해 안내되어 압착롤러에 의해 압착을 받으며 보빈에 감겨지게 된다. 절연이나 기록·재생용 등으로 사용되는 폴리에스터 필름은 두께가 약 2.2 μm ~10 μm 이기 때문에 필름의 운송도중 외란 발생 시나 필름의 출발, 제동 시에 롤러의 관성에 의해서 필름에 굽힘, 영구 변형, 구겨짐 등의 손상이 발생할 수 있다. 따라서, 고속으로 이동하는 연속 생산 공정에서는 롤러의 관성력이 중요하므로 롤러의 동적 특성이 설계에 고려

되어야 한다. 또한, 보빈에 감겨지는 필름의 두께 및 구겨짐은 필름에 가해지는 압착력에 의해 결정되므로 압착 롤러에 의해 필름에 가해지는 압력 분포가 일정하도록 설계되어야 한다. 압착 롤러는 앞의 두가지 조건을 만족시키기 위해 낮은 회전 관성과 높은 굽힘 강성이 요구된다.

롤러의 구동특성을 향상시키기 위한 여러 가지 해석 및 실험이 수행되어져 왔다. Bang은 복합재료 가이드 롤러를 설계 및 제작하였으며, 실험을 통하여 성능을 평가하였다[1]. Conroy는 시멘트 공업에 사용되는 롤러프레스의 설계기법에 관하여 연구하였다[2]. Yang은 회전하는 임의의 비대칭 롤러에 감겨지는 실의 정상상

*한국과학기술원 기계공학과 대학원

**한국과학기술원 기계공학과, 교신저자(E-mail: dglee@kaist.ac.kr)

태 거동에 대한 운동 방정식을 유도하였으며, 다양한 경계조건 및 초기조건에 대하여 방정식의 해를 구하였다[3]. Good는 웹(Web)에 감겨진 롤의 내부응력을 계산하기 위한 모델 및 경계조건을 제시하였으며, 실험을 통하여 이를 검증하였다[4]. Senk는 압연공정에 사용되는 한쌍의 롤러 설계를 위한 이론적 모델과 실용적 모델을 제시하였으며, 제시된 모델을 사용하여 공정을 시뮬레이션하였다[5]. Lee는 스펀들 시스템의 동적 및 열적 안정성을 강화하기 위하여 탄소섬유 복합재료를 사용한 스펀들 시스템을 개발하였다[6]. 그러나, 얇은 폴리머 필름 생산 공정을 위한 대형 복합재료 압착 롤러에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 위에서 언급된 롤러의 두가지 요구조건을 만족시키기 위하여, 비강성 및 진동 감쇠 성능이 우수한 고강성의 탄소섬유 복합재료를 이용하여 압착 롤러를 설계 및 제작하였다. 탄소섬유 복합재료는 롤러 축에서 발생하는 외란에 의한 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있기 때문에 매우 두께가 얇고 정밀한 필름의 제조공정에 사용되는 롤러의 소재로 매우 적합하다. 압착 롤러의 최적 적층 각도 및 적층 순서와 압착 롤러 위에 코팅되는 고무의 형상은 유한요소 해석을 통하여 결정되었으며, 특히 고무의 형상은 보빈위에 적층되는 필름과 고무 코팅 층사이의 압력이 일정하게 분포되도록 결정되었다. 제작된 압착 롤러의 성능은 굽힘 실험 및 진동 실험을 통하여 평가되었다.

2. 굽힘하중을 받는 복합재료 축의 해석

복합재료 압착 롤러는 증공의 복합재료 축과 복합재료 축위의 고무 코팅 층, 그리고 베어링 장착을 위한 두 개의 강철 슬리브로 구성되어 있다. 본 연구에서 복합재료 압착 롤러는 Table 1의 설계기준을 따라 설계되었으며, 고무 코팅 층의 형상은 설계된 복합재료 축의 굽힘 강성을 고려하여 결정되었다.

Table. 1 Specification of the pressing roller

Length (mm)	2550
Outer diameter (mm)	140
Load (N/m)	2000
Max. deflection (mm)	0.65

복합재료 축의 최적설계를 위한 유한요소 해석에는

상용소프트웨어인 ABAQUS를 사용하였으며, 복합재료 축은 3차원 요소인 c3d8r과 c3d6r 요소를 사용하여 Fig. 1과 같이 전체 복합재료 축의 1/4만이 모델링되었다. Fig. 1에서 잘려진 복합재료 단면은 대칭경계조건을 적용하였으며, 베어링이 장착되는 강철 슬리브부분은 반경방향 변위를 구속하였다.

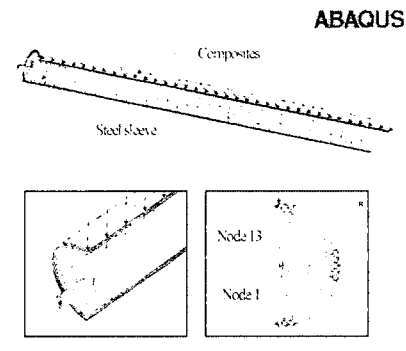


Fig. 1 FEM models for the composite shaft.

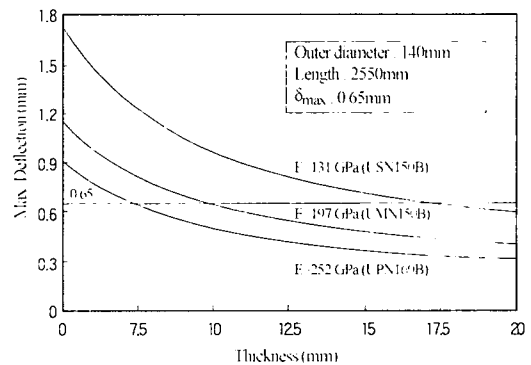


Fig. 2 Maximum deflection w. r. t. composite shaft thickness and prepreg type.

Fig. 2는 축의 두께 및 축방향 강성에 따른 최대 처짐량을 나타낸다. Fig. 2에서 131 GPa, 197 GPa, 252 GPa의 영률은 각각 (주) SKC에서 제작된 USN150B, UMN150B, UPN160B 프리프레그를 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 축의 두께 및 축방향 강성에 따른 회전관성 및 1차 굽힘 고유진동수를 나타낸다. Fig. 2에서 최대 처짐량이 0.65 mm가 되는 세가지 다른 프리프레그로 만들어진 복합재료 축의 두께는 각각 17.58 mm,

9.88 mm, 7.3 mm이며, 각각의 두께에 해당하는 복합 재료 축의 회전관성 및 재료비는 Table 2와 같다. Table 2에서 UMN150B로 제작된 복합재료 축의 회전 관성이 UPN160B의 회전관성에 근사하면서 재료비는 UPN160B에 비하여 훨씬 낮은 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 복합재료 축의 소재로 UMN150B 프리프레그를 선택하였으며, 복합재료 축의 두께는 10 mm로 결정되었다. 외경과 두께가 결정된 복합재료 축의 적층각도 및 적층순서는 유한요소 해석을 통하여 결정되었으며, 복합재료 축 외부의 고무 코팅 층에 의하여 복합재료 축에 가해지는 압력은 Fig. 5와 같이 원 주방향으로 코사인형상으로 분포하며, 축방향으로의 압력분포는 일정하다고 가정하였다. Fig. 6은 복합재료 축의 적층순서가 $[\pm\theta]_n$ 일 때, 적층각도에 따른 최대 처짐이 발생하는 Fig. 1의 1번 node의 최대처짐량과 복합재료 축 단면의 찌그러짐을 나타내는 Fig. 1의 1번 node와 13번 node 사이의 처짐량의 차이값 즉 상대 최대처짐량을 나타내고 있다.

Table 2 Material cost and rotational inertia w. r. t. prepreg type

	Thickness (mm)	Relative material cost	Rotational inertia (kgm ²)
USN150B	17.58	1.0	0.1028
UMN150B	9.88	1.43	0.0684
UPN160B	7.3	2.23	0.0535

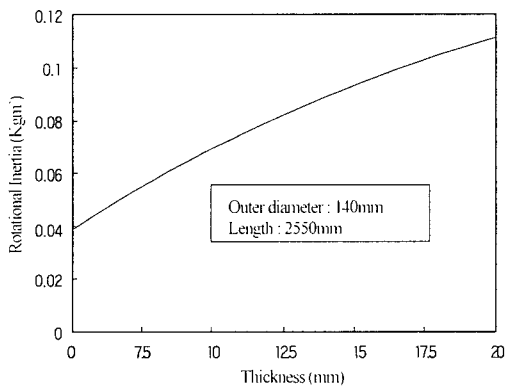


Fig. 3 Rotational inertia w. r. t. roller thickness.

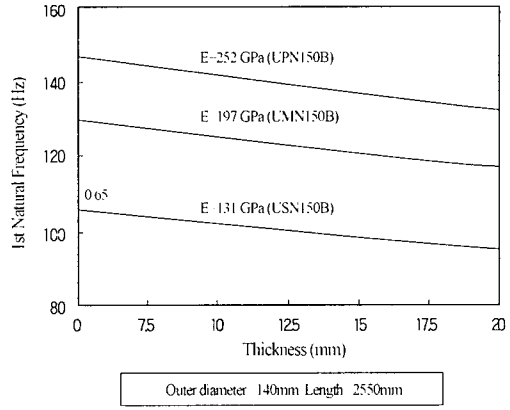


Fig. 4 1st bending natural frequency with simply supported ends w. r. t. composite shaft thickness and prepreg type.

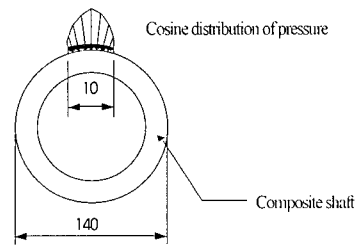


Fig. 5 Cosine pressure distribution on the composite shaft exerted by the rubber coating layer.

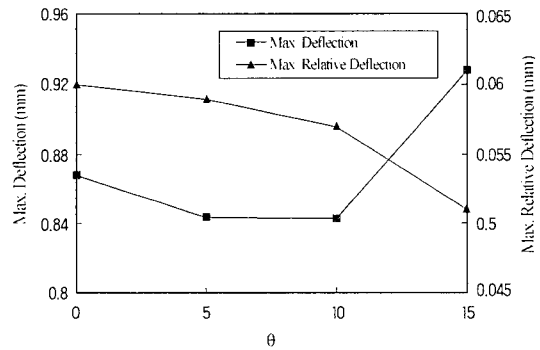


Fig. 6 Maximum deflection and maximum relative deflection w. r. t. stacking sequence type of $[\pm\theta]_n$ when the thickness of the composite shaft was 10mm.

Fig. 6에서 적층각도 5°와 10°의 축방향 강성은 적층각도 0°보다 낮지만, 반경방향 강성은 높기 때문에 결과적으로 적층각도 5°와 10°의 최대 처짐량이 적층각도 0°보다 작게 나타난다. 따라서, Fig. 6으로부터 복합재료 축의 처짐이 굽힘과 축단면의 반경방향 찌그러짐에 의해 발생하므로 최대처짐이 발생하는 1번 node의 처짐량을 줄이기 위해서는 복합재료 축의 반경방향 강성을 강화해야한다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 주적층각이 $[0]_{nr}$ 인 복합재료 축에 $[\pm\theta]_{nr}$ 의 보조적층각을 Fig. 7의 6가지 적층 순서에 따라 적층하였을 경우에 대한 최대 처짐량을 구하여 복합재료 축의 최적 적층각도 및 적층순서를 결정하였다. 먼저, 최적 적층순서를 결정하기 위하여 주적층각의 두께를 9 mm, 보조 적층각의 두께를 1 mm로 고정시킨 뒤 해석을 수행하였다. 주적층각이 0°일 때, 보조적층각과 적층순서 변화에 따른 최대 처짐량과 상대 최대처짐량은 Fig. 8과 같다.

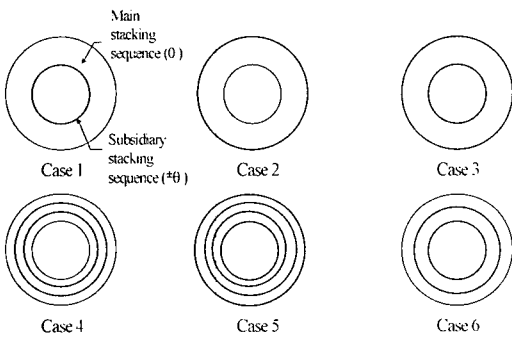


Fig. 7 Stacking patterns used in the evaluation of the composite shaft.

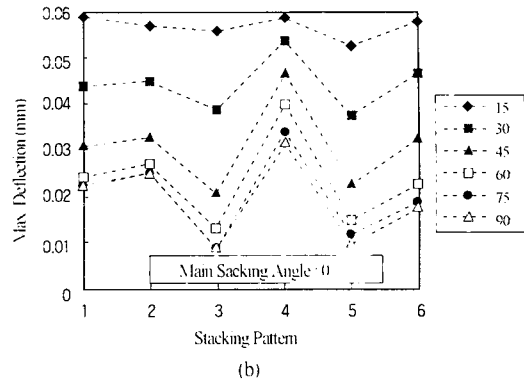
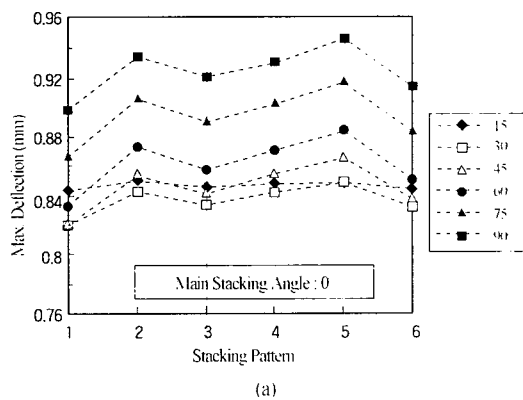
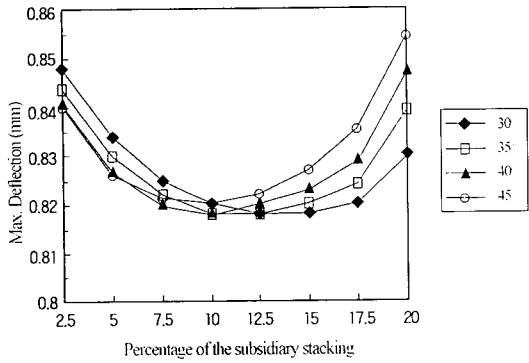
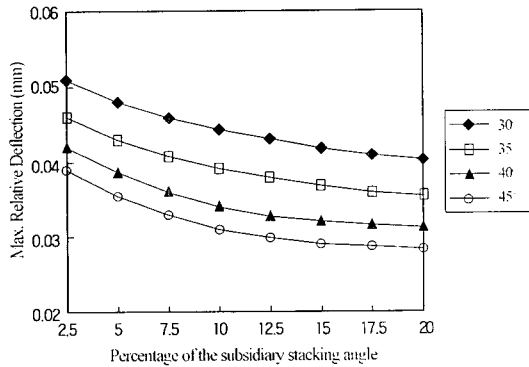


Fig. 8 Maximum deflection and maximum relative deflection w. r. t. stacking pattern and stacking sequence of the subsidiary stacking.; a)maximum deflection, b)maximum relative deflection(radial distortion).

Fig. 8 (a)에서 보조적층각이 복합재료 축의 내부에 위치하는 경우가 보조적층각이 복합재료 축의 외부에 위치하는 경우보다 최대처짐량이 작으므로, 보조적층각이 복합재료 축의 내부에서 외부로 이동하여 배치될 수록 복합재료 축의 전체적인 굽힘 강성이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8 (b)에서 상대 최대처짐량 즉 반경방향 강성은 보조 적층각의 적층순서에 무관하고 보조적층각도의 증가에 따라 증가하며, 보조적층각이 15°일 때는 반경방향강성이 매우 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 8 (a)로부터 복합재료 축의 강성이 최대가 되는 적층각도 및 적층순서는 적층각이 30° ~ 45°이고 적층순서가 Fig. 7의 1번 형태일때인 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 주적층각 0°와 보조적층각의 적층비율에 따른 강성변화를 알아보기 위해서 보조적층각을 30°에서 45°까지 5°씩 변화시키면서 보조적층각의 적층비율변화에 대한 최대처짐량을 유한요소해석을 통하여 계산하였으며, 해석결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 복합재료 축의 최대처짐량은 보조적층각의 적층비율이 10% ~ 15%일 때에 최소가 된다. 따라서, 본 연구에서는 복합재료 축의 강성을 최대로 하기 위한 적층비율 및 적층순서를 각각 10% ~ 15%, Fig. 7의 1번 형태로 선정하였으며, 보조적층각은 복합재료 경화후 맨드릴의 제거를 쉽게 하기위해서 45°로 결정하였다.



(a)



(b)

Fig. 9 Maximum deflection and maximum relative deflection w. r. t. subsidiary stacking angle and its thickness when the stacking pattern was the case 1 of Fig. 7 and the main stacking angle was 0°. ; (a) maximum deflection, (b) maximum relative deflection (radial distortion).

3. 복합재료 축의 설계 및 제작

일반적으로 증공형 복합재료 축의 제조에는 강철맨드렐이 사용된다. 그러나, 복합재료의 적층각도가 축방향에 대하여 0°에 가깝고 축의 두께와 길이가 각각 10 mm, 2550 mm인 대형 복합재료 축의 경우에는 강철과 복합재료의 반경방향 열팽창계수의 차이로 인해 복합재료 제조 후에 강철 맨드렐 제거를 위한 큰 힘이 요구될뿐만 아니라 강철 맨드렐 제거시에 복합재료 축이 손상을 입을 가능성이 높다. 따라서, 본 연구에서는 복합재료 축에 손상을 미치지않고 강철맨드렐을 쉽게

제거하기 위해서 강철보다 반경방향 열팽창계수가 작은 적층각도가 ±45°인 프리프레그를 3 mm 적층하여 경화시킨후 강철맨드렐을 제거하여 복합재료 맨드렐을 제작하였으며, 제작된 3 mm 두께의 복합재료 축 위에 복합재료 해석에서 결정된 적층순서에 따라 0° 프리프레그를 9mm 적층하여 압착롤러용 복합재료 축을 제작하였다. ±45°의 복합재료 맨드렐은 제조단가를 낮추기 위하여 USN150B를 사용하여 제작하였다. 복합재료 맨드렐을 사용하여 결과적으로 복합재료 축의 전체 두께가 10mm에서 12mm로 증가하였으며, 회전관성과 굽힘강성은 각각 14.9 %, 6.2 % 증가하였다. Table 3은 제작된 복합재료 축의 설계치수를 나타낸다.

Table. 3 Specification of the composite shaft

Length	2550 mm
Outer diameter	140 mm
Thickness	12 mm
Stacking sequence	[(USN150B)H5 ₂₀ /(UMN150B)O ₆₀] ₁

4. 고무코팅층의 해석 및 설계

복합재료 축의 외부에 장착되는 고무코팅층의 형상은 압착롤러가 보빈 위에 감겨지는 필름을 압착할 때, 필름에 일정한 압력이 가해지도록 결정되어야한다. 본 연구에서는 Fig. 10과 같은 유한요소 모델을 이용한 유한요소 해석을 통하여 복합재료 압착롤러가 보빈 위의 필름을 압착할 때에 복합재료 축의 처짐량(figure 11)

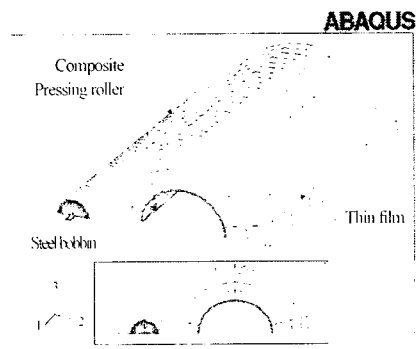


Fig. 10 Modeling for FEM contact analysis of the composite pressing roller and the film stacked bobbin.

을 구한 후, 고무코팅 층을 복합재료 축의 처짐량에 따른 포물선 형상으로 보정하였다. Fig. 12는 포물선 중앙의 높이 (h)에 따른 고무코팅 층과 보빈위에 감겨진 필름간의 압력분포를 나타낸다. Fig. 12에서 포물선 중앙의 높이가 0.8 mm일때에 고무코팅 층과 필름간의 압력분포가 균일한 것을 알 수 있다.

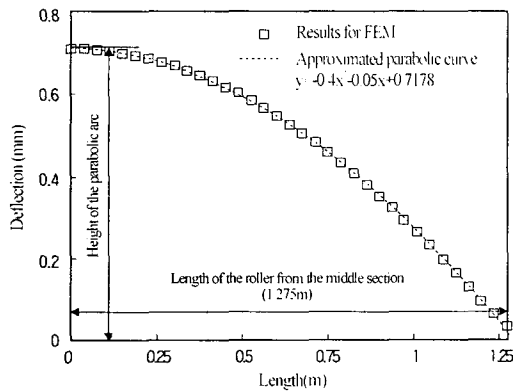


Fig. 11 Maximum deflection curve along the axial length of the composite shaft and its approximated curve.

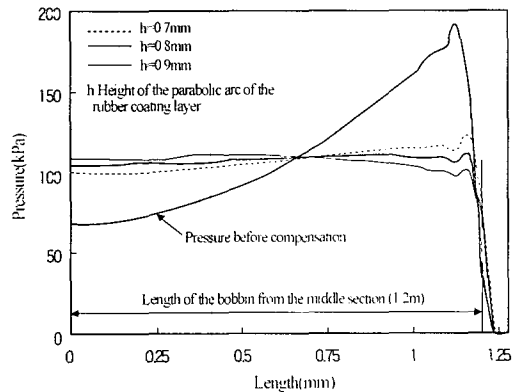


Fig. 12 Pressure distribution of the contact area before after thickness compensation.

5. 복합재료 압착롤러의 성능평가

복합재료 압착롤러의 정적 및 동적 특성 파악을 위하여 삼점굽힘시험과 진동실험을 수행하였다. 삼점굽힘시험에서 196 N의 하중을 복합재료 압착 롤러의 중

앙부위에 가했을 때, 중앙부위의 처짐량을 측정하였다. 시험 결과, 중앙부위의 처짐량은 0.1 mm로 유한요소 해석 결과인 0.103 mm와 매우 근사한 값을 나타내었다. 빔이론[7]을 사용하여 계산된 굽힘강성값은 Table 4와 같다. 복합재료 롤러의 진동특성은 충격망치와 가속도계를 이용한 진동실험을 통하여 측정되었으며, 측정된 신호는 FFT analyzer를 통하여 PC에 저장되었다. 진동 실험을 통하여 측정된 복합재료 압착롤러의 1차고유진동수와 감쇠비는 Table 4와 같다.

Table. 4 Static and dynamic characteristics of the composite pressing roller

Static characteristics flexural rigidity (kNm ²)	Dynamic characteristics	
	1st natural frequency (Hz)	Damping ratio
677.8	92.5	0.0228

6. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 폴리머 필름 생산에 사용되는 복합재료 압착롤러의 설계, 제작 및 성능평가를 수행하였다. 유한요소해석 및 성능평가 실험으로부터 얻어진 결론은 아래와 같다.

1. 분포하중을 받는 원형 복합재료 증공축의 굽힘강성을 높이기 위해서는 원주방향 강성 보강을 위한 보조적층각이 증공축의 내부에 위치해야한다.
2. 복합재료 롤러의 굽힘강성은 주적층각이 0°, 적층비율이 10% ~ 15%이고 보조적층각의 적층각도가 30° ~ 45°일 때, 가장 높은 값을 가진다.
3. 균일한 압력분포를 위한 고무코팅층의 형상은 복합재료 축의 처짐으로부터 포물선으로 가정되었으며, 유한요소 해석을 통하여 자세한 형상이 결정되었다.

참고문헌

(1) Bang, K. G., Choi, J. K., Kim, H. S., Lee, D. G. and Jeon, H. S., "Development of Guide Rollers Using Electroplated Carbon Fiber-Epoxy Composite for Thin Polymer Film Processing," *Composite Structures*, Vol. 38, 1997, pp. 321-328.

- (2) Conroy, G. H., "Progress in Roller Press Design Technology," *Trans. IEEE on Industry Applications*, Vol. 30, 1994, pp. 561-567.
- (3) Yang, R. J., "Steady Motion of a Thread over a Rotating Roller," *J. Applied Mechanics of Trans. ASME*, Vol. 61, 1994, pp. 16-22.
- (4) Good, J. K., Wu, Z. and Fikes, M. W. R., "The Internal-Stresses in Wound Rolls with the Presence of a Nip Roller," *J. Applied Mechanics of Trans. ASME*, Vol. 61, 1994, pp. 182-185.
- (5) Senk, D., Litterscheidt, H., Simon, R. W., Kopp, R. and Rake, H., "Modeling and Simulation for the Double-Roller Strip Casting Process," *Stahl und Eisen*, Vol. 115, 1995, pp. 107-111.
- (6) Lee, D. G., Sin, H. C. and Suh, N. P., "Manufacturing of a Graphite Epoxy composite Spindle for a Machine Tool," *Ann. CIRP*, Vol. 34, 1985, pp. 365-369.
- (7) Crandall, S. H., Dahl, N. C., Lardner, T. J., *An Introduction to the Mechanics of Solids*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., U. S. A., 1978, chap. 8.