

연속 섬유의 펼침에 대한 기술 현황 및 적용

노정우* · 이우일*†

Review : Continuous Fiber Tow Spreading Technologies and Its Applications

Jeong U Roh*, Woo Il Lee*†

ABSTRACT: This paper reviewed the continuous fiber tow spreading technologies and its applications. The effect of the continuous fiber tow spreading in manufacturing process of continuous fiber reinforced thermoplastic composite was introduced theoretically. The fiber tow spreading technologies were categorized according to the spreading medium and its order during manufacturing process. The general principles, the applications, and the merits and demerits of fiber tow spreading technologies were introduced. Furthermore, the proposal for future direction of research on this issue was considered in this study.

초 록: 연속 섬유의 펼침에 대한 기술 현황 및 이의 적용에 대해 본 연구에서 정리되었다. 이론적 접근을 통해 연속 섬유 펼침의 효과를 소개하였고, 섬유 펼침 수단과 섬유 펼침 장치의 공정 상 위치를 기준으로 연속 섬유의 펼침에 대한 기술을 분류 정리하였다. 또한, 각 기술의 일반적인 섬유 펼침 원리, 기술적용 및 기술의 장 단점에 대해 소개하였으며, 향후 연속 섬유의 펼침에 대한 기술 연구 방향에 대해서도 고려되었다.

Key Words: 리뷰 논문(review paper), 연속 섬유(continuous fiber), 섬유 펼침(fiber spreading), 열 가소성 수지(thermoplastic)

1. 서 론

고유가로 인한 산업분야의 고강성 경량화 소재의 수요가 증가함에 따라 연속 섬유 강화 고분자 복합소재에 대한 관심이 증가하고 있다. 열 경화성 수지의 경우, 낮은 점도를 갖기 때문에 중간재 및 완성품의 함침도가 우수하고, 비교적 빠른 함침 속도에 따른 대량생산이 가능하여 기존에 많은 연구와 제품생산이 이루어져 왔다[1,2]. 하지만, 재활용이 어렵고, 수지의 경화 사이클이 길다는 단점을 안고 있었다. 반면, 친 환경에 대한 세계적 관심이 증대되고 세계 시장을 토대로 가격경쟁력 확보가 시급해 짐에 따라 재활용 및 공정시간 단축을 이점으로 한 열 가소성 고분자 복합소재에 관심이 보다 집중되고 있다. 하지만, 열 가소성 수

지의 경우, 용융점도가 매우 높아 함침에 필요한 시간이 증가하여 생산성이 낮아지고, 이로 인한 제품의 가격 경쟁력 손실에 대한 문제점을 고려하지 않을 수 없다.

열 가소성 수지 고분자 복합소재는 단 섬유로 강화된 열 가소성 고분자 복합소재(Short Fiber Thermoplastic, SFT)와 장 섬유로 강화된 열 가소성 고분자 복합소재(Long Fiber Thermoplastic, LFT)를 이용한 제품의 생산이 산업계에서 큰 부분을 이루어 왔다. 하지만, 보다 높은 차원의 고강성, 경량화, 가격 경쟁력 및 친 환경성을 동시에 고려하는 시장의 기호 변화에 따라 연속 섬유 강화 열 가소성 고분자 복합소재 (Continuous fiber reinforced thermoplastic)에 대한 선호도가 증가하고, 이의 제조 공정 효율 향상을 통한 생산성 증대가 주요 관심사로 부각되고 있다.

접수: 2013년 5월 10일, 수정: 2013년 6월 14일, 게재승인: 2013년 6월 15일

*서울대학교 기계항공공학부

*†서울대학교 기계항공공학부, Corresponding author (E-mail: wilee@snu.ac.kr)

하지만, 연속 섬유 강화 열 가소성 고분자 복합소재의 경우, 연속적인 제조 공정 특성 상 공정 속도가 증가됨에 따라 제품의 함침도가 저하될 수 있다. 그러므로 제품의 품질이 일정 기준 이상을 만족하는 범위 내에서 제조 공정 효율 향상을 통한 생산성 증대를 고려해야만 한다.

이를 고려할 때, 제품 생산성 증대 방법으로는 크게 재료적 관점과 기계적 관점으로 접근하여 검토해 볼 수 있다. 재료적 관점에 의거한 방법으로는 수지의 용융점도를 낮추는 방법이 대표적이다. 하지만, 수지의 흐름성을 개선하여 용융지수(Melt Index, MI)가 높은 수지를 사용한 경우, 수지의 용융점도를 낮추어 함침성을 개선할 수 있지만, 수지의 용융지수가 높아짐에 따라 모재의 기계적 물성이 낮아지는 경향이 일반적이다. 그러므로 고강성 제품을 목표로 한 제품 생산측면에서 수지의 점도 개선을 통한 해결책은 이상적이지 못하다.

기계적 관점으로 접근하여 볼 때는 세 가지 변수를 검토할 수 있다. 첫 번째로 압력을 고려해 볼 때, 수지와 섬유 토우에 압력을 가하여 함침이 이루어 질 수 있으나 더 큰 압력을 가하기 위한 공정설비 비용 증가와 섬유의 투과성 계수 저하의 부정적 영향이 증가될 수 있다. 두 번째로는 투과성 계수를 증가시키는 방법으로, 투과성 계수를 증가시키기 위해 텍스(tex)가 낮은 토우를 사용하는 방법과 섬유 펼침 방법이 고려될 수 있다. 하지만, 텍스가 낮은 토우를 사용할 경우, 동일 시간 당 중량 기준 생산성을 저하시키는 단점이 있다. 세 번째로는 함침깊이를 줄일 경우, 함침에 필요한 시간을 줄일 수 있기 때문에 같은 공정 조건에서 보다 나은 함침도를 확보할 수 있다. 이를 위해서는 섬유를 펼침에 따라 함침깊이를 줄일 수 있는 방법이 또한 적용될 수 있다. 섬유 펼침 방법을 통해 함침깊이를 감소시킬 경우, 아래 Darcy의 법칙에 따라 길이의 제공에 비례하여 함침시간을 감소시킬 수 있다[3].

$$t = \frac{\eta s^2}{2K\Delta P} \quad (1)$$

여기서 t 는 함침시간, s 는 함침깊이, η 는 수지의 용융점도, ΔP 는 압력구배, 그리고 K 는 투과성 계수를 나타낸다.

그러므로 본 논문에서는 섬유 펼침의 중요성을 인지하고, 섬유 펼침 효과에 대한 이론적 접근과 함께 연구 및 소개된 섬유 펼침 기술 및 각 기술의 적용과 장단점 그리고 향후 연구 방향에 대해 소개하고자 한다.

2. 섬유 펼침 효과에 대한 이론적 접근

2.1 공정속도 증가에 따른 함침시간감소

별도의 공정 설비 증설 및 개조없이 생산성 향상을 위해 공정 속도를 증가시킬 경우, 함침시간은 감소한다. 함침시간은 섬유가 수지의 함침을 유도하는 개체와의 접촉하는

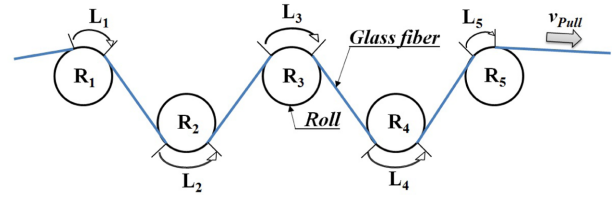


Fig. 1. Schematic of contact length at multi-roll impregnation die.

총 길이와 섬유당침속도를 함께 고려하여 아래 식 (2)와 같이 생각될 수 있다. 용융수지에 직접 섬유를 통과시켜 함침을 유도하는 직접 함침법(Direct melt impregnation method)을 예로 들면, Fig. 1에서 보듯이 섬유가 함침다이(impregnation die) 내에 위치한 롤러와 접촉하는 총 길이를 섬유당침속도로 나눈 것을 함침시간으로 고려할 수 있다.

$$t = \frac{\sum_{x=1}^n L_x}{v_{pull}} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{v_{pull}} \quad (2)$$

여기서 v_{pull} 는 섬유당침속도, L_x 는 각 롤에서 섬유 접촉 길이를 나타낸다.

2.2 섬유 펼침 효과에 대한 이론적 접근

함침시간, 투과성 계수, 압력구배, 그리고 수지의 용융점도를 함께 고려하여 총 함침깊이를 아래 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$s_{total} = \sqrt{\frac{2K\Delta P t}{\eta}} \quad (3)$$

$$D_{imp} = \frac{s_{total}}{h_z(P_a)} \quad (4)$$

$$h_z(P_a) = \frac{A_c}{W} = \frac{NA_f}{WV_f} \quad (5)$$

여기서 s_{total} 는 총 함침깊이, D_{imp} 는 함침도, $h_z(P_a)$ 는 일정 적용 압력(P_a)에서 섬유 토우의 두께, A_c 는 섬유 토우의 단면적, W 는 섬유 토우의 폭, N 는 섬유 토우의 섬유 필라멘트 개수, A_f 는 섬유 필라멘트의 단면적, 그리고 V_f 는 섬유체적 분율을 나타낸다.

공정 속도 증가로 인해 줄어든 함침시간 내에 정해진 설비 규격을 변경없이 사용하는 경우, 함침도를 높이기 위해서는 식 (4)에 보듯이 일정 적용 압력에서 섬유 토우의 두께를 감소시켜야 함침도를 증가시킬 수 있다. 식 (5)에 기술된 바와 같이, 일정 적용압력에서 섬유 토우의 두께는 섬유 토우의 폭에 반비례하여 감소한다[5]. 그러므로 연속 섬유 강화 열 가소성 고분자 복합소재의 고속 성형을 유도하는 방법 중, 연속 섬유 펼침 방법이 공정 속도 증가와 함께

함침도를 향상시킬 수 있는 효과적 방법으로 고려 될 수 있다.

3. 섬유 펼침 기술 및 적용

3.1 다축 롤 구성 함침 다이

3.1.1 섬유 펼침과 수지 함침을 동시에 하는 경우

섬유 펼침을 함침다이에서 수지 함침과 동시에 하는 경우, 다수의 롤로 구성된 함침다이를 이용하여 섬유가 롤을 지나면서 섬유 펼침과 함침이 동시에 되어 같은 생산 조건에서 함침도를 높일 수 있다. 델프트 공과대학(Delft University of Technology)[6]에서는 다수의 기하학적 롤을 이용하여 함침도를 높이고 함침다이 내에서 섬유의 진행경로 안정성을 분석하는 연구를 진행하였으며, Henk Bijsterbosch *et al.* [7]는 실린더 핀과 타원 핀을 조합하고 핀 사이의 간격을 조절함에 따라 함침도를 비교하는 연구를 수행한 바 있다. 위의 연구의 결과를 통해 섬유 펼침에 대한 부분에 대해 주의하여 볼 때, 실린더 핀만을 이용한 경우 보다, 다수의 기하학적 롤의 적절한 조합을 통해 함침다이 내에서 섬유의 펼침을 유도하는 경우, 같은 생산 조건에서 제품의 함침도를 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.1.2 섬유 펼침을 수지 함침 전에 하는 경우

3.1.2.1 건식 섬유 펼침(Multi-rolls dry spreading)

수지 함침 전 단계에서 다수의 기하학적 롤을 이용하여 기계적으로 섬유를 펼쳐 섬유의 폭을 증가시키는 방법이 고려될 수 있다. 이러한 방법에는 기존에 다수의 실린더 핀만을 조합한 경우와 타원 롤, 각진 롤 및 실린더 롤 등의 기하학적 롤을 조합한 경우로 나눌 수 있다.

실린더 핀만을 사용한 경우, 핀 간의 거리 및 높낮이를 변수로 하여 섬유 펼침 효과를 관찰한 연구 사례가 있다[8, 9]. 이에 대한 대표적 연구를 수행한 S.D.R. Wilson[9]은 아래 관계식에 따라 실린더 롤을 지나면서 섬유의 폭이 결정되는 것을 밝힌 바 있다.

$$w = (12AH)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 w 는 섬유의 폭, A 는 섬유 토우의 단면적, 그리고 H

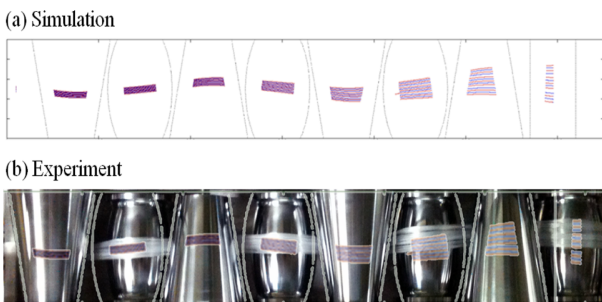


Fig. 2. Multi-roll dry spreading device; (a) fiber trajectory simulation, (b) experiment result [7]

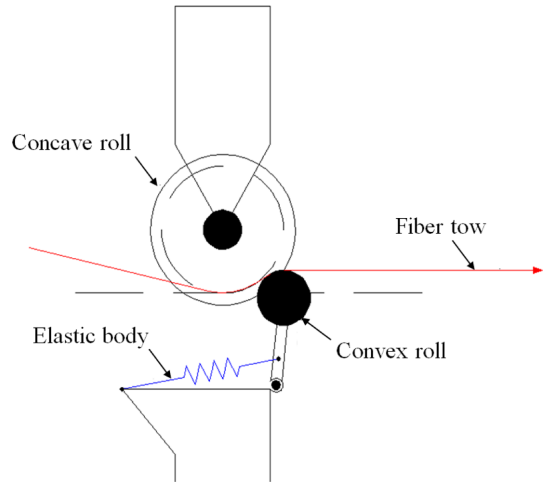


Fig. 3. Schematic of thumb mimicking spreading device [8]

는 핀 간의 높낮이를 나타낸다.

실린더 핀만을 사용한 경우에 비하여 타원 롤, 각진 롤 및 실린더 롤 등의 기하학적 롤을 조합한 경우, 섬유의 펼침을 보다 용이하게 수행할 수 있는데, Fig. 2에서 보듯이 서울대학교에서는 타원 롤과 각진 롤, 및 실린더 롤 등 다수의 기하학적 롤을 조합하여 벡터학적 방법으로 장치 내 섬유의 경로를 해석하고 이를 통해 섬유 펼침 양상을 예측하여 폭 6 mm, 2,400 텍스 유리섬유 토우를 폭 20 mm으로 펼칠 수 있는 장치와 Fig. 3에서 보듯이 오목 롤과 볼록 롤 한 쌍을 조합한 장치를 이용하여 6 mm 폭 2,400 텍스 유리섬유 토우를 12 mm 폭으로 펼칠 수 있는 장치를 개발한 바 있다[10,11].

3.1.2.2 습식 섬유 펼침 (Multi-rolls wet spreading in water tank)

물 탱크 내부에 다수의 기하학적 롤을 이용함과 동시에 초음파, 진동 등의 기타 방법을 추가적으로 이용하여 섬유의 펼침을 보다 원활히 수행할 수도 있다. 일본의 Technomax 社에서는 초음파 발생기를 물 탱크에 설치하여 섬유의 펼침을 효과적으로 수행하였다는 사례를 보고한 바 있다[12,13].

Fig. 4[12]는 Technomax 社가 개발한 섬유 펼침 장치의 개

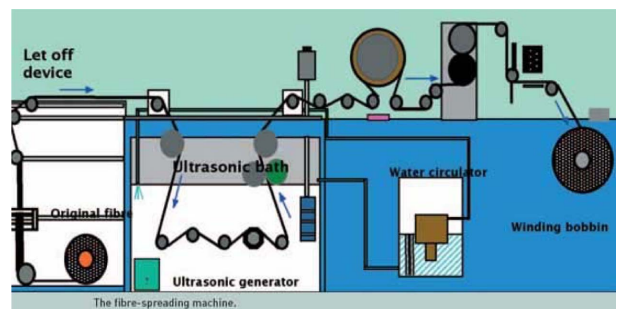


Fig. 4. Schematic of multi-rolls wet spreading device in water tank [12]

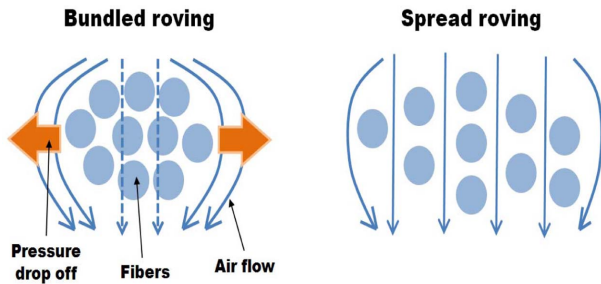


Fig. 5. Schematic of principle of the air flow spreading device.

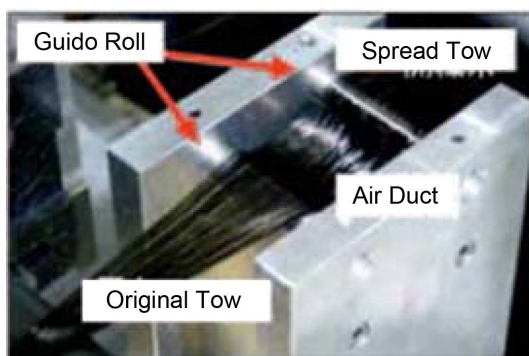


Fig. 6. Air flow spreading of carbon fiber tow [16].

념도를 보여주고 있다.

3.2 공기를 이용한 펼침 방법(Air flow spreading)

공기를 불어 섬유를 펼치는 방법은 현재 산업계에서 두루 적용되고 있는데, 일본에서는 Mitsuya 社, IZUMI 社와 Harmoni Industry 社, 미국에서는 Adherent Technologies 社 등이 본 방법을 사용하여 폭이 넓은 섬유 토우 제조와 공정 효율 향상에 기여하고 있다.

본 방법은 특히 분말 함침법(powder impregnation method)을 이용한 연속 섬유 강화 열 가소성 고분자 복합재료 제조 공정에 있어 분말 챔버로 섬유가 투입되기 전 단계에 섬유의 펼침을 수행하는데 이용되어 왔다. 섬유 펼침을 통해서 수지 분말이 섬유 필라멘트에 효과적으로 고착될 수 있도록 할 수 있기 때문이다[14,15].

본 방법의 섬유 펼침 원리는 Fig. 5[16,17]에서 보듯이 모여 있는 섬유 필라멘트 사이로 공기가 지나가면서 유로 확보를 위해 필라멘트 사이의 간극이 넓어지게 되는 것이다. Fig. 6은 공기를 탄소섬유에 불어 섬유를 연속적으로 펼치는 모습을 보여주고 있다[17].

4. 기술 적용 난점 및 연구방향

섬유의 펼침과 수지의 함침을 동시에 수행하는 경우, 섬유를 당길 때, 섬유와 수지 사이에 발생하는 항력(drag force)

에 의해 섬유에 장력이 발생하게 된다. 섬유 당김 속도가 낮을 경우에는 크게 문제되지 않지만, 섬유 당김 속도를 증가시켜 생산량을 높이려고 할 때, 항력은 섬유 당김 속도에 비례하여 커지게 되므로 고속 성형 시 섬유의 안전성에 문제를 야기할 수 있다. 또한, 함침시간이 줄어 제품의 함침도가 낮아지는 문제가 발생된다. 그러므로 연속 섬유 강화 열가소성 고분자 복합소재의 고속 생산을 유도할 경우, 함침다이 밖에서 섬유 펼침을 통해 항력 발생을 최소화할 수 있다.

함침다이 밖에서 섬유 펼침을 개별적으로 수행하는 경우, 위에 소개된 방법 등을 이용하여 충분한 함침을 위해 필요한 수지와의 접촉시간을 최소화할 수 있기 때문에 섬유와 수지 사이에 발생하는 항력을 감소시킬 수 있으나, 각각의 기술에 따라 섬유 손상 및 섬유 펼침 효율이 균일화되어야 하는 난점을 고려해야 한다.

섬유를 건식으로 펼치는 경우, 다양한 기하학적 물을 조합하여 토우를 효과적으로 펼쳐지도록 설계할 수 있으나, 섬유와 물 표면간의 마찰에 따른 섬유의 손상 문제를 고려하여야 한다. Fig. 3에 소개된 오목 물과 볼록 물 하나씩을 적용한 장치의 경우, 물의 사용을 최소화 하였지만, 섬유에 장력을 사전에 충분히 걸어주어야 하므로 공정 속도가 증가할수록 섬유에 발생하는 장력의 증가로 섬유 안전성에 부정적이다. 습식 섬유 펼침의 경우에는 물을 윤활제로 하여 섬유와 물 표면 사이와 섬유간의 마찰을 줄여 섬유 손상을 줄이고, 섬유 펼침을 효과적으로 수행할 수 있으나, 수지 함침 전에 섬유에 남아있는 수분을 완전히 제거하여야 하므로 추가 공정이 필요하다. 공기를 이용한 섬유 펼침의 경우, 강한 공기 흐름을 적용함에 따라 섬유의 손상이 발생할 수 있다. 또한, 강한 공기 흐름과 함께 손상된 섬유가 공기 중으로 날라가기 때문에 분진에 따른 작업자의 안전 문제 및 기기 고장의 원인이 될 수 있다. 그러므로 섬유 펼침을 수행함에 있어 섬유 펼침의 효율만 고려하기 보다, 섬유의 손상 최소화 및 추가 공정 비용 발생 등을 함께 종합적으로 고려하여 설계하여야 한다.

5. 결 론

연속 섬유 펼침 기술은 연속 섬유 강화 복합소재의 생산성과 제품의 품질 향상을 기대할 수 있도록 하며, 앞으로도 그 발전 가능성이 크다. 섬유의 펼침을 통해 공정 속도 향상과 기계적 물성 향상 등에 있어서 장점을 가질 수 있으며, 특히 연속 섬유 강화 열 가소성 수지 프리프레그 제조와 관련하여 본 기술의 장점을 최대한 이용할 수 있을 것으로 여겨진다. 연속 섬유 펼침 기술은 제품의 가격 경쟁력을 고려한 고속 생산 체제에서 섬유 펼침을 통한 수지 함침 개선과 함께 섬유의 손상 등을 종합적으로 고려한 각 공정 및 기술의 특성에 맞는 연구 개발이 향후 연구 방향으로 고려될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단과 기초기술연구회(KRCF)을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU) (R31-2008-000-10083-0)과 Seed 형 협동연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press LLC., USA, 2002.
2. Krishan K.C., *Composite Materials: Science and Engineering*, 2nd edition, Springer, USA, 1998.
3. Kim, T.W., Jun, E.J., Um, M.K., and Lee, W.I., "A Study on the Effect of Pressure on the Resin Impregnation of Fiber Bundles," *Composites Research*, Vol. 1, No. 1, 1988, pp. 67-72.
4. Chang, I.Y., and Lees, J.K., "Recent Development in Thermoplastic Composites: A Review of Matrix Systems and Processing Methods," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 1, 1988, pp. 277-296.
5. Pandita, S.D., Irfan, M.S., Machavaram, V.R., Shotton-Gale, N., Mahendran, R.S., Wait, C.F., Paget, M.A., Harris, D., Leek, C., and Fernando, G.F., "Clean Wet-filament Winding - Part 1: Design Concept and Simulations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 3, 2013, pp. 379-390.
6. Weustink, A.P.D., *Development of a Rapid Thermoplastic Impregnation Device*, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2008.
7. Henk, B., and Reinoud, J.G., "Impregnation of Glass Rovings with a Polyamide Melt. Part 1: Impregnation Bath," *Composites Manufacturing*, Vol. 4, No. 2, 1993, pp. 85-92.
8. Irfan, M.S., Machavaram, V.R., Mahendran, R.S., Shotton-Gale, N., Wait, C.F., Paget, M.A., Hudson, M., and Fernando, G.F., "Lateral Spreading of a Fiber Bundle Via Mechanical Means," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 3, 2012, pp. 311-330.
9. Wilson, S.D.R., "Lateral Spreading of Fibre Tows," *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 32, 1997, pp. 19-26.
10. Roh, J.U., and Lee, W.I., "Processing of Thermoplastic Composites Reinforced with Long Fibers for Large Volume Applications," Proceeding of the 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 2012.
11. Roh, J.U., and Lee, W.I., "Effect of Fiber Spreading on Impregnation of Thermoplastic into Continuous Fiber Bundle," Proceeding of the SAMPE 2012, Charleston, U.S.A., Oct. 2012.
12. www.jeccomposites.com/news/composites-news/innovative-technology-carbon-and-aramid
13. www.compositesworld.com/columns/a-technological-brake-for-the-carbon-supply-roller-coaster
14. Claire, S.-M., Pavel, S., Suresh, G.A., Shridhar, Y., and Shawn, W., "A Model for Thermoplastic Melt Impregnation of Fiber Bundles During Consolidation of Powder-impregnated Continuous Fiber Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 1, 2010, pp. 93-100.
15. Ogden, A.L., Hyer, M.W., Wilkes, G.L., and Loos, A.C., "The Development of an Alternative Thermoplastic Powder Prepregging Technique," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 14-31.
16. Markus, B., and Peter, M., "New Approach to Manufacture Thermoplastic Composites Using In-situ Impregnation Tape Placement Process," Proceeding of the SAMPE 2012, Charleston, U.S.A., Oct. 2012.
17. Sihn, S.W., Kim, R.Y., Kazumasa, K., and Stephen, W.T., "Experimental Studies of Thin-ply Laminated Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 6, 2007, pp. 996-1008.