

밀폐형 함침법을 이용한 CFRP 사각 파이프 인발성형에서 인발장치 및 경화금형에 관한 연구

강병수^{1,2} · 유형민[†]

한국생산기술연구원 청정기술연구소¹ · 한국기술교육대학교 기계공학부^{2,†}

A study on the drawing device and curing mold in CFRP rectangular pipe pultrusion process using a closed impregnation method

Byung-Soo Kang^{1,2} · Hyeong-Min Yoo[†]

Research Institute of Clean Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)¹
School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH)^{2,†}
(Received June 17, 2022 / Revised June 29, 2022 / Accepted June 30, 2022)

Abstract: In the pultrusion process for the CFRP (Carbon fiber reinforced plastic) rectangular pipe, the drawing device is essential which can continuously produce products and draw the carbon fiber tow. In addition, since the degree of cure changes depending on the temperature and the temperature distribution of the curing mold changes depending on the pultrusion speed, the temperature distribution of the curing mold under certain conditions must be studied before processing. In this study, in the pultrusion process using a closed impregnation method, which has several advantages compared to the general pultrusion process using an open bath impregnation method, the drawing force required to pull the carbon fiber tows and the temperature distribution of the curing mold was analyzed to design the drawing device and the curing mold efficiently.

Key Words: Curing mold, CFRP rectangular pipe, Drawing device, Pultrusion, Temperature distribution

1. 서 론

인발성형(pultrusion)에서 인발장치(drawing device)는 크릴에 배치되어있는 탄소섬유의 수많은 로빙사투우를 잡아당겨 CFRP 사각파이프 제품을 생산할 수 있도록 하는 가장 필요한 장치이며 가장 중요한 역할을 갖는다. 또한 당겨지는 속도에 따라 제품 생산성이 향상되기 때문에 인발성형을 이용하여 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 사각 파이프 생산을 위해서는 에폭시 수지의 경화속도를 컨트롤 하는 것이 매우 중요한 기술 중 하나이다¹⁻⁵⁾.

CFRP 사각 파이프를 결함 없이 성공적으로 생산하기 위해서 경화금형의 형상, 히터의 배치 및 온도

컨트롤은 상당히 중요하기 때문에 온도편차를 최소화하는 생산기술이 요구된다⁶⁻⁸⁾.

크릴에 배치되어 투입되는 카본투우다발은 겉으로 보이는 섬유 뭉치의 지름 보다 작은 지름을 갖는 섬유 가이드를 통과하면서 압축되어 저항이 증가되고, 함침장치에서 최종제품형상에 비슷한 단면을 갖도록 배열되어 높은 점도를 갖는 수지 함침이 진행되기 때문에 카본투우다발을 당길 때 부하는 더욱 증가 된다.

투우다발은 실제 생산되는 제품의 단면형상으로 배열된 후 경화 금형 안으로 당겨지고, 투우에 함침된 에폭시수지는 경화금형을 통과하며 경화되기 때문에 카본투우를 최종 제품의 단면 형상을 가질 수 있도록 배열해주는 섬유 가이드를 설계하는 중요하다⁹⁾.

이러한 중요성을 갖는 인발시스템을 이용하여 CFRP 사각파이프를 제작하기 위해서는 생산 공정

1. 한국생산기술연구원 청정기술연구소
† 교신저자: 한국기술교육대학교 기계공학부
E-mail: yhm2010@koreatech.ac.kr

뿐만 아니라 장치 설계 및 조립 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 CFRP 사각파이프 생산을 위해서 섬유를 배열하고 배열 따른 인발력을 확인하였으며, 탄소섬유 토우다발을 안정적으로 잡아 당겨 줄 수 있는 인발장치를 개발하였다. 또한 인발성형시스템을 이용하여 에폭시수지가 정상 경화되어 양품의 제품이 생산될 수 있도록 설계된 경화금형의 온도 제어에 따른 온도분포를 측정하였다.

2. 실험

2.1. 밀폐형 함침법을 이용한 인발성형 시스템

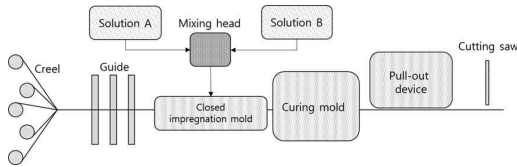


Fig. 1 Closed impregnation method

밀폐형 함침법은 기존 개방형 욕조 대신 입구와 출구를 제외한 전체가 막혀있는 밀폐형 함침 장치를 이용하여 가공된 내부의 공간에 에폭시 수지와 경화제를 함침장치 내부에 위치한 노즐로 분사한다. 이때, 정렬되어 연속적으로 들어오는 탄소섬유를 밀폐형 함침 장치 내에서 에폭시 수지로 함침 시키는 방법이 밀폐형 함침법이다.

이 방법은 탱크에서 정밀하게 토출되는 수지는 믹싱헤드를 통하여 액이 섞이게 되며, 밀폐형 함침 장치 내부의 노즐에서 혼합수지가 토출되어 섬유에 함침 되도록 설계하여 모든 공정은 장치 내부에서 이루어지기 때문에 유해가스 누출이 없어 환경에 대한 문제를 제거할 수 있다^{10,11)}.

본 연구에서는 밀폐형 함침법을 이용한 인발 성형 시스템을 제작하였으며 시스템은 크게 장비 모니터링 시스템, 수지 관리 및 토출을 위한 수지 저장탱크 시스템, 믹싱헤드, 밀폐형 함침장치, 경화 금형, 인발 장치 및 커팅장치로 구분된다.

2.2. 인발성형 시스템 설계 및 인발장치 설계

인발성형으로 제작되는 CFRP 사각파이프는 섬유가 일 방향으로 배열되어 연속적으로 투입되기 때문에 섬유가 감겨져 있는 로빙사를 유리하게 배치

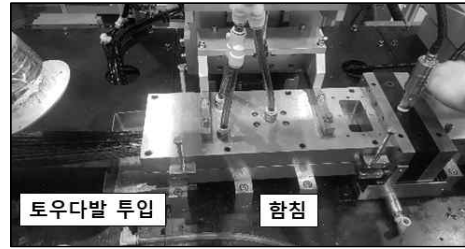


Fig. 2 Closed impregnation device

하여 섬유를 공급할 시 섬유 가이드로 들어가는 배열이 쉬워져 작업 생산성을 높일 수 있으며, 일정한 배열을 갖는 CFRP 사각파이프를 생산할 수 있다. 이러한 장점을 가질 수 있도록 fig. 3의 a) 와 같이 154개의 탄소섬유 로빙사를 고정 후 투입시켜주는 크릴장치를 설계하였다.

밀폐형 함침장치를 이용한 인발성형 시스템에서 수지 혼합은 기계식 펌프를 이용한 정밀 혼합 방식으로 일정한 압력의 수지와 경화제를 토출하도록 fig. 3 b)와 같이 설계되어 혼합 시간 및 혼합오차에 문제에 대한 개선을 이루었으며, 수지 저장 탱크 내부의 수지는 간접적으로 온도 조절을 할 수 있도록 설계하여 탱크 내부 수지온도를 안전하게 상승시킬 수 있다. 탱크 내부의 내벽 온도와 중앙 온도, 상부 및 하부 온도를 균일하게 맞추기 위하여 내부에 임펠러를 설치하여 자동 교반이 되도록 제작하여 수지와 경화제배합에 이점이 있다. 또한, 경화에 필요한 양에 맞도록 정밀 토출되도록 제작하여 제품의 기계적 물성을 향상시킬 수 있다.

시스템에서 생산되는 제품은 사각 파이프로 금형 중앙에 맨드릴을 넣어 파이프 형상을 제작하였으며, 함침된 수지에 열전달이 고루 잘 되도록 경화금형 상부, 하부에 일정한 간격으로 5개씩 총 10개의 구멍을 뚫은 후 봉 히터를 설치하여 경화금형 내부에 열이 고루 퍼질 수 있도록 하였다. 온도 조절을 위해 히터 봉이 들어가는 홀 옆에 pt100 온도센서를 설치하여 설정된 온도를 유지할 수 있는 시스템을 Fig. 3 c)와 같이 구성하였다.

최종적으로 탄소섬유체적비율 60%의 CFRP 사각 파이프를 제작하였으며, 공정 중 수지가 함침되고 경화되어 생산되기 때문에 인발 시 저항이 크다. 따라서 안정적인 인발력을 갖고 연속적으로 인발할 수 있도록 유압실린더를 이용하여 최대 10 ton으로 슬립이 일어나지 않도록 잡아주고, 10 ton의 인발력

을 갖는 2-step 공정 인발장치를 Fig. 3 d)와 같이 설계하였다. 설계 된 시스템은 2개의 인발기를 이용하는 것으로 하나의 인발장치가 사각 파이프를 하여 잡아당길 때 다른 하나는 초기위치에서 기다리고 처음 인발기가 인발종료 위치에서 바를 놓는다. 그와 동시에 두 번째 인발 장치는 연속적으로 사각 파이프를 다시 잡아 당겨 연속적으로 인발이 가능한 장치이다. 경화되어 나오는 사각 파이프를 인발장치에 설치되어 있는 근접센서를 이용하여 슬립이 일어나지 않을 정도의 힘으로 잡기 때문에 CFRP 사각파이프 생산에 있어 잡을 때 생기는 결함을 최소화 하였다.

연속적으로 파이프가 생산되기 때문에 일정한 길이로 절단시킬 수 있는 절단장치를 시스템 마지막 공정에 배치하여 시스템 설계 및 제작하였으며, 전체 시스템은 Fig. 3 e)장비 모니터링 시스템으로 컨트롤 가능하다.

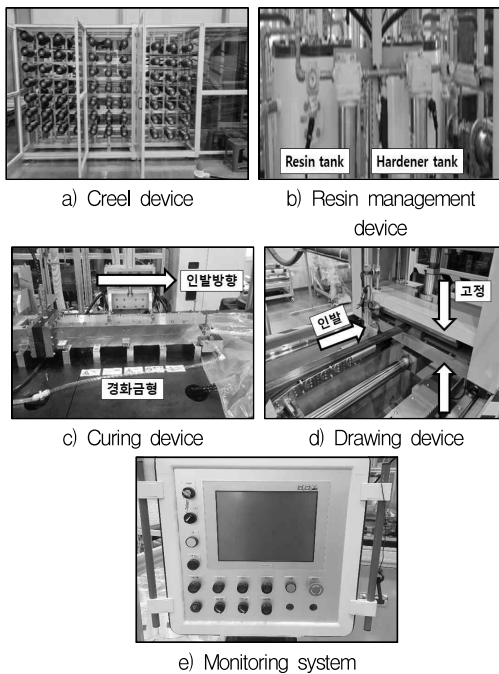


Fig. 3 Pultrusion system configuration

2.3. 인발력 시험

크릴장치를 이용하여 인발되는 탄소섬유의 장력을 유지시킬 수 있으며, 섬유 배열이 쉽도록 크릴장치를 사용한다. 섬유가 장착된 크릴장치, 섬유를 배열을 위한 섬유가이드, 수지 함침을 위한 밀폐형 함침장치 및 수지경화를 위한 경화장치로 섬유가 연

속적으로 통과하여 나온 섬유다발을 인발장치로 당긴다. 이때 장치 간 정렬이 되지 않거나 섬유 끼임 및 수지 과 경화 등의 문제로 인하여 필요한 인발력은 상당히 요구된다. 인장력 시험은 Fig. 4와 같이 장치의 정렬 및 섬유 끼임 등을 확인하고 CFRP 사각 파이프를 생산하기 위하여 투입되는 섬유의 전체 인발력을 측정 위하여 크릴에서 공급되는 탄소 탄소섬유 토우를 인발성형 조건과 같이 준비한 후 경화 금형 끝단에서 24k 토우 1가닥 씩 랜덤으로 잡아당겨 걸리는 인발력을 측정하였다.

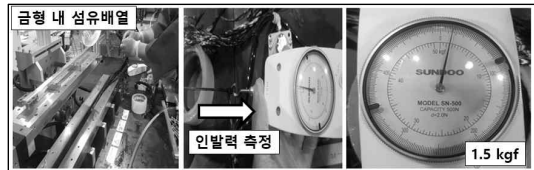


Fig. 4 Drawing force test

2.4. 경화금형 온도분포 시험

경화금형의 온도분포에 따라 CFRP 사각 파이프에 함침 된 수지의 경화정도가 바뀌기 때문에 경화금형의 온도를 컨트롤 하는 것은 생산되는 CFRP의 최종 물성에 큰 영향을 미친다. 온도가 너무 낮으면 수지가 경화되지 않고 경화금형을 통과하여 원하는 형상을 얻을 수 없으며, 과 경화 될 경우 경화금형에 끼어 인발이 되지 않는다. 또한 위치에 따른 온도 편차가 클 경우 부분 경화 및 미경화 부분이 발생하여 원하는 제품 품질 달성이 어려워 지기 때문에 적정 온도 분포 수준을 유지하는 것이 중요하다.

경화금형은 상부, 하부로 나뉘며 각 5개의 히터를 일정한 간격으로 배열하여 가열시킨다. 경화금형의 온도분포 시험은 Fig. 5 와 같이 히터 옆 금형의 온도를 측정하도록 설계된 pt100 센서 구멍 안에 T-type 열전대를 설치하여 설정 온도에 따른 금형 내부 온도 변화를 살펴보았으며, 금형 외부 표면에 열전대를 Fig. 6 과 같이 설치하여 금형표면의 온도 분포를 살펴보았다.

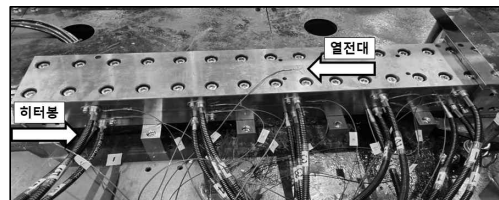


Fig. 5 Curing mold heater & T-C

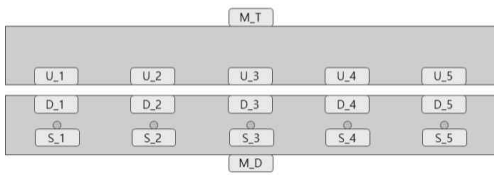


Fig. 6 Thermocouple installation location

3. 실험결과 및 분석

3.1. 섬유 인발력 분포

사각 파이프 생산에 사용된 섬유는 24k를 이용하였으며, 탄소섬유체적비 60% 기준으로 탄소섬유 126가닥을 전체 장치를 통과하여 준비한 후 push-pull gage로 측정된 인발력은 Table 1과 같다. Table 1의 실험결과를 보면 24k 토우 1가닥을 당겼을 때 약 1.5 kgf의 작은 힘으로 섬유를 인발시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 CFRP 사각 파이프를 만들 때 126개의 토우다발이 사용되는데, 전체 섬유를 당기기 위해서는 최소 180 kgf의 인발력이 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한, 임의의 8 곳의 서로 다른 위치에서도 편차가 거의 없는 것을 확인할 수 있고, 이는 설계한 인발 장치에서 정렬, 섬유 끼임 및 꼬임 등의 문제가 없다는 것을 의미한다.

Table 1 Drawing force test results

type	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
drawing force (kgf)	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5	1.6	1.5

실험은 수지함침 및 경화를 제외한 시험으로 섬유의 배열, 수지 함침 및 경화 등의 공정을 지남에 따라 인발 시 걸리는 저항, 압력 및 부하 등의 영향을 살펴볼 때, 안전계수를 고려하여 계산된 최소 인발력(180 kgf)보다 큰 안정적인 인발을 보장할 수 있는 장치를 이용하여야 한다.

3.2. 경화 금형 온도 분포

경화금형의 온도 시험을 위하여 경화 온도는 170 °C로 설정하였으며, 금형 내부의 온도 및 표면의 온도를 측정한 결과는 Table 2와 같다. 열전대 위치 #5는 수지가 함침 되어 경화금형 안으로 투입되는 곳이고 #1은 수지가 경화 완료되어 배출되는 곳이다. 인발을 통한 CFRP 제작 공정 중 함침 및 경화장치는 위치에 따른 온도 편차가 적어야 고른 품질의 제

품을 얻을 수 있으나, 이번 실험은 실험실이 아닌 실제 생산 공장 환경에서 진행 되어 다른 시스템의 영향으로 온도 편차가 비교적 크게 나타났다. Fig. 7,8과 Table 2에서 볼 수 있듯이 상부 금형은 대기에 노출되어 있기 때문에 평균 온도값이 하부 금형에 비해 낮은 반면, 하부 금형은 아래 쪽에 금형을 받치는 플레이트가 존재하여 온도 손실을 상부금형에 비해 막을 수 있었던 것으로 판단된다. 또한, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 상부 금형 #5 위치에서 온도 값이 매우 낮게 측정되었는데, 이는 경화를 위해 수지가 처음 투입되는 곳으로 몰드 상부에 환기를 위한 환기구가 작동되고 있어 열 손실로 인해 가장 낮게 온도가 측정되었다. 환기구 영향이 #4에도 미치는 것을 확인할 수 있고, 나머지 #1~3위치의 온도는 설정 기준에 가깝게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 상부 금형 경화과는 달리 하부 금형에서는 환기구 영향이 없고, 설정 온도 센서와 가까워 평균 온도가 설정 기준 온도에 가까운 것을 확인할 수 있다. 배출구 쪽 #1에서 온도가 떨어지는 것은 하부 배출구 뒷단에서 air를 이용해 불순물을 제거하기 위한 추가 작업을 진행하는데, air가 금형 하부에 온도 변화를 준 원인으로 판단된다.

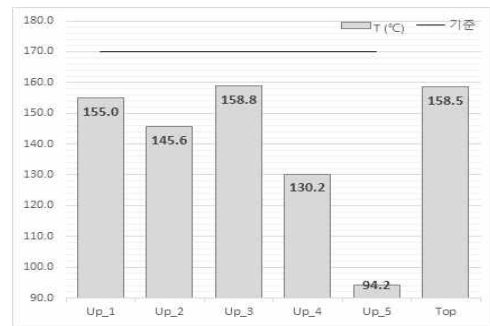


Fig. 7 Upper curing mold temperature distribution

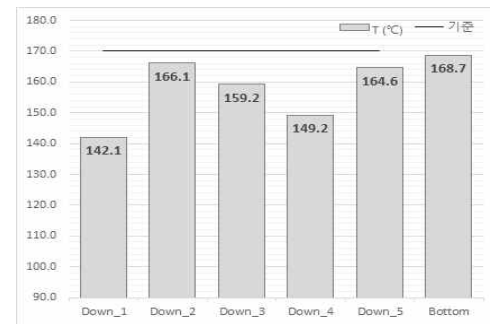


Fig. 8 Lower curing mold temperature distribution

Table 2 Temperature distribution

No.	T-C position	T1 (°C) (Set)	T2 (°C)	T1-T2 (°C)
1	Up_1	170	155.0	15.0
2	Down_1		142.1	27.9
3	PT100_1		178.6	-8.6
4	Up_2	170	145.6	24.4
5	Down_2		166.1	3.9
6	PT100_2		169.0	1.0
7	Up_3	170	158.8	11.2
8	Down_3		159.2	10.8
9	PT100_3		172.1	-2.1
10	Up_4	170	130.2	39.8
11	Down_4		149.2	20.8
12	PT100_4		170.8	-0.8
13	Up_5	170	94.2	75.8
14	Down_5		164.6	5.4
15	PT100_5		176.5	-6.5
16	Top	170	158.5	11.5
17	bottom		168.7	1.3

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 인발성형 시스템에서는 탄소섬유를 당겨주는 인발장치를 설계하고, 적정 하중을 판단할 수 있도록 투입되는 섬유에 대해서 필요한 인발력 시험을 진행하였다. 또한, 경화금형의 온도 분포에 따라 최종 CFRP 물성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 일정하게 설치되어 있는 히터 주변의 상부, 하부 금형에 t-type 열전대를 설치하고 온도측정을 통하여 온도 편차를 확인하고자 하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 임의의 위치에서 탄소섬유 24k 토우 1 가닥을 당길 때 필요한 인발력은 1.5 kgf이고, 각 위치에서의 편차가 매우 작은 것으로 볼 때, 설계한 가이드 플레이트, 함침장치 및 경화장치의 정렬, 섬유의 꼬임 등의 인발 장치 상에서의 문제가 없음을 알 수 있다.
- 2) 생산하려는 CFRP 사각 파이프는 24k 탄소섬유 126가닥을 필요로 하고, 이때 탄소섬유체적비는 60%이다. 따라서 섬유가이드, 함침장치 및 경화장치를 통과하는 탄소섬유 토우 126 가닥을 잡아당길 때 최소한으로 필요한 인발력은 180 kgf 이다.
- 3) 인발력 시험 결과는 수지함침 및 경화를 제외한 시험으로 인발시스템 장치들의 배열, 섬유의 배

열, 수지 함침 및 경화 등의 공정을 지남에 따라 섬유에 걸리는 저항, 압력 및 부하 등의 영향으로 안정적인 인발이 가능하도록 인발장치 설계가 필요하다.

4) 경화금형 온도 분포 시험 결과, 금형 상부 환기구의 영향으로 경화금형장치 입구(상부 금형 #5)에서의 온도가 가장 낮았고, 영향을 받은 #4, 5를 제외 하면, 온도 편차는 하부 금형에서 13°C 수준이고, 하부 금형은 배출구 뒷단의 영향을 받은 #1을 제외 하더라도 20°C 가량으로 상부 금형 보다 큰 편차를 보였다.

5) CFRP 생산에 사용되는 수지는 경화 시 충분한 시간이 요구되나 인발공정에서는 연속적으로 섬유를 잡아당겨 생산하기 때문에 경화에 필요한 시간이 충분하지 않을 수 있다. 따라서 금형전체의 온도를 설정한 온도로 유지시켜 수지가 미 경화 되어 인발되지 않도록 해야 한다. 또한, 경화금형 입구 #5에서 온도를 설정 온도로 유지시켜주면 예폭시 경화시간을 줄일 수 있기 때문에 인발 속도를 높여 CFRP 생산성을 높일 수 있다.

6) 위의 경화금형 온도분포 시험 결과를 토대로, 정밀한 항온 시설이 갖추어지지 않은 양산 공장 환경에서 경화금형의 온도를 균일하게 맞추는 것은 어려우며, 실질적으로 정밀한 항온 시설을 갖추는 것 또한 비용이 많이 들기 때문에, 수지의 온도에 따른 경화 분석을 통해 경화가 빠르게 진행되지 않는 선에서 온도를 보수적으로 높게 설정하고, 온도 편차를 크게 하는 외부 조건들을 최소화 하여 미경화로 인한 최종 제품의 품질에 영향이 미치지 않도록 주의를 기울이는 것이 필요하다.

본 연구에서 인발력 시험은 수지함침 및 경화절차를 제외하고 단순하게 섬유를 당기는 시험만 진행하였기 때문에 실제 CFRP 사각 파이프 생산 시 필요한 인발력에 대한 시험이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 보이고, 경화 금형 온도 분포 또한 환기구와 air 투입 공정 위치를 바꾸어 실제 CFRP 생산 시 발생할 수 있는 불량을 최소화 하여야 한다.

후기

이 논문은 중소벤처기업부에서 선도연구기관협력기술개발사업(산연협력R&VD)으로 시행한 ‘탄소 복합재 제조를 위한 양산화 기술개발’ (2020-2021) 과제(S3009618)의 기술개발 결과임.

참고문헌

- 1) Liu, T.Q., Xing, L., Peng, F., “A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects”, Compos. Part B Eng, Vol. 191, pp. 107958, 2020.
- 2) Khan, L.A., Mehmood, A.H., “Cost-effective composites manufacturing processes for automotive applications”, Lightweight Compos. Struct. Transp, pp. 93-119, 2016.
- 3) Joshi, S.C., “The pultrusion process for polymer matrix composites”, Manuf. Tech. Polym. Matrix Compos. (PMCs) pp. 381-413, 2012.
- 4) Arrabiyeh, P.A., May, D., Eckrich, M., Dlugaj, A.M., “An overview on current manufacturing technologies: Processing continuous rovings impregnated with thermoset resin”, Polym. Compos. Vol. 42, pp. 5630-5655, 2021.
- 5) Voorakaranam, S., Joseph, B., Kardos, J.L., “Modeling and Control of an Injection Pultrusion Process”, J. Compos. Mater., Vol. 33, pp. 1173-1204, 1999.
- 6) Barkanov, E., Akishin, P., Namsone, E., Bondarchuk, A. and Pantelelis, N., “Real-time characterization of pultrusion processes with a temperature control”, Mechanics of Composite Materials, Vol 56, pp. 135-148, 2020.
- 7) Joshi, S.C., Lam, Y.C. and Tun, U.W., “Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 34, pp. 1151-1159, 2003.
- 8) Dias, R.D.C.C., de Sousa Santos, L., Ouzia, H. and Schledjewski, R., “Improving degree of cure in pultrusion process by optimizing die-temperature”, Materials Today Communications, Vol. 17, pp. 362-370, 2018.
- 9) Wilson, S.D.R., “Lateral spreading of fibre tows”, J. Eng. Math, Vol. 32, pp. 19-26, 1997.
- 10) Strauß, S., Senz, A., Ellinger, J., “Comparison of the Processing of Epoxy Resins in Pultrusion with Open Bath Impregnation and Closed-Injection Pultrusion”, J. Compos. Sci, Vol. 3, p. 87, 2019.
- 11) Kang, B., Lee, C., Kim, S.-M., Yoo, H.-M., “Processing and Evaluation of a Carbon Fiber Reinforced Composite Bar Using a Closed Impregnation Pultrusion System with Improved Production Speed”, Appl. Sci., Vol. 12, p. 4906, 2022.

저자 소개

강 병 수 (byung-soo kang)

[정회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 7월~현재 : 한국생산기술연구원, 기술원

< 관심분야 >

복합재료, 생산자동화, 인발·사출성형 및 금형

유 형 민 (Hyeong-Min Yoo)

[정회원]



- 2017년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
- 2017년 3월~2019년 6월 : 삼성전자 생산기술연구소, 책임연구원(CL3)
- 2019년 7월~2020년 8월 : 한국기계연구원 부설 재료연구소, 선임연구원
- 2020년 9월~현재 : 한국기술교육대학교 기계공학과, 조교수

< 관심분야 >

복합재료, 복합재료 액상성형공정, 사출성형 및 금형