

# 탄소섬유강화복합소재의 고압수지이송성형공정에서 금형 내 캐비티의 압력 및 온도신호에 따른 성형특성

한범정<sup>\*,\*\*\*</sup>, 정용채<sup>\*</sup>, 김성렬<sup>\*\*</sup>, 김노원<sup>\*\*</sup>, 강명창<sup>\*\*\*, #</sup>

<sup>\*</sup>(주)디유티코리아, <sup>\*\*</sup>한국생산기술연구원, <sup>\*\*\*</sup>부산대학교 융합학부

## Forming Characteristics with Cavity Pressure and Temperature Signal Inside Mold in High-Pressure Resin Transfer Molding Process of Carbon Fiber Reinforced Composite Material

Beom-Jeong Han<sup>\*\*\*</sup>, Yong-Chai Jeong<sup>\*</sup>, Sung-Ryul Kim<sup>\*\*</sup>, Ro-Won Kim<sup>\*\*</sup>, Myung Chang Kang<sup>\*\*\*, #</sup>

<sup>\*</sup>DUTKOREA Co., Ltd, 32, Dasan-ro 208-32, Saha-gu, Busan 49485, Korea

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Busan, 46938, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Graduate school of convergence science, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received 14 November 2017; received in revised form 15 November 2017; accepted December 2017)

### ABSTRACT

The high-pressure resin transfer molding (HP-RTM) process has a very effective for the mass production of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) for light weight in the automotive industry. In developing robust equipment, new process and fast cure matrix systems reduces significantly the cycle time less than 5 minutes in recent years. This paper describes the cavity pressure, temperature and molding characteristics of the HP-RTM process. The HP-RTM mold was equipped with two cavity pressure sensors and three temperature sensors. The cavity pressure characteristics of the HP-RTM injection, pressurization, and curing processes were studied. This experiment was conducted with selected process parameters such as mold cap size, maximum press force, and injection volume. Consequently, this monitoring method provides correlations between the selected process parameters and final forming characteristics in this work.

**Key Words :** Carbon Fiber Reinforced Composite Material(탄소섬유강화복합소재), High-Pressure Resin Transfer Molding (고압수지이송성형), Process Condition Monitoring(공정조건 감시), Cavity Pressure Sensor(캐비티 압력센서), Temperature Sensor(온도센서)

### 1. 서 론

지구 온난화와 자원 고갈로 환경에 대한 중요성

이 커지면서 최근 자동차 산업의 주요 현안은 경량 화이며, 이를 해결하기 위하여 탄소섬유강화복합소재(CFRP : Carbon fiber reinforced plastic composite - 이하 CFRP)가 부각되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

CFRP를 이용한 부품개발을 위해 고압 수지이송 성형(HP-RTM : High-pressure resin transfer molding - 이하 HP-RTM) 공정 등과 같이 고속 제조공정 기

# Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

술 및 성형 특성평가에 대한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>[4-6]</sup>. Hamidreza<sup>[7]</sup> 등은 직선형 고압 믹싱헤드 설계모델을 이용하여 혼합 효율의 최적화를 위한 전산 유동해석을 진행하여, 노즐에서 분사되는 제트의 속도가 높은 경우 믹싱 효율이 증대되는 결과를 제시하였다. Han<sup>[8]</sup> 등은 HP-RTM 공정에서 직선형 고압 믹싱헤드의 성능 및 유용성 평가를 통한 CFRP 성형 실험을 실시하였다.

HP-RTM 공정은 직조된 탄소섬유 프리폼(Preform)을 금형에 적층한 후, 일정한 겹을 유지한 상태에서 수지(Resin)와 경화제(Hardener)의 혼합물을 탄소섬유에 주입 및 가압하여 압축 성형하는 방식이다. 수지 주입 후 압축하기 때문에 수지의 함침방향은 수직방향이 되어 수평방향보다 수직방향에 대한 수지함침 저항성이 발생하므로 CFRP 성형품의 상부면과 하부면의 품질차이가 발생하게 된다<sup>[9]</sup>.

따라서, 본 연구에서는 CFRP의 고속생산을 위한 HP-RTM 공정에서 고온(200°C), 고압(160bar)의 레진 및 경화제가 믹싱헤드(Mixing head)를 통해 금형으로 주입될 때, 금형내의 압력과 온도 변화에 따른 CFRP 성형품질을 감시하기 위해 캐비티 압력과 온도 센서를 금형에 설치하였고, 센서로부터 획득된 신호를 처리하기 위한 신호획득시스템을 제작하였다. 그리고 HP-RTM 금형 감시시스템은 성형조건에 따른 금형내의 캐비티 압력 및 온도를 검출하여 CFRP 성형품질과의 연관성을 제시하고, CFRP 성형품질의 안정화 방안을 확립하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 HP-RTM 공정감시 구성도이다<sup>[10]</sup>. HP-RTM 프레스(Press)로 5,000kN으로 가압할 때 RTM 금형의 캐비티 압력은 약 160bar가 형성되고, 성형온도는 200°C 이하이다. 이러한 성형조건에 적합한 캐비티 압력 센서(Cavity pressure sensor, Kistler, 6161AA, 0~200bar) 2개 및 온도 센서(Temperature sensor, Kistler, 6194, 0~400°C) 3개를 하부 금형에 설치하였다.

CFRP 금형은 550mm × 450mm의 크기이고, 탄

소 섬유시트는 SGL사의 HPT<sup>®</sup> 300 C45(섬유방향: ±45°)와 HPT<sup>®</sup> 300 C090(섬유방향: 0°/90°)을 사용하였다. 시편 금형에 맞게 재단 후 X,Y 양방향 강성을 위해 0°/90°/±45°로 탄소 섬유 시트 7장을 교차 적층하여 압력 및 온도센서가 장착된 하부 금형에 배치하였다. HP-RTM 공정에 적합한 고속경화 수지인 에폭시 수지(KER -9610, Kumho petrochemical)와 경화제(KCA9610, Kumho petrochemical)를 고압 공급 장치(High pressure supply unit)에서 믹싱헤드(Mixing head)로 공급하였다.

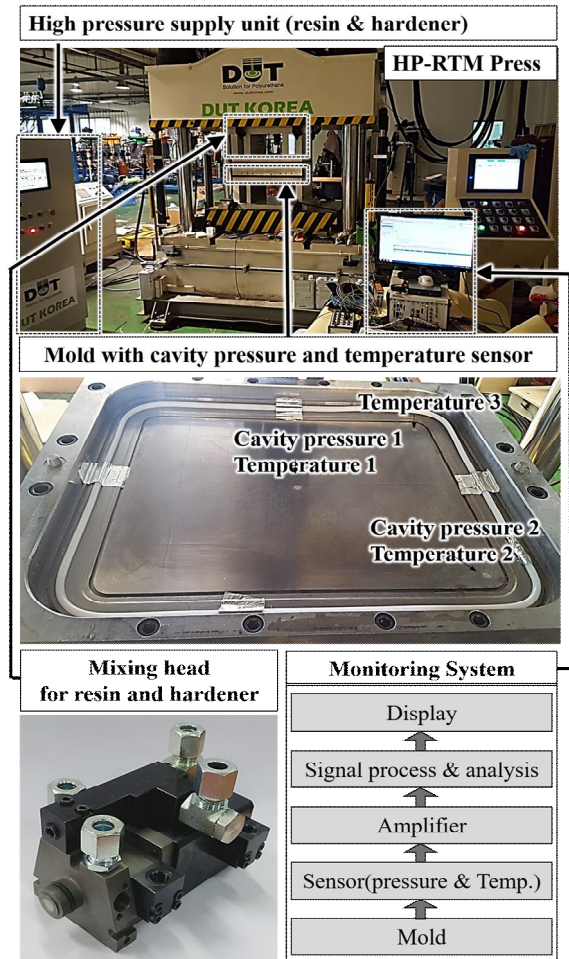


Fig. 1 Process condition monitoring system using cavity pressure sensor and temperature sensor in HP-RTM molding machine

믹싱헤드에서 수지와 경화제가 혼합하여 성형 금형에 주입하였고, 수지의 주입 총량은 615g으로 섬유 함유량은 약 34% 이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 공정별 캐비티내 압력 및 온도변화 특성

Fig. 2는 캐비티 압력센서 신호를 분석한 결과로서, HP-RTM 공정에서 탄소섬유강화복합소재의 시편을 주입시작(Injection start), 프레스 가압(Apply press force), 경화 시작(Curing start), 금형 탈형(Open mold)의 성형과정에서 순차적으로 획득된 신호이다. Fig. 2에서 중심부 압력은 수지가 주입되는 시점에서 급격히 상승하다가 가압이 시작되는 지점에서 다시 상승한다. 그리고 가압이 끝나는 시점에서 서서히 감소하다가 수지의 경화가 완료되는 100sec 이후 압력은 일정해진다. 또한, 말단부 압력은 가압하는 시점에서 상승하고, 가압이 완료된 후 수지의 경화에 의한 체적의 수축으로 인해 압력은 감소하며, 100sec 이후 경화가 완료되어 압력은 일정하게 유지되고 있다.

Fig. 3은 성형공정 중 하형에 설치된 온도센서 1, 2, 3에 의해 획득된 신호로서, Fig. 3(a)의 경우, 하형 중심부 온도는 금형온도 118°C에 80°C의 수지가 주입됨으로서 온도는 감소하고, 약 50sec에서 주재와 경화제의 발열반응이 발생하여 온도가 서서히 증가하며, 100sec 이후 발열반응이 끝나면서 일정해진다. Fig. 3(b),(c)는 하형 말단부의 온도신호로서 하형 중심부의 온도변화와 달리 50sec 부근에서의 급격한 온도변화는 없다. 이것은 수지가 금형 말단부에 아직 도달하지 않아 금형의 온도가 측정되었고, 가압이 시작되면서 온도가 상승하며, 가압 종료 이후에도 수지의 발열반응에 의해 온도는 상승한다. 그리고 약 100sec 이후부터는 발열반응이 끝나고 수지가 경화되면서 온도는 서서히 감소하였다. 말단부의 온도 변화는 하형 중심부와 달리 일정한 온도를 유지하다 발열반응이 일어나며, 이것은 수지는 중심부에서 말단부 방향으로 주재와 경화제의 반응이 일어남과 동시에 확산되기 때문이다.

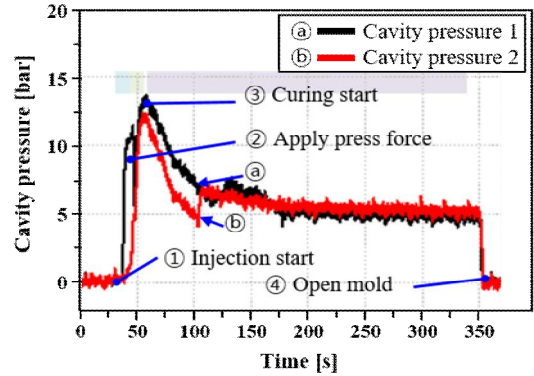


Fig. 2 Change in cavity pressure during HP-RTM process

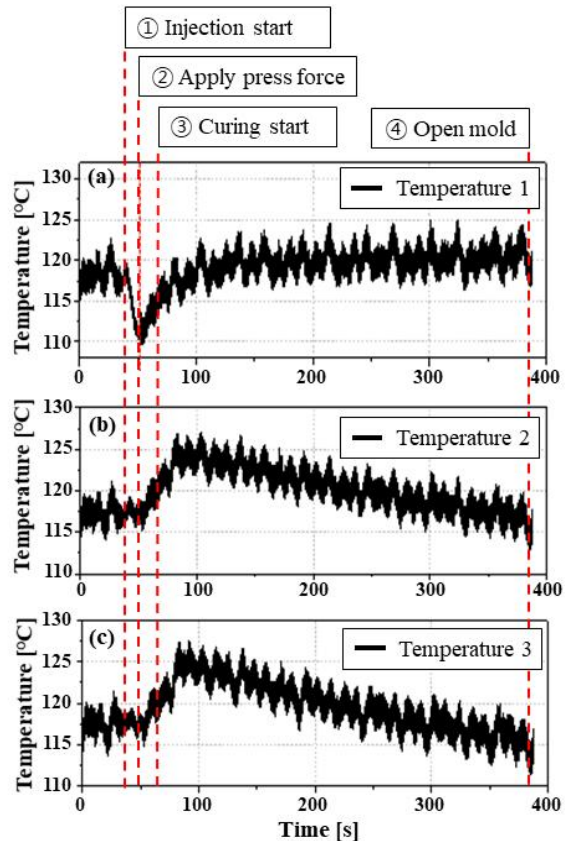
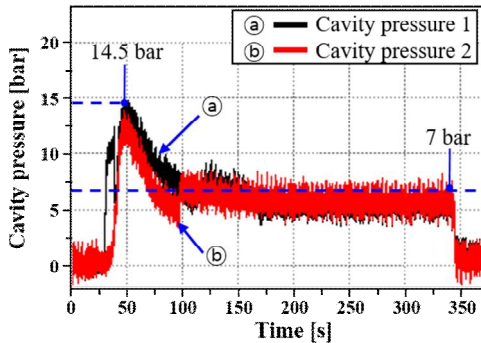


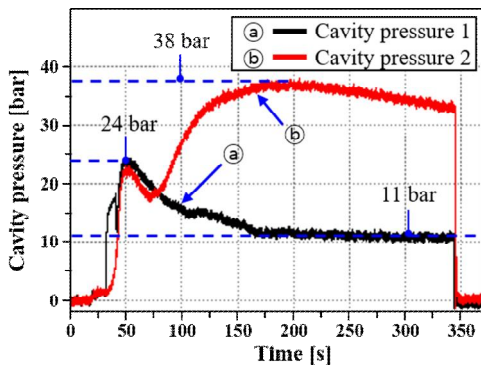
Fig. 3 Change in temperature at (a) the center, (b) the right-bottom end and (c) the right-top end during HP-RTM process

### 3.2 금형의 입력 및 온도에 따른 CFRP 성형 특성 평가

공정조건에 따른 CFRP 성형특성을 평가하고자 캐비티 압력과 온도를 검출하여 정상상태(Case 1)와 비정상상태(Case 2)의 신호를 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 성형공정에 따른 하형 중심부와 말단부에 설치된 캐비티 압력센서와 온도센서의 결과이다. Fig. 4는 정상상태로 가압시 캐비티 압력은 최대 14.5bar, 유지 압력은 하형 중심부와 말단부에서 약 7bar로 동일하게 측정되었다. 그러나 비정상상태의 경우 가압시 캐비티 압력은 최대 24bar, 하형 중심부의 유지압력 11bar, 금형 말단부는 최대 38bar까지 상승되었다. 비정상상태의 경우 정상상태에 비해 가압시 금형 내부의 초기 진공상태의 불량으로 경화시간에 38bar의 이상 압력이 발생함을 알 수 있다.

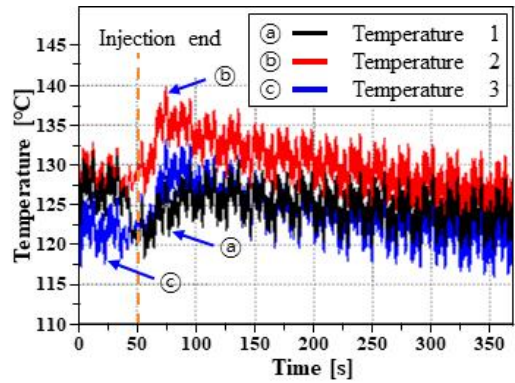


(a) Cavity pressure in normal state(case 1)

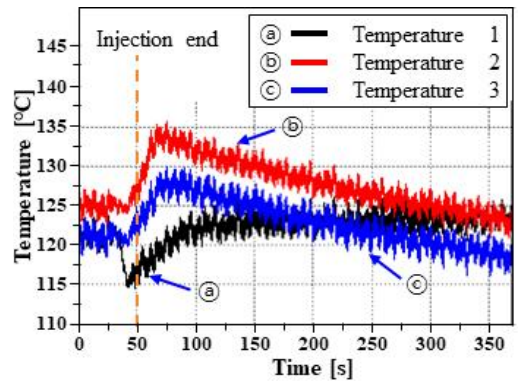


(b) Cavity pressure in abnormal state(case 2)

Fig. 4 Cavity pressure in normal and abnormal state



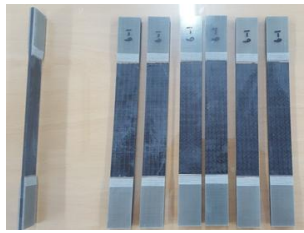
(a) Temperature in normal state(case 1)



(b) Temperature in abnormal state(case 2)

Fig. 5 Temperature in normal and abnormal state

Fig. 5는 금형의 중심부와 말단부의 온도를 측정 한 결과로서 Fig. 5(a)는 정상상태에서 금형 중심부 온도(Temperature 1)의 경우 금형에 수지가 주입된과 동시에 약 5.77°C 감소하였고 이후 수지 반응에 의해 5.48°C 상승되었다. 말단부(Temperature 2, 3)의 경우 두 위치 모두 수지의 발열반응에 의해 초기 금형 온도에 비해 각 7.07°C, 7.53°C 상승되었다. Fig. 5(b)는 비정상상태의 경우 금형에 수지가 주입됨에 따라 금형 중심부 온도는 8.08°C 감소하였고, 말단부의 두 위치는 각 8.70°C, 6.37°C 상승하였다. 비정상상태는 정상상태에 비해 레진 주입완료 후 금형 중심부의 온도가 낮고, 금형 중심부에만 과도한 양의 레진이 주입되어 말단부의 두 위치까지 레진이 이동하지 못하여 고른 함침이 되지 않았음을 의미한다.



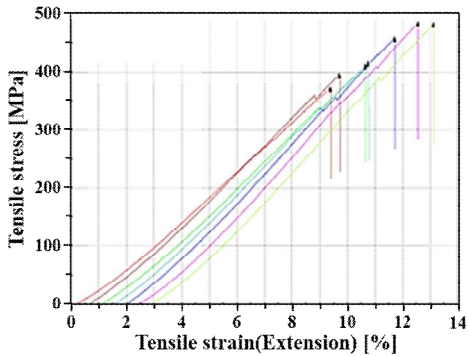
(a) ASTM D3039 tensile test specimen



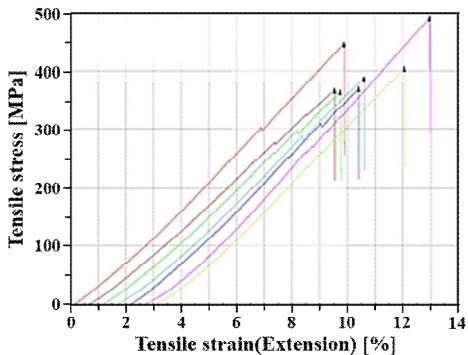
(b) ASTM D790 flexure test specimen

Fig. 6 ASTM D3039 tensile test specimen and ASTM D790 flexure test specimen

본 연구에서 성형된 CFRP의 품질을 평가하기 위해 공정조건에 따른 CFRP의 가장 큰 특징인 인장강도(Tensile stress)와 가장 취약점인 굽힘강도(Flexure stress)로 성형특성을 분석하였다. Fig. 6(a)는 복합재료의 인장강도 시험규격인 ASTM D 3039와 Fig. 6(b)는 굽힘강도의 시험규격인 ASTM D 790으로 제작된 시험사진이다. 시험장비는 MTS사의 피로재료시험기 (MTS, LandMark 100kN, US)를 이용하였다. Fig. 7은 7개의 인장 시험편에 대한 결과이고, Fig. 8은 5개의 굽힘 시험편에 대한 결과이다. 정상상태의 경우 인장강도 평균 431MPa, 굽힘강도 평균 512MPa, 비정상상태의 경우 인장강도 평균 404MPa, 굽힘강도 평균 458MPa로 측정되었다. 각 Case에서의 개별 시험편의 인장강도 및 굽힘강도 측정 결과로서 비정상상태의 경우 시험두께는 두꺼우나 인장과 굽힘강도 모두 정상상태에 비해 값이 작고 편차가 큼을 알 수 있었다.

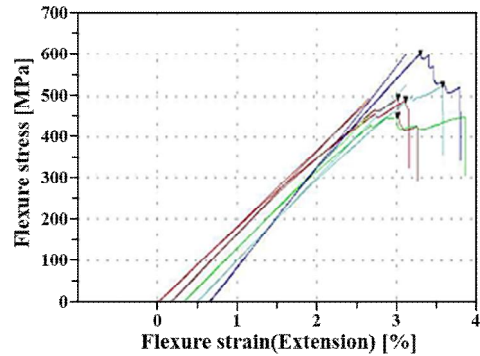


(a) Tensile stress of normal state(case 1)

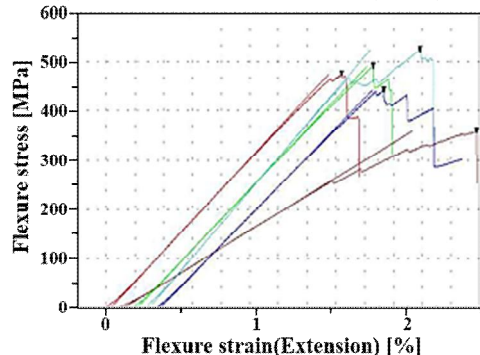


(b) Tensile stress of abnormal state(case 2)

Fig. 7 Tensile stress of normal and abnormal state



(a) Flexure stress of normal state(case 1)



(b) Flexure stress of abnormal state(case 2)

Fig. 8 Flexure stress of normal and abnormal state

#### 4. 결론

본 연구에서는 HP-RTM을 이용한 CFRP 성형품질의 향상을 위해 금형내 캐비티 압력과 온도와의 상호관계를 규명하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

1. HP-RTM 성형공정에서 수지 주입, 프레스 가압, 경화, 금형 탈형 공정에 대한 각각의 캐비티 압력 및 온도와의 연관성을 제시하였다.
2. 압력변화에 따른 각 공정상의 성형단계에 있어서, 비정상적인 상태의 경우 공기가 배출이 되지 않아 CFRP 내부에 기포가 생성된 경우로 캐비티 압력은 상승되고, 수지의 과충진과 미함침이 발생되면 온도의 변화로 인장강도 및 굽힘강도가 각각 10% 정도 감소함을 확인하였다.
3. 내부기포 및 미함침 상태 등에 의해 나타나는 압력상승 및 온도편차는 CFRP소재 특성에 의하여 탄소섬유적층간의 결합력을 약화시켜 성형품질에 나쁜 영향을 미쳤다.
4. 금형 내에서 발생하는 온도와 캐비티 압력 센서의 신호특성에 의하여 수지충진, 함침, 경화상태의 감시가 가능하고, 각 성형단계에서 CFRP의 성형품질을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음. [S2423840, 자동차 경량화 CFRP 부품 대량 생산을 위한 복합 금형 Surface RTM System 개발]

#### REFERENCES

1. Gardiner, G., "HP-RTM one the rise," Composites World, MAY 2015, pp. 58-65, 2015.
2. Kim, K. Y., Kwak, S. H., Han, G. D., Park, J. S., Cho, J. H. and Kang, M. C., "Formability Evaluation of the Vacuum Resin Transfer Molding of a CFRP Composite Automobile Seat Cross Part," Journal of the Korean Society of

- Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 24-29, 2017.
3. Kim, H. Y., Kim, T. G., Lee, S. W. and Yoon, H. S., "Development of Manufacturing System Package for CFRP Machining," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 33, No. 6, pp. 431-438, 2016.
4. Lee, S. T., Park, S. G. and Choi, H. W., "CFRP Laser Joining Computer Simulation in a Parallel Kinematic Machine," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 77-82, 2017.
5. Won, S. J., Li, C. P., Park, K. M. and Ko, T. J., "The Exit Hole Burr Generation of CFRP with Ultrasonic Vibration," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 134-140, 2017.
6. Kim, K. S., Bae, K. M. and Oh, S. Y., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles," Elastom. and Compose, Vol. 47, No. 1, pp. 65-74, 2012.
7. Karbasian, H., Kim, Y. W., Lee, I. B., Han, B. J., Jeong, Y. C. and Kim, K. C., "Numerical visualization of mixing in a circular chamber by two opposite impinging jets," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 14, No. 3, pp. 32-37, 2016.
8. Han, B. J., Jeong, Y. C., Hwang, K. H. and Kang, M. C., "Performance and Feasibility Evaluation of Straight-Type Mixing Head in High-Pressure Resin Transfer Molding Process of Carbon Fiber Reinforced Composite Material," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 157-165, 2017.
9. Chaudhari, R., "Characterization of High-Pressure Resin Transfer Molding Process Variants for Manufacturing High-Performance Composites," Fraunhofer Verlag, pp. 28, 2014.
10. Kim, J. S., Kang, M. C., Ryu, B. J. and Ji, Y. K., "Development of an on-line tool-life monitoring system using acoustic emission signals in gear shaping," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, pp. 1761-1777, 1999.