

탄소 섬유강화 복합소재의 고압 수지이송 성형공정에서 직선형 믹싱헤드의 성능 및 유용성 평가

한범정^{*,**}, 정용채^{**}, 황기하^{*}, 강명창^{*,#}

^{*}부산대학교 융합학부, ^{**}(주)디유티코리아

Performance and Feasibility Evaluation of Straight-Type Mixing Head in High-Pressure Resin Transfer Molding Process of Carbon Fiber Reinforced Composite Material

Beom Jeong Han^{*,**}, Yong Chai Jeong^{**}, Ki Ha Hwang^{*}, Myung Chang Kang^{*,#}

^{*}Graduate school of convergence science, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

^{**}DUTKOREA Co., Ltd, 32, Dasan-ro 208-32, Saha-gu, Pusan 49485, Korea

(Received 7 October 2017; received in revised from 8 October 2017; accepted 16 October 2017)

ABSTRACT

The high-pressure resin transfer molding (HP-RTM) technology has been commercialized for fast production of fiber reinforced composite materials. The high-pressure mixing head was one of the most core component of the HP-RTM process. In this study, a mixing head was systematically designed, manufactured and evaluated. This mixing head was composed of a nozzle, a mixing chamber, a cleaning piston part, and an internal mold release part. In actual, a straight-type structure was newly designed instead of the conventional L-type structure for improving the maximum mixing pressure and mixing ratio precision. The performance of mixing head was showed maximum mixing pressure of 15.22MPa and mixing ratio precision of 0.12%. CFRP molding experiments were successfully obtained a 6~11 laminating carbon sheet using HP-RTM presses and specimen molds.

Key Words : Carbon Fiber Reinforced Composite Material(탄소 섬유강화 복합소재), High-Pressure Resin Transfer Molding (고압 수지이송 성형), High-Pressure Mixing Head(고압 믹싱헤드), Maximum Mixing Pressure(최대 믹싱 압력), Mixing Ratio Precision(믹싱 비율 정밀도)

1. 서 론

최근 들어 지구 온난화와 자원 고갈로 환경에 대한 중요성이 커지면서 자동차, 항공 산업분야에

서도 친환경 및 경량화를 위한 기술개발이 주요 이슈가 되고 있다^[1-2]. 이러한 경량화를 위해서 전 세계적으로 관심이 증대되고 있는 탄소 섬유강화 복합소재(Carbon fiber reinforced composite material)는 람보르기니나 페라리 등 고성능 스포츠카에서 무게절감을 위해 주로 적용되고 있다. BMW 등 일부 업체에서 고급 차종의 차체 부품에 양산을 시작하였으며, 닛산 등 일본의 자동차 회사에서도

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

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

양산을 위해 활발하게 연구하고 있다^[3-7].

탄소 섬유강화 복합소재를 이용한 부품개발을 위해 고압 수지이송 성형(HP-RTM : High-pressure resin transfer molding)공정 등과 같이 고속 제조공정 기술 및 성형 특성평가에 대한 연구는 많이 진행되고 있다^[8]. Fig. 1은 탄소 섬유강화 복합소재의 고속 생산을 위한 고압 수지이송 성형공정도이다. Fig. 1(a)에서 프리폼을 하부 금형에 배치한 후 부분적으로 금형을 닫고 금형 표면과 섬유 프리폼 사이에 약 2mm 이하의 작은 간격을 유지한다. Fig. 1(b)에서 고압 믹싱헤드(Mixing head)로 수지(Resin)와 경화제(Hardener)를 혼합하여 금형에 주입하고, 혼합액은 프리폼 상부로 유동하고 부분 함침된다. Fig. 1(c)는 필요한 양의 수지가 주입 완료되면 금형을 완전히 닫고 압착한다. 마지막으로 Fig. 1(d)에서 부품은 수지가 경화된 후 금형이 열리고 경화된 RTM 부품이 제거되는 과정을 나타내고 있다^[9].

이러한 탄소 섬유강화 복합소재용 고속 생산장비의 성능 확보를 위해 Fig. 1(b)에서 설명하고 있는 주요 핵심부품인 고압 믹싱헤드의 관련 기술 개발이 더욱 요구되고 있다. Lee와 Kim^[10]은 인몰드 코팅용 믹싱헤드에서 혼합특성을 연구하였고, Teixeira^[11]등은 반응사출공정용 믹싱헤드에 대하여 흐름특성을 연구하였다. 또한, 고압 믹싱헤드는 다양한 금형에 장착되기 위해서는 단순한 구조의 소형 형상이 요구된다. 기존 L형 구조는 별도의 혼합실 실린더가 요구되어 형상이 복잡한데 비하여, 직선형 구조는 단순한 믹싱헤드를 설계할 수 있는 장점을 가지고 있다. Hamidreza^[12]등은 직선형 고압 믹싱헤드 설계모델을 이용하여 혼합 효율의 최적화를 위한 전산 유동해석을 진행하여, 노즐에서 분사되는 제트의 속도가 높은 경우 믹싱 효율이 증대되는 결과를 제시하였다.

한편, 기존에는 성형 완성품의 탈형을 위해서 금형 공정에서 별도의 수작업 및 자동화 공정으로 외부 이형제를 투입하는 공정개선이 요구되었다. 효율적인 생산을 위해 내부 이형제 수지가 개발되어 있으며^[13], 고압 믹싱헤드의 또 다른 구조 측면에서는 내부 이형제 첨가를 위한 정적 믹서 구조 및 이형제 투입 모듈의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 탄소 섬유강화 복합소재

의 고속 생산을 위한 고압 수지이송 성형공정에서 내부 이형제 모듈이 장착된 직선형 고압 믹싱헤드를 새로이 설계 및 제작하였다. 그리고 개발된 고압 믹싱헤드의 최대 믹싱 압력 크기에 의한 안정성 평가 및 믹싱 비율 정밀도 평가에 따른 성형 품질 정도를 조사하였다. 또한, SGL사의 HPT[®] 300 C45과 HPT[®] 300 C090 두 종류의 탄소 섬유시트 6 ~ 11층을 X,Y 양방향 강성을 위해 교차적층하여 그 단면 두께 변화에 따른 압축정도를 조사하여 고압 믹싱헤드의 유용성을 제시하고자 한다.

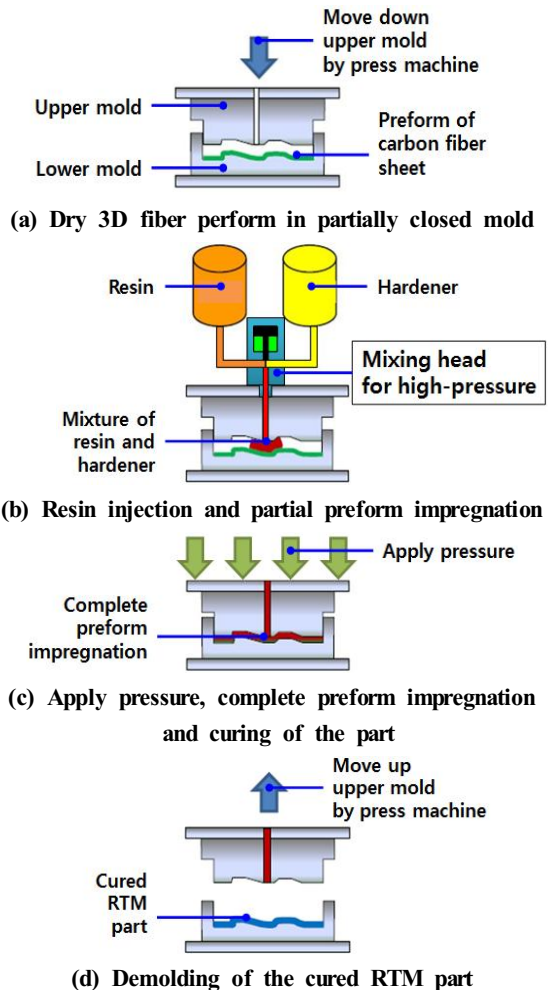
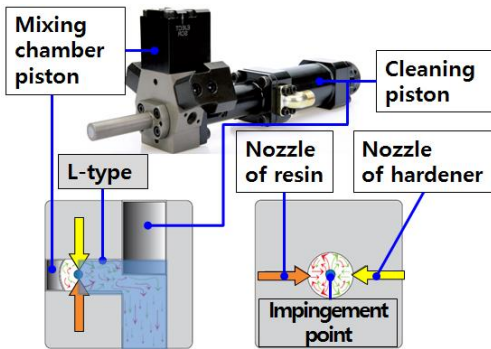


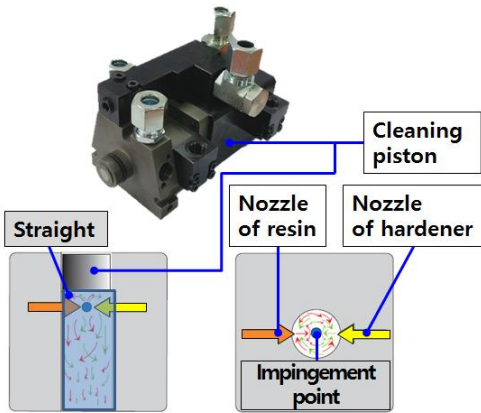
Fig. 1 Schematic process drawings of high-pressure resin transfer molding method^[14]

2. 내부 이형제 모듈을 가진 직선형 고압 믹싱헤드 설계 및 제작

Fig. 2는 기존의 L형 믹싱헤드와 새로이 제안한 직선형 믹싱헤드의 구조를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 L형 믹싱헤드 구조로 혼합액의 On/Off 제어를 위하여 혼합실 피스톤(Mixing chamber piston)과 클리닝 피스톤(Cleaning piston)이 구성된다. Fig. 2(b)는 직선형 믹싱헤드 구조이며 별도의 믹싱 챔버 피스톤(Mixing chamber piston)부를 구성하지 않고 클리닝 피스톤만으로 혼합액의 On/Off 제어할 수 있는 구조를 나타내고 있다. 따라서, 직선형은 L형보다 단순한 소형 구조로 설계



(a) L-type mixing head

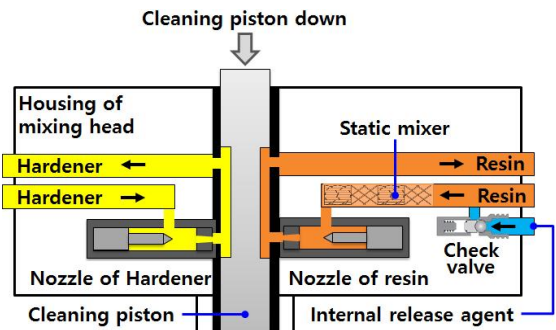


(b) Straight mixing head

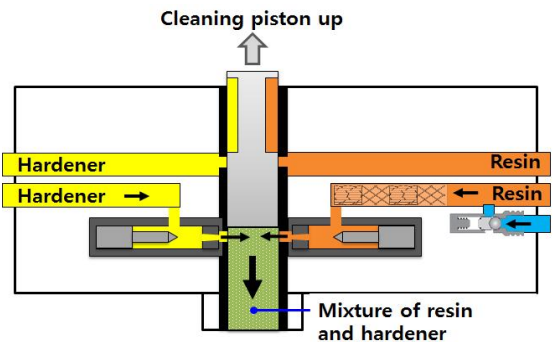
Fig. 2 Structure comparison of L-type and straight mixing head

할 수 있는 이점을 가지고 있다. L형 구조는 혼합실의 충돌 지점에서 흐름이 시작하여 아웃렛 파이프로 굴절하여 직선형 보다 믹싱효율이 증대되지만^[15] 복합소재 고속생산을 위해서는 단순한 소형 구조를 위해 직선형 믹싱헤드를 설계하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 직선형 고압 믹싱헤드의 기본 작동원리를 나타내고 있다. 믹싱헤드 하우징에 수지 및 경화제를 공급하기 위한 입력구(In)와 순환하기 위한 출력구(Out)가 구성된다. 각 용액은 노즐(Nozzle)을 통하여 분사한다. Fig. 3(a)에서 클리닝 피스톤이 전진하여 수지 및 경화제는 각 노즐에서 분사되지만 클리닝 피스톤에 가공된 홈을 통하여 다시 탱크로 순환되는 상태를 나타내고 있다. Fig. 3(b)는 혼합 및 주입 상태로 클리닝 피스톤이 후진하여 수지 및 경화제가 노즐에서 분사된다. 분사된 용액은 혼합실 내에서 충돌되고, 혼합되어 출구로 금형에 주입된다.



(a) Mixing head in recirculation mode



(b) Mixing head during resin mixing and injection step

Fig. 3 Concept design and operating principle of a high-pressure straight mixing head

또한, 내부 이형제(Internal release agent) 주입을 위해 수지 배관라인에 수지와 내부이형제의 혼합을 위하여 Fig. 3(a)에 나타낸 것처럼 정적 믹서(Static mixer) 및 내부 이형제 흐름을 제어하기 위한 체크 밸브(Check valve)를 구성하였다. Fig. 4는 최종 설계 및 제작된 직선형 믹싱헤드를 보여준다.

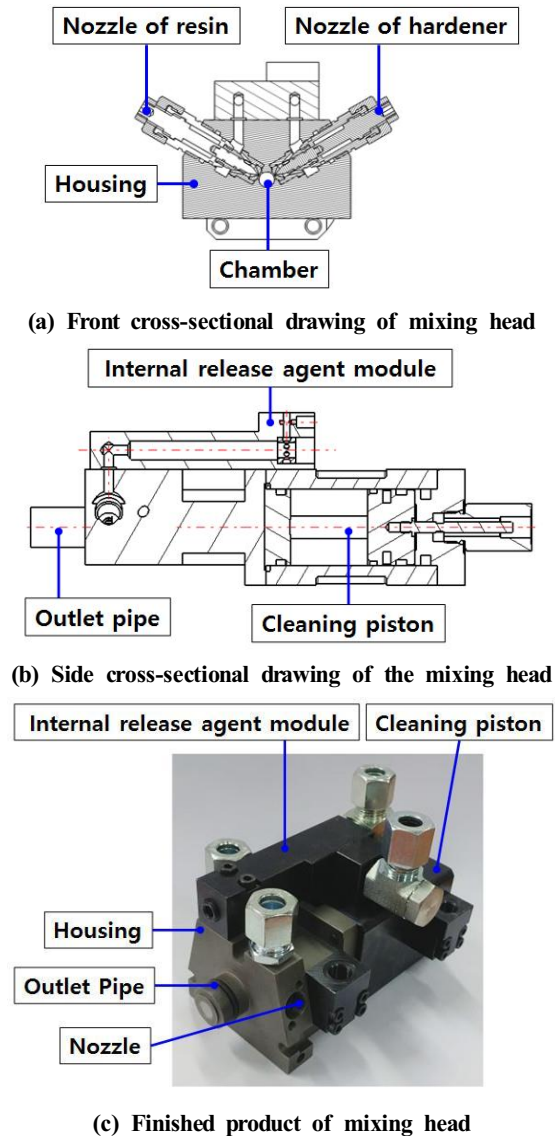


Fig. 4 Design drawing and finished product of mixing head

3. 실험 장치 및 방법

3.1 직선형 고압 믹싱헤드의 성능 평가

Fig. 5(a)는 고압 공급장치(High-pressure supply unit)이며, 수지 및 경화제의 각 탱크와 정량 펌프(Metering pump, Pressure Range : ~ 25MPa) 및 모터(Motor) 등으로 구성된다. 온풍장치(Heating air device)를 구성하여 수지 및 경화제 탱크의 온도를 70~80도로 유지한다. 유압공급장치(Hydraulic unit)는 믹싱헤드의 클리닝 피스톤의 작동 유압을 공급하도록 구성된다. 고압 믹싱헤드는 공급 장치에 연결되어 금형에 장착되고 수지와 경화제의 혼합물을 주입한다.

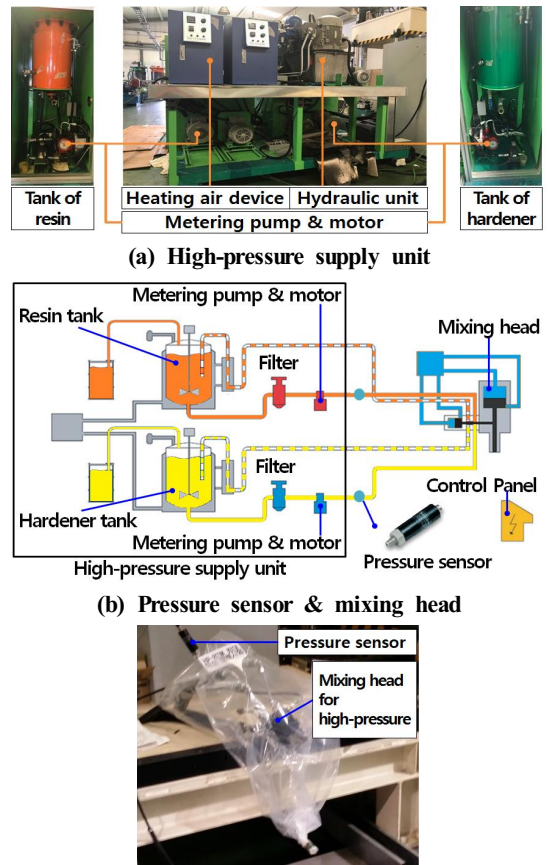


Fig. 5 Experimental apparatus for maximum pressure and mixing ratio precision of mixing head

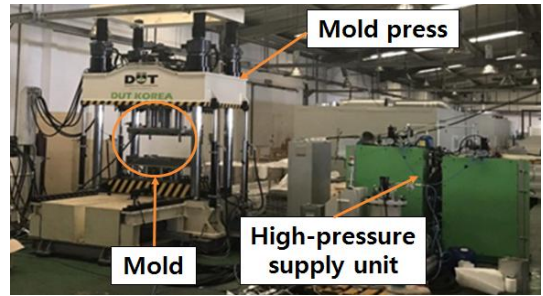
Fig. 5(b)와 같이 고압 공급장치에 구성된 미터링 펌프를 구동하여 탱크의 용액을 믹싱헤드에 공급된다. 믹싱헤드에 공급된 용액은 노즐에서 분사되고 클리닝 피스톤이 후진하면 각 용액은 금형에 주입된다. 고압 공급장치와 믹싱헤드의 연결 배관 라인에 압력 게이지(SENSYS, SC-2100), 압력센서(SENSYS, PTA, Range: 0~500MPa)를 설치하여 최대 믹싱 압력(MPa)을 측정하였다. Fig. 5(c)와 같이 수지와 경화제를 압력의 반복성을 확인하기 위하여 총 5회 최대 믹싱압력 실험을 진행하였다.

믹싱비율 정밀도평가를 위하여 수지와 경화제의 토출된 유량(g/sec)은 각 용액을 10초간 분사하여 정밀 저울(CAS, XE-600)로 측정하였다. 믹싱비율 정밀도의 반복성을 확인하기 위하여 총 5회의 유량 측정실험을 진행하였다. 측정된 수지와 경화제의 유량으로 수지 대비 경화제의 믹싱비율을 계산하여 믹싱비율 정밀도를 평가하였다.

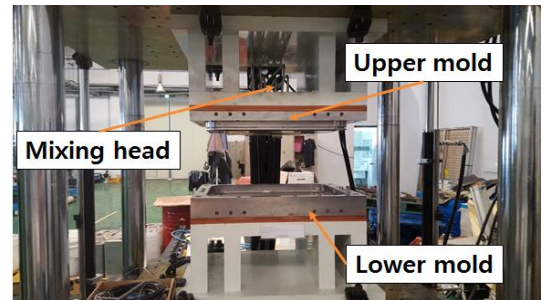
3.2 직선형 고압 믹싱헤드의 탄소 섬유강화 복합소재 유용성 평가

직선형 믹싱헤드의 유용성을 알아보기 위하여 탄소 섬유강화 복합소재에 프레스 성형 실험을 수행하였다. Fig. 6(a)와 같이 200톤 성형 프레스(Mold press, DUTKOREA, HP-RTMP200)에 상부금형(Upper mold) 및 하부금형(Lower mold)을 장착하였다. 상부금형에는 믹싱헤드를 장착하고, 믹싱헤드는 고압 공급장치에 연결하였다. 하부 금형에 카본 시트를 배치하였다. 그리고 상하부 금형을 수지의 주입공간을 위해 상하부 금형을 2mm 간격으로 유지하고, 고압 믹싱헤드를 통하여 에폭시 수지 및 경화제의 혼합물을 주입하였다. 주입이 완료된 후 금형을 완전히 닫고, 5분간 경화시킨 후 시편을 금형에서 탈형하였다.

탄소 섬유강화 복합소재의 고압 믹싱헤드의 유용성을 알아보기 위하여 Fig. 7(a)와 같이 하부 금형에 탄소 섬유시트를 적층하였다. 이때 사용된 탄소 섬유시트는 Fig. 7(b)와 같이 SGL사의 HPT® 300 C45 (섬유방향: $\pm 45^\circ$)와 HPT® 300 C090(섬유방향: $0^\circ/90^\circ$)를 시편 금형에 맞게 재단 후 $0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ$ 로 X,Y 양방향 강성을 위해 교차 적층하였다.

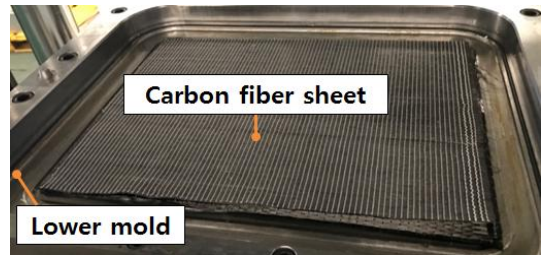


(a) Mold press and high-pressure supply unit

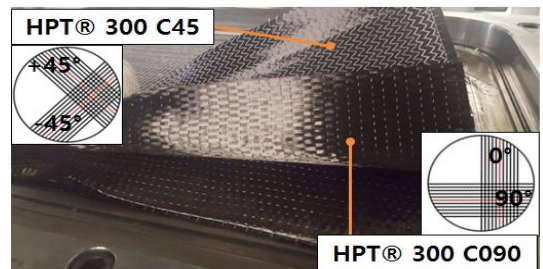


(b) Mold and mixing head

Fig. 6 Experimental apparatus of high-pressure resin transfer molding process for manufacturing carbon fiber reinforced composite material



(a) Carbon fiber sheets arranged in lower mold



(b) Cross-lamination of carbon fiber sheets

Fig. 7 Carbon sheet with 6-ply cross-lamination C45 and C090 on lower mold

Table 1 Material property of epoxy resin and hardener

Item	KER 9610 (Resin)	KCA 9610 (Hardener)
Viscosity at 25 °C (Pa.s = N·s/m ²)	1,500 ~ 3,000	< 50
Mixing viscosity at 25 °C (Pa.s = N·s/m ²)	600 ~ 800	
Specific gravity at 25 °C	1.10 ~ 1.20	0.94 ~ 0.98

Table 1은 고압 수지이송 성형공정에 적합한 고속경화 수지인 에폭시 수지(KER -9610, Kumho petrochemical)와 경화제(KCA9610, Kumho petrochemical)이며, 성형 공정 실험에 사용하였다. 앞서 설명한 두 종류의 탄소 섬유시트를 금형 성형 공간의 두께가 2.7~3.2mm이므로 6장 ~ 11장을 적층하여 그 단면 두께의 변화에 따른 압축정도를 확인하였다. 적층 단면사진은 고배율 현미경(VHX500, Keyence Corp., Japan)을 이용하여 두께 방향(X-Z 평면)으로 50배 확대하여 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 최대 믹싱 압력 및 믹싱비율 정밀도 평가

2015년 Composite world 잡지에서 보고한 바에 의하면, 저압 성형공정은 1.0~2.0MPa에서 수지를 혼합하여 주입하고 표준 공정시간은 30~60분이다. 고압 수지이송 성형공정은 믹싱헤드에서 최대 15.0MPa 및 금형에서 3.0MPa에서 12.0MPa까지를 의미하며, 표준 공정시간은 10분 미만이라고 정의하고 있다^[16].

Fig. 8은 최대 믹싱압력에 대한 총 5회 실험 결과를 나타내고 있다. 수지(A)는 15.17~15.23 MPa의 값을 보였고, 그 값들의 평균은 15.20 MPa이다. 경화제(B)는 15.17 ~ 15.32 MPa의 값을 보였고, 그 값들의 평균은 15.25 MPa이다. 각 값의 측정값에 대한 분포를 알아보기 위하여 표준 편차를 구한 결

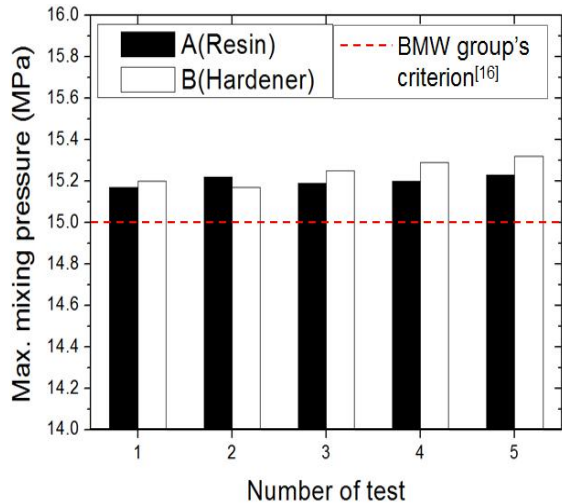
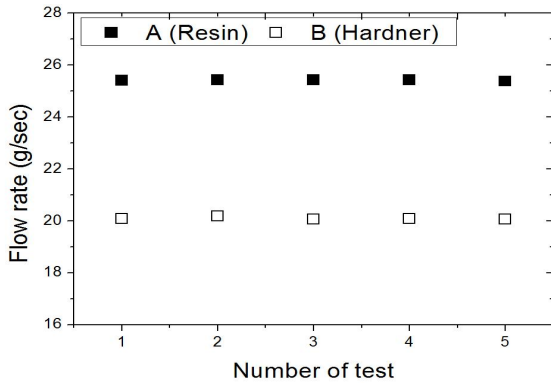


Fig. 8 Measurement results of maximum mixing pressure for resin and hardener of mixing head using pressure sensor

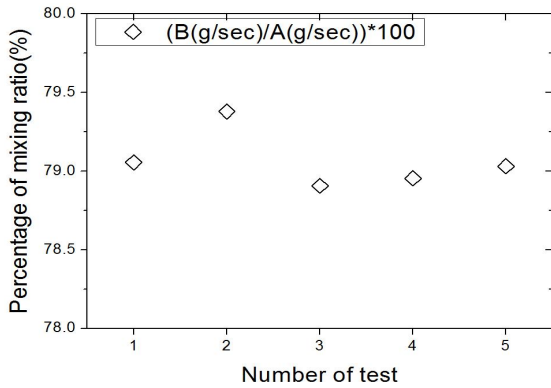
과 수지 0.024 MPa 및 경화제 0.062 MPa를 확인하여 안정적인 15 MPa 이상 최대 믹싱압력의 크기가 거의 균일한 값을 가짐을 알 수가 있었다.

또한 믹싱헤드에서 유체 믹싱 효율에 영향을 미치는 인자는 유체의 온도, 점도, 레이놀즈 수, 노즐 형상 및 압력 등 매우 다양하다^[17-19]. 본 연구의 관점에서는 최대 믹싱압력을 15MPa 이상을 확보함으로써 탄소 섬유강화 복합소재 성형시에 수지 및 경화의 믹싱 효율이 증대되어 품질 향상이 가능할 것이라 생각된다.

Fig. 9(a)는 수지 및 경화제의 유량 측정 결과이다. 수지 유량은 25.37 ~ 25.42 g/sec, 경화제 유량은 20.05 ~ 20.07 g/sec로 측정되었다. 용액의 믹싱비율은 측정된 유량으로 경화제(B)/수지(A)의 비율을 계산하였다. Fig. 9(b)는 계산된 믹싱비율을 나타내고 있으며 최대 79.38%, 최소 78.95%, 평균 79.07%이다. 믹싱 비율의 평균 대비 오차는 최대 0.31%, 최소 -0.16%, 절대 평균 0.12%를 가지며, 그리고 그 값들로부터 표준편차는 0.19%로 거의 균일한 값을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터, 탄소 섬유강화 복합소재의 성형공정에 있어서 매우 안정적인 최종 성형품질이 얻어질 것으로 충분히 예상할 수 있다.



(a) Flow rate of resin and hardener

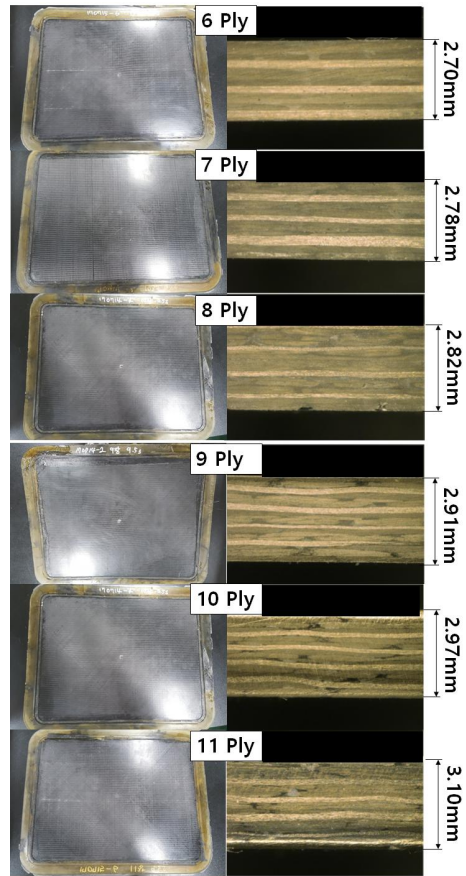


(b) Mixing ratio of resin to hardener

Fig. 9 Evaluation of mixing ratio precision for resin and hardener of mixing head by flow rate measurement

4.2 탄소 섬유강화 복합소재의 적층 성형 평가

탄소 섬유시트 6~11장을 X,Y 양방향 강성을 위해 교차 적층하였고, 개발된 직선형 고압 믹싱헤드로 에폭시 수지(KER-9610)와 경화제(KCA-9610)를 믹싱 주입하여 탄소 섬유강화 복합소재의 성형 가능성을 확인하였다. Fig. 10은 적층 수에 따른 섬유 강화 복합소재 성형 완성품과 단면 사진이다. 단면 사진에서 6장 적층시 두께 2.70mm에서 11장 적층시 두께 3.10mm 로 증가하였다. Fig. 11은 Fig. 10에 측정된 각 적층수별 두께를 적층수로 나누어 한 층의 평균두께(Average thickness of the one ply)를 조사하였다.



(a) CFRP molded product (b) Cross-section

Fig. 10 CFRP molded product and cross-section fabricated by laminated quantity

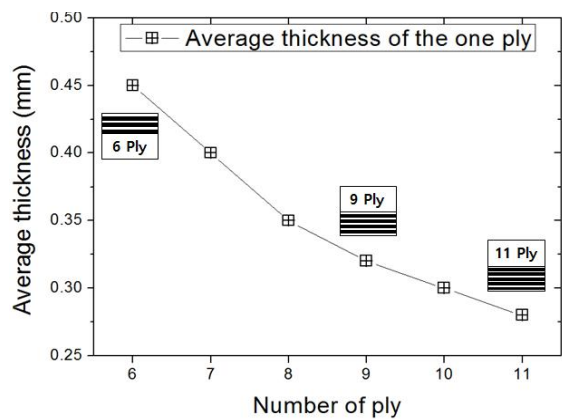


Fig. 11 Average thickness of the one ply by laminated quantity

적층수가 증가할 수록 한 층의 평균 두께가 감소함으로 섬유시트 압축이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 시편의 강도가 증가할 것으로 예상된다^[20]. 강도시험 및 공정조건 관련내용은 향후 추가 연구 결과를 보고할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 내부 이형제 모듈, 노즐, 혼합실, 클리닝 피스톤부로 구성된 직선형 고압 믹싱헤드 에 대한 성능 평가를 진행하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

1. 탄소 섬유강화 복합소재의 고속 수지이송 성형 공정의 특성을 고려하여, 내부 이형제 모듈과 직선형 고압 믹싱헤드를 단순한 소형구조로 새로이 설계 및 제작하였다.
2. 최대 믹싱압력의 평균값은 수지가 15.20 MPa 그리고 경화제 15.25 MPa을 보였다. 표준 편차는 수지 0.024 MPa 및 경화제 0.062 MPa로서, 안정적인 최대 믹싱압력 분포를 가짐을 알 수가 있었다.
3. 믹싱 비율은 각 용액의 유량을 측정하여 경화제(B)/수지(A)의 비율을 계산한 결과로 최대 79.38%, 최소 78.95%, 평균 79.07%이다. 믹싱 비율 정밀도는 평균 0.12%를 가지며, 표준편차는 0.19%로 거의 균일한 값을 가짐을 알 수 있었다.
4. 탄소섬유시트 6~11장을 적층한 결과, 적층두께는 2.70 ~ 3.10mm로 적층수가 증가할수록 전체 두께는 증가하고, 한 층의 평균 두께가 감소함으로써 섬유시트의 압축이 증가하는 것을 알 수 있었고, 이는 인장강도 증가효과로 나타날 것으로 예측할 수 있다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부 지역특화(주력) 산업 육성사업의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다. (R0005055)

REFERENCES

1. Kim, K. Y., Kwak, S. H., Han, G. D., Park, J. S., Cho, J. H., Lee, C. H., 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.
2. Kim, H. Y., Kim, T. G., Lee, S. W., Yoon, H. S., Kyung, D. S., Choi, I. H., Choi, H., Ko, J. M., "Development of Manufacturing System Package for CFRP Machining," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 431-438, 2016.
3. Lee, S. T., Park, S. G., 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.
4. Won, S. J., Li, C. P., Park, K. M., 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.
5. Kim, K. S., Bae, K. M., Oh, S. Y., Seo, M. K., "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles," Elastomers and Composites, Vol. 47, No. 1, pp. 65-74, 2012.
6. Ahn, J. M., Seong, D. G., Lee, W. O., Um, M. K., Choi, J. H., "A Study on Slip Behavior of Fiber Preform by High Speed Resin Flow in High Pressure Resin Transfer Molding," Composites Research, Vol. 27, No. 1, pp. 31-36, 2014.
7. Joo, Y. H., Park, Y. C., Lee, Y. M., Kim, K. H., Kang, M. C., "The Weldability of a Thin Friction Stir Welded Plate of Al5052-H32 using High Frequency Spindle," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 90-95, 2017.

8. Kim, K. S., Park, S. J., "Technique Status of Carbon Fibers-reinforced Composites for Aircrafts," *Elastomers and Composites*, Vol. 46, No. 2, pp. 118-124, 2011.
9. Simacek, P., Advani, S., Iobst, S., "Modelling Flow in Compression Resin Transfer Molding for Manufacturing of Complex Lightweight High-Performance Automotive Parts," *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 23, pp. 2523-2545, 2008.
10. Lee, H. S., Kim, D. M., "A Study on Mixing Characteristics of Two-component Polyurethane for In-mold Coating," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 317-323, 2013.
11. Teixeira, A. M., Santos, R. J., Costa, M. R. P. F. N., Lopes, J. C. B., "Hydrodynamics of the Mixing Head in RIM: LDA Flow-Field Characterization," *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 51, No. 6, pp. 1608-1619, 2005.
12. Karbasian, H., Kim, Y. W., Lee, I. B., Han, B. J., Jeong, Y. C., 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.
13. Robert, B., Piotrowicz, K., "Epoxy resin and release agents part I: Influence of external and internal release agents on the adhesive properties of epoxy resin," *Journal of Applied Engineering Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 45-50, 2015.
14. Raman, C., "Characterization of High-Pressure Resin Transfer Molding Process Variants for Manufacturing High-Performance Composites," *Fraunhofer Verlag*, pp. 28, 2014.
15. Baser, S. A., Shetty, D. G., Khakhar, D. V., "Jet Impingement Mixing in an L-type Mixhead: Comparison of Mixing Criteria," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 33, No. 24, pp. 1611-1618, 1993.
16. Ginger, G., "HP-RTM one the Rise," *Composites World*, pp. 58-65, 2015.
17. Tucker, C. L., Suh, N. P., "Mixing for Reaction Injection Molding. II. Impingement Mixing of Fiber Suspensions," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 20, No. 13, pp. 887-898, 1980.
18. Nguyen, L. T., Suh, N. P., "Processing of Polyurethane/Polyester Interpenetrating Polymer Networks by Reaction Injection Molding. Part II: Mixing at High Reynolds Numbers and Impingement Pressures," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 26, No. 12, pp. 799-842, 1986.
19. Kim, D. Y., Lee, T. K., Jeong, H. D., Kim, H. J., "Influences of Polyurethane Nozzle Shape on Mixing Efficiency," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 31-35, 2016.
20. Moon, J. B., Kim J. H., Jang, H. K., Park, J. S., "A Study on Calculation of Composites Lamina Material Properties through Reverse Engineering of Light Weight Composite Car-body," *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-10, 2017.