탄소섬유 강화 복합재의 압축성형 기술

이정민[1] · 김병민[2] · 고대철[3]
1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템학과
2. 부산대학교 기계공학부
3. 부산대학교 융합학부

CFRP Compression Forming Technology

J. M. Lee, B. M. Kim, D. C. Ko
1. Precision Manufacturing Systems Division, Pusan National University, Busan, South Korea
2. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, South Korea
3. Graduate School of Convergence Science, Pusan National University, Busan, South Korea

1. 개 요

최근 CFRP 소재의 개발이 가속화되면서 기존에 적용되던 우주·항공기 부품 및 스포츠 용품 등의 고가 제품뿐만 아니라 대량생산이 요구되는 차체 부품에도 사용량이 증가하고 있다[1]. 따라서, 대량생산을 만족시키는 CFRP 제품의 제조공법에 관한 연구들이 다양하게 수행되고 있다. 기존의 우주·항공 부품 및 스포츠 용품은 주로 오토클레이브(autoclave) 공법을 통해 제조되었다. 하지만 오토클레이브 공법으로 제조된 제품은 품질이 우수한 반면, 생산시간(cycle time)이 긴 단점이 있다[2]. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 탈 오토크레이브(out of autoclave, OOA)에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다[3].

Fig. 1은 CFRP 제품의 제조공정에 따른 생산성과 품질의 관계를 나타낸 것이다[4]. 사출성형(injection molding, IM)은 플라스틱 레진(resin)에 단섬유(short fiber)를 혼합하고, 금형의 캐비티(cavity)로 분사하여 제품을 제조하는 공법이다. 금형 내부에 다수의 캐비티를 가공하여 생산성이 우수한 장점을 지니지만, 단섬유 사용으로 인해 강도가 약한 단점을 가진다[5].

이러한 단점을 극복하기 위해 개발된 공정이 레진 트랜스퍼 몰딩(resin transfer molding, RTM) 공법이다[6]. 연속섬유(continuous fiber)를 이용하여 예비성형체(preform)를 제조하고, 이를 금형 내부에 안착한 후, 고압으로 레진을 주입하여 제품을 제조한다. RTM 공법은 설비 비용이 고가이며 레진 주입 시 발생하는 섬유배열의 뒤틀림에 의해 기계적 물성이 저하하는 단점을 가지지만, 기존 오토클레이브 공법에 비해 생산성이 우수하고 제품의 강도 또한 우수하다. 따라서 최근 독일의 BMW에서도 RTM 공법을

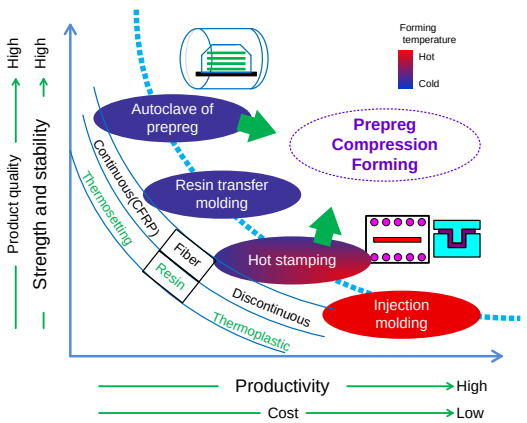

Fig. 1 Forming method of CFRP characterized in with productivity and strength and stability[4]

통해 차체 프레임(frame) 및 샤시(chassis)를 제조하여 i3 및 i8등의 양산차에 적용하고 있다.

CFRP를 이용한 핫스템핑(hot stamping) 공법은 열가소성 장섬유 복합재(long fiber thermoplastics, LFT)를 가열된 하부 금형에 안착하고, 상부 금형으로 가압하여 금형의 캐비티로 유동시켜 제작하는 방법이다. 핫스템핑 공법으로 제조된 제품은 10mm 이상의 장섬유를 사용하기 때문에 IM으로 제조된 제품에 비해 기계적 물성은 우수하지만, 자동차의 구조재로 사용될 정도의 기계적 강도를 가지지 못한다.

이를 극복하기 위한 방안으로 최근에 프리프레그 압축성형(prepreg compression forming, PCF) 공법에 대한 연구가 진행되고 있다[7]. PCF 공법은 탄소섬유에 레진이 미리 함침된 프리프레그 소재를 사용하여 핫스템핑과 동일한 방법을 통해 제품을 제조하는 공법으로, 생산성과 기계적 강도를 동시에 만족시키는 차세대 성형기술이다. 본 연구에서는 PCF 공법을 통한 CFRP 차체부품 제조 기술과 최근의 연구 분야 및 적용사례에 대해 소개하고자 한다.

2. PCF 공법

일반적으로 PCF 공법에 사용되는 프리프레그는 크게 열경화성(thermosetting), 열가소성(thermoplastic) 두 가지 레진을 사용한다. 먼저 열경화성 프리프레그 소재를 사용하는 PCF공법은 다음과 같은 공정 순서로 제품이 제조된다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 ①먼저 프리프레그를 배열에 따라 적층 한 후, ②예비가열(pre-heating)을 거쳐 ③냉간금형을 통해 프리폼(preform)을 제작한다. ④제작된 프리폼을 이송하여 ⑤온간금형을 통해 가압 및 경화 공정을 거쳐 ⑥최종적으로 냉각 및 탈형을 거쳐 제품이 제조된다. 이 공정은 프리폼 금형과 온간금형을 이용하여 복잡한 형상을 가진 제품에 대해서도 다단 성형(progressive forming)을 수행할 수 있는 장점을 지닌다.

일반적으로 열경화성 프리프레그를 이용한 PCF공법은 소재의 경화시간에 따라서 제품의 생산시간이 결정되기 때문에 레진의 포뮬레이션(formulation)이 매우 중요하다. 최근 Mitsubishi rayon와 SK chemical에서 기술 협약을 통해 5분 이내에 경화가 가능한 급속경화 프리프레그를 개발하였다. 기존의 에폭시(epoxy)를 적용한 프리프레그의 경화시간이 약 2

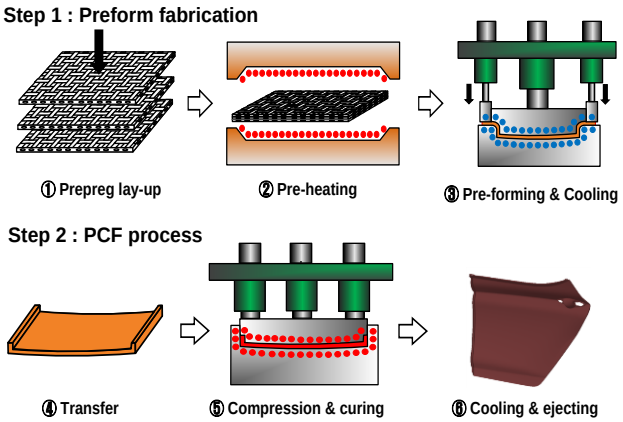

Fig. 2 PCF process using the thermosetting CFRP

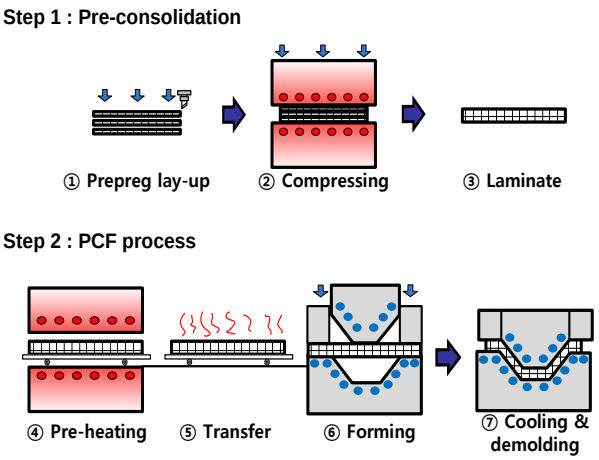

Fig. 3 PCF process using the thermoplastic CFRP

시간이었던 것을 감안하면 획기적으로 제품의 생산시간을 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3은 열가소성 프리프레그를 이용한 PCF 공법을 나타낸 것으로 ①먼저 프리프레그를 적층한 후, ②가열된 평판 프레스를 통해 압축성형을 수행하고, ③선행압밀(pre-consolidation)이 된 적층체를 제작한다. ④제작된 적층체를 예비가열 후, ⑤가열된 금형을 통해 성형을 수행한다. ⑥마지막으로 금형을 냉각시킨 후 탈형하여 제품을 제작한다.

열가소성 프리프레그를 이용한 PCF 공법은 소재의 온도가 유리전이온도(glass transition temperature, Tg) 이하로 하강하면 즉시 경화되는 성질을 지닌다. 따라서 고온에서 경화시간을 거쳐 제조되는 열경화성 소재에 비해 생산시간이 매우 빠른 장점을 지닌다. 또한, 열경화성 소재는 경화된 이후에 재성형 및 재활용이 불가능하지만 열가소성 소재는 유리전이온도 이상 가열 시, 재성형 및 재활용이 가능하기 때

문에 차세대 친환경소재로 평가 받고 있다. 하지만 열가소성 소재는 열경화성 소재에 비해 치수정밀도와 기계적 물성이 낮으며, 수축에 의한 뒤틀림 문제로 인해 이를 극복하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있는 실정이다[3, 5, 8].

3. CFRP의 성형 해석 및 물성평가

일반적으로 PCF 공법은 기존 수작업으로 성형하는 오토클레이브 공법과는 달리 제품의 형상을 프레스로 성형하여 제조한다. 이러한 성형과정에서 섬유 직물의 배열이 변형되어 방향에 따른 물성이 변하게 된다. 또한, 성형 시 주름(wrinkling)으로 인해 제품의 결함이 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 최근에는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 직물이 직조된 방향에 대해서는 탄성체(elastic body), 전단방향에 대해서는 점탄성체(visco-elastic body)로 가정하여 유한요소해석을 수행하고, 이를 통해 주름 및 직물의 배열을 예측하는 연구들이 진행되고 있다[8]. 이러한 직물 소재의 유한요소해석을 수행하기 위해서는 세 가지의 평가를 통해 프리프레그의 기계적 물성을 도출한다.

복합재의 성형 시 가장 중요한 변형 인자는 전단에 의한 성형이다. 앞서 언급한 바와 같이 직물방향으로는 탄성체를 가정하기 때문에 주로 변형되는 방향은 소재의 전단방향이라 할 수 있다. 이러한 전단 방향의 물성을 평가하는 방법으로는 크게 편향인장시험(bias extension test), 사진틀 전단시험(picture frame test) 두 가지로 나뉜다.

Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 편향인장시험은 소재를 45도 방향으로 세장비가 2:1 이상인 시편을 제작한다[9, 10]. 편향인장 시험을 수행하면 시험편 내에 크게 세 가지의 변형모드가 작용한다. 먼저 변형이 발생하지 않는 A구간, 전단력과 인장력이 혼재하는 B구간, 그리고 순수 전단력만 작용하는 C구간으로 나뉜다. 따라서 순수 전단에 의해 변형된 C구간의 전단각도(shear angle)와 하중을 통해 다음의 식으로 전단응력, 전단변형률을 계산할 수 있다.

Fig. 6은 사진틀 전단실험을 나타낸 것으로, 편향인장시험에서 발생하는 순수 전단구간만을 지그에 고정 후 동일한 방법을 통해 전단응력 및 전단변형률을 측정한다. Fig. 7은 편향인장시험으로 측정된 전단응력-전단변형률 선도를 나타낸 것으로, 하중이

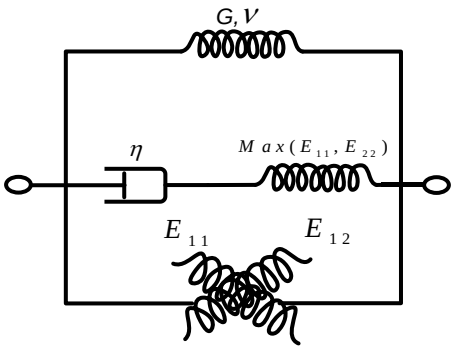

Fig. 4 Schematic overview of the material law used fabric composite[8]

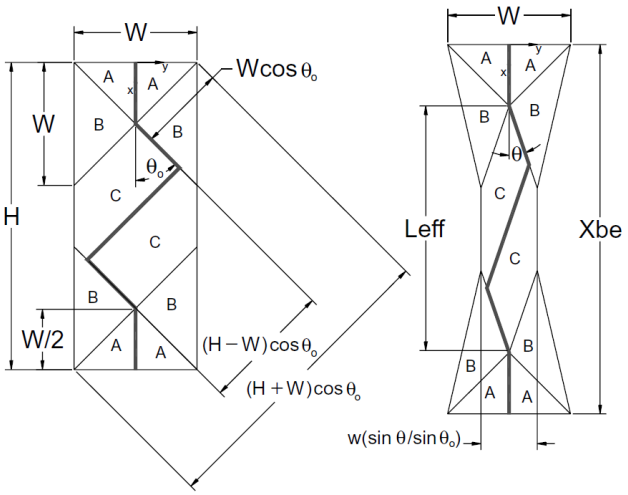

Fig. 5 Schematics showing the undeformed and deformed shapes in the bias-extension test[9]

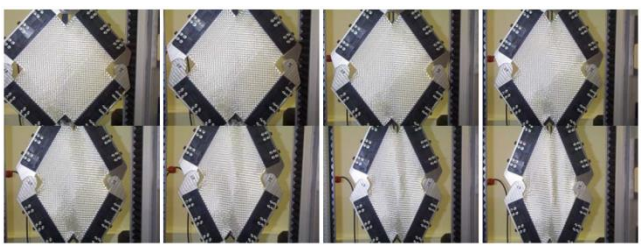

Fig. 6 Picture frame test for the fabric composite[8]

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A(t)} \qquad with\ A(t) = A_0\left(\frac{Cos\theta_0}{Cos\theta(t)}\right) \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = \lambda t = ln\left(\frac{Cos\theta(t)}{Cos\theta_0}\right) \tag{2}$$

불안전한 초기 구간을 제외하고 안정적인 구간에 대한 기울기를 통해 전단탄성계수(shear modulus, G)를 도출한다. 그리고 전단각도가 더 이상 변형하지

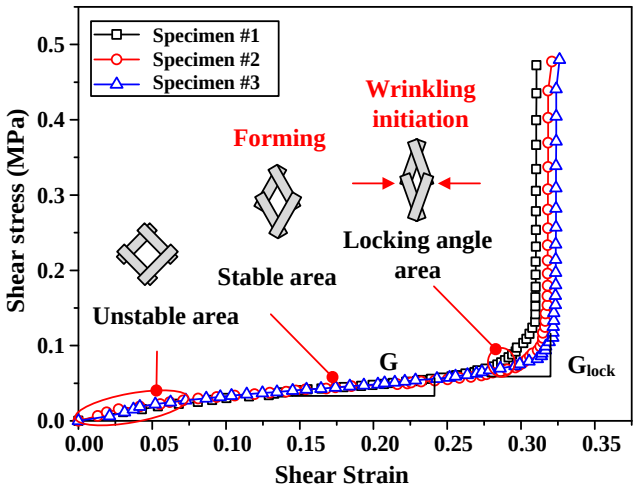

Fig. 7 Graph of shear stress-shear strain

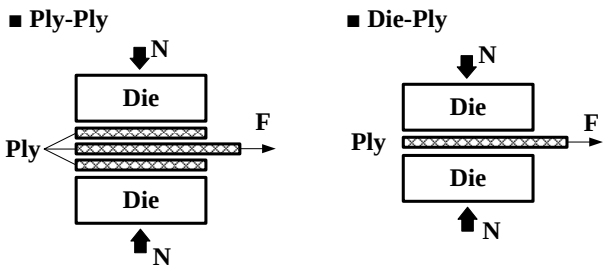

Fig. 8 Friction tests between ply-ply and die-ply

않는 잠금각도(locking angle)에 도달하게 된 이후의 기울기를 잠금전단탄성계수(locking shear modulus, Glock)로 계산한다. 여기서 잠금각도가 중요한 이유는 전단변형이 더 이상 발생하지 않는 것을 의미하며, 추가적인 변형이 발생하면 압축력에 의해 주름이 발생하기 때문이다[11].

다음으로 측정되어야 하는 소재의 물성은 마찰력이다. CFRP의 경우, 플라이(ply)를 여러 층으로 적층시킨 적층체(laminate)를 사용하여 성형하기 때문에 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 금형과 소재간, 소재와 소재간의 마찰계수 평가가 요구된다. CFRP는 기지재와 섬유가 혼합되어 있는 소재이기 때문에 온도와 인출속도에 따른 정밀한 측정이 요구된다. 그 이유는 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 층간의 슬립(slip)을 고려하지 않을 경우, 내부에서 발생하는 층간 박리(delamination)현상을 예측하지 못할 위험이 있다. 따라서 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 온도와 속도에 따른 마찰계수를 실험 및 해석적으로 정밀하게 평가하여야 한다[12].

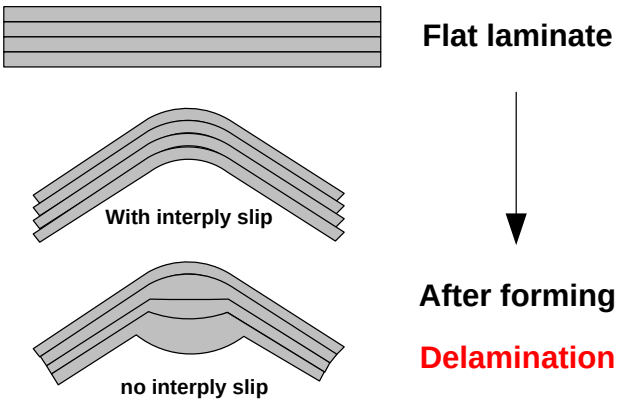

Fig. 9 Inter-ply slip during forming of multilayered composite[8]

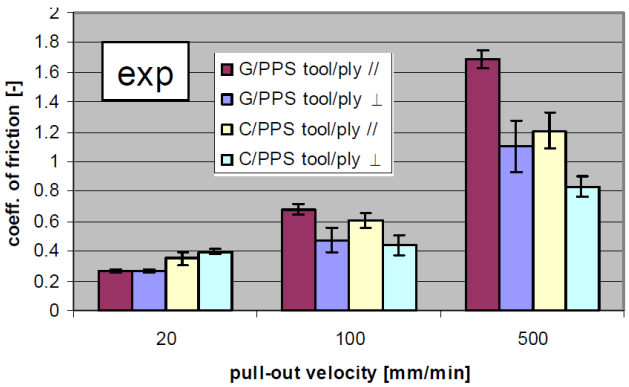

Fig.10 Friction coefficient of the tool-ply and ply-ply[12]

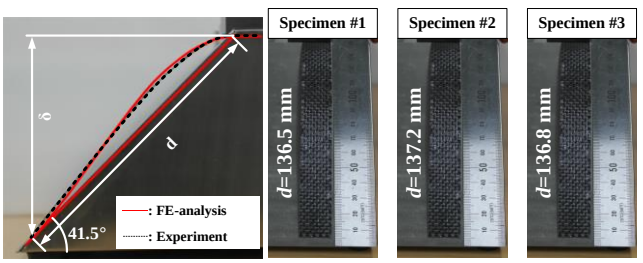

Fig. 11 Self-weight bending test of CFRP prepreg

마지막으로 강연도(self weight bending)시험은 소재의 자중에 의한 처짐량을 역해석(inverse analysis) 기법을 통해 평가하는 방법이다. 이는 CFRP의 열간성형 시 소재가 다이와 펀치에 직접적으로 접촉하는 부분을 실제와 같이 모사하기 위해 필요한 시험이다. 시험방법은 Fig. 11과 같이, ASTM D1388규격에 의거하여 41.5° 각도를 가진 지그 위에 프리프레그를 고정하여 그 처짐량과 형상을 해석과 비교하여 굽힘 강성을 결정한다[13].

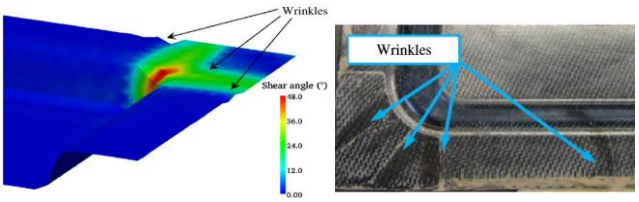

Fig.12 Comparison of the results for the CAE and FE-analysis[14]

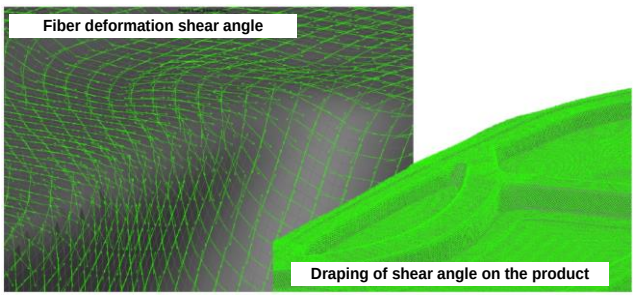

Fig.13 Hybrid analysis of forming-structure[15]

Fig.14 Applications of the parts of car body

Fig. 12는 측정된 물성을 활용하여 유한요소해석을 수행한 결과이다. 성형해석을 통해 코너부에 주름이 발생하는 것을 확인하였으며, 실험에서 이와 동일한 부위에 주름이 발생하는 것을 확인할 수 있다[14].

위에서 측정한 물성과 해석방법은 온도가 프리프레그의 물성에 크게 영향을 미치지 않는 열경화성 소재에 대한 연구 결과이다. 열가소성의 경우, 앞선 실험들을 열간에서 수행하고, 온도에 따른 결과값을 도출하여야 한다. 또한 열전달에 의해 뒤틀림이 발생하기 때문에, 이를 고려한 금형의 온도 제어 또한 중요한 인자라고 할 수 있다.

이 밖에도 PCF 공법과 관련된 다양한 연구들이 진행되고 있다. 최근에는 Fig. 13에 나타낸 것과 같이 성형된 직물의 패턴을 구조강도해석과 연동하여 해석의 정밀도를 높이려는 연구들이 수행되고 있으며, 아직까지 이에 대한 명확한 연구결과들이 나오지 않아 이러한 문제에 관한 연구가 시급하다.

4. 적용 사례

현재 세계적으로 RTM 성형에 관한 연구가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 국내에서도 현대자동차, 롯데케미칼 및 효성이 합작하여 Intrado 의 내부 프레임을 RTM 공법으로 제조한 바가 있다. 압축성형의 경우, 이탈리아의 람보르기니에서 LFT 소재를 사용하여 엔진커버를 제작하였으며, 독일의 벤츠에서도 LFT 와 금속의 하이브리드 적층을 통해 차체하부 덮게를 제작하였다. 이에 반해 연속섬유를 사용한 PCF 공법은 그 효율성에 비해 많은 연구가 진행되지 않고 있다. 최근 PCF 공법을 적용한 사례는 일본의 Mitsubish rayon 에서 압축성형공법을 통해 차량 후드(hood)의 외부 판넬과 내부 보강재를 제작하였으며[15], 국내에서는 ㈜신영에서 차량 루프판넬(roof panel)과 보강재(reinforcement)를 제작하였다[16]. 그 밖에도 한국탄소융합기술원에서 다양한 공법을 통해 차체부품 개발을 위한 연구를 수행하고 있다. 하지만 국내에서 보유한 설비의 한계로 인해 CFRP 차체부품의 생산이 쉽지 않은 실정이다. 국내에는 차체 부품을 제작할 수 있는 프레스 산업 시장 규모가 크기 때문에 기존설비를 활용한 PCF 공법을 통해 효율적으로 CFRP 차체부품을 생산할 수 있는 기술을 갖추어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

CFRP를 이용한 차체부품 개발에 있어서 가장 중요한 요인은 생산속도, 제품의 단가, 그리고 설비비용이다. 생산속도와 단가의 경우, 소재의 개발을 통해 원소재비의 절감과 속경화형 소재 개발을 통해 극복할 수 있는 반면, 내수 시장에서 고가의 오토크레이브 장비나 RTM 장비를 구축하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서, 국내의 시장에 가장 알맞은 PCF 공법을 통한 CFRP 차체부품 제조 기술 개발이 필요하다고 판단된다. 성형 시 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 성형해석 예측기술 및 금형 제어기술을 확보할 수 있으면 이를 통해 CFRP 차체부품의

제조강국으로 도약할 것을 기대된다.

REFERENCES

[1] Q. Liu, Y. Lin, Z. Zong, G. Sun, Q. Li, 2013, Lightweight Design of Carbon Twill Weave Fabric Composite Body Structure for Electric Vehicle, Compos. Struct., Vol. 97, pp. 231~238.

[2] D. Stefaniak, E. Kappel, T. Spröwitz, C. Hühne, 2012, Experimental Identification of Process Parameters Inducing Warpage of Autoclave-processed CFRP Parts, Composites Part A, Vol. 43, No. 7, pp. 1081~1091.

[3] C. Anthony, R. Dipa, O. Winifred, C. Gearoid, R. Inga, S. Walter, 2014, OOA (Out-Of-Autoclave) Manufacturing of Benzoxazine Resin-systems by LRI (Liquid-Resin-Infusion) for Ambient and High Temperature Aerospace Applications, International Conference and Forum SAMPE EUROPE 35th, pp. 69~76.

[4] J. Yanagimoto, K. Ikeuchi, 2012, Sheet Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Lightweight Parts, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 1, pp. 247~250.

[5] S. Pimenta, S. T. Pinho, 2011, Recycling Carbon Fibre Reinforced Polymers for Structural Applications: Technology Review and Market Outlook, Waste Manage., Vol. 31, No.2, pp. 378~392.

[6] I. Taketa, K. Yamaguchi, E. Wadahara, M. Yamasaki, T. Sekido, A. Kitano, 2006, The CFRP Automobile Body Project in Japan. In Proceedings of 12th US-Japan Conference Computational Materials, pp. 411~421

[7] J. Wulfsberg, A. Herrmann, G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stöß, M. Fette, 2014, Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry, Procedia Eng., Vol. 81, pp. 1601~1607.

[8] K. Vanclooster, 2009, Forming of Multilayered Fabric Reinforced Thermoplastic Composites, Leuven: University of Leuven.

[9] G. Lebrun, M. N. Bureau, J. Denault, 2003, Evaluation of Bias-extension and Picture-frame Test Methods for the Measurement of Intraply Shear Properties of PP/glass Commingled Fabrics, Compos. Struct., Vol. 61, No. 4, pp. 341~352.

[10] P. Bekampienė, J. Domskienė, 2009, Analysis of Fabric Specimen Aspect Ratio and Deformation Mechanism during Bias Tension, Mater. Sci. (Medžiagotyra), Vol. 15, No. 2.

[11] P. Hallander, M. Akermo, C. Mattei, M. Petersson, T. Nyman, 2013, An Experimental Study of Mechanisms Behind Wrinkle Development during Forming of Composite Laminates, Composites Part A, Vol. 50, pp. 54~64.

[12] R. Akkerman, R. Ten Thije, U. Sachs, M. De Rooij, 2010, Friction in Textile Thermoplastic Composites Forming, In Proceedings of the 10th International Conference on Textile Composites-TEXCOMP, Vol. 10, pp. 271~279.

[13] ASTM International, 2012, Standard Test Methods for Stiffness Fabric, ASTM D1388, American Society for Testing Materials.

[14] Q. Chen, P. Boisse, C. H. Park, A. Saouab, J. Bréard, 2011, Intra/inter-ply Shear Behaviors of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites in Thermoforming Processes, Compos. Struct., Vol. 93, No. 7, pp. 1692~1703.

[15] K. Akiyama, Development of PCM Technology, MITSUBISHI RAYON CO., LTD.

[16] J. M. Lee, K. H. Lee, B. M. Kim, D. C. Ko, 2016, Design of Roof Panel with Required Bending Stiffness using CFRP Laminates, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 17. No. 4, pp. 479~485.