

가압장치를 이용한 오토클레이브 대체 복합재료 성형공정 개발 및 분석

김정수* · 김병하** · 조치룡*†

Development and Analysis of the Autoclave Alternative Composite Material Molding Process Using a Pressure Device

Jung-Soo Kim*, Byung-Ha Kim*, Chee-Ryong Joe*†

ABSTRACT: In this study, a device and pressure press process that is able to substitute autoclave process is developed. This process complements disadvantages of autoclave process which are long process-time and high production cost. The developed device provides air pressure as well as the vacuum which are greatest feature of autoclave process. The device is sealed using hydraulic pressure to keep the air pressure inside the mold. The transfer of the heat is designed to be direct. The heating and pressure charging time are decreased by reducing the interior space. Tooling cost is reduced dramatically compared to autoclave process. Spring-back phenomenon is measured and compared. The temperatures of several parts of the mold during molding are measured. The fiber volume fraction of the parts molded by autoclave process and by the developed process are compared.

초 록: 고품질의 복합재료를 생산할 수 있는 Autoclave 공정의 단점인 긴 성형공정과 높은 생산비용을 보완하여 본 연구에서는 Autoclave 공정을 대체할 수 있는 Pressure press 공정과 장치를 개발하였다. Autoclave 공정의 가장 큰 특징이라고 할 수 있는 진공, 가압 공정을 금형 내부에 공간 설계를 통해 가능하게 하였고, 금형 내부 공기압이 소실되지 않도록 유압 press를 이용하여 가압장치를 설계하고 금형을 밀폐하였다. 가압장치에서는 가열과 냉각이 가능하게 하여 금형에 직접 온도를 전달할 수 있게 하였다. Autoclave 공정에 비해 내부 공간이 축소되어 가열 시간과 공기압 충전시간이 단축되었고 설비규모가 축소되어 초기설치비가 절감되었다. 가열방식에 따른 공정의 분석을 위해 V 자 형태의 금형을 제작하여 spring-back 현상 발생여부와 정도를 측정하고 Autoclave 공정과 비교하였으며, 복합재료 성형 시 금형의 온도를 측정하여 소재에 전달되는 각 부분의 온도를 관찰하였다. 그리고 같은 조건에서 Autoclave 공정과 Pressure press 공정으로 성형된 복합재료의 섬유 체적율을 비교하여 기계적 특성을 예측하였다.

Key Words: 오토클레이브 공정(Autoclave process), 가압 프레스 공정(Pressure press process), 금형 공간설계(Mold space design), 스프링-백(Spring-back), 섬유 체적율(Fiber volume fraction)

1. 서 론

복합재료 산업은 꾸준한 성장을 이루고 있고 여러 기관에서도 주목하고 있는 산업이다. 우주항공, 철도, 선박, 건

설, 스포츠, 에너지 분야 등 여러 분야로 확산되고 있으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 이렇게 복합재료가 많은 분야에서 주목받는 것은 복합재료가 담당하고 있는 기능들이 대부분 인간의 삶의 질을 윤택하게 하고, 한정적인 국가

Received 11 December 2014, accepted 23 December 2014

*Department of Mechanical Design Engineering, Changwon National University

*†Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Corresponding author (E-mail: jcr@changwon.ac.kr)

**KCA Inc.(Korea Composite Application)

자원을 절약하는 데에 매우 중요한 역할을 하고 있기 때문이다. 예를 들면, 복합재료가 수송기기용 차량에 적용되면 경량화로 인한 에너지 절감 효과, 소음 감소로 인한 안락감, 쾌적함 등을 제공하게 된다[1,2]. 구체적으로는 높은 비강도 및 비강성 특성을 가지고 각 재료의 조합이나 성형 공정에 따라 필요한 제품 특성을 만들어 낼 수 있다. 또한 기존의 금속재료 사용과 비교하면, 복합재료를 사용하는 경우에 중량은 약 30% 이상, 그리고 부품의 수는 약 30~75% 감소하는 것으로 나타난다[3].

최근 열가소성 수지계열의 기지를 사용한 연구가 활발해지는 추세이나 아직까지는 열경화성 수지를 사용한 복합재료가 제품의 주류를 이루고 있다. 열경화성 수지의 성형공정으로는 Hand lay-up, VARTM(Vacuum assisted Resin Transfer Molding), Hot press curing, Autoclave curing, Filament winding 등의 방법이 있는데 이 중 Autoclave 공정을 사용한 경화 제품의 품질이 일반적으로 다른 방법에 비하여 좋은 것으로 알려져 있다[4].

Autoclave 공정은 까다로운 항공용 부품 조건을 통과하는 고품질의 제품생산이 가능하여 항공우주 산업에서 핵심적으로 쓰이고 있지만 투자비, 운영비가 매우 높고 성형공정이 길어 뛰어난 물성이 필요한 항공기부품 등의 제작 이외에는 사용이 되지 않고 있는 실정이다. 따라서 복합재료의 응용을 확대하기 위해서는 무엇보다 고품질의 복합재료를 성형할 수 있으면서 저비용, 고생산성의 기술이 필요하다[5].

따라서 본 연구에서는 Autoclave 공정을 대체하는 Pressure press 공정을 개발하여 우주항공, 방위산업 뿐만 아니라 일반산업에서도 우수한 성질의 복합재료가 사용될 것을 기대한다.

2. 공정 개발

본 연구에서는 높은 생산성과 낮은 비용으로 Autoclave 공정을 대체할 수 있는 공정을 개발하였다. Pressure press 공정은 Autoclave 공정의 가장 큰 특징이라고 할 수 있는 진공과 가압공정을 포함한다. Fig. 1과 같이 press를 이용해 상하부 금형을 아래에서 가압하여 금형 내부를 밀폐시키고 금형내부공간을 공기압을 채워 press를 통해 가열하여 성형하는 방법이다. Autoclave 공정에 비해 내부 공간이 축소되어 가열 시간과 공기압 충전시간이 단축되었고 설비규모 축소로 인해 초기설치비도 절감되었다.

연구 개발 초기단계에 금형내부에 진공, 가압, 가열, 냉각 기능이 모두 포함된 설계를 하였지만, 이러한 방법은 금형의 설계 및 제작에 비용이 많이 들고 제품의 형상이 바뀌었을 때 다시 제작해야한다는 단점이 있어 press의 표면을 평판 형태로 제작하고 위아래 평판 사이에 열 전도성이 좋은 알루미늄(Al)으로 만들어진 금형을 따로 제작하였다. 이러한 방법은 장비 하나에서 금형의 종류에 따라 그에 맞는 여

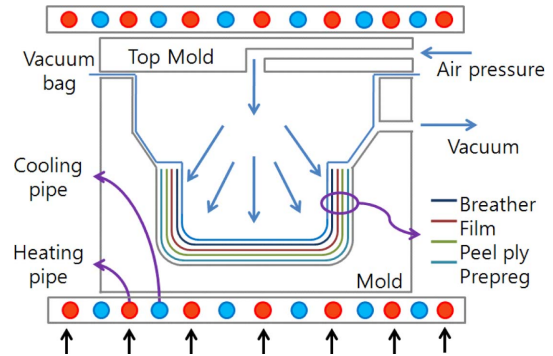


Fig. 1. Schematic diagram of the pressure press process



Fig. 2. Pressure press process equipment

러 가지 제품을 제작할 수 있고 금형의 개수에 따라 생산성이 매우 높아진다. 고온의 press에 금형만 교환해가며 진공과 압력을 주어 성형할 수 있어 효율적이다.

2.1 가압장치 및 가열/냉각 시스템

가압 고정 장치로 유압 press 시스템을 설치하였다. 이는 성형 시 유지되어야 하는 금형 내부 공기압이 소실되지 않도록 금형을 높은 압력으로 가압한다. 금형의 온도가 올라가면서 금형이 팽창하여 더욱 안정적인 밀봉이 가능하다. 그리고 Fig. 3과 같이 금형과 제품의 안전을 위해 유압 press 위치조절이 가능한 안전 sensor 2개를 부착하여 일정 높이부터 press의 상승속도가 대폭 감소하게 되어 미세한 움직임이 가능하게 제작하였다. 또한 안전을 위해 성형완료 후 press가 내부공기압력으로 밀리는 것을 방지하기 위해 성형완료 1분 후부터 유압 press의 압력이 내려가도록 설계되었다. Fig. 3과 같이 가열/냉각을 위해서 유압 press 내부에 가열관(Heating pipe)과 냉각관(Cooling pipe)을 다수 설치하여 가열 시에는 가열관을 통해 열이 전달되어 금형의 온도가 상승하고, 냉각 시에는 냉각관을 통해 냉각수가 순환되어 금형의 온도가 하강하는 시스템을 가진다.

가열관에는 카트리지 히터(Cartridge heater)가 사용되었다. 카트리지 히터는 금속 보호관내에 열선을 안 또는 바깥

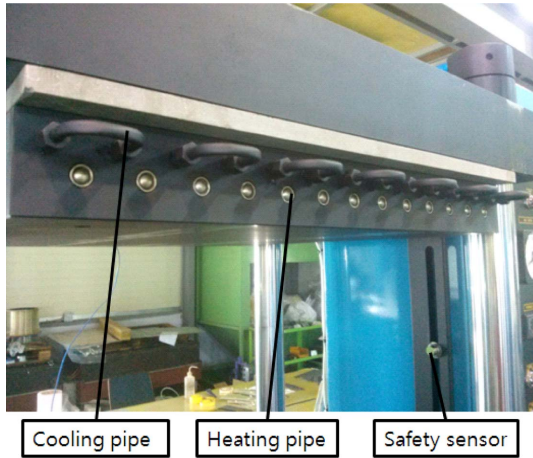
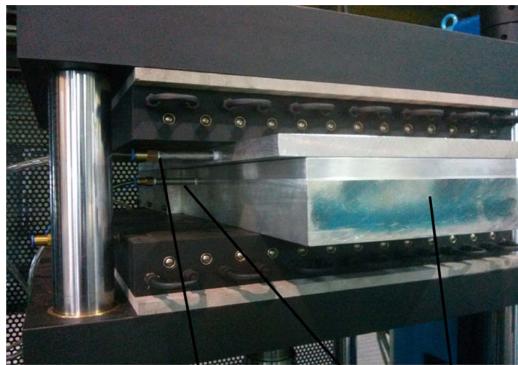


Fig. 3. Heating / Cooling system, Safety sensor

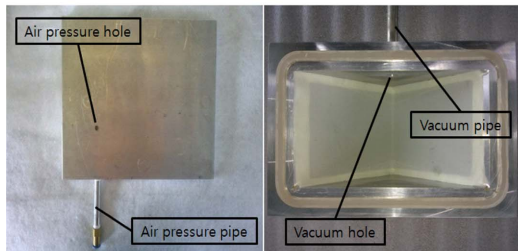
에 나선 형태로 균일하게 권선한 후, 절연성 및 전도성이 좋은 산화마그네슘을 충전, 압축 시키는 방법으로 sensor를 함께 내장하여 제작하므로 일정한 온도를 유지할 수 있다. 고열을 필요로 하는 곳에 강력한 가열을 할 수 있으며, 대체로 소형 가열장치이며 고도의 정밀성을 요구하는 특수 가열장치이다.

2.2 금형 설계 및 진공/공기압 시스템

금형은 열 전도성이 좋은 알루미늄(Al)금속으로 제작하



(a) Vacuum / air pressure system



(b) Air pressure system

(c) Vacuum system

Fig. 4. Design of vacuum / air pressure system in the mold

여 유압 press 가열장치에서 전달되는 열이 금형내부 골고루 전달되게 하였다. 또한 본 연구의 핵심이라고 할 수 있는 금형 내부는 일반적인 생산금형과 다르게 진공/압력 등을 위한 공간으로 활용하는 설계를 하였다. 진공을 위해서는 제품의 형태를 방해하지 않는 부분에 진공통로를 만들어 진공 호스를 연결하였으며, 상부 덮개 금형에는 공기압을 공급하기 위한 통로를 제작하였다. 따라서 진공비닐아래는 진공상태로 만들고, 진공 비닐 위에서 공기압으로 압착시켜 autoclave의 진공/가압 시스템을 금형과 press 내부에서 모두 가능하게 공정을 간소화 하였다. 내부 공기압을 채우는 과정은 autoclave의 용기보다 금형 속 공간이 더 좁기 때문에 신속하고 균일하게 압이 가해진다. 또한, 한국기계연구원 부설 재료연구소에서 압력계 교정을 하여 정확한 압력을 주입할 수 있게 하였다.

2.3 전체 시스템 제어장치

Fig. 5와 같이 Pressure press 공정의 시스템 들을 통합하여 제어할 수 있는 controller를 제작하였다. 성형되는 prepreg 경화 사이클의 해당 온도와 시간을 입력하여 실행 가능하고 진공과 유압 press, 내부공기압의 세기 조절이 가능하고 미리 설정해 놓은 경화사이클과 압력, 진공을 이용하여 자동 시스템도 가능하다. HANYOUNGNUX 사의 그래픽기록계 GR100 제품을 설치하였고 6개의 sensor 채널을 통해 온도와 압력을 측정하여 필요한 데이터를 실시간으로 확인할 수 있다. 또한, SD card를 삽입하여 그래프, 수치 등의 형태로 기록할 수 있으며 데이터를 얻을 수 있다.

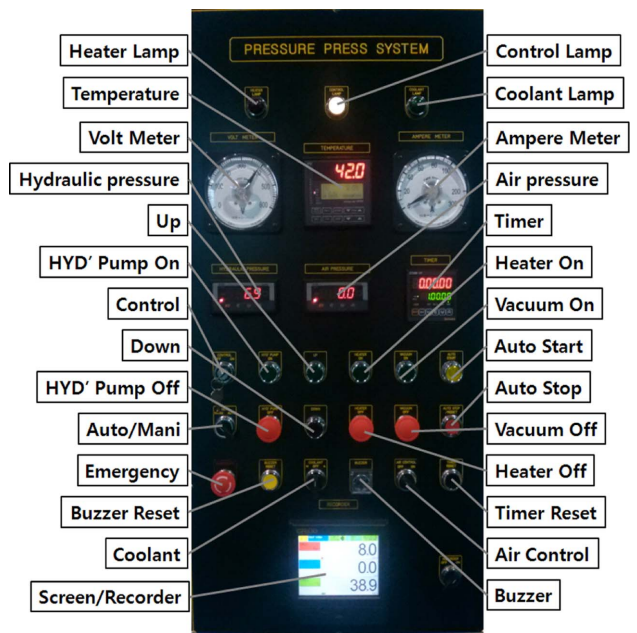


Fig. 5. Entire system controller

3. Pressure press 공정과 Autoclave 공정의 차이점 분석

3.1 재료와 성형 조건

본 실험에서는 SK 케미칼 사의 USN 175A(Unidirectional carbon prepreg) 사용하였고 성형조건은 각각 진공압력 1 bar, 내부공기압 3.8 bar를 사용하였다. 성형과정은 판매사의 권장경화 사이클로 15분간 90°C로 온도를 상승시킨 후 30분간 유지하고 30분간 온도를 125°C로 상승시킨 후 80분간 유지하고 온도를 떨어뜨리는 방식으로 실시하였다.

3.2 성형 과정의 차이점

Autoclave 공정과 Pressure press 공정의 성형과정에서의 차이점은 가열방식의 차이와 가압방식의 차이이다. 가열방식에서 Autoclave 공정은 용기 속의 공기를 가열하여 금형에 열을 전달하는 간접가열방식을 사용하고 Pressure press 공정은 가열 press를 이용해 금형에 온도를 직접 전달한다. 가압방식은 Autoclave 공정은 용기 내부를 공기압으로 채워 가압하고 Pressure press 공정은 금형 내부의 소재가 적층된 부분에 한해 가압된다. 따라서 가열, 가압 공간이 Autoclave에 비해 Pressure press 공정이 확연히 협소하고 이에 따른 시간과 장비가격차이도 크다.

3.3 금형의 온도변화 관찰

Autoclave 공정은 내부 공기를 가열하여 금형에 간접적으로 열을 전달하는 방식을 사용하고 Pressure press 공정은 press 표면을 가열하여 금형에 직접 열을 전달하는 방식을 사용한다. Autoclave 공정의 간접가열 방식에 비해 Pressure

Table 1. Compare pressure press and autoclave

	Pressure press	Autoclave
System	Vacuum, Pressure, Heating, Cooling	
Heating system	Direct heating	Air heating(indirect)
Internal volume	Narrow	Wide
Pressure build up time	Short	Long
Equipment cost	Cheep	Expensive

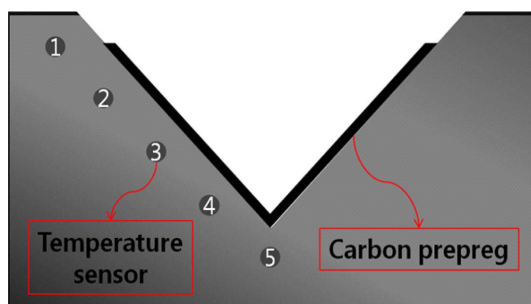


Fig. 6. Temperature sensors located in the mold

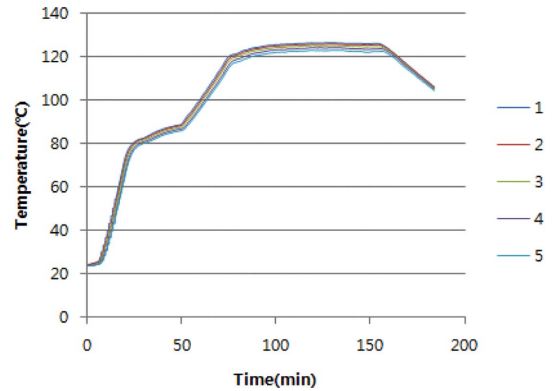


Fig. 7. Mold temperature measured during the cure cycle

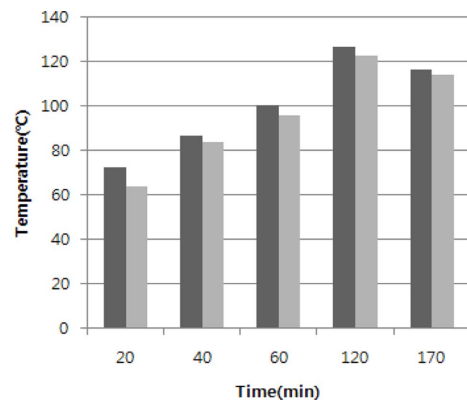


Fig. 8. Comparison of mold temperature in section ① and ⑤

press 공정의 직접 가열방식이 불균일하게 열이 전달될 것을 예상하여 실제 금형의 온도 변화를 관찰해 보았다. Pressure press 공정은 열을 아래에서 직접전달 하기 때문에 Fig. 6과 같이 온도센서를 아래에서부터 일정한 거리를 유지하여 설치하였다. 그리고 제품성형 시 온도변화를 관찰하였고 Fig. 7의 그래프와 같았다. ①번과 ⑤번 사이의 온도 변화를 자세히 살펴보기 위해 경화 사이클의 각 부분마다 온도의 차이를 그래프로 나타내었다. Fig. 8과 같이 온도 상승구간인 20분, 60분 구간은 온도 차이가 9.5°C, 4.8°C로 비교적 크지만 온도 유지구간인 40분, 120분 구간은 2.9°C, 3.2°C 차이로 온도차이가 크지 않았다. 다음 온도의 차이는 복합재료의 성형에 크게 영향을 미치지 못하지만 공정의 정확성을 위해 장치 주변의 온도를 유지할 수 있는 연구가 추가로 필요할 것으로 보인다.

3.4 Spring-back 현상을 통한 분석

본 연구에서는 가열방식에 따른 Pressure press 공정의 확립과 정확도를 검증하기 위해 V자 형태의 금형을 제작하여 spring-back 현상을 관찰하였다. 두 가지 공정에서 각각 성형하고 변화를 관찰하였다. Fig. 9와 같이 Pressure press 공정으로 성형한 복합재는 89.04°, Autoclave 공정으로 성형한 복합재는 89.07°로 나타났다. 이것으로 두 공정으로 제작된

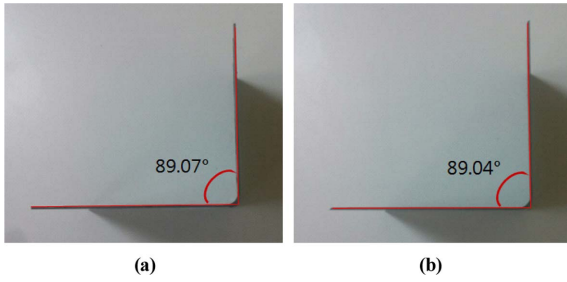


Fig. 9. Composite angle molded by (a) Autoclave (b) Pressure press

복합재료의 겉으로 드러나는 차이점은 없다는 것을 알 수 있다.

3.5 섬유 체적을 계산

탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 섬유 체적율은 복합재료의 기계적 성질에 큰 영향을 미치므로 정확하게 계산해야 하고 섬유 체적율이 두 가지 공정에서 동일하게 측정된다면, 기계적 특성이 크게 다르지 않을 것으로 예측된다[6,7]. 측정법으로 ASTM의 매트릭스 분해법과 연소법 그리고 이론적 계산법이 있다. 매트릭스 분해법은 화학적 방법으로 매트릭스 수지를 분해, 제거하여 잔사로 보강섬유의 체적율을 측정하는 방법으로 시간이 오래 걸리고 조작이 위험하다. 연소법은 탄소섬유가 산화되기 어려운 고온의 불화성 기체 속에서 에폭시 수지를 열 분해시켜 잔사로 체적율을 측정하는 방법으로 측정정밀도가 매트릭스 분해법보다 약간 떨어진다는 결점이 있지만, 측정시간이 짧고 조작이 안전하다[7].

하지만 본 연구에서는 이론적 계산법에 의해 섬유 체적율을 계산하였다. 이것은 섬유의 밀도와 적층 수, 시편의 두께, FAW(Fiber Areal Weight)를 이용해 (1) 식으로 계산가능하다.

$$V_f = \frac{FAW \times n}{\rho_f \times t} \times 100 \tag{1}$$

여기서, V_f 는 섬유 체적율, FAW는 섬유 면중량, n 은 적층수, ρ_f 는 섬유의 밀도, t 는 시편의 두께이다. FAW는 175 g/cm^2 , ρ_f 는 1.8 g/cm^3 로 계산하였다.

Table 2는 Autoclave 공정에서 성형한 시편으로 산출한 섬유 체적율을 나타내며 61.1%로 나타났다. Table 3은 Pressure press 공정에서 성형한 시편으로 산출한 섬유 체적율을 나

Table 2. Fiber volume fraction of CFRP in the Autoclave

	FAW (g/cm ²)	ρ_f (g/cm ³)	n (ea)	t (mm)	V_f (%)
1	175	1.8	8	1.27	61.2
2	175	1.8	8	1.26	61.5
3	175	1.8	8	1.28	60.8
Ave.	175	1.8	8	1.27	61.1

Table 3. Fiber volume fraction of CFRP in the pressure press

	FAW (g/cm ²)	ρ_f (g/cm ³)	n (ea)	t (mm)	V_f (%)
1	175	1.8	8	1.29	60.2
2	175	1.8	8	1.27	61.2
3	175	1.8	8	1.28	59.8
Ave.	175	1.8	8	1.29	60.8

타내며 60.8%로 Autoclave 공정에서 성형한 시편과 같은 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고품질의 복합재료를 생산할 수 있는 Autoclave 대체 복합재료 성형공정인 Pressure press 공정을 개발하였다. 진공, 가압 공정을 금형 내부에 공간 설계를 통해 가능하게 하였고, 유압 press를 이용해 가압장치를 설계하고 금형을 밀폐하여 금형 내부 공기압이 소실되지 않도록 하였다. 가압장치에서는 가열과 냉각이 가능하게 하여 금형에 직접 온도를 전달할 수 있게 하였다. Autoclave 공정에 비해 열전달방식의 변화와 내부 공간의 축소로 복합재 성형시간이 1/6배 단축되었고 공정설비가 축소되어 초기 설치비가 1/2배 가량 절감되었다. 가열방식에 따른 공정의 분석을 위해 V 자 형태의 금형을 통해 측정된 spring-back 현상은 두 공정 모두 약 -1° 차이를 보이며 겉으로 드러나는 차이점은 찾아볼 수 없었다. 복합재료 성형 시 금형의 ①과 ⑤ 사이의 온도 차이는 평균적으로 3°C 이었으며 이는 Press 주변온도의 영향의 차이로 보고 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 예상된다. 두 가지 공정으로 같은 조건에서 성형된 복합재료의 섬유 체적율을 계산하였고 Autoclave 공정 61.1%와 Pressure press 공정 60.8%로 섬유 체적율이 일치하는 경향을 보였다.

이 후, 생산성을 높이기 위해 경화속도에 따른 기본적인 기계적 특성 변화 연구가 진행된다면 Autoclave 공정을 저비용, 고생산성을 가진 Pressure press 공정으로 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 동남기술연구마을 연구과제로 수행되었고 이 논문의 일부는 2013~2014년도 창원대학교 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kim, K.S., Bae, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., "Trend of Carbon Fiber reinforced Composites for Light-weight Vehicles," *Journal of Elastomers and Composites*, Vol. 47,

- No. 1, 2012, pp. 65-74.
2. Yun, S.G., Jo, M.H., Kim, Y.Y., Lee, D.G., Kim, Y.D., Jo, Y.S., and Hwang, J.S., "CAE and Applied Mechanics Division," *Journal of the Korean Society for Macanical*. Vol. 47, No. 8, 2007, pp. 42-51.
 3. Kwon, S.C., Im, C.M., Choi, B.K., Lee, S.W., and Kim, Y.H., "A study on the Analysis of Causes & Minimizing of Defects at Composite Materials Sandwich Aircraft Structure in Autoclave Processing," *Journal of Composites Research*, Vol. 14, No. 1, 2011, pp. 22-29.
 4. Son, S.Y., and Lee, D.G., "Thermal Properties on the Autoclave Molding of Carbon Fiber Epoxy Composite," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 03, No. 1, 1990, pp. 53-58.
 5. Park, H.G., Yun, Y.G., and Yun, H.S., "Development of Vacuum-Press Curing Equipment for the Substitution of Autoclave," *Proceeding of the Korean Society for Composite Materials*, Korea, Oct. 2001, pp. 39-42.
 6. Yoon, B.I., "Effect of Fiber Bolome Fraction on the Mechanical Properties in Carbon Fiber-Epoxy Composite," *Published by the the Polymer Society of Korea*, Vol. 12, No. 7, 1988, pp. 619-626.
 7. Moon, Y.J., *A Study on the Shape of the Fiber-reinforced Composite Material According to the Durability and Mechanical Properties*, Ph.D Thesis, Pukyong University, Korea, 2011.