

대형 항공부품 열가소성 탄소 복합재 구조물 성형을 위한 Press-welding consolidation 가압 방식 비교

김원주^{a,b}, 김진수^{a,*}, 이찬주^c, 윤왕호^a, 최현석^c, 김동언^d, 백종훈^d, 최재혁^b

Comparison of Pressurization Methods for Press-welding and Consolidation of Large thermoplastic Carbon Fiber Composite for aircraft Part Structures

Wonju Kim^{a,b}, Jinsu Gim^{a,*}, Chanjoo Lee^c, Wangho Yun^a,
Hyunseok Choi^c, Dongearn Kim^d, JongHun Baek^d, Jae Hyuk Choi^b

^a Jinju Center, Dongnam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

^b Department of Future Technology Convergence Engineering, Gwangju University

^c Mobility Components Group, Daegyeong Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

^d Research Institute of Intelligent Manufacturing & Materials Technology, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 February 2026
Revised 25 March 2026
Accepted 1 April 2026

Keywords:

Thermoplastic composite
Carbon fiber reinforced plastics (CFRP)
Composite welding
Composite consolidation
Press welding

ABSTRACT

Although thermoset-based carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) for lightweighting aircraft are widely produced by autoclave processing, their application is limited by the long cycle times and high energy consumption of autoclaves, coupled with the inability to remelt cured thermosets for recycling and reprocessing. To overcome these limitations, this study proposes a press-welding process capable of simultaneous welding and consolidation. Two pressurization methods, thermal expansion-based and hydrostatic-based pressurization, were devised and applied to form small-scale structures. The thickness distributions of the formed parts were analyzed, corresponding to the pressurization method. The thermal expansion-based method exhibited central thinning owing to mold temperature gradients and thickness imbalance. In contrast, the hydrostatic pressurization approach yielded a relatively uniform thickness and temperature distribution across the entire area. Thus, hydrostatic pressurization is considered to be more effective for fabricating large-area thermoplastic composite structures.

1. 서론

최근 탄소중립 실현을 위한 환경 규제가 강화됨에 따라 항공 산업에서의 탄소배출 저감 요구가 점차 확대되고 있으며^[1, 2], 이에 따라 연료 소모 저감을 위한 항공기 경량화 구조물의 성형 공정 개발의 중요성이 증가하고 있다. 항공기 기체 경량화를 위해 무거운 금속 소재를 대체할 수 있는 탄소섬유 강화 복합재(carbon

fiber reinforced plastics, CFRP)의 적용이 확대되는 추세이다^[3-5]. 탄소섬유 강화 복합재는 matrix로 사용되는 고분자의 특성에 따라 열경화성(thermoset)과 열가소성(thermoplastic)으로 구분되며, 주로 항공기 기체 부품에는 열경화성 소재 기반 CFRP가 주로 사용되고 있다^[6]. 열경화성 소재는 우수한 기계적 물성과 성형 후 치수 안정성 측면에서 장점이 있으나, 경화 이후 재용융이 불가능하여 재활용 및 수리가 어렵다는 한계를 가진다^[7,8]. 반면에, 열가소

* Corresponding author. Tel.: +82-55-924-0134

E-mail address: jgim@kitech.re.kr (Jinsu Gim).

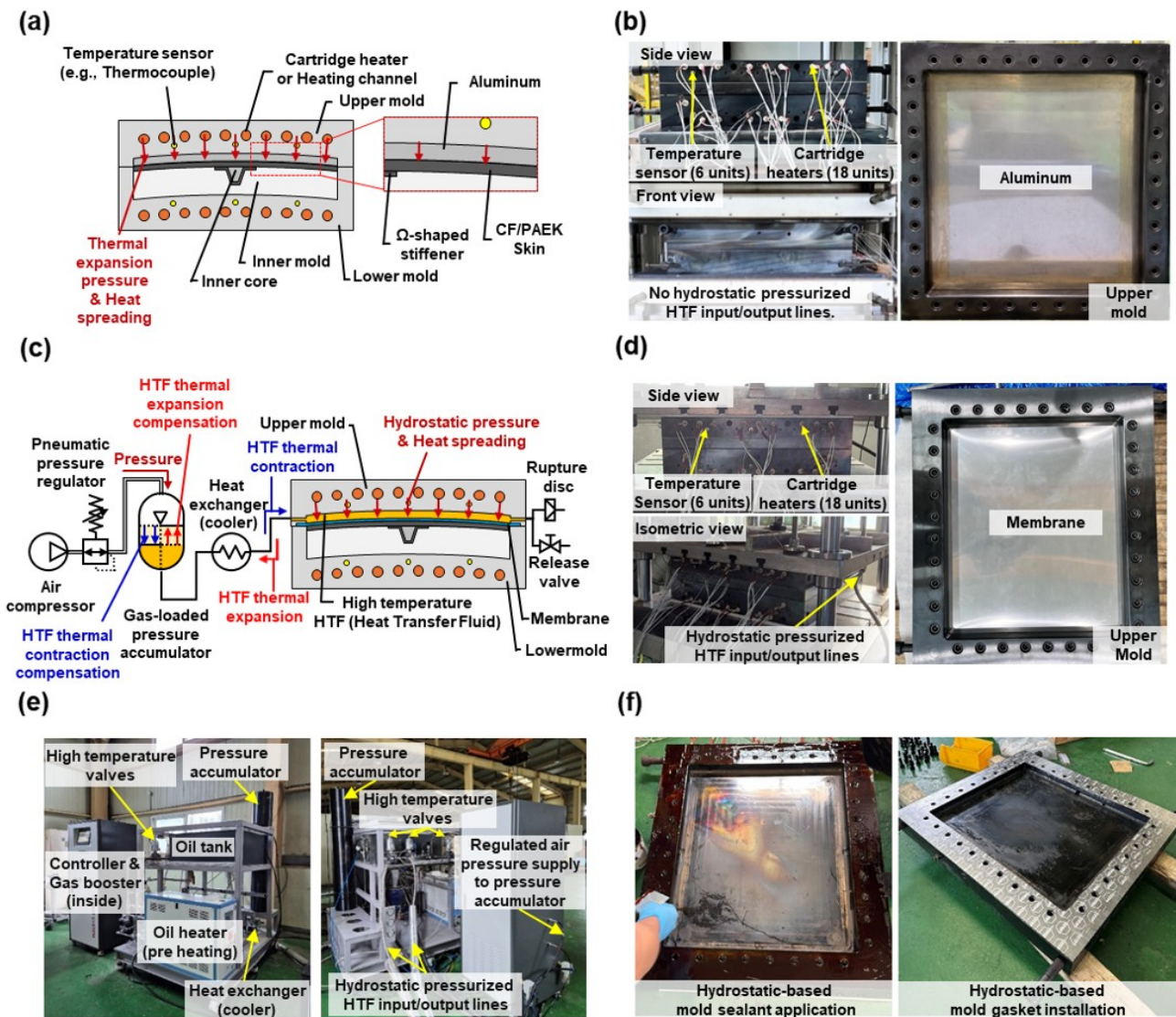


Fig. 1 Schematics of proposed pressurization methods and pressurization equipment. (a) Thermal-expansion-based pressurization method. (b) Thermal-expansion-based press-welding mold. (c) Hydrostatic pressurization method. (d) Hydrostatic press-welding mold. (e) Hydrostatic pressurization system. (f) Mold preparation for preventing leakage

성 탄소섬유 복합재(carbon fiber reinforced thermoplastic, CFRTP)는 재용융이 가능하여 재활용과 수리가 용이하여 주목받고 있다^[9-11].

열가소성 탄소섬유 강화 복합재 항공기 부품 제조는 오토클레이브(autoclave) 공정이 널리 활용되어 왔다. 오토클레이브는 복합재 구조물에 균일한 고압·고온 환경을 형성할 수 있어 적층부 공극(void) 저감과 치밀화(consolidation)에 유리하므로 우수한 품질의 복합소재 구조물 성형이 가능하다. 다만 대형 챔버 전체에 고온·고압 환경을 형성해야 하므로 에너지 소비가 크고 성형 사이클이 길어 생산 효율이 낮은 한계를 가진다. 특히 대형 구조물 성형시 금형 및 적층체의 열용량 증가는 오토클레이브 공정에 대한 에너지 소모 및 사이클 타임을 증가시킨다. 따라서 대형 구조 부품을

성형 시, 성형 및 집합을 위한 금형이나, 프레스(hot press) 등을 활용하는 Out-of-autoclave (OoA) 공정과 같이 에너지 효율과 생산성을 개선하면서도 품질을 확보할 수 있는 대체 제조 기술 개발이 연구되고 있다^[12-15].

본 연구는 대면적 항공부품 성형을 위한 OoA 공정 개발을 위하여, 보강재(stiffener)와 스킨(skin)을 금형을 이용하여 접합하는 동시에 치밀화를 진행하는 press-welding 공정을 제안한다. 접합 및 치밀화를 위한 적절한 가압 방식을 선정하기 위하여 열팽창 기반 가압 및 정수압(hydrostatic) 가압 방식을 고안하였다. 폭 1/2 m의 축소형 모델 성형에 두 가압 방식에 따른 성형 결과를 비교하여, 대형 실제 구조물 성형에 적절한 가압 방식을 선정하였다. 최종적으로 선정된 가압 방식을 폭 1 m 모델(m-scale) 성형에 적용

하여 추후 폭 2.5 m의 항공기 cargo door 성형에 대한 가능성을 검증하였다.

2. Press-welding 가압 방식

2.1 열팽창 가압 방식

열팽창 기반 방식은 높은 열팽창 및 우수한 열전도율 특성을 가지는 금속 소재의 두께 방향으로의 열팽창을 이용하여 제품 표면에 고온 압력을 가하는 방식이다. 가압 요소의 열팽창으로 발생한 변위는 보강재와 스킨에 압력을 가하며, 동시에 빠른 열전달은 복합재의 접합과 치밀화를 일으킨다. Fig. 1(a)는 이러한 열팽창을 이용한 가압 방식을 나타낸다. 금속의 열팽창의 제어를 위하여 상하부 금형 내부에 삽입된 카트리지 히터와 금형 외곽에 설치된 열전대가 사용된다.

성형품의 두께 편차 또는 형상 불량을 억제하기 위하여 열팽창 가압 방식이 적용된 금형을 프레스로 구축하였다. 열팽창 가압 방식은 가압 요소의 열팽창 변위가 구속 조건에 의해 반력으로 전환되면서 접합부 압력이 형성되는 변위 기반(displacement-driven) 가압 방식이다. 따라서 열팽창 변위가 충분히 형폐(clamping)되지 않을 경우 금형의 열립 또는 휨 변형이 발생하여 성형품의 두께 편차 또는 형상 불량으로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 외부 프레스를 사용하여 금형의 두께를 고정함으로써, 열팽창 변위가 유효 가압력으로 전환되도록 가압 방식을 구현하였다.

가압에 사용된 열팽창 가압 요소는 열팽창계수가 비교적 큰 알루미늄 소재(Al6061)를 사용하였으며, 크기는 $400 \times 500 \times 10$ mm이다. 해당 소재의 선형 열팽창계수(linear coefficient of thermal expansion, CTE)는 $23.6 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 이다. 사용된 가압 요소를 가열하는 경우, 온도 300°C 상승 시 가압 요소의 두께는 약 $70 \mu\text{m}$ 증가한다.

열팽창 방식의 가압 방식은 가압력인 열팽창량이 온도에 직접적으로 연관되므로, 가압을 위한 시스템이 간단하다는 장점이 있다. 다만, 과도한 열팽창으로 인하여 소재가 과하게 압축되는 경우, 복합소재 내부의 수지가 금형 틈새로 빠져나가거나 이로 인한 유동으로 섬유 파단이 발생하여 설계 두께보다 얇고 기계적 물성이 낮은 복합재 구조물이 성형될 수 있다. 따라서, 이를 방지하기 위하여 열팽창량이 일정량 이상 발생하면, 더 이상 복합재가 가압되지 않도록 하는 스톱퍼(stopper)를 금형에 설치하였다. Fig. 1(b)는 열팽창을 제어하기 위한 히터와 열전대, 그리고 금형의 두께를 구속하기 위한 프레스를 나타낸다.

2.2 정수압 가압 방식

정수압 가압 방식은 외부의 압력이 압력 전달 매질을 통하여 복합재 표면에 고루 가해지도록 하는 방식이다¹⁶⁾. 압력 전달 매질인

유체의 흐름이 없으면 복합재 표면에 정수압이 형성되기 때문에, 복합재의 곡률에 상관 없이 두께 방향(표면의 수직 방향)으로 일관된 압력을 가할 수 있다. Fig. 1(c)는 이러한 정수압 기반 가압 방식의 작동 메커니즘을 나타낸다¹⁴⁾. 공압 컴프레서에서 공급되어 레귤레이터로 제어되는 공압은 축압기(pressure accumulator) 내에 충전된 압력 전달 매질을 가압한다. 가압된 압력 전달 유체는 금형에 압력을 전달하고, 해당 압력은 복합재 표면에 전달된다. 압력 전달 유체와 복합재의 직접적인 접촉을 막기 위하여 박막(membrane)이 사용된다.

압력 전달 매질은 복합재에 압력만을 전달하기 때문에, 접합과 치밀화를 위한 성형 온도까지의 가열을 위하여 히터와 열전대가 사용되어야 한다. Fig. 1(d)는 정수압 가압 방식용 금형에 설치된 히터, 열전대, 압력을 전달하기 위한 배관과 멤브레인을 나타낸다.

상온에서부터 복합재의 성형 온도까지 압력 전달 매질의 특성이 안정적으로 유지되어야 한다. 따라서, 해당 온도까지 사용이 가능한 압력 전달 유체로, 고온 사용이 가능한 열매유(heat transfer fluid, HTF)를 사용하였다. 열매유의 경우 상온에서부터 약 380°C 까지 상변화 또는 열분해 없이 사용이 가능한 고온 열매유(Therminol 72, Eastman Chemical Company, USA)를 선정하였다.

정수압 가압 방식은 압력 전달 유체의 온도 변화에 따른 부피 팽창 및 수축을 보상하기 위한 메커니즘이 필수적이다. 복합재 성형을 위한 온도 상승 및 냉각 과정에서 발생하는 약 350°C 에 달하는 온도 변화는 압력 전달 유체의 상당한 부피 팽창 및 수축을 일으킨다. 따라서, 금형 내부에 압력 전달 유체가 밀폐되는 경우, 온도 상승에 따른 압력 전달 유체의 부피 증가는 복합재에 작용하는 압력을 극단적으로 증가시킬 수 있다. 또한 온도감소에 따른 압력 전달 유체의 부피 감소는 멤브레인의 파손을 일으킬 수 있다.

위의 온도변화 상황에서 압력 전달 유체의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 열팽창 및 수축을 보상하는 메커니즘을 구성하였다. Fig. 1(c)는 압력 전달 유체의 부피 변화를 보상하기 위한 축압기와 열교환기를 포함한다. 상온에서 공정 온도(380°C)까지의 온도 변화에 따라서, 사용된 고온 열매유의 부피는 상온 대비 40% 증가한다. 승온 과정에서 팽창하는 열매유의 일부는, 가압회로의 일관된 압력을 유지하기 위하여 금형에서 축압기 방향으로 이동한다. 이 과정에서 고온의 열매유가 축압기를 손상시키는 것을 방지하기 위하여 열교환기가 고온의 열매유를 냉각시킨다. 냉각 과정에서는 수축하는 열매유의 부피를 보상하기 위하여, 축압기로부터 열매유가 금형으로 공급되어 가압 회로와 금형 내부의 압력이 일정하게 유지된다. 이를 통해 냉각 수축에 따른 계면 이격 및 잔류 공극 재형성을 억제하고, 고화 완료 시점까지 안정적인 가압 상태를 유지할 수 있도록 하였다. Fig. 1(e)는 정수압 가압 방식을 구현하기 위한 가압 시스템을 나타낸다.

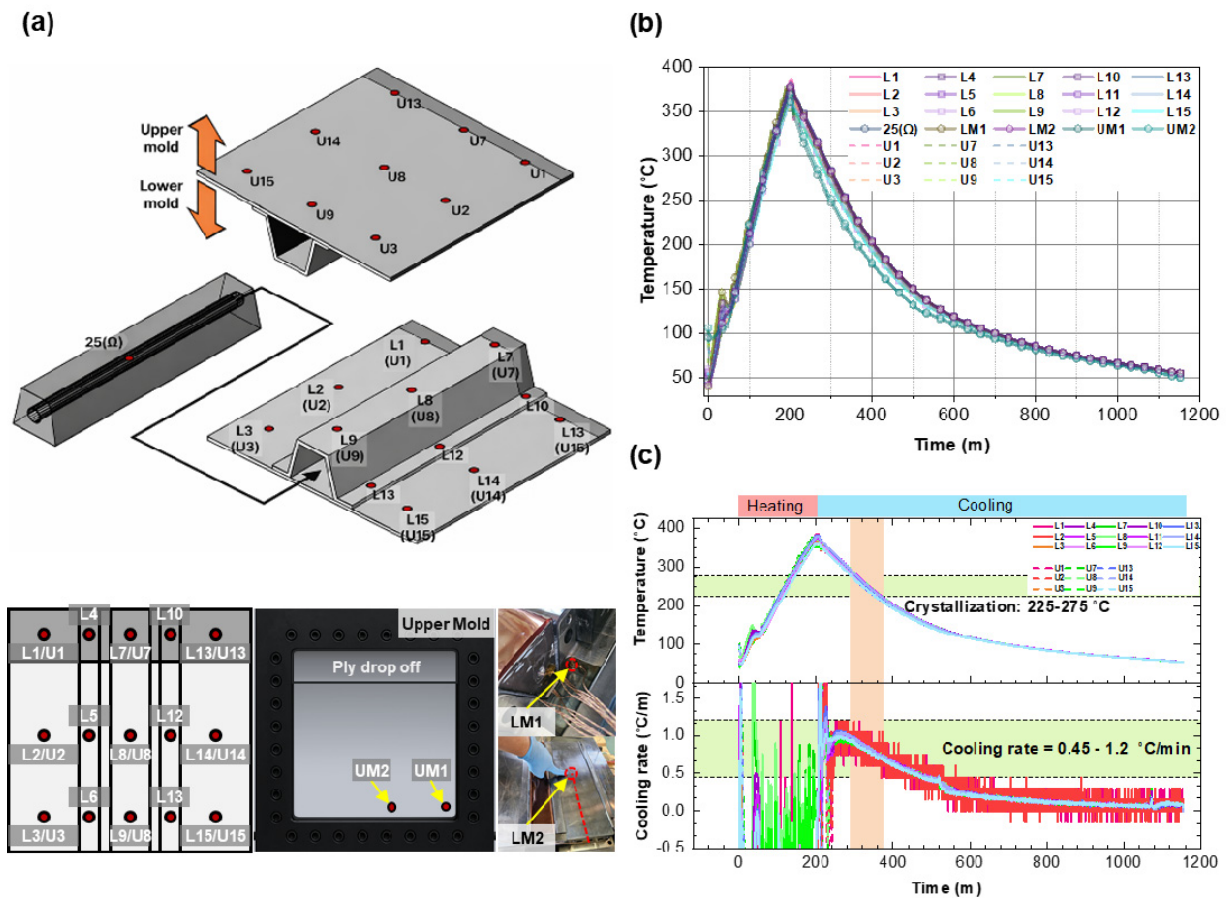


Fig. 2 Temperature measurements on the part surface and mold for hydrostatic pressurization. (a) Locations of the thermocouples. (b) Temperature histories of the part surface and mold. (c) Cooling rate of the part surface

가압 열매유의 누설(leak)을 방지하기 위하여 금형과 멤브레인 사이에 고온용 실란트와 가스켓을 설치하여 밀폐를 보장하였다. 고온의 열매유가 압력을 통하여 누출되면, 해당 열매유의 즉각적인 끓음 또는 기화가 발생할 우려가 있다. 특히 최고 온도와 압력이 가해지는 공정 상황에서는 열매유의 점도가 상온과 비교하여 약 100배 감소하여 누출 가능성이 높아진다. 따라서 Fig. 1(f)와 같이, 고온용 실란트(770P, Deacon industries Inc, USA)와 가스켓 (Innosild, Kukil Inntot Co. Ltd., Korea)을 사용하여 열매유 누설을 방지하였다. 공압을 이용한 사전 누출 테스트 결과 2 bar의 압력에도 공기가 누출되지 않아, 공기와 비교하여 고점도의 열매유가 공정 중 누출되지 않을 것으로 판단하였다.

2.3 Unit-cell press-welding 공정

두 가압 방식 모두 카트리지 히터를 이용하여 금형과 성형품 온도를 상승시키는 동시에 압력을 가하여 접합과 치밀화를 진행한다. 이후 냉각을 통해 고화시키는 공정 방법으로 수행된다. 열가소성 수지는 접합부 온도가 용융온도(melting temperature, T_m) 부근으로 상승하면 점도가 크게 감소하여, 계면에서 국부 유동이 가능해

지고 가압에 의해 미세 공극 부피가 압축되거나 내부 기체가 빠져나가게 되며 접촉면적이 증가한다. 냉각 단계에서는 고화가 완료될 때까지 가압을 유지하여, 냉각 수축에 따른 계면 이격 및 잔류공극의 재발생을 억제한다.

가열 조건은 수지의 열특성을 기준으로 설정하였으며, 접합부 온도가 수지 T_m 이상에서 가공온도(processing temperature, T_p)까지 도달하도록 공정 온도를 설정하였다. 열팽창 기반 가압 구조는 금속 접촉 및 전도 중심으로 열이 전달되어 열전달이 상대적으로 빠르다. 따라서 금형 외곽부에 삽입된(flush-mounted) 열전대로도 충분히 온도 모니터링이 가능하다고 판단하였다. 정수압 기반 가압 방식은 히터~금형~열매유~멤브레인~성형품으로 열전달 경로가 길다. 또한 열매유는 금속 대비 열전도율이 상온 기준 약 1/400 수준으로 낮아, 성형품 온도가 금형 온도에 빠르게 도달하지 못하는 열전달 지연이 발생할 수 있다. 따라서 금형 외곽에 설치된 열전대에서 측정되는 온도만으로 성형품의 실시간 온도를 판단하기 어렵기 때문에, Fig. 2(a)와 같이 성형품 표면(상부 9개, 하부 15개)과 금형 내부(멤브레인 2개, 하부 금형 2개, 코어 1개)의 다수 위치에 열전대를 부착하여 실시간 온도 데이터를 계속하였다.

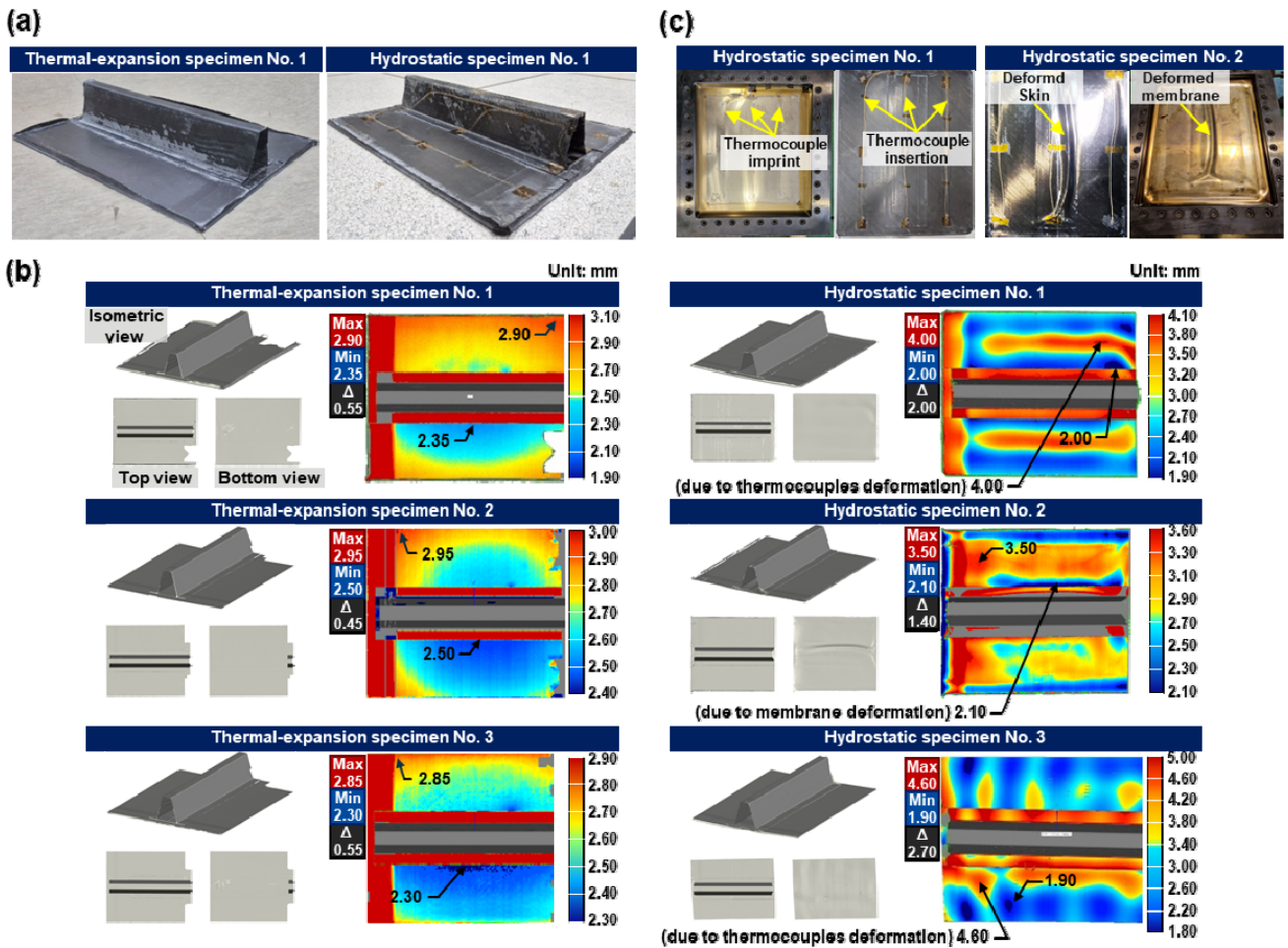


Fig. 3 (a) Specimens molded by thermal-expansion and hydrostatic press-welding processes. (b) 3D-scanned geometry of the specimens and measured thickness distribution. (c) Membrane and skin deformation caused by the hydrostatic leak test and thermocouple attachment

Table 1 Thermal properties of the used thermoplastic composite (TC1225)

Property	Value	Note
Thickness (mm/ply)	0.138	
Resin content (vol%)	34	
Density (g/cm ³)	1.587	@ 23°C
Glass transition temperature (°C)	147	
Melting temperature (°C)	305	
Processing temperature (°C)	340~385	
Crystallization temperature (°C)	220~280	
Typical crystallinity (%)	>20	Cooling rate < 80°C/min

승온 구간에서 발생할 수 있는 금형 내 온도 불균일을 최소화하기 위해, 승온 과정 중 온도 유지(dwell) 조건을 적용하였다. Fig. 2(b) 승온 초기 단계에 성형 표면 선형(leading) 온도 기준 120°C에서 약 30분 유지하여 금형 온도 편차를 수렴시켰다. 그 결과 금형 내 최대 온도 편차는 ±15°C 범위 내로 유지되어 공정 중 과도한

온도 편차 없이 성형이 진행될 수 있었다. 성형 조건과 열전대 설치 여부를 소폭 변경하여 각 가압 방식별 3개의 시험편을 성형하였다. 냉각은 자연 냉각(natural cooling)으로 수행하였다.

사용된 열가소성 복합소재의 결정화 구간(225~275°C)에서의 냉각 속도(cooling rate)를 측정된 결과, Fig. 2(c)와 같이 냉각 속도는 0.45~1.2 °C/min 였으며, 이러한 냉각 속도는 최대 결정화도 약 35%를 달성할 수 있는 열 이력이다. 참고로, 사용된 열가소성 복합소재(TC1225 LM-PAEK, Toray Industries Inc., Japan)의 열 물성은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

열팽창 기반 및 정수압 기반 가압 방식의 두께 형성 특성을 비교하기 위해, 각 가압방식으로 성형된 구조물에 대해 3D 스캔을 수행하여 분석하였다. Fig. 3(a)는 각 가압 방식별 성형품의 모습을 나타낸다. Fig. 3(b)는 성형품의 3차원 형상 측정 결과와, 이를 통

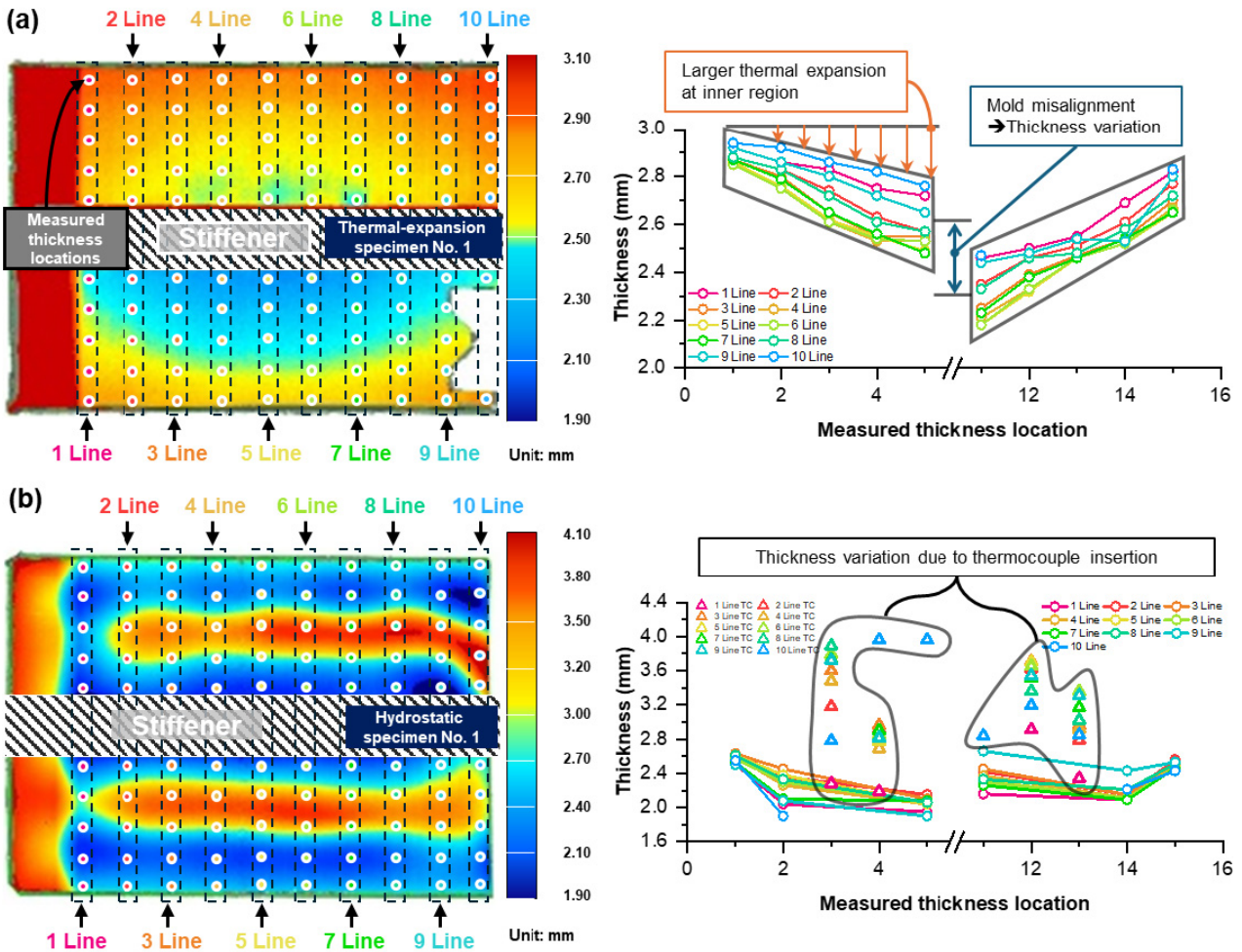


Fig. 4 Thickness measurement locations and local thickness distribution analysis results of No. 1 specimens: (a) specimen molded using the thermal-expansion-based pressurization method. (b) specimen molded using the hydrostatic pressurization method.

Table 2 Thickness measurement results of press-welding specimens by pressure application methods (Unit: mm)

Thermal expansion				
Specimen	Max	Min	Avg	Δ
No.1	2.90	2.35	2.60	0.55
No.2	2.95	2.50	2.65	0.45
No.3	2.85	2.30	2.50	0.55
Hydrostatic				
Specimen	Max	Min	Avg	Δ
No.1	4.00	2.00	2.80	2.00
No.2	3.50	2.10	2.90	1.40
No.3	4.60	1.90	3.10	2.70

하여 도출한 두께 분포를 Table 2에 나타냈다.

3.1 열팽창 가압 성형품 두께 분석

Fig. 3(b) 두께 분포를 보면 열팽창 기반 가압 방식 성형품은

정수압 기반 시제 대비, 최대(max)-최소(min)의 두께 편차(Δ)가 작고 국부적인 범위에서의 두께 분포가 비교적 균일한 경향을 보였다. 이는 열팽창 가압 방식이 고체 상태의 열팽창 요소의 팽창에 의한 변위 가압 방식이라는 특징과, 스톱퍼에 의한 두께 제어에 의한 결과로 판단된다. 스킨 또는 구조물에 국부적인 두께 편차가 있더라도, 일부 두꺼운 위치가 집중 가압됨으로써 두께 편차가 완화되기 때문이다.

Fig. 3(b)의 열팽창 기반 No. 1~3 성형품에서는 내·외측 방향의 두께 비대칭 경향이 관찰되었다. 이러한 비대칭은 성형 공정 중 금형 외곽부의 열 손실이 상대적으로 내부보다 크게 발생하기 때문이다. Fig. 4(a)는 No. 1 성형품에 대해 등간격으로 설정한 총 100개 지점의 국소 두께를 추출하여 두께를 분석한 결과를 나타낸다. 열팽창 기반 성형품 분석 결과, 금형 내측부의 온도가 공기로의 열 손실이 크게 발생하는 외측보다 높기 때문에 열팽창 요소의 내측 두께가 외측보다 두꺼워짐에 따라서 성형품 중앙부가 더 많은 가압량(변위)을 받아 얇게 성형되었다. 또한 상·하 및 좌·우 방향

의 두께 비대칭이 발생하였다. 이는 열팽창 요소의 위치 및 변위가, 금형과 프레스 형판의 평행도 또는 위치 정밀도에 의존적이기 때문으로 판단된다. 즉, 열팽창 요소가 균일하게 팽창하더라도 금형 상하의 평행도에 차이가 발생할 경우, 성형품의 상·하면 두께 비대칭이 발생할 수 있기 때문이다.

따라서, 열팽창 가압 방식은 가압매체의 특성에 따라서 국부적으로 균일한 두께 분포 측면에서는 유리하나, 전반적인 두께 분포는 금형 내부의 온도 불균일과 금형의 정렬에 크게 영향을 받는다.

3.2 정수압 가압 성형품 두께 분석

정수압 기반 가압 방식 성형품에서는 형상 변형과 함께 국부 두께 편차가 열팽창 가압 성형품과 비교하여 상대적으로 크게 관찰되었다. Fig. 3(b)의 정수압 기반 No. 1~3 성형품에서는 열전대 삽입된 위치에서 국부적으로 두께가 증가한 경향이 확인되었다. 또한, No. 2, 3 시편에서는 고온 열매유 누설 테스트 수행 과정에서 발생한 멤브레인 변형의 영향으로 두께 분포가 전반적으로 균일하지 않게 나타났다. Fig. 3(c)는 이러한 국부적인 두께 불균형을 유발한 열전대 부착 및 누설 테스트 과정에서 발생한 멤브레인 변형을 나타낸다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 Fig. 4(b)에서 정수압 기반 No. 1 성형품의 국부적인 두께 분석을 하였다. 분석 결과, 열전대 삽입부가 약 1.5 mm 두께가 나타났다. 열전대 삽입에 따른 국부 두께 증가를 제외하면, 정수압 기반 성형품의 전반적인 두께 편차는 상대적으로 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 이러한 국부 두께 편차는 정수압 가압 방식의 한계라기보다, 열 이력 확인을 위한 열전대 부착 및 삽입에 의한 성형품의 두께 불균형과 열매유 누설 테스트 수행 과정에서 발생한 멤브레인의 국부 변형인 것으로 확인하였다.

이러한 국부 두께 편차는 정수압 기반 가압 방식 자체의 한계라기보다, 열전대 삽입과 성형 이전 단계에서 발생한 멤브레인 변형으로 인한 것으로 판단된다. 따라서 실제 공정에서 정수압 방식의 재현성을 확보하기 위해 멤브레인의 변형 억제가 필요하다. 멤브레인 변형 억제 방안으로, 누설 테스트 단계에서는 멤브레인이 자유롭게 팽창하지 않도록 금형 캐비티 내부 형상과 동일한 삽입물을 배치한 상태에서 누설 여부를 확인할 필요가 있다. 이를 통해 멤브레인의 팽창 공간을 물리적으로 제한함으로써 변형을 억제할 수 있다. 또한 온도 이력 측정을 위한 열전대는 멤브레인과 성형품 사이에 직접 삽입하기보다 금형 내부에 장착하는 방식이 성형품의 두께 균일도를 안정적으로 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

정수압 가압 성형품의 전반적인 두께 편차는 열팽창 가압 방식과 비교하여 고르게 나타났다. 열전대 삽입과 성형 이전의 멤브레인 변형에 의한 성형품 두께의 국부적인 편차를 제외한다면, 열팽창 가압 방식과 비교하여 성형품 내·외측, 상하, 좌우의 두께 분포

가 균일하였다. 즉, 정수압 가압 방식은 스킨의 두께가 균일하고 멤브레인의 사전 변형이 없는 한, 금형의 평행도나 정렬 오차와 금형 내·외 측의 온도 구배에 의한 두께 편차 발생이 억제되어 전반적으로 고른 두께의 제품을 성형할 수 있다.

또한 열매유의 특성에 의한 승온 및 냉각 과정에서 성형품의 온도 불균형 억제는 균일한 두께의 성형에 기여한다. 열매유의 열전달률이 금속 소재의 열팽창 요소보다 낮다. 열매유가 담긴 채널 내부에서는 대류에 의하여 열매유의 국부적인 순환이 발생한다. 따라서, 비록 승온 및 냉각 속도가 다소 느릴 수 있어도 성형품에서의 온도 차이가 금형 내외측의 온도 차이보다 적게 발생하여, Fig. 2(b)와 같이 온도 편차가 억제된다. 이러한 균일한 온도 분포는 정수압에 의한 균일한 압력의 영향과 더불어 균일한 두께 분포의 구조물을 성형할 수 있게 한다.

3.3 정수압 가압 방식의 m-scale 성형 공정 적용

대면적 항공기 구조물의 성형 공정에 있어서 열팽창 가압 방식보다 정수압 가압 방식이 균일한 두께의 열가소성 복합재 구조물을 성형하기에 유리하다. 복합소재 구조물 크기가 증가할수록 금형 크기 증가에 따른 열 손실 불균일도, 정렬 오차 등의 증가가 누적될 가능성이 크다. 따라서 열팽창 가압 방식에서는 열팽창량 불균일에 의한 성형품의 두께 불균형이 발생할 가능성이 높다. 그러나 압력과 열을 균일하게 전달할 수 있는 정수압 가압 방식은 이러한 요인을 상쇄하기 때문에, 대면적 항공기 구조물 성형에 유리하다고 판단된다. 따라서, unit-cell 크기의 축소형 구조물 성형에서 시도한 정수압 가압 방식을 m-scale 크기로 확대 적용하였다.

M-scale 금형은 Fig. 5(a)와 같이 상·하부(upper/lower mold)로 구성되며, 기본 가압 및 가열 방식은 unit-cell과 동일하다. 추가적으로 대류에 의한 외곽부 열 손실을 억제하고 금형 내 온도 구배를 완화하기 위해 금형 외곽에 Fig. 5(b)와 같이 단열판(insulator plate)을 부착하였다. 성형품의 탈형 용이성을 확보하고 표면에서 발생하는 백화 불량을 억제하기 위하여 성형 전 복합소재에 접촉할 금형 표면에 Fig. 5(c)와 같이 이형제를 도포하고 이형 필름을 부착하였다.

성형품 크기가 unit cell 대비 약 5배 확대되면서 금형 내 온도 불균일성이 커질 수 있다. 또한 이로 인한 잔류응력(residual stress)과 변형이 발생할 가능성이 있다. 이에 복합소재 스킨 표면에 열전대를 Fig. 5(d)와 같이 다수 위치(상부 15개, 하부 12개)에 부착하여 성형 중 전 영역의 온도 편차를 모니터링하였으며, Fig. 5(e)와 (f)는 온도 및 승온/냉각 속도를 나타낸다.

승온 구간에서는 성형품 표면의 선행 온도를 기준으로 100°C에서 20분, 250°C에서 20분, 330°C에서 10분씩 온도를 유지하여 선행 온도와 지연 온도의 차이를 감소시켰다. 성형 결과 목표 온도

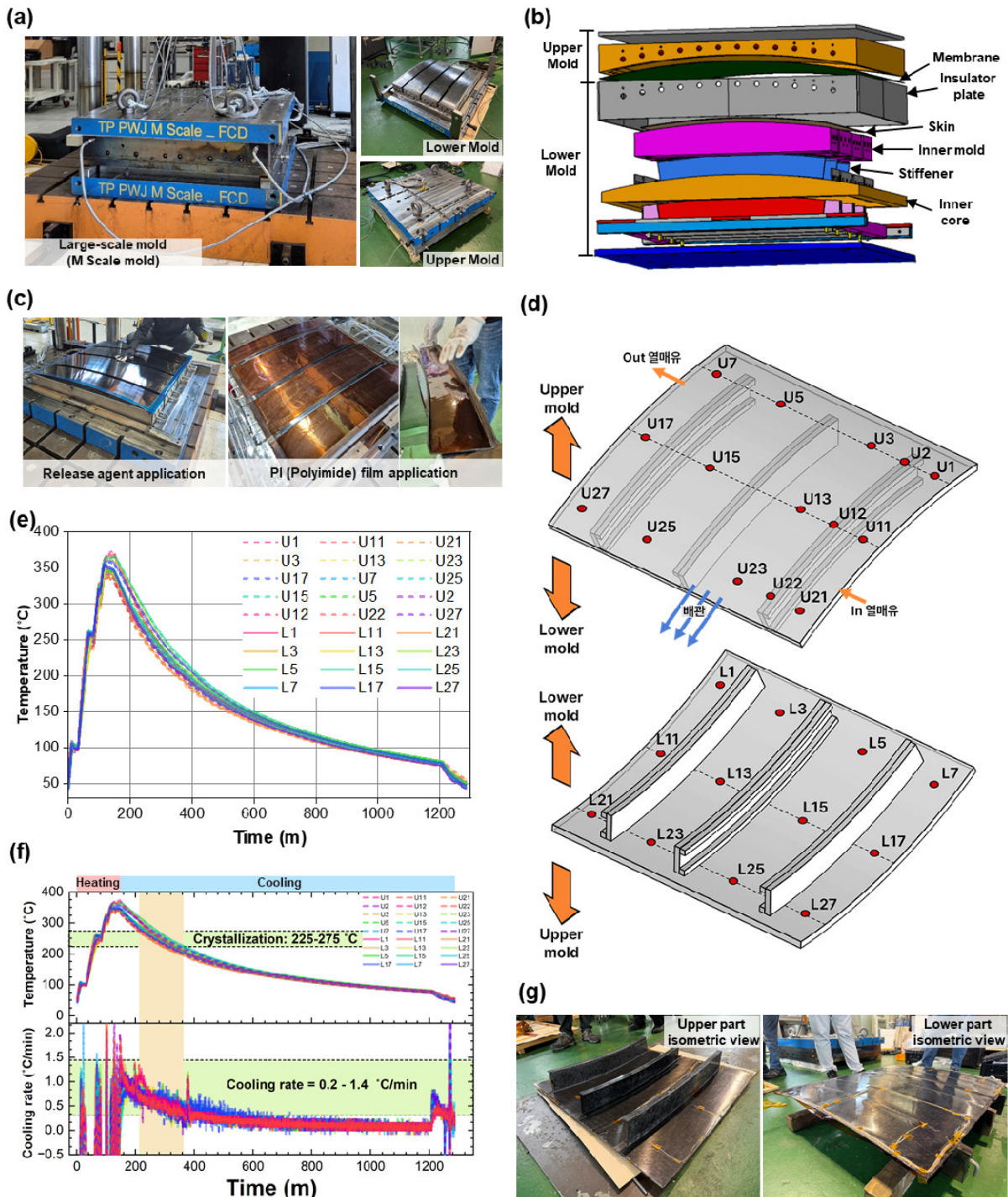


Fig. 5 (a) Press welding mold for m-scale part. (b) Mold structure of press-welding for m-scale part. (c) Application of a release agent and a release film. (d) Thermocouple positions. (e) Temperature histories of the part surface. (f) Cooling rate of the part surface. (g) Molded m-scale part using the hydrostatic pressurization-based press welding process

까지의 승온 시간은 150분이 소요되었다. 이후 냉각은 자연 냉각으로 수행되어, 성형 온도로부터 상온까지의 냉각 시간은 약 1,000분 소요되었다. 온도 측정 결과 승온 및 냉각 과정에서 온도 편차는 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 미만의 범위로 유지되었으며, 결정화 온도 구간에서의 냉

각 속도는 $0.2\sim 1.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 였다. 전체 성형 공정에 약 1,200분의 사이클 시간이 소요되었다.

M-scale 크기의 복합소재 구조물의 press-welding 성형 결과, Fig. 5(g)와 같이 눈에 띄는 비틀림과 두께 편차가 없는 양호한

성형품을 얻을 수 있었다. 이는, 정수압 가압 방식에 의한 균일한 압력 전달과 온도 분포에 의한 결과라 판단된다.

시도한 m-scale 구조물의 정수압 가압 방식 기반 press-welding 공정은 긴 냉각 시간으로 인하여 제작 시간이 다소 길다는 단점이 있었다. 향후 금형 내부에 냉각수를 이용한 강제 냉각 방식을 도입하여, 현재 공정 대비 성형 시간을 약 80% 수준으로 단축할 계획이다. 다만, 이러한 급격한 냉각이 결정화 특성이나 잔류응력에 미치는 영향을 면밀히 분석할 필요가 있다. 따라서 성형품의 두께 편차와 비틀림을 억제하면서도 사이클 타임을 최소화할 수 있는 최적의 냉각 조건을 도출하고자 한다. 이를 통해 오토클레이브 공정 대비 생산성 향상, 에너지 절감, 그리고 제조 원가 절감을 동시에 실현할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 오토클레이브 없이 금형 가열과 가압만으로 열가소성 탄소섬유 강화 복합소재의 접합 및 치밀화를 동시에 구현하기 위한 press-welding 공정을 제안하였다. 열팽창과 정수압 기반의 두 가지 가압 방식을 고안하고, 가압 방식에 따른 성형품의 두께 편차를 비교하였다. 1/2 m 크기의 축소형 unit-cell 복합소재 구조물 성형에 제안한 두 가압 방식을 적용하고 결과를 분석하여, 대면적 항공기 구조물 성형을 위한 가압 방식을 도출하고자 하였다.

축소형 unit-cell 성형품의 두께 분석 결과, 열팽창 가압 방식은 국부적인 두께 편차가 적으나 성형품 전반에 걸친 내외측 및 상하 좌우의 두께 편차가 크게 발생하였다. 반면, 정수압 성형 방식은 국부적인 두께 편차는 발생하더라도 성형품 전반에 걸친 두께는 균일하였다. 열팽창과 정수압 가압 방식에 따른 성형품의 두께 편차 발생은 두 가압 방식의 특징에 의하여 발생하였다.

정수압 가압 방식은 대면적 항공기 구조물의 성형 시 균일한 두께의 성형품을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 열팽창 가압 방식은 금형의 평행도 및 정렬과 더불어 열팽창 요소의 온도 불균일의 영향이 성형품의 전반적인 두께 편차를 발생시킨다. 정수압 가압 방식은 열전대 설치 또는 멤브레인의 변형에 두께 편차 발생에 취약했다. 그러나, 이의 영향을 배제한 정상적인 성형 공정의 경우에는 금형 정렬 및 온도 편차의 영향이 열매유의 균일한 압력과 열전달로 상쇄되기 때문에 열팽창 대비 구조물 전반에 있어서 균일한 분포의 두께를 얻을 수 있다.

향후에는 강제 냉각 조건을 도입하여 사이클 타임을 단축하고 생산성을 향상시켜, 2.5 m 폭의 항공기 cargo door 성형에 제안한 press-welding 공정을 적용하여 제안한 성형 방식의 실증을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 연구비 지원(RS-2024-00431591)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Raihan, A., 2025, Sustainable Aviation: A Critical Review of Policies, Technologies, and Future Pathways, *J. Air Transp. Res. Soc.*, 5 100080, <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2025.100080>.
- [2] Braun, M., Grimme, W., Oesingmann, K., 2024, Pathway to Net Zero: Reviewing Sustainable Aviation Fuels, Environmental Impacts and Pricing, *J. Air Transp. Manag.*, 117 102580, <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580>.
- [3] Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., Wang, H., 2023, Past, Present and Future Prospective of Global Carbon Fibre Composite Developments and Applications, *Compos. Pt. B-Eng.*, 250 110463, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>.
- [4] Soutis, C., 2005, Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction, *Mater. Sci. Eng. A*, 412:1-2 171-176, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.064>.
- [5] Park, J. H., Kang, Y. S., Lee, M. G., Jeon, Y. H., 2018, An Experimental Study on the Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastics and Steel Plate Using Self-Piercing Rivets, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:3 211-217, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.211>.
- [6] Choi, H. S., So, T. Y., Baek, J. H., Kim, J. S., Lee, C. J., Kim, D. E., 2025, Surface Whitening in CF/PPS Thermoplastic Composites During Press Welding : An Experimental Study, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 8.
- [7] Pickering, S. J., 2006, Recycling Technologies for Thermoset Composite Materials—Current Status, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 37:8 1206-1215, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>.
- [8] Oliveux, G., Dandy, L. O., Leeke, G. A., 2015, Current Status of Recycling of Fibre Reinforced Polymers: Review of Technologies, Reuse and Resulting Properties, *Prog. Mater. Sci.*, 72 61-99, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.
- [9] Xu, X., Peng, G., Zhang, B., Shi, F., Gao, L., Gao, J., 2025, Material Performance, Manufacturing Methods, and Engineering Applications in Aviation of Carbon Fiber Reinforced Polymers: A Comprehensive Review, *Thin-Walled Struct.*, 209 112899,

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112899>.

- [10] Vaidya, U. K., Chawla, K. K., 2008, Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, *Int. Mater. Rev.*, 53:4 185-218, <https://doi.org/10.1179/174328008X325223>.
- [11] da Costa, A. P., Botelho, E. C., Costa, M. L., Narita, N. E., Tarpani, J. R., 2012, A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications, *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 4:3 255-265, <https://jatm.com.br/jatm/article/view/166>.
- [12] Pinakidis, J., Miller, S., 2024, viewed 29 March 2026, Joining, Disassembly, and Reconfiguration of Thermoplastic Composites for Space Applications, NASA Technical Memorandum, NASA/TM-20240002690, NASA Glenn Research Center, <<https://ntrs.nasa.gov/citations/20240002690>>.
- [13] Ogugua, C. J., Anton, S. V., Tripathi, A. P., Larrabeiti, M. D., van Hees, S. O., Sinke, J., Dransfeld, C. A., 2023, Energy Analysis of Autoclave CFRP Manufacturing Using Thermodynamics Based Models, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 166 107365, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107365>.
- [14] Choi, H., Lee, C.-J., Jeon, Y.-J., Choi, W.-C., Kim, D., 2024, Press Conduction Welding for Secondary Bonding of Aircraft Skin/Stiffener Assemblies Using Carbon Fiber/PEKK Thermoplastic Composites and PEI Adhesive, *Polymers*, 16:6 750, <https://doi.org/10.3390/polym16060750>.
- [15] Ekuase, O. A., Anjum, N., Eze, V. O., Okoli, O. I., 2022, A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing, *J. Compos. Sci.*, 6:6 172, <https://doi.org/10.3390/jcs6060172>.
- [16] Gim, J., Lee, C., Kim, D. E., Choi, H., Cho, M., 2024, Welding and Consolidation Apparatus of Thermoplastic Composite Material, KR Patent Application: 10-2024-0170077.



Wonju Kim

Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), and Master's candidate in the Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate School, Gwangju University. His research interests include thermoplastic press-welding and injection molding.
E-mail: wkim1686@kitech.re.kr



Jinsu Gim

Senior Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests are autonomous manufacturing technology using in-process sensors and artificial intelligence (AI), rheokinetics, and polymer/composite processing including molding, forming, joining/welding, and mold technology.
E-mail: jgim@kitech.re.kr



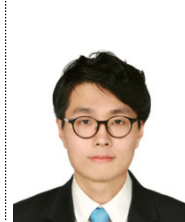
Chanjoo Lee

Principal Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include CFRP hot forming process and tool design.
E-mail: cjlee80@kitech.re.kr



Wangho Yun

Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include machining process.
E-mail: whyun@kitech.re.kr



Hyunseok Choi

Post-doctoral Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include forming process design of metals and composites for lightweight structures.
E-mail: hschoi01@kitech.re.kr

	<p>Dongeom Kim Principal Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include forming process design of metals and composites for lightweight structures. E-mail: kdu0517@kitech.re.kr</p>
	<p>JongHun Baek Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), and Master's candidate in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University. His research interests include thermoplastic composite forming and surface characteristics. E-mail: bjh7365@kitech.re.kr</p>
	<p>Jae Hyuk Choi Professor in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Gwangju University. His research interests include optimization of injection molding process and thermoset plastic molding. E-mail: jhchoi@gwangju.ac.kr</p>