

特輯

"철도분야에서의 신소재 복합재 응용 기술"(총 7편) 중 - 제6편

오토클레이브 성형기법을 이용한 복합재 철도차량 차체 제작

신광복*, 이상진**

1. 서론

철도차량에서 신소재 복합재료(composite materials)의 활용은 높은 비강성 및 비강도(specific stiffness & strength) 특성과 복잡한 구조물에 대한 우수한 제작성 등으로 인해 날로 증가되는 추세이다. 현저한 기술적 진보를 얻기 위해 철도차량은 더 가볍고, 강하고, 안전하며 전통적인 소재와는 차별화된 소재를 요구하고 있다. 복합재료의 철도차량에의 응용은 무게 감소, 이로 인한 속도 증가, 에너지 소비량 감소, 낮은 관성, 적은 트랙 마모 그리고 큰 유효 탑재량 등의 장점을 지니고 있으며 철도차량 디자인에 여러 다양함을 제공하고 낮은 무게 중심 설계에 의한 안전성 확보, 단순화된 구조 설계에 의한 좌석수의 증가 등의 장점을 지니고 있다. 또한, 모듈화 설계를 가능케 함으로서 제작 공정의 감소 및 유지보수 효율화를 얻을 수 있게 된다[1].

복합재료는 과거 철도차량에서 내장재, 전두부 등과 같이 2차 부재에 제한적으로 사용되어 왔으나 1990년대부터 지붕(roof), 사이드 구조(side structure) 및 차체(carbody structure)와 같이 하중을 직접 지탱하는 1차 부재(primary structure)로의 사용이 확대되고 있다.

1차 부재인 철도차량 차체에 신소재 복합재료를 적용하기 위해서는 설계기술 뿐만 아니라 설계검증을 바탕으로 한 제작기술의 뒷받침이 매우 중요하다. 기존의 스테인레스 강 차체 및 중공 압출재 알루미늄 차체와 같은 금속재 차체의 제작 기술은 국책사업 등을 통해 선진국 수준에 도달하였으며 G7 고속전철, 표준전동차, 광주전동차 등이 상업 운행되고 있다.

복합재 철도차량 차체에 대한 제작 기법은 대상 구조물의 운영조건, 사용 재료 그리고 성형장비 등에 따라 다양한 방법이 존재하기 때문에 설계 단계에서 최적의 성형방법을 결정하여 복합재 구조물을 제작하여야 한다. 한국형 고속 틸팅열차(TTX)는 국내 최초로 하이브리드 복합재 차체 개발을 수행하고 있으며 이에 따른 설계 및 제작 기술

은 연구개발과제 성공을 위해 매우 중요한 요소이다. 하이브리드 복합재 차체에 대한 설계 기술은 기존의 금속재 차체 설계 기술에 대한 응용, 해외 기술 자료 분석 및 참여 연구원들의 노력에 의해 확보되었으나, 하이브리드 복합재 차체에 대한 제작 기술은 설계 기술 확보만으로는 쉽게 해결될 문제는 아니다. 하이브리드 복합재 차체 제작은 소재, 성형 방법 및 설비, 설계 완성도, 작업 공간, 숙련된 기술자 등의 주변 여건이 모두 갖추어져야 가능하다.

본 논문에서는 국내 최초로 연구 개발하는 하이브리드 복합재 차체 제작을 위한 필요 기술을 정립하고 이를 토대로 오토클레이브 성형 기법에 의한 일체형 복합재 차체를 제작함으로써 국내의 복합재 철도차량 차체 제작 기술을 독자적으로 확보하고자 하는 데 목적을 두고 있다.

2. 복합재 차체 제작을 위한 선행조건

복합재 차체는 기존의 금속재 차체와는 달리 제작 완료 후 용접 및 절단 작업 등에 어려움이 있어 현장 맞춤형의 수정작업은 거의 불가능하다. 따라서, 복합재 차체는 많은 선행조건들을 완벽히 갖춘 후 제작을 해야 하는 기술적 어려움을 갖게 된다. 복합재 차체 제작을 위한 주요 선행조건들은 다음과 같다.

2.1 차체 제작 개념도

복합재 차체 제작을 위해 가장 먼저 갖추어야 할 선행조건은 제작 개념도를 결정하는 것이다. 복합재 차체의 제작은 앞에서 언급하였듯이 금속재 차체의 제작 방법과는 달리 온도 및 압력 하에서 성형 공정을 거친 후 완성되게 된다. 따라서, 복합재 차체의 제작 개념도는 성형장비 보유 현황, 기술 수준, 해외 동향, 제작성 및 제작비용 그리고 양산성 등을 고려해서 결정해야 한다.

* 국립 한밭대학교 기계공학부 기계설계공학전공, 교신저자(E-mail:shin955@hanbat.ac.kr)

** (주)한국화이버 철도차량사업부

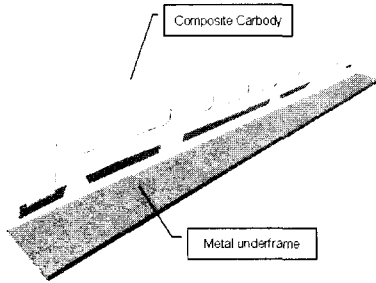


Fig. 1 The manufacturing concept of TTX motorized car.

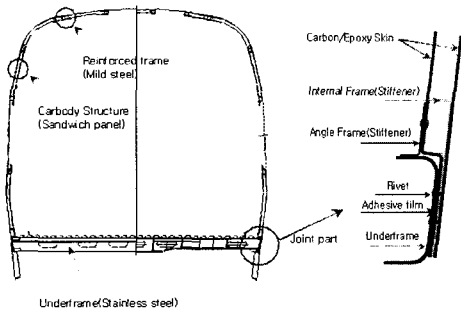


Fig. 2 The configurations of TTX carbody section.

TTX 구동차(motorized car)의 하이브리드 복합재 차체는 위의 사항들을 종합적으로 고려하여 Fig. 1에서 보듯이 지붕, 사이드 및 엔드 구조가 동시에 성형되는 일체형 복합재 차체 제작으로 결정하였다. 또한, 언더프레임은 하부기기 및 대차와의 인터페이스를 고려하여 스테인레스강으로 제작될 것이다.

2.2 차체 구성 재료 선정

복합재 차체의 제작 개념도를 바탕으로 차체의 구성 재료를 선정해야 한다. 재료 선정 시 고려해야 할 사항은 재료의 비강성 및 비강도, 재료비용, 선택된 성형방법에 대한 적합성 그리고 재료 공급량 등이다. TTX 구동차의 하이브리드 복합재 차체는 Fig. 2와 같이 단면이 구성된다.

Fig. 2에서 보듯이 차체는 샌드위치 복합재(sandwich composite)로 구성되고, 언더프레임은 스테인레스 강을 사용하여 제작되어 진다. 강제 보강재(reinforced frame)는 샌드위치 복합재 차체의 구조 강성 및 강도를 보강하기 위해 사용되어 진다. 샌드위치 복합재 차체와 금속재 언더프레임은 용접에 의한 체결이 불가능하여 리벳 체결 방식과 접착제에 의한 체결 방식을 동시에 사용하는 하이브리드 체결 방식(hybrid joint method)으로 조립되어진다. 접착제에 의한 체결방식은 리벳 홀 주위에 걸리는 응력집중을 완화시키면서 차량의 기밀유지에 효과가 있는 것으로 알려져 있다[2].

Table 1 The materials used to the TTX carbody structure

	Materials	Remarks
Skin	CF1263 carbon fabric/epoxy prepreg	Fiber : T700 series, 12K Curing temp. of Resin : 121℃ Thickness : 0.7mm
Core	Aluminum 3104 honeycomb	Cell size : 3/8" Cell wall thickness : 70µm Cell depth : 36mm
Adhesive film	Bondex 606	Curing temp. : 121℃ Thickness : 0.2mm

Table 1은 차체를 구성하는 샌드위치 복합재의 구성 재료를 나타내고 있다. 스킨(skin)은 CF1263 카본 패브릭/에폭시 프리프레그(carbon fabric/epoxy prepreg)가 사용되며 코어(core)는 알루미늄 3104 하니콤(aluminum 3104 honeycomb)이 사용된다. 스킨과 코어는 본덱스 606 접착 필름(Bondex 606 adhesive film)에 의한 접착되어 진다.

2.3 3차원 설계 및 해석 검증

복합재 차체에 대한 제작개념도 및 재료 선정이 완료되면 설계 작업을 수행하게 된다. 복합재 차체의 경우 용접작업 및 홀 가공 등의 어려움이 있어 제작 후 타 부품과의 기구학적 인터페이스를 위한 형상 변경이나 부분 수정이 필요한 경우 가공상의 어려움이 있어 설계의 완성도는 매우 중요하다. 이를 위해 TTX 하이브리드 복합재 차체는 CATIA V5를 이용한 3차원 설계를 수행하였다. 3차원 설계는 타 시스템과의 기구학적 인터페이스를 제작 전에 미리 수행함으로써 제작 시 발생하는 시행착오와 제작 오류를 최소화할 수 있어 제작 시간 및 제작비용을 절감할 수 있는 장점을 지닌다. Fig. 3은 TTX 구동차에 대한 3차원 도면을 나타내고 있다.

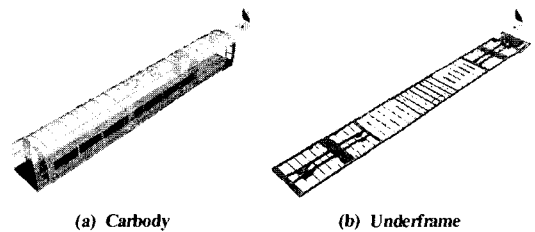


Fig. 3 3D models for TTX motorized car.

차량 설계는 제작 전에 설계요구조건을 만족하는지를 구조해석 및 충돌해석을 통해 검증한 후 수정 및 보완 작업을 통해 완성하였다[3-4].

2.4 차체 성형공법

복합재료를 이용한 철도차량 차체 제작 방법은 매우

다양하다. 따라서, 개발하고자 하는 대상 구조물의 운영조건, 제작비용 및 기술, 장비 보유 현황 등을 면밀히 검토한 후 결정해야 한다. 일반적인 복합재 차체 제작 공법들은 아래의 방법들이 주로 사용된다[5].

- 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공법[6]
- 레진 트랜스퍼 몰딩 RTM (Resin Transfer Molding) 공법[7]
- 진공 인퓨전(Vacuum Infusion) 공법[8]
- 오토클레이브(Autoclave) 공법[9]

TTX 하이브리드 복합재 차체는 다양한 성형 공법 중 오토클레이브 성형 방법을 채택하였다. 오토클레이브 성형 공법은 고강성 및 고강도의 대형구조물을 일체형으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있어 우주항공용 복합재 구조물 제작에 많이 사용되는 공법이다. 단점으로는 장비 제작비용과 유지보수비용이 다소 높지만 국내에 대형 오토클레이브 장비를 보유하고 있으며 오토클레이브 공법을 이용한 성형 기술이 안정화되어 TTX 하이브리드 복합재 차체 제작을 위한 성형 공법 중 최적이라는 결론을 얻게 되었다.

2.5 성형장비 구축

TTX 구동차는 길이 23m, 폭 3m, 높이 2.7m의 치수를 가진다. 따라서, 일체형으로 TTX 하이브리드 복합재 차체를 제작하기 위해서는 대형 오토클레이브 장비가 필요하게 된다. 오토클레이브에서 복합재 차체를 성형하기 위해서는 차체의 치수 외에 부가적인 성형 장비 등의 치수도 고려해야 하므로 최소한 길이 25m, 직경 4m 이상의 오토클레이브 장비가 요구된다.

Fig. 4는 국내에서 보유한 대형 오토클레이브 장비 모습을 보여주고 있다. 본 장비는 세계 2번째 규모의 오토클레이브 장비이며, 길이 30m, 직경 5m의 치수와 최대설계압력 7bar, 최대운영온도 180℃의 운영성능을 가진다. 또한, 온도 및 압력은 자동 조절되는 시스템을 갖추고 있다.

3. 하이브리드 복합재 차체 제작 공정

TTX 하이브리드 복합재 차체는 앞에서 언급하였듯이 카본 패브릭/에폭시 복합재 스킨과 알루미늄 하니컴 코어를 갖는 샌드위치 복합재 구조로 제작된다. 또한, 샌드위치 복합재 구조물의 강성과 강도를 보강하기 위해 금속재 보강재가 삽입된다. 오토클레이브 성형 공법에 의한 복합재 차체 제작은 다음과 같이 크게 5단계의 공정을 거쳐 완성되어 진다.

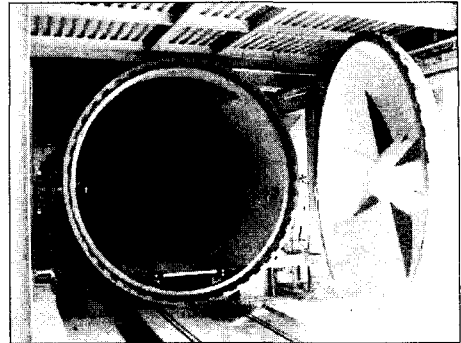


Fig. 4 Autoclave equipment.

3.1 목형 및 유리 섬유강화 복합재 몰드 제작

오토클레이브 성형 공법에 의해 복합재 구조물을 제작할 경우 일반적으로 두 종류의 대형 몰드, 즉, 목형 몰드(wood mould)와 섬유강화 복합재 몰드(FRP mould)가 사용된다.

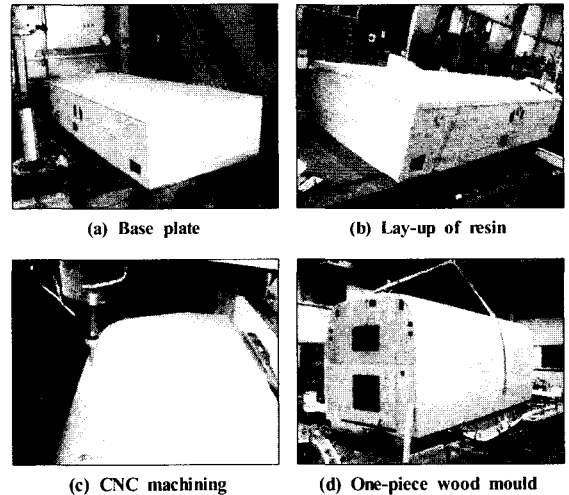


Fig. 5 The manufacturing processes of wood mould.

목형 몰드는 섬유강화 복합재 몰드를 제작하기 위한 준비 단계로 차체의 외형 치수와 표면 상태에 영향을 미치게 된다. 목형 몰드는 23m 길이의 일체형 제작이 어려워 8.4m, 6.6m, 8.0m 길이를 갖는 3개의 블록으로 제작하였다. 목형 제작 과정은 먼저 합판 및 목재로 기준면을 제작(Fig. 5(a))한 후 표면에 가공용 에폭시 수지를 도포(Fig. 5(b))하게 된다. 가공용 수지가 경화된 후 CNC 밀링 및 보링 가공 등을 통해 외형면을 생성(Fig. 5(c))하게 되고 가공이 끝난 각 부위들을 조립하여 최종적인 한 블록의 목형 몰드를 완성

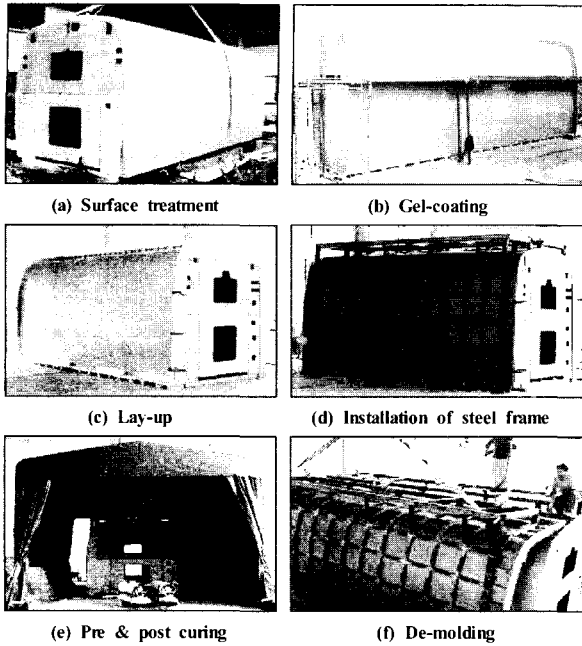


Fig. 6 The manufacturing processes of FRP mould.

(Fig. 5(d))하게 된다. 이렇게 완성된 3개의 블록은 섬유강화 복합재 몰드를 제작하기 위해 사용되어 진다.

섬유강화 복합재 몰드는 완성된 3개의 목형 몰드 표면 위에 유리 패브릭/에폭시 복합재 프리프레그(glass fabric/epoxy composite prepreg)를 적층하여 제작하게 된다.

먼저, 목형 몰드 표면은 복합재 몰드의 원활한 탈형(de-moulding)을 위하여 이형처리(Fig. 6(a))를 하게 된다. 이형 처리 후 목형 몰드를 보호하고 복합재 몰드의 내구성(durability)을 향상시키기 위해 젤-코팅(gel-coating) 작업(Fig. 6(b))을 수행한다. 젤-코팅 작업 후 유리 패브릭/에폭시 복합재 프리프레그를 적층(Fig. 6(c))하게 된다. 이때, 적층 두께는 성형 시 몰드의 변형을 최소화하기 위해 20mm로 하였다. 적층 완료 후, 적층된 유리 패브릭/에폭시 복합재 표면에는 Fig. 6(d)와 같이 금속 보강재를 설치하게 된다. 이는 오토클레이브에서 성형 시 고온 및 고압의 환경에서 복합재 몰드의 강성을 보강하여 변형을 최소화함으로써 실제 제작품의 결함을 없애기 위해서이다. 금속 보강재 설치가 완료되면 복합재 몰드는 Fig. 6(e)에서 보듯이 상온에서 5일 동안 경화시킨 후 60~80℃ 분위기 온도에서 4시간동안 후경화(post-cure)하여 완성된다. Fig. 6(f)는 성형이 완료된 복합재 몰드를 탈형하는 과정을 보여준다. Fig. 7은 목형 몰드에서 탈형된 섬유강화 복합재 몰드의 조립된 모습을 보여준다. 탈형된 복합재 몰드에서는 도어 및 gang웨이(gangway), 옥상 에어콘 설비, 창문 설비 등을 위한 세퍼레이트(separate)를 확인할 수 있다.

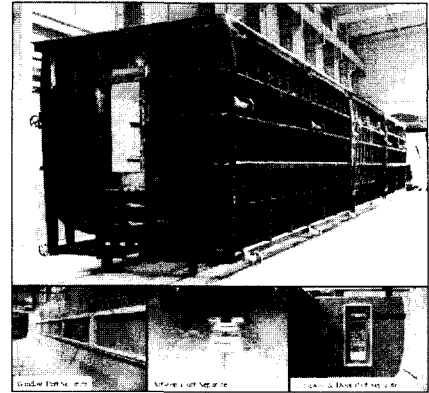


Fig. 7 The assembled FRP mould.

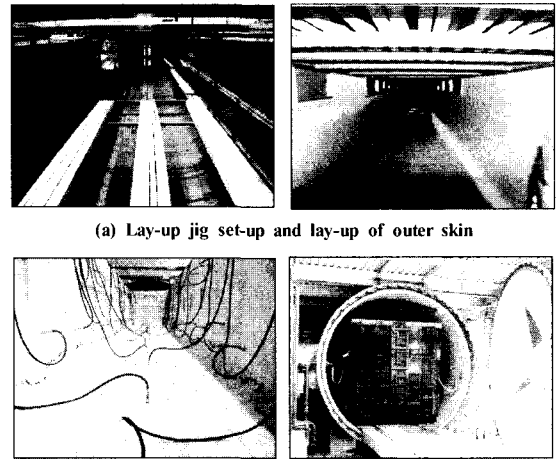


Fig. 8 The manufacturing processes of the outer skin.

3.2 복합재 차체 외피(outer skin) 적층 및 1차 성형

복합재 차체 성형을 위한 몰드 제작이 모두 완료되면, 샌드위치 복합재 구조물에 대한 적층작업을 수행하게 된다. 가장 먼저 샌드위치 구조물의 외피(outer skin)에 대한 적층 및 성형 작업을 수행하게 된다. 외피에 사용된 재료는 카본 패브릭/에폭시 프리프레그(carbon fabric/epoxy prepreg)로 한 플라이(ply)의 두께는 0.7mm이다. TTX 복합재 차체의 외피는 2mm로 제작되므로 총 3개의 플라이가 사용되어 졌다.

외피에 대한 저층에 앞서 복합재 차체의 절연을 목적으로 0.158mm 두께를 갖는 유리 패브릭/에폭시 프리프레그(E-glass fabric/epoxy prepreg) 한 플라이를 적층하게 된다. 유리 패브릭/에폭시 프리프레그에 대한 적층 후, 외피에 대한 적층은 수작업에 의해 이루어지며 적층이 완료되면,

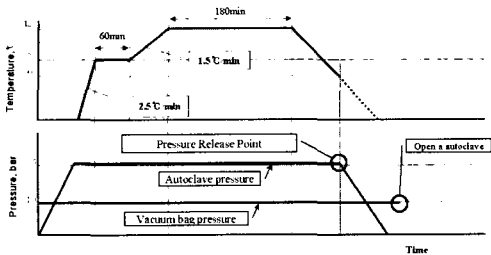


Fig. 9 The curing cycle using autoclave.

필 플라이(peel ply)를 추가로 적층하게 된다. 필 플라이의 목적은 복합재 외피와 알루미늄 하니컴 코어를 접착시키기 위해 사용되는 본덱스 접착필름(Bondex adhesive film)의 접착력을 향상시키기 위함이다. Fig. 8(a)와 같이 외피 및 필 플라이 적층이 완료되면, 진공 백(vacuum bag)을 이용하여 적층된 외피를 진공에 의해 밀봉(sealing)하고 압력(pressure)을 가하게 된다. 이때, 가해지는 압력은 1bar이다. Fig. 8(b)와 같이 진공 백(vacuum bag) 작업이 완료되면 오토클레이브에서 성형하게 된다. Fig. 8(c)는 모든 작업이 완료된 후 외피 성형을 위해 오토클레이브 안에 장착하는 모습을 나타내고 있다.

오토클레이브에서 복합재 외피를 성형할 때 가장 중요한 조건은 적절한 성형 사이클(curing cycle)에 의해 운영되는 것이다. 즉, 오토클레이브 성형 공법은 성형 시간(curing time)동안 온도(temperature)와 압력(pressure)을 어떻게 운영하는가에 따라 제품의 품질과 성공 여부가 결정된다. 본 연구에서는 항공기 동체에 대한 성형 사이클 조건 분석과 6.6m 복합재 차체 제작을 통해 TTX 하이브리드 복합재 차체에 대한 최적의 성형 사이클을 결정하였다. Fig. 9는 TTX 하이브리드 복합재 차체 제작을 위한 오토클레이브 성형 사이클(curing cycle)을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 진공 백 압력은 복합재 스킨 층의 층간 분리(delamination)를 방지하기 위해 성형이 완료될 때까지 1bar를 유지하고 오토클레이브 압력은 최대 2.5bar까지 유지시킨다. 온도는 복합재 외피가 적절한 조건하에서 경화 되도록 온도 사이클을 설정하였고 냉각 시에는 갑작스런 온도 변화에 의한 열변형을 최소화하기 위해 자연냉각을 시켰다. 이때 온도는 총 16곳에서 체크하게 된다. 온도가 60°C까지 내려오면 오토클레이브를 열고 상온까지 자연냉각시킨 후 물드를 꺼내어 다음 작업을 준비하게 된다. Fig. 10은 성형이 완료된 복합재 차체 외피를 보여주고 있다. 이때 외피는 2차 성형을 위해 복합재 몰드에서 탈형시키지 않는다.

3.3 알루미늄 하니컴 코아 및 금속 보강재 삽입

복합재 외피의 성형이 성공적으로 완료되었으면, 다음

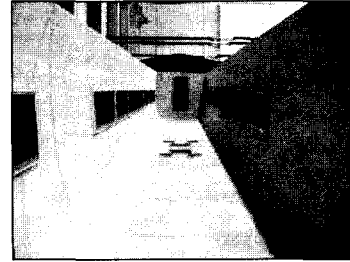


Fig. 10 The cured composite outer skin.

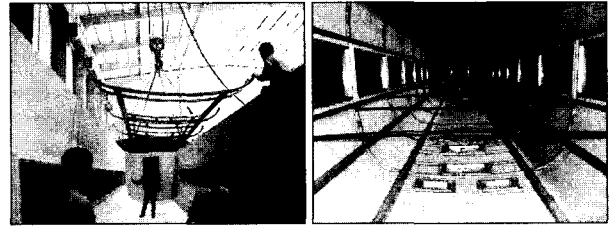


Fig. 11 The installation of the reinforced frame.

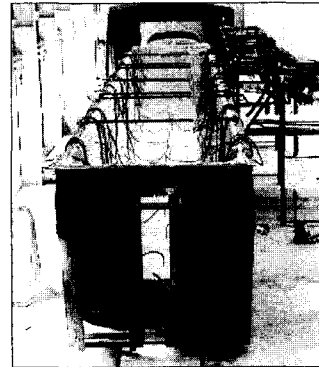


Fig. 12 The vacuum bagging process.

단계로 알루미늄 하니컴 코아와 금속 보강재를 복합재 외피 위에 설치해야 한다. 이때, 알루미늄 하니컴 코아와 금속 보강재를 복합재 외피 위에 위치시키기 전에 먼저 필 플라이(peel ply)를 제거한다. 필 플라이를 제거한 후 본덱스(Bondex) 606 접착필름을 복합재 외피에 부착시킨 후 그 위에 알루미늄 하니컴 코아와 금속 보강재를 위치시킨다. Fig. 11은 지붕, 사이드 및 엔드 구조에 삽입된 금속 보강재의 설치 모습을 보여준다.

3.4 복합재 차체 내피(inner skin) 적층

알루미늄 하니컴 코아와 금속 보강재 설치가 완료되면, 복합재 차체 내피(inner skin)를 적층하게 된다. 내피는 알루미늄 하니컴 코아와 금속재 보강재에 본덱스(Bondex)

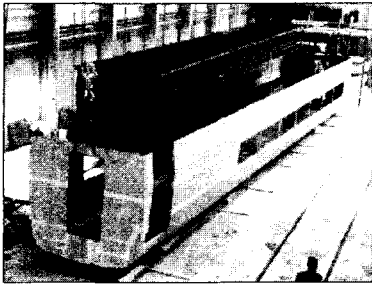


Fig. 13 The TTX sandwich composite carbody.

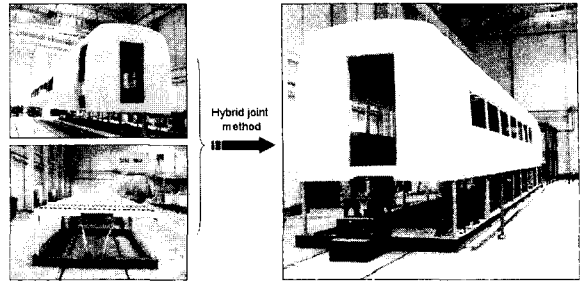


Fig. 14 The assembled carbody and underframe.

606 접착필름을 부착시킨 후 외피 적층과 같은 방법으로 수행하게 된다. 내피 적층이 완료되면, 외피를 성형할 때와 마찬가지로 진공 백(vacuum bag)을 이용하여 대상 구조물을 밀봉(sealing)하고 압력을 가하게 된다. Fig. 12는 모든 적층 작업이 완료된 후 성형 준비를 위해 완료된 진공 백 작업 모습을 보여준다.

3.5 복합재 차체 제작을 위한 2차 성형 및 탈형

Fig. 12와 같이 모든 적층 작업이 완료된 복합재 물드는 외피 성형 때와 마찬가지로 오토클레이브에서 성형하게 되며 사용된 성형 사이클 역시 동일하다. 성형시간은 6시간 정도 소요되며 성형이 완료되면 복합재 물드로부터 탈형하게 된다. 복합재 물드와 복합재 차체를 탈형할 때는 표면에 손상이 가해지지 않도록 조심스럽게 작업을 해야 한다. 실제로 복합재 물드 표면에는 성형 전 이형처리 등을 하여 탈형 작업은 어렵지 않게 이루어졌다.

Fig. 13은 탈형이 완료된 23m 길이를 갖는 TTX 하이브리드 복합재 차체의 모습을 보여주고 있다. 제작 완료된 TTX 하이브리드 차체는 정밀 치수 검사, 복합재 스킨의 층간분리(delamination) 유무 검사 등을 통해 결함을 확인한 결과, 제작 공정상의 오류는 발견하지 못하였다.

4. 금속재 언더프레임과의 체결

TTX의 언더프레임은 스테인레스 강으로 제작되었기 때문에 하이브리드 복합재 차체와의 용접 체결은 불가능하다. 따라서, 새로운 개념의 체결방식이 요구되어 진다. 앞에서 언급하였듯이 TTX의 금속재 언더프레임과 복합재 차체는 접착제에 의한 체결방식과 리벳에 의한 기계적 체결 방식을 동시에 사용하는 하이브리드 체결방식(hybrid joint method)에 의해 조립되어 진다. 이때 리벳은 차체 길이 방향으로 최소 50mm에서 최대 200mm 간격으로 체결되어졌다. 접착제는 제작 공정 단축을 위해 필름(film) 형태의 상온경화용을 사용하였다. Fig. 14는 복합재 차체와

금속재 언더프레임이 하이브리드 체결방식에 의해 조립된 모습을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 복합재 차체 제작을 위한 필요기술에 대한 정립과 오토클레이브 성형기법 연구를 통해 일체형 TTX 하이브리드 복합재 차체 제작을 완료하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- i) 복합재 철도차량 차체 제작을 위해서는 선행 조건들이 갖추어져야 하며, 이들 선행 조건들로는 차체 제작 개념도, 재료 선정, 설계 및 검증, 성형 공법의 선정 그리고 성형 장비 구축이 요구된다.
- ii) TTX 하이브리드 복합재 차체는 고강성 및 고강도의 구조물 제작에 이용되는 오토클레이브 성형 기법에 의해 제작하였으며, 제작 공정의 단축을 통한 제작 비용 절감을 위해 일체형 차체 제작 방식을 채택하였다. 하이브리드 복합재 차체 성형과정은 물드 제작, 외피 적층 및 1차 성형, 알루미늄 하니컴 코어 및 금속 보강재 삽입, 내피 적층 그리고 복합재 차체 2차 성형 및 탈형의 5단계로 구성된다.
- iii) 오토클레이브 성형공법을 통해 23m 길이를 갖는 TTX 하이브리드 복합재 차체를 일체형으로 제작하는 데 성공하였으며, 치수 검사와 복합재 스킨의 층간분리 유무 등의 검사 결과 제작상의 오류를 발견하지 못하였다. 오토클레이브에 의한 일체형 복합재 차체 제작은 세계 최초이며 본 연구를 통해 독자적인 복합재 차체 제작 기술을 보유하게 되었다.
- iv) TTX 하이브리드 복합재 차체는 하중시험 및 고유진동수 측정 시험 등을 통해 차체 및 언더프레임과의 결합부에 대한 구조 안전성을 확인할 것이다.

참고문헌

- 1) K. B. Shin and S. J. Lee, "The case and technique on lightweight of railway vehicle system using composite materials," *The Korean society for composite materials*, Vol. 17, No. 4, 2004, pp. 82-86.
- 2) A. Starlinger, "Transportation industry applications of ABAQUS at ALCAN," *ABAQUS Users Conference Proceedings*, Maastricht, 2002, pp. 1-16.
- 3) S. H. Kim, S. G. Kang, S. E. Lee, C. G. Kim and K. B. Shin, "Analysis of the composite structure of tilting train express(TTX)", *The 2004 Autumn Conference of Korean Society for Railway*, 2004, pp. 171.
- 4) H. S. Jung, T. S. Kwon, J. S. Koo and T. M. Cho, "Crush analysis of a TTX M-car design," *The 2004 Autumn Conference of Korean Society for Railway*, 2004, pp. 164.
- 5) A. P. Kettle, J. Lacasta, A. M. Robinson and J. J. Carruthers, "Proceeding of review: Composites in the rail industry conference," *Railview Ltd.*, Derbyshire, UK, 1997.
- 6) S. T. Peters, "Handbook of composites," *2nd Edition*, Chapman & Hall, 1998.
- 7) M. Hintermann, "Composite processing technologies for railway applications," *The fourth COMPOSIT's workshop on Composite Manufacturing for Transport Applications*, Aachen, Germany, 2002.
- 8) G. Marsh, "Putting SCRIMP in context," *Reinforced Plastics*, Vol. 41, No. 1, 1997, pp. 22-26.
- 9) G. Eckold, "Design and manufacture of composite structures," *Cambridge*, Woodhead Publishing Limited, 1994.