

特輯

“철도분야에서의 신소재 복합재 응용 기술”(총 7편) 중 - 제7편

철도차량 분야에서의 복합재 적용을 위한 성능 평가 기술

이상진*, 신광복**, 류봉조**, 정종철*, 김정석***

1. 서론

국내외 수송 분야 전문가들은 최근 운송물량의 확대와 운송시간 단축을 위한 차량의 고속화 요구에 따라 차량 경량화, 선로 개선, 추진시스템 개발을 통한 속도향상 기술개발을 활발히 추진 중에 있다. 특히, 차량의 속도향상 및 에너지 절감을 위하여 차량의 경량화를 위한 연구 중 하나로 복합소재 차체 제작에 관한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.

본 논문에서는 철도차량 차체 구조물로서 복합재를 적용할 때, 구조안전성을 확보하기 위해 평가해야 하는 항목을 조사하고, 각 항목에 대한 평가기술을 소개하고자 한다.

2. 철도차량 구조물 성능평가 항목

2.1 구성품 시험

철도차량의 일부본인 구성품으로써의 평가항목을 조사하였다. 기본적으로 복합재 차체에 대한 구조하중 평가를 비롯하여 충돌특성, 피로내구성, 단품으로 차음성능, 화염성능 평가 등이 있다. 다음은 각 항목에 대한 상세설명이다.

2.1.1 구조하중 평가

구조하중 평가의 시험방법 및 평가기준은 JIS E7105 [1] 그리고 “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에 따른다.

시험은 총 5가지로 분류된다.

- 수직하중 시험 (Vertical load test)
- 압축하중 시험 (End compressive load test)
- 비틀림 하중 시험 (Torsional load test)
- 3점지지 시험 (Three-point support test)
- 고유진동수 측정 시험 (Natural frequency measuring test)

Table 1 시험하중

시험 항목	시험 하중의 크기		
수직 하중	(정비중량 - 대차중량 + 승객하중) × 1.2 - (차체중량 + 시험기재질량)		
압축 하중	압축 하중	전차, 내연동차 및 밀착식 자동 연결기를 갖춘 객차	50 ton _r
		레일 버스	30 ton _r
	밀착식 자동 연결기 이외의 연결기를 갖춘 객차	100 ton _r	
수직 하중	공차중량 - (차체중량+시험기재질량)		
비틀림 하중	4 ton _r -m		
3점지지 시험	공차중량 - (차체중량 + 시험기재질량)		
고유진동수	진동을 일으킬 수 있는 부하 하중		

- 주) - 공차중량은 승객, 화물, 및 상업운행을 위한 승객 용품 및 자재가 차량에 포함되지 않은 상태의 중량.
- 정비중량은 열차가 상업운행을 위한 승객용품 및 자재가 차량에 적재되어 있는 상태의 중량.

시험항목에 따른 적용하중은 Table 1에 준하여 계산된다.

수직하중 시험, 비틀림 시험 및 3점 지지시험 시, 차체를 수직지지하기 위한 지지대는 바디볼스터(Body bolster)의 에어스프링(Air Spring)이 부착되는 곳(4 Point)에 위치하며 비틀림 하중시험이나 비틀림 고유진동수 시험을 위하여 바디볼스터 센터에 또 하나의 지지대가 위치한다(Figure 1). 총 5개의 수직 지지대는 차체의 레벨링 등을 위하여 자동 높낮이 조절이 가능하도록 하였다. 압축 시험시의 차체는 반력벽과 연결기 고정부분 사이에 위치한 지지기둥(Support Bar)을 통해 고정한다. 시험하중은 유압실린더를 이용하여 적용한다. 키스톤 플레이트 상면에는 10 ton_r 용량의 18개의 실린더로 하중을 분포시키며(Figure 2) 커플러 연결부에는 200 ton_r 용량의 실린더로 압축하중을 가한다(Figure 3). 모든 시험하중은 주조정판넬(Main control panel)로부터 조정되며 비례 제어 밸브를 사용하여 보다 빠르고 정확하게 지정된 하중을 적용할 수 있도록 한다.

* (주) 한국화이바 철도차량사업부
 ** 한밭대학교 기계공학부 기계설계공학과, +교신저자 (shin955@hanbat.ac.kr)
 *** 한국철도기술연구원 선임연구원

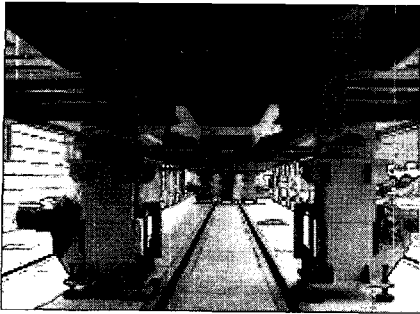


Fig. 1 차체 지지대.

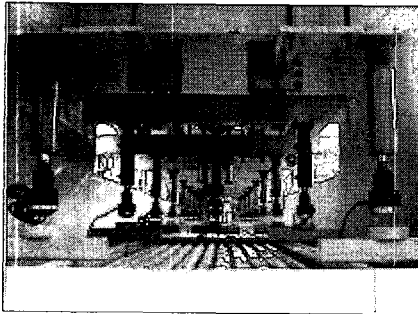


Fig. 2 수직분포하중용 실린더.

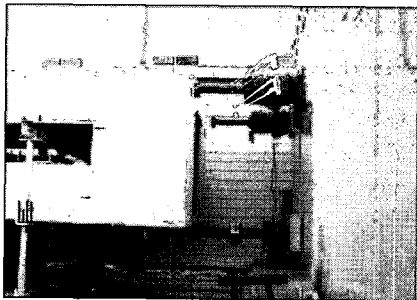


Fig. 3 압축하중용 실린더.

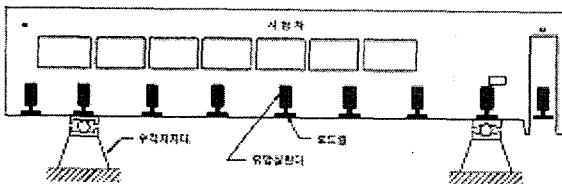


Fig. 4 수직하중시험 개념도.

각 항목별 시험절차는 다음과 같다.

- 수직분포하중 시험 (Figure 4)

- ① 4개의 차체 지지대를 이용하여 차체를 4점지지 한다.
- ② 변형률 및 처짐량 측정을 위한 계측기를 조정한다.

(Calibration & Zero Setting)

- ③ 수직하중용 실린더(18개)를 이용하여 수직하중을 가한다.
- ④ 측정된 변형률, 처짐량 및 하중값을 기록/저장한다.

- 압축하중 시험 (Figure 5)

- ① 4개의 차체 지지대를 이용하여 차체를 4점지지 한다.
- ② 변형률 및 처짐량 측정을 위한 계측기를 조정한다.
- ③ 압축하중 시험을 위한 수직하중을 가한다.
- ④ 수직하중이 가해진 상태에서 압축하중을 적용한다.
- ⑤ 측정된 변형률, 처짐량 및 하중값을 기록/저장한다.

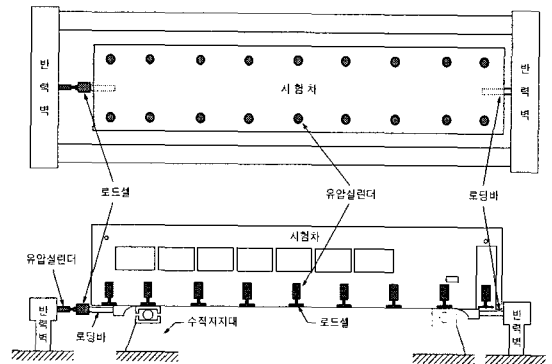


Fig. 5 압축하중시험 개념도

- 비틀림 하중 시험 (Figure 6)

- ① 3개의 차체 지지대를 이용하여 차체를 3점지지 한다.
- ② 변형률 및 처짐량 측정을 위한 계측기를 조정한다.
- ③ 실린더를 이용하여 차체를 고정한다.
- ④ 실린더를 통해 차체에 비틀림 하중을 가한다.
- ⑤ 하중이 안정화 된 상태에서 3분간 유지한다.
- ⑥ 측정된 변형률, 처짐량 및 토크값을 저장한다.

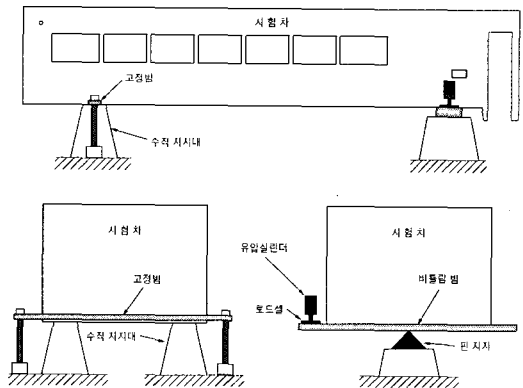


Fig. 6 비틀림 하중 시험 개념도.

- 3점지지시험 (Figure 7)

- ① 4개의 차체 지지대를 이용하여 차체를 4점지지 한다.
- ② 변형률 및 처짐량 측정을 위한 계측기를 조정한다.
- ③ 3점지지 시험을 위한 수직하중을 가한다.
- ④ 하중이 가해진 상태에서 지지대를 하강한다.
- ⑤ 측정된 변형률, 처짐량 및 토크값을 저장한다.

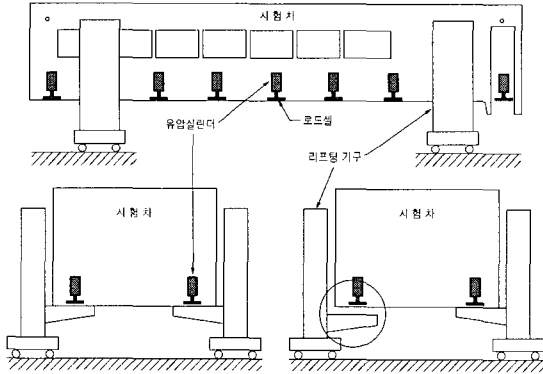


Fig. 7 3점 지지시험 개념도.

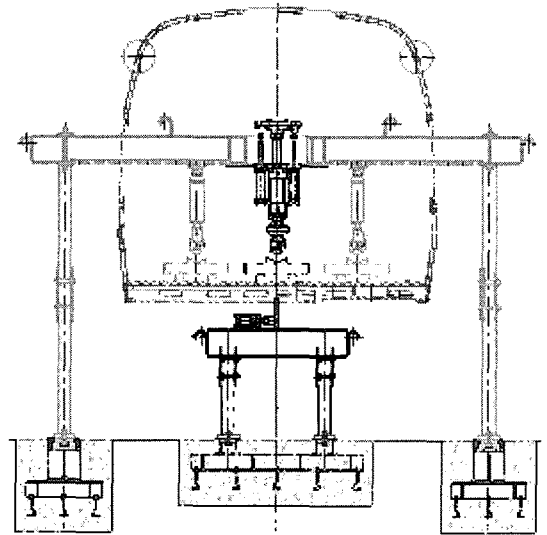


Fig. 8 차체 고정용 장치.

- ⑦ 가속도 센서를 통해 입력되는 신호를 측정/저장한다.

- 고유진동수 측정 시험 (Figure 8)

고유진동수는 굽힘 및 비틀림 고유진동수를 각각 측정 한다.

굽힘 고유진동수 측정시험 순서는 다음과 같다.

- ① 4개의 차체 지지대를 이용하여 차체를 4점지지 한다.
- ② 가속도 센서를 부착한다.
- ③ 중앙에 위치한 실린더를 이용하여 차체에 굽힘변형을 가한다.
- ④ 차체고정용 지그를 이용하여 변형된 차체를 고정 한다.
- ⑤ 실린더를 초기상태로 복귀시킨다. (차체진동 시간섭이 발생하지 않도록 주의)
- ⑥ 차체고정용 지그를 순간적으로 제거하여 차체를 진동 (굽힘모드)시킨다.
- ⑦ 가속도 센서를 통해 입력되는 신호를 측정/저장한다.

비틀림 고유진동수 측정시험 순서는 다음과 같다.

- ① 3개의 차체 지지대(1번, 4번, 5번)를 이용하여 차체를 3점지지 한다.
- ② 가속도 센서를 부착한다.
- ③ 차량 단부쪽에 위치한 실린더를 이용하여 비틀림 변형을 가한다.
- ④ 차체고정용 지그를 이용하여 변형된 상태의 차체를 고정한다.
- ⑤ 실린더를 초기상태로 복귀시킨다.
- ⑥ 차체고정용 지그를 순간적으로 제거하여 차체를 진동 (비틀림모드)시킨다.

2.1.2 충돌 및 피로내구성 평가

차량의 고속화에 따라 정적인 성능 평가를 기본으로 하여 충돌, 피로 내구성과 같은 실제 운행 상태의 성능이 요구되어지고 있다. 이에 철도 운영기관에서는 충돌 안전도 기준을 제정, 엄격히 적용하고 있는 추세이다. 간단한 예로 열차 대 열차 충돌사로서 상대속도 55 km/h로 충돌시 에너지 흡수구조에 의하여 승객과 운전자 보호되도록 하여야 한다.

차체의 피로 내구성에 대한 국내 기준은 명확하지 않으며, 알루미늄 등 금속차체의 경우도 실제 차체에 피로하중을 가하여 그 성능을 평가하도록 한 규정은 없다. 한편, 국내에서도 알루미늄 차체 개발과제에서 피로특성을 평가한 사례를 확인할 수 있었다[2]. 실제 차체가 받게 되는 하중상태로 만차 적재상태에서 주행 중 대차로부터 전달되는 운동에 의해 동적 하중을 받게 된다. 대차로부터 전달되는 동적하중을 균일 주파수, 균일 하중 크기의 유압 가진기로 차체에 동하중을 가하여 그 특성을 평가한다.

2.1.3 차체 단일 특성 평가

실제 차량에서의 단일특성 평가는 실내의 부품이 취부된 완성차에 대해 평가되어야 하나, 차체만이 복합재료 바뀌어 적용되는 경우, 복합재 차체 재질에 대해서 단일특성을 평가하고자 한다. 일반적으로 차량의 냉난방 용량 산출을 위한 열 부하 계산 시, 고려사항으로 주행선 구간의 기후, 승차 인원의 변동, 차체의 전열, 일사량, 환기량, 실내 기기의 발열 및 승객의 발열 등이 있다.

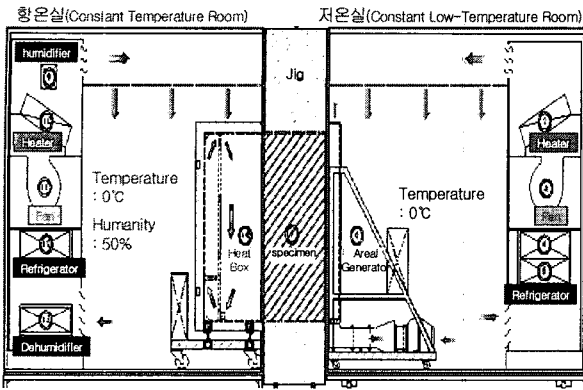


Fig. 9 열관류율 시험장치 개요도.

차량 단열성능평가에는 별도의 규정이 정해져 있지 않아, 현재 건축용으로 이루어지고 있는 KS 시험규정에 따라 수행되어진다[3].

단열성능평가를 위한 열관류율 시험장치 개요도는 Figure 9와 같다.

열관류율 시험의 항온실 시험조건은 20℃(온도), 50%(t상 대습도)이며, 저온실은 0℃로 설정하여 실험을 진행한다. 열관류율 시험장치는 항온실, 저온실, 항온실 내 가열상자, 저온실 내 냉풍 취출 장치, 각 실의 공조기기, 온습도 제어 장치, 계측장치 및 기타 부대설비로 구성되어 있다. 저온실에는 KS F 2299와 ISO 8990에 의하여 시험체의 전체 표면에 대한 표면 열전달 저항 값을 일정하게 유지하기 위한 냉풍 취출 장치가 구성된다. 냉풍 취출 장치는 저온실의 공기를 시험체 표면에 가능한 균일하게 흐르도록 함과 동시에 풍속을 조절할 수 있다.

열관류율 측정시험 절차는 다음과 같다.

- ① 차체 단면시편을 지그에 고정하는 과정을 나타내는 것으로 개구부에 부착된 시편은 우레탄 폼으로 가장 자리를 충진한다(Figure 10).
- ② T type 열전대를 부착한다(Figure 11).
- ③ 항온실 내부의 가열상자와 저온실 내부의 기류발생장치를 지그에 고정시키고, 시험 전에 실내온도 20℃±1℃, 실내 상대습도 50±5%의 항온항습실에서 24시간 이상 양생 후 시험한다(Figure 12).
- ④ 시험체 양쪽의 공기 온도 및 표면 온도가 한 방향으로 변화하지 않고 거의 일정하게 된 상태를 확인 한 후에, 공시체 양쪽의 공기 온도와 표면 온도 및 가열상자로의 공급 열량을 30분마다 5회 측정한다.
- ⑤ 평균값을 사용하여 열관류 저항 또는 열 저항을 구한다.

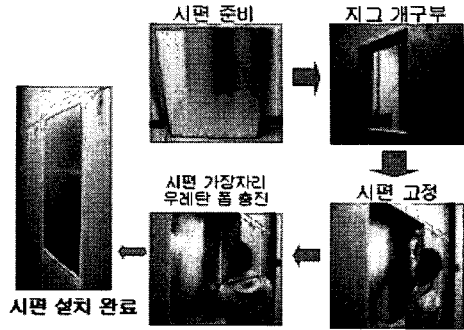


Fig. 10 시험편 설치.

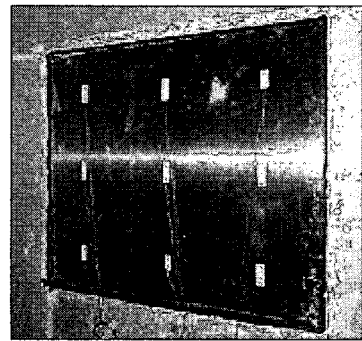


Fig. 11 온도측정센서 설치.

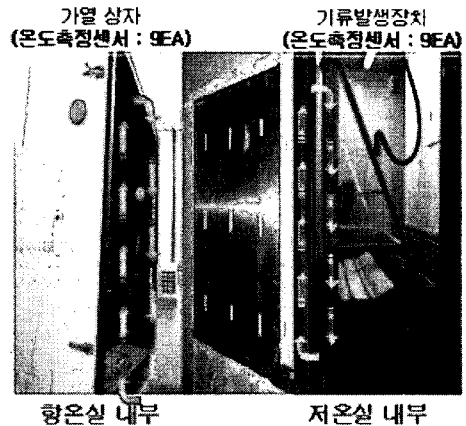


Fig. 12 시험전 시험편 처리과정.

2.1.4 차체 차음 특성 평가

일반적으로 차량의 차음 특성 평가는 실내의 부품이 조립완료된 완성차에 대해 평가되어진다[4]. 복합재료로 차체를 대체할 경우, 기존 차량과의 비교 분석을 위해 차체 단품에 대한 차음 특성을 평가할 필요가 있다.

실험적으로 차음성능을 계측하기 위해서는 측정시편에 음파가 가능한 한 모든 입사각으로 투과되도록 잔향실 (Reverberation room)을 사용한다. 잔향실은 음원(Sound source)으로부터의 음향에너지가 가능한 한 감소되지 않고 모든 방향으로 균일하게 확산되도록 Figure 13과 같은 형상으로 설계된 방이다. 간단한 이론적 해석으로부터 공통벽이 있는 두 개의 잔향실의 감음량(Noise reduction, $L_{p1}-L_{p2}$)을 측정하면 다음과 같이 차음손실(Sound Transmission Loss)을 구할 수 있다.

$$STL = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A} \right)$$

L_{p1} = 소음원실(Source room)의 평균 음압레벨 (dB)

L_{p2} = 수음실(Receiving room)의 평균 음압레벨 (dB)

S = 구획부재의 표면적 (m^2)

A = 수음실의 실상수(Room constant) (m^3)

한편, 실상수는 수음실의 흡음성능을 표현하는 지표로서 차음성능 측정 시 수음실의 흡음특성 영향을 배제하기 위해 사용된다. 이것은 수음실의 잔향시간(Reverberation time)을 측정하면 다음의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$A = \frac{55.3 V}{c T_{60}}$$

여기서, V = 수음실의 용적 (m^3),

c = 음속 (Speed of sound)

T_{60} = 음향에너지가 60dB 감소하는데 걸리는 시간 (sec)

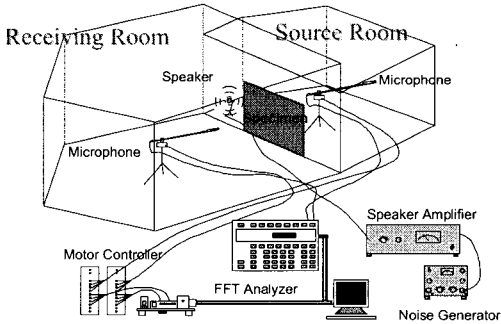


Fig. 13 잔향실을 이용한 차음 성능 측정 개략도.

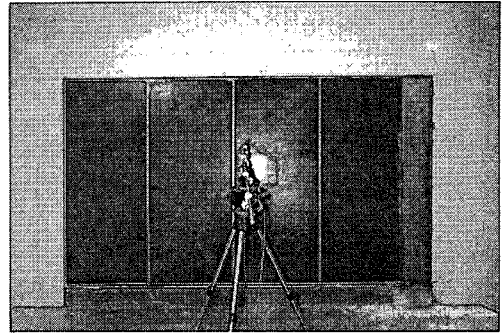


Fig. 14 수음실(Receiving Room).

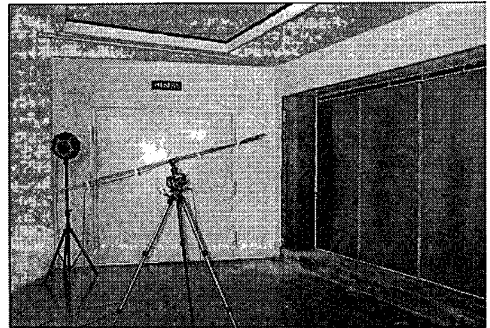


Fig. 15 소음원실(Source Room).

Figure 13은 차음 성능 측정을 위한 잔향실과 실험장비들을 도시하고 있으며, 두 잔향실 사이에 설치 가능한 시편의 최대 크기는 4.2m×2.4m 이다. 차음 시험은 수음실과 소음원실의 두 개의 잔향실을 사이에 두고 프레임을 이용하여 고정하며, 틈새는 실링재를 이용하여 완전히 격리시킨다.

Figure 14와 Figure 15에서 볼 수 있듯이, 마이크로폰이 공간 내의 여러 위치에서 음량을 측정될 수 있게 되어 있어 각 위치별 측정값의 평균치로 차음손실을 평가 한다.

2.1.5 차체 화염 시험

차체 재질에 대한 화염 성능시험은 기존의 금속재질일 경우 큰 의미는 없었다. 차체 재질을 고분자 화합물질인 복합재를 적용하고자 한다면, 차량 실내 화재 발생 시, 연소성(Flammability), 연기발생(Smoke Density), 독성가스(Toxicity) 시험 뿐만 아니라, 화재로 인한 차체 붕괴 특성을 평가해야 할 것이다.

2.2 완성차 시험

차량의 구성품에 대한 시험과 함께 모든 구성품이 조립된

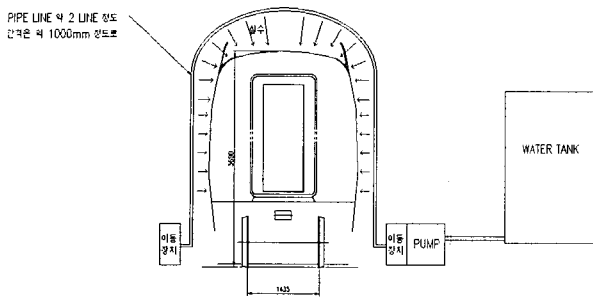


Fig. 16 살수 시험장치 개략도.

상태의 완성차에 대한 시험으로는 제어회로시험, 기능 동작 시험, 종합제어시험 등의 성능평가 항목이 있다. 차체 구조물과 관련된 항목으로는 차체 누수시험, 차체 리프팅 시험, 차내 차음 시험[4] 등이 있다. 이 중에서 차체 누수시험은 차량의 측면, 단면 및 지붕 윗면에 비가 내리는 상태로 거의 균등하게 살수할 수 있는 장치가 필요하다. 시험조건은 강수량 상당 150 mm/h 이상으로 하고 살수 노즐부 수압은 100 kPa 이상으로 한다. Figure 16은 누수시험 개략도를 보여주고 있다.

살수 시험은 차량 정차 시험과 차량 이동시험이 있다.

이동 시험은 균등한 속도로 서행 통과시키면서 5분 이상 살수하고 살수 중 및 살수 종료로부터 10~20분 후에 각각 차체 내부에서 누설 유무를 확인한다. 복합재 차체의 경우 접합부 부위에서 특히 유의해야 할 것이다.

3. 맺음말

구조재로서 복합재의 철도차량 분야 적용을 위해 필요한 성능 평가 항목을 확인하였다. 기본적으로 구조하중 시험을 비롯하여 구조적 안전성 확보를 위한 충돌 및 피로 내구성 평가가 필요하다. 또한, 차량 냉난방용량 산출을 위한 차체 단열 특성 평가, 차음 특성평가 내용 및 절차를 확인하였다. 이밖에도 새로운 재질인 복합재에 대한 화염성능 평가 항목, 완성차 측면에서의 차체 누수 시험 등의 평가 내용 및 절차를 확인하였다. 향후에는 복합재 특성을 고려한 시험항목 및 평가기준에 대한 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- 1) JIS E 7105, “Test method for static load of body structures of railway rolling stock,” 1994.
- 2) 서승일, 박춘수, 신병천, “알루미늄 차체 하중 시험 방

법에 관한 비교 평가,” 한국철도학회지, Vol. 7 No. 1, 2004, pp. 32-36.

3) KS F 2277, “건축용 구성재의 단열성 측정방법-교정 열상자법 및 보호열상자법,” 2002.

4) KS R9143, “철도 차량 차내 소음 시험 방법,” 1982.