

# 도시철도차량 구조체의 정밀진단에 관한 고찰

## On study the diagnosis of carbody structure for EMU

정종덕\*  
Chung, Jong-Duk

윤성철\*  
Yoon, Sung-Cheol

홍선호\*  
Hong, Sun-Ho

전한준\*\*  
Chun, Han-Jun

---

This paper describes EDM testing, Magnetic particle testing and Ultrasonic testing results of carbody structure for EMU. Carbody is subject to vibration, impact and wear which can cause severe defects leading to a fatal accident. The purpose of the test is to prove the endurance of Korean EMU for the commercial operation.

---

### 1. 서론

국내 도시철도차량의 운행이 20년 이상 지속되면서 유지보수의 필요부위나 필요정도의 정밀한 파악과 적절한 교체시기를 확보함으로써 대형사고를 미연에 방지함과 동시에 차량관리의 안전성 확보와 유지보수비용 절감에 기여할 수 있는 정밀진단 수행체계의 법제화를 통한 도시철도차량의 안전운행확보가 절실하다. 그러므로 도시철도차량 정밀진단은 차량사용 내구연한의 연장 가능여부를 확인하기 위하여 상태평가, 안전성평가, 및 잔존수명평가를 실시하는 것이다.

본 논문에서는 정밀진단 대상 항목인 차량의 치수측정은 “도시철도차량의 정밀진단지침”에 의거하여 정밀진단 신청자가 제시한 기준도면 및 자료에 의하여 실시하였으며, 치수검사의 대상부위는 차체의 주요치수를 선정하고 3차원 측정장비를 이용하여 측정 실시하였다.

철도청에서 의뢰한 “전기동차(저항제어)시험”의 차량은, 총 6량을 정밀진단 대상으로 하고 있다. 따라서 정밀진단 지침에서 제시하는 다량의 치수를 측정하고, 측정값의 정밀도를 높이기 위한 방법으로 특정 위치의 기준점을 배치하여 각 부위의 치수를 측정하는 방법을 사용하였다.

차체는 정상적인 운행상태에서 개조 및 대대적인 보수, 보강 없이 최소 25년간 사용할 수 있도록 설계되고 제작되도록 되어 있고, 차체의 구조는 언더프레임, 측면 구조틀, 지붕 구조틀 및 끝 칸막이 구조틀로 구성되어 있으며, 차체를 이루는 모든 구성품은 최대하중과 정상운행 조건하에서, 과도한 변형으로 인한 기기의 오동작을 방지하고 원활한 기능 수행을 위해 충분한 강도 및 강성이 유지되도록 되어 있다. 특히, 언더프레임은 수직하중 및 연결기를 통하여 전달되는 수평하중 및 대차를 통하여 전달되는 하중을 충분히 견딜수 있는 구조가 요구되어 센터실과 사이실, 크로스빔에 대하여 자분탐상검사와 사이드실과 크로스빔에 대해서는 초음파탐상검사를 실시하였다.

본 논문에서는 도시철도차량 정밀진단을 통하여 차량사용 내구연한의 연장 가능여부를 확인하고 상태평가, 안전성평가, 및 잔존수명평가를 실시하여 차량의 유지보수비용 절감에도 효과적으로 기여할 수 있는 도시철도차량 정밀진단을 실시하고 차량을 운행하여 신뢰성을 확보하고자 한다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 연구원

## 2. 차체의 치수검사

### 2.1 치수측정 변위계측

#### 2.1.1 개요

차량형상의 치수 및 변위 계측은 차량 안전성 평가의 지표로서 매우 중요하다. 여기서 차량의 제작초기의 치수와 설계상의 치수가 동일하다는 가정하에 변위여부의 평가가 이루어질 수 있다. 일반적인 제작전 차량 부재 단면의 치수는 측정간에 인바테이프나 변위계를 사용하여 계측할 수 있으나, 제작이 완료된 후의 치수측정은 공간적인 제약으로 인하여 3차원 측정기를 사용하여 측정하여야 한다. 본 진단에서는 차량의 치수 및 변위측정을 위해서 측정간의 거리를 비접촉방법인 3차원 좌표측량기를 사용하여 공차상태 조건 하에서 치수 및 변위 여부를 계측하였다.

#### 2.1.2 전자기파거리측량기를 사용한 변위의 계측

적외선, 레이저광선, 극초단파 등의 전자기파(electromagnetic wave)를 이용하여 거리를 관측하는 방법을 전자기파거리측량(EDM)이라 한다. 전자기파거리측량기를 사용하면 짧은 시간에 지형이나 장애물에 관계없이 측정할 수 있으며 최대 100km이상의 장거리를 정밀도 1/100,000이상으로 빠른 시간내에 간편하게 측정할 수 있다. 전자기파거리측량기는 광파거리 측정기와 전파거리 측정기로 크게 나눌 수 있으며 본 연구에서는 광파거리 측정기를 사용하여 변위를 계측하였다.

#### 2.1.3 측정방법 및 장비

본 과업에서는 광파거리 측정기(Light Wave EDM)를 사용하여 용벽의 변위 계측을 수행하였다. 광파거리 측정기는 가시광선, 적외선, 레이저광선 등을 이용하는 것으로서 강도 변조한 광파를 측정점에 세운 기계로부터 발사하여 이것이 목표점의 반사경에 반사하여 돌아오는 반사파와 발사파의 위상차로 거리를 관측한다. 광파거리측량기는 주로 중단거리용으로 쓰이며 정확도는 통상 (5mm±5ppm)의 정확도이나 본 연구에서 사용된 장비는 현재까지 개발된 광학측정장비 중 가장 정확도가 높은 LEICA사의 TC2002(정밀도:1mm±1ppm)를 사용하였다.

## 2.2 차체 주요 치수측정

### 2.2.1 치수 측정방법 및 기준점 세팅

정밀진단 대상 항목인 차량의 치수측정은 “도시철도차량의 정밀진단지침”에 의거하여 정밀진단 신청자가 제시한 기준도면 및 자료에 의하여 실시하였으며, 치수검사의 대상부위는 차체의 주요치수를 선정하고 3차원 측정장비를 이용하여 측정 실시하였다.

철도청에서 의뢰한 “전기동차(저항제어)시험”의 차량은, 총 6량을 정밀진단 대상으로 하고 있다. 따라서 정밀진단 지침에서 제시하는 다량의 치수를 측정하고, 측정값의 정밀도를 높이기 위한 방법으로 특정 위치의 기준점을 배치하여 각 부위의 치수를 측정하는 방법을 사용하였다.

동일 레벨선상의 직선구간의 선로를 확보하기 위해 구로 차량기지의 검수고를 대상차량측정위치로 선정하였으며, 검수고 내부의 기준점은 다음 그림1과 같이 배치하였다.

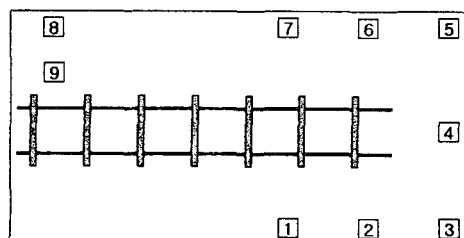


그림1. 검수고 내부의 기준점 배치현황

이때 검수고내 설치된 기준점의 초기 측정 좌표는 아래 표1 과 같다.

표1. 검수고 내부의 기준점에서의 측정결과 (구로차량기지 검수고 내)

측점	X	Y	Z	TARGET
POINT C4	32822.3	-4274.6	11085.5	Tape Target
POINT C5	34164.0	3947.6	8978.1	Tape Target
POINT C6	27913.7	5775.0	10558.1	Tape Target
POINT C8	-37643.0	4856.0	9425.0	Tape Target
POINT C3	16361.1	-14207.9	10819.5	Tape Target
POINT C2	27975.7	-14278.9	10768.2	Tape Target
POINT C1	33965.4	-14311.8	10482.7	Tape Target

또한 선로의 기울기에 의한 영향을 받지 않는 차량의 창문 등의 측정은 그림2와 같이 검수고 야외에서 측정토록하여 측정시간을 단축하도록 하였다.



그림2. 진단대상차량 치수측정 및 사용된 반사 Tape Target

## 2.4 치수측정 결과

차량의 치수 및 변형측정을 위해 비접촉 방법인 3차원 좌표측량기를 사용하여 치수 및 변위여부를 측정된 결과 공차상태에서 차체 캠버량은 역캠버가 발생되지는 않았지만 6량중 3량이 좌측과 우측의 캠버량 편차가 발생되었으며, 언더프레이밍의 수평도는 동력차 1량에서 전후방향으로 기준치를 만족하지 못하고 수평도가 뒤틀어 졌음을 알 수 있었다.

차체길이는 6량중 5량이 기준치에서 벗어나 있으며 전체적으로 차체길이의 상면과 하면이 치수 차이가 발생함을 알 수 있었고, 차체폭은 6량 모두 기준치를 만족하고 있지 않음을 알 수 있으며 전체적으로 각 차량마다 부위별로 차체폭이 일정하지 못하고 돌출 또는 함몰되어 있어 쉽게 배플림의 현상이 나타남을 알 수 있었다.

차체높이는 6량중 4량이 기준치에서 벗어나 있으며 특히, 동력차(1량)는 차량중심 높이와 볼스터 센터 중심높이차가 약 60mm 이상 차이가 나타났으며, 출입구는 너비 및 높이가 6량 모두 기준치에서 벗어나 있다. 이는 오랜 운행으로 인하여 개구부(Open section)가 넓어 변형이 쉽게 발생되었음을 알 수 있었다.

## 3. 비파괴 검사

### 3.1 자분 탐상 검사(Magnetic particle testing)

#### 3.1.1 자분탐상검사

자분탐상검사는 비파괴 검사방법중 널리 이용되고 있는 방법의 하나로, 강자성체인 시험체의 표면 및 표면 바로 밑의 불연속(결함)을 검출하기 위하여 시험체에 자장을 걸어 자화시킨 후 자분을 적용시키고, 누설 자장으로 인해 형성된 자분지시를 관찰하여 그 지시의 크기, 위치 및 형상 등을 검사하는 방법이다.

다른 비파괴 검사방법과 비교해 볼 때, 자분탐상검사는 미세한 표면균열 검출에 가장 적합하며, 검사품의 크기, 형상 등에 크게 구애됨이 없이 검사수행이 가능하지만 모든 재질에 대해서 적용할 수 있는 아니라 자화가 가능한 강자성체에만 국한된다.

강자성체의 표면 또는 표면에 있는 불연속부를 검출하기 위하여 강자성체를 자화시키고 자분을 적용시켜 누설자장에 의해 자분이 모이거나 붙어서 불연속부의 윤곽을 형성, 그 위치, 크기, 형태 및 넓이 등을 검사하는 방법이다.

### 3.1.2 자분탐상검사 결과

언더프레임의 센터실, 볼스터 및 교차부위(센터실과 볼스터 및 센터실과 크로스빔)에 대하여 차종별로 검사를 실시하였다. 표2는 차량의 자분탐상 결과를 그림3은 자분탐상 부위의 개략도를 나타내고 있으며 차량제작시 용접부에 의한 결함으로 추정되는 부위를 제외하고는 결함이 검출되지 않았다.

표2. 차량의 자분탐상 결과

구 분	검사 개소	결함 여부	비 고
1. Tc-car(1024호)	39 개소	양호	
2. M-car(1424호)	31 개소	양호	
3. M'-car(1524호)	31 개소	양호	차량제작시 용접부 결함(3곳) 검출

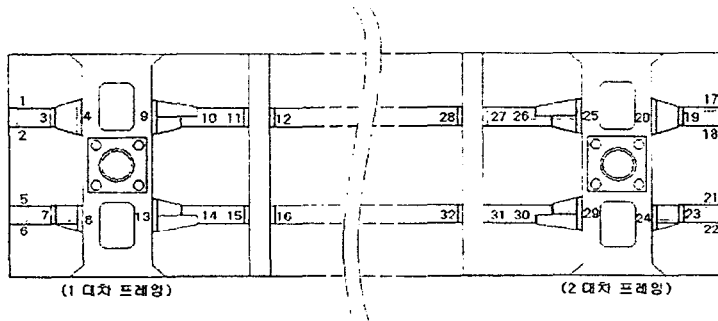


그림3. 자분탐상검사 부위 개략도

## 3.2 초음파 탐상 검사(Ultrasonic testing)

### 3.2.1 초음파 검사이론

초음파 탐상검사는 초음파를 이용하여 시험체에 초음파를 전달하여 내부에 존재하는 불연속으로부터 반사한 초음파의 에너지량, 초음파의 진행시간 등을 분석하여 불연속의 위치 및 크기를 정확히 알아내는 방법이다. 초음파 탐상방법에는 원리면으로 여러 가지 방법이 있으나, 결함(불연속)을 검출하기 위한 초음파탐상법으로 펄스-에코우법이 가장 널리 사용되고 발전되어 있다.

시험체의 내부결함 및 외부결함을 탐상하는 방법으로 널리 사용되고 있는 비파괴 검사방법은 방사선투과검사와 초음파 탐상검사가 있는데, 초음파 탐상검사가 방사선 투과검사에 비해 우수한 점은 시험체의 두께가 두꺼워도 쉽게 검사가 가능하고, 균열과 같은 면상의 결함 검출능력이 탁월한 반면, 단점으로는 결함의 종류를 식별하기 어렵고 금속조직의 영향을 받기 쉽다는 점이다.

### 3.2.2 초음파 두께 측정결과

본 검사의 주 대상인 차체 언더프레임의 주요 부재인 사이드실, 센터실, 크로스빔에 대하여 두께 변화를 아래 표3과 같이 측정하였으며 표4는 각 부위별 두께 감소율을 나타낸다. 두께 변화의 주요 원인은 부식으로 인한 감소율로 판단된다. (그림4는 언더프레임 초음파 측정부위 개략도 참조)

표3. 차량의 초음파 두께 측정결과

구분	검사 개소	두께 감소율(%)	감소율 큰부위
1. Tc-car(1024호)	32 개소	0~9.77	1) 사이드실(중앙부) 2) 크로스빔(볼스터주변)
2. M-car(1424호)	30 개소	0~8.66	1) 크로스빔(볼스터주변) 2) 크로스빔(중앙부)
3. M'-car(1524호)	35 개소	0~12.00	1) 크로스빔(볼스터주변) 2) 크로스빔(볼스터주변)

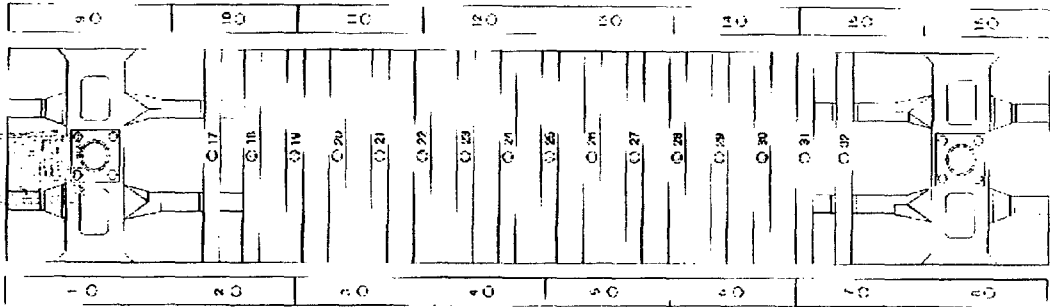


그림4. 차체 언더프레임(1024호) 초음파 두께 측정 부위 개략도

표4. 차체(1024호)의 각 point의 두께감소율

측정위치	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
감소율(%)	2.88	2.50	9.77	4.00	4.44	2.66	4.00	1.83	0.88	2.33	0.44	4.44	1.77	4.00	1.83	3.83
측정위치	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
감소율(%)	7.11	7.11	5.55	6.00	6.22	6.88	6.44	6.22	5.55	5.11	6.00	4.66	4.22	6.66	4.44	4.44

#### 4. 차체 부식의 실태조사

차체의 외관상태 검사후 부식이 심한 언더프레임(under frame) 및 측면 외판(side panel), 끝칸막이 외판(end panel) 및 연결막 등에 대하여 부식 상태를 파악하고자한다.

##### 4.1 부식현황

동력차와 부수차의 현장 조사 분석 및 비교 결과, 동력차의 차체 및 언더프레임의 부식이 심하게 발생됨을 알 수 있었다. 부위별로는 차량출입부의 승객 출입문 주변 및 연결부 부위의 부식이 현저하게 진행되었는데 실링부의 실링재 열화로 파손이 일어나 빗물 및 수분의 유입이 용이하게 되어 부식의 정도가 심하게 발생되며, 사이드 실 및 차체 바닥의 부식도 심하게 나타남을 알 수 있었다.

부식이 심한 부위는 대부분 강판이 관통되는 상태까지 부식이 진전되었으며, 일부 도장된 부위는 부식의 관찰이 용이하지 않았으나 표면의 외관 거칠기로부터 판단할 때 도장면 하부를 따라 부식이 진행되고 있는 것으로 추정되었다. 차체 모재의 부식으로 인해 부식밀도가 증가하게 되고 부피가 팽창하여 객차외부 도막의 파손을 유발하여 도막의 파손으로 인해 수분의 침입이 용이하게 되므로 부식진전이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

특히, 힘을 많이 받는 차량의 중앙부의 사이드실과 키스톤 플레이트는 타 부위에 비하여 현저하게 부식이 진전되었음을 알 수 있었다.

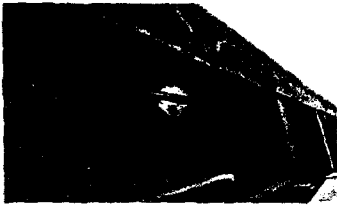


그림 5. 부수차 하부면 부식

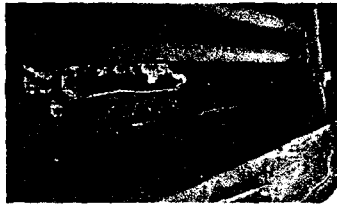


그림 6. 동력차 하부면 부식

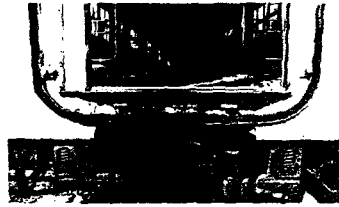


그림 7. 연결부 부식

#### 4.2 부식의 실태조사 결과

금속의 부식은 자연적인 현상이지만 금속의 합금설계, 부품의 구조적인 배치설계 및 도장(페인트) 등의 방식처리에 의해 부식의 발생을 지연시킬 수 있다. 동력차가 상대적으로 부식이 심하게 관찰된 이유는 다음과 같이 추정 가능하다. 첫째, 전장품 및 구동부품의 장착 때문에 부수차와 대비하여 차체 하중이 많이 걸리며, 둘째, 이와 같은 부품들에 의해 발생하는 열 때문에 주변의 차체 구조물의 평균 온도가 높게 유지될 경향이 많다. DC 견인전동기의 경우, 제동시 회귀되지 않은 일부 에너지가 저항열로 발산되면서 차체의 일부에 환경변화를 주기적으로 가져올 수 있다.

부식은 전기화학적 반응으로서 양극과 음극이 존재하며 양극에 해당하는 금속은 녹이 발생하여 열화 된다. 구조물의 틈새부위, 결합부위는 양극으로 반응하여 부식이 가속화되기 쉬우며, 더불어 높은 온도, 다습한 분위기 및 부식촉진 인자, 하중에 의한 변형 등은 이와 같은 양극반응을 더욱 활성화 시키게 된다.

사이드 실은 차체의 하중을 받치고 있는 프레임의 일부로서 부식에 의해 원래의 치수가 변형되거나 전기화학적 열화가 발생됨을 알 수 있었다.

차체 바닥의 굴곡 강판에 발생한 구멍부식은 승객의 부주의에 의해 실족이 가능하며 심할 때는 인명피해 유발 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 차체 및 하부구조물에 발생된 부식의 정도는 심각한 수준이며 보수를 통하여 복구시키기 보다는 신규 교체가 바람직하다.

### 5. 결론

본 논문에서는 도시철도차량 정밀진단 방법 중에 전자기파거리측량기를 사용한 차체의 치수 측정과 비파괴검사를 통하여 차량의 정밀진단 결과를 기술하였다.

차체길이는 6량중 5량이 기준치에서 벗어나 있으며 전체적으로 차체길이의 상면과 하면이 치수 차이가 발생함을 알 수 있었다. 차체폭은 6량 모두 기준치를 만족하고 있지 않음을 알 수 있으며, 전체적으로 각 차량마다 부위별로 차체폭이 일정하지 못하고 돌출 또는 함몰되어 있어 쉽게 배플립의 현상이 나타남을 알 수 있었다. 출입구는 너비 및 높이가 정밀대상 차량 모두 기준치에서 벗어나 있어 오랜 운행으로 인하여 개구부(Open section)가 넓어 변형이 쉽게 발생되었음을 알 수 있었다.

비파괴 검사를 통하여 차체 언더프레임의 주요 부재인 사이드실, 센터실, 크로스빔에 대하여 두께 변화를 측정하였으며 측정된 두께 변화 감소율을 부식으로 인한 감소율로 판단된다.

차체 강판의 부식은 유지보수 작업 때 용접에 의해 부분적으로 뎀질 및 도장처리 되었으나 승객의 안전을 고려할 때 위험요소가 많이 발견되었으며, 특히, 차량과 차량 사이의 통로 하부부식 및 승객 출입 개폐문 하부의 부식은 적기에 검사가 안 될 경우, 인적 피해의 발생 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

도시철도차량의 정밀진단을 통해 사용내구연한이 도래된 도시철도차량의 최대과제인 연장운행의 안전성을 확보하고 운전 장애를 최소화하여 차량의 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다고 판단된다.