

중앙 안내방식의 모노레일 대차 구조와 성능 향상 방안에 관한 연구

Study of the performance improvement solution and bogie structure of center guided type monorail

김재민† 김명수* 김학수** 고흥근*** 김경한****
Jae-Min Kim Myung-Su kim Hak-Soo Kim Hyung-Keun Ko Kyung-Han Kim

ABSTRACT

The bogie structure of center guided type monorail has been applied to Incheon Wolmi Eunha monorail at first in the world, and aluminum alloy material bogie is first ever introduced in Korea. Since bogie transfers vertical and horizontal loads to the track and guide rail as an essential system, its structure should have enough durability and secure excellent operation performance and ride quality.

This study presents a suitable structure for center guided type monorail, a system combination method for bogie operation performance and riding quality, and a solution for better bogie frame durability.

국문요약

중앙 안내방식의 모노레일대차 구조는 세계최초로 인천 월미모노레일에 적용되었으며, 대차프레임 소재 또한 우리나라에서는 최초로 알루미늄 재질을 사용하였다. 대차는 수직하중과 수평하중을 노면과 가이드 레일에 전달하는 중요한 시스템으로서 내구성이 충분한 구조를 가지고 있어야 할 뿐만 아니라, 우수한 주행 성능과 승차감이 확보되어야 한다.

본 논문에서는 중앙 안내방식의 모노레일에 적합한 대차 구조를 비롯하여 대차의 주행성능 및 승차감을 확보할 수 있는 시스템 구성 방법은 물론 대차프레임의 내구성을 향상 시킬 수 있는 방안에 대해 제시하였다.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

모노레일은 고가 구조에 가장 적합한 신교통 수단으로서 첨단 기술 접목과 과학적인 운용기법을 통해 경쟁력 있는 경전철로 자리 매김하고 있는 추세이고 우리나라에서도 인천 월미모노레일뿐만 아니라 대구시 3호선에도 모노레일을 도입하기로 결정하였다. 그러나 모노레일에 대한 표준규격이 아직까지 상세하게 정해지지 않아 다른 차종의 사례와 세계 각국의 경험을 토대로 연구가 진행되고 있다.

최근 로윈이 개발한 중앙 안내방식의 모노레일은 기존의 경전철(AGT, LIM, 자기부상열차)에 비해 도입 비용이 저렴하고 도심과 어울리는 친환경 도심 관광형 모노레일로서 향후 도심의 핵심 교통수단이 될 것으로 기대 되고 있다.

† 책임저자 : 비회원, (주)로윈 연구개발실장
E-mail : a kjm204@rowin.co.kr
TEL : (054)420-2981 FAX : (054)420-2991
* 비회원, (주)로윈 연구개발실 선임연구원
** 비회원, (주)로윈 연구개발실 주임연구원
*** 비회원, (주)로윈 기술본부장
**** 비회원, 교신저자 : (주)로윈 연구개발실 선임연구원

본 논문에 소개된 대차는 지금까지 모노레일에 사용된 과좌식 대차 및 현수식 대차와 전혀 다른 형식으로서 국내 철도차량 기술의 우수성을 널리 알리는 성과물이 될 것이다.

1.2 중앙 안내방식의 대차 시스템 구조

모노레일 대차는 일반 철도차량의 대차에서 요구되는 사항과 다를 바 없이 차량을 지지하여 견인력과 제동력을 전달하는 것은 물론 차량의 동역학적 성능, 즉 양호한 승차감, 헌팅, 탈선 및 전복에 대한 안전성 유지, 원활한 곡선추종 성능을 좌우하는 핵심 장치이다. 그림1은 그동안 많이 적용된 과좌식 주행 장치로서 차륜은 1축당 2개씩 배치되고 양 측면 위쪽에는 4개의 안내륜이 부착되며, 양측 아래쪽에 안정륜 2개가 설치되는 구조이다. 이 같은 대차구조에 따라 모노레일 궤도빔의 상부폭과 측면의 안내면, 안정면의 제원이 정해진다.

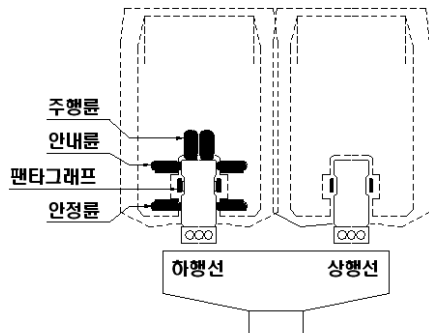


그림1. Straddle type bogie

중앙 안내방식의 모노레일은 개발 초기단계에서 부터 신개념 Y Beam 가이드 레일로 채택했고 기존 모노레일의 분리형 안내, 안정구조를 일체형으로 하여 안내와 안정 기능을 동시에 수행할 수 있도록 개발하였다. 이와 같은 대차는 국내·외적으로 적용된 사례가 없는 신기술로서 Air Spring을 2점 지지방식이 아닌 안정성과 승차감이 뛰어난 4점 지지방식을 적용하였으며, 주행륜 또한 고무타이어를 채택하여 승차감을 한층 더 증대시켰고 주행륜이 파손 되더라도 비상운행이 가능하도록 Run Plat 장치를 추가하여 차량의 안정성을 확보하였다. 안내와 안정 기능을 동시에 겸하는 4개의 안내륜은 우레탄을 사용하여 Air Spring 내부의 공기압력으로 Y Beam과 강한 결속력을 유지하는 반면 타이어와 Y Beam 레일의 접촉면을 최소화하여 주행성능을 향상시켰다. 그림2는 Y Beam형 대차의 구조이다.

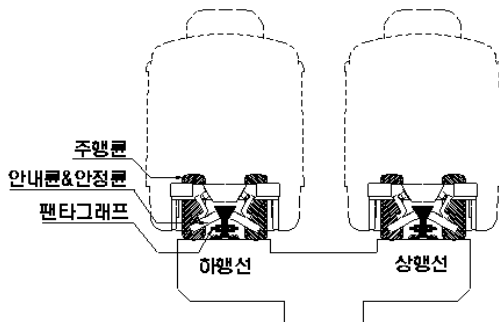


그림2. Center guided type bogie

2. 연구 수행 프로세서 및 구조해석

2.1 연구 수행 범위

중앙 안내방식 대차의 동역학 해석에서 얻을 수 있는 하중이력을 이용하여 대차의 내구 강도를 평가하고 이를 바탕으로 Y Beam형 Aluminum 대차프레임의 내구평가 기준을 확립하기 위해 그림3과 같은 과정을 거쳐 Y Beam형 Aluminum 대차프레임 구조강도 및 내구해석 FE model을 이용하여 대차프레임

각각의 하드 포인트에 작용하는 하중분력 중 내구수명에 큰 영향을 미치는 하중을 찾아내고 어떤 조건에서 대차프레임이 취약한지를 판단하였다.

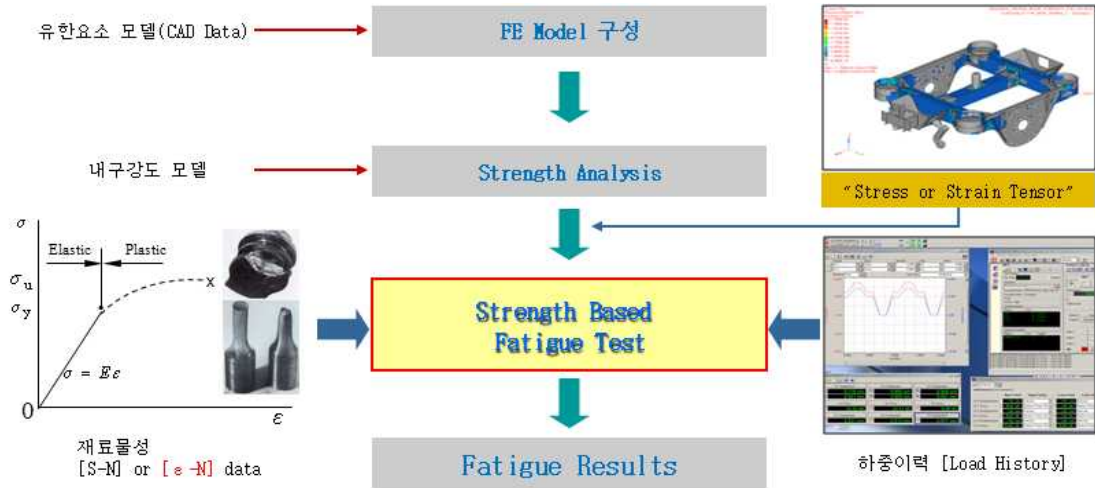


그림3. 내구강도 피로분석 프로세스

2.2 정적해석

그림4와 같이 모노레일 Aluminum 대차프레임 정적강도 해석 결과로부터, 프레임은 정상적인 차량 운행 시 발생하는 하중조건(수직, 좌우, 전후)에 대해 재료의 사용응력(항복강도)을 기준으로 평가 시 충분한 강도 성능을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

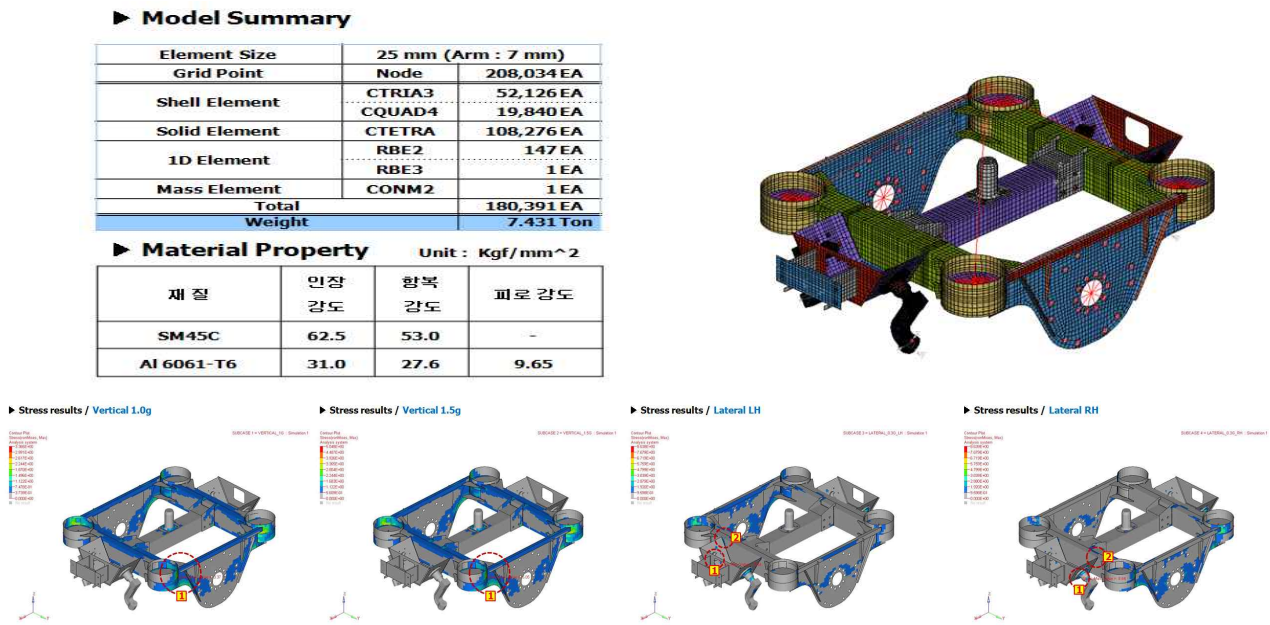


그림4. Aluminum 대차프레임 정적해석

3. 시험조건 및 결과

3.1 정하중 조건

Aluminum 대차프레임에 대한 시험은 국내에서 규정 되어 있지 않은 관계로 본 시험에서는 표1의 하중조건을 바탕으로 JIS E 4207시험 규정에 따랐으며, 정하중 조건은 표2와 같이 Aluminum 대차에 작용하는 수직정하중, 좌우하중, 전후하중 3가지의 시험조건으로 수행하였다.

표 1. 모노레일의 시험 중량 조건

기호	구분	중량(Kg)	비고
L1	공차중량	8,100	
L2	최대승객중량	2,990	
L3	대차중량	1,570	
L4	대차당 수직정하중	4,760	(L1+L2-L3) / 2

표 2. 대차프레임 정하중조건

No.	하중조건	하중기호	응력기호	하중크기	하중방향	비고
1	수직하중	FV_1.0	A	70.02 kN	하방향	
		FV_1.3	B	91.0 kN	하방향	
3	좌우하중	FL_a1	E1	-14.02 kN	좌측방향	
		FL_a2	E2	14.02 kN	우측방향	
3	전후하중	FL_O1	D1	-18.63 kN	전진시	
		FL_O2	D2	18.63 kN	후진시	

3.2 정하중 시험결과

각 하중조건에서 계산된 응력결과로부터 조합 평균응력과 응력진폭은 다음과 같이 계산하여 표3과 같은 결과를 얻어냈다.

1) 평균응력

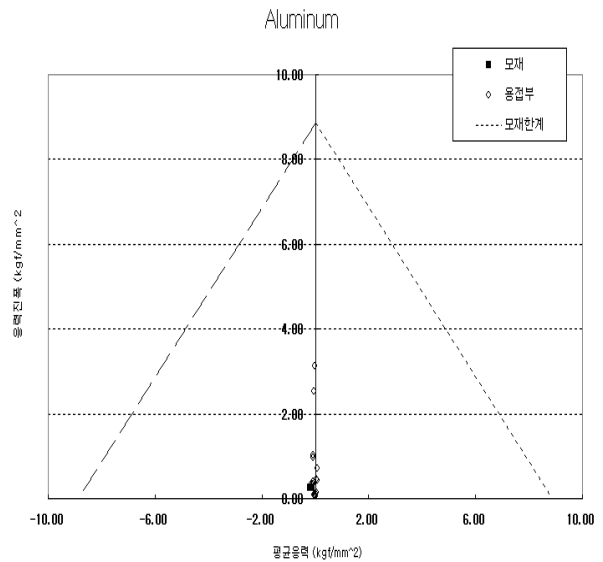
$$\sigma_{MR} = \frac{(D1 + D2)}{2} + \frac{(E1 + E2)}{2}$$

2) 응력진폭

$$\sigma_{AD}^2 = (B - A)^2 + \left(\frac{D1 - D2}{2}\right)^2 + \left(\frac{E1 - E2}{2}\right)^2$$

표 3. 대차프레임 정하중 시험결과

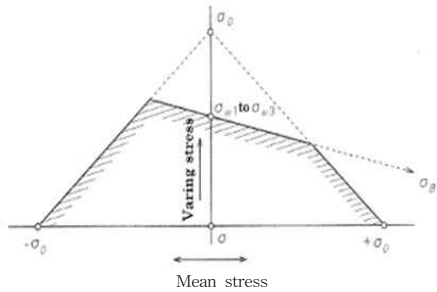
Channel No.	수직하중		좌우하중		전후하중		조합응력		비고	재질
	1g	1.3g	좌	우	전진	후진	평균	진폭		
	A	B	E1	E2	D1	D2	kgf/m ²	kgf/m ²		
1	0.30	0.29	0.23	-0.21	0.42	-0.29	0.07	0.42	용접	Al
	-0.05	-0.07	-0.02	0.01	0.14	-0.07	0.03	0.11	용접	
2	-0.29	-0.33	0.11	-0.06	-0.08	0.12	0.04	0.14	용접	Al
3	-0.24	-0.27	0.12	-0.07	0.13	-0.08	0.05	0.15	용접	Al
4	0.24	0.17	0.29	-0.21	-0.35	0.38	0.05	0.45	용접	Al
	0.13	0.09	0.01	0.03	-0.10	0.11	0.02	0.11	용접	
5	-0.01	0.00	0.19	-0.31	-0.02	-0.06	-0.10	0.25	모재	Al
6	0.00	0.01	0.10	-0.38	-0.07	-0.04	-0.19	0.24	모재	Al
7	0.39	0.45	-0.74	0.62	-0.76	0.75	-0.07	1.02	용접	Al
	0.21	0.25	-0.09	-0.01	-0.04	0.12	0.00	0.09	용접	
8	0.37	0.44	0.56	-0.76	-0.70	0.74	-0.08	0.98	용접	Al
	0.07	0.11	0.03	-0.06	-0.01	0.06	0.01	0.07	용접	
9	0.46	0.19	-2.70	2.61	-1.59	1.68	0.00	3.13	용접	Al
	0.10	0.00	-0.54	0.62	-0.35	0.43	0.08	0.70	용접	
10	0.29	0.23	2.00	-2.26	1.47	-1.29	-0.04	2.54	용접	Al
	0.04	0.02	0.23	-0.42	0.24	-0.24	-0.09	0.41	용접	
11	-0.72	-0.87	-0.09	-0.09	0.26	-0.35	-0.13	0.34	용접	Al
12	-0.49	-0.66	0.01	-0.02	-0.37	0.24	-0.07	0.35	용접	Al
13	0.28	0.36	-0.01	-0.04	0.02	-0.03	-0.03	0.09	용접	Al
14	0.19	0.25	0.01	-0.03	-0.03	0.03	-0.01	0.07	용접	Al



3.3 피로시험 조건 및 결과

철 대차의 경우 그림5와 같은 선도를 응용하여 측정된 응력이 안전영역에 있는지 정의할 수 있으나 Aluminum 대차의 경우 피로 허용응력에 대한 데이터(문헌, 논문, 서적 등)가 부족하여 합당한 값을 적용하기 어렵고 Aluminum의 일반적인 피로한도(Endurance Limit)가 없으므로, 본 시험에서는 Aluminum에 대한 그림6의 등가 피로한도(Equivalent Endurance Limit)를 사용하여 "Fatigue Allowable Stress/Material"을 대체할 수 있을 것으로 판단하여 시험 결과를 도출하였다.

Allowable stress The allowable stress shall be within the limit of the stress limit diagram



σ_B : Tensile strength of material (MPa)
 σ_o : Allowable stress to yield of material (MPa)
 σ_{m1} to σ_{113} : Tensile strength of material(MPa)
 The tensile strength(σ_B), yield point(σ_y), and fatigue allowable stress(σ_{m1} to σ_{113}) of the main materials shall be given in table
 Tensile strength, yield point, and fatigue allowable stress of typical materials

Unit:MPa

Item	Kind of materials		
	SM400	SM490	
Tensile strength of material (σ_B)	400	490	
yield point of material (σ_y)	235	355	
Allowable stress to yield of material(σ_o)	205	305	
fatigue allowable stress	Material (σ_{m1})	135	155
allowable stress	Toe part of weld	when not finishing (σ_{112})	70
		when finishing (σ_{113})	110

그림5. 철 대차의 데이터 처리

※ For Aluminum and copper alloys
 -No endurance limit
 -Equivalent Endurance Limit

The value of the fatigue strength (S'_f) at $5e^8$ cycles

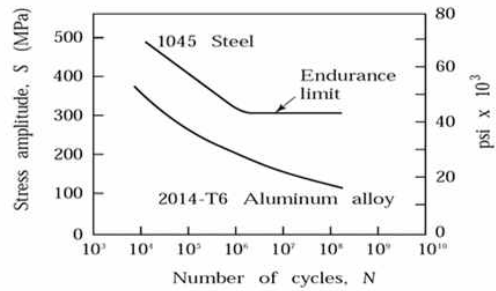
※ Aluminum alloys

$$S'_e (S'_f \text{ at } 5e^8 \text{ cycles}) = 0.4 S_{ut} \text{ for } S_{ut} < 48\text{ksi} (330 \text{ MPa})$$

$$= 19\text{ksi} (130\text{MPa}) \text{ for all other values of } S_{ut}$$

$$S'_e (S'_f \text{ at } 5e^8 \text{ cycles}) = 0.4 S_{ut} \text{ for } S_{ut} < 40\text{ksi} (280 \text{ MPa})$$

$$= 14\text{ksi} (100\text{MPa}) \text{ for all other values of } S_{ut}$$



Typical S-N curves for two metals. Note that, unlike steel, aluminum does not have an endurance limit.

그림6. Aluminum의 등가 피로한도 데이터 처리

피로하중시험 또한 규정화되어 있지 않기 때문에 기존 철 대차의 시험방법인 UIC 615-4에서 규정하는 총 1,000만회의 반복수하에 3단계로 구분되는 시험조건을 고려하여, 표4의 각 단계별 피로하중 조건에 대하여 그림7과 같이 시험을 수행하였다. 그 결과 모든 조건에 대하여 현재 Aluminum으로 개발된 중앙 안내방식 대차프레임은 시험규격을 만족하는 것으로 나타났다.

표 4. 피로 하중시험 조건

단계	하중 비율	방향	시험 하중	주파수	목표 수명	결과
1	100%	상/하	0 kN ~ 70.02 kN	3 Hz	6,000,000 회	이상없음
		좌/우	-14.02 kN ~ 14.02 kN			
2	120%	상/하	0 kN ~ 84.02 kN			
		좌/우	-16.83 kN ~ 16.83 kN			
3	140%	상/하	0 kN ~ 98.03 kN			
		좌/우	-19.63 kN ~ 19.63 kN			

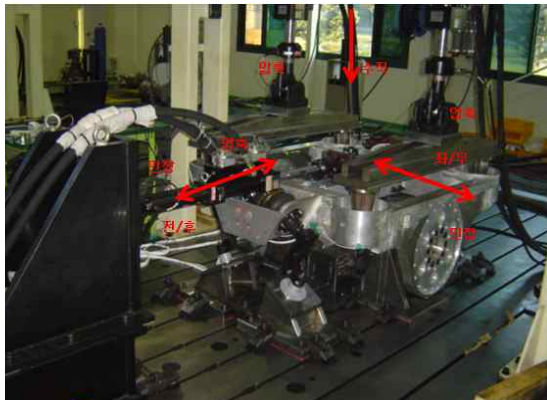
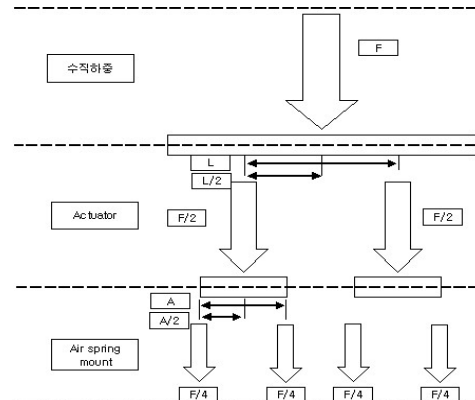


그림7. 피로시험



4. 승차감 확보

중양 안내방식의 Aluminum 대차의 승차감을 향상시키기 위하여 4점지지 Air Spring 과 Y Beam형 우레탄 안내.안정륜, 댐퍼, 현가장치 등이 실제 차량의 승차감에 어떤 영향을 미치는지 그림8.의 KS R9160 철도차량의 진동 특성 측정 및 UIC 513R에 규정된 가중필터를 통과 시킨 후 통과한 신호를 매 5초마다 실효값(RMS)의 누적빈도분포에서 95%에 해당하는 각각의 Axp95, Ayp95, Azp95 를 구하여 시험을 진행 하였다.

다음 식에 의하여 승차감 지수 N을 구할 수 있다.

$$3) \text{ 승차감 지수 } N = 6 \sqrt{(A_{xt95})^2 + (A_{yt95})^2 + (A_{zt95})^2}$$

표 5. 승차감 시험결과

승차감시험 판정					비고
위치	Car 1 구동차량	Car 1 제동차량	Car 2 구동차량	Car 2 제동차량	
N	1.76	2.06	1.95	1.89	기준 : 2.5이하
판정	좋음	양호	좋음	좋음	

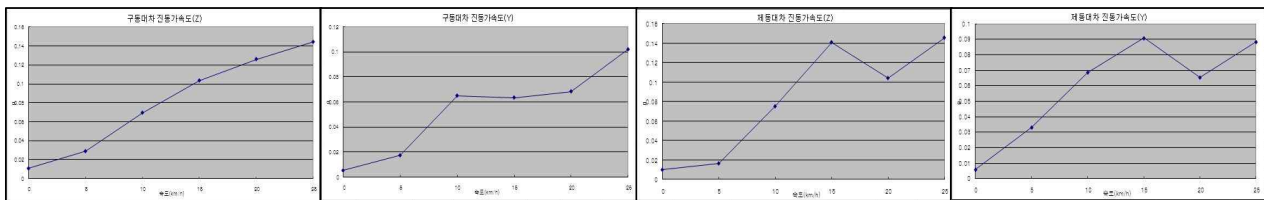


그림8. 진동가속도 시험결과

5. 결론

이미 소개한 바와 같이 Y Beam형 가이드레일에 적용할 수 있는 Aluminum 대차는 인천 월미모노레일을 통하여 세계 최초로 실용화 되었다. 대차가 보유해야 할 주행 성능, 승차감 및 내구성을 만족 시킨 것은 물론 경량화 성과까지 얻어냄으로서 Aluminum 대차 기술의 새로운 지평을 열었다 해도 과언이 아니라는 사실을 여러 종류의 해석과 시험 결과를 통해 입증시켰다. 앞으로 대차의 성능은 앞서 설명한 내용들 외에도 주행륜이 하중을 전달하는 노면과 안내.안정륜의 하중을 전달하는 Y Beam의 구조 및 평탄도에 따라서 크게 차이가 날 수 있다는 점을 충분히 고려하여 종합적인 연구에 박차를 가할 것이며, 모노레일 대차기술이 발전해 나가야 할 방향을 제시하는데 앞장 설 것이다.

참고문헌

1. 홍재성, 류상환, 이호용, 황현철, “모노레일형식 경전철 차량 표준규격 연구(기본 구성 및 성능) 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.436-440, 2008.
2. 안용모, 백차승, “모노레일 시스템 궤도빔의 합리적인 경간장 결정방안” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.199-205, 2008.
3. 조연호, 박재호, “경량전철의 승차감 개선을 위한 현가장치의 레이아웃 최적화” 한국자동차공학회 부문종합 학술대회, pp.1685-1690, 2009.
4. 한성욱, 우관제, “자기부상열차의 동적 거동을 고려한 내구해석 기법개발” 한국철도학회 논문집, pp.1-8, 2010.
5. 허용학, “피로시험(Fatigue Testing)” 한국표준과학연구원 재료시험법.