

공항철도 차량 동특성 해석 및 시험에 관한 연구

A Study for Vehicle Dynamic Analysis and Test of Airport Railroad

양희주* 성재호**
Yang Hee-joo, Seong Jae-ho

ABSTRACT

Airport railroad have required maximum design speed 120km/h and wind speed 50m/s condition as design item of airport railroad vehicles. To design and manufacture the vehicle satisfying these conditions, it must carry out the dynamic behaviors analysis such as hunting stability, ride comfort derailment ratio, unloading ratio and lateral force to meet the criterion described in Urban Railroad Act. Dynamic behaviors of vehicle have carried out using the multi-body dynamics simulation program(VAMPIRE).

This paper presents the evaluation methods and criterion used to verify dynamic performance of airport railroad vehicle, and show the analysis results of vehicle dynamic simulation and the test results for vibration and ride comfort measured on running performance tests .

As a results, each analysis results and test results meet the criterion described in Urban Railroad Act.

1. 서론

공항철도의 설계사항으로서 최대설계속도 120km/h 와 50m/s의 풍속조건이 주어져 있다. 이러한 조건에 적합한 철도차량을 설계, 제작하기 위해서는 주행 안정성, 승차감, 곡선 추종 성능 등의 동적 성능이 충분히 만족하는 지를 사전에 해석해야 하며, 이러한 동적 성능들을 만족시키기 위해서는 각종 현가 장치 특성치들을 변화시켜가며 해석해야 한다. 차량 동특성해석에 적용된 프로그램은 철도 차량 동특성 해석 전용 프로그램인 VAMPIRE(Vehicle Dynamic Modeling Package In a Railway Environment)을 이용하여 수행하였다.

본 논문에서는 당사에서 제작하여 공항철도에 납품한 전동차에 대한 동특성 평가방법과 평가기준을 나타내었으며, 해석결과와 납품 시운전을 통해 얻은 결과를 비교하였다. 각각의 결과가 도시철도법에서 제시한 평가기준을 만족하였다.

* (주)로템 기술연구소 응용기술연구팀 선임연구원, 비회원

E-mail : yanghj@rotem.co.kr

TEL : (031)460-1296 FAX : (031)460-1780

** (주)로템 기술연구소 응용기술연구팀 연구원, 비회원

2. 모델링

2.1 차량 모델링

차량의 동역학 해석을 위해서는 실제의 복잡한 차량 구조를 질량, 스프링 및 댐퍼의 Lumped parameter로 이루어진 수학적 모델로 단순화 시켜야 한다. 본 해석에서는 차체와 2개의 대차 프레임, 4개의 차륜 세트를 질량 요소로 하여 그 사이에 적절한 스프링과 댐퍼를 연결시켜 모델화 하였다.

본 논문에 적용된 차량 형상 과 대차 모델링을 그림1~2에 나타내었다.

2.2 궤도 불규칙도 모델링

본 논문에서 궤도 불규칙도 모델링은 AEA Tech(구 BRR)에서 측정한 최고속도 160km/h에相当하는 데이터를 적용하였으며, 궤도 불규칙도 및 곡선 운행조건은 그림3~4에 나타내었다.

2.3 차륜/레일 모델링

본 논문에 적용된 차륜은 답면구배 1/20을 갖는 차륜으로서 차륜 직경이 860mm, 차륜간 플랜지 후면 간격이 1354mm이다. 레일은 60kg레일을 사용하였으며, 궤간은 1435mm이다. 본 논문에 적용된 차륜과 레일의 접촉 형상을 그림5에 나타내었다.

3. 해석 조건 및 결과

3.1 주행안정성 해석

임계속도 이상에서는 궤도로 부터의 조그만 가진에도 대차 진동은 증가하는 쪽으로 발산하게 된다. 본 해석에서는 차량의 주행속도를 120 km/h에서 200 km/h까지 10km/h 단위로 점차 증가시키고, 병행하여 임계속도에 큰 영향을 미치는 등가답면구배(conicity)를 신조시 0.05에서 답면마모가 심하게 되었을 때의 0.4 까지 변화시켜 가며 그림6과 같은 외부가진이 작용되었을 때 차륜세트의 좌우방향 변위의 수렴성 여부를 판단하여 임계속도를 산출하였다.

그림6은 비선형 시간응답 해석을 적용하기 위한 궤도의 좌우, 상하 외란이고, 그림7은 임계속도가 최소로 되는 공차상태에 대한 답면구배별 윤축의 좌우 수렴 여부를 속도별로 나타내었다. 임계속도 해석결과를 표1에 요약/정리하였다.

표 1. 임계속도 해석조건, 평가기준, 해석결과

주행안정성	임계속도 해석결과(km/h)		평가기준
	공차하중	만차하중	
신조시(C=0.05)	200 이상	200이상	
마모시(C=0.4)	150~160	170~180	121(최고운행속도*1.1)

임계속도가 최소로 되는 경우인 공차하중, 차륜마모한도시의 임계속도 해석결과 150~160km/h 로서 판정 기준을 만족하므로 주행안정성이 확보되었음을 알 수 있다.

3-2 주행안전성 해석

주행안전성 해석은 동적 탈선계수, 동적 윤중감소율, 차륜 횡압을 계산하여 정해진 허용한도 내에 있는지 평가하는 것으로서 곡선궤도를 대상으로 검토하였다.

주행안전성 평가기준은 “도시철도차량안전기준에 관한 규칙”에 근거하였으며 표2에 해석조건과 평가기준 그리고 해석결과를 요약/정리 하였다. 곡선반경 400R, 공차상태에 대한 해석결과를 그림8에 나타내었으며, 곡선반경별 공차/만차에 대한 빈도누적확률을 그림9~10에 나타내었다.

표2. 주행안전성 해석조건, 평가기준, 해석결과

주행안전성	곡선반경 (m)	주행속도 (km/h)	최대치 (공차)	최대치 (만차)	평가기준	해석결과
탈선계수 (Y/Q)	400R	74	0.60	0.51	빈도누적확률에 따라 0.8~1.1까지 허용	최대치 및 빈도누적확률기준 이내에 있음
	600R	90	0.49	0.43		
동적 윤증감소율 ($\Delta Q/Q$)	400R	74	0.44	0.28	빈도누적확률에 따라 50%~80%까지 허용	최대치 및 빈도누적확률기준 이내에 있음
	600R	90	0.38	0.25		
차륜 횡압 (Y)	400R	74	3.21(ton)	4.17(ton)	(2.9+0.3P) ton이내 ≤ 4.44 ton(공차) ≤ 5.19 ton(만차)	최대치 기준 이내에 있음
	600R	90	2.70(ton)	3.50(ton)		

곡선 선로 400R, 600R을 대상으로 주행안전성(동적 탈선계수, 동적 윤증감소율, 차륜 횡압)을 해석하였다. “도시철도차량안전기준에 관한 규칙”에 의거한 동적 탈선계수, 동적 윤증감소율, 차륜 횡압에 대한 주행안전성 해석 결과, 평가기준 허용한도를 모두 만족하는 차량이라 하겠다.

3-3 승차감 해석

승차감해석은 제작규격서에 명시된 “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에서 정의된 승차감 지수를 적용하였으며, 평가기준은 승차감 지수(N) 2.5이하이다.

$$N = 6\sqrt{(a_{XP95})^2 + (a_{YP95})^2 + (a_{ZP95})^2}$$

승차감 해석조건과 평가기준 그리고 해석결과를 표3에 요약/정리하였으며, 공차상태에 대한 해석결과를 그림11에 나타내었다.

표3. 승차감 해석조건, 평가기준, 해석결과

하중 조건	주행 속도 (km/h)	해석위치	진동가속도 (m/s ²)			승차감지수 'N' 해석결과	평가 기준
			Axp95	Ayp95	Azp95		
공차	80	전위대차상부	0.047	0.201	0.159	1.56	≤ 2.5
		후위대차상부	0.047	0.145	0.142	1.25	
만차	80	전위대차상부	0.044	0.127	0.134	1.14	≤ 2.5
		후위대차상부	0.044	0.146	0.122	1.17	

“도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에 의거하여 승차감 지수 ‘N’을 구했으며, 해석결과 승차감 최대치는 공차하중, 전위대차상부에서 1.56으로서 평가기준인 2.5이하를 만족하는 차량이라 하겠다.

4. 성능 시험 결과

“도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에 따라 공차상태의 진동가속도와 승차감시험을 인천공항~김포공항구간에서 수행하였다.

4.1 진동가속도 시험결과

“도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에 따라 진동시험을 실시하였으며, 좌우방향과 상하방향 진동가속

도의 속도별 시험평균값을 그림12~13에 나타내었다.

진동가속도 시험결과, 좌우/상하방향 진동가속도가 평가기준인 보통구간이상을 만족하였다.

4.2 승차감시험 시험결과

“도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”에 따라 승차감시험을 실시하였다. 승차감 시험결과를 표4에 요약/정리하였으며, 그림14~15에 나타내었다.

승차감 시험결과, 평가기준인 승차감지수(N) 2.5이하를 만족하였다.

표4. 승차감 시험조건, 평가기준, 시험결과

하중 조건	시험 구간	주행 속도 (km/h)	해석위치	진동가속도 (m/s ²)			시험결과	평가 기준
				Axp95	Ayp95	Azp95		
공차	화물청사 → 운서	83	전위대차상부	0.069	0.162	0.201	1.60	≤2.5
			후위대차상부	0.069	0.172	0.196	1.62	
	검암 → 계양	85	전위대차상부	0.088	0.123	0.196	1.49	
			후위대차상부	0.088	0.113	0.181	1.39	

5. 결 론

공항철도 전동차에 대한 해석 및 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 임계속도가 최소로 되는 경우인 공차하중, 차륜마모한도시의 임계속도 해석결과 150~160km/h 로서 판정기준을 만족하므로 주행안정성이 확보되었음을 알 수 있다.
- 동적 탈선계수, 동적 운중감소율, 차륜 횡압에 대한 주행안전성 해석결과, 평가기준 허용한도를 모두 만족하는 차량이라 하겠다.
- 승차감 해석결과 최대치는 공차하중, 전위대차상부에서 1.56으로 계산되었으며, 평가기준인 2.5이하를 만족하는 차량이라 하겠다.
- 진동가속도 시험결과, 상하방향/좌우방향 진동가속도가 평가기준인 보통구간이상에 들었다.
- 승차감 시험결과, 승차감 지수 N은 최대 1.60로서 평가기준인 2.5이하를 만족하였다.

위와 같이 동특성 해석 및 시험결과, 평가기준을 만족하는 양호한 동적성능을 지닌 차량으로 판명되었다.

6. 참고자료

1. 도시철도법(2004), “도시철도차량안전기준에 관한 규칙(건교부령 제231호)”,
2. 도시철도법(2004), “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준(건교부 고시 제 2000-126호)”
3. (주)로템(2002년), “인천국제공항철도 동특성해석 보고서”
4. (주)로템(2006년), “공항철도 진동및 승차감 시험결과 보고서”
5. VAMPIRE user’s manual



그림 1. 공항철도 - 일반형

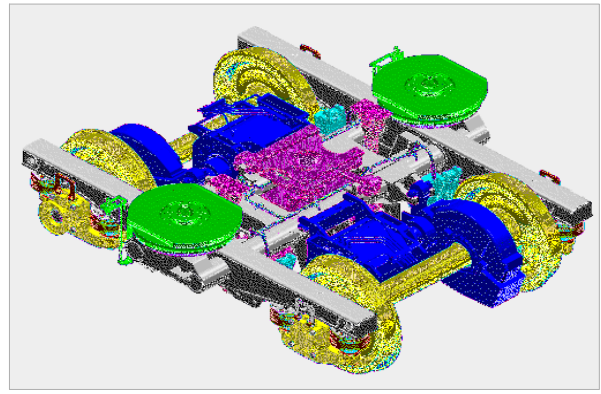


그림 2. 공항철도 - 대차

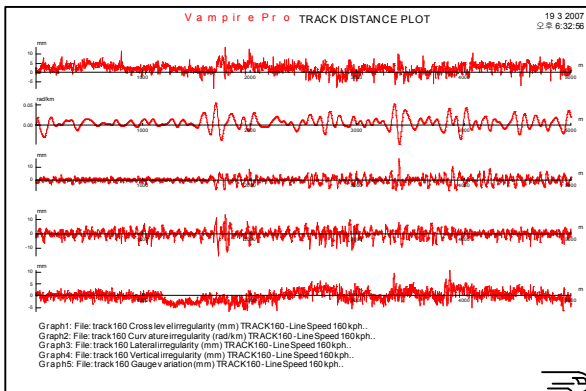


그림 3. 궤도 불규칙도

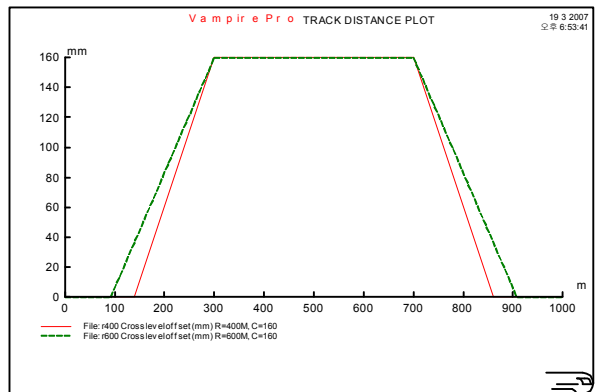


그림 4. 곡선반경별 캔트변화량

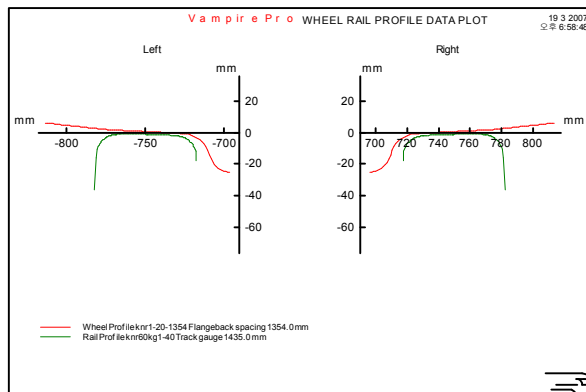


그림 5. 차륜 - 레일 접촉 형상

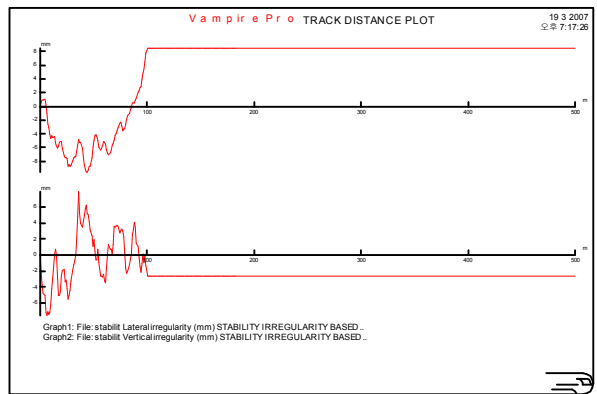


그림 6. 궤도 외란

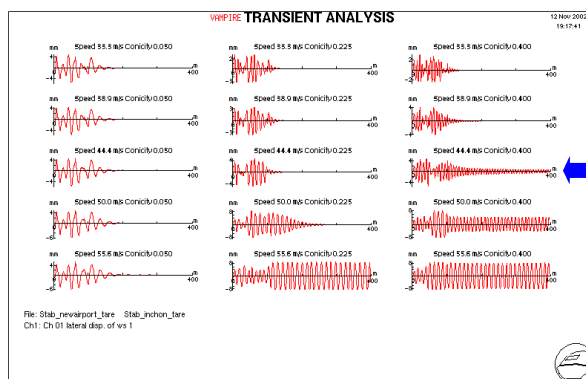


그림 7. 임계속도 해석결과(공차)

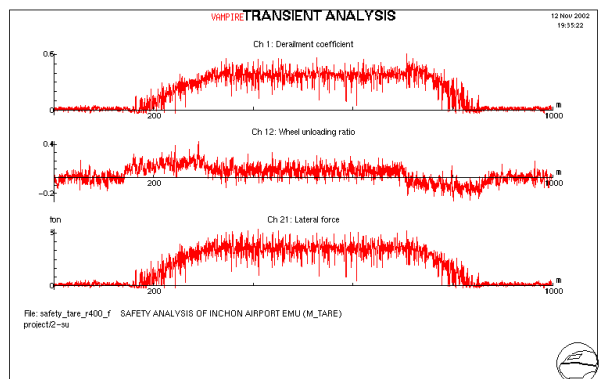


그림 8. 주행안정성 해석결과(400R-공차)

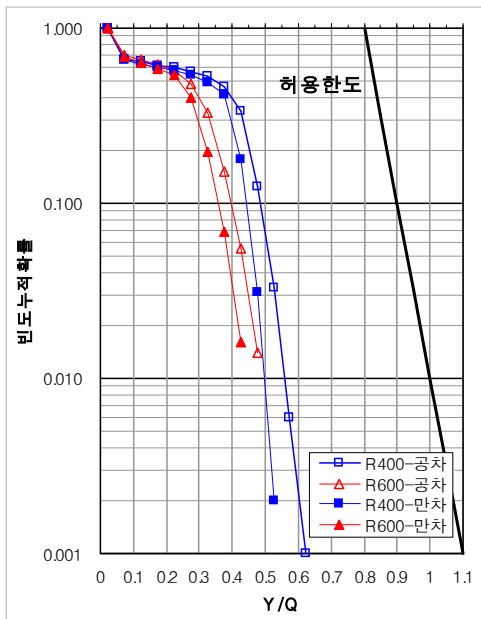


그림 9. 동적 탈선계수 해석결과(공차/만차)

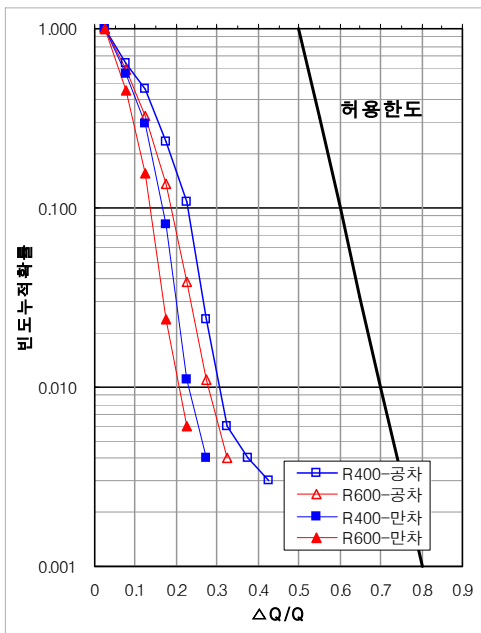


그림 10. 동적 윤중감소율 해석결과(공차/만차)

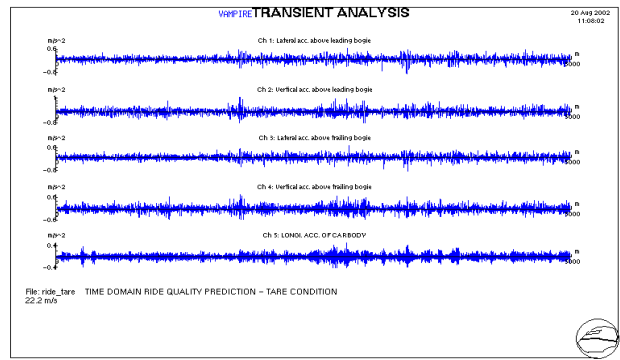


그림 11. 승차감 해석결과(공차)

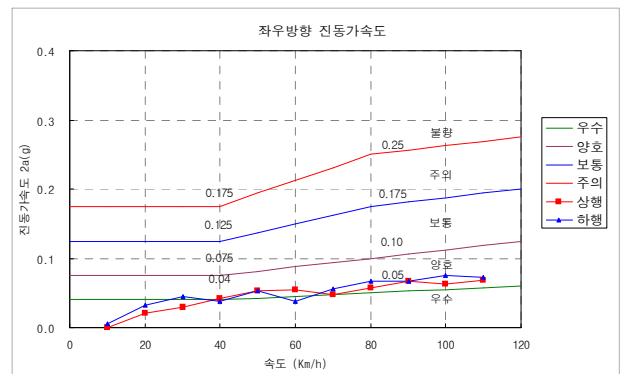


그림 12. 진동가속도 시험결과(공차)-좌우방향

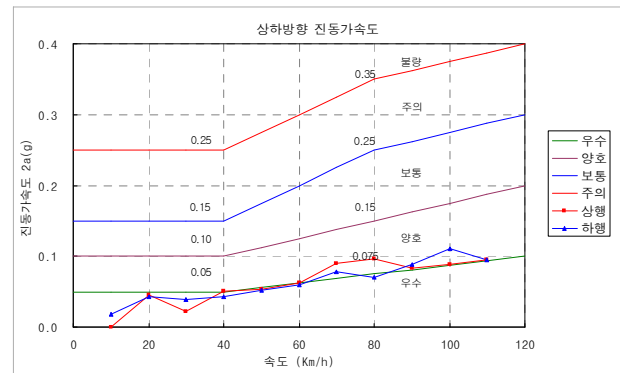


그림 13. 진동가속도 시험결과(공차)-상하방향

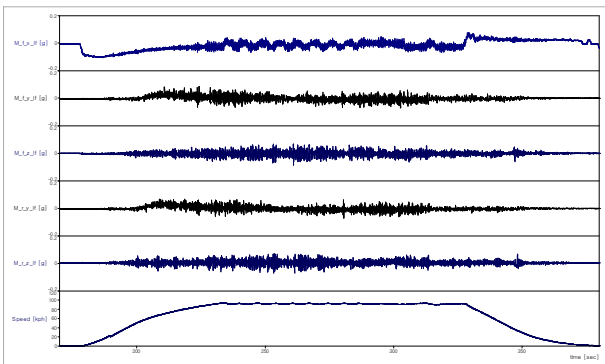


그림 14. 승차감 시험결과 (공차, 화물청사-운서)

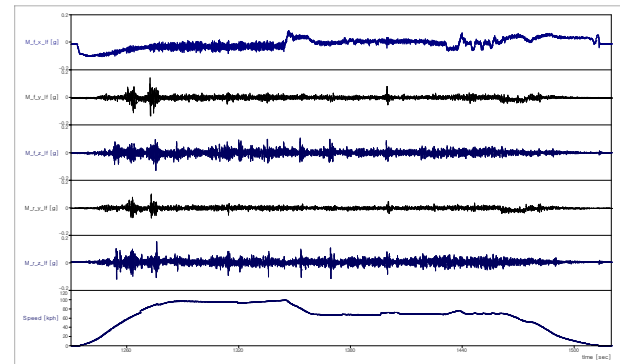


그림 15. 승차감 시험결과 (공차, 검암-계양)