

Push-Pull Type 철도차량 Jerking 현상 해석

Dynamic Analysis of Jerking in Push-Pull Type Train

김영준*
Kim, Young-Jun

박상규**
Park, Sang-Gyu

ABSTRACT

The scheme to reduce jerking phenomena in one push-pull type trainset was proposed. To simulate the jerking between coaches, dynamic analysis model was made. This model could analyze longitudinal dynamic behavior between locomotives and coaches caused by spring and damping characteristics of couplers and center pivots, characteristic curves of traction and braking. To validate the analysis results, tests were conducted in the same driving and braking condition. Comparison of longitudinal acceleration between simulation and test results shows a good agreement. To minimize the jerking phenomena, lots of dynamic simulations were conducted with varying driving/braking effort curve. From the results of simulations, an efficient and economic way to reduce jerking phenomena was found to be to reduce slope of tractive effort curve and synchronize braking time between locomotives and coaches. Test results show that this way could reduce the jerking phenomena. To express jerking phenomena quantitatively, maximum peak to peak values of acceleration were used.

1. 서 론

본 연구에서는 기존의 Push-Pull Type 철도차량에서 Jerking현상이 발생하여 이를 감소시킬 수 있는 방안을 찾는 것을 목적으로 하고 있다. Jerk의 정의는 가속도의 시간에 대한 미분값이지만 본 연구에서는 출발, 제동등의 운전조건에서 차량이 앞뒤로 출렁거리는 현상을 Jerking현상이라고 정의하였으며, Jerking현상을 비교 평가하는 수단으로서는 차체에서의 주행방향 Maximum Peak to Peak 가속도를 사용하였다. 기존의 Push-Pull Type 철도차량은 편성차량의 전방과 후방에 동력차가 있으며 중간에는 객차가 편성되어 있는 형태이다. 구동장치는 동력차에만 장착되어 있으며, 전후방 동력차가 동기화되어 있다. 제동장치는 동력차와 객차 모두 가지고 있으나 형식이 다르다. 동력차에는 구동모타가 저항기로 변환되어 작용하는 Dynamic Brake와 Brake Shoe와 바퀴간의 접촉 마찰력을 이용하는 Friction Brake가 있으며, 객차에는 Friction Brake만 있다. 이와같이 동력차와 객차의 제동장치가 상이한 관계로 동력차들간에 또는 객차들간에만 동기화가 되어 있다. 구동 및 제동력은 전방동력차에서 운전조건별 특성곡선에 의하여 정해지는데, 특성곡선은 소프트웨어로 되어 있어 교정이 용이하다. 따라서 이들 특성곡선을 교정하여 Jerking현상 감소효과가 있다면 우선적으로 적용해야 하는 개선안이 될 수 있다. 본 연구에서는 구동력 및 제동력 특성곡선이 Jerking현상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석 모델을 구성하였고, 몇가지 기본적인 운전조건에 대한 해석결과를 시험결과와 비교하였다. 또한 구동 및 제동 특성이 Jerking에 미치는 영향을 파악하고 구동 및 제동 특성의 최적치를 구하기 위하여 동력학 해석을 수행하였으며 시험결과와의 비교를 통하여 그 타당성을 입증하였다.

* 현대정공(주) 기술연구소 선임연구원

** 현대정공(주) 기술연구소 수석연구원

2. 본 문

2.1 동력학 해석 모델

MATLAB Version 4.2 상용 소프트웨어를 사용하였으며 그림1에서와 같이 차체와 대차를 각각 강체로 가정한 26 자유도의 1차원 주행방향 운동방정식을 구성하고, Runge-Kutta 적분법에 의해서 시간영역해석을 수행하도록 하였다.

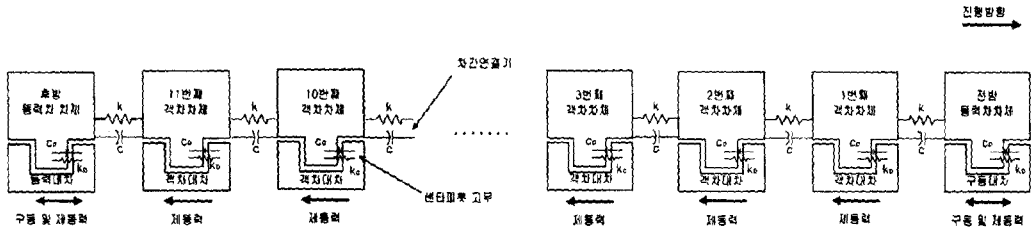


그림1. 편성차량 동력학 모델 개념도

그림1의 동력학 모델에는 강체외에 2가지의 스프링, 감쇠요소가 사용되었는데 차간연결기와 센타피봇 고무이다. 차간연결기는 그림2와 같이 연결기 몸체와 완충기로 이루어져 있다. 완충기는 고무와 금속편의 조합으로 이루어져 차간에 발생할 수 있는 충격을 완화시키는 역할을 하므로 스프링과 감쇠요소로 모델링하였다. 한편 차간연결기는 체결된 상태에서 몸체간 맞물리는 부위에 틈새가 있으므로 그림3과 같이 스프링 특성곡선에 임의 변위까지는 힘이 발생하지 않는 구간을 추가하였다. 차간연결기의 감쇠특성치는 상수로 입력하였다. 센타피봇 고무는 대차로부터 차체로 전달되는 주행방향 충격을 완충시켜 주는 기능을 하며 스프링 및 감쇠특성치를 상수로 입력하였다. 차량을 추진시키거나 제동시키는 힘은 대차에 작용하도록 모델링하였다. 해석결과로는 시간에 대하여 스프링 및 감쇠요소가 부착되어 있는 부위의 작용반력, 상대변위, 상대속도와 강체로 모델링된 차체 및 대차의 위치, 속도, 가속도 그리고 차량 운전조건에 따라 발생하는 동력차의 구동력 및 동력차, 객차의 제동력등을 출력할 수 있다.

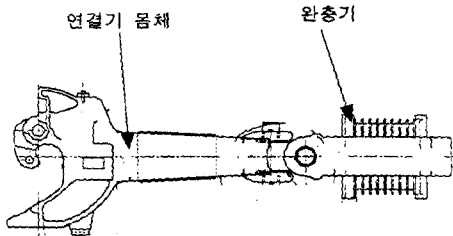


그림2. 차간연결기

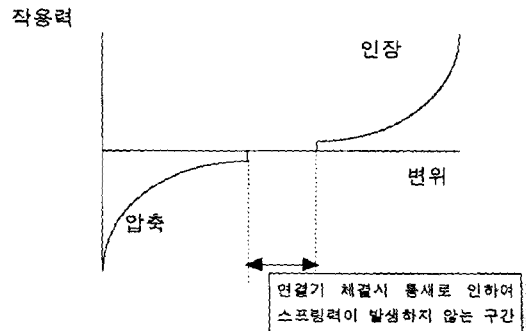


그림3. 차간연결기의 스프링 특성곡선

2.2 차량 운전 특성

전방동력차의 승무원은 속도 핸들과 제동 핸들을 이용하여 차량 운전을 수행하는데[1], 핸들을 조종하면 차량내의 Microprocessor에서는 그림4,5의 운전제어 흐름도에 따라 구동력 및 제동력의 작용시점과 크기를 결정한다. 본문에서는 사용빈도가 높은 운전조건인 출발,가속,감속,상용제동에 대하여 언급하였다. 그림4는 출발, 가속, 감속 운전제어 흐름을 나타 내고 있다. 정지되어 있는 차량을 출발시키기 위해서 운전사는 원하는 속도에 도달하도록 속도 핸들을 조정하여 속도를 입력한다. 동력차내의 Microprocessor에서는 입력속도와 차량의 현재속도를 비교하여 현재속도가 0km/h 이면 프로그램되어 있는 출발시 구동력 특성곡선에 의하여 구동력이 발생하도록 모터에 신호를 보낸다. 출발시 구동력 특성곡선은 차량의 속도와 입력속도의 차이가 7.8km/h이하가 될 때까지 적용되며 그 이후에는 Speed Control 특성곡선이 적용된다. 만약 차량의 현재속도가 0km/h가 아닌 상태에서 입력속도를 높이면 가속시 구동력 특성 곡선이 적용되며, 입력속도를 낮추면 감속시 특성곡선이 적용된다. 가속시 구동력 특성곡선은 출발시와 마찬가지로 차량의 속도와 입력속도의 차이가 7.8km/h이하가 될 때까지 적용되며 그 이후에는 Speed Control 특성곡선이 적용된다. 감속시 특성곡선 적용시에는 남아있는 구동력을 감속시 구동력 특성곡선에 따라 제거하고 동력차에는 제동력 특성곡선에 따라 Dynamic Brake가 작용하며 객차에는 Friction Brake가 작용한다. 감속시 특성곡선은 차량의 속도와 입력속도의 차이가 3km/h이하가 될 때까지 적용되며, 그 이후에는 Speed Control 특성곡선이 적용된다. Speed Control은 출발, 가속, 감속이후 차량의 속도가 입력속도를 유지하여 Undershoot나 Overshoot를 최소화하는 기능으로써 차량속도가 입력속도보다 3km/h이상 클 경우에는 Speed Control시 제동력 특성곡선에 따라 감속되고, 입력속도가 차량속도보다 3km/h이상 클 경우에는 Speed Control시 구동력 특성곡선에 따라 가속된다. 그림5는 상용제동 운전제어 흐름을 나타내고 있다. 차량속도 15km/h이상에서는 Brake Shoe의 마모를 줄이기 위하여 Dynamic Brake만 사용하고 15~5km/h구간에서는 두가지 모두 사용되며 5km/h미만에서는 Friction Brake만 사용하게 된다. 객차에서는 Dynamic Brake가 없으므로 차량속도와 관계없이 Friction Brake만 사용한다. 그림4,5의 조건별 구동 및 제동력 곡선은 그림6~10에 나타내었다.

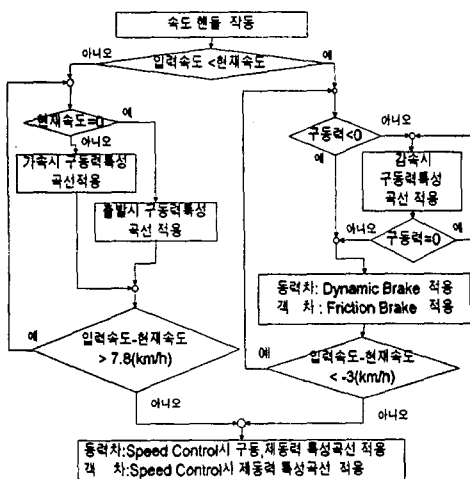


그림4. 출발, 가속, 감속시 운전제어 흐름도

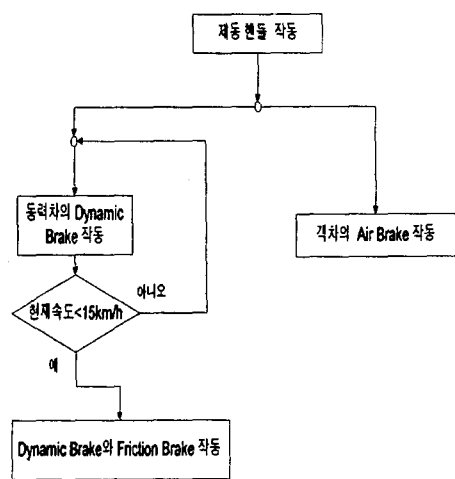


그림5. 상용제동시 운전제어 흐름도

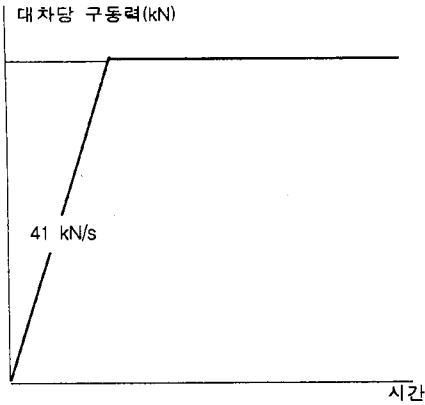


그림6.출발시 구동력 특성곡선

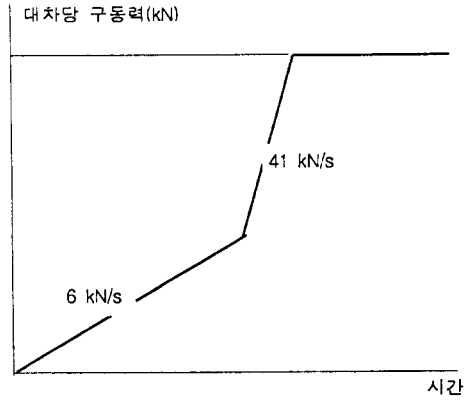


그림7.가속시 구동력 특성곡선

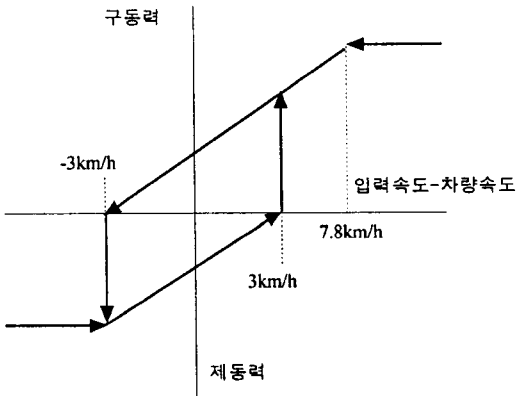


그림8. Speed Control시 특성곡선

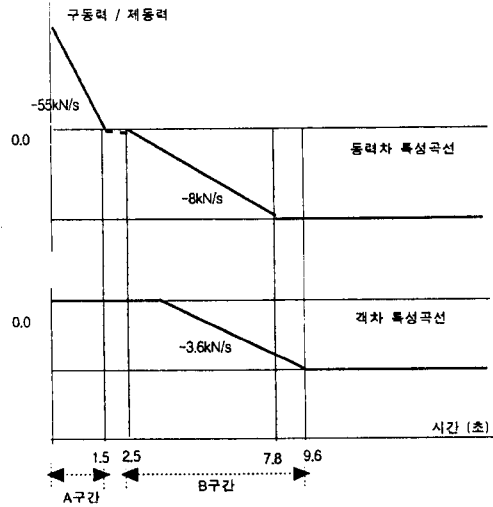


그림9. 감속시 특성곡선

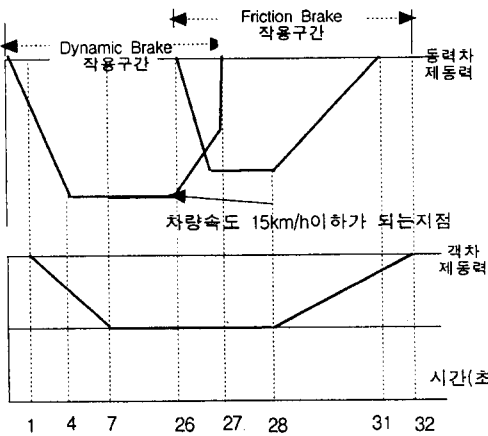


그림10. 상용제동시 제동력 특성곡선

그림9는 감속시 특성곡선이다. A구간에 남아 있는 구동력을 제거하고 B구간부터는 제동력이 작용한다. 차량속도 15km/h이상에서는 동력차의 경우 Dynamic Brake가 작용하며 객차에서는 Friction Brake가 작용하는데 Brake Shoe를 미는 공기압이 작용하는데 시간이 걸리므로[2] Dynamic Brake보다 약 1초정도 늦게 시작된다. 이와 같은 현상은 그림10의 상용제동시 특성곡선에서 더 현저히 나타남을 보여 주고 있다.

3. 시험 및 해석 결과 비교

2장에서 설명한 해석모델을 사용하여 출발 및 상용제동시 해석을 수행하고 시험 결과와 비교하였다. 비교 항목은 편성차량중 가속도 크기가 큰 후방동력차와 11번째 객차 및 10번째 객차의 가속도 곡선, 동력차의 구동력 및 제동력 곡선, 차량 속도이다. 그림11은 출발시 시험 결과이며 그림 12는 같은 조건에 대한 해석 결과이다. 20초부터 출발하기 시작하며 20초에서 22초사이에서 차량 Jerking현상이 나타나고 있다. 표1은 Jerking현상이 발생하였을 때 시험과 해석 결과로부터 Maximum Peak to Peak 가속도를 찾아 비교하였다. 시험 과 해석 결과는 유사한 경향을 보이고 있으며 가속도 크기오차도 최대 0.01g로 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 특히 시험 결과 가속도 크기의 순서가 11번째 객차, 10번째 객차, 후방 객차 순인데 해석에서도 일치하는 경향을 보이고 있다. 상용제동은 정차역에서의 제동에 사용하므로 출발과 마찬가지로 사용빈도가 높다. 그림13,14는 차량속도 113km/h에서 상용제동을 사용했을 때 시험 및 해석 결과이며 출력항목은 출발시와 동일하다. 상용제동시 Jerking현상은 2구간에서 발생하였는데 제동이 시작되는 18초~28초 구간과 차량이 정지하기 직전인 44초~48초 구간에서 발생하고 있다. 그림13의 구동력 곡선은 신호의 특성상 구동시나 제동시 모두 양의 방향으로 표시되는데 속도곡선이 감소하는 경우에 구동력 곡선의 양수값은 Dynamic Brake에 의한 제동력 크기를 의미한다. 전술한 바와 같이 동력차에서는 Dynamic Brake와 Friction Brake를 사용하는데 제동을 하는 대부분의 구간에서 Dynamic Brake를 사용함을 알 수 있다. 한편 첫번째 Jerking현상 발생구간중 14초에서 18초사이에서는 승무원이 제동을 시작하다가 중단한 비정상적인 운전을 실시하였는데 시험과 동일한 조건을 맞추기 위해서 해석에서도 같은 조건을 입력하였다. 표3에서는 상용제동시 차량의 Jerking현상이 발생하였을 때 시험과 해석 결과로부터 Maximum Peak to Peak 가속도를 찾아 비교하였다. 유사한 경향을 나타내고 있으나 가속도 크기는 출발시보다는 오차가 크다.

표1. 출발시 차량의 Maximum Peak to Peak Acceleration 비교

항목	후방·동력차	11번째 객차	10번째 객차
시험	0.06g	0.16g	0.15g
해석	0.06g	0.15g	0.14g

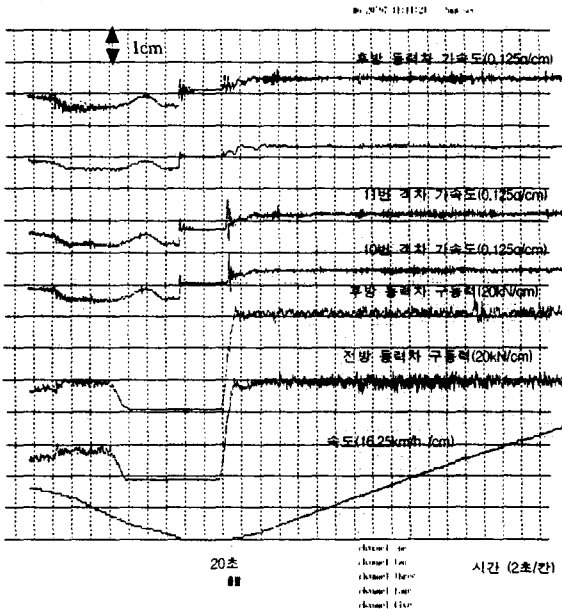


그림11. 출발시 시험 결과

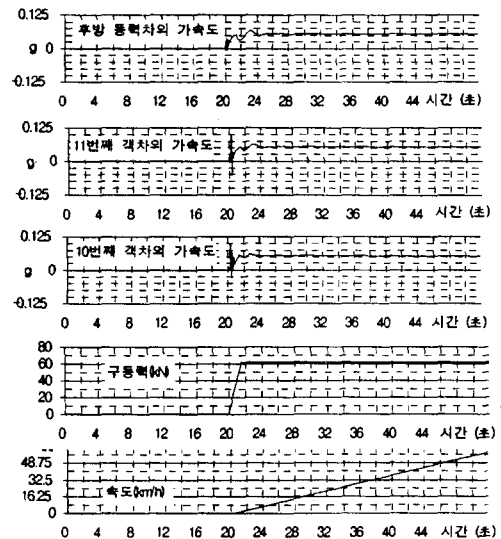


그림12. 출발시 해석 결과

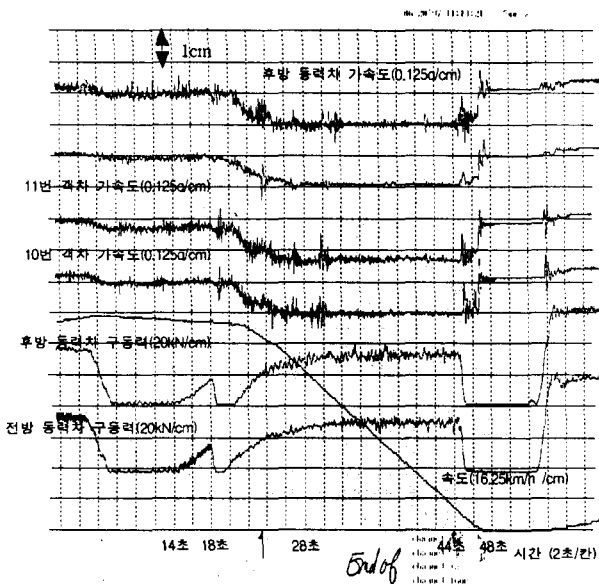


그림 13. 상용제동시 시험 결과

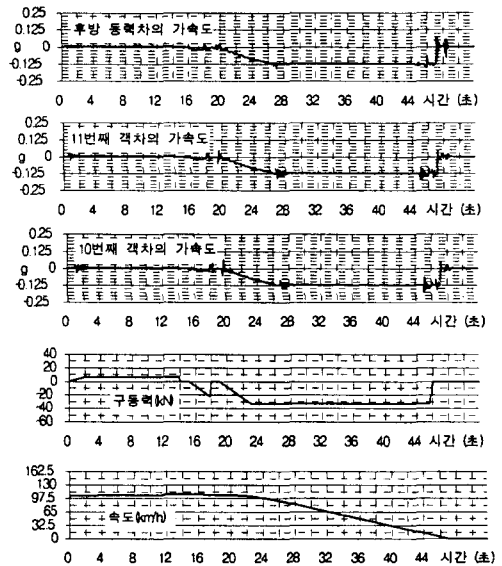


그림 14. 상용제동시 해석 결과

표2. 상용제동시 차량의 Maximum Peak to Peak Acceleration 비교

항 목		후방 동력차	11번째 객차	10번째 객차
시험	제동시작구간(18~28초)	0.09g	0.14g	0.13g
	Dynamic Brake 제동력 감소구간(44~46초)	0.18g	0.12g	0.15g
	최종제동구간(46초~48초)	0.19g	0.17g	0.22g
해석	제동시작구간	0.10g	0.12g	0.10g
	Dynamic Brake 제동력 감소구간	0.08g	0.08g	0.09g
	최종제동구간	0.20g	0.18g	0.18g

4. 구동 및 제동 특성이 Jerking에 미치는 영향

구동력 및 제동력 특성곡선을 수차례 변경하여 동력학 해석을 수행하였으며, 차량의 Jerking현상을 감소시킨 구동력 및 제동력 특성곡선을 찾을 수 있었다.

첫번째 변경안은 출발시 구동력 특성곡선을 변경한 경우이다. 출발시 구동력 특성곡선을 그림15의 실선과 같이 변경하였을 경우 표3의 변경안1과 같이 모든차량의 Maximum Peak to Peak 가속도가 감소됨을 알 수 있었다. 출발시 구동력 특성곡선을 선정할 때 주위할 점은 사양서상의 편성차량 가속도 성능기준을 만족하는 범위 내에서 Jerking현상이 크지 않도록 구동력을 완만하게 증가시켜야 한다는 점이다.[3] 특성곡선을 여러차례 변화시켜 해석을 수행한 결과 하나의 기울기를 갖는 곡선으로는 성능과 Jerking현상 모두를 만족할 수가 없으며, 2개이상의 기울기를 갖는 곡선을 사용해야 함을 알 수 있었다.

두번째 변경안은 감속시 구동력 특성곡선을 변경한 경우이다. 변경전 감속시 구동력 특성곡선의 기울기는 -55kN/s이었는데 여러번의 해석을 통해서 -17kN/s로 변경시킨 경우 표3의 변경안2와 같이 Jerking현상이 감소되었음을 알 수 있었다.

세번째 변경안은 그림17과 같이 상용제동시 객차와 동력차간의 제동시작 시점을 일치시키고 동력차와 객차간의 최대 감속도 크기를 일치시키는 경우이다. 변경전의 경우 동력차와 객차의 제동

장치가 상이한 관계로 제동시점이 동기화가 되어있지 않고 동력차에서 신호를 받은 후 약1초 늦게 작용한다. 또한 최대 제동력을 차량중량으로 나눈 최대 감속도는 동력차의 경우 $-0.117g$ 이며, 객차는 $-0.134g$ 이었는데 이들 크기를 일치시키기 위해 객차의 최대 제동력을 줄였다. 표4의 시험결과는 여러차례의 시험중 가장 큰 가속도를 선정한 것이다. 제동시작시점과 Dynamic Brake의 제동력 감소 시작시점에서는 변경안3을 적용한 경우 개선효과가 크게 나타난 반면, 최종 정지시에는 개선효과가 크지 않았다. 해석은 그림14에서 사용한 운전 조건을 사용하였으며 시험결과보다는 가속도 크기가 작으며 제동시작과 Dynamic Brake의 제동력 감소시작 시점에서는 개선 효과가 크며, 정지시에는 개선효과가 없는 것으로 나타났다.

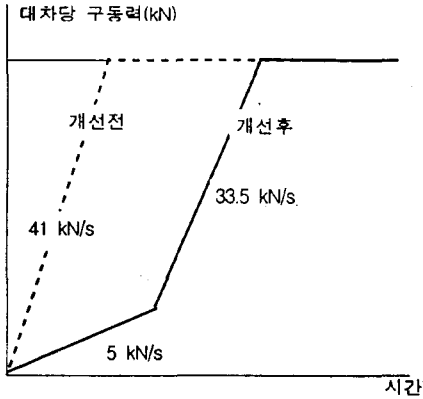


그림15. 출발시 구동력 특성변경안

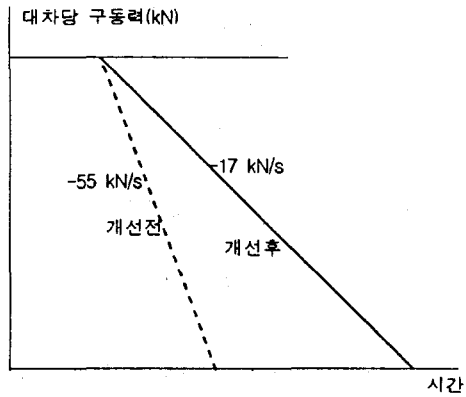


그림16. 감속시 구동력 특성변경안

표3. 변경안에 대한 차량의 Maximum Peak to Peak 가속도 비교

항목	후방 동력차	11번째 객차	10번째 객차	운전 조건
변경전	시험	0.06g	0.16g	출발시
	해석	0.06g	0.15g	
	시험	0.11g	0.10g	감속시
	해석	0.06g	0.11g	
변경안1	시험	0.03g	0.09g	출발시
	해석	0.04g	0.08g	
변경안2	시험	0.05g	0.05g	감속시
	해석	0.03g	0.03g	

변경안1: 출발시 구동력 특성 변경

변경안2: 감속시 구동력 특성 변경

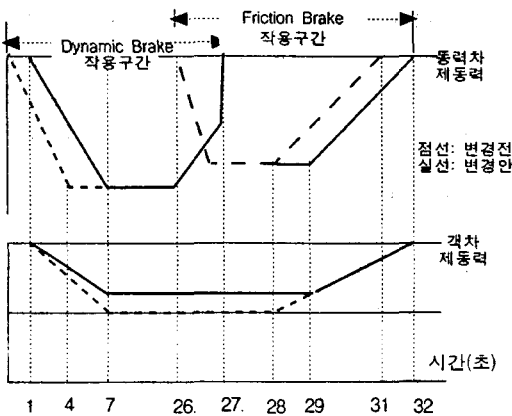


그림17. 제동력 특성곡선 변경안

표4. 상용제동시 Maximum Peak to Peak 가속도

항목	제동시작	Dynamic Brake 제동력감소시작	최종정지
시험	변경전	0.25g	0.24g
	변경안3	0.16g	0.20g
해석	변경전	0.12g	0.20g
	변경안3	0.01g	0.20g

5. 결 론

기존에 Jerking 현상이 과다하게 발생하고 있는 Push-Pull Type의 철도차량에 대하여 그 원인을 파악하고 개선방안을 마련하기 위한 1차원 주행방향 해석모델을 개발하였다. 서론에 기술한 바와 같이 Jerk의 정의는 가속도의 시간에 대한 미분값이지만 본 연구에서는 출발, 제동등의 운전 조건에서 차량이 앞뒤로 출렁거리는 현상을 Jerking 현상이라고 정의하였으며, Jerking 현상을 비교 평가하는 수단으로서는 차체에서의 주행방향 Maximum Peak to Peak 가속도를 사용하였다. 본 연구를 통하여 개발한 동력학 해석 모델에 Jerking 현상이 크게 발생하는 출발, 감속, 상용제동 운전에 대해서 시험조건과 동일한 운전조건과 초기속도를 입력한 결과, 각 차량에서 발생하는 Jerking 현상을 재현시킬 수 있었다. 출발의 경우, 구동력이 작용하는 순간 큰 Jerking 현상이 발생하였는데 시험과 해석이 모두 같은 시점에서 발생하였으며, 그 크기도 시험의 경우 최고 0.16g, 해석의 경우 0.15g로 유사하였다. 본 해석 모델을 사용하여 구동력 특성곡선의 기울기를 낮추고 해석을 수행한 결과 Jerking 현상이 줄어드는 것을 확인하고 출발시 구동력 특성곡선의 기울기가 큰 것이 Jerking의 원인임을 파악할 수 있었다. 따라서 출발시의 Jerking 현상을 줄이기 위해서는 구동력 특성곡선의 기울기를 낮출 필요가 있었는데 이는 편성차량의 가속성능과 관계가 있었다. 수차체의 해석을 통하여 두 조건을 다 만족하는 구동력 특성곡선을 찾을 수가 있었는데 이는 하나의 기울기로 이루어진 직선이 아니라 낮은 기울기와 높은 기울기를 조합한 형태의 특성곡선이었다. 이 특성곡선을 적용하여 시험해 본 결과, 해석과 마찬가지로 Jerking 현상이 감소함을 확인할 수 있었다. 감속의 경우는 잔존하는 구동력이 제거되는 순간 큰 Jerking 현상이 발생하였는데 해석을 통하여 구동력 감소곡선의 기울기를 변경시켜 Jerking 현상을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었으며 이 역시 최종 선정된 특성곡선을 적용하여 시험을 수행한 결과 해석과 같이 Jerking 현상의 감소 효과를 확인할 수 있었다. 상용제동의 경우는 Jerking 발생하는 구간이 3구간이 있었는데 제동시작시, 동력차의 Dynamic Brake 제동력 감소시, 최종차량제동시이다. 같은 조건에 대하여 해석을 수행한 결과, Jerking 원인은 Dynamic Brake와 객차의 Friction Brake의 제동시작시점이 일치하지 않고 동력차와 객차간의 (최대제동력/중량)의 비가 같지 않기 때문임을 알 수 있었으며, 이 들을 일치시킨 결과 해석과 시험에서 Jerking 감소 효과를 볼 수 있었다. 특히 제동이 시작되는 시점과 Dynamic Brake 제동력이 감소되는 시점에서의 Jerking 현상이 크게 줄었다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 1차원 주행방향 동력학 해석모델은 주행시 Jerking 시험 결과와 잘 일치하였으며, 구동 및 제동 특성곡선의 완만화가 Jerking에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 현대정공(1996), "PUSH PULL TRAINS DRIVER'S MANUAL"
2. M. J. Leigh(1994), "Brake Blending", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Vol 208, pp.43-49
3. Taiwan Railway Administration(1993), "SPECIFICATION FOR PUSH PULL TRAIN, Specification No. 82400B-1", pp.26,66