

모형기차의 동역학 해석 검증을 위한 실험장치 구성

Experimental Setup for Dynamic Analysis and Verification of Model Trains

탁 태 오* 김 석 태**

Tak, Tae-Oh Kim, Suc-Tae

Abstract

A model trains must have similitude with its original model not only in shape but also in motion. Motion characteristics of a model train under considerations are maximum velocity in straight and circular tracks and stopping distance. Equations of motions are derived to obtain maximum speed and stopping distance based on the Newton's Second Law and the energy principal. To accurately predict traction and resistance force between wheel and rail. wheel slip, or creepage, is taken into consideration. To verify the equations of motion, various experiments have been carried out including measurement of gear efficiency, location of mass center, rolling resistance force, traction force, slip, maximum velocity and stopping distance. This paper addresses how the experiments are setup and carried out in detail. Also the results of experiments are compared with the analytical predictions, which showed good agreements with each other.

키워드 : 모형기차, 운동방정식, 최대속도, 정지거리, 구름저항

Keywords : Model Trains, Equation of Motion, Maximum Velocity, Stopping Distance, Rolling Resistance

1. 서론

모형기차는 실제로 운행되는 특정한 기차의 외관을 그대로 모방하여 일정한 비율로 축소하여 제작되는 것으로서, 보는 이로 하여금 마치 실제로 기차가 움직이는 것과 같은 느낌을 가지게 하는 고가의 상품이다. 그림 1과 같이 모형기차로부터 실제기차와 같은 느낌을 가지기 위해서는 섬세한 외관도 중요하지만 모형기차의 움직임 또한 실제기

차와 닮아야 한다. 예를 들어 실제기차의 최고속도가 시속 150km/h 라 하면 1/32로 축소된 모형기차의 최고속도는 대략 시속 5km/h 정도가 되어야 한다. 모형기차의 구동은 그림 2와 같이 직류모터를 사용하며, 감속기어를 통하여 바퀴를 직접 구동하는 방식이다.

모형기차의 설계에서 고려하는 성능은 직선주행 속도, 곡선주행 속도, 정지거리 등이다. 모형기차는 실제기차에 비하여 축소된 비율만큼 직선주행 속도를 가지도록 구동부를 적절히 설계해야 하며, 설치된 원형궤도에서 탈선이나 전복되지 않고 주행할 수 있어야 한다. 이러한 모형기차의 성능예측과 구동부 설계를 위한 연구는 이미 진행되어 있다.[1]

실제기차의 주행성능예측에 관한 연구는 국외의 경우 Association of American Railroads(AAR)의

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 석사과정

TOS 프로그램[2], Carnegie-Mellon 대학의 TPS 프로그램[3] 등이 있다. 이들 프로그램들은 열차의 선로주행에 따른 주행시간, 열차속도, 소비에너지 및 연료 등과 같이 열차의 성능을 표현할 수 있는 변수들에 대한 정보를 제공한다. 국내의 경우는 고속전철 차량편성 모델에 대한 주행시간과 소비에너지 등을 비교 분석하기 위한 프로그램이 개발되었다.[4]

본 연구는 모형기차의 구동 및 제동에 관한 방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 주어진 설계변수에 대한 모형기차의 성능을 예측하기 위한 실험방법을 제시하고자 한다. 또한 이를 실제 모형기차에 적용하여 실험을 수행하고, 예측된 결과와 비교 검증하고자 한다.



그림1. 모형기차의 외관

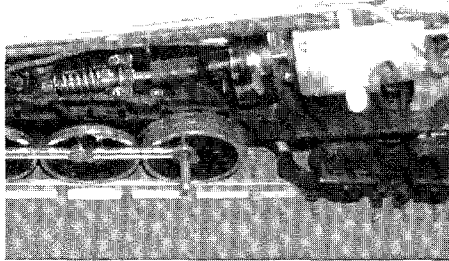
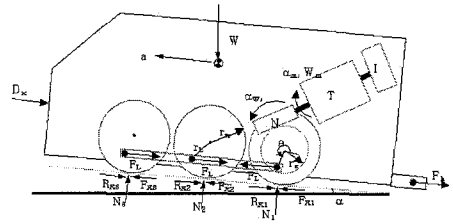


그림2. 모형기차의 구동부

2. 모형기차의 운동방정식

2.1 최고속도에측을 위한 구동방정식

실제 모형기차의 구동부의 모습은 그림 2 에 나타나 있다. 모형기차의 구동메커니즘을 살펴보면 모터에 의해서 발생된 구동토크는 모터와 웜 사이의 웜(worm)기어를 통하여 웜에 전달되고 웜에 전달된 구동토크는 구동력 F_x 로 작용하며, 주행 저항으로는 구름저항 R_x , 공기저항 D_A , 구배저항 $W\sin\alpha$. 와 객차에 대한 견인력 F_h 를 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.



W : 기차중량	α_w : 기차가속도	α : 등판각
F_x : 구동력	F_g : 구동토크 전달력	R_x : 구름저항
N : 수직반력	F_h : 견인력	D_x : 공기저항
T_m : 모터토크	T_g : 기어작용토크	T_w : 바퀴구동토크
α_w : 모터 각가속도	α_g : 바퀴 각가속도	i_w : 모터 편성
i_w : 바퀴 편성	r_w : 바퀴반경	r_g : 바퀴 기어부 반경
μ : 구동장크각도	r_g : 바퀴구동장크 연결반경	N : 기어비
μ : 기계적 효율		

그림 3. 모형기차의 자유물체도

$$Ma_x = F_x - R_x - D_A - W\sin\alpha - F_h \quad (1)$$

모터에서 발생된 토크를 T_m , 웜기어의 기어비와 효율을 각각 N 과 η , 바퀴의 반경을 r_w 라하고 레일과 바퀴 사이에 슬립이 없다고 가정하면 구동력은 다음과 같다.

$$F_x = \frac{N\eta T_m}{r_w} \quad (2)$$

정상상태일 경우 가속도는 0이 되고, 식 (1)에 식 (2)를 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{N\eta T_m}{r_w} = R_x + D_A + W\sin\alpha + F_h \quad (3)$$

식 (3)에서 정상상태의 속도를 V 라하고, 구배저항을 무시하면 구름저항, 공기저항, 객차에 대한 견인력은 모두 정상상태의 속도 V 의 함수가 된다. 또한 모형기차는 저속으로 움직이므로 공기저항도 무시한다면 그림 4와 같이 저항전체의 합력과 구동력이 같아지는 점이 주행속도가 된다. 그러나 실제 모형기차에 있어서 구동력은 바퀴와 레일간의 슬립에 의하여 100% 전달되지 못한다.[5]

모형기차의 바퀴반경을 r_w , 각속도를 ω , 주행속도를 V 라 하면 다음과 같이 슬립 S 를 정의한다.

$$S = \frac{r_w\omega - V}{r_w\omega} \quad (4)$$

슬립과 구동력과의 일반적인 관계는 그림 5와 같다. 그림에서와 같이 슬립이 전혀 발생하지 않는 상태에서는 구동력이 발생하지 않으며, 슬립이 증가됨에 따라 구동력도 증가하다가 어느 정도 이상의 슬립에서는 거의 동일한 구동력이 발생한다. 실제기차에 있어 이러한 슬립과 구동력과의 관계를 해석하기가 대단히 어려우며, 바퀴의 슬립을 크립 피치(creepage)라 부른다.[6] 실제기차의 경우 슬립은 20% 이내에서 발생하며 구동력과 슬립과의 관계는 식 (5)와 같은 선형관계를 가진다.

$$F_x = \mu S \quad (5)$$

위의 관계를 모형기차에 적용하기 위해서는 그림 5와 같은 슬립-구동력 관계를 실험적으로 구해야 한다.

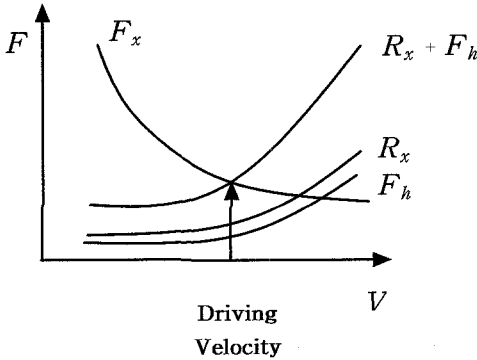


그림 4. 주행속도의 결정

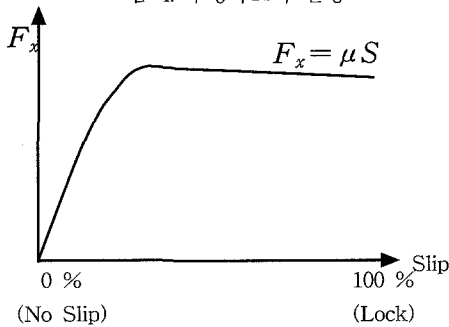


그림 5. 슬립과 구동력과의 관계

2.2 정지거리에 측을 위한 운동방정식

모형기차에 대하여 일과 에너지 원리를 적용하여 보면, 전원이 공급이 차단된 상태에서 기차가 가지고 있는 운동에너지는 정지되는 과정에서 저항력이 기차에 행한 일과 같다. 기차의 운동에너지는 모터에 연결된 플라이휠, 바퀴, 기차의 질량이 가진 에너지가 있으므로 식 (6)과 같이 에너지 방

정식을 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i V^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m I_i \omega_i^2 = \int_0^l R_x dx \quad (6)$$

여기서 좌변의 M_i 는 i 번째 객차의 하중을, I_i 는 i 번째 회전체의 관성을, V 와 ω_i 는 각각 전원공급이 차단된 직후의 기차의 속도와 i 번째 회전체의 각속도를 나타낸다. 우변의 R_x 는 기차의 주행저항이며, l 은 기차의 정지거리가 된다.

2.3 임계속도에 측을 위한 운동방정식

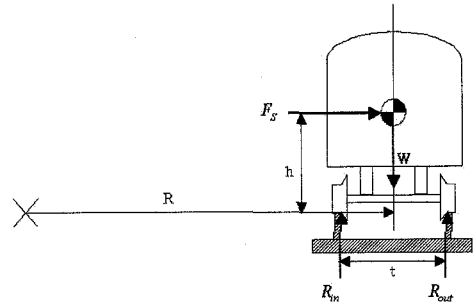


그림 6. 원형트랙에서 모형기차의 자유물체도

기차가 원심력에 의하여 중심을 잃고 전복되기 직전의 상황을 가정하여 보면 기차는 원형트랙 바깥쪽으로 넘어지게 되므로 트랙 안쪽의 휠과 레일은 접촉을 잃게 되고 그 반력 R_{in} 은 0 이 된다. 정상상태에서 기차에 발생하는 원심력이 무게중심에 작용한다고 보면, 원심력 F_s 는 식 (7)과 같다.

$$F_s = ma = mR\omega^2 = m \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

그림에서 레일 바깥쪽에 미치는 반력 R_{out} 이 미치는 점에 대하여 모멘트 방정식을 세워 보면 다음과 같다.

$$mg \cdot \frac{t}{2} = m \frac{V^2}{R} \cdot h \quad (8)$$

위 식 (8)을 임계속도 V 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{gtR}{2h}} \quad (9)$$

식 (9)에서 유도된 바와 같이 정해진 반경 R 을 원 운동하는 물체의 임계속도 V 는 정해진 운동반경 R , 무게 중심점까지의 높이 h , 게이지 t 의 함수이다.

3. 모형기차 운동측정

모형기차의 성능을 예측하기 위해서는 2장에서 설명한 바와 같이 구동부에 사용된 웜기어의 효율을 측정해야하고, 주행 중에 작용되는 구름저항을 측정해야 한다. 또한 동력궤차에 있어 바퀴와 레일 간에 발생하는 모형기차의 슬립을 측정해야 하며, 모형기차의 실제 구동력을 측정해야 한다. 자료획득을 위하여 구름저항, 슬립, 구동력, 정지거리 측정실험은 근접센서, 로드셀(load cell), WGI-300A 증폭기, SC-2043-SG DAQ(Data Acquisition)보드와 LabVIEW 5.0을 이용하여 실험장치를 구성하였고, 임계속도를 예측하기 위하여 기차의 무게중심 높이를 측정하였다.

3.1 기어효율 측정실험

모형기차의 모터에서 발생된 모터토크 T_m 가 웜기어를 거치면서 기어비 N 만큼 증가되어 바퀴토크 T_w 로 작용하게 된다. 이론상 모터에서 발생된 토크는 100% 바퀴에 전달되어야 하지만, 실제로는 기어의 맞물림 상태 등에 따라서 이론치보다 적은 토크가 전달된다. 이러한 기어의 입력토크에 대한 출력토크의 비인 효율 η 을 구함으로써 정확하게 바퀴에 전달되는 토크를 구할 수 있다.

그림 7은 기어효율을 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 입력축 기어에 일정한 반경 R 을 갖는 풀리를 연결하고 무게 m_g 를 달아 토크 T_g 를 발생시킨다. 웜기어를 통한 토크는 기어비 N 만큼 배가되어 출력축 기어에 작용한다. 이때 출력축 기어에 일정한 반경 R_w 를 갖는 풀리와 적절한 무게 m_w 를 이용하여 저항토크 T_w 를 발생시켜 기어의 정적 평형상태를 찾으면 다음과 같은 식으로 기어효율 η 을 구할 수 있다. 그리고 동적 상태로 인한 기어효율의 감소는 고려하지 않는다.

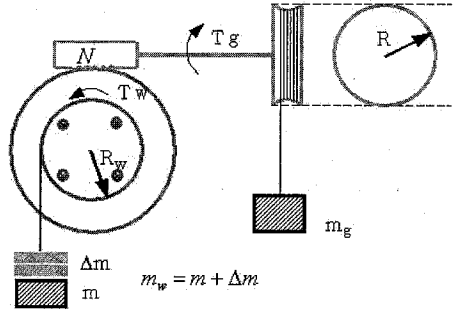


그림 7. 기어효율 측정을 위한 실험장치 구성도

$$\eta = \frac{T_w}{NT_g} = \frac{(m + \Delta m)R_w}{Nm_gR} = \frac{m_w R_w}{Nm_g R} \quad (10)$$

표 1은 기어효율 측정실험 결과를 나타내고 있다. 입력축 기어에 무게 m_g 로 2.372g을 달았고, 저항토크를 발생시켜 기어의 정적평형을 잡기 위한 무게 m_w 로 평균 36.7588g을 얻을 수 있었다. 실험결과를 식 (10)을 이용하여 구한 기어의 효율은 96.41% 이었고, 이는 일반적으로 기어가 갖는 효율과 잘 맞음을 알 수 있다.

표 1. 기어효율 측정 실험 결과

m_g (g)	실험 m_w (g)	
2.7137	1차	36.7588
	2차	36.8588
	3차	36.7588
	4차	36.7588
	5차	36.6588
	평균	36.7588
이론토크	1058.072 g-mm	
실험 저항토크	1020.057 g-mm	
기어효율	96.41 %	

3.2 무게중심 높이 측정실험

2.3절에서 살펴본 바와 같이 일정한 반경을 갖는 원형궤적을 운동하는 물체의 임계속도 V 는 정해진 운동반경 R , 무게 중심점까지의 높이 h , 게이지 t 의 함수임을 알았다. 기차의 무게 중심을 측정하기 위해서는 그림 8에서 보듯이 수평상태에서의 하중 W_0 과 θ 만큼 기울인 상태에서의 하중 W_{θ} 을 알면 구할 수 있다.

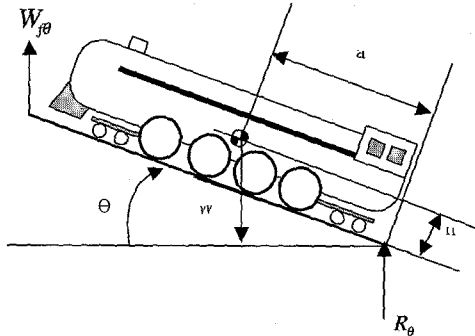
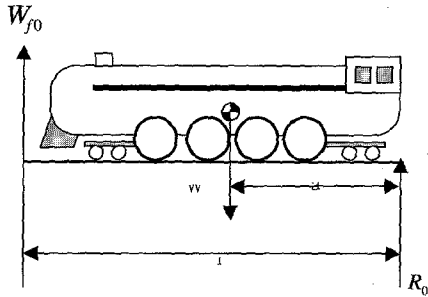


그림 8. 기차의 무게중심의 높이측정을 위한 실험

그림 8에서 보면 반력 R_0 가 작용하는 점이 고정점이 되고, W_0 가 작용하는 점이 상하로 움직이면서 힘을 측정할 수 있다. 기차가 수평을 이룬 정적 평형상태($\theta=0$)에서 고정점에 대한 모멘트 방정식은 다음과 같다.

$$W_0 \cdot l = a \cdot W \quad (11)$$

식 (11)에서 a 에 관하여 풀면 다음과 같다.

$$a = \frac{W_0 \cdot l}{W} \quad (12)$$

그림 8에 보는 바와 같이 기차를 θ 만큼 기울인 상태를 고려해 보자. 이때 기울어지는 각도는 보통 $20^\circ \sim 30^\circ$ 정도를 유지한다. 기울어진 상태에서 고정점에 관한 모멘트 방정식은 다음과 같다.

$$W_{f0} \cos \theta \cdot l + W \sin \theta \cdot h - W \cos \theta \cdot a = 0 \quad (13)$$

여기서 식 (12)를 식 (13)에 대입하여 무게중심이 h 에 관하여 풀면 다음과 같다.

$$h = \frac{-(W_{f0} - W_0) \cos \theta \cdot l}{W \sin \theta} \quad (14)$$

$$= \frac{-(W_{f0} - W_0) \cdot l}{W \tan \theta}$$

표 2는 실험을 통하여 구한 하중들과 측정값들이며, 식 (14)이용하여 구한 무게중심의 높이이다.

표 2. 무게중심 높이측정 결과

	기관차	객차
W	2900g	1620g
W_0	1400g	795g
W_{f0}	1225g	654g
θ	24.29°	30.06°
l	37.3cm	31cm
h	4.986cm	4.66cm

모형기차의 주어진 원형트랙의 반경 R 은 91.2cm 이고 레일과 레일사이의 거리인 게이지 t 는 3.2cm 이다. 표 3은 2.3절의 식 (9)를 이용하여 구한 예측 임계속도와 실험을 통하여 구한 실제 임계속도를 나타낸 것이다.

표 3. 임계속도 예측 결과

	예측임계속도	실제임계속도	오차(%)
기관차	1.7205 m/s	1.5529 m/s	9.74
객차	1.7813 m/s	1.7142 m/s	3.676

객차의 경우 실제임계속도와 예측된 결과의 오차가 3.676 %로 잘 맞고 있으나, 기관차의 경우는 10%에 가까운 오차를 보이고 있다. 이는 실제모형기차에 있어서 기관차의 경우 기차와 보기(bogie) 사이에 롤이 발생되도록 설계되어 있어 이론적인 임계속도보다 실제임계속도가 낮아짐을 알 수 있다.[7]

3.3 구름저항 측정실험

그림 9는 모형기차의 구름저항을 측정하기 위한 실험장치 구성도를 나타내고 있다. 직선 트랙의 경우 모터의 이용하여 정상상태에 도달할 수 있도록 충분한 가속거리 이상을 끌고 근접센서를 이용하여 그 순간의 속도를 측정하고 로드셀을 이용하여 힘을 측정한다. 원형트랙의 경우 모터를 이용하여 끌 수 없으므로 동력객차와 로드셀을 이용하여 직접 연결하고, 직선트랙에서와 같이 근접센서와 로

드셀을 이용하여 정상상태에서의 속도와 힘을 측정한다.

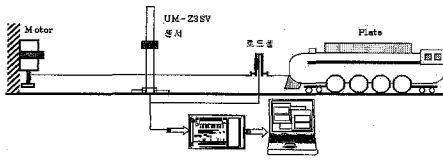
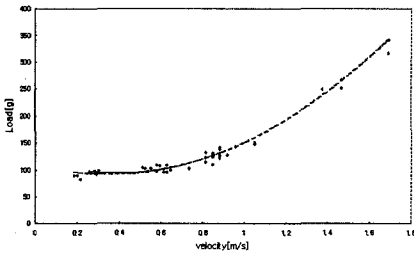
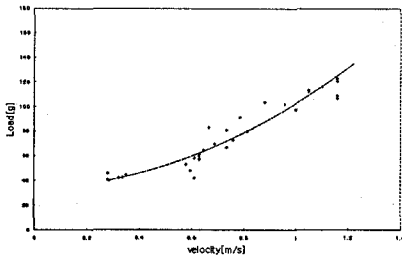


그림 9. 구름저항측정 실험장치 구성도

그림 10과 11은 기관차와 객차의 직선 및 원형트랙에서의 구름저항측정 실험결과이다. 그래프의 점들은 실험값이고 선은 그 값을 보간한 것이다.

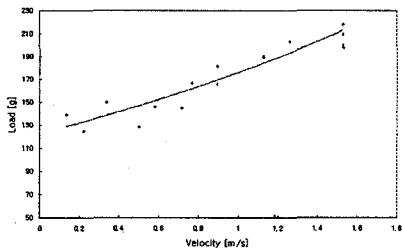


(a) 기관차

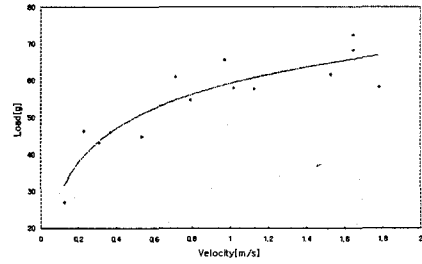


(b) 객차

그림 10. 직선트랙에서의 구름저항 측정결과



(a) 기관차



(b) 객차

그림 11. 원형트랙에서의 구름저항 측정 결과

3.4 구동력 및 슬립을 측정실험

모형기차가 움직이는데 있어 모터에서 발생된 구동력은 웜기어를 통하여 바퀴에 전달된다. 이론적으로 모터에서 발생된 구동력은 손실 없이 바퀴에 전달되지만 실제 모형기차에 있어선 기어효율로 인하여 손실이 발생된다. 모터에 의해 발생된 구동력이 전달된 바퀴는 레일과 접촉하여 구동하게 된다. 이때 레일과 기차바퀴는 구동하는데 있어 슬립이 발생되고 발생된 슬립에 의해 실제 바퀴에 전달된 구동력은 이론적인 값보다 작아진다.

그림 12에는 모형기차를 구동시키는 모터의 9, 12, 15, 18 볼트에 대한 토크-RPM 선도를 나타낸다. 특성선도에서 보듯이 RPM과 토크는 서로 반비례하며, 모터가 저속 회전 시 큰 토크를 발생시키는 반면 고속회전 시에는 작은 토크를 발생시킨다. 이러한 특성은 웜기어를 거치면서 기어비 만큼 토크의 증가와 RPM의 감속을 가져온다.

그림 13은 모형기차의 실제구동력과 슬립율을 측정하기 위한 실험장치의 구성도이다. 기관차의 구동모터에 일정한 전압을 공급하고 기관차에 추를 실을 수 있는 트레일러를 연결한다. 기관차와 트레일러는 실과 로드셀을 이용하여 연결하고 추의 무게가 증가됨에 따라 증가되는 견인력을 측정하도록 한다. 일정한 전압에 대하여 추의 무게를 증가함에 따라 변하는 속도를 근접센서를 이용하여 측정한다. 동시에 바퀴부분에 기차의 RPM을 측정할 수 있도록 타코미터를 설치하여 바퀴의 RPM을 측정한다.

모터의 특성은 9, 12, 15, 18 볼트에 관해서 나와 있다. 따라서 기차에 공급하는 일정한 전원은 위의 볼트수를 따른다. 일정하게 공급된 전원에 대하여 추의 무게를 증가시켜 실험을 수행한다. 추의 무게를 증가시키는 이유는 증가된 무게에 따른 견인력의 변화와 속도의 변화, 그에 따른 슬립율을 측정하기 위함이다. 이와 같은 방법으로 1회 실험을 수행하게 되면 기차의 속도와 RPM, 추의 무게에 맞는 견인력을 구하게 된다. 정해진 전압에 대하여 측정된 속도와 RPM을 이용하여 식 (4)에 의해

기차의 슬립율을 계산하고 추의 무게에 해당되는 힘과 속도를 이용하여 실제 구동력을 얻는다. 그림 14에서 17은 직선 및 원형트랙에서 측정된 실제구동력 및 슬립을 측정결과이다.

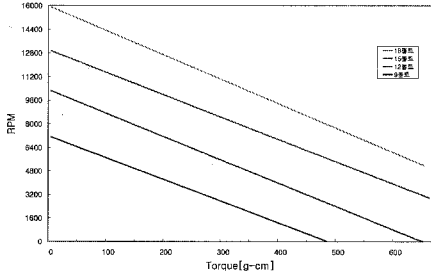


그림 12. 모터의 토크-RPM 특성

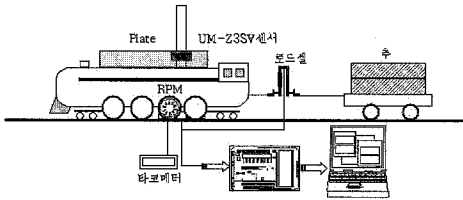


그림 13. 구동력 및 슬립을 측정장치 구성도

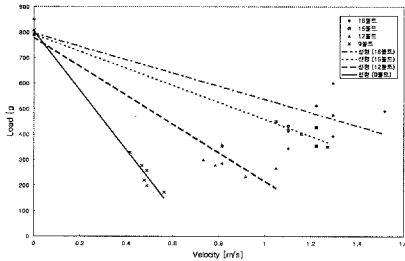


그림 14. 직선트랙에서 구동력 측정결과

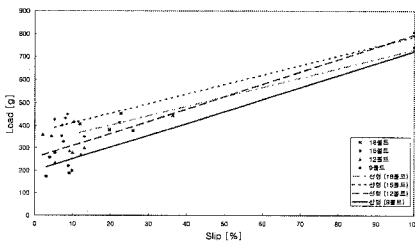


그림 15. 직선트랙에서 슬립을 측정결과

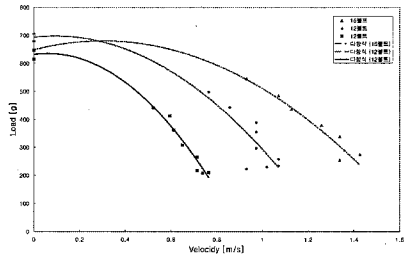


그림 16. 원형트랙에서 구동력 측정결과

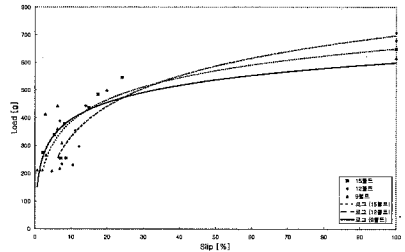


그림 17. 원형트랙에서 슬립을 측정결과

원형트랙의 경우 18볼트에 대한 실험은 견인력을 부여하기 위해 연결한 트레일러의 전복으로 인하여 측정할 수가 없었다.

3.5 정지거리 측정실험

그림 18은 정지거리 측정을 위한 실험 장치 구성도를 나타낸다. 속도측정을 위한 근접센서와 전원공급을 차단하기 위한 스위치 사이에 속도측정을 위한 평판의 길이 22cm를 두어 정확한 정지속도를 측정하도록 하였다. 전원공급이 차단되기 직전의 기차의 속도와 바퀴의 RPM을 측정하고, 전원이 차단되는 스위치의 위치에서부터 기차가 정지하는 곳까지의 거리가 정지거리가 된다.

표 4는 식 (6)에 의해 구한 정지 거리와 실험을 통해 구한 정지거리 결과를 나타내고 있다. 높은 전압일수록 예상정지거리와 잘 일치한다. 이는 높은 전압일수록 큰 에너지를 갖고 있어 유도된 식과 잘 일치한다.

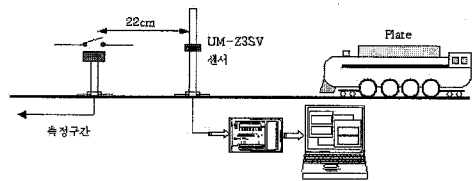


그림 18. 정지거리측정 실험장치 구성도

표 4. 정지거리 실험 결과

전압	예상정지거리	실험정지거리	오차(%)
9	1.54402m	1.168m	24.3533
12	2.17449m	1.848m	14.8853
15	2.56208m	2.390m	6.7426
18	2.81174m	2.963m	5.3795

3.6 직선 및 원형트랙에서의 속도예측

모형기차에서 모터는 입력된 전기에너지를 토크와 RPM으로 변환하여 준다. 변환된 에너지는 웜 기어를 거치면서 기어비와 기어효율이 곱해져 바퀴로 전달된다. 이때 기차가 슬립없이 구동한다고 가정하면 어떠한 에너지 손실도 일어나지 않으므로 실험에 의해 구해진 기차의 실제구동력과 모터 특성으로부터 구동메카니즘을 통해 얻어진 모터구동력은 일치해야 한다. 또한 기차는 정상상태로 구동하는 동안 작용되는 구름저항 R_x , 공기저항 D_A 그리고 객차에 대한 전인력 F_h 등의 저항을 극복해야 한다. 그러므로 실험을 통하여 구해진 기차의 주행저항과 모터에 의해서 발생하는 구동력이 일치하는 점이 기차가 낼 수 있는 최대속도가 된다.

그림 19 는 12볼트를 기준으로 슬립을 고려하지 않은 속도예측 결과이다. 그래프에서 실선은 모터에 의해 발생하는 구동력을, 점선은 실험에 의해 측정된 기차의 실제구동력을, 일점쇄선은 기차의 주행저항을 의미한다. 슬립이 고려되지 않은 속도예측은 그래프상의 구름저항선도와 모터구동력이 만나는 점(v_2)이 되며, 실제 기차의 속도는 실제구동력과 구름저항선도가 만나는 점(v_1)이 된다. 그림에서 보듯이 예측된 속도와 실제속도가 일치하지 않는다. 이는 모터에서 발생하는 구동력이 기차를 구동시키는데 100% 전달되지 않음을 의미한다.

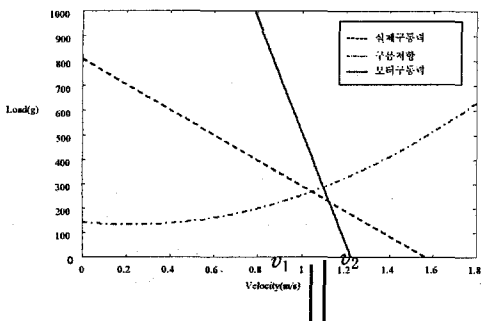


그림19. 슬립을 고려하지 않은 속도예측

주어진 모터 특성곡선을 이용하여 슬립이 고려되지 않은 모터특성곡선을 얻을 수 있다. 여기에 실

험에서 측정된 슬립율과 구동력의 관계를 이용하여 슬립이 고려되지 않은 모터구동력으로부터 슬립이 고려된 모터구동력을 얻게 된다. 이렇게 하여 얻어진 구동력선도를 이용하여 실제속도와 비교해 본다. 그림 20과 21은 12볼트에서 직선 및 원형트랙에서 12볼트일 때 슬립을 고려한 속도예측 결과이다. 표 5와 6은 직선 및 원형트랙에서 각 전압별 속도예측 결과를 나타낸다.

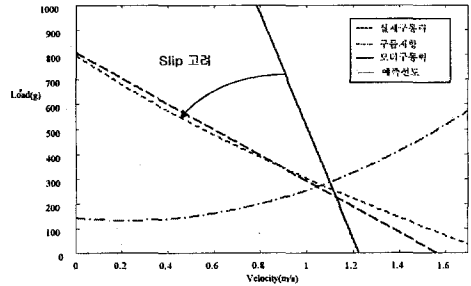


그림 20. 슬립을 고려한 직선트랙에서의 속도예측

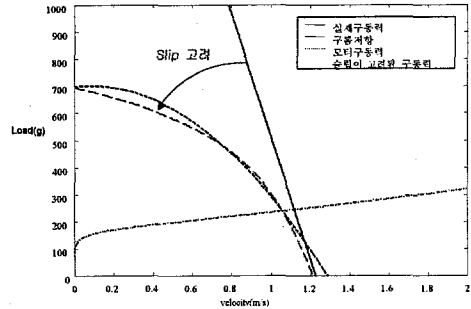


그림 21. 슬립을 고려한 원형트랙에서의 속도예측

표 5. 직선트랙에서 속도예측 결과

전압	실제속도 (m/s)	슬립불고려속도(m/s)		오차(%)
		슬립고려속도(m/s)	슬립고려속도(m/s)	
9	0.7534	0.8129	0.7797	7.8975
		0.7797	0.7797	3.4908
12	1.0476	1.1666	1.0676	11.3593
		1.0676	1.0676	1.9091
15	1.2695	1.4711	1.3421	15.8803
		1.3421	1.3421	5.7188
18	1.5172	1.7880	1.4695	17.8487
		1.4695	1.4695	3.1439

표 6. 원형트랙에서 속도예측 결과

전압	실제속도 (m/s)	슬립불고려속도(m/s)	
		슬립고려속도(m/s)	오차(%)
9	0.7451	0.7621	2.2816
		0.7516	0.8724
12	1.0571	1.1181	5.7705
		1.0531	0.3784
15	1.3881	1.4351	3.3859
		1.3827	0.3890
18	-	-	-
		-	-

한기계학회 논문집 A권 제 24권 제 1호, pp.134 -143, 2000

[5] Rao V. Dukkipati, Joseph R. Amyout. "Computer-Aided Simulation in Railway Dynamics" Marcel Dekker Inc., 1988

[6] Vijay K. Garg, Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems" Academic Press, 1984

[7] Thomas D. Gillpspie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, 1992

4. 결론

본 연구는 모형기차의 동역학적 성능을 측정할 수 있는 실험장치를 제안하였고, 실제 실험장치를 구성하였다. 이를 모형기차에 적용하여 기어효율, 구름저항, 구동력 및 슬립율을 측정하였다. 또한 구동 및 제동에 관한 운동방정식을 유도하였고 실험을 통하여 검증하였다.

실험을 통하여 직접 구한 구동력, 슬립 등을 이용하여 모형기차의 직선 및 원형트랙에서의 속도를 예측하였고, 모형기차의 속도는 슬립의 함수임을 규명하였다. 기차의 무게중심을 측정하여 원형트랙에서의 임계속도를 예측하였고, 객차와 보기사이의 롤이 임계속도에 미치는 영향을 밝혔다. 일과 에너지를 이용하여 정지거리를 예측하였고, 실험을 통하여 전원공급이 차단되기 직전에 많은 에너지를 갖을수록 예측된 정지거리와 잘 일치함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] 탁태오, 윤순형, 김석태. "모형기차의 동역학적 성능예측", 대한기계학회 동역학 및 제어 부문 하계 학술대회 논문집, pp.524 -529, 2000

[2] Quetin F, Castel L, Gautier P, and Zheng J.S., "A New Tool to Optimize the Travel Time Won on Tilting Trains Versus Investment", WCRR97 Vol. A, pp.67 -72, 1997

[3] Howard S.M., Gill L.C., and Wong P.J., "Review and Assessment of Train Performance Simulation Models", Transportation Research Record 917, pp.1 -6, 1983

[4] 정경렬, 김상헌 박수홍, 이장용, "고속전철차량 시스템의 주행성능예측 소프트웨어 개발", 대