

한국형 고속전철의 추진시스템 설계 및 성능 연구

Design and Performance Study of Propulsion System

for Korean High Speed Train

박광복*

PARK, Kaung-Bok

김현철**

KIM, Hyun-Cheol

ABSTRACT

This study was carried out about the design and the performance study of propulsion system for Korean High Speed Train of maximum operating speed of 350km/h. The propulsion system was studied to two parts the formation of power transmission and the performance of traction system base on Korean-TGV. For maximum operating speed of 350km/h at Seoul-Pusan high speed line, the power of train should be have the remaining acceleration of 0.058m/s/s and the slopeability of 6%. This performance study of propulsion system would be continued for defining of adhesion factor, friction factor and aerodynamic factor assumed to analysis and simulation.

1. 서언

60년도 초에 시작된 경제개발은 공로중심으로 전개되어 철도는 도로 및 항공기에 비해 크게 낙후되어 왔다. 최근 경부고속전철의 건설로 다시 철도산업은 활기를 찾게 되었다. 경부고속전철 사업의 경우는 국내 8개 회사와 해외 4개 회사로 구성된 컨소시움이 결성되었으며, 한국고속철도건설공단과 컨소시움 대표인 프랑스 지이시 알스톰(Gec-Alsthom) 사간에 계약이 체결되어 사업을 수행 중에 있다. 그러나 실제 경부고속전철은 지이시 알스톰사가 시스템 엔지니어링과 설계를 단독 수행 함으로서 실질적인 설계기술은 기술이전 받을 수 없게 되어있으며, 생산 및 시험을 위한 기술이 이전되고 있는 상태이다. G7 고속전철 사업은 이러한 현실을 고려하여, 독자적인 기술확보와 실경험을 채득하기 위하여 한국형 고속전철을 350km/h의 주행속도 목표로 개발 중에 있는 것이다.

본 연구에서는 한국형으로 개발되는 고속전철의 시스템 설계를 위해 추진시스템을 구성하고 동

* 대우중공업(주) 철도차량기술연구소 수석연구원

** 대우중공업(주) 철도차량기술연구소 선임연구원

력전달 장치인 전인 모터, 감속기, 연결기 및 차축기어에 대하여 연결과 구조를 검토하여 전인모터 출력과 감속기를 설정하고 그 결과를 토대로 열차추진성능을 연구하면서 점착계수, 350km/h 에서 가속여력, 평행속도 및 구배 능력 등의 연구를 통해 전인곡선을 작성하고 또한 완성된 전인성능으로 서울-부산 고속철도 구간의 주행 시뮬레이션을 수행하여 열차의 Trip Time 등을 연구하고자 한다. 본 연구는 추진시스템이 최종적으로 확정될 때까지 계속적인 연구를 통해 개선해 나갈 것이며, 개발 후 시험을 통해 연구단계에 전제되었던 사항들을 검증할 것이다.

2. 추진시스템 설계

2.1 추진시스템 구성

G7 고속전철의 안정적이고 확실한 추진동력 전달, 대용량의 소요 동력 확보, 전달동력의 에너지 효율 측면을 고려하여 전인전동기(Traction Motor)에 의한 감속기와 연결기(Coupling)를 거쳐 차축을 구동할 수 있는 차축기어로 연결하여 동력을 차륜에 전달하는 구조로 한다. 또한 전인전동기는 차체에 설비하여 설치의 안정성과 대차에 전달되는 각종 충격하중에 보호 되도록 한다.

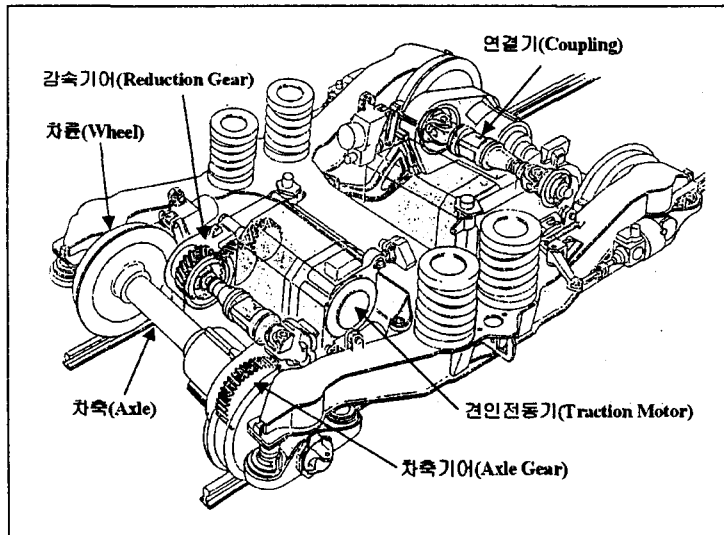


그림 1. 추진시스템 구성

2.2 운동에너지

고속열차가 350km/h 의 속도로 주행시에 운동에너지(Kinematic Energy)는 속도의 자승으로 동력에너지가 소모되며 다음의 운동에너지 방정식에 의해서 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 780,000 \times \left(\frac{350 \times 1000}{3600} \right)^2 \quad \text{여기서 } W: \text{ 열차중량 } 780,000 \text{ kg}$$

$$= 3,686 \text{ MJ}$$

2.3 견인력과 동륜주 출력

열차의 운전은 견인전동기에서 발생하는 회전력을 차륜에 전달하여 접촉력 범위내의 출력을 발생, 차륜을 회전시켜 열차를 주행하고 있다. 따라서, 전동기의 출력, 열차속도, 회전력과 견인력, 출력등에 대하여 검토해 보고자 한다.

1) 전동기의 출력

$$\begin{aligned} \tau &: \text{회전력}(N \cdot m) \\ \tau &= F \cdot r \quad \text{여기서 } F: \text{견인력}(N) \quad \text{----- (1)} \\ r &: \text{견인력작용반지름}(m) \end{aligned}$$

$$\text{식 (1) 에서 1회전 할 때 일은 } F \cdot 2\pi \cdot r = F \cdot 2\pi \cdot \frac{\tau}{F} = 2\pi \cdot \tau \quad \text{----- (2)}$$

로 되고, 회전수가 N:4,500 rpm, 회전력이 $\tau = 2,332 N \cdot m$ 인 경우 1 초(sec)에 해당하는 출력 P(watt)은

$$\begin{aligned} P &= 2\pi \cdot \tau \cdot \frac{N}{60} \quad (N \cdot m / \text{sec}) = 2\pi \times 2,332 \times \frac{4500}{60} \quad \text{으로 된다----- (3)} \\ &\cong 1100 \text{ kw} \end{aligned}$$

2) 열차속도

열차속도는 견인 전동기축의 회전수 N: 4,500rpm, 차륜의 직경 D: 0.885m 및 기어비 η_g : 2.091 인 경우 다음과 같은 관계식에 의해 산출 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot D \cdot \frac{N}{60} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{3600}{1000} = \frac{60 \cdot \pi \cdot D \cdot N}{R} \times 10^{-3} \quad (km/h) \quad \text{----- (4)} \\ &= \frac{60 \cdot \pi \cdot 0.885 \times 4500}{2.091} \times 10^{-3} = 359 \text{ km/h} \end{aligned}$$

3) 견인력과 동륜주 출력

견인전동기의 회전력이 차륜과 레일의 접촉면에서 일어나는 힘이 견인력이며, 1 량의 차량에서 발생하는 견인력을 F(N), 견인전동기 전기자의 반지름을 r(m), 전기자의 원주에 생기는 힘 $F_a(N)$, 회전력을 $\tau_a(Nm)$, 전동기의 대수를 n, 동력전달효율을 η_g 라고 하고, 차량이 1회전 하면 주전동기는 R 회전인 경우 견인력은

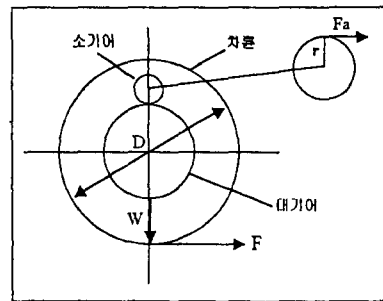


그림 2. 견인력과 동륜주 출력 작용도

$$\begin{aligned} \frac{\pi \cdot D \cdot F}{n} &= 2\pi \cdot r \cdot f_a \cdot R \cdot \eta_g = 2\pi \cdot \tau_a \cdot R \cdot \eta_g \\ F(N) &= \frac{2 \cdot n \cdot \tau_a \cdot R \cdot \eta_g}{D} \end{aligned}$$

으로 된다. 한편 동륜주 출력은 다음식에 의해서도 구할수 있다. 즉 축중 W를 17,000kg, 축수 n을 16개, 접촉계수 μ 를 초기에 0.188로 했을 때 동륜주 출력은

$$F = \frac{\mu \cdot W \cdot 10^3}{102} \times n = \frac{0.188 \times 17 \times 10^3}{102} \times 16 = 501 \text{ KN 로 계산된다.}$$

4) 출력

출력을 계산하기 위하여 식 (4)에서 N을 유도해 식 (1)과 함께 (3) 식에 대입하면

$$P = \frac{2\pi}{60} \times \tau \times N = \frac{2 \cdot \pi}{60} \times F \times r \times \frac{60 \times 1000}{2\pi \cdot r \cdot 3600} \times V = \frac{F \cdot V}{3.6} \text{ ----- (5)}$$

으로 되고, 여기서 전달효율을 η_g : 0.975, 350km/h 동륜주 출력 F를 176KN, 주행속도 V를 350km/h 라고 하면 출력은 다음과 같이 정리 된다.

$$P = \frac{F \cdot V}{3.6} \times \eta_g = \frac{176 \times 350}{3.6} \times 0.975 = 16,683 \text{ kw} \text{ ----- (6)}$$

식 (6)에서 견인력 F의 t는 평균가속도 (a=0)인 경우 F = Rt(열차저항)이므로 열차저항 Rt를 알면 견인력을 구할 수 있다.

2.4 점착력

점착력은 레일과 차륜간의 점착계수에 의하여 설정되며 서로의 상태에 따라 계수가 차이가 나고 있다. 다음은 선진국에서 사용하고 있는 점착계수를 그림 3는 프랑스의 경우이고 그림 4은 독일 ICE의 경우이다.

$$T_a = W \times a \times \mu$$

여기서 T_a 는 점착력, W는 점착중량으로서 272,000Kg, a는 증력가속도 (9.8m/s/s) μ 는 한계 점착계수로서 초기점착계수 $\mu=0.2$ 을 적용하여 계산하면 다음과 같다.

$$T_a = W \times \mu = 272 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.2 = 533 \text{ KN} \text{ ----- (7)}$$

견인력은 점착력 한계를 초과 할 수 없으며 항상 견인력은 점착력보다 작게 설계되어야 한다.

$$F < T_a$$

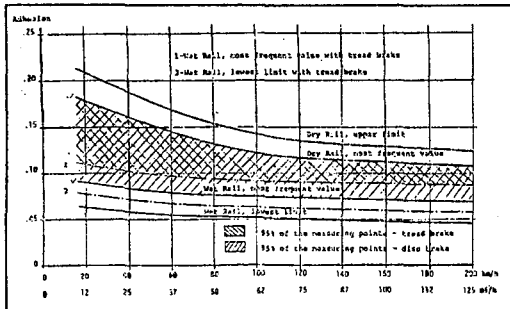


그림 3. 프랑스의 TGV 점착계수 곡선

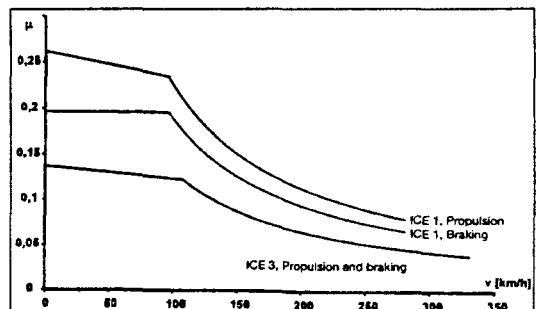


그림 4. 독일 ICE 점착계수 곡선

점착계수는 선로의 상태, 하중의 작용상태등에 따라 크게 다르기 때문에 각 국가에서는 실험에 의한 점착계수 곡선을 보유하고 있다. 본 G7 고속전철에서는 아직 점착계수를 속도별로 정의한 것이 없어 우선 Gec-Alstom 이 사용했던 Eurostar 의 점착한계곡선을 사용하고 350km/h 의 주행속도에서 점착계수는 7% 로 설정하여 계산 하였다.

2.5 감속기 (Reduction Unit)

동력전달 장치는 감속기어(Reduction Gear), 연결기(Coupling) 및 차축기어(Axle Gear)로 구성하여 2 단계 감속을 한다. 동력전달 장치는 역방향으로 힘이 전달되지 않도록 설계되어 있다.

1) 기어 연결 구조

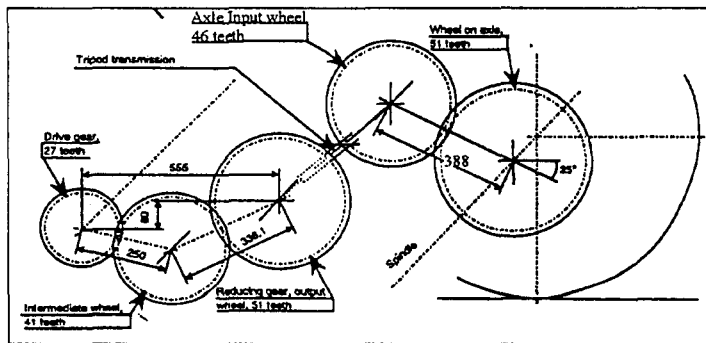


그림 5. 기어 연결 구조

2) 기어비

감속기어와 구동기어의 잇수를 다음과 같이 설계하면 감속비를 구할수 있다

• 감속기어 축

구동기어(Z1) 잇수 : 27 개

중간기어(Z2) 잇수 : 41 개

감속기어(Z3) 잇수 : 51 개

• 구동기어 축

차축입력기어(Z4) 잇수 : 46 개

차축기어(Z5) 잇수 : 51 개

$$R = \left(\frac{Z2}{Z1} \times \frac{Z3}{Z2} \right) \times \left(\frac{Z5}{Z4} \right) = \left(\frac{41}{27} \times \frac{51}{41} \right) \times \left(\frac{51}{46} \right)$$

$$= 1.888 \times 1.108$$

$$= 2.091$$

----- (8)

3) 감속기어

감속기어는 전인전동기의 동력을 효과적으로 차륜에 전달하고, 모터 회전수를 4500rpm 으로 구동할때 최고주행속도 350km/h 로 주행하기 위하여 적절한 감속을 위해 설비한다. 감속기는 3 개의 헬리컬 기어(Helical Gear)로 구성하며 감속비는 기어비에서 검토한대로 1.888:1 로 설계 한다. 설치는 전인전동기에 장착하여 차체에 3 지점으로 취부 한다.

도표 1. 감속기어 제원표

구분	구동기어	중간기어	감속기어
형식	헤리켈		
헤리켈각	15°		
모듈	7		
잇수	27 개	41 개	51 개
직경	200 mm	300 mm	372.2 mm
재질	16NCD13 (NFA35567)		

도표 2. 차축기어 제원표

구분	차축 입력 기어	차축 기어
형식	Spur Gear	
모듈	8	
잇수	46 개	51 개
직경	368 mm	408 mm
재질	16NCD13 (NFA35567)	

4) 차축기어

차축기어는 전인전동기에서 전달되어져 오는 동력을 차륜에 전달하여 차량을 구동하기 위한 것으로 차축에 설비된다. 차축기어는 두개의 슈퍼기어(Spur Gear)로 구성하며 감속비는 1.108:1 로 설계한다. 구동 토크(Driving Torque)는 탄성링에 붙은 반력암(Reaction Arm)에 의하여 흡수하도록 설계 한다.

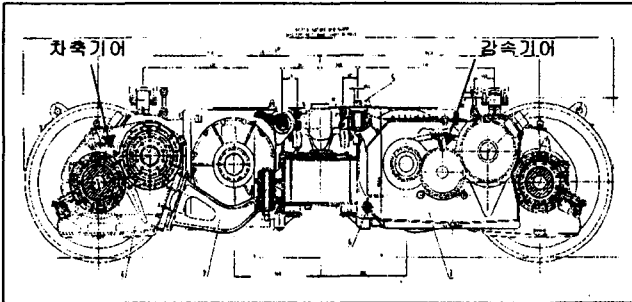


그림 6. 감속기어 및 차축기어 설치도

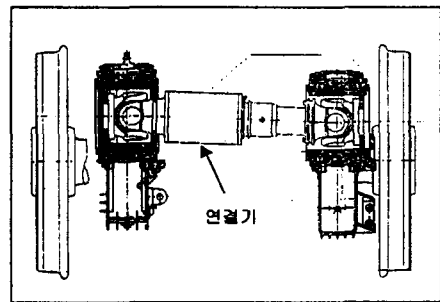


그림 7. 연결기 설치도

2.6 연결기(Coupling)

연결기는 전인전동기에서 나오는 동력을 감속기(Reaction Unit)를 통해 감속하여 (Axle Gear)로 전달하는 경로에 위치하고 있으며, 열차가 주행중에 발생하는 차체와 대차의 상대운동 즉 수직, 횡방, 회전운동, 축의길이 방향의 진동을 흡수하여 동력을 전달하는 장치이다. 연결기는 중앙에 축방향 운동을 할수 있는 Tripod Type 미끄럼 부분이 있고 양쪽에는 두개의 Cardon Joint 를 설비 하였다. 충격과 토크의 이상 변동으로 연결기축(Coupling Shaft)에 기계적인 손상이 가해졌을 경우 비상제동 장치를 작동하도록 연결기 불균형 검지기(Coupling Unbalance Detection)를 설치 하였다.

도표 3. 연결기 특성표

구분	경사각도 α	축의 길이	
		최대	최소
구동시	7.5°	1206 mm	1040 mm
정지시	1.9°	1121 mm	
보수시	7°	1128 mm	
한계치	15°	1230 mm	990 mm

도표 4. 모터의 특성

구분	사양	구분	사양
형식	3상능형 유도전동기	토크	기동시: 700 Nm 정격: 2600 Nm
극수	4극	기어효율	0.975
냉각방식	강제풍풍식	회전관성계수	3.8 %
정격	1100 kw	기어비	2.091
회전수	4500 rpm	중량	1430 kg

2.7 견인 모터

견인전동기는 3상 농형 유도전동기 (Induction Motor) 를 사용하여 350 km/h의 최고 주행속도를 위해 최고 회전 속도 4500 rpm으로 설계하며 정격출력은 1100 kw으로 한다. 전동기의 출력은 저속에서 큰 회전력과 전류를 얻을 수 있으며 고속 회전력에서는 낮은 회전력과 전류가 생성된다. 또한 효율은 전속도 영역에 걸쳐 일정한 것으로 나타난다.

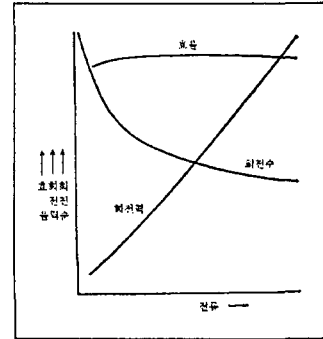


그림 8. 전동기의 특성

3 열차 기본 조건

열차의 추진성능은 선로 및 구배 조건에 따라 계산, 검토되어지며 이를 바탕으로 하여 최적의 열차편성 모델을 산출한다. 여기서는 G7 차세대 고속전철인 20량 1편성에 대한 추진 성능을 계산 하였다.

3.1 열차 편성

기본편성 : PC + MT + 7IT + 2MT + 7IT + MT + PC

PC = 동력차 (Power Car) MT = 동력 객차 (Motorized Trailer)

IT = 중간 객차 (Intermediate Trailer)

3.2 열차 기본 조건 (고속전철 시스템 요구사항)

최고운행 속도 : 350 km/h

추진성능 : 상용최고 속도시 0.05 m/s/s 이상의 여유가속도를 가지거나 또는 5 %의 구배를 주행 할 수 있어야 한다.

3.3 계산 결과

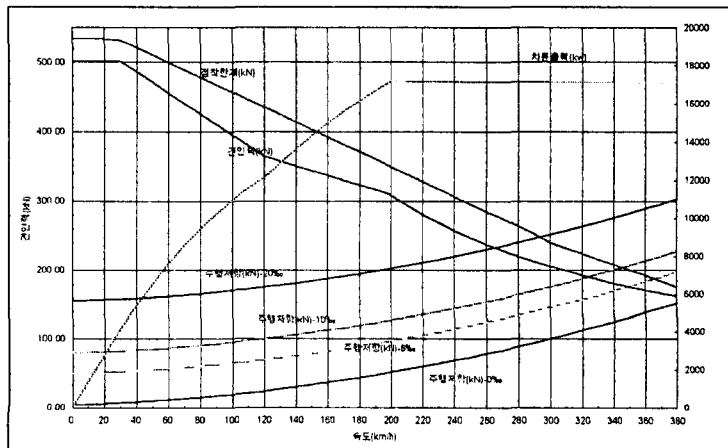


그림 9. G7 차세대 고속전철의 속도별 견인곡선도

그림 9와 같이 현재의 모타의 수와(16개) 주어진 점착계수(초기동시 0.188)를 가지고 최대 모타의 출력을 계산해보면 모타당 1100 kw의 용량을 갖는다. 이는 최고상용속도에서 6%의 구배 등판능력과 0.058 m/s/s의 가속여력을 갖는다(표 5).

도표 5. 고속전철 성능 계산

항목	편성	K-TGV	G7 고속전철
		2P+2M+16T	2P+4M+14T
열차중량 [ton]		782	780
전동기 출력 [kW]		1,130	1,100
전동기 대수		12	16
총출력		13,560	17,600
기동시 견인력 [kN]		383.67	501.34
350 km/h		135.99	175.85
가속도 평균 [%]		0.126	0.275
기동시		0.498	0.645
300km/h 시		0.073	0.137
350km/h 시		-	0.058
균형속도 [km/h]		354.79	389
최대 등판 구배			
300km/h 시		8 %	-
350km/h 시		-	6 %
350 km/h 도달			
가속거리 [km]		58.1	26.7
가속시간 [sec]		774	398

열차의 성능은 상용최고 속도에서의 최대 등판 구배 또는 상용최고 속도에서의 가속여력 가속도 (m/s/s)로 나타내어 진다. 우선 구배에 관하여 보면 PAKER & ASSOCIATES INC 에서 제출된 보고서에 의하면 추진시스템에 관한 언급 중 구배에 관한 내용이 다음과 같이 나타나 있다.

- 350km/h 에서는 0.3%의 경사도, 300km/h 에서는 1.5% 경사도가 지배적인 경사도이므로 952, 953 신칸선에 대해서는 300km/h 이상의 최고속도가 달성되는 것을 보장하여야 한다 - 이는 모든 추진에 관한 성능계산이 0% 구배를 기준으로 계산하지만 실제로 0%의 구배 선로는 찾기가 힘들며 상기내용과 같은 속도별 지배적인 경사도를 감안해야 한다. 실제로 G7 열차를 0.3% 구배에서 계산을 해보면 열차평행속도는 370km/h 로 계산되어 진다.

도표 6 최고속도시의 가속여력 가속도(m/s/s) 비교

		WIN350	TGV-K	ICE3	Eurostr	G7 고속열차
가속도 (m/s/s)	350km/h	0.11	-	-	-	0.058
	300km/h	-	0.073	0.05	0.04	0.137
상용 최고속도시 최대구배		-	8‰	5‰	4‰	6‰
차량수		분산식 6 량	집중식 20 량	분산식 8 량	집중식 20 량	집중식 20 량

표 6에서와 같이 현재의 G7 열차의 경우 경부선에 비교하여 가속여력 및 등판능력이 적은 감이 있다. 외국과 다른 지형조건 및 선로 조건을 가지고 있는 현재 국내의 상황에서는 속도에 따른 가속여력의 기준과 그에 따른 경제성 검토 및 열차시격, 추진성능 등이 경부선과 비교하여 검토 되어 져야 할 것이다. 또한 그림 3.과 같이 SNCF에서 제시된 저속차량(200Km/h)에서의 속도/점착계

수의 관계(HOESS.J.A, 1981)에 의해 Wet Rail (젖은선로)에서의 점착력은 보통상태의 선로 보다 반 이상 감소되므로 선로의 조건에 따른 영향 역시 열차운행의 중요한 요소가 된다. 이상과 같이 모터의 출력 및 제어를 결정시에는 선로의 조건, 적정 구배 등 열차의 시격을 감안한 여러 변수를 고려하여 결정 해야 될 것이라 생각된다. 따라서 추진성능 계산에 필요한 견인력 및 점착계수, 모타특성선도 등에 대해서 종합적인 시스템 DEFINE 과 연구가 계속적으로 진행 되어 져야 한다.

4. 주행 시물레이션

주행 시물레이션에는 우선적으로 열차의 특성이라 할 수 있는 주행저항, 열차의 형태, 속도에 따른 모터의 효율, 견인선도, 최고속도 등이 입력자료로 필요하며 주어진 선로의 구배(그림 10), 선로의 곡률반경(그림 11)에 따라 구간별 열차의 제한속도(그림 12)를 계산하게 된다. 전 주행 구간에 걸쳐 제한속도가 설정이 되면 구간별 TRIP TIME 및 속도(그림 13)가 계산된다

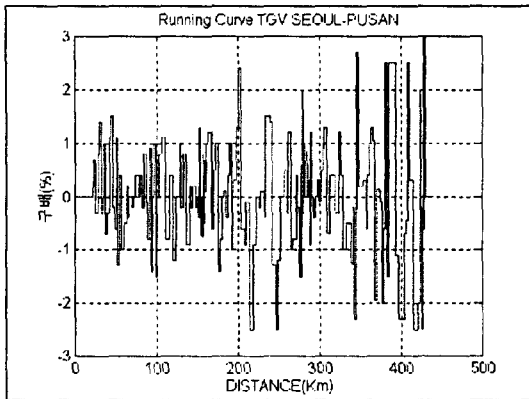


그림 10. 거리에 대한 구배분포도

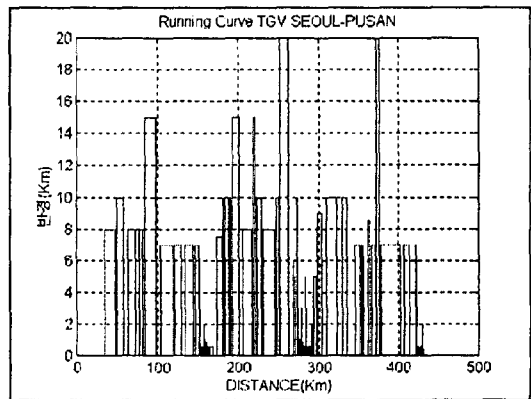


그림 11. 거리에 대한 곡률반경

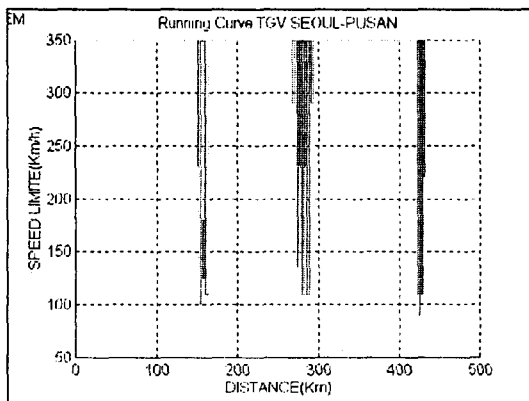


그림 12. 전체운행 거리에 대한 제한속도

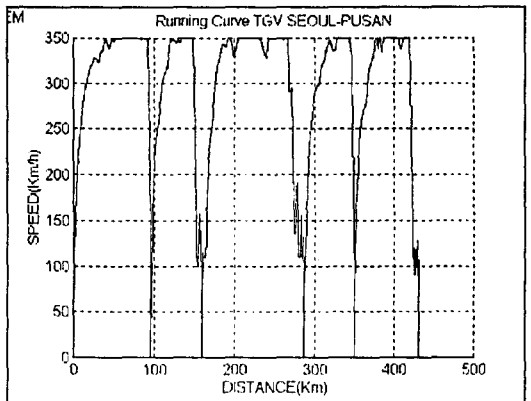


그림 13. 실제 운행속도 (서울-부산)

본 시물레이션의 결과, 역 구간별 주행 속도/시간 및 소요동력/회생동력 등이 계산 되어진다. 이는

차량 설계/제작 측면에서 비용과 주행시간을 고려한 최적 추진력 결정에 도움을 주고, 급전계동 설계자에게는 급전소의 부하예측에 활용되며 철도 운영자에게는 열차시간표의 작성, 외란에 대한 주행시간의 영향해석 및 소비에너지 예측에 사용된다.

5. 결론

본 연구에서는 추진시스템의 설계를 통해 추진동력전달방법을 설계를 수행 하였으며, 또한 추진 성능 연구를 통해 견인력 곡선을 도출 하였다. 이때 얻어진 결과로서 견인전동기의 출력은 1100kw 이며, 초기점착계수는 0.188, 350km 에서 점착계수는 0.07 을 설정하였고, 기어 감속비는 1.888:1, 차축 감속기 1.108:1 로서 총감속비는 2.091:1 을 얻었으며, 전동기의 최대회전속도 4500rpm 에서 열차는 350km/h 를 주행할 수 있도록 설계 되었다.

한편 주행 시뮬레이션을 통해 경부고속철도에서 서울-부산간의 여행시간을 103 분으로서 기존 경부선 보다 11 분 단축효과가 있다고 판정되었으며, 총 소요동력은 12,484 kw 로서 경부선 8769 kw 보다 다소 높게 나타났다. 앞으로 6 년차까지 계속 상세연구를 수행할 것이며 개발 완료 후 시 제차량의 시험을 통해 가정되거나 선진자료를 이용한 factor, 점착계수, 관성율, 공기저항식등 많은 실험식 등을 확인과 시험을 통해 앞으로 소요될 고속전철 기술 개발에 활용하고자 한다.

참고문헌

1. HOESS.J.A (1981), "Braking System for Advanced High-Speed Passenger Trains". *Passenger Train Equipment Review Report*, U.S. Department of Transportation, p2-1~2-19,
2. PARKER (1997). "고속전철 경향 개요", PAKER & ASSOCIATES INC, 1997. 4. 24
3. E.TASSILLY (1995), "V" OR THE CHALLENGES OF VERY HIGH SPEED RAIL " 고속철도와 21 세 기 국가개발에 관한 한불 공동학술회의", 교통개발연구원/프랑스 국립교통연구원, 논문집, pp320~322
4. 정연석, 이덕출 (1990), 신전기철도 동명출판사
5. 전차운전개론, 일본교우사
6. 대우중공업 (1997), "G7 고속전철 동력차 시스템 엔지니어링 기술개발 1 차년도 보고서"
7. GEC-ALSTHOM (1993), "TGV 한국 Seoul-Pusan High Speed Rail System Proposal"
8. RICHARD A. U., Rail Traction Energy Management Model. Comprail 87 International Conference - Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and other Advance Mass Transit System., July 7~9, 1987, Frankfurt 21pages
9. 한국고속전철건설공단 (1997), "G7 고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발 1 차년도 보고서"