

<技術論文>

서울 지하철 전동차의 최적 감속기어비

김 승 우* · 이 장 무**

(1979年 2月 19日 接受)

Optimum Reduction Gear Ratio for a Rapid Transit Car in Seoul

Seung Woo Kim and Jang Moo Lee

Abstract

An optimum reduction gear ratio problem for a subway rapid transit car in Seoul was solved by using a computer program package, which is a modified and extended version of the simple model by Mischke¹⁾. The optimum value of reduction gear ratio was evaluated by minimizing the total start-to-stop time.

The validity of the computer program package was verified by cross-checking the calculated values of gear ratio and dynamic characteristics with the actual and measured values.

- | | |
|----------|---------------------|
| 부 | 호 |
| A | 전동차의 단면적 (m^2) |
| a | 감속도 (m/s^2) |
| F | 중외력 (N) |
| f | 마찰력 (N) |
| g | 중력가속도 (m/s^2) |
| K | 전인모터의 수 |
| N_T | 전인모터의 회전수 (rpm) |
| n | 감속기어비 |
| R | 바퀴의 반경 (m) |
| T | 전인모터의 토크 (N) |
| V | 전동차의 속도 (m/s) |
| VR | 제한속도 (m/s) |
| W | 전동차 및 적재하중의 총무게 (N) |
| ρ | 레일의 곡률반경 (m) |
| ω | 전동차 바퀴의 각속도 (rad/s) |

1. 서 론

어떤 도시에서 새로운 전철이나 지하철의 건설을 계

획할 경우, 그 전철이나 지하철 구간에 합당한 전동차 (transit car)를 설계하는 것이 주요한 문제로 대두 된다. 전동차와 같은 교통수단은 대량의 인원을 단시간 내에 목적지에 수송하는 것을 목적으로 하기때문에 전동차의 운행시간(start-to-stop time)을 단축시켜 운행 횟수를 늘리면 많은 인원을 수송할 수 있게 된다.

그러므로 전동차 설계시 가장 중요한 것중의 하나가 주어진 구간에서 운행시간을 최소화하는 것이다. 전동차의 운행시간을 단축시키기 위한 방법에는 보통 고성능의 견인모터(traction motor)를 사용하는 방법과 견인모터와 바퀴(powered wheel) 사이의 감속기어비(reduction gear ratio)를 조정하는 방법이 있다. 사용할 수 있는 견인모터는 통상 전원공급과 모터의 크기, 비용등에 있어 많은 제약이 있을 수 있다. 따라서 주어진 견인모터를 사용하면서 감속기어비를 적절히 조절하여 최대의 효과를 얻고 이것으로 만족할 수 없는 경우에는 새로운 견인 모터로 바꾸고 감속기어비를 조정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 전철 또는 지하철의 제 특성이 알려져 있는 경우 운행시간을 최소화하는 감속기어비를 구하고 운행특성을 파악할 수 있는 전산프로그램 패키지(package)를 최근의 참고문헌^{1,2,3)}을 이용하여 보충

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 서울대학교 기계설계학과

확장하고 이를 서울특별시에서 건설되어 있는 지하철에 적용하여 그 타당성 및 실용성을 검증하였다.

2. 전동차의 동역학

운행중의 전동차의 자유물체도는 Fig.1 과 같이 되며 이에 작용하는 힘은 모터로부터 바퀴에 전달되는 힘 (tractive efforts of the wheels)과 저항력 (drag force) 이다. 또한 전동차에서 회전부분의 관성은 전동차 전체의 관성에 비하여 매우 작으므로 무시하여 뉴우톤의 제 2 법칙을 적용하면 다음의 운동방정식을 얻는다¹⁾

$$dt = \frac{WKd\omega}{g(KnT/R - f(V))} \tag{1}$$

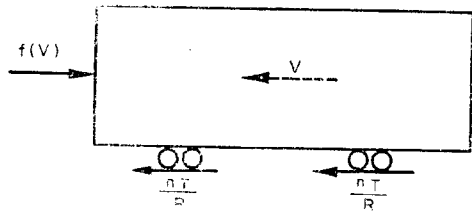


Fig. 1. Free body diagram of a transit car

앞에서 구한 미분방정식(1)을 적분하면 속도와 시간과의 관계를 구할 수 있으나 식(1)에서 T와 f(V)가 전동차의 속도의 복잡한 함수이어서 해석적인 방법으로 해를 구하는 것은 불가능하다. 따라서 전산기를 이용하여 수치적인 방법으로 주어진 임의의 감속비 n에 대하여 해를 구하고 운행시간 (start-to-stop time)을 최소로 하는 감속비 n을 황금분할탐사법¹⁾ (Golden Section Search)인 GOLD subroutine을 이용하여 구한다.

임의의 감속비 n에 대하여 속도와 시간의 관계는 Fig. 2와 같은 형태를 갖게 되며 속도는 처음에 시간과 함께 증가하나 평형속도 (balancing speed)에 수렴하는 경향을 가지며 평형속도는 전동차에 작용하는 힘 $F = \frac{KnT}{R} - f(V)$ 를 0으로 놓아 구할 수 있다. 또한 Fig. 2의 곡선의 밑 면적은 운행거리를 나타내고 있다. 그리고 감속기어비 n이 운행시간에 미치는 영향은 다음과 같다. 즉 감속비가 큰 경우는 가속도는 커져서 전동차의 속도는 빨리 증가하나 평형속도가 작아지므로 운행시간이 길어지며, 감속비가 작은 경우는 평형속도는 커지나 가속도가 작아 속도가 느리게 증가하므로 운행시간이 길어지게 된다. 그러므로 운행시간을 최소로 하는 최적기어비가 존재하게 된다.

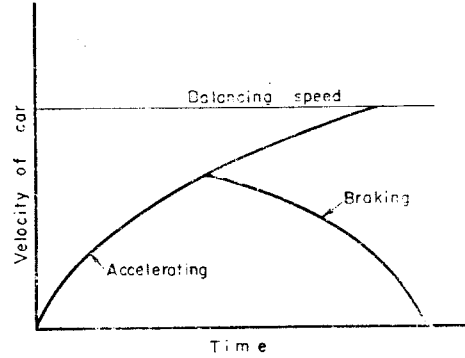


Fig. 2. Velocity vs time

이제 전동차의 동역학을 규명하기 위하여 고려하여야 할 사항을 열거하면 다음과 같다.

(1) 저항력 (drag force)

운행중 전동차에 작용하는 저항력 f(V)는 공기저항력 (aerodynamic resistance)을 F_{aero} , 레일과 바퀴사이의 저항력 (rolling resistance)을 F_{roll} , 구배 (grade)에 의한 저항력 (grade resistance)을 F_{grade} 라 할때 다음과 같다.

$$f(V) = F_{aero} + F_{roll} + F_{grade} \tag{2}$$

이들을 분류 설명하면 아래와 같다.

(a) 공기저항력

운행중의 전동차의 공기저항은 실험적으로 다음 식과 같이 표시된다.³⁾

$$F_{aero} = 0.575AV^2(N) : \text{leading car} \tag{3}$$

$$F_{aero} = 0.0815AV^2(N) : \text{trailing car} \tag{4}$$

그러므로 현 지하철에 쓰이고 있는 전동차는 2M2T의 2중계편성으로 6량의 차량이 연결운행되고 있으므로 F_{aero} 는 $0.983AV^2(N)$ 이 된다. 그러나 바람의 속도 또는 터널의 구조 차량의 표면 상태에 따라 저항이 두 배까지 증가할 수 있다는 것이 알려져 있다.^{3,4)}

(b) 바퀴와 레일간의 저항³⁾

$$F_{roll} = [0.004W \times \frac{1}{\rho} + 6.5 \times 10^{-4}W + 0.0000503 \times W \times V + 516](N) \tag{5}$$

(c) 구배저항

퍼센트 구배 (percentage grade)를 x라 할때 다음과 같다.

$$F_{grade} = W \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{x}{100} \right) \right] (N) \tag{6}$$

(2) 모터의 특성

일반적으로 전동차에는 직류모터(D-C motor)를 사용하고 있으며 발생하는 토크는 모터의 아마츄어 샤프트(armature shaft)의 속도에 따라 변하며 감속기어를 거쳐 동력륜(powered wheel)에 전달되어 견인력(traction effort)을 발생시킨다. Fig. 3은 직류모터의 토크와 아마츄어 샤프트의 속도간의 일반적인 특성을 보여주고 있다. 서울시 지하철의 전동차에 사용되는 모터는 덕류 직류 모터로서 히다치의 HS-1320Crb이며 토크 $T(N-m)$ 와 회전수 $N_T(rpm)$ 사이의 관계식은 참고문헌⁽⁷⁾의 견인모터 특성곡선으로 부터 구하여진다. 즉 T 와 N_T 의 몇점을 찾아낸 다음 curve fitting program을 이용하여 추정함수를 $T=c/N_T^b$ 로 선택하여 최적함수를 구하면 다음의 식을 얻는다.

$$T=1862(N-m) \text{ (단 } N_T < 1200rpm) \tag{7}$$

$$T=1.065 \times 10^{14}/N_T^{3.60}(N-M) \text{ (단 } N_T \geq 1200rpm) \tag{8}$$

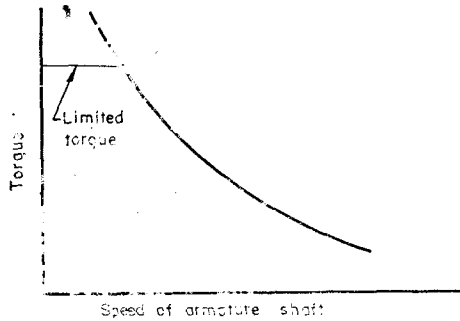


Fig. 3. A typical characteristic curve for D-C traction motor

(3) 레일과 바퀴간의 마찰계수

참고문헌⁽⁷⁾에 의하면 직류 발전 전기 기관차의 경우 마찰계수 μ 에 대하여 다음과 같은 실험식을 권장하고 있다.

$$\mu=0.265 \times (1+0.12V)/(1+0.145V) \tag{9}$$

(4) 제한 속도

일반적으로 전동차의 운행은 레일의 상태에 따라 속도의 제한이 주어지는 데 속도 제한에 가장 큰 영향을 주는 것은 레일의 곡률반경(radius of curvature)이다. 참고 문헌⁽⁷⁾에는 곡률반경과 제한속도의 관계를 Table로서 보여주고 있다. 일반적으로 레일의 굵고 평탄한 경우 지상의 전철구간에서는 110km/h 이하, 지하철구간에서는 100km/h 이하를 제한속도로 택하고 있다. 그러나 참고문헌의 table은 제한속도와 곡률반경의 관계를 연속적으로 주고 있지 않으므로 computer 이용에

편리하게 하기 위하여는 Table에 표시된 값들에 가장 근접하는 제한속도와 곡률반경과의 함수관계를 curve fitting program에 의하여 찾을 필요가 있다. 제한속도를 $VR(km/hr)$, 곡률반경을 $\rho(m)$ 라 하면 다음의 결과를 얻는다.

$$VR=4.76904+0.2502\rho-0.00017592\rho^2 \tag{10}$$

(5) 제동 감속도

현재 서울시에 사용되고 있는 제동시스템은 동적 제동(dynamic braking)과 기계적제동(mechanical braking) 중 후자를 택하고 있다. 기초 동력학을 이용하면 제동중의 전동차의 마찰계수(working adhesion value during service braking)를 coeff 2, 감가속도를 $a(m/sec^2)$, 제동초속도를 $V_0(m/sec)$, 제동거리를 $S(m)$ 라 할 때 다음의 관계식을 얻는다.

$$a=g \times \text{coeff2} \tag{11}$$

$$S=V_0^2/(2 \times \text{coeff2} \times g) \tag{12}$$

제동중의 마찰계수를 구하기 위하여 철도차량연구소에서 측정된 실험자료⁽⁷⁾(지상 전철구간에서 각종 제동시의 제동거리, 제동시간, 초속도 등에 관한 Table)와 식 (12)를 이용하면 Table. 1과 같은 결과를 얻는다. 위의 결과에서 coeff 2는 0.10이라고 추정할 수 있으며 이 값을 이용하여 제동시간을 계산하여 측정된 실제 제동시간과 비교한 결과 모두 10% 이내의 오차를 갖었다.⁽⁷⁾

Table 1. Calculated values of coeff2

Types of braking	Station-to-station	V_0 (m/sec)	$S(m)$	coeff 2
Emergency	Siheung-Kwanak	29.08	423.88	0.1018
Emergency	Myunghak-Kunpo	29.75	463.08	0.0975
Emergency	Kwanak-Siheung	30.08	443.97	0.1040
Emergency	Karibong-Siheung	30.39	495.97	0.0950
Emergency	Bukog-Kunpo	29.17	432.44	0.1004

3. 수치적 해석 및 전산 프로그램

앞에서 구한 자료들을 검토하여 보면 전동차의 운동 방정식을 해결하고 또한 최적기어비를 구하는데 있어 해석적인 방법은 불가능하다는 것을 알 수 있으며 수치적인 방법과 전산기(digital computer)를 이용하기 위하여 많은 subprogram과 main program이 필요하다

다는 것을 알 수 있다. 완성된 전산프로그램들의 구성과 기능을 설명하면 다음과 같다.

(1) Subroutine TRACK

이 프로그램의 목적은 달리고 있는 전동차의 어느 순간에서 그 전동차가 위치하고 있는 레일의 곡률반경과 구배를 구하는데 있다. 한 구간을 이상화하여 표시하였을 때 입면도와 평면도는 Fig. 4와 같이되며⁽²⁾ 한 구간을 완전히 묘사하기 위해서는 다음과 같은 특성이 필요하다.

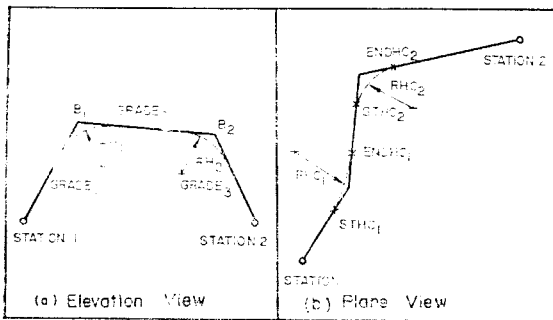


Fig. 4. An idealized model for track

- (a) 구간거리 (DIST)
- (b) 구배의 크기 (GRADE_i)
- (c) 구배의 변화가 일어나는 점 (B_i)
- (d) 곡률반경 (RHC_i)
- (e) 한 곡률이 발생하는 시작 점 (STHC_i)과 끝나는 점 (ENDHC_i)

(2) Subroutine DRAG

식 (2), (3), (4), (5), (6)에 의하여 주어진 전동차의 속도(V), 단면적(A), 중량(W), 차량의 닛수(Nc), 구배 (GRADE), 곡률반경 (RHC)에 대하여 전동차에 작용하는 총저항을 계산한다.

(3) Subroutine TMOTOR

전인모터의 특성을 주는 subroutine으로 식 (7)과 (8)에 의하여 주어진 전동차의 속도(V), 기어감속비 (RATIO), 동력륜의 반경(R)에 대하여 모터에 발생한 토크(TM)를 계산하여 준다.

(4) Subroutine EFFORT와 FRICT

전인모터에 의하여 발생된 주어진 TM 값에 대하여

동력륜에 전달되는 힘 TE(Traction Effort)는 subroutine EFFORT에 의하여 계산되며 전인모터의 수를 K라 할 때 아래의 식으로부터 계산된다.

$$TE = K \times RATIO \times TM / R \quad (13)$$

그러나 TE가 바퀴와 레일간의 최대마찰력 (COEFF1×W)보다 큰 경우에는 바퀴에 레일간에 미끄럼이 발생하여 TE는 (COEFF1×W) 이상 증가하지 못하므로 (K×RATIO×TM/R)이 (COEFF1×W)보다 큰 경우에는 아래의 식이 사용된다.

$$TE = \mu W \quad (14)$$

또한 이 subroutine에서는 변수 L을 정의하여 미끄럼이 발생할 때에는 1을, 발생치 않을 때는 0을 기억시켜 매 구간에 있어 미끄럼 발생 여부를 computer program output에 print out시켰다. 바퀴와 레일사이의 마찰계수(COEFF1)를 구하기 위하여는 식 (9)를 이용한 subroutine FRICT를 사용하였다.

(5) Subroutine RESTRV

이 subroutine은 전동차의 속도가 식 (10)에 의하여 주어지는 제한속도를 초과하고 있는지 여부를 파악하고 초과시 그 위치와 속도를 print out시킨다.

(6) Subroutine BRAKE

이 subroutine에서는 주어진 전동차의 속도에 대한 제동시간과 제동거리가 구하여지며 제동시의 마찰계수(COEFF2)는 유사한 전동차기종과 전철노선에 대한 각종 제동 데이터에서 계산된다.

(7) Subroutine MERIT⁽¹⁾

주어진 임의의 기어비에서 전구간의 운행시간의 역수를 구하는 subroutine이다. 역수를 구하는 이유는 search subroutine인 GOLD가 최대값을 찾도록 구성되어 있기 때문이다. 여기서는 주어진 임의의 기어비와 주어진 시간에서 t 시간후의 속도와 거리를 Euler의 방법을 이용하여 구하고 이를 합산하여 제동직전까지의 시간과 거리를 구한다. 다음 subroutine BRAKE을 불러 현재의 속도로부터 완전 정지시까지의 제동시간과 거리를 구한다. 위의 두 거리를 합한 운행거리가 해당 구간거리와 일치하게 될 때 그 구간의 실제 운행시간이 결정되며 전 구간의 운행시간을 합하여 역수를 취한 것이 MERIT이 된다. 자세한 내용은 참고문헌⁽⁷⁾의 flow chart와 program listing에 기술되어있다.

(8) EXECUTIVE PROGRAM

앞에 기술된 subprogram 과 GOLD search subprogram 을 이용하는 main program 으로 각 프로그램의 배열은 Fig. 5 에 도시되어있다.

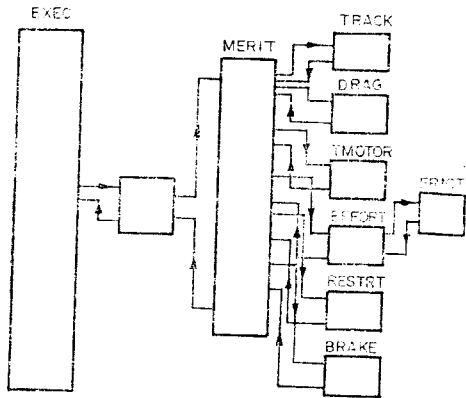


Fig. 5. Program Arrangement

이 프로그램의 기능을 분류하면 입력, GOLD 를 이용한 최적기어비 산출, 속도 점검, wheel slip 점검, 출력 등이다.

4. 실예에대한 적용 및 검토

앞의 프로그램들을 이용하여 서울특별시의 지하철 구간(서울역~청량리)의 전동차를 예로하여 최적감속기어비 및 운행특성을 구하고 이를 현재 사용되고 있는 감속기어비 및 실제운행특성과 비교 검토하였다.

(1) 입력 데이터

프로그램에 입력될 데이터를 요약하면 아래와 같다.

(a) 전동차의 제원

전동차의 단면적 : $A=3.12m \times 2.6m$

T_c car 의 무게 : $W_{Tc}=34.5(\text{ton})$

M car 의 무게 : $W_M=43.5(\text{ton})$

M' car 의 무게 : $W_{M'}=46.5(\text{ton})$

Table. 2. Station-to-station distances

Station-to-station No.	Distances (m)	Station-to-station No.	Distances (m)	Station-to-station No.	Distances (m)	Station-to-station No.	Distances (m)
1	1070	5	820	9	935	13	8702
2	1030	6	1282	10	943	14	800
3	800	7	943	11	1282	15	1030
4	870	8	935	12	820	16	1070

Table. 3. Grade at each station-to-station interval (partially given).

Station-to-station No.	B (m)	GRADE (%°)	B (m)	GRADE (%°)	B (m)	GRADE (%°)	B (m)	GRADE (%°)	B (m)	GRADE (%°)
1	189	5	464	34	878	-21.5	1070	2.6		
2	124	2.6	330	4.3	663	-2	850	-9	1030	-2
3	120	-2	376	-5.5	660	-8	800	1.7		
4	160	1.7	400	10	520	-16	870	-1.1		
5	323	-1.1	570	-6.0	820	-2				

Table 4. Radius of curvature at each station to station interval (partially given).

Station-to-station No.	STHL	ENDHC	RHC	STHC	ENDHC	RHC	STHC	ENDHC	RHC	STHC	ENDHC	RHC
1	284	366	1600	492	698	600	757	967	450			
2	95	313	400	342	595	140						
3	260	400	2000									
4	309	417	3000	534	560	2000						
5	180	330	3000	427	648	420	650	710	900	736	820	1000

총차량무게 : $W_C=249.0(\text{ton})$

총적재하중 : $W_L=56.2(\text{ton})$

(b) 도터의 제원

형칭 : HS-1320-Crb

토크 : $T=(1.08667 \times 10^{15}/N_T^{3.50}) \text{ kg}_f\text{-m}(\text{단 } N_T \geq 1200 \text{ RPM})$

$T=190\text{kg}_f\text{-m}(\text{단 } N_T < 1200\text{rpm})$

출력 : $120\text{kW}(375\text{Volt} \cdot 300 \text{ amp})$

(c) 동력륜 (powered wheel)

반경 : $R=0.43(\text{m})$

마찰계수 : $\mu=0.265 \times \frac{1+0.403V}{1+0.322V}$

(d) 지하철 왕복노선의 각 구간의 거리는 Table. 2와 같다.

(e) 각 구간의 구배는 Table. 3과 같다.

(f) 각 구간의 곡률반경은 Table. 4와 같다.

(2) 최적 감속기어비

건설된 프로그램에 위의 데이터를 입력시켜 계산한 최적 기어비 n_{opt} 는 4.94이었으며 이 때의 총왕복운행 시간(승하차 시간은 제외) t_{opt} 는 1338초 즉 22분 18초이었다. 감속기어비의 변화에 의한 총 왕복운행시간의 변화를 살펴보면 Fig. 6과 같으며 기어비가 운행시간

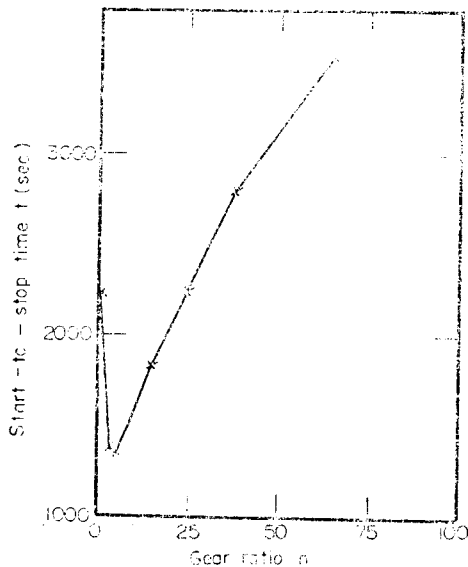


Fig. 6. Gear start-to-stop time.

에 미치는 영향이 지대함을 알 수 있다. Fig.6에서 알 수 있듯이 최적감속기어비는 4.0과 6.0 사이에 존재하

며 이 구간에서의 운행시간의 변화는 Table. 5에서와 같이 거의 변화가 없다. 따라서 주어진 최적기어비(4.0과 6.0 사이)에서 운행조건 즉, 일터데이터(예컨대 적재하중 또는 저항등)가 다소 변동되어도 총운행시간에는 큰 영향을 미치지 않는 것같이 있음을 알 수 있다. 현재 서울 지하철 전동차에 사용되고 있는 감속기어비는 5.80인데 이는 $n_{opt}(=4.94)$ 에 비하여 운행시간이 단지 12초 길어지게 할 뿐이므로 실제로 있어 최적기어비에 가깝다고 할 수 있다.

Table 5. Gear ratio and start-to-stop time

Gear ratio	9.11	5.80	4.97	4.94	4.90	4.85	4.65	4.35	3.54
Start-to-stop time (sec)	1530	1350	1338	1338	1338	1339	1341	1343	1388

(3) 운행특성의 비교

건설된 프로그램 패키지의 타당성을 검증하기 위하여 서울 지하철 전동차의 실제 운행특성과 컴퓨터 출력에 의하여 예측된 운행특성을 아래와 같이 비교하였다.

(a) 미끄럼 (wheel slip)

계산결과에 의하면 서울 지하철 구간에서는 가속 중 미끄럼이 발생하지 않는 것으로 지적되고 있다(만 곡률에 의한 미끄럼은 고려하지 않았음). 실제로도 정상 조건하에서(곡률이 심한 부분에 마모방지를 위하여 레일에 주유를 하는 경우 과도한 주유가 있을 수 있음) 미끄럼이 일어나지 않음을 확인하였다.

(b) 속도제한

제2 및 15구간(시청—종각)에는 Table. 4에서 볼 수 있듯이 급한 커브가 있어 곡률반경이 140m나 되어 전동차를 정상운전(full notch 사용)하면 시청 출발의 경우 출발점에서 302.2m 떨어진 지점에서 운행속도가 56.54 km/hr가 되어 이 지점의 제한속도 35 km/hr를 초과하여 안전운행이 되지 못함을 지적하여 주고 있으며 종각 출발의 경우 출발점에서 452.8m 떨어진 지점에서 운행속도가 56.9 km/hr가 되어 이 지점의 제한속도 35 km/hr를 초과하여 역시 안전운행이 되지 못함을 지적하여 주고 있다. 현재지하철 전동차 운행의 경우 시청—종각 전구간에서 제한속도 35 km/hr를 초과하지 않도록 운전기사가 낮치(notch)로서 속도를 충분히 줄여서 서행 안전운행을 하고 있었다.

(c) 각 구간의 운행시간

Table. 6. Comparison of calculated and measured values of start-to-stop time

Station-to-station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Calculated time (sec)	95.5	87.5	71.6	79.0	73.2	100.6	83.5	81.9	86.2	79.0	99.5	76.3	78.5	74.8	89.4	93.7
Measured time (sec)	92.4	136.5	72.3	79.2	74.4	99.5	84.8	84.5	78.5	80.1	98.8	75.9	77.5	74.7	150.1	131.4

Table. 7. Possible maximum velocity and measured maximum velocity.

Station-to-station No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Possible maximum velocity (km/hr)	69.8	65.1	64.6	61.8	62.4	63.9	56.3	64.0	60.6	64.4	65.2	57.3	62.7	54.9	61.5	71.3
Measured maximum velocity (km/hr)	61	32	62	62	59	59	56	61	61	62	65	57	61	55	35	59

실제의 감속기어비 $n=5.80$ 에 대하여 각 구간의 계산된 운행시간과 실제운행 평균시간(운전실 및 객실에 탑승하여 stop watch로 10차 측정하고 Fig. 7에 보인 전동차 속도기록 테이프 2매에 의하여 측정하였음)을 비교하면 Table. 6과 같다. 우선 16개 구간중 2, 15, 16 구간을 제외한 전 구간에서 계산치와 실측치의 값이 아주 잘 일치하고 있는 것을 알수 있다. 상기 세 구간에서 계산치와 실측치가 큰 차이를 갖는 것은 조사 결과 다음 이유때문인 것으로 밝혀졌다. 우선 2 및 15 구간(시청-종각)에서는 전술 하였듯이 과도한 곡률로 인하여 운전기사가 이 구간내에서는 낮기로 속도를 줄여 항상 35 km/hr 이하의 속도로 서행운전을 하기 때문이다. 따라서 운전기사의 낮기조작을 고려하면 측정치에 가까운 계산치를 얻을 수 있다. 또한 16 구간(시청 출발-서울역 도착)에서는 구배와 남대문의 방진(vibration reduction)을 위한 감속, 진입시의 폐쇄구간의 존재 등으로 서행운전이 실시되고 있음을 확인하였다. 운전기사의 낮기조작에 따라 또는 승객의 다소에 따라 운행시간이 때로는 차이가 있었으나 전반적으로 계산치와 실측치는 잘 일치하고 있었다.

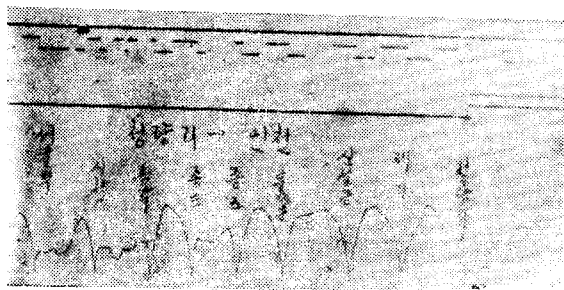


Fig. 7. Velocity recording tape of rapid transit

(d) 각 구간의 최대 주행속도

각 구간에서 가능한 최대 주행속도(계산치)를 실측된 최대주행속도와 비교하면 Table. 7과 같다. Table 7에서 알 수 있듯이 최대가능속도에 거의 도달된 경우는 4, 7, 9, 11, 12, 14의 여섯구간만이 있으며 운전기사는 긴급한 경우를 제외하고는 가능한한 60 km/hr를 훨씬 초과하지 않도록 낮기로 조정하고 있어 정확한 비교는 할 수 없었다.

(e) 평균속도

지하철을 계획할 경우 보통 평균속도를 40~45 km/hr로 내정하는데 이에 위반되는 구간은 2, 15구간을 제외하면 하나도 없는 것이 계산상으로 밝혀졌다.

9. 결 론

참고문헌⁽¹⁾의 전동차에 대한 간략한 모델을 실용적인 문제(다구간, 구배, 곡률, 제한속도 등등)를 풀수 있도록 확장하여 서울특별시 지하철 전동차에 적용하여 최적 감속기어비와 운행 동특성을 계산하여 실제값과 비교한 결과 매우 잘 일치하고 있다. 현급 국내 교통난 해소를 위하여 서울에 대규모 전철을 계획하고 있고 가까운 장래에 지방도시에도 전철이 도입되어야 하므로 전동차의 설계, 지하철 계획에 본 연구 결과가 도움이 될 것으로 믿는다. 본 연구의 컴퓨터 계산은 KIST의 CYBER 컴퓨터로 9 초이내에 수행될 수 있었다.

본 연구에 많은 조언과 자료를 아끼지 않은 철도 차량연구소와 지하철본부 전차과장 배원근씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chales R.Mischke, "An Introduction to computer-aided Design", Prentice Hall 1967.
2. L.A. Suokas and R.C. Flanagan, "Regenerative Drive for Subway Trains," Part II, *A.S.M.E. Transaction*, August 1976
3. W.M. Keller, "Variables in Train Resistance," *A.S.M.E. Paper No. 58-A-265*, November 1958.
4. T. Hara, "Aerodynamic Drag of Trains in Tunnels," Quarterly Report.
5. 久保田, 最新鐵道車輛工學, 交友社, 昭和47年.
6. Jamison, "Fortran IV Programming Based on the IBM System 1130," McGraw-Hill Book Co.
7. 김승우, "전산기 원용 기계설계 I (전동차의 감속기어비의 최적설계)", 서울대학교 학사 졸업논문집 1978.