

시뮬레이션에 의한 고속전철용 집전시스템 매개변수 연구

Simulation-based Parametric Study of the Current Collection System of High Speed Trains

한형석¹
Hyung-Suk Han

Keywords : *Catenary(가선)*, *Pantograph(판토그래프)*, *Contact Loss(이선)*, *Lumped Mass Model(집중질량모델)*, *Central Difference Method(중앙차분법)*

Abstract

In an electric traction system in which power is supplied from a catenary via a pantograph, the mechanical design of the catenary and pantograph is clearly of importance in relation to the problem of current collection at high speed. A computer-simulation technique is used to study the effects of changing parameters of pantograph and catenary on the quality of current collection at high speed. The current collection system is evaluated on the basis of the contact-force variations and displacement responses of the pantograph and contact wire. This study shows that current-collection quality is determined primarily by the overhead line parameters rather than by the pantograph. The results can be applied to optimize the design of current-collection systems.

1. 서 론

고속전철에서의 집전시스템은 가선 (catenary)과 판토그래프(pantograph)로 구성되며, 고속에서의 안정 주행을 위해서는 연속적이고도 일정한 집전 능력이 요구된다. 이를 위하여는 접촉선과 판토그래프 집전판 사이에서의 이선, 접촉력, 판토그래프 변위가 최적 설계되어야 한다. 이선은 연속적인 전력공급을 저해할 뿐만 아니라 아크 발생에 의한 집전판의 마모증대, 통신장애 등의 문제를 야기한다[1]. 가선-판토그래프계 즉 집전시스템에 대한 연구는 30여 년 동안 고속철도의 발전과 더불어 철도 선진 각국에서 연구가 활발하게 진행되어 왔다[2-7]. 국내에서는 90년대 중

반 고속철도개발사업 시작과 함께 연구되어 국산 고속전철에 적용되고 있다. 그런 함수를 이용한 집전계의 동적 모델 연구가 국내의 연구 시작이라고 할 수 있다[8]. 파동의 관점에서 시스템에 대한 특성 파악 및 주요 설계변수들의 영향도를 고찰하기도 하였다[9-10]. 이전의 방법과는 다르게 유한요소법을 이용한 동특성 해석이 국내에서도 수행되었다[11]. 이와 같은 연구에서 집전 시스템의 모델링 방법과 주요 설계변수의 집전 품질 영향도가 일부 설계 변수에 대하여 이루어졌다. 본 논문에서는 이미 개발된 동적 시뮬레이션 방법을 적용하여 집전시스템을 구성하는 15개의 설계변수 즉 매개변수의 변화에 대한 집전 성능 영향을 고찰하는데 목적이 있다. 적용된 시뮬레이션 기법은 집중질량 모델 기법이며 수치적분은 중앙차분법을 이용한다. 연속체인 가선계는 분포 집중질량계로, 판토그래프는 3 자유도로 가정하여 모델한다. 해석 모델을 이용하여 집전시스템을 구성하는 매개변수들에

¹ 정회원, 한국기계연구원, 선임연구원

대한 동적 영향을 분석하여 고속전철의 속도 향상을 위한 집전시스템의 설계방향을 제시한다.

1. 집전시스템 구조

고속전철의 집전시스템은 전력을 공급하는 가선계와 집전하는 판토티그래프로 구성된다.

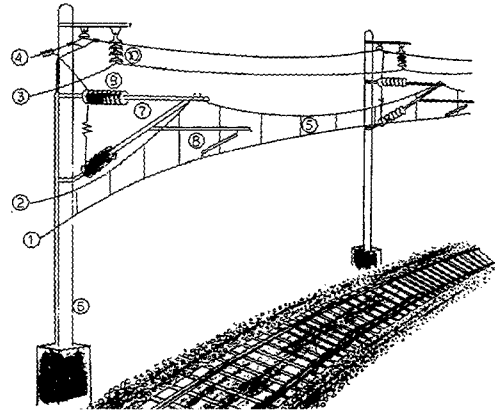
2.1 가선계

고속전철용으로 이용되는 가선계의 대표적인 형식 중의 하나인 단순가선계는 Fig. 1에서와 같은 구조이며, 경부고속전철에도 적용된다. 가선계의 구성 부품으로는 접촉선(contact wire), 현수선(messenger wire), 행거선(hanger), 자동 장력 조정 장치(automatic tensioning device), 가동브래킷(moving bracket), 금구류(fittings) 등이 있다. 접촉선은 판토티그래프와 직접 접촉하여 전류를 공급하며 전도 및 내부식성이 우수한 재료인 동선(Cu)이 많이 이용된다. 접촉선의 파동전파속도는 차량의 최고속도를 결정하는 주요 요인이며 접촉선의 선밀도와 장력에 의해 결정된다. 현수선은 접촉선을 수평으로 유지하기 위하여 가설되며 주로 청동(bronze)을 이용한다. 행거는 접촉선과 현수선을 연결해 주며 강도가 큰 내부식성 재료를 사용한다. 이선에 영향을 주는 행거의 간격은 동적 해석을 통하여 적절히 조정되어야 한다. 자동장력조정장치는 온도 변화에 관계없이 접촉선과 현수선에 동일한 장력을 유지해주는 기능을 갖으며 활차선(wheel), 중추(balance weight)로 구성되어 있다. 가동브래킷은 접촉선에 스테거링(staggering)을 주기 위하여 이용된다. 이상의 부품들은 판토티그래프와 연성을 일으켜 이선에 영향을 주기 때문에 가선계의 동적 설계를 통하여 이러한 부품들의 위치, 특성들을 적절하게 결정해야 한다.

2.2 판토티그래프

Fig. 2는 경부고속전철에서 이용되고 있는 판토티그래프로써 일명 GPU(Grand Plunger Unique) 형 판토티그래프라 한다. 판토티그래프에는 전력을 인입하기 위한 집전판 및 지지 스프링, 저주파 충격을 흡수하기 위한 댐퍼, 상승/하강을 위한 스프링, 공기 구동기 등이 있다. 구성 부품의 질량, 스프링 탄성 및 댐퍼의 감쇠특성이 판토티그래프의 동특성을 결정하며 결과적

으로 이선과 접촉력에 영향을 주게 된다. 또한, 고속주행시 양력으로 인한 수직 방향의 힘이 크게 증가함으로 판토티그래프의 공력 설계도 고속전철에서는 매우 중요하다.



번호	명칭	번호	명칭
①	접촉선	⑥	전주
②	현수선	⑦	가동브래킷
③	금전선	⑧	금구
④	보호선	⑨	장간애자
⑤	행거선	⑩	현승애자

Fig. 1 Structure of the catenary system

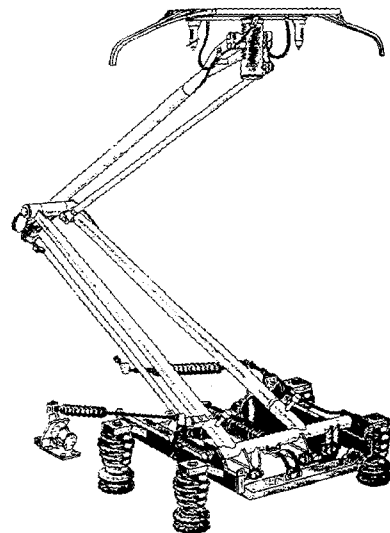


Fig. 2 GPU type pantograph

3. 동적 시뮬레이션 방법

가선계는 연속계이나 본 논문에서는 집중질량 모델을 이용하여 운동방정식을 구한다. 운동방정식의 적분은 중앙차분법을(central difference method) 이용한다. 가선계에 대한 동적 모델을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 이용한다.

- (a) 가선계의 접촉선, 현수선은 굽힘 모멘트를 받지 않는 현(string)으로 가정한다.
 - (b) 접촉선, 현수선은 상하 진동만 한다.
 - (c) 가선은 연속계이나 유한개의 집중질량으로 가정한다.
 - (e) 현의 양 끝단은 고정되어 있다.
 - (f) 한 질량의 강성은 상호 이웃하는 질량의 변위차에 의해서만 영향을 받는다.
 - (g) 가선계의 감쇠는 점성 감쇠이다.
- 이상의 가정을 이용하면 가선계를 Fig. 3과 같은 동적 해석 모델로 바꿀 수 있다.

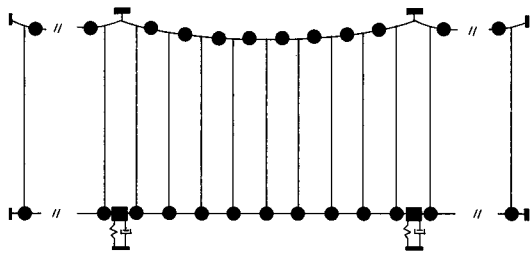


Fig. 3 Dynamic model of the catenary system

임의의 질량 m_i 에 대한 운동방정식은 상하변위 y_i 에 대하여 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 y_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \{ Z_{n1}(t) + Z_{n2}(t) + F_i(t) \}, \quad (1)$$

$i = 1, N, N: \text{number of masses}$

식(1)에서 $Z_{n1}(t)$ 는 이웃 질량과의 변위차가 있는 경우 장력으로 인한 복원력이며 다음 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$Z_{n1}(t) = - \sum_j \frac{T_j (y_i(t) - y_j(t))}{l_j} \quad (2)$$

$j = i-1, i+1$

여기서, l_j : distance between i and j

T_j : tension force between i and j

식(1)에서 $Z_{n2}(t)$ 는 감쇠력으로써 이웃 질량과의 상대속도에 의하여 결정되며 식(3)과 같다.

$$Z_{n2}(t) = - \sum_j C_j \{ \dot{y}_i(t) - \dot{y}_j(t) \} \quad (3)$$

$j = i-1, i+1$

여기서, C_j : damping constant

식(1)에서 $F_i(t)$ 는 접촉선과 판토틀라프 사이의 접촉력이다.

판토틀라프는 1, 2 또는 3 자유도의 집중질량으로 모델링될 수 있다. 본 연구에서 사용하는 판토틀라프 모델은 3개의 질량을 갖는 선형모델이며, Fig. 4에 나타내었다.

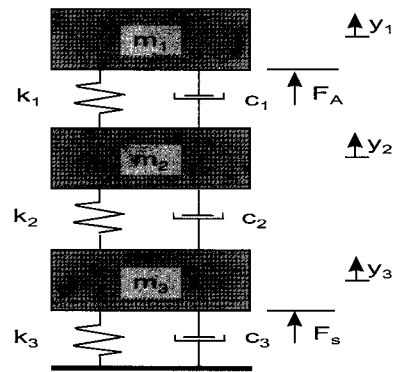


Fig. 4 3 DOF pantograph model

양력은 F_A 로서 $F_A = k_a V^2$ 이며 V 는 차량의 속도, k_a 는 양력계수이다. 집전시스템의 동적 시뮬레이션에서 중요한 것 중 하나는 접촉선과 판토틀라프 사이의 접촉력을 정확히 구하는 것이다. 접촉력을 구하는 방법은 다음과 같다. 설명의 편의를 위하여 판토틀라프는 Fig. 5와 같은 1자유도라고 가정한다. 그러나 매개변수 분석 시뮬레이션에서는 판토틀라프를 3자유도로 모델링하였다. 판토틀라프에 미지의 접촉력 $P_m(t)$ 가 작용한다고 가정하면, 1자유도 판토틀라프에 대한 운동방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{d^2 Y(t)}{dt^2} = \frac{1}{M_p} \{ P_o(t) - P_m(t) \} \quad (4)$$

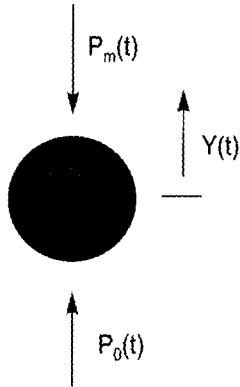


Fig. 5 1 DOF pantograph model

판토타그래프의 이동에 따른 접촉선과의 접촉거리 관계는 Fig. 6과 같다고 가정한다. 식(1), (4)로부터 질량과 판토타그래프의 위치와 속도를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

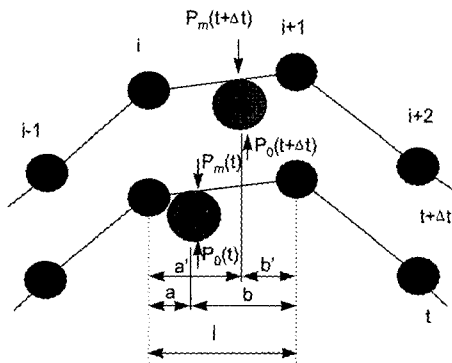


Fig. 6 Contact relation in simulation

식(5)~(6)은 집중질량화 된 가선의 운동방정식을 구성하게 된다.

$$y_k(t + \Delta t) = y_k(t) + \dot{y}_k(t) \Delta t + \frac{1}{2} \left\{ \frac{Z_k(t)}{m_k} (\Delta t)^2 + \frac{F_k(t)}{m_k} (\Delta t)^2 \right\} \quad (5)$$

$$\dot{y}_k(t + \Delta t) = \dot{y}_k(t) + \frac{Z_k(t)}{m_k} \Delta t + \frac{F_k(t)}{m_k} \Delta t \quad (6)$$

여기서,

$$Z_k(t) = Z_{k1}(t) + Z_{k2}(t), \quad k = i, i + 1$$

Fig. 5와 같은 판토타그래프의 운동방정식은 식(7)~(9)으로 표현된다.

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + \dot{Y}(t) \Delta t + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{M_p} \{P_o(t) - P_m(t)\} (\Delta t)^2 \right\} \quad (7)$$

$$\dot{Y}(t + \Delta t) = \dot{Y}(t) + \frac{1}{M_p} \{P_o(t) - P_m(t)\} \Delta t \quad (8)$$

$$Y(t + \Delta t) = r y_i(t + \Delta t) + \delta y_{i+1}(t + \Delta t) \quad (9)$$

여기서,

$$r = b(t + \Delta t)/l, \quad \delta = a(t + \Delta t)/l$$

그리고 $F_k(t)$ 는 선형보간법으로 식(10)과 같이 계산한다.

$$F_k(t) = \begin{cases} \alpha P_m(t) & (k = i) \\ \beta P_m(t) & (k = i + 1) \\ 0 & (\text{others}) \end{cases} \quad (10)$$

여기서,

$$\alpha = b(t)/l$$

$$\beta = a(t)/l$$

식(10)을 식(5)에, (5),(7)를 (9)에 대입하면 $P_m(t)$ 는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$P_m(t) = \frac{\dot{Y}(t) + \frac{P_o}{M_p} \Delta t - \frac{D(t)}{\Delta t}}{\frac{\Delta t}{m_i} (\alpha r + \beta \delta) + \frac{\Delta t}{M_p}} \quad (11)$$

여기서,

$$D(t) = r \left\{ y_i(t) + \dot{y}_i(t) \Delta t + \frac{1}{m_i} Z_i(t) (\Delta t)^2 \right\} + \delta \left\{ y_{i+1}(t) + \dot{y}_{i+1}(t) \Delta t + \frac{1}{m_i} Z_{i+1}(t) (\Delta t)^2 - Y(t) \right\} \quad (12)$$

접촉력은 초기조건과 식(10)의 제약 식으로부터 결정된다. 만일 $P_m(t) > 0$ 이면 판토타그래프와 접촉선이 접촉한 것으로 본다. $P_m(t) < 0$ 이면 비접촉 상태로 취급하면서 $P_m(t) = 0$ 로 정한다. 이상의 식에 대한 수치해를 구하면, 접촉력, 이선율, 가선 및 판토타그래프의 진동응답 등을 시뮬레이션할 수 있다.

4. 매개변수 분석

집전시스템의 동적 시뮬레이션은 3장의 시뮬레이션 방법을 바탕으로 하는 "가선도- S2" 프로그램을 이용하였다[12]. 본 논문에서 시뮬레이션에 이용되는 초기 모델은 경부고속전철 집전시스템의 시방에 기초하여 설정되었다. 다만, 차량의 속도를 경부고속전철의 운행속도보다 높은 350 km로 정하였다. 초기 모델의 집전시스템 시방은 Table 1, Table 2와 같다. Table 1, Table 2의 물성 값을 이용하여 초기 모델에 대한 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 이선율은 0.95 % 이었다. Fig. 7은 접촉력으로써 평균접촉력은 231 N, 표준편차는 64 N 이었다. Fig. 8은 판토틀 그래프의 변위으로써 평균은 126 mm, 표준편차는 20 mm 이었다. 시뮬레이션에 의하여 예측된 평균접촉력과 판토틀 그래프의 변위는 경부고속전철에서의 설계치보다 큰 값으로서 이는 차량의 설계 속도가 300 km/h에서 350 km/h로 증가되었기 때문이다. 이 해석을 통하여 초기 모델인 경부고속전철의 속도를 350 km/h로 향상시키면 그에 따라 집전시스템 동적 상호작용이 변하여 접촉력의 경우 경부고속전철의 공칭 값 180 N보다 증가된 231 N을 보인다. 접촉력이 증가하면 그에 따라 집전판 마모 증가가 예상된다.

Table 1 Specification of the catenary

항목	값	항목	값
스팬거리(m)	63	접촉선장력(N)	20000
행거수	9	현수선장력(N)	14000
접촉선밀도(kg/m)	1.334	행거질량(kg)	0.36
현수선밀도(kg/m)	0.605	금구질량(kg)	0.87

Table 2 Specification of the GPU type pantograph

항목	값	항목	값
m1 (kg)	8.1	c1 (Ns/m)	130
m2 (kg)	8.0	c2 (Ns/m)	36
m3 (kg)	23.1	c3 (Ns/m)	5
k1 (N/m)	9000	양력계수 kA	0.019
k2 (N/m)	1200	(N/(m/sec) ²)	
k3 (N/m)	6876	차량속도	350
		(km/h)	

집전시스템의 설계시 이선율을 최소로 해야함은 물론 접촉력 및 접촉력 표준편차를 적절한 값을 유지함으로써 접촉선의 마모 및 피로 저감을 달성해야 한다.

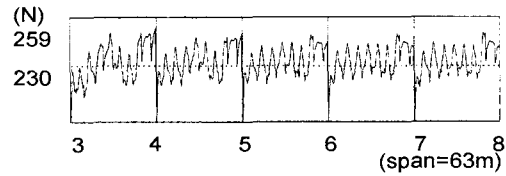


Fig. 7 Contact force

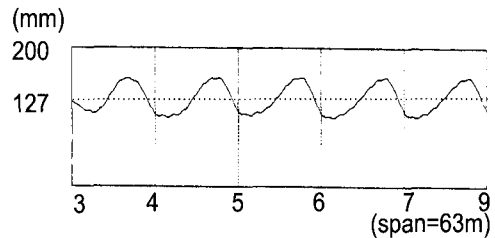


Fig. 8 Displacement of the pantograph

집전시스템을 구성하는 매개변수들의 변화에 의한 동적 응답 특성을 파악하기 위하여 Table 3과 같이 중요한 매개변수 15개를 선택하였다. 그리고 각 매개변수를 +20%, -20% 만큼 변화시켜 해석하였다. 단 매개변수 중 스패너리는 구조상 +14%, -28% 만큼 변화시켰다. Fig. 9는 각 변수의 변화에 따른 이선율을 보여주고 있다. 이선율은 판토틀 그래프 매개변수 보다는 가선의 매개변수 영향을 상대적으로 많이 받는 것을 알 수 있다. 접촉선밀도는 작을 수록, 접촉선 장력은 클 수록 이선율이 저감되는 것을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 접촉력에 관계된 결과로써 평균 접촉력의 변화에 대하여는 스패너리, 행거수, 판토틀 그래프 k_2 , 판토틀 그래프 k_3 가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 판토틀 그래프 k_2 는 작을 수록, 판토틀 그래프 k_3 는 클 수록 평균접촉력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 접촉력의 최대 값에 대하여는 행거수의 영향이 가장 큰 것을 볼 수 있다. Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15는 판토틀 그래프의 변위응답 결과이다. 판토틀 그래프의 변위는 스패너리, 행거수, 접촉선 밀도, 접촉선 장력, 판토틀 그래프 k_2 , 판토틀 그래프 k_3 의 영향이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 스패너리, 행거수, 접촉선 밀도, 접촉선 장력, 판토틀

그래프 k_3 는 증가할 수록, 판토크라프 k_2 는 감소할 수록 변위가 감소함을 알 수 있다. 변위 표준편차는 스펠 거리, 행거수가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 최대 변위는 스펠거리, 행거수, 판토크라프 k_2 , 판토크라프 k_3 이 상대적으로 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 이상의 결과를 분석할 때, 가선의 매개변수인 스펠거리, 행거수, 접촉선 밀고, 접촉선 장력의 영향도가 크고 판토크라프에서는 k_2, k_3 만이 주로 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Table 3 Parameters

항목	초기값의 -20%	초기값	초기값의 +20%
A(스팬거리)	45(-28%)	63	72(14%)
B(행거수)	7	9	11
C(접촉선밀도)	1.07	1.334	1.6
D(접촉선장력)	16000	20000	24000
E(행거질량)	0.288	0.36	0.432
F(금구질량)	0.696	0.87	1.044
G(m1)	6.48	8.1	9.72
H(m2)	6.4	8.0	9.6
I(m3)	18.48	23.1	27.7
J(k1)	7200	9000	10800
K(k2)	960	1200	1440
L(k3)	5500	6876	8251.2
M(c1)	104	130	156
N(c2)	28.8	36	43.2
O(c2)	4	5	6

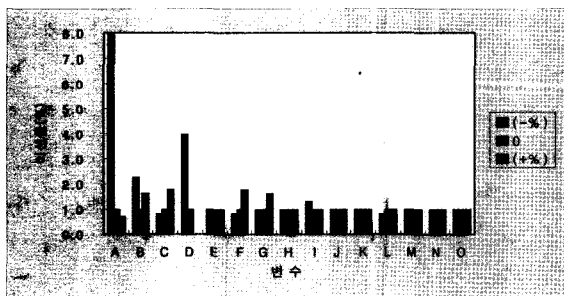


Fig. 9 Contact loss

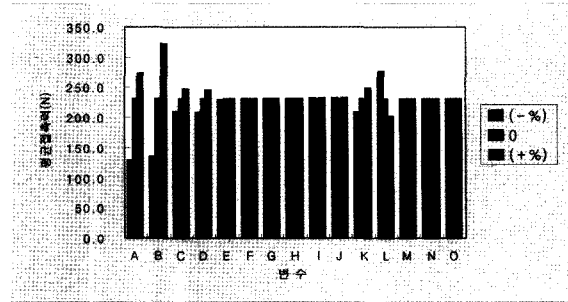


Fig. 10 Average contact force

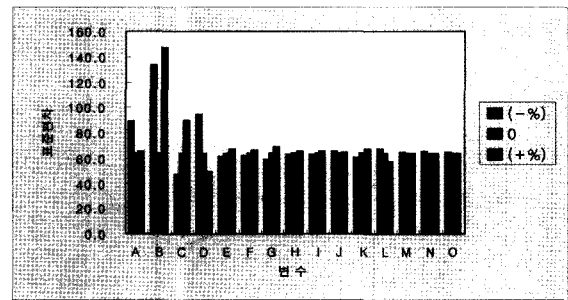


Fig. 11 Standard deviation of contact force

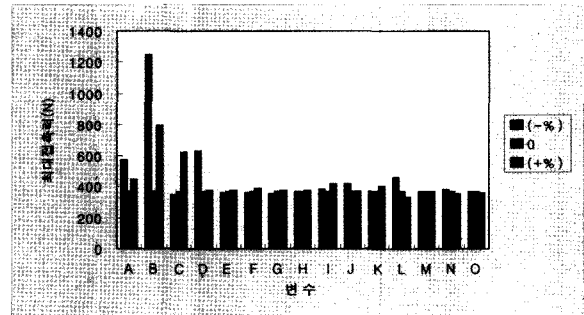


Fig. 12 Maximum contact force

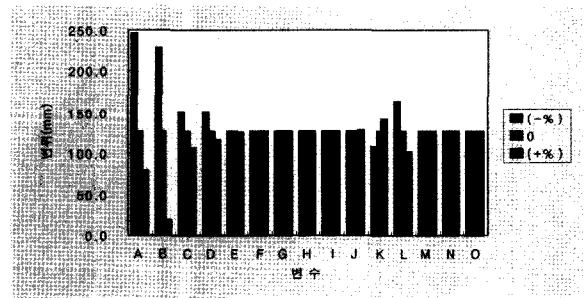


Fig. 13 Displacement of the pantograph

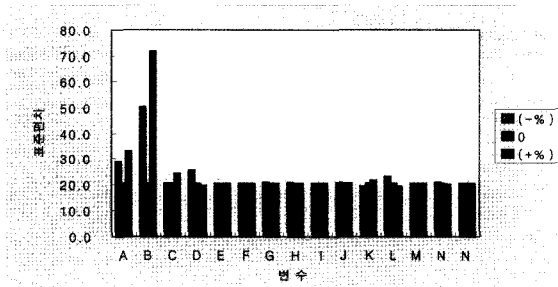


Fig. 14 Standard deviation of the displacement

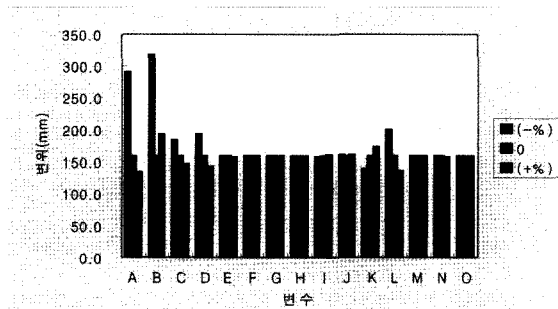


Fig. 15 Maximum displacement of the pantograph

5. 결론

이상과 같이 집전시스템의 동적 시뮬레이션을 통해 매개변수의 영향도를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 이선율에는 판토티그래프 보다 가선의 영향이 크며 스패너리를 크게 할 수록, 접촉선 밀도, 금구질량은 작을수록 이선율이 감소한다.
- (2) 접촉력의 변동은 스패너리, 행거수, 접촉선 밀도, 판토티그래프 질량, 판토티그래프의 k2의 영향이 크다.
- (3) 판토티그래프 변위는 스패너리, 행거수, 접촉선 밀도, 접촉선 장력, 판토티그래프 강성계수 k2, k3 의 영향이 크다.

참고 문헌

1. "고속전철 핸드북", 고속전철 건설공단
2. 眞鍋克十, "Japanese Railway Research Review", pp. 46-56, 1989
3. P. Defosse and B. Sauvestre, "French Railway Review", Vol. 1, No. 6, 1983
4. T. Vinayalingam, "Computer Evaluation of Controlled

- Pantographs for Current Collection From Simple Catenary Overhead Equipment at High Speed", J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 105, pp. 287-295, 1983
5. Mitsuo Aboshi and Issei NAKAI, "Reduction of Catenary Vibration in High Speed Running", RTRI Report, Vol. 9, No. 9, pp. 31-39, 1995
6. Klaus Becker and Uwe Resch, "Contact Force Simulation and Study of the Wear Behaviour of High Speed Catenaries", WARSCHIA, DOC/24.05.95, pp. 20-30, 1995
7. Katsushi Manabe, "High-Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System", JSME International Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 31-40, 1989
8. 임진수, "그린 함수를 이용한 가선-판토티그래프계의 운동 해석", 대한기계학회논문집 제17권 8호, pp. 1438-1445, 1992
9. 김양한, 박연규, 김시문, 노현석, "임의의 경계조건을 갖는 가선계의 파동 현상에 대한 고찰", 대한기계학회논문집 제16권 11호, pp. 2059-2071, 1992
10. 박수경, 김시문, 김양한, "임의의 임피던스를 갖는 단순 현가방식 가선계의 파동현상", 대한기계학회논문집(A) 제 20권 11호, pp. 2059-2071, 1996
11. 김진수, 최병두, "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회지 제9권 제2호, pp. 317-323, 1999
12. "가선도 -S2; 가선/판토티그래프 시스템 시뮬레이터", 철도종합기술연구소, 일본, 1994