

모드중첩법을 기초로 한 집전성능해석 프로그램 개발

Development of a Dynamic Simulation Program for Pantograph-Catenary System based on a Mode Superposition Method

조용현,* 이기원,** 현승호,*** 정홍채***
Yong Hyeon Cho, Kiwon Lee, Hyun, Seung-Ho, Heungchai Chung

ABSTRACT

A dynamic simulation program for pantograph-catenary system is developed based on a mode superposition method to predict current collection performance. Formulations for the dynamic simulation are presented in this paper. The number of modes which should be considered for a KTX catenary system is reviewed through frequency response analyses. The responses for GPU pantograph - KTX catenary system are simulated with various train speeds. The our simulation results are in reasonably good agreements with RTRI simulation program, SNCF simulation program, and BR simulation program.

1. 서론

집전 성능은 철도의 속도 향상을 위하여 반드시 확보해야 할 중요 성능으로 차량에 설치된 팬터그래프와 공중에 설치되어 있는 전차선의 동력학적 상호작용에 의하여 결정된다. 단순한 해석적 방법으로는 집전 성능을 정확히 예측하기 곤란하므로 유한 차분법, 유한 요소법, 모드중첩법 등의 여러 가지 수치 해석적 방법을 사용하여 집전 성능을 예측하려는 노력이 시도되어 왔다.

본 논문에서는 집전 성능 예측을 위하여 시도되었던 모드중첩법[1]을 기초로 하여 고속용 가선계에서의 집전 성능 예측을 할 수 있도록 시뮬레이션에 필요한 정식화(formulations)를 수행하였다. 가선계는 선형 시스템이라고 가정하여 가선계의 거동을 모드 중첩으로 표현하였고, 팬터그래프는 3개의 질량을 갖는 3 자유도로 모델링하였는데 필요시 비선형 댐퍼와 범프 스톱과 같은 비선형 요소를 반영할 수 있게 하였다. 모드중첩법에서는 구조물의 동특성을 정확히 묘사하기 위하여 충분한 수의 고유모드를 고려해야 한다. 본 논문에서는 실제 고속용 가선계를 대상으로 주파수 응답 특성 등을 분석하여 시뮬레이션에 필요한 고유모드의 개수를 정하였다. 본 연구를 통해 개발된 해석 결과의 정확도를 검토하기 위하여 GPU 팬터그래프와 KTX 가선계를 대상으로 한 시뮬레이션 결과를 일본 RTRI 시뮬레이션 프로그램, 프랑스 SNCF 시뮬레이션 프로그램, 영국 BR 시뮬레이션 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하여 보았다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국철도기술연구원 연구원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원

2. 정식화

2.1 가선계 모델 및 운동방정식

n 개의 자유도를 가진 시스템은 n 개의 고유모드를 가지고 있다. 각각의 모드는 고유진동수(ω)와 고유모드모양(ϕ)으로 표현된다. 선형 동역학 시스템에서의 모드모양은 직교(orthogonal)하므로 이를 시스템 변위를 표현하는 Base vector로 사용할 수 있다. 가선계와 같은 동적 시스템의 변위는 위치와 시간의 함수이므로 위치의 함수인 고유모드와 시간의 함수인 모드크기(modal amplitude)의 곱으로 이루어진 항들의 선형 조합으로 표현할 수 있다[2].

$$y(x, t) = \sum z_i(t) \phi_i(x) \quad (1)$$

여기서 $y(x,t)$ = 시스템 변위

$\phi(x)$ = i 번째 고유모드모양

$z_i(t)$ = i 번째 모드의 모드크기

i = 모드번호

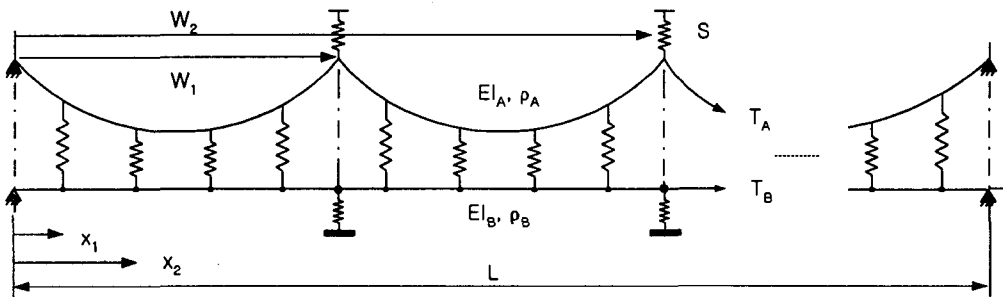


그림 1 가선계의 수학적 모델

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 가선계의 양단에서는 회전은 가능하나 변위는 0이므로 이러한 경계 조건을 만족시키기 위하여 가선계의 변위를 유한개수의 sine 함수를 중첩한 푸리에 시리즈(Fourier series)로 나타낼 수 있다.

$$\text{조가선 } y(x, t) = \sum A_m(t) \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \quad (2-a)$$

$$\text{전차선 } z(x, t) = \sum B_m(t) \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \quad (2-b)$$

여기서 A_m, B_m = 조가선 및 전차선의 m 번째 사인함수의 크기(amplitude)

A_m, B_m 을 정하기 위하여 라그랑지 방법(Lagrange method)을 사용하여 A_m, B_m 을 일반 좌표로 하는 가선계의 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{A}_m} \right) - \frac{\partial L}{\partial A_m} = 0 \quad (3-a)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{B}_m}\right) - \frac{\partial L}{\partial B_m} = 0 \quad (3-b)$$

여기서 $L=T-V$

$$T = T_{cat} + T_{mas} + T_{dropper} + T_{arm}$$

T_{cat} = 전차선 질량으로 인한 운동에너지

T_{mas} = 조가선 질량으로 인한 운동에너지

$T_{dropper}$ = 드로퍼 질량으로 인한 운동에너지

T_{arm} = 곡선당김금구 질량으로 인한 운동에너지

$$V = V_{tension} + V_{bending} + V_{dropper} + V_{tower} + V_{arm}$$

$V_{tension}$ = wire 장력으로 인한 위치에너지

$V_{bending}$ = Wire의 굽힘강성으로 인한 위치에너지

$V_{dropper}$ = 드로퍼 스프링으로 인한 위치에너지

V_{tower} = 전주 스프링에 의한 위치에너지

V_{arm} = 곡선당김금구의 스프링 효과에 의한 위치에너지

유도된 가선계 운동방정식으로부터 가선계의 조화 운동을 가정하여 고유진동수 및 고유모드모양을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_i = \sum_{m=1}^M A_{im} \sin\left(\frac{m\pi X_A}{L}\right) + \sum_{m=1}^M B_{im} \sin\left(\frac{m\pi X_B}{L}\right) \quad (4)$$

여기서 M 은 사용되는 sine함수의 개수

A_{im} 과 B_{im} 은 가선계의 고유벡터이다.

시스템의 고유모드모양이 일단 알려지면 식(1)로 표현되는 시스템 변위를 운동방정식에 대입하여 모드별 운동방정식을 얻게 된다.

$$M_i \ddot{z}_i + 2\zeta_i \omega_i M_i \dot{z}_i + \omega_i^2 M_i z_i = Q_i \quad (5)$$

여기서 M_i = i 번째 모드 질량

ζ_i = i 번째 모드 댐핑계수

ω_i = i 번째 고유 진동수

z_i = i 번째 모드 크기

Q_i = i 번째 모드 하중

이 방정식은 선형 2계 미분방정식으로 모드별로 독립적으로 고려할 수 있다. 즉 시스템의 운동방정식이 모드별로 decoupled 된다. 상기 미분방정식은 4th order Runge-Kutta 방법을 사용하여 해를 구한다. 이 때 외력은 팬터그래프에 의한 접촉력(fc)으로 가선에 작용하는 접촉력과는 방향이 반대이고 크기는 같다.

$$fc = ks*(\text{팬터그래프 헤드 변위} - \text{전차선 변위}) + \text{정적압상력} + \text{공력} \quad (6)$$

여기서 fc = 접촉력

ks = 가상 스프링의 스프링계수

전차선 변위 = 사전이도(Presag)가 고려된 정적 변위 + 동적 변위

고속용 가선계에서는 접촉력이 어느 이상 커지게 되면 팬터그래프가 지나가는 근방의 위치에 있는 드로퍼가 느슨해질 수 있다. 드로퍼가 느슨해지면 드로퍼 강성은 0이 되게 된다. 54 m 경간 KTX 가선계에 대한 구조해석 결과에 따르면 팬터그래프가 드로퍼의 위치에 있을 때에는 접촉력이 160 N을 초과하면 드로퍼가 느슨하게 되며, 팬터그래프가 드로퍼 사이의 중간 위치에 있을 때에는 접촉력이 300 N정도가 되면 드로퍼가 느슨하게 된다. 고속 가선계에서의 이러한 비선형 특성을 정확히 고려하기 위하여 매 계산 스텝마다 느슨해진 드로퍼를 찾아 그것의 강성을 0으로 놓고 고유모드를 다시 계산하여 시뮬레이션을 해야만 한다. 특정 드로퍼의 느슨함으로 인한 가선계의 고유진동수 변화는 저주파 쪽보다는 가선의 거동에 상대적으로 영향을 덜 주는 고주파 쪽에 있을 것으로 생각되며, 매 스텝마다 고유모드를 해석해야 하면 계산량이 너무 많아지는 문제가 있으므로 본 논문에서는 드로퍼의 느슨해짐을 고려하지 않았다.

2.2 팬터그래프 모델 및 운동방정식

팬터그래프 모델은 다음과 같다.

- 팬터그래프 질량들간의 움직임은 주어진 행정(stroke) 내에서 제한된다.
- 헤드 아래에 모델링 되어있는 댐퍼들은 작용 방향에 따라 비선형적인 거동을 한다.

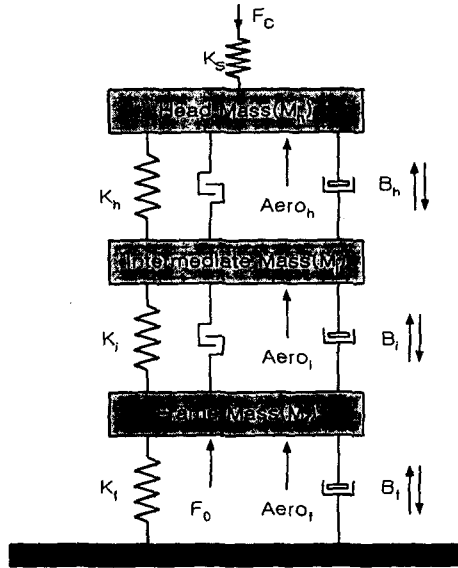


그림 2 팬터그래프의 수학적 모델

$$m_h \ddot{y}_h = -k_h(y_h - y_i) - B_h(\dot{y}_h - \dot{y}_i) - f_c + Aero_h \quad (7-a)$$

$$m_i \ddot{y}_i = k_h(y_h - y_i) + B_h(\dot{y}_h - \dot{y}_i) - k_i(y_i - y_f) - B_i(\dot{y}_i - \dot{y}_f) + Aero_i \quad (7-b)$$

$$m_f \ddot{y}_f = k_i(y_i - y_f) + B_i(\dot{y}_i - \dot{y}_f) + f_0 + Aero_f - k_f y_f - B_f \dot{y}_f \quad (7-c)$$

$$(y_h - y_i) \leq bump\ stop_1, \quad (y_i - y_f) \leq bump\ stop_2$$

B_f, B_i, B_h 의 값은 댐퍼의 작용 방향에 따라 그 값을 달리함.

3. 해석 결과 및 토의

3.1 고유모드 해석

그림 3에 나와 있는 KTX 가선계(경간길이 54m)를 대상으로 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하여 드로퍼가 느슨해짐을 고려하지 않은 경우에 대하여 고유모드를 계산해 보았다. 계산 결과를 검증하기 위하여 드로퍼가 느슨해짐을 고려하는 경우와 고려하지 않는 2 가지 경우에 대하여 ABAQUS를 사용하여 고유모드를 구해 보았다.



그림 3 가선계 유한요소 모델

KTX 가선계에 대한 고유진동수 및 모드모양에 대한 계산 결과가 표 3 및 그림 4에 나와 있다. 고유진동수 계산 결과는 sine 항의 개수를 증가시키에 따라서 유한 요소법으로 계산된 결과에 가까워지며, 3경간에 대하여 sine 항의 개수를 50개로 하면 적절한 수준의 정확도로 고유진동수를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 개발 프로그램에서 구한 모드 모양은 ABAQUS에서 구한 모드 모양과 거의 비슷함을 그림을 통해서 알 수 있다.

드로퍼의 느슨함을 고려하여 계산한 고유진동수를 살펴 보면 저차 진동모드에서는 드로퍼의 느슨함을 고려하지 않은 경우와 거의 같으나 고차 진동모드에서는 일부 차이가 남을 알 수 있다. 드로퍼가 느슨해짐에 따라서 주변 드로퍼 사이의 간격이 커지게 되어 새로운 고차모드가 생기게 되는 것으로 보인다. 새로 발생하는 고차모드의 영향을 분석하기 위하여 드로퍼의 느슨함을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 가선계의 주파수 응답 특성을 ABAQUS를 사용하여 구해 보았다. 그 결과가 그림 5에 나와 있는데 저차 모드에서는 주파수 응답 특성이 거의 일치하나 모드 17, 18(5.92, 6.15 Hz)의 고차 모드에서는 차이를 보인다.

모드중첩법에서는 고려해야 할 진동모드의 차수를 결정하는 기준으로서 모드유효질량(Modal effective mass)을 사용할 수 있다. 고려하는 모드까지의 유효질량의 합이 실제 질량에 가까우면 가까울수록 동적 특성을 정확히 표현할 수 있다고 한다[3]. ABAQUS를 사용하여 계산한 모드유효질량 계산 결과는 표 4에 나와 있다.

드로퍼의 느슨함을 고려한 경우나 고려하지 않은 경우에 있어서 모드유효질량이 크게 다르지 않으며, 고려 차수를 11차까지 한 것이나 20차까지 한 것이 큰 차이를 보이고 있지 않으므로 본 논문에서는 계산의 효율성을 고려하여 모드유효질량이 약 95%가 되도록 고유모드의 차수를 동적 시뮬레이션을 위하여 선택하였다.

표 3 KTX 가선계 고유진동수 계산결과

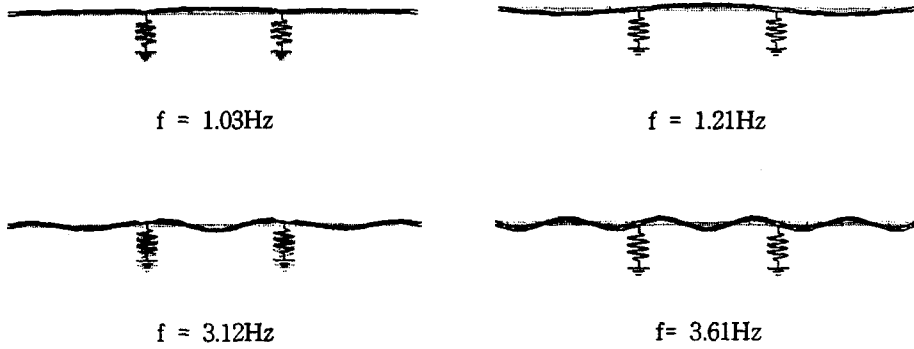
[단위 : Hz]

고유진동 모드	ABAQUS		개발 프로그램에서 사용한 사인함수 개수		
	경우1	경우2	30	50	100
1	1.03	1.03	1.15	1.08	1.06
2	1.14	1.14	1.19	1.16	1.16
3	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
4	2.08	2.08	2.30	2.14	2.12
5	2.28	2.28	2.38	2.32	2.31
6	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42
7	3.12	3.12	3.42	3.20	3.18
8	3.40	3.40	3.56	3.45	3.44
9	3.61	3.61	3.63	3.62	3.62
10	4.19	4.18	4.54	4.26	4.23
11	4.52	4.52	4.73	4.57	4.55
12	4.80	4.79	4.82	4.81	4.81
13	5.00	5.01	5.48	5.31	5.29
14	5.26	5.25	5.74	5.65	5.62
15	5.55	5.56	5.99	5.96	5.93
16	5.61	5.60	6.32	6.27	6.20
17	5.94	5.92	6.49	6.41	6.28
18	6.34	6.15	6.60	6.51	6.37
19	6.69	6.43	7.04	6.76	6.63
20	7.09	6.71	7.15	6.94	6.87

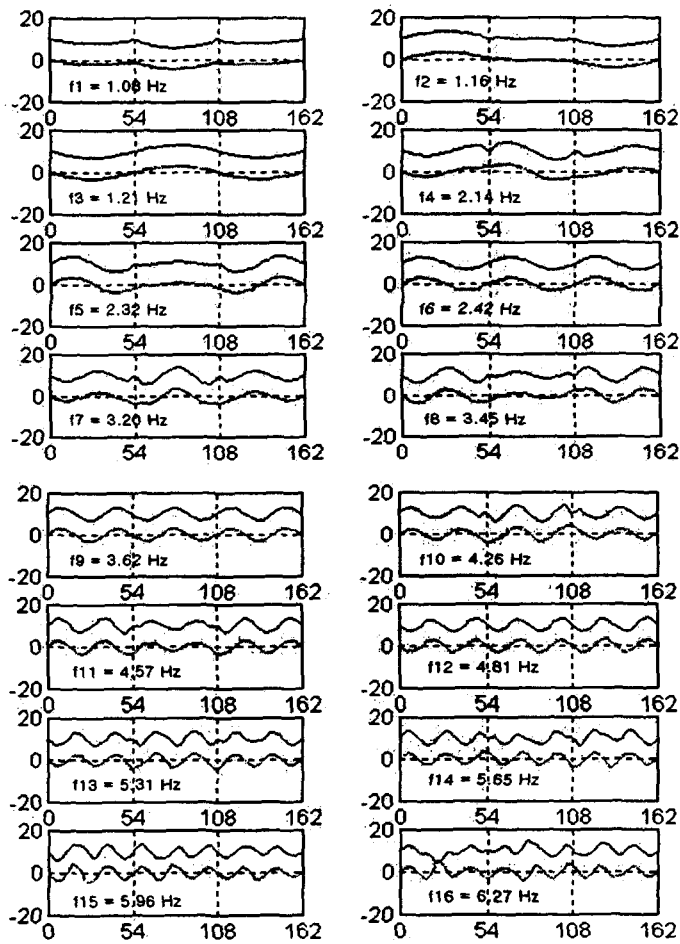
경우 1 : 드로퍼 느슨함 미고려, 경우 2 : 드로퍼 느슨함 고려

표 4 모드유효질량 계산 결과

고려 차수	실제질량 (kg)	드로퍼의 느슨함 미고려		드로퍼의 느슨함 고려	
		모드유효질량 (kg)	모드유효질량 /실제질량(%)	모드유효질량 (kg)	모드유효질량 /실제질량(%)
		1- 11	322.7	304.9	94.5
1- 14	322.7	309.3	95.8	308.9	95.7
1- 20	322.7	311.2	96.4	310.9	96.3

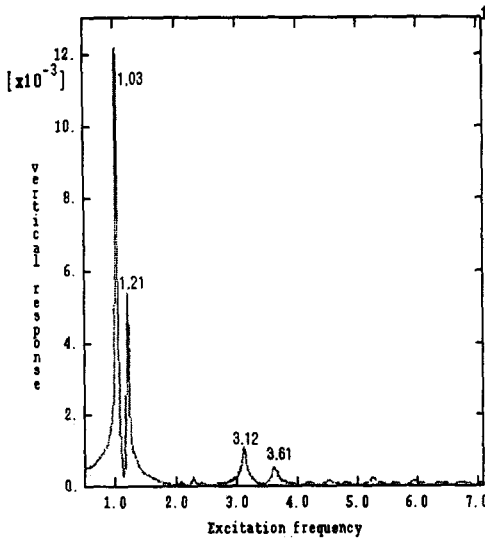


(a) ABAQUS를 사용한 계산결과(×2000)

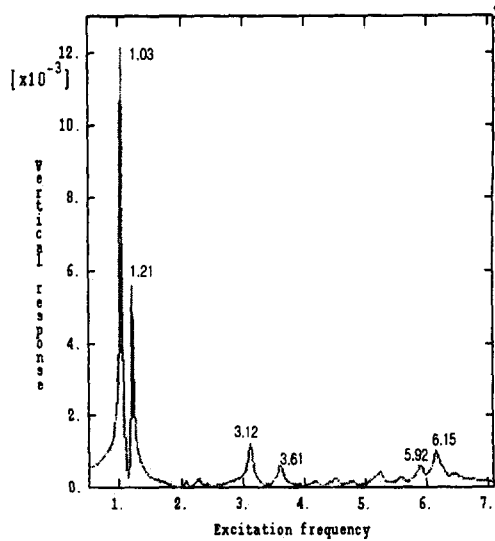


(b) 개발 프로그램 계산결과

그림 4 가선계 진동모드 계산 결과



(a) 드로퍼 느슨함 미고려



(b) 드로퍼 느슨함 고려

그림 5 KTX 가선계의 주파수 응답 특성

3.2 동적 해석

본 논문에서는 KTX 가선계(경간 63m, 54m)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 고속 주행시 가선계의 양단에서는 오차가 많이 발생하게 되므로 이를 피하기 위하여 경간 개수를 9개로 하여 시뮬레이션을 하고 가선계의 중간에 위치한 경간 4, 5, 6으로부터 결과를 취하였다. 가선의 동적 거동을 표현하기 위하여 sine항의 개수를 150개를 선택하여 고유 모드를 계산하고, 이 중에서 1차부터 38차의 고유 모드를 동적 해석에 사용하였다. 38차 모드의 고유진동수는 경간 63m의 경우에는 4.53Hz이고, 경간 54m의 경우에는 5.17Hz이다. 3경간의 경우 4.53Hz이면 모드유효질량 대 실제 질량의 비가 94.5%이 된다. 9경간에서의 고유진동수는 3경간에서의 고유진동수보다 낮을 것이므로 경간 63m의 경우 고려하는 주파수가 4.53 Hz이면 모드유효질량 대 실제 질량의 비가 94.5% 보다는 클 것이므로 충분한 고유모드가 시뮬레이션에 반영되었다고 생각할 수 있다.

가선과 팬터그래프 사이의 접촉력은 전차선과 팬터그래프 헤드의 상대 위치에 따라서 변동하기 때문에 수렴 조건을 만족할 때까지 접촉력을 변화시켜가면서 여러 번의 계산을 해야 한다. 본 논문에서는 다음의 2 가지 수렴 조건에 대하여 검토해 보았다.

- 조건1 : $\Delta fc = fc^i - fc^{i-1} \leq (fc^i + fc^{i-1}) * 1/20$

- 조건2 : $\Delta fc = fc^i - fc^{i-1} \leq (fc^i + fc^{i-1}) * 1/2000$

수렴 조건을 달리하면서 시뮬레이션을 한 결과가 그림 6에 나와 있는데 수렴조건을 완화하면 접촉력이 약간의 진동을 하게 되어 표준편차는 약간 커지지만 바른 해에서 벗어나지는 않는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 완화된 수렴 조건을 가지고 동적 시뮬레이션을 수행하였다.

300 km/h의 속도로 주행할 때의 접촉력 변화가 그림 7에 나와 있다. 계산된 접촉력에 포함된 의미가 없는 고주파 성분을 제거하기 위하여 Butterworth 필터를 사용하여 접촉력 데이터를 처리하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 cut-off 주파수가 30 Hz일 때의 접촉력은 cut-off 주파

수가 20 Hz일 때의 접착력과 큰 차이를 보이고 있지 않으나, cut-off 주파수가 5 Hz일 때와는 차이를 보이고 있다. 5 Hz와 20 Hz 사이에는 드로퍼 통과 진동수(Dropper passing frequency)가 있으므로 cut-off 주파수가 5 Hz와 20 Hz에서 접착력이 차이를 보이는 것은 팬터그래프가 드로퍼를 지나면서 받게 되는 가진 등에 의하여 유발된 것으로 추정된다.

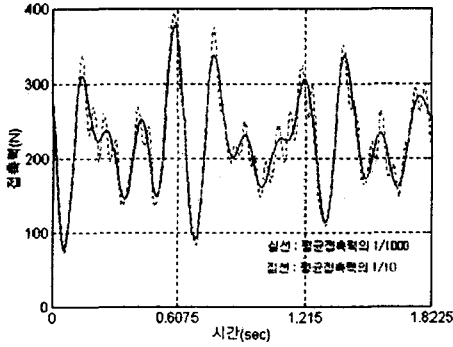


그림 6 수렴조건 변화에 따른 시뮬레이션 결과

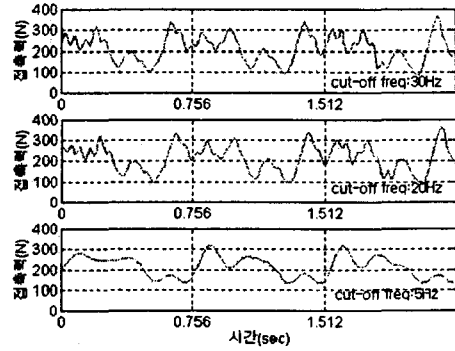


그림 7 접착력 해석결과(필터링처리)

경간 63 m, 54 m 각각에 대한 300 km/h 주행시의 접착력 변동 및 팬터그래프 질량의 이동 궤적이 그림 8, 9에 나와 있다. 접착력이 변동하게 되는 경향을 자세히 살펴보면 중간 질량, 예를 들어 GPU 팬터그래프의 경우 플런저(Plunger) 스프링 상부의 이동 궤적이 접착력에 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 중간 질량의 이동 궤적이 아래로 블록하게 되면 접착력이 감소하고 위로 블록하게 되면 접착력이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 접착력의 변동을 최소화시키기 위해서는 상부 질량과 중간 질량의 사이의 거리를 일정하게 유지할 필요가 있는데 만약 중간질량이 상부 질량의 이동 궤적을 가능한 한 그대로 따라 가게끔 능동적으로 제어를 할 수 있다면 집전 성능이 매우 우수한 팬터그래프를 개발할 수 있음을 의미한다.

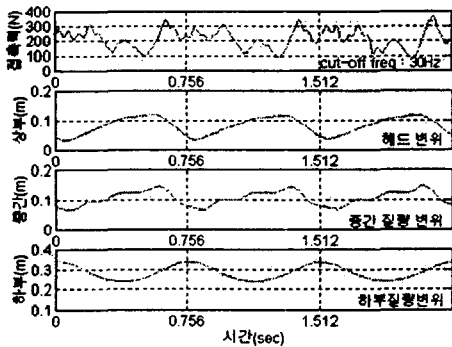


그림 8 300km/h 주행시 시뮬레이션(경간 63m)

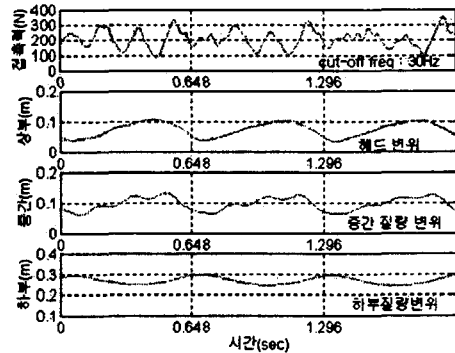


그림 9 300km/h 주행시 시뮬레이션(경간 54m)

320 km/h로 주행하는 시뮬레이션의 결과를 애니메이션한 것이 그림 10에 나와 있다. 전차선

의 거동은 팬터그래프가 지나감에 따라서 후방의 전차선은 상하로 진동하게 되고 전방의 전차선은 미약하게 진동하고 있음을 알 수 있다. 팬터그래프가 경간의 전반부에 위치하여 있을 때에는 팬터그래프 위치에서 전차선은 양의 구배를 가지며, 경간의 중앙부를 지날 때에는 팬터그래프 위치에서 전차선은 최대의 변형을 보이며, 경간의 후반부를 지날 때에는 팬터그래프 위치에서 전차선은 음의 구배를 보이고 있다. 이는 시간별로 전차선에서 최대 응력이 발생하는 위치가 반드시 팬터그래프가 지나가는 위치와 일치하지 않음을 의미한다. 팬터그래프의 위치에 따라서 전차선의 구배가 달라지는 것은 경간 양단에서의 강성이 경간 중앙에서의 강성과 다르기 때문이라고 생각되며, 팬터그래프 후방에 위치한 전차선이 진동하게 되는 것은 팬터그래프에 의하여 야기된 파동이 전차선을 타고 흐르기 때문이라고 생각된다.

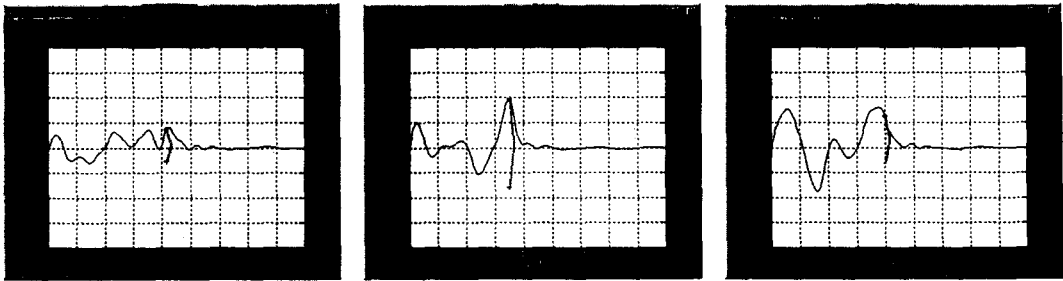


그림 10 320 km/h 주행시 시뮬레이션 결과

개발 프로그램의 정확도를 비교 평가하기 위하여 경간 63m의 KTX 가선계(프랑스의 Nord 가선계와 동급)에 대한 시뮬레이션 결과를 프랑스의 SNCF, 일본의 RTRI, 영국의 BR에서 개발한 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과와 비교하여 보았다. 가선계 및 팬터그래프 입력 데이터로는 영국의 BR이 사용하였던 값을 사용하였다[4]. 이러한 입력 데이터를 가지고 개발 프로그램과 일본 RTRI 개발 프로그램[5]을 사용하여 동적 시뮬레이션을 수행하였으며, 영국 BR의 결과와 프랑스 SNCF의 결과는 관련 문헌으로부터 취하였다[4, 6]. 영국 BR의 결과를 제외하고는 모두 단일 팬터그래프만이 사용되는 경우에서의 접촉력이고, 영국 BR의 결과는 2개의 팬터그래프를 사용할 때 전방 팬터그래프에서의 접촉력이다. 개발 프로그램의 시뮬레이션 결과를 외국의 시뮬레이션 결과와 비교한 것이 그림 11에 나와 있다. 개발 프로그램의 시뮬레이션 결과는 영국 BR의 결과와 프랑스 SNCF/일본 RTRI 프로그램 결과의 사이에 있으므로 비교적 양호한 결과를 보이고 있다고 생각된다. 그림에 나와 있는 접촉력은 개발 프로그램에서는 가선의 사전 이동을 반영하지 않은 상태에서 계산된 것으로 이를 반영하면 표준편차가 줄어들 수 있으리라 생각된다.

한편, 경간 54m의 KTX 가선계에 대하여 개발 프로그램과 일본 RTRI 개발 프로그램을 사용하여 시뮬레이션한 결과가 표 5에 정리되어 있다. 평균 접촉력이 모두 200 N 이상으로 계산되었는데 본 해석을 위하여 사용한 BR 자료에 나와 있는 공력계수가 GPU 팬터그래프에 대하여 일반적으로 알려져 있는 공력계수보다 컸기 때문이다. 평균 접촉력은 RTRI 개발 프로그램보다 개발 프로그램에서 약 5 N 정도 크게 계산된다. 이는 개발 프로그램에서 드로퍼의 느슨함을 고려하지 못하여 팬터그래프가 지나가는 위치에서의 드로퍼가 팬터그래프의 압상을 저지함에 따라 발생하는 오차로 생각된다. 접촉력의 표준 편차는 속도의 증가 및 경간 길이의 증가에 따라서 증가하고

있음을 확인할 수 있다.

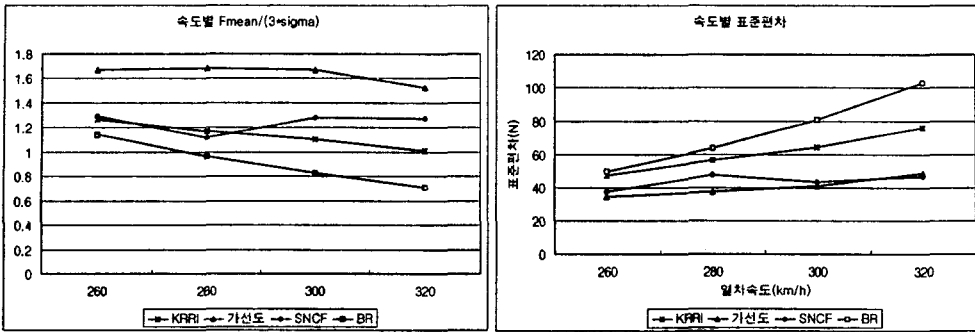


그림 11 동적 시뮬레이션 결과 비교(KTX 가선계, 경간 63m)

표 5 경간 54m에 대한 시뮬레이션 결과

항목 \ 속도	260km/h		280km/h		300km/h	
	개발	RTRI	개발	RTRI	개발	RTRI
평균접촉력	177.8	172.2	192.5	187.6	208.1	203.3
최대접촉력	269.5	247.0	283.0	258.0	352.5	280.0
최소접촉력	86.3	106.0	100.2	118.0	88.0	59.0
표준편차	38.5	29.2	42.1	31.9	56.6	35.9

4. 결론

본 논문에서는 고속용 가선계에서의 집전 성능 예측을 할 수 있도록 모드중첩법을 기초로 시뮬레이션에 필요한 정식화(formulations)를 해 보았으며, 적용 사례로서 KTX 가선계-GPU 팬터그래프를 대상으로 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 프로그램의 정확도를 검토하기 위하여 시뮬레이션 결과를 프랑스의 SNCF, 일본의 RTRI, 영국의 BR에서 개발한 프로그램의 시뮬레이션 결과와 비교하여 보았다. 비교 결과에 따르면 개발 프로그램이 고속 주행시 드로퍼의 느슨해짐과 사전 이도를 반영하지 못하였지만 이들 프로그램에 의한 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 보이고 있으므로 개발 프로그램은 비교적 양호한 결과를 제공한다고 생각된다.

향후 가선의 사전 이도 등을 반영할 수 있게끔 개발 프로그램을 보완하면 더욱 정확한 시뮬레이션이 가능하다고 생각된다. 또한, 열차의 속도 향상에 따라 집전 성능 뿐만 아니라 전차선의 피로수명 예측이 필요하므로 향후에는 접촉력 계산 이외에도 전차선에 걸리는 동적 응력을 계산할 수 있도록 프로그램을 보완할 예정이다.

후기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동 주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되고 있는 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] Armbruster, K., 1983, "Modelling and Dynamics of Pantograph-Catenary Systems for High Speed Trains," Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [2] Roy R. Craig, Jr., 1981, "Structural Dynamics," John Wiley & Sons, Inc
- [3] ABAQUS seminar book, 1995, "Linear Dynamics," Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc
- [4] ERRI, 1996, "Simulation of the dynamic behavior of the overhead/pantograph system(two pantograph raised)," ERRI A 186/RP 1
- [5] RTRI GASENDO program manual, 1999
- [6] CEGELEC, 1993, "Mathematical modelling of LGV catenary-GPU pantograph system," Letter