

200km/h급 전차선로에서 사전이도가 미치는 집전성능 영향 분석연구

The influence of the pre-sag of a railway contact wire to the current collection performance

조용현*
Cho, Yong Hyeon

이기원**
Lee, Kiwon

박찬배***
Park, Chan-bae

ABSTRACT

The railway catenary is softer in the middle of a span than at the end. This stiffness variation induce the vertical motion of a moving pantograph, which results in the large variation of contact forces. To reduce the vertical motion of a pantograph, we can introduce a pre-sag of the contact wire. The pre-sag changes merely equilibrium position of the contact wire. Because the pantograph must follow the sag added to the motion of the contact wire, the sag gives downward forces to the pantograph. If the pre-sag is proper, the variation of the vertical motion of the pantograph is reduced. However, excessive sag worsens the current collection performance because the pantograph receives too large downward forces by the contact wire. The objective of the paper is to establish the theoretical basis to understand how the pre-sag affect the contact force variation and to propose the proper sag for the railway catenary for the train speed up to 200 km/h.

1. 서 론

전차선로는 경간의 양단 보다 중앙부분에서 연하다. 이러한 강성의 변화는 주행하는 집전장치의 수직 운동을 크게 하여 결과적으로 큰 접촉력의 변화를 초래한다. 집전장치의 수직 운동을 줄이기 위하여 전차선에 사전이도를 줄 수 있다. 사전이도는 전차선의 힘의 평형 위치만을 변화시킨다. 집전장치는 전차선의 운동과 사전이도를 더한 위치를 추종해나갈 수 밖에 없으므로 사전이도는 집전장치에 아래 방향의 힘을 주게 된다. 사전이도가 적절하다면 집전장치의 수직운동의 변화를 줄일 수 있을 것이다. 그러나 사전이도가 과도하다면 집전장치에 지나치게 큰 아래 방향의 힘이 작용하게 되어 집전성능을 악화시킬 것이다. 본 연구의 목적은 사전이도가 집전성능에 어떻게 영향을 미치는가를 이해할 수 있는 이론적인 기초를 수립하고, 200 km/h급 전차선로에 적용할 수 있는 적절한 사전이도를 제시하는 데에 있다.

제 2절에서는 사전이도와 접촉력 변화에 관한 물리적 이해를 위하여 이론식을 유도하였고, 제 3절에서는 200 km/h 급 전차선로에 대하여 동적 시뮬레이션을 통하여 사전이도와 접촉력 등의 성능 변화를 해석하였다. 제 4절에서는 사전이도의 이론식과 시뮬레이션결과를 토대로 200 km/h 급 전차선로에 적절한 사전이도에 관하여 논의하였으며, 제 5절 결론에서는 연구결과를 종합적으로 정리하였다.

* 한국철도기술연구원, 정회원

E-mail : yhcho@krri.re.kr

TEL : (031)460-5112 FAX : (031)460-5459

** 한국철도기술연구원

*** 한국철도기술연구원

2. 사전이도와 접촉력 변화에 관한 이론식

2.1 전차선로의 강성 변화

일반적으로 전차선의 강성은 지지점에서 크고, 경간의 중앙에서 작다. 유한요소법을 이용하여 경간 50 m의 호남선 전차선로에 대한 강성의 해석 결과는 그림 1과 같다.

전차선로의 강성은 앞서 설명한 바와 같이 지지점과 지지점 인근의 드로퍼 위치에서 가장 크고, 경간 중앙에서 작다. 이러한 강성의 차이는 정적 압상량의 차이를 유발하게 되어 열차가 운행하게 되면 팬터그래프의 집전판이 수직 방향으로 요동치게 된다.

강성의 최대치, 최소치, 평균치를 k_{\max} , k_{\min} , \bar{k} 로 각각 표시하면 강성의 부등율 ϵ 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2\bar{k}} \quad (1)$$

또한, 위치 x 에서의 강성은 다음 식을 사용하여 근사적으로 표시할 수 있다.

$$k(x) = \bar{k} \left(1 + \epsilon \cos \frac{2\pi}{S} x \right) \quad (2)$$

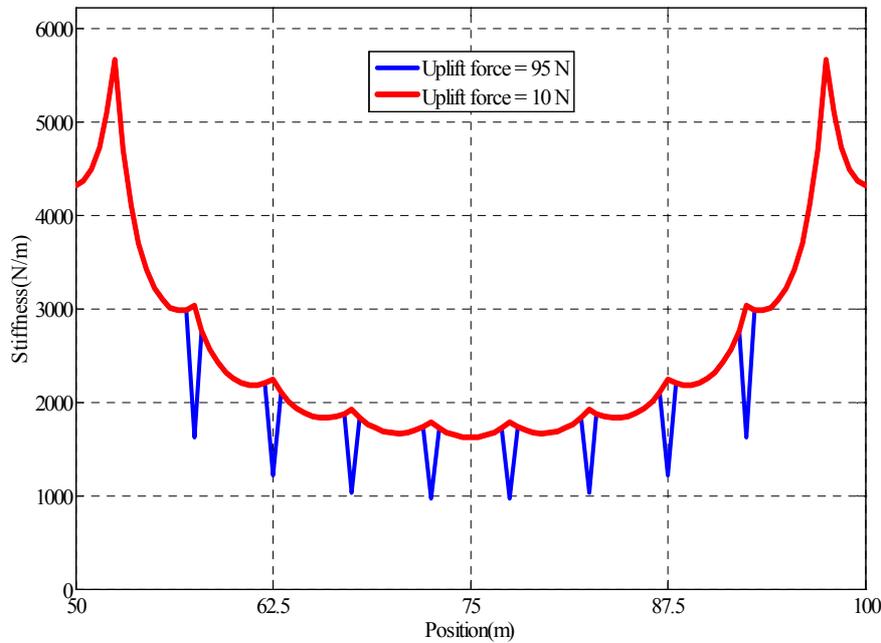


그림 1 호남선 전차선로의 강성 변화

2.2 사전이도가 없는 경우의 접촉력 변화

한 경간의 전차선로의 질량을 m 이라 하고, 팬터그래프의 질량을 M 이라 하며, 팬터그래프에 작용하는 압상력을 P_0 라고 가정하자.

그림 2와 같이 전차선로와 팬터그래프가 결합된 시스템에서 사전이도 $y_0=0$ 으로 가정하고 운동방정식을 써 보면 다음과 같다.

$$(M+m) \frac{d^2 y}{dt^2} + \bar{k} \left(1 + \epsilon \cos \frac{2\pi x}{S} \right) y = P_0 \quad (3)$$

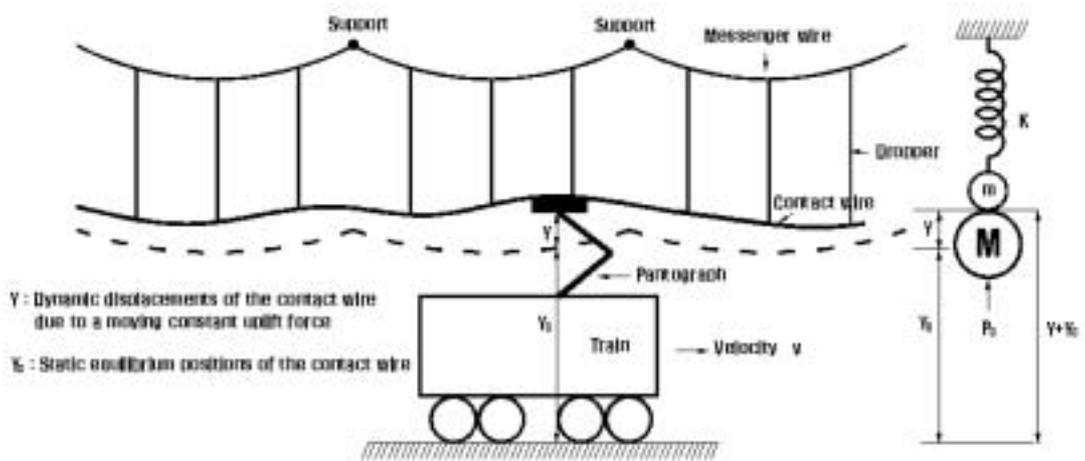


그림 2 전차선로와 팬터그래프가 결합된 시스템

식 (3)의 근사해를 다음과 같이 가정해 보자.

$$y = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi vt}{S} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 계수비교 방법을 사용하여 팬터그래프의 평균 변위와 변위 진폭을 나타내는 a_0, a_1 을 구해 보면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{(\bar{k} - (M+m)(2\pi v/S)^2)P_0}{k(\bar{k} - (M+m)(2\pi v/S)^2) - k^2\epsilon^2/2} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\bar{k}\epsilon P_0}{k(\bar{k} - (M+m)(2\pi v/S)^2) - k^2\epsilon^2/2} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 식 (4)에 대입하면 팬터그래프의 변위는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(t) = \frac{\{(\bar{k} - (M+m)(2\pi v/S)^2) + \bar{k}\epsilon \cos(2\pi v t/S)\}P_0}{k(\bar{k} - (M+m)(2\pi v/S)^2) - k^2\epsilon^2/2} \quad (7)$$

식 (7)의 분모가 0이 되면 팬터그래프의 변위가 무한히 커진다. 팬터그래프의 변위를 무한히 크게 하는 속도 v_{cr} 를 공진속도라 하는데 그 값은 다음과 같다.

$$v_{cr} = \frac{S}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{M+m} (1 - \frac{\epsilon^2}{2})}$$

팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력 P는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_0 - M \frac{d^2 y}{dt^2} = P_0 - M \left(\frac{2\pi v}{S}\right)^2 a_1 \cos\left(\frac{2\pi vt}{S}\right) \quad (9)$$

즉, 접촉력의 변동은 식 (6)의 a_1 에 비례한다. 따라서, 접촉력 변동을 줄이기 위해서는 질량 (M+m)이 작아야 하고, 강성 평균치 \bar{k} 가 크며, 강성의 부등율 ϵ 이 작아야 한다는 것을 식 (6)으로부터 알 수 있다.

2.3 사전이도가 있는 경우의 접촉력 변화

전차선의 사전이도를 제외하고는 2.2절과 동일하게 가정해 보자. 전차선로의 강성이 경간 중앙에서 작기 때문에 접촉력 변동을 줄이기 위한 사전이도 y_0 를 다음과 같이 가정해 보자.

$$y_0 = d \left(\cos \frac{2\pi vt}{S} - 1 \right) \quad (10)$$

사전이도가 있는 경우에 전차선로와 팬터그래프의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M \frac{d^2(y+y_0)}{dt^2} + m \frac{d^2y}{dt^2} + k(1 + \varepsilon \cos \frac{2\pi vt}{S})y = P_0 \quad (11)$$

식 (11)의 근사해를 식 (4)와 같이 가정하고 2.2절과 같은 방법으로 계수 a_0 와 a_1 을 구해 보면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{P_0}{k} + \frac{\varepsilon}{2} \frac{\varepsilon P_0 + M k (\frac{2\pi v}{S})^2}{k(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}) - (M+m)(\frac{2\pi v}{S})^2} \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{\varepsilon P_0 + M k (\frac{2\pi v}{S})^2}{k(1 - \frac{\varepsilon^2}{2}) - (M+m)(\frac{2\pi v}{S})^2} \quad (13)$$

식 (12), (13)으로부터 팬터그래프의 변위를 무한대로 하게 하는 속도 즉 공진속도는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$v_{cr} = \frac{S}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{(M+m)} (1 - \frac{\varepsilon^2}{2})} \quad (14)$$

공진속도는 사전이도가 있는 경우와 없는 경우에 모두 같다 즉 사전이도는 공진속도에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

접촉력의 변동은 a_1 에 비례하므로 a_1 의 분자를 0을 만들 수 있도록 사전이도 d 를 아래와 같이 선택할 수 있다면 접촉력 변동을 줄일 수 있다.

$$\text{사전이도} = -2d = \frac{2\varepsilon P_0}{M(\frac{2\pi v}{S})^2} \quad (15)$$

즉, 강성 부등율이 크거나, 압상력이 크면 접촉력 변동을 줄이기 위하여 사전이도를 크게 주어야 한다. 또한, 주어진 강성 부등율과 압상력에 의하여 접촉력 변동이 될 때 팬터그래프 관성이 작은 경우에는 접촉력 변동을 줄이기 위하여 큰 사전이도가 필요하며, 경간 통과 주파수가 작은 경우에도 큰 사전이도가 필요하다. 경간 통과 주파수는 같은 속도로 주행하더라도 경간이 길어지면 경간 통과 주파수가 작아진다. 따라서 같은 속도로 열차가 주행하더라도 경간이 길어질수록 큰 사전이도가 필요하다.

식 (13)에서 알 수 있듯이 사전이도 d 가 식 (14)와 다를 경우에는 계수 a_1 의 절대값이 크게 되므로 더 큰 접촉력의 변동을 유발할 수 있다.

따라서, 접촉력 변동을 최소로 하는 최적의 사전이도는 전차선로와 팬터그래프의 운용 조건에 따라서 변하므로 구체적인 전차선로와 팬터그래프의 운용 조건을 가지고 동적 시뮬레이션을 통해서 최적의 사전이도를 결정하는 것이 바람직하다.

3. 사전이도와 접촉력 변화에 관한 시뮬레이션

3.1 팬터그래프 모델

본 연구에서 검토하는 팬터그래프는 한국철도기술연구원이 개발하고 있는 틸팅열차에 탑재되는 팬터그래프 즉 WBL 85이다. WBL 85는 싱글암 형태의 팬터그래프이므로 3 수준의 mass-spring-damper 모델을 사용하는 것이 적합하다. 팬터그래프의 동적 파라미터는 WBL 85의 제작사인 승크사가 제시한 값을 사용하였다. 다만 2번째 수준의 스프링 상수는 동적 모델의 검증 과정에서 참고문헌[1]에서 실험을 통해 구한 팬터그래프의 추종진폭과 본 연구에서 사용하는 동적 모델의 추종진폭이 가급적 일치할 수 있도록 조정하였다(그림 3 참조).

표 1 팬터그래프 동적 파라미터

동적 파라미터	값	비고
m1	6.4 kg	Pan-head 질량
c1	0 Ns/m	
k1	7200 N/m	
m2	11.5 kg	
c2	0 Ns/m	
k2	16500 N/m	승크 제시치 : 13500 N/m
m3	10.15 kg	
c3	60 Ns/m	
k3	80 N/m	
양력계수	$0.00097 * \text{speed}(\text{km/h})^2$	
정적 압상력	70 N	

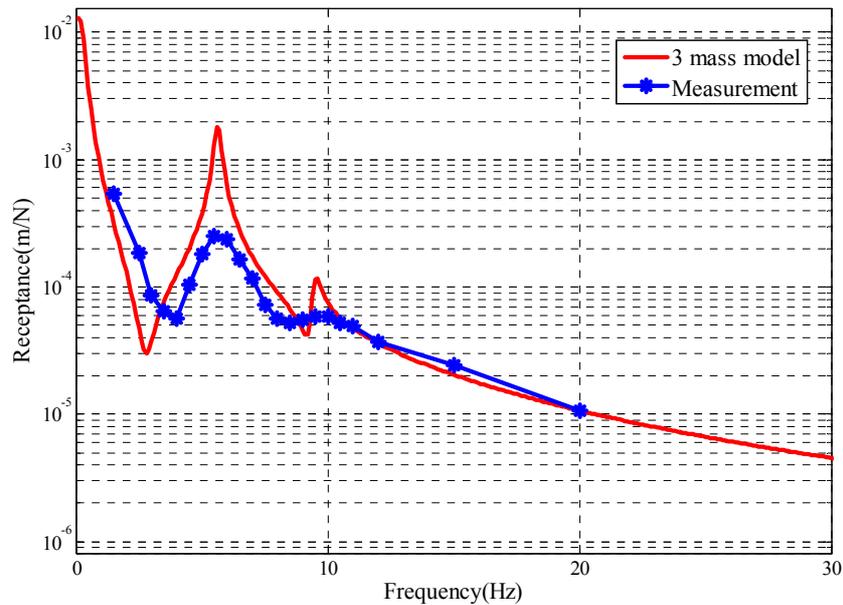


그림 3 팬터그래프의 추종진폭 실험결과[1] 와의 비교를 통한 동적 모델의 검증

3.2 전차선로 모델

본 연구에서 200 km/h 급 전차선로 검토하는 것은 호남선과 동일한 심플 타입 카터너리 방식의 전차선로이다(그림 4 참조). 조가선과 전차선은 5 m의 등간격으로 설치된 드로퍼에 의하여 연결되어 있다. 전차선로는 전선으로 구성되어 있으므로 팬터그래프와 달리 분포시스템의 질량을 가지고 있다. 전차선로의 감쇠는 경감쇠 시스템으로 전차선의 감쇠계수는 0.01, 조가선의 감쇠계수는 0.05를 사용하였다. 전차선은 동봉을 인발하여 만든 전선이므로 전차선의 강성으로 보의 굽힘강성과 장력에 의한 강성을 고려하였고, 조가선은 꼬인 선이므로 조가선의 강성으로 장력에 의한 강성을 고려하였다. 드로퍼는 실제로 전차선을 지지해 주는 역할을 하면서 팬터그래프에 의해 야기된 파동을 반사시켜 주는 역할을 한다. 본 연구에서는 드로퍼가 실제 전차선로에서와 마찬가지로 파동 반사체의 역할을 할 수 있도록

드로퍼를 외력으로 나타내지 않고 유한요소로 모델링하였다[2].

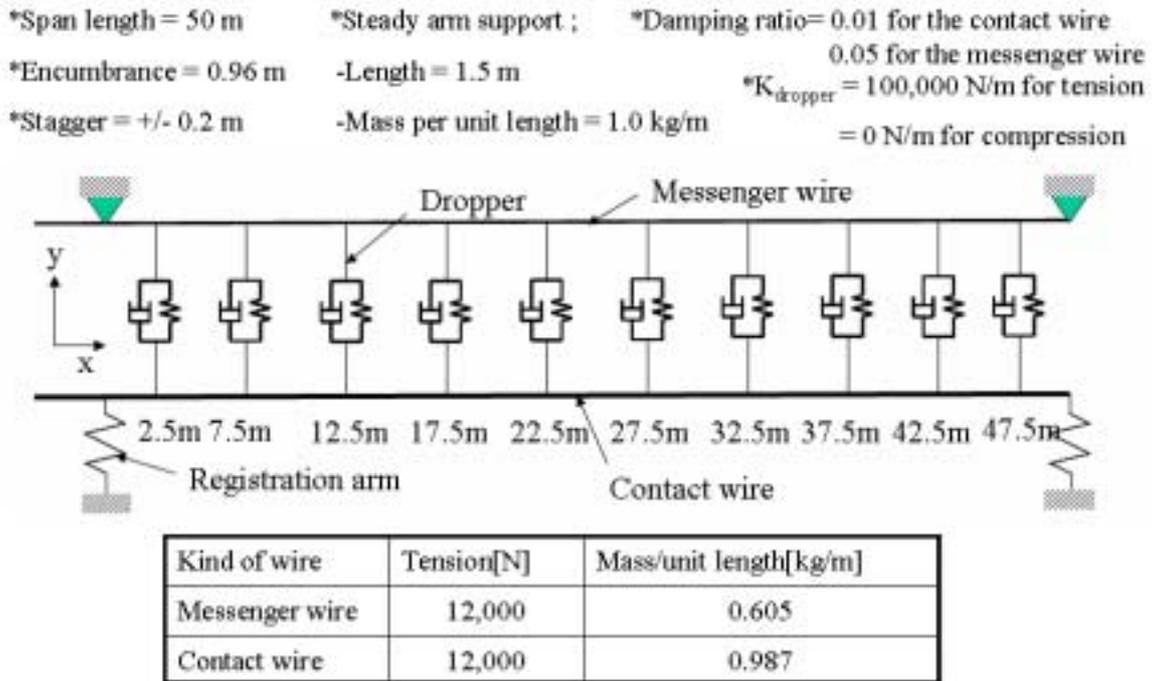


그림 4 전차선로 동특성 모델

3.3 시뮬레이션 결과

열차가 전차선로를 160 ~ 240 km/h로 주행하는 경우 접촉력 및 압상량이 어떻게 변화하는지를 살펴 보기 위하여 3.1, 3.2에 나와 있는 동적 모델을 사용하여 집전성능 시뮬레이션을 수행하였다.

사전이도의 크기에 따른 집전 성능의 변화를 살펴보기 위하여 3 가지의 사전이도, 즉 경간의 1/1000, 1/2000, 0에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 경간 50 m의 전차선로가 3 가지의 사전이도를 가질 때의 집전성능 해석 결과가 표 3에 나와 있다. 한편, 동일한 사전이도, 즉 경간의 1/1000을 가진 상태에서 경간의 변화에 따른 집전 성능의 변화를 살펴보기 위하여 경간 50 m와 40 m의 전차선로에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 3 시뮬레이션 결과(경간 50 m, 사전이도 : 경간/1000, 경간/2000, 0)

pre-sag=1/1000, 경간 50m					
속도	F _{mean}	F _σ	Uplift	F _{mean} -3F _σ	F _σ /F _{mean}
[km/h]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[%]
240	120	42	55	-6	35%
220	112	36	46	4	32%
200	105	30	39	15	29%
180	98	22	38	32	22%
160	91	14	18	49	15%

pre-sag=1/2000, 경간 50m					
속도	Fmean	F ₀	Uplift	Fmean-3F ₀	F ₀ /Fmean
[km/h]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[%]
240	120	40	64	0	33%
220	113	36	58	5	32%
200	105	33	53	6	31%
180	99	35	42	-6	35%
160	92	23	17	23	25%

pre-sag=0, 경간 50m					
속도	Fmean	F ₀	Uplift	Fmean-3F ₀	F ₀ /Fmean
[km/h]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[%]
240	120	37	75	9	31%
220	112	35	70	7	31%
200	106	38	65	-8	36%
180	100	44	60	-32	44%
160	94	36	17	-14	38%

표 4 시뮬레이션 결과(경간 : 40 m, 사전이도 : 경간/1000)

pre-sag=1/1000, 경간 40m					
속도[km/h]	Fmean	F ₀	Uplift	Fmean-3F ₀	F ₀ /Fmean
	[N]	[N]	[mm]	[N]	[%]
240	122	44	50	-11	36%
220	113	35	38	8	31%
200	106	30	30	15	28%
180	98	23	26	29	23%
160	92	20	24	33	22%

열차 통과로 인하여 드로퍼에 작용하는 힘이 크게 변동하므로 속도 향상에 따라서 드로퍼가 피로파괴되는 일이 종종 발생한다. 드로퍼의 피로파괴에 대한 평가를 위하여 드로퍼에 작용되는 힘의 변화를 예측할 필요가 있다. 열차가 200 km/h로 주행하는 경우에 지지점 인근의 드로퍼에 작용하는 드로퍼 힘을 해석한 결과가 그림 5에 나와 있다.

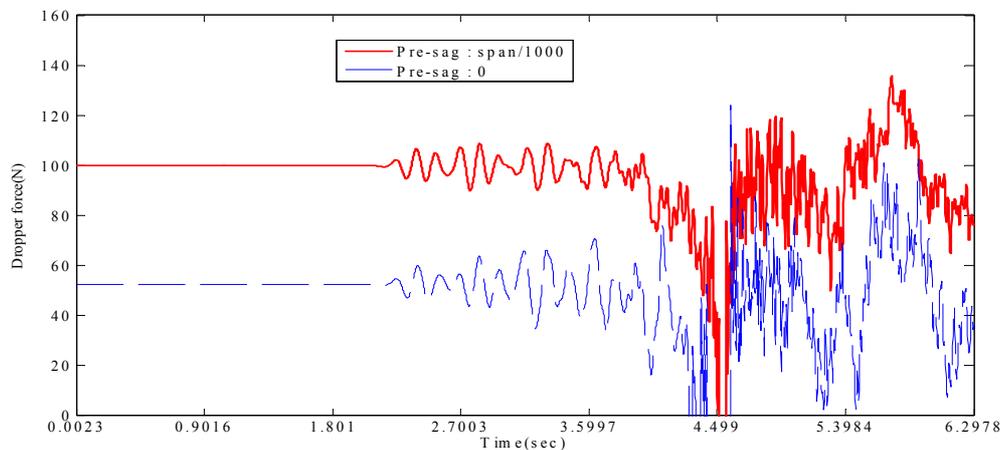


그림 6 사전이도에 따른 드로퍼 작용력의 변화

4. 토의

표 3에 따르면 열차 속도가 200 km/h가 되기까지는 통계적 최소 접촉력이 사전이도의 크기가 증가함에 따라서 더 큰 값을 갖는다. 즉 집전성능이 양호해짐을 알 수 있다. 사전이도가 없는 경우에는 통계적 최소 접촉력이 0 이하가 되므로 양호한 집전성능을 확보할 수 없는 반면에 사전이도가 경간/1000인 경우에는 통계적 최소 접촉력이 0 이상이므로 양호한 집전성능을 확보할 수 있다.

200 km/h를 초과하는 경우에는 사전이도가 클수록 집전성능이 악화된다는 것을 표 3에서 볼 수 있다. 사전이도가 없는 경우에 속도가 증가하면 오히려 집전성능이 개선되는 특성을 갖는다. 이러한 현상은 식 (13)의 a_1 은 속도가 커짐에 따라서 사전이도 d에 비례하여 증가하기 때문에 발생한다. 따라서, 모든 열차 속도에서 항상 같은 최적의 사전이도가 존재하는 것이 아니라, 특정 열차 속도에서만 성립한다고 할 수 있다.

표 3에서 한 가지 더 주목할 점은 사전이도가 경간/1000일 때가 경간/2000보다 양호한 성능을 보인다는 것이다. 200 km/h급 전차선로에서는 사전이도가 고속철도에서의 사전이도, 즉 경간/2000보다 클 때 양호한 집전 성능을 갖는다는 것이다. 식 (15)에 따르면 사전이도는 강성 부등율, 압상력에 비례하지만 속도의 제곱에 반비례한다. 따라서, 기존선이 고속선에 비하여 압상력은 1/2 정도로 작지만 낮은 열차 속도로 인하여 식 (13)의 a_1 를 줄이기 위한 사전이도는 고속선보다 커야 한다는 것을 알 수 있다.

지지점에서의 압상량을 보면 사전이도가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 작다는 것을 알 수 있다. 사전이도가 있으면 팬터그래프의 압상량을 줄일 수 있어서 팬터그래프와 전차선 곡선당김금구의 간섭가능성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 기존선의 곡선당김금구의 압상 한도가 10 cm이나, 바람 등 예상치 못한 요인에 의한 추가적인 압상을 고려하여 시뮬레이션에서의 허용 압상량은 곡선당김금구의 허용 압상량의 50% 즉 5 cm라고 가정하면, 사전이도가 경간/1000 일 때 열차 운행속도가 200 km/h일 때 지지점에서의 압상은 허용기준을 만족한다.

표 4를 보면 경간 40 m인 경우 사전이도가 경간/1000인 경우 통계적 최소 접촉력이 경간 50 m일 때보다 작아졌으나 여전히 0 보다 크므로 집전성능에는 변화가 없으리라 판단된다.

사전이도가 있게 되면 접촉력 변동 및 압상량이 작아지는 장점이 있지만 드로퍼에 작용하는 하중은 더 커지는 단점이 있다. 200 km/h 급 전차선로에서는 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 사전이도를 경간/1000으로 주는 경우와 사전이도가 없는 경우에 드로퍼에 작용하는 하중에는 현격한 차이는 발견할 수 없다.

따라서, 200 km/h 급 전차선로에는 경간/1000의 사전이도가 적합하리라 판단된다. 그러나, 이상의 결과는 시뮬레이션에 기초한 결과이므로 최종적으로 실제 전차선로에 적용하기 앞서 사전이도에 따른 전차선로의 성능 변화를 본선시험을 통하여 확인할 필요가 있다.

5 결론

강성 부등율이 크거나, 압상력이 크면 접촉력 변동을 줄이기 위하여 사전이도를 크게 주어야 한다. 또한, 주어진 강성 부등율과 압상력에 의하여 접촉력 변동이 될 때 팬터그래프 관성이 작은 경우에는 접촉력 변동을 줄이기 위하여 큰 사전이도가 필요하며, 경간 통과 주파수가 작은 경우에도 큰 사전이도가 필요하다. 경간 통과 주파수는 같은 속도로 주행하더라도 경간이 길어지면 경간 통과 주파수가 작아진다. 따라서 같은 속도로 열차가 주행하더라도 경간이 길어질수록 큰 사전이도가 필요하다.

접촉력 변동을 최소로 하는 최적의 사전이도는 전차선로와 팬터그래프의 운용 조건에 따라서 변하므로 구체적인 전차선로와 팬터그래프의 운용 조건을 가지고 동적 시뮬레이션을 통해서 최적의 사전이도를 결정하는 것이 바람직하다. 200 km/h 급 전차선로에는 경간/1000의 사전이도가 적합하리라 판단된다. 이상의 결과는 시뮬레이션에 기초한 결과이므로 최종적으로 실제 전차선로에 적용하기 앞서 사전이도에 따른 전차선로의 성능 변화를 본선시험을 통하여 확인할 필요가 있다.

참고문헌

1. 고태환, 김기남, 한성호, 김영민(1997년), “한국형틸팅열차 판토품라프의 추종성능 특성시험”, 한국철도학회 학술대회
2. ANDREA COLLINA AND STEFANO BRUNI (2002년), “Numerical Simulation of Pantograph - Overhead Equipment Interaction“, Vehicle System Dynamics, Vol. 38, No. 4, pp. 261-291