

도시철도 교량구간의 전차선 압상량에 대한 안전성 연구

A study on the safety about Contact wire uplift of a metro-railroad bridge section

이재봉* 장우진** 조용현*** 이기원**** 소선영***** 박종학*****

Bong-Jae Lee, Woo-Jean Jang, Yong-Hyeon Cho, Ki-Won Lee Sun-Young So, Jong-Hak Park

ABSTRACT

There are 5 railway bridges in a Seoul metro network; Jamsil, Dangsang(line 2), Dongho(line 3), Dongjak(line 4) and Chungdam(line 7). Because there are strong wind and vibration in the bridges, uplift of a contact wire caused by pantographs in the bridge section is higher than in a normal section. If the uplift at the support point exceed 10 cm, an interference between pantographs and catenary system happens. Estimated maximum uplift is obtained by applying safety factor 2 to the simulation results. The application of the safety factor is needed for taking into account of the effect of the wind, etc. Previously, we can not check whether or not the safety factor is proper. Recently, we can measure the uplift during the train operation, as a telemetry system which can measure dynamic behavior of the contact wire has been developed. The aim of this research is to review how proper the safety factor related to the uplift is, based on the measurement. We performed simulations and experiments for the uplift at the Jamsil railway bridge. The simulations were performed for the every kind of the train passing the Jamsil bridge. In order to compare the analysis results with the measurement results, we measured the uplifts at the support when the trains passed the measuring point. Finally, we proposed adequate safety factor with the uplift for the bridge section.

1. 서론

서울 도시철도 노선망에는 5개의 철도교량 즉 잠실, 당산(2호선), 동호(3호선), 동작철교(4호선) 및 청담철교(7호선)가 있다. 철도교량에서는 바람과 열차 진동이 크므로 교량구간에서 팬터그래프에 의한 전차선 압상은 일반구간에서보다 크다. 지지점에서 전차선 압상이 10[cm]를 초과하게 되면 팬터그래프와 전차선 지지물간에 간섭이 발생하게 된다. 최대 예상 압상량은 구간에 상관없이 시뮬레이션에서 얻은 압상량에 안전율 2를 곱하여 계산한다. 안전율의 적용은 바람 등으로 인한 추가 압상을 고려하기 위함이다. 과거에는 팬터그래프에 의한 전차선의 실제 압상량을 실측할 수 없어서 안전율이 적정한지를 평가할 수 없었다. 그러나 최근에 활선상태에서 측정이 가능한 텔레메트리 시스템이 국내에서 개발됨에 따라서 열차가 통과하는 상태에서 전차선의 압상을 직접 측정할 수 있게 되었다. 본 연구의 목적은 측정결과를 기초로 현재 적용되는 안전율의 적절성을 검토하는 것이다. 이를 위하여 잠실철교를 대상으로 전차선 지지점에서의 압상량 해석 및 측정을 수행하였다. 시뮬레이션은 잠실철교를 지나는 모든 형식의 전동차를 대상으로 하였다. 해석결과와의 비교를 위하여 잠실철교를 열차가 통과할 때 전차선 압상량을 측정하였다. 최종적으로 해석결과와 측정결과를 기초로 교량구간에서 최대 압상량 예측을 위한 적정 안전율을 제시하였다.

* 책임저자 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 서울메트로 기술본부

E-mail : catenarysm@paran.com

TEL : (02)520-5870 FAX : (02)520-5868

** 정회원, 서울산업대학교 전기공학과 교수

*** 정회원, 한국철도기술연구원

**** 정회원, 한국철도기술연구원

***** 정회원, 서울메트로 기술본부

***** 서울메트로 기술본부

2. 압상량 이론

2.1 열차 주행에 의한 동적 압상량 [1]

팬터그래프와 전차선의 동적 상호작용에 의한 압상량의 수식을 유도하기 위하여 그림 1에 나와 있는 탄성 지지보 모델을 고려해 보자. 탄성지지(연속적으로 분포하고 있는 스프링)에 장력을 가한 보를 고정하여 그 위를 일정한 크기의 힘이 주행하도록 한다. 여기에서는 탄성 지지 위에 장력이 걸린 보를 가선으로 생각하고 주행하는 일정한 크기의 힘을 팬터그래프로 간주하고 있다.

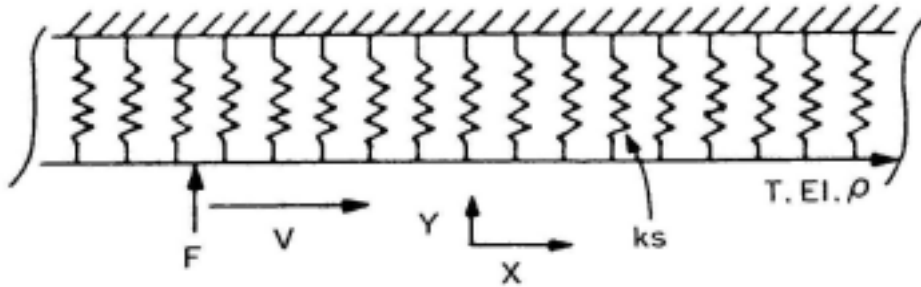


그림 1 탄성 지지보 모델

실제의 가선에서는 장력이 가해진 보가 전차선에 탄성지지가 조가선이나 보조 조가선에 대응하고 있다. 이와 같은 모델의 진동을 지배하는 방정식은

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + k_s y = F \delta(x - Vt) \quad (1)$$

로 쓸 수 있다. 여기에서 ρ , EI , T , k_s 는 전차선의 선밀도, 강성, 장력 및 탄성지지 스프링상수이다. 또한, F 는 주행하는 힘의 크기, V 는 그 속도이며, $\delta(x - Vt)$ 는 힘이 있는 점 $x = Vt$ 를 포함하여 적분한 경우에는 1이고 다른 점에서는 0이 되는 함수이다. 모델과 같이 x 방향으로 정수가 일정한 계에서는 이동하중에 따른 선의 변형을 보면 시간에 따르지 않고 일정한 형태가 된다.

그래서 이동하중과 함께 이동좌표로 (1)식을 풀면 팬터그래프보다 전방에서는

$$y = \frac{F}{2EI\lambda_+ (\lambda_+^2 - \lambda_-^2)} \left[\exp(\lambda_+ x) - \frac{\lambda_+}{\lambda_-} \exp(\lambda_- x) \right] \quad (2)$$

가 되고, 팬터그래프의 후방에서는 이와 대칭인 형태가 된다. 여기에서 λ_+ , λ_- 는

$$\lambda_{\pm} = -\sqrt{\frac{T - \rho V^2}{2EI} \pm \sqrt{\left(\frac{T - \rho V^2}{2EI}\right)^2 - \frac{k_s}{EI}}} \quad (3)$$

이다.

실제 가선, 팬터그래프 정수와 모델 정수와의 관계를 구하기 위해 팬터그래프 점의 압상량을 (2)식에서 $x = 0$ 으로 하여 구하면,

$$y_{x=0} = \frac{F}{2EI\lambda_+ \lambda_- (\lambda_+ - \lambda_-)} \doteq \frac{F}{2\sqrt{k_s T} [1 - (\frac{V}{C})^2]^{1/2}} \quad (4)$$

이 된다.

여기에서 C는 앞에서 서술한 파동전파속도이고 마지막 항의 근사는 $1 - (V/C)^2 \gg 4EI k_s / T^2$ 일 때, 즉 실제의 가선에서는 대략 $V/C=0.95$ 정도인 속도까지 성립된다. (4)식에서 $V=0$ 이라 하면 정적인 압상량에 상당하는 값을 계산할 수 있다. (4)식을 보면 열차 속도가 파동전파속도가 되면 동적 압상량이 이론적으로 무한대가 되고, 열차속도가 파동전파속도에 가까워짐에 따라서 동적 압상량이 커짐을 알 수 있다. 도시철도 전차선의 단면적은 170mm^2 이고, 장력이 1.5톤 작용하므로 전차선을 현이라 가정하면 파동전파속도는 355km/h 가 된다. 도시철도 차량의 주행속도를 70km/h 라고 가정하면 동적 압상량은 (4)식에 의하여 정적 압상량의 1.02배가 된다는 것을 알 수 있다. 도시철도 구간에서는 열차 속도가 전차선의 파동전파속도에 비하여 매우 낮으므로 동적 압상량은 정적 압상량과 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

2.2 차량의 동적 수직 운동

차량은 주행하면서 선로와 차륜의 동적 상호작용에 의하여 수직방향으로 운동을 하게 된다. 이러한 차량의 수직 변위는 전차선에도 영향을 미칠 수 있다. 그러나 차량의 동적 변위가 전차선의 압상량으로 그대로 전달되지 않는다. 그 이유는 팬터그래프에 질량, 댐퍼, 스프링의 현가장치가 있어서 일부가 흡수되기 때문이다.

동력차의 차체 진동이 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력에 미치는 영향을 시뮬레이션한 결과[2]에 따르면 차량이 고속(160 km/h)으로 주행하는 경우에는 선로의 궤도 틀림 등에 의하여 팬터그래프의 동적 거동이 영향을 받으나 저속(80 km/h)으로 주행하는 경우에는 그러하지 않았다고 한다.

차량이 파장 30m, 깊이 15mm의 궤도 틀림을 가진 선로를 고속으로 주행하는 경우에 차체의 가속도는 1.2m/s^2 까지 증가하고 접촉력은 증가하게 되지만 최대 접촉력은 궤도 틀림이 없을 때에 비하여 10% 이내로 증가하였다고 한다. (4)식에 의하여 압상량은 압상력에 비례하므로 차체 진동에 의한 압상량 증가는 10%이내가 될 것으로 추정할 수 있다.

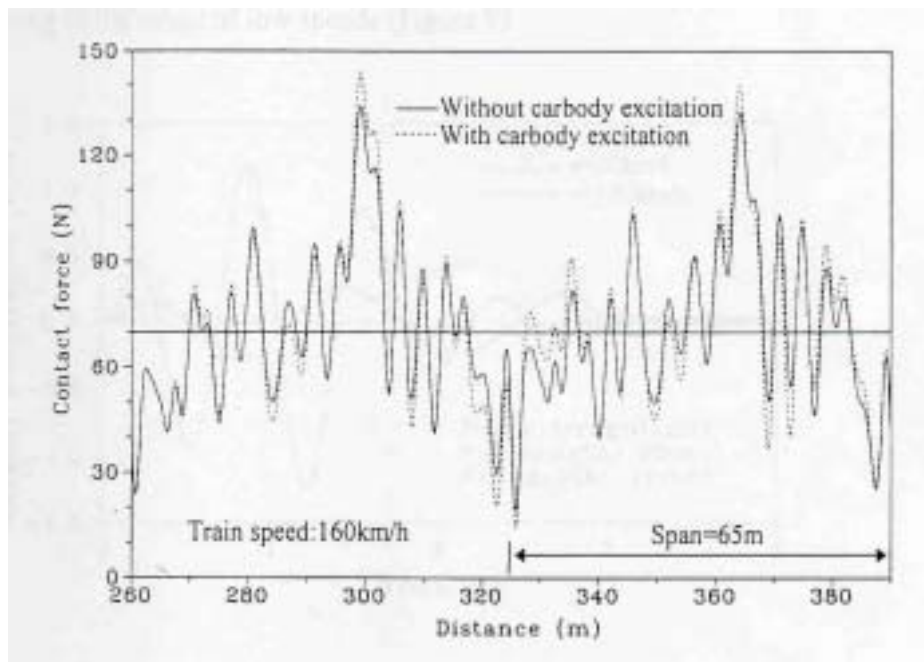


그림 2 궤도 틀림에 의한 차체 진동으로 인한 접촉력 변화[2]

궤도 틀림 상태, 열차 속도, 팬터그래프의 동적 특성 등 여러 가지 요인에 의하여 차체 진동에 의한 압상량 변화는 경우마다 차이가 나겠지만 도시철도 구간에서는 차량이 저속으로 주행하므로 차체 진동이 압상량에 큰 영향을 미친다고 예측하기 어렵다.

2.3 바람에 의한 압상

전차선을 압상하는 힘은 크게 정적 압상력과 공기역학적 양력으로 나눌 수 있다.

도시철도 차량의 팬터그래프에 작용하는 정적 압상력은 60N이다. 공기역학적 양력은 다음과 같이 팬터그래프 체감 유속의 제곱에 비례한다[3].

$$F_{aero} = \alpha V^2 \quad (5)$$

여기서 α 는 양력계수($N/(km/h)^2$)를 나타내고, V 는 팬터그래프의 체감 유속 즉 열차속도에 풍속을 더한 유속을 나타낸다.

풍속이 30m/s를 초과하면 도시철도 차량의 운행이 중단되도록 되어 있다. 순간적인 풍속은 측정이 용이치 않으며 지형 및 구간의 영향에 따라서 풍속의 세기가 달라질 수 있다. 최악의 경우로 만약에 열차가 30m/s 즉 108 km/h 의 맞바람을 받으면서 주행하는 경우에는 팬터그래프는 열차의 주행속도에 풍속을 합한 유속의 바람을 받게 된다. 풍속 30km/h의 바람을 맞으면서 열차 속도가 70km/h로 주행하는 경우에는 팬터그래프의 체감 유속은 178km/h가 된다. 따라서, 맞바람을 맞는 상태에서 열차가 주행하는 경우에는 공기역학적 양력이 급격히 증가하여 팬터그래프에 의한 전차선의 압상이 커지게 된다.

또한, 열차가 교행하는 경우에는 반대 방향으로 주행하는 열차가 팬터그래프에 맞바람을 불게 하므로 팬터그래프의 체감 유속이 증가하게 되어 전차선의 압상량이 일시적으로 증가할 수 있다.

3. 압상량 측정

3.1 시험 조건

- (1) 일시 : 2006. 05. 25(목) 09:00~12:00
- (2) 장소 : 2호선 잠실철교(외선, 전철주 1159호)
- (2) 기상 : 맑은 날씨에 풍속은 5 m/s이하
- (3) 측정 대상 차량
3 가지 편성의 차량이 측정점을 통과할 때 압상량을 측정하였다.

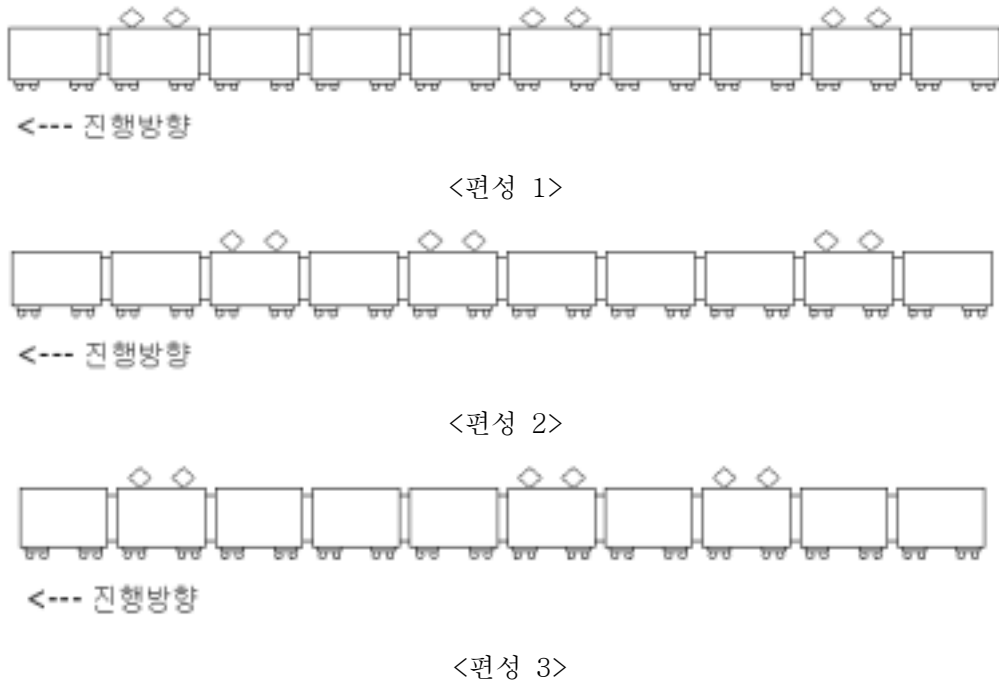


그림 3 측정점 통과 열차 편성

3.2 시험 장치

(1) 시험장치 구성

본 연구를 위하여 잠실철교 외선 전차선로 가동브라켓에 설치한 전차선로 온라인 무선계측시스템은 그림 5와 같다. 무선계측시스템은 변위계를 포함한 센서부, 계측부, 송수신부, 전원부, Host 컴퓨터로 나눌 수 있다. Host 컴퓨터를 제외한 품목은 활선 상태의 전차선로에 설치되어 있다.



그림 4 전차선로 온라인 무선계측시스템

전차선로 온라인 무선계측시스템의 구성은 아래 그림과 같다.



그림 5 전차선로 온라인 무선계측 시스템 구성도

(2) 주요 사양

- 총 채널 수 : 16채널
- 채널당 최대 샘플링 주파수 : 1000Hz
- 변위계
 - * 형식 : 와이어 인출(Wire extension)
 - * 최대 측정 가능 변위 : 2m
 - * 변위 측정점 : 곡선당김금구에 의한 전차선 지지점

3.3 시험 결과

잠실철교 외선을 통과하는 3가지 편성의 열차의 압상량을 측정하였다. 각각의 편성이 6회 측정 점을 지날 때 얻은 압상량 피크를 처리하여 아래 표와 같은 최대, 최소 및 평균 압상량을 구하였다.

표 1 지지점 압상량 측정결과(단위 : mm)

차량편성	최소 압상량	평균 압상량	최대 압상량
편성 1	14.20	19.67	30.60
편성 2	30.70	34.60	43.00
편성 3	17.60	24.87	40.70

표 1에 나와 있는 편성의 종류별로 최대 압상량이 기록될 때의 측정 파형이 아래 그림에 나와 있다.

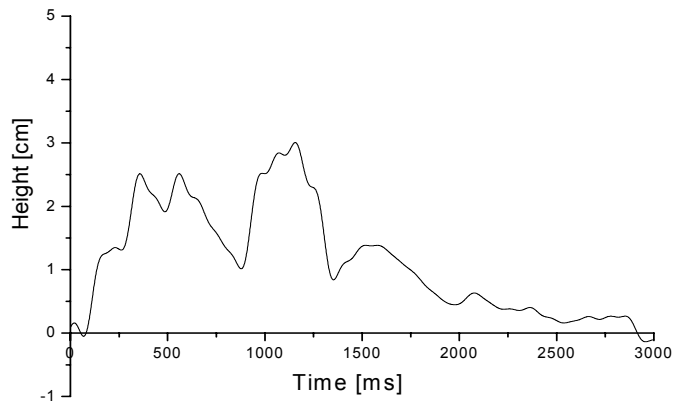


그림 6 편성 1 통과 시 지지점 압상량 파형
(최대 압상량 : 30.60mm)

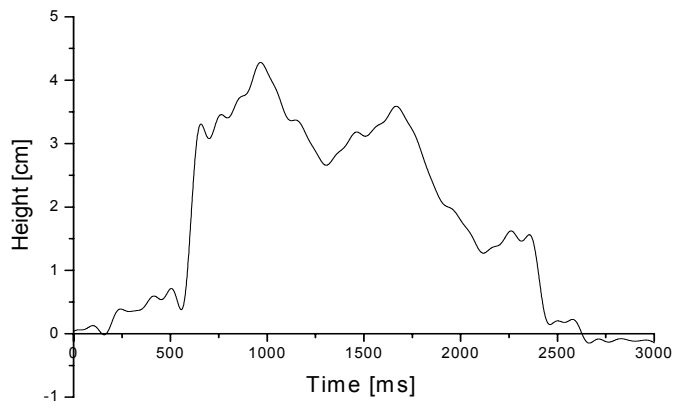


그림 7 편성 2 통과 시 지지점 압상량 파형
(최대 압상량 : 43.00mm)

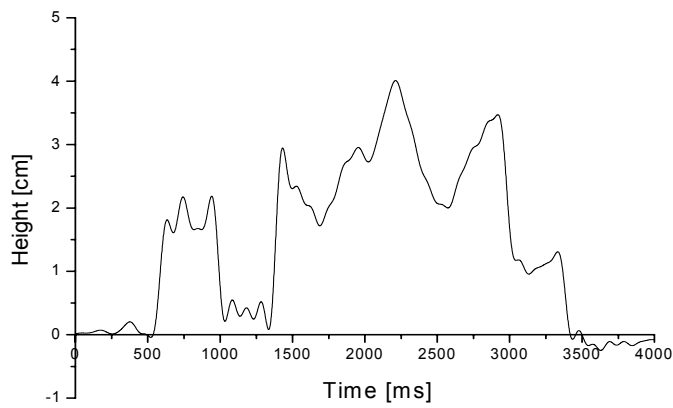


그림 8 편성 3 통과 시 지지점 압상량 파형
(최대 압상량 : 40.70mm)

4. 압상량 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

지지점에서의 전차선 압상량 분석을 위하여 일본 철도기술총합연구소에서 개발한 전차선/팬터그래프 동특성 해석프로그램 “가선도(架線道)”를 이용하여 시뮬레이션 하였다[3]. 가선도 프로그램의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 전차선과 조가선을 현(String) 요소로 처리
- 차량으로부터 야기되는 진동, 선로 횡풍 및 교행풍 등은 고려되지 않음
- 전차선 양 끝단, 조가선 양 끝단 및 현수점은 고정점으로 모델링
- 곡선당김급구의 영향을 강성, 질량, 감쇠에 대하여 반영
- Catenary 감쇠는 심플 카티너리에 적용되는 적용
- 가운데 1경간을 유효 데이터로 처리(맨 처음과 끝에 위치한 고정점의 영향을 배제하기 위하여 가운데 경간에서 지지점 압상량 취득)

전차선로는 아래 그림과 같이 경간 50m의 8경간으로 모델링하였다.

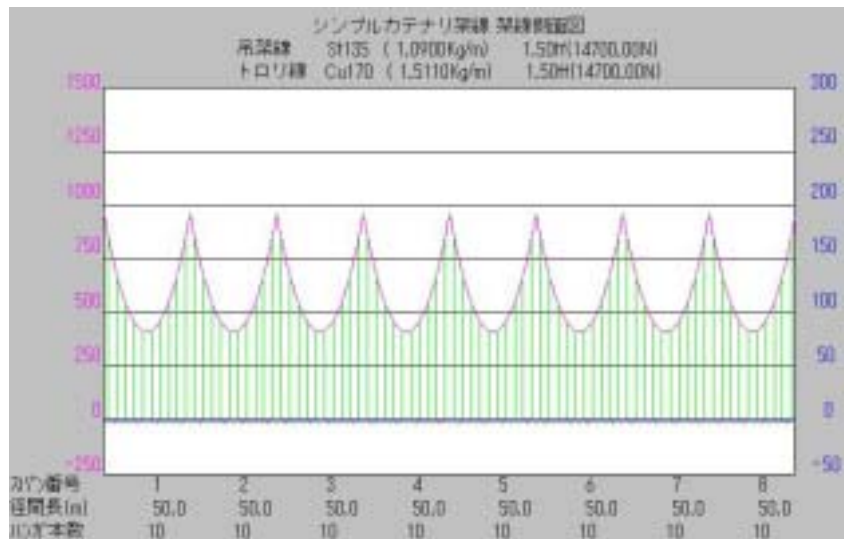


그림 9 “가선도”를 이용한 전차선로 모델링 [3]

2호선 잠실철교를 운행하는 서울 Metro 차량에는 여러 대의 팬터그래프가 설치되어 있다. 각각의 팬터그래프 동적 모델은 아래 그림과 같이 팬터그래프를 2 수준의 질량-스프링-댐퍼로 모델링하였다.

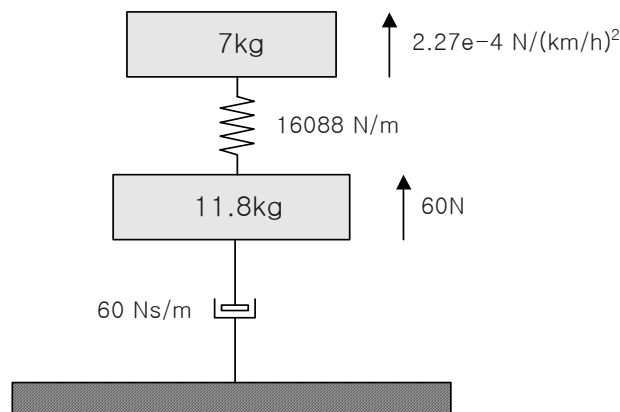


그림 10 팬터그래프 수학적 모델링

여러 대의 팬터그래프 간의 거리는 편성마다 다르다. 편성별 팬터그래프 간의 거리는 다음 표와 같다.

표 2 팬터그래프의 탑재 위치

편성 종류	1번 팬터그래프	2번 팬터그래프	3번 팬터그래프	4번 팬터그래프	5번 팬터그래프	6번 팬터그래프
편성 1	0 m	14 m	80 m	94 m	140 m	154 m
편성 2	0 m	14 m	40 m	54 m	120 m	134 m
편성 3	0 m	14 m	80 m	94 m	120 m	134 m

4.2 시뮬레이션 결과

앞 절과 같은 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 아래 표와 같다.

표 3 시뮬레이션을 통한 지지점 최대 압상량

차량 편성	최대 압상량[mm]
편성 1	12.1
편성 2	14.7
편성 3	14.6

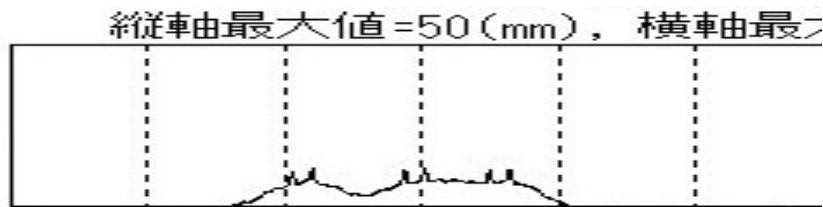


그림 11 편성 1 통과 시 지지점 압상량 파형

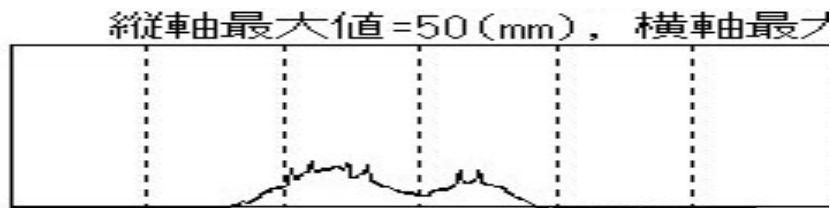


그림 12 편성 2 통과시 지지점 압상량 파형

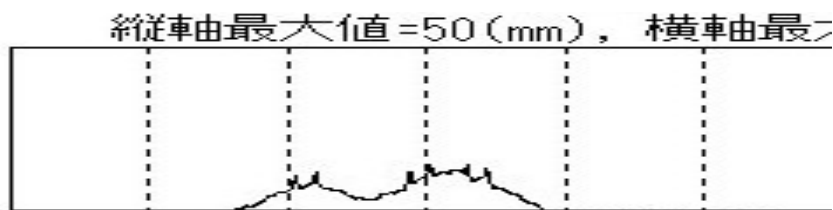


그림 13 편성 3 통과시 지지점 압상량 파형

5. 분석 및 토의

5.1 지지점에서의 압상량 안전율

열차의 안전 운행을 위하여 지지점에서의 전차선과 팬터그래프의 압상량을 제한하는 것이 필요하다. 정상 운영조건에서 최대 경간길이를 갖는 구간의 지지점에서 압상량은 시스템 설계자 혹은 시뮬레이션 프로그램에 의하여 계산되어야 한다. EN 50119에 따르면 지지점에서의 무 제한 압상 공간은 계산 혹은 시뮬레이션을 통해 구한 압상량의 2배 이상이어야 한다고 한다[4]. 즉 안전 운행을 위하여 지지점에서의 최대 압상량은 시뮬레이션 결과에 2이상의 안전율을 곱하여 구해야 한다는 것이다.

다음 표 4에 시뮬레이션과 측정 결과를 비교하였다. 최대 압상량은 편성마다 차이가 나지만 측정값이 시뮬레이션에 비하여 2.5~2.9배 컸다. 이는 시뮬레이션을 수행할 때 교행 풍, 차체 진동 등 실제 현장 여건을 모두 고려할 수 없기 때문에 발생한 차이라고 생각한다. 현재의 전차선로 동적 설계에서는 구간에 상관없이 시뮬레이션에서 얻은 압상량의 2배를 지지점에서의 최대 압상량으로 취하여 왔다. 그러나, 이 값은 측정값보다 작다는 것이 확인되었으므로 안전 확보를 위하여 향후에는 시뮬레이션 결과의 3배 이상을 취하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

표 4 지지점 압상량의 측정 및 시뮬레이션 결과 비교

차량 편성	측 정 [mm]			시뮬레이션 [mm]	(A)/(B)
	최소 압상량	평균 압상량	최대 압상량(A)	최대 압상량(B)	
편성 1	14.2	19.7	30.6	12.1	2.5
편성 2	30.7	34.6	43.0	14.7	2.9
편성 3	17.6	24.9	40.7	14.6	2.8

5.2 편성 간의 압상량 비교

측정결과에 따르면 동력차들의 거리가 상대적으로 가까운 편성 2와 3이 편성 1에 비하여 더 큰 압상량을 보였다. 편성 2의 경우 첫 번째 동력차와 두 번째 동력차 사이의 거리가 두 번째 동력차와 세 번째 동력차의 거리에 비하여 가까우므로 첫 번째 동력차에 탑재된 팬터그래프 1, 2가 측정점을 지날 때 즉 통과 초기에 압상량이 최대가 되었다. 편성 3의 경우 두 번째 동력차와 세 번째 동력차의 거리가 첫 번째 동력차와 두 번째 동력차 사이의 거리보다 가까우므로 두 번째 동력차가 측정점을 지날 때 즉 통과 중기에 압상량이 최대가 되었다.

이러한 경향은 시뮬레이션 결과에 그대로 나타난다. 편성 2, 3의 경우가 편성 1에 비하여 큰 압상량을 보였다. 또한, 편성 2의 경우 그림 12에서 볼 수 있는 바와 같이 통과 초기에 압상량이 최대가 되었고, 편성 3의 경우 그림 13에서 볼 수 있는 바와 같이 통과 중기에 압상량이 최대가 되었다.

동력차 간의 거리가 가까우면 뒤 동력차의 팬터그래프가 만드는 외란이 앞으로 전달되어 앞 동력차의 팬터그래프에 의한 전차선 압상을 더욱 크게 한다고 생각한다. 같은 동력차에 탑재된 두 대의 팬터그래프에서는 앞의 팬터그래프가 전차선을 압상한 후 전차선이 충분히 원래의 위치로 내려오기 전에 뒤의 팬터그래프가 측정점을 지나게 되므로 뒤의 팬터그래프가 전차선을 더 크게 압상하는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 도시철도 교량구간을 통과하는 열차의 팬터그래프가 전차선 지지점에 압상량을 최근 개발된 텔레메트리 시스템을 이용하여 최대 압상량 측정치와 시뮬레이션결과와 비교 분석을 하였다.

분석결과를 기초로 현재 적용하는 안전율의 적절성을 검토하는 것으로 판타그래프 집전특성에 따른 시스템 개량, 동력차의 적정한 조합 및 편성, 전차선로 시공표준 개정과 개량 등에 참고자료가 될 수가 있을 것이다.

이상의 연구결과는 도시철도 교량구간에서 전차선 압상량은 교량의 고유특성과 동력차에 탑재한 판타

그래프 간격의 영향에 따라 압상량 안전율이 다르게 분석되었고 앞으로 지속적으로 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 鐵道總合技術研究所, “電車線 と パンタグラフ の 特性”
2. W.M.Zhai and C.B.Cai, "Effect of locomotive vibrations on pantograph-catenary system dynamics", Vehicle System Dynamics Supplement 28(1998), pp. 47-58
3. 鐵道總合技術研究所, “架線道 取扱説明書”
4. BS EN 50119:2001, "Railway applications - fixed installations - electric traction overhead contact line"