

터널로 진입하는 고속 전철에 의한 공력 변화가 고속 가선계에 미치는 영향 분석(I)

an Analysis for the Effects of Changes of Aerodynamic Forces by a High Speed Train entering a Tunnel on a High Speed Catenary System(I)

조용현,* 정홍채**, 권혁빈***
Yong Hyeon Cho, Heungchai Chung, Hyeok-Bin Kwon

ABSTRACT

When a high speed train enters a tunnel, wind speed passing through the train in a tunnel section becomes higher due to the reverse flow to the direction of the train. The higher wind speed gives more aerodynamic forces to the pantograph on the train. Therefore, it is necessary to perform aerodynamic and dynamic analyses in order to check whether the current collection of the high speed train, entering the tunnel, still remain permissible or not. In this paper, the aerodynamic analysis has been performed under the assumption that a high speed train at 300 km/h enters a tunnel whose cross sectional area is 107m^2 and length is 1000m. In consideration of the aerodynamic analysis results, the dynamic analysis has been performed based on the catenary and pantograph dynamic models in SEOUL-PUSAN high speed rail, using the GASENDO developed by RTRI. In addition, the fatigue life of the contact wire has been reviewed using the Goodman diagram. Based on the analysis results, it is concluded that the increase of the aerodynamic forces on the pantograph in the tunnel section shall not affect characteristics of current collection adversely except that motions of the pantograph may be constrained by bump-stops.

1. 서론

집전 장치로서 열차 지붕에 설치되는 팬터그래프는 열차가 주행할 때 공기를 가르면서 열차와 함께 주행하게 되어 공기역학적 항력과 양력을 받게 된다. 공기역학적 힘은 풍속의 제곱에 거의 비례하므로 고속으로 열차가 주행하는 경우에는 팬터그래프에 큰 힘의 양력이 생기게 된다. 열차가 고속으로 터널에 진입하게 되면 팬터그래프에 작용하는 양력이 크게 변동하게 되어 집전 성능에 영향을 미치게 되며, 팬터그래프와 접촉하는 전차선의 압상량이 크게 증가하여 응력이 일시적으로 증가하게 되므로 전차선의 피로수명이 단축될 수 있다.

경부고속철도의 경우 터널 구간이 전체 선로 길이의 약 46% 정도로 큰 비중을 차지하고 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국철도기술연구원 책임연구원
*** 서울대학교 대학원 항공우주공학과 박사과정

경부고속철도와 같이 터널이 많은 일본의 신간선의 경우에 있어서 터널 진입과 관련한 많은 연구가 진행되어 왔다. 관련 연구 결과에 따르면 터널 진입 직후 팬터그래프가 받는 풍속은 급격히 증가하게 되는데 열차의 속도가 빠를수록, 터널의 단면적이 작을수록 증가하게 된다고 한다[1].

경부고속철도 터널 단면적은 107m^2 으로 일본 등 외국의 고속철도용 터널에 비하여 크게 설계되었다. 하지만, 터널을 진입하는 열차의 속도가 300km/h 로 외국에 비하여 고속이므로 터널 진입 시 발생하는 공기역학적 힘의 변동이 집전 성능 등에 악 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 경부고속철도와 동일한 단면을 갖는 차량과 터널을 해석 대상으로 하여 열차가 터널을 300 km/h 로 진입한다고 가정한 상태에서 유동해석 및 동력학적 해석을 수행하여 팬터그래프가 겪게 되는 유속 변화와 이에 따른 전차선의 압상량 변화 등 집전 성능의 변화를 검토해 보았다. 또한 터널에서 전차선에 걸리는 접촉력이 커짐에 따라서 전차선의 피로 수명에 어떠한 영향을 미치게 되는지를 검토해 보았다.

2. 유동해석

2.1 지배방정식 및 수치해법

열차의 터널 진출입 시 열차 주위의 유동장의 변화를 살펴보기 위하여 전산유체역학을 이용한 수치해석을 수행하였다.

수치해석에 사용된 지배방정식은 아래에 나타난 축대칭 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H = \frac{1}{Re_c} \left[\frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v \right]$$

위의 방정식을 차분화하여 해를 구하는 과정에서는 풍상차분법(upwind scheme)을 이용한 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하였으며, 수치해석방법으로는 Roe의 플럭스 차이 분할기법(FDS:Flux Difference Splitting)과 Van Leer의 플럭스벡터 분할기법(FVS:Flux Vector Splitting)을 이용하였다. 공간 정확도를 높이기 위해 물리 변수를 외삽하는 MUSCL기법을 사용하였으며, Koren differential limiter를 도입하였다. 시간 적분에는 Euler 후방 차분의 내재적 방법을 사용하였으며, 시간간격은 동일시간간격(constant time stepping)을 사용하였으며, 행렬 처리에는 AF-ADI 기법을 도입하였다. 난류 점성 계수 μ_t 는 Baldwin-Lomax 대수형 난류 모델을 사용하여 구하였다.

2.2 영역분할기법

열차가 터널에 진출입하는 것과 같이 물체간의 상대적인 운동이 있는 경우 단일화된 격자계의 형성이 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 정렬격자를 이용한 영역분할기법(zonal method)을 이용하였다.

그리고, 영역 간의 유동정보의 교환을 위해서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자경계면에서 빠르고 정확하게 유동정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법[2]을 이용하였다.

이 방법은 Overlapping 격자기법에 비해 내삽과정에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다. 또한 두 영역의 격자밀집도의 차이가 있더라도 안정적으로 내삽을 수행할 수 있다.

2.3 계산결과

계산에 사용된 열차의 길이는 140m(7량 정도)이며 터널의 길이는 1km이다. 터널의 단면적은 경부선의 터널(107m²)을 기준으로 하였으며, 열차의 단면적 및 전두부 형상은 TGV-K(9.143m²)와 동일한 조건으로 하였고 열차의 속도는 300km/h로 가정하였다.

그림 1에서는 열차의 전두부가 터널에 진입했을 때의 열차 주위 및 터널 내부의 압력장과 터널 벽면에서의 압력을 그린 것이다. 열차의 터널 진입에 의해 압력파가 형성되는 것을 잘 알 수 있다. 그림 2에는 팬터그래프가 위치한 부분에서의 유속을 평균하여 시간에 따라 그린 것이다. 터널을 따라 진행하는 압력파에 의해 유속의 변동이 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 터널에 진입하는 순간 팬터그래프가 느끼는 유속은 급격히 증가하고, 터널 내부에서 비교적 일정하게 유지되다가 터널을 빠져 나올 때 다시 증가하였다가 급격히 감소하여 개활지에서의 유속으로 돌아간다.

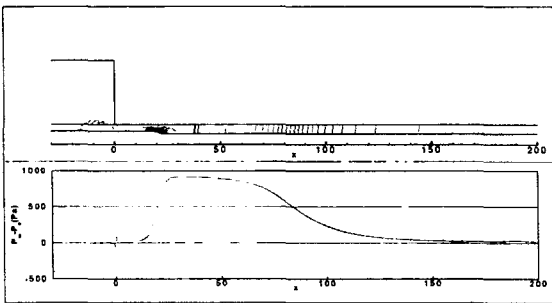


그림 1 열차 진입 시 압력장과 터널 벽면의 압력

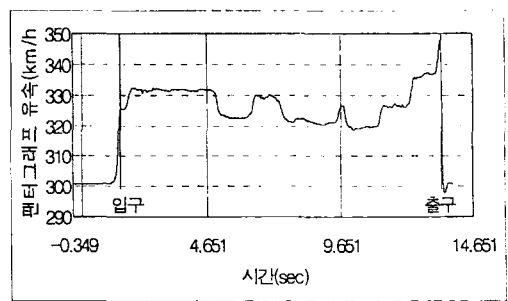


그림 2 후방 팬터그래프가 느끼는 유속

3. 집전 성능 해석

3.1 해석 방법

일본 철도기술종합연구소(RTRI)에서 개발한 집전 성능해석 프로그램을 사용하여 열차가 고속으로 터널을 진입할 때 발생하는 양력 변화를 고려하여 집전 성능의 변화를 해석해 보았다. 본 프로그램에서는 가선계를 연속 질량 대신 집중 질량으로 모델링하고, 팬터그래프를 몇 개의 질량으로 단순화시킨 다음 가선계와 팬터그래프 사이의 접촉력을 매개로 하여 상호작용이 이루어지도록 운동방정식을 정식화하고 이를 central difference method를 이용하여 풀어 접촉력, 이선, 전차선 변위 등을 구한다[3].

3.2 가선계 모델링

실제 가선계는 그림 3과 같이 연속계이나 본 논문에서는 가선계를 아래와 같이 모델링하였다.

- (1) 접촉선 및 조가선은 그림 4와 같이 유한계의 집중질량과 질량이 없는 현(string)으로 표시하고, 상하진동만 한다.
- (2) 현의 끝은 고정되어 있고 회전은 허용된다.
- (3) 전주(mast)에 고정되어 있는 조가선은 회전이 허용된다.
- (4) 가선계의 감쇠는 점성감쇠이다.
- (5) 전차선로에 위치한 질점에서의 감쇠는 질량들의 속도 차이에 비례하여 표현된다.

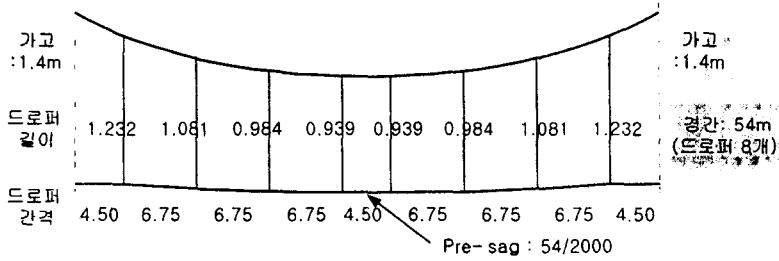


그림 3 경부고속철도 가선계(경간길이 54m)

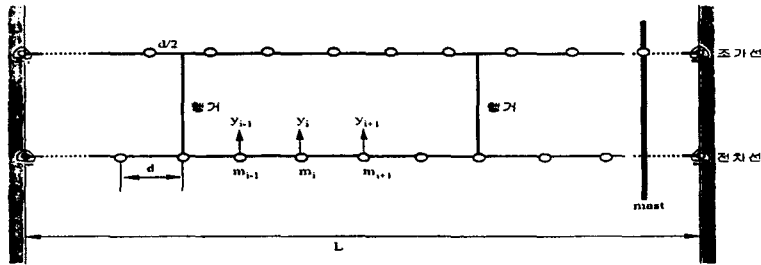


그림 4 전차선로 모델링

그림 3에 나와 있는 형상을 가지는 경부고속철도 가선계(총 25개 경간)를 해석 대상으로 하였다. 동적 해석 시 사용한 가선계의 데이터는 표 1과 같다.

표 1 경부고속철도 가선계 입력 데이터

항목	값	항목	값
전차선 장력	20,000 (N)	전차선 단위질량	1.334 (kg/m) (Cu 150mm ²)
조가선 장력	14,000 (N)	조가선 단위질량	0.605 (kg/m) (Bz 65mm ²)
가고	1.40 (m)	드로퍼 단위질량	0.4 (kg/개) (Bz 12mm ²)
사전 이도 (Pre-sag)	경간길이의 1/2000 (m)	곡선당김금구 스프링상수	210 (N/m)
드로퍼 간격	그림 3 참조	곡선당김금구 질량	0.90 (kg)

3.2 팬터그래프 모델링

본 논문에서는 경부고속철도에서 사용하고 있는 GPU 팬터그래프를 집전성능 해석 시에 고려하였다. GPU 팬터그래프에 대한 동적 모델은 그림 5와 같다[4].

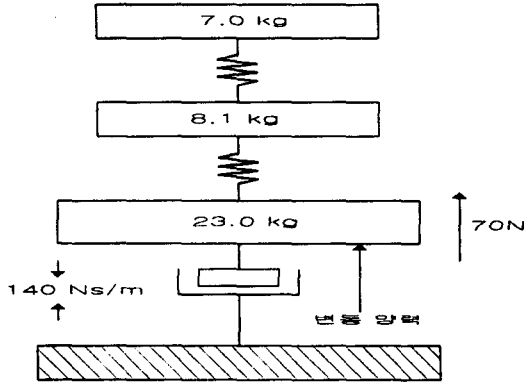


그림 5 GPU 25kV 팬터그래프 동적 모델

3.3 양력 변화 모델링

고속으로 주행하는 팬터그래프가 가선을 들어 올려 주는 힘은 정적 압상력과 양력의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_0 + \alpha * V^2$$

여기서 P_0 는 팬터그래프의 기계장치에 의하여 가선을 밀어 주는 힘으로 정지 상태에서 가선을 들어 주는 힘이므로 이를 정적 압상력이라 하고, $\alpha * V^2$ 은 열차가 주행함에 따라서 발생하는 양력(Lift force)을 나타내는데 α 는 양력계수($N/(km/h)^2$)이고, V 는 열차 속도이다. 경부고속철도 차량에 설치되는 GPU 팬터그래프의 경우 정적 압상력은 70N이고, 양력계수는 $0.0013 N/(km/h)^2$ 으로 열차가 개활지를 300 km/h 주행 시 양력은 120 N이 된다.

팬터그래프에 걸리는 양력의 변화는 팬터그래프를 지나는 유속의 변화에 의하여 주로 발생하므로 정확한 집전 성능 분석을 위하여는 공력 변화에 관한 현장 실측 데이터를 사용하는 것이 가장 바람직하나 현재로서는 이를 구할 수 없는 상황이므로 앞서 설명하였던 해석적 방법을 이용하여 구한 유속 변화를 본 논문에서는 사용하였다.

유동장에 놓인 물체가 받는 양력은 일반적으로 물체가 받게 되는 유속의 제곱에 비례한다고 한다. 이 때의 비례 상수는 물체의 형상, 유동 조건 등 여러 가지 요인에 의하여 결정되는데 유체역학적으로 안정한 팬터그래프의 경우 이러한 비례 상수가 일정하다고 한다. 유체역학적으로 안정하지 못한 팬터그래프의 경우에는 유속이 증가함에 따라서 양력이 증가하다가 어느 유속 이상에서는 갑자기 양력이 감소하여 팬터그래프와 전차선이 떨어지는 이선 현상을 유발할 수 있다고 한다[1]. 그러나 본 논문에서 고려하는 GPU 팬터그래프는 300 km/h 이상에서도 사용된 바 있는 고속용이므로 이러한 유체역학적 불안정성은 없다고 보고, 팬터그래프에 작용하는 양력은 유속에 따라서 증가한다고 가정한다.

터널 진입시 팬터그래프를 지나는 유속이 변하여 양력의 크기가 변하게 되나 본 논문에서는 유속을 일정하게 놓는 대신에 양력과 관련된 비례상수를 변화시켜 다음과 같이 양력 변동을 모델링하였다.

$$P = P_0 + \alpha * (V + u)^2 = P_0 + \beta * V^2$$

여기서 u 는 열차가 터널에 진입함에 따라서 터널 바깥으로 불어 나가는 바람의 속도를 나타내며, β 는 변동 양력계수를 나타내는데 상기 식으로부터 변동 양력계수 β 는

$$\beta = \alpha * \frac{(V + u)^2}{V^2}$$

로 쓸 수 있다. 그림 6에는 상기 식을 이용하여 계산한 터널 진입 시 팬터그래프 변동 양력 계수 β 의 변화를 보여 주고 있다.

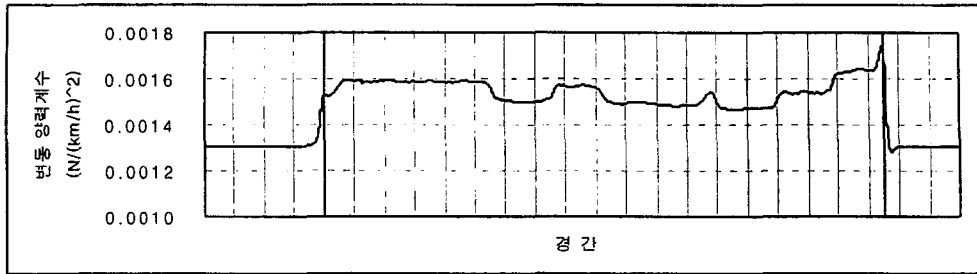


그림 6 집전 성능 해석에 사용된 변동 양력계수 β

열차가 터널에 진입하면서 팬터그래프가 겪게 되는 양력 변동을 가선 경간 4부터 23까지의 구간에 부여하고, 터널 진입 위치를 경간 5가 시작되는 위치가 되도록 가선계를 모델링하였다. 동적 해석에서는 가선계의 고정 양단 근처에서 변위 구속 등으로 인하여 오차가 해석 결과에 포함되므로 오차 유입을 방지하기 위하여 경간 1부터 3까지 그리고 경간 24부터 25까지의 결과는 버리고, 중간 경간에서의 해석 결과만을 취하였다.

3.4 접촉력 계산 결과

GPU 팬터그래프가 300 km/h의 속도로 길이 1000m인 터널을 진입할 때 팬터그래프와 전차선 사이에 작용하는 접촉력을 계산한 결과가 그림 7에 나와 있다. 최대 접촉력은 터널 입구와 출구에 위치한 경간에서 발생하였는데 그 값은 각각 290N, 289N이다. 터널 입구 근방에 위치한 경간에서의 접촉력 변화가 그림 7 (a)에 나와 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 열차가 터널에 진입하게 되면 팬터그래프를 지나는 유속의 갑작스런 증가로 인하여 접촉력이 증가하고 터널 구간 내에서 큰 접촉력을 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편, 터널 출구 근방에 위치한 경간에서의 접촉력 변화가 나와 있는 그림 7(b)로부터 열차가 터널을 빠져 나와도 터널에서의 큰 접촉력을 한 동안 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 터널 출구에서 팬터그래프를 지나는 유속이 순간적으로 증가하였다가 감소하게 되는데 이러한 순간적인 유속의 변화는 접촉력의 변동에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 그림 7(b)를 통해 알 수 있다.

경부고속철도 계약서에 따르면 가선계가 받을 수 있는 접촉력은 100초 기준으로 200N보다 작아야 한다고 한다[5]. 개활지의 경우에 대하여 접촉력을 계산해 본 결과 100초 평균값이 187N, 표준 편차가 31N이다. 그림 7에 나와 있는 터널 구간에서의 접촉력을 계산해 보면 12초 주행하는 동안의 평균은 208 N이고, 표준편차로는 31N을 얻게 된다. 개활지와 터널 구간에서의 접촉력을 비교해 보면 터널 구간에서의 접촉력 평균값은 개활지에 비하여 커지나 100초 평균을 하면 189N이 되므로 길이 1000m의 터널을 지나는 것은 가선계에 무리한 부담을 주지 않는 것으로 생각된다. 표준 편차에 있어서는 개활지에서와 터널 구간에서 거의 변화가 없으므로 접촉력의 산포도는 같다고 할 수 있다.

3.5 전차선 변위 계산결과

터널을 진입하면서 접촉력이 커지게 되면 전차선의 압상량이 커지게 되어 팬터그래프와 전차선 사이에 간섭이 발생할 수 있으므로 터널 진입시 전차선 압상량을 계산할 필요가 있다. 접촉력이 가장 크게 발생하였던 경간이 터널 입구 및 출구에 위치하였으므로 이들 두 경간에서의 전차

선 변위를 계산해 보았다. 터널 입구에 위치한 구간에서의 전차선 변위가 그림 8(a)에 나와 있고, 터널 출구에 위치한 구간에서의 전차선 변위가 그림 8(b)에 나와 있다. 최대 변위는 접촉력이 최대로 작용하는 지점에서 생기게 되는데 그 값은 108.0~111.2mm이고, 곡선당김금구 위치에서는 85.3mm, 구간 중앙에서는 85.3~92.5mm의 전차선 변위가 발생함을 그림으로부터 알 수 있다. 개활지에 위치한 구간의 곡선당김금구 위치에서의 전차선 변위를 계산해 보면 72.5mm를 얻게 되므로 터널 구간에서 양력에 의한 전차선 압상은 약 13mm 정도가 됨을 알 수 있다. 그러나 경부고속철도 가선계는 400mm까지의 압상을 허용하고 있으므로 터널 구간에서의 전차선 압상량의 증가는 팬터그래프와의 간섭 문제를 야기시키지 않을 것으로 생각된다.

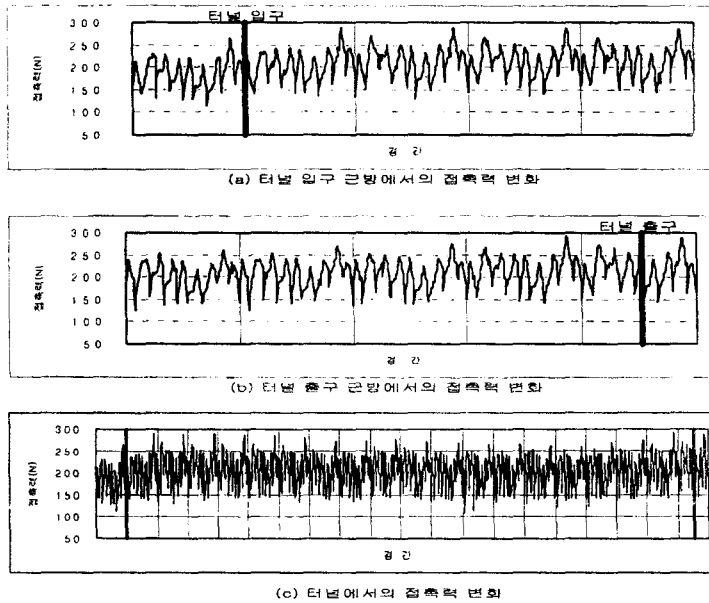


그림 7 터널 구간에서의 접촉력 변화

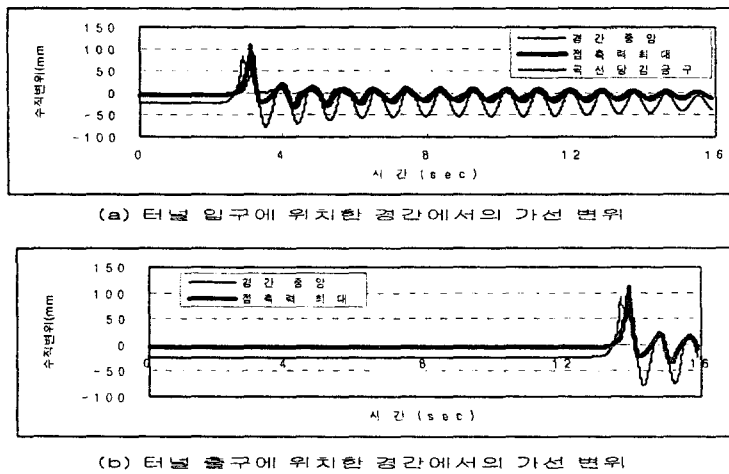
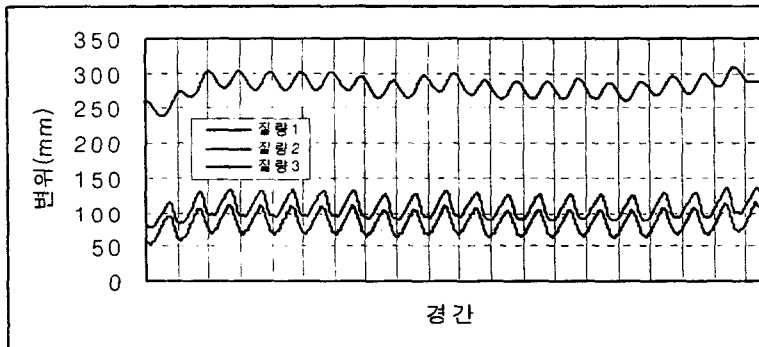


그림 8 터널 구간에서의 전차선 변위 변화

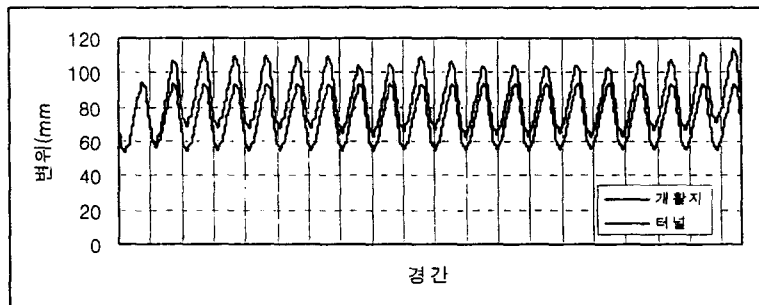
3.5 팬터그래프 변위 계산 결과

그림 5에 나와 있는 바와 같이 GPU 팬터그래프에는 3 단계의 질량, 즉 상부, 중간, 하부 질량이 있다. 팬터그래프가 전차선과 접촉하면서 진행을 하게 되면 이들 질량은 수직 방향으로 움직이게 된다. 열차가 터널을 진입할 때 팬터그래프의 수직 변위가 그림 9(a), (b)에 나와 있다. 팬헤드의 최대 수직 변위는 탄성이 상대적으로 작은 경간 중심부분에서 생기고, 최소 수직 변위는 탄성이 상대적으로 큰 곡선당김금구 근처에서 생긴다는 것을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 볼 수 있듯이 팬 헤드의 양정(Stroke)은 개활지에서는 41.4mm이고, 터널 구간에서는 56.1mm 이다. GPU 팬터그래프의 팬 헤드가 갖는 허용 양정이 나와 있는 관련 도면이 없어 허용 양정을 정확히 알 수는 없으나 $\pm 30\text{mm}$ 로 나와 있는 자료[6]가 있으므로 이를 기준으로 생각해 보면 열차의 본선 시운전시 팬 헤드의 조정이 정밀하게 이루어지지 않으면 터널 구간에서 팬터그래프의 운동이 구속되어 이선이 발생할 가능성이 있으므로 유의할 필요가 있다고 생각된다.

팬 헤드가 갖는 최대 변위는 그림 9(b)에서 알 수 있듯이 개활지 구간에서 94.4mm, 터널 구간에서 114.2mm가 생긴다. 이 값은 경부고속철도 GPU 팬터그래프의 압상량 제한 설정치인 200mm보다 작으므로 팬터그래프에 장착된 압상량 제한 장치의 작동없이 집전할 수 있음을 예상할 수 있다.



(a) 팬터그래프 질량의 수직변위 변화



(b) 팬터그래프 헤드의 수직변위 변화 비교

그림 9 팬터그래프 변위

4. 피로 강도 해석

4.1 응력해석

전차선은 장력에 의한 정적 인장 응력을 받고 있는 상태에서 팬터그래프 지나감에 따라서 변동 응력을 추가로 받게 된다. 이러한 응력 상태에 있는 전차선에 대한 피로 강도 해석을 하기 위하여 변동 응력 뿐만 아니라 정적 응력을 알아야 하므로 경부고속철도 가선계에 대한 응력해석을 범용 유한요소법 ABAQUS 5.7을 사용하여 수행하였다.

유한요소법을 이용한 응력해석 모델은 그림 10과 같으며 모델링과 관련된 주요 특성은 아래와 같다.

- 전차선 및 조가선은 빔(Beam) 요소로, 드로퍼는 바(Bar)요소로 모델링
- 드로퍼는 인장력(Tension)은 지탱할 수 있으나 압축력(Compression)은 지탱하지 못하는 비선형을 모델링
- 전차선 편위로 인한 곡선당김금구에서 발생하는 강성(Stiffness) 및 질량을 반영
- 고정단의 영향을 배제시키기 위하여 동일한 3경간을 모델링하고, 해석 데이터는 가운데 경간의 데이터만을 취하여 평가에 사용.
- 구속 조건은 그림10에서와 같이 병진 자유도에 대하여 전차선, 조가선의 왼쪽 끝단은 완전 고정, 오른쪽 끝단 및 중간 조가선 현수점은 롤리(Roller) 고정을 하였으며, 회전 자유도에 대하여는 모두 자유상태로 놓았음.

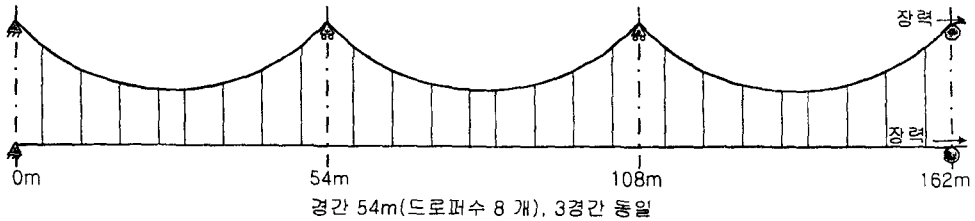


그림 10 가선계 응력해석 모델

해석을 통해 얻은 경부고속철도 가선계의 정적 평형 상태가 그림 11에 나와 있는데 경간 중앙 부분에서 정적 처짐(Presag)을 가짐을 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 전차선의 중앙이 곡선당김금구 위치에 비하여 탄성이 상대적으로 작아 팬터그래프의 수직 변위가 크게 발생하게 되어 이선이 발생하게 되므로 이를 완화하고자 경간 중앙에 이러한 정적 처짐을 주어 팬터그래프의 상하 방향 변위를 줄이고자 하는 것이다.

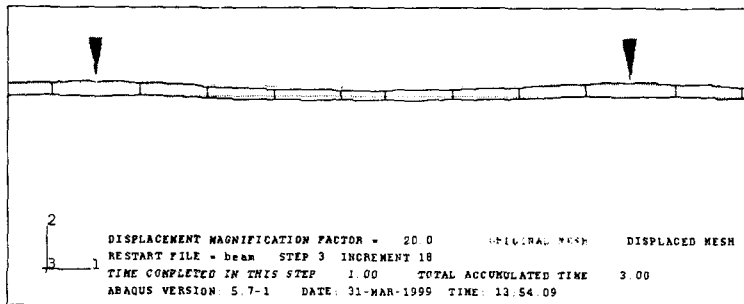


그림 11 경부고속철도 가선계의 정적 평형 상태(경간 54m)

그림 7로부터 터널 구간에서의 최대 접촉력은 290N이고, 작용 위치가 곡선당김금구로부터 우측으로 47.25m 떨어진 곳이라는 것을 알았으며 이 위치에서의 변동 응력을 계산한 결과가 표 2에 나와 있다. 또한 곡선당김금구의 위치와 경간 중앙에서의 변동 응력을 계산한 결과가 표 2에 나와 있다. 이 때 계산에 사용한 접촉력의 크기는 곡선당김금구에서 113N, 경간 중앙에서 237N이다.

표 4 전차선에 작용하는 정적 응력 및 변동 응력

위치	구분	접촉력(N)	정적 응력(MPa)	변동 응력(MPa)
접촉력 최대	전차선 상부	290	134	24
	전차선 하부		133	24
곡선당김금구	전차선 상부	113	134	8
	전차선 하부		133	8
경간 중앙	전차선 상부	237	134	19
	전차선 하부		133	20

일반적으로 재료에 정적 응력이 작용하고 있는 상태에서 변동 응력이 작용하는 경우에는 변동 응력만이 작용하는 경우에 비하여 피로 수명이 짧아지므로 본 논문에서는 평균 응력이 피로 수명에 미치는 영향을 간단히 고려할 수 있는 Goodman 다이어그램을 사용하여 피로 수명을 평가하였다. 표 2에 나와 있는 정적 응력과 변동 응력을 Goodman 다이어그램에 표시해 보면 최대 접촉력 작용점에서의 변동 응력이 안전 영역에 있음을 그림 12를 통해 알 수 있다. 여기서 사용한 피로 한도는 일본에서 문헌에서 구한 전차선 피로한도(순동 기준)로 60 MPa[4]이며, 인장한도는 경부고속철도 계약서에 나와 있는 순동(-35℃ 기준)에 대한 값으로 347.3 MPa[5]이다.

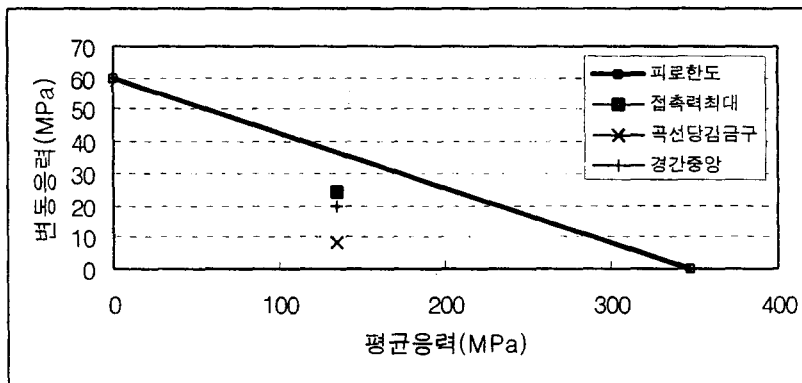


그림 12 전차선에 대한 Goodman 다이어그램

5. 종합의견

본 논문에서는 경부고속철도와 단면적이 같은 7량 편성의 열차(GPU 팬터그래프 탑재)가 길이 1000m이고, 경부고속철도와 단면적이 같은 터널(단면적 107m^2)을 300 km/h로 진입하는 경우에 대한 공력 해석, 집전성능 해석 및 전차선 피로수명 해석을 수행하였다.

해석 결과에 따르면 팬터그래프와 가선 사이의 최대 접촉력은 터널 입구 및 출구 근방에 위치한 경간에서 발생하였는데 그 값은 약 290 N이다. 접촉력이 최대가 되는 위치에서 108.0~111.2mm이고, 곡선당김금구 위치에서는 85.3mm, 경간 중앙에서는 85.3~92.5mm의 전차선 변위가 생긴다. 개활지에 위치한 경간의 곡선당김금구 위치에서의 전차선 변위는 72.5mm로 계산되므로 터널 구간에서 양력에 의한 전차선의 압상은 약 13mm 정도임을 알 수 있다. 그러나 경부고속철도 가선계는 400mm까지의 압상을 허용하고 있으므로 터널 구간에서의 전차선 압상량의 증가는 팬터그래프와의 간섭 문제를 야기시키지 않을 것으로 생각된다.

팬 헤드의 최대 수직 변위는 탄성이 상대적으로 작은 경간 중심부분에서 생기고, 최소 수직 변위는 탄성이 상대적으로 큰 곡선당김금구 근처에서 생긴다. 팬 헤드의 양정(Stroke)은 개활지에서는 41.4mm이고, 터널 구간에서는 56.1mm 이다. 이 값은 경부고속철도 GPU 팬터그래프의 압상량 제한 설정치인 200 mm보다 작으므로 팬터그래프에 장착된 압상량 제한 장치의 작동없이 집전할 수 있음을 예상할 수 있다. GPU 팬터그래프의 팬 헤드가 갖는 허용 양정이 나와 있는 관련 도면이 없어 허용 양정을 정확히 알 수는 없으나 양정이 $\pm 30\text{mm}$ 로 나와 있는 자료가 있으므로 이를 기준으로 생각해보면 열차의 본선 시운전시 팬 헤드의 조정이 정밀하게 이루어지지 않으면 터널 구간에서 팬터그래프의 수직 운동이 구속되어 이선이 발생할 가능성이 있으므로 유의할 필요가 있다고 생각된다.

열차가 터널에 진입할 때 터널 구간에 위치한 가선계에 작용하는 접촉력이 증가하여 전차선의 피로 수명이 단축될 수 있다. 본 논문에서 터널 진입 시 발생하는 접촉력의 변화, 경부고속철도 전차선 재질, 전차선 장력(20 kN)을 고려하여 피로수명 평가를 수행해 본 결과 열차가 300 km/h의 속도로 터널에 진입할 때 생기는 변동 응력은 Goodman 다이어그램에서 안전 영역 내에 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 사용한 자료 중에서 터널 구간에서의 경간길이 등과 같은 일부는 정확한 설계자료에 근거한 것이 아님을 밝힌다. 터널 구간에서는 양력 등이 급변하여 이선 등 집전 문제가 발생하기 쉬우므로 이에 대비하고자 정확한 설계자료와 시험결과를 확보하기 위한 노력을 해야 할 것이며, 이를 기초로 한 세밀한 집전 관련 연구를 지속적으로 추진할 필요가 있다.

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] 권혁빈, 이동호, "고속전철의 터널진입 해석을 위한 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법의 연구" 98년 항공우주학회추계학술대회 논문집, 1998년
- [3] Y.Fujii, K.Manabe, "Computer Simulation for Dynamics of Overhead Catenary-Pantograph System," Computers in Railways
- [4] ERRI, "Simulation of the dynamic behavior of the overhead/pantograph system(two pantograph raised)," ERRI A 186/RP 1, 1996년
- [5] 한국고속철도건설공단, "CONTRACT for provision of Rolling Stock, Catenary, and Train Control System," Vol 1, 2, 1994년
- [6] CEGELEC, "Mathematical modelling of LGV catenary-GPU pantograph system," Letter, 1993년