

한국형 고속전철 집전 시스템의 동적설계에 관한 연구

A Study on Dynamic Design of Current Collection System for the Korean High Speed Train

허 신*, 경진호*, 송달호*
Hur, Shin Kyung, Jin-Ho Song, Dahl-Ho

ABSTRACT

The dynamic performance design of catenary-pantograph system which collects current for the next generation Korean high speed train(KHST) was considered. Used was the same dynamic model of the catenary-pantograph system as that of TGV-K which will be introduced for Kyung-bu corridor. Using the model, sensitivity analysis for design variables were made to improve dynamic performance of KHST system. The results of sensitivity analysis and performance improvement are as follows:

- (1) It was found that aerodynamic force, tension of contact wire, mass of contact strip, mass of supporting contact strip, mass of clamp, mass of steady arm, and stiffness of plunger were the design variables most influencing the dynamic performance of the system.
- (2) Pantograph with reductions of 20% aerodynamic force, 34% weight of supporting contact strip, 20% spring constant of plunger, and 34% equivalent mass of steady arm was very possible system for the KHST which will be running at maximum operating speed 350 km/h.

1. 서론

경부고속전철(TGV-K)의 집전계에 대해서는 프랑스에서 설계/제작되었으며, 프랑스를 비롯한 선진국의 설계기술 이전은 기대할 수 없는 실정이다. 따라서 G7과제에서 집전계 관련 연구를 통해서 한국형 고속전철(KHST)의 집전계에 대한 설계기술을 개발하고 있다. KHST 집전계의 개발 방향은 TGV-K 집전계의 가선계는 가능한 한 그대로 사용하고, 판토히래프의 성능만을 개선하여 전반적인 목표 성능시방을 달성하고자 하는 것이다.¹⁾ 이것은, 가선계는 한번 설치하면 장기적으로 운영을 할 수 밖에 없는 구조이고, 설치 비용이 많이 들기 때문에 가선계의 재설치나 근본적인 수정은 어렵다고 본 것이 주된 이유이다. 따라서 KHST 집전계의 연구 개발은 주로 판토히래프의 동적성능 개선 또는 새로운 개념의 판토히래프 개발로 추진하는 것이 타당하다고 본다. 고속전철의 속도향상을 위한 핵심 기술중의 하나는 집전시스템의 성능 향상이 반드시 필요하며, 최적 성능기준은 안정된 집전성능, 전차선과 판토히래프 집전판의 마모 최소화, 속도향상에 따른 소음저감이 다. 집전성능을 최적화하기 위하여 집전계의 신뢰성 있는 수치 모의해석을 사용함으로써 집전계의 동적거동에 영향을 주는 많은 성능변수에 대한 분석 및 최적화를 경제적이고 신속하게 할 수 있다.²⁾

본 논문에서는 최고 운전속도 350 km/h인 KHST의 집전 시스템에 대한 동적설계를 위해서 TGV-K에 사용하는 집전계를 기본 모델로 이용한다. 설정된 기본 모델의 주요 동적 설계변수의 변화에

* 한국기계연구원, 신교통기술연구부, 정희원

대한 동적성능의 변화를 파악하고, 동적성능에 가장 큰 영향을 주는 설계변수를 선택하여, 동적 성능 개선에 사용한다.

2. 집전 시스템의 모델

2.1 단순 가선계의 모델

가선의 모델은 그림 1에서와 같이 TGV-K용의 단순 가선계이고, 전차선, 전차선을 행거로 지지하는 조가선, 편위(staggering)를 주는 당김금구로 구성되어 있다. 주요 제원으로서 경간은 63 m 이고, 가고는 1.4 m이며, 사전 이도(pre-sag)는 경간 길이의 1/2000이다. 표 1은 단순 가선계의 특성 데이터를 보이고 있다. 가선의 감쇠비는 가선의 내부 감쇠와 공기마찰에 의한 감쇠를 시험에 의해서 측정된 값으로 참고문헌으로부터 인용한 값이다.³⁾ 각각의 행거 질량은 전차선과 조가선을 고정하는 클램프의 질량을 포함한다.

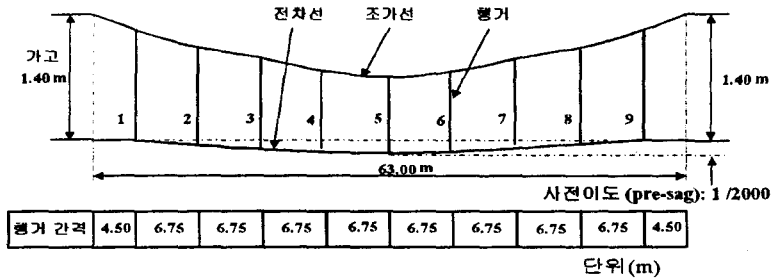


그림 1. 단순 가선계의 구조 및 제원

표 1. 단순 가선계의 해석 모델 데이터

항목	선밀도 (kg/m)	장력 (N)	감쇠비	기타	항목	값
조가선	0.605	14,000	0.01	-	경간(m)	63
전차선	1.334	20,000	0.05	-	행거수	9
행거선	0.108	-	-	클램프 질량 (2 × 0.25kg)	집중질량 간격(m)	0.45

당김장치는 전차선을 잡아주는 이어금구와 그것을 연결하는 당김금구로 구성되어 있다. 당김장치의 등가질량 m 은 식(1)과 같이 고려한다.

$$m = m_e + m_p / 3 \quad (1)$$

여기서, m_e 는 이어금구의 질량이고, m_p 는 당김금구의 질량이다. 또한, 스프링 상수는 전차선의 편위로 발생하는 횡장력과 당김금구의 설치 각도에 의해서 계산되는 값이고, 감쇠상수는 연결부의 마찰로 발생하는 값이다.³⁾ 표 2는 TGV-K용으로 사용되는 당김장치의 등가모델의 특성 데이터이다.

표 2. 당김장치의 특성 데이터

	등가질량 (kg)	스프링 상수 (N/m)	감쇠상수 (Ns/m)
곡선당김장치	0.61	218	0.23

2.2 판토타그래프의 모델

그림 2는 TGV-K에 사용되는 GPU 형식의 판토타그래프 등가 해석모델로서, 3 자유도의 집중질량 모델로 구성되어 있으며, 각각의 집중질량 사이에는 스프링과 댐퍼로 연결되어 있다. 표 3은 GPU 판토타그래프의 등가모델의 데이터를 나타내고 있다. 압상력은 판토타그래프의 메인 프레임에 작용하는 정적 압상력 70 N과 집전판 지지부에 작용하는 상방향 공력과 메인 프레임에 작용하는 하방향 공력으로 구성된다.

특히, 공력은 운전속도의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로 고속운전시에는 총 압상력중에서 공력이 차지하는 비율이 크게 된다. GPU 판토타그래프에서 작용하는 집전판 지지부의 상방향 공력은 주행속도 300 km/h에서 약 131 N이고, 주행속도 350 km/h에서는 약 180 N의 공력이 작용한다.⁴⁾

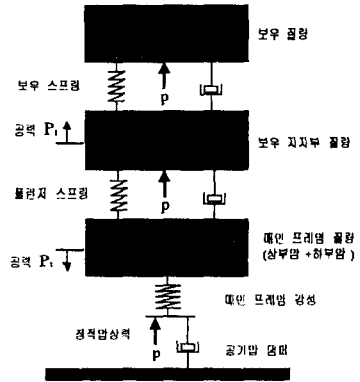


그림 2. GPU 판토타그래프의 등가 해석모델

표 3. GPU 판토타그래프 등가 해석모델의 특성 데이터

	등가질량 (kg)	스프링 상수 (N/m)	감쇄상수 (Ns/m)	압상력 (N)	공력압상계수 (N/(Km/h) ²)
집전판	8.1	9,000	6.0	-	-
집전판 지지부	8.0	1,500	0	-	0.00146
메인 프레임부	23.1	6,876	140	70	-0.00231

3. 동적성능 평가 기준

한국형 고속전철의 집전 시스템의 성능해석 결과를 비교할 수 있는 적합한 성능평가 기준치가 있어야 하지만 제시된 기준치가 없으므로 TGV-K 집전계의 성능평가 기준치를 그대로 사용한다. 집전계의 동적성능을 평가하기 위해서 다음과 같은 성능평가 기준을 사용한다.

3.1 이선율

판토타그래프와 전차선은 항상 접촉된 상태에 있어야 하지만, 판토타그래프의 이동에 따라 순간적으로 비접촉이 발생하는데, 이러한 현상을 이선이라고 한다. 일반적으로, 고속전철의 속도향상은 이선 특성에 제한을 받으며, 한국형 고속전철의 집전계에서는 이선율을 1% 이하로 제한하고 있다. 이선율을 식으로 표시하면 식(2)와 같다.

$$\text{이선율 (\%)} = \frac{\sum(\text{이선시간})}{\text{주행시간}} \times 100 \quad \text{또는} \quad \frac{\sum(\text{이선하여 주행한 거리})}{\text{주행거리}} \times 100 \quad (2)$$

3.2 접촉력

접촉력의 크기는 집전 시스템의 동적거동 및 유지보수에 중요한 설계기준이다. 접촉력이 증가하거나 감소함에 따라 전차선 및 집전판의 기계적 마모와 아크 발생에 의한 전기적 마모 사이에 상반되는 효과를 가지므로 마모를 줄일 수 있는 최적의 접촉력을 결정할 필요가 있다. 그리고 수치 모의해석 또는 시험에 의해서 얻어진 접촉력 데이터를 정확하게 평가하기 위해서는 통계학적인 처리를 할 필요가 있다. 즉, 수치 모의해석 또는 시험구간의 전 접촉력의 시간이력을 통계처리하여 접촉력의 평균값(F_{mean})과 표준편차(σ)를 구한다. 그리고 식(3)의 가우스 분포에 포함되는 값만을 취하여 접촉력의 평가기준으로 삼는다.

$$(F_{\text{mean}} - 3\sigma) \leq F \leq (F_{\text{mean}} + 3\sigma) \quad (3)$$

위 가우스 분포식의 최소치와 최대치를 최소 접촉력, 최대 접촉력이라 부르고, 이선을 피하기 위해서는 식(4)를 만족해야 한다.

$$(F_{\text{mean}} - 3\sigma) \geq 0 \text{ 또는 } (F_{\text{mean}} / 3) \geq \sigma \quad (4)$$

TGV-K 집전계에서 제시하는 접촉력 평가의 기준치는 다음과 같다.

- 평균 접촉력 $F_{\text{mean}} = 180 \text{ N}$
- 최소 접촉력 $F_{\text{min}} = 60 \text{ N}$
- 표준 편차 $\sigma = 40 \text{ N}$ ($\sigma / F_{\text{mean}} = 22 \%$)

이 접촉력의 기준치를 만족할 경우, 운전속도 300km/h에서의 TGV-K 집전계의 집전성능은 이선률 1% 이하를 유지할 수 있으며, 집전판 또는 가선의 마모를 최소화할 수 있다.⁵⁾

3.3 압상량

평균 압상량은 전차선의 상하 이동의 정도로서 전차선의 피로파괴, 유지보수와 관련된 성능지수이고, 전주 위치에서의 최대 압상량은 당김금구(steady arm)의 상승 높이를 결정하는 설계변수이다. TGV-K 가선계에서 당김금구의 최대 허용 압상량은 40 cm이다.

4 동적 설계변수에 대한 집전계의 민감도 분석

TGV-K 집전계에 대해서 운전속도를 350 km/h로 증가시킨 경우, 이선율은 1% 이내를 만족하지만, 접촉력의 성능기준은 만족하지 못한다. 따라서 한국형 고속전철의 최대 운전속도 350 km/h를 만족시키는 집전 시스템을 위해서는 가선계 또는 판토틀래프의 동적성능을 개선하여야 함을 알 수 있다.⁵⁾ 동적성능 개선을 위한 방안으로서, 기본 모델의 주요 동적 설계변수의 변화에 대한 가선-판토틀래프의 동적성능의 변화를 파악하고, 동적성능에 가장 큰 영향을 주는 설계변수를 선택하여, 동적성능 개선에 사용한다.

4.1 동적 설계변수의 선정

표 4는 동적 설계변수의 분석을 위해서 12개의 주요 설계변수를 선정하고, 각 설계변수의 기준값을 $\pm 20\%$ 씩 변화시킨 것이다. 동적 설계변수의 기준값은 TGV-K 집전 시스템의 동적특성치를 사용한다.

표 4 선정된 동적 설계변수

설계변수	기호	-20%	기본모델	+20%
전차선 장력(N)	A	16,000	20000	24000
클램프 질량(kg)	B	0.4	0.5	0.6
곡선당김 아암 등가질량(kg)	C	0.488	0.61	0.732
공력($N/(km/h)^2$)	D	0.001168	0.00146	0.001752
집전판 질량(kg)	E	6.48	8.1	9.72
집전판 지지부 질량(kg)	F	6.4	8.0	9.6
집전판 프레임 질량(kg)	G	18.48	23.1	27.72
집전판 스프링 상수(N/m)	H	7,200	9,000	10,800
집전판 지지부 스프링 상수(N/m)	I	1,200	1,500	1,800
집전판 감쇄상수(Ns/m)	J	4.8	6.0	7.2
집전판 프레임 감쇄상수(Ns/m)	K	112	140	168

4.2 동적 설계변수에 대한 민감도 분석 결과

설계변수의 변화에 대한 동적성능의 판단기준은 이선율, 평균 접촉력, 표준편차, 최소 접촉력, 최대 접촉력, 곡선당김 아암의 압상량이다.

그림 3에서 이선율에 크게 영향을 주는 설계변수는 A, B, C, D, E, F, H이다. 특히 장력의 변화는 이선율에 지배적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 평균 접촉력에 크게 영향을 주는 설계변수는 D이며, 나머지 변수는 거의 변화가 없다. 그림 5에서 표준편차에 크게 영향을

주는 설계변수는 A, B, E이며, 특히 장력의 변화가 가장 큰 영향을 줌을 알 수 있다. 그림 6에서 최대 접촉력에 크게 영향을 주는 설계변수는 A, B, D, E이며, 특히 장력의 변화가 가장 큰 영향을 주며, 그 다음은 공력의 변화에 대한 영향이다. 그림 7에서 최소 접촉력에 크게 영향을 주는 설계변수는 A, B, C, D, E, F이며, 특히 장력의 변화가 가장 큰 영향을 주며, 그 다음은 공력의 변화에 대한 영향이다. 그림 8에서 곡선당김 아암의 압상량에 크게 영향을 주는 설계변수는 A, B, D, E이며, 특히 장력의 변화가 가장 큰 영향을 주며, 그 다음은 공력의 변화에 대한 영향이다.

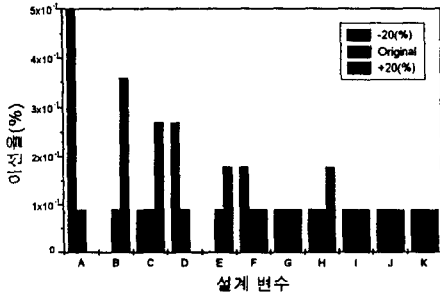


그림 3 이전율 변화

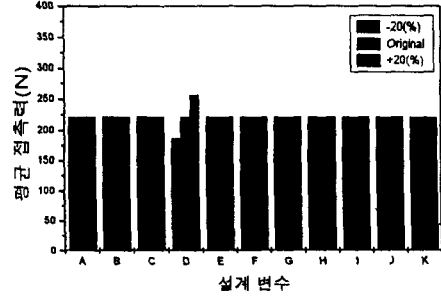


그림 4 평균 접촉력의 변화

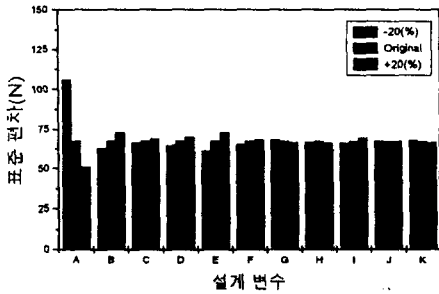


그림 5 표준편차의 변화

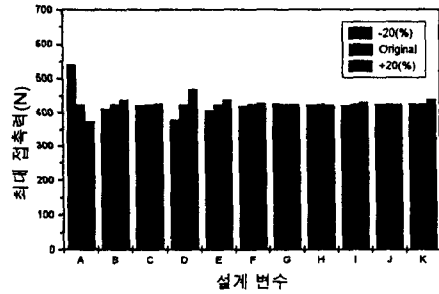


그림 6 최대 접촉력의 변화

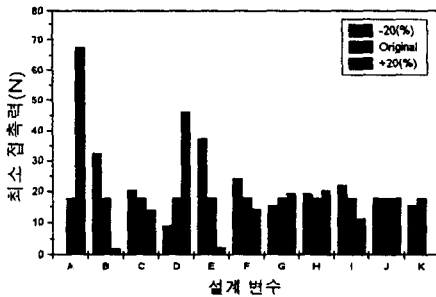


그림 7 최소 접촉력의 변화

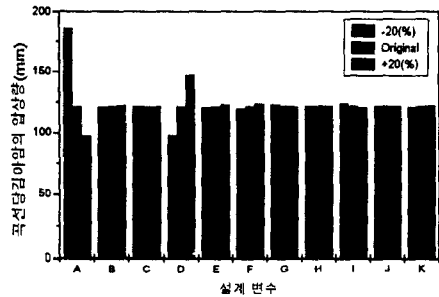


그림 8 곡선당김 아암의 압상량의 변화

5. 한국형 고속전철의 집전 시스템에 대한 동적성능 해석

한국형 고속전철의 집전 시스템에 대한 동적설계를 위해서 몇 가지 해석 시나리오를 만들었다.

민감도 해석을 통하여 동적성능에 영향을 많이 주는 동적 설계변수로서는 공력, 전차선의 장력, 집전판 질량, 집전판 지지부 질량, 플러저 스프링 상수, 클램프 질량, 당김금구의 등가질량으로 나타났다. 따라서 위에서 제시된 동적 설계변수를 한국형 고속전철의 집전 시스템의 동적성능 개선에 사용한다. 표 5는 설계변수의 변화에 대한 해석 시나리오를 보이고 있다.

Case 1은 판토크래프의 동적특성만을 개선하여 한국형 고속전철에 적합한 집전 시스템으로 사용하기 위한 것이다. 가선계의 재설계로 인한 새로운 가선의 개발 및 재설치 비용 등이 막대한 점을 고려하면 가장 현실적인 대안이다. 개선 내용은 판토크래프의 공력을 20%, 집전판 질량을 35%, 집전판 지지부 질량을 34%를 경량화하고, 플러저 스프링 상수를 20% 작게 한 것이다. Case 2는 Case 1의 개선안에 더하여 행거의 고정 클램프 질량을 20% 경량화한 경우이다. Case 3은 Case 1의 개선안에 더하여 곡선당김 아암의 등가질량을 34% 경량화한 경우이다. Case 4는 Case 1의 개선안에 더하여 TGV-K 가선계의 전차선의 장력인 20,000 N를 4.8% 증가시킨 경우이다. 전차선의 안전율이 2.2에서 2.1로 감소하나 크게 문제되지 않을 것으로 생각된다.

이상의 4가지 case들에서 보듯이 한국형 고속전철 집전 시스템의 동적설계 방안은 가선계는 가능한 한 TGV-K의 가선계를 유지하면서 판토크래프의 동적성능을 크게 향상시켜 열차의 속도향상을 도모하고자 하는 것이다.

표 5 설계변수의 변화에 대한 해석 시나리오

	동적 설계변수						
	공력계수(P_1) ($N/(km/h)^2$)	전차선 장력(N)	집전판 질량(kg)	집전판 지지부 질량(kg)	플러저 스프링 상수(N/m)	클램프 질량(kg)	당김금구 질량(kg)
Case 1	1.15E-3	20,000	5.2	5.3	1,200	0.25	0.61
Case 2	1.15E-3	20,000	5.2	5.3	1,200	0.2	0.61
Case 3	1.15E-3	20,000	5.2	5.3	1,200	0.25	0.4
Case 4	1.15E-3	21,000	5.2	5.3	1,200	0.25	0.61

5.3 수치 모의해석 결과

표 6은 위의 해석 시나리오를 따라 수치 모의해석을 한 결과로서, 집전 시스템의 동적성능에 가장 영향을 주는 접촉력 및 압상량의 통계치를 보이고 있다. 그림 9는 Case 1의 판토크래프의 동적특성 개선에 대한 추종성능 해석을 한 것이다. 수평축은 판토크래프에 작용하는 가진 주파수 범위를 나타내고, 수직축은 작용하는 가진력에 대해서 판토크래프의 추종변위를 나타낸다. 그림에서 경간 주파수는 운행속도를 경간의 길이로 나눈 값을 의미하고, 행거 주파수는 운행속도를 행거 사이의 거리로 나눈 값을 의미한다. 결국 경간 주파수와 행거 주파수는 판토크래프를 가진하는 주파수가 된다. 따라서 TGV-K의 GPU 판토크래프가 속도 300 km/h로 주행했을 경우와 동적특성을 개선한 판토크래프가 속도 350 km/h로 주행하였을 경우에 대해서 동적컴플라이언스를 보면, 속도 300 km/h일 때보다 주행속도 350 km/h일 때에 경간 주파수에서 뿐만 아니라 주파수 대역 1 Hz에서 6 Hz까지 추종성능이 좋아진 것을 알 수 있다. 행거 주파수 지점에

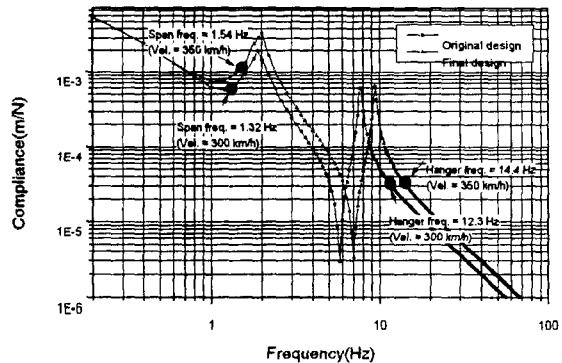


그림 9 판토크래프의 동적성능 개선

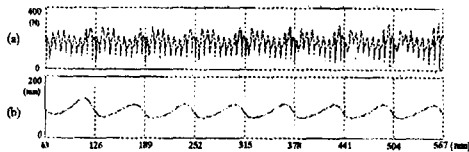
서는 추종성능이 개선되지 않았다. 이는 행거 주파수의 추종성능에 관련있는 집전판 스프링 상수의 민감도가 낮기 때문에 성능개선에 포함시키지 않은 결과로 생각된다. 평균 접촉력은 기준치의 2%를 초과하지만 대체적으로 만족스럽고, 표준편차는 17.5%, 최대 접촉력은 6.6%를 초과한다. 최소 접촉력은 기준치보다 29% 작다. 그림 10(a)는 접촉력의 발생 파형으로서 경간 지지부 근방에서 최대치를 나타낸다. 그림 10(b)는 전차선의 압상량으로서 경간 지지부의 2/3지점에서 최대치를 나타내고, 전주 지점에서의 당김금구 압상변위는 9.3 cm로서 기준치 이내에 있다.

Case 2의 경우, 평균 접촉력은 기준치의 2%를 초과하지만 대체적으로 만족스럽고, 표준편차는 9.0%, 최대 접촉력은 1.6%를 초과한다. 최소 접촉력은 기준치보다 12.5% 작다. 그림 11(a)는 접촉력의 발생 파형으로서 경간 지지부 근방에서 최대치를 나타낸다. 그림 11(b)는 전차선의 압상량으로서 경간 지지부의 2/3지점에서 최대치를 나타내고, 전주 지점에서의 당김금구 압상변위는 9.3 cm로서 기준치 이내에 있다.

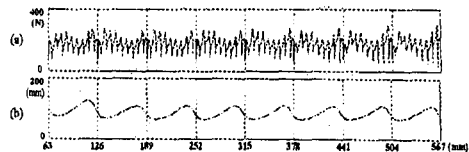
Case 3의 경우, 평균 접촉력은 기준치의 2%를 초과하지만 대체적으로 만족스럽고, 표준편차는 15.0%, 최대 접촉력은 6.3%를 초과한다. 최소 접촉력은 기준치보다 24.5% 작다. 그림 12(a)는 접촉력의 발생 파형으로서 경간 지지부 근방에서 최대치를 나타낸다. 그림 12(b)는 전차선의 압상량으로서 경간 지지부의 2/3지점에서 최대치를 나타내고, 전주 지점에서의 당김금구 압상변위는 9.3 cm로서 기준치 이내에 있다.

표 6 접촉력 및 압상량의 수치 모의해석 결과(V= 350 km/h)

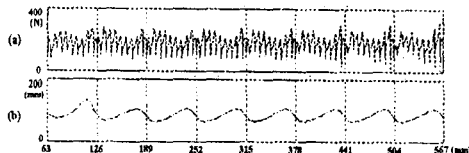
해석 항목 \ 설계변수	350(km/h) 기준치	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
평균 접촉력(N)	180	183.3	183.3	183.3	183.3
접촉력의 표준편차(N)	40	47.0	43.6	46.0	43.6
최대 접촉력(N)	300	317.0	305.0	319.0	307.0
최소 접촉력(N)	60	42.3	52.5	45.3	52.5
당김금구의 압상량(cm)	40	9.3	9.3	9.3	8.8



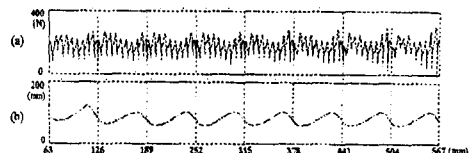
(a) 접촉력 및 (b) 전차선의 압상변위
그림 10 Case 1의 해석 결과



(a) 접촉력 및 (b) 전차선 압상변위
그림 11 Case 2의 해석 결과



(a) 접촉력 및 (b) 전차선 압상변위
그림 12 Case 3의 해석 결과



(a) 접촉력 및 (b) 전차선 압상변위
그림 13 Case 4의 해석 결과

Case 4의 경우 평균 접촉력은 기준치의 2%를 초과하지만 대체적으로 만족스럽고, 표준편차는

9.0%, 최대 접촉력은 2.3%를 초과한다. 최소 접촉력은 기준치보다 12.5% 작다. 그림 13(a)는 접촉력의 발생 파형으로서 경간 지지부 근방에서 최대치를 나타낸다. 그림 13(b)는 전차선의 압상량으로서 경간 지지부의 2/3지점에서 최대치를 나타내고, 전주 지점에서의 당김금구의 압상변위는 8.8 cm로서 기준치 이내에 있다.

6. 결론

최고 운전속도 350 km/h인 한국형 고속전철(KHST)의 집전 시스템에 대한 동적설계를 위해서, 경부고속전철에 사용하는 집전계를 기본 모델로 사용하였다. 사용된 기본 모델의 동적 설계변수에 대한 민감도 해석을 통하여 동적성능에 가장 큰 영향을 주는 설계변수를 선정하였다. 동적성능 개선에 있어서 개선계는 가능한 한 최소한의 설계변경을 하고, 판토틀래프의 동적성능을 크게 개선하여 최고 운전속도 350 km/h에서 동적성능 기준을 만족할 수 있는 한국형 가선-판토틀래프계의 동적설계를 수행하였다. 한국형 고속전철의 집전 시스템에 대한 동적성능 개선을 위해서 작성된 해석 시나리오에 따라 수행한 동적설계의 결론은 다음과 같다.

- (1) 사용된 기본 모델의 동적 설계변수에 대한 민감도 해석을 통하여 동적성능에 큰 영향을 주는 동적 설계변수로서는 공력, 전차선의 장력, 집전판 질량, 집전판지지부 질량, 플러저 스프링 상수, 클램프 질량, 당김금구의 질량임을 알았다.
- (2) GPU 판토틀래프의 동적특성에 대한 성능만을 개선한 Case 1과 GPU 판토틀래프의 성능개선 및 당김금구를 경량화시킨 Case 3의 경우는 표준편차와 최소 접촉력이 동적성능의 기준치를 만족할 수 있는 수준은 되지 못하나 상당히 개선되었음을 알 수 있었다. 동적성능 평가의 기준치에 가장 접근하는 경우는 GPU 판토틀래프의 성능개선 및 전차선의 장력을 4.8 % 증가시킨 Case 2와 GPU 판토틀래프의 성능개선 및 행거 클램프금구를 경량화시킨 Case 4이다. 이들의 경우는 이선 발생의 확률에 직접적인 영향을 주는 최소 접촉력은 기준치에 접근해 있고, 집전판과 전차선의 마모 및 전차선의 파손에 영향을 주는 최대 접촉력은 작게 나타났다.
- (3) 350 km/h용 한국형 고속전철 집전 시스템의 동적설계의 결과, Case 2와 Case 4가 한국형 고속전철 집전 시스템의 동적성능 시방을 만족시킬 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 고속전철 시스템 기본 사양(1998), 한국철도기술연구원
2. Dr.-Ing, Klaus Becker etc(1995), "Systematic Development of a High-speed Overhead Contact Line", Railway Technical Review No. 3-4, pp. 3-11
3. 철도종합기술연구소, "가선도-s1 Ver.1 매뉴얼"
4. 철도종합기술연구소(1996), "전차선과 판토틀래프의 특성", 연우사 출판
5. 허신, 경진호외 2명(1998), "속도향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전 시스템의 성능에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 533-539