

G7 고속전철기술개발사업 집전시스템 사양의 최적화 연구

An Optimization Study on Technical Specifications of a Current Collection System in G7 Korean High Speed Train Development Project

조용현,* 김영국,* 현승호,** 이기원,*** 김휘준****

Yong Hyeon Cho, Young Guk Kim, Seung-Ho Hyun, Kiwon Lee, Hwi Jun Kim

ABSTRACT

A study on Technical Specifications of the current collection system in G7 Korean High Speed Train Project is performed in this paper. First, an appropriate level of contact wire tension for 350 km/h commercial operation is proposed based on the foreign high speed train operation experiences and a relevant technical criterion. Second, two optimized design specifications of the pantograph for G7 Korean High Speed Train are proposed based on current collection quality. In order to perform design optimization, a formulation on the follow-up characteristics of a pantograph with 3 levels of masse-spring-damper is derived in this paper. Dynamic design parameters of the pantograph are adjusted to maximize follow-up capability at the dropper and span passing frequencies.

1. 서론

고속전철기술개발(G7)사업에서 개발하고 있는 고속 열차의 최고 운영속도인 350 km/h에서 원하는 집전 성능을 얻기 위해서는 팬터그래프뿐만 아니라 가선계의 사양을 적절히 선택해야 한다.

주행 속도가 파동 전파 속도에 가까워지면 전차선이 대 변형을 하여 이선(Loss of contact)이 생기게 된다. 이선의 발생은 집전 성능을 악화시키므로 주행 속도는 파동 전파 속도의 어느 수준 이하로 제한해야 한다. 파동 전파 속도는 장력에 비례하므로 고속으로 열차가 주행하기 위해서는 반드시 충분한 장력이 전차선에 걸려 있어야 한다.

본 연구에서는 350 km/h로 주행하기 위하여 필요한 전차선 장력을 고속철도 선진국의 운영 경험과 관련 기술 기준을 참조로 제안하였다. 또한, 팬터그래프의 추종 특성을 나타내는 다이내믹 플렉서빌리티(Dynamic flexibility)를 유도해 보고, 이를 활용하여 동적 설계 변수의 변화가 추종 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석된 내용을 기초로 350 km/h 급 G7 팬터그래프의 동적 설계 변수를 최적화 하여 G7 팬터그래프의 사양을 제시하였다. G7 팬터그래프의 사양이 갖는 집전 성능을 예측하기 위하여 KTX 가선계를 대상으로 주행 시뮬레이션을 수행하였고, 다이내믹 플렉서빌리티를 사용하여 팬터그래프의 동적 설계를 수행하는 방법에 대한 효용성을 검토하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원

**** 한국생산기술연구원 선임연구원

2. 고속용 가선계의 장력

팬터그래프의 주행 속도가 파동 전파 속도에 접근하게 되면 이선에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보기 위하여 아래 그림과 같이 팬터그래프가 저속, 고속, 파동 전파 속도로 주행하는 3 가지 경우에 대하여 살펴보기로 하자.

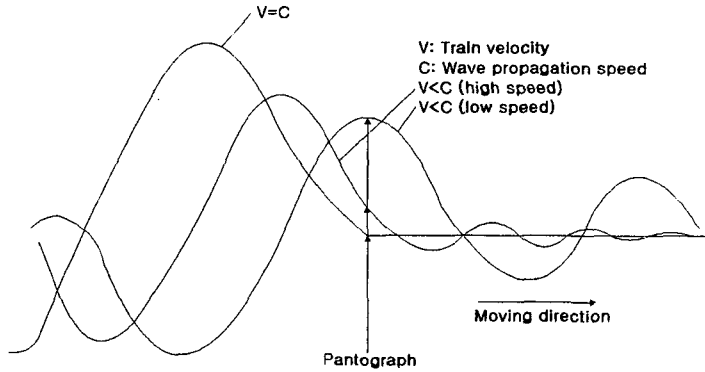


그림 1 팬터그래프 주행 속도에 따른 전차선 진동 모습

팬터그래프가 저속으로 주행하는 경우에는 팬터그래프에 의해 전차선에 가해지는 외란이 전·후방으로 퍼지게 되어 전차선의 변위는 팬터그래프를 중심으로 거의 대칭이 되나 고속으로 주행하여 파동 전파 속도에 보다 접근하는 경우에는 팬터그래프에 의한 외란이 전방보다는 후방에 전달되어 팬터그래프의 후방에 위치한 전차선의 변위가 전방에 위치한 전차선의 변위보다 크게 되어 팬터그래프의 위치에서 전차선이 음의 구배를 가지게 된다. 이러한 음의 구배를 갖는 전차선을 주행하는 팬터그래프는 아래 방향으로 내려가는 관성력을 받게 되어 경간 지지점과 같이 강성 변화가 생기는 곳에서 전차선을 추종할 수 없어 이선이 생기게 된다. 팬터그래프의 주행 속도가 파동 전파 속도와 같게 되면 한 번 이선이 생기게 되는 경우에 팬터그래프와 전차선 사이의 갭이 지속적으로 팬터그래프를 따라 가게 되어 집전을 할 수 없게 된다.

또한, 전차선에 걸리는 응력은 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비에 의존한다. 해석적인 방법을 이용하여 구한 전차선의 동적 굽힘 응력은 식(1) 과 같이 표현되는데 주행 속도가 파동 전파 속도와 같게 되면 이론적으로 굽힘 응력이 무한대가 된다.

$$\sigma = \frac{F}{2Z} \cdot \sqrt{\frac{EI}{T}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(V/c)^2}} \quad (1)$$

여기서, F, Z, EI, T, V, c는 압상력, 단면계수, 강성, 장력, 주행 속도, 파동 전파 속도를 나타낸다.

그림 2에 일본에서 사용하고 있는 전차선에 대하여 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비가 미치는 영향을 시뮬레이션을 해서 얻은 결과를 보여 주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 열차의 주행 속도가 파동 전파 속도의 비가 0.8 이상이 되면 전차선의 굽힘 응력이 급격히 증가하고, 속도비가 0.7 ~ 0.8 사이에 있으면 곡선 당김 금구와 같은 경점에서 대략 1.5 ~ 2배의 굽힘 진폭이 생기게 되어 피로파괴가 발생할 수 있다고 한다[1]. 따라서 영업 운전을 위해서는 반드시 장력을 충분히 가하여 피로파괴가 쉽게 일어나지 않도록 해야 한다.

앞서 설명한 바와 같이 팬터그래프의 주행 속도가 파동전파속도에 접근하게 되면 이선의 발생

등 문제가 발생하게 되므로 주행 속도를 파동 전파 속도보다 어느 정도 이하로 낮게 할 필요가 있다.

고속전철을 운영하고 있는 선진 각국에서의 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비는 표 1과 같다 [1]. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 고속 운행을 위하여 열차 속도 대 파동전파속도의 비를 0.68 이하가 되도록 장력을 조정하고 있다. 만약 경부고속철도를 350 km/h의 주행하게 되면 열차 속도 대 파동전파속도의 비가 0.79가 되고 이 값은 선진 외국의 0.68 보다 훨씬 커 이션 발생 가능성이 크다고 말할 수 있다.

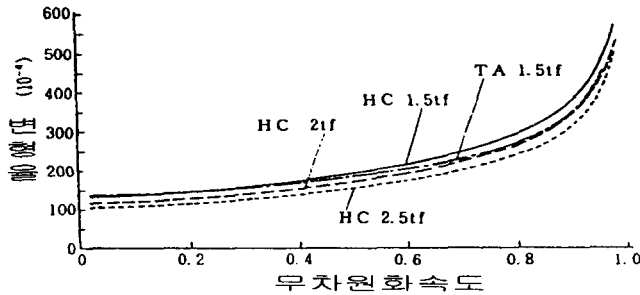


그림 2 열차속도 대 파동전파속도의 비가 전차선 굽힘 응력에 미치는 영향[1]

표 1 선진 각국의 고속 가선계의 비교[1]

철도명	선종류(mm ²)	장력(N)	선밀도(kg/m)	파동전파 속도(a)	열차속도(b)	b/a
TGV대서양	Cu 150	20000	1.33	441km/h	300	0.68
TGV남동선	Cd Cu 120	14000	1.07	412	270	0.66
신간선	Cu 170	14700	1.51	355	240	0.68
ICE신철선	Cu 120	15000	1.07	426	250	0.59

한편, UIC Code 794 OR에서는 고속 가선계(> 300 km/h)의 경우 안정된 집전을 위하여 가선계에 작용하는 장력을 다음과 같이 권고하고 있다[2].

$$\text{최소 파동 전파 속도} > V_{\text{max}} + 40 \text{ m/s} = 350 + 40 \times 3.6 = 494 \text{ km/h}$$

이러한 권고사항을 수용하기 위해서는 350km/h로 주행하기 위하여 25 kN 이상의 장력을 가해야 한다.

전차선의 장력과 관련한 선진국의 운영 경험과 UIC 코드를 검토해 본 결과 경부고속철도 전차선에 부여되어 있는 장력 20 kN(이에 해당하는 파동전파속도는 441 km/h)은 350 km/h로 영업 운행하기에는 부족한 것으로 판단된다.

경부고속철도 계약서에 따르면 경부고속철도 가선계의 전차선이 가져야 할 최소 구조강도 안전율은 15%의 마모를 고려한 상태에서 2.2 이다[3]. 경부고속철도 전차선에 작용하는 장력이 변함

에 따라서 계산된 구조강도 안전율이 표 2에 나와 있다. 표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 경부고속철도 전차선 재료인 Hard drawn Cu로는 장력을 20 kN 보다 크게 할 수 없음을 알 수 있다.

표 2 전차선 구조강도 안전율

장력	파단하중(면적)		구조강도 안전율	
	마모 미고려	마모 고려	마모 미고려	마모 고려
20kN	52.1kN (150mm ²)	44.2kN (127.5mm ²)	2.60	2.21
23kN			2.26	1.92
26kN			2.00	1.70

따라서, 300 km/h에서 350 km/h로 속도 향상을 위해서는 20 kN을 넘는 고 장력에도 견딜 수 있는 새로운 고 강도 전차선 개발이 요구되어 고속전철기술개발사업에서는 「고속 전차선 시스템 개발」 과제에서 Mg-Cu를 소재로 한 고 강도 전차선을 개발한 바 있다. Mg-Cu 소재는 마모율 15%를 고려하고도 장력을 26 kN (UIC Code 794 OR에서 권고하는 최소 전차선 장력인 25 kN 보다 큼)까지 올려도 구조 강도에 문제가 없으며, Hard drawn Cu에 비하여 도전율은 나쁘지만 전력 손실의 증가가 미미하다고 검토된 바 있다[4]. 따라서 최고 속도 350 km/h로 영업 운영을 하기 위하여 전차선의 소재로 「고속 전차선 시스템 개발」 과제에서 개발한 Mg-Cu를 사용할 수 있으리라 생각한다.

만약 장력을 26 kN까지 상승시키면 파동 전파 속도를 501 km/h까지 올릴 수 있다. 다시 말해 장력을 26 kN까지 증가시키면 350 km/h로 주행하더라도 열차 속도 대 파동전파속도의 비를 0.69로 낮출 수 있어 G7 열차가 안정적 집전을 하면서 350 km/h로 주행할 수 있으리라 생각된다. 또한, 장력이 증가하면 전차선에 걸리는 굽힘 응력이 낮아져 유지 보수 비용이 줄어들 것으로 생각된다.

3. 고속용 팬터그래프의 동특성

3.1 접촉력의 변동 원인

팬터그래프와 전차선 사이에 작용하는 접촉력은 집전 성능을 나타내는 데에 중요한 척도로 사용되고 있다. 접촉력 변동이 심하다는 것은 팬터그래프와 전차선이 이선될 확률이 높다는 것을 의미한다. 이러한 접촉력 변동은 크게 두 가지로 나누어 원인을 생각할 수 있다. 하나는 그림 3에서 보는 바와 같은 전차선 처짐 즉 이도(Dip)에 의한 것이고, 다른 하나는 주기적으로 변화하는 전차선의 강성이다.

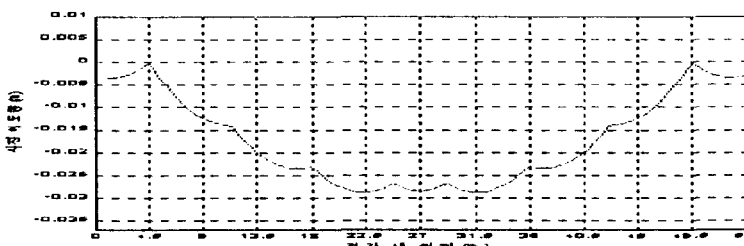


그림 3 전차선의 이도

이러한 드로퍼 사이의 이도 및 강성 변화는 드로퍼 통과 주파수(Dropper passing frequency)로 팬터그래프를 가진하게 되고, 경간을 주기로 한 이도 및 강성 변화는 경간 통과 주파수(Span passing frequency)로 팬터그래프를 가진하게 된다. 따라서 팬터그래프와 전차선 사이에 작용하는 접촉력은 개념적으로 그림 4와 같이 변동을 하게 된다[1]. 경간 길이가 드로퍼 간격 보다는 길기 때문에 경간 통과 주파수는 상대적으로 저주파이고, 드로퍼 통과 주파수는 상대적으로 고주파이다.

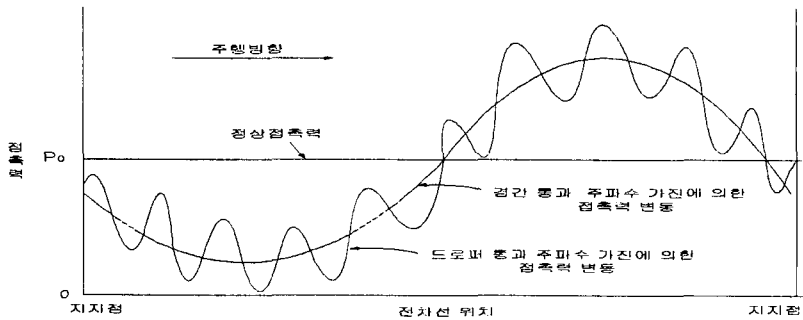


그림 4 접촉력 변동의 원인

3.2 추종 진폭 수식화

앞서 살펴본 바와 같이 전차선은 팬터그래프를 가진하게 되므로 팬터그래프가 전차선을 충분히 추종할 수 없게 되면 이선이 생기게 된다. 추종 특성 중에서 대표적으로 사용되고 있는 추종 진폭은 개발 팬터그래프의 공장 시험 단계에서 가진 시험기를 사용하여 팬터그래프 헤드를 가진할 때 시험 주파수에서 이선이 시작되는 팬터그래프 헤드의 변위를 의미한다[1]. 이러한 추종 진폭은 시험을 통해 확인하는 항목이지만 설계 단계에서도 동적 설계 변수를 결정할 때 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 팬터그래프의 설계 변수를 기초로 추종 진폭을 수식화 하고 이를 팬터그래프의 동적 설계에 활용하였다.

KTX 열차에 탑재되어 있는 팬터그래프는 그림 5에 나와 있는 GPU 팬터그래프이다. 고속용을 대표할 수 있는 GPU 팬터그래프는 그림 6과 같이 3개의 등가 질량을 가지는 것으로 동적 모델링 하므로 본 연구에서는 추종 진폭의 수식화를 3개의 등가 질량을 가지는 팬터그래프에 대하여 수행하였다.

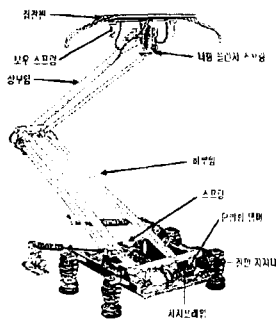


그림 5 GPU 팬터그래프

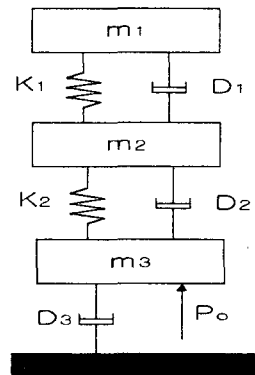


그림 6 3 등가 질량 모델

팬터그래프에 대한 운동 방정식으로부터 팬터그래프의 헤드에 작용하는 힘과 속도와의 비 즉 기계 임피던스(mechanical impedance), Z_p 를 구해 보면 식 (2) 와 같은 결과를 얻을 수 있다. 추종 진폭은 변위/힘의 차원을 가지므로 식 (3) 과 같이 변환하여 기계 임피던스로부터 추종 진폭을 얻을 수 있다.

$$Z_p = iw_p m_1 + D_1 + \frac{k_1}{iw_p} - \frac{\left(\frac{k_1}{iw_p} + D_1\right)^2}{iw_p m_2 + D_1 + D_2 + \frac{(k_1 + k_2)}{iw_p} - \frac{\left(\frac{k_2}{iw_p} + D_2\right)^2}{iw_p m_3 + D_2 + D_3 + \frac{k_2}{iw_p}}} \quad (2)$$

$$\frac{X}{F} = \frac{1}{Z_p * iw_p} \quad (3)$$

3.3 동적 설계 변수의 영향 분석

GPU 팬터그래프의 동적 설계 변수를 변화시키면서 동적 설계 변수가 추종 특성에 미치는 영향을 살펴보겠다. 우선, 동적 설계 변수의 변화를 표 3과 같이 가정해 보자.

표 3 GPU 팬터그래프의 동적 설계 변수의 변화

동적 설계 변수	negative	baseline(GPU)[5]	positive
m_1	5	7	9
m_2	5.1	8.1	11.1
m_3	10	23	36
k_1	4000	9000	14000
k_2	500	1200	1900
D_3	0	140	250

GPU 팬터그래프의 설계 변수들이 변화함에 따라서 변화하는 추종 특성의 변화가 그림 7~12에 나와 있다. 이들 그림으로부터 드로퍼 통과 주파수와 같은 고주파 영역에서는 추종 특성을 높이기 위해서는 팬헤드의 질량(m_1)을 줄이거나 팬헤드 지지 스프링의 강성(k_1)을 높여야 함을 알 수 있다. 팬헤드의 질량을 줄이게 되면 모든 고주파 영역에서 추종 특성이 개선되는 반면에 팬헤드 지지 스프링의 강성을 높이면 피크 발생 주파수 근방에서만 추종 특성이 개선되는 특성을 보인다. 팬헤드 지지 스프링의 강성(k_1)을 지나치게 증가시키면 중요한 운전 속도 영역에 Anti-resonance 주파수가 위치할 수 있으므로 주의해야 한다.

한편, 경간 통과 주파수와 같은 저주파 영역에서 피크가 발생하는 주파수를 높이기 위해서는 스프링 k_2 의 강성을 높여야 하나 스프링 k_2 의 강성을 높이면 추종 진폭이 낮아지는 특성을 보인다. 스프링 k_2 의 강성은 피크 발생 주파수의 증가와 추종 진폭의 감소를 종합적으로 고려하여 결정해야 한다. 경간 통과 주파수 영역에 위치한 Anti-resonance 주파수에서의 추종 진폭은 질량 m_3 을 줄이거나 댐퍼 D_3 을 크게 해야 증가한다. 그러나 질량 m_3 은 민감도가 낮아 큰 실효성은 없는 것으로 보인다.

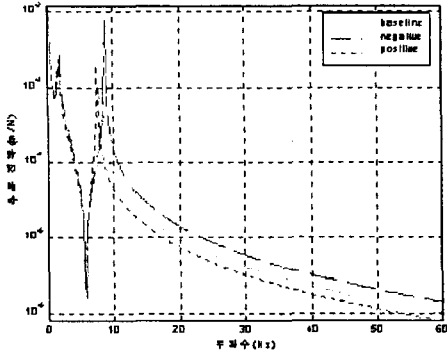


그림 7 m_1 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

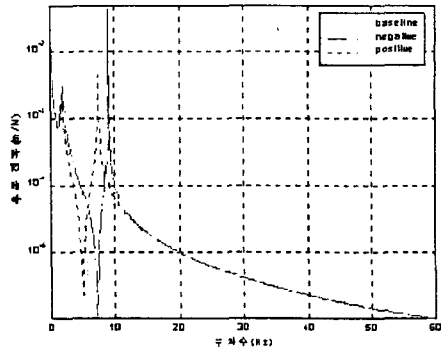


그림 8 m_2 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

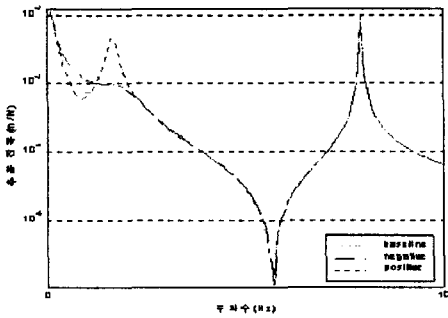


그림 9 m_3 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

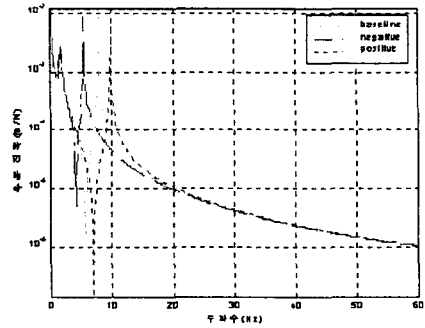


그림 10 k_1 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

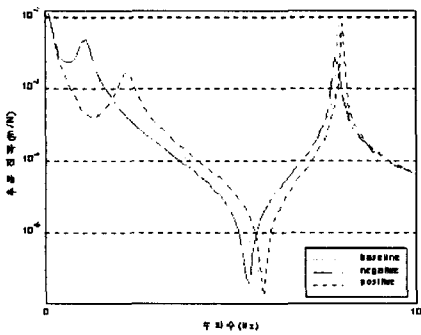


그림 11 k_2 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

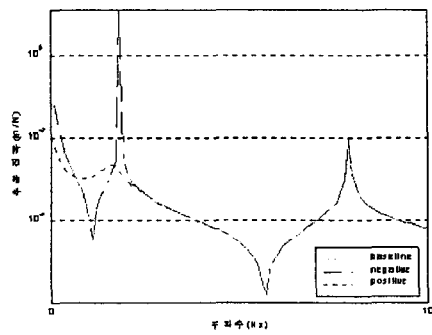


그림 12 D_3 의 변화에 따른 추중 진폭 변화

추중 진폭의 피크가 발생하는 주파수는 그림 13에 표시되어 있는 수식에 의하여 대략적으로 계산될 수 있다.

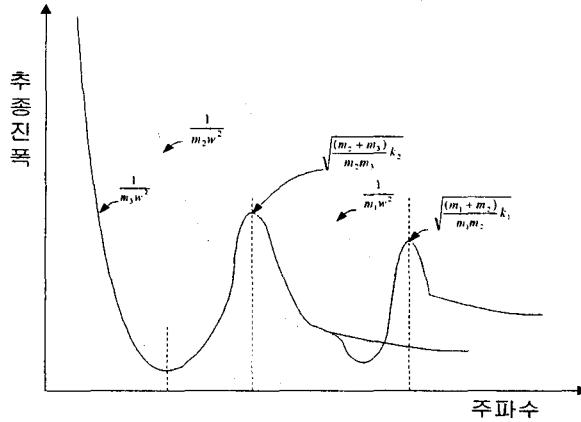


그림 13 3개 등가 질량 팬터그래프에서의 추종 진폭 피크 발생 주파수

3.4 G7 팬터그래프의 동적 설계

고속전철기술개발사업에서는 최고 운행 속도 350 km/h 급 고속용 저 이션 팬터그래프의 개발을 목표로 한국철도기술연구원에서는 팬터그래프 및 가선계의 인터페이스 사양을 제시하고 있고, 한국생산기술연구원은 연구기관으로서 G7 팬터그래프를 개발하고 있다.

팬터그래프의 집전 성능, 제작성 등을 고려하여 시제작되었던 설계(안)들이 표 4에 나와 있다.

표 4 시제작 팬터그래프의 동적 설계 변수

동적 설계 변수	설계 1안	설계 2안	GPU
m_1	8.6	6.5	7
m_2	4.3	8.0	8.1
m_3	21.9	20.0	23
k_1	14000	9000	9000
k_2	75000	2200	1200
D_3	140	150	140

시제작되었던 설계(안)과 GPU 팬터그래프의 추종 진폭을 비교한 결과가 그림 14에 나와 있다. 그림 14에서 알 수 있듯이 연구가 진행되어감에 따라서 팬터그래프의 집전 성능이 많이 개선되고 있다. 설계 2안과 GPU 팬터그래프에 대하여 경간 통과 주파수에서의 추종 진폭이 그림 15에 비교되어 있고, 드로퍼 통과 주파수에서의 추종 진폭이 그림 16에 비교되어 있다.

경간 통과 가선에 대한 추종 진폭은 주행 속도가 350 km/h일 때에는 단 경간에서 설계 2안이 우수하고 장 경간에서 GPU 팬터그래프가 우수하다고 예상할 수 있다. 반면에 열차 속도가 300 km/h일 때에는 GPU 팬터그래프가 G7 팬터그래프보다 경간 통과 가선에 대한 추종 특성이 우수할 것으로 예상할 수 있다.

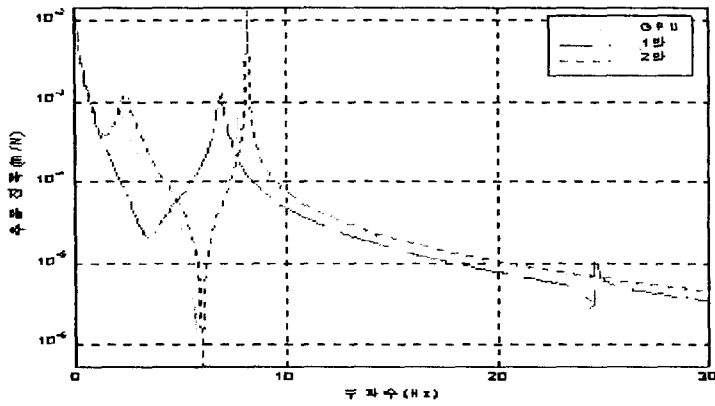
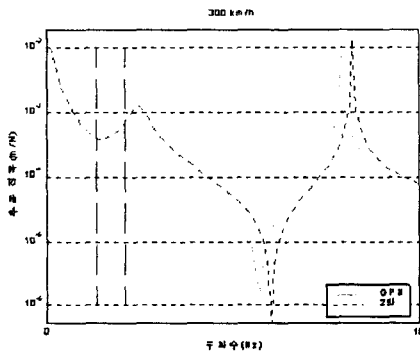
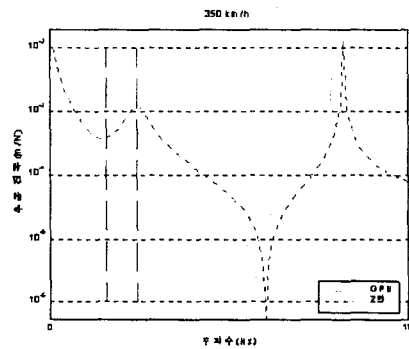


그림 14 설계 1, 2안의 팬터그래프의 추종 진폭



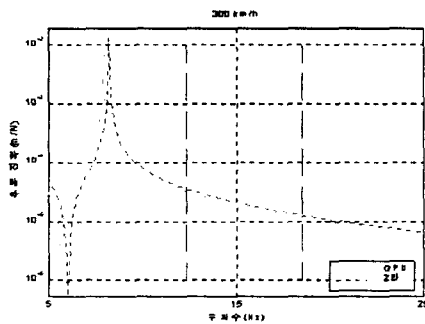
(a) 300 km/h 주행시



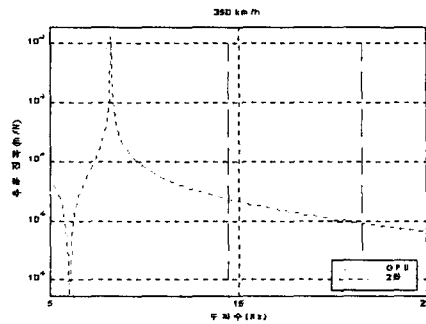
(b) 350 km/h 주행시

그림 15 설계 2안의 경간 통과 가진에 대한 추종 특성

드로퍼 통과 가진에 대한 추종 특성은 열차 속도가 350 및 300 km/h에서 모두 설계 2안이 GPU보다 우수한 특성을 보이고 있다. 이는 설계 2안의 m_1 이 GPU 팬터그래프의 m_1 보다 작기 때문으로 생각된다.



(a) 300 km/h 주행시



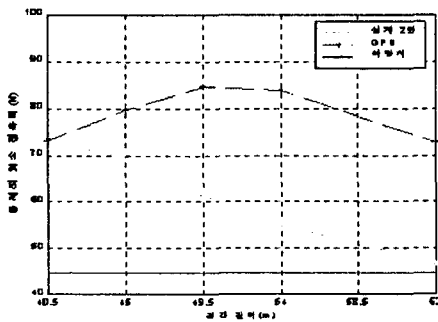
(b) 350 km/h 주행시

그림 16 설계 2안의 드로퍼 통과 가진에 대한 추종 특성

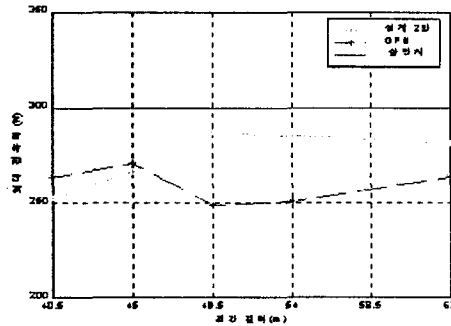
지금까지는 팬터그래프의 동적 특성만을 살펴 보았지만 집전 성능은 팬터그래프와 가선계의 상호 작용에 의하여 결정되므로 보다 정확한 집전 성능의 예측을 위해서는 이들을 모두 포함한 주행 시뮬레이션의 수행이 필요하다. 설계 2안의 팬터그래프가 KTX 가선계(전차선 장력 : 20kN)를 300 km/h로 주행하는 경우와 KTX 가선계(전차선 장력 : 26kN)를 350 km/h로 주행하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 17에는 300 km/h로 주행할 때 설계 2안의 팬터그래프와 GPU 팬터그래프가 갖게 되는 접촉력의 분포(동일한 공력계수 사용)가 나와 있다. 설계 2안이 보이는 최소 접촉력은 하한치 45N을 상회하고 있고, 최대 접촉력은 상한치 300N 이하를 만족하고 있지만 설계 2안의 집전 성능이 GPU 팬터그래프보다 나쁜 것으로 파악된다. 이는 경간 통과 가진에 대한 추종성이 드로퍼 통과 가진에 대한 추종성보다 영향이 크다는 것을 의미한다.

그림 18에는 350 km/h로 주행할 때 설계 2안의 팬터그래프가 갖는 접촉력의 분포가 나와 있다. 장력이 26kN으로 조정된 가선계에서는 최소 접촉력은 하한치 45N을 만족하나 최대 접촉력은 일부 경간 길이에서 상한치 300 N을 초과하고 있다. 장력이 20kN으로 조정된 가선계에서는 모든 경간 길이에서 최소 접촉력 및 최소 접촉력 기준을 만족하지 못하고 있다. 따라서 집전 성능을 보다 향상시키기 위하여 G7 팬터그래프의 동적 성능 개선이 필요하다.

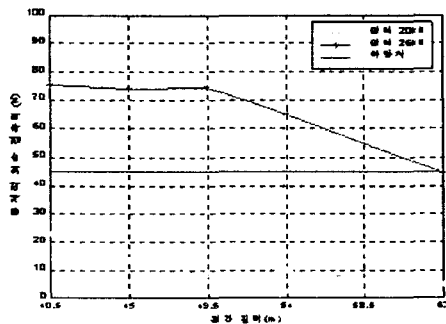


(a) 최소 접촉력

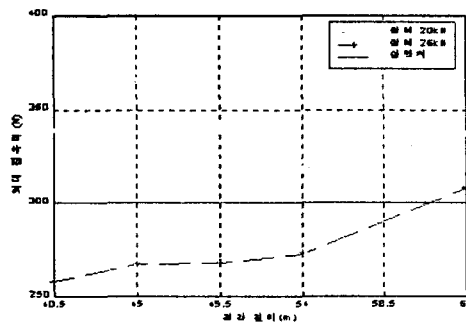


(b) 최대 접촉력

그림 17 접촉력 분포(설계 2안, 300km/h)



(a) 최소 접촉력



(b) 최대 접촉력

그림 18 접촉력 분포(설계 2안, 350km/h)

팬터그래프의 성능 개선을 위하여 앞서 살펴 보았던 동적 설계 변수의 영향을 기초로 여러 차례의 개선 과정을 거쳐 표 4와 같은 350 km/h 급 팬터그래프의 동적 설계안을 얻었다.

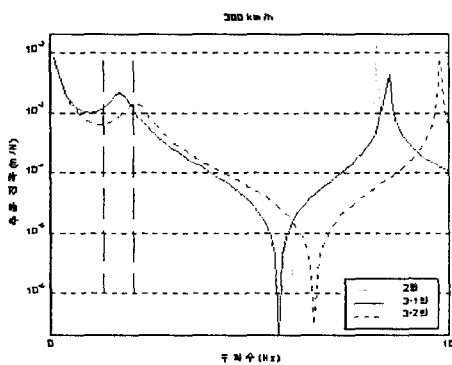
설계 3-1안의 경우에는 고주파 추종 특성을 개선하기 위하여 m_1 을 경량화 하였고, k_2 를 줄여

추종 진폭의 피크가 장 경간 통과 주파수에서 최대가 될 수 있도록 하였다. 설계 3-2안의 경우에는 고주파 추종 특성을 개선하기 위하여 m_1 을 경량화 하였고, 추종 진폭의 피크가 경간 통과 주파수 영역의 가운데에 올 수 있도록 스프링 k_2 를 증가했으며, 스프링 k_1 을 속도향상에 따른 드로퍼 통과 주파수의 증가 비율 즉 $(350/300)^2$ 을 고려하여 상향 조정하였다.

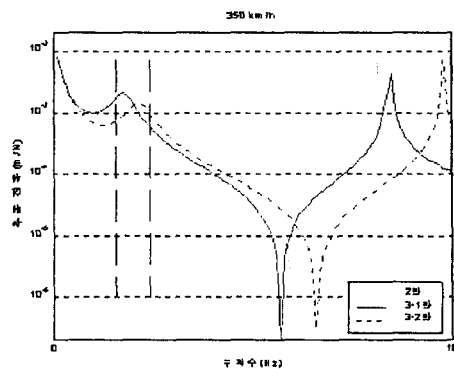
표 4 G7 팬터그래프의 동적 설계 변수(안)

동적 설계 변수	설계 2안	설계 3-1안	설계 3-2안
m_1	6.5	5.5	5.5
m_2	8.0	8.0	8.0
m_3	20.0	20.0	20.0
k_1	9000	9000	12000
k_2	2200	1200	1700
D_3	150	200	200

새로운 팬터그래프 설계안들에 대한 추종 진폭이 그림 19, 20에 나와 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 새로운 설계안들은 드로퍼 통과 가진 뿐만 아니라 경간 통과 가진에 대한 추종 특성이 개선되었다. 드로퍼 통과 가진에 가장 추종성이 좋은 것은 설계 3-2안으로 보이며, 경간 통과 가진에 대한 가진에 있어서는 장 경간을 지날 때에는 설계 3-1안이 가장 좋으며, 단 경간을 지날 때에는 설계 3-2안이 가장 좋은 것으로 보인다.

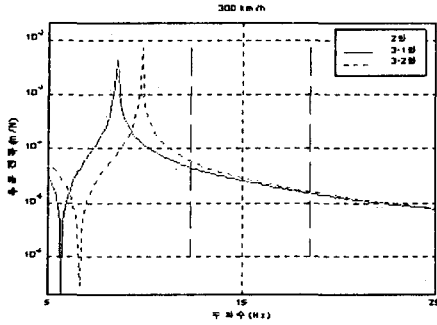


(a) 300 km/h 주행시

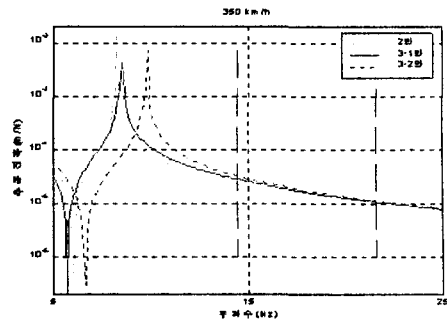


(b) 350 km/h 주행시

그림 19 설계 3-1, 3-2안의 경간 통과 가진에 대한 추종 진폭



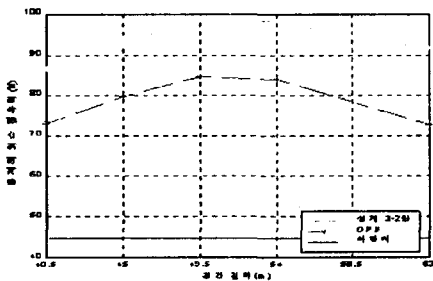
(a) 300 km/h 주행시



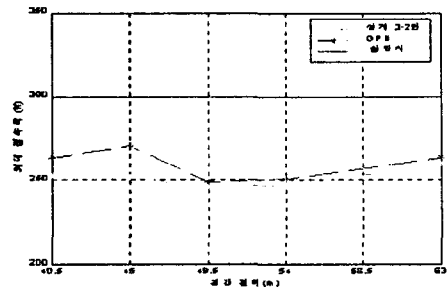
(b) 350 km/h 주행시

그림 20 설계 3-1, 3-2안의 드로퍼 통과 가진에 대한 추중 진폭

설계 3-1안에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 21, 22에 나와 있다. 그림 21에는 300 km/h로 주행할 때 갖게 되는 접촉력의 분포(동일한 공력계수 사용)가 나와 있다. 설계 3-1안이 보이는 최소 접촉력 및 최대 접촉력은 모두 성능 기준을 만족하고 있고 GPU 팬더그래프보다 우수한 집전 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 22에는 KTX 가선계를 350 km/h로 주행할 때 갖게 되는 접촉력의 분포가 나와 있다. 장력이 26kN으로 조정된 가선계에서는 최소 접촉력 및 최대 접촉력은 집전 성능 기준을 모두 만족하고 있다. 장력이 20kN로 조정된 가선계(현재의 KTX 가선계)에서의 집전 성능을 살펴 보면 54m 이상의 장 구간에서는 집전 성능 기준을 만족하고 있으나 49.5m 이하의 단 구간에서는 집전 성능이 급격히 저하되고 있음을 알 수 있다.

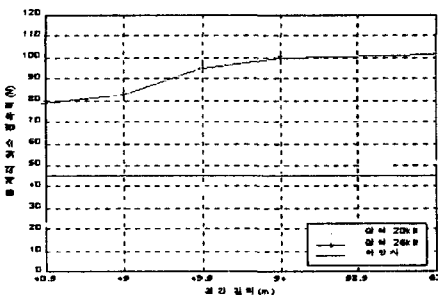


(a) 최소 접촉력

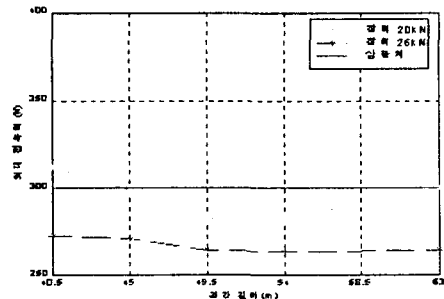


(b) 최대 접촉력

그림 21 접촉력 분포설계 (설계 3-1안, 300km/h)



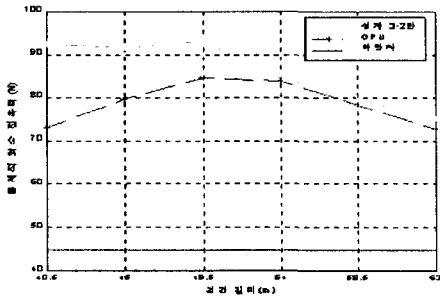
(a) 최소 접촉력



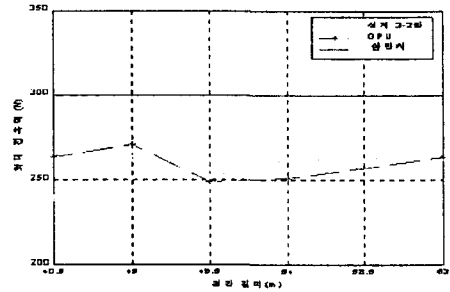
(b) 최대 접촉력

그림 22 접촉력 분포(설계 3-1안, 350km/h)

설계 3-2안에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 23, 24에 나와 있다. 그림 23에는 300 km/h로 주행할 때 갖게 되는 접촉력의 분포(동일한 공력계수 사용)가 나와 있다. 설계 3-2안이 갖는 최소 접촉력 및 최대 접촉력은 모두 성능 기준을 만족하고 있고 GPU 팬터그래프보다 우수한 집전 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 24에는 KTX 가선계를 350 km/h로 주행할 때 갖게 되는 접촉력의 분포가 나와 있다. 장력이 26kN으로 조정된 가선계에서는 최소 접촉력 및 최대 접촉력은 집전 성능 기준을 모두 만족하고 있다. 장력이 20kN로 조정된 가선계에서의 집전 성능을 살펴보면 모든 구간에서 집전 성능 기준을 만족하지 못하고 있으나 구간 길이가 45m ~63m 까지의 넓은 영역에서 최소 접촉력이 40N 이상을 보이고 있다.

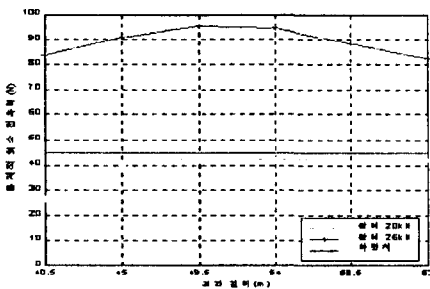


(a) 최소 접촉력

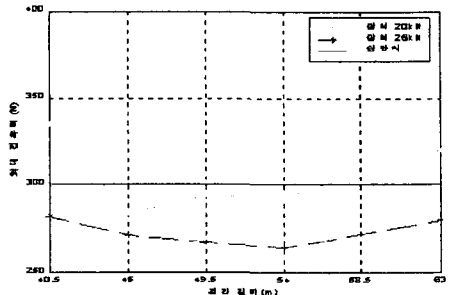


(b) 최대 접촉력

그림 23 접촉력 분포(설계 3-2안, 300km/h)



(a) 최소 접촉력



(b) 최대 접촉력

그림 24 접촉력 분포(설계 3-2안, 350km/h)

그림 21, 22, 23, 24에 나와 있는 구간 별 최소 접촉력과 그림 19에 나와 있는 구간 통과 가진에 대한 추종 특성을 비교해보면 어느 정도 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 설계 3-1안의 팬터그래프가 300 km/h로 장 구간을 주행할 때 GPU 팬터그래프와 거의 같은 수준의 최소 접촉력을 보이고 있는데 이는 설계 3-1안의 팬터그래프는 GPU 팬터그래프보다 드로퍼 통과 가진에 대한 추종 특성은 우수하나 장 구간에서 구간 통과 가진에 대한 추종 특성은 거의 같기 때문으로 생각된다. 따라서 고속용 팬터그래프의 최소 접촉력은 드로퍼 통과 가진 보다는 구간 통과 가진에 대한 추종 특성이 더욱 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 구간 통과 가진에 의한 접촉력의 변동이 드로퍼 통과 가진에 의한 접촉력의 변동 보다 크기 때문으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속전철기술개발(G7)사업에서 개발하고 있는 고속 열차가 350 km/h로 영업 운행을 하기 위하여 필요한 전차선의 장력과 팬터그래프의 사양을 제시하였다.

전차선의 장력이 충분히 확보되지 않으면 주행 속도 대 파동 전파 속도의 비가 낮아져 이선이 쉽게 발생할 수 있고, 팬터그래프가 전차선을 통과하면서 발생하는 굽힘 응력이 높아져 유지 보수 비용이 많이 소요될 수 있다. 고속철도 선진국의 경험과 관련 기술 기준을 검토해 본 결과 350 km/h로 영업 운행을 하기 위해서 전차선 장력을 26 kN 까지 증가시켜야 함을 알 수 있었다. 현재 KTX 가선계에 사용되는 전차선 소재는 구리로 26 kN의 장력을 견딜 수 없으므로 장력 증가에 대비하여 고속전철기술개발사업에서는 고강도 Mg-Cu 전차선을 개발한 바 있다.

집전 성능과 밀접한 관련이 있는 접촉력 변동은 경간을 통과하는 시간을 주기로 하는 경간 통과 가진과 드로퍼 사이를 통과하는 시간을 주기로 하는 드로퍼 통과 가진에 의해 생긴다. 이러한 가진원들에 대한 팬터그래프의 추종 특성을 분석하기 위하여 팬터그래프의 다이내믹 플렉서빌리티(Dynamic flexibility)를 유도해 보고, 이를 활용하여 동적 설계 변수의 변화가 추종 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석된 내용을 기초로 350 km/h 급 G7 팬터그래프의 동적 설계 변수를 최적화하여 G7 팬터그래프의 사양을 제시하였다. 제안된 G7 팬터그래프의 사양이 갖는 집전 성능을 예측하기 위하여 KTX 가선계를 대상으로 주행 시뮬레이션을 수행해 보았다. 이선과 직접적인 관련이 있는 경간 별 최소 접촉력은 시뮬레이션 결과와 다이내믹 플렉서빌리티를 사용하여 예측한 추종 진폭이 거의 일치하였다. 최소 접촉력은 고주파인 드로퍼 통과 가진보다는 저주파인 경간 통과 가진에 대한 추종 진폭이 더욱 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 고속용 팬터그래프 설계할 때에는 경간 통과 가진에 대한 추종 진폭을 가능한 한 크게 동적 변수를 설정하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

후기

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

참고문헌

- [1] 鐵道總合技術研究所, "電車線 とパンタグラフの特性," 1993
- [2] UIC Code 794 OR, "Pantograph-Overhead line interaction on the European high-speed network," International Union of Railways, 1996.1
- [3] 한국고속철도건설공단, "CONTRACT for provision of Rolling Stock, Catenary, and Train Control System," Vol 1, 2, 1994
- [4] 고속전철기술개발사업 1단계 보고서, "고속전철시스템엔지니어링 기술개발(98-1-1-0)," 1999
- [5] ERRI, "Simulation of the dynamic behavior of the overhead/pantograph system(two pantograph raised)," ERRI A 186/RP 1, 1996