

전차선 드로퍼 간격에 따른 집전성능 분석

Study of Current Collection Performance according to Dropper Spacing for Catenary

권삼영* 이기원** 창상훈***
Kwon, Sam-Young Lee, Kiwon Chang, Sang-Hoon

Abstract

This paper presents study of collection performance according to dropper spacing for catenary. Static characteristics analysis, dynamic simulation, stress and wear analysis for different 5 catenary configurations according to dropper spacing are performed. And collection performance for TGV-Nord catenary system is also analyzed in order to compare and evaluate.

1. 서론

전차선로는 주행하는 열차에 전력을 공급하기 위한 수단으로써 공중 가선(Overhead Lines) 방식으로 시설물을 설치하게 된다. 따라서 전차선로(Catenary System)는 현수 지지(Carriage Cable)역할을 수행하는 조가선(Messenger Wire)이 제일 상부에 설치되고, 차량의 팬터그래프(Pantograph)와 접촉하도록 전차선(Contact Wire)이 제일 하부에 설치되어야 하므로, 그 사이를 연결하는 전선 또는 강체 성격의 부재(Rigid Member)가 필요하게 되는데 이를 드로퍼(Dropper)또는 행거(Hanger)라 한다. 전차선로의 가선은 열차에 안정적이고 효율적으로 전력을 공급하기 위하여 여러 가지 가선방식이 고안되어 사용되고 있는데, 드로퍼(Dropper) 또는 행거(Hanger)는 일반적으로 두 가지 타입이 사용되고 있다.

본 연구는 저속용 재래선에 대하여 추후 우리나라에서 신설되는 전차선로에서 현수방식을 모두 행거 타입이 아닌 드로퍼 타입으로 설치하기로 함에 따라 적절한 드로퍼 배치간격을 도출하기 위한 검토로써, 드로퍼(Dropper) 방식만을 검토대상으로 다루고자 한다. 드로퍼 방식은 전차선과 조가선에 클램프타입의 금구로 고정 부착하고 그사이 전선은 가요성(Flexibility)이 있는 케이블을 사용하는 방식으로 기계적인 현수지지 역할과 함께 전기적인 통로역할도 수행할 수 있다.

최적의 드로퍼 배치간격을 선정하는 데에는 다음의 점이 고려되어야 한다.

- 정적 특성(드로퍼 길이, 처짐 관계)
- 집전 성능(이선율, 이선의 특성(이선 길이 등), 팬터그래프와의 동력학 특성)
- 경간길이와의 관계(드로퍼 배치간격과 표준 경간길이와의 밀접한 관계가 있으며, 대부분의 경우 표준 경간길이를 드로퍼 배치간격에 맞추어 선정하게 된다)
- 곡선당김금구와의 관계(압상량)
- 전차선로 수명 및 유지보수 관계(응력 특성, 전차선 마모특성, 마모율)
- 경제성

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

따라서, 최적의 드로퍼 배치간격을 검토하기 위하여 다음과 같은 절차로 분석을 수행하고자 한다.

- 검토 대상 드로퍼 configuration 선정
- 정적 해석(Static Characteristics Analysis)
- 동적 시뮬레이션 해석(Dynamic Simulation)
- 응력 및 마모 영향 검토

2. 검토 대상 드로퍼 configuration 선정

열차속도 등을 고려한 최적의 드로퍼 배치간격을 평가하기 위해서는 정적 해석 및 동역학 해석 등을 수행해 보아야 한다. 그러나 모든 드로퍼 배치간격에 대하여 다 수행해 볼 수는 없으므로 적절한 configuration을 검토대상으로 선정하여 수행해 보는 것이 합리적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 5가지 configuration(케이스 1 ~ 케이스 5)을 선정하였으며, configuration 선정은 운영중인 우리나라 기존 전차선로의 드로퍼 간격(5m와 10m의 2가지 타입)을 포함하여 5m~12m까지 5개 configuration을 선정하였으며 비교검토 대상으로 고속용이지만 경부고속철도에 설치되는 TGV-Nord선을 선택하였다. 그리고 케이스 1부터 5까지의 configuration에 대한 데이터는 충북선 설계데이터를 준용하였다. 다음은 커티너리 데이터 및 드로퍼 배치간격이다.

표 2.1 케이스 1에서 5의 커티너리 데이터

항목	데이터
전차선 장력	10,000 (N)
전차선 선종 및 단위질량	Cu 110mm ² , 0.9877 (kg/m)
조가선 장력	10,000 (N)
조가선 선종 및 단위질량	CdCu 65mm ² , 0.5974 (kg/m)
드로퍼 단위질량	0.30 (kg/개)
편위	±0.2 (m)
가고	0.96 (m)
곡선당김금구 길이	0.9 (m)
곡선당김금구 압상허용량	0.150 (m)
곡선당김금구 각도	11 (deg)
사전 이도(Pre-sag)	없음

표 2.2 각 케이스의 configuration

Configuration	드로퍼수 / 드로퍼 배치간격(m)											비고
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
케이스 1	2.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2.5	우리 나라 기존선 행거 타입 Catenary와 동일
케이스 2	4	6	6	6	6	6	6	6	4			검토용으로 새로 선정한 타입
케이스 3	5	8	8	8	8	8	5					검토용으로 새로 선정한 타입
케이스 4	5	10	10	10	10	5						우리 나라 산업선 드로퍼 타입 Catenary와 동일
케이스 5	6	12	14	12	6							검토용으로 새로 선정한 타입
TGV-Nord	4.5	6.75	6.75	6.75	4.5	6.75	6.75	6.75	4.5			비교검토 대상

3. 정적 해석(Static Characteristics Analysis)

정적 해석이라 함은 팬터그래프와 같은 외부 작용이 없는 상태에서 커티너리 구조에 대한 특성 해석을 의미한다. 정적해석은 드로퍼 길이계산에서부터, 탄성도 특성 및 불균일을 파악, 고유주파수 해석, 정적 압상량 파악 등이 있고, 이외에도 파동전파속도, 반사계수, Doppler 계수, 증폭계수 등 각종 커티너리 특성을 나타내는 계수의 파악 등도 이 범주와 관련이 있다고 할 수 있다. 정적해석의 결과는 그 자체로서 커티너리가 갖추어야 할 기본 설계 조건을 제시하는 경우도 있겠지만 대체로는 팬터그래프와의 동력학 특성을 미리 예측하는 자료로서 사용된다. 하지만 본 연구에서는 탄성도 특성 및 불균일을 파악 등은 생략하고, 드로퍼 길이 계산만 수행하기로 한다.

3.1 드로퍼 길이

각 케이스에 대하여 드로퍼길이 계산공식에 따라¹⁵⁾ 계산된 드로퍼 길이는 다음의 표 3.1과 같다.

표 3.1 검토대상 configuration의 드로퍼 길이

Configuration	드로퍼 길이 (m) (지지점을 기준으로)				
	첫번째	두번째	세번째	네번째	다섯번째
케이스 1	0.859	0.695	0.571	0.489	0.448
케이스 2	0.801	0.625	507	0.448	
케이스 3	0.765	0.557	0.453		
케이스 4	0.766	0.523	0.443		
케이스 5	0.729	0.479			

여기서 드로퍼 길이를 검토하는 이유는 최소 드로퍼 길이를 확인해보기 위해서이다. 주로 경간 중앙에서 발생하는 최소 드로퍼 길이는 드로퍼의 특성이 인장력을 받을 때에는 높은 강성도를 갖는 강체와 같은 부재이지만, 압축을 받게되면 강성도가 거의 제로인 상태로 변하게 되는 특성을 갖고 있으므로, 드로퍼 길이에 대하여 최소길이를 정하여 이를 설계 시 고려하고 있다. 최소 드로퍼 길이에 대해서 TGV-Nord선 설계에서는 0.275m로 규정하고 있고, 우리 나라 기존선에서는 0.150m로 규정하고 있다. 검토대상 케이스 5가지에 대하여 최소 드로퍼 길이는 모두 이 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

4. 동적 시뮬레이션 해석(Dynamic Simulation)

동적 시뮬레이션이란 전차선로와 팬터그래프를 수학적으로 모델링하여 열차가 주행함에 따라 발생하는 전차선과 팬터그래프사이의 동력학적 상호작용을 컴퓨터로 재현하는 기법을 말하며, 이를 통하여 집전 성능이나 전차선로와 팬터그래프의 영향 인자 등을 파악하기 위하여 실시한다.

본 연구에서는 동적 시뮬레이션 해석을 위하여 일본의 철도총합기술연구소(RTRI)에서 개발한 “가선도(架線圖)” 라는 프로그램을 사용하기로 하였다. 이 프로그램의 특징은 전차선 및 조가선을 현(string) 요소로 모델링하였고, 계산알고리즘으로 유한차분법을 사용하였으며, 시뮬레이션 결과 데이터를 질점 간격사이에 대하여 평균값으로 처리하여 고주파 응답 데이터에 대한 필터링 기능을 가지고 있지만 이선율 데이터의 정확성이 떨어지는 단점이 있다.

4.1 전차선로 모델링

전차선로(Catenary)는 중복선 설계데이터를 기준으로 앞에서 언급한 5개 configuration에 대하여 모델링하였으며, 모델링 특징은 다음과 같다.

- 각각의 configuration에 대하여 8경간으로 모델링
- 전차선과 조가선을 현(String)요소로 모델링, 즉 상하 움직임만을 고려한다.
- 경계조건으로 전차선은 8경간의 양쪽 끝단에서만 고정된 것으로 하고, 조가선은 8경간의 양쪽 끝단과 각 전주 현수점에서 견고한 고정점으로 처리

- 가동브레이크가 전차선을 잡고있는 곳에서 전차선에 편위가 있음으로 인한 곡선당김금구에서의 수직작용력의 영향을 곡선당김금구의 길이와 각도로 계산하여 반영함
- 드로퍼의 질량은 전차선과 연결점에서만 반영하고, 곡선당김금구의 질량도 고려함
- Catenary 감쇄는 이웃하는 질점(Node) 사이의 속도차이에 비례하는 방식으로 하고, 감쇄계수는 RTRI가 권고하는 일반적인 커티너리에 대한 값 적용

4.2 팬터그래프 모델링

팬터그래프는 현재 철도청에서 도입을 위해 시운전 중에 있는 신형 전기기관차(기관차 번호 : 8101 - 8102)를 모델로 하였다. 이 기관차의 설계 최고속도는 150km/h, 연속운행 최고속도는 140km/h이다. 탑재된 팬터그래프는 싱글암(Single Arm) 타입으로 형식번호는 8WL0129-6YH40이며 Siemens AG Osterreich사에서 설계 제작하였다. 동력학 시뮬레이션을 위해 입력해야 하는 팬터그래프 모델링 데이터는 위 팬터그래프에 관한 자료를 반영하여 다음과 같이 하였다¹¹⁾.

표 4.1 팬터그래프 모델링 데이터

이름	기호	값	설명
집전판 질량	m1	8.0 (kg)	KTGV 팬터그래프 데이터 준용
스프링 하 질량	m2	11.0 (kg)	
고무 스프링 계수	k1	8800±10% (N/m)	
첫 Stage 댐핑 계수	c1	0	
시스템 댐퍼 댐핑 계수	c2	0	
압상력(정적+양력)	P	70±10 (N)	공기역학적 양력 고려 안함

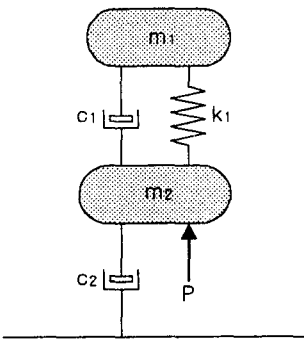


그림 4.1 팬터그래프 모델

4.3 전차선-팬터그래프 동력학 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 120km/h를 시뮬레이션 속도로 설정하고, 앞에서 선정된 검토용 configuration 케이스 1에서 케이스 5까지에 대하여 4.2절의 팬터그래프 모델로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에서는 정상 조건에서의 평가와 아울러 최악 조건에서의 평가도 필요하므로 팬터그래프의 모델링 데이터 중 변동 가능범위(±)가 표시된 데이터에 대하여 결합 최악 조건(Combined Worst Condition), 즉 여러 가지 변동 가능 데이터가 병합된 경우에 대한 경우의 수 중에서 가장 집전 성능에 나쁜 조건을 말하는 것으로, 이를 "최악 팬터그래프 조건"이라고 하기로 하였다. 여러 조건을 사전 시뮬레이션 해본 결과 "최악 팬터그래프 조건"은 스프링 계수(k1)가 +10%이고(9680 N/m), 정적 압상력이 -10 N일 때가 병합된 경우임을 확인하였다.

전차선로는 동일한 경간이 8경간 연속되어 설치된 것으로 모델링하여 시뮬레이션 하였으며, 양 끝단 고정점의 영향을 배제하기 위해 4번째 경간부터 6번째 경간까지의 3경간 데이터만을 유효데이터로 보아 처리하였다. 다음은 케이스 1 및 TGV-Nord의 시뮬레이션 결과이다.

① 케이스 1의 시뮬레이션 결과

- V = 120 km/h, 스프링상수(k) = 8800 N/m, 정적압상력(P) = 70 N

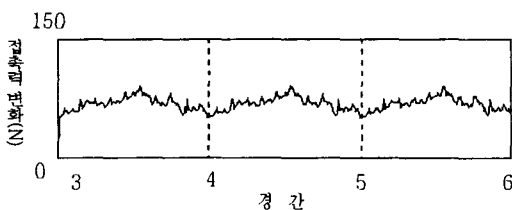


그림 4.2 집촉력 변화

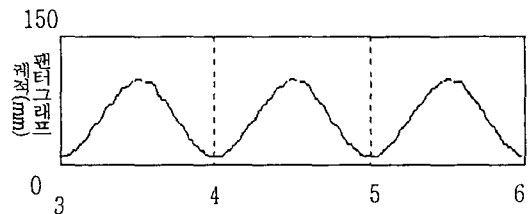


그림 4.3 팬터그래프 제적(압상)량 그래프

② TGV-Nord 시뮬레이션 결과

- $V = 300 \text{ km/h}$, 팬터그래프 = GPU-25kV용, 압상력 = 정적(70N)+공기역학적 양력(= kaV^2 , ka : 양력계수, V : 열차속도)

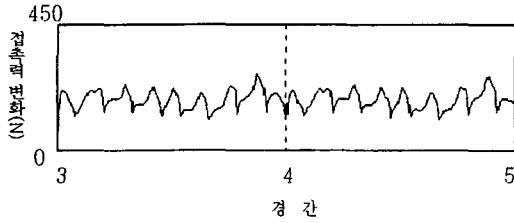


그림 4.4 접촉력 변화

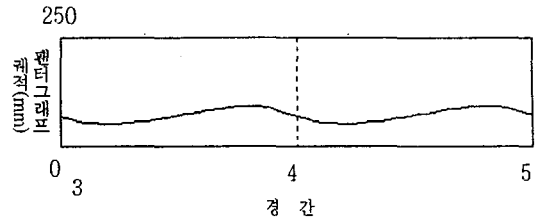


그림 4.5 팬터그래프 웨어(압상량 그래프)

4.4 시뮬레이션 결과 데이터

시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 4.2 시뮬레이션 결과 데이터

Configuration	팬터그래프 조건	평균 접촉력(N)	최대 접촉력(N)	접촉력 표준 편차(N)	최대 압상량(mm)
케이스 1	정상 조건	69.98	91	9.28	70.8
	최악 조건	59.41	80	8.53	60.6
케이스 2	정상 조건	69.38	99	10.53	72.2
	최악 조건	59.41	82	9.15	62.0
케이스 3	정상 조건	69.4	98	10.7	75
	최악 조건	59.41	92	10.53	64.8
케이스 4	정상 조건	69.36	106	12.65	76.4
	최악 조건	59.39	100	14.88	66.7
케이스 5	정상 조건	69.41	141	19.07	81.0
	최악 조건	59.42	134	20.68	69.2

(정상 조건 : $k_1=8800\text{N/m}$, $P=70\text{N}$, 최악 조건 : $k_1=9680\text{N/m}$, $P=60\text{N}$)

4.5 시뮬레이션 결과 검토

시뮬레이션에서 얻은 결과를 분석해 보면 몇 가지의 뚜렷한 특징을 볼 수 있다.

- 케이스 1에서 케이스 5로 갈수록, 즉 드로퍼 간격이 커짐에 따라 평균 접촉력, 최대 접촉력, 접촉력 표준편차, 압상량이 커진다.
- 드로퍼 간격이 커짐에 따라 평균 접촉력과 접촉력 표준편차가 다 커지지만, 평균 접촉력의 증가 비율보다 접촉력 표준편차의 증가비율이 크다.
- 충격 접촉력(Impluse Type Contact Force)은 드로퍼 간격이 작을 때에는 드로퍼 지점에서 발생하지 않으나 드로퍼 간격이 클 때에는 매 드로퍼지점에서 발생한다.
- 팬터그래프 최악조건에서의 평균 및 최대 접촉력은 정상 조건에서보다 작지만, 평균 접촉력에 대한 표준편차의 비율은 정상조건에서보다 크다.
- 최대 접촉력은 경간중앙에서 발생하는 경향을 보인다.
- 압상량은 경간중앙에서 최대가 되고, 곡선당김금구가 있는 지지점 부근에서 최소가 되는 Simple Catenary의 전형적인 양상을 보이고 있다.

또한 프랑스, 독일 및 일본의 동력학 시뮬레이션 관련 논문 및 자료에서도 마찬가지로 평균 접촉력과 표준 편차의 비율을 집전 성능을 평가하는데 중요한 항목으로 다루고 있다. 따라서, 평균 접촉력에 대한

표준 편차의 비가 집전 성능을 평가하는데 핵심적인 요소로 판단하여 이를 r(%)로 정의하였다.

$$\gamma = \frac{\text{접촉력 표준 편차}}{\text{평균 접촉력}} \times 100 (\%) \quad (4-1)$$

시뮬레이션 결과에 대하여 r값을 구해보면 다음과 같다.

표 4.3 평균 접촉력 대 표준편차의 비

Configuration	팬터그래프 정상 조건일 때 r(%)	팬터그래프 최악 조건일 때 r(%)
케이스 1	13.26	14.36
케이스 2	15.17	15.40
케이스 3	15.42	17.72
케이스 4	18.24	25.05
케이스 5	27.47	34.80

이 r값에 대하여 독일의 자료에서는 고속선에 대한 기준이지만 20%이하를 기준으로 삼고 있다⁷⁾. 한편 프랑스는 TGV-Nord선(경부고속철도와 동일한 설계)의 경우 평균 접촉력 대 표준편차의 비(r)가 22%로서 만족스런 집전 성능을 보인다고 하였다¹⁴⁾. 일본의 경우를 판단하기 위해 “일본철도총연보고” 94년 3월호에 게재된 “심플렉티너리 가선 130km/h 주행시험결과” 도표로부터 이선을 1%에 해당하는 평균 접촉력 대 표준편차의 비(r)를 선으로 그어 확인해보면 약21~22% 정도에 해당함을 알 수 있다¹⁶⁾.

따라서 보수적인 관점에서 바라보아 20%이하를 양호한 집전성능을 가질 수 있는 평균 접촉력 대 표준편차의 비(r)에 대한 기준으로 삼기로 한다. 표 4.3에서 보는바와 같이 케이스 4와 케이스 5는 팬터그래프 최악조건을 고려할 때 평균 접촉력 대 표준편차의 비(r)가 20% 이상으로서 기준을 만족하지 못한다. 따라서 양호한 집전 성능을 유지하기 위해서는 케이스 3까지, 즉 드로퍼 간격이 9m까지만이 가능하다고 판단된다. 그러나 이는 선로/궤도 조건과 관리 상태, 차량 진동 등이 반영되지 않은 상태에서의 결과로서 실제 적용에서는 이보다 보수적인 관점에서 판단할 필요가 있다.

5. 응력 및 마모 영향 검토

최적 드로퍼 배치간격을 검토하기 위해서는 응력(Stress) 및 마모(Wear)에 대한 영향도 또한 검토할 필요가 있다.

5.1 응력 검토

드로퍼 수가 적어지게 되면 드로퍼당 걸리는 하중이 증가하게 되고, 이로 인해 드로퍼가 연결된 지점에서 드로퍼, 조가선 및 전차선에 작용하는 정적 응력이 증가할 것이다. 여기에 팬터그래프가 접촉하여 달리는 동적 상황에서는 드로퍼 지점에서 진동이 커질 것임을 예상할 수 있다. 앞의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 드로퍼 수가 적어짐에 따라 압상량도 커지고, 드로퍼 지점에서의 접촉력도 충격 타입(Impulse Type)이 심화됨을 확인하였다. 따라서 드로퍼 수가 적어짐에 따라 드로퍼 지점에서의 전차선의 응력도 증가할 것이다.

그러나 일반적인 전차선로 조건에서 응력의 문제는 접촉력, 압상량뿐만이 아니라 팬터그래프 통과 회수 등 다른 여러 가지 요소가 영향을 미치며, 아울러 일반적으로 응력이 문제가 되는 곳은 오버랩 구간이나 교차금구가 있는 곳 등 특수개소이고 이러한 특수 개소는 드로퍼 간격과 무관하기 때문에, 드로퍼 간격에 따른 응력의 변화는 특수개소에 비하여 영향을 무시할 수 있는 정도로 판단할 수 있다. 오히려 전차선의 응력은 전차선 부재의 단면적에 직접 반비례하므로 드로퍼 간격에 따른 전차선 마모특성과 관련되어 있다.

5.2 마모 영향 검토

마모는 전차선 수명과 관련이 있다. 전차선에 마모가 발생하는 요인은 팬터그래프 집전판과의 기계적 마찰과 이선 시 전기 아크(Arc)에 의한 용융 소손이 있다. 마찰로 인한 기계적 마모는 접촉력과 직접적

인 관계가 있고, 같은 구조의 전차선 전반에 걸친 마모율로 결과가 나타난다. 이에 반하여 아크에 의한 마모는 집전 성능 즉, 이선율과 관련이 있고, 국부적인 마모와 관련이 있다.

따라서 드로퍼 간격은, 이 간격에 따라 접촉력도 달라지고, 집전 성능도 달라지므로 전차선 마모와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

우선 드로퍼 배치간격에 따라 접촉력이 어떻게 달라지는지 살펴보자. 4절의 동력학 시뮬레이션에서 구한 데이터로부터 Case1 configuration을 비교기준으로 삼고 접촉력 증가경향을 살펴보면 다음과 같다.

표 5.1 평균 및 최대 접촉력 증가 경향

Configuration	평균 접촉력 증가율(%)		최대 접촉력 증가율(%)		비고
	팬터 정상조건	팬터 최악조건	팬터 정상조건	팬터 최악조건	
케이스 2	-0.9	0	8.8	2.5	케이스 1 기준
케이스 3	0.8	0	7.7	15.0	“
케이스 4	-0.9	0	16.5	25.0	“
케이스 5	-0.8	0	54.9	67.5	“

표 5.1을 보면, 케이스 1에서 케이스 5로 감에 따라, 즉, 드로퍼 간격이 커짐에 따라 평균 접촉력은 거의 변화가 없으나 최대 접촉력이 증가함을 볼 수 있으며, 케이스 5의 경우는 50 %이상까지 증가함을 볼 수 있다. 이러한 경향으로부터 드로퍼 배치간격이 커짐에 따라 전차선의 파상마모(Wave Shape Wear) 또는 편마모가 심화될 것임을 예상할 수 있다. 또한 접촉력 그래프로부터 드로퍼 지점에서 임펄스 형태의 접촉력이 드로퍼 간격이 커짐에 따라 심화되는 것을 보더라도 이를 알 수 있다. 이를 확인할 수 있는 자료로서 일본 신간선에서 실측한 데이터에 의해 작성한 드로퍼(행거) 간격에 따른 마모 및 마모 형상에 대한 보고가 있다¹²⁾.

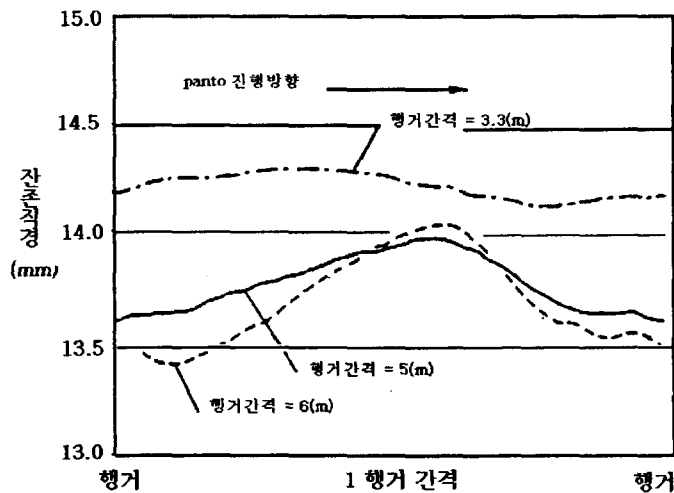


그림 5.1 신간선의 드로퍼 간격대 전차선 마모 경향(실측치)

그림 5.1에 의하면 행거간격이 3m에서는 균일한 마모형상을 보이나, 행거간격을 6m로 늘렸을 때는 평균적인 마모율이 증가함과 아울러 더욱 심각한 문제로서 행거 지점에서보다 행거사이 중간 지점에서의 마모가 많이 발생하는 비균일적인 파상마모 형상을 보인다는 점이다. 이럴 경우 전차선 수명은 더욱 단축된다. 그러나 구체적으로 드로퍼 또는 행거 간격별 마모율과의 관계에 관한 정확한 수치적 데이터가 아직 없어 최적 드로퍼 배치간격을 결정하는데 어려움이 있다.

6. 결론

전차선의 드로퍼 간격을 배치함에 있어서, 중복선 전차선로와 신형 전기기관차 설계를 기준으로 120km/h에서 동역학 시뮬레이션을 수행한 결과, 양호한 집전 성능을 보장할 수 있는 드로퍼 간격으로 앞에서 설정한 configuration의 케이스3까지, 즉, 최대 8m까지 가능한 것으로 나타났다.

그러나, 이 결과는 차량의 진동, 선로 조건, 전차선로 시공 오차 및 유지보수 조건 등이 감안되지 않은 결과이며, 아울러 앞에서 검토한 바와 같이 드로퍼 간격이 늘어남에 따라 전차선이 비균일적으로 마모되어 전차선의 수명을 단축시키고, 집전 성능에도 나쁜 영향을 미칠 수 있으므로, 실제 적용에 있어서는 보수적인 관점에서 고려하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 김길상, 권삼영, 유승위, "전차선과 팬터그래프 사이 동역학 시뮬레이션 프로그램 개발 연구", 고속철도 연구보고서(전기분야), 한국고속철도건설공단, 1996.2, P125-196
- 2) ORE(Office for Research and Experiments of the UIC), "Test runs on the FS with more than one pantograph", Questions A84(Behaviour of pantographs and overhead equipment at speeds higher than 160km/h), Interim Reports No. 2, 1966, 10,
- 3) 網干光雄, "パンタグラフの 接触力 変動に与える トロリ線 波動の影響に 關する 研究", 日本機械學會 論文集(C編), 64卷 622号, P1896-1903, 1998.6
- 4) 吉澤武司, "電車線路 特輯 - 種類と 用途・特徴" 鐵道と 電氣技術 Vol. 5 NO. 5, Page37~40, 1994, 5
- 5) 철도공무원교육원, "전차선보수(교류)", Page153-155, 직무전문과정(7-070-086), 철도공무원교육원, 1997. 5
- 6) ORE, "Theoretical investigations and experimental tests by BR(static behaviour)", Questions A84, Reports No. 9, 1970, 10,
- 7) Karl-Hans Bauer 등, "Effects of Design Parameters of Overhead Contact Lines on High-Speed Operation - a Comparison of Theory and Testing", Translation of an article from "Elektrische Bahnen", No. 10/1989, Page 269~279, SIEMENS,
- 8) ORE, "Comparison and analysis of test results - Recommendations concerning the design of pantographs and overhead equipment", Questions A84, Reports No.11(Final report), 1970, 10,
- 9) 架線圖 프로그램 사용자 설명서, 일본철도총합기술연구소
- 10) 鐵道總合技術研究所 編, "電車線と パンタグラフの 特性", 財團法人 研友社, 1993, 10
- 11) KNR 신형전기 기관차 정비지침서, 철도청, 1998.812) 鐵道總合技術研究所 編, "電車線と パンタグラフ의 特性", 財團法人 研友社, 1993, 10, P83-89
- 12) 鐵道總合技術研究所 編, "電車線と パンタグラフ의 特性", 財團法人 研友社, 1993, 10, P83-89
- 13) 철도청(철도기술공사), "충북선 전철, 전력설비 기본 설계 보고서", 1997
- 14) 경부고속철도 TGV French Group 제의서 중 Technical Provisions Catenary Systems, Answer to Addendum 18 Appendix 2, 1993
- 15) 권삼영 외 "전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구(II)" 연차보고서, 한국고속철도건설공단, 1998.
- 16) Mitsuo ABOSHI, Hiroki Nagasawa, "在來線高速化に對應した架線構造と管理手法", 일본철도총연보고 (RTRI Report), 1994. 3.