고속 전차선로 드로퍼에 대한 기계적 하중에 관한 연구

Mechanical Loads of Dropper for High Speed Electric Railway

이기천[†] · 이태훈¹ · 이종우²

Gi-chun Lee · Tae-hoon Lee · Jong-woo Lee

Abstract The dropper supports the contact wire and is attached using various types of dropper clips on the catenary. Droppers are subject to mechanical stress from buckling during the passage of pantographs. In order to investigate failure causes for the high speed line dropper, theoretical analyses and experiments have been carried out. In this paper, mathematical formulas are derived for the pre-sag of the dropper static load. The measured values in the experiment were similar to the theoretical predictions. To analyze the cause on fracture of dropper wire, we have conducted analysis such as SEM(Scanning Electron Microscope) of fractured specimens in the field and new specimens. Finally, we performed measurement for the variation of dynamic load on the dropper when a pantograph moved at 300km/h under the Korean high speed overhead line. If such mechanical load occur repeatedly with every passing pantograph, it is possible that the dropper wire will break due to fatigue. This results will be used for special management of high speed catenary system maintenance and life estimation of dropper.

Keywords : Dropper, Fatigue, Fracture, Static load, Dynamic load

초 록 드로퍼는 전차선로에서 여러형태의 클램프로 취부되어 전차선이 수평으로 유지하도록 지지하고, 판토그래프가 통과할 때 굽힘에 대한 기계적 응력에 영향을 받는다. 고속선용 드로퍼의 파단 원인을 조사하기 위해, 이론적 분석 및 시험을 실행하였다. 본 논문에서 사전이도에 의한 드로퍼의 정적 하중을 계산하였고, 시험에서 측정된 값과 유사하였다. 드로퍼 와이어의 파단원인을 분석하기 위해 현장에서 파단된 시료는 SEM 분석을 하였고, 새 시료도 일부 병행하며 시행하였다. 마지막으로, 고속열차가 300km/h로 통과할 때 드로퍼에 대한 동적 하중의 변화를 측정하였다. 기계적 하중이 반복적으로 발생될 때, 드로퍼 와이어는 피로에 의해 파단될 것이다. 이 결과는 고속전차선로 유지보수의 특별 관리와 드로퍼의 수명평가를 하는데 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 드로퍼, 피로, 파단, 정적하중, 동적하중

1. 서 론

드로퍼는 심플 커티너리식 전차선로에서 전차선을 조가선에 조가하기 위한 금구를 말하며, 드로퍼선과 드로퍼 금구로 구성되어 있다. 드로퍼는 고속열차의 판토그래프가 전차선로를 접촉하며 지나갈 때 가선의 진동 특성에 영향을 주어 단성의 균일성을 유지하고, 접촉력을 좋게하여 이선현상 등을 예방한다.

그러나, 2004년 4월에 경부고속철도 1단계(광명역~ 동대구역간)를 개통하고 운영하면서 간헐적으로 발생하던 드로퍼 단선 현상이 5년째 접어들면서 증가하였으며, 고속열차 운행에 지장을 주었다.

본 연구는 프랑스에서 운영 중인 기술 기반을 근거로 코아계약으로 설치된 경부고속철도 전차선로를 6년간 운영 중에 발생한 드로퍼의 단선(파단) 데이터를 바탕으로 드로퍼

의 단선 특성을 분석하여 드로퍼 단선 취약 부분을 파악하고, 드로퍼의 파단면을 SEM분석하여 파단 원인을 살펴보았다. 드로퍼 단선 취약부분에 대해 고속 열차가 고속(300km/h)으로 운행할 때 드로퍼의 정적 하중 및 동적하중을 측정하여 드로퍼에 작용하는 기계적 하중에 대해 살펴보고, 드로퍼의 단선 특성 분석과 비교 분석하여 합리적인 유지보수 방향을 제시하고자 한다.

2. Dropper 전차선로 시스템

2.1 심플 커티너리 방식

심플 커티너리(Simple catenary)는 전차선이 드로퍼에 의하여 조가선에 지지되는 간단한 구조이므로 건설 및 유지보수 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있으나, 구조상 추종성이 고르지 못한 단점을 가지고 있다.

‘Fig. 1’은 심플 커티너리 방식의 경부고속선 전차선 로를 보여주고 있다. 심플 커티너리 방식의 전차선로 구조를 살펴보면 전차선(Contact wire), 조가선 (Catenary wire), 드로퍼(Dropper), 지지브라켓 (Supporting bracket) 및 곡선당김

[†]교신저자 : 한국철도공사 철도교통관제센터
E-mail : lgctajan@korail.com

¹한국철도공사 연구원

²서울과학기술대학교 철도전문대학원

Fig. 1 Contact line with droppers at the supports

금구(Registration arm)로 구성되어 있다.

전차선은 주기적으로 설치된 드로퍼에 의해 조가선에 지지된다. 조가선은 지지브라켓에 의해 지지되며 곡선당금구는 활 모양으로 휘어져 있는 형상을 한 금구로 전차선이 편위(Stagger)를 가지도록 설치되어 있다[2].

경부고속철도의 경우, 조가선과 전차선 사이를 드로퍼로 연결하여 전차선을 일정한 높이로 유지시키는 구조로 특히, 경간 전체에 걸쳐 균일한 추중성을 유지하도록 사전이도(Presag)를 준다. 적절한 양의 사전 이도는 주행 중에 판토틀의 진동폭을 적게 하는 동시에 전차선에 대한 접촉력과 그 변동을 적게 하여 이선을 방지하고 양호한 집전을 할 수 있게 한다.

심플 커티너리는 집전능력이 가선의 정적 탄성특성 보다는 진동특성에 더 크게 영향 받는 원리를 이용하여 드로퍼 간격조정을 통해 탄성의 불균일성을 감소시킴과 함께 장력을 높여 단순 구조화를 실현한 설계이다.

심플 커티너리는 프랑스, 우리나라 및 일본의 차세대 고속 전철 시스템에서 채택하고 있다. 경부고속철도는 조가선의 장력을 14[kN], 전차선의 장력을 20[kN]으로 하고, 가고를 1,400 [mm]로 하여 심플 커티너리 방식으로 운행되고 있다.

2.2 드로퍼

2.2.1 드로퍼 구성

드로퍼는 전차선을 수평으로 유지하기 위해 전차선을 조가선에 현수하는 장치로서 드로퍼는 'Fig. 2'와 같이 12[mm²]의 청동연선 양단에 클립형 금구로 조가선 이도에 맞춰 전차선을 조가선에 현수되게 지지하며 그 구조는 전차선이 판토틀의 압상력 작용 등으로 상승시 드로퍼의 청동연선은 유연하게 휘어지며, 전차선 상호 작용에 유연하게 대처하여 진동피로, 마모 등을 줄일 수 있다. 드로퍼선은 'Table 1'과 같이 단면적 12[mm²]와 직경 5.19[mm]의 청동연선으로 제작되어 있으며, 구성은 0.65[mm]의 소선 7가닥으로 꼬여진 중심의 1묶음과 외피 층을 만드는 0.54[mm]의 직경을 가지는 7개의 소선으로 꼬여진 7묶음으로 구성되어 있다.

2.2.2 드로퍼의 배치간격

드로퍼의 배치간격은 'Fig. 3'에서와 같이 경간 내에서 첫

Fig. 2 Composition of dropper

Table 1 Characteristics of dropper wire[3]

Type	Items	Bronze(Bz)
Nominal cross section[mm ²]	12
	Number of strand[stand/mm]	(7×0.65)×1 (7×0.54)×6
	Material[%]	Strong Element : r (0.9~1.2) Tin(0.2~0.3) etc.(0.03 below)
	Tensile load[N]	6,943
	Electric resistance[Ω/km]	2.1 below
	Weight[kg/m]	0.103

63.00 m span - 9 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

58.50 m span - 9 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	4.50	4.50	6.75	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

54.00 m span - 8 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	6.75	4.50	6.75	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

49.50 m span - 7 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------

45.00 m span - 7 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	4.50	4.50	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------	------

40.50 m span - 6 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	4.50	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------	------	------

36.00 m span - 5 droppers

4.50	6.75	6.75	6.75	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------

31.50 m span - 5 droppers

4.50	6.75	4.50	4.50	6.75	4.50
------	------	------	------	------	------

Fig. 3 Arrangement of droppers

번째와 마지막번째 드로퍼는 무조건 4.50[m]로 하고 나머지는 6.75[m]를 원칙으로 하며, 표준경간 길이를 고려하여 4.50[m]를 경간 중앙에 배치할 수 있도록 되어있다.

표준경간 길이는 4.50[m]와 6.75[m]의 조합 값 중에서 선정되며, 최대 63[m]부터 최소 31.5[m]까지 다양한 표준경간 길이를 규정하고 있다.

3. 드로퍼 단선 분석

3.1 드로퍼 단선 특성 분석

드로퍼의 단선은 KTX 고속열차 운행에 있어 중요한 요소의 하나로 드로퍼가 단선이 되면 고속전차선의 가선 특성에 큰 영향을 주어 탄성의 불균일성을 발생 시켜 고속열차의 판토타그래프와 전차선의 이선현상이 발생되어 전차선의 국부 마모와 드로퍼 단선으로 드로퍼 와이어 처짐이 판토타그래프와 순간 접촉 충격으로 발생하는 전차선로의 변형과 판토타그래프 파손 등으로 인한 심각한 열차운행 장애를 유발시킬 수 있다.

2004년 개통부터 2009년까지 운영하면서 간헐적으로 발생한 6년간의 고속전차선로의 드로퍼 단선을 취합하여 특성별로 'Fig. 4'와 같이 백분율로 표시하여 분석 하였다.

드로퍼의 단선 발생을 연도별로 구분하여 분석하면 2004년에는 7.4[%], 2005년에는 13.1[%], 2006년에는 15.0[%], 2007년에는 14.0[%], 2008년에는 20.6[%], 2009년에는 29.9[%]로 나타났으며, 2008년(5년차)부터 드로퍼 단선 발생이 증가됨을 알 수 있었다. 프랑스의 경우도 1993년도 부터 상업 속도 300[km/h]로 영업운전을 하고 있는 TGV-N (북부선) 노선의 경우는 영업운행을 시작한지 만 5년이 경과된 시점부터 드로퍼 단선이 발생한 기록이 있다.

월별로 구분하여 분석하면 기온의 변화 등으로 시설물의 변형이 생기는 10월에 16.8[%]로 많이 발생 되었으며, 동절기 12월 10.3[%]와 해빙기 3월, 9월, 11월은 각각 9.3[%]로 나타났다.

설치 구간별로 구분하여 분석하면 토공구간이 35[%], 진동이 많은 교량구간이 42[%], 터널구간이 23[%]로 발생하였다. 경부고속 1단계 구간(광명~동대구)은 총 연장 230[km]로 토공구간은 32.3[%], 교량구간은 34.7[%], 터널구간은 33.0[%]로 시설되어 있다.

특히, 드로퍼 배치별로 살펴보면 1번째 드로퍼가 37.4[%]로 가장 많이 발생되었고, 다음으로 마지막 N 번째 드로퍼가 35.5[%]로 많이 발생하였다. 따라서, 지난 6년간 발생한 드로퍼 단선은 1번째 드로퍼와 마지막번째 드로퍼가 72.7[%]

Fig. 4 Analysis of fractured droppers

를 차지 하였다. 한 경간내 드로퍼는 'Fig. 3'에서와 같이 5~9 개로 구성되어 있다.

3.2 파단면 분석

파단품의 파단면 전반에 걸쳐 산화정도가 심하고, 파단 후 발생한 마모와 압착에 의해 파단면이 다수 손상되어 파단의 원인분석은 손상 정도가 심하지 않은 일부 소선을 선택하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 실시하였다.

'Fig. 5'와 같이 파단면에서 크랙이 발생한 후 전파된 해안자국(Beach mark)이 관찰되었으며, 파단면의 전반에 걸쳐 이물질이나 결함의 흔적은 관찰되지 않았다. 따라서, 전형적인 피로 파괴로 판단된다.

Fig. 5 Fractured plane of dropper

3.3 드로퍼의 피로하중

드로퍼에 작용하는 기계적 피로하중은 정적하중과 동적하중으로 구분한다. 정적하중은 경간길이, 드로퍼 설치 위치, 드로퍼 길이 등에 따라 차이가 난다. 동적 하중은 열차속도, 드로퍼의 정적하중, 파동 반사 등에 따라 다르게 나타난다.

따라서, KTX 고속열차 운행선에서 실제로 드로퍼에 작용하는 정적하중 및 동적하중의 값을 얻기 위하여 일정 구간

Fig. 6 Contact line with droppers at the support: a) telemetry, b) dropper, c) strain gage,

Table 2 Arrangement of droppers at the supports

Dropper No.	123-21	1	2	3	4	5	6	123-23	1	2	3	4	5	6	123-25	
Distance between droppers[m]		4.65	6.73	6.49	4.50	6.51	6.73	4.33	4.71	6.83	6.53	4.43	6.50	6.79	4.28	
Height[mm]	834	832	818	814	813	824	840	832	837	820	817	824	826	851	838	
Direction	Seoul → Pusan															

을 선정하고 안전 조치한 후, 전압 25kV가 인가된 전차선로에 활성 상태에서 실시간 측정이 가능 한 실시간 계측 시스템을 ‘Fig. 6’과 같이 설치하고, 전차선 높이, 드로퍼 간격, 드로퍼 높이를 측정하였다.

3.3.1 전차선 높이 측정

드로퍼의 기계적 피로하중을 측정하기 위하여 사전 준비 작업으로 고속철도 전차선로의 123-21호주(이하 21 호주)에서 123-25호주(이하 25호주)간 사이에서 모터카 바닥면을 기준으로 전차선 높이와 드로퍼 간격, 드로퍼의 높이를 측정하였으며, 측정결과는 ‘Table 2’ 및 ‘Fig. 7’과 같이 나타났다.

 F_n : n번째 드로퍼의 정적하중[N]

X_n : n번째 드로퍼까지의 수평거리[m]

$$d_n$$
 : n번째 전차선 사전이도량[m] T_c : 전차선 장력[N] W_c : 전차선 단위길이당 무게[N/m] W_d : 드로퍼의 평균중량[N/개] S : 경간의 길이[m]

사전이도(1/2,000)가 주어지는 21호주와 25호주간의 2경간을 각각에 드로퍼 6개씩, 전차선 80[m]를 전차선 이도와 조가선 이도, 가고를 EXCEL프로그램을 이용하여 계산하고, 드로퍼의 길이를 정하면 전차선로의 형상은 ‘Fig. 8’과 같이

Fig. 7 Height of a contact wire

3.3.2 드로퍼의 정적하중 계산

사전이도에 의한 전차선 높이 차가 있기 때문에 전차선 장력에 의한 드로퍼 하중의 편중을 고려하여야 한다. 드로퍼 정적하중을 구하기 위한 일반식[4]을 나타내면

첫번째 드로퍼 하중

$$F_1 = \left\{ X_1 + \frac{X_2 - X_1}{2} + \frac{T_c(d_2 - d_1)}{(X_2 - X_1)W_c} \right\} W_c + W_d \quad (1)$$

 $2 \leq i \leq n-1$ 번째 드로퍼 하중

$$F_i = \left\{ \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2} - \frac{T_c(d_i - d_{i-1})}{(X_i - X_{i-1})W_c} + \frac{T_c(d_{i+1} - d_i)}{(X_{i+1} - X_i)W_c} \right\} W_c + W_d \quad (2)$$

마지막 드로퍼 하중($i=n$ 일 때)

$$F_n = \left\{ \frac{X_n - X_{n-1}}{2} - \frac{T_c(d_n - d_{n-1})}{(X_n - X_{n-1})W_c} + (S - X_n) \right\} W_c + W_d \quad (3)$$

Fig. 8 Static configuration of overhead contact line

Fig. 9 Static internal force on the droppers

나타났다[4,7].

식(1), (2), (3)에 의해 계산된 드로퍼의 정적하중은 ‘Fig. 9’와 같이 1경간에서 1번째와 6번째, 2경간에서 1번째와 6번째 드로퍼에 제일 큰 하중인 약 147[N]이 작용하였다. 이것은 드로퍼 단선 특성 분석에서 ‘Fig. 4(d)’의 드로퍼 배치별 분석 결과와 같이 1번째와 마지막 번째 드로퍼가 많이 단선된 분석 결과와 아주 많은 상관 관계가 있음을 알 수 있었다.

3.3.3 드로퍼의 정적/동적하중 분석

드로퍼에 작용하는 정적하중을 측정하기 위하여 21호주 6번째 및 23호주 1번째 드로퍼가 더 이상 저항 하지 않는 슬랙(slack)이 발생할 때까지 밑에서 전차선을 손으로 밀어 올린 후 놓았다. ‘Fig. 10’은 21호주 6번째 드로퍼의 정적하중은 102[N]으로 측정되었고, 이 값은 드로퍼의 높이 차에 의한 작용하는 힘의 오차에 의해 계산치보다 작아진 것으로 판단 된다. ‘Fig. 11’은 23호주 1번째 드로퍼의 정적 하중은 141[N]으로 측정 되었으며, 이 값은 계산치와 유사하였다.

드로퍼에 작용하는 동적하중을 측정하기 위하여 활선 상태에 측정이 가능한 실시간 계측 시스템을 이용하여 ‘Fig. 6’과 같이 측정장비인 텔레메트리(Telemetry)와 무유도 변형률 게이지(Strain Gage)를 설치하고, 고속 열차가 300[km/h]로 운행할 때, 4회에 걸쳐 21호주 6번째 및 23호주 1번째 드로퍼의 동적하중을 ‘Table 3’과 ‘Fig. 12~Fig. 19’와 같이 측정하였다.

드로퍼의 동적하중을 분석하면 ‘Table 3’에서와 같이 1번째와 6번째가 각각 최대 240[N], 177[N]로 측정되었으며, 1번째 드로퍼가 최대하중이 63[N] 더 많이 작용했다. 전반적으로 1번째 드로퍼의 동적하중이 6번째 드로퍼의 동적하중보다 크게 작용하였다.

‘Fig. 4(d)’의 드로퍼 배치별 분석에서 1번째 드로퍼가 마

Fig. 10 Static load of the 21-6th dropper

Fig. 11 Static load of the 23-1st dropper

Table 3 Static and dynamic load of droppers

Speed[km/h]	6th dropper[N] at the 21 support	1st dropper[N] at the 23 support
0	102	141
300(1 st test)	177	240
300(2 nd test)	172	238
300(3 rd test)	173	240
300(4 th test)	167	219

지막번째보다 드로퍼 단선이 많은 발생한 것은 ‘Table 3’에서와 같이 1번째 드로퍼에 정적하중 및 동적 하중 더 많이 작용했기 때문임을 알 수 있었다.

그리고, 동적하중 측정결과 그래프는 ‘Fig. 12’에서 ‘Fig. 19’와 같으며, 동적하중 측정 그래프를 살펴보면, 드로퍼는 판토타그래프가 접근할 때 전차선의 파동에 의해 미세하게 흔들리다가 판토타그래프가 드로퍼를 통과하는 매우 짧은 순간에 느슨해지며 드로퍼가 인장 상태로 돌아오는 아주 짧은 순간 드로퍼에 최대 인장력이 작용하고, 상하 진동하면서 드

Fig. 12 Dynamic load of the 21-6th dropper(1st test)

Fig. 13 Dynamic load of the 23-1st dropper(1st test)

Fig. 14 Dynamic load of the 21-6th dropper(2nd test)

Fig. 15 Dynamic load of the 23-1st dropper(2nd test)

Fig. 16 Dynamic load of the 21-6th dropper(3rd test)

Fig. 17 Dynamic load of the 23-1st dropper(3rd test)

Fig. 18 Dynamic load of the 21-6th dropper(4th test)

Fig. 19 Dynamic load of the 23-1st dropper(4th test)

로퍼의 굽힘응력이 발생되면서 서서히 진동이 감소하여 정적인 상태로 돌아 간다. 드로퍼를 통과한 직후에 충격 하중 형태의 최대 인장력은 전차선 자중에 의한 충격 하중이 가장 큰 원인 중에 하나라고 판단되며, 드로퍼는 이러한 지속적으로 반복된 기계적 진동피로 증가로 인하여 종국엔 항복점에 이르러 파단이 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2004년도 경부고속철도 개통이후 2009년도까지 발생한 드로퍼 단선을 분석한 결과는 드로퍼 단선은 5년차 부터 급증하였고, 기온의 변화 등으로 시설물 변형이 생기는 10월과 진동이 많은 발생 하는 교량구간에서 많이 발생하였다.

드로퍼의 단선은 정적하중과 동적하중을 많이 받는 1번째와 6번째에서 가장 많이 발생했으며, 그 중에 1번째 드로퍼가 더 하중을 받으므로 더 많이 단선되었으며, 드로퍼에 작용하는 정적하중과 동적하중의 크기에 따라서 드로퍼의 단선과 밀접한 상호 관계가 있음을 알 수 있었다.

드로퍼의 1번째와 6번째(또는 마지막번째)가 많이 단선된 것은 고속 열차의 운행 스케줄에 따라 판토티그래프의 습동에 의해 드로퍼를 지날 때마다 지속적으로 발생하는 순간 최대 인장력과 굽힘응력 등의 기계적 피로 증가가 다른 드로퍼보다 많이 작용함으로써 드로퍼의 피로 파괴가 빨리 진행되어 단선된 것임을 알 수 있었다.

따라서, 드로퍼 단선의 취약부분인 1번째 드로퍼와 마지막번째 드로퍼는 지금보다 강도가 높은 드로퍼 와이어를 사용하거나, 유지보수 대체주기를 10년에서 5년으로 조정하여 시행하는 것이 바람직하다.

향후, 국내의 고속선 전차선로 운영의 안정성과 유지 보수 관리를 효율적으로 향상시키기 위해선 드로퍼 단선 현상을 지속적으로 관찰하여야 하며, 드로퍼 재질의 구조 개선과 순환전류에 의한 전기적 피로 영향에 관련된 연구수행이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] Y.H. Ahn (2000) The question at issue of connector wire in high speed railway catenary system of France, *Journal of the Korean Society for Railway autumn Conference of the Korean Society for Railway*.
- [2] Y.H. Cho (2008) Numerical simulation of railway panto-graph overhead contact line dynamics considering dropper nonlinearity and contact wire pre-sag, PhD Thesis, Seoul National University.
- [3] KRS PW 0008-07(R) (2006) Bronze Stranded Con-ductor(Bz).
- [4] Y.S. Kim, H.C. Yoo (2008) Electric Railway, Dongil Press, pp. 483-494.
- [5] S.G. Chung, et al (2007) Technical Development for Improvement of Electric Railway System, Korea Railroad Research Institute, KRRI Research 07-095.
- [6] S.G. Chung, et al (2008) Technical Development for Improvement of Electric Railway System, Korea Railroad Research Institute, KRRI Research 08-024.
- [7] S. Hur, et al (2002) A Study on the Dynamic Simulation of High Speed Current Collection System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 5(1), pp. 47-54.

접수일(2010년 12월 8일), 수정일(2011년 3월 4일),
게재확정일(2011년 5월 7일)