

고속선용 드롭퍼 피로분석 연구

A Study on Fatigue Analysis of Dropper for High Speed Electric Railway

이태훈† 박기범* 전용주* 류영태* 조용현** 이기원** 박영**
Lee, Tae-Hoon Park, Ki-Bum Jeon, Yong-Joo Ryu, Young-Tae Cho, Yong-Hyeon, Lee, Ki-Won Park, Young

ABSTRACT

The dropper supports the contact wire and is attached using thimbles and various types of dropper clips on the catenary. Consequently droppers are subject to mechanical loads from friction and buckling during the passage of pantographs. If such mechanical loads occur repeatedly with every passing pantograph, it is possible that the dropper wire will break due to fatigue. 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 prediction of the dropper static load. The measured values in the experiment agree well with the theoretical predictions. And, we performed measurement for the variation of forces on the dropper. To analyze the cause analysis on fracture of dropper wire, we have conducted experiment such as fatigue test of new products, SEM(Scanning Electron Microscope) and EDX(Energy Dispersive X-ray) of fractured specimens in the field.

Finally, we also measured the vertical displacements when a pantograph moved at 300km/h under the Korean high speed overhead line.

1. 서론

2004년 4월 경부고속철도 개통이후 전차선로 드롭퍼 단선 장애가 약 4년간 55여개소가 발생되어, 이에 대한 단선 원인분석 및 대책 강구가 필요하였다. 고속철도 전차선로는 코아계약으로 설치되었으며, 국내 지역적 환경과 KTX 집전장치 미치는 파동에 의한 기계적 피로도 증가여부를 도출하고자 한다. 또한 고속철도 전차선로 드롭퍼의 단선원인 분석을 통한 안정성 향상과 고속철도 전차선로 드롭퍼 수명단계 측정으로 유지보수관리 체계를 효율화하는데 그 목적을 둔다.

1993년부터 상업속도 300[km/h]로 영업운행을 하고 있는 TGV-N(북부선)노선의 경우는 영업운행을 시작한지 만 5년이 경과 된 시점부터 드롭퍼 및 균압선 등에서 가다소손이 발생하기 시작하여 절손장애가 발생한 기록이 있다. 이것은 열차안전운행에 저해 요인으로 작용하기 때문에 파단원인 분석, 현장측정 등을 통하여 신중히 검토하여야 한다.

† 책임저자 : 비회원, 코레일 연구원
E-mail : leeth74@korail.com
TEL : (042)609-3145 FAX : (042)609-4915
* 비회원, 코레일 연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원

2. 전차선로 시스템

2.1 심플 카티너리 방식

심플 카티너리(Simple catenary)는 전차선이 드롭퍼에 의하여 조가선에 지지되는 간단한 구조이므로 건설 및 유지보수 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있으나, 구조상 컴플라이언스(Compliance)가 고르지 못한 단점을 가지고 있다.

경부고속철도의 경우, 조가선과 전차선 사이를 드롭퍼로 연결하여 전차선을 일정한 높이로 유지시키는 구조로 특히 경간전체에 걸쳐 균일한 컴플라이언스를 유지하도록 사전 이도(Pre-sag)를 준다. 적절한 양의 사전 이도는 주행 중에 팬터그래프의 진동폭을 적게 하는 동시에 전차선에 대한 접촉력과 그 변동을 적게하여 이선을 방지하고 양호한 집전을 할 수 있게 한다.

심플 카티너리는 집전성능이 가선의 정적 탄성특성보다는 진동특성에 더 크게 영향받는 원리를 이용하여 드롭퍼 간격조정을 통해 탄성의 불균일성을 감소시킴과 함께 장력을 높여 단순 구조화를 실현한 설계이다. 심플 카티너리는 프랑스, 우리나라 및 일본의 차세대 고속전철 시스템에서 채택하고 있다. 경부고속철도는 조가선의 장력을 14[kN], 전차선의 장력을 20[kN]으로 하고, 가고를 1,400[mm]로 하여 심플 카티너리 방식으로 운행되고 있다.

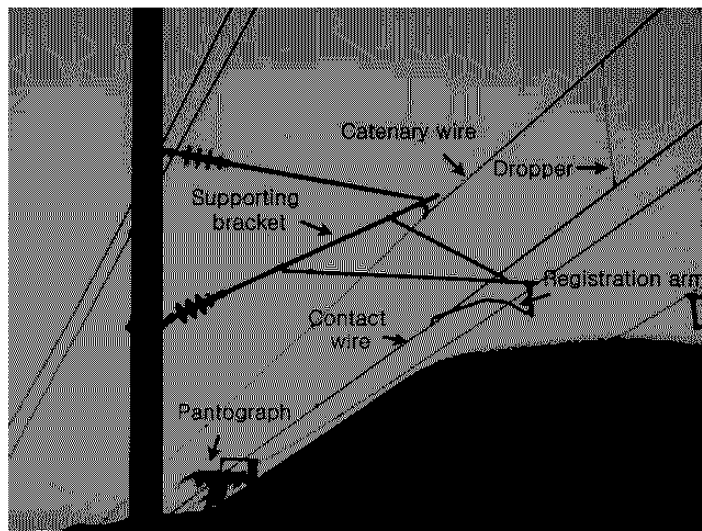


그림 1. 심플 카티너리 방식

그림 1은 심플 카티너리 방식의 경부고속선 전차선로를 보여주고 있다. 심플 카티너리 방식의 전차선로 구조를 살펴보면 전차선(Contact wire), 조가선(Catenary wire), 드롭퍼(Dropper), 지지브라켓(Supporting bracket) 및 곡선당김금구(Registration arm)로 구성되어 있다. 전차선은 주기적으로 설치된 드롭퍼에 의해 조가선에 지지된다. 조가선은 지지브라켓에 의해 지지되며 곡선당김금구는 활 모양으로 휘어져 있는 형상을 한 금구로 전차선이 편위(Stagger)를 가지도록 설치되어 있다.

2.2 드롭퍼

(1) 드롭퍼의 구성

드롭퍼는 전차선을 수평으로 유지하기 위해 전차선을 조가선에 현수하는 장치로서 드롭퍼는 12[mm]의 청동연선 양단에 클립형 금구로 조가선 이도에 맞춰 전차선을 조가선에 현수되게 지지하며 그 구조는 전차선이 팬터그래프의 압상력 작용 등으로 상승시 드롭퍼의 청동연선은 유연하게 휘어지며, 전차선 상호작용에 유연하게 대처하여 진동피로, 마모 등을 줄일 수 있다. 드롭퍼선은 단면적 12[mm]와 직경 5.19[mm]의 청동연선으로 제작되어 있으며, 구성은 0.65[mm]의 소선 7가닥으로 꼬여진 중심의 1륙음과 외피층

을 만드는 0.54[mm]의 직경을 가지는 7개의 소선으로 꼬여진 6 묶음으로 구성되어 있다.

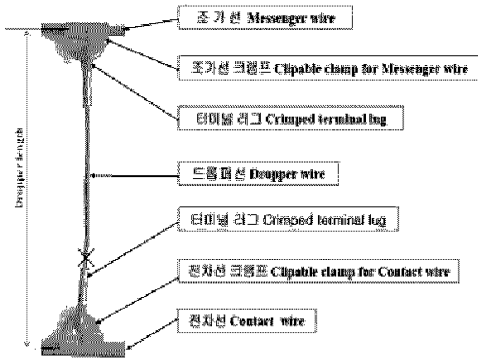


그림 2. 드롭퍼의 구성

표 1. 드롭퍼선 특성

	적용규격	청동연선(Bz)
	공칭단면적 [mm ²]	12
	소선수 [가닥/mm]	(7×0.65)×1 (7×0.54)×6
	재료 [%]	카드뮴(0.9~1.2) 주석(0.2~0.3) 기타(0.03 이하)
	인장하중 [N]	6,943
	전기저항 [Ω/km]	2.1 이하
	단위중량 [kg/m]	0.103

(2) 드롭퍼의 배치간격

드롭퍼의 배치간격은 경간 내에서 첫 번째와 마지막 번째 드롭퍼는 무조건 4.50[m]로 하고 나머지는 6.75[m]를 원칙으로 하되, 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.

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	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	4.50	4.50	6.75	6.75	4.50		
40.50 m span - 6 droppers									
4.50	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	4.50					
31.50 m span - 5 droppers									
4.50	6.75	4.50	4.50	6.75	4.50				

그림 3. 표준경간에서의 드롭퍼 간격

3. 드롭퍼 단선현황 및 파단면 분석

3.1 드롭퍼 단선현황

2004년부터 2007년까지 경부고속철도 전차선로 드롭퍼 단선현황을 분석한 결과, 지형별 단선현황은 교량구간 56.4[%], 터널구간 23.6[%], 토공구간 20.0[%] 순으로 나타났다.

표 2. 드롭퍼 단선현황

구분	계	지형별			설치위치별					지역별		
		교량	터널	토공	일반 개소	에어 조인트	에어 섹션	건널선	상승 개소	광명	오송	약목
2004년	9	5	4		4	2	1	1	1	1	8	
2005년	16	6	4	5	11	3	1			3	9	3
2006년	16	12	2	2	10	3	2		1		5	11
2007년	15	8	3	4	11	4				3	3	9
합계	55	31	13	11	36	12	4	1	2	7	25	23

또한 설치위치별 단선현황 중 가장 높은 개소는 일반개소 65.5[%]이며, 전기적으로 접속되어 있는 에어조인트개소 21.8[%], 전기적으로 분리되어 있는 에어섹션개소 7.3[%], 상승개소 3.6[%] 및 교차하는 전차선의 레일면상 높이를 같은 높이로 유지하여 팬터그래프가 전차선에 끼여드는 사고를 방지하는 건널선개소 1.8[%]순으로 나타났다.

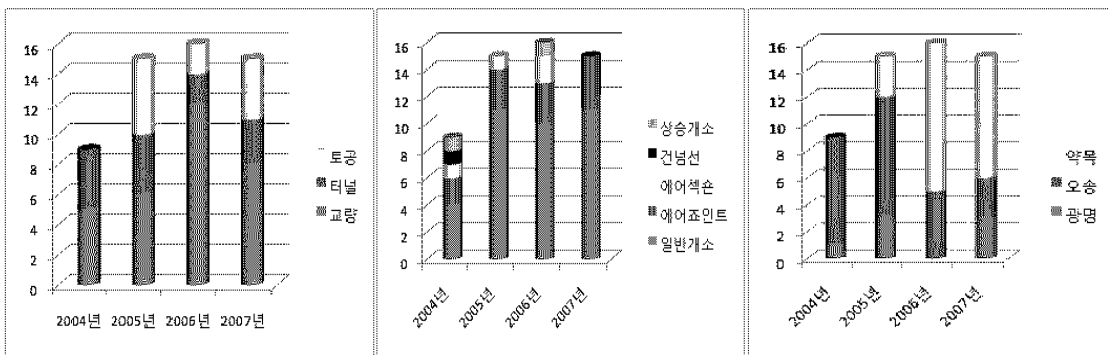


그림 4. 구간/설치위치/지역별 드롭퍼 단선현황

3.2 파단면 분석

(1) 경도 측정값

시료의 경도는 파손품의 와이어 단면, 터미널러그 단면, 그리고 터미널러그의 길이방향 단면부위와 정상품의 와이어 단면의 경도를 하중 100[g]에서 5점을 측정하여 평균값을 계산하였다. 표 3 및 그림 5와 같이 측정값을 나타내었으며, 시료별 차이는 크게 나타나지 않았다.

표 3. 각 시료별 경도 측정값

시료 구분		경도 (HV 0.1)	비고
정상품 와이어 단면		213	5점 측정치의 평균임
파 단 면	와이어 단면	193	
	터미널러그 단면	189	
	터미널러그 길이방향 와이어 부위	192	

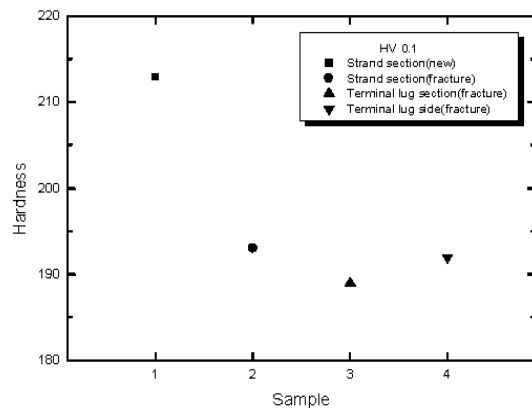


그림 5. 각 시료별 경도 측정값

(2) 파단면 및 미세조직 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 파단면 분석을 실시하였다.

파단면에서 크랙이 발생한 후 전파된 해안자국(Beach mark)이 관찰되었으며, 파단면의 전반에 걸쳐 이물질이나 결함의 흔적은 관찰되지 않았다. 따라서, 전형적인 피로파괴로 판단되었다. 또한, 파단품의 소선 길이 방향으로 연신된 미세조직이 관찰되었으며, 열에 의한 결정립 성장으로 판단된다.

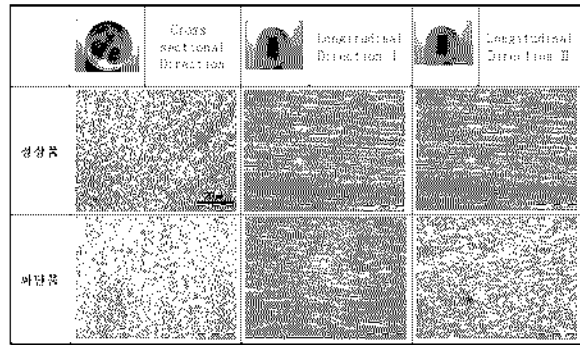
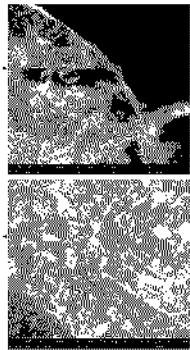
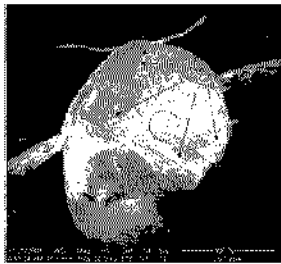


그림 6. 드롭퍼 파단면의 해안자국

그림 7. 각 시료의 SEM 미세조직

(3) 피로시험

피로시험을 위해 드롭퍼 시료길이를 200[mm]로 재단하였으며, 피로시험기는 INSTRON (Model : B3000)장비를 사용하였다. 1차시험은 진폭 ± 15 [mm], 주파수 8[Hz], 하중 220[N]으로 시험을 실시하였으며, 20만회에서 피로응력 부위가 터미널러그 부위가 아닌 와이어의 중간부분에서 파손되었다. 2차시험은 시험조건을 진폭 ± 1.5 [mm], 주파수 7[Hz], 인장하중 100/-50[N]으로 변경하여 가속시험을 실시하였으며, 11,820,749회에서 드롭퍼의 터미널러그 부위에서 파손되었다.

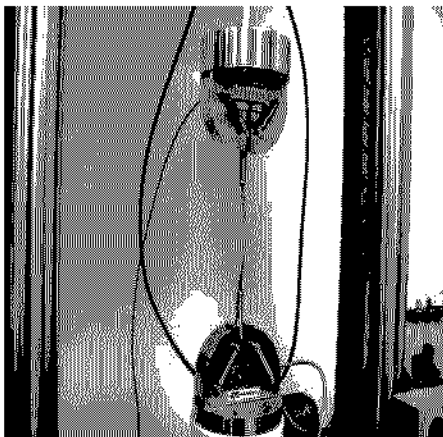


그림 8. 피로시험 사진

시험조건	피로시험 후 파단 사진
○ 1차시험 - 변위 : ± 15 [mm] - 주파수 : 8[Hz] - 인장하중 : 220[N]	
○ 2차시험 - 변위 : ± 1.5 [mm] - 주파수 : 7[Hz] - 인장하중 : 100/-50[N]	

그림 9. 피로시험 후 파단 사진

(4) BDX 정성분석

정성분석은 시료수를 임의로 8개의 시편을 채취하여 파단품과 피로시험으로 파단된 시료의 단면을 BDX(Energy Dispersive X-ray)장비를 이용하여 분석하여 비교하였다. 분석결과는 표 4에서 나타내는 바와 같이 주성분이 Cu로 차이는 없으나 차이를 보이는 원소는 황(S)으로 파손품 시료에서는 대부분 검출되었으나, 정상품(피로시험 후 파단품) 시료는 나타나지 않았다. 그리고 카드뮴(Cd) 원소는 정상품(피로시험 후 파단품) 시료에는 고루 나타나는 반면 파단품 시료는 잘 나타나지 않았다.

표 4. 정상품 및 파단품의 정성분석 결과

시료구분		원소 (wt%)							
		Cu	Zn	Al	S	Cd	Si	Cl	Sn
정상품 (피로시험 후 파단품)	1	88.51	-	10.81	-	-	-	0.67	-
	2	92.48	5.57	0.40	-	1.26	-	0.30	-
	3	93.86	-	2.24	-	2.95	-	0.95	-
	4	90.90	5.91	0.67	-	1.47	-	1.05	-
	5	87.39	5.15	5.55	-	1.49	-	0.42	-
	6	91.72	5.58	1.04	-	1.65	-	-	-
	7	91.93	0.02	-	-	7.24	-	0.81	-
	8	94.27	3.37	0.41	0.06	1.53	-	0.36	-
파단품	1	80.15	9.66	1.79	3.55	-	1.06	3.79	-
	2	75.40	11.59	-	3.93	0.81	3.64	4.64	-
	3	79.05	11.10	1.21	3.75	-	1.05	3.84	-
	4	95.43	-	2.58	-	-	-	1.99	-
	5	89.70	6.88	0.86	0.73	-	-	1.84	-
	6	89.52	6.02	1.49	0.82	0.52	-	1.47	0.15
	7	79.31	12.49	-	4.41	-	0.03	3.76	-
	8	79.76	8.47	1.61	4.64	1.52	1.38	2.39	0.24

4. 전차선로 정적변형 및 드롭퍼의 정적하중(표준경간 40.50[m])

4.1 전차선로 정적변형

표준경간이 40.50[m]일 때 전차선 사전이도에 의한 전차선 이도, 조가선 이도, 드롭퍼의 길이의 계산된 값을 나타내었다.

(1) 전차선 사전이도에 의한 전차선 이도

사전이도량 경간/2,000에 대한 각 드롭퍼의 처짐량을 계산하면 다음 표와 같다.

표 5. 표준경간 40.50[m]의 전차선 이도

드롭퍼	1	2	3	4	5	6
거리[m]	4.50	11.25	18.00	22.50	29.25	36.00
처짐량[m]	0.0000	0.0136	0.0198	0.0198	0.0136	0.0000

(2) 조가선 이도

조가선 이도는 각 드롭퍼 지점에서의 조가선 처짐량을 계산하면 다음 표와 같다.

표 6. 표준경간 40.50[m]의 조가선 이도

드롭퍼	1	2	3	4	5	6
처짐량[m]	0.125	0.225	0.270	0.270	0.225	0.125

(3) 드롭퍼 길이

드롭퍼의 길이는 다음에 의하여 정하여 진다.

드롭퍼의 길이 = 가고 + 전차선 사전이도에 의한 이도 - 조가선 이도

표 7. 표준경간 40.50[m]의 드롭퍼 길이

드롭퍼	1	2	3	4	5	6
길이[m]	1.275	1.189	1.149	1.149	1.189	1.275

4.2 드롭퍼의 정적하중

먼저 사전이도에 의한 전차선 높이차가 있기 때문에 전차선 장력에 의한 드롭퍼 하중의 편중을 고려해야 한다. 각 드롭퍼에 대한 높이차와 정적하중을 계산하면 다음 표와 같다.

표 8. 표준경간 45.00[m]의 드롭퍼 정적하중

드롭퍼	1	2	3	4	5	6	7	
높이차[m]	0.0	0.014	0.007	0.001	-0.001	-0.007	-0.014	0.0
정적하중[N]	149.278	74.895	63.013	51.130	63.013	74.895	149.278	

사전이도가 없는 경우에는 드롭퍼의 정적하중은 드롭퍼 1 및 6에서 최대로 걸리고 그 값은 11.087[kgf]이다. 경간/2,000의 사전이도를 전차선에 주는 경우에도 드롭퍼의 정적하중은 드롭퍼 1 및 6에서 최대가 되나 그 값은 15.210[kgf]으로 증가한다. 사전이도를 부여함으로써 드롭퍼의 정적하중은 약 4.123[kgf] 증가하게 된다.

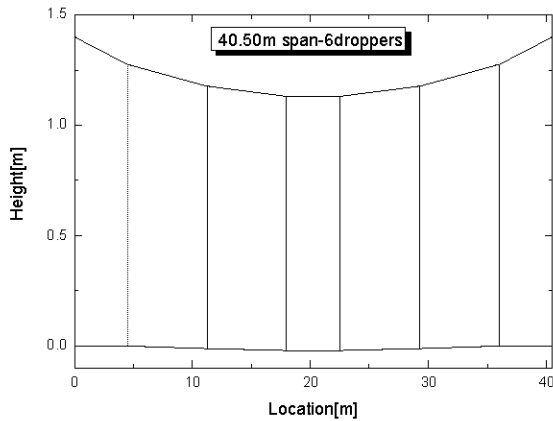


그림 10. 전차선로 정적변형

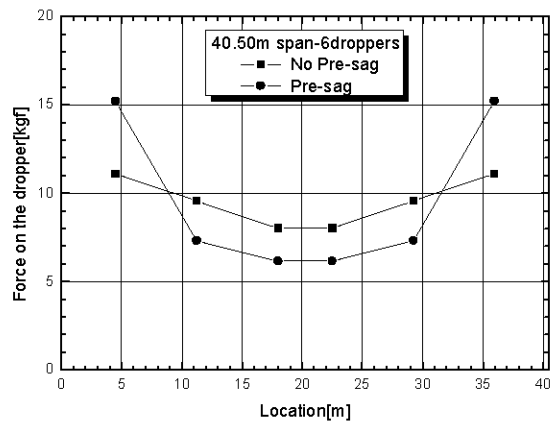


그림 11. 드롭퍼에 작용하는 정적하중

5. 드롭퍼의 피로하중 및 지지점 압상량

5.1 전차선 높이 측정

열차통과로 인한 드롭퍼의 피로하중을 측정하기 전에 고속철도 전차선로의 123-21호주에서 123-25호주사이의 전차선 높이와 드롭퍼 간격을 측정하였으며, 측정결과는 표 9와 같다.

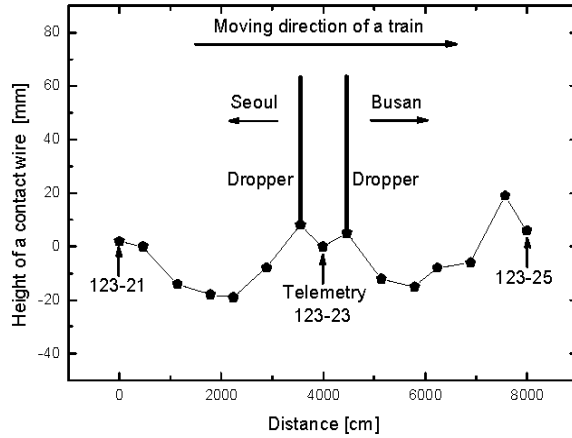


그림 12. 측정지점의 전차선 높이

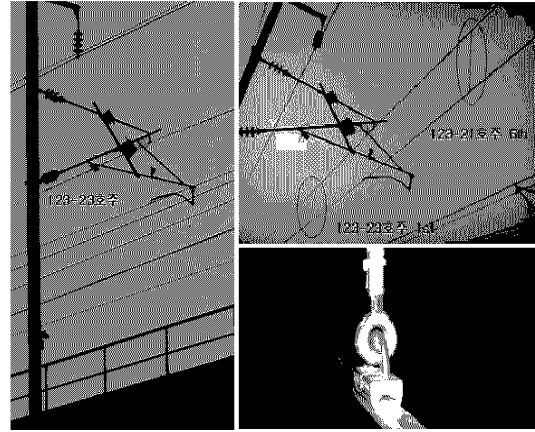


그림 13. 드롭퍼 피로하중 측정

표 9. 드롭퍼 간격 및 높이

드롭퍼 번호	123 -21 호주						123 -23 호주						123 -25 호주					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
드롭퍼 간격[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				
모터카 바닥기준 전차선 높이[mm]	834	832	818	814	813	824	840	832	837	820	817	824	826	851	838			
서울 → 부산(하선)																		

5.2 드롭퍼의 정적/동적하중 및 전차선의 지지점 압상량 측정

드롭퍼에 작용하는 정적하중을 측정하기 위하여 123-21호주 6번째 드롭퍼가 더 이상 저항하지 않는 슬랙(slack)이 발생할 때까지 밑에서 전차선을 손으로 밀어 올린 후 놓았다. 측정결과는 10.43[kgf]의 하중을 나타내었으며, 계산값보다 상대적으로 작은 힘이 걸렸다. 123-23호주 1번째 드롭퍼의 측정결과는 14.40[kgf]의 하중을 나타내었으며, 계산값과 유사하였다.

KTX 고속열차가 270[km/h] 및 300[km/h]일 때, 1차 측정에서 5차 측정까지 5회에 걸쳐 123-21호주 6번째 드롭퍼 및 123-23호주 1번째 드롭퍼의 동적하중을 측정하였다. 또한 123-23호주 가동브라켓의 진동파이프와 전차선 사이에 압상량 측정용 와이어센서를 설치하여, 곡선당김금구 위치에서 전차선의 압상량을 측정하였다. 드롭퍼의 정적/동적 하중 및 압상량의 측정결과는 표 10과 같다.

표 10. 드롭퍼 정적/동적하중 및 압상량 측정결과

속도 [km/h]	123-21호주 6th 드롭퍼 [kgf]	123-23호주 1st 드롭퍼 [kgf]	지지점 전차선 압상량 [mm]
0	10.43	14.4	-
300(1차)	18.08 (-13.71~4.37)	24.47 (-15.16~9.31)	82.75
300(2차)	17.60 (-12.86~4.74)	24.32 (-16.16~8.16)	84.19
300(3차)	17.66 (-12.56~5.10)	24.49 (-17.49~7.00)	74.04
300(4차)	17.02 (-13.29~3.73)	22.3 (-16.26~6.04)	81.32
270(5차)	16.97 (-12.19~4.78)	21.53 (-14.75~6.83)	60.90

5. 결 론

본 연구는 경부고속철도 개통이후 전차선로 드롭퍼 단선 장애가 발생되어, 이에 대한 단선 원인분석 및 대책 강구가 필요하였다.

드롭퍼의 파단면 분석에서 파면에서 크랙이 발생한 후 전파된 해안자국(Beach mark)의 관찰로 전형적인 피로파괴로 판단되었으며, 파단품의 소선 길이 방향으로 연신된 미세조직의 관찰로 열에 의한 결정립 성장으로 판단된다.

드롭퍼의 정적하중 특성에서 정상 설치시 정적하중은 약 15[kgf]이 작용되는 것으로 계산되었다. 123-21호주 6번째 드롭퍼의 정적하중은 10.43[kgf]으로 측정되었으며 이 값은 계산치보다 작았으며, 123-23호주 1번째 드롭퍼의 정적 하중은 14.40[kgf]으로 측정되었으며 이 값은 계산치와 유사하였다. 드롭퍼의 동적하중 특성에서 최대 변동 범위는 123-23호주 1번째 드롭퍼의 경우 24.49[kgf], 123-21호주 6번째 드롭퍼의 경우 18.08[kgf]로 각각의 드롭퍼에 작용하는 정적하중의 2배 이내로 측정되었다.

마지막으로, 드롭퍼는 고속열차의 운행에 의한 지속적으로 반복되는 굽힘응력과 우리나라 기후의 특성상 사계절 온도변화가 드롭퍼 수명에 영향을 미친것으로 사료되며, 드롭퍼의 정적 하중은 전차선의 높이에 영향을 받게 되므로 전차선 높이 관리에 주의를 기울일 필요가 있다.

향후에는 국내의 고속선 전차선로 환경에서 안정성과 유지보수 관리를 효율적으로 향상시키기 위해서 본 연구의 결과를 바탕으로 기계적 굽힘이 반복적으로 진행되더라도 수명이 오래갈 수 있도록 드롭퍼의 와이어 및 구조 개선과 순환전류에 따른 드롭퍼의 전기적 피로영향에 관련된 연구수행이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 안영훈(2000), "프랑스 고속철도 전차선로 시스템에서 균압선의 문제점", 한국철도학회 추계학술대회논문집
2. 조용현(2008), "드롭퍼 비선형과 전차선 초기 처짐을 고려한 철도 펜더그래프-전차선로 동역학의 수치시뮬레이션", 박사학위논문, 서울대학교
3. 김양수, 유해출(2008), "전기철도공학", 동일출판사
4. 권삼영(2008), "해외철도기술동향 : 전차선로-집전분야", 한국철도학회지 제11권 제2호, pp.27-30
5. 정상기(2007), "전력시스템 성능향상 기술개발", 한국철도기술연구원
6. 정상기(2008), "전력시스템 성능향상 기술개발", 한국철도기술연구원