

시속 400km급 전차선로 드로퍼 피로시험 하중 분석연구

The Analysis of Fatigue Test Load for Droppers in Overhead Contact Line for 400km/h Operation

조용현*[†], 이기원**, 권삼영**, 박영**, 박철민**

Yong Hyeon Cho*, Kiwon Lee**, Sam-Young Kwon**, Young Park**, Chulmin Park**

Abstract Droppers by which the weight of a contact wire is carried to a messenger wire become slackened when a pantograph passes under it. After the passage of the pantograph, dynamic tension is abruptly applied to the droppers due to the free drop of the lifted contact wire. After that, tensions on the droppers become oscillatory and are gradually decayed to a static tension. Thus, fatigue loads are applied to the droppers of high-speed rail catenary. It is said that one of the major maintenance works associated with Kyeongbu High-Speed Rail overhead contact line is to replace the broken droppers with new ones. It is expected that droppers are likely to be broken more frequently as train speed increases from 300km/h to 400km/h. In order to save maintenance costs with droppers, it is desirable to reduce dynamic forces on the droppers by giving no-sag to a contact wire. It is necessary to establish fatigue test load to droppers in order to ensure that they have infinite fatigue life during the factory test. To this end, we simulated the dynamic forces on the droppers by using SPOPS, the dynamic simulation program for overhead contact line and a pantograph coupled system. The accuracy of the simulation was validated by comparing those with measurement data taken from Kyeongbu High-speed line. Based on the simulation results, we proposed that fatigue test load is set to be 300N for the purpose of the validation of infinite fatigue life for the droppers of the High-speed overhead contact line for 400km/h operation

Keywords : Overhead contact line, Pantograph, Dropper, Fatigue Test

초 록 팬터그래프가 전차선의 하중을 조가선에 전달하는 드로퍼를 통과할 때 전차선이 압상되면서 드로퍼는 일시적으로 느슨해진다. 열차가 통과한 직후 전차선이 자중에 의하여 낙하하면서 드로퍼에는 일시적으로 큰 동적 장력이 걸리고, 진동과정을 거치면서 감소하다가 정적 장력 상태로 수렴하게 된다. 경부고속철도 전차선로에서의 주요 유지보수 작업 중의 하나가 지지점 인근의 드로퍼가 열차 통과에 따른 동 하중에 의하여 피로 파괴됨으로써 드로퍼를 교체하는 것이었다. 열차 속도가 300km/h에서 400km/h 증가하게 되면 드로퍼에는 더 큰 동 하중이 유발될 것으로 예상된다. 시속 400km급 전차선로에서는 드로퍼 동하중을 줄이기 위하여 전차선에 사전이도를 부여하지 않는 것이 바람직하다. 시속 400km급 전차선로에 적용되는 드로퍼의 피로 성능을 적절히 평가할 수 있는 시험하중 기준을 수립할 필요가 있다. 경부고속철도에서의 드로퍼 장력 측정을 통해 검증한 팬터그래프-전차선 동역학 시뮬레이션을 통하여 시속 400km로 열차 통과시 드로퍼가 겪게 될 동 하중을 예측한 결과를 기초로 드로퍼의 무한수명을 입증하기 위한 드로퍼의 공장 피로시험 하중으로 300N을 제안하였다.

주요어 : 전차선로, 팬터그래프, 드로퍼, 피로시험

† 교신저자: 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부(yhcho@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

** 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

1. 서론

팬터그래프가 전차선의 하중을 조가선에 전달하는 드로퍼를 통과할 때 전차선이 압상되면서 드로퍼는 일시적으로 느슨해진다. 열차가 통과한 직후 전차선이 자중에 의하여 낙하하면서 드로퍼에는 일시적으로 큰 동적 장력이 걸리고, 진동과정을 거치면서 감쇠하다가 정적 장력 상태로 수렴하게 된다. 경부고속철도 전차선로에서의 주요 유지보수 작업 중의 하나가 지지점 인근의 드로퍼가 열차 통과에 따른 동 하중에 의하여 피로 파괴됨으로써 드로퍼를 교체하는 것이었다. 열차 속도가 300km/h에서 400km/h 증가하게 되면 드로퍼에는 더 큰 동 하중이 유발될 것으로 예상되므로 시속 400km급 전차선로에 적용되는 드로퍼의 피로 성능을 적절히 평가할 수 있는 시험하중 기준을 수립할 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 드로퍼의 피로 하중을 줄이기 위한 전차선로의 설계방안을 제시함과 함께 경부고속철도에서의 드로퍼 장력 측정 및 팬터그래프-전차선 동역학 시뮬레이션을 통하여 시속 400km급 전차선로 드로퍼가 겪게 될 동 하중을 예측하고 이를 토대로 드로퍼 공장 피로시험 하중을 제시하였다.

2. 드로퍼의 피로하중 특성 및 피로시험방법

2.1 피로하중 특성

팬터그래프가 전차선의 하중을 조가선에 전달하는 드로퍼를 통과할 때 전차선이 압상되면서 드로퍼는 일시적으로 느슨해졌다가, 즉 드로퍼 장력이 0으로 되었다가 전차선이 자중에 의하여 낙하하면서 드로퍼에는 정적 하중보다 큰 동 하중이 순간적으로 걸리게 되고, 전차선과 조가선의 진동에 따라서 드로퍼 작용 하중은 동적으로 변화하다가 궁극적으로는 정적 하중값으로 수렴하게 된다. 팬터그래프가 통과함에 따라서 드로퍼가 피로파괴가 발생할 수 있으므로 새로운 전차선로 시스템을 설계할 때에는 팬터그래프-전차선 동역학 시뮬레이션을 통하여 집전성능 이외에도 드로퍼 동하중 예측 등 피로 수명에 대한 검토가 필요하다.

2.2 피로시험방법

드로퍼는 열차 통과에 따라서 피로 파괴를 일으키는 동하중이 작용하므로 EN 50119:2009[1]에서는 Figure 1과 같이 드로퍼에 인장과 압축의 교번하중을 200만회 이상을 주면서 피로파괴가 발생하지 않음을 확인하는 피로시험을 요구하고 있다. 이 때 드로퍼 장력은 100~400N으로 하고 드로퍼의 압축 길이는 20~200mm로 하고, 피로시험은 주기는 0.5~10Hz로 하도록 되어 있다.

시속 400km급 전차선로의 드로퍼에 대한 피로시험을 수행하기 위하여 드로퍼 장력을 얼마로 할 것인가를 정해야 한다.

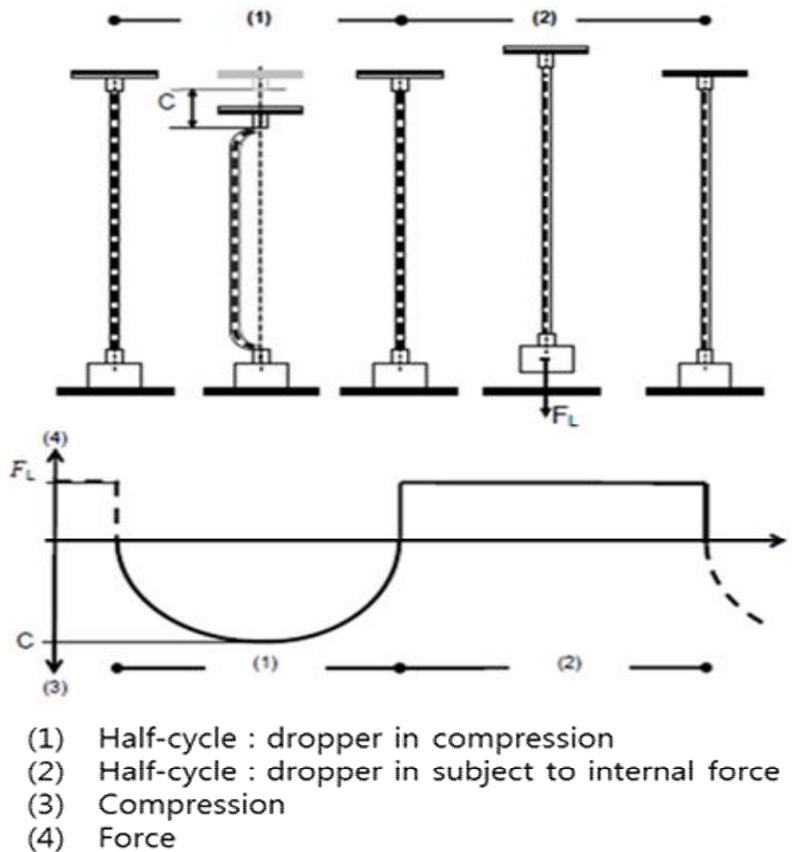


Figure 1. Dropper Fatigue Test Scheme [1]

3. 경부고속철도 드로퍼의 동하중 시뮬레이션 및 검증

3.1 시속 300km 열차 통과시 드로퍼 동하중 시뮬레이션

전차선로의 드로퍼에 작용하는 동하중 예측을 위하여 한국철도기술연구원에서 개발한 SPOPS(Simulation Program of Overhead contact line and Pantograph coupled System) 프로그램[2]을 사용하였다. SPOPS는 유한요소법 기반 시뮬레이션 프로그램으로 전차선의 스테거로 인한 집전성능의 영향을 평가할 수 있는 시뮬레이션 프로그램이다.

경부고속철도 경간 40m의 전차선로에 설치된 드로퍼를 대상으로 열차 통과에 따른 동하중을 시뮬레이션하였다. 경부고속철도의 전차선에는 경간길이의 1/2000에 해당하는 만큼 사전이도(Pre-sag)가 부여되어 있다. 사전이도가 있으면 전주 인근의 드로퍼는 다른 드로퍼에 비하여 가장 큰 정적 하중을 받게 된다. KTX열차가 시속 300km로 통과할 때 드로퍼가 겪는 하중의 변화가 Figure 1에 나와 있다. 드로퍼에 작용하는 정적 하중은 15kg이고 열차 통과에 따라서 최고 23kg까지 증가하게 됨을 알 수 있다. 한 가지 특이한 점은 최대 하중이 열차 통과 직후가 아니라 열차 통과 이후 전차선과 조가선이 진동하는 과정에서 발생한다는 점이다.

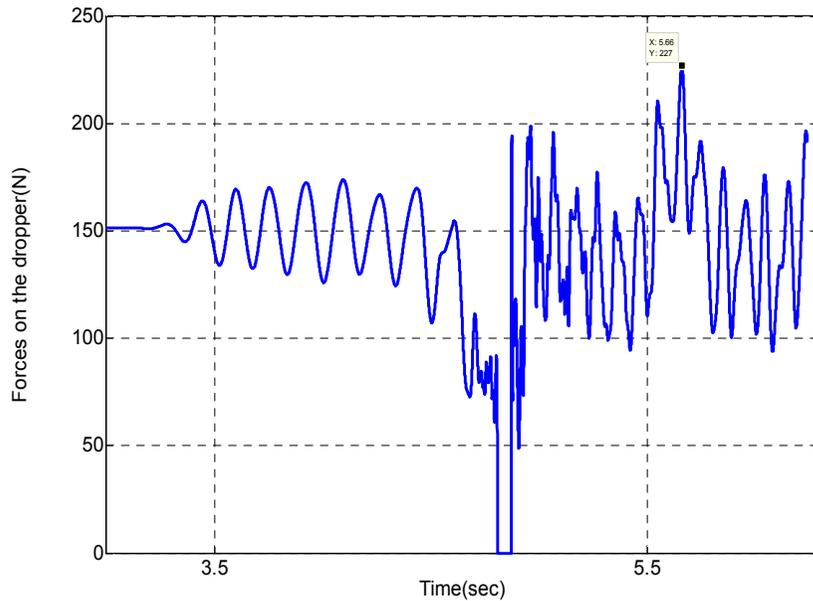


Figure 2 Simulated Dynamic Forces on the Dropper nearest to a Mast due to the Passage of KTX Pantograph

3.2 드로퍼 동하중 측정 및 시뮬레이션 결과와의 비교

경부고속철도 하선 연제교 123-21호주(경간 40m)의 부산방향에 있는 전주에서 가장 가까운 드로퍼에 Figure 3에 나와 있는 로드셀을 설치하여 KTX 열차 통과에 따른 드로퍼 동하중을 측정하였다.



Figure 3 Installation and Calibration of a Loadcell for Dynamic forces on the Dropper nearest to the Mast Registered as 123-21 Located in YeonJe Bridge

측정결과가 Figure 4에 나와 있다. 시간 경과에 따른 드로퍼에 작용하는 동하중의 변화 추이를

살펴보면 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 최대 하중이 열차 통과 직후가 아니라 열차 통과 이후 전차선과 조가선이 진동하는 과정에서 발생한다. 측정된 드로퍼 동하중의 증감 변화도 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다. 정적인 상태에서 드로퍼에 작용하는 힘은 14kg이었으며 열차 통과에 따라서 발생하는 최대 동하중은 19.2kg이었다. 하중 변화의 크기에 있어서는 시뮬레이션 결과(23.3kgf)가 실 노선에서의 측정 결과(19.2kgf)보다는 약 21% 정도 크다(정적 하중을 시뮬레이션에서와 같이 15.4kgf로 취하면 측정결과가 20.2kgf이 되어 시뮬레이션 결과와 측정결과의 오차는 15%로 줄게 됨). 다시 말해, 시뮬레이션 결과가 측정 결과보다 보수적이라는 것을 알 수 있다.

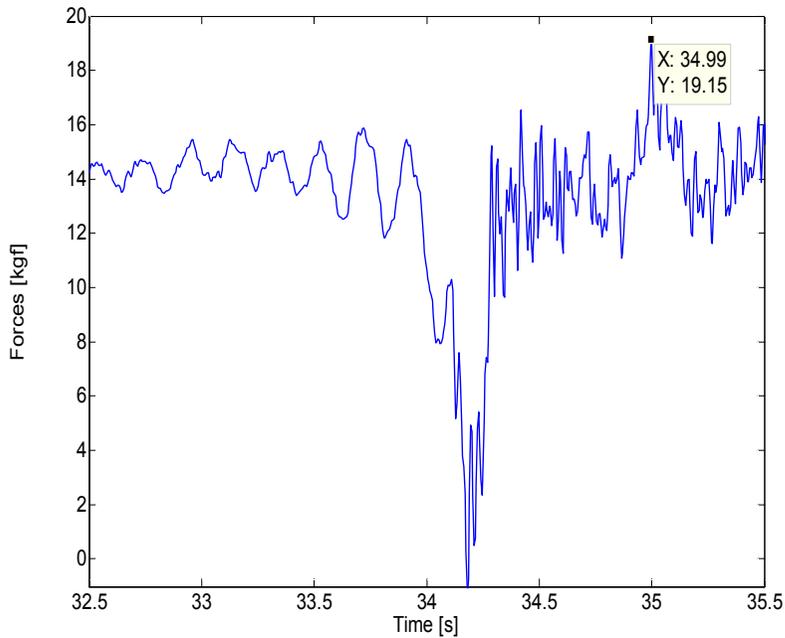


Figure 4 Measured Dynamic Forces on the Dropper nearest to the Mast Registered as 123-21 Located in YeonJe Bridge

4. 시속 400km 열차 통과 시 드로퍼 동하중 예측 및 피로시험하중 검토

4.1 시속 400km 열차 통과시 드로퍼 동하중 예측

전차선에 사전이도를 부여하면 전주 인근의 드로퍼에 작용하는 정적 하중은 다른 드로퍼에 비하여 크나, 사전이도가 없으면 드로퍼 각각에 균등한 장력이 작용하게 된다. 정적 하중이 크게되면 동하중의 변화가 크게 되므로 시속 400km급 전차선로에서는 전차선의 사전이도를 부여하지 않았다. 드로퍼의 배치는 아래 표와 같은데 여기에는 두 가지 드로퍼 배치(안)이 제시되어 있다. 두 가지 (안)의 차이는 전주와 전주 인근 드로퍼 간격이 1안에서는 6m, 2안에서는 4.5m인 점이다. 시뮬레이션 결과에 따르면 HEMU열차의 팬터그래프가 시속 400km로 주행하는 경우 두 가지 배치(안) 모두 집전성능 기준을 만족한다. 드로퍼 배치 1안은 경간이 55m일 때 드로퍼 배치 2안은 경간이 50m 일 때 국부적 이선과 관련이 있는 전차선과 팬터그래프 사이의 최소 접촉력이 더 큰 것으로 예측되었다.

Table 1 Locations of Droppers in Overhead Contact Line for 400km/h Operation

Span [m]	Option	Number of Droppers	Distance between neighring droppers (m)								
			Mast	No. 1	No. 2	No.3	No.4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 7
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No.8	No. 9
55	1	8	6	5	6.5	6.5	7	6.5	6.5	5	6
50	1	8	6	5	6.5	5	5	5	6.5	5	6
55	2	8	4.5	6.5	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5	4.5
50	2	8	4.5	6.5	6.5	5	5	5	6.5	6.5	4.5

두 가지 드로퍼 배치를 적용한다는 가정 아래서 열차 통과에 따른 드로퍼 동 하중을 예측하였다. 드로퍼에 걸리는 최대 동하중은 드로퍼 배치 1안에 대해 경간 50m에서는 20.1 kg, 경간 55m에서는 22.0 kg이라는 것을 Figure 5에서 알 수 있고, 드로퍼 배치 2안에 대해 50m에서는 20.2kg, 경간 55m에서는 21.2 kg이라는 것을 Figure 6에서 알 수 있다.

4.2 드로퍼 피로하중 검토

드로퍼는 열차 통과시 드로퍼가 일시적으로 느슨해졌다가 전차선의 낙하로 인하여 장력이 급격히 증가하는 동적 현상을 겪기 때문에 일반적으로 정적인 상태에서 드로퍼의 장력이 클수록 열차 통과에 따른 장력의 변화가 커지게 된다. 시뮬레이션 결과에 따르면 열차가 시속 400km로 통과함에 따른 전차선로 드로퍼에 작용하는 장력의 변화는 22kgf 이하로 예측된다. 시속 400km급 전차선로에서 드로퍼 장력은 시속 300km급 경부고속철도 전차선로에 비하여 격렬히 변하지만, 드로퍼가 겪는 장력의 최대값과 최소값의 차이만을 보면 전차선의 사전이도가 없는 시속 400km급 전차선로가 전차선의 사전이도가 S/2000이 있는 시속 300km급 경부고속철도 전차선로에 비하여 1kgf 정도 작다.

경부고속철도 주요 유지보수 작업 중의 하나가 지지점 인근의 드로퍼의 교체로 이는 피로 파괴에 기인한 것이다. 그러므로 시속 400km 전차선로 설계 시 열차 통과에 따른 드로퍼 장력 변화를 가능한 한 줄이고자 전차선에 사전이도를 부여하지 않는다.

드로퍼 피로시험을 위한 추무게 산정을 하기 앞서 일반적인 사용되는 피로 허용 강도, $\sigma_{allowable}$ 를 고찰할 필요가 있다. 피로 허용 강도, $\sigma_{allowable}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{allowable} = \frac{1}{f_m f_s} \frac{C_1 C_2 \sigma_{wo}}{\beta} \quad (1)$$

여기서 f_m 는 재료의 피로한도에 대한 안전율, f_s 는 사용하중에 대한 안전율, C_1 는 크기효과에 따른 피로강도 저하, C_2 는 표면상태 및 부식작용에 따른 피로강도 저하, β 는 노치 효과로 인한 응력집중, σ_{wo} 는 시편을 이용하여 얻은 피로한도이다.

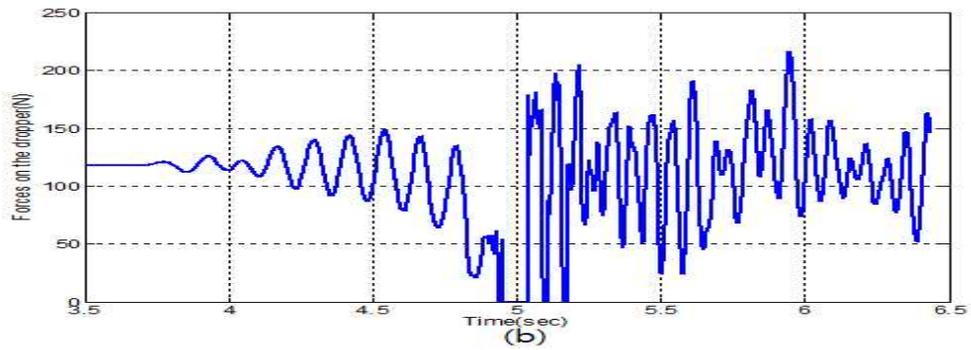
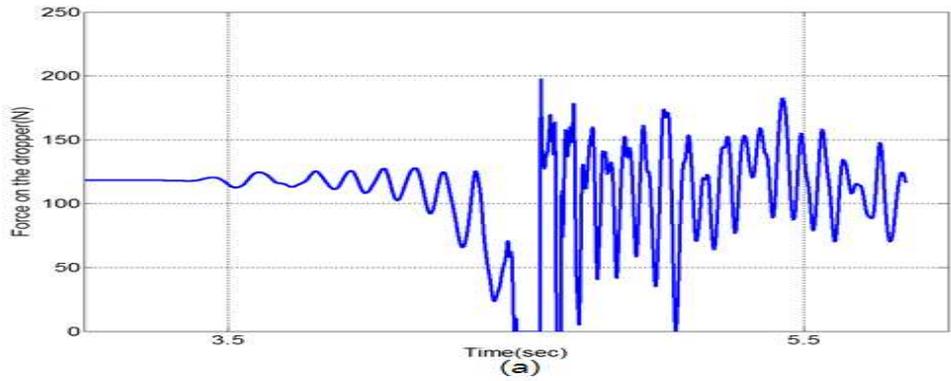


Figure 5 Simulated Dynamic forces on the Dropper nearest to a Mast for the Overhead Contact Line labeled by Option 1: Up; Span 50m, Down: Span 55m.

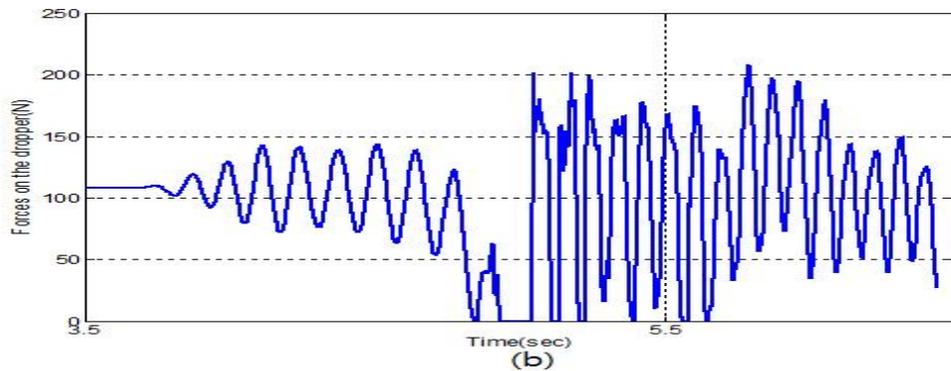
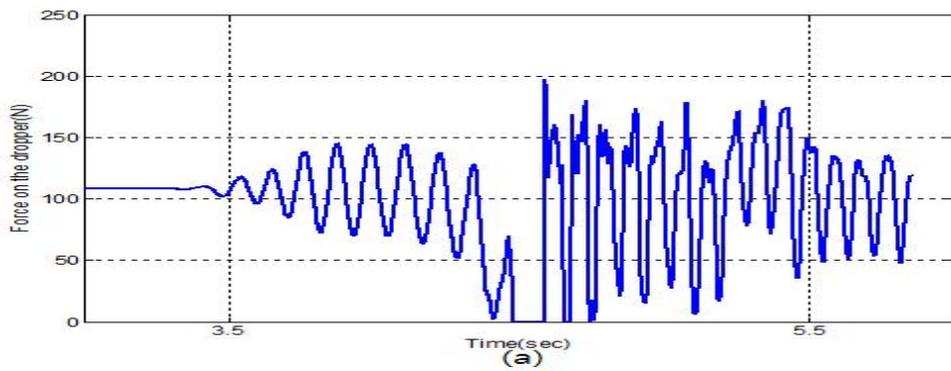


Figure 6 Simulated Dynamic forces on the Dropper nearest to a Mast for the Overhead Contact Line labeled by Option 2: Up; Span 50m, Down: Span 55m.

드로퍼 실물을 대상으로 시험하고 있고, 드로퍼는 내 부식성을 가지고 있으며, 드로퍼에는 노치가 없으므로 $C_1=1$, $C_2=1$, $\theta=1$ 이라고 둘 수 있다. 드로퍼 피로시험시 추를 사용하여 실제하중과 같은 편진 하중을 부여하므로 피로 하중의 형태에 따른 피로 한도에 대한 별도의 보정은 필요없다. 참고문헌 [3]에 따르면 자동차와 철도차량에서는 안전율 $f=f_m f_s$ 는 1.2 ~ 1.3의 값을 사용하고 있다.

드로퍼의 무한 피로수명을 확인하기 위한 시험용 추의 무게는 시뮬레이션 혹은 실험을 통하여 얻은 드로퍼 장력 변화에 안전율을 곱한 값이어야 한다. 측정보다 보수적인 결과를 제공하는 것으로 보이는 시뮬레이션을 통하여 22kgf의 드로퍼 장력 변화를 얻었고, 여기에 안전율 1.2 ~ 1.3을 곱하여 시험 추가 26.4~28.6 kg의 범위를 가져야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 약간의 여유율을 고려하여 300N의 동하중으로 드로퍼의 피로 시험을 수행하는 것으로 드로퍼 피로시험 사양을 정하였다.

5. 결론

경부고속철도 전차선로에서의 주요 유지보수 작업 중의 하나가 지지점 인근의 드로퍼가 열차 통과에 따른 동 하중에 의하여 피로 파괴됨으로써 드로퍼를 교체하는 것이었다. 열차 속도가 300km/h에서 400km/h 증가하게 되면 드로퍼에는 더 큰 동 하중이 유발될 것으로 예상된다. 시속 400km급 전차선로에서는 드로퍼 동하중을 줄이기 위하여 전차선에 사전이도를 부여하지 않는 것이 바람직하다. 경부고속철도에서의 드로퍼 장력 측정을 통해 검증한 팬더그래프-전차선 동역학 시뮬레이션을 통하여 시속400km로 열차 통과시 드로퍼가 겪게 될 동 하중을 예측한 결과를 기초로 판단해 보면 드로퍼의 무한수명을 입증하기 위한 드로퍼의 공장 피로시험 하중은 300N으로 하면 충분하다.

후 기

본 연구는 국토교통부에서 지원한 “400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] EN 50119 (2009) *Railway applications Fixed installations-Electric traction overhead contact lines*, BS EN.
- [2] Y.H. Cho (2008) Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper, *Journal of Sound and Vibration*, 315(3), pp. 433-454.
- [3] 일본기계학회(1961), 금속재료 피로강도의 설계자료 I, 개정 제2판.