

고속용 풀리형식 장력조정장치 개발

A Development of Pulley-type Tensioning Device for a High Speed Railway

이기원* 조용현** 권삼영** 박영***
Lee, Kiwon Cho, Yong Hyeon Kwon, Sam-Young Park, Young

ABSTRACT

In the electrical railway, the tension ascension of contact wire is essential to speed up of train and current collection performance of catenary largely depends on the tension. The tension variation rate of the tensioning device used in existing line limits within 5%, and the tension variation rate of the spring-type tensioning device installed at the section where tensioning length is short bounds within 15%. So it is urgent for us to localize it for high speed line, which the tension variation rate is limited within 3%. Therefore in this study, a pulley-type tensioning device for high speed line is developed. To verify the performance of developed device, a performance test, overload test and failure test is carried out under the code of the Kyung-Bu High Speed line. And it is secured durability performance through a fatigue test.

1. 서론

전기철도에서 전차선로(Catenary)/팬터그래프(Pantograph)계는 전기차에 전력을 공급하는 집전방법의 하나이며, 현재 가장 널리 사용되고 있다. 팬터그래프의 원활한 집전을 위하여 전차선로의 전차선 및 조가선은 항상 일정장력이 작용하고 있다. 전기차의 속도향상을 위하여 전차선로 측면에서 파동전파속도를 올리는 것이 필수적이며, 파동전파속도를 올리기 위해 장력상승을 고려하여야 한다[1 - 4].

전차선 및 조가선에 일정장력을 유지하기 위하여 자동 장력조정장치를 사용하며, 장력조정장치는 온도 변화에 따라서 전차선과 조가선이 신축하여도 장력추가 상하로 움직여서 전선의 장력을 항상 표준 장력으로 유지할 수 있도록 해 준다. 현재 국내에서 사용하는 장력장치는 다음과 같이 3가지 종류가 사용되고 있다.

- 도르래식 장력조정장치(경부고속철도에서 개별식으로 사용)
- 활차식 장력조정장치(기존선에서 일괄식으로 사용)
- 스프링식 장력조정장치(터널 및 측선 등 인류구간이 짧은 선로에서 사용)

고속철도의 경우 전차선 및 조가선에 정밀하게 장력을 부가할 수 있는 개별식 장력장치를 채택하고 있

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부

E-mail : kenlee@krri.re.kr

TEL : (031)460-5422 FAX : (031)460-5459

** 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

을 뿐만 아니라 장력 변동 비율이 3% 이내[5]로 규정하고 있고, 일괄식 장력장치인 활차식 자동장력조정장치의 경우는 장력변동 비율을 5% 이내[6], 그리고, 스프링식 장력조정장치는 15% 이내[7]로 규정하고 있다.

전차선로 속도향상을 위하여 전선 각각에 개별적으로 장력을 부여할 수 있는 개별식 장력조정방식을 채택해야 하며, 장력 변동 비율을 엄격히 규정해야할 필요성이 증대되고 있다. 그러나, 국내에서는 개별식 장력조정이 가능한 도르래식 장력조정장치를 생산하는 업체가 없으며, 고속선에 사용되는 도르래식 장력조정장치는 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서 기존선의 속도향상을 위하여 도르래식 장력조정장치를 국산화 하였다. 개발한 장력조정장치는 개별식(2톤용) 혹은 일괄식(2.4톤용)으로 장력을 조정할 수 있어 활용 범위가 넓고, 장력 변동 비율도 3% 이내로 맞추어 고속에 적합하다.

2. 도르래식 장력조정장치 설계

2.1 적용범위 및 용량

서론에서 언급한 바와 같이 도르래식 장력조정장치는 일괄식과 개별식으로 전차선로에 장력을 줄 수 있다. 일괄식은 하나의 장력조정장치와 장력 분배 바(Bar)를 사용하여 전차선과 조가선에 장력을 부여하는 방식이고, 개별식은 두 개의 장력조정장치를 각각 전차선과 조가선에 연결하여 장력을 부여하는 방식이다. 일괄식 장력 조정은 현재 기존선에서 사용되는 방식으로 장력조정장치의 설치 대수가 적으므로 전철화 건설비가 절감될 수 있으나 조가선 혹은 전차선이 단선되는 경우 나머지 전선에 과도한 장력이 급격히 작용하게 되어 안전 문제가 발생할 수 있다. 반면에 개별식 장력 조정은 고속선에서 사용되고 있는 방식으로 안전에는 유리하고 정밀한 장력을 부가할 수 있으나 건설비가 많이 소요되는 단점이 있다.

개발한 장력조정장치의 성능을 정하기 위하여 국내 전차선로에 적용되는 장력을 검토하였다. 호남선에서는 전차선(Cu 110)과 조가선(Bz 65)에 각각 1.2톤의 장력을 일괄식으로 부여하므로 호남선 적용을 위해 장력조정장치는 최대 2.4톤의 장력을 줄 수 있어야 한다. 그리고, KTX열차가 운행되는 고속 전차선로의 선종은 전차선 Cu150, Bz65로 전차선에는 2톤, 조가선에는 1.4톤의 장력이 개별식으로 부여되고 있다. 고속선에 적용하기 위해서는 장력조정장치 개발품이 2톤의 장력을 줄 수 있어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 장력조정장치 개발품이 기존선 속도향상 및 고속선에 모두 적용될 수 있도록 최대 장력이 2.4톤이 되도록 설계하였다.

2.2 형상 및 소재

도르래식 장력조정장치는 도르래, 장력추와 장력을 전달하는 와이어로프로 구성된다. 장력조정장치의 하중 비 즉 장력추의 무게 대 장력은 5 : 1이다.

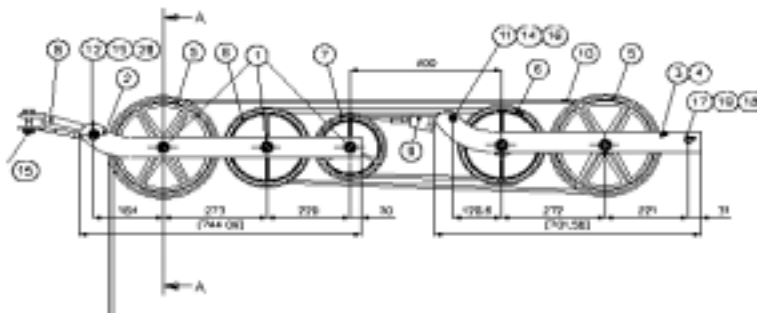


그림 1 도르래식 장력조정장치

도르래 ⑤, ⑥, ⑦의 소재는 알루미늄이고, 암 ②, ③, ④의 소재는 강이며, 와이어 로프는 스테인레스 재질을 사용하였다.

2.3 베어링 설계

가. 베어링 정격하중 설계기준[8]

베어링이 과도한 하중이나 순간적으로 충격을 받으면 국부적으로 전동체나 내외륜에 영구변형이 일어나 원활한 회전에 영향을 주게 된다. 정 등가하중은 정지한 축이나 요동운동 또는 저속회전을 하는 베어링에 적용된다. 요구되는 성능과 사용 조건에 따라서 안전계수를 고려하여 베어링을 선택한다.

$$C_s = \frac{C_o}{P_o}$$

여기서 C_s 는 베어링의 정하중에 대한 안전계수, C_o 는 기본 정 정격하중, P_o 는 정 등가하중이다.

장력조정장치는 충격이 없는 원활한 상태에서 사용된다고 볼 수 있으므로 장력조정장치 베어링의 안전계수(C_s)로 1.2를 적용하기로 한다.

나. 베어링 정 등가하중(P_o) 검토

장력 2톤이 작용하는 경우 장력추가 연결되는 도르래에 대하여 와이어에 작용하는 장력을 T라 놓으면 그림 2와 같이 자유물체도를 그릴 수 있다. 와이어에 작용하는 장력 T는 0.4톤이고 도르래 1의 베어링에 작용하는 힘은 566 kgf임을 알 수 있다. 2개의 볼 베어링이 힘을 지지하고 있으므로 하나의 볼 베어링에 작용하는 힘은 283 kgf이다.

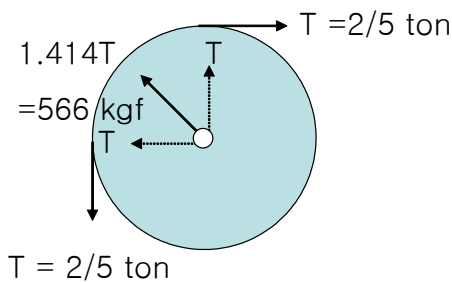


그림 2 도르래에 작용하는 힘(장력추)

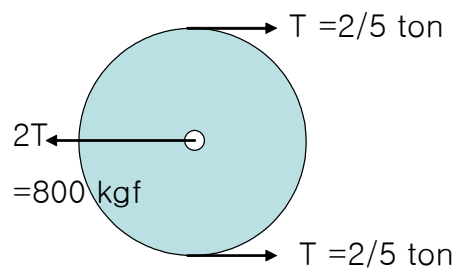


그림 3 도르래에 작용하는 힘

또한, 장력추가 연결되지 않는 기타의 도르래에 대하여 장력 2톤이 작용하는 경우 와이어에 작용하는 장력을 T라 놓으면 그림 3과 같이 자유물체도를 그릴 수 있다. 와이어에 작용하는 장력 T는 0.4톤이고 도르래의 베어링에 작용하는 힘은 800 kgf임을 알 수 있다. 2개의 볼 베어링이 힘을 지지하고 있으므로 하나의 볼 베어링에 작용하는 힘은 400 kgf이다.

장력이 2톤을 초과하는 경우 베어링에 작용하는 정 등가하중은 앞서 검토하였던 장력 2톤이 작용할 때의 정 등가하중을 기초로 장력의 비례 관계를 이용하여 표 1과 같이 구할 수 있다.

표 1 장력으로 인한 베어링 정 증가하중

장력	장력추 연결 도르래의 베어링 정 증가하중	기타 도르래의 베어링 정 증가하중	비고
2톤	283 kgf	400 kgf	고속선 개별식
2.4톤	340 kgf	480 kgf	호남선 일괄식
4톤	566 kgf	800 kgf	2톤의 과하중
4.8톤	680 kgf	960 kgf	2.4톤의 과하중

다. 베어링의 안전성 검토

앞서 계산한 베어링 정 증가하중과 베어링 제작사가 제시한 기본 정 정격하중으로부터 안전계수를 계산한다. 아래 표에서 볼 수 있듯이 선정된 베어링은 장력이 2톤인 경우에는 안전계수 1.5, 2.4톤이 작용하는 경우 안전계수가 1.2로 설계기준 즉 안전계수 1.2 이상을 만족한다.

표 2 선정된 베어링의 안전계수

장력	장력추 연결 도르래의 베어링 작용하중	기타 도르래의 베어링 작용하중	베어링 기본 정 정격하중	안전계수
2톤	283 kgf	400 kgf	595 kgf	1.5
2.4톤	340 kgf	480 kgf	595 kgf	1.2

2.4 구조강도해석

2.4톤의 장력이 걸리는 전차선로에 사용할 수 있는 장력조정장치는 정상 장력의 2배 즉 4.8톤의 장력을 받는 상태에서 소재가 탄성을 유지해야 하고, 10톤의 장력을 받은 상태에서 파단이 발생되지 않도록 설계하여야 한다.

장력조정장치에서 가장 응력이 많이 걸리는 부분은 구조용 강 소재로 제작한 Anchor Arm이다. 장력조정장치에는 2개의 Anchor Arm이 있는데 그 중에서 전선에 가까운 쪽의 Anchor Arm에 더 큰 하중이 작용한다. 따라서 본 연구에서는 전선에 가까운 쪽의 Anchor Arm를 해석 대상으로 상용 유한요소 해석 툴인 ANSYS 10.0 을 이용하여 응력해석을 수행하였다.

Anchor Arm에 대한 유한요소 모델링은 그림 4와 같고, 응력이 많이 작용할 것으로 보이는 표면에 유한요소를 고밀도로 배치하였다. 사용된 유한요소는 평면응력을 표현할 수 있는 2차원 요소이다. 요소 특성으로 Anchor Arm의 두께 9t를 입력하였다.

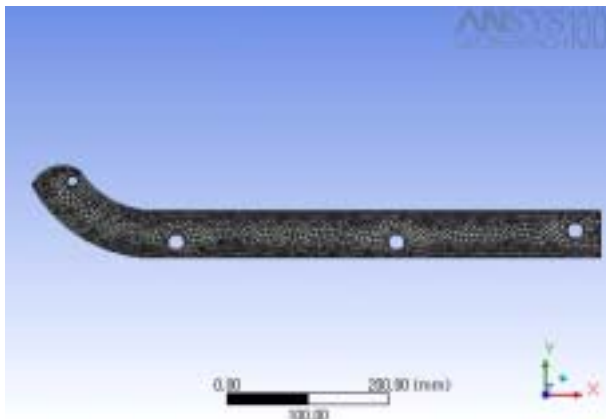


그림 4 Anchor arm 유한 요소 모델

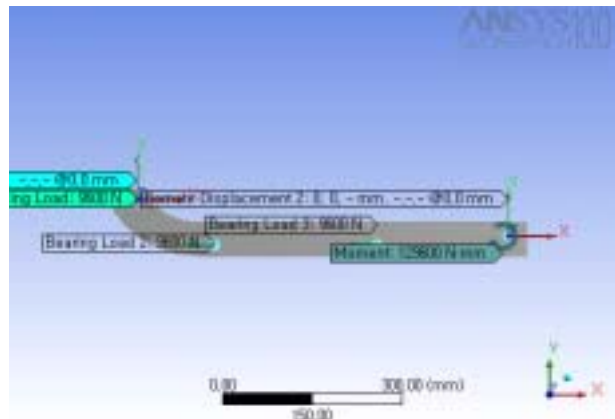


그림 5 Anchor arm에 작용하는 하중

4.8톤의 내 하중 특성을 평가하기 위하여 그림 5와 같이 Anchor arm에 작용하는 하중을 유한요소해 적용하였다. 적용 위치는 베어링이 끼워지는 각각의 구멍으로 하중의 크기는 장력이 4.8톤인 경우 각각 9,600N이다. 집중 하중의 방향이 일직선이 아니므로 모멘트 불 평형이 발생하게 된다. 이러한 모멘트 불 평형으로 인한 원치 않는 응력 발생을 막기 위하여 전차선로가 연결되는 구멍 주변에 모멘트를 부여하였다. 경계조건으로 최 좌단 구멍은 위치를 고정하고 최 우단 구멍은 y축 방향 변위만을 구속하였다.

위와 같은 조건에서 해석한 결과는 그림 6 및 7과 같다. 응력분포를 나타내는 그림 6에서는 최대 응력이 최 좌단구멍(와이어를 고정하는 크래프 설치 위치) 내면에 나타나는데 이것은 구멍의 수직 변위를 구속했기 때문에 나타나는 것이다. 이것은 강제 운동을 없애기 위한 경계조건으로 인하여 발생한 응력이므로 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

그림 7은 Anchor arm의 상면에서 발생하는 응력을 보여 주고 있다. 힘을 받아 변형되면서 최대 인장응력이 직선부와 곡선부가 만나는 위치에서 발생한다. 4.8톤의 장력이 작용할 때의 최대 응력은 157 MPa로 항복응력인 250 MPa 이내이므로 Anchor arm은 4.8톤의 장력이 작용하더라도 여전히 탄성상태를 유지할 수 있을 것이다. 따라서 4.8톤은 본 연구에서 목표로하는 최대 표준장력 2.4톤의 두 배이므로 본 연구에서 개발되는 장력조정장치를 사용할 때에 구조 안전의 문제를 발생하지 않을 것임을 예상할 수 있다.

또한, 최소 파단하중인 10톤의 장력이 작용하는 경우에는 Anchor arm에 327 MPa의 응력이 작용하게 된다. 이 값은 항복응력을 초과하는 인장한도 이내이다. 따라서 10톤의 장력이 작용하게 되는 경우 Anchor arm에 영구 변형이 생기게 되나 파단이 발생하지는 않을 것으로 예측할 수 있다.

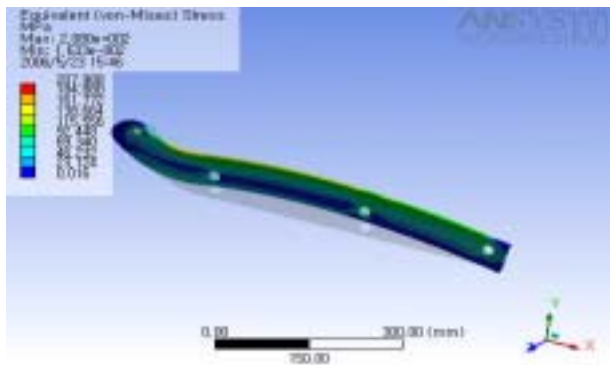


그림 6 Anchor arm에 작용하는 응력 분포

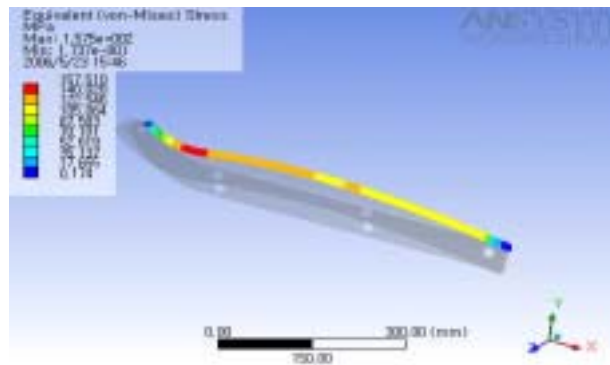


그림 7 Anchor arm 상면에 작용하는 응력 분포

2.5 제작 및 조립

Anchor arm을 제외한 도르래 등의 부품은 주조 금형을 만들어 제작하였다. 도르래의 형식은 총 3가지이므로 3 종류의 금형을 제작하여 중력 주조방식으로 도르래를 제작하였고, 도르래를 지지하는 Anchor arm는 구조용 강판을 레이저로 절단하여 제작하였다. 또한, Anchor arm의 부식을 막기 위하여 절단된 강판을 아연도금으로 처리하였다.

3. 공장 성능 시험

장력조정장치의 공장성능을 측정하기 위하여 정적 장력측정, 접촉상태 점검, 운영 시험, 과하중 시험, 파단시험 및 피로시험을 수행하였다. 위 시험 중 경부고속철도 폴리타입 장력조정장치 사양[5]에서 제시하고 있는 시험은 운영시험, 과하중 시험(type test) 및 파단시험(type test)이다.

3.1 장력 측정

개발하는 도르래식 장력조정장치가 당초 설계대로 장력추 : 장력의 비가 5:1이 되는지를 확인하기 위하여 장력 측정시험을 수행하였다. 장력추 400kg과 480kg을 걸었을 때 장력은 2톤과 2.4톤이 나와야 한다.

그림 8과 같이 장력조정장치를 설치하여 장력추를 올려 놓으면서 장력을 측정하였다. 장력 측정결과에 따르면 장력의 오차는 0.5% 이내로 작은 값이었다. 이는 도르래식 장력조정장치의 제작 및 조립이 양호하게 되었음을 의미하는 것이다.



그림 8 장력 측정 모습



그림 9 도르래와 와이어로프 사이의 접촉 상태

3.2 접촉 상태 점검

도르래식 장력조정장치는 여러 개의 크기가 다른 도르래가 와이어로프로 연결되어 있다. 장력조정장치에 장력추를 매달게 되면 도르래의 히브와 와이어로프의 접촉상태가 변하게 된다. 장력이 2톤 혹은 2.4톤이 걸릴 때 도르래와 와이어로프 사이의 접촉상태가 양호한지를 확인할 필요가 있다.

접촉면의 상태 확인을 위하여 도르래 내면에 화이트를 바르고 나서 장력추를 장력이 2톤과 2.4톤이 될 때까지 장력조정장치에 올려 놓고 나서 접촉면을 검사해 보았다. 검사 결과는 그림 9와 같이 접촉상태가 원활하였다. 원주 방향의 접촉 상태는 와이어로프와 도르래가 접촉하기 시작한 부분과 접촉이 끝나려는 부분에서 강한 접촉이 있음을 확인할 수 있었고 그 중간 부분에서는 접촉 강도는 상대적으로 약하지만 균일한 접촉 상태를 보였다. 원주방향으로 접촉 상태는 다음 그림과 같이 9시 방향을 중심으로 대칭 형태를 띠고 있었다. 접촉 상태가 양호한 것을 볼 때 모든 움직 도르래가 헛 돌지 않고 제대로 힘을 전달하고 있다고 판단된다.

3.3 운영(operating) 시험 및 과하중(overload) 시험

운영시험 및 과하중 시험은 경부고속철도 장력조정장치 공장성능시험 사양[5]에서 제시하고 있는 시험으로, 국내에 시험설비를 갖추고 있지 않아서, 스위스의 Furrer+Frey사에서 시험을 수행하였다. 사양에서 규정하고 있는 운영시험 및 과하중 시험 절차는 다음과 같다.

- ① 장력장치는 4.8 kN의 추 무게를 사용하여 정상적인 상태로 설치
- ② 추에 의해 작용하는 힘 P는 검교정된 저울을 사용하여 측정
- ③ 전차선 인류 케이블은 추의 상승, 하강을 위하여 견인장치에 고정
- ④ 전선의 장력 T는 장력장치에 가까운 위치에서 검교정된 로드셀로 측정
- ⑤ 견인장치를 사용하여 20 cm씩 추의 높이 변화를 주면서 추를 0 → 4 m 및 4m → 0 m의 위치로 이동
- ⑥ 4 m를 한 번에 이동할 수 없을 때에는 2 m씩 2 번으로 나누어 시험을 할 수 있음

⑦ 매 20 cm 이동을 한 후 추가 안정화된 이후에 장력을 측정하여, 성능지수는 각 측정마다 다음 식으로 계산된다.

$$Pf = \frac{T}{P \times r} = \frac{T}{5P}$$

여기서, r은 장력조정장치의 힘 증폭비이다

- ⑧ 성능지수는 항상 0.97 이상이 되어야 하고, 또한, 추의 연속적인 두 위치에서 장력 T의 차이는 두 값 중 작은 것의 1% 이내이어야 함
- ⑨ 과하중 시험의 경우, 전선의 장력이 48 kN이 되도록 추를 매달아, 장력장치의 부품들이 변형되지 않는지를 육안으로 확인한 후, ① - ⑧을 반복함

전차선 장력을 2톤과 2.4톤으로 하여 운영시험과 과하중시험을 수행한 결과 시제품이 표 3과 같이 시험합격기준을 모두 만족하였다. 즉 성능지수는 0.97 이상이 나왔고, 연속적인 두 위치에서 장력 T의 차이가 두 값 중 작은 것은 1% 이내에 들었다.

표 3 시험결과

Step	L[cm]	장력 2톤 부가시				장력 2.4톤 부가시			
		최초시험시		과하중 부가후		최초시험시		과하중 부가후	
		Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down
		P = 408 kg				P = 490 kg			
		T[kg]	T[kg]	T[kg]	T[kg]	T[kg]	T[kg]	T[kg]	T[kg]
1	0	2066	2036	2066	2032	2464	2440	2452	2416
2	20	2074	2036	2064	2032	2476	2444	2466	2416
3	40	2074	2042	2068	2038	2480	2446	2468	2422
4	60	2072	2042	2064	2036	2478	2442	2466	2424
5	80	2078	2046	2070	2034	2468	2440	2454	2426
6	100	2072	2038	2066	2040	2468	2440	2464	2418
7	120	2072	2044	2064	2028	2474	2444	2462	2420
8	140	2062	2030	2064	2026	2466	2434	2462	2426
9	160	2074	2038	2064	2032	2464	2438	2460	2420
10	180	2074	2044	2066	2036	2470	2440	2462	2418
11	200	2082	2042	2076	2044	2468	2436	2456	2424
12	220	2072	2032	2058	2024	2474	2444	2456	2420
13	240	2064	2030	2070	2030	2472	2438	2464	2424
14	260	2072	2040	2064	2032	2480	2450	2466	2424
15	280	2064	2038	2060	2030	2472	2430	2452	2432
16	300	2066	2036	2070	2036	2472	2438	2456	2418
17	320	2058	2030	2054	2032	2462	2432	2454	2420
18	340	2066	2032	2060	2032	2462	2430	2452	2418
19	360	2068	2036	2060	2032	2474	2440	2462	2418
20	380	2070	2038	2066	2040	2476	2442	2462	2432
21	400	2062	2034	2066	2034	2460	2430	2452	2426
		2066		2060		2456			

3.4 파단(breaking) 시험 및 피로 시험

경부고속철도 장력조정장치 공장성능시험 사양[5]에서 파단 시험의 경우 장력조정장치가 적어도 100 kN 이상의 장력에 견디도록 설계되어야 한다고 규정한다. 즉, 장력장치를 사용상태로 설치한 후 장력장치의 부품 중의 하나가 파괴될 때까지 힘을 가한다. 파괴되는 하중은 100 kN 보다 커야 한다. 따라서, 그림 10과 같이 장력조정장치를 설치하였다. 즉, 장력추 대신에 와이어를 고정하고 액츄에이터를 이용하여 점차적으로 인장력을 가하여 시험한 결과 13톤 이상에서 볼트로 헛지가 되는 앵커 클래비스(⑧)에서 파단이 일어나 시험합격기준을 만족하였다.

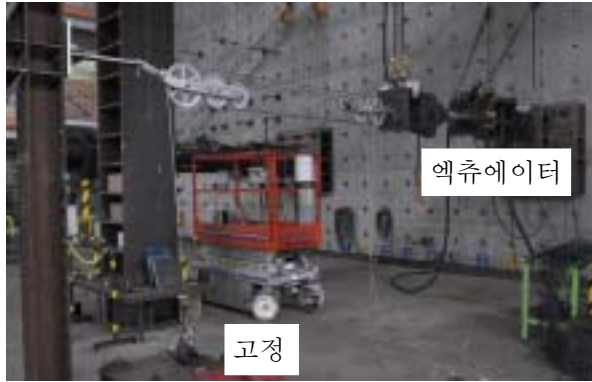


그림 10 파단시험 수행장면

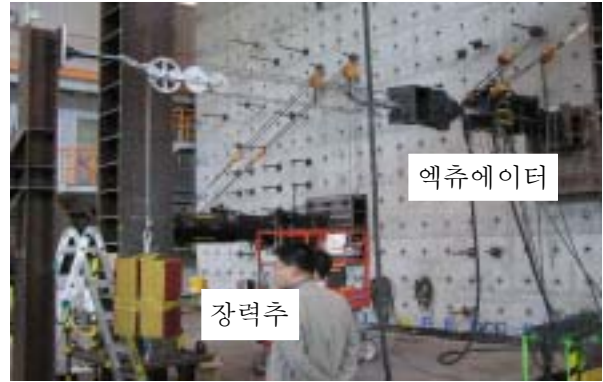


그림 11 피로시험 수행장면

피로시험의 경우 전차선 혹은 조가선이 아침/저녁으로 온도변화에 의해 신축되기 때문에 사용기간 동안 베어링, 스테인레스 스틸 선 및 도르래 히브의 마찰 등에 대한 내구성능을 확인하기 위하여 수행하였다. 장력조정장치 사용기간을 30년으로 보고, 아침/저녁으로 한번 신축한다고 가정하여 장력조정장치를 사용상태로 설치하고 장력추를 0.1Hz로, $\pm 35\text{cm}$ 상하이동을 11,000회 거동할 수 있도록 액츄에이터를 가진하였다. 시험결과 장력조정장치 성능에 문제가 없었다.

4. 결론

본 연구에서 기존선의 속도 향상을 위하여 경부고속철도에서 사용하고 있는 도르래식 장력조정장치를 국산화 하였다. 설계단계에서 베어링 및 Anchor Arm의 안전성 검토도 수행되었고, 안전성 확보를 위하여 경부고속철도 장력조정장치 사양[5]에서 규정하고 있는 운영 시험, 과하중 시험 및 파단시험을 시험 사양에 따라 수행하였을 뿐만 아니라, 정적 장력측정, 접촉상태 점검 및 피로시험을 수행하였다. 또한, 향후 기존선 등에 시험설치하여 현장 적용성을 확인할 예정이다.

개발한 장력조정장치는 고속철도에서 사용하는 개별식(2톤용) 혹은 호남선 등 기존선에서 사용하고 있는 일괄식(2.4톤용)으로 장력을 조정할 수 있어 활용 범위가 넓고, 장력 변동 비율도 3% 이내로 맞추어 고속화에 부합한다.

현재 기존선 고속화 및 호남선 고속철도건설 등 전차선로 건설이 활발히 진행하고 있는 상황에서 장력 변동 비율이 낮은 도르래식 장력조정장치를 국산화하게 되면 수입 대체 효과가 클 것으로 기대된다.

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 철도기술개발사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] "Contact Lines for Electric Railways", Siemens, 2001
- [2] "425km/h走行時における架線・パンタグラフ系の集電性能", 小林輝雄외 5인, T.IEE Japan. Vol.117-D No.5, 1997
- [3] "架線・パンタグラフ系の技術開発 現状と課題", 真鍋克士, RTRI REPORT Vol.9, No.9, 1995
- [4] "電車線とパンタグラフ(3) - 電車線・パンタグラフ系の基本運動特性 -", (財)鉄道総合技術研究所 / 研究開発推進室 / 真鍋克士, 鉄道と電気技術 VOL.13 No.6, 2002
- [5] "Technical Specification for the supply of pulley type tensioning devices", Korea TGV Consortium
- [6] "한국철도표준규격 자동장력조정장치", KRS PW 0205-06, 0208-06, 2006
- [7] "한국철도표준규격 스프링식 자동장력조정장치", KRS PW 0216-06, 2006
- [8] "기계설계 이론과 실제", 홍장표, 북힐스, 2005