ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 12, pp. 1742～1746, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.12.1742

400 km/h급 전차선로 곡선당김금구 개발

Development of a Steady Arm for the Maximum Speed of 400 km/h

이 기 원† · 박 영* · 권 삼 영* · 조 용 현* · 정 헌 수**
(Kiwon Lee · Young Park · Sam-Young Kwon · Yong Hyeon Cho · Heonsoo Jeong)

Abstract - In order to develop a overhead catenary system for the maximum speed of 400 km/h on Honam high-speed line, increasing tension of contact wire, changing dropper distributions, reducing a hard point and etc. should be considered. And it is also essential to develop core components taking account of the increased tension. Therefore we developed a new steady arm for the max. speed of 400 km/h in this study. FEM (Finite Elements Method) analysis was performed to ensure the strength of the arm. An oval shape was applied to the arm, so that 25 % of strength was increased and 9 % of weight was decreased. And a type test according to the code KRSA-3012 was performed to ensure the performance. Fatigue test in KRRI (Korea Railroad Research Institute)'s test-bed was also performed to evaluate its performance. Some section of the Honam High-speed line was constructed with the developed steady arm.

Key Words : Steady arm, 400 km/h

1. 서 론

전기철도에서 전차선로는 열차의 지붕에 설치되어 있는 팬터그래프의 집전판과 기계적 접촉을 하면서 열차에 전기를 공급하는 설비이다. 열차 속도가 올라가면 팬터그래프에 의한 전차선 진동과 파동전파반사가 격렬히 일어나고 안정적으로 전력을 공급받는데 애로점이 있다. 따라서 전차선로 분야에서는 속도에 적합한 전차선로 시스템의 구성과 부품 개발이 필수적이다. 전차선로에서 속도향상을 위한 가장 중요한 요소는 아래와 같은 파동전파속도를 올리기 위하여 전차선 장력을 높이고 선중량을 가볍게 하는 것이다. 그리고 사전이도를 적용하거나 경간길이 및 드로퍼간 간격을 최적화하여 경간 내 탄성을 균일하게 해야 하고, 클램프 등의 무게를 감소 시켜서 경점을 완화하는 것도 집전성능에 좋은 영향을 미친다[1].

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \tag{1}$$

여기서, c : 파동전파속도 [m/s], T : 전차선 장력 [kN], ρ : 전차선 선중량 [kg/m]

열차의 팬터그래프에 전력을 공급하는 전차선을 현수하기 위한조가선은 그림 1과 같이 가동브래킷에 설치된다. 그리고, 팬터그래프 집전판이 일정하게 마모될 수 있도록 그리고 곡선부에서 팬터그래프가 전차선을 벗어나지 않도록 하기 위하여 곡선당김금구(steady arm)를 이용하여 전차선에 편위를 적용한다. 높은 속도로 열차가 운행하기 위하여 전차선 장력을 크게 해야 하고, 장력에 의한 횡장력이 커지기 때문에 높은 곡선당김금구 강도가 요구된다.

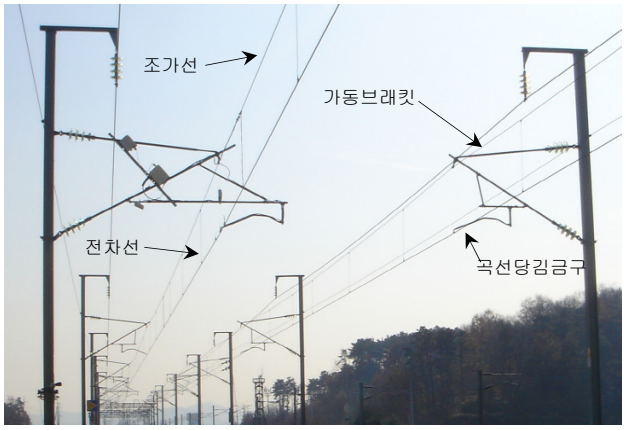


그림 1 경부고속철도 전차선로 시스템
Fig. 1 Overhead Catenary System for Kyungbu High-speed

현재 사용하고 있는 고속철도용 곡선당김금구는 전차선 장력 최대 26 kN까지 사용할 수 있고, 400 km/h급 전차선로를 구성하기 위하여 전차선 장력을 34 kN까지 상승시켰다. 따라서 사양에서 제시하고 있는 곡선당김금구 파괴하중이 6,000 N에서 7,500N으로 상승되었다[2, 3]. 그리고 높은

† Corresponding Author : High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : kenlee@krri.re.kr
* High-Speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea
** Semyung Electric Machinery Co., LTD
Received : October 22, 2014; Accepted : November 03, 2014

속도에 대응하고 집전성능 향상을 위하여 곡선당김금구의 무게를 줄이는 것이 절실히 필요하다. 또한 시운전중인 HEMU-430x를 국내에 적용하고 나아가서는 해외 진출을 하기 위하여 최고시속 400 km 운행에 적합한 새로운 고속 전차선로 시스템과 부품을 개발할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 최고운행속도 400 km/h급 전차선로 시스템[2, 3]에 적합한 곡선당김금구를 개발하였다. 개발한 곡선당김금구는 기존 고속철도용 곡선당김금구와 비교하여 강도를 높이고 무게를 가볍게 하였다. 개발된 곡선당김금구는 공인기관 형식시험을 거치고, 설치상태에서 피로시험을 수행 완료하였고 현재 호남고속철도 400 km/h급 구간(단선기준 56 km)에 설치하여 HEMU-430x를 이용하여 집전성능 시험을 준비하고 있는 중이다.

2. 본 론

2.1 곡선당금금구 개발

우리나라 전차선로에 사용하고 있는 곡선당김금구는 그림 2와 3과 같이 압상량을 100 mm 제한하는 기존선용 곡선당김금구와 240 mm로 제한하는 고속철도(경부고속철도용 및 호남고속철도 350 km/h급용) 곡선당김금구로 크게 나눌 수 있다. 곡선당김금구는 속도에 따라 압상량을 제한하는 기능을 가지고 있고, 무게를 가볍게 설계하여 전차선에 경점을 최소화하는 것이 집전성능 측면에서 유리하다. 그러나 높은 속도를 운행하기 위하여 전차선 장력을 크게 해야 하고 장력에 의한 횡장력이 커지기 때문에 곡선당김금구의 강도는 높아져야 한다.

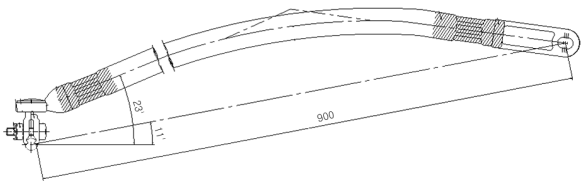


그림 2 기존선용 곡선당김금구[4]
Fig. 2 Steady arm for conventional line[4]

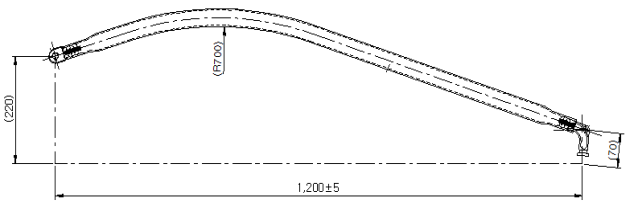


그림 3 경부고속철도 2단계 및 호남고속철도용 곡선당김금구[5]
Fig. 3 Steady arm for high-speed line[5]

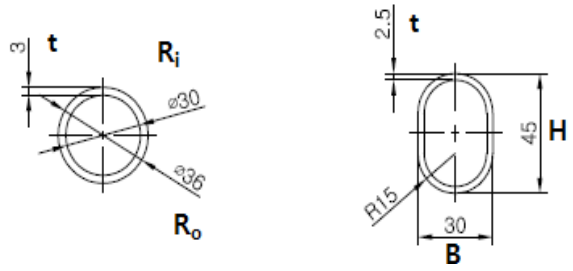
호남고속철도 구간의 선로조건 및 환경조건을 고려하여 곡선당김금구에 작용하는 최대하중을 계산하였다. 최대하중 계산 방법은 경부고속철도에서 사용한 기법을 사용하였다. 최소 곡선반경인 5,000 m 선로와 직선선로를 적용하여 계산한 결과 직선선로에서 최대하중이 발생하였고, 직선선로에 대하여 최대 하중을 계산한 결과는 표 1과 같다. 계산한 최대 하중에 예상치 못한 조건에 대한 여유율 15 %[6]를 고려하면 곡선당김금구에 작용하는 최대하중은 2,810 N 이다.

표 1 하중케이스
Table 1 Load Combination

개소	Zone1, 일반개소	Zone1, 노출개소	Zone2, 일반개소	Zone2, 노출개소
앞경간 (m)	65	60	55	50
뒷경간 (m)	65	60	55	50
곡선반경 (m)	직선	직선	직선	직선
전차선장력 (N)	34,000	34,000	34,000	34,000
풍압 (N/m)	19.13	19.13	29.15	29.15
지형계수	1.0	1.3	1.0	1.3
횡장력(곡선반경, N)	0.0221	0.0204	0.0187	0.0170
횡장력 (편위, N)	418.5	453.3	494.5	544.0
횡장력 (풍압,N)	1,243	1,492	1,603	1,895
횡장력 합(N)	1,662	1,945	2,098	2,439

여기서,

- Zone : 호남고속철도에서 최대풍속에 따라 Zone 1은 오송-정읍, Zone 2는 정읍-광주로 구분함
- 경간길이 : 각 설치개소에 따른 최대표준경간을 적용하며 (앞경간+뒷경간)/2로 평균경간길이를 사용. Zone1 에서 400 km/h급 전차선로의 경우 최대경간은 55 m로 제한하고 있지만, 여유율을 고려하여 호남고속철도 최대경간길이 계산 결과를 이용함
- 곡선반경 : 최소반경 5,000 m이고, 곡선반경이 20,000 m 이상일 때는 직선로로 간주함.
- 풍압 : 각 설치개소별로 최저온도(-25 ℃)에서 극심풍을 적용(관측된 최고풍속에 의한 풍압 × 안전율1.75)
- 지형계수 : 선로 높이에 대한 계수로 10 m 이하를 일반개소, 그 이상을 노출개소로 정의함
- 횡장력 : 곡선반경으로 인한 횡장력 계산은 (경간×장력)/ 곡선반경 편위로 인한 횡장력 계산은 (-현재편위 - 뒷편위)×장력 / 경간풍압으로 인한 횡장력 계산은 풍압×지형계수×(앞경간+뒤경간)/2 곡선당김금구의 강도를 올리고 무게를 최대한 작게 하기 위하여 그림4와 같이 트랙형태로 설계하였음



기존모델 개발모델

그림 4 곡선당김금구 단면형상
Fig. 4 Cross section for steady arm

표 2 곡선당김금구의 파이프 재료 특성
Table 2 Characteristics of pipe

항목	파이프
재료	A5083 H32 TD
항복강도(N/㎟)	235 이상
인장강도(N/㎟)	314 이상
탄성계수(N/㎟)	70.3×10^3

응력해석은 유한요소상용해석 프로그램인 Ansoft 사의 ANSYS를 사용하였다. 하중 및 경계조건은 그림 5와 같이 왼쪽 고정점의 변위자유도(ux, uy)를 구속하고, 오른쪽 하중 작용점에 경사진 방향으로 수직방향만 고정하였다. 전차선

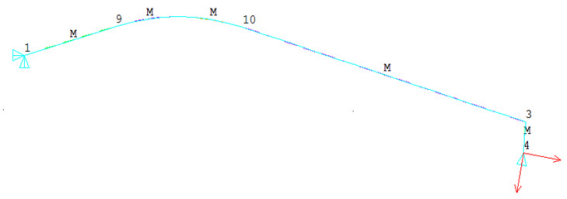


그림 5 하중 및 경계조건
Fig. 5 Condtion for load and boundary condition

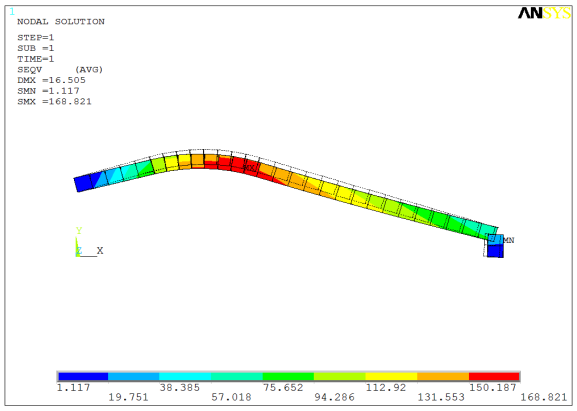


그림 6 응력 및 변위 분포도
Fig. 6 Contour plot of stress and deformation

연결부에 작용 하중은 최대하중인 2,810 N을 작용시켰다. 고속철도용 곡선당김금구 재료(표 2 참조)를 이용하여 위와 같은 조건으로 응력해석을 수행한 결과는 그림 6과 같다. 하중선도와 가장 먼 파이프 벤딩 부위에서 최대 응력 169 MPa이 발생되었다. 최대 하중조건에서 최대 응력이 항복강도 이하이므로 강도 측면에서 문제가 없음을 확인하였다.

결정된 단면과 재료를 이용하여 제작한 곡선당김금구 시제품은 그림 7과 같다. 강도는 곡선당김금구 철도용품 공단규격서[8]에서 제시된 바와 같이 파괴하중 기준으로 25 % 증가되었고, 무게는 약 9 % 감소하였다(표 3 참조).

그림 7 개발한 곡선당김금구 시제품
Fig. 7 Developed steady arm

표 3 곡선당김금구 특성비교
Table 3 Comparison of steady arms

속도	파괴하중	무게*
350 km/h 이하급	6,000 N	1300 g
400 km/h 이하급	7,500 N	1190 g

* 실측치 기준(회전클립 제외)

2.2 성능검증

제작한 시제품에 대하여 곡선당김금구 철도용품 공단규격서에 따라 공인기관에서 형식시험을 수행하였다. 사양에서 제시하고 있는 주된 기계적 시험항목은 소성변형 시험, 파괴하중 시험 및 진동피로 시험으로 시험을 수행한 결과 모두 기준을 만족하였다.

그리고, 한국철도기술연구원 구내 테스트베드(약 450 m 길이)에 개발한 곡선당김금구를 포함하여 400 km/h급 전차선로를 구축하고 조립상태에서의 피로성능을 추가적으로 확인하였다. 테스트 베드는 400 km/h급과 동일한 전차선 선종/장력과 조가선 선종/장력 등을 적용하여 구성하였다. 그림 8과 같이 열차 주행중 팬터그래프에 의한 충격하중을 모사하고 곡선당김금구 위치에서 전차선에 제작한 공압을 이용한 피로시험기를 이용하여 충격하중을 가하였다. 무차원비 변화에 따른 변형률 측정결과[9]를 보면 무차원비가 0.7에서 약 200 με 정도의 전차선 변형률을 보이고 있다. 400 km/h급 전차선로의 무차원비가 0.7 임을 고려하고 여유율을 두어 그림 9와 같이 300 με 이상의 충격을 전차선에 가하도록 하였다. 시험횟수는 호남고속철도 운영 스케쥴 등을 고려하여 100만회 이상을 수행하

였다. 피로시험 후에 겉모양 검사를 수행하였고, 내부 크랙발생 여부를 확인하기 위하여 방사선 투과시험을 수행하여 시편의 건전성을 확인한 결과 양호하였다.

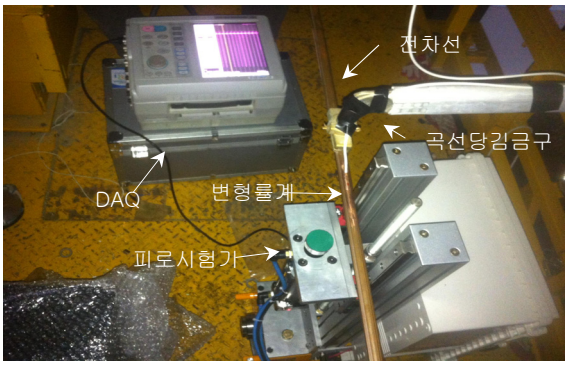


그림 8 설치상태에서 곡선당김금구 피로시험
Fig. 8 Fatigue test of steady arm in the working condition

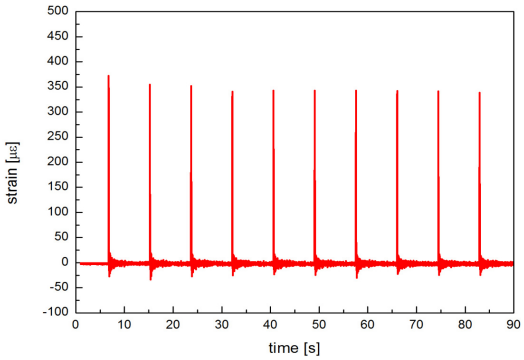


그림 9 피로시험기를 이용한 전차선 변형률 파형
Fig. 9 Strain of sontact wire with a fatigue test

이와 같이 공인기관 형식시험과 설치상태에서의 피로시험 등을 수행한 후에 그림 10과 같이 호남고속철도 56 km 구간에 설치를 완료하였다. 향후 400 km/h급 전차선로 시스템에 대한 실선에서의 현장확인을 위해 HEMU-430x를 투입하여 집전성능 시험을 수행할 예정이다.

그림 10 호남고속철도 곡선당김금구 현장설치(좌: 350 km/h급, 우: 400 km/h급)
Fig. 10 Steady arm applied to Honam high-speed catenary system (left: 350 km/h, right: 400km/h)

3. 결 론

현재 시운전중인 HEMU-430x를 국내에 적용하고 나아가서는 해외 진출을 하기 위하여 최고시속 400 km 운행에 적합한 새로운 고속 전차선로 시스템과 부품을 개발할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 최고운행속도 400 km/h급 전차선로 시스템에 적합한 곡선당김금구를 개발하였다. 개발한 곡선당김금구는 기존의 고속철도용 곡선당김금구와 비교하였을 때 전차선 장력이 약 30 % 증가된 34 kN에 대응할 수 있게 설계되었다. 또한 규격에서 제시하고 있는 파괴하중인 7,500 N을 만족하여 강도를 25 % 증가시켰다. 그리고 제작된 곡선당김금구의 무게를 실측하였을 때 그 무게가 1,190 g으로 약 9 % 감소되었다. 개발된 곡선당김금구는 공인기관 형식시험을 거치고, 설치상태에서 피로시험을 완료하였다. 현재 호남고속철도 400 km/h급 구간(단선기준 56 km)에 설치하고 HEMU-430x를 이용하여 집전성능 시험을 준비하고 있다. 본 연구에서 개발한 곡선당김금구는 향후 속도향상을 고려한 경점 저감용 곡선당김금구로 확대 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 논문의 계산기법 및 계산 절차를 향후 개발하는 곡선당김금구 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

References

[1] Yong Hyeon Cho, “Analysis of the Major Design Parameters of a Pantograph-Railway Catenary System for Improving the Current Collection Quality”, Journal of the Korea Society for Railway, Vol. 17, No. 1, pp. 7-13, 2014. 2
[2] Yong Hyeon Cho et al, “Development of overhead contact line system for speed enhancement”, Korea Railroad Research Institute, 2012. 10
[3] Yong Hyeon Cho et al, “Development of overhead contact line system for speed enhancement”, Korea Railroad Research Institute, 2013. 10
[4] Korea Railroad Standards, “Steady Arm - KRS PW 0030”, 2006
[5] Drawings of Catenary System for Kyungbu High-speed Railway, “Assembly for a steady arm (1.20 m) - A05C16”, Korea Rail Network Authority, 1998
[6] Drawings of Catenary System for Kyungbu High-speed Railway, “Structure Loads and Moments issued from Catenary”, KOREA TGV Consortium, 1998
[7] Patent “A Steady Arm with oval Shape for Overhead Catenary System (10-1317801)”, The Korea

Intellectual Property Office, 2013. 10
[8] Korea Rail Standard Authority, “Steady Arm/HSL - KRSA-3012”, Korea Rail Network Authority, 2013. 2
[9] Kiwon Lee, “A Experimental Study on Train Speed and Wave Propagation Speed of Contact Wire according to the Speed-up”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 12, pp. 1820~1823, 2013

저 자 소 개

이 기 원(Kiwon Lee)
1997년 RIT(미) 기계공학과 졸업(공학석사), 2009년 성균관대 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 선임연구원

박 영(Young Park)
2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원

권 삼 영(Sam-Young Kwon)
1997년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 2007년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원 책임연구원

조 용 현(Yong Hyeon Cho)
1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사), 2008년 서울대 기계공학과 졸업(공학박사)
현재 한국철도기술연구원 수석연구원

정 헌 수(Heonsoo Jeong)
1991년 돔명대 산업공학과 졸업(전문학사), 2005년 동의대 산업공학과 졸업(공학사), 2002년~ 가공송전연구회 분과위원(금구류), 현재 세명전기공업(주) 부설연구소 부장