

국내 고속철도 증속을 위한 전차선로 요구조건 분석

Analysis on Conditions of Catenary System for Speeding Up the Domestic High Speed Railway

유향복*[†], 박민주*, 정상국*, 양인동* , 박윤철**Hyang-Bok Ryoo*[†], Min-Ju Park*, Sang-Gug Jeong*, In-Dong Yang*, Yoon-Cheol Park**

Abstract The Catenary system of Korean High Speed Railways (HSR) is currently under operation at speeds of 300km/h (Gyeongbu HSR) and 350km/h (Honam HSR) in Korea.

The Gyeongbu HSR(Seoul~Busan) adopted from the French TGV, was originally designed to run at speeds of 350km/h, but the maximum operating speed is limited to 308km/h, which is 70% of wave propagation speed of catenary system. The Honam HSR(Osong-Gwangju) was designed and constructed so that it can run up to speeds of 350km/h. Suseo-Pyeongtaek HSR is being constructed for the maximum operating speed of 310km/h lowering the tension of the catenary from 26kN to 20kN, even though the designed speed was 350km/h.

If Korea adopts new rolling stock which can run at speeds over 310km/h under current railway conditions, we cannot delay the improvement of the catenary system.

This paper is to suggest the best ways to improve the catenary facilities in order to accelerate the train speeds to 350km/h by analyzing the relationship between catenary system's dynamic characteristics and tensions, where between electric car lines, depending on the various maximum speeds.

Keywords : Speed-up, Catenary, High speed railway

초 록 우리나라의 고속철도 전차선로는 300km/h 급(경부), 350km/h 급(호남 및 수도권), 400km/h 급(호남)이 건설되어 운영되고 있다. 경부고속철도는 프랑스로부터 도입된 설비로 설계속도는 350km/h 이나 최고운행속도는 파동전파속도의 70% 수준인 308km/h 로 제한되고 있다. 호남고속철도는 설계속도와 최고운행속도가 동일하게 350km/h(400km/h 일부)로 건설되었다. 수도권고속철도는 350km/h 급으로 설계하였으나 TPS 결과에 따라 최고운행속도를 310km/h 수준으로 하여 가선장력을 20kN 으로 적용 설치하였다. 향후 수도권고속철도 선로조건에서 310km/h 이상 증속이 가능한 차량이 도입될 경우 전차선로의 일부 개량이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 최고속도별 전차선로 동특성과 가선장력간의 관계를 분석하여 350km/h 로 증속시 전차선로의 시설개량에 대한 방안을 제시하고자 한다.

주요어 : 속도향상, 전차선로, 고속철도

† 교신저자 : 한국철도시설공단 기술본부 전철처(ryoohb@kr.or.kr)

* 한국철도시설공단 기술본부 전철처

** 한국철도시설공단 KR연구원 기술연구처

1. 서 론

우리나라의 고속철도 전차선로는 광명~부산간 경부고속철도, 오송~광주송정간 호남고속철도 및 수서~평택간 수도권고속철도로 건설되어 운영중에 있으며, 수도권고속철도는 제 2 의 철도사업자가 운영을 담당하고 있다.

경부고속철도는 프랑스로부터 도입된 설비로 설계속도는 350km/h 이나 최고운행속도는 파동전파속도의 70% 수준인 308km/h 로 제한되고 있다. 호남고속철도는 설계속도와 최고운행속도가 동일하게 국내에서 개발한 시스템인 350km/h(400km/h 일부)급으로 건설되었다. 호남고속철도의 일부구간은 400km/h 급으로 건설되어 HEMU-430X 의 고속시험 및 여러가지 국가 R&D 사업의 Test-bed 로 운영되고 있다.

수도권고속철도는 350km/h 급 시스템이 적용되었으나 TPS 결과에 따라 최고운행속도를 310km/h 수준으로 하여 가선장력을 20kN 으로 적용 설치하였다.[1] 향후 수도권고속철도 선로조건에서 310km/h 이상 증속이 가능한 차량이 도입될 경우를 대비하여 350km/h 로 증속시 전차선로의 시설개량에 대한 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 국내 전차선로 시스템 비교

철도설계지침 및 편람(KR E-03040)의 해설3에 의한 국내 전차선로 시스템은 [표1]과 같이 설계속도 등급별 설계사양을 제시하고 있으며, 해당 선구의 기본계획, 선로조건, 열차운행속도 및 기술개발 등에 따라 변경하여 설계에 적용할 수 있도록 하고 있다.[2]

[표1. 전차선로 시스템 비교]

| 설비구분 | | 최 고 운 행 속 도 | | | | |
|--------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 설계속도 | | 150km/h | 200km/h | 250km/h | 300km/h | 350km/h |
| 전 차 선 | | Cu 110/150mm ² | Cu 110mm ² | Cu 110/120mm ² | Cu 150mm ² | Cu-Sn 150mm ² |
| 조 가 선 | | Cu-Mg 65.4mm ² | Cu-Mg 65.4mm ² | Cu-Mg 65.4mm ² | Cu-Mg 65.4mm ² | Cu-Mg 116mm ² |
| 전차선 | 높 이 | 5.2m | 5.2m | 5.2m | 5.08m | 5.10m |
| | 사전이도 | - | S / 1,000 | S / 2,000 | S / 2,000 | S / 3,000 |
| 가 고 | | 0.96m/0.71m | 0.96m/0.71m | 1.20m/0.85m | 1.4m | 1.4m |
| 드로퍼배치 | | 2.5/5.0m | 2.5/5.0m | 2.5/5.0m | 4.5/6.75m | 4.5/6.5m |
| 장력조정장치 | | 일괄 (2.0t, 2.4t, 3.0t) | 일괄 (2.4t) | 일괄 (T:1.4t, M:1.4t) | 개별 (T:2.0t, M:1.4t) | 개별 (T:2.6t, M:2.0t) |

2.1.1 전기철도 고속화와 전차선로 최고운행속도 결정요인

전기철도 고속화는 단순히 차량 성능 향상만으로는 불가능하며 전차선로의 속도향상과 함께 체계화(Systemize)하는 것이 필수적이다.

차량이나 노반, 궤도, 신호시스템이 최고속도에 적합하다 하여도 전차선로의 속도향상이 없으면 열차는 속도를 증속할 수 없게 된다

이는 전기차량에 전기를 공급하는 전차선과 전기차량의 집전장치(팬터그래프)간의 접촉에 관한 메카니즘이 숨어있기 때문이다.

즉 전차선은 일정한 압상력을 가진 팬터그래프가 전차선과 접촉하여 운행함에 따라 전선에 파동이 생기는데 이 파동이 진행되는 속도를 파동전파속도(Wave propagation speed)라 하며 집전장치보다 앞서서 진행된다. [3]

$$C = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \text{ [m/sec]}$$

C : 파동전파속도 (m/sec)
 T : 전차선의 장력 (N)
 ρ : 전차선의 단위질량 (kg/m)

열차운행속도가 파동전파속도에 가까워질수록 전차선의 압상량 등이 증가 되어 집전에 어려움이 발생하고 이선현상이 발생하여 아크를 동반하게 됨에 따라 열차에 원활한 전력공급에 차질이 생긴다 [4].

이러한 이유로, 철도 국제기준(EN 50119, UIC 799)에도 열차의 최고운행속도는 파동전파속도의 70[%] 이내로 규정하고 있다.

궁극적으로 열차속도를 올리기 위해서는 전차선의 파동전파속도를 증가해야 한다는 뜻이다. 파동전파속도를 증가시키기 위해서는 전선의 질량(ρ)을 가볍게 하거나 가선장력(T)을 높여야 하는데, 전차선의 부하전류와 허용용량을 감안할 때 기존 규격의 전차선으로는 전선의 굵기를 줄이는데 한계가 있어 합금전차선을 적용하여 상승된 가선장력을 견딜 수 있도록 함으로써 파동전파속도를 증가하게 되었다.

그 결과, 고장력(26kN, 34kN)에 견디며 도전율이 70[%] 이상 확보되도록 하는 고도의 합금기술이 적용된 전차선 개발이 요구되어, 호남고속철도에 적용된 350km/h급, 400km/h급의 전차선로 시스템은 기존의 동(Cu) 전선에 주석 또는 마그네슘을 첨가한 합금전차선(CuSn150mm², CuMg150mm²)으로 개발하여 파동전파속도를 502[km/h]와 574[km/h]로 상승시키게 되었다.

합금전차선을 적용함에 있어 도전율에 의한 허용전류와 마모한계에 따른 교체시기의 경제성을 감안하여 전차선의 안전율을 합금계열은 2.0배 순동계열은 2.2배를 적용하였다.[2]

2.1.2 고속철도 속도별 동특성 비교

그 동안 국내에서 건설된 고속철도 전차선로의 시설물검증시험과 개발차량의 고속시험에서 측정된 것으로 장력증가시 드로퍼의 변화 및 교체여부에 대한 판단자료로 활용할 수 있을 것이다. 이곳에서는 차상시험인 접촉력이나 이선율측정은 제외하고 지상시험인 압상량에 대하여만 언급하도록 한다. [5]

[표2. 고속선 압상량 측정결과]

| 속도별 | 경부고속 | 호남고속 | 수도권고속 |
|---------|-------------------|----------------|-------------|
| 300km/h | 90.00 (1단계, 20kN) | 32.86 (26kN) | 57.4 (20kN) |
| 310km/h | - | 24.09 (26kN) | - |
| 330km/h | 84.28 (2단계, 23kN) | - | - |
| 350km/h | 90.50 (2단계, 23kN) | 38.7 (365km/h) | - |
| 차 량 | KTX, KTX-산천, HEMU | KTX-산천(호남) | KTX-산천(SRT) |

*경부고속자료인용 : 철도연, “호남고속철도 테스트베드구간 증속시험수행결과”, 2014.4.

[표2]의 시험에서 보는 바와 같이 전차선의 압상량 기준인 200mm보다 낮게 측정되고 있으며 가선장력이 낮은 구간에서 상대적으로 압상량이 높은 것을 알 수 있다.

2.2 경부고속철도의 증속 검토

2.2.1 해외 사례에 따른 경부고속철도 전차선로 내구수명 예측

우리나라가 고속철도를 도입한 프랑스의 경우 경부고속철도와 동일한 시스템에서 영업운행 시작 후 25년이 경과하여 전차선을 교체하였고, 우리나라의 열차운행횟수보다 적은 구간으로 볼 때 현재 경부고속철도는 개통(2004.04월) 이후 약 12년 동안 사용되어 일정만큼의 마모가 발생하였고 개통 후 20~23년 시점에는 교체 시기가 도래할 것으로 판단하고 있다.

[표3. 전차선 교체시기 예측]

| 선규격 | 현 상태 | 교체기준 | 교체예정시기(추정) |
|----------------------|--------------------------|-----------|--|
| Cu150mm ² | 마모 5~7%수준 (korail 제공) | 단면적 15%마모 | 1단계 : 2027년 (시험선구:2024년) 2단계 : 2033년 |

2.2.2 경부고속철도 속도향상 검토

[표3]과 같이 전차선의 교체예정시기 도래시에는 현재와 같은 300km/h 운행을 위한 개량을 할 것인지 아니면 350km/h급 이상으로 개량을 할 것인지에 대한 검토가 요구된다. 이미 차량은 350km/h 이상을 운행할 수 있는 기술개발이 완료된 상태로 향후 경부고속선의 속도향상을 위하여는 개량시기에 고속화하는 것이 합리적인 방안이라고 보여진다

경부고속철도는 1,2단계로 구분되어 1단계 구간인 광명~동대구 구간은 자갈 도상으로 건설되었고, 2단계 동대구~부산간은 콘크리트 도상으로 건설되었다. 전차선로 시스템은 단계별 구분없이 동일한 형식으로 건설되었고, 일부 애자류는 국산화에 따라 전면 폴리머애자를 적용하였다.

자갈도상 구간은 고속화에 매우 취약하여 콘크리트 도상으로의 개량이 요구된다.[6] 즉 현재 상황에서 고속화를 추진하기에는 콘크리트 도상구간에 해당된다고 볼 수 있다. 이러한 조건속에서 경부고속철도 구간에 300km/h 초과 속도향상에 필요한 전차선로 시스템 개량은 다음과 같이 추진되어야 할 것으로 보인다.

[표4. 속도별 개량범위]

| 330km/h 증속 | 350km/h 이상 증속 |
|--|---------------------------|
| 전차선 장력증가(20kN ⇒23kN)로 가능 최대마모율 재설정, 전철주/기초 보강 검토 필요 | 장력/선종 변경, 전철주/기초 보강 검토 필요 |

[표4]와 같은 개량범위는 국가R&D로 추진된 “차세대고속철도기술개발사업(HEMU-430X)”의 일환으로 경부고속철도 동대구~울산 구간에서 시행한 증속시험의 결과에서 도출되었다.[7]

전차선의 종류는 순동(Cu150mm²)과 합금선(Cu-Sn, Cu-Mg)으로 구분되며 현재 경부고속선의 전차선 선종인 Cu150mm²에서 330km/h를 운행가능하다는 것은 전차선의 인장하중(51.94kN)이 안전율 2.2를 적용시 23.6kN의 가선장력을 인가할 수 있고, 이때 파동전파속도가 330km/h에 적합하게 되는 것이다. 그러므로 330km/h를 운행목표로 한다면 전차선 가선장력의 3kN 증가와 오버랩구간의 드로퍼 및 가동브래킷에 대한 일부 정밀조정으로 운행이 가능하게 된다.

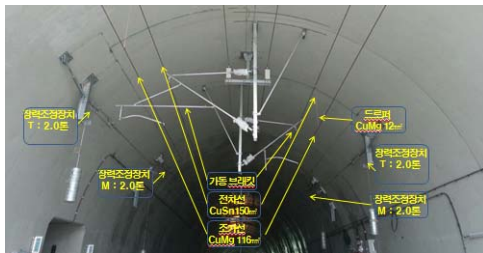
다만, 350km/h의 운행속도를 목표로 한다면 전차선,조가선,장력조정장치의 전면개량이 요구되며 아래와 같이 시설물개량에 대한 기간이 소요될 것으로 판단된다. 또한 고강도 전차선과 전차선 단면적을 줄이고(Cu-Mg 120mm²) 적절한 장력을 부가하는 연구 등을 통하면 개량 기간 등을 단축시킬 수도 있다.

[표5. 350km/h급 전차선로 적용 개량기간]

| 구간 | 목표속도 | 소요기간 | 전차선1섹션 교체작업일수 |
|--------|---------|---|---|
| 동대구~부산 | 350km/h | 17개월 - 복선130.7km, 약 200섹션, - 5일 x 200 = 1,000일 * 2구간 작업적용 1,000/2 = 약 500일 | -임시도르래 설치 1일 -전차선 가선 (1섹션 1,300m 기준) - 과장력 3일 (72시간 기준) - 전차선/조가선 철거/신설/조정 1 |

2.3 수도권고속철도 속도향상 검토

수서~평택간 수도권고속철도는 대부분이 터널로 이루어져 있으며 고속 운행구간과 중저속 운행구간으로 구분된다. 수서정거장 및 주박기지는 강체 가선방식을 적용하였고, 기타 본선구간은 심플커티너리 방식을 적용하였다. 아래 그림에서 보듯이 호남고속철도와 동일한 전차선로 시스템을 적용하였으나 전차선 가선장력을 20kN으로 설치하였다.



[그림1. 수도권고속철도]

수서~평택간에 운행될 차량의 운전속도를 감안하여 경제적 설계를 위한 방안이다. 향후 300km/h를 초과하는 차량이 도입되어 증속이 필요할 시 전차선로 가선속도를 증가시키는 것은 필수적이다.

이미 전차선은 350km/h급으로 개발된 Cu-Sn150mm²를 설치하였기 때문에 전차선의 교체에 대한 문제는 해결된다.

다만, 가선장력을 올려 속도를 증가할 때 기존 드로퍼의 교체여부에 대한 검토로 개량범위를 경제적으로 결정할 필요가 있다.

우선 50m 경간에서 300km/h 초과에 대한 속도별 가선장력과 사전이도 변화량을 산정하면 [표6]과 같다.[2]

[표6. 가선장력과 사전이도 변화량]

| 운행속도(km/h) | 파동전파속도(km/h) | 가선장력(kN) | 사전이도(Pre-sag) | |
|-----------------------------|--------------|----------|---------------|---------|
| 300 | 441 | 20.0 | a / 2,000 | 20.50mm |
| 310 | 443 | 20.2 | a / 2,000 | 20.50mm |
| 320 | 457 | 21.5 | a / 2,080 | 19.71mm |
| 330 | 473 | 23.0 | a / 2,150 | 19.07mm |
| 340 | 485 | 24.3 | a / 2,210 | 18.55mm |
| 350 | 502 | 26.0 | a / 2,300 | 17.83mm |
| Sag량 차이 (350km/h : 300km/h) | | | | 2.67mm |

위 계산은 장력증가에 따른 전차선의 Sag량 변화만을 감안해 본 내용으로 드로퍼의 길이는 변화가 없는 것으로 가정하였다. 최대 Sag량의 차이는 2.67mm로 실제 경간 중앙의 드로퍼가 20kN 장력때보다 약간 들어올라옴을 의미한다. 또한 350km/h급 전차선로 시스템의 “압상허용량 및 사전이도크기” 산정 결과에 따르면 a/2000, a/3000 모두 압상량 및 접전성능이 양호한 것으로 예측하였다.[8] 다만, 40m 경간에서 a/2000일 때 접촉력이 350N을 미미하게 초과하는 부분이 있으나, 위에서 산정한 결과인 사전이도 a/2300로 정밀 검증한다면 기준값 이내로 만족할 것으로 판단된다. 그리고 위 결과는 간략계산법에 의해 검토된 것으로 실제 개량단계에서는 시뮬레이션과 Test-bed를 구성하여 체계적인 검증이 요구되고 이러한 과정에서 개량범위를 최소화하는 경제적 개량방안을 마련하여야 한다.

3. 결론

수도권고속철도와 같이 350km/h급 전차선로 시스템에 전차선 가선장력을 20kN으로 설치한 경우 장래 속도증가시 350km/h까지 드로퍼의 길이와 Pre-sag에 큰 영향이 없는 것으로 산정 되기 때문에 교체까지의 개량은 요구되지 않는것으로 보인다. 다만 흐름장지장치를 중심으로 양장력 방향으로 전차선의 미세한 흐름이 발생하므로 드로퍼의 수직도, 곡선당김금구와 진동방지파이프간의 수직도를 유지하기 위하여 전차선측에서의 정밀조정은 필요할 것이다. 아울러, 가선장력만을 단순히 증가시켜 속도를 향상하는 방안에 대하여는 압상량의 변화, 드로퍼에 발생하는 미세한 굴곡 등을 감안하여 동특성 시뮬레이션과 일부구간 Test-bed를 구축하여 현차시험에 의한 동특성을 측정하는 등 정밀검증에 따라 결정되어야 한다.

참고문헌

- [1] 한국철도시설공단, “수도권고속철도 설계보고서”, 2013.
- [2] 한국철도시설공단, “철도설계지침 및 편람(KR Code)”
KR E-03130(Rev.4), KR E-03220(Rev.3), KR E-03020(Rev.3), KR E-03040(Rev.6)
- [3] 김양수,유해출(2008),”전기철도공학”, 동일출판사
- [4] 이기원, “속도향상에 따른 열차속도와 전차선 파동전파속도에 대한 실험적 연구,” 전기학회논문집, Vol.62, No. 12
- [5] 한국철도시설공단, "시설물검증보고서(경부 2010, 호남 2014)"
- [6] KOTI/유신, “경부 및 호남고속철도 속도향상방안 연구”, 2011. 5월.
- [7] 한국철도기술연구원, "경부고속철도 증속계획_전차선로 가선장력증가", 2012.
- [8] 한국철도시설공단, “최고운행속도 350km/h급 전차선로 시스템 기술개발” 연구보고서,2011.12.