

250Km/h급 전차선로의 가선에 관한 고찰

A view of overhead-line in catenary system applied on 250km/h

안영훈*

Ahn, Young Hoon

ABSTRACT

Before linking the network of conventional and new line to High Speed Railway, we have to consider speed-down prevention of High speed Rolling Stock. The result of study, the experience of design and construction for HSR review in this paper. The most important parameter of design seek out dropper configuration to determine maximum span of catenary system. And then the another important parameter look into a span determined. For 250km/h speed-up level, suitable length of dropper configuration is 6meter, maximum span is 63meter, contact height is 5100millimeter, system height is 1200millimeter, messenger wire is Bz 65mm², contact wire is cd 150mm² or 110mm², messenger wire`s tension is 14kN, contactor wire`s tension is 20kN or 14kN. This numerical value is adoptable to 250km/h but its need once more review in practical design and critical simulation.

1. 서론

교류전기철도에 있어서 전차선로시스템은 궤도에서 주행하는 전기철도차량에 외부로부터 전기를 공급하기위한 설비를 총칭하고 있으며, 터널, 지하구간, 3궤조방식 등의 특수한 경우를 제외하고 대부분의 전차선로시스템은 궤도를 따라 일정한 간격으로 설치되어 있는 전주에 전선을 지지하기 위한 설비들을 부착시켜 전선을 가선헬으로서 궤도 위를 주행하는 전기철도차량이 궤도상의 일정한 높이에서 전기를 공급받을 수 있게 가공선로(Overhead line)의 형태로 가선헬되어 있다.[1][2][3]

전차선로시스템은 궤도시스템과 함께 전기철도차량의 최대운전속도를 제한하는 특성을 가지고 있는 중요 설비이며, 전차선로시스템의 가선헬구조에 해당하는 전차선로(Catenary line)가 직접적으로 전기철도차량의 최대운전속도에 영향을 미치고 있으므로 전차선로의 설계 시에 전차선로의 가선헬속도를 향상할 수 있는 방법을 모색하는 것이 전기철도차량과의 인터페이스 측면에서 매우 중요하다고 할 것이다.[5][6][7]

본고에서는 기존선과 고속선의 가공 전차선로에 적용된 기존의 연구결과들과 적용된 기술들 그리고 구성요소들을 고찰하여 250Km/h급 가선헬속도를 가지는 일반 전기철도의 가공 전차선로 설계에 적용할 수 있는 몇 가지 파라미터를 제안하고자 한다.

* 특허청 심사관, 고려대학교 박사과정, 정회원

2. 가공 전차선로에 대한 고찰

가공 전차선로(Overhead Catenary line)는 가선구조의 형태에 따라 심플커티너리, 변Y형심플커티너리, 더블심플커티너리, 헤비심플커티너리, 콤파운드커티너리, 합성콤파운드커티너리, 헤비콤파운드커티너리, 합성심플커티너리, 더블트로리, 더블조가선 등 다양한 형태가 개발되어 각 나라의 특성에 맞게 적용되어 왔으며,[4][5][6][7]

우리나라의 일반 교류 전기철도에는 심플커티너리가 고속철도에는 심플커티너리에 장력을 높인 고장력 심플커티너리가 채용되었으며, 독일의 고속철도인 ICE 및 프랑스의 초기 고속철도인 TGV동남선에는 변Y형심플커티너리가 채용되었으나, 프랑스의 다른 고속선 및 독일의 최근 건설 예정인 고속선 설계에는 고장력 심플커티너리가 적용되었으며, 일본의 신칸센 고속선은 본선은 헤비콤파운드커티너리, 합성콤파운드커티너리를 측선에는 심플커티너리를 적용하여 오다가 역시 최근에 개통된 신칸센에서는 장력을 증가시킨 심플커티너리를 본선에 채용하고 있다.[3][4][6][7]

이는 세계적으로 중장거리 간선 전기철도에서 전기철도의 동력방식이 고장율이 적고 유지보수비, 초기투자비에 유리하며, 승차감이 좋고 가선조건이 좋은 전기기관차[동력 집중식으로 집전장치인 팬터그래프가 싱글암 구조임] 방식이 고속형 장거리 노선에 적합함이 세계 각국의 고속열차운행의 경험을 통하여 입증된 때문이다. 세계적으로 교류 전기철도의 중장거리 노선의 전차선로는 심플커티너리로 통일되고 있고 고속선일 경우 장력을 증가시킨 고장력 심플커티너리를 적용하고 있는 것이 일반화 경향이다.[3][6][7]

우리나라의 교류전기철도에 적용된 심플커티너리는 가선구조면에서 보았을 때 크게 3종류로 볼 수 있다. 어느 정도 가고조정이 가능한 가동브래킷에 의해 가선된 심플커티너리로 50c/s그룹[유럽방식]으로부터 기술이전 되어 주로 산업선에 적용되었던 것이 첫 번째이고, 수도권 및 주요간선의 전기철도 및 전철화에 적용되었던 가고조정이 불가능한 가동브래킷에 의해 가선된 심플커티너리가 두 번째로 이는 전철화 초창기에 일본으로부터 기술이전 되어 한국형 표준으로 굳어져 기존선 200km/h급이하 전기철도의 전차선로 표준으로까지 확장되었다.[1][9]

마지막으로 TGV의 도입과 함께 기술이전 되어 300km/h급 고속철도의 고장력 심플커티너리다. 산업선에 적용되었던 심플커티너리가 고속철도의 고장력 심플커티너리와 구조 및 형태상으로 유사하며 고속철도의 고장력 심플커티너리는 산업선에 적용되었던 심플커티너리에 가선속도와 관련된 기술적인 측면들[가고, 장력, 압상량, 파동전파속도의 변화]을 고려하여 성능을 업그레이드한 기술진화의 과정을 거쳐 고속화에 적용되었다고 볼 수 있다.

한국형 표준으로 굳어진 심플커티너리는 호남선 전철화시에 가선속도의 향상[최대 열차운행속도 200km/h 수용]이라는 기술적인 측면에서 한계상황을 맞게 되어 열차의 고속운행에 따른 전차선의 파동전파속도를 향상하고자 장력을 증가하고 전차선의 압상량에 따른 곡선부에서의 곡선당김금구의 가동범위를 높이고자 금구를 개량하였다.

그러나 전차선 인류개소의 전차선 교차개소에서 전차선간의 압상량 증가에 따른 가고의 상승을 가동브래킷이 수용할 수 없어서 가동브래킷의 조가선 체결부에 별도의 지지대를 만들어 부착시킴으로서 가고를 강제로 높은 불완전한 형태의 가선구조를 갖게 되었다.

이러한 가동브래킷의 단점을 보완하고자 가고를 조정할 수 있는 가동브래킷이 개발되어 특허를 획득하기도 하였으나 이는 전반적인 심플커티너리의 기술향상 측면에서 바람직하지 못하며 한국형 표준 심플커티너리는 200km/h이상의 가선 속도에서 치명적인 기술적 한계에 직면하고 있다.

기존선 전철화 및 신선 건설을 300km/h급으로 하는 것은 건설재원이나 운영 측면에서 바람직하지 못하며 프랑스, 독일의 철도 운영사례에서처럼 일반 철도노선의 속도를 향상시켜 고속철도와 네트워크로 통합하여 고속철도의 운영 가동성을 높이는 것이 바람직하므로 호남선의 전철화는 고속철도 연계운영의 모범 사례이다.

그러나 고속철도의 연계운영 측면에서 기존선의 속도향상 문제를 충분한 시간적 여유를 가지고 검토할 기회가 부족하여 불완전한 상태에서 대전~익산구간은 최대 150km/h, 익산~목포구간은 최대 200km/h의 속도향상을 어렵게 달성하였다.

현재까지는 호남선전철화 구간을 KTX가 200km/h이하로 운행하는데 큰 문제점 없이 2년이라는 운영경험을 맞이하고 있으나 고속철도와 연계운영의 효율면에 있어서는 아직 부족한 속도이다.

적어도 최대 250km/h의 속도향상을 수용하여야만 고속신선과 일반철도의 연계운영이 효율적일 것이다. 고속신선의 건설과 호남선전철화의 경험을 토대로 250km/h급의 전차선로를 설계하고 건설할 기술은 충분히 축적되어 있다고 판단되므로 일반철도에 250km/h급 전차선로 가선구조를 도입할 필요성이 대두되고 있다.

3. 250Km/h급 가공 전차선로의 설계 파라미터

한 전주의 중심과 인접 전주의 중심까지의 수평직선거리를 경간(Span)이라고 할 때 한 경간 내에서 이루어지는 커티너리 가선구조를 최소단위로 하여 이를 일정수량만큼 연속적으로 갖게 되는 가공 전차선로의 단위 길이를 인류구간이라 한다. 이 인류구간이 일정 중첩구간을 가지면서 연속적으로 철도노선을 따라 전개된 규칙적인 형태로 전차선로는 설치된다.

따라서 어느 철도노선 구간에 있어서의 전차선로의 속도향상을 고려할 경우 가장 기본적으로 중요하게 고려하여야 할 사항은 한 경간 내에서의 커티너리 가선구조이며, 이를 바탕으로 인류구간의 표준길이를 설정하고 중첩구간에서의 문제 등을 고려한다.[8][11]

그러므로 표1에 정리하여 제시된 250km/h 이상의 가선속도를 가지는 설계파라미터들을 살펴보고 이를 토대로 고속신선이 아닌 일반철도 구간에서의 250km/h급 전차선로 설계에 필요한 사항을 검토한다. 여기에서 제시되는 사항들은 기존선의 속도향상과 고속신선의 설계 및 건설경험을 바탕으로 그간 연구되어진 연구결과와 이론 그리고 적용기술을 고찰하여 현실적으로 고속신선을 새로 건설함 없이 일반철도를 250km/h급으로 향상시키고자 하는 시도에서의 개괄적인 검토이므로 제시되는 수치들에 존재하는 허용 공차가 클 수 있다. 차후 실시설계 시에 상세한 기술검토 및 필요하다면 시뮬레이션에 의한 세밀한 검증이 요구된다.

표1. 250km/h이상의 전차선로에 관한 설계 파라미터

구 분	신간선(동북선)	TGV(대서양)	ICE	KTX
개통 개시년도	1982	1989. 9	1991. 5	200. 4
가 선 방 식	콤팩운드 커티너리	고장력 심플커티너리	변Y형 심플커티너리	고장력 심플커티너리
전차선 현수방식	행거 및 드로퍼	드로퍼	균압겸용 드로퍼	드로퍼
행거, 드로퍼 배치간격	3.5, 7	4.5, 6.75	5, 9	4.5, 6.75
최대경간(m)	50	63	65	63
가 고 (m) () 최소가고	1,800	1,400(1,146)	1,800	1,400(1,146)
전차선 높이(mm)	5,000	5,080	5,300	5,080
전차선 편위(mm)	좌우 200	좌우 200	좌우 300	좌우 200
최대 인류구간(m)	1,600	1,600	1,200	1,200(1,500)
곡선반경(m)	4,000	4,000	4,000	7,000
최대구배(%)	20.25	35	12.5	25
장력장치	일괄자동장력	개별자동장력	개별자동장력	개별자동장력
조가선 및 장력 (kN)	St 180mm ² (25.0)	Bz 65mm ² (14.0)	Bz 70mm ² (15.0)	Bz 65mm ² (14.0)
전차선 및 장력 (kN)	Cu 170mm ² (14.7)	Cu 150mm ² (20.0)	CuAg 120mm ² (15.0)	Cu 150mm ² (20.0)
전차선 단위중량(kg/h)	1.511	1.334	1.080	1.334
파동전파속도(km/h)	355	441	425	441
운전최고속도(km/h) () 시험최고속도	270(380)	300(515)	280(407)	300(352.5) () HSR 최고속도
무차원화비	0.79	0.689	0.59	0.689
정상집전속도(km/h)	249	309	298	309

표1에서 250km/h급 이상의 전차선로는 고장력 심플커티너리(High Tension Simple Catenary)로 통일화되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 고속열차의 동력방식이 분산식보다는 집중식이 운영경험상 증장거리에 유리하다고 인정되었기 때문이며, 집중식은 열차편성 유니트당 집전장치인 팬터그래프를 하나만 사용하여도 열차를 충분히 운영하는 것이 가능하므로 가선구조가 단순한 심플커티너리가 설계, 건설, 유지보수 측면에서 유리할 뿐만 아니라 기술적인 검토에 있어서도 유리하기 때문이다. 심플커티너리에서 최대경간(Maximum Span)을 설정하는 것이 중요하며 경간(Span)은 드로퍼 배치간격의 배수로 결정된다.

일본이 1964년 동해도신간선을 240km/h로 건설 후에 동북, 상월신간선을 새로이 건설하고자 할 때 제일먼저 검토한 것이 이선 아크(arc)에 의한 소음방지대책이었고 이를 위해 집전계 소음시험을 행한 결과로 드롭퍼의 간격을 7m(행거 3.5m의 2배로 결정)로 설정하였다.[5]

프랑스는 직류전철구간에서 집전효과가 우수하고 설치가 용이한 4.5m의 드롭퍼 간격을 선정하여 오랫동안 사용하였으나 기존선 교류전철화 시에 경제성 및 시설물 경량화를 위해 드롭퍼 간격 9m로 시뮬레이션 결과 종전보다 성능이 저하되어 이에 대한 대책으로 고속신선 건설계획 시 드롭퍼 간격을 4.5~9m의 중간인 6.75m로 하여 시뮬레이션 한 결과 4.5m와 같은 집전효과가 나타나 드롭퍼 간격을 4.5m와 6.75m를 조합하여 사용하고 있다.[2][3]

그러나 경간은 4.5m의 배수로 설정하고 있다. 우리나라 경부고속철도에도 이를 적용하여 경간을 27m에서 63까지 9종류를 설계에 반영하였다.[2][3]

일본은 초창기 직류전철 기술을 영국으로부터 전수받을 때 인치 및 피트를 미터법으로 환산하여 경간을 9m의 배수로 선정되어 18m에서 63m까지의 경간을 적용했으나 전후 전철화 시 경간을 5m의 배수로 설정하였으며 드롭퍼 간격은 10m로 하였으나 소음이 심하여 앞서 언급했듯이 동북신간에서부터 가장 최적의 급전을 보이며 소음이 적은 7m로 하고 있다.[7]

호남선전철화시에도 200km/h급의 속도에서 집전성능을 고려하여 드롭퍼의 배치간격을 5m와 10m로 적용한 경험이 있다.[9] 최근의 국내 연구논문에서 기존선의 최대경간을 60m까지 제시하고 있으며, 드롭퍼의 배치간격도 양호한 집전상태를 유지하며 최대 6m까지 가능성이 시뮬레이션 검증을통하여 확인하고 있다.[8][10]

이러한 사실들을 종합해볼 때 양호한 집전상태의 최대 드롭퍼 배치간격은 4.5m~7m의 범위에 있으며, 이 범위에서는 단펜터(싱글암타입)를 가진 열차가 시속 250km의 속도로 주행하며 양호한 집전성능을 갖는다고 판단된다. 따라서 경제성 및 시설물의 경량화 등을 고려하여 최적의 드롭퍼 배치간격은 6m, 6.5m, 6.75m, 7m의 어느 하나로 설정함이 바람직하나 경간은 드롭퍼 배치간격의 배수로 결정되므로 6.5m 및 6.75m의 경우 설계, 시공, 유지보수에 있어서 계산이 복잡하여 이를 제외하고 6m 또는 7m로 하여 경간은 6m의 배수인 경우 24m부터 60m까지 7m의 배수인 경우 21m부터 63m까지 7종류의 경간에 대한 검토가 필요하다.

설계, 시공, 운영의 측면에서 드롭퍼 배치간격을 6m로 설정하여 최대경간 60m를 설정하는 것이 바람직하다. 경간에는 프리세그(Pre-seg)를 두지 않는 대신에 한 경간 내의 탄성을 고려하여 경간 중앙의 좌우에 설치되는 드롭퍼 배치간격을 3m로 하는 것도 고려할 필요가 있다.

가고(System Height)는 싱글 펜터를 가진 차량의 주행속도 250km/h에서의 전차선 동적 압상량을 고려하여 1,200mm로 하는 것이 요구되고 전차선 높이는 고속철도차량과 전기기관차의 혼용운영 등을 고려할 때 5100mm로 하는 것이 좋다. 이 높이는 고속선의 전차선 높이인 5080mm와 큰 차이가 없어 고속선과 일반선의 직결선로 부근에서의 양 전차선간의 높이 조정에 유리할 뿐만아니라 GPU타입의 고속펜터 및 전기기관차의 펜터의 접촉력을 유지하는데 있어서도 무리가 없는 범위이다. 고속철도에 사용되는 펜터그래프(Pantograph)의 압상력(K)은 다음의 식1에 의하여 구하여 진다.

$$K = 70 + 17.28 \times 10^{-3} \times V^2 \quad [N], \quad \text{-----} \quad (1)$$

K: 압상력[N] V: 열차속도[m/s]

식1에 의하면 열차정지 상태 시의 압상력은 70[N]이고 260km/h에서의 압상력은 160[N]이다. 260km/h의 속도에서는 곡선반경이 4000m 이상이 되어야 함으로 250km/h급 전차선로에 있어서도 최소곡선반경은 4000m 이상이 되어야 한다.[2][3][8][11] 조가선은 Bz 65mm에 장력은 14kN을 적용하고 도르레 타입의 개별장력을 사용하는 것이 현수곡선(Catenary curve)의 유지 및 온도변화에 따른 조가선의 신축에 대한 자동조정에 유리하다. 조가선의 단위당하중(kg/m)이 0.605이므로 경간을 63m로 하였을 경우 경간 중앙에서의 조가선 최대 이도(D_m)는 우리가 알고 있는 WS²/8T에 대입하면 약 215mm가 얻어진다.

D_m에 드롭퍼 최소길이 150mm, 전차선의 최대 압상량 300mm, 30m/s의 초속에서의 전차선 최대 상승높이 500mm 등을 고려하면 1165mm의 값이 최소 가고(System height) H_s가 될 수 있으므로 설계와 시공의 편리성을 등을 고려하여 H_s=1200mm로 하여도 아무런 문제가 없다.

전차선의 선종, 전차선의 장력을 검토하여 파동전파속도를 계산하고 이 속도의 70%의 범위내에 열차속도 250km/h가 수용될 수 있는지를 검토하면 다음과 같다. 고속철도와의 연계를 고려하여 전차선은 Cu 150mm를 사용하고 장력은 14kN을 적용하여 도르레 타입의 개별장력을 사용하면 파동전파속도는 369km/h이고 이 속도의 70%범위는 258km/h이므로 충분하다.

경제성을 고려하여 Cu 110mm(단위당 하중은 0.987kg/m)을 사용하고 장력은 12kN을 적용하여 도르레 타입의 개별장력을 사용하면 파동전파속도는 397km/h이고 이 속도의 70%범위는 278km/h이므로 이것도 충분한 열차최대속도의 범위에 있다.

4. 결론

고속철도와 연계하여 일반철도를 네트워크로 구성하여 전철화를 최대한 활용하는 것이 철도운영의 경제성 및 국가재원의 적정한 투자라는 측면에서 바람직하며, 네트워크 선로에서 운행되는 고속열차의 운행속도가 낮아지는 것을 방지하기 위하여 일반철도도 250km/h급으로 최대속도를 향상할 필요가 있으며 이를 위하여 전기차량의 동력공급원인 전차선로 가선시스템의 속도향상을 위하여 전차선로의 가선구조에 대한 몇 가지 기본적인면서도 중요한 파라미터를 고찰해본 결과를 정리하면 아래와 같다.

이 결과들은 고속선에 대한 기존 연구결과들과 현장에 적용된 설계 수치 그리고 경험 등을 토대로 검토된 사항이므로 실제 250km/h급의 전차선로 설계 시에는 다시 한번 신중한 검토를 하고 필요하다면 시뮬레이션에 의한 검증도 한다.

- 고장력 심플커티너리로 정한다.
- 전차선로는 경간을 기본 단위로 하여 특정길이를 인류구간으로 설정한다.
- 경간은 드롭퍼 배치간격을 설정한 후에 이의 배수로 정한다.
- 최적의 집진성능을 고려하여 드롭퍼 배치간격은 6m로 하고 지지물 전후에서는 3m로 한다.
- 경간에 프리세그를 두지 않는 대신에 경간 중앙의 좌우에서의 드롭퍼 배치간격 3m를 검토한다.
- 직선로의 표준경간은 60m로 설정한다.
- 곡선로의 곡선반경에 따라 경간은 24m, 30m, 36m, 42m, 48m, 54m를 고려한다.
- 최소곡선반경은 4000이상으로 한다.
- 전차선의 인류길이는 기계화 시공을 고려하여 최대 1200m로 설정한다.
- 가고는 1200mm로 설정한다.
- 전차선 높이는 5100mm를 표준으로 한다.
- 전차선의 편위는 좌우200mm를 표준으로 한다.
- 조가선 선종은 Bz 65mm에 장력은 14kN을 적용하고 도르레 타입의 개별 장력을 사용한다.
- 전차선 선종은 Cu 150mm에 장력은 14kN을 검토하고 도르레 타입의 개별 장력을 검토한다.
- 전차선 선종은 Cu 110mm에 장력은 12kN을 검토하고 도르레 타입의 개별 장력을 검토한다.
- 전차선 선종은 상기 2가지 중에서 경제성, 급전의 안정성 등을 더 비교 검토하여 최종 선택한다.

참고문헌

1. 강창호, 안영훈, “電車線路”, 철도공무원교육원, 1998
2. 서동설, 안영훈, 유춘상, 주용환, 최형근, “고속철도 전차선로”, 철도경영연수원, 2000
3. 철도인력개발원, “고속철도전기”, 2004
4. 社團法人日本鐵道運轉協會, “詳解 新幹線”, 소화50
5. JR교본연구회편, “철도기술자를 위한 전기개론시리즈 전차선”, 1995
6. 김태수, “전기철도 방식선정 및 성능향상에 관한 연구”. 연세대학교산업대학원, 1996
7. 한국철도기술연구원, “전차선로 시설기준 수립”, 1999
8. 유향복, “가공전차선로의 최대경간길이 계산기법에 관한 연구”, 서울산업대학교철도기술대학원, 2003
9. 한국철도기술연구원, “호남선전철화 타당성조사 및 기본계획 제3권”, 2001
10. 심규식, “기존선 전차선로의 드로퍼 배치 및 개선에 관한 연구”, 연세대학교산업대학원, 2001
11. 강용삼, “기존선 고속화에 따른 전차선로 설계요소기술에 관한 연구, 고려대학교산업정보대학원, 2002