

전차선로 속도향상에 따른 오버랩 구간(Overlap section) 경간 구성 기법

Research on Configuration Optimization of Overlap Section in Overhead Catenary System for High-speed Railway

최 태 수* · 최 규 형*
(Choi Tae-su · Choi Kyu-Hyoung)

Abstract - Overhead catenary system of electric railway has overlap sections which divide and tighten trolley wire supplying electric power to train, where current collection performances may become worse according to railway speed-up. Current collection tests conducted at 400 km/h test-bed section of Honam high-speed railway show that balanced line arrangement at overlap section is needed to secure current collection without arc generation between trolley wire and train current collection device. This paper proposes a design procedure of the overlap section to allow for tension increase and uplift of the trolley wires according to railway speed-up. By applying the proposed procedure to the overhead catenary system of Honam high-speed railway, it is suggested that the minimum span length should be 33.2 m for railway speed-up to 350 km/h and 43.7 m for speed-up to 400 km/h.

Key Words : Current collection, Overhead catenary system, Insulated overlap, Uninsulated overlap, Overlap section

1. 서 론

가공전차선로는 철도차량의 팬터그래프(pantograph)와 기계적 인 접촉을 통해 전기를 공급하는 전기철도의 핵심장치로서, 주행 중인 철도차량에 안정적으로 전력을 공급하기 위하여 지면으로부터의 높이 및 가선장력을 일정하게 유지시킬 필요가 있다. 이에 따라, 가공전차선로는 전기를 공급하는 전차선과, 전차선의 지상 고를 일정하게 유지시켜주고 전류를 분담하기 위한 조가선, 전차선과 조가선을 연결하는 드로퍼 (dropper) 등으로 복잡하게 구성되며, 철도선로를 따라 설치된 전주의 가동브라켓을 통하여 일정한 높이로 지지되도록 설치한다[1].

전차선의 장력을 일정하게 유지하고 온도변화에 따른 전차선의 신축팽창에 대응하기 위하여, 전차선을 일정한 간격으로 절단하여 인류구간 (dead-end section)으로 구분하고, 인류구간별로 장력을 일정하게 조정하도록 하고 있다. 또한, 인류구간과 인류구간의 연결개소에서는 전차선이 단절되기 때문에, 팬터그래프가 원활하게 통과할 수 있도록 인류구간들이 중첩되는 구간을 두고 있다. 이렇게 두 인류구간이 겹쳐지는 구간을 오버랩 구간

(overlap section)이라고 하며, 오버랩 구간은 전차선 및 조가선의 가선장력, 풍압, 선로의 곡선반경, 가동 브래킷의 회전각도 등을 고려하여, 팬터그래프 집전범위가 전차선을 벗어나지 않도록 시설한다[2].

철도차량이 오버랩 구간을 통과할 때는 철도차량의 팬터그래프는 접촉하고 있는 인류구간의 전차선에서 인접한 인류구간의 전차선으로 절체하여 집전을 계속하여야 한다. 이에 따라 가공전차선로의 오버랩 구간에서는 중첩되는 두 전차선의 기하학적 배치 및 지상고 차이 등에 따라 전차선과 팬터그래프 간의 접촉이 끊어져 전력공급이 중단되는 이션현상이 발생하여 집전성능이 저하될 위험성이 높다. 국외 연구로는, 가공전차선로와 팬터그래프의 동적거동을 모델링한 시뮬레이션 툴을 이용하여 오버랩 구간에서의 집전성능을 분석하는 기법이 제시되었으나, 오버랩 구간에서 2중으로 구성된 전차선로시스템 및 팬터그래프 동적거동의 복잡성 때문에 시뮬레이션의 정도를 향상시키기 곤란하다는 문제점이 있다[3,4]. 또한 다물체 (multibody) 팬터그래프 모델과 유한요소법 (FEM)에 의한 전차선로 모델을 적용하여 시뮬레이션의 정도를 높이는 기법에 대한 연구도 제시되었다[5]. 그 밖에, 고속철도 오버랩 구간에서의 인상구간 및 접촉점 위치에 따른 형상별로 이션을 및 전차선 마모량을 측정하고 시뮬레이션에 의한 분석을 병행함으로써 최적의 오버랩 구간 형상에 대한 검토결과도 제시되었다[6]. 국내 연구로는 철도 고속화에 따라 전차선의 파동전파속도를 높이기 위하여 장력을 증가시켰을 때, 오버랩 구간에서 전차선 높이가 기준 높이보다 증가되는 상승구간의 위치변화 계산에 대한 연구 등이 수행되었다[7].

† Corresponding Author : Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Korea
E-mail: khchoi@seoultech.ac.kr

* Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Korea
Received : March 20, 2017; Accepted : April 17, 2017

이상과 같이 가공 전차선로의 오버랩 구간 구성을 최적화하는 것은 집전성능 향상을 위하여 필수적이며, 최근 철도를 고속화함에 따라 그 중요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 오버랩 구간에서의 전차선 상승구간의 기하학적 형상에 따라 오버랩 구간의 설치 방향을 고찰하고, 열차속도 350 km/h급 및 400 km/h급 전차선로에서 속도향상에 따른 전차선 가선장력별로 오버랩 구간 구성 방법 및 최적의 경간길이를 제시하고자 한다.

2. 가공전차선로 오버랩 구간 집전성능

2.1 오버랩 구간 구조

가공전차선로는 그림 1에 보이는 것처럼, 인류구간별로 구분하여 장력을 조정하고 있으며, 인류구간의 중간지점에는 흐름방지장치를 설치하여 전차선이 한쪽 방향으로 흐르지 못하도록 하고 있다. 인류구간과 인류구간 간의 오버랩 구간은 전주 5개를 통하여 4경간으로 구성되는데, 오버랩 구간 양끝에는 자동장력조정장치를 통하여 전차선과 조가선을 인류하는 장력주가 있으며, 오버랩 구간 중간에는 주축주를 두고, 장력주와 주축주 사이에 중간주를 둔다.

주축주와 중간주에는 가동 브래킷을 2개 설치하여, 오버랩되는 2개 인류구간의 전차선들을 각각 지지한다. 중간주의 2개의 가동 브래킷 간에 간격은 1.0 m로 하고, 가동 브래킷 간의 간격은 후면금속판과 등근 막대로 전주에 부착한 2개의 "U"자형 가로대와 상부 가로대를 가동 브래킷에 볼트를 조여서 조정한다. 주축주의 2개의 가동 브래킷 간격은 1.6 m로 한다. 중간주와 장력주 사이에는 인류를 위해 수평경간을 둔다.

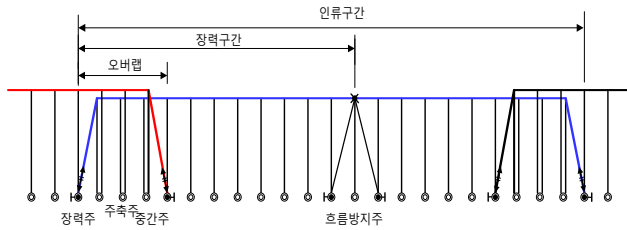


그림 1 가공전차선로의 오버랩 구간 구성
Fig. 1 Configuration of overlap section in overhead catenary system

2.2 오버랩 구간 종류

오버랩 구간은 그림 2와 같이 전차선의 일부분에 사고가 발생한 경우나 일상의 유지보수 작업을 위해서 전기적으로 구분하기 위한 장치인 에어섹션(Insulated overlap)과 그림 3과 같이 전차선 및 조가선의 온도변화에 대응하기 위해 일정한 길이마다 인류하는 기계적 구분장치인 에어조인트(Uninsulated overlap)로 나눌 수 있다. 이러한 에어섹션의 전차선 상호간 이격거리는 500 mm, 에어조인트의 전차선 상호간 이격거리는 200 mm 이상을 유지하

도록 하고 있다.

그림 2, 3에서와 같이 오버랩 구간의 주축주와 중간주 사이의 두 전차선이 팬터그래프의 집전 기준높이인 집전면보다 상승되는 구간이 중간주와 주축주 사이에 나타나게 되는데 이를 상승구간이라고 한다. 중간주에서의 상승높이(H)는 200 km/h급 가공 전차선로에서는 500 mm이고, 300 km/h 이상의 가공 전차선로에서는 500 mm 또는 550 mm이며, 수평 파이프를 사용하여 전차선을 들어 올린다[8].

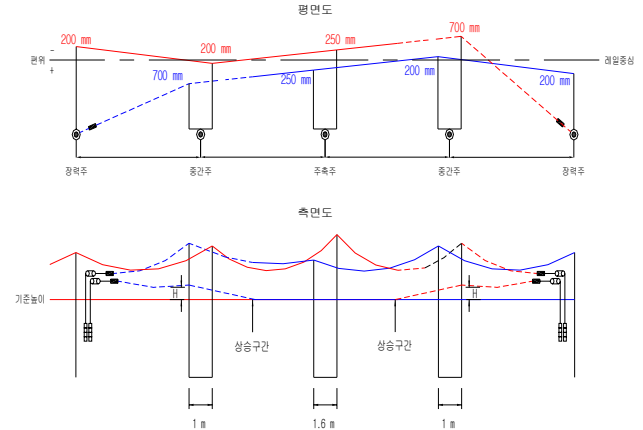


그림 2 가공전차선로의 에어섹션 구성
Fig. 2 Configuration of insulated overlap section in overhead catenary system

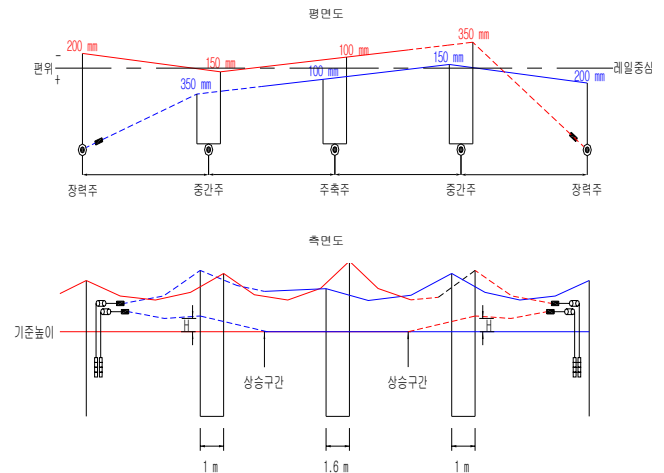


그림 3 가공전차선로의 에어조인트 구성
Fig. 3 Configuration of uninsulated overlap section in overhead catenary system

2.3 오버랩 구간에서의 집전성능

가공전차선로의 오버랩 구간에서 철도차량 팬터그래프가 주축주를 통과할 때 인류구간의 절체가 이루어지므로, 전차선 평행구

간을 적절히 설치하면 팬터그래프의 이선 현상의 감소를 기하고 안정된 집전을 보장할 수 있다. 오버랩 구간에서 2개의 인류구간 전차선 높이와 관련한 구성을 구분하면 그림 4와 같이 4가지 케이스로 나누어 볼 수 있다. 열차가 A에서 B구간으로 진행할 경우에, 케이스 B와 케이스 D는 집전성능에 좋지 않은 영향을 주는 구성이고, 케이스 A와 케이스 C의 구성은 집전성능에 유리하다. 케이스 B와 케이스 D에서는 열차가 운행될 때 팬터그래프가 압상력과 공력에 의하여 A 전차선이 압상되기 때문에 B 전차선에 타격을 주어 이상마모가 발생하고 집전성능이 나빠진다. 케이스 B의 경우에는 팬터그래프 압상력에 의하여 A 전차선이 압상되어도 B 전차선이 높게 설치되어 있기 때문에 부드럽게 팬터그래프가 운행될 수 있지만, 속도에 따라 팬터그래프 압상력에 의한 압상량이 다르기 때문에, 중간주에서 B 전차선의 인상높이 H를 결정하는데 어려움이 있다. 따라서 가공 전차선로 오버랩 구간은 일반적으로 케이스 A와 같이 설치하고, 주축주에서 두 전차선의 높이 차이가 없도록 설치하고 있다[6, 9].

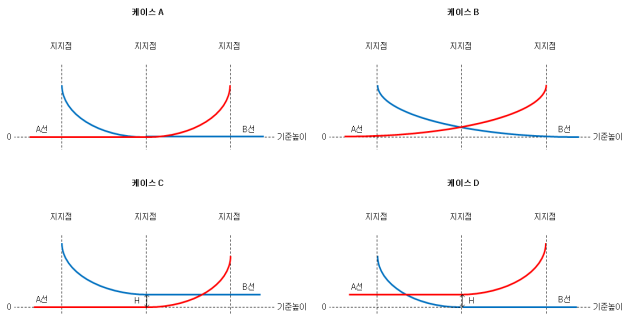


그림 4 가공전차선로의 오버랩 구간 구성 비교
 Fig. 4 Comparison of overlap section configurations in overhead catenary system



그림 5 이선아크 발생 영상
 Fig. 5 A photograph of arc generation by contact loss

2.4. 고속전차선로에서의 오버랩 구간 집전성능 측정, 분석

호남고속철도에서 수행한 차세대 고속열차(HEMU-430x)의 430 km/h급 증속시험과정에서, 특정 오버랩 구간을 통과할 때 그림 5에 보이는 것처럼 25 ms 이상 지속되는 이선 아크가 발

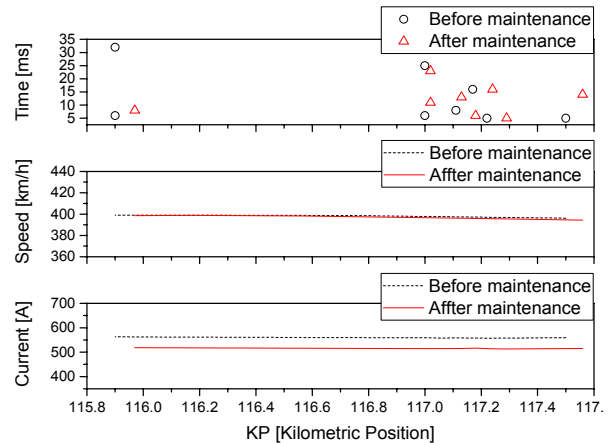


그림 6 이선아크 시험결과
 Fig. 6 Test results of arc generation

생하였다[10]. 분석결과, 주로 그림 4의 케이스 B와 같이 설치된 오버랩 구간에서 상대적으로 큰 이선아크가 발생하였으며, 이러한 오버랩 구간 구성을 케이스 A와 같이 조정하였다. 조정한 후에는 그림 6에 보이는 것처럼 대형 이선아크가 발생하지 않았고 성공적으로 시험을 수행할 수 있었다.

3. 고속화에 대비한 오버랩 구간 구성

3.1. 고속화에 따른 전차선로 설계

우리나라 경부고속철도의 경우 프랑스의 설계를 기술이전 받아서 열차속도 300 km/h급의 전차선로를 건설하였다. 최근 건설된 호남고속철도에서는, 경부고속철도의 건설경험을 바탕으로, 열차속도 350 km/h급 및 400 km/h급 전차선로를 순수 우리나라 기술로 설계 및 제작, 시공하였다. 표 1은 경부고속철도 및 호남고속철도 전차선로의 주요 규격을 보인다. 열차운행속도를 향상시키기 위해서는, 식 (1)에 보이는 것처럼, 전차선의 가선장력을 증가시켜서, 전차선의 파동전파속도를 향상시킬 필요가 있다. 이에 따라, 전차선의 장력은 경부고속철도의 20 kN에 비해, 호남고속철도에서는 26 kN으로 증대되었으며, 400 km/h급 열차운행시험을 위한 테스트베드 구간에서는 34 kN까지 증가시키고 있다

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

여기서, C : 파동(횡파) 전파속도 [m/s]
 T : 전차선의 장력 [N]
 ρ : 전차선의 단위 질량 [kg/m]

3.2. 고속화에 따른 오버랩 구간 설계

전차선 가선장력이 증가하였을 때, 그림 7에 보이는 것처럼,

표 1 고속철도 전차선로 규격

Table 1 Specifications of high-speed overhead catenary systems

파라미터	경부고속 철도	호남고속 철도	호남고속철도 400km/h급 테스트베드
최고속도 [km/h]	300	350	400
전차선 장력 [kN]	20	26	34
전차선 선종	Cu 150 mm ²	CuSn 150 mm ²	CuMg 150 mm ²
전차선 단중 [kN]	0.013335	0.01338	0.013335

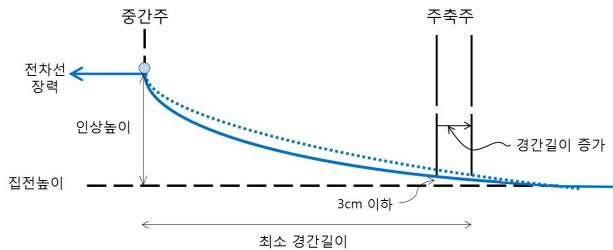


그림 7 장력 증가에 따른 주축주에서의 전차선 인상

Fig. 7 Uplift of contact wire at main post according to increased tension

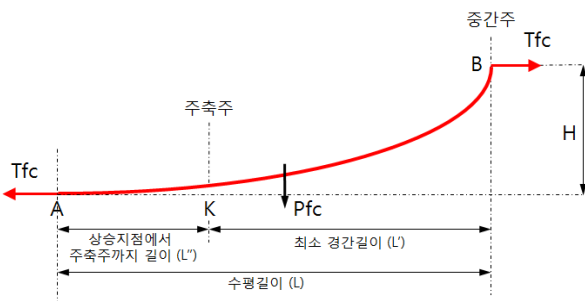


그림 8 인상구간 길이 계산

Fig. 8 Calculation of uplift section length

주축주에서 전차선 높이가 인상된다. 따라서 열차속도를 400 km/h까지 상승시킬 경우, 표 1에 보이는 것처럼 기존 300 km/h 급 전차선로에 비해 전차선 장력이 20 kN에서 34 kN으로 70%까지 증가되기 때문에, 오버랩 구간 구성을 그림 4의 케이스 A와 같이 조정하기 위하여 새로운 경간기준이 필요하다.

전차선이 그림 8과 같이 중간주에서 H 높이만큼 인상되었다고 가정할 때, 중간주에서 주축주까지의 최소 경간길이(L')는 길어질수록 전차선에 호그(hog)가 생기지 않는다. 따라서 곡선반경이 작아서 경간을 짧게 설계할 때는 이러한 부분을 고려하여 5경간으로 확장하여 설계하여야 전차선이 인상되지 않는다.

전차선이 포물선 형상으로 처진다고 가정하였을 때 전차선 기준높이인 집전높이까지 처지는 수평길이 L은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$L = \sqrt{\frac{H \cdot 2T_{fc}}{\text{Mass of CW}}} = L' + L'' \quad (2)$$

여기서, H : 전차선 인상높이 [m]

T_{fc} : 전차선 장력 [N]

Mass of CW : 전차선 단중 [N]

L' : 최소 경간길이 [m]

L'' : 상승지점에서 주축주까지의 길이 [m]

한편 최소 경간길이 L'는 전주의 중심을 기준으로 산정하여야 하므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L' = \text{표준경간}(S) + \frac{\text{중간주 평행틀 간격}}{2} - \frac{\text{주축주 평행틀 간격}}{2} \quad (3)$$

위와 같은 식을 이용하여 호남고속철도 350 km/h급 및 400 km/h급 테스트베드 구간의 전차선로 오버랩 구간을 계산하였다. 다음은 오버랩 구간의 경간길이를 계산하기 위한 조건이다.

(1) 경부고속철도에서 중간주의 전차선 인상높이 H는 550 mm이지만, 전차선 장력이 상승됨에 따라 경간길이를 최대한 길게 설계하기 위하여 인류애자와 팬더그래프와의 인터페이스 등을 고려하여 중간주에서의 인상높이 H를 500 mm로 결정하였다[10].

(2) 팬더그래프는 정적 압상력 및 주행 중의 공력에 의하여 압상되어 전차선을 밀어 올리기 때문에, 주축주에서 전차선 높이가 30 mm 상승되는 경우(case 1)와 10 mm 상승되는 경우(case 2)로 나누어 검토하였다.

위와 같은 조건에서, 열차속도 350 km/h급 및 400 km/h급 전차선로에 대해 식 (2) 및 식 (3)을 이용하여 오버랩구간의 최소 경간길이를 계산한 결과는 표 2 및 표 3과 같다. 주축주 인상높이가 30 mm인 경우, 350 km/h급 및 400 km/h급 전차선로의 최소

표 2 주축주 인상높이가 30 mm인 경우 최소 경간길이 (Case 1)

Table 2 Minimum span length when uplift at main post is 30 mm (Case 1)

파라미터	경부고속 철도	호남고속 철도	호남고속철도 400 km/h급 테스트베드
수평길이 (L) [m]	40.61	44.08	50.49
중간주 전차선 인상높이 [mm]	550	500	500
인상시 최소 경간길이(L') [m]	31.2	33.3	38.2
상승지점에서 주축주까지 길이(L'') [m]	9.41	10.78	12.29

표 3 주축주 인상높이가 10 mm인 경우 최소 경간길이(Case 2)
Table 3 Minimum span length when uplift at main post is 10 mm(Case 2)

파라미터	경부고속 철도	호남고속 철도	호남고속철도 400 km/h급 테스트베드
수평길이(L) [m]	40.61	44.08	50.49
중간주 전차선 인상높이 [mm]	550	500	500
인상시 최소 경간길이(L') [m]	35.2	38.1	43.7
상승지점에서 주축주까지 길이(L'') [m]	5.41	5.98	6.79

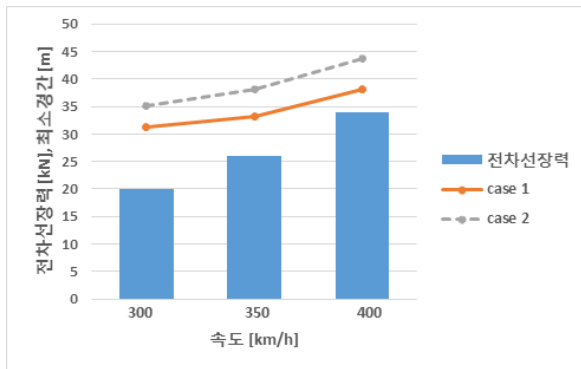


그림 9 고속화에 따른 전차선장력 및 최소 경간길이 변화
Fig. 9 Deviation of wire tension and minimum span length according to railway speed-up

경간길이는 각각 33.3 m와 38.2 m가 적합하다고 분석되었다. 한편 차세대 고속열차(HEMU-430x) 시험결과를 보면, 열차속도가 400 km/h급까지 올라갈 경우 주축주에서 두 전차선의 높이차가 더욱 더 큰 영향을 미치게 되어 이선아크 발생이 증가한다. 따라서, 주축주에서 두 전차선간 높이차를 조금 더 보수적으로 설정하여 10 mm이하로 관리할 필요가 있다[9]. 만약 주축주에서 두 전차선간의 높이차를 10 mm로 정의하고 열차속도 400 km/h급 전차선로 오버랩 구간에서 최소 경간길이를 계산하면 각각 38.1 m, 43.7 m가 된다.

이상으로부터, 철도 고속화에 따른 가선장력 증가와, 이에 적합한 오버랩구간에서의 최소경간길이와의 관계를 그림 9에 보인다. 주축주에서의 전차선 인상 높이차를 10 mm로 작게 할 경우 최소 경간길이(L')가 약 5 m 늘어나게 되어 전철주 수량이 감소하게 됨을 알 수 있다. 즉, 인류구간 양단에 오버랩 구간이 있으며 오버랩 구간은 4개 경간으로 구성되므로, 인류구간에서 오버랩 구간을 제외한 나머지 장력구간 길이는 약 40 m 감소하게 된다. 장력구간에서의 평균 경간거리가 50 m일 경우, 인류구간당 평균적으로 전철주 0.8개를 생략할 수 있으며, 인류구간 150개로

구성된 전차선로의 경우 약 120개의 전철주 수량을 줄일 수 있게 된다. 또한, 전차선 단종이 일정하다고 했을 때, 전차선의 장력이 증가함에 따라 인상 지점이 빨라지고 차량의 집전장치인 팬터그래프가 오버랩 구간의 두 전차선을 동시에 접촉하는 거리는 짧아짐을 알 수 있으며, 접촉거리가 짧아진다고 해서 동역학적 집전성능에 영향을 미치지 않는다.

4. 결 론

호남고속철도를 350 km/h급으로 설계하고 또한 400 km/h급 차세대 고속철도를 개발하여 운행시키는 등 철도를 고속화함에 따라 고속 전차선로의 집전성능 향상이 더욱 중요해졌으며, 특히 오버랩 구간은 전차선로의 취약개소로써 많은 주의가 필요한 구간이다. 호남고속철도의 400 km/h급 테스트베드에서 오버랩 구간에 대한 집전성능을 측정, 분석한 결과, 오버랩 구간에서 2개의 전차선 간에 높이차가 있을 경우 이선 아크가 크게 발생하며, 전차선 배치를 최적화함에 따라 이선 아크가 감소되는 것을 확인하였다.

철도 고속화에 따라 전차선 장력이 증가하면 오버랩 구간에서 전차선이 인상되기 때문에, 증가된 장력을 고려하여 인상높이와 최소 경간길이를 검토하는 기법을 제시하였으며, 경간길이를 최대한 증가시켜 중간주의 인상높이를 낮추고 열차속도에 적합한 오버랩 구간 경간기준을 제시하였다. 호남고속철도의 350 km/h급 및 400 km/h급 전차선로에 대하여 적용한 결과, 오버랩 구간에 대한 최소 경간기준을 각각 33.2 m와 38.2 m로 제시하였다. 특히, 열차속도가 400 km/h까지 올라가게 되면, 집전성능 향상을 위하여 주축주에서의 전차선 높이차에 대한 기준을 보수적으로 적용하여, 최소 경간길이를 43.7 m까지 확장할 수 있다는 것을 제시하였다.

여기에서 제시한 오버랩구간의 경간기준은 고속 전차선로를 구성하는 이중 오버랩에도 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 향후 다양한 속도의 전차선로에 적합한 오버랩 경간 기준을 정하는데 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] E.K. Youn, K.H. Choi, "A Study on Reliability Analysis of Electric Railway Catenary System using FMECA", Transactions of KIEE, vol. 64, no. 11, pp. 1618~1625, Nov. 2015.
- [2] S. H. Chang, K. Lee, S. Y. Kwon, J. W. Park, "Technique of Tension Length Calculation for 350km/h High Speed Catenary System", 2011 Annual Conference of Korean Society for Railway, pp. 932-939, May 2011.
- [3] G. Mei, W. Zhang, H. Zhao & L. Zhang, "A Hybrid Method to simulate the Interaction of Pantograph and Catenary on Overlap Span", International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Volume 44, 2006.

- [4] J.P. Massat, J.P. Laine & A. Bobillot, "Pantograph-catenary Dynamics Simulation", Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement, 551-559, 2006.
- [5] P.C. Antunes, "Development of Multibody Pantograph and Finite Element Catenary Models for Application to High-speed Railway Operations", Thesis of Master Degree, Technico Lisboa, Oct. 2012.
- [6] M. Shimizu, Y. Fujii, "Improvement of Structure of Contact Wire on Overlap Sections of Shinkansen", Quarterly Report of RTRI, Vol. 41, No. 4, 2000.
- [7] S.Y. Kwon, Y. Cho, Y. Park, K. Lee, "A Prediction of the Geometry Change Especially in Takeoff Point of Overlaps When Increasing Contact Wire Tension in a Existing Catenary", 2011 Annual Conference of Korean Society for Railway, pp.1863-1867, Oct. 2010.
- [8] SIEMENS, "Contact Lines for Electric Railways", 2009.
- [9] "Facilities and Component Diagrams of New 400km/h High Speed Catenary System (General Drawing of Single Pole-Air Joint-(A00A07))", KRRI, 2014. 07.
- [10] Y. Park, K. Lee, "Analysis on Installation Condition According to Dynamic Characteristics for Overhead Catenary System", Transactions of KIEE, vol. 65, no. 9, pp. 1605~1609, 2016.

저 자 소 개



최 태 수 (Tae-Su Choi)

1984년 철도대학교 철도전기와 졸업.
2007년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업.
1984년 철도청. 1992년 한국철도시설공단
사업단장. 서울과학기술대학교 철도전문대학
원 철도전기신호공학과 박사과정
E-mail : tschoi@kr.or.kr



최 규 형 (Kyu-Hyoung Choi)

1981년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982
년 홋카이도(北海道)대학 대학원 전기공학과
졸업(공학박사).
2005년~현재 서울과학기술대학교 철도전문
대학원 철도전기신호공학과 교수
Phone : 02-970-6873
E-mail : khchoi@seoultech.ac.kr