

순환전류에 대한 전철설비 보호카바 개선 연구

강승욱*, 김인철**, 김효진***, 김대식***, 백성현***, 한상옥****
 *가톨릭상지대학, **한국철도공사, ***한국전기공사협회, ****충남대학교

A study on better wire protector of equipment on the Circulating Current in Catenary System

Kang Seung Wook*, Kim In Chol**, Kim Hyo Jin***, Kim Dae Sik***, Baek Seong Hyun***, Han Sang Ok****
 *Catholic Sangji College, **Korea Railroad, ***Korea Electrical Contractors Association, ****Chungnam National University

Abstract - In these days, Korea Railway apply simple catenary system to general lines and high speed lines of Korea Electric Railway. Circulation Current in catenary system frequently bring undesirable consequences. Namely, the Connector wire has many problems according to a flow of excessive circulation (or traction current) and a sudden rise of temperature on catenary when electric car or locomotive is running in high speed. The occurrence of events by the load increase ment do considerable damages to peoples, organizations and systems. On a case by case accidents, the reel-type protective cover as part of various methods has some problems. In this project, we proposed the improved changes on the catenary system of a improvement and change of a messenger wire protector, improvement of connector wire's institution angle and of a replacement the connector wire with a dropper. Its tridimensional space limitation dictated the scale of the 32xφ55 to be as small as possible. It is easier to install than work by the existing cover on the messenger wire.

1. 서 론

친환경적인 전기철도의 지속적인 건설과 설비가 운용되고 있는 우리나라에서 한정된 궤도상에 증가하는 승객을 수용하기 위해서 열차를 증설하였고 이에 따른 부하 증가로 전차선로 상에 순환전류(Circulation Current)로 인한 피해가 발생하였다. 발생하는 이 순환전류는 변전소로부터 공급된 전류가 급전선-급전분기장치-전기차에 집전되기까지의 사이에 전차선 이외의 전선, 가선금구 등에 흐르는 전류로 1973년 전철개통 후 90년대 초반부터 열차증가에 따른 부하전류 급증으로 순환전류의 문제점이 나타나기 시작하였으며, 열차 통과시 부하변동 및 진동의 원인에 의해 흔축과 아크열로 금속의 용해, 접촉저항의 증대로 온도가 상승하거나 금속의 열화 등으로 수도권 전철구간에서 사고 및 장애를 발생시켰다. 이와 같은 장애가 지속적으로 발생, 연구와 대책이 필요하게 되었으며, 순환전류에 따른 조가선, 행거 등이 손상되지 않도록 전기적 절연이나 완전한 접속(M-S-T접속) 등 다양한 대책을 마련하였다. 전철신설구간은 전량 드로퍼로 설치되고 있으며 기존선은 지지점 첫 번째 양쪽은 드로퍼로, 나머지는 실폐형 신형보호카바(3호)를 사용함으로써 순환전류의 문제점을 개선하였다

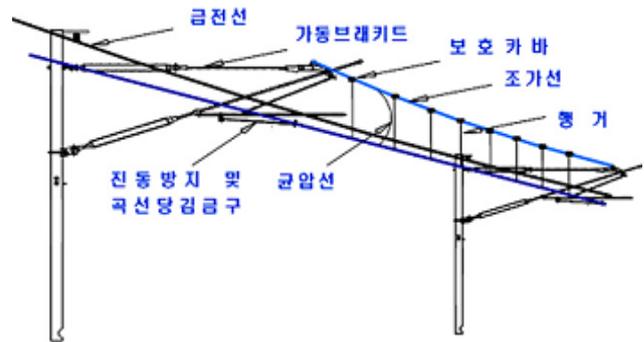
가공전차선로(架空電車線路)는 전차선의 안전 및 유지보수 확보 그리고 전기차의 운행에 꼭 필요한 시스템으로써, 고속화에 따른 전기철도 발전을 위해서 기술 확보가 반드시 필요하다. 행거방식에 설치되어 있는 기존의 보호카바는 팬더그래프 습동시 진동으로 인해 회전하여, 파손되고 이탈되므로 인해 조가선과의 불완전접촉으로 순환전류를 발생시키고 있다. 이로써 조가선이 소손, 단선현상이 일어나고 있으며, 새로운 보호카바 개발로 이탈 및 파손을 원천적으로 예방할 수 있는 구조가 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 발생한 전차선로의 순환전류 문제점을 기존 설비의 발생 사고를 통해서 사고발생 요인과 사고별 유형 그리고 사고방지를 위한 분석과 기존 보호카바의 문제점을 개선 보완한 부품을 제안하고자 한다.

2. 본 론

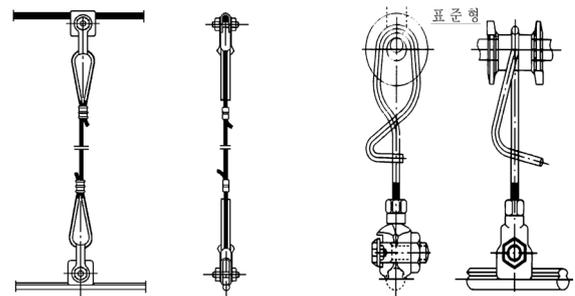
2.1 전차선로의 일반 특성

가공전차선로(架空電車線路) 시스템은 전차선(contact wire)을 조가선(messenger wire)에 행거(hanger)나 드로퍼(dropper) 등으로 체결하는 가선방식으로 장거리 간선노선의 전기철도에서 급전시스템을 위한 가선방식으로 전세계적으로 널리 사용되고 있고 고속전기철도에서도 구조 및 소재상의 기술변화가 있기는 하지만 근본적인 형태에 있어서는 큰 변화 없이 고속화를 이루어 내고 있는 가선방식이다. 조가선이 이루어내는 형상에 의해 Catenary System이라고 한다.[1][2] 커티너리에서 순환

전류(Circulating Current)란 변전소로부터 전류가 급전선, 급전분기장치를 통하여 전기차에 집전되기까지의 사이에 전차선 외의 전선, 가선금구 등에 흐르는 전류를 말한다.[3][4][5] 전철용 변전소로부터 급전선, 급전분기선, 전차선을 통하여 전기차에 전기를 공급하는 전차선로 경로는 복수의 전선과 전선을 지지하는 금구 등의 부재도 도체로 구성되어 있기 때문에 아주 복잡한 전류회로를 구성하고 있다. 전차선로의 구성은 그림 1과 같고, 실제 순환전류가 흐르는 경로는 급전선 → 급전분기장치 → 전차선 → 균압선 → 조가선 → 가동브래킷 → 곡선당김금구 → 행거, 균압선 → 전차선 등 복잡한 회로로 구성된다. 그림 2와 그림 3은 각각 드로퍼와 행거 타입의 한 예이다. 우리나라 기존선에서는 운영 및 유지 보수 경험에 따라 행거가 조가선과의 전기적 접촉이 불량함으로 인해 발생하는 전기적 피해를 방지하기 위하여 아예 슬리브 등으로 조가선을 덮고 여기에 행거를 걸어주는 방식도 사용하고 있다.



<그림 1> 전차선로의 구성



<그림 2> 드로퍼(dropper)타입

<그림 3> 행거(hanger)타입

2.1.1 전기적 특성.

전차선은 차량의 동력에 필요한 전류를 공급하여야 한다. 부하의 특성상 시동, 정지가 빈번하게 반복되며 큰 견인력으로 주행해야 하므로 대용량의 부하전력이 요구되고 그 크기는 시간적 공간적으로 급변한다. 그리고 전압의 변동이 작은 양질의 전력이 필요하며, 전차선은 양질의 도전체와 전압강하가 적게 발생되도록 제작되어야 한다. 커티너리의 전체 단면적은 ①선로형태 ②차량중량 ③변전소의 주 변압기 용량 ④도체의 허용온도와 같은 변수에 의해 결정된다.

2.1.2 기계적 특성

전기철도의 전원공급은 궤도면 위 일정한 높이에 가설된 전차선과 전기차의 집전장치를 통하여 공급하게 되는데 전차선과 팬더그래프 사이

의 동력전달은 동역학적 운동 등의 기계적 특성에 대단히 민감하며 이러한 접촉력 패턴에 대한 집전특성은 열차운전에 가장 중요한 요소가 된다. 따라서 팬터그래프가 접촉하는 전차선은 고속으로 운행하는 동안에도 이선이나 과도한 변형이 없어야 한다. 이를 위해 ①커터너리의 가요성(조가선과 전차선 지지의 탄력성) ②극한 온도조건 하에서도 자체형상 유지와 같은 사항이 요구된다. 따라서 전차선로를 구성하는 각종 설비들을 발생할 수 있는 모든 일반적인 하중(정적, 동적)에 견딜 수 있거나, 표준안전율을 고려하여 설계하여야 한다.

2.2 순환전류 검토

순환전류는 조가선의 드로퍼, 곡선당김금구(진동방지금구)의 말단부 및 전선 교차개소의 가선간의 접촉과 불완전 접속개소에서 발생하는 진동 및 기타 다른 원인에 의해 발생하며 순환전류의 사고는 전류분류회로의 불완전 접촉에 전류가 증대하여 발생한다.

2.2.1 순환전류 발생 원인

①연결부의 접촉저항 증대와 이종금속 접촉의 부식과 같이 통상적으로 순환전류 장애는 곡선당김금구의 압지지 볼트나 행거, 클램프 등 불완전 접속개소에서 일어나고 있으며, ②전기차 운행의 진동 및 가선 간 접촉으로 전차선과 조가선에 전압차 발생으로 아크가 발생하며 ③전차선과 조가선 사이가 상대적으로 가까워 선로정수가 거의 같지만, 두 선의 임피던스가 다르기 때문에 변전소로부터 동일한 전압을 받고도 전차선과 조가선을 일정 간격으로 접속하는데 전위차가 발생한다.

2.2.3 순환전류 사고 발생 전압

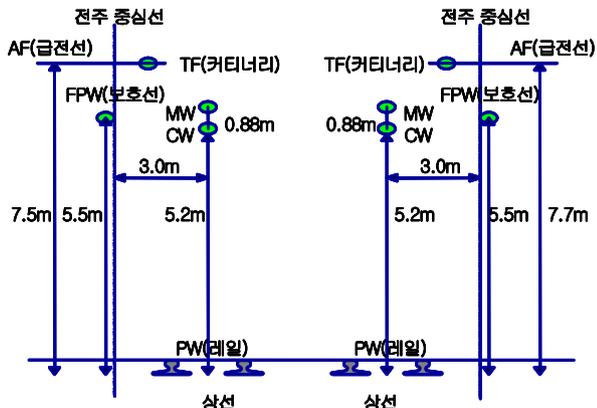
조가선과 전차선간에 균압선으로 접속되어 있는 회로에서, 전위차는 저항의 관계가 평형조건이 이루어 질 때가 "0"이다. 순환전류의 사고는 접촉점의 불완전 접속시 가선진동으로 가선이 서로 접촉할 때, 개방전압(떨어질 때의 전위차)이 수 볼트 이상 되면 아크(Arc)가 발생한다. 따라서 조가선, 행거간의 아크 발생전압은 아크 발생전류의 크기에 무관하고 접촉 후 개방할 때 전압이 2.5V 이상인 것으로 알려져 있다. 이러한 아크 발생에 의한 전선의 용손을 줄이기 위하여 한 개소의 주위에 위치하는 전선 및 금구의 전압분포가 아크 발생전압 이하로 유지하여야 한다.

2.2.4 순환전류 분포 및 분석

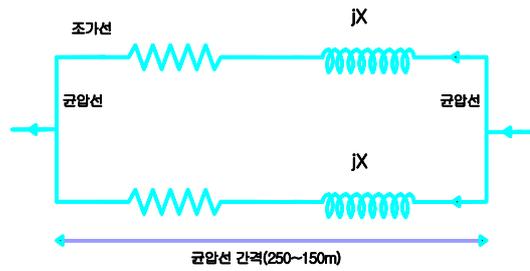
일반적으로 급전계통회로 해석에서 전차선과 조가선은 병렬회로로 간주한다. 사용된 전차선의 선종은 Cu 110mm²이고 조가선의 선종은 Cdcu 110mm²이다. 이 두 선의 전기저항은 각각 0.1592Ω/km, 0.3315Ω/km이다.[9]

①전차선과 조가선의 전류분포는 7:3~9:1 범위로 나타났으며,

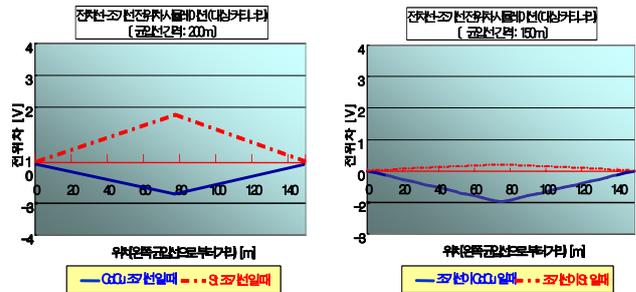
②전차선과 조가선의 전류분포 비율은 두 전선의 저항값에 비해하였다. 수도권 전철과 KTX의 사용 전차선, 조가선 선종에 따라 전위차분포를 시뮬레이션을 통하여 순환전류 분석결과 첫째 커터너리 선종에 따라 전위에 대한 차이가 났으며, 둘째 균압선의 간격에 따라 전류분포도가 차이가 났고 셋째 전류분배비에 따라 민감도가 컸다. 는 사실을 알 수 있었다. 그리고 KTX의 견인동력은 13,560[kw]로 현재 경부상, 하1선에 운행중인 VVVf 전동차의 견인력 800[kw]의 약 16.95배에 이르고 전동차는 동력분산식으로 각 집전장치에 부하가 분담되는 반면 KTX는 동력 집중식으로 하나의 팬터그래프를 통하여 집전되므로 부하가 한 곳에 편중되는 System이 되어 KTX 운행시 대용량 집중부하에 의해 순환전류가 발생할 수 있다. 그림 4는 전차선로의 구성 및 위치를 나타내고 그림 5은 전차선과 조가선 그리고 균압선의 등가회로이며 그림 6은 균압선 간격이 200m와 150m일 때의 전차선과 조가선의 전압분포이다.



<그림 4> 전차선로의 구성 및 위치



<그림 5> 전차선과 조가선의 등가회로



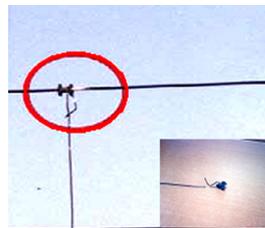
<그림 6> 전차선과 조가선의 전압분포

2.3 순환전류 장애발생 요인, 장애 유형

전차선로 순환전류에 의한 사고는 전차선로 커터너리방식에서 조가선, 행거 또는 드로퍼, 균압선, 곡선당김장치, 전선교차개소 등 불완전 접속개소에서 전기차 또는 바람 등에 의한 가선진동에 의해 접촉부의 분리 및 접촉이 반복될 때 아크(Arc)열에 의해 접촉저항이 증대하여 주열(Joule)현상에 의한 온도상승으로 금구류가 용해되고 조가선 등이 소손되어 단선에 이르게 된다.[13][14] 순환전류에 의한 장애발생 유형은 다음과 같이 분류할 수 있다. ①부식 및 접촉 불량 등에 기인한 접촉저항의 증가로 접촉점에서 전기차가 통과 중 과도한 전류가 흘러 주열 열에 의한 것 ②전기차가 통과 중에 진동 또는 바람에 의한 가선의 흔들림으로 해서 가선 및 금구간의 반복적인 접촉으로 아크 발생에 의한 용해 ③교차개소 및 복선인 경우에는 전체 전차선로가 복잡한 전류분포를 이루게 되어 전기차가 통과 중에 전류가 한곳에 편중되어 흘러 불완전 접속개소에서 주열 열에 의해 소손 및 단선에 의한 것 ④행거이어가 보호카바의 파손 등으로 이탈되어 조가선에 직접 접촉할 때 개방전압이 수 볼트(Volt) 이상 되어 아크 발생

2.3.1 장애 사례

현재 전차선로에 발생한 전기적, 기계적인 장애사고는 수도권 전철 구간 중 전기차 운행 간격이 비교적 짧은 구간에서 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다. 그림 7, 그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11은 여러 장애발생 부위의 사례를 보여주고 있다. 그림 12, 그림 13은 실패형(reel-type) 보호카바의 파손을 보여주고 있다.



<그림 7> 행거이어의 조가선촉 마모



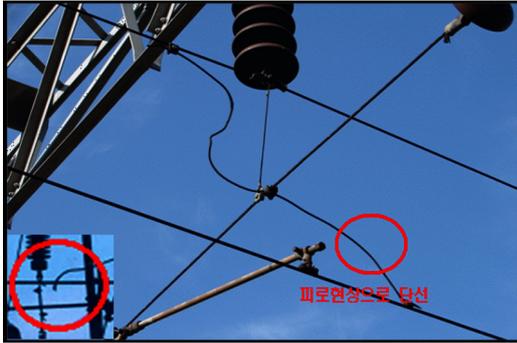
<그림 8> 곡선당김금구 압지지볼트



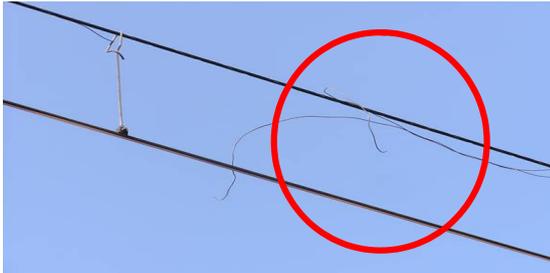
<그림 9>회전 클립의 전기적 마모



<그림 10> 리벳볼트 아크로 응해



<그림 11> 순환전류에 의한 곡선당김구류 용손을 막기 위해 M-S-T 균압선[Cu 38mm]을 설치하였으나 기계적인 피로현상으로 단선



<그림 12> 보호카바 파손으로 행거와 조가선의 불안전접촉과 가닥 단선

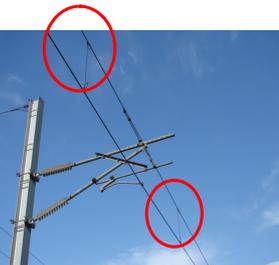


<그림 13> 실패형 보호카바 파손

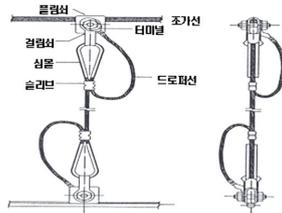
2.5 사고 방지 대책

순환전류 사고를 방지하기 위한 대책으로 다음과 같이 도출하였다.

- 1) 기존의 실패형 보호카바의 개량 또는 개발 교체
 - 2) 불안전 접촉구류류 개소(M-S-T 균압선) 설치각도 개선
 - 3) 진동이 심한 브래킷 양쪽의 행거이어를 드로퍼로 교체
- 그림 14는 상기 2)항의 개선 사례이고, 그림 15는 상기 3항의 개선 사례를 나타내고 있다.



<그림 14> 브래킷 양쪽 드로퍼



<그림 15> 개선된 드로퍼 균압선

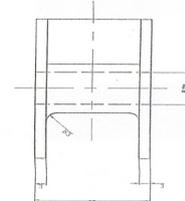
2.5.1 실패형 보호카바 문제점 및 개발

행거방식은 드로퍼 방식에 비하여 유지보수성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 현장에서의 유지보수 경험담을 들어볼 때 행거가 보호커버 밖으로 자주 이탈하고, 보호커버 밖으로 이탈하면 행거가 조가선에 직접 닿게 되어 전위차로 인한 조가선 가닥 소손이 발생한다는 것이다. 사용되고 있는 실패형 보호카바의 문제점은 다음과 같다. 그림 16은 기존의 실패형 보호카바를 나타내고 있다.

- 1) 실패형 보호카바는 회전형으로 되어있어 열차가 통과할 때 팬터그래프 승동으로 인한 진동 및 회전으로 시간이 경과함에 따라 자체 마모와 조가선을 마모 시키며
- 2) 기존 보호카바는 순수 플라스틱으로 제조되어 자외선에 쉽게 부스러진다.

- 3) 보호카바 자체 마모로 인해 파손과 더불어 조가선을 마모시켜 가닥 단선과 함께 행거이어의 계속적인 불안전접촉으로 전체적인 단선을 일으킬 수 있다.
- 4) 복잡한 구조로 되어있어 교체하는데 시간이 걸리고(1개 취급시 2분) 또한 손가락 부상 위험이 있다.

이를 개선하기 위하여 개발한 보호카바는 삽입형으로 그림 17과 그림 18과 같이 두 가지 종류를 제안하였다. 이는 기존 실패형의 32xΦ55 입체공간을 유지하되, 제시된 상기의 문제점을 해결할 수 있는 것으로 사료된다. 특히 작업의 편의성과 용이성 개선을 통하여 유지보수 업무와 부상 위험성 제거는 확실히 개선 할 수 있다.



<그림 16> 기존 실패형 보호카바



<그림 17> 개발 삽입형 보호카바 예



<그림 18> 개발 삽입형 보호카바 예

3. 결 론

전기철도 분야의 가장 중요한 설비인 전차선 설비에 있어, KTX 운행에 따른 기존 수도권 전차선로의 순환전류 문제를 포함한 장애사례와 요인을 살펴보았다. 전기철도시스템 특성상 순환전류에 의한 사고 방지 차원의 해결 한 방안으로써 보호카바에 있어 기존의 실패형을 개량한 삽입형 보호카바를 제시하였다. 균압선의 배치는 순환전류 발생에 영향을 미치는 주요 요인으로써 반드시 함께 검토가 되고 있으며 균압선 간격이 적절히 제시된 시스템으로 순환전류에 충분히 대비한 대책이라 할지라도 미소한 전위차는 항상 존재한다. 그리고 현장 유지보수 요원들의 경험에 따르면 이문과는 달리 순환전류로 인한 설비 소손 현상이 실제 현장에서 발생되고 있음을 강조하고 있다. 또한 순환전류에 대한 여러 보고서에서도 전류용량 600A는 너무 적절하지 않으며 800A를 적용하여야 한다는 지적이 있는 상황이다. 균압선 간격이 시설기준을 만족하지 못하거나, 균압선의 접속이나 조임 상태가 불량하거나, 선로 임피던스가 현격히 일반구간과 다를 개연성이 있는 개소는 전차선로 순환전류 문제가 발생할 가능성 충분히 있다[17]. 전차선로는 전차선의 안전 및 유지보수 확보 그리고 전기차의 운행에 꼭 필요한 시스템으로서, 고속화에 따른 발생 문제점을 직시하여 해결해 감으로써, 유지보수 비용 절감과 향후 진행될 전철화 사업에 따른 전기철도 기술발전을 위해서 기술 확보가 반드시 필요하다.[15] 이는 장기적인 관점에서 시공단계에서부터 유지보수 비용의 경제성을 고려하여 전차선로는 높은 전압과 전류를 변전소로부터 전기차의 팬터그래프와 접촉을 유지한 상태에서 전기차에 공급하는 매개 역할을 하면서 항상 외부 대기 중에 노출되어 있고 전기

차 운행에 다른 전류와 전압의 변동률이 커서 사고가 발생할 가능성이 항상 존재하므로 전차선로의 설계 및 시공할 때 주의 깊게 다루어져야 할 뿐만 아니라 운영상의 문제점을 유지보수 차원에서 세밀히 검토하여 설비를 부분적으로 개량하거나 설계에 피드백 시켜 반영하여야 한다.

3.1 파급효과

1) 기술적 측면

본 개발은 기존 실패형 보호카바와 순환전류에 의한 사고 발생을 감소시키고, 전기철도시스템의 전철분야에 있어 순환전류 감소를 위한 관련 기술 확보에 기여한다. 이를 통하여 고속화를 위한 관련 기술 축적과 수출 부품으로 활용 가능 할 것이다.

2) 경제·산업적 측면

설비개량으로 예산과 시간을 절감함으로써 유지보수 비용 절감에 도움이 되며, 수도권 전철사고 및 장애 발생 예방과 전철 시스템 안정성 강화에 기여할 수 있다. 따라서 시설물의 총 생애주기·가치공학 측면에서 매우 긍정적이다. 게다가 전기철도 설비분야인 기술력 제고에 기여할 수 있다.

3) 전기공사업체 측면

안전성 확보로 전철 공사 관련 작업의 능률 향상시키고, 사고 예방에 따른 공사업체의 경쟁력 강화에 기여할 것이다. 이로써 전기공사업체의 대외 좋은 이미지 구축에 이바지 할 것이다.

3.2 활용방안

기존 전기철도(수도권)의 전차선로에 설치된 수십만 개의 보호카바의 교체 가능하다. 이로써 경비를 절감할 수 있을 것이며 게다가 기존 실패형 보호카바의 설치 작업 시간을 줄일 수 있어 업무 효율 향상도 기대된다. 대량생산으로 산업 활성화에도 적극 활용할 수 있다. 이를 예방함으로써 시민에 대한 교통 불편을 감소시키는 것은 물론이고 인·물적 경비절감에 크게 기여할 것이다

[참 고 문 헌]

- [1] ORE, "Theoretical investigations and experimental tests by BR(static behaviour)", Questions A84, Reports No. 9, 1970, 10,
- [2] Karl-Hans Bauer 등, "Effects of Design Parameters of Overhead Contact Lines on High-Speed Operation - a Comparison of Theory and Testing", Translation of an article from "Elektrische Bahnen", No. 10/1989, Page 269~279, SIEMENS,
- [3] ORE, "Comparison and analysis of test results-Recommendations concerning the design of pantographs and overhead equipment", Questions A84, Reports No.11(Final report), 1970, 10,
- [4] 架線圖 프로그램 使用者 說明書, 日本鐵道總合技術研究所
- [5] 鐵道總合技術研究所 編, "電車線とパンタグラフの特性", 財團法人研友社, 1993, 10
- [6] 日本國有鐵道, "電氣鐵道", 電氣書院, 1982
- [7] 鐵道總合技術研究所 編, "電車線とパンタグラフの特性", 財團法人研友社, 1993, 10, P83-89
- [8] 日本鐵道電氣技術協會, "鐵道技術者를 위한 電氣概論", JR教本研究會編, 1990
- [9] 김양수, 유해철, "전기철도공학", 동일출판사, 2004
- [10] 안영훈 외 4인, "고속철도전철설비", 철도경영연수원, 2000
- [11] 유춘상 외 4인, "고속철도전차선로(I,II,III)", 철도경영연수원, 2000
- [12] ALSTOM HOLDINGS/EUKORAIL, "GENERAL ELECTRIFICATION PRINCIPLES OF SYSTEMS AND EQUIPMENT", 2000
- [13] (주)대동기술단, "전차선로 순환전류 사고 방지를 위한 드로퍼 개선 방안", 2000
- [14] 강인권, "최신전기철도개론", 성안당, 2004
- [15] 안영훈, "프랑스 고속철도 전차선로 시스템에서 균압선의 문제점", 2001
- [16] 김인철, 강승욱, "전차선로시스템의 순환전류에 대한 안정성 향상에 관한 고찰", 대한전기학회 전기설비위원회 춘계학술대회 논문집, pp24-26, 2006
- [17] 한국철도기술연구원, "전차선로 시설기준 수립", 1996