

# 160km/h가 가능한 협소터널용 터널가선시스템 설계 및 개발

## Development of the catenary system for the narrow tunnel with design speed of 160km/h

권삼영\*

조용현\*\*

창상훈\*\*\*

이희성\*\*\*\*

Kwon, Sam-Young

Cho, Yong Hyeon

Chang, Sang-Hoon

Lee, Hi-Sung

### ABSTRACT

While performing the advisory services of the electrification of conventional lines for KTX (Korea High Speed Train), we faced the speed-up problem of catenary system for the existing narrow tunnel. To solve this problem, the new system, to be named "Oblique encumbrance tunnel catenary", was developed. This system is mainly characterized by a simple catenary type, a dual bracket, a oblique encumbrance, a small system height and the same bracket used for the radial tension load and compression one.

In this paper, the basic concepts, overall system configuration and main points considered in a design phase for the 'oblique encumbrance tunnel catenary' are described. Moreover, the detail design criteria and other contents like manufacturing pilot products and verifying the performance through a factory and site test are added.

### 1. 서론

2000년의 경부선 동대구-부산간 기존선 전철화에서 터널 높이가 낮아 전차선로를 가설할 공간이 나오지 않는 터널이 다수 있어 문제가 제기되었었다. 이 터널들은 아주 오래 전에 건설된 단선 터널들로서 터널 확장이나 궤도 하로작업 등이 공기나 공사비 측면에서 허용되기가 매우 어려운 상황이었다. 따라서, 전차선로가 차지하는 공간을 최소로 하기 위하여 기존 KNR의 터널 브래킷 방식 가선을 사용하기로 결정되었었다. 그러나, 터널 브래킷 방식 가선은 KTX를 기준으로 최대속도가 120km/h를 넘기 어렵다고 예측 검토되었었다. 따라서, 선로가 허용하는 최대속도까지 KTX가 주행할 수 있도록 하기 위하여 단선터널 공간에서 160km/h 설계속도를 갖는 가선시스템의 필요성이 대두되었다. 그 과정에서 트윈 심플 커티너리(Twin Simple Catenary)나 강체 가선(Conductor Rail Catenary System)으로 시스템을 선정하자는 의견도 있었으나 이들 시스템이 고비용이고, 복잡하며, 공간이 부족하고, 유지보수에 불리하므로 부적합하다는 판단에 따라 새로운 시스템을 개발하기로 결정되었던 것이다.

이에 따라, 2001년에 협소터널에서 160km/h가 가능한 터널 가선 시스템을 개발하였으며, 이를 "엇가고 터널가선시스템(Oblique Encumbrance Catenary System)" 이라고 이름을 붙였다.

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

이 시스템은 실제 경부선에 설치할 시스템으로서 개발에서 실패가 있어서는 안되므로 설계에 완벽을 기하도록 노력하였으며(2001. 7월, 설계완료), 브래킷 및 금구의 시작품을 제작하고(2001. 9월, 시작품 제작 완료), 성능 및 신뢰성에 대한 시험을 공인기관 및 공장에서 실시하여 강도, 절연특성 등 설계 성능을 확인하였으며(2001. 10월), 철도청 영동선 풍에 피암터널에 현장 설치하여 종합적인 기술적합성과 신뢰성을 검증하였다(2001. 12월 ~ 2002년 4월).

본 논문은 엇가고 가선시스템의 설계 개념과 개발과정에서 검토된 설계 주안점, 설계 기준, 설계 내용 및 시작품 제작 및 시험, 검증 내용에 대하여 기술한다.

## 2. 엇가고 시스템 개념 설계

철도청에서 사용하고 있는 터널브래킷 가선시스템은 가고(System Height)가 작고, 설치공간을 최소화 할 수 있는 장점을 가진 터널가선시스템이다. 그러나 전차선과 조가선이 단일 브래킷에 함께 연결되어있기 때문에, 브래킷 자체는 조가선에 대한 지지역할을 위하여 높은 강성도를 가져야 함과 동시에, 팬더그래프 통과에 따른 전차선의 진동을 허용하기 위하여 매우 유연하여야 하는 매우 상반된 특성을 가져야 한다. 따라서, 브래킷은 일정한 유연성을 갖는 FRP 재질을 사용하며, 적절한 강성도를 갖도록 하는 것이 핵심적인 기술이다. 이런 기본적인 구조상 이 시스템의 속도는 일정한 범위에서 한계가 있을 수밖에 없고, KTX의 경우에는 120km/h가 한계점일 것이라고 보는 예측 검토가 있었다.

현재까지 가선 방식 중에서 심플 커티너리(Simple Catenary) 시스템이 가장 단순하고 경제적이면서 고속까지 안정적으로 집전특성이 보장되는 시스템인 것은 이미 주지의 사실이다. 따라서, 새로 개발할 시스템은 터널 브래킷 가선의 한계인 120km/h를 넘으면서, 협소 단선터널에 설치하는데 설치 방식에서 무리가 없고, 설치공간을 작게 차지하며, 유지보수가 용이한 단순한 시스템이어야 하므로 심플 커티너리 시스템이 가장 적절하다고 판단되어, 가고를 축소한 심플 커티너리 시스템인 엇가고 가선 시스템을 고안하게 되었다.

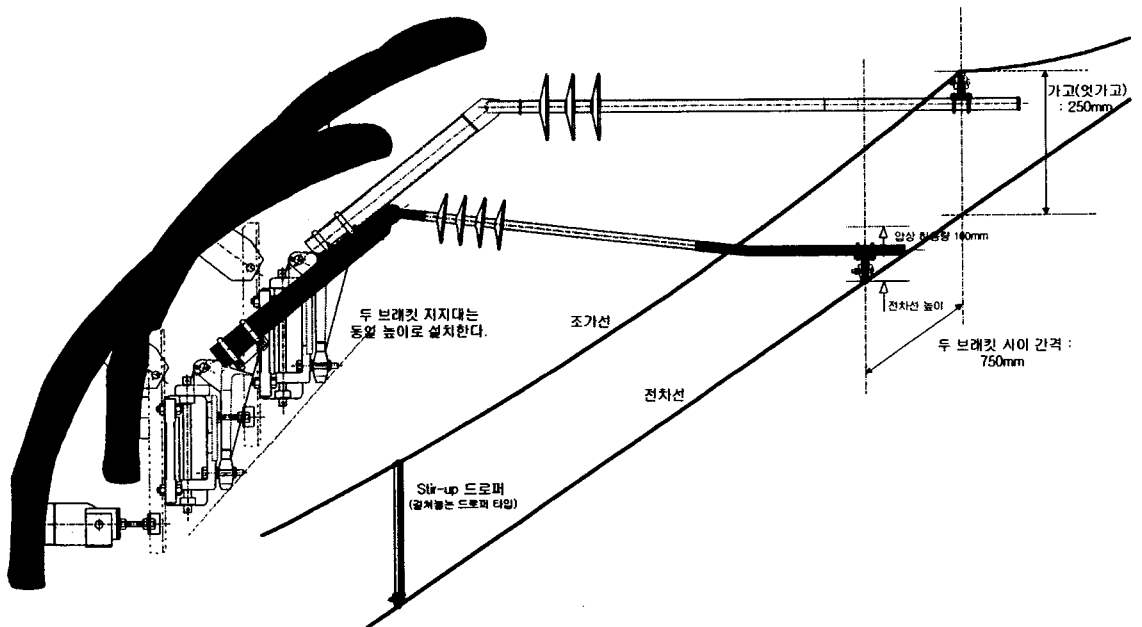


그림 1. 설치 개념도

이 시스템은 KNR에서 기존에 사용하던 터널브래킷 가선의 지지물 구조가 협소터널용으로 적절한 것을 발견하고 이 장점을 그대로 사용하기로 하였다. 그러나, 심플 커티너리 시스템이 되기 위해서는

전차선과 조가선을 분리 지지토록 하는 구조이어야 하나, 터널 브래킷 지지프레임의 구조상 동일 평면에 상하로 배치할 공간이 없다. 또한 축소된 가고에서 전차선용 곡선당김금구의 압상량을 높일 수 있는 구조가 되어야 한다는 점을 고려하여 엇가고(Oblique Encumbrance), 즉, 전차선 지지점과 조가선 지지점을 일정 간격을 두어 엇갈리게 배치하는 Configuration을 고안한 것이다.

엇가고 시스템의 컨피그레이션을 만족하기 위해서는 전차선을 지지하고 동시에 25kV에 대한 절연물을 자체적으로 가진 새로운 곡선당김금구가 필요하게 된다. 아울러, 조가선을 지지하는 브래킷과 기타 전선을 잡는 조가금구류(Clamps and Holders)도 기존의 것이 너무 무겁거나 강성이 적절하지 않아 새로이 개발할 필요가 있다. 따라서, 엇가고 가선시스템 개발에서 설비의 개발 또는 개발범위를 다음과 같이 결정하였다.

- 1) 전차선 지지 브래킷(FRP 절연 곡선당김금구)
- 2) 조가선 지지 브래킷
- 3) 전선 조가금구(Clip Holder) - 전차선용 및 조가선용

개발범위 결정에서는 최소화를 위하여 브래킷을 터널 벽에 고정 및 지지하는 프레임은 기존 터널 브래킷용 지지 프레임을 그대로 사용하기로 하였다. 이 프레임은 좌우 회전이 가능할 뿐만 아니라 기울기 조정(높이 조정)도 일정 범위에서 가능한 구조이므로 협소터널용으로 적절하다고 판단되었다.

### 3. 엇가고 시스템 금구 설계

#### 3.1 설계 기준

먼저, 엇가고 시스템용 브래킷 및 금구 개발을 위한 설계의 기준을 다음과 같이 정하였다.

- 정격 전압 : 25kV
- 최소 경간 : 20m
- 편위 : 곡선반경 3000m 이상에서 좌우 200mm(±200mm)
- 최소 가고 : 250mm
- 전차선 장력 : 15000N 이하
- 조가선 장력 : 14000N 이하
- 전차선 무게 : 1.334kg/m(Cu 150mm<sup>2</sup> 기준) 이하
- 조가선 무게 : 0.605kg/m(Bz 65mm<sup>2</sup> 기준) 이하
- 최소곡선반경 : 600m
- 캔트 : 160mm 이하
- 최대 풍속 : 40.5m/s
- 주위온도 : -25℃ ~ 40℃

#### 3.2 설계 주안점

개발하기로 한 각 품목에 대하여 세부적으로 고려해야 할 주안점을 다음과 같이 도출하였다.

##### 3.2.1 전차선 지지 브래킷(FRP 절연 곡선당김금구)

곡선당김금구 개발의 핵심 기술은 전차선과 조가선을 분리 지지하는 것과, 전차선을 잡는 지지물에 대하여 상하로 자유롭게 움직일 수 있도록 구조를 만드는 것이다. 또한 가능한 한 가볍도록 해야 한다. 일반 가동브래킷은 인장형과 압축형의 두 가지가 있지만 곡선당김금구는 항상 인장력을 받도록 설치된다. 그러나 터널은 협소하므로 전차선 지지 브래킷을 인장형과 압축형을 구별하여 설치할 공간적 여유가 없다. 따라서 전차선 지지 브래킷을 인장형과 압축형의 구별이 없고, 인장력과 압축력을 동시에 견딜 수 있도록 개발하여야 한다. 곡선당김금구 역할을 하는 구조에서는 압축 작용력에 대하여 가장 취약하

므로, 압축력에 의한 좌굴(Buckling) 안정성 검증이 필수적이다.

### 3.2.2 조가선 지지용 브래킷

조가선 지지 브래킷은 치짐도 줄이고, 전선 자중에 의한 굴곡 하중을 견디도록 강도가 큰 FRP 봉이 필요하므로 FRP 봉을 개량한다. FRP 봉의 강도를 높이기 위해서는 직경이 큰 봉을 사용하여야 하며, FRP 봉의 직경이 커지면 FRP 봉을 고정시키는 부위의 접속 깊이도 보다 깊어져야 하므로 지지프레임과의 접속부위도 변경되어야 한다. 또한 전차선 지지 브래킷과 조가선 지지 브래킷은 한 세트로 설치되어야 하므로 전차선 지지 브래킷의 설치 길이도 고려해야 한다. 한편, 조가선 지지 브래킷은 터널 천장과 가장 가까운 위치에 설치되는 전차선로 구조물이므로 터널 천장이 아치형일 경우 브래킷의 금속부위(연결관) 길이가 길면 터널과 가까울 질 수 있으므로 이 부위 길이를 가능한 한 짧게 하는 것이 좋다.

### 3.2.3 전선 조가금구(볼시벨)

전선 조가금구는 견고해야 한다. 그러나 전차선을 잡아주는 역할을 하는 전차선 조가금구는 곡선당김금구와 함께 진동하므로 가벼워야 한다. 기존의 터널 브래킷용 볼시벨은 너무 무겁다. 따라서 새로이 충분한 강도를 갖는 튼튼한 구조이면서 최대한 경량이 되도록 형상 설계해야 한다. 새로운 브래킷 구조와 Tube 직경에 맞도록 해야 하며, 브래킷에 좌굴하중이 최대한 적게 걸리도록 브래킷 중심선으로부터 전선 중심선까지의 수직거리(편심거리)를 작도록 하는 것도 고려해야 한다.

## 3.3 설계

최종적으로 완성된 설계 내용의 주요 포인트를 요약하면 다음과 같다.

### 3.3.1 전차선 지지 브래킷(FRP 곡선당김금구)

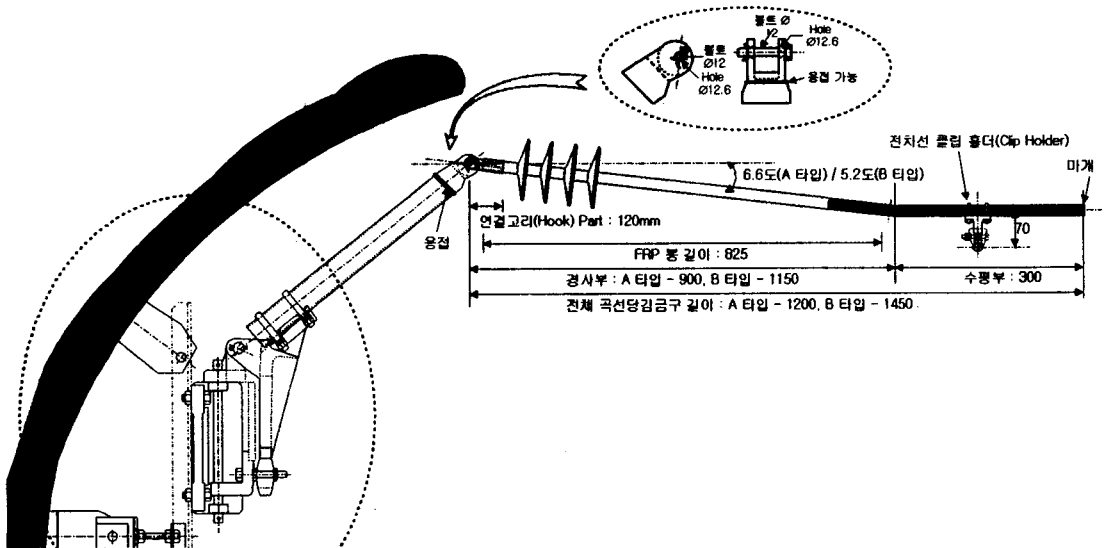


그림 2. 전차선 지지 브래킷 설계도

브래킷 길이를 A(Short Bracket)와 B(Long Bracket)의 두 타입으로 하였는데, 이는 설계 기준 편위를 만족시키도록 하면서 곡선당김금구를 가능한 한 경량으로 하고, 아울러 팬터그래프와의 접촉성 가능성 검토를 통하여 결정된 것이다. 편위는 정상적인 편위 뿐만이 아니라 곡선구간에서 캔트에 의하여 팬터그래프 중심선이 높은 경우도 고려하여 전차선이 위치할 수 있는 폭을 A, B 두 타입에 걸쳐 500mm가

보장되도록 설계하였고, 허용압상량은 100mm 이상이 되도록 설계하였다.

형상을 보면 연결관에서 일정각도로 굽은 모양인데 이는 다음 사항을 고려한 것이다.

- 1) 편위에 상관없이 전선조가금구가 전차선을 수직상태에서 볼 수 있도록
- 2) 최적의 압상량 보장
- 3) 편심으로 작용하는 힘의 작용방향을 고려한 좌굴강도 강화수단

재질 선정은 절연부는 고강도 FRP를 채용하기로 하고, 금속 연결관은 경량화를 목표로 알루미늄 합금으로 선택하였다.

설계기준조건에서 최대 하중을 산출하여 이 하중이 인가될 때 FRP 재질이 전달 수 있는 좌굴강도 해석을 통하여 FRP 봉 직경과 연결관 규격을 결정하였으며, 연결관 재질을 알루미늄으로 한 것은 경량이 고, 부식에 강하기 때문으로 가격 측면에서도 큰 상승요인이 되지 않음을 확인하여 결정하였다.

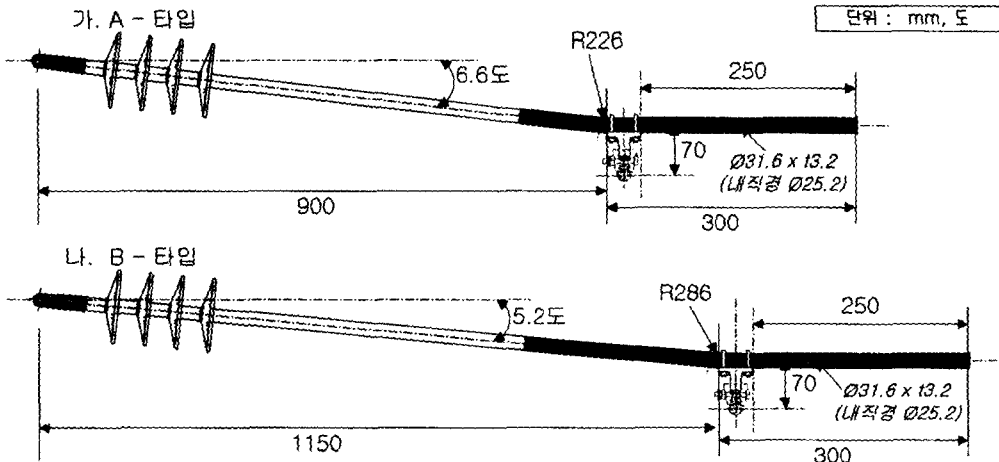


그림 3. FRP 곡선당김금구 설계도

절연설계에서는 FRP 부위의 길이가 기존 터널브래킷 보다 줄어들에 따라 표면누설거리(Creepage Distance)를 설계목표인 1,100mm에 만족시키기 위하여 갓의 크기는 줄이는 대신 개수를 늘려 설계하였으며, 곡선당김금구는 가동부위이므로 교대 갓(Alternative Shed) 대신 같은 크기의 갓으로 단순한 구조를 택하였다. 절연부 외피 재질은 기존 터널브래킷의 EPDM 재질 대신에 장기 신뢰성 측면에서 우수하고 현재 고분자 애저에서 주종으로 사용되는 실리콘(Silicone)으로 선정하고, 외피는 3mm로 기존 터널브래킷 2mm보다 강화하여 신뢰성을 높이도록 설계하였다.

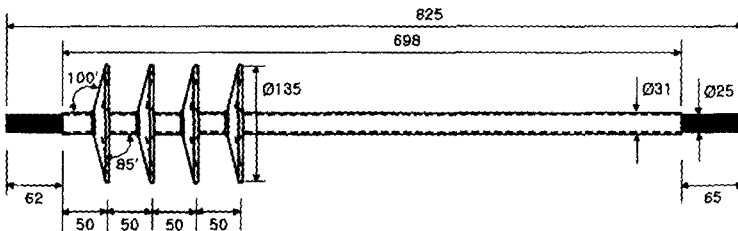


그림 4. FRP 곡선당김금구 절연부 설계도

곡선당김금구 역할을 하는 브래킷 부위의 무게는 2.5kg이하를 목표로 하였다.

### 3.3.2 조가선 지지 브래킷

경제성 측면에서 개발 범위를 축소하기 위하여 FRP봉과 관련된 부분만 변경하고 나머지는 기존 터널브래킷 사양을 그대로 준용하기로 하고, 굴곡응력 계산을 통하여 FRP 직경을 선정하였으며, 조가선 지

지 브래킷의 역할은 지지가 주목적이므로 강성도를 크게 높이도록 설계하였다.

연결관의 길이는 절연 곡선당김금구와 한 세트가 되도록 A, B 두 가지 타입으로 하고, 연결관은 경량이고, 부식에 강한 알루미늄 합금 재질을 선정하였다. FRP 봉 재질의 강도 요구치는 전차선 지지 브래킷에서의 강도 요구치와 같도록 하였다.

경사 프레임(경사 지지관)과 FRP 봉의 결합을 견고히 할 필요가 있으며, FRP 직경의 2배 이상이 지지관에 삽입되도록 해야 함에 따라 직경의 2.3배 정도가 삽입되도록 설계하였다.

절연부 외피 재질과 전기적 절연성능도 전차선 지지 브래킷과 같도록 설계하였다.

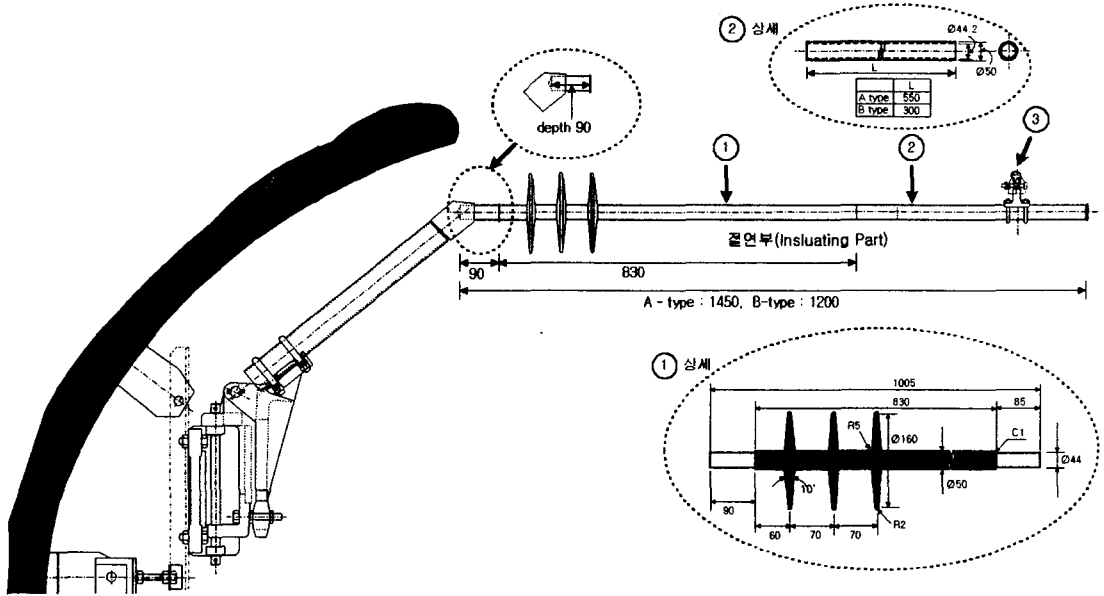


그림 5. 조가선 지지 브래킷 설계도

### 3.3.3 전차선 및 조가선 조가금구(Clip Holder)

경량화를 위하여 재질은 알루미늄 합금으로 하고, 구조는 U 볼트를 사용하여 조이는 타입으로 하였으며, 기존에 있는 철도청 표준 전차선 이어(Ear) 금구와 호환성을 위하여 이어 금구와 물리는 부분의 치수는 철도청 표준규격을 따르도록 하였다. 전차선 허용 압상량을 최대화 하면서 팬더그래프와 접촉되지 않도록 하기 위하여 클램프 길이를 가능한 길도록 설계하였으며, 쓸모 없는 부위는 가능한 한 없애도록 형상 설계하여 강도와 경량화 측면에서 최적이 되도록 하였다.

조가선 조가금구는 전차선 조가금구와 동일 규격을 유지하되 전차선 지지 브래킷에 비해 조가선 지지 브래킷의 직경이 크므로 이에 맞도록 접촉평면 치수를 바꾸어주었다.

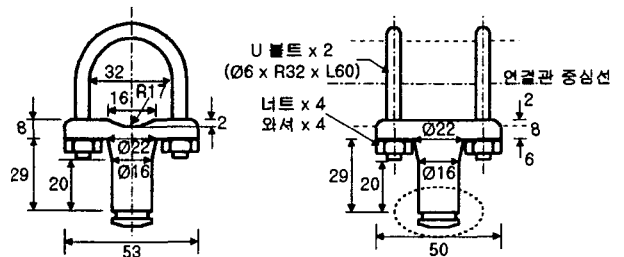


그림 6. 조가금구 설계도

### 3.4 검증

설계한 브래킷 규격과 재질데이터에 대하여 구조적으로 안정되고 좌굴응력을 견딜 수 있는지, 설치 상태에서 처짐이 얼마나 발생하는지를 확인하기 위하여 FEM 구조해석 프로그램(MSC NASTRAN)으로 응력, 처짐량 등을 검증하면서 변수 조정을 실시하였고, 아울러, 목표 질량을 맞추기 위한 관련 변수 최적화와 일부 형상 조정을 하였다.

#### 4. 시작품 제작 및 시험

A, B 타입별로 각 2조를 시작품으로 제작하여 공인시험기관 및 공장에서 강도시험, 재질시험, 절연시험 등을 실시하였으며, 시험 결과 하중, 절연, 폴리머 신뢰성 등에서 만족한 성능을 보임을 확인하였다.

또한, 열차가 운행중인 실제 선로(영동선 풍에피암터널)에 3개월 이상 설치하여 신뢰성을 시험하였다.

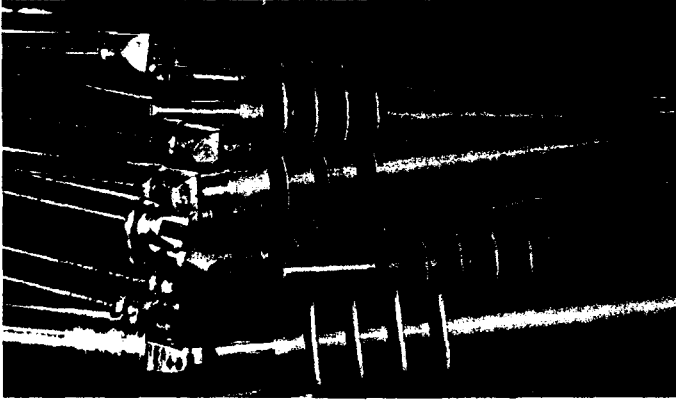


그림 7. 브래킷 시작품

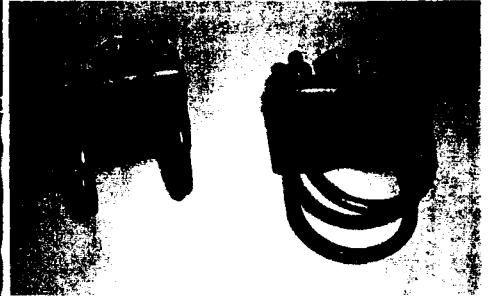


그림 8. 조가금구 시작품

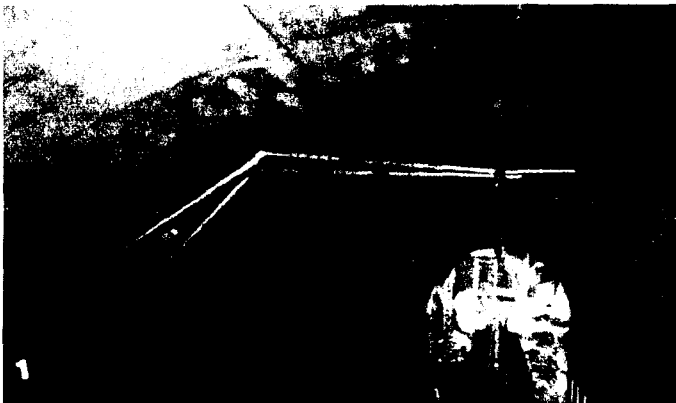


그림 9. 풍에피암터널 현장설치 모습



그림 10. 고속카메라 촬영(팬터 통과 시)

#### 5. 결론 및 향후 추진 계획

협소한 기존 터널에서 160km/h가 가능한 가선 시스템을 목표로 잇가고 시스템을 개발하였으며, 잇가고 시스템에 사용되는 브래킷과 금구를 설계하고, 시작품을 제작하였으며, 성능시험 및 현장설치시험 과정을 통하여 만족한 성능과 신뢰성을 가지고 있음을 확인하였다.

이제, 본 잇가고 시스템 및 개발한 금구는 정식 철도청 표준품목이 될 것이며, 경부선에 설치될 예정이다. 아울러, 다른 선로의 전철화에서 협소 터널에서 속도향상을 위한 가선 시스템으로 활용될 것이다.

이번 기회를 계기로 우리나라에서 독자적으로 전차선로 자재를 직접 설계하고 개발하는 일련의 활동들이 활성화되기를 기대한다.

#### 참고문헌

1. 권삼영 외 다수, "고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선전철화 사업 기술자문(2-1단계) 보고서- 전차선 분야", 한국철도기술연구원, 2001. 12.
2. 권삼영 외 다수, "고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선전철화 사업 기술자문(2002년) 보고서- 전차선/전력분야", 한국철도기술연구원, 2000. 12.