

고속용 판토티래프의 기술현황



한형석

(KIMM 신교통기술연구부)

- '90.2 아주대학교 기계공학과(학사)
- '92.2 아주대학교 대학원 기계공학과(석사)
- '97.2 아주대학교 대학원 기계공학과(박사)
- '97.3 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



경진호

(KIMM 신교통기술연구부)

- '85.2 한국항공대학교 항공기계공학과(학사)
- '88.2 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '88.3 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



송달호

(KIMM 신교통기술연구부)

- '68. 2 서울대학교 기계공학과(학사)
- '68 - '69 강원산업(주) 생산기사
- '69 - '72 해군사관학교 기계공학과 교관(중위)
- '72 - '81 한국원자력연구소 기계제2공학실장(최종)
- '75. 2 서울대학교 기계공학과(석사)
- '81 - '86 Lehigh대학교 고체 및 파괴역학연구소 연구조교
- '86. 10 Lehigh대학교 기계공학과 응용역학 박사
- '87 - 현재 한국기계연구원 신교통기술연구부장

1. 머리말

판토티래프는 전차선(catenary)으로부터의 전류를 차량에 전달하는 장치로서 전동차 지붕 위에 설치되어 있다. 판토티래프의 설계 목표는 고속 및 다양한 환경 조건하에서 연속적이고 일정한 량의 전류를 차량에 전달하도록 하는 것이다. 열차가 고속화될수록 전류의 흐름이 중단되는 이선, 접촉선과 판토티래프 집전판의 마모, 공력소음 등이 큰 문제로 대두되며, 이들 문제들이 고속용 판토티래프의 설계 기술에서 중요시되고 있다.

특히 이선은 동력 전달을 중단시킬 뿐만 아니라 이선 시에 발생하는 아크로 인한 마모 증대, 통신 장애를 일으킨다. 유럽과 일본에서는 그러한 문제를 인식하고 고속용 판토티래프에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 또한 저속전철이나 고속전철을 운행하는 나라에서는 기존의 가선계를 그대로 이용하면서 고속화를 달성하기 위하여 기존 가선계에 대한 최적의 판토티래프 설계에 노력을 기울이고 있다. 우리나라에서는 고유한 고속용 판토티래프가 없지만 현재 선도 기술개발사업(G7)으로 개발을 수행하고 있다. 여기서는 고속용 판토티래프의 설계 기술, 국내외의 현황, 현재 시험 중인 선진국의 신 개념 판토티래프 설계 기술을 소개하고자 한다.

2. 구조

오늘날 전 세계에서 사용되는 판토티래프는 모두 수동형 시스템이다. 가장 널리 이용되고 있

는 판토프래프의 기본 구조는 대칭형 구조 판토프래프(그림 1 (a))와 그의 변형인 비대칭형 판토프래프이다.(그림 1 (b))

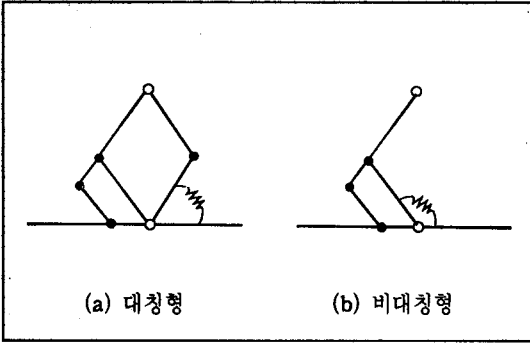


그림 1. 판토프래프의 구조

특히 비대칭형 판토프래프는 고속용에 적합한 것으로 알려져 있는데 이 구조의 이점은 상대적으로 경량 구조면서도 큰 기계적 강성을 갖고 접히는 공간은 적으나 넓은 범위의 가선계 높이에 이용 가능하다는 것이다.

또한 중요 파라메타(예, 암의 길이)를 약간 수정하면 다양한 조건에 쉽게 적용할 수 있다. 이 기본 구조를 이용한 고속용 판토프래프로 프랑스 TGV의 GPU 형 판토프래프(그림 2), 독일 ICE의 DSA 350S(그림 3), 일본 신간선의 TPS 203(그림 4) 등이 있다. 제품마다 구성이 다르지만 일반적으로 판토프래프는 크게 집전판, 집전판 지지부, 현가장치, 상부암, 하부암, 제어장치 등으로 구성된다.

전류가 흐르는 접촉선과 직접 접촉하는 판토프래프 집전판은 원활한 접촉이 이루어져 전원을 연속적으로 공급할 수 있게 하기 위하여 탄소, 구리 및 소결합금을 주로 이용한다. 스프링으로 구성되는 현가장치는 판토프래프의 접촉선에 대한 추종을 좋게 하기 위하여 설치된다. 상승암과 하강암은 기구학적 운동을 결정하기 위하여 이용된다. 제어장치는 공기 모터, 스프링, 공기 벨로우즈 등으로 구성되며 판토프래프의 상하 운동을 제어하는 기능을 가진다.

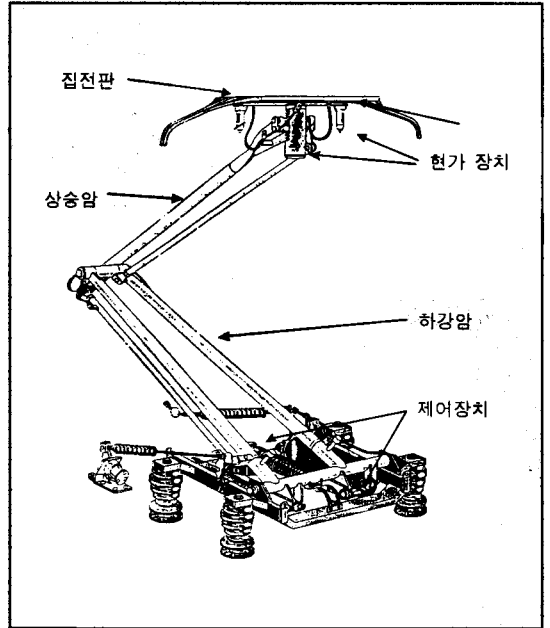


그림 2. TGV의 GPU형 판토프래프

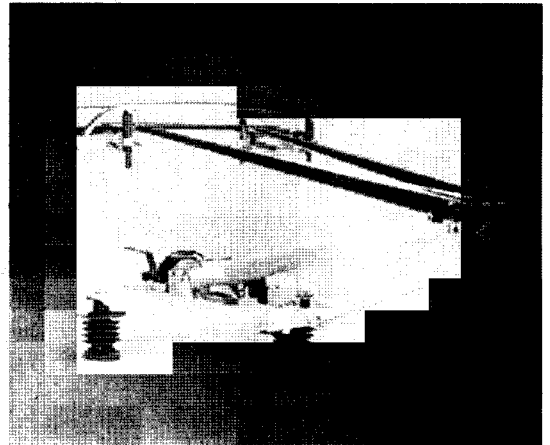


그림 3. 독일 ICE의 DSA 350S 판토프래프

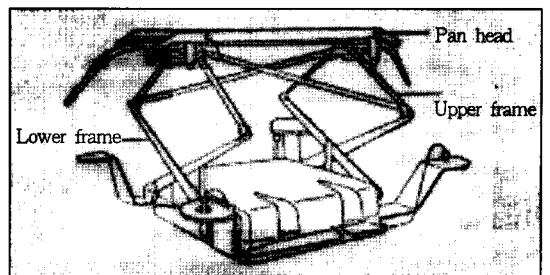


그림 4. 일본 신간선의 TPS 203 판토프래프

3. 성능 요건

가선과 판토티그래프로 구성되는 고속전철의 집전시스템은 기본적으로 고속 주행 시에 접촉선과 판토티그래프가 일정한 압력으로 접촉을 유지하여 안정된 전력의 공급이 가능하도록 해야 한다. 그러면서도 가선과 집전판의 마모를 최소화하여 시스템의 수명을 길게 해야 한다. 이러한 성능 특성은 접촉력으로서 대표되며 다음과 같은 정량적인 평가 기준이 이용된다.

- 평균 접촉력 M
- 접촉력 범위 $M \pm 3\sigma$
- 이선의 통계적 발생
- 정해진 안정 마진(예, 30N 또는 50N)이하 접촉력의 통계적 발생

판토티그래프를 개발할 때 이러한 성능 특성 시방이 선정되어야 하며 좋은 설계는 이 평가 기준을 만족하면서도 공기 저항과 소음을 최소화시키는 것이다.

이와 같은 요구 조건을 만족하기 위한 기존 설계에 대하여 살펴보면 정적 압상력은 판토티그래프의 하단부, 전차선의 진동 흡수는 상단부가 담당한다. 외란에 대한 판토티그래프의 동력학적 응답은 변위에 대한 판토티그래프의 관성 저항에 의하여 결정된다. 이러한 이유로 집전판은 현가 장치에 의하여 지지되며, 상승·하강 제어장치의 작동 없이 가선 형상의 작은 불균형에도 대응할 수 있게 된다. 판토티그래프의 집전판 지지부는 관성 저항을 줄일 수 있도록 가볍게 하고, 운동 부위의 마찰 저항을 작게 한다. 열차의 고속 주행 시에 집전판 주위에 발생하는 공기 역학적 양력은 속도 증가와 함께 증가하기 때문에 판토티그래프는 속도와 방향에 따른 양력의 변화에 대응할 수 있어야 하기 때문에 판토티그래프의 상단부는 공기 역학을 고려하여 저항과 소음을 줄일 수 있도록 되어야 하며, 바람과 차량의 진동, 기온 강하 등 불균일한 외부 환경에 견딜 수 있는 가볍고 견고한 구조물로 되어야 한다. 또한 집전

판의 재질이 접촉선의 수명과 통전성을 고려하여 설계되어야 한다. 이상을 요약하면 요구조건을 만족하기 위한 설계 방향은 다음과 같다.

- 가능한 한 집전판의 무게를 줄인다.
- 집전판 지지 부위의 감쇠를 최소화한다.
- 집전판 부위의 강성이 하부 구조물의 강성보다 작게 한다.
- 집전시와 접힌 상태에서의 공기 저항을 줄인다.
- 가능한 한 바람의 방향에 관계없이 균일한 공기 역학적 성능을 갖도록 한다.
- 대기의 난기류를 줄인다.
- 내 마모성 집전판을 이용한다.

4. 국내외 현황

전통적으로 각국은 각국 고유의 가선계시스템을 개발하였고 그 시스템에 적합한 판토티그래프를 최적화 하여왔다. 대표적인 고속용 판토티그래프는 프랑스의 GPU 형 판토티그래프(그림 2), 독일의 DSA 350 S(그림 3), 일본의 TPS 203(그림 4)이다. 대표적인 세 모델에 대한 특성 비교가 표 1에 주어진다.^[1]

GPU 판토티그래프는 1단의 구조물 위에 집전판이 대형의 원통형 플런저 서스펜션을 통하여 지지되어 있으며, 이에 따라 동력학적 성능이 보다 우수하고 구조적으로 단순화되어 보수를 쉽게 할 수 있다. 플런저 서스펜션을 통하여 집전판의 동하중을 8kg 정도로 가볍게 하였으며, 현수선의 변형, 판토티그래프의 이상 또는 돌발적인 공기저항 증가 등에도 효과적으로 집전할 수 있다. GPU 판토티그래프는 1500V/DC 또는 25kV/AC에 사용할 수 있고 2000A까지의 전류용량을 가진다. 시속 300km/h 이상에서 사용이 가능하며 TGV에서는 GPU 판토티그래프를 이용하여 1990년 5월 18일 시속 515.3km의 세계 최고 속도를 기록하였다.

독일의 DSA 350 S는 RE 250노선에서 220km/h

표 1. 고속용 판토틀래프의 특성 비교

구 분	GPU 25	DSA 350 S	TPS 203
사용 열차	TGV	ICE	신간선 300 계
형 식	single-arm 형	single-arm 형	cross-arm 형
정격 용량	25kV 500A	25kV 1000A	25kV 300A
최대 속도	350km/h	350km/h	300km/h
사용 온도	-40°C ~ +70°C	-	-
제어 방식	공기식	공기식	공기식
공기 압력	5~10bar	4~10bar	4.6~8.3bar
상 승	공기→실린더 압축→상승 스프링력	공기→공기벨로우즈 상승	공기 상승
하 강	실린더내 공기 배출→실린더 스프링력	공기벨로우즈 공기 배출→댐퍼하강	스프링력 하강
동작 범위	0.1~2.7m, 최대 2.8m	0.9~2.8m, 최소 0.7~최대 3.0m	평균 0.57m, 최소 0.37~최대 0.92m
무 게	335kg	106kg(절연여자 제외)	145kg
평균 압상력	70N	80±5N	최소 54N, 평균 78~88N
집전판	강판 틀에 탄소판	알루미늄 틀에 탄소판	소결합금
집전판 지지	스프링 박스에 지지	개개의 스프링에 의한 지지	
비 고	<ul style="list-style-type: none"> 고장 진단 장치 시험속도 : 515km/h 4개의 절연체 상부 습동면 경량화 원통형 플런저 두 개의 상승 스프링 	<ul style="list-style-type: none"> 고장 진단 장치 시험속도 : 406.9km/h 3개의 절연체 상부습동면 경량화 공기벨로우즈 사용 집전판 수명 : 60,000km 	<ul style="list-style-type: none"> 시험속도 : 345.2km/h 4개의 절연체

까지 주행 가능하도록 설계되었다. 주행 시에 최고 속도 범위 내에서 가선의 높이 변화나 바람의 세기에 관계없이 가선과 판토틀래프 사이의 접촉력 평균이 120N, 표준편차가 24N 이하가 되도록 설계되었다. 가동 부위의 강성을 하부 구조물의 강성보다 작게 하였으며, 집전시와 비집전시(접혀진 상태)에 공력 저항을 최소화하도록 설계되었다. 전체 설계는 양산을 목적으로 최적화 되었으며 이는 생산비의 1/4를 절감시켰다. DSA 350 S는 독일 연방 철도청의 접촉력 표준편차 요구량을 만족시켰다. DSA 350 S 판토틀래프의 또 다른 특징들은 여러 가지 전류·전압과 형상의 변화에 최소한의 부품 교체만으로 이용할 수 있도록 모듈라 개념을 채택하였다. 기계적 조정이 필요 없도록 설계되어 판토틀래프를

빠르고 쉽게 교환할 수 있다. 사용된 재료들은 도색이 필요 없으며 주 베어링은 별도의 윤활이 필요 없고 전기 마모 방지를 위해 베어링은 전기적으로 절연되어 있다. 집전판의 이상 마모와 파손을 감지하기 위하여 공기압으로 작동되는 고장 진단 시스템이 설치되었다. 상승 장치는 민감하게 조절할 수 있는 공기 벨로우즈를 사용하여 전차선과의 접촉력도 일정하게 유지한다. 집전판은 개개의 스프링에 의하여 지지되고 충격을 흡수한다.

TPS 203 판토틀래프는 대칭형구조를 취하고 있으며, 공기 압력에 의해 상승하고 스프링에 의해 하강한다. 일단 상승된 판토틀래프의 압상력은 스프링 힘에 의해 일정하게 유지된다. 고속 집전시에 안정된 집전을 할 수 있도록 소형화

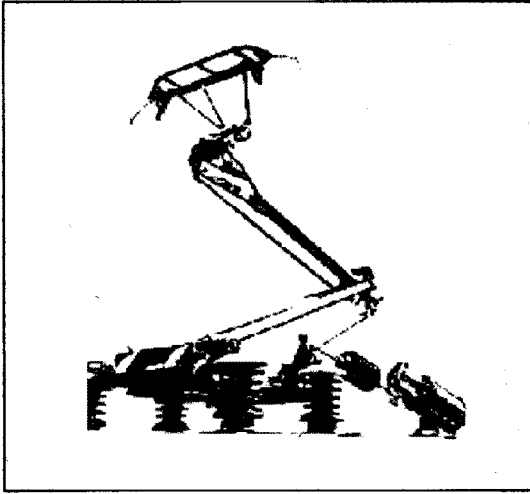


그림 5. Faiveley의 2단계 판토그래프

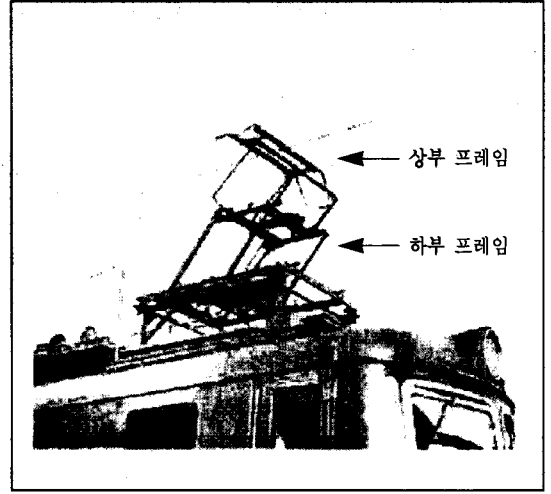


그림 6. TS-1M 판토그래프(ChS2 locomotive)

및 경량화되었다. 집전판의 재질은 구리 또는 철의 소결합금이 쓰이고 있다. 또한 판토그래프에서 높은 레벨의 소음이 발생하므로 덮개를 씌워 공력음의 발생을 줄이고 있다.

이 이외에도 널리 이용되지는 않지만 고속용으로 개발된 판토그래프들이 있다. SNCF와 Faiveley는 그림 5와 같은 2단계 판토그래프를 이용하여 동적 문제를 해결하고자 하였다. 실제 실험 결과 집전 성능은 향상됨을 보여줬으나 접촉판과 접촉선의 마모는 정적 접촉력의 증가로 크게 증가하였다. 다른 종류의 2단계 판토그래프가 Moscow와 Leningrad를 연결하기 위하여 러시아에서 개발되었다.(그림 6) 1972년의 구조는 200km/h용으로 개발됐는데 그림 6에서 보여주는 것 같이 두 개의 프레임을 포함하고 있다. 평행사변형으로 만들어진 하부 프레임이 대칭형 판토그래프인 상부 프레임에 연결된다. 각 시스템은 기계적으로 제어되는 공압 액추에이터와 연결된다. Brecknell, Willis & Co. 는 비대칭형 판토그래프의 운행 방향에 따른 양력 크기의 변화를 줄이기 위하여 보조 날개를 추가함으로써 성능을 개선하기도 하였다.

국내에서는 고속전철용 판토그래프의 설계 및 생산의 경험이 없다. 경부고속전철의 도입을 계

기로 1990년 말부터 한국기계연구원에서 과학기술부의 지원하에 “고속전철 시스템의 속도향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구”를 시작으로 기술동향, 문제점 및 연구 방향 등이 제시되었다.^[2] 1994년에는 한국기계연구원에서 국책연구개발사업으로 “고속전철 집전시스템의 개념설계” 연구를 수행하여 판토그래프의 핵심설계 기술과 시험기술에 대한 체계를 세웠다.^[3,4] 또한 판토그래프의 구성 부품의 민감도를 연구하여 한국형 판토그래프의 최적설계 방향을 제시하였다.^[5,6] 그 결과 1997년부터 선도기술개발과제의 하나인 “판토그래프 개발”에 중심으로 참여하여 고유모델의 개발을 주도하고 있다.

5. 신 개념 설계

5.1 능동 제어를 이용한 기존 판토그래프의 개선

전 절에서 언급한 것 같이 판토그래프의 성능은 형상, 운행 방향, 지붕 조건, 바람 조건 등과 같은 많은 파라메타에 영향을 받는다. 비록 이러한 효과들의 크기를 이론적으로 계산하는 것은 어렵지만 차량에서 전체적인 상승력을 측정하는

것은 상대적으로 단순한 문제이다. 이 상승력을 이용한 능동형 판토틀래프가 제안되고 있다.

DB AG, DLR 및 Adtranz 는 그림 7에서 보여주는 것 같이 접촉판의 현가에 액추에이터를 채용한 능동형 DSA 350 S를 제안하였다.^[8] 액추에이터는 접촉판 지지 스프링에 연속적인 힘을 발생시킨다. 센서 신호는 접촉판 지지 스프링의 힘이다.

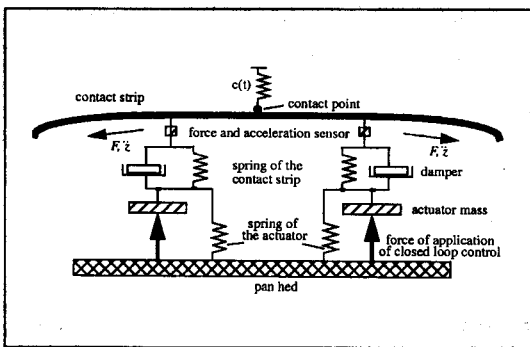


그림 7. 능동형 판토틀래프의 구조

이 능동형 판토틀래프의 개념을 시험하기 위하여 PI 제어기(proportional-integral controller)와 이상적 액추에이터가 이용되었다. 성능 목표는 접촉력을 국제규격 $F=180N$ 로 제어하는 것이다. 능동형 판토틀래프의 접촉력과 수동형 판토틀래프의 접촉력 비교가 그림 8에 나타나 있다. 결과는 능동형 판토틀래프의 접촉력이 수동형의 값보다 저 주파수임을 보여준다.

수동형 즉 비제어 판토틀래프의 접촉력 최대 변화폭 $A_{uncontrolled}=118N$ 이고 제어된 접촉력의 최대 변화폭 $A_{controlled}=11N$ 으로 동적 힘의 감소를 보여준다. 또한 접촉력의 분산은 작을 수록 좋는데 $\sigma_{controlled}=2.3N$, $\sigma_{uncontrolled}=19N$ 으로 능동형의 값이 작은 것을 알 수 있다.

DLR의 다른 제안은 공압 벨로우즈(bellows)와 판토틀래프의 회전 조인트에 설치한 제어 부품에 의하여 접촉력의 수준을 제어하는 것이다. 이러한 액추에이터들은 압전요소(piezoelectrical elements)를 이용하여 만들 수 있다.

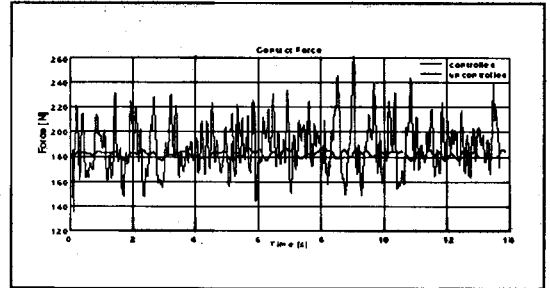


그림 8. 수동형과 능동형의 접촉력 비교

5.2 메카트로닉스와 신 기술을 이용한 새로운 개념의 개발

현재 DB AG, Adtranz 및 DLR은 혁신적인 고성능 판토틀래프 개발 연구를 수행하고 있다. 목적은 운전 제한 없이 고속(25% 상승)으로 기존 가선 네트워크에서 운행할 수 있는 판토틀래프 원형을 생산하는 것이다. 이 판토틀래프에서는 접촉력 제어장치가 포함되어 있다. 또한 소음 규정을 만족하기 위한 방안이 포함되어 있다. 또한 운행하는 동안 센서 신호로부터 판토틀래프/가선 시스템의 상태를 조기에 감지하는 온라인 진단을 통합하는 것이 계획되었다. 기계 역학적, 소음, 공기역학 또는 제어와 같은 각분야의 전문 분야에 있어서 개발하는 동안 얻어진 결과들은 기존 판토틀래프를 개선에 적용하기 위한 연구를 계속 수행하고 있다. 판토틀래프의 새로운 개념들은 다음과 같은 요구 사항들을 고려하고 있다.

- 저 공기역학적 항력
- 저 소음 방출
- 연속적이고 신뢰성 있는 전기에너지의 전달
- 접촉선과 집전판의 저 마모
- 강건하고 긴 수명 구조
- 규약과 제약 사항 준수

과거에는 특히 마지막 사항이 유럽에서 새로운 집전기의 개발을 방해했다. 그러나 새로운 기구적 해가 가능함을 일본에서 보여줬다.^[8,9] 그림 9, 그림 10은 일본에서 개발한 익형 판토틀래프를 보여주고 있다. 이 모델의 가장 큰 장점은 소음의 저감이다. 그림 9의 개념은 큰 단면으로 설

계된 적은 수의 부품들로 구성함으로 소음을 줄이는 것이다. 그러나 동적 추종성이 좋지 않아 상용화에는 성공하지 못하였다. 그러나 그림 9의 개발 결과를 이용하여 그림 10과 같은 상용화 모델을 개발하였다. 그림 10의 판토티그래프는 그림 9의 저소음 형상의 장점과 비대칭형의 장점을 채택함으로 좋은 결과를 보이고 있으며 일본의 새 노선에 채택할 것으로 알려져 있다.

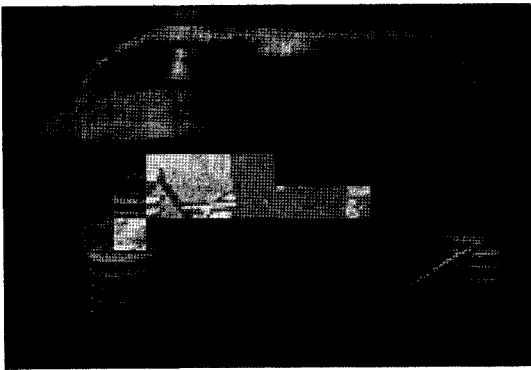


그림 9. 익형 판토티그래프(T type)

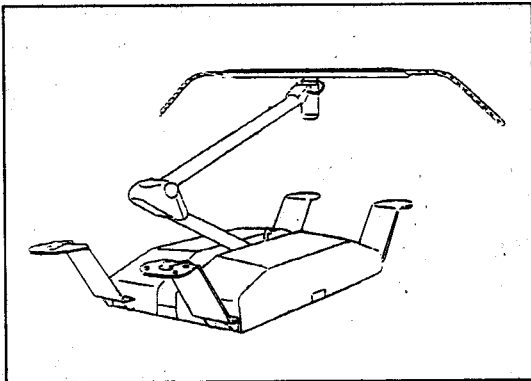


그림 10. 익형 판토티그래프(V type)

6. 맺는말

본 논문에서는 고속용 판토티그래프의 설계 요구 조건, 설계 기술, 국내의 현황 및 신 기술의 판토티그래프를 소개하였다. 유럽과 일본을 중심으로 고성능, 저소음 판토티그래프 개발을 활발히 진행하고 있다. 선진국의 기술현황을 볼 때 한국

형 판토티그래프의 개발은 구조적인 면에서는 유럽 판토티그래프의 장점, 공기역학적인 면에서는 일본의 장점을 받아들여 국내의 사정에 맞게 설계하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 국내도 차후 전철화 노선의 확대와 고속전철의 국산화를 위하여 판토티그래프에 대한 지속적인 기술 개발이 요구되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 백남욱, 장경수, 김효식, 강부형, 철도차량 총서, 기전연구사, 1997.
- [2] 송달호 외, 고속전철 시스템의 속도 향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구, 한국기계연구소 연구보고서, 1991.
- [3] 최진민 외, 고속전철 집전시스템의 개념설계, 한국기계연구원 연구보고서, 1995.
- [4] 최진민 외, 고속전철 집전시스템의 개념설계(II), 한국기계연구원 연구보고서, 1996.
- [5] 경진호, 허신, 최진민, 송달호, 한형석, 350km/h 급 고속전철용 가선-판토티그래프 시스템의 이선 저감에 관한 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.156-161, 1997.
- [6] 허신, 경진호, 한형석, 송달호, 속도 향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전시스템의 성능에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.533-539, 1998.
- [7] Galeotti, G., Galanti, S. and Toni P., Servo actuated railway pantograph for high-speed running with constant contact force, IMechE, Vol. 207, 1993.
- [8] Karlheinz Althammer, Wilhelm Baldauf, Simulation of actively controlled pantographs in overhead line systems, Proceedings of WCRR, pp.161-168, 1997.
- [9] Katsushi Manabe, Mitsur Lkeda, Development of low-noise pantograph, Proceedings of WCRR, 1994.