

경량전철 차량용 제3궤조 집전장치의 개발

A Development of the Third Rail Current Collecting Shoegear for the Light Rail Transit

정락교¹, 김연수¹, 박성혁¹, 이병송¹, 최규형²

Rag-Gyo Jeong, Yeon-Su Kim, Sung-Hyuk Park, Byung-Song Lee, Kyu-Hyoung Choi

Keywords : Third Rail(제3궤조), Current Collecting Shoegear(집전장치), Conductor Rail(급전선), Light Rail Transit(경량전철), AGT(Automated Guideway Transit)

Abstract

In general, a third rail current collecting shoe gear is widely used in the light rail transit system since it is more efficient and economical than an overhead pantograph. Therefore, its specification is prescribed in the Korean standard specifications for the light rail transit for its applications. This paper describes the development of the third rail current collecting shoe gears which is suitable to Korean situation and satisfactory to the Korean standard specifications. Two types are developed for the steel wheel and the rubber tyred AGT system, and various experiments are executed. It is found that performance of the third rail current collecting shoe gear developed is proved acceptable.

1. 서론

일반적으로 경량전철은 10,000~20,000명/방향/시간의 최대 수송능력을 가지며, 단거리 노선이면서 수송수요가 집중되는 지역에 건설·운영되는 최첨단 궤도교통 시스템이다. 따라서 경량전철은 기존의 도시철도에 비해 차량과 인프라 시스템의 경량화가 가능하여 건설비의 절감효과가 크며, 무인운전 방식을 적용함으로써 운영비의 절감효과를 갖는다. 또한 운전시각의 단축을 통한 승객 서비스 향상, 급구배 및 급곡선 통과능력을 향상시킴으로써 노선선정의 유연성 향상 및 환경친화성 향상, 시스템의 안전성 및 안정성 향상 등 많은 장점을 가지고 있는 차세대 도시

철도 시스템이다.

철도차량의 집전이란 차량의 집전장치를 통해 급전선의 전기 에너지를 수전하는 것을 의미하며, 경량전철의 집전방식은 카테나리(catenary) 가공선 방식과 제3궤조 집전방식으로 분류된다. 일반적으로 저속으로 운행되는 경량전철 분야에서는 고속차량에 적합한 카테나리 가공선 방식에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있는 제3궤조 방식이 주로 적용되고 있으며, 특히 차량조건과 노선훈성을 만족하면서, 이선(Interruption)과 집전슈의 마모를 최소화하는 다양한 집전장치와 급전선이 개발되어 운영 중에 있다[1-3].

현재 국내에서 개발 중에 있는 경량전철 시스템은 고무차륜형식 AGT 시스템, 철제차륜형식 AGT 시스템, LIM AGT 시스템이며, 이들의 집전/급전방식은 제3궤조 방식을 채택하고 있다

¹ 정회원, 한국철도기술연구원 경량전철연구팀

² 정회원, 한국철도7기술연구원 도시철도기술개발사업단

[4-7]. 그러나 국내에서는 제3궤조 집전방식을 적용한 도시철도가 전무한 실정이며, 제3궤조 집전장치 및 급전선의 설계 및 제작기술도 미진한 실정에 있다[8-9].

본 논문에서는 고무차륜형식 AGT용 횡방향 집전장치와 철제차륜형식 AGT용 측면상방향 집전장치의 개발에 관한 것으로서, 경량전철 차량이 주행궤도를 따라 주행할 때 발생하는 상하, 좌우방향의 변위에 의한 급전선과 집전슈의 접촉력의 변화를 최소화하여 이선현상과 집전슈의 편마모 현상을 최소화할 수 있으며 차량에 안정적인 전원공급이 가능하게 하는 제3궤조 집전장치의 설계방법을 제안하였다.

2. 제3궤조 집전장치의 설계조건

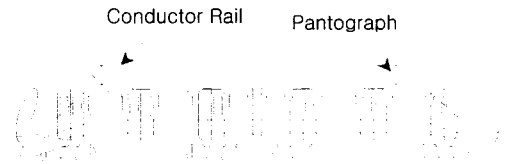
2.1 정의 및 특징

도시철도의 집전 및 급전방식은 Fig. 1과 같이 카테나리 가공선 방식과 제3궤조 방식으로 분류된다. 카테나리 가공선 방식은 궤도 상부에 설치된 가공 전차선(급전선)으로부터 판토틀래프를 통해 차량에 요구전력을 공급하는 방식이다. 반면 제3궤조 집전방식은 주행용 궤도의 상면 또는 측면에 설치된 독립적인 급전선으로부터 제3궤조 집전장치를 통해 수전하는 집전방식이다. 제3궤조 집전방식은 카테나리 설비가 필요 없으므로 경제적이며, 노선의 전체적인 외형이 단순해지므로 도심지의 미관에 적합한 방식이다. 또한 급전선이 외부에 노출되지 않으므로 집전에 있어서 환경적 영향(눈, 비 등)이 거의 없으며, 급전선은 반영구적이므로 유지보수 측면에서도 유리하고 특히 경량전철에 적용된 사례가 많다.

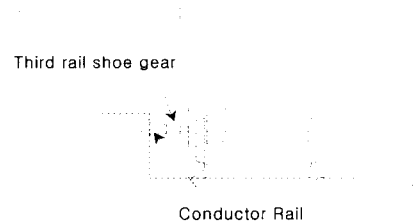
2.2 제3궤조 집전방식의 분류

제3궤조 집전방식의 유형은 형식에 따라 다양하게 분류되지만 급전선과 집전슈의 접촉위치에

의한 분류가 가장 일반적이며, Fig. 2와 같이 크게 3가지 유형으로 분류된다. 급전선과 집전슈의 접촉위치는 횡방향 접촉(side contact), 측면상방향 접촉(bottom contact), 측면하방향 접촉(top contact)이 있으며, 대부분 급전선은 절연커버와 같이 설치된다. 이들 중 본 논문에서 제시한 고무차륜 AGT용 횡방향 집전장치는 횡방향 접촉 방식이며, 철제차륜형식 AGT용 측면 상방향 집전장치는 측면상방향 접촉방식이다.



(a) 카테나리 가공선 방식

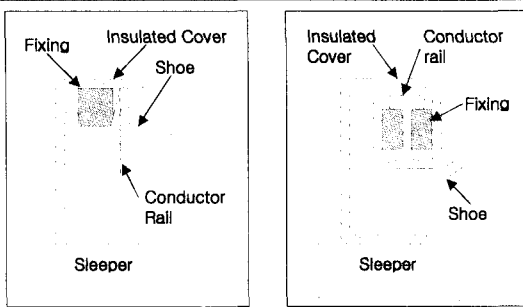


(b) 제3궤조 집전방식

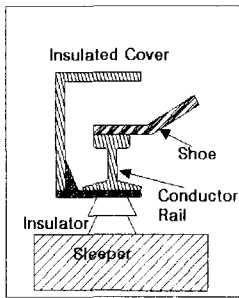
Fig. 1 Current collecting of urban railway transit

2.3 설계 요구조건

차량은 주행 중 주행노선 및 차량특성으로 인해 상하, 좌우방향의 변위가 발생되고, 이는 급전선과 집전장치의 집전슈와의 접촉력을 변화시킨다. 이와 같은 접촉력의 변화는 급전선과 집전슈의 불연속적인 접촉을 유발시켜 차량에 안정적인 전기 에너지 공급에 문제를 발생시키거나 집전슈의 일부분에 과도한 접촉력을 작용시켜 편마모로 인한 집전슈의 수명단축 등 많은 문제



(a) 횡방향 접촉방식 (b) 측면상방향 접촉방식



(c) 측면하방향 접촉방식

Fig. 2 Classification of the third rail current collecting

를 유발시킨다. 따라서 제3궤조 집전장치 설계 기술은 다양한 외란에 대해 급전선과 집전슈의 연속적인 접촉을 유지시켜 차량에 안정적인고 연속적인 전원을 공급하는 동시에 집전슈의 마모를 최소화함으로써 차량의 유지보수 비용을 절감하는 것이 핵심기술이다.

본 연구에서는 집전장치에 대한 상기의 요구 조건을 만족하기 위해 다음과 같은 설계 요구조건을 설정하였다.

- (1) 집전슈의 마모특성이 양호해야 한다.
- (2) 차량 주행시 발생하는 충격이나 진동을 양호하게 흡수할 수 있어야 한다.
- (3) 일정한 접촉력을 유지해야 한다(접촉력은 9 kgf로 설정)[8-9]
- (4) 이상전원으로부터 차량기기를 보호할 수 있어야 한다.

- (5) 집전슈의 높이 조절이 가능해야 한다.
- (6) 횡방향 집전장치(고무차륜 AGT 용)의 경우, "+" 측과 "-" 측이 동시에 포함되도록 설계한다.

3. 제3궤조 집전장치의 설계 및 제작

3.1 집전슈의 일정한 마모를 위한 설계

측면상방향 집전장치의 경우 집전장치 설치 초기시 급전선과의 접촉부위가 집전슈의 중심부가 되는 경우 집전슈의 마모부분은 중심부를 시작으로 바깥방향으로 진행된다. 이 경우 집전슈는 일부분만이 편마모 현상이 발생하며, 결국에는 집전슈의 수명을 단축시키게 된다. 이러한 현상을 착안하여 집전장치 설치 초기에 집전슈와 급전선이 접촉되는 지점을 Fig. 3(a)와 같이 5° 안쪽으로 경사지도록 설계하였다. 이러한 현상을 고려하지 않으면 집전슈의 교체주기를 앞당길 뿐만 아니라, 집전슈의 일정한 마모를 위해 집전슈의 마모상태를 점검하고 집전슈를 180° 회전시켜 재설치해야 한다.

고무차륜형식 AGT에 적용되는 횡방향 집전장치의 경우 주행 중 발생하는 차량의 변위에 의해 급전선에 대한 집전슈의 위치(특히 상하방향)가 변화하게 된다. 이러한 경우에도 집전슈와 급전선의 접촉면적 변화는 크지 않아야 원활한 집전이 가능하므로 집전슈의 형상은 Fig. 3(b)와 같이 평면형상을 갖도록 설계하였다. 또한 차륜 파손의 경우에도 급전선과 이선되지 않도록 충분한 폭을 갖도록 설계하였다. 집전슈는 급전선의 폭을 감안하여 충분한 너이로 설계하였고, "+" 측과 "-" 측의 집전슈를 병렬로 설치할 수 있도록 하였다. 또한 양쪽 끝단은 급전선과의 원활한 접촉을 위해 임의의 각을 갖도록 설계하였다.

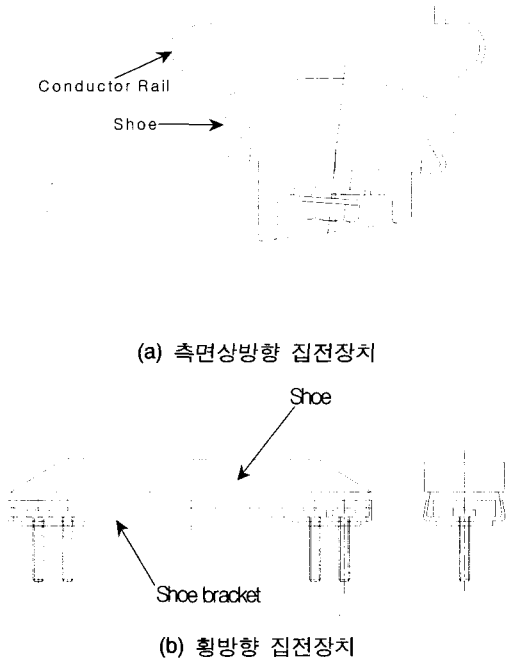


Fig. 3 Shape and contact of current collecting shoe

3.2 정(Positive)극과 부(Negative)극을 동시에 포함하도록 설계

고무차륜 AGT에 적용되는 횡방향 집전장치의 경우 차륜과 레일을 부극으로 사용할 수 없으므로 Fig. 4와 같이 정극 집전슈와 부극 집전슈를 동시에 포함해야 하며, 정극 집전슈는 베이스(Base)에 절연체를 사용할 수 있도록 하고 퓨즈를 설치할 수 있는 구조이어야 한다.

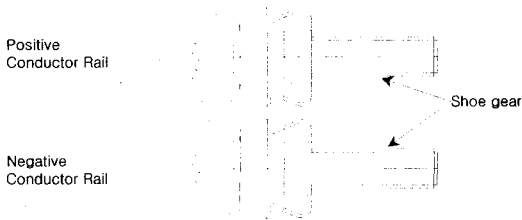


Fig. 4 Contact between conductor rail and shoe in side contact type shoe

3.3 충격과 진동에 대비한 설계

차량이 주행하면 집전장치가 급전선과 접촉하며 이동하게 되므로 크고 작은 충격이나 진동으로부터 견딜 수 있어야 한다. 이러한 충격이나 진동은 차량의 주행시 항상 존재하므로 이러한 점을 집전장치 설계에 반영해야 한다.

측면상방향 집전장치의 경우 집전장치와 급전선 사이의 진동 및 충격흡수를 위해서 축의 저널 부분에 Fig. 5와 같은 우레탄 고무(Urethane Rubber : 충격흡수, 내후성(기후), 내유성을 고려)를 사용했다. 또한 횡방향의 충격흡수를 위해 충격흡수 스프링(Shock Spring : 최대 1,200 N)을 설치하였다. 상하방향의 충격은 좌우 축 지지부 내의 우레탄 고무에 흡수된다. 또한 집전슈가 급전선 연결부와 접촉할 때 집전장치는 차량진행 방향의 충격력을 받게되는데 최대 100 kgf 정도의 충격을 흡수할 수 있도록 설계하였다.

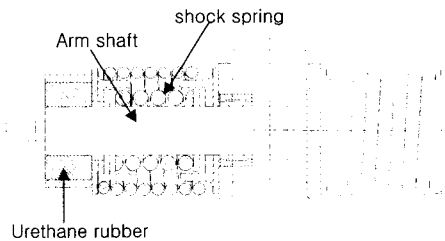


Fig. 5 Countermeasure for shock and vibration in bottom contact type shoe

횡방향 집전장치의 경우는 측면상방향 집전장치와 달리 주행방향 및 급전선의 수직방향 충격 및 진동은 집전장치 내의 인장스프링으로 대부분 흡수할 수 있다. 측면상방향 집전장치의 경우 집전슈를 고정하는 아암(arm)이 급전선과 직각을 이루면서 작동하므로 충격 및 진동으로부터 아암을 보호할 수 있는 별도의 장치가 요구된다. 반면 횡방향 집전장치의 경우 링크(Link)가 급전선 방향으로 구성되므로 충격 및 진동에 대한 별도의 보호장치가 요구되지 않는다. 따라서 본

연구에서는 충격과 진동에 대한 별도의 보호장치 대신 집전장치의 각종 스프링이 이러한 충격 및 진동을 충분히 흡수할 수 있는 구조를 개발하였다.

3.4 일정한 접촉력 유지를 위한 설계

측면상방향 집전장치의 경우 차량의 주행시 집전장치의 아암 축은 급전선과의 원활한 접촉을 유지하기 위해 차량의 움직임과 급전선의 설치 오차범위 내에서 회전할 수 있도록 설계된다. 그러나 이렇게 아암 축이 회전하는 경우에도 일정한 접촉력을 유지해야만 집전능력이 향상되고 집전슈의 마모를 최소화할 수 있다. 일정한 접촉력을 유지하기 위해 집전장치에는 일반적으로 스프링을 이용하고 있으며, 종류는 인장 코일스프링, 압축 코일스프링, 비틀림 코일스프링 등이 있다. 인장 또는 압축 코일스프링을 적용한 해외의 제품의 경우 아암 회전각도에 따른 접촉력의 변화가 비틀림 코일스프링을 적용하는 것보다 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5 및 6(a)와 같은 비틀림 코일 스프링을 적용하여 차량 주행중 발생하는 다양한 외란에 대해 집전슈와 급전선 사이의 접촉력을 일정하게 유지시키는 기구를 개발하였으며, 집전슈의 상하방향 최대 작동 가능범위가 상방향 50 mm, 하방향 40 mm(접촉력 7.5~10.5 kgf)가 되도록 설계하였다. 이때의 스프링 상수는 설계 요구사항인 접촉력 9 kgf와 집전슈 등의 자중을 고려하여 결정된다.

횡방향 집전장치의 경우 Fig. 6(b)와 같이 2쌍의 링크가 집전슈와 한 몸체인 아암에 연결되어 집전슈를 작동시키는 구조를 가지며, 인장 스프링은 2쌍의 링크에 대각선 방향으로 연결되어 수축되는 힘으로 급전선과 집전슈의 접촉력을 발생시킨다. 또한 집전슈와 아암을 관절형으로 연결시켜 좌우방향으로 각각 5° 씩 회전 가능하도록 설계하여 집전슈와 급전선의 일정한 면접촉 유지 및 접촉력이 유지될 수 있도록 하였다.

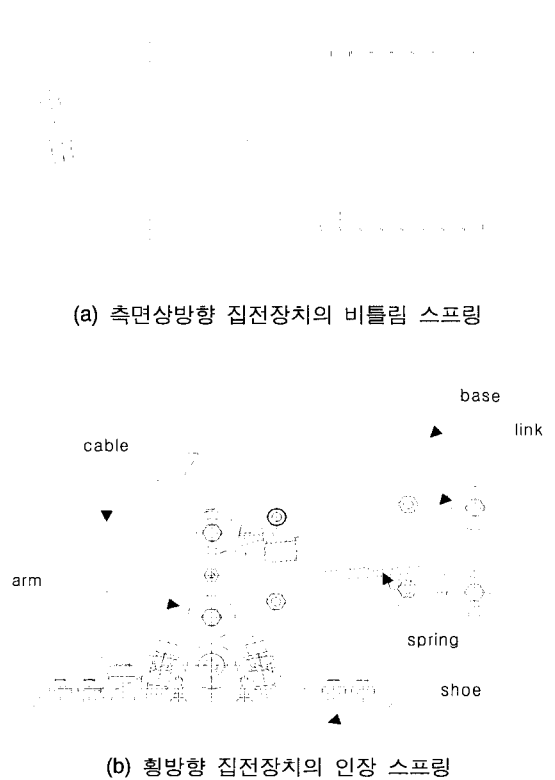


Fig. 6 Spring for maintaining contact force between conductor rail and shoe

3.5 퓨즈 설치에 대한 고려

퓨즈의 선정은 집전장치의 용량을 결정하는데 중요한 설계인자이다. 일반적으로 최대 전류용량을 기준으로 선정되지만 초과되는 경우도 고려해야 한다. 따라서 호환성이 우수한 퓨즈를 선정해야 하며 검토될 수 있는 모든 용량을 수용할 수 있어야 한다.

측면상방향 집전장치의 경우 이러한 문제점을 해결하기 위해 2개의 퓨즈를 병렬로 연결할 수 있어서 필요시 최대 2배의 용량까지 수용할 수 있는 구조로 설계하였다. 1개의 퓨즈를 설치하는 경우 각각의 취부 브라켓트만을 사용하여 집전장치 본체에 설치가 가능하고, 2개의 퓨즈를 병렬로 사용하는 경우에는 추가되는 별도의 브라

캐트만을 이용하여 집전장치 본체에 설치 가능하도록 하였다.

횡방향 집전장치의 경우 “+” 측의 집전슈는 퓨즈와 연결되며, “-” 측 집전슈는 차량 측의 접지에 해당되므로 퓨즈와 연결되지 않는다. 퓨즈 커버에 퓨즈를 감시할 수 있는 창을 제작하여 퓨즈의 작동시 커버를 열지 않고 외부에서 신속하게 확인하여 즉각적인 조치를 취할 수 있도록 설계하였다. 또한 커버의 내부에는 패킹을 부착하여 물이나 기타 이물질이 유입되는 것을 방지하였고, 측면에 부착된 클램프를 이용하여 간단한 설치 및 제거가 가능한 구조로 설계하였다.

3.6 집전슈의 동작범위

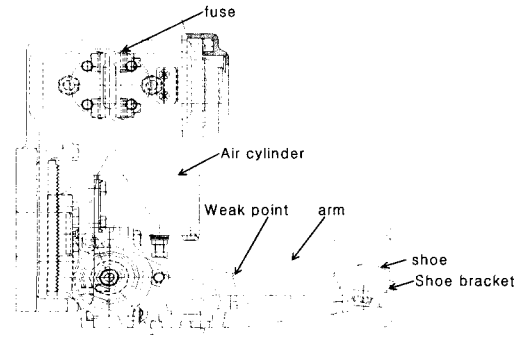
집전장치의 설계시 고려되어야 할 중요한 사항 중의 한가지가 집전장치의 동작범위이며, 이 동작범위 내에서 접촉력 변화를 최소화하면서 이션현상을 최소화해야 한다.

측면상방향 집전장치의 경우 Fig. 7과 같이 상방향 50 mm, 하방향 40 mm의 동작범위를 설정하였고, 이 범위내에서 접촉력 변화를 최소화하도록 설계하였다. 또한 횡방향 집전장치의 동작범위는 Fig. 7과 같이 차량의 바깥방향으로 93 mm, 안쪽방향으로 80 mm를 설정했으며, 정상위치에서의 접촉력이 9.0 kgf, 최대 동작한계에서의 접촉력이 ±1.5 kgf의 범위를 갖도록 설계하였다.

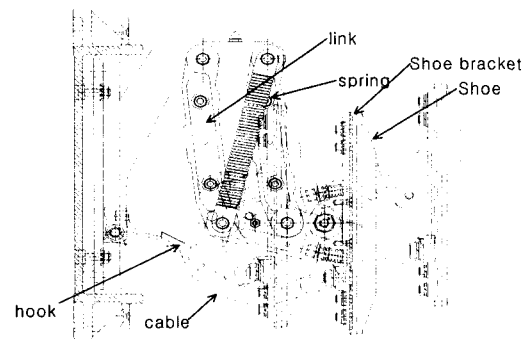
3.7 취약부분(Weak Point)의 고려

차량의 주행시 발생되는 충격이나 진동에 대비하여 집전장치를 설계할 하였음에도 불구하고 집전장치 자체로서 감당할 수 없는 큰 충격이 가해졌을 경우 집전장치는 피해가 최소화되도록 일부분만이 파손되어 치명적인 전기적 혹은 기계적인 사고를 방지할 수 있어야 한다. 따라서 측면상방향 집전장치의 경우 Fig. 7과 같이 아암 중간부위에 취약부(Weak point)를 만들어 이러한 예기치 못한 충격으로부터 집전장치 본체를 보호함으로써 치명적인 사고를 예방할 수 있도록

설계하였다. 또한 횡방향 집전장치의 경우에는 아암에 연결되는 인장 스프링에서 이러한 충격을 흡수할 수 있으므로 취약부분을 고려하지 않았다.



(a) 측면상방향 집전장치



(b) 횡방향 집전장치

Fig. 7 Operating range of current collecting shoe gear

3.8 집전슈와 급전선의 분리

긴급 상황 또는 차량 검수시 집전슈와 급전선을 분리시키야 할 경우가 있다. 따라서 측면상방향 집전장치의 경우 Fig. 7(a)와 같이 공기 실린더를 이용하여 차량에 공급되는 전원을 차단할 수 있도록 설계했으며, 공기 실린더가 설치되지 않는 구조로도 원활히 작동하도록 별도의 브라켓을 설치 가능하도록 하였다. 횡방향 집전장치

의 경우 Fig. 7(b)와 같이 베이스 브라켓에 설치되어 있는 후크를 이용하여 차단할 수 있도록 설계하였다.

3.9 차량한계 검토

집전장치의 크기 및 급전선의 위치는 경량전철 차량한계 및 건축한계를 고려하여 설계해야 한다. 본 연구에서는 경량전철 차량 표준사양(1998. 2. 건교부 고시)[6]과 경량전철 시스템 기술개발사업(1999~2002, 한국철도기술연구원) 1차년도 연구성과[7]를 근거로 Fig. 8과 같이 설계하였다.

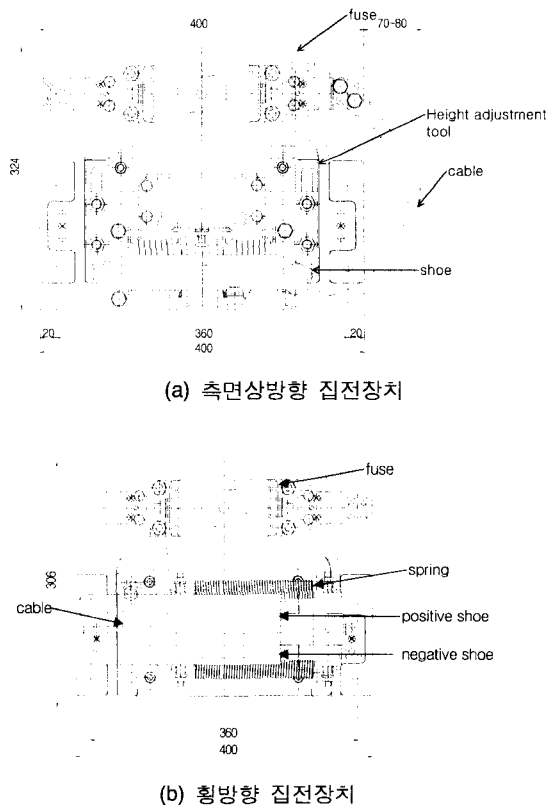


Fig. 8 Rolling stock gauge for current collecting shoe gear

3.10 집전선 높이를 조정할 수 있는 구조

주행 면으로부터 급전선의 높이에 대한 대응성과 차륜의 마모 및 삭정으로 인해 발생하는 접촉력 변화에 대한 보정방법으로 집전선의 높이 조정이 가능하면 집전성능 향상 및 집전선 마모절감, 유지보수의 편의성을 향상시킬 수 있다. 따라서 측면상방향 집전장치의 경우 Fig. 8(a)와 같이 하우징 역할을 하는 베이스에 나사산이 가공된 취부용 시트(Seat) 브라켓을 설치하고, 아암 축을 지지하는 베이스에도 동일 형태의 나사산을 가공하여 필요시 나사산의 엇갈림을 이용하여 높이를 자유로이 조절할 수 있도록 설계하였으며, 높이조정은 최대 40 mm까지 조절이 가능하게 하였다.

4. 집전장치의 성능시험

제3궤조 집전장치의 성능시험 항목으로는 집전선의 마모시험, 이선율 실험, 집전용량(접촉저항) 실험, 충격실험, 진동실험, 절연실험, 접촉력 변화율 실험, 각종 동작실험 등이 있으며, 이의 결과를 종합하여 집전장치의 주요 구성요소인 집전선, 각종 스프링, 링크 등을 최적화한다. 집전선의 마모시험, 이선율 실험, 집전용량 실험은 접촉력의 변화와 환경적인 영향(눈, 비) 조건에 따라 수행해야 하며, 충격실험과 진동실험은 급전선의 설치조건과 차량의 주행조건에 따라 파손 및 공진현상 등을 분석해야 한다.

본 연구에서는 철제차륜형식 AGT용 측면상방향 집전장치와 고무차륜형식 AGT용 횡방향 집전장치의 시제품을 제작하여 각종 동작실험, 절연실험, 접촉력 변화율 실험, 이선율 측정실험을 수행하였다. 동작실험은 각각의 집전장치가 설계 요구조건을 만족하면서 의도한대로 동작하는지의 여부를 확인했으며, 원활하게 동작하였다. 또한 집전선과 프레임 사이의 절연저항시험 결과 2,000 MΩ을 나타냈으며, 3 kV AC를 1분간 통전하였을 때 절연내압시험 또한 양호한 결과를 나

타냈다. 급전선과 집전슈의 접촉력 변화율 실험은 동작범위 내에서 집전슈의 위치에 따른 접촉력을 스프링 게이지를 이용하여 측정하였으며, 각각의 동작위치에서의 접촉력은 Fig. 9 및 10과 같이 대체로 설계기준 9 ± 1.5 kgf를 만족하였다.

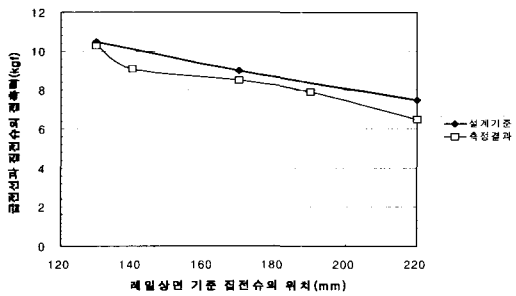


Fig. 9 Contact force as shoe location changes in bottom contact type

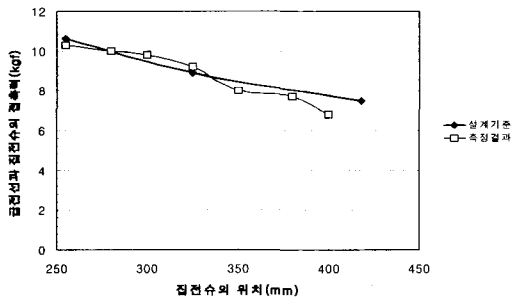


Fig. 10 Contact force as shoe location changes in side contact type

이선을 측정시험은 전체 집전시간 동안 발생된 이선시간의 크기 및 비율을 측정하였으며, 급전선의 설치공차는 0.667 mm/m 으로 설정하였다. 이선을 측정시험 결과 차량운행에 악영향을 미치는 0.01 초 이상의 이선은 발생하지 않았으며 대부분 미소시간의 이선시간을 나타냈다. 또한 최대 설치공차를 갖는 급전선 설치조건에서 두 가지 집전장치 모두 6 % 이하의 이선율을 나타

냈으며, 이는 급전선의 정상설치조건하의 해외 제3레조 집전장치 이선율(약 3~5 %)보다 다소 큰 값을 나타냈으나 급전선의 설치공차를 감안하면 거의 유사한 성능을 갖는 것으로 분석된다. 따라서 집전장치의 설계 파라미터를 최적화하고, 실제 노선에서의 급전선 설치공차를 최소화하면 차량운행상에 문제를 유발시키지 않고 집전슈의 수명을 극대화시킬 수 있는 집전장치의 개발이 가능할 것으로 분석된다.

5. 결 론

본 연구에서는 경량전철 차량 표준사양과 개발 목표사양에서 제시된 철제차륜형식 AGT와 고무차륜형식 AGT용 제3레조 집전장치를 상세 설계하고 시제품을 제작하여 성능실험을 수행하였다. 각각의 집전장치는 차량의 주행 변위에 따른 급전선과 집전슈 사이의 접촉력 변화를 최소화하여 이선현상과 집전슈의 편마모 현상을 최소화할 수 있는 구조로 개발되었다. 또한 충격 및 진동에 대비한 구조, 이상전원에 대한 보호, 급전선과 집전슈의 분리기능 등이 반영되었다. 제작된 집전장치의 각종 동작실험, 절연실험, 집전슈의 위치에 따른 접촉력 변화율 실험, 이선을 측정실험을 수행하여 설계 요구조건과 시제품의 성능을 비교 분석하였다.

후 기

본 연구는 건설교통부가 지원하는 "경량전철 시스템 기술개발사업(분야 : 종합 시스템 엔지니어링)"의 2차년도 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Brecknell, Wills & Co., "General Specification for an Under-Running Third Rail System"

2. Brecknell, Wills & Co., "Specification for DC Third Rail Conductor System for London Docklands Light Railway"
3. Kasai, S., Suwa, M., Watanabe, J., "Development of New Type Pantograph for Rigid Contact Wires", JSME, Vol. 23, No. 180, pp. 977-982, 1980.
4. 한국철도기술연구원, "1차년도 경량전철 기술표준화 연구 결과보고서", 1997.
5. 한국철도기술연구원, "2차년도 경량전철 기술표준화 연구 결과보고서", 1998.
6. 건설교통부, "도시철도차량 표준사양", pp. 81-156, 1998.
7. 건설교통부, "경량전철 시스템 기술개발사업 1차년도 연구 결과보고서 (분야 : 종합 시스템 엔지니어링)", 1999.
8. 정락교, 김연수, "경량전철 제3궤조 집전성능에 관한 연구(1)", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 1998.
9. 정락교, 김연수, "슬라이딩 접촉에 의한 집전 시스템의 성능향상 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999.