

## 경량전철 제 3궤조 집전특성에 관한 연구(I)

### The Study on the Third Rail Current Collecting Characteristics for Light Rail Transit

정락교\*      김연수\*      박성혁\*      목진용\*      이정식\*\*  
Raggyo Jeong      Yeonsu Kim      Sunghyuk Park      Jinyong Mok      Jungsik Lee

---

#### ABSTRACT

In the design of the light rail transit which is more reliable and economical, it is essential to develop a efficient third rail system. Especially, the analysis for the conductivity of conduct rail and the wear of collecting shoe is the first step of its development. In this paper, experiments for conductivity in conductor rail, wear in collecting shoe were performed respectively as different materials of conductor rail and current collector. Noise level and interruption, wear and contact resistance of collecting shoe were proposed as design parameters for the development of this system. Experimental equipment and methods of design parameter stated above were proposed, which is expected that analyzed results will be used as a basic data for the development of the system.

**KEY WORDS** : light rail transit(경량전철), third rail(제3궤조), conductor rail(가선), collecting shoe(집전슈우)

---

#### 1. 서 론

집전이란 가선과 집전슈우 사이의 미끄럼 접촉을 통해 차량에 요구전력을 공급하는 것이다. 차량의 집전방식은 크게 카테나리(Catenary) 집전방식과 제 3궤조 집전방식으로 분류된다. 표1<sup>(1)</sup>에서 비교된 것처럼 카테나리 집전방식은 궤도 상부에 설치된 가공전차선(가선)으로부터 판토틀레프를 통해 집전하는 방식이며, 고속주행 차량에 주로 사용되고 있다. 또한 제 3궤조 집전방식은 고가형식 노선의 중·저속차량에 많이 사용되는 방식이며, 주행용 레일 외에 궤도의 상·측면에 설치된 도전레일(가선)로부터 집전기를 통해 수전하는 집전방식으로서 카테나리 설비가 필요하지 않으므로 노선의 전체적인 외형이 단순해지고 도심지 미관에 적합하다. 그러나 국내에서는 시공된 사례가 없

---

\* 한국철도기술연구원

\*\* 우진산전

기 때문에 제 3궤조 집전방식에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 제3궤조 가선/집전시스템 개발에 있어서 선행되어야 할 가선의 전기적 특성실험과 집전슈우의 마모실험을 수행하여 가선 및 집전슈우의 재질별 특성을 분석하였다. 또한 제3궤조 집전기 개발에 요구되는 설계파라미터를 위한 성능실험 항목을 설정하고, 이에대한 실험방법을 제안하였다.

표 1. 집전방식의 비교

항 목	카테나리 집전방식	제3궤조 집전방식
집전장치	Pantograph	Shoegear
급전거리	3~4km	1.5~2km
가 선	마모시교체 단선우려	교체필요없음 단선우려없음
사용수명	12~15년	50년
구조물중량	무겁다	가볍다.
외 관	불 량	외부노출없음

## 2. 본 론

제 3궤조 집전시스템의 설계는 운행중 발생할 수 있는 차량의 변위에 대한 이선 및 접촉력의 변화를 최소화하여 차량에 필요한 전원이 연속 공급되도록 해야한다. 또한 미끄럼 접촉에 의한 가선 및 집전슈우의 마모특성을 분석하여 경제성이 우수하고 유지·보수에 용이한 설계가 되어야 한다. 특히 집전기 설계시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- 집전기의 동적 특성 및 접촉력 변화
- 집전용량, 접촉특성
- 가선과 집전슈우의 접촉으로 인한 전기적, 기계적 마모특성
- 소음 및 환경문제

### 2.1 가선

가선(도전레일)의 몸체는 고전도성 알루미늄으로 제작하여 전기적 전도성이 양호하도록 하고, 접촉부에는 스테인레스강을 용접이나 원자합성의 방법 또는 기계적 끼워 맞춤 등으로 접속하여 마모 특성이 양호하도록 제작된 알루미늄-스테인레스강 복합 도전레일이 주로 사용된다. 실험에 의한 도전레일의 전기적 특성은 표2와 같다.

표 2. 도전레일 전기적 특성

구 분	접촉부	몸체
도전율(%IACS)	2.35	51.4
비저항( $\mu \Omega \text{cm}$ )	73.5	3.3

### 2.2 집전슈우

제 3궤조 집전방식에서의 집전슈우는 알루미늄-스테인레스강 복합 도전레일과 접촉하여 전원을 차량으로 인입시키는 접촉부이다. 이러한 접촉부분은 충분한 집전 용량과 높은 도전율을 가져야하

며 접촉저항과 아크에 의한 마모가 작아야 한다. 기계적으로는 쉽게 파손되거나 마모되지 않아야 하고 접촉력이 양호해야 한다. 또한 환경에 유해한 공해 물질을 발생시키지 않아야 한다. 집전슈우의 집전성능은 열차의 속도설정에 매우 중요한 파라미터이다<sup>(2)</sup>. 현재 도시철도 차량에 주로 사용되는 철계소결합금, 동계소결합금과 선진국에서 새로이 개발되어 적용되고 있는 카본계 집전슈우에 대한 비저항 및 집전 용량 실험을 수행하였다.

### 2.2.1 집전슈우의 비저항 실험

시험편을 10mm×10mm×60mm로 제작하여 양단면에 1A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도로 전류를 공급하면서 시험편 중앙부에 간격이 20mm가 되도록 길이방향으로 2점을 취하여 전압계로 측정하였다.<sup>(3)</sup>

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{L} \times 10^4 \quad (1)$$

- ρ : 저항률(Ω · m)
- S : 통전 단면적 (m<sup>2</sup>)
- L : 전압 측정점간 거리 (m)

### 2.2.2 집전 슈우의 집전용량 실험

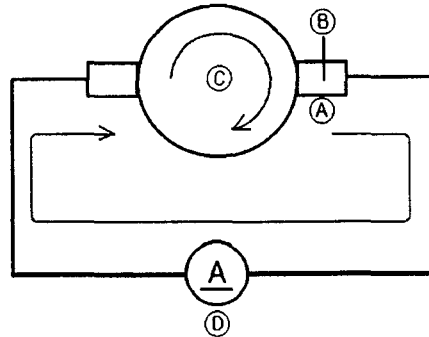
집전슈우의 집전용량은 접촉부위의 열에 의해 지배된다. 90℃일 때의 전류용량을 허용 전류밀도라 하고, 120℃일 때의 전류밀도를 최고 허용 전류밀도라고 정의하였다<sup>(4)</sup>. 온도에 영향을 주는 요소는 집전슈우와 가선의 접촉력 및 접촉 단면적, 집전슈우 소재의 비저항과 접촉저항에 따라 변화하므로 본 실험의 결과는 집전슈우의 크기 결정에 대한 기본자료로 활용 가능할 것이다.

#### 1) 실험장치 구성

그림1, 2와 같이 스테인레스강으로 제작된 링을 회전시키면서 온도 센서가 부착된 집전슈우를 스테인레스 링에 접촉하도록 하였다. 전류는 0~200A까지 가변되는 전류 조정기를 이용하여 집전 슈우 부분에 전류를 인가하였다. 온도측정은 10A씩 증가시키면서 센싱된 온도가 포화되는 지점을 레코더를 이용하여 기록하였다.

#### 2) 실험방법

스테인레스 회전 링을 고정시킨 상태에서 전류를 증가시키면서 전류 변화에 대한 온도를 측정하였다. 다음으로 스테인레스 회전 링을 70km/h로 회전시키면서 전류에 따른 온도 그래프를 작성하여 기계적 접촉력에 따른 차이점을 확인하였다.



(A) : Collector Shoe      (B) : Temperature sensor  
 (C) : Stainless steel ring(70km/h)    (D) : Ampere Meter

그림 1. 집전슈우 집전용량 실험기 구성도

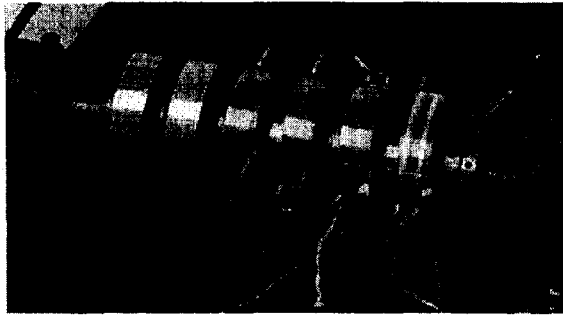


그림 2. 집전슈우 집전용량 실험장치

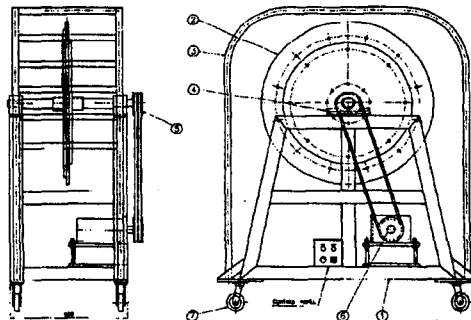
### 2.2.3 집전슈우의 마모량 실험

마모실험은 허용전류밀도의 전류를 공급하면서 500시간 동안 70km/h로 회전시켜 마모량을 측정하였다. 초기 시험편의 무게는 550g이고 500시간 마모시험 후 무게를 측정하여 시간당 마모량으로 환산하였다.

## 2.3 집전성능 실험

### 2.3.1 실험장치

그림 3과 같이 제작한 회전 디스크 형식 집전 성능 실험기는 집전기가 차량에 실제로 설치되어 사용되는 것과 같은 효과를 얻기 위해 원형의 강체 가선을 지름 1.2m의 회전 디스크에 설치하였다. 회전 디스크는 구동모터와 벨트전동장치를 통해 회전되기 때문에 가선은 제 3계조 집전슈우와 미끄럼 접촉을 하게 된다. 실험기는 경량전철의 최고속도인 80km/h까지 작동된다(이때 디스크는 425rpm으로 회전한다). 회전 디스크에 설치되는 가선은 스테인리스강과 연강(Mild Steel) 2종류가 실험대상이 되며, 회전디스크가 알루미늄이므로 2개의 다른 재질이 접합되는 경량전철용 가선에 상당하게 된다. 또한 집전슈우는 동계소결합금, 철계소결합금, 금속함침카본(Metalized Carbon) 3종류가 실험대상이 되어 각각의 성능이 비교된다(표3, 4 참조).



- ① 플레이트    ②·도전레일용 Wheel
- ③ 안전용 덮개    ④ 축지지 클램프
- ⑤ 회전축    ⑥ 모터    ⑦ 롤러

그림 3. 제3계조 집전기 성능시험기 구조

표 3. 시험기에 적용된 제3제조용 집전슈우

Collector capacity	750 VDC, 900A
Maximum speed	80km/h
Standard contact force	5~9kgf
Current slider	- 동계소결합금 - 철계소결합금 - 금속합침카본

표 4. 시험기에 적용된 가선조건

Trolley wire	- 스테인리스강 - 연강(Mild Steel)
Rotary Disc	- 내식성 알루미늄
Conduct wire diameter	- 1,000mm

### 2.3.2 실험 항목 및 방법

2개 종류의 가선과 3개 종류의 집전슈우가 시험대상이며, 집전슈우와 가선사이의 접촉력을 5~9kgf로 변화시킨다. 또한 회전 디스크의 회전속도를 변화시키면서 다음과 같은 항목을 측정한다.

#### 1) 소음레벨 측정

소음레벨은 모터와 벨트전동장치 등의 외부소음을 차단하기 위해 집전슈우와 가선의 접촉면 주변에 방음장치를 설치한 후 microphone으로 측정된다. 또한 출력되는 waveform은 주파수 분석을 수행하는 데이터 레코더에 기록되며 주파수 분석기는 1/3 octave band pressure level filter이다.

2개 종류의 가선과 3개 종류의 집전슈우로 구성되는 6가지의 실험조건에 대해 속도를 단계별로 변화시키면서 집전슈우와 가선의 접촉으로 인해 발생하는 소음을 측정한다. 특히 경량전철의 일반적인 최고속도인 60~80km/h에서의 소음은 소음에 대한 집전슈우 및 가선 재질의 성능 지표로 활용 가능할 것이다.

#### 2) 이선율 측정

이선율은 실험기에 설치된 측정장치에 의해 측정되며 기록은 전자기 oscillograph로 이루어진다. 이선율은 (접촉이 중단되는 총시간 ÷ 측정시간 × 100(%))으로 정의되며, 크기에 따라 다음과 같이 3가지로 분류된다<sup>(6)</sup>.

(a) Small interruption : 접촉 중단시간 0.01초 미만. 차량의 운전 에 거의 영향을 주지 않는다.

(b) Medium interruption : 접촉 중단이 0.01~0.1초. 지엽적인 가선마모 유발 가능성 존재

(c) Large interruption : 중단이 0.1초 이상. 집전에 대한 심각한 문제 발생

급전이 이루어질 때의 집전슈우 마모는 급전이 없을 때의 마모보다 매우 크게 나타난다. 이는 접촉 중단에 의한 arc discharge에 의한 전기적 마모가 집전슈우의 수명을 단축시키는 중요한 인자임을 의미한다. 따라서 6가지의 경우에 대해 속도별, 접촉력별로 이선율을 측정하여 최소 이선율 조건을 산출한다.

#### 3) 집전슈우 마모측정

가선과 집전슈우에 규정된 전압과 전류를 공급하면서 60km/h 속도로 30km를 주행할 때의 접촉력의 변화에 대한 마모중량 손실을 측정(1mg 정확도)하여 마모량(두께 mm)으로 환산한다. 단 집전슈우와 가선사이의 미끄럼 면은 dry condition과 wet condition을 적용하여 서로 비교한다.

#### 4) 접촉저항

집전슈우와 접지 사이에 전압계와 전류계를 설치하고 접촉력과 속도에 따른 전압과 전류를 측정하여 오옴의 법칙에 의해 접촉저항을 측정한다. 접촉력과 속도에 따른 접촉저항을 측정하여 전

력 손실을 최소화하면서 급전할 수 있는 최적의 접촉력을 산출한다.

### 3. 실험결과 분석

표 4는 집전슈우의 재질별 비저항 실험의 결과를 나타낸 것이다.

표 4. 비저항 측정

집전슈우 재질	비저항 ( $\Omega \cdot m$ )
철계소결 합금	$0.24 \times 10^{-6}$
동계소결 합금	$0.13 \times 10^{-6}$
금속합침 카본	$9.50 \times 10^{-6}$

그림 4는 스테인레스 링을 정지시킨 상태에서 전류를 증가시키면서 집전슈우의 온도를 측정 한 결과이다. 온도를 증가시키는 요인은 소재의 비저항과 접촉에 의한 접촉저항이고 동계 소결합금, 철계소결합금, 금속합침카본 순으로 많은 전류를 흘릴 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 스테인레스 링을 70km/h로 회전시키면서 전류의 증가에 대한 집전슈우의 온도변화를 측정 한 결과이다. 집전용량은 스테인레스 링의 회전에 의한 열의 분산으로 인하여 2A/mm<sup>2</sup>의 전류 만큼 집전 용량이 증가함을 알 수 있고 각 소재에 따른 집전용량은 표 6에서 비교하였다.

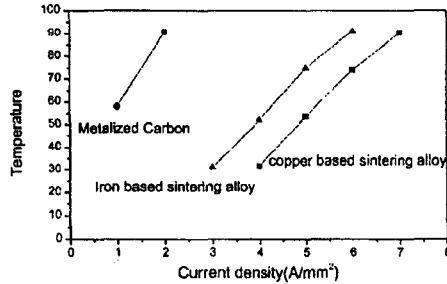


그림 4. 스테인레스 링 정지시 집전 전류밀도에 따른 집전 슈우의 온도변화

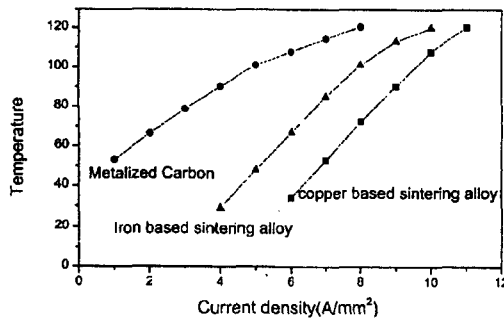


그림 5. 스테인레스 링 회전시 집전 전류밀도에 따른 집전슈우의 온도변화

표 5. 집전슈우의 허용전류밀도

구 분	허용전류밀도 (A/mm <sup>2</sup> )	최고허용전류 밀도(A/mm <sup>2</sup> )
동계 소결합금	9	11
철계 소결합금	8	10
금속합침카본	4	8

표 6은 집전슈우의 재질별 마모실험의 결과를 나타낸 것이다. 카본금속합침 집전슈우가 철계나 동계 소결합금보다 마모성능이 우수하다.

표 6. 집전슈우의 마모량 시험

집전 shoe 재질	마모량(g/hr)
철계소결합금	0.31
동계소결합금	0.28
금속카본합침	0.21

#### 4. 결 론

본 논문에서는 제 3궤조 집전 시스템의 주요 구성요소인 도전레일과 집전슈우의 특성 실험을 수행하였고, 집전기 개발에 요구되는 설계파라메타를 위한 실험항목 및 방법을 제안하였다. 경량전철에 적용되는 제 3궤조 가선 및 집전기 설계를 위한 파라메타로는 집전슈우와 강체가선 사이의 소음, 이선율, 마모량, 접촉저항(도전율) 등이다.

본 연구의 후속연구로서는 상기한 설계 파라메타에 대한 가선 및 집전슈우의 재질별, 속도별, 접촉 조건별(dry condition, wet condition), 접촉력에 따라 실험을 수행할 계획이며, 이러한 실험결과를 토대로 집전슈우와 가선의 재질 및 최적 접촉력을 결정할 예정이다. 이것은 경량전철에 적용되는 제 3궤조 집전 및 가선시스템 설계의 기초자료로 활용 가능할 것이다.

#### 참고문헌

1. 1997 년도 경전철표준화 연구보고서(한국철도기술연구원)
2. General Specification for an Under-Running Third Rail System (Brecknell, Wills & Co.)
3. JIS E 6301-1991 판토히라프용 집전슈우 해설
4. M.Antler, Sliding Wear of Metallic Contacts, IEEE Trans., CHMT, 4(1), 15-29, 1981
5. Kasai, S., Suwa, M., Watanabe, J., "Development of New Type Pantograph for Rigid Contact Wires", JSME, Vol.23, No.180, pp.977-982, 1980.