

슬라이딩 접촉에 의한 집전시스템의 성능향상의 연구

정락교*°, 김연수° 윤용기° 박성혁° 정상기° 이병송° 목진용° 최성규°
 °한국철도기술연구원 경량전철연구팀

A study on the performance increasing of current collecting system with a sliding contact

R.G. Jeong Y.S. Kim Y.Ki. Yoon S.H. Park S.G. Chung B.S. Lee J.Y. Mok S.K. Choi
 Light Rail System Research Lab, Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, the wearing characteristics of current collecting shoes, interruption phenomena and contact resistances between collecting shoes and conductor rails are established as design parameters for development of the third rail current collector. An experimental analysis for established design parameters is performed as the materials of current collector shoe, contact force, sliding velocity and contact condition(dry/wet condition) between current collectors shoe and conductor rails. As a result of this study, the magnitude of contact force is in proportion to the amount of wear in the collecting shoe, but is in inverse proportion to the interruption and contact resistance between the collecting shoe and the conductor rail. And optimal values of design parameters are presented through analyzing the experimental results of the amount of wear, interruption and contact resistance.

호르게 되면 접촉부 부근의 영역에 전류가 집중(constriction)하게 된다. 또한 접촉부 표면은 일반적으로 불순물이 존재하므로 이러한 불순물에 의한 피막저항(film resistance) 및 수축저항(constriction resistance)에 의해 접촉부에 발열을 야기 시키므로 접촉물체들의 온도를 상승시켜 접촉부의 각종 기계적, 전기적 성질을 변화시킨다.[2] 또한 비저항이 온도의 영향으로 물체 내부에서 균일하지 않을 경우에는 해석적으로 접촉부의 전류분포를 구하는 것이 곤란하며, 접촉력분포와 표면거칠기를 고려하여 전류분포와 접촉저항을 예측하는 것은 수치적인 해석이 어려운 실정이다.[7]

제3궤조 집전시스템의 집전이 이루어지는 경우 이선현상, 집전시작 및 집전차단의 동작특성으로 표현할 수 있고, 제3궤조 가선과 집전슈우의 접촉, 분리 동작에 따른 전기적 특성을 고찰하기 위하여 접촉부위 양단에 부착된 센서를 이용하여 전류 및 전압의 과도현상을 측정함으로써 관찰할 수 있다. 이런 내용을 도시한 것이 그림 1.과 같으며, 슬라이딩 접촉부위의 전류-아크 전압 특성을 나타낸다.

1. 서론

제3궤조 집전시스템의 집전슈우와 가선의 동작측면에서 가선과 집전슈우 사이의 접촉력을 크게하면 이선(interruption)현상이 감소하여 아크에 의한 주변기기 손상과 집전슈우의 전기적 마모를 감소시킬 수 있으나, 집전슈우와 가선의 마찰력 증가로 집전슈우의 수명을 단축시킨다.[3] 반면 접촉력을 감소시키면 집전슈우의 수명은 연장시킬 수 있으나, 이선현상이 증가하게 되어 집전성능이 저하되는 결과를 초래한다.[1]

집전슈우로 사용되고 있는 동계소결합금은 환경적 측면과 경제적인 측면에서 국내의 전동차에 사용범위가 확대되고 있다[5] 윤향특성과 마모특성, 전기적 특성이 우수한 금속합금카본이 선진국 경량전철에 널리 사용되고 있으나, 국내에서는 이에 대한 제조기술 등 관련기술과 물성치 등이 알려져서 바가 미비하여 집전시스템의 개발에 장애요소가 되고 있다.[4]

본 연구의 내용은 제3궤조 집전시스템 개발을 위한 설계 파라미터로서 집전슈우의 마모특성, 가선과 집전슈우의 이선현상 및 접촉저항을 설정하였다. 집전슈우의 마모량은 비급전시의 전기적 마모량과 급전시의 전기적 마모량으로 분류하여 분석하였으며, 눈, 비 등의 환경적인 요인에 대한 특성을 분석하기 위해 접촉면을 건조조건과 습한조건으로 설정하였다. 또한 가선과 집전슈우 사이의 접촉력과 집전슈우의 마모량과의 특성을 파악하기 위해 접촉력을 단계적으로 변화시켜 집전슈우의 마모량을 측정하였다.

제2장 슬라이딩 접촉이론 및 등가회로

기계적으로 접촉하고 있는 두 물체 사이에 전류가

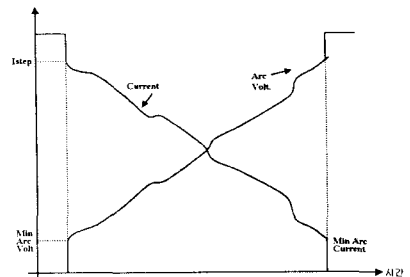


그림 1. 집전시스템 접촉부의 아크
 그림 1.에서 제3궤조 집전시스템의 슬라이딩 접촉부를 분리할 때 전체적인 등가회로는 접촉저항을 포함한 임피던스 회로이므로 전류의 크기는 키르히호프의 전압 법칙에 따라 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$I_{step} = (V_{source} - V_{min-arc Voltage}) / Z \quad (1)$$

제3장 집전성능에 미치는 파라미터

3.1 이선 및 이선율

이선이란 차량의 주행으로 발생하는 변위로 인해 집전슈우와 가선의 접촉이 중단되는 현상을 의미하며 이선율을 정의하면 다음 식과 같다.

$$\text{이선율} = \text{접촉이 중단되는 총시간} \div \text{측정시간} \times 100[\%]$$

3.2 집전슈우 및 가선 재질

3.2.1 집전슈우의 재질 및 특성

철계소결합금은 전도율, 마모 등 성능은 우수하지만

납(약 20~30%) 성분이 많이 포함되어 환경적인 원인으로 인해 다른 재질로 대체가 요구되고 있다.

동계소결합금은 주 성분인 구리와 티타늄, 인, 납 등을 혼합하여 소결합금으로 제작한다.

금속합침카본은 최근 개발되어 사용하고 있는 집전슈우 재질이며, 흑연을 사용하여 윤활성능을 향상시킨 특징을 가지고 있다.[8]

3.2.2 가선(급전선)의 재질

제3계조 급전시스템의 가선은 알루미늄(바다)/스테인레스강(접촉부) 복합체로 제작되기 때문에 알루미늄과 스테인레스강 사이의 전기저항을 최소화해야 한다.

구 분	접촉부	몸체	어셈블리
도전을 (%IACS)	2.35	51.4	51.2
비저항 ($\mu\Omega\text{cm}$)	73.5	3.3	3.37

표 1. 가선재료의 전기적 특성

3.3 접촉저항

3.3.1 집전슈우의 재질별 접촉저항

표 2.는 집전슈우의 재질에 따른 접촉저항의 특성을 나타낸 것이다.

종 류	성 능 및 특 성
탄소	- 질이 가장 굳고 접촉저항이 가장 큼 - 전압이 대단히 높은 경우에 사용
흑연	- 가장 많이 사용되며 마찰저항이 중간
금속흑연	- 마찰저항이 가장 작음 - 저전압 대전류 기계에 사용

표 2. 집전슈우의 재질별 성능 및 특성
단 접촉저항은 접촉면의 상태, 접촉력, 전류밀도, 속도, 온도 등에 따라 달라질 수 있다.[6]

3.3.2 가선 접촉저항

가선전류는 알루미늄의 가선 몸체에서부터 가선접촉부 끝단의 스테인레스강으로 흐르므로 알루미늄과 스테인레스강 사이의 접촉이 이루어지는 압착단자의 접합기술은 가선의 특성에 중요한 영향을 미치며, 접합에 의한 압착단자의 접촉저항은 전류의 흐름에 따른 집전성능과 관련이 있으므로 압착단자의 특성에 따라 접촉저항 값이 너무 높으면 접촉부분에서 과열의 원인이 되며 아크 발생과 급속한 고장의 원인이 된다. 접촉저항의 경제값 이상에서의 전류는 과열을 야기 시키며 폭주(run away)효과를 발생한다.[5]

3.4 마모

집전슈우의 마모는 접촉력, 미끄럼 속도, 집전용량의 영향을 받으며, 금속합침카본 집전슈우의 경우 80%는 전기적 마모, 20%는 기계적 마모로 추정된다.

가선과 집전슈우 사이의 속도가 증가하면 마찰계수는 감소하며, 속도가 감소할수록 마찰계수는 증가한다. 기계적 마모는 속도에 비례하나 전기적 마모는 마찰속도에 반비례한다.(단 마찰면에 윤활 작용이 있는 경우는 예외이다.)

가선과 집전슈우 사이의 접촉력이 증가할수록 집전슈우의 마모량은 비례적으로 증가한다.

통전전류가 증가하면 가선과 접촉된 점에서 발생된 마찰열 및 아크에 의해 생성된 열에 의해 집전슈우 소재가 열화되어 마모가 증가하기 때문이다.

가선과 집전슈우 사이에 이선이 발생했을 때 아크의 발생에 의한 아크 열이 증가하여 마모량을 증가시킨다. 이러한 이선 현상은 접촉력을 작게 설정하면 증가되므로 적정한 접촉력 적용으로 이선 현상은 방지할 수 있다.[1][3]

제4장 실험장치 및 실험방법

회전디스크형식 집전 성능 실험장치는 집전 시스템이 차량에 실제로 설치되어 사용되는 것과 같은 효과를 얻기 위해 원형의 강체 가선을 지름 1.2m의 회전 디스크에 설치하였다.

집전슈우의 접촉력은 공기실린더의 압력을 제어하여 항상 설정압력으로 일정하게 제어되도록 제작되었다. 집전슈우는 동계/철계소결합금, 금속합침카본의 3종류가 있으며, 다양한 차량속도와 접촉력 조건에서 성능이 비교 분석된다.

집전슈우의 마모특성, 가선과 집전슈우 사이의 이선율, 가선과 집전슈우 사이의 접촉저항 등의 설계 파라미터가 접촉력의 크기, 주행속도, 가선과 집전슈우 접촉 조건(건조조건, 습한조건)등에 따라 어떠한 거동을 갖는지를 분석하기 위한 실험을 수행하였다.

알루미늄합금/스테인레스강 복합체 가선과 동계소결합금 및 철계소결합금, 금속합침카본의 집전슈우를 실험대상으로 하였으며, 집전슈우와 가선사이의 접촉력을 6~10kgf사이에서 단계적으로 변화시킨다. 또한 회전 디스크의 회전속도를 20~80km/h로 설정하여 실험을 수행한다. 마모시험의 경우, 가선과 집전슈우의 접촉 조건에는 건조 조건과 습, 비 등의 환경 조건을 고려하여 습한 조건을 적용하며, 급전 및 비급전 조건도 적용한다. 허부하 시험기의 최대용량이 1,000[VA]이므로, 통전 전류 450[A] 가선전압 2[V] 내외로 하여 실험을 수행하였다.

통전 전류용량 설정은 차량편성을 2량/1편성을 기준으로 하여 추진제어장치 130[kVA]×2대와 보조전원장치의 부하 용량 65[kVA]×2대의 합과 허용치 1.25를 고려하여 설정하였다.

제5장 실험결과 및 고찰

5.1 집전슈우의 마모량

그림 2.는 금속합침카본의 비급전시 환경조건(건조조건/습한조건)에 따르는 마모특성을 비교한 결과이다. 낮은 접촉력에서도 상당한 차이가 발생하지만 접촉력을 증가시키면 건조 조건에서의 마모량은 급속히 증가하게 된다. 습한 조건에서는 가선과 집전슈우에서의 수분이 수막을 형성하여 윤활작용을 하므로 상대적으로 마모량이 작게 나타나게 되지만, 접촉력을 증가시키면 수막이 파괴되어 마모량이 증가하게 된다.

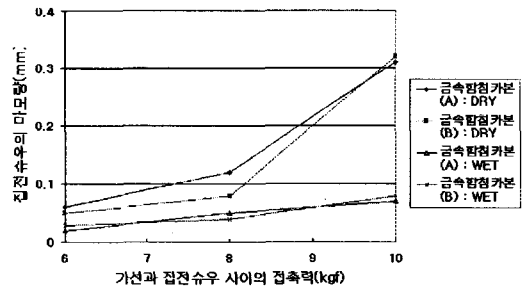


그림 2. 비급전시 집전슈우의 접촉력 변화에 따른 마모도

그림 3.은 금속합침카본의 급전시 환경조건(건조조건/습한조건)에 따르는 마모특성을 비교한 결과이다. 비급전 조건과 비교하면 마모량이 증가한 것으로 나타나는데 그 이유는 급전에 의한 아크발생으로 집전슈우의 마모가 촉진되었기 때문이다. 집전슈우는 급전조건에서 작동하므로 이러한 아크발생을 최소화하는 구조로 집전기를 설계해야만 집전슈우의 수명을 연장할 수 있을 것으로 분석된다.

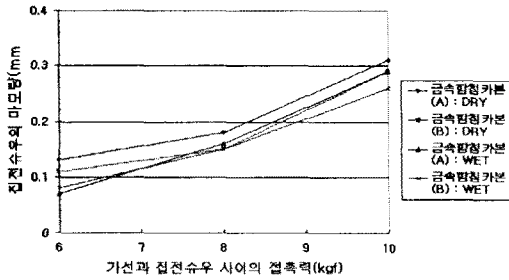


그림 3. 급전선 집전슈우의 접촉력 변화에 따른 마모도

5.2 이선 및 이선율

이선을 측정실험결과 가선과 집전슈우 사이의 접촉력을 증가시키면 이선율은 대체적으로 감소하는 경향을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이것은 접촉력에 의한 집전슈우의 마모량과 이선율은 상반되는 경향을 갖는다는 것을 의미한다. 따라서 집전시스템 설계시 과도한 접촉력은 집전슈우의 기계적 마모량을 증가시키므로 집전슈우의 수명을 단축시키고, 과도한 접촉력은 이선율을 증대시켜 아크에 의한 집전슈우의 전기적 마모량을 증가시키므로 적절한 접촉력을 설정해야 하며 형상에 따른 영향과 속도에 따른 영향이 크게 미치는 것을 알 수 있었다.

그림 4.에서는 전체적인 접촉력에 따른 이선율을 나타내며, 이 측정결과를 분석하면 금속합침카본의 경우 접촉력 6kgf, 속도 80km/h에서 25회에 걸쳐 2.236ms만큼 단 한번의 이선현상이 발생하고 이선율은 2.23%가 나타나는 것을 알 수 있으며, 동계소결합금은 접촉력 6kgf 및 속도 60km/h에서 13회에 걸쳐 4.004ms의 이선 현상이 발생하고 이선율은 2.0821%임을 볼 수 있으며, 나머지 8kgf, 10kgf 및 속도 60km/h, 80km/h에서도 연속해서 나타남을 볼 수 있다. 철계소결합금의 경우는 전 범위에서 나타남을 알 수 있었다. 이는 철계소결합금의 경우 시편이 다른 시편에 비해 둥근 형태 때문에 더욱 이선이 많음을 알 수 있다.

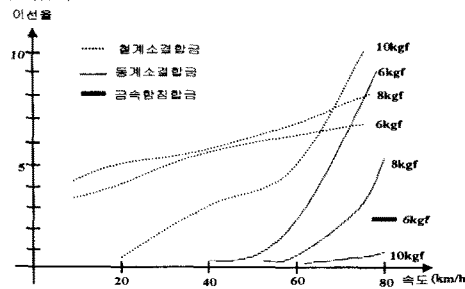


그림 4. 압상력에 대한 이선율

5.3 접촉저항

가선과 집전슈우 사이의 철계소결합금/동계소결합금/금속합침카본 접촉력 및 속도를 증가시키면 대체로 접촉저항이 감소되는 결과를 얻었으며, 전기 전도도 측면에서는 동계소결합금의 경우가 가장 좋으나 철계소결합금의 경우 형상이 둥근 형태이기 때문에 접촉저항이 작은 것으로 보인다. 이것은 이선율 측정 실험결과와 마찬가지로 접촉력에 따른 기계적 마모량과는 상반되는 경향을 나타내며, 철계소결합금/동계소결합금/금속합침카본합금 순서로 접촉저항이 작아짐을 알 수 있으며, 그림 5.는 압상력에 따른 접촉저항을 나타낸 것이다.

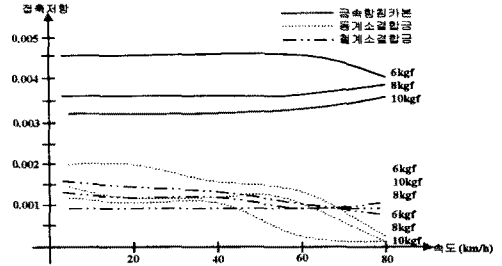


그림 5. 압상력에 대한 이선율

5.4 집전용량

회전원판을 70km/h의 속도로 300km를 회전시키고 가선전류를 변화시키면서 금속합침카본 집전슈우의 온도를 측정 한 결과 가선전류를 최대 900(A) 까지 주었을 때 집전슈우의 온도상승이 100℃가 넘지 않음을 확인할 수 있었다.

제 6장 결론

본 연구에서는 제3제조집전시스템의 기본설계에 필요한 기본 파라미터 도출과 그 특성에 대한 경향을 확인·분석하였다.

집전시스템의 집전용량은 차량의 전력 용량에 따른 계산결과와 가선전류 및 집전 슈우 크기의 여유율을 고려하여 집전시 온도특성을 실험을 통하여 100℃ 이하에서 포화됨을 확인하였다. 마모량은 접촉력의 증가에 따라 증가할 뿐만 아니라 급전선이 비 급전선에서도 보다 더 증가하는 특성과 이선 및 접촉저항은 감소함을 고찰하여 접촉력 및 전기적 특성에 따른 접촉력은 8kgf에서 집전시스템의 집전성능이 최대가 되는 결과를 도출하였다.

이러한 실험결과를 종합해 보면 집전기의 경우 도전체 일과 집전슈우의 마모특성 및 이선현상을 고려하는 설계가 이루어져야 할 것이며, 향후연구과제로는 기본설계의 종합적인 파라미터 및 기본설계 및 기계적인 차량가동해석에 따른 접촉력과 슈우의 소재개발을 수행하기 위한 기초연구가 수행되어야 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Shoji Kasai, Masateru Suwa, Watanabe "Development of New Type Pantograph for Rigid Contact Wires" Bulletin of the JSME, Vol. 23, No., pp.972~982, 1980.
- [2] Ragnar Holm, Else Holm "Electric Contacts Theory and Application" Fourth edition
- [3] 이규태, 오인택 "고속철도 차량시스템 엔지니어링" 고속철도건설공단 pp.31-1~34-8, 1996.
- [4] 寺岡利雄, 福原邦夫 "集電しゅう 動摩耗の研究(第1報)" 潤滑 第30巻 第12号 pp.878~882, 1985.
- [5] DM.Ingram, D.J. Hartland "Aluminum Stainless Steel Conductor Rail Developments for the Modern Railway" Annual Report of Bracknell Willis Co, pp.21~34, 1994.
- [6] 이복희, 백용현, 김철성, 하성철, 김정섭 "전기·전자재료공학" 보성문화사, pp.29~35, 1986.
- [7] 박수용, "전기접촉저항과 접촉부의 전류밀도분포에 대한 기계적 접촉조건에 영향을 관한 연구" 한국과학기술연구원 석사학위 논문 pp.3~15, 1987.
- [8] 일본공업규격(JIS) E6301 "Current Collect-shoe for Pantograph"