

지하철 터널 구간 강체가선 방식의 특성분석

Analysis of Overhead Rigid Conductor Line for the Subway tunnel section

임금광¹
Yim, Geum-Kwang

창상훈²
Chang, Sang-Hoon

김왕곤³
Kim, Wang-Gon

Abstract

Railroad, a superior mode of public transportation provides safe, efficient, speedy, comfortable and economical service, has fundamentally different characteristics from airplanes, ships and cars. Among the unique characteristics of a railroad is the fact that it operates on fixed track with multiple car trains.

The subway system was first selected as the best solution to difficult automobile traffic conditions and environmental problems. Seoul subway no.1line (Jongno line) was opened for service on August 15, 1974.

Seoul city has completed and now operates eight subway lines (286.7km) since 1974. At present the subways operate in Busan, Daegu and Incheon city, and are under construction in Gwangju and Daejeon city. The power source for subway trains has been electricity since 1896, and power supply systems are the third rail type and/or the catenary system. The typical catenary system is the rigid bar type. R-bar and T-bar are used in the rigid bar type of catenary system, and the two types of R-bar and T-bar are used in Korea also. R-bar is used only for AC 25kV power supply and T-bar for DC 1,500V. From 30 years of subway experience I would like to suggest the most economic catenary system to ensure of safety, reliability and expediency for the railway lines to be constructed and the forthcoming replacement due to the life cycle after studying and analysing the characteristics, advantages and disadvantages of R-bar and T-bar.

1. 서론

철도는 대중 교통수단으로서 안전, 정확, 신속, 쾌적하면서도 보다 싸게 서비스를 제공하는 우월한 교통수단으로서 항공기, 선박, 자동차와는 근본적으로 다른 특성이 있다. 그 중에는 정해진 선로 위에서만 주행할 수 있다는 점과 여러대의 차량을 길게 편성하여 운용할 수 있다는 것은 철도만의 특성이다. 따라서 오늘날 대도시 교통난과 환경문제 해소를 위한 대책중 상책으로 “지하철”을 첫째로 선택하고 있다. 1974년 8월 15일 수도권 전철 개통시 서울 지하철 1호선(종로선)도 동시에 개통되었다. 그로부터 30년이 지난 지금 서울시는 8호선까지 286.7km가 완공되어, 영업중이고, 부산, 대구, 인천에서도 운행중이며, 광주와 대전에서는 건설 중이다. 지하철 차량의 동력원은 1896년부터 전기이고, 전기를 공급하는 시스템은 제3궤조방식과 가공전차선 방식이다. 최신 전차선 가선시스템 중 대표적인 것은 강체가선 방식이다. 강체가선방식에는 R-Bar와 T-Bar가 대표적으로 사용되고 있으며, 국내에도 이 두 가지 방식이 채택되고 있으나, R-Bar는 국철 교류 25kV 급전방식에만 사용되고 있고,

*1. 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 학생회원, 인천국제공항철도(주) 기전본부장, gkyim@irex.or.kr

*2. 한국철도기술연구원, 국책연구센터장, 공학박사, 정회원, 031-460-5108, shchang@krri.re.kr

*3. 서울산업대학교 교수 공학박사, 02-970-6407 wang@snut.ac.kr

T-Bar는 직류 1,500V 급전방식에만 사용되고 있다. 지하철 30년의 역사를 갖고 있는 지금 R-Bar와 T-Bar의 장단점과 특성을 연구분석하여 앞으로 건설하는 노선과 Life Cycle(유효수명)이 도래되어 교체할 때 안전성, 신뢰성, 편리성이 확보되고 가장 경제적인 가선시스템을 제시하고자 한다.

2. 강체가선방식의 일반적 특징

강체가선방식은 전차선과 일체로 되어 있기 때문에 단선의 염려가 적은 점, hanger나 connector, 진동방지금구 등이 불요하며 설비의 부속품이 적은 점, 주행중 가선진동이 없는 등의 이유로 보수 및 보안상 매우 유리하다. 그러나 강체가선의 탄성이 작기 때문에 종래의 형상으로는 고속 주행에 적합하지 않다. 그림1, 2에 우리나라에서 사용되고 있는 T형 알루미늄 강체가선방식(T-bar)과 R형 알루미늄 강체가선방식(R-bar)을 나타내었다. 지하철의 경우는 강체가선의 결점을 해소하기 위해 주행하는 팬터그래프를 강체가선 구간용으로 개량해서 집전특성을 향상시키거나 1편성에 복수의 팬터그래프를 갖고, 고압 모선에서 전기적으로 접속시켜 이선 시의 arc 발생량을 저감하는 등의 대책을 시행하고 있다.

또한 강제전차선의 현재 주행속도는 통상 90km/h이하로 제한하고 있는데 앞으로는 지하구간의 쾌속화가 계획되고 있어 강제전차선의 속도향상의 필요성이 높아지고 있다. 이러한 요구에 대응하기 위해 고속화에 관한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다.

본 절에서는 가공전차선방식과의 특징을 비교분석 하였다.

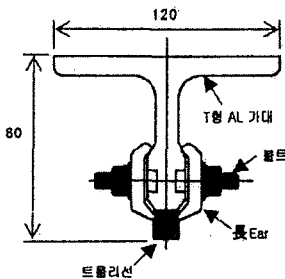


그림1 T형 알루미늄 강체가선(T-bar)

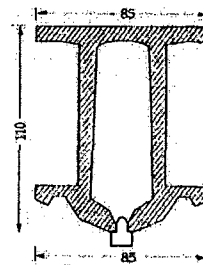


그림2 R형 알루미늄 강체가선(R-bar)

2.1 커티너리 방식과 강체방식의 중요한 특징비교

커티너리식에서는 전차선이 추종하기 쉽기 때문에 팬터그래프가 다소 동요하여도 이선이 발생되지 않는 개소가 있는 반면 전차선, 조가선에 장력을 가하기 때문에 전차선 등이 마모되어 장력부담으로 단선되기 쉬운 개소가 있다.

반면 강체방식은 커티너리 방식과 같은 장력에 의한 단선이 없고, 파동전파속도에 의한 열차속도의 제한이 없는 개소도 있지만 설치장소의 제한을 받거나 이선을 줄이기 위해 습동면의 요철관리가 필요한 개소가 있다.

강체가선은 장력장치가 없어 전차선의 움직임이 거의 없기 때문에 습동면의 요철이 발생하게 되면 이선에 미치는 영향이 크며, end approach 구분개소에서의 집전성능에 한계가 있다.

2.2 강체가선방식의 장점분석

2.2.1 단선방지를 위한 마모관리 저감기술

커티너리 전차선에서는 전차선의 단선사고가 발생하면 전차선을 원상 복구하여 열차를 소통시키기까지 많은 시간이 소요된다. 이 방식에서는 전차선이 단선되지 않도록 전기검측차 등에 의한 마모관리가 이루어지고 있다. 그러나 강제전차선은 장력장치가 없기 때문에 단선방지를 위한 마모관리는 불필요하다.

2.2.2 전차선 교체주기의 연장

전차선의 단선방지를 위해 전차선이 마모 한도이상 마모되면 교체하여야 한다. 이 교체주기는 전차선의 재질, 굵기, 통과팬터그래프 수, 습동판 재질 등에 의해 결정된다. 이것에 비해 강제방식에서는 기본적으로는 전차선의 단면적을 자유롭게 선택할 수 있으며, 커티너리식보다 마모한도를 크게 줄일 수 있어 교체주기를 대폭적으로 길게 가져갈 수 있다.

2.2.3 외란 등에 의한 전차선의 구조변화에 대한 보수관리의 저감

전차선은 자연환경 중에 설비되어 있기 때문에 커티너리 방식에서는 온도변화와 풍압에 의해 전차선이 이동하여도 팬터그래프가 전차선에서 떨어지게 되어 사고를 일으키지 못하도록 보수에 중점을 두고 있다. 또 전차선의 장력변화와 전차선의 마모에 대해서도 같은 방법으로 보수하고 있다. 특히 전차선의 분기개소에서 팬터그래프가 할입되지 않도록 본선과 측선의 전차선의 간격, 높이가 적정하게 되도록 유지하여야 한다. 이것에 비해 강제방식은 온도변화에 의한 신축이외에는 변화가 없으므로 가공방식보다 보수가 상대적으로 적은 특징을 가지고 있다.

3. 집전성능의 평가기준과 영향을 미치는 요인

3.1 평가기준

강제전차선에서는 커티너리 전차선과 달리 압상량과 응력을 기준으로 삼지 않고 주로 이선에 의해 성능의 평가가 가능하다. 직류구간에서의 목표치는 이선율이 습동판 등의 마모에 대한 영향을 고려해서 5%정도, 이선계속시간이 보조전원장치의 성능을 고려하여 20ms정도로 고려되고 있다.

3.2 고유진동수

지지점 중앙에 있는 자유진동에 의해 각각의 지지점 간격에서 고유진동수를 계산한다. 지지점 간격이 길어짐에 따라 고유진동수가 낮아지게 된다. 참고로 지지점 간격 5m에서의 고유진동수는 약 9.8Hz가 된다.

또 강체가선을 梁(보)로 고려한 경우의 횡진동 주파수 f_1 은 다음 식으로 표현된다.

$$f_1 = \frac{v^2}{2\pi l^2} \frac{\sqrt{EI}}{\rho}$$

여기서, v , l , EI , ρ 는 각각 진동모드에 의해 결정되는 정수, 지지점 간격, 굴곡강성, 단위길이당 질량이다. 진동모드는 1차 모드로 한다.

3.3 강제전차선의 습동면 요철(凹凸) 및 팬터그래프 특성

강제방식은 무장력이고 집전장치의 압상력에 의해 변위가 거의 없는 방식으로 커티너

리방식과 상이하어 전차선의 변위와 응력이 없으므로 집전성능의 평가는 주로 이선으로 평가한다. 이 강제방식의 이선은 주로 습동면의 요철 및 집전장치의 특성에 좌우된다. 강제방식의 습동면 요철이 이선에 미치는 영향을 정밀하게 평가하기 위해서는 습동면 요철을 불규칙과정으로 취급할 필요가 있지만 여기서는 설명을 간단하게 하기 위해 습동면 요철을 정현파형태의 요철, 집전장치를 질점으로 본다.

그림3에 질점이 정현파 형태의 요철을 접촉해 나가면서 주행할 때의 모델을 나타내고 있다. 주행속도가 높게 되면 질점의 관성력이 크게 된다. 관성력이 압상력P 보다 크게 되면 질점이 요철에서 떨어지게 되는데 이 이선이 시작되는 속도를 이선개시속도 V_R 이라 한다.

이선개시속도가 높을 때 강제방식의 집전성능이 양호하게 된다. 이선개시속도를 지배하는 것은 습동면 요철의 파장, 진폭, 집전장치의 압상력, 질량 등이다.

이선개시속도를 높이기 위해서는 요철의 진폭을 작게하여 집전장치의 압상력을 크게 할 필요가 있다. 특히 요철의 파장은 긴 쪽이, 집전장치의 질량은 작은 쪽이 이선개시속도는 높게 된다.

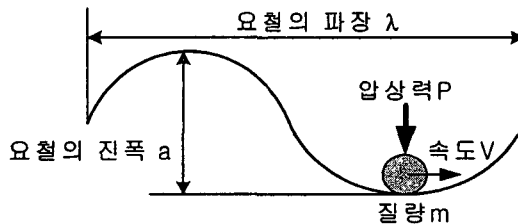


그림3 요철을 접촉하며 주행하는 질점

강제방식은 커티너리 방식과 달리 팬터그래프의 진동에 추종하는 특성이 없기 때문에 팬터그래프의 특성이 집전성능에 미치는 영향이 크고 지지점 간격에 기인하는 요철에 추종하기 쉬운 특성을 얻는 것이 특히 중요하다. 습동면 요철의 파장(지지점 간격)을 λ (m), 열차속도를 V (km/h)라 하면 팬터그래프의 상하진동주파수 f (Hz)는 다음 식으로 표현된다.

$$f = \frac{V}{3.6\lambda}$$

예를들면 지지점 간격을 5m로 한 경우는 5Hz가 90km/h에 상당한다.

또 강제전차선에서는 전차선의 압상량을 고려할 필요가 없기 때문에 이선을 억제하기 위해서는 팬터의 정적압상력 및 양력을 크게하는 것이 유효하다. 그러나 커티너리 가선구간도 주행하는 경우에는 이 압상특성을 고려하여 이러한 것을 결정할 필요가 있다.

4. R-Bar와 T-Bar의 비교

4.1. R-Bar와 T-Bar의 탄생

(1) R-Bar

R-Bar는 Conductor Rail, Conductor Bar, Rigid Bar 또는 Rigid Catenary로 불리운다 약해서 R-Bar로 국내에서 작명하였다.

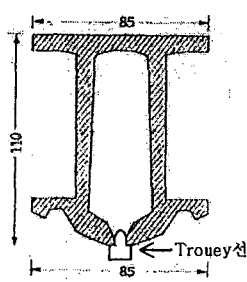
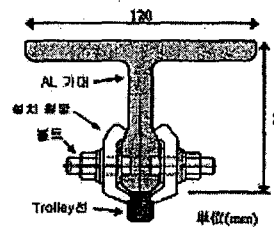
1983년 프랑스의 Railtech International사에서 개발한 것을 RATP-REP 철도회사

에서 Nanterre 시험선구 400m에서 DC, 1,500V방식으로 성공하였고, 스위스의 Furrer + Frey사는 1984년 Zurich~Opfikon간 300m 시험선구에서 AC, 15kV방식으로 성공하여 유럽지하철을 중심으로 확산되었다. 국내에서는 1990년 9월 과천선 및 분당선 지하구간 DC, 1,500V용 터널단면에 AC, 25kV 복선 전철에 맞게 개량 채택하여 세계 최초로 성공리에 사용하고 있다.

(2) T-Bar

일본에서 개발된 T-Bar는 昭和 36년(1961년) 3월 帝都高速度交通營団[Teito Rapid Transit Authority : 營団 (에이단) 또는 帝都(테이토)라 부른다.] “히비고꾸센(日比谷線)” 의 개업시부터 채용되었고, 그후 지하철뿐만 아니라 협소한 터널에도 사용되었다. 우리나라에는 1971년 4월 12일 착공하여 1974년 8월 15일 개통한 서울지하철 1호선에 채택된 후 DC, 1,500V 지하철에 계속 사용되고 있다.

4.2. R-Bar와 T-Bar의 특성비교

구분		R-Bar	T-Bar	비고
형태	형상			
	구조	간단	복잡	
	단면적	2,214[mm ²]	2,642[mm ²] (본체+이어=2100+542)	
	단위중량	5.8[kg/m]	5.6[kg/m]	
	허용응력	16[kg · f/mm ²]	11[kg · f/mm ²]	
설치	유지보수, 시공	쉬움	어려움	
	전차선 지지방식	R-Bar에 직접 지지	롱이어 부착지지	
	전차선 가선방법	자동가선 (1일 15[km] 이상)	수동가선(1일 5[km])	
	강체 지지간격	10[m]	5[m]	
	강체연결	12[m]마다 특수판 연결	10[m]마다 아르곤 용접	
	1section 길이	400[m](최대 500[m])	200[m](최대 250[m])	1구간
	곡선로 강체 구부리기	R=120[m]까지 자동굴곡	특수 공구 사용 굴곡	
	평행개소 (Air Joint)설치	자동신축장치 설치 (Expansion Element)	평행개소장치 설치 (Expansion Joint)	
기타	허용속도	160[km/h]	80[km/h]	
	국내 적용	교류구간 → 과천선	직류구간 → 서울 지하철등	
	향후 전망	특성이 좋으므로 널리 사용을 적극 검토		

4.3. R-Bar와 T-Bar의 경제성 비교

R-Bar와 T-Bar의 1km 건설비와 전차선 교체 비용을 같은 조건(DC, 1,500V 지하철 구간)에서 비교한 결과는 다음 표와 같다.

[표5-1] 건설비와 교체비 비교

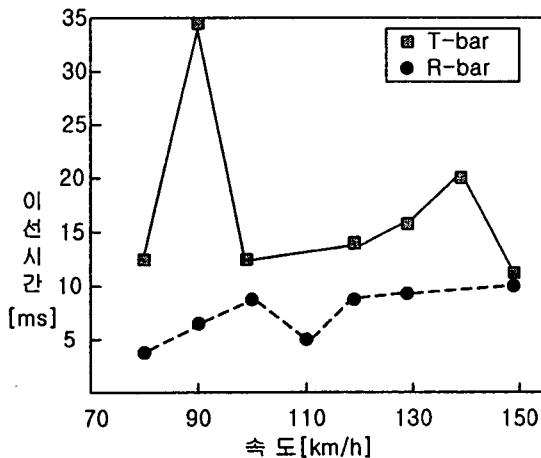
(금액단위 : 천원)

구분	R-Bar(A)	T-Bar(B)	증감(A-B)	비율(%) (A / B)
건설비	150,148	190,469	△40,321	78.83
전차선 교체비	642	3,423	△2,781	18.75

- ※주. 1. R-Bar는 스위스 또는 프랑스에서 수입품 기준가격(m당 49,816원)이고, T-Bar는 국산 기준가격(m당 28,800원)으로 약 173% 고가임.
 2. R-Bar가 국산화되면 건설비 단가는 R-Bar가 더욱 유리해질 것임.
 3. 전차선 교체비(인건비 기준)는 R-Bar가 더욱 유리해질 것임.
 4. T-Bar 전차선 교체 작업시 1조의 작업량이 1일 평균 60m(1,560m/26일)로 1section(200m)을 3~4회 나누어 작업해야 하므로 전차선로 품질 및 기능 유지에 문제가 있음.
 5. R-Bar의 경우 1조 작업량이 R-Bar 1section(400~500m)의 전차선을 여유 있게 교체할 수 있어 전차선로 품질 및 기능 확보에 아무 문제점이 없음.

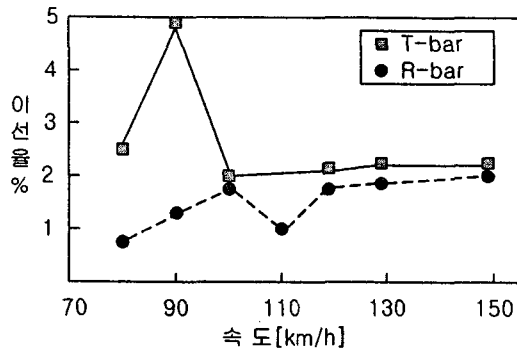
4.4 집전성능 시험결과

4.4.1 팬터그래프 추종성능



R바 이선시간 수정이 필요함(협소터널 자료)

4.4.2 이선율



4.4. 결론

국내 지하철의 터널구간 전차선 가선방식은 부산지하철(합성 콤파운드 커티너리 방식)을 제외하고는 DC, 1,500V구간은 T-Bar방식, 교류 25kV 구간은 R-Bar방식을 채택하고 있으나, 유럽의 경우는 대부분 교류, 직류 구분없이 R-Bar를 사용하고 있다.

R-Bar는 T-Bar에 비하여 가선특성, 속도특성이 우수할 뿐만 아니라 건설비 및 보수비 측면에서 매우 경제적이다. 특히 전차선 교체에서 T-Bar는 1section을 3~5토막씩 나누어 개신하므로 전차선의 성능을 약화시키는 문제점이 있으나, R-Bar는 1section을 무리없이 완전히 교체할 수 있어 가선특성을 정상적으로 유지할 수 있는 가장 큰 장점을 갖고 있어 신설 건설 및 기존선 개량시 R-Bar가 매우 유리하다.

5. 참고문헌

1. Furrer+Frey(1991.3) The Conductor rail manual
2. 서울특별시지하철공사(1994) 서울지하철 알루미늄 합금 T-Bar 및 Long Ear 규격서
3. 일본지하철협회 세계의 지하철-115도시 최신정보, 산해당(2000.6.10)
4. 김양수/유해출(1999.9), 전기철도공학, 동일출판사
5. 손길신(2003.2.20), 도시철도(Urban Railway), 한국철도산업연구원
6. 임금광(1995.3), 전철설비실무, 서울지방철도청
7. 전기서원(1973.1), 전기철도
8. 철도종합기술연구소편 전차선과 집전체의 특성
9. 岩瀬勝(1998.12) 집전기술, 研友社