

UIC 규격을 적용한 고속철도 장대터널구간의 전차선로 검토 Study for Catenary System in High Speed Railway Long Tunnel applied UIC Standard

안영훈† 송진호*
Young-Hoon Ahn Jin-Ho Song

ABSTRACT

In long tunnel If we reduce the length of system height on catenary system, tunnel construction cost is cut down. It is because of tunnel section curtailment. So that we have review reduction of system height according to tunnel section. We have designed reduction of system height considered characteristics of overhead contact systems within UIC 799 code.

1. 서론

한국은 2004년 4월 1일자로 고속철도 KTX를 300km/h로 상업운전을 시작하였다. 또한 독자적인 고속철도 차량의 기술개발을 시작하여 한국형 고속철도 HSR350-X를 개발하여 2004년 12월 4일 영업 중인 고속철도 노선에서 352.4km/h의 시운전을 달성하였다. 2010년 3월 2일부터는 KTX-산천이 영업을 개시하여 세계 4위의 고속철도 기술보유국이 되었다. 일본이 1964년 10월, 프랑스가 1981년 9월, 독일이 1991년 5월에 고속철도 기술보유국이 된 이래 세계에서 네 번째 아시아에서는 두 번째 인 것이다.

세계적으로 고속철도 건설은 호황기를 누리고 있다. 이는 기후변화 협약에 따른 저탄소 녹색성장을 지향하는 국제사회의 공동관심사로서 육상교통의 Green Technology로 부각되어 많은 나라들이 전기에너지를 동력으로 하는 고속철도 건설을 추진하고 있다. 해외 고속철도 건설시장은 단순히 차량만을 수출하는 것이 아니라 토목, 궤도, 역사시설로 이루어진 Infrastructure에 Rolling stock, E&M, PM, SE, O&M, Technical Transfer를 통합한 패키지 형태를 선호하고 있다.¹⁾ 한국은 브라질의 리오-상파울로-캄피나스간 약 500km의 고속철도노선에 패키지 형태의 고속철도 수출을 위하여 브라질 고속철도사업단을 구성하여 많은 노력을 하고 있다. 브라질 사업수주의 관건은 건설비를 줄여서 총사업비를 낮추어 장기적으로 영업을 확보할 수 있는 것에 달려있다. 브라질 노선의 특수성은 전체 노선의 40%이상을 차지하는 Tunnel construction cost를 절감하는 것이 Key Factor이다.

고속철도 차량의 운행성능에 영향을 미치지 않는 범위 내로 철도터널의 단면을 최소화하여 시공하는 것이 터널 공사비와 공기를 절감하는 최상의 방법이다.

2. 철도터널 단면 검토

철도 터널의 내공 단면적은 아래에 열거한 사항들을 포함한 필요한 면적을 기준으로 검토해야 한다.

† 정회원, 세종기술(주), 해외사업본부, 전무이사, 전기철도기술사
E-mail : ahnknr@korea.com
TEL : (02)2108-6746 FAX : (02)2108-6790
* 정회원, 세종기술(주), 대표이사, 공학박사

- ◎ 차량한계
- ◎ 건축한계
- ◎ 유지보수에 필요한 여유 폭
- ◎ 열차교행에 소요되는 여유 폭
- ◎ 전차선로의 설치 공간

일반적으로 철도차량의 속도가 150km/h 전후인 경우에는 터널 내공단면은 차량한계와 건축한계를 주요 기준으로 검토하여 그 크기를 설정하며, 철도차량의 속도가 200km/h 이상인 고속철도인 경우에는 터널 내공단면은 터널내 공기압의 영향에 따라 설정한다. 고속철도 터널의 경우에는 상기 기준을 바탕으로 열차의 고속주행에 따른 공기저항 및 그 압력을 생각하여 터널의 내공단면 크기를 설정하여야 한다.³⁾

고속철도의 터널내공 단면적과 상업속도, 차량단면적을 표1에서 비교하여 볼 수 있다. 일본 산양신간선에 운행되는 차량의 단면적이 제일 크에도 불구하고 상업속도가 낮아서 그런지 터널내공 단면적이 제일 작다. 일본의 지형여건 상 산악지대가 많아 터널의 연장이 길기 때문에 공사비를 줄이기 위한 측면이 컸다고 생각된다. 스페인 AVE의 경우 차량은 프랑스 TGV를 기본으로 하고 전기시스템은 독일기준으로 터널은 자국의 기술을 적용하여 설계하고 시공하다보니 프랑스보다는 크고 독일보다는 작은 터널내공 단면적을 보이고 있다. 스페인은 독자적인 고속철도 기술을 보유하고 있지 않으므로 선진국의 기술을 종합적으로 채택하였다고 볼 수 있으며 특히 터널 총연장이 매우 짧다.

스페인 AVE 고속철도구간인 Madrid~Sevilla간 471km 노선에서 터널은 17개소로 총연장이 15.819km이다.

표1. 고속철도 터널내공 단면적 비교

항목	일본 산양신간선	프랑스 TGV-A	독일 ICE	스페인 AVE
영업노선	新大阪~博多	Paris~lemans,Tours	Hannover~stuttgart	madrid~sevilla
상업속도(km/h)	220~275	250~300	250~300	250~270
터널내공단면적(m ²)	60.40~66.70	60.40~71.00	82.20~94.00	75.00
차량단면적(m ²)	22.80~26.00	16.54	20.00	16.54
차량/터널 비율(%)	24.20~43.00	27.38~23.30	24.40	22.05

일본의 산양신간선의 신대판~강산간 노선의 터널은 바닥폭 8.13~8.2m, 아치부의 반경이 4.8m, 레일면상단에서 천정까지의 높이는 8.1m로 터널내공 유효단면적은 66.7m²이다. 산양신간선의 강산~박다간 노선의 터널은 레일면상단에서 천정까지의 높이가 7.8m로 터널내공 유효단면적은 60.4m²로 작다. 산양신간선 신대판~박다간 554km중 터널은 275km로 49.6%를 차지한다. 산양신간선은 산악지역이 많아서 터널이 많은 노선이므로 터널 단면이 적은 것이 공기 및 공사비에 유리하다고 판단된다.

프랑스 TGV 고속철도구간에서 터널은 주로 대서양선에 건설되었으며 전체 노선 285km중에 14개소 총연장 20.78km로 7.29%이다. 터널은 두 가지 유형으로 원형터널은 아치부의 반경이 5.5m, 레일면상단에서 천정까지의 높이는 7.68m, 바닥폭은 11m로 터널내공 유효단면적은 71m²이다. 마제터널은 아치부의 반경이 5m, 레일면상단에서 천정까지의 높이는 6.55m, 바닥폭은 10m로 터널내공 유효단면적은 60.40m²이다. 프랑스의 마제터널의 단면적은 일본 산양신간선의 작은 터널의 단면적과 일치한다.

독일 ICE는 Hannover~Wurzburg간 327km 구간에서 터널은 122km로 전체노선의 37%이고 Manheim~Stuttgart간 100km구간에서 터널은 31km로 31%이다. 터널의 바닥폭은 12.5m, 아치부의 반경이 6.3m. 레일면상단에서 천정까지의 높이는 8.5m로 터널내공 유효단면적은 82.2~94.0m²이다.³⁾

IEC차량과 TGV차량을 비교할 때 ICE차량 단면적이 크므로 양 차량의 속도가 동일하다고 가정할 때 IEC가 차량한계와 건축한계가 크고 공기압 영향도 크므로 독일 고속철도 터널내공 단면적이 큰 것을 알 수 있다. 또한 지형 여건상 독일은 산악지대가 많으므로 터널연장이 길고 장대터널도 많아 터널내공 단면적을 크게 설정하였다고 볼 수 있다.

한국은 경부고속철도에 TGV-A모델을 기본 차량모델로 도입하였고 터널은 한국기술로 설계하고 시공하였다. 최대 설계속도를 350km/h로 기준하였기에 터널내공 단면적은 107m²로 세계 고속철도 터널중에서 가장 큰 터널 단면적을 확보하였으나 경부고속철도 구간에서 최고 운행속도는 303km/h이다. 호남고속철도 건설을 위한 기본설계에서 최대 설계속도를 350km/h 기준으로 터널 단면적을 96.7m²을 제시하고 있어 경부고속철도 터널 단면적보다는 작은 값을 제시하고 있다. 터널 내 공기압과 열차 교행시의 횡압 등의 논의가 있었으나 일단 기본설계는 터널 단면적 96.7m²을 제시하였고 일부에서는 더 줄여야 한다는 논의와 연구가 진행 중에 있다. 터널 건설공법의 발달과 터널 내부면 처리기술도 발달하여 공기압과 미기압파를 감쇄시킬 수 있는 수준까지 도달하였다고 하니 터널 단면적을 현재보다 더 줄일 수 있을 것이다.

차량한계, 건축한계, 공기압, 미기압파의 문제를 해결하여도 터널의 천정 하부에 수직으로 가선되는 전차선로 시스템의 가고(System height)를 줄이지 않고는 레일면 상단에서 천정까지의 높이를 줄일 수 없으므로 현실적으로 터널 단면적을 축소하기는 어렵다. 가고는 지지점(Supporting Point)에서 전차선(Contact Wire)과 조가선(Messenger Wire)의 수직거리이다.

터널의 레일면을 기준으로 천정까지의 높이와 전차선의 높이, 가고를 표2에 정리하였다. 전차선의 높이는 전차선을 지지하는 개소에서 레일면 상단에서 전차선까지의 수직 높이이므로 두 높이는 레일상면을 기준으로 비교할 수 있다. 일본, 프랑스, 독일의 경우 터널 단면이 큰 유형을 비교대상으로 하였다

표2. 고속철도 터널의 레일면 상단에서 천정까지의 높이와 전차선 높이, 가고

항목	일본 산양신간선	프랑스 TGV-A	독일 ICE	호남고속철도
터널 단면(m ²)	66.70	71.00	94.00	96.70
천정 높이(m)	8.10	7.68	8.50	8.75
전차선 높이(m)	5.00	5.08	5.30	5.08
가고(m)	1.50	1.40	1.80	1.40
A(m)	6.50	6.48	7.10	6.48
B(m)	1.60	1.20	1.40	2.27

주) A=전차선 높이+가고, B=천정높이-(전차선 높이+가고)

전차선의 높이가 크면 차량한계가 커지고 건축한계도 크게 된다. 이런 측면에서 보면 독일의 ICE 차량한계가 가장 크다고 할 수 있다. 실제로 ICE 폭과 높이는 3020mm, 3840mm이며, TGV-A 폭과 높이는 2094mm, 3480mm이고, 신간선 300계는 폭과 높이가 3380mm, 3650mm이다.²⁾ 가고가 크면 가공전차선로의 탄성력이 좋고 차량의 팬터그래프의 추종성능이 양호하게 되고 지지점간의 거리 즉 경간(span)이 커진다. 승차감, 열차의 집전성능 측면에서 보면 ICE가 유리하나 터널이 많은 지형을 고려하면 일본, 프랑스에 비하여 터널 공사비가 단위면적당 더 많은 비용이 들었다고 볼 수 있다. 터널이 많은 한국의 경우 독일과 비교했을 때 차량한계, 전차선 높이, 가고가 전부 작고 B값이 큰 것을 고려하면 터널 단면을 줄일 수 있는 여지는 있다고 본다.

일본의 신간선은 합성컴파운드 커티너리, 독일은 변Y형 심플커티너리를 가공전차선로에 채택하고 있어서 고장력 심플커티너리 방식을 채택하고 있는 프랑스에 비하여 전차선 가고가 1500mm, 1800mm로 크다는 것을 알 수 있다.⁵⁾ 오픈 구간인 개활지에서 토공, 교량구간에서 가고가 큰 것이 열차의 집전성능에 유리하고, 지지물의 감소로 초기 건설비가 적게 투입 될 수 있다. 그러나 터널이 많은 지형에서는 터널 공사비의 증가 요인이 되므로 합리적인 검토가 요구된다. 이러한 측면에서 보면 지지점에서 프랑스의 TGV-A의 A(m)가 터널 내에서 제일 작으나 B(m)가 제일 작아 터널내에 전차선로를 설치할 공간이 적은 것을 알 수 있다. 이것은 전차선로의 설계와 시공이 복잡해지고 터널 상부의 구조가 복잡해지는 특성을 가지게 된다.

터널이 5km이상 되는 장대터널일 경우 환기설비 또는 터널내 화재시를 고려하여 제연설비를 터널상부에 부착할 경우에는 터널 상부 구조가 매우 복잡하게 된다. 이러한 점을 고려한다면 독일 ICE의 터널이 A(m)가 크에도 불구하고 B(m)가 큰 터널 단면을 보유하고 있어 장대 터널인 경우 터널 상부에 환기설비와 제연설비를 설치하는데 TGV-A보다 여유가 있다.

한국의 경우 경부고속철도 107m²의 터널 단면은 표2와 비교할 때 여유가 많은 단면이다. 호남고속철도 기본설계에서 제시한 터널 단면도 독일 IEC에 비교할 때 여유가 있는 단면이다. 한국이 채택한 전차선로 시스템인 가공전차선로(Overhead Catenary Line)는 TGV-A와 동일하며 이는 독일 ICE에 비하여 620mm 작은 값을 가지기 때문이다.

200km/h 이상의 속도를 내는 고속철도 차량의 경우 고속철도 노선의 터널 단면은 열차의 고속주행에 따른 공기저항 및 그 압력을 생각하여 크기를 설정하여야 하므로 표3은 열차의 밀폐도와 터널 단면 크기에 따른 열차 속도를 나타낸다. 이것은 열차의 밀폐도 즉 기밀정도가 클수록 동일 터널 단면에서 열차의 최대속도를 높일 수 있고, 열차의 기밀정도가 동일 할 때는 터널 단면이 커져야 열차의 최대속도가 높아질 수 있음을 의미한다.

표3. 열차의 밀폐도와 터널 단면 크기에 따른 열차 속도

최고속도	열차의 최대속도(km/h)		
터널단면(m ²) 열차밀폐도(τ)	65	80	100
3.0	200	230	250
5.0	235	270	300
7.0	280	320	350

차량의 밀폐도가 좋아지면 동일 터널 단면적에서도 터널 내부를 주행하는 열차의 최대속도가 높아질 수 있다는 것이므로 고속철도에서는 차량의 기밀도가 터널의 단면적을 결정하는 주요 요인이 된다. 차량한계, 건축한계, 열차의 최대속도가 같은 조건에서 차량의 기밀도가 동일하거나 터널의 압력차를 줄일 수 있는 터널 시공기술이 갖추어져 있다면 최종적으로 터널 단면을 결정하는 것은 터널 천정부에 설치되는 전차선로 시스템의 구성 형태와 크기이다.

3. UIC code 799 OR⁴⁾ 검토

UIC는 국제철도 연맹으로 철도에 관한 제반 규정을 마련하고 있으며, 특히 고속철도에 관한 부분도 상세히 규정하고 있어서 세계 고속철도 시장에 고속철도를 수출하고자 할 경우 이 규정을 준수하지 못하면 수출이 불가능 할 수 있다. 고속철도 건설을 원하는 많은 국가들이 UIC 기준을 만족할 것을 RFP에 포함시키고 있기 때문이다.

UIC code 799R에서 전차선로에 관한 주요한 규정들을 살펴보고자 한다. 표4는 국제철도연맹에서 규정하고 있는 가공전차선로의 정적특성에 관한 것으로 속도 대역을 3가지로 형태로 즉, 200km/h보다 큰 것에서부터 230km/h까지, 230km/h보다 큰 것에서부터 300km/h까지, 300km/h보다 큰 것으로 구분하고 있다.

200km/h보다 큰 것에서부터 230km/h까지의 속도대역에서 전차선의 높이 표준은 5000 to 5500[mm]이고 최소는 4920[mm], 최대는 6500[mm]이다. 230km/h보다 큰 속도대역에서 전차선의 높이 표준은 5080 to 5300[mm]이고 최소 값과 최대 값은 정하지 않고 있다.

UIC code 799R에 의하면 산양신간선이 230km/h이상으로 영업운전 할 경우 표2에서 보이는 일본 고속철도 전차선의 높이는 5000[mm]로서 규정미달이다. 허용치(Tolerance)를 적용하여도 UIC 기준을 준수하지 못한다. 그러나 프랑스와 독일은 UIC 기준을 준수하고 있으며 한국도 마찬가지로 UIC 기준에

적합하다. 230km/h 보다 높은 열차의 최대속도 대역에서 프랑스는 하한 값을 독일은 상한 값을 전차선 높이로 설정하고 있음을 표4에서 알 수 있다. 터널 단면 축소라는 측면에서는 전차선 높이가 낮은 프랑스의 값이 허용치(Tolerance)를 적용하여도 유리하다. 터널 내부에서 전차선로의 높이를 최종결정하는 것은 지지점에서 전차선과 조가선간의 수직거리인 가고(System height)이므로 이에 대한 UIC code 799 OR기준을 표5에 표시한다. 표5에 보여주는 요소들은 고속철도의 전차선에 있어서 중요한 것이다. 교류 25kv 고속철도의 표준 가고는 Open line구간에서 1400mm로 Tunnels에서는 800mm로 규정하고 있다.

표4. Static characteristics of overhead lines

Serial No	Parameters, comments for design speed of:	>200 to 230km/h	>230 to 300km/h	>300k m/h	Unit
1	Standard height of contact wire Tolerance	5000 to 5500 ±30	5080 to 5300	0+20/±30	[mm]
2	Maximum difference in contact wire height measured between two successive supports where contact wire height on construction was contact	30	10	10	[mm]
3	Minimum contact wire height for design speed of ≤230km/h (at special points : bridges, tunnel, etc.)	4920	-	-	[mm]
4	Maximum contact wire height for design speed of ≤230km/h with account taken of uplift (at special points)	6500	-	-	[mm]

표5. Design parameters of overhead lines

Serial No	Parameters, comments for design speed of:	>200 to 230km/h	>230 to 300km/h	>300km/h	Unit
19	Maximum span lengths Tracks in tunnels	50	50	50	[m]
21	Length of shortest dropper for standard system With account taken of the dynamic forces arising during short circuits and/or the design of the droppers. 25kV	0,20	0,20	0,20	[m]
22	Standard system height (encumbrance) Vertical distance between contact wire and messenger wire at the supports - Open line • 15kV • 25kV - Tunnels • 15kV • 25kV	1,80 1,25 1,10 0,60	1,80 1,40 1,10 0,80	1,80 1,40 1,10 0,80	[m]

그러나 한국의 터널구간에서는 개활지와 같은 1400mm를 적용하고 있다. 이럴 경우 전차선로의 높이는 두 전차선로 섹션이 겹치는 평행개소의 가동브래킷 지지점(하수강)에서 한 쪽 전차선의 높이는 1400mm보다 최소 250mm이상 높아야 하므로 1650mm이상이어야 한다. 이를 고려하여 전차선 설치 단면도를 Drawing하면 그림1, 그림2와 같다. 그림1은 터널 단면적 90.03㎡인 NATM 터널에 230km/h보다 큰 열차 속도를 갖는 전차선로 평행개소를 도시한 것이고 그림2은 동일조건에 Cut & off 터널에 도시한 것이다.

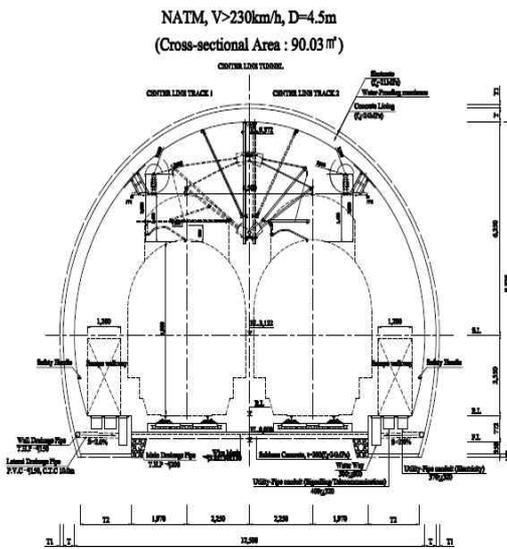


그림1. NATM 터널과 전차선로

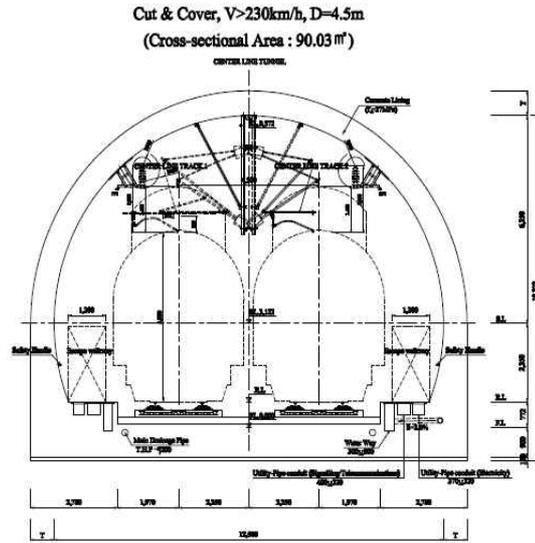


그림2. Cut & off 터널과 전차선로

4. 결론

한국 KTX-산천의 차량한계, 건축한계 및 교류 25kv의 개활지 전차선로의 가고를 적용하여 터널 천정에 50m 이하의 공간을 갖는 전차선로 평행개소 단면도를 도시하면 터널 단면이 90.03m²일 경우 UIC 기준에 적합한 전차선로를 구성할 수 있다고 판단된다. 그러므로 브라질 고속철도 노선처럼 터널구간이 전체 노선의 40%정도를 차지할 경우 토공 및 교량구간에 비하여 터널 공사비를 대폭적으로 절감할 수 있다. 또한 토공 및 교량구간 보다는 터널 구간의 전차선로 공사비가 적으므로 총사업비 측면에서도 상당한 가격 경쟁력을 갖는다. UIC 799 OR기준의 터널내 표준 가고를 검토하여 적용하면 터널 단면을 더욱 낮출 수도 있다.

그러나 터널 단면의 축소에 따른 터널 내부에서 상선과 하선 차량이 최고속도로 교행할 때의 공기압의 변화와 미기압과 발생 등에 의한 차량의 기밀도 등을 고려하여야만 터널 단면의 축소로 인한 열차속도의 저감이 안된다. 그러므로 차량의 성능을 최대한 발휘 하면서 터널 내부에서 일어나는 공역학 현상이 터널 벽면의 기압변화를 감쇄할 수 있는 터널벽면 공법이 적용되어 터널 단면이 감소하고 차량의 기밀도가 인체에 거의 영향을 주지 않는 수준으로 높아진다는 전제 조건하에서 UIC 799 OR기준에 의거한 Overhead Catenary system의 가고를 줄일 수 있을 것이다.

이러한 실예의 하나로 일본의 동북신간선에서는 960mm의 일반 전기철도의 가고를 갖는 고장력 심플 커터너리 방식으로 300km/h의 속도를 달성하고 있다는 것이 향후 고속철도의 터널 단면을 설정할 때 다시 검토가 필요하다고 생각된다. 물론 공역학 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 공역학 현상이 기술향상으로 극복될 수 있다면 300km/h 이상의 상업속도를 갖는 고속철도 터널 내공 단면적은 표3에서처럼 80m²대로 축소될 수도 있을 것이다.

공역학 현상을 극복할 수 있다면 UIC 799 OR기준 범위내에서 가공 전차선로의 가고(System height)를 줄이는 것이 터널 단면을 줄일 수 있는 final key factor라는 사실을 확인하였다. 또한 UIC 799 분석과 UIC 799의 전차선로 파라미터를 적용하여 가선을 설계하면 기존 한국의 고속철도 터널보다 축소된 단면적을 갖는 터널구조속에도 가공전차선로를 설치하는 것이 가능하다는 것을 도면상에서 검증하였다.

참고문헌

1. 국토해양부, 한국고속철도 해외시장 진출촉진 전략수립 연구, pp.177-180, 2009.2
2. 待永芳文, “海外鐵道技術に學ぶ,” 鐵道と電氣技術, VOL.18, No4, pp.3-10, 2008.4
3. 한국고속철도시설공단, 고속철도핸드북, pp.296-297, 1993.2
4. UIC, UIC Code 799R, 2002.3
5. Friedrich Kiebling, Rainer Puschmann and Axel Schmieler, “Contact Lines for Electrical Railways,” pp.10-15, 2001.10