

# 저비용 · 저심도 경전철의 개요와 적용 사례



이 안 호 |  
한국철도기술연구원  
저심도철도연구  
TF 팀장 (연구총괄)



임 철 수 |  
선구엔지니어링  
상무  
(토목분야)



김 성 민 |  
한섬건축사사무소  
소장  
(건축분야)

## I. 머리말

국내 경전철의 건설 방식은 지상고가 방식과 지하 방식이 혼용되고 있다. 전자는 수요가 부족한 지방에서 경제성 확보를 위해 부득이 선택하는 방식이며, 비교적 많은 수요를 확보할 수 있는 서울은 후자를 유일한 방식으로 채택하고 있다.

이처럼 어느 정도 수요가 보장된 서울의 경전철 사업은 큰 지하 공사비를 여하히 저감할 수 있느냐가 사업성 확보의 관건이 된다.

이에 반해 지방에서는 도시철도의 운영 적자 가중 우려와 더불어, 지상고가 방식에 따른 도시 미관 저해 논란이 끊이지 않고 있으며, 이것이 수요 예측의 부정확성과 더불어 지역에서 경전철 건설 정책 자체를 반대하는 분들의 주된 논거로 활용되고 있는 실정이다.

이러한 시대적 배경을 바탕으로, 서울과 달리 사업 추진 자체도 큰 어려움을 겪고 있는 지방을 우선 대상으로, 지상고가 수준의 사업비로 지하 경전철을 건설할 수 있도록 기술적 지원을 하는 것이 바로 “저비용 · 저심도 경전철 시스템” 개발의 요체이다.

여기서는 본 시스템의 개요와 토목 공사비를 중심으로 하는 저비용의 원리, 그리고 첫 대상으로 “광주 도시철도 2호선”에의 적용 사례에 대해 소개하고, 마지막으로 일본의 유사 사례를 소개한다.

## II. 시스템의 개요

### 1. 시스템의 정의

저비용 · 저심도 도시철도 시스템은,

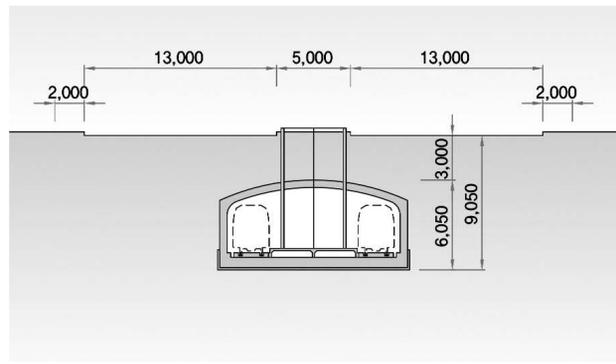
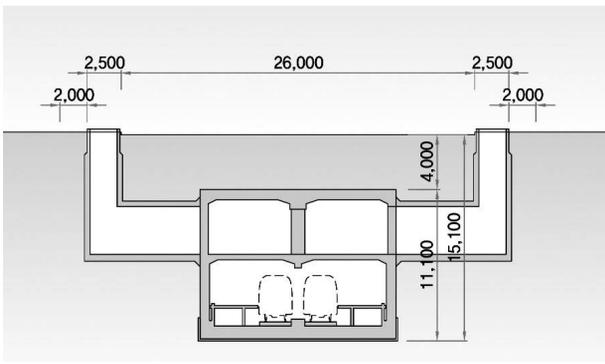


그림 1. 국내 지하 경전철(좌)과 저비용 · 저심도 경전철(우) 비교

- ▶ 구조물 규모가 최소화 되도록 지하에 특화된 차량 시스템을 개발, 사용하고,
- ▶ 횡단보도와 도로 중앙의 교통섬을 이용해서 섬식 승강장과 본선을 모두 지하 1층의 저심도에 건설함으로써(그림 1, 2)
- ▶ 성능은 향상되고 비용은 지상고가 수준인 지하 경전철 시스템을 말하며,
- ▶ 이것은 토목뿐만 아니라 건축, 설비, 궤도, 차량, 전기, 신호, 통신, 운영 계획 등 관련 분야 전체를 포괄하는 Total design에 의해 실현된다.

2. 시스템의 특징

주요 특징으로는, 본선과 승강장을 모두 지하 1층에 설치함으로써

- ▶ 상부 Open을 통한 자연 채광, 자연 환기가 가능하여 대규모 공조 시설이 불필요하게 되므로 역사 규모를 최소화할 수 있고
- ▶ 승강 설비 규모 및 이동 동선의 최소화로 승객의 이용 편의도 대폭 향상되는 점 등을 들 수 있다. (그림 1, 2)

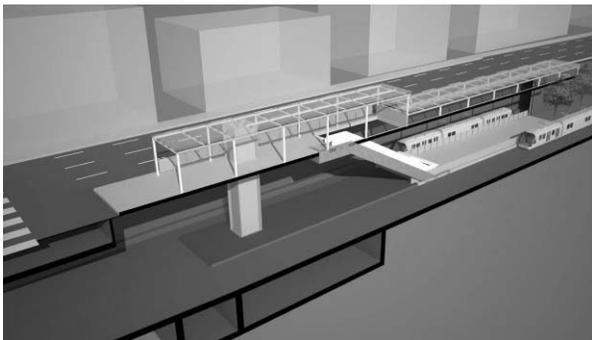


그림 2. 섬식 정류장 조감도

3. 저비용의 원리

그림3에 지하 경전철의 굴착 심도별 토목 공사비 추이를 수록했다.

그래프의 횡축에는 굴착 심도를, 종축에는 지하 1, 2, 3층 정거장 중심에서의 굴착 심도별 본선 1km와 정거장(환기구 포함) 1개소의 토목 공사비를 나타냈다.

표에서 보듯이 개착 구조물인 정거장의 공사비는 심도에 비례해 증가한다. 그러나 본선 공사비는 개착 구간에서는 심도에 비례해 증가하지만, 지하 2층을 기준으로 N.A.T.M으로 공법이 바뀌며, 심도가 깊어질수록 감소한다. 그 결과 3층 정거장에 이르게 되면 본선 1km와 정거장 1개소의 공사비가 큰 차이가 없게 된다. 최종적으로 전체 km당 공사비는 2층 정거장을 기준으로 저심도 또는 대심도로 갈수록 감소한다(지반 조건에 따라 이 기준 심도는 바뀔 수 있다). 그림 3은 지하 2층 정거장 정도의 심도가 개착을 하기에는 깊고, 그렇다고 N.A.T.M을 적용하기에는 암질이 좋지 않은 가장 비경제적 심도인 사례이다. 때문에 1기 지하철의 개착 구간에서는 본선을 최대한 상향시켜 저심도로 유도한 역함프형 종단을 쉽게 찾아볼 수 있다.

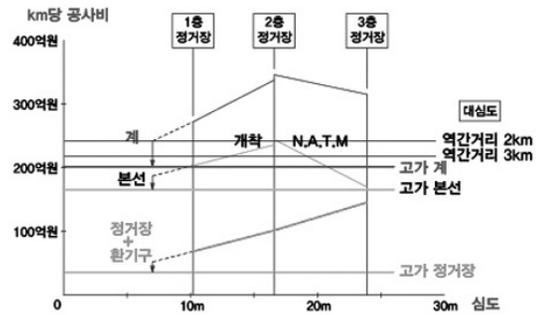


그림 3. 국내 지하 경전철의 심도별 토목 공사비

표 1. 경전철 시스템 별 차량 규격 비교

구 분	고무차륜 AGT				철륜식 경전철		
	일본 (고가용)	국산		VAL208 (메트로)	국산		일본 (지하용)
		기존	저심도		기존	저심도	
폭×높이	2.49×3.34	2.40×3.50	2.40×3.20	2.08×3.27	2.65×3.60	2.40×3.20	2.40×3.10
면적비	1.00	1.01	0.92	0.82	1.15	0.92	0.89

※VAL208의 규격은 지멘스사 홈페이지 자료 준용

한편, 대심도 구간에서 역간 거리를 2km, 3km로 확대하면 정거장 공사비가 차지하는 비중이 1/2, 1/3로 감소되어, 거의 지상고가 건설비에까지 근접하게 되는 것을 그림에서 볼 수 있다(그림 3의 수평선). 이를 통해 수도권광역급행철도(GTX) 등 역간 거리가 긴 노선에서는 대심도도 매우 경제적인 공법임을 확인할 수 있다.

그러나 역간 거리를 길게 할 수 없는—특정 지역이 선로만 통과하고 역세권에서 제외된다면 도시철도 서비스의 확대라는 원칙에도 맞지 않고, 무엇보다 지역의 엄청난 저항에 직면할 것이기 때문에—도시철도에서는 저심도 공법이 가장 경제적인 공법임을 그림 3은 보여주고 있다. 나아가 역사는 저심도에 건설하고, 본선은 대심도에 N.A.T.M으로 건설할 수 있는 중단 조건을 구성할 수 있다면 보다 경제적 설계도 가능할 것이다. 여기서는 이러한 특수한 조건은 해당 설계자의 몫으로 남기고, 보편적인 조건 하에서의 저심도 공법에 대해서 다루고자 한다.

그럼에도 불구하고 심도를 낮추는 것은 하천 box 등 지장물의 존재나 기타 여러 사유로 목표인 지상고가 공사비 수준까지 낮추는 것은 곤란하다.

때문에 저심도 공법을 지상고가 수준의 경제적 공법으로 만들기 위해서는 토목공학적 접근을 넘어서는 “시스템 전체”로서의 접근이 필요하다.

#### 가. 구축한계의 최소화

고가나 노면 시설과는 달리 지하철의 경제성에 큰 영향을 미치는 것은 터널 단면의 크기, 즉 구축한계이다. 이러한 구축한계의 최소화를 위해서는 차량 단면적의 최소화, 궤도 높이의 최소화, 전기 시설의 합리적 배치, 나아가 터널 단면적 축소로 인한 차량 측의 소음 대책 등 시스템 단

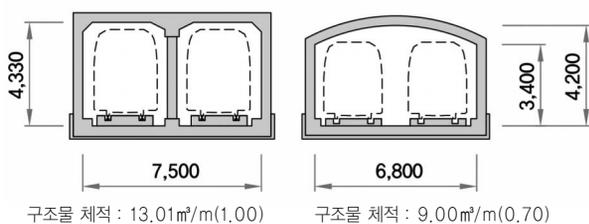


그림 4. 국내 기존 지하 경전철(좌)과 저비용 · 저심도 경전철(우) 비교

위에서의 총체적 대응이 필요하다.

표 1은 국내의 경전철의 차량한계를 비교한 것이다. 표에서 보듯이 일본의 경우 고무차륜 AGT 차량은 고가 전용으로 개발되어 노선 계획상 불가피한 경우(히로시마 아스트라라인 시점 일부)를 제외하고는 모두 고가 구간에 사용하고 있다. 지하용으로는 선형모터를 사용해서 높이를 축소한 LIM 차량을 별도로 개발, 후쿠오카 3호선(나나쿠마선), 도쿄 12호선(오에도선), 요코하마 3호선(그린라인) 등에 사용하고 있다(미니 지하철이라고 불림). 유럽은 차량 폭이 극단적으로 작은 VAL208을 지하와 고가에 혼용하고 있다.

따라서, 국내에서도 저심도 경전철의 경제성을 극대화하기 위해서는 지하에 특화된 차량의 개발이 필요하며, 1차적으로는 기존에 개발된 차량의 전장품의 콤팩트화로도 가능하다. 나아가 장기적으로는 LIM의 적용 등 차량 측면에서의 적극적 대응도 필요할 것이다.

그림 4는 표 1에 의한 저비용 · 저심도 경전철 구조물과, 국내 기존 지하 경전철 구조물의 콘크리트 물량을 비교한 것이다. 이것만으로도 상당한 수준의 재료 절감을 통한 공사비의 절감을 기대할 수 있다.

#### 나. 가설공법의 개선

기존 지하철의 가시설은 복공과 중앙파일 설치, 또 중앙파일과 버팀보의 좌굴장 확보를 위한 각종 체널, 브레이싱 등이 복잡하게 얽혀있다. 이것을 △굴착면적의 최소화, △강성이 큰 버팀보의 사용, △가시설 굴진 개념의 도입과, 이에 따른 무복공 구간의 확대로 큰 폭의 비용 절감 결과를 얻을 수 있다(그림 5).

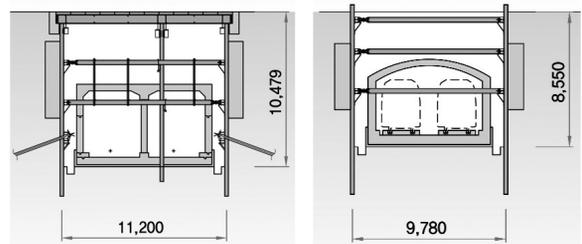


그림 5. 가설공법 비교. 국내 기존 지하 경전철(좌), 저비용 · 저심도 경전철(우)

이외에도 매물 자재의 사용을 배제하고, 버팀보, 엄지말뚝 등 가시설 재료를 반복 사용할 수 있도록 공정 계획을 수립함으로써 가시설물의 자재비를 절감하는 것도 주요 포인트이다.

### Ⅲ. 광주 도시철도2호선 적용 사례

#### 1. 광주 도시철도2호선 계획 현황

광주 도시철도 2호선 사업은 3단계로 나누어 총연장 41.7km에 역 44개를 신축하는 총사업비 1조 7,394억 원 규모의 사업이다(그림 6). 본 사업은 2010년 말에 KDI의 예비타당성조사를 통과한 후 지난해 11월 말 국토해양부로부터 전 구간 지상고가 AGT로 기본계획 변경 승인을 받은 후, 현재 광주시가 자체 TF팀을 구성하여 건설 방식, 건설 시기 등에 대해 논의 중에 있다. 논의의 핵심은 지상고가

경전철 건설에 따른 도시미관 등의 문제점을 어떻게 해소할 것인가로, 지상고가로 추진 시 시민 사회에서도 극심한 논란이 예고되고 있다.

이러한 지방의 현안에 실질적 도움을 주고자 한국철도기술연구원에서는 지난해 말 광역도시철도연구본부 내에 저심도철도연구TF(팀장 이안호)을 구성하여, 지상고가 사업비를 초과하지 않는 범위 내에서 경전철을 저심도 지하 방식으로 건설하는 방안을 연구해왔다. 여기서는 그 성과의 일부로서 광주 도시철도 2호선 1, 2단계(순환선) 36.8km 구간에 본 시스템을 적용한 결과를 소개한다.

#### 2. 광주시의 계획노선대 도로 및 지장물 현황

그림7에 광주2호선 노선대 도로 현황을 수록했다.

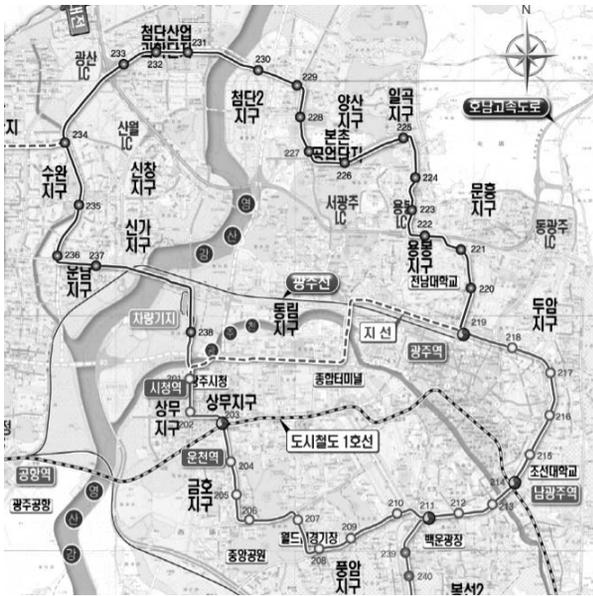
노선대 대부분의 도로가 35m 이상의 넓은 도로 조건을 갖추고 있고, 특히 연장이 8km가 넘는 임방울대로는 도로 폭이 60m로 저심도 경전철을 적용하기에 더없이 좋은 조건을 갖추고 있음을 알 수 있다. 도로 폭이 20m로 매우 좁은 월드컵서로와 천지인로는 도로에 인접해서 가용 녹지가 있기 때문에, 도로 폭 25m 구간인 우치로 약 2km만이 공사 시 우회도로 확보 등의 대책이 필요한 구간이다.

지하 지장물은 구간별로 산재한 소수의 하수 box를 제외하면 대부분의 중·횡관들이 지하 1~3m에 매설되어 있어 저심도 공법을 적용하기에 무리가 없다. 다만, 용봉천 하천 북개 구간인 설죽로 2km, 1호선 남광주역 교차 구간과 영산강 교차 2개소 정도가 저심도 시스템을 적용하기 곤란한 구간이다.

#### 3. 구조물 계획 및 공사비 검토

##### 가. 본선 계획

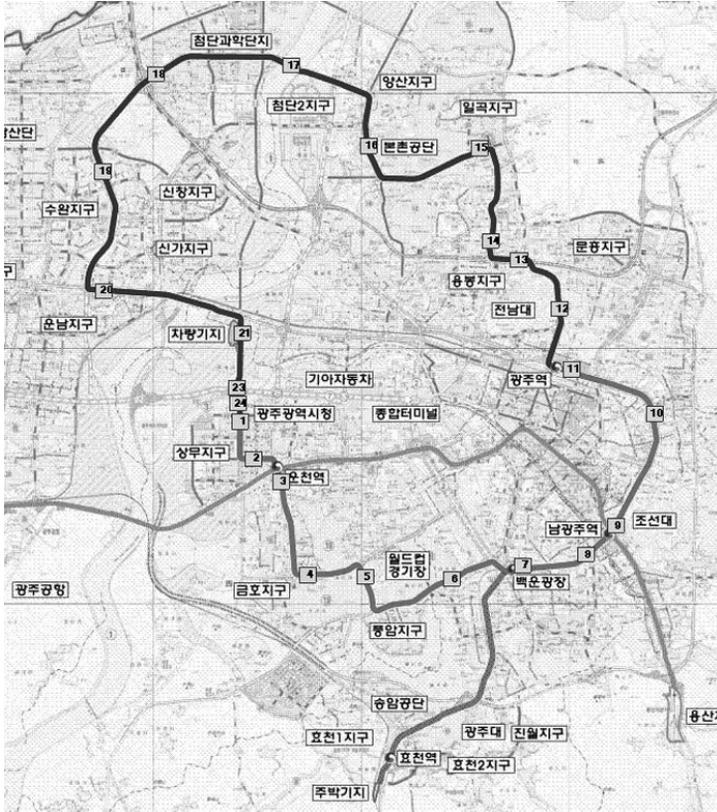
용봉천 하천 북개 구간인 설죽로 구간과 남광주 교차 구간 약 3km는 공사비가 가장 높은 단선병렬 쉴드 공사비로 계상하고, 영산강 횡단 2개소 중 기존 교량 폭이 35m보다 좁은 광신대교 구간은 전용교량을 설치하도록 검토했다. 반면 교량 폭이 45m로 넓은 첨단대교 구간은 기존 교량의 중앙부를 도로 시설과 완전 차단하여 활용하는 것으로 계획했다. 나머지 저심도 구간의 구조물 계획을 그림 8에 수록했다.



구분	1단계	2단계	계
연장(km)	15.77	21.09	36.86
역수	20	18	38
토목공사비	3,319억 원	4,478억 원	7,797억 원

⇒ 토목공사비 약 7,800억 원을 목표로 설정

그림 6. 광주 도시철도2호선 1,2단계(순환선) 노선 현황



번호	도로명	폭-차선
1	상무중앙로	50m-8차로
2	상무자유로	35m-6차로
3	운천로	35m-6차로
4	금화로	35m-6차로
5	월드컵서로	20m-4차로
6	회재로	35m-6차로
7	대남로	35m-4차로
8		40m-8차로
9	필문로	40m-8차로
10		40m-8차로
11	우치로	40m-8차로
12		25m-4차로
13	천지인로	20m-4차로
14	설죽로	35m-6차로
15	양일로	30m-6차로
16	하서로	30m-6차로
17	임방울대로	60m-8차로
18		60m-10차로
19		60m-8차로
20	하남로	35m-8차로
21		35m-8차로
22		35m-8차로
23	계획도로	35m-6차로
24	상무로	35m-8차로

그림 7. 광주 도시철도2호선 계획 노선 도로 현황

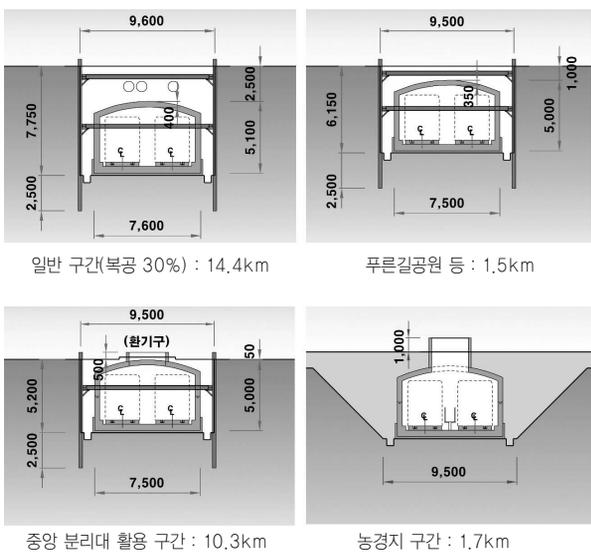


그림 8. 보선 구조물 및 가시설 적용 현황

일반 구간 14.4km는 최소 심도 2.5m를 확보하여 무복공을 표준으로 계획하였으며, 교차로 통과부, 횡단보도 구간 등을 감안하여 연장의 약 30%를 복공 가시설로 계획했다. 경전선 폐선부지에 조성된 푸른길 공원 약 1.5km는 식생이 가능한 토피 1.0m를 확보한 무복공 구조로, 임방울로 등 중앙분리대를 활용할 수 있는 10.3 km 구간에 대해서는 토피가 없는 자연 환기형 box 구조로 계획했다. 마지막으로 농경지 구간 1.7km는 오픈컷을 이용한 box 공사비로 산출하였으나, 이 구간은 임방울로 구간과 더불어 실제 설계 시에는 성토 구조 및 반지하로 계획할 경우 보다 경제적인 건설이 가능할 것이다. 다만, 지하 공사의 리스크를 감안하여 본 검토에서는 반영하지 않았다.

#### 나. 정류장 계획

본 시스템 개요의 핵심은 정류장이다. 이를 위해서는 과

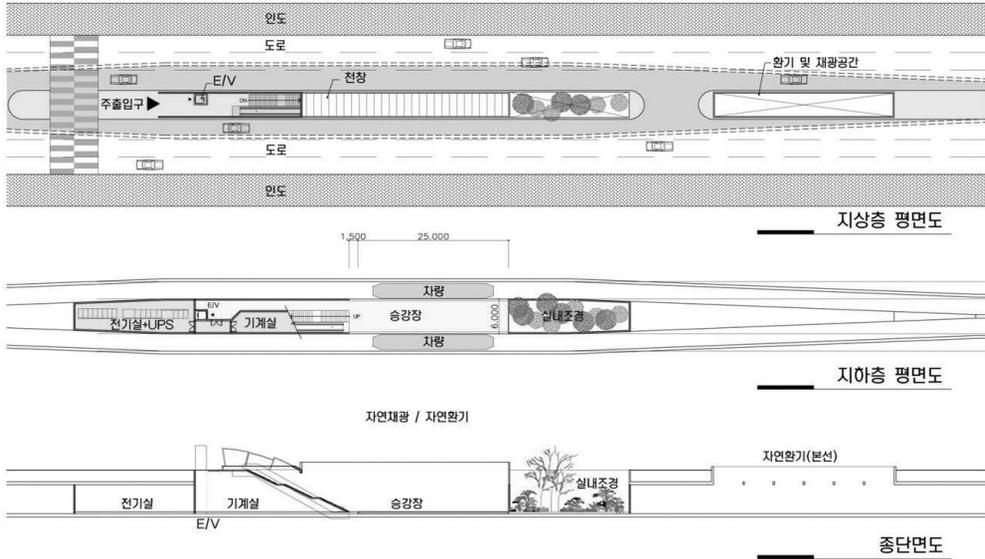


그림 9. 저심도 섬식 정류장의 건축 계획도

거와 같이 지하 역사를 승객이 머물며 사람을 만나는 정거장의 개념에서 탈피, 지상에서 가장 가까운 낮은 심도에서, 버스 정류장이나 트램 정류장과 같이 차량 탑승을 위해 잠시 대기하는 개념으로의 전환 즉, 지하철 역사에 대한 패러다임의 전환이 필요하다. 그리고 이것을 실현하기에 광주 2호선 경과지는 넓은 도로 등 최상의 환경을 갖추고 있다.

그림 9에 저심도 섬식 정류장 기본 type의 건축 계획도를 수록했다.

정류장의 건설 계획도 본선과 크게 다르지 않다. 굴착 폭

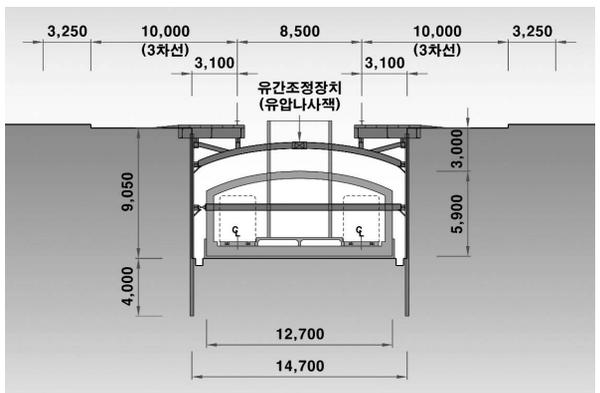


그림 10. 섬식 정류장의 건설 계획

이 전체 14.7m에 불과하기 때문에 차선 조정을 통해 공사 중 왕복 4~6차로가 확보되는 구간은 무복공, 그렇지 못한 구간에는 부분 복공을 적용했다. 다만, 복공을 위한 중앙파일의 설치의 시공성이 불량할 뿐 아니라 목적 구조물 상·하부 슬래브에서의 누수 등 사용성 측면에서도 취약 부를 남기기 때문에, 그림 10과 같이 중앙파일이 없는 복공 시스템을 개발해서 적용했다.

**다. 토목 공사비 집계**

표 2에 광주 2호선의 토목 공사비 산출 결과를 수록했다. 환기구 공사비에는 개소 당 2.8억 원의 기계비가 포함되어

표 2. 광주 2호선 토목 공사비 산출 결과

공 종	1단계		2단계		계	
	지상고가	저심도	지상고가	저심도	지상고가	저심도
1. 정류장	716	827	645	630	1,361	1,456
2. 본선	2,539	2,186	3,593	3,286	6,132	5,473
3. 환기구	465		332		796	
4. 환송통로	64			64		
5. 하천box 이설			240		240	
계	3,319	3,477 (1.05)	4,478	4,248 (0.95)	7,797	7,725 (0.99)
증감		증 158		감 230		감 72

있다. 또한 표 2의 결과는 지상고가 건설비의 99% 수준으로 건설 가능하다는 결과이나, 상세 설계에 의한 값이 아닌 개략 공사비이므로 “지상고가 수준”의 공사비로 이해하면 될 듯하다.

본 공사비의 산출 방법은 다음과 같다.

- ▶ 정류장, 본선 각 표준단면 별로 구조계산을 통해 단면 결정(이 단계에서는 경제성 설계에 입각)
- ▶ km당 수량 산출 및 적산에 의한 직접공사비 산출
- ▶ 노면 복구공, 지장물 보호공, 가설 사무실 등 부대공사비로 17.6% 가산(지하 경전철 실적 공사비 분석 비율)
- ▶ 정류장의 경우 출입구, 집수정 등의 부대 시설 공사비를 고려 10% 추가 가산
- ▶ 잡비율 37%(면세율 적용)를 가산하여 각 표준단면 별 km 당 표준단가 산출
- ▶ 구간별 표준단면 적용 연장 산정(이 단계에서는 지하 공사의 리스크를 감안하여 보수적으로 적용)
- ▶ 총공사비 산출

이상과 같이 표준단가 자체는 경제성 설계에 입각해서 산출한 반면, 표준단면의 구간별 적용은, 예컨대 성토나 깎기, 또는 반지하 등 훨씬 경제적으로 건설할 수 있는 구간도 앞서 선정한 표준단면을 적용함으로써 현 단계에서 예측할 수 없는 지하 공사의 리스크에 대비하였다.

덧붙이면 그러한 구간은 약 7km 정도이고, 리스크 발생이 없을 시 추가 절감이 가능한 공사비는 추정 공사비의 약 9% 정도이다.



그림 11. 삿포로 지하철 개찰 및 승강장 사진(좌, 개찰 너머 정차 중인 차량이 보인다), 투시도(우)

#### IV. 일본의 저심도 지하철 사례

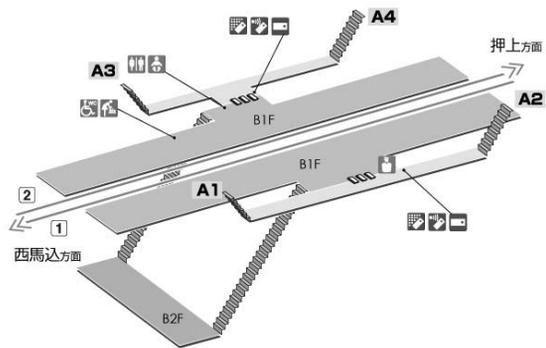
현재 건설 중에 있는 우이~신설 경전철의 시점부 5개 역사 구간이 지하 1층에 승강장과 본선이 같이 있는 저심도 구간이다.

한편 일본에서는 저심도 지하철의 역사가 길다. 도쿄 지하철의 최초 개통 구간인 아사쿠사~우에노간(1927년 개통. 이 구간은 지금은 3호선인 긴자선의 일부가 되었다)에서는 양단의 두 역은 이용자가 많아 홈 층과 개찰 층을 상하에 두었지만, 중간 2역은 홈과 개찰구를 동일 깊이의 저심도에 건설해서 비용 절감을 도모했다(지하철의과학, 카와베 켄이치 川辺謙一, 2011년). 이 구간을 비롯해서 도쿄 지하철 1호선(아사쿠사선) 지하 20개 역사 가운데 7개, 4호선(마루노우치선) 지하 24개 역사 가운데 11개가 그림 10과 같은 형태의 지하 1층 저심도 정거장으로 건설되었고, 이 형태는 삿포로 지하철 등 기타 여러 노선에서도 볼 수 있다.

#### V. 맺음말 – 앞으로의 과제

도시 공간을 어떻게 활용할 것인가는 오랜 기간 논쟁되어 온 화두이다.

지하 공간의 활용 방안에 대해서도 일정한 논의와 공감대 형성이 필요할 것으로 보인다. 본 시스템에 대한 우려 가운데 하나가 상부 토피를 너무 작게 하면 장래 지장물 설



치 시 문제가 되지 않겠는가 하는 것이기 때문이다.

모든 시설은 건설되고 나면, 타 시설 입장에서 보면 지장물이다. 그 시설이 노면에 있건, 고가 형태로 있건, 지하에 있건 이러한 사실에 큰 차이는 없을 것이다.

최근의 도시계획이나 공공시설 건설의 세계적 동향이 “인간” 중심-유니버설디자인-임은 두말할 나위가 없다. 공공시설을 계획하는데 있어서도 시설 제공자의 입장이 아니라 시설 이용자 입장에서, 시설 이용자가 가장 편리하게 사용할 수 있는 공간을 제공하는 노력은 정책 입안자의 몫만은 아닐 것이다. 이러한 관점에서 보면, 노면에서 가장 가까운 공간을 공공교통시설로 활용하고자 하는 당위성과, 종단 대응력이 뛰어난 경전철의 만남은 결코 우연이 아닐 것이다.

최근의 휴대폰이나 컴퓨터 같은 제품은 구입 시기에 많은 고민을 안겨주는 제품이다. 비싼 최신 제품을 구입해도 금방 더 싸고 좋은 제품이 나오기 때문이다. 이 점을 강조하면 평생 신상품을 사용하는 즐거움은 맛보기 어려울 지도 모른다.

마찬가지로, 장래 언제 설치될지도 모를 지장물을 대비

해서 그 공간을 비워야 한다면, 아마 그 공간은 영원히 빈 공간으로 남게 될지도 모른다.

한편, 정류장의 시설 배치에 대해서도 제도적 보완이 필요할 것이다. 엘리베이터와 같이 베리어 프리를 위한 필수 시설 등은 법적 기준을 상회하도록 충분히 고려되어야 하겠지만, 기타 선택 가능한 시설은 각 지자체가 지역과 노선의 실정에 맞게 결정할 수 있도록 하는 방향으로 정비될 필요가 있다.

한국철도기술연구원은 2010년 홍순만 원장님 체제를 맞아 다양한 혁신을 추구하고 있습니다. 그 대표적인 것이 경기도, 광주광역시 등의 지자체와 MOU를 체결해서 시행하고 있는 “지자체 맞춤형 기술 지원” 사업입니다. 이 사업의 첫 실질적 성과인 본 시스템에 대한 연구가 보다 진전되어, 광주 2호선에 성공적으로 적용되고, 나아가 대한민국 경전철 건설의 새로운 패러다임을 정립하는 롤 모델이 될 수 있도록, 연구에 참여하고 있는 원내 및 원외 연구진 모두에게 많은 전문가 분들의 깊은 관심과 조연을 부탁드립니다. S