

# 경량전철 무인자동운전의 비용 절감 효과 분석

## A Cost Reduction Effects Analysis on Automatic Operation of Light Rail

민 재 홍\*

Min, Jae-Hong\*

### ABSTRACT

Light Rail is highlighted for its construction cost and operation & maintenance cost in Korea. However, lack of analysis on driverless operation effect causes many disputes. In this paper, using latest driverless operation cost data, analysed cost reduction effect of it, with comparing present KNR's metropolitan subway signal system. It showed there is enough economic appropriateness B/C 1.241 on interest rate 6%, 1.076 on 8% and 0.943 on 10%, though it couldn't include passenger travel time value.

## 1. 서 론

### 1.1. 서론

경량전철<sup>1)</sup>은 일반 지하철 등 중량전철에 비하여 수송규모는 작지만 그 건설비와 운영유지비가 상대적으로 저렴하여 중소도시의 간선교통망이나, 기존지하철의 지선으로 각광받고 있는 수단이다. 하지만 현재 국내에서 논의되고 있는 가장 큰 쟁점 중 하나인 경제적 효과, 그 중에서도 무인운전에 대한 효과분석이 미비하여 아직 국내도입사태가 없는 경량전철의 도입여부 결정에 활용될 자료가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 무인자동운전의 비용절감효과에 대한 분석을 실시하여 경량전철의 경제적 효과분석에 도움이 되고자 한다.

1) 경량전철의 정의는 각국마다 다르게 사용되고 있다. 영어로는 Light Rail이라 총칭할 수 있으며, 이 단어의 어원은 정확하지 않으나 미국의 trolley, streetcar, 영국의 tram, tramway의 완곡한 표현으로 1960년대에 처음 사용되었다고 알려져 있다. 미국의 대중교통협회(American Public Transportation Association; APTA)에서 말하는 Light Rail의 정의는 '중량철도와 비교하여 적은 수송량을 가진 전기철도로서 독립된 또는 공유된 right-of-way를 가지며, 고상 또는 저상 플랫폼에서 승하차하고, 1량 또는 다량으로 연결되어 있다. 또한 이것은 'streetcar', 'trolley car', 'tramway'로도 알려져 있다'고 되어있다. 또한, Transportation Research Board(TRB)에서는 'Light Rail Transit이란 지면에, 고가구조물상에, 지하에 독립된 right-of-way를 가지거나, 경우에 따라서는 가로상에 right-of-way를 가지고, 궤도 또는 차량바닥 높이로 승하차가 가능하며, 1량 또는 다량편성이 가능한 운영상의 특징을 갖는 도시 전기 철도 시스템이다'라고 정의하고 있다.

\* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

## 1.2. 연구의 범위

본 연구에서는 무인자동운전 경량전철의 사례를 분석하고, 비교할 유인운전시스템을 정의하여, 가상의 두 시스템간의 초기투자비용의 차와, 이로 인한 운영유지비의 차, 무인자동운전으로 얻을 수 있는 편익을 건설 후 30년간의 경제성 분석을 통해 분석한다.

## 2. 무인자동운전시스템

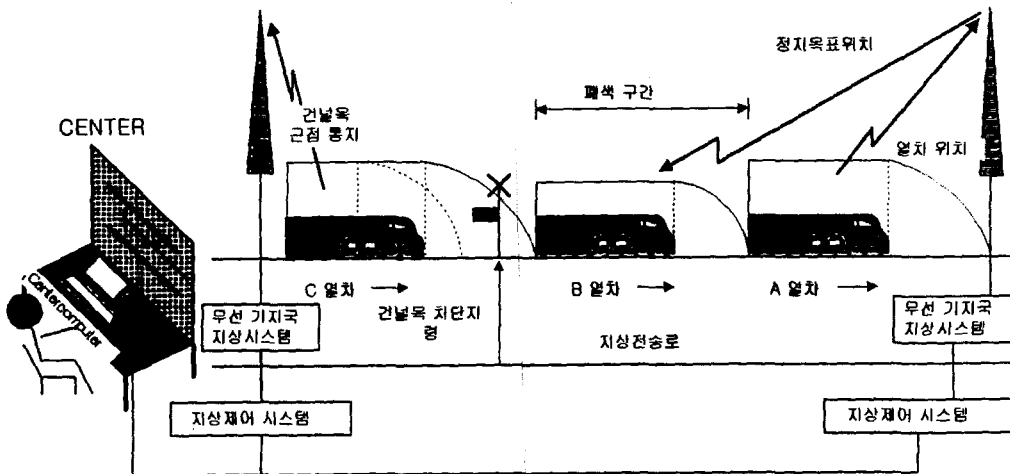
### 2.1. 무인자동운전시스템의 개요

무인자동운전이란 열차의 운행에 관한 모든 것을 자동으로 수행함에 덧붙여 승무원이 탑승하지 않는 완전한 자동운전이라 할 수 있다. 이것의 핵심은 신호제어시스템에 있는데, 현재 알려진 무인자동운전용 신호제어시스템으로는 일본의 CARAT, 캐나다의 SELTRAC, 미국의 AATC 등이 있다.

#### 2.1.1. CARAT

CARAT(Computer And Radio Aided Train control system)는 일본의 철도총합연구소가 1987년부터 개발하기 시작한 운전제어시스템으로 열차운전의 고속 및 고밀도 운전에 유연하고 경제적으로 대응할 목적으로 연구개발 및 실용화하고 있는 차세대 열차제어 시스템이다.

이 시스템은 궤도회로 등 선로변의 기기를 사용하지 않고 차상제어를 중심으로 하여, 차상-지상간에 디지털 무선에 의해 데이터를 전송하고 열차를 제어하는, 이동폐색에 의한 열차제어 시스템이다. 지상에 남은 기능은 차상에서 검출한 위치와 속도정보를 근거로 하여 폐색제어와 선로전환기제어, 경보제어 등과 같으며 <그림 1>은 시스템의 개념도를 표시한 것이다. CARAT은 일본의 신간선 등 주로 일본지역에서 널리 이용되고 있다.



<그림 1> CARAT 시스템 개념도

#### 2.1.2. SELTRAC

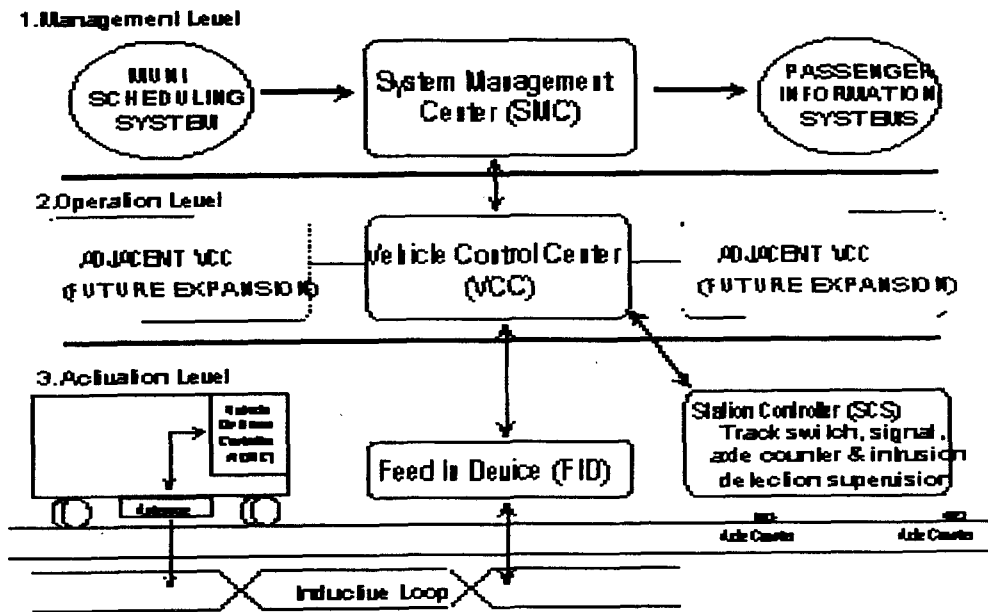
SELTRAC은 완전히 자동화된, 무인, 이동폐색 및 통신을 이용한 열차제어(CBTC: Communication Based Train Control) 시스템으로 운영되는 시스템이다.

SELTRAC은 이동체색의 개념에 근거한 시스템으로 경제적인 운전시격을 확보할 수 있으며 이 시스템의 장점으로는 운전시격의 최소화, 부가적인 하드웨어 없이 양방향운전이 가능하고 진로 및 스케줄조정과 다른 ATS기능을 위한 연속적인 열차확인이 가능하여 일시적인 속도제약의 통제를 포함한 완전한 속도프로파일의 제어하고 Health Monitoring Unit과 더불어 차량시스템의 선로변 모니터링이 가능하다는 것이다.

열차운행에 있어서 안전의 기본 요구조건은 다음으로 확인될 수 있으며 이러한 조건들은 차상, 궤도변 제어장소 및 원격 전철기 연동장치의 바이탈(Checked- redundant)컴퓨터 시스템에 의해 효과적으로 수행된다.

- 강제적인 안전한 열차분리
- 열차위치에 대한 전철기 채정
- 열차 속도제한시행

SELTRAC 시스템의 설계와 개발을 통하여 이중계(checked-redundant) 및 다른 fail-safe원리가 엄격하게 적용되었으며 전체시스템의 어떠한 레벨에서 고장이 발생하면 시스템을 안전조건으로 복귀하며, 3-레벨의 계층으로 구성되어 있다. 이 시스템의 개념은 <그림 2>와 같다.



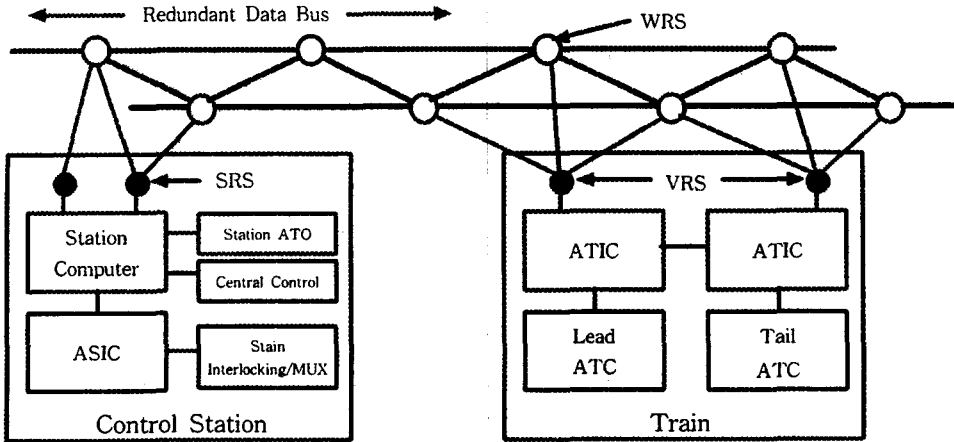
<그림 2> SELTRAC 시스템 구성도

SELTRAC은 캐나다 밴쿠버 Skytrain, Toronto SRT, 미국의 Detroit People Mover, 샌프란시스코의 MUNI, 영국의 Dockland Light Rail, 터키의 Ankara ART, 말레이시아의 PUTRA LRT 등 경량 전철에 널리 이용되고 있다.

### 2.1.3. AATC

AATC 시스템은 분산 구성의 지상장치와 차상장치로 구성되며, 각 지역 제어기는 SC(Station Computer)와 ASIC(Station Interface Controller)를 포함한다. SRS(Station Radio Set) 및 WRS(Wayside Radio Set)를 선로변에 설치하여 SC 및 차상장치와의 통신 중추로 사용한다. AATC

차상장치는 VRS(Vehicle Radio Set)와 ATIC(Train Interface Controller), 그리고 차상 ATC로 구성된다. <그림 3>은 AATC 시스템의 전체 개념도이다.



<그림 3> AATC 시스템 구성도

AATC는 다중 하드웨어 구조로써 고도의 신뢰성 및 유용성을 가지며, 정상동작 상태에서 한 시스템은 마스터로써, 또 한 시스템은 대기상태로 두 시스템이 동시에 모두 동작해 신뢰성을 높이고 있다. 이 시스템은 샌프란시스코 BART(Bay Area Rapid Transit) 등지에서 사용되고 있다.

### 3. 비용절감 효과 분석방법

무인자동운전에 대한 비용절감 효과를 분석하기 위해서 일반적인 공공투자사업에 널리 사용되는 비용/편익 분석을 사용하도록 한다. 정확한 효과 분석을 위해서는 각 시스템별 주요구성요소별 비용을 산출하고 이에 대한 유지보수비용을 산정한 후에 두 시스템 대안의 비용/편익 분석을 수행하고, 이 두 분석을 비교해야 한다. 그러나, 유인운전시에는 무인자동운전에 비교하여 편익이 없다고 볼 수 있으므로 본 연구에서는 두 시스템의 비용 차를 비용항목으로 보고, 무인자동운전시 얻을 수 있는 편익만을 편익항목으로 보는 하나의 시나리오에 대해서 단순 비용/편익 분석을 수행한다.

비용/편익 분석의 주요한 개념과 비용항목, 편익항목은 다음과 같다.

#### 3.1. 순현재가치(Net Present Value : NPV)

현재가치법이란 서로 다른 시간에 발생하는 다양한 항목의 편익과 비용을 현재가치로 환산하여 정책을 평가하는 방법이다. 여기서 기준년도의 현재가치로 할인하여 총편익에서 총비용을 제한 값이 순현재가치(NPV)이다.

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$$

$B_i$  : 연도별 편익,

$C_i$  : 연도별 비용,

$r$  : 할인율,

$i$  : 평가기간( $i=1, 2, \dots, n$ ).

현시점으로 전환된 편익이 비용보다 크면 제시된 대안은 정책으로 의미가 있음을 가리키며 그렇지 않으면 그 대안은 정책으로 의미가 없으므로 기각된다. 즉 순현재가치가 양(positive)인 사업은 자

본비용을 회수하고도 잉여가 발생하는 것을 의미하므로 투자타당성이 있는 것으로 판단한다.

### 3.2. 비용편익분석(Benefit/Cost Analysis)

정책 및 대안의 효과는 편익과 비용으로 요약된다. 여러 대안이 가지고 있는 각각의 비용과 편익을 분석하여 최적의 대안을 선택하는 방법이 비용편익분석이며 비용편익비(BCR)를 이용하는 방법이 널리 사용된다.

$$B/C = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+r)^i} / \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i},$$

$B_i$  : 연도별 편익,  
 $C_i$  : 연도별 비용,  
 $r$  : 할인율,  
 $i$  : 평가기간( $i=1,2,\dots,n$ ).

### 3.3. 내부수익률(Internal Rate of Return : IRR)

내부수익률이란 현재가치의 편익과 비용을 서로 동일하게 만드는 할인율이다. 내부수익률에 의한 기본적인 대안평가는 대안들의 내부수익률과 할인율, 즉 시간의 투자가치와 비교하므로써 이루어진다. 즉, 대안의 내부수익률이 할인율보다 높으면 비용의 수익률이 할인율보다 높다는 것을 의미하므로 그 대안은 실질적으로 편익을 증가시키는 정책대안이라 할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+r)^i} = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i},$$

$B_i$  : 연도별 편익,  
 $C_i$  : 연도별 비용,  
 $r$  : 내부수익률,  
 $i$  : 평가기간( $i=1,2,\dots,n$ ).

### 3.4. 비용항목

무인자동운전비용에 대한 사례로서 캐나다 밴쿠버시의 Skytrain 연장선 건설계약에 사용된 무인운전시스템 비용을 이용한다. 유인운전시의 시스템 비용은 현재 수도권전철 국철구간에서 운용되고 있는 ATC, ATS 비용을 철도청의 '2000년 신호업무자료'의 원단위를 이용, Skytrain 연장선과 같은 규모를 건설할 경우의 비용을 산출하여 사용한다. 유지보수 비용은 각 시스템이 처한 운용환경에 따라 변화가 심하므로, 각 시스템을 내구연한 30년으로 보고 30년 후 각 시스템을 재구축하기 위한 비용을 감가상각비를 유지보수비의 개념으로 30년간 정액법에 의해 배분한다.<sup>2)</sup>

### 3.5. 편익항목

무인자동운전의 편익으로는 인건비절감액, 운전시격 단축에 따른 편익, 평균운전속도 향상에 따른 편익 등이 있으나, 운전시격 단축과 속도향상에 따른 편익은 정량화에 어려움이 있어 인건비절감액만을 편익으로 본다.

2) 해당시스템을 사용하는데 소요되는 전력비용은 서로간에 상쇄할 수 있으므로 무시한다.

## 4. 무인자동운전의 비용 절감 효과 분석

### 4.1. 비용의 산출

무인자동운전의 시설비용으로는 SELTRAC을 이용하고 있는 Skytrain 연장선 건설계획을 사용하였다. 해당 노선은 연장 21km, 13개역, 60량의 차량으로 운행될 계획인데, 여기에 추가로 기존에 사용하던 150량의 차량에 새로운 차상장치(Vehicle On Board Controllers; VOBCs)와, 기존노선에서 운영하던 무인자동운전 시스템을 향상된 SELTRAC으로 갱신하는 것을 포함하여 총 미화 약 3천만 불에 최근 계약이 이루어졌다<sup>3)</sup>. SELTRAC은 궤도 전구간에 대하여 유도루프를 장착하기 때문에 다른 무인자동운전 시스템보다 가격이 고가로 알려져있고, 연장노선에 해당하지 않는 부분에 대한 정확한 비용을 입수하기 어려워 전체 비용의 80%를 시스템 비용으로 보았고, 환율은 1,130원/\$를 적용하였다.

유인운전의 시설비용은 수도권전철 구간 중 철도청이 운영하는 과천, 분당, 안산선에서 사용되는 ATC(Automatic Train Control)를 기준으로 삼았다. ATC의 구축비용은 km당 7억원<sup>4)</sup>으로 Skytrain의 연장선과 같은 규모로 할 경우, 총 147억원이 소요된다.

### 4.2. 편익의 산출

편익은 무인자동운전으로 얻어지는 편익만을 고려하며, 상대적으로 유인운전은 무인자동운전에 비해 편익이 없다고 본다.

무인자동운전으로 얻어지는 편익 중 계량화가 가능한 것으로 인건비 절감이 있으며, 인건비는 기존 경량전철 건설운영기본계획을 참고하여 승무원의 절감부분을 계산하였다. Skytrain 연장계획의 60량 차량이면 4량 1편성으로 할 경우 15열차를 구성할 수 있으며, 같은 규모의 열차가 소요되는 기본계획 자료<sup>5)</sup>에 의하면 1열차 1인 승무시 38명으로 산정하고 있고, 국철구간의 ATC를 기준으로 하면 1열차당 2인이 승무하고, 이에 따라 76명의 승무원을 감축할 수 있게 된다.

1인당 인건비는 '98년 운수창고 및 통신업 월평균임금인 1,417,072원<sup>6)</sup>에 연간특별급여를 월평균임금의 100%를 적용하고, 년평균 임금상승률을 적용한 21,487,346원/년을 적용하였다.

### 4.3. 비용/편익 분석

이와 같은 비용과 편익을 2001년부터 운행한다 가정하고 30년간의 비용/편익 분석을 수행한 개요가 <표 1>에 나타나 있다.

3) <http://www.alcatel.com>

4) 철도청, '2000년 신호업무자료', p. 321

5) 경기도, '부천시 경량전철 건설운영기본계획', 1997

6) <http://www.stat.go.kr>

<표 1> 비용/편익 분석 개요

단위:백만원

년도	무인자동운전(A)		유인운전(B)		분석대상 대안			
	시스템 비용	감가상각 (유지보수)	시스템 비용	감가상각 (유지보수)	비용 (A-B)	인건비 절감액	순편익	현재가 (NPV)
2000	27,120		14,700		12,420		-12,420	-12,420
2001		904		490	414	1,633	1,219	1,150
2002		904		490	414	1,633	1,219	1,185
2029		904		490	414	1,633	1,219	212
2030		904		490	414	1,633	1,219	200
합계	27,120	27,120	14,700	14,700	24,840	48,991	24,115	4,360

주) 현재가는 이자율 6% 경우임

비용/편익 분석시 자주 사용되는 NPV, B/C, IRR을 사회적 할인율(이자율) 6%, 8%, 10%의 세 가지의 경우로 나누어 분석한 결과가 <표 2>에 나타나 있다.

<표 2> 비용/편익 분석의 이자율에 따른 민감도 분석결과

구 분	6%	8%	10%
순현재가치(NPV)	4,360백만원	1,304백만원	-928백만원
비용/편익비(B/C)	1.241	1.076	0.943
내부수익률(IRR)	2.92%	1.01%	-0.82%

분석된 결과는 사회적 할인율이 8%일 경우를 기준으로 이보다 떨어질 경우는 무인자동운전의 비용절감효과가 나타나고, 이보다 올라갈 경우 효과가 떨어지는 양상을 보여준다. 통상 재무분석시 내부수익률이 사회적 할인율보다 높게 나올 때 그 사업의 재무적타당성이 높다고 할 수 있으나, 본 연구에서는 편익과 비용항목이 매년 같은 양상을 보이고 있어 내부수익율은 그다지 의미가 없다. 사회적 할인율 6%일 경우에 순현재가치는 약 44억원으로 전체 경량전철 건설사업비로 보면 그리 큰 액수는 아니나, 무인자동운전을 도입하여 얻을 수 있는 효과중에 본 연구에서는 인건비절감만을 고려했고, 운전속도의 향상, 향후 수송수요 증가시 배차간격의 단축이 용이한 점 등 계량하기 어려운 편익들을 고려한다면, 무인자동운전의 도입은 그 효과가 충분하다고 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 근래 그 효과에 대하여 논란이 일고 있는 경량전철의 무인자동운전의 비용절감 효과에 대하여 캐나다 밴쿠버 Skytrain에서 사용하는 SELTRAC 신호제어시스템과, 수도권전철 국철

구간에서 사용하는 ATC를 대상으로 최근의 사례를 이용하여 분석을 수행하였다. 분석결과 사회적 할인율이 6%일 경우 B/C 1.241, 8%일 경우 1.076, 10%일 경우 0.943으로 나타나 운전속도 향상에 따른 이용자 시간가치, 운전시각 단축 등의 효과를 고려하면 무인자동운전은 그 도입효과가 충분하다고 할 수 있다.

#### 참고문헌

- 1) 김홍배, '도시 및 지역경제:분석과 예측', 기문당, 1995
- 2) 건설교통부, '경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서', 1999
- 3) 경기도, '부천시 경량전철 건설운영기본계획', 1997
- 4) 철도청, '2000년 신호업무자료', 2000
- 5) 철도청, '고속철도와 기존철도의 직결운영에 대한 타당성조사', 1998
- 6) Greater Vancouver Transportation Authority, 'Strategic Transportation Plan', 2000
- 7) Greater Vancouver Transportation Authority, '1999 Financial Statement', 1999
- 8) <http://www.alcatel.com>