

녹색 신교통 시스템 바이모달트램의
수송수요 및 운행속도별 운영비용 분포특성 분석

**The Analysis of Distribution Characteristic on the Operation Cost for
Respective Transport Volume and Travel Speed of New Transit System
Bi-Modal Tram**

배을호*† 김경만** 신철호*** 김도한**** 박영곤*****
Bae, Eul-Ho Kim, Kyung-Man Shin, Cheol-Ho Kim, Do-Han Park, Young-Kon

ABSTRACT

The status and effectiveness of Bi-modal Tram is analyzed through the comparison of the transport effectiveness and operation cost between the public transportation systems (bus, light rail transit) considering the vehicle and operation characteristic of new transit system Bi-modal Tram. The standard operation schedule is established in consideration of the vehicle specification and operation characteristic of main public transportation modes, and then the annual average operation cost is estimated depending on the volume, speed, analysis length for respective public transportation mode. Through analyzing the operation cost and distribution characteristic of public transportation modes depending on the transport volume and travel speed, the operational efficiency suitable for the city is derived. It is concluded that the operational efficiency of Bi-modal Tram is superior to that of the bus and light rail transit on the aspect of travel volume and operation speed.

1. 서론

국내외적으로 다양화되고 있는 사회적인 요구에 맞춰 기존 도시철도 시스템을 보완하고 운영효율 및 고객이용의 편의성 측면을 보다 개선하는 신교통시스템에 대한 연구 및 개발, 도입 등에 대한 노력이 꾸준히 이루어지고 있는 상태이다. 신교통시스템은 일반적으로 기존 중량전철 시스템과 비교하여 첨단 IT기술 및 운영방식을 도입하여 건설비용 등 고정비용 뿐만아니라, 자동.무인 운전방식 도입에 따른 시스템 비용은 상대적으로 많이 소요되나, 운영단계에서 운전비용 절감효과가 있어 비용대비 효과가 높은 새로운 도시철도시스템으로 인식되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 신교통시스템의 운영비용 측면의 장점을 감안하여, 최근 국내에서 연구 개발된 녹색 신교통시스템인 바이모달트램 시스템의 생애주기적인 관점에서 운영효율성에 대해 검토하고자 하였다. 이를 위해 바이모달트램 시스템의 운영비용 규모 및 특성 분석은 다른 시스템과의 운영특성 분석을 위한 방법론을 정립하고 상호 비교를 통해 도시내 대중교통체계로서의 위상 및 도입 특성을 파악하고자 하였다.

*† 책임저자 : 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 상무, 구조기술사
E-mail : beh@hec.co.kr
TEL : (02)2166-8790 FAX : (02)2648-7808
** 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 부장
*** 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 차장
**** 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 대리
***** 정회원, 한국철도기술연구원, 바이모달수송시스템연구단, 책임연구원, 공학박사

2. 본론

2.1 바이모달트램 시스템 개요

바이모달트램 시스템은 철도의 정시성과 버스의 유연성을 충족시키면서 마그네틱 유도방식의 CNG-하이브리드 차량으로 운행되는 신교통시스템이다. 바이모달트램의 수송가능용량은 방향별 시간당 약 2,500~7,000명 수준으로 일반버스와 경전철(LRT) 용량의 중간 규모이고, 각 차량의 조향이 자유로워 정류장에서의 정밀정차가 가능한 점이 특징이다.

바이모달트램 시스템은 전용선로를 반드시 건설해야 하는 지하철이나 경전철(LRT)에 비해 사업비 및 건설기간 측면에서 유리하고, 차량이 경량의 복합소재로 구성되어 연료의 소모 또한 적을 것으로 기대된다.

또한, 환경문제가 크게 대두되고 있는 시대의 흐름에서, 바이모달트램은 유해가스의 배출이 거의 없는 CNG-하이브리드와 연료전지 엔진시스템을 사용하기 때문에 대기오염을 감소시키는 데 효과적이어서 향후 친환경 신교통수단으로 각광받을 것으로 기대된다.



그림 1. 바이모달트램 차량



그림 2. 친환경 선로형 포장

2.2 운영비용 특성 검토방법

2.2.1 검토방향

본 연구에서는 바이모달트램 시스템의 운영효과를 합리적으로 파악하기 위해, 도시지역내 주요 대중교통수단과 운영비용 규모를 상대적으로 비교함으로써 주요 대중교통 시스템간 운영비용 특성을 분석하고, 운영비용과 상관관계가 높은 수송수요, 운행속도를 주요 결정변수로 선정하여 일반적인 도시교통환경 아래에서 운영비용의 상대적인 분포특성을 도출하고, 운영비용 및 효율성 측면에서 바이모달트램 시스템의 도시대중교통 체계상의 위상 및 도입 특성 등에 대해 검토하였다.

바이모달트램 시스템의 운영비용 특성은 도시지역 전용선로 구간에서의 분석시스템의 운영을 전제로 각 분석시스템 대안별 차량제원 및 운행특성 등을 토대로 일반적인 운영기본계획을 수립하였다. 또한 이를 바탕으로 분석시스템 대안별 수송수요와 운행속도에 따른 단위연장당 연평균 운행비용 규모를 산출한 후, 바이모달트램 시스템을 중심으로 다른 시스템과의 상대적인 운영비용 규모에 대한 비교를 통해 운영효율 및 관련 특성을 파악하였다. 본 연구의 주요 분석환경 및 운영비용 검토를 위한 산정식을 정리하면 다음과 같다.

- 주요 대중교통 시스템 : 바이모달트램, 경전철(LRT), 일반버스
- 전용노선 분석연장 : 5km, 10km, 15km, 20km
- 수송수요 검토범위 : 수단별 정원 및 운행특성 등 고려, 1,000~10,000인/시.방향 기준
- 전용노선 운행요소 산정 : 운행속도별 차량대수 및 운전요원 산정(혼잡율 100%기준)
- 운영비용 산정 기준 : 도로 및 철도부문 예비타당성조사 표준지침(제5판) 참조
 - 세부항목 : 인건비, 유류비, 차량유지관리비, 시스템유지관리비, 인프라유지관리비(정거장, 선로), 차량구입비
 - 차량구입비 : 내구연한 기준으로 연간 차량구입비를 균등 분할 적용 (대체투자 미고려)
- 운영기간(10년)동안 발생한 수송수요 및 운행속도별 운영비용 추정결과를 km당 평균 운영비용으로 환산

- 바이모달트램 운영비용규모 분포특성 산정식 (다른 시스템과의 상대비교)

$$\overline{OC_{ij} Ratio} = \frac{\overline{OC_{ijm}}}{\overline{OC_{ijn}}}$$

여기서, $\overline{OC_{ij} Ratio}$: 수송수요, 운행속도별 다른 시스템 대비 단위연장당 연평균 운영비용 규모 비율

$\overline{OC_{ij}}$: 수송수요, 운행속도별 시스템의 단위연장당 연평균 운영비용 (억원/km.년)

m : 분석시스템 (바이모달트램), n : 분석시스템 (일반버스, 경전철)

i : 수송수요 (1,000~10,000인/시.방향), j : 운행속도 (15~70km/h)

- 주요 시스템별 단위연장당 연평균 운영비용 산정식

$$\overline{OC_{ijm}} = \frac{OC_{ijkm}}{P \cdot L_k}$$

여기서, $\overline{OC_{ijm}}$: 수송수요, 운행속도별 시스템의 단위연장당 연평균 운영비용 (억원/km.년)

OC_{ijkm} : 수송수요(i), 운행속도(j), 분석연장(k)별 시스템m의 운영비용

P : 운영비용 분석기간 (10년), L_k : 분석연장 (5, 10, 15, 20km)

$$OC_{ijkm} = (OCL_m + OCC_m + OCI_m)_{ijk} \text{ 또는 } (OCL_m + OCC_m + OCI_m + CC_m)_{ijk}$$

여기서, OCL_m : 시스템 m의 인건비

OCC_m : 시스템 m의 차량유지비 (차량유지관리비, 유류비, 동력비)

OCI_m : 시스템 m의 시설유지비 (인프라시설, 시스템설비 유지관리비)

CC_m : 시스템 m의 차량구입비 (초기투입비용 개념)

표 1. 운영비용 산정 흐름 및 산정식

구분	운영비용 산정 흐름도	운영비용 산정방안
운영기본계획		운전시각 (배차간격) : 60분/(첨두시 최대혼잡구간수요/차량정원)
		소요차량수 : 소요차량수 = 운행소요편성수+예비편성수 운행소요편성수 = 왕복운전시간/첨두시배차간격 예비편성수 = 운행소요차량수×예비율(10%)
		운행횟수/운행거리 : 운행횟수 = 운행시간(분)/차량배차간격 연간차량운행거리=노선연장×차량운행횟수×357일×2(왕복)
		운전요원 : 소요승무원 = 총 운전시간/1인당 운전시간 총 운전시간 = 일일운행횟수×왕복운전시간/60 총승무원=(소요승무원+예비승무원)/출근율
		인건비 : 소요 운전요원수×평균 운전요원 임금
운영비용산정		유류비 : 차량시스템 연비×연간운행거리×연료단가
		동력비 : Car.km당 전력소모량×전력비×연간운행거리
		차량유지관리비 : 차량유지관리비 원단위×연간운행거리
		시스템유지관리비 : 시스템유지관리비 원단위×시설연장
		인프라유지관리비 : 인프라시설유지관리비 원단위×시설연장
		차량구입비 : 차량단가×소요차량편성수
		총 운영비용 산정 : 분석환경 조건 → 연간 운영비용 → km당 연평균 운영비 → 차량구입비(분할)

2.4 바이모달트램의 운영비용 분포 검토

2.4.1 분석연장별 운영비용 분포특성

바이모달트램 시스템의 분석연장별 수송수요 및 운행속도에 따른 운영비용 분포 특성을 검토하면, 일반버스와 비교시 순수 운영비용은 전반적으로 낮은 수준으로, 차량비용을 포함한 운영비용은 수송수요 및 운행속도가 높을수록 상대적인 운영비용 규모가 낮은 수준의 분포를 나타내며, 경전철과 비교시 바이모달트램의 운영비용은 수송수요가 낮고 운행속도가 높을수록 상대적인 운영비용 규모가 낮은 수준의 분포를 나타내는 것으로 검토되었다.

특히, 바이모달트램 시스템의 운영비용 분포 특성은 분석구간 10~15km일 때, 다른 분석연장에서 보다 일반버스나 경전철과 비교시 운영비용 규모가 우수하게 나타났는데, 이는 차량배차간격 및 운영계획 특성 등의 영향으로 바이모달트램 시스템의 운영비용 규모가 다른 교통수단에 비해 운영비용 측면에서 경제성 및 경쟁력을 확보하는 적정 운행연장 규모의 범위를 나타내는 것으로 해석될 수 있다.

표 2. 분석연장별 바이모달트램의 평균 운영비용 분포특성

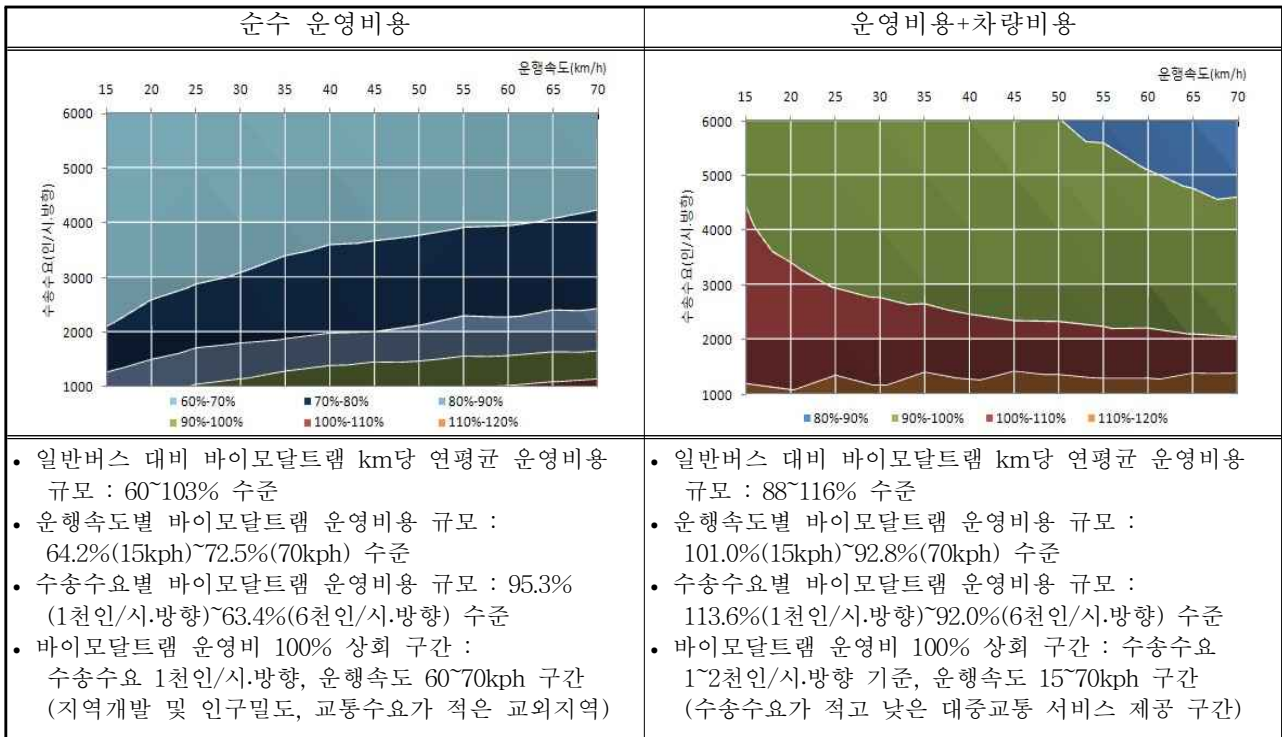
구분		분석연장 5km	분석연장 10km	분석연장 15km	분석연장 20km
일반버스 대비 바이모달트램 운영비용 분포특성	연간 운영비용				
	운영비용 + 차량비용				
경전철 대비 바이모달트램 운영비용 분포특성	연간 운영비용				
	운영비용 + 차량비용				

2.4.2 일반버스 대비 바이모달트램의 운영비용 분포 검토

도시대중교통체계상에서 바이모달트램의 일반적인 운영특성을 검토하기 위해, 일반버스와 상대적인 개념에서 연평균 운영비용 규모를 단위연장당 평균 운영비용으로 환산하여 수송수요 및 운행속도에 따른 분포 특성을 검토하였다.

바이모달트램 시스템의 운영비용 분포를 차량비용을 포함한 운영비용을 기준으로 검토하면, 수송수요 1,000인/시.방향이 하 영역에서는 바이모달트램 시스템이 일반버스 운영비용을 상회하나, 수송수요 2,000인/시.방향 이상, 운행속도 25km/h 이상인 영역에서는 일반버스 대비 운영효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 도시지역에서 일반버스보다 대용량의 수송수요를 처리하고 양질의 대중교통서비스를 제공할 목적인 경우, 바이모달트램의 도입 및 운영효율이 일반버스에 비해 우수한 것으로 판단된다.

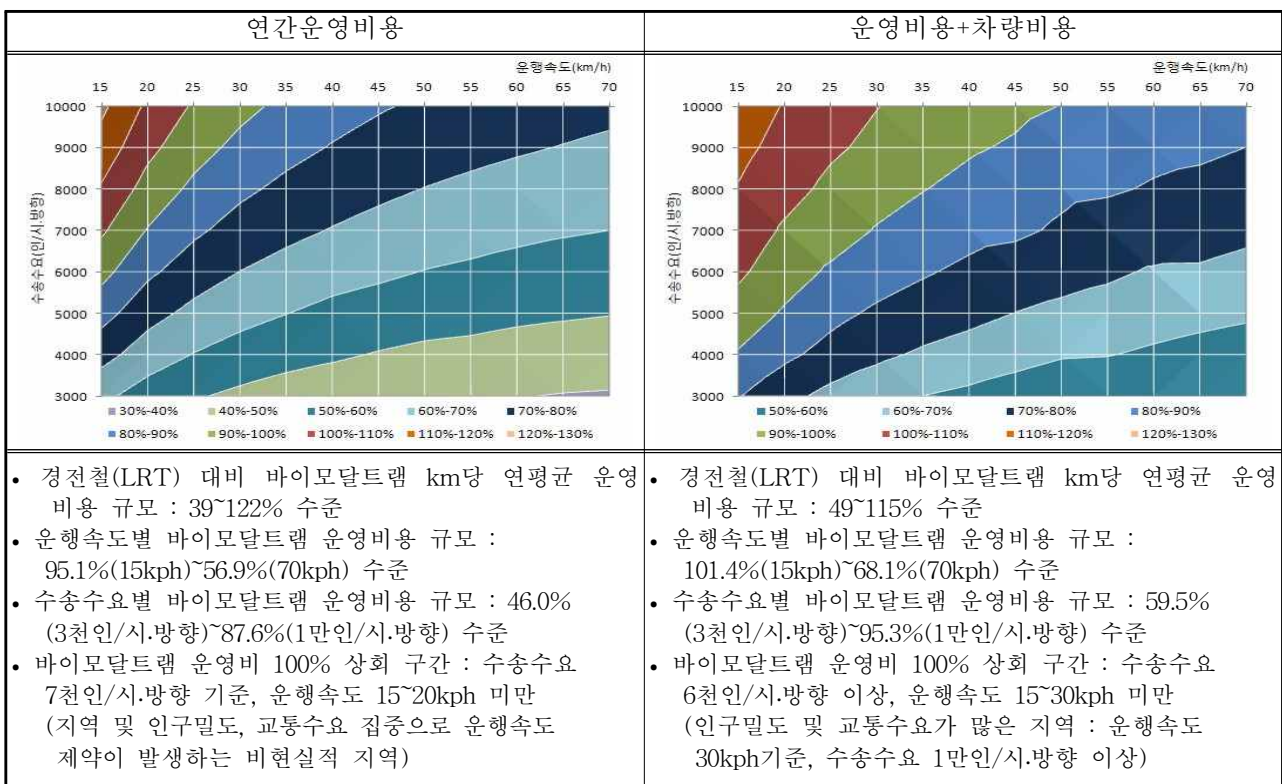
표 3. 일반버스 대비 바이모달트램의 평균 운영비용 분포특성



2.4.3 경전철 대비 바이모달트램의 운영비용 분포 검토

경전철(LRT)과의 상대적인 개념에서 바이모달트램 시스템의 연평균 운영비용 규모를 검토하면, 순수 운영비용 및 차량비용을 포함한 운영비용은 모두 수송수요 및 운행속도에 따라 유사한 분포특성을 나타내는 것으로 검토되었다.

표 4. 경전철 대비 바이모달트램의 평균 운영비용 분포특성



경전철(LRT) 및 바이모달트램과 같은 신교통시스템은 차량비용의 비중이 높으므로, 차량구입비용을 내구연한을 기준으로 연간 차량비용으로 환산·적용한 단위연장당 평균 운영비용 자료를 기준으로 바이모달트램의 운영비용 분포 특성을 검토하면, 도시철도 시스템의 계획기준인 운행속도 30kph 기준시 수송 수요 10,000인/시·방향 이하 영역에서 바이모달트램 시스템의 운영효율이 경전철(LRT)보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 바이모달트램 시스템이 도시대중교통체계상 경전철(LRT)보다는 낮은 수송수요에서 운영효율 및 경제적 효과를 나타내는 것으로 해석될 수 있다.

따라서, 바이모달트램 시스템을 도시지역 대중교통체계 운영특성 측면에서 검토하면, 도입지역의 수송 수요 및 대중교통 서비스 제공 목표인 운행속도에 따라 일반버스에 비해 우수하고, 일반버스와 경전철(LRT)사이의 중규모 수송수요 처리영역에서 운영효율이 우수한 것으로 분석되었다.

3. 결론

바이모달트램 시스템의 운영비용 특성에 대해, 일반버스 및 경전철(LRT)과 대비한 상대적인 개념에서 수송수요 및 운행속도별 단위연장당 연평균 운영비용 규모의 분포특성을 기준으로 살펴보았다.

바이모달트램 시스템의 운영비용 특성은 일반버스와 비교하면 수송수요가 높고 운행속도가 높은 영역에서 운영비용이 상대적으로 낮은 분포를 나타내는 것으로 분석되었는데, 이는 바이모달트램 시스템이 일반버스보다 더 많은 승객을 빠르게 수송하는 측면에서 운영효율이 우수한 특성을 나타내는 것이다.

경전철(LRT)과 비교하면, 수송수요가 상대적으로 낮고 운행속도가 높은 영역에서 운영효율이 우수한 것으로 나타났는데, 이는 바이모달트램 시스템이 경전철(LRT)보다는 수요밀도가 다소 떨어지는 중규모 수준의 수송수요를 빠르게 수송하는 측면에서 운영효율이 우수한 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

따라서 바이모달트램은 운영측면에서 도입대상지역의 대중교통 공급목표 및 수송 특성 등에 따라 계획수요가 일반버스보다 높고 경전철(LRT)보다는 다소 낮은 영역에서 고급의 대중교통 서비스를 제공하는 경우 운영효율이 우수한 것으로 판단된다.

이상에서 검토된 바이모달트램 시스템의 운영비용 분포 특성을 종합적으로 검토하면 바이모달트램은 일반버스와 경전철(LRT)의 중간적인 영역에 위치하며, 기존 도시내 대중교통체계간을 상호 연계·보완하는 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비 지원(06-교통핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 현대엔지니어링(주), “신에너지 바이모달 저상굴절차량 운영을 위한 시설물 기준개발 및 적용”, 교통체계효율화사업 제3차년도 연구보고서, 2009.
2. 한국개발연구원, “도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구 (제5판)”, 2008년도 예비타당성조사 연구보고서, 2008.
3. 국토해양부, “교통시설 투자평가지침 개정안”, 2009.
4. 한국철도기술연구원, “도시철도시스템 기술의 이해”, KRRI 철도기술총서 제2호, 2008.