

# 녹색 신교통 시스템 바이모달트램의 비용-수요 공급곡선을 고려한 도시 대중교통체계 적용 특성 분석

## Analysis of Applicability in the Public Transportation System considering the Cost-volume Supply Curve of New Transit System Bi-Modal Tram

김홍석\*†      김량균\*\*      함재현\*\*\*      전재청\*\*\*\*      윤희택\*\*\*\*\*  
Kim, Hong-seok    Kim, Ryang-Gyun    Ham, Jae-Hyun    Jeon, Jae-Cheong    Yoon, Hee-Taek

### ABSTRACT

We studied the cost-volume supply characteristic of public transportation systems focused on Bi-modal Tram in the main cities to analyze the applicability and status for the new transit system Bi-modal Tram as public transportation system. The operation cost considering the characteristic of vehicle, facilities, operation and average cost for respective public transportation system and the time cost considering the travel and transfer time are defined to the social cost, and the cost-volume supply curve is based on this social cost. The cost-volume supply characteristic between public transportation modes in the city is determined on the basis of cost-volume supply curve. Through the comparison between cost-volume supply characteristic of main transportation systems, it is analyzed about the relation between public transportation systems in the city and the characteristic for proper service provision. The application of Bi-modal Tram in the city is concluded that it is effective to reduce the social cost on the existing public transportation system.

### 1. 서론

최근 도시교통의 새로운 패러다임을 살펴보면, 도시교통환경의 다양성 및 복잡성, 노약자 및 교통약자에 대한 사회적 배려 및 관심, 양질의 교통서비스 및 이용 편의성을 추구하는 대중의 욕구와 더불어 친환경적인 도시교통체계에 대한 사회적인 요구가 증가하고 있다.

이러한 도시교통 패러다임 변화에 부합하여 기존 대중교통수단의 공급 목표를 만족하면서 도시철도 시스템을 보완하는 개념에서 첨단 IT기술 등과 접목되어 운영효율 및 승객 이용 편의를 극대화하는 신교통시스템에 대한 연구 및 개발, 도입에 대한 노력이 꾸준히 이루어져 왔다.

본 연구에서는 신교통시스템중 최근 국내 연구 및 개발중인 바이모달트램 시스템을 중심으로, 다양한 사회적 요구와 도시교통환경 하에서 신교통시스템(바이모달트램)의 대중교통체계상의 위상 및 기존 대중교통체계와의 관계 등을 비용공급 측면에서 파악하고자 하였다.

\*† 책임저자 : 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 이사, 교통기술사  
E-mail : hongseok@hec.co.kr  
TEL : (02)2166-8847 FAX : (02)2648-7809  
\*\* 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 차장, 구조기술사  
\*\*\* 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 과장, 교통기술사  
\*\*\*\* 비회원, 현대엔지니어링(주) 인프라.환경사업본부, 기반시설부, 사원  
\*\*\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 바이모달수송시스템연구단, 책임연구원, 공학박사

## 2. 본론

### 2.1 분석 방안 검토

국내외적으로 도시지역 대중교통체계는 대부분 도시철도(지하철)와 일반버스를 중심으로 구축 및 운영되고 있으며, 기존 대중교통수단의 단점을 보완하면서 다양한 승객편의 및 교통서비스 제공 등을 위해 신교통시스템의 도입 및 연구개발이 활발히 진행중에 있다.

신교통시스템은 차량 및 운영시스템의 특성에 따라 매우 다양한 형태로 구분되는데, 시스템 특성에 따라 AGT(자동안내계조식철도), 모노레일, 노면전차, 바이모달트램 시스템 등으로 구분할 수 있다.

이중 최근 국내에서 연구개발된 바이모달트램 시스템은 도로 위에 일반차로와 혼용 또는 전용 주행로를 설치하거나, 고가 및 지하공간에 전용 주행로를 설치하여 운행하는 고무차륜식 노면 신교통시스템으로, 정시성 확보, 건설비 절감, 기존 교통체계와의 연계 및 적용성, 운영비 및 공사비 절감, 친환경성 등의 측면에서 많은 장점을 가지고 있는 새로운 대중교통시스템으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 바이모달트램을 중심으로 새로운 신교통시스템 유형의 도시지역 대중교통체계 도입 특성 및 다른 기존 대중교통수단과의 관계를 살펴보기 위해, 도시대중교통환경 및 분석조건 등을 일반화하고 주요 대중교통시스템간의 조합을 통해 주요 분석대안을 선정하였다.

그림 1. 주요 도시지역 대중교통 시스템



분석대안은 주요 대중교통시스템인 일반버스, 바이모달트램, 경전철(LRT)을 기준으로, 기존 대중교통체계와 유사한 형태인 일반버스 연계노선 형태(버스+버스, 바이모달트램+버스, 경전철(LRT)+버스)와 전용노선 형태(바이모달트램, 경전철(LRT))로 구분하여 분석대안을 다음과 같이 세분화하였다.

표 1. 분석환경 및 분석대안 선정

분석 환경	시스템 분석 대안				
	구 분	교외연계	도시전용	교외연계	비고
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분석 네트워크 (분석연장 L=20km)</li> <li> </li> <li>• 분석환경 : 도심/교외 연계노선 구간</li> <li>• 분석조건 : 기존 도시 대중교통 운영체계                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교외지역 지선버스 연계 · 환승 구조</li> <li>- 교외 및 도심지역 전용노선 확장 구조</li> </ul> </li> <li>• 분석대안                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 버스+버스, 바이모달트램+버스, 경전철+버스</li> <li>- 바이모달트램, 경전철(전체구간)</li> </ul> </li> </ul>	검토연장	5km	10km	5km	
	Case 1	일반버스 (15km/h)	일반버스 (20km/h)	일반버스 (15km/h)	환승
	Case 2	일반버스 (15km/h)	바이모달트램 (35km/h)	일반버스 (15km/h)	환승
	Case 3	일반버스 (15km/h)	경전철 (40km/h)	일반버스 (15km/h)	환승
	Case 4	바이모달트램 전용노선 (35km/h)			전용
	Case 5	경전철(LRT) 전용노선 (35km/h)			전용

주 : ( ) 는 분석시나리오별 분석 환경내 평균 운행속도 가정치 (일반적인 운행속도 현황 고려)

## 2.2 비용-수요 공급곡선 도출

본 연구에서는 주요 대중교통시스템간의 상대적인 관계 및 대중교통 공급특성 등을 도출하기 위해, 사회경제적 관점에서 교통공급이론상의 비용항목 개념을 반영하고, 분석대안별 단위연장당 연평균 공급비용과 수송수요간의 관계를 통해 비용-수요 공급곡선을 도출하여 대중교통 적용특성을 분석하였다.

교통공급이론상의 공급비용은 크게 대중교통 노선선택, 적정 시스템 선정, 서비스 유형 결정 등에 있어서 아주 중요한 역할을 담당하고 있으며, 일반적으로 고정비용(fixed cost)과 변동비용(variable cost)으로 구분할 수 있다.

고정비용은 교통시설 건설 혹은 차량구입에 소요되는 자본비 성격을 갖고 있는데 일정한 시점에 한번 투자된 비용으로 정의되며, 변동비는 대중교통체계를 운영함에 따라 발생하는 비용으로 일반적으로 운전원의 인건비, 연료비 또는 동력비, 차량관리비 등이 있다.

대중교통 공급비용인 고정비용(초기비용)과 변동비용(운영비용)의 합계인 총비용을 1년간 비용으로 환산한 비용을 총연간비용 또는 평균비용(average cost)로 표현하기도 하는데, 본 연구에서는 분석대안별로 수송수요에 따라 분석환경에 맞게 운영기본계획을 수립하고, 초기 투입비용과 분석기간(10년 기준)동안 발생한 총 운영비용을 산출하여 분석대안별로 총 공급비용으로 산정하였으며, 분석연장과 분석기간을 고려하여 평균비용 개념에서 수송수요별 단위연장당 연평균 공급비용을 산정하였다.

$$\cdot \text{단위연장당 연평균 공급비용} = (\text{연간 고정비(초기비용)} + \text{연간 변동비(운영비용)}) / \text{분석연장}$$

산정된 분석대안별 연평균 공급비용을 기준으로 수송수요별 분포 및 추세식 파악을 통해 분석대안 조건을 고려한 공급비용과 수송수요간의 공급특성을 나타내는 비용-수요 공급곡선을 도출하였다.

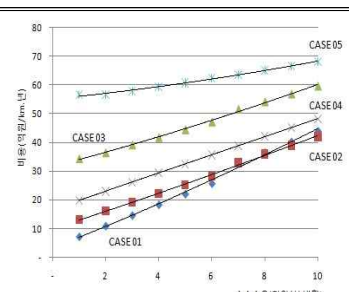
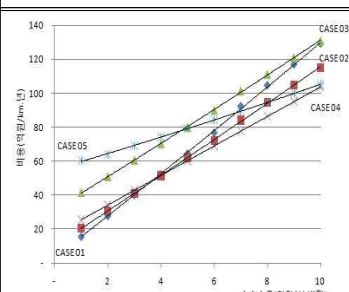
또한, 대중교통체계의 공공성 측면을 감안하여 대중교통이용에 따른 승객의 통행 및 환승시간을 시간 가치로 환산하여 사회적 비용 개념에서 시간비용을 포함하는 방안도 추가적으로 검토하였다.

따라서 본 연구에서는 도시지역 대중교통체계의 일반화된 분석환경을 고려하여, 주요 대중교통시스템을 중심으로 분석대안을 선정하고, 대중교통체계 공급에 소요되는 초기 및 운영비용을 중심으로 한 일반적인 공급비용과 승객의 이용시간을 계량화한 시간비용을 포함한 사회적인 공급비용을 중심으로 수송수요별 단위연장당 연평균 공급비용을 산정하고 이를 통해 비용.수요 공급곡선을 도출하였다.

표 2. 분석대안별 연간 운영비용 산정 방안

구분	운영비용 산정 흐름도	운영비용 산정방안	
운영기본계획		운전시격	60분/(침두시 최대혼잡구간수요/차량정원)
		소요차량수	<ul style="list-style-type: none"> <li>·소요차량수 = 운행소요편성수+예비편성수</li> <li>·운행소요편성수 = 왕복운전시간/침두시배차간격</li> <li>·예비편성수 = 운행소요차량수×예비율(10%)</li> </ul>
		운행횟수/운행거리	<ul style="list-style-type: none"> <li>·운행횟수 = 운행시간(분)/차량배차간격</li> <li>·연간차량운행거리=노선연장×차량운행횟수×357일×2(왕복)</li> </ul>
		운전요원	<ul style="list-style-type: none"> <li>·소요승무원 = 총 운전시간/1인당 운전시간</li> <li>·총 운전시간 = 일일운행횟수×왕복운전시간/60</li> <li>·총승무원=(소요승무원+예비승무원)/출근율</li> </ul>
운영비용산정		인건비	소요 운전요원수×평균 운전요원 임금
		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

표 3. 분석대안별 비용·수요 공급곡선 추세식 도출

일반적인 공급비용(시간비용 미포함)	사회적인 공급비용(시간비용 포함)
 <ul style="list-style-type: none"> <li>•Case 1 (<math>R^2=0.9958</math>) <math>y=0.0523X^2+3.637X+3.2238</math></li> <li>•Case 2 (<math>R^2=0.9982</math>) <math>y=0.0258X^2+2.9868X+9.9141</math></li> <li>•Case 3 (<math>R^2=0.9974</math>) <math>y=0.0418X^2+2.4485X+31.49</math></li> <li>•Case 4 (<math>R^2=1.0</math>) <math>y=-0.0032X^2+3.2001X+16.613</math></li> <li>•Case 5 (<math>R^2=0.9948</math>) <math>y=0.0399X^2+0.9263X+55.049</math></li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>•Case 1 (<math>R^2=0.9995</math>) <math>y=0.0523X^2+12.144X+3.2238</math></li> <li>•Case 2 (<math>R^2=0.9998</math>) <math>y=0.0258X^2+10.307X+9.9141</math></li> <li>•Case 3 (<math>R^2=0.9998</math>) <math>y=0.0418X^2+9.5707X+31.49</math></li> <li>•Case 4 (<math>R^2=1.0</math>) <math>y=-0.0032X^2+8.7408X+16.613</math></li> <li>•Case 5 (<math>R^2=0.9996</math>) <math>y=0.0399X^2+4.6201X+55.049</math></li> </ul>

2.3 비용-수요 공급곡선 분포 특성

경제성분석에서는 분석대안의 비용이 어떤 결정변수의 함수로 구성된 경우, 다른 대안이 동일한 변수의 함수이면 이들 대안간의 비용이 같아지는 값을 분기점(break-even point)라고 하며, 대안간 비용이 다른 경우, 결정변수의 변화에 따라 비용함수가 증가 또는 감소하게 되는데, 비용의 합이 어떤 결정변수에 의해 최소가 될 때, 이 점을 대안의 최적점(optimum point)으로 정의한다.

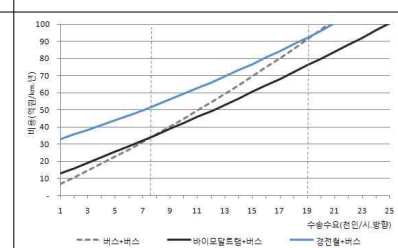
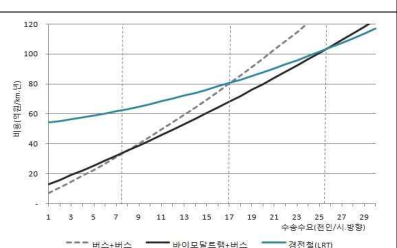
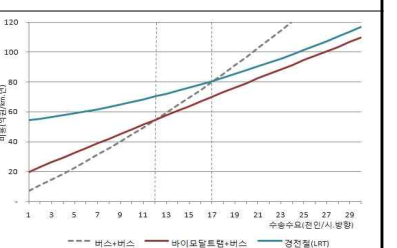
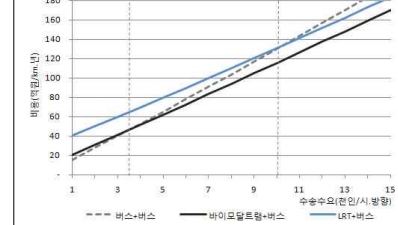
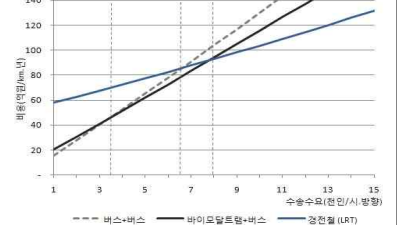
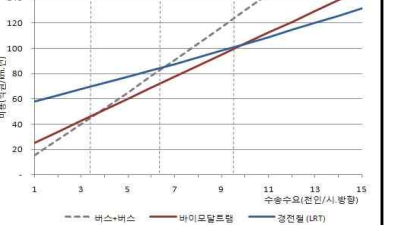
본 연구에서는 이를 반영하여 분석대안간 분포 및 도입특성, 상호 관계 등에 대한 검토는 도시교통환경 조건에서 수송수요 조건에 따라 분석대안간의 분기점을 대중교통체계의 전환점으로, 공급비용 규모가 최소가 되는 대중교통 분석대안을 적정 시스템 대안으로 검토하였다.

분석대안별 비용-수요 공급곡선을 통해 도출된 분포특성은 일반적인 공급비용과 사회적인 공급비용으로 구분하여 검토하면 <표 4>와 같다.

일반적인 공급비용과 시간비용을 포함한 사회적인 공급비용의 특성을 검토할 때, 분석대안간의 분기점(대중교통시스템의 전환시기)을 기준으로 할 경우, 사회적인 공급비용이 일반적인 공급비용보다 수송수요가 낮은 수준에서 대중교통시스템의 전환시기가 빠르게 나타나는 특성을 나타내고 있다.

일반버스와의 연계를 통해 대중교통체계를 운영하는 경우와 전용노선 중심으로 대중교통체계를 운영하는 경우를 살펴보면, 일반버스와 바이모달트램 또는 일반버스와 경전철(LRT)의 연계노선보다는 바이모달트램이나 경전철(LRT) 전용노선의 일반 및 사회적인 공급비용이 수송수요가 증가할수록 다소 낮은 형태를 나타내고 있다.

표 4. 분석대안별 비용·수요 공급곡선 분포도

구분	연계노선 구간	연계 + 전용구간	전용 구간
분석 대안	• 버스+버스, 바이모달트램+버스, 경전철(LRT)+버스	• 버스+버스, 바이모달트램+버스, 경전철(LRT)(전용)	• 버스+버스, 바이모달트램(전용), 경전철(LRT)(전용)
일반적인 공급 비용			
사회적인 공급 비용			

## 2.4 바이모달트램의 대중교통체계 적용특성 검토

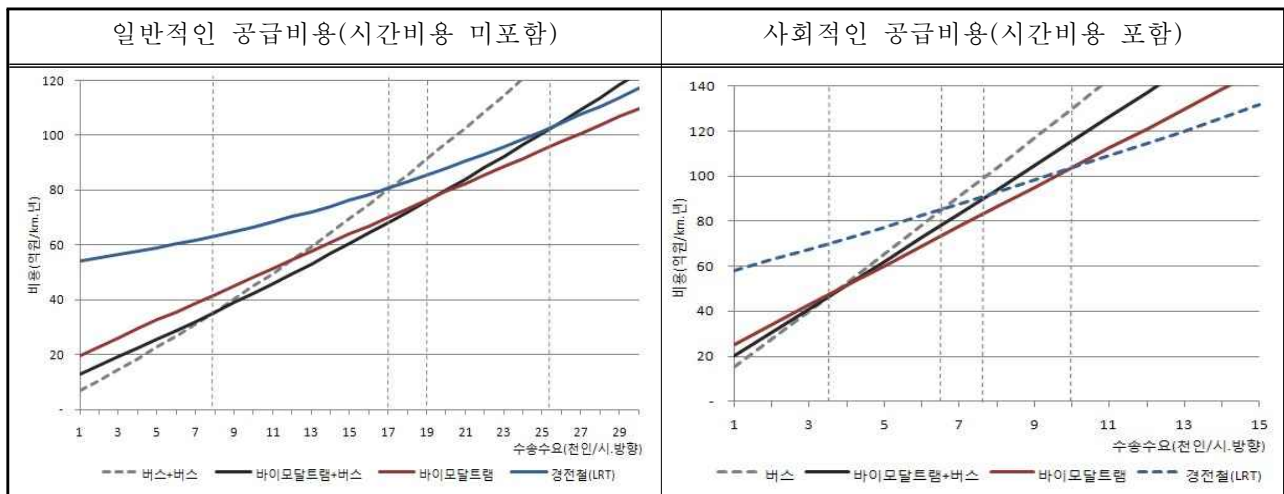
바이모달트램 시스템을 중심으로 분석대안간 비용-수요 공급곡선의 분포를 살펴보면, 사회적인 공급비용을 기준으로 한 분석대안간 전환점 분포가 일반버스와 경전철(LRT)은 수송수요 6.5천인/시.방향에서, 일반버스와 바이모달트램(버스연계, 전용)은 수송수요 3.5천인/시.방향에서, 바이모달트램(버스연계)과 경전철(LRT)은 7.5천인/시.방향, 바이모달트램(전용)과 경전철(LRT)은 10천인/시.방향에서 교차되어, 바이모달트램 시스템의 공급곡선이 일반버스와 경전철(LRT) 공급곡선과 상호 교차하며 삼각형(△) 형태의 교차영역을 형성하는 것으로 나타났다.

수송수요별 공급비용이 최소가 되는 분석대안은 일반버스 > 바이모달트램+버스 또는 바이모달트램(전용) > 경전철(LRT) 순으로 전환.공급되는 것이 최적의 대중교통공급체계 형태로 나타났다.

일반적인 공급비용을 기준으로 검토한 경우도 이와 유사한 형태의 교차영역 및 전환점 분포를 나타내고 있는데, 수송수요별 공급비용의 최소 분석대안이 일반버스 > 바이모달트램+버스 > 바이모달트램(전용)으로 전환.공급되는 형태가 최적의 대중교통공급체계 형태로 나타났다.

이는 바이모달트램 시스템이 일반적인 도시지역 대중교통체계상에서 일반버스와 경전철(LRT)과 비교했을 때, 수송수요 및 공급비용 측면에서 중간영역을 차지하며 대중교통공급체계 및 서비스 제공 등의 측면에서 보완적인 특성을 나타내고 있는 것으로 해석되었다.

표 5. 바이모달트램의 공급곡선 특성 검토

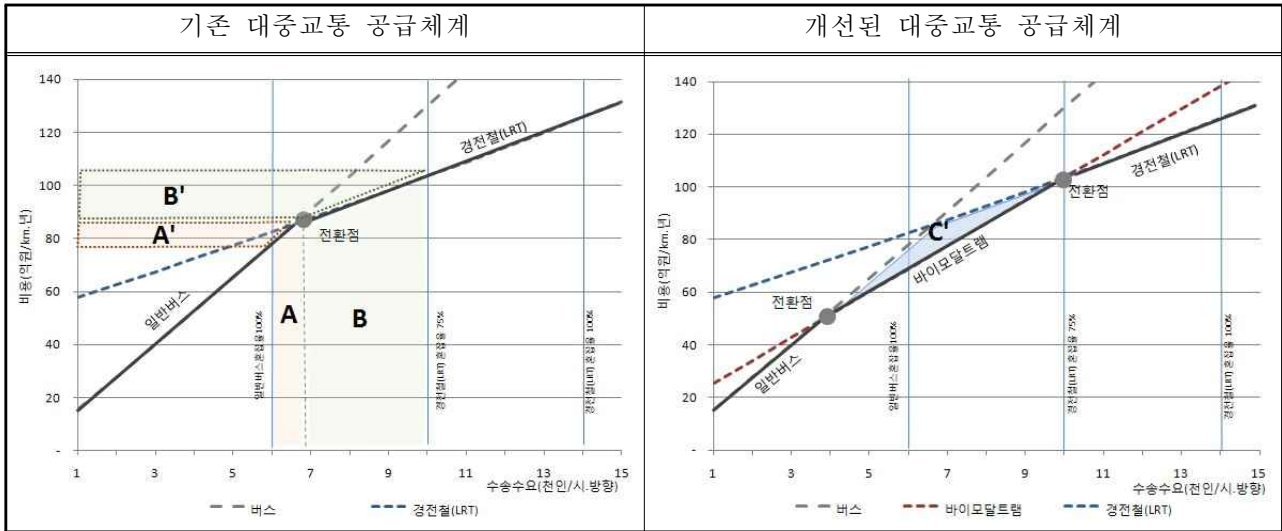


바이모달트램 시스템의 대중교통체계상의 위치 및 특성을 교통경제학적 측면에서 살펴보면, 기존의 도시지역 대중교통체계 공급특성은 수송수요 및 도시여건이 미숙한 초기단계에 일반버스 중심으로 대중교통 서비스를 공급하다가 수송수요 및 도시환경이 성숙되면 대용량의 도시철도 또는 경전철(LRT)로 전환되는 일반적인 대중교통 공급흐름을 갖고 있다. 그러나 이러한 기존 도시대중교통 공급체계에서 대중교통 공급과 수요간의 불균형 현상이 발생할 경우, 일반버스 중심의 대중교통공급체계에서는 서비스용량 초과로 인한 서비스 저하 및 혼잡 증가(A영역)와 이에 따른 시간손실 및 교통혼잡 비용(A'영역)이 발생하게 되고 경전철(LRT) 중심의 대중교통공급체계에서는 서비스용량 미달로 인한 공급과잉(B영역)과 운영적자 및 과잉투자(B'영역) 등이 사회적인 교통손실 비용으로 발생하게 된다.

이러한 경우, 기존 도시대중교통체계를 보완할 수 있는 중간적인 대중교통체계로서 바이모달트램 시스템을 도입한다면, 기존 대중교통체계가 가지고 있는 초기투자 및 운영비용, 시간비용 등의 측면에서의 공급비용을 절감(C'영역)하고 기존 공급체계상의 수송수요와 공급간의 불균형 문제 및 사회적인 손실비용을 최소화함으로써, 도시지역 대중교통공급체계를 보완 및 개선하는 효과를 도출하게 된다.

따라서 바이모달트램 시스템은 도시교통환경 성숙 및 수송수요 증가에 따라 경전철(LRT) 등 중대형 도시철도시스템의 전환시점 이전에 도시철도에 준하는 대중교통서비스를 제공함으로써, 향후 중대형 도시철도 시스템의 조기 공급에 따른 제반문제 최소화 및 도시철도 영역의 사전 확대 효과가 예상된다.

표 6. 바이모달트램의 대중교통 공급체계 개선 특성



### 3. 결론

녹색 신교통시스템인 바이모달트램 시스템에 대해 주요 도시 대중교통시스템(일반버스, 경전철)을 대상으로 비용-수요 공급곡선을 도출하여 사회경제적인 관점에서 대중교통공급 특성을 검토한 결과, 바이모달트램 시스템은 비용공급 특성상 기존 대중교통체계를 보완하는 중간적인 영역을 담당하게 된다.

또한, 바이모달트램 시스템은 도시 대중교통체계상에서 도시교통환경 성숙 및 수송수요 증가에 맞춰 경전철(LRT) 등 중대형 도시철도시스템의 전환시점 이전에 도시철도에 준하는 대중교통 서비스를 제공하고, 노선운영 사전경험 및 부지확보 등을 통해 향후 경전철 및 도시철도 시스템으로의 원활한 전환 및 조기 공급에 따른 제반문제를 최소화함으로써, 도시철도 서비스 영역을 확대하는 역할을 할 것으로 판단된다.

따라서 바이모달트램 시스템의 도시대중교통체계 적용은 기존 도시교통환경의 사회적 손실비용 최소화 및 대중교통공급체계의 개선효과가 예상되므로, 바이모달트램 시스템과 같은 신교통시스템의 보다 활발한 연구 및 도입검토를 통해 도시철도 시스템의 조기 도입환경을 조성한다면 기존 도시철도 시스템의 문제요인 보완 및 영역확대에 긍정적인 효과를 나타낼 것으로 기대된다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

1. 현대엔지니어링(주), “신에너지 바이모달 저상굴절차량 운행을 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. 한국철도기술연구원, “도시철도시스템 기술의 이해”, KRRRI 철도기술총서 제2호, 2008.
4. 원제무, 도시교통론, 박영사
5. 김영희 외, 경제성공학(제8판), 청문각