

■ 論 文 ■

일반균형이론을 이용한 고속도로 버스전용차로 효과분석모형

A General Equilibrium Model for Effect Analysis of
Bus-Exclusive Lane on Expressway

조 중 래

(명지대학교 교통공학과 교수)

하 혜 종

((주)대한콘설턴트 교통계획부)

목 차

- | | |
|---------------|----------------|
| I. 서론 | 3. 모형의 계수 |
| II. 모형 | 4. 더미보정 과정 |
| 1. 일반균형모형의 개념 | 5. 전용차로 효과분석방법 |
| 2. 실행모형의 정립 | 6. 효과분석결과 |
| III. 사례 연구 | IV. 결론 |
| 1. 대상지역 모형구조 | 참고문헌 |
| 2. 자료 | |

요 약

본 연구에서는 일반균형이론을 이용하여 버스전용차로의 효과분석모형을 정립하였고, 이 모형을 이용하여 경부고속도로의 버스전용차로에 대한 효과분석을 수행하였다.

본 연구에서 제안된 버스전용차로 효과분석모형에 있어 수요모형으로는 로짓모형을 사용하였고, 서비스모형, 즉 공급모형으로는 지체함수식을 사용하였다. 이를 통하여 버스전용차로 설치에 따른 교통수단간 전환수요를 내생화 하였다.

경부고속도로를 대상으로 한 사례분석의 결과, 버스전용차로의 효과를 극대화하는 혼잡수준이 존재한다는 것과, 버스전용차를 설치할 경우 교통수단간의 수요전이효과에 따라 버스뿐만 아니라 일반차로를 이용하는 승용차의 통행여건도 개선된다는 사실을 발견하였다.

I. 서론

버스전용차로제는 대중교통 우선정책의 가장 대표되는 정책사례로, 우리나라에서는 1996년 3월 현재 서울시의 39개 구간(연장 163.7km)에서 전일 버스차로제가 운영되고 있고, 경부고속도로 서초~청원 구간(연장 123.6km)에 주말버스차로제가 운영되고 있으며, 경인고속도로의 신월~서인천 구간(연장 13.5km)에는 다인승차량(HOV)전용차로제가 실시되고 있다.

그러나 이러한 버스차로제의 효과에 대하여는 긍정적인 평가와 부정적인 평가가 엇갈리고 있는 것이 현실이다. 그럼에도 불구하고 버스전용차로제에 대한 효과분석에 관한 연구는 매우 미미한 바, 그것은 이론적인 측면에서는 버스전용차로 설치로 인해 승용차 등 타 교통수단으로부터 버스로 전환되는 교통량을 반영할 수 있는 모형을 구성하기가 매우 어렵고, 또한 현실적으로는 버스전용차로 시행 전후의 관측자료를 구하기가 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 모형구성상의 어려움을 극복할 수 있는 버스전용차로 효과분석모형으로서 일반균형모형을 제안하고 실제의 사례분석을 통하여 버스전용차로제의 효과를 분석하였다. 본 연구에서 적용된 일반균형모형의 수요측면의 모형은 수단선택모형으로서의 로짓모형을 근간으로 하였고, 공급모형으로는 각 구간의 지체함수식을 사용하였다. 또한 경부고속도로 양재~대전(144.7km)간의 하행선 구간을 대상으로 경부고속도로 버스전용차로에 대한 효과를 분석하였다.

II. 모형

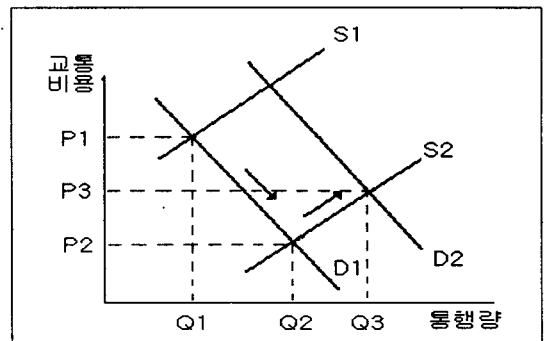
1. 일반균형모형의 개념

교통에서는 통행의 수요측면인 통행자의 노선선택의 합리적인 가정과 공급측면인 통행량의 변화에 따른 통행 비용의 변화라는 두가지 요소를 고려하여 일반균형(General Equilibrium)의 개념을 시스템 분석에 적용할 수 있다.

하나의 출발지와 하나의 도착지를 연결하는 단일

구간으로 이루어진 도로구간이 있고, 통행자는 그 도로구간을 통행할 때 승용차와 버스 중 하나의 교통수단을 이용할 수 있다고 가정하자. 또한 통행자가 두 교통수단 중 어떤 교통수단을 이용할 것인가 하는 것은 잘 알려진 비연속선택이론에 의하여 결정되고 선택행태에 미치는 결정요인은 통행시간과 비용이라고 가정하자. <그림 1>은 이러한 가정하에서 버스전용차로 설치에 대한 버스의 수요와 공급에 관한 일반균형의 개념을 설명한 것이다.

총 통행자의 수가 고정되어 있다고 가정할 경우, 버스에 대한 수요모형은 총통행자에 비연속선택이론으로부터 구성되는 버스의 선택확율을 곱하여 구성할 수 있고, 공급곡선으로는 도로구간을 운행하는 버스의 비용곡선, 즉 지체함수가 사용 될 수 있다. 교통에서의 지체함수는 평균비용함수이기 때문에 공급함수로는 적절하지 못하다는 지적이 있을 수 있다. 그러나 통행자는 한계비용을 인지하는 것이 불가능하고 따라서 통행자가 선택행위를 함에 평균비용을 기준으로 한다는 점에서 도로구간 사용에 대응하는 공급모형으로는 평균비용함수가 사용되어야 한다. 이러한 점에서, 일반경제학에서의 공급개념과 혼동되는 것을 방지하기 위하여 본 연구에서는 일반균형모형에서의 '공급함수' 혹은 '공급곡선' 이라는 용어에 대신하여 '서비스함수' 혹은 '서비스곡선' 이라는 용어를 사용하기로 한다.



<그림 1> 공급변화에 따른 교통수요 변화

<그림 1>에서 수요곡선 D_1 과 서비스 곡선 S_1 은 버스전용차로가 설치되기 전이었을 경우의 버스에 대한 수요와 서비스 수준을 나타낸 것이며 이때의 균형은 점

(Q₁, P₁)에서 이루어 진다. 이제 버스전용차로가 설치 되면 버스의 통행시간이 단축되고 이것은 버스 서비스곡선의 변화(S₁ → S₂)를 가져 와 새로운 균형상태 인 점(Q₂, P₂)로 균형점이 이동한다. 버스전용차로 설치로 인한 버스통행시간의 단축은 승용차 이용자로부터의 버스전환수요를 발생시키게 되며 그 결과 수요 곡선이 D₁에서 D₂로 이동하게 되어 새로운 균형상태 (Q₃, P₃)가 이루어 지게 된다.

이러한 기본개념을 적용하여 본 논문에서 사용하는 수요모형 D_k와 서비스모형 T_k의 구조를 살펴보면 다음과 같다.

$$D_k = N \cdot P_k(\bar{T}, \bar{C}), \text{ for all } k. \quad (1)$$

$$T_k = h_k(\bar{D}), \text{ for all } k. \quad (2)$$

식(1)에서 N은 총 수요, P_k는 교통수단 k를 선택할 확률, \bar{T} 는 각 교통수단의 통행시간 Vector, \bar{C} 는 각 교통수단을 이용하는 데 필요한 비용 Vector를 의미한다. 식(2)에서 T_k는 \bar{T} 의 요소로서 교통수단 k의 통행시간, h_k는 서비스 함수로서의 지체함수, \bar{D} 는 교통량 vector를 의미하며 교통수단 k의 수요 D_k를 요소로 한다.

식(1)에서, 이용가능한 n개의 교통수단 중 k를 선택할 확률 P_k는 아래의 로짓모형으로 나타낼 수 있다.

$$P_k = \frac{\exp(\alpha T_k + \beta \hat{C}_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(\alpha T_i + \beta \hat{C}_i)}, \text{ for all } k. \quad (3)$$

따라서, 식(1)과 식(3)에 의해 교통수단 k의 수요 D_k는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_k = N \cdot \frac{\exp(\alpha T_k + \beta \hat{C}_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(\alpha T_i + \beta \hat{C}_i)}, \text{ for all } k. \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 \hat{C}_k 는 통행료 및 연료비 등 통행 비용에 해당하는 것으로 이중 통행료는 전용차로의 설치와 관계없이 일정하며 연료비 등은 속도의 함수로 표현되고 때문에 결국 통행시간의 함수로 표현될

수있다. 따라서 통행비용항목 \hat{C}_k 는 모형의 보편성과 객관성을 해치지 않고 상수로 가정될 수 있는 바, 본 연구에서는 통행시간만을 변수로 가정한다.

식(2)에서 사용되는 지체함수 h_k에 BPR식을 적용하면 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k = T_k^0 \left[1 + \gamma \left(\frac{V(\bar{D})}{C} \right)^\delta \right], \text{ for all } k, \quad (5)$$

여기서, T_k : 교통량이 V 일때의 구간 통행시간

T_k⁰ : 자유교통류일때의 구간 통행시간

V(\bar{D}): 구간의 교통량

\bar{D} : 각 교통수단의 수요 Vector

C : 구간의 용량

γ, δ : 파라메타

버스전용차로에 대한 균형모형의 핵심은 식(5)에서 통상 VC비율이라고 이야기 되는 V(\bar{D})/C의 구성에 있다. 버스전용차로가 없을 경우 이 항에서 수요 \bar{D} 는 각 교통수단의 PCU를 합한 값이 되고 용량 C는 전 차선의 용량으로 구성된다. 그러나 전용차로가 있을 경우, 이 항은 두 개의 서로 다른 항으로 구분되어 일반차로의 수요는 버스를 제외한 교통량, 그리고 용량은 전 차선중 전용차로를 제외한 차선의 용량으로 계산된다. 마찬가지로 버스전용차로의 수요는 버스의 통행량으로, 그리고 용량은 버스전용차로의 용량으로 계산되어 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

(1) 버스전용차로가 없는 경우 :

$$T_a = T_a^0 \left[1 + \gamma \left(\frac{D_a + D_b + W}{C} \right)^\delta \right]$$

$$T_b = T_b^0 \left[1 + \gamma \left(\frac{D_a + D_b + W}{C} \right)^\delta \right]$$

(2) 버스전용차로가 있는 경우 :

$$T_a = T_a^0 \left[1 + \gamma \left(\frac{D_a + W}{C} \right)^\delta \right]$$

$$T_b = T_b^0 \left[1 + \gamma \left(\frac{D_b}{C_b} \right)^\delta \right]$$

위의 식에서 a 는 일반차로 및 버스를 제외한 여객 교통수단에 대한 index, b 는 버스전용차로 및 버스에 대한 index이고, D 는 pcu로 환산된 교통량, W 는 pcu로 환산된 화물차량의 교통량, C 는 도로용량을 나타낸다.

식(1)에서 식(5)까지의 모형식을 이용한 버스전용차로 균형방정식(Balancing Equations)은 다음과 같이 표현된다.

$$F_1^k(\bar{D}, \bar{T}) = D_k - N \cdot \frac{\exp(\alpha T_k + \beta \bar{C}_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(\alpha T_k + \beta \bar{C}_k)}, \text{ for all } k. \quad (6)$$

$$= 0$$

$$F_2^k(\bar{D}, \bar{T}) = T_k - T_k^0 [1 + \gamma (\frac{V(\bar{D})}{C})^\theta], \text{ for all } k. \quad (7)$$

$$= 0$$

식(6)과 식(7)은 2K개의 비선형연립방정식으로 구성되어 있고, 앞에서 설명된 바와 같이 통행비용 \bar{C}_k 는 상수로 가정될 수 있기 때문에 각 교통수단별 D_k^* 와 통행시간비용 T_k^* 가 균형변수가 된다¹⁾.

2. 실행모형의 정립 : Many-to-Many Case

본 항에서는 경부고속도로구간에 대한 버스전용차로 효과분석을 위한 균형모형을 설정한다. 고속도로구간의 진출입구를 출발 및 도착지로 가정하고 여러개의 출발지와 여러개의 도착지가 있는 경우의 모형을 구성한다. 이를 위하여 다음을 가정하였다.

- (1) 각 기·종점간의 총수요는 고정되어 있다.
- (2) 버스전용차로의 설치여부와 관계없이 각 구간별 화물교통량은 일정하다.
- (3) 버스전용차로에 대한 승용차의 불법적 운행은 고려하지 않는다.
- (4) 진출입을 위한 버스의 일반차로 이용으로 인한

정체는 고려하지 않는다.

1) 변수의 정의

모형을 구축함에 있어 사용될 변수들을 다음과 같이 정의한다.

- k : 교통수단 (여기서, a : 승용차 b : 버스 w : 기타 교통량)
- i, j : 기점과 종점을 나타내는 index로 물리적으로는 고속도로구간의 각 IC의 위치에 해당하는다.
- l : 고속도로 진출입 IC의 index로 물리적으로는 기종점을 나타내는 i 나 j 와 동일하다.
- N_{ij} : 기점 i 에서 종점 j 간의 총 수요(trip)
- $D_{k|ij}$: 기점 i 에서 종점 j 간 교통수단 k 의 수요 (trip)
- $P_{k|ij}$: 기점 i 에서 종점 j 에서 교통수단 k 를 선택할 확률
- W_{ij} : 기점 i 에서 종점 j 간의 기타 교통량(pcu)
- $T_{k|ij}$: 기점 i 에서 종점 j 간 교통수단 k 에 의해서 변환된 통행 시간(분)
- $T_{k|ij}^0$: 기점 i 에서 종점 j 간 교통수단 k 의 교통량이 0일 때 통행시간(분)
- $C'_{k|ij}$: 기점 i 에서 종점 j 간 교통수단 k 가 통행하는데 필요한 비용(원)
- $X_{k|ij}$: 기점 i 에서 종점 j 간의 교통수단 k 의 기타 속성치
- $T_{k|l_{i+1}}$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서 교통수단 k 의 통행시간(분)
- $T_{k|l_{i+1}}^0$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서 교통수단 k 의 교통량이 0일 때 통행시간(분)
- $V_{l_{i+1}}$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서의 교통량(pcu)
- $V_{k|l_{i+1}}$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서 교통수단 k 의 교통량(pcu)
- $C_{l_{i+1}}$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서 총 용량(pcu)
- $C_{k|l_{i+1}}$: l 에서 $l+1$ 로 가는 구간에서 교통수단 k 의 용량(pcu)
- m_k : 교통수단 k 의 평균재차인원(인/대)

1) 일반적으로 버스는 운행Schedule에 따라 운행되기 때문에 통행수요에 대한 차량차량운행의 반응이 비탄력적으로 나타난다. 그러나 본 모형은 장기모형(Long-Run Model)이기 때문에 수요에 대한 차량운행의 탄력성 문제는 없을 것으로 판단된다.

θ_k : 교통수단 k 의 승용차 환산 계수
 $a, \beta, \gamma, \delta, \tau$: 파라메타

2) 모형

기점 i 에서 종점 j 로 가는 여러개의 O-D pair에 대한 버스전용차로 균형모형은 다음과 같이 구성될 수 있다.

(1) 버스전용차로가 없을 경우

버스전용차로가 없을 경우, 기점 i 에서 종점 j 로 가는 교통수단 k 의 수요모형은 식(8)과 같이 표현할 수 있다. 식(8)에서 교통수단의 수요 D_k 는 각 수단의 통행시간과 비용, 기타 속성값에 의해 결정된다.

$$D_{kij} = N_{ij} \frac{e^{\alpha_k T_{kij} + \beta_k C_{kij} + \tau_k \bar{X}_{kij}}}{e^{\alpha_a T_{ajj} + \beta_a C_{ajj} + \tau_a \bar{X}_{ajj}} + e^{\alpha_b T_{bjj} + \beta_b C_{bjj} + \tau_b \bar{X}_{bjj}}}, \quad \text{for all } i, j, k, \quad (8)$$

기점 i 에서 종점 j 로 가는 교통수단 k 의 서비스모형은 수단 k 가 기점 i 에서 종점 j 까지 통행하는데 걸린 통행시간 $T_{k|ij}$ 로 구성되는 데 이는 기점과 종점 사이에 있는 각 구간의 통행시간 $t_{k|l, l+1}$ 의 합으로 표현된다.

$$T_{kij} = \sum_{l=i}^{j-1} T_{k|l, l+1}, \quad \text{for all } i, j, k, \quad (9)$$

식(9)에서 각 구간의 수단 k 의 통행시간을 나타내는 $T_{k|l, l+1}$ 은 식(10)과 같다.

$$T_{k|l, l+1} = T_{k|l, l+1}^0 [1 + \gamma (\frac{V_{l, l+1}}{C_{l, l+1}})^\delta], \quad \text{for all } l, k, \quad (10)$$

또한 식(10)에서의 각 구간의 교통량을 나타내는 $V_{l, l+1}$ 은 각 기점에서 각 종점까지 통행하는 교통량 중에서 그 구간을 통과하는 교통량들의 합으로 표현된다.

$$V_{l, l+1} = \sum_{i=1}^l \sum_{h=l+1}^j (\frac{D_{a|i, h}}{m_a} + \theta_b \frac{D_{b|i, h}}{m_b} + \theta_w W_{i, h}), \quad \text{for all } l. \quad (11)$$

식(8)에서부터 식(11)까지를 이용하여 균형방정식

을 도출하면 식(12) 및 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} & D_{kij} - N_{ij} \cdot P_{kij} \\ &= D_{kij} - N_{ij} \frac{e^{\alpha_a T_{ajj} + \beta_a C_{ajj} + \tau_a \bar{X}_{ajj}}}{e^{\alpha_a T_{ajj} + \beta_a C_{ajj} + \tau_a \bar{X}_{ajj}} + e^{\alpha_b T_{bjj} + \beta_b C_{bjj} + \tau_b \bar{X}_{bjj}}} \\ &= 0, \quad \text{for all } i, j, k \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & T_{kij} - F(\bar{D}) \\ &= T_{kij} - \sum_{l=i}^{j-1} t_{k|l, l+1} \\ &= 0, \quad \text{for all } i, j, k \end{aligned} \quad (13)$$

이 비선형 균형 연립 방정식의 결정변수는 수요 Vector \bar{D} 와 통행시간 Vector \bar{T} 로, 방정식 및 결정변수의 수는 각각 $2 \times I \times J \times K$ 개이다.

(2) 버스전용차로가 있을 경우

버스전용차로가 있을 경우에는, 수요모형은 식(8)과 같이 버스전용차로가 없을 때와 동일하다. 또한, 공급모형 역시 식(9)와 같이 버스전용차로가 없을 때와 동일하지만, 각 구간에서 수단 k 의 통행시간은 다음과 같이 정의된다.

$$T_{a|l, l+1} = T_{a|l, l+1}^0 [1 + \gamma (\frac{V_{a|l, l+1} + V_{w|l, l+1}}{C_{a|l, l+1}})^\delta], \quad \text{for all } l, \quad (14)$$

$$T_{b|l, l+1} = T_{b|l, l+1}^0 [1 + \gamma (\frac{V_{b|l, l+1}}{C_{b|l, l+1}})^\delta], \quad \text{for all } l, \quad (15)$$

여기에서,

$$V_{a|l, l+1} = \sum_{i=1}^l \sum_{h=l+1}^j \frac{D_{a|i, h}}{m_a}, \quad \text{for all } l. \quad (16)$$

$$V_{b|l, l+1} = \sum_{i=1}^l \sum_{h=l+1}^j \theta_b \frac{D_{b|i, h}}{m_b}, \quad \text{for all } l. \quad (17)$$

$$V_{w|l, l+1} = \sum_{i=1}^l \sum_{h=l+1}^j \theta_w W_{i, h}, \quad \text{for all } l. \quad (18)$$

버스전용차로가 있을 경우의 균형방정식은 식(12)와 식(13)과 같이 버스전용차로가 없을 때와 동일하

게 표현된다.

III. 사례 연구

1. 대상지역 모형구조

분석 대상은 본 연구의 공간범위에서 설정한 경부 고속도로 폐쇄식 운영구간을 중심으로 한 양재~대전 구간(연장 144.7km)으로 하행선만 고려하였으며, 기종점 및 각 구간은 양재~수원~기흥~오산~안성~천안~목천~청주~청원~신탄진~대전 구간을 대상으로 하였다. 고속도로의 IC를 수요발생 및 도착지점으로 가정하여 Node로 처리하였으며 각 IC간 구간은 Link로 처리하였다. 이렇게 하여 구축된 분석대상의 Node수는 11개, Link수는 10개로 구성된다. 따라서, 기점 11개, 종점 11개인 O-D matrix에서 하행선만을 고려하므로, 사례분석모형은 승용차와 버스의 수요에 관한 방정식이 각각 55개, 각 수단에 대한 통행시간에 관한 방정식이 각각 55개로 총 220개의 비선형 연립방정식으로 구성되고 이로부터 각 기종점별 각 수단별 수요와 통행시간이 결정된다.

2. 자료

1) 기종점 통행량

앞에서 언급된 바와 같이 본 모형에서는 각 기종점간 총통행량은 고정되어 있다고 가정한다. 따라서 교통량의 변화에 따른 고속도로 버스전용차로의 효과를 분석하기 위해서는 관찰된 기준 O/D가 필요하다. 본 연구에서는 기준O/D로서 경부고속도로내 폐쇄식 운영구간에서의 IC간 O/D를 사용하였는 바, 본 연구에서 사용된 기준O/D 자료는 1995년 1년 동안의 도로

공사 내부자료이다.

수집된 O/D자료의 원래 형태는 연간 영업실적자료로 구성되어 있어 이를 그대로 본 연구에 활용하기에는 부적합 것으로 판단되었다. 따라서 연간 O/D에 해당하는 이들 자료를 1년 365일을 기준으로 1일 O/D로 변환하였고, 1일 24시간 O/D에 구간별 12시간 환산계수 K^2 를 적용하여 12시간 O/D로 변환하였다. 현재 운영중인 버스전용차로의 효과를 분석하려면 주말 O/D 자료가 있어야 하지만, 주말에는 관측된 자료가 없으므로 본 논문에서는 평일 평균 12시간 차종별 O/D 자료를 이용하였으며³⁾, 차종은 승용차, 버스, 기타 교통량으로 구분되어 있다.

3. 모형의 계수

균형모형에서 사용되는 파라메타는 <표 1>과 같다.

<표 1> 균형모형에서 사용되는 의 파라메타

서비스모형 (지체 함수)	수요모형 (Logit모형)
수단별 자유통행시간 교통용량 평균재차인원 승용차 환산계수 γ, δ	α_a, α_b β_a, β_b 수단별차량운행비

1) 서비스모형의 계수

교통수단 k 의 자유통행시간 T_k^0 은 교통수단 k 의 자유속도에 의해 구할 수 있다. 고속도로에서 교통수단 k 의 자유속도는 차로수에 따라 달라진다. 따라서, 승용차는 왕복 8차로의 경우는 125KPH, 왕복 4차로의 경우에는 115KPH를 사용하였으며⁴⁾ 버스는 왕복 8차로의 경우는 100KPH, 왕복 4차로의 경우에는 90KPH를 사용하였다.⁵⁾ 또한, 교통수단별 재차인원은 경인·경수 고속도로에서 조사된 결과를 이용하였는 바 승용차 평균재차인원은 $m_a=1.5$ 인/대, 고속버스 평균재차인원으로는 $m_b=24.8$ 인/대를 사용했다.⁶⁾

2) 한국도로공사, 1995년 고속도로 교통량 조사, 1996.

3) 이는 본 연구의 목적이 현재의 경부고속도로 버스전용차로에 대한 실질적인 효과 분석에 있는 것이 아니라 고속도로 버스전용차로 효과분석모형을 제안하고 그의 운용방안을 제시하며, 교통량의 변화에 따른 전용차로의 효과가 어떻게 변화하는 지를 예시적으로 보여주고자 하는 것이기 때문에 평일 기준교통량을 기준O/D로 사용 하여도 무방하다고 판단되었다.

4) 강호익, 도로유형별 지체함수 정립과 교통배정에 미치는 영향분석, 1996, 8.

5) 김연규, 이수범, 경부고속도로 제한속도 연구, 1996.

6) 교통개발연구원, 고속도로 전용차선제 실시방안, 1992.

승용차 환산계수로는 1992년 건설부에서 펴낸 "도로용량편람"에 의해 고속도로의 경우, 도로의 전반적인 특성만을 고려하는 일반지형에서의 버스 승용차 환산계수로 $\theta_b=1.3$, 그리고 기타 교통량은 화물차로 간주하여 $\theta_w=1.5$ 의 승용차 환산계수를 적용하였다.

교통용량은 차선당 2,200대/시를 적용하였고⁷⁾, BPR식의 파라메타로는 왕복 8차로에서는 $\gamma=0.77$, $\delta=1.20$ 을, 그리고 왕복 4차로에서는 $\gamma=0.48$, $\delta=1.91$ 를 사용하였다.⁸⁾

2) 수요모형의 계수

수요 모형으로 사용한 로짓 모형에서 통행시간 및 비용에 대한 파라메타는 본 연구의 대상이 고속도로라는 점을 감안하여 고속도로 통행에 대한 계수값을 적용하여야 하는 바 본 연구에서는 1991년에 수행된 「고속도로 편익조사와 통행요금체계에 관한 연구」(도로공사)에서 추정된 계수값을 적용하였다.

<표 2> 효용함수의 교통수단별 파라메타

교통수단	파라메타	
	시간 / 거리	ln(비용 / 거리)
승용차	$\alpha_a = -2.834(-65.2)$	$\beta_a = -2.379(-112.4)$
버스	$\alpha_b = -1.753(-26.8)$	$\beta_b = -2.024(-58.7)$

자료: 한양대학교 산업과학연구소, 고속도로 편익조사와 통행요금체계에 관한 연구, 1991. 12.

효용함수 중 통행비용은 승용차를 이용하는 경우는 통행료, 연료비 및 기타 차량운행비, 버스를 이용하는 경우는 요금으로 구성된다. 이중 차량운행속도의 함수로 표현되는 연료비를 제외한 나머지 비용들

은 버스전용차로의 설치여부와 관계없이 일정하다고 가정할 수 있다. 또한 통행시간과 비용을 제외한 기타 속성 X_k 역시 상수항으로, 본 사례분석모형에서는 위의 두 변수의 값을 효용함수의 더미항목에 포함시켰다.

한편, 효과분석을 위하여 필요한 차량운행비용은 차량 특성, 도로의 특성에 따른 차량운행비용의 관계식을 사용하여 산정하였는 바, 본 연구에서 사용된 차량운행비 함수식은 다음과 같다.

$$VOC_k = a_{k1} + a_{k2} \cdot S_k + a_{k3} \cdot S_k^2 + a_{k4} \cdot \ln S_k$$

여기에서, S_k 는 차종 k 의 평균속도를 나타낸다.

<표 3> 차량운행비용 모형의 교통수단별 파라메타

교통수단	a_1	a_2	a_3	a_4
승용차	3409	1.845	-0.00620	-83.77
버스	5802	-0.994	0.01396	-96.91

주) 1993년도 운행비용에 불가상승율을 감안하여 추정된 값.

4. 더미보정 과정⁹⁾

통행시간과 비용을 제외한 기타 속성 X_k 역시 상수항이므로 이 두 변수는 효용함수의 더미값에 포함시켜 계산할 수 있다. 이제 승용차에 대한 더미를 d_{ij} 라고 하면 i 에서 j 까지의 교통수단 $k(k=a$ for Auto, $k=b$ for Bus)의 수요 D_{kij} 는 다음과 같이 표현된다.

$$D_{ij} = N \frac{e^{\alpha_a T_{ij} + d_{ij}}}{e^{\alpha_a T_{ij} + d_{ij}} + e^{\alpha_b T_{ij}}}$$

7) 시간당용량을 12시간으로 환산하여 12시간용량을 사용하였다. 이론적 측면에서 '12시간용량'의 개념은 정의되지 않고 따라서 현실적으로 12시간용량을 적용하는 데에는 무리가 따른다. 그러나, 버스전용차로의 효과분석은 전일을 대상으로 수행되어야 하며, 따라서 수요와 서비스관련 입력자료로는 전일자료가 사용되어야 할 것이다. 또한, 본 연구의 주 목적은 버스전용차로의 설치에 따라 발생하는 전환수율 내생화하여 전용차로의 효과를 분석하는 일반균형모형을 개발하는데 있는 바, 본 연구에서 사용된 12시간용량의 BPR식은 정확한 교통량배분 결과를 구하기 위함이라기 보다 단순히 서비스함수(공급함수)의 한 형태로서 제시되고 사용되었다고 보는 것이 타당할 것이다. 즉 여기에서 제안된 일반균형모형의 하위모형으로서의 서비스 함수의 요건은 '수요의 증가에 따라 서비스수준은 감소한다'는 것이며 따라서 이러한 일반적 원칙만 지켜진다면 여러가지의 다양한 형태의 서비스함수가 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

8) 강호익, 도로유형별 지체함수 정립과 교통배정에 미치는 영향분석, 1996. 8.

9) 일반적으로 시뮬레이션을 위한 모형작업에 있어서는 관찰된 자료를 기초로 기본모형(Base Case)에 대하여 외생적으로 사용된 각종 상수값에 대한 보정과정을 거치게 된다. 본 고에서의 로짓모형 더미보정과정(Dummy adjustment process)은 각 대안의 특성변수로서의 더미값을 보정하는 과정을 의미한다.

$$D_{bij} = N \frac{e^{\alpha_b T_{bij}}}{e^{\alpha_a T_{bij}} + d_{ij} + e^{\alpha_b T_{bij}}}$$

여기에서 T_{kij} 는 i 에서 j 까지의 교통수단 k 의 통행시간을 의미한다.

한편 A_{ij} 및 B_{ij} 를 각각 i 에서 j 까지의 기준시점의 관찰된 승용차와 버스의 통행수요라고 하고, 관찰된 수요와 로짓 모형에 의해 예측되는 수요가 같다고 하면,

$$\frac{B_{ij}}{A_{ij}} = \frac{D_{bij}}{A_{ij}} = \frac{e^{\alpha_b T_{bij}}}{e^{\alpha_a T_{bij}} + d_{ij}}$$

가 된다. 위 식의 양변에 자연로그를 취하면,

$$\ln\left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right) = \alpha_b T_{bij} - \alpha_a T_{bij} - d_{ij}$$

가 되고, 이로부터 i 에서 j 까지를 운행하는 승용차의 승용차 더미 d_{ij} 는 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$d_{ij} = -\alpha_a T_{bij} + \alpha_b T_{bij} + \ln A_{ij} - \ln B_{ij}, \text{ for all } (i, j).$$

위의 식에 의하여 계산된 더미를 사용함으로써 기준시점의 관찰치와 예측치를 일치시킬 수 있으며, 이로부터 버스전용차로의 설치 등으로 인한 외생적 변화의 영향을 보다 정확하게 분석할 수 있게 된다.

5. 전용차로 효과분석방법

본 연구에서는 앞에서 설정된 모형과 자료를 통하여 대하여 버스전용차로에 대한 효과를 분석하였다. 버스전용차로의 효과에 대한 논쟁의 쟁점은 교통량의 변화에 따라 그 효과가 어떻게 달라 질 것이며, 또한 버스전용차로의 설치기준이 되는 교통량이 존재하는가, 그리고 존재한다면 버스전용차로를 설치하기위한 최소혼잡정도는 어느정도이며, 더 나아가 전용차로의 효과가 최대가 되는 혼잡수준은 과연 존재하는가 하

는 점이다. 이러한 점에서 본 연구에서는 기준관찰 OD로부터 OD교통량을 변화시켜가면서 교통혼잡의 변화에 따른 효과변화를 분석하였는 데, 분석지표로는 버스전용차로가 없을 경우의 MOE값에 대한 전용차로를 운용할 경우의 MOE값의 변화율을 사용하였다. 효과분석을 위한 MOE로는 수단별 교통량 및 수단분담율, 수단별 평균통행시간비용, 총 통행시간비용, 수단별 평균 운행비용, 수단별 총 운행비용, 총일 변화비용 등을 사용하였다.

6. 효과분석결과

관측한 O/D 교통량을 기준교통량(Base Case:이하 "B"라고 표현)으로 하여 전체 O/D 수요를 0.5배, 1.5배, 2배 등으로 10배¹⁰⁾까지 증가시켜 가면서 교통량 변화에 따른 버스전용차로제의 효과를 분석하였다¹¹⁾.

여기서 기준 교통량 B에서의 O/D의 총통행량 및 구간교통량은 다음과 같다¹²⁾.

- 총통행량 : 195,823Trip/12시간
- 서울을 기점으로 하는 통행량 : 136,902Trip/12시간
- 최대 구간(서울~수원)의 교통량 : 40,584대/12시간
- 최소 구간(청주~청원)의 교통량 : 12,278대/12시간

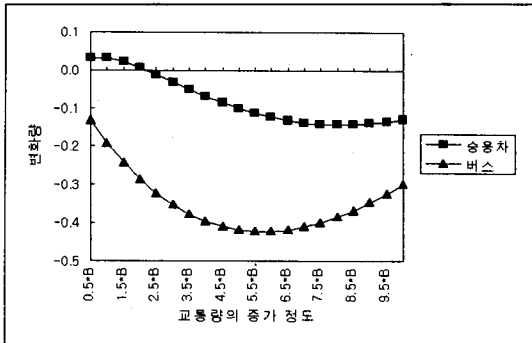
1) 수단교통량 변화 분석

<그림 2>는 서울~수원 구간의 버스전용차로 설치에 따른 교통수단별 V/C의 변화를 보여 준다. <그림 2>에서의 '변화량'은 버스전용차로를 설치하기 전과 설치한 후의 일반차로와 전용차로의 V/C의 변화량을 나타낸다.

승용차의 경우 비혼잡시 버스전용차로가 있을 때에는 일반차로의 혼잡이 증가하는 현상을 보이고 있는데 이것은 버스전용차로 설치로 인한 일반차로의 용량감소효과가 승용차로부터 버스로의 수요전환효과보다 더 크기 때문이라고 판단된다. 그러나, 통행수

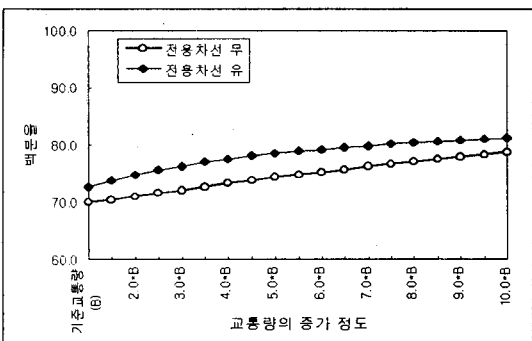
10) 기준교통량의 10배가 되는 것은 현실적으로 불가능하나 연구를 위한 이론적 관찰을 위하여 기준교통량의 10배까지를 가정하였다.
 11) 현재의 기준점간 통행분포는 변하지 않는다고 가정하였다.
 12) 비교를 위하여 기준교통량의 5.5배가 되는 5.5×B에서의 혼잡정도를 보면, V/C 비율을 기준으로 할 때 최대혼잡구간에서는 1.59, 최소혼잡구간에서는 0.45정도이다.

요가 증가할수록 승용차로부터 버스로 전환하는 전환 수요가 증가하여 일반차로의 혼잡도 감소하게되는 현상을 보이고 있다. 전체적으로 볼 때, 통행수요가 기준교통량의 2.5배정수준부터 전용차로 뿐만 아니라 일반차로의 통행여건도 좋아지고 있음을 볼 수 있다.

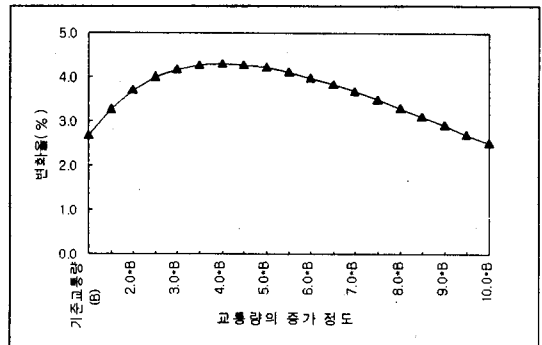


〈그림 2〉 전용차로 설치에 따른 차로별 V/C의 변화¹³⁾

〈그림 3〉에서 교통량의 증가에 따른 버스의 분담율은 버스전용차로가 없을 때와 있을 때 모두 증가한다는 것을 보여 준다. 이것은 수요 모형으로 사용한 로짓 모형에서 변수에 대한 각 교통수단의 한계 효용은 다르다고 가정하여 버스와 승용차의 변수에 대한 계수가 다른 값을 가지기 때문이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 승용차의 통행시간에 대한 계수는 -2.834 이고, 버스의 통행시간에 대한 계수는 -1.753으로 버스보다 승용차의 수요 감소 비율이 더 크다.



〈그림 3〉 버스 분담율의 변화



〈그림 4〉 전용차로 운영시 버스통행량 변화

〈그림 3〉에서는 전용차로 설치에 따른 버스분담율의 변화를 나타내고 있다. 기준교통량에서의 버스의 분담율은 약 70%를 보이고 있으나 전용차로가 운영될 경우 그 분담율은 약 72%가되어 약간 증가함을 나타내고 있다. 이러한 전용차로 설치에 따른 버스분담율의 변화는 교통량이 기준교통량의 4배정도되는 지점에서 가장 크게 나타나고 있는 데, 이러한 현상은 〈그림 4〉의 버스교통량의 변화에서도 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 통행수요가 기준 교통량의 4.0배 이상이 되는 시점부터 전용차로의 설치로 버스수요의 증가효과는 점차 감소하는데, 그 이유는 기준 교통량의 4.0배 이상인 경우부터 버스전용차로 역시 혼잡해져서 승용차로부터 버스로의 수요 전환효과가 감소하기 때문이다¹⁴⁾.

2) 수단별 통행시간 변화분석

〈그림 5〉는 버스전용차로를 운영할 경우, 서울을 기점으로 각 종점까지의 수단별 통행시간 변화를 보여 준다. 비교적 혼잡하지 않은 기준교통량의 0.5배인 경우(〈그림 5(a)〉)와 기준교통량인 경우(〈그림 5(b)〉), 승용차는 전용차로가 없을 때보다 있을 때 통행시간이 더 증가하지만 버스의 통행시간은 감소한다. 이것은 앞에서 설명된 바와 같이 전용차로가 설치됨에 따라 일반차로의 용량이 감소하기 때문이다.

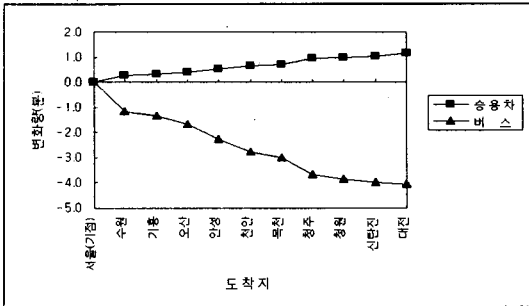
기준교통량의 2.5배인 경우(〈그림 5(c)〉)부터는 전용차로가 없을 때보다 있을 때 승용차의 통행시간도

13) 그림에서 '승용차'는 일반차로를, '버스'는 전용차로를 의미한다.

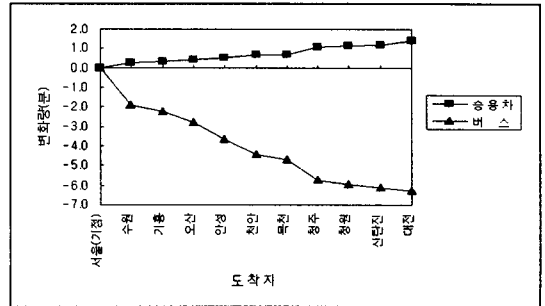
14) 기준교통량의 4.0배인 경우 버스전용차로 최대혼잡구간의 V/C는 0.83을 나타내었음.

감소하기 시작한다. 그 이유는 이때부터 용량감소효과보다 수요전환효과가 더 크게 나타나기 때문이라고 판단되며, 다만, 목천~청주 구간에서부터 일반차로의 통행시간 감소가 둔화됨을 보이고 있는데 이것은 목천~청주 구간은 편도 3차선 구간으로서 서울부터 목

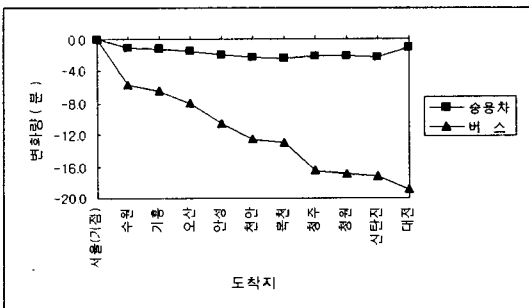
천까지의 4차선 구간에 비하여 전용차로 설치에 따른 일반차로의 용량감소효과가 더 크기 때문이라고 판단된다. <그림 5(c)>에서 보듯이 이러한 현상은 편도 2차선 구간인 신탄진~대전 구간에서 더 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다.



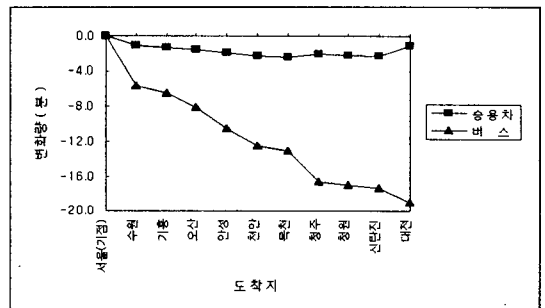
(a) 기준교통량의 0.5배인 경우 (V/C = 0.08~0.23)



(b) 기준교통량의 경우 (V/C = 0.12~0.38)



(c) 기준교통량의 2.5배인 경우 (V/C = 0.24~0.83)



(d) 기준교통량의 5.0배인 경우 (V/C = 0.42~1.47)

<그림 5> 전용차로 설치에 따른 기준점간 통행거리별 통행시간의 변화¹⁵⁾

3) 통행시간비용 및 차량운행비용 분석

<그림 6>은 버스전용차로 설치 전후의 통행시간비용¹⁶⁾의 변화를 보여주고 있다. <그림 6(a)>에서 볼 때 기준교통량의 경우, 버스전용차로를 설치하면, 고속도로 이용자의 총통행시간비용은 약 55% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 감소추세는 교통량 증가에 따라 지속되다가 교통량이 기준교통량의 5.5배 정도 되는 시점에서는 전용차로의 설치에 따라 총비용이 15%정도가 감소되어 전용차로제의 효과가 극대

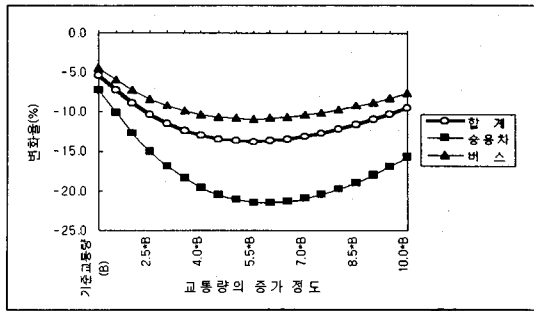
화되는 것으로 분석되었다. 그러나 <그림 6(b)>에서 보듯이 고속도로의 교통량이 기준교통량의 3배 정도에 이르기까지 일반도로구간을 이용하는 승용차의 인-Km당 평균 통행시간비용은 버스전용차로의 설치로 인하여 오히려 증가함을 보이고 있으나 <그림 6(b)>에서 보듯이 총통행시간비용은 감소하고 있다. 이것은 전용차로의 설치에 따라 일반차로의 용량감소로 승용차의 인-Km당 평균통행시간비용은 감소하나 버스로의 전환수요가 발생함에 따라 승용차의 교통량

15) 그림에서 변화량=버스전용차로 운영시의 통행시간 - 버스전용차로가 없을 때의 통행시간

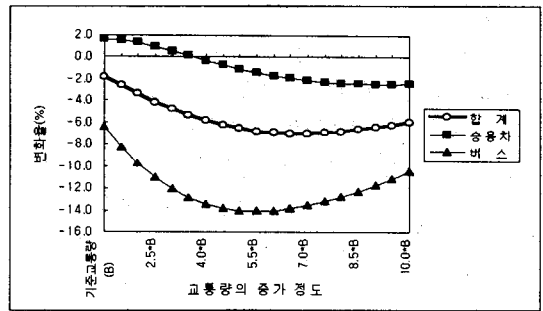
16) '통행시간비용'은 통행시간에 시간가치를 곱하여 환산된 비용으로서 본 연구에서는 「교통혼잡비용 예측연구」(KOTI, 1992)에서 추정된 시간가치를 적용하여, 승용차 이용자에 대하여는 6,174원/h, 버스이용자에 대하여는 4,054원/h를 가정하였다.

이 감소하기 때문이다. 이에 반하여 버스의 경우는 그 반대현상을 보이고 있는 바, 전용차로의 설치에 따라 버스의 평균통행시간비용은 크게 감소하나, 버

스로의 전환수요가 발생하고 이로 인하여 버스의 교통량이 증대됨에 따라 버스 총통행시간비용의 감소율은 상대적으로 낮게 나타나고 있다



(a) 총통행시간비용



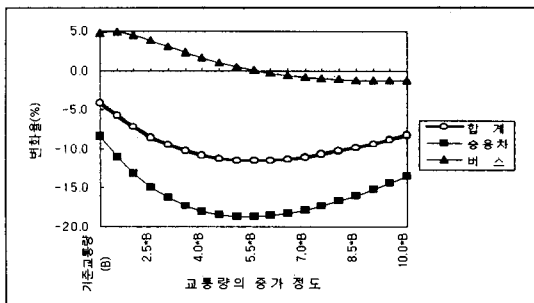
(b) 인-km당 평균통행시간비용

〈그림 6〉 전용차로운영에 따른 통행시간비용의 변화¹⁷⁾

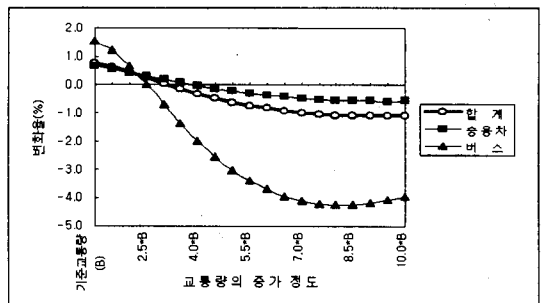
한편, 〈그림 7〉은 전용차로 설치 전후의 차량운행비용의 변화를 보여주고 있다. 일반차로를 이용하는 승용차의 경우는 통행시간비용의 변화추세와 유사한 양상을 보이고 있으나, 버스의 경우에 있어서는 평균 차량운행비용과 총차량운행비용에 있어 전용차로설치에 따른 감소효과가 미미한 것으로 나타났으며, 특히 교통량이 기준교통량의 5.5배정도에 이를 때까지 버스의 총차량운행비용은 전용차로의 설치에 따라 오히려 증가하고 있음을 보이고 있다. 이는 버스의 경

우 전용차로의 설치에 따라 버스의 운행속도가 경제속도 이상으로 증가하고 이에 따라 버스의 연료소모량이 증대되며, 동시에 버스로의 전환수요가 증가하면서 버스의 차량 교통량이 증가하기 때문이다.

〈그림 7(b)〉에서 보듯이 전용차로의 설치에 따른 총차량운행비용의 감소효과는 앞의 총통행시간비용에 있어서와 같이 교통량이 기준교통량의 5.5배정도에 되는 수준에서 극대화되는 것으로 분석되었고, 그 이후부터는 점차 감소효과가 줄어들음을 보이고 있다.



(a) 총차량운행비용



(b) Veh-km당 평균차량운행비용

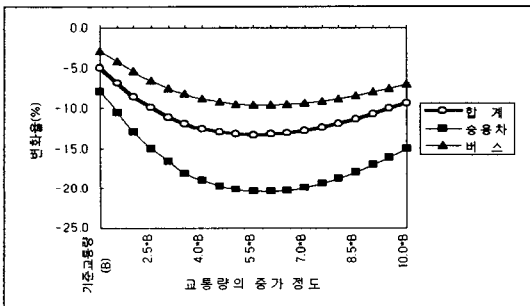
〈그림 7〉 전용차로운영에 따른 차량운행비용의 변화

17) 그림에서의 '변화율'은 전용차로 설치 전후의 시간비용의 변화율을 의미한다.

4) 일반화비용 분석

버스전용차로의 효과분석에 있어 종합평가지표로 사용될 수 있는 MOE는 일반화비용¹⁸⁾일 것이다. <그림 8>은 전용차로 운영에 따른 총일반화비용의 변화를 보여주고 있다.

전용차로를 설치할 경우, 기준 교통량 수준에서 System의 총일반화비용은 약 5.0% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 전용차로 설치에 따른 System의 총일반화비용의 감소율은 교통량의 증가 정도에 따라 점점 증가하다가 기준 교통량의 5.5배정도에서는 감소율이 13%정도에 달해 가장 큰 감소효과를 나타내고 있다¹⁹⁾. 이 후부터 교통량이 증가되어 가면서 감소효과는 점차 둔화되어 감을 볼 수 있는데, 이는 버스전용차로제의 효과를 극대화시키는 적정 혼잡수준이 존재한다는 것을 의미한다.



<그림 8> 전용차로운영에 따른 총일반화비용의 변화

IV. 결론

본 연구에서는 고속도로 버스전용차로의 효과분석을 위한 일반균형모형을 개발하고, 경부고속도로구간을 대상으로 사례분석을 수행하였다. 본 연구에서 제시된 일반균형모형의 특징은 버스전용차로 설치에 따른 교통수단간의 수요전이 효과를 내생화 하였다는 점이며, 사례분석을 통하여 얻어진 결론을 정리하면

다음과 같다.

첫째, 버스전용차로제의 효과를 극대화시키는 적정 수준의 혼잡이 존재한다.

둘째, 버스전용차로를 설치할 경우 교통수단간의 수요전이효과에 따라 버스뿐만 아니라 일반차로를 이용하는 승용차의 통행여건도 개선된다.

셋째, 버스전용차로의 설치여부는 도로구간의 혼잡 정도를 고려하여 판단하여야 한다.

이상의 결론과 현재의 경부고속도로의 통행수요를 감안할 때, 주말뿐만 아니라 평일에도 전용차로제를 시행하는 것이 바람직 할 것으로 보이나, 이에 대한 보다 정확한 정책적 판단을 위하여는 보다 정확한 실증자료를 이용하여 보다 면밀한 효과분석이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 강호익, 도로유형별 지체함수 정립과 교통배정에 미치는 영향분석, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1996. 8.
2. 건설부, 도로용량편람, 1992.
3. 교통개발연구원, 고속도로 전용차선제 실시방안 연구, 1992.
4. 교통개발연구원, 교통혼잡비용 예측 연구, 1992. 12.
5. 김연규, 이수범, "경부고속도로 제한속도 연구", 교통정책연구 제3권 1호, 1996.
6. 김진주, 버스전용차선제의 효과측정과 평가에 관한 연구, 성균관대학교 행정대학원, 1991.
7. 서준석, 중앙버스 전용차선제의 효과 및 개선방안 연구 : 서울시 천호대로 중앙버스 전용차선제의 시행 사례, 명지대학교 교통대학원 석사학위 논문, 1996. 6.

18) '일반화비용'은 앞절에서 언급된 통행시간비용과 차량운행비용의 합으로 정의되는데, 총일반화비용은 고속도로를 이용하는 모든 통행자의 통행시간비용과 고속도로구간에서 운행되는 모든차량의 운행비용을 모두 합한 것으로 이의 변화량 혹은 변화율은 전용차로 설치에 따른 종합적 평가지표로 사용될 수 있다.

19) 기준교통량의 5.5배가 되는 5.5×B에서의 혼잡정도는 V/C를 기준으로 하여 볼 때, 전용차로가 없을 경우 가장 혼잡한 구간에서는 1.59, 가장 혼잡하지 않은 구간에서는 0.45 정도를 보이고 있다. 또, 전용차로가 있을 경우는 일반차로의 V/C는 최대 1.48, 최소 0.42, 그리고 버스 전용차로의 V/C는 최대 1.17, 최소 0.37 정도이다.

8. 설재훈, 버스우선 신호의 평가 및 적용에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1987. 7.
9. 양규학, 버스전용차선제 효과측정 및 평가에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원, 1984.
10. 원재무, 도시교통론, 1995. 9.
11. 이일병, 임현연, "버스전용차선제 효과평가", 대한교통학회지 제5권 2호, 1987.
12. 장덕형, 고속도로 통행의 지체함수와 통행저항 파라미터의 민감도 분석에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1993. 2.
13. 한국도로공사, 1995년 고속도로 교통량 조사, 1996.
14. 한양대학교 산업과학연구소, 고속도로 편익조사와 통행요금체계에 관한 연구 최종보고서, 1991. 12.
15. 水明洋, 竹内 史, 福島利彦, "バス専用レーン設置による効果を生ずる 交通要件", 第13回 交通工學研究發表會論文集, 1993. 11.
16. 水明洋, 竹内 史, 福島利彦, "バス専用レーン設置效果の評價に關する 研究", 交通工學, Vol. 30 No. 5, 1995.
17. 中村文彦, 太田勝敏, 新谷洋二, "ニュータウンにおけるバスの優先手法適用に關する考察", 交通工學, Vol. 23 No. 5, 1988.
18. 中村文彦, 多様な輸送方式を取り入れた鐵道端末バス輸送計劃手法に關する研究, 東京大學 工學博士學位論文, 1991.
19. 河上省吾, 石京, "多手段綜合交通均衡モデルを用いた公共交通機關の整備・運營方法の比較評價に關する研究", 交通工學, Vol. 30 No. 4, 1995.
20. Bacon V.W., Jr., D.J. Lovell, A.D. May, M.V. Aerde, "Use of Integration Model to Study High-Occupancy-Vehicle Facilities", Transportation Research Record 1446, 1994.
21. Berg W.D., R.L. Smith, Jr., T.W. Walsh, Jr. and T.N. Notbohm, "Evaluation of a Contraflow Arterial Bus Lane", Transportation Research Record 798, 1979.
22. Chavala T.C. and W.H. Lin, "Policy Options for Route Guidance Networks Incorporating HOV Lanes", Transportation Quarterly, Vol. 47, No. 1, 1993.
23. Christiansen D.L., "Status and Effectiveness Houston High-Occupancy-Vehicle Lane System", Transportation Research Record 1280, 1988.
24. Eash R., "Equilibrium Traffic Assignment with High-Occupancy-Vehicle Lanes", Transportation Research Record 1394, 1993.
25. Farnsworth G. and C.G. Ulberg, "Evaluation of Seattle's South I-5 Interim High-Occupancy Vehicle Lanes", Transportation Research Record 1394, 1993.
26. Fuhs C.A., "Concurrent-Flow High-Occupancy-Vehicle Treatment on Freeway-Success Story in Houston", Transportation Research Record 854, 1981.
27. ITE Technical Council Committee 6A-37, "The Effectiveness of High-Occupancy Vehicle Facilities", ITE Journal, 1988.
28. Johnston R.A. and R. Ceerla, "The Effects of New High-Occupancy Vehicle Lanes on Travel and Emissions", Transportation Research A, Vol. 30, No. 1, 1996.
29. McMullen B.S. and T. Gut, "HOV Lane Effectiveness in Controlling Traffic Congestion", Transportation Quarterly, Vol. 46, No. 3, 1992.
30. NATO Committee on the Challenges of Modern Society, Bus Priority Systems, CCMS Report No. 45, 1976.
31. Pint A.E., C.A. Zimmer and F.E. Loetterle, "Role of High-Occupancy-Vehicle Lanes in Highway Construction Management", Transportation Research Record 1280, 1988.
32. Poppe M.J., D.J.P. Hook and K.M. Howell, "Evaluation of High-Occupancy-Vehicle Lanes in Phoenix, Arizona", Transportation Research Record 1446, 1994.
33. Shalaby A.S. and R.M. Soberman, "Effect of with-flow bus lanes on bus travel times", Transportation Research Record 1433, 1994.
34. Sheffi Y., Urban Transportation Networks : Equilibrium Analysis with Mathematical

- Programming Methods, 1985.
35. Suh S.D., C.H. Park and T.J. Kim, "A Highway Capacity Function in Korea : Measurement and Calibration", *Transportation Research A*, Vol. 24A, No. 3, 1990.
 36. Turnbull K.F., C.G. Ulberg and L.N. Jacobson, "Evaluation of the Seattle I-5 North High-Occupancy Vehicle Lane 2+ Occupancy Requirement Demonstration", *Transportation Research Record* 1394, 1993.
 37. Turnbull K.F., K.M. Hall and M.R. Ringrose, "High-Occupancy-Vehicle Treatment on Toll Facilities", *Transportation Research Record* 1446, 1994.