

■ 論 文 ■

간선-지선 노선체계의 효율성

Efficiency of Radial Transit Routes

박준식

고승영

이청원

(Postdoctoral Fellow, The University of Texas at Austin)

(서울대학교 건설환경공학부 교수)

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

목 차

- I. 서론
- II. 거점간 연결노선
 - 1. 이용자 측면
 - 2. 운영자 측면

- III. 중심지와 거점간 연결노선
- IV. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 대중교통, 노선구조, 간선-지선 노선체계 가지형/지선형, 방사형 노선 Transit, Route Structure, Trunk with Branches/Trunk with Feeders, Radial Transit Route

요 약

본 연구에서는 간선-지선 노선체계인 가지형과 지선형 노선체계의 이용자 비용과 운영자 비용을 비교하여 각 노선체계의 효율성을 분석하였다. 기본적으로 지선형 노선체계의 간선구간 시스템이 지선 시스템과 동일할 경우에는 이용자 측면에서 가지형 노선체계가 보다 효율적이다. 간선구간의 시스템이 지선구간의 시스템보다 상위 위계의 시스템일 경우에는 지선형 노선체계의 간선운행 시스템을 통한 통행비용 절감이 그에 따라 추가적으로 발생하는 환승과 대기비용보다 클 경우에 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적이다. 이는 격자형 대중교통 노선망에 대해 위계구조 노선망의 효율성을 분석한 박준식 외(2007c)의 연구결과와 일치하는 결과이다. 각 기종점간 통행수요가 적을 경우에는 지선형 노선체계에서 각 지점의 통행수요에 맞추어 운행간격을 증가시켜 차량의 승객 탑승률 또는 운행효율을 높이는 방안을 모색할 수 있다. 이 경우 차량 운행비용계수, 노선길이, 그리고 종점 수가 증가할수록 지선형 노선체계가 효율적일 상황이 증가하고, 환승비용과 통행자의 대기시간 비용환산계수가 증가할수록 지선형 노선체계가 효율적일 상황이 감소한다. 간선구간의 중간에 도시 중심지가 위치하여 승하차 통행수요가 발생하는 경우, 간선의 중간에 위치하는 도시 중심지로의 통행량이 많을수록 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적일 상황이 증가한다. 따라서 승하차 수요가 집중되는 도시 중심부와 수요가 분산되어 있는 외곽부의 노선체계를 이원화시킬 경우 하나의 노선체계로 운영하는 경우보다 효율적이라 결론내릴 수 있다. 원활한 환승체계를 갖추어 환승비용을 감소시킬 경우 더욱 효과적이라 하겠다.

This study analyzed the efficiency of a trunk with branches and a trunk with feeders route system comparing the user cost and operator cost of those route systems. Basically, a trunk with branches is more efficient than a trunk with feeders in the passengers' perspective if the transit system of a trunk and feeders are the same. In the case that the trunk system is hierarchically higher than the feeder system, a trunk with feeders has the competitive edge over a trunk with branches if the saving of travel cost induced by using the trunk line is larger than the increasing waiting and transfer cost. This result is consistent with the previous research by Park et al.(2007c), which analyzed the efficiency of hierarchical structure in a grid transit network. If the travel demand of each origins and destinations is low, increasing headway according to the travel demand can increase passenger load or operating efficiency in a trunk with feeders route system. In this case, a trunk with feeders route system is more prevalent as the operating cost, route length, and number of destinations increases, while it is less prevalent as the transfer cost and passengers' time value of the waiting time increases. In cases that central business district, which is located in the middle of a trunk line, generates travel demand, a trunk with feeders is more efficient than a trunk with branches with the increasing travel demand from and to the CBD. Therefore it can be concluded that to have a dual operating system between CBD and suburban is more efficient than one type transit system. The efficiency of that system can be increased through an efficient transfer system that can reduce the transfer cost.

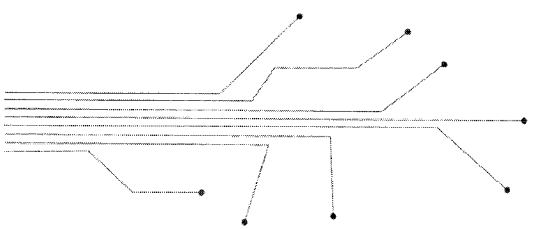
이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (기초과학 분야 : KRF-2007-357-D00292)

1. 서론

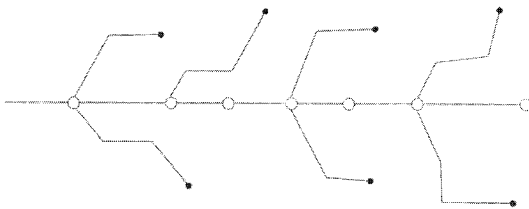
도심과 도심 또는 도심과 부도심을 연결하는 대중교통 노선은 대부분 장거리 노선이기 때문에 간선-지선 노선체계로 구성되어 있다. 이러한 노선체계는 도심과 외곽을 연결하는 방사형 노선망에서 주로 나타난다. 간선-지선 노선체계는 크게 가지형(Trunk with Branches)과 지선형(Trunk with Feeders)으로 구분할 수 있다. [16] 가지형의 경우 <그림 1>의 (가)와 같은 형태로, 간선노선이 여러 방향으로 갈라져 연장 운영되는 형태를 말하고, 지선형은 <그림 1>의 (나)와 같은 형태로, 간선노선과 독립된 지선들이 간선 정류장에서 연결 운영되는 형태를 말한다. 각 노선형태의 특징과 장단점은 Vuchic(2005)에 자세하게 설명되어 있다.

많은 도시들이 부도심을 연결하는 대중교통 노선체계를 간선-지선 노선체계로 운영하고 있는데 지역의 특성과 대중교통 운영체계의 특성 등에 따라 가지형과 지선형이 혼합되어 있다. 대중교통 노선체계의 구성은 운영주체의 특성에 따라 달라지는 경향이 있기 때문에 상황에 따라 효율적이지 못한 노선체계로 운영되기도 한다. 그러나 실제로 어떤 노선체계가 보다 효율적인지에 대한 명확한 기준이나 해석 또한 없는 것이 근본적인 문제점이라 할 수 있다.

대중교통 노선설계는 운행계획의 첫 번째 단계로 노



(가) 간선-지선 가지형



(나) 간선-지선 지선형

출처: Vuchic(2005)의 Figure 4.14

<그림 1> 간선-지선 노선형태

선(망)의 구조, 노선의 위치 및 간격, 정류장 위치 및 간격, 배차계획 등을 설정하게 된다. [8] 노선(망)의 구조에 대한 연구는 노선설계에 관한 다른 연구들에 비해 상당히 드물다. 박준식 외(2007d)에 의하면 노선(망) 구조 자체에 대한 국외 연구는 Newell(1979)과 Kho(1999, 2000)가 있으며 국내 연구로는 박준식 외(2007c)가 있다.

Newell(1979)의 연구는 격자형 노선망과 L자형 노선망을 비교한 연구로 격자형 노선망이 모든 경우에 최적일 수 없음을 보였다. Kho(1999)는 매우 드물게 Many-to-few의 수요형태 문제를 다루었으며, Kho(2000)는 우회하는 버스노선의 효율성에 대해 연구하였다. 박준식 외(2007c)는 격자형 노선망에서 노선망의 위계구조가 효율적인 조건을 제시하였다.

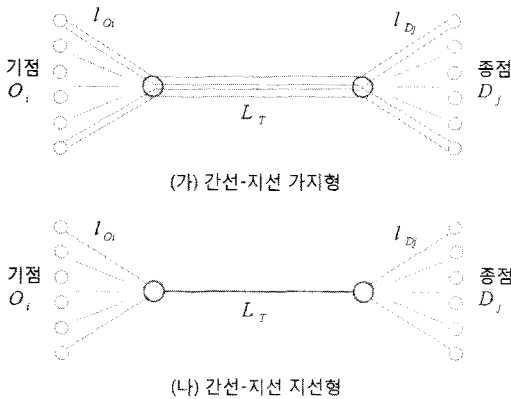
방사형 노선망의 최적설계요소를 구하는 연구는 Byrne and Vuchic(1972)을 시작으로 Byrne(1975), Clarens and Hurdle(1975), Wirasinghe, Hurdle, and Newell(1977), Wirasinghe(1980) 등 비교적 많이 연구되어 왔다. 그러나 이들 연구는 최적 정류장 간격, 배차간격, 간선 또는 지선의 최적 노선간격 등에 대한 연구로 노선 또는 노선망 구조에 대한 연구는 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 간선-지선 노선체계를 가지형과 지선형의 두 가지로 구분하고 이용자 측면과 운영자 측면에서 두 가지 노선구조의 비용을 비교하여 두 노선체계의 효율성을 분석한다. 노선구조에 대한 분석이므로 거시적인 관점에서 여러 가지 가정에 의해 최대한 단순화된 모형을 사용하기로 한다. 따라서 세부적인 운영 스케줄링과 같은 문제는 다루지 않는다.

II. 거점간 연결노선

1. 이용자 측면

두 거점을 연결하는 간선-지선 노선체계는 <그림 2>와 같이 간략화 될 수 있다. 대중교통 시스템의 이용자 비용은 크게 접근비용, 대기비용, 그리고 통행비용으로 구성되는데 [5-8, 12-15], 기점 O_i 와 종점 D_j 를 통행하는 통행자의 이용자 비용은 가지형과 지선형에 대해 각각 다음과 같이 구해진다. 여기서 기점과 종점에서의 노선 접근비용은 노선체계에 따라 변화하지 않으므로 모형식에서 고려하지 않는다.



〈그림 2〉 거점간 간선-지선 노선의 간략화

〈가지형〉

$$UC_{TB} = W_{TB}(O_i) + T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j}) \quad (1)$$

- 여기서, $W_{TB}(O_i)$: 기점 지선의 대기비용
 $T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j})$: 전체 통행비용
 l_{O_i} : 기점 부분 지선의 노선연장
 L_T : 간선의 노선연장
 l_{D_j} : 종점 부분 지선의 노선연장

〈지선형〉

$$UC_{TF} = W(O_i) + T_F(l_{O_i}) + t(T) + W(T) + T_T(L_T) + t(D_j) + W(D_j) + T_F(l_{D_j}) \quad (2)$$

- 여기서, $W(O_i)$: 기점 지선의 대기비용
 $T_F(l_{O_i})$: 기점 지선의 통행비용
 $t(T)$: 간선으로의 환승비용
 $W(T)$: 간선의 대기비용
 $T_T(L_T)$: 간선의 통행비용
 $t(D_j)$: 종점 지선으로의 환승비용
 $W(D_j)$: 종점 지선의 대기비용
 $T_F(l_{D_j})$: 종점 지선의 통행비용
 l_{O_i} : 기점 부분 지선의 노선연장
 L_T : 간선의 노선연장
 l_{D_j} : 종점 부분 지선의 노선연장

1) 시스템이 동일할 경우

가지형 노선체계의 시스템과 지선형 노선체계의 지선 시스템이 동일하다면, $T_{TB}(l_{O_i}) = T_F(l_{O_i})$, $T_{TB}(l_{D_j}) = T_F(l_{D_j})$ 이다. $W_{TB}(O_i)$ 와 $W(O_i)$ 를 같게 운영한다면, 가지형과 지선형의 이용자 비용 차이는 식(3)과 같이 정리된다.

$$UC_{TB} - UC_{TF} = T_{TB}(L_T) - T_T(L_T) - (t(T) + W(T)) - (t(D_j) + W(D_j)) \quad (3)$$

가지형과 지선형의 간선운행 시스템이 동일할 경우 즉, 지선형의 간선운행 시스템이 지선운행 시스템과 동일하면 $T_{TB}(L_T)$ 는 $T_T(L_T)$ 와 같아지므로 식(3)은 다음과 같이 정리된다.

$$UC_{TB} - UC_{TF} = -t(T) - W(T) - t(D_j) - W(D_j) \quad (4)$$

식(4)를 보면, 가지형과 지선형의 이용자 비용 차이는 결국 지선형에서 간선노선으로의 환승비용과 환승을 위한 대기비용만으로 정리가 되는데, 환승비용과 환승을 위한 대기비용이 0이 될 수 없으므로 가지형 노선체계의 이용자 비용 UC_{TB} 는 항상 지선형 노선체계의 이용자 비용 UC_{TF} 보다 작게된다. 즉, 간선구간의 시스템이 지선구간의 시스템과 동일할 경우는 가지형 노선체계가 지선형 노선체계보다 이용자 측면에서 효율적이다.

2) 시스템이 다를 경우

간선구간의 시스템이 지선구간의 시스템과 다를 경우, 즉 간선구간의 시스템이 지선구간의 시스템보다 상위 위계1)의 시스템일 경우에는 이용자 측면에서 지선형 노선 체계가 가지형 노선체계보다 효율적일 수가 있다. 이는 지선형 노선체계의 이용자 비용이 가지형 노선체계의 이용자 비용보다 작을 경우로, 식(3)을 정리하면 식(5)와 같은 조건식을 구할 수 있다.

$$UC_{TB} > UC_{TF} \Leftrightarrow T_{TB}(L_T) - T_T(L_T) > t(T) + W(T) + t(D_j) + W(D_j) \quad (5)$$

1) 대중교통 시스템에서 위계에 대한 정의는 명확하지 않으나 Vuchic(2005)은 대중교통 시스템을 용량과 통행속도에 따라 구분하였고, 박준식 외(2007c)는 운영비용과 통행속도가 높은 시스템을 상위 위계로 정의하였다. 본 연구 이 부분에서는 이용자비용만을 고려하고 있어 통행속도가 높아 통행시간을 절감시킬수 있는 시스템을 상위 위계 시스템으로 고려한다.

식(5)의 부등식 왼편은 지선형 노선체계의 간선운행 시스템을 이용함에 따른 통행비용 절감을 의미하며, 부등식 오른편은 지선형 노선체계의 간선운행 시스템을 이용함에 따라 추가적으로 발생하는 환승과 대기비용을 의미한다. 즉, 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 이용자 측면에서 효율적일 경우는 지선형 노선체계의 간선운행 시스템을 통한 통행비용 절감이 그에 따라 추가적으로 발생하는 환승과 대기비용보다 클 경우로 해석된다. 이는 격자형 대중교통 노선망에 대해 위계구조 노선망의 효율성을 분석한 박준식 외(2007c)의 연구결과와 일치하는 결과이다.

2. 운영자 측면

1) 운행간격을 동일하게 유지할 경우

가지형 노선체계에서 기점 O_i 와 종점 D_j 를 운행하는 노선의 운행간격을 h_{ij} 라 하면 지점 O , C , 그리고 D 에서의 평균 운행간격은 다음과 같이 계산된다.

$$\langle O \text{ 지점} \rangle \bar{h}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^J \frac{1}{h_{ij}}}, \quad \forall i \quad (6)$$

$$\langle C \text{ 지점} \rangle \bar{h}_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{1}{h_{ij}}} \quad (7)$$

$$\langle D \text{ 지점} \rangle \bar{h}_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{h_{ij}}}, \quad \forall j \quad (8)$$

노선의 운영비용이 운영거리에 비례하는 것으로 가정할 경우, 지선형 노선체계의 간선과 지선의 각 구간을 앞에서 산출한 가지형 노선체계의 각 구간의 평균 운행간격과 동일하게 운영하면 가지형 노선체계와 동일한 운영비용으로 지선형 노선체계를 운영할 수 있다.

모든 노선의 운행간격 h_{ij} 가 h 로 동일하고 이용자의 대기시간을 운행간격의 절반으로 가정하면 가지형과 지선형의 이용자 비용은 다음과 같이 계산된다. 지선형 노선체계에서 기점의 O_i 지점을 통과하는 노선은 종점의 개수인 J 개이므로 가지형 노선체계로 전환하고 동일한 운행간격(운행회수)을 유지할 경우 평균 운행간격은 h/J

가 된다. 마찬가지로 간선과 종점구간에서의 평균 운행간격은 각각 h/IJ 와 h/I 가 된다.

〈가지형〉

$$UC_{TB} = \alpha \frac{h}{2} + T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j}) \quad (9)$$

여기서, α =대기시간의 비용환산계수

〈지선형〉

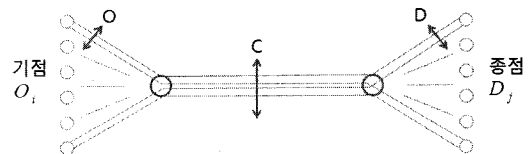
$$UC_{TF} = \alpha \frac{h}{2J} + T_F(l_{O_i}) + t(T) + \alpha \frac{h}{2IJ} + T_T(L_T) + t(D_j) + \alpha \frac{h}{2I} + T_F(l_{D_j}) \quad (10)$$

여기서, I, J =기점과 종점의 개수

지선형 노선체계의 간선운행 시스템이 가지형 노선체계의 운행시스템과 동일하면 $T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j})$ 는 $T_F(l_{O_i}) + T_T(L_T) + T_F(l_{D_j})$ 와 동일해진다. 이 경우 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적인 조건은 다음과 같이 구해진다.

$$UC_{TB} > UC_{TF} \Leftrightarrow \alpha \frac{h}{2} (1 - \frac{1}{IJ} - \frac{1}{I} - \frac{1}{J}) > t(T) + t(D_j) \quad (11)$$

기점과 종점의 개수가 무수히 많을 경우 식(11)의 좌변은 가지형 노선의 대기비용이 되고, 우변은 지선형 노선의 환승비용이 된다. 즉, 지선형 노선의 환승비용이 가지형 노선의 초기 대기비용 보다 작을 경우 지선형 노선체계가 효율성이 갖게 된다. 즉, 통행수요가 적어 운행간격이 매우 길고, 기·종점 수가 많을 경우, 환승시설을 잘 갖추어 환승비용을 작게 하면 가지형과 동일한 시스템으로 간선을 운행하여도 지선형 노선체계가 가지형 노



〈그림 3〉 가지형 노선체계

선체계보다 효율적임을 의미한다. 이는 이용자 측면의 첫 번째 분석결과의 예외적인 상황으로 볼 수 있는데, 모든 노선의 운행간격이 동일하고 이용자의 대기시간을 운행간격의 절반으로 가정하였기 때문에 나타나는 결과이다. 실제로 운행간격이 길 경우 이용자들이 운행계획표를 참고하기 때문에 이용자의 대기시간은 운행간격의 절반보다 훨씬 작아진다.

기점이 4개, 종점이 2개이고 모든 노선이 동일하게 20분 간격으로 운행되는 지선형 노선체계를 생각해 보자. 식(11)에서 좌변 $\alpha \frac{h}{2} (1 - \frac{1}{I} - \frac{1}{I} - \frac{1}{J})$ 는 $\alpha \frac{20}{2} (1 - \frac{1}{4 \times 2} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2}) = 1.25\alpha$ 가 된다. 대기시간의 비용환산계수 α 를 1로 가정하면 가지형 노선체계의 환승비용 $t(T) + t(D_j)$ 가 1.25보다 작을 경우에만 가지형 노선체제로 전환하는 것이 보다 효율적이 된다. 만약 기점과 종점이 각각 10개씩인 경우에는 1.25가 7.9로 증가하여 가지형 노선체제로의 전환을 보다 유리하게 만든다.

2) 운행간격을 늘릴 경우

각 기종점간 통행수요가 충분하여 가지형 노선체계의 모든 노선이 차량의 용량에 가까운 수준으로 운행될 경우에는 지선형 노선체계의 경우에도 가지형 노선체계에서의 각 지점(O, C, D)의 운행간격과 동일한 운행간격을 유지해야 한다. 그러나 각 기종점간 통행수요가 적을 경우에는 지선형 노선체계에서 각 지점의 통행수요에 맞추어 운행간격을 증가시키는 방안을 생각할 수 있다. 이는 운행간격을 증가시켜 차량의 승객 탑승률 또는 운행 효율을 높이는 방안이다.

각 지점의 운행간격을 $\bar{h}_i \rightarrow \bar{h}'_i (\bar{h}_i < \bar{h}'_i)$, $\bar{h}_c \rightarrow \bar{h}'_c (\bar{h}_c < \bar{h}'_c)$, $\bar{h}_j \rightarrow \bar{h}'_j (\bar{h}_j < \bar{h}'_j)$ 로 변경할 경우, 운행회수가 감소하여 운행비용을 감소시킬 수 있다. 각 지점별 감소되는 단위 시간당 운행비용은 다음과 같다.

$$\langle O \text{ 지점} \rangle \Delta OC_{O_i} = \gamma_o \times l_{O_i} \left(\frac{1}{\bar{h}_i} - \frac{1}{\bar{h}'_i} \right) \quad (12)$$

$$\langle C \text{ 지점} \rangle \Delta OC_C = \gamma_o \times L_T \left(\frac{1}{\bar{h}_c} - \frac{1}{\bar{h}'_c} \right) \quad (13)$$

$$\langle D \text{ 지점} \rangle \Delta OC_{D_j} = \gamma_o \times l_{D_j} \left(\frac{1}{\bar{h}_j} - \frac{1}{\bar{h}'_j} \right) \quad (14)$$

여기서, γ_o = 차량 운행비용계수 (원/km)

총 운행비용 절감은 식(15)와 같다. 차량 운행비용계수 γ_o 가 큰 경우 운행간격을 증가시킴에 따른 운행비용 절감이 크다. 운행간격 증가에 따른 운행비용 절감은 초기 운행간격이 길수록 작아지게 된다.

$$\Delta OC_{TB \rightarrow TF} = \Delta OC_{O_i} + \Delta OC_C + \Delta OC_{D_j} \quad (15)$$

가지형과 지선형의 이용자 비용은 다음과 같다.

<가지형>

$$UC_{TB} = \alpha \frac{h_{ij}}{2} + T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j}) \quad (16)$$

<지선형>

$$UC_{TF} = \alpha \frac{\bar{h}'_i}{2} + T_F(l_{O_i}) + t(T) + \alpha \frac{\bar{h}'_c}{2} + T_T(L_T) + t(D_j) + \alpha \frac{\bar{h}'_j}{2} + T_F(l_{D_j}) \quad (17)$$

지선형의 간선운행 시스템이 지선운행 시스템과 동일할 경우 $T_{TB}(L_T) = T_T(L_T)$ 이므로, 가지형 노선체계를 지선형 노선체제로 전환할 경우 증가하는 이용자 비용은 식(18)과 같다. 증가하는 이용자 비용은 통행자의 대기시간 비용환산계수 α 와 운행간격의 차이에 비례한다.

$$\Delta UC_{TB \rightarrow TF} = \frac{\alpha}{2} (\bar{h}'_i + \bar{h}'_c + \bar{h}'_j - h_{ij}) + t(T) + t(D_j) \quad (18)$$

기종점간 단위시간당 승객수가 q_{ij} 라면 단위시간당 증가되는 이용자 비용은 $q_{ij} \times \Delta UC_{TB \rightarrow TF}$ 이다. 따라서 이용자 비용과 운영자 비용을 모두 고려하여 지선형 노선체계가 가지형 노선체계 보다 효율적인 조건은 식(19)와 같다.

$$\Delta OC_{TB \rightarrow TF} \geq \sum_{I,j} q_{ij} \times \Delta UC_{TB \rightarrow TF} \quad (19)$$

앞서와 같이 모든 노선의 운행간격 h_{ij} 가 h 로 동일하고 이용자의 대기시간을 운행간격의 절반으로 가정하고, 운행간격은 초기값의 두배로 증가시켜 보자. 이 경우 하나의 기점(I=1)에 대해 운영비용 절감과 이용자 비용

증가를 구하면 다음과 같다.

<운행비용 절감>

$$\Delta OC_{TB \rightarrow TF} = \frac{\gamma_0}{2h} \times (l_{O_i}J + L_TJ + l_{D_j}) \quad (20)$$

<이용자 비용 증가>

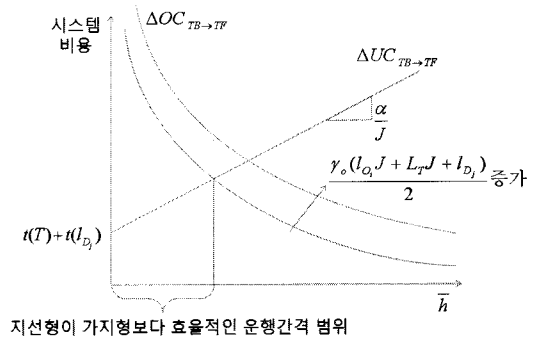
$$\Delta UC_{TB \rightarrow TF} = \sum_j q_{ij} \left\{ \alpha \frac{h}{J} + t(T) + t(D_j) \right\} \quad (21)$$

여기서, 중점이 2개이고, l_{O_i} , L_T , l_{D_j} 가 각각 3, 10, 3km, $q_{ij}=100$ 명/시간, $\alpha=1$ 원/시간, $t(T)$ 와 $t(D_j)$ 는 각각 1000원, $\gamma_0=10,000$ 원/km인 경우 운행비용 절감 $\frac{\gamma_0}{2h} \times (l_{O_i}J + L_TJ + l_{D_j})$ 는 $\frac{10000}{2h} \times (3 \times 2 + 10 \times 2 + 3) = 145000h$ 이고, 이용자 비용 증가 $\sum_j q_{ij} \left\{ \alpha \frac{h}{J} + t(T) + t(D_j) \right\}$ 는 $2 \times 100 \left\{ \frac{h}{2} + 1000 + 1000 \right\} = 100h + 400000$ 가 된다. 이를 운행간격 h 에 대해서 풀면 $h \approx 0.36$ (21.7분)으로 계산된다. 따라서 운행간격이 21.7분 이하일 경우에만 지선형이 가지형보다 효율적이 된다.

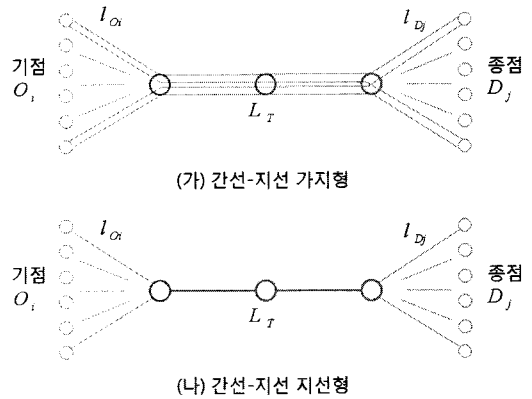
운행비용 절감과 이용자 비용 증가를 평균 운행간격 h 에 대해 그래프를 그려보면 <그림 4>와 같다. 평균 운행간격이 증가함에 따라 운행비용 절감은 감소하고 이용자 비용 증가는 증가하는 형태를 나타낸다. 운행비용 절감이 이용자 비용 증가보다 큰 운행간격 범위 내에서 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율성을 갖는다. 운행비용 곡선을 보면, 차량 운행비용계수, 노선길이, 중점 수가 증가할수록 그래프가 우상향하므로 적정 운행간격 범위는 늘어난다. 반면 이용자 비용 증가곡선을 보면 환승비용과 통행자의 대기시간 비용환산계수가 증가할수록 적정 운행간격 범위는 감소한다. 그러나 중점수가 증가하면 직선의 기울기가 감소하므로 적정 운행간격 범위가 늘어나게 되어 운행비용 절감곡선에서와 같은 효과가 나타난다. 기중점간 통행수요 q_{ij} 가 증가할 경우 직선의 절편과 기울기 모두 증가하므로 적정 운행간격 범위는 크게 감소한다.

III. 중심지와 거점간 연결노선

간선구간의 중간에 도시 중심지가 위치하여 승하차 통행수요가 발생하는 경우를 생각해보기로 한다. 이 경우 두 거점을 연결하는 노선 중간에 기중점이 하나 추가



<그림 4> 지선형 노선체계가 효율적일 조건



<그림 5> 간선구간에 중심지가 있을 경우

된 것이므로 통행 기중점은 $O \rightarrow C$, $O \rightarrow D$, $C \rightarrow D$ 의 세 가지가 늘어난다. 각각에 대해 가지형과 지선형 노선체계의 이용자 비용을 구해보기로 한다.

<가지형>

$$UC(OC)_{TB} = W_{TB}(O_i) + T_{TB}(l_{O_i} + L_T/2) \quad (22)$$

$$UC(OD)_{TB} = W_{TB}(O_i) + T_{TB}(l_{O_i} + L_T + l_{D_j}) \quad (23)$$

$$UC(CD)_{TB} = W_{TB}(T) + T_{TB}(L_T/2 + l_{D_j}) \quad (24)$$

<지선형>

$$UC(OC)_{TF} = W(O_i) + T_F(l_{O_i}) + t(T) + W(T) + T_T(L_T/2) \quad (25)$$

$$UC(OD)_{TF} = W(O_i) + T_F(l_{O_i}) + t(T) + W(T) + T_T(L_T) + t(D_j) + W(D_j) + T_F(l_{D_j}) \quad (26)$$

$$UC(CD)_{TF} = W(T) + T_T(L_T/2) + t(D_j) + W(D_j) + T_T(l_{D_j}) \quad (27)$$

지선형 노선체계에서 간선구간의 시스템이 지선의 시스템과 다를 경우를 생각해보자. 거점간 연결노선에서 분석한 바와 같이, 지선형 노선체계의 간선운영 시스템을 통한 통행비용 절감이 그에 따라 추가적으로 발생하는 환승과 대기비용보다 클 경우에 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적이 된다.

지선형 노선체계의 간선구간 시스템이 지선 시스템과 같은 경우를 비교해보기로 한다. 앞서와 마찬가지로 모든 노선의 운행간격 h_{ij} 가 h 로 동일하고 이용자의 대기 시간을 운행간격의 절반으로 가정하고 가지형과 지선형의 이용자 비용의 차이를 구해보자. 각 지점에서의 평균 운행간격은 동일하게 유지하여 운행비용은 동일하다.

$$\begin{aligned} \Delta UC_{TB \rightarrow TF} &= \frac{ah}{2}(q_{OC} + q_{OD} + q_{CD}) \\ &- q_{OC} \left(\frac{ah}{2J} + \frac{ah}{2IJ} + t(T) \right) \\ &- q_{OD} \left(\frac{ah}{2J} + \frac{ah}{2IJ} + \frac{ah}{2I} + t(T) + t(D_j) \right) \\ &- q_{CD} \left(\frac{ah}{2IJ} + \frac{ah}{2I} + t(D_j) \right) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서, q_{OC} : 기종점 OC의 통행수요
 q_{OD} : 기종점 OD의 통행수요
 q_{CD} : 기종점 CD의 통행수요

식(28)을 기종점 수요에 따라 정리하면 식(29)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta UC_{TB \rightarrow TF} &= q_{OC} \left\{ \frac{ah}{2} \left(1 - \frac{1}{J} - \frac{1}{IJ} \right) - t(T) \right\} \\ &+ q_{OD} \left\{ \frac{ah}{2} \left(1 - \frac{1}{J} - \frac{1}{IJ} - \frac{1}{I} \right) - (t(T) + t(D_j)) \right\} \\ &+ q_{CD} \left\{ \frac{ah}{2} \left(1 - \frac{1}{IJ} - \frac{1}{I} \right) - t(D_j) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$\Delta UC_{TB \rightarrow TF}$ 가 0보다 클 경우에 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 더 효율적이 된다. 식(29)를 보면 오른쪽의 두 번째 항은 두 기점간 연결노선의 조건식(11)과 동일하다. 첫 번째 항의 $(1 - \frac{1}{J} - \frac{1}{IJ})$ 와 세 번째 항의 $(1 - \frac{1}{J} - \frac{1}{IJ})$ 는 $(1 - \frac{1}{J} - \frac{1}{IJ} - \frac{1}{I})$ 보다 크고 두 번째 항의 $t(L_T) + t(D_j)$ 는 첫 번째 항의 $t(L_T)$ 와 세 번째 항의 $t(D_j)$

보다 크기 때문에 q_{OC} 와 q_{CD} 가 커질수록 전체적인 비용차이가 증가하게 된다. 즉, 간선의 중간에 위치하는 도시 중심지로의 통행량이 증가할수록 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적일 상황이 두 기점간 연결노선의 경우보다 증가하게 된다. 따라서 승하차 수요가 집중되는 도시 중심부와 수요가 분산되어 있는 외곽부의 노선체계를 이원화시킬 경우 하나의 노선체계로 운영하는 경우보다 효율적이라 결론내릴 수 있다. 원활한 환승체계를 갖추어 환승비용을 감소시킬 경우 더욱 효과적이라 하겠다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 도심과 도심 또는 도심과 부도심을 연결하는 장거리 대중교통 노선체계인 간선-지선 노선체계의 효율성을 분석하였다. 이러한 노선체계는 하나의 도심에서 여러 개의 부도심 또는 위성도시를 연결하는 방사형 노선망에 주로 적용되고 있다. 수도권 지역의 도심과 각 축별 부도심 또는 위성도시를 연결하는 방사형 노선망이 구축되어 있으며 가지형과 지선형 노선체계가 혼합되어 있다. 간선-지선 노선체계에서 가지형과 지선형의 특징 및 장단점은 익히 알려져 있으나 두 가지 노선체계 대안 중 어떤 노선체계가 과연 효율적인지에 대한 해답은 명확하게 내리지 못하고 있다. 본 연구에서는 이러한 의문을 해소하고자 가지형과 지선형 노선체계의 이용자 비용과 운영자 비용을 비교하여 어떤 노선체계가 어떠한 상황에서 보다 효율적인지를 분석하였다.

기본적으로 지선형 노선체계의 간선구간 시스템이 지선 시스템과 동일할 경우에는 이용자 측면에서 가지형 노선체계가 보다 효율적이라 하겠다. 그러나 통행수요가 적어 운행간격이 매우 길고, 통행수요가 여러 지점으로 분산되어 있어 기·종점 수가 많은 경우, 환승비용을 작게 하면 가지형과 동일한 시스템으로 간선을 운행하여도 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적일 수도 있는 것으로 분석되었다. 하지만 이는 이용자의 대기 시간을 운행간격의 절반으로 가정하였기 때문에 나타나는 결과로 실제 현실과는 다소 차이가 있다. 실제로는 운행간격이 길 경우 이용자들은 운행계획표를 참고하여 정류장에 도착하기 때문에 이용자의 대기시간은 운행간격의 절반보다 훨씬 적게 된다.

간선구간의 시스템이 지선구간의 시스템보다 상위 위계의 시스템일 경우에는 지선형 노선체계의 간선운영 시스템을 통한 통행비용 절감이 그에 따라 추가적으로 받

생하는 환승과 대기비용보다 클 경우에 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적인 것으로 분석되었다. 이는 격자형 대중교통 노선망에 대해 위계구조 노선망의 효율성을 분석한 박준식 외(2007c)의 연구결과와 일치하는 결과이다. 따라서 위계구조 대중교통 노선망의 효율성 조건은 격자형 노선망과 방사형 노선망 모두 동일함을 의미한다.

각 기종점간 통행수요가 적을 경우에는 지선형 노선체계에서 각 지점의 통행수요에 맞추어 운행간격을 증가시켜 차량의 승객 탑승률 또는 운행효율을 높이는 방안을 모색할 수 있다. 이 경우 차량 운행비용계수, 노선길이, 종점 수가 증가할수록 지선형 노선체계가 효율적일 상황이 증가하고, 환승비용과 통행자의 대기시간 비용환산계수가 증가할수록 지선형 노선체계가 효율적일 상황이 감소한다. 즉, 유가와 임금의 상승으로 운행비용이 증가할수록, 또한 통행수요 분포가 넓게 퍼져 있을수록 지선형 노선체계가 유리해지는데, 이 경우 환승비용을 감소시키는 것이 중요하다. 그 반면 통행자들의 시간가치가 매우 높은 경우는 가급적 많은 기종점을 직접 운행하여 승객들의 대기 및 환승시간을 최소화시키는 방안이 효율적이다. 이 경우 운영비용을 충당하기 위해 통행요금의 상승이 수반될 것이다.

간선구간의 중간에 도시 중심지가 위치하여 승하차 통행수요가 발생하는 경우, 간선의 중간에 위치하는 도시 중심지로의 통행량이 많을수록 지선형 노선체계가 가지형 노선체계보다 효율적일 상황이 증가한다. 따라서 승하차 수요가 집중되는 도시 중심부와 수요가 분산되어 있는 외곽부의 노선체계를 이원화시킬 경우 하나의 노선체계로 운영하는 경우보다 효율적이라 결론내릴 수 있다. 원활한 환승체계를 갖추어 환승비용을 감소시킬 경우 더욱 효과적이라 하겠다.

본 연구는 간선-지선 노선체계의 효율성을 분석한 해석 연구로 가정을 통해 많은 부분을 간략화하였기 때문에 보다 상세한 분석이 요구되는 경우도 있을 것이다. 또한 본 연구에서 고려하지 못한 많은 노선체계 대안이 있을 수 있으나 그에 대한 분석은 향후 연구과제로 남기도록 한다.

참고문헌

- 고승영(1995), "동시환승(Timed-Transfer) 버스 시스템", 대한교통학회지, 제13권 제4호, 대한교통학회, pp.105~115.
- 고승영·이양호(1996), "구역분할 버스운영에 관한 연구", 대한교통학회지, 제14권 제1호, 대한교통학회, pp.69~80.
- 고승영(2002), "버스도착시간 정보에 대한 연구", 대한교통학회지, 제20권 제5호, 대한교통학회, pp.175~181.
- 김점산·조혜정·박준식(2007), "시내버스업체의 경영 및 서비스 평가제도 도입 효과분석", 대한교통학회지, 제25권 제5호, 대한교통학회, pp.44~55.
- 박준식·고승영·김점산·권용석(2007), "최적 배차 시간 설정에 관한 해석적 연구", 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.137~144.
- 박준식·고승영·이청원·김점산(2007), "최적 정류장 간격의 해석적 연구", 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.145~154.
- 박준식·고승영·전경수(2007c), "격자형 대중교통 노선망의 위계구조 효율성 분석", 대한교통학회지, 제25권 제4호, 대한교통학회, pp.123~133.
- 박준식·권용석(2007d), "대중교통 노선망 설계에 관한 해석적 연구의 모형 구조와 풀이", 대한교통학회지, 제25권 제6호, 대한교통학회, pp.129~140.
- Byrne, B.F.(1975) "Public Transportation Line Positions and Headways for Minimum User and System Cost in a Radial Case", Transportation Research, 9, pp.97~102.
- Byrne, B.F., Vuchic, V.R.(1972) "Public Transportation Line Positions and Headways for Minimum Cost", Proceedings of the Fifth International Symposium on Traffic Flow and Transportation, American Elsevier, New York, pp.347~360.
- Clarens, G.C., Hurdle, V.F.(1975) "An Operating Strategy for a Commuter Bus System", Transportation Science, 9, pp.1~20.
- Kho, S.Y.(1990) "Design of Bus Routes for a Many-to-Few Travel Demand", Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory held in Yokohama, Japan, July 18-20, pp.343~362.
- Kho, S.Y.(2000) "Zigzagging of Bus Routes-An Analytical Approach", Transportation Research Record, 1731, pp.10~14.

14. Newell, G.F.(1979) "Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes", *Transportation Science*, 13, pp.20~35.
15. Vuchic, V.R., Newell, G.F.(1968) "Rapid Transit Inter-Station Spacing for Minimum Travel Time", *Transportation Science*, 2, pp.303~399.
16. Vuchic, V.R.(2005) *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*, John Wiley & Sons, Inc.
17. Wirasinghe, S.C.(1980) "Nearly Optimal Parameters for a Rail/Feeder-Bus System on a Rectangular Grid", *Transportation Research*, 14A, pp.33~-40.
18. Wirasinghe, S.C., Hurdle, V.F., Newell, G.F.(1977) "Optimal Parameters for a Coordinated Rail and Bus Transit System", *Transportation Science*, 11, pp.359~374.

- ✉ 주 작 성 자 : 박준식
- ✉ 교 신 저 자 : 박준식
- ✉ 논문투고일 : 2008. 7. 3
- ✉ 논문심사일 : 2008. 8. 27 (1차)
2008. 8. 28 (2차)
- ✉ 심사판정일 : 2008. 8. 28
- ✉ 반론접수기한 : 2009. 2. 28
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필