

■ 論 文 ■

## 노드중복과 링크중복문제를 고려한 로짓선택확률의 비교연구

A study on logit choice probability model  
taking into account the problems of common-nodes and common-links

**백 승 걸**

**임 용 택**

**임 강 원**

(서울대학교 환경대학원 박사과정) (여수대학교 교통물류시스템공학부 교수) (서울대학교 환경대학원 교수)

### 목 차

- |  |  |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 노드중복과 링크중복문제</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 로짓통행배정모형과 링크선택확률</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 순환경로문제</p> <p style="padding-left: 20px;">3. 경로중복문제</p> <p>III. 노드중복과 링크중복을 고려한 로짓선택모형</p> | <p>IV. 사례분석</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 분석시나리오</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 분석결과</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

### 요 약

로짓경로선택모형의 문제점으로 지적되고 있는 순환교통류(cyclic flow)와 경로중복(path overlapping)은 노드중복(common nodes)과 링크중복(common links)문제로 해석할 수 있다. 노드중복은 최단경로 보장문제 및 균형배정시 효율성 문제와, 링크중복은 비관련대안의 독립성 문제와 관련된다. 최근 위 문제들에 대한 연구가 각각 이루어지고 있으나, 두 가지 문제를 모두 고려한 연구나 이런 경우 로짓모형의 속성을 비교한 연구는 없었다. 이 글에서는 노드중복과 링크중복을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 선택확률을 비교하여 현재 이용되고 있는 로짓경로선택모형의 문제점과 한계를 살펴보았다. 이를 위하여 본 연구에서는 노드중복문제와 링크중복문제를 동시에 고려한 로짓경로선택모형을 제시하였다. 이는 기존의 링크중복개념을 특정링크를 기준으로 통행기점에서 특정링크의 초기노드까지의 링크중복과 특정링크 종점노드부터 통행중점까지의 링크중복으로 세분화한 것이라고 할 수 있다. 제시된 모형을 이용하여 가상네트워크에서 경로 및 링크선택확률을 계산한 결과, 노드중복과 링크중복을 고려함으로써 선택대안들간의 차별성을 고려하면서 특정경로 또는 특정링크의 선택확률이 과소 또는 과대추정되는 문제를 감소시킬 수 있었다. 이러한 결과를 통해 중복경로와 순환경로를 배제한 다중경로를 보다 효과적으로 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

통행배분(trip distribution)모형은 희망선을 통해 기중점통행(trip between Origin-Destination pair)을 추정하고, 통행배정(trip assignment)모형은 기중점 통행량을 이용하여 특정링크의 교통량(link flow)을 추정하게 된다. 그러나 좀 더 세밀하고 객관적인 네트워크 특성분석을 위해서는 각 기중점통행과 네트워크 상의 각 링크와의 관계를 파악하여야 한다. 네트워크의 각 링크와 기중점통행과의 관계를 링크선택확률(link choice probability)이라 한다. 링크선택확률모형은 도시내 특정도로나 도로축의 기능을 명확히 분석하거나 도로축의 관리, 도로기능부여 등을 통한 도로효율성의 증대를 꾀할 수 있으며, 수요관리 등을 통한 혼잡완화, 혼잡세 징수지점의 파악 등 방대한 교통분야에 적용할 수 있는 기법이다.

링크선택확률모형은 직접 관측이 불가능한 O/D자료와 관측된 링크교통량과의 인과관계를 설정하여 링크교통량으로부터 O/D자료를 추정해 내는 O/D 추정 방법에 특히 중요하다. Lo 등(1996)은 관측교통량을 이용한 기중점 추정모형에서 잘못된 링크선택확률이 심각한 오차를 발생시킬 수 있음을 보인 바 있다.

링크선택확률을 구하는 방법은 1) 링크상에서의 통행기중점 조사에 의한 방법, 2) 통행배정시 링크를 이용하는 경로교통량을 저장하는 방법, 3) 링크이용의 경로집합을 가정하고 통행을 합리적인 대안노선에 배분하는 방법이 있다. 통행배정방법을 이용하여 링크선택확률모형을 구하는 경우, 모든 링크에서 O/D쌍간 통행이 관측될 수 있으므로 링크이용확률은 0이 아니어야 한다. 따라서 확률적 통행배정방법을 이용하여야 하며(Kuwahara, 1987), 주로 로짓모형을 이용한다. 이는 로짓모형이 개별자료(disaggregate data)에 적합한 폐쇄형구조(closed form)를 가지고 있기 때문이다.

그러나 로짓모형은 비관련대안의 독립성(IIA ; Independence of Irrelevant Alternatives)으로 인해 중복경로(overlapping path)에 대해 통행량을 과다추정하는 문제를 발생시킨다. 또한 로짓모형에서 일반적으로 이용되는 다이얼(Dial) 알고리즘은 순환교통류(cyclic flow)를 발생시킬 수 있고, 특히 링크이용확률을 구하기 위해 최근 제시된 Bell(1995)의 수정로짓모형 등은 순환교통류를 제외하여야만 의미

를 가진다.

본 연구의 목적은 경로중복과 순환교통류를 노드중복(common nodes)과 링크중복(common links)문제로 해석하고, 이 두 문제를 모두 고려한 로짓모형을 개발한 후 이를 이용하여 링크중복과 노드중복을 배제하지 않은 경우와 배제한 경우 등 여러 시나리오별 경로 및 링크선택확률의 계산결과를 비교하였다. 통행배정에서의 경로설정은 경로계산(path enumeration)을 피하는 것에 중점을 두지만, 본 연구에서는 통행배정모형보다는 링크선택확률의 추정에 중점을 두어 경로계산을 포함하였다.

본 연구의 구성은 2장에서는 먼저 로짓모형의 링크선택확률에 대한 기본개념과 노드중복, 링크중복 문제에 대해 살펴보고, 3장에서는 이 두가지 문제를 동시에 고려하여야 하는 이유와 두 가지 문제를 고려한 모형을 제시하였다. 4장에서는 노드중복과 링크중복 문제를 고려해 가상네트워크에 대한 사례를 분석하고 결과를 정리하였다.

## II. 노드중복과 링크중복문제

### 1. 로짓확률모형과 링크선택확률

로짓확률효용모형 가정 하에 경로선택확률  $p_k$ 는 다음과 같다.

$$p_k = \text{prob}[V_k + \varepsilon_k \geq V_h + \varepsilon_h] \quad \forall h, k \in I_{rs} \quad (1)$$

여기서,  $p_k$  : 경로 k의 선택확률  
 $V_k$  : 경로 k의 확정적 효용  
 $\varepsilon_k$  : 경로 k의 확률적 효용  
 $h, k$  : r-s간 경로  
 $I_{rs}$  : r-s간 경로집합

위에서  $\varepsilon_k$ 가 Gumbel 분포를 따른다면 다음과 같은 경로선택의 다항로짓모형이 된다.

$$p_k = \frac{\exp[\theta V_k]}{\sum_{k \in I_{rs}} \exp[\theta V_k]} \quad (2)$$

여기서,  
 $\theta$  : 인지비용계수(dispersion parameter)

경로를 이루는 링크비용은

$$c_k^{rs} = \sum_{ij} c_{ij} a_{ij,k}^{rs} \quad (3)$$

여기서,

- $c_k^{rs}$  : r-s간 경로 k의 비용
- $c_{ij}$  : 링크 ij의 비용(노드 i와 노드 j로 연결된 링크의 비용)
- $a_{ij,k}^{rs}$  : 링크 ij와 r-s의 경로 k간의 상보행렬(incidence matrix)

로짓모형에 의한 경로선택확률은

$$p_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_k^{rs})}{\sum_h \exp(-\theta c_h^{rs})} \quad (4)$$

여기서,  $p_k^{rs}$  : r-s간 통행이 경로 k를 선택할 확률

링크선택확률은

$$p_{ij}^{rs} = \sum_k p_k^{rs} a_{ij,k}^{rs} \quad (5)$$

여기서,  $p_{ij}^{rs}$  : r-s간 통행의 링크 i-j 선택확률

따라서 링크교통량은

$$x_{ij} = \sum_{rs} p_{ij}^{rs} t_{rs} \quad (6)$$

- 여기서,  $x_{ij}$  : 링크 i-j (관측)교통량
- $p_{ij}^{rs}$  : r-s간 통행의 링크 i-j 선택확률
- $t_{rs}$  : r-s간 통행량

위 식에서 링크선택확률과 관측링크교통량을 구한다면 기중점 교통량을 구할 수 있다.

일반적으로 경로의 수는 상당히 많아서 경로의 수가 제한되지 않으면 로짓모형의 적용이 어렵기 때문에, 합리적인 경로를 가정하는 다이얼모형(STOCH 알고리즘)이 주로 이용된다. 다이얼 알고리즘에서 전방경

로단계(forward pass step)는 모든 링크에 가중치를 부여하고 후방경로단계(backward pass step)는 링크교통량을 계산한다. 다이얼방법은 경로계산(path enumeration)을 필요로 하지 않기 때문에 확률적 이용자균형(stochastic user equilibrium)배정에 일반적으로 이용된다.

Fisk(1980)와 Bell(1995)은 다이얼모형을 노드 기반으로 수정한 로짓모형으로 확률적 통행배정문제(SUE)를 설정하였다. Bell(1995)은 전방 또는 후방경로와 각 기점에서 모든 노드까지의 최소비용을 알지 않아도 되는 로짓배정방법을 제시하였다. Bell(1995)의 수정(가중치) 로짓모형에 의한 링크 ij의 가중치는

$$w_{ij} = \exp(-\theta c_{ij}) \quad (7)$$

기중점 r-s간 경로 k의 가중치는

$$w_k^{rs} = \prod_{ij} (w_{ij})^{a_{ij,k}^{rs}} \quad (8)$$

식(8)에서 경로가중치는 경로내 모든 링크의 가중치곱과 같다. (7)를 (8)에 대입하면

$$\begin{aligned} w_k^{rs} &= \prod_{ij} \exp(-\theta c_{ij} a_{ij,k}^{rs}) \\ &= \exp\left(\sum_{ij} -\theta c_{ij} a_{ij,k}^{rs}\right) = \exp(-\theta c_k^{rs}) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 경로선택확률은 다음과 같이 된다.

$$p_k^{rs} = \frac{w_k^{rs}}{\sum_h w_h^{rs}} = \frac{w_k^{rs}}{w_{rs}} \quad (10)$$

Bell(1995)의 로짓모형에서 노드간 행렬( $w_{rs}$ )는 인접노드에 대한 가중행렬의 연속곱으로 구한다. Bell(1995)은 Van Vliet(1981)의 공식을 이용하여 아래와 같이 링크선택확률을 계산하였다.

$$p_{ij}^{rs} = w_{ri} w_{ij} w_{js} / w_{rs} \quad (11)$$

식(11)에서  $w_{ri}$ 와  $w_{js}$ 는 r-i와 j-s 는 모든 경로의 결합가중치이다.

$$w_{ri} = \sum_{a=1}^{RI} \exp(-\theta c_a^{ri})$$

$$w_{js} = \sum_{b=1}^{JS} \exp(-\theta c_b^{js}) \quad (12)$$

여기서 RI와 JS는 순환경로를 포함한 r-i와 j-s간 경로의 수이다.

Bell(1993) 등의 방법은 인접노드에 대한 노드간 가중행렬의 연속 곱셈과 Van Vliet(1981)이 제시한 가중링크선택확률을 이용하기 때문에 경로산정이 필요 없으며, 가능경로에 대한 효과적인 제약이 없어서 SUE 배정을 수립시키는 데 적합하다. 그의 첫번째 방법은 유한경로집합을 고려하는 것으로 루프가 없는 모든 경로를 포함하며, 두번째 방법은 루프가 있는 무한한 수의 모든 경로를 고려한다. 이는 후에 Akamatsu(1996)가 흡수마코프과정(absorbing Markov Process)을 이용하여 제시하였다. 그러나 그의 모형은 모든 경로(루프가 있는 무한한 수의 경로)가 고려되는 경우에만 적용할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 로짓 배정을 정확하게 구현할 수 없다. 따라서 Bell의 로짓배정은 모든 순환(cyclic)경로가 제거될 수 있는 경우에만 의미가 있다(Huang(1998) 등).

## 2. 순환경로문제

Bell(1993)의 방법은 Floyd-Warshall 최단경로 알고리즘과 유사하며, 따라서 루프를 네트워크에서 제외하지 않으면 최단경로를 보장하지 못하는 문제가 발생한다(Bell, 1995). 식(11)에서 루프가 있는 경우에도 모든 노드간 가중치는 순환을 포함하지 않지만 순환교통량의 영향은 완전히 배제할 수 없다.

순환교통류 문제는 로짓모형에 국한된 문제는 아니다. Janson(1987)이 보인 바와 같이 동일 기중점 통행에 의한 순환교통류로 인해 통행배정시에 수립에 도달하지 못하게 된다. Huang(1998) 등은 Bell(1993)의 문제를 해결하기 위해 순환교통류를 포함하지 않는 배정문제를 제시하였다. 네트워크가 루프를 포함하지 않으면 식(11)는 모든 경로를 포함하는 로짓배정문제에 적합하다. 루프가 네트워크에 존재하지 않아, 즉 r-i 간 RI경로의 노드가 j-s 간 JS경로에 나타나지 않기 때문에, r-s간 통행중 링크 i-j를 통과하는 경로의 수는 (RI×JS)이다(Huang(1998) 등).

따라서 식(11)은 r-s 간 통행중 링크 ij를 통과하는 모든 경로의 경로선택확률의 합을 나타내며, 이는 곧 링크선택확률이다. 여기서 r-s간 통행이 링크 ij를 통과할 때 r-i와 j-s간 부경로(subpath) 사이에 적어도 한 개의 중복노드가 있게 되면 루프를 포함하게 된다. Huang(1998) 등은 순환교통량을 제외하는 로짓배정모형을 설정하기 위해 식(13)과 같이 순환경로의 영향을 제거하였다.

$$p_{ij}^{rs} = \frac{w_{ri}w_{ij}w_{js}}{w_{rs}} - q_{ij}^{rs} \quad (13)$$

여기서  $q_{ij}^{rs}$ 는 루프경로에 의해 생성된 링크선택확률로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_{ij}^{rs} = \frac{\sum_{a=1}^{RI} \sum_{b=1}^{JS} w_a^{ri} w_{ij} w_b^{js} \delta_{ab}}{w_{rs}} \quad (14)$$

여기에서 RI와 JS는 r-i와 j-s간에 중복노드가 없는 모든 경로의 수이다.  $\delta_{ab}$ 는 a,b 경로간에 중복노드가 있는 경우에는 1, 없는 경우에는 0이다. 위식에서 두 번째 항을 구하기 위해서는 경로사이의 공통적인 노드를 알아야 한다. 따라서 순환교통량을 제외한 로짓배정에 Van Vliet(1981)의 공식을 이용하기 위해서는 경로계산이 필요하다. Huang(1998) 등은 순환교통류 문제를 해결하기 위하여 순환경로를 제외한 모든 비순환경로를 가능경로로 설정하였으나, 비현실적으로 많은 경로를 가능경로로 설정하였고, 다음에 설명하는 경로중복 문제를 고려하지 않아 경로중복문제가 증폭된다는 문제를 가지고 있다.

## 3. 경로중복문제

로짓선택모형은 폐쇄형으로 개별자료를 이용한 분석에 효과적이다. 그러나 다항선택모형으로 비관련대안의 독립성, 즉 대안들간의 교차탄력성(cross-elasticity)을 제한하는 문제를 가지고 있다. 그러므로  $\theta=0$ 일 때(즉 경로선택이 경로비용과 독립적일 때)와 링크비용함수가 상수일 때는 비관련대안의 독립성문제가 만족되지만  $\theta$ 가 커질수록, 즉 운전자들의 경로에 대한 정보가 증가할수록 최단비용경로에 대한 교통량이 증가

하게 된다(Fisk, 1980). 따라서 전통적인 로짓모형의 비관련대안 독립성문제에 관련된 대안이 있는 경우 비현실적인 경로선택확률을 도출한다. 즉 로짓기반의 통행배정모형은 기존의 대안과 유사한 경로대안도 독립적인 대안으로 인식하기 때문에 중복된 노선에 교통량을 과다추정하는 경향이 있다(Sheffi, 1985).

이러한 문제는 명시적인(explicit) 경로계산이나 과대중복경로(heavily overlapping paths)를 제거하여 해결할 수 있다. 프로빗(probit) 노선선택모형도 확률요소간 상관을 통해 공통링크를 가진 경로의 유사성을 나타낼 수 있으나, 정산과 해석이 용이하지 않다는 문제를 가지고 있다. 따라서 프로빗모형에서 가정하는 인지경로 확률잔차의 공분산을 이용하지 않고 로짓모형의 공유요소인 추가비용으로 중복경로간의 유사성(similarity)을 계산하는 방법이 더 적합하다. 중복경로를 고려한 로짓모형은 개별자료의 정산과 효과적인 경로 교통량 계산이 가능한 폐쇄형 구조를 유지하면서 다항로짓모형의 문제점인 일부 경로에 대한 과대추정을 극복할 수 있다. Cascetta(1996) 등은 그가 제시한 C-로짓모형을 통해 결정적 효용을 식(15)와 같이 수정하였다.

$$V_k^n = V_k^n - CF_k \quad (15)$$

여기서  $CF_k$ 는 공유요소(commonality factor)이다. 공유요소는 여러 가지 방법으로 나타낼 수 있지만 Cascetta(1996) 등이 제시한 일반적인 방법은 식(16)과 같다.

$$CF_k = \beta_0 \ln \sum_{h \in I_n} \left[ \frac{L_{hk}}{\sqrt{L_h} \sqrt{L_k}} \right]^\gamma \quad (16)$$

여기서  $L_{hk}$ 는 경로 h와 k의 공통된 링크의 비용이며,  $L_h, L_k$ 는 각각의 노선 h와 k의 총 노선비용이다.  $\beta_0$ 는 중복되는 모든 노선에 대한 중복정도의 영향계수로 1 이하의 값을 가지며,  $\gamma$ 는 특정노선간 중복정도에 대한 영향계수로 양의 값을 갖는다. 공유요소는 프로빗모형에서 인지경로비용의 상관계수의 합과 비슷한 개념이라 할 수 있다. 따라서 식(2)의 경로선택 로짓모형은 아래와 같이 수정된다.

$$D_k^n = \frac{\exp[\theta (V_k^n - CF_k)]}{\sum_{h \in I_n} \exp[\theta (V_h^n - CF_h)]} \quad (17)$$

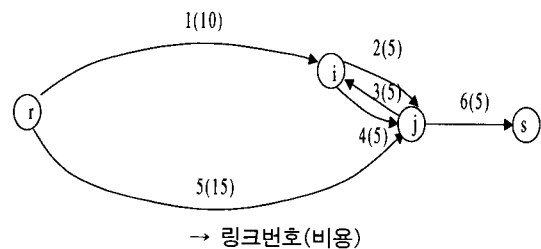
Chan(1997) 등은 Cascetta(1996) 등의 공유요소를 이용하여 경로중복을 고려한 링크선택확률을 구하였으나, 이는 단순히 링크와 경로의 상보관계를 이용한 링크선택확률이었다. 이외에도 de la Bara(1993) 등은 O-D쌍간 최소중복을 가지는 다중경로(k-path) 알고리즘을 제안하였고, Cascetta(1996) 등이 이를 적용하였다(Huang(1998)).

Damberg(1996) 등은 [0,1] 범위의 최대중복을(MPO : Maximal Portions of Overlap)을 설정하여 최대중복을 이상의 중복경로는 가능경로집합에서 제외하였다. 여기서 MPO=0이면 노선중복은 허용되지 않고 MPO=1이면 제외되는 노선은 없다. 경로중복이 심할 경우 로짓모형의 적용은 비현실적인 결과를 도출시키지만, 경로중복이 완전히 제거될 경우 결과적인 교통량은 실제로 관측되는 노선교통량과의 차이가 있을 수 있다. 왜냐하면 네트워크와 통행특성상 특정링크에 교통량이 집중되는 것이 일반적이기 때문이다. 이는 공유요소에서  $\beta_0$ 로 표현되며,  $\beta_0$ 는 1 이하의 값을 가진다.

링크중복문제는 주로 중복경로를 배제한 다중경로를 도출하여 정보제공을 하기위한 운전자 측면의 고려사항이라고 할 수 있으며, 이용자행태를 반영하는 이용자균형 통행배정 문제에서는 링크중복이 이용자들의 현실적인 행태를 반영하는 것이라 볼 수 있다.

### III. 노드중복과 링크중복을 고려한 로짓선택모형

〈그림 1〉에서는 순환교통류와 경로중복문제를 예로 보여주고 있다. 순환교통류에 대해서는 실제 순환교통류가 발생할 수 있는 상황(Huang(1998)) 등을 간단히 표현한 것이다.



〈그림 1〉 순환교통류와 경로중복문제

(그림 1)에서 순환교통류 문제는 r-s간 경로가 r-j-i-j-s로 j라는 노드가 중복되는 경우이고, 경로중복문제는 r-i-j-s간 3개 경로 중 2개 경로는 r-i, j-s 링크가 중복되어 거의 유사한 경로지만, 로짓모형에서는 독립된 경로로 구분되는 문제이다.

순환교통류문제와 경로중복문제는 동시에 발생할 수 있으며 유사한 문제일 수도 있으나, 순환교통류문제는 중복노드(common nodes)에 초점을 두는 것이고, 경로중복문제는 중복링크(common links)에 초점을 두는 것이다. 또한 노드중복문제는 현실적으로 네트워크에서 그 규모에 관계없이 발생 그 자체가 중요하나, 링크중복문제는 발생 그 자체는 일반적인 것으로 중요하지 않으나 규모가 중요하다. 따라서 링크중복문제는 노드의 중복과 달리 중복링크의 연장, 중복비율 등 여러 가지 유형으로 나타낼 수 있다. 이렇게 순환교통류문제는 노드중복문제로, 경로중복문제는 링크중복문제로 해석할 수 있다.

또한 노드중복은 각 경로 자체에 관련된 문제이나, 링크중복문제는 2개 이상의 경로간에 관련된 문제이다. 따라서 로짓모형에 의한 확률적 네트워크할당의 경우 개별 통행자들의 인지비용에 따라 경로를 선택하고 이에따라 상이한 최단경로를 갖게 되므로, 즉 복수경로(multi-path)를 고려하는 것이므로 두 가지 문제를 모두 고려하여야 한다.

로짓모형에서 식(4)의 계수  $\theta$ 는 인지통행시간을 조정하는 계수이다.  $\theta$ 가 크면 인지여러는 작아지고, 통행자들은 최소비용경로를 선택할 것이다.  $\theta$ 가 작을 경우에는 인지여러가 커져서 최소비용경로보다 더 비용이 큰 많은 경로를 이용하게 된다. 결국  $\theta$ 가 0에 가까운 경우 모든 경로의 교통량은 경로통행시간에 관계없이 같아진다(Sheffi, 1985). 따라서 일반적으로  $\theta$ 가 커질수록 로짓모형의 비관련대안의 독립성은 만족되지 않는다. 또한 경로정보의 제공을 위해서는 중복된 경로가 아닌 명확한 대안으로서의 경로설정이 필요하다(Huang(1998) 등). 루프가 있는 무한한 수의 모든 경로를 고려하는 Akamatsu(1996)의 모형에서는 경로집합들이 노드중복뿐만 아니라 링크중복도 증가하게 된다.

본 연구에서는 링크중복과 노드중복을 모두 고려한 로짓선택확률모형을 제시하였다. 즉 식(12)와 (17)을 동시에 고려하여 기점에서 어떤 링크의 초기노드와 그 링크의 종점노드에서 종점까지의 가중치를 수정하

여 식(18)을 제시하였다.

$$w_{ri} = \sum_{a=1}^{Ri} \exp[-\theta (c_a^{ri} + CF_a^{ri})]$$

$$w_{js} = \sum_{b=1}^{Js} \exp[-\theta (c_b^{js} + CF_b^{js})] \tag{18}$$

식 (18)에 따라 식 (13),(14)를 수정하면 식(19)와 같이 노드중복과 링크중복을 고려한 링크선택확률모형을 도출할 수 있다.

$$p_{ij}^{rs} = \frac{\sum_{a=1}^{Ri} \exp[-\theta (c_a^{ri} + CF_a^{ri})] \exp(-\theta c_{ij}) \sum_{b=1}^{Js} \exp[-\theta (c_b^{js} + CF_b^{js})]}{\exp(-\theta c^{rs})} - q_{ij}^{rs} \tag{19}$$

여기서

$$q_{ij}^{rs} = \frac{\sum_{a=1}^{Ri} \sum_{b=1}^{Js} \exp[-\theta (c_a^{ri} + CF_a^{ri})] \exp(-\theta c_{ij}) \exp[-\theta (c_b^{js} + CF_b^{js})] \delta_{ab}}{\exp(-\theta c^{rs})}$$

각 노드까지의 중복링크계산은 존쌍간의 경로를 구한 뒤 중복링크부분을 계산하는 기존의 중복경로 계산과 달리 각 노드까지의 중복경로를 계산한다. 이는 기존의 링크중복개념을 특정링크를 기준으로 통행기점에서 특정링크의 초기 노드까지의 링크중복과 특정링크 종점노드부터 통행종점까지의 링크중복으로 세분화한 것이라고 할 수 있다. 즉 특정링크를 중심으로 경로중복의 정도가 다름을 반영한다. 이 경우 가까운 노드의 경우 출발점에서 다음 노드까지 경로가 중복되는 경우는 거의 없고 노드가 멀리 있을수록 경로중복이 커지게 되기 때문에 비현실적인 경로탐색은 발생하지 않는다.

## IV. 사례분석

### 1. 분석시나리오

(그림 1)의 예제네트워크에 대해 앞에서 기술한 노드중복과 링크중복문제를 분석하였다. 예제 네트워크에서 2번 이상의 순환교통량을 포함하는 경우 경로의 수는 무한대로 증가하기 때문에 한번의 순환교통량을 고려하였으며, 이 때 발생가능한 경로들을 링크로

표시하면 다음과 같이 모두 5개이다(이때, 분석의 편의상 5번 링크를 사용하는 경로는 순환과정 없이 6번 링크로 직접 연결된다고 가정한다).

- ① 1 → 2 → 6
- ② 1 → 4 → 6
- ③ 5 → 6
- ④ 1 → 2 → 3 → 4 → 6
- ⑤ 1 → 4 → 3 → 2 → 6

여기서 경로④와 ⑤는 노드중복에 해당되고, 5개 대안 모두 링크중복이 발생한다. 식(18)과 식(13)을 이용하여 노드중복과 링크중복문제를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 경로선택확률과 링크선택확률을 분석하였다. 각 경우의 가능경로대안은 다음과 같다.

- CASE A 노드중복과 링크중복 허용
  - 경로 대안 5개
- CASE B 노드중복 배제
  - 노드중복이 발생하는 경로 ④,⑤를 제외한 3개 경로, 즉 ①,②,③
- CASE C 링크중복 배제
  - 5개 대안을 모두 가능경로로 하여 링크중복을 고려

- CASE D 노드중복과 링크중복 배제
  - 노드중복경로를 제외한 3개 대안경로의 링크중복만을 고려

위 4개의 분석시나리오에 대하여 경로비용에 대한 선택민감도를 파악하기 위해 인지비용계수( $\theta$ )가 0.001, 0.5, 1.0인 경우를 비교하였다. 경로도출시 중복정도의 반영수준에 대한 영향을 파악하기 위해 식(16)의  $\beta_0$ 가 1.0과 0.5인 경우를 비교하였다.  $\gamma$ 는 모두 1로 가정하였다.

## 2. 분석결과

〈표 1〉, 〈표 2〉, 〈표 3〉은  $\theta$ 값의 변화에 따른 각 CASE별 경로선택 확률값의 변화를 보이고 있다. 링크중복을 고려하지 않는 경우 동일한 경로비용을 가지지만 중복링크가 많은 경로와 그렇지 않은 경로가 동일한 선택확률을 가지고 있다. 노드중복을 고려하지 않는 경우 순환경로도 인지비용계수값이 작을 경우에는 거의 동일한 선택확률을 가지고 있다. 노드중복과 링크중복을 모두 허용하는 경우와 노드중복만을 고려할 경우 노드중복이 있는 경로④,⑤를 제외한 나머지 3개 대안의 경로선택확률이 동일하고, 링크중복만을 배제할 경우 경로③을 제외한 나머지 4개 경로 대안의 선택확률이 동일하다.

〈표 1〉 예제네트워크에 대한 경로선택확률( $\theta = 0.001$ )

경로	비용	노드 및 링크중복 허용(CASE A)	노드중복 배제(CASE B)	링크중복 배제(CASE C)		노드 및 링크중복 배제(CASE D)	
				$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$	$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$
①	20	0.2008	0.3333	0.2000	0.2000	0.3333	0.3333
②	20	0.2008	0.3333	0.2000	0.2000	0.3333	0.3333
③	20	0.2008	0.3333	0.2001	0.2001	0.3335	0.3334
④	30	0.1988	0.0000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000
⑤	30	0.1988	0.0000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000

〈표 2〉 예제네트워크에 대한 경로선택확률( $\theta = 0.5$ )

경로	비용	노드 및 링크중복 허용(CASE A)	노드중복 배제(CASE B)	링크중복 배제(CASE C)		노드 및 링크중복 배제(CASE D)	
				$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$	$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$
①	20	0.3318	0.3333	0.1850	0.1928	0.2937	0.3139
②	20	0.3318	0.3333	0.1850	0.1928	0.2937	0.3139
③	20	0.3318	0.3333	0.2600	0.2286	0.4127	0.3721
④	30	0.0022	0.0000	0.1850	0.1928	0.0000	0.0000
⑤	30	0.0022	0.0000	0.1850	0.1928	0.0000	0.0000

〈표 3〉 예제네트워크에 대한 경로선택확률( $\theta = 1.0$ )

경로	비용	노드 및 링크중복 허용(CASE A)	노드중복 배제(CASE B)	링크중복 배제(CASE C)		노드 및 링크중복 배제(CASE D)	
				$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$	$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$
①	20	0.3333	0.3333	0.1674	0.1850	0.2516	0.2937
②	20	0.3333	0.3333	0.1674	0.1850	0.2516	0.2937
③	20	0.3333	0.3333	0.3305	0.2600	0.4968	0.4127
④	30	0.0000	0.0000	0.1674	0.1850	0.0000	0.0000
⑤	30	0.0000	0.0000	0.1674	0.1850	0.0000	0.0000

〈표 4〉 예제네트워크에 대한 링크선택확률( $\theta = 0.5$ )

링크	노드 및 링크중복 허용(CASE A)	노드중복 배제(CASE B)	링크중복 배제(CASE C)		노드 및 링크중복 배제(CASE D)	
			$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$	$\beta_0=1$	$\beta_0=0.5$
1	0.6682	0.6667	0.7400	0.7714	0.5873	0.6279
2	0.3363	0.3333	0.5550	0.5785	0.2937	0.3139
3	0.3363	0.3333	0.3700	0.3857	0.0000	0.0000
4	0.0045	0.0000	0.5550	0.5785	0.2937	0.3139
5	0.3341	0.3333	0.2600	0.2286	0.4127	0.3721
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

$\theta$ 가 0에 가까운 경우(〈표 1〉의  $\theta = 0.0001$ )는 경로비용의 차이에도 선택확률값이 거의 동일하고, 링크중복을 배제하였을 경우와 허용하는 경우의 선택확률값의 차이가 거의 없으며, 노드중복을 배제하였을 경우만 선택확률값이 달라진다. 그러나 인지비용계수  $\theta$  값이 증가할수록(〈표 2〉  $\theta = 0.5$ , 〈표 3〉의  $\theta = 1$ ), 경로비용의 차이 및 링크중복의 정도에 따라 경로선택이 영향을 받게 된다. 즉  $\theta$ 가 아주 작을 경우, 경로비용이 경로선택에 영향을 별로 미치지 않으므로 링크중복에 따라 경로선택이 달라지지 않으나,  $\theta$  값이 커짐에 따라(즉, 완전정보에 가까워짐에 따라) CASE A의 경우 경로 ④⑤의 선택비율이 감소되다가,  $\theta$ 가 1.0 이상이 되면 경로 ④⑤의 선택확률이 거의 0이 되어 현실적인 선택확률값을 도출한다. CASE D에서 볼 수 있듯이 노드 및 링크중복을 모두 배제할 경우 노드중복인 경로④,⑤가 대안경로에서 제외되며, 노드중복이 없고 링크중복이 적은 경로③이 대안경로 ①②보다 큰 경로선택확률을 가진다.

$\theta$ 가 0에 가까운 경우는 중복정도의 영향계수값  $\beta_0$ 도 거의 고려되지 않지만  $\theta$ 가 증가할수록  $\beta_0$ 값이 0.5일 때보다 1.0일 때 중복경로의 선택확률은 감소되며, 중복경로와 비중복경로의 차이도 커지게 된다. 중복정도에 대한 영향계수를 고려함으로써 기존의 대

안과 유사한 경로대안도 독립적인 대안으로 하여 중복된 노선에 교통량을 과다추정하는 로짓기반 경로선택의 문제를 감소시킬 수 있었다.

$\theta$ 와  $\beta_0$ 에 대한 영향을 정리하면, 정보제공이 커지며 중복된 경로에 대한 영향정도를 크게 고려할수록, 일부 중복경로에 대한 과다추정이 감소하게 된다. 따라서 복수의 대안경로를 도출하기 위해서는 노드 및 링크중복을 반영하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

〈표 4〉는  $\theta$ 가 0.5인 경우, 각 링크의 선택확률을 나타내고 있다. 노드중복만을 배제하였을 경우, 링크 4를 제외한 링크 2,3,5의 선택확률이 동일하고, 노드중복과 링크중복을 모두 허용한 경우와 링크중복만을 배제하였을 경우는 링크1,2,4의 선택확률이 동일한 경로비용을 가진 링크 5보다 과다추정되었다. 노드중복과 링크중복을 모두 배제하였을 경우 노드중복, 링크중복에 의해 과다추정된 링크 1,2,3의 선택확률이 감소하고, 과소추정된 링크5의 선택확률이 증가하여 보다 합리적인 링크선택확률을 도출하였다.

네트워크가 혼잡해지면 도로용량의 영향이 운전자의 확률적 요소의 영향보다 커지게 되어 노선간 통행배정결과가 유사해지므로, 본 연구에서는 연구범위에서 혼잡상황은 제외하였다.



## V. 결론

링크중복문제와 노드중복문제는 주로 중복경로와 순환경로를 배제한 다중경로를 도출하여 정보제공을 하기위한 운영자 측면의 경로선택모형에서 중요하게 이용될 수 있다. 본 연구에서 제시된 링크중복과 노드중복을 고려한 모형은 기존의 링크중복개념을, 특정 링크를 기준으로 하여 통행기점에서 특정링크의 초기노드까지의 링크중복과, 특정링크의 종점노드에서 통행종점까지의 링크중복으로 구분한 것이다. 본 연구에서는 링크중복과 노드중복을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 등 몇가지 시나리오에 따라 경로선택확률과 링크선택확률을 서로 비교하였다.

제시된 모형을 이용하여 가상네트워크에서 경로 및 링크선택확률을 계산한 결과, 노드중복과 링크중복을 고려해야만 선택대안들간의 차별성을 고려하면서 특정 경로 또는 특정링크의 선택확률이 과대추정되는 문제를 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 특성을 통해 중복경로와 순환경로를 배제한 다중경로의 도출을 효과적으로 할 수 있고, 본 연구의 모형을 일반네트워크로 확장하여 링크선택확률모형의 실제 적용 가능성을 검토할 수 있으며, 특히 링크선택확률모형을 이용해 링크선택확률이 달라짐에 따른 링크교통량으로부터의 기종점 추정모형 등에 적용할 수 있다. 본 연구에 대한 향후 연구과제로, 명시적인 경로계산을 하지 않고 노드중복과 링크중복을 고려하는 모형의 개발이 필요하다. 이는 혼잡상황을 고려한 대규모 가로망에 적용시 특히 필요하다.

## 참고문헌

1. Akamatsu T.(1996), "Cyclic flows, Markov process and stochastic traffic assignment", *Transportation Research* 30B, pp.369~386.
2. Bell M. G. H., Lam W.H.K. Ploss G. and Inadudi D.(1993), "Stochastic user equilibrium assignment and iterative balancing". the 12th ISTTT, pp.427~439.
3. Bell M. G. H.(1995), "Alternative to Dial's assignment algorithm", *Transportation Research* 29B, pp.287~295.
4. Bell M. G. H. and Iida Y. (1997), "Transportation Network Analysis", John Wiley & Sons.
5. Cascetta E. Nuzzolo A. Russo F. and Vitetta A. (1996), "A new route choice logit model overcoming IIA problems", the 13th ISTTT, pp.691~711.
6. Chan K. S. and Lam W.H.K. (1997), "Estimation of link flow variance by stochastic traffic assignment", *IFAC97*, pp.1310~1315.
7. Damberg O., Lundgren J.T., and Patrikson M. (1996), "An algorithm for the stochastic user equilibrium problem", *Transportation Research* 20B, pp.115~131.
8. de la Barra T. (1993), "Multidimensional path search and assignment", *The 21st PTRC Summer Annual Conference*, pp.307~319.
9. Fisk C. (1980), "Some developments in equilibrium traffic assignment", *Transportation Research* 14B, pp.243~255.
10. Huang H.J. & Bell M. G. H. (1998), "A study on Logit assignment which excludes all cyclic flows", *Transportation Research* 32B, pp.401~412.
11. Janson B. (1987), "The problem of cyclic flows in traffic assignment", *Transportation Research* 21B, pp.299~310.
12. LeBlanc L. J. & Farhangian L. J. (1982), "Selection of a trip table which reproduces observed link flows", *Transportation Research* 16B, pp.83~88.
13. Lo H. P. and N. Zhang and Lam W. H. K. (1996). "Estimation of and O-D matrix with random link choice proportions : a statistical approach", *Transpn. Res.* 30B, pp.309~324.
14. Sheffi. Y. (1985), "Urban transportation networks", Prentice-Hall.
15. Van Vliet D. (1981), "Selected node-pair analysis in Dial's assignment algorithm", *Transportation Research B. Vol. 15*, pp.65~68.