

■ 論 文 ■

동적 네트워크 로딩 방법 및 적용에 관한 연구

Dynamic Network Loading Method and Its Application

한 상 진

(교통개발연구원 책임연구원)

목 차

- I. 서론
- II. 정적통행배분과 네트워크 로딩
 - 1. 통행배분모형
 - 2. 네트워크 로딩
 - 3. 통행배분과 네트워크 로딩
- III. 동적 모형에서의 고려사항
 - 1. 시간대별 O/D 교통수요
 - 2. 경로통행시간의 계산방법
 - 3. 인과성
 - 4. FIFO 조건
 - 5. 교통량전파
- IV. 동적 네트워크 로딩
 - 1. 동적네트워크 로딩 문제
 - 2. 기존연구고찰
 - 3. 새로운 동적네트워크 로딩
- V. 가상 가로망에서의 적용
 - 1. 링크비용함수
 - 2. 사례 네트워크
 - 3. 네트워크 로딩결과
- VI. 결론
- 참고문헌

Key Words : 동적통행배분모형, 네트워크 로딩, 경로통행시간, 인과성, FIFO 조건, 교통류전파, 교통류보존

요 약

본 연구는 통행배분 모형과 네트워크 로딩의 일반적인 원리 및 그 관계를 규명하고, 시간을 고려한 네트워크 로딩방법 즉, 동적네트워크 로딩 방법을 소개한다. 우선 본 연구에서는, 동적 네트워크 로딩을 올바르게 구현하기 위해 인과성(causality), FIFO(First-In-First-Out), 교통량전파(flow propagation), 교통류보존(flow conservation) 등의 조건이 만족되어야 함을 제기한다. 그리고, 구체적인 동적 네트워크 로딩 방법을 알고리즘 형식으로 설명하였으며, 이후 링크 비용함수로써 결정적 대기행렬모형을 도입하여 가상 네트워크 속에서 동적 네트워크 로딩이 어떻게 이루어지는지를 수치적으로 보여준다.

1. 서론

본 연구에서는 통행배분(traffic assignment)을 실시하기 위해 반드시 수반되어야 하는 네트워크 로딩(network loading) 방법에 대해 설명한다. 통행배분 모형이 시간 변수를 고려하는지의 여부에 따라 정적 통행배분과 동적 통행배분으로 구분되는 것처럼, 네트워크 로딩도 정적인 경우와 동적인 경우로 구분할 수 있다.

동적네트워크 로딩은 최근 각광받고 있는 첨단교통체계(Intelligent Transport System:ITS)에서 제시하는 여러 가지 교통운영 방법들의 효율성을 평가하는 동적통행배분 모형의 핵심 요소로써 매우 중요한 역할을 담당한다. 그러나 많은 동적통행배분 관련 연구에서 동적 네트워크 로딩 방법에 대해서는 구체적인 설명을 생략하고 있다. 이는 각 시간대별로, 어떻게 경로교통량이 한 링크에서 합쳐지고 분류되는지를 명쾌히 설명하기 어려운데 있다.

본 연구에서는 이러한 측면에서, 동적 네트워크 로딩의 구체적인 방법론을 개발하고 가상 네트워크를 통해 동적 네트워크 로딩이 어떻게 이루어지는지를 설명하고자 한다. 본 연구는 다음과 같은 순서로 구성되었다.

우선 2장에서 통행배분과 네트워크 로딩의 관계를 정적인 경우를 들어 설명하고, 3장에서는 동적통행배분에서 고려할 사항을 구체적으로 설명한다. 그 후 4장에서 본 논문의 핵심인 동적 네트워크 로딩 방법을 설명한다. 마지막으로 5장에서는 가상 네트워크 속에서 동적 네트워크 로딩방법이 어떻게 작동하는지를 수치적으로 보여준다.

II. 정적통행배분과 네트워크 로딩

1. 통행배분모형

통행배분(traffic assignment)이란, 주어진 네트워크 자료, O/D(기·종점) 교통량 수요, 링크비용함수, 경로선택모형 등을 이용해 네트워크의 각 링크별 통행량 및 통행시간을 추정하는 방법을 일컫는다. 통행배분 모형은 경로선택모형의 유형에 따라 결정적(deterministic) 통행배분모형과 확률적(stochastic) 통행배분모형으로 구분된다. 결정적 통행배분 모형에

서는 운전자들이 각 경로에 대해 느끼는 일반화된 통행비용이 항상 같으며 또 일률적으로 행동한다는 가정을 바탕으로 교통량을 가로망에 배분한다. 결정적 통행배분모형 중 많이 쓰이는 모형에는 전량배분법(all-or-nothing assignment)과 사용자균형통행배분법(user equilibrium assignment) 등이 있다. 이에 반해, 확률적 통행배분모형에서는 같은 경로라 할지라도 운전자들이 느끼는 통행비용은 서로 다를 수 있으며, 또한 일률적으로 똑같이 행동하지 않는다는 점을 고려해 경로 선택을 확률적으로 표현하며, 이를 기반으로 교통량을 가로망에 배분한다. 확률적 통행배분모형은 경로선택모형의 종류에 따라 구분되며 자주 쓰이는 방법에는 로짓(logit) 통행배분과 프로빗(probit) 통행배분모형, 확률적사용자균형(stochastic user equilibrium) 통행배분법이 있다.

2. 네트워크 로딩

네트워크 로딩은 각 O/D(기·종점)별로 경로교통량이 주어졌 있을 때 이를 네트워크에 뿌려주어 네트워크의 각 링크에 어느 정도의 교통량이 부하 될지를 찾아내는 과정을 일컫는다. 다시 말해, 네트워크 로딩은 통행배분과정에서 경로선택모형을 적용하여 경로별 교통량을 얻은 후에, 이를 네트워크에 부하하여 각 링크별 교통량을 계산하기 위해 실시한다. 일반적으로, 네트워크의 링크에 부하되는 교통량은 각 O/D별, 경로별 교통량의 합으로 표현된다. 정적(static) 네트워크 로딩의 경우에는 그 과정을 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$e_a = \sum_{od} \sum_p f_p^{od} \delta_a^p, \quad \forall a \quad (1)$$

또는,

$$e_a = \sum_{od} \sum_p q^{od} P_p^{od} \delta_a^p, \quad \forall a \quad (2)$$

여기서,

e_a : 링크 a의 링크교통량

f_p^{od} : O/D쌍 od를 잇는 경로 p의 경로교통량

q^{od} : O/D쌍 od의 교통수요

P_p^{od} : O/D쌍 od를 잇는 경로 p가 선택될 확률

δ_a^p : 링크 a 가 경로 p에 속하면 1을 그렇지 않으면 0을 값을 갖는다.

식(1)은 결정적 통행배분 모형인 경우를 설명하고 있으며, 식(2)는 확률적 통행배분 모형인 경우를 설명한다. 정적인(static) 차원의 분석에 있어서는 결정적 모형이건 확률적 모형이건 관계없이 링크 교통량은 그 링크를 지나는 모든 경로 교통량의 합으로 표현된다. 다시 말해, 경로 교통량만 주어지면 링크 교통량은 단순히 해당 링크를 지나는 모든 경로 교통량을 합하기만 하면 된다. 이런 측면에서, 정적인 차원에서의 네트워크 로딩은 매우 간단한 작업이고 이해하기도 용이하다고 볼 수 있다.

3. 통행배분과 네트워크 로딩

통행배분모형 중에는 네트워크 로딩 그 자체로(즉, 1회의 네트워크 로딩으로) 통행배분이 완료되는 모형이 있고, 여러 번의 네트워크 로딩을 거친 후에야 통행배분이 완료되는 모형이 있다.

예를 들어, 전량배분법(all-or-nothing assignment)의 경우 경로 선택모형에서 모든 통행자들이 최소비용경로만을 이용한다고 가정하기 때문에 각 O/D별 교통수요를 모두 최소비용경로에 부하하면 된다. 그리고 더 이상의 네트워크 로딩은 필요하지 않다. 마찬가지로 확률적 통행배분 모형중 로짓 통행배분 모형이나 프로빗 통행배분 모형도 한번의 네트워크 로딩으로 통행배분이 완료된 것으로 본다.

그러나, 사용자균형(User Equilibrium:UE) 통행배분모형이나 확률적사용자균형(Stochastic User Equilibrium:SUE) 통행배분모형의 경우에는 여러 번의 네트워크 로딩이 요구된다. 이들 통행배분모형에서는 일정한 조건을 만족시키는 통행패턴, 즉 사용자균형(user equilibrium)상태를 찾는 것이 목적인데, 이런 상태를 단번의 네트워크 로딩에 의해 찾기는 어렵기 때문이다.

사용자균형 상태를 찾는 통행배분 모형에서는 수학적 모형으로 사용자 균형상태를 정식화(formulation)하고 해법알고리즘(solution algorithm)에서 이 상태를 만족시키는 통행패턴을 여러 번의 네트워크 로딩을 통해 찾아나간다. 다시 말해, 여러 번의 네트워크 로딩 결과를 조합해서, 사용자 균형상태를 만족시키

는 해를 찾는다고 볼 수 있다. UE 통행배분모형에서는 주로 전량배분법을 네트워크 로딩으로 이용하고, SUE 통행배분모형에서는 주로 로짓이나 프로빗 통행배분법을 네트워크 로딩 방법으로 이용한다.

III. 동적 모형에서의 고려사항

구체적인 동적 네트워크 로딩 방법을 설명하기 전에 본 절에서는 먼저 동적 통행배분모형이나 그 과정에서 수행하는 동적 네트워크 로딩에서 고려해야 할 사항을 설명한다. 동적 모형의 가장 큰 특징은 정적 모형과는 달리 시간 변수를 고려한다는 것이다. 따라서, 동적 네트워크 로딩에서는 네트워크를 흐르는 교통량의 크기와 이들이 겪는 통행시간의 변화를 시간대별로 분석해야 한다.

하지만, 시간을 고려하기 때문에 동적 네트워크 로딩에서는 정적 통행배분 모형과 달리 많은 저장용량과 긴 계산 시간을 필요로 한다. 시간대별로 링크 유입 및 유출 교통량, 통행시간 등을 계산해내야 하기 때문이다. 이 밖에 동적 네트워크 로딩에서는 다음의 사항을 올바르게 고려해야 한다.

- 인과성
- FIFO(First-In-First-Out) 조건
- 교통량전파(flow propagation)
- 교통량 보존법칙

또한 동적 통행배분 모형 속에서 동적 네트워크 로딩을 수행하기 위에서는 앞에서 제시한 요구사항이외에도 시간대별 O/D 교통량 수요의 추정과 경로통행시간의 계산을 합리적으로 수행해야 한다. 본 절에서는 이러한 여섯 가지 조건에 대해 구체적으로 설명한다.

1. 시간대별 O/D 교통수요

정적통행배분에서는 O/D쌍별 교통수요가 시간에 따라 변하지 않고 항상 일정하다고 가정한다. 그러나 동적통행배분 모형에서는 분석시간단위(1분, 15분 등)별로 교통수요가 있어야만 분석이 가능하다. 합리적인 시간대별 교통수요를 얻는 방법에 대한 연구는 활발하지 않으나 Romph(1994)는 정적통행배분에서 사용하는 O/D에 출발시간함수(departure time function)

를 곱하여 시간대별 교통수요를 얻는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} q^{od}(t) &= q^{od} \cdot \Omega^{od}(t) \\ \sum_t \Omega^{od}(t) &= 1 \\ \Omega^{od}(t) &\geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$q^{od}(t)$: 시간 t에서의 O/D 쌍 od에 대한 교통수요
 $\Omega^{od}(t)$: od에 대한 출발시간함수

이러한 방법 이외에도 출발시간과 경로선택을 동시에 고려하여 총통행량이 주어졌을 때 사용자균형을 만족시키는 시간대별 O/D 교통수요를 만들어내는 방법도 존재한다. 보다 자세한 내용은 Hendrickson과 Kocur (1981), Friesz 등(1993), Ran과 Boyce(1996) 등에서 찾을 수 있다. 또는 동적 O/D matrix를 예측하는 기법을 이용할 수도 있다. 이와 관련된 내용은(Bell, 1991; Chang and Tao, 1996)에서 찾을 수 있다.

2. 경로통행시간의 계산방법

동적통행배분 모형에서도 정적통행배분 모형처럼 경로를 이루는 모든 링크들의 통행비용을 합하여 경로통행비용을 계산하면 되지만, 시간대별로 네트워크의 상태, 다시 말해 링크비용과 교통량의 크기가 변화하는 것을 고려해야하기 때문에 경로통행비용 계산이 다소 복잡하다. 일반적으로, 동적통행배분 모형에서 제시되는 경로통행시간에는 두 가지 유형이 있다. 하나는 "현실적(ideal)" 경로통행시간이고 다른 하나는 "순간적(instantaneous)" 경로통행시간이다. 현실적 경로통행시간은 통행자들이 실제로 통행하면서 경험하는 통행시간, 다시 말해, 변화하는 네트워크 상황을 반영하여 계산된 통행시간을 말하며, 순간적 경로통행시간은 출발하는 시간에 생성된 네트워크 상황만을 기준으로 계산된 통행시간을 말한다. 두 경로통행시간의 계산 방법은 수학적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_p^d(t) &= c_{a_1}(t) + c_{a_2}(t + c_{a_1}(t)) + \dots + c_{a_m}(t + c_{a_1}(t) \\ &\quad + c_{a_2}(t + c_{a_1}(t)) + \dots + c_{a_{m-1}}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$C_p^n(t) = c_{a_1}(t) + c_{a_2}(t) + \dots + c_{a_m}(t) \quad (5)$$

여기서,

$C_p^d(t)$: 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 이상적 경로통행시간

$C_p^n(t)$: 시간 t에 출발하여 경로 p를 이용할 때의 순간적 경로통행시간

$c_a(t)$: 시간 t에 link a의 통행시간

$a_1, a_2, \dots, a_m \in p$

3. 인과성(causality)

인과성이란 현재 통행자들의 행동은 과거에 의해 영향을 받지 미래에 의해 영향받지 않는다는 것이다. 다시 말해, 현재 통행자들의 행동 또는 선택은 과거의 통행자들이 만들어 놓은 교통상황에만 영향을 받지, 앞으로 통행하게 될 미래의 통행자들의 행동에 의해서는 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다. 인과성은 링크 안에서의 교통류 흐름을 모형화 할 때에도 고려되어야 한다. 즉, 링크 내의 한 지점에서 나타나는 교통류의 변화는 하류부의 교통상황에만 영향을 받지 상류부의 영향을 받지 않는다.

4. FIFO(First-In-First-Out) 조건

FIFO 조건은 먼저 출발한 통행자가 먼저 도착해야 한다는 원리를 말한다. 현실에서는 나중에 출발한 통행자가 먼저 출발한 통행자보다 더 빨리 목적지에 도착하는 경우가 많으므로 FIFO 조건이 만족되지 않는다. 그러나, 이러한 상황을 모형 속에 반영한다는 것은 매우 어렵기 때문에 동적통행배분 모형에서는 FIFO 조건하에서 구축된다. 참고로, 정적네트워크 로딩에서는 같은 경로를 이용하는 모든 통행자들은 똑같은 통행시간을 경험할 것이라고 가정하기 때문에 FIFO 조건에 대한 고려가 필요 없다.

한 링크에서의 FIFO 조건은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\frac{d\tau_a(t)}{dt} \geq 0 \quad (6)$$

여기서, $\tau_a(t)$ 는 t 시간에 링크 a에 진입한 교통류가

그 링크를 빠져나가는 시간(즉, 링크의 종점부 도착 시간)을 말한다.

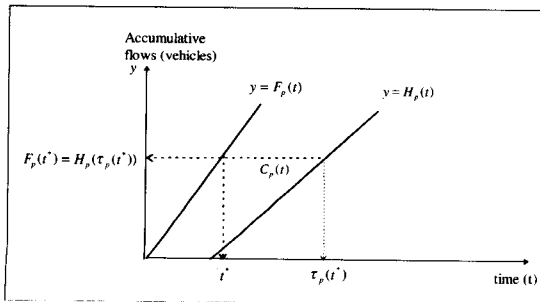
식(6)은 링크 a의 종점부 도착시간 $\tau_a(t)$ 는 출발시간 t가 증가하면 더불어 증가해야함을 나타낸다. 따라서, 추월현상은 발생하지 않는다.

5. 교통량전파(flow propagation)

교통량전파란 교통류의 크기가 차량의 궤적을 따라서 바뀌는 현상을 나타낸다. 정적 네트워크 로딩에서는 교통량전파 현상을 고려할 필요가 없다. 왜냐하면, 교통류의 크기는 전체 경로에서 항상 같을 것이라고 간주하기 때문이다. 하지만 동적통행배분에서는 네트워크의 상황에 따라 경로를 따라 흐르는 교통류의 크기가 바뀐다는 사실을 고려해야 한다. 예를 들어, 경로 상의 한 지점에서 병목현상이 발생하게 되면, 이 지점으로 유입되는 교통량이 아무리 크더라도 유출되는 양은 병목 지점이 갖는 용량을 초과하지 못한다. 일반적으로 교통류전파 현상은 다음의 식(7)로 표현이 가능하다.

$$h_p(\tau_p(t)) = \frac{f_p(t)}{\frac{d\tau_p(t)}{dt}} \quad (7)$$

식(7)은 종점부의 유출교통량은 도착시간의 변화율과 유입교통량에 의해 결정됨을 나타낸다. 즉, 식(7)을 이용하면 교통량의 크기가 경로를 따라서 어떻게 변화하는지를 설명할 수 있다. 식(7)은 FIFO 조건이 만족되는 경우, 경로 p의 시간 t에서의 누적유입교통량 $F_p(t)$ 는 경로 p의 도착시간 $\tau_p(t)$ 에서의 누적유출교통량 $H_p(\tau_p(t))$ 와 같다는 사실로 증명해 낼 수 있다. <그림 1>은 이 관계를 나타내고 있다.



<그림 1> 누적교통량과 통행시간

<그림 1>을 통해 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$F_p(t) = H_p(\tau_p(t)) \quad (8)$$

$$\text{또는, } \int_{u=0}^t f_p(u) du = \int_{w=0}^{\tau_p(t)} h_p(w) dw \quad (9)$$

따라서, 식(9)를 미분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$f_p(t) = h_p(\tau_p(t)) \cdot \frac{d\tau_p(t)}{dt} \quad (10)$$

즉, 식(7)을 유도할 수 있게 된다. 식(8)은 경로뿐만 아니라 링크에서도 성립하므로 위의 식(7)은 링크에 대해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_a(\tau_a(t)) = \frac{e_a(t)}{\frac{d\tau_a(t)}{dt}} \quad (11)$$

6. 교통류보존(flow conservation)법칙

동적통행배분 모형에서 교통류보존은 링크, node, 기점(origin)에서 표현될 수 있다. 먼저, 링크 a에서의 교통류보존은 아래의 식처럼 표현이 가능하다.

$$\frac{dx_a(t)}{dt} = e_a(t) - g_a(t), \text{ 또는} \quad (12)$$

$$x_a(t) = E_a(t) - G_a(t) \quad (13)$$

여기서,

$x_a(t)$: 시간 t에 링크 a에 남아있는 차량대수

$e_a(t)$: 시간 t에 링크 a로의 유입교통량

$g_a(t)$: 시간 t에 링크 a로부터의 유출교통량

$E_a(t)$: 시간 t에 링크 a로 유입된 누적유입교통량

$G_a(t)$: 시간 t에 링크 a에서 유출된 누적유출교통량

식(12)는 차량대수의 변화율을 표현한 것으로 Merchant와 Nemhauser(1978)의 연구에서 처음 등장하였으며, 식(13)은 식(12)를 적분했을 때에 얻어진다. 참고로 식(13)을 보면 시간 t까지 링크 a로 유입된 총

차량대수, $E_a(t)$ 에서 시간 t 까지 링크 a 로부터 빠져나간 총차량대수, $G_a(t)$ 를 빼면 시간 t 에 링크 a 에 남아있는 차량대수, $x_a(t)$ 가 됨을 알 수 있다. 즉, 교통류보존법칙을 설명한다고 볼 수 있다.

입의의 노드 j 에서의 교통류 보존은 다음의 식으로 표현이 가능하다.

$$\sum_{a \in B(j)} g_a(t) = \sum_{a \in A(j)} e_a(t) \quad (14)$$

여기서,

- $B(j)$: 노드 j 로 들어가는 링크 집합
 $A(j)$: 노드 j 에서 빠져나오는 링크 집합

식(14)는 노드 j 가 종점인 링크들에서 시간 t 에 빠져나온 교통량의 합은, 시간 t 에 노드 j 가 시점인 링크들로 유입된 교통량의 합과 같다는 것을 나타낸다.

비슷하게, 기점 o 에서의 교통류보존은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$q^{od}(t) = \sum_{a \in A(o)} \sum_{p \in R_{o,d}} f_{p,a}^{od}(t) \quad (15)$$

여기서, $f_{p,a}^{od}(t)$ 는 시간 t 에 기종점 o 와 d 를 연결하는 경로 p 의 경로교통량 중에서 링크 a 로 유입되는 교통량을 나타낸다. 식(15)는 따라서, 시간 t 의 교통 수요 $q^{od}(t)$ 는 시간 t 에 기점 o 에서 종점 d 를 향해 움직이는 모든 가능한 경로교통량의 합과 같아야 함을 나타낸다.

IV. 동적네트워크 로딩

1. 동적네트워크 로딩문제(Dynamic Network Loading Problems)

동적 네트워크 로딩이란 시간대별 경로교통량이 주어졌을 때 링크에 부하되는 시간대별 링크 교통량을 계산하는 것을 말한다. 하지만, 동적 네트워크 로딩은 정적 네트워크 로딩처럼 단순하지 않다. 해당 링크를 이용하는 모든 O/D쌍별 경로교통량의 합으로 링크교통량을 계산한다는 원리는 같지만, 링크에 진입하는 경로교통량의 크기가 시간대별로 다르다는 점을 고려

해야하기 때문이다. 일반적으로 동적 네트워크 로딩은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$e_a(t) = \sum_{s \leq t} \sum_{od} \sum_{p \in R_{o,d}} f_p^{od}(s) \delta_{p,s}^a(t) \quad \forall a, \forall t \quad (16)$$

여기서,

$$\delta_{p,s}^a(t) = \begin{cases} 1 & \text{시간 } s \text{에 경로 } p \text{를 출발한 교통류가} \\ & \text{시간 } t \text{에 링크 } a \text{를 사용하는 경우} \\ 0 & \text{그 외의 경우} \end{cases}$$

식(16)은 t 시간의 링크 교통량 $e_a(t)$ 는 모든 O/D 쌍에 대해 t 시간보다 작은 s 시간에 경로 p 에 진입한 경로교통량 중에서 t 시간에 링크 a 에 진입한 경우만을 합하여 계산됨을 보여준다. 결국, 식(16)은 동적 네트워크 로딩 과정에서는 각 시간대별로 여러 경로교통량 $f_p^{od}(s)$ 가 어떤 식으로 합쳐져 각 링크로 유입되는지를 설명할 수 있어야 함을 보여준다. 다시 말해, $\delta_{p,s}^a(t)$ 를 올바르게 계산해내는 것이 중요하다.

2. 기존연구고찰

동적 네트워크 로딩의 방법론은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 하나는 확장된 시-공간 네트워크(Expanded time-space network)를 이용하는 방법이고, 다른 하나는 최적화 문제로 푸는 방법이며, 마지막 방법은 흐름도에 의거한 방법이다. 먼저 확장된 시-공간 네트워크 방법에서는 물리적으로 연결된 링크와 노드가 시간대별로도 연결된다고 간주하여 각 시간대별로 독립적인 링크에 남아있는 교통량을 계산하는 방법이다. 이 방법은 주로 동적네트워크 로딩 문제를 시간적 순서에 따라 풀기보다는 모든 시간대에 대해 단번에 풀 때 이용된다. 대개는 동적 네트워크 로딩을 목적함수와 제약식으로 구성되는 최적화문제(Optimisation technique)로 전환하여 이 문제의 해를 구함으로써 모든 시간대별 링크 통행량을 계산한다. 이러한 방법의 대표적인 연구로는 Ran and Boyce(1996), Chen and Hsueh(1998) 등을 꼽을 수 있다. 두 번째 방법은 시간대별로 링크와 노드를 확장시키는 방법을 사용하지는 않지만, 최적화 기법으로 네트워크 로딩 문제를 푸는 방법이다. 이러한 연구에는 Wu, Chen, and Forian(1998)이 대표적이다. 그러나, 최적화 기

법을 이용한다는 측면에서 앞에서 기술한 방법과 크게 다르지는 않다고도 볼 수 있다. 마지막으로 단순한 흐름도를 이용한 방법에서는 임의의 링크에 전파되는 경로교통량이 어떻게 합쳐지는지 또는 링크로부터 어떤 식으로 분류되는지를 시간의 흐름에 따라 계산하는 방식이다. 이 방법을 이용하면 특별한 수학적 기법을 이용하지 않고도 동적네트워크 로딩을 실시할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 연구에는, Xu, Wu, Florian, Marcotte, and Zhu(1999)와 Han(2000)이 대표적이다. 그러나, 이러한 방법으로 동적네트워크 로딩을 실시할 때는 링크비용함수(link performance function) 선택에 특히 주의해야 한다.

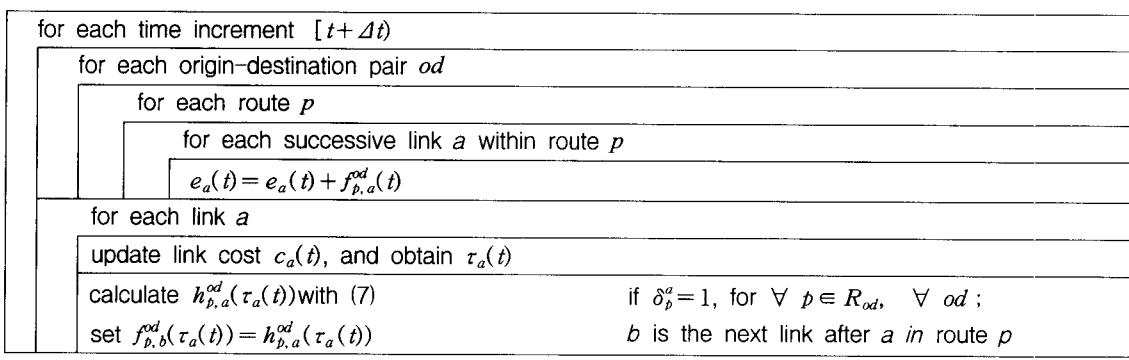
3. 새로운 동적네트워크 로딩

기점을 떠난 경로교통량이 언제 어느 링크에 도달하게 될지를 계산하기 위해서는, 유입량, 유출량, 그리고 통행시간의 관계를 설명하는 링크비용함수를 이용한다. 그러나, 동적통행배분 모형에서는 링크비용함수의 선택에 신중할 필요가 있다. 만약 링크비용함수가 3절에서 언급한 인과성, FIFO 조건, 교통량전파 등을 제대로 고려하지 못한다면, 경로교통량이 언제 어느 링크에 도달하게 될지를 제대로 계산할 수 없기 때문이다. Han(2000)은 동적통행배분 모형에 사용되어온 링크비용함수 중에서 결정적 대기행렬 모형(deterministic queuing model)과 교통량전파기반

모형(flow propagation based whole link model)이 위에서 언급한 인과성, FIFO조건, 교통량전파 등을 잘 만족시키고 있음을 설명하고 있다.

올바른 링크비용함수를 이용하고, 또한 운전자들이 이용할 수 있는 경로 집합이 알려져 있고 또한 경로를 구성하는 링크 정보가 이미 알려져 있다면 동적네트워크로딩은 <그림 2>과 같은 순서로 실행될 수 있다.

<그림 2>에서 보듯, 링크 유입교통량 $e_a(t)$ 는 O/D 쌍 od의 경로 p를 이용하는 경로교통량 중에서 t 시간에 링크 a를 이용하는 교통량 $f_{p,a}^{od}(t)$ 를 모든 O/D 쌍과 모든 경로에 대하여 합하여 계산한다. 임의의 시간 t에서의 링크 유입교통량은 이런 식으로 모든 링크에 대해 계산된다. 일단 링크 유입교통량 $e_a(t)$ 가 계산되면 링크비용함수를 이용해 링크통행시간을 계산하고 이 결과를 이용하여 링크에서 빠져나가는 시간 $\tau_a(t)$ 를 계산한다. 또한, 링크에서 빠져나가는 시간 $\tau_a(t)$ 에서 링크 a를 이용하는 각 경로별 유출교통량 $h_{p,a}^{od}(\tau_a(t))$ 는 교통류전파를 설명하는 식(7)에 의해 계산이 된다¹⁾. 일단 $h_{p,a}^{od}(t)$ 가 계산되면, 그 값은 경로 p 속에서 링크 a와 연결되는 다음 링크 b로의 유입교통량 $f_{p,b}^{od}(\tau_a(t))$ 가 된다. 이런 식으로 언제 얼마나 많은 교통량이 한 링크에서 다른 링크로 전이되는지를 사전에 계산할 수 있다. 이런 식의 네트워크 로딩을 최초 시간부터 최종 시간까지 순차적으로 실시하면, 인과성, 교통량전파, 교통량보존법칙을 모두 만족시킬 수 있다.



<그림 2> 동적 네트워크 로딩의 순서도

1) 링크 유출교통량을 먼저 계산한 후에 경로별 유출교통량을 계산할 수도 있다. 이 경우 경로별 유출교통량은 링크 유출교통량 중에서 링크 유입교통량에 대한 경로별 유입교통량의 비율로 계산된다. 다시 말해, 다음과 같은 관계를 이용하여 계산한다.

$$\frac{h_{p,a}^{od}(\tau_a(t))}{g_a(\tau_a(t))} = \frac{f_{p,a}^{od}(t)}{e_a(t)}$$

V. 가상 가로망에서의 적용

본 연구에서 제안한 동적네트워크 로딩이 작동하는 원리를 구체적으로 설명하기 위해, 가상 네트워크와 교통수요를 설정하고, 동적네트워크 로딩을 실시하였다.

1. 링크비용함수

각 링크로 유입된 교통량이 어느 시간대에 얼마만큼 다음 링크로 유출되는지를 설명하는 링크비용함수로는 결정적 대기행렬모형(deterministic queuing model)을 이용한다. 이 모형은 다음과 같이 수식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{dL}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{if } (L_a(t) = 0, e_a(t - \phi_a) < Q_a) \\ e_a(t - \phi_a) - Q_a, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17a)$$

$$g_a(t) = \begin{cases} e_a(t - \phi_a), & \text{if } (L_a(t) = 0, e_a(t - \phi_a) < Q_a) \\ Q_a, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17b)$$

$$d_a(t) = \frac{L_a(t + \phi_a)}{Q_a} \quad (17c)$$

$$c_a(t) = \phi_a + d_a(t) \quad (17d)$$

여기서,

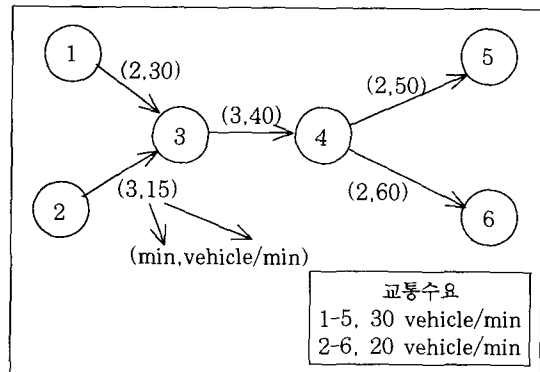
- ϕ_a : 자유교통류 상황에서의 링크 a 통행시간
- Q_a : 링크 a의 용량
- $L_a(t)$: 시간 t에 링크 a에 남아있는 대기행렬길이 (차량대수)
- $d_a(t)$: 시간 t에 링크 a에 진입하는 차량이 겪는 지체시간
- $c_a(t)$: 시간 t에 링크 a를 통행하는데 따르는 비용 또는 시간

식(17)이 나타내고 있는 결정적 대기행렬 모형에 따르면, 모든 링크 유입교통량은 자유속도로 링크하류부까지 이동하게되며, 만약 유입교통량이 링크의 용량보다 작고, 링크에 남아있는 대기행렬이 없을 경우에는 유출교통량은 유입교통량과 같게된다. 반대로, 대기행렬에 차량이 남아있거나, 유입교통량이 용량을

초과할 경우, 유출교통량은 링크의 용량과 같게된다. 한편, 결정적 대기행렬모형은 모형 구조가 간단할 뿐만 아니라, 동적통행배분 모형이 요구하는 여러 가지 요구조건들 예를 들어, FIFO 조건, 교통량전파조건, 인과성 등을 모두 잘 만족시키는 것으로 분석되었다 (Han, 2000).

2. 사례 네트워크

동적 네트워크 로딩을 위한 사례 네트워크로 <그림 3>을 선정하였다. 이 네트워크는 6개의 노드와 5개의 링크로 구성되어 있으며, 링크의 자유교통류 통행 시간과 링크용량은 링크 옆의 괄호에 표시되어있다. O/D에 대한 교통량 수요는 1번 노드에서 5번 노드까지 30(대/분), 2번 노드에서 6번 노드까지 20(대/분)이 0분에서부터 20분까지 일정하게 생성되는 것으로 가정하였다.



<그림 3> 가상 네트워크와 교통수요

3. 네트워크 로딩 결과

<그림 3>의 가상 네트워크에 결정적 대기행렬 모형을 이용하여 동적 네트워크 로딩을 실시한 결과는 다음의 <표 1>과 같이 정리된다.

<표 1>은 각 링크별 유입교통량을 시간대별로 나타내고 있다. 링크 1과 링크 2는 각각 O/D 1-5, 2-6를 연결하는 시작 링크이기 때문에 20분까지 교통수요가 그대로 유입되는 것을 알 수 있다. 링크 3으로의 유입 교통량은 링크 1과 링크 2에서 유출된 교통량이 어떻게 합해지느냐를 보여준다. 즉, 2분이 되어야 링크 1로부터 유출된 교통량 30(대/분)이 유입되기 시작하며

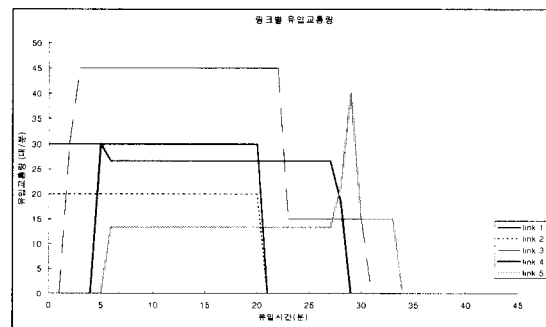
〈표 1〉 네트워크 로딩 결과
(시간대별 링크 유입교통량, 대/분)

time (분)	link 1	link 2	link 3	link 4	link 5
0	30	20	0	0	0
1	30	20	0	0	0
2	30	20	30	0	0
3	30	20	45	0	0
4	30	20	45	0	0
5	30	20	45	30	0
6	30	20	45	26.66667	13.33333
7	30	20	45	26.66667	13.33334
8	30	20	45	26.66667	13.33333
9	30	20	45	26.66667	13.33333
10	30	20	45	26.66667	13.33333
11	30	20	45	26.66667	13.33333
12	30	20	45	26.66667	13.33333
13	30	20	45	26.66667	13.33333
14	30	20	45	26.66667	13.33333
15	30	20	45	26.66667	13.33333
16	30	20	45	26.66667	13.33333
17	30	20	45	26.66667	13.33333
18	30	20	45	26.66667	13.33333
19	30	20	45	26.66667	13.33333
20	30	20	45	26.66667	13.33333
21	0	0	45	26.66667	13.33333
22	0	0	45	26.66667	13.33333
23	0	0	15	26.66667	13.33333
24	0	0	15	26.66667	13.33333
25	0	0	15	26.66667	13.33333
26	0	0	15	26.66667	13.33333
27	0	0	15	26.66667	13.33333
28	0	0	15	18.82354	21.17647
29	0	0	15	0	40
30	0	0	15	0	15
31	0	0	0	0	15
32	0	0	0	0	15
33	0	0	0	0	15
34	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0

3분부터는 링크 2에서 유출된 양이 합해져서 45(대/분)이 유입되는 것을 알 수 있다. 그러나, 링크 3으로의 유입교통량은 20분에 끝나지 않고 30분까지 계속 나타나는 현상을 보여주고 있다. 이는 링크 2의 대기행렬에 남아있던 교통량이 계속 유입되기 때문이다.

또한, 링크 4와 링크 5로의 유입교통량은 링크 3으로부터 교통량이 어떻게 유출되는지를 보여준다고 볼 수 있다. 링크 3으로 유입된 최초의 교통량은 5분에 링크 4로 유출되고, 그 후부터는 링크 1과 2로부터 링크 3의 용량 40(대/분)을 초과하는 45(대/분)의 교통량이 유입되어, 용량만큼 링크 3으로부터 유출됨을 보여준다. 즉, 링크 4와 링크 5로 유입되는 교통량의 합은 링크 3의 유출교통인 40(대/분)과 같다. 그러다가, 링크 3의 유출교통량이 용량 이하로 떨어지면, 링크 4와 링크 5의 교통량도 계속 줄어들게 된다. 〈그림 4〉는 이러한 시간대별 링크 유입교통량의 변화를 그래프로 보여주고 있다.

〈그림 4〉의 가상 네트워크에서는 두 개의 O/D만을 제시하여 네트워크 로딩이 어떻게 이루어지는지를 설명하였지만, 다수의 O/D와 다수의 경로가 존재하여도 4절에서 설명한 네트워크 로딩방법을 실시할 수 있다. 더 현실적인 크기의 네트워크 로딩 적용 사례는 Han(2000)의 연구를 참고하기 바란다.



〈그림 4〉 링크별 유입교통량의 변화

V. 결론

지금까지, 통행배분 모형과 네트워크 로딩 자체와 이들의 관계를 정적인 모형구조 속에서 설명하고, 동적 네트워크 로딩 방법을 소개하였다. 동적 네트워크 로딩을 올바르게 구현하기 위해서는 우선적으로 인과성, FIFO(First-In-First-Out) 조건, 교통량전파(flow propagation), 교통류보존(flow conservation) 등

의 조건을 만족시키는 것이 중요하며, 또한 동적 네트워크 로딩을 동적 통행배분 속에서 이용할 때에는 동적 O/D 교통량 수요의 추정과 경로통행시간의 계산도 반드시 고려되어야 함을 제시하였다.

본 연구에서 제안한 동적 네트워크 로딩 방법은 이러한 요구 조건을 만족시키면서, 각 시간대별로 각 경로교통량이 링크 속에서 어떻게 합쳐지고 빠져나가는지를 설명하고 있다. 즉, 각 링크별로 유입되는 경로교통량을 매 시간마다 저장하고 이들이 링크로부터 빠져나가는 시간과 그 양을 링크비용함수로 도입하여 계산해야 한다고 설명한다. 결정적 대기행렬 모델을 링크비용함수로 이용하여 가상 네트워크에 이러한 네트워크 로딩방법을 적용한 결과, 각 링크에 유입되는 교통량이 합리적으로 계산되고 있음을 검증할 수 있었다. 향후 연구 속에서는 본 연구에서 제안하는 네트워크 로딩방법 보다 효율적인 방법, 예를 들어 저장 용량 및 계산시간을 줄일 수 있는 방법을 모색하는 것이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Beckmann, M., McGuire, C. B., and WINSTEN, C.B.(1956) Studies in the economics of transportation, New Haven : Yale University Press.
2. Chen, S. and Hsueh, C.(1998) A model and an algorithm for the dynamic user-optimal route choice problem. Transportation Research, 32B(3), pp.219~234.
3. Friesz, T. L., Bernstein, D., Smith, T. E., Tobin, R. L., and Wie, B.(1993) A variational inequality formulation of the dynamic networks user equilibrium problem. Operation Research, 41(1), pp.179~191.
4. Han, S.(2000) Dynamic traffic assignment techniques for general road networks, Ph.D. Thesis, University of London, U. K.
5. Hendrickson, C. and Kocur, G.(1981) Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model. Transportation Science, 15, pp.62~77.
6. Heydecker, B. G. and Addison, J. D.(1996) An exact expression of dynamic traffic equilibrium. In : Transportation and Traffic Theory (ed. J-B Lesort). Oxford: pergamon, pp.359~383.
7. Heydecker, B. G. and Verlander, N.(1999) Calculation of dynamic traffic equilibrium assignments. Proceedings of the European Transport Conferences, Seminar F, P434, pp.79~91.
8. Merchant, D. K. and Nemhauser, G. L. (1978) A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problem. Transportation Science, 12(3), pp.183~199.
9. Ran, B. and Boyce, D. E.(1996) Modelling Dynamic Transportation Networks : An Intelligent Transportation System oriented approach, Springer.
10. Sheffi, Y.(1985) Urban transportation networks : equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
11. Smith, M. J.(1979) The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria, Transportation Research, 13B(4), pp.295~304.
12. Wardrop, J. G.(1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1(2), pp.325~362.
13. WU, J. H., Chen, Y., Florian, M.(1998) The continuous dynamic network loading problem : a mathematical formulaion and solution method, Transportation Research (B), 32(3), pp.173~187.
14. XU, Y. W., WU, J. H., Florian, M., Marcotte, P., and Zhu, D.L.(1999) Advances in the continuous dynamic network loading problem. Transportation Science, 33(4), pp.341~353.

✉ 주 작성자 : 한상진

✉ 논문투고일 : 2001. 11. 26

논문심사일 : 2002. 2. 1 (1차)

2002. 2. 7 (2차)

심사판정일 : 2002. 2. 7