

■ 論 文 ■

# 통행시간변화를 고려하는 신뢰도통행배정모형 개발

Development of the Reliability Traffic Assignment Model  
based on the Travel Time Variation

문 병 섭

(서울대학교 환경대학원 박사과정)

이 승 재

(서울시립대학교 교통공학과 조교수)

임 강 원

(서울대학교 환경대학원 교수)

## 목 차

- I. 서론
- II. 신뢰도에 대한 선행연구
- III. 통행시간신뢰도 통행배정모형
  - 1. 간섭이론
  - 2. 통행시간신뢰도
  - 3. 통행시간신뢰도 사용자균형상태
  - 4. 통행시간신뢰도 균형통행배정
- IV. 가로망 적용
  - 1. 단순 가로망
  - 2. Sioux-Fall 가로망
- V. 결론
- 참고문헌
- 5. 해석 알고리즘

## 요 약

교통혼잡이 만연된 도로와 교통혼잡이 발생하지 않는 도로에서는 운전자의 통행행태가 서로 다르다. 교통혼잡이 만연된 도로의 운전자는 자신이 선택할 경로가 혼잡으로 인해 발생할 통행시간변화를 우선 고려하여 경로를 선택한다. 본 연구에서는 통행시간변화를 고려하는 운전자의 경로선택행위를 모사하기 위하여 통행시간신뢰도를 새롭게 정의하고 신뢰도 통행배정모형을 정립하였다. 통행시간신뢰도는 통행시간변화의 정도에 의해서 결정되는 함수이며, 통행시간변화는 도로용량과 교통량의 함수이다. 본 연구에서는 신뢰도 통행배정모형을 이용하여 통행시간신뢰도를 극대화하기 위해 경로를 선택하는 운전자의 통행행태를 모사하였고, 그 해가 Wardrop의 균형상태를 만족시킴을 증명하였다. 그리고 가상 가로망을 대상으로 기존의 통행시간 통행배정모형과 비교, 분석하였다.

## 1. 서론

통행배정모형은 운전자가 출발지와 목적지를 연결하는 최단경로를 선택한다는 가정아래 운전자의 통행행태를 모사한다. 통행시간을 기반으로 한 통행배정모형에서는 최단경로가 링크의 통행시간에 의해 정의된다. 그러나 기존의 통행배정모형은 교통혼잡이 빈번한 도로의 운전자의 경로선택행위를 정확하게 모사하지 못한다. 그 이유는 운전자가 통행시간을 고려하여 경로를 선택하는 것이 아니라, 통행시간변화(travel time variation)를 고려하여 경로를 선택하는 경향이 강하기 때문이다.

운전자들의 선택행위가 다른 가장 큰 이유는 교통혼잡의 영향이다. 최단경로를 찾는 욕구는 동일하지만, 빈번하게 발생하는 통행시간변화는 교통혼잡과 정체 발생가능성을 우선 고려하는 선택행위의 변화를 가져왔다. 달리 말하면, 운전자들은 대안경로들의 예측통행시간 차이가 일정한 범위 내에 존재한다면 통행시간변화가 가장 작은 경로를 선택한다.

본 연구에서는 변화된 운전자의 통행행태를 통행배정모형에 반영하기 위하여 신뢰도(reliability)를 기반으로 한 통행배정모형을 새롭게 정립하였다. 시스템공학에서 신뢰도의 개념은 어떤 시스템이 제공하는 일정한 서비스 질의 안정성(stability) 정도로 정의된다. 교통분야에서는 운전자의 선택행위가 고려되어야 하기 때문에 기존의 신뢰도 개념과는 다르게 정의되어야 한다. 본 연구에서는 신뢰성공학의 간섭이론(interference theory)을 이용하여 통행시간신뢰도를 새롭게 정의하였고, 신뢰도에 따라서 운전자가 자신의 경로를 선택한다고 가정하였다.

통행시간신뢰도는 통행시간변화의 발생가능성을 나타내는 변수이며, 일정한 도로구간의 도로용량과 그 구간을 통행하고자 하는 통행수요의 차이에 의해서 결정된다. 통행시간변화는 궁극적으로 교통수요와 도로용량의 차이에 의해서 발생하는 교통현상이기 때문이다. 따라서 통행시간변화가 가장 작은 경로가 통행시간신뢰도가 가장 높은 경로이다.

본 연구에서 2장은 신뢰도에 대한 교통분야의 선행연구를 검토하였고, 3장에서는 통행시간신뢰도와 통행시간신뢰도 사용자균형상태를 정의하고 통행시간신뢰도 통행배정모형을 정립하였다. 4장에서는 가상가로망을 대상으로 신뢰도 통행배정모형과 기존의 통

행시간 통행배정모형을 비교하였고, 5장에서는 본 연구의 결론을 제시하였다.

## II. 신뢰도에 대한 선행연구

교통분야에서도 신뢰도에 대한 연구가 다양하게 진행되었다. 그러나 선행연구들의 대부분은 신뢰도를 교통계획모형에 반영하기보다는 교통망을 효율적으로 운영하기 위한 도로운영 측면에서 연구되었다. 따라서 신뢰도에 대한 개념이 본 연구와는 다르며, 연구자에 따라서 각기 다르게 정의되었다.

Polus and Schofer(1976)는 차선점유율(lane occupancy)을 이용하여 신뢰도를 평가하였고, 신뢰도를 평균구간점유율의 분산의 역수로 정의하였다. 점유율이 높으면 교통량이 많고, 교통량이 많으면 통행시간이 증가한다는 기본개념에서 출발하였다. 따라서 점유율의 변화가 커질 때 도로는 운영상의 일관성이 떨어지고 신뢰도가 저하된다고 가정하였다.

차선점유율은 도로의 검지기로부터 손쉽게 계산될 수 있으므로 자료획득이 용이하고, 실시간자료를 이용하여 신뢰도를 계산하는 경우에 매우 용이하다. 그러나 차선점유율은 오직 교통량과 밀접한 관련이 있다. 따라서 통행시간변화에 영향을 미치는 도로조건, 기상조건과 같은 외적인 영향으로 인한 신뢰도변화를 반영하지 못하는 한계가 있다.

Ferrari(1988)는 통행속도 순열의 속도변화 차이를 이용하여 신뢰도를 정의하였다. 단순히 속도만을 이용하여 신뢰도를 계산하므로 자료획득이 용이하고 단순하며, 통행시간은 속도와 밀접한 관련이 있으므로 속도를 이용하여 손쉽게 통행시간변화를 추정하고 신뢰도를 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 신뢰도의 기준점인 극한밀도(limit density)를 추정하기가 어렵다. 더욱이 극한밀도는 조사지점에 따라서 다르게 추정되므로 대상지역의 모든 도로를 조사해야 하는 어려움이 있다.

Wakabayashi and Iida(1994)는 신뢰도를 연결성(terminal reliability)과 통행시간신뢰도(travel time reliability)로 구분하였다. 연결성은 도로구간의 단락(fail)과 연결(success)을 이용하여 도로가 폐쇄되지 않고 연결될 확률을 의미한다. 반면에 통행시간신뢰도는 혼잡 등의 영향으로 인한 도로의 통행시간변화를 고려하는 개념이다.

이러한 개념분리는 매우 중요한 의미를 갖는다. 그리고 이들이 제안한  $v/c$ 를 이용하여 혼잡정도에 따라서 통행시간신뢰도를 추정하는 방법은 혼잡을 유발하는 다양한 요소들의 영향을 평가할 수 있는 대안이다. 그러나 계산과정에서 혼잡분포의 표준편차를 계산하기 위해 도로용량별로 매개변수를 달리 추정해야 하는 단점이 있다.

Nicholson and Du(1997)는 지진의 영향을 고려하기 위하여 도로의 부분폐쇄로 인한 교통량의 감소율로 신뢰도를 평가하였다. 이 방법은 천재지변으로 인한 도로의 단락을 표현하는 방법이므로 도로의 병목구간에서는 제한적으로 적용가능하나, 일상적인 도로현상에 적용하기에는 한계가 있으며, Wakabayashi and Iida(1994)가 개념정립한 연결성만을 언급하였다.

Willumsen and Hounsell(1998)은 통행시간의 표준편차로 신뢰도를 정의하였다. 통행시간의 변동폭이 클수록 표준편차가 커지고, 신뢰도가 떨어진다고 가정하였다. 그리고 통행시간의 표준편차를 설명하기 위해 자유유통행시간, 지체, 혼잡정도를 독립변수로 하는 회귀식을 제안하였다. 그러나 신뢰도의 높고 낮음을 평가할 수 있는 기준이 모호하며, 회귀식의 독립변수를 대상지역의 도로별로 달리 추정해야 하는 단점이 있다.

통행시간변화는 단순히 하나의 요소에 의해서만 발생하는 현상이 아니라, 다양한 요소들의 복합적인 영향에 의해서 발생하는 현상이다. 따라서 이러한 요소들의 영향을 직접 또는 간접적으로 모두 반영할 수 있는 평가척도가 필요하다. 선행연구에서는 차선점유율, 속도, 혼잡도, 통행량감소율, 통행시간 표준편차를 이용하여 신뢰도를 평가하였지만, 본 연구에서는 신뢰도의 평가척도로서 도로용량과 교통량의 관계식을 사용한다. 도로용량은 확률적으로 변하는 도로의 공급 그리고 교통량은 교통수요를 반영할 수 있으며, 도로용량과 교통량의 차이에 의해서 통행시간변화가 실제 발생하기 때문이다.

### III. 통행시간신뢰도 통행배정모형

#### 1. 간섭이론

통행수요와 공급에 의한 통행시간변화를 신뢰도함수로 정의하기 위하여 본 연구에서는 신뢰도설계(reliability design)에서 사용하는 간섭이론을 이용하였다. 간섭이론에서는 어떤 기재(device)에 가해지

는 충격의 확률밀도함수(probability density function for stress)와 내구력의 확률밀도함수(probability density function for strength)의 상대적 크기에 의해서 신뢰도를 계산한다.

어떤 기재의 신뢰도는 내구력(S)이 어떠한 충격(s)보다도 더 클 확률이다.

신뢰도  $R = P(S > s) = P(S - s > 0)$   $f_s(\cdot)$ 가 충격 확률밀도함수이고,  $f_S(\cdot)$ 가 내구력 확률밀도함수일 때 <그림 2>에서 충격이 구간  $ds$ 에 놓일 확률은 그 구간의 면적과 같다

$$P(s_0 - \frac{ds}{2} < s < s_0 + \frac{ds}{2}) = f_s(s_0) \cdot ds$$

그리고 내구력이 어떠한 충격  $s_0$  보다 클 확률은 다음과 같다.

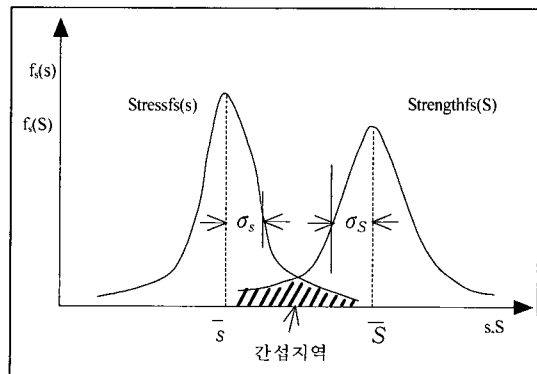
$$P(S > s_0) = \int_{s_0}^{\infty} f_S(S) dS$$

충격과 내구력의 랜덤변수가 각각 독립이라고 가정할 때, 충격이 구간  $ds$ 에 놓여있고 그 구간의 충격보다 내구력이 클 확률은 다음 식에 의해 계산된다.

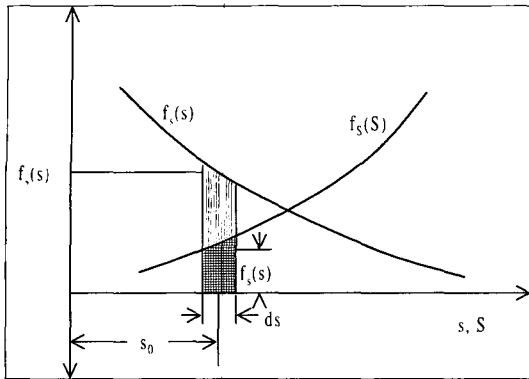
$$f_s(s_0) ds \cdot \int_{s_0}^{\infty} f_S(S) dS$$

따라서 내구력 S가 어떠한 충격 s보다 클 확률인 신뢰도는 식(1)에 의해서 계산된다.

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) \left[ \int_s^{\infty} f_S(S) dS \right] ds \quad (1)$$



<그림 1> 간섭이론의 신뢰도



〈그림 2〉 〈그림 1〉의 간섭지역을 확장시킨 부분

본 연구에서는 간섭이론의 충격과 내구력이 교통분야에서 도로 일정구간의 교통량 그리고 도로용량과 동일하다고 가정한다. 간섭이론에서는 충격이 내구력보다 작을 경우 기차는 정상 운영되지만, 충격이 내구력보다 클 경우에는 고장이 발생한다. 이와 마찬가지로 교통분야에서도 교통량이 도로용량보다 작을 경우에는 교통소통이 원활하므로 운전자는 자신이 예측한 통행시간 내에 목적지에 도착할 수 있다. 그러나 교통량이 도로용량에 근접할수록 통행시간변화가 발생할 확률은 증가하고, 교통량이 도로용량보다 클 경우에는 혼잡이 발생하여 지체현상이 발생한다.

본 연구에서는 all-or-nothing 통행배정기법을 사용하기 위하여 교통량을 결정적(deterministic)인 값으로 가정한다. 도로용량은 도로조건이나 기상조건 등으로 인해서 확률적으로 변하므로 정규분포를 따른다고 가정한다. 따라서 링크의 신뢰도는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 R_a &= P[\text{링크 } \alpha \text{의 도로용량이 교통량보다 큰 사건}] \\
 &= P[X < Y] \\
 &= \int_x^{\infty} g(y) dy \\
 &= \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dy \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기에서

$R_a$  : 링크  $\alpha$ 의 신뢰도

$x$  : 링크  $\alpha$ 의 교통량

$g(y)$  : 정규분포를 따르는 링크  $\alpha$ 의 도로용량,  $Y$ 의 확률밀도함수

$\mu$  : 링크  $\alpha$ 의 도로용량의 평균

$\sigma$  : 링크  $\alpha$ 의 도로용량의 표준편차

링크의 신뢰도는 도로용량의 확률밀도함수를 교통량으로부터 무한대까지 적분한 값이 된다. 그러므로 신뢰도는 도로용량이 일정할 경우 교통량의 함수이며, 교통량이 증가할수록 통행시간변화가 발생할 확률은 증가하고 신뢰도는 떨어진다.

## 2. 통행시간신뢰도

Bagowsky(1961)는 신뢰도를 '어떤 시스템이 일정한 조건 아래에서 정해진 시간동안 그 목적을 충분히 수행할 수 있는 확률이다'고 정의하였다. Wakabayashi and Iida(1994)도 통행시간신뢰도를 '차량이 주어진 시간 내에 주어진 목적지에 도착할 수 있는 확률이다'고 정의하였다.

본 연구에서는 통행시간변화의 정도를 신뢰도로 가정하고, Wakabayashi and Iida(1994)의 정의를 확장하여 다음과 같이 통행시간신뢰도를 정의한다.

통행시간신뢰도는 차량이 선택한 경로의 통행시간 변화폭이 적어 주어진 시간 내에 주어진 목적지에 도착할 수 있는 확률이다.

통행시간변화가 크게 발생하는 경로는 통행시간신뢰도가 낮으며, 통행시간신뢰도가 높은 도로는 통행시간변화가 작은 경로이다. 따라서 최단경로는 대안 경로 중에서 통행시간변화가 가장 작게 발생하는, 통행시간신뢰도가 가장 높은 경로이다.

## 3. 통행시간신뢰도 사용자균형상태 (reliability user equilibrium)

통행배정모형은 경제학적 균형(equilibrium) 개념을 이용하여 모든 운전자가 완전한 정보를 갖고 단일 최소비용경로를 선택하며, 균형상태에 도달한다고 가정한다. 이러한 상태를 Wardrop(1952)은 어떤 통행자도 자신의 경로를 일방적으로 바꾸어 통행시간을 개선할 수 없는 균형상태라고 정의하였다.

본 연구에서는 운전자가 통행시간신뢰도를 극대화하기 위해 경로를 선택한다고 가정한다. 이것은 각 출발지와 목적지를 통행하는 모든 운전자들이 최단경

로인 단일경로에만 집중되는 것을 의미하는 것은 아닙니다. 초기에 최단경로로 선택된 경로에 모든 운전자들이 집중되면 그 경로에는 혼잡이 발생하게 된다. 따라서 다음단계에서는 다른 경로가 최단경로로 선택되며, 이 경로 역시 혼잡이 발생하면 또 다른 경로가 다음단계에서는 최단경로로 선택된다. 이러한 일련의 과정을 거쳐서 교통망은 균형상태에 도달하게 된다. 이러한 상태를 통행시간신뢰도 사용자균형상태라고 하며, 다음과 같이 정의한다.

통행시간신뢰도 사용자균형상태는 어떤 통행자도 자신의 경로를 일방적으로 변경하여 자신의 통행시간신뢰도를 개선할 수 없는 상태이다.

통행시간신뢰도를 이용한 통행배정모형이 Wardrop의 균형상태를 만족시킴을 증명하기 위하여 본 연구에서는 수학적으로 균형통행배정문제를 유도하여 통행시간신뢰도 사용자균형상태가 Wardrop의 균형상태를 만족시킴을 증명하였다.

**4. 통행시간신뢰도 균형통행배정**

교통망에서 경로(path)는 링크(link)의 직렬형태로 구성된다. 따라서 경로의 신뢰도는 각 링크의 신뢰도를 곱하여 식(3)과 같이 계산된다. 식(3)에 로그함수를 취하면 경로신뢰도는 식(4)와 같이 가산함수형태로 변환된다.

$$R_k = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n = \prod_a R_a \quad (3)$$

$$\ln(R_k) = \ln(\prod_a R_a) = \sum_a \ln(R_a) \quad (4)$$

여기에서

$R_k$  : 경로 k의 신뢰도

$a$  : 경로 k를 구성하는 각 링크 ( $a = 1, 2, \dots, n$ )

운전자들은 통행시간신뢰도를 극대화하기 위해 경로를 선택하지만, 본 연구에서는 동등수학기법(equivalent mathematical program)을 이용하여 최소화문제로 유도하기 위해 링크  $a$ 의 통행시간신뢰도를 식(4)를 이용하여 식(5)와 같이 수학적으로 정의하였다.

$$TR_a(x) = -\ln(R_a(x)) \quad (5)$$

링크별 통행시간신뢰도의 총합을 최소화하는 균형통행배정문제(equilibrium assignment problem)를 수학적으로 유도하면 다음과 같다.

$$\text{MIN } z(x) = -\sum_a \int_0^{x_a} \ln R_a(\omega) d\omega \quad (6)$$

$$s.t. \quad \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (6a)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (6b)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{k,a}^{rs} \quad \forall a \quad (6c)$$

$$R_a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2\} dx \quad (6d)$$

여기에서,

$x_a$  : 링크  $a$ 의 교통량

$f_k^{rs}$  : 출발지와 목적지  $r-s$ 를 연결하는 경로  $k$ 의 교통량

$q_{rs}$  : 출발지  $r$ 과 목적지  $s$  사이의 교통수요

$\delta_{a,k}^{rs}$  : 링크  $a$ 가  $r-s$ 를 연결하는 경로  $k$ 에 포함되면 1, 아니면 0을 나타내는 변수

$R_a(\omega)$  : 교통량이  $\omega$ 이고, 도로용량이 정규분포를 따를 경우 링크  $a$ 의 신뢰도(식(2) 참조)

식(6a)는 교통량보존법칙을 의미하고, 식(6b)는 교통량의 비음조건(nonnegativity condition)을 나타낸다. 그리고 식(6c)는 경로  $k$ 와 링크  $a$ 를 연결시켜주는 관계식(incidence relationship)이다. 식(6d)는 링크의 통행시간신뢰도이다.

**1) 동등조건(equivalency condition)**

식(6)이 균형통행배정문제와 동일하다는 것을 증명하기 위해서는 식(6)을 만족시키는 해가 통행시간신뢰도 사용자균형상태를 만족시키는 것을 보여줘야 한다. 이것은 극소화문제의 일계미분조건이 통행시간신뢰도 사용자균형상태와 동일하다는 것을 보여줌으로써 증명될 수 있다. 이를 위해 식(6)의 제약조건들을 라그랑지함수형태로 치환하면 식(7)이 유도된다.

$$L(f, u) = z[x(f)] + \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \quad (7)$$

식(7)의 일계조건은 식(7a), (7b)와 같다.

$$f_k^{rs} \frac{\partial L(f, u)}{\partial f_k^{rs}} = 0, \quad \frac{\partial L(f, u)}{\partial f_k^{rs}} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (7a)$$

$$\frac{\partial L(f, u)}{\partial u_{rs}} = 0 \quad \forall r, s \quad (7b)$$

식(7b)는 교통량보존의 제약조건으로서 균형상태에서는 언제나 만족된다. 그리고 식(7a)는 식(8)과 같이 치환될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} L(f, u) \\ &= \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} z[x(f)] + \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 오른쪽 첫 번째 항은 합성함수를 이용하여 식(9)와 같이 변형가능하다.

$$\frac{\partial z[x(f)]}{\partial f_l^{mn}} = \sum_{b \in A} \frac{\partial z(x)}{\partial x_b} \frac{\partial x_b}{\partial f_l^{mn}} \quad (9)$$

식(9)의 오른쪽 첫 번째 항의 값은 식(10)과 같이 풀어진다. 이것은 링크의 통행시간신뢰도가 바로 그 링크의 교통량의 함수이기 때문이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial z(x)}{\partial x_b} &= \frac{\partial}{\partial x_b} \left\{ - \sum_a \int_0^{x_a} \ln R_a(\omega) d\omega \right\} \\ &= - \ln R_b \end{aligned} \quad (10)$$

또한 식(9)의 오른쪽 두 번째 항은 어느 경로의 교통량에 대한 링크교통량의 편미분으로서 식(11)과 같이 풀어진다.

$$\frac{\partial x_b}{\partial f_l^{mn}} = \delta_{b,l}^{mn} \quad (11)$$

따라서 식(10)과 식(11)의 결과를 식(9)에 다시 대입하면 식(12)가 유도되는데, 이것은 특정 경로의 신뢰도를 의미한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial z[x(f)]}{\partial f_l^{mn}} &= \sum_b - \ln R_b \delta_{b,l}^{mn} \\ &= c_l^{mn} = - \ln R_l^{mn} \end{aligned} \quad (12)$$

식(8)의 오른쪽 두 번째 항은 아래와 같이 단순화시킬 수 있다. 따라서 이 항은 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_k^{rs}}{\partial f_l^{mn}} &= \begin{cases} 1 & \text{if } r=m, s=n, k=l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) &= -u_{mn} \end{aligned} \quad (13)$$

식(12)와 식(13)을 식(8)에 다시 대입하면, 라그랑지함수의 편미분은 식(14)와 같다.

$$-\frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} L(f, u) = c_l^{mn} - u_{mn} \quad (14)$$

따라서 식(6)의 극소화문제에 대한 일계미분조건은 식(15)의 일련의 조건들로 표현될 수 있다.

$$f_k^{rs} (c_k^{rs} - u_{rs}) = 0 \quad \forall k, r, s \quad (15a)$$

$$c_k^{rs} - u_{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (15b)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (15c)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (15d)$$

여기에서 식(15c)와 (15d)는 교통량보존법칙과 비음조건이다. 따라서 두 식은 목적함수를 최소화하는 점에서 만족된다. 식(15a), (15b)에서 라그랑지승수  $u_{rs}$ 는 출발지  $r$ 과 목적지  $s$ 를 연결하는 최단경로의 통행시간신뢰도를 의미한다. 따라서 임의의 경로  $k$ 의 통행시간신뢰도  $c_k^{rs}$ 는 라그랑지승수보다 크거나 작으며, 통행량  $f_k^{rs}$ 는  $c_k^{rs}$ 가  $u_{rs}$ 와 동일할 때 통행배정되며, 아니면 0이 된다.

그러므로 식(6)의 일계미분조건은 통행시간신뢰도 사용자균형상태를 만족시킨다. 즉, 식(6)은 통행시간신뢰도를 극대화하기 위해 통행하는 운전자의 경로선택행위를 표현한 균형통행배정문제이다.

### 5. 해석 알고리즘

식(6)에서 정립한 균형통행배정문제는 Frank-Wolfe 알고리즘을 이용하여 해를 찾을 수 있다.

**【단계 0】**

계산된  $R_a = R_a(0)$ ,  $\forall a$ 를 기반으로 all-or-nothing 통행배정. 이를 통해서  $\{x_a^n\}$  를 계산,  $n=1$

**【단계 1】**

$$R_a^n = R_a(x_a^n), \forall a$$

**【단계 2】**

계산된  $\{R_a^n\}$  을 기반으로 all-or-nothing 통행배정. 이를 통해서  $\{y_a^n\}$  을 계산

**【단계 3】**

다음 식을 만족하는 가중치값( $\alpha_n$ ) 계산

$$MIN_{0 < \alpha \leq 1} - \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} \ln R_a(\omega) d\omega$$

**【단계 4】**

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n(y_a^n - x_a^n), \forall a$$

**【단계 5】**

수렴조건을 만족하면, 정지. 균형 링크교통량은  $\{x_a^{n+1}\}$  수렴조건을 만족하지 않으면,  $n=n+1$ , **【단계 2】**로 반복수행

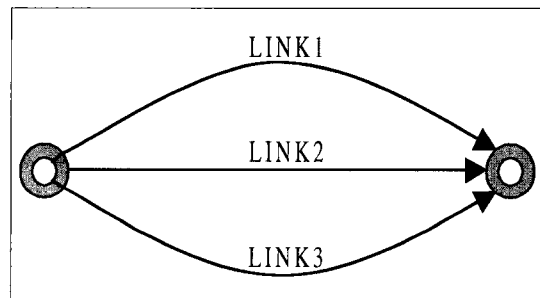
### IV. 가로망 적용

#### 1. 단순 가로망

지금까지 정립한 신뢰도 통행배정모형을 <그림 3>과 같은 단순 가로망에 적용하였다. 가로망은 출발지와 목적지를 연결하는 3개의 링크로 구성된 네트워크이다. <그림 3>의 가로망은 링크 자체가 경로가 되므로 3개의 경로가 존재한다. 각 링크의 특성을 나타내는 입력자료는 <표 1>과 같다. 도로용량의 밀도함수

가 정규분포를 따른다고 가정하기 때문에 링크별 도로용량의 평균과 표준편차를 가정했고, 표준편차는 도로용량의 1/2로 가정했으며 초기교통량은 모두 0이다. 또한 기존의 통행시간 통행배정모형과 비교하기 위해 각 링크의 자유류통행시간(free-flow travel time)을 가정하였다.

교통수요가 10대인 것으로 가정하고, 먼저 통행시간 통행배정모형에 따라서 교통량을 계산하였으며, 그 결과는 <표 2>와 같다. 모형이 6차례 반복(iteration)되었을 때 각 경로의 통행시간은 약 25.6으로 동일하며, 이 때 어느 누구도 자신의 통행시간을 변경할 수 없는 사용자 균형상태(user equilibrium)가 된다.



<그림 3> 단순 가로망

<표 1> 링크별 특성

링크	도로용량의 평균	도로용량의 표준편차	초기 교통량	자유류 통행시간
1	2	1	0	10
2	4	2	0	20
3	3	1.5	0	25

<표 2> 통행시간 통행배정모형의 결과

반복 회수	통행 시간			교통량			가중치 ( $\alpha$ )
	링크1	링크2	링크3	링크1	링크2	링크3	
0	10.0	20.0	25.0	10.00	0.00	0.00	
1	947.5	20.0	25.0	4.03	5.97	0.00	0.5965
2	34.8	34.8	25.0	3.38	5.00	1.61	0.1611
3	22.3	27.4	25.3	3.62	4.83	1.55	0.0356
4	26.1	26.4	25.3	3.55	4.73	1.73	0.0204
5	24.8	25.9	25.4	3.59	4.69	1.71	0.0072
6	25.6	25.7	25.4	3.57	4.67	1.76	0.0054

〈표 3〉 신뢰도 통행배정모형의 결과

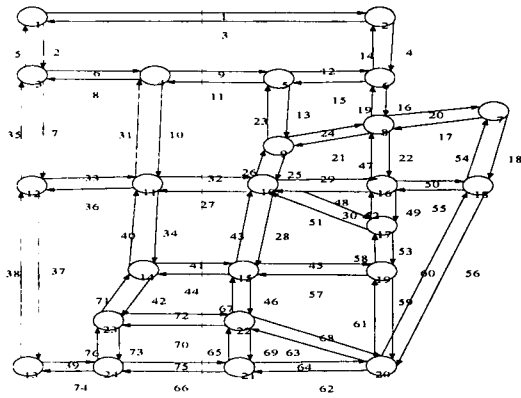
반복 회수	통행시간신뢰도			교통량			가중치 ( $\alpha$ )
	링크1	링크2	링크3	링크1	링크2	링크3	
0	34.65	0.02	0.02	0.0	10.0	0.0	
1	0.02	6.61	0.02	0.0	5.7	4.3	0.42855
2	0.02	1.63	1.63	2.2	4.4	3.3	0.22213
3	0.89	0.89	0.89	2.2	4.4	3.3	0.00001
4	0.89	0.89	0.89	2.2	4.4	3.3	0.00000

다음으로, 동일한 도로용량을 가정하고 본 연구에서 정립한 신뢰도 통행배정모형에 따라서 교통수요 10대를 배정하였으며, 그 결과는 〈표 3〉과 같다.

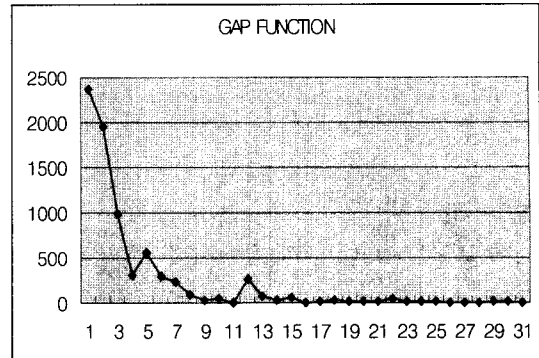
초기교통량이 없는 단순가로망에 신뢰도 통행배정모형과 통행시간 통행배정모형을 적용한 결과, 가장 큰 차이점은 균형상태에서 각 링크에 배정된 교통량이다. 두 모형 모두 링크 2에 배정된 교통량이 가장 많지만, 링크 1과 링크 3에 배정된 교통량의 크기는 서로 다르다. 이것은 사용된 비용함수의 차이에 의해서 발생한 것으로 분석된다. 통행시간 통행배정모형은 교통량, 도로용량, 자유류통행시간의 함수이지만, 신뢰도 통행배정모형은 도로용량과 교통량의 함수임을 알 수 있다.

2. Sioux-Fall 가로망

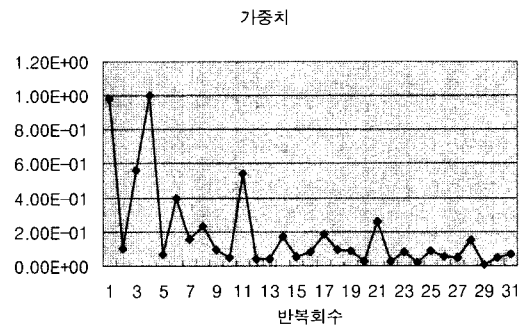
다중출발지-목적지(multi origin-destination)를 갖는 Sioux-Fall 가로망에도 본 연구의 모형을 적용하였다. Sioux-Fall은 24개의 노드와 24개의 존, 76개의 링크로 구성된 가로망으로서 24개의 존 모두에서



〈그림 4〉 Sioux-Fall 가로망



〈그림 5〉 목적함수 변화



〈그림 6〉 가중치 변화

나머지 다른 존으로 통행하고자 하는 교통수요가 존재한다.

〈그림 5〉는 Sioux-Fall 가로망에 적용한 목적함수의 변화를 나타내며, 반복회수가 증가함에 따라서 0에 수렴함을 나타내고 있다. 또한 〈그림 6〉은 가중치의 변화로서 그 크기가 감소하고 있다.

통행시간신뢰도를 극대화하려는 운전행태를 모사하는 본 연구의 모형은 Sioux-Fall 가로망에서도 통행시간신뢰도 사용자균형상태에 도달하였다. 따라서 Wardrop의 균형상태임이 증명되었다. Sioux-Fall과 같은 대형가로망에서도 본 연구의 모형이 균형상태에 도달한 것은 통행시간신뢰도를 신뢰도함수에 로그함수를 치하여 가산함수형태로 비용함수를 전환하였기 때문에 가능한 것으로 분석된다.

시스템공학에서 신뢰도를 계산하기 위해서는 각 경로를 구성하는 링크의 신뢰도를 모두 알아야 한다. 따라서 시스템공학에서 적용가능한 가로망의 크기는 제한적이다. 그러나 교통분야에서는 가로망의 크기가 대규모이므로 본 연구의 모형은 경로를 구체적으로



열거하지 않고 각 링크별 통행시간신뢰도의 총합을 최소화시킴으로써 신뢰도를 극대화하려는 운전행태를 대형 가로망에서도 모사하였다.

## V. 결론

교통계획모형은 통행배정모형을 구축하여 가상의 교통네트워크에 현실의 도로교통량을 모사하려는 모형이다. 따라서 교통계획모형의 실효성은 얼마나 정확하게 현실을 반영할 수 있는가에 의해서 결정된다.

현재와 같이 교통혼잡이 만연된 도로와 교통혼잡이 발생하지 않는 도로에서는 운전자의 통행행태가 서로 다르다. 혼잡이 발생하지 않는 도로는 기존의 통행시간 통행배정모형과 같이 단순히 통행시간에 따라서 운전자는 경로선택을 한다. 그러나 기후조건, 교통사고, 도로조건 등으로 교통혼잡이 수시로 발생하는 도로에서 운전자는 통행시간변화를 감안하여 최단경로를 선택한다.

본 연구에서는 교통혼잡이 빈번하게 발생하는 도로의 운전자의 경로선택행위를 모사하기 위하여 통행시간신뢰도라는 개념을 이용하여 통행배정모형을 정립하였다. 통행시간신뢰도는 통행시간변화의 정도에 의해서 결정되는 함수이며, 통행시간변화는 도로용량과 교통량에 의해서 결정된다. 따라서 통행시간신뢰도는 도로용량과 교통량의 함수이다.

도로용량과 교통량에 의해서 계산되는 통행시간신뢰도는 변화된 운전자의 통행행태를 표현하는 효율적인 변수임이 본 연구에서 증명되었다. 운전자들은 통행시간에 매우 민감하며, 통행시간은 도로용량과 교통량의 크기에 의해서 실제 결정된다. 현재와 같이 다양하게 변하는 교통사고, 도로조건 등은 도로용량의 크기로 표현될 수 있고, 기후조건과 같은 교통수요의 변화는 교통량의 크기에 의해서 나타낼 수 있다. 또한 교통량과 도로용량은 도로에서 손쉽게 측정될 수 있는 변수이다. 따라서 통행시간신뢰도는 장래 도로운영과 유지관리를 위해서도 편리하게 사용될 수 있으리라고 기대된다.

그러나 본 연구모형은 몇가지의 한계성을 내포하고 있으며 이에 대한 후속연구가 필요하다. 첫째, 교통량을 결정적인 값으로 가정하였으나 실제로 교통량은 일정한 분포를 나타내므로 이에 대한 고려가 필요하다. 이와 관련하여 교통량의 분포 형태의 가정에 따른 해의 유일성을 수리적 및 실험적 차원에서 증명할

필요가 있다. 둘째, 통행시간신뢰도 이외의 다른 결정요소를 고려하지 못하고 있다. 대안도로들의 통행시간 차이가 크지 않다면 운전자가 통행시간신뢰도가 높은 경로를 선택하는 것이 합리적이지만, 통행시간 차이가 크다면 신뢰도 이외의 다른 요소를 운전은 고려할 수 있다. 따라서 통행시간신뢰도 이외의 다른 요소를 함께 고려할 수 있는 모형의 확장이 필요하다. 셋째, 신뢰도 통행배정모형을 본 연구에서는 가상의 가로망에 적용하였다. 추후 연구에서는 실측자료를 이용한 분석 및 평가가 필요하다. 그리고 실시간으로 통제되는 도로운영에 이용되기 위해서는 동적형태로 신뢰도 통행배정모형을 확장시켜야 한다.

## 참고문헌

1. A. Nicholson and Z. Du(1997), "Degradable Transportation Systems : an Intergrated Equilibrium Model", Transportation Research, Vol. 31 B(3), pp.209~223.
2. A. Nicholson and Z. Du(1997), "Degradable Transportation Systems : Sensitivity and Reliability Analysis", Transportation Research, Vol. 31 B(3), pp.225~237.
3. A. Polus and J.L. Schofer(1976), Analytic study of freeway reliability, Transportation engineering journal.
4. B. Moon, S. Lee and K. Lim(1997), "Reliability Assignment considering Driver's Behavior under an Emergency Condition", Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems.
5. Brunilde S. and F. Soumis(1991), "Communication & Transportation Network Reliability using Routing Models", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 40(1), pp.29~38.
6. B. S. Dhillon(1983), "Reliability Engineering in Systems Design and Operation", Van Nostrand Reinhold Company.
7. E. Castillo(1988), "Extreme Value Theory in Engineering", Boston : Academic.
8. Ferrari P.(1988), The reliability of the mo-

- torway transport system, *Transportation Research, B*, Vol. 22.
9. F. S. Hiller and G. J. Lieberman(1986), "Introduction to Operations Reserch", Fourth Edition, Holden-Day Inc.
  10. Harry F. Martz and Ray A. Waller(1982), "Bayesian Reliability Analysis", Network : Wiley.
  11. H. Wakabayashi and Y. Iida(1994), Improvement of road network reliability with traffic management, *IFAC Transportation Systems*, pp.603~608.
  12. K.C. Kapurn and L.R. Lamberson(1977), "Reliability in Engineering Design", John Wiley & Sons.
  13. L.G. Willumsen and N.B. Hounsell(1998), Simple models of highway reliability : supply effects, *Travel behaviour research : updating the state of play*, Elsevier.
  14. M.G.H. Bell and Y. Iida(1997), "Transport Network Analysis", John Wiley & Sons.
  15. R. Billinton and R.N. Allan(1992), "Reliability evaluation of engineering systems", Second Edition, Plenum Press.
  16. S.S. Rao(1992), "Reliability-based Design", McGraw-Hill Inc.