



재난·재해 시 대피 및 우회차량 경로 제공 알고리즘 개발

Developing algorithms for providing evacuation and detour route guidance under emergency conditions

양 총 현* 손 영 태** 양 인 철*** 김 현 명****
Yang, Choong Heon Son, Young Tae Yang, In Chul Kim Hyun Myoung

Abstract

The transportation network is a critical infrastructure in the event of natural and human caused disasters such as rainfall, snowfall, and terror and so on. Particularly, the transportation network in an urban area where a large number of population live is subject to be negatively affected from such events. Therefore, efficient traffic operation plans are required to assist rapid evacuation and effective detour of vehicles on the network as soon as possible. Recently, ubiquitous communication and sensor network technology is very useful to improve data collection and connection related emergency information. In this study, we develop a specific algorithm to provide evacuation route and detour information only for vehicles under emergency situations. Our algorithm is based on shortest path search technique and dynamic traffic assignment. We perform the case study to evaluate model performance applying hypothetical scenarios involved terror. Results show that the model successfully describe effective path for each vehicle under emergency situation.

Keywords : *dynamic traffic assignment, horizontal queue model, direct influence area, indirect influence area*

요 지

교통공학 분야에서 비상사태와 기후 변화로 인한 교통망의 영향을 연구하는 주제는 많은 관심을 받고 있다. 특히, 많은 인구가 거주하고 있는 도심지역 교통망에 대해서는 비상사태에 대응하기 위한 적절한 교통운영관리 대책이 필요하다. 이를 위해 교통망 수요와 공급에 비정상적인 상황이 발생했을 때, 영향권 내에 있는 차량들의 신속한 대피와 그 근방 지점으로 접근하는 차량들에 대한 우회경로 정보제공 전략 개발을 위한 다양한 시뮬레이션 모형이 개발되어 왔다. 비상사태의 특성에 따라 요구되는 교통운영관리 전략 및 대응방안이 달라지는 것이 일반적이다. 이에 대한 연구의 일환으로 최근 들어 유티쿼터스(ubiquitous) 통신 및 센서네트워크 기술을 적용하여 비상사태 발생 시 개별 맞춤형 정보제공을 통해 교통운영관리의 실효성을 증진하기 위한 방안이 개발 중에 있다. 신속하고 정확한 비상사태 관련정보의 수집, 연계, 제공으로 교통운영관리에 대한 관리기반을 확보하고, 보다 체계적인 교통운영의 상황조치와 모니터링으로 교통운영관리의 시스템 안전성을 유지하는 것이다. 본 연구에서는 이에 필요한 핵심 사항 중 비상사태 발생 시 차량에 대한 대피 및 우회정보 제공을 위한 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 비상사태 발생 시 교통망에 근거한 동적 대피 및 우회경로 제공을 위해 동적 최단경로 탐색기법과 동적 통행배정모형을 기반으로 하였다. 이를 서울시 강남구 도로망에 적용하였고 가상 시나리오(테러 발생)에 따라 모형의 성능을 평가하였다.

핵심용어 : *동적 모형, horizontal 대기 모형, 직접영향권, 간접영향권*

* 정회원 · 명지대학교 산학협력단, 연구원, 공학박사, 주저자
** 정회원 · 명지대학교 교통공학과, 교수, 교신저자(E-mail : son@mju.ac.kr)
*** 비회원 · University of California, Irvine, Ph.D candidate
**** 비회원 · Asian Institute of Technology, professor, P.E



1. 서론

최근, 교통공학 분야에서 비상사태(Emergency)와 기후변화(Climature change)로 인한 교통 시스템의 영향을 주제로 하는 연구가 많은 관심을 받고 있다. 기본적으로 교통 시스템은 자연재해나 인적 재해와 같은 비상사태 발생 시 그 시스템의 특성 상 내구성이 취약하다. 즉, 교통시스템은 매우 중요한 사회기반시설임에도 불구하고, 외부의 자극에 쉽게 영향을 받는 특성을 가지고 있다. 특히, 많은 인구가 거주하고 있는 도심지역 교통시스템은 비상사태에 적절히 대응하기 위한 효과적인 교통운영관리대책이 필요하다. 교통운영관리대책은 중요한 교통 링크의 손실 및 그 영향권의 확산에 따른 차량의 대피 및 우회 경로 제공을 포함하고 있다. 교통시스템에 대한 수요와 공급에 일시적으로 또는 장기적으로 비정상적인 상황이 발생했을 때, 발생지점에 있는 차량들의 신속한 대피와 그 지점으로 접근하는 차량들에 대한 우회 경로 정보제공을 위해 다양한 시뮬레이션 모형이 개발되고, 사용되어져 왔다. 비상사태의 특성에 따라 요구되는 교통운영관리 전략 및 대응방안이 달라지는 것이 일반적이다. 이에 대한 연구의 일환으로 최근 들어 유비쿼터스(ubiquitous)통신 및 센서네트워크 기술을 적용하여 비상사태 발생 시 개별 맞춤 정보제공을 통해 교통운영관리의 실효성을 증진시키는 방안이 연구 중에 있다. 즉, 신속하고 정확한 비상사태 관련정보의 수집, 연계, 제공으로 교통운영관리에 대한 관리기반을 확보하고, 보다 체계적인 교통운영의 상황조치와 모니터링으로 교통운영관리의 시스템 안전성을 유지하는 것이다. 이에 필요한 핵심사항 중 비상사태 발생 시 차량에 대한 대피 및 우회정보 제공을 위한 알고리즘 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 비상사태 발생 시 교통망에 근거한 동적 대피 및 우회경로 제공을 위한 알고리즘을 동적 최단경로 탐색기법과 동적 통행배정모형을 기반으로 개발하여 이를 서울시 강남구 도로망에 적용하였고 가상의 시나리오(테러발생)에 따라 모형의 성능을 평가하였다.

2. 기존 연구 고찰

앞서 기술한 바와 같이, 비상사태 발생 시 교통운영과 관련한 모형 개발에 관한 연구는 국내외에서 많이 진행되어 왔다. 비상사태 묘사를 위한 모형은 크게 1) 네트워크 모형, 2) GIS-based 모형, 3) 미시적 교통류 모형 4) activity-based와 같이 4가지로 구분된다. 네트워크 모형은 비상상황 하에서 네트워크 교통 패턴에 초점을 맞추고 경로 선택과 네트워크 설계 문제들을 포함한다. GIS-based 모형은 이 분야에서는 새로운 경향으로써, 위험지역 분석과 특정 지역에 대한 위험지도를 만들어 낼 수 있다. 미시적 교통류 모형은 작은 지역에 한해 교통과 사람의 흐름을 분석할 수 있다. 활동기반(Activity-based) 모형은 사람의 비상상황 하에서의 대피활동을 평상시 활동패턴을 고려해 묘사하게 된다.

국내에서는 재난 재해와 같은 비상사태 발생에 대비한 다양한 재난관리 매뉴얼 등을 설치 운영 중(서울시정개발연구원, 2004, 2006)에 있다. U-transportation 기반기술 개발 연구에서는 재난 재해시(비상상태)의 형태를 크게 자연, 인적 그리고 사회적 재난으로 구분하였다. 자연재난은 풍수해, 폭설, 안개등을 포함하고, 인적재난은 터널화재, 구조물 붕괴 등을 의미하고, 사회적 재난은 테러나 도로 점거등으로 분류하였다(국토해양부, 2008). 이상건 외(2005)의 연구에서는 각종 자연재해 및 인적재난에 의해 국가기간교통망에 유고상황이 발생했을 때, 이를 해결하기 위한 효율적인 소개전략모형을 제시하였다. 그러나 이 연구는 재난의 유형이 태풍과 집중호우 같은 자연재해에 국한되어 있다. 신성일 외(2007)의 연구에서는 자연재해로 인한 비상사태 발생에 대한 예방과 대비에 초점을 맞춘 예측, 최적 신호운영, 그리고 상용 시뮬레이션을 이용한 우회교통정보 제공 및 교통류 관리방안을 개발하였다. 동적 모델링과 시뮬레이션은 비상상황의 동적진행을 묘사하는데 매우 유용하다. Chen and Zhan(2004)은 agent-based 시뮬레이션을 이용해 서로 다른 도로망 구조에 대해

동시 다발적인 그리고 단계적인 대피의 효과를 조사하였다. 반면에, Liu et al(2006)은 단계별 대피운영과 관련된 중요한 특성을 조사하기 위한 네트워크 모형을 개발하였다. 이러한 동적 분석에 많이 이용된 동적 상용 통행 시뮬레이션 모형으로는 대표적으로 DynaMIT(Balakrishna, 2008)이 있다.

3. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 비상사태 발생 및 전개 상황에 대한 정보를 운전자가 100% 획득할 수 있다는 가정 하에 도로 교통망의 물리적 피해와 운전자 보호를 극대화하기 위해 재난위험권(직접영향권)에 속한 차량들을 신속히 대피시키고, 재난위험권으로 접근하는 차량(간접영향권)들을 미리 우회시키는데 필요한 경로 정보를 동적(dynamic)으로 제공할 수 있는 알고리즘 개발을 목적으로 하였다. 본 연구에서는 차량 시뮬레이션에 초점을 맞추었으나, 버스나 택시 같은 대중교통수단과 보행자는 고려하지 않는다. 비상사태와 관련해서 사회적 재난 중 테러로 인한 도로 폐쇄를 가정한 시나리오를 구성하였고, 정보의 형태나 내용은 구체적으로 명시하지 않으며, 긴급상황 발생 시 차량 내에서 실시간 정보확인이 가능하다고 가정한다. 시뮬레이션은 2시간 분석을 기준으로 하며, 차로별 차량 처리방안과 같은 미시 시뮬레이션 차원의 문제들은 모형에서 고려하지 않는다.

4. 모형 개발

4.1 위계 기반 경로선택 모형

본 연구에서 경로선택 행태는 2단계의 위계를 갖는 교통망을 통해 묘사된다. 다시 말하면, 전체 교통망은 고속도로를 포함하는 주간선도로망과 이 보다 하위개념인 보조간선도로망으로 구분되며, 각 경로

간 심각한 중복이 발생하지 않도록 하기 위해 주간선 도로망에서 상호 독립적인 교통축을 탐색한다. 이는 각 기중점을 연결하는 독립적인 주간선 도로축이 해당 축을 통행하는 이용자들에게 인식된다고 가정하는 것이다.

4.1.1 상위문제

상위문제는 경로 간 중복을 고려해 복수의 주간선 도로축을 탐색하는 문제로 정의하며, 본 연구에서는 임용택(2006)에서 개발한 n-path 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 중복된 경로에 별점을 부과하여 중복을 최소화하는 방법으로써, 이를 통해 주간선 도로망에서 경로 간 중복이 최소화된 복수의 경로들을 탐색한다. 이 때, 사용되는 링크기반 최단경로탐색 알고리즘은 김현명과 임용택(1999) 등이 개발한 링크기반 탐색기법을 사용하였다. 상위문제의 해도출 알고리즘은 다음과 같다.

N개의 노드와 A개의 링크로 구성된 교통망을 $G(N, A)$ 라고 가정했을 때, 해도출 알고리즘은 링크기반의 최단경로를 먼저 탐색한 후, 도출된 경로의 링크에 별점을 부과하고, 다시 최단경로를 찾는 순서로 반복된다. t^{ij} 를 링크 ij 를 통행하는데 필요한 통행시간이라고 정의하고, C_{end}^{ij} 는 링크 ij 가 지점 r 에서 노드 j 까지를 연결하는 최단경로에 속하기 위해서는 아래 식을 만족해야 한다.

$$C_{end}^{ri} + t^{ij} \leq C_{end}^{rj} \quad \forall_{r,i,j} \in N \quad (1)$$

만약 링크 ij 가 식 (1)의 조건을 만족하면, 링크 ij 는 r 에서 j 까지의 preceding link 집합 $PL(r, j)$ 의 원소로 등록된다. 편의상 식 (1) 포함여부를 거친 링크를 R 로 정의하고, 이를 Labelled 링크라 하고, R' 는 아직 검색을 거치지 않은 Unlabelled 링크 집합을 나타낸다고 가정하면, 링크기반 최단경로탐색 알고리즘은 다음과 같다.



1단계) 집합 O 로부터 기점과 연결된 링크(r, j)들을 검색. 링크 (r, j)를 집합에 포함시킴

$$C_{end}^{ri} = t^{ri} \text{로 설정하고, } j \neq i \text{ 이면}$$

$$C_{end}^{ri} = \infty \text{로 설정 } PL(r, j) = \emptyset$$

2단계) R' 링크들 중에서 현재 R 내에서 가장 작은 C_{end}^{ri} 를 갖는 링크의 종점 노드와 직접 연결된 링크들에 대해 식 (1)의 작업 수행

$$\text{만약, } C_{end}^{ri} = C_{end}^{ri} + t^{ij} \text{ 이면,}$$

$$\text{링크 } (r, j) \in PL(r, j)$$

3단계) 링크(r, j)를 라벨 처리함. 즉, 링크(r, j)를 R 에 추가하고 이 링크를 R' 에서 삭제함

4단계) 만약 $R' = \emptyset$ 면 정지, 그렇지 않으면 2단계로 이동

위 알고리즘을 통해 기종점간 최단경로 탐색 알고리즘이 구축되면 이를 근거로 경로간의 중복을 고려해 독립성을 갖는 주간선도로축을 탐색하기 위한 n-path 알고리즘을 다음과 같이 구축할 수 있다.

0단계) 초기화. 교통망을 주간선도로망 집합 G^A 와 보조간선도로망 G^L 로 구분하고 $n=1$ 로 설정

1단계) 앞서 기술한 링크기반 최단경로 알고리즘을 통해 최단경로 탐색. 이를 P_n^{rs} 라고 정의하고, 이 경로에 속한 링크의 집합을 I_n^{rs} 라 정의

2단계) 새로 추가된 경로 P_n^{rs} 의 모든 링크들에 링크별점을 곱함

3단계) 새로 추가된 경로 n 에 대해 중복도 검사 실시. 경로 n 의 기존경로 k 에 대한 중복도

$$Op_{kln}^{rs} = \frac{\text{두 경로의 중복길이}}{\text{경로 } n \text{의 길이}}$$

4단계) 만약 경로 n 의 중복도가 기존의 경로 k 에 대해 미리 정의된 수준 이상의 중복도를 가지면 정지, 아니면 단계1로 이동. 정지하면,

G^A 상에 있는 경로만 주간선도로 교통망의 기종점간의 최단도로 축으로 저장함

n-path 알고리즘을 통해 기종점간에 기준 이하의 중복도를 가진 경로들이 탐색되면 이중 주간선도로망에 포함된 링크들의 부분만을 이용해 독립적인 주간선도로축을 구축한다. 주간선도로축을 전체경로에서 독립시킬 경우, 운전자들의 경로선택 시 경로의 부분적인 정보 갱신이 전체 경로의 선택에 미치는 영향을 좀 더 현실적으로 묘사할 수 있으며, 정보형태에 따른 이용행태 변화도 묘사할 수 있다. 그러나 실제 통행의 기종점들은 주간선도로망에 직접적으로 연결되어 있지 않을 수 있다. 이러한 경우는 각 주간선도로의 최근접 지점에서 각 기종점 노드 간을 연결하는 보조간선도로망을 탐색해 최종적으로 각 기종점간의 전체 경로를 구축하게 된다.

4.1.2 하위문제

위계기반 최단경로 탐색에서 보조간선도로망의 경로를 선택하는 문제는 운전자들이 주간선도로망의 경로를 먼저 선택한 후에 이루어진다. 즉, 모든 통행자들은 이미 자신들이 이용할 경로의 주요 구간에 대한 선택은 완료된 상태고, 선택된 축으로 접근하기 위한 경로를 선택하는 문제가 하위문제가 된다. 본 연구에서는 주간선도로축 선택을 마친 운전자들에 대해서 기점부터 주간선도로축의 기점까지는 출발시간 당시의 동적 통행시간(instantaneous travel time)을 이용해 최단경로를 선택한다고 가정한다. 이것은 시뮬레이션 시 매 출발시간마다 교통상태에 근거해 갱신하게 된다. 동일한 기법이 주간선도로축 종점에서 실제 통행종점까지의 경로선택에도 적용되고, 최단경로 탐색에는 축 경로 구축에 이용했던 n-path 알고리즘을 그대로 이용한다.

본 연구에서는 운전자들의 경로선택 행태를 설명하기 위해 다항로짓(Multinomial Logit) 모형을 이용한다. 일반적으로 이 모형은 경로선택문제에 잘 적용되진 않는데, 그 이유는 다항로짓 모형이 정확한

선택확률을 계산하기 위해서는 각 선택대안 간에 충분한 상호 독립이 보장(IIA 가정)되어야 하는데, 일반적인 경로탐색 알고리즘으로는 교통망 안에서 독립이 보장되는 경로들을 탐색하는 것이 어렵기 때문이다. 그러나 본 연구에서 제시한 위계기반 경로 구축과정에서 얻어진 각 축들은 충분한 독립성을 가지고 있으므로, 적용에 문제점은 없다. 시간대 t 에 기점 i 를 출발하여 j 로 향하는 운전자가 주간선도로 축 k 를 선택할 확률은 모든 경로가 서로 독립이고 전체 통행비용 중 설명변수를 통해 설명되지 않는 부분이 Gumbel분포를 따른다고 가정하면 Multinomial Logit 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$P_k^{ij}(t) = \frac{e^{\beta \cdot C_k^{ij}(t)}}{\sum_{m \in M} e^{\beta \cdot C_m^{ij}(t)}} \quad \forall_{i,j,k,m} \quad (2)$$

여기서, β 는 정산해야 할 계수 값으로서, 이 값이 0이면, 축선택은 완전 임의선택이 되고, β 가 1이면 경로선택은 전적으로 $C_k^{ij}(t)$ 간의 차이에만 의존하게 된다. 이 때, $C_k^{ij}(t)$ 은 차량이 시간 t 에 출발했을 때 주간선도로축 k 의 통행비용을 나타낸다. 이 때 축 k 의 통행시간은 전체 통행경로의 통행시간을 모두 고려해야 하기 때문에 주간선도로망의 통행시간뿐만 아니라, 보조간선도로망 상의 통행시간도 모두 포함한다. 본 연구에서는 보조간선도로망 상의 운전자들은 최단경로를 선택한다고 가정하기 때문에, 축 k 의 동적 통행비용 $C_k^{ij}(t)$ 은 다음과 같이 구성된다.

$$C_k^{ij}(t) = t_L^{i-k(i)} + C_A^{k(i)-k(j)}(t + t_L^{i-k(i)}) + t_L^{k(j)-j} + \epsilon \quad \forall_{i,j,k,t} \quad (3)$$

$t_L^{i-k(i)}$ 는 보조간선도로망에서 통행의 최초기점 i 에서 주간선도로망축 기점 $k(i)$ 까지의 통행시간을 의미한다. 이 통행시간은 상수값으로 주어질 수 있고, 출발시점에서 기점 주위의 교통상태를 통해 추정될 수도 있으며, 하루의 각 시간대마다 현장자료를 통해 다르게 설정할 수도 있다. 본 연구에서는 보조간선도로의 평균통행속도를 통해 최단경로의 통행시간을

이용해 이 값을 계산하였다. $C_A^{k(i)-k(j)}(t + t_L^{i-k(i)})$ 는 시간 $t + t_L^{i-k(i)}$ 에 축 k 에 도착했을 때 축 k 상의 기점 $k(i)$ 로부터 $k(j)$ 까지의 동적통행시간을 의미하며, 계산방법도 $t_L^{i-k(i)}$ 과 동일하다.

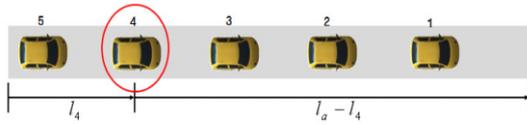
4.2 링크 내 교통류 모형 개발

링크 상에 있는 모든 차량들은 링크의 교통류상태에 따라 진행하게 된다. 거시적인 통행배정모형에서는 모든 링크의 차량들은 동일한 하나의 대표 속도를 가진다고 가정한다. 이러한 가정은 단순하게 교통류를 모형화한다는 장점에도 불구하고, 이러한 진행방식은 현실과 큰 차이가 있다는 점에서 많은 비판을 받아왔다. 교통망 부하모형의 대표적인 방식은 이용자 평형(UE)기반의 통행배정 모형들은 대부분 수직지체(vertical or point queue) 모형을 이용하였다. 그러나 이 모형은 spillback 문제와 달리 같은 물리적인 혼잡의 동적 전파과정을 설명하지 못한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 수평지체(horizontal queue) 모형이 개발되었다. 수평지체 모형에서는 링크의 유출부부터 순차적으로 용량 이상의 도착차량들이 누적됨으로써, 대기행렬이 형성된다. 이러한 과정이 실제 도로에서 대기행렬 발생과정과 동일하다. 수평지체 모형에서는 대기행렬의 증가가 실제 링크의 여유공간과 주행 가능공간을 차지하여 링크의 여유용량이 감소하는 상황을 묘사할 수 있기 때문에, spillback 현상이 실제와 같이 묘사된다. 다음은 본 연구에서 사용된 modified Greenshield 모형의 구조이다.

$$u_a(t) = u_a^{\min} + (u_a^{\max} - u_a^{\min}) \times \left(1 - \frac{k_a(t)}{k_a^{\text{jam}}}\right) \quad (4)$$

식 (4)에서 $u_a(t)$ 와 $k_a(t)$ 는 t 시간에 링크 a 의 통행속도와 밀도를 나타낸다. k_a^{jam} 은 링크 k 의 최대 밀도이다. 각 시간대 t 의 시작마다 모든 차량들이 t 의 시점에 갖는 통행속도는 식 (4)를 통해 계산된다. 이전 연구(Jayakrishnan et al, 1995)에서는 이 방

정식을 링크 전체의 단일 대표속도를 계산하는데 이용하였으나, 본 연구에서는 Kim(2008)이 개발한 것과 같이 개별 차량들의 서로 다른 통행속도를 계산할 수 있도록 하였다. 시점 t 에서 각 차량들은 자신의 전방에서 주행 중인 차량의 대수와 전방구간의 길이를 고려해 계산된 전방밀도를 통해 자신의 주행속도를 결정한다. 계산식은 그림 1에서 제시한 것과 같다.



$$u_a(t) = u_a^{\min} + (u_a^{\max} - u_a^{\min}) \times \left[1 - \frac{1}{k_{a-jam}} \times \left\{ \frac{\text{전방차량대수}(=3)}{\text{lane}_a (l_a - l_4)} \right\} \right]$$

그림 1. 링크상에서의 주행속도 결정방법

최전방의 차량(1번차량)은 자유류 속도로 주행이 가능한 반면, 그 차량을 따르는 후속차량들은 전방의 차량대수 증가에 따라 상대적으로 낮은 속도로 주행하게 된다. 그러나 이러한 전방 밀도에 따른 주행속도는 전방차량의 속도와 전방 구간 길이에 따라 완벽하게 실현되지 않을 수 있다. 이러한 점을 고려하기 위해 본 연구에서는 다음과 같이 간단한 추종기법을 적용하였다.

$$Dist_n(t_v) = \text{Min}(l_a - l_n, l_{n-1}^{*w} - l_n - g_{\min}, u_{n,a}(t_{iv}) \cdot \Delta t_v) \quad (5)$$

여기서, g_{\min} = 최소차간간격

l_n = n 번째 차량이 현재의 시뮬레이션 시간(t_{iv})시작 시점까지 주행한 거리

$u_{n,a}(t_{iv})$ = t_{iv} 의 시작시점에 링크 a 상의 차량 n 의 통행속도

l_{n-1}^{*w} = $n-1$ 번째 차량이 시간대 t_{iv} 의 종료 시점까지 주행하는 거리

식 (5)와 같이, 차량이 링크 상에서 시간 Δt_{iv} 동안 주행할 수 있는 최대 길이는 1) 현재 차량 전반에 남

아 있는 주행길이, 2) 전방 주행 중인 차량의 t 시간 종료 시의 위치, 3) t 시점 시작 시 주행속도로 주행할 수 있는 최대거리 중 가장 작은 값으로 결정된다. 식 (5)에 의해 링크의 최전방 차량부터 순서대로 시간대 t_{iv} 동안의 차량의 이동거리가 결정된다.

만약, 전방 차량이 시간길이 t_{iv} 종료 전에 링크에서 유출된다면, 해당 차량은 남은 시간만큼을 하류부 링크에서 이용할 수 있다. 수학적으로 이 조건은 $u_{n,a}(t_{iv}) \cdot \Delta t_{iv} \geq l_a - l_n$ 으로 정의된다. 이 때, 차량 n 에게 남은 시간은 식 (6)에 의해 계산된다.

$$RD-time_n(t_v) = \Delta t_{iv} - \frac{l_a - l_n}{u_{n,a}(t_{iv})} \quad (6)$$

4.3 대피차량 경로 설정 기법

본 연구에서 교통망에서 비상사태 발생으로 인해 차량소통에 영향을 받는 지역은 직접영향권과 간접영향권으로 분류하였다. 직접영향권 안에 있는 차량들은 대피대상 차량으로 설정되는데, 이는 전진이 더 이상 가능하지 않은 차량들을 의미한다. 이 경우, 링크기반 최단경로 탐색기법에 의해 현재 폐쇄된 링크에서 우회할 수 있는 가장 가까운 지점까지의 경로를 먼저 탐색하고, 이를 대피차량 소개경로로 설정한다. 대피차량들이 비상상황으로 인한 직접 영향권을 벗어난다면, 대피차량 소개경로에 대한 타 차량 이용제한은 해제된다. 대피대상 차량들에 대한 대피경로 정보제공을 위한 링크기반 최단경로 알고리즘의 경우 하나의 기점에서 모든 종점으로의 최단경로를 탐색한다(one-to-many). 탈출 노드 및 대피경로 설정 알고리즘은 다음과 같다.

1단계) 테리에 의한 직접영향권 설정. 이 지역은 교통망에서 $G(N^D, A^D)$ 로 정의함. 직접 영향권 내의 대피대상 차량들을 모두 확인.

2단계) 링크 $(i, j) \in A^D$ 에 대해 모든 노드 i 로부터 모든 종점 노드 s 까지의 최단경로를 링크 기

- 반 최단경로 알고리즘으로 탐색
- 3단계) 각 대피차량들에 대해 모든 노드 i 에서 차량의 실제종점 s 까지 탐색된 최단 경로상의 노드들 중 $n \in N^D$ 들을 확인하고, 그 중 i 에서 가장 가까운 노드 m 을 탈출노드로 설정
- 4단계) 최소의 통행비용을 제공하는 경로를 탈출경로로 설정
- 5단계) 링크 (i, j) 의 차량을 링크 (j, i) 로 이동시키고, 링크 (i, j) 에서 가장 많이 진행한 차량부터 U-turn으로 이동시킴
- 6단계) 시뮬레이션 수행, 직접영향권이 변하면 1단계로 이동

4.4 우회차량 경로 설정 기법

우회대상 차량들은 현재 링크 상에서 진행하는 데는 큰 문제가 없으나, 현재 경로가 직접영향권을 통과하는 차량들을 포함한다. 현재 위치에서 각 종점까지의 경로를 복수로 탐색하는 방법을 채택하였다. 따라서 차량들은 하나 이상의 우회경로에 대한 정보를 받는다. 이러한 경우, 식 (2)와 같은 다항로짓모형을 이용하게 된다. 본 연구의 경우 위계기반 경로탐색 과정에서 각 기종점간의 모든 독립축 경로들을 탐색해놓기 때문에 복수경로를 새로 탐색하는 계산 부담이 없으므로, 이미 구축된 복수경로들에 통행시간만을 갱신하고 경로 선택 확률만 갱신해준다. 우회차량들은 대피차량들에 비해 양적으로 훨씬 많기 때문에 짧은 시간간격을 이용해 우회경로들에 대한 축 선택 확률을 자주 갱신해야 한다. 또한 현재 위치에서 축 시작지점까지의 경로도 실시간 정보를 이용해 최단 경로를 이용한다고 가정한다.

우회차량 경로 설정 시 중요한 사항은 간접영향권을 어떻게 설정할 것인가와 관련한 문제이다. 간접영향권은 차량의 통행이 가능하지만, 직접영향권과 대피경로에 의해 차량 통행이 영향을 받는 지역을 의미

한다. 본 연구에서는 간접영향권을 정의하는 규칙을 개발하고, 내생적으로 영향권을 계산하는 방법을 사용하였다. 이 경우 간접영향권은 교통망의 상황이 변함에 따라, 그에 상응하게 재설정될 수 있다. 그림 2는 복수경로의 개념을 이용한 간접영향권 영향계수 산정방법을 묘사한 것이다.

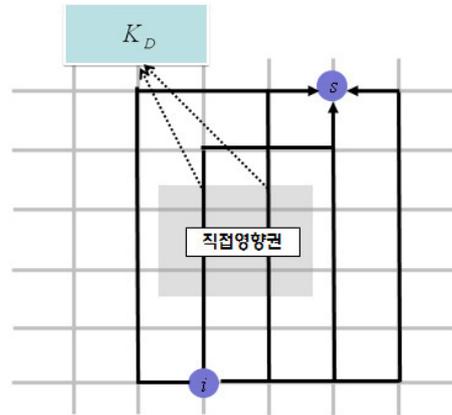


그림 2. 간접영향권 설정 방법

그림 2에서 K^D 는 직접영향권을 통과하는 경로의 집합을 나타낸다. 이때 특정 기종점 (i, s) 의 간접영향권 설정계수는 식 (7) 과 같이 계산된다.

$$\Phi^{is} = \frac{\sum_{k \in K^D} \sum_{a \in A} d_a \cdot \delta_{k,a}^{is}}{\sum_{k \in K} \sum_{a \in A} d_a \cdot \delta_{k,a}^{is}} \quad (7)$$

여기서, d_a = 링크 a 의 길이

$\delta_{k,a}^{is}$ = 기종점 (i, j) 간의 경로 k 가 링크 a 를 통과하면 1, 그렇지 않으면 0

식 (7)의 분모는 기종점 (i, s) 간의 복수경로 전체 길이의 합을 의미하며, 분자는 이 경로들 중 직접영향권을 통과하는 경로 길이의 합을 의미한다. Φ^{is} 의 값은 0과 1사이에 있으며, 이 값이 일정 임계치(α) 이상이면, 이 기종점은 재해의 간접영향권에 있는 것이다. 본 연구에서는 $\Phi^{is} > \alpha$ 인 종점 s 의 숫자가 일

정 개수 이상이 존재하는 경우 이 노드는 간접영향권 내에 있다고 간주한다. 영향권 내에 일부가 $\Phi^{is} < \alpha$ 인 경우라도, 해당 노드가 다른 노드들에 의해 형성된 영향권에 둘러싸여 있다면, 이 노드는 영향권 내에 있는 것으로 간주한다. 간접영향권 설정 및 우회차량 복수경로 계산을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- 1단계) 각 기종점 (r, s)별로 n-path 알고리즘을 이용해 경로를 탐색
- 2단계) 직접영향권내의 모든 링크를 교통망에서 일시적으로 제외
- 3단계) 기종점간 경로들에 대해 K^D 를 확인
- 4단계) Φ^{rs} 를 기준으로 간접영향권내에 있는 노드들을 확인한 후, 이를 이용해 간접영향권 설정
- 5단계) 간접영향권의 노드들에 대해 n-path 알고리즘으로 모든 종점들에 대한 복수경로를 계산하고, 간접영향권 내의 모든 차량들에 대해 식(2)를 통해 우회경로를 제공
- 6단계) 정해진 시간간격마다 교통망 통행시간을 갱신하고 변화된 시간에 따라 식(2)를 적용해 우회경로 선택확률을 갱신
- 7단계) 직접영향권이 변하면 1단계로 이동

5. 시나리오 분석 및 결과

5.1 예제교통망

본 연구에서 개발한 알고리즘은 테러 상황과 같이 교통망의 공급이 일시적으로 급격히 감소하는 상황에 적용해 보았다. 예제교통망으로는 서울시 강남구의 교통망을 기초로 설계하였다. 교통망의 기하구조 특성은 항공사진을 근거로 하여 실제와 동일하게 구축하였고, 교통망의 링크들은 주간선도로 링크와 보

조간선도로 링크로 구분하였다. 각 링크의 차로당 용량은 2,000대/시로 하고, 각 링크의 유출용량은 신호교차로에서의 용량을 고려하여 700대/시로 설정하였다.

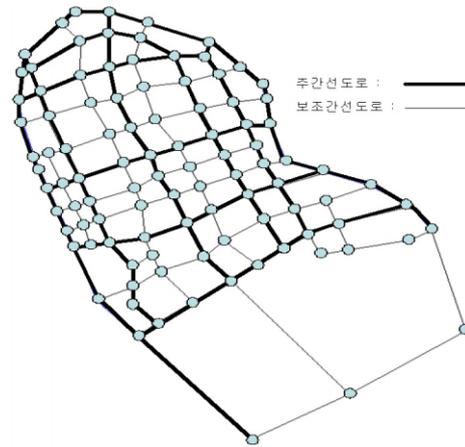


그림 3. 예제교통망 (서울시 강남구)

5.2 동적 O-D 표

본 연구에서 이용한 동적 O-D표의 발생은 다음과 같은 3단계로 구성된다.

- 1단계) $T \cdot p^i = O^i$
- 2단계) $O^i \cdot p^{ij} = T^{ij}$
- 3단계) $T^{ij}(t_{dp}) = T^{ij} \cdot \Phi^{is}(t_{dp})$

p^i 는 총 발생차량들 중 기점 i 에서 발생하는 차량의 비율이다. 이용 가능한 기존의 O-D표가 있는 경우, p^i 를 O-D표에서 계산할 수 있다. 그러나 본 연구에서 이용되는 모든 모수들은 가정에 의한 것이다. 기점 발생량이 O_i 로 결정된 다음 과정은 기점 발생교통량을 종점 선택비율에 따라 각 종점에 배분하는 것이다. 전통적인 4단계 교통계획 과정인 경우, 이 단계는 통행배분과정에 해당된다. p^{ij} 는 노드 i 의 발생교통량이 종점 j 를 선택하는 비율을 나타낸다. 이 비율을 계산하기 위해서는 중력모형이나 엔트로피 모형 같은 일반적인 통행배분 모형이나 로짓모형과

같은 개별형태모형을 사용할 수도 있다. 동점 O-D 표를 얻기 위한 마지막 단계는 정적 교통량을 각 출발시간대별로 배정해 동적 출발교통량을 계산하는 것이다. $\Phi^{is}(t_{dp})$ 는 출발교통량의 패턴을 나타내는 프로파일을 의미한다. 본 연구에서는 다양한 출발교통량 행태를 고려하기 위해 그림 4와 같은 3가지 형태의 패턴을 교통망상의 기종점 쌍들에 적용하였다.

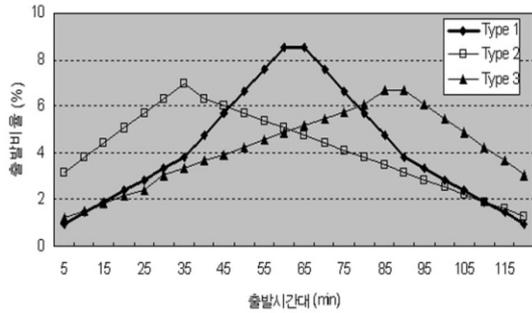
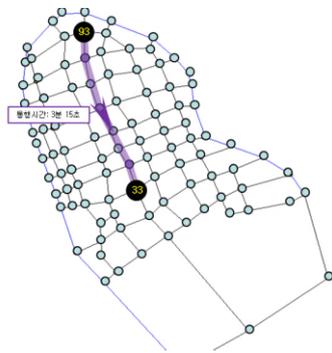


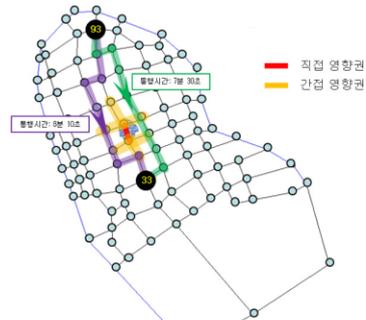
그림 4. 출발교통량 프로파일

5.3 테러 시나리오 설계

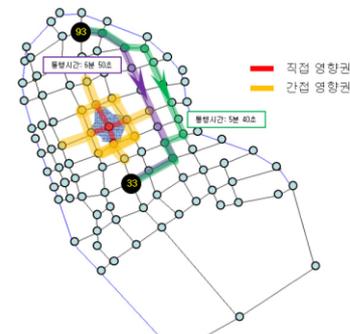
긴급 상황 발생 시나리오는 다음과 같이 가정되었다. 오전 8:00경 서울시 강남구 인근에서 인질을 이용한 테러 공격 정보가 입수되어, 8:10분경에 남구 내에 단일 링크가 폐쇄되었다. 그로부터 점차적으로 복수 링크, 지역 링크가 폐쇄되어 그로 인한 직접영향권과 간접영향권이 시간에 따라 변하는 상황을 설정하였다. 이 중 특정 노드(33번과 93번)간 통행을 하나의 예로 제시하였다.



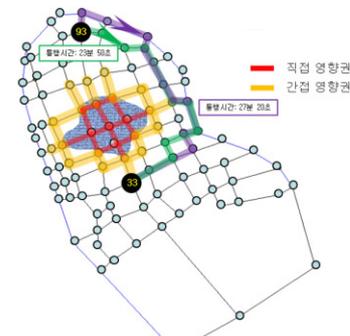
정상상태: 오전 8:00-8:20



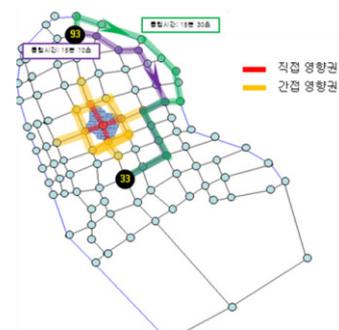
1번 시나리오: 오전 8:20-8:30



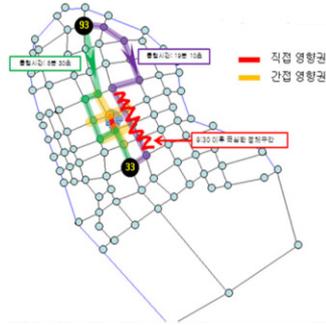
2번 시나리오: 오전 8:30-8:40



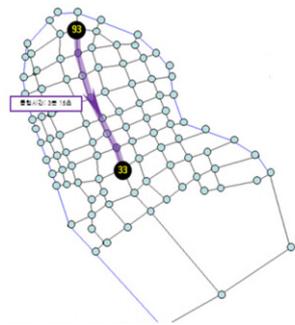
3번 시나리오: 오전 8:40-9:00



4번 시나리오: 9:00-9:20



5번 시나리오: 9:20~9:30



정상상태 복귀: 9:30~10:00

앞서 언급한대로, 경로 발생의 경우, 운전자가 출발 전과 테러 발생 후 장래 경로가 테러지역 또는 그로 인한 간접 영향권에 속하는 경우에만 경로 안내가 제공된다. 위 시나리오의 전반적인 흐름은 다음과 같다.

- 오전 8:00~8:20: 테러발생 전의 도로망 정상상태
- 오전 8:20~8:30: 테러발생 후 단일링크 폐쇄상태
- 오전 8:30~8:40: 테러발생 후 복수링크 폐쇄상태
- 오전 8:40~9:00: 테러발생 후 도로망 일부 폐쇄상태
- 오전 9:00~9:20: 폐쇄 해제상태
- 오전 9:20~9:30: 1번 시나리오 상태로 복귀상태
- 오전 9:30~10:00: 도로망 정상화

4번 시나리오에서 9:15분경 통행시간이 감소한 이유는 9:00 경에 일부지역이 폐쇄로부터 해제되면서 비어 있는 도로들이 발생, 해당 도로를 이용한 차량들은 상대적으로 낮은 통행시간을 경험하였기 때문으로 판단된다. 9:20분경 다시 통행시간이 증가한 것은 해당 시간에 출발한 일부 차량들이 정체가 극심한 구간을 통과했기 때문으로 판단된다.

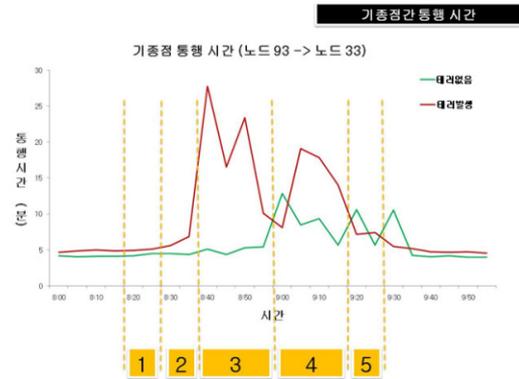


그림 5. 테러 발생 전·후 그리고 시나리오별 기종점 통행시간 비교

그림 6은 직접 영향권에 놓여 있던 링크들의 통행속도를 비교한 것이다. A, B, C 링크 모두 테러가 발생한 후 통행속도가 감소하였다. 링크 A의 경우 3번 시나리오에서 폐쇄로 인해 통행속도가 0이고, 이후 4번 시나리오에서도 간접영향권에 속하기 때문에 계속 속도가 0으로 유지되고 있다.

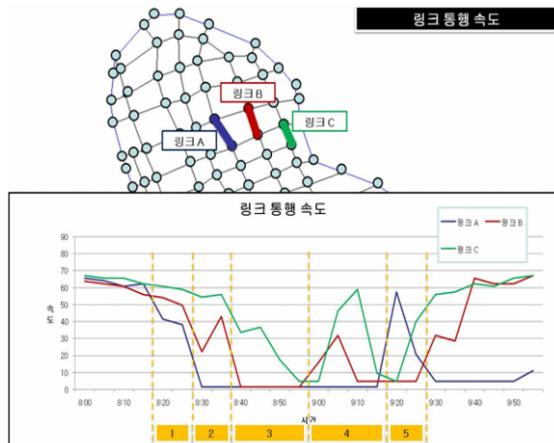


그림 6. 영향권에 놓여있던 링크의 통행속도 비교

4번 시나리오 이후 링크 폐쇄가 풀리면서, 일시적으로 통행속도가 자유속도에 근접하다가 차량의 통행이 집중되면서 다시 감소하게 된다. 링크 B의 경우 3번 시나리오에서 간접영향권에 속하기 때문에 속도가 0이 된다. 이후 4번 시나리오에서 간접영향권에서 벗어남으로써 속도가 증가했으나, 통행이 집중되면서 다시 속도가 감소하게 된다. 도로폐쇄가 완



전히 해제된 이후에도 속도는 지속적으로 증가하고 있다. 링크 C의 경우 3번 시나리오가 끝날 무렵까지 계속 속도가 감소하다가 4번 시나리오에서 갑자기 증가하고 있다. 5번 시나리오에서 다시 감소했다가 상황이 완전히 종료된 후 속도가 증가하였다.

6. 결론

본 연구에서는 재난·재해와 같은 비상사태 발생 시 효율적인 교통운영을 위한 대피 및 경로 정보제공 알고리즘을 개발하였다. 경로 안내는 두 가지 행태로 제공된다고 가정하였다. 운전자가 출발 전에 미리 경로를 안내받는 경우와 이미 종점으로 가기 위해 도로를 주행 중인 경우에 현재 경로와 장래 경로에 대한 정보를 받는다. 시나리오 분석 결과, 본 연구에서 개발된 알고리즘은 시나리오 설계에 맞게 합리적인 값들을 산출하였다. 향후 연구로 시뮬레이션 platform 개발을 통해 실시간 자료와의 상호작용을 통해 비상사태 발생에 대응하여 교통 시스템의 효율성을 일정수준으로 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

국토해양부 (2008), "U-transportation 기반기술 개발" 교통체계효율화사업 제2차년도 중간보고서

김현명, 임용택 (1999), "유전알고리즘을 이용한 전역탐색 최단경로 알고리즘 개발" 대한교통학회 제17권, 제2호, pp 163-178,

서울시정개발연구원 (2005), "긴급 상황 발생 시 인명대피 및 구조를 위한 교통망제어" 시정연 SDI 2005-PR-37.

서울시정개발연구원 (2004), "서울시 대규모 재난관리를 위한 기본 추진전략 수립 방안 (I)" 시정연 2004-PR-18.

신성일, 조용찬, 이창주 (2007), "수해 재난 시 우회교통 정보 제공 및 교통류 관리 전략" 대한교통학회 제 25권 제6호, pp 33-42.

이상건, 김호정, 오성호, 정선영, (2005), "국가기간교통망의 유고 대응전략 연구" 국토연구원

임용택 (2004), "일반가로망에서 교통정보제공을 위한 n-path 알고리즘의 개발" 대한교통학회 제22권 4호, pp 135-146.

Balakrishna, R, et al (2008), "Simulation-Based Framework for Transportation Network Management in Emergencies" *Journal of Transportation Research Record*. No. 2041, pp80-88.

Chen, X., and F. B. Zhan (2004), "Agent-Based Modeling and Simulation of Urban Evacuation: Relative Effectiveness of Simultaneous and Staged Evacuation Strategies. *Presented 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Record*

H,M, Kim (2008), "New Dynamic Travel Demand Modeling Methods in Advanced Data Collecting Environments" Ph.D Dissertation, UC-Irvine.

Liu, Y., X. Lai, G. L. Chang. (2006), "Cell-Based Network Optimization Model for Staged Evacuation Planning Under Emergencies". *Journal of Transportation Research Record*, No. 1964, pp 127-135.

R. Jayakrishnan, W. K. Tai, A. Chen (1995), "A Dynamic Traffic Assignment Model with Traffic-Flow Relationship, *Transportation Research 3C*, pp 51-72.

접 수 일 : 2009. 6. 8
 심사 일 : 2009. 6. 22
 심사완료일 : 2009. 8. 31