

# 서울정책포커스

2007. 5. 14 제25호

## 수해 재난 시 교통류 관리방안

신성일(서울시정개발연구원 연구위원)

### < 목 차 >

요약

1. 문제의 제기
2. 폭우/침수 시 국내·외 교통류 관리 사례
3. 교통방재 개념
4. 폭우/침수 시 교통방재를 적용한 교통류 관리 방안
5. 사례분석

## 요 약

우리나라는 몬순지대의 대륙성 기후권에 속하기 때문에 하절기에 다량의 집중호우와 태풍이 발생하며, 최근에는 도시화와 토지이용 고도화에 따른 지구온난화, 엘니뇨 등의 기상이변으로 단시간 동안 특정지역에 집중되는 국지성 호우도 빈번히 발생하고 있다.

서울시의 경우 2006년 여름 중부지방에 내린 집중호우로 2002년 이후 처음으로 한강 시민공원 전 구간이 침수되고 주택 침수와 도로 유실로 많은 피해가 발생하였다. 잠수교의 차량통행이 전면 중단되고 올림픽대로 및 강변북로가 통제되는 등 서울시 곳곳에서 극심한 교통체증이 발생하였으며, 일부 지역에서는 초기통제 미흡으로 침수사실을 알지 못하는 운전자가 침수지역으로 진입하여 차량이 침수되거나 고립되는 상황도 발생하기도 하였다.

본 연구는, 집중호우에 의한 침수로 도로망이 유실될 경우 침수지역으로 진입하려는 차량을 통제/우회시켜 차량고립 등으로 인한 인명피해를 줄이는 한편, 주변지역의 교통혼잡을 완화해 침수의 1차적 피해(도로유실 등)가 2차 피해(차량 고립, 교통 혼잡)로 확산되는 것을 막기 위해 교통방재 개념을 적용한 교통관리 방안을 제안하였다. 즉, 본 연구는 재난관리 초점을 예방/대비에 중점을 두고 예측/최적화/시뮬레이션을 이용한 교통방재 개념에 근거하여 수해 시 피해 최소화 방안으로 우회교통정보 제공 및 교통류(交通流) 관리방안을 제시하였다. 특히 수해 시 그 피해규모가 클 것으로 예측되는 도시고속도로의 침수에 대비하여 진입램프에 차단기를 설치하는 방안을 제안하였다. 사례분석을 통해 폭우나 폭설로 인한 감속운행 시 교통상황에 적합한 연동신호운행을 할 경우 평균통행속도가 증가할 수 있음을 보여주었다. 또한 도시부 도로에서 일부구간 침수 시 사전 우회정보를 제공해 차량/운전자를 위험상황에서 안전하게 보호하고, 차량우회로 인한 네트워크 전체의 소통악화를 비상 신호운영(좌회전 규제 해제 등)을 통해 개선할 수 있음을 보여주었다.

## 1. 문제의 제기

### ○ 우리나라의 기후

- 우리나라는 몬순지대에 속하는 대륙성 기후권에 들어 있는 이유로 특히 하절기인 6~9월 사이 다량의 집중강우와 태풍이 발생하고 있으며, 최근에는 도시화와 토지이용 고도화에 따른 지구온난화, 엘니뇨 등의 기상이변으로 단시간 동안 특정지역에 집중되는 국지성 호우도 빈번히 발생하고 있음.
- 수해원인으로는 태풍, 호우, 폭풍 등이 있음. 최근 10년간의 원인별 우심피해 발생 현황을 살펴보면 태풍발생 횟수가 309건, 호우 469건, 태풍·호우 242건 등 총 1,216건이 발생하였으며, 재산피해액은 약 12조원에 이르렀음.

<표 1> 최근 10년간 원인별 우심피해발생(1993년~2002년)

| 원 인   | 발생횟수  | 피해액(천원)        | 평균피해액(천원)  |
|-------|-------|----------------|------------|
| 태 풍   | 309   | 5,822,906,117  | 18,844,356 |
| 호 우   | 469   | 3,607,927,160  | 7,692,808  |
| 호우·태풍 | 242   | 1,702,848,241  | 7,036,563  |
| 폭 풍 설 | 160   | 872,478,250    | 5,452,989  |
| 폭 풍   | 13    | 24,358,204     | 1,873,708  |
| 폭 풍 우 | 9     | 9,441,800      | 1,049,089  |
| 대 설   | 1     | 849,467        | 849,467    |
| 호우·폭풍 | 6     | 8,530,989      | 1,421,832  |
| 해수범람  | 7     | 19,037,768     | 2,719,681  |
| 합 계   | 1,216 | 12,068,377,996 | 9,924,653  |

주: 호우·태풍, 호우·폭풍은 두 가지 현상이 중복되는 경우임.

자료: 국립방재연구소, 2002, 「재해백서」,

### ○ 도로 침수 사례

- 2006년 여름 중부지방에 내린 집중호우로 인해 서울시는 2002년 이후 처음으로 한강 시민공원 전 구간이 침수되고, 주택 침수와 도로 유실로 많은 피

해가 발생하였음.

- 침수로 잠수교의 차량통행이 전면 중단되고 올림픽대로 및 강변북로가 통제 되는 등 서울시 곳곳에서 극심한 교통체증이 발생하였음.
- 또한, 일부 지역에서는 초기통제 미흡으로 침수사실을 알지 못하는 운전자가 침수지역으로 진입하여 차량이 침수되거나 고립되는 상황이 발생하기도 하였음.



[그림 1] 올림픽대로 침수



[그림 2] 차량 침수

## 2. 폭우/침수 시 국내 · 외 교통류 관리 사례

### ○ 일본의 관리 사례 (한신고속도로<sup>1)</sup>)

- 고속도로상의 터널내에서 침수상황이 발생하면 해당 터널에 대한 침수정보 제공과 함께 정보시스템의 경고 메시지 표출 및 터널내 방송시스템을 통해 대피를 유도하고 있음.

1) 한신고속도로공단 홈페이지(<http://www.hepc.go.jp/>) 자료 이용

- 상황발생지점 인접 진입램프에서는 관리공단 직원 및 경찰이 통제를 하고, 개폐식 차단기를 이용하여 원천적으로 차량진입을 금지하고 있음.



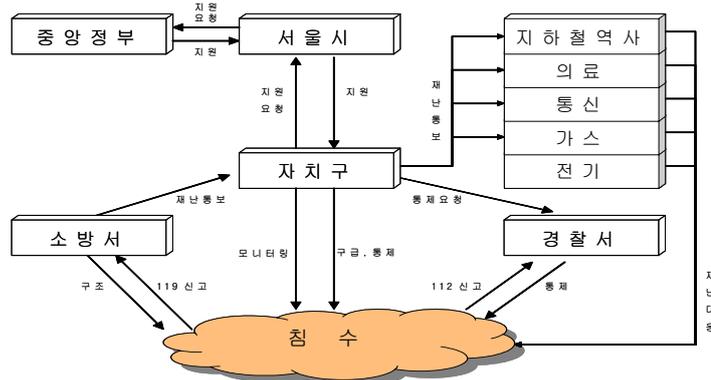
[그림 3] 원인 및 경고 메시지 표출



[그림 4] 개폐식 차단기 운영

○ 서울시 관리 사례

- 서울시의 경우 기상청의 강우정보와 CCTV를 이용하여 한강수위, 빗물펌프장, 침수가능지역을 상시 모니터링하고 있음.



[그림 5] 침수시 자치구 재난관리체계

- 침수사실이 확인되면 자치구에서는 경찰서 및 서울 시설안전관리공단에 통제요청과 함께 현장으로 공무원을 투입하여 상황판단 및 주민통제를 실시함.

### 3. 교통방재 개념

○ 방재의 발전방향

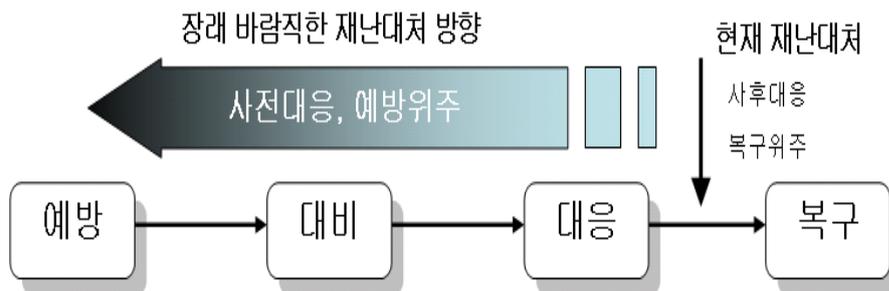
- 방재는 예방, 대비, 대응, 복구의 4단계로 실시되고 각 단계는 시간의 흐름에 따라 순차적으로 진행됨.
- 현재 우리나라의 방재는 주로 대응과 복구 위주로 시행되고 있어 복구비 비중이 선진국에 비해 월등히 높은 실정임. 이러한 관리체계로 인해 자원 및 인력 동원, 피해규모증가 등에서 재난 관리의 비효율성이 나타나고 있음.

<표 2> 전체 예산 중 피해복구비가 차지하는 비율 (우리나라/일본)

| 구 분  | 2000년 | 2001년 | 2002년 | 2003년 | 2004년 | 5년평균  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 우리나라 | 46.6% | 48.4% | 82.7% | 72.6% | 44.6% | 59.0% |
| 일 본  | 16.6% | 15.6% | 14.4% | 9.4%  | 8.8%  | 13.0% |

자료 : 국회 예산정책처, 2005.12, “재난관리 재정분석”, 「예산현안분석」 제10호.

- 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 예방과 대비 위주의 사전관리 기능을 중심으로 하는 재난관리체계가 요구되며 구체적으로는 ITS와 유비쿼터스(Ubiquitous) 기술을 활용한 사전예측 콘텐츠가 개발되어야 하겠고, 더 나아가 종합사전예측관리 시스템이 구축되어야 할 것임.



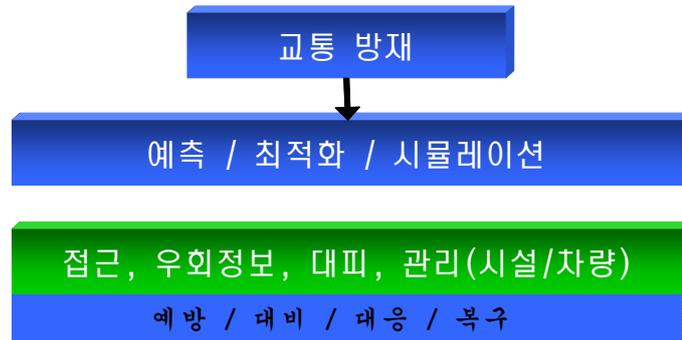
[그림 6] 장래 바람직한 재난대처 방향

○ 교통방재

- 인구 및 주거공간의 고밀도 현상과 도로/교량 등 기반시설에 의존하고 있는 도시의 특성으로 인해 한 지점이나 도로 구간에서 발생하는 재난의 피해가 교통망을 따라 주변지역으로 확산되고 피해규모가 커지는 일이 빈번히 발생함.
- 사후관리에 치중한 현 방재정책의 문제점이 드러나면서 사전관리에 중점을 둔 도시방재에 대한 관심이 증대되고 있음.
- 일반적으로 교통이 '사람이나 사물의 운반을 위하여 장소간의 거리를 극복하기 위한 행위'라고 정의되듯이 재난발생시 소방차의 현장접근과 인근지역 주민의 대피는 이러한 교통의 개념과 일치함. 또한, 교통에서의 예측/최적화/시뮬레이션 기법은 사전관리의 가능성을 제시해주고 있어 재난관리 분야에서 활용성이 높음.
- 교통방재는 예측/최적화/시뮬레이션을 통해 어떤 지점(Point) 및 도로(Line)에서 발생한 재난의 결과로 인한 1차적인 재난 피해를 줄이고 피해의 확산을 방지하여, 그 영향이 인근 지역으로 확산되어 2차 재난으로 확대되는 것을 막는 재난 방지 활동임<sup>2)</sup>.
- 이런 교통방재를 구성하는 요소에는 사전예측, 교통네트워크 효율의 최적화, 가상 시나리오의 시뮬레이션을 통한 접근로 및 우회정보 안내와 대피, 그리고 시설 및 차량의 관리를 들 수 있음.

---

2) 서울시정개발연구원, 2006, 「서울시 교통방재체계 구축방안 연구」.



[그림 7] 교통방재 개념 및 구성요소

#### 4. 폭우/침수 시 교통방재를 적용한 교통류 관리방안

○ 도시고속도로 침수 시 교통류 관리전략

- 2006년에 이례적인 폭우로 올림픽대로가 침수되어 차량들이 도로를 빠져나가지 못하고 U-turn하여 역주행하는 일이 발생하였음.



[그림 8] 역주행하는 차량들

- 고속도로는 도로 특성상 램프를 이용한 진·출입만이 가능하기 때문에 일단 도로에 진입한 차량은 진출램프를 통해서만 도로를 빠져나갈 수 있음.

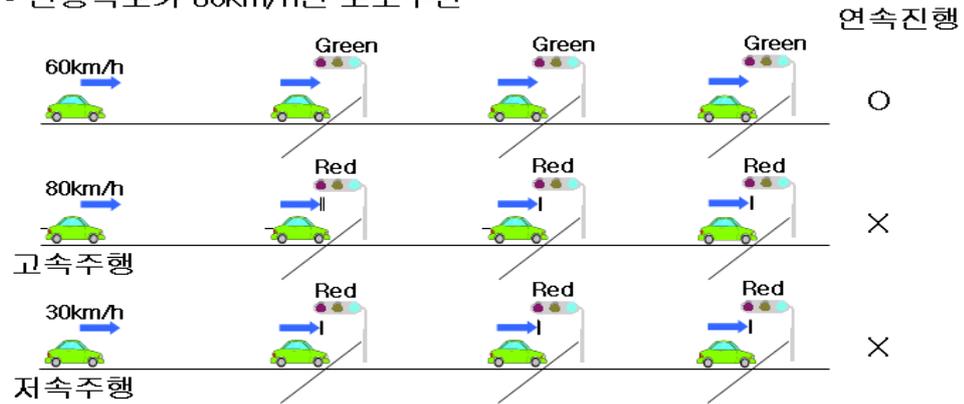
- 도시고속도로에서 침수와 같은 재난이 발생하면 도로전광판(VMS)을 통하여 운전자에게 1차적인 정보를 제공하고 인근 경찰서의 인력이 동원되어 접근하는 차량을 통제하고 있는 실정임.
  - 도시고속도로 상에서 재난이 발생하면 첫째 고속도로 상의 운전자에게 재난 발생 정보를 전달하고 둘째, 더 이상의 차량이 도로로 진입하는 것을 막아야 함.
  - 향후 텔레메틱스의 발달과 함께 라디오, 핸드폰 등을 통하여 운전자에게 실시간으로 정보전달이 가능하겠으나, 일본의 경우와 같이 램프에서의 원천적 차량 통제가 필요하며, 진입램프와 연결된 교차로에서는 램프 진입 현시의 제거 등 교통류 관리가 동반되어야 함.
- 폭우시 도시부 도로 연동신호제어 관리전략
- 현재 도심부 교차로에서 신호에 의한 지체를 감소시키기 위해 일정속도로 구간을 주행할 경우 하류부 교차로에서 녹색신호를 받아 정지하지 않고 주행할 수 있도록 각 신호기별로 연동 값을 부여하여 운영하고 있음.
  - 폭우시 빗물에 의한 시야 감소 및 제동거리 증가로 인하여 운전자는 저속주행을 하게 되고, 결국 저속주행을 하는 차량은 연속적인 녹색신호를 받지 못해 교차로에 정지하게 되어 교차로 지체와 통행시간이 증가하게 됨.
  - 현재 서울시에서는 80개 연동구간을 설정하고 평일/토요일/공휴일/특수일, 첨두/비첨두시를 구분한 TOD(Time of Day)-Table을 적용하여 연동신호를 운영<sup>3)</sup>하고 있지만 기존의 TOD-Table은 요일별/시간대별 교통량의 변화만을 고려하여 설계되고 폭우나 폭설 등의 환경적 요인을 고려하지 않아 외부영향으로 인한 차량의 저속주행 시 현실과 맞지 않게 됨.

---

3) 서울지방경찰청, 2001, 「2000년 신신호시스템 개선」.

- TOD-Table의 설계시 환경변화에 따른 운전자의 감속을 예측하고 예측된 속도에 맞는 TOD- Table을 사전 설계하여 상황에 맞게 적용해야 함.

• 연동속도가 60km/h인 도로구간



[그림 9] 연동구간의 차량속도에 따른 교통류 흐름

○ 도시부 도로 침수 시 우회경로 정보제공을 통한 교통류 관리전략

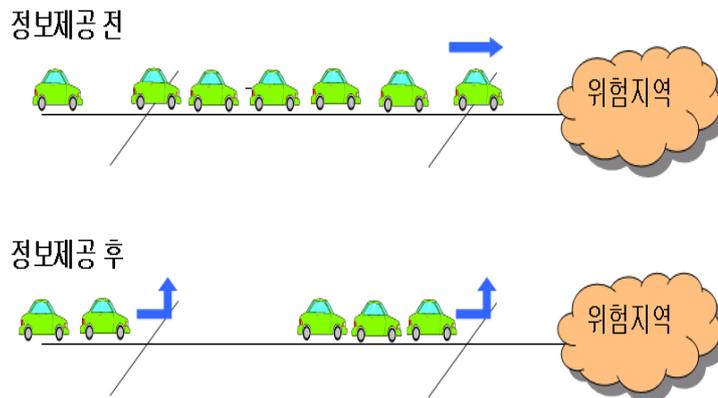
- 도로가 침수되었을 때 운전자가 전방의 침수사실을 인지하지 못한 채 재난 현장으로 진입했을 경우, 차량 침수의 재산피해뿐만 아니라 운전자의 고립으로 인명피해까지 유발시킬 가능성이 있음.
- 재난이 발생했을 경우 효과적으로 차량을 재난으로부터 멀어지게 할 수 있도록 네트워크상의 신호운영체계와 경로선택모형을 이용하여 최적경로를 산정하고 이러한 정보를 운전자에게 효과적으로 전달해야 함.
- 향후 유비쿼터스 기반의 텔레메틱스의 발전으로 교통상황뿐만 아니라 사건/사고와 같은 다양한 정보를 운전자가 제공받을 수 있는 환경이 구축될 것<sup>4)</sup>으로 판단됨.

4) 서울시정개발연구원, 2006, 「U-서울도래와 서울시 교통대응 전략」.



[그림 10] 텔레메틱스 기술동향

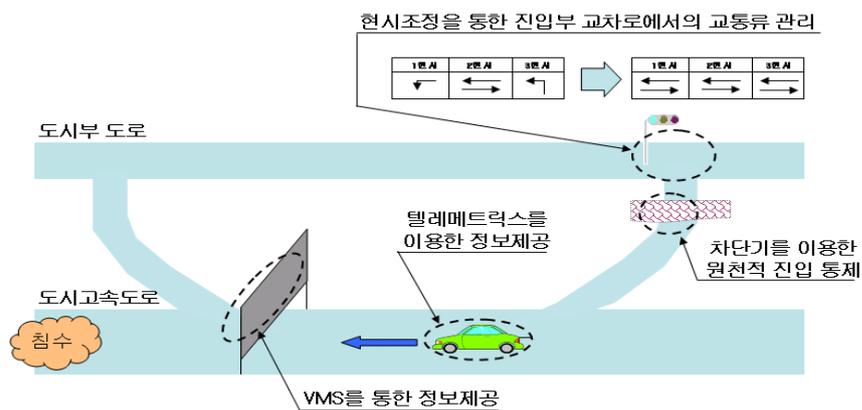
- 정보제공을 통하여 운전자를 위험으로부터 우회시키게 되면 주변 교통 네트워크는 침수지역에서 우회하는 차량들의 영향을 받게 되는데, 이러한 문제는 주변 네트워크의 신호시간 최적화나 연동신호 운영, 회전규제를 제거하는 방법 등으로 개선의 여지를 갖고 있음.



[그림 11] 우회정보 제공 전/후 차량의 위험도 노출

## 5. 사례 분석

- 도시고속도로 침수 시 교통류 관리
  - 관리자는 텔레메틱스, VMS 등 정보제공 매체를 이용하여 고속도로를 주행하는 운전자에게 재난발생 정보를 제공함으로써 운전자가 인접 진출램프로 우회하도록 유도함.
  - 진출램프 차단기를 작동하여 재난지역으로 진입하려는 차량을 원천적으로 봉쇄하며, 인근 신호교차로의 진입현시를 제거하는 방식의 신호를 운영함.



[그림 12] 도시고속도로 교통류 관리사례

- 폭우시 도시부 도로 연동신호제어 관리
  - 강남구 대치동의 동서 두 개축을 대상으로 현재 상황, 주행속도가 감소하였을 경우(시나리오 1), 주행속도가 감소하여 연동속도를 변경하였을 경우(시나리오 2)의 3가지 시나리오로 구분하고 시뮬레이션 분석툴인 CORSIM<sup>5)</sup>을 이용하여 비교 분석함.

5) Corridor Simulation(Corsim): 1980년대 미국 연방도로국의 지원으로 개발된 시뮬레이션 모형으로 도심가도와 고속도로의 차량과 운전자 행동특성 분석모형으로 사용되며, 다양한 효과척도(속도, 교통량, 밀도, 지체, Spill-Back, 대기길이 등)를 제공해 줌.

<표 3> 연동제어 시나리오

| 시나리오   | 상황  |
|--------|---|
| 현재 상황  | 연동속도가 60km/h인 도로구간                        |
| 시나리오 1 | 환경적 요인으로 주행속도 감소<br>(50, 40, 30km/h)      |
| 시나리오 2 | 주행속도가 감소(30km/h)하였을 때<br>연동속도를 30km/h로 변경 |

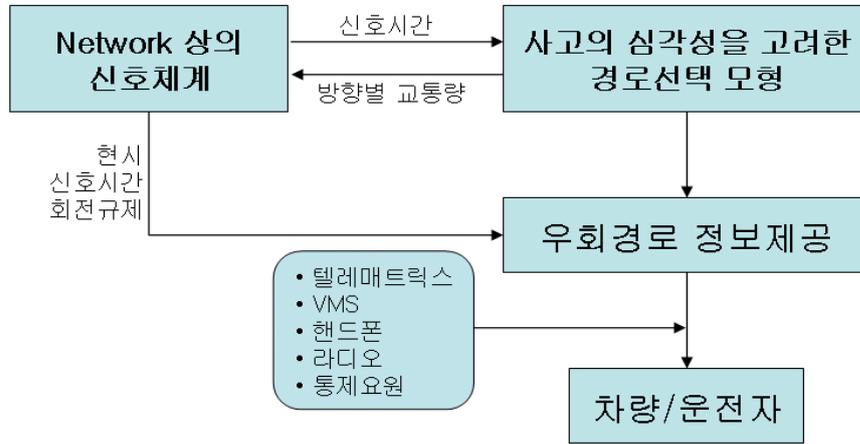
<표 4> 시나리오별 효과분석

| 연동 값 적용 | 주행속도<br>(km/h) | Control-Delay<br>(s/veh) | Queue-Delay<br>(s/veh) | Stop-Delay<br>(s/veh) | 평균통행속도<br>(km/h) |
|---------|----------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------|
| 현재 상황   | 60             | 3.55                     | 4.54                   | 3.99                  | 18.7             |
| 시나리오1   | 50             | 3.60                     | 4.58                   | 4.02                  | 17.4             |
|         | 40             | 3.90                     | 4.93                   | 4.34                  | 15.4             |
|         | 30             | 4.51                     | 5.56                   | 4.78                  | 12.6             |
| 시나리오2   | 30             | 4.00                     | 4.90                   | 4.14                  | 13.5             |

- 시나리오 1의 경우 차량이 경험하는 신호에 의한 지체(Delay)는 3.55초/대에서 4.51초/대로 27.0% 증가하였으며, 대기행렬 발생으로 인한 지체 역시 4.54초/대에서 5.56초/대로 22.5% 증가하는 것으로 나타났음.
- 시나리오 2의 경우 각각의 지체는 다시 감소하는 것으로 나타났고, 평균 통행속도도 다시 증가하는 것으로 분석되었음.
- 침수로 인한 경로 단절시 우회경로 정보제공을 통한 교통류 관리
  - 네트워크의 신호체계와 사고 심각성을 고려한 경로선택 모형을 동시에 고려할 수 있는 Route Guidance 알고리즘<sup>6)</sup>에 의해 선정된 우회경로는 텔레메

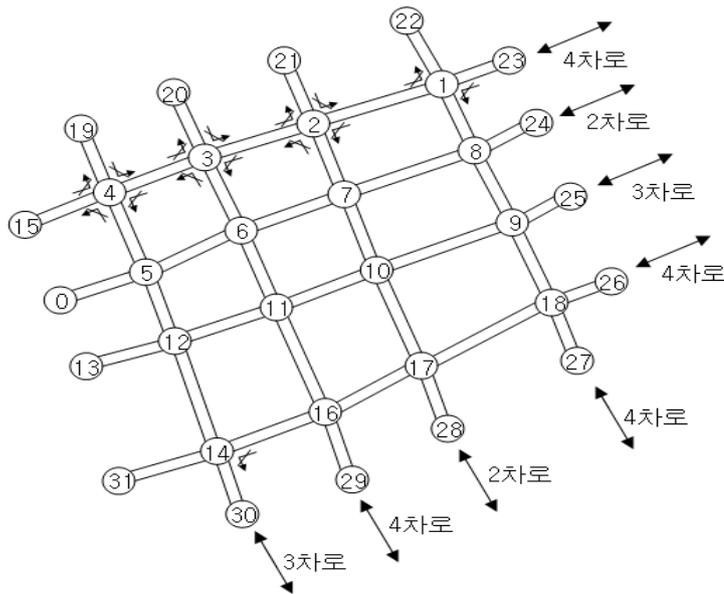
6) 변동부등식(Variational inequality)기반의 경로선택 모형을 이용함.

텍스, VMS, 핸드폰, 라디오 등을 통해 차량과 운전자에게 제공됨.



[그림 13] 정보제공을 통한 교통류 관리전략

- 분석 범위는 강남구 대치동 일대의 격자형의 도로를 대상으로 하였으며, 모든 교차로는 신호교차로로 운영되고 있고 ⑮↔④↔③↔②↔①↔㉓ 구간은 좌회전 금지로 운영 중에 있음.



[그림 14] 분석 네트워크

- 폭우시 상황에 대한 3가지 시나리오를 구성하여 분석함.

<표 5> 교통류 관리 시나리오

| 시나리오   | 상황   |
|--------|--|
| 현재 상황  | -  |
| 시나리오 1 | 집중호우로 저지대인 ⑪ ↔ ⑩구간이 침수되었으며, 운전자는 침수사실을 인지하지 못한 채 침수지역으로 접근함. |
| 시나리오 2 | ⑪ ↔ ⑩구간 침수시 운전자에게 침수사실을 알리고 Route Guidance 알고리즘에 의해 우회시킴.    |
| 시나리오 3 | 시나리오 2. + 테헤란로 축의 좌회전 규제를 해제하여 운전자로 하여금 경로선택의 폭을 확대함.        |

- 분석결과 현황에서 ⑪ ↔ ⑩구간을 통과하는 O/D 통행량은 총 3,451대로 나타났음. 해당구간에서 폭우로 인해 도로가 침수될 경우 이 차량들은 이러한 사실을 알지 못한 채 침수지역으로 진입하려고 시도하여 위험에 노출됨.

<표 6> 우회로 인한 네트워크 소통상태 비교

| 구 분              | 시나리오 1 | 시나리오 2 |
|------------------|--------|--------|
| 위험노출(대)          | 3,451  | 0      |
| 총 지체(s/veh)      | 8.36   | 11.31  |
| 총 주행거리(mile/veh) | 1.81   | 1.93   |
| 평균통행속도(mile/h)   | 12.6   | 9.7    |

- 시나리오 1에 비해 시나리오 2는 총 지체 및 주행거리가 증가하고 네트워크 평균통행속도가 감소하였으나 위험에 노출된 3,451대의 차량은 위험으로부터 안전할 수 있는 것으로 나타남.
- 침수구간이 최단경로인 운전자들은 우회정보를 제공받아 다른 경로를 이용하게 되면서 네트워크 전체의 지체 및 총 주행거리가 증가하고 평균 통행속

도가 감소하는 것으로 분석됨.

<표 7> 회전규제를 해제한 경우 소통상태 비교

| 구 분              | 시나리오 1 | 시나리오 2 | 시나리오 3 |
|------------------|--------|--------|--------|
| 총 지체(s/veh)      | 8.36   | 11.31  | 11.58  |
| 총 주행거리(mile/veh) | 1.81   | 1.93   | 1.85   |
| 평균통행속도(mile/h)   | 12.6   | 9.7    | 10.1   |

- 분석 네트워크의 ⑮↔④↔③↔②↔①↔⑭ 구간은 현재 좌회전 금지로 운영되고 있는 실정으로 침수 등 재난상황이 발생하였을 경우 전 방향 진행 가능한 비상 신호Mode로 전환/운영할 경우 운전자의 경로 선택폭이 넓어져 전체적인 네트워크 소통상태가 완화되는 것으로 판단됨.

<표 8> 시나리오별 효과분석

| 연동 값 적용 | 주행속도 (km/h) | Control-Delay (s/veh) | Queue-Delay (s/veh) | Stop-Delay (s/veh) | 평균통행속도 (km/h) |
|---------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------|
| 현재 상황   | 60          | 3.55                  | 4.54                | 3.99               | 18.7          |
| 시나리오 1  | 50          | 3.60                  | 4.58                | 4.02               | 17.4          |
|         | 40          | 3.90                  | 4.93                | 4.34               | 15.4          |
|         | 30          | 4.51                  | 5.56                | 4.78               | 12.6          |
| 시나리오 2  | 30          | 4.00                  | 4.90                | 4.14               | 13.5          |

신성일 | 서울시정개발연구원 연구위원  
02-2149-1099  
ssi@sdi.re.kr

도가 감소하는 것으로 분석됨.

<표 7> 회전규제를 해제한 경우 소통상태 비교

| 구 분              | 시나리오 1 | 시나리오 2 | 시나리오 3 |
|------------------|--------|--------|--------|
| 총 지체(s/veh)      | 8.36   | 11.31  | 11.58  |
| 총 주행거리(mile/veh) | 1.81   | 1.93   | 1.85   |
| 평균통행속도(mile/h)   | 12.6   | 9.7    | 10.1   |

- 분석 네트워크의 ⑮↔④↔③↔②↔①↔⑭ 구간은 현재 좌회전 금지로 운영되고 있는 실정으로 침수 등 재난상황이 발생하였을 경우 전 방향 진행 가능한 비상 신호Mode로 전환/운영할 경우 운전자의 경로 선택폭이 넓어져 전체적인 네트워크 소통상태가 완화되는 것으로 판단됨.

<표 8> 시나리오별 효과분석

| 연동 값 적용 | 주행속도 (km/h) | Control-Delay (s/veh) | Queue-Delay (s/veh) | Stop-Delay (s/veh) | 평균통행속도 (km/h) |
|---------|-------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------|
| 현재 상황   | 60          | 3.55                  | 4.54                | 3.99               | 18.7          |
| 시나리오 1  | 50          | 3.60                  | 4.58                | 4.02               | 17.4          |
|         | 40          | 3.90                  | 4.93                | 4.34               | 15.4          |
|         | 30          | 4.51                  | 5.56                | 4.78               | 12.6          |
| 시나리오 2  | 30          | 4.00                  | 4.90                | 4.14               | 13.5          |

신성일 | 서울시정개발연구원 연구위원  
02-2149-1099  
ssi@sdi.re.kr