

□ 論 文 □

# 도시고속도로 교통류 관리를 위한 시뮬레이션 모델의 개발

Development of Simulation Model to Evaluate and Manage Urban Freeways

**김 태 형**

(서울시정개발연구원 연구원)

**장 명 순**

(한양대학교 교통공학과 교수)

**이 광 훈**

(서울시정개발연구원 연구위원)

목 차

- I. 서론
  - II. 기존 모델의 검토
  - III. KUFRE 모델의 개발
    - 1. KUFRE 모델 개발의 배경
    - 2. KUFRE 모델의 개요
    - 3. KUFRE 모델의 정립
    - 4. KUFRE 모델의 계산과정
  - IV. KUFRE 모델의 검증
    - 1. 정체의 전과과정
    - 2. 정체의 완화과정
    - 3. 합류구간의 정체진행과정
  - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

요 약

선진 외국의 대도시에서는 도시고속도로의 원활한 교통류 흐름을 유지하기 위하여 다양한 교통류 관리기법을 도입·시행하고 있으며, 운영전략의 개발과 교통류 관리기법의 평가를 위한 다양한 모델을 개발·적용하고 있다. 서울시 도시고속도로의 경우에는 외국 도시고속도로의 교통류와 상이한 특성이 많아 기존에 개발된 모델의 적용이 매우 어려운 실정이며, 현재까지 실제 교통류 관리를 위한 목적으로 개발되어 적용되는 모델은 없는 실정이다. 따라서 향후 서울시 도시고속도로 교통관리시스템의 효율적인 운영을 위하여 교통류 관리기법을 선정하고, 각 기법별로 교통류 소통상황을 예측할 수 있는 기능을 갖춘 국내 실정에 맞는 도시고속도로 교통류 예측모델의 개발이 반드시 필요하다.

본 연구의 목적은 도시고속도로를 대상으로 교통류의 현상을 잘 표현하며, 도시고속도로 교통류 관리를 위한 기법의 개발 및 평가가 가능한 시뮬레이션 모델(KUFRE: Korea Urban Freeway Simulation Model)을 개발하는 것이 목적이다.

## I. 서론

서울시의 경우 2011년까지 적극적인 도시고속도로 건설계획을 추진할 계획이며, 2003년에는 총 218.4km 연장의 도시고속도로망을 갖추게 된다. 하지만 아직도 도시고속도로 건설계획에는 교통관리를 위한 아무런 조치도 취해지고 있지 않으며, 이미 개통되어 운행되고 있는 도시고속도로의 경우에도 교통관리 및 운영에 있어서는 초보단계 수준이다.

도시고속도로는 도시교통의 총아로 선진 외국의 대도시에서는 일반간선도로와는 별도로 도시고속도로만을 관리하는 교통관리시스템을 도입·운영하고 있다. 또한 도시고속도로의 원활한 교통류 흐름을 유지하기 위하여 다양한 교통류 관리기법을 도입·시행하고 있으며, 운영전략의 개발과 교통류 관리기법의 평가를 위한 다양한 모델을 개발·적용하고 있다.

서울시 도시고속도로는 최근 많은 연구들을 통해 밝혀진 것처럼, 원활한 교통류 흐름을 저해하는 램프접속 및 엇갈림구간이 전체 구간의 약 63%를 차지하고 있으며, 특히 가감속차선의 부족, 분류부 진출램프 용량부족 등 부적절한 기하구조 및 램프운영미숙으로 인하여 합·분류부 구간에 만성적인 병목지점을 형성하고 있다. 특히 램프구간내 차로별 교통량 분담율 및 속도는 차량들간의 엇갈림 및 차로변경 등에 의해 변화가 심한 것으로 나타나고 있다. 또한 이와 같은 지역적 특성 및 운전자 운전행태의 차이 등에 따라 일정한 도로구간의 교통류를 설명하는 교통량-속도 관계가 외국의 그것과는 다른 특징들을 갖고 있는 등 외국 도시고속도로의 교통류와 상이한 특성이 많아 기존에 개발된 모델의 적용이 어려운 실정이며, 현재까지 실제 교통류 관리를 위한 목적으로 개발되어 적용되는 모델은 없는 실정이다. 따라서 향후

서울시 도시고속도로 교통관리시스템의 효율적인 운영을 위하여 교통류 관리기법을 선정하고, 각 기법별로 교통류 소통상황을 예측할 수 있는 기능을 갖춘 국내 실정에 맞는 도시고속도로 교통류 예측모델의 개발이 반드시 필요하다.

따라서 본 연구는 도시고속도로를 대상으로 교통류의 현상을 잘 표현하며, 도시고속도로 교통류 관리를 위한 기법의 개발 및 평가가 가능한 시뮬레이션 모델(KUFRE : Korea Urban Freeway Simulation Model)을 개발하는 것이 목적이다.

## II. 기존모델의 검토

시뮬레이션이란 시스템을 수학적이고 논리적인 모델로 설계하고, 컴퓨터를 이용하여 모델을 통해 결과를 예측·평가·시험하는 과정이다. 따라서 실시스템에 대한 실질적인 구축없이도 시뮬레이션을 이용하여 여러 대안들을 평가할 수 있으며, 비용이 많이 들고 실제로 실험을 하기에 위험한 운영시스템인 경우에도 시뮬레이션을 이용해 쉽게 결과를 예측해 볼 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 이용하여 교통상황의 사전/사후 검증과 각종 교통규제(일방통행, 버스전용차로, 가변차선제, 램프미터링 등)의 적용, 교차로 형태 및 도로망의 개선, 교통신호제어 시스템의 운영 및 평가 등을 교통류 이론을 기초로 한 시뮬레이션을 통해 간접적으로 상황을 묘사하고 평가할 수 있다.

교통류 시뮬레이션 모델은 1950년대 컴퓨터의 탄생과 함께 부분적으로 연구가 진행된 후, 계속해서 넓은 분야에 걸쳐 일반적이고 구체적인 교통 Simulator들이 만들어지고 있다. 교통류 시뮬레이션 모델은 차량군을 다루는 거시적 모델과 개별차량의 한대 한대를 다루는 미시적

모델, 그리고 통행배분과 교통류 시뮬레이션을 동시에 수행할 수 있는 통합모델 등으로 구분할 수 있다.

교통류 시뮬레이션 모델은 MACK-FRE-FLO-FRECON series, INTRAS type, TRAF-FICQ, FREQ series, CORQ-CORCON series, SCOT family, TRAFLO, DYNEV, CONTRAM, SATURN, MICRO-ASSIGNMENT type 등 많은 모델이 존재하고 있다.

고속도로 교통류 시뮬레이션 모델은 대부분 거시적 모델로 고속도로의 교통류 특성을 이용하여 고속도로 기하구조 및 교통조건하의 교통상황을 묘사하는 기능을 가진 프로그램으로 고속도로 시뮬레이션 모델은 주로 FREFLO, FRECON, CORQ, FREQ 모델에 의해 특정지워지고 있다. 다음 <표 1>은 위에서 언급되어진 교통류 시뮬레이션 모델의 각각의 특징을 간략적으로 기술한 것이다.

기존 모델이 서울시 도시고속도로 교통류를 재현함에 있어 갖는 모델 적용의 한계성을 최근 널리 사용되고 있는 FREQ, FREFLO 모델을 중심으로 기술하면 다음과 같다.

FREQ 모델은 손으로 계산하기 힘든 넓은 지역 및 다수의 대안을 평가하는데 L.P.를 사용하기 때문에 계산과 최적해를 찾는 데 용이하며, 독립구간보다는 연속구간의 IC분석에 용이하다. 또한 램프미터링, 다인승전용차로 평가 등 다양한 교통류 관리방안의 평가에 용이하며, 램프상의 합/분류 및 위빙하는 교통류를 HCM식에 근거하여 잘 표현하고 있으며, 최적화(Optimization)가 가능하다. 그러나 합류구간의 용량이 합분류되는 교통량과 기하구조에 따라 변해야 하나 아직 고려가 되지 않으며, 고정된 수요(Static Demand)와 정적인 상태(Steady State)를 가정하기 때문에 현실과 많은 괴리가 발생한다. 또한 HCM방식으로 자료를 결정적(Deterministic)으로

입력시켜 운전자의 행태를 표현하는데는 한계가 있으며(단순히 합류비나 분류비 적용), 15분 정도의 큰 시간간격으로 시뮬레이션 하므로 혼잡이나 교통사고 등과 관련되는 동적현상을 정확하게 설명하기는 힘들며, 짧은 시간간격으로 급격하게 변하는 교통류를 잘 재현하지 못하고 있다. 그리고 공간적인 범위가 제한되어(길이는 15mile이하, 합/분류램프 38개 이하) 거시적인 지역의 적용시 한계가 있다.

FREFLO 모델은 이전에 개발된 고속도로 거시적 교통류 모델인 MACK에 기초를 두고 있어 수십초단위의 짧은 시간간격을 사용하므로 사고 및 기하구조에 의해 급격하게 발생하는 혼잡상황과 교통류의 급격한 변화를 정확하게 시뮬레이션 하는 것이 가능하다. 또한 유체식에 의한 교통류 이동상황을 재현하는 기능이 뛰어나다. 그러나 대부분의 거시적 모델처럼 운전자의 목적지에 대한 정보의 결여로 분류부에서 단순히 정해진 비율만큼의 본선교통량을 진출시킴으로써 분류부에서의 혼잡으로 인한 영향을 재현하는데 한계가 있으며, 운전자 행태를 고려하지 못하는 문제가 있다. 또한 램프미터링, 다인승전용차로 실시, 차선이용제어, 유고관리 평가 등 다양한 도시고속도로 교통류 관리방안을 평가하는데 한계가 있다.

### III. KUFRE 모델의 개발

#### 1. KUFRE 모델 개발의 배경

도시고속도로 정체의 주요인은 본선과 결합하는 유·출입구에 의한 영향이 가장 높다. 서울시 도시고속도로의 경우 유·출입 램프의 간격이 매우 짧고, 많아 교통류의 안정된 흐름을 방해하며, 잦은 차선변경의 원인을 제공함으로써

〈표 1〉 교통류 시뮬레이션 모델의 특징

모델명	통행배정		교통류		배경	모델형태	모델목적
	기법	기타	고속도로	간선도로			
FREFLO	-	-	보존식, 동적인 속도-밀도관계 (유체흐름)	-	MACK	결정적 거시적	고속도로 (한방향)
FRECON	램프미터링에 따른분산	-	FREFLO의 변형	간단한 여행시간	FREFLO	거시적	고속도로 (한방향)
INTRAS (FOMIS)	-	-	시간대별 교통량 시뮬레이션	-	NETSIM	확률적 미시적	고속도로 사고연구
TRAFFICQ	-	사용자 특별경로	-	개체:자동차, 보행인	Original	미시적	도시가로망
FREQ	램프 대기행렬의 분산	재선택을 위한 소그룹의 고려	HCM (속도-교통량)	간단한 여행시간	Original	거시적	고속도로 평가: 차선 우선권
CORQ	점진적인 반복	대기차량의 재배정	단계별함수, 여행시간	내포된 여행시간 정산	Original	거시적	고속도로의 대기행렬
CORCON	점진적인 반복+교통량 분산	-	단계별함수, 여행시간	내포된 여행시간 정산	CORQ	거시적	고속도로의 대기행렬
SCOT	UTCS-1: 회전 DAFT : 최단경로	-	DAFT, 차량군의 속도-밀도	UTCS-1 : 개개인의 자동차	DAFT, UTCS-1	거시적 미시적	교통축의 실시간 조절전략 테스트
TRAFLO	TRAFFIC	계획지향적인 비대기행렬	FREFLO	I: NETSIM II: TRANSYT III: WESTER	FREFLO, NETSIM, TRANSYT	거시적 미시적	모든 교통망
DYNEV	TRAFFIC	계획지향적인 비대기행렬	Flow Histogram (NETFLO II)	Flow Histogram (NETFLO II)	TRAFLO	Mesoscopic	위험에서의 구출
CONTRAM	점진적인 반복	전피크시의 재반복(경로)	-	Delay = $f(G+C,C,V+C)$ +대기지체군	Original	Mesoscopic	도시간선도로와 고속도로
SATURN	All or nothing	-	-	Cyclic file : $TT+BnXn+QT$	Original	Mesoscopic	도시간선도로와 고속도로
MICRO- ASSIGNMENT	-	-	-	-	전통적인 교통계획	거시적	-

주) M.VANAERDE, S. YAGAR, A.UGGE, AND E. R. CASE, "A Review of Candidate Freeway-Arterial Corridor Traffic Models", TRR1132

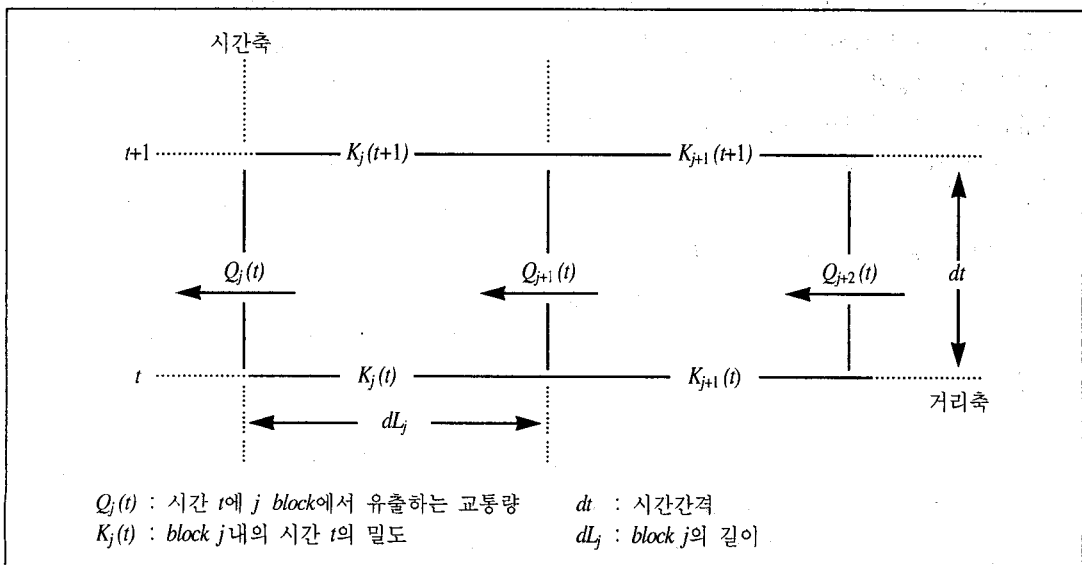
정체의 가중을 더하는 것으로 분석된다. 따라서 도시고속도로의 일반적 형태인 짧은 간격의 유·출입구에 의한 영향으로 급격하게 변화하는 교통류의 현상을 잘 반영하며, 합·분류부 구간을 잘 표현해 줄 수 있는 모델의 개발이 필요하며, 과포화시 대기행렬이나 충격파(shockwave)의 전개과정, 합·분류부 구간에서의 교통류 현상의 재현과 램프미터링, 다인승전용차로 실시, 차선이용제어, 유고관리 평가 등 도시고속도로 교통혼잡을 개선시킬 수 있는 교통류 관리기법의 개발 및 평가가 가능한 모델의 개발이 요구된다.

- 따라서 KUFRE 모델이 갖추어야 할 시뮬레이션 모델의 기본적인 특성은 다음과 같다.
- 첫째, 연속교통류가 재현될 수 있어야 한다.
  - 둘째, 교통밀도의 전파를 충실히 재현할 수 있어야 한다.
  - 셋째, 유체 보존식의 적용과 교통량-밀도곡선(Q-K)식의 차별 적용이 가능해야 한다.
  - 넷째, 시간간격은 급변하는 교통류 흐름을 재현할 수 있도록 5~10초의 짧은 간격으로

- 시뮬레이션을 실행할 수 있어야 한다.
- 다섯째, 합·분류 구간에서의 교통재현 능력이 높아야 한다.
- 여섯째, 램프미터링, 다인승전용차선 실시, 차선이용제어, 유고관리 평가 등 교통류 관리기법의 개발 및 평가가 가능해야 한다.

## 2. KUFRE 모델의 개요

교통류의 표현은 柔原雅夫 등에 의해 개발된 블럭밀도법(Block Density Method)을 채택하였다. 블럭밀도법(Block Density Method)이란 연속교통류(도시고속도로)를 일정한 여러 구간의 블럭으로 구분하고, 각 블럭의 밀도와 최하류단 블럭의 통과교통량을 이용하여 시간간격(dt)마다 각 블럭의 밀도 및 통과교통량을 구하는 방법으로 <그림 1>에서 t시간에서 j블럭의 유출교통량( $Q_j(t)$ )과 밀도( $K_j(t)$ )를 안다고 할 때, t+1시간에서의 j블럭의 밀도( $K_j(t+1)$ )와 j블럭에의 유입교통량( $Q_{j+1}(t)$ )을 순차적으로 구하는 것이다.



<그림 1> 블럭밀도법(Block Density Method)의 개요

구체적인 계산과정은 block j의 교통량 연속 조건을 유체보존의 법칙에 의거하여 식 ①과 같이 표현하고

$$K_j(t+1) \cdot dL_j = K_j(t) \cdot dL_j + Q_{j+1}(t) \cdot dt - Q_j(t) \cdot dt \quad \text{①}$$

$Q_{j+1}(t)$ 는 Block j에서 수용가능교통량과 j+1에서 수요교통량을 비교하여 작은 값을  $Q_{j+1}(t)$ 로 선택하게 되는데, Block j+1에서의 수요교통량과 Block j에서의 수용가능교통량은 다음 수식에 의해 산출될 수 있다.

Block j+1에서의 수요교통량은 j+1블럭에서 j블럭으로 이동하고자 하는 순수한 교통수요(Demand)로 식 ②에 의거하여 결정된다.

$$Q_{j+1}(t) = K_{j+1}(t) \cdot \frac{dL_{j+1}}{dt} \quad \text{②}$$

또, Block j에서의 수용가능교통량은 블럭 j에서 받아들일 수 있는 교통용량(Capacity)으로 도시고속도로의 교통류 특성 분석결과  $Q=U \cdot K$ (Q:교통량, U:속도, K:밀도)의 관계가 정상류 구간과 강제류 구간이 차이를 보임에 따라 식 ③과 식 ④로 각각 나누어 적용하였다.

$$Q_{j+1}(t) = \text{Free Speed} \cdot K_j(t+1) \text{EXP}^{a \cdot K_j(t+1)} \\ \text{: 강제류 구간 ③}$$

$$Q_{j+1}(t) = \text{Free Speed} \cdot K_j(t+1)(1-b \cdot K_j(t+1)) \\ \text{: 정상류 구간 ④}$$

$K_j(t+1)$ 과  $Q_{j+1}(t)$ 는 식 ①과 ②, 또 식 ①과 ③, ④를 연립방정식으로 풀어 정해지게 되며, 블럭을 하나씩 상류측으로 이동시키면서 블럭

j+1에 대하여 똑같은 계산을 하게 된다.

### 3. KUFRE 모델의 정립

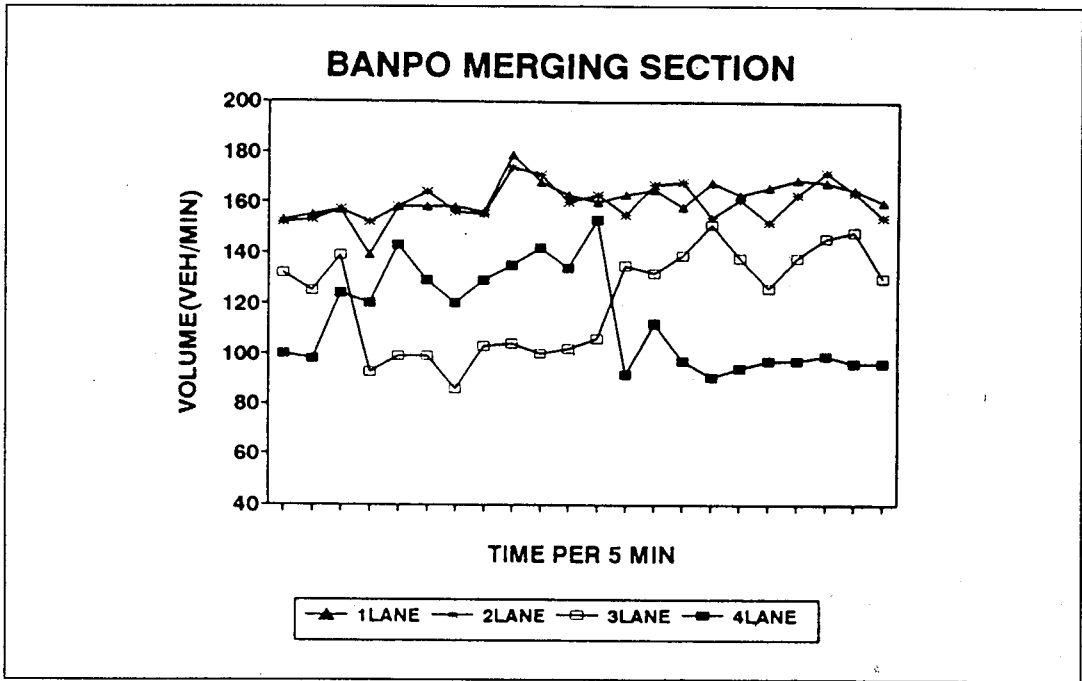
모델의 정립을 위하여 서울시의 대표적인 도시고속도로인 올림픽대로를 대상으로 교통류 특성에 대한 현장조사와 기초 현장자료를 수집하여 모델에 반영하였다.

#### 1) 차선군의 분류

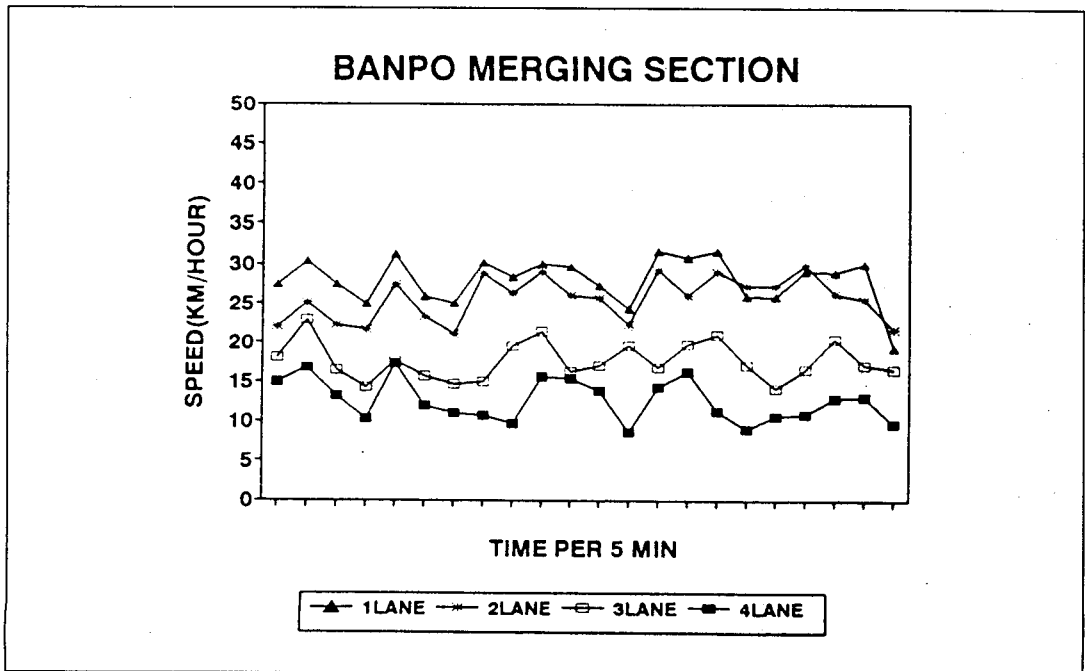
합류부 지점의 교통류 특성을 분석하기 위하여 반포대교남단 유입램프 구간의 차선별 통과교통량 및 속도의 변화를 측정하였다. <그림 2>와 <그림 3>을 통하여 알 수 있듯이 합류되는 유입교통량으로 인한 교통량의 감소는 차선별로 다른 특성을 나타내고 있다. 즉, 내측차선(1, 2차선)은 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있으며, 외측차선(3, 4차선)은 유입하는 교통량으로 인한 교통와해현상(Breakdown)으로 많은 교통량의 감소를 나타내고 있다.

다음 <표 2>는 합류부 구간의 본선 내측차선과 외측차선이 서로 다른 교통류의 특성을 나타내고 있음을 통계 Software인 SAS를 이용하여 통계학적 분석방법(T-검정)으로 분석한 결과이다. 분석된 결과를 보면, 두 차선군(내측, 외측)의 분산(Variiances)은 F-검정을 통하여 유의수준 0.05에서 서로 동일한 것으로 나타났으며, 두 차선군의 분산이 같을 경우에 자유도 108.0의 분포에서 T값 19.8817보다 큰 확률이 0.0000이므로 유의수준 0.05보다 작으므로, 두 차선군의 평균값이 같지 않다는 결론이 나왔다.

따라서 합류부 구간의 분석시 내측차선(1, 2차선)과 외측차선(3, 4차선)의 두 차선군으로 분류하고, 합류부 접속차선을 외측차선(3, 4차선)으로 가정한다.



〈그림 2〉 반포대교남단 유입램프 구간의 차선별 통과교통량의 변화



〈그림 3〉 반포대교남단 유입램프 구간의 차선별 속도의 변화

<표 2> 차선군별 특성 비교 통계검정 (TTEST)

<u>TTEST PROCEDURE</u>						
Variable : VOLUME						
LANE	N	Mean	Std Dev	Std Error	Minimum	Maximum
1, 2	55	128.6181818	8.48198725	1.14371093	106.0000000	150.0000000
3, 4	55	93.9818182	9.74582704	1.31412705	70.0000000	114.0000000
Variances	T	DF	Prob> T			
Unequal	19.8817	106.0	0.0001			
Equal	19.8817	108.0	0.0000			
For H0 : Variances are equal, F' = 1.32    DF = (54,54)    Prob>F' = 0.3104						

2) 합류부의 표현

합류부 구간은 기본구간(본선)과는 달리 유입하는 교통류의 영향으로 인하여 본선구간 교통류의 교통와해현상(Breakdown)이 뚜렷이 나타나며, 차선별로 영향을 받는 정도가 다르고, 본선구간과는 다른 교통류의 특성을 나타낸다.

따라서, 합류부의 표현시 램프 유입교통량의 영향을 받는 접속차선은 위의 1)의 결과에 의거하여 외측차선(3, 4차선) 2개차선으로 지정하였으며, 기본적으로 본선구간은 4차선으로 가정하였다.

(1) 합류부 용량제약조건

접속차선(3, 4차선)의 교통량과 램프 유입교통량의 합은 합류차선의 용량을 넘지 못한다는 조건이다.

$$V_{34} + V_r \leq C_m$$

(2) 균형제약조건

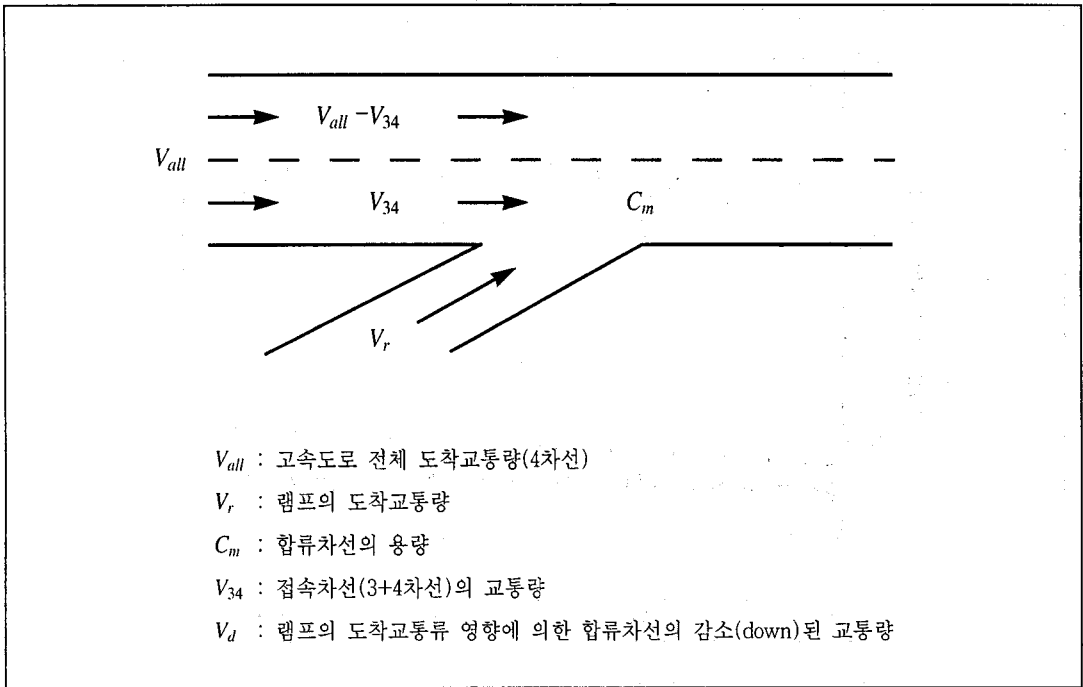
본선구간 각 차선의 교통량의 동일성을 가정한 것이다. 즉 합류부 구간으로 접근할 때 램프 유입교통량의 영향을 받는 접속차선(3, 4차선)과 영향을 받지 않는 내측차선(1, 2차선)은 동일한 교통량의 비율로 나누어 진행된다.

$$V_{34} \leq \frac{V_{all}}{2}$$

(3) 접속차선의 마찰감소교통량

본선구간 접속차선(3, 4차선)의 교통량은 유입하는 램프교통량과 본선 도착교통량의 정도에 따라 그 양이 정해진다. 또한 유입하는 램





〈그림 4〉 합류부의 표현

프교통량의 정도에 따라 접속차선의 마찰감소 교통량의 양은 달라지며, 본선도착교통량과 램프교통량의 함수로 정의된다.

$$V_d = V_{12} - V_{34} = f(V_{all}, V_r)$$

### 3) 접속차선의 마찰감소교통량 관계식 추정

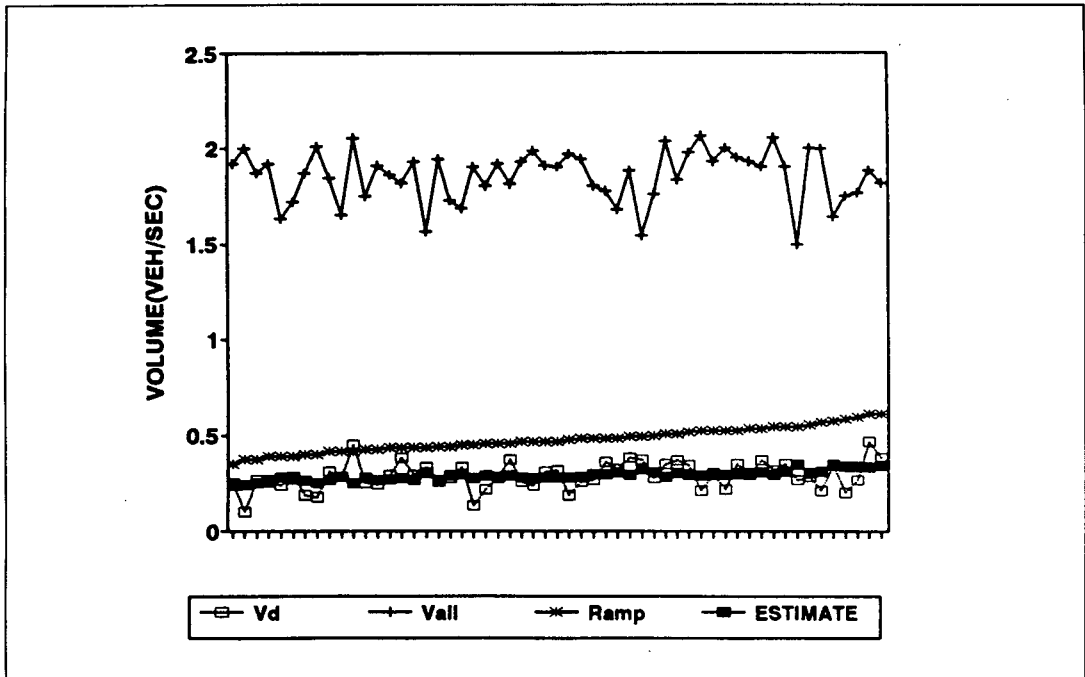
접속차선(외측차선)의 교통량은 유입하는 램프교통량과 본선 도착교통량의 정도에 따라 그 양이 정해진다. 또한 유입하는 램프교통량이 증가할수록 접속차선이 받는 영향은 점점 커져서 접속차선의 마찰감소교통량은 점점 증가한다. 여기서 마찰감소교통량이란 유입램프 교통량의 영향을 거의 받지 않는 내측차선(1, 2차선)의 통과교통량에서 유입램프 교통량의 영향을 극심하게 받는 외측차선(3, 4차선)의 통과

교통량을 뺀 값으로 정의하며, 본선 도착교통량과 램프교통량의 함수로 정의된다.

$$V_d = V_{12} - V_{34} = f(V_{all}, V_r)$$

〈그림 5〉는 반포대교남단 합류부 구간의 차선별 교통량과 램프교통량을 조사하여 접속차선의 마찰감소교통량을 통계 Software인 SAS의 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 이용하여 예측한 것이다. 즉, 램프교통량이 증가함에 따라 램프교통량의 영향으로 인해 본선의 도착교통량은 다소 감소하며, 마찰감소교통량은 상대적으로 증가하는 것으로 나타난다.

$$Estimated V_d = 0.29 + 0.3687 V_r - 0.094 V_{all}$$



〈그림 5〉 접속차선의 마찰감소교통량 예측식

4) 합류부 교통용량 제약 ( $C_m$ )

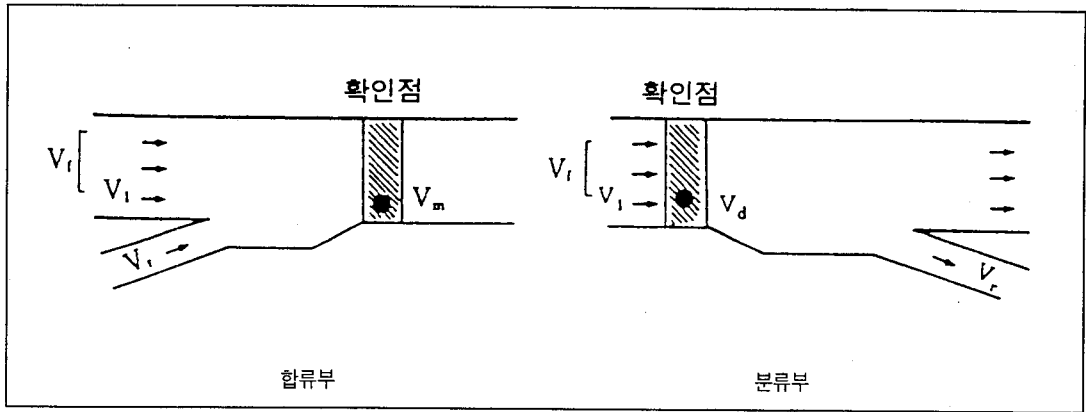
도로용량편람('92 건설부)에서는 합류부 교통용량에 대해서 고속도로 기본구간의 용량과는 별개의 최대서비스 교통량으로 제시하고 있으며, 합류가 실시되는 지점의 접속차선의 확인점 (Check Point)에서의 교통량으로 서비스수준을 판정하는 것으로 제시하고 있다.

진입램프 접속부의 용량산정을 위한 확인점을 진입직후 하류부의 접속차선에 둘 때, 용량은 합류직후 접속차선의 최대교통량으로 정의할 수 있으며, 그 값은 2,200pcphpl로 고속도로 기본구간의 값과 같다. 램프접속부의 서비스 수준기준은 운행특성상 고속도로 기본구간보다 떨어진다.

〈표 3〉 합류부와 분류부의 최대서비스 교통량 ( $C_m = 2V_m$ )

(단위 : 승용차/시/차선)

서비스수준	合流部	分流部	高速道路 기본구간
A	≥ 650	≥ 700	≥ 750
B	≥ 1,050	≥ 1,100	≥ 1,150
C	≥ 1,450	≥ 1,500	≥ 1,550
D	≥ 1,800	≥ 1,850	≥ 1,900
E	≥ 2,200	≥ 2,200	≥ 2,200
F	-	-	-

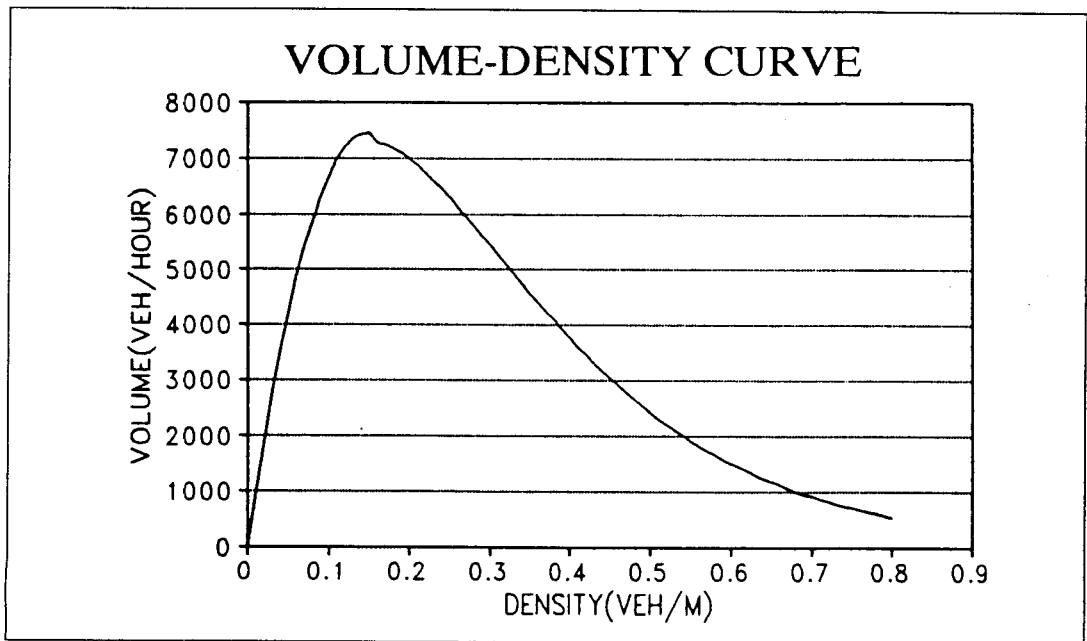


〈그림 6〉 연결로 접속부의 분석을 위한 확인점(Check Point) 교통량

5) 교통류 관계식의 정립

교통류 관계식을 적용하기 위하여 올림픽대로 노량대교 기본구간 4차선의 현장자료를 수집하여 시뮬레이션 모델에 적용하였다. 〈그림 7〉은 비디오 촬영을 통해 수집된 기본구간 4차선의 실제 통과교통량 및 비디오화면 판독을 통

해 수집된 밀도를 이용하여 교통량-밀도 곡선(Q-K Curve)식을 예측한 것이다. 현장데이터의 분석결과, 교통량-밀도곡선의 관계가 정상류 구간과 강제류 구간이 차이를 보임에 따라, 교통량과 밀도의 급격한 변화를 보이는 지점을 임계지점으로 가정하여, 임계밀도 이하의 정상



〈그림 7〉 교통량-밀도곡선(Q-K Curve) 예측식

류 구간에서는 Greenshields가 제안한 교통량-밀도 곡선식을 사용하였고, 임계밀도 이상의 강제류 구간에서는 Underwood가 제안한 교통량-밀도 곡선식을 통계 Software인 SAS의 non-linear 모델로 예측한 것이다.

$$Q = 28.2 * K * (1 - \frac{K}{0.29}) \quad (\text{정상류 구간})$$

$$Q = 36.2 * K * \text{EXP}(-6.57 * K) \quad (\text{강제류 구간})$$

#### 4. KUFRE 모델의 계산과정

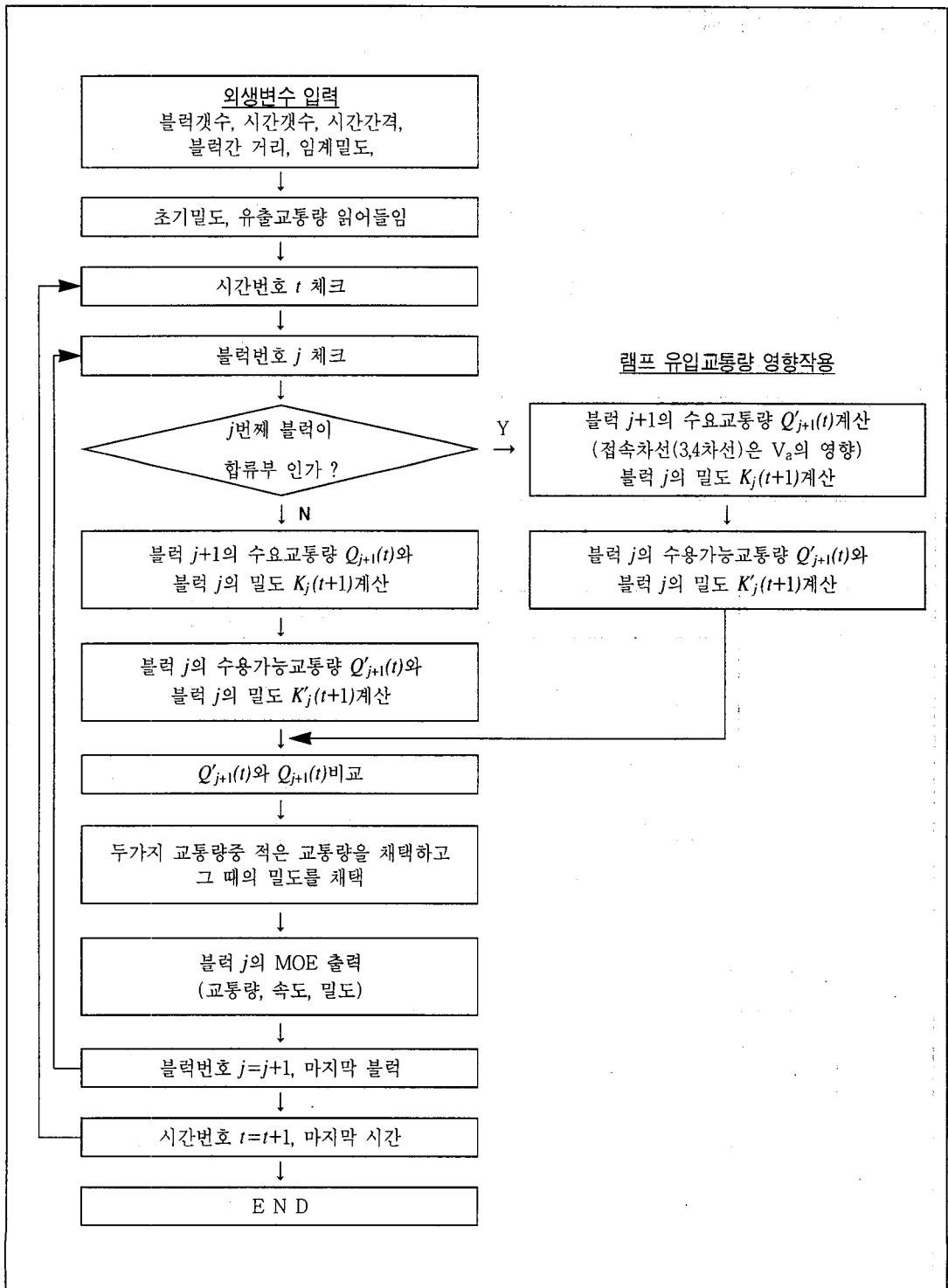
KUFRE 모델은 교통량 연속조건과 Q-K 곡선식에 의해서 시간간격( $d$ )마다 각 블럭의 밀도와 통과교통량이 계산되어 지는 모델이다. 따라서 각 블럭의 초기밀도와 최하류단 블럭의 유출교통량의 정확한 자료의 수집이 중요하며, 교통류의 흐름을 특정지워주는 Q-K 곡선식의 정확한 예측이 필요하다.

모델의 세부적인 계산과정은 다음과 같다.

- step 0 : 블럭갯수(Block Num.), 시간갯수(Time Num.), 시간간격( $d_t$ ), 블럭간 거리( $d_L$ ), 임계밀도( $K_m$ ) 등의 외생변수들을 입력한다.
- step 1 : 초기밀도, 최하류단 유출교통량을 읽어 들인다.
- step 2 : 시간번호와 블럭번호를 체크하고, 블럭이 본선구간인지, 합류구간 인지 판단하여 합류구간이면 step 3과 step 4로 가고, 비합류구간이면 step 5로 간다.
- step 3 : 램프 유입교통량의 영향으로 접속차선(3, 4차선)은 마찰감소교통량 관계식( $V_m$ )의 영향을 받아 블럭 j+1의 수요교통량 계산시 마찰감소교통량 만큼의 교통량 저해현상이 나타난다.

또한 블럭 j의 밀도 계산시 램프 유입교통량이 포함된 관계식으로 부터 도출된다.

- step 4 : 램프 유입교통량이 포함된 상태에서 교통량 연속조건과 블럭 j에서의 수용가능교통량 관계식을 통하여 블럭 j의 수용가능교통량과 그 때의 블럭 j의 밀도를 구한다. 수용가능교통량은 Q-K 곡선식에 의해 결정되어지며, 특히 강제류 구간에서는 Q-K 곡선의 형태가 지수식의 형태를 가지기 때문에 교통량과 밀도의 해를 찾기 위해서 황금분할법(Golden section method)에 의해서 계산이 수행된다. 수행이 완료되었으면 step 7로 간다.
- step 5 : 교통량 연속조건과 블럭 j+1에서의 수요교통량 관계식을 통하여 블럭 j+1의 수요교통량과 그 때의 블럭 j의 밀도를 구한다.
- step 6 : 교통량 연속조건과 블럭 j에서의 수용가능교통량 관계식을 통하여 블럭 j의 수용가능교통량과 그 때의 블럭 j의 밀도를 구한다. 강제류 구간의 해를 찾기 위해서 합류구간과 마찬가지로 황금분할법(Golden section method)에 의해서 계산이 수행된다.
- step 7 : 수요교통량과 수용가능교통량을 서로 비교하여 적은 교통량을 채택하고, 그 때의 밀도를 t+1 시간대의 밀도로 채택한다.
- step 8 : 블럭 j의 MOE(교통량, 속도, 밀도)를 출력한다.
- step 9 : 블럭을 상류쪽으로 하나씩 이동시키면서 전시간대가 수행될 때까지 앞 블럭에서 행한 방법대로 계산을 수행한다.



<그림 8> KUFRE 모델의 수행과정

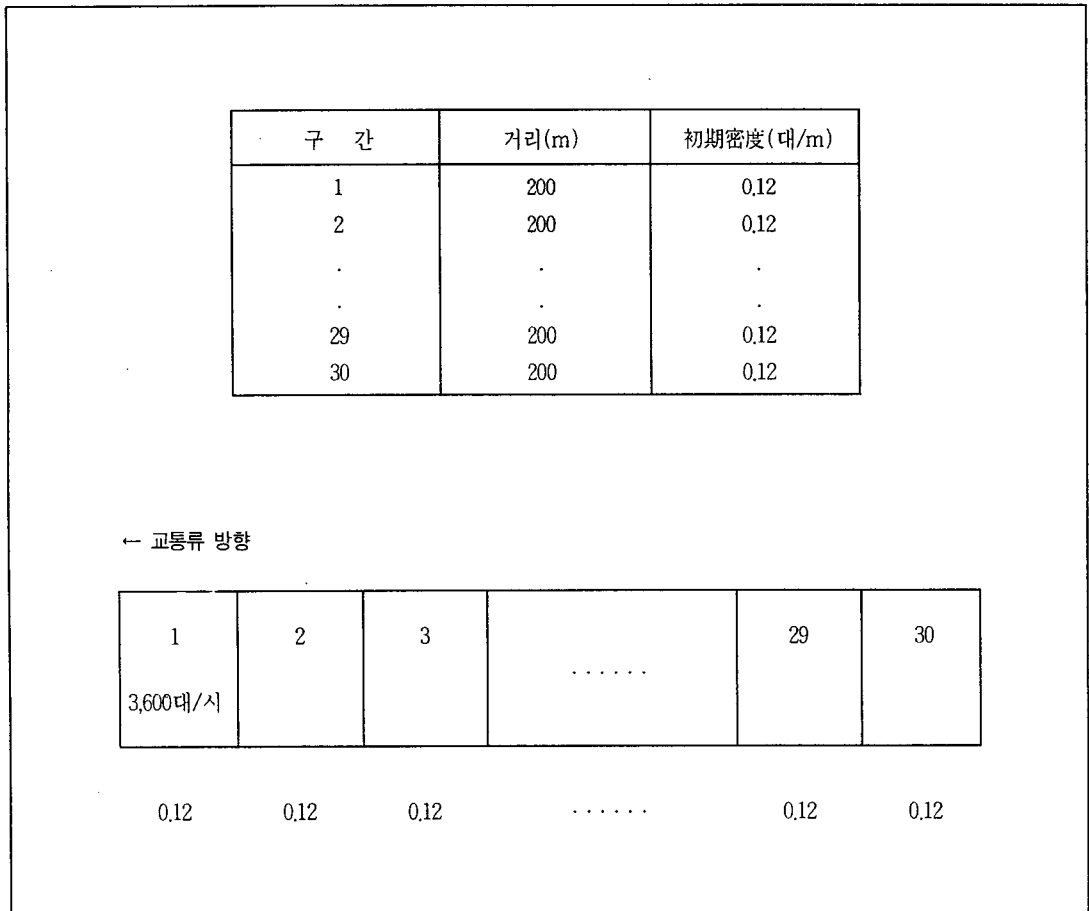
### IV. KUFRE 모델의 검증

#### 1. 정체 of 전파과정

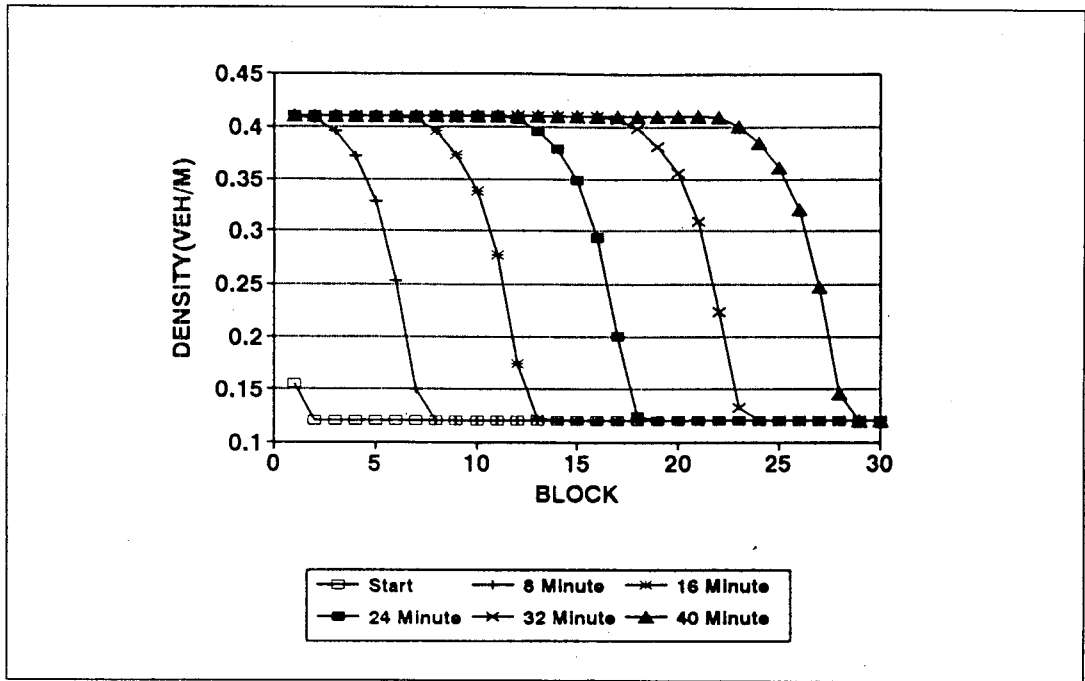
상류측 용량변화(예 : 사고발생, 공사 등)에 의한 충격파(Shockwave)가 하류측으로 전파되어 가는 과정을 검증하기 위하여 <그림 9>와 같은 제약조건을 두고 시뮬레이션을 실행하였다. 전체구간을 30개 블록으로 구분하고, 각 구간길이를 200m로 설정하였다. 그리고 각 구간의 초기밀도를 동일하게 0.12대/m로 하고, 유출

교통량을 1대/1초(3,600대/시)로 제약하여 12초 시간간격으로 시뮬레이션을 실행하였다. 즉 상류부의 유출교통량을 사고, 공사 등의 원인으로 인하여 제약하고서 정체의 파급현상을 관찰하였다.

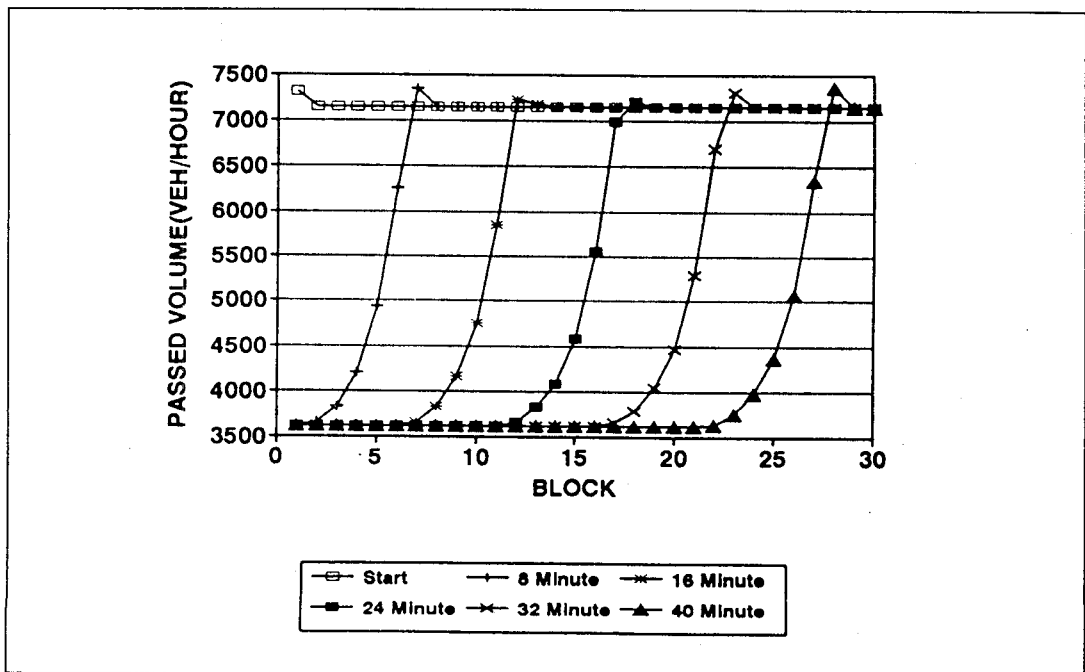
다음의 <그림 10>은 시간의 경과에 따른 블록간 밀도의 변화를 나타낸 것이고, <그림 11>은 시간별 교통량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시간경과에 따른 정체전파 과정이 재현됨을 확인할 수 있다.



<그림 9> 모델 검증의 제약조건 (정체의 전파)



〈그림 10〉 시간별 밀도변화 (정체의 전파)



〈그림 11〉 시간별 교통량 변화 (정체의 전파)

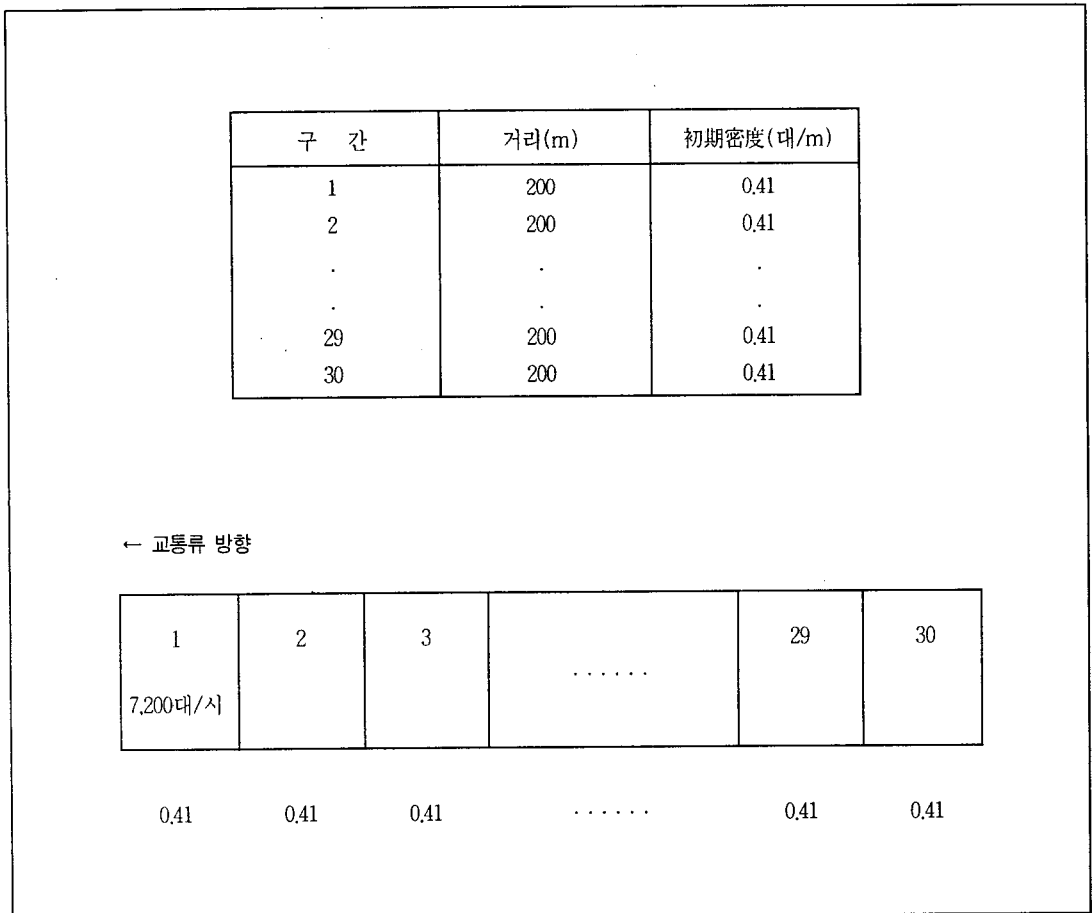
## 2. 정체의 완화과정

상류측의 제약조건 해소(예 : 사고수습, 공사완료 등)에 의한 충격파(Shockwave)가 정체완화됨에 따라 상류측으로 역전파되어 가는 과정을 검증하기 위하여 <그림 12>와 같은 제약조건을 두고 시뮬레이션을 실행하였다.

전체구간은 동일하게 30개 블록으로 구분하였고, 구간길어도 200m로 설정하였다. 그리고 각 구간의 초기밀도는 동일하게 0.41대

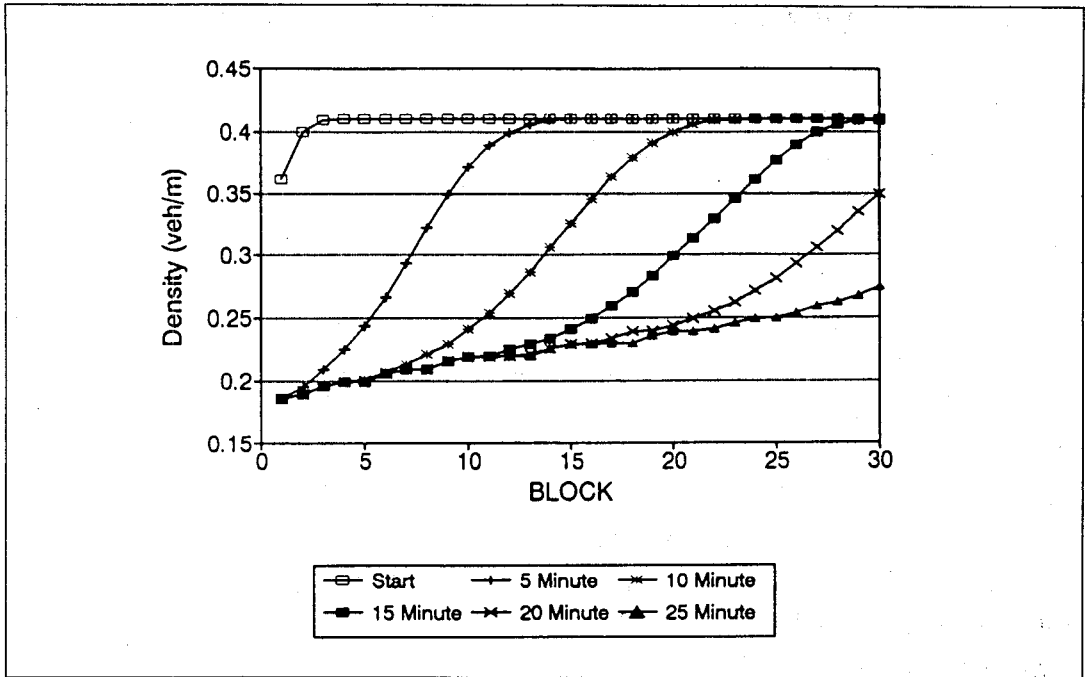
/m로 하고, 유출교통량을 2대/1초(7,200대/시)로 설정하여 12초 시간간격으로 시뮬레이션을 실행하였다. 즉 상류부의 사고, 공사 등의 정체원인을 해소함으로 유출교통량 제약을 해소하고 정체가 해소되어 감을 보여주고 있다.

다음의 <그림 13>은 시간의 경과에 따른 블록간 밀도의 변화를 나타낸 것이고, <그림 14>는 시간별 교통량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시간경과에 따른 정체완화과정이 재현됨을 확인할 수 있다.

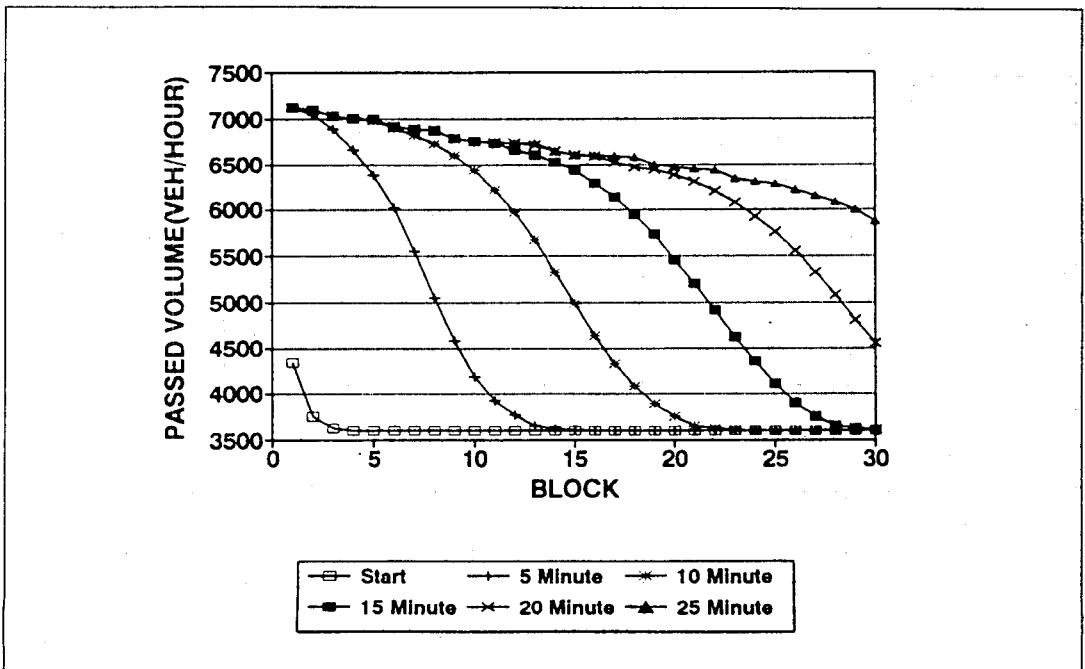


<그림 12> 모델 검증의 제약조건 (정체의 완화)





〈그림 13〉 시간별 밀도변화 (정체의 완화)



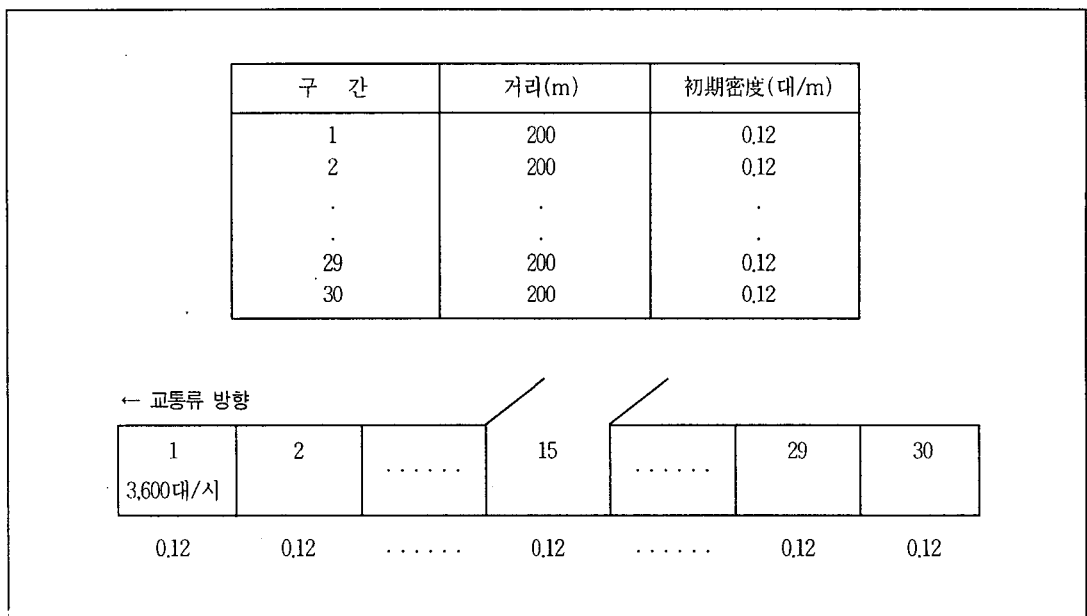
〈그림 14〉 시간별 교통량 변화 (정체의 완화)

### 3. 합류구간의 정체진행과정

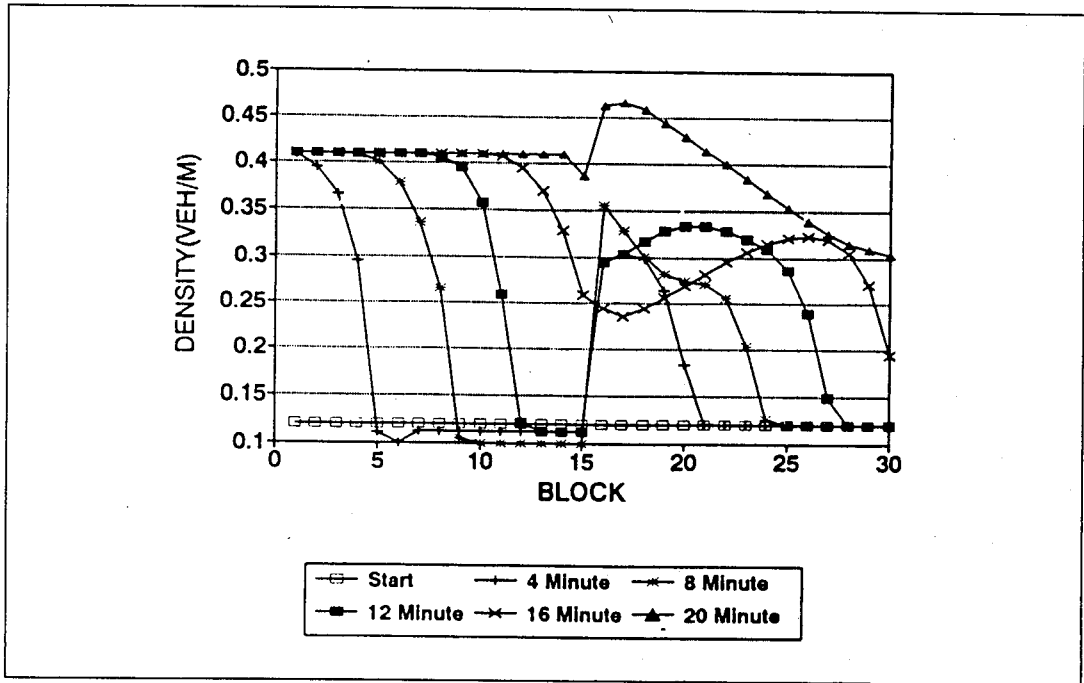
합류부 구간은 본선구간과는 달리 램프교통량과 본선구간 교통량과의 상충으로 인하여 합류부 구간을 전후하여 급격한 교통와해현상(Breakdown)과 밀도증가의 현상을 나타낸다. 상류측의 제약조건과 하류측 15번의 합류부 구간의 램프교통량의 변화에 따른 교통류의 흐름을 검증하기 위하여 <그림 15>와 같은 제약조건을 두고 시뮬레이션을 실행하였다. 전체구간은 본선구간과 동일하게 30개 블록으로 구분하였고, 구간길어도 200m로 설정하였다, 그리고 각 구간의 초기밀도는 동일하게 0.12대/m로 하고, 유출교통량은 1대/1초(3,600대/시)로 제약하였으며, 15번 합류부 구간의 램프 유입교통량은 현실의 교통상황을 반영한 가정된 교통량을 시뮬레이션 시간간격마다 삽입하였다. 즉 상류부의 사고, 공사 등의 정체원인과 더불어 합류부 구간의 램프교통량의 변화에 따른 교통류가 서

로 만나서 합류부 하류구간으로 정체가 더욱 가중되어 가는 과정을 보여주는 것이다.

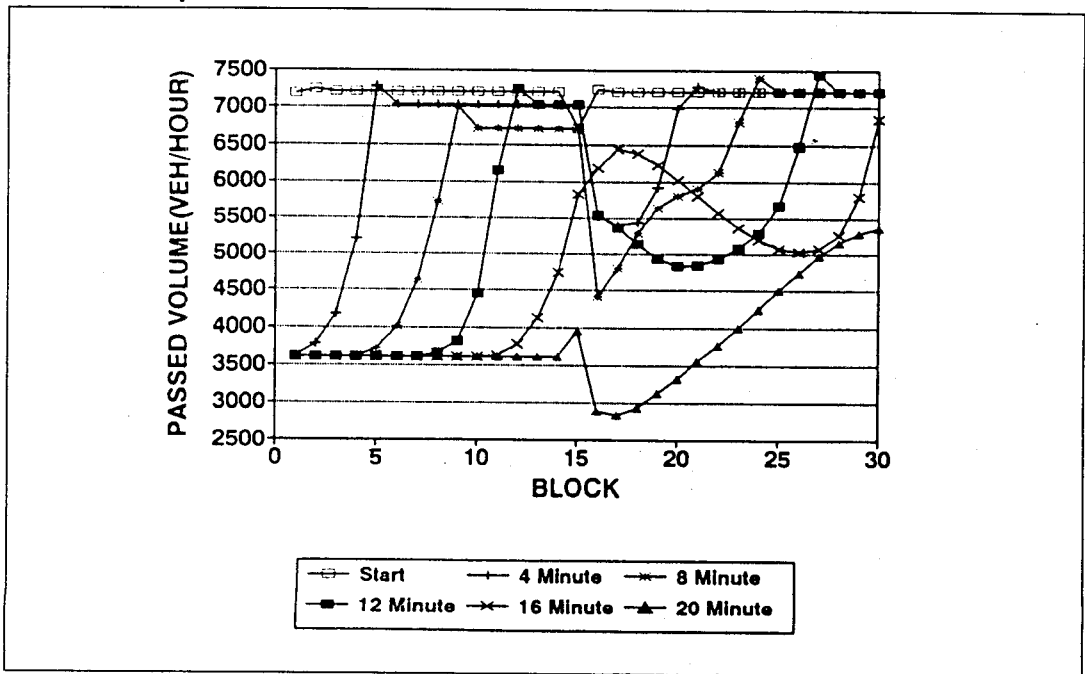
다음의 <그림 16>은 시간의 경과에 따른 블록 간 밀도의 변화를 나타낸 것이고, <그림 17>은 시간별 교통량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 상류측의 제약조건으로 인하여 유출교통량이 3,600대/시로 제한됨에 따라 하류쪽으로 충격파(Shockwave)가 전파되어 가면서 밀도의 증가와 교통량의 감소로 정체가 점점 가중되어 감을 볼 수 있으며, 합류부 구간(15번 블록)에서는 램프 유입교통량으로 인한 접촉차선 마찰감소교통량 관계식의 영향을 받아 교통량의 급격한 감소현상과 함께 정체가 합류부 구간(15번 블록) 후방으로 밀려가는 것을 볼 수 있다. 그리고 시뮬레이션 실행 20분후부터는 상류측의 제약조건으로 인한 충격파와 합류부 구간(15번 블록)의 교통량의 급격한 감소현상으로 인한 충격파가 합하여 저서 합류부 구간 하류쪽으로 정체가 더욱 가중되어 가는 것을 볼 수 있다.



<그림 15> 모델 검증의 제약조건 (합류구간)



〈그림 16〉 시간별 밀도변화 (합류구간)



〈그림 17〉 시간별 교통량 변화 (합류구간)

## V. 결론 및 향후 연구과제

### 1. 결론

본 연구의 목적은 서울시 도시고속도로 교통류 관리를 위한 기법을 개발·평가하기 위하여 도시고속도로의 교통류를 재현할 수 있는 시물레이션 모델을 개발하는 것이며, 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 도시고속도로는 구간별로 교통용량이 차이가 있을 뿐 아니라 유·출입 교통류로 인한 교통와해현상(Breakdown)으로 지점 및 구간에서의 용량 변화가 동태적(Dynamic)이다

둘째, 올림픽대로의 현장자료를 통한 교통량-밀도 관계식(Q-K Curve)을 적용하는 한편 블럭단위의 유체연속방정식을 적용함으로써 급격하게 변화하는 교통류의 흐름에 적용할 수 있는 Dynamic 시물레이션 모델을 개발하였다.

셋째, 합류부 유입램프구간의 교통류 특성을 파악함으로써 본선교통류와 램프교통류로 인한 접촉차선의 마찰감소교통량 관계식을 도출하였다.

네째, 시물레이션 모델의 적용 결과 본선구간에서의 정체의 전파, 정체의 완화 등 기본적인 교통류 특성들과 합류구간에서의 병목지점(Bottleneck)의 형성과 용량감소현상 등 정체진행과정을 재현할 수 있었다.

### 2. 향후 연구과제

첫째, 합류시, 합류차선의 용량과 합류교통량( $V_r$ ), 그리고 본선 전체교통량( $V_{all}$ )과의 명확한 관계의 규명이 필요하다.

둘째, 도시고속도로 정체의 주요원인 중 하나인 분류부의 교통류 특성 및 표현에 대한 세밀한 연구의 필요성과 인접신호교차로와의 통합관리를 위한 시물레이션 기법의 개발이 필요하다.

셋째, 실측 교통류와의 비교 검증 및 개선을 통한 현장적용이 가능한 모델로의 발전이 이루어져야 하겠다.

넷째, 교통상황에 따른 운전자 경로선택기능의 부여와 향후 FTMS 및 ITS와 연계하여 모형의 발전이 이루어져야 하겠다.

## 참고문헌

1. 강정규, 1997, "URFSIM-1 : 도시고속도로 교통류 시물레이션 모형 개발", 대한교통학회지 제15권, 제1호, 대한교통학회
2. 건설부, 1992, "도로용량편람"
3. 김대호, 1995, "대도시 교통류관리에 관한 연구"
4. 김영찬, 1993, "고속도로 램프미터링을 위한 선형계획모형의 개선"
5. 김태형, 1995, "도시고속도로 합류부 구간의 시물레이션 모델의 개발"
6. 서울대학교 공학연구소, 1994, "고속도로 교통분석 및 예측시스템 구축에 관한 연구"
7. 서울시정개발연구원, 1994, "간선도로 교통류 관리방안 연구"
8. 서울시정개발연구원, 1997, "도시고속도로 교통관리시스템 소프트웨어 요구사항 분석"
9. 조영주, 1994, "동태적 교통정보를 이용한 고속도로 유입램프 제어계획에 관한 연구"
10. 진광성, 1994, "블럭밀도법에 의한 연속교통류 관리기법에 관한 연구"
11. Adolf D. May, 1987, "Freeway Simulation Models Revisited", TRR 1132
12. Adolf D. May, 1990, Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall
13. Ajay K. Rathi, Edward B. Lieberman, and Mark Yedlin, 1987, "Enhanced FREFLO :

- Modeling of Congested Environments”, TRR 1112
14. Carlos F. Daganzo, 1994, “The Cell Transmission Model : A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory”, Transpn. Res.-B. Vol 28B, No4
  15. Eunmi Park, 1993, “Critical Assessment of the Features of Two Ramp Metering Optimization Models”
  16. FHWA, 1993, TRAF User Reference Guide Version 4.0
  17. Fred L. Hall and Lisa M. Hall, 1990, “Capacity and Speed-Flow Analysis of the Queen Elizabeth Way in Ontario”, TRB
  18. J. H. Banks, 1989, “Freeway Speed-Flow-Concentration Relationships : More Evidence and Interpretations”, TRB
  19. M. Vanaerde, S. Yagar, A. Ugge, and E. R. Case, 1987, “A Review of Candidate Freeway-Arterial Corridor Traffic Models”, TRR 1132
  20. TRB, Special Report 165, 1975, Traffic Flow Theory
  21. TRB, Special Report 209, 1985, Highway Capacity Manual
  22. U.C Berkeley, 1985, FREQ8PE:A Freeway Corridor Simulation and Ramp Metering Optimization Model
  23. 松井寛, 1983, “高速道路交通流の動的記述モデル”, 交通工學
  24. 柔原雅夫 등 3인, 1993, “都市内高速道路を対象とした 経路選擇機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発”, 交通工學