

## 고속도로 톨게이트 운영 시뮬레이션 모형 개발

### A Simulation Model For Freeway Tollgate Operat

조용성\*, 김호중\*\*, 배명환\*

\*(주)심테크시스템, \*\*광주과학기술원 기전공학과

E-mail : yscho@simtech.co.kr

Tel : 02-578-4956

#### 요 약

본 연구는 FTMS와 TCS를 실시간으로 통신하여 톨게이트 운영에 관련된 다양한 교통정보를 제공하는 교통상황 모니터링과 미래의 교통상황을 예측하고 이를 바탕으로 톨게이트 교통상황을 예측하는 톨게이트 시뮬레이션 시스템(TGSS)을 개발하는 것이다. 교통상황 모니터링은 실시간 교통자료를 통계처리하고 분석하여 사용자에게 그래픽하게 교통정보를 제공하고 교통류의 예측은 톨게이트에 도착하는 교통류를 60분 후까지 예측하여 톨게이트 운영자에게 제공한다. 또한 톨게이트 예측시스템은 서울톨게이트에 도착하는 교통류 패턴을 이용하여 미래 톨게이트 교통상황을 시뮬레이션하고 이에 대한 톨게이트 운영 대안을 제시하는 기능을 수행한다. FTMS 및 TCS와 실시간으로 통신하기 위하여 별도의 통신프로그램을 작성하였고 통신에 의해 수집된 실시간 교통자료들은 모니터링 시스템과 연계하여 서울 톨게이트 주변구간의 교통상황과 톨게이트 운영 현황을 제공한다. 교통류 예측 시스템에 사용되는 모형은 거시적 교통류 모형인 Simple Continuum 모형과 시계열 모형을 이용하였고 이를 통해 서울 톨게이트에 도착하는 미래 교통류를 예측 할 수 있다. 톨게이트의 교통상황을 구현하기 위하여 미시적 모형인 차량추종모형과 차로변경모형을 톨게이트 예측 시스템에 반영하였고 현재의 톨부스 운영안과 사용자가 입력하는 톨부스 운영대안에 따라 시뮬레이션 함으로써 미래 톨 플라자내 교통상황을 톨게이트 운영자에게 애니메이션으로 보여줄 수 있다. 톨게이트 시뮬레이션 시스템을 이용하여 현재의 톨게이트 운영안과 최적화된 운영안을 상호 비교함으로써 톨게이트 운영자는 좀더 과학적인 톨게이트 운영을 모색할 수 있을 것으로 생각된다. 실용적 측면에서 볼 때, 톨게이트 시뮬레이션 시스템(TGSS)은 실시간 통신을 통한 모니터링과 교통류 예측으로 톨게이트 상황을 시뮬레이션 하고 톨게이트 운영 대안을 제시·평가함으로써 서울톨게이트 운영을 효율화하고 이로 인한 고속도로 소용 증대를 도모할 수 있을 것으로 기대된다..

**Key Words: Freeway, Tollgate, FTMS, TCS, Real-time Simulation**

# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경

고속도로 내 교통체계는 교통수요의 급격한 증가로 심각한 정체현상을 보이고 있으며, 이로 인하여 물류 비용의 증가와 수송능력의 저하현상이 발생하여 시간적, 경제적으로 막대한 손실이 초래하고 있는 실정이다.

도로의 신설 및 확장은 도로용지의 한계와 막대한 건설비용 등 여러 가지 한계를 지니고 있기 때문에 새로운 도로의 건설보다는 기존도로의 효율적인 운영과 관리를 통하여 고속도로의 효율성을 제고하는 방안이 절실하게 요구되어 진다.

이를 위해 FTMS와 TCS 등의 실시간 교통정보를 활용한 고속도로 관리 시스템의 개발이 필요한 시점이다.

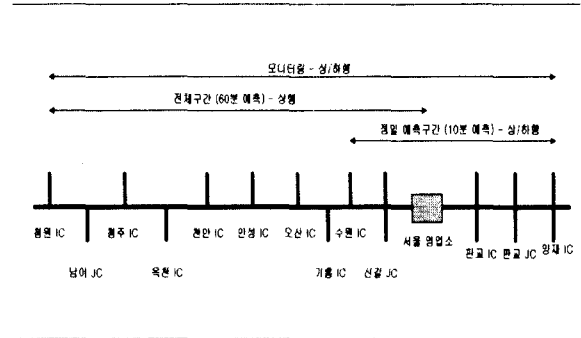
## 1.2 연구의 목적

상습정체지역의 하나인 톨게이트 구간의 혼잡을 해소하고 톨게이트 운영의 효율화를 모색하기 위하여 기존의 FTMS (Freeway Traffic Management System) 와 TCS (Toll Collection System)의 실시간 교통 Data를 이용하여 현재의 고속도로 상황을 모니터링하고 톨게이트에 도착하는 교통류의 예측기능을 포함한 모의실험을 수행하고, 톨게이트 운영자의 톨게이트 구간의 지체해소 대응방안을 실시간으로 적용하여 교통류를 관리할 수 있는 기초 소프트웨어(TGSS)를 연구 개발하고자 한다.

## 1.3 연구의 범위

### 가. 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 경부고속도로 본선 궁내동 서울 톨게이트를 중심으로 구현하며 교통량 자료수집과 신뢰성을 확보하기 위하여 인접구간의 I.C.(Inter-change)와 J.C.(Junction)를 포함한 일정거리 이상의 상/하류부 구간을 대상으로 한다.



[그림 1] 연구의 공간적 범위

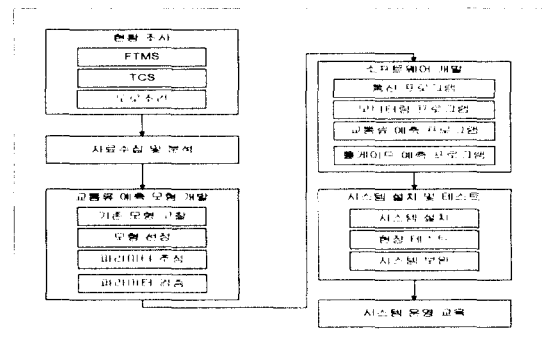
### 나. 내용적 범위

본 연구의 내용적 범위는 크게 3가지로 구분되는데, 첫째, 톨게이트 운영자가 톨게이트 전후의 현재 교통상황을 신속하고 종합적으로 파악하여 톨게이트를 보다 효율적이고 합리적으로 운영할 수 있도록 하는 모니터링 시스템 개발과 둘째, 미래의 톨게이트에 도착하는 교통류를 예측하는 기능과 이를 예측하기 위해 필요한 본선구간에 대한 거시적 시물레이션 모형의 개발이다.

마지막으로, 톨게이트내의 미래 교통상황을 개별 차량의 움직임을 표현하고 정밀한 분석이 가능한 미시적 시물레이션 모형의 개발로, 이를 통해 현재 운영방안 또는 운영자가 변경하려는 운영안으로 톨게이트 운영상황을 설정하여 시물레이션 함으로써 톨게이트의 미래상황을 예측하게 되고 예측된 통행량에 대한 최적 운영안을 자동으로 산출하는 기능이 포함된다.

## 1.4 연구의 수행과정

본 연구는 다음과 같은 과정을 통해 개발되어 진다.



[그림 2] 연구개발 수행과정

# 2. 자료 수집 및 분석

## 2.1 도로조건

도로는 지형적인 특성이나 도로의 여건에 따라 그 특징이 규정되어 질 수 있다. 본 연구에서 관심이 되는 도로의 특성은 도로의 서비스 수준이 될 것이다. 대상구간의 도로를 서비스 수준이 변화하는 지점을 찾아내고 대상 구간을 동일한 특성을 갖는 여러 개의 소구간으로 구분하여 각각의 소구간의 특성을 반영하는 값들로 구간의 특성을 표현하여야 한다.

서비스 수준과 같은 도로의 특성은 일반적으로 도로의 선형, 경사 정도, 도로의 포장상태, 차로수 등의 지형적인 특성에 의해 변한다고 볼 수 있다. 또한, 연계도로에서 차량이 유입되거나 유출되는 지점에서도 교통류가 변화하므로 구간을 나눌 때 반영되어야 한다. 그밖에 실시간으로 자료를 받아야 하므로 루프가 설치되어 있는 지점도 도로를 구분하는 기준으로 하여 구간을 구분하였다.

## 2.2 FTMS 자료 수집

VDS에서 수집된 자료의 형식은 각 지점의 차로 별 교통량, 점유율 및 평균속도 자료가 주어지는 Loop Polled Cycle Data 형식과 각 지점별 교통량, 점유율, 평균속도, 평균차량길이가 주어지는 VDS Polled Cycle Data 형식이 있으며, 30초 단위로 자료가 수집된다.

### 가. Data 보정

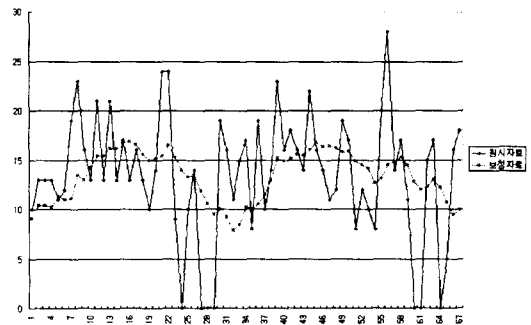
일반적으로 감지기에서 수집되는 자료들은 감지기 자체가 가지는 불안정성과 더불어 외적요인으로 인하여 자료에 noise를 가질 수 있으므로 자료의 신뢰성을 높이기 위해서는 자료들의 외적 요인에 의한 변동요인을 완화시킬 수 있는 평활화 기법이 필요하다.

평활화(smoothing method)란 미래의 값을 예측하기 위해서 관측된 값들에 이동평균(moving average), 가중이동평균(weighted moving average) 등의 방법을 사용하여 시계열의 불규칙 변동을 평준화시키는 방법이다.

본 연구에서는 자료 평활화의 방법으로 이동평균법을 사용하고 원시자료(평활화 전)과 평활화한 자료를 비교하여 자료 전송율을 비교하였다.

이동평균법이란  $n$ 개의 과거자료들의 평균을 계산하고 현재의 값으로 사용하는 방법이다. 여기서 과거자료 중 누락된 자료는 자료가 없는 것으로 간주하여 계산한다.

아래의 그래프에서 보는 것과 같이 원시자료는 가끔 자료의 누락이 발생하고 불규칙적으로 이상치가 발생된다. 그림에서 보는 것과 같이 이동 평균법으로 평활화한 자료에는 이상치가 제거된 것을 볼 수 있다.



[그림 3] 원시자료의 평활화

## 2.3 TCS 자료 수집

TGSS는 서울 영업소의 톨게이트 운영조건과 통행량 등 서울 영업소에 국한된 정보를 이용하게 된다. 본사의 경우 서울 영업소에서 정리되고 가공된 형태의 자료만을 관리하기 때문에 위와 같은 정보를 얻기 위해서는 서울 영업소 컴퓨터와 직접 통신을 해야 한다.

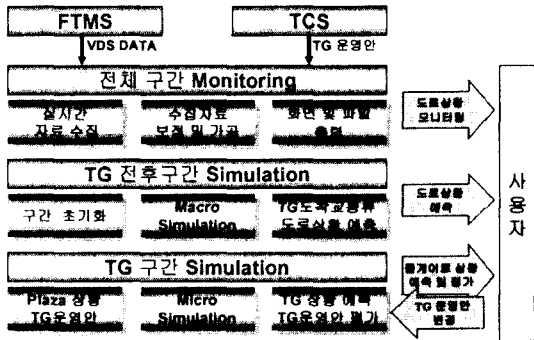
TGSS에서 필요로 하는 자료는 서울 톨게이트를 통과하는 차량에 대해 통행권을 발행하거나 통행권을 확인하는 시점에 발생하는 통행권 발행자료와 통행권 확인 자료를 실시간으로 수신함으로써 모두 얻을 수 있으며 통신 방식은 기존의 TCS 통신망을 그대로 사용할 수 있는 TCP/IP Socket 통신방식으로 결정하여 개발하였다.

## 3. 시물레이션 모형 개발

### 3.1 시스템 Flow

TGSS는 FTMS와TCS로부터 실시간으로 자료수집을 하고, 수집된 자료를 이용하여 톨게이트 운영자에게 도로 및 톨게이트 상황을 컴퓨터 상에 표현

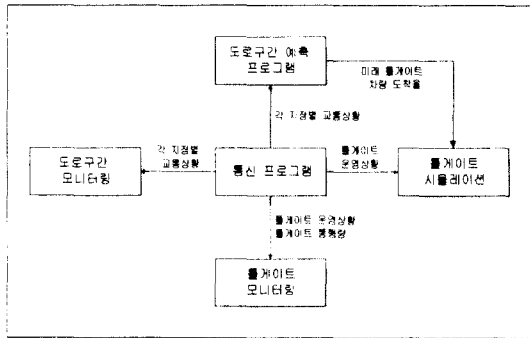
하고, 미래의 도로상황 및 톨게이트 상황을 예측하여 사용자에게 보여주는 기능을 수행하게 된다. 또한, 미래의 예측된 교통상황에 적절한 톨게이트 운영대안을 제시하여주며, 운영대안을 시뮬레이션하여 운영대안을 평가하게 된다.



[그림 4] TGSS의 System Flow

### 3.2 시스템 구성

TGSS는 아래의 독립적인 4개의 실행 프로그램으로 구성되어 있다.



[그림 5] TGSS의 구성

#### 가. 메인 프로그램 (TGSS.EXE)

TGSS를 실행시키면 가장 먼저 실행되는 프로그램으로써 실행되는 순간 통신 프로그램을 실행시킨다. 사용자가 TGSS의 메뉴에서 원하는 작업을 선택하면 해당 프로그램을 실행시키는 역할을 수행한다.

또한, 도로구간의 모니터링, 톨게이트 구간 모니터링, 도로구간의 예측결과, 톨게이트 예측결과를 사용자에게 보여주는 기능을 수행한다.



[그림 6] TGSS의 메인 화면

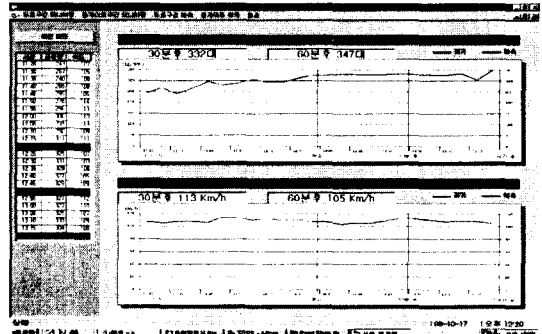
#### 나. 통신 프로그램 (GTCSFTMS.EXE)

FTMS와 TCS로부터 교통정보와 톨게이트 상황 자료를 실시간 통신으로 수집하여 파일로 기록하는 기능을 수행한다.

통신 프로그램은 FTMS로부터 새로운 자료를 수신할 때마다 교통류 예측 프로그램을 실행시킨다.

#### 다. 교통류 예측 프로그램 (SCONTINUM.EXE)

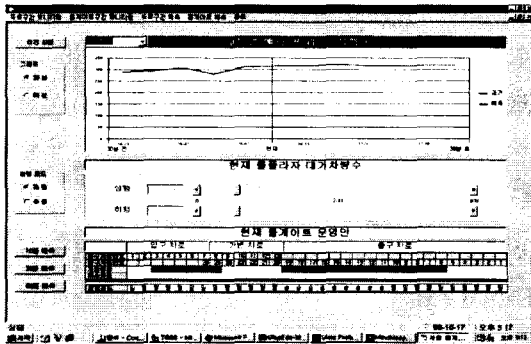
교통류 예측 프로그램은 미래에 톨게이트 차량 도착율을 예측하고, 기본구간의 교통류 변화를 예측하고 예측결과를 파일로 저장한다.



[그림 7] TGSS의 교통류예측 프로그램

#### 라. 톨게이트 예측 프로그램 (SENG.EXE)

톨게이트의 예측시간(10분, 30분, 60분) 후 상황과 톨게이트 운영대안에 대한 평가를 시뮬레이션을 수행하고 시뮬레이션 결과를 파일로 저장한다.



[그림 8] TGSS의 톨게이트 예측 프로그램

### 3.3 교통류 모형

고속도로 시뮬레이션 모형에 채택되는 교통류모형은 교통류를 나타내는 수준에 따라 거시적(macroscopic)모형과 미시적(microscopic) 모형으로 구분되는데, 도로구간에서는 Simple Continuum 모형 및 시계열 모형과 같은 거시적 모형을 사용하여 교통류를 예측하고, 톨플라자 내에서는 대기하고 이동하는 차량의 행태를 묘사하기 위해 차량추종모형(Car following model)과 차로변경모형(Lane change model)과 같은 미시적 모형을 사용한다.

## 4. 시뮬레이션 모형의 평가

### 4.1 교통류 예측 모형의 평가

#### 가. Simple continuum 모형

정밀구간(서울 양재를 기점으로 이점 8.4km에서 31.4km에 속하는 구간)을 예측하기 위해 개발된 모형으로 이를 검증하기 위하여, LOOP가 위치하는 구간에서 30초 주기(실제 FTMS Data가 올라오는 주기)로 Data를 수집하여 예측과정에서 수집된 30초 단위의 통과 차량수와 비교하여 오차를 계산하고, 오차를 평균하여 한 Station에 대한 전체오차합계를 계산하여 검증을 수행하였다.

#### 나. 시계열 예측 모형

전체구간을 예측하기 위해 개발된 모형으로 이를 검증하기 위하여, 각각의 구간에 대하여 시계열 모형을 수행하여 교통류의 영향이 파급되는 시각과 파급되는 교통량, 속도를 계산하여 동일한 방법으로 검증을 수행하였다.

<표 1> Simple Continuum 모형의 예측결과

시각	오차합계	시각	오차합계
05:39:00	- 0.07	05:44:30	0.05
05:39:30	- 0.11	05:45:00	0.08
05:40:00	- 0.14	05:45:30	0.09
05:40:30	- 0.10	05:46:00	0.09
05:41:00	- 0.08	05:46:30	0.03
05:41:30	- 0.04	05:47:00	0.07
05:42:00	0.00	05:47:30	0.08
05:42:30	0.07	05:48:00	0.05
05:43:00	0.04	05:48:30	0.01
05:43:30	0.03	05:49:00	0.04
05:44:00	0.04		

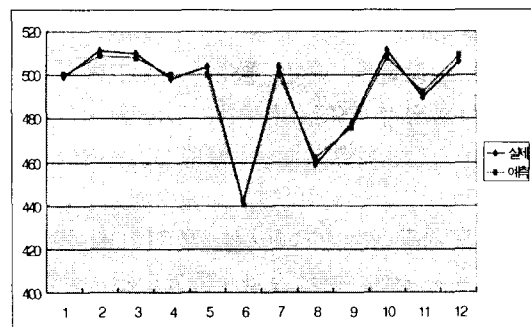
<표 2> 시계열 모형의 예측결과

시각 (오전)	적중율(%)		시각 (오후)	적중율(%)	
	교통량	속도		교통량	속도
00:00	91	98	00:00	88	81
01:00	87	97	01:00	92	91
02:00	83	97	02:00	95	97
03:00	80	95	03:00	91	94
04:00	85	94	04:00	94	82
05:00	70	95	05:00	95	89
06:00	82	98	06:00	80	91
07:00	94	98	07:00	94	89
08:00	65	96	08:00	86	92
09:00	89	98	09:00	91	90
10:00	89	98	10:00	84	87
11:00	83	88	11:00	90	90

### 4.2 톨게이트 예측 모형의 평가

#### 가. 차량 도착율

실제 차량 도착율과 예측한 차량 도착율과의 검증을 검증하는 방법으로 입력한 차량 도착간격으로 차량이 발생되는지를 검증한 결과, 상행의 경우 절대평균 %차이가 0.45 %, 하행의 경우 0.17 %로 톨게이트에 정확하게 차량이 발생된다고 할 수 있다.



[그림 68] 톨게이트 차량도착율 검증 결과

### 나. 차종 구성비

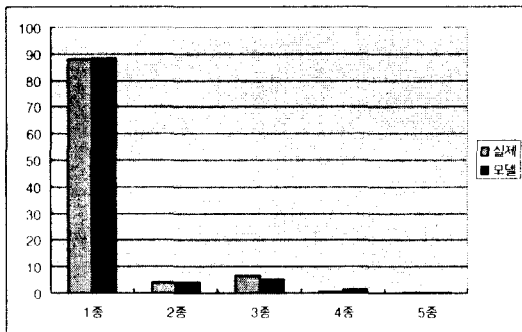
실제로 도착한 차량과 톨게이트 예측 프로그램 상에서 발생한 차량의 차종구성비를 Chi-square test로 유의 수준 0.01, 0.05, 0.1에서 검정한 결과, 상행과 하행 모두 귀무 가설을 기각할 수 없다. 즉, 실제의 차종 구성비와 모델의 차종 구성비는 같다고 할 수 있다.

하행의 차종구성비 오차는 2.19 %, 상행의 경우 2.52 %로 비교적 오차가 작은 것으로 분석되었다.

$$\text{차종 구성비 오차} = \sum_{i=1}^5 |P_i - \bar{P}_i|$$

<표 3> 차종 구성비의 검증 결과 (단위 : %)

상행	1종	2종	3종	4종	5종
실제	88.17	3.92	6.66	0.72	0.54
모델	88.55	4.14	5.41	1.38	0.53



[그림 10] 차종구성비 검증 결과

### 다. 통과 차량수

실제로 통과한 차량수와 톨게이트 예측 프로그램에서 예측한 통과량을 비교하기 위해 톨게이트를 통과하는 차량의 수의 변화를 5분 단위로 1시간동안 수집하여 검증한 결과, 상행의 경우 절대평균 %차이가 2.60 %로 나타났으며, 하행의 경우에는 5.81 %로 나타났으며 이는 톨게이트의 상황을 비교적 정확히 예측한다고 할 수 있다.

$$\text{절대평균오차} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} |y(t) - \bar{y}(t)|$$

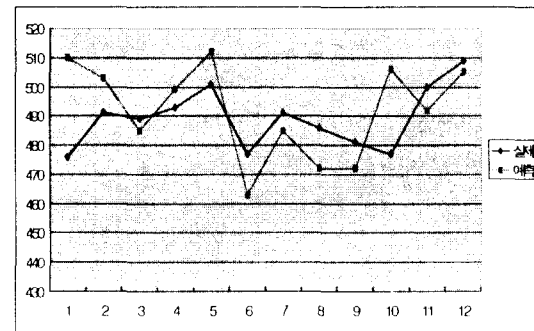
$$\text{절대평균 \% 차이} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} 100 \cdot \frac{|y(t) - \bar{y}(t)|}{y(t)}$$

where,  $y(t)$  : 실제 통과차량수

$\bar{y}(t)$  : 모델 통과차량수

<표 4> 톨게이트 통과 차량수의 검증 결과

시간 (5분단위)	실제 통과차량 수	모델 통과차량 수	절대평균 오차	절대평균 % 차이
1	476	510	34	7.1429
2	491	503	12	2.444
3	489	485	4	0.818
4	493	499	6	1.217
5	501	512	11	2.1956
6	477	463	14	2.935
7	491	485	6	1.222
8	486	472	14	2.8807
9	481	472	9	1.8711
10	477	506	29	6.0797
11	500	492	8	1.6
12	509	505	4	0.7859
전체	5871	5904	12.583	2.5993



[그림 11] 통과차량수의 검증 결과

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구는 실시간 자료를 이용하여 톨게이트 구간의 교통류를 효율적으로 관리하고자 톨게이트 시뮬레이션 시스템을 개발하였으며, 이를 통해 운영자의 운영안 결정에 객관적인 근거자료를 제공하고, 응용할 수 있는 기반을 제공하였다.

향후, 본 연구를 토대로 예측 모형의 신뢰도를 높이기 위한 보정 작업이 필요하며, 고속도로 전체적인 효율을 증대하기 위해 인근 영업소를 포함한 Network 차원의 시뮬레이션 관리가 필요하다.

### 참고문헌

[1] TRB, Traffoc Flow Theory - A Revised Monograph. 1998

[2] 건설교통부, 교통관리 효과분석을 위한 모의실험모형 개발(1), 1998.2

외 다수