

## 멀티 에이전트를 이용한 도로정체에 따른 교통흐름 예측 및 통합제어

조기용<sup>1)</sup> · 배철호<sup>2)</sup> · 이정환<sup>2)</sup> · 주열<sup>3)</sup> · 서명원<sup>4)</sup>

성균관대학교 기계공학부<sup>1)</sup> · 성균관대학교 기계공학부 대학원<sup>2)</sup> ·  
미시시피주립대학교 전기·컴퓨터공학부<sup>3)</sup> · 성균관대학교 기계공학부<sup>4)</sup>

### The Integrated Control Model for the Freeway Corridors based on Multi-Agent Approach

Kiyong Cho<sup>1)</sup> · Chulho Bae<sup>2)</sup> · Junghwan Lee<sup>2)</sup> · Yul Chu<sup>3)</sup> · Myungwon Suh<sup>\*4)</sup>

<sup>1)</sup>Postdoctoral, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

<sup>2)</sup>Graduated School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

<sup>3)</sup>School of Electric and Computer Engineering, Mississippi State University, MS 39762, USA

<sup>4)</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 13 January 2006 / Accepted 17 April 2006)

**Abstract** : Freeway Corridors consist of urban freeways and parallel arterials that drivers can use alternatively. Ramp metering in freeways and signal control in arterials are contemporary traffic control methods that have been developed and applied in order to improve traffic conditions of freeway corridors. However, most of the existing studies have focused on either optimal ramp metering in freeways, or progression signal strategies between arterial intersections. There have been no traffic control systems in Korea that integrates the freeway ramp metering and arterial signal control. The effective control strategies for freeway operations may cause negative effects on arterial traffic. On the other hand, traffic congestion and bottleneck phenomenon of arterials due to the increasing peak-hour travel demand and ineffective signal operation may generate an accessibility problem to freeway ramps. Thus, the main function of the freeway which is the through-traffic process has not been successful. The purpose of this study is to develop an integrated control model that connects freeway ramp metering systems and signal control systems in arterial intersections. And Optimization of integrated control model which consists of ramp metering and signal control is another purpose. Optimization results are verified by comparison with the results from MATDYMO.

**Key words** : Vehicle dynamics(차량동역학), Multi-agent(멀티에이전트), Traffic simulation(교통 시뮬레이션), Virtual driving lane(가상주행라인), Agent simulation(에이전트 시뮬레이션)

### 1. 서론

국내의 경우 2020년 서울도시기본계획의 도로망 계획에 대한 현재 및 중·장기계획을 살펴보면 도시고속도로(600km)와 간선도로(800km)의 연장이 총 1400km에 다다를 계획이다.<sup>1)</sup> 그리고 가까운 장

래에 도시 교통량의 50%이상이 도시고속도로에서 처리되는 시기가 도래할 전망이다. 그러나 개통된 도로의 운용상황을 볼 때, 고속·고용량의 통행은 도시고속도로의 건설로만 보장되는 것이 아님을 알 수 있다. 국내 도시고속도로의 운영은 아직 초보적인 수준이며 특히 운영의 비효율은 정체를 일으킬 뿐 아니라 교통안전에 심각한 영향을 미치고 있다.

\*Corresponding author, E-mail: suhmw7447@skku.edu

선진 외국의 대도시에서는 일반 간선도로와는 별도로 도시고속도로만을 관리하는 교통관제시스템과 안전관리대책을 도입·운용하고 있으며, 최근 지능형교통체계의 전략 대상 시설로서 그 중요도가 증대되고 있다. 따라서 도시고속도로의 효율적 운영을 위한 교통 흐름 예측의 필요성은 최근 들어 더욱 증대되고 있다. 이러한 필요성에도 불구하고, 교통 흐름 예측은 다음의 이유로 정확한 예측이 어려운 상황이다. 대다수의 교통 흐름 예측 모형은 다양한 미지수를 포함하고 있으며, 이러한 미지수는 시물레이션 수행에 많은 영향을 미친다. 하지만, 미지수가 실제 획득 가능한 교통자료보다 많기 때문에 추정이나 가정의 값을 사용하게 되며, 따라서 실제의 교통 상황 예측에 활용이 어렵다.<sup>2)</sup>

고속도로와 간선도로를 포함하는 교통축의 실제 상황은 상호 독립된 시스템이 아니라 시스템 운영 목적,<sup>3)</sup> 개별통제전략으로 인한 영향 등이 유기적으로 통합된 시스템으로 봐야 한다. 세계적으로 이러한 시스템에 대한 접근방법인 통합제어모형에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 추세지만, 국내에는 아직까지 이러한 관점에서 연구한 사례가 전무한 상태이다.<sup>4)</sup> 그러므로 위에서도 밝혔듯이 현재 및 장래의 도로망계획과 도시간·지역간 통행량이 급격히 증가하고 있는 실정 등을 감안하면 국내에도 이러한 도시고속도로 교통축에 대한 통합제어모형에 대한 연구가 반드시 필요하리라 판단하여, 본 논문에서는 고속도로에 대한 램프 미터링(ramp metering)와 간선도로에 대한 신호 주기 제어(signal control)를 연결시키는 통합제어를 수행하였다.

본 연구에서는 선행 연구에서 개발된 MATDY-MO 시스템<sup>5,6)</sup>을 이용하여 제한된 유효 정보에 대하여 도로 기하구조, 통행수요, 제어방식의 변화에 따라 도시고속도로 본선과 램프의 교통류 흐름을 동적으로 예측하고 이를 다른 방법과 비교·검증하였다. 아울러 예측된 교통 흐름을 바탕으로 도시고속도로 교통축의 통합제어에 대한 최적화를 수행하였다.

## 2. 통합 제어 최적화 문제 정의

본 연구에서는 램프 미터링과 신호주기 제어를

포함한 통합제어에 대하여 기존의 통합제어모형과는 다른 방법으로 최적화를 수행하였다. 대상 고속도로 모델은 Fig. 1과 같다. 여기서, FTT는 고속도로 지체 차량수, ATT, ATT'는 간선도로 지체 차량수, RD는 램프 지체 차량수,  $S_j$ 는 고속도로 구간j의 교통량,  $FC_j$ 는 고속도로 구간j의 용량,  $RC_j$ 는 램프 구간j의 용량을 나타낸다. 또한,  $Q_0$ ,  $c_1$ ,  $A_0$ 는 각 구간별 교통량으로 Fig. 3과 같다. 출입램프에서 유출되는 교통량( $E_j$ )은 상류부에 대한 도착 교통량( $A_0$ )의 10%인 값으로 설정하였다. 또한 지체차량은 속도가 5km/hr보다 작은 경우로 정의하였다. 도시고속도로와 간선도로의 유입유량은 Fig. 2와 같고, 자세한 데이터는 Table 1에 나타내었다.

대상 도로 모델을 바탕으로 지체의 최소화, 총통행량의 최대화 및 지체와 총통행량을 모두 최적화하는 세 가지 경우에 대하여 최적화를 수행하고 실제시물레이션 결과 값과 비교·평가 하였다. 전체 최적 설계 과정에 대한 흐름도는 Fig. 4와 같다. 목적함

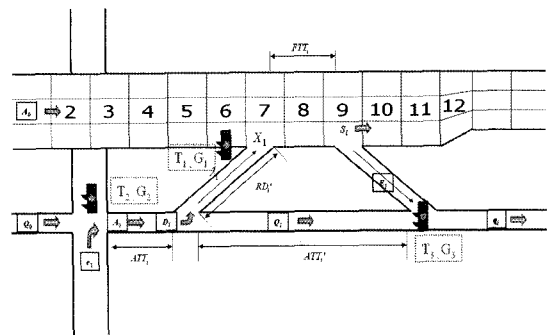


Fig. 1 Configuration of the system

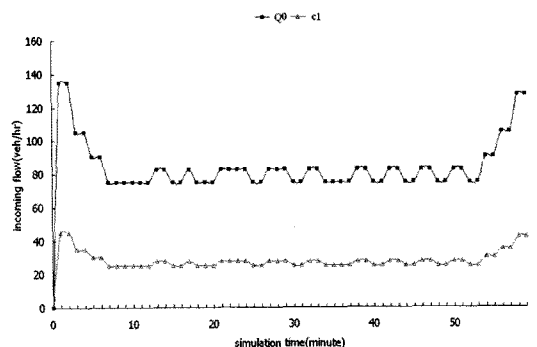
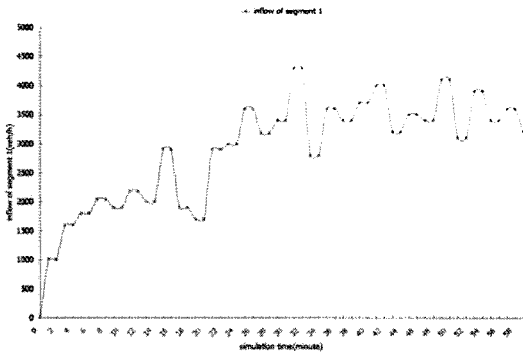
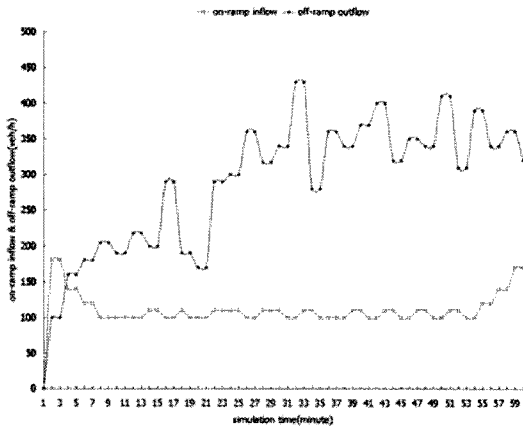


Fig. 2 Incoming traffic flows from arterials



(a) Inflow of segment 1



(b) On-ramp inflow & off-ramp outflow

Fig. 3 Incoming traffic flows

Table 1 Incoming traffic flow

Time (min.)	$A_0$	$Q_0$	$c_1$	$D_1$
1	1000	135	45	180
2	1000	135	45	180
3	1600	105	35	140
4	1600	105	35	140
...	...	...	...	...
60	3200	128	43	171

수의 유형은 통제목적에 따라 다양하다. 동일한 통제과정이 주어진 상태에서도 다양한 통제목표를 달성하기 위해 다른 목적함수들이 사용될 수도 있다. 하지만, 일반적으로 고속도로 통합제어 모형에서 사용하고 있는 목적함수는 고속도로의 가장 효율적인 운영을 그 목적으로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 운영효율성의 척도인 전체 통행 시

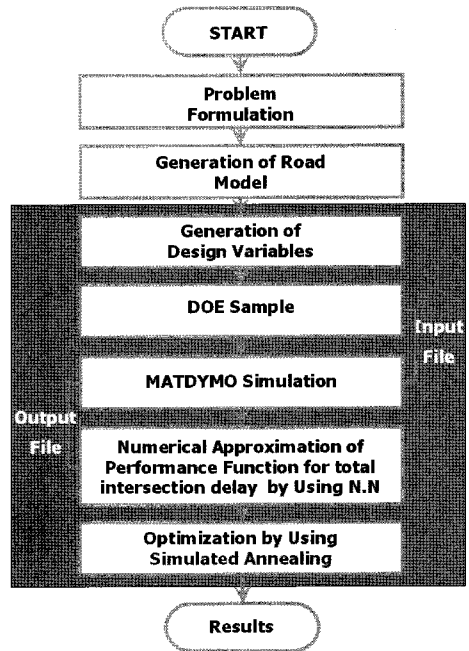


Fig. 4 Flow chart of optimization

간 동안 총 지체 차량의 최소화(CASE 1), 도시고속도로의 총 통행 차량 수의 최대화(CASE 2), 그리고 총 지체 차량의 최소화와 총 통행 차량 수의 최대화를 모두 만족시키는 것(CASE 3)을 목적 함수로 하였다. 각 경우별 목적 함수는 다음과 같다.

① CASE 1(총 지체 차량의 최소화)

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \sum_{i=1}^M F &= FTT_i + A TT_i + A TT'_i + RD_i \\ &= f(T_1, T_2, T_3, R_1, R_2, R_3) \end{aligned} \quad (1)$$

② CASE 2(총 통행 차량 수의 최대화)

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^M G = S_i = g(T_1, T_2, T_3, R_1, R_2, R_3) \quad (2)$$

③ CASE 3(CASE 1 + CASE 2)

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^M H = F(\text{CASE1}) - \omega G(\text{CASE2}) \quad (3)$$

제한 조건은 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Subject to : } 0 \leq S_j \leq FC_j \quad 0 \leq RD_j \leq RC_j \\ 0 \leq T_1 < 15 \quad 0 \leq R_1 \leq T_1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$60 \leq T_2 < 180 \quad 0 \leq R_2 \leq T_2$$

$$60 \leq T_3 < 180 \quad 0 \leq R_3 \leq T_3$$

여기서, FTT는 고속도로 지체 차량수, ATT, ATT'는 간선도로 지체 차량수, RD는 램프 지체 차량수,  $S_j$ 는 고속도로 구간 j의 교통량,  $FC_j$ 는 고속도로 구간 j의 용량,  $RC_j$ 는 램프 구간 j의 용량, 그리고  $\omega$ 는 Weight function을 나타낸다.

### 2.1 실험계획법

본 연구에서는 실험계획법(Design of Experiment) 중에서 주 효과와 적은 차수의 교호작용만을 검출하는 라틴방격법(Latin Hypercube)<sup>7)</sup>을 적용하였다. 라틴방격법의 장점은 각 요소들에 대해서 보다 많은 점과 보다 많은 조합들을 조사할 수 있다. 또한 적은 횟수의 실험으로 주 영향을 얻어낼 수 있고, 큰 설계 영역에서 효과적으로 실험점을 추출할 수 있다. 본 연구에서 추출한 실험점의 조합은 Table 2에서 볼 수 있듯이, 80개의 실험점을 추출하여 근사합수의 신뢰도를 높였다. Fig. 5는 각 변수가 각 구간별 지체와 통행량에 미치는 주영향을 나타내고 있다.

ATT의 값은 시뮬레이션에서 항상 0이 나왔기 때

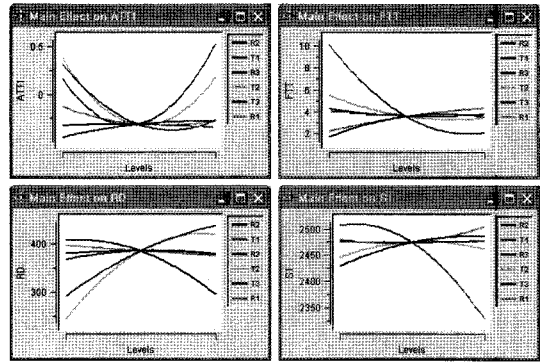


Fig. 5 Main effect of the design variables for responses

문에 이하 인공 신경망 및 시뮬레이티드 어닐링에 의한 최적화에서 제외하였다. ATT'은  $T_1^2, T_2^2, T_3^2$ ,  $T_2 - T_3$ 에 비례적인 관계를 가지며,  $T_1, T_1 - T_2$ 에 반비례하는 것으로 나타났다. FTT는  $T_1^2, T_2^2, R_1, T_3$ 에 비례하고,  $T_1, T_2, T_3$ 에 반비례하는 것으로 나타났다. 즉, 진출 램프의 녹색 신호가 길면 길수록 도시 고속도로에서 지체가 발생하고, 램프 주기가 길면 길수록 지체는 작아진다. RD는  $T_1, T_2, T_1 - T_2$ 에 비례하여 증가하고,  $T_3^2, T_2^2, T_3$ 에 반비례한다.

Table 2 Errors between NN and MATDYMO

	T1	T2	T3	R1	R2	R3	S1			ΣDelay		
							NN	MAT-DYMO	Error (%)	NN	MAT-DYMO	Error (%)
1	0.31	116.33	172.65	0.31	0.71	0.31	2310.28	2210	4.54	121.09	125	3.13
2	0.61	96.73	91.84	0.61	0.61	0.55	2131.82	2225	4.19	101.43	101	0.42
3	0.92	155.51	128.57	0.08	0.16	0.12	2501.78	2431	2.91	155.09	159	2.46
4	1.22	170.20	77.14	0.49	0.78	0.27	2362.39	2441	3.22	60.27	62	2.79
5	1.53	106.53	121.22	0.96	0.27	0.80	2453.08	2339	4.88	146.44	144	1.70
6	1.84	172.65	131.02	0.80	0.90	0.02	2307.16	2413	4.39	63.64	66	3.57
7	2.14	72.24	126.12	0.98	0.57	0.86	2234.55	2236	0.07	99.89	103	3.02
8	2.45	121.22	138.37	0.69	0.65	0.94	2435.73	2339	4.14	95.02	90	5.58
9	2.76	126.12	108.98	0.10	0.55	0.53	2269.17	2312	1.85	165.68	164	1.02
10	3.06	91.84	111.43	0.22	1.00	0.76	2152.69	2103	2.36	57.88	59	1.89
11	3.37	143.27	99.18	0.39	0.41	0.73	2504.37	2399	4.39	185.31	184	0.71
12	3.67	167.76	135.92	0.16	0.80	0.29	2320.18	2412	3.81	88.29	88	0.33
13	3.98	84.49	153.06	0.92	0.35	0.88	2364.01	2352	0.51	94.91	100	5.09
14	5.20	165.31	170.20	0.51	0.00	0.16	2568.13	2532	1.43	198.43	207	4.14
15	5.51	64.90	94.29	0.59	0.33	0.65	2367.98	2348	0.85	130.68	126	3.71
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	14.69	150.61	86.94	0.24	0.02	0.96	2279.95	2286	4.54	219.37	221	0.74

마지막으로  $S_1$ 은  $T_3$ ,  $R_1^2$ 에 비례하고,  $T_1$ ,  $T_1^2$ ,  $T_1-T_2$ 에 반비례하는 것으로 나타났다.

### 2.2 인공신경망

근사최적화 기법(approximate optimization)은 주어진 시스템을 묘사하는데 있어서 설계자가 요구는 오차의 범위를 만족시키는 근사 최적 모델을 생성하는 방법이다. 일반적으로 최적화 문제는 시뮬레이션을 통해 입력 설계 변수에 대한 목적 함수 및 구속 조건을 반복적으로 계산함으로써 최적화 과정보다는 오히려 시뮬레이션 과정에 많은 시간을 소요한다. 근사최적화 기법을 사용함으로써, 이러한 직접 최적화 과정에서 발생할 수 있는 계산비용의 문제, 모델의 실용성 문제 등을 해결할 수 있다. 근사최적화 기법을 구현하는데 있어서 인공 신경망(neural network)<sup>8)</sup>을 이용하여 입력 데이터와 출력 데이터 간의 관계를 기반으로 주어진 시스템을 적절히 묘사할 수 있는 모델을 생성하였다.

이를 위해 인공신경망을 입력 노드 6개, 은닉 노드 10개, 그리고 출력 노드 4개로 구축하였다. 구축된 인공신경망을 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)<sup>9)</sup>으로 학습(train) 시켜 목적함수를 근사하

였다. 역전파 신경망의 학습을 위한 자료는 실험계 획법에 의해 구한 입력 값에 대한 MATDYMO의 결 이를 위해 인공신경망을 입력 노드 6개, 은닉 노드 10개, 그리고 출력 노드 4개로 구축 하였다. 구축된 인공신경망을 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)<sup>9)</sup>으로 학습(train) 시켜 목적함수를 근사하 였다. 역전파 신경망의 학습을 위한 자료는 실험계 획법에 의해 구한 입력 값에 대한 MATDYMO의 결 과 값을 사용하였다. 또한 역전파 신경망의 학습자 료가 결과에 미치는 영향을 분석하여 역전파 신경 망의 학습 자료에 대한 목적함수의 민감성을 분석 하였다. 구성된 인공 신경망과 MATDYMO에 각각 35개의 임의의 값을 이용하여 오차를 구했으며, 이 를 Table 2에 나타냈다. Fig. 6은 근사된 목적함수에 서 각 설계변수와 ATT의 상관관계를 나타낸다.

### 3. 통합 제어 최적화

시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)<sup>10)</sup>은 금 속의 풀림(annealing) 과정에 기초한 방법으로서 탐 색 과정에서 확률적으로 목적 함수가 증가되는 설 계 변수 값을 허용하여 국소 최적점(local minimum) 을 이탈하여 전체 최적점(global optimum)으로 수렴 해 가는 특징이 있다. 금속의 풀림 과정을 살펴보면 용융 상태의 금속을 서서히 온도를 낮추면 최종적 으로 전체 에너지가 최소인 상태에 도달하게 된다. 이때 중간 상태 p에서 다음 상태 q로 넘어갈 때의 에 너지 차이( $\Delta E$ )를 식 (1)과 같이 산정하고,  $\Delta E$ 가 음 수일 때는 상태 변화를 무조건 허용하고,  $\Delta E$ 가 양 수일 때는 Metropolis criterion으로 정의되는 확률 ( $P_{accept}$ )만큼 조건적으로 상태 변화를 허용한다. 여 기서, T는 온도,  $K_B$ 는 볼츠만(Boltzman) 상수이다.

$$\Delta E = E_q - E_p \tag{5}$$

$$P_{accept} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{K_B T}\right) \tag{6}$$

시뮬레이티드 어닐링은 상기 상태 변화 허용 조 건을 일반적인 최적화 문제에 적용한 방법이다. 본 연구의 경우 각 구간별 지체의 최소화나 고속도로 구간 1의 교통량의 최대화된 목적 함수가 에너지에 해당되며 상태 p에서 다음 상태 q로 변환되는 과정

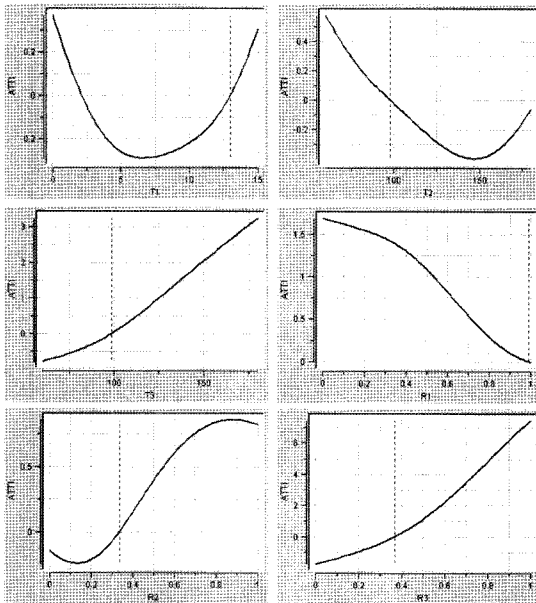


Fig. 6 Interrelation between design variable and ATT

은 설계 변수인 각 신호기의 주기와 녹색 신호 길이를 변화시키는 것에 해당한다. 따라서 각 설계 변수를 변화시켜 목적 함수를 계산하되 초기에 최대값으로 설정한 온도 T를 점진적으로 낮추어 목적 함수가 증가될 확률을 점점 감소시키면서 T가 지정된 최소 온도에 도달하거나 목적 함수가 더 이상 감소하지 않을 경우의 설계 변수 값이 최소 지체 또는 최대 교통량에 해당한다고 할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션에 의한 적정성 평가

최적화 결과를 Table 3에 나타내었다. 각각에 대한 반복(iteration) 횟수는 1000회이었다. Fig. 7, 8, 그리고 Fig. 9에 각 결과에 대한 수렴 경향을 나타내었다. Fig. 6의 결과와 같이 ATT에 대한 값은 항상 0이 나오기 때문에 제외하였다. 또한, 최적값과 MAT-DY-MO에 의한 실제값을 Table 4에서 비교하였다.

##### 1) CASE 1: 지체 최소화

각 구간에 대한 지체 최소화에서는 FTT, ATT, ATT', RD의 합측, 각 구간에서 지체되는 차량의 수를 합한 값을 최소화하는 것을 목적함수로 하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 초기 지체는 191을 나타냈으나 최적화된 값은 8.36으로 2184.7% 감소하였다.

Table 4 Errors between optimum and MATDYMO

Constraint	Optimum	MATDYMO	Error (%)
<b>Minimum Delay</b>			
$S_1$	2390.565	2279	4.9
$\Sigma$ Delay	8.363553	15	-44.2
<b>Maximum Traffic Flow</b>			
$S_1$	2738.78	2634	4.0
$\Sigma$ Delay	70.22111	82	-14.4
<b>Max. Traffic Flow &amp; Min. Delay</b>			
$S_1$	2726.337	2578	5.8
$\Sigma$ Delay	43.34432	43	0.8

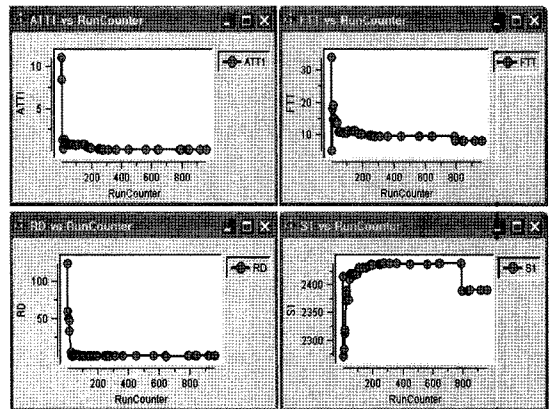


Fig. 7 Acceleration of responses optimization for CASE 1 by SA

Table 3 Result of optimization

Design variable	Case of optimization					
	Maximum traffic flow		Minimum delay		Max. traffic flow & Min. delay	
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
$T_1$	4	11.78	4	13.16	4	9.9
$T_2$	80	107.34	60	95.15	80	65.11
$T_3$	160	101.23	70	76.70	160	60.24
$R_1$	3	11.02	3	11.77	3	9.88
$R_2$	8	24.66	60	95.15	60	65.10
$R_3$	40	21.61	70	13.67	70	0.000
Constraint	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
$S_1$	2300	2738.78	2100	2390.57	2434	2726.34
ATT	0	0	0	0	8	0
ATT'	8.2	0.001	12	0.088	8.2	0.002
RD	231	50.59	145	0.1	122	22.16
FTT	34	19.628	34	8.18	35	21.18
$\Sigma$ Delay	273.2	70.22	191	8.36	165.2	43.34

그에 따라 통행량도 2425에서 2391로 1.4% 감소하는 것으로 나왔다. 이렇게 구한 최적값에 대한 설계 변수를 MATDYMO의 초기값으로 설정하고 시물레이션을 수행했을 경우, 최적설계와 통행량은 4.9%, 총 지체는 44.2% 차이를 보였다. 여기서 총 지체의 오차가 큰 이유는 실제 시물레이션에서 차량들이 도시고속도로 본선에 끼어들기를 할 때 소량의 지체가 누적되기 때문이다. 절대값을 비교하였을 경우, 8.4와 15로 최적값이 너무 작은 값이기 때문에 오차가 확대된 경향을 나타낸다. 실제 시물레이션에서 지체가 15이기 때문에 지체가 많이 감소된 것을 알 수 있다.

2) CASE 2: 통행량 최대화

Fig. 8에서 통행량 최대화에 대한 최적값을 살펴 보면, 고속도로로 구간 1의 교통량이 초기 2300에서 2738.8로 크게 늘어난 것을 알 수 있다. 총 지체는 273.2에서 70.22로 289% 감소하였다. 총 지체에 대한 각 구간별 지체의 비율을 보면 RD, 즉 진입램프의 지체가 전체 지체를 지배하였고, 램프에서 진입하는 차량과 진출하는 차량으로 인해 도시고속도로 본선에도 지체가 발생하는 것을 알 수 있다. CASE 1과 비교하였을 경우, 본선의 지체가 CASE 1보다 CASE 2에서 증가하였다. 이유는 본선의 교통량이 많기 때문에 끼어들기에 의한 감속에 의한 영향이 지체로 이어진 것으로 판단된다. 최적값의 설계 변수를 초기값으로 MATDYMO를 통하여 시물레이션 한 결과, 최적값과 고속도로로 구간 1의 교통량은 4%,

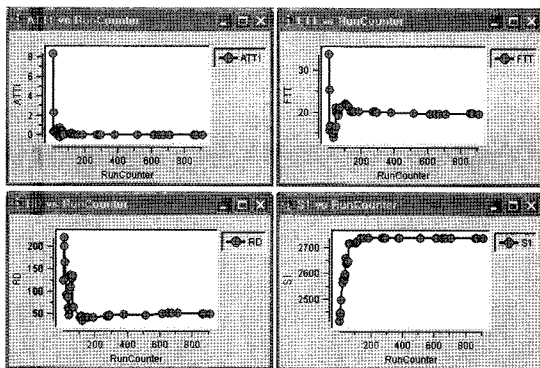


Fig. 8 Acceleration of responses optimization for CASE 2 by SA

총 지체는 -14.4% 차이를 보였다.

3) CASE 3: 지체 최소화 + 통행량 최대화

여기서는 선행했던 두 가지 경우를 모두 만족 하는 경우의 최적값을 도출하였다. Fig. 9에서 고속도로로 구간 1의 교통량을 살펴보면, 초기 2434에서 최적값으로 2726으로 10.7% 증가한 것으로 나타났으며, 총 지체는 165.2에서 43.34로 281% 감소한 것을 나타냈다. 앞의 경우와 비교하면 총 지체는 CASE 1(지체 최소화)보다 높고, CASE 2(통행량 최대화)보다 낮게 나왔다. 고속도로로 구간 1의 교통량은 CASE 1보다 매우 높고, CASE 2와 비슷하지만 조금 작은 값을 나타냈다. 이상을 정리하면, 다음과 같다.

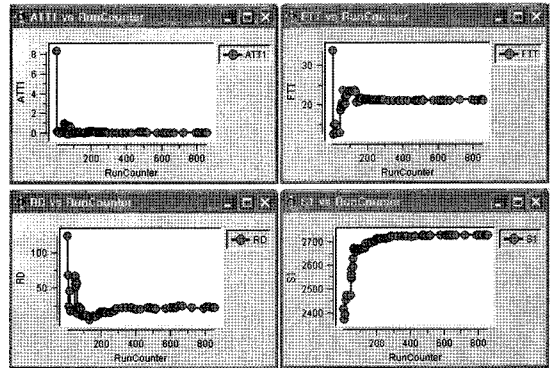


Fig. 9 Acceleration of responses optimization for CASE 3 by SA

$\Sigma$  Optimum Delay에 대하여

$$case_1 \leq case_3 \leq case_2 \tag{7}$$

$\Sigma$  Optimum S에 대하여

$$case_1 \leq case_3 \leq case_2 \tag{8}$$

최적값과 그에 따른 실제값을 비교하면, 총 지체는 43.3와 43으로 0.8%, 고속도로로 구간 1의 교통량은 2726과 2578로 5.8%의 오차를 보였다. 실제값을 통하여 각 경우를 비교하면 다음과 같다.

$\Sigma$ Real Delay에 대하여

$$case_1 \leq case_3 \leq case_2 \tag{9}$$

$\Sigma$ Real S에 대하여

$$case_1 \leq case_3 \leq case_2 \quad (10)$$

각 경우에 따른 결과와 각 변수들의 영향도를 비교하면, 도시 고속도로 본선에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 램프 미터링을 위한  $T_1$ ,  $R_1$ , 그리고 간선도로 중사거리의 신호 제어를 위한  $T_2$ ,  $R_2$ 이다.  $T_2$ ,  $R_2$ 에 의해 교차로 유입 교통량이 증가하면, 잠재적으로 도시 고속도로로 진입하는 차량이 증가하게 된다. 아울러  $T_1$ ,  $R_1$ 에 의해 램프 진입이 허용되고 그에 따라 고속도로 구간 1의 교통량과 FTT가 영향을 받게 된다. 최적화 결과에서 살펴보면, RD와 FTT의 값 변화가 전체 목적함수의 최적화에 지대한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 도시고속도로의 본선 흐름에 간선도로의 차량흐름이 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 도시고속도로 교통축에 대한 통합 제어를 수행한다면, 도시 고속도로의 교통흐름을 제어할 수 있고 이러한 통합제어가 필요함을 알 수 있다. 실제 교통 제어에 적용 시에는 램프와 간선도로에서 지체하는 차량을 최소화하면서 전체 교통량은 최대화하는 CASE 3의 최적화가 가장 이상적이라 판단되며, 그 이유는 너무 오랜 신호대기는 운전자의 위법을 유발할 가능성을 높이기 때문에, 도시고속도로와 간선도로의 교통량 모두를 최적화시킬 수 있기는 CASE 3이 실제 적용 시 제어에 대한 부담감을 줄일 수 있는 가장 이상적인 방법이라 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 멀티 에이전트 기반 차량동역학을 이용한 교통 시뮬레이션을 이용하여 도시고속도로 교통축 통합제어에 대하여 실험계획법, 인공 신경망, 그리고 시뮬레이티드 어닐링을 통하여 최적화를 수행하였다. 최적화 대상을 램프 미터링과 간선도로 신호 주기 제어를 통한 지체의 최소화, 도시고속도로 통행량의 최대화, 그리고 지체 및 통행량 최적화의 세 가지로 정하여, 각각에 대한 최적화를 수행하였다. 최적화 결과, 지체 및 통행량 최적화의 경우 총 통행량이 초기 2434에서 2726으로 증가하였으며, 총 지체 차량 수는 초기 165에서 43으로 감소하는 것으로 나타났다. 도시고속도로와 간선도로의

원활한 흐름을 유지하기 위해서는 간선도로의 지체를 최소화하고 도시고속도로 총 통행량을 최대화하는 지체 및 통행량 최적화가 가장 적합한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10938-0)와 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수연구실 및 해외공동연구(KRF-2005-213-D00020) 지원사업의 연구결과입니다.

## References

- 1) 2020 City Plan, <http://www.seoul.go.kr/org/organ/subhomepage/urban/2020cityplan/index.html>.
- 2) R. B. Chandra and S. Sivaramakrishnan, "A Multidimensional Mixed Ordered-response Model for Analyzing Weekend Activity Participation," *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.39, pp.255-278, 2005.
- 3) M. Papageoriou, "An Integrated Control Approach for Traffic Corridors," *Transportation Research*, Vol.3, pp.19-30, 1995.
- 4) E. S. Park, J. H. Lim, I. H. Suh and Z. Bien, "Hierarchical Optimal Control of Urban Traffic Networks," *International Journal of Control*, Vol.40, pp.813-829, 1984.
- 5) K. Y. Cho and M. W. Suh, "Multi-Agent for Traffic Simulation with Vehicle Dynamic Model. I: Development of Traffic Environment," *Transactions of KSAE*, Vol.12, No.5, pp.125-135, 2004.
- 6) K. Y. Cho and M. W. Suh, "Multi-Agent for Traffic Simulation with Vehicle Dynamic Model. II: Development of Agnet," *Transactions of KSAE*, Vol.12, No.5, pp.136-145, 2004.
- 7) J. C. Helton and F. J. Davis, "Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.81, pp.23-69, 2003.



- 8) D. Chakraborty, "Artificial neural network based Delamination Prediction in Laminated Composites," *Materials & Design*, Vol.26, pp.1-7, 2005.
- 9) P. I. Cowling and R. Keuthen, "Embedded Local Search Approaches for Routing Optimization," *Computers & Operations Research*, Vol.32, pp. 465-490, 2005.
- 10) D. S. Goodsell and A. J. Olson, "Automated Docking of Substrates to Proteins by Simulated Annealing," *Proteins: Struct. Funct. Genet*, pp. 195-202, 1990.