

大規模 交通 制御 시스템

朴 恩 世

(韓國電氣通信研究所 研究員)

■ 차 례 ■

- | | |
|---------------|--------------------|
| 1. 서론 | 4. 계층적구조의 교통제어 시스템 |
| 2. 도시교통망의 모델 | 5. 결론 |
| 3. 교통문제제어의 개요 | 참고문헌 |

1 서론

최근 차량이 급속적으로 증가함에 따라 대부분의 대도시 도로망은 이미 과포화 상태가 되었다. 특히, 러시아워때의 교통 혼잡으로 인한 각종 사고 및 도시 공해등의 피해는 날로 심각한 사회 문제로 대두되고 있으며, 교통 체증으로 인한 차량의 지연 시간들은 결과적으로 막대한 경제적인 손실을 초래하고 있다. 그러나 현실적으로 교통 도로망의 시설 확충은 차량의 증가에 비해 뒤떨어져있기 때문에, 현재로서 유일한 교통 문제 해결책은 기존의 도로 시설을 효과적으로 사용할 수 있는 방안을 찾는 것이라 하겠다.

일반적으로 효과적인 도로망의 운용을 위한 교통제어 시스템을 구성하기 위해서는

- 1) 교통 신호 제어
- 2) 도로별 속도 제한 및 통과 차량수 제한에 따른 교통량 조절
- 3) 교통 정보 서비스 체제 확보
- 4) 효율적인 통신망 구성

등에 대한 연구가 필요하다. 예를 들어, Tokyo 교통 제어 및 감시 시스템에서는¹⁾ 그림 1과 같이 계층적 구조의 computer 시스템을 구성하여 lower-level에서는 local controller 나 detector 등에서 필요한 자료를 수집하고 upper-level에서는 수집된 자료를 분석하여 전체 교통망에 대한 총괄적인 결정을

을 내려 lower-level의 computer에서 수행하도록 한다. 또한, 여러가지 주변 장치를 두어 각종 자료의 분석 및 통계 작업을 하여 그 결과를 유효 적절히 제공하는 종합 교통 정보 시스템을 구성하고 있다. 표 1에서는 Tokyo의 교통 제어 시스템에 의해 얻어진 연간 연료의 절감과 각종 공해 요인등의 감소 효과를 보여주고 있다.

computer에 의한 효과적인 교통 신호 처리를 위해서는^{1),2)} 무엇보다도 교통망에 대한 정확한 모델과 그에 따른 적절한 제어 방식이 필요하다. 본 고에서는 교통망에 대한 모델 방법을 개괄적으로 서술하고 특히, 계층적 최적 제어 및 intelligent control 방법들에 의한 교통 제어 방식을 소개하기로 한다.

2 도시교통망의 모델

서울 시내의 교통 요충인 서울 시청앞의 교통망은 아마도 가장 교통이 혼잡한 지역중의 하나일 것이다. 이 지역은 심지어 러시아워때 외에도 심각한 교통 혼잡으로 인해 많은 피해를 당하고 있어 관계 당국에서도 많은 노력을 해 오던 곳이다.

그림 2는 1980년 당시 서울 시청앞의 교통망과 교통량의 흐름도이다. 그림에서 $x_1 \dots, x_{15}$ 는 각 지점에서 대기할 수 있는 차량의 흐름을 의미한다. 따라서, 전체적으로 15방향의 교통량의 흐름이 있으며 이 교통량들은 하나의 교통신호에 의해 제어되고 있다. 그러나, 교통량이 밀집될 때는 점선 부분의 교통

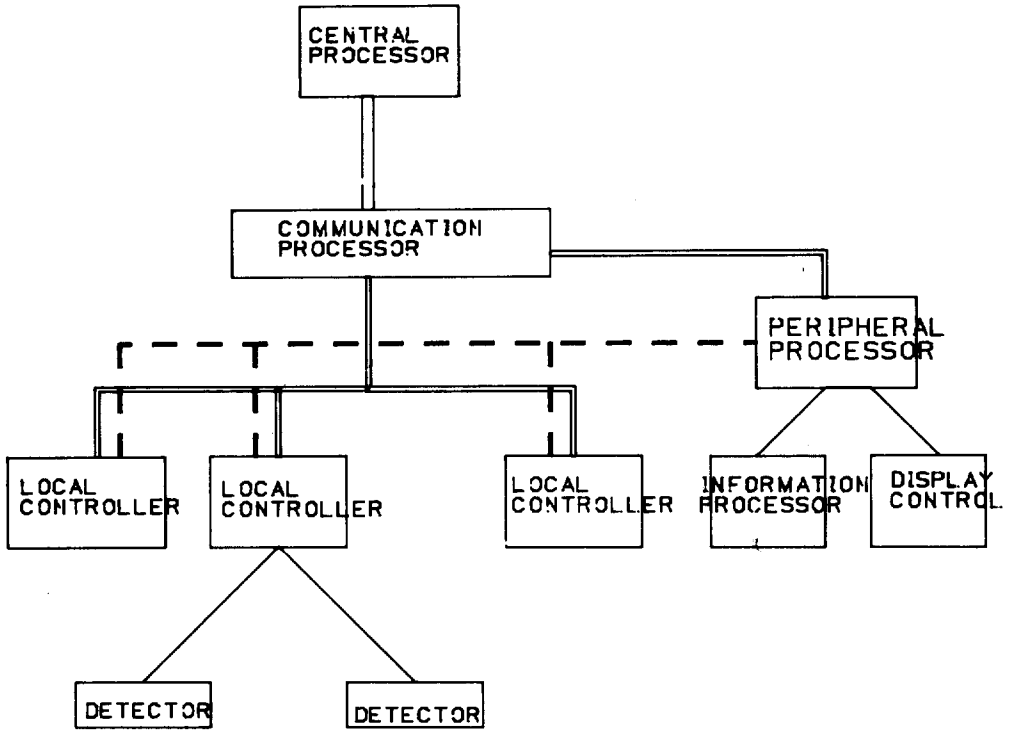


그림 1. 도쿄 교통제어 시스템 구성도

표 1. Computer 제어방식에 의한 파생효과

	Before Computer Control	After Computer Control	Rate (%)
Journey Time per KM (Sec.)	242.1	189.2	- 21.9
Stops per KM	3.91	2.47	- 36.8
Total Emission Per Year	117.1	83.2	- 29
Total Fuel Consumption Per Year ($\times 10^3$ K l)	252	215	- 14.7
Traffic Accidents Per Year	663	460	- 30.6

량 (x_5, x_6, \dots, x_{10}) 이 누적되어 다른 방향으로의 교통량의 흐름을 방해하게 되는데, 점선 부분의 교통량에서는 각 지점에 머무를 수 있는 차량의 수가 매우 제한되어 있으나 실제로는 과다하게 밀집되기 때문에 전체적으로 교통 혼잡을 초래하게 되는 것이다. 따라서, 적절한 교통 신호 제어를 위해서는 이와 같

은 사항들을 고려한 모델에 의한 문제의 구성이 필요하다.

1959년 Webster 가⁴⁾ 도시 교통망에서의 신호 제어 모델을 제시한 이래, 많은 교통 모델들이 발표되었다. 그들은 크게 macroscopic model 과 microscopic model 로 대별된다. macroscopic model 에서는 교통량을 연속적인 유체의 흐름과 연관시켜 그의 dynamics 를 연속조건을 이용한 편미방 함수로 표시하였으며⁴⁾ microscopic model 에서는 각각의 차와 운전사를 개별적인 변수로 생각하여 외부에서 가해지는 자극과 이에 대한 운전사의 반응시간과의 관계식으로 교통량에 대한 dynamics 를 설명하였다⁵⁾ 그러나, 대도시의 복잡한 도로망에서는 많은 차량들에 대한 각각의 dynamics 를 고려하는 것은 거의 불가능하므로 많은 차량들에 대한 집합적인 dynamics 를 다루는 macroscopic model 이 주로 사용된다.

macroscopic model 에 의한 도로 교통망의 dynamics 는 일반적으로 도시 교통망과 highway 교통망으로 나누어 지는데, 근본적인 차이점은 도시 교통망에서는 highway 교통망과는 달리 교차로가 있기 때문에 서로 교차하는 교통량이 존재하며, 한 교차로내

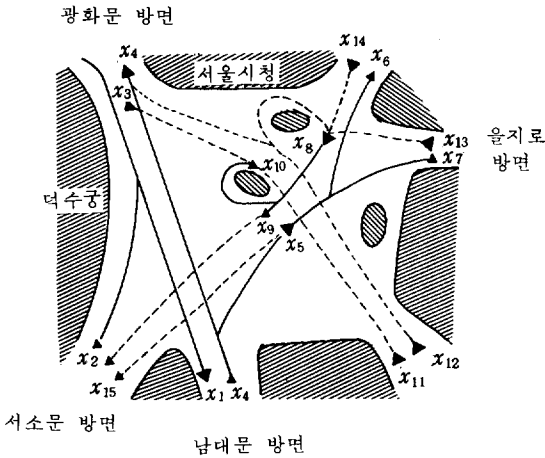


그림 2. 서울 시청 앞 교통 도로망

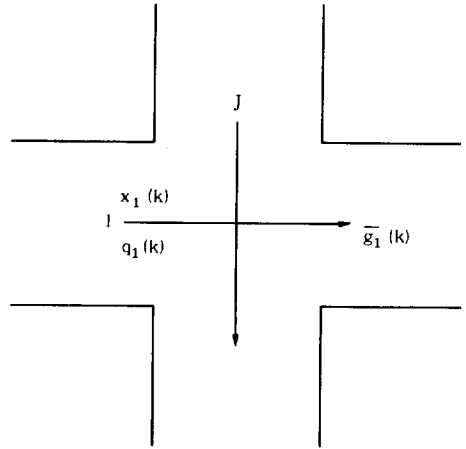


그림 3. 도시교통망의 기본모델

에서의 green signal 에 대한 cycle time 이 있다는 점이다. 또한, highway 교통망에서는 도로상에 존재할 수 있는 차량의 수의 제한이 없는 반면, 도시 교통망에서 각 구간마다의 거리가 짧기 때문에 심한 제약을 받게 된다. 이러한 점을 제외하고는 highway 교통망과 도시 교통망의 dynamics 는 동일하게 설명될 수 있다.

그림 3 과 같은 간단한 one - way no - turn 교차로에서 i 를 교통망의 방향이라 하고, $\bar{g}_i(k)$ 를 시간 k 에서 한 cycle time C 동안에 평균적으로 교차로를 빠져나가는 차량의 수, $q_i(k)$ 를 교차로로 진입하는 차량의 수라 하자. 이때, 교차로에 남아 있는 차량의 수 $x_i(k)$ 를 상태 변수로 보면 교통망의 dynamics 는

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i(k) - \bar{g}_i(k) \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다^{6), 7), 8), 18)} 또한 cycle time C 는 각 방향에서의 green signal, G_1 과 G_2 , 및 loss time l 의 합으로 표시된다.

$$C = G_1 + G_2 + l = G_e + l \quad (2)$$

(2)식에서 G_e 는 한 cycle time 동안의 effective green signal 을 의미한다.

이제 도시 교통망의 과포화 및 비포화현상을 알아 본다. 도로망이 과포화 상태일때는 $\bar{g}_i(k) < x_i(k)$ 가 되어 계속적으로 교차로에 차량이 누적됨을 의미하며, 비포화시에는 $\bar{g}_i(k) \geq x_i(k)$ 가 되어 원활한 교통 소통이 됨을 의미한다. 따라서, 식 (1)의 $\bar{g}_i(k)$ 는 이러한 도로망의 성질을 설명할 수 있어야 하므로,

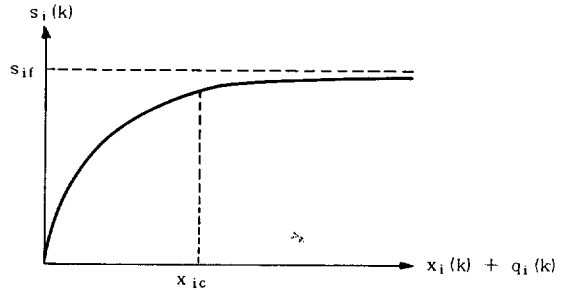


그림 4. output flow rate 의 모델

[8]에서는 $\bar{g}_i(k)$ 를 다음과 같은 비선형 함수로 설명하였다.

$$\bar{g}_i(k) = S_i(k, x_i(k), q_i(k)) u_i(k) \quad (3)$$

$$S_i(k, x_i(k), q_i(k)) = S_{if} [1 - \exp\{-K_i (x_i(k) + q_i(k)) / X_{ic}\}] \quad (4)$$

(3)식에서 $u_i(k)$ 는 $u_i(k) \triangleq G_i / C$ 와 같이 정의되고, $S_i(k, x_i(k), q_i(k))$ 는 output flow rate 이며 (4)식과 같이 state queue $x_i(k)$ 와 input queue $q_i(k)$ 의 함에 대한 지수 함수 형태로 표시된다 (그림 4 참조). 식(4)에서 S_{if} 는 Webster³⁾에 의해 정의된 saturation flow rate 이며 한 cycle time 동안 같은 방향으로 계속 green signal 이 유지될 때 그 방향에서 교차로를 빠져 나갈 수 있는 차량의 최대치이다. 또한, K_i 와 X_{ic} 는 도로의 용량에 따라 결정되는 상수이다.

그림 5 와 같이 서로 인접한 교차로의 경우, (i, j) 교차로의 output flow $\bar{g}_i(k)$ 는 $(i + 1, j + 1)$ 교차로의 input flow $q_j(k)$ 가 되므로, 이 경우 delay

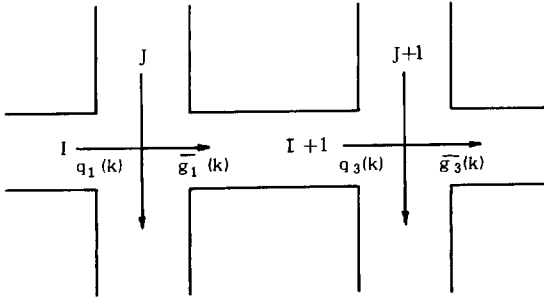


그림 5. 상호연결된 교차로 모델

time 을 $d = (\theta + a) C$, (θ 는 정수, $0 \leq a < 1$) 이라 하면, $q_3(k)$ 는

$$q_3(k) = (1 - a) S_1(k - \theta, x_1(k - \theta), q_1(k - \theta)) u_1(k - \theta) + a S_1(k - \theta + 1, x_1(k - \theta + 1), q_1(k - \theta + 1)) u_1(k - \theta + 1) \quad (5)$$

과 같이 표시된다. 따라서 전체 교통망 시스템은 다음과 같은 비선형 vector difference equation 으로 설명될 수 있다.

$$x(k+1) = E_n x_n(k) + \sum_{j=0}^{\theta} B_j(k) u(k-j) + d(k) \quad (6)$$

식 (6)에서 $x(k)$ 와 $u(k)$ 는 각 $n \times 1, m \times 1$ vector 이며 E_n 은 $n \times n$ identity matrix, θ 는 전체 교통망에서의 가장 큰 delay time 를 표시한다. $B_j(k)$ 는 $S_i(k-j, x_i(k-j), q_i(k-j))$ 를 component 로 하는 $n \times m$ matrix 이며 $d(k)$ 는 외부에서 들어오는 $n \times 1$ input vector 이다. 또한, 도로 교통망에서의 실제적인 이유로 state queue $x_i(k)$ 와 control signal $u_i(k)$ 에 다음과 같은 제한이 가해진다.

$$0 \leq x_i(k) \leq x_{i,max} \quad (7)$$

$$u_{min} \leq u_i(k) \leq u_{max} \quad (8)$$

한편, highway 교통망에서는 (7)식의 $x_{i,max}$ 의 제한이 없으며 (8)식과 같은 control signal 을 두지 않으므로 (1)식의 $\bar{g}_i(k)$ 를 하나의 독립된 변수로 취급하여

$$0 \leq \bar{g}_i(k) \leq S_{if} \quad (9)$$

와 같은 제한 조건을 두고 있다.⁹⁾

3 교통문제 제어와 개요

도시 교통망 모델에 대한 최적 제어문제에서는 일반적으로 각 교차로에서 기다리는 차량들의 지연시

간을 최소로 하기 위한 control signal 의 값을 찾는 것이므로 state queue $x_i(k)$ 의 합 또는 $x_i(k)$ 의 제곱의 합을 최소화하는 목적 함수를 갖게 된다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n x_i(k) \quad (10)$$

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n x_i^2(k) \quad (11)$$

(11)식과 같이 $x_i^2(k)$ 의 합의 최소화는 실제로 지연시간의 최소화를 의미하지는 않지만 각 교차로에서 기다리는 차량들에 대한 각 방향에서의 전반적인 감축을 의미하며 어떠한 한 방향으로의 지나친 차량의 증가를 허용하지 않고, 또한, linear quadratic 문제로 구성되므로 계산상의 잇점을 가지고 있다.

(10)식과 같은 목적 함수에 대해서는 교통망의 dynamics 가 비선형 요소로 가질 경우 해결하기가 매우 어렵다. 그러나, 과포화된 highway 교통망과 같이 교통망의 dynamics 가 선형 방정식으로 표시가 될때에는 linear programming 이나 Hamilton-Jacobi 의 이론을 도입하여 해결 할 수 있다.^{9),10)} 또한, [11]와 [12]에서는 nonlinear dynamics 를 piecewise linearized model 로 수정하여 각기 linear regulator 문제 및 linear programming 문제로 해를 구하였다. 그렇지만, [11]에서 지적한 바와 같이 linearized model 에서는 실제 교통망을 적절히 표현하기 어렵고 시스템의 차원이 클 경우에는 해를 구하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서, [12]에서는 시스템의 정확한 모델에 대해 이론적인 제어 방식에 의한 해를 구하는 방법과 실제 implementation 시 sub-optimal 한 방식을 채택하는 것과의 trade-off 에 대해 기술하였다.

교통망의 dynamics 를 linear equation 으로 표시한 경우에는 도로망을 지나는 차량이 항상 일정한 속도로 움직이는 것으로 가정하는데, 이는 도로망이 과포화되 있음을 의미한다. [9]과 [13]에서는 이러한 경우에 대한 dynamic routing 방식을 소개하였으며, 특히, [13]에서는 비집중화 local controller 의 도입을 제안하였다. 또한, [9], [13]의 모델에는 state queue $x_i(k)$ 에 대한 한계치가 없기 때문에, 주어진 문제에 대한 해가 있을 필요 충분조건은 도로망의 topology 에 의해 결정된다. 그러나 그들의 모델은 전체의 교통망이 모두 과포화되었을 때를 제외하고는 다소 현실과 맞지않는 결점이 있다. 예를 들어, 그림 6과 같은 도로망에서, [9]에 의한 교통량의 배정은 1번 방향에 15, 2번 방향에 5, 3번 방향에 0 과 같다. 그러나 실험적으

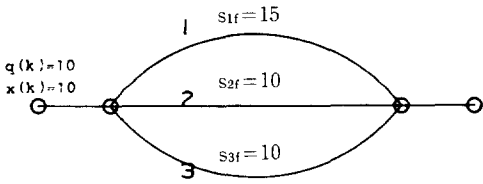


그림 6. 3개의 노선을 갖는 교통망

로¹⁴⁾ output flow rate는 (4)식과 같이 state queue $x_i(k)$ 와 input queue $q_i(k)$ 에 좌우되므로 실제 도로망의 성질에 맞지 않는 결과가 나오게 된다.

대규모 교통망에서는 시스템 자체의 차원이 크기 때문에 linear programming 및 linear regulator 등의 방법으로는 해결하기 어려웠으므로 Burhardt와 Kulikowski¹⁵⁾는 decomposition 및 계층적 최적 제어 방식등의 대규모 시스템 개념을 사용할 것을 제안하였고 [6-8] 및 [16-18]에 의해서 시도되었다. [6-8] 및 [18]에서는 2단계의 계층적 구조를 취하여 최적 제어 문제의 해를 구하였으며 [17]에서는 intelligent 제어 방식을 도입하였다.

4 계층적구조의 교통제어 시스템

계층적 최적 제어 방식이란 대규모의 차원을 지닌 시스템을 분할하여 작은 차원을 지닌 여러개의 부시스템과 조정자(coordinator)로서의 상부 시스템을 두는 계층적 구조를 취하여 각 단계 사이의 반복

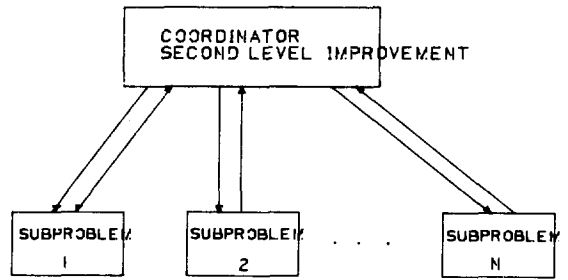


그림 7. 계층적 최적제어 방식의 구조

적인 계산을 통해 전체 시스템의 해를 구하는 방식이다(그림 7 참조).

[6-8] 및 [16-18]에서는 구성된 최적제어 문제에 대한 Lagrangian 함수를 Decomposition하여 2단계의 계층을 두고 upper-level에서는 coordinator로서 Lagrange Multiplier 값을 lower-level로 보내고 lower-level에서는 부시스템에 대한 해를 구한다. 각 부시스템의 해는 다시 upper-level로 보내져서 개선된 multiplier의 값을 구하게 된다. 이러한 계층적 최적 제어 방식의 장점은, 첫째로 대규모 시스템의 최적 제어 문제에 대한 계산 시간의 능률을 들 수 있다. 특히, [16]에서와 같이 각 부시스템에 microcomputer를 배정하여 전체적으로 parallel processing이 되면 더욱 빠른 시간내에 해를 구할 수 있다. 또한 각 부시스템들을 서로 독립적으로 implementation할 수 있으므로, 교통 시스템과 같은 문제에서는 각 교차로마다 microcomputer를 두어 중

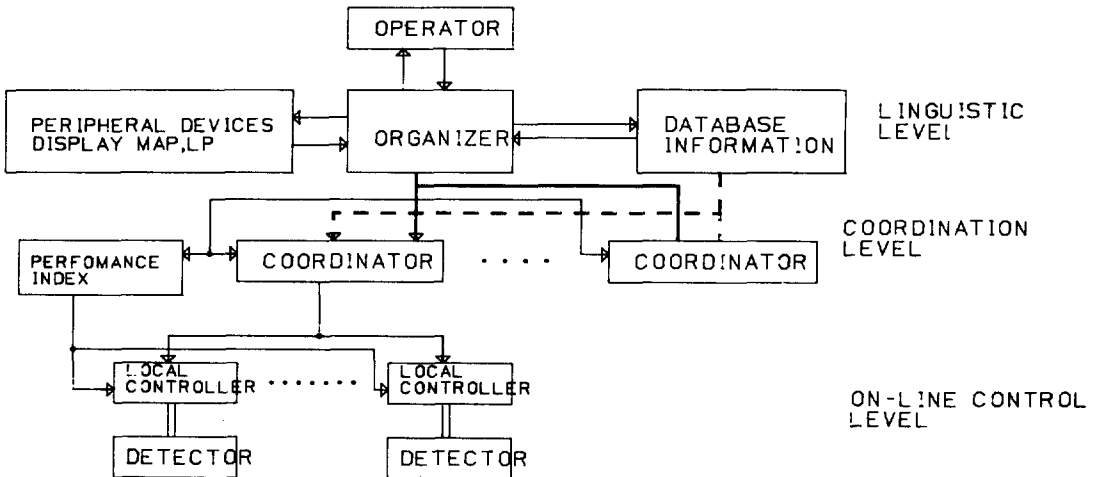


그림 8. 종합 교통제어 시스템의 구조

앙의 시스템과의 통신망을 구성하여 각종 자료의 분석 및 통계 작업을 통한 종합적인 교통 정보시스템을 구성할 수 있다. 그러나 현재까지 발표된 계층적 최적 제어 방법으로는 real-time 방식의 교통 제어는 불가능하다. 따라서 각각의 교통망에서 여러가지 상황에 대한 simulation을 통해 coordinator의 값을 구하여 이를 database화하여 실제의 상황에서 가장 비슷한 경우에 대한 coordinator의 값을 이용하는 방안도 검토되고 있다.¹⁷⁾

[17]에서는 계층적 구조의 intelligent 제어 방식을 도입하여 전체 시스템을 아래와 같이 3 단계로 나누었다. (그림 8 참조)

- 1) On-line control level
- 2) Coordination level
- 3) Linguistic organization level

1, 2의 단계에서는 [6-8] 및 [16]의 계층적 최적 제어 방식과 동일한 구조를 가지며, 아울러 현재의 상황에 대한 coordinator의 값을 database에서 찾아내 빠른 시간내에 계산 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 또한 가장 높은 단계인 linguistic organization level에서는 traffic operator (또는 engineer)와 시스템간의 통신을 통해 전반적인 교통 정책을 반영할 수 있도록 되어 있다.

5 결 론

이상으로 도로 교통망에서 발생하는 문제점 및 그 해결 방법에 대해 개괄적으로 기술하였다.

지금까지 발표된 교통 문제의 해결책은 일부 현상만의 설명으로 일반적인 적용이 어렵거나 정확한 모델이라 할지라도 계산 능력이 처지기 때문에 뚜렷한 해결책이 되지 못하고 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 적절한 모델과 효과적인 알고리즘에 대한 연구가 절실히 요구된다. 아울러, 교통량 측정 및 통신망 구성등의 부대 시설에 대한 연구도 시급한 실정이다.

참 고 문 헌

1) H. Inose; "Road-traffic control with the particular reference to Tokyo traffic control and surveillance system", IEEE Proc. vol. 64, No. 7, pp. 1028-1038, 1976.
 2) B.C. Black and D.C. Gazis; "Real-time traffic flow control", IBM systems Journal, No. 3, 1971.

3) F.V. Webster; "Traffic signal setting", Road Research Technical Paper, No. 39, 1958.
 4) D.C. Gazis and L.C. Edie; "Traffic flow theory", IEEE Proc., vol. 56, pp. 458-471, 1968.
 5) D.C. Gazis, R. Herman and R.W. Rothery; "Analytical methods in transportation: mathematical car-following theory of traffic flow", proc., ASCE, J. of Eng. Mechanics Div., vol. 89, pp. 26-46, Dec. 1963.
 6) M.G. Singh and H. Tamura; "Modelling and hierarchical optimization for oversaturated urban road traffic networks", Int. J. Control vol. 20, No. 6, pp. 913-934, 1974.
 7) J.H. Lim, S.H. Hwang, I.H. Suh and Z. Bien; "Hierarchical optimal control of oversaturated urban traffic networks", Int. J. Control, vol. 33, pp. 727-737, 1981.
 8) 박은세, 임준홍, 서일홍, 변증남, "On modelling and hierarchical optimal control of urban traffic networks", 제 14 차 대한 전기학회 계측제어분과 학술발표회논문집, 연세대학교, 1981
 9) P.E. Sarachik and Ü. Özgüner; "On decentralized dynamic routing for congested traffic networks", IEEE Trans. Automat. Control., vol. 27, No. 6, pp. 1233-1238, 1982.
 10) J.A. Wattleworth; "Peak-period analysis and control of a freeway system", Highway Research Record, No. 157, pp. 1-21, 1967.
 11) D.K. Merchant; "A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems", Transportation Science, vol. 12, No. 3, pp. 183-199, 1978.
 12) G. Jumarie; "Sub-optimal control with observer of a two-lane highway traffic flow", Int. J. Systems Sci., vol. 12, No. 7, pp. 893-906, 1981.
 13) E.J. Davison and Ü. Özgüner; "Decentralized control of traffic networks", IEEE Trans. Syst., Man, Cybein., vol. 13, No. 4, pp. 476-487, 1983.
 14) L. Edie; "Car-following and steady state theory of non congested traffic", Oper. Res., vol. 10, pp. 66-86, 1961.
 15) K.K. Burhardt and R. Kulikowski; "Optimum control of oversaturated traffic system", Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Tech., pp. 573-584, 1970.

- 16) M. Papageorgiou and G. Schmidt; "Implementation of a hierarchical optimization algorithm on a multimicrocomputer system", vol. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 13, No. 1, pp. 1-18, 1983.
- 17) C.S.G. Lee; "Hierarchically intelligent control and management of traffic systems", Proceedings

- of the 8th IFAC World Congress, Japan, August 1981.
- 18) E.S. Park, J.H. Lim, I.H. Suh, and Z. Bien; "Hierarchical optimal control of urban traffic networks", Accepted to be published in Int. J. Control.

新 規 加 入 者 名 單 (2 月)

(84. 2. 1 - 2. 29) : 32명 (正-27명 學生-5명)

구분	회원 번호	성 명	소 속
正	392029	孫 義 桓	현 대 차 량
	499063	吳 應 鍾	대 한 전 선
	585054	林 裁 尹	충 북 대
	678012	蔡 洪 仁	"
	141031	盧 龍 洙	국립공업시험원
	263253	朴 珖 會	"
	396051	宋 良 會	"
	575587	李 岱 勳	"
	701167	崔 甲 洪	"
	844052	黃 仁 景	"
	122700	金 基 昶	인 하 대
	122701	金 大 榮	"
	122702	金 賢 澤	"
	125029	南 勝 午	"
	263254	朴 珉 晟	"
	357004	石 成 源	"

구분	회원 번호	성 명	소 속
	437048	安 榮 勳	인 하 대
	460001	魚 秀 榮	"
	549028	劉 振 浩	"
	575588	李 源 培	"
	575589	李 允 錫	"
	610033	全 東 昊	"
	620165	鄭 然 昔	"
	648011	朱 興 墩	"
	701168	崔 衡 默	"
	818006	玄 哲	"
	122703	金 慶	동 양 공 전
學 生	122698	金 元 九	충 북 대
	575586	李 今 濬	"
	122699	金 永 燦	국립공업시험원
	453028	梁 熙 勇	"
	793051	韓 龍 錫	"