

□ 論 文 □

고속도로시스템의 정주기식 램프미터링을 위한 최적화모형의 개발

Development of an Optimization Model for Freeway Entrance-Ramp Metering

金 永 燦

(명지대 교통공학과 교수)

賓 美 英

(명지대 교통공학과 대학원)

— 목 차 —

- | | |
|---|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 대상모형선정</p> <p>1. Messer모형</p> <p>2. 수정된 Messer모형</p> <p>3. Yuan모형</p> <p>4. Papageorgiou모형</p> <p>5. 비교</p> | <p>III. 사례를 통한 모형의 비교평가</p> <p>1. 평가계획</p> <p>2. 평가결과</p> <p>IV. 모형의 수정</p> <p>1. 추가 제약조건식</p> <p>2. 제안된 모형의 테스트</p> <p>3. 컴퓨터프로그래밍</p> <p>V. 결론</p> |
|---|--|

— ABSTRACT —

Peak-period congestion is a frequent occurrence on many freeways. Entrance-metering is an effective strategy in improving urban freeway traffic condition. This paper describes the procedure to develop a computer program for preparing optimum ramp-metering strategies. Four existing ramp-metering optimization models were reviewed and evaluated in regard to their theories and actual performances. A optimization model was proposed in this paper. Final model takes a form of quadratic programming. The performance of the proposed model was test using FREFLO.

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

I. 서론

국내의 고속도로들은 도시고속도로, 지역간 고속도로를 막론하고 폭발적으로 증가하는 심각한 체증현상을 보이고 있어 이동성을 위주로 하는 고속도로 원래의 기능은 이미 상실하고 흡사 대형주차장을 방불케 하는 것이 오늘날의 실정이다. 이러한 교통체증으로 속도의 저하, 여행시간의 증가, 이에 따른 사회혼잡비용은 날이 급격히 증가하고 있다. 투자재원이 제한된 현실에서 교통문제를 도로의 추가건설도 필요하지만, 고속도로의 교통수요를 과학적인 방법으로 관리하고 통제하여 고속도로를 포함한 주변도로들을 충분히 활용함으로써 교통축 관리의 차원에서 고속도로의 수송능력을 제고하는 방안을 강구해야 할 때이다.

고속도로교통관리체계는 교통량의 급격한 증가나 교통사고와 같은 유고상황을 조기에 파악하여 본선에 진입하는 교통량을 통제하거나 도로상황에 관련한 정보를 운전자에게 제공하여 차량들이 혼잡지역을 우회하게하여 고속도로혼잡을 미연에 방지하거나 사고에 따른 지체를 최소화시키기 위하여 설치운영되는 각종 장비들의 집합체를 말한다. 고속도로교통관리체계가 국내에서는 지역간 고속도로를 대상으로 일부 실시되고 있지만, 미국, 영국, 일본 등 선진 외국의 대도시에서는 1960년대부터 이러한 체계가 설치운영되어 고속도로 소통효율을 증진하는데 실효를 거두고 있으며, 관계체계의 활용도는 간선도로 교통신호제어시스템만큼 일반화되어 있다.[1,2,3]

고속도로교통관리체계가 도시고속도로에 실시될 경우 여러 기능중 램프미터링은 고속도로 소통증진을 위하여 가장 중요한 위치를 차지한다. 진입램프미터링이란 고속도로본선으로 진입하는 교통량을 진입램프에서 통제하여 본선

의 교통혼잡을 방지함으로써 고속도로시스템의 수송능력을 극대화하고자 하는 기법이다. 도시고속도로의 소통증진 측면에서 램프미터링기법을 통하여 미국의 경우 최대 60퍼센트까지 속도향상의 효과를 보고하고 있고[4], 서울시의 올림픽고속도로의 경우 모의실험을 통하여 효과를 분석한 바 있다.[5]

진입램프미터링시스템에서의 핵심기술은 고속도로시스템을 구성하는 다수의 진출입램프에서 최적 차량진입허용량(optimum metering rate)을 산출하는 컴퓨터프로그램을 개발하는 것이다. 고속도로램프미터링 최적화모형은 Wattleworth와 Berry[6]가 처음 개발하였으며, 제어목표로 유출량극대화를 추구한 선형계획모형이다. Messer[7]는 Wattleworth의 모형을 발전시켜 다단계 램프미터링시스템을 구축하였다. 그 후 Yuan와 Kreer[8]는 대기차량길이를 통제하는 기능을 추가하여 최적화 알고리즘을 제안하였다. Chen과 Cruz[9]은 유출량극대화의 제어목표를 본선의 교통류를최대화를 목적함수로 한 선형계획모형을 제시하였다.

이상의 모형들은 교통류의 steady-state상황을 전제로 유도되었는데 Papageoriou[10]는 상대적으로 현실적인 전제인 non-steady-state상황을 가정한 모형을 제시하였다. 이러한 가정은 이론적으로 우수하기는 하나 다양한 교통상황에 대하여 검증되지 않는 상태이다. 특히 Papageoriou모형은 합류부의 용량처리부분이 미진하여 최적해의 신뢰성에 문제점이 발생할 수 있다.

FREQ시리즈[11]는 May에 의하여 최근까지 지속적으로 개발되어왔다. FREQ는 최적화모형과 함께 시뮬레이션기능도 보유하며 그외에도 다양한 옵션을 제공하나 너무 단순화된 최적화 모형을 사용하여 개선의 여지가 있다. Chang와 Messer[12]은 동적모형의 개념을 도입

하여 FREQ의 최적화모형의 틀에서 최적해를 향상시키는 방법론을 제시하였으나, 여전히 steady-state가정을 사용한다.

국내 도시고속도로에는 램프미터링이 실시되지 않으므로 인하여 램프미터링 최적화문제에 대한 연구가 미미하다. 김영찬[13]이 FREQ의 단점을 보완하여 정수계획법을 이용한 최적화모형을 제시한 바 있으나 최적화모형을 제시하는데 그쳤으며, 컴퓨터프로그램의 개발은 없었다. 서울시정개발연구원[14]와 도로교통안전협회[15]의 연구보고서에 따르면 서울시의 도시고속도로를 대상으로 고속도로교통관리체계가 수년내로 구축할 것으로 보고되고 있다. 이러한 국내현실을 볼 때 고속도로 진입램프미터링 분석용 컴퓨터모델이 국내의 연구결과로 시급히 개발되어야 한다고 본다.

본 연구의 목적은 고속도로시스템을 대상으로 램프미터링을 실시할 경우 정주기식 제어방식에서 사용되는 램프미터링 시간계획을 산출하는 최적화 모형을 선정하여 컴퓨터프로그램밍하는데 있다. 연구절차는 우선 정주기식 램프미터링에 대한 대한 기존의 모형들은 비교평가하여 적절한 모형을 선정한다. 모형들의 평가는 이론적인 측면뿐만 아니라 실제사례를 중심으로 테스트하여 성능을 비교평가한다. 이러한 작업을 통하여 선정된 모형은 현실성이 있도록 제약조건식을 추가하여 수정한 다음 컴퓨터 프로그래밍작업을 실시한다. 본 연구에서는 램프미터링 최적화모형의 이론적 개발보다는 사용가능한 컴퓨터모형을 개발하는데 주안점을 두고 있다.

II. 대상 모형 선정

컴퓨터프로그램밍을 위하여 다음의 네가지

모형들을 선정하였다.

- Messer모형
- 수정된 Messer모형
- Yuan모형
- Papageorgiou모형

Messer모형[7]은 최근에 널리 사용되고 있는 소프트웨어인 FREQ[11]의 최적화 모듈의 이론적 근간이 되고 있으므로 우선 선정하였다. Messer모형이 시간간격별로 별도의 해를 산출하는 순차적 방법을 취하는데, 이 방법을 개선하여 수정된 Messer모형이 제시되었다[12, 13]. 수정된 모형은 순차적 해법대신에 시간간격별 모형을 대상시간격에 대하여 한 개의 모형으로 묶어서 해를 구하는 동시해법방식을 사용하였다. Messer모형은 고속도로본선의 각 구간 교통량을 진입교통량의 진출입비율에 따라 대수합을 구하여 표현한 반면에, Yuan모형[8]은 교통류의 속도, 밀도, 교통량의 관계에 의하여 연속방정식을 사용하여 구간교통량을 표현하여 Messer모형에 비하여 이론적으로 우수하다고 보인다. 이상의 모형은 steady-state가정하에 제시된 모형인데 반하여, Papageorgiou모형[10]은 non-steady-state가정을 사용하여 한층 현실적인 교통류표현방법을 사용하여 최적화모형을 개발하였다. 이상에서 선정된 모형을 요약하면 다음과 같다.

1. Messer 모형

램프미터링에서 최적진입교통량을 산출하는 1960년대 중반에 개발된 초기모형을 Messer모형이다. 이 모형은 FREQ모형의 최적화모듈에서 사용되어 현재까지 사용되고 있으며, 핵심부분을 요약하면 다음과 같다.[7]

$$\text{목적함수 : } \text{Maximize } \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$\text{제약조건식 : } \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} \leq B_j \text{ 모든 } j \text{에 대하여} \quad (2)$$

$$X_i = T_i \quad (3)$$

$$X_i \leq T_i \text{ 모든 } i \text{에 대하여} \quad (4)$$

여기서, X_i : 진입로 i 의 진입교통량

A_{ij} : 진입로 i 에서 병목구간 j 의

O-D(origin-destination)비율

B_j : 병목구간 j 의 용량

T_i : 진입로 i 의 교통수요

$i = 1, 2, \dots, I$: 진입로의 갯수

$j = 1, 2, \dots, J$: 병목구간의 갯수

Messer모형의 제어목표는 고속도로에 진입하고자 하는 진입교통량을 최대화하는 것이다. 이 모형은 각 시간간격 k 에 대하여 수식화한 것으로, 제약조건식(2)는 고속도로를 통과하려는 교통량은 본선의 병목구간용량을 초과할 수 없다는 제약조건식이다. 식(3)은 고속도로 본선구간의 진입량은 통제하지 않으므로 교통수요량과 같다는 제약식이다. 식(4)는 진입로에서 진입교통량 X_i 는 교통수요 T_i 를 초과할 수 없음을 표현한 것이다. 이 모형에서 다음 시간간격 $k+1$ 에 대한 각 진입로에 교통 수요 T_i 는 다음식에 따라 계산된다.

$$T_i(k+1) = L_i(k) + D_i(k+1) \quad (5)$$

여기서,

$D_i(k)$: 주기 k 일때 진입로 i 의 교통 수요

$L_i(k)$: 주기 k 일때 진입로 i 의 대기교통량

식(5)는 특정 시간간격에서 진입하지 못하고 진입램프에 잔류하는 대기 차량들은 다음 시간간격의 교통 수요에 추가된다는 것이다.

Messer모형은 모형이 단순하여 계산효율이 우수하므로, 실시간제어에 핵심알고리즘으로 이

용된다는 장점이 있으나, steady-state가정을 이용한 모형의 단순화로 인하여 교통류의 표현이 다소 현실적이지 못한 점이 문제점으로 지적되고 있다.

2. 수정된 Messer

본 모형은 제어목표나 주요 제약식이 Messer 모형과 동일하며, 다른 점은 Messer모형은 시간간격별로 모형화하지만, 수정된 모형에서는 모든 시간간격에 대하여 제약식을 통합한 형태를 사용한다. 이 모형의 목적함수와 제약조건식은 다음과 같다.[12,13]

$$\text{목적함수 : } \text{Maximize } \sum_{k=1}^I \sum_{i=1}^n X_i(k) \quad (6)$$

$$\text{제약조건식 : } \sum_{i=1}^n A_{ij}(k) X_i(k) \leq B_j(k) \text{ 모든 } j, k \text{에 대하여} \quad (7)$$

$$X_i = T_i \quad (8)$$

$$X_i(k) \leq T_i(k) \text{ 모든 } i, k \text{에 대하여} \quad (9)$$

$$L_i(k) = T_i(k) - X_i(k) \text{ 모든 } i, k \text{에 대하여} \quad (10)$$

$$T_i(k) = D_i(k) + L_i(k-1) \text{ 모든 } i, k \text{에 대하여} \quad (11)$$

사용된 기호는 Messer모형과 동일하다. 차이점은 교통량에 해당하는 변수들이 구간과 시간의 2차원배열로 표현된 것이며, 시간간격간의 대기차량전이를 나타내는 식(11)이 Messer모형과는 달리 최적화문제의 제약조건식으로 삼입되어 있다. 수정된 모형은 Messer모형보다 계산시간이 상당히 길어지는 단점은 있으나, 우수한 최적해를 도출하는 경우가 있다. 제어목표는 최대진입량으로 하면서 특정 진입램프에서 발생하는 대기행렬의 최대길이를 제약하고자하는 경우는 수정된 모형의 해가 상대적으로 우수해진다.

3. Yuan모형

일반적인 진입램프최적화모형의 제어목표가 진입교통량을 최대화하는 것에 비해, Yuan모형은 진입로에서 미터링으로 인하여 발생하는 차량들의 길이를 최소화하고자 하는 것을 제어목표로 하고 있다. 진입램프미터링을 실시할 경우 과도하게 발생하는 대기차량이 인접교차로의 소통에 악영향을 미칠 수 있으므로, 대기차량의 길이를 최소화하는 제어목표도 바람직하다. 진입교통량최대화 와 대기차량길이 최소화는 상호연관성이 있으나 실제 산출되는 최적해에는 차이가 난다. 이 모형은 Messer모형과 달리 구간교통량을 산출하는데 있어, 교통류의 동적인 특성을 반영하여 현실적인 제약식을 사용한다. 교통류의 동적인 특성은 차량보존 법칙인 연속방정식과 속도의 가감속에 따른 밀도의 변화를 모형화하였다. 이 모형의 최종형태를 요약하면 다음과 같다.[8]

$$\text{목적함수 : } \text{Maximize } \sum_{k=1}^n \delta_k^t (y_r^k - e_a^k) \quad (12)$$

$$\text{제약조건식 : } y_r^k \leq y_{cr}^k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$y_r^k = (1 - \delta_0^{k1} f^{k1})(1 - \delta_0^{k2} f^{k2}) \dots \\ (1 - \delta_0^{k1} f^1) \delta_1^t y_r^k + (1 - \delta_0^{k1} f^{k1}) \\ (1 - \delta_0^{k2} f^{k2}) \dots (1 - \delta_0^{k1} f^1) \delta_1^t y_r^k + \\ \delta_1^t y_r^k \quad (14)$$

- 여기서, δ_k^t : 1 구간 k에 진입램프가 있을 경우
- 0 구간 k에 진입램프가 없을 경우
- δ_0^k : 1 구간 k에 진출램프가 있는 경우
- 0 구간 k에 진출램프가 없는 경우
- f^k : 구간 k에서 본선교통량중 진출하는 교통량의 비율
- y_r^k : 구간 k에서 진입로의 진입교통량
- y_{cr}^k : 구간 k의 병목구간의 용량
- e_a^k : 대기 교통량 증가화 변수

위의 식에서 보듯이 목적함수는 대기행렬길이의 자승을 최소화하는 형태를 띄고 있다. 식(13)은 본선의 교통량은 용량을 초과할 수 없도록 하는 제약식이며, 식(14)는 교통류의 동적 특성을 고려하여 유도된 구간교통량을 나타내는 관계식이다. Yuan모형의 최종형태는 quadratic programming의 형태를 나타낸다.

4. Papageorgiou모형

전절에 제시된 세가지 모형들은 공히 교통류의 steady-state가정을 기초로 작성된 모형들이다. 즉, 정해진 시간간격(통상 15분)동안 각 램프로 진입한 교통량은 고속도로구간의 거리나 교통류의 속도와 관계없이 순식간에 전체 고속도로구간에 영향을 미친다는 가정이다. 실제 상황을 고려하면, 분석대상 고속도로구간이 길 때는 이러한 가정이 현실성이 결여된다는 문제점이 있다. Papageorgiou모형은 이러한 steady-state모형의 한계점을 개선하기 위한 방편으로 교통류의 속도를 감안하여 특정 램프에서 진입한 교통량이 고속도로의 각 구간에 부하되는 시간이 달라지도록 모형화하였다. 이러한 non-steady-state가정은 현실적이라는 점에서 바람직하지만 제안된 모형이 너무 복잡하고 실지 계산상에서도 과도한 기억용량나 계산시간 등의 문제가 있어, 간략화시킨 형태가 최종모형으로 제시되었다. 모형은 다음과 같다.

$$\text{목적함수 : } \text{Maximize } \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^i X_i(k)(K-k+1) \quad (15)$$

$$\text{제약조건식 : } q_j^k(k) \leq B_j(k) \quad j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K, \\ f = 1, \dots, i+1 \quad (16)$$

$$q_j^k(k) = \sum_{i=1}^k \alpha_{ij}(k-k_{ij})r_i(k-k_{ij}) + \\ \sum_{i=k_{j1}, \dots, k_{jn}} \alpha_{ij}(k-k_{ij}+1)r_i(k-k_{ij}+1) \\ \text{for } kT - \Delta t_{n,j} < t \leq kT - \Delta t_{n,j} \\ \sum_{i=1}^K X_i(k) \leq \sum_{i=1}^K D_i(k) \quad i=1, \dots, I, k=1, \dots, K \quad (18)$$

여기서,

$X_i(k)$: 시간간격 k 에서 진입로 i 의 진입량

$D_i(k)$: 시간간격 k 에서 진입로 i 의
교통수요

$q_j^f(k)$: 시간간격 k 에서 병목구간 j 의
시간흐름에 의한 f 번째 교통량

$B_j(k)$: 시간간격 k 에서 병목구간 j 의 용량
 $i = 1, 2, \dots, I$: 진입로의 갯수

$j = 1, 2, \dots, J$: 병목구간의 갯수

$k = 1, 2, \dots, K$: 시간간격의 갯수

$f = 1, 2, \dots, i+1$: 한 시간간격동안의
시간간격에 의한 교통량 변화의 횟수

Papageorgiou모형의 목적함수나 제약식에 관한 배경은 수정된 Messer모형과 동일하며, 단지 식(17)에서 달라진다. 교통류를 표현하는 방식에서 특정 고속도로구간에 추가되는 교통이 진입교통량의 OD비율로 계산되지 않고, 여행시간을 고려하여 각 진입램프에서 진입하는 교통량의 부가시간이 달라지는 현상을 모형화하여 다소 복잡한 형태를 띤다. 자세한 내용은 참고문헌[10]을 참조하면 된다.

5. 비교

본 절에서 선정한 네가지 모형을 비교해 볼 때 Messer모형과 Yuan모형은 시간간격별로 별도로 해를 구하는 순차해법(sequential method)을 사용하며, 수정된 Messer모형과 Papageorgiou모형은 동시해법(simultaneous method)를 사용한다. 동시해법은 순차해법에 비하여 상대적으로 우수한 해를 구하는데는 유리하지만, 대상고속도로구간이 장거리이고 시간대가 많은 때는 계산상에서 컴퓨터메모리문제나 계산속도 등 제약이 따른다. 순차해법은 계산시간이 짧으므로 실시간 램프미터링방식의 제어알고리즘으로

사용될 수 있다. Yuan모형만 quadratic programming의 형태를 취하고 여타의 모형들은 선형계획법의 형태를 취한다.

고속도로에 추가되는 교통류의 모형측면에서는 steady-state가정의 한계를 벗어난 Papageorgiou모형이 가장 우수한 것으로 사료되며, 교통류의 동적 특성을 고려하여 모형화한 Yuan모형도 이론적으로 타당성이 있다. Messer모형과 수정된 Messer모형은 너무 단순화하여 교통류를 표현한다. 하지만, 복잡한 고속도로교통류를 분석할 때 이론적으로 우수하면 일반적으로 모형의 최적해도 우수하다고 볼 수는 있겠으나 반드시 그렇지 않은 경우도 있다. 따라서, 다음 절에서는 실제 사례를 중심으로 선정된 네가지 모형의 성능을 비교평가한다.

Ⅲ. 사례를 통한 모형의 비교평가

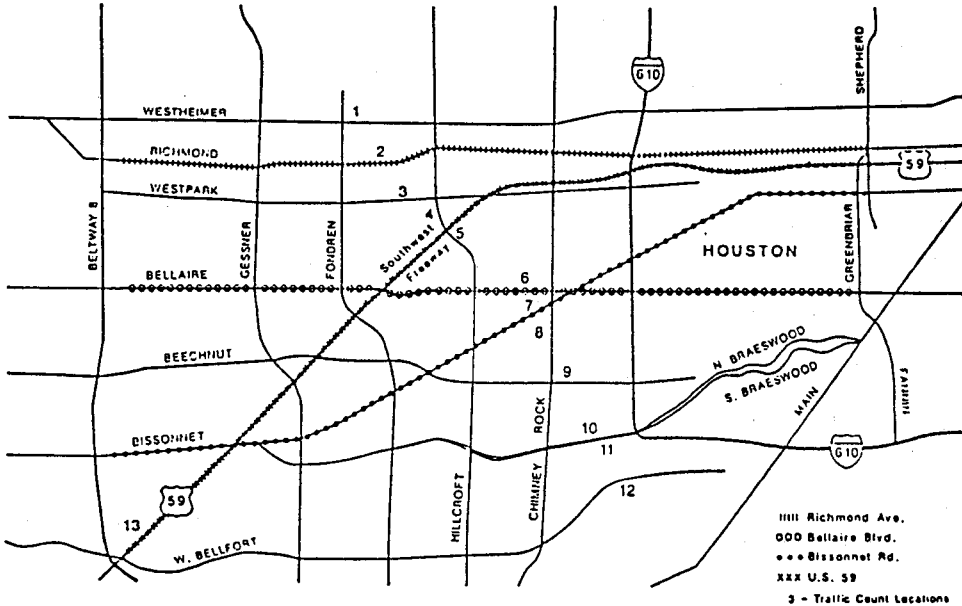
1. 평가 계획

전절에서 제시된 네가지 모형들을 실제 자료를 통하여 각 모형이 산출하는 최적해의 성능을 비교분석한다. 객관적인 결과를 얻기 위하여 두가지 사례를 선정하였다. 네가지 대상모형을 비교, 분석하기 위하여 두가지의 사례 자료를 통하여 시행하였다. 첫째 사례는 미국 휴스턴시의 Southwest Freeway(US59)을 선정하였으며, 둘째 사례는 Papageorgiou의 논문[10]에서 사용된 예제자료를 사용하였다.

사례 1 미국 휴스턴시의 Southwest Freeway (US59)는 휴스턴시의 남서지역에서 동북지역의 대각으로 관통하는 고속도로로 현재 진입램프 미터링을 실시하는 고속도로이다.(〈그림 1〉 참조) 본 연구에서는 전구간중 일부 구간을 선정

하였으며, 대상구간은 8개의 진입램프와 5개의 진출램프가 포함된다. 분석시간은 1시간으로 하며, 시간간격은 15분으로 하여, 4개의 시간간

격이 있다. 교통량과 O-D패턴은 각 시간간격마다 달라진다.



<그림 1> 미국 휴스톤시의 Southwest Freeway(US 59)

사례 2 Papageorgiou의 논문에서 사용된 자료는 고속도로의 대상구간이 6개의 진입램프와 7개의 진출램프를 포함한다. 분석 시간은 총 3시간으로 시간 간격은 20분의 단위로 9개의 시간간격이 있다. 교통량은 사례1과 마찬가지로 매 시간 간격마다 달라지나, O-D패턴은 동일한 것을 사용하였다.

LINDO[16]는 선형계획법이나 quadratic programming의 문제를 풀기 위하여 널리 사용되는 소프트웨어이다. 두가지 사례에 대하여 네가지 모형을 각각 적용하여 최적해를 산출한다. LINDO를 사용하기 위하여 대상사례의 최적화문제를 수계산으로 선형계획법 형태의 문제를 작성하였다.

이상의 두가지 사례의 자료를 사용하여 모형을 평가하기 위하여 다음의 두단계를 거쳤다.

제2단계 최적해를 FREFLO를 사용하여 시뮬레이션 시행

제1단계 LINDO를 사용한 최적해의 산출

네가지 대상모형의 최적해를 산출하기 위하여 모든 모형을 컴퓨터프로그래밍하기 보다는 범용소프트웨어를 사용하는 것이 효율적이다.

전 단계에서 산출된 최적해의 성능을 비교하기 위하여 현장에서 직접 테스트하는 방법이 제일이겠지만 현실적으로 가능하지 못하므로, 고속도로교통류전용 시뮬레이션 프로그램인 FREFLO를 사용하였다. FREFLO는 TRAF[17]

에 속하는 프로그램으로 거시적 모의실험모형이다. 이 모형은 서로 다른 제어전략을 평가하는 목적으로 개발된 프로그램으로 일반적으로 사용되므로 본 연구에서 램프미터링의 효과에 따른 고속도로 소통상태를 시뮬레이션하는데 적절하다고 판단되었다.

2. 평가 결과

1) 최적해의 비교

LINDO를 이용하여 두가지 사례에 대하여 최적해를 계산하였다. LINDO를 사용하여 본 문제들의 해를 구하는데 별반 문제점을 없었다. 사례1에 대하여 대상모형을 사용하여 구해진 최적해를 총진입교통량과 대기차량의 최대길이를 비교하면 <표 1>과 같다. 총진입교통량으로 볼 때 Papageorgiou모형이 최대량을 산출되며, Messer모형과 수정된 Messer모형이 비슷한 결과를 내고, Yuan모형이 최소치를 낸다. 대기차량의 최대길이를 살펴보면, Yuan모형이 최소값을 산출한다. 이유는 Yuan모형은 목적함수로 진입교통량최대화를 사용하지 않고, 대기차량길이 최소화를 채용하기 때문이다. 바람직한 모형은 총진입교통량을 최대화하고 대기차량길이를 최소화하는 것인데, 이러한 두가지 조건을 동시에 만족시키는 모형은 없다.

<표 1> 총진입교통량과 대기차량의 최대길이 비교 (사례1)

	총진입교통량 (Σ진입량)	차이* (%)	대기차량의 최대길이 (대/시간간격)	차이* (%)
Messer모형	4,625		362	
수정된 Messer모형	4,626	0.0	333	-8.0
Yuan모형	4,550	-1.6	213	-41.2
Papageorgiou 모형	5,840	+26.2	361	0.0

주: 차이는 Messer모형을 기준으로한 퍼센트로 나타냄.

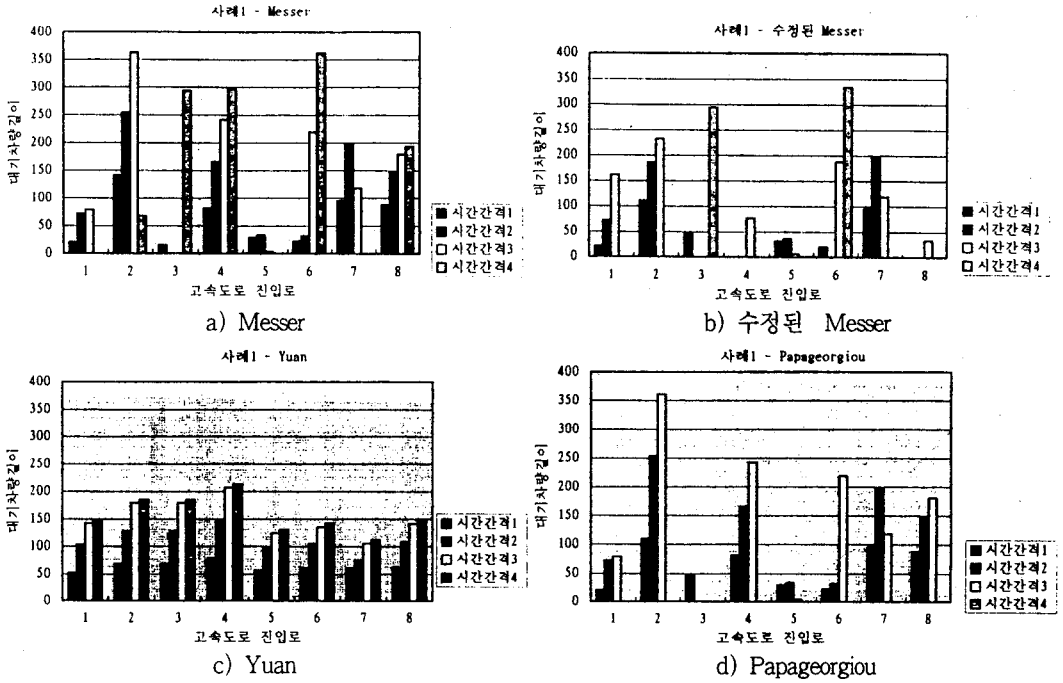
사례2의 경우 총진입교통량과 대기차량의 최대길이에 대한 비교는 <표 2>에 요약되어있다. 총진입교통량 최대화의 측면에서는 Yuan모형의 해가 최소량이 되고, 여타의 모형이 동일한 값을 산출했다. 대기차량의 최대길이를 비교하면 사례1의 결과와 마찬가지로 Yuan모형이 최소량을 나타낸다.

<표 2> 총진입교통량과 대기차량의 최대길이 비교 (사례2)

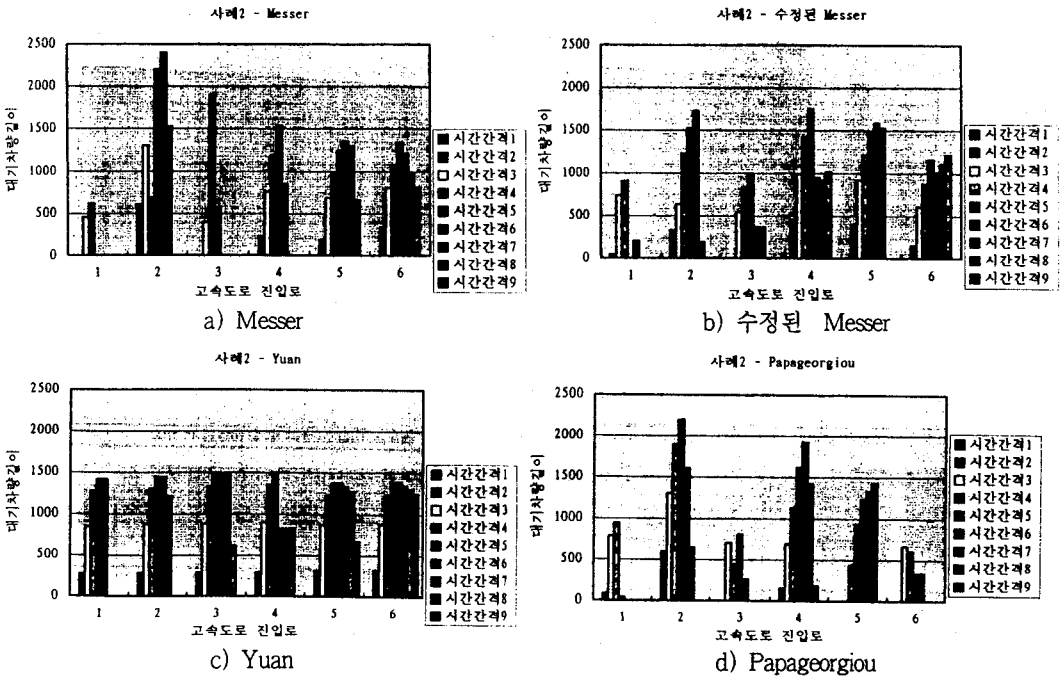
	총진입교통량 (Σ진입량)	차이* (%)	대기차량의 최대길이 (대/시간간격)	차이* (%)
Messer모형	18,500		2,400	
수정된 Messer모형	18,500	0.0	1,753	-27.0
Yuan모형	16,592	-10.3	1,499	-37.5
Papageorgiou 모형	18,500	0.0	2,200	-8.3

주: 차이는 Messer모형을 기준으로한 퍼센트로 나타냄.

상식적으로 볼 때, 진입교통량이 많으면 대기차량의 길이도 줄어들어야 하는데, Yuan모형의 경우는 총진입교통량이 타모형에 비하여 적으면서 대기차량의 최대길이도 적다. 이유는 <그림 2>과 <그림 3>에 나타나는데, 이 그림들은 사례1과 사례2에 대하여 최적해에 따른 대기차량의 길이를 개별 진입램프에 대하여 시간간격별로 나타낸 것이다. Yuan모형에서 발생하는 대기차량의 길이는 타모형에 비하여 대체로 고른 분포를 보인다. 즉, Yuan모형의 특징인 특정 진입램프에서 과도한 대기차량이 발생하지 않고 균등하게 분배하려는 모형의 의도를 확인할 수 있다.



〈그림 2〉 진입램프에 발생하는 대기차량길이 (사례 1)



〈그림 3〉 진입램프에 발생하는 대기차량길이 (사례 2)

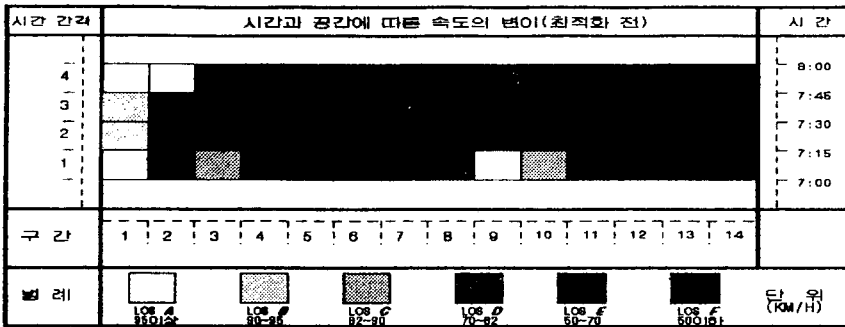
모형의 최적해를 두고 비교한 결론은 진입량 최대화란 측면에서는 Papageorgiou모형이 타모형에 비하여 근소하게 우수하며, 대기차량길이 최소화란 측면에서는 Yuan모형이 일관성있게 우수하다. 주의할 점은 진입량최대화는 본선에서 혼잡상태가 발생하지 않는다는 전제하에 작성된 목표이다. 다시 말해서, 각 모형에서 산출된 최적미터링량으로 실시하였때 본선의 용량보다 과다한 양인 진입한 경우는 본선구간에 혼잡이 발생하여 실시 진입가능한 량은 모형에서 산출된 값보다 적어지게 된다. 램프미터링의 실시에 따른 본선의 혼잡상태는 별도의 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있다. 다음 절에서는, 본 절에서 제시된 최적미터링량을 입력하였을 때 발생하는 교통상황을 FREFLO를 사용

하여 평가한다.

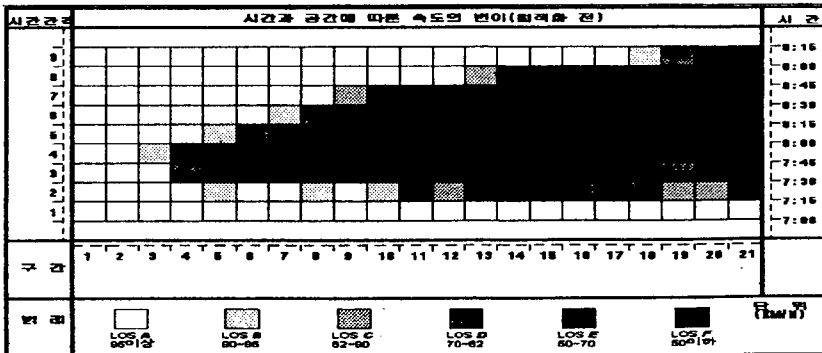
2) 시뮬레이션 결과의 비교

고속도로램프미터링의 목적은 고속도로의 본선에 혼잡을 발생시키지 않는 한도에서 최대의 교통량을 진입시키는 것이다. 네가지 대상모형으로 구한 최적해가 실시 적용될 경우의 교통상황이 과연 혼잡상태를 해소했는지를 확인하는 과정이 본 절에 기술된다.

<그림 4>와 <그림 5>은 각각 사례1과 사례2의 경우에 램프미터링을 실시하지 않을 경우 예상되는 교통상황을 FREFLO를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 사례1과 사례2에서 서비스수준 F의 혼잡이 대부분의 구간에서 발생하는 것으로 결과가 나왔다.



<그림 4> 램프미터링 실시 전의 모의실험결과 (사례 1)

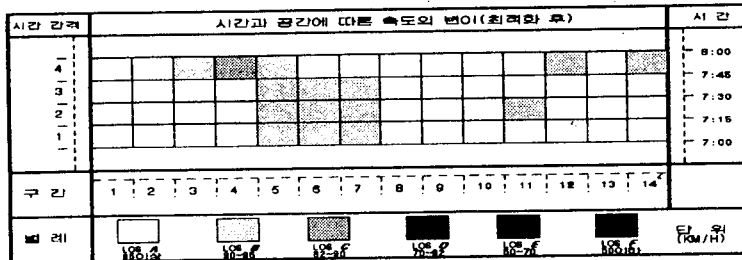


<그림 5> 램프미터링 실시 전의 모의실험결과 (사례 2)

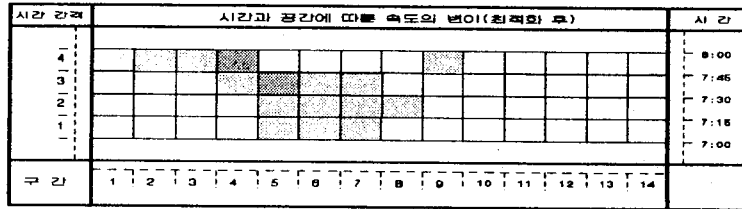
〈그림 6〉은 램프미터링 실시 후 네가지 모형의 결과를 사례1의 자료로 시뮬레이션한 것이다. Messer모형과 수정된 Messer모형, 그리고 Yuan모형을 적용한 경우 고속도로본선구간에 혼잡구간이 발생하지 않는 것으로 나타난다. 반면에, Papageorgiou모형은 4번째 시간간격에서 혼잡상태가 발생하는 것으로 결과가 나왔

다. 따라서, 〈표 1〉에서 Papageorgiou모형의 총진입교통량이 과다하다는 사실을 확인하게 된다. 〈그림 7〉은 사례2의 자료로 시뮬레이션한 것이다.

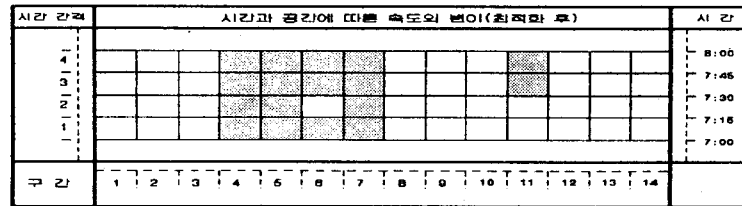
네 모형 공히 혼잡상태를 발생하게 하는데, Yuan모형의 결과에서 상대적으로 적은 혼잡구간이 발견된다.



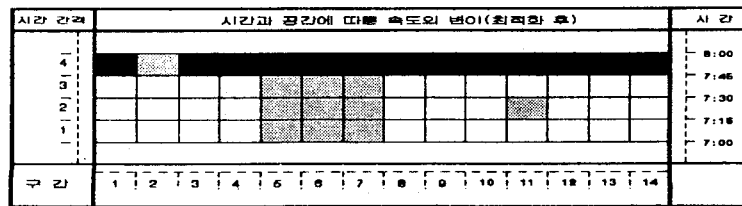
a) Messer



b) 수정된 Messer

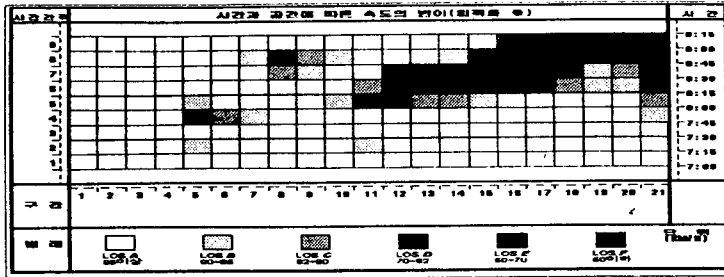


c) Yuan

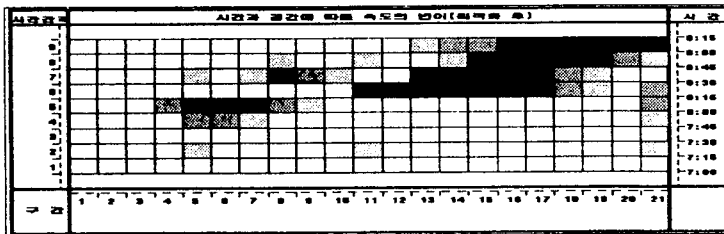


d) Papageorgiou

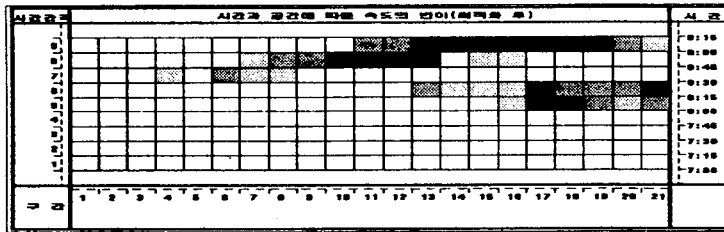
〈그림 6〉 램프미터링 실시 후의 모의실험결과 (사례 1)



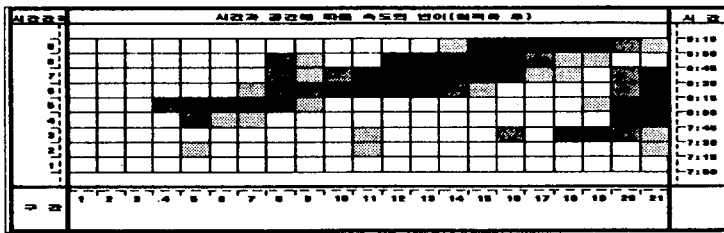
a) Messer



b) 수정된 Messer



c) Yuan



d) Papageorgiou

〈그림 7〉 램프미터링 실시 후의 모의실험결과 (사례 2)

이상의 결과를 요약하면 Yuan모형이 타모형에 비하여 총진입교통량에서는 적은 값을 산출하지만, 시뮬레이션에 의하면 타모형들의 최적해가 본선에 과도한 혼잡상태를 유발하므로 Yuan의 최적해가 적절하다고 보인다.

더우기, Yuan모형은 진입램프상에서 발생하

는 최대 대기차량길이를 감소시키므로 타모형에 비하여 바람직한 결과를 제시한다. 따라서, 본 논문에서 대상으로한 네가지 모형중 Yuan모형이 가장 우수하다고 사료되어, 컴퓨터프로그래밍은 이 모형을 근간으로 하여 작성하기로 한다.

IV. 모형의 수정

1. 추가 제약조건식

전 절에서 Yuan모형을 프로그래밍대상모형으로 선정하였다. 목적함수는 식(12)이고, 제약조건식은 식(13)과 식(14)이다.(QP1) 이 형태는 최적화모형의 기본적인 골격을 이루기는 하나 실제 문제에 적용하려면 별도의 제약조건식을 추가할 필요가 있다.

Yuan모형의 문제점은 합류부구간의 용량을 고려하지 못한다는 점이다. 예를 들어, 편도 2차선고속도로에서 특정구간에서 용량이 시간당 4,000대이고 교통량이 3,000대이면 여유용량이 1,000대이라고 볼 수 있다. 하지만, 합류부에서는 이러한 관계가 성립하지 않는다. 합류구간에서 교통량의 차선별 분포가 50대 50이라면 차선당 교통량은 1,500대이므로 차선당 용량 2,000대와 비교하면 합류부의 용량은 500대가 된다. 실제 상황에서는 합류부에서 교통량의 차선별 분포는 50대 50은 아니며, 본선교통량과 진입교통량의 함수로 표현된다. 이러한 접속부의 특성을 수식화하여 제약조건식으로 추가할 필요가 있다.

램프미터링최적화 모형에서 접속부 용량에 대하여 Messer[7]와 Park[18]이 미국의 자료를 통하여 관계식을 제시한 바 있다. 접속부 용량은 운전자의 운전특성에 많은 영향을 받게 된다. 따라서, 본 연구에서는 외국의 식을 사용하기 보다는 국내 도로용량편람[19]의 자료를 사용하여 관계식을 유도하였다.

도로용량편람의 '제6장 연결로와 접속부' 편에 8차선 고속도로의 경우 본선의 접속차선의 교통량을 예측하는 관계식은 다음과 같이 제시되어 있다.

$$V_i = 0.233 V_f - 0.201 V_r$$

여기서, V_i = 본선의 접속차선 교통량 (대/시)
 V_f = 합류부 직전의 본선 교통량 (대/시)
 V_r = 진입램프 교통량 (대/시)

위의 식을 최적화모형에 적용가능한 형태로 변형하면 본선의 차선당 용량을 2,000대/시로 가정할 때 다음의 제약식이 유도된다.

$$0.233 y_k^* + 0.799 X_a \leq 2000 \quad (19)$$

여기서, y_k^* : 구간 k의 본선교통량
 X_a : 진입로 a의 진입교통량

램프미터링을 현장에서 실시할 경우 고려해야 하는 사항으로 최대치와 최소치를 적절히 설정해야 한다. 참고문헌[4]에 의하면 진입램프가 1차선인 경우 최소치로는 180대/시, 최대치로는 900대/시를 권장한다. 추가되는 제약식은 다음과 같다.

$$X_{min} \leq X \leq X_{max} \quad (20)$$

본 연구에서 제시하는 램프미터링 최적화모형의 최종형태는 다음과 같다.

QP2 : Maximize 식(12)
 subject to 식(13), (14), (19), (20)

2. 제안된 모형의 테스트

본 연구에서 제안한 모형(QP2)과 원 Yuan모형(QP1)의 결과를 비교하기 위하여 서울시의 올림픽고속도로의 자료로 테스트하였다. 테스트용 자료는 참고문헌[5]에서 발췌하였다.

LINDO를 사용하여 두 모형의 최적해를 구하고, 산출된 최적해를 FREFLO로 시뮬레이션하였다.

〈표 3〉은 Yuan모형과 제안된 모형이 산출한 램프미터링전략을 실시할 경우 시뮬레이션 결과를 요약한 것이다. 고속도로본선의 경우 속도가 30퍼센트 증가하는 것으로 평가되었다. 고속도로전체 교통축은 고속도로본선과 강북강변도로를 포함한 것이다. 주변도로를 포함하여 시뮬레이션한 경우에도 제안된 모형이 Yuan모형보다 우수한 결과를 보여준다.

〈표 3〉 Yuan모형과 제안된 모형의 비교 (단위:KMPH)

	Yuan모형	제안된 모형
올림픽대로 본선	35.1	45.7 (+30%)
대상도로 전체 교통축	31.8	39.0 (+23%)

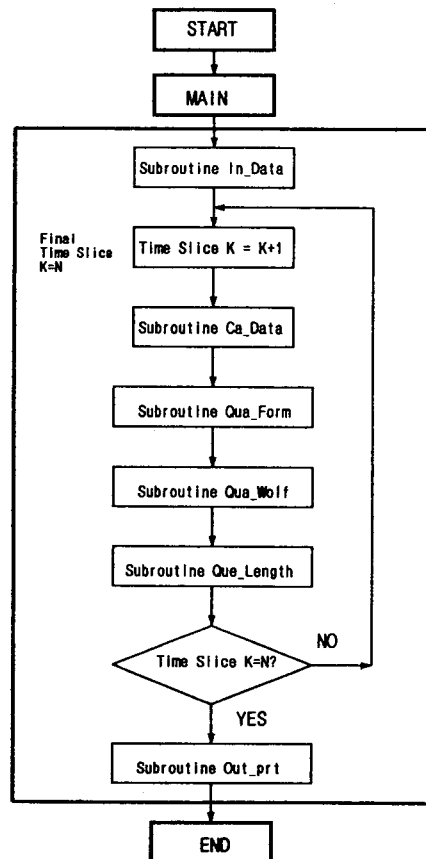
3. 컴퓨터 프로그래밍

본 연구에서 제안된 모형은 quadratic programming의 형태를 가지며 FORTRAN-77으로 프로그래밍하였다. Quadratic programming문제의 최적해를 산출하는데 있어서 다양한 알고리즘이 가능하겠으나 본 연구에서는 Wolfe 알고리즘[20]을 사용하였다. 프로그램의 전체 구조는 〈그림 8〉과 같다.

프로그램의 구성에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

- MAIN: 전체적으로 각 부프로그램의 호출을 연결하는 기능을 수행한다.
- Subroutine In_Data: 프로그램에 필요한 입력자료를 받는 기능을 한다.
- Subroutine Ca_Data: 시간간격별 입력자료를 처리한다.
- Subroutine Qua_Form: 처리된 자료를 quadratic programming형태로 행렬화 한다.
- Subroutine Qua_Wolfe: Wolfe 알고리즘[20]을 사용하여 quadratic form의 해를 구한다.

- Subroutine Que_length: 최적화 결과로 도출된 대기차량길이를 계산한다.
 - Subroutine Out_prt: 결과를 출력한다.
- 본 프로그램의 입력변수는 다음과 같다.
- NON_RAMP: 대상고속도로구간의 진입램프 수
 - NOFF_RAMP: 대상고속도로구간의 진출램프 수
 - NBOTTLE: 병목구간의 수
 - DEMEND(i): 진입램프 i의 시간간격별 교통수요
 - CAPACITY(k): 병목구간 k의 용량
 - OD(i,j): 진입램프 i에서 진출램프 j까지의 기종점 비율



〈그림 8〉 프로그램의 전체구조

- TA(i,k): 진입램프 i의 교통량이 병목구간 k를 통과하면 1, 통과하지 않으면 0.

본 프로그램의 실행으로 산출되는 값은 다음과 같다.

- 개별 진입램프의 시간간격별 최적 미터링을
- 개별 진입램프에서 미터링으로 발생하는 대기차량수
- 미터링후에 예상되는 본선의 구간별 교통량
- 미터링후 개별 진출램프의 유출 교통량

본 연구에서 개발된 프로그램의 결과가 정확한 최적해를 내는가에 대한 평가는 동일한 자료를 사용하여 LINDO의 해와 본 프로그램의 해를 비교하는 방법을 사용하였다. 비교결과 두가지 방법이 동일한 최적해를 산출하는 것을 확인하여, 프로그램의 정확도를 만족할 수 있었다. 본 프로그램을 PC486급 컴퓨터로 실행했을 때 계산시간은 무시해도 무방할 정도였다.

고속도로 진입램프미터링에 대한 최적해를 산출하는데 일반적인 경우에 적용이 가능하도록 개발되었지만, 편리한 사용을 위한 사용자-인터페이스 부분에 대해서는 추가 작업이 필요하다.

V. 결론

교통운영분야에서 국내의 연구현황을 살펴보면 신호교차로를 중심으로 한 단속류교통시설의 연구에 치우친 경향이 있으며, 연속류 분야에 대한 연구가 미진한 느낌이 있다. 본 논문에서는 도시고속도로를 대상으로 하는 진입램프최적화모형을 개발하는 과정을 기술하였다. 모형을 개발하기 위하여 이 분야에서 대표적인 네가지모형을 선정하였으며, 두가지 사례를 통하여 비교평가하였다. 평가를 통하여 적절한 모형을 선정하였다. 선정된 모형의 현실 적용

성을 향상시키기 위하여 현실적인 제약조건식을 추가하여 모형의 기본형태를 완성하고 컴퓨터프로그래밍하였다. 제시된 모형은 quadratic programming의 형태를 취한다.

본 논문에서 제시된 최종모형은 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. FREFLO를 시뮬레이션의 도구로 사용하였다. 시뮬레이션의 결과가 현장상황과 다소 괴리가 있을 수 있으나 램프미터링의 전후상황을 상대비교하는데 용도로는 별 문제점이 없으리라 본다.

제시된 컴퓨터모형은 램프미터링의 최적해를 산출하는데는 기본골격은 갖추고 있으나, 소프트웨어로 완성되기 위해서는 다양한 기능을 추가하는 작업이 지속되어야 한다. 예를 들어, 다양한 제어목표, 미터링으로 인한 우회차량비율 추정 등의 기능이 보완되어야 하며, 사용편리를 위하여 사용자-인터페이스부분의 추가작업이 필요하다. 국내에서는 램프미터링이 아직 실시되는 사례가 없으나 조만간에 서울시를 시작으로 시스템이 구축될 것으로 예상되어, 본 연구를 시작으로 이 분야의 연구가 활성화되기를 기대한다.

램프미터링 최적화모형의 개발과 함께 연속류분야에서 진행되어야 하는 연구로 연속교통류 시뮬레이션모형의 개발이 있다. 연속류시설을 대상으로한 최적화모형과 시뮬레이션모형이 통합되면 완성된 형태라고 볼 수 있다. 필자는 현재 이 분야의 연구를 수행중이다.

참고 문헌

1. Bigg, R.G., et al. 'US59(Southwest Freeway) in Houston Control.' Texas Highway Department, Houston, Texas, 1971.
2. Nc Dernittm, J.H., et al. 'Chicago Area

- Expressway Surveillance and Control: Final Report,' Illinois DOT, FHWA, 1979.
3. Blumentritt, C.W. et al. 'Guidelines for Selection of Ramp Control Systems,' NCHRP Report 232, TRB, Washington D.C., 1981.
 4. ITE, 'Traffic Control Systems Handbook,' ITE, Washington, D.C., 1985.
 5. 명지대 공학기술연구소. '도시고속도로 램프미터링 기법의 효과 분석,' 1994.
 6. Wattleworth, J.A. and D.S. Berry. 'Peak-Period Control of a Freeway System-Some Theoretical Investigations,' Highway Research Record 89, HRB, Whashington D.C., 1965.
 7. Messer, C.J. 'A Design and Synthesis of a Multilevel Freeway Control System and a Study of its Associated Operational Control Plan,' Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, 1969.
 8. Yuan, L.S. and J.B. Kreer. 'Adjustment of Freeway Ramp Metering Rates to Balance Entrance Ramp Queues,' Transportation Research, Vol.5, 1971, pp 127-133.
 9. Chen, C. et al. 'Entrance Ramp Control for Travel-Rate Maximization in Express-ways,' Transportation Research, Vol. 8, 1974, pp 52-64.
 10. Papageorgiou, M. 'A New Approach to Time-of-Day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model,' Transportation Research, Vol.14B, 1980, pp 349-360.
 11. Imada, T. and A.D. May. 'FREQ8PE: A Freeway Corridor Simulation and Ramp Metering Optimization Model,' ITS, University of California, Berkeley, 1985.
 12. Chang, E.C. and C.J. Messer. 'Queue Management Feature in Freeway On-Ramp Control,' Paper Submitted for Presentation at the 1992 TRB Annual Meeting, National Research Council, Washing D.C., August 1991.
 13. 김 영찬. '고속도로 진입통제를 위한 선형계획모형의 개선,' 제24회 학술발표회 제출논문, 대한교통학회, 1993.
 14. 서울시정개발연구원. '서울시 교통수요관리 방안,' 1993.
 15. 도로교통안전협회. '첨단도로교통체계 기본계획(안) 수립 연구,' 1994.
 16. Schrage, L. 'Linear, Integer and Quadratic Programming with LINDO,' 3rd Ed., The Scientific Press, 1987.
 17. Federal Highway Administration. 'TRAF-USER GUIDE Implementation Package,' Report No. FHWA IP-85-xx, Washington D.C. 1985.
 18. Park, E. 'Critical Assessment Of The Features Of Two Ramp Optimization MODELS,' Ph.D Dissertation, Texas A&M University, College Station, 1993.
 19. 건설부. '도로용량편람,' 건설부, 1992.
 20. Kuester, J.L. and Joe H. Mize. 'Optimization Techniques with Fortran,' McGraw-Hill Book Company, 1973.