

화음탐색법을 이용한 교통망 링크 통행비용함수 정산기법 개발

김현명^{1*} · 황용환¹ · 양인철²

¹ 명지대학교 교통공학과, ² 한국건설기술연구원 도로연구실

Calibration of a Network Link Travel Cost Function with the Harmony Search Algorithm

KIM, Hyun Myung^{1*} · HWANG, Yong Hwan¹ · YANG, In Chul²

¹ Department of Transportation Engineering, Myungji University, Gyeonggi 449-728, Korea

² Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

Abstract

Some previous studies adopted a method statistically based on the observed traffic volumes and travel times to estimate the parameters. Others tried to find an optimal set of parameters to minimize the gap between the observed and estimated traffic volumes using, for instance, a combined optimization model with a traffic assignment model. The latter is frequently used in a large-scale network that has a capability to find a set of optimal parameter values, but its appropriateness has never been demonstrated. Thus, we developed a methodology to estimate a set of parameter values of BPR(Bureau of Public Road) function using Harmony Search (HS) method. HS was developed in early 2000, and is a global search method proven to be superior to other global search methods (e.g. Genetic Algorithm or Tabu search). However, it has rarely been adopted in transportation research arena yet. The HS based transportation network calibration algorithm developed in this study is tested using a grid network, and its outcomes are compared to those from incremental method (Incre) and Golden Section (GS) method. It is found that the HS algorithm outperforms Incre and GS for copying the given observed link traffic counts, and it is also pointed out that the popular optimal network calibration techniques based on an objective function of traffic volume replication are lacking the capability to find appropriate free flow travel speed and a value.

본 연구에서는 최근 개발된 화음 탐색법을 이용해 교통망 통행배정 모형의 통행비용 함수의 하나인 BPR 함수의 계수들을 추정하였다. 기존 연구에서는 교통량과 통행시간 자료를 실측해 이를 통계적으로 분석해 계수를 추정하는 방법과 관측교통량과 통행배정 교통량을 일치시키는 계수값을 찾는 것을 목표로 통행배정 모형과 최적화 기법을 결합시킨 방법을 이용하여 왔다. 이중 대형 교통망의 계수 정산에 자주 이용되어온 최적화 기법은 관측 통행패턴을 최대한 근접하게 재현하는 계수를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 그 수학적 성질과 추정 계수값에 대한 수학적 검토가 충분히 이루어지지 못했다. 본 연구에서는 이러한 문제 인식아래 최근 개발된 전역 탐색 기법인 화음탐색법 기반의 교통망 비용함수 정산 방법을 개발하였다. 화음탐색법은 2000년대 초반 개발된 이후 다양한 분야에서 기존에 사용되던 전역탐색기법들에 비해 우수한 성질을 입증하여 왔으나 교통분야에는 그 적용 예가 거의 없었다. 본 연구는 화음탐색법의 개념을 설명하고 이를 이용해 개발된 정산 알고리즘을 기존 연구에서 사용된 점진증가법 및 황금율법과 성능 비교하였다. 화음탐색법 기반 정산기법은 기존 기법들에 비해 관측 통행패턴을 보다 근접하게 재현할 수 있는 비용함수 계수값들을 찾을 수 있는 것으로 나타났다. 또, 관측 교통량 기반 계수추정법은 BPR식의 β 값 추정에는 적합하지만 초기속도나 α 값 정산을 위해서는 통행 속도나 시간과 같은 추가 자료가 필요한 것으로 판단된다.

Key Words

BPR Function, Harmony Search, Network Calibration, Parameter Estimation, Volume Delay Function
BPR함수, 화음탐색법, 교통망 정산, 파라미터추정, 통행지체함수

* : Corresponding Author

khclsy@gmail.com, Phone: +82-31-330-6479, Fax: +82-31-330-6479

Received 24 April 2012, Accepted 29 August 2012

© Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

4단계 통행수요 예측의 최종 단계인 통행배정(Traffic assignment)은 수요분석과정의 마지막에 시행되어 최종 결과 도출에 큰 영향을 미친다는 점과 결과물인 링크 교통량이 자료수집의 편의 때문에 통행수요 예측기법의 검증에 빈번히 이용된다는 점을 고려하면 높은 신뢰성을 확보해야 한다. 통행배정 모형의 신뢰성에 영향을 미치는 요소는 크게 입력자료와 모형 내 요소로 나눌 수 있는데 이중 입력자료의 경우 기종점 통행량표(OD traffic table)로서 교통계획 표준 4단계 과정 중 통행배정에 앞선 단계인 통행발생(Trip generation), 통행분포(Trip distribution), 수단선택(Modal split)의 결과로 얻어진다.

이에 비해 모형 내 요소로는 경로선택 모형(Route choice model)과 통행비용 함수(Travel cost function)가 통행배정 모형의 정확성에 큰 영향을 미친다. 경로선택 모형의 경우 이용자들이 경로를 선택하는 규칙을 설명하는 것으로 일반적으로 이용자평형 규칙을 이용한다. 반면 통행비용 함수의 경우 도로구간의 교통류율과 용량을 설명변수로 이용해 다양한 계수들과 함께 교통량 증가에 따른 통행시간 증가를 설명한다. 도로구간의 교통량과 통행시간은 자료수집이 용이하기 때문에 경로선택 행태에 비해 통행비용 함수들은 다양하게 제시되어왔으며 그중 미국 공로청(BPR, Bureau of Public Road)의 식이 가장 많이 이용되고 있다.

기종점 통행수요나 경로선택 행태에 비해 현장에서의 실측을 통해 검증이 가능하다는 점에서 통행비용함수는 교통망 모형의 정확도를 높이기 위해 가장 먼저 신뢰성을 확보해야 하며, 국가나 지역 고유의 교통류 특성, 도로구간 고유의 기하구조 등에 종속적이기 때문에 국가별로 지역별로 독립적인 정산이 필요하다. 우리나라에서도 현재까지 여러 차레 비용함수 정산연구가 수행되었으나 각 연구의 정산 결과들이 서로 달라 현재 계수 표준화 작업이 필요한 상황이다. 이러한 연구간 편차가 발생한 이유는 표준적인 정산기법 없이 각 연구들이 서로 다른 정산 방법을 이용했다는 점, 도로의 유형 구분이 서로 달랐다는 점, 그리고 정산에 이용된 자료도 차이가 있었다는 점 등을 들 수 있다. 또 각 연구가 서로 다른 정산 기법을 사용하였으나 각 기법간의 성능 비교가 정밀하게 이루어지지 못했다는 점도 중요한 문제점으로 지적할 수 있다.

본 연구는 이러한 교통망 정산에 관련된 여러 문제 중 새로운 정산 알고리즘을 제시하는데 목표를 두고 있다. 복수해가 존재하는 교통망 정산의 특성상 전역 탐색 알고리즘(Global search algorithm)의 일종인 화음 탐색법(Harmony search method)을 이용해 통행 비용 함수 계수정산 문제를 풀 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 개발된 기법을 실제 정산문제에 황금율(Golden-section) 법, 점진증가(Incremental) 법과 같은 전통적 기법과 함께 적용하여 그 성능을 비교하였다.

II. 기존교통망 정산 및 비용함수 연구 검토

1. 국외연구

해외에서는 1960년대 초반부터 교통량 증가에 따른 통행시간의 증가를 비선형적으로 나타낼 수 있는 함수들의 정산 결과가 발표되기 시작하였다 (Smock, 1962; Mosher, 1963; Soltan, 1965; Overgaard, 1967). 일반 도로구간이 아닌 신호교차로를 고려한 링크 통행시간 지체의 모형화도 1960년대 후반부터 연구가 시작되었는데, Wardrop (1968)의 경우 신호교차로에서의 대기시간과 주행시간을 신호 형태를 고려해 통행량의 함수로 나타내고자 하였다. 현재 이용되는 형태의 통행비용 함수가 등장한 것 역시 1960년대 중반이었다. 1964년 미국 공로청에서는 현재 가장 많이 이용되는 2개의 계수를 가진 함수식(BPR식)을 제시하면서 계수 α , β 의 값을 각각 0.15와 4로 제시하였다. 이 값은 이후 네델란드에서 정산결과(Steenbrink, 1974) $\alpha=2.52$, $\beta=5$ 와 같이 각 국가의 교통특성에 따라 다르게 설정되고 있다. 이러한 연구들에서 계수의 정산기법은 조사된 현장 자료를 통한 통계적 분석이 주를 이루었다.

함수의 형태를 지정하고 현장 자료를 통해 계수를 추정하는 연구와 함께 BPR식의 형태 자체를 새로운 함수로 바꾸고자 하는 연구도 발표된 바 있다. Spicess (1989)는 BPR식이 혼잡구간을 지난 후 지나치게 급격히 상승한다는 문제점을 지적하고, 통행배정 모형의 수렴성 향상을 위해 교통량-용량비(V/C)가 1.0 보다 큰 구간에서는 선형의 형태로 통행시간이 증가하는 Conical 함수를 제시하였다.

앞에서 설명한 식들은 도로유형을 구분하지 않고 하나의 대표적인 도로유형에 대한 식을 제시하였으나, 실제 도로의 유형은 다양하게 구분되기 때문에 개별 도로

의 특성을 반영할 수 있도록 도로의 유형을 구분해 개별적인 함수를 정산하는 것이 바람직하다. 통행비용 함수를 복수로 정의한 초기 연구는 Campbell et al. (1959)가 발표한 CATS 함수를 들 수 있는데, 이 식은 신호에 의한 추가 지체를 $V/C(=0.6)$ 를 기준으로 구분해 설계통행시간에 추가하였다.

$$t = t_0 \quad \text{for} \quad \frac{v}{C} \leq 0.6$$

$$t = t_0 + S\left(\frac{v}{C} - 0.6\right) \quad \text{for} \quad \frac{v}{C} > 0.6 \quad (1)$$

이와 유사하게 Irwin et al. (1961)은 V/C 를 기준으로 불연속적인 두 직선함수를 통해 지체의 영향을 고려하였으나, 이러한 불연속 형태의 함수는 수리형 통행배정에는 일반적으로 적용하기 어렵다. Davidson (1966)의 경우 대기행렬 이론에 근거한 함수를 제시하였는데, 이는 링크교통량이 용량을 초과하는 경우 혼잡의 급격한 증가를 반영하지 못하는 단점이 있다. 하지만 이 함수는 수리모형의 수렴성 확보에 효과적인 장점이 있으며 Daganzo (1977a, b), Boyce et al. (1981)의 연구에서 사용되었고, Akcelik (1978)은 Davidson의 식을 확장한 형태의 식을 발표하기도 했다. 또, Florian and Nguyen (1976)은 도로의 곡선반경 및 편구배 등의 기하구조적 요소를 반영한 비선형 함수식을 개발하였다.

위의 연구들이 혼잡의 영향을 고려하기 위해 함수를 복수로 정의하였다면, 최근 들어 통행배정모형의 발전과 함께 차량의 유형에 따라 또는 도로구간의 유형에 따라 개별 함수를 정의하는 연구들도 발표되고 있다. 이러한 연구의 초기 예로는 Mahmassani and Mouskos (1988)을 들 수 있는데, 이 연구에서는 승용차와 트럭의 동일 링크 주행에 따른 상호 영향을 고려하기 위해 복수 차종이 혼재된 교통량을 고려하는 링크 통행비용 함수를 제시하였다.

차종1 BPR 식 :

$$t_a^1(x_a) = 3 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a^1 + 2x_a^2}{500} \right)^4 \right]$$

차종2 BPR 식 :

$$t_a^2(x_a) = 4 \left[1 + 0.25 \left(\frac{x_a^1 + 2x_a^2}{500} \right)^4 \right] \quad (2)$$

식(2)에서 승용차는 차종 1, 트럭은 차종 2로 정의된

다. 위 식은 트럭 단위 교통량 증가가 통행시간에 미치는 영향이 승용차 단위 교통량 증가의 2배에 이른다고 가정해 이를 교통량 계수로 고려하였으며, BPR식의 α, β 값을 각 차종에 대해 다르게 적용해 차종 간 가감속 특성과 주행특성을 다르게 표현하였다. 이후 Wynter (1995)는 다차종 통행비용 함수의 정산상의 어려움과 각 차종 함수간의 관계에 대해 연구한 바 있다. 이러한 복수 차종 통행비용 함수에 관련된 연구의 경우 통계적인 기법으로 계수값을 추정한 것이 아니라 몇 가지 논리적으로 타당한 조건들을 미리 정의하고 이를 만족하는 계수를 경험적으로 설정하였기 때문에 실제로 현실에 적용 가능한 계수값을 제시하지는 않았다.

2. 국내연구

국내에서는 1980년대 중반부터 통행비용함수 정산에 대한 연구가 시작되었다. 국내 연구가 외국과 구분되는 특성은 대부분의 연구가 통행배정 모형에 적용을 전제로 정산되었기 때문에 초기 연구부터 도로의 유형을 구분해 연구가 시행되었다는 점이다. 특히 특정 구간이나 지점 자료와 교통류 이론에 기초한 외국의 정산 기법과는 달리 국내에서는 주로 교통망의 관측교통량을 재현하는 계수값을 찾는 연구들이 수행되었다.

Lee (1986)의 경우 부산-울산 간 국도와 지방도를 분석대상으로 BPR식의 계수를 추정($\alpha = 0.3, \beta = 2$)하였고, 함수를 통행자, 지역유형, 교통시설 유형별로 세분화하여 적용하는 방안이 필요하다고 주장하였다. 동일한 해에 Choi (1986)는 서울에서 BPR, Smock과 Davidson함수의 적합도를 검증하였는데 도시부 가로는 Davidson식이 우수하였으며 지역별 특성에 따라 지체함수를 분별하여 선택하여야 한다고 주장하였다.

Suh (1990)은 최초로 국내 전국 도로망을 대상으로 BPR함수의 계수값을 추정하였는데, 사용된 방법론은 전국 기중점표를 이용해 통행배정을 실시하고 Bi-level Programming 기법을 통해 관측교통량과 배정교통량의 차이가 최소화되는 계수값을 찾았다. 산출 결과는 도로의 서비스 수준에 따라 각각의 함수 모수를 정산하였는데 LOS C에서는 $\alpha=0.41, \beta=7.21$, LOS D에서는 $\alpha=0.45, \beta=7$, LOS E의 경우 $\alpha=1.65, \beta=9$ 를 최적 계수값으로 제시하였다.

Ju (1993) 역시 전국규모의 정산작업을 시행하였는데 Suh (1990)과는 달리 도로망을 지역간 도로와 도시

Table 1. Coefficients of BPR function (Ju, 1993)

Coeff	Regional				
	Overall	Highway	National Road	Provincial Road	
α	2.04	2.06	1.38	1.9	
β	1.99	1.09	1.91	3.0	
Coeff	Urban				
	Overall	Arterial	Minor Arterial	1 lane	2 lane
α	2.0	0.9	2.05	1.65	5.79
β	3.04	4.5	2.00	3.3	0.95

Table 2. Coefficients of BPR function (Chun-Nam National University, 2007)

Road Hierarchy	Free flow spd (Km/h)	capa/lane (pcupl)	value	
			α	β
Highway(1 lane)	80	1,600	3.931	5.316
Highway(2 lane)	117	2,200	1.459	1.943
Highway(3 lane+)	119	2,200	3.210	5.936
Arterial(1 lane)	70	750	1.896	3.894
Arterial(2 lane)	80	1,000	0.430	3.566
Arterial(3 lane)	90	1,200	0.653	3.232

가로로 구분하여 BPR식과 Davidson식의 계수를 추정하였다. 연구 결과 BPR식은 전반적으로 모든 차로에서 통행행태를 잘 묘사하는 것으로 나타났으며 추정 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에서 보는바와 같이 지역간 도로에서는 α 값이 1.38-2.06, 도시내 도로의 경우 0.9-5.79의 값이 추정되었으며, β 의 경우 지역간 도로에서는 1.09-3.0, 도시내 도로에서는 0.95-4.5사이의 값이 추정되어 앞선 Suh (1990)의 연구에 비해 α 값은 상대적으로 크고 β 값은 절반 이하의 값을 갖는 것으로 나타났다.

Jang (1993)은 1971년부터 91년까지의 고속도로 기종점 통행량표를 적용해 고속도로의 BPR식 계수값 추정을 시도하였다. 추정의 전제조건으로 α 는 0에서 1사이에서 β 는 0에서 10사이에 존재한다고 가정하고 Suh (1990)과 같이 서비스수준 C, D, E에 대해 정산한 결과 α 값은 각각 0.17, 0.37, 0.58, β 값은 1.5, 2.3, 2.4로 추정되어 과거 시행된 Suh (1990)에 비해 상당히 낮고 Ju (1993)의 연구와는 유사한 수준의 값을 도출하였다. Kang (1996)은 고속도로 검지기 자료와 국도 상시 교통량 조사자료를 이용해 BPR식의 계수값을 정산하였는데, 고속도로의 경우 α 값은 0.48-0.77, β 값은 1.20-2.30사이에 존재하는 것으로 나타났다.

Table 3. The estimation of BPR function for highway and major arterial road (The Korea Transportation Institute, 2009)

Road Hierarchy		lanes	α	β
Highway		2	0.611	2.772
		3+	0.526	2.707
Major arterial	0<k<0.3 (k: intersection density)	1	0.686	1.991
		2+	0.668	1.911
	0.3≤k<0.7	1	0.809	1.849
		2+	0.798	1.809
	0.7≤k<1.0	1	0.818	1.849
		2+	0.803	1.815

최근 Chun-Nam National University (2007)는 고속도로와 일반국도를 대상으로 국가교통DB를 이용해 통행배정과 황금율법을 결합하는 Bi-level 기법을 이용하여 기존에 많이 이용되던 점진증가법의 단점을 보완하였다. Table 2의 정산 결과를 보면 기존 연구들에 비해 α 값과 β 값이 조금 크게 추정되었음을 확인할 수 있다.

The Korea Transportation Institute (2009)는 도로구간에서 조사된 교통류 자료를 이용해 BPR식의 계수값을 추정하였고, 그 결과는 Table 3과 같다. The Korea Transportation Institute (2009)의 연구는 외국의 연구와 같이 교통류 이론과 현장 자료 및 통계적 기법에 의해 계수값을 추정하였기 때문에 현실에 가까운 계수값이 도출되는 장점을 갖고 있으나, 관측 교통량 재현력이 검증되지 않은 한계를 가지고 있다.

III. 복수도로 위계를 고려한 통행비용함수 정산 방법론 정립

1. Multi-type 함수를 고려한 Bi-level 정산기법

앞서 살펴본 국내외 정산기법들은 크게 두 가지 부류로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 그룹은 외국의 연구들이나 The Korea Transportation Institute (2009)의 연구와 같이 교통망 전체에 대한 고려 없이 도로망의 여러 지점에서 수집된 교통류 자료를 이용하여 통계적인 방법을 통해 도로유형의 교통류 조건을 가장 잘 재현하는 계수값을 찾는 것이다.

이와 같이 지점 및 구간 자료와 통계분석에 의존한 기법의 경우 교통류 이론이나 현실에 부합하는 계수값을 찾을 수 있다는 장점이 있으나 현실의 교통망 분석에 적

Table 4. Comparison of β values in existing researches

Continuous flow					
lanes	1	2	3	4	5++
Kang (1996)	-	-	-	1.91	1.20
CNU (2007)	5.32	1.94	5.94	-	-
The Korea Transportation Institute (2009)	-	2.77	2.71		
Discontinuous flow					
lanes	1	2	3	4	5++
Ju (1993)	3.30	0.95	-	-	-
Kang (1996)	-	2.30	-	1.80	-
CNU (2007)	3.89	3.57	3.23	-	-
The Korea Transportation Institute (2009)	1.85	1.82			

용하는 것에는 몇 가지 문제점이 있다.

첫 번째 문제점은 계수값이 지점자료에 크게 종속된다는 점이다. 일반적으로 계수 정산을 위한 자료 수집이 한정된 숫자의 조사지점에서 이루어지기 때문에 자료의 조사위치에 따라 추정된 계수값에 상당한 차이가 발생할 수 있다. 교통망에서 광범위하게 조사되는 교통량 자료를 이용하는 최적화 기법에 의한 정산 결과의 경우 이러한 종속성이 낮지만, 통계적 기법의 경우 자료 조사지점의 추가나 배제에 의한 계수값 변화가 발생할 수 있다.

또, 교통계획 및 분석에서 교통망의 검증이 교통량 재현을 통해 이루어지기 때문에 통계적 기법을 통해 정산된 계수값도 통행배정 후 재현 교통량이 실제 교통량과 차이가 있다면 경험적인 방법을 통해 계수값을 조정해야 하는 문제가 있다. 이러한 경험적 조정은 이론적 근거가 미약하고 이중 작업을 초래한다.

반면 국내외에서 자주 이용되어온 교통량 재현기법의 경우 전체 교통망에 걸쳐 조사된 지점 교통량을 가장 잘 재현하는 비용함수 계수를 찾는다는 점에서 정산 후 바로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 관측교통량과 최적화 기법을 이용하는 기존의 연구들을 보면 정산된 계수값에 일관성이 부족하고 연구간 추정 계수값의 차이도 매우 크다는 사실을 확인할 수 있다. 예를 들어 Such (1990)과 Chun-Nam National University (2007)의 α 값 추정 결과를 보면 평균 2배 이상의 값 차이가 존재한다. β 값의 경우 그 차이가 더 명확하여 기존 국내 연구 결과를 정리한 Table 4를 보면 유사한 형태, 동일한 차로수를 갖는 도로에서도 추정값간에 4배 가까운 차이가 나타나는 경우도 있다. 특히 일부 연구에서는 차로수

의 증가나 도로 유형간 β 값 관계가 일관성이 부족한 경우를 확인할 수 있다.

이러한 문제는 통행배정 기반 정산 기법이 갖는 고유한 문제이다. 먼저 링크 교통량은 통행비용함수의 계수값에만 영향을 받는 것이 아니라 기종점 통행량 표나 경로선택 모형 등 통행배정 모형에 포함된 모든 입력자료와 모형의 영향을 받는다. 따라서 계수값만으로 관측교통량과 배정 교통량간 편차를 최소화한다고 해서 합리적인 계수값 추정이 가능하지는 않다. 두 번째 문제는 Bi-level programming 기법의 문제이다. 통행배정모형과 최적화 기법이 결합한 정산 기법의 경우 링크 교통량을 재현하는 계수 집합이 하나가 아니라 복수로 존재한다. 이러한 문제는 기종점표 추정을 비롯해 다양한 교통망 추정문제에서 나타나는 것이다 (Kim, 2008). 이러한 한계를 때문에 Table 4의 일부 연구에서 보느냐와 같이 통행배정 모형을 이용한 최적화 기반 정산에서는 비현실적이고 일관성 없는 계수값의 추정이 나타날 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 두 기법의 장점을 결합한 추정 기법을 제시하였다. 먼저 최적화 기법의 한계를 완화하기 위해 α 와 β 및 초기속도(V_0)값의 추정 범위를 합리적으로 설정할 경우 이를 최적화 과정에서 반영할 수 있도록 전역 탐색 기법을 설계하였다. 또 추정 범위 뿐만 아니라 각 도로 위계별로 각 계수들 간에 지켜져야 할 제약조건들이 있는 경우 이러한 제약들이 최적화 과정에서 반영되도록 수학적 제약식을 구성해 최적화가 가능하도록 하였다. 단, 본 연구에서는 이러한 제약들이 수학적 최적화 과정에서 반영되도록 설계하는 것만 고려하고, 개별 도로위계간의 계수관계나 계수의 존재 범위를 교통류 이론을 통해 설정하는 것은 향후 연구로 남겨둔다. 이러한 제약 설정과 범위 결정은 먼저 현실 교통망에서의 도로 위계가 설정되고 실제 자료를 통해 교통류 분석이 수행되어야 하기 때문이다.

중복 정산 및 자료에 대한 종속성 완화를 위해 정산의 전체 틀은 통행배정 모형을 하위 모형으로 이용하는 Bi-level programming을 선정하였다. 따라서 개발된 모형은 관측교통량을 가장 잘 재현하는 통행비용함수의 계수값 집합을 각 도로위계별로 추정하게 된다. 단, 복수해가 존재하는 문제의 특성상 실행가능영역 전역에서 해를 찾을 수 있도록 해도출 기법은 전역 탐색 알고리즘 중 가장 최근에 개발되어 광범위하게 이용되고 있는 (Lee and Geem, 2005) 화음탐색법(Harmony search)을 선정하였다.

2. 화음탐색법

1) 화음탐색법의 개념

본 연구는 최근 전역탐색 알고리즘으로 개발되어 다양한 분야에서 적용되고 있는 화음탐색법을 통행비용함수 정산에 적용하고 그 성능을 기존 기법과 비교하는데 목표를 두고 있다 (Geem et al., 2005; Lee and Geem, 2005). 본 연구에서는 Meta-Heuristic 최적화 알고리즘의 하나인 화음탐색법을 적용하여 정적 교통망의 VDF 계수 추정 문제를 풀기로 한다.

화음탐색법(이하 HS)는 음악 작곡에서 그 기본개념을 가져왔는데, 연주자가 청중에게 감동을 주기위해 현장에서 좋은 화음 조합을 찾아 연주하는 즉흥 연주를 모방한 알고리즘으로서, 연주자들이 서로 조화를 찾아가며 연주하는 것을 모방해 아름다운 화음을 찾듯이 해를 검색하는 방법이다. 최적화연산 과정은 연주자가 자신의 악기를 이용해 음을 연주하되 복수의 악기를 연주한 음이 얼마나 아름다운지를 평가하고 이를 조정하는 과정으로 이루어진다. 이때, 각 악기들이 연주한 음들 중 좋은 화음이 저장되는데 이를 Harmony memory (이하 HM)라 한다. HM에 저장 가능한 화음의 최대개수는 HMS(Harmony memory size)라 하며, HMS의 역할은 유전알고리즘(Genetic algorithm)에서 유전자와 동일하다. 유전 알고리즘의 돌연변이 확률이나 교배법칙 설정과 마찬가지로 HS역시 초기에 Harmony memory size, 화음기억율(Harmony memory considering rate, HMCR), 피치조정율(Pitch adjusting rate, PAR), 종료조건 등의 외부입력 변수값들이나 규칙들을 설정한다. 화음탐색법에서 가장 핵심적인 과정은 화음기억을 통해 새로운 화음을 만드는 것과 현재 기억된 화음의 일부 음을 조정해 더 좋은 화음으로 변화시키는 과정이다. 이러한 과정은 다음 절에서 설명하도록 한다.

2) 화음탐색법의 구조

(1) 화음기억(Harmony memory consideration, HMC)

화음기억이란 새로운 화음을 만드는 경우 HM에 있는 화음을 조합해 새 화음을 만들어내는 것을 말한다. 화음탐색법에서는 새로운 화음을 만드는 방법이 크게 세 가지가 있는데, 첫 번째는 현재의 기억과 관계없이 완전히 새로운 화음을 만드는 것이며, 두 번째 기법은 현재 기억

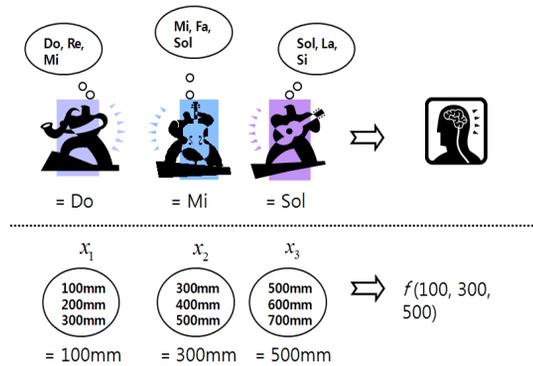


Figure 1. Harmony memory consideration (Geem et al., 2007)

된 화음에서 일부 기억들을 추출해 새로운 화음을 만드는 화음기억이고, 세 번째 기법은 피치조정이다.

기억된 화음에서 새로운 화음을 구성하는 방법은 Figure 1에 설명되어 있다. 각 연주자들은 기존에 연주된 화음 중 가장 성과가 좋았던 음들을 화음의 성과 순서에 따라 기억하고 있는데 화음기억과정에서는 저장된 음을 각 연주자별로 하나씩 선택하여 임의의 화음 대안을 만든다.

예를 들어 첫 번째 연주자의 경우 도, 레, 미를 기억하고 있는데 새로운 화음을 만들 때에는 이 세 음 중 임의의 한 음인 도를 연주할 수 있다. 이때, 도를 선택함에 있어 과거 도가 포함된 화음(도, 미, 솔)의 다른 음인 미와 솔은 고려하지 않는다. 다른 연주자들도 자신에게 기억되어 있는 음 중 하나씩을 임의로 연주하여 화음을 만들고, 만약 이렇게 만들어진 화음이 기억된 화음보다 우수하면 열등한 화음은 삭제하고 우수한 화음을 새로 기억한다.

(2) 피치조정(Pitch Adjustment, PA)

현실의 연주자들은 자신이 연주한 음이 다른 연주자들과 어울리지 않다고 느꼈을 때 현재의 음을 조금만 올리거나 내려서 좀 더 나은 연주를 만들어 가는데, 피치 조정은 이와 같이 악보나 연주에서 음을 위나 아래로 조정해 화음을 만드는 방법이다. 최적화 과정 중 기억에서 가져온 화음의 일부 음을 위나 아래로 일정 크기(예를 들어, Δ_{pa})만큼 이동시키며, 이동 범위는 이산 문제의 경우 이산 간격으로 설정하고, 연속 변수의 경우 범위를 설정한다. 화음탐색법에서 피치 조정은 저장된 해의 주변을 국지적으로 검색하며 더 좋은 해의 발견 가능성을 높이고, 검색범위를 축소해 효율성을 향상시키는 역할을 한다.

알고리즘에서는 PAR이라는 계수로 피치조정 선택 확률을 결정하며 보통 0.01에서 0.3 사이 값으로 설정한

다. 화음탐색법에서는 해를 구성하는 모든 값들의 피치 조정을 통해 실행가능 영역의 전 방향으로 주변 영역내의 목적함수 값들을 탐색하여 해가 갱신할 수 있는 방향이 존재한다면 쉽게 해당 방향으로 이동할 수 있다. 화음탐색법에 대해 더 자세한 설명을 필요로 하는 독자는 Lee and Geem (2005)를 참고하기 바란다.

3) 화음탐색법 기반 통행비용함수 정산 알고리즘

화음탐색법을 통행비용함수 계수 정산에 적용할 경우 가장 복잡한 점은 목적함수의 형태가 아니라 각 계수들에 적용되는 제약식의 형태이다. 통행비용 함수의 계수들은 본 연구에서 크게 두 가지 종류의 제약들에 의해 종속된다고 가정한다. 첫 번째 제약은 계수값의 존재범위 제약으로서 이 값은 초기에 설정되면 계산 과정에서는 바뀌지 않기 때문에 계수의 초기값 발생과 계산과정 중간에 발생하는 화음의 임의발생 과정에서 경계 제약으로만 고려하면 다른 복잡한 고려과정을 필요로 하지는 않는다. 하지만 두 번째 제약인 계수간 관계 제약의 경우 각 계수간 상대적인 크기 관계를 정의하는 제약이기 때문에 하나의 계수값이 바뀌면 연쇄적으로 다른 도로유형의 계수값들도 바뀌어야한다. 따라서 화음탐색법 내부 과정에서 이러한 제약들이 계수값 발생, 조합의 각 과정에서 모두 고려되어야 하고, 이에 따라 VDF 계수값들의 위계에 따른 상호 관계가 위배되지 않도록 각 반복계산 후 모든 VDF 계수들에 대해 제약 만족을 확인하고 만약 위배되는 경우가 발견되면 이를 수정하는 단계를 알고리즘 내에 추가하였다.

화음탐색법을 기반으로 본 연구에서 개발한 VDF 정산모형의 구조는 Figure 2와 같다. 첫 번째 과정은 초기화 과정으로 이 과정은 크게 알고리즘 내 입력 계수값 설정과 VDF 파라미터의 초기값 설정으로 구성되어 있다. 입력계수값은 HCMR, PAR, MC(새 연주를 과거의 기억을 조합해 만들 비율) 등이며, 모수의 초기값들은 각 도로 등급별 존재가능 범위에서 임의로 발생시키되, 각 등급별 제약조건들은 모두 만족하면서 발생하게 된다.

미리 설정된 연주 숫자만큼 초기 VDF 값들이 발생되면 이 값들을 이용해 각 연주별로 통행배정을 실시하고 관측교통량과 통행배정 교통량을 비교해 화음의 성과를 계산한다. 본 연구에서는 화음의 평가를 위해 RMAE(Relative Mean Absolute Error) 값을 이용

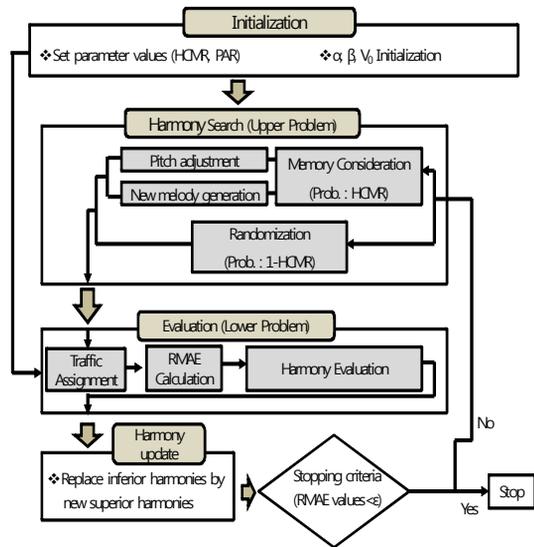


Figure 2. HS-based VDF calibration algorithm

하며 그 정의는 식(3)과 같다. 화음의 평가에는 이용하지 않지만 최종 정산 결과의 평가를 위해서는 관측교통량 값간 차이를 고려하기 위해 식(4)의 GEH 값도 함께 이용하였다.

$$RMAE_{va} = \frac{|v_a - \bar{v}_a|}{v_a} \quad (3)$$

$$GEH_a = \sqrt{\frac{(v_a - \bar{v}_a)^2}{0.5 \times (v_a + \bar{v}_a)}} \quad (4)$$

여기서, v_a : 모형에서 도출된 링크 a의 추정 교통량
 \bar{v}_a : 링크 a의 관측교통량

계산된 RMAE값을 기준으로 각 연주의 성과를 평가해 연주를 순서대로 정렬하고, 만약 최고 성과의 연주의 RMAE가 미리 정의된 정지규칙을 만족하면 정지하고, 그렇지 않으면 화음 탐색을 재 실시한다. 화음 탐색의 1 단계는 현재 기억 속에 저장한 연주를 통해 새 연주를 발생시키는 과정과 완전한 임의연주 발생과정을 통해 새 연주를 만드는 과정을 실시하는 것이다. 만약 연주가 저장된 기억을 이용할 경우 1) 현재 기억을 부분적으로 조정해 새 연주를 만들거나(Pitch Adjustment), 또는 기억들을 조합해 새로운 연주를 만들게 된다. 이러한 과정을 통해 새 연주가 만들어지면 이를 통행배정하여 RMAE를 계산하고, 만약 새 연주가 기존 연주보다 우수

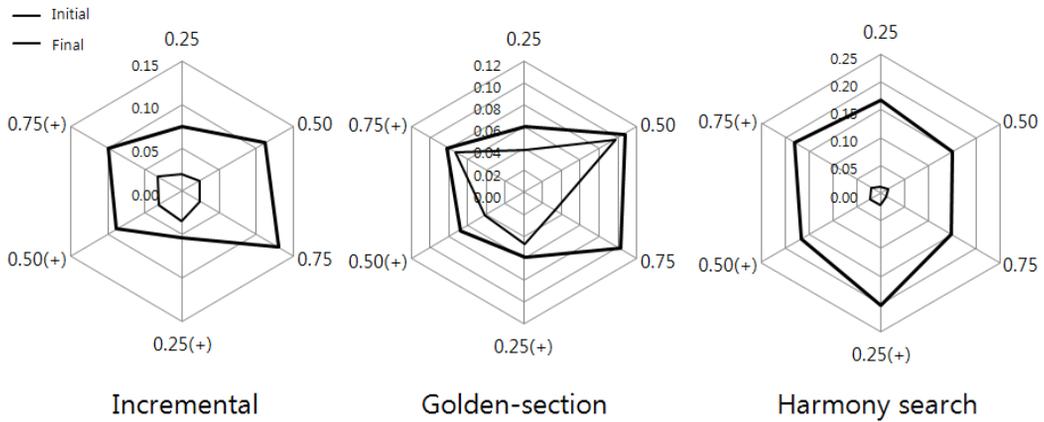


Figure 4. Comparison of RMAE values

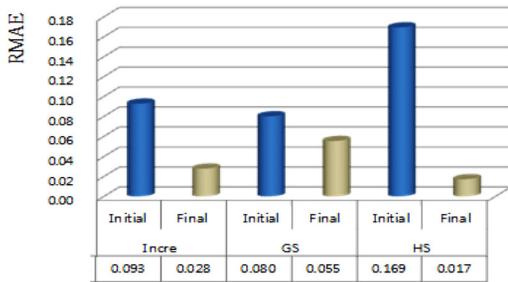


Figure 5. Comparison of average RMAE values among methods

Table 7. GEH values of Scenarios with HS

		0.25	0.50	0.75	0.25(+)	0.50(+)	0.75(+)
GEH (<5)	# of links	71	68	72	67	63	69
	(%)	98.6	93.2	98.6	90.5	84.0	94.5
GEH (5-10)	# of links	1	3	1	4	8	3
	(%)	1.4	4.1	1.4	5.4	10.7	4.1
GEH (10>)	# of links	0	2	0	3	4	1
	(%)	0	2.7	0	4.1	5.3	1.4
link # sum		72	73	73	74	75	73

링크의 관측 통행량이 10이하인 링크는 분석의 안정성 확보를 위해 제외하였다. 점진증가법의 경우 전체 계산 값 중 가장 RMAE값이 낮은 경우를 저장해 최적값으로 도출하였다. 세 기법들을 비교하면 점진증가법이나 황금율법의 경우 각 시나리오 별로 RMAE값 감축에 상당한 편차가 나타남을 확인할 수 있다. 특히, 황금율법에서 이러한 현상이 두드러지는데 이는 최소화 목적함수의 비볼록성 등 형태에 따라 볼록함수 최적화에 적합한 황금율법의 성능이 영향을 받는다는 사실을 보여주는 것이다.

반면, 점진증가법의 경우 정해진 규칙에 따라 전 구간에 대한 계산을 시행하기 때문에 상대적으로 시나리오 간 최소 RMAE 값에 차이는 작았다.

최소 RMAE값을 6개 시나리오에 대하여 평균한 값을 Figure 5에 제시하였다. 가장 RMAE값을 최소화시킨 모형은 화음탐색법으로서 0.017의 RMAE값을 기록해 링크교통량의 관측치와 배치치의 차이가 1.7(%) 수준이었다. 다음으로는 점진증가법이 0.028이었고 황금율법은 0.055로서 약 5.5(%)의 교통량 편차가 잔존하는 것으로 분석되었다. Figure 4와 Figure 5의 결과를 정리하면 화음탐색법이 교통망의 혼잡이나 참값의 편기에 큰 영향을 받지 않고 안정적으로 관측교통량과 추정교통량간 편차를 최소화하는 통행비용 함수의 계수값을 찾아내는 것으로 나타났다. 또, 최종 도출된 RMAE값도 6개 시나리오의 모든 경우에서 점진증가법과 황금율법에 비해 작았다.

Table 7에서는 각 시나리오별 GEH값을 비교하였다. 일반적으로 GEH값은 5이하인 경우 관측치와 동일한 값을 도출한 것으로 보고, 10이상인 경우 상당한 차이가 있는 것으로 판단한다. 전체적으로는 전체 관측지점 중 85(%) 이상이 GEH 5 이하인 경우 시뮬레이션이 관측치를 잘 재현한 것으로 판단한다. Table 7을 보면 전체적으로 수요 수준이 높은 시나리오에서 GEH값이 좋지 않게 나타났으나 0.5(+)를 제외한 모든 경우에 GEH 5이하가 90(%)를 넘는 것으로 나타났다. 결론적으로 다양한 수요수준에서 GEH값을 확인한 결과 화음탐색법을 통해 관측 통행패턴이 재현되는 계수값 추정이 가능하다는 사실을 확인하였다.

Table 8. Discrepancies in estimated VDF coefficients

		0.25	0.50	0.75	0.25(+)	0.50(+)	0.75(+)	Ave
V ₀	Incre	0.440	2.190	3.000	0.250	5.000	3.000	2.313
	GS	2.580	1.870	1.760	2.195	1.480	3.770	2.276
	HS	4.180	2.450	3.750	2.203	2.100	3.830	3.086
α	Incre	0.130	0.130	0.110	0.110	0.130	0.110	0.120
	GS	0.110	0.060	0.108	0.080	0.030	0.070	0.076
	HS	0.125	0.060	0.080	0.150	0.070	0.050	0.089
β	Incre	0.250	0.410	0.170	0.260	0.160	0.270	0.253
	GS	0.520	0.390	0.250	0.140	0.200	0.690	0.365
	HS	0.050	0.110	0.200	0.210	0.450	0.160	0.197

3. 계수추정 정확도 분석

본 연구에서는 계수값의 최적여부를 링크 교통량 재현력을 통해 평가하고 있으나, 이 절에서는 관측교통량 발생에 이용한 VDF 계수값(목표값)을 기준으로 각 기법들이 어떠한 값을 추정하는지를 분석하였다. 물론 현실에서는 VDF 계수 참값은 존재하지 않고, 연구에서 사용된 최적화 목적함수가 계수값 추정정확도를 목적함수에 반영하지 않기 때문에 관측교통량 RMAE값을 최소화하는 VDF계수 집합이 관측교통량 발생시 사용한 VDF 계수와 일치함을 보장할 수 없으나 각 계수정산 기법의 비교를 통해 추정 기법의 계수정산 특성을 분석하고, 또한 향후 연구를 위한 보완사항을 도출할 수 있다.

Table 8은 세 기법의 각 시나리오에 대한 각 계수값의 추정 편차를 정리한 것이다. 초기속도(V₀)의 추정 편차는 4개 도로유형에 대한 V₀ 추정치와 관측교통량 발생 계수값간 차이를 나타낸 것으로서, 점진증가법과 황금율법이 화음탐색법보다는 관측교통량 발생 초기속도값에 조금 더 가까운 추정치를 도출하였다. α값의 경우 황금율법과 화음탐색법이 유사한 수준의 편차를 나타내었고, 혼잡구간에서 통행배정의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 β값의 경우 점진증가법이나 황금율법에 비해 화음탐색법의 추정력이 높은 것으로 나타났다.

이러한 결과를 교통량 재현 능력과 연계하여 분석해 보면 교통량 재현 능력을 기준으로 계수값을 추정하는 방법의 한계를 확인할 수 있다. 먼저 Figure 5에서 확인한 바와 같이 RMAE값으로 대표되는 교통량 재현 능력에서는 점진증가법이 황금율법에 비해 우수한 결과를 나타내었으나, 실제 계수값 추정에서는 황금율법이 V₀와 α에서 더 나은 추정능력을 보여주었다. 다만, β값의 경우 황금율법이 가장 부정확한 추정결과를 도출하였는데, β

값에 대한 추정 능력이 교통량 재현 능력과 높은 상관성을 가지고 있다는 점을 미루어 볼 때 이 결과는 특히 주목할 만하다.

즉, 교통량 재현과 목표값 추정의 결과를 비교해 볼 때, 교통량을 정확히 재현하기 위해서는 V₀나 α값 보다는 β값의 정확한 추정이 중요하다는 것이다. 이를 반대로 해석하면, 교통량을 재현하는 현재의 계수 정산 방식으로는 정확한 β값의 추정은 어느 정도 가능하지만, 상대적으로 중요도가 떨어지는 V₀나 α값의 정산은 쉽지 않음을 알 수 있다. β값의 경우 통행시간의 지수 증가를 설명하는 역할을 하며, 이는 용량 수준 이상의 통행 수요가 존재하는 교통망에서는 β값이 통행시간에 가장 결정적인 영향을 주는 계수임을 나타낸다. 따라서 혼잡상황에서 통행자의 경로선택에 큰 영향을 미치며, 이는 부정확하게 추정된 β값으로는 링크 교통량의 재현이 매우 어려움을 나타낸다.

이와 비교해 V₀는 비혼잡 상황에서 통행 거리 기반의 최단경로를 도출하는 역할을 한다. 즉, 교통망에 혼잡이 없을 때 통행자의 경로선택에 큰 영향을 미치게 된다. 하지만 일정수준 이상의 혼잡이 존재하는 경우 추정된 V₀가 현실의 V₀와 차이가 있는지를 통행 배정결과를 통해 확인하기는 어렵다. 만약 통행시간 자료가 존재하는 경우 비혼잡 링크의 통행시간 관측치와 재현치의 비교를 통해 쉽게 V₀의 정산이 가능하지만, 교통량만을 목적함수에 반영하는 현재의 방법으로는 V₀의 정확한 추정은 매우 어렵다. 이러한 문제는 α값에도 동일하게 적용되는데, 교통량 재현에 문제가 발생하는 경우 부정확한 α값 추정치로 인한 영향과 V₀에 의한 영향을 명확히 구분하기 어렵기 때문이다. 이에 비해 β값의 경우 큰 오차가 존재하는 경우 V/C가 1.0 이상이라면 통행패턴에 큰 영향을 미치기 때문에 교통량 편차 최소화를 이용하더라도 통행 패턴 비교를 통해 추정오차가 큰 링크나 위계를 발견해 수정할 수 있다.

이상의 결과를 정리하면 현재의 교통량 기반 통행비용함수 정산 기법의 경우 목적함수 값을 충분히 감소시키더라도 계수들의 정확한 추정을 보장할 수 없음을 알 수 있다. 특히 β값을 제외한 나머지 계수값들의 경우 목적함수와의 추정력 상관성이 상대적으로 더 낮음을 확인하였다. 따라서 향후 이를 극복하기 위해서는 V₀와 α값 추정 정확도를 향상시킬 수 있는 자료를 정산과정에 추가하는 것이 필요하다. 단, V₀의 경우 설계속도나 비혼잡 시간대 실측을 통한 실제 최대속도의 확인이 가능하

므로 이를 이용하고, α 값의 경우 용량수준에서 β 값의 영향을 없애는 방법으로 교통류 이론적 해석을 통해 그 값을 정의할 수 있으므로 최적화 기법에 전적으로 의존하지 않고 자료의 개선이나 교통류 이론을 통한 정산을 최적화 기법에 반영하는 연구가 필요하다.

V. 결론 및 토의

본 연구에서는 최근 개발된 전역 탐색 기법인 화음탐색법을 이용하여 교통망 통행비용 함수의 계수인 초기속도(V_0), α 값 및 β 값을 추정하는 연구를 수행하였다. 현실과 최대한 가까운 상황에서 신뢰성 있는 결론을 도출하기 위해 2개의 수요 수준에서 3개의 계수 참값 시나리오를 가정, 총 6개의 시나리오를 고려하여 정산기법의 시험을 실시하였다. 화음탐색법의 성능과 비교를 위해 기존 연구에서 이용된 황금율법과 점진증가법도 함께 계수 추정에 이용하였다.

분석 결과 화음탐색법은 모든 경우에서 기존 기법에 비해 우수한 현실 교통량 재현력을 갖는 교통망을 정산하는 것으로 나타났다. 평가 지표로 사용된 RMAE와 GEH에서 모두 만족할 만한 수준의 정확도를 확보하였다.

본 연구에서는 향후 연구를 위한 중요한 시사점들도 제시하였다. 먼저 현재 가장 많이 이용되는 교통량 재현력을 기준으로 한 통행비용함수 계수 정산은 V_0 와 α 값 정산에 대해서는 한계가 있을 수 있다는 점이다. 이를 개선하기 위해서는 관측 통행시간이나 속도가 계수 정산에 반영되어야 할 것이다. 두 번째로 V_0 와 α 값 및 β 값의 합리적 존재 범위에 대한 교통류 이론에 기반한 검토가 필요하다. 단순히 관측 교통량을 재현하는 것으로 추정된 계수가 타당하다고 결론짓는 것은 분석결과에서 보듯 위험하기 때문에 교통류 이론을 통한 합리적인 계수 존재 범위나 계수 간 관계를 설정하는 것이 필요하다.

본 연구에서 개발한 화음탐색법에서는 계수의 존재 범위나 동일계수의 서로 다른 위계간 상호 관계를 표현하는 제약 조건을 최적화 과정에서 반영하도록 함으로써 향후 연구를 위한 기능을 추가하였다. 이러한 조건들은 최적화 과정에서 제약식으로 고려되기 때문에 해의 존재 영역을 감소시켜 불합리한 계수값이 추정될 수 있는 가능성을 배제할 수 있고, 계산량 측면에서도 효율적이다. 향후에는 이러한 제약을 교통류 이론을 기반으로 설정하여 최적화 과정에 포함하는 방법에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

REFERENCES

- Akcelik R. (1978), A New Look at Davidson's Travel Time Function, *Traffic Eng. and Control*, Vol.19, No.10, pp.459-463.
- Boyce D. E., Janson B. N., Eash R. W. (1981), The effect on equilibrium trip assignment of different link congestion functions, *Transp. Rec.*, Part A, Vol.15, No.3, pp.223-232.
- Campbell E. W., Keefer L. E., Adams R. W. (1959), A Method For Predicting Speeds Through Signalized Street Sections, *Highway Research Record Bulletin* 230.
- Chun-Nam National University (2007), Validation of road VDF Function; The Improvement and Fundamental Survey Method Research on Passenger Travel OD Table 여객O/D의 신뢰성 제고 및 조사방법론 기초연구 중 도로의 통행비용함수 파라미터 보완 및 검증.
- Choi K. C. (1986), Comparative Analysis and Application of Capacity-deterrence Function 용량저항함수의 비교 분석 및 그 적용방안에 관한 연구, Master Dissertation, Seoul National University.
- Daganzo C. F. (1977a), On the Traffic Assignment Problem with Flow Dependent Costs-I, *Transp. Rec.* 11, pp.433 - 437.
- Daganzo C. F. (1977b), On the Traffic Assignment Problem with Flow Dependent Costs-II, *Transp. Rec.* 11, pp.439 - 441.
- Davidson K. B. (1966), A Flow Travel-time Relationship For Use in Transportation Planning, *Proc. 3rd Australia Road Research Board*, pp.183-194.
- Florian M., Nguyen S. (1976), An Application and Validation of Equilibrium Trip Assignment Methods, *Transp. Sci.* 10, pp.374-390.
- Geem Z. W., Geem W. B. (2007), Cutting-edge Optimization Technique and its Application to the Civil Engineering, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.57, No.1, pp.155-171.
- Geem Z. W., Lee K. S., Park Y. J. (2005), Application of Harmony Search to Vehicle Routing, *American J. Appl. Sci.* 2, No.12, pp.1552-1557.

