

통행배정모형의 수렴성 판단 및 종료기준 설정

Analysis of Convergence Level and Exit Criteria on Traffic Assignment Algorithms

김 주 영*	김 재 영**	박 상 준**	이 승 재***
(Joo-young Kim)	(Jae-young Kim)	(Sang-jun Park)	(Seung-jae Lee)
(University of Seoul)	(KDI, PIMAC)	(KDI, PIMAC)	(University of Seoul)

· Corresponding author : Seungjae Lee(University of Seoul) , E-mail sjlee@uos.ac.kr

요 약

기존의 링크기반의 Frank-Wolfe 통행배정 기법은 구현의 용이성과 결과의 안정성 등으로 인해 널리 사용되어 왔으나, 교통분석을 위해 사용하는 기초자료의 크기와 정밀도가 향상됨에 따라 수렴성에 대한 논란이 제기되었다. 본 연구에서는 개별링크기반의 통행배정 기법 외에 경로기반, 출발지기반 알고리즘을 이용한 분석결과의 안정성, 적용가능성에 대한 검토를 수행하였다. 분석결과 각각의 상용프로그램 및 통행배정기법별로 결과의 차이가 일부 존재하지만 수렴성이 어느 정도 확보된 이후부터는 안정된 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 특히 대규모 교통망에서 통행배정 모형이 충분히 수렴되지 않은 상태에서는 수렴성 및 종료기준에 따라 분석결과의 안정성에 관한 문제가 제기될 가능성이 존재하였다. 따라서 실무적으로 적절한 수준의 수렴성 확보 및 안정된 결과 값을 도출하고자 하는 노력이 요구된다.

핵심어 : 수렴성, 링크 기반 알고리즘, 출발지 기반 알고리즘, 경로 기반 알고리즘, 통행배정

ABSTRACT

Existing link-based Frank-Wolfe algorithm has been widely used, thanks to its ease of simulation and stable results; however, it comes with low convergence issue towards near the optimum value. Such issue was not considered as a major drawback in the past. However, in the present, some arguments have occurred over the method's stability, analysis time, and other limits as the size and details of the fundamental data for traffic analysis have vastly improved. Therefore, this paper compared the theoretical attributes and the pros and cons between the Frank-Wolfe algorithm and the Origin-based algorithm and Path-based algorithm newly being developed. As a result of this paper, there is possibility that a problem of stability may arise depending on the convergence and exit criteria. Thus, In practice, this effort to derive the appropriate level of convergence is required to secure and stable results.

Key words : Convergence Level, Frank-Wolfe Algorithm, Origin-Based Algorithm, Path-Based Algorithm, Traffic Assignment

† 본 연구는 2013년 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 수행하였습니다.

* 주저자 : 서울시립대학교 도시과학연구원 융합도시연구센터 연구교수

** 공저자 : 한국개발연구원 공공투자관리센터 전문위원

*** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

† Received 20 November 2014; reviewed 29 January 2015; Accepted 3 February 2015

I. 서 론

도로부문 타당성조사에서는 사업의 경제성 분석을 위하여 교통수요 분석 모형을 사용하고 있으며, 현재 대부분의 경우 4단계 모형을 적용하고 있다. 4단계 모형 중 마지막 단계로서 도로부문 사업의 교통수요 추정에 있어 링크 교통량을 결정하는 중요한 역할을 하는 통행배정 단계에서는 Frank-Wolfe Algorithm(이하 FWA)을 기반으로 한 이용자 균형(User Equilibrium) 모형이 그동안 대표적으로 사용되어 왔다. 이용자 균형통행배정 기법은 Wardrop's(1952)의 통행경로 선택원리에 기초를 두고 있다. 이것은 Beakman(1956)에 의하여 수학적 모형으로 구현되었으며, Frank 와 Wolfe에 의하여 볼록결합 알고리즘(Convex combination Algorithm)으로 모형화 되었다.

그러나 교통수요 분석을 위해 사용하는 기초자료의 크기(Size)와 정밀도(Detail)가 향상됨에 따라 기존에 사용하던 FWA 기반의 이용자 균형 통행배정 모형의 정확도 및 한계에 관한 논란이 제기되기 시작하였다. 따라서 기존 방법론 대비 정밀성을 보다 향상시키고자 새로운 알고리즘(Origin-Based, Path-Based)들이 지속적으로 개발되어 왔으며, 최근 들어 이들 알고리즘이 본격적으로 교통수요분석을 위한 상용프로그램에 탑재되기 시작하고 있다. 따라서 다양한 통행배정 기법의 발달과 분석프로그램의 개발, 동시에 이에 대한 신뢰성 판단 및 검증에 대한 필요성이 대두되었다.

일반적으로 통행경로를 선정하는 과정에서 Link를 기반으로 탐색하는 Link 기반 알고리즘(대표적으로 FWA)과 Path 기반으로 탐색하는 경로 기반 알고리즘(Path-Based Algorithm), 그리고 Path의 중첩되는 구간을 제외하고 비교하는 출발지 기반 알고리즘(Origin-Based Algorithm)으로 구분하여 분류할 수 있다. Link 기반 알고리즘(FWA)은 연산과정에서 적은 메모리를 필요로 하고 최적해에 도달하는 과정에서의 안정성(stability)을 확보하지만, 반복연산에 의해 일정수준 이상에서 연산효율이 점차 떨어지는 단점을 보이며, 경로기반 알고리즘(Path-Bas-

ed Algorithm: PBA)은 최적해에 도달하기 위한 연산속도가 빠르지만, 많은 메모리를 필요로 하여 다수의 경로 및 노드로 구성되는 대규모 네트워크에 적용이 쉽지 않다. 또한 출발지기반 알고리즘(Origin-Based Algorithm : OBA)은 가장 적은 메모리를 필요로 하며 연산에 필요한 시간이 가장 작은 장점이 있으나, Local optimum을 사용하여 최적해에 도달하기 때문에 불안정성(unstability)을 가지며 수렴성 측면에서 문제점이 존재한다고 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 우선 통행배정 단계에서 사용되어 온 기존의 FWA 기반모형과 새롭게 개발되고 있는 모형간의 이론적 특징 및 장·단점을 비교하고, 국내·외에서 널리 사용하고 있는 상용프로그램(EMME, TransCAD, CUBE)의 적용 알고리즘에 따른 수렴성 검토를 수행하였다. 구체적으로 수렴성 수행 결과는 가상의 교통망(Toy-Network)와 대규모 네트워크에서 비교된다. 가상의 교통망(Toy-Network)에서, 알고리즘들이 계산된 최적해에 수렴할 수 있는지 확인 할 수 있다. 이 논문은 link 기반 알고리즘과 path 기반 알고리즘 또는 출발지기반 알고리즘(Origin-Based Algorithm)의 기법별을 통하여 안정한 유일한 해를 찾을 수 있을지 확인할 수 있다. 대규모 네트워크에서는, 각 프로그램 및 통행배정 기법별로 가상의 사업시행 전후에 따른 주요 통행배정 결과값이 합리적인 가를 확인 할 수 있다. 최근 일부 연구들은 Frank-Wolfe algorithm의 통행배정 기법이 최적해 근처에서 수렴성이 저하되는 문제를 갖고 있다고 발표하였다. 따라서 본 연구는 교통량 및 편익산출을 위한 통행배정모형의 수렴성을 판단하고 종료기준에 대한 연구를 수행하고자 한다. 구체적으로 먼저 통행배정모형의 이론적 검토 및 수렴성판단과 관련된 기존연구를 검토하고, Toy-Network 및 실제 대규모 네트워크를 기반으로 사례분석을 실시하여, 통행배정 알고리즘별 알고리즘 종료조건에 따른 교통량, 편익의 수렴성을 검토하였다. 마지막으로 타당성조사 단계에서 안정적인 결과를 도출하기 위한 주요 기준에 대해서 제안하고자 한다.

II. 이론적 검토

1. 통행배정의 기본원리

통행배정은 전통적인 4단계 교통수요분석 모형의 최종단계에서 수행되며, 주어진 기·종점간 통행량을 교통망에 배정하는 과정이라고 할 수 있다.

통행배정의 기본원리는 교통수요와 공급의 관계에 기초를 두고 있으며, 교통량 변화에 따른 서비스 수준의 변화를 나타내는 Link 저항함수와 서비스 수준의 변화에 따른 통행량 변화를 나타내는 수요함수의 관계로 표현 할 수 있다.

통행배정에서는 전량 통행배정기법, 용량제약 통행배정기법, 확률선택모형을 이용한 통행배정기법, 이용자균형(User Equilibrium) 통행배정기법이 있다. 이 중에서 주로 이용자균형(User Equilibrium)이 주로 사용되고 있으며, 본 연구에서도 이용자균형 통행배정기법을 기준으로 분석 하였다.

통행배정 모형은 크게 각 기·종점간에 시간 등의 비용이 최소가 되는 경로를 찾는 부분과 통행량을 교통망에 부하>Loading)하는 부분으로 나누어진다. 본 연구의 초점이 되는 통행량을 교통망에 부하하는 방법은 우선적으로 시간적 요소의 고려에 따라 동적(Dynamic) 모형과 정적(Static) 모형으로 구분된다. 다음으로는 용량과 확률요소의 고려에 따라 크게 네 가지로 구분되며, 그 동안 확률적 요소를 고려하지 않되 용량제약은 고려하는 Wardrop의 이용자 균형원리에 기반 한 모형이 가장 널리 적용되어 왔다.

이용자균형 통행배정은 Wardrop(1952)의 첫 번째 통행경로 선택원리에 기초를 두고 있으며, ‘통행자는 자신의 통행시간을 최소화하는 통행경로를 선택한다’는 가정에서 출발한다. 이러한 가정에서 통행자의 통행경로 선택원리는 Wardrop(1952)에 의해서 두 가지 가능성이 제시되었다. 첫 번째 통행경로 선택원리는 ‘통행자는 다른 통행자의 통행경로 선택과는 상관없이 자신의 통행시간을 최소화하는 통행경로를 선택 한다’는 것이고, 두 번째 통행경로 선택원리는 ‘모든 통행자들은 총 통행시간 혹은 개별

통행자들의 평균 통행시간이 최소화되도록 통행자들은 통행경로를 선택 한다’고 정의하였다.

2. 이용자 균형 원리 구현을 위한 알고리즘 비교

이용자 균형원리는 1952년 Wardrop에 의해 최초 제안된 이후, 4년 뒤 Beckmann(1956)에 의해 수학적 모형으로 구성되었다. 이후 Beckmann의 모형을 풀기 위한 효율적 해법은 Leblanc(1973)에 의해 제시 되었으며, Leblanc은 이때 1956년 Frank & Wolfe가 최초로 제안한 볼록결합(convex combination) 알고리즘을 적용하였다.

FWA에 기반한 이용자균형 통행배정모형은 수렴성이 최적해 근처에서 저하되는 문제를 갖고 있어 이를 해결하고자 Fukushima(1984), Weintraub(1985), Lupi(1986), Janson(1987), Arezki(1990) 등에 의해 여러 연구들이 진행되어 왔다. 그리고 수렴성의 근본적인 향상을 위해 또 다른 알고리즘을 개발하고자 하는 시도 또한 활발하게 이루어져왔다. 대표적인 것으로는 Dafermos(1968), Jayakrishnan et al(1994)의 경로기반(Path-Based) 알고리즘과 Bar-Gera(1999), Dial(2006) 등의 출발지기반(Origin-Based) 알고리즘 등이 있다.

이에 본 연구에서는 알고리즘의 유형을 크게 Link-Based Algorithm(Frank-Wolfe Algorithm), Path-Based Algorithm, Origin-Based Algorithm의 3가지로 구분하여 접근하고자 하였다.

3. 통행배정 기법별 연구 및 구현 현황

링크기반 알고리즘의 경우 1956년 Frank and Wolfe에 의하여 처음 제안되었으며, 이후 1982년 Powell and Sheffi에 의하여 개선된 형태인 Improved Frank-Wolfe algorithms을 제안하였다. 이외에도 1985년 Hearn 등에 의한 Restricted Simplicial Decomposition(RSD) algorithm 과 1997년 Larsson and Patriksson에 의한 Nonlinear Simplicial Decomposition(NSD)의 형태로 발전되었다. 최근에는 2003년 Daneva et al.에 의하여 Conjugate FW algorithms

(CFW)과 Bi-conjugate FW algorithms(BFW)가 제안되었으며, 현재 CUBE 및 TransCAD에서 적용하여 활용되고 있다.

경로기반 알고리즘은 1968년 Dafemos에 의하여 제안되었으며, 1992년 Larsson and Patriksson에 의하여 Disaggregate Simplicial Decomposition(DSD) algorithm 형태로 개선되었다. 이후 1994년에는 Jayakrishnan et al. 등에 의하여 현재 CUBE에 적용되는 Gradient Projection(GP) algorithm 형태로 개선되었다.

마지막으로 출발지기반 알고리즘은 가장 최근인 1999년 Bar-Gera에 의해 제안된 방법으로 같은 해 Dial에 의하여 발표된 Algorithm B와 거의 같다. 이후 2007년 Bar-Gera and Luzon에 의해 Traffic Assignment by Paired Alternative Segments(TAPAS)로 개선되었으며 2008년 Nie et al.에 의해 Improved Origin-based Algorithm로 개선되었다.

현재 상용화된 교통분석 프로그램에서 적용하고 있는 이용자균형 알고리즘은 다음과 같다. EMME는 링크기반, 경로기반 통행배정 기법을 적용하고 있다. CUBE는 링크기반모형과 경로기반 통행배정 기법을 적용하고 있으며, 링크기반 통행배정 기법으로는 FWA, CFWA, BCFWA, 경로기반 통행배정 기법으로는 GPA를 적용하고 있다. TransCAD에서는 링크기반 통행배정 기법의 FWA, CFWA, BCFWA를 적용하고 있으며, 링크기반 통행배정 기법과 출발지기반 통행배정 기법을 적용할 수 있다. 이때, 출발지기반 통행배정 기법은 Algorithm B를 적용하고 있다.

III. 기존 연구 검토 및 연구방법론 설정

1. 기존 연구 검토

통행배정기법간의 결과를 비교한 최근 연구로는 Shin-ichi Inoue et al.(2012)에 의해서 수행되었다. “Computational Experience on Advanced Algorithms for User Equilibrium Traffic Assignment Problem and Its Convergence Error”의 연구에서 주요 통행배정

알고리즘별 결과 값을 보여준다. 바르셀로나와 위니펙에 대한 통행배정 결과 FWA의 수렴속도가 가장 낮은 것으로 분석되었으며 TAPAS의 수렴속도가 가장 빠른 것을 확인할 수 있었다. 다른 ASD, DSD(Disaggregate Simplicial Decomposition), Bagera’s algorithm 들은 유사한 연산속도를 나타내는 것으로 분석되었다.

교통분석 프로그램별로 분석하여 비교한 사례결과는 다음과 같다. EMME의 FWA와 PG(PBA)를 분석해본 결과 PG의 연산속도가 FWA보다 빠르게 나타났다. Relative Gap도 PG(PBA)는 10^{-6} 까지 수렴하였지만, FWA는 10^{-4} 까지 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

TransCAD의 FWA, BCFW, OUE에 대한 사례를 분석한 결과, 프로그램 연산속도는 OUE, BCFW, FW순으로 빠르다. OUE는 10^{-6} 까지 가장 먼저 도달한 것을 알 수 있다. BCFW는 10^{-5} 까지 가장 먼저 도달하였지만 10^{-6} 까지 수렴하는데 오랜 시간이 소요되었다.

CUBE의 사례 분석결과는 PBA가 BCFW, FW보다 월등히 빠른 수렴속도를 나타내는 것으로 분석되었다. 수렴하는데 있어 연산횟수 또한 46회 만에 10^{-6} 까지 수렴하는 것을 알 수 있다. BCFW와 FW는 10^{-4} 이하에서 연산속도가 현저히 낮아지는 현상이 발생하고 있다. EMME와 TransCAD, CUBE 모두 FWA의 연산속도는 비슷한 것으로 분석되었으며 프로그램에 따라 BCFW, OUE, PBA에 대한 분석을 수행하였고 각각 FWA보다 빠른 속도와 높은 수렴성을 나타내는 것을 알 수 있다.

수렴성 검토에 관한 연구에서는 “Convergence of Traffic Assignment”, Boyce et al.(2004)는 미국 뉴저지 지역에 두 개의 램프 건설에 따른 효과를 파악하기 위해 EMME/2를 이용해 분석한 결과 안정된 링크 교통량을 얻기 위해서는 Relative Gap = 0.01%(10^{-4})정도 되어야 한다는 결론 도출하였으며 Relative Gap이 10^{-11} 에 도달했을 때의 결과 값을 참값으로 가정하였다. 이러한 연구를 통해 FWA에 비해 OBA를 적용했을 때 수렴 속도가 훨씬 빠르다

는 점을 보여주었다. “The Equilibrium Assignment”, Bloy(2004)는 남아프리카 공화국 가우텡 지역을 대상으로 32개 서로 다른 사업에 대하여 Relative Gap의 변화에 따른 B/C의 변화를 분석하여 교통량 추정정보보다 편익 추정정보에 더 많은 통행배정 횟수가 필요하며, 경제성 평가를 위한 Relative Gap은 0.01%(10^{-4}) 정도는 되어야 한다는 결론을 도출하였다. “Traffic Assignment Convergence and its Effects on Selecting Network Improvements”, Blaschuk(2009)은 캐나다 켈거리 지역에 위치한 2개의 도로 확장 사업을 대상으로 사업 시행시와 미시행시의 총 주행시간(VHT)의 변화를 분석하여 Bloy(2004)와 비슷한 결과를 도출하였으며, 교통량 변화를 파악하거나 총주행시간의 변화를 파악하고자 할 때 모두 Relative Gap이 0.01%(10^{-4}) 이하로 되어야 한다는 결론을 도출하였다. 또한 “Convergence of the Sydney strategic traffic model”, Wilson(2006)은 호주 시드니 지역의 사례를 대상으로 통행배정 횟수에 따른 도로이용자의 비용의 변화 분석하여 통행배정 횟수에 따라 통행시간 절감편의 변화가 크다고 제시하였다. 상기와 같은 연구들은 Relative Gap이 최소한 0.01%(10^{-4})가 되어야한다는 점을 도출할 수 있고, 특히나 편익을 산정할 경우에는 교통량만 추정할 때보다 더 정교해야하므로 0.01%(10^{-4}) 이하로 되어야하는 것을 파악할 수 있다.

2. 연구방법론 설정

본 연구에서는 기존에 주로 사용하여왔던 개별 링크기반(Link-Based)의 통행배정 기법 외에 새로운 통행배정기법(경로기반, 출발지기반)을 이용한 분석 결과의 안정성, 적용가능성 등에 대한 검토를 수행하고자 한다. 구체적으로는 먼저 개별 알고리즘의 교통량 수렴정도의 차이를 비교하기 위해서 통행배정 결과의 참값을 직접 계산할 수 있는 가상의 toy-network 구축하고, 실제 계산상의 값과 국내외에서 널리 사용되고 있는 상용프로그램인 EMME, TransCAD, Cube의 적용 알고리즘별 산출값과 비교하여 개별 알고리즘이 정확성, 수렴성에 대해서 검

토하하였다.

다음으로 대규모 네트워크에 각 상용프로그램의 적용 알고리즘별로 수렴성, 배정된 교통량, 수렴정도에 따른 편익 변화 분석을 수행한다. 이를 통해서 각 프로그램의 적용 알고리즘별로 수렴성에 대한 검토를 수행하고, 안정화단계에 이르는 통행배정 종료조건을 제시하고자 한다.

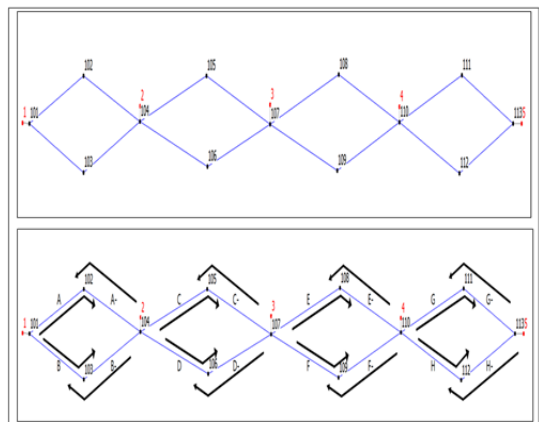
IV. 사례분석

1. Toy-network 분석

1) 분석범위 설정

교통 분석 프로그램별 알고리즘에 따른 수렴정도 분석에 앞서 본 연구에서는 Toy-network를 설정하여 각 알고리즘별 안정성 및 기능을 파악하려 한다. 이를 위해 총 16개 링크로 구성된 toy-network을 구성하고 평균 V/C에 따른 통행량(O/D)를 구성하여 각 링크별 통행량과 통행시간, 목적함수 값을 실제 계산상의 값과 교통분석 프로그램의 알고리즘 별 값과 비교하였다.

토이 네트워크 구성 내역은 순방향(101-104-107-110-113)에 대하여 각각의 링크를 A, B, C, D, E, F, G, H 라고 정의하고, 역방향(113-110-107-104-101)에 대한 각각의 링크를 A-, B-, C-, D-, E-, F-, G-, H- 라고 정의하였다.



〈Fig. 1〉 Toy-network

링크 속성의 경우 각 링크는 동일한 거리와 용량 및 파라미터를 포함하고 있으며 각 링크별 자유통행속도의 차이를 두어 링크의 속성값을 설정하였다.

<Table 1> Link attribute value

DISTANCE(km)	100
SPEED(km/h)	80~90
CAPACITY(veh/lane)	50,000
Alpha	0.15
Beta	4.00

토이네트워크 분석에서는 평균 V/C에 따라 시나리오를 적용하고자, O/D 통행량을 각 존pair별로 10,000, 30,000, 50,000통행으로 구성하였으며 내부 통행량을 제외한 존별 통행량은 동일한 것으로 설정하여 분석을 수행하였다.

2) 토이네트워크 통행량 및 목적해 도출

본 분석의 경우 평균 V/C에 따라 시나리오를 선정하였으며 이는 비혼잡 상황과 혼잡상황, 극심한 혼잡상황으로 구분할 수 있다. 따라서 본 분석에서는 V/C에 따라 시나리오를 설정하였으며, 구체적으로 시나리오 1의 경우 V/C 0.4, 시나리오 2의 경우

V/C 1.0, 시나리오 3의 경우 V/C 2.0로 설정하였다.

시나리오에 따라 각 링크별 통행량 및 통행시간, 목적함수 값을 계산하여 보면 다음과 같은 결과를 보이며, 시나리오별 총통행시간과 목적함수 값이 상이함을 보이는 것으로 나타났다.

3) 교통수요 프로그램별 simulation solution

Toy-network을 분석하기 위해 EMME, TransCAD, CUBE의 교통수요 프로그램을 활용하였다. 교통수요 프로그램의 통행배정결과를 산출하기 위한 통행배정 종료조건은 다음과 같다.

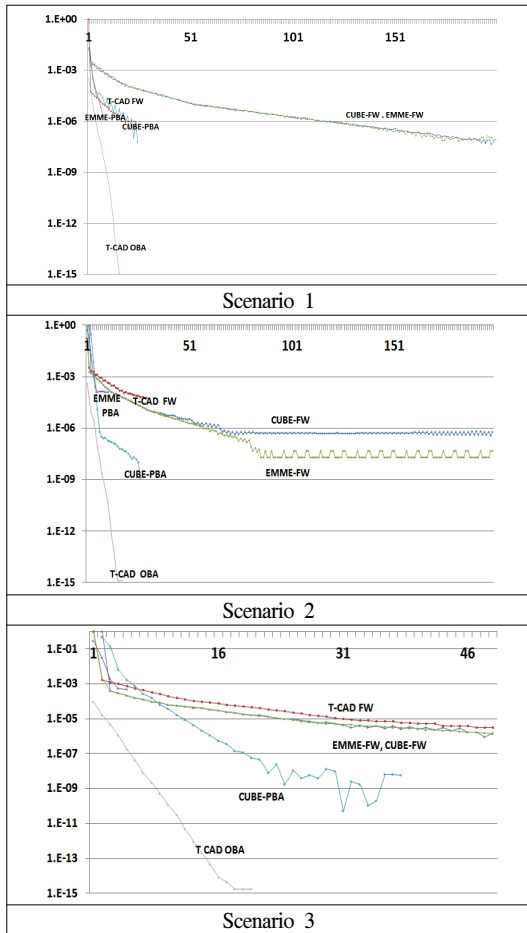
- Relative Gap : -10^{-5}
- iteration : 10,000회

단, CUBE의 경우 사용자가 최대 Iteration구현을 999회까지 할 수 있도록 설정되어 있어 999회를 종료조건으로 설정하였다.

Toy-network를 교통수요 프로그램으로 통행배정 종료조건에 따라 통행배정을 수행한 결과를 분석해 보았다. 교통수요 분석 프로그램별 목적함수 값은 다르지 않은 것으로 판단 할 수 있다. 하지만 V/C

<Table 2> Result of Objective value in Toy network(V/C=0.4)

Dir.	Volume			Travel time			Objective value		
	Do 1.	Do 2	Do 3	Do 1.	Do 2	Do 3	Do 1.	Do 2	Do 3
A	12,865.1730	59,612.1080	99,782.7170	1.2354	1.6087	4.1719	15,883.0689	73,892.5926	127,096.4228
B	27,134.8270	60,387.8920	100,217.2800	1.2354	1.6087	4.1719	33,096.9932	73,957.1610	126,161.2149
C	27,684.9650	89,782.3100	124,783.5300	1.2073	3.0470	8.1177	32,964.4874	109,106.1144	160,077.2485
D	32,315.0350	90,217.6900	125,216.4700	1.2073	3.0470	8.1177	38,030.9547	108,388.4953	158,902.2906
E	27,737.9560	89,787.3440	124,788.5300	1.1793	2.9765	7.9300	32,259.5470	106,575.2250	156,362.5913
F	32,262.0440	90,212.6560	125,211.4700	1.1793	2.9765	7.9300	37,095.6647	105,890.4063	155,241.3568
G	13,336.0260	59,642.7900	99,799.9030	1.1372	1.4815	3.8419	15,154.7284	68,050.3438	117,009.1084
H	26,663.9740	60,357.2100	100,200.1000	1.1372	1.4815	3.8419	29,964.3674	68,105.0987	116,216.0049
A-	12,936.2670	59,616.8100	99,785.3500	1.2203	1.5892	4.1213	15,776.0767	72,997.3134	125,550.1867
B-	27,063.7330	60,383.1900	100,214.6500	1.2203	1.5892	4.1213	32,612.5049	73,060.3253	124,637.5202
C-	27,711.7660	89,784.8560	124,786.0600	1.1931	3.0113	8.0228	32,608.2302	107,825.8197	158,198.1180
D-	32,288.2340	90,215.1440	125,213.9400	1.1931	3.0113	8.0228	37,557.5160	107,124.8898	157,050.4905
E-	32,262.0440	90,212.6560	125,211.4700	1.1793	2.9765	7.9300	37,095.6647	105,890.4063	155,241.3568
F-	27,737.9560	89,787.3440	124,788.5300	1.1793	2.9765	7.9300	32,259.5470	106,575.2250	156,362.5913
G-	13,398.4980	59,646.7810	99,802.1390	1.1245	1.4649	3.7989	15,054.6474	67,290.3083	115,697.3104
H-	26,601.5020	60,353.2190	100,197.8600	1.1245	1.4649	3.7989	29,561.9607	67,343.8468	114,921.8257
Total	400,000	1,200,000	1,800,000	18.9528	36.3114	95.8691	466,975.9593	1,422,073.5716	2,224,725.6379



(Fig. 2) Change of Relative Gap in Toy-networks

에 따른 목적함수 값을 비교할 경우, V/C=0.4일 때, 교통수요 분석 프로그램별 목적함수 값의 차이가 상대적으로 큰 것으로 분석 되었다.

Toy-network의 V/C별 목적함수 값은 교통수요 분석 프로그램에 관계없이 동일한 수준을 나타내는 것으로 분석할 수 있다. 교통혼잡상황을 가정하여 토이네트워크 시나리오 설정에 따른 교통수요 분석 프로그램의 분석결과, FWA의 분석결과와 수학적 계산결과와의 차이는 PBA, OBA의 분석 결과 차이 보다 조금 더 큰 값이 계산 되는 것으로 분석되었다. 또한 동일한 Toy-network에 통행량이 다를 때의 통행배정 결과를 비교해 보았다. 교통수요 분석 프로그램에 관계없이 동일한 목적함수 값을 도출해보면, V/C와 교통수요 분석 프로그램에 관계없이 분석 결과는 동일한 것을 확인 할 수 있었다. 수학적 계산 방법의 한계로 인하여 보다 복잡한 구조에 대한 분석을 수행하지 못하였다. 하지만, 본 Toy-network 분석을 통하여 교통수요분석 프로그램의 분석 결과가 서로 다르지 않은 점을 확인할 수 있는 분석 결과이다.

2. 대규모 네트워크 분석

1) 분석의 개요

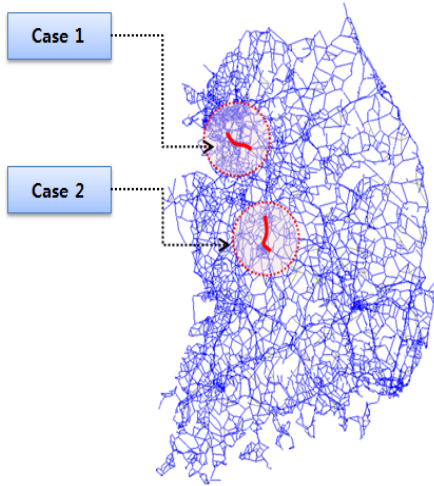
대규모 네트워크에서는 한국의 Korea regional O/D/Network를 이용하여 분석을 수행하였다. Korea regional O/D/Network은 250개의 존, 27,654개의 node, 64,378link를 포함하는 대규모 네트워크로써, 한국 지역간 통행을 분석할 수 있는 데이터 이다.

분석사례는 다음과 같이 설정되었다. 시나리오 1의 경우 경부고속도로 [남이JCT~비룡 JCT]의 32.1km구간의 고속도로를 확장하는 사업으로 대규

(Table 4) Objective function values comparison followed by assignments in softwares

Division	EMME		Trans Cad		CUBE		
	FWA	PBA	FWA	OBA	FWA	PBA	
V/C =0.4	Obj. Value	466,976.02	466,975.94	467,169.33	467,169.33	466,975.96	466,976.13
	Difference	-0.0577	0.0188	-0.0017	0.0004	-0.0012	-0.1690
	Error Rate(%)	-10^{-5}	-10^{-6}	-10^{-7}	10^{-8}	-10^{-7}	-10^{-5}
V/C =1.0	Obj. Value	1,422,073.57	1,422,073.58	1,422,073.76	1,422,073.52	1,422,073.57	1,422,073.59
	Difference	-0.0014	-0.0043	-0.0000	0.0000	0.0015	-0.0232
	Error Rate(%)	-10^{-7}	-10^{-7}	-10^{-9}	-10^{-9}	-10^{-7}	-10^{-6}
V/C =2.0	Obj. Value	2,593,602.47	2,593,602.18	2,593,602.96	2,593,602.72	2,593,602.48	2,593,602.48
	Difference	0.0285	0.3180	0.0101	0.0101	0.0110	0.0105
	Error Rate(%)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}

모 사업에 해당하고, 시나리오 2의 경우 영동고속도로[서창~안산]간 14.9km를 확장하는 중소규모 사업으로 시나리오를 설정하였다.



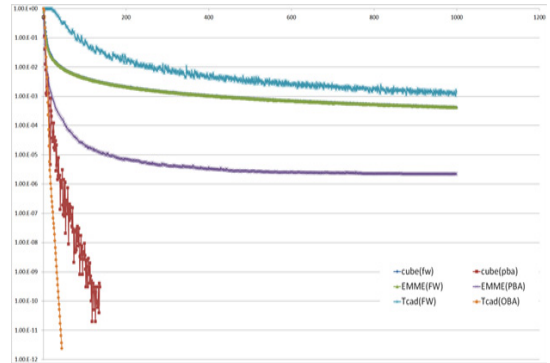
〈Fig. 3〉 Large scale network

먼저 분석을 위해서 사업미시행시 각 교통수요 분석 프로그램별 통행배정 결과가 필요하다. 따라서 모든 프로그램에 대하여 경험적으로 FWA는 10^{-4} 의 Relative Gap을 종료조건으로 설정하였고, PBA, OBA는 EMME는 10^{-6} , 나머지 프로그램은 10^{-10} 을 종료조건으로 설정하였다. 그 외의 다른 종료조건은 동일하게 설정하였으며 최대 연산횟수를 10,000회를 설정하였다. 단, CUBE는 3,000회로 설정하였는데, 분석 프로그램에 대한 모의 Iteration 수행결과 3,000회의 분석시간이 오래 걸리고 Relative GAP의 변화도 없는 것으로 판단하여 3,000회 이상의 분석은 의미가 없는 것으로 판단하였다.

2) 미시행시 분석결과

전국 지역간 자료에 대한 분석 결과를 살펴보면, 반복연산횟수에 따른 Relative-Gap의 변화는 다음과 같다. Frank-wolfe algorithm의 경우, TransCAD를 기준으로 3,783의 연산을 15분 동안 수행 후 Relative Gap을 만족하고 종료하였다. 프로그램별로 차이는 있지만, Relative Gap을 만족시키기 위한 연산횟수

는 약 3,800번 정도로 추정할 수 있다. Path-based algorithm과 Origin-based algorithm의 경우 Frank-wolfe algorithm보다 빠른 속도로 Relative Gap이 감소하는 것으로 분석되었다. PBA는 CUBE가 EMME보다 연산횟수와 Relative Gap 측면에서 빠른 것으로 분석되었으며, OBA의 경우 빠르게 연산이 종료되는 것을 알 수 있다.



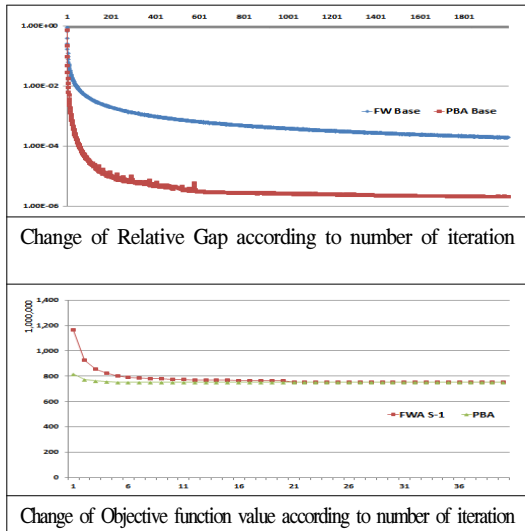
〈Fig. 4〉 Change of relative gap according to number of iteration (summary)

〈Table 5〉 Analysis result

Section	EMME		Trans Cad		CUBE		ImTas	
	FW	PB	FW	OB	FW	PB	FW	OB
Iteration	2,000	198	3,783	1,067	1,499	134	4,364	45
Relative Gap	10^{-4}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-10}	10^{-4}	10^{-11}	10^{-5}	10^{-13}
Objective Value	751,599,000	751,408,056	754,180,078	754,064,545	-	-	754,095,100	754,064,544
CPU time(h)	1.166	0.883	0.245	0.314	4.477	0.777	3.156	0.076

먼저, EMME를 이용한 분석 결과 총 반복연산 횟수 2,000번에 대하여 링크기반 알고리즘(Frank wolfe algorithm)은 10^{-4} 수준의 Relative-Gap을 추정하였으며, 경로 기반 알고리즘(Path Based Algorithm)은 10^{-6} 수준의 Relative-Gap을 추정하였다. 링크기반 알고리즘에서는 2000번 연산을 통하여 Relative Gap 10^{-4} 까지 수렴하였다. 경로 기반 알고리즘에서는 59회에 Relative Gap이 10^{-4} 를 만족하였으며, 198회에 10^{-5} 를 만족하였다. 하지만 10^{-6} 은 2000번 이상의 연산이 필요로 하였다. 연산 초반에는 Relative Gap이 감소하는 속도가 느려지는

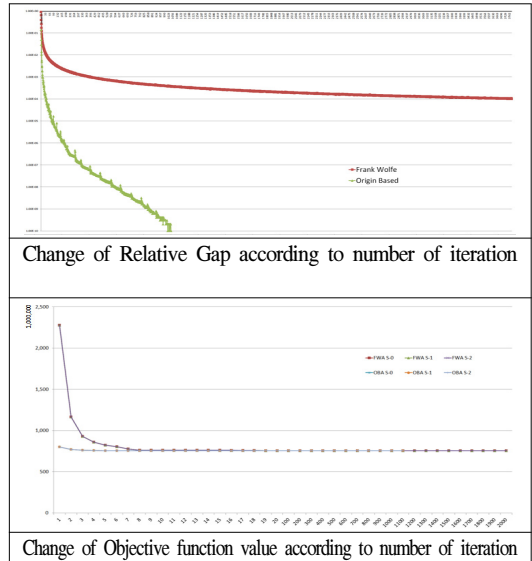
현상을 관찰 할 수 있었다. EMME는 FWA의 분석 결과는 다른 교통수요 분석 프로그램과 유사한 결과를 나타내었다. Relative GAP의 수렴 속도나 수렴 범위에 대하여 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 PBA 분석 결과는 CUBE의 PBA와 다른 수렴성을 나타내었으며, Trans CAD의 OBA와도 상이한 특성을 나타내었다. EMME의 PBA는 FWA의 수렴성이 증가한 정도로 분석할 수 있다. FWA Relative GAP의 경우, 10^{-4} 근처에서 수렴속도가 감소하는 결과가 10^{-7} 정도 수렴수준에서 동일한 결과가 나타나는 것으로 분석되었다.



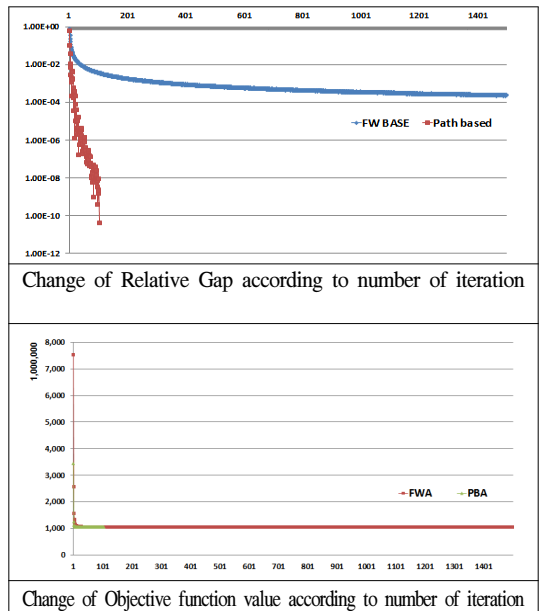
〈Fig. 5〉 The result of analysis(EMME)

둘째로, TransCAD는 반복연산횟수를 10,000번으로 설정하였으며 Relative-Gap = 0을 종료조건으로 적용하였다. 반복연산 횟수가 증가함에 따라 출발지 기반 알고리즘(Origin Based Algorithm)은 링크기반 알고리즘(Frank Wolfe algorithm)보다 빠르게 Relative-Gap이 감소하였지만 더 이상 Relative-Gap이 감소하지 않았다. 링크기반 알고리즘은 출발지 기반 알고리즘보다 연산속도는 느렸지만 10^{-4} 까지 Relative-Gap이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 출발지 기반 알고리즘은 경로기반 알고리즘 보다 목적함수 값에 빨리 수렴하고, 연산시간은 더 오래 걸

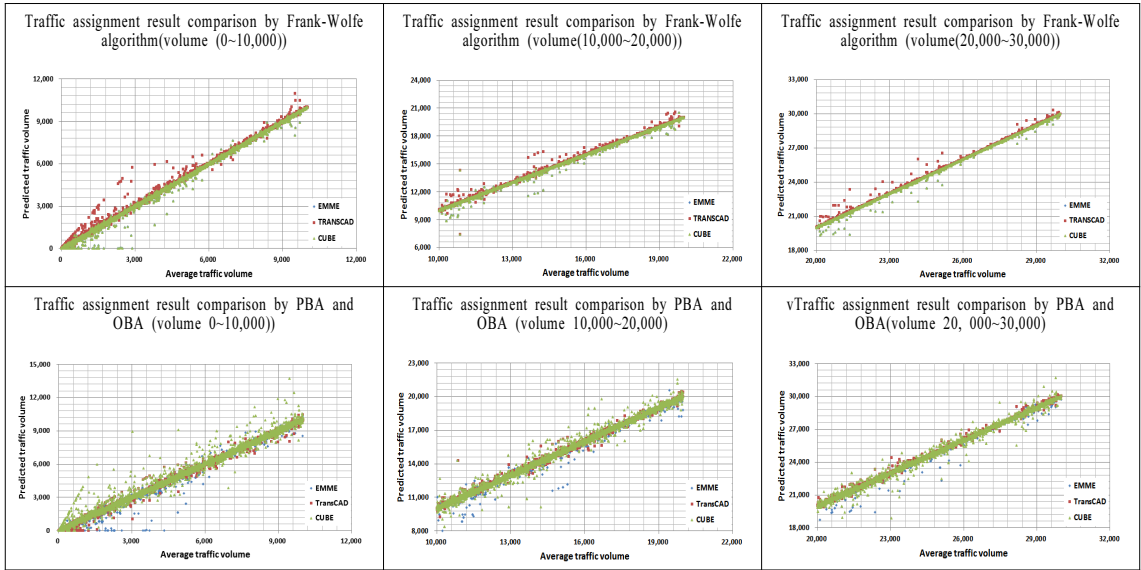
리는 것을 확인할 수 있었다. 구체적으로, TransCAD의 분석결과 FWA는 10^{-4} , OBA는 10^{-10} 까지 수렴하였다. 목적함수 값은 OBA가 FWA보다 더 작은 값을 찾았으며, OBA가 FWA보다 빠른 속도로 연산을 종료하는 것으로 분석되었다.



〈Fig. 6〉 The result of analysis(TransCAD)



〈Fig. 7〉 The result of analysis(CUBE)



〈Fig. 8〉 Traffic assignment result comparison by algorithms

마지막으로 CUBE의 경우 분석결과, 링크기반 알고리즘에서는 10^{-4} 수준의 Relative-Gap으로 수렴하였으나, 경로기반 알고리즘에서는 10^{-10} 수준의 Relative-Gap까지 분석되었지만, 수렴하지 못하는 결과를 나타내었다. CUBE에서는 목적함수가 제시되지 않고 총통행비용, 총 통행거리, 총 통행시간에 대한 분석결과를 제시한다. 총 통행거리는 반복연산 초기에 링크기반알고리즘의 변화율이 크게 나타났으며 200번 이후 경로기반알고리즘의 총 통행거리와 비슷한 값을 추정하였다. 총 통행시간도 비슷한 결과를 나타내었다.

3) 교통량 분석 결과

먼저 일부 특정링크를 중심으로 미시행과 시행시의 차이를 검토하였다. FWA의 경우, 프로그램별로 미시행과 시행시의 교통량 차이는 약 0.2%~2.8%로 유사한 것으로 나타났으며, PBA와 OBA의 경우에도 교통량 차이는 유사하며, 0.6%~7%의 차이를 보이고 있다.

다음으로, 각 교통수요 분석프로그램의 미시행 시나리오에 대하여 각 링크의 평균 교통량을 추정하고, 프로그램별 편차를 추정해 봄으로서, 교통수

요분석 프로그램에 따른 추정 교통량의 차이를 비교하였다. 각각의 프로그램의 편차는 FWA의 경우, -2.13%~2.13%로 유사하며 PBA 혹은 OBA의 경우에도 -0.74%~0.04%로 차이가 미미한 것을 알 수 있다. 분석결과 교통량이 증가함에 따라 통행배정량의 차이가 증가하는 것으로 분석되었으며, PBA가 OBA보다 교통량의 분산이 높게 나타났다.

4) 편익 분석 결과

프로그램별, 알고리즘별로 시나리오1, 시나리오2의 편익결과에 대해서 비교하였다. 시나리오1의 경우, 92백만원/일~97백만원/일로 산출되어서 약 4%의 차이를 보이고 있어서 유사하게 산정되는 것을 알 수 있다. 시나리오2에 있어서도 편익이 134백만원/일~138백만원/일로 약 3%의 차이를 보이고 있어서 시나리오1과 마찬가지로 별 차이가 없는 것을 알 수 있다.

Relative Gap별 편익분석결과를 살펴보면, 최종수렴결과와 달리 알고리즘별로 편익값이 상이한 것을 알 수 있다. 분석 모형별로 편익분석을 살펴보면, 우선 EMME의 경우, Relative Gap이 $10^{-1} \sim 10^{-6}$ 을 살펴보면, 10^{-4} 이후에 편익값이 안정화 되어 가는

<TABLE 7> The result of benefit analysis according to Relative Gap

CASE1		G : 10 ⁻¹	G : 10 ⁻²	G : 10 ⁻³	G : 10 ⁻⁴	G : 10 ⁻⁶	G : 10 ⁻¹⁰		
EMME - FWA	do not	193,705,099,264	186,529,644,544	185,448,398,848	185,354,584,064				
	do	193,542,193,152	186,396,540,928	185,382,453,248	185,287,360,512				
	Benefit	162,906,112	133,103,616	65,945,600	67,223,552				
TransCAD - FWA	do not	202,071,282,731	191,791,334,250	190,670,837,217	190,557,983,308				
	do	202,136,466,758	191,757,578,707	190,575,763,465	190,462,847,839				
	Benefit	-65,184,027	-54,414,909	803,287	1,625,606				
CUBE - FWA	do not	468,315,753,054	202,333,486,608	192,119,505,642	190,935,029,622				
	do	468,022,559,964	202,375,291,644	192,031,957,890	190,842,844,158				
	Benefit	293,193,090	-41,805,036	87,547,752	92,185,464				
EMME - PBA	do not	187,940,323,328	185,541,246,976	185,340,592,128	185,331,384,320				
	do	187,829,305,344	185,491,931,136	185,267,666,944	185,263,833,088				
	Benefit	111,017,984	49,315,840	72,925,184	67,551,232				
TransCAD - OBA	do not	197,395,223,307	190,923,499,111	190,544,411,875	190,541,980,030			190,544,522,240	190,545,664,167
	do	197,226,915,379	190,873,206,733	190,454,077,230	190,450,501,926			190,449,560,055	190,450,111,002
	Benefit	168,307,928	50,292,377	90,334,645	91,478,104			94,962,185	95,553,165
CUBE - PBA	do not	228,177,913,326	196,865,733,540	193,344,627,270	191,085,295,866			190,809,155,118	190,805,829,966
	do	228,116,047,998	196,641,198,276	193,340,645,838	190,920,066,438			190,716,948,098	190,713,341,514
	Benefit	61,865,328	224,535,264	3,981,432	165,229,428			92,207,020	92,488,452
CASE2		G : 10 ⁻¹	G : 10 ⁻²	G : 10 ⁻³	G : 10 ⁻⁴			G : 10 ⁻⁶	G : 10 ⁻¹⁰
EMME - FWA	do not	193,705,099,264	186,529,644,544	185,448,398,848	185,354,584,064				
	do	193,665,548,288	186,438,287,360	185,362,579,456	185,268,846,592				
	Benefit	39,550,976	91,357,184	85,819,392	85,737,472				
TransCAD - FWA	do not	202,071,282,731	191,791,334,250	190,670,837,217	190,557,983,308				
	do	201,297,216,113	191,678,277,113	190,535,133,279	190,422,378,250				
	Benefit	774,066,619	113,057,137	135,703,938	135,605,058				
CUBE - FWA	do not	468,315,753,054	202,333,486,608	192,119,505,642	190,935,029,622				
	do	468,046,328,238	202,368,717,906	191,945,121,108	190,803,215,784				
	Benefit	269,424,816	-35,231,298	174,384,534	131,813,838				
EMME - PBA	do not	187,940,323,328	185,541,246,976	185,340,592,128	185,331,384,320				
	do	187,834,941,440	185,480,003,584	185,251,282,944	185,246,285,824				
	Benefit	105,381,888	61,243,392	89,309,184	85,098,496				
TransCAD - OBA	do not	197,395,223,307	190,923,499,111	190,544,411,875	190,541,980,030	190,544,522,240	190,545,664,167		
	do	197,359,689,464	190,638,801,893	190,415,370,711	190,408,854,835	190,409,143,817	190,409,498,755		
	Benefit	35,533,843	284,697,217	129,041,164	133,125,195	135,378,423	136,165,412		
CUBE - PBA	do not	228,177,913,326	196,865,733,540	193,344,627,270	191,085,295,866	190,809,155,118	190,805,829,966		
	do	228,494,929,380	196,854,259,578	193,266,136,182	192,751,568,910	190,676,373,400	190,673,925,956		
	Benefit	-317,016,054	11,473,962	78,491,088	-1,666,273,044	132,781,718	131,904,010		

것을 알 수 있다. TransCAD의 경우에도 FWA는 10⁻⁴ 까지 도출되며, 수렴성이 높아질수록 편익값이 안정화 되었으며, Cube의 경우에도 FWA는 Relative Gap이 10⁻⁴ 까지 분석하였고 편익이 약 92백만원/일로 산정되고 있다. PBA의 경우에는 10⁻¹⁰ 까지 분석되었고 편익이 92백만원/일로 분석되어서 FWA와 유사한 것으로 나타났다.

3. 활용방안

각각의 통행배정기법 및 프로그램별 분석 결과 및 활용상에서 고려하여야 할 사항들을 좀 더 살펴보면 다음과 같다.

링크기반(Link-Based) 통행배정 기법은 검토된 4개의 분석프로그램 모두에서 지원하고 있으며, 다른 통행배정 기법에 비해 수렴횟수(Iteration Number)

에 따라 목적함수값과 수렴지표(Relative Gap 등)가 서서히 안정적으로 감소하는 현상을 보이고 있다. 다만, 다른 기법들에 비해 보다 많은 시간이 소요되며 모형의 수렴정도가 일정 수준, 예를 들어 Relative Gap값이 10^{-4} 까지 도출된 이후부터는 아무리 많은 시간이 걸리더라도 결과값의 개선효과가 극히 미미한 것으로 나타나고 있다. 그럼에도 불구하고 수렴정도를 나타내는 지표 중 Relative Gap값이 10^{-4} 에 도달하는 경우 다른 결과와 유사한 결과를 도출하는 것으로 검토되어, EMME, TranCAD, Cube의 3개 프로그램에서 링크기반(Link-Based) 통행배정 기법을 이용할 경우 최소한 Relative Gap값이 10^{-4} 까지는 낮아지도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

경로기반(Path-Based) 통행배정기법은 EMME, TransCAD, Cube 프로그램에서 지원하고 있으며, EMME와 Cube를 이용한 분석결과 링크기반(Link-Based) 통행배정기법에 비해 목적함수값과 수렴지표(Relative Gap 등)가 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 각 프로그램별로는 조금씩 차이가 존재하였는데, EMME의 경우 수렴정도를 나타내는 Relative Gap 값이 10^{-6} , Cube에서는 10^{-10} 까지 도출될 수 있지만, 일정수준 이하에서는 투입된 시간 대비 결과의 차이는 크지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 다른 결과값들과 비교하였을 때 경로기반(Path-Based) 통행배정기법을 적용할 경우 EMME의 경우에는 최소한 Relative Gap값이 10^{-5} , CUBE의 경우에는 10^{-7} 까지는 낮아지도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

출발지기반(Origin-Based) 통행배정 기법은 TransCAD프로그램에서 지원하고 있으며, 링크기반(Link-Based) 및 경로기반(Path-Based) 기법 보다 목적함수값과 수렴지표(Relative Gap 등)가 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 수렴지표(Relative Gap 등)는 가장 낮게 나타나고 있어 기존 기법들에 비해 빠르다고 볼 수 있으나, 최종적인 통행배정 결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 앞서 분석한 결과들과 비교하였을 때 출발지기반(Origin-Based) 통행

배정 기법의 경우 최소한 Relative Gap 값이 10^{-6} 수준까지 낮아지도록 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

V. 결 론

통행배정 모형은 교통여건 변화에 따른 이용자의 경로선택 행위 변화를 모형에서 구현하기 위해 수요(지역간 통행량)와 공급(도로망)간의 균형점을 이용자 균형원칙이라는 제약조건 하에서 찾아가는 최적화 모형의 하나라 할 수 있다. 따라서 어떠한 프로그램과 통행배정 기법들을 이용하더라도 최적해에 도달하였을 경우 그 결과값은 근본적으로 같아야 하나, 모형에서 고려하고자 하는 현실세계가 복잡해질수록 최적해에 도달한 결과를 얻기 어렵다는 한계를 갖고 있다. 따라서 적절한 수준에서 통행배정 결과의 안정적인 결과를 도출하고자 하는 노력이 요구된다.

본 연구에서는 개별링크기반(Link-Based)의 통행배정 기법 외에 새로운 통행배정기법(경로기반, 출발지기반)을 대상으로 통행배정알고리즘의 수렴성을 검토하고 적정수준의 종료기준을 제시하고자 하였다. 분석결과 수렴성이 어느 정도 확보된 이후부터는 비교적 안정된 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 실무적으로 사용되는 여러 교통분석 프로그램과 통행배정 기법들을 달리하여 분석한 결과 국가교통DB와 같은 교통망을 이용하여 분석할 경우 통행배정 모형이 충분히 수렴되지 않은 상태에서는 어떠한 결과값을 적용하는가에 따라 차이가 클 수 있어 조사결과의 안정성에 관한 문제가 제기될 가능성이 존재한다. 따라서 비용/편익 분석을 수행하는데 있어서 각 연구진들은 이에 대한 인식과 더불어 주의를 기울일 필요가 있으며, 본 연구에서 분석된 결과를 참조하여 각 분석프로그램 및 통행배정 기법별로 적정한 수준의 수렴성 확보 및 안정된 결과값을 도출하여야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Beckmann, M.J., McGuire, C.B., and C.B. Winston, *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, Connecticut, 1956.
- [2] LeBlanc, L.J., *Mathematical Programming Algorithms for Large Scale Network Equilibrium and Network Design Problems*. PhD thesis, Northwestern Univ, Evanston, Illinois, USA. 1973
- [3] Fukushima, M., "On the Convergence of a Class of Outer Approximation Algorithms for Convex Programs," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 10, pp.147-156, 1984.
- [4] Weintraub, A., and C. Ortiz. Accelerating "Convergence of the Frank-Wolfe Algorithm," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 19, pp.113-122, 1985.
- [5] Lupi, M., "Convergence of the Frank-Wolfe Algorithm in Transportation Networks," *Civil Engineering Systems*, vol. 3, pp.7-15, 1986.
- [6] Hendrickson, C. T., and Janson, B. N., "Expert Systems and Pavement Management," *Presented at 2nd North America Conference on Managing Pavements*, Toronto, Ontario, USA. 1987.
- [7] Arezki, Y. and D. Van Vliet., "A Full Analytical Implementation of the PARTAN/Frank - Wolfe Algorithm for Equilibrium Assignment," *Transportation Science*, vol. 24, pp.58-62, 1990.
- [8] Dafermos, S. C., *Traffic Assignment and Resource Allocation in Transportation Networks*, PhD thesis, Operations Research, Johns Hopkins University, Baltimore, USA, 1968.
- [9] Jayakrishnan, R., Tsai, Wei T., Prashker, Joseph N., and Rajadhyaksha, Subodh. *A Faster Path-Based Algorithm for Traffic Assignment*. Working Paper, University of California Transportation Center, 1994
- [10] Bar-Gera H., *Origin-based Algorithms for Transportation Network Modeling*. PhD thesis, University of Illinois at Chicago, USA, 1999.
- [11] Robert B. Dial., "A Path-Based User-Equilibrium Traffic Assignment Algorithm That Obviates Path Storage and Enumeration," *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 40, pp.917-936. 2006.
- [12] Powell, W.B. and Y. Sheffi. "The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step," *Transportation Science*, vol. 16, pp.45-55, 1982.
- [13] Hearn, D.W., Lawphongpanich, S., and J.A. Ventura. *Computation Mathematical Programming : Restricted Simplicial Decomposition : Computation and Extensions*. Springer Berlin Heidelberg, USA, 1987.
- [14] Larsson, T., M. Patriksson, and C. Rydergren. *Network Optimization : Applications of Simplicial Decomposition with Nonlinear Column Generation to Nonlinear Network Flows*. Springer Berlin Heidelberg, Sweden, 1997.
- [15] Daneva, M., and P. O. Lindberg. "A Conjugate Direction Frank-Wolfe Method with Applications to the Traffic Assignment," *Operations Research Proceedings*, Springer Berlin Heidelberg, Sweden, 2002.
- [16] Larsson, T., and M. Patriksson., "Simplicial Decomposition with Disaggregated Representation for the Traffic Assignment Problem," *Transportation Science*, vol. 26, pp.4-17, 1992.
- [17] Bar-Gera H., and A. Luzon., "Differences among Route Flow Solutions for the User-Equilibrium Traffic Assignment Problem," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 133, pp.232-239, 2007.
- [18] Zhang, H. M., Nie, Y., and Z. Qian, "Estimating Time-Dependent Freeway Origin-Destination Demands with Different Data Coverage: Sensitivity Analysis," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2047, Transportation Research Board

- of the National Academies, Washington, D.C., pp.91 - 99, 2008.
- [19] Inoue, S., and Maruyama. T., “Computational Experience on Advanced Algorithms for User Equilibrium Traffic Assignment Problem and Its Convergence Error”. at *8th International Conference on Traffic and Transportation Studies*, Changsha, China, 2012.
- [20] Florian, M., and S. He., *Changing Assignment Algorithms : The Price of Better Convergence*(2009), from <http://teachamerica.com/APP09/APP09S14Florian/player.html>
- [21] Caliper Mapping Software, *New Empirical Study of Alternative Traffic Equilibrium Algorithms*(2010), from http://www.caliper.com/press/what_transcad_users_should_know_about_traffic_assignment.pdf,
- [22] Zhong, Z., and M. Matthew., *What TransCAD Users Should Know about New Static Traffic Assignment Methods*(2010), from <https://www.google.co.kr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2F>
- [23] Boyce, D., Ralevic-Dekic, B., and H. Bar-Gera., “Convergence of Traffic Assignments: How Much is Enough?,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 130, pp.49-55, 2004.
- [24] Bloy, K. *The Equilibrium Assignment - What Is A “Correct” Solution?*(2004), from http://inro.ca/en/pres_pap/international/ieug04/BloyMexico.pdf.
- [25] Wilson, B., “Finding the Value in ESD,” *Property Australia*, vol. 20, pp.70-71, 2006.

저자소개



김 주 영 (Kim, Joo-Young)

2014년 2월 ~ 현재 : 서울시립대학교 연구교수
2010년 3월 ~ 2014년 2월 : 서울시립대학교 공학박사(교통공학)
2008년 3월 ~ 2010년 2월 : 서울시립대학교 공학석사(교통공학)
e-mail : trafficplan@naver.com
연락처 : 02) 6490-5661



김 재 영 (Kim, Jae-Young)

2007년 3월 ~ 현재 : 한국개발연구원(KDI) 전문위원
2001년 8월 ~ 2007년 2월 : 한국개발연구원(KDI) 연구원, 주임연구원
2004년 3월 ~ 2007년 2월 : 서울시립대학교 공학박사(교통공학)
1999년 3월 ~ 2001년 2월 : 서울시립대학교 공학석사(교통공학)
e-mail : planner@kdi.re.kr
연락처 : 010-6674-9965



박 상 준 (Park, Sang-Jun)

2005년 11월 ~ 현재 : 한국개발연구원(KDI) 전문위원
2004년 2월 : 한양대학교 박사과정 수료(교통계획)
2004년 1월 ~ 2005년 11월 : 경기개발연구원 연구원
2001년 4월 ~ 2004년 1월 : 서울시정개발연구원
e-mail : spark@kdi.re.kr
연락처 : 044-550-4735



이 승 재 (Lee, Seung-Jae)

1998년 10월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교수(교통공학과)
1996년 10월 ~ 1998년 9월 : 서울시립대학교 도시공학과 전임강사
1995년 11월 ~ 1996년 9월 : 교통개발연구원 책임연구원
1990년 10월 ~ 1995년 4월 : University College London 공학박사(교통공학)
1988년 3월 ~ 1990년 2월 : 서울대학교 환경대학원 도시계획학석사
e-mail : sjlee@uos.ac.kr
연락처 : 02) 6490-2823