

대중교통중심개발(TOD) 개선효과 진단을 위한 변동부등식기반 보행네트워크 평가모형

손지언*

Sohn, Jhieon*

A Variational Inequality-based Walkability Assessment Model for Measuring Improvement Effect of Transit Oriented Development (TOD)

ABSTRACT

The core strategy of transit oriented development (TOD) is to promote high density mixed land use around railway stations. Case studies in advanced countries show that provision of policies for comprehensive maintenance of pedestrian facilities around railway station spheres is being pursued with efficacy. In spite of the importance placed on integrated pedestrian maintenance, domestic construction of integrated pedestrian infrastructure around railway station spheres lacks direction. Thus, there is a clear need for an evaluation standard that can provide the foundation for judgments on TOD improvement. This research proposes a network model that consolidates the interior of the station as well as its surrounding areas to determine the ease of pedestrian flow for effective TOD evaluation. The model considers the railway station and surrounding areas as an assembled network of pedestrian flow. The path chosen by the pedestrian is defined as the optimal degree of inconvenience, and expands on Wardrop's User Equilibrium (1952). To assess the various circumstances that arise on pedestrian facilities including congestion of the pedestrian pathway, constrained elevator capacity, and wait at the crosswalk, a variational inequality based pedestrian equilibrium distribution model is introduced.

Key words : Transit oriented development, Integrated pedestrian facilities, Variational inequality, Pedestrian equilibrium

초록

대중교통중심개발(TOD)을 위한 핵심전략은 철도역을 중심으로 보행권내에서 고밀도의 복합토지이용을 유도하는 방안을 마련하는 것이다. 해외에서는 이미 역세권을 중심으로 보행시설의 통합정비를 위한 제도를 마련하고, TOD를 효과적으로 추진해왔다. 그러나 국내는 종합적인 보행정비의 중요성에도 불구하고, 역세권 중심의 통합보행인프라 구축에 대한 방향설정이 부족하다. 따라서 우선 역세권 주변의 보행시설의 통합정비에 대한 평가기준을 마련하여 TOD 개선에 대한 판단근거로 활용하는 것이 시급하다. 본 연구는 TOD의 효과 평가를 위해 역사 건물내부와 주변지역을 통합하여 보행의 원활한 정도를 평가하는 네트워크 모형을 제안한다. 모형은 철도 역사와 주변지역을 일체화된 보행 네트워크상의 흐름으로 간주한다. 보행자가 선택한 경로는 최소시간 경로라고 정의하여 Wardrop의 이용자 균형(1952) 개념을 확대 적용하였다. 보행통로의 혼잡상황, 엘리베이터의 용량한계, 횡단보도의 대기과 같이 보행시설에서 나타나는 다양한 행태를 고려하기 위해서 변동부등식기반의 보행자 균형배정모형을 제안한다.

검색어 : 대중교통중심개발, 통합보행시설, 변동부등식, 보행자 균형

* 정희원 · 인천발전연구원 연구위원 (Corresponding Author · Incheon Development Institute · sohn21@idi.re.kr)

Received December 7, 2015/ revised December 17, 2015/ accepted March 16, 2016

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

대중교통중심개발(Transit-Oriented Development, 이하 TOD)의 일반적인 개념은 토지이용과 교통의 연관성을 강조하고 대중교통 중심의 토지이용과 보행친화적인 교통체계 환경을 유도하고자 하는 방식을 일컫는다(Koo, 2011). 대도시에서 TOD는 많은 교통 및 보행수요가 발생하는 버스정류장 및 철도역과 같은 교통결절점에서 고밀도의 복합적 토지이용과 보행친화적인 가로망 및 도시설계 패턴을 유도함으로써 지속가능한 정주환경 및 교통체계를 구축하고자 하는 계획기법으로 발전되어 왔다(Sung et al., 2007).

외국사례에서는 철도역사와 같은 대중교통허브를 중심으로 복합토지이용과 도시개발을 위한 제도를 정착시켜 TOD의 효과를 증진시키고 있으며, 역사건물을 중심으로 주변토지이용을 활성화하기 위한 일체적 개발방식과 같은 지원제도를 운영하고 있다(Sung et al., 2007). 그러나 1990년대 이후 다양한 시도를 했던 국내의 TOD는 실질적인 실현 및 구체적인 성과에 대하여 결론을 내리지 못하고 있는 상황이다.

이러한 상황은 철도의 일일 승하차 인원이 10만명 이상이고, 버스 이용자까지 합하면 15만명이 넘는 인천의 교통중심지인 부평역과 그 인근의 도시경관을 보면 평가가 가능하다. Fig. 1에서와 같이 1988년부터 2015년까지 30여년 동안 부평역 인근의 고층건물은 고밀화 되었지만, 이에 반해 대중교통 이용자의 편의를 도모하거나 혹은 보행친화적인 구조로 변화하고 있지 못한 것이 현실이다.

이러한 상황은 해외 사례를 통해서 비교평가가 가능하다. Fig. 2는 홍콩의 홍콩역과 올림피크역인데, 역주변과 주변지역의 원활한 보행연계를 위한 입체통로를 구축하여 보행의 흐름을 관리하고 보행시간을 단축시켜주는 보행인프라를 구축하여 TOD 효과를 증진하는 개념이 설계에 적용된 대표적인 사례라고 볼 수 있다.

이에 비해, 각종 개선사업을 통해 비교적 세련되게 변한 서울역도 역사를 중심으로 주변지역과 연결성에 대한 고려가 거의 없음을 Fig. 3을 통해서 알 수 있다. 이러한 상황은 직선거리와 실제이동상황을 비교했을 때, 보행에 대한 고려가 현저하게 떨어짐을 파악할 수 있다. Shin and Lee (2014)에 의하면 서울역 중심에서 주변지역까지 직선거리로 이동하는 시간에 비하여 2.3배 이상 소요되어 보행인프라 정비수준에 심각한 문제가 있는 것으로 파악되고 있다.



1988



2011



2015

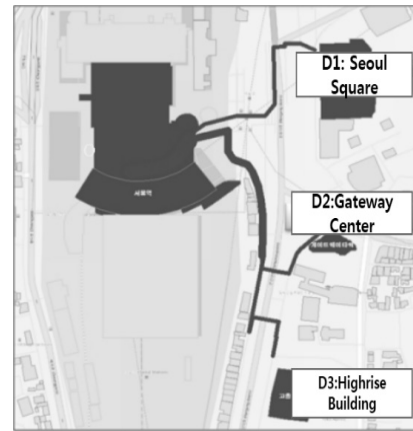
Fig. 1. Bupyeong Station (1988, 2011, 2015)



Fig. 2. Hong Kong Station and Olympic Station



Fig. 3. Seoul Station



| Division | D1 Seoul Square | D2 Gateway Center | D3 High Building |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Real Distance/Direct Distance | 1.56 | 1.81 | 1.52 |
| Real Time/Direct Time | 2.37 | 2.48 | 2.33 |

Fig. 4. Seoul Station and Inconvenience Degree (Shin and Lee, 2014)



Fig. 5. Walking Environment of Pedestrian Facilities

그 동안 부평역 또는 서울역과 같은 대규모 교통시설을 효과적으로 활용하기 위하여 역사에 복합도지이용을 활성화하는 시도 및 계획이 있어왔으나, 주변지역과 일체화된 TOD의 근본적인 개념 적용에는 한계가 있었다.

본 연구에서는 국내 철도 및 지하철 역사를 중심으로 TOD의 효과적인 추진을 위해 제도적인 측면에서 해외사례를 연구하기 전에, 우선 교통측면에서 역사건물과 주변지역에 대해 일체화된 보행을 유도하는 평가 기법에 대하여 논의하고자 한다. 이를 위해

1)역사의 보행권역을 네트워크로 구축하는 기법을 적용하고, 2)다양한 보행시설 및 인프라를 구축하여 원활한 보행이 이루어지는데 대한 평가모형을 구축하며, 3)모형을 통하여 보행의 원활한 정도를 판단하는 보행성 평가지표를 제안한다.

연구에서 제안하는 모형은 Wardrop (1959)의 이용자 균형모형을 보행자 균형모형으로 확장하는 방안이다. 보행시설은 일반보도와 같이 단순한 형태의 보행시설뿐만 아니라 보행통로와 같이 양방향 보행수요의 영향을 받는 시설, 엘리베이터와 같이 탑승용량이 존재하고 대기하는 형태를 포함하는 시설, 신호횡단보도의 일정한 대기시간을 필요로 하는 시설 등 다양한 보행시설에서 보행에 영향을 주는 함수를 도입하기 위하여 변동부등식에 기반하는 수식화 및 알고리즘을 구축한다. 또한 사례연구를 통하여 모형의 활용성에 대하여 논의한다.

2. 이론적 배경

2.1 기존 보행 통행배정모형과 본 모형의 차이점

보행자 통행배정이란 보행을 시작하는 기점과 끝나는 종점까지 보행자가 경로를 선택해서 이동하는 현상을 보행공간에 재현하는 것이다. 보행자는 경로 상에서 다양한 보행시설을 만나게 되는데, 이때 통행저항을 고려하여 경로를 선택하게 된다. 보행자의 통행배정모형과 관련된 연구는 최근에야 국내를 중심으로 시작되고 있는 단계이다. 보행자 통행배정 모형관련 연구는 크게 보행네트워크 통행배정연구와 시뮬레이션 기반의 연구로 구분된다.

우선 보행네트워크 통행배정 모형의 연구로서, Lee (2010)는 다계층 보행자 통행배정기법을 수리적인 모형으로 구축하여 제안하였다. 이 연구는 보행에 다수의 계층이 포함된 상호작용에 대한 영향을 고려하기 위하여 기존의 수리적 균형배정모형 개념을 변동부등식(Variational Inequality)으로 설명하고 셀기반의 보행네트워크를 구축하여 대각화알고리즘을 실행하는 방안을 보여주었다. 그러나 이 연구는 다양한 보행시설과 그 시설의 용량문제에서 나타나는 혼잡상황에 대해서는 고려하지 못하는 한계를 포함하고 있다. 일정 보도지역의 단일 출발지-목적지 쌍에 대하여 하나의 보도공간을 셀(Cell)단위로 구분한 보행네트워크에 대하여 다양한 보행시설에 대한 특성을 반영하지 못하는 한계를 포함하고 있다. 또한 Shin and Lee (2014)는 대규모 복합교통시설에서 보행자의 보행체감도를 최소화하는 경로를 선택한다는 가정을 기반으로 경로선택모형을 제안하였다. 이 모형에서 보행자의 가중점간 보행경로에 대해 유사경로를 기반으로 설정하는 기법을 적용하여 균일확률로 배정한다. 이 모형은 다양한 보행시설에 대한 특성을 반영하는 장점이 있으나 보행시설과 보행자에서 나타나는 상호작용은 표현하지 못하는 한계가 존재한다. 한편 Lee et al. (2015)는 공간구문론

과 보행자 통행배정모형을 결합하였다. 이 연구에서 보행자 통행배정은 보행네트워크에서 보행자는 최소통행시간경로를 이용한다는 논리를 구축하여 유사경로개념을 이용한 균일확률분포개념을 구축하였다. 특히 이 모형은 시각적 거리(Sight Distance)를 나타내는 공간구문론을 통합하여 보행자가 경험하는 링크의 통합도 개념을 구축하였다. 이 모형에서는 보행용량과 상호작용에 대해서는 반영이 되지 못하는 한계가 존재했다.

한편 시뮬레이션 기반의 보행 통행배정모형에 대한 연구는 일정 공간의 시설에서 보행 밀도와 속도를 마이크로 시뮬레이션에 한정하는 경향을 보여주고 있다. Ahmed Abdelghany et al. (2005)은 미시적 보행자 시뮬레이션을 위해서 이산적 셀 단위의 공간구조로 네트워크화 하고 개별보행자들을 배정하였다. 이 연구는 미시적구장 맵포스 부분에 서비스 처리시간을 평가하기 위해 적용하였다. Son et al. (2004)은 또한 셀단위의 시뮬레이션 기법을 구축하여 보행 교통류 특성을 파악하는 기법을 마련하였다. 이 연구는 지하철 환승로의 보도축을 대상으로 보행흐름의 특성을 속도, 밀도의 변화를 통하여 실제상황과 비교하였다. Park et al. (2012)는 SimWalk 시뮬레이션을 이용하여 환승역 보행행태 분석에 적용하였다.

보행통행배정과 관련된 연구는 타 교통수단에 비하여 많지 않다. 보행자 통행배정모형 연구가 수단 관련 연구 중에서 상대적으로 적은 이유는 보행자의 경로 선택에 대한 다양한 고려사항이 많기 때문으로 판단된다. 일정한 규칙에 의해 도로를 주행하는 차량과는 달리 보행행태가 이루어지는 보행공간의 경로선택은 무한하다고 볼 수 있어 단일 평면의 보행공간에서 보행자의 속도를 통한 LOS측정에 머무르는 것으로 파악된다.

본 연구는 TOD기반의 보행시설 설치에 대한 정량적인 판단을 위한 것으로, 대중교통역사와 같은 거점을 중심으로 주변건물을 연결하는 다양한 보행시설에 대한 적정성 평가를 위한 수리적 모형을 제안한 것이다. 모형에서 보행네트워크 상에서 발생하는 보행의 상호작용에 대한 보행시설의 보행용량과 같은 문제를 반영하기 위하여 변동부등식기반의 새로운 수식을 제안하였다. 이 모형에서 보행자가 선택하는 경로는 최소통행시간 경로라고 정의하여 기존의 Wardrop (1952)의 균형개념을 적용하였다. TOD기반의 보행에 대한 이동성과 안전성에 대한 판단지표로서 보행시간, 보행거리, 보행불편도, 차량과의 상충도 측면에서 정량적 평가지표를 구축하였다.

2.2 이용자 균형배정모형

통행배정은 교통 상황을 예측하여 교통망의 조건을 판단하는 것이다. 대부분의 정적 통행선택모형은 Wardrop이 제안한 이용자 균형원리(1952)에 의해서 수식화 되었는데, 이용자 균형원리(User Equilibrium: UE)란 다음과 같다.

“주어진 기중점간 사용된 경로의 통행비용은 동일하고 최소비용 경로이며, 사용되지 않은 경로는 더 낮은 비용을 갖지 않는다.”

위의 UE조건을 경로기반의 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta_k^{rs} - \mu_{rs} = 0, \text{ if } f_k^{rs*} > 0 \quad \forall k, r, s$$

$$\eta_k^{rs} - \mu_{rs} \geq 0, \text{ if } f_k^{rs*} = 0 \quad \forall k, r, s$$

$$(\eta_k^{rs} - \mu_{rs}) \cdot f_k^{rs*} = 0 \quad \forall k, r, s$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

여기서, η_k^{rs} : 기점r-중점s를 연결하는 경로k의 통행비용
 μ_{rs} : 기점r-중점s간 최소통행비용
 f_k^{rs} : 기점r-중점s를 연결하는 경로k의 통행량
 $*$: 최적해

Beckmann et al. (1956)은 비선형계획법(Nonlinear Programming: NLP)를 기반으로 UE를 다음과 같이 표현하였다. 이 식은 UE에 적합하며 최적해가 존재하며 단일해라는 것을 증명하였다. LeBlanc et al. (1975)는 Frank-Wolfe알고리즘이 최적경로알고리즘의 반복으로 대규모 네트워크에 효과적으로 적용됨을 보여주었다.

$$\min \sum_a \int_o^{x_a} c_a(\omega) d\omega$$

$$s.t. q_{rs} = \sum_k \int_k^{rs} \quad \forall r, s$$

$$f_{rs}^k \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs} \quad \forall a$$

여기서, x_a : 링크a의 통행량
 f_k^{rs} : 기점r-중점s를 연결하는 경로k의 통행량
 c_a : 링크a의 통행시간
 q_{rs} : 기점r-중점s 수요
 $\delta_{k,a}^{rs}$: 기점r-중점s간 경로상에 링크 a가 존재하면 1 아니면 0

2.3 변동부등식기반 균형배정모형

변동부등식(Variational Inequality: VI)은 다양한 네트워크 문제에 적용되었다(Smith, 1979; Dafermos, 1980; Nagurney, 1993). VI는 비선형수식, 최적화문제, 보조정리, 고정점문제 등과 같은 수학적 문제 일반화를 위해 적용되었으며, 링크비용함수가 비대칭(Asymmetric)인 경우 동일한 수학적 수식이 존재하지 않는 상황을 극복하기 위해서 제안되었다. UE문제의 VI는 Smith (1979a)와 Dafermos (1980)에 의해서 제안되었다. VI에서 최적 링크교통량 벡터 \mathbf{x}^* 를 발견하는 문제이다.

$$\sum_a c_a(\mathbf{x}^*)(x_a - x_a^*) \geq 0$$

$$s.t. q_{rs} = \sum_k f_k^{rs} \quad \forall r, s$$

$$f_{rs}^k \geq 0 \quad \forall k, r, s$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs} \quad \forall a$$

여기서, \mathbf{x} : 링크 교통량 벡터 $\{x_1, x_2, \dots, x_a, \dots, x_{|A|}\}$
 x_a : 링크a의 교통량
 f_k^{rs} : 기점r-중점s를 연결하는 경로k의 통행량
 c_a : 링크a의 통행비용
 q_{rs} : 기점r-중점s간 수요
 $\delta_{k,a}^{rs}$: 기점r-중점s간 경로상에 링크 a가 존재하면 1 아니면 0

VI문제의 해법으로 가장 많이 적용되는 것은 대각화 알고리즘(Diagonalization Algorithm)이다(Dafermos, 1982). 대각화 알고리즘은 일반적인 UE의 알고리즘인 Frank-Wolfe알고리즘의 적용이 가능하다. 대각화 알고리즘은 크게 2단계 내부 및 외부 알고리즘으로 구분된다. 내부 알고리즘은 기존의 Frank-Wolfe알고리즘이 적용되며 외부 알고리즘은 다른 링크의 통행량으로 고정시키는 방안이다.

3. 모형의 구축

3.1 보행인프라 구분

철도역사와 철도역의 복합토지이용 및 주변건물과의 보행의 연계성을 판단하기 위해서 보행인프라에 대한 판단이 필요하다. 일반적으로 정상보행에서 나타나는 역세권의 보행인프라 및 관계되는 특성은 Table 1과 같다. Table 1에서 VI 수식의 반영이

Table 1. Pedestrian Facilities & Related Walking Time Factors

| Pedestrian Facilities | Function of Walking Cost | Walking speed(m/sec) |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Sidewalk | Interaction | 1.0 |
| Passage(underground, ground) | Interaction | 1.0, 1.0 |
| Direct Bridge to Building | Interaction | 1.0 |
| Elevator(general, high speed) | Waiting & Interaction | 1.75, 3.0 |
| Escalator(one, two stories) | Waiting & Interaction | 0.5 |
| Stair(upward, downward) | Interaction | 0.4, 0.6 |
| Crosswalk | Waiting | 1.0 |
| Pedestrian Exclusive Deck | Interaction | 1.0 |

source: Shin & Lee (2014)

필요한 부분은 상호작용(Interaction)과 대기(Junction Delay)에서 나타나는 통행비용함수의 비대칭성을 고려하기 위한 것이다.

Table 1에서 개방된 건물외부 보행시설에서는 보도의 자체 보행량만 보행시설 속도에 영향을 미치는 것으로 구성된다. 보도, 보행통로, 건물직결브리지는 보행공간에서 양방향의 보행량이 서로 속도에 영향을 미치는 것으로 상호작용의 보행함수로 나타낸다. 대기상황은 보행시설을 이용하기 위해서 기다리는 시간을 의미한다. 대기 및 상호작용은 보행시설을 이용하기 위해서 기다리는 상황에서 보행시설의 용량에 의하여 상호작용의 영향을 고려하는 문제이다.

- 여기서, \mathbf{x} : 링크 보행량 벡터 $\{\dots, x_a, \dots\}$
- \mathbf{v} : 회전 통행량 벡터 $\mathbf{v} = \{ \dots v_{ab}, \dots \}$
- x_a : 링크a의 보행량
- f_k^{rs} : r-s간 경로k의 보행량
- $c_a(\mathbf{x})$: 링크a의 보행비용함수
- $d_{ab}(\mathbf{v})$: 링크a에서 링크b로 회전하는 보행비용함수
- q_{rs} : r-s간 수요
- $\delta_{k,a}^{rs}$: r-s간 경로k가 링크a를 통과하면 1, 아니면 0
- A_a^+ : 링크a에서 나가는 방향으로 회전하는 링크 집합

3.2 모형 구축

3.1절에서 나타나는 보행인프라와 보행함수의 특성을 반영하여 VI식으로 구성하면 다음과 같은 모형식으로 제안된다. 여기서는 차량의 균형배정모형에서 사용되었던 내용을 보행자의 통행특성 내용으로 전환하여 표현한다. VI식은 2가지 식으로 구성되는데 첫 번째 식은 일반적인 통행에 따른 상호작용을 위한 VI식을 나타내며, 두 번째 식은 대기함수 및 상호작용을 나타내는 식이다.

$$\sum_a c_a(\mathbf{x})(x_a - x_a^*) + \sum_a \sum_{b \in A_a^+} d_{ab}(\mathbf{v})(v_{ab} - v_{ab}^*) \geq 0$$

$$q_{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \forall r, s$$

$$f_{rs}^k \geq 0, \forall r, s, k$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs}, \forall a$$

$$v_{ab} = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \cdot \delta_{k,ab}^{rs}, \forall ab$$

3.3 알고리즘

본 모형의 적용을 위해서 대각화 알고리즘을 제안하기로 한다. 대각화 알고리즘은 외부 알고리즘에서 대각화 요소를 제외하고 고정시키며, 내부 알고리즘에서 Frank-Wolfe를 적용하는 방법이다. 외부 알고리즘에서 고정된 보행량을 상수(M_1, M_2)로 고정시키고 내부알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

$$\min_{(x_a, v_{ab})} \sum_a \int_0^{x_a} c_a(M_1 + \omega) d\omega + \sum_a \sum_{b \in A_a^+} \int_0^{v_{ab}} d_{ab}(M_2 + \omega) d\omega$$

3.4 보행성 평가지표

TOD개선에 대한 판단을 위해서는 보행이동성과 보행안전성을 지표화 할 필요가 있다. 여기서 보행성이 개선되었다는 의미는 보행시설에 의한 보행의 편리성 정도를 나타내며, 이는 보행거리의 단축, 보행시간의 단축 보행불편도의 감소로 나타낸다. 또한 보행안전성은 보행하는 동안 차량과 상충이 얼마나 감소했는가에 대한 판단지표로 나타낼 수 있다. Table 2는 4가지 보행성 평가지표를 보여준다.

Table 2. Evaluation Index of Walkability

| Evaluation Index | Equation | Remarks | |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Average Walking Distance(m) | $\frac{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs} \cdot dist_a)}{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs})}$ | $dist_a$ | Distance of Link a(m) |
| Average Walking Time(minute) | $\frac{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs} \cdot t_a + \sum_{b \in A_a^+} f_k^{rs} \cdot \delta_{k,ab}^{rs} \cdot d_{ab})}{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs})}$ | | |
| Average Walking Inconvenience Degree (min.- ncon.) | $\frac{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \xi_a \cdot \delta_{k,a}^{rs} \cdot t_a + \sum_{b \in A_a^+} f_k^{rs} \cdot \xi_{ab} \cdot \delta_{k,ab}^{rs} \cdot d_{ab})}{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs})}$ | ξ_a ξ_{ab} | Inconvenience Degree of Link a Inconvenience Degree of Turn ab |
| Average Pedestrian-vehicle conflict (veh/person-min.) | $\frac{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs} \cdot veh_a)}{\sum_r \sum_s \sum_k \sum_a (f_k^{rs} \cdot \delta_{k,a}^{rs})}$ | veh_a | Vehicle Conflict of Link a(Veh) |

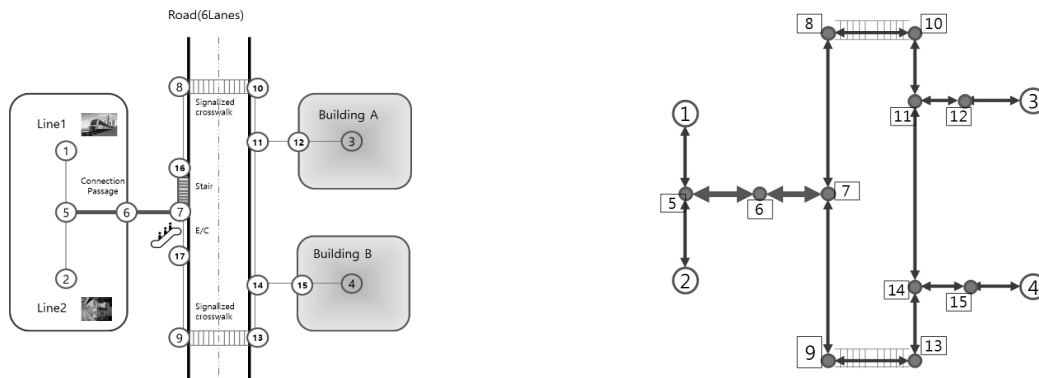


Fig. 6. A Toy Target Area and Its Pedestrian Network

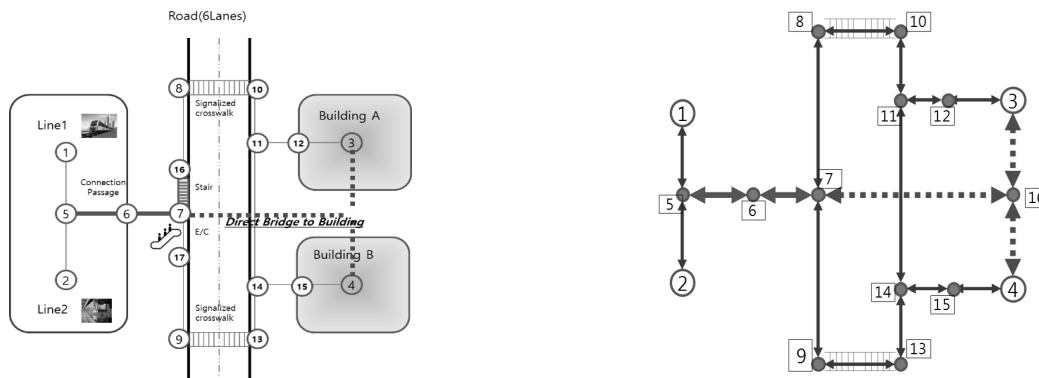


Fig. 7. Alternative with Direct Bridge to Buildings

4. 사례연구 및 분석

4.1 네트워크 구축

본 연구에서는 가상의 2개 노선에서 환승이 발생하는 철도역사를 대상으로 사례연구를 수행한다. 철도역사는 중앙의 6차선 도로를 신호횡단보도를 통해하여 2개의 건물인 A와 B를 목적지로

하는 수요가 존재한다. 링크는 30개이며 노드는 15개, 준 4개, 일반노드는 11개로 구성되어 있다. 연결통로는 4개의 링크로 하고 나머지는 보도 26개로 가정하였다.

Fig. 7는 철도역사에서 건물 A와 B로 직결로 연결되는 통로를 나타낸 대안이다. 노드7에서 노드16을 직접 연결하는 보행통로를 구축하고 보행의 특성을 파악하는 대안이다. 대안 네트워크에서

노드는 1개, 링크는 6개가 증가하였다.

4.2 통행함수

Fig. 6의 네트워크에서 건물내부의 보도 및 건물외곽지역에 존재하는 보행시설의 통행시간은 보행거리를 보행속도로 나눈 값이며 함수는 다음과 같다. 이 통행함수에 해당되는 보행시설은 건물내 보도, 횡단보도 통행, 도로상 보도이다. 일반적인 보행대기 시간은 고려되지 않으나(W=0), 신호횡단보도의 경우 대기시간에 대한 반영이 필요하다(W>0).

$$T = \frac{L}{S} + W$$

여기서 S : 보행시설별 보행속도(m/sec)

L : 보행시설 길이(m)

T : 보행시설의 보행시간(sec)

W : 보행시설의 대기시간(sec)

연결통로의 경우에 이용자가 많아서 밀도가 증가하게 되면 보행 시간에 영향을 주는 역방향의 보행도 포함된다. 이러한 작용을 포함한 통행함수는 아래의 Fig. 8와 같으며, 보행시간 함수는 다음과 같다. 여기서 x_1, x_2 는 방향1과 2의 보행량이며, K_1, K_2 는 방향별 보행시설의 최대밀도이다.

$$T_1 = T_0 + T_0 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{x_1 + 0.3 \cdot x_2}{K_1 + 0.3 \cdot K_2} \right)^\beta$$

$$T_2 = T_0 + T_0 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{0.3 \cdot x_1 + x_2}{0.3 \cdot K_1 + K_2} \right)^\beta$$

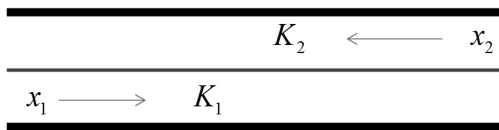


Fig. 8. Connection Passage

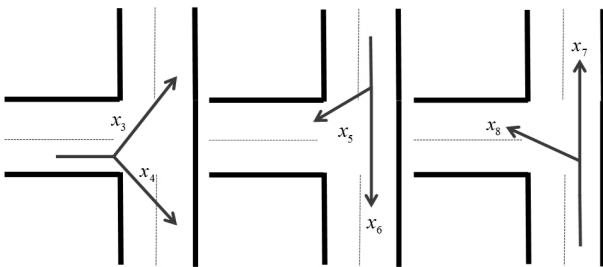


Fig. 9. Turning Time of Direct Building Connection Passage

Fig. 6대안에서 구축된 건물직결브리지의 경우 Fig. 8의 통행시간 상호영향에 대한 고려 이외에 직결통로 끝단에서 발생하는 방향별 지체에 대한 반영도 필요하다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 9과 같이 직결통로에서 발생하는 회전통행시간은 고려하지 않는다.

4.3 사례연구

통행수요는 철도1호선과 2호선에서 건물3과 건물4를 왕복으로 100명의 보행이 이동한다는 가정으로 총 800(인)으로 구축하였다.

대기시간을 반영하는 네트워크의 개념은 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 두개의 인접된 보행시설이 (i-j-k)의 3개 노드로 연결되어 있는 기본 네트워크에 대하여 (i-j)에서 (j-k)로 진행하면서 대기시간의 반영이 필요한 경우에 대기시간을 합산하는 과정이 필요하다. 이러한 종류의 시설은 신호횡단보도, 무신호횡단보도와 같이 차량의 상충이 발생하는 지점과 엘리베이터, 에스컬레이터와 같이 승객이 이용 가능한 용량의 한계치가 존재하는 시설 등이 해당된다. 본 연구에서 적용한 시설 및 대기시간은 Table 4와 같다.

Fig. 9에서 건물직결브리지가 존재하지 않는 경우에는 모든 통행이 보행통로를 통해서 양측 신호횡단보도를 이용하는 것으로 파악되었다. 반면 Fig. 10와 같이 건물직결브리지가 구축된 경우에는 모든 보행이 직접 건물로 유입되는 것을 확인하였다. 따라서 보행인프라의 구축으로 보행거리, 보행시간, 보행불편도, 차량상충

Table 3. Demand (Pedestrian)

| Origin | Destination | Pedestrian (person) |
|--------|-------------|---------------------|
| 1 | 3 | 100 |
| 1 | 4 | 100 |
| 2 | 3 | 100 |
| 2 | 4 | 100 |
| 3 | 1 | 100 |
| 3 | 2 | 100 |
| 4 | 1 | 100 |
| 4 | 2 | 100 |

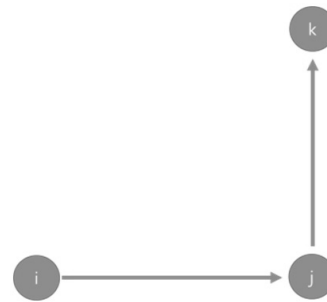


Fig. 10. Node Type of Two Facilities

Table 4. Waiting Time(turn ; sec)

| i-node | j-node | k-node | ij-facility | jk-facility | Waiting time(sec) |
|--------|--------|--------|-------------|----------------------|-------------------|
| 9 | 17 | 7 | Sidewalk | E/C(up) | 100 |
| 6 | 7 | 17 | Passage | E/C(down) | 100 |
| 16 | 8 | 10 | Sidewalk | Signalized crosswalk | 80 |
| 11 | 10 | 8 | Sidewalk | Signalized crosswalk | 80 |
| 17 | 9 | 13 | Sidewalk | Signalized crosswalk | 80 |
| 14 | 13 | 9 | Sidewalk | Signalized crosswalk | 80 |

Table 5. Used Path (Present Status)

| Used path | Pedestrian |
|----------------------------------|------------|
| 1->5->6->7->16->8->10->11->12->3 | 100 |
| 1->5->6->7->17->9->13->14->15->4 | 100 |
| 2->5->6->7->16->8->10->11->12->3 | 100 |
| 2->5->6->7->17->9->13->14->15->4 | 100 |
| 3->12->11->10->8->16->7->6->5->1 | 100 |
| 3->12->11->10->8->16->7->6->5->2 | 100 |
| 4->15->14->13->9->17->7->6->5->1 | 100 |
| 4->15->14->13->9->17->7->6->5->2 | 100 |

Table 6. Used Path(Alternative)

| Used path | Pedestrians |
|------------------|-------------|
| 1->5->6->7->0->3 | 100 |
| 1->5->6->7->0->4 | 100 |
| 2->5->6->7->0->3 | 100 |
| 2->5->6->7->0->4 | 100 |
| 3->0->7->6->5->1 | 100 |
| 3->0->7->6->5->2 | 100 |
| 4->0->7->6->5->1 | 100 |
| 4->0->7->6->5->2 | 100 |

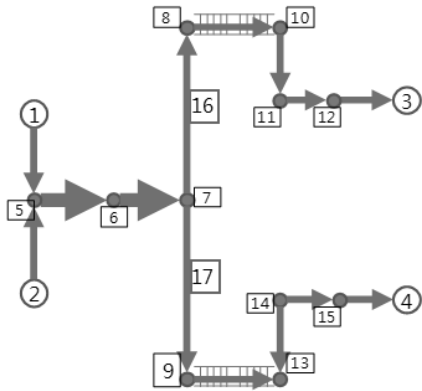


Fig. 11. Pedestrian Volume of Present Status

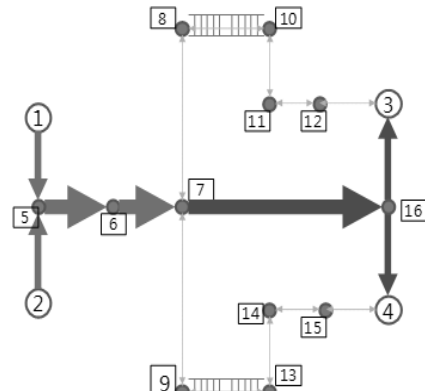


Fig. 12. Pedestrian Volume of Alternative

도의 지표에서 많은 개선을 보여주고 있다. 이것은 서론에서 예시했던 홍콩의 올림픽역의 상황과 매우 유사한 내용으로 보행인프라의 구축을 통하여 TOD의 개선효과를 확인할 수 있는 가능성을 보여주는 결과이다.

Table 7은 TOD를 위한 개선방안에 대하여 의미 있는 결과를 제공한다. 우선 직결통로를 구축함으로써 보행이동성에 대한 지표가 현저하게 개선되었음을 보여주고 있다. 평균통행거리에서 630(m)에서 505(m)로, 통행시간은 19분에서 12분으로 개선된 이동성 측면을 예시한다. 특히 통행불편도는 35(분-불편)에서 12(분-불편)으로 급격한 개선과정을 보여준다. 보행자는 건물의 이동을 위한 도로상에서 상하 통행에 민감하며, 또한 짐을 든 보행의

Table 7. Comparison of Present Status and Alternative

| Value of Index | Before | After |
|----------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
| Average Walking Distance(m) | 630(m) | 505(m) |
| Average Walking Time(minute) | 19(min) | 12(min) |
| Average Walking Inconvenience Degree (min.-Incon.) | 35(min.-Incon.) | 12(min.-Incon.) |
| Average Pedestrian-vehicle confliction (veh/person-min.) | 52(veh/person-min.) | 0(veh/person-min.) |

경우 불편도의 차이는 더욱 커질 것으로 생각된다. 서론에서 보여준 서울역의 경우 장거리를 이동하는 보행을 생각할 때 TOD적으로 적합하지 않은 보행여건을 나타내고 있다는 것을 예증하고 있다. 보행자의 안전에서도 또한 많은 개선효과를 보여주고 있다. 현황에서는 분당 52대의 차량과 상충을 경험하는 반면, 대안의 경우 차량의 상충 없이 안전하게 목적지까지 도달하는 것을 보여준다.

5. 결론

TOD를 효과적으로 추진하기 위하여 철도역사를 중심으로 보행권내에서 고밀도의 복합도지이용을 유도하는 방안을 마련하는 노력이 진행되고 있다. 홍콩, 일본, 미국 등 해외사례를 통해서 역세권 중심 보행시설의 통합정비를 위한 제도를 마련하는 것이 TOD를 효과적으로 추진하는 방안이다. 국내 TOD의 올바른 방향설정을 위해서 역세권 주변 보행시설의 통합정비에 대한 평가기준을 마련하는 것이 무엇보다 선행될 필요가 있다.

본 연구는 TOD의 효과평가를 위해 역사 건물내부와 주변지역을 통합하여 보행의 원활한 정도를 평가하는 네트워크 모형을 구축하였다. 모형은 철도역사와 주변지역을 일체적인 보행 네트워크 상의 흐름으로 간주하였다. 보행자의 경로선택행태를 모형화하기 위하여 보행자가 선택한 경로는 최적불편도 경로로 정의하였으며, 보행의 상호영향과 대기의 특성을 고려하기 위하여 수학적 해법이 존재하지 않는 대안으로 적용되는 변동부등식(VI)을 도입하여 보행자 균형배정모형을 제안한다. 모형의 결과로 볼 때, 보행자의 흐름을 예측하여 보행성의 개선을 판단 가능한 지표를 도출할 수 있음을 확인하였다. 모형은 적용 가능성에 대하여 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Beckmann, M. J., McGuire, C. B. and Winsten, C. B. (1956). *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven, Conn.

Dafermos, S. (1980). "Traffic equilibrium and variational inequalities." *Transportation Science* 14, pp. 42-45.

Dafermos, S. (1982). "Relaxation algorithms for the general asymmetric traffic equilibrium problem." *Transportation Science* 16, pp. 231-240.

Dijkstra, E. W. (1959). A Note of Two Problems in Connected with Graphs. *Numer. Math.* 1. 99. pp. 269-271.

Fisk, C. S. and Nguyen, S. (1982). "Solution algorithms for network equilibrium models with asymmetric user costs." *Transportation Science* 16, pp. 361-381.

Florian, M. and Spiess, H. (1982). "The convergence of diagonalization algorithms for asymmetric network equilibrium problems."

Transportation Research 16B, pp. 477-483.

Kirby, R. F. and Potts, R. B. (1969). "The minimum route problem for networks with turn penalties and prohibitions." *Transportation Research* 18B, pp. 123-133.

Koo, J. H. (2011). "A strategy for urban spatial restructure of TOD as a green urban regeneration strategy." *Architecture Journal*, Vol. 21, No. 10.

LeBlanc, L. J., Morlok, E. K. and Pierskalla, W. (1975). "An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem." *Transportation Research*, Vol. 9, No. 5, pp. 309-318.

Lee, J. H. (2003). "Application of agent-based modeling on transport systems analysis." *Korean Society of Transportation*, Vol. 21, No. 1.

Lee, J. H. (2010). Development of Multi-Class Pedestrian Assignment Algorithm, Master Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University.

Lee, M. Y. (2004). Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.

Lee, M. Y. (2014). Walkability Evaluation Model for Local Walking Areas, KRIHS.

Lee, M. Y., Kim, J. H. and Kim, E. J. (2015). A Pedestrian Network Assignment Model Considering Space Syntax, Korea Society of ITS Accepted for Publication (2015.12).

Lim, H. J. (2005). "A Study on Transit-Oriented Development Method to Activate Transit Use for High Urban-Density Multi-Nucleated Seoul, Korean Society of Transportation Vol. 23, No. 5.

Meneguzzer, C. (1995). "An equilibrium route choice model with explicit treatment of the effect of intersections." *Transportation Research* 29B, pp. 329-356.

Nagurney, A. (1993). *Network Economics: A Variational Inequality Approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass.

Park, J. H., Oh, S. H. and Rhee, J. H. (2012). "A study on the analysis of walking behavior in transfer stations after the improvement of walking environment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3, pp. 189-196.

Sheffic, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Shin, S. I. and Lee, K. H. (2013). Walkability Improvement Strategies for Large Scaled Transportation Complex, Seoul Institute.

Smith, M. J. (1979a). "The existence, uniqueness and stability of traffic equilibrium." *Transportation Research* 13B, pp. 295-304.

Son, Y. T., Park, W. S., Kim, S. G., Kim, T. W. and Kim, Y. H. (2004). "Developing CA (Cellular Automata)-Based simulation models for pedestrian traffic flows." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 4D, pp. 563-568.

Sung, H. G., Park, J. H. and Kim, D. J. (2007). Impact Analyses of Transit-Oriented Development and Revising Current Transportation and Urban Planning Laws for Its Application in Korea, Korea Transport Institute.

Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proc. Inst. Civ. Eng., Part II*, 1, pp. 325-378.