

■ 論 文 ■

## 경제성 분석의 브레이스 파라독스 극복 방안

Overcoming the Braess' Paradox in Feasibility Study

**박 경 철**

(경기개발연구원 초빙책임연구원)

**류 시 균**

(경기개발연구원 연구위원)

**이 성 모**

(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

**손 상 훈**

(경기개발연구원 연구원)

### 목 차

- |   |  |
|---|--|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구 배경 및 목적</p> <p>2. 연구 수행방법</p> <p>II. 이론적 배경</p> <p>1. 통행배정 모형</p> <p>2. 브레이스 파라독스</p> <p>III. 경제성 분석에서의 파라독스</p> <p>1. 용어정의</p> | <p>2. 분석방법</p> <p>3. 편익산정</p> <p>IV. 파라독스 극복 방안</p> <p>1. 대안검토</p> <p>2. 새로운 링크비용 함수 적용</p> <p>V. 결론</p> <p>참고문헌</p> |
|---|--|

Key Words : 브레이스 파라독스, 사용자 평형 상태, 체계 최적 상태, 경제성 분석, 링크비용 함수  
Braess' Paradox, User Equilibrium, System Optimum, Feasibility Analysis, Link Cost Function

### 요 약

경제성 분석과정에서 브레이스 파라독스는 교통시설의 확충에도 불구하고 음(-)의 사회적 편익을 창출하는 형태로 나타난다. 이런 경우 사업시행 효과를 정확하게 추정할 수 없어 사업의 필요성을 판단하는데 많은 어려움을 겪게 된다. 본 연구에서는 경제성 분석 과정에서 나타나는 브레이스 파라독스 현상을 살펴보고 이에 대한 해결방안을 모색하는 것을 목적으로 하였다.

간단한 네트워크에 대한 분석결과, 경제성 분석 상에서 파라독스가 발생하는 경우는 교통량 수준이 특정 조건을 만족하는 경우에만 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 통행배정 기법에서는 사용자 평형보다는 체계 최적 상태의 경우가 파라독스의 발생을 줄일 수 있었다. 하지만, 통행배정 기법에 상관없이 운행비용 절감편익에 있어서는 모든 조건에 대해 파라독스가 발생하였으며, 이로 인해 전체 총 편익측면에서도 지속적으로 파라독스가 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 경제성 분석의 파라독스 해결을 위해, 본 연구에서는 운행비용을 포함하는 새로운 링크비용 함수를 제시하였다. 새로운 링크비용 함수는 운행비용 절감편익 측면의 파라독스를 완화시켜 사용자 평형 상태에서는 파라독스를 완화시켰으며, 체계 최적 상태에서는 파라독스를 완전히 제거하는 것으로 분석되었다.

In the feasibility analysis, Braess' Paradox results in the negative social benefit in spite of adding transportation facilities. Consequently, it has been difficult to judge on the investment of SOC projects. This research aims to analyze the Braess' Paradox in the feasibility analysis and to seek a remedy for the Paradox.

Several experiments were conducted on the simple network under the various conditions. From the experiments, following findings were validated: Braess' Paradox occurred only if travel demands met within certain intermediate range. In terms of traffic assignment method, the SO was more likely to reduce the effect of the Braess' Paradox than the UE. However, the Braess' Paradox in the benefit of operating cost saving occurred in all cases and the paradox in the total benefit continued.

In order to solve the problem, new link cost function considered travel time and operating cost simultaneously were suggested. As a result, the negative benefit was significantly decreased in the UE case and total negative benefit was no longer shown in the SO case through the analysis.

# 1. 서론

## 1. 연구 배경 및 목적

우리나라는 대규모 신규사업의 신중한 착수와 재정투자의 효율성 제고를 위해서 1999년부터 총사업비 500억원 이상인 대규모 개발사업을 대상으로 예비타당성조사 제도를 도입하여 시행하고 있다.

현행 예비타당성 조사 지침은 경제적 타당성, 정책적 타당성, 지역균형발전 타당성에 대한 분석결과를 종합적으로 평가해서 최종 결론을 도출하도록 규정하고 있지만 사업의 타당성에 결정적인 역할을 하는 것은 경제적 타당성 분석 결과이다. 경제적 타당성 분석은 사업에 투자되는 비용과 사업으로 인해 유발되는 사회적 편익간 비교(비용-편익 분석)를 통해서 이루어진다. 따라서 정확한 예비타당성 조사 분석이 이루어지기 위해서는 편익산정 과정의 정확성이 확보되어야 된다.

편익추정 과정에서 나타나는 분석 상의 많은 문제 중에 하나가 교통분야에서 잘 알려진 브레이스 파라독스이다. 브레이스 파라독스는 교통시설의 투자가 전체 네트워크의 효율성을 향상시키지 못하고 오히려 악화시키는 역설적인 현상을 의미한다. 경제성 분석과정에서 브레이스 파라독스는 교통시설의 확충에도 불구하고 음(-)의 사회적 편익 형태로 나타난다.

이런 경우 사업시행 효과를 정확하게 추정할 수 없어 사업의 필요성을 판단하는데 많은 어려움을 겪게 된다.

본 연구에서는 편익산정 과정에서 나타나는 이와 같은 브레이스 파라독스에 대한 해석과 이에 대한 해결방안을 모색하는 것을 목적으로 한다. 기존의 브레이스 파라독스는 통행시간 측면에서만 검토되었지만, 본 연구에서는 운행비용 측면까지 포함하여 분석하였다. 본 연구결과는 예비타당성 조사과정의 정확성을 높여 국책사업의 계획단계에서 합리적인 정책적 판단을 하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 수행방법

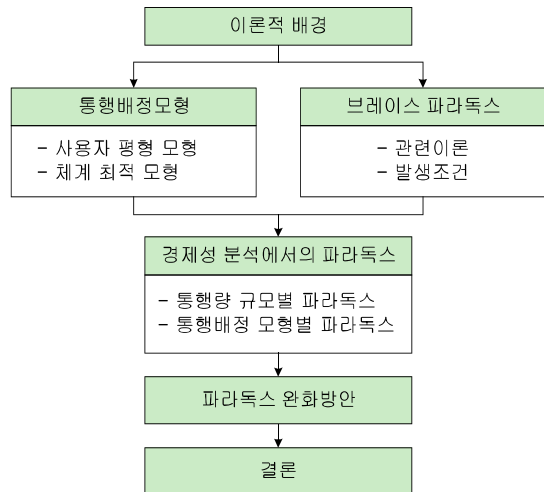
본 연구의 수행절차는 다음과 같다.

첫째, 브레이스 파라독스와 관련된 이론적인 배경을 살펴보고, 파라독스가 어떤 경우에 발생하는지를 살펴본다.

둘째, 브레이스 파라독스가 경제성 분석과정에서는

어떤 형태로 나타나는지를 통행량 규모별, 통행배정 모형별로 검토한다.

셋째, 경제성 분석과정에서 발생하는 브레이스 파라독스를 완화시키기 위한 방안을 검토하여 제시한다.



〈그림 1〉 연구수행방법

## II. 이론적 배경

### 1. 통행배정 모형

#### 1) 사용자 평형모형

Wardrop(1952)의 제1원리에 의해 개별 통행자가 경로를 선택하고 통행을 하게 되면 모든 이용경로의 통행시간은 동일하게 된다. 이런 상태를 사용자 평형(UE : User Equilibrium) 상태라고 하며 수리적으로는 식 (1)~(3)과 같은 최적화 모형의 해가 된다.

$$\text{Min } z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} c_a(w)dw \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \tag{2}$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \tag{3}$$

여기서,  $c_a$  : 링크  $a$ 의 비용함수

$f_k^{rs}$  : 기종점  $r, s$ 간의  $k$ 경로 통행량

$q_{rs}$  : 기종점  $r, s$ 간의 통행량

2) 체계 최적모형

Wardrop(1952)의 제2원리에 따라서 개별 통행자가 통행을 하게 되면 모든 이용경로의 총통행시간의 합은 최소가 되게 된다. 이런 상태를 체계 최적(SO : System Optimum) 상태라고 하며, 수리적으로는 식(4)~(6)의 최적화 모형의 해가 된다.

$$\text{Min } \tilde{Z}(x) = \sum_a x_a c_a(x_a) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad (5)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad (6)$$

- 여기서,  $c_a$  : 링크  $a$ 의 비용함수
- $x_a$  : 링크  $a$ 의 통행량
- $f_k^{rs}$  : 기종점  $r, s$ 간의  $k$ 경로 통행량
- $q_{rs}$  : 기종점  $r, s$ 간의 통행량

2. 브레이스 파라독스

1) 브레이스 파라독스의 정의

1968년 Braess는 네트워크에 링크를 추가하였는데도 시스템의 총통행시간이 오히려 증가하는 모순적인 현상이 발생한다는 사실을 발견했는데 이것이 교통 분야에 잘 알려진 브레이스 파라독스이다.

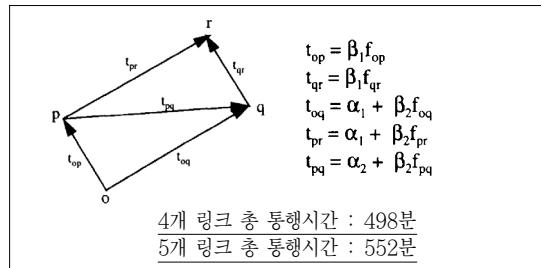
이와 같은 파라독스가 발생하는 이유는, 개별 통행자들이 다른 사람을 고려하지 못하는 사용자 평형에 근거하여 통행을 행하기 때문이다. 따라서 브레이스 파라독스를 야기시키는 도로개설사업은 총통행시간의 감소를 기대할 수 없게 된다. 수학적인 관점에서 보면 공급행위는 체계 최적 문제의 목적함수를 감소시키려는 의도를 가지고 있으나 실제 통행은 사용자 평형문제의 목적함수에 따라 배정되기 때문에 결과적으로 통행행태는 체계 최적 목적함수를 감소시키지 못하게 된다.

브레이스 파라독스는 이와 같이 해석이 가능하기 때문의 Sheffi(1985)는 더 이상 파라독스로 보지 않고 pseudo paradox라고 언급하였다.

2) 브레이스 파라독스의 발생 조건

Pas와 Principio(1996)은 교통량 및 링크비용함수의 계수에 따라 브레이스 파라독스가 발생하는 경우와

그렇지 않은 경우가 있음을 브레이스가 사용한 예제에 적용하여 분석하였다.



〈그림 2〉 Braess의 예제 네트워크

사용자 평형 통행배정과 최적 최적 통행배정 기법을 적용한 각각 경우에 대해 파라독스가 발생하는 경우를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- ① 수요가 너무 작기 때문에 브레이스 파라독스가 발생하지 않음.

통행량 조건	Braess의 예제에서의 조건
$Q \leq \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\beta_1 + \beta_2}$	$Q \leq 3.64$

- ② 브레이스 파라독스가 발생하지만, 체계 최적 통행배정 기법 적용시 네트워크 효율성이 향상됨.

통행량 조건	Braess의 예제에서의 조건
$\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\beta_1 + \beta_2} < Q \leq \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\beta_1 - \beta_2}$	$3.64 < Q \leq 4.44$

- ③ 브레이스 파라독스가 발생하고, 체계 최적 통행배정 기법을 적용하여도 네트워크 효율성이 저하됨.

통행량 조건	Braess의 예제에서의 조건
$\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\beta_1 - \beta_2} < Q < \frac{2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\beta_1 - \beta_2}$	$4.44 < Q < 8.89$

- ④ 수요가 너무 커서 브레이스 파라독스가 발생하지 않음.

통행량 조건	Braess의 예제에서의 조건
$Q \geq \frac{2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\beta_1 - \beta_2}$	$Q \geq 8.89$

이상의 결과를 살펴보면, 브레이스 파라독스는 수요 수준이 낮아 혼잡이 발생하지 않는 경우와 수요수준이 과다하게 높아 혼잡이 발생하는 경우에는 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 파라독스가 발생하는 경우는 일정 수요 규모 내에서만 관측되었다.

또한, 파라독스가 발생하는 경우 수요가 어느 정도 수준 이하가 될 때에는 체계 최적 통행배정 기법으로 전체 네트워크의 효율성을 향상시킬 수 있어 파라독스가 없어지는 것으로 나타났다. 그러나 수요가 어느 정도 이상이 되면 체계 최적 상태에서도 네트워크의 효율성은 개선되지 않아 파라독스가 지속되게 된다.

이와 유사한 연구가 Yang(1997)에 의해 수행되었으며, 그의 연구에서는 민감도 분석법을 활용한 배정방법을 통해 통행량 수준에 따른 브레이스 파라독스의 발생 유무를 보여주었다.

### III. 경제성 분석에서의 파라독스

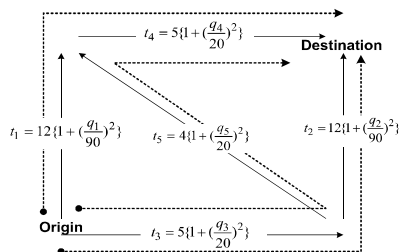
#### 1. 용어정의

새로운 도로의 건설이나 기존 도로의 확장 사업이 사회적 편익을 향상시키지 못하고 오히려 악화시키는 경우를 본 연구에서는 경제성 분석에서의 브레이스 파라독스로 정의하였다. 기존의 브레이스 파라독스는 통행시간 측면에서만 검토되었지만, 경제성 분석에서는 통행시간 비용과 운행비용 등과 같은 다양한 편익에 대한 분석이 필요하다.

#### 2. 분석방법

##### 1) 분석 네트워크

본 연구에서는 브레이스가 활용한 대칭적인 네트워크를 대상으로 하였다. 하지만, 보다 현실적인 분석을 위해



〈그림 3〉 분석 네트워크

선형의 통행시간 함수가 아닌 〈그림 3〉과 같이 비선형 형태를 갖는 BPR 통행시간 함수식을 기반으로 하였으며, 운행비용 산정을 위해 링크길이를 추가 설정하였다.

#### 2) 편익항목 설정

경제성 분석과정에서 파라독스가 나타나는 현상을 검토하기 위해 〈그림 3〉과 같은 네트워크에서의 사회적인 편익을 분석하였다.

현재 국내에서 평가되고 있는 타당성 조사에 포함되는 편익 항목은 〈표 1〉과 같다. 이상의 다양한 편익 항목 중 본 연구에서는 공통 편익만을 대상으로 하였으며, 이 중에서도 전체 편익 중 대부분을 차지하고 있는 차량운행비용 절감편익 및 통행시간 절감편익만을 분석대상에 포함시켰다.

〈표 1〉 편익항목

구분	편익항목
공통 편익	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차량운행비용 절감 편익</li> <li>• 통행시간 절감 편익</li> <li>• 교통사고 감소 편익</li> <li>• 환경비용(공해 및 소음) 절감 편익</li> </ul>
사업 특수 편익	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공사중 교통혼잡으로 인한 부(-)의 편익</li> <li>• 철도건설목적 개선 편익</li> <li>• 철도사업으로 인한 도로공간 축소에 따른 부(-) 편익</li> <li>• 주차비용 절감 편익</li> </ul>

#### 3) 통행시간 절감편익

통행시간 절감편익은 개별 이용자의 통행시간에 시간가치를 적용하여 산정된다. 본 연구에서는 모든 수요는 승용차로 구성됨을 가정해서 동일한 시간가치를 적용하였다.

#### 4) 운행비용 절감편익

운행비용 산정을 위해 본 연구에서는 〈표 2〉의 속도-운행비용 자료를 근거로 운행비용과 속도 관계를 회귀분석을 통해 추정하였다. 분석결과, 운행비용과 속도는 식 (7)과 같은 관계식을 갖는 것으로 나타났으며 운행비용 산정시 이를 활용하였다.

$$O = a + bv + cv^2 + dv^3 \quad (R^2 = 0.994) \quad (7)$$

$$= 302.3041 - 5.5267 \cdot v + 0.0564 \cdot v^2 - 0.0002 \cdot v^3$$

여기서,  $O$  : 운행비용(원/km)  
 $v$  : 통행속도(km/시)

〈표 2〉 승용차 속도별 차량운행비용

(단위 : km/시, 원/km)

속도	연료비	엔진 오일비	타이어 비	유지 관리비	감가 상각비	합계
10	52.56	6.07	0.45	7.77	189.27	256.12
20	31.69	5.06	0.84	9.19	161.31	208.08
30	26.96	4.38	1.29	10.88	137.65	181.16
40	24.35	3.71	1.87	11.31	116.14	159.34
50	24.87	3.71	2.38	12.72	98.94	142.61
60	25.82	3.71	3.03	13.42	89.26	135.23
70	27.24	3.71	3.73	14.13	81.73	130.54
80	27.92	3.37	4.51	15.54	73.13	124.46
90	30.36	3.03	5.47	15.97	67.75	122.59
100	32.73	3.71	6.50	16.96	63.02	122.92
110	35.41	4.72	7.92	15.97	57.64	121.66
120	39.70	7.08	9.40	20.49	50.97	127.65

자료 : 도로사업 투자분석 기법정립, 국토연구원, 1999

### 3. 편익산정

#### 1) 통행배정

##### (1) 사용자 평형상태

사용자 평형상태에서는 모든 경로의 통행시간은 동일하게 된다. 총 4개 링크로 구성된 네트워크에 대한 사용자 평형상태 조건은 식(8)~(9)와 같으며, 이를 활용하여 각 링크의 통행량을 산정하였다.

$$\text{통행시간 조건} : t_1 + t_4 = t_2 + t_3 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{통행량 조건} : Q &= q_1 + q_3 \quad (9) \\ q_1 &= q_2, q_3 = q_4 \end{aligned}$$

링크가 추가된 총 5개 링크로 구성된 네트워크에 대한 사용자 평형상태의 조건은 식(10)~(11)과 같으며 이를 바탕으로 각 링크 통행량을 산정하였다.

$$\text{통행시간 조건} : t_1 + t_4 = t_2 + t_3 = t_3 + t_5 + t_4 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{통행량 조건} : Q &= q_1 + q_3 \quad (11) \\ q_1 &= q_2, q_3 = q_4 \\ q_4 &= q_1 + q_5, q_3 = q_2 + q_5 \end{aligned}$$

##### (2) 체계 최적상태

체계 최적상태에서는 모든 경로의 통행시간 합이 최소가 되게 된다. 총 4개 링크로 구성된 네트워크에 체계

최적상태 조건은 식(12)~(13)과 같으며, 이를 통해 각 링크 통행량을 산정하였다.

$$\text{최적상태 조건} : \text{Min} \sum_{i=1}^4 t_i q_i \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{통행량 조건} : Q &= q_1 + q_3 \quad (13) \\ q_1 &= q_2, q_3 = q_4 \end{aligned}$$

총 5개 링크로 구성된 네트워크에 대한 체계 최적상태의 조건은 식(14)~(15)와 같으며 이를 통해 각 링크 통행량을 산정하였다.

$$\text{최적상태 조건} : \text{Min} \sum_{i=1}^5 t_i q_i \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{통행량 조건} : Q &= q_1 + q_3 \quad (15) \\ q_1 &= q_2, q_3 = q_4 \\ q_4 &= q_1 + q_5, q_3 = q_2 + q_5 \end{aligned}$$

#### 2) 통행시간 절감편익

##### (1) 통행시간 절감편익의 산정과정

통행시간 절감편익을 산정하기 위해 각각의 경우에 대한 총통행시간을 계산해야 된다. 링크 통행량을 기초로 계산된 총통행시간은 식(16)과 같다.

$$\text{총통행시간} : \sum_{i=1}^n t_i q_i \quad (16)$$

여기서,  $t_i$  : 링크  $i$ 의 통행시간

$q_i$  : 링크  $i$ 의 통행량

본 연구에서의 통행시간 절감편익은 UE상태와 SO상태를 구분하였다. 시간가치를 고려한 각각의 통행시간 절감편익은 식(17), (18)과 같다.

☐ 통행시간 절감편익(UE상태)

$$VOIS^U = VOI(T_4^U - T_5^U) \quad (17)$$

여기서,  $T_4^U$  : 링크 4개일 때, UE의 총통행시간

$T_5^U$  : 링크 5개일 때, UE의 총통행시간

$VOT$  : 시간가치

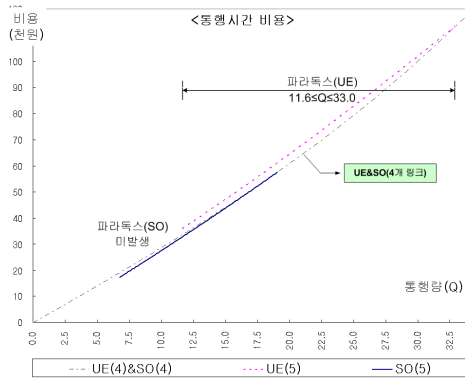
☒ 통행시간 절감편익(SO상태)

$$VOIS^S = VOT(T_4^S - T_5^S) \quad (18)$$

여기서,  $T_4^S$  : 링크 4개일 때, SO의 총통행시간  
 $T_5^S$  : 링크 5개일 때, SO의 총통행시간  
 $VOT$  : 시간가치

(2) 통행시간 절감편익 산정결과

이상의 과정을 통해 산정된 통행량에 따른 총통행시간 비용은 <그림 4>와 같으며, 두 곡선 사이의 차이가 통행시간 절감편익이 된다.



<그림 4> 총통행시간 비용 산정결과

분석결과, 사용자 평형상태일 때에는 가능한 모든 영역에서 파라독스가 발생되었으나, 체계 최적상태에서는 파라독스가 발생되지 않았다. 즉, 시간가치만을 분석에 포함한 본 연구의 통행시간 절감편익은 기존의 브레이크 파라독스 연구와 동일한 결과를 제시하고 있다.

3) 운행비용 절감편익

(1) 운행비용 절감편익 산정과정

운행비용 절감편익 산정을 위해 링크 길이를 분석에 포함시켰으며, 분석의 편리성을 위해 모든 링크 길이는 동일하다고 가정하였다.

총운행비용은 통행량 및 링크길이, 링크비용 함수를 이용하여 산정되며 이를 수식으로 표현하면 식(19)와 같으며, 운행비용 함수는 식(7) 관계식을 적용하였다.

$$\text{총운행비용} : \sum_{i=1}^n o_i \cdot l_i \cdot q_i \quad (19)$$

여기서,  $o_i$  : 링크  $i$ 의 운행비용  
 $(a + bv_i + cv_i^2 + dv_i^3)$

$l_i$  : 링크  $i$ 의 길이

$q_i$  : 링크  $i$ 의 통행량

$v_i$  : 링크  $i$ 의 통행속도

$a, b, c, d$  : 링크  $i$ 의 운행비용 함수 계수

산정된 총운행비용을 기초로 통행배정 기법별 운행비용 절감편익은 식(20), (21)과 같이 계산된다.

☒ 운행비용 절감편익(UE상태)

$$VOCS^U = O_4^U - O_5^U \quad (20)$$

여기서,  $O_4^U$  : 링크 4개일 때, UE의 총운행비용  
 $O_5^U$  : 링크 5개일 때, UE의 총운행비용

☒ 운행비용 절감편익(SO상태)

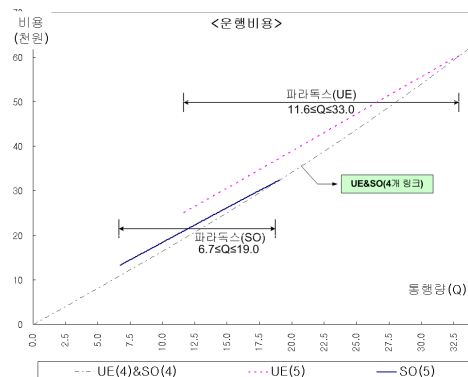
$$VOCS^S = O_4^S - O_5^S \quad (21)$$

여기서,  $O_4^S$  : 링크 4개일 때, SO의 총운행비용  
 $O_5^S$  : 링크 5개일 때, SO의 총운행비용

(2) 운행비용 절감편익 산정결과

분석 네트워크의 통행량에 따른 총운행비용 결과는 <그림 5>와 같으며, 두 곡선 사이의 차이가 운행비용 절감편익이 된다.

운행비용의 경우, 사용자 평형상태 뿐만 아니라 체계 최적상태 모두에서 링크를 추가한 경우의 운행비용이 크



<그림 5> 총운행비용 산정결과

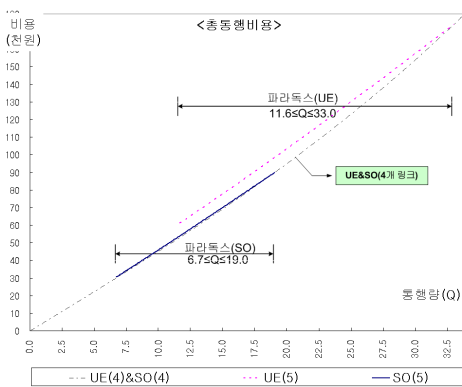
게 나타났다. 즉, 통행시간 절감편익과는 달리 운행비용 절감편익의 경우, 통행배정 기법에 상관없이 모든 해가 존재하는 통행량 조건에서 파라독스가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4) 총편익 산정결과

앞서 산정된 링크 통행량에 따른 총통행시간 비용과 총운행비용의 합계인 전체 네트워크의 총통행비용을 산정하면 <그림 6>과 같으며, 두 곡선 사이의 차이가 총통행비용 절감편익이 된다. 총편익 측면의 파라독스는 사용자 평형상태 및 체계최적상태 모두 해가 존재하는 통행량 범위내에서 브레이스 파라독스가 발생하였다.

중요한 점은 체계 최적상태에서 통행시간 절감편익은 파라독스가 발생하지 않았지만, 운행비용 절감편익에서 발생한 파라독스의 영향으로 전체 경제성 분석의 편익산정에서는 파라독스가 발생하였다는 것이다.

즉, 통행시간 측면에서는 체계 최적모형을 통해 통행배정을 수행하면 파라독스가 해결되었지만 전체 경제성 분석에서는 이를 통해서도 파라독스가 사라지지 않는다는 것이다.



<그림 6> 총통행비용 산정결과

IV. 파라독스 극복 방안

1. 대안검토

이상의 분석결과를 토대로 경제성 분석과정에서 발생하는 브레이스 파라독스를 완화시키기 위한 방안들을 모색해 보았다.

1) 통행량 측면

다양한 조건에 대한 경제성 분석결과, 동일한 네트워크에 대해서도 브레이스 파라독스는 일정 통행량 조건내에서만 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

즉, 통행량이 낮은 경우와 높은 경우는 파라독스가 발생하지 않았다. 따라서 경제성 분석과정에서 파라독스가 발생하는 경우 통행량을 조정하면 파라독스를 해소시킬 수 있다. 그러나 이는 타당성 조사 분석과정에서 총통행량 불변 지침을 어기게 되어 실제 분석과정에서 활용하기 어려운 방안이다.

2) 통행배정 기법 측면

브레이스 파라독스의 발생 원인에서도 알 수 있듯이 이용자들이 사용자 평형이 아닌 체계 최적상태로 경로를 선택하게 되면 파라독스가 발생하지 않게 된다는 것이 일반적인 통념이다.

통행시간을 기준으로 산정되는 통행시간 절감편익의 경우, 체계 최적상태인 경우에 파라독스가 소멸되는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 통행배정 방법을 사용자 평형이 아닌 체계 최적 배정모형을 활용하면 파라독스를 개선시킬 수 있을 것이다.

그러나 운영비용 절감편익의 경우는 체계 최적상태에서도 파라독스가 발생하였다. 이런 경우 총 편익 측면에도 영향을 미쳐 전체 편익산정 측면에서는 파라독스가 지속되게 된다. 이는 일반적인 브레이스 파라독스와 경제성 분석의 브레이스 파라독스 사이의 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다.

따라서 체계 최적상태의 배정기법을 적용하는 경우에도 경제성 분석과정에서의 파라독스는 계속 발생할 가능성이 높다.

3) 통행비용 함수 측면

경제성 분석과정의 파라독스의 특이한 점은 체계 최적상태에서도 운행비용 측면에서는 파라독스가 지속적으로 발생한다는 것이다. 즉, 단순히 통행시간만을 기초로 한 링크비용 함수를 가지고 배정을 하게 되면 운행비용 측면에서는 지속적으로 파라독스가 발생하는 것이다.

실제 현실에서 통행자는 일반적으로 통행시간이 짧은 경로를 선호하지만, 운행비용(톨비용, 유류비용 등)을 함께 고려하여 무조건으로 통행시간이 짧은 경로만을 선

택하는 것은 아니다. 즉, 통행시간뿐만이 아니라 어느 정도의 운행비용을 함께 고려하여 경로를 선택하게 된다.

이와 같은 사실을 토대로 본 연구에서는 경제성 분석의 브레이크스 파라독스 해결방안으로 통행배정시 기존에 널리 쓰이고 있고, (예비)타당성 조사지침에서 권고하고 있는 단순한 통행시간만을 기초로한 링크비용 함수가 아닌 운행비용을 포함한 링크비용 함수를 기초로 분석할 것을 해결방안으로 제시한다.

이를 수식으로 비교하면 식(22), 식(23)과 같다.

$$\text{기존의 링크비용 함수 : } C_a = T_a \quad (22)$$

$$\text{개선된 링크비용 함수 : } C_a = T_a + O_a \quad (23)$$

여기서,  $C_a$  : 링크  $a$ 의 비용함수  
 $T_a$  : 링크  $a$ 의 통행시간 함수  
 $O_a$  : 링크  $a$ 의 운행비용 함수

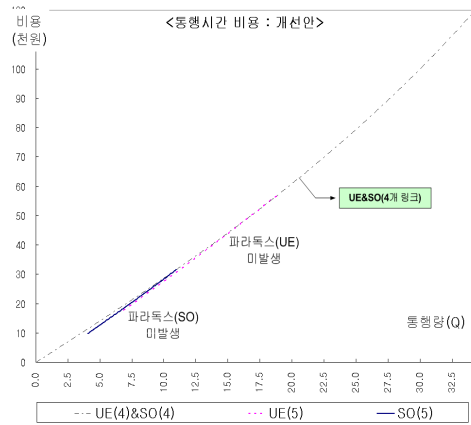
## 2. 새로운 링크비용 함수 적용

링크비용 함수 측면의 파라독스 개선효과를 검토하기 위해 개선된 링크비용 함수를 토대로 경제성 분석을 수행하였다. 본 연구에서 제시하는 개선된 링크비용 함수는 식(24)와 같은 형태를 가지게 된다.

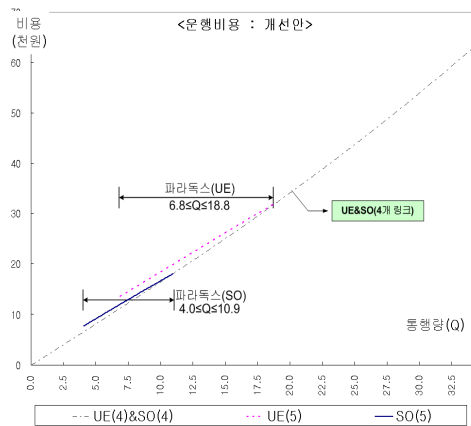
$$C_a = T_a + O_a \\ = VOFIT_a^0 \{1 + \alpha(V_a/c_a)^\beta\} + a + bv_a + cv_a^2 + dv_a^3 + \gamma_a \quad (24)$$

여기서,  $VOT$  : 시간가치(원/시)  
 $T_a^0$  : 링크  $a$ 의 자유통행시간(시)  
 $V_a$  : 링크  $a$ 의 교통량(대/시)  
 $c_a$  : 링크  $a$ 의 용량(대/시)  
 $v_a$  : 링크  $a$ 의 통행속도(km/시)  
 $\gamma_a$  : 링크  $a$ 의 톨비용(원)(단, 링크  $a$ 가 유료도로일 경우)  
 $\alpha, \beta$  : 링크  $a$ 의 통행시간 함수 계수  
 $a, b, c, d$  : 링크  $a$ 의 운행비용 함수 계수

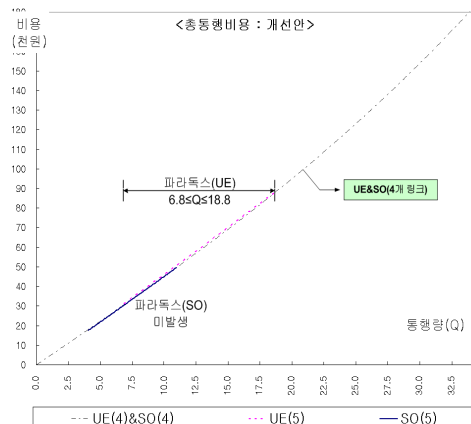
식(24)의 링크비용 함수를 토대로 <그림 3>의 분석 네트워크에 대해 통행배정 기법별 통행시간 비용 및 운행비용, 총 통행비용을 산정한 결과는 <그림 7>~<그림 9>와 같다.



<그림 7> 총통행시간비용 산정결과(개선 후)



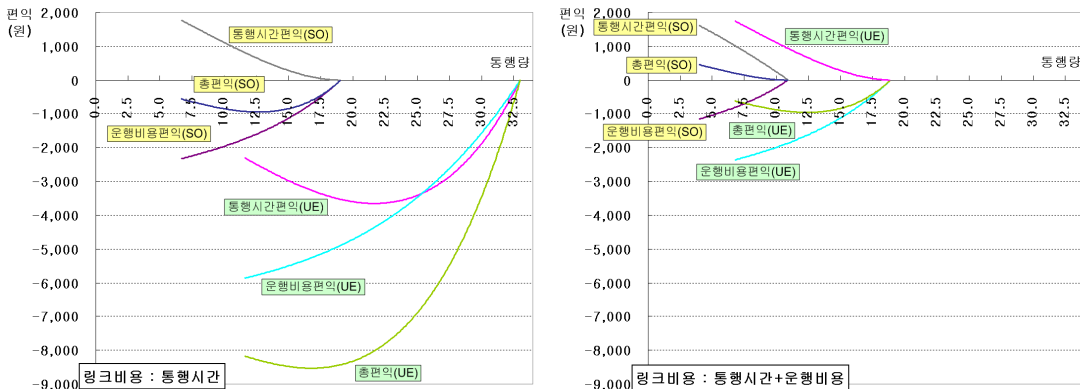
<그림 8> 총운행비용 산정결과(개선 후)



<그림 9> 총통행비용 산정결과(개선 후)

개선된 링크비용 함수를 적용한 결과, 통행시간 비용 측면에서는 사용자 평형상태나 체계 최적상태 모두 파라





〈그림 10〉 편익산정결과 비교

독스가 나타나지 않았다. 하지만 운행비용 측면에서는 가능한 모든 범위에 대해서 사용자 평형상태나 체계 최적상태 모두 파라독스가 나타났다. 그러나 기존 링크비용 함수의 분석결과에 비해 링크 추가 후, 전체 네트워크의 운행비용 증가분이 크지 않아 파라독스가 다소 완화되었다는 것을 확인 할 수 있다.

이를 기준으로 총 통행비용 측면에서 살펴보면, 사용자 평형상태의 경우는 가능한 통행량 범위내에서 모두 파라독스가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 체계 최적상태의 경우는 파라독스가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

즉, 개선된 링크비용 함수를 활용하면 운행비용 측면의 파라독스는 다소 완화되며, 총 편익측면에서 체계 최적상태에서는 더 이상 파라독스가 나타나지 않게 된다. 이상의 내용은 배정기법별, 통행량별 편익을 보여주고 있는 〈그림 10〉을 보면 보다 명확하게 알 수 있다.

따라서 기존의 링크비용 함수 개선을 통해 경제성 분석 과정에서 발생하는 브레이크 파라독스를 다소 완화시킬 수 있으며, 동시에 사용자 평형배정이 아닌 체계 최적배정을 활용하면 경제성 분석과정의 브레이크 파라독스를 완전히 극복할 수 있다는 것을 확인하였다.

### V. 결론

본 연구에서는 교통분야에 잘 알려진 브레이크 파라독스가 경제성 분석과정에서 발생하는 현상을 살펴보고 개선방안을 검토하였다. 기존의 브레이크 파라독스는 통행시간 측면에서만 검토되었지만, 경제성 분석에서는 통행시간 측면 이외에도 다양한 편익에 대한 분석이 필요

하다.

이를 확인하기 위해 본 연구에서는 간단한 예제 네트워크에 대해 통행량 수준 및 통행배정 기법에 따라 다양한 편익항목 중 대표적인 편익항목인 통행시간 절감편익과 운행비용 절감편익의 변화를 살펴보았다.

예제 네트워크에 대한 분석결과, 경제성 분석 상에서 파라독스가 발생하는 경우는 교통량 수준이 특정 조건을 만족하는 경우에만 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

통행배정 기법에서는 사용자 평형보다는 체계 최적상태의 경우가 경제성 분석의 파라독스 발생을 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 체계 최적상태에서도 기존에 널리 쓰이고 있고, (예비)타당성 조사시점에서 권고하고 있는 통행시간만을 고려한 링크비용 함수식에서는 운행비용 절감편익 측면에서 높은 음(-)의 편익을 발생시키며 이는 결국 전체 편익 측면의 파라독스를 유발하였다.

이에 대한 개선책으로 가능한 대안 검토결과, 본 연구에서는 수정된 링크비용 함수를 제시하였다. 개선된 링크비용 함수는 통행시간비용과 운행비용이 동시에 고려된 형태를 가지게 된다. 실제로 운전자의 경우는 통행시간 뿐만이 아니라 다양한 운행비용(톨비용, 유류비용 등)도 함께 고려하며 경로를 선택하는 것이 일반적임으로 개선된 함수가 기존 함수보다 더욱 현실적이라 판단 된다.

제시된 링크비용 함수를 적용한 경제성 분석결과, 사용자 평상상태의 경우 기존 링크비용 함수에 비해 음(-)의 편익 크기가 상당부분 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 개선된 링크비용 함수는 사용자 평상상태에서 발생하는 경제성 분석의 파라독스를 완화시켰다. 더욱이

체계 최적 배정방법을 적용하는 경우, 운행비용 절감편익의 파라독스 완화로 인해 전체 편익 측면의 파라독스 문제가 완전히 해결되는 것을 확인하였다.

이상의 연구 결과, 본 연구의 개선된 링크비용 함수는 경제성 분석의 브레이스 파라독스의 해결 가능성을 보여 주었다. 하지만 본 연구의 실효성을 높이기 위해서는 향후 다음과 같은 연구가 필요하다.

첫째, 경제성 분석과정에서 기존의 사용자 평형상태 배정이 아닌 체계 최적 배정방법을 활용하기 위해서는 배정기법의 현실 모사능력에 대한 근본적인 검증이 필요하다.

둘째, 간단한 네트워크가 아닌 보다 현실적인 네트워크에서의 분석과 검증이 필요하다.

마지막으로 네트워크에 대해서는 규모에 대한 검토도 함께 이루어져야 하며, 이는 보다 정확한 경제성 분석을 위해 한정된 네트워크를 추출하는 경제성 분석 영향권 설정방법과 직접적으로 연관된 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Ana L.C. Bazzan and Franziska Klügl(2005), "Case studies on the Braess Paradox: Simulating route recommendation and learning in abstract and microscopic models", Transportation Research Part C, Vol. 13, pp.299~319.
2. Braess, D.(1968), "Ueber ein paradoxen der verkehrsplanung", Unternehmensforschung. 12. pp.258~268.
3. Eric I. Pas and Shari L. Principio(1997), "Braess' Paradox : Some New Insights", Transpn Res.-B, Vol. 21, No. 3, pp.265~275.
4. Hai Yang(1997), "Sensitivity Analysis for The Elastic-Demand Network Equilibrium Problem with Applications", Transpn Res.-B, Vol. 31, No. 1, pp.55~70.
5. Igal Milchtaich(2003), "Network topology and the efficiency of equilibrium", Games and Economic Behavior, Vol. 57, pp.321~346.
6. Sheffi, Y.(1985), "Urban Transportation Network", Prentice Hall.
7. Tim Roughgarden(2006), "On the severity of Braess's Paradox: Designing networks for selfish users in hard", Journal of Computer and System Sciences, Vol. 72, pp.922~953.
8. 국토연구원(1999), "도로사업 투자분석 기법정립".
9. 임강원, 임용택(2003), "교통망분석론", 서울대학교 출판부.
10. 한국개발연구원(2004), "도로·철도 부분사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판)".

✉ 주 작 성 자 : 박경철

✉ 교 신 저 자 : 박경철

✉ 논문투고일 : 2007. 5. 19

✉ 논문심사일 : 2007. 7. 30 (1차)

2007. 11. 7 (2차)

2007. 11. 29 (3차)

✉ 심사판정일 : 2007. 11. 29

✉ 반론접수기한 : 2008. 6. 30