

브레이스 파라독스 극복을 위한 경제성 분석방안 연구

The Guide Line for A Feasible Study Overcoming The Braess' Paradox

박 경 철
(경기개발연구원 책임연구원)

류 시 균
(경기개발연구원 연구위원)

이 성 모
(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

손 상 훈
(경기개발연구원 연구위원)

목 차

I. 서론	2. 편익산정
1. 연구 배경 및 목적	3. 해결방안 모색
2. 연구 수행방법	IV. 사례분석
II. 이론적 배경	1. 분석대상
1. 통행배정 모형	2. 방안별 분석결과
2. 브레이스 파라독스	V. 결론 및 연구의 한계점
III. 경제성 분석에서의 파라독스	참고문헌
1. 분석방법	

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

우리나라에서는 1999년부터 총사업비 500억 원 이상인 대규모 개발사업에 대해서는 예비타당성조사 제도를 도입하여 대형 신규사업의 신중한 착수와 재정투자의 효율성을 높이기 위해 노력하고 있다.

현행 예비타당성 조사는 경제적 타당성, 정책적 타당성, 지역균형발전 타당성 분석 등이 종합적으로 검토되고 있으며 이중 사업의 타당성에 결정적인 역할을 하는 것이 경제적 타당성 분석 결과이다.

경제적 타당성 분석은 사업에 투자되는 비용과 사업으로 인해 유발되는 사회적인 편익을 기준으로 비용-편익 분석 방법을 통해 이루어진다. 따라서 정확한 예비타당성 조사 분석이 이루어지기 위해서는 편익산정 과정에서의 정확성이 선행되어야 된다.

편익추정 과정에서 나타나는 분석 상의 많은 문제 중에 하나가 교통분야에서 잘 알려진 브레이스 파라독스이다. 브레이스 파라독스는 교통시설의 투자가 전체 네트워크의 효율성을 향상시키지 못 하고 오히려 악화시키는 역설적인

현상을 의미한다. 경제성 분석과정에서 브레이스 파라독스는 교통시설의 확충으로 인해 오히려 사회적인 편익이 악화되는 형태로 나타난다.

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

본 연구에서는 경제성 분석 과정에서 나타나는 이와 같은 브레이스 파라독스에 대한 해결방안을 모색하는 것을 목적으로 한다. 이는 예비타당성 조사과정의 정확성을 높여 국책사업의 계획단계에서 합리적인 정책적 판단을 하는데 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 수행방법

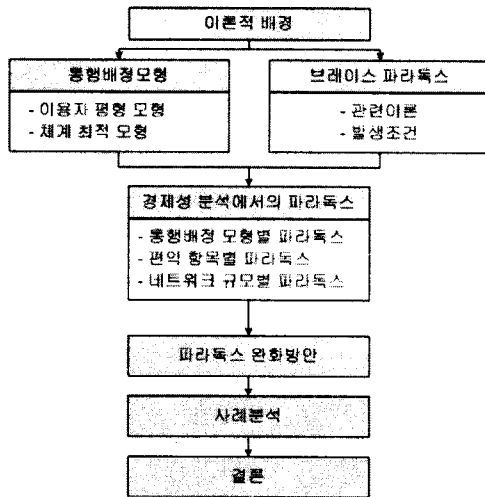
본 연구의 수행절차는 다음과 같다.

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

둘째, 브레이스 파라독스가 경제성 분석과정에서는 어떤 형태로 나타나는지를 다양한 관점에서 검토한다.

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

넷째, 실제 사례분석을 통해 본 연구방안의 활용 가능성을 검토한다.



<그림 1> 연구수행방법

II. 이론적 배경

1. 통행배정 모형

1) 사용자 평형모형

Wardrop(1952)의 제1원리에 의해 사람들이 통행을 하게 될 때 나타나는 평행상태로 모든 이용경로의 통행시간은 동일하게 된다. 이런 상태를 사용자 평형(UE : User Equilibrium) 상태라고 하며 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

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

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

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

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 의해 사람들이 통행하게 될 때 나타나는 평행상태로 이용경로의 총통행시간의 합은 최소가 되게 된다. 이런 상태를 체계최적(SO : System Optimum) 상태라고 하며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Min } \bar{Z}(x) = \sum_a x_a c_a(x_a)$$

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

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

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

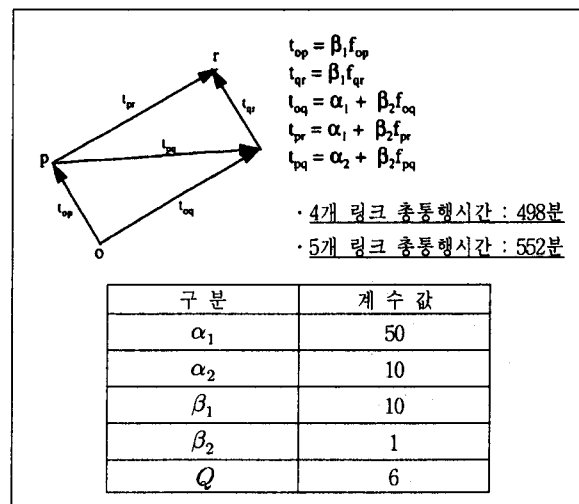
2. 브레이스 파라독스

1) 브레이스 파라독스의 정의

1968년 Braess는 네트워크 상에 링크의 추가가 총 시스템의 통행시간을 증가시키는 모순적인 현상을 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. 그러므로 총통행시간을 감소하는 것을 기대할 수 없게 된다. 수학적인 관점에서 보면 공급행위는 체계최적 문제의 목적함수를 감소시키려는 의도를 가지고 있다. 그러나 실제 통행은 사용자 평형문제의 목적함수에 따라 배정되기 때문에 결과적으로 통행행태는 체계최적 목적함수를 감소시키지 못한다.

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



<그림 2> Braess 예제 네트워크

2) 브레이스 파라독스의 발생 조건

Pas와 Principio(1996)은 교통량 및 링크 통행량 함수 계수에 따라 브레이스 파라독스가 발생하는 경우가 그렇지 않은 경우를 브레이스가 사용한 예제에 적용하여 분석하였다.

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

- ① 수요가 너무 작기 때문에 브레이스 파라독스가 발생하지 않음.

일반적인 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 적용시 네트워크 효율성이 향상 됨.

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

- ③ 브레이스 파라독스가 발생하고, 체계 최적을 적용하여도 네트워크 효율성이 저하됨.

일반적인 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.

일반적인 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 수요수준이 낮아 혼잡이 발생하지 않는 경우와 수요수준이 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 최적으로 전

체 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.

III. 경제성 분석에서의 파라독스

1. 분석방법

1) 용어정의

새로운 도로의 건설이나 기존 도로의 확장 사업이 사회적 편익을 향상시키지 못하고 오히려 악화시키는 경우를 본 연구에서는 경제성 분석에서의 브레이스 파라독스로 정의하였다.

2) 분석방법

① 분석대상 설정

본 연구에서는 브레이스가 활용한 네트워크를 대상으로 하였으며, 운영비용 산정을 위해 링크길이를 변수로써 추가 설정하였다.

② 편익항목 설정

경제성 분석과정에서 파라독스가 나타나는 현상을 검토하기 위해 브레이스가 적용한 네트워크에서의 사회적인 편익을 분석하였다.

현재 국내에서 평가되고 있는 타당성 조사에 포함되는 편익 항목은 다음과 같다.

<표 1> 편익항목

구분	편익항목
공통편익	·차량운영비용 절감 편익
	·통행시간 절감 편익
	·교통사고 감소 편익
	·환경비용(공해 및 소음) 절감 편익
사업특수편익	·공사중 교통혼잡으로 인한 부(-)의 편익
	·철도건설목 개선 편익
	·철도사업으로 인한 도로공간 축소에 따른 부(-) 편익
	·주차비용 절감 편익

이상의 다양한 편익 항목 중 본 연구에서는 공통 편익만을 대상으로 하였으며, 이 중에서도 전체 편익 중 대부분을 차지하고 있는 차량운

행비용 절감편익 및 통행시간 절감편익만을 분석대상에 포함시켰다.

③ 통행시간 절감편익

통행시간 절감편익은 개별 이용자의 통행시간에 시간가치를 적용하여 산정된다. 본 연구에서는 모든 수요는 승용차 이용으로 전제하여 동일한 시간가치를 적용하였다.

④ 운행비용 절감편익

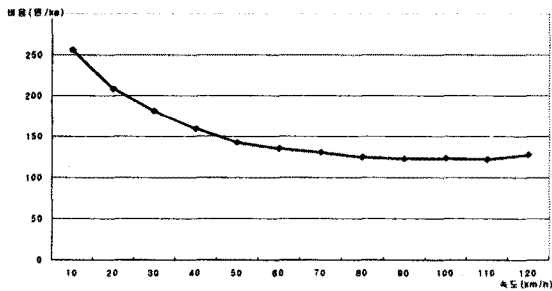
운행비용 산정을 위해 본 연구에서는 다음의 속도-운행비용 자료를 활용하였다.

<표 2> 승용차 속도별 차량운행비용

(단위 : 원/km)

속도	연료비	엔진오일비	타이어비	유지관리비	감가상각비	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



<그림 3> 속도-운영비 관계

<표 2>의 자료를 근거로 운행비용과 속도의 관계를 간단한 선형 회귀분석을 통해 추정하였다. 분석결과, 운행비용과 속도는 다음과 같은 관계식을 갖는 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{운행비(원/km)} &= a + b \cdot v \\ &= 217.28 - 0.99 \times v \quad (R^2 = 0.69) \end{aligned}$$

2. 편익산정

1) 통행배정 결과

브레이크 예제 네트워크에 대한 사용자 평형 및 체계 최적 상태에서의 각 링크별 배정된 통행량 및 이에 따른 통행시간은 <그림 4>와 같이 산정되었다.

2) 통행시간 절감편익

① 통행시간 절감편익 산정과정

통행시간 절감편익을 산정하기 위해 각 경우의 총통행시간을 계산해야 된다. 앞서 산정된 배정결과를 기초로 계산된 총통행시간은 다음과 같다.

$$\text{총통행시간} : \sum_{i=1}^n t_i \cdot q_i$$

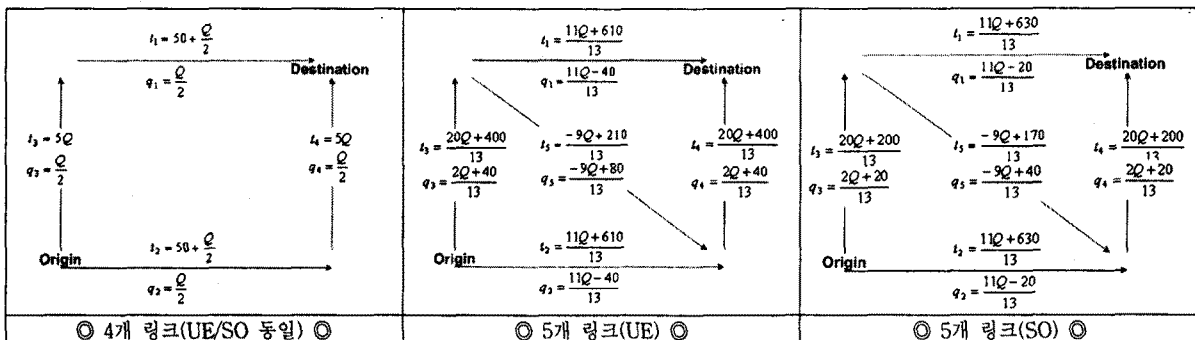
여기서, t_i = 링크 i 의 통행시간

q_i = 링크 i 의 통행량

☑ 총통행시간(4개 링크 네트워크)

UE: $T_4^U = \frac{11}{2} Q^2 + 50Q$ (단, $Q \geq 0$)

SO: $T_4^S = \frac{11}{2} Q^2 + 50Q$ (단, $Q \geq 0$)



<그림 4> 통행배정 결과

☑ 총통행시간(5개 링크 네트워크)

UE: $T_5^U = \frac{1}{169}(403Q^2 + 13,130Q)$ (단, $3.64 \leq Q \leq 8.89$)

SO: $T_5^S = \frac{1}{169}(403Q^2 + 13,130Q - 10,400)$
(단, $1.81 \leq Q \leq 4.44$)

본 연구에서의 통행시간 절감편익은 UE상태와 SO상태를 구분하였다. 시간가치를 고려한 통행시간 절감편익은 다음과 같다.

☑ 통행시간 절감편익(UE상태)

$VOTS^U = C(T_4^U - T_5^U)$

여기서,

- T_4^U = 링크 4개일 때, UE의 총통행시간
- T_5^U = 링크 5개일 때, UE의 총통행시간
- C = 시간가치

☑ 통행시간 절감편익(SO상태)

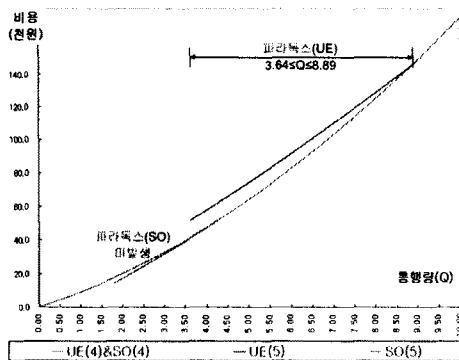
$VOTS^S = C(T_4^S - T_5^S)$

여기서,

- T_4^S = 링크 4개일 때, SO의 총통행시간
- T_5^S = 링크 5개일 때, SO의 총통행시간
- C = 시간가치

② 통행시간 절감편익 결과

통행량에 따른 통행시간 비용은 <그림 5>와 같다.



<그림 5> 통행시간 비용 산정결과

분석결과, 사용자 평형 상태일 때에는 가능한 모든 영역에서 파라독스가 발생되었으나, 체계 최적 상태에서는 파라독스가 발생되지 않았다. 즉, 시간가치만을 분석에 포함한 본 연구의 통행시간 비용은 기존의 브레이크 파라독스에 사용된 예제와 동일한 결과를 제시하고 있다.

3) 운행비용 절감편익

① 운행비용 절감편익 산정과정

운행비용 절감편익의 산정을 위해 본 연구에서는 링크길이를 분석에 포함시켰으며, 분석의 편리성을 위해 모든 링크 길이는 동일하다고 가정하였다. 각 경우의 총운행비용은 다음과 같이 구해진다.

총운행비용 : $\sum_{i=1}^n o_i \cdot l_i \cdot q_i$

- 여기서, o_i = 링크 i 의 운행비용($o_i = a + b \times v_i$)
- l_i = 링크 i 의 길이
- q_i = 링크 i 의 통행량
- v_i = 링크 i 의 통행속도

☑ 총운행비용(4개 링크 네트워크)

UE: $O_4^U = 2aQ + \frac{2b^2Q}{Q+100} + \frac{b^2}{5}$ (단, $Q \geq 0$)

SO: $O_4^S = 2aQ + \frac{2b^2Q}{Q+100} + \frac{b^2}{5}$ (단, $Q \geq 0$)

☑ 총운행비용(5개 링크 네트워크)

UE: $O_5^U = \frac{17}{13}aQ + \frac{80}{13}al + \frac{b^2}{5} + b^2 \left[\frac{22Q-80}{11Q+610} + \frac{9Q-80}{9Q-210} \right]$
(단, $3.64 \leq Q \leq 8.89$)

SO: $O_5^S = \frac{17}{13}aQ + \frac{40}{13}al + \frac{b^2}{5} + b^2 \left[\frac{22Q-40}{11Q+630} + \frac{9Q-40}{9Q-170} \right]$
(단, $1.81 \leq Q \leq 4.44$)

4개 및 5개 링크 네트워크에 대한 총운행비용이 산정되면 운행비용 절감편익은 다음과 같이 계산된다.

☑ 운행비용 절감편익(UE상태)

$VOCS^U = O_4^U - O_5^U$

여기서,

- O_4^U = 링크 4개일 때, UE의 총운행비용
- O_5^U = 링크 5개일 때, UE의 총운행비용

☑ 운행비용 절감편익(SO상태)

$VOCS^S = O_4^S - O_5^S$

여기서,

- O_4^S = 링크 4개일 때, UE의 총운행비용
- O_5^S = 링크 5개일 때, UE의 총운행비용

② 운행비용 절감편의 결과

본 연구에서는 네트워크 규모가 편의에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 규모(링크길이)에 따른 운행비용 절감편의를 산정하였다.

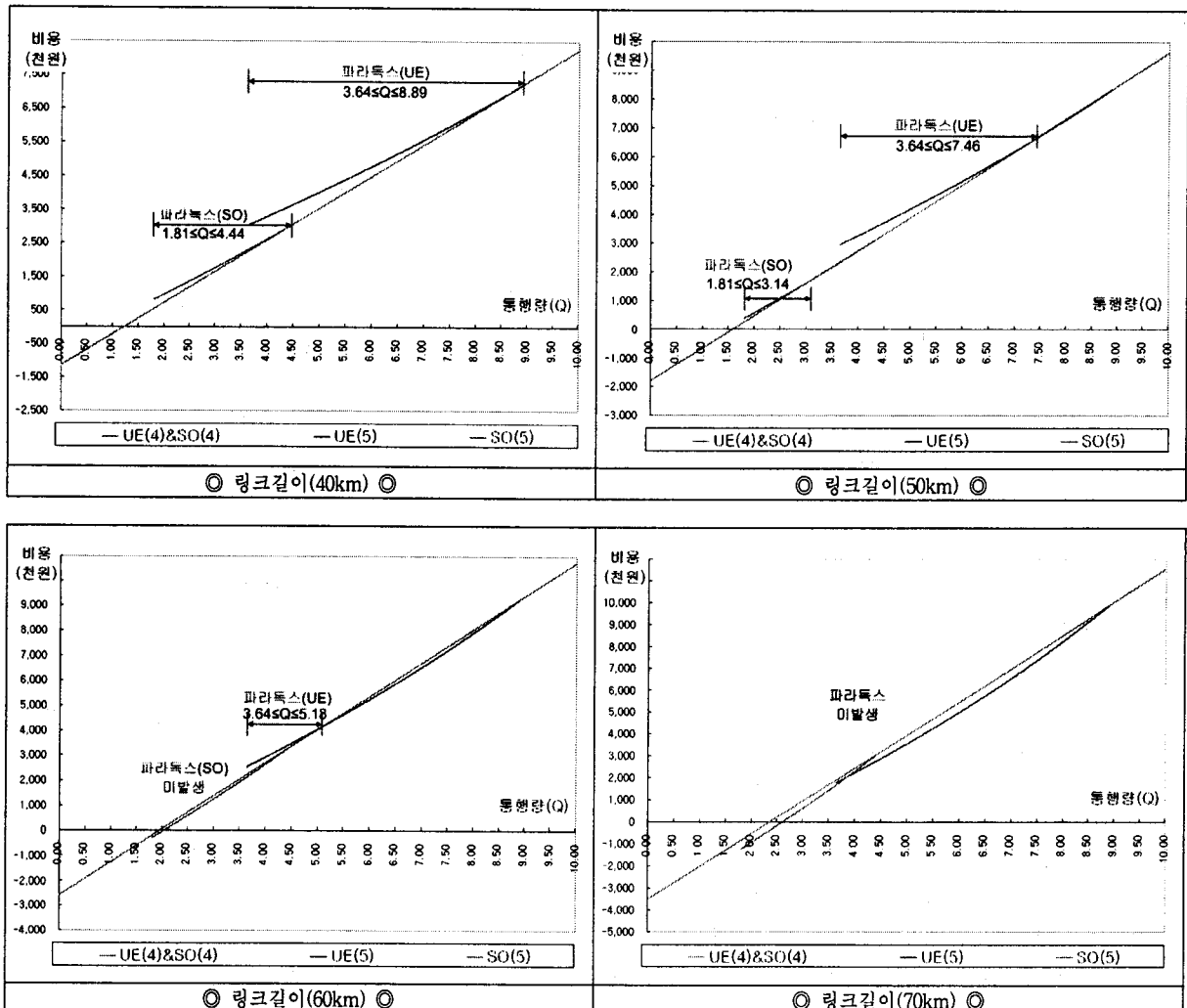
분석결과는 <그림 6>과 같으며, 링크 규모별 통행배정별 파라독스 발생결과는 <표 3>과 같다.

통행시간 절감편의과는 달리 운행비용 절감편의의 경우, 링크 길이가 40km인 경우는 UE 상태뿐만 아니라 SO상태에서도 파라독스가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

링크 규모에 따른 파라독스를 살펴보면, UE 상태 및 SO상태 모두 링크가 커질수록 파라독스 발생구간이 감소하여 파라독스가 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

<표 3> 링크 규모에 따른 운행비용 측면의 파라독스 분석결과

구분		링크길이	40km	50km	60km	70km
이용자 평형 상태 (UE)	통행배정 가능범위		$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$
	파라독스 발생범위		$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 7.35$	$3.64 \leq Q \leq 5.13$	-
	파라독스 발생률(%)		100.0%	70.7%	28.4%	0.0%
체 계 최 적 상 태 (SO)	통행배정 가능범위		$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$
	파라독스 발생범위		$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 3.16$	-	-
	파라독스 발생률(%)		100.0%	51.3%	0.0%	0.0%



<그림 6> 운행비용 산정결과

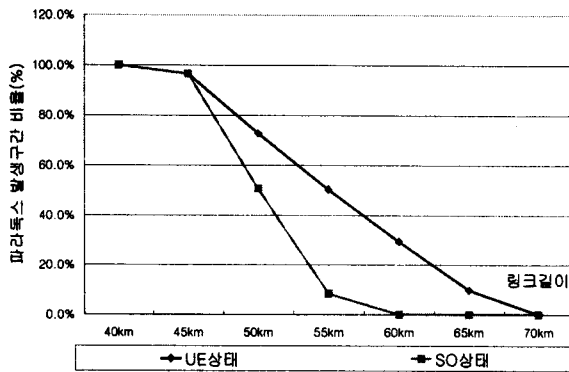
사용자 평형상태의 경우는 70km 이상에는 파라독스가 모두 사라졌으며, 체계최적의 경우는 60km 일 때부터 파라독스가 사라지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 체계최적 상태의 경우가 네트워크 규모에 의한 운행비용 측면의 파라독스 소멸속도가 더 빠르게 나타났다.

4) 총편익 산정결과

앞서 구간 통행시간 절감편익과 운행비용 절감편익의 합계인 총편익을 산정하여 통행배정 모형별, 네트워크 규모별 파라독스 발생행태를 살펴보았다. 분석결과는 <표 4>와 같다.

총편익 측면의 파라독스는 이용자 평형상태 및 체계최적 상태 모두 네트워크 규모가 커짐에 따라 감소하였으며, 체계 최적 상태일 때 파라독스가 더 빨리 완화되었다.

이용자 평형상태의 경우는 링크길이가 70km가 되면 파라독스가 완전 소멸되었으며, 체계 최적상태의 경우는 링크길이가 60km가 되면 파라독스가 발생하지 않았다.



<그림 7> 총편익 측면의 파라독스 비율

<표 4> 총 편익 측면에서의 파라독스 분석결과

구 분		링크길이			
		40km	50km	60km	70km
이용자 평형 상태 (UE)	통행배정 가능범위	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 8.89$
	파라독스 발생범위	$3.64 \leq Q \leq 8.89$	$3.64 \leq Q \leq 7.46$	$3.64 \leq Q \leq 5.18$	-
	파라독스 발생률(%)	100.0%	72.8%	29.3%	0.0%
체 계 최 적 상태 (SO)	통행배정 가능범위	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 4.44$
	파라독스 발생범위	$1.81 \leq Q \leq 4.44$	$1.81 \leq Q \leq 3.14$	-	-
	파라독스 발생률(%)	100.0%	50.6%	0.0%	0.0%

3. 해결방안 모색

이상의 분석결과를 토대로 경제성 분석과정에서 발생하는 브레이크 파라독스를 완화시키기 위한 방안들을 검토해 보았다.

1) 통행량 측면

다양한 조건에 대한 경제성 분석결과, 동일한 네트워크에 대해서도 브레이크 파라독스는 일정 통행량 조건 내에서만 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 대안이다.

2) 통행배정 기법 측면

브레이크 파라독스의 발생원인에서도 알 수 있듯이 이용자들이 사용자 평형이 아닌 체계 최적 상태로 경로를 선택하게 되면 파라독스가 발생하지 않게 된다는 것이 일반적인 통념이다. 통행시간을 기준으로 산정되는 통행시간 절감편익의 경우, 체계 최적 상태인 경우에 파라독스가 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

즉, 통행배정 방법을 사용자 평형이 아닌 체계 최적 배정모형을 활용하면 파라독스를 완화시킬 수 있을 것이다.

그러나 운영비용 절감편익의 경우는 체계 최적상태인 경우도 네트워크 규모에 따라서 파라독스가 발생하였다. 이런 경우 총 편익 측면에도 영향을 미쳐 전체 편익산정 과정에도 파라독스가 나타나게 된다.

따라서 체계 최적 상태의 배정기법을 적용하는 경우에도 경제성 분석과정에서의 파라독스는 계속 발생할 수 있는 가능성이 있다.

3) 영향권 설정 측면

경제성 분석과정의 파라독스 발생 분석결과에 의하면 링크길이가 커지는 경우 이용자 평형 및 체계 최적 상태 모든 경우의 파라독스가 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 경제성 분석과정에서 파라독스가 발생하는 경우 경제성 분석 대상 영향권을 확대하면 파라독스를 극복할 수 있을 것이다.

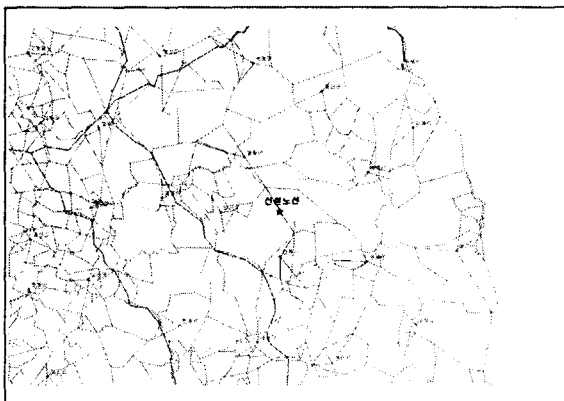
IV. 사례분석

1. 분석대상

실제 대규모 네트워크를 대상으로 본 연구에서 검토된 내용을 검증하기 위해 사례분석을 수행하였다.

사례분석 대상은 강원도 영월군 하동면과 경북 영주시 부석면을 연결하는 가상의 국도 신설 사업으로 하였다.

- 사업구간 : 영월군 하동면~영주시 부석면
- 도로연장 : L=20.0km
- 사업규모 : 왕복 4차로



<그림 8> 사례분석 네트워크

가상 사례분석 자료는 KTDB에서 배포된 전국 247개 존에 대한 2006년 네트워크 자료 및 O/D 자료를 활용하였다.

2. 방안별 분석결과

1) 브레이크 파라독스 발생

현행 예타지침(제4판)을 적용하여 사례 대상 지역에 대한 사용자 평형 배정기법을 적용한 분석자료를 근거로 경제성 분석결과, 통행량이 2006년 현재보다 2배가 되는 경우 파라독스가 발생하는 것으로 나타났다.

2) 파라독스 해결방안 검토

본 연구에서는 다음 기법을 종합적으로 적용하여 경제성 분석에서의 브레이크 파라독스 해결을 모색하였다.

① 통행량 측면 검토

전체 통행량을 -20%~+20%까지 조정하여 분석결과를 검토함.

② 통행배정 기법 측면 검토

통행배정 기법을 체계 최적 모형을 적용하여 분석결과를 검토함.

③ 영향권 설정 측면 검토

경제성 분석을 위한 경제성 분석 영향권 범위를 반경 40km~120km사이를 적용하여 분석결과를 검토함.

3) 분석결과

다양한 분석방안에 대한 사업시행에 따른 편익 분석결과는 <표 5>, <표 6>과 같다.

통행량 측면을 살펴보면, 통행량이 현재보다 감소하는 경우와 증가하는 경우 모두 파라독스가 완화되었다. 특히, 통행량이 감소하여 현재 수준의 80%정도가 되는 경우와 증가하여 110%가 되는 경우, 경제성 분석과정에서 생기는 파라독스가 사라지는 것을 확인할 수 있다.

<표 5> 사용자 균형 상태 분석결과

(단위 : 억원/년)

구분		영향권	반경 40km	반경 60km	반경 80km	반경 100km	반경 120km
통행량 (80%)	운행비용 절감편익		19.6	29.4	38.6	47.6	50.8
	시간비용 절감편익		21.8	38.6	60.0	84.3	86.3
	합 계		41.4	67.9	98.6	131.9	137.1
통행량 (90%)	운행비용 절감편익		0.5	-4.2	38.4	61.8	71.7
	시간비용 절감편익		-16.4	-23.1	34.5	84.8	105.6
	합 계		-15.9	-27.3	72.9	146.6	177.3
통행량 (100%)	운행비용 절감편익		-5.8	-3.8	61.7	86.7	91.5
	시간비용 절감편익		-45.2	-40.1	46.3	84.8	95.5
	합 계		-50.9	-43.9	108.0	171.5	186.9
통행량 (110%)	운행비용 절감편익		46.6	31.8	60.5	65.1	77.6
	시간비용 절감편익		44.2	29.3	82.3	83.4	103.3
	합 계		90.8	61.1	142.8	148.5	180.9
통행량 (120%)	운행비용 절감편익		29.4	31.3	113.7	132.4	158.0
	시간비용 절감편익		4.0	9.5	151.6	173.7	258.9
	합 계		33.4	40.9	265.3	306.2	416.8

<표 6> 체계 최적 상태 분석결과

(단위 : 억원/년)

구분		영향권	반경 40km	반경 60km	반경 80km	반경 100km	반경 120km
통행량 (80%)	운행비용 절감편익		19.3	29.3	39.7	45.9	49.8
	시간비용 절감편익		21.2	38.5	61.3	76.6	87.5
	합 계		40.5	67.8	101.0	122.5	137.3
통행량 (90%)	운행비용 절감편익		0.8	-3.9	38.3	59.4	70.3
	시간비용 절감편익		-15.8	-22.0	33.6	78.3	96.5
	합 계		-15.0	-25.8	71.9	137.7	166.7
통행량 (100%)	운행비용 절감편익		-5.6	-4.3	62.6	88.1	89.2
	시간비용 절감편익		-44.9	-40.5	48.8	92.6	93.7
	합 계		-50.6	-44.8	111.3	180.7	183.0
통행량 (110%)	운행비용 절감편익		47.6	31.9	62.7	69.2	87.0
	시간비용 절감편익		45.5	29.0	84.8	79.3	136.6
	합 계		93.1	60.9	147.6	148.5	223.6
통행량 (120%)	운행비용 절감편익		28.3	31.5	114.9	134.7	145.6
	시간비용 절감편익		2.5	11.0	151.7	213.8	213.8
	합 계		30.7	42.5	266.6	348.6	359.3

통행배정 기법 측면을 검토하면, 사용자 평형 상태나 체계 최적 상태 모두 파라독스 발생 형태 및 완화 형태가 비슷한 모양을 보이고 있어 대규모 네트워크에 대해서는 배정기법이 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

주목할 만한 점은 배정기법을 달리해도 전체 편익 산정결과와는 서로 유사한 결과를 제시한다는 것이다. 따라서 예타지침(제4판)에서 제시하는 사용자 평형 배정기법 이외에도 체계 최적 배정기법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

영향권 설정을 살펴보면, 파라독스 발생시 배정기법에 상관없이 소규모 영향권에서 영향이 큰 것으로 나타났다. 즉, 영향권이 40~60km인 경우 경제성 분석에서의 파라독스가 발생한 것을 확인할 수 있다. 영향권이 60km를 넘어서게 되면 이와 같은 파라독스가 사라지는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 연구의 한계점

본 연구에서는 교통 분야에 잘 알려진 브레이크 파라독스가 경제성 분석과정에 미치는 영향을 살펴보고 개선방안을 검토하였다.

이를 확인하기 위해 간단한 예제 네트워크에 대해 통행량 수준 및 통행배정 기법, 네트워크 규모에 따른 대표적인 편익항목인 통행시간 절감편익과 운행비용 절감편익의 변화를 살펴보았다.

브레이크의 네트워크에 대한 분석결과, 경제성 분석 상에서 파라독스가 발생하는 경우는 교통량 수준이 특정 조건을 만족하는 경우에만 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 배정기법에서는 사용자 평형보다는 체계 최적 상태의 경우가 파라독스의 발생을 줄이고, 파라독스의 완화 속도가 빠르다는 것을 알 수 있었다.

또한 네트워크 규모도 파라독스에 영향을 미치면 네트워크가 커지게 되면 파라독스가 사라지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과의 현실 적용 가능성을 검토하기 위해, 대규모 네트워크에서 가상의 국도건설 사업을 대상으로 사례분석을 수행하였다. 경제성 분석 과정에서의 브레이크 파라독스가 발생하는 경우를 기준으로 파라독스 완화를 위한 기법을 적용해 보았다.

대규모 네트워크에서의 통행배정 기법은 파라독스 완화에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 보여주었다. 즉, 체계 최적 모형을 적용한 경우에도 특별한 파라독스의 완화효과가 나타나지 않았다. 특이한 점은 통행배정 기법별 편익 총량은 서로 유사한 수치를 보여 경제성 분석과정에서 다양한 배정기법의 적용 가능성을 보여주었다.

한편, 교통량 수준 및 영향권 범위에 대해서는 파라독스가 민감하게 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 교통량의 경우는 임의적인 수정이 불가능함으로 경제성 분석 상에 파라독스가 발생하는 경우, 문제점 해결방안으로 영향권의 재설정 방안을 검토하는 것이 바람직하다.

이 경우 파라독스를 없애기 위해 너무 광범위하게 영향권을 설정하게 되면 편익이 과대 추정될 위험성이 있으므로 분석대상 특징에 따라 신중한 선택이 필요하다.

본 연구의 수행 중에 나타난 한계점은 다음과 같다.

첫째, 브레이크 파라독스는 네트워크의 형태에도 영향을 받는데 본 분석에는 이에 대한 검토가 이루어지지 못한 한계점이 있다.

둘째, 보다 다양한 사례분석을 통해 경제성 분석과정에서의 파라독스 해결을 위한 적정 영향권 산정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

마지막으로 총량적인 분석이 아닌 보다 미시적인 해석을 통해 경제성 분석과정에서의 브레이크 파라독스 해결방안에 대한 검토가 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. Igal Milchtaich(2003), "Network topology and the efficiency of equilibrium", Games and Economic Behavior, Vol. 57, pp. 321-346

5. Sheffi, Y.(1985), "Urban Transportation Network", Prentice Hall

6. 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

7. 도로·철도 부분사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제4판), 한국개발연구원, 2004

8. 도로사업 투자분석 기법정립, 국토연구원, 1999