

■ 論 文 ■

# 브라이스역설에 대한 실증적 검증

(남산2호터널 폐쇄사례를 중심으로)

Emprical Tests of Braess Paradox

(The Case of Namsan 2nd Tunnel Shutdown)

**엄진기**

(서울시정개발연구원 연구원)

**황기연**

(서울시정개발연구원 연구위원)

**김익기**

(한양대학교 교통공학과 부교수)

## 목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 배경 및 목적
  - 2. 연구방법론
- II. 브라이스역설의 주요내용
- III. 역설의 검증 : 남산2호터널 폐쇄사례
  - 1 사례지역현황
- 2. 폐쇄효과예측 및 브라이스역설 검증방법론
- 3. 분석결과
- 4. 실측치와의 비교
- IV. 결론
- 참고문헌

## 요 약

본 연구의 목적은 도시 가로망의 일부구간을 증설(폐쇄)하였을 경우 가로망의 통행시간이 증가(감소) 한다는 브라이스역설 이론이 실제 가로망상에서 구현되는지 입증하는데 있다. 사례연구를 위해 1999년2월 보수공사를 위해 3년간 폐쇄된 서울시 도심의 남산2호터널 구간을 선정하였고, 폐쇄시 서울시 전체가로망과 혼잡통행료 징수구간에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 서울시의 교통혼잡관리를 위해 개발된 SECOMM모형을 효과예측을 위해 활용하였고, 예측의 정확성을 검증하기 위해 이용자균형(UE:user equilibrium) 상태와 체계최적(SO:system optimum) 상태에서의 총통행시간의 차이를 비교하였다. 또한 해당구간에 대한 서울시의 폐쇄전후 모니터링 조사를 참조로 브라이스역설이 모형상에서 뿐만 아니라 실제가로망상에서 구현되는지도 함께 비교 검증하였다.

분석결과 브라이스의 가정대로 가로망상의 통행수요가 고정되어 있을 경우, 남산1,3호터널의 혼잡통행료를 징수하는 상황에서 2호터널을 폐쇄하면 서울시 전체가로망의 속도가 21.95km/h에서 22.21km/h로 개선되어 브라이스역설 현상이 입증되었다. 반면, 혼잡통행료를 면제한 상황에서는 속도가 저하되는 것으로 나타나 브라이스역설 현상은 혼잡통행료 징수와 같은 주변 교통체계의 변화와 밀접하게 관련이 있는 것으로 나타났다. 한편, 가로상 통행수요가 가변적인 상황하에서는 서울시통행속도가 거의 변화가 없는 것으로 나타나 브라이스역설은 매우 제약적 환경에서 관측되어진다는 점을 확인하였다.

예측의 정확성에 대한 이론적 검증결과 UE의 평균통행시간이 SO의 평균통행시간에 비해 모두 크게 나타나서 결과가 이론적으로 정확함이 검증되었고 혼잡통행료 징수시 SO의 평균통행시간이 미징수시의 SO보다 적게 나타나 남산1,3호터널의 혼잡통행료를 지속적으로 징수하는 것이 바람직한 것으로 평가되었다. 한편, 서울시의 남산2호터널 주변도로에 대한 사후모니터링 결과 평균속도가 폐쇄전 29.53km/h에서 폐쇄후 30.37km/h로 개선되어 브라이스역설 현상이 구현되고 있음을 현실적 관측치로 검증할 수 있었다.

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

서울시에서는 99년2월 남산2호터널이 보수공사를 위해 향후 3년간 폐쇄 조치됨에 따라 대체로 확보를 위해 인근에 있는 남산1, 3호 터널의 혼잡통행료 징수를 중단해야 한다는 논의가 일어났다. 찬성하는 측의 논리는 남산의 혼잡통행료를 계속 징수하면 남산2호 터널을 이용하던 통행이 다른 도로로 우회하기 때문에 서울시 전체적으로 혼잡이 극심해진다는 것이었다. 한편, 반대측의 논리는 남산2호터널 때문에 1,3호 터널의 혼잡통행료 징수를 중단하면 2호터널 우회 차량뿐 아니라 새로운 승용차 수요의 유발로 도심의 교통은 더욱 혼잡해진다는 것이었고, 또한 2호터널의 폐쇄는 해당 링크의 특성이 브라이스역설상의 새로이 첨가된 링크의 특성과 유사하여 폐쇄하더라도 전체 통행량에 대한 영향이 거의 없다는 것이었다.

본 연구의 목적은 도시에서 도로의 일부를 폐쇄할 경우 브라이스역설이 주장한 상황이 실제적으로 발생하는가 하는 것을 실증적으로 검증하는데 있다. 검증 결과 폐쇄하여도 도로교통에 영향이 없다면 이를 근거로 남산1,3호 터널의 혼잡통행료는 지속시킬 필요가 있다고 판단된다. 또 한편으로는 기존 가로의 링크중에서 전체적인 효율에 기여도가 낮은 링크를 찾아내어 타 용도로 전환시키거나 도로의 폐쇄, 차량통행의 통제 및 통행료 부과 등의 교통정책을 도입하여 도시내 도로정비가 도로의 공급에만 국한하지 않고 다양한 정책 대안에 의해 교통체계의 효율화를 달성할 수 있다는 가능성을 현실적 자료에 의한 검증할 필요가 있다고 판단된다. 이와 같은 이론적 분석결과와 실측 자료에 의한 검증은 기존 가로를 폐쇄하는 정책도 하나의 대안으로써 고려될 수 있다는 점을 보여 주어 교통정책결정에서 다양한 시각을 갖는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2. 연구방법론

본 연구의 목적을 달성하기 위한 방법론으로는 사례연구를 택하였고, 사례지역은 위에서 언급된 것처럼 남산2호터널 폐쇄구간을 설정하였다. 폐쇄에 따른

가로망상의 효과분석을 위해서는 '98년에 구축된 서울시교통혼잡관리모형(SECOMM)을 이용하기로 하였다(서울시정개발연구원, 1998). 한편, 2호터널을 폐쇄한 뒤 교통상황에 대한 서울시모니터링자료(서울시, 1999)를 활용하여 실제 상황하에서 예측된 자료가 얼마나 현실을 잘 반영하는지 비교 분석한다.

한편, 브라이스의 역설(Braess, 1968)을 검증하는 과정에 있어서 그가 증명을 위해 가정한 조건들을 연구의 목적을 위해서는 다소 변화시킬 필요가 있을 것으로 판단된다. 첫째, 1) 새로운 링크를 건설하였을 때가 아니고 반대로 기존의 링크를 폐쇄한 경우, 2) 단순한 소규모 가로망이 아닌 많은 O-D 쌍의 교통량이 이용 가능한 현실적 교통망을 적용 등으로 조건을 변화시킨다. 이때 가로망의 통행수요는 고정되어 있다고 가정한다.

본 연구의 구성은 제2장에서 브라이스역설의 내용을 보다 구체적으로 알아보고 역설에 관한 다양한 논의에 대해 소개하고, 제3장에서는 브라이스 역설이 실제 상황하에서 구현되는지 남산2호터널의 폐쇄사례를 통해 분석해 본다. 이를 위해 1절에서는 사례지역을 자세하게 소개하고, 2절에서는 폐쇄에 따른 효과를 예측하기 위해 예측방법론을 제시하고 예측결과의 정확성을 이론적으로 검증하기 위한 검증방법론을 제시하며, 3절에서 예측 및 검증 결과를 분석하며, 4절에서는 관련 가로에 대한 실측자료를 통해 서울시가 로에서 브라이스역설이 실현되는지 검증한다. 제5장에서는 본 연구의 결론으로 매듭 한다.

## II. 브라이스역설(Braess Paradox)의 주요 내용

한 링크에서 속도와 용량의 개선이 오히려 전체적으로 지체를 증가시킬 수 있다. 이와 같은 현상은 1968년 독일의 수학자인 Braess에 의해 수학적으로 입증되었으며, 이전부터 도로교통에서 수시로 인식할 수 있었던 현상이었다.

Pas와 Principio(1997)은 브라이스 역설에 대한 논문에서 이 역설은 총통행수요가 일정한 범위 내에 있을 때에만 실현되고 그 범위는 각 링크의 혼잡함수 값에 의해 결정된다고 주장했다. 다시 말해 통행수요가 지나치게 적거나 지나치게 많은 경우에 역설은 적

용되지 않는다는 것이다.

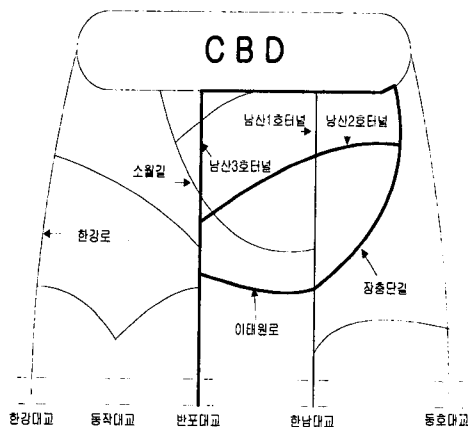
브라이스 역설에 대한 기존의 연구는 대부분 브라이스가 역설을 증명하기 위해 사용했던 상호대칭적 4개 링크를 대상으로 행해졌고, 링크지체함수(link performance function)는 선형함수를 적용하였으며, 노선배정 원칙은 Wardrop의 제1법칙에 의한 통행자 균형상태(traffic user equilibrium)의 교통패턴을 가정하였다. 따라서 이와 같이 특수한 상태에서 설명된 브라이스 역설이 일반적인 상황에서도 쉽게 관측될 수 있는지에 대한 여부는 아직까지 입증되지 않고 있다.

### III. 역설의 검증 : 남산2호터널 폐쇄사례

#### 1. 사례지역현황

##### 1) 사례지역 가로망

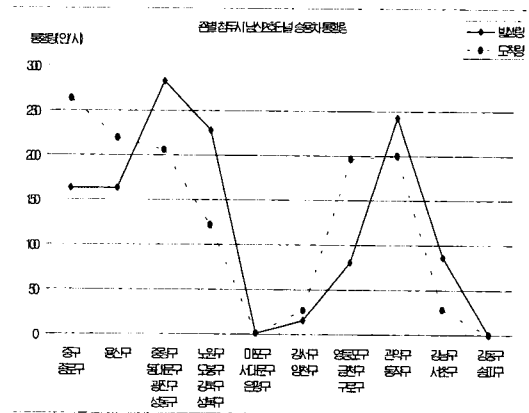
남산2호터널은 <그림 1>에 나타난 것처럼 남산3호터널, 도심가로, 이태원로, 장충단길로 둘러싸인 도로로써 도심으로 향하는 차량들의 우회도로로서의 기능을 갖고 있다. 한편, 남산2호터널은 주변의 4개도로와 함께 브라이스가 실험한 교통망과 같은 형태를 구성하고 있다.



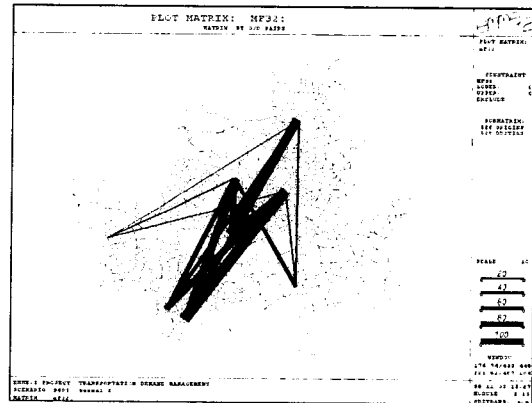
<그림 1> 남산2호터널 주변 가로망도

##### 2) 남산2호터널 통과 통행량 분석

남산2호터널의 통과 통행의 발생 및 도착은 <그림 2>와 같이 동대문구와 관악구 및 동작구에서 가장 많



<그림 2> 남산2호터널 주변 승용차통행 발생·도착량



<그림 3> 남산2호터널 주간 승용차 O/D 희망선도

은 통행발생량을 보이고 있으며, 도착량의 경우 종로, 중구와 용산구, 동대문구에서 많은 도착량을 나타내고 있다.

남산2호터널을 통과하는 주간 통행량을 살펴보면 <표 1>과 같이 동대문, 성동구와 동작, 관악구간의 통행량 구성비가 16.2%로서 가장 큰 것으로 분석되었으며 용산구와 동대문간의 통행량도 10.6%로서 높은 구성비를 보이고 있다.

희망선도의 통행행태를 보면 <그림 3>과 같이 2호터널을 기준으로 대칭적인 형태를 보이고 있는 동작, 관악구와 동대문구간 통행과 용산구와 동대문구간의 통행이 주요 통행축으로 나타나고 있으며 종로, 중구를 중심으로 하는 통행패턴은 남산1,3호터널 통행료 징수에 따른 우회 통행량을 다소 포함하고 있는 것으로 추정된다.

〈표 1〉 남산2호터널 통과 승용차 교통량 구성비

순위	존 PAIR	교통량 (대/시)	구성비 (%)
1	성동, 광진, 동대문, 중랑 ⇔ 동작, 관악	205	16.2
2	용산 ⇔ 성동, 광진, 동대문, 중랑	134	10.6
3	성북, 강북, 도봉, 노원 ⇔ 용산	110	8.7
4	동작, 관악 ⇔ 종로, 중구	104	8.2
5	성동, 광진, 동대문, 중랑 ⇔ 구로, 금천, 영등포	87	6.9
6	용산 ⇔ 종로, 중구	62	4.9
7	종로, 중구 ⇔ 구로, 금천, 영등포	55	4.3
8	구로, 금천, 영등포 ⇔ 성북, 강북, 도봉, 노원	54	4.3

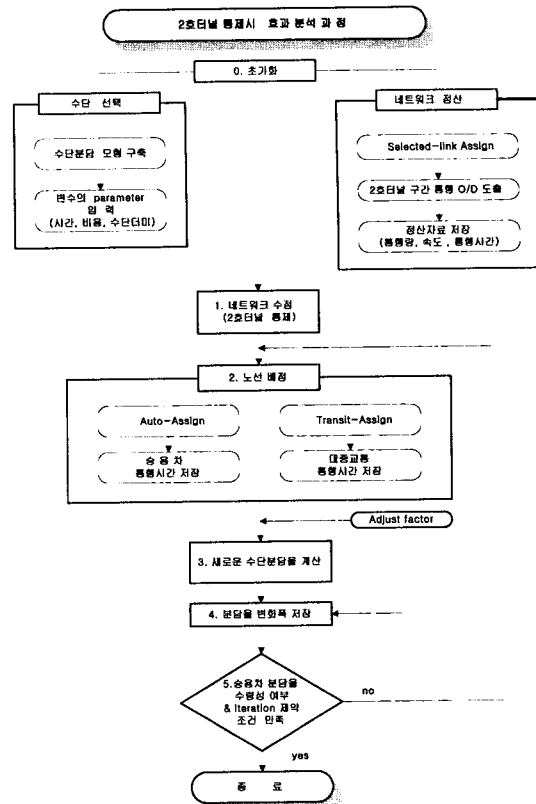
주) 교통량은 '97년 교통센서스결과 구축된 수단별OD중 승용차 수단 사람통행(person trip)에 승용차 평균재차인원(1.45人)을 적용하여 교통량으로 환산하였음.

2. 폐쇄효과예측 및 브라이스역설 검증방법론

1) 터널폐쇄효과 예측방법론

Braess Paradox 현상을 설명하기 위해 제시되었던 가로망에서는 새로운 링크를 추가한 반면, 2호터널은 가로망에서 기존 링크가 폐쇄된 경우다. 따라서 효과분석을 통해 터널의 폐쇄가 서울시 전체 속도를 개선시킨다면 Braess Paradox 현상이 입증됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 확장된 서울시 전체 네트워크차원에서 Braess Paradox의 여부를 검증한다. 또한 본 연구에서는 2호터널 폐쇄에 따른 효과는 1)브라이스의 가정처럼 가로망상의 수요가 고정된 상태와 2)수단전환에 의해 가로상 수요가 변화하는 상태 등 2가지 경우로 구분하여 예측하도록 하였다.

효과예측을 위해서는 SECOMM모형을 활용한다. SECOMM은 수단분담과 노선배정을 결합한 단기교통혼잡관리모형으로서 수요관리 대안별 효과분석 및 단계적으로 교통환경의 변화에 따른 효과를 예측하기 위해 개발된 모형이다. 따라서 SECOMM은 통행환경의 변화에 따라 통행자의 행태변화 분석이 가능하며 네트워크에 반영되어 속도 및 통행시간 변화를 분석할 수 있다(서울시정개발연구원, 1998). 분석과정은 아래의 〈그림 4〉와 같다.



〈그림 4〉 남산2호터널 폐쇄시 SECOMM 효과분석 과정도

우선 가로망상의 통행수요가 변화하지 않는다고 가정할 경우의 분석과정은 초기화 단계에서의 네트워크정산, 2호터널 통제에 따른 네트워크 수정, 수정후 노선배정 등의 3가지 단계만을 수행한다. 분석결과로는 서울시 네트워크의 속도변화가 있으며 서울시 정기속도자료(서울시, 1998) 구분상의 도심, 방사간선, 도시고속도로, 서울시전체지점 등에 대하여 결과를 제시하게 된다.

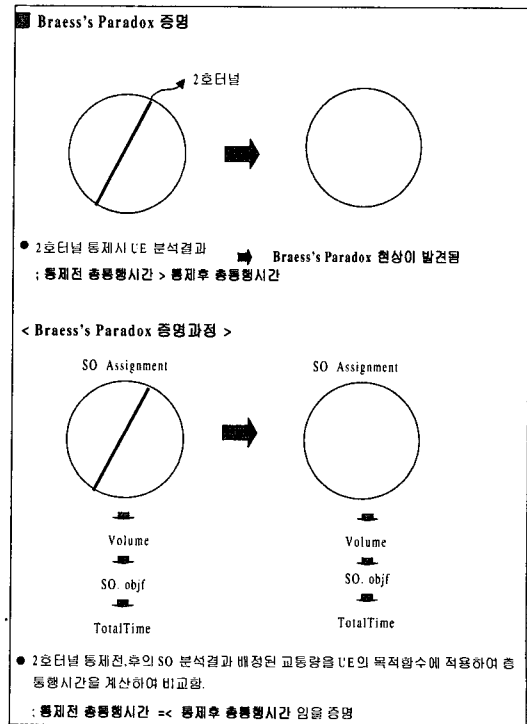
한편 가로망상의 통행수요가 변화한다고 가정할 경우 분석과정은 다소 복잡해진다. SECOMM의 분석과정은 〈그림 4〉와 같이 첫 번째 초기화 단계(단계 0)에서는 수단선택모형의 효용함수에 포함된 변수에 대한 계수 입력, 2호터널 통과O/D 저장 및 터널폐쇄전의 통행량, 속도, 통행시간을 저장한다. (단계 1)에서는 2호터널 폐쇄에 따른 네트워크수정을 (단계 2)에서는 수정된 네트워크를 바탕으로 승용차 및 대중교통 노선배정을 수행하고 각 수단의 평균통행시간을 저장한다. (단계 3)에서는 폐쇄전의 통행시간과 폐쇄후의 통행시간의 변화는 보정계수를 적용하여 수단분담모형에 적용되며 새로운 효용값과 수단분담율을 계산한

다. 단, 수단분담모형은 현재 2호터널을 통행하는 수단별 통과O/D에 대해서만 적용하도록 한다. (단계 4)에서는 분담율의 변화량을 저장하여 수렴조건으로 이용한다. 즉, 2호터널의 통제로 인한 교통체계가 균형을 이루게 되었을 때 분담율의 변화량은 0에 가깝게 되므로 (단계 5)에서는 이들 변화량을 통한 수렴성 여부를 판단하며 주어진 반복횟수에 의해 종료하게 된다. (단계 5)의 종료조건을 만족하지 않을 경우에는 다시 (단계 2)로 환류하여 (단계 5)까지의 과정을 반복하게 된다. SECOMM의 분석결과로는 2호터널 폐쇄시의 수단분담율과 네트워크의 속도변화가 있으며 수단분담율의 수단은 승용차, 택시, 버스, 지하철 등 4개 수단으로 한정하며, 네트워크의 속도 변화는 서울시 정기속도자료의 도심, 방사간선, 도시고속도로, 서울시전체지점 등에 대하여 결과를 제시하게 된다.

2) 브라이스역설 검증 방법론

서울시가 남산2호터널을 폐쇄하기 전과 후의 교통량과 평균속도를 관측한 결과 남산2호 터널 주변의 통행속도가 폐쇄 후 오히려 높아졌음이 밝혀졌다. 이와 같은 현상은 여러 가지 요인에 의해 발생할 수 있을 것이나 본 연구는 남산2호터널이 서울 도로망 상에서 브라이스 역설의 예제 단순 교통망과 유사한 형태를 갖고 있다고 판단하여 남산2호터널의 폐쇄에 따른 속도 증가현상을 브라이스 역설의 한 현상을 설명하는 좋은 예제로 판단하였다. 하지만 이와 같은 현상을 관측치로써 증명하기가 어려워 본 연구에서는 교통망 시뮬레이션을 통해 서울시의 현상이 브라이스 역설에 기인하였음을 증명하고자 한다. 예측의 정확성에 대한 검증은 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 반드시 필요한 절차이다. 따라서 본 연구에서는 현실적 교통패턴을 설명하고자 하는 사용자 균형상태 (UE: User Equilibrium)를 교통망 시뮬레이션 프로그램을 통해 남산2호터널의 폐쇄전과 후를 분석하여 시뮬레이션 분석결과와 폐쇄전과 후의 관측자료인 링크 교통량과 통행속도를 비교하여 모형의 정확성을 검증하였다. 브라이스 역설은 도로망 개선 전과 후를 사용자 균형상태로 노선배정을 하고 체계최적화(SO: System Optimization)의 목적함수를 지표(measurement)를 사용하여 도로망 개선 후의 효과를 비교할 때 교통상태가 더 나빠진 상태로 나타나는 현상이라고 해

석 설명할 수 있을 것이다. 그러므로 교통망 시뮬레이션 결과가 남산2호터널 폐쇄전과 후의 링크 교통량 관측치와 유사할 경우 이 분석결과를 교통체계최적화의 목적함수에 대입하여 총통행시간을 산출하여 그 값이 폐쇄 후에 더 작아지면 브라이스 역설 현상이 발생하고 있음을 설명하는 것이 된다. 이러한 브라이스 역설에 대한 보충적 설명을 위한 분석으로는 Wardrop의 제2법칙에 따라 교통체계최적화 상태의 교통패턴을 남산2호터널 폐쇄 전과 후에 대해 분석하고 그 결과를 역시 교통체계최적화의 목적함수에 대입하여 총통행시간을 산출하여 폐쇄 전과 후의 그 값을 비교하도록 하였다. 이러한 분석은 교통체계최적화로 교통망을 분석할 경우 브라이스 역설의 경우에도 도로망 개선 후에 교통 상태가 좋아지는 것으로 분석됨을 보여주하고자 하는 것이다. 즉 이것은 도로망 개선이 되었어도 도로망을 효율적으로 활용하기 위해서는 정부의 개입에 의해 개별 통행자의 노선선택 행태에 변화를 줄 필요가 있음을 의미하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 남산2호터널의 폐쇄 전과 후의 사용자 균형상태의 교통패턴과 교통체계최적화 상태의 교통패턴을 교통망 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.



<그림 5> Braess Paradox 현상 입증과정

본 연구에서는 <그림 5>와 같이 2호터널 폐쇄전, 후를 UE(User Equilibrium)에 의해 노선 배정한 총통행 시간 결과와 SO(System Optimum)에 의한 총통행시간 결과가 반대현상을 보이게 됨을 보여주고자 하였다. 즉, UE(User Equilibrium)에 의한 총통행시간은 2호터널 폐쇄전에 비해 폐쇄시에 감소를 보이는 반면, SO의 경우에는 폐쇄전이 폐쇄후에 비해 같거나 적은 결과를 보일 수 있음을 보여주고자 한 것이다. 이를 위해 먼저, UE에 의한 노선배정을 수행하여 총통행시간을 비교하도록 하며 다음으로 SO에 의한 노선배정을 수행한다. 일반적으로 UE(User Equilibrium)과 SO(System Optimum)의 목적함수는 식(1)과 식(2)에 의해 표현된다.

$$SO : \min z(x) = \sum_a x_a t_a(x_a) \tag{1}$$

$$UE : \min z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \tag{2}$$

계약조건

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

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

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

SO의 노선배정은 UE의 목적함수 형태로 변환하여 수행하여 질 수 있다. SO의 목적함수 형태인 식(1)을 UE의 비용함수에 한계비용(Marginal Cost)을 적용하여 사용자 균형상태를 구할 경우 실제적인 비용함수에 의한 교통최적화 상태가 됨을 알 수 있다. 이것은 식(3)과 같이 SO의 목적함수를 링크 교통량으로 미분한 값을 UE의 목적함수 식(2)의 링크 통행비용으로 사용할 경우 식(4)와 같이 됨을 알 수 있다.

$$\sum_a x_a t_a(x_a) \text{을 } x_a \text{에 대하여 미분하면} \\ t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a} \tag{3}$$

즉,

$$SO: \min z(x) = \sum_a x_a t_a(x_a) \tag{4} \\ = \sum_a \int_0^{x_a} [t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}] dx_a$$

결과적으로 UE의 목적함수에 한계비용을 고려하여 도출하면 SO의 통행패턴과 같아진다는 의미로 해석된다. 식(3)은 두 부분의 비용의 합을 의미하는데  $t_a(x_a)$ 는 총교통량이  $x_a$ 일 때 추가적인 통행자가 경험하게 되는 링크통행시간이며  $dt_a(x_a)/dx_a$ 는 추가적인 한 통행자가 기존에 링크 a를 이용하던 각각의 통행자에게 부담시키는 통행시간을 의미한다. 본 연구에서는 11개의 차별화된 링크비용함수(BPR식)를 이용하여 식(5)의 형태로 구성하였다.

$$BPRf : t_a = t_0 (1 + \alpha (\frac{v}{c})^\beta) \tag{5}$$

$$t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a} \\ = t_0 (1 + \alpha (\frac{v}{c})^\beta) + v \cdot t_0 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot (\frac{v^{\beta-1}}{c^\beta}) \\ = t_0 [(1 + \alpha (\frac{v}{c})^\beta) + \alpha \cdot \beta \cdot (\frac{v}{c})^\beta] \\ = t_0 [1 + \alpha \cdot (\beta + 1) \cdot (\frac{v}{c})^\beta]$$

식(4)에 의해 노선배정(Assignment)을 수행하면 SO의 통행패턴을 가진 교통량이 네트워크에 배정되게 되며 이렇게 구한 링크별 교통량은 UE의 목적함수에 다시 입력되어 총통행시간을 계산하게 된다. 따라서 2호터널 폐쇄전, 후의 UE 와 SO의 총통행시간을 비교하므로써 브라이스 역설과 관련된 현상을 체계적으로 설명하고자 한다.

### 3. 분석결과

#### 1) 폐쇄시 교통상황변화 예측

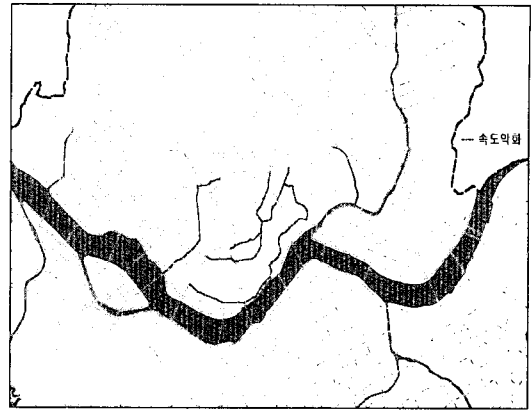
##### (1) 가로상 통행수요 불변시

남산2호터널 차량운행 폐쇄시 통행속도 변화는 1,3호터널 혼잡통행료 징수시와 징수를 중단하였을 경우등 2가지 상황을 가정하여 분석하였다. 분석결과 는 <표 2>와 <그림 6>, <그림 7>과 같다.

통행료징수 유지시에는 도심의 속도가 21.05km/h에

서 20.98km/h로 변화함에 따라 -0.3%의 속도저하가 예상되나 방사간선, 도시고속도로 및 서울시 전체 속도가 다소 향상되는 결과를 보이는 것으로 예측되었다. 이는 가로망이 상당수준 형성된 도심가로에서 도로의 추가적인 공급이 오히려 교통소통에 비효율을 야기할 수 있다는 브라이스 역설 현상으로 추정된다.

반면, 통행료 징수를 하지 않았을 경우에는 도심의 속도가 21.05km/h에서 20.46km/h로 변화함에 따라 0.59km/h(-2.8%) 감소하는 것으로 분석되었으며, 서울시 전체통행속도는 21.95km/h에서 21.92km/h로 0.03km/h의 통행속도의 저하를 가져오는 것으로 예측되었다. 이러한 서울시 통행속도 저하는 통행료 징수를 하지 않음에 따른 유발수요(통과통행의 유입, 승용차 수단으로의 전이)를 발생시켜 장기적으로 더욱 악화될 수 있으며 혼잡통행료 시행전의 서울시 속도수준으로 떨어질 가능성이 높다. 따라서 2호터널 통제하에서 기존 남산1,3호터널 혼잡통행료의 징수여부는 도심통행속도 및 서울시 통행속도에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

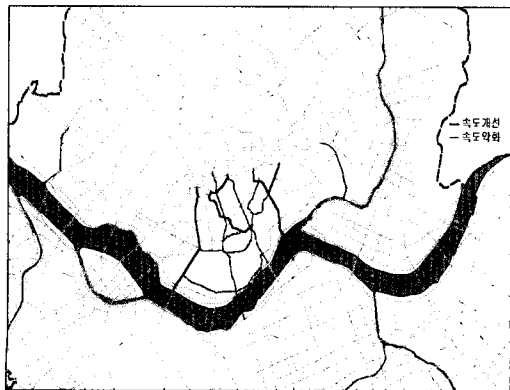


〈그림 7〉 통행료징수 및 2호터널 폐쇄시

〈그림 6〉은 2호터널 폐쇄시 기존에 징수하였던 혼잡통행료를 받지 않았을 경우를 예측한 것으로서 남산1,3호터널과 연결된 교통축의 통행속도는 저하되는 것으로 나타나고 있다. 즉, 3호터널과 연결된 반포대교와 1호터널과 연결된 한남대교등 속도가 저하되고 있다. 반면, 통행료 미징수시 도심진입의 우회도로로 이용되던 소월길과 동호대교와 금호터널 연결하는 동호로축, 한강대교와 도심을 연결하는 한강로축등은 속도개선이 이루어지는 것으로 분석되었다. 그러나 이러한 일부구간의 속도개선은 통행료를 받지 않음에 따라 도심을 비롯한 서울시 전체가로의 속도저하를 가져오기 때문에 바람직한 현상으로 보기는 어렵다.

〈표 2〉 남산2호터널 차량운행 폐쇄시 속도변화 예측

구분	평균 속도(km/h)						
	현재 속도	남산 2호터널 통제					
		혼잡통행료 징수			혼잡통행료 없음		
속도	속도변화	증감율	속도	속도변화	증감율		
도심	21.05	20.98	-0.07	-0.3	20.46	-0.59	-2.8
방사간선	21.50	21.91	+0.41	1.9	21.54	+0.04	0.2
도시고속	36.68	37.75	+1.07	2.9	36.45	-0.23	-0.6
서울시	21.95	22.21	+0.26	1.2	21.92	-0.03	-0.2



〈그림 6〉 통행료 없음 및 2호터널 폐쇄시

〈그림 7〉은 통행료를 징수한 상태에서 2호터널을 통제하였을 경우로서 2호터널과 평행한 인접도로 축의 속도가 저하되는 것으로 분석되었는데 마포대교와 도심을 연결하는 마포대로축과 이태원로, 다산로, 금호동길, 독서당길등이 이에 해당되는 것으로 나타났다. 통행료 징수를 지속함에 따라 주변가로의 속도는 저하되고 있지만 그 폭이 크지 않고 오히려 서울시 전체적으로는 속도가 개선되는 것으로 추정되어 체계 최적화에 이바지하는 것으로 판단된다.

(2) 가로상 통행수요 가변시

앞서 언급한 바와 같이 SECOMM은 수단분담모형과 노선배정의 모형의 결합모형으로서 교통상황 변화시 상호 영향을 반영하는 것이 특징이다. 수요가 고정된 상태에서 2호터널의 통제가 통행시간의 감소를 가져오므로 SECOMM은 이를 수단분담모형에 반

영하여 <표 3>과 같이 승용차의 수단분담율이 다소 증가하며 대중교통의 수단 분담율은 감소하는 결과를 보이고 있다. SECOMM의 분석결과 도로용량의 감소에도 불구하고 가로상 통행량이 증가했다는 사실은 간접적으로 Braess Paradox현상이 초래됨을 설명하고 있다.

<표 3> 2호터널 폐쇄시 수단분담율 변화

구 분	'99분담율	2호터널 폐쇄시	
		예측분담율	증감(%)
승용차	19.61	19.64	+0.03 (+0.18)
택시	9.23	9.23	0.0 (0.0)
버스	28.77	28.75	-0.02 (-0.04)
지하철	33.8	33.79	-0.01 (-0.01)

주) '99년 분담율은 서울시 예측 분담율임('98.6 서울시교통관리실)

그러나 <표 4>는 2호터널의 폐쇄가 시스템의 향상을 가져옴에 따라 다소 증가된 승용차 수요가 네트워크의 속도를 전반적으로 떨어뜨리는 결과를 보이고 있다. 이러한 속도 감소정도는 서울시 전체적으로 0.05km/h로써 매우 미미한 수준이지만 브라이스 역설과 같은 현상이 분석되었으며 이것은 도로의 통행 속도 향상으로 대중교통에서 승용차로의 전환이 브라이스 역설의 현상을 상쇄시킬 정도의 영향 규모는 되지 않는 것으로 해석될 수 있을 것이다.

<표 4> 2호터널 폐쇄시 가로별 속도변화(통행료징수시)

구분	'98년속도 (km/h)	2호터널 폐쇄시	
		속도	감소(%)
도심	20.18	19.30	-0.88 (-4.37)
방사간선	23.97	23.62	-0.35 (-1.48)
도시고속	42.54	41.44	-1.10 (-2.59)
서울시	25.19	25.14	-0.05 (-0.21)

주) 현재 속도는 '98년 정기속도자료의 구간 운행속도임.

2) 브라이스역설 검증결과

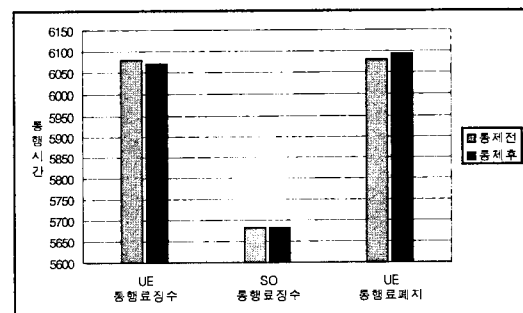
<표 5>와 <그림 8>는 2호터널 폐쇄에 따른 UE와 SO의 통행시간비교 결과로서 2호터널 폐쇄시에 1,3호터널 혼잡통행료를 계속 징수할 경우 Braess Paradox현상이 발생하는 것으로 분석되었다. 즉, 통행료 계속 징수시 UE에 의한 통행시간비교에서 폐쇄

전보다 폐쇄후의 통행시간이 감소하는 결과를 보이고 있으며 SO의 통행시간은 폐쇄전·후에 변화가 없음을 보이고 있다. 반면, 통행료를 폐지할 경우 폐쇄전에 비해 폐쇄후의 UE 통행시간이 증가함에 따라 Braess Paradox현상은 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 혼잡통행료 징수로 우회하는 차량이 남산2호터널을 이용하면서 발생하는 현상으로 판단된다. <표 6>은 2호터널 폐쇄전 혼잡통행료 징수가 시스템 차원에서 효과적임을 보여주는 것으로 SO의 통행시간이 징수전에 비해 징수후에 감소하는 결과를 나타내고 있다. 따라서 혼잡통행료의 징수가 2호터널의 Braess Paradox현상에 영향을 미치고 있으며, 2호터널의 통제는 혼잡통행료 징수효과를 보다 극대화하고 있는 것으로 판단된다.

따라서, 2호터널의 폐쇄에 의해 혼잡통행료를 폐지해야 한다는 주장에 대해 오히려 혼잡통행료 징수가 바람직하다는 결론을 내릴 수 있다.

<표 5> 남산2호터널 폐쇄시 UE와 SO상태의 평균통행 시간비교

구 분		1,3호통행료징수시		1,3호통행료징수중단시	
		2호터널 폐쇄전	2호터널 폐쇄후	2호터널 폐쇄전	2호터널 폐쇄후
통행수요 불변시	UE	>	<	<	<
	SO	≤	<	<	<
통행수요 변화시	UE	<	<	<	<
	SO	<	<	<	<



<그림 8> 2호터널 폐쇄전·후 UE와 SO의 통행시간 변화도

<표 6> 남산1,3호터널 혼잡통행료 징수에 따른 SO의 평균통행시간 비교(2호터널 폐쇄전) (단위:분)

구 분	통행료 징수전	징수후	변화(%)
총통행시간	5,764	5,682	-82 (-1.42)



#### 4. 실측치와의 비교

서울시에서는 남산2호터널이 폐쇄되기 시작한 1999년 2월 21일 이전인 18일과 이후인 22일, 23일 오전, 낮, 오후로 나누어 폐쇄시 효과를 비교하기 위해 주변가로에 대한 전후 교통량 및 속도조사를 시행했다(서울시, 1999). 조사결과 남산2호터널의 폐쇄가 주변도로에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

남산2호터널을 이용하던 교통량은 남산3호터널, 이태원로, 경리단길 등 3개 인접우회도로 42.4%가 우회한 것으로 나타났고, 나머지는 기타 우회도로 또는 버스나 지하철로 수단을 전환한 것으로 추정된다. 한편, 장충단길은 2호터널 진출입교통량이 감소됨에 따라 교통량이 감소되었으며, 2호터널과 직접적으로 연관성이 적은 1호터널의 경우 오히려 통행량이 약간 감소되었다(서울시, 1999).

속도변화를 보면 장충단길은 교통량감소로 속도가 9.5%나 개선되었으며, 남산3호터널은 교통량이 증가했음에도 속도가 8.5%나 개선되었다. 그러나 교통량이 늘어난 이태원로와 경리단길의 속도는 상당히 악화된 것으로 나타났다. 우회도로 전체로 볼 때 거의 변화가 없는 것으로 나타나서, 브라이스역설이 실증적으로 검증되는데 중요한 참고자료가 될 것으로 보인다(〈표 7〉 참조). 단, 앞에서 분석결과로 제시한 서울시 통행속도는 도로 기능 및 위치별로 서울시 전체 가로의 평균속도를 계산한 것으로서 실측조사와 직접적으로 비교하기가 어렵지만 실측결과와 분석결과를 통해 브라이스역설 현상이 입증되었다.

#### IV. 결론

본 연구의 목적은 도시 가로망의 일부구간을 증설(폐쇄)하였을 경우 가로망의 통행시간이 증가(감소)한다는 브라이스역설 이론이 실제 가로망상에서 구현되는지 입증하는데 있다. 사례연구를 위해 1999년 2월 보수공사를 위해 3년간 폐쇄된 서울시 도심의 남산2호터널 구간을 선정하였고, 폐쇄시 서울시 전체 가로망과 혼잡통행료 징수구간에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다.

분석결과 브라이스의 가정대로 가로망상의 통행수요가 고정되어 있을 경우, 남산1,3호터널의 혼잡통행료를 징수하는 상황에서 2호터널을 폐쇄하면 서울시 전체가로망의 속도가 개선되어 브라이스역설 현상이 입증되는 것으로 나타났다. 반면, 혼잡통행료를 면제한 상황에서는 반대여서 브라이스역설 현상은 혼잡통행료의 존재유무와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 한편, 가로상 통행수요가 가변적인 상황하에서는 서울시통행속도가 거의 변화가 없는 것으로 나타나 브라이스의 수요불변 가정이 역설의 실현여부와 관련이 있는 것으로 나타났다.

관측결과 서울시는 남산2호터널 폐쇄 전에 비해 폐쇄 후의 관측 통행시간이 1.37% 개선되었으며, 교통망 시뮬레이션 분석에 있어서 폐쇄 후가 폐쇄 전보다 이용자 균형상태(UE: User Equilibrium)에서 총통행시간이 적어져서 브라이스 역설 현상이 실제적 상황에서 관측될 수 있음을 본 연구는 보여 주었다. 이것은 남산2호터널의 공사가 완료된 후 개통하기 전에 남산2호 터널에 대한 통행요금 징수, 차량 통행의 통제, 용도의 전환 등 특별한 교통정책으로 정부가 개입하여야만 남산2호터널 개통 후 브라이스 역설에

〈표 7〉 남산2호터널 폐쇄전·후 주변도로 통행속도 변화 (실측자료)

도로	폐쇄전			폐쇄후			전후대비증감(%)
	도심방향	외곽방향	양방향평균	도심방향	외곽방향	양방향평균	
남산1호터널 (한남대교남단~주차동)	38.25	27.34	30.62	42.94	20.67	27.91	-2.71 (-8.85)
남산3호터널 (반포대교남단~회현동)	35.56	30.01	31.87	39.41	30.79	34.57	+2.7 (8.47)
소월길 (회현동~북한남동)	30.35	30.31	30.33	31.87	31.26	31.57	+1.24 (4.09)
이태원로 (삼각지~북한남동)	27.57	20.06	23.23	26.43	15.23	19.33	-3.90 (-16.79)
장충단길 (동국대입구~북한남동)	28.18	27.47	27.73	29.37	31.45	30.37	+2.64 (9.52)
경리단길 (경리단~하이얏트호텔)	17.29	18.86	18.01	12.17	15.37	15.85	-2.16 (-11.99)
전체평균	29.53	25.68	26.97	30.37	24.13	26.60	-0.37 (-1.37)

의한 역효과를 방지하고 교통체계를 효율화할 수 있음을 의미하는 것이다. 또한 본 연구에서는 교통망 시뮬레이션 분석결과 남산2호터널 폐쇄에도 불구하고 남산1,3호터널의 혼잡통행료를 지속적으로 징수하는 것이 바람직한 것으로 판단하였다.

결론적으로 본 연구에서는 많은 O-D쌍에 의해 이용이 가능한 현실의 복잡한 도로망 가운데 특별한 기능적 특성을 갖고 있는 링크의 유무에 의해 브라이스 역설 현상이 관측될 수 있음을 보여 주었다. 물론 이와 같은 현상이 발생하더라도 반드시 브라이스 역설에 의한 것이라고 단정하기에는 여러 가지 변수가 많고 2호터널 폐쇄로 인한 교통수단간 수요변화가 없다는 가정을 전제로 하고 있으므로 보다 정확한 분석을 위해 수요변화여부에 대한 정확한 조사가 필요하다는 점을 밝혀둔다. 그러나 서울시의 통행속도 관측치를 통해 남산2호터널의 폐쇄로 인한 교통패턴 변화현상이 브라이스 역설의 현상에서 도래하였다는 유추가 가능하였고, 이것을 검증하기 위해 정산과정을 거친 교통망 시뮬레이션 분석을 통해 폐쇄 전과 후의 통행자 균형상태를 비교하여 브라이스 역설 현상이 이론적 분석 상에서도 서울시 남산2호터널의 경우 관측됨을 보여 주었다. 그리고 남산2호터널의 폐쇄 전과 후에 대해 교통체계최적화 교통패턴을 분석한 결과 브라이스 역설에 의한 도로의 비효율적 활용을 막기 위해서는 남산2호터널을 개통하기 전에 정부는 통행

요금징수, 차량통행의 제한 및 통제, 용도의 전환 등 교통정책을 고려되어야 함을 분석 결과를 기초로 주장하였다.

## 참고문헌

1. Dafermos, S. and Nagurney, A. (1984) On Some Traffic Equilibrium Theory Paradoxes, *Transportation Research B*, Vol. 18, No. 2.
2. Pas, E and Principio, S. (1997) Braess Paradox: Some New Insights, *Transportation Research B*, Vol. 31, No. 3.
3. Sheffi, Y. (1985) *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
4. 서울시, 정기속도조사자료, 1998.
5. 서울시 교통관리실, 남산2호터널 전면통제전후 교통상황 임시조사결과, 1999. 3.
6. 서울시정개발연구원, 서울시 교통혼잡관리프로그램 실행을 위한 교통수요관리 효과분석체계의 구축, 1998.
7. 황기연, 김익기, 엄진기 (1999) 교통수요관리 방안의 단기적 효과분석모형의 구축, *대한교통학회지*, 제17권, 제1호, 1999. 3.