■ 論 文 ■

혼잡통행료 산정모형의 개발 및 계층간 형평성 연구

A Multiple User Class Congestion Pricing Model and Equity

임 용 택
(전남대학교 교통물류학부 부교수)

김 병 관
(서울대학교 환경대학원 박사과정)

목 차

Key Words : 다계층 가변수요, 최적혼잡통행료, 시간가치, 형평성, 시간단위 체계최적, 화폐단위 체계최적
multi-class variable demand, first-optimal pricing, value of time, equilty, system optimum

요 약

전통적으로 혼잡통행료는 교통시설의 한계사회비용과 한계개인비용의 차이를 혼잡통행료로 부과함으로써 사용자 균형(user equilibrium)상태의 도로망을 체계최적(system optimum)으로 유도하는 한계비용가격(marginal cost pricing) 또는 최적혼잡통행료(first-optimal pricing)이론에 근거를 두고 있다. 이러한 이론을 기초로 본 연구에서는 가변수요를 갖는 다계층 도로이용자를 대상으로 링크 최적혼잡통행료의 이론적 특성을 살펴보고 혼잡통행료 징수에 따른 계층간 그리고 지역간 형평성을 분석하기 위한 방법론을 연구한다. 여기서, 도로이용자가 경험하는 경로통행비용은 시간요소(통행시간)와 화폐요소(혼잡통행료)의 2가지 판단기준으로 구성되고 시간가치에 의해 하나의 단위로 전환(trade off)이 가능하다. 경로통행비용이 시간단위로 환산될 경우, 최적혼잡통행료는 시간단위 체계최적 조건으로부터 도출될 수 있고 경로통행비용이 화폐단위로 환산될 경우, 최적혼잡통행료는 화폐단위 체계최적 조건으로부터 도출될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 체계최적 조건으로부터 도출된 최적혼잡통행료를 산정하는 모형을 개발하고 이를 통하여 계층간 형평성을 살펴본다.

Traditionally, a congestion charge based on first-best congestion pricing theory, namely, the theory of marginal cost pricing theory, is equal to the difference between marginal social cost and marginal private cost. It is charged on each link so as to derive a user equilibrium flow pattern to a system optimal one. Based on this theory this paper investigates on the characteristics of first-best congestion pricing of multiple user class on road with variable demand, and presents two methods for analysis of social and spatial equity. For these purposes, we study on the characteristics of first-best congestion pricing derived from system optimal in time and in monetary unit, and analyze equity from this congestion pricing with an example network.

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-521-D00608).

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

혼잡통행료(congestion pricing)는 도로 운영자(정부)가 혼잡이 발생하는 교통시설의 이용에 일정한 조치를 취하지 않으면 교통시설은 비효율적으로 이용된다는 점에 착안하여 연구되어져 왔다. 전통적으로 혼잡통행료는 교통시설의 한계사회비용과 한계개인비용의 차이를 혼잡통행료로 부과함으로써 사용자 균형(user equilibrium) 상태의 도로망을 체계최적(system optimum)으로 유도하는 한계비용가격(marginal cost pricing) 또는 최적혼잡통행료(first-optimal pricing)이론에 근거를 두고 있다. 이러한 이론에 따른 혼잡통행료를 징수하게 되면 통행자들은 통행시간과 통행비용(toll charge)의 이중기준(bi-criterion)에 의해 기종점간의 경로를 선택하게 된다. 이중기준은 통행자들의 시간가치(value of time)에 의해 시간단위(time unit)와 화폐단위(monetary unit)로 환산되어질 수 있다. 일반적으로 시간가치는 모든 도로 이용자에게 동일하다고 가정되어 왔는데 이러한 동질적인 이용자(homogeneous users)의 경우에 대해서는 기존 한계비용가격 이론을 통하여 잘 확립되어 왔다.

그러나 현실적으로 통행자들 간에는 차이가 존재하기 때문에 모든 통행자를 하나의 계층으로 고려하는 기존 연구들은 한계가 있다. 본 연구는 통행자의 계층이 동질적이지 않고 소득과 같은 특성에 의해 통행자의 계층이 구분되며 이렇게 구분된 계층은 이산적인 시간가치를 갖고 있다고 가정한다. 그리고 각 계층의 통행수요는 고정된 것이 아니라 통행비용에 따라 변한다고 가정한다. 결국, 다계층 가변수요 상황에서 시간단위와 화폐단위의 최적혼잡통행료의 특성과 각 소득 계층간 형평성(equity)을 연구하는 것이 본 논문의 목적이다.

본 연구에서는 우선 다계층 가변수요에서 통행비용이 시간 또는 화폐단위로 측정될 경우의 교통망 균형조건을 이용하여 링크 최적혼잡통행료를 산정하는 모형을 개발하고, 이를 통하여 최적혼잡통행료 징수시 발생하는 계층간 형평성문제를 분석하고자 한다. 여기서 시간단위와 화폐단위 최적혼잡통행료 산정문제는 각기 시간 및 화폐단위로 사회적 순 편익(social net benefit)을 최대화시키는 목적함수로 구성된다.

본 연구에서는 현실을 그대로 표현하기에는 모형상 한계가 있기 때문에 다음과 같은 기본 가정을 전제로 한다. 먼저, 본 연구에서 다루는 대상은 승용차 이용자에 한정하며, 따라서 대중교통과의 수단간 전환행태는 고려하지 않는다. 또한, 통행시간과 통행비용이외의 교통사고 비용이나 환경비용 등은 고려하지 않는다.

먼저, 다계층 혼잡통행료 및 형평성문제와 관련된 기존 연구들을 간단히 살펴보자.

Ⅱ. 기존연구 고찰

1. 다계층 혼잡통행료에 관한 연구

현재까지 제시된 혼잡통행료 연구들은 주로 통행자들이 동일한 시간가치를 갖는다고 가정한 동질적인 이용자(homogeneous users)를 대상으로 하였다. 이에 따르면 한계사회비용과 한계개인비용의 차이만큼의 혼잡통행료가 각 링크에 부과되면 교통망은 체계최적(system optimal) 상태에 도달하게 된다(Beckmann, 1965; Dafermos and Sparrow, 1971).

본 연구에서는 서로 다른 시간가치를 갖는 다계층 사용자를 고려한다. 다계층 사용자란 다음과 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 교통망에서의 통행량이 서로 다른 차량 또는 수단으로 구분된다는 것이고 각 계층(수단)은 개별적인 비용-통행량 함수를 갖고 동시에 각각의 방법으로 자신과 다른 수단의 비용함수에 영향을 미친다. Dafermos(1973)와 Smith(1979)는 다른 차량형태를 갖는 다계층 사용자 균형과 체계최적 문제를 연구했다. 이러한 형태의 다계층 사용자 균형은 계층간의 비대칭 문제로 인하여 복잡한 변동부등식의 해법을 요구하게 된다 (Nagurney, 2000). 두 번째는 수단의 구분이 아닌 동일한 수단을 이용하지만 교통망을 이용하

〈표 1〉 다계층 혼잡통행료에 관한 연구

저자	내용
Arnott and Kraus (1998)	이질적인 사용자 그룹에 대하여 동일한 최적 혼잡통행료가 가능하고 단일해가 아님을 보임
Dial (1999)	각 기종점에 대하여 연속적으로 분포된 시간가치의 가정하에 링크의 최적 혼잡통행료는 링크 한계비용의 사회적 요소로 결정됨
Mayet and Hansen (2000)	통행료가 징수되지 않는 고속도로에 대하여 연속적 분포의 시간가치를 갖는 second-best 혼잡통행료를 연구
Hai Yang and Xiaoning Zhang (2002)	다계층 가변수요 교통망에서 계층간·기종점간 형평성을 고려한 최적 혼잡통행료 산정 모형 개발

는 통행자의 특성이 시간가치와 같은 속성들로 구분된다는 것이다. 이런 경우, 서로 다른 시간가치에 의한 이질적 사용자(heterogeneous users)를 갖는 교통망 문제는 사용자가 계층별로 이산적으로 구분된 시간가치를 갖는다고 가정하거나 또는 전체 모집단에 대한 연속적 분포의 시간가치를 갖는다는 가정 하에 연구되어왔다. <표 1>은 시간가치에 의해 구분된 다계층 사용자 혼잡통행료 산정 연구를 정리한 것이다.

2. 혼잡통행료 형평성에 관한 연구

혼잡통행료의 도입이 이론적, 기술적으로 충분히 실현 가능함에도 불구하고 혼잡통행료 징수 시 각 계층에 대한 영향이 동일하지 않다는 이유로 많은 반대 의견이 존재하고 있다. 예를 들어 혼잡통행료 징수 시 통행료를 지불하고 대상 도로를 계속 이용하는 이용자중 높은 시간가치를 갖는 계층은 지불한 통행료보다 더 나은 혼잡감소 편익을 얻을 것이고 그에 비해 낮은 시간가치를 갖는 계층은 혼잡통행료 징수 전보다 낮은 편익을 얻을 것이다. 반대로 혼잡통행료 징수를 피하기 위해 통행을 포기한 통행자는 도로 사용에 따른 편익을 포기하게 되고 다른 수단으로의 전환에 따른 불편을 겪게 된다.

이러한 형태의 형평성 문제는 많은 연구자에 의해서 관심을 받아왔다(Small 1981, 1983; Hau 1995; Armelius, 2005). 혼잡통행료에 대한 계층간 형평성에 관한 연구는 Small(1981)의 연구를 계기로 시작되었는데 후생경제학 이론을 적용하여 가격 변화로 인한 후생효과를 분석하였다. 이 과정에서 소득계층별 보상변화(compensating variation)를 추정하여 형평성 측면의 효과분석을 시도하였다. Small(1983)은 그의 연구를 발전시켜 샌프란시스코 만 지역의 CBD 통행자를 대상으로 도시고속도로 혼잡통행료에 대한 후생효과를 분석하였다. Hau(1995)는 통행료를 지불하는 승용차 이용자와 지불하지 않는 승용차 이용자 및 대중교통 이용자에 대하여 후생변화를 추정하여 형평성 효과를 이론적으로 정리하였으며, Armelius(2005)는 통행수단과 출발시간 변경을 고려하여 혼잡통행료의 효과를 분석하였다. 또한 국내연구에서 조은경(2006)은 수도권을 대상으로 도심 진입 혼잡통행료에 대하여 다항로짓모형의 수단별 간접효용함수를 이용하여 소득계층별 보상변화를 추정하여 형평성 분석을 수행하였다.

앞에서 살펴본 대부분의 연구 결과는 시간절감 편익과 더불어 통행료 수입의 재투자를 고려한다면 혼잡통행료 부과로 인해 통행자 전체에게 편익을 증대시킬 수 있다고 보았다. 하지만 시간가치가 큰 고소득계층의 편익이 가장 크고 그에 비해 저소득계층은 불리한 영향을 받는다고 추정하였다. 이러한 불평등 문제는 통행료 수입의 효율적인 재투자로 해결할 수 있다고 하였으나, 이러한 재투자를 위한 기법이 아직 확립되거나 적용되지는 못하고 있다.

기존연구들이 주로 계층간의 형평성에 관한 연구였다면 Yang(2002)은 혼잡통행료의 징수에 따라 서로 다른 기종점에 대하여 통행비용의 변화가 다르게 나타난다는 공간적 형평성(spatial equity)에 대하여 분석하였다. 결국, 형평성 문제는 크게 계층간 다른 시간가치에 의한 사회적 형평성(social equity)과 다른 기종점 간의 통행에 의한 공간적 형평성(spatial equity)문제로 정리될 수 있다.

Ⅲ. 다계층 혼잡통행료 산정모형

다수의 계층을 고려하여 최적 혼잡통행료를 결정하는 문제는 게임이론을 통하여 표현할 수 있다. 게임이론(game theory)은 게임에 참여하는 참가자(player)들이 자신의 이익을 최대화시키기 위하여 어떤 최적전략(optimal strategy)을 결정할 것인가를 연구하는 분야로 산업공학, 경영학, 경제학 등 여러 학문분야에 널리 활용되고 있다. 이런 게임이론은 교통분야에서도 사용되고 있는데, 대표적으로 교통망설계 문제(transportation network design problem)가 있으며, 이를 풀기 위하여 바이레벨 프로그램(bi-level program)이 제시되었다. 바이레벨문제는 상위문제(upper level problem)와 하위문제(lower level problem)로 구성되며, 본 연구에서 다루는 혼잡통행료 문제의 경우, 사회적 순편익 최대화가 상위문제가 되며, 통행자의 가변수요 경로선택문제가 하위문제가 된다.

1. 상위문제(upper level problem)

본 연구에서 구축되는 상위문제는 시간단위와 화폐단위로 나누어지는데, 이는 각 소득계층별로 시간가치가 다르기 때문에 이를 모형에 반영하기 위해서이다. 먼저,

본 연구에서 사용되어지는 주요 변수들에 대한 정의는 다음과 같다.

$t_a(v_a)$: 링크 통행량 v_a의 통행시간함수로 각 링크의 평균통행시간 (미분가능, 볼록함수이고 링크통행량 v_a가 증가함에 따라 단조증가)

v_a^m : 링크 a의 계층 m의 링크통행량

p_a : 링크 a의 혼잡통행료 (link toll)

W : O-D쌍 w의 집합

R_w : O-D쌍 $w \in W$ 사이의 모든 경로집합

m : 통행자 계층, 통행자 그룹에 따른 M개의 계층

β_m : 계층 m의 평균 시간가치 (β_m>0)

$D_w^m(c_w^m)$: O-D쌍 w간 계층 m의 통행수요(d_w^m), 기종점 통행비용(c_w^m)의 감소함수

$D_w^{m,-1}(d_w^m)$: O-D쌍 w간 계층 m의 기종점 통행비용(c_w^m), 기종점 통행수요 d_w^m의 역함수

$r \in R_w$: O-D쌍 $w \in W$ 사이의 유효한 경로 집합

$t_w^r = \sum_a t_a(v_a)\delta_{ar}^w$: O-D쌍 $w \in W$의 경로 $r \in R_w$의 통행시간

$c_w^r = \sum_a p_a \delta_{ar}^w$: O-D쌍 $w \in W$의 경로 $r \in R_w$의 링크 혼잡통행료의 합(화폐)

δ_{ar}^w : O-D쌍 $w \in W$의 경로 r이 링크 a를 이용하면 1이고 그렇지 않으면 0

1) 시간단위 최적혼잡통행료 산정

먼저, β_m의 시간가치를 갖는 각 계층 m은 통행비용, $c_w^r(\beta_m)$을 최소화하는 경로를 선택한다고 가정하자. 경로를 선택하는 판단기준인 $c_w^r(\beta_m)$은 일반화 통행시간(화폐는 그에 대응하는 통행시간으로 환산됨) 또는 일반화 통행비용(통행시간은 그에 대응하는 화폐로 환산됨)으로 구분될 수 있다. 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$c_w^r(\beta_m)_{time} = t_w^r + \frac{c_w^r}{\beta_m} = \sum_a \left\{ t_a(v_a) + \frac{p_a}{\beta_m} \right\} \delta_{ar}^w,$$

$$r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \tag{1}$$

$$c_w^r(\beta_m)_{cost} = \beta_m t_w^r + c_w^r = \sum_a \{\beta_m t_a(v_a) + p_a\} \delta_{ar}^w,$$

$$r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \tag{2}$$

이제 계층별로 구분된 시간가치를 가질 때 시간단위 체계최적인 시간단위 기준의 사회적 순 편익 최대화의 교통망 균형조건으로부터 최적 혼잡통행료를 찾고 그 특성을 분석해 보자.

시간단위로 측정되는 사회적 순 편익 최대화는 다음의 최소화 문제로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{f,d} Z[p] &= \sum_a \sum_m t_a(v_a) v_a^m \\ &\quad - \sum_m \sum_w \int_0^{d_w^m} D_w^{m,-1}(x)dx \\ &= \sum_{a \in A} v_a t_a(v_a) - \sum_m \sum_w \int_0^{d_w^m} D_w^{m,-1}(x)dx \end{aligned} \tag{3}$$

$$s.t. \quad \sum_r f_{rw}^m = d_w^m,\ w \in W,\ m \in M \tag{4}$$

$$f_{rw}^m \geq 0,\ r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \tag{5}$$

$$d_w^m \geq 0,\ w \in W,\ m \in M \tag{6}$$

$$v_a^m = \sum_w \sum_r f_{rw}^m \delta_{ar}^w,\ a \in A,\ m \in M \tag{7}$$

$$v_a = \sum_{m=1}^M v_a^m,\ a \in A. \tag{8}$$

여기서, f_{rw}^m는 경로 $r \in R_w$, $w \in W$ 상의 계층 m의 통행량이다.

위 최소화 문제를 쌍대성 이론(dual theory)에 따라 필요최적조건(necessary optimal condition)을 구하면 다음과 같은 시간단위 체계최적 교통망 균형조건을 도출할 수 있다.

$$\sum_a \left\{ t_a(v_a) + v_a \frac{\delta t_a(v_a)}{\delta v_a} \right\} \delta_{ar}^w = u_w^m,\ \text{if } f_{rw}^m > 0,$$

$$r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \tag{9}$$

$$\sum_a \left\{ t_a(v_a) + v_a \frac{\delta t_a(v_a)}{\delta v_a} \right\} \delta_{ar}^w \geq u_w^m,\ \text{if } f_{rw}^m = 0,$$

$$r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \tag{10}$$

$$D_w^{m,-1}(d_w^m) = u_w^m,\ \text{if}\ d_w^m > 0,\ w \in W,\ m \in M \quad (11)$$

$$D_w^{m,-1}(d_w^m) \le u_w^m,\ \text{if}\ d_w^m = 0,\ w \in W,\ m \in M \quad (12)$$

식(9)와 (10)에서 좌변은 링크 a의 시간단위 한계비용(mc_a)의 합이 되고 우변의 u_w^m은 계층 m에 대하여 동일하게 인식되는 O-D쌍 w간 시간단위 최소통행비용(time unit minium path cost)이라 할 수 있다. 이러한 균형에 대한 요구사항은 모든 통행자가 네트워크 상의 링크를 이용할 때 통행시간과 통행시간의 외부성으로 구성되는 동일한 시간단위 사회적 한계비용을 직면해야만 한다.

식(9)와 식(10)으로부터 시간단위의 링크 혼잡통행료는 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 하지만 링크에 부과되는 혼잡통행료는 각 계층의 시간가치에 의해 식(14)와 같이 차별화되어야만 실제 징수가 가능하다고 할 수 있다.

$$p_a = v_a \frac{dt_a(v_a)}{dv_a},\ a \in A \quad (13)$$

$$p_a^m = \beta_m v_a \frac{dt_a(v_a)}{dv_a},\ a \in A,\ m \in M \quad (14)$$

그러나 이렇게 도출된 계층별로 상이한 최적 링크 혼잡통행료는 시간가치에 따라 사용자 계층을 구분하여 관측해야 하므로 실제 적용이 쉽지 않다는 한계가 있다.

2) 화폐단위 최적혼잡통행료 산정

여기서는 계층별로 구분된 시간가치를 가질 때 화폐단위 체계최적인 화폐단위 기준의 사회적 순 편익 최대화를 달성하기 위한 교통망 균형조건으로부터 최적 혼잡통행료를 도출하고 그 특성을 분석한다.

화폐단위로 측정되는 사회적 순 편익 최대화는 다음의 최소화 문제로 공식화될 수 있다.

$$\min_{f,d}\ Z[p] = \sum_a \sum_m \beta_m t_a(v_a) v_a^m - \sum_m \sum_w \int_0^{d_w^m} \beta_m D_w^{m,-1}(x)dx \quad (15)$$

$$s.t.\quad (4)-(8).$$

위 최소화 문제의 필요최적조건을 앞에서의 경우와 마찬가지로 쌍대성 이론에 따라 구해보면 다음과 같은 화폐단위의 체계최적 교통망 균형조건을 도출할 수 있다.

$$\sum_a \left\{ \beta_m t_a(v_a) + \sum_m \beta_m v_a^m \frac{\delta t_a(v_a)}{\delta v_a} \right\} \delta_{ar}^w = u_w^m,$$

$$\text{if}\ f_{rw}^m > 0,\ r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \quad (16)$$

$$\sum_a \left\{ \beta_m t_a(v_a) + \sum_m \beta_m v_a^m \frac{\delta t_a(v_a)}{\delta v_a} \right\} \delta_{ar}^w \ge u_w^m,$$

$$\text{if}\ f_{rw}^m = 0,\ r \in R_w,\ w \in W,\ m \in M \quad (17)$$

$$\beta_m D_w^{m,-1}(d_w^m) = u_w^m,\ \text{if}\ d_w^m > 0,\ w \in W,\ m \in M \quad (18)$$

$$\beta_m D_w^{m,-1}(d_w^m) \le u_w^m,\ \text{if}\ d_w^m = 0,\ w \in W,\ m \in M \quad (19)$$

식(16)과 식(17)에서 좌변은 계층 m에 대한 링크 a의 화폐단위 한계비용(mc_a^m)의 합이 되고 우변의 u_w^m은 계층 m에 따라 다르게 인식되는 O-D쌍 w간의 화폐단위 최소경로비용(monetary unit minium path cost)이라 할 수 있다. 위 식으로부터 한계비용가격 이론에 따른 최적 링크 혼잡통행료는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_a = \sum_{m=1} \beta_m v_a^m \frac{dt_a(v_a)}{dv_a},\ a \in A \quad (20)$$

식(20)을 약간만 변형하면 최적 링크 혼잡통행료는 다음과 같다.

$$p_a = \left(\sum_{m=1} \frac{v_a^m}{v_a} \beta_m \right) \left(v_a \frac{dt_a(v_a)}{dv_a} \right),\ a \in A \quad (21)$$

화폐단위의 체계최적 교통망 균형에 대한 요구조건은 다음과 같다. 각 링크에 대하여 링크 a를 통행하는 모든 사용자 계층 m에 대해 그들이 실제 경험하는 통행시간비용 $\beta_m t_a(v_a)$(화폐단위)에다 추가적으로 식(21)에 의해서 주어지는 혼잡통행료가 부과되어야만 한다.

결과적으로 링크 혼잡통행료 식(21)은 링크를 통행하는 모든 통행자에게 동일하고 통행시간의 외부성, $v_a \delta t(v_a)/\delta v_a$에 링크를 통행하는 모든 계층의 통행량 가중평균의 시간가치를 곱한 것과 같아진다. 결국, 링크 a를 이용하는 통행자의 평균 시간가치는 다음과 같다고 할 수 있다.

$$\hat{\beta}_a = \sum_m \frac{v_a^m}{v_a} \beta_m,\ a \in A \quad (22)$$

요약하면, 화폐단위 체계최적은 모든 사용자 계층에

대하여 동일한 링크 혼잡통행료를 갖는 다계층 교통망 균형으로 확인될 수 있고 링크 혼잡통행료는 통행시간의 외부성에 링크를 통행하는 모든 계층의 통행량 가중평균 시간가치를 곱한 것과 같다.

2. 하위문제(lower level problem)

앞에서 구축된 혼잡통행료가 교통망에 부과되면, 기종점간 통행수요(travel demand)가 변할 뿐 아니라, 경로선택도 달라진다. 즉, 이는 다계층 가변수요 통행배정문제가 되며 Sheffi(1985)의 가변수요 통행배정문제를 다계층으로 확장하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_{f,d} Z[v,d] = \sum_m \sum_a \int_0^{v_a^m} t_a(x)dx - \sum_m \sum_w \int_0^{d_w^m} D_w^{m,-1}(x)dx$$

$$s.t. \quad (4)-(8)$$

이 문제는 해당 계층만 변수로 설정하고 다른 계층은 고정시켜 푸는 대각화 알고리듬(diagonal algorithm)과 가변수요 통행배정법인 초과수요방법(excess demand method)을 이용하여 풀 수 있다.

Ⅳ. 혼잡통행료에 대한 형평성 분석

본 연구에서는 혼잡통행료 부과에 따른 계층간 형평성 분석을 위하여 2가지 방법론을 제안한다.

첫째, Small(1981, 1983)과 조은경(2006)의 방법론을 이용하여 혼잡통행료 부과에 따른 통행자들의 후생변화를 통하여 형평성 측면의 효과를 분석한다. 조은경의 경우 1원의 가치가 계층에 상관없이 모두 동일하다는 가정 하에 보상변화를 형평성 분석의 척도로 보았으나 본 연구에서는 1원의 가치는 계층에 따라 다르다고 보았기 때문에 보상변화가 아닌 후생변화로 형평성을 분석하였다. 대신 보상변화를 혼잡통행료 이전의 후생으로 되돌려 놓기 위한 보상액으로 보았다. 보상변화란 가격변화에서 오는 소득효과를 제거하고 대체효과만으로 수요관계를 설정하는 것으로, 실질소득이 예전 수준에 머물도록 하기 위하여 소득을 증감시키는 것을 의미한다. 본 연구에서 보상변화는 통행자들의 효용을 통행비용의 변화가 일어나기 이전 수준으로 되돌려 놓기 위해 필요한 소득의 변화가 되고 이를 통행자들의 화폐단위로 환산된 후생변화로 해석할 수 있다. 따라서 보상변화는 혼잡통행료로 인해 통행비용의 증가시 (+)부호가 되고 통행비용 감소시 (-)부호가 되어 후생변화와 반대로 움직이게 된다. 따라서 각 계층별 후생변화(ΔU_w^m)와 보상변화(Δe_w^m)는 효용함수(utility function)와 소득의 한계효용(marginal utility of income)을 이용하여 식(23)과 (24)같이 추정할 수 있다.

$$\Delta U_w^m = U_w^{m,a} - U_w^{m,b}, \; w \in W, \; m \in M \tag{23}$$

$$\Delta e_w^m = -\frac{1}{\lambda^m} \Delta U_w^m, \; w \in W, \; m \in M \tag{24}$$

여기서, $U_w^{m,b}$와 $U_w^{m,a}$는 혼잡통행료 부과 전・후의 O-D쌍 w를 통행하는 계층 m의 효용이고 λ^m은 계층 m에 대한 소득의 한계효용이다.

둘째, 혼잡통행료 부과 전과 후의 O-D쌍 w에 대하여 계층별 O-D 통행비용(화폐단위) 또는 최소경로비용(화폐단위)의 변화율을 비교하여 계층간 형평성을 분석한다. 혼잡통행료 부과에 따라 특정 O-D(w)에 대하여 계층별로 통행비용의 변화율은 다를 것이라 예상되고 O-D 통행비용의 변화율을 구할 때 시간단위 체계최적조건을 이용한 최적 혼잡통행료 징수와 화폐단위 체계체적조건을 이용한 최적 혼잡통행료 징수의 경우를 비교하기 위하여 O-D쌍 w에 대하여 계층별 O-D 통행비용의 변화율(ϕ_w^m)을 식(25)와 (26)같이 화폐단위 일반화 통행비용으로 계산한다.

(시간단위 체계최적 최적혼잡통행료)

$$\phi_w^m = \frac{\widehat{u_{w,\cos t}^m}}{\widetilde{u_{w,\cos t}^m}} = \frac{\beta_m \widehat{u_w^m}}{\beta_m \widetilde{u_w^m}}, \; w \in W, \; m \in M \tag{25}$$

(화폐단위 체계최적 최적혼잡통행료)

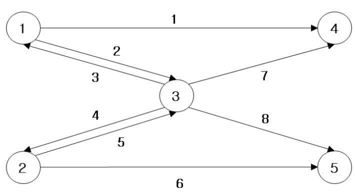
$$\phi_w^m = \frac{\widehat{u_{w,\cos t}^m}}{\widetilde{u_{w,\cos t}^m}} = \frac{\widehat{u_w^m}}{\widetilde{u_w^m}}, \; w \in W, \; m \in M \tag{26}$$

여기서, $\widetilde{u_{w,\cos t}^m}$는 혼잡통행료 징수 전(사용자 균형상태)의 계층 m의 화폐단위 일반화 O-D(w) 통행비용이고 $\widehat{u_{w,\cos t}^m}$는 혼잡통행료 징수 후(체계최적상태)의 계층 m의 화폐단위 일반화 O-D(w) 통행비용이다.

Ⅴ. 예제 교통망을 이용한 분석

1. 예제 교통망

본 연구에서 제시된 시간단위와 화폐단위의 체계최적 혼잡통행료 문제와 이를 통한 형평성문제를 예제 교통망을 통하여 분석해 보자. 예제 교통망은 〈그림 1〉과 같이 5개의 노드와 8개의 링크로 구성되어 있으며 2개의 기종점쌍이 존재한다.



〈그림 1〉 예제 교통망

링크 비용함수는 다음과 같은 BPR함수이며, 링크별 속성자료는 〈표 2〉와 같다.

$$t_a = t_a^0\{1+0.15(v_a/c_a)^4\}$$

〈표 2〉 링크 속성자료

링크 번호	자유통행시간 (t_a^0) (분)	링크용량 (c_a) (통행/분)
1	2	10
2	1	20
3	1	10
4	1	10
5	2	15
6	3	8
7	3	8
8	4	12

기종점 수요는 상대적으로 시간가치가 낮은 계층 1(저소득층)과 시간가치가 높은 계층 2(고소득층)로 구성된 2개의 계층에 대하여 2개의 O-D쌍(1→5, 2→4)을 고려하여 총 4개의 O-D쌍을 고려한다. 계층별 수요함수는 다음과 같은 지수함수의 형태를 갖는다고 가정하고 수요함수 및 통행자 계층과 관련한 속성자료는 〈표 3〉과 같다.

$$d_w^m = D_w^m(c_w^m) = \overline{d_w^m}\, exp(B_w^m c_w^m)$$

또한, 계층별 효용함수는 다음 식과 같고 효용함수의 속성자료, 소득의 한계효용은 〈표 4〉와 같다.

$$U_w^m = a_m + b_m u_{w,\cos t}^m$$

〈표 3〉 수요함수 및 계층별 속성자료

계층 (m)	O-D (w)	기점 (O)	종점 (D)	$\overline{d_w^m}$	B_w^m
1	1	1	5	18	-0.03
	2	2	4	15	-0.03
2	1	1	5	20	-0.02
	2	2	4	17	-0.02

〈표 4〉 계층별 속성자료

계층(m)	β_m (백원/분)	a_m	b_m	λ_m
1	1.00	7.00	-0.08	0.30
2	1.30	10.00	-0.06	0.14

2. 분석결과

먼저, 각 계층별로 가변수요 사용자 균형, 시간단위 체계체적, 화폐단위 체계체적 통행배정을 수행한 결과와 이들이 균형 상태에 도달했음을 〔부록〕에 기술하였다.

〈표 5〉는 한계비용가격이론에 의해 산정된 시간단위 및 화폐단위별 각 링크의 최적혼잡통행료와 이들 혼잡통행료가 부과될 경우의 사회적 순 편익을 보여주고 있다.

시간단위와 화폐단위의 사회적 순 편익을 비교해 보면, 예상했듯이 시간단위 체계최적문제가 시간단위 사회적 순 편익을 최대화시킴을 알 수 있으며, 마찬가지로 화폐단위 체계최적문제가 화폐단위 사회적 순 편익을 극대화시키고 있다. 이러한 결과의 차이를 설명하면 다음과 같다. 시간단위 체계최적의 경우, 균형조건 식(9)-(12)에서 알 수 있듯이 특정 기종점을 통행하는 각 계층은 같은 기종점 통행비용(시간단위)을 갖는다. 이러한 균형에 대한 요구조건은 모든 도로 사용자가 네트워크상의 링크를 이용할 때 통행시간과 통행시간의 외부성으로 구성되는 동일한 시간단위 사회적 한계비용을 직면해야만 한다는 가정 하에 이루어진다. 반면, 화폐단위 체계최적의 경우, 균형조건 식(16)~(19)에서 알 수 있듯이 특정 기종점을 통행하는 각 계층은 계층별로 서로 다른 기종점 통행비용(화폐단위)을 가짐을 알 수 있다. 이러한 균형에 대한 요구조건은 도로 사용자(m)가 네트워크상의 링크(a)를 통행할 때 실제 경험하는 통행시간비용 $\beta_m t_a(v_a)$(화폐단위)와 화폐단위 통

〈표 5〉 통행비용 및 최적혼잡통행료 산정 결과

구분		사용자균형	시간단위 체계최적	화폐단위 체계최적
링크최적 혼잡통행료 p_a^m (백원)	p_1^1	-	2.5	2.9
	p_1^2	-	3.3	2.9
	p_2^1	-	1.9	2.2
	p_2^2	-	2.5	2.2
	p_3^1	-	1.3	1.4
	p_3^2	-	1.6	1.5
	p_4^1	-	0.9	1.0
	p_4^2	-	1.1	1.0
	p_5^1	-	5.2	6.0
	p_5^2	-	6.8	6.0
	p_6^1	-	6.4	7.4
	p_6^2	-	8.3	7.4
	p_7^1	-	3.8	4.4
	p_7^2	-	4.9	4.4
	p_8^1	-	7.3	8.4
	p_8^2	-	9.4	8.4
사회적순편익 (시간환산, 분)		2460.13	2535.07	2534.17
사회적순편익 (화폐환산, 백원)		2957.02	3046.28	3047.27

행시간의 외부성으로 구성되는 화폐단위 사회적 한계비용을 직면해야만 한다는 가정 하에 이루어진다. 결국, 시간단위 체계최적은 특정 기종점을 통행하는 각 계층이 동일한 시간단위 기종점 통행비용(시간단위 한계비용)을 갖도록 통행배정이 이루어지고 화폐단위 체계체적은 서로 다른 화폐단위 기종점 통행비용(화폐단위 한계비용)을 갖도록 통행배정이 이루어지기 때문이다.

산정된 최적혼잡통행료에 대하여 계층간 후생변화와 보상편화가 〈표 6〉에 나와 있다.

계층별 후생변화는 시간단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수 시 계층 1과 2의 후생변화가 -0.54~-0.56으로 거의 유사하게 감소함을 알 수 있다. 반면 화폐단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수 시 계층 2에 비해 계층 1의 후생감소량이 큼을 알 수 있다. 따라서 본 예제에서는 시간단위 체계최적에 따른 혼잡통행료의 징수가 계층간 형평성 분석에서 좀 더 낫다고 볼 수 있겠다.

또한 화폐단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수 시 계층간 후생변화의 차이는 크지만 보상변화액은

〈표 6〉 계층별 후생변화 및 보상변화

구분		사용자균형	시간단위 체계최적	화폐단위 체계최적
U_w^m	U_1^1	6.24	5.68	5.57
	U_1^2	9.26	8.71	8.80
	U_2^1	6.25	5.70	5.59
	U_2^2	9.27	8.74	8.81
ΔU_w^m	ΔU_1^1	-	-0.56	-0.67
	ΔU_1^2	-	-0.54	-0.46
	ΔU_2^1	-	-0.55	-0.66
	ΔU_2^2	-	-0.54	-0.46
Δe_w^m (백원/통행)	Δe_1^1	-	1.86	2.23
	Δe_1^2	-	3.88	3.30
	Δe_2^1	-	1.83	2.21
	Δe_2^2	-	3.83	3.27

계층 1의 소득의 한계효용이 크기 때문에 크게 차이가 나지 않고 있다.

마지막으로, 혼잡통행료 부과에 따른 계층별 O-D 통행비용의 변화율(ϕ_w^m)을 비교해보면, 〈표 7〉에서 보듯이 시간단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수의 경우(1.73:1.73, 1.74:1.74)는 통행료 징수 전・후의 O-D 통행비용의 변화가 계층1과 2에 대해 동일하게 증가하는 것으로 분석되어 화폐단위 체계최적의 경우(1.88:1.62, 1.89:1.63)보다 계층간 형평성 측면에서 낫다고 볼 수 있다.

또한, 혼잡통행료 부과에 따른 지역간 O-D 통행비용의 변화율도 표에서 알 수 있는데, 시간단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수의 경우, 계층에 상관없이 혼잡통행료를 징수하면 O-D 통행비용이 w=1은 1.73배, w=2는 1.74배 증가하는 것으로 분석되어 w=2가 통행비용이 약간 더 증가하는 것으로 분석되었다. 화폐단위 체계최적 조건에 의한 혼잡통행료 징수의 경우도 계층 1

〈표 7〉 O-D 통행비용의 변화율(ϕ_k^m)

혼잡통행료 산정방법	m / w	계층1	계층2
시간단위 체계최적	1 (ϕ_1^m)	1.73	1.73
	2 (ϕ_2^m)	1.74	1.74
화폐단위 체계최적	1 (ϕ_1^m)	1.88	1.62
	2 (ϕ_2^m)	1.89	1.63

에 대해서는 w=1은 1.88, w=2는 1.89 이고 계층 2에 대해서는 w=1은 1.62, w=2는 1.63 으로 지역에 따라 O-D 통행비용의 증가량이 크게 차이가 나지 않았다. 따라서 본 예제 교통망에서는 혼잡통행료 산정방법에 상관없이 지역간 형평성은 크게 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

Ⅵ. 결론

본 연구에서는 통행수요가 통행비용에 의해 변화한다는 가정 하에 시간가치(소득수준)에 의해 구분되는 다계층 도로이용자를 대상으로 링크 최적혼잡통행료의 특성을 살펴보고 혼잡통행료 징수에 따른 계층간 그리고 지역간 형평성을 분석하기 위한 방법론을 제시하였다.

도로이용자가 시간요소(통행시간)와 화폐요소(혼잡통행료)의 2가지 판단기준으로 경로통행비용을 인식할 경우 시간가치에 의해 이 2가지 요소는 한 가지 요소로 전환(trade off)이 가능하다. 경로통행비용이 시간단위로 환산될 경우, 최적혼잡통행료는 시간단위 체계최적 조건으로부터 도출될 수 있고 경로통행비용이 화폐단위로 환산될 경우, 최적혼잡통행료는 화폐단위 체계최적 조건으로부터 도출될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시간단위와 화폐단위의 체계최적 조건을 조사하고 한계비용가격이론에 따른 링크 최적혼잡통행료를 산정하였다.

또한 이러한 혼잡통행료의 징수에 따른 효용변화와 O-D 통행비용의 변화율을 구하여 계층간·지역간 형평성을 분석할 수 있는 방법론을 제시하였다. 예제를 통하여 분석한 결과, 시간단위 체계최적 조건에 따른 혼잡통행료 징수가 계층간 형평성 측면에서 좀 더 나은 결과를 보였다. 하지만 본 연구는 이러한 형평성을 분석하기 위한 방법론 개발에 초점을 맞춘 연구로서 수요함수, 효용함수, 소득의 한계효용과 같은 여러 가지 중요한 자료를 가정하여 분석하였다. 따라서 이러한 결과는 기본 가정이나 분석 교통망이 달라지는 경우, 결과 역시 다르게 나타날 가능성이 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구결과를 일반화시키기 위해서는 좀 더 다양한 시나리오로 분석되어야 하는데, 이에 대해서는 향후 연구로 남겨둔다.

본 연구에서는 모든 링크가 혼잡통행료 부과의 대상이 되는 한계비용가격이론에 따른 최적혼잡통행료(first-best pricing, marginal cost pricing)를 대상으로 분석하였다. 향후 실질적인 적용을 위해서는 다계층 사용자를 대상으로 중요 링크 또는 경로를 대상으로 혼잡통행료(second-best pricing)를 부과하기 위한 방법을 연구할 필요가 있을 것이다. 또한 혼잡통행료 부과에 따른 형평성을 분석하고 형평성에 따른 불평등 문제를 통행료 수입의 효율적인 재투자로 해결하기 위한 재투자 기법에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

1. 김병관·임용택·임강원(2004), "민감도 분석을 이용한 도로 혼잡통행료 산정 모형 개발", 대한교통학회지, 제22권 제5호, 대한교통학회, pp.139~149.
2. 조은경(2006), "혼잡통행료 부과방안의 효율성과 형평성 분석 : 수도권을 대상으로", 서울대학교 환경대학원 박사학위 논문.
3. Arnott, R., Kraus, M.(1998), "When are anonymous congestion charges consistent with marginal cost pricing?", Journal of Public Economics 67, pp.45~64.
4. Armelius, H.(2005), "An Integrated Approach to Urban Road Pricing", Journal of Transport Economics and Policy 39, pp.75~92.
5. Beckmann, M. J.(1965), "On optimal tolls for highways, tunnels and bridges", In: Vehicular Traffic Science, American Elsevier, New York, pp.331~341.
6. Dafermos, S. C., Sparrow, F. T.(1971), "Optimal resource allocation and toll patterns in user-optimized transportation network", Journal of Transportation Economics and Policy 5, pp.198~200.
7. Dafermos, S. C.(1973), "The traffic assignment problem for multi-class user transportation network", Transportation Science 6, pp.73~87.
8. Dial, R, B.(1999), "Network-optimized road pricing. Part 1: a parable and model", Transportation Science 47, pp.54~64.
9. Dial, R. B.(1999), "Network-optimized road pricing. Part 2: algorithms and examples", Transportation Science 47, pp.327~336.
10. Hau, T. D.(1995), "A Conceptual Framework for Pricing Congestion and Road Damage", in B. Johansson & L. Mattsson (eds), Road Pricing: Theory, Empirical Assessment and Policy, Kluwer Academic Publishers, pp.57~63.

11. Hai Yang, Xiaoning Zhang(2002), "Multiclass Network Toll Design Problem with Social and Spatial Equity Constraints", Journal of Transportation Engineering 128 pp.420~428.
12. Hai Yang, Xiaoning Zhang(2002), "Multiclass Network Toll Design Problem with Social and Spatial Equity Constraints", Journal of Transportation Engineering 128, pp.420~428.
13. Mayet, J., Hansen, M.(2000), "Congestion pricing with continuously distributed values of time", Journal of Transport Economics and Policy 34, pp.359~370.
14. Nagurney, A.(2000), "A multiclass, multicriteria traffic network equilibrium model", Mathematical and Compute Modeling 32, pp.393~411.
15. Smith, M. J.(1979), "The marginal cost taxation of a transportation network", Transportation Research 13B, pp.237~242.
16. Small, K. A., Rosen, H. S.(1981), "Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models", Econometrica 49, No 3, pp.105~130.
17. Small, K. A.(1983), "The Incidence of Congestion Tolls on Urban Highways", Journal of Urban Economics 13, pp.105~130.

〔부록〕 다계층 가변수요 통행배정결과

본문 〈그림 1〉의 예제 교통망을 대상으로 다계층 가변수요 통행배정 결과는 〈부록-표1~표2〉와 같다. 아래의 통행배정결과에서 균형 상태를 확인하기 위한 예를 들어보겠다.

〈부록-표1〉 다계층 가변수요 통행량 배정결과

구 분		사용자 균형	시간단위 체계최적	화폐단위 체계최적
링크 통행량 (v_a^m, v_a)	v_1^1	5.66	4.71	5.33
	v_1^2	8.52	7.31	6.67
	v_1	14.18	12.02	12.00
	v_2^1	13.53	10.98	10.52
	v_2^2	18.19	15.82	16.15
	v_2	31.72	26.80	26.68
	v_3^1	5.66	4.71	5.33
	v_3^2	8.52	7.31	6.67
	v_3	14.18	12.02	12.00
	v_4^1	5.32	4.59	4.21
	v_4^2	7.68	6.39	6.71
	v_4	12.99	10.98	10.92
	v_5^1	10.58	8.61	8.25
	v_5^2	14.93	13.02	13.28
	v_5	25.52	21.63	21.53
	v_6^1	5.32	4.59	4.21
	v_6^2	7.68	6.39	6.71
	v_6	12.99	10.98	10.92
	v_7^1	4.93	3.90	2.93
	v_7^2	6.41	5.71	6.61
	v_7	11.34	9.62	9.53
	v_8^1	8.22	6.39	6.31
	v_8^2	10.51	9.43	9.44
	v_8	18.73	15.82	15.75
통행수요 (d_w^m)	d_1^1	13.53	10.98	10.52
	d_1^2	18.19	15.82	16.15
	d_2^1	10.58	8.61	8.25
	d_2^2	14.93	13.02	13.28

〈부록-표2〉 통행비용 배정결과

구분		사용자균형		시간단위 체계최적		화폐단위 체계최적	
		분	백원	분	백원	분	백원
링크 통행시간 (평균비용) t_a^m	t_1^1	3.21	3.21	2.63	2.63	2.62	2.62
	t_1^2	3.21	4.17	2.63	3.41	2.62	3.41
	t_2^1	1.95	1.95	1.48	1.48	1.48	1.48
	t_2^2	1.95	2.54	1.48	1.93	1.48	1.92
	t_3^1	1.61	1.61	1.31	1.31	1.31	1.31
	t_3^2	1.61	2.09	1.31	1.71	1.31	1.70
	t_4^1	1.43	1.43	1.22	1.22	1.21	1.21
	t_4^2	1.43	1.86	1.22	1.58	1.21	1.58
	t_5^1	4.51	4.51	3.30	3.30	3.27	3.27
	t_5^2	4.51	5.86	3.30	4.29	3.27	4.26
	t_6^1	6.13	6.13	4.60	4.60	4.56	4.56
	t_6^2	6.13	7.97	4.60	5.98	4.56	5.93
	t_7^1	4.82	4.82	3.94	3.94	3.91	3.91
	t_7^2	4.82	6.27	3.94	5.12	3.91	5.08
	t_8^1	7.56	7.56	5.81	5.81	5.78	5.78
	t_8^2	7.56	9.83	5.81	7.56	5.78	7.51
링크 한계비용	mc_1^1	8.06	8.94	5.13	5.59	5.11	5.53
	mc_1^2	8.06	9.90	5.13	6.38	5.11	6.31

mc_a^m	mc_2^1	5.75	6.40	3.42	3.76	3.38	3.72
	mc_2^2	5.75	6.98	3.42	4.21	3.38	4.16
	mc_3^1	4.03	4.47	2.57	2.79	2.56	2.76
	mc_3^2	4.03	4.96	2.57	3.19	2.56	3.16
	mc_4^1	3.14	3.44	2.09	2.24	2.07	2.22
	mc_4^2	3.14	3.87	2.09	2.61	2.07	2.59
	mc_5^1	14.57	16.32	8.49	9.42	8.37	9.31
	mc_5^2	14.57	17.68	8.49	10.41	8.37	10.29
	mc_6^1	18.64	20.87	10.98	12.10	10.81	11.97
	mc_6^2	18.64	22.71	10.98	13.48	10.81	13.34
	mc_7^1	12.08	13.32	7.70	8.37	7.53	8.29
	mc_7^2	12.08	14.77	7.70	9.55	7.53	9.46
	mc_8^1	21.81	24.20	13.07	14.36	12.90	14.19
	mc_8^2	21.81	26.47	13.07	16.10	12.90	15.93
최소 통행비용 u_w^m	u_1^1	9.51	9.51	16.48	16.48	17.89	17.89
	u_1^2	9.51	12.36	16.48	21.42	15.44	20.07
	u_2^1	9.33	9.33	16.19	16.19	17.60	17.60
	u_2^2	9.33	12.13	16.20	21.06	15.20	19.76

〈부록-표2〉에서 계층 1의 기점(2)→종점(4)의 통행에서 이용 가능한 경로는 링크집합 5→7, 5→3→1의 2가지 경로가 존재한다. 사용자균형의 경우 기종점 최소통행비용(u_2^1)은 9.33(분)이고 경로 5→7의 통행비용은 4.51+4.82=9.33(분), 경로 5→3→1의 통행비용은 4.51+1.61+3.21=9.33(분)으로 균형 상태임을 알 수 있다.

시간단위 체계최적의 경우 기종점 최소통행비용(u_2^1)은 16.19(분)이고 경로 5→7의 통행비용은 8.49+7.70=16.19(분), 경로 5→3→1의 통행비용은 8.49+2.57+5.13=16.19(분)으로 균형 상태임을 알 수 있다.

또한 화폐단위 체계최적의 경우도 기종점 최소통행비용(u_2^1)은 17.60(백원)이고 경로 5→7의 통행비용은 9.31+8.29=17.60(백원), 경로 5→3→1의 통행비용은 9.31+2.76+5.53=17.60(백원)으로 균형 상태임을 알 수 있다.

♧ 주 작 성 자 : 임용택
♧ 교 신 저 자 : 김병관
♧ 논문투고일 : 2007. 6. 29
♧ 논문심사일 : 2007. 8. 27 (1차)
2007. 9. 18 (2차)
♧ 심사판정일 : 2007. 9. 18
♧ 반론접수기한 : 2008. 2. 29