

첨단교통정보체계(ATIS)하에서 협력적 사용자 균형

Cooperative user equilibrium under Advanced Traveler Information Systems

임 용 택

(여수대 교통공학과 조교수)

Key Words : 협력적 사용자균형, Wardrop 사용자균형, Fallacy of composition, Braess' paradox, ATIS

목 차

I. 서 론

II. Fallacy of composition과 Wardrop의 균형

III. 새로운 경로선택 원리 : 협력적 사용자균형

IV. 결 론

참고문헌

I. 서 론

최근 운전자에 대한 우회안내 교통정보의 제공이 가능해지고 있으며, 이런 경향은 향후 급속히 진전되리라 예상된다. 현재 교통망분석시 경로선택 기준으로 주로 사용되는 개념은 Wardrop(1952)이 제안한 사용자 균형원리(User Equilibrium)로 도로를 이용하는 운전자들 간에는 균형이 존재하며, 균형 상태에서는 자신의 경로를 임의로 변경해서 이익을 얻을 수 없는 상태로 정의된다. 그런데 사용자 균형원리는 운전자들간에 서로 협력하지 않고 오직 자신들만의 통행시간을 최소화시키려는 형태로 경로를 선택한다는 기본 가정이 존재한다. 이런 가정은 교통정보의 제공이 없는 경우에는 타당하지만, 실시간 교통정보제공이 가능한 상황에서는 무리가 있다. 즉, 교통정보를 제공받는 운전자는 다른 운전자들의 움직임을 실시간 파악할 수 있고 이에 따라 자신의 경로를 변경할 수 있기 때문이다. 이 경우 교통정보를 제공받는 운전자와 그렇지 않은 운전자간에는 리더(leader)와 추종자(follower)관계 또는 서로 협력관계가 존재할 수 있다. 이런 경우, 운전자들간의 비협력성을 가정하는 Wardrop의 사용자 균형개념은 현실에 맞지 않으며, 새로운 사용자 균형이 필요하게 된다.

본 연구에서는 교통정보를 통해 운전자간의 협력이 가능한 교통망 상황하에서 운전자의 경로선택기준을 제시하는 데 목적이 있다. 이를 Wardrop의 사용자균형과는 달리 협력적 사용자균형(Cooperative User Equilibrium)이라 정의한다. 교통정보의 효과를 분석하기 위해서 기존연구들이 진행해온 방법은 Wardrop의 사용자균형상태를 전제로 두고 운전자를 교통정보를 제공받는 집단과 그렇지 않은 집단으로 구분한 후, 이들간의 정보효과를 분석하는 방법이었다(Vuren et al.,1991; Baek et al.,1997; Yang,1998 등 참조). 따라서 기존 연구들은 운전자간의 비협력상황을 그대로 유지하는 형태를 갖고 있다.

이에 반해 본 연구에서 제시하는 방법은 운전자간의 협력상황을 고려한다는 점에 차이가 있다. 몇 개의 예제를 통해 본 연구에서 제시하는 협력적 사용자균형 개념을 설명한다.

II. Fallacy of composition과 Wardrop의 균형

먼저, 오류(fallacy)에 대해 살펴보자. 오류는 일반적으로 그럴듯하게 보이지만 실제로는 잘못된 상태를 의미한다. 합성의 오류(fallacy of composition)는 개별적인 부분들을 하나로 합칠 때 발생하는 오류로 다음과 같은 예들이 있다. "A 프로농구팀을 구성하는 선수 하나 하나는 매우 우수하다. 따라서 A 농구팀은 매우 우수하다." "분필을 구성하는 원자는 보이지 않는다. 따라서 분필은 눈에 보이지 않는다." 또 다른 예로 "승용차 한대는 버스 한 대 보다 휘발유를 적게 소비하고 오염물질도 적다. 따라서 승용차는 전체적으로 버스보다 환경적으로 유리하다". 이와 반대의 오류도 있는데, 이를 분할의 오류(fallacy of division)이라 하며 전체를 부분으로 분할할 때 발생하는 오류다. 다음과 같은 예가 있다. "왕립학회는 설립한지 300년이 넘었다. Thompson 교수는 그 학회의 회원이다. 따라서 Thompson교수의 나이는 300세가 넘었다". 물론 이런 오류들은 자주 발생하는 오류는 아니지만 경제학에서는 널리 알려진 오류들이다.

이중 합성의 오류(fallacy of composition)를 최적화문제(optimization program)에 적용해 보면, 다수의 개별 문제로 구성된 최적화문제에서 개별문제를 최적화시킨 결과를 합한 결과는 결코 전체적으로 최적화 되지 않을 수도 있다는 점을 시사하고 있다. 즉, 이것은 개별적으로 최적화 시킨 결과와 전체문제의 최적화는 서로 다를 수 있다는 것이다. 이는 상대

방에 대한 인식없이 각기 자신만의 목적을 최적화시키는 Nash게임으로 문제를 구성할 경우, 발생할 가능성이 커지게 된다.

합성의 오류를 교통부분에 적용해 보자. 일반적으로 경로선택 문제에서 주로 사용되는 Wardrop의 사용자균형원리(Wardrop User equilibrium principle, 1952)는 일종의 Nash균형으로 다음과 같이 표현된다.

[Wardrop User Equilibrium, WUE]

사용자들이 자신의 경로를 일방적으로 변경하여 통행시간을 단축할 수 없는 상태가 사용자 균형(UE)상태다.

이 경우, 사용자가 실제로 선택한 모든 경로의 통행시간은 모두 동일하며, 아직 사용되지 않은 어떤 경로의 통행시간보다 크지 않게 된다. Wardrop의 사용자 경로선택원리는 상대방에 대한 배려없이 자신의 통행비용을 최소화시키려는 자기이기적(selfish)인 원리로 이때 도달되는 균형상태가 사용자균형(User Equilibrium)이며 Nash 균형이 된다. 이런 Wardrop의 균형원리는 사용자들의 경로선택 행태를 현실적으로 잘 반영한다고 볼 수 있다.

그러나, 각 개인의 통행비용을 최소화시키려는 목적하에서 도달된 사용자균형이 개인들을 합성화(composition)시킨 전체의 최적상태인지는 불확실하다. 즉, 이런 사용자균형상태에서 도출된 결과는 최적해가 아닐 수 있는데, 다음 2가지 예제를 살펴보자.

[예제1] 사용자균형(User Equilibrium)과 사용자 최적(User Optimality) : Smith(1984)

하나의 기점과 하나의 종점을 연결하는 두 개의 경로 R_1 과 R_2 가 있다고 하자. 이때 경로비용 $C(\cdot)$ 를 아래와 같다고 가정한다.

$$C_1(f) = 3f_1 + f_2 + 1$$

$$C_2(f) = 2f_1 + f_2 + 2$$

이때, 용량제약은 없다고 가정하고 통행수요는 아래와 같이 정의한다.

$$D = \{f; f_1 + f_2 = 2, f_1 \geq 0, f_2 \geq 0\}$$

위와 같은 문제에서 경로통행량 (1, 1)이 Wardrop균형해이다. 이때, 경로통행비용은 다음과 같다.

$$C_1(1, 1) = C_2(1, 1) = 5$$

위 문제에서 또 다른 Wardrop의 균형해(Equilibrium)는 없다. 따라서 사용자 최적 통행패턴은 Wardrop 균형이어야 하며, 오직 가능한 사용자 최적 통행패턴은 $f=(1, 1)$ 이다.

그러나 사실 이 결론은 틀린 것이다. 즉, $f=(1, 1)$ 은 사용자 최적 통행패턴이 아니다. 그 이유는 경로 1의 모든 통행량이

경로 2로 전환하면 이 통행량은 더 낮은 통행비용을 갖게 되기 때문이다.

$$C_2(0, 2) = 4 < 5 = C_1(1, 1)$$

즉, $f=(1, 1)$ 이면 사용자 최적 통행패턴에 대한 정의와는 모순되는 것이다

만약, 경로 1을 이용하는 모든 통행량이 경로 2로 경로를 변경한다면, 경로 1이나 경로 2의 통행자들이 모두 경로비용이 감소하게 된다. 그러나 $f=(0, 2)$ 는 균형상태가 아니다. 이는 사용되지 않는 경로 1의 경우 비용이 3이고 사용되는 경로 2의 경우 비용이 4이므로 통행량이 경로1로 옮겨갈 동기가 남아있는 상태이기 때문이다. 즉, $f=(0,2)$ 인 경우 Wardrop의 균형상태를 만족시키지 못한다. 따라서 $f=(1,1)$ 은 Wardrop의 균형해이지만 최적해는 아니다. 중요한 결론은 합리적인 조건하에서 Wardrop의 균형은 존재하지만, 사용자 최적의 교통량은 존재하지 않을 수도 있다는 것이다 ■

[예제2] Braess' paradox (Sheffi, 1985)

<그림1>과 같이 2개의 경로와 4개의 링크를 갖고 하나의 O-D쌍을 갖는 네트워크를 생각해 보자. 총 O-D 통행량은 6 단위이며 각 링크의 통행함수는 다음과 같다.

$$c_1(x_1) = 50 + x_1$$

$$c_2(x_2) = 50 + x_2$$

$$c_3(x_3) = 10x_3$$

$$c_4(x_4) = 10x_4$$

먼저, 경로간 통행시간 균형개념을 이용하여 네트워크의 사용자균형(UE)통행패턴을 구하면,

경로통행량은 $f_1 = 3, f_2 = 3$ 통행이 되고 각 링크통행량은

$$x_1 = 3, x_2 = 3, x_3 = 3, x_4 = 3$$

이때 링크통행시간은 $c_1 = 53, c_2 = 53,$

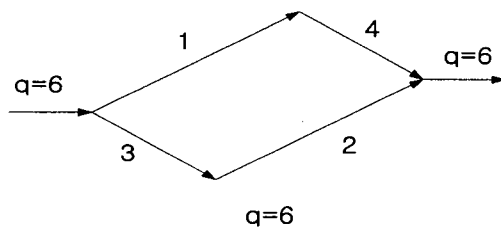
$$c_3 = 30, c_4 = 30$$

이다. 따라서, 경로시간은 $C_1^{OD} = 83, C_2^{OD} = 83$ 시간단위로서 사용자균형조건을 만족하며, 총통행시간은 498 (= 경로1의 총 통행시간 + 경로2의 총통행시간 = $83 \times 3 + 83 \times 3$) (통행 · 시간)단위이다.

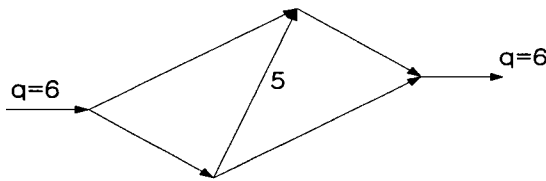
만약 교통관리자가 통행시간을 개선시키고 지체를 줄이기 위해 교통망을 확장한다고 가정하자. 이것은 두개의 중간노드를 연결하는 새로운 도로를 건설함으로써 가능하다. 그림(b)은 추가된 링크(5번째)와 링크추가로 생긴 새로운 경로를 보여주고 있다. 새로 추가된 링크의 통행비용함수는 다음과 같다.

$$c_5(x_5) = 10 + x_5$$

새로운 네트워크에 대한 사용자균형상태는 다음과 같이 계산



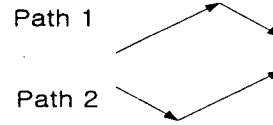
(a) Original network



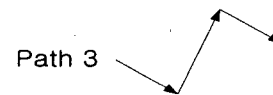
(b) Expanded network

<그림1> Braess' paradox

Path definition



형인 Wardrop의 균형 상태에서 얻어진 결과는 최적해(optimal solution)가 아닐 수도 있으며, Braess의 역설과 같이 특정 조건이 만족되는 경우에는 사용자의 통행시간을 오히려 증가시키는 오류(fallacy)를 야기할 수도 있다는 것이다. 즉, 이런 결과는 사용자들이 자신만의 목적을 배타



적으로 만족시키기 위하여 취하는 비협력(Non-cooperative) 게임하에서 발생할 가능성이 커진다. 이런 문제가 생기는 근본 원인은 도로를 이용하는 사용자들이 서로 협력하지 않고 비협력하에서 자신들만의 목적을 최적화시키기 때문에 발생한다고 볼 수 있다.

된다.

즉, 균형교통량은

$$x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 4, x_4 = 4, x_5 = 2$$

이며, 경로교통량은

$$f_1 = f_2 = f_3 = 2$$

이다. 따라서, 경로통행시간은 $C_1^{OD} = C_2^{OD} = C_3^{OD} = 92$ 시간단위이며, 총통행시간은 $552 (= \text{경로1} + \text{경로2} + \text{경로3의 총 통행시간} = 92 \times 2 + 92 \times 2 + 92 \times 2)$ (통행 · 시간)단위이다

여기에서 주목해야 할 점은 네트워크의 총통행시간이 링크추가 전의 498시간과 비교해 링크를 추가하면 552시간이라는 것이다. 총통행시간이 증가했을 뿐 아니라 네트워크의 통행자가 경험한 통행시간도 83시간단위에서 92시간단위로 증가한 것이다. 즉, 교통혼잡을 완화시키고자 신설된 도로가 교통상황을 더 악화시키고 있다. 이런 모순을 Braess역설(Braess's paradox)라고 한다. 이 모순은 물론 쉽게 설명할 수 있다. 통행시간의 증가는 각각의 운전자가 그 자신의 통행시간을 최소화한다는 사용자균형(UE)에 근거한다. 경로에 대한 이런 개인적인 선택행위는 다른 네트워크 이용자에게 미치는 영향을 고려하지 않고 자기 이익만을 위주로 행해진다. 그러므로 총통행시간이 감소하는 것을 기대할 수 없게 된다 ■

앞에서 살펴본 2개의 예제를 통하여 알 수 있는 것은 Nash균

III. 새로운 경로선택 원리 :

협력적 사용자균형

최근 실시간 교통정보제공이 가능해지고, 사용자간의 커뮤니케이션이 활발해짐에 따라, 사용자간의 협력이 가능해질 것으로 보인다. 만약 이런 상황이 현실화된다면, 사용자간의 비협력력을 전제로 하는 Wardrop의 경로선택원리는 수정이 필요하며, 사용자간의 협력을 균형원리에 포함시킬 필요가 있다. 즉, 사용자간의 협력하에서 경로를 선택하는 원리를 새롭게 정의하게 된다. 이는 자연스러운 통행행태라기 보다는 자신의 통행시간을 최소화시키기 위하여 상대방과 협력하는 전략적인 통행행태라고도 볼 수 있다. 이런 측면에서 새롭게 정의되는 사용자 균형원리를 협력적 사용자균형(Cooperative User Equilibrium, CUE) 또는 전략적 사용자균형(Strategic User Equilibrium)라 표현한다.

[Cooperative User Equilibrium, CUE]

At cooperative user equilibrium, all used paths have the same cooperative travel time and the cooperative travel time is the minimum cooperative travel time for each OD pair.

본연구에서 새롭게 제시한 협력적 사용자균형(CUE)원리를 예제를 통하여 기존 Wardrop의 균형(WUE)원리와 비교해 보자.

【예제3】 Wardrop의 사용자균형(WUE)과 협력적 사용자균형(CUE)

교통망에 2명의 운전자가 존재하며, 운전자1은 교통정보를 제공받고 운전자2는 그렇지 않은 경우를 고려해보자. 각 운전자들은 다음 식과 같이 주어진 자신의 목적함수 P_1 , P_2 를 최소화시키는 것으로 가정한다.

$$(운전자1) P_1(x_1, x_2) = x_1^2 - x_1x_2 + 2x_2^2 + x_1 \quad (1)$$

$$(운전자2) P_2(x_1, x_2) = 2x_1^2 - x_1x_2 + x_2^2 \quad (2)$$

여기서 목적함수 P_1 , P_2 는 Fisk(1984)가 제안한 식으로, 각각 최소값이 존재한다.

먼저, 기존 Wardrop의 사용자균형(WUE)원리로 위 문제를 풀어보자. 이 경우 운전자1과 2는 서로 상대방을 고려하지 않고 자신만의 목적함수를 최소화시키는 방향으로 의사결정을 하는 비협력상황이 된다. 따라서,

$$\frac{\partial P_1}{\partial x_1} = 2x_1 - x_2 + 1 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial x_2} = -x_1 + 2x_2 = 0 \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 연립해서 풀면 다음과 같다.

$$x_1 = -\frac{2}{3} \quad x_2 = -\frac{1}{3} \quad \text{이고}$$

$$P_1 = -0.222 \quad P_2 = 0.777 \quad (5)$$

다음으로 본 연구에서 제시한 협력적인 사용자균형(CUE)원리로 위 문제를 풀어 보자. 운전자1은 제공받는 교통정보를 통하여 자신의 결정에 대하여 운전자2가 어떻게 반응하는지를 알 수 있기 때문에 이를 고려하여 결정을 내리게 된다. 반면, 운전자2는 자신만의 목적을 최소화시키려는 결정을 하게 된다. 따라서 이 경우, 운전자2의 움직임이 운전자1의 목적함수내에 포함되어야 하므로, 위 식 (4)로부터 도출된

$x_2 = \frac{1}{2} x_1$ 을 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_1(x_1, x_2(x_1)) = x_1^2 + x_1$$

따라서,

$$\frac{\partial P_1}{\partial x_1} = 2x_1 + 1 = 0 \text{이므로, 최종적으로 다음과 같은}$$

해를 얻는다.

$$x_1 = -\frac{1}{2} \quad x_2 = -\frac{1}{4}$$

$$P_1 = -0.250 \quad P_2 = -0.437 \quad (6)$$

여기서, Wardrop의 사용자균형원리로 구한 해(식5)와 협력적 사용자균형원리로 구한 해(식6)에는 분명한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 협력적 사용자균형원리로 푼 해가 더 낮은 목적함수 값을 갖고 있어 더 좋은 해를 도출한다는 사실을 보여 준다. 이는 교통정보의 효과로 간주될 수 있으며 교통정보를 통한 상호 협력적인 상황하에서는 Wardrop의 비협력적 경로선택원리 보다 본 연구에서 제안한 협력적인 사용자 균형이 더 현실적임을 시사하고 있다 ■

IV. 결론

본 연구에서는 지능형교통체계(Intelligent Transport Systems)가 구현됨에 따라 운전자들간의 경로선택행위가 비협력상황이 아닌 협력적인 상황으로 전개될 것으로 예상하고 이에 맞는 새로운 경로선택 원리를 제시하였다. 제시된 협력적 사용자균형은 운전자들간의 협력관계하에서 이루어진 균형상태로 기존 Wardrop의 사용자 균형원리와는 다른 균형상태로 정의된다. 예제를 통하여 이들 두 개의 사용자 균형상태를 분석한 결과, 협력적 균형상태가 Wardrop의 균형상태 보다 더 좋은 해를 찾을 수 있음을 확인할 수 있었다.

그러나, 본 연구는 경로선택문제에 있어 이제 새롭게 시작하는 접근법으로 향후 많은 연구과제가 남아 있다. 먼저, 협력적 균형개념을 교통망차원으로 적용하기 위해서는 협력적 통행시간(cooperative travel time)에 대한 정의가 필요하다. 협력적 통행시간은 기존 통행비용함수와는 달리, 나의 경로선택에 대한 상대방의 반응(reaction)을 통행비용함수내에 포함해야 한다. 두 번째로 수리적인 모형의 구성(model formulation)과 해석 알고리즘(solution algorithm)을 개발하는 연구도 있다. 본 연구에서는 아직 이 문제에 대한 답을 갖고 있지 못해서 간단한 수학적인 문제만을 다루었다. 또한, 모형구성과 관련해서 정보를 받는 집단과 그렇지 않는 집단 등 사용자들 여러 형태로 구분하여 모형식을 구축해야 할 것으로 보인다. 이밖에 교통정보제공과 관련된 기존 연구들(예를 들어 정보제공으로 인한 Braess' paradox)에 대해서도 새로운 해석이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- Baek, S., Y. Lim, K. Lim (1997) Multi-Class Dynamic Stochastic Assignment, proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, 21~24 Oct. Berlin, 1997
- Bandyopadhyay, S. (1996) Growth, welfare and optimal trade taxes: a fallacy of composition, Journal of Development

Economics, Vol. 50, 369-380

Fisk, C.S.(1984) Game theory and transportation systems modelling, Transportation Research Vol. 18B, 301-313

Sheffi,Y.(1985) Urban Transportation Networks, Prentice Hall, Englewood Cliffs,NJ.

Smith M.J,(1984) Two alternative definitions of traffic equilibrium, Transportation Research 18B, No.1, 63-65

Yang, H.(1998) Multiple equilibrium behaviors and advanced traveler information systems with endogenous market penetration, Transportation Research 32B, 205-218

Wardrop J.G.,(1952) Some theoretical aspects of road traffic research, Proc. Inst. Civil Engineer, Part II, 325-378