

# Game-Based Content Caching and Data Sponsor Scheme for the Content Network

Won JoongSeop<sup>†</sup> · Kim SungWook<sup>††</sup>

## ABSTRACT

Recently, as the types of services that can be enjoyed in mobile telecommunication networks such as social networks and video streaming are increasing, mobile users(MUs) can access mobile contents easily by consuming mobile data. However, under a mobile telecommunication environment, MUs have to pay a high data fee to a network service provider(SP) in order to enjoy contents. The 'data sponsor' technique, introduced as a way to solve this problem, has attracted attention as a breakthrough method for enhancing contents accessibility of MUs. In this paper, we propose an algorithm that determines the optimal discount rate through the Stackelberg game in the data sponsor environment. We also propose an algorithm to design edge caching, which caches highly popular content for MUs on edge server, through many-to-many matching game. Simulation results clearly indicate that the profit for CP's content consumption is improved by about 6~11%, and the profit of CP according to the ratio of edge caching is improved by about 12% than the other existing schemes under data sponsor environment.

**Keywords :** Game Theory, Stackelberg Game, Matching Game, Data Sponsoring

## 콘텐츠 네트워크 환경에서 게임이론을 이용한 콘텐츠 캐싱 및 데이터 스폰서 기법

원종섭<sup>†</sup> · 김승욱<sup>††</sup>

## 요약

최근 소셜 네트워크, 비디오 스트리밍 등 이동통신망 환경에서 즐길 수 있는 서비스가 종류가 점점 증가함에 따라, 모바일 사용자(MU: Mobile User)는 이동통신 데이터를 소모하여 원하는 콘텐츠에 더욱 쉽게 접근할 수 있게 되었다. 하지만 이동통신 환경 아래서, 모바일 사용자는 콘텐츠를 즐기기 위해 네트워크 서비스 제공자(SP: Service Provider)에게 높은 이동통신 데이터 요금을 내야한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 소개된 '데이터 스폰서(data sponsor)' 기법은 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을 높이는 획기적인 방법으로 주목받고 있다. 본 논문에서는 서비스 제공자와 콘텐츠 제공자를 리더 그룹, 모바일 사용자를 추종자 그룹으로 하는 슈타켈버그 게임을 통해 최적의 요금 할인율을 결정짓는 알고리즘을 제안한다. 또한 모바일 사용자의 콘텐츠에 대한 접근성을 더욱 높이기 위해, 모바일 사용자에게 높은 인기가 있는 콘텐츠를 엣지 서버에 캐싱하는 엣지 캐싱을 게임이론의 다대다 매칭 게임을 통해 설계하는 알고리즘을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존에 제안된 데이터 스폰서 기법에 비해 본 논문에서 제안한 방법이 제공자들의 콘텐츠 소모에 대한 수익률 측면에서 6~11% 가량의 우위를 보였으며, 엣지 캐싱의 유무에 따라 콘텐츠 제공자의 수익률이 12% 향상됨을 확인하였다.

**키워드 :** 게임이론, 슈타켈버그 게임, 매칭 게임, 데이터 스폰서

## 1. 서론

최근 소셜 네트워크, 비디오 스트리밍 등 이동통신망 환경

에서 즐길 수 있는 서비스가 종류가 점점 증가함에 따라, 모바일 사용자(MU: Mobile User)는 이동통신 데이터를 소모하여 원하는 콘텐츠에 더욱 쉽게 접근할 수 있게 되었다. 하지만 이동통신 환경 아래서, 모바일 사용자는 콘텐츠를 즐기기 위해 네트워크 서비스 제공자(SP: Service Provider)에게 높은 이동통신 데이터 요금을 내야한다. 높은 이동통신 데이터 요금은 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을 방해하는 중요한 방해요소이기 때문에, 콘텐츠 제공자(CP: Content Provider)의 입장에서 데이터 요금은 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2019-2018-0-01799).

† 비회원: 티맥스소프트 소프트웨어 연구개발 연구원

†† 중신회원: 서강대학교 컴퓨터공학과 교수  
Manuscript Received: December 27, 2018  
First Revision: January 23, 2019  
Accepted: February 19, 2019

\* Corresponding Author: Kim SungWook(swkim01@sogang.ac.kr)

저하시켜 자신의 더 높은 이익 창출을 방해하는 걸림돌 중 하나이다. 이를 해결하기 위한 방법으로, ‘데이터 스폰서(data sponsor)’가 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을 높이는 방법으로 주목받고 있다[1].

2014년, AT&T는 유튜브, 트위터와 같은 콘텐츠 제공자가 모바일 사용자의 이동통신 요금을 일정량 지불하는 데이터 스폰서 기법을 제안하였다. 데이터 스폰서 기법은 모바일 사용자가 콘텐츠 제공자의 지원을 받아 더 적은 이동통신 요금으로 콘텐츠를 즐기게 함으로써 콘텐츠에 대한 모바일 사용자의 접근성을 높일 수 있으며, 동시에 콘텐츠 제공자는 콘텐츠에 포함되어 있는 광고 등의 부가적인 수익을 통해 보다 높은 이익 창출이 가능해진다. 결론적으로, 데이터 스폰서 기법은 콘텐츠 제공자와 모바일 사용자, 그리고 서비스 제공자 모두에게 이익이 되는 잠재성을 가지고 있다. 두 제공자와 모바일 사용자가 데이터의 단위가격을 조정하고 데이터 지원 금액을 조절하는 것으로 본인의 이익을 최대화하기 위해 행동한다는 점에서, 데이터 스폰서는 제공자와 사용자를 참가자로 하는 경쟁적 상황으로 설명할 수 있으며, 이는 게임 상황으로 설계하기 수월하다. 때문에 데이터 스폰서에서 각 참가자의 이익을 최대화하기 위한 해결 방법으로 게임이론(game theory)을 적용하려는 움직임이 활발해지고 있다.

예를 들어, 콘텐츠 트래픽의 양이 불확실할 때 콘텐츠 제공자의 트래픽 데이터를 조사함으로써 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자 간의 데이터 가격 결정 문제를 다룬 기법이 제안되었으며[2], 다수의 콘텐츠 제공자 간 경쟁상황에서의 데이터 스폰서를 다룸으로써 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자의 이익 증진을 추구하는 연구도 있다[3]. 또한 서비스 제공자의 독점 상황 아래에서 단일 콘텐츠 제공자와 다수의 모바일 사용자간의 데이터 스폰서 환경을 슈타켈버그 게임으로 모델링한 연구가 진행되었으며[4], 데이터 스폰서를 지원하는 콘텐츠 제공자와 지원하지 않는 콘텐츠 제공자와의 공존 상황을 다룬 연구 역시 존재한다[5, 6]. 그 외, 서비스 제공자와 콘텐츠 제공자 간의 상호 작용을 연구하고, 콘텐츠 제공자의 트래픽과 평가 함수에 의한 가격 결정 메커니즘을 소개하는 연구도 있다[7]. 마지막으로 진화게임을 토대로 모바일 사용자간 서비스 선택 절차에 대해 연구하고, 이것이 서비스 제공자와 콘텐츠 제공자의 이익 증진에 어떤 긍정적인 영향을 미치는지를 나타낸 연구도 존재한다[8].

그러나 위의 연구들은 데이터 스폰서 환경에 있어 중요한 부분인 모바일 사용자 간 상호작용을 고려하지 않고 있다. 이동통신 환경에서 밀집된 지역의 트래픽 증가는 곧 해당 서비스를 사용하는 모바일 사용자의 서비스 질 감소로 이어진다. 때문에 트래픽에 따른 혼잡제어를 모바일 사용자 간 상호작용으로 고려한 데이터 스폰서 환경을 설계해야 한다. 뿐만 아니라, 데이터 스폰서 환경에서 모바일 사용자의 요금 지원 외의, 콘텐츠 제공자가 선택할 수 있는 전략의 다양성에 대한 고려가 부족하다. 이동통신 환경에서 콘텐츠 제공자는 엡지 캐싱을 통해 모바일 사용자가 높은 서비스 품질로 콘텐츠를

즐길 수 있게끔 하는 엡지 캐싱이 가능하다.

데이터 스폰서 환경에서 모바일 사용자의 요금 지원과 더불어, 모바일 사용자들의 콘텐츠에 대한 선호도를 파악하여 캐싱을 한다면 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성이 더욱 높아져 더 많은 이익효과를 볼 수 있을 것이다. 때문에 본 논문에선 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자 간 협력게임을 통해 데이터 스폰서 비용과 데이터 가격을 결정하고, 혼잡제어를 고려하여 모바일 사용자 간 상호작용을 포함한 슈타켈버그 게임을 소개한다. 또한 콘텐츠 제공자의 이익 증가를 위해, 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을 높이는 엡지 캐싱을 메칭 게임으로 구현한다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2장에서는 데이터 스폰서, 엡지 캐싱의 개념 및 게임이론에 대한 관련 연구를 설명하고 3장에서는 제안된 기법의 엄밀성 증명 및 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 기존의 기법들과의 성능 평가를 통해 제안된 기법의 유효성을 논하고 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

콘텐츠 제공자의 이익을 최대화하기 위한 다양한 데이터 스폰서 기법이 존재하지만, 그 중 콘텐츠 트래픽 기반의 데이터 스폰서 기법이 대표적인 방법이다. 또한 모바일 사용자를 게임 참가자로 고려하지 않고, 서비스, 콘텐츠 제공자 간 슈타켈버그 게임을 통한 데이터 스폰서 기법에 대해 알아본다.

### 2.1 콘텐츠 트래픽 기반의 데이터 스폰서

콘텐츠의 소모 트래픽 기반의 데이터 스폰서 기법은, 이동통신망 상에서 발생한 콘텐츠 관련 모든 트래픽을 조사하여 이를 기반으로 모바일 사용자에게 요금을 지원해준다[2]. 이때 발생한 트래픽의 위치와 시간 등을 매개 변수로 설정하여 콘텐츠의 발생 상황에 따라 지원해주는 요금의 양을 조절한다. 또한 콘텐츠 트래픽이 불확실한 상황에서 콘텐츠 제공자의 데이터 스폰서 방법에 대해 트래픽 관점으로 설명하였다.

이 방법에서 콘텐츠 제공자는 모바일 사용자의 특성을 고려하는 것이 아닌 발생된 콘텐츠의 트래픽에 집중하기 때문에, 요금 지원을 결정에 필요한 계산량이 적다는 장점이 있다. 또한 이동통신망에서의 트래픽 측정이 불확실한 상황에서 트래픽의 특성과 예측에 따른 요금 결정 방법 또한 제시되어 있기 때문에, 데이터 스폰서의 안정성을 높였다. 하지만 혼잡제어와 같이 트래픽 발생에 따른 모바일 사용자 간 경쟁 상황을 고려하지 않았으며, 콘텐츠의 종류에 따른 수익의 다양성을 고려하지 않았기 때문에, 콘텐츠 제공자의 이익 증진에 대한 효과가 상대적으로 적다는 단점이 있다.

### 2.2 서비스, 콘텐츠 제공자 간 슈타켈버그 게임을 통한

#### 데이터 스폰서

서비스 제공자와 콘텐츠 제공자간의 슈타켈버그 게임을 통한 데이터 스폰서 기법에선, 서비스 제공자는 데이터 단위

당 요금 설정과 데이터 요금 지원율을 전략으로 가지며, 콘텐츠 제공자는 서비스 제공자가 제안한 전략의 수용 여부를 전략으로 가진다[5]. 하나의 서비스 제공자가 리더, 다수의 콘텐츠 제공자가 추종자의 형태로 슈타켈버그 게임을 진행하는 해당 모형은 데이터 스폰서를 지원하는 콘텐츠 제공자와 지원하지 않는 콘텐츠 제공자와의 공존 상황을 다루었다.

이 방법에서 콘텐츠 제공자는 서비스 제공자가 제안한 요금 지원율을 전략으로 선택한다. 서비스 제공자가 제공하는 이동통신망을 사용하는 콘텐츠 제공자 입장에서, 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자가 서로 비협력적인 경쟁상황이라면 위의 방법은 적은 계산량으로 효율적인 데이터 스폰서를 구현할 수 있다. 하지만 만약 협력적인 관계라면, 콘텐츠 제공자는 본인이 제공하는 콘텐츠와 모바일 유저의 특성을 전략에 세세히 설정할 수 없기 때문에, 콘텐츠 제공자의 수익 증진에 어려움이 있다. 또한 이 방법 역시 혼잡제어 등과 같은 트래픽 발생에 따른 모바일 사용자 간 경쟁 상황을 고려하지 않았다.

### 3. 제안된 기법

본 장에서는 데이터 스폰서 환경에서 콘텐츠 제공자, 서비스 제공자, 모바일 사용자들 간의 슈타켈버그 게임에 대해 자세히 설명한다. 또한 제한된 저장 공간을 가지고 있는 콘텐츠 제공자의 엣지 서버에, 최적의 콘텐츠 캐싱을 위한 매칭 게임을 설명한다. 제안하는 기법을 적용함으로써 데이터 스폰서 환경에서 세 부류의 참가자(서비스 제공자, 콘텐츠 제공자, 모바일 사용자)의 최적 전략을 도출하고, 매칭게임을 통한 최적의 콘텐츠 캐싱을 보인다.

#### 3.1 데이터 스폰서 시스템 모델

우선 본 논문은 세 부류의 참가자로 구성된 데이터 스폰서 시장을 고려한다. 구체적으로, 이동통신 환경을 제공하는 서비스 제공자, 데이터를 소모하여 이를 사용하는 모바일 사용자, 그리고 모바일 사용자에게 콘텐츠를 제공하여 수익을 얻는 콘텐츠 제공자로 구성된 참가자들이 서로 상호작용을 통해 각자의 이익을 결정한다. 이를 본 논문에선 게이미피케이션을 활용하여 모델링한다. 이를 위해 각 참여자들의 효용함수(utility function)를 정의하고, 효용함수를 토대로 하여 참여자 간 두 단계 슈타켈버그 게임을 실시한다.

##### 3.1.1 모바일 사용자의 효용

우선 앞서 언급했듯 게임은 참가자, 참가자의 선택 가능한 전략, 그리고 선택한 전략의 결과인 효용으로 구성된다. 따라서 데이터 스폰서 환경을 모델링하기 위해선 우선적으로 각 참가자의 효용함수를 정의해야 한다. 모바일 사용자  $i \in N$ ,  $N = \{1, \dots, n\}$ 의 데이터 요구량을  $x_i (x_i \geq 0)$ 라 하고,  $X = (x_1, \dots, x_n)$  과  $X_{-i}$  를 모든 모바일 사용자의 데이터 요구량 프로파일과 모바일 사용자  $i$ 를 제외한 데이터 요구량 프

로필이라 할 때, 모바일 사용자  $i$ 의 효용 함수는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$u_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i) = a_i \log_b(x_i + 1) - c \left( \sum_{j \in N} x_j \right)^2 - p^u (1 - \theta_i) x_i \quad (3.1)$$

Equation (3.1)의 우변 첫 번째 항은 모바일 사용자  $i$ 가 이동통신 데이터를 소모함으로써 얻을 수 있는 가치를 나타낸다. 여기서  $a_i > 0$ ,  $b_i > 1$ 은 각 유저의 특성을 나타내는 인자이다.  $x_i$ 가 커질수록 기울기가 작아져 증가폭이 점점 줄어드는 로그함수의 특성은 데이터 소모가 많아질수록 모바일 사용자가 느끼는 만족도의 증분이 점점 작아지는 것을 잘 나타낼 수 있다. 우변 두 번째 항은 서비스 제공자가 모바일 사용자들에게 제공할 수 있는 이동통신 트래픽 수용량의 한계로 인한 혼잡도를 나타낸다. 혼잡도를 각 모바일 사용자의 데이터 사용량 합에의 제곱과 혼잡계수를 통해 나타내어, 전체적인 데이터 사용량의 증가가 각 모바일 사용자의 혼잡도에 영향을 주어 효용의 감소로 이어지는 것을 나타내었다[9]. 우변의 마지막 항은 모바일 사용자가 데이터를 사용했을 때 서비스 제공자에게 지불해야 하는 단위요금  $p^u$ 과 콘텐츠 제공자가 모바일 사용자의 요금의 일부  $\theta_i$ 를 스폰서 해줌으로써, 모바일 사용자가 최종적으로 지불해야 하는 요금을 나타낸다.

##### 3.1.2 콘텐츠 제공자의 효용

각 모바일 사용자  $i$ 의 스폰서 비율  $\theta_i (\theta_i \in [0, 1])$ 은 콘텐츠 제공자에 의해 결정된다. 콘텐츠 제공자의 효용은 콘텐츠를 소모함으로써 얻는 광고 수익과 모바일 사용자에게 지원해주는 스폰서 비용을 포함한다. 스폰서 비용은 서비스 제공자가 지정한 데이터 단위요금과 모바일 사용자의 데이터 소모량과 관계되므로, 콘텐츠 제공자의 효용함수는 Equation (3.2)와 같이 정의할 수 있다.

$$CP = \gamma \sum_{i \in N} (s x_i - t x_i^2) - p^u \sum_{i \in N} x_i \theta_i \quad (3.2)$$

일반적으로 콘텐츠 소모를 통해 얻을 수 있는 광고 수익은 각 모바일 사용자 마다 일정량 제한되어있다. 이는 광고를 적은 사람이 많이 보는 것보다 많은 사람이 적게 보는 것이 더 큰 광고 효과를 가진다는 광고주의 입장이 고려된 것이기 때문에, 효용함수에서 우변 첫 번째 항과 같이 각 모바일 사용자의 데이터 사용량의 이차식 합으로 콘텐츠 제공자의 이익을 나타낼 수 있다.  $\gamma$ 은 모바일 사용자의 데이터 사용량과 통화의 가치를 동등하게 해주는 인자이며  $s, t > 0$ 은 콘텐츠 제공자의 특성을 나타내는 인자이다. 우변의 두 번째 항은 콘텐츠 제공자가 스폰서를 해줌으로써 소비되는 요금을 나타낸다.

##### 3.1.3 서비스 제공자의 효용

서비스 제공자의 효용은 모바일 사용자와 콘텐츠 제공자

에게서 받는 데이터 사용 요금의 총 합이라 할 수 있다. 이동통신 네트워크를 유지하기 위해 드는 비용을 고려할 수 있겠지만, 네트워크 유지비용은 이동통신 데이터 사용에만 영향을 받는 것이 아닐뿐더러, 데이터 요금으로 얻는 수익과 비교하면 굉장히 미시적이기에 함수의 간편화를 위해 생략한다. 또한 모든 모바일 사용자에게 책정되는 데이터 단위요금에, 서비스 제공자의 효용함수는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$SP = p^u \sum_{i \in N} x_i \quad (3.3)$$

3.2 제안하는 두 단계 슈타켈버그 게임

Fig. 1과 같이, 데이터 스폰서 상황은 두 단계 슈타켈버그 게임 상황으로 모델링할 수 있다. 첫 번째 단계에서, 서비스 제공자와 콘텐츠 제공자는 슈타켈버그 게임에서의 리더 역할을 하며 서로 협력하는 상황 아래에서 자신의 전략을 결정한다. 이때 서비스 제공자의 전략은 Equation (3.3)을 최대화시킬 수 있는 단위요금  $p^u$ 이며, 콘텐츠 제공자의 전략은 Equation (3.2)를 최대화시킬 수 있는 각 모바일 유저의 스폰서 비율  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 이다. 그 뒤, 두 번째 단계에서 각 모바일 사용자는 리더가 정해놓은  $p^u, \theta$ 를 토대로 Equation (3.1)을 최대화하기 위한 전략  $x_i$ 를 설정한다.

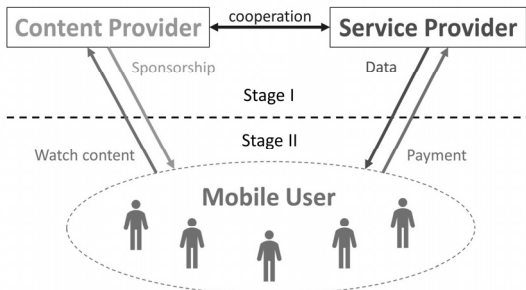


Fig. 1. Two-stage Stackelberg Game Model

3.2.1 모바일 사용자의 데이터 사용량 결정 방식

슈타켈버그 게임의 두 번째 단계는 리더의 전략을 보고 모바일 사용자들이 자신의 효용이 최대화가 되는 전략을 선택하는 것이다. 이때 모바일 사용자는 혼잡성을 효용함수에 포함하고 있기 때문에, 비협조 서브 게임  $G$ 로 정의할 수 있다. 고로 두 번째 단계에서 중요한 것은, 그 어떤 모바일 사용자의 효용도 증가하지 않는 균형점을 찾는 것이다.

서브게임  $G$ 에서, 리더의 전략과 본인을 제외한 나머지 모바일 사용자의 전략  $X_{-i}$ 가 주어졌을 때, 모바일 사용자  $i$ 의 최적 전략은 효용함수 최대화 되는 지점이다. 여기서 모바일 사용자의 효용함수는 극점이 하나 존재하는 오목 함수의 꼴을 띠기 때문에,  $\frac{\partial u_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i)}{\partial x_i} = 0$ 을 만족하는  $x_i$ 가 모

바일 사용자  $i$ 의 최적전략이라 할 수 있다. 이를 효용함수에 직접적으로 계산하면 모바일 사용자  $i$ 의 최적전략  $x_i^*$ 는 아래와 같다.

$$x_i^* = \max \left\{ 0, \frac{1}{4c} \left( -(K+2c) + \sqrt{(K-2c)^2 + 8c \frac{a_i}{\ln b_i}} \right) \right\}$$

$$\text{where } K = p^u (1 - \theta_i) + 2c \left( \sum_{j \in N, j \neq i} x_j \right) \quad (3.4)$$

Equation (3.4)에서 알 수 있듯, 각각의 모바일 사용자는 본인의 데이터 사용량을 무한히 증가시켜 추가적으로 얻는 이익이 없음을 알 수 있다. 때문에 주어진 효용함수를 가진 서브게임  $G$ 에서 균형점이 존재한다는 존재성과, 해당 균형점이 유일하다는 유일성을 보인다면 계산으로 얻어지는 최적 전략을 통해 서브게임  $G$ 에서의 균형점을 찾을 수 있다.

Theorem 1:

$u_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i)$ 를 효용함수로 가지는 비협력 서브게임  $G$ 는 내쉬 균형이 적어도 하나 존재한다.

Proof:

효용으로 엄밀한 오목함수를 가진 N-person 게임은 균형점이 적어도 하나 무조건 존재한다[10]. 서브게임  $G$ 의 효용함수  $u_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i)$ 는  $u_i(tx_i + (1-t)y_i, X_{-i}, p^u, \theta_i) > tu_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i) + (1-t)u_i(y_i, X_{-i}, p^u, \theta_i)$ 를 항상 만족하기 때문에 엄밀한 오목함수라 할 수 있다 ( $t \in [0, 1], x_i, y_i$ 는  $i$ 의 전략 정의역). 때문에 서브게임  $G$ 에는 균형점이 존재한다.

Theorem 2:

$u_i(x_i, X_{-i}, p^u, \theta_i)$ 를 효용함수로 가지는 비협력 서브게임  $G$ 에서, 효용 프로파일 관점에서의 point-to-set mapping의 야코비 행렬이 엄밀한 대각 오목이기 때문에, 존재하는 내쉬 균형점은 유일하다.

Proof:

$U(X) = \{u_1(X), \dots, u_n(X)\}$ 에서, point-to-set mapping  $F(U(X)) = [\nabla_{x_i} u_i(X)]_{i=1}^N$ 을 가질 수 있다. 이때

$$\nabla F(U(X)) = \begin{bmatrix} \nabla_{1,1}^2 u_1(x) & \nabla_{1,2}^2 u_1(x) & \dots & \nabla_{1,n}^2 u_1(x) \\ \nabla_{2,1}^2 u_2(x) & \nabla_{2,2}^2 u_2(x) & \dots & \nabla_{2,n}^2 u_2(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \nabla_{n,1}^2 u_n(x) & \nabla_{n,2}^2 u_n(x) & \dots & \nabla_{n,n}^2 u_n(x) \end{bmatrix}$$



$$= \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{\ln b_1(x_1+1)^2} & -2c & \dots & -2c \\ -2c & \frac{-a_2}{\ln b_2(x_2+1)^2} & \dots & -2c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -2c & -2c & \dots & \frac{-a_n}{\ln b_n(x_n+1)^2} \end{bmatrix}$$

이며, 계산을 통해  $\nabla F(U(X)) + \nabla F(U(X))^T$  가 실수 범위 안에 있는 임의의 행렬  $A$ 에 대해  $A(\nabla F(U(X)) + \nabla F(U(X))^T)A^T < 0$  을 만족시키는 음의 정부호 행렬이기 때문에,  $\nabla F(U(X))$ 가 엄밀한 대각 오목이라는 것을 보일 수 있다. point-to-set mapping 행렬  $\nabla F(U(X))$ 가 엄밀한 대각 오목이라는 것은  $U(X)$ 를 효용함수 프로파일로 가지는 게임 상황에서 균형점이 유일하다는 것과 동치이기 때문에[10], 서브게임  $G$ 는 유일한 균형점을 가진다.

위와 같이 두 번째 단계의 서브게임에서 내쉬 균형의 존재성과 유일성을 보였기 때문에, Equation (3.4)를 통해 모바일 사용자의 최적 전략을 결정할 수 있다. 이 경우, 반복적으로 모바일 사용자의 전략을 수정하는 아래의 알고리즘을 사용하여 보다 낮은 계산량으로 낮은 손실율의 내쉬 균형점을 찾을 수 있다[11].

### 3.2.2 제공자의 요금 할인율과 데이터 요금 결정 방식

비협력 게임에서, 이기적인 참가자간의 게임 진행은 최적의 값이 아닌, 비효율적인 내쉬 균형을 도출할 가능성이 있다. 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자는 모바일 사용자라는 고객을 유치하여 서로의 이익을 높일 수 있는 협력게임이 가능한 상황을 고려할 수 있기 때문에, 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자 간의 협력게임을 고려하였다. 이 경우, 두 제공자의 상호작용은 최적화 문제로 모델링이 가능하다. 고로, 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자의 이익을 최대화하기 위한 목적함수를 Equation (3.6)과 같이 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\theta_i, p^u} \quad & R = \gamma \sum_{i \in N} (sx_i - tx_i^2) + p^u \sum_{i \in N} x_i (1 - \theta_i) \\ \text{s.t.} \quad & x_i = x_i^* \text{ derived by (3.4) for all } i \in N \end{aligned} \quad (3.5)$$

이때, 목적함수에 포함된 제한조건은 모바일 사용자가 최적 전략을 선택할 때의 콘텐츠 요구량  $x_i$ 이다. 이는 슈타켈버그 게임에서 리더 그룹에 속하는 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자가 팔로워 그룹에 속하는 모바일 사용자의 전략 선택을 예측하는 백워드 인덕션(Backward Induction)으로써, 이를 통해 리더 그룹은 본인의 최적 전략을 결정할 수 있게 된다.

Equation (3.5)는 제한조건을 제거하여, 문제에 대한 최적의 해를 도출하기 위한 KKT(Karush Kuhn Tucker) 조건을 만족시키는 형태로 고쳐 쓸 수 있다. 그때 해당 함수의 헤시

안 행렬을 통해 Equation (3.5)의 최적해의 유일성을 보일 수 있다[4].

### Theorem 3:

목적함수  $R$ 은  $\Theta$ ,  $p^u$ 에 대해 엄밀한 오목 함수이며, 이때 유일한 최적해  $\Theta^*$ ,  $\{p^u\}^*$ 를 가진다.

### Proof:

$R$ 의 최적해의 유일성의 증명은 Theorem 2의 증명과 유사

하다.  $R$ 의 헤시안 행렬  $H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 R}{\partial \Theta^2} & \frac{\partial^2 R}{\partial \Theta \partial p^u} \\ \left( \frac{\partial^2 R}{\partial \Theta \partial p^u} \right)^T & \frac{\partial^2 R}{\partial (p^u)^2} \end{bmatrix}$ 는 실수

범위 안에 있는 임의의 행렬  $A$ 에 대해  $AHA^T < 0$  을 만족시키는 음의 정부호 행렬이며, 때문에 엄밀한 대각 오목이다. 행렬  $H$ 가 엄밀한 대각 오목이라는 것은 목적함수  $R$ 이 유일한 최적해를 가진다는 것과 동치이기 때문에, 목적함수  $R$ 은 유일한 최적해  $\Theta^*$ ,  $\{p^u\}^*$ 를 가진다[10].

### Algorithm 1.

1. Initialize  $V = (\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n, p^u)$ . If there is a history, set it to the initial value.
2. Define  $g(\mu) = R(V + \mu \nabla R(V))$  to find the step size  $\mu$ .
3. **while**  $|\nabla R(V)| > \epsilon_1$
4.  $\mu_1 = \mu_0$ ,  $h_1 = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$ , initialize  $\alpha > 1$
5. **if**  $h_1 < 0$
6. **then**  $\mu_2 = \mu_1$ ,  $\mu_1 = \frac{\mu_1}{\alpha}$ , and  $h_1 = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$
7. **while**  $h_1 < 0$
8. **do**  $\mu_2 = \mu_1$ ,  $\mu_1 = \frac{\mu_1}{\alpha}$ , and  $h_1 = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$
9. **else**  $\mu_2 = \mu_1 * \alpha$ , and  $h_2 = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$
10. **while**  $h_2 > 0$
11. **do**  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $\mu_2 = \mu_1 * \alpha$ , and  $h_2 = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$
12. **while**  $|\nabla g(u)| > \epsilon_2$
13. **do**  $\hat{\mu} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$ ,  $\hat{h} = \frac{dg(\mu)}{d\mu}$
14. **if**  $\hat{h} > 0$
15. **then**  $\mu_1 = \hat{\mu}$
16. **else**  $\mu_2 = \hat{\mu}$
17.  $V = V + \hat{\mu} \nabla R(V)$
18. Calculate Mobile user's strategy  $X$  by using  $V$  and (3.4)
19. **return**  $V, X$

위와 같이, 목적함수  $R$ 은 이차 미분을 통해 헤시안 행렬  $H$ 를 구함으로써 최적해를 도출할 수 있다. 하지만 모바일 사용자의 수가 많아질수록  $H$ 를 계산하는데 필요한 연산량이 모바일 사용자의 제공수로 증가하기 때문에, 직접적으로 최적해를 계산하는 방법은 불가능하다. 때문에 목적함수가 엄밀한 오목 함수일 때, 근사 최적해를 찾을 수 있는 반복 알고리즘인 GABS(Gradient Assisted Binary Search)를 응용하여 최적의  $\theta^*$ 와  $\{p^u\}^*$ 를 찾는다[12]. 이를 통해 모바일 사용자의 최적 전략 선택 알고리즘을 통해  $\{X^*, \theta^*, \{p^u\}^*\}$ 를 구할 수 있다.

### 3.3 엣지 캐싱 시스템 모델

콘텐츠 제공자, 서비스 제공자, 그리고 모바일 사용자로 구성된 데이터 스폰서 시장에서 콘텐츠 제공자는 자신의 이익 상승을 위해 모바일 사용자의 데이터 요금 일부를 지원한다. 여기에 서비스 제공자로부터 대역의 형식으로 지원되는, 혹은 콘텐츠 제공자가 사실로 소유하고 있는 엣지 서버에 높은 선호도의 콘텐츠를 캐싱한다면, 콘텐츠를 소모하는 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성이 더 높아질 것이다. 이를 위해 콘텐츠와 콘텐츠 제공자의 평가함수를 정의하고, 이를 토대로 하여 콘텐츠와 콘텐츠 제공자간의 매칭 게임을 통한 엣지 캐싱을 실시한다.

#### 3.3.1 엣지 캐싱 목적 함수

엣지 캐싱은 콘텐츠 제공자가 엣지 서버를 사용하여 모바일 사용자와 가까운 위치의 서버에 콘텐츠를 캐싱하는 방법이다. 이로 인해 전송 딜레이 등 모바일 사용자가 체감하는 서비스 품질을 향상시켜 콘텐츠에 대한 모바일 사용자의 접근성이 높아진다. 하지만 엣지 서버의 저장 공간은 제한되어 있기 때문에, 엣지 캐싱을 할 때 중요한 것은 제한된 저장 공간을 높은 적중률의 콘텐츠로 채워야 효율이 최대화 될 수 있다. 때문에 엣지 캐싱을 위해 최적의 콘텐츠와 콘텐츠 서버의 연결 행렬  $D$ 를 구하는 목적 함수를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_D \quad & \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M P_{m,l} T_{m,l} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{l=1}^L d_{l,n} \leq q_n, \\ & \sum_{n=1}^N d_{l,n} \leq N_l \\ \text{where} \quad & P_{m,l} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \gamma^{t-1} N_{m,t} \end{aligned} \tag{3.6}$$

$P_{m,l}$ 은 콘텐츠  $l \in L$ 을 모바일 사용자  $m \in M$ 이 요구할 확률, 즉 콘텐츠  $l$ 에 대한 모바일 사용자  $m$ 의 선호도를 의미한다. 이때  $P_{m,l}$ 은 일정 주기의 시간  $T$  동안의 등장 횟수  $N_{m,t}$

에 대한 가중평균으로 구하며,  $\gamma$ 은 시간에 대한 할인율을 나타낸다.  $T_{m,l}$ 은 모바일 사용자  $m$ 이 콘텐츠  $l$ 을 다운받을 때 소요되는 시간을 의미한다. 때문에  $T_{m,l}$ 의 경우 모바일 사용자와 물리적으로 가까운 위치에 저장된 캐싱 콘텐츠를 다운받는 경우 굉장히 작은 값이 되며, 그렇지 못한 경우 상대적으로 큰 값을 가진다.  $d_{l,n}$ 은 콘텐츠와 콘텐츠 서버의 연결 행렬  $D^{L \times M}$ 의 원소로, 콘텐츠  $l$ 이 서버  $n$ 에 캐싱되어 있는지를 나타내는 변수이며( $d_{l,n} \in \{0,1\}$ )  $q_n$ 과  $N_l$ 은 각각 서버에 캐싱할 수 있는 콘텐츠의 개수와 콘텐츠가 서로 다른 서버에 저장될 수 있는 개수를 의미한다.

위의 목적함수를 최소화시키는 행렬  $D$ 는 캐싱에 대한 높은 적중률을 보일 뿐만 아니라, 모바일 사용자가 느끼는 전송 지연 또한 최소화 시킨다. 하지만 Equation (3.6)을 풀기 위한 최적화 문제는 NP-Hard이기 때문에, 이를 풀기 위해서 다른 근사 알고리즘이 필요하다. 때문에 본 논문에선 Equation (3.6)의 해를 도출하기 위한 반복 알고리즘인, 다대다 매칭 게임을 활용한 콘텐츠 매칭 알고리즘을 소개한다.

### 3.4 제안하는 콘텐츠 매칭 게임

본 장에선 목적함수 Equation (3.6)을 풀기 위한 콘텐츠 매칭 알고리즘을 제안한다. 다대다 매칭 게임의 참가자는 콘텐츠 집합  $L$ 과 엣지 서버 집합  $N$ 으로 구성되어 있다. 매칭게임은 각각의 참가자가 본인의 이득을 최대화하는 연결을 찾기 위한 평가 함수를 가지고 있기 때문에, 본 게임 역시 콘텐츠와 엣지 서버의 평가 함수를 각각 정의하여 게임을 진행한다.

#### 3.4.1 엣지 서버와 콘텐츠의 평가 함수

콘텐츠 제공자는 캐싱의 높은 적중률과 서버의 낮은 저장 공간 낭비를 통해 이득을 최대화시킬 수 있다. 이를 고려하여 엣지 서버와 콘텐츠 각각의 평가 함수를 정의해야, 콘텐츠 제공자가 엣지 캐싱을 하는 목적에 부합한다. 때문에 콘텐츠  $l$ 에 대한 서버  $n$ 의 평가  $V_n(l)$ 과 서버  $n$ 에 대한 콘텐츠  $l$ 의 평가  $V_l(n)$ 은 Equation (3.7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_n(l) &= \frac{1}{|H_n|} \sum_{h \in H_n} P_{h,l} \quad \text{and} \\ V_l(n) &= \frac{1}{|H_n|} \sum_{h \in H_n} P_{h,l} T_{h,l} \end{aligned} \tag{3.7}$$

$H_n$ 은 서버  $n$ 에 접근할 수 있는 모바일 사용자의 집합을 의미한다. 즉, Equation (3.7) 첫 번째 식의 경우 서버  $n$ 에 접근 가능한 모든 모바일 사용자의 콘텐츠  $l$ 에 대한 선호도의 평균이 콘텐츠  $l$ 에 대한 서버  $n$ 의 평가이다. 참가자 간의 최적의 연결을 도출해야 하는 콘텐츠 매칭 게임에서, 콘텐츠의 높은 선호도는 높은 적중률을 의미하기 때문에 이를 토대로 콘텐츠를 캐싱한다면 높은 적중률을 보일 것이다. 서버에 대

한 콘텐츠의 평가를 나타내는 Equation (3.7) 두 번째 식은 첫 번째 식에 소요되는 다운로드 시간  $T_{n,l}$ 이 추가되었다. 이는 모바일 사용자의 체감 서비스 품질을 고려사항에 넣기 위함이며, 서버  $n$ 에 접근할 수 있는 모바일 사용자의 선호도가 높다 할지라도 혼잡, 연결 불안정 등의 이유로 다운로드 시간이 높을 경우 해당 서버의 콘텐츠 캐싱 회피 기능을 한다.

### 3.4.2 콘텐츠 매칭 알고리즘

콘텐츠와 엣지 서버 간 다대다 매칭 게임은 엣지 서버를 우선으로 하여 진행된다. 우선  $H_n, q_n, N_l$ 을 입력으로 받고  $P_{m,l}$ 를 계산하여 초기화한다. 그 후 계산된 선호도를 기준으로 엣지 서버  $n$ 의 콘텐츠  $l$ 에 대한 평가  $V_n(l)$ 을 계산하여 이를 내림차순으로 정렬한다. 각 엣지 서버는  $V_n(l)$ 이 가장 높은 콘텐츠에게 연결 요청을 보내며, 각 콘텐츠는 많은 요청을 받은 순으로 서버를 선택하게 된다. 서버와 마찬가지로 콘텐츠  $l$ 은  $V_l(n)$ 을 통해 각 서버를 평가하며, 콘텐츠  $l$ 이 동시에 복수 존재할 수 있는 최대량인  $N_l$ 에 도달할 때까지 서버를 선택한다. 이는 콘텐츠가 최대량에 도달할 때까지, 서버의 최대 저장 공간인  $q_n$ 에 도달할 때까지 반복되며, 알고리즘 수행 결과로 도출된 콘텐츠와 엣지 서버의 연결이 목적함수 Equation (3.6)을 최소화하는 연결이다.

데이터 스폰서와 엣지 캐싱 기법의 유기적 연결은 모바일 사용자의 효용에 Equation (3.7) 두 번째 식을 콘텐츠 인자  $\alpha \in [0,1]$ 로 연결함으로써 구현한다.  $\alpha$ 는 모바일 사용자의 효용에 엣지 캐싱으로부터 얻는 서비스 품질(QoS: Quality of Service), 캐싱의 경우엔 소모되는 데이터 다운로드 딜레이를 어느정도의 비율만큼 적용시킬지를 의미한다. 즉,  $\alpha$ 값이 크면 클수록 콘텐츠 제공자는 모바일 사용자의 서비스 품질에 민감하게 반응하는 것이다.  $\alpha$ 가 작을수록 데이터 스폰서 환경에서 엣지 캐싱의 기여도를 낮게 계산하는 것이며, 반대로  $\alpha$ 가 높을수록 엣지 캐싱의 기여도를 높게 생각한다. 기존의 통화를 기준으로, 모바일 사용자의 효용에  $\alpha$ 의 값을 1/4로 설정할 경우 데이터 스폰서 환경에서 최적의 엣지 캐싱 비율을 나타낼 수 있다[4].

## 4. 성능 평가

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 슈타켈버그 게임을 적용한 콘텐츠 스폰서와 매칭 게임을 적용한 콘텐츠 캐싱의 성능을 시뮬레이션을 통하여 기존에 존재하는 타 기법들과 비교한다. 이를 통해 본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 평가하도록 한다. 100m × 100m 크기의 맵 안에서 50개의 가상 모바일 사용자를 랜덤하게 배치하였다. 각 모바일 사용자는 콘텐츠에 대한 임의의 선호도를 가지며, 본인의 선호도와 콘텐츠 소모에 대한 QoS를 토대로 이익을 계산한다. 이때 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자는 모바일 사용자의 이익을 역 귀납법을 사용하여 예측, 계산하여 이익을 창출하며, 이때 각

제공자의 특징은 실험 환경에서의 특성 인자로 결정된다. 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 평가를 위한 환경 설정은 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. System Parameters

System parameters	Value
number of mobile user	50
number of content type	50
MU's factor	$0 < a_i < 10, 1 < b_i < 20$
CP's factor	$s, t = 1$
initial support rate	$0 < \theta_i < 0.5$
initial data cost	$p^u = 0.1$
initial data usage	$0 < x_i < 10$
congestion coefficient	$c = 0.2$
content preference distribution	$p_l = \frac{1}{l^k} / \sum_{i=1}^l \frac{1}{l^k}, k = 0.5$
replicable number of content $l$	$N_l = 2$
storage space	$q_n = 5$
number of edge server	3

각 실험의 성능 평가 기준은 콘텐츠 제공자의 콘텐츠 소모에 대한 수익률 비교, 서비스 제공자의 트래픽 소모에 대한 수익률 비교, 엣지 캐싱의 유무에 따른 콘텐츠 제공자의 수익률에 대해 비교하였다.

제안하는 알고리즘의 성능 분석을 위해, 동일 환경에서 데이터 스폰서 알고리즘을 제안한 DSC(Data sponsoring based stackelberg game between Service provider and Content provider)기법과[5], 콘텐츠 트래픽의 양이 불확실할 때 콘텐츠 제공자의 트래픽 데이터를 조사함으로써 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자 간의 데이터 가격을 결정하는 DCT(Data sponsoring based Content Traffic)기법을 통해 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자의 콘텐츠 소모에 대한 수익률을 비교하였다[2]. 또한 엣지 서버의 크기에 따른 엣지 캐싱 비율을 수정하여 모바일 사용자의 효용을 비교하였으며, 마지막으로 엣지 캐싱의 유무에 따른 콘텐츠 제공자의 수익률 변화에 대해 비교하였다.

Fig. 2는 데이터 스폰서 환경에서 시간에 따른 콘텐츠 제공자의 콘텐츠 소모에 대한 수익률 비교 그래프이다. 이때 콘텐츠는 동적으로 확장되지 않기 때문에, 시간이 지날수록 모바일 사용자가 소모한 콘텐츠의 양이 많아져 증가 폭이 줄어든다. 이때 DSC, DCT, 그리고 데이터 스폰서를 적용하지 않은 순정의 경우 제안한 기법보다 데이터 소모의 속도가 느릴 수 있다. 즉, 동적으로 확장되는 콘텐츠 시장에서 타 기법보다 모바일 사용자의 접근성을 빠르게 높일 수 있는 제안 기법으로 콘텐츠 제공자는 보다 높은 이익을 얻을 수 있다.

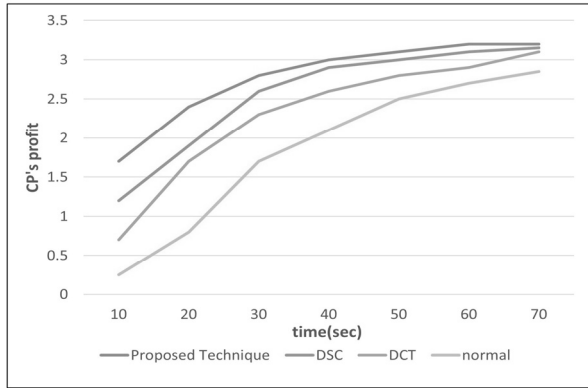


Fig. 2. Profit for CP's Content Consumption

Fig. 3은 데이터 스폰서 환경에서 서비스 제공자의 트래픽 소모에 따른 수익률을 비교한 그래프이다. Fig. 2와 마찬가지로, 정적인 콘텐츠 상황이라 가정하였기 때문에 시간이 지남에 따라 누적된 서비스 제공자의 이익 증가 폭이 점차 줄어든다. 또한 마찬가지로 순정상상태의 이동통신망은 콘텐츠 소모 속도가 느린 반면, 데이터 스폰서 환경에서는 빠름을 볼 수 있으며, 본 논문에서 제안한 기법이 더 빠르게 모바일 사용자의 접근성을 높여 콘텐츠 소모 속도가 빠름을 볼 수 있다.

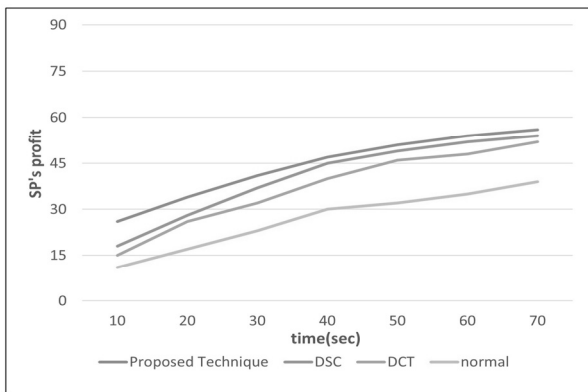


Fig. 3. Profit for SP's Content Consumption

Fig. 4는 엣지 캐싱의 유무에 따른 콘텐츠 제공자의 수익률을 비교한 그래프이다. 엣지 서버의 수와 콘텐츠의 수의 비가 적절하지 않을 경우 엣지 캐싱의 의미가 퇴색되기 때문에, 콘텐츠 종류의 수에 비례하여 엣지 서버의 수를 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 만약 콘텐츠 종류의 수에 비해 엣지 서버의 수가 많게 될 경우, 단순히 다양한 콘텐츠를 엣지 서버에 저장하여 모바일 사용자가 느끼는 서비스 품질을 향상시키면 되기 때문에 엣지 캐싱이 무의미해지며, 마찬가지로 엣지 서버의 수가 너무 적다면 모바일 사용자가 만족할만한 엣지 캐싱 자체가 불가능하다. 실험 환경에서, 콘텐츠 종류의 수와 저장 공간의 비가 1:3.5 일 때 유의미한 엣지 캐싱의 실험을 진행할 수 있다[14].

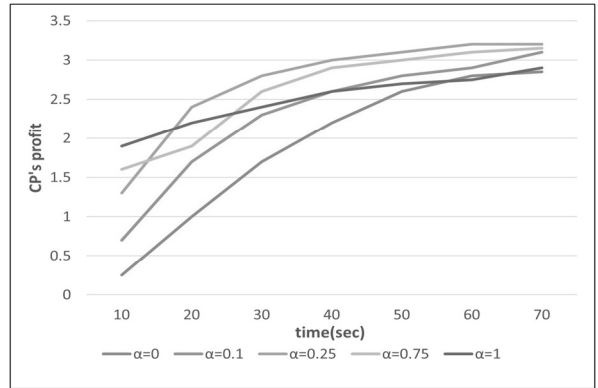


Fig. 4. Profit of CP According to the Ratio of Edge Caching

$\alpha=0$ 인 상황은 본 논문에서 제안한 데이터 스폰서 환경에서 엣지 캐싱을 고려하지 않은 경우이며,  $\alpha=1$ 인 상황은 콘텐츠 제공자가 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성과 서비스 품질을 일대일 비율로 고려한다는 의미이다.  $\alpha$  값이 크면 클수록 초기 모바일 사용자의 접근성은 높았으나, 시간이 지날수록 모바일 사용자 개인이 가지는 콘텐츠에 대한 접근성, 즉 흥미와 가격 부분에 대한 효용이 떨어져 성능이 저하되는 것을 보였다. 반복적인 실험 결과 예상대로  $\alpha=0.25$ 인 경우 시뮬레이션의 성능이 가장 높게 측정되는 양상을 보였고, Fig. 2와 Fig. 3에서 표현한 제안 기법 역시  $\alpha=0.25$ 인 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다.

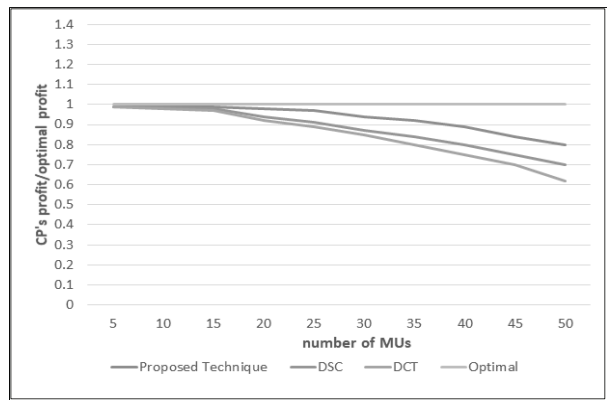


Fig. 5. Profit of CP over Number of MU

Fig. 5는 모바일 사용자의 숫자에 따른 콘텐츠 제공자의 수익, 즉 콘텐츠 소모 속도를 나타내는 그림이다. DSC와 DCT, 제안한 기법 모두 동일하게 주어진 시간동안 콘텐츠 제공자의 최적의 이익과 비교하여 얼마나 빠른 이익을 보이는지를 수치화하여 그래프로 나타냈다. 모바일 사용자의 수가 많아질수록 제한된 시간 내에 계산을 완료하지 못하게 시간을 설정하였기 때문에, 최적의 이익과 비교하여 제안된 기법으로 도출된 콘텐츠 제공자의 이익의 차가 점점 커지지만, 타 기법과 비교하여 빠른 콘텐츠 소모 속도를 보임을 알 수



있다. 또한 이는 충분한 시간이 주어졌을 때 콘텐츠 제공자의 이익을 나타내는 Fig. 2와 비교하였을 때 모바일 사용자가 이보다 더욱 많아질 경우에도 타 기법과 비교하여 콘텐츠 소모에 있어 우위에 있음을 예측할 수 있다.

본 시뮬레이션은 개인이 소유할 수 있는 성능의 PC 환경 아래서 진행하였기 때문에 모바일 사용자의 수를 50명으로 제한하여 실험을 진행하였다. 여기서 모바일 사용자의 수와 개개인의 특징을 나타내는 특징 인자의 다양성을 늘린다면, 계산량이 많아져 최적의 전략을 도출하는데 소비되는 비용이 증가된다. 이는 더 나은 PC 환경에서 극복할 수 있지만, 모바일 사용자의 수와 콘텐츠의 종류가 많아지는 실제 네트워크 상황에선 시뮬레이션에서 고려되지 않은 모바일 사용자의 이동성, 콘텐츠의 확장성, 더 넓은 범위의 이동통신망에 대한 영향력과 등과 같은 미시적인 제한조건이 더 커져, 본 논문에서 도출한 전략이 최적의 전략과 오차가 발생할 가능성이 있다. 이는 더욱 세세한 제한조건 검토와 시뮬레이션 환경 확장이 필요하다.

## 5. 결 론

최근 소셜 네트워크, 비디오 스트리밍 등 이동통신망 환경에서 즐길 수 있는 서비스가 종류가 점점 증가함에 따라, 모바일 사용자는 이동통신 데이터를 소모하여 원하는 콘텐츠에 더욱 쉽게 접근할 수 있게 되었다. 하지만 이동통신 환경 아래서, 모바일 사용자는 콘텐츠를 즐기기 위해 네트워크 서비스 제공자에게 높은 이동통신 데이터 요금을 내야한다. 이를 해결하기 위한 방법으로, 데이터 스폰서가 모바일 사용자의 콘텐츠 접근성을 높이는 방법으로 주목받고 있다. 본 논문에서는 서비스 제공자와 콘텐츠 제공자를 리더 그룹, 모바일 사용자를 추종자 그룹으로 하는 슈타켈버그 게임을 통해 최적의 요금 할인율을 결정짓는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 리더 그룹의 참가자인 콘텐츠 제공자와 서비스 제공자가 협력하는 상황에서 최적화 기법을 통한 최적의 전략 선택하며, 추종자 그룹의 참가자인 모바일 사용자는 서로 간의 경쟁상황 속에서 내쉬 균형을 찾는 알고리즘을 통해 최적의 전략을 결정짓는다. 또한 모바일 사용자의 콘텐츠에 대한 접근성을 더욱 높이기 위해, 모바일 사용자에게 높은 인기가 있는 콘텐츠를 엷지 서버에 캐싱하는 엷지 캐싱을 게임이론의 매칭 게임을 통해 설계하는 알고리즘을 제안하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존에 제안된 데이터 스폰서 기법에 비해 본 논문에서 제안한 방법이 제공자들의 콘텐츠 소모에 대한 수익률 측면에서 6~11% 가량의 우위를 보였으며, 엷지 캐싱의 유무에 따라 콘텐츠 제공자의 수익률이 12% 향상됨을 확인하였다. 결과적으로 제안한 기법이 동일한 데이터 스폰서 환경에서 제공자들의 합리적인 전략 선택과 그에 따른 모바일 사용자의 효용 증가로 인해, 기존의 타 기법에 비해 더 높은 이익 창출을 보장한다.

## References

- [1] M. Andrews, "Implementing sponsored content in wireless data networks," *51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pp.1208-1212, 2013.
- [2] M. Andrews, G. Bruns and H. Lee, "Calculating the benefits of sponsored data for an individual content provider," *IEEE 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp.1-6, 2014.
- [3] R. T. Ma, "Subsidization competition: Vitalizing the neutral internet," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.24, No.4, pp.2563-2576, 2016.
- [4] C. Joe-Wong, S. Ha, and M. Chiang, "Sponsoring mobile data: An economic analysis of the impact on users and content providers," *IEEE Conference on Computer Communications*, pp.1499-1507, 2015.
- [5] L. Zhang, W. Wu, and D. Wang, "Sponsored data plan: A two-class service model in wireless data networks," *ACM SIGMETRICS*, Vol.43, No.1, pp.85-96, 2015.
- [6] L. Zhang and D. Wang, "Sponsoring content: Motivation and pitfalls for content service providers," *IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, pp.577-582, 2014.
- [7] L. Zhang, W. Wu, and D. Wang, "Tds: Time-dependent sponsored data plan for wireless data traffic market," *IEEE International Conference on Computer Communications*, pp.1-9, 2016.
- [8] W. Wang, Z. Xiong, D. Niyato, and P. Wang, "A hierarchical game with strategy evolution for mobile sponsored content/service markets," *IEEE Global Communications Conference*, pp.1-6, 2017.
- [9] X. Gong, L. Duan, X. Chen, and J. Zhang, "When social network effect meets congestion effect in wireless networks: Data usage equilibrium and optimal pricing," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.35, No.2, pp.449-462, 2017.
- [10] J. B. Rosen, "Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp.520-534, 1965.
- [11] A. Gilpin, S. Hoda, J. Pena, and T. Sandholm, "Gradient-based Algorithms for Finding Nash Equilibria in Extensive Form Games," *International Conference on Game Theory*, 2007.
- [12] G. Miao, N. Himayat, and Y. Li, "Energy-Efficient Transmission in Frequency-Selective Channels," *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp.1-5, 2008.
- [13] Y. Kim, *Game Theory*, ParkYoungSa, 2011.
- [14] J. Li, M. Liu, J. Lu, F. Shu, Y. Zhang, S. Bayat, and K. Jayakody, "On Social-Aware Content Caching for D2D-Enabled Cellular Networks with Matching Theory," *IEEE Internet of Things Journal*, pp.1-14, 2017.



### 원 중 섭

<https://orcid.org/0000-0003-2872-0766>

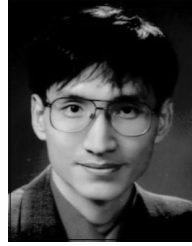
e-mail : dnjswndtjq@sogang.ac.kr

2016년 서강대학교 컴퓨터공학과(학사)

2019년 서강대학교 컴퓨터공학과(석사)

2019년~현 재 티맥스소프트 소프트웨어  
연구개발 연구원

관심분야: 게임이론을 이용한 콘텐츠 네트워크



### 김 승 욱

<https://orcid.org/0000-0003-1967-151X>

e-mail : swkim01@sogang.ac.kr

1993년 서강대학교 컴퓨터공학과(학사)

1995년 서강대학교 컴퓨터공학과(석사)

2003년 Syracuse University, Computer  
Science 박사

2005년 중앙대학교 컴퓨터공학부 조교수

2006년~현 재 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야: 게임이론을 이용한 네트워크 자원관리