

게임이론을 이용한 멀티미디어 서비스의 차별적 자원 할당 알고리즘

Resource Allocation Algorithm for Differentiated Multimedia Services using Game Theory

신광섭¹, 정재윤², 서덕영³, 강석호¹

¹서울대학교 공과대학 산업공학과

²경희대학교 테크노공학대학 기계산업시스템공학부

³경희대학교 전자정보대학 전자정보학부

kwangsup.shin@gmail.com

jyjung@khu.ac.kr

suh@khu.ac.kr

shkang@cybernet.snu.ac.kr

Abstract

Game theory is adapted to a variety of domains such as economics, biology, engineering, political science, computer science, and philosophy in order to analyze economic behaviors. This research is an application of game theory to wireless communication. In particular, in terms of bargaining game we dealt with a multimedia resource allocation algorithm in wireless communication, which is rapidly spreading such as Wibro, WCDMA, IPTV, etc. The algorithm is assumed to allocate multimedia resources to users who can choose and access differentiated media services. For this purpose, a utility function of users is devised to reflect quality of service (QoS) and price. We illustrated experimental results with synthesis data which were made to mimic real multimedia data, and analyzed differentiated service providing and the effect of the utility function.

Keywords: Multimedia resource allocation, game theory, bargaining solution, proportional fairness.

1. 개요

무선 네트워크의 급격한 발전으로 WiBro, HSDPA, WCDMA, DMB와 같은 차세대 통신 기술은 언제 어디서든 안정적인 서비스를 제공하며 우리의 삶을 변화시키고 있다. 그 중에서 DMB, 화상전화, IPTV 등과 같이 무선 네트워크를 이용한 멀티미디어 서비스는 가용 자원이 제한적이고 데이터 전송률은 사용자 환경 및 미디어 특성에 의존적이며, 데이터 지연에 민감하여 일부 정보의 손실을 감수하기도 한다[5]. 즉, 유선 서비스와는 달리 실시간으로 제공되는 무선 서비스는 서비스 품질 보장을 위하여 충

분한 전송량이 보장되어야 할 뿐만 아니라 지속적으로 일정 수준 이상의 자원이 제공되어야 하므로 제한된 자원을 얼마나 효율적으로 활용하는가가 중요한 이슈이다. 많은 통신 연구들이 최적화 기법을 통하여 제한된 무선 환경에서의 멀티미디어 자원 할당을 위한 알고리즘이 제시되었으나, 무선 네트워크 상에서 사용자 이동으로 인한 변동과 자원 경쟁상황을 고려하기가 용이하지 않았다. 무선 통신에서 제한된 자원에 대한 다중 사용자의 협력적, 비협력적 경쟁 상황을 고려하기 위하여 최근 게임이론이 도입되고 있다.

1.1 통신분야의 게임이론

경제학, 경영학, 사회학에 주로 도입되던 게임 이론은 이미 생물학, 철학, 인터넷, 통신 등 다양한 영역으로 확산되고 있다 [1]. 통신 분야에서 네트워크 상의 노드 또는 사용자들이 게임의 참여자로 해석될 수 있으며, 경쟁 관계에 있는 참여자들은 자신의 이익을 극대화하기 위하여 합리적으로 행동한다는 가정 하에 무선 장비들은 기계 자체의 성능 혹은 시스템 전체적인 성능을 제한하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 제한된 성능을 향상시키기 위한 새로운 프레임워크가 제시되어 왔으며, van der Schaar와 Shankar는 그들의 연구에서 게임 참여자들이 서로 정보를 교환하고, 자원을 할당하기 위해 서로 상호 협력할 수 있는 새로운 패러다임을 제안하기도 하였다 [5]. 게임 이론을 이용한 자원 할당과 관련된 가정이나 이슈는 크게 다음과 같이 세 가지로 요약할 수 있다.

• **자원 낭비의 회피:** 이제까지 사용자가 필요 이상의 자원을 가질 수 있다라고 가정하고 있

는 연구는 찾아 볼 수 없었다. 즉, 게임 참여자가 이성적임을 보장하는 것이기도 하지만, 동시에 네트워크 관리자 혹은 자원 관리자 역시 필요 이상의 자원을 할당해 제한된 자원이 낭비되는 것을 허용하지 않는다는 것도 동시에 의미한다.

- **공정성 (fairness):** 제한된 자원을 사용자들에게 할당하는 네트워크 운영자는 반드시 게임 참여자들에게 자원 할당 정책이 모두에게 공정한 것임을 보장해야만 한다. 게임이 공정하지 못하다는 사실을 알게 된다면, 어떤 누구도 게임에 참여하지 않게 될 것은 당연한 일이다.
- **개인 혹은 전체의 효용(utility) 최대화:** 경쟁 게임에서 각 참여자들은 자신의 효용을 최대화하기 위해 다른 참여자들과 경쟁한다. 동시에 네트워크 운영자는 개인들의 효용으로부터 도출될 수 있는 전체 효용을 최대화하기 위해 노력한다.

처음 두 기준에 관한 연구는 네트워크 내 자원을 어떻게 공유할 것인가, 혹은 네트워크를 구성하기 위한 비용을 어떻게 분배할 것인가를 중심으로 주로 이루어진다 [24]. 자원 할당을 위한 직관적인 방법은 모든 참여자들에게 동일한 양을 할당하는 것이지만, 이는 사용자와 시스템의 특성을 고려하지 못한다. 이를 보완하기 위하여 사용자의 효용을 고려한 비율적 공정성 (proportional fairness)을 보장하기 위한 자원 할당 정책이 제시되었다 [27]. 참여자의 효용을 고려하여 자원을 경쟁하는 Bargaining game의 대표적인 방법으로 Nash Bargaining Solution (NBS)이 있으며, 이는 제한된 자원의 할당, 네트워크 상의 흐름 관리 혹은 네트워크 설계 등의 다양한 분야에 적용되어 시스템 전체의 효용을 높이는 방법이다 [6, 8, 9, 25]. NBS는 크게 1) 파레토 효율성(Pareto optimality), 2) 규모의 불변성(invariance), 3) 해에 무관한 대안에 대한 독립성(independence of irrelevant alternatives), 4) 대칭성(symmetry)의 네 가지 공리를 만족시킨다. 그러나 세 번째 공리는 각 참여자들의 자원에 대한 수용 능력을 고려하지 않는다는 비판을 받아왔다. 이를 극복하기 위해 제시된 또 다른 Bargaining game의 해법으로 Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution (KSBS)가 있다. KSBS는 NBS의 세 번째 공리를 개별적 단조성(individual monotonicity)으로 대체하였다 [26]. H. Park과 van der Schaar는 멀티미디어 자원 할당에서 NBS와 KSBS의 차이점을 비율적 공정성의 의미를 기준으로 비교 분석하였다 [14]. 이들은 NBS와 KSBS의 최적조건과 함께 NBS의 정량적 측면에서의 비율적 평등과 KSBS의 정성적 측면에서의 평등 간의 차이점을 분석하였다. 기존의

연구들에서 제시된 공정성에 입각한 자원 할당 정책이 성공적으로 반영되었으나 [28, 29], 자원 할당 결과가 서비스 품질에 미치는 영향을 고려하지 못하여 콘텐츠 중심의 멀티미디어 서비스 환경에서 적합되지 못하였다는 한계가 존재한다.

게임 이론의 기본적인 가정은 게임에 참여하는 모든 참가자들은 각자 자신의 효용함수에 근거하여 합리적인 의사결정을 한다는 것이다. 참여자의 합리성에 대한 가정, 즉 참여자가 시스템 내에서 얻을 수 있는 효용을 정량적으로 표현하는 것의 근본적인 어려움을 지적하는 경우도 존재하지만[4], 효용함수는 경쟁적 상황에서 합리적 행위를 결정하는 정량적 기준으로 인정할 수 있다. 멀티미디어 서비스에 관한 기존 연구에서는 사용자의 효용함수를 정의하기 위하여 서비스 품질(QoS: Quality of Service)을 흔히 사용하였다. 무선 멀티미디어 네트워크 환경에서 QoS는 서비스 지연에 대한 민감도 혹은 정보의 왜곡 비율과 같이 할당된 자원으로부터 사용자가 느끼는 시스템에 대한 만족도로 표현될 수 있다. 다른 연구에서는 모든 비디오 프레임에 대해 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)을 기준으로 평가된 비디오 품질을 일정 수준 이상 지속적으로 유지하기 위해 인코더와 채널을 결합시키는 방안이 제시되었으며 [31], 네트워크 채널이 가지는 제약조건 하에서 비디오 시퀀스 중 왜곡된 양을 최소화하는 방안도 연구되었다 [32]. 이들과 유사하지만 윈도우(windowed) 기술을 적용하여 실시간 문제를 해결하기 위한 연구도 수행되었다 [33]. 그러나 여전히 효용함수는 사용자에게 할당된 자원이 실질적인 가치를 정확하게 표현하지 못하고 있는데, 이는 할당된 자원(대역폭)을 통해 전송되는 데이터 유형에 따라 만족도가 달라지며, 서비스 지연에 대한 민감도 역시 실시간 전송 환경에 매우 민감하기 때문이다 [1].

1.2 논문의 접근법

본 연구에서는 서비스에 대한 품질 또는 만족도를 예측하기 위한 간접적인 방법으로 서비스 이용에 대한 비용을 추가로 사용한다. 일반적으로 네트워크 상의 사용자들은 일정 수준 이상의 서비스 품질을 보장받기 위해서 그에 합당한 비용을 지불해야만 한다. 이 경우 사용자에게 할당된 자원으로부터 파생되는 비용 손실을 절감하고 서비스 품질을 극대화하는 것이 사용자들의 궁극적인 목표라고 할 수 있다 [30]. 네트워크 비용의 정량화 문제는 여러 연구에서 큰 차이점을 보이고 있는데, 일반적으로 네트워크는 사용자들의 대역폭의 요구량에 따라서 비용을 책정하는데 [4], Kelly는 사용자들은 할당

된 대역폭에 따라 비용을 지불한다고 가정하였으며 [27], Courcoubetis et al., Shenker 등은 나아가 정보의 흐름과 비용 산정을 결합하는 방법을 제시하기도 하였다 [34, 35]. 네트워크 운영자가 사용하는 비용 산정 기법은 대부분 네트워크 구축을 위해 투자된 금액과 운영자 개인적인 비용을 기반으로 비용을 책정하고 있으며, 또한 네트워크에 참여하고 있는 사용자들이 기준이 아니라 경쟁 관계에 있는 타 네트워크를 기준으로 가격 정책을 수립하기 때문에 대개 현실적인 상황을 잘 반영하지 못하는 경향이 있다 [1]. 따라서 네트워크의 사용자와 운영자 모두를 고려할 때, 가격 책정 및 자원 할당 정책은 게임에 참여하는 모든 사용자와 운영자의 수익을 극대화시킬 수 방향으로 수립되어야만 한다 [9]. 그러나, 최근의 무선 멀티미디어 네트워크 환경을 그대로 반영하기에는 아직까지 몇 가지 한계점이 남아있다. 앞서 논의했던 바와 같이 대부분의 기존 연구들은 한 가지 형태 혹은 수준의 서비스만을 가정하고 있을 뿐, 서비스 형태 혹은 수준의 차별성은 고려하지 못하고 있다. 서비스 차별화와 유사한 개념으로는 협상력(bargaining power)이라는 개념을 이용하여 할당되는 자원의 양을 차별화하는 방법이 유일하다 [13, 14]. 협상력을 이용하는 방법은 높은 협상력을 가진 사용자에게 더 많은 자원을 할당할 것을 보장하는 것을 기본 가정으로 삼고 있다. 이러한 협상력을 바탕으로 일반적인 NBS는 사용자 효용의 가중 합으로 표현되는 시스템 전체 효용을 최대화 목적으로 자원을 할당하고, KSBS는 각 사용자들의 최대 효용치에 비해 동일한 비율의 효용 저하를 보장하기 위한 방법으로 자원을 할당한다 [14]. 그러나, 현실적으로는 더 많은 비용을 지불하더라도 높은 수준의 서비스를 보장받기를 원하는 즉, 프리미엄 서비스를 원하는 사용자가 존재하며, 동시에 서비스 제공자들은 이러한 프리미엄 회원들에게 타 회원에 비해 다양한 혜택을 제공하는 것이 더욱 일반적이다. 무선 환경 하에서의 멀티미디어 서비스에서 협상력의 차이는 서비스 수준의 등급으로 해석될 수 있다. 따라서 자원 할당 정책은 이 서비스 수준의 차별성과 공정함을 모두 만족할 수 있어야만 한다. 또한 서비스 차별화는 서비스 수준에 따라 다른 비용을 수반해야만 한다.

지금까지 살펴본 기존 연구의 한계점들을 해결하기 위해, 본 연구에서는 다수의 사용자와 네트워크 운영자들이 존재하는 상황에 적합하다고 알려진 게임 이론을 적용하여 차별화된 서비스 수준을 위한 새로운 자원 할당 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 나머지는 부분은 다음과 같이 구

성된다. 2절에서는 본 연구에서 사용하고 있는 기본 가정 및 자원 할당 알고리즘을 개괄적으로 설명하고, 3절에서는 알고리즘에 대한 세부적인 설명과 각 단계별 최적해 및 조건을 설명한다. 간단한 예제와 함께 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 효과를 보이기 위한 결과는 4절에서 기술할 것이며, 마지막으로 본 연구의 결론 및 추후연구를 5절에서 제시한다.

2. 가정 및 절차

본 연구에서 제안하는 서비스의 차별화 및 자원 할당 게임의 특징과 개략적인 절차에 대해 설명한다. 본 논문에서 사용하는 각종 기호에 대한 설명은 표 1에 정리하였다.

2.1 문제의 가정

우리가 다루고자 하는 문제의 기본 가정은 다음과 같다. 네트워크는 제한된 자원을 사용자에게 할당하는 한 명의 자원 관리자와 자원을 두고 경쟁하는 n 명의 사용자로 구성된다. 자원 관리자는 제한된 양(R_{MAX})의 자원을 사용자들에게 공정하게 할당하기를 원한다. i 번째 사용자는 할당된 자원의 양(R_i)으로부터 도출된 고유의 효용치($X_i = \pi_i(R_i)$)를 가진다. 또한 최소의 효용 요구 수준($\pi_i(R_i^0)$)을 가지며, 이 값은 서비스 거부 수준(disagreement point)이라고 부를 수 있다. 서비스 거부 수준은 사용자가 게임에 참여하기 위한 최소한의 요구조건으로, 자원 관리자는 사용자가 네트워크 내에 머무를 수 있도록 하기 위해서 이 최소 요구 수준을 보장해 주어야 한다. 서비스 제공자는 서로 다른 서비스 수준을 가진 m 개의 서비스 유형을 제공하며, 네트워크 내에 속한 사용자는 이 중 반드시 하나의 서비스를 선택해야만 한다. 그리고 본인이 선택한 서비스 수준에 따라 할당된 자원의 양을 기준으로 일정 서비스 이용료를 지불해야만 한다. 자원 관리자는 각 서비스 유형의 협상력($\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)$)을 조절하면서 서비스 수준을 차별화할 수 있는데, 협상력의 값은 다른 서비스 유형에 비해 일정 수준 이상의 자원을 할당받을 수 있음을 의미하는 동시에 서비스 유형에 따라 그 비용도 달라짐을 의미한다. 사용자 i 의 협상력(α_i)는 해당 사용자가 특정 서비스 유형을 선택했을 때 바로 결정된다. 예를 들어 사용자 i 가 j 번째 서비스 유형을 선택했다면, 사용자 i 의 협상력(α_i)의 값은 β_j 와 같아지게 된다. 이 과정은 다음 식(1)로 표현될 수 있다.

표 1. 기호 및 설명

기호	설명	기호	설명
R_{MAX}	이용 가능한 총 자원의 양	β_j	서비스 유형 j 의 협상력
R_i^{MAX}	사용자 i 의 최대 요구량	K_β	서비스별 단위 협상력 증가 비율
R_i^0	사용자 i 의 최소 요구량	K_C	서비스 별 단위 비용 증가 비율
R_i	사용자 i 에 할당된 자원의 양	$\pi_i(\cdot)$	사용자 i 의 효용함수
b_i	사용자 i 의 이용 가능한 총 예산	X_i	사용자 i 의 효용
C_j	서비스 유형 j 의 단위 비용	X	효용치 집합 $X = (X_1, \dots, X_n)$
x_{ij}	사용자 i 의 결정변수	X^*	최적 협상해
α_i	사용자 i 의 협상력		

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (1)$$

이진변수 x_{ij} 는 사용자 i 가 j 번째 서비스 유형을 선택하였는지 여부를 나타낸다. 모든 사용자는 한 가지 유형의 서비스만을 선택해야 하므로, 사용자 i 의 x_{ij} 값들의 합은 1과 같아야만 한다. 각 서비스를 이용하기 위한 단위 비용 ($C = (C_1, \dots, C_m)$)은 서비스 유형별로 달라지며, 높은 협상력을 보장하는 서비스 유형을 선택할수록 더 많은 비용을 지불해야 하는 것이 일반적이므로, 비용의 순서 ($C_k \leq C_l$)는 협상력의 순서 ($\beta_k \leq \beta_l$)와 동일하다. 문제를 단순화하기 위해 비용 벡터의 순서는 크기에 따라 순차적으로 배열되어 있다고 가정하여, 부등식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_1 \leq \dots \leq C_m \quad \& \quad \beta_1 \leq \dots \leq \beta_m \quad (2)$$

예를 들면, 다음과 같이 단위 비용과 협상력은 선형함수의 형태로 표현할 수 있다.

$$C_j = C_1 + (j-1)K_c, \quad j = \{2, \dots, m\}$$

$$\beta_j = \beta_1 + (j-1)K_\beta, \quad j = \{2, \dots, m\}$$

이 때, K_c 와 K_β 는 상수값으로 단위 비용과 협상력의 증가 비율을 의미한다. 각 사용자들의 효용치들로 구성된 가능해 집합 S 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$S = \{ \pi_1(x_1 | \alpha), \dots, \pi_n(x_n | \alpha) \} \subset \square^n \quad (3)$$

이 때, x_i 는 $(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im})$ 의 벡터를 나타내고, m 개의 구성요소 중 오직 하나만이 1의 값을 가진다. α 는 사용자가 선택한 서비스

유형별 협상력에 의해 결정된다. 이 가능해 집합은 공집합일 수 없고, 볼록 형태의 경계가 있는 닫힌 집합으로 가정할 수 있다. 벡터 $d = (d_1, \dots, d_n)$ 는 서비스 거부 수준의 집합이며, 앞서 정의한 가능해 집합과, 이 둘의 쌍 (S, d) 으로 Bargaining game을 정의할 수 있다.

$$d = (d_1, \dots, d_n) = \{ (\pi_1(R_1^0), \dots, \pi_n(R_n^0)) \} \in \square^n \quad (4)$$

2.2 자원 할당 알고리즘

본 논문에서는 차별화된 다수의 멀티미디어 서비스에 접속한 다수의 사용자에게 자원을 할당하는 알고리즘을 다음과 같이 제시하였다.

Algorithm 1. Resource Allocation Algorithm

Input

- Total amount of resources: R_{MAX}
- Pairs of maximum and minimum requirement: $(R_i^{MAX}, R_i^0), \forall i \in \{1, \dots, n\}$
- Unit cost: $C = (C_1, \dots, C_m)$
- Bargaining power: $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)$

Preliminary set up

- 1) Resource manager randomly assigns service types to users,
- 2) Obtain utilities from the resources allocated by KSBS: (X_i)
- 3) Determine the sequence to change the service type SEQ = order of users' utility status $(X_i^{MAX} - X_i)$

Repeat

- Let user p be the first user of SEQ, and the service type of p be the j^C
- 1) Obtain the set of utilities U if p selects other service types

- 2) If any of other service types can guarantee the bigger utility than current one, p will change the service type as the best one (j^N).

$$j^N = \arg \max_{j^N \in \{1, \dots, m\}} \pi_i(x_{ij} | \beta) > \pi_i(x_{ij^c} | \beta)$$

- 3) Otherwise, p will not change the service type.
 4) Discard the first user from SEQ.

Until

SEQ is empty

자원 관리자는 각 사용자에게 무작위로 서비스 유형을 지정한 후, KSBS를 이용해 현재 지정된 서비스 유형을 기준으로 자원을 할당하며, 할당된 양에 의해 사용자의 효용이 결정된다. 각 사용자별로 결정된 효용과 최고 요구 수준의 차이를 기준으로 서비스 유형을 변경할 순서를 정한다. 각 사용자는 순서대로 현재보다 더 큰 효용을 제공해 줄 수 있는 서비스 유형으로 전환할 수 있다.

3. 자원 할당 알고리즘

본 논문에서 제시하는 자원 할당 알고리즘에서 사용되는 KSBS에 대해서 더욱 자세하게 살펴보도록 한다.

3.1 파레토 효율성

여러 사용자가 참여하는 자원 할당 게임에서 가능해 중 특정 해가 최적임을 보이기 위해서는 파레토 효율성의 조건을 만족해야 하는데, 그 정의는 아래와 같다.

정의 3.1. 파레토 효율성 (Pareto Optimality).

$X = (X_1, \dots, X_n) = \{\pi_1(x_1 | \alpha), \dots, \pi_n(x_n | \alpha)\} \in S$ 인 자원할당 해가 아래 조건을 만족할 때 파레토 효율적이라고 부른다.

$$(X'_1, \dots, X'_n) \in S \text{ and } (X_1, \dots, X_n) \leq (X'_1, \dots, X'_n) \text{ then } (X_1, \dots, X_n) = (X'_1, \dots, X'_n).$$

파레토 효율성은 더 이상 모든 사용자들의 성능을 동시에 더 좋게 만들 수 있는 방법을 찾을 수 없음을 의미한다 [7]. 정의 2.1에서의 두 벡터 간의 부등식은 구성요소 간의 부등식을 의미한다. 특히 다수의 참여자들 간의 게임에서는 이러한 파레토 효율성 조건을 만족하는 지점은 무수히 많이 존재할 수 있다는 사실은 이미 알려져 있다 [10]. 따라서 우리는 이러한 여러 파레토 최적해 중에 어느 해가 시스템을

최적화시킬 수 있는지를 판단할 수 있는 기준을 수립해야만 한다. 본 논문의 경우에는, 사용자들에게 자원을 할당하기 위한 정책을 중심으로 협상해(bargaining solution)를 판단하기 위한 기준을 수립해야 한다. 자원 할당과 관련된 기존의 많은 연구들에서 이미 여러 가지 속성을 가진 협상해를 제시하고 있으며, 그들 모두 최적성과 공정성을 보장하고 있다 [11, 12]. 그러나 본 연구에서는 최대 달성 가능한 효용치로부터 동일한 수준의 품질 감소를 보장하는 방법으로 잘 알려져 있는 KSBS를 적용하기로 한다 [13].

3.2 KSBS 정의

Algorithm 1에서 사용자들이 서비스 유형을 변경하는 기준으로는 특정 서비스를 선택했을 때 할당 받는 자원으로부터 도출되는 효용치가 사용된다. 앞서 언급한 바와 같이 자원을 할당하는 기준인 KSBS의 정의와 그 의미에 대해 자세하게 설명한다. KSBS에서는 앞서 정의한 가능해 집합을 아래 정의 3.2와 같이 협상 집합(Bargaining Set)으로 정의할 수 있다 [2].

정의 3.2. 협상 집합 (Bargaining Set). 협상 집합 B 는 가능해 집합 S 중에서 개별적으로 모두 합리적(individually rational)이며, 파레토 효율성을 만족하는 집합이다.

협상 집합은 사용자 개개인이 이성적이며, 파레토 효율성을 만족하는 효용의 집합으로 해석될 수 있다. 아래 정의 3.3과 같이 4가지 공리를 만족할 때, 협상 집합의 특정해는 KSBS라고 정의할 수 있다 [13].

정의 3.3 KSBS (Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution). 아래의 네 가지 공리를 만족시키는 $X^* = F(S, d)$ 를 서비스 거부 수준 d 에 대한 KSBS라고 부른다.

- 1) 파레토 효율성(Pareto Optimality): X^* 는 파레토 효율성을 만족함.
- 2) 크기에 불변성(Independence of Linear Transformations): 어떤 선형변환 φ 에 대해서도 $\varphi(F(S, d)) = F(\varphi(S), \varphi(d))$ 를 만족함.
- 3) 개별적 단조성(Individual Monotonicity): 또 다른 가능 효용 집합 S' 에 대하여, 만약 $S' \supset S$, $d' = d$, $\max_{X \in S, X \geq d} X_k = \max_{X \in S', X \geq d} X_k$ for all $k \in \{1, \dots, n\} \setminus \{i\}$ 이면, $[F(S', d')]_i \geq [F(S, d)]_i$ 임을 만족함.
- 4) 대칭성(Symmetry): 사용자를 교환하여도 S 가 불변해야 함. 즉, $F_i(S, d) = F_j(S, d)$ for all

possible user i, j .

첫 번째 공리는 정의 3.1에서 언급했던 파레토 효율성 조건을 의미하며, 두 번째 공리는 만약 두 사용자가 동일한 효용함수와 서비스 거부 수준을 가지고 있다면, 모두 동일한 효용을 얻게 된다는 것을 의미한다. 세 번째 공리는 효용함수와 거부 수준이 선형적 변형을 인해 그 값이 변하더라도 협상해는 변하지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 이 조건은 효용함수와 거부 수준이 선형적으로 증가 혹은 감소하더라도 선형적 변형을 일어난 전체 집합 내에서는 동일한 KSBS를 얻을 수 있음을 의미한다 [14]. 마지막 공리는 협상 해의 가능 영역이 특정 사용자에게 유리한 방향으로 증가하면 이는 반드시 해당 사용자에게 유익함을 의미한다 [13]. 일반적인 형태의 KSBS는 협상 집합 B 와 다음 식 (5)을 통해 정의되는 직선과의 교점으로 해석될 수 있다.

$$L = \left\{ X \left| \frac{X_1}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}}, \right. \right. \\ \left. \left. X_i > 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, \forall i \right\} \quad (5)$$

이 때, 효용의 정의에 따라 $X_i^{MAX} = \pi_i(R_i^{MAX})$ 라고 할 수 있으며, 서비스 거부 수준 (d)이 가능해 집합을 정의하는 원점이 된다. 우리는 이를 다음 식(6)을 통해 얻을 수 있는 상수 값 δ 와 X_i 를 제약 조건 $\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) \leq R^{MAX}$ 에 대입해서 풀 수 있다.

$$\delta = \frac{X_1}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}} \quad (6)$$

협상해는 협상 집합에 포함된다는 조건을 이용한 것으로, 이 방정식은 일반적으로 δ 에 관한 n 차원식의 형태가 된다. 따라서 이분법과 같은 효과적이고 단순한 방법을 통해 해를 구하는 것이 적당하다 [3]. 이미 할당될 자원의 최대값(자원 관리자가 가지고 있는 제한된 자원의 양)과 최소값(사용자의 최소 요구수준)을 알고 있으므로, 이분법을 적용하여 $\lceil \log_2((u-l)/\epsilon) \rceil$ 안에 근사해에 도달할 수 있다 [14]. 이분법을 이용하여 첫 번째 사용자의 근사해를 구한 후, KSBS의 공리인 식(7)을 이용하여 다른 사용자의 근사해를 모두 계산할 수 있다.

$$\frac{X_1^*}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \frac{X_i^*}{\alpha_i X_i^{MAX}} \quad (7)$$

이분법을 이용해서 최적의 자원할당 계획을 찾아가는 방법은 Algorithm 2에 설명되어 있다.

Algorithm 2. Bisection method

Input:

lower bound $l := \min(R_1^0, \dots, R_n^0)$

upper bound $u := R^{MAX}$

threshold $\epsilon > 0$

Repeat

- 1) Let R_i be the mid-point of l and u ;
 $R_i = (u+l)/2$
- 2) Obtain R_i ($i = 2, \dots, n$) based on R_1 using equation (1)
- 3) Check the feasibility of R_i ($i = 1, \dots, n$) for the bargaining and budget constraint
- 4) If feasible $l := R_i$, else $u := R_i$

Until difference between l and u is less than the threshold $\epsilon; u-l \leq \epsilon$

4. 효용함수와 리소스 할당

본 절에서는 사용자의 효용함수를 먼저 정의하고, Algorithm 1의 각 세부 단계별로 최적해를 구하는 방법 및 최적 조건을 자세하게 설명한다. 2절에서 언급한 바와 같이, 사용자는 효용치에 따라 서비스 유형을 선택하는데, 이 효용치는 자원 할당 계획에 따라 결정된 자원의 양에 의해 결정된다. 자원 할당 계획은 사용자가 선택한 서비스 유형을 기준으로 KSBS를 모든 사용자에게 적용해서 수립한다. 먼저 사용자의 효용함수를 정의하고, 이 함수가 최적해를 가질 수 있음을 보이기 위해 해집합이 닫혀있고, 볼록 형태를 가지며, 경계를 가져야 한다는 조건을 만족시키고 있음을 보일 것이다. 본 논문에서 다루는 문제 자체가 볼록 형태임을 보일 것이다.

4.1 사용자 효용함수

사용자의 효용함수를 정의하기 위해서 지금까지 많이 제시된 왜곡 비율(distortion rate) 모형과 사용자의 주된 관심 요소인 비용 요소를 사용한다. Wavelet 비디오 코더를 위한 왜곡 비율 모형과 같이 할당된 대역폭을 이용해 전송된 비디오 시퀀스의 왜곡 모형을 이용한 효용함수는 이미 많은 연구에서 제시되어 왔으며 [21, 22,

23], 그 중 평균 왜곡 비율 모델 [15]이 최근 비디오 코딩 기술에 가장 적합하다고 알려져 있으므로 [16], 사용자 효용함수의 일부로 이 모델을 사용하고자 한다. 왜곡 비율 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{\mu}{R - R_0} + D_0, R \geq R_0, D_0 \geq 0, \mu > 0 \quad (8)$$

비디오 시퀀스의 왜곡은 평균제곱오차(Mean Squared Error: MSE)로 측정 가능하며, 각 매개변수 값들은 비디오 시퀀스의 특성, 시공간적 해상도, 서비스의 지연 등을 의미한다. 모든 매개변수는 양의 값을 가지며, 할당된 자원의 양을 기준으로 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{D} \quad (9)$$

효용함수에서의 계산의 편의를 위하여 로그 함수를 제거한 진수 부분을 다음과 같이 재정의할 수 있다.

$$NoiseRatio_i(R_i(x_i)) = \frac{k(R_i(x_i) - R_i^0)}{D_{0i}(R_i(x_i) - R_i^0) + \mu_{0i}} \quad (10)$$

또한, 서비스 유형별 단위 비용과 할당된 자원의 양의 곱으로 사용자가 서비스를 이용하기 위해 지불해야 하는 비용을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$COST(R_i(x_i)) = R_i(x_i) \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \quad (11)$$

앞서 정의한 왜곡 비율 모델 PSNR과 비용 요소의 합을 통해 사용자의 효용함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_i = \pi_i(x_i) = NoiseRatio_i(R_i(x_i)) + \lambda_i COST(R_i(x_i)) \\ = \frac{k_i(R_i(x_i) - R_i^0)}{D_{0i}(R_i(x_i) - R_i^0) + \mu_{0i}} + \lambda_i R_i(x_i) \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \quad (12)$$

효용함수의 구성요소 간의 매개변수 λ_i 는 사용자가 서비스를 이용하기 위해 지불하는 비용에 얼마나 민감한지를 나타내는 지표이며, 비용과 왜곡 비율의 절대적인 크기를 조정하기 위해 사용된다. 서비스 이용을 위한 비용은 일반적으로 효용을 감소시키는 효과가 있으므로 음의 값을 가진다고 가정한다. 식(13)과 같이 PSNR의 1차 도함수는 항상 양의 값을 가지고, 2차 도함수는 음의 값을 가지며, 비용 요소의 1차 도함수는 상수값을 가지므로, 사용자가 일정

수준 이상의 자원을 할당 받게 되면 반드시 효용함수는 감소하게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial R_i} NoiseRatio_i(R_i) > 0 \text{ and } \frac{\partial^2}{\partial R_i^2} NoiseRatio_i(R_i) < 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial R_i} \left(\lambda_i R_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \right) = \lambda_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij}$$

사용자가 합리적임을 가정할 때, 이 수준 이상의 자원은 할당 받지 않는 것이 당연하다. 즉, 앞서 정의한 사용자의 최대 요구 수준은 이 값과 같게 된다. 정의 2.3에서 살펴본 바와 같이, KSBS를 이용해서 최적의 자원 할당 계획을 수립하는 것은 상수 δ 의 최대값 (δ^*)을 찾는 것과 동일한 의미를 가진다.

$$\delta^* = \max \left(\delta = \frac{X_1}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \dots \\ = \frac{X_i}{\alpha_i X_i^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}} \right) \quad (12)$$

식 (7)과 (12)과 함께 이분법을 이용하면, 최적의 자원 할당 계획을 수립할 수 있으며, 이때의 각 사용자의 자원 할당량은 다음 식(13)과 같이 각 개인별 효용함수의 역함수를 통해 얻을 수 있다.

$$R_i^* = \pi_i^{-1}(X_i^*) \quad (13)$$

이 때, 각 사용자별 최적의 효용치 (X_i^*)는 $X_i^* = \delta^* \cdot \alpha_i \cdot X_i^{MAX}$ 를 이용해 얻을 수 있으며, 앞서 효용함수의 정의에서 언급한 바와 같이 식 (14)를 이용해 각 사용자 별 최대 효용치 X_i^{MAX} 로부터 얻을 수 있다.

$$R_i = R_i^*(x_i) = \pi_i^{-1}(X_i^*) \\ = \pi_i^{-1}(\delta^* \cdot \alpha_i \cdot X_i^{MAX}) \\ = \pi_i^{-1} \left(\delta^* \cdot X_i^{MAX} \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij} \right) \quad (14)$$

자원 관리자가 사용자들에게 할당할 수 있는 자원의 양은 제한적이며, 사용자는 또한 할당된 자원을 협상하기 위한 예산이 제한적이라고 할 수 있으므로, 앞에서 도출된 최적해가 다음 두 제약조건을 만족하는 지 반드시 확인해야만 한다.

$$\sum_{i=1}^n R_i \leq R_{MAX}$$

$$R_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \leq b_i, \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \quad (15)$$

$$R_i^0 \leq R_i \leq R_i^{MAX}$$

첫 번째 제약조건은 사용자에게 할당된 자원의 총합이 자원관리자가 보유한 총 자원의 양을 초과할 수 없음을 의미한다. 두 번째 제약 조건은 사용자에게 할당된 자원의 양은 해당 사용자가 협상할 수 있는 범위 내의 양이어야 함을 의미한다. 마지막 제약 조건은 사용자가 이성적임을 의미하는 것으로, 각 사용자에게 할당된 양은 사용자가 원하는 최소 수준과 최고 수준의 범위 내에 존재해야 함을 의미한다. 이와 같이 서비스 유형이 확정되어 있는 상황 하에서는 서비스 유형별 협상력과 단위 비용을 가지고 이분법을 이용해 최적의 자원 할당 계획을 수립할 수 있다.

4.2 볼록성(convexity) 증명

이번 절에서는 가능해 집합이 볼록 다각형 구조의 집합임을 증명한다. 다음 Theorem 1과 같이 임의의 두 해의 선형 결합도 해집합에 속함을 보임으로써 증명할 수 있다.

제언 4.1. 가능 집합 S 는 볼록집합(convexity)이다.

Proof. 어떠한 $x_1, x_2 \in C$ 와 $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$ 에 대해서도 $\theta x_1 + (1-\theta)x_2 \in C$ 이면 집합 C 는 볼록집합이다. X 와 Y 를 가능 효용 집합 S 의 두 결합 효용 지점(joint utility points)이라고 가정하자. S 가 볼록집합임을 보이려면 $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$ 에 대하여 아래를 증명해야 한다.

$$X = (X_1, \dots, X_n) = (\pi_1(x_1), \dots, \pi_n(x_n)) \in S$$

$$Y = (Y_1, \dots, Y_n) = (\pi_1(y_1), \dots, \pi_n(y_n)) \in S \quad (16)$$

$$\Rightarrow \theta X + (1-\theta)Y \in S$$

이 때, (x_1, \dots, x_n) 와 (y_1, \dots, y_n) 는 구매 제약 조건을 만족하는 해를 의미한다. $X_i = \pi_i(x_i)$ 와 $Y_i = \pi_i(y_i)$ 는 각각 자원이 x_i 와 y_i 만큼 할당 되었을 때의 효용치를 나타낸다. 효용함수의 정의와 구매 제약 조건으로부터 가능해 집합 S 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S = \left\{ X \mid \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) \leq R_{MAX}, \text{ for all } i \right\} \quad (17)$$

이 집합이 볼록 다각형 구조임을 보이기 위해서는 임의의 $\theta (0 \leq \theta \leq 1)$ 값에 대해 다음 부등식이 성립함을 보여야만 한다.

$$\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) \leq R_{MAX}, \text{ for } X, Y \in S \quad (18)$$

식 (18)로부터 θ 값에 따라 다음 부등식 (19)를 도출할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) \leq R_{MAX} & \text{if } \theta = 1 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(Y_i) \leq R_{MAX} & \text{if } \theta = 0 \\ \leq \max \left\{ \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i), \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(Y_i) \right\} & \text{o.w} \end{cases} \quad (19)$$

θ 값이 0 혹은 1의 값을 대입함으로써, 처음 두 식을 얻을 수 있고, 마지막 부등식이 성립하는 것은 Appendix I에서와 같이 다음 식(20)이 볼록 형태임을 보임으로써 증명할 수 있다.

$$h(\theta) \square \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) \quad (20)$$

이미 제약조건 (18)을 통해 해집합의 특정해 X 와 Y 의 결합해 역시 가능해임을 보였으므로, 본 문제의 가능해 집합 S 도 볼록 형태임이 증명되었다. ■

4.3 효용기반 Congestion Game

앞서 정의한 사용자 간의 게임이 특정해로 수렴함을 보이기 위해서는 게임이 가진 구조가 적어도 하나 이상의 내쉬 균형에 도달할 수 있음을 보여야 한다. 이미 Congestion Game은 적어도 하나의 Nash 균형을 가진다는 사실이 알려져 있으므로 [11], 만약 본 논문에서 제안하는 게임이 Congestion Game의 형태로 모형화될 수 있음을 보인다면, 적어도 하나의 Nash 균형에 도달할 수 있다고 말할 수 있다. Congestion Game은 다음과 같이 Congestion Model로부터 정의된다.

정의 4.1. Congestion model:

$$\langle M, A, (\Omega_i)_{i \in M}, (c_f)_{f \in A} \rangle$$

M 은 공집합이 아닌 사용자들의 집합이며, A 는 공집합이 아닌 유한한 시설의 집합이다. 게임 참여자들이 선택할 수 있는 순수 전략의

집합 $(\Omega)_{i \in M}$ 은 공집합이 아닌 유한한 A 의 부분집합이다. 시설집합의 한 원소 f 는 이익함수 c_f 를 가지는데, 이 함수 $c_f(k), k \in \{1, \dots, n\}$ 는 시설 f 에 총 k 명의 참가자들이 존재할 때의 이익으로 표현된다.

정의 4.2. Congestion Game:

$$G = \langle M, (\Omega)_{i \in M}, (u_i)_{i \in M} \rangle,$$

Congestion Game에서 M 과 $(\Omega)_{i \in M}$ 는 정의 4.1에서 정의한 바와 동일하며, 각 참가자 i 가 특정 전략을 선택했을 때 얻을 수 있는 이익함수 $(u_i : \Omega \rightarrow \mathbb{R}, i \in M)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_i(\sigma) = \sum_{f \in \sigma_i} c_f(n_f(\sigma))$$

$\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_n) \in \Omega = \times_{i \in M} \Omega_i$ 는 사용자가 선택할 수 있는 모든 전략의 집합을 의미하며, $n_f(\sigma)$ 는 다음 식과 같이 전략 σ 를 택함으로써 시설 집합의 특정 원소 f 를 선택한 사용자들의 수가 된다.

$$n_f(\sigma) = |\{i \in M : f \in \sigma_i\}|, f \in A$$

따라서 사용자의 이익함수 $c_f(k)$ 는 오직 동일한 시설 f 를 선택한 참여자의 수에 관한 함수가 된다. 본 논문에서 제안하는 KSBS를 이용하는 자원 할당 알고리즘은 제언 4.1을 통해 Congestion Game의 형태로 표현될 수 있음을 증명한다.

제언 4.2: 만약 자원 할당하기 위해 최대 효용 값을 기준으로 KSBS를 적용하는 방법이 다음 세 가지 조건을 만족한다면, Congestion Game의 형태를 가진다고 말할 수 있다.

- i. m 개의 서비스 유형은 Congestion Game의 시설집합으로 볼 수 있다.
- ii. n 명의 사용자들은 Congestion Game의 참여자들로 볼 수 있다.
- iii. 서비스 유형을 선택하기 위해 사용되는 효용함수는 Congestion Game의 이익함수로 볼 수 있다.

처음과 두 번째 조건이 성립하는 것은 Congestion Game의 정의한 기준과 본 논문에서 정의한 기준과 동일하므로 증명이 불필요하다. 따라서 세 번째 조건을 증명하는데 집중하도록 한다. Congestion Game의 정의에 따르면, 이익함수는 오직 동일한 시설을 선택한 사용자의 수

에 관한 함수이어야 한다. 여기서 Congestion Game의 이익함수를 위해 효용 상태 함수 $(\rho(\cdot))$ 를 다음과 같이 새롭게 정의한다.

$$\rho(i) = |X_i^{MAX} - X_i^*|$$

효용 상태 함수는 각 사용자별 최대 효용 요구 수준과 현재의 최적의 자원 할당량으로부터 도출된 효용의 차이로 정의된다. 앞서 언급한 바와 같이 자원 관리자는 자원 할당을 위해 효용 기준의 공정한 정책을 이용하며, 사용자는 효용을 기준으로 서비스 유형을 선택하는데, 이때 KSBS를 이용할 경우 모든 사용자에 대한 품질 저하의 절대적인 양이 아닌 비율이 모두 동일하게 유지된다. 비록 동일한 서비스 유형에 속한 사용자의 최대 효용치에 따라 품질 저하의 값은 달라지더라도, 자원관리자는 품질 저하 비율이 최소화할 수 있도록 해야만 한다. 즉, 일부 사용자들로 이루어진 조합을 모두 고려하더라도 앞서 정의한 상수 δ 의 값을 최대화하는 것과 동일한 의미가 된다. 따라서 특정 서비스 유형 j 를 선택한 사용자 i 의 최소 품질 저하 비율을 이익함수로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u_i(\sigma) = c_i(n_{\sigma_j}(\sigma)) = c_j(x_j) = \rho_i \left(\sum_{i=1}^n x_{ij} \right) \quad (21)$$

이 때, $x_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} = n_j(\sigma)$ 는 전략 σ 중에서 서비스 유형 j 를 선택한 사용자들의 수를 의미한다. 효용 상태 함수 $\rho_i(x_j)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_i(x_j) &= X_i^{MAX} - X_i^* \\ &= X_i^{MAX} \left(1 - \delta^* \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

최대 효용치는 사용자 개개인의 정해진 값이기 때문에, 사용자 입장에서는 오직 서비스 유형을 선택하는 것만이 가능하므로, 최소의 효용 상태 값을 보장받을 수 있는 서비스 유형을 선택하게 된다. 이는 KSBS를 이용하는 자원 할당 정책에서는 효용 상태는 동일한 서비스의 유형을 선택한 사용자들의 수에 관한 함수의 형태로 표현 가능하다는 것을 의미한다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 KSBS를 이용한 자원 할당 정책은 Congestion model $\langle M, A, (\Omega)_{i \in M}, (\rho_j)_{j \in A} \rangle$ 로 표현 가능하며, 사용자 간의 제한된 자원에 대한 경쟁적 게임은

$G = \langle M, (\Omega)_{i \in M}, (\rho_i)_{i \in M} \rangle$ 의 Congestion Game으로 모형화가 가능하다. ■

KSBS를 이용한 자원할당 정책이 Congestion Game의 형태를 가지기 때문에, 앞서 언급한 Congestion Game이 적어도 하나 이상의 Nash 균형에 도달할 수 있다는 특성을 이용해 본 논문에서 제안하는 자원 할당 알고리즘 역시 하나의 Nash 균형을 가진다고 말할 수 있다.

4.4 서비스 결정

앞 절에서는 사용자별 서비스 유형이 결정되어 있다는 가정하에서는 하나 이상의 Nash 균형이 존재함을 보였다. 단계 1에서 각 사용자에게 할당될 자원의 양이 결정된 후에는 사용자는 다른 서비스로의 전환 여부를 판단한다. 이 의사 결정은 반드시 특정 서비스 유형을 선택했을 때 얻을 수 있는 효용치를 기준으로 이루어져야 한다. 만약 여러 사용자가 동시에 서비스 유형을 바꿀 수 있다라고 가정한다면, 궁극적으로 어떤 사용자도 서비스 유형을 결정하지 못하게 되어 자원 할당 계획을 수립하지 못하는 상황이 벌어진다. 이와 같은 문제는 이미 여러 연구에서 언급되어 왔다 [18, 19, 20]. 따라서 한번에 하나의 사용자만 서비스 유형을 바꿀 수 있다고 가정하고, *Elementary Stepwise System (ESS)*을 이용하고자 한다. ESS는 순차적으로 사용자가 의사 결정하는 방법을 제공하며, n 명의 사용자는 $(n-1)$ 번 안에 Nash 균형에 도달할 수 있음이 증명되었다 [17, 20]. 이 절의 나머지 부분에서는 ESS를 본 문제에 적용하는 방법에 대해 설명하기로 한다. 서비스 유형을 전환하는 순서는 현재의 효용 상태 즉, 최고 효용치와 현재 효용치의 차이로 결정된다. 즉, 효용 상태 값이 가장 큰 사용자가 가장 먼저 서비스 유형을 전환할 지 여부를 판단하는 것이다. 세부적인 절차는 알고리즘 2에서 자세하게 기술되어 있다.

Algorithm 3. ESS algorithm

Input:

Set of users $U = \{1, 2, \dots, n\}$

Current service type $x = \{x_i\}, \forall i \in U$

Repeat

- 1) find the first user who will change the service type: $u = \arg \max_{i=(1,2,\dots,n)} \rho_i(x_i), u \in U$
- 2) obtain the optimal service type (j^*) for user u :

$$j^* = \begin{cases} j, \pi_i(x_{ij}) \geq \max(\pi_i(x_{il})) \\ l, \pi_i(x_{ij}) < \max(\pi_i(x_{il})) \end{cases}, l \in \forall \{1, \dots, m\} / j$$

User will change the service type only if it can find the other service type that user can obtain larger utility than current one.

- 3) update the vector x_u with the result of the previous step

$$x_{uj} = \begin{cases} 1, j = j^* \\ 0, j \neq j^* \end{cases}$$

- 4) Discard user u from the set of users U :
 $U = U - \{u\}$

Until the set U is empty: $|U| = 0$

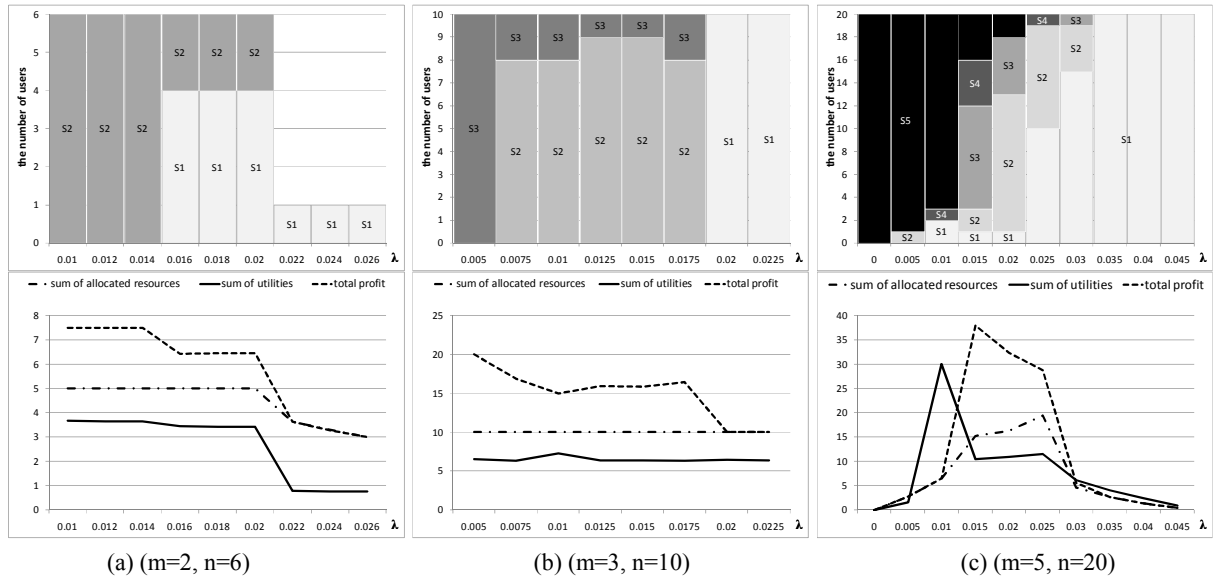
5. 실험

본 절에서는 앞에서 제시한 알고리즘을 이용하여 차별화된 가격을 가진 다수의 멀티미디어 서비스에 다수의 사용자가 서비스를 결정하고 자원을 할당받는 실험을 수행한다. 본 실험을 통하여 차별화된 다수의 서비스에 사용자들이 어떻게 분포하게 되는지 분석하고, 그에 따른 전체 자원 활용율과 사용자들의 효용, 그리고 서비스 제공자의 수입이 어떻게 변화하는지 보여준다.

5.1 실험설계

본 실험을 위하여 웨이블릿 비디오 코더 연구[12,14]에서 제시된 영상 데이터의 속성을 바탕으로 하여 실제와 유사한 속성을 가진 가상 멀티미디어 데이터를 생성하였으며, <표 2>에 제시된 바와 같이 서비스 개수(m)와 사용자 수(n)에 대하여 3가지 실험을 설정하였다. 2가지, 3가지, 5가지의 차별화된 가격의 서비스에 대하여, 각각 6개, 10개, 20개의 데이터를 생성하여 실험을 수행하였다. 즉, $(m, n) = (2, 6), (3, 10), (4, 20)$. 다섯 가지 서비스 S1~S5는 대역폭에 대한 단위 비용을 1.0~3.0으로 설정하였고(실제 적용시 비용의 Scale은 λ 에 의해 조정 가능함), 해당 서비스를 선택한 사용자의 구매력(bg.power)은 단위 비용에 비례하도록 설정하였다.

또한, 세 가지 실험에서 참여하는 사용자들의 멀티미디어 데이터의 최대 요구량(R_i^{MAX})은 min 값과 max 값 내에서 동일한 간격을 유지하도록 할당하였다. 예를 들어, $(m, n) = (2, 6)$ 의 경우, $R_i^{MAX} = \{2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5\}$ 를 갖는다.



(a) (m=2, n=6) (b) (m=3, n=10) (c) (m=5, n=20)
 <그림 1> 매개변수 λ 에 따른 서비스 할당 결과
 (막대그래프는 사용자의 최종 서비스 결정, 꺾은선그래프는 총자원할당량, 총효용합, 서비스총수입)

표 2. 실험 설계 (m: 서비스 개수, n: 사용자 수)

(m, n)	service	S1	S2	S3	S4	S5	R_i^{MAX}		R_{MAX}
		unit cost	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	min	
(2, 6)	bg.power	0.40	0.60				2.0	4.5	5.0
(3, 10)	bg.power	0.22	0.33	0.44			5.0	9.5	10.0
(5, 20)	bg.power	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	10.0	19.5	20.0

표 3. (m=2, n=6)의 실험결과

λ	results	R_i^{MAX}							sum
		2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
0.01	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	
	resource	0.72	0.79	0.83	0.86	0.88	0.89	5.00	
	utility	0.58	0.6	0.61	0.62	0.62	0.62	3.67	
0.012	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2		
	resource	0.73	0.79	0.83	0.86	0.88	0.88	5.00	
	utility	0.58	0.6	0.61	0.61	0.62	0.62	3.66	
0.014	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2		
	resource	0.74	0.8	0.84	0.86	0.87	0.87	5.00	
	utility	0.58	0.59	0.6	0.61	0.61	0.61	3.64	
0.016	service	S2	S2	S1	S1	S1	S1		
	resource	1.34	1.52	0.51	0.52	0.53	0.54	5.00	
	utility	0.69	0.71	0.49	0.5	0.5	0.51	3.44	
0.018	service	S2	S2	S1	S1	S1	S1		
	resource	1.35	1.53	0.51	0.52	0.53	0.53	5.00	
	utility	0.69	0.71	0.49	0.5	0.5	0.5	3.42	
0.02	service	S2	S2	S1	S1	S1	S1		
	resource	1.36	1.53	0.51	0.52	0.52	0.53	5.00	
	utility	0.69	0.7	0.49	0.5	0.5	0.5	3.40	
0.022	service	S1	-	-	-	-	-		
	resource	3.63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.63	
	utility	0.79	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.79	
0.024	service	S1	-	-	-	-	-		
	resource	3.28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.28	
	utility	0.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.78	
0.026	service	S1	-	-	-	-	-		
	resource	2.99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.99	
	utility	0.77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.77	

5.2 실험결과

• (m=2, n=6)의 실험결과

표 3은 (m=2, n=6)의 실험결과로 매개변수 λ 의 변화에 따른 사용자들이 최종적으로 결정한 서비스(service), 할당받은 자원의 양(resource),

그로 인한 효용(utility)을 보여준다. 매개변수 λ 는 $NoiseRatio_i(R_i(x_i))$ 과 $COST(R_i(x_i))$ 의 비율을 조정하는 역할을 한다. 즉, λ 가 작으면, 효용함수에서 품질의 비중이 크지만, λ 가 증가하면 비용의 비중이 커져서 사용자들이 가격이 저렴한 서비스 S1쪽으로 이동하는 경향을 보여준다.

<그림 1>에서 막대그래프는 세 가지 실험에서 각 사용자들이 λ 가 증가함에 따라 어떻게 서비스를 옮겨가는지 보여준다. 또한, 꺾은선그래프에는 세 가지 실험결과에서 정리된 전체 자원 할용량(일점쇄선)과 사용자들의 효용(실선), 그리고 서비스 제공자의 수입(점선)이 어떻게 변화하는지 보여준다.

(m=2, n=6)의 예에서 첫 번째 사용자는 $\lambda = 0.014$ 이하에서는 더 비싼 서비스인 S2를 선택하다가, $\lambda = 0.016$ 이상이 되면 S1로 이동한다. 또한, 두 번째, 세 번째, 네 번째 사용자들은 마찬가지로 이동하다가 $\lambda = 0.022$ 이상이 되면 효용이 음수로 내려가기 때문에 서비스에서 이탈하게 된다. 반면, 다섯 번째, 여섯 번째 사용자는 S를 고수하다가 $\lambda = 0.022$ 이상이 되면 함께 이탈한다.

이러한 추이는 (m=2, n=6)의 꺾은선그래프에서 (일점쇄선으로 표시된) 총자원할당량이 R_{MAX} 인 5.0에서 하락하는 것을 확인할 수 있다. (실선으로 표시된) 6명의 총효용의 합이 마찬가지로 $\lambda = 0.022$ 에서 감소한다. 또한, 서비스제공자의 총수입은 λ 가 증가하면서 점점 감소하고 있다. 첫 번째 실험에서는 가격비중을 조정하는 λ 와 마찬가지로 사용자의 효용함수를 이해하지 못하고 가격을 증가시키면 사용자 이탈로 인하여 총수입과 고객만족도(효용)가 감소함을 보여준다.

• (m=3, n=10)의 실험결과

본 논문에서 제시한 λ 의 구간에서는 10명의 사용자가 서비스에서 이탈하지 않는다. 그러나 물론 λ 가 증가하면 비용증가로 인해 서비스를 이탈하게 된다. 주어진 범위 내에서는 자원할당량은 R_{MAX} 인 10.0을 모두 사용하고 있으며, 10명 사용자의 총효용합이 7 정도로 유지된다. 반면에 서비스총수입은 저렴한 서비스인 S2와 S1로 옮겨갈 때마다 급격하게 감소한다.

표 4. (m=3, n=10)의 실험결과

λ	Results	R_i^{MAX}										Sum
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	
0.005	service	S2	S2	S2	S2	S3	S3	S3	S3	S3	S3	
	resource	0.99	1	1	1.01	1	1	1	0.99	0.98	0.98	9.95
	utility	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	6.50
0.0075	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S3	S3	
	resource	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	1.9	1.84	9.96	
	utility	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.59	0.59	0.76	0.75	6.29
0.01	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S3	S3	
	resource	1.28	1.28	1.27	1.26	1.25	1.23	1.21	1.18	0	0	9.96
	utility	0.7	0.7	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.85	0.85	7.22	
0.0125	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S3	S3	
	resource	0.95	0.94	0.93	0.92	0.9	0.88	0.87	0.85	0.83	1.88	9.95
	utility	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62	0.61	0.61	0.6	0.74	6.32
0.015	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S3	
	resource	1.01	0.99	0.97	0.95	0.93	0.9	0.87	0.85	0.82	1.66	9.95
	utility	0.64	0.64	0.63	0.63	0.62	0.62	0.61	0.61	0.6	0.71	6.31
0.015	service	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	2	2		
	resource	1	0.97	0.95	0.92	0.89	0.86	0.82	0.79	1.46	1.3	9.96
	utility	0.64	0.63	0.63	0.62	0.61	0.6	0.6	0.59	0.69	0.67	6.28
0.0175	service	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	1.08	1.07	1.06	1.04	1.01	0.99	0.96	0.94	0.91	0.89	9.95
	utility	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.62	6.42
0.02	service	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	1.11	1.09	1.07	1.04	1.01	0.98	0.95	0.92	0.89	0.86	9.92
	utility	0.66	0.66	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.62	0.61	6.38
0.0225	service	S2	S2	S2	S2	S3	S3	S3	S3	S3	S3	
	resource	0.99	1	1	1.01	1	1	1	0.99	0.98	0.98	9.95
	utility	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	6.50

• (m=5, n=20)의 실험결과

세 번째 실험결과는 5가지 서비스를 사용자들이 점진적으로 옮겨가는 추이를 잘 보여주고 있다. 특히, 이 실험설계는 총자원의 양이 $R_{MAX}=20$ 으로 여유가 있는 편이다. 일점쇄선을 보면 $\lambda=0.025$ 에서 총자원할당량이 20에 근사하며 나머지 상황에서는 항상 여유가 있다. 그 이유는 사용자들이 비용부담으로 인하여 큰 전송량을 원하지 않기 때문이다. 이는 데이터의 최대 요구량 R_i^{MAX} 이 크지만, 품질척도인 $NoiseRatio_i(R_i(x_i))$ 는 체감하지만, $COST(R_i(x_i))$ 은 선형적으로 증가하여 효용이 증가하지 않기 때문이다. 특히, 총자원할당량은 $\lambda=0.025$ 에서 최대이지만, 총효용합과 서비스총수입은 각각 $\lambda=0.01$ 과 $\lambda=0.015$ 에서 최대값을 가진다. 자원

을 100% 사용하지 않더라도 적정수준의 가격유도를 통하여 사용자들이 고가 서비스로 가입할 수 있도록 한다면 서비스 제공자 입장에서 총수입이 증가할 뿐만 아니라, 사용자 입장에서 총효용합이 증가할 수 있음을 보여주고 있다.

5.3 토의

본 실험은 다양한 의미를 보여주고 있다. 첫 번째는 서비스 차별화의 필요성이다. 다양한 가격대의 서비스를 제공함으로써 실험 (m=5, n=20)과 같이 여러 속성의 데이터 사용자들이 자신에 맞는 서비스를 선택하여 이탈할 가능성이 줄어든다는 점이다.

두 번째는 가격 설정의 중요성이다. 실험 (m=5, n=20)과 같이 설정 고객들이 이탈하지 않더라도 가격결정을 잘못하게 되면 서비스 받고자 하는 데이터의 사용량이 줄어들어, 일점쇄선으로 표시된 총자원할당량이 0.01이하 또는 0.03이상에서는 5이하로서 총가용자원 R_{MAX} 의 25%이하로 밀돌고 있다. 그 결과 총효용합과 서비스총수입도 5이하 수준이다.

세 번째는 실험 (m=5, n=20)에서 보듯이 같이 자원활용률과 총효용합, 서비스총수입은 각각 다른 가격지점에서 형성되었다는 것이다. 사용자들의 효용함수를 잘 이해함으로써 서비스 제공자는 전략적 목적에 따라 고객만족도, 총수입과 같이 원하는 목적에 적합한 가격수준을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론 및 추후연구

본 논문에서는 서비스 차별화된 서비스 환경에서의 멀티미디어 자원 할당에 관한 알고리즘을 제안하였다. 통신 서비스는 Traffic Class라고 부르는 통신 서비스 등급체계가 있어서, Wibro의 경우 현재에는 사용자 확보를 위하여 정액제를 제공하지만, 사용자가 증가하는 가까운 시점에는 고급 서비스를 통하여 차별화된 서비스를 제공할 것으로 예견되고 있다. 본 논문은 이러한 무선 통신 환경에서 차별화된 서비스 제공을 통하여 제한된 자원을 효과적으로 할당하는 방안을 제시한다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 차별화된 서비스에 대한 자원 할당 알고리즘과 단계별 최적해를 구하는 과정을 설명하였고, KSBS를 이용하여 자원 할당 계획이 최적 조건을 만족하고 있음을 보였다. 또한 멀티미디어 데이터의 특성을 반영한 가상의 실험을 통하여 알고리즘의 구현 가능성 및 효과를 입증하였다. 제안된 알고리즘을 통해 서비스 수준이 차별적인 환경에서 사용자 전체가 만족할 수 있는 최적의 자원 할당 계획을 수립할 수 있을 것이다.

표 5. (m=5, n=20)의 실험결과

λ	Results	$R_i^{MAX} (= 20)$																				sum
		10.00	10.50	11.00	11.50	12.00	12.50	13.00	13.50	14.00	14.50	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	
0.045	service	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.40
	utility	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.82
0.040	service	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	1.32
	utility	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	2.29
0.035	service	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	2.59
	utility	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	4.01
0.030	service	S1	S3	S2	S2	S2	S2	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	0.31	0.32	0.35	0.32	0.30	0.27	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	4.59
	utility	0.37	0.37	0.39	0.38	0.36	0.34	0.32	0.32	0.31	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	6.03
0.025	service	S1	S4	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	resource	0.98	2.29	2.62	1.86	1.51	1.28	1.11	0.97	0.86	0.76	0.68	0.59	0.56	0.54	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	19.37
	utility	0.63	0.67	0.74	0.71	0.69	0.67	0.64	0.62	0.60	0.57	0.55	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	11.41
0.020	service	S1	S5	S5	S3	S3	S3	S3	S3	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	
	resource	0.58	2.34	1.12	1.62	1.33	1.13	0.97	0.85	0.73	0.69	0.64	0.60	0.57	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.36	16.26
	utility	0.52	0.68	0.62	0.69	0.67	0.64	0.62	0.59	0.57	0.55	0.54	0.53	0.51	0.50	0.48	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41	10.90
0.015	service	S1	S5	S5	S5	S5	S4	S4	S4	S4	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S2	
	resource	0.34	2.68	1.62	1.27	1.04	0.92	0.83	0.74	0.67	0.60	0.57	0.54	0.50	0.47	0.45	0.42	0.39	0.37	0.35	0.34	15.11
	utility	0.40	0.72	0.69	0.66	0.62	0.61	0.59	0.57	0.54	0.53	0.51	0.50	0.48	0.47	0.46	0.44	0.43	0.41	0.40	0.40	10.43
0.010	service	S1	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S4	
	resource	4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.03	6.53
	utility	0.85	1.92	1.88	1.84	1.80	1.76	1.72	1.68	1.64	1.59	1.55	1.51	1.47	1.43	1.38	1.34	1.30	1.25	1.25	0.78	29.94
0.005	service	S2	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	
	resource	2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.75
	utility	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82
0.000	service	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	S5	
	resource	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	utility	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

실험 결과에서와 같이, 동일한 환경에서라도 각 서비스 유형의 협상력 증가 비율을 달리했을 때, 사용자의 서비스 유형 선택 결과 분포가 달라짐을 알 수 있다. 즉, 각 개인별 가격 민감도와 서비스 수준에 대한 민감도가 다르기 때문에 서비스 유형별 단위 비용 및 협상력의 차이는 사용자들의 선택에 일정 수준 이상의 영향을 미치게 된다. 따라서 자원 관리자 입장 혹은 시스템 전체의 효용을 먼저 정의하고, 이를 최대화할 수 있는 전략을 도출하는 방법론 정의에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 문제의 단순화를 위해 가정한 서비스 유형별 단위 비용 및 협상력의 선형적 증가라는 가정을 다양한 형태의 실질적인 설정으로 확대하여 보편적인 가격 차별화 모형에서의 서비스 유형 선택 및 자원 할당에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원

의 IT원천기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

References

[1] M. Felegyhazi and J.-P. Hubaux, *Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial*, Lausanne, Switzerland, 2006.

[2] K. Binmore, *Fun and Games: A Text on Game Theory*, Lexington, MA: D.C. Heath, 1992.

[3] S. Boyd, L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. New York: Cambridge Univ. Press, 2004.

[4] Avriel M., *Nonlinear Programming: analysis and methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1976

[5] M. Van. Der Schaar and Sai Shankar N, "Cross-layer wireless multimedia transmission: Challenges, principles and new paradigms", *IEEE Wireless Comm.* Vol. 12, No.4, (2005), pp. 50-58.

[6] Z. Dziong and L. G. Mason, "Fair-efficient call admission control policies for broadband networks - a game theoretic framework," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 4, (1991),

- pp. 123–136.
- [7] R. La and V. Anantharam, "Optimal routing control: Repeated game approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 47, No. 3, (2002), pp. 437–450.
- [8] C. Douligeris and R. Mazumdar, "A game theoretic perspective to flow control in telecommunication networks," *Journal Franklin Inst.*, Vol. 329, No. 2, (1992), pp. 383–402.
- [9] H. Yaïche, R. R. Mazumdar, and C. Rosenberg, "A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 8, No. 5, (2000), pp. 667–678.
- [10] E. Even-Dar, A. Kesselman, and Y. Mansour, "Convergence time to Nash equilibria," in *Proc. 30th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP '03)*, (2003), pp. 502–513.
- [11] D. Monderer and L. S. Shapley, "Potential games," *Games and Economic Behavior*, Vol. 14, No. 44, (1996), pp. 124–143.
- [12] Y. Andreopoulos, A. Munteanu, J. Barbarien, M. van der Schaar, J. Cornelis, and P. Schelkens, "In-band motion compensated temporal filtering," *Signal Processing: Image Communication (special issue on "Subband/Wavelet Interframe Video Coding")*, Vol. 19, No. 7, (2004), pp. 653–673.
- [13] Ehud Kalai and Meir Smorodinsky, "Other solutions to Nash's Bargaining Problem", *Econometrica*, Vol. 43, No. 3, (1975), pp.513-518.
- [14] H. Park and M. van der Schaar, "Bargaining strategies for networked multimedia resource management," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 55, No. 7, (2007).
- [15] K. Stuhlmüller, N. Färber, M. Link, and B. Girod, "Analysis of video transmission over lossy channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 18, No. 6, (2000).
- [16] Y. Andreopoulos, A. Munteanu, J. Barbarien, M. van der Schaar, J. Cornelis, and P. Schelkens, "In-band motion compensated temporal filtering," *Signal Process.:Image Commun. (Special Issue on "Subband/Wavelet Interframe Video Coding")*, Vol. 19, No. 7, (2004), pp. 653–673.
- [17] Hyunggon Park and Mihaela van der Schaar, "Congestion Game Modeling for Brokerage based Multimedia Resource Management," in *Proc. Int. Packet Video Workshop 2007 (PV 2007)*, (2007), pp. 18-25.
- [18] Orda, R. Rom, and N. Shimkin, "Competitive routing in multiuser communication networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 1, No. 5, (1993), pp. 614–627.
- [19] E. Even-Dar, A. Kesselman, and Y. Mansour, "Convergence time to Nash equilibria," in *Proc. 30th International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP '03)*, (2003), pp. 502–513.
- [20] T. Boulogne, E. Altman, and O. Pourtallier, "On the convergence to Nash equilibrium in problems of distributed computing," *Annals of Operation Research*, Vol.109, (2002),pp.279-291.
- [21] M.Wang and M. van der Schaar, "Rate-distortion modeling for wavelet video coders," in *Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)*, (2005), pp. 281–284
- [22] K. Stuhlmüller, N. Färber, M. Link, and B. Girod, "Analysis of video transmission over lossy channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.18, No. 6, (2000).
- [23] M. Dai, D. Loguinov, and H. Radha, "Rate-distortion modeling of scalable video coders," in *IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP '04)*, (2004).
- [24] E. Altman, T. Boulogne, R. E. Azouzi, and T. Jimenez. "A survey on networking games. Telecommunication Systems", *Computers & Operations Research*, Vol.33, (2006), pp.286-311.
- [25] Mazumdar R, Mason L, Douligeris C. "Fairness in network optimal flow control: optimality of product forms", *IEEE Tras. on Communications*, Vol.39, No.5, (1991), pp.775-782.
- [26] Cao XR. "Preference functions and bargaining solutions," In: *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Cotrol. Dec. (1982)*, pp.167-171.
- [27] F. Kelly, "Charging and rate control for elastictraffic", *Europ. Trans. Telecomm.*, Vol.8, No.1, (1997), pp.33-37.
- [28] F.Kelly, A.Maulloo, and D. Tan, "Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability," *J. Operat. Res. Soc.*, Vol. 49, No. 3, (1998), pp. 237–252.
- [29] L. Massoulié and J. Roberts, "Bandwidth sharing: Objectives and algorithms," in *Proc. 18th Ann. Joint Conf. IEEE Comput. Commun. Soc. (INFOCOM 99)*, (1999), Vol. 3, pp. 1395–1403.
- [30] Carlos E. Luna, Lisimachos P. Kondi, and Aggelos K. Katsaggelos, "Maximizing User Utility in Video Streaming Applications," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13, No. 2, (2003).
- [31] W. Ding, "Joint encoder and channel rate control of VBR video over ATM networks," *IEEE Trans. Circuits Systems for Video Technology*, Vol. 7, (1997), pp.266–278.
- [32] Ortega, K. Ramchandran, and M. Vetterli, "Optimal trellis-based buffered compression and fast approximations," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 3, (1994), pp. 26–40, .
- [33] J. J. Chen and D. W. Lin, "Optimal bit allocation for coding of video signals over ATM networks,"

- IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 15, (1997), pp. 1002–1015.
- [34] C. Courcoubetis, V. A. Siris, and G. D. Stamoulis, “Integration of pricing and flow control for available bit-rate services in ATM networks,” in *Proc. IEEE Globecom ’96, London, U.K.*, (1996), pp. 644–648.
- [35] S. Shenker, “Fundamental design issues for the future Internet,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. 13, (1995), pp. 1176–1188.

Appendix I.

Proof of the Convexity of the function $h(\theta)$

함수 $h(\theta)$ 가 볼록 다각형 구조임을 보이기 위해서는 $h(\theta)$ 의 이차 도함수가 모든 θ ($0 \leq \theta \leq 1$)에 대해 음의 값을 가지지 않는다는 것을 보여야 한다.

$$h(\theta) = \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1} (\theta X_i + (1-\theta) Y_i)$$

$h_i(\theta)$ 를 함수 $h(\theta)$ 의 i 번째 요소라고 하면, $h_i(\theta)$ 의 2차 편미분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 h_i(\theta)}{\partial \theta^2} = \frac{2D_{0i}^2 (\theta x_i + (1-\theta)y_i - R_i^0 + \mu_{0i})}{k\mu_{0i}}$$

효용함수의 정의로부터 매개변수 k 와 μ_{0i} 는 양의 값을 가지며, D_{0i}^2 는 명백하게 음의 값을 가지지 않는다. 또한 만약 $x_i \geq R_i^0$ 와 $y_i \geq R_i^0$ 을 기본 가정으로 하고 있으므로, 이 둘의 선형 결합 역시 최소 자원 요구량보다 크다는 것은 $(\theta x_i + (1-\theta)y_i \geq R_i^0)$ 자명하다. 따라서 이차 편미분 함수의 모든 구성요소가 음의 값을 가지지 않기 때문에 $h_i(\theta)$ 는 음의 값을 가지지 않고, 따라서 함수 $h_i(\theta)$ 는 볼록 다각형 구조를 가진다고 말할 수 있다. 또한 $h_i(\theta)$ 의 집합적 구조를 가진 $h(\theta)$ 역시 볼록 다각형 구조를 가진다고 말할 수 있다. ■