

## 게임이론을 이용한 멀티미디어 서비스의 차별적 자원 할당 알고리즘\*

신광섭\*\* · 정재윤\*\*\*† · 서덕영\*\*\*\* · 강석호\*\*

### Resource Allocation Algorithm for Differentiated Multimedia Services Using Game Theory\*

KwangSup Shin\*\* · Jae-Yoon Jung\*\*\*† · Doug Young Suh\*\*\*\* · Suk-Ho Kang\*\*

#### ■ 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 problem in wireless communication, which is rapidly spreading such as Wibro, WCDML, 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.

Keyword : Multimedia Resource Allocation, Game Theory, Bargaining Solution, Proportional Fairness

논문접수일 : 2008년 10월 15일 논문게재확정일 : 2009년 01월 21일

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 IT원천기술개발사업(ITA-2008-F-005-01)의 지원으로 수행되었음. 본 논문은 2008년도 한국경영과학회 추계학술대회 경쟁부문(이론) 수상논문으로 소정의 심사과정을 거쳐 게재 추천되었음.

\*\* 서울대학교 산업공학과

\*\*\* 경희대학교 산업경영공학과, 산학협력기술연구원

\*\*\*\* 경희대학교 전자정보학부

† 교신저자

## 1. 개요

무선 네트워크의 급격한 발전으로 Wibro, HSDPA, WCDMA, DMB와 같은 차세대 통신 기술은 언제 어디서든 안정적인 서비스를 제공하고 있으며, 우리의 삶을 급속도로 변화시키고 있다. 그 중에서 DMB, 화상전화, IPTV 등 무선 네트워크를 이용한 멀티미디어 서비스는 가용 자원이 제한적이고, 데이터 전송률이 사용자 환경 및 미디어 특성에 의존적이며 데이터 지연에 민감하여 일부 정보의 손실을 감수하기도 해야 하는 특성을 가진다[5]. 즉, 유선 서비스와는 달리 실시간으로 제공되는 무선 서비스는 서비스 품질 보장을 위하여 충분한 전송량이 보장되어야 할 뿐만 아니라 지속적으로 일정 수준의 자원이 제공되어야 하므로 제한된 자원을 효율적으로 활용하는 것이 중요한 이슈이다. 지금까지 다양한 통신 분야의 연구에서, 제한된 무선 환경의 멀티미디어 자원 할당을 위한 최적화 알고리즘이 제시되었으나, 무선 네트워크 상에서 사용자 이동으로 인한 변동과 자원 경쟁 상황을 고려하기가 용이하지 않았다. 최근에는 이러한 무선 통신에서 제한된 자원에 대한 다중 사용자의 협력적, 비협력적 경쟁 상황을 고려하기 위하여 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 분야에서는 네트워크 상의 노드 또는 사용자들이 게임의 참여자로 해석될 수 있다. 경쟁 관계에 있는 참여자들은 자신의 이익을 극대화하기 위하여 합리적으로 행동한다는 가정 하에 무선 장비들은 기기의 자원을 한정적으로 제공하거나, 또는 시스템 전체 자원을 제한하는 방법을 사용한다. 이러한 제약 상황 하에서 경쟁적으로 자원을 요구하는 상황에 게임 이론을 적용하는 방안들이 연구되고 있다. van der Schaar와 Sh-

ankar는 게임 참여자들이 서로 정보를 교환하고, 자원을 할당하기 위해 상호 협력할 수 있는 새로운 패러다임을 제안하였다[5]. 게임 이론을 이용한 자원할당 문제의 일반적인 가정은 다음과 같이 세 가지로 요약할 수 있다.

- **자원 낭비의 회피** : 사용자에게 필요 이상의 자원을 할당하지 않는다. 즉, 게임 참여자가 이성적임을 가정함과 동시에, 네트워크 혹은 자원 관리자가 필요 이상의 자원을 할당하여 자원을 낭비하지 않는다는 것을 의미한다.
- **공정성(fairness)** : 제한된 자원을 사용자들에게 할당하는 네트워크 운영자는 게임 참여자들에게 자원 할당 정책이 모두에게 공정함을 보장해야 한다. 게임의 공정성은, 사용자들이 게임에 참여하고 게임이 성립함을 의미한다.
- **개인 혹은 전체 효용(utility)의 최대화** : 경쟁 게임에서 각 참여자들은 자신의 효용을 최대화하기 위해 다른 참여자들과 경쟁한다. 동시에 네트워크 운영자는 개인들의 효용으로 부터 도출한 전체 효용을 최대화하고자 한다.

처음 두 가지 기준에 관한 연구는 네트워크 내 자원을 어떻게 공유할 것인가, 혹은 네트워크를 구성하기 위한 비용을 어떻게 분배할 것인가를 중심으로 이루어진다[24]. 자원 할당을 위한 직관적인 방법은 모든 참여자들에게 동일한 양을 할당하는 것이지만, 이는 사용자와 시스템의 특성을 반영하지 못한다. 이를 보완하기 위하여 사용자의 효용을 고려한 비율적 공정성(proportional fairness)을 보장하는 자원 할당 정책이 제시되었다[27]. 참여자의 효용을 고려하여 자원을 배분하고자 하는 협력적 게임 모형으로 Bargaining game의 대표적인 해법으로 Nash Bargaining Solution(NBS)이 있다. NBS는 통신 분야에서 네트워크 상의 흐름 관리 혹은 네트워크 자원 할당에 적용되어 시스템 전체의 효용을 높이기 위해 사용되었다[6, 8, 9, 25]. NBS는 크게 1) 파레토 효율성(Pareto optimality), 2) 규모

의 불변성(invariance), 3) 해와 무관한 대안의 독립성(independence of irrelevant alternatives), 4) 대칭성(symmetry)이라는 네 가지 공리를 보장한다. 그러나 세 번째 공리는 참여자들의 자원에 대한 차별적 수용 능력을 고려하지 않는다는 약점이 존재한다. 이를 보완하기 위해 제시된 Bargaining game의 또 다른 해법으로 Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution(KSBS)가 있다. KSBS는 NBS의 세 번째 공리 대신에 개별적 단조성(individual monotonicity)을 적용하였다[26]. H. Park과 van der Schaar는 멀티미디어 자원 할당에서 NBS와 KSBS의 차이점을 비율적 공정성의 의미에서 비교 분석하였다[14]. 이들은 NBS, KSBS의 최적조건과 함께 NBS의 정량적 측면에서의 비율적 평등과 KSBS의 정성적 측면에서의 평등 간의 차이점을 분석하였다. 기존 연구들에서 제시된 공정성에 입각한 자원 할당 정책이 성공적으로 반영되었으나[28, 29], 자원 할당 결과가 서비스 품질에 미치는 영향을 고려하지 않아 콘텐츠 중심의 멀티미디어 서비스 환경에 적합하지 않다는 한계가 존재한다.

게임 이론에서는 게임에 참여하는 모든 참가자들이 각자 자신의 효용함수에 근거하여 합리적인 사결정을 한다고 가정한다. 이러한 참여자의 합리성에 대한 가정, 즉 참여자가 시스템 내에서 얻을 수 있는 효용을 정량적으로 판단할 수 있다는 가정에서 한계를 지적하는 경우도 존재하지만[4], 효용함수는 경쟁적 상황에서 합리적 행위를 결정하는 기준으로 가장 널리 사용되고 있다. 멀티미디어 서비스에 관한 기존 연구들은 사용자의 효용함수를 정의하기 위하여 서비스 품질(QoS: Quality of Service)을 주로 사용하였다. 무선 멀티미디어 네트워크 환경에서 QoS는 서비스 지연에 대한 민감도 혹은 정보의 왜곡 비율 등으로 표현되어, 할당된 자원으로부터 사용자가 느끼는 시스템에 대한 만족도로 표현된다. 다른 연구에서는 모든 비디오 프레임에 대해 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)로 평가된 비디오 품질을 일정 수준 이상 지속적으로 유지하기 위해 인코더와 채널을 결합시키는 방안이 적

용되었으며[31], 네트워크 채널이 가지는 제약조건 하에서 비디오 시퀀스 중 왜곡된 양을 최소화하는 방안도 연구되었다[32]. 또한 윈도우(windowed) 기술을 적용하여 실시간 문제를 해결하기 위한 연구도 수행된 바 있다[33]. 그러나 여전히 효용함수는 사용자에게 할당된 자원이 실질적인 가치를 정확하게 표현하는데 어려움이 있는데, 그 이유는 할당된 자원(대역폭)을 통해 전송되는 데이터의 유형에 따라서 사용자 만족도가 달라질 수 있으며, 서비스 지연에 대한 민감도 역시 실시간 전송환경에서 변동의 폭이 커지기 때문이다[1].

## 1.2 논문의 접근법

본 연구에서는 서비스에 대한 사용자 만족도를 표현하기 위하여, 사용자가 서비스 이용에 지불해야 하는 비용을 추가로 고려한다. 네트워크 상의 사용자들은 일정 수준의 서비스 품질을 보장받기 위하여 그에 합당한 비용을 지불해야 한다. 이 경우 사용자들은 할당된 자원에 대한 비용을 절감하고 서비스 품질을 극대화하는 것을 목표로 한다[30].

네트워크 비용의 정량화 문제는 여러 연구에서 큰 차이점을 보이고 있으며, 일반적으로 네트워크는 사용자들의 대역폭의 요구량에 따라서 비용을 책정한다[4]. Kelly는 사용자들은 할당된 대역폭에 따라 비용을 지불한다고 가정하였고[27], Courcoubetis et al., Shenker 등은 나아가 정보의 흐름과 비용 산정을 결합하는 방법을 제시하였다[34, 35]. 네트워크 운영자 측의 비용 산정 방법은 보통 네트워크 구축에 투자된 금액과 서비스 운영 비용을 기반으로 비용을 책정하거나, 네트워크에 참여하고 있는 사용자의 기준이 아니라 경쟁 관계의 타 네트워크를 기준으로 가격을 수립하기 때문에 현실적인 상황을 반영하지 못하는 경향이 있다[1]. 따라서 가격 책정 및 자원 할당 정책은 네트워크의 사용자와 운영자 모두를 고려하여 사용자와 운영자 모두의 이익을 극대화시킬 수 있도록 수립되어야 한다[9].

앞서 언급한 바와 같이 기존 연구들은 대부분 단

일 서비스를 가정하고 있으며, 서비스 유형이나 서비스 수준의 차별성을 고려하지 않고 있다. 일부 연구에서만 서비스 품질의 차별화를 위하여 협상력(bargaining power)이라는 개념을 이용하여 자원의 할당량을 차별화하는 방법이 제시되고 있다[13, 14]. 협상력을 이용하는 방법에서는 높은 협상력이 높은 사용자가 더 많은 자원을 할당 받는 것을 보장한다. NBS는 이러한 협상력을 바탕으로 사용자 효용의 곱으로 표현되는 시스템 전체 효용을 최대화하는 방향으로 자원을 할당한다. 반면에, KSBS는 각 사용자들의 최대 효용치에 비례하여 동일한 비율로 효용을 삭감시키는 방식으로 자원을 할당한다[14]. 그러나 현실에는 더 많은 비용을 지불하더라도 높은 수준의 서비스를 보장받기를 원하는 사용자, 즉 고급 서비스를 이용자가 존재한다. 서비스 제공자들은 이러한 고급 회원들에게 타 회원에 비해 높은 서비스 품질을 제공하는 것이 일반적이다. 무선 환경의 멀티미디어 서비스에서 협상력의 차이는 서비스 수준을 차별화하는 것으로 적용할 수 있으며, 자원 할당 정책은 서비스 수준의 차별성과 공정함을 모두 만족할 수 있어야 한다. 또한 서비스 차별화는 서비스 수준에 따라 상이한 비용을 지불하도록 해야 한다.

지금까지 살펴본 기존 연구의 한계점들을 해결하기 위해, 본 연구에서는 다수의 사용자와 네트워크 운영자들이 존재하는 상황에 적합하다고 알려진 게임 이론을 적용하여 차별화된 서비스 수준을 위

한 새로운 자원 할당 알고리즘을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 본 연구에서 사용하고 있는 기본 가정 및 절차를 소개한다. 자원 할당 알고리즘은 제 3장에서 개괄적으로 설명하고, 세부적인 설명과 각 단계별 최적해 및 조건은 제 4장에서 설명한다. 제 5장에서는 간단한 예제를 통하여 본 논문에서 제시한 알고리즘의 실험 결과는 기술하고, 본 연구의 결론 및 추후연구를 제 6장에 기술하였다.

## 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 1>에 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 할당하고자 한다.  $i$ 번째 사용자는 할당된 자원의 양 ( $R_i$ )으로 부터 도출된 고유의 효용치( $X_i = \pi_i(R_i)$ )를 가진다. 또한 최소의 효용 요구 수준( $\pi_i(R_i^0)$ )을 가

<표 1> 기호 및 설명

기 호	설 명	기 호	설 명
$R_{MAX}$	가용 자원의 양	$\beta_j$	서비스 유형 $j$ 의 협상력
$R_i^{MAX}$	사용자 $i$ 의 최대 요구량	$K_\beta$	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 총예산	$X_i$	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
$\alpha_i$	사용자 $i$ 의 협상력		

지며, 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 보장해주어야 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 할당 받을 수 있음을 의미하며, 동시에 서비스 유형에 따라 그 비용도 달라짐을 의미한다. 사용자  $i$ 의 협상력( $\alpha_i$ )은 해당 사용자가 특정 서비스 유형을 선택할 때 결정된다. 예를 들어 사용자  $i$ 가  $j$ 번째 서비스 유형을 선택했다면, 사용자  $i$ 의 협상력( $\alpha_i$ )의 값은 선택된 서비스의 협상력( $\beta_j$ )을 갖는다. 이 과정은 다음 식 (1)로 표현될 수 있다.

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

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 같아야 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, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C_1 \leq \dots \leq C_m \text{ and } \beta_1 \leq \dots \leq \beta_m \quad (2)$$

예를 들어 다음과 같이 단위 비용과 협상력을 선형적인 관계로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_j &= C_1 + (j-1)K_c, \quad j = \{1, \dots, m\} \\ \beta_j &= \beta_1 + (j-1)K_\beta, \quad j = \{1, \dots, m\} \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$S = \{\pi_1(x_i | \alpha), \dots, \pi_n(x_n | \alpha)\} \subset \mathbb{R}^n \quad (4)$$

이 때,  $x_i$ 는  $(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im})$  벡터를 나타내고,  $m$ 개의 구성요소 중 선택된 서비스만 1의 값을 가지고, 나머지 서비스는 0의 값을 갖는다.  $\alpha$ 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 집합이다. Bargaining game은 앞서 정의된 가능해 집합  $S$ 와  $d$ 의 쌍  $(S, d)$ 로 정의할 수 있다.

$$d = (d_1, \dots, d_n) = \{(\pi_1(R_i^0), \dots, \pi_n(R_i^0))\} \in \mathbb{R}^n \quad (5)$$

## 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 requirements

$t : (R_i^{MAX}, R_i^0), \forall i \in \{1, \dots, n\}$

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. 알고리즘

본 장에서 앞서 언급된 멀티미디어 서비스의 자원 할당 알고리즘에서 사용되는 KSBS의 특성 및 해법에 대해서 자세히 살펴본다.

#### 3.1 파레토 효율성

여러 사용자가 참여하는 자원 할당 게임의 가능해 중 특정해가 최적이기 위해서는 파레토 효율성을 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 개선할 수 있는 방법이 없음을 의미한다 [7]. 정의 3.1에서의 두 벡터 간의 부등식은 구성요소 간의 부등식을 의미한다. 특히 다수의 참여자들 간의 게임에서는 이러한 파레토 효율성을 만족하는 지점이 무수히 많이 존재할 수 있다[10]. 따라서 여러 파레토 효율성을 만족하는 해 중에서 어떤 해가 시스템을 최적화시킬 수 있는지를 판단할 수 있는 기준을 수립해야 한다. 많은 기존연구에서 이미 자원 할당과 관련된 여러 가지 기준을 제시하고 있으며, 그들은 각자 설정한 최적성과 공정성을 보장하고 있다[11, 12]. 그 중에서 본 연구에서는 각 참여자가 최대 수용 가능한 효용치로부터 동일한 비율로 효용을 감소시키는 것을 보장하는 방법인 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 개인이 이성적이며, 파레토 효율성을 만족하는 효용의 집합으로 해석될 수 있다. 아래 정의 3.3과 같이 네 가지 공리를 만족하는 협상 집합의 특징하는 KSBS라고 정의할 수 있다[13].

**정의 3.3 : KSBS (Kalai-Smorodinsky Bargaining Solution).** 아래의 네 가지 공리를 만족시키는 최적해  $X^* = F(S, d)$ 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  $\phi$ 에 대해서도  $\phi(F(S, d)) = F(\phi(S), \phi(d))$ 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,  $[F(S', d)] \geq [F(S, d)]$ , 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 언급한 파레토 효율성을 의미하며, 두 번째 공리는 만약 두 사용자가 동일한 효용함수와 서비스 거부 수준을 가지고 있다면 동일한 효용을 얻어야 함을 의미한다. 세 번째 공리는 효용함수와 거부 수준이 선형적 변환이 되더라도 협상해가 변하지 않아야 함을 의미한다. 즉, 효용함수와 거부 수준이 선형적으로 증가 혹은 감소하더라도 선형적 변환을 일어난 전체 집합 내에서는 동일한 KSBS를 보장해야 함을 의미한다[14]. 마지막 공리는 협상해의 가능 영역이 특정 사용자에게 유리한 방향으로 증가하면 이는 반드시 해당 사용자에게 유익함을 의미한다[13]. 기하학적으로 KSBS는 식 (6)을 통해 정의되는 직선  $L$ 과 협상 집합  $B$ 의 교점으로 해석될 수 있다.

$$L = \left\{ X \left| \frac{X_1}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}}, \right. \right. \\ \left. \left. X_i > 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, \forall i \right\} \quad (6)$$

효용의 정의에 따라  $X_i^{MAX} = \pi_i(R^{MAX})$ 라고 할 수 있으며, 서비스 거부 수준( $d$ )은 가능해 집합에서 최소 효용 지점이 된다. 우리는 식 (7)을 통해 얻을 수 있는 상수값  $\delta$ 와  $X_i$ 를 협상 집합의 경계선인  $\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) = R^{MAX}$ 에 대입함으로써 KSBS를 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{X_1}{\alpha_1 X_1^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}} \quad (7)$$

협상해는 협상 집합에 포함된다는 조건을 이용한 것으로, 이 방정식은 일반적으로  $\delta$ 에 관한  $n$ 차원 식의 형태가 된다. 따라서 Algorithm 2에 제시된

이분법(bisection method)을 이용하여 효과적으로 해를 구할 수 있다[3]. 이미 할당될 자원의 최대값(자원 관리자가 가지고 있는 제한된 자원의 양)과 최소값(사용자의 최소 요구수준)을 알고 있으므로, 이분법을 적용하면  $\lceil \log_2((u-l)/\varepsilon) \rceil$  안에 근사해에 도달할 수 있다[14]. 이분법을 이용하여 첫 번째 사용자의 근사해를 구한 후, KSBS의 공리인 식 (8)을 이용하여 다른 사용자의 근사해를 모두 계산할 수 있다.

$$\frac{X_i^*}{\alpha_i X_i^{MAX}} = \frac{X_j^*}{\alpha_j X_j^{MAX}} \quad (8)$$

이분법을 이용해서 최적의 자원할당 계획을 찾아 가는 과정은 *Algorithm 2*에 기술되어 있다.

#### *Algorithm 2.* Bisection method

Input :

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

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

threshold  $\varepsilon > 0$

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  $R_i$  using equation (7)
- 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  $\varepsilon$ ;  $u-l \leq \varepsilon$

## 4. 효용함수와 자원 할당

본 장에서는 사용자의 효용함수를 먼저 정의하

고, *Algorithm 1*의 각 세부 단계별로 최적해를 구하는 방법 및 최적 조건을 자세하게 설명한다. 제 2장에서 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 모형[15]이 최근 비디오 코딩 기술에 가장 적합하다고 알려져 있으므로[16], 사용자 효용함수의 일부로 이 모형을 사용하고자 한다. 왜곡 비율 모형은 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{\mu}{R - R_0} + D_0, \quad R \geq R_0, \quad D_0 \geq 0, \quad \mu > 0 \quad (9)$$

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.

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



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

$$NoiseRatio_i(R_i(x_i)) = \frac{k(R_i(x_i) - R_i^0)}{D_{oi}(R_i(x_i) - R_i^0) + \mu_{oi}} \quad (11)$$

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

$$COST(R_i(x_i)) = R_i(x_i) \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \quad (12)$$

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

$$X_i = \pi_i(x_i) = NoiseRatio_i(R_i(x_i)) + \lambda_i COST(R_i(x_i)) \\ = \frac{k_i(R_i(x_i) - R_i^0)}{D_{oi}(R_i(x_i) - R_i^0) + \mu_{oi}} + \lambda_i R_i(x_i) \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \quad (13)$$

효용함수의 구성요소 간의 매개변수  $\lambda_i$ 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 (14)와 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.

$$\frac{\partial}{\partial R_i} NoiseRatio_i(R_i) > 0 \text{ and } \frac{\partial^2}{\partial R_i^2} NoiseRatio_i(R_i) < 0 \\ \frac{\partial}{\partial R_i} \left( \lambda_i R_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \right) = \lambda_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \quad (14)$$

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  $\delta$ 의 최대값 ( $\delta^*$ )을 찾는 것과 동일한 의미를 가진다.

$$\delta^* = \max \left( \delta = \frac{X_i}{\alpha_i X_i^{MAX}} = \dots \right. \\ \left. = \frac{X_i}{\alpha_i X_i^{MAX}} = \dots = \frac{X_n}{\alpha_n X_n^{MAX}} \right) \quad (15)$$

식 (8)과 식 (15)를 이분법으로 풀면 최적의 자원 할당 계획을 수립할 수 있으며, 이 때의 각 사용자의 자원 할당량은 다음 식 (13)과 같이 각 개인별 효용함수의 역함수를 통해 얻을 수 있다.

$$R_i^* = \pi_i^{-1}(X_i^*) \quad (16)$$

이 때, 각 사용자별 최적의 효용치  $X_i^*$ 는  $X_i^* = \delta^* \cdot \alpha_i \cdot X_i^{MAX}$ 로 얻을 수 있으며, 앞서 효용함수의 정의에서 언급한 바와 같이 식 (17)를 이용해 각 사용자별 최대 효용치  $X_i^{MAX}$ 로부터 얻을 수 있다.

$$R_i = R_i^*(x_i) = \pi_i^{-1}(X_i^*) \\ = \pi_i^{-1}(\delta^* \cdot \alpha_i \cdot X_i^{MAX}) \\ = \pi_i^{-1} \left( \delta^* \cdot X_i^{MAX} \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij} \right) \quad (17)$$

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 만족하는지 확인해야 한다.

$$\sum_{i=1}^n R_i \leq R_{MAX} \\ R_i \sum_{j=1}^m C_j x_{ij} \leq b_i, \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \\ R_i^0 \leq R_i \leq R_i^{MAX} \quad (18)$$

첫 번째 제약조건은 사용자에게 할당된 자원의 총합이 자원관리자가 보유한 가용 자원의 양을 초과할 수 없음을 의미한다. 두 번째 제약조건은 사용자에게 할당된 자원의 양은 해당 사용자가 협상할 수 있는 범위의 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 기준으로 이분법을 이용해 최적의 자원 할당 계획을 수립할 수 있다.

#### 4.2 볼록형(convexity) 증명

이번 절에서는 가능해 집합이 볼록 다각형 구조의 집합임을 증명한다. 다음 정리 4.1과 같이 임의의 두 해의 선형 결합도 해집합에 속함을 보임으로써 증명할 수 있다.

정리 4.1 : 가능 집합  $S$  는 볼록형(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 볼록형이다.  $X$ 와  $Y$ 를 가능 효용 집합  $S$ 의 두 결합 효용 지점(joint utility points)이라고 가정하자.  $S$ 가 볼록형임을 보이려면  $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ 에 대하여 아래를 증명해야 한다.

$$\begin{aligned} X &= (X_1, \dots, X_n) = (\pi_1(x_1), \dots, \pi_n(x_n)) \in S \\ Y &= (Y_1, \dots, Y_n) = (\pi_1(y_1), \dots, \pi_n(y_n)) \in S \\ &\Rightarrow \theta X + (1-\theta)Y \in S \end{aligned} \quad (19)$$

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.

$$S = \left\{ X \mid \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) \leq R_{MAX}, \text{ for all } i \right\} \quad (20)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) \leq R_{MAX}, \text{ for } X, Y \in S \quad (21)$$

식 (18)로 부터  $\theta$  값에 따라 다음 부등식 (22)를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) \\ &= \begin{cases} \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i) \leq R_{MAX} & \text{if } \theta = 1 \\ \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(Y_i) \leq R_{MAX} & \text{if } \theta = 0 \end{cases} \quad (22) \\ &\leq \max \left\{ \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(X_i), \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(Y_i) \right\} \text{o.w} \end{aligned}$$

$\theta$  값이 0 혹은 1의 값을 대입함으로써, 처음 두 식을 얻을 수 있고, 마지막 부등식이 성립하는 것은 <Appendix I>에서와 같이 다음 식 (23)이 볼록형임을 보임으로써 증명할 수 있다.

$$h(\theta) \triangleq \sum_{i=1}^n \pi_i^{-1}(\theta X_i + (1-\theta)Y_i) \quad (23)$$

이미 제약조건 (21)을 통해 해집합의 특정 해  $X$ 와  $Y$ 의 결합해 역시 가능해임을 보였으므로, 본 문제의 가능해 집합  $S$ 도 볼록형임이 증명되었다. ■

#### 4.3 효용기반 Congestion Game

앞서 정의한 사용자 간의 게임이 특정해로 수렴함을 보이기 위해서는 게임이 가진 구조가 적어도 하나 이상의 Nash 균형에 도달할 수 있음을 보여야 한다. Congestion Game은 적어도 하나의 Nash 균형을 가진다는 사실이 이미 알려져 있다[11]. 본 논

문에서 제안된 게임이 Congestion Game으로 모형화될 수 있음을 보임으로써, 적어도 하나의 Nash 균형에 도달할 수 있음을 증명하였다. Congestion Game은 다음과 같이 Congestion Model로부터 정의된다.

정의 4.1 : Congestion Model :

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

M은 공집합이 아닌 사용자들의 집합이며, A는 공집합이 아닌 유한한 시설의 집합이다. 게임 참여자들이 선택할 수 있는 순수 전략의 집합  $(\Omega)_{i \in M}$ 은 공집합이 아닌 유한한 A의 부분집합이다. 시설집합의 한 원소 f는 이익함수  $c_f$ 를 가지는데, 이 함수  $c_f(k)$ ,  $k \in \{1, \dots, n\}$ 는 시설 f에 총 k명의 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 M과  $(\Omega)_{i \in M}$ 는 정의 4.1에서 정의한 바와 동일하며, 각 참가자 i가 특정 전략을 선택했을 때 얻을 수 있는 이익 함수  $(u_i : \Omega \rightarrow \mathbb{R}, i \in M)$ 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  $\sigma$ 를 택함으로써 시설 집합의 특정 원소 f를 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 f를 선택한 참여자의 수에 관한 함수가 된다.

본 논문에서 제안하는 KSBS를 이용하는 자원 할당 알고리즘은 정리 4.2를 통해 Congestion Game의 형태로 표현될 수 있음을 증명한다.

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

- i. m개의 서비스 유형은 Congestion Game의 시설집합으로 볼 수 있다.
- ii. n명의 사용자들은 Congestion Game의 참여자들로 볼 수 있다.
- iii. 서비스 유형을 선택하기 위해 사용되는 효용함수는 Congestion Game의 이익함수로 볼 수 있다.

처음 두 조건이 성립하는 것은 Congestion Game의 정의한 기준과 본 논문에서 정의한 기준과 동일하므로 증명이 불필요하다. 따라서 세 번째 조건에 대한 증명을 제시한다. Congestion Game의 정의에 따르면, 이익함수는 오직 동일한 시설을 선택한 사용자의 수에 관한 함수이어야 한다. 여기서 Congestion Game의 이익함수를 위해 효용 상태 함수  $(\rho(\cdot))$ 를 다음과 같이 새롭게 정의한다.

$$\rho(i) = |X_i^{MAX} - X_i^*| \quad (24)$$

효용 상태 함수는 각 사용자 별 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, 이 때 KSBS를 이용할 경우 모든 사용자에 대한 품질 저하의 절대적인 양이 아닌 비율이 모두 동일하게 유지된다. 비록 동일한 서비스 유형에 속한 사용자의 최대 효용치에 따라 품

질 저하의 값은 달라지더라도, 자원관리자는 품질 저하 비율이 최소화할 수 있도록 해야만 한다. 즉, 일부 사용자들로 이루어진 조합을 모두 고려하더라도 앞서 정의한 상수  $\delta$ 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.

$$u_i(\sigma) = c_i(n_\sigma, (\sigma)) = c_j(x_j) = \rho_i\left(\sum_{j=1}^n x_{ij}\right) \quad (25)$$

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

$$\begin{aligned} \rho_i(x_j) &= X_i^{MAX} - X_i^* \\ &= X_i^{MAX} \left(1 - \delta^* \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij}\right) \end{aligned} \quad (26)$$

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  $\langle M, A, (\Omega_i)_{i \in M}, (\rho_j)_{j \in A} \rangle$ 로 표현 가능하며, 사용자 간의 제한된 자원에 대한 경쟁적 게임은  $G = \langle M, (\Omega_i)_{i \in M}, (\rho_i)_{i \in M} \rangle$ 의 Congestion Game으로 모형이 가능하다. ■

KSBS를 이용한 자원 할당 정책이 Congestion Game의 형태를 가지기 때문에, 앞서 언급한 Congestion Game이 적어도 하나 이상의 Nash 균형에 도달할 수 있다는 특성에 근거하여 본 논문의 자원 할당 알고리즘 역시 하나의 Nash 균형을 가진다고 말할 수 있다.

#### 4.4 서비스 결정

앞 장에서는 사용자 별 서비스 유형이 결정되어 있다는 가정하에서는 하나 이상의 Nash 균형이 존재함을 보였다. 본 알고리즘에서는 각 사용자에게 할당될 자원의 양이 결정된 후에 사용자는 다른 서비스로의 전환 여부를 평가한다. 이 의사 결정은 반드시 특정 서비스 유형을 선택했을 때 얻을 수 있는 효용치를 기준으로 이루어져야 한다. 만약 여러 사용자가 동시에 서비스 유형을 바꿀 수 있다고 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. 다시 말해서, 효용 상태 값이 가장 큰 사용자가 가장 먼저 서비스 유형을 전환할 지 여부를 판단하는 것이다. 세부적인 절차는 *Algorithm 3*에 기술하였다.

##### 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  $u$  :

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

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 장에서는 멀티미디어 자원 할당 문제를 제시된 알고리즘을 이용한 간단한 실험 결과를 보여준다. 실험 설계로는 가격이 다른 다수의 차별화된 멀티미디어 서비스가 존재할 때, 다수의 사용자가 자신의 서비스를 효용함수에 근거하여 합리적으로 결정하면, 그 결과에 따라 자원을 할당하는 실험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 차별화된 다수의 서비스에 사용자들이 어떻게 분포하게 되는지 분석하고, 그에 따른 전체 자원 활용율과 사용자들의 효용, 그리고 서비스 제공자의 수입이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

### 5.1 실험설계

본 실험을 위하여 Wavelet 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  $\lambda$ 에 의해 조정 가능함), 해당 서비스를 선택한 사용자의 구매력(bg.power)은 단위 비용에 비례하도록 설정하였다.

또한, 세 가지 실험에서 참여하는 사용자의 멀티미디어 데이터의 최대 요구량( $R_i^{MAX}$ )은 min값과 max값 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.

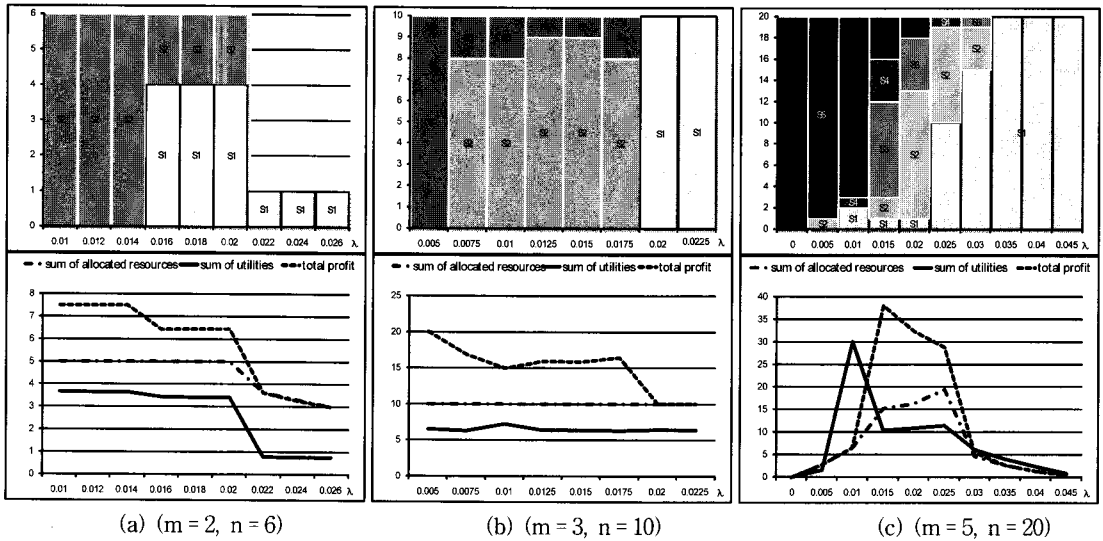
### 5.2 실험결과

- (m = 2, n = 6)의 실험결과

<표 3>은 (m = 2, n = 6)의 실험결과로 매개변수  $\lambda$ 의 변화에 따른 사용자들이 최종적으로 결정할 서비스(service), 할당 받은 자원의 양(resource), 그로 인한 효용(utility)을 보여준다. 매개변수  $\lambda$ 는 NoiseRatio,  $R_i(x_i)$ 과 COST( $R_i(x_i)$ )의 비율을 조정하는 역할을 한다. 즉,  $\lambda$ 가 작으면, 효용함수에서 품질의 비중이 크지만,  $\lambda$ 가 증가하면 비용의 비중이 커져

<표 2> 실험설계(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	max	
(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



[그림 1] 매개변수  $\lambda$  에 따른 서비스 할당 결과

주) 막대그래프는 사용자의 최종 서비스 결정, 꺾은선그래프는 총 자원 할당량, 총 효용합, 서비스 총 수입.

서 사용자들이 가격이 저렴한 서비스 S1쪽으로 이동하는 경향을 보여준다.

[그림 1]에서 막대그래프는 세 가지 실험에서 각 사용자들이  $\lambda$  가 증가함에 따라 어떻게 서비스를 변경해 가는지 보여준다. 또한, 꺾은선그래프에는 세 가지 실험결과에서 정리된 전체 자원 활용량(일점 쇄선)과 사용자들의 효용(실선), 그리고 서비스 제공자의 수입(점선)이 어떻게 변화하는지 보여준다.

실험 (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 유지하다가  $\lambda = 0.022$  이상이 되면 함께 이탈한다.

이러한 추이는 실험(m = 2, n = 6)의 꺾은선그래프에서(일점 쇄선으로 표시된) 가용자원의 양이  $R_{MAX}$  인 5.0에서 하락하는 것을 확인할 수 있다. (실선으로 표시된) 6명의 총효용의 합이 마찬가지로  $\lambda$

= 0.022에서 감소한다. 또한, 서비스제공자의 총수입은  $\lambda$  가 증가하면서 점점 감소하고 있다. 첫 번째 실험에서는 가격비중을 조정하는  $\lambda$  와 마찬가지로 사용자들의 효용함수를 이해하지 못하고 가격을 증가시키면 사용자 이탈로 인하여 총수입과 고객만족도(효용)가 감소함을 보여준다.

• (m = 3, n = 10)의 실험결과

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

• (m = 5, n = 20)의 실험결과

세 번째 실험 결과는 5가지 서비스를 사용자들이 점진적으로 옮겨가는 추이를 잘 보여주고 있다. 특히, 이 실험은 가용자원의 양이  $R_{MAX} = 20$ 으로 다른









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.

## 참고 문헌

- [1] Felegyhazi, M. and J.-P. Hubaux, *Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial*, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [2] Binmore, K., *Fun and Games: A Text on Game Theory*, Lexington, MA: D.C. Heath, 1992.
- [3] Boyd, S., 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] Van. Der Schaar, M. and N. Sai Shankar, "Cross-layer wireless multimedia transmission: Challenges, principles and new paradigms," *IEEE Wireless Comm.* Vol.12, No.4(2005), pp. 50-58.
- [6] Dziong, Z. 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] La, R. and V. Anantharam, "Optimal routing control: Repeated game approach," *IEEE Trans, Automat, Contr.*, Vol.47, No.3(2002), pp.437-450.
- [8] Douligeris, C. 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] Ya'iche, H., 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] Even-Dar, E., 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] Andreopoulos, Y., 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] Park, H. and M. van der Schaar, "Bargaining strategies for networked multimedia resource management," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.55, No.7(2007).
- [15] Stuhlmüller, K., 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 Inter-frame 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] Even-Dar, E., 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] Boulogne, T., 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] Wang, M. 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] Stuhlmüller, K., 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] Dai, M., D. Loguinov, and H. Radha, "Rate-distortion modeling of scalable video coders," in *IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP '04)*, 2004.
- [24] Altman, E., T. Boulogne, R.E. Azouzi, and T. Jimenez. "A survey on networking games. Telecommunication Systems," *Computers and 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 Control*, (1982), pp.167-171.
- [27] Kelly, F., "Charging and rate control for elastic traffic," *Europ. Trans. Telecomm.*, Vol.8, No.1 (1997), pp.33-37.
- [28] Kelly, F., 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] Massoulié, L. and J. Roberts, "Bandwidth sharing : Objectives and algorithms," in *Proc. 18th Ann. Joint Conf. IEEE Comput. Commun. Soc. (INFOCOM 99)*, Vol.3(1999), 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] Ding, W., "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] Chen, J.J. 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] Courcoubetis, C., 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] Shenker, S., "Fundamental design issues for the future Internet," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.13(1995), pp.1176-1188.

## 〈Appendix I〉

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

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

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

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

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

효용함수의 정의로부터 매개변수  $k$ 와  $\mu_{0i}$ 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 볼록형이라고 말할 수 있다. 또한  $h_i(\theta)$ 의 집합적 구조를 가진  $h(\theta)$ 역시 볼록 다각형 구조를 가진다고 말할 수 있다. ■