

# A New Dual Connective Network Resource Allocation Scheme Using Two Bargaining Solution

Chon Woo Sun<sup>†</sup> · Kim Sung Wook<sup>††</sup>

## ABSTRACT

In order to alleviate the limited resource problem and interference problem in cellular networks, the dual connectivity technology has been introduced with the cooperation of small cell base stations. In this paper, we design a new efficient and fair resource allocation scheme for the dual connectivity technology. Based on two different bargaining solutions - Generalizing Tempered Aspiration bargaining solution and Gupta and Livne bargaining solution, we develop a two-stage radio resource allocation method. At the first stage, radio resource is divided into two groups, such as real-time and non-real-time data services, by using the Generalizing Tempered Aspiration bargaining solution. At the second stage, the minimum request processing speeds for users in both groups are guaranteed by using the Gupta and Livne bargaining solution. These two-step approach can allocate the 5G radio resource sequentially while maximizing the network system performance. Finally, the performance evaluation confirms that the proposed scheme can get a better performance than other existing protocols in terms of overall system throughput, fairness, and communication failure rate according to an increase in service requests.

Keywords : 5G Network, Resource Allocation, Dual Connectivity, Game Theory, Bargaining Solution

## 이중 협상 해법을 이용한 새로운 다중 접속 네트워크에서 자원 할당 기법

전 우 선<sup>†</sup> · 김 승 옥<sup>††</sup>

## 요 약

이중 연결 네트워크(Dual Connectivity Network)는 소물 셀 기지국(SBS: Smallcell Base Station)의 제한된 자원 문제와 간섭 문제를 완화하기 위해 스몰 셀 기지국과 매크로 셀 기지국(MBS: Macrocell Base Station)이 협력하여 서비스를 지원하는 기술이다. 하지만 이중 연결 네트워크 역시 한정된 자원을 분배해주는 기술이기 때문에 자원 할당 방식은 매우 중요한 문제이다. 그래서 본 논문에서는 이중 연결 네트워크에서 효율적이고 공정한 자원할당을 위해 일반화된 강한 포부 협상 해법(GTABS: Generalizing Tempered Aspiration Bargaining Solution)과 굽타 리브 협상 해법(GLBS:Gupta and Livne Bargaining Solution)을 이용한 두 단계 자원 분배 알고리즘을 제안한다. 단계 자원 분배 알고리즘은 다음과 같다. 첫 번째 단계인 그룹 자원 분배 알고리즘에서는 GTABS를 이용하여 각 기지국의 무선 자원을 실시간 그룹과 비 실시간 그룹에게 효율적으로 할당한다. 두 번째 단계인 사용자 자원 분배 알고리즘에서는 GLBS를 이용하여 각 그룹으로 나누어진 자원을 각 그룹의 사용자들에게 최적으로 할당한다. 이러한 두 단계 자원 분배 방식은 5G 무선 자원을 최적으로 할당하여 네트워크 시스템 성능 최대화와 사용자 만족도를 동시에 보장한다. 마지막으로 본 논문에서는 성능 평가를 통해 제안된 방식이 서비스 요청 증가에 따라 전체 시스템 처리량, 공정성, 통신 장애율 측면에서 비교 방식들 보다 모두 10% 이상의 효율성을 입증했다.

키워드 : 5G 네트워크, 자원 할당, 이중 연결 네트워크, 게임 이론, 협상 해법

## 1. 서 론

5세대 네트워크 진화는 기존의 데이터 전송 속도 향상만을 목표로 발전해왔던 과거 이동 통신과는 달리 초광대역 서비스, 대규모 연결, 고신뢰/저지연 통신을 목표로 발전하고 있다. 5G 네트워크의 발전과 동시에 사용자들의 데이터 요청 수는 기하급

수적으로 증가하였고 과거보다 통신에 있어 속도와 서비스 만족도에 대한 요구 역시 높아지고 있다. 사용자들의 높아진 요구를 보장해 주기 위해 5G 네트워크는 현재 상용화된 Sub -6GHz 대역뿐만 아니라 초 고주파수 대역인 28GHz~300GHz인 밀리미터파 대역까지 사용하여 서비스를 지원한다. 밀리미터파 대역은 전송 데이터의 속도와 신호의 직진성이 증가하여 특정 방향으로 데이터를 보내는 데 유리하지만, 직진성이 강한 만큼 신호 감쇠 현상이 빈번하게 발생한다는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 5G 네트워크는 기지국 통신 가능 단위별로 영역을 나누어 서비스를 지원하는 스몰셀 기지국(SBS: Small cell Base Station)기술을 사용한다[1,2].

※ 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2020-2018-0-01799).

† 비 회 원 : 현대오트모터 연구원

†† 종신회원 : 서강대학교 컴퓨터공학과 교수

Manuscript Received : January 18, 2021

Accepted : March 3, 2021

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

이러한 SBS는 통신이 가능한 영역이 수 km 이하이며 10W급 소출력을 가지고 있는 펌프, 피코셀 기지국과 마이크로 기지국을 통합한 기지국이다. SBS는 넓은 지역을 관리하는 매크로 셀 기지국(MBS: Macrocell Base Station)과는 달리 한정적인 지역만을 관리하기 때문에 장애물로 생길 수 있는 초 고주파 신호 감쇠 현상을 해소할 수 있으며 최대 전송 용량 및 단위 면적당 전송 용량을 증가시킬 수 있어 트래픽 관리에 있어서 장점이 있다. 하지만 하나의 SBS에서 지원해 줄 수 있는 무선 자원은 한정적이기 때문에 많은 요청이 동시에 들어오면 과부하 문제가 발생한다. 과부하 문제점을 보완하기 위해 여러 논문에서는 다중 SBS의 밀집설치기법을 제안했으나 같은 대역폭을 사용하는 근접 SBS 간의 간섭 문제가 발생한다는 문제점이 있다. 또한 다수의 SBS를 설치할 경우 비용 역시 많이 발생한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 SBS와 다른 대역폭을 동시에 사용하여 서비스를 지원하는 이중 접속 네트워크(DCN: Dual Connectivity Network)를 이용하여 기존의 문제점을 해결하였다[3].

DCN이란 사용자 단말이 기지국 자원 제어장치에 접속하는 상황에서 Non-ideal backhaul을 통하여 연결되는 무선 자원이 적어도 두 개 이상인 네트워크를 의미한다[4]. 따라서 두 개 이상의 서로 다른 대역폭을 지원하는 기지국에서 동시에 다른 무선 자원을 사용자의 단말에 제공하는 기술을 의미한다. 하지만 DCN 역시 한정적인 자원을 할당해주는 것이기 때문에 공정하고 효율적인 자원 할당 방식을 찾는 것은 매우 어렵고 중요한 문제이며 많은 논문에서 연구하는 주제이다. 이를 위해 효율적이며 공정한 새로운 기법이 필요하다.

게임 이론이란 각 플레이어가 다른 플레이어들의 행동을 고려하여 자신의 이익을 효과적으로 달성하기 위해 최선의 전략을 어떻게 결정할 것인지를 수학적으로 분석하는 학문이다. 게임 이론에는 다양한 게임이 존재하며 모든 게임 플레이어의 전략에는 항상 그에 상응하는 효용이 따른다. 본 논문에서는 DCN에서의 최적의 자원 할당을 위해 모든 게임 플레이어가 상호 협조하여 최적의 협상해를 구하는 협상 해법을 사용한다[5].

협상 해법에는 공리로 협상을 해결하는 내쉬 협상 해법[6-9], 요구치를 이용하여 협상 해법을 찾는 칼라이-스모르딘스키 협상 해법[10], 평등하게 협상 해법을 찾는 Egalitarian 협상 해법, 평등보다는 최대 효용만을 고려하는 Utilitarian 협상 해법, 요구치를 이용하여 협상 해법을 찾는 Chun and Thomson 협상 해법 [11] 등 다양한 기법이 존재한다. 하지만 본 논문에서는 참조점(reference point)을 이용하여 협상 해법을 찾는 Gupta-Livne 협상 해법(GLBS: Gupta and Livne Bargaining Solution) [12-14]과 일반화된 요구조절 협상 해법 (GTABS: Generalizing Tempered Aspiration Bargaining Solution) 을 사용한다 [15]. 두 협상 해법을 선택한 이유는 2장에서 설명한다.

본 논문에서는 DCN에서 GLBS와 GTABS를 사용하여 최적의 자원을 할당하는 듀얼 레벨 무선 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 듀얼 레벨 무선 자원 할당 알고리즘은 사용자들을 실시간 그룹과 비 실시간 그룹으로 나누고 5G 네트워크 무선 자원(NR: New Radio)과 4G 네트워크 무선 자원(LTE:

Long-Term Evolution)을 GTABS와 GLBS를 이용하여 사용자에게 분배한다. 끝으로, 시뮬레이션을 통해 제안된 자원 할당 알고리즘이 기존에 존재하는 타 비교 기법들보다 시스템 전체 처리율, 공정성, 통신 실패율에서 모두 효율적임을 입증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 게임이론 협상 해법에 대한 설명과 본 논문에서 사용하는 GTABS와 GLBS 협상 해법들에 대하여 자세하게 설명한다. 3장에서는 기존에 제시된 다양한 무선 자원 할당 기법들을 설명한다. 4장에서는 제안 알고리즘의 네트워크 구조와 각 효용 함수를 설명한 후 본 논문에서 제안하는 듀얼 레벨 무선 자원 할당 알고리즘을 구체적으로 설명한다. 5장에서는 다른 무선 자원 할당 기법들과 성능 평가를 통해 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증한다. 6장에서는 결론으로 마무리한다.

## 2. 게임 이론

### 2.1 협조게임에서의 협상 해법

협상 해법의 개념을 설명하기 위해 간단한 2인 협조게임을 가정한다. 풀려고 하는 협상 문제  $A$ 는  $A = F(S, d)$  로 나타낸다. 여기서  $S$ 란  $S = \{u = (v_1, v_2) \mid v_1 = u_1(s_1), v_2 = u_2(s_2)\}$ 이며  $v_1, v_2$ 는 게임 플레이어 1,2의 효용함수 값들이다. 따라서  $S$ 는 선택 가능한 전략 즉 모든 협상 점에 대한 집합을 나타내는 협상 집합이다.  $d$ 란  $d = (u_1(d_1), u_2(d_2))$ 이며 게임 플레이어들끼리 협상이 결렬되었을 때를 나타내는 협상 결렬 점이다. 마지막으로  $F$ 는 협상 함수이며  $F(S, d) \rightarrow \mathbb{R}^2$ 으로 나타낸다. 아래 설명할 협상 해법마다 정의된 공정성의 정의 즉 공리를 모두 만족한다면 협상 함수  $F$ 는 해당 협상 해법으로 풀 수 있는 유일한 협상 점 다른 말로 협상해  $X^* = (x_1^*, x_2^*) = F(S, d)$ 로 나타낼 수 있다[5]. 협상해를 구하는 방식은 다양하나 본 논문에서는 참조점 개념과 이상점(idealistic point) 개념을 확장하여 협상해를 찾는 GLBS와 GTABS을 아래에서 설명한다[12-15].

### 2.2 GLBS 기법

GLBS는 참조점( $r$ )과 이상점을 통하여 협상해를 구하는 방식이다. 참조점이란 협상 문제에서 참여한 플레이어들끼리의 중간 협상해이며 이상점이란 각 플레이어가 다른 플레이어들을 제외하고 본인만 고려하여 이상적으로 원하는 점을 의미한다. GLBS에서는 협상이 결렬되었을 경우 협상 결렬점  $d$ 가 아닌 참조점의 값이 해로 정의된다. 단 GLBS의 참조점은 무조건 협상 집합 안에 존재해야 한다는 조건이 있으며,  $r \in S$ 로 표현된다. 또한 참조점을 이용하여 얻은 협상해는 협상 결렬점 보다 항상 우월하며 파레토 최적이지 아닐 수 있다[14].

또한 GLBS를 통해 나온 협상해는 약한 파레토 최적성(Weak Pareto Optimality), 긍정적인 아핀 변환 불변성(Invariance under Positive Affine Transformations), 관련 도메인 (Relevant Domain), 단조 로움 제한(Restrict Monotonicity), 충돌 지점의 변화에 대한 민감도 제한(Limited Sensitivity to Changes in the Conflict Point), 대칭성(Symmetry)이라는 6가지

공리를 모두 만족해야 한다. 위 6가지 공리를 모두 만족하는 GLBS는 아래와 같이 정의한다.

$$GLBS(S, d, r) = [\lambda^* \times a(S, d)] + [(1 - \lambda^*) \times r]$$

$$s.t., \lambda^* = \max \{ \lambda \in [0, 1] \mid ([\lambda \times a(S, d)] + [(1 - \lambda) \times r]) \in S \} \quad (1)$$

$\lambda^*$ 는 GLBS의 최적의 비율을 의미한다. 또한  $a(S, d)$ 와  $r$ 은 각각 협상 결렬 점으로부터의 이상점과 참조점을 의미한다. 따라서 GLBS는 모든 공리와 규칙을 만족하며 이상점과 참조점을 고려하여 최대의 효용 값이 나올 수 있도록 비율적으로 나누어 협상해를 찾는다. 본 논문에서는 GLBS를 사용한 이유로는 참조점의 개념을 이용하여 각 사용자의 요청 사항을 준수하며 최소 서비스를 보장해주며 최적의 자원을 할당해 주기 위해서이다.

### 2.3 GTABS 기법

GTABS는 앞서 설명한 GLBS의 참조점이 반드시 협상 집합 안에 존재해야 한다는 한정적인 상황의 규칙을 일반화하여 참조점 위치의 제약을 없애고 협상해를 구하는 방식이다[15]. GTABS를 통해 나온 협상해는 약한 파레토 최적성(Weak Pareto Optimality), 긍정적인 아핀 변환 불변성(Invariance under Positive Affine Transformations), 대칭성(Symmetry), 포부에 대한 제한된 단조성(Restricted Monotonicity with respect to Aspirations), 기준점 변경에 대한 민감도 제한(Limited Sensitivity to Changes in Reference Point), 내부 연속성(Internal Continuity), 외부 연속성(External Continuity)이라는 7가지 공리를 모두 만족해야 한다. 위 7가지 공리를 모두 만족하는 GTABS는 아래와 같이 정의한다.

$$GTABS(S, d, r) = \lambda^* a(S, d, r) + (1 - \lambda^*) d$$

$$s.t., \begin{cases} \lambda^* = \max \{ \lambda \in [0, 1] \mid \lambda a(S, d, r) + (1 - \lambda) d \in S \} \\ a(S, d, r) = \max \{ r, \max \{ t \in \mathbb{R} \mid (t, r_{-i}) \in S \} \} \end{cases} \quad (2)$$

Equation (2)에서  $a(S, d, r)$ 란 협상 집합, 협상 결렬 점, 참조점을 고려한 포부점(tempered aspiration point)으로 플레이어들이 참조점으로부터 생각하는 이상점이다. 단 참조점이 협상 집합 밖에 있을 경우 참조점이 곧 이상점이 된다. GTABS 역시 GLBS와 같이 모든 공리와 규칙을 만족하며 이상점과 참조점을 고려하여 최대의 효용 값이 나올 수 있도록 비율적으로 나누어 협상해를 찾는다. 본 논문에서 GTABS를 사용한 이유는 일반화된 참조점 규칙을 이용하여 실시간 그룹과 비실시간 그룹의 실제 상황을 고려하기 위해서이다.

## 3. 관련 연구

### 3.1 이기종 무선 네트워크에서의 비례적 공정한 무선 자원 분할 방식

‘이기종 무선 네트워크에서의 비례적 공정한 무선 자원 분할 방식’은 5G 네트워크의 무선 자원과 4G 네트워크의 무선 자원을 동시에 사용할 수 있도록 LTE와 WIFI를 사용자에게

분할하는 시나리오를 제안한다[16]. 무선 자원을 분할하는 방식으로는 사용자가 요청한 파일 크기에 비례하게 할당하여 사용자 간의 공정성을 최대화하는 간단하고 효과적인 알고리즘을 보여준다. 하지만 이 기법에서는 사용자의 요청 지연 민감성을 고려하지 않고 있어 VoIP와 실시간 스트리밍 서비스를 사용하는 파일 크기는 작으나 지연 민감성이 높은 사용자의 서비스 지원에 있어 실패율이 높다는 한계점을 가지고 있다.

### 3.2 지연 인식 이기종 무선 네트워크에서의 무선 자원 분할 방식

‘지연 인식 이기종 무선 네트워크에서의 분할 방식’은 사용자 지불과 서비스 품질 (QoS) 요구 사항 사이의 균형을 맞추기 위해 제안된 알고리즘이다[17]. 특히 이 논문의 요구 사항은 지정된 시간 안에 데이터 전송이 완료될 확률에 의해 특징지어진다. 또한 이 기법에서는 유한 수평 마르코프 결정 문제로 먼저 효율적인 LTE 자원을 사용하고 그 후 부족한 자원을 보완하기 위해 비 효율적인 LTE 자원을 사용하거나 WIFI를 사용하는 다중 슬롯 모드 선택 프로세스를 공식화하는 알고리즘을 제안하였다. 하지만 이 기법은 비 효율적인 WIFI를 사용하여 일정한 수준의 사용자 요청 보장을 해주지 못한다는 한계점을 가지고 있다.

### 3.3 비 면허 대역을 사용한 유틸리티 기반 무선 자원 분할 방식

‘비 면허 대역을 사용한 유틸리티 기반 무선 자원 분할 방식’은 사용자 서비스 품질 (QoS) 요구 사항을 나타내는 유틸리티를 최대화하기 위해 제안된 알고리즘이다[18]. 이 기법은 먼저 주 대역폭으로 면허 대역인 LTE를 사용하여 대역폭을 할당한다. 그 후 서비스 만족도가 부족한 사용자들에게 이차 대역폭으로 비 면허 대역 WIFI를 사용하게 하여 서비스 품질 요구 사항에 대한 전체 만족도를 최대화하도록 하는 간단하고 효과적인 방법이다. 하지만 이 기법은 일차 주 대역을 할당 후 이차 대역폭을 면허 대역이 아닌 비 면허 대역으로 서비스를 지원하기 때문에 일정한 수준의 서비스 품질을 유지하기 힘들다는 한계점을 가지고 있다.

## 4. 제안된 기법

### 4.1 네트워크 구조

본 논문에서 제안하는 네트워크 구조는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 하나의 MBS와 하나의 SBS로 구성되어 있다. 하나의 SBS 속에는 총  $N$  명의 사용자로 구성되어 있으며 사용자  $N$ 명에게 SBS에서는 총 대역폭 량( $\lambda$ ) 만큼 5G 네트워크 대역폭을 할당해 줄 수 있고 MBS에서는 총 대역폭 량( $K$ ) 만큼의 4G 네트워크 대역폭을 할당해 줄 수 있다. 또한 사용하는 전송 기술은 직교 주파수 분할 다중 방식이며 다운 링크 자원 할당에만 중점을 둔다.

5G 네트워크로 발전하면서 이전보다 다양한 유형의 트래픽이 통신 시스템에 전송되고 있지만 본 논문에서는 트래픽의 유형을 실시간 트래픽과 비 실시간 트래픽 두 가지 범주로

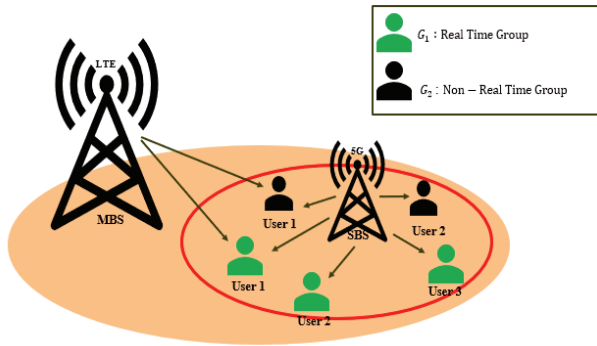


Fig. 1. Network Structure

분류한다. 비 실시간 트래픽이란 파일 전송 프로토콜(FTP), 하이퍼 텍스트 전송 프로토콜(HTTP)이며 그 외 실시간 스트리밍 미디어 또는 VoIP와 같은 유형의 트래픽을 실시간 트래픽이라고 정의한다.

1) 채널 설정

기지국과 사용자  $i$  사이에 반송파는 모두 독립적이고 동일하게 분포된 레일리 페이딩으로 가정하며 채널 계수  $h_i$ 는 제로 평균 및 분산  $\sigma^2$ 를 갖는 가우시안 랜덤 변수를 의미한다. 또한 본 논문에서는 기지국이 채널 상태 정보를 완벽하게 알고 있는 상태로 가정한다. 기지국에서 반송파를 사용자  $i$ 에게 수신할 때 발생하는 신호 대 잡음 비(SNR: Signal to Noise Ratio)는 Equation (3)과 같다[19].

$$s_i = \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2} \tag{3}$$

여기서  $P_i$ 란 전송 전력을 의미하며 최대 전송 전력의 평균치인  $P_i = \frac{P_{MAX}}{N}$  로 계산되며,  $\sigma^2$ 는 가산 백색 가우스 잡음(AWGN)을 의미한다. 사용자  $i$ 에게 할당할 수 있는 전송률은 Equation (4)와 같이 정의한다.

$$r_i = B \times \log(1 + s_i) \tag{4}$$

위 식의  $B$ 는 반송파의 대역폭을 의미한다. 본 논문에 사용자  $i$ 는 SBS로부터 5G 네트워크 대역폭을 할당 받고 MBS로부터 4G 네트워크 대역폭을 할당받는다. 그렇기에 사용자  $i$ 가 할당 받을 수 있는 전체 대역폭을 Equation (5)와 같이 나타낸다.

$$r_i^{tot} = r_i^{5G} + r_i^{4G} \tag{5}$$

2) 그룹 효율 함수

본 논문에서는 기지국에서 사용자 요청 처리 속도를 기준으로 다양한 트래픽을 실시간 그룹과 비 실시간 그룹으로 나누어 Equation (6)과 같이 각 그룹의 효율 함수를 정의한다.

$U_{G_x}(B_{G_x})$ 는 각 그룹이 실제 무선 자원  $B_{G_x}$ 만큼 할당 받았을 때 효율 함수를 의미한다. 여기서  $G_x$ 는  $G_x = \{G_1, G_2\}$ 이며  $G_1$ 은

$$U_{G_x}(B_{G_x}) = \log \left( 1 + \alpha \left( \frac{\gamma_{G_x}}{T_{G_x}^{AVG}} \right) \right)$$

$$s.t., \begin{cases} B_{G_x} \in K, M \\ \gamma_{G_x} = R(B_{G_x}) \\ T_{G_x}^{AVG} = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{G_x}} w_i * t_i^{Request} \right)}{N_{G_x}} \end{cases} \tag{6}$$

실시간 그룹  $G_2$ 는 비 실시간 그룹을 의미한다.  $\gamma_{G_x}$ 란 그룹의 평균 SNR일 때 그룹에 예상되는 처리 속도를 나타낸다.  $\gamma_{G_x}$ 를 구하는 과정에서  $R(\cdot)$ 은 대역폭이  $B_{G_x}$ 를 할당 받고 평균 SNR 일 때 Equation (4)를 통해 구할 수 있는 예상되는 통신 속도를 의미한다.  $T_{G_x}^{AVG}$ 는 사용자 요청 처리량과 거리를 고려한 각 그룹의 평균 요청 처리량을 의미한다.  $T_{G_x}^{AVG}$ 를 구하는 과정에서 가중치  $w_i$ 는  $w_i = \left( 1 - \frac{s_{g,i}}{s_{max}} \right)$ 으로 계산되며 각 사용자 별 SNR 가중치이다. 여기서,  $s_{g,i}$ 는 반송파  $g$ 에서 사용자  $i$ 의 SNR이고  $s_{max}$ 는 기지국과 사용자 간의 가장 좋은 반송파의 SNR이다. 기지국과 거리가 가까울수록 가중치는 낮아지는데 이는 기지국과의 위치를 고려하여 SNR이 높은 사용자는 기지국 입장에서 요청 처리량을 보장하는데 대역폭을 적게 소모할 수 있기 때문이다.  $N_{G_x}^{t_i^{Request}}$ 는 각 그룹에 속한 총 사용자의 수와 각 그룹에 속한 사용자마다 요청한 처리량을 의미하며  $\alpha$ 는 조절 변수이다.

3) 사용자 효율 함수

실시간, 비 실시간 두 그룹에 속한 각 사용자들은 서로 다른 요청 처리량을 가지고 있으며 사용자의 효율 함수는 Equation (7)과 같이 정의한다.

$$U_i(b_i) = \frac{1}{1 + e^{-\mu \left( \frac{T_i}{w_i * t_i^{Request}} \right)^{\beta}}}$$

$$s.t., b_i \in B_{G_x}^*, \forall i \in \{1, 2, \dots, N_{G_x}\}, G_x = \{G_1, G_2\} \tag{7}$$

Equation (7)의  $U_i(b_i)$ 는 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 각 그룹에 할당된 최적의 대역폭  $B_{G_x}^*$ 중 해당 그룹에 속한 사용자  $i$ 에게  $b_i$ 만큼 무선 자원을 할당하였을 때의 효율 함수를 의미한다.  $\mu, \beta$ 는 각각 조절 변수를 나타내며  $t_i^{Request}, w_i$ 는 위에 Equation (6)에서와 같이 사용자  $i$ 의 요청 처리량과 SNR을 고려한 가중치를 의미한다.  $T_i$ 는 사용자  $i$ 가  $b_i$ 만큼 자원을 할당 받았을 때 나올 수 있는 처리량을 의미하고 아래 Equation (8)을 통해 계산된다. Equation (8)은 3GPP에서 정의한 수식을 기반한다[17,19].

$$T_i = 10^{-6} \times Q_i \times R_{max} \times \frac{b_i \times 12}{\tau} \times (1 - OH) \tag{8}$$

Table 1. Group Resource Allocation

Algorithm 1 Group Resource Allocation	
<b>User Number :</b>	$N$
<b>Cluster User :</b>	$G = \{G_1, G_2\}$
<b>Input Data :</b>	$M(\text{Small Cell Bandwidth}), K(\text{Macro Cell Bandwidth})$
<b>Begin</b>	
<b>While Not the end of <math>M</math>:</b>	
<b>Calculate :</b>	$G.S(S, d, r) = \lambda^* a(S, d, r) + (1 - \lambda^*) d$
<b>End</b>	
<b>Result</b>	$(B_G^*, B_G^*)$
<b>While Not the end of <math>K</math>:</b>	
<b>Calculate :</b>	$G.S(S, d, r) = \lambda^* a(S, d, r) + (1 - \lambda^*) d$
<b>End</b>	
<b>Result</b>	$(B_G^*, B_G^*)$

Equation (8)에서  $Q_i$ 란 사용자  $i$ 의 변조 방식에 따른 송신 비트 수로 비트 수가 높아질수록 송신 거리가 짧아진다. 그래서 기지국과의 거리가 먼 사용자들은 높은 처리량을 받을 수 없다. 그리고  $b_i$ 는 사용자  $i$ 에게 할당된 대역폭을 의미하고  $R_{\max}$ 는 저밀도 패리티 검사 코드의 최대 수를 의미하며  $OH$ ,  $\tau$ 는 오버헤드 비율과 OFDM의 평균 심볼 시간을 의미한다.

#### 4.2 듀얼 레벨 자원 분배 알고리즘

본 논문에서 제안하는 듀얼 레벨 자원 분배 알고리즘은 두 단계로 구성되는데 첫번째 단계에서는 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 기지국의 한정적인 무선 자원을 실시간 그룹과 비 실시간 그룹으로 나눈다. 그 후 두번째 단계에서는 사용자 자원 분배 알고리즘을 이용하여 두 그룹으로 나뉘어진 무선 자원을 각 그룹 사용자들의 지연 민감성, 요청 패킷의 크기, 위치를 고려하여 자원을 최적으로 할당한다.

##### 1) 첫번째 단계 : 그룹 자원 분배 알고리즘

‘그룹 자원 분배 알고리즘’의 참여자는 실시간 그룹과 비 실시간 그룹이며  $G_x = \{G_1, G_2\}$ 으로 나타낸다.  $G_1$ 은 실시간  $G_2$ 는 비 실시간 그룹을 의미하며 한정적인 SBS의 무선 자원  $M$ 과 MBS의 무선 자원  $K$ 를 각 그룹에 할당한다. 협상 집합과 협상 결렬점이 정의된 후 첫 번째 단계의 기법에서는 참조점  $r$ 을 기준으로 각 참여자의 이상점을 찾은 후 협상 결렬점  $d$ 로부터 최대 효용 값이 나올 수 있도록 비율적으로 나누어 협상해를 찾는다. 본 논문에서 참조점  $r$ 은 각 그룹의 평균 요청 지연 민감도와 요청 패킷 크기를 고려한 중간 합의점 즉 최소 요청 보장 정도를 의미하며 Equation (9)와 같이 정의한다.

Equation (9)의  $P_{G_x}^{Rpacket}, D_{G_x}^{Rdelay}$ 은 각각 각 그룹에 속한 사용자들의 요청하는 패킷 크기와 지연민감도의 평균 값을 의미하며,  $\gamma_{G_x}$ 란 Equation (6)에서 정의한 그룹의 평균 SNR일 때 그룹에 예상되는 처리량을 나타낸다. Equation (9)는 참조점이 협상 집합 안에 있는 상황 또는 참조점이 협상 집합

$$r = \{ Q_{G_1}, Q_{G_2} \}$$

$$\begin{cases}
 Q_{G_x} = \operatorname{argmin} \left( \log \left( 1 + \alpha \left( \frac{\gamma_{G_x}}{D_{G_x}^{Rdelay} * P_{G_x}^{Rpacket}} \right) \right) \right) \\
 s.t. \left\{ \begin{aligned}
 D_{G_x}^{Rdelay} &= \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{G_x}} D_i^{Rdelay} \right)}{N_{G_x}} \\
 P_{G_x}^{Rpacket} &= \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_{G_x}} P_i^{Rpacket} \right)}{N_{G_x}}
 \end{aligned} \right.
 \end{cases} \quad (9)$$

밖에 있는 두 상황을 모두 고려한 이상점을 의미한다. Equation (9)를 통해 참조점  $r$ 을 구한 후  $r$ 로부터 각 그룹의 최대 요청값, 즉 이상점  $a(S, d, r)$ 을 Equation (10)과 같이 정의한다.

$$a(S, d, r) = \max \{ r, \max \{ t \in \mathbb{R} \mid (t, r_{-i}) \in S \} \} \quad (10)$$

Equation (10)을 통해 이상 점을 정의한 후 실시간 비 실시간 각 그룹의 협상하는 Equation (11)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 G.S(S, d, r) &= \lambda^* a(S, d, r) + (1 - \lambda^*) d \\
 s.t. \lambda^* &= \max \{ \lambda \in [0, 1] \mid \lambda a(S, d, r) + (1 - \lambda) d \in S \}
 \end{aligned} \quad (11)$$

Equation (11)에서  $G.S(S, d, r)$ 란 2장에서 설명한 GTABS의 모든 공리를 만족하며 정해진 협상 집합, 결렬점, 참조점을 통해 정의한 이상점을 통해 구한 유일한 협상의 해이다. 본 논문에서는 각 기지국의 무선 자원을 두 그룹으로 나눈 최종적 결과이며 동시에 최적의 할당 값인  $(B_G^*, B_G^*)$ 를 의미한다.

본 논문에서 그룹 자원 분배 알고리즘에 GTABS를 사용한 이유는 실제 무작위 한 네트워크 상황 속 그룹에서 요청하는 최소 요청 보장 정도가 기지국에서 처리해줄 수 있는 처리량( $S$ )의 수용 상황을 고려하기 위해서이다. 그룹 자원 분배 알고리즘은 Table 1과 같다. Table 1을 통해 나온 최종적 결과인  $(B_G^*, B_G^*)$ 는 이 단계인 사용자 자원 분배 알고리즘의 입력값이 된다.

##### 2) 두번째 단계 : 사용자 자원 분배 알고리즘

GLBS를 기반한 두번째 단계의 ‘사용자 자원 분배 알고리즘’은 첫번째 단계 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 나뉘어진 무선 자원을 각 그룹에 속해있는 사용자 최소 요청을 보장해 주며 한정된 자원을 효율적으로 분배하는 알고리즘이다. 두 번째 단계의 기법에서 게임의 참가자는 각 그룹에 속해 있는 사용자들  $N_{G_x} = \{1, 2, \dots, i\}$ 이다. 그리고 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 각 그룹에서 할당 받은 한정된 자원들 중 Equation (7)을 통해 나올 수 있는 결과들의 집합을  $Z$ 로 나타낸다. 또한, GLBS를 이용하는 ‘사용자 자원 분배 알고리즘’ 역시 참조점 이용하여 협상해를 구하며, 참조점  $r_{G_x}$ 은 각 그룹에 속해있는 사용자의 요청 지연 민감도, 요청 패킷 크기, 기지국과 사용자간의 거리를 고려한 반드시 보장해 줄 수 있는 최소 요청 보장 정도를 의미한다.

$$r_{G_x} = \{b_1^m, b_2^m \dots b_i^m\}$$

$$s.t. , \begin{cases} \forall i \in (1, 2, \dots, N_{G_x}), G_x = \{G_1, G_2\} \\ b_i^m = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \left( \frac{1}{1 + e^{-\alpha \left( \frac{T_i}{w_i^* D_i^{Delay} P_i^{Packet}} \right) + \beta}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

Equation (12)에서  $D_i^{Delay}$ 와  $P_i^{Packet}$ 은 각각 사용자  $i$ 의 요청 지연 민감도와 요청 패킷 크기를 의미하며,  $w_i$ 와  $T_i$ 는 Equation (7)에서 정의와 동일하다. Equation (12)을 통해 각 그룹의 사용자들의 참조점이 협상 집합 안에 정해지면 그 이후로는 참조점을 협상 결정점으로 간주한 후 Equation (13)과 같이 협상해를 정의한다.

$$G.L.S(Z, d, r_{G_x}) = [\lambda^* \times a_{G_x}(Z, d)] + [(1 - \lambda^*) \times r_{G_x}]$$

$$s.t., \lambda^* = \max\{\lambda \in [0, 1] \mid ([\lambda \times a_{G_x}(Z, d)] + [(1 - \lambda) \times r_{G_x}]) \in S\} \quad (13)$$

Equation (13)의  $a_{G_x}(Z, d)$ 는 각 그룹의 사용자들이 처음 협상 결정점  $d$ 로부터 정의한 이상점을 의미한다. Equation (13)을 통해 나온 협상 해  $G.L.S(Z, d, r_{G_x})$ 는 2장에서 설명한 GLBS의 모든 공리를 만족하며 정해진 협상 집합, 결정점, 그룹 참조점을 통해 구할 수 있는 유일한 협상해로 각 그룹에 속한 사용자에게 나누어 줄 수 있는 최적의 자원을  $b^{G_x^*} = \{b_1^{G_x^*}, b_2^{G_x^*}, \dots, b_i^{G_x^*}\}$ 로 정의한다. 본 논문에서 사용자 자원 분배 알고리즘에 GLBS를 사용한 이유는 참조점 특징을 이용하여 각 사용자에게 최소로 보장해 줘야하는 서비스 정도를 결정하고 협상이 결정되어도 서비스 성공률을 높이기 위해서이다. 수식이 아닌 간단한 알고리즘을 통한 사용자 자원 분배 알고리즘은 Table 2와 같다.

Table 2을 통해 나온 최종적 결과인  $b^{G_1^*}$ 와  $b^{G_2^*}$ 는 각 사용자가 실질적으로 할당 받은 최종 무선 자원의 양을 의미한다.

Table 2. User Resource Allocation

Algorithm 2 User Resource Allocation	
<b>Input :</b>	Group Bandwidth : $(B_G^1, B_G^2)$
<b>Number of Group User :</b>	$G_1 = \{1, 2, \dots, N_{G_1}\}, G_2 = \{1, 2, \dots, N_{G_2}\}$
<b>Begin</b>	
<b>While Not the end of <math>B_G^1</math></b>	
<b>Calculate</b>	$G.L.S(Z, d, r_{G_x}) = [\lambda^* \times a_{G_x}(Z, d)] + [(1 - \lambda^*) \times r_{G_x}]$
<b>Result :</b>	$b^{G_1^*} = \{b_1^{G_1^*}, b_2^{G_1^*}, \dots, b_i^{G_1^*}\}$
<b>END</b>	
<b>While Not the end of <math>B_G^2</math></b>	
<b>Calculate</b>	$G.L.S(Z, d, r_{G_x}) = [\lambda^* \times a_{G_x}(Z, d)] + [(1 - \lambda^*) \times r_{G_x}]$
<b>Result :</b>	$b^{G_2^*} = \{b_1^{G_2^*}, b_2^{G_2^*}, \dots, b_i^{G_2^*}\}$
<b>END</b>	

## 5. 성능 평가

### 5.1 환경 구성

제안 기법의 성능을 평가하기 위해서 가정한 네트워크의 시스템 환경은 Table 3과 같다.

본 논문은 Table 3과 같이 실험을 설정하였다. Table 3 설정값은 다양한 범위의 파라미터로 수 차례 실험을 진행하여 범위 값이 변해도 결과에는 상관이 적다는 것을 확인하여 최종으로 실험한 설정값을 기재한 것이다. 본 논문에서 제안한 듀얼 레벨 자원 분배 알고리즘 성능의 우수성을 입증하기 위해 이기종 무선 네트워크에서 비례 적 공정한 무선 자원 분할 방식(PFWA)과 사용자 수에 따른 평균치 분할 방식(MeanCal)과의 비교를 통해 분석하였다. 또한 본 실험에서 한 사용자당 1~100정도의 서비스 요청을 한다고 가정하였다.

Fig. 2는 증가하는 서비스 요청 수에 따른 시스템 처리량을 나타낸다. 본 논문에서는 제안 알고리즘을 포함한 3가지의 알고리즘을 비교 분석함에 있어 SBS의 5G 네트워크 무선 자원(NR: New Radio) 뿐만 아니라 MBS의 4G 네트워크 무선 자원(LTE: Long-Term Evolution)까지 같이 사용하여 더 많은 처리가 가능하도록 설정했다. 동일한 설정 하에 본 논문에서 제안한 자원 할당 기법(Pro)은 사용자의 요청 패킷

Table 3. System Parameters

System Parameters	Value
Number of Mobile User	0-6
Number of Small cell Base Station Resource	100
Number of Macro cell Base Station Resource	50
Maximum Transmit Power	30
Low Density Parity Check Code	0.93
Overhead Rate	0.18
Number of transmitted bits according to user i modulation method	8
Orthogonal Frequency Division Multiplexing Average Symbol Rate	17
Disagreement Point	0
Group utility function control variable	4.7
User Utility Function Adjustment Variable 1,2	4.6/2.3
Algorithm Optimal Rate Value	0.5

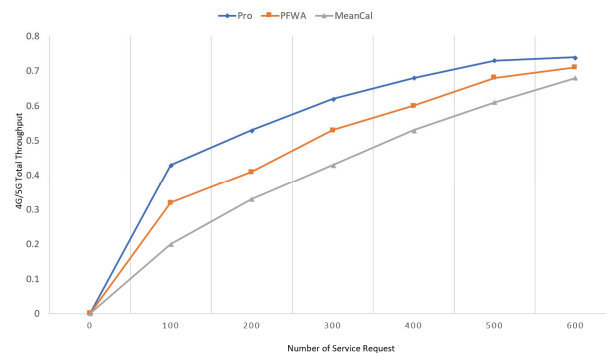


Fig. 2. Throughput According to Increasing Number of Service Requests

사이즈만을 고려하여 비례하게 나눠주는 PFWA와 사용자의 요청 패킷 사이즈와 요청 지연 민감성, 거리 등을 모두 고려하지 않고 사용자의 수에 따라 나눠주는 MeanCal 방식보다 시스템 처리량에 있어 우수한 결과를 보여준다. 위와 같은 결과를 만들 수 있었던 가장 큰 이유는 사용자 자원 분배 알고리즘에서 협상 과정에 있어 비교 알고리즘들과는 다르게 사용자의 요청 지연 민감성까지 고려하여 협상을 진행하였기 때문이다.

Fig. 3은 증가하는 서비스 요청 수에 따른 공평도를 나타낸다. 공평도를 평가하기 위해 Jain의 공정성 지수(Jain's fairness)를 사용한다[20]. Jain의 공정성 지수는 네트워크 엔지니어링에서 사용자 또는 응용 프로그램이 시스템 자원의 공정한 공유를 받고 있는지 여부를 결정하는 데 주로 사용된다. Jain의 공정성 지수는 Equation (14)와 같이 정의된다.

$$J(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (14)$$

본 논문에서  $x_i$ 는 제안 알고리즘을 포함한 3가지의 알고리즘을 통해 각 사용자가 최종적으로 받은 무선 자원의 양으로 정의했고  $n$ 은 사용자의 수로 정의한다. 또한 Fig. 3과 같이 서비스 요청이 늘어날수록 공정성이 떨어지는 결과는 한정된 무선 자원에서 증가하는 사용자 수를 고려한 환경에서는 자연스러운 결과이다. 자원 할당에 있어 우선 첫번째 단계 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 두 그룹으로 나누어 각 그룹의 최소 요청 처리량을 보장해준 후 두 번째 단계에서 사용자 자원 분배 알고리즘을 통해 사용자의 서로 다른 요구 사항을 고려하여 제안 알고리즘(Pro)이 비교 알고리즘인 PFWA와 MeanCal보다 우수한 공정성을 보여주었다.

마지막 Fig. 4는 증가하는 서비스 요청 수에 따른 통신 실패율을 나타낸다. 서비스 요청이 증가하면 서비스 실패 확률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과 역시 한정적인 자원을 여러 사용자가 나누어서 사용하는 네트워크 상황에서는 자연스러운 결과이다. Fig. 4의 실패율을 측정하기 위해 본 논문에서는 아웃티지 확률을 사용한다[21]. 아웃티지 확률이란 사용자가 할당 받은 무선 자원이 주어진 신호 대 잡음비 한계점인  $T$  값보다 작을 경우 통신에 있어 실패율이 증가하는 방식이다. 아웃티지 확률은 Equation (15)와 같이 정의된다.

$$P_{OUT} = E[pr[SINR(b_i) < T]] \quad (15)$$

본 논문에서는 통신이 성공하기 위해 설정해 놓은 신호 대 잡음 비 임계 값을 13으로 설정한다. 임계 값을 설정 후 늘어나는 사용자 수에 따른 할당된 개인 대역폭을 이용하여 아웃티지 확률 계산했으며, 개인의 아웃티지 확률을 평균낸 값이 Fig. 4의 결과값이다. 제안한 알고리즘은 비교 기법들에 비해 사용자 위치를 포함한 사용자 요청 요소를 더 많이 고려하여 서비스 실패율이 낮게 증가하여 통신 성공에 있어 비교 기법보다 우수한 성능을 보여주었다.

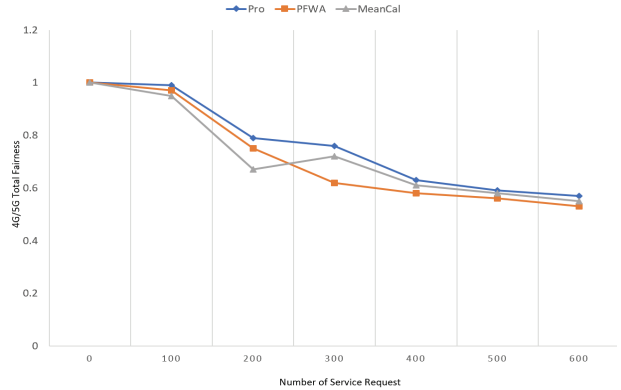


Fig. 3. Fairness According to Increasing Number of Service Requests

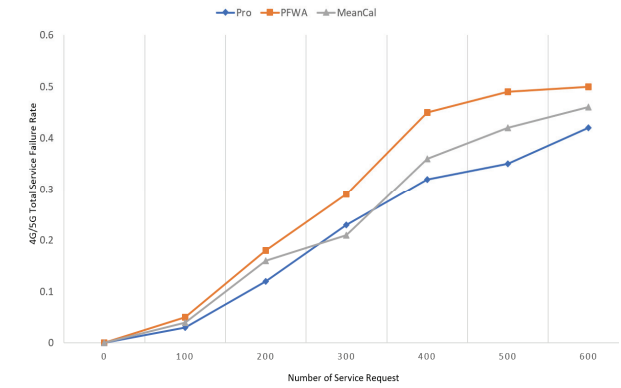


Fig. 4. Service Failure Rate According to Increasing Number of Service Requests

## 6. 결 론

본 논문에서는 SBS의 한정적인 자원 한계점과 기지국간의 간섭 문제를 보완할 수 있는 DCN에서의 최적의 자원 할당 기법을 제안하였다. 제안 알고리즘은 사용자가 크게 실시간 비 실시간 그룹으로 나누어진 상황에서 듀얼 레벨 무선 자원 할당으로 이루어진다. 첫번째 단계에서는 GTABS를 기반한 그룹 자원 분배 알고리즘을 통해 실시간, 비 실시간 두 그룹에게 무선 자원을 최적으로 할당한다. 두 번째 단계에서는 GLBS를 사용자 자원 분배 알고리즘을 통해 최소 요청 처리량을 보장해주며 효율적으로 자원을 할당한다. 이와 같은 듀얼 레벨 접근 기법은 먼저 SBS의 5G 네트워크 무선 자원을 할당한 후 MBS에서 동일한 방법으로 4G 네트워크 무선 자원을 사용자에게 할당한다. 제안 알고리즘은 다른 무선 자원 할당 방식과 비교를 통해 시스템 전체 처리량과 사용자 간의 공정성 그리고 통신 실패 확률에서 모두 우수한 성능을 입증하였다.

본 연구를 통해 한정적인 무선 자원을 보다 더 최적으로 사용할 수 있는 방법을 연구할 수 있었으며, 추후 연구로는 고정적으로 정해져있는 사용자의 위치를 동적으로 변화하는 모빌리티 통신을 고려한 연구를 진행할 계획이다.

## References

- [1] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," in *IEEE Communications Magazine*, Vol.52, No.2, pp.74-80, 2014.
- [2] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.32, No.6, pp.1065-1082, 2014.
- [3] S. Xu and Y. Fu, "Resource allocation algorithm for maximizing network utility in LTE network with dual connectivity," *3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp.600-606, 2017.
- [4] 3GPP Technical Report (TR) 36.872, "Small cell enhancements for EUTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects," Tech. Rep., Decembe, available at [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org), 2013.
- [5] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Basar, and A. Hjrungnes, "Game theory in wireless and communication networks," Cambridge University Press, 2011.
- [6] J. Nash, "Two-person cooperative games," *Econometrica*, Vol.21, No.1, pp.128, 1953.
- [7] K. Avrachenkov, J. Elias, F. Martignon, G. Neglia, and L. Petrosyan, "Cooperative network design: A Nash bargaining solution approach," *Computer Networks*, Vol.83, pp.265-279, 2015.
- [8] K. Bairagi, N. H. Tran, W. Saad, Z. Han, and C. S. Hong, "A game-theoretic approach for fair coexistence between LTE-U and Wi-Fi systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.68, No.1, pp.442-455, 2019.
- [9] D. Kim, K. Lee, and J. Kim, "Nash bargaining approach for fair and efficient LTE-WiFi aggregation," in *IEEE Access*, Vol.7, pp.117176-117187, 2019.
- [10] H. Houba, X. Tieman, and R. Brinksma, "The Nash- and Kalai-Smorodinsky bargaining solution for decision weight utility functions," *Game Theory and Information* 9611001, University Library of Munich, Germany, 1996.
- [11] Y. Chun and W. Thomson, "Bargaining problems with claims," RCER Working Papers 189, University of Rochester - Center for Economic Research (RCER), 1989.
- [12] E. Karagözoğlu and K. Keskin, "A tale of two bargaining solutions," *Games, MDPI, Open Access Journal*, Vol.6, No.2, pp.1-14, 2015.
- [13] E. Karagözoğlu and K. Keskin, "Endogenous reference points in bargaining," *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol.88, No.2, pp.283-295, 2018.
- [14] S. Gupta and Z. A. Livne, "Resolving a conflict situation with a reference outcome: An axiomatic model," *Management Science*, Vol. 34, No.11, pp.1303-1314, 1988.
- [15] P. V. Balakrishnan, J. C. Gómez, and R. V. Vohra, "Bargaining problems with arbitrary reference points," 2011.
- [16] S. Singh, M. Geraseminko, S. P. Yeh, N. Himayat, and S. Talwar, "Proportional fair traffic splitting and aggregation in heterogeneous wireless networks," *IEEE Communications Letters*, Vol.20, No.5, pp.1010-1013, 2016.
- [17] H. Lee, S. Vahid, and K. Moessner, "Traffic-aware resource allocation with aggregation in heterogeneous networks with WLANs," *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Ljubljana, Slovenia, pp.1-5, 2018.
- [18] J. Liu, X. Tao, X. Zhou, and Q. Cui, "Utility based resource allocation algorithm with carrier aggregation on unlicensed band," *Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, Taipei, pp.180-184, 2015.
- [19] 3GPP "NR; User Equipment (UE) radio access capabilities," TS 38.306 V16.2.0, System Architecture for the 5G System (Release 16), 2020.
- [20] R. Jain, W. Hawe, and D. Chiu, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in Shared Computer Systems," DEC-TR-301, 1984.
- [21] A. S. Avestimehr and D. N. C. Tse, "Outage capacity of the fading relay channel in the low SNR regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.53, No.4, pp.1401-1415, 2007.



## 전우선

<https://orcid.org/0000-0002-7555-7351>

e-mail : sunnyjun959@naver.com

2019년 한신대학교 정보통신공학과(학사)

2021년 서강대학교 컴퓨터공학과(석사)

현재 현대오토에버 연구원

관심분야 : Dual Connectivity Network  
& Network Resource Allocation



## 김승욱

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

e-mail : swkim01@sogang.ac.kr

1993년 서강대학교 컴퓨터공학(학사)

1995년 서강대학교 컴퓨터공학(석사)

2003년 Syracuse University,

Computer Science(박사)

2005년 중앙대학교 컴퓨터공학부 조교수

2006년 ~ 현재 서강대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야 : Network Resource Allocation using Game Theory