

# 6G 저지연 통신을 위한 2단계 임의 접속의 성능 분석

김 태 훈\*, 방 인 규<sup>o</sup>

## Performance Analysis of Two-Step Random Access for 6G Low-Latency Communications

Taehoon Kim\*, Inkyu Bang<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 2단계 임의 접속 (Two-step random access) 절차에 대해 살펴보고, 2단계 임의 접속의 One-shot 성공 확률 (success probability), 임의 접속 성공 확률, 임의 접속 실패 확률을 수학적으로 분석하고 모의실험을 통해 수학적 분석의 타당성을 검증한다.

**Key Words** : Two-Step Random Access, One-Shot Success Probability, RA Success Probability, RA Failure Probability

### ABSTRACT

In this paper, we investigate two-step random access (RA) procedure and mathematically analyze its performance in terms of one-shot success probability, RA success probability, and RA failure probability. Through extensive simulations, we validate our mathematical analysis.

### I. 서 론

2019년 5G 상용화가 최초로 시작되었으며 고도화된 서비스를 제공하기 위해 이동통신 시스템은 지속

적으로 발전하고 있다. 또한, 약 10년 주기로 새롭게 출범하는 차세대 이동통신 서비스를 실현하기 위해 세계 주요국은 6G 관련 원천기술 확보를 위해 선행연구 및 연구개발 투자를 진행하고 있으며 2023년 6G 비전 설정을 목표로 하고 있다<sup>1)</sup>. 6G에서는 자율주행차, 플라잉카, 초실감 확장 현실, 실시간 원격 수술 등의 서비스가 실현될 것으로 예상된다<sup>2)</sup>.

각 단말은 이동통신 서비스를 이용하기 위해 임의 접속(random access) 절차를 통해 기지국과 연결을 맺는 과정을 수행해야 한다<sup>3)</sup>. 일반적으로 4단계로 구성된 경쟁 기반의 임의 접속 절차를 이용하는데<sup>3)</sup>, 경쟁으로 인하여 안정적인 접속 성능을 보장해주지 못하며 경쟁 참여자가 많아지는 상황에서는 접속 지연 시간이 길어져 저지연 서비스를 제공하지 못하게 된다<sup>4)</sup>. 이러한 문제를 극복하기 위해 4단계 임의 접속 과정에서 짧은 메시지를 전송하고자 하는 시도도 있었으며<sup>5)</sup>, 최근에는 간소화된 2단계 임의 접속 기법이 제안되었다<sup>5,6)</sup>.

본 논문에서는 2단계 임의 접속 절차를 면밀히 검토한다. 그리고, 2단계 임의 접속을 한 번에 성공하는 확률인 one-shot 성공 확률, 임의 접속 성공 확률, 임의 접속 실패 확률을 수학적으로 분석하고, 모의실험을 통해 분석의 타당성을 검증한다.

### II. 2단계 임의 접속<sup>2)</sup>

2단계 임의 접속 (Two-step random access) 절차는 그림 1과 같으며, 각 절차에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

1) **(Step 1 - Msg A 전송)** 각 단말은 Msg A를 전송한다. Msg A는 4단계 임의 접속에서 단말이 전송하는 Msg1(프리앰블)과 Msg3(연결 요청 메시지 또는 스케줄링 요청 메시지)로 구성된다. 즉, Msg A를 전송하는 것은 4단계 임의 접속에서의 프리앰블 전송과 메시지 전송을 동시에 수행하는 것과 동일하다<sup>3)</sup>.

보다 구체적으로, 각 단말은 임의로 선택한 하나의 프리앰블을 임의 접속 채널(PRACH)을 통해 전송하는 동시에, 미리 할당되어있는(pre-allocated) 상향링

\* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1G1A1101176).

<sup>o</sup> 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1069934).

• First Author : (ORCID:0000-0002-9353-118X)Hanbat National University Department of Computer Engineering, thkim@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7109-1999)Hanbat National University Department of Intelligence Media Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202205-064-A-LU, Received April 28, 2022; Revised May 16, 2022; Accepted May 16, 2022

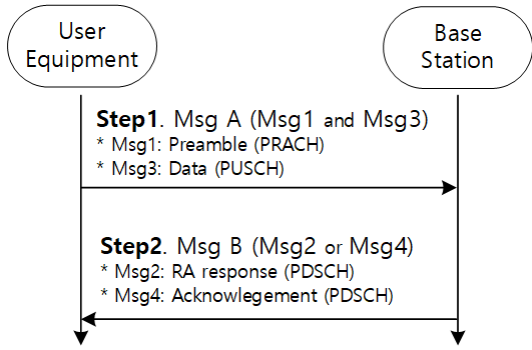


그림 1. 2단계 임의 접속 절차  
Fig. 1. Procedure of two-step random access

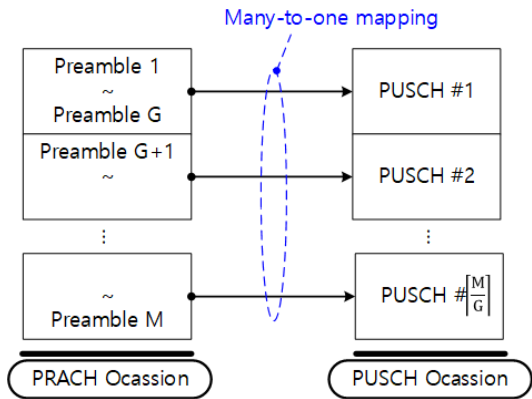


그림 2. 프리앰블 및 사전할당된 PUSCH 자원의 다대일 대응 관계  
Fig. 2. Many-to-one mapping relation between several preambles and pre-allocated PUSCH resource

크 공유 채널(PUSCH)을 통해 데이터를 전송한다. 하나 또는 다수개의 프리앰블은 하나의 PUSCH 자원에 대응(mapping)되어 있어, 프리앰블 선택에 따라 데이터 전송에 사용해야 하는 PUSCH가 정해지게 된다. 그림 2는 프리앰블 집합과 사전할당된 PUSCH 자원 사이의 대응 관계를 보여주고 있으며,  $G$ 개의 프리앰블로 구성된 집합마다 서로 다른 PUSCH가 할당되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 다대일(many-to-one) 대응 관계로 인해 Msg A 전송 시에 PUSCH 자원을 사용하는 과정에서 충돌(collision) 문제가 추가로 발생할 수도 있다.

2) (Step 2 - Msg B 전송) 기지국은 프리앰블의 검출 여부, PUSCH를 통해 수신된 데이터의 복호 여부에 따라 Msg B 전송 여부, Msg B 내용을 결정하게 된다. 그림 3은 Msg A의 검출 및 복호 상태에 따른 후속 절차를 보여주고 있으며, 다음과 같이 크게 3가지의 경우로 구분할 수 있다.

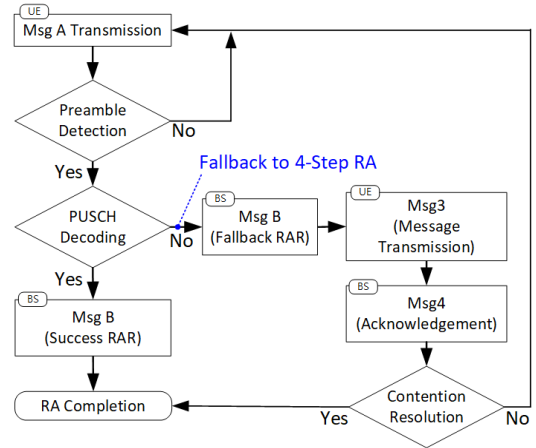


그림 3. Msg A 검출 및 복호 상태에 따른 후속 절차  
Fig. 3. Subsequent procedures according to Msg A detection and decoding status

① 기지국이 프리앰블을 검출하지 못하면, 기지국은 어떠한 응답도 전송하지 않는다. Msg A를 전송하고 Msg B의 수신을 기다리던 단말은 Msg B를 수신하지 못하게 되고 2단계 임의 접속을 재시도하게 된다.

② 기지국이 프리앰블을 정상적으로 검출하고, 검출된 프리앰블과 대응되는 PUSCH로부터 데이터를 성공적으로 복호했을 때에는 승인(Acknowledgement) 역할을 하는 success RA response (RAR)을 포함한 Msg B를 전송하게 된다. 이를 수신한 단말은 2단계 임의 접속을 성공적으로 완료했다고 판단한다.

③ 기지국이 프리앰블을 정상적으로 검출하였으나, 검출된 프리앰블과 대응되는 PUSCH로부터 데이터를 복호하지 못한 경우에는 fallback RAR<sup>1)</sup>을 포함한 Msg B를 전송하며, 이를 수신한 단말은 4단계 임의 접속으로 전환(fallback)하게 된다. 즉, fallback RAR에 포함된 상향링크 허가 정보(uplink grant)가 가리키고 있는 상향링크 자원을 통해 Step 1에서 전송했던 데이터(즉, Msg A의 데이터)를 Msg3으로써 재전송하게 된다. 기지국은 성공적으로 복호된 Msg3에 대해 Msg4(Acknowledgement)를 전송하고, Msg4를 성공적으로 수신한 단말은 2단계 임의 접속은 실패하였지만 4단계 임의 접속으로 전환 후 최종적으로 임의 접속은 성공했다고 판단한다. 4단계 임의 접속으로 전환 후 Msg3을 전송했음에도 불구하고 Msg4를 수신하지

1) Fallback RAR은 4단계 임의 접속의 Msg2(즉, 임의 접속 응답(RA response))과 동일하다. 이로 인해, fallback RAR을 수신한 단말은 4단계 임의 접속으로 전환할 수 있다.

못한 단말은 최종적으로 임의 접속이 실패했다고 간주하고, Step 1으로 돌아가 2단계 임의 접속을 처음부터 재시도하게 된다.

### III. 성능 분석

본 장에서는 2단계 임의 접속을 한 번에 성공하는 확률인 one-shot 성공 확률, 2단계 임의 접속을 한 번에 성공하지는 못했지만 4단계 임의 접속으로 전환 후 성공하는 확률인 임의 접속 성공 확률, 4단계 임의 접속으로 전환했음에도 불구하고 결국 임의 접속을 실패하는 확률인 임의 접속 실패 확률을 수학적으로 분석한다.

$n$ 개의 단말이 동시에 2단계 임의 접속을 시도하는 상황을 고려하며, 그중 특정 단말  $u_o$  (UE of interest) 관점에서 분석을 진행한다.  $M$ 은 2단계 임의 접속을 위해 시스템이 할당된 전체 프리앰블 수이며,  $G$ 는 사전 할당된 하나의 PUSCH 자원에 대응되는 프리앰블의 수를 의미한다.

$u_o$ 가 선택한 프리앰블에 대응되는 PUSCH 자원을  $u_o$ 가 독점적으로 사용하는 경우에만  $u_o$ 는 2단계 임의 접속을 한 번에 성공하게 된다. One-shot 성공 확률  $p_{one-shot}$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_{one-shot} = \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{n-1}. \quad (1)$$

반대로  $u_o$ 가 선택한 프리앰블에 대응되는 PUSCH 자원을 다른 단말도 사용하는 경우(2)에는 기지국이 데이터를 성공적으로 복호하지 못하기 때문에 기지국은 프리앰블 검출 결과에 기반하여 fallback RAR을 Msg B에 포함하여 전송하게 되며, 이를 수신한 단말들은 4단계 임의 접속으로 전환(fallback)하게 된다. 즉,  $u_o$ 의 2단계 임의 접속 시도가 4단계 임의 접속으로 전환될 확률은  $p_{fallback} = 1 - p_{oneshot}$ 이다.

4단계 임의 접속으로 전환 후, Msg3를 보내는 상향링크 자원을 독점하는 경우에만 임의 접속을 성공하게 되며, 본 논문에서는 이러한 경우를 임의 접속 성공이라고 명명하였다. 임의 접속 성공 확률  $p_s$ 는 다음과 같다.

$$p_s = \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n-1}{i} \left(\frac{G}{M}\right)^i \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{n-1-i} \times \left(1 - \frac{1}{G}\right)^i. \quad (2)$$

$u_o$ 와 동일한 프리앰블을 선택한 단말이 하나 이상 존재할 경우에는 결과적으로 4단계 임의 접속으로 전환하게 되며,  $u_o$ 를 포함하여 해당 프리앰블을 선택한 모든 단말이 동일한 상향링크 자원을 통해 Msg3를 전송하게 된다. 자원 충돌로 인하여  $u_o$ 의 Msg3는 복호되지 못하며, 결과적으로  $u_o$ 는 Msg4를 수신하지 못하게 되어 임의 접속을 실패하게 된다. 이러한 경우를 임의 접속 실패라고 명명하였으며, 임의 접속 실패 확률  $p_f$ 는  $p_f = 1 - p_{one-shot} - p_s$ 이다.

### IV. 성능 평가 및 논의

수학적 분석의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB 기반의 모의실험을 진행한다. 시스템에서 제공하는 전체 프리앰블 수는 64로 가정하며, 4개의 프리앰블이 동일한 PUSCH 자원에 사전 할당 되어있다고 가정한다 ( $M=64, G=4$ ). 이 경우, 2단계 임의 접속을 위해  $\left\lceil \frac{M}{G} \right\rceil = 16$ 개의 PUSCH 자원이 사전 할당된 것이다. 그림 4는 2단계 임의 접속을 동시에 시도하는 단말의 수( $n$ )에 따른 성능을 보여주고 있다. 모든 성능 지표에 대해 모의실험 결과와 수학적 분석 결과가 잘 맞는 사실을 통해, 수학적 접근 방법이 타당하다는 것을 확인할 수 있다. 2단계 임의 접속을 시도하는 단말의 수가 증가함에 따라 임의 접속을 한 번에 성공하는 경우는 줄어들게되며, 결과적으로 one-shot 성공 확률

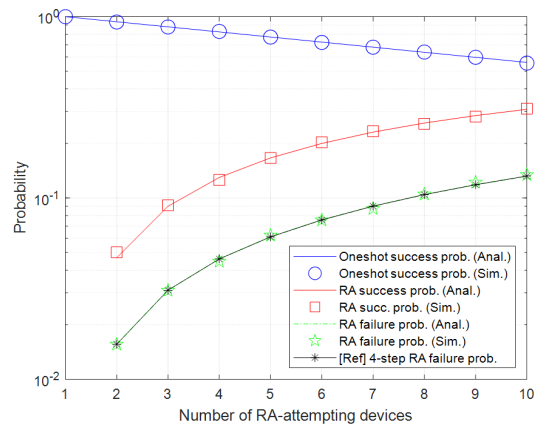


그림 4. 임의 접속을 시도하는 단말 수의 변화에 따른 확률  
Fig. 4. Probabilities for varying the number of RA-attempting devices

2)  $u_o$ 가 선택한 프리앰블이 대응되는 PUSCH 자원에 동시에 대응되는 다른 프리앰블을 선택한 단말이 하나 이상 존재하는 경우와  $u_o$ 와 동일한 프리앰블을 선택한 단말이 하나 이상 존재하는 경우로 구분하여 접근할 필요가 있다.

이 감소하게 된다. 이 경우, 4단계 임의 접속으로 전환 되는 단말의 수가 증가하게 되므로 임의 접속 성공 확률과 실패 확률도 비례하여 증가하게 된다. 또한, 임의 접속 성공 확률과 실패 확률의 합이  $p_{fallback}$  과 같은 것을 확인할 수 있다. 비교를 위해 모든 단말이 4단계 임의 접속을 시도할 때의 임의 접속 실패 확률(즉, 충돌 확률)을 함께 도시하였으며,  $p_f$ 와  $p_c$ 가 유사한 것을 확인할 수 있다.  $G$ 값을 크게 설정할 경우에  $p_{one-shot}$ 은 감소하며, 반대의 경우에는  $p_{one-shot}$ 이 증가한다.  $G$ 값의 설정에 따라  $p_{one-shot}$ 이 달라지겠지만,  $p_{one-shot}$ ,  $p_s$ ,  $p_f$ 의 양상은 그림 4와 같다.

## References

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "The road towards 6G: A comprehensive survey," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 334-366, Feb. 2021.
- [2] T. Kim, "6G 이동통신을 위한 임의 접속 기술 발전 방향," *Weekytrend*, no. 2033, pp. 2-14, 2022.
- [3] 3GPP TS 38.321 version 15.3.0 Release 15, "5G; NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification," Sep. 2018.
- [4] T. Kim and I. Bang, "An enhanced random access with preamble-assisted short-packet transmissions for cellular iot communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 6, pp. 1081-1084, Jun. 2019.
- [5] 3GPP RP-190711, "3GPP Work Item Description, 2-step RACH for NR," Sep. 2019.
- [6] J. Kim, *et al.*, "Two-step random access for 5g system: latest trends and challenges," *IEEE Network*, vol. 35, no. 1, pp. 273-279, Jan./Feb. 2021.