

# 무선 개인 영역 네트워크에서 정보의 적시성을 보장하기 위한 개선된 슬롯형 CSMA 백오프 기법

김지훈\*, 김범수\*\*

## Improved Slotted CSMA Backoff Technique for Ensuring Data Freshness in Wireless Personal Area Networks

Ji-Hoon Kim\*, Beom-Su Kim\*\*

이 연구는 및 2023년도 경상국립대학교 교내연구비 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00333695)

### 요약

최근 무선 개인 영역 네트워크에서 센서가 수집한 데이터의 적시성을 위한 성능평가 메트릭으로 AoI가 제안되었으며, 이는 센서 노드에서 정보가 수집된 시간과 목적지에서 데이터를 수신한 시간의 차이로 계산된다. 기존 TDMA 기반의 스케줄링 기법들은 각 소스 노드에서 데이터가 생성된 시간에 맞춰 타임슬롯을 할당함으로써 시스템 평균 AoI 최소화를 달성하였으나, 무선 개인 영역 네트워크와 같이 소스 노드가 이질적인 샘플링 주기를 가지는 네트워크 환경에서는 데이터가 생성된 시간을 정확히 추정할 수 없는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 개선된 슬롯형 CSMA/CA 백오프 기법을 제안한다. 해당 논문은 ns-3 네트워크 시뮬레이터를 통해 성능평가를 진행하였으며 AoI 증가에 따른 평균 백오프 주기가 기존 기법에 비해 약 63% 감소하는 결과를 보였다.

### Abstract

Recently, AoI has been adopted as a performance metric for the timeliness of information collected by sensors in wireless personal area networks. It is calculated as the difference between the time when information is collected from the sensor node and the time when data is received from the destination. Existing centralized scheduling techniques have attempted to minimize the average AoI of the entire system by allocating timeslots according to the time when data is generated at each source. However, they have difficulty estimating the exact sampling start time of each source, ultimately increasing the average AoI. To solve this problem, this paper proposes an improved slotted CSMA/CA backoff technique. The paper conducted a performance evaluation through the ns-3 network simulator, and the average backoff period decreased by about 63% compared to the existing backoff techniques.

### Keywords

IEEE 802.15.4 MAC, CSMA/CA, adaptive back-off mechanism, age of information

\* 경상국립대학교 컴퓨터공학과 학사과정  
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7566-5519>  
\*\* 경상국립대학교 컴퓨터공학과 교수(교신저자)  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8035-1967>

• Received: May 28, 2024, Revised: Jun. 25, 2024, Accepted: Jun. 28, 2024  
• Corresponding Author: Beom-Su Kim  
Dept. of Computer Science, Gyeongsang National University, Korea  
Tel.: +82-55-772-1383, Email: [bbk5391@gnu.ac.kr](mailto:bbk5391@gnu.ac.kr)

## I. 서 론

최근 원격 헬스모니터링, 원격수술, 자율주행 등 시민 감 통신 응용 분야의 발전으로 인하여 무선통신시스템에서 정보의 적시성이 중요한 성능평가 메트릭으로 주목받고 있다. 정보의 적시성은 AoI(Age of Information)으로 공식화할 수 있으며, 이는 센서 노드에서 데이터 샘플링 시간과 실제 모니터링 시스템에서 데이터를 수신한 시간 사이 차이로 계산된다[1]. 무선 시민감 통신(Wireless time-sensitive communication) 시스템에서 AoI를 최소화하기 위해 다양한 자원 할당 최적화 기법이 제안되었으며, TDMA(Time Division Multiple Access) 기반의 스케줄링을 기반으로 한다[2]-[4]. 이들은 N개의 센서 노드와 1개의 코디네이터(혹은 기지국) 간의 싱글 홉 무선 통신 시스템을 기반으로 동작하며, 코디네이터는 센서 노드에서 데이터가 생성된 시간에 맞춰 타임슬롯을 할당함으로써 시스템 평균 AoI 최소화를 달성한다.

위 스케줄링 기법들은 공통적으로 매 타임슬롯의 시작 지점에서 센서들이 새로운 데이터를 생성하고, 스케줄된 타임슬롯에서 버퍼에 저장된 가장 최신 데이터를 전송한다고 가정한다. 하지만, 실제 통신 시스템에서 센서들의 타입은 이질적이며 샘플링 주기 또한 모두 다르다. 즉, 센서들의 이질적인 샘플링 주기로 인하여 코디네이터가 타임슬롯을 할당한 시간에 스케줄된 센서의 AoI가 이미 임계치를 넘어서거나, 버퍼에 보낼 데이터가 존재하지 않을 수 있다. 따라서, 실제 통신 시스템에서 TDMA 기반의 스케줄링 기법은 시스템의 평균 AoI 값을 증가시키거나, 대역폭 낭비로 이어질 수 있다.

센서들의 이질적인 샘플링 주기로 인해 발생하는 AoI 증가 및 대역폭 낭비 문제는 CSMA 기법 중 CSMA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 기반의 무작위 접근 통신 기술을 통해 해결할 수 있다[5]-[8]. 코디네이터가 직접 센서 노드들의 전송 시간을 결정하는 TDMA 기반의 스케줄링 기술과 달리, CSMA 기반의 분산 스케줄링 기술은 센서 노드가 데이터를 생성한 시간에 맞춰 경쟁을 통해 데이터를 즉각적으로 전송함으로써 시스템 평균 AoI 최소화 및 대역폭 낭비를 최소화할 수

있다. 하지만, 기존 CSMA 기법 역시 통신 시스템을 구성하는 센서 노드의 개수가 많을수록 잦은 충돌로 인해 AoI가 증가할 수 있다. 또한, 기존 지수 백오프 메커니즘(Exponential back-off mechanism)은 충돌이 발생할 경우, 재전송 대기 시간을 지수적으로 증가시키므로 충돌이 빈번한 상황에서는 시스템 평균 AoI를 크게 증가시킬 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 CSMA 기반 통신 프로토콜에서의 적응적 백오프 메커니즘을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 백오프 메커니즘은 각 센서가 데이터를 생성한 시간으로부터 AoI 값을 선형적으로 증가시키며, 자신의 현재 AoI 값을 기준으로 백오프 지수를 적응적으로 조정함으로써 전송 기회를 높이도록 한다. 이를 통해 데이터가 생성된 이후부터의 시간이 오래된 센서의 재전송률이 증가하며 시스템 평균 AoI 최소화를 효과적으로 달성할 수 있다.

## II. 관련 연구

AoI는 특정 정보가 생성되거나 업데이트된 시점부터 해당 정보가 수신 측에 도착하기까지의 시간 경과를 나타내는 지표로 실시간 데이터 통신이 요구되는 응용 분야에서 정보의 최신성을 측정하기 위해 사용된다[1]. 최근 실시간 통신이 요구되는 산업의 고도화로 인해 AoI는 다양한 통신 시스템 최적화를 위한 의사결정 메트릭으로 사용되고 있다. [2]에서는 기존 TDMA 기법에서 착안한 Greedy 정책, Randomized 정책, 클라이언트의 AoI와 전송 성공 확률을 고려한 Max-Weight 정책, 클라이언트 상태를 기반으로 최적의 전송 결정을 내리도록 하는 Whittle's Index 정책들을 제안하였다. 특히, Max-Weight와 Whittle's Index 정책은 기존의 Greedy 및 Randomized 정책과 비교해 AoI를 약 30~40% 향상시켰다. [3]에서는 AoI의 제한 시간과 패킷 손실률을 고려하여, 일정 수준의 AoI 제한 위반을 허용하는 스케줄링 기법을 제안하였다. 안정적인 허용의 경우, 시스템 부하가  $\ln 2$  이하일 때, 100% 성공률을 보임으로써 기존 TDMA 기법과 비교해 약 69.3% 향상된 안정성을 보였다.

또한, [4]에서는 AoI가 사전 정의된 임계값  $d_i$ 를 초과하지 않도록 하는 스케줄러를 설계하고 검증하도록 하는 스케줄링을 다뤘다. 이때, MAT (Maximum AoI Threshold) 벡터를 도입한 기존 EDF 방식과 비교했는데 제안 방식이 EDF 방식과 비교해 스케줄링 성공률이 약 1222.1% 더 안정적인 성능을 보였다. 하지만, TDMA 기법들은 실시간성의 한계를 지닌다. 그래서 TDMA가 아닌 CSMA 기반의 스케줄링 기법들이 제안되었다.

[5]에서는 밀집된 네트워크 환경을 고려한 OFDMA 랜덤 액세스 백오프 알고리즘을 제안하였다. RU(Resource Unit) 분할을 통한 동시 데이터 전송으로 이전 프레임에서의 접속 결과를 파악하여 최대 성능 전후로 나누고 충돌 RU와 Idle RU 수를 조절하였다. 이로써 동적인 OBO(OFDMA backoff) 값 조정으로 상황에 맞는 OBO 갱신을 통해 전체적인 전송률 향상을 기대하였다.

[6]에서는 링크와 평균 채널 보유 시간 비교를 통해 이상적인 CSMA 시나리오를 제안하였고 비대칭 서비스와 대칭 서비스 비율로 나누어 시나리오를 도입한 라운드 로빈 스케줄링 기법과의 비교 시나리오를 통해 기존 CSMA 기법과 비교해 8.1% 더 높은 최신화 성능을 보여주며 이상적인 CSMA 상황과 비교해 20% 더 낮은 성능을 보였다. 또한, [7]에서는 Q-learning 기반의 강화학습 에이전트를 설계해 노드의 데이터 전송 속도를 조절하는 방법을 제안하여 기존 CSMA 기법과 비교해 약 10% 높은 처리량을 보여주었다.

또한, [8]에서는 기존 지표인 AoI가 정보의 신선도를 정량화한다는 측면에서 한계가 있기에 새로운 지표인 AoOI(Age of Outdated Information)를 도입하였다. 해당 시나리오(Heh 스케줄링)는 과거 데이터를 기반으로 우선순위 메트릭을 추정해 각 시간 슬롯에서 가장 큰 우선순위 메트릭을 가진 소스를 전송해 AoOI가 기존 CSMA 기법과 비교해 약 1 ~ 16%까지를 향상됨을 증명하였다.

[9] 역시, 기존 AoI의 한계를 보완하여 AoII(Age of Incorrect Information) 업데이트하는 정보가 실제 상태와 일치하지 않는 정보를 가진 시간을 측정 즉, 정확성을 고려한 메트릭을 도입하였다. 해당 논문의 제안 시나리오가 기존 AoI만 고려한 시나리오와 비

교해 정확성과 신선도 모두 약 20% 감소시켰다.

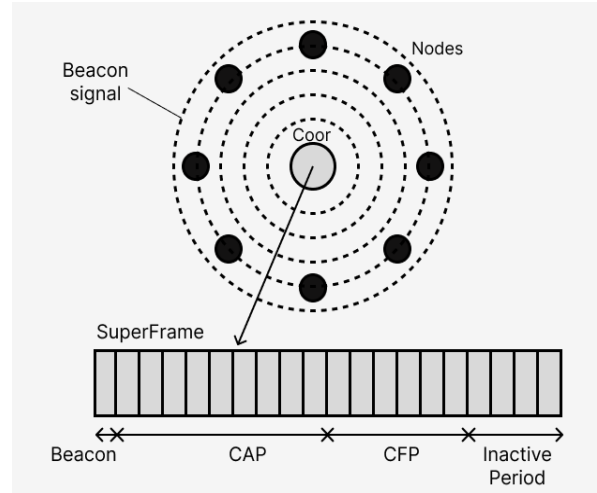


그림 1. 스타 토폴로지 형태의 통신 모델과 슈퍼프레임 구조

Fig. 1. Communication model and superframe structure in star topology

### III. 시스템 모델 및 문제 정의

#### 3.1 시스템 모델

본 시스템은 IEEE 802.15.4 표준 기반의 무선 개인 영역 네트워크를 가정한다. 그림 1과 같이 해당 통신 모델은 1개의 코디네이터와 N개의 센서 노드로 구성되며, 서로 1홉 스타 토폴로지 형태로 상호 연결된다. 해당 통신 모델에서의 데이터 송수신은 노드와 코디네이터 사이의 MAC과 PHY계층의 데이터를 주로 다루고 또한, 데이터 송수신 사이 슈퍼프레임구조에서 CSMA가 다루는 CAP(Contention Access Period)구간을 주로 다룬다. CAP구간에서 사용하는 CSMA 기법은 슬롯형 CSMA와 비슬롯형 CSMA 기법으로 나뉘는데 CAP구간을 다 사용했을 경우, 비슬롯형 CSMA기법을 사용한다. 우리가 제안하는 백오프 메커니즘은 슬롯형 CSMA 기법에서 주로 다룬다. 슬롯형 CSMA 기법은 코디네이터는 주기적으로 비컨 메시지를 브로드 캐스트 하며, 비컨 메시지를 수신한 센서 노드는 데이터 송신 준비를 한다. 코디네이터의 송수신 상태가 idle일 때, 해당 소스 노드는 데이터를 코디네이터에게 송신한다.

이때, 노드들이 데이터를 동시에 보낼 경우, 충돌이 발생해 각 소스 노드는 백오프 메커니즘에 따라 재전송을 대기한다.

CSMA 기법에서 기존 알고리즘은 다음과 같이 설정된다. 최소 백오프 지수( $m\_macMinBE$ ), 최대 백오프 지수( $m\_macMaxBE$ ), 백오프 지수( $m\_BE$ )로 설정된다. 그리고 충돌이 일어나면  $m\_BE = \max(m\_BE + 1, m\_macMaxBE)$  값에 의해 재정의 되고 upperBound가  $pow(2, m\_BE) - 1$ , 해당 노드의 백오프 기간 할당  $Random(0, upperBound + 1)$ 로 정의된다. 즉, 기존 백오프 기간 정의는 0에서  $2^{m\_BE}$  사이에서 정의되어 AoI 값과는 아무 관련이 없을뿐더러 충돌이 일어나면 재전송 대기 기간이 늘어나게 되도록 메커니즘이 정해져 있어 AoI 값이 늘어나게 된다.

### 3.2 문제 정의

기존의 Exponential Back-off Mechanism은 재전송 대기 시간을 결정할 때, 재전송 시도 횟수에 기반하여 랜덤화된 지연 시간을 사용한다. 백오프 기간 결정 로직은 백오프 지수(BE : 백오프 기간 동안의 대기 시간 범위)로 제한된다. 백오프 범위는 다음 식 (1)을 따른다.

$$T_{wait} = Random(0, 1, \dots, 2^i - 1) * T_{slot} \quad (1)$$

위 수식에서  $T_{wait}$ 는 기다리는 시간,  $i$ 는 재전송 시도 횟수를 의미한다. 슬롯형 CSMA 방식을 사용하면 기존 지수 백오프 메커니즘을 따른다. 지수 백오프 메커니즘은 재전송 시도가 늘어남에 따라 대기 시간이 지수적으로 증가한다. 이때, 노드의 AoI 값이 상대적으로 높음에도 불구하고 재전송 대기를 진행하므로 AoI 값을 완전히 최소화하지 못하고 오히려 증가시킨다. 즉, 채널이 사용 가능해도 백오프 메커니즘에 의해 재전송 대기를 하는 문제가 발생한다. 위의 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 각 노드에 AoI를 나타내는 값을 부여하여 AoI 값에 따라 재전송 대기 시간을 조절하는 백오프 메커니즘을 제안한다.

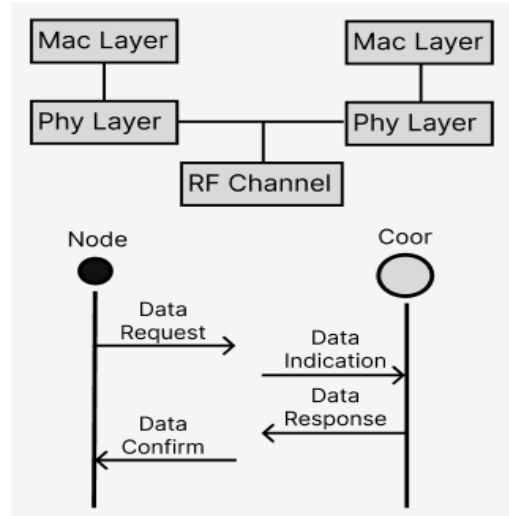


그림 2. 노드와 코디네이터 사이 통신 모델 계층 및 데이터 송수신 구조  
Fig. 2. Between the node and the coordinator communication model layers and data transmission / reception structures

## IV. 적응적 백오프 카운터 결정 알고리즘

### 4.1 제안하는 기법의 기본 동작

제안하는 기법의 기본 아이디어는 다음과 같다. 각 노드에 AoI를 나타내기 위해 노드의 Mac 계층에 AoI를 나타내는 새로운 값을 생성한다. 노드가 데이터를 생성한 시점(Request)부터 AoI 값을 +1씩 증가시킨다. 그렇게 각 노드에게 AoI 값을 나타내는 값을 만들고 해당 값들을 코디네이터에게 넘겨준다. 코디네이터는 각 노드에게 받은 AoI 값을 적용해 백오프 지수를 조정하며 본 논문에서 제안하는 적응적 백오프 메커니즘에 적용한다. 각 노드는 적응적 백오프 메커니즘에 의한 백오프 기간을 할당받고 할당받은 백오프 기간만큼 대기한 이후에 재전송을 시도한다. 해당 메커니즘에 의해 AoI 값이 클수록 낮은 백오프 기간을 할당받아 재전송률을 높인다. 이로써 전송을 성공한 시점(Indication)에 AoI 값을 초기화시키는 메커니즘을 통해 평균 AoI 값을 최소화한다.

알고리즘 1은 기존 백오프 메커니즘을 pseudo code 형태로 나타낸 것이다.

---

**Algorithm 1. Original back-off mechanism**

---

Initialization:

```
1: m_macMaxBE ← 5
2: m_BE ← m_macMinBE
```

Function: PlmeCcaConfirm(LrWpanPhyEnumeration status)

```
1: m_BE = min((m_BE + 1), (m_macMaxBE))
```

Function: RandomBackoffDelay()

```
1: upperBound ← pow(2, m_BE) - 1
2: m_randomBackoffPeriodsLeft =
   m_random(0, upperBound + 1);
3: randomBackoff =
   Seconds((m_randomBackoffPeriodsLeft *
   Irwpan::aUnitBackoffPeriod) / symbolRate)
```

---

## 4.2 제안하는 백오프 알고리즘

제안하는 기법의 핵심은 환경 변수인 백오프 지수 값의 변경을 통해 백오프 기간을 할당시키는 것이다. 먼저, 초기 백오프 지수( $m_{BE}$ )를 최소 백오프 지수( $m_{macMinBE}$ )가 아닌 최대 백오프 지수( $m_{macMaxBE}$ )로 설정하고 백오프 지수 업데이트를 최대 백오프 지수에서 AoI 값을 뺀 값으로 설정한다. 이후 백오프 지수를 통해  $upperBound(2^m_{BE})$ 를 설정하고 백오프 기간을 할당한다. 이를 통해 각 노드는  $0 \sim upperbound + 1$  사이의 랜덤 백오프 기간을 할당받는다. 다음은 위의  $upperBound$  설정 메커니즘을 ‘메커니즘 1’로 설정하여 식 (2)과 pseudo code 형태로 표현한 것이다.

$$upperBound = 2^{BE} - 1 \quad (2)$$

$$BackoffPeriodsLeft = Random(0, upperBound + 1)$$

해당 알고리즘의 경우, AoI의 값이 지속적으로 증가하여 AoI 값의 차이가 적은 상황에서 스케줄링에 따라 기존 백오프 메커니즘에 비해 AoI 값을 감소시킨다. 하지만, AoI 값의 차이가 큰 상황에서는 해당 스케줄링의 성능이 저하되었기에 메커니즘 2를 제안한다. 해당 메커니즘의 경우, 백오프 지수 설정은 동일하나  $upperBound$ 를  $BE * BE$ 로 설정한다. 이로써 AoI 값의 차이가 클 경우에는 해당 ‘메

커니즘 2’의 스케줄링의 성능이 ‘메커니즘 1’에 비해 증가함을 보인다. 다음은 위의 메커니즘을 식 (3)과 pseudo code 형태로 표현한 것이다.

$$upperBound = BE \times BE \quad (3)$$

$$BackoffPeriodsLeft = Random(0, upperBound)$$

---

**Mechanism 1. proposed scheduling mechanism 1**

---

Initialization:

```
1: m_macMaxBE ← ...
2: m_BE ← m_macMaxBE
```

Function: PlmeCcaConfirm(LrWpanPhyEnumeration status)

```
1: m_upperAoI ← GetMac()->GetAoIMac()
2: if m_upperAoI <= m_macMaxBE then
3:   m_BE = max((m_macMinBE),
   (m_macMaxBE - m_upperAoI))
4: else then
5:   m_BE = m_macMinBE
```

Function: RandomBackoffDelay()

```
1: upperBound ← pow(2, m_BE) - 1
2: m_randomBackoffPeriodsLeft =
   m_random(0, upperBound + 1);
3: randomBackoff =
   Seconds((m_randomBackoffPeriodsLeft *
   Irwpan::aUnitBackoffPeriod) / symbolRate)
```

---



---

**Mechanism 2. proposed scheduling mechanism 2**

---

Initialization:

```
1: m_macMaxBE ← ...
2: m_BE ← m_macMaxBE
```

Function: PlmeCcaConfirm(LrWpanPhyEnumeration status)

```
1: m_upperAoI ← GetMac()->GetAoIMac()
2: if m_upperAoI <= m_macMaxBE then
3:   m_BE = max((m_macMinBE),
   (m_macMaxBE - m_upperAoI))
4: else then
5:   m_BE = m_macMinBE
```

Function: RandomBackoffDelay()

```
1: upperBound ← m_BE * m_BE
2: m_randomBackoffPeriodsLeft =
   m_random(0, upperBound);
3: randomBackoff =
   Seconds((m_randomBackoffPeriodsLeft *
   Irwpan::aUnitBackoffPeriod) / symbolRate)
```

---

### V. 성능 평가

제안하는 스케줄링 기법의 성능평가를 위해, C++ 기반의 네트워크 시뮬레이터인 NS-3을 사용하였으며 Lr-Wpan-Mlme 네트워크에서 노드끼리의 송수신 충돌 상황 시나리오 환경하에서 기존 백오프 매커니즘 스케줄링 기법과 제안한 백오프 매커니즘 1, 2의 성능을 비교 분석하였다. 또한, 정확한 비교 분석을 위해 기존 BEB 알고리즘과 더불어 CW 기반의 우선순위 백오프 알고리즘을 시뮬레이션으로 구현하여 AoI에 따라 할당받는 Backoff period를 확인하였다.

#### 5.1 실험 환경 정의

최적의 CSMA/CA 환경 구축을 위해 비콘 주기와 슈퍼 프레임 주기를 최대로 설정해 활성 구간을 최대로 설정하며 CAP구간 만의 활성화를 위해 fmlCapSlot 값을 최대로 설정한다. 데이터 충돌이 자주 일어나는 환경 구현을 위해 최대 충돌 횟수 제한 값을 기존보다 2배 이상으로 높인다. 또한, 실제 환경과 유사하도록 AoI의 표준 편차가 큰 환경과 작은 환경을 구별시킨다. 이를 능동적으로 구현하기 AoI 업데이트 시간 단위를 microSeconds로 설정해 표준 편차가 큰 환경(min:100)과 작은 환경(max:1000)을 구축시킨다. 나머지 환경 변수인 CW(Contention Window length)와 전송할 데이터 패킷 크기는 기본으로 설정한다. 전체적인 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 표 1과 같고 제안 매커니즘에서 사용한 추가적인 파라미터 설정값은 표 2과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Beacon order	14
Superframe order	14
fmlCapSlot	15
macMaxCSMABackoffs	10
IncAoIMac interval (μs)	100 ~ 1000
CW	2
Data packet size	5 bytes

표 2. 백오프 파라미터  
Table 2. Backoff parameters

Parameter	Value
macMinBE	2
macMaxBE	20 ~ 5
BE	macMaxBE

그리고 AoI에 따라 할당받는 backoff-period를 달리 하기 위해 데이터 전송 시작 시간대를 분리한다. 또한, 노드의 개수는 A, B가 동일하며 C는 A, B보다 적은 노드들이 데이터 전송을 시도한다. 시뮬레이션에 설정된 데이터 전송 시간대는 아래 표 3과 같다.

표 3. 데이터 전송 주기  
Table 3. Transmission periods

A	Seconds(2.930)	A	Seconds(2.930)
B	Seconds(2.931)	B	Seconds(2.932)
C	Seconds(2.932)		

#### 5.2 실험 결과

먼저, 기존 BEB(Binary Exponential Back-off) 알고리즘은 그림 3과 같이 백오프 기간이 백오프 지수, AoI 값에 비례하므로 AoI가 증가함에 따라 평균 백오프 할당 기간이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

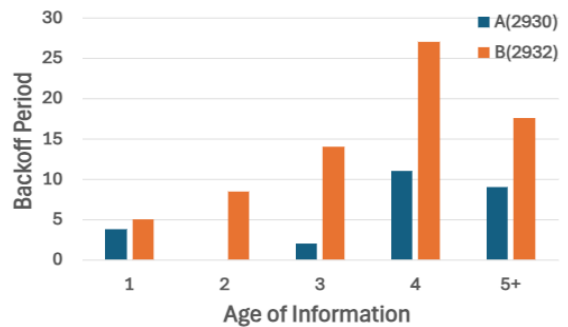


그림 3. 기존 백오프 매커니즘에서의 AoI에 따른 평균 백오프 기간

Fig. 3. Based on AoI in the traditional backoff mechanism average backoff period

첫 번째로 제안하는 백오프 매커니즘에서 백오프 지수는 최대 백오프 지수(macMaxBE)에서 AoI를 뺀 값으로 설정된다. 이는 초기 최대 백오프 지수를 감소시켜 AoI 값이 증가하는 것을 대체하여 더욱 빠른 결과를 만들어 낸다.

즉, AoI 값이 증가하는 환경을 AoI가 1인 시점 (데이터 전송 시점)에 초기 최대 백오프 지수를 감소시키는 환경에서 실험을 진행하였다. 해당 실험 결과, 그림 4와 같이 기존 백오프 매커니즘과 비교해서 평균 백오프 기간 증가 폭이 약 748.31%, 증가 비율이 약 143.57% 감소했다. 즉, 최대 백오프 기간이 감소(AoI 값이 증가) 할수록 평균값이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

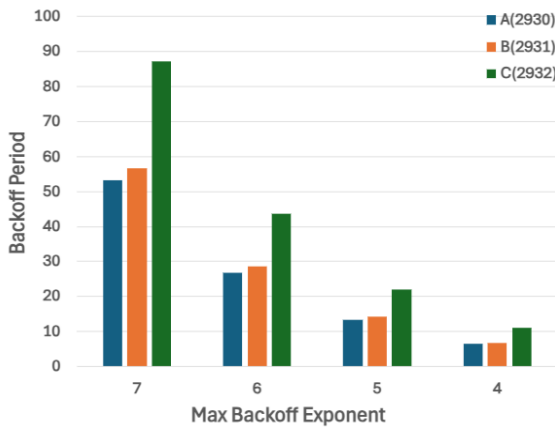


그림 4. 제안 ‘메커니즘 1’에서의 최대 백오프 지수의 감소(AoI의 증가)에 따른 평균 백오프 기간

Fig. 4. Average backoff period due to decrease in maximum backoff index (increase in AoI) in proposed ‘Mechanism 1’

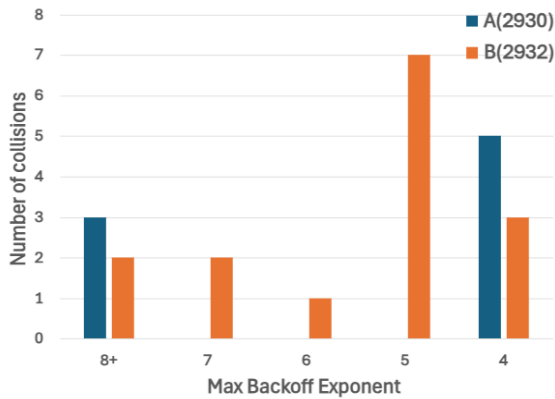


그림 5. 제안 ‘메커니즘 1’에서의 최대 백오프 지수의 감소(AoI의 증가)에 따른 충돌 비율 비교

Fig. 5. Comparison of the collision rate with the decrease of the maximum backoff index (increase in AoI) in the proposed ‘Mechanism 1’

또한, 해당 매커니즘에서 최대 백오프 지수의 감소에 따른 각 타임(A, B)에서의 충돌 횟수를 비교할 수 있었다. (첫 충돌 횟수 제외) 실험 결과, 그림

5와 같이 A 타임이 B 타임보다 데이터 전송을 먼저 시작해 AoI 가 더 높으며 최대 백오프 지수가 감소(AoI가 증가)할 때, 충돌 횟수가(재전송 시도율이) 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

제안 ‘메커니즘 2’ 실험 결과, 그림 6과 같이 기존 백오프 매커니즘과 비교해서 평균 백오프 기간 증가 폭이 약 508.25% 감소, 증가 비율이 약 123.39% 감소하였다. 즉, 해당 매커니즘 역시 최대 백오프 지수가 감소(AoI가 증가)함에 따라 할당받는 백오프 기간의 평균이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

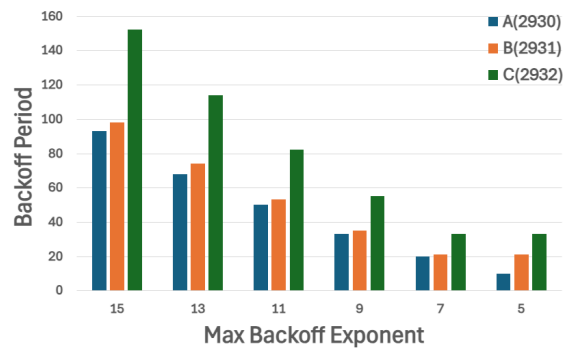


그림 6. 제안 ‘메커니즘 2’에서의 최대 백오프 지수의 감소(AoI의 증가)에 따른 평균 백오프 기간

Fig. 6. Average backoff period due to decrease in maximum backoff index (increase in AoI) in proposed ‘Mechanism 2’

또한, 그림 7과 같이 해당 매커니즘 역시 최대 백오프 지수가 감소(AoI 값이 증가)함에 따라 충돌 비율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

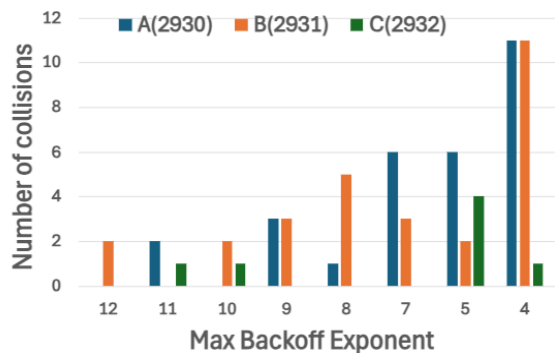


그림 7. 제안 ‘메커니즘 2’에서의 최대 백오프 지수의 감소(AoI의 증가)에 따른 충돌 비율 비교

Fig. 7. Comparison of the collision ratio with the decrease of the maximum backoff index (increase in AoI) in the proposed ‘Mechanism 2’

그리고 AoI가 높을수록 충돌 비율이 증가하는 차이를 확인할 수 있었다. 전송 시간은 A, B, C 타임 순서로 이때, AoI 값 역시 A가 가장 높고 C가 가장 낮다. 또한, 각 타임에서 충돌시킨 노드의 개수는 A, B가 C보다 많고 최대 백오프 지수가 12~9, 8~4 일 때의 평균 충돌 횟수를 비교한 실험 결과, 그림 8과 같이 평균 충돌 횟수의 평균 비율이 약 243.33% 증가하였다. 또한, A의 증가 비율이 380%, B의 증가 비율이 200%, C의 증가 비율이 150%로 A 타임의 충돌 비율이 B, C보다 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

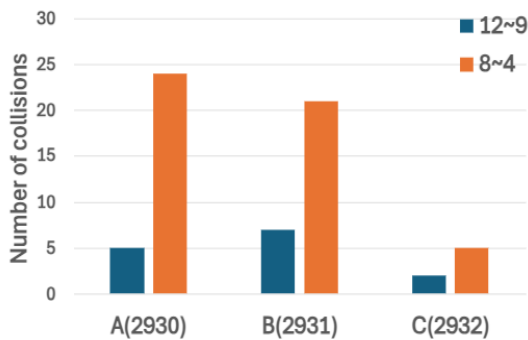


그림 8. 제안 '메커니즘 2'에서의 각 타임 간 충돌 비율 비교

Fig. 8. Comparison of collision rates between times in proposition 'Mechanism 2'

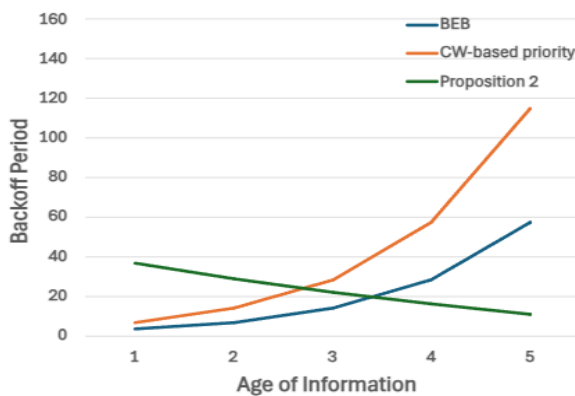


그림 9. AoI 에 따른 할당받는 평균 백오프 기간 비교  
Fig. 9. Comparison of the average backoff period allocated according to AoI

마지막으로, 노드를 시간대별로 구분하지 않고 모두 동시에 보냈을 때, 각 메커니즘에서 AoI가 증가함에 따라 할당받는 평균 Backoff Period를 비교하였다. 기존 백오프 기법과 CW 기반의 우선순위 백오프 메

커니즘은 AoI가 높아질수록 할당받는 평균 Backoff Period가 각각 2.04%, 2.025% 증가하는 결과를 보였다. 그러나, 제안 메커니즘의 경우, 할당받는 평균 Backoff Period가 0.745% 감소하는 결과를 보였다.

### 5.3 성능 결과 분석

기존 기법인 BEB 메커니즘과 CW 기반의 우선순위 백오프 메커니즘의 경우, AoI 증가에 따라 평균적으로 할당받는 평균 Backoff Period가 증가하였다. 그러나, 제안 기법은 위의 2개의 기법과 비교하여 할당받는 평균 Backoff Period 증가 비율이 약 63% 낮아 오히려 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과를 통해 제안하는 메커니즘이 각 소스의 AoI가 증가함에 따라 더 낮은 Backoff Period를 할당할 수 있으며 각 소스가 더 높은 전송 기회를 획득함으로써 전체적인 평균 AoI 값을 최소화할 수 있음을 증명하였다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 무선 개인 영역 네트워크에서 정보의 적시성을 보장하기 위한 개선된 슬롯형 CSMA 프로토콜을 제안하였다. 구체적으로, 각 노드에서 수집된 정보의 신선도를 나타내기 위한 메트릭인 AoI를 계산한 뒤, AoI 값에 따른 백오프 카운터를 적응적으로 결정함으로써 시스템 평균 AoI 최소화를 달성하였다. 시뮬레이션 결과 기존 백오프 기법과 비교하여 제안하는 백오프 기법은 충돌 발생 시 AoI 값에 따라 재전송 페널티를 효과적으로 제어할 수 있었고, 네트워크에 많은 디바이스가 존재하더라도 정보의 적시성을 개선 가능성을 증명하였다.

## References

[1] Y.-P. Hsu, E. Modiano, and L. Duan, "Age of information: Design and analysis of optimal scheduling algorithms", IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Aachen, Germany, pp. 2637-2650, Jun. 2017.



<https://doi.org/10.1109/ISIT.2017.8006590>.

[2] I. Kadota, A. Sinha, and E. Modiano, "Scheduling policies for minimizing age of information in broadcast wireless networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 26, No. 6, pp. 2637-2650, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2873606>.

[3] C. Li, Q. Liu, and W. Lou, "On scheduling with AoI violation tolerance", *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 2637-2650, May. 2021. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM42981.2021.9488685>.

[4] C. Li, S. Li, and W. Lou, "AoI scheduling with maximum thresholds", *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Toronto, ON, Canada, pp. 2637-2650, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155514>.

[5] J.-Y. Park and S.-M. Kim, "Backoff Value Setting of OFDMA-based Random Access Protocol", *The Korea Society of Information Technology Conference Proceedings*, pp. 724-725, Jun. 2022.

[6] A. Maatouk, M. Assaad, and A. Ephremides, "Minimizing the age of information in a CSMA environment", *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*, Avignon, France, pp. 2637-2650, Apr. 2019. <https://doi.org/10.23919/WiOPT47501.2019.9144109>.

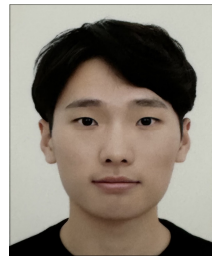
[7] S. Cho, "Rate Adaptation with Q-Learning in CSMA Wireless Networks", *Journal of Information Processing Systems*, Vol. 16, No. 5, pp. 1048-1063, Oct. 2020. <https://doi.org/10.3745/JIPS.03.0148>.

[8] Q. Liu, C. Li, and S. Kompella, "Ao 2 I: Minimizing age of outdated information to improve freshness in data collection", *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, London, United Kingdom, pp. 2637-2650, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM48880.2022.9796932>.

[9] S. Kriouile and M. Assaad, "Minimizing the age of incorrect information for real-time tracking of markov remote sources", *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Melbourne, Australia, pp. 2637-2650, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISIT45174.2021.9518209>.

## 저자소개

김 지 훈 (Ji-Hoon Kim)



2020년 3월 ~ 현재 :  
경상국립대학교 컴퓨터공학과  
학사과정  
관심분야 : 5G, 사물인터넷,  
기계학습

김 범 수 (Beom-Su Kim)



2009년 3월 ~ 2016년 2월 :  
경상국립대학교(학사)  
2016년 3월 ~ 2018년 2월 :  
경상국립대학교(석사)  
2018년 3월 ~ 2022년 2월 :  
충남대학교(박사)  
2022년 7월 ~ 2022년 12월 :  
펜실베이니아 주립대학교 연수연구원  
2023년 9월 ~ 현재 : 경상국립대학교 컴퓨터공학과  
조교수  
관심분야 : 5G/6G, 에드혹 네트워크, 사물인터넷,  
기계학습