

# PHY/MAC 계층을 모두 고려한 RFID Gen-2 시스템의 간섭 분석

## Interference Analysis of RFID Gen-2 System Considering Both PHY and MAC Layers

윤현구·최선웅\*·장병준\*

Hyungoo Yoon · Sunwoong Choi\* · Byung-Jun Jang\*

### 요약

본 논문에서는 리더간 간섭이 EPCglobal Generation-2(Gen-2) RFID(Radio Frequency Identification) 시스템의 성능에 미치는 영향을 물리 계층과 MAC 계층을 모두 고려하여 분석하였다. 이를 위해 기존의 태그 충돌만을 고려한 Gen-2 프로토콜 성능 분석 연구에 리더간 간섭을 추가하여, 실제 UHF RFID 시스템 운용 상황과 유사한 환경에서 성능을 분석할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안한 모델은 DTMC(Discrete Time Markov Chain) 모델에 다른 리더에 의해 발생하는 리더간 간섭 확률을 결합한 것으로, 간섭 리더의 수에 따른 QSR(Query Success Rate)와 TIS(Tag Identification Speed)의 변화를 정량적으로 분석할 수 있다. 시뮬레이션을 검증하기 위하여 이론치와 비교한 결과, 100개 이상의 태그를 갖는 경우 이론치와 차이를 보이지 않았다. 분석 결과, EPCglobal Gen-2 프로토콜에서 간섭 리더 1기당 TIS가 10 tags/sec씩 감소되는 것을 확인하였다.

### Abstract

This paper investigates the performance of EPCglobal Generation-2(Gen-2) radio frequency identification(RFID) protocol under reader-to-reader interfering environments. We establish a modified discrete-time Markov chain(DTMC) model for the Gen-2 and accordingly obtain quantitative results of query success rate(QSR) and tag identification speed (TIS). Extensive simulations validate our theoretical analysis and demonstrate that the number of tags over 100 has little impact on the performance. TIS linearly decreases by 10 tags/sec/reader as the number of interfering readers increases. Our model for Gen-2 protocol is also useful to study the performance of other RFID protocols.

Key words : UHF RFID, EPCglobal Gen-2 Protocol, Reader-to-Reader Interference, Markov Chain Model

### I. 서론

사물에 부착된 태그를 통해 그 정보를 인식하는 RFID(Radio Frequency Identification) 기술로 인해 물류·유통·의료·환경 등 다양한 u-City(ubiquitous-City) 서비스가 가능하게 되었다. 특히, 전 세계적으로

유통 및 자산관리 부문에서 RFID 도입이 추진되어 RFID 수요는 폭발적인 증가세를 나타내고 있다. 국내 RFID 서비스는 정부 주도로 확산되고 있으며, 특히 2008년 말 방송통신위원회의 국내 900 MHz 대역 주파수 재정비 계획에 따라 RFID/USN(Ubiquitous Sensor Network)에 할당된 주파수를 908.5~914 MHz

「본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(KI001842-2010-03, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발). 연구비 지원에 감사드립니다.」

명지전문대학 컴퓨터전자과Dept. of Computer and Electronic Engineering, Myongji College)

\*국민대학교 전자공학부(Dept. of Electronics Engineering, Kookmin University)

· 논문 번호 : 20100330-032

· 교신저자 : 장병준(e-mail : bjjang@kookmin.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 5월 31일

에서 917~923.5 MHz 확대·이전하였고, 중심 주파수 지정, 밀집 모드 기술 기준, LBT(Listen-Before-Talk) 관련 기술 기준 등을 개정하여 다양한 서비스 개발이 가능하도록 제도적 개선을 이루었다.

일반적으로 RFID 시스템은 응용 서비스의 종류와 목적에 따라 사용 주파수 대역과 인식 방식 등을 다르게 적용한다. u-City에 적용되는 응용 서비스는 긴 인식 거리를 필요로 하기 때문에 UHF(Ultra High-Frequency) 대역의 RF(Radio Frequency) 신호를 사용한다. 그러나 RF 신호를 사용하는 RFID 시스템은 전파의 특성에 의해 발생하는 주파수 간섭을 피할 수 없다. 이에 UHF RFID 시스템의 주파수 간섭에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

UHF RFID의 간섭은 크게 리더간 간섭, 다중 리더에 의한 태그 간섭, 그리고 태그 충돌로 알려진 다중 태그에 의한 리더 간섭으로 분류된다<sup>[1]~[3]</sup>. 태그 충돌은 EPCglobal Gen-2 표준에서 충돌 횟수와 idle 슬롯의 수를 이용해서 능동적으로 슬롯의 길이를 조절하는 적응 Q 알고리즘으로 간섭 회피를 하도록 권고하고 있다<sup>[4]</sup>. 다중 리더에 의한 태그 간섭은 리더의 인식 영역이 중복된 곳에 태그가 존재할 경우에 발생하므로, 시스템 설치 시에 이를 고려하여 리더 위치를 결정하면 간섭을 피할 수 있다. 리더간 간섭은 RFID 주파수 채널이 많지 않거나, 일정한 공간에 많은 리더가 설치된 경우에 발생한다. 리더간 간섭은 UHF RFID 시스템의 성능에 심각한 영향을 주므로 최근 많은 연구가 수행되고 있다.

리더간 간섭을 분석하기 위해, 참고문헌 [5]에서는 피간섭 리더의 수신부에서 태그 신호의 SINR(Signal-to-Noise plus Interference power Ratio)을 이용하여 링크의 성능을 BER(Bit Error Rate)로 나타내었다. 이 연구는 물리 계층에서 간섭이 미치는 영향을 정량화하기 위해 단일 태그를 가정하였기 때문에, 다중 태그에 의한 태그 충돌을 고려해야 하는 RFID 시스템의 태그 인식 속도는 계산할 수 없었다. 반면, 참고문헌 [6]은 태그 충돌을 고려해서 RFID 시스템의 throughput을 분석하였으나, PHY 계층에서 간섭은 고려하지 않았다. 따라서 기존의 연구 결과로는 리더간 간섭이 RFID 시스템 성능에 미치는 영향을 정확하게 분석하기 어렵다. 특히, 리더간 간섭에 의한 RFID 시스템 성능 분석은 물리(PHY) 계층과 MAC 계층을 모두 고려해야 하나, 현재까지 물리 계

층과 MAC 계층을 모두 고려한 연구는 RFID 분석에서는 없었다.

이에 본 논문에서는 리더간 간섭이 UHF RFID 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 PHY와 MAC 계층을 동시에 고려한 간섭 분석 모델을 제안하고, 이를 EPCglobal의 Gen-2(Generation-2) 표준을 적용하여 태그 인식 속도를 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 간섭 분석을 위한 기본 모델로서 EPCglobal Gen-2 프로토콜에서 태그 인식 과정과 통계적 간섭 모델에 대해 기술한다. III장에서는 slotted ALOHA 방식의 성능 분석을 위한 DTMC(Discrete-Time Markov Chain) 모델에 리더간 간섭을 추가한 새로운 모델을 설명한다. 그리고 리더간 간섭 분석을 위한 시나리오 및 관련 파라미터, 간섭에 의한 태그 인식 속도를 분석한 결과를 IV장에 나타내었다. 마지막으로 본 논문의 결론과 향후 연구 방향을 V장에서 기술하였다.

## II. RFID 시스템 모델

EPCglobal Gen-2 프로토콜은 860~960 MHz의 UHF 대역을 사용하는 수동 RFID 시스템의 PHY와 MAC 계층에 대한 무선 접속 규격으로, 이전 규격에 비해 유연하고 빠른 태그 인식 속도가 특징이다. Gen-2 프로토콜에서 리더는 적응 슬롯 카운트(adaptive slot count) 알고리즘을 사용하므로, 리더간 간섭에 의한 Gen-2 프로토콜의 성능 저하를 분석하기 위해서는 리더의 태그 인식 과정과 적응 슬롯 카운트 알고리즘 및 리더간 간섭이 발생할 확률에 대한 계산이 필요하다.

### 2-1 Slotted ALOHA

Gen-2 프로토콜에서 리더가 다수의 태그를 인식하기 위해, slotted ALOHA 방식을 사용한다. 각각의 태그들은 랜덤하게 자신의 슬롯 번호를 선택하고, 슬롯 번호가 0인 태그는 응답하고, 나머지 태그는 자신의 차례를 기다림으로써 서로 충돌을 회피하여 리더와 통신한다.

이를 위해 리더는 inventory round를 반복하면서 태그를 인식하며, inventory round는 리더가 연속적으로 송신하는 Query 간의 간격을 의미한다. 일반적으로 Query는 inventory round의 시작 부분에서 전송되

며, 태그로부터의 응답이 일정 기간 동안 없을 경우에 새로운 inventory round의 시작을 나타내기 위해 전송된다. 그리고 각각의 inventory round에서 리더는 태그를 인식하기 위해 QueryRep나 QueryAdjust를 송신한다. Query에는 임의의 양의 정수  $Q$ 값이 존재하여, 이를 받은 모든 태그들은  $[0, 2^Q - 1]$  범위에서 균일한 분포를 갖는 랜덤한 정수 중에 임의의 값을 자신의 슬롯 번호로 선택하고, 슬롯 번호가 0인 태그만 응답한다. QueryAdjust는  $Q$ 값을 바꿔야할 경우에 사용되는 command로, 태그들은 Query와 마찬가지로 새로 지정된  $Q$ 값에 따라 자신의 슬롯 번호를 다시 선택한다. QueryRep는 모든 태그들이 자신의 슬롯 번호를 1씩 감소시키는 command이다.

그림 1은 slotted ALOHA 방식의 태그 인식 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림 1에서 (a)는 리더가 송신한 query(Query, QueryRep, QueryAdjust)에 대해 단일 태그가 RN16(16-bit Random or Pseudo Random Number)을 리더에 송신하고, 이를 받은 리더는 모든 태그에게 ACK(Acknowledge)를 보내지만

RN16에 해당하는 태그만이 EPC(Electronic Product Code)를 리더에게 전송하여 인식되는 과정을 나타낸다. 이 경우, 태그를 인식하는데 소요되는 시간( $T_{succ}$ )은 식 (1)처럼 계산할 수 있다.

$$T_{succ} = 2 \times (T_1 + T_2) + T_q + T_{RN} + T_{ACK} + T_{EPC} \quad (1)$$

여기서  $T_q$ 는 Query, QueryRep 혹은 QueryAdjust command의 시간을,  $T_{RN}$ ,  $T_{ACK}$ ,  $T_{EPC}$ 는 각각 RN16, ACK, EPC command의 시간 구간을 의미한다. 그림 1의 (b)는 두 개 이상의 태그가 리더의 command에 RN16을 전송하여 충돌이 발생한 경우를 나타내며, 충돌 발생에 따른 시간  $T_{col}$ 은 식 (2)와 같다.

$$T_{col} = T_1 + T_2 + T_q + T_{RN} \quad (2)$$

그림 1(c)는 리더의 command에 대한 태그 응답이 없는 경우로서, 시간  $T_{idle}$ 은 식 (3)과 같다.

$$T_{idle} = T_1 + T_3 \quad (3)$$

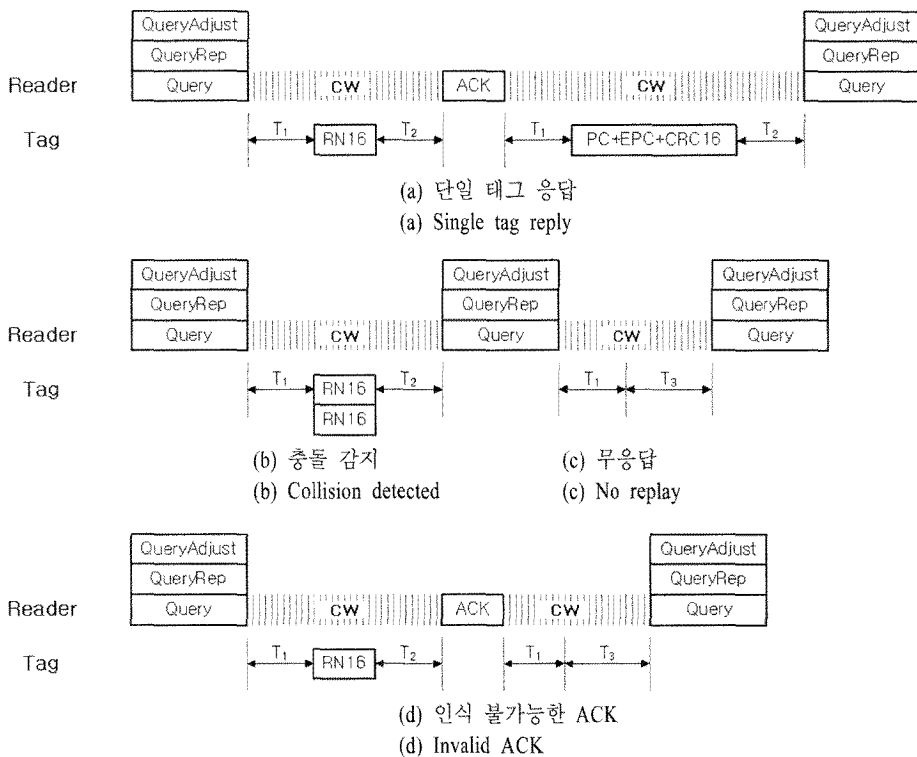


그림 1. Gen-2 프로토콜에서 태그 인식 과정 및 link timing<sup>[4]</sup>  
 Fig. 1. Tag identification process and link timing in Gen-2 protocol<sup>[4]</sup>.

그림 1(d)는 RN16은 정상적으로 단일 태그가 응답하였으나, 태그의 EPC 정보 송신에 문제가 발생한 경우를 나타낸다. 이 경우는 RN16과 EPC 전송 시간 차이에서 채널의 변화가 발생한 경우로 해석할 수 있으나, UHF RFID의 경우는 고속 이동에 따른 채널의 시간에 따른 변화가 크지 않아 본 논문에서는 이를 고려하지 않았다.

## 2-2 Adaptive Q Algorithm

Slotted ALOHA를 사용하는 Gen-2 프로토콜에서 태그가 응답할 수 있는 슬롯의 수가 크면 충돌이 발생할 확률은 작지만, 리더가 태그를 인식하지 못하는 idle 구간이 많아져서 태그 인식 시간이 커진다. 반대로 슬롯의 수가 태그 수에 비해 작으면 잦은 충돌로 인해 인식 시간 역시 커지게 된다. 따라서 슬롯의 수를 결정하는  $Q$ 값을 태그 수에 따라 적절히 조정해야 태그 인식 시간을 줄일 수 있다. 그러나 리더는 자신이 인식해야 할 전체 태그의 수를 알 수 없다. 이에 Gen-2 프로토콜은 태그 충돌과 idle slot의 수를 사용하여  $Q$ 값을 조절하는 알고리즘을 제안하였고, 이는 그림 2에 나타나 있다.

그림 2에서  $Q_{fp}$ 는 소수점으로 표현된  $Q$ 값이고,  $c$ 는  $Q_{fp}$ 의 증감을 나타내는 값으로  $0.1 < c < 0.5$ 이다.  $Q_{fp}$ 의 초기값을 4.0으로 하고, 충돌이 일어나면  $Q_{fp}$  값을  $c$ 만큼 증가시키고, 충돌이 일어나지 않으면  $c$ 만큼 감소시키는 알고리즘이다.  $Q_{fp}$  값의 최대값은  $Q_{max}$  값으로 충돌이 더 발생해도 더 이상  $Q_{fp}$  값은 증가하지 않는다. 그리고  $round()$ 는 소수점 첫째 자리에서 반

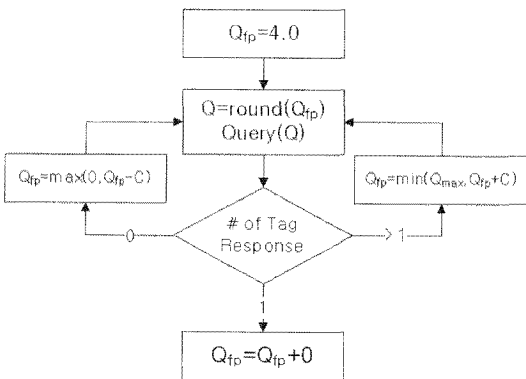


그림 2. 적응  $Q$  알고리즘  
Fig. 2. Adaptive  $Q$  algorithm.

올림하는 함수이다.

## 2-3 간섭 확률

UHF RFID 시스템에서 다른 리더에 의한 주파수 간섭은 다수의 리더가 밀집된 공간에 존재하는 경우에 발생하며, 이에 따른 RFID 역방향 링크의 성능 저하는 참고문헌 [5], [7], [8] 등에서 이미 연구되었다. 본 논문에서는 리더간 간섭이 RFID 시스템의 throughput에 미치는 영향에 대해 분석하기 위해, 참고문헌 [9]의 모델을 사용한다.

간섭 모델은 그림 3과 같이 피간섭원 주위로 반경  $r_{min}$ 인 원 내부에는 간섭원이 없고,  $r_{min} < r < R$ 인 고리모양 영역에 간섭원이 공간적으로 균일한 분포를 갖는다고 가정한 모델이다.

그림 3의 모델에서 단일 간섭원을 가정할 때, 간섭 전력의 누적 확률 밀도 함수(CDF: Cumulative probability Density Function)는 식 (4)로 표현된다<sup>[9]</sup>.

$$\Pr\{I_{int} < I\} = \exp\{-\pi \rho_u r_{min}^2 ((I/I_{max})^{-2/\gamma} - 1)\} \quad (I \leq I_{max}) \quad (4)$$

여기서  $\rho_u$ 는 간섭원의 면적 밀도를,  $I_{max}$ 는 최대 간섭 전력으로 그림 3에서 간섭원까지의 거리  $d$ 가  $r_{min}$ 일 때의 간섭 전력을 의미한다.

## III. Discrete-Time Markov Chain Model

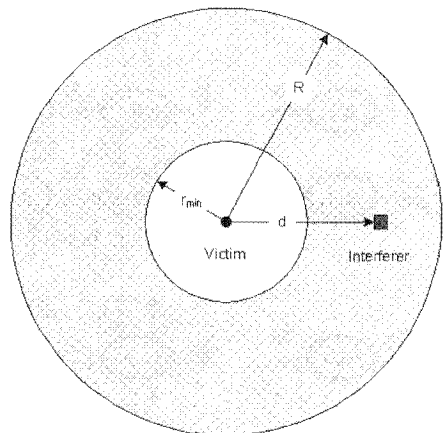


그림 3. 간섭원의 공간 분포  
Fig. 3. Spatial distribution of interferers.

본 논문에서는 리더의 query에 대한 태그의 응답을 다음의 세 가지 경우로 분류한다.

- Success : 리더의 query에 단일 태그만 응답하고, 다른 리더에 의한 간섭이 없어 태그의 정보를 인식하는데 성공하는 경우
- Idle : 리더의 query에 태그 응답이 없는 경우
- Collided : 리더의 query에 하나 이상의 태그가 동시에 응답하거나 다른 리더가 동일 주파수를 사용하여, 해당 리더가 태그 정보를 인식하지 못하는 경우

Gen-2 프로토콜은 태그 응답에 따라 적응 Q 알고리즘을 사용하므로, Q의 현재 값  $q$  ( $Q_{min} \leq q \leq Q_{max}$ )와 남은 태그의 수  $n$  ( $0 \leq n \leq N$ )도 query에 대한 태그 응답의 경우에 따라 변하게 된다. 여기서  $Q_{max}$ 는 q의 최대값을  $Q_{min}$ 은 q의 최소값을 결정하는 인수로 Gen-2에서는 각각 15와 0이고, N은 inventory round에서 리더가 인식해야 하는 태그의 수를 의미한다.

그림 4는 Gen-2 프로토콜에서 리더가 태그를 인식하는 과정을 DTMC(Discrete-Time Markov Chain)로 모델링한 것이다. 리더와 태그의 상태(state)는 두 변수( $q, n$ )에 의해 결정되고, 표 1에 나타난 이벤트에 따라 상태 천이가 발생한다.

표 1에 태그 인식 과정에서 발생할 수 있는 이벤트들을 정리하였다.

그림 4에서  $Q_{min} < q < Q_{max}$  이고  $0 < n \leq N$  일 때

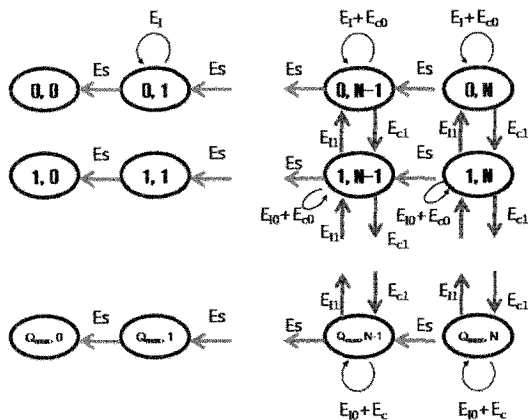


그림 4. 이산 시간 Markov chain 모델  
Fig. 4. Discrete-time Markov chain model.

표 1. 태그 인식 과정에서의 이벤트 종류  
Table 1. Events in the tag identification process.

이벤트	설명
$E_s$	리더의 query에 단일 태그가 응답하고, 다른 리더에 의한 간섭이 없어 태그 인식에 성공한 경우
$E_{i0}$	리더의 query에 응답한 태그가 없고, 다른 리더에 의한 간섭이 없을 때, 적응 Q 알고리즘 적용 후 q값이 변경되지 않은 경우
$E_{i1}$	리더의 query에 응답한 태그가 없고, 다른 리더에 의한 간섭이 없을 때, 적응 Q 알고리즘 적용 후 q값이 변경된 경우
$E_I = E_{i0} \cup E_{i1}$	모든 태그가 응답하지 않은 경우
$E_{C0}$	리더의 query에 하나 이상의 태그가 응답하거나 리더간 간섭이 발생했을 때, 적응 Q 알고리즘 적용 후 q값이 변경되지 않은 경우
$E_{C1}$	리더의 query에 하나 이상의 태그가 응답하거나 리더간 간섭이 발생했을 때, 적응 Q 알고리즘 적용 후 q값 변경된 경우
$E_C = E_{C0} \cup E_{C1}$	충돌이 발생한 경우

이벤트에 따라 q와 n이 증가 또한 감소한다.

- $E_s$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n-1)$
- $E_{i1}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q-1, n)$
- $E_{C1}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q+1, n)$
- $E_{C0} + E_{i0}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n)$

그리고  $q = Q_{min}$  이고,  $0 < n \leq N$  일 때는 idle slot이 계속 발생해도 더 이상 q값이 감소하지 않는다.

- $E_s$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n-1)$
- $E_{C1}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q+1, n)$
- $E_{C0} + E_I$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n)$

$q = Q_{max}$  이고,  $0 < n \leq N$  일 때는 충돌이 일어나도 q값이 증가하지 않는다.

- $E_s$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n-1)$
- $E_{i1}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q-1, n)$
- $E_C + E_{i0}$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n)$

$Q_{min} < q < Q_{max}$  이고,  $n=1$  일 때 충돌이 발생하지 않으므로 q값이 증가하지 않는다.

- $E_s$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n-1)$
- $E_n$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q-1, n)$
- $E_0$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n)$

$q = Q_{\min}$  이고,  $n=1$ 일 때 idle slot이 증가해도 더 이상  $q$ 값이 감소하지 않는다.

- $E_s$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n-1)$
- $E_l$  : 상태 천이  $(q, n) \rightarrow (q, n)$

마지막으로  $n=0$ 이면 모든 태그를 인식한 경우이므로 상태 천이는 발생하지 않는다.

그림 4에서 각각의 상태는 모두 바로 이전의 상태에 의해 결정되며, 모든 상태 천이는 과거의 천이결과가 현재에 영향을 미치지 않는 memoryless 특성을 갖는다. 따라서 확률 및 통계 프로세스 이론에 따라 태그 인식 과정은 유한한 상태를 갖는 2차원 DTMC로 모델링 될 수 있으며, 표 1의 이벤트에 따라 상태 천이가 발생한다. 각각의 이벤트에 대한 확률은 참고문헌 [6]에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Pr\{E_s\} = p_s(q, n) \quad (5)$$

$$\Pr\{E_n\} = (1-c) \times p_n(q, n) \quad (6)$$

$$\Pr\{E_0\} = c \times p_0(q, n) \quad (7)$$

$$\Pr\{E_{c0}\} = (1-c) \times p_c(q, n) \quad (8)$$

$$\Pr\{E_{c1}\} = c \times p_c(q, n) \quad (9)$$

$$\Pr\{E_l\} = \Pr\{E_n\} + \Pr\{E_0\} = p_n(q, n) \quad (10)$$

$$\Pr\{E_c\} = \Pr\{E_{c0}\} + \Pr\{E_{c1}\} = p_c(q, n) \quad (11)$$

여기서  $p_s(q, n)$ ,  $p_n(q, n)$ ,  $p_c(q, n)$ 은 상태  $(q, n)$ 에서 query command에 대한 태그의 응답이 각각 success, idle, collided일 확률을 각각 의미한다. 그리고  $k$ 번째 query command에 대한 응답이 success, idle, collided일 확률은  $p_s^k(q, n)$ ,  $p_n^k(q, n)$ ,  $p_c^k(q, n)$ 으로 표현한다. 태그의 수  $N$ 과 슬롯카운터의 크기  $2^q$ 값이 클 경우, 각각의 이벤트 확률은  $k$ 에 무관하다고 가정할 수 있다<sup>[6]</sup>. 만약  $n$ 개의 태그가  $[0, 2^q]$  범위에서 균일(uni-form)한 랜덤 슬롯 번호를 선택한다고 가정하면, 모든  $k$ 에 대해서 success, idle, collided 응답 확률은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} p_s^k(q, n) &= p_s(q, n) \\ &= n C_1 (1/2^q) (1-1/2^q)^{n-1} (1-p_{int}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$p_n^k(q, n) = p_n(q, n) = (1-1/2^q)^n (1-p_{int}) \quad (13)$$

$$p_c^k(q, n) = p_c(q, n) = 1 - p_s(q, n) - p_n(q, n) \quad (14)$$

여기서  $p_{int}$ 는 다른 리더에 의해 간섭이 발생할 확률로, 주파수 hopping 방식의 RFID 시스템의 경우에는 동일한 주파수를 사용하는 다른 리더에 의한 간섭 전력( $I_{int}$ )이 허용간섭 전력 기준( $I_{th}$ )보다 클 확률을 의미하며, 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} p_{int} &= \Pr\{I_{int} > I_{th}\} \\ &= \frac{1 - \exp\{-\pi \rho_q r_{\min}^2 ((I_{th}/I_{\max})^{-2/\gamma} - 1)\}}{N_{FH}} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $N_{FH}$ 는 주파수 hopping 채널수를 의미한다.

따라서 단일 query에 대한 평균 태그 인식 속도 (TIS: Tag Identification Speed)는 식 (1)~(3)과 식 (12)~(14)를 이용하여 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$TIS = \frac{\Pr\{E_{sj}\}}{\Pr\{E_{sj}\}T_{succ} + \Pr\{E_{lj}\}T_{idle} + \Pr\{E_{cj}\}T_{col}} \quad (16)$$

식 (16)에서 각각의 이벤트 확률은 리더의 상태  $(q, n)$ 에 따라 다르므로, 참고문헌 [6]에서처럼 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 계산하며, 사용 시뮬레이션 툴은 MATLAB을 이용하였다. RFID Gen-2 시스템은 주파수 hopping을 사용하므로, 각각의 간섭 리더는 4초 간격으로 6개의 채널에서 랜덤하게 임의의 채널을 선택하여 신호를 송신하도록 모델링 하였다. 그리고 인접 채널 간섭은 참고문헌 [4]에 주어진 MRM 스펙트럼 마스크를 사용하여 리더의 대역외 방사 전력을 계산하고, 이를 모두 더하여 전체 간섭 전력을 계산한다.

#### IV. 간섭 분석 결과

EPCglobal Gen-2 프로토콜에서 리더간 간섭이 시

표 2. 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Simulation parameters.

파라미터	값
# of FH channel	6
Mode	Multiple reader
$T_{ari}$	25 $\mu$ s
$RT_{cal}$	2.5 $\cdot T_{ari}$
$TR_{cal}$	3 $\cdot TR_{cal}$
DR	8
LF	125 kHz
$T_{pri}$	1/LF
Delimiter	12.5 $\mu$ s
RTPreamble	Delimiter+data0+ $RT_{cal}$ + $TR_{cal}$
RTFrameSync	Delimiter+data0+ $RT_{cal}$
RTrate	64 kbps
TRPreamble	6 $\cdot T_{ari}$
TREndSignal	2 $\cdot T_{ari}$
$T_1$	max( $RT_{cal}$ , 10 $\cdot T_{ari}$ )
$T_2$	5 $\cdot T_{ari}$
$T_3$	5 $\cdot T_{ari}$
$nQuery$	22
$nQueryAdjust$	9
$nQueryRep$	4
$nRN16$	16
$nACK$	18
$nEPC$	16+64+16
$P_{TX}$	4 W EIRP
$I_{th}$	-74.7 dBm
Pathloss exponent, $\gamma$	4.0
$r_{min}$	10 m
R	1 km

스텝 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션 파라미터를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 TR은 태그에서 리더로의 데이터 전송 방향을, RT는 리더에서 태그로의 데이터 전송 방향을 의미한다.  $T_{ari}$ 는 리더에 송신하는 데이터-0의 시간 간격을,  $RT_{cal}$ 과  $TR_{cal}$ 은 리더에서 태그로 전송하는 모드 시그널의 preamble에 있는 calibration 심볼들의 길이를 의미하고, Delimiter는 preamble을 구분하기 위한 심볼로서 preamble의 처음에 위치한다. LF는 link frequency를,

DR은 divide ratio를 나타낸다.  $nQuery$ ,  $nQueryAdjust$ ,  $nQueryRep$ ,  $nRN16$ ,  $nACK$ ,  $nEPC$ 는 각각 Query, QueryAdjust, QueryRep, RN16, ACK, EPC 데이터의 길이를 나타낸다.  $P_{TX}$ 는 리더의 최대 송신 전력을 의미하고,  $\gamma$ 는 경로 손실 지수를 의미한다.

그림 5는 간섭이 없는 경우, TIS와 QSR에 대한 이론과 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 시뮬레이션값은 공간적으로 균일한 분포를 갖는 간섭 리더가 존재할 때, Slotted ALOHA 방식의 UHF RFID 시스템에서 리더가 태그를 인식하는 과정을 Monte Carlo 시뮬레이션 방법에 의해 계산한 것으로, 사용 파라미터는 표 2의 값을 사용하여 얻은 결과이다. 가로축은 태그의 수를, 세로축은 각각 TIS와 QSR을 의미한다. 그림에서 실선은 이론값을 '+'가 시뮬레이션 값을 나타낸다. 태그의 데이터율에 따라 TIS는 차이가 분명하지만 QSR은 차이가 없으며, 태그의 수 100개 이상에서 TIS와 QSR은 값이 거의 수렴하여 일정함을 알 수 있다. TIS는 태그의 데이터율이 낮을수록 이론과 시뮬레이션이 일치하고, QSR의 이론 및 시뮬레이션 결과는 태그 데이터율에 상관없이 2~3 % 내외의 차이를 보이고 있다.

그림 6은 간섭 리더의 수에 따른 TIS와 QSR 그래

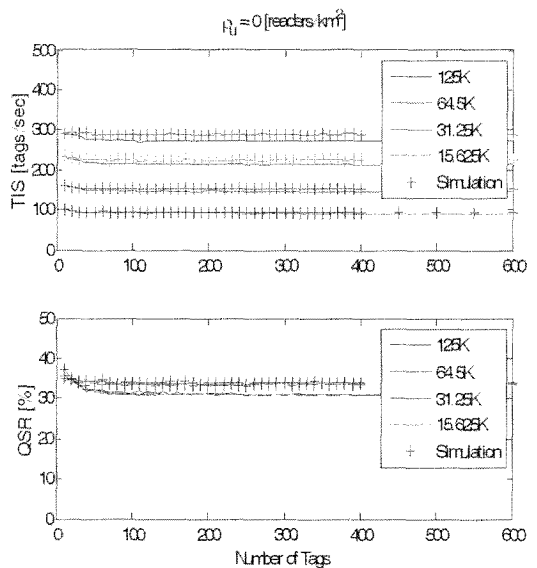


그림 5. 태그 수에 따른 TIS와 QSR  
Fig. 5. TIS and QSR according to a number of tags (solid line: theory, +: simulation).

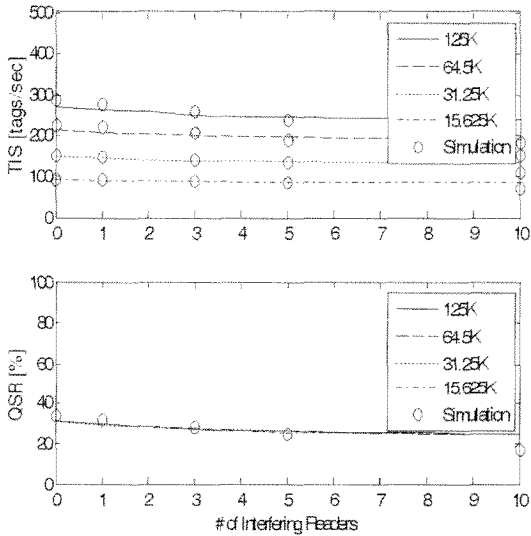


그림 6. 간섭 리더의 수에 따른 TIS와 QSR  
Fig. 6. TIS and QSR according to a number of interfering readers.

프를 보여주고 있다. 태그의 수는 그림 5에서 태그 수에 따른 성능 변화가 거의 없는 500개로 설정하였다. 가로축은 간섭 리더의 수를 의미하며, 세로축은 그림 5와 동일하게 TIS와 QSR을 의미한다. TIS와 QSR 모두에서 이론과 시뮬레이션 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 리더간 간섭으로 피간섭 리더에서는 태그 인식 확률이 감소되기 때문에 QSR이 0.7%/interfering reader 감소하고, 이로 인해 TIS가 10 Tags/sec/interfering reader로 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

따라서 UHF RFID 시스템 설치 시에, 반경 10 m의 보호 영역을 두고, 반경 1 km 내에 간섭 리더가 존재하면 리더 1개당 태그 인식 속도를 10 tags/sec 저하시킴으로 이를 감안하여 리더를 설치하여야 한다.

## V. 결 론

리더간 간섭이 UHF RFID 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 PHY과 MAC 계층을 동시에 고려한 간섭 분석 모델을 제안하였다. 제안한 모델은 PHY 계층에서 리더간 간섭을 확률로 모델링하고, EPCglobal Gen-2 프로토콜의 throughput 분석을 위한 DTMC 모델에 간섭 확률을 적용한 모델이다. 제안한 간섭 분석 모델을 이용하여 TIS와 QSR을 계

산하였고, 이론과 시뮬레이션 모두 2~3% 내외로 일치함을 확인하였다. 간섭 리더에 의한 영향은 간섭 리더 1개당 태그 인식 속도 10 tags/sec를 저하시키는 효과를 보이고 있으며, 실제 RFID 리더 설치 시에 이를 감안하여 위치와 출력 등을 설정해야 UHF RFID 시스템이 적정 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Sarma, D. Brock, and D. Engels, "Radio frequency identification and the electronic product code", *IEEE Micro*, vol. 21, no. 6, pp. 50-54, Nov./Dec. 2001.
- [2] W. Engels, E. Sarma, "The reader collision problem", in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern.*, vol. 3, pp. 92-97, 2002.
- [3] B. Carbutar, M. K. Ramanathan, M. Koyuturk, C. Hoffman, and A. Grama, "Redundant reader elimination in RFID systems", in *Proc. 2nd Annu. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor Ad Hoc Commun. Netw.*, pp. 176-184, 2005.
- [4] EPCglobal, EPC Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860~960 MHz Version 1.0.9, EPC-global Standard Specification, 2004.
- [5] D. Y. Kim, B. J. Jang, H. G. Yoon, J. S. Park, and J. G. Yook, "Effects of reader interference on the RFID interrogation range", in *Proc. 37th EuMC*, pp. 728-731, Oct. 2007.
- [6] C. Wang, M. Daneshmand, K. Sohraby, and B. Li, "Performance analysis of RFID generation-2 protocol", *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 8, no. 5, pp. 2562-2601, May 2009.
- [7] D. Y. Kim, H. G. Yoon, B. J. Jang, and J. G. Yook, "Interference analysis of UHF RFID systems", *Progress Electromag. Res. B*, vol. 4, pp. 115-126, 2008.
- [8] D. Y. Kim, H. G. Yoon, B. J. Jang, and J. G. Yook, "Effects of reader-to-reader interference on the UHF RFID interrogation range", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2337-2346, Jul. 2009.



[9] Jay E. Padgett, Robert A. Ziegler, "Analysis of the interference temperature concept to support spec-

trum sharing between licensed services and unlicensed devices", *Telcordia Technologies*, 2004.

윤 현 구



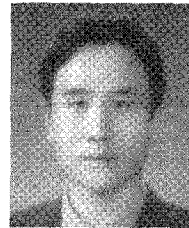
1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2002년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
2002년~2004년: (주)현대시스콤 선

임연구원

2004년~현재: 명지전문대학 컴퓨터전자과 부교수

[주 관심분야] 디지털 통신, 무선 자원 관리, MIMO 채널 모델링, RFID/USN

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수  
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로(MMIC, Hybrid), 무선 통신 시스템, RFID/USN

최 선 응



1998년: 서울대학교 전산과학과 (공학사)  
2000년: 서울대학교 전산과학과 (공학석사)  
2005년: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (공학박사)  
2005년 9월~2007년 2월: 삼성전자

정보통신총괄 책임연구원

2007년 3월~현재: 국민대학교 전자공학부 전임강사

[주 관심분야] 무선 네트워크, 네트워크 자원 관리, 시스템 성능 평가