Adaptive Frequency Hopping 을 사용하는 블루투스 피코넷의 패킷 간섭과 통합 처리량 분석

김승연*, 조충호**, 이형우*
*고려대학교 전자정보공학과
**고려대학교 컴퓨터 정보학과
e-mail : kimsy8011@korea.ac.kr

An Analysis of Packet Interference and Aggregated Throughput Using an Adaptive Frequency Hopping in Bluetooth Piconets

Seung-Yeon Kim*, Choong-Ho Cho**, Hyong-Woo Lee*
*Dept. of Electronics and Information Engineering, Korea University
**Dept. of Computer and Information Science, Korea University

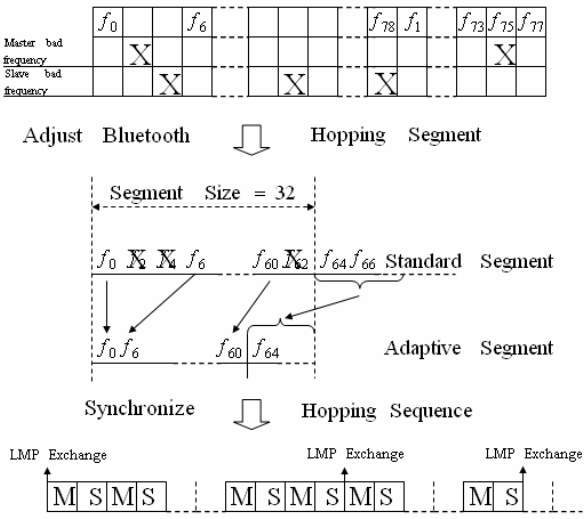
요 약

본 논문에서는 Adaptive Frequency Hopping (AFH) 알고리즘을 사용하는 블루투스로 이루어진 피코넷이 Wireless Local Area Network (WLAN) 과 공존할 때 피코넷(Piconet) 패킷(Packet)간의 충돌(Interference) 과 통합 처리량을 분석하였다. 동일한 주파수 대역의 Unlicensed ISM(Industrial, Scientific, Medical) Band 를 사용하는 WLAN 은 22MHz 대역을 사용하기 때문에 AFH 알고리즘을 사용하는 블루투스와 공존할 경우 WLAN 의 개수에 따라 홉 수가 달라진다. 본 논문에서는 멀티플 슬롯(Multiple-slot) 패킷을 사용하는 피코넷 클러스터(Piconet Cluster)의 패킷 충돌 모델을 가지고 AFH 알고리즘에 의해 서로 다른 홉(hop) 수를 갖게 된 피코넷의 패킷 충돌 확률과 통합 처리량을 전체 피코넷의 수를 증가시키면서 분석하였다.

1. 서론

블루투스나 IEEE 802.11b 표준은 WPAN 과 WLAN 를 위한 가장 대중적인 기술이다. 그러나 동일한 Unlicensed ISM Band 를 사용하기 때문에 한 공간에서 블루투스와 IEEE 802.11b 를 같이 사용했을 경우 각각의 패킷 전송이 있어서 충돌이 발생하게 된다. 예를 들어 몇 미터 떨어진 곳에 AP(access point)를 놓고 WLAN 을 사용하면서 블루투스 헤드 셋이나 PDA 를 사용하는 경우 동일한 2.4GHz 에서 2.48GHz 중 선택된 22MHz 의 Band 에서 WLAN 이 작동하고 블루투스는 홉핑(hopping)패턴에 의해 임의(Random)로 주파수를 바꾸게 된다. 이때 두 디바이스(Device)의 주파수가 같게 되면 패킷 충돌이 발생하게 된다. IEEE 802.15[1]의 Coexistence Task Group[2]에서는 블루투스와 WLAN 과 주파수간 패킷 충돌을 줄이기 위해서 블루투스에 AFH[3]방식을 제안하였다.

블루투스 피코넷에서는 마스터가 채널을 컨트롤하는데[4] 피코넷은 독립적인 마스터들을 조절해 주는 장치가 없기 때문에 한 공간에 여러 개의 피코넷이 공존할 경우 블루투스 패킷 간의 충돌이 발생하게 된다. 공항, 국제회의, 쇼핑몰 등과 같이 한 공간 안에 많은 사람들이 밀집된 곳에서 모바일 폰이나 헤드 셋을 사용했을 경우 발생할 수 있다. 특히 AFH 알고리즘을 갖는 블루투스를 WLAN 을 사용하는 공간에서 사용한다면 블루투스 간 패킷 충돌은 더 자주 발생하게 될 것이다. 패킷의 충돌은 피코넷의 처리량에 영향을 주기 때문에 그에 대한 연구는 중요



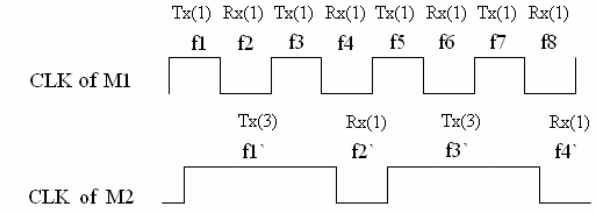
(그림 1) Adaptive Frequency Hopping

하다. 본 논문에서는 멀티플 슬롯 패킷을 사용하는 피코넷 클러스터의 패킷 충돌 모델을 가지고 AFH 알고리즘에 의해 서로 다른 홉 수를 갖게 된 피코넷의 패킷 충돌 확률과 통합 처리량을 분석하였다.

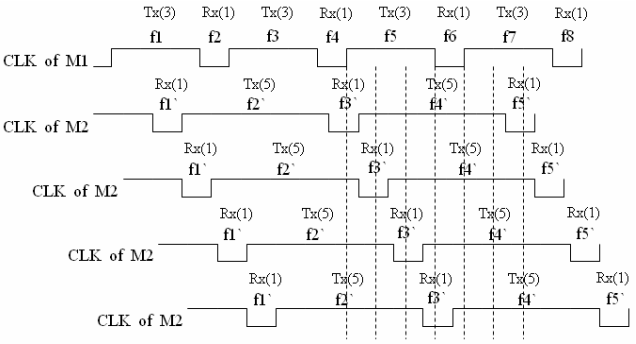
2. 관련연구

2-1 AFH (Adaptive Frequency Hopping) [5]

일반적으로 블루투스 전송 채널은 625μs 슬롯(Slot) 79 개로 나눈다. 그리고 마스터의 패킷 전송은 슬롯의 홀수 번째에 이루어진다. 각각의 패킷은 최대 주파수 홉핑률(Maximum Frequency Hopping Rate) 1600hops/s 로 다른 홉핑 주파수로 전송된다. AFH 알고리즘 적용 블루투스의 경우 2.402-2.480GHz 주파수 범위에서 짝수 주파수와 홀수 주파수로 분류한다. 마스터가 전송할 수 있는 홀수 주파수만을 본다면 분류된 주파수에서 처음 32 개의 주파수를 선택한다. 그리고 선택된 주파수에서 16 개의 주파수를 선택한다. 처음 32 개의 주파수를 선택하고 남아있던 주파수에서도 16 개를 선택하여 총 32 개의 주파수를 결정한다. 선택된 32 개의 주파수에는 Good 주파수와 Bad 주파수가 있는데 (Good 주파수=채널의 간섭이 없거나, 채널상태가 좋은 주파수, Bad 주파수=채널의 간섭이 있거나, 채널상태가 좋지 않은 주파수) 이때 그림 1 에서 보는 것처럼 AFH 알고리즘에 의해 Bad 주파수를 Good 주파수로 대체하게 된다. AFH 와 원래의 블루투스 홉핑 세그먼트 알고리즘(Bluetooth hopping segment algorithm)과 차이는 선택된 32 개의 채널을 Good 주파수로 채운다는 것이다. AFH 알고리즘을 적용한 블루투스를 사용할 때 Bad 주파수가 많을 경우 그 세그먼트 안에 Good 주파수가 너무 적은 상황이 발생하게 되는데 최근 FCC (Federal Communications Commission)에서는 적어도 15 개 이상의 다른 주파수를 사용하도록 되어있다. 주파수 패턴의 변화는 마스터와 슬래이브(Slave) 간의 LMP(Link Management Protocol) 메시지의 교환으로 이루어진다



(그림 2) 1 과 3 슬롯 패킷을 갖는 비대칭 비 동기간 간섭



(그림 2) 3 과 5 슬롯 패킷을 갖는 비대칭 비 동기간 간섭

2-2 충돌확률 [6]

피코넷이 갖는 주파수 홉 수를 s 라 한다면 그림 2 에서 1 슬롯을 갖는 마스터 1(M1)가 3 슬롯을 갖는 마스터 2(M2)에 의해 충돌이 발생할 확률(p_{13})은 마스터 1 가 f1 의 주파수 동안 마스터 2 의 주파수와 같을 확률은 2/s 이다. 마스터 1 가 f2 의 주파수 동안 마스터 2 의 주파수와 충돌할 확률은 1/s 이다. 같은 과정으로 f3 일 경우는 1/s, f4 일 경우는 2/s 이다. 4 가지 경우의 평균을 구하면 (2/s +1/s +1/s +2/s)/4=3/2s 가 된다. 반대로 마스터 2 가 마스터 1 에 의해 충돌이 발생할 확률(p_{31})은 마스터 2 가 f1`의 주파수 동안 마스터 1 의 주파수와 같을 확률은 4/s 이다. 마스터 2 가 f2`주파수 동안 마스터 1 의 주파수와 같을 확률은 2/s 이다. 두 경우의 평균을 구하면 (4/s+ 1/s)/2=3/s 가 된다. 앞에서 p_{13}, p_{31} 을 구한 것과 같은 방식으로 그림 3 의 p_{35}, p_{53} 을 구하면 각각 5/3s, 5/2s 가 된다. 나머지 다른 슬롯을 갖는 경우의 확률을 구하면 p_{11}, p_{33}, p_{55} = 1/s, p_{15} = 1/s, p_{51} = 5/s 가 된다. 앞에서 구한 식들은 두 개의 마스터가 동종(Homogeneous)간의 경우를 가지고 생각했다. 두 개의 마스터가 이종(Heterogeneous)간의 경우 주파수 홉 수 s 를 결정할 때 둘 중 홉 수가 큰 마스터의 홉 수를 따르게 된다. 예를 들어 79 개의 홉을 갖는 마스터 1 과 23 개의 홉을 갖는 마스터 2 가 있다면 p_{11}, p_{33}, p_{55} = 1/79, p_{13} = $3/(2\times 79)$, p_{31} = 3/79, p_{15} = $3/(2\times 79)$, p_{51} =4/79, $p_{35}=5/(3\times 79)$, $p_{53}=5/(2\times 79)$ 가 된다.

3. 모델링[5]

이종간 시스템에서 N 개의 피코넷이 있을 때 $N = N_{\alpha 1} + N_{\beta 1} + N_{\gamma 1} + N_{\alpha 2} + N_{\beta 2} + N_{\gamma 2}$ 이고 (N_{ij} 에서 i 가 α 면 1 슬롯, β 면 3 슬롯, γ 면 5 슬롯, j 가 1 이면 s1 홉, 2 이면 s2 홉), X_N 을 충돌이 발생하지 않을 확률변수로 나타내면 우리가 원하는 것은 X_N 의 평균인

$E(X_N)$ 을 찾는 것이다.

p_{ij} 을 충돌하지 않을 확률이라 하면 (p_{ij} 에서 i 가 α 면 1 슬롯, β 면 3 슬롯, γ 면 5 슬롯, j 가 1 이면 s1 홉, 2 이면 s2 홉) 식 (1)과 같다.

$$p_{\alpha 1}=(1-p_{11})^{N_{\alpha 1}-1}\cdot(1-p_{13})^{N_{\beta 1}}\cdot(1-p_{15})^{N_{\gamma 1}}\cdot(1-p'_{11})^{N_{\alpha 2}}\cdot(1-p'_{13})^{N_{\beta 2}}\cdot(1-p'_{15})^{N_{\gamma 2}}$$

$$p_{\beta 1}=(1-p_{31})^{N_{\alpha 1}}\cdot(1-p_{33})^{N_{\beta 1}-1}\cdot(1-p_{35})^{N_{\gamma 1}}\cdot(1-p'_{31})^{N_{\alpha 2}}\cdot(1-p'_{33})^{N_{\beta 2}}\cdot(1-p'_{35})^{N_{\gamma 2}}$$

$$p_{\gamma 1}=(1-p_{51})^{N_{\alpha 1}}\cdot(1-p_{53})^{N_{\beta 1}}\cdot(1-p_{55})^{N_{\gamma 1}-1}\cdot(1-p'_{51})^{N_{\alpha 2}}\cdot(1-p'_{53})^{N_{\beta 2}}\cdot(1-p'_{55})^{N_{\gamma 2}}$$

$$p_{\alpha 2}=(1-p_{11})^{N_{\alpha 1}}\cdot(1-p_{13})^{N_{\beta 1}}\cdot(1-p_{15})^{N_{\gamma 1}}\cdot(1-p'_{11})^{N_{\alpha 2}-1}\cdot(1-p'_{13})^{N_{\beta 2}}\cdot(1-p'_{15})^{N_{\gamma 2}}$$

$$p_{\beta 2}=(1-p_{31})^{N_{\alpha 1}}\cdot(1-p_{33})^{N_{\beta 1}}\cdot(1-p_{35})^{N_{\gamma 1}}\cdot(1-p'_{31})^{N_{\alpha 2}}\cdot(1-p'_{33})^{N_{\beta 2}-1}\cdot(1-p'_{35})^{N_{\gamma 2}}$$

$$p_{\gamma 2}=(1-p_{31})^{N_{\alpha 1}}\cdot(1-p_{33})^{N_{\beta 1}}\cdot(1-p_{35})^{N_{\gamma 1}}\cdot(1-p'_{51})^{N_{\alpha 2}}\cdot(1-p'_{53})^{N_{\beta 2}}\cdot(1-p'_{55})^{N_{\gamma 2}-1}$$

…... (1)

$E(X_{Nij})$ 을 충돌이 없을 확률의 평균값이라 하면 ($E(X_{Nij})$ 에서 i 가 α 면 1 슬롯, β 면 3 슬롯, γ 면 5 슬롯, j 가 1 이면 s1 홉, 2 이면 s2 홉) 식 (2), (3)과 같다

$$E(X_{N_{\alpha 1}})=\sum_{\gamma_{\alpha 1}=1}^{N_{\alpha 1}}\gamma_{\alpha 1}\cdot\binom{N_{\alpha 1}}{\gamma_{\alpha 1}}p_{\partial 1}{}^{\gamma_{\alpha 1}}(1-p_{\alpha 1})^{N_{\alpha 1}-\gamma_{\alpha 1}}$$

$$E(X_{N_{\beta 1}})=\sum_{\gamma_{\beta 1}=1}^{N_{\beta 1}}\gamma_{\beta 1}\cdot\binom{N_{\beta 1}}{\gamma_{\beta 1}}p_{\beta 1}{}^{\gamma_{\beta 1}}(1-p_{\beta 1})^{N_{\beta 1}-\gamma_{\beta 1}}$$

$$E(X_{N_{\gamma 1}})=\sum_{\gamma_{\gamma 1}=1}^{N_{\gamma 1}}\gamma_{\gamma 1}\cdot\binom{N_{\gamma 1}}{\gamma_{\gamma 1}}p_{\gamma 1}{}^{\gamma_{\gamma 1}}(1-p_{\gamma 1})^{N_{\gamma 1}-\gamma_{\gamma 1}}$$

$$E(X_{N_{\alpha 2}})=\sum_{\gamma_{\alpha 2}=1}^{N_{\alpha 2}}\gamma_{\alpha 2}\cdot\binom{N_{\alpha 2}}{\gamma_{\alpha 2}}p_{\partial 2}{}^{\gamma_{\alpha 2}}(1-p_{\alpha 2})^{N_{\alpha 2}-\gamma_{\alpha 2}}$$

$$E(X_{N_{\beta 2}})=\sum_{\gamma_{\beta 2}=1}^{N_{\beta 2}}\gamma_{\beta 2}\cdot\binom{N_{\beta 2}}{\gamma_{\beta 2}}p_{\beta 2}{}^{\gamma_{\beta 2}}(1-p_{\beta 2})^{N_{\beta 2}-\gamma_{\beta 2}}$$

$$E(X_{N_{\gamma 2}})=\sum_{\gamma_{\gamma 2}=1}^{N_{\gamma 2}}\gamma_{\gamma 2}\cdot\binom{N_{\gamma 2}}{\gamma_{\gamma 2}}p_{\gamma 2}{}^{\gamma_{\gamma 2}}(1-p_{\gamma 2})^{N_{\gamma 2}-\gamma_{\gamma 2}}$$

…… (2)

$$E(X_N)=E(X_{N_{\alpha 1}})+E(X_{N_{\beta 1}})+E(X_{N_{\gamma 1}})+E(X_{N_{\alpha 2}})+E(X_{N_{\beta 2}})+E(X_{N_{\gamma 2}})$$

…… (3)

통합 처리량(Aggregated Throughput)은

1 슬롯 패킷의 토털 지속시간= $625\mu s$

페이로드(payload)=240bits(30bytes)

3 슬롯 패킷의 토털 지속시간 $=3\times 625\mu s=1875\mu s$

페이로드(payload)=1464bits(183bytes)

5 슬롯 패킷의 토털 지속시간 $=5\times 625\mu s=3125\mu s$

페이로드(payload)=2712bits(339bytes)

라고 한다면

피코넷이 서로 같은 홉 수를 가질 때는 식 (4)와 같이 되고,

$$E(X_N)=E(X_\alpha)\times 10^6\times(240/625)$$
$$+E(X_\beta)\times 10^6\times((1464/1875)+(240/625))/2$$
$$+E(X_\gamma)\times 10^6\times((2712/3125)+(240/625))/2 \text{ bit/ s}$$

…… (4)

피코넷이 서로 다른 홉 수를 가질 때는 식 (5)와 같다.

$$E(X_N)=E(X_{\alpha 1})\times 10^6\times(240/625)$$
$$+E(X_{\beta 1})\times 10^6\times((1464/1875)+(240/625))/2$$
$$+E(X_{\gamma 1})\times 10^6\times((2712/3125)+(240/625))/2$$
$$+E(X_{\alpha 2})\times 10^6\times(240/625)$$
$$+E(X_{\beta 2})\times 10^6\times((1464/1875)+(240/625))/2$$
$$+E(X_{\gamma 2})\times 10^6\times((2712/3125)+(240/625))/2 \text{ bit/s}$$

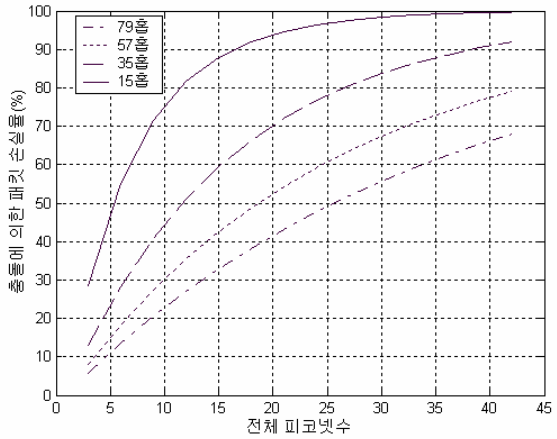
…… (5)

본 논문에서는 AFH 방식의 블루투스의 경우 홉 수 s 값이 유동적이기 때문에 위에서 설명된 s1 홉이나 s2 의 홉 수는 분석 시에 변하는 값으로 사용한다. 특히 WLAN 과 공존하는 경우 WLAN 이 사용하는 주파수 대역이 22MHz[7] 이기 때문에 WLAN 개수에 따라 1 개 이면 57, 2 개 이면 35 의 값을 사용하였다. 또한 FCC 에서 정한 최소 홉핑 수를 고려해서 15 의 값도 사용하였다.

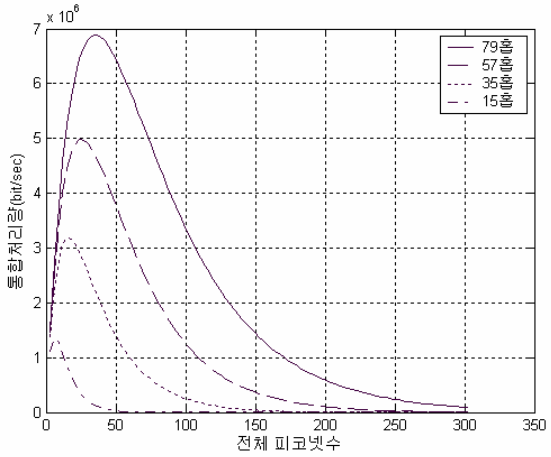
4. 분석 결과

그림 4 는 같은 홉 수를 갖는 클러스터에서 1 슬롯 패킷의 피코넷(33%), 3 슬롯 패킷의 피코넷(33%), 5 슬롯의 피코넷(34%)이 존재할 때 블루투스의 홉 수를 15, 35, 57, 79 로 바꾸면서 전체 피코넷 수가 증가할 때 패킷의 손실률을 분석하였다. 그림 4 에서 보면 전체 피코넷의 수가 증가하면 패킷 간의 충돌이 자주 발생함을 알 수 있었다. 블루투스의 홉 수가 79 일 경우 약 20 개의 피코넷이 존재할 때 손실률 50%을 보인다. 57 홉의 경우는 약 18 개, 35 홉의 경우는 약 12 개, 15 홉의 경우 약 5 개 일 때 손실률 50%을 보였다. 또한 블루투스의 홉 수가 줄어들수록 패킷 간의 충돌도 자주 발생하여 손실률이 증가함을 알 수 있다. WLAN 와 AFH 방식의 블루투스 가 공존하였을 때 AFH 알고리즘에 의해 블루투스가 사용할 수 있는 주파수 홉 수는 WLAN 이 1 개 인 경우 57 홉, 2 개 인 경우 35 홉으로 줄어들게 된다. 그림 4 에서 알 수 있듯이 홉 수가 줄어든 블루투스로 이루어진 피코넷은 다른 피코넷과의 패킷 충돌이 자주 발생하게 될 것이다

그림 5 은 클러스터에 있는 피코넷이 모두 같은 홉 수를 가질 때 홉 수를 15, 35, 57, 79 로 바꾸면서 전체 피코넷 수가 증가할 때 통합처리량을 분석하였다. 그림 5 에서 보면 전체 피코넷의 수가 증가함에 따라 통합처리량도 증가 하는데 어느 이상의 피코넷 수가 되면 통합처리량이 감소 함을 알 수 있다. 블루투스의 홉 수가 79 일 경우 총 피코넷 수가 40 개



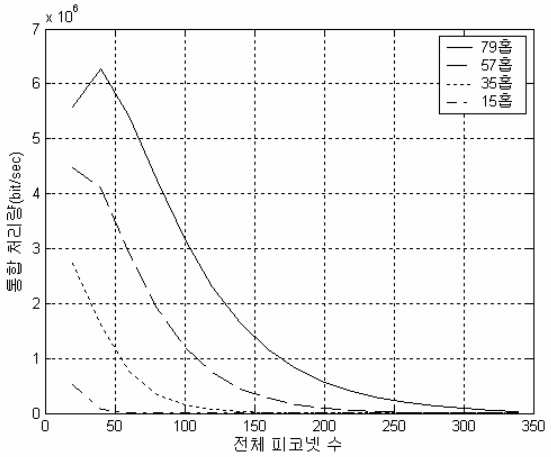
(그림 4) 1 슬롯 패킷의 피코넷(33%), 3 슬롯 패킷의 피코넷(33%), 5 슬롯 패킷의 피코넷(34%)를 갖는 같은 홉 수의 클러스터 패킷 손실률



(그림 5) 모든 피코넷이 같은 수의 홉 수를 가질 때의 통합처리량 (1 슬롯 패킷의 피코넷 33%, 3 슬롯 패킷의 피코넷 33%, 5 슬롯 패킷의 피코넷 34%)

까지 증가 할수록 통합처리량도 증가 하지만 그 이상이 되면 통합처리량이 감소한다. WLAN 와 AFH 방식의 블루투스가 공존하였을 때 AFH 알고리즘에 의해 블루투스가 사용할 수 있는 주파수 홉 수는 WLAN 이 1 개 인 경우 57 홉, 2 개 인 경우 35 홉으로 줄어듦을 고려한다면 홉 수가 줄어들수록 최대 통합처리량을 갖는 전체 피코넷의 수도 줄어들 것이다. FCC 에서 최소 홉핑 수를 15 로 정하였기 때문에 WLAN 을 3 개 사용해도 홉 수는 15 를 유지한다. 하지만 WLAN 과의 패킷 충돌이 발생하므로 그림 5 의 15 홉을 갖을 때 보다 통합처리량은 줄어들 것이다.

그림 6 는 클러스터에 있는 피코넷이 서로 다른 홉 수를 가질 때 홉 수를 15, 35, 57, 79 로 바꾸면서 전체 피코넷 수가 증가할 때 통합처리량을 분석하였다. 3 장에서 세운 모델에서 s1 과 s2 값을 변화 시킬 때 앞에서 설명한 것처럼 s1 가 s2 값이 크게 되면 s1 의 값을 따르게 된다. 앞장에서 살펴본 같은 홉 수를 갖는 피코넷 간의 통합처리량과 같이 홉 수가 서로 다를 경우에도 전체 피코넷의 수가 증가해도 어느 이상의 피코넷 수가 존재하면 통합처리량 떨어짐을 알 수 있다 또한 홉 수가 줄어들수록 최대통합처리량도 줄어듦을 알 수 있다. WLAN 이 여러 개가 존재하고 AFH 방식의 블루투스가 공존하게 된다면 WLAN 의 영향을 다르게 받으면서 서로 다른 홉 수를 갖는 피코넷이 존재할 수



(그림 6) 피코넷이 다양한 홉 수를 가질 때의 통합처리량(1 슬롯 패킷의 피코넷 50%, 3 슬롯 패킷의 피코넷 25%, 5 슬롯 패킷의 피코넷 25%)

있는데 이때 충돌이 더욱 많아져 통합처리량이 크게 떨어질 것이다

5. 결론

본 논문에서는 AFH 알고리즘을 사용하는 블루투스로 이루어진 피코넷이 여러 개가 존재하고 WLAN 과 공존하게 될 때 블루투스의 홉 수의 변화 시에 피코넷 간의 패킷 충돌과 그에 따른 통합 처리량을 분석하였다. AFH 방식의 블루투스가 많아지고 피코넷이 증가하게 되면 알고리즘에 의해 줄어든 홉 수가 피코넷 간의 패킷 충돌을 증가 시킬 수 있음을 알 수 있었다.

6. 감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 한국산업기술평가원의 성장동력기술개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] IEEE 802.15.2 Coexistence Mechanisms, http://ieee802.org/15/pub/TG2-Coexistence-Mechanisms.html, 2003.

[2] IEEE 802.15 WPAN Task Group 2(TG2), http//ieee802.org/15/pub/TG2.html, 2003.

[3] B. Treister, H. B. Gan, K. C. Chen, H. K. Chen. A. Batra, and O. Eliezer. “Adaptive Frequency Hopping : A Non-Collaborative Coexistence Mechanism,” IEEE 802.15-01/252r0, May 2001.

[4] The Bluetooth Special Interest Group. Baseband Specification Version 1.1 (2001). [Online]. Available: http://www.bluetooth.com

[5] Nada Golmie, Nicolas Chevrollier, and Olivier Rebala, “Bluetooth and WLAN Coexistence: challenges and solutions”, IEEE Wireless Communications, December 2003.

[6] Kshirasagar Naik, David S. L. Wei, Yu T. Su, and Norio Shratori. “Analysis of packet interference and aggregated throughput in a cluster of Bluetooth piconets under different traffic conditions”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, No. 6, june 2005.

[7] IEEE Std. 802.11b, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band,” Sept. 1999.