

6LoWPAN 기반의 무선 센서 네트워크 Duty Cycle 특성 분석

정훈 | 한동혁* | 남상준* | 김관중 | 정종문*

한국전자통신연구원, *연세대학교

요 약

6LoWPAN은 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 센서 네트워크에 IPv6를 지원하기 위한 기술이다. 본고에서는 6LoWPAN WG에서 개발 및 논의되고 있는 기술 및 주요 쟁점을 소개하고, 6LoWPAN의 저전력 통신을 위해 에너지 효율을 높일 수 있는 duty cycle 제어와 관련된 중요한 요소들을 논의하고자 한다.

1. 서 론

과거에 비해 실시간으로 모니터링 해야 할 필요가 있는 정보(온도, 가속도, 위치 정보, 압력, 지문, 가스 등)들이 늘어남에 따라서 각종 센서에서 수집한 정보를 무선으로 수집할 수 있도록 구성된 네트워크, WPAN(wireless personal area network), Ad-hoc network 등의 기술이 발전하고 있다. 결과적으로 센서 네트워크 기술이 매우 활성화되고 있다.

기존의 센서 네트워크는 저전력 MCU(Multipoint Control Unit)들을 사용하여 임의의 환경에서 독립적인 네트워크를 구성하였다. 하지만 점점 지능적이고 대규모 및 복잡도가 높은 응용 서비스가 개발되는 추세이며 요구사항 또한 변하고 있다 [1]. 특히, 변화하는 무선 네트워크의 요구사항에 따라 효율적인 라우팅, 신뢰성 있는 고장 복구 및 회피 방안을 포함하는 무선 통신 프로토콜이 필요하다. 많은 센서 네트워크 플랫폼이 IEEE 802.15.4 호환 프로토콜로써 non-IP 기

반 솔루션을 채택하고 있는데, 이는 IP가 센서 네트워크에는 부적합하며, 과도한 시스템 자원을 요구한다는 믿음 때문이었다. 그러나 non-IP 기반 솔루션은 인터넷과 같은 다른 시스템에 연결하기 위해 설계 및 운영이 복잡한 게이트웨이를 필요로 한다. 즉, 두 개의 서로 다른 프로토콜을 연결하는 것은 두 프로토콜의 기능 및 의미가 유사한 것들을 번역해주고, 유사하지 않은 기능들은 버려야 하는 등의 문제가 있다 [2]. 따라서 IPv6(Internet Protocol Version 6) 기반의 센서 네트워크 프로토콜이 IETF의 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network) WG [3]에서 집중적으로 개발되고 있다.

IP를 기반으로 함에 있어서 IPv4대신에 IPv6를 사용하는 이유는 IPv4주소체계의 포화와 IPv6가 갖는 이점들에서 찾을 수 있다. IPv6가 도입되는 지금은 인터넷의 지속적인 발전을 위한 진정으로 중요한 전환점이며 IPv6는 차세대 인터넷 프로토콜로, 상당히 확장된 주소 공간을 제공하기 때문에 전세계 수십억 IP기반 통신 기기들이 모든 일에 인터넷을 사용하고 있는 현재, 인터넷 주소 고갈에 대한 두려움 없이 더욱 혁신적인 어플리케이션을 실행할 수 있는 기회를 제공할 것이다.

IPv6를 채택한 LoWPAN 기술인 6LoWPAN은 짧은 전송 거리, 낮은 데이터 전송율, 저전력 및 저비용의 특징을 갖는 IEEE 802.15.4-2003 [4] 표준 기반의 장비들로 IP 네트워크가 가능하게 하는 기술이다. LoWPAN에서는 전송한 바와 같은 낮은 데이터 전송 속도, 저전력 등의 특징이 있으며 기존 네트워크에 비해 많은 수의 노드가 배치되므로 이러한 LoWPAN상에서 헤더 크기가 큰 IPv6 패킷을 효율적으로 전

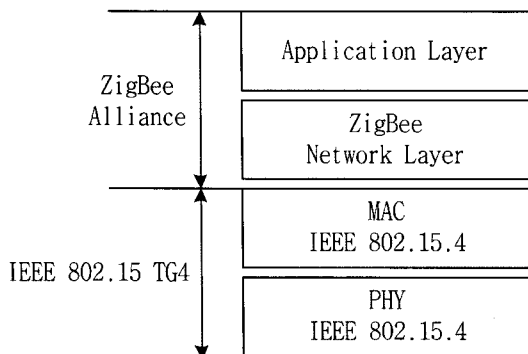
달하기 위한 기술이 6LoWPAN WG에서 논의되고 있다.

본고에서는 기존의 센서네트워크의 표준인 IEEE 802.15.4와 앞으로의 센서네트워크 기술의 중심이 될 6LoWPAN 그리고 이와 관련하여 저전력으로 동작해야 하는 센서 네트워크의 노드들의 에너지 효율을 높일 수 있는 duty cycle 제어에 관하여 논의 하고자 한다.

II. IEEE 802.15.4 와 6LoWPAN

1. IEEE 802.15.4

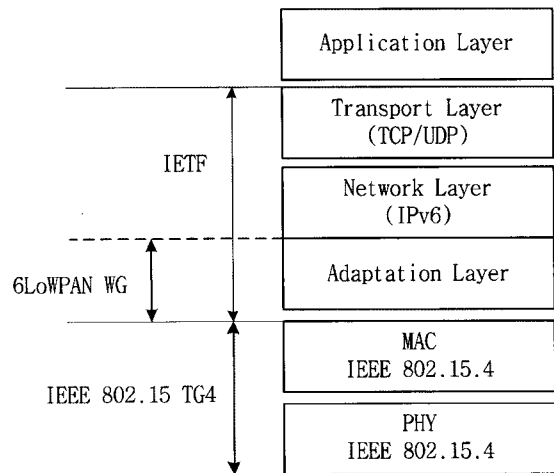
IEEE 802.15.4 표준은 Wireless Personal Area Network (WPAN)에서 저전력 네트워크를 제공하기 위한 표준으로, 장비간 저전력, 저비용, 낮은 전송속도의 특징을 가지며 실제 물리적 환경을 모니터링 할 수 있는 무선 센서 네트워크를 목표로 하고 있다. 널리 사용되는 사용자 기반 무선 네트워크 시스템인 IEEE 802.11은 비교적 비용 문제가 중요하게 고려되지 않는 것과 고속 통신이 요구되는 집에서 IEEE 802.15.4와 차이가 있다. IEEE 802.15.4는 약 10m ~ 100m의 전송 거리와 최대 250kbps의 데이터 전송 속도를 제공하며, 저주파 대역으로 868MHz와 915MHz를, 고주파 대역으로 2.4GHz 대역을 사용한다 [5]. IEEE 802.15.4의 표준은 PHY와 MAC 계층만을 정의하며 사용되는 시스템에 따라 다양한 상위 계층 기술이 사용된다. 대표적인 상위 계층 프로토콜로 ZigBee Alliance에서 지원하는 ZigBee [6]를 포함하여 공



(그림 1) ZigBee 의 프로토콜 스택

개표준(open-standard) 무선 네트워크 기술인 WirelessHART [7], 산업 자동화를 위한 무선 네트워크 시스템을 다루는 ISA100.11a 등이 있으며 IEEE 802.15.4의 PHY 및 MAC을 기반으로 한 IPv6의 패킷 데이터 전송 시스템인 6LoWPAN 등이 있다. 특히 우리나라에서 6LoWPAN 기술은 USN (Ubiquitous Sensor Networks) 기술에 IP를 도입한 IP-USN이라는 개념으로 소개되어 연구 개발되고 있다.

(그림 1)에서 볼 수 있듯이 ZigBee는 IEEE 802.15.4 표준의 PHY와 MAC을 기반으로 네트워크, 보안 및 어플리케이션 계층을 규정한다. ZigBee는 가장 널리 사용되는 무선 네트워크 프로토콜 중 하나지만, 기업체들의 모임을 통해 만들어진 것이기 때문에 널리 사용되고 있고 공개되어 있는 TCP/IP 보다 네트워크 구축과 유지, 보수에 상대적으로 비싼 비용이 든다. 또한, 광범위하게 사용되는 IP통신망과의 연동이 어려워 확장성에 한계가 있다. 따라서 IEEE 802.15.4 기반 WPAN에 IP통신을 지원하는 6LoWPAN 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 6LoWPAN 기술은 IP를 효율적으로 사용하기 위해 (그림 2)에 표시한 범위에서 다양한 기술 표준이 정의되고 있다.



(그림 2) 6LoWPAN의 프로토콜 스택

2. IPv6 기반의 LoWPAN

서두에도 언급하였듯이 IP 기반 프로토콜은 non-IP 기반

프로토콜에 비해 많은 장점을 갖는다. IP system을 사용함에 있어서 가장 두드러지는 이점은 IP 네트워크가 이미 널리 사용되고 있어서 이와 관련된 많은 인프라가 구축되어 있다는 것이다. 따라서 기존의 IP 기반 네트워크들과 특별한 게이트웨이 및 프록시 등의 장치 없이 연동이 가능하다. 또한 IP 관련 기술들이 널리 알려져 있고 이미 구현이나 다양한 상황에 따른 메커니즘 등이 입증되었으며, 기술이 공개되어 있어서 기술 사양이 자유롭게 접근 가능하기 때문에 경제적인 비용으로 설치 및 운용이 가능하다. 네트워크 구축 뿐만 아니라 구축 후 유지, 보수 측면에서도 진단, 관리, commission 등을 위한 기술이 이미 완성되어 있어서 충분히 non-IP 프로토콜에 비해 많은 장점을 갖는다고 할 수 있다.

센서네트워크의 주요목적은 시시각각 변화하는 정보들을 효율적으로 수집하는 것이기 때문에 정보수집을 직접적으로 수행하는 대부분의 말단의 센서 노드들은 auto configuration 을 하게 된다. 곧 주변환경에 맞게 내부조건을 변화시키기 때문에 statelessness가 요구된다. IPv6의 자동 주소 설정 체계는 이것을 가능하게 해준다. 또한 무선 센서 네트워크의 특성상 모니터링 시 많은 센서 노드들이 요구되는데 이런 많은 노드와 장비는 동시에 그만큼의 주소공간을 요구하기 마련이다. 이점 또한 IPv6의 128 bit 주소 체계로 해결이 가능하다. 이는 IPv6가 IPv4에 비해 가지는 가장 눈에 띄는 특징이기도 하다. 또한 LoWPAN의 특성상 제한된 패킷 크기를 요구하는 경우, IPv6의 주소 format은 IEEE 802.15.4의 주소를 포괄하도록 사용될 수 있다.

이와 같이 IPv6가 LoWPAN에 적용됨에 있어서 많은 이점들이 있지만 아직까지는 많은 IP 기반의 네트워크들이 IPv4를 사용하고 있다. 그러나 6LoWPAN은 IPv4와 IPv6를 연동해주는 4-6 translation에 의해 호환이 가능하기 때문에 위 언급된 많은 이점들을 충분히 살릴 수 있다.

3. 6LoWPAN(RFC4919)

2005년 3월 62차 IETF 회의에서 6LoWPAN WG을 창설하고 이는 LoWPAN 상에서 IPv6 패킷 전송 방안을 정의하는 것을 목적으로 하였다. 이 WG에서 창설 이래 작업한 문서 RFC4919 [8]에 6LoWPAN의 특징이 잘 정리되어 있다.

먼저 전반적으로 정의 되어 오던 일반적인 WSN의 특징들

을 모두 가지고 있다. 일반적인 네트워크에 비해서 많은 수의 센서 노드들이 배치되며 모니터링 하는 대상에 따라 장치의 위치가 정해질 수도 그렇지 않을 수도 있다. 따라서 ad-hoc으로 동작하거나 장치의 위치 정보에 접근하지 못하는 경우가 있을 수도 있다. 그리고 말단의 센서 노드들이 전원 이 일정하게 공급될 수 없는 위치에 있거나 주변의 모니터링 하는 대상에 따라서 위치를 변경해야 하는 경우가 생기기 때문에 일부 또는 모든 장치가 배터리에 의해 동작하므로 저전력 특성을 지닌다. 따라서 일반적인 네트워크에 비해 비신뢰적인 경우가 있을 수 있다. WSN의 신뢰성을 떨어트리는 요인은 위에 언급한 저전력 특성뿐만 아니라 WSN이 동작하는 환경에 따라 불확실한 라디오 연결성, 배터리 방전, 장치의 lockup, 물리적인 간섭 등이 있다. 이와 더불어 LoWPAN에 연결된 장치는 에너지 보존을 위해 장기간 비활성 모드로 동작할 수 있으며 비활성 모드인 경우에는 통신이 불가능하다. 효율적인 에너지 사용을 위한 비활성 모드와 통신이 가능한 활성 모드의 비율 및 기타 설정은 통신 환경에 따라 규정하는 것이 좋으며, 이에 대해서는 III장에서 더 자세히 논의한다.

세부적인 6LoWPAN의 특성상 크기가 작은 패킷을 사용하게 된다. 6LoWPAN의 PHY layer에 최대 127 옥텟이 할당되며, 따라서 MAC layer의 프레임 크기는 최대 102 옥텟으로 제한된다. Link layer의 보안에 의한 오버헤드가 최대한 적용된 것을 가정할 때 데이터 패킷에 81 옥텟이 남게 된다. 그리고 IEEE 802.15.4와 같은 MAC layer를 사용하므로 MAC 주소에 16-bit의 짧은 주소 또는 64-bit의 확장 주소를 모두 지원한다.

WSN의 특성에 맞게 낮은 데이터 전송률을 보여준다. PHY layer에 2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz의 대역폭을 사용하는 경우 데이터 전송률은 각각 250 kbps, 40 kbps, 20 kbps이다. 토폴로지 측면에서는 ZigBee와 마찬가지로 star 및 mesh 토폴로지 동작을 지원한다. 하지만 이 부분은 아직 정확하게 정의 되지 않았다. ZigBee와 같은 토폴로지를 당연히 지원하지만 star와 mesh가 혼합된 토폴로지를 지원하기도 한다.

IEEE 802.15.4에서 정의한 PHY, MAC이 두 계층 위에 IPv6를 사용하기 위해 필요한 계층(Adaptation layer)이 특별히 추가 된다.

4. 6LoWPAN의 목표

6LoWPAN에서 해결하고자 하는 근원적인 목표는 패킷 오버헤드, 대역폭 소모, 프로세싱 요구 및 전력 소모를 줄이는 것이며 세부적으로는 다음과 같다.

1) Fragmentation and Reassembly layer

프로토콜의 데이터 유닛이 81 옥텟크기로 작으며, 이는 IPv6의 패킷 크기인 1280옥텟에 못 미친다. 따라서 6LoWPAN의 특징으로 말한 adaptation layer가 IP layer 아래에서 fragmentation과 reassembly를 담당하게 된다.

2) Header Compression

IPv6/TCP/UDP를 센서 노드에 탑재하기 위해서 128 옥텟 프레임이 이들을 실어야 한다. 이를 위해 Adaptation layer에서 fragmentation과 reassembly 과정을 거쳐서 패킷을 적절한 크기로 단축시키게 된다. IP 패킷이 81 옥텟으로 전송되고, IPv6 헤더가 optional 헤더 없이 40 옥텟인 경우 UDP, TCP와 같은 상위 layer protocol에는 41 옥텟만 주어진다. UDP의 헤더가 8 옥텟, TCP의 헤더가 20 옥텟인 것을 감안하면, UDP 통신 데이터에 33 옥텟, TCP 통신 데이터에 21 옥텟이 할당되는 셈이다. 또한 fragmentation 및 reassembly layer에서 추가의 오버헤드를 필요로 할 수 있으므로 실제 데이터에는 매우 적은 옥텟만이 주어진다. 이러한 프로토콜을 그대로 사용하는 경우 과도한 fragmentation과 reassembly를 요구하게 되므로 헤더 압축이 필요하며, 또한 PHY와 MAC 계층에서 최대로 데이터를 사용했을 경우 패킷에는 80옥텟이 남게 되고 그 안에 IPv6/TCP 또는 IPv6/UDP 헤더 및 센서 응용을 위한 데이터가 표현되어야 한다. 이를 위해서는 패킷 단축이 불가피하여 6LoWPAN에서는 dispatch를 사용하여 해당 패킷임을 표현하고 더불어 IPv6/TCP/UDP 헤더 단축 방법을 제안하고 있다. IETF에서는 RFC 4919, RFC 4944 [9] 외에 여러 Internet-Draft를 공개하고 있으며, [10]에서는 산업 모니터링(Industrial Monitoring), 구조물 모니터링(Structural Monitoring), 가정 자동화(Home Automation), 건강 관리(Healthcare), 차량 통신(Vehicle Telematics), 농산물 모니터링(Agricultural Monitoring) 등을 기본 시나리오로써 제안하고 있다.

3) Address Auto-configuration

stateless 자동 주소 생성은 작은 생성 오버헤드를 지니고 있기 때문에 더 작은 오버헤드를 필요로 하는 6LoWPAN에 더 적합하다.

4) Mesh Routing Protocol

멀티 홉 메시 네트워크를 지원하는 라우팅 프로토콜이 필요하다. 기존의 멀티 홉 메시 네트워크 지원 프로토콜들은 오버헤드가 큰 주소체계를 사용하였으나 패킷 크기가 상대적으로 작은 6LoWPAN에 적용을 하기 위해서는 프로토콜 제작 시 주의가 필요하다.

5) Implementation Consideration

IEEE 802.15.4기반의 IP전송은 특정한 implementation 방법에 따라 더 효율적일 수 있으므로 implementation 시의 고려사항이 문서화되어야 한다.

6) Application and higher layer Considerations

헤더압축 이후 고려사항으로 프로토콜의 효율성 문제가 대두될 것이며 이에 따라 기존의 프로토콜들을 LoWPAN에 적합하도록 가볍게 재정의하거나 수정하고, 더 나아가서 향후에는 응용레벨의 상호 운용성을 위한 상세 내용에 대한 정의가 필요하다.

7) Security Considerations

위치와 제한된 디스플레이, 고밀도, ad-hoc 특성의 배치와 같은 경향이 있는 장치들을 안전한 네트워크 안에서 구동하는 방법에 대해 고려해야 한다.

III. Duty cycle을 고려한 6LoWPAN 프로토콜 설계

1. WSN의 duty cycle 메커니즘

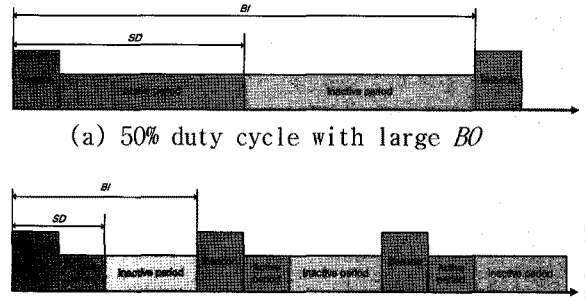
WSN 프로토콜 설계에 있어서 에너지 효율은 핵심적인 고려사항이다. 무선 통신에서 에너지 낭비의 원인은 패킷 전송 시 충돌에 의한 재전송, 다른 노드를 목적지로 하는 패킷

을 엿듣는 overheard, 불필요한 제어 패킷 전송에 따른 오버헤드 및 이웃 노드가 언제 데이터를 전송할 지 모르기 때문에 자신의 전원을 수신모드로 유지하는 idle listening 등이 있다. 특히 에너지 효율성의 주원인인 idle listening은 저전력 WSN 프로토콜에서 반드시 피해야 할 문제이다. 일반적으로 WSN의 MAC 프로토콜은 radio 모듈을 주기적으로 활성화 구간(active period)과 비활성화 구간(inactive period)으로 전환하는 duty cycle 동작으로 idle listening에 의한 에너지 낭비 문제를 해결한다.

duty cycle이란 활성화 구간과 비활성화 구간의 비로써 50%의 duty cycle은 장치가 주기적으로 1:1의 비로 활성화/비활성을 반복하는 것을 의미한다. duty cycle이 커지면 활성화 구간이 길어짐에 따라 데이터 전송율(throughput)이 증가하며 에너지 소모 또한 증가한다. 반대로 duty cycle이 작아지면 긴 비활성화 구간동안 전송해야 할 패킷이 누적되어 짧은 활성화 주기마다 전송해야 하므로, 데이터 전송율이 줄어들고 전송 시간 지연(latency)이 늘어나며, 에너지 소모는 줄어든다.

duty cycle이 서로 같은 네트워크라 할지라도 (그림 3)에서와 같이 긴 활성화 구간 및 비활성화 구간을 가지는 경우와 짧은 활성화 구간 및 비활성화 구간을 가지는 경우에 따라 다른 네트워크 특성을 가진다. (그림 3)의 (a)와 같이 긴 활성화 구간을 갖는 경우 비활성화 구간이 늘어남에 따라 전송 시간 지연이 증가하며, 버퍼에 쌓인 패킷 간의 채널 경쟁이 치열하여 패킷 드롭율이 높아짐에 따라 데이터 전송을 또한 저하된다. 반대로 (그림 3)의 (b)와 같이 짧은 활성화 구간을 갖는 경우 beacon 전송 주기가 늘어남에 따라 오버헤드가 증가하며, 에너지 소모가 늘어나지만 버퍼에 쌓인 패킷이 짧은 시간마다 전송되므로 데이터 전송율에 이득이 있다.

따라서 WSN의 환경과 사용 목적에 따라, duty cycle은 에너지 소모와 데이터 전송율, 전송 시간 지연 등을 고려하여 최적의 설정을 하는 것이 필요하다. 예를 들어, Low power RF transceiver인 CC1000는 이상적인 AA 배터리의 에너지로 1년 동안 동작하기 위해 약 2%의 duty cycle을 가져야 하며 [11], 가정 자동화를 위해서는 1% 이하의 duty cycle이 제안된다 [12]. 또한 빌딩 자동화 application은 센서 장비가 분당 한번씩 데이터 전송을 하면서 적어도 5년 이상 동작되어야 한다.



(그림 3) BO, SO에 따른 superframe 비교

2. IEEE 802.15.4의 duty cycle 제어

IEEE 802.15.4의 beacon-enabled 모드에서 PAN coordinator는 (그림 3)과 같이 superframe을 정의할 수 있다. Superframe은 16개의 슬롯으로 구성되고 15ms 부터 245s의 길이를 가지며, 활성화 부분과 비활성화 부분을 구분하여 노드가 저전력 모드로 전환할 수 있게 한다. 802.15.4 표준의 MAC은 duty cycle 동작을 위해 superframe 길이에 영향을 미치는 *macBeaconOrder(BO)*와, superframe 내의 활성화 구간을 제어하는 *macSuperFrameOrder(SO)*의 두 파라미터를 사용한다. Superframe의 길이는 비콘 전송 주기 beacon interval(BI)로도 불리며 다음과 같이 정의 된다.

$$BI = 2^{BO} \times aBaseSuperFrameDuration$$

이때, BO 는 $0 \leq BO \leq 14$ 의 범위에서 정의되며 *aBaseSuperFrameDuration*은 superframe의 최소 길이(duration)를 의미한다.

활성화 구간의 길이 *SuperframeDuration(SD)*는 아래와 같이 정의된다.

$$SD = 2^{SO} \times aBaseSuperFrameDuration$$

이때, SO 는 $0 \leq SO \leq BO$ 의 범위에서 정의된다.

즉, 활성화 구간의 길이는 SD , 비활성화 구간의 길이는 $(BI-SD)$ 로 정해진다. 따라서 BO 와 SO 두 파라미터에 적절

한 값을 정의함에 따라 네트워크의 전송 시간 지연, 지터, 데이터 전송을 등을 고려한 duty cycle 설정이 가능하며, 트래픽 부하 등에 따라 동적으로 *BO*, *SO*를 수정하여 네트워크에 적용하는 duty cycle 제어 방법 또한 고려해볼 수 있다.

3. Duty cycle 기반 MAC 프로토콜

IEEE 802.15.4는 저전력 단거리 전송을 위한 PHY 및 MAC 계층 표준을 정의하고 있으나, MAC에서 사용되지 않는 과도한 기능들을 명시하고 있는 탓에 IEEE 802.15.4의 PHY 계층을 기반으로 idle listening 최소화를 고려하는 에너지 효율적인 MAC 프로토콜들이 새로 제안되고 있다.

Duty cycle 기반의 WSN 프로토콜은 동기식(synchronous) 프로토콜과 비동기식(asynchronous) 프로토콜의 두 종류로 구분된다. 동기식 프로토콜은 대표적으로 S-MAC [13], T-MAC [14], D-MAC [15] 등이 있으며, 비동기식 프로토콜은 B-MAC [16], WiseMAC [17] 등이 있다.

S-MAC과 T-MAC은 모두 일정하지 않은 트래픽 패턴을 다루기 위해 adaptive duty cycle을 제안한다. S-MAC은 이웃 노드들의 RTS, CTS 메시지를 엿듣고 자신의 활성화 구간을 조정하여 duty cycle을 적용한다. S-MAC은 이웃 노드의 스케줄 정보를 유지해야 하는 탓에 자원이 제한된 노드들로 구성된 대규모의 네트워크에는 적합하지 않다. T-MAC은 본질적으로 S-MAC과 유사하며, 활성화 상태로 동작하도록 스케줄된 노드가 idle 상태인 경우 비활성화 상태로 에너지를 절약하는 early sleeping을 도입한다. T-MAC 또한 S-MAC과 같이 복잡도 및 확장성(scalability)의 문제가 있다.

WiseMAC과 B-MAC은 비동기식 센서 네트워크 프로토콜로써 동기식 프로토콜에 비해 스케줄링 및 동기화의 오버헤드를 필요로 하지 않으므로, 에너지 소모가 줄어들어 상대적으로 가벼운 장점이 있다. 두 프로토콜은 수신 노드의 주기적인 활성화를 고려하여, 패킷 전송 시 preamble을 우선 전송하여 수신 노드가 반드시 데이터를 수신하도록 한다. B-MAC 기반의 비동기식 프로토콜 설계 시, 노드의 활성화 주기가 길어지면 preamble 크기가 커짐에 따라 송신에 소모되는 전력이 늘어나고 활성화 주기가 짧아지면 수신 측이 listening에 소모하는 전력이 늘어나는 trade-off를 고려해야 한다.

센서 네트워크의 동기식 프로토콜은 동기화로 인해 전송

시간 지연에서 이득을 보장하지만, 동기화 및 스케줄링의 높은 오버헤드 비용이 발생하는 문제가 있다. 비동기식 프로토콜 또한 긴 preamble로 인한 문제들을 내재하고 있다. 첫째로 수신 측은 긴 preamble의 전송이 완료되고 나서야 데이터를 전송 받을 수 있으므로 송수신 측의 에너지 낭비가 있으며 추가적인 시간 지연이 있다. 또한 비동기식 프로토콜은 목적이 아닌 노드들 역시 preamble 기간 동안 활성상태를 유지해야 하는 문제가 있다.

또한, 전술한 duty cycle 기반 MAC 프로토콜들은 6LoWPAN의 IP 특성을 고려하지 않아 6LoWPAN에 적용하여 최적화된 duty cycle 제어를 하기에 어려움이 있다.

4. 6LoWPAN 특성을 고려한 duty cycle 제어

6LoWPAN의 링크 프로토콜 설계 시 상위 IPv6 계층과의 상호 운용을 염두에 두어야 한다. IP 네트워크는 기본적으로 IP 링크가 패킷 전송을 idle listening하여 always-on 상태를 가정하고 있으며, 이는 저전력 무선 네트워크에는 적합하지 않다. 하지만 어떠한 경우에도 6LoWPAN은 저전력 특성을 유지해야 하며, 노드들이 주기적인 비활성화 구간에서 응답 불가능함을 고려하여 프로토콜을 설계해야 한다 [18].

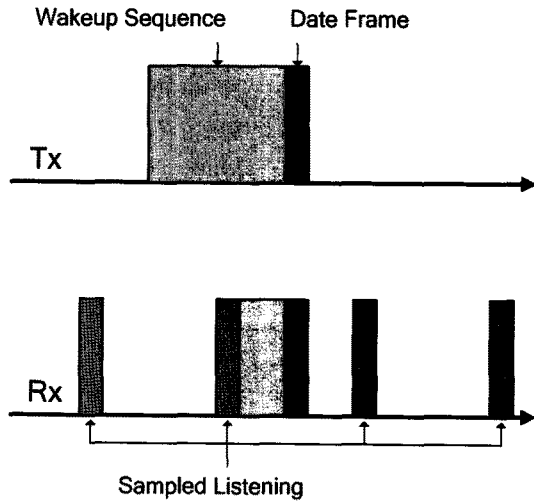
따라서 효율적인 에너지 소모를 위한 duty cycle 기술이 IP 기반 네트워크에서 동작하기 위해 아래의 특성들을 고려해야 한다 [19].

- Always-on : IP 패킷을 이웃 노드에 전송할 때 연결 설정, 동기화 등의 요구사항 없이 통신이 가능해야 한다.
- Low latency : 이웃 노드 간의 전송 시간 지연이 낮아야 한다.
- IP datagram delivery reliability : IP 링크는 네트워크 계층에서 best-effort 데이터그램 전송을 지원하고 종단간 신뢰성 있는 전송이 가능해야 한다.

즉 6LoWPAN 기반 프로토콜은 duty cycle에 따라 노드들이 주기적으로 전송 모듈을 꺼놓음에도 불구하고 신뢰성 있는 패킷 전송을 보장해야 한다. 이를 위해 송신 및 수신 노드 간 통신 방식과 시간 등을 조정해야 하며, 현재 sampled listening, scheduling, streaming 등의 기술이 제안

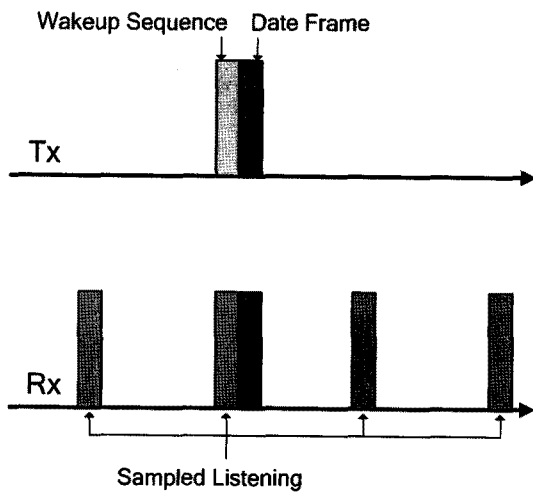
되고 있다.

1) Sampled listening



(그림 4) Sampled listening 동작의 예

sampled listening은 수신측이 idle listening을 하는 대신 주기적으로 짧은 시간 동안만 데이터 송신을 검사하는 방법으로, 1) 데이터 송신 시 wakeup 신호 전송, 2) 채널 sampling을 필요로 한다. IEEE 802.15.4 표준은 패킷 기반 인터페이스



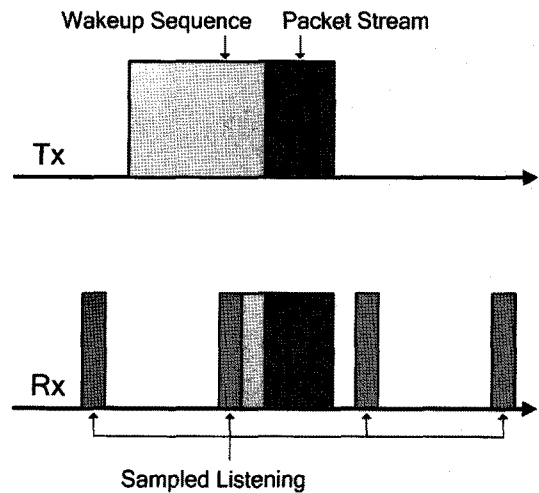
(그림 5) Scheduling 동작의 예

를 지원하므로 통신 비용을 최소화하는 정보 필드를 포함하는 wakeup 프레임 설계가 필요하다. Sampled listening으로 주어진 duty cycle에서 수신 주기를 줄일 수 있으며 따라서 전송 시간 지연도 줄어든다.

2) Scheduling

scheduling 기술은 노드 간 시간 동기화 방법이다. Sampled listening 시 노드가 이웃 노드들의 sample 스케줄을 모르는 경우 wakeup 신호는 수신 측의 sample 주기 이상의 길이를 가져야 한다. 하지만 이웃 노드의 샘플 주기 등의 정보가 있으면 wakeup 신호를 효과적으로 줄일 수 있다. 이는 링크 헤더에 주기 및 동작 모드정보를 piggyback하는 필드를 추가하여 노드 간 데이터, ACK 전송 시 이를 주고받도록 구현이 가능하며, sample schedule 정보를 이용하여 노드의 wakeup 신호 길이를 최소화할 수 있다.

3) Streaming



(그림 6) Streaming 동작의 예

Streaming은 sampled listening으로 인한 전송 시간 지연, 에너지 효율 및 데이터 전송율의 trade-off 에서 데이터 전송율과 에너지 효율 모두를 향상시킬 수 있는 기술이다. 링크 헤더에 streaming 전송을 알리는 비트를 사용하여 수신 측은 연속된 패킷을 위해 listening을 유지한다. 송신 노드는

추가 wakeup 신호 없이 연속되는 데이터를 전송하여 데이터 전송율과 에너지 효율 모두 향상할 수 있으며, 6LoWPAN의 데이터 fragmentation을 고려할 때 높은 효율을 얻을 수 있다.

IV. 결론

6LoWPAN은 센서 네트워크에 IP를 접목시켜 기존의 폐쇄적이던 센서 네트워크 망에 확장성을 제공하는 기술로, 가정 자동화, 산업 모니터링, 건강 관리, 차량 통신 등 다양한 분야에 적용 가능하여 전 세계적으로 관심이 커지고 있는 기술이다.

본 논문에서는 이러한 6LoWPAN을 지원하기 위해 논의되고 있는 다양한 기술적 쟁점들을 알아보았으며, 6LoWPAN에서 에너지 효율을 향상시키기 위한 duty cycle 제어 기술, 6LoWPAN의 최적 duty cycle 설계를 위한 고려 사항에 대해 알아보았다.

현재 6LoWPAN을 위해 패킷 fragmentation, 헤더 압축 등 다양한 기술이 논의되고 있으며, 특히 6LoWPAN의 에너지 효율 및 네트워크 성능 향상을 위해 어플리케이션의 데이터 전송 주기 및 전송율, 에너지 효율, 전송 시간 지연 등을 고려하여 6LoWPAN 프로토콜의 duty cycle 제어가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음 (10037187, 광역 환경관리 센서네트워크 기술개발).

참고 문헌

- [1] 송준근, 마평수, "IP-USN을 위한 센서 네트워크 운영체제 동향," 전자통신동향분석 제23권 제1호, pp.12-20, 2008년 2월.
- [2] J. Hui, D. Culler, "IPv6 in Low-Power Wireless Networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 11, pp.1865-1878, Nov. 2010.
- [3] IETF 6LoWPAN WG. Available: <http://tools.ietf.org/wg/6lowpan/>
- [4] Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR- WPANs), IEEE 802.15.4-2003 Standard for Information Technology, 2003.
- [5] J. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter, and B. Heile, "IEEE802.15.4 : Developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks," *IEEE Network*, vol. 15, no. 5, pp. 12-19, Sep. Oct. 2001.
- [6] ZigBee. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>
- [7] HART Communications Foundation, WirelessHART Overview, 2007. [Online]. Available : http://www.hartcomm2.org/hart_protocol/wireless_hart/wireless_hart_main.html
- [8] N. Kushalnagar, G. Montenegro, C. Schumacher, IPv6 Over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs) : Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals, IETF RFC 4919, Aug. 2007.
- [9] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, and D. Culler, "Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks," *Internet Engineering Task Force RFC-4944*, Sept. 2007.
- [10] E. Kim, D. Kaspar, N. Chevrollier, JP. Vasseur, Design and Application Spaces for 6LoWPANs, Jul. 2011. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6lowpan-usecases-09>
- [11] J. Hill, "System Architecture for Wireless Sensor Networks," doctoral thesis, Dept. Electrical Eng. and Computer Sciences, Univ. of California, Berkeley, 2003.
- [12] A. Brandt, J. Buron, G. Porcu, "Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks," *IETF Request for Comments RFC 5826*, Apr. 2010.
- [13] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access

Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 493-506, Jun. 2004.

- [14] T. Dam and K. Langendoen, “An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SENSYS' 03)*, pp. 171-180, Nov. 2003.
- [15] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, “An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS' 04)*, pp. 224-231, Apr. 2004.
- [16] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SENSYS' 04)*, pp. 95-107, Nov. 2004.
- [17] A. El-Hoiydi and J. Decotignie, “WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 9th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC' 04)*, vol. 1, pp. 244-251, Jul. 2004.
- [18] E. Kim, D. Kaspar, C. Gomez, C. Bormann, Problem Statement and Requirements for 6LoWPAN Routing, Feb. 2011. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6lowpan-routing-requirements-09>
- [19] J. W. Hui and D. E. Culler, “IP is dead, long live IP for wireless sensor networks,” in *SenSys' 08: Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. New York, NY, USA: ACM, pp. 15-28, 2008.

약 력



정 훈

1997년 전남대학교 공학사
 1999년 전남대학교 공학석사
 1999년 ~ 현재 한국전자통신연구원 지능형센서네트워크연구팀
 신입연구원
 관심분야 : RFID/USN, ZigBee, 6LoWPAN, WPAN,
 USN기반 수질관리



한 동 혁

2009년 연세대학교 공학 학사
 2009년 ~ 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학부
 석·박사 통합 과정
 2009년 ~ 현재 연세대학교 통신네트워크 연구실 연구원
 관심분야 : QoS, 센서 네트워크



남 상 준

2011년 연세대학교 공학 학사
 2011년 ~ 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학부 석사 과정
 2011년 ~ 현재 연세대학교 통신네트워크 연구실 연구원
 관심분야 : Wireless Sensor Network, 6LoWPAN,
 Cognitive radio



김 관 중

1982년 충남대학교 이학사
 1984년 충남대학교 이학석사
 1984년 ~ 현재 한국전자통신연구원 지능형센서네트워크연구팀
 책임연구원
 관심분야 : RFID/USN, 환경IT융합, USN기반 수질관리



정 중 문

1992년 연세대학교 공학 학사
 1994년 연세대학교 공학 석사
 1999년 펜실베이니아 주립대학교 전기공학 박사
 1997년 ~ 1999년 펜실베이니아 주립대학교 조교수
 2000년 ~ 2004년 오를라호마 주립대학교 조교수
 2004년 ~ 2006년 오를라호마 주립대학교 부교수(장년보장)
 2000년 ~ 2005년 미국 OCLNB 연구소 소장
 2000년 ~ 2005년 미국 국방부(US DoD)연구책임자
 2005년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
 관심분야 : 모바일 Ad-hoc 네트워크, 네트워크 보안,
 네트워크 최적화