

무선 센서 액추에이터 네트워크에서의 시간지연을 고려한 노드 스케줄링 제어 기법[☆]

A Node Scheduling Control Scheme with Time Delay Requirement in Wireless Sensor Actuator Networks

변희정^{1*}
Heejung Byun

요약

무선 센서 액추에이터 네트워크(WSAN) 시스템은 기존의 무선 센서 네트워크(WSN)에서 액추에이터 기능을 추가한 센서 노드들을 연결하여 망을 구성하는 시스템이다. 액추에이터는 센서 노드와 함께 작동하며, 재난구호, 군용 감시체계, 건강 모니터링 및 기반시설 보안 등의 여러 응용분야에 적용된다. 이러한 응용분야는 적시에 정확하게 작동하여 데이터를 신뢰성 있게 전달하는 능력이 요구된다. 생물학적으로 영감을 받은 모델링 기법은 개별적인 단순함을 유지하면서 동시에 강인성과 확장성, 적응성을 달성할 수 있는 기법으로 최근 상당한 관심을 받아오고 있다. 본 논문에서는 생물학적 메커니즘 중 전염병 전파 모델을 기반으로 이산 동적 모델을 제안하고 WSAN 시스템에 적용하고자 한다. 이를 위해 에너지 소모를 최소화하면서 동시에 시간지연 구속조건을 갖는 데이터 전파를 위한 노드 스케줄링 기법을 제안한다. 제안된 기법의 평형 상태 분석과 제어이론을 바탕으로 시스템의 안정성을 분석한 후 시뮬레이션 결과를 통해 요구 지연 시간을 만족하는 동시에 에너지 소모를 줄이는 성능을 검증한다.

☞ 주제어 : 무선 센서 액추에이터 네트워크, 노드 스케줄링, 시간 지연

ABSTRACT

Wireless sensor-actuator networks (WSANs) enhance the existing wireless sensor networks (WSNs) by equipping sensor nodes with an actuator. The actuators work with the sensor nodes and perform application-specific operations. The WSAN systems have several applications such as disaster relief, intelligent building, military surveillance, health monitoring, and infrastructure security. These applications require capability of reliable data transfer to act responsively and accurately. Biologically inspired modeling techniques have received considerable attention for achieving robustness, scalability, and adaptability, while retaining individual simplicity. In this paper, an epidemic-inspired algorithm for data dissemination with delay constraints while minimizing energy consumption in WSAN is proposed. The steady states and system stability are analyzed using control theory. Also, simulation results indicate that the proposed scheme provides desirable dissemination delay and energy saving.

☞ keyword : wireless sensor actuator networks, node scheduling, time delay

1. 서론

무선 센서 네트워크(WSN)는 다양한 물리적 현상을 감지하고 감시할 수 있는 장치들을 연결한다. 일반적으로

WSN은 배터리로 작동되는 다수의 작은 센서 노드들로 구성되어 있다. 최근 다양한 과업을 수행하는 액추에이터 노드가 도입되었고 센서와 액추에이터는 무선 센서 액추에이터 네트워크 (WSAN)를 형성할 수 있게 되었다[1]-[2]. WSAN에서 센서는 물리적 환경에 관한 정보를 수집하며 동시에 액추에이터가 환경에 적합한 결정을 내리고 적정 조치를 취한다. WSAN 적용분야로는 재해 구제, 지능형 빌딩, 군용 감시 체계, 건강 감시, 기반 시설 보안 등이 있다. 이러한 비상 상태와 구조 응용 분야와 같은 임무필수 (mission-critical)분야는 응용분야에 특화된 기능과 신뢰할 수 있는 성능 보장을 요구한다. 또한 환경을 감지하고 난

¹ Dept. of IT, Suwon University, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 445-701, Korea.

* Corresponding author (heejungbyun@suwon.ac.kr)

[Received 22 June 2016, Reviewed 1 July 2016, Accepted 3 August 2016]

☆ 이 논문은 2014년도 정부 (미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입 (No. 2014R1A1A3050424).

후 조치를 취하기 때문에 조치를 취하는 시점에 센서 데이터가 유효해야 한다. 따라서 효율적이고 신뢰할 수 있는 자료 전송 체계가 적시에 정확하게 작동해야 한다. 하지만 기존의 WSN을 위한 매체접근제어(media access control)(MAC) 프로토콜은 주로 에너지 절감을 위해 설계되었고 이러한 에너지 소비 절감은 추가적인 중단간 시간 지연을 유발하며, 이는 역동적인 네트워크 변화 환경에서 WSN 시스템이 신뢰할 수 있는 통신 요건을 충족시키기 어렵게 만든다. 따라서 WSN 시스템에서는 에너지 절감과 지연 시간 요구를 만족하는 이중적인 목표를 갖는 신뢰할 수 있는 노드 스케줄링 제어 기법이 필요하다.

생물학적으로 영감을 얻은 모델들 중, 전염병 기반 통신 모델은 무선 네트워크에서 데이터를 전송하는 효과적인 수단을 제공한다 [3]-[11]. 전염병 이론의 전염병 개념으로 모델링된 데이터 전파와 관련된 유명한 연구 중 하나는 SPIN이다[4]. 이 연구에서는 모든 노드에 개별 노드 관측의 효율적인 전파에 관심을 집중했으며, 네트워크에서 불필요한 전송을 줄여주는 데이터 기술자 (data descriptor)를 제안하였다. Firecracker 프로토콜[5]은 무선 네트워크를 통해 데이터가 빠르게 전파되도록 라우팅과 브로드캐스트를 결합한 기법을 제안하였다. Trickle[6]은 네트워크에서 모든 노드에 가능한 빨리 코드 갱신을 전파하고 관리하기 위해 제안되었다. 이 프로토콜의 핵심적인 내용은 이웃하는 노드 사이에서 전송을 제한하기 위해 브로드캐스트 속도의 동적인 조정을 이용하는 “polite gossip”이다. 이는 노드가 코드를 전파할 때를 결정하는 메커니즘을 제공한다. Deluge [7]은 Trickle 원리를 기반으로 대형 데이터 객체의 전송을 지원하는 특성을 추가하였다. 미들 웨어는 원하는 신뢰도에 따라 과정을 조절하는 정보 전파 기술을 사용하여 제어된 전염병 방식 전파를 제공하기 위해 제안되었다[8]. 또한 MRO (multi-rumor overwriting) 모델도 제안되었다[9]. 이 모델은 주기적으로 감지된 데이터의 전파와 상호작용에 대해 설명하고 있으며, 이는 네트워크에 유의한 간섭을 초래하지 않고, 가시를 이용하여 분배된다. 하지만 이러한 생체 기반 모델들을 이용한 알고리즘들은 역동적인 네트워크 조건 하에서도 고정된 파라미터를 이용하므로 특정한 응용분야에 대한 원하는 성능 수준을 보장하기 힘들다. 또한 기존의 알고리즘은 해석 모델 보다는 주로 실험 결과를 기반으로 시스템 성능을 확인하므로 시스템 안정성 측면에서 이론적으로 분석되지 않았다. 안정성 문제는 이들 시스템의 해석적 복잡성 때문에 시뮬레이션 결과로만 확인되었다.

이러한 문제를 다루기 위해 본 논문에서는 전염병 이

론에 의해 영감을 받은 지연시간 요구를 고려한 데이터 전파 기법을 제안한다. 제안된 기법은 응용분야의 시간 지연 요구사항에 따라 노드 상태를 제어하며, 이는 정보 확산율이 동적으로 조절되도록 한다. 또한 제안된 기법이 원하는 전파 시간지연과 시스템 안정성을 보장함을 제어 이론을 바탕으로 증명한다.

제안된 방식의 주요 기여는 (1) 전염병 체계를 기반으로 하는 WSN 을 위한 새로운 모델 제안하였으며 (2) 제안된 모델의 동력학은 자동으로 WSN 시스템 성능이 역동적인 네트워크 조건에서 에너지 소모를 최소화 하며, 원하는 전파 시간지연을 갖도록 하며, (3) 제어 이론을 바탕으로 네트워크 응답성과 정상상태를 도출하고, (4) 안정성에 대한 이론적 분석을 통해 시스템 파라미터 조건을 제공한다는 것이다.

2. 노드 스케줄링 알고리즘

2.1 네트워크 모델

우리는 하나 혹은 여러 개의 소스 노드가 모든 액츄에이터에 메시지를 전파하는 WSN을 고려한다. 노드의 집합을 $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 로 정의하고, 각 노드는 두 가지 상태 즉 활성화 (active) 또는 슬립(sleep) 중 하나로만 존재할 수 있다. 노드는 슬립일 때 무선 통신을 비활성화 시키며, 활성화될 때 정보 패킷을 교환하기 위해 무선 기능을 활성화 한다.

초기에는 모든 노드들은 주기 I_M 으로 활성화 한다. 노드가 켜져 있는 동안, 새로운 데이터를 수신했을 경우, 노드는 계산된 확률로 이웃에 그 데이터를 전송하며, 주기 $I_m(I_m < I_M)$ 으로 활성화 된다. 노드가 모든 타임 슬롯마다 시간 간격 I_m 으로 무선 기능이 활성화 되고 이 때, 제안된 기법으로 노드의 활성/슬립 상태를 결정한다. 활성화되면, 노드는 시간 간격 T_a 동안 작동한 채 유지되며, 이후 슬립 모드로 들어간다. 활성화되는 동안, 노드가 새로운 데이터를 받는다면, 노드는 데이터를 이웃 노드들에게 전송한다. 반면 슬립상태가 되면 무선 기능을 비활성화 시키고 I_m 시간 동안 슬립상태를 지속한다.

2.2 알고리즘

전염병 이론의 Susceptible-Infected-Susceptible (SIS) 모델 ([10]-[11])을 기반으로 다음과 같은 이산 동적 모델을 제안한다.

$$N_s(n+1) = N_s(n) - \alpha(n)N_a(n)N_s(n) + \beta N_s(n)$$

$$N_a(n+1) = N_a(n) + \alpha(n)N_a(n)N_s(n) - \beta N_a(n)$$

$$N_t(n) = N_s(n) + N_a(n),$$

여기서 $N_s(n)$ 와 $N_a(n)$ 는 각각 타임 슬롯 n 에서 슬립 상태에 있는 노드와 활성화 상태에 있는 노드의 수이며, α 는 감염률 (정보 확산률), β 는 제어 파라미터, N_t 는 총 노드 수이다. 위의 동적 모델은 활성화 노드의 수가 동적인 감염도 α 에 의해 결정되게 한다. 일반적인 SIS 기반 알고리즘은 고정된 확산률로 정보를 전달하게 된다. 하지만 응용 분야에 대해 원하는 성능뿐만 아니라 네트워크 상태에 따라 확산률을 조절하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위해 α 값을 제어하는 α -제어기를 제안한다. α -제어기를 설계하기 전에, 전파 시간지연과 응용분야의 지연시간 요건을 각각 $d(n)$ 과 d_r 로 정의한다. 소스 노드가 패킷을 전송할 때, 전송 시간을 나타내는 타임스탬프 (timestamp)를 포함한다. 각 노드는 표에 전파 지연시간 값을 저장한다. 초기 전파 지연시간 값은 0이며, 매 제어주기마다 초기값으로 리셋 된다. 노드가 패킷을 수신하면, 노드는 소스 노드에서 자신까지의 패킷 시간 지연을 측정하고, 저장된 전파 지연 시간을 이전에 저장된 전파 지연시간과 수신된 패킷으로부터 측정된 패킷 시간지연 사이에 최대 값으로 갱신한다. 이후 이 노드는 새롭게 저장된 전파 시간 지연으로 패킷을 전달한다. 전파 지연 시간을 이용하여, α -제어기는 다음과 같은 식으로 제안한다:

$$\alpha(n+1) = (1 - \varepsilon)\alpha(n) + \eta\Phi(\sigma(n))$$

$$\sigma(n) = d(n) - d_r,$$

여기서 ε ($\ll 1$)은 양의 상수이며, η 는 선택해야 하는 제어 파라미터이다. 함수 Φ 는 $[-d_M, \infty]$ 구간에서 증가함수이며, 여기서 d_M 은 지연시간 요건의 상한 값이다. 즉 측정된 시간지연이 요구조건을 초과할 경우, α 값이 증가하며, 이는 전체 노드 중 새롭게 활성화된 노드의 증가로 이어진다. 측정된 시간지연이 시간지연 요건보다 작을 경우, α 값은 감소하며, 슬립 상태의 노드 수 증가를 야기한다. 동적 모델에 의해 결정된 N_a 값을 이용하여, 각 노드는 다음 타임 슬롯 동안, 노드가 활성화 또는 슬립될 지를 결정한다. 각 노드들은 $[0, 1]$ 구간에서 균일하게 분포하는 난수 값 ω 를 독립적으로 생성한다. 활성화 노드와 총 노드의 비 (N_a/N_t)가 ω 보다 작다면, 노드는 슬립 상태로 들어간

다. 이에 반해 활성화된 비율이 ω 보다 크다면, 노드는 다음 타임 슬롯 동안 활성화 상태가 된다. 전파 시간지연이 필요한 시간지연을 초과할 경우, α 와 N_a 값은 증가하며, 활성화될 확률을 더욱 높여 준다. 이는 지연시간 축소와 더 빈번한 패킷 전송을 야기하지만, 전파 지연시간이 필요한 시간지연보다 더 작다면, α 와 N_a 값이 감소하고, 슬립 시간 증가로 에너지 절감으로 이어진다. 활성화 되어 있는 동안, 노드가 k 번 연속 타임 슬롯 동안 어떠한 패킷도 받지 못했다면, 측정된 시간지연 값 d 는 0으로 쓰이며, N_a 가 줄어든다. d 가 여전히 0인 상태에서 N_a 가 최소 N_a 에 도달하면, 노드는 초기 상태로 돌아가고 매번 I_M 주기로 활성화 된다. 결과적으로, 주어진 응용분야 요건 수준과 네트워크 조건에 대해, 감염률(정보 확산률) α 가 결정되며 이로 인해 활성화된 노드 수 N_a 를 효율적으로 제어할 수 있게 된다. 따라서 특정한 응용분야에 대해 원하는 성능 수준에 따라 노드 스케줄링이 이뤄지게 된다.

2.3 평형점 분석 및 안정성 검증

함수 $\Phi(\sigma(n))$ 를 다음과 같이 1차 함수로 간단하게 모델링한다:

$$\Phi(\sigma(n)) = d(n) - d_r.$$

N_t 가 전체 전염 과정 동안 대략 일정하다는 즉 $N_t(n) \approx N$ 가 성립 하에, N_{as} 와 α_s 를 N_a 와 α 의 정상상태 값이라 하자. 제안된 이산 동적 모델은 다음과 같이 정리된다:

$$N_a(n+1) = N_a(n) + (\alpha(n)N - \beta)N_a(n) - \beta N_a(n)^2.$$

위 식으로 다음과 같은 평형 상태를 얻을 수 있다:

$$N_{as} = N - \frac{\beta}{\alpha_s}.$$

위의 평형상태에 따르면 지연시간 요구사항에 따라 활성화된 노드의 수가 변한다는 점을 알 수 있다. 즉 시간지연 요건이 여유가 있어 질수록(큰 값), α_s 값은 작아지며, N_{as} 값이 더 작아지게 한다. 이에 반해 지연시간 요건이 엄격해질수록(작은 값), α_s 값은 더 커지며, N_{as} 값이 더 커지게 한다. $\Phi(\alpha_s) = \delta s < \delta^*$ 를 만족하는 δ^* 를 고려하면 N_{as} 의 상한 값은 다음과 같이 유도된다.

$$N_{as} < N - \frac{\varepsilon}{\eta\delta^*}\beta.$$

$0 < N_{as} < N$ 이기 때문에, β 조건을 다음과 같이 유도할 수 있다:

$$0 < \beta < \eta \frac{\Phi(\sigma_s)}{\varepsilon} N < \eta \frac{\delta^*}{\varepsilon} N.$$

또한 η 의 조건 역시 다음과 같이 유도된다:

$$0 < \eta < \frac{\varepsilon}{\delta^*}.$$

$\sigma^* = \Phi^{-1}(\delta^*)$ 라고 할 때

$$0 < \Phi^{-1}(\delta_s) < \sigma^*.$$

결국 정상상태에서 시간지연은 다음과 같이 유도된다.

$$d_r < d_s < d_r + \sigma^*.$$

이 결과에 따르면 정상상태에서 시간지연 범위는 지연 시간 요건 d_r 과 σ^* 값에 의해 결정된다. $\delta^*(> 0)$ 에 따라 N_{as} 와 d_s 제어 파라미터 β , η 의 범위는 자동으로 결정된다.

제안된 시스템의 응답성과 안정성을 검증하기 위해, $x = N_s/N$ 로 나타내면, 이산 동적 모델은 다음 식과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$x(n+1) = (1 + \alpha(n)N - \beta)x(n) - \alpha(n)Nx(n)^2$$

$$\alpha(n+1) = (1 - \varepsilon)\alpha(n) + \eta\Phi(\sigma(n)).$$

정상상태에 도달하기 위한 네트워크의 시간 상수(상승 시간) t_r 는 다음과 같이 주어진다.

$$t_r = \frac{1}{\alpha_s N - \beta},$$

여기서 α_s 는 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha_s = \frac{\eta}{\varepsilon} \Phi(\sigma_s) < \frac{\eta}{\varepsilon} \delta^*.$$

즉 제안된 시스템의 응답성은 지연시간 요구조건 d_r 에 따라 크게 달라진다. 지연시간 요구조건이 엄격해 질수록 (작아질수록), α 값은 점점 커져, 정상 상태에 도달하는 짧은 상승시간을 야기한다. 이에 반해 시간지연 요건이 여유가 있어질수록 (커질수록) 네트워크를 위한 상승시간이 점점 길어진다. 또한 α 값은 σ^* 에 따라 증가하며, 이는 더 짧은 수렴시간을 야기한다. 즉 σ^* 값이 커질수록, 지연시간의 원하는 범위는 더 넓어지며, 따라서 전파 시간지연

이 더 짧은 시간에 원하는 범위 내로 수렴할 수 있다. 이에 반해 σ^* 의 범위가 작아지면, 원하는 시간지연 범위 내로 수렴하기 위해 필요한 시간이 길어진다.

시스템의 안정성을 검증하기 위해, 비선형 시스템을 평균 정상상태 점에 대한 선형화를 통해 근사화 한다. $z(n) = [x(n) \alpha(n)]^T$ 라 하면, 다음과 같은 선형 시스템을 얻을 수 있다.

$$z(n+1) = Az(n),$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 1 + \beta - N\alpha_s & N\phi(1 - \phi) \\ 0 & 1 - \varepsilon \end{bmatrix},$$

이 때 $\phi = 1 - \beta/(N_{as})$ 이다. 즉, 파라미터가 다음 관계를 만족한다면 제안한 시스템은 점근적으로 안정 (asymptotically stable) 하게 되고 정상상태의 시간 지연은 $[d_r, d_r + \sigma^*]$ 사이에 존재함을 보장하게 된다.

$$0 < \eta < \frac{2\varepsilon}{N\delta^*}$$

$$0 < \beta < \eta \frac{\delta^*}{\varepsilon} N.$$

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 C++로 작성된 시뮬레이터를 이용하여 수행되었다. 시뮬레이션 시작 시점에 노드들은 시뮬레이션 영역 내부에 임의로 배치되었으며, 소스 노드는 중앙에 배치했다. 노드는 활성화 모드와 슬립 모드 사이를 스위칭하여 작동 주기를 시작한다. 소스 노드는 패킷을 주기적으로 생성하기 시작한다. 패킷은 순차 번호로 표시되어 있어, 노드가 중복된 패킷을 수신하거나 전달하지 않도록 한다. 소스 노드의 목표는 주어진 시간지연 요건 내에서 네트워크에 있는 다른 모든 노드 (액추에이터)에 패킷을 보내는 것이다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1에 기술하였다.

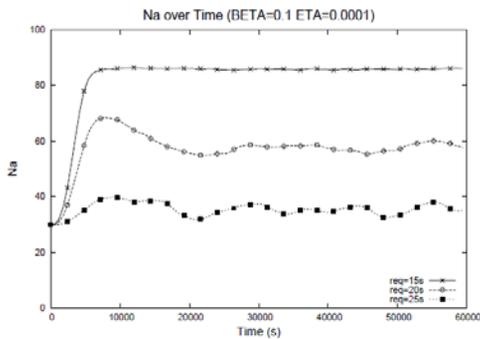
그림 1은 각각 15초, 20초, 25초의 지연시간 요건에 대한 제안된 방식에 따른 N_a 의 변화를 보여준다. 이 실험에서 노드 수는 100이다. N_a 가 시간지연 요건을 기준으로 각 경우에 일정한 값에 수렴함을 관찰 할 수 있다. 결과에 따르면 N_a 는 요구되는 시간지연이 짧아질수록 더 높은 값에 수렴한다. 또한 시간지연 요건이 엄격해 질수록 α 값이 증가하며, 반대로 정상상태로 도달하기 위한 상승시간이 짧아짐을 그림 1로 확인할 수 있다.

(표 1) 시뮬레이션 파라미터

(Table 1) Simulation parameters

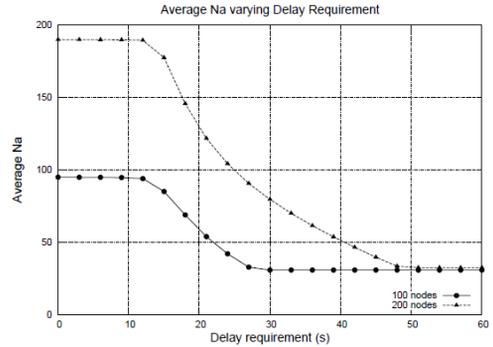
| Parameter Name | Default Value |
|----------------------------------|---------------|
| simulation area | 100m × 100m |
| number of nodes | 100, 200 |
| transmission range | 20m |
| carrier sense range | 40m |
| duty cycle (wakeup interval) | 1s |
| packet generation interval | 60s |
| current consumption: Tx | 17.4mA |
| current consumption: Rx | 19.7mA |
| current consumption: mode switch | 10.05mA |
| mode switch time | 300 μ s |
| backoff time | 30ms |
| initial N_a | 30 |
| β | 0.1 |
| η | 0.0001 |
| ε | 0.001 |
| δ^* | 0.01 |
| k | 1 |
| τ | 60s |
| D_{max} | 1000s |
| gossip_tx_count | 3 |
| gossip_tx_interval | 1s |

다음으로, 우리는 0에서 60초까지 변하는 지연시간 요건에 따른 제안된 방식의 평균 N_a 를 그림 2에서 보여주고 있다. 활성화된 센서 노드의 평균 숫자가 시간지연 요건에 의해 제어된다는 점을 확인할 수 있다. 요구 시간 지연이 길어질 수록 평균 N_a 가 증가한다. 이전 실험과 유사하게, 이 결과는 전파 시간지연과 에너지 소비 사이의 균형을 제어할 수 있는 범위가 존재한다는 사실로 보여준다. 100개의 노드를 사용하면, N_a 의 변화는 시간지연 요건 10과 30초 사이일 때 발생한다. 200개의 노드를 사용하면, 이 범위는 10과 50초 사이이다.



(그림 1) 요구지연 시간에 따른 N_a

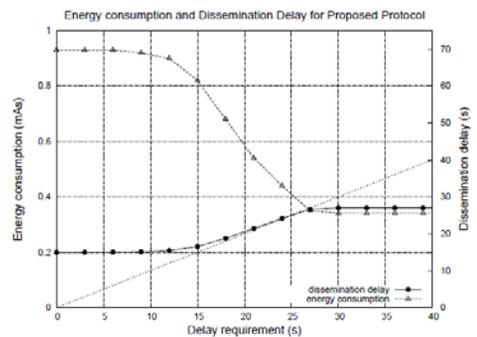
(Figure 1) Time behavior of N_a according to delay requirement



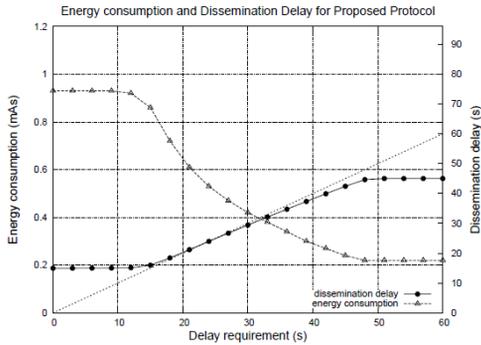
(그림2) 요구지연 시간에 따른 평균 N_a

(Figure 2) Averaged N_a according to delay requirement

그림 3은 제안된 방안의 에너지 소모와 최대 지연시간을 보여준다. 제어 가능한 범위 내에서 제안된 방식이 지연시간 요건을 충족하면서 에너지를 소모를 줄일 수 있도록 파라미터를 제어할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 그래프에서 점선은 전파 시간지연이 지연시간 요건과 동일한 경우이다. 제어 가능한 범위 내에서 우리는 지연시간 요건을 달성할 수 있음을 관찰할 수 있다. 그림 2와 3의 결과를 종합할 때, 지연시간 요건에 여유가 있을 수록, N_a 값이 감소하며, 이는 에너지 소모를 줄인다는 점을 보여준다. 이에 반해 지연시간 요건이 엄격해질수록, N_a 는 증가하며, 이는 지연시간 요건에 부합하기 위해 더 빈번한 패킷 전송을 초래한다. 시간지연 요건이 제어 가능한 범위 밖으로 설정되면, 전파 시간지연과 평균 에너지 소모는 중점 중 하나로 고정된다. 그림 3(a)와 (b)의 결과와 비교하여, 요구되는 지연시간이 긴 경우, 노드 당 에너지 소모가 낮기 때문에, 더 긴 네트워크 수명을 달성할 수 있다.



(a) 100 nodes



(b) 200 nodes

(그림 3) 제안된 알고리즘의 에너지 소모와 전파 시간지연.
(Figure 3) Energy consumption and dissemination delay for the proposed protocol

4. 결론

본 논문에서는 WSA를 위해 시간 지연을 고려한 노드 스케줄링 방식을 제안하였다. 전염병학적 모델을 WSA에서 사용하기 적합한 형태로 이산 동적 모델을 제안하였고 이 모델을 기반으로 WSA의 노드 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 응용분야에 대한 원하는 성능을 보장하기 위해, 제안된 방식은 정보 확산률을 제어하며, 이는 지연시간 요건과 동적 네트워크 환경에 따라 활성/슬립 노드 수를 결정하게 된다. 제안된 방안에 대해 제어 이론을 이용하여 시스템 성능을 분석하고 시스템 파라미터 조건을 유도했다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 요구되는 지연 시간을 만족하고 에너지 소모를 줄임을 확인하였다.

참 고 문 헌 (Reference)

[1] O. Akan, I. Akyildiz, and V. C. Gungor, "A real time and reliable transport protocol for wireless sensor and actor networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 16, no. 2, pp. 359-370, 2008.
<http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2007.900413>

[2] H. Salarian, K. Chin, and F. Naghdy, "Coordination in wireless sensor-actuator networks: A survey," *Journal of Parallel Distributed Computing*, vol. 72, no. 7, pp. 856-867, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpdc.2012.02.013>

[3] Pradip De and Sajal K. Das, Y. Gao, and D. Zuo, "Epidemic models, algorithm and protocols in wireless sensor and ad-hoc networks," John Wiley & Sons, doi:10.1002/9780470396360.ch3, 2008.

[4] J. Kulik, W. Rabiner, H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," *Proc. the Fifth ACM/IEEE Int. Conf. Mobile Computing and Networking*, pp. 174-184, 1999.
<http://dx.doi.org/10.1145/313451.313529>

[5] P. Levis and D. Culler, "The firecracker protocol," *Proc. the 11th ACM SIGOPS European workshop*, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1.1.1.2952>

[6] P. Levis, N. Patel, D. Culler, and S. Shenker, "Trickle: a self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks," *Proc. the 1st conf. Symp. Networked Systems Design and Implementation*, vol. 1, pp. 2-2, 2004.

[7] J. W. Hui and D. Culler, "The dynamic behavior of a data dissemination protocol for network programming at scale," *Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems*, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1145/1031495.1031506>

[8] M. Musolesi and C. Mascolo, "Controlled epidemic-style dissemination middleware for mobile ad hoc Networks," *Proc. 3rd Ann. Int. Conf. Mobile and Ubiquitous Systems*, pp.1-9, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1109/MOBIQW.2006.361736>

[9] G. Williamson, D. Cellai, S. Dobson, and P. Nixon, "Modelling periodic data dissemination in wireless sensor networks," *UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, pp.499-504, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1109/EMS.2009.31>

[10] R. M. Anderson and R. M. May, "Infectious diseases of humans: dynamics and control," Oxford University Press, 1992.

[11] M. E. J. Newman, "The structure and function of complex networks," *SIAM Review*, vol. 45, pp. 167, 2003.
<http://dx.doi.org/10.1137/S003614450342480>

● 저 자 소 개 ●



변 희 정 (Heejung Byun)

1999년 숭실대학교 정보통신공학과 졸업(학사)

2005년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석박사)

2010 삼성종합기술원 전문연구원/삼성전자 DMC연구소 책임연구원

2010~현재 수원대학 IT대학 정보통신공학과 조교수

관심분야 : 네트워크 모델링 및 시스템 분석

E-mail : heejungbyun@suwon.ac.kr