

# 무선 센서 네트워크에서의 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법

## (Multipath-Based Congestion Control Scheme in Wireless Sensor Networks)

이 동 호 <sup>†</sup>                      정 광 수 <sup>\*\*</sup>  
(Dongho Lee)                      (Kwangsue Chung)

**요 약** 무선 센서 네트워크에서는 다수의 노드에서 소수의 싱크로 수렴하는 트래픽의 특성으로 인해 네트워크의 혼잡이 빈번히 발생한다. 기존의 혼잡 제어 기법은 혼잡 발생 시 트래픽 제어를 통해 혼잡을 회피할 수 있으나 트래픽의 제어는 응용에서 요구하는 피델리티를 위반한다는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 리소스의 제어를 통하여 혼잡을 회피하는 멀티패스 기반의 혼잡 제어 기법을 제안한다. 멀티패스 기반 혼잡제어 기법은 혼잡 발생 시 다수의 대체 경로를 통하여 트래픽을 분산시켜 전송하므로 혼잡 회피가 가능하고 네트워크 리소스의 활용도 또한 증대한다. 실험을 통해 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법이 응용의 피델리티를 만족시키며 효과적으로 혼잡을 제어할 수 있음을 확인하였다.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, 멀티패스, 혼잡 제어, 리소스 제어

**Abstract** In wireless sensor networks, due to the many-to-one convergence of upstream traffic, congestion more probably appears. Network congestion can be alleviated by controlling incoming traffic, but using traffic control can violate fidelity level required by

· 본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

· 이 논문은 제36회 추계학술발표회에서 '무선 센서 네트워크에서의 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것이다

<sup>†</sup> 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과  
dhlee@adams.kw.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수  
kchung@kw.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 24일

심사완료 : 2010년 1월 28일

Copyright©2010 한국정보과학회: 개인 목적이 아닌 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제4호(2010.4)

applications. In this paper, we propose multipath-based congestion control scheme alleviating congestion by resource control for wireless sensor networks. When congestion occurs, the multipath-based congestion control scheme distributes network traffic through multiple alternate paths, and consequently, the scheme enables to detour in the congested spot and increase resource utilization. Our results show that our multipath-based congestion control scheme can satisfy fidelity level required by applications and alleviate congestion effectively.

**Key words** : Wireless Sensor Networks, Multipath, Congestion Control, Resource Control

### 1. 서론

무선 센서 네트워크는 기존 네트워크보다 많은 수의 노드로 구성되며 노드 간의 조밀도가 높은 특징을 갖는다. 센싱 필드에 배치된 많은 센서 노드에 의해 생성된 센싱 정보는 멀티홉을 통해 소수의 싱크 노드로 전달된다. 이와 같은 통신 구조로 인해 무선 센서 네트워크는 기존 네트워크와는 상이한 트래픽 구조를 갖는다[1].

무선 센서 네트워크에서의 트래픽은 목적지 방향에 따라 다른 특성을 보인다. 싱크 노드에서 다수의 센서 노드로 향하는 하향 트래픽은 일대다로 발산되는 특성을 갖는다. 이러한 하향 트래픽은 주로 싱크 노드에서 센서 네트워크로 명령을 보내거나 각 센서 노드를 원격 프로 그래밍하기 위하여 사용되며 대부분 간헐적으로 발생한다. 반면 다수의 센서 노드에서 싱크 노드로 향하는 상향 트래픽은 다대일로 수렴하는 특성을 보이며 주로 센싱 등의 태스크 수행 결과를 보고하기 위하여 사용된다. 상향 트래픽은 센서 네트워크 트래픽의 대부분을 차지하기 때문에 네트워크의 성능에 많은 영향을 미친다. 즉 상향 트래픽의 폭주로 인하여 네트워크 혼잡이 발생하게 되면 패킷 손실이 많고 높은 전송 지연을 보이게 되며, 이러한 현상은 전체 센서네트워크의 에너지 효율성을 떨어뜨리고 응용의 서비스 품질(Quality of Service)에 영향을 미친다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 상향 트래픽으로 인해 발생하는 혼잡을 제어하기 위한 기법은 반드시 필요하며 많은 연구가 진행되고 있다[2].

기존의 혼잡 제어 기법은 트래픽 제어 기법과 리소스 제어 기법으로 나뉜다. 트래픽 제어 기법은 트래픽의 양이나 버퍼의 상태를 모니터링하여 혼잡을 감지하고 이를 센서 노드에게 통지하여 센서 노드의 트래픽 전송률 조절을 통하여 혼잡을 완화시킨다. 트래픽 제어를 통한 혼잡 제어는 사용 가능한 리소스에 맞추어 적절히 혼잡 제어를 수행할 수 있으나 센서 네트워크 응용에서 요구하는 피델리티를 위반할 수 있다는 단점이 있다. 리소스 제어 기법은 혼잡 발생 시 사용 가능한 리소스의 양을

요구되는 트래픽에 맞게 증가시켜 혼잡을 처리하는 기법이다. 이와 같은 리소스 제어 기법은 응용의 퍼포먼스를 위반하지 않고 혼잡을 제어할 수 있다[3].

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어를 위하여 리소스 제어 기법과 트래픽 제어 기법을 혼합한 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법을 제안한다. 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법은 혼잡 발생 시 가용 리소스인 대체 경로를 탐색하고 멀티패스 전송을 이용하여 트래픽을 분산시켜 혼잡을 회피한다. 가용 리소스를 통해 모든 혼잡이 해소되지 않을 경우엔 트래픽 제어를 수행하여 응용의 퍼포먼스 위반을 최소화 한다.

본 논문의 2장에서는 무선 센서 네트워크에서의 혼잡 제어 기법에 대한 관련 연구를 기술하였고 3장에서는 제안하는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법에 대해 상세히 기술하였다. 4장에서는 실험을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가하였으며 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

## 2. 관련 연구

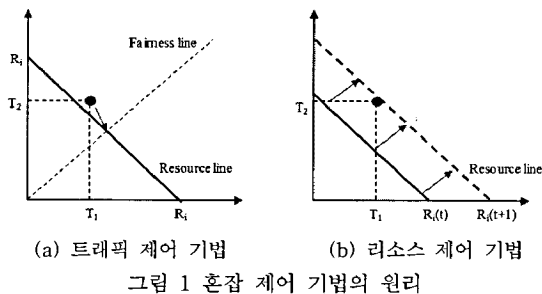
기존의 혼잡 제어 기법은 트래픽 제어 기법과 리소스 제어 기법으로 나뉜다. 트래픽 제어 기법은 트래픽의 양이나 버퍼의 상태를 모니터링하여 혼잡을 감지하고 이를 센서 노드에게 통지하여 센서 노드의 트래픽 전송률 조절을 통하여 혼잡을 완화시킨다. 트래픽 제어 기법에서의 주요 고려 사항은 리소스의 효율적인 이용과 플로우 간 공정성이다. 그림 1(a)는 트래픽 제어 기법의 원리를 나타낸다. 두 개의 플로우가 T1과 T2의 전송률로 송신을 할 때, 수신자의 리소스보다 전송률의 합이 크다면 혼잡이 발생된다. 이때 트래픽 제어에서는 수신자의 이용 가능 리소스인 리소스 라인 안쪽으로 전송률을 이동시켜야 하며 각 플로우 간 공정성을 보장해주기 위해 공정성 라인에 전송률을 위치시키게 된다.

리소스 제어 기법은 혼잡 발생 시 사용 가능한 리소스의 양을 요구되는 트래픽에 맞게 증가시켜 혼잡을 처리하는 기법이다. 그림 1(b)는 리소스 제어 기법의 원리를 나타낸다. 수신자에게 주어진 리소스보다 요구되는 트래픽이 더 많을 때 수신자는 리소스를 트래픽에 맞추

어 증가시켜 혼잡을 회피한다[3].

무선 센서 네트워크에서 혼잡 제어에 관한 기존 연구는 주로 트래픽 제어 기반의 혼잡 제어 기법을 제안하였다. ESRT(Event-to-Sink Reliable Transport)[4]는 트래픽의 양을 변화시키며 그에 따른 신뢰도를 측정하여 가장 신뢰도가 높으며 혼잡이 발생하지 않는 최적의 동작 구간을 찾는다. 그 후, 네트워크 트래픽의 양이 너무 많거나 적을 때 최적의 동작 구간의 전송률로 점진적으로 변화하여 혼잡을 회피한다. STCP(Sensor Transmission Control Protocol)[5]는 싱크 노드에서 동작하는 신뢰적인 전송 프로토콜로 다수의 응용에서 요구하는 전송률 및 신뢰성 정도에 따른 혼잡 제어를 수행한다. STCP는 중간 노드에서 트래픽을 모니터링하여 혼잡을 판별하고 이를 전송 패킷의 헤더에 피기백하여 싱크 노드에게 혼잡의 발생을 알린다. 싱크 노드는 각 노드의 전송률 변경을 요구하여 혼잡을 회피한다. PCCP(Priority-Based Congestion Control)[2]는 홉-바이-홉 기반의 혼잡 제어 프로토콜로 패킷의 도착 시간 간격과 서비스 시간 간격의 차를 이용하여 혼잡을 측정한다. 혼잡이 측정되면 ICN(Implicit Congestion Notification) 패킷을 통해 혼잡을 통지하고, 통지받은 노드는 매체 접근 제어(Media Access Control) 계층의 전송률을 조절하여 혼잡을 회피한다. PCCP는 또한 각 노드의 우선순위에 따라 다른 전송률을 제공하여 가중치 공정성(Weighted Fairness)을 이룰 수 있다. 이와 같은 트래픽 제어 기반의 혼잡 제어 기법은 효과적으로 혼잡을 완화할 수 있으나 응용에서 의미 있는 정보 파악을 위해 요구하는 각 노드의 데이터 전송률을 변화시키게 되므로 응용에서 요구하는 퍼포먼스가 보장될 수 없다. TARA(Topology-Aware Resource Control)[3]는 리소스 제어 기법을 사용한 혼잡 제어 기법으로 혼잡 제어를 위하여 휴면중인 임의의 수의 노드를 활성화 시켜서 우회 경로로 사용한다. 이와 같이 네트워크상의 휴면 노드를 이용하기 위해서는 네트워크의 토폴로지를 인지하는 것이 중요하다. 또한 다양한 혼잡 발생 토폴로지를 가정하여 그에 알맞은 트래픽 분산 방법을 제시한다. TARA는 응용의 퍼포먼스 요구를 만족시키면서 혼잡을 완화할 수 있으나 토폴로지 인지를 위한 오버헤드가 크고, 트래픽 분산을 위한 정확한 알고리즘이 제시되지 않았다는 단점을 갖는다.

TADR(Traffic-Aware Dynamic Routing)[6]은 포텐셜 기반의 트래픽 인지 동적 라우팅 알고리즘으로 네트워크를 포텐셜 필드로 정의하고 혼잡 발생 시 혼잡 지점을 인식하여 이를 우회하는 경로를 사용하여 혼잡을 회피한다. 기본적인 라우팅 백본 설정을 위해 각 노드의 깊이 정보를 사용하고 혼잡 감지 및 트래픽 인지를 위



하여 큐의 길이 정보를 사용한다. 이와 같은 포텐셜 필드 기반 라우팅 기법은 혼잡 발생 시 우회 경로를 사용하여 트래픽의 공간적 분산이 가능하며 우회 경로가 없을 경우 전송 억제를 이용하여 트래픽의 공간적 분산이 가능하다. 하지만 TADR은 혼잡의 회피를 위해 하나의 대체 경로만을 사용하게 되므로 네트워크 토폴로지의 리소스를 최대한 사용하지 못하는 단점을 갖는다.

**3. 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법**

제안하는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법은 혼잡 발생 시 이용 가능한 다수의 대체 경로를 통해 트래픽을 분산시켜 혼잡을 완화시키는 기법이다. 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법에서는 가용 리소스인 대체 경로를 검색하기 위하여 멀티패스 탐색 알고리즘이 사용된다. 또한 혼잡 발생 시 사용할 대체 경로를 계산하기 위한 멀티패스 협상 기법, 그리고 각 대체 경로로 분산시킬 전송률을 계산하는 트래픽 분산 기법이 사용된다.

**3.1 멀티패스 탐색 알고리즘**

멀티패스 탐색 알고리즘은 대체 경로를 통한 트래픽 분산을 위해 상호 간섭이 존재하지 않은 서로 다른 경로를 찾기 위한 알고리즘이다. 그림 2와 같은 상호 간섭이 없는 두 개의 경로를 통해 소스 노드의 트래픽을 분산시킬 경우 각 링크에서 감당할 트래픽의 양이 감소되어 트래픽 집중에 따른 혼잡 발생을 완화시킬 수 있다.

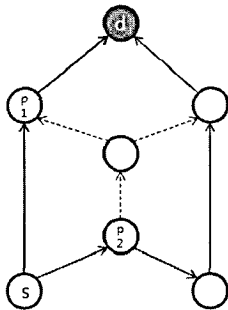


그림 2 멀티패스 전송의 예

멀티패스 탐색 알고리즘은 라우팅 프로토콜이 동작하여 기본적인 경로가 만들어진 이후 동작한다. 먼저 각 노드는 이웃 노드 간 깊이와 자신의 이웃 노드 정보를 교환한다. 교환이 완료되면 수집한 정보를 이용하여 대체 부모 노드의 후보를 계산한다. 이때 부모 노드가  $w$  인  $v$  노드에 대해 대체 부모 노드 후보의 집합  $C(v)$ 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$C(v) = \left\{ \begin{array}{l} x | Depth(x) = Depth(v-1), \\ x \notin Neighbor(w) \end{array} \right\} \quad (1)$$

대체 부모 노드 후보  $C(v)$ 에 대해  $v$  노드는 CPN (Candidate Parent Notification) 메시지를 전달하여 대체 부모 노드임을 알린다. 또한 CPN 메시지에  $v$  노드의 기본 경로에 속한 노드의 리스트를 포함한다. CPN 메시지를 수신한 대체 부모 노드는 자신의 경로가  $v$  노드와 중첩되는 경로인지 확인하고 그 경우 라우팅 프로토콜을 다시 동작시켜  $v$  노드와 서로소인 경로를 찾아 대체 경로로 사용한다.

**3.2 멀티패스 협상 기법**

제안하는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법에서 네트워크의 혼잡 판별은 각 노드에서 분산적으로 수행된다. 각 노드는 정의된 혼잡 판별 주기 동안의 데이터 수신율과 송신율의 비율을 통해 계산한다.  $t$  시간에서 노드의 혼잡 정도  $d(t)$ 는 식 (2)와 같이 정의 된다.  $r_i$ 와  $r_o$ 는 각각 수신율과 송신율을 나타내며  $w_i$ 와  $w_o$ 는 수신율과 송신율의 가중치를 나타낸다.  $\frac{N}{dur}$ 은 혼잡 판별 시간 동안의 패킷 수를 나타낸다.

$$d(t) = \frac{r_o(t)}{r_i(t)} = \frac{(1-w_o) \times r_o(t-1) + w_o \times \frac{N_o}{dur}}{(1-w_i) \times r_i(t-1) + w_i \times \frac{N_i}{dur}} \quad (2)$$

혼잡 정도가 1보다 작은 경우 혼잡임을 판별하고 해당 노드는 토폴로지 상의 자식 노드에게 혼잡 통지 메시지를 전달한다. 혼잡 통지 메시지에 해당 노드의 혼잡 정도 정보가 삽입된다. 혼잡 통지 메시지를 수신한 노드는 부모 노드의 혼잡 정도 정보를 통해 가용 리소스를 계산하고 대체 부모 노드 집합에 MQ(Multipath Request) 메시지를 전달한다. MQ를 수신한 대체 부모 노드는 자신의 혼잡 정도  $d$ 가 1보다 크거나 같을 경우 MR(Multipath Reply) 메시지에 자신의 혼잡 정도 정보를 삽입하여 백오프 수행 후에 전송하여 MQ 메시지에 대해 응답한다. 특정 시간 동안 MR 메시지를 수집한 노드는 수집된 추가 리소스를 이용하여 자신의 트래픽을 분산하여 다수의 부모 노드에게 데이터를 전송한다. 그림 3은 멀티패스 협상 기법의 동작 과정을 나타낸다.

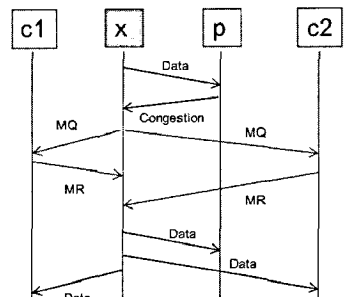


그림 3 멀티패스 협상 기법의 동작 과정

### 3.3 트래픽 분산 기법

부모 노드와 대체 부모 노드의 리소스 정보를 수집한 노드는 트래픽을 가용 리소스에 따라 분산한다. 트래픽을 처리하기 위한 가용 리소스가 부족할 경우 트래픽 분산 이전에 트래픽을 제어를 수행한다. 트래픽의 제어는 트래픽 분산 기법과 호환이 되기 위해 식 (3)과 같이 적용한다. 즉 새로운 전송률은 한 부모 노드의 가용 리소스와 그 이상의 리소스를 가진 부모 노드 수의 곱을 계산하여 가장 큰 값으로 정한다.

$$new\_rate = MAX(r_i),$$

$$r_i = resource_i \times n(\{x | x \in C, resource_x \geq resource_i\}) \quad (3)$$

각 부모 노드로의 트래픽의 분산은 송신 노드의 복잡도를 고려하여 동일한 전송률을 적용한다. 트래픽 분산 기법은 최대 전송률 분산과 최다 노드 분산으로 나뉜다. 최대 전송률 분산은 해당 노드의 전송률을 최소한으로 나누어 가용한 부모 노드에게 분산시키는 기법으로 최소한의 부모 노드를 사용한다. 최대 전송률 기반 트래픽 분산 기법의 유사 부호는 그림 4와 같다.

```

FOR p=1 TO parent_count
    count = 0
    FOR EACH node IN Parents
        IF resource(node)>=traffic_rate/p THEN
            dest[count] = node
            count = count + 1
        IF p == count THEN
            multipath_xmit(dest[], traffic_rate/p)
        END
    END IF
END IF
END FOR
END FOR
    
```

그림 4 최대 전송률 기반 트래픽 분산 기법

```

FOR p=parent_count TO 1
    enable = TRUE
    FOR EACH node IN Parents - except[]
        IF resource(node)<traffic_rate/p THEN
            except[count++] = node
            enable = FALSE
        END IF
    END FOR
    IF enable THEN
        multipath_xmit(Parents-except[], traffic_rate/p)
    END
END IF
END FOR
    
```

그림 5 최다 노드 기반 트래픽 분산 기법

최다 노드 분산 기법은 해당 노드의 전송률을 후보 부모 노드의 수로 나누고 나누어진 전송률을 지원하지 않는 부모 노드가 있을 경우 순차적으로 부모 노드의 수를 줄여가며 나누게 된다. 최다 노드 기반 트래픽 분산 기법의 유사 부호는 그림 5와 같다.

### 4. 실험 및 성능 평가

제안하는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법의 성능을 평가하기 위해 ns-2 시뮬레이터[7]를 이용하여 트래픽 제어 기반 혼잡제어 기법과 제안하는 기법을 구현하여 실험을 수행하였다. 실험 환경은 그림 6과 같은 토폴로지에서 s1 노드는 5초부터 전송을 시작하며 전송률을 변화시켰고, s2노드는 배경 트래픽의 역할로 10pkt/s의 트래픽을 지속적으로 노드 1에게 전송한다. 모든 노드는 초당 25개의 패킷을 처리할 수 있다.

그림 7은 s1 노드의 패킷 전송률을 증가시켰을 때 싱크 노드에서의 평균 패킷 수신율을 나타낸다. 패킷 전송률을 15pkt/s 이상으로 증가시킬 경우 혼잡이 발생하여 트래픽 제어 기법에서 송신 노드의 전송률을 감소시킨다. 한번 조정된 전송률은 트래픽의 상황이 바뀌지 않으므로 유지된다. 반면 제안하는 멀티패스 기반 혼잡제어 기법은 혼잡이 발생할 경우 트래픽 분산을 수행한다. 또한 혼잡 제어 주기마다 트래픽의 변화를 인지하여 적절한 전송률로 부모 노드 집합에 트래픽을 분산한다. 요구

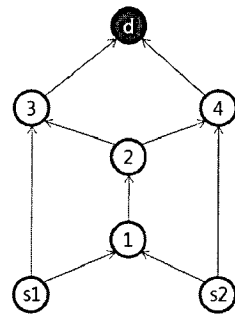


그림 6 네트워크 토폴로지

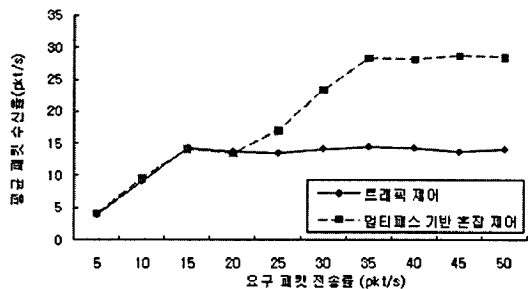


그림 7 전송률 증가에 따른 평균 수신율 비교

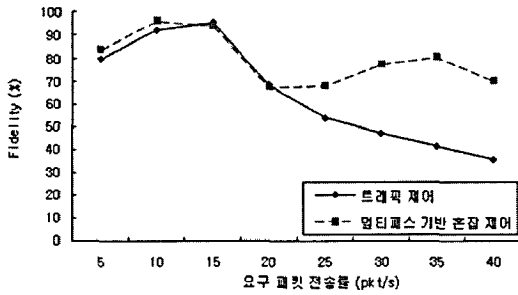


그림 8 전송률 증가에 따른 피델리티 값 비교

패킷 전송률이 35 pkt/s 이상이면 가용 리소스를 초과하기 때문에 최소한의 트래픽 제어를 수행한다.

그림 8은 s1 노드의 패킷 전송률을 증가시켰을 때 싱크 노드에서의 피델리티 값을 백분율로 나타낸다. 피델리티 값은 각 노드의 전송 요구량과 싱크 노드에서의 패킷 수신 수의 비율이다. 트래픽 제어는 혼잡 제어를 위해 송신 노드의 패킷 전송률을 변경하게 되므로 전송 요구량이 많을수록 피델리티 값은 감소한다. 반면 제안하는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법은 특정 수준의 트래픽 증가에 대해 60% 이상의 피델리티 값을 보임은 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 혼잡 제어를 위하여 멀티패스를 사용하여 혼잡을 분산시키는 멀티패스 기반 혼잡 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 혼잡 발생 시 미리 계산된 대체 부모 노드의 가용 리소스를 고려하여 트래픽을 다수의 노드로 분산한다. 또한 트래픽이 가용 리소스를 초과하는 경우 최소한의 트래픽 제어를 수행한다. 실험을 통하여 제안한 혼잡 제어 기법은 멀티패스를 이용하여 혼잡을 효과적으로 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 제안하는 두 가지 트래픽 분산 기법의 효율성을 분석하여 네트워크 특성에 따른 효율적인 기법 적용을 고려할 것이며, 기존에 제안된 다른 리소스 제어 기법과의 성능 비교를 수행하고자 한다.

참고 문헌

[1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communication Magazine*, vol.40, no.8, pp.104-112, August 2002.

[2] C. Wang, K. Sohrawy, V. Lawrence, B. Li, and Y. Hu, "Priority-based Congestion Control in Wireless Sensor Networks," *IEEE International Conference on Sensor Networks 2006*, vol.1, pp.22-31, June 2006.

[3] J. Kang, Y. Zhang, and B. Nath, "TARA: Topology-Aware Resource Adaptation to Alleviate Congestion in Sensor Networks," *IEEE Transaction on Parallel and Distributed System*, vol.18, issue. 7, pp.919-931, July 2007.

[4] Y. Sankarasubramaniam, O. Akan, and I. Akyildiz, "ESRT: Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks," *The ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing 2003*, pp.177-188, June 2003.

[5] Y. Iyer, S. Gandham, and S. Venkatesan, "STCP: A Generic Transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks," *International Conference on Computer Communications and Networks*, pp.449-454, October 2005.

[6] T. He, F. Ren, C. Lin, and S. Das, "Alleviating Congestion Using Traffic-Aware Dynamic Routing in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks 2008*, pp. 233-241, June 2008.

[7] The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.