

무선 센서 네트워크에서 On-demand 위치 기반 라우팅 프로토콜

(On-demand Geographic Routing Protocol in Wireless Sensor Networks)

이 의 신[†] 박 수 창[†]
(Euisin Lee) (Soochang Park)

진 민 속[†] 박 호 성[†]
(Min-Sook Jin) (Hosung Park)

김 태 희[†] 김 상 하^{**}
(Taehee Kim) (Sang-Ha Kim)

요 약 위치 기반 라우팅 프로토콜들에 기본 가정인 이웃 노드들간의 주기적인 위치 정보 교환은 다음 두 가지 문제를 갖는다: (1) 데이터 전달이 없는 지역에 노드들의 불필요한 에너지 소비와 (2) 데이터 전달 시점에 이웃 노드 위치 정보의 부정확성. 따라서, 본 논문은 이동 무선 센서 네트워크에서 on-demand 위치 기반 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안 방안에서 송신 노드는 데이터 전달 시점에 필요한 이웃 노드들만의 위치 정보를 획득하고 그 노드들의 이동성을 고려하여 그 이웃 노드들 중에 가장 적합한 노드

를 목적지 노드까지 데이터 전달을 위한 수신 노드로 결정한다. 시뮬레이션 결과는 제안 방안이 기존의 위치 기반 라우팅 프로토콜보다 더 효율적임을 보인다.

키워드: 무선 센서 네트워크, on-demand 위치 기반 라우팅, 구역, 이동성

Abstract An underlying assumption in geographic routing protocols, periodic position exchange among neighbors has two problems: (1) unnecessary energy consumptions of nodes in regions without data delivery and (2) position invalidation of neighbors in forwarding data. Hence, this paper proposes an on-demand geographic routing protocol in mobile wireless sensor networks. The proposed protocol make a sender acquire position information of only necessary neighbors to reduce energy consumption in data forwarding time and determine an optimal node among them as a receiver for relaying data to a destination by considering their mobility. Simulation results show that the proposed protocol is more efficient than an existing geographic routing protocol.

Key words: Wireless sensor networks, On-demand Geographic routing, Section, Mobility

1. 서 론

위치 기반 라우팅에서, 데이터 패킷을 보내기 위한 모든 송신 노드들은 목적지 노드까지 가장 가까운 자신의 이웃 노드에게 그 데이터 패킷을 전달한다. 이러한 과정을 수행하기 위해, 모든 노드들은 자신의 라디오 범위 내의 이웃 노드들의 위치 정보를 아는 것이 위치 기반 라우팅에서 요구된다. 이러한 위치 정보를 얻기 위해, 위치 기반 라우팅에서 각각의 노드들은 자신의 이웃 노드들과 주기적으로 위치 정보를 교환[1-4]하거나 그러한 주기적인 위치 정보 교환의 문제를 다소 해소한 방법[5]을 사용함으로써 자신의 모든 이웃 노드들의 위치 정보를 안다.

그러나, 데이터 패킷 전달이 없는 지역에서 주기적으로 위치 정보를 교환하는 것은 그 지역에 노드들에게 불필요한 에너지 소비를 야기시킨다. 게다가 노드들이 이동성을 가질 때, 각각의 노드가 데이터 패킷을 전달할 때 주기적인 위치 정보 교환에 의해 획득한 이웃 노드들의 위치 정보는 노드들의 이동으로 인해 유효하지 않을 수 있다[6]. 이러한 위치 정보의 유효하지 않음은 위치 정보 교환의 주기가 크거나 노드들의 이동 속도가 크면 더 크게 될 것이다. 따라서, 이처럼 네트워크가 동적인 상황에서는 각각의 노드는 데이터 패킷을 전달하기 원할 때 자신의 이웃 노드들의 위치 정보를 수집하는 것이 더 효과적이다.

위치 기반 라우팅에서 각각의 송신 노드(Sender node)는 자신의 이웃 노드들 중에 목적지 노드까지 가장 가까운 노드를 수신 노드(Receiver node)로 선택한다. 다

· 본 연구는 충남대학교 컴퓨터공학과 BK21 차세대정보기술SW인력양성 사업단 지원으로 수행하였습니다.

· 이 논문은 제35회 추계학술대회에서 '무선 센서 네트워크에서 On-demand 위치 기반 라우팅 프로토콜의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

† 학생회원 : 충남대학교 컴퓨터공학과
eslee@cclab.cnu.ac.kr
winter@cclab.cnu.ac.kr
badamul@cclab.cnu.ac.kr
hspark@cclab.cnu.ac.kr
thkim@cclab.cnu.ac.kr

** 종신회원 : 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
shkim@cnu.ac.kr
(Corresponding author)

논문접수 : 2009년 1월 19일

심사완료 : 2009년 4월 28일

Copyright©2009 한국정보과학회: 개인 목적이거나 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: 컴퓨터의 실제 및 레터 제15권 제7호(2009.7)

시 말하면, 송신 노드는 자신의 모든 이웃 노드들의 위치 정보를 알 필요가 없다. 따라서, 단지 목적지 노드까지 자신보다 가까운 이웃 노드들만의 위치 정보를 모든 이웃 노드들의 위치 정보를 얻는 것보다 많은 무선 자원과 에너지를 절약할 수 있다. 특히, 대규모 네트워크는 한 노드의 라디오 범위 내에 많은 노드들이 존재할 것이다. 이러한 많은 노드들이 제한된 무선 자원을 통해 자신들의 이웃 노드들과 위치 정보를 교환한다면 수많은 무선 충돌이 발생할 것이다. 따라서, 이러한 노드들은 자신들의 위치 정보를 전달하는 동안 제한된 무선 자원을 효율적으로 공유하여야 한다.

그러므로 본 논문은 대규모 이동 센서 네트워크에 위치 기반 라우팅에서 이러한 문제들을 해결하기 위한 새로운 방안을 제안한다. 제안된 방안에서, 모든 송신 노드는 데이터 패킷을 전달하기 원할 때 자신의 이웃 노드들의 위치 정보를 요구한다. 모든 이웃 노드들이 자신들의 위치 정보를 응답할 때 발생하는 무선 충돌을 방지하기 위해, 센서 노드는 목적지 노드까지의 거리에 따라 자신의 라디오 범위를 구역들로 나누고 각각의 다른 구역에 다른 응답 시간을 부여한다. 또한, 노드들의 이동에 의해 야기되는 위치 정보 무효성의 문제를 다루기 위해, 제안 방안은 송신 노드가 이웃 노드들의 위치를 예측할 수 있기 위한 간단한 방법을 이용한다. 이러한 방법을 사용함으로써, 송신 노드는 수신 노드로써 자신의 이웃 노드들 중에 가장 최적인 노드들 선택할 수 있다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성되었다. 우리는 2장에서 제안 방안을 설명하고 3장에서 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 성능을 평가한다. 마지막으로 4장에서 결론으로 논문을 마무리한다.

2. 제안 방안

제안 방안은 3 가지 단계로 구성된다: (a) 이웃 노드 위치 정보 요구, (b) 이웃 노드 위치 정보 응답, (c) 데이터 전달. 제안 방안은 다음의 두 가지 가정을 기반으로 한다: 첫째로, 모든 노드들은 주기적인 GPS 신호나 위치 인식 알고리즘[7]을 통해 자신의 위치, 속도, 그리고 방향을 알고 이러한 정보를 비콘(Beacon) 메시지에 포함시킨다. 둘째로, 모든 원 홉(one-hop) 이웃 노드들은 Promiscuous mode로 동작하여 위치 정보 교환 메시지 수신(Overhear)할 수 있다.

2.1 이웃 노드 위치 정보 요구

위치 기반 라우팅에서, 소스 노드가 기원인 데이터 패킷을 받은 송신 노드는 목적지 노드에게 그 데이터 패킷을 전달하기 위해 자신의 이웃 노드들 중에서 목적지 노드로부터 가장 가까운 노드를 수신 노드로 선정하여 그 데이터 패킷을 전달한다. 제안 방안은 노드들 간의 주기

적인 위치 정보 교환을 통해서 위치 정보 관리 테이블을 관리하지 않고 데이터 전달 시점에 이웃 노드들의 위치 정보를 획득하여 데이터를 전달한다. 따라서, 제안 방안은 데이터를 목적지까지 전달하기 위해서는 어떠한 이웃 노드가 수신 노드로써 선정되어야 하는지를 결정하기 위해 자신의 원 홉 이웃 노드들에 위치 정보를 요구하기 위한 Position_Request 메시지를 포워딩한다.

그 이웃 위치 정보 요구 메시지는 각각의 이웃 노드들이 자신의 위치 정보 요구 응답 메시지를 포워딩할 시간이 명시되어 있다. 그림 1은 이웃 노드들의 응답 시간의 구분을 명시한 것을 보여준다. 그림 1에서 송신 노드(X)는 데이터 패킷을 목적지 노드(D)에게 전달하기 위해, 목적지 노드까지 자신보다 가까운 노드들 중에서 수신 노드를 선택할 것이다. 그러므로 Positive region (전진 지역)에 노드들 만이 응답 메시지를 전달하는 것이 에너지 면에서 효율적이다. 그러나 그 Positive region에 많은 노드들이 밀집하여 있다면, 그림 1과 같이 그 Positive region도 목적지 노드로부터 거리에 따라서 다시 몇 개의 Section(구역)으로 나누고 가장 가까운 WS1에 있는 노드들만이 먼저 응답 메시지를 시간 T1에 보내서 그들 중에서 수신 노드가 선정되면 에너지 면에서 더 효율적이다. 만약에 WS1에 어떠한 노드도 존재하지 않아서 응답 메시지가 전달되지 않았다면, 그 다음 시간 2T에 WS2에 노드들이 응답 메시지를 전달할 것이고, 송신 노드는 그들 중에 목적지 노드에 가장 가까운 노드를 수신 노드로 선정할 것이다.

만약 Positive region에 어떠한 노드도 존재하지 않아서, 송신 노드는 어떠한 이웃 노드 정보도 받지 못할 수 있다. 그러면 그 Positive region은 송신 노드 입장에서 목적지 노드까지 자신보다 가까운 이웃 노드가 존재하지 않는 void[2]가 된다. 그래서 송신 노드는 void 지역을 우회하여 목적지까지 보내기 위해, Right Hand

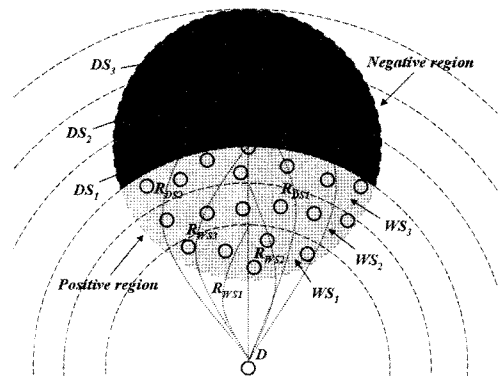


그림 1 송신 노드(x)의 무선 범위를 목적지 노드(D)까지의 거리를 통해서 Section으로 나누는 예

Rule[1-3]이나 Back Pressure Rule[4]에 따라 Negative region(후퇴 지역)에 노드들 중에서 하나의 노드를 선택하여 데이터를 전달해야 한다. 그 Negative region 역시 Section로 나누어서 Positive region과 같은 방법으로 이웃 노드의 정보를 얻고 그 정보를 통해 데이터를 전달할 수신 노드를 선택한다.

2.2 이웃 노드 위치 정보 응답

송신 노드로부터 이웃 노드 정보 요구 메시지를 받은 후, 모든 이웃 노드들은 자신의 위치 정보, 속도, 그리고 방향의 정보를 담은 Position_Response 메시지를 송신 노드에게서 지정 받은 T_i 에 보낸다. 따라서, 그림 1에서 WS1에 노드들이 먼저 시간 T_1 에 자신의 정보를 송신 노드에게 전달한다. 다음 시간 T_2 에는 WS2에 노드들이 자신의 정보를 송신 노드에게 전달한다. 이러한 과정으로 차례대로 Positive region에 모든 이웃 노드들이 자신의 정보를 송신 노드에게 전달하게 된다. Positive region에 노드들이 Position_Response 메시지를 모두 전달하면 Negative region에 노드들이 Positive region과 동일한 방법으로 자신들의 Position_Response 메시지를 송신 노드에게 전달한다.

위치 기반 라우팅은 송신 노드가 자신의 데이터를 전달하기 위해 목적지 노드로부터 자신의 이웃 노드들 중에 가장 가까운 노드를 수신 노드로 선택하여 그 노드에게 데이터를 전달하는 것이다. 그러므로 모든 이웃 노드들의 위치 정보가 필요하지는 않다. 따라서, 우리는 이러한 불필요한 데이터 전달을 막기 위해 간단한 스킴을 제시한다. 송신 노드가 T_1 시간 이내에 WS1에 노드들로부터 이웃 노드 정보를 받으면, 그 노드들 중에 목적지 노드에게 가장 가까운 노드를 수신 노드로 선택하여 그 노드에게 자신의 데이터를 전달한다. 그러면 송신 노드에 모든 이웃 노드들은 그 데이터를 Promiscuous mode로 엿들어, 자신의 위치 정보를 송신 노드에게 보내는 것을 멈춘다. 따라서 불필요한 이웃 노드 정보 교환이 일어나지 않게 된다.

2.3 데이터 전달

그림 송신 노드가 그림 1에 WS1에 이웃 노드들로부터 Position_Response 메시지를 받으면 그 노드들 중에 하나의 노드들 수신 노드로써 선정한다(여기서 송신 노드가 WS1로부터 어떠한 Position_Response 메시지를 받지 못하면, 수신 노드를 선택하기 위한 과정은 다음 WS2에서 수행된다. 이러한 과정은 송신 노드가 어떠한 Section에서 하나 이상의 이웃 노드들로부터 Position_Response 메시지를 받을 때까지 계속된다.) 우리는 여기서 송신 노드가 수신 노드를 선택할 시점에 하나의 Section에서 Position_Response 메시지를 보낸 이웃 노드들 중에 목적지 노드로부터 가장 가까운 노드를 써서 선

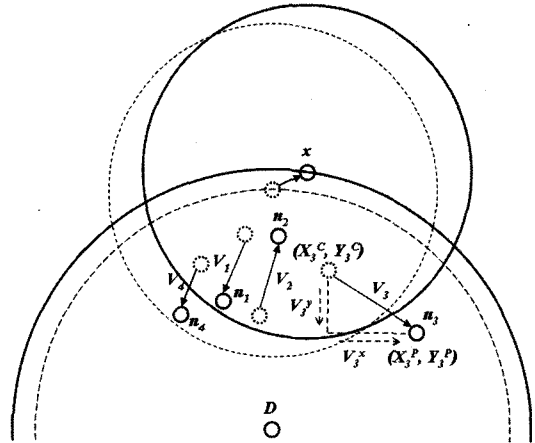


그림 2 송신 노드(x)가 하나의 Section에서 4개의 이웃 노드들 중에 목적지 노드(D)로부터 가장 가까운 노드 n_1 을 수신 노드로 선정하는 예

택하기 위한 간단한 방법을 제시한다. 제안 방법은 Position_Response 메시지에 포함된 각각의 이웃 노드들의 위치 정보, 속도, 그리고 방향을 이용한다.

그림 2는 송신 노드(x)가 하나의 Section에서 4개의 이웃 노드들 중에 목적지 노드(D)로부터 가장 가까운 노드를 수신 노드로 선정하는 방법에 대한 하나의 예를 나타낸다. 4개의 노드 n_1, n_2, n_3 , 그리고 n_4 가 Position_Response를 보냈을 때, 각각의 현재는 점선 원의 위치이다. 하지만 송신 노드가 수신 노드를 선택할 때, 각각의 노드 위치는 각각의 속도와 방향에 따라 이동하여 실선 원이 된다. 그 결과로써, 목적지 노드에 가장 가까운 노드 n_2 는 목적지 노드로부터 더 멀어지고, n_3 는 센터의 라디오 범위를 벗어나게 되어 데이터를 전달받을 수 없는 위치에 있게 되고, n_4 는 목적지 노드에 가장 가까운 노드가 되지만 송신 노드의 이동으로 인해 송신 노드의 무선 범위를 밖에 위치하게 된다. 반면, 노드 n_1 은 목적지 노드로부터 가장 먼 위치에 있었지만, 송신 노드가 데이터를 보낼 당시에는 목적지로부터 가장 가까운 위치에 있게 되어 송신 노드는 노드 n_1 에게 데이터를 전달한다.

송신 노드가 효과적으로 수신 노드를 선정하게 하기 위해, 우리는 Position_Response 메시지에 포함된 노드의 현재 위치, 속도, 그리고 방향의 정보에 기반한 간단한 위치 예측 방안을 사용한다. 제안 방안은 이웃 노드들의 이동성 즉, 속도와 방향은 Position_Response 메시지를 보내고 송신 노드가 수신 노드를 선택할 짧은 순간에 거의 변화하지 않는다는 사실에 기반을 둔다. 그러므로, 제안 방안의 위치 예측 실패율은 매우 낮다. 그림 2는 노드 n_3 의 위치 예측의 예를 보여준다. 노드 n_3 의

현재 위치가 (X_3^C, Y_3^C) 이고 and x축과 y축을 따르는 속도가 각각 V_3^x 과 V_3^y 일 때, 시간 T 이후에 노드 n3 의 위치는 (X_3^P, Y_3^P) 이다. (X_3^P, Y_3^P) 는 다음 식을 사용하여 계산된다:

$$X_3^P = X_3^C + V_3^x * T, Y_3^P = Y_3^C + V_3^y * T \quad (1)$$

따라서, 송신 노드는 제안된 위치 예측 방안을 사용하여 목적지 노드로부터 가장 가까운 이웃 노드를 수신 노드로 선정할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

우리는 제안 방안을 MICA 명세[8]를 참조하여 네트 워크 시뮬레이터인 Qualnet ver.3.8[9]에서 구현하였다. 우리는 시뮬레이션 결과를 통해 제안 방안이 노드 밀집도와 노드 속도의 관점에서 GPSR[2] 프로토콜과 성능을 비교한다.

3.1 노드 밀집도에 대한 성능 평가

이번 소장에서, 우리는 노드 밀집도에 대한 성능을 평가한다. 우리는 노드의 수를 50에서 400까지 50 노드의 간격으로 변화를 주었다.

그림 3(a)는 전체 에너지 소비를 보여준다. GPSR에서 전체 에너지 소비는 노드의 수에 비례하여 증가한다. 왜냐하면, GPSR에서 모든 노드들은 자신의 이웃 노드들과 주기적으로 위치 정보를 교환하기 때문이다. 반면에 제안 방안에서 전체 에너지 소비는 거의 유사한 작은 값을 갖는다. 왜냐하면, 제안 방안은 데이터 패킷을 전송하기 위해 필요한 노드들만의 위치 정보를 요구하기 때문이다.

그림 3(b)는 데이터 전송률을 보여준다. 노드 밀집도가 증가하면 GPSR에서 데이터 전송률은 이웃 노드들의 수의 증가로 인해 송신 노드가 수신 노드를 선택하는 것을 보장할 수 있기 때문에 증가한다. 그러나 노드의 수가 200개 이상이 되면, GPSR은 주기적인 위치 정보 교환의 증가로 인해 많은 무선 충돌이 발생하여 오히려 데이터 전송률이 감소한다. 반면에, 제안 방안은 노드의

수가 200개를 넘어도 데이터 전송률이 증가한다. 이것은 제안 방안이 단지 필요한 이웃 노드들만 자신들의 위치 정보를 전달하도록 요구하므로 많은 무선 충돌을 방지할 수 있기 때문이다.

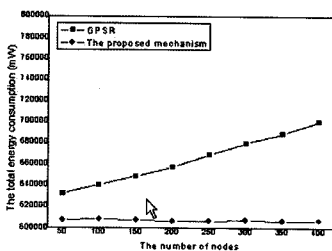
그림 3(c)는 평균 전송 지연을 보여준다. 노드의 밀집도가 증가하면 소스 노드들로부터 데이터 패킷은 짧은 홉 수 통신을 통해서 목적지까지 전달된다. 따라서, GPSR에서 평균 전송 지연은 감소한다. 그러나 노드의 수가 200개 이상이 되면 GPSR에 평균 전송 지연은 다시 감소한다. 이것 역시 많은 주기적인 위치 정보 교환으로 인해 데이터 패킷 전송시에 많은 무선 충돌이 발생하여 많은 재전송을 야기시키기 때문이다. 하지만 제안 방안에서 평균 전송 지연은 GPSR에 평균 전송 지연보다 낮은 값을 유지한다. 왜냐하면, 제안 방안은 필요한 노드들만의 위치 정보 교환을 요구하기 때문에 데이터 패킷의 무선 충돌을 방지할 수 있어 재전송없이 데이터 패킷을 전달할 수 있기 때문이다.

3.2 노드 속도에 대한 성능 평가

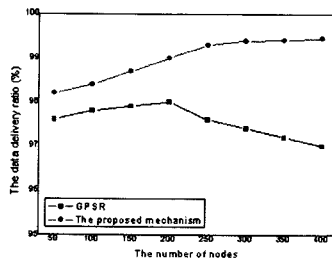
이번 소장에서, 우리는 노드 속도에 대한 제안 방안과 GPSR의 성능을 평가한다. 우리는 노드들의 평균 속도를 1 m/s에서 15 m/s로 2 m/s의 간격으로 변화를 주었다.

그림 4(a)는 전체 에너지 소비를 보여준다. GPSR에서 전체 에너지 소비는 제안 방안보다 노드 속도에서 더 크다. 이것은 GPSR이 주기적인 위치 정보 교환으로 인해 많은 에너지를 소비하기 때문이다. 게다가 노드의 속도가 증가하면 GPSR에 전체 에너지 소비는 제안 방안보다 더 빠르게 증가한다. 이것은 노드의 위치 정보의 부정확성이 노드의 속도를 가지고 높아지기 때문에 GPSR이 더 많은 재전송을 하기 때문이다. 반면에, 제안 방안은 위치 예측 방안을 사용하여 노드의 위치 정보 부정확성을 방지하기 때문에 재전송이 많이 발생하지 않는다.

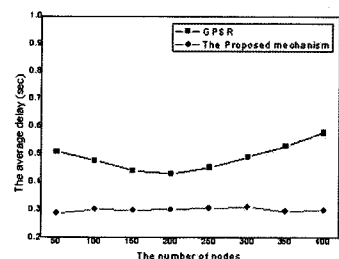
그림 4(b)는 데이터 전송률을 보여준다. 낮은 속도에서, GPSR과 제안 방안 모두 유사한 높은 데이터 전송률을 가진다. 하지만, 높은 속도에서 GPSR의 데이터 전송률은 노드 속도에 따라서 급감한다. 왜냐하면, GPSR



(a) 전체 에너지 소비



(b) 데이터 전송률



(c) 평균 전송 지연

그림 3 노드 밀집도에 대한 시뮬레이션 결과

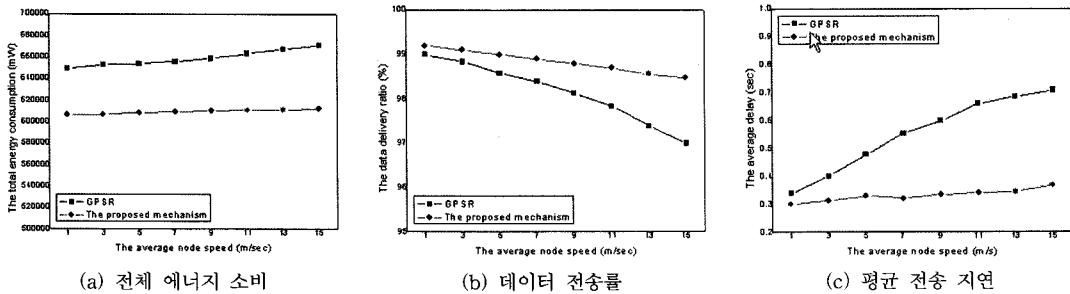


그림 4 노드 속도에 대한 시뮬레이션 결과

은 빠른 노드 속도로 인해 위치 정보의 부정확성이 증가하여 더 많은 재전송이 발생하기 때문이다. 반면에, 제안 방안은 노드 속도 증가함에 비해 데이터 전송률이 천천히 감소한다. 이것은 제안 방안이 노드의 위치 정보 부정확성을 방지하여 재전송을 줄이기 때문이다.

그림 4(c)는 제안 방안이 GFSR보다 평균 전송 지연 관점에서 더 효과적인 성능을 나타냄을 보여준다. GFSR과 제안 방안 모두 노드의 속도가 느릴 때는 위치 정보의 정확성이 높아지기 때문에 빠르게 목적지 노드까지 전달된다. 하지만 노드의 속도가 증가하면, GFSR은 위치 정보 부정확성으로 인해 전달 노드의 부재로 인한 전달 노드의 재선택과 데이터의 재전송으로 평균 전송 지연의 크게 증가한다. 반면에, 제안 방안은 위치 예측 방안을 사용하여 올바른 전달 노드를 선택하기 때문에 위치 정보 부정확성을 방지하여 평균 전송 지연이 크게 증가하지 않는다.

4. 결론

본 논문에서, 우리는 무선 센서 네트워크에서 On-demand 위치 기반 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안 방안은 필요한 노드들만의 위치 정보 교환을 통해 기존의 위치 기반 라우팅 프로토콜의 주기적인 위치 정보 교환의 문제를 해결하였다. 게다가 제안 방안은 간단한 위치 예측 방안을 사용하여 이동 노드들의 위치 정보 부정확성의 문제를 해소하였다. 시뮬레이션 결과는 제안 방안이 기존의 잘 알려진 위치 기반 라우팅 프로토콜인 GFSR보다 여러 가지 성능 평가 요소에서 더 효율적임을 나타냈다.

참고 문헌

[1] S. Basagni *et al.*, "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (Dream)," ACM MOBICOM 1998.
 [2] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,"

ACM MOBICOM 2000.

[3] F. Kuhn *et al.*, "Worst-Case Optimal and Average-Case Efficient Geometric Ad-Hoc Routing," ACM MobiHoc 2003.
 [4] T. He *et al.*, "A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol.16, no.10, pp.995-1006, Oct. 2005.
 [5] Q. Chen *et al.*, "Adaptive Position Update in Geographic Routing," IEEE ICC 2006.
 [6] D. Son *et al.*, "The Effect of Mobility-Induced Location Errors on Geographic Routing in Mobile Ad Hoc and Sensor Networks: Analysis and Improvement Using Mobility Prediction," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.3, Issue.3, pp.233-245, Jul. 2004.
 [7] J. Albowitz *et al.*, "Recursive Position Estimation in Sensor Networks," IEEE ICNP 2001.
 [8] J. Polastre *et al.*, "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research," IEEE IPSN 2005.
 [9] Scalable Network Technologies, Qualnet, [online] available: <http://www.scalable-networks.com>