

무선 센서 네트워크에서의 감지범위 보존을 위한 백업 노드 기반 결함 허용 기법

(A Backup Node Based Fault-tolerance Scheme for Coverage Preserving in Wireless Sensor Networks)

한 주 선[†] 하 란^{**}
(Joosun Hahn) (Rhan Ha)

요 약 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 한정된 배터리 자원은 네트워크 수명에 직접적인 영향을 끼친다. 따라서 불필요한 전력 소모를 줄이기 위해, 많은 경우 최소한의 센서 노드만을 활성 모드로 유지하고 나머지는 휴면 모드로 유지한다. 그러나 이러한 경우, 예상하지 못한 결함으로 인해 센서 노드가 감지 및 전송 기능을 수행하지 못하게 되면 네트워크 서비스를 안정적으로 제공할 수가 없다. 따라서 센서 노드의 결함에도 불구하고 감지수준을 일정하게 유지하는 것은 신뢰성 있는 감지환경을 제공하는 데 있어 매우 중요하다. 본 논문에서는 센서 노드의 결함으로 인한 감지수준 저하의 문제를 효과적으로 극복하기 위해 FCP(Fault-tolerant Coverage Preserving) 기법을 제안한다. FCP 기법에서는 각 활성 노드에 대해 백업 노드 집합을 미리 선정하여, 활성 노드의 결함 시 결함 노드를 대신하도록 한다. 성능 평가 결과, FCP 기법이 기존 결함 허용 기법들에 비해 평균 87.2% 향상된 감지범위 보존 성능을 보일 뿐 아니라, 추가 백업 노드 수와 추가 제어 메시지 전송량 측면에서도 각각 평균 57.6%, 평균 99.5% 향상된 효율성을 제공함을 보였다.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 센서 노드 스케줄링, 결함 허용, 감지범위 보존

Abstract In wireless sensor networks, the limited battery resources of sensor nodes have a direct impact on network lifetime. To reduce unnecessary power consumption, it is often the case that only a minimum number of sensor nodes operate in active mode while the others are kept in sleep mode. In such a case, however, the network service can be easily unreliable if any active node is unable to perform its sensing or communication function because of an unexpected failure. Thus, for achieving reliable sensing, it is important to maintain the sensing level even when some sensor nodes fail. In this paper, we propose a new fault-tolerance scheme, called FCP(Fault-tolerant Coverage Preserving), that gives an efficient way to handle the degradation of the sensing level caused by sensor node failures. In the proposed FCP scheme, a set of backup nodes are pre-designated for each active node to be used to replace the active node in case of its failure. Experimental results show that the FCP scheme provides enhanced performance with reduced overhead in terms of sensing coverage preserving, the number of backup nodes and the amount of control messages. On the average, the percentage of coverage preserving is improved by 87.2% while the additional number of backup nodes and the additional amount of control messages are reduced by 57.6% and 99.5%, respectively, compared with previous fault-tolerance schemes.

Key words : wireless sensor networks, sensor node scheduling, fault-tolerance, coverage preserving

· 본 연구는 한국과학재단 특장기초연구(KRF-R01-2006-000-10073-0), 대학 IT연구센터 육성지원사업 HY-SDR 연구센터, 2007학년도 제2학기 홍익대학교 해외연구년 연구 지원으로 수행되었음

† 정 회 원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과 연구교수
jshan@zeen.snu.ac.kr

** 종신회원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과 교수
rhanha@cs.hongik.ac.kr

논문접수 : 2009년 2월 11일

심사완료 : 2009년 4월 16일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 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 : 정보통신 제36권 제4호(2009.8)

1. 서론

무선 센서 네트워크는 감지, 연산, 무선 통신 기능을 가지고 있는 센서 노드들과 게이트웨이의 역할을 하는 베이스 스테이션으로 구성된 네트워크이다[1]. 각 센서 노드는 감지한 정보를 베이스 스테이션으로 전달하고, 베이스 스테이션은 인터넷, 위성통신 등 기존의 네트워크를 통해 수집된 정보를 사용자나 응용 프로그램에게 제공한다. 무선 센서 네트워크는 미리 구축된 인프라 없이 네트워크 자가 구성 능력이 있다는 점에서 기존의 무선 ad hoc 네트워크와 유사하다. 그러나 상대적으로 많은 수의 센서 노드들이 밀집된 망을 구성하여 서로 협동적인 행태로 정보를 처리한다는 점에서 기존의 네트워크와 차별된다[2]. 특히 센서 노드는 전력 공급이 극히 제한적이고 열악하고 유해한 환경 조건에서 동작하는 경우가 많으므로 결함이 발생할 가능성이 높다. 따라서 무선 센서 네트워크에서는 센서 노드가 정보를 감지하고 전달할 수 있는 신뢰할 수 있는 환경을 조성하는 것이 매우 중요하다. 신뢰성 있는 센서 감지 환경을 조성하기 위해, 특히 감지범위(sensing coverage)와 감지수준(sensing level)을 고려할 수 있다. 감지범위는 센서 노드가 이벤트를 감지할 수 있는 범위를 의미하며, 각 센서 노드의 감지범위를 모두 통합한 범위를 나타낸다. 감지수준은 센서 노드가 이벤트를 감지하는 강도를 의미하며, 어떤 이벤트가 발생했을 때 이를 감지할 수 있는 센서 노드가 다수 존재할수록 감지수준이 높다고 할 수 있다.

최근 센서 감지 분야에서는 네트워크 영역을 감지할 수 있는 센서 노드 집합을 결정하는 방법론들이 활발하게 연구되고 있다. 특히 한정된 전력을 가진 센서 노드가 네트워크 수명을 오랜 시간 동안 유지할 수 있도록 하기 위해 감지수준이 최소가 되는 감지범위를 제공하고자 노력하였다[3-6]. 네트워크 영역이 적어도 한 개의 센서 노드에 의해 감지되도록 센서 노드의 최소 집합을 결정하는 것을 '최소한의 감지범위(minimum coverage)'라고 정의한다[2]. 최소한의 센서 노드 집합으로 감지 및 통신이 이루어지면 센서 노드 간의 간섭, 충돌 등의 문제를 억제할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 최소한의 센서 노드 집합을 선택하는 것은 NP-hard 문제이다[3]. 또한, 최소한의 센서 노드 집합은 일부 센서 노드에 결함이 발생할 경우 최소의 감지수준을 보장하지 못하고 네트워크 영역 중 감지불능 지역(sensing hole)이 생길 수 있다. 결국, 센서 감지 문제를 고려한 신뢰할 수 있는 감지 환경은 네트워크 전 영역을 포함하는 감지범위를 제공해야 하고, 그 감지범위에 한해 적어도 최소의 감지수준을 유지함을 보장할 수 있어야 한다.

이후 센서 노드의 결함으로 인한 감지수준 저하 문제를 극복하기 위해 제안된 방법으로는 재-스케줄링을 기반으로 하는 결함 허용 기법[7]과 백업 노드를 기반으로 하는 결함 허용 기법[8,9]이 있다. 재-스케줄링 기반의 결함 허용 기법은 센서 노드 간의 감지범위 중복을 최소화하는 이상적인 방법이지만, 결함 발생 시마다 재-스케줄링을 수행하기 위한 제어 메시지가 다량으로 발생하고 결함 복구 시간이 길며 그만큼 감지불능 시간도 길어진다는 제약을 가지고 있다. 반면, 백업 노드 기반의 결함 허용 기법은 결함이 발견된 즉시 미리 결정된 백업 노드를 활성화하지만 하연 되므로, 결함 복구 시간이 짧고 네트워크 규모에 상관없이 일정하여 큰 규모의 무선 센서 네트워크에도 적용하기 적합한 방법이다.

본 논문에서 제안하는 결함 허용 기법은 백업 노드를 기반으로 하며 FCP(Fault-tolerant Coverage Preserving) 기법이라고 명명한다. 제안하는 FCP 기법은 센서 노드의 전체 감지영역에서 일정한 감지수준을 유지함을 보장할 뿐만 아니라, 백업 노드 선정 비용 측면에서도 효과적인 결함 극복을 가능하도록 하는 데에 중점을 두고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 무선 센서 네트워크에서의 감지범위에 관한 기존의 연구들을 간략히 살펴보고 기존 연구의 문제점을 분석한다. 3절에서는 본 논문에서 제안하는 FCP 기법의 백업 노드 선정 전략과 결함 허용 노드 스케줄링 알고리즘을 상세히 기술한다. 4절에서는 기존의 결함 허용 기법과의 비교를 통한 성능 평가에 대해 기술한다. 마지막으로 5절에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대해 기술한다.

2. 관련 연구

2.1 기존 연구

무선 센서 네트워크에 관한 다양한 연구 분야 중 특히 센서 노드의 고유한 특성인 감지범위를 고려한 감지 문제에 대해 여러 연구가 이루어졌다[3-9]. 그러나 이전의 센서 감지 문제 관련 연구들은 대개 응용 계층에서 감지범위를 고려한 센서 노드 스케줄링에 초점을 두었고 센서 노드의 결함에 대처하는 노력은 부족하였다[4-8]. [4]에서는 센서 노드의 감지영역과 이웃하는 노드들의 감지영역을 고려한 후원범위(sponsored coverage)를 통해 센서 노드의 활성 모드와 휴면 모드를 결정한다. 후원범위의 개념은 이웃 노드들의 감지영역을 측정할 수 있는 척도로 정확하고 효율적이다. 그러나 센서 노드의 결함에 대응하는 방법을 추가로 제시하지 못하고 있기 때문에 센서 노드 스케줄링 과정 이후에 감지불능 지역이 발생할 가능성을 지니고 있다. 후에, [5]에서 확장된 후원범위 계산 방법을 제시하였으나, 역시

감지수준과 결합에 대한 고려는 이루어지지 않았다. [6]에서는 감지영역을 고려하는 동시에 네트워크 수명을 가능한 한 오래 유지할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 센서 노드의 감지영역 내에 존재하는 모든 이웃 노드들은 휴면 모드로 전환한다. 휴면 모드로 전환된 센서 노드들은 비주기적으로 자신의 감지영역 내에 활성 모드로 동작중인 센서 노드가 있는지를 확인한다. 만약 자신의 감지영역 내에 활성 모드인 센서 노드가 존재하지 않는 경우에는 자신이 스스로 활성 모드로 전환한다. 이러한 방법은 활성 모드로 동작하는 센서 노드의 수를 현격히 감소시키기 때문에 에너지를 상당히 절약할 수 있으므로 무선 센서 네트워크 수명을 연장할 수 있다. 그러나 이웃 노드의 감지영역이 센서 노드의 감지영역을 모두 포함하는 것을 보장하지 못하기 때문에 감지불능 지역이 발생할 가능성이 높다. 또한 센서 노드의 결합 발생 시 이를 확인한 이웃 노드가 스스로 활성화될 때까지 어떠한 대응도 하지 못한다. [7]에서는 주기적으로 각 센서 노드가 자신의 감지시간을 이웃 노드와 조정함으로써 최소의 감지수준을 유지하는 방법을 제시하고 있다. 또한, 예측할 수 없는 결합을 진단하기 위해 이웃 노드에게 주기적인 heartbeat 패킷을 송신한다. 일정 시간이 지나도 heartbeat 패킷이 수신되지 않으면 해당 센서 노드에 결합이 발생하였다고 판단하고 재-스케줄링이 일어난다. 비록 센서 노드의 결합에 대처하는 방법을 제시하고는 있으나, 재-스케줄링을 수행하기 위한 제어 메시지가 많이 발생하여 에너지 소모가 많다. 한편, [8]에서는 네트워크 영역 내의 모든 감지지점에 대해 백업 노드 집합을 선택하는 분산 알고리즘을 제시하고 있다. 각 센서 노드는 자신의 감지영역 내에 존재하는 감지지점에 대해 해당 감지지점을 커버 가능한 휴면 노드들을 감지지점과 가까운 거리 순으로 정렬하여, 그 중 소정의 임계확률을 만족하는 부분 집합을 백업 노드 집합으로 선택한다. 비록 백업 노드를 이용한 결합 허용 알고리즘을 제시하고는 있으나, 백업 노드 집합 선정이 감지지점 중심으로 이루어지므로 이웃 노드 간의 메시지 교환이 재-스케줄링만큼 많이 요구되고, 백업 노드 집합 선정에 활성 노드가 관여하여 활성 노드의 감지 활동이 제약을 받을 수 있다.

지금까지 제안된 감지범위를 고려한 센서 노드 스케줄링 방법들은 센서 노드의 결합에 대해 효율적으로 대처하는 방법을 제시하지 못하고 있다. 센서 노드에 결합이 발생했을 경우, 어떠한 대응도 하지 않고 다음의 센서 노드 스케줄링 시점이 돌아오기만을 기다리거나 혹은 새로운 센서 노드를 다시 선택하기 위해 재-스케줄링을 시도하고 있다. 결합에 대한 어떠한 대응도 하지 않는 경우, 네트워크 영역 중 감지불능 지역이 발생하게

된다. 재-스케줄링이 일어나는 경우, 센서 노드와 이웃 노드 간의 정보 교환을 통해 센서 노드 스케줄링이 수행되기 때문에 많은 제어 메시지가 발생하게 된다. 하지만 무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 이벤트를 감지하는 동작보다 패킷을 전송하는 동작에서 더 많은 에너지를 소모하기 때문에 전송하는 패킷의 수를 줄이는 것은 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다. 이에 적은 제어 메시지로 일정한 감지수준을 제공하기 위해, 후원범위를 고려한 새로운 백업 노드 선택 전략을 사용한 결합 허용 센서 노드 스케줄링 알고리즘인 FANS[9]가 제안되었다.

2.2 FANS 알고리즘

FANS 알고리즘에서는 활성 노드의 감지영역과 이웃하는 휴면 노드들의 감지영역을 고려하여 각 휴면 노드가 제공하는 후원범위를 산출하고, 서로의 후원범위에 포함되지 않도록 백업 노드 집합을 선정하여 백업 노드의 수를 최대 5개로 제한한다. 또한, 백업 노드로 선택된 노드만이 메시지를 발송하도록 하여 제어 메시지 전송량을 최소화한다.

FANS 알고리즘은 백업 노드 수와 제어 메시지 전송량 측면에서 모두 효율적인 알고리즘이지만, 감지범위 측면에서는 감지범위를 보존하기에 충분한 이웃 노드가 존재하나 감지범위를 보존하지 못할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 그림 1은 이러한 FANS 알고리즘의 문제점을 보여주는 예이다. 그림에서 노드 A는 활성 모드로 결정된 노드이고, 노드 B, C, D, E는 휴면 모드로 결정된 노드들이다. 만일 노드 A의 이웃 노드가 그림 1(a)와 같이 존재할 경우 FANS 알고리즘에 의해 선정되는 노드 A의 백업 노드는 노드 B, C, D이며, 노드 A의 감지범위가 보존된다. 그러나 노드 A의 이웃 노드로 노드 E가 추가되어 그림 1(b)와 같이 위치할 경우에는 노드 A의 백업 노드로 노드 B와 노드 E가 선정되고 노드 C와 D는 노드 E의 후원범위에 포함되어 백업 노드로 선정되지 못한다. 따라서 이 경우 노드 A의 감지범위가 보존되지 않는다.

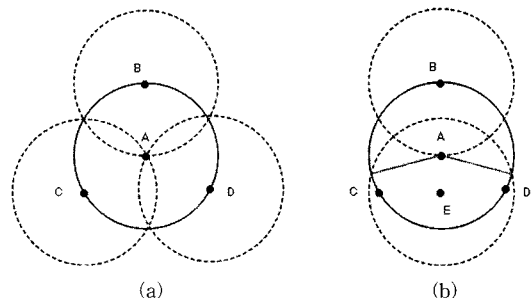


그림 1 FANS 알고리즘의 문제점

이와 같은 문제가 발생하는 이유는, 첫째로 보다 넓은 후원범위를 제공하는 근거리의 이웃 노드부터 우선적으로 백업 노드로 선정하는 FANS 알고리즘의 백업 노드 선정 전략 때문이며, 둘째로 다른 백업 노드의 후원범위에 속하는 이웃 노드는 무조건적으로 백업 노드로 선정될 기회를 박탈하는 FANS 알고리즘의 백업 노드 판단 기준 때문이다.

본 논문에서 제안하는 FCP 기법의 백업 노드 선정 전략에서는 그림 1의 노드 B, C, D와 같이 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 이웃 노드를 우선적으로 백업 노드로 선정한다. 이렇게 함으로써 활성 노드의 감지범위 보존에 반드시 필요한 노드를 백업 노드로 선정하여 활성화시켜서, 감지수준이 유지 가능한 경우에는 반드시 감지수준을 유지하면서 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있다. 다음 절에서는 새로운 백업 노드 선정 전략을 제안하고 이 전략을 적용한 결합 허용 센서 노드 스케줄링 알고리즘을 기술한다.

3. FCP(Fault-tolerant Coverage Preserving) 기법

무선 센서 네트워크는 크기가 한정되어 있기 때문에 모든 센서 노드들이 활성화되지 않아도 네트워크 서비스를 제공할 수 있다. 센서 노드는, 표 1[10]에 나타낸 바와 같이, 동작 모드에 따라 기능 및 전력 소모량이 각기 다르기 때문에, 최소 개수의 센서 노드만을 활성 모드로 유지함으로써 불필요한 전력 소모를 줄이면 무선 센서 네트워크의 수명을 연장할 수 있다. 그러나 예상하지 못한 센서 노드의 결함으로 인해 감지 및 통신 기능을 수행하지 못하는 경우, 네트워크 서비스를 안정적으로 제공할 수 없기 때문에 일정한 감지수준을 유지하는 것은 신뢰성 있는 감지환경을 제공하는데 있어 매우 중요하다. FCP 기법은 후원범위를 고려한 백업 노드 선정과 이를 포함한 결합 허용 센서 노드 스케줄링으로 구성된다. 제안하는 FCP 기법은 기존의 여느 센서 노드 스케줄링 기법에 적용하여 사용될 수 있다. 이 절에서는 먼저 FCP 기법의 백업 노드 선정 전략을 소개하고 이어서 백업 노드 선정 전략을 적용한 결합 허용 센서 노드 스케줄링 알고리즘에 대해 기술한다.

3.1 후원범위를 고려한 백업 노드 선정 전략

이 절에서는 센서 노드의 감지범위에 대해 일정한 감지수준을 유지하기 위한 백업 노드 선정 전략에 대해 설명한다. 백업 노드 집합은 특정 센서 노드의 감지범위를 모두 포함할 수 있는 이웃 노드들의 집합이다. 본 논문에서는 특히 FANS 알고리즘과 마찬가지로 기존의 CPNS(Coverage Preserving Node Scheduling) 알고리즘[4]에서 제안된 후원범위의 개념을 도입하여 백업 노드 선정에 이용한다. 후원범위란, 센서 노드의 감지영역 중 이웃 노드의 감지영역과 중복되는 부채꼴 형태의 영역을 의미하며 그림 2의 빛금 친 영역이다.

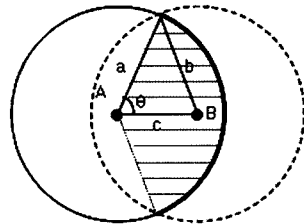


그림 2 후원범위

그림 2와 같이, 한 센서 노드에 대한 이웃 노드의 후원범위는 부채꼴의 호로써 표시할 수 있다. 그림에서 a, b, c 를 각각 노드 A의 감지거리, 노드 B의 감지거리, 두 노드 간의 거리라고 할 때, 노드 A에 대한 노드 B의 후원범위의 크기 L 은 식 (1)에 의해 계산할 수 있다.

$$L = \frac{\theta\pi a}{90^\circ} \quad \text{단, } \theta = \arccos\left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ac}\right) \quad (1)$$

본 논문에서는 모든 센서 노드의 감지거리가 동일하다고 가정하기 때문에 식 (1)은 다음과 같이 식 (2)로 정리될 수 있다.

$$L = \frac{\theta\pi a}{90^\circ} \quad \text{단, } \theta = \arccos\left(\frac{c}{2a}\right) \quad (2)$$

여기서, 노드 A와 동일한 좌표에 위치한 이웃 노드가 없다고 가정한다면 c 는 $0 < c \leq a$ 를 만족하므로, 각도 θ 는 $60^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 를 만족한다. 따라서 노드 A에 대한 이웃 노드의 후원범위의 크기는 $\frac{2}{3}\pi a \leq L < \pi a$ 를 만족한다.

이를 확장하면, 한 센서 노드에 대한 n 개의 이웃 노드의 후원범위는 circular-arc digraph G 로 표시할 수 있다. 이 때, 정점 $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 은 n 개의 이웃

표 1 센서의 동작 모드에 따른 기능 및 전력 소모량

동작 모드	기능			전력 소모량
	연산 기능	감지 기능	통신 기능	
활성(active)	Active	On	Tx, Rx	1040 mW/ms
유ힴ(idle)	Sleep	On	Rx	270 mW/ms
휴면(sleep)	Sleep	Off	Off	10 mW/ms

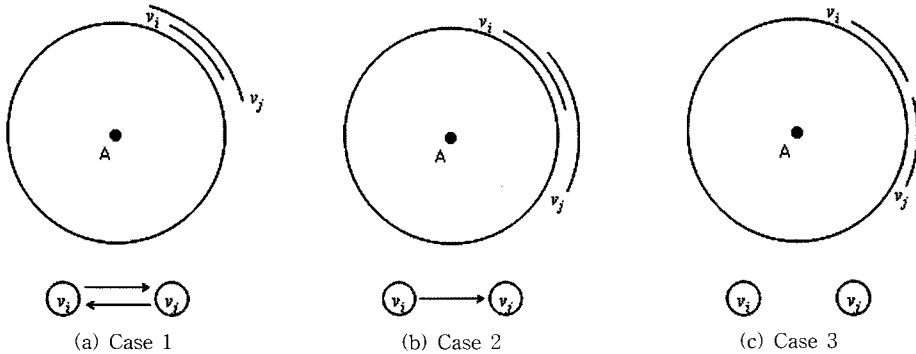


그림 3 circular-arc digraph

노드에 각각 대응되며, 간선 $E(G) \subseteq \{ \langle v_i, v_j \rangle \mid v_i, v_j \in V(G) \wedge v_i \neq v_j \}$ 은 다음 규칙에 의해 형성된다.

Case 1. 노드 v_i 의 후원범위가 노드 v_j 의 후원범위에 전적으로 모두 포함되는 경우, $\langle v_i, v_j \rangle \in E(G)$ 이고, $\langle v_j, v_i \rangle \in E(G)$ 이다.

Case 2. 노드 v_i 의 후원범위가 노드 v_j 의 후원범위와 시계 방향으로 중복되는 경우, $\langle v_i, v_j \rangle \in E(G)$ 이고, $\langle v_j, v_i \rangle \notin E(G)$ 이다.

Case 3. 노드 v_i 의 후원범위가 노드 v_j 의 후원범위와 전적으로 중복되지 않는 경우, $\langle v_i, v_j \rangle \notin E(G)$ 이고, $\langle v_j, v_i \rangle \notin E(G)$ 이다.

정리 1. 만일 한 센서 노드의 감지영역이 n 개의 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버된다면, 해당 n 개의 이웃 노드의 후원범위로 구성된 circular-arc digraph G 는 강한 연결 그래프(strongly connected graph)이다.

증명. 만일 G 가 강한 연결 그래프가 아니라면 임의의 두 정점 v_i 와 v_j 에 대해 v_i 에서 v_j 로의 경로가 존재하지 않을 것이다. 즉, v_i 에서 진출하는 모든 경로 $v_i \rightarrow \dots \rightarrow v_{x-1} \rightarrow v_x$ 와 v_j 로 진입하는 모든 경로 $v_y \rightarrow v_{y+1} \rightarrow \dots \rightarrow v_j$ 에 대해 간선 $\langle v_x, v_y \rangle$ 가 존재하지 않는다. 간선 $\langle v_x, v_y \rangle$ 가 존재하지 않는다는 것은 노드 v_x 의 후원범위와 포함관계에 있거나 또는 시계 방향으로 중복되는 후원범위가 없음을 의미한다. 이는 센서 노드의 감지영역이 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버된다는 가정에 위배되므로, 따라서 G 는 강한 연결 그래프임이 성립한다. ■

한 센서 노드에 대한 백업 노드 집합은 센서 노드의

감지영역을 완전히 커버하도록 선정되어야 한다. 따라서 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 이웃 노드는 반드시 백업 노드로 선택되어야 한다. 뿐만 아니라, 이미 선택된 다른 백업 노드들에 의해 후원범위가 모두 커버되는 이웃 노드는 안전하게 백업 노드 선정에서 제외시킬 수 있다.

정의 1. 필수 백업 노드(essential backup node) : n 개의 이웃 노드의 후원범위로 구성된 circular-arc digraph G 와 임의의 정점 $v \in V(G)$ 에 대해 $V(G') = V(G) - \{v\}$ 에 의해 생성된 유도 부분 그래프 G' 이 있다고 하자. 이 때, 만일 G 의 임의의 두 정점 v_i 와 v_j 에 대해 G 에는 v_i 에서 v_j 로의 경로가 존재하나 G' 에는 v_i 에서 v_j 로의 경로가 존재하지 않는다면, v 에 대응되는 노드는 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 이웃 노드이며 반드시 백업 노드 집합에 포함되어야 한다.

정의 2. 잉여 백업 노드(redundant backup node) : n 개의 이웃 노드의 후원범위로 구성된 circular-arc digraph G 와 임의의 정점 $v \in V(G)$ 에 대해 $V(G') \subseteq V(G) - \{v\}$ 에 의해 생성된 유도 부분 그래프 G' 과 $V(G'') = V(G') \cup \{v\}$ 에 의해 생성된 유도 부분 그래프 G'' 이 있다고 하자. 이 때, 만일 G'' 에 v 를 경유하는 v_i 에서 v_j 로의 경로($v_i \rightarrow \dots \rightarrow v \rightarrow \dots \rightarrow v_j$)가 존재하는 모든 정점 v_i 와 v_j 에 대해 G' 에도 v_i 에서 v_j 로의 경로가 이미 존재한다면, v 에 대응되는 노드는 이미 선택된 다른 백업 노드들에 의해 후원범위가 모두 커버되는 이웃 노드이며 안전하게 백업 노드 집합에서 제외시킬 수 있다.

3.2 결합 허용 센서 노드 스케줄링 알고리즘

이 절에서는 앞서 제안한 백업 노드 선정 전략을 적용한 센서 노드 스케줄링 과정과 센서 노드의 결합 극복 진행 과정에 대해 설명한다. 본 논문에서 네트워크 생명주기는 일정한 주기 R 로 나누어지며, 그림 4와 같이 각 주기는 센서 노드의 활성 모드, 휴면 모드를 결정

1) 노드 v_i 의 후원범위가 노드 v_j 의 후원범위와 반시계 방향으로 중복되는 경우는 노드 v_j 의 후원범위가 노드 v_i 의 후원범위와 시계 방향으로 중복되는 경우와 같으므로 별도로 고려하지 않아도 된다.

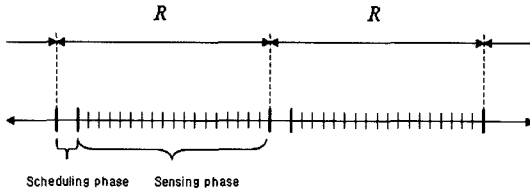


그림 4 네트워크 생명주기

하는 스케줄링 단계와 활성 모드의 센서 노드가 감지 활동을 수행하는 감지 단계로 구성된다.

각 주기의 스케줄링 단계에서는 CPNS 알고리즘 등 기존의 센서 노드 스케줄링 알고리즘을 사용하여 센서 노드의 활성 모드, 휴면 모드를 결정한다. 예를 들어, CPNS 알고리즘을 사용하여 센서 노드를 스케줄링 하는 경우, 우선 모든 센서 노드는 자신의 위치 통지 메시지인 PAM(position advertisement message)을 이웃 노드에게 브로드캐스트한다. PAM에는 센서 노드의 ID와 위치 정보가 기입되어 있으며, PAM을 받은 노드들은 이웃 노드의 위치 정보를 토대로 circular-arc digraph G 를 구성하여 자신의 감지영역이 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버되는지 점검한다. 만일 센서 노드의 감지영역이 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버되는 경우, 센서 노드는 임의의 back-off 시간을 대기한 후 상태 통지 메시지인 SAM(status advertisement message)를 브로드캐스트한다. SAM를 브로드캐스트한 노드는 감지 단계에서 휴면 모드로 동작할 것이 결정된다. 임의의 back-off 시간을 대기하는 동안 다른 노드로부터 SAM를 받는 노드들은 circular-arc digraph G 에서 SAM을 송신한 노드에 대응하는 정점을 제거한 후 자신의 감지영역이 여전히 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버되는지 다시 점검한다. 센서 노드의 감지영역이 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버되는 경우 자신의 SAM 메시지를 브로드캐스트한다. 만일 센서 노드의 감지영역이 이웃 노드의 후원범위에 의해 완전히 커버되지 못하는 경우 감지 단계에서 활성 모드로 동작할 것이 결정된다.

기존의 센서 노드 스케줄링 알고리즘에서는, 각 주기의 감지 단계에서, 활성 모드로 결정된 센서 노드는 즉시 감지 활동을 시작하고 휴면 모드로 결정된 센서 노드는 즉시 휴면 모드로 돌입하였다. 그러나 이 경우, 감지 단계에서 활성 모드로 동작하는 센서 노드에 결함이 발생하게 되면 결함이 발생한 노드의 감지영역에서 발생한 이벤트는 다음 스케줄링 단계가 될 때까지 감지하지 못하였다. 이와 같은 센서 노드의 결함에 따른 문제점을 극복하기 위해, 본 논문에서 제안하는 결함 허용 센서 노드 스케줄링 알고리즘에서는, 각 주기의 감지 단

계에서, 휴면 모드로 결정된 센서 노드가 휴면 모드로 돌입하기 전에 각 활성 모드의 센서 노드에 대해 백업 노드 집합을 미리 선정해 둔다. 따라서 감지 단계에서 활성 모드의 노드에 결함이 발생하는 경우, 미리 선정된 백업 노드 집합이 활성화되어 결함이 발생한 노드를 대신하여 이벤트를 감지할 수 있다.

그림 5와 6은 각 주기의 감지 단계에서 수행되는 백업 노드 선정 알고리즘을 기술한 의사 코드이다. 그림 5에서 활성 모드로 결정된 센서 노드는 임의의 back-off 시간 T_q 를 대기한 후 BREQ(backup request)를 브로드캐스트하고(line 5) 즉시 감지 활동을 시작한다(line 6). BREQ에는 활성 노드의 (노드 ID ID_A , heartbeat 주기 P_A , circular-arc digraph G_A)의 정보가 기입되어 있다.

```

01: for each node  $N_A$  scheduled to be in active mode
02:   set a  $T_q$  timer
03:   while (1)
04:     if ( $T_q$  is expired)
05:       broadcast its own BREQ( $ID_A, P_A, G_A$ )
06:       start the sensing task
07:     end if
08:   end while
09: end for
    
```

그림 5 FCP 기법의 백업 노드 선정 알고리즘(활성 모드로 결정된 노드)

한편, 그림 6에서 휴면 모드로 결정된 센서 노드들은 활성 노드의 BREQ를 수신하고(line 2) BREQ에 기입된 circular-arc digraph G_A 의 정보를 통해 자신이 필수 백업 노드인지 점검한다(line 4). 이는 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 노드를 우선적으로 백업 노드로 선정하기 위함이다. 만일 자신이 필수 백업 노드인 경우, 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 것이므로 임의의 back-off 시간 T_{p1} 를 대기한 후 BREP(backup reply)를 브로드캐스트하고 백업 노드로 선택된다(line 9-10). BREP에는 BREQ를 송신한 노드의 ID, BREP를 송신하는 노드의 ID가 기입되어 있다. 만일 자신이 필수 백업 노드가 아닌 경우, 임의의 back-off 시간 T_{p2} 동안 백업 노드로 선택된 다른 이웃 노드들로부터 BREP를 대기한다(line 19). 이 때, T_{p2} 는 T_{p1} 보다 매우 큰 값이다. 임의의 back-off 시간 T_{p2} 를 대기하는 동안 다른 백업 노드들로부터 BREP를 받으면(line 25), BREP에 기입된 정보를 통해 현 단계의 백업 노드 집합으로 구성된 circular-arc digraph G_A 의 유도 부분 그래프 G'_A 에서 자신이 잉여 백업 노드인지 점검한다(line 26-27). 만일 자

```

01: for each node  $N_S$  scheduled to be in sleep mode
02:   if (a BREQ( $ID_A, P_A, G_A$ ) is received)
03:     PHASE1:
04:       check if  $N_S$  is the essential backup node using  $G_A$ 
05:       if ( $N_S$  is the essential backup node)
06:         set a  $T_{p1}$  timer
07:         while (1)
08:           if ( $T_{p1}$  is expired)
09:             broadcast its own BREP( $ID_A, ID_S$ ) /* selected as a backup node */
10:             switch to sleep mode
11:           end if
12:         end while
13:       else
14:         go to PHASE2
15:       end if
16:
17:     PHASE2:
18:        $V(G'_A) = \emptyset$ 
19:       set a  $T_{p2}$  timer
20:       while (1)
21:         if ( $T_{p2}$  is expired)
22:           broadcast its own BREP( $ID_A, ID_S$ ) /* selected as a backup node */
23:           switch to sleep mode
24:         end if
25:         if (a BREP( $ID_A, ID_T$ ) is received)
26:            $V(G'_A) = V(G'_A) \cup \{v_T\}$ 
27:           check if  $N_S$  is the redundant backup node in the induced subgraph  $G'_A$ 
28:           if ( $N_S$  is the redundant backup node)
29:             discard its own BREP( $ID_A, ID_S$ ) /* not selected as a backup node */
30:             switch to sleep mode
31:           end if
32:         end if
33:       end while
34:     end if
35:   end for

```

그림 6 FCP 기법의 백업 노드 선정 알고리즘 (휴면 모드로 결정된 노드)

신이 잉여 백업 노드가 아닌 경우, 자신의 BREP를 브로드캐스트하고 백업 노드로 선택된다(line 22-23). 만일 자신이 잉여 백업 노드인 경우, 백업 노드로 선정될 기회를 잃고 자신의 BREP 전송을 포기한다(line 29-30). 이러한 과정을 반복하면, 각 활성 노드에 대해 백업 노드 집합이 선정되고 이들은 백업 노드로 선택되지 못한 노드들과 함께 휴면 모드로 전환된다.

각 주기의 감지 단계에서 각 활성 노드는 결합의 진단을 위해 BREQ에 기입한 heartbeat 주기마다 heartbeat 패킷을 브로드캐스트하며, 백업 노드로 선정된 노드들도 백업하고 있는 활성 노드의 heartbeat 주기마다

유휴모드로 깨어나 해당 활성 노드의 결합 발생 여부를 확인한다. 만약 활성 노드가 주기적으로 heartbeat 패킷을 송신하지 않는 경우, 백업 노드는 해당 센서 노드에 결합이 발생하였다고 판단하여 스스로 활성 모드로 전환한다. 이렇게 활성 모드로 전환된 노드들은 다시 자신의 결합을 대비하여 BREQ를 브로드캐스트하고, 그림 6에 기술된 알고리즘을 통해 다시 새로운 백업 노드 집합이 선정된다. FCP 기법에서 백업 노드로 선정된 노드는 각 주기의 감지 단계에서 활성(active), 유휴(idle), 휴면(sleep)의 세 가지 동작 모드를 가지며, 이들의 상태 전환 다이어그램을 그림 7에 보였다.

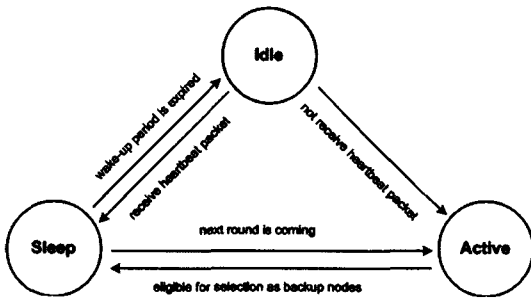


그림 7 백업 노드의 상태 전환 다이어그램

그림 8은 FCP 기법의 백업 노드 선정 과정을 보여주는 예이다. 그림에서 원으로 표현된 각 노드의 감지범위는 실선 혹은 점선으로 표시하였는데, 실선은 스케줄링 단계에서 활성 모드로 결정된 노드의 감지범위를 의미하고, 점선은 휴면 모드로 결정된 노드의 감지범위를 의미한다. 그림 8(a)에서 노드 A는 BREQ를 브로드캐스트하고 감지 활동을 시작한다. 그림 8(b)에서 BREQ를 받은 각 이웃 노드는 BREQ에 가입된 circular-arc digraph G 의 정보를 통해 자신이 단독으로 후원하는 영역을 제공하는 필수 백업 노드인지 점검한다. 그 중, 노드 E와 F는 필수 백업 노드이므로 바로 BREP를 브로드캐스트한다. 노드 B, C, D는 필수 백업 노드가 아니므로 바로 BREP를 송신하지 않고 임의의 back-off 시간 동안 다른 백업 노드의 BREP를 대기한다. 노드 E와 F로부터 BREP를 수신한 노드 B, C, D는 노드 E와 F로 구성된 유도 부분 그래프 G' 에서 잉여 백업 노드

인지 점검하고, 잉여 백업 노드가 아니므로 자신들의 BREP도 브로드캐스트하기 위해 준비한다. 그림 8(c)의 예에서는 노드 C가 먼저 자신의 BREP를 브로드캐스트하였다. 노드 C로부터 추가로 BREP를 수신한 노드 B와 D는 노드 C, E, F로 구성된 유도 부분 그래프 G' 에서 다시 잉여 백업 노드인지 점검하고, 잉여 백업 노드로 판단하여 BREP 전송을 포기하고 백업 노드로 선택되지 않는다. 만일 노드 B와 D가 먼저 자신들의 BREP를 브로드캐스트하였다면 노드 C가 BREP 전송을 포기하고 백업 노드로 선택되지 않았을 것이다. 이러한 과정을 반복하면, 유도 부분 그래프 G' 이 강한 연결 그래프가 되는 노드 C, E, F가 백업 노드로 선택된다.

그림 9는 그림 8과 동일한 네트워크 시나리오에 대해 CPNS, FANS, FCP의 결함 극복 진행 과정을 비교한 예이다. 그림에서 원으로 표현된 각 노드의 감지범위는 실선 혹은 점선으로 표시하였는데, 실선은 감지 단계에서 활성 모드로 동작하는 노드의 감지범위를 의미하고, 점선은 유휴 모드로 동작하는 노드의 감지범위를 의미한다. 휴면 모드의 노드의 감지범위는 표시하지 않았다. 그림 9(a)에서 활성 노드인 노드 A에 결함이 발생한 경우, CPNS에서는 노드 A의 감지범위만큼 감지불능 지역이 발생한다. 그림 9(b)의 FANS에서는 거리가 가장 가까운 노드 B와 D가 활성 모드로 전환된다. 노드 C와 F는 노드 B의 후원범위에, 노드 E는 노드 D의 후원범위에 각각 포함되어 백업 노드로 선정되지 못하며, 따라서 노드 A의 감지범위가 보존되지 못한다. 그림 9(c)의 FCP에서는 단독으로 후원범위를 제공하는 노드 E와 F,

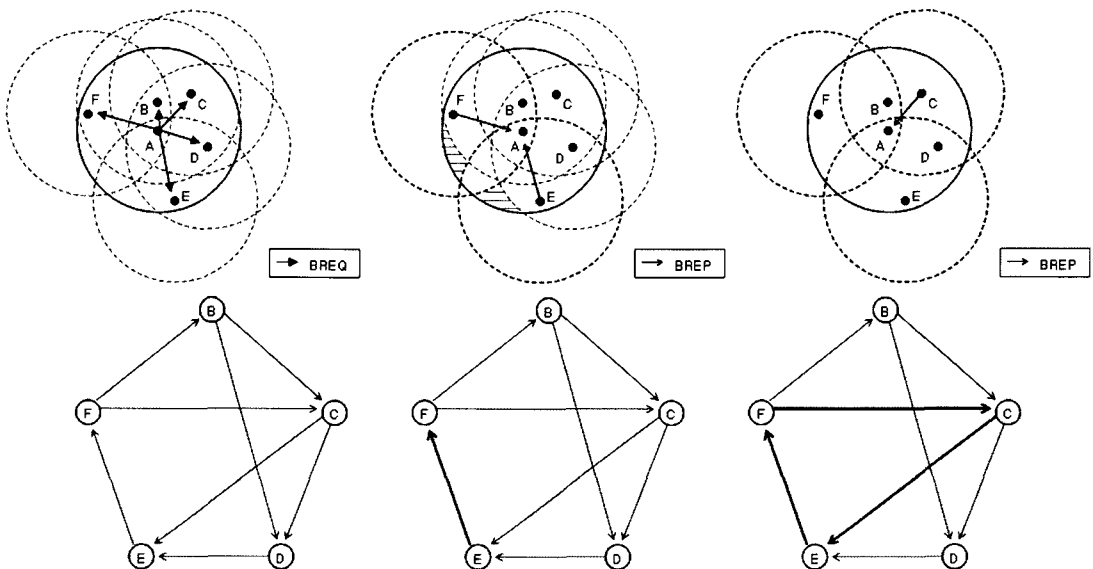


그림 8 FCP 기법의 백업 노드 선정 과정

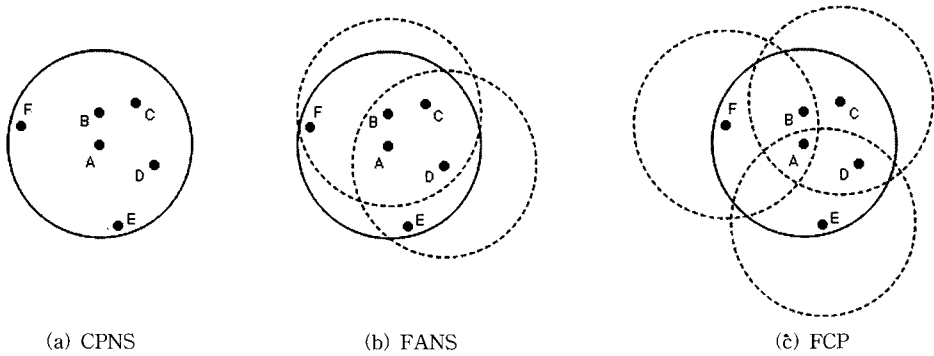


그림 9 결합 극복 진행 과정 비교

그리고 노드 C가 활성 모드로 전환되며, 노드 A의 감지 범위가 모두 보존된다.

지금까지 설명한 FCP 기법의 백업 노드 선정 알고리즘의 장점은 다음과 같다. 첫째로, 활성 노드는 BREQ 전송으로 백업 노드 선정 절차를 착수시킬 뿐 백업 노드 선정에 직접적으로 관여하지 않고 감지 활동을 수행한다. 백업 노드 선정 절차는 휴면 모드로 결정된 노드들에 의해 백그라운드로 수행된다. 둘째로, 백업 노드 선정에 참여한 이웃 노드 중 실제 백업 노드로 선정되는 노드들만 메시지를 발생시킨다. 마지막으로, FCP 기법의 백업 노드 선정 알고리즘은 그래프에 경로 존재 여부 점검만을 필요로 하는 단순한 알고리즘으로, 연산 복잡도가 낮으므로 특히 시스템 자원에 제약을 받는 센서 노드에 적용하기 적합하다.

4. 성능 평가

4.1 실험 환경 및 평가 기준

본 논문에서 제안하는 FCP 기법이 FANS 및 다른 결합 허용 기법과 비교해 얼마나 효과적으로 결합을 극복하는지 확인하기 위해 모의실험을 통한 성능 평가를 수행하였다. 모의실험 대상은 [9]에서 제안한 FANS, ECPNS-2 기법과 본 논문에서 제안하는 FCP 기법으로 정하였다. 이 중, ECPNS-2 기법은 한 활성 노드에 결합이 발생할 경우 해당 활성 노드의 이웃하는 휴면 노드를 대상으로 지역적으로 CPNS 알고리즘을 수행함으로써 결합을 극복하는 재-스케줄링 기반의 결합 허용 기법이다. 모의실험을 위해, $100 \times 100m^2$ 의 평면 네트워크 공간에 총 41개의 활성 노드를 그림 10과 같은 형태로 일정하게 배치하고 소정 개수의 휴면 노드를 랜덤하게 배치하여 각 결합 허용 기법에 따라 백업 노드를 선정하였다. 이 때, 각 노드의 감지반경은 $10m$ 로 모두 동일하다고 가정하였으며, 감지범위를 측정하기 위해 네트워크 공간에 $5 \times 5cm$ 간격의 격자형으로 분포된 감지 지

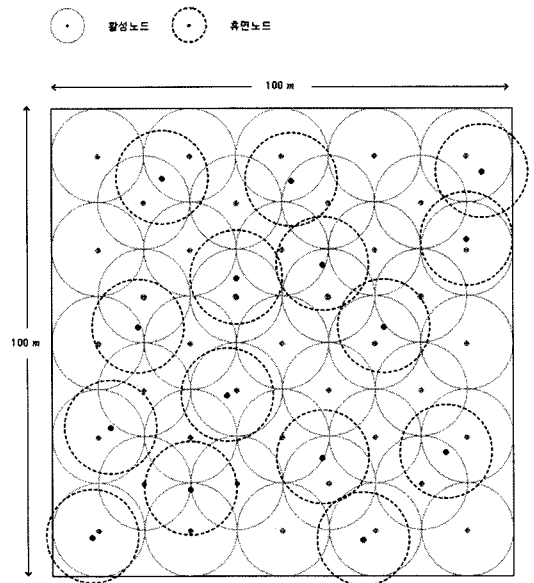


그림 10 모의실험 환경

점을 가정하였다.

성능 평가 기준은 다음과 같다. 첫째로, 각 결합 허용 기법으로 선정된 백업 노드가 제공하는 감지범위를 측정하여 비교하였다. 둘째로, 각 결합 허용 기법으로 선정된 백업 노드의 개수를 측정하여 비교하였다. 마지막으로, 각 결합 허용 기법으로 백업 노드 선정 과정에서 발생하는 제어 메시지 전송량을 측정하여 비교하였다. 이와 같은 세 가지 성능 비교를 통해 FCP 기법의 감지 범위 보존 역량과 효율성을 정량적으로 평가할 수 있다.

모든 실험은 휴면노드의 개수를 50개부터 500개까지 설정하며 수행하였으며, 각 설정에 대해 10번씩 반복 수행하여 그 평균을 취하였다. 그림 11은 휴면 노드 개수의 증가에 따른 각 활성 노드 당 평균 이웃 노드 개수를 보이고 있다.

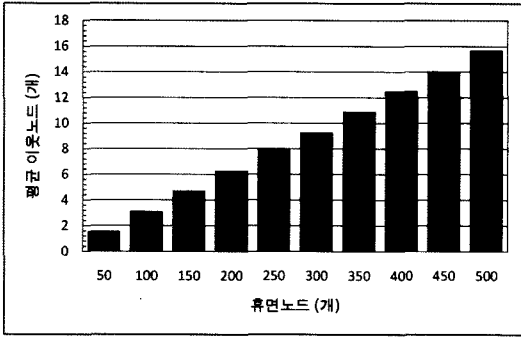


그림 11 활성 노드 당 평균 이웃 노드 개수

4.2 실험 결과

4.2.1 감지범위 향상

각 활성 노드에 대해 FANS, ECPNS-2, FCP 기법으로 각각 백업 노드를 선정할 후, 각 기법으로 선정된 백업 노드에 의해 제공되는 감지범위를 측정하였다. 감지범위는 5x5cm 간격의 격자형으로 분포된 감지지점인 한 개 이상의 센서 노드의 감지영역에 포함되는 비율로 산정하였다. 그림 12는 FANS, ECPNS-2, FCP 기법으로 선정된 백업 노드에 의해 감지범위가 보존되는 활성 노드의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, FANS 기법의 경우 휴면 노드 개수 설정에 따라 최소 1.5%에서 최대 62.0%의 활성 노드에서 감지범위가 보존된 반면, ECPNS-2와 FCP 기법에서는 최소 3.2%에서 최대 96.3%의 활성 노드에서 감지범위가 보존됨을 확인할 수 있다. 특히 휴면 노드의 개수가 450개 이상 즉, 이웃 노드의 개수가 14개를 초과하는 경우, ECPNS-2와 FCP 기법에서는 감지범위가 보존되는 활성 노드의 비율이 95% 이상에 달하였다. 반면, FANS 기법에서는 백업 노드로 선정할 수 있는 이웃 노드가 충분히 존재함에도 불구하고 약 35%에 이르는 활성 노드에서 감지범위가 보존되지 못하였다. 수치적으로 FCP 기법이 FANS 기법보다 평균 87.2%, 최대 116.7% 향상된 감지범위 보

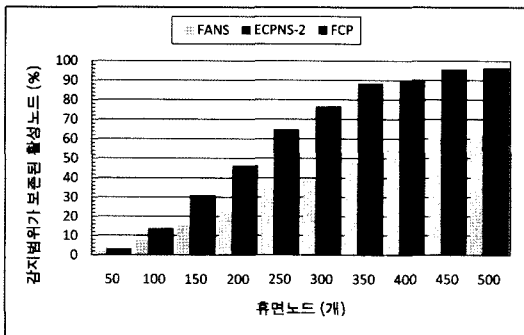


그림 12 감지범위가 보존된 활성 노드 비율

존 비율을 보였다. 그림 12의 실험 결과로 FCP 기법이 ECPNS-2 기법에 못지않은 감지범위 보존 역량을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이후의 실험 결과에서 확인할 수 있듯이, FCP 기법에서는 보다 적은 비용으로 이와 같은 감지범위 보존이 가능하다.

4.2.2 백업 노드 증가

각 활성 노드에 대해 FANS, ECPNS-2, FCP 기법으로 각각 백업 노드를 선정할 후, 각 기법으로 선정된 백업 노드의 개수를 계수하였다. 그림 13은 FANS 기법으로는 감지범위가 보존되지 않지만, ECPNS-2와 FCP 기법으로는 감지범위가 보존되는 활성 노드에 대해 추가로 선정된 백업 노드의 개수를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, ECPNS-2 기법의 경우 휴면 노드 개수 설정에 따라 최소 1.1개, 최대 6.4개의 추가 백업 노드를 선정하여 감지 범위를 보존한 반면, FCP 기법에서는 최소 0.7개, 최대 2.4개의 추가 백업 노드만으로 동일한 감지 범위 보존 효과를 얻을 수 있었다. 적은 백업 노드 수는 적은 수의 노드만을 활성화함으로써 에너지 소모량 및 네트워크 수명 연장 측면에서도 높은 효율을 보일 것을 기대할 수 있다. 수치적으로 FCP 기법이 ECPNS-2 기법에 비해 평균 57.6%, 최대 65.6% 적은 추가 백업 노드를 선정함을 보였다.

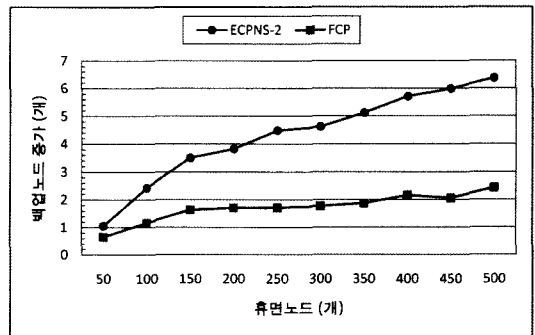


그림 13 FANS 대비 백업 노드 증가 개수

4.2.3 제어 메시지 증가

각 활성 노드에 대해 FANS, ECPNS-2, FCP 기법으로 각각 백업 노드를 선정하는 과정에서 발생하는 제어 메시지의 개수를 계수하였다. 그림 14는 FANS 기법으로는 감지범위가 보존되지 않지만, ECPNS-2와 FCP 기법으로 감지범위가 보존되는 활성 노드에 대해 추가로 발생하는 제어 메시지의 개수를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, ECPNS-2 기법의 경우 휴면 노드 개수 설정에 따라 최소 46.7개, 최대 988.4개의 추가 제어 메시지를 발생하여 감지 범위를 보존한 반면, FCP 기법에서는 최소 0.7개, 최대 2.4개의 추가 제어 메시지만으로

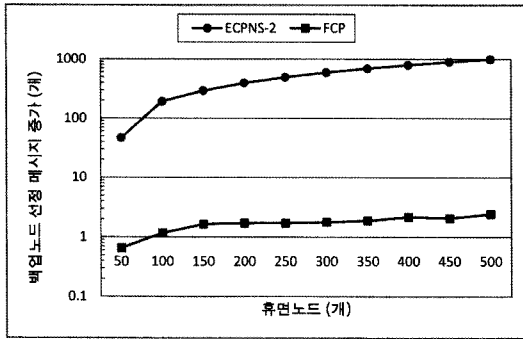


그림 14 FANS 대비 백업 노드 선정 메시지 증가 개수 (로그 스케일)

동일한 감지 범위 보존 효과를 얻을 수 있었다. 이는 ECPNS-2 기법의 경우 이웃 노드의 수에 비례하여 제어 메시지 전송량이 증가하나, FCP 기법의 경우 백업 노드의 수에 비례하여 제어 메시지 전송량이 증가하기 때문이다. 이 실험 결과는 재-스케줄링을 기반으로 하는 결합 허용 기법이 백업 노드를 기반으로 하는 결합 허용 기법보다 수백 배 많은 제어 메시지를 발생시킴을 증명한다. 또한, 그림 13의 실험 결과에서 확인하였듯이 FCP 기법은 적은 수의 백업 노드만을 활성화시키는데, 이는 결합 진단 과정에서도 보다 적은 heartbeat 메시지를 발생하기 때문에 ECPNS-2보다 적은 수의 제어 메시지를 발생할 것을 기대할 수 있다. 수치적으로 FCP 기법이 ECPNS-2 기법에 비해 평균 99.5%, 최대 99.8% 적은 추가 제어 메시지가 발생됨을 보였다.

4.3 실험 결과 분석

앞서 언급한 세 가지 평가 기준에 대해 모의실험을 수행한 결과, 전반적으로 센서 노드의 개수가 많아질수록 감지범위가 보존되는 비율이 높아져 센서 노드의 결합에 더 안정적인 감지환경을 제공할 수 관찰할 수 있었다. 또한, 재-스케줄링을 기반으로 하는 것보다 백업 노드를 기반으로 하는 것이 더 효율적으로 결합 극복을 가능하게 함을 관찰할 수 있었다.

우선, 감지범위 보존 비교에서 FCP 기법은 FANS 기법보다 향상된 감지범위 보존 성능을 보였다. FCP 기법으로는 감지범위가 보존되나 FANS 기법으로는 감지범위가 보존되지 않는 경우가 발생하는 원인은 FCP 기법으로 선정된 백업 노드 집합에는 포함되나 FANS 기법으로 선정된 백업 노드 집합에는 포함되지 않는 노드들이 존재하기 때문이다. 이들 노드는 이미 백업 노드로 선정된 다른 노드의 후원범위에 포함되는 노드들로, FANS 기법의 백업 노드 선정 알고리즘으로는 감지범위를 보존하기에 충분한 이웃 노드가 존재하나 감지범위를 보존하지 못하는 경우가 발생함을 확인할 수 있었

다. 수치적으로 FCP 기법이 FANS 기법보다 평균 87.2%, 최대 116.7% 향상된 감지범위 보존 비율을 보이는 것으로 나타났다.

또한, 백업 노드 개수 비교에서 FCP 기법의 백업 노드 선정 전략을 사용함으로써 적정한 수준의 추가 백업 노드로 감지범위를 보존함을 보였다. 이는 재-스케줄링 기반의 결합 허용 기법의 문제점에 기인한 것으로, 별도의 백업 노드 선정 알고리즘이 없는 ECPNS-2 기법의 경우 CPNS 알고리즘이 그대로 적용되어 노드의 전체 감지영역이 다른 백업 노드들에 의해 커버되어야만 백업 노드 집합에서 제외되었다. 반면, FCP 기법의 경우 활성 노드에게 제공하는 후원범위가 다른 백업 노드들에 의해 모두 커버되지만 하면 백업 노드 집합에서 제외되어, 결과적으로 보다 적은 수의 백업 노드로 활성 노드의 감지범위를 보존할 수 있었다. 수치적으로 FCP 기법이 ECPNS-2보다 평균 57.6%, 최대 65.6% 적은 추가 백업 노드를 선정하는 것으로 나타났다.

마지막으로, 백업 노드 선정 과정에서 발생하는 제어 메시지 전송량의 비교에서는 FCP 기법으로 ECPNS-2 기법에 비해 상대적으로 극소량의 추가 제어 메시지가 발생함으로 결합에 더 효과적으로 대처함을 보였다. 이 역시 재-스케줄링 기반의 결합 허용 기법의 문제점에 기인한 것으로, ECPNS-2 기법의 경우 재-스케줄링을 위해 발생하는 제어 메시지량이 이웃 노드의 수에 비례하여 증가하나 FCP 기법의 경우 백업 노드 선정을 위해 발생하는 제어 메시지량이 백업 노드의 수에 비례하여 증가하였다. 수치적으로 FCP 기법이 ECPNS-2 기법보다 평균 99.5%, 최대 99.8% 적은 추가 제어 메시지를 발생하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 감지영역을 고려한 센서 노드 스케줄링 기법에서 고려하지 않았던 일정한 감지수준을 유지하는 방법을 제시함으로써 기존의 감지영역을 고려한 센서 노드 스케줄링 기법과 비교해 결합에 효과적으로 대처하여 신뢰성 있는 감지환경을 제공하게 하였다. 본 논문에서 제안한 FCP 기법은 백업 노드를 기반으로 하는 결합 허용 기법으로, 결합이 발생한 센서 노드의 감지범위를 보존할 뿐만 아니라 백업 노드로 선정된 센서 노드만이 제어 메시지를 발생하도록 함으로써 더욱 효과적인 결합 극복을 가능하게 한다. 모의실험을 통한 FANS, ECPNS-2 기법과의 비교 실험에서 FCP 기법은 감지범위 보존, 백업 노드 개수, 제어 메시지 전송량 측면에서 결합에 따른 문제점을 효과적으로 대처하여 이전보다 적은 추가 비용으로 감지범위를 보존할 수 있는 결합 허용 기법임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 센서 노드 스케줄링은 효율적으로 결함을 극복하기 위한 효과적인 결함 극복 방법을 제시하고 있다. 하지만 결함을 진단하는 방법은 기존의 heartbeat 방법을 사용하고 있다. 보다 효율적으로 결함을 진단할 수 있는 센서 노드 스케줄링 개발 방법을 모색하는 것은 향후 연구과제로 남긴다.

참 고 문 헌

- [1] Toh, C. K., *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2002.
- [2] Ilyas, M. and Mahgoub, I., *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*, CRC Press, 2005.
- [3] Chen, H., Wu, H. and Tzeng, N. F., "Grid-based approach for working node selection in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*, pp. 3673-3678, 2004.
- [4] Tian, D. and Georganas, N. D., "A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks," in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp.32-41, 2002.
- [5] Boukerche, A., Fei, X. and Araujo, R. B., "A local information exchange based coverage-preserving protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Communications*, vol.8, pp.3420-3425, 2006.
- [6] Ye, F., Zhong, G., Cheng, J., Lu, S. and Zhang, L., "PEAS: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks," in *Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, pp.28-37, 2003.
- [7] Yan, T., He, T. and Stankovic, J. A., "Differentiated surveillance for sensor networks," in *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.51-62, 2003.
- [8] Zou, Y. and Chakrabarty, K., "Redundancy analysis and a distributed self-organization protocol for fault-tolerant sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol.3, no.3, pp.243-272, 2007.
- [9] Choi, J., Hahn, J. and Ha, R., "A fault-tolerant adaptive node scheduling scheme for wireless sensor networks," *Journal of Information Science and Engineering*, vol.25, no.1, pp.273-287, 2009.
- [10] Sinha, A. and Chandrakasan, A., "Dynamic power management in wireless sensor networks," *IEEE Design and Test of Computers*, vol.18, no.2, pp. 62-74, 2001.



한 주 선

1994년 숭실대학교 전자계산학과 졸업
 1996년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 1999년 10월~2006년 8월 지인정보 기술(주) 책임연구원. 2006년 9월~현재
 홍익대학교 컴퓨터공학과 BK21 연구교수.
 관심분야는 컴퓨터 구조, 실시간 시스템, 임베디드 시스템, 무선 센서 네트워크



하 란

1987년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업
 1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 석사
 1989년 3월~1990년 7월 한국통신 전임
 연구원. 1995년 University of Illinois at
 Urbana-Champaign 전산학 박사. 1995
 년 9월~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과
 교수. 관심분야는 센서 네트워크, 모바일/무선 컴퓨팅, 실시간 시스템, SDR