

계층적 클러스터링을 기반으로 하는 무선 센서 네트워크의 Throughput 과 Availability 평가

이 준 혁, *오 영 환

한국정보통신기능대학 정보통신설비과, *광운대학교 전자통신공학과

Assessing Throughput and Availability based on Hierarchical Clustering in Wireless Sensor Networks

Jun-Hyuk Lee, *Young-hwan Oh

Department of Information & Communication, Korea Information & Communication Polytechnic College

*Department of Electronic and Communication Engineering, Kwangwoon University

Abstract

A unreliable network system results in unsatisfied performance. A performance criterion of a network is throughput and availability. One of the most compelling technological advances of this decade has been the advent of deploying wireless networks of heterogeneous smart sensor nodes for complex information gathering tasks. The advancement and popularization of wireless communication technologies make more efficiency to network devices with wireless technology than with wired technology. Recently, the research of wireless sensor network has been drawing much attentions.

In this paper, We evaluate throughput and availability of wireless sensor network, which have hierarchical structure based on clustering and estimate the maximum throughput, average throughput and availability of the network considering several link failure patterns likely to happen at a cluster consisted of sensor nodes. Also increasing a number of sensor nodes in a cluster, We analysis the average throughput and availability of the network.

Key words : throughput, availability

1. 서 론

센서 기술, 저전력 RF설계기술 등의 발달로 무선 네트워크를 통하여 연결될 수 있는 소형, 저가, 저전력의 센서 노드들이 개발되어 왔다. 이러한 센서 노드의 하드웨어 구조는 신호를 감지하는 센서부, 감지된 아날로그 데이터의 디지털 처리를 위한 처리부, 데이터나 네트워크 구성을 위해 신호를 전송하거나 수신하는 송수신부로 구성된다.

이러한 많은 수의 센서 노드들이 현상의 내부나 매우 한정된 공간 내에서 조밀하게 배치되어 네트워크를 형성함으로서 홈 네트워크, 공장관리, 재난감시 등의 다양한 응용에 적용될 수 있다[1].

센서 네트워크란 물리공간의 상태인 빛, 소리, 온도, 움직임 같은 물리적 데이터를 센서 노드에서 감지, 측정하여 디지털 신호로 변환한 다음 중앙의 기본노드(Base station 또는 Sink)로 전달하는 센서 노드들로 구성되는 네트워크이다[2]. 특히, 센서 노드들은 서비스 영역에 배치된 후 자동적으로 ad-hoc 네트워크를 형성한 후 필요한 실세계(Physical world)의 정보를 수집 및 처리를 통하여 응용서비스를 제공해 준다[3].

센서 네트워크에서 센서 노드의 위치는 미리 결정된 형태 없이 배치될 수 있고, 근접한 센서 노드들이 유사한 정보를 감지하는 특성에 의해 임의의 센서 노드의 동작이 실패하거나 기능이 소멸되는 경우에도 네트워크의 전체적인 동작에는 영향을 미치지 않는다는 장점이 있다. 하지만 센서 네트워크 환경에서의 네트워크 성능은 기존 유선 네트워크 환경에 비해 상대적으로 좋지 못하다. 기존 네트워크에서 고장이 발생하는 경우는 크게 네트워크를 구성하고 있는 구성품의 고장으로 인한 전체 시스템의 고장을 유발시키는 직접적인 경우와 시스템 내부의 트래픽 폭주로 네트워크의 처리능력이 초과하여 야기되는 고장 또는 시스템 성능 저하로 볼 수 있다. 반면, 센서 네트워크에서는 기존 네트워크에서 나타날 수 있는 고장뿐만 아니라, 무선 네트워크가 가지는 환경, 영향 등이 추가된다. 이는 전체 시스템의 고장유발과 성능저하를 초래 할 수 있다. 네트워크의 성능 평가 방법으로 네트워크 Throughput과 Avai-lability를 평가하

여, 네트워크의 성능을 분석하는 방안이 제시되었다[4][5][6].

본 논문에서는 계층적 클러스터링 구조를 갖는 무선 센서 네트워크의 최대 Throughput과 Availability를 평가하고, 클러스터를 구성하는 센스 노드의 수 증가에 따른 네트워크의 평균 Throughput과 Availability를 비교한다. 본 논문은 2장에서 클러스터링을 기반으로 하는 계층적 라우팅 기법에 대해서 소개하고, 3장에서는 네트워크 모델 및 해석을 소개하며, 4장에서는 네트워크의 고장 유형별 최대 Throughput과 센서 노드의 수를 증가 시킨 네트워크의 평균 Throughput과 Availability를 평가하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 계층적 클러스터링 기반의 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크에서 인접한 노드간의 유사한 정보의 중복 전달로 인한 에너지 낭비를 줄이기 위한 “데이터 모음(Data aggregation)”이 필요하다는 특성을 고려할 때 클러스터링에 기반 한 계층적 라우팅 기법이 많은 장점을 가진다.

즉, 로컬 클러스터를 형성함으로서 인접한 지역에서 발생한 사건에 대한 유사한 정보를 클러스터 헤드로 전송하고 클러스터 헤드가 데이터 모음을 수행하여 보다 에너지 효율적인 라우팅을 가능하게 하며, 요청된 질의에 대한 클러스터 헤드에 의한 전달로 비효율적인 질의의 플러딩을 막을 수 있다.

클러스터링 기반의 계층적 라우팅 기법에서는 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

- 지속적인 전력이 공급되는 싱크가 모든 센서 노드에 직접 데이터를 전달할 수 있고, 수집 데이터의 저장 및 데이터 가공 등의 에너지 집약적인 기능을 수행한다.
- 센서 필드내의 센서 노드들은 같은 특성을 가지며, 초기에 같은 에너지가 부여된다.

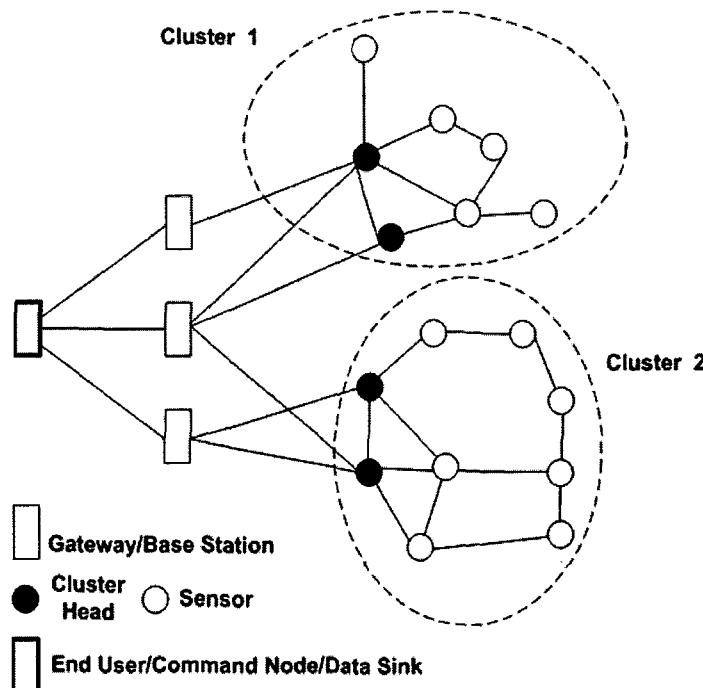
클러스터링 기반 라우팅 프로토콜에서 센서 네트워크는 그림 1과 같이 구성된다. 즉, 클러스터라는 작은 영역들로 센서 네트워크가 분할되고, 각 클러스터에는 클러스터 헤더가 존재하여 클러스터 멤버로부터 데이터를 수집하고 이를 모아서 싱크로 전달하거나, 상위 계층 클러스터 헤드로 전달하는 역할을 한다.

2.1 Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)

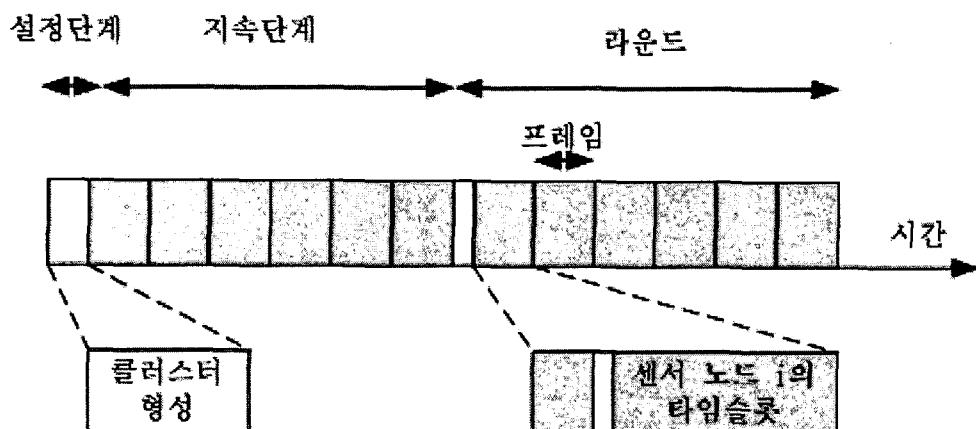
LEACH는, 클러스터 헤드가 클러스터의 멤버 노드들로부터 데이터를 수집하여 “데이터 퓨전”을 통해 데이터를 모아서 직접 싱크로 전달한다. 이 기법의 특징은 네트워크에 있는 모든 센서 노드들에 에너지 소비를 공정하게 분산시키기 위해, 에너지 집약적인 기능을 하는 클러스터 헤드를 무작위로 순환시키고, 전체적인 통신비용을 줄이기 위해 클러스터 헤드에서 클

러스터내의 데이터를 모아 지역적으로 퓨전 하는 것이다.

이를 위해, LEACH의 동작은 그림 2와 같이 라운드라는 시간 단위로 이루어진다.



<그림 1> 계층적 클러스터링 기반의 무선 센서 네트워크



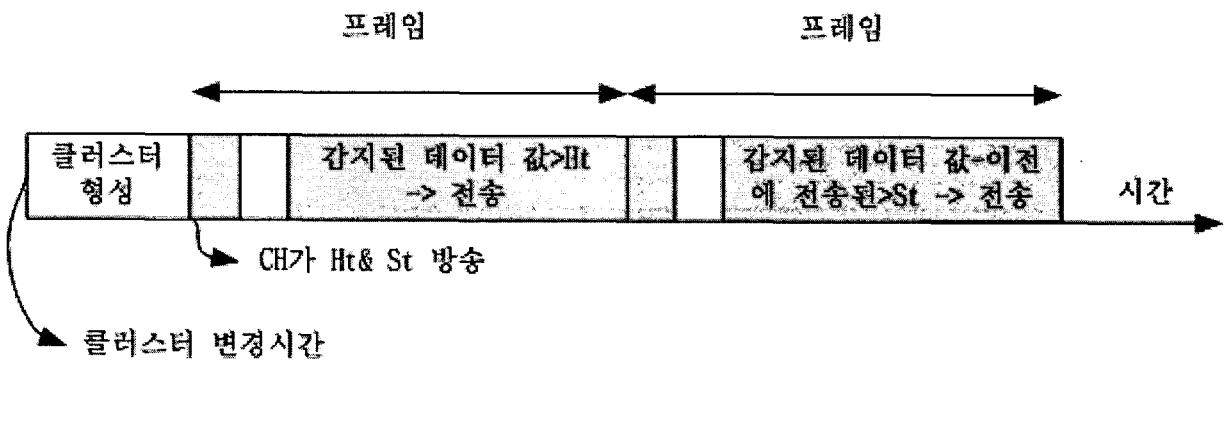
<그림 2> LEACH의 타임라인

2.2 Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol(TEEN)

TEEN은 센서 노드들이 주기적으로 전송할 데이터를 가지지 않는다는 점을 제외하고

L-EACH와 유사하게 동작한다. LEACH가 사전적(Proactive) 센서 네트워크에 적합한 특성을 가지지만, TEEN은 시간 임계적인 데이터를 처리한다는 점에서 반응적(Reactive) 센서 네트워크에 적합하다.

TEEN은 LEACH의 클러스터 형성 기법을 사용하나, 데이터 전송 단계에서 그림 3과 같이 다른 방법을 사용한다.



TEEN에서 센서 노드들은 클러스터 결정시간에 클러스터 헤드가 방송한 임계값인 H_t 와 S_t 에 기반을 두고 현재 감지된 데이터를 전송할지를 결정한다.

즉, 감지된 데이터의 값이 처음으로 H_t 를 초과하면, 이를 저장하여 해당 시간 슬롯에 전송한다. 이후에는 감지된 데이터의 값이 저장된 값보다 S_t 이상 큰 경우에 저장하고, 해당 시간 슬롯에 전송한다.

2.3 Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol(APTEEN)

APTEEN은 사전적 센서 네트워크와 반응적 센서 네트워크의 한계점을 최소화하면서 두 가지의 장점을 통합하는 하이브리드 네트워크를 제공한다. APTEEN을 채택한 하이브리드 네트워크에서, 센서 노드들은 데이터를 주기적으로 전송할 뿐만 아니라, 측정한 데이터의 속성 값의 갑작스런 변화에도 반응한다.

APTEEN은 TEEN과 같은 형태로 시간 임계적 데이터를 처리하고, 사전적 동작을 위해서 센서 노드가 카운트 시간동안 데이터를 전송하지 않은 경우 데이터를 감지해서 클러스터 헤드로 전송하도록 하여 TEEN의 단점을 개선하였다.

APTEEN에서는 인접한 노드들이 유사한 데이터를 감지하는 특성을 활용하여 인접한 두 노드의 쌍을 지어, 각 쌍에 대해 한 노드만이 질의에 응답하고, 다른 노드는 “sleep” 모드에서

전력 소비를 줄일 수 있도록 한다.

3. 네트워크 모델 및 해석

네트워크의 Throughput을 신뢰도 평가 기준으로 하고, 네트워크를 구성하고 있는 구성품(노드, 링크)의 고장은 네트워크 전체의 성능저하를 유발시키고, 결국에는 고장으로 이어진다. 네트워크의 고장은 주로 두 가지로 크게 나누어진다.

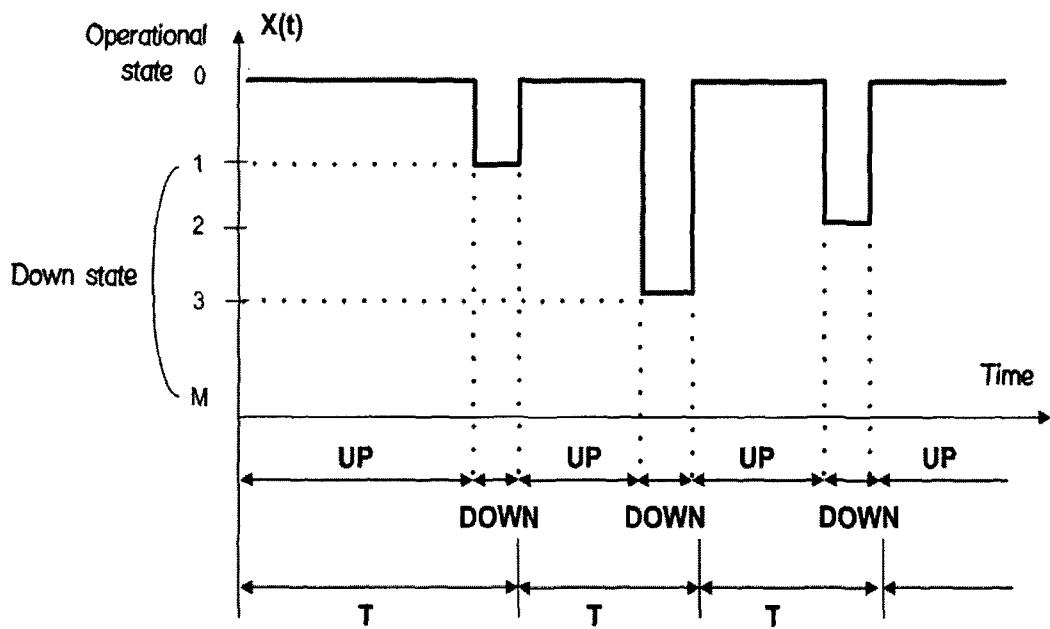
첫째, 노드의 연결이 끊어지는 링크고장, 둘째, 노드의 과부하, 혼잡, 유입되는 트래픽의 차단, 버퍼의 과잉 등에 의한 혼잡고장이다.

3.1 네트워크 시스템 정의 및 가정

- ① 네트워크를 구성하고 있는 구성품은 높은 신뢰도를 가지고 있다.
- ② 구성품의 고장시간은 지수분포를 가지며, 고장시 수리시간은 평균고장 시간보다 짧다.
- ③ 네트워크는 안정상태에 있고, 고장이 발생하면 트래픽의 흐름은 고장 나지 않은 링크로 분산되어 즉시 안정상태를 유지한다.
- ④ 고장수리를 위해 교체되는 구성품은 새것이며 수리 후, 다시 높은 신뢰도를 갖는다.
- ⑤ 고장난 구성품이 수리, 교체되는 동안 다른 구성품은 고장 나지 않는다.

3.2 네트워크 모델

- ① Process는 안정상태($i=0$)와 고장상태($i=1, \dots, M$)를 반복한다. (i 는 고장형태)
- ② 시스템은 i 형태의 고장이 발생하면 down 된다.
- ③ 수리 후 시스템은 다시 안정상태로 복귀하여 정상상태를 유지한다.



<그림 4> 네트워크 고장 형태별 주기변화

④ notation

λ_i 고장율, ($i=1, \dots, M$)

U_i i 고장형태에서의 up time

D_i i 고장형태에서의 repair time

T up-down cycle time

T_0 cycle time 중 안정상태 시간 ($\min U_i$)

⑤ up time, $E[T_0]$

$$E[U_i] = \int_0^\infty \left(\sum_{j=1}^M e^{-\lambda_j t} \right) dt = \Lambda^{-1} = \frac{1}{\Lambda} \left(\Lambda = \sum_{j=1}^M \lambda_j \right)$$

⑥ cycle time, $E[T]$

$$E[T] = \Lambda^{-1} + (\Lambda^{-1}) \sum_{j=1}^M \rho_j = \lambda_i \cdot E[D_j], \quad j=1, \dots, M$$

$$E[T_j] = \frac{\lambda_i}{\Lambda} E[D_j] = \frac{\rho_i}{\Lambda}, \quad j=1, \dots, M$$

⑦ steady-state probability

$$p_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{X(t) = j\} = E[T_j]/E[T] = \rho_j \cdot p_0, \quad j=1, \dots, M$$

$$p_0 = 1 / \left(1 + \sum_{j=1}^M \rho_j \right)$$

⑧ Average Throughput(AT)

$$AT = \frac{E[\text{throughput during one cycle}]}{E[\text{cycle time}]}$$

$$= \left[r(0) + \sum_{k=1}^M r(k) \cdot p_k \right] / \left[1 + \sum_{k=1}^M r(k) \cdot p_k \right] = \sum_{k=0}^M r(k) \cdot p_k$$

⑨ Availability(AV)

$$AV = \frac{E[\text{uptime during one cycle}]}{E[\text{cycle time}]}$$

$$= \sum_{k=0}^M I(k) \cdot J(k) \cdot p_k$$

$$I(k) = \begin{cases} 1, & \text{네트워크가 } k\text{상태에 연결되어 있을 경우} \\ 0, & \text{그 이외의 경우} \end{cases}$$

$$J(k) = \begin{cases} 1, & \text{네트워크가 } k\text{상태에서 혼잡하지 않을 경우} \\ 0, & \text{그 이외의 경우} \end{cases}$$

4. 무선 센서 네트워크의 Throughput 과 Availability

4.1 notation

$v(k)$ 네트워크 입력 트래픽

$v^*(k)$ 최대 네트워크 throughput

$g_i(k)$ 노드 i 에 패킷이 처음 나타날 확률

$f_{ij}(k)$ 노드 i 에서 노드 j 로 패킷 서비스가 끝날 확률, ($i, j=1, \dots, M$)

$1 - \sum_j f_{ij}(k)$ 노드 i 에 패킷이 남아 있을 확률

$\mu_i(k)$ 노드 i 의 서비스율

4.2 Maximal Throughput

$$v^*(k) = [\max(a_1(k), \dots, a_I(k))]^{-1} = a_i(k)^{-1}$$

여기서, $a_i(k) \equiv e_i(k)/\mu_i(k)$, $i=1, \dots, I$

$$e_i(k) = g_i(k) + \sum_{j=1}^I e_j(k) \cdot f_{ij}(k), \quad i=1, \dots, I$$

$$e(k) = g^T(k) + F^T(k) \cdot e(k) = (1 - F^T(k))^{-1} \cdot g^T(k)$$

$$r(k) \equiv \min\{v(k), v^*(k)\}$$

4.3 기본조건

$$\lambda_i = 1/year, E[D_i] = 2/365 years \quad (i=0, 1, 2, 3, 4, 5)$$

$$p_0 = 0.968, p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = p_7 = p_8 = p_9 = 0.0053$$

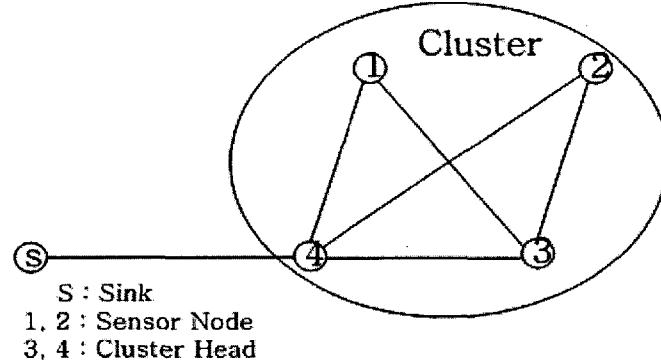
$$g^T(k) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$$

$$\mu_1(k) = 0.4, \mu_2(k) = 0.5, \mu_3(k) = 0.6, \mu_4(k) = 0.7, \mu_5(k) = 0.8, \mu_6(k) = 0.9$$

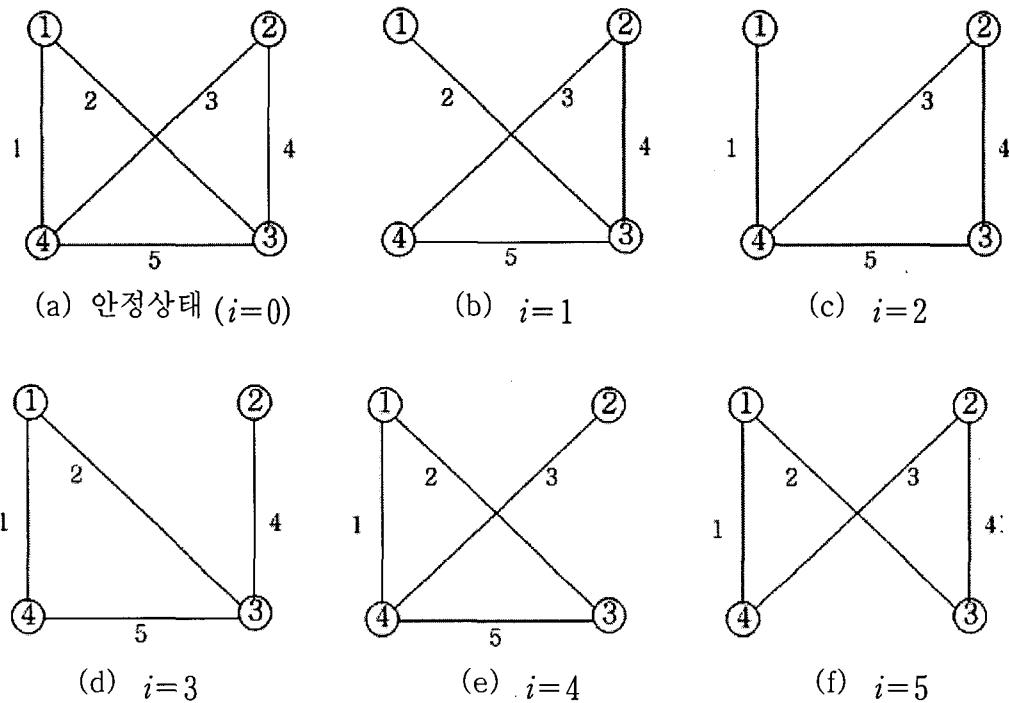
$$v(k) = v = 0.95 \quad (k=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)$$

4.4 Throughput 과 Availability 평가

4.4.1 4노드 클러스터



<그림 5> 무선 센서 네트워크 그래프(4노드 클러스터)



<그림 6> 링크고장 유형별 네트워크 그래프(4노드 클러스터)

① 네트워크가 안정상태(0)인 경우(a)

$$e_1(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{6}(e_2(0) + e_3(0))$$

$$e_2(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{6} e_3(0) + \frac{1}{4} e_4(0)$$

$$e_3(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{6} e_2(0) + \frac{1}{4} e_4(0)$$

$$e_4(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{6}(e_2(0) + e_3(0))$$

$$e_1(0) = e_4(0), \quad e_2(0) = e_3(0),$$

$$e_1(0) = e_4(0) = 7/16, \quad e_2(0) = e_3(0) = 9/16$$

$$e^T(0) = (7/16, 9/16, 9/16, 7/16)$$

$$v^*(0) = [\max(1.0978, 1.125, 0.9375, 0.625)]^{-1} = 0.8889$$

② 네트워크가 1의 상태인 경우(b)

$$e^T(1) = (4/21, 5/21, 7/21, 5/21), \quad v^*(1) = [\max(0.4762, 0.4762, 0.5556, 0.3401)]^{-1} = 1.8$$

③ 네트워크가 2의 상태인 경우(c)

$$e^T(2) = (5/21, 4/21, 5/21, 7/21), \quad v^*(2) = [\max(0.5952, 0.381, 0.3968, 0.4762)]^{-1} = 1.68$$

④ 네트워크가 3의 상태인 경우(d)

$$e^T(3) = (1/2, 1/2, 1/2, 1/2), \quad v^*(3) = [\max(1.25, 1, 0.8333, 0.7143)]^{-1} = 0.8$$

⑤ 네트워크가 4의 상태인 경우(e)

$$e^T(4) = (4/21, 5/21, 5/21, 7/21), \quad v^*(4) = [\max(0.4762, 0.4762, 0.3968, 0.4762)]^{-1} = 2.1$$

⑥ 네트워크가 5의 상태인 경우(f)

$$e^T(5) = (5/21, 4/21, 7/21, 5/21), \quad v^*(5) = [\max(0.5952, 0.381, 0.5556, 0.3401)]^{-1} = 1.68$$

⑦ Average Throughput(AT)

$$AT = 0.95(p_0 + p_1 + p_2 + p_4 + p_5) + (0.855 \cdot p_3) = 0.9443$$

⑧ Availability (AV)

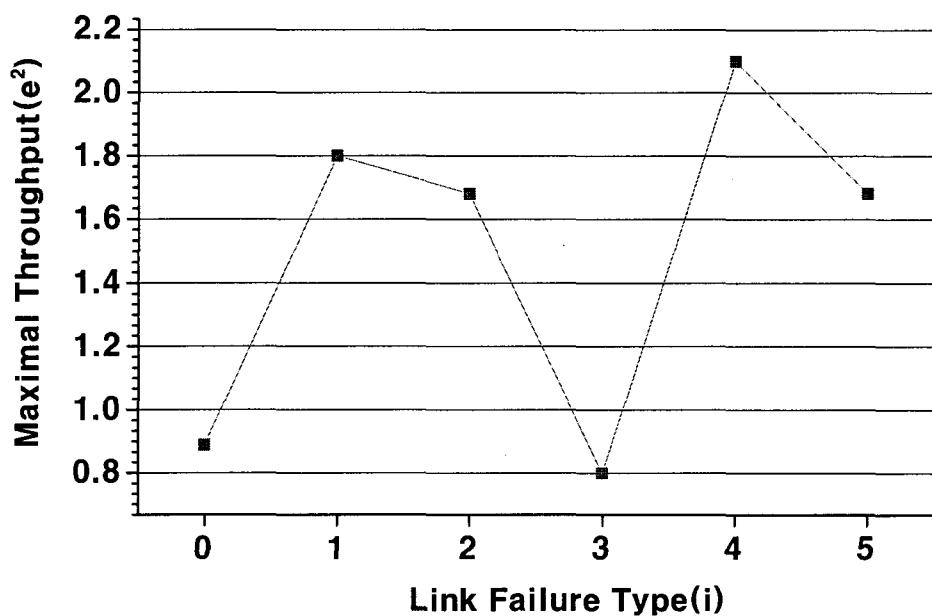
$$I(k) = \{1, k=0,1,2,3,4,5\},$$

$$J(k) = \begin{cases} 1, & k=0,1,2,4,5 \\ 0, & k=3 \end{cases}$$

$$AV = p_0 + p_1 + p_2 + p_4 + p_5 = 0.9892$$

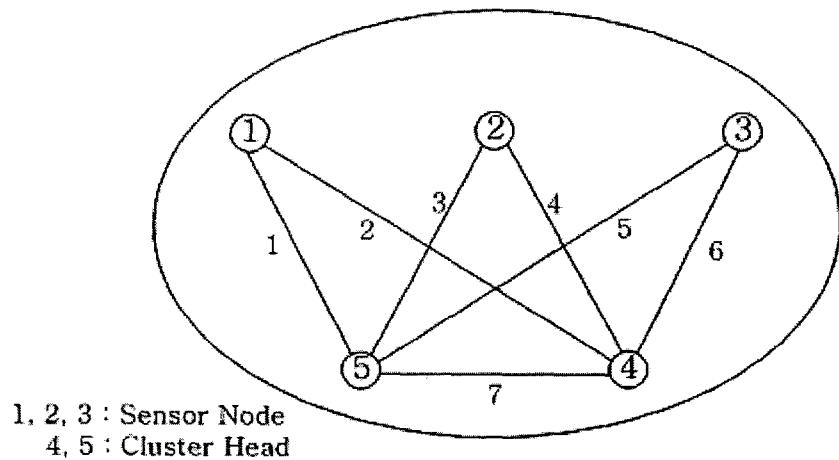
<표 1> 노드 서비스율(μ)에 따른 고장형태별(i) Maximal Throughput

고장형태 (i)	노드 1 ($\mu=0.4$)	노드 2 ($\mu=0.5$)	노드 3 ($\mu=0.6$)	노드 4 ($\mu=0.7$)	Maximal Throughput $v^*(k)$
	$a_1(k)\mu$	$a_2(k)$	$a_3(k)$	$a_4(k)$	
0	1.0938	1.125	0.9375	0.625	0.8889
1	0.4762	0.4762	0.5556	0.3401	1.8
2	0.5952	0.381	0.3968	0.4762	1.68
3	1.25	1	0.8333	0.7143	0.8
4	0.4762	0.4762	0.3968	0.4762	2.1
5	0.5952	0.381	0.5556	0.3401	1.68

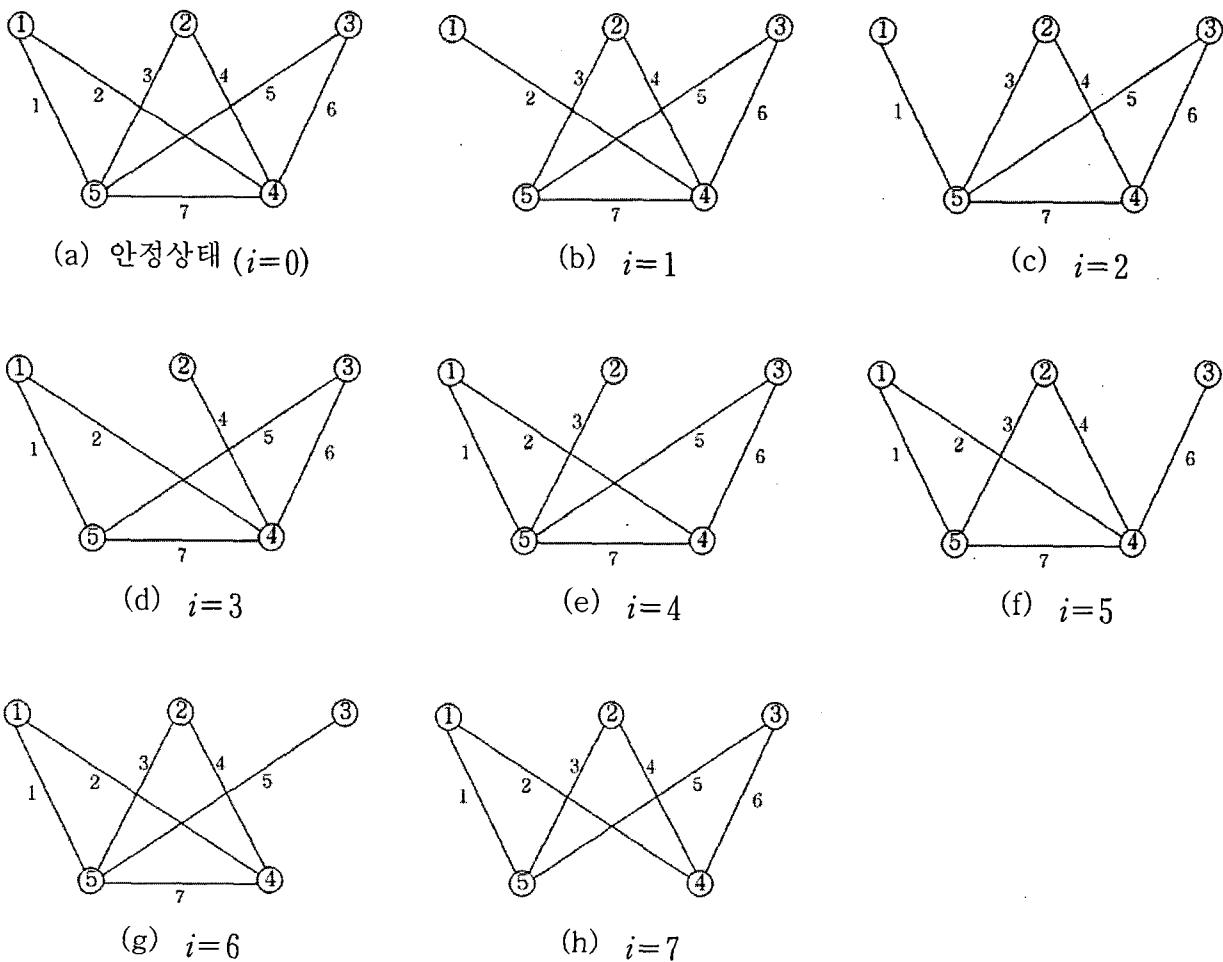


<그림 7> 링크고장 유형별 Maximal Throughput

4.4.2 5노드 클러스터



<그림 8> 무선 센서 네트워크 그래프(5노드 클러스터)



<그림 9> 링크고장 유형별 네트워크 그래프(5노드 클러스터)

① 네트워크가 안정상태(0)인 경우(a)

$$e_1(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} e_4(0) + \frac{1}{8} e_5$$

$$e_2(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} e_4(0) + \frac{1}{8} e_5(0)$$

$$e_3(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} e_4(0) + \frac{1}{8} e_5(0)$$

$$e_4(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{4} e_2(0) + \frac{1}{4} e_3(0) + \frac{1}{8} e_5(0)$$

$$e_5(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{4} e_2(0) + \frac{1}{4} e_3(0) + \frac{1}{8} e_4(0)$$

$$e_1(0) = e_2(0) = e_3(0), e_4(0) = e_5(0)$$

$$e_1(0) = e_2(0) = e_3(0) = 9/23, e_4(0) = e_5(0) = 14/23$$

$$e^T(0) = (9/23, 9/23, 9/23, 14/23, 14/23)$$

$$v^*(0) = [\max(0.9783, 0.7826, 0.6522, 0.8689, 7609)]^{-1} = 1.0222$$

② 네트워크가 1의 상태인 경우(b)

$$e^T(1) = (0.34375, 7/16, 7/16, 0.75, 9/16)$$

$$v^*(1) = [\max(0.8594, 0.875, 0.7292, 1.0714, 0.7031)]^{-1} = 0.9333$$

③ 네트워크가 2의 상태인 경우(c)

$$e^T(2) = (0.34375, 7/16, 7/16, 9/16, 0.75)$$

$$v^*(2) = [\max(0.8594, 0.875, 0.7292, 0.8036, 0.9375)]^{-1} = 1.0667$$

④ 네트워크가 3의 상태인 경우(d)

$$e^T(3) = (7/16, 0.34375, 7/16, 0.75, 9/16)$$

$$v^*(3) = [\max(1.0938, 0.6875, 0.7292, 1.0714, 0.7031)]^{-1} = 0.9143$$

⑤ 네트워크가 4의 상태인 경우(e)

$$e^T(4) = (7/16, 0.34375, 7/16, 9/16, 0.75)$$

$$v^*(4) = [\max(1.0938, 0.6875, 0.7292, 0.8036, 0.9375)]^{-1} = 0.9143$$

⑥ 네트워크가 5의 상태인 경우(f)

$$e^T(5) = (7/16, 7/16, 0.34375, 0.75, 9/16)$$

$$v^*(5) = [\max(1.0938, 0.875, 0.5729, 1.0714, 0.7031)]^{-1} = 0.9143$$

⑦ 네트워크가 6의 상태인 경우(g)

$$e^T(6) = (7/16, 7/16, 0.34375, 9/16, 0.75)$$

$$v^*(6) = [\max(1.0938, 0.875, 0.5729, 0.8036, 0.9375)]^{-1} = 0.9143$$

⑧ 네트워크가 7의 상태인 경우(h)

$$e^T(7) = (16/37, 16/37, 16/37, 21/37, 21/37)$$

$$v^*(7) = [\max(1.0811, 0.8649, 0.7207, 0.8108, 0.7095)]^{-1} = 0.925$$

⑨ Average Throughput(AT)

$$AT = 0.95(p_0 + p_2) + (0.87 \cdot p_1) + 0.85(p_3 + p_4 + p_5 + p_6) + (0.86 \cdot p_7) = 0.9518$$

⑩ Availability(AV)

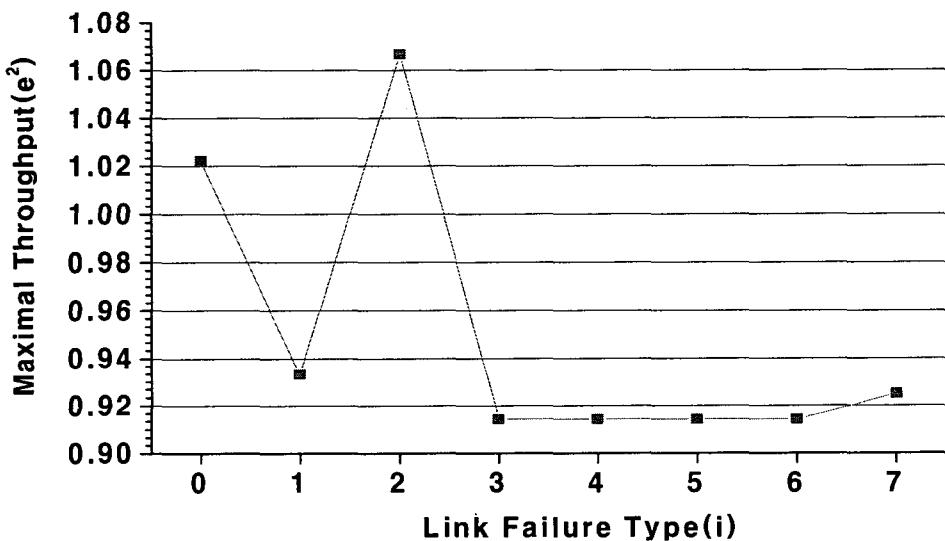
$$I(k) = \{1, k=0,1,2,3,4,5,6,7\}$$

$$J(k) = \begin{cases} 1, & k=0,2 \\ 0, & k=1,3,4,5 \end{cases}$$

$$AV = p_0 + p_2 = 0.9733$$

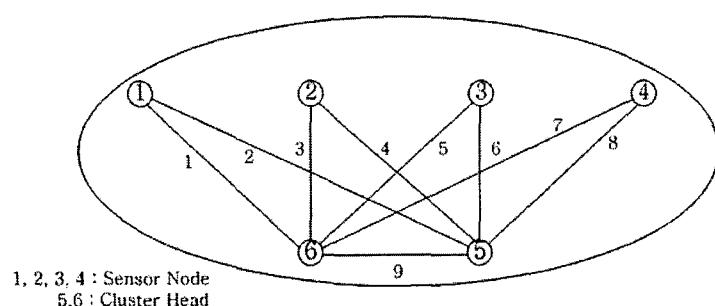
<표 2> 노드 서비스율(μ)에 따른 고장형태별(i) Maximal Throughput

고장형태 (i)	노드 1 ($\mu=0.4$)	노드 2 ($\mu=0.5$)	노드 3 ($\mu=0.6$)	노드 4 ($\mu=0.7$)	노드 5 ($\mu=0.8$)	Maximal Throughput $v^*(k)$
	$a_1(k)$	$a_2(k)$	$a_3(k)$	$a_4(k)$	$a_5(k)$	
0	0.9783	0.7826	0.6522	0.8696	0.7609	1.0222
1	0.8594	0.875	0.7292	1.0714	0.7031	0.9333
2	0.8594	0.875	0.7292	0.8036	0.9375	1.0667
3	1.0938	0.6875	0.7292	1.0714	0.7031	0.9143
4	1.0938	0.6875	0.7292	0.8036	0.9375	0.9143
5	1.0938	0.875	0.5729	1.0714	0.7031	0.9143
6	1.0938	0.875	0.5729	0.8036	0.9375	0.9143
7	1.0811	0.8649	0.7207	0.8108	0.7095	0.925

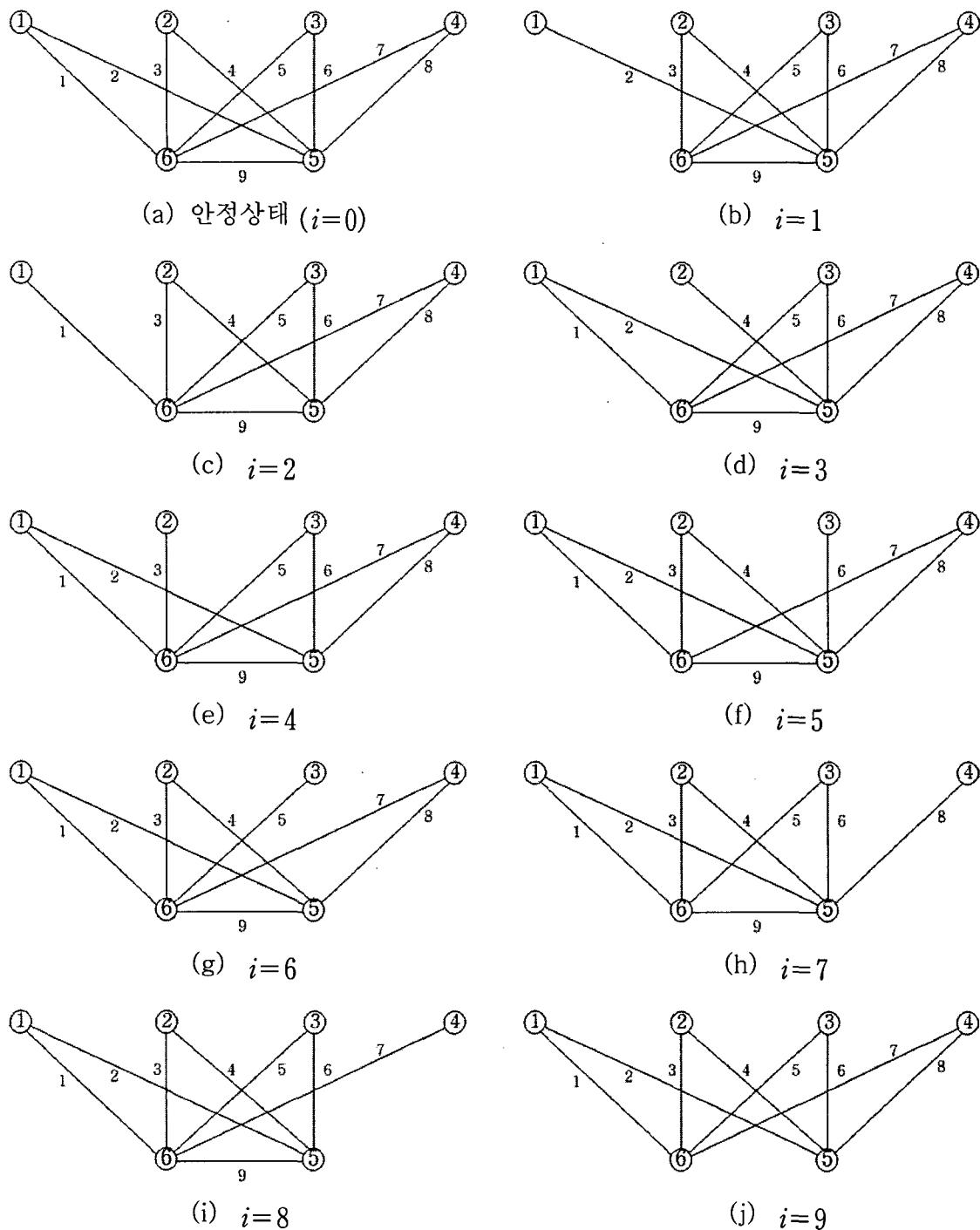


<그림 9> 링크고장 유형별 Maximal Throughput

4.4.3 6노드 클러스터



<그림 10> 무선 센서 네트워크 그래프(6노드 클러스터)



<그림 11> 링크고장 유형별 네트워크 그래프(6노드 클러스터)

① 네트워크가 안정상태(0)인 경우(a)

$$e_1(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{10} e_5(0) + \frac{1}{10} e_6$$

$$e_2(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{10} e_5(0) + \frac{1}{10} e_6(0)$$

$$e_3(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{10} e_5(0) + \frac{1}{10} e_6(0)$$

$$e_4(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{10} e_5(0) + \frac{1}{10} e_6(0)$$

$$e_5(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{4} e_2(0) + \frac{1}{4} e_3(0) + \frac{1}{4} e_4(0) + \frac{1}{10} e_6(0)$$

$$e_6(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e_1(0) + \frac{1}{4} e_2(0) + \frac{1}{4} e_3(0) + \frac{1}{4} e_4(0) + \frac{1}{10} e_5(0)$$

$$e_1(0) = e_2(0) = e_3(0) = e_4(0), e_5(0) = e_6(0)$$

$$e_1(0) = e_2(0) = e_3(0) = e_4(0) = 11/31, e_5(0) = e_6(0) = 20/31$$

$$e^T(0) = (11/31, 11/31, 11/31, 11/31, 20/31, 20/31)$$

$$v^*(0) = [\max(0.8871, 0.7097, 0.5914, 0.5069, 0.8065, 0.7168)]^{-1} = 1.1273$$

② 네트워크가 1의 상태인 경우(b)

$$e^T(1) = (0.31522, 9/23, 9/23, 9/23, 0.65217, 14/23)$$

$$v^*(1) = [\max(0.7881, 0.7826, 0.6522, 0.559, 0.8152, 0.6763)]^{-1} = 1.2267$$

③ 네트워크가 2의 상태인 경우(c)

$$e^T(2) = (0.31522, 9/23, 9/23, 9/23, 9/23, 14/23, 0.65217)$$

$$v^*(2) = [\max(0.7881, 0.7826, 0.6522, 0.559, 0.7609, 0.7246)]^{-1} = 1.269$$

④ 네트워크가 3의 상태인 경우(d)

$$e^T(3) = (9/23, 0.31522, 9/23, 9/23, 0.65217, 14/23)$$

$$v^*(3) = [\max(0.9783, 0.6304, 0.6522, 0.559, 0.8152, 0.6763)]^{-1} = 1.0222$$

⑤ 네트워크가 4의 상태인 경우(e)

$$e^T(4) = (9/23, 0.31522, 9/23, 9/23, 14/23, 0.65217)$$

$$v^*(4) = [\max(0.9783, 0.6304, 0.6522, 0.559, 0.7609, 0.7246)]^{-1} = 1.0222$$

⑥ 네트워크가 5의 상태인 경우(f)

$$e^T(5) = (9/23, 9/23, 0.31522, 9/23, 0.65217, 9/23)$$

$$v^*(5) = [\max(0.9783, 0.7826, 0.5254, 0.559, 0.8152, 0.6763)]^{-1} = 1.0222$$

⑦ 네트워크가 6의 상태인 경우(g)

$$e^T(6) = (9/23, 9/23, 0.31522, 9/23, 14/23, 0.65217)$$

$$v^*(6) = [\max(0.9783, 0.7826, 0.5254, 0.559, 0.7609, 0.7246)]^{-1} = 1.0222$$

⑧ 네트워크가 7의 상태인 경우(h)

$$e^T(7) = (9/23, 9/23, 9/23, 0.31522, 0.65217, 14/23)$$

$$v^*(7) = [\max(0.9783, 0.7826, 0.6522, 0.4503, 0.8152, 0.6763)]^{-1} = 1.0222$$

⑨ 네트워크가 8의 상태인 경우(i)

$$e^T(8) = (9/23, 9/23, 9/23, 0.31522, 14/23, 0.65217)$$

$$v^*(8) = [\max(0.9783, 0.7826, 0.6522, 0.4503, 0.7609, 0.7246)]^{-1} = 1.0222$$

⑩ 네트워크가 9의 상태인 경우(j)

$$e^T(9) = (5/13, 5/13, 5/13, 5/13, 8/13, 8/13)$$

$$v^*(9) = [\max(0.9615, 0.7692, 0.641, 0.5495, 0.7692, 0.6838)]^{-1} = 1.04$$

⑪ Average Throughput(AT)

$$AT = 0.95(p_0 + p_1 + p_2) + 0.86(p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8) + (0.88 \cdot p_9) = 0.96171$$

⑫ Availability(AV)

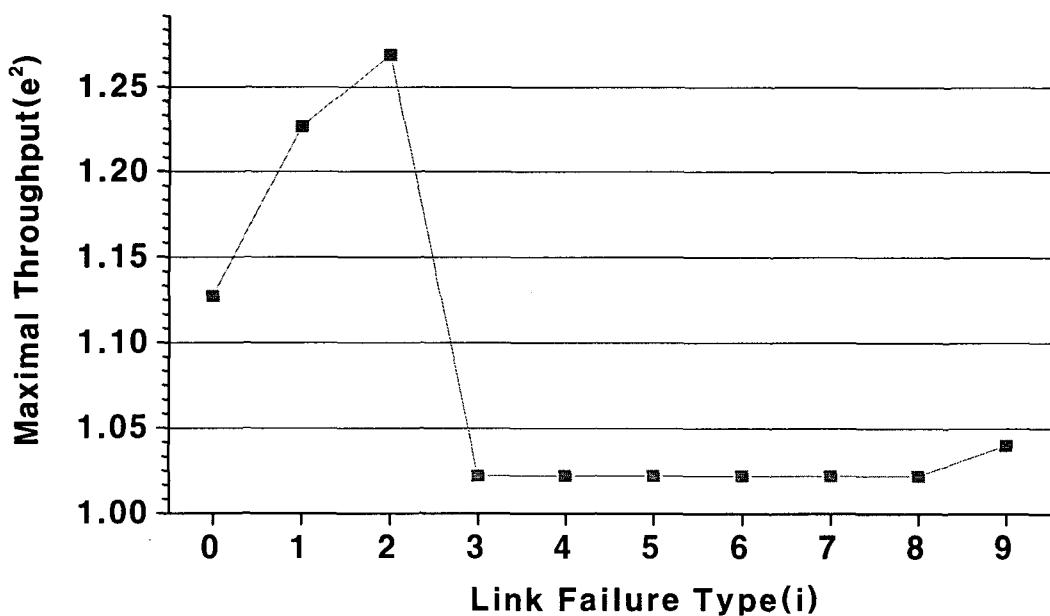
$$I(k) = \{1, k=0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$$

$$J(k) = \begin{cases} 1, & k=0,1,2 \\ 0, & k=3,4,5,6,7,8,9 \end{cases}$$

$$AV = p_0 + p_1 + p_2 = 0.9786$$

<표 3> 노드 서비스율(μ)에 따른 고장형태별(i) Maximal Throughput

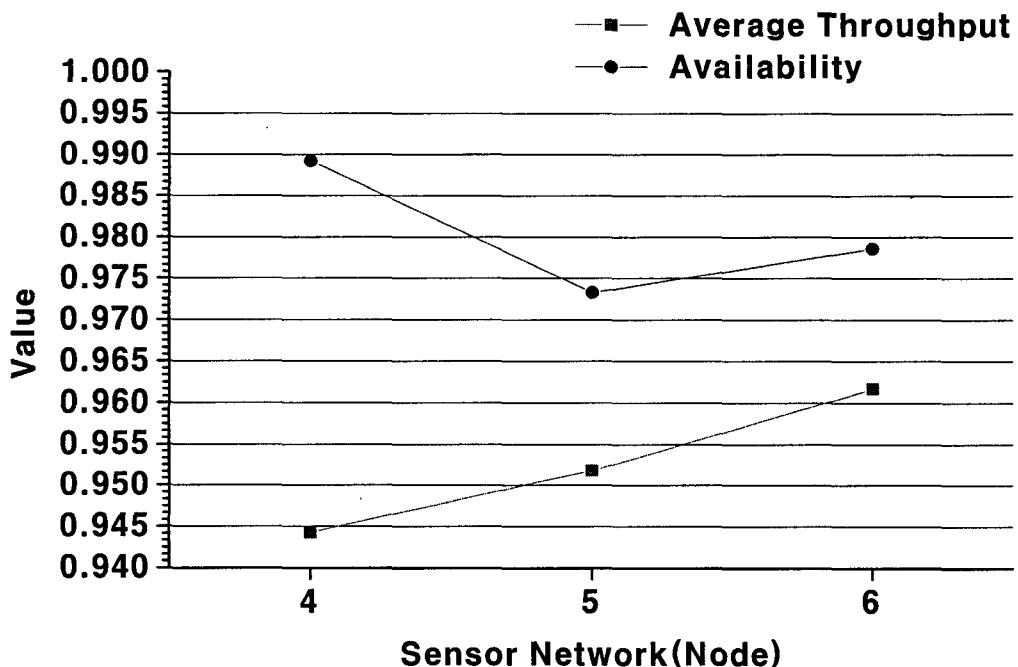
고장형태 (i)	노드 1 ($\mu=0.4$)	노드 2 ($\mu=0.5$)	노드 3 ($\mu=0.6$)	노드 4 ($\mu=0.7$)	노드 5 ($\mu=0.8$)	노드 6 ($\mu=0.9$)	Maximal Throughput $v^*(k)$
	$a_1(k)$	$a_2(k)$	$a_3(k)$	$a_4(k)$	$a_5(k)$	$a_6(k)$	
0	0.8871	0.7097	0.5914	0.5069	0.8065	0.7168	1.1273
1	0.7881	0.7826	0.6522	0.559	0.8152	0.6763	1.2267
2	0.7881	0.7826	0.6522	0.559	0.7609	0.7246	1.269
3	0.9783	0.6304	0.6522	0.559	0.8152	0.6763	1.0222
4	0.9783	0.6304	0.6522	0.559	0.7609	0.7246	1.0222
5	0.9783	0.7826	0.5254	0.559	0.8152	0.6763	1.0222
6	0.9783	0.7826	0.5254	0.559	0.7609	0.7246	1.0222
7	0.9783	0.7826	0.6522	0.4503	0.8152	0.6763	1.0222
8	0.9783	0.7826	0.6522	0.4503	0.7609	0.7246	1.0222
9	0.9615	0.7692	0.641	0.5495	0.7692	0.6838	1.04



<그림 12> 링크고장 유형별 Maximal Throughput

<표 4> 노드 수 증가에 따른 네트워크 평균 Throughput 및 Availability

네트워크 (노드 수)	Average Throughput (AT)	Availability (AV)
4	0.9443	0.9892
5	0.9518	0.9733
6	0.9617	0.9786



<그림 13> 노드의 수 증가에 따른 평균 Throughput 및 Availability 비교

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 계층적 클러스터링을 기반으로 하는 무선 센서 네트워크의 성능 평가 방법으로 Throughput과 Availability를 평가하였다. 클러스터 영역에서 센스 노드와 클러스터 헤더가 갖는 특성을 고려하여 노드 간 발생 가능한 링크 고장 형태별 최대 Throughput과 Availability를 평가하였고, 클러스터내의 노드 수를 증가 시켜 확장된 네트워크에서의 평균 Availability 평가한 결과 센서 노드의 수가 증가될수록 평균 Throughput이 증가하는 것을 확인 하였다.

향후에는 본 연구에서 고려한 네트워크의 링크고장 뿐만 아니라, 노드의 고장도 고려하여 네트워크의 성능을 평가하는 연구가 이루어져야 할 것이다. 그리고 무선 센서 네트워크를 위해 제안된 다른 라우팅 기법이 적용된 네트워크에 대한 성능평가도 진행 되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 이준혁, 오영환, “클러스터링 라우팅 프로토콜을 기반으로 한 센서 네트워크에서의 Throughput 과 Availability 평가”, 한국통신학회 추계종합 학술 발표회 논문 초록집 2005년 11월, Vol. 32, pp250
- [2] 배정숙, 김성희, “무선 센서 네트워크에서의 라우팅 프로토콜”, ITFIND 주간기술동향, 2004년 4월 7일
- [3] 강정훈, 유준재, 윤명현, 이민구, “센서 네트워크 및 애플리케이션 기술동향”, 전자공학회지 제32권 7호, 2005년 7월 pp 786-787
- [4] 김대영, 도윤미, 박노성, 이상수, 팜민룡, 뒤편백, 파티오즈투르크, “센서 네트워크기술”, 정보처리학회지 제10권 제4호, 2003년 7월 pp 85-86
- [5] Peter Kubat "Assessing Throughput and Reliability in Communication and Computer Network" IEEE Transactions Reliability, Vol. 37. NO 3, 1988 August, pp 308-311
- [6] P. Kuat, "Reliability analysis for intefated network application to burst switching", IEEE Trans. Commun., Vol COM-34, 1986 Jun, pp564-568
- [7] P. L. Schweizer, "Maximum throughput in finite capacity open queuing network with product-form solutions", Management Sciene, Vol 24, 1977