

# 특집 11 | 그린 빌딩을 위한 무선 센서 기반 실내 환경 모니터링

## 목 차

1. 서 론
2. 요구사항
3. 실내용 고취합을 저전력 USN 기술
4. 실측 성능
5. 건물 내 시범 운영
6. 건물 관리 시스템과 연동
7. 결 론

장진엽 · 이창근 · 강정훈  
(삼성SDS · 삼성물산 · 전자부품연구원)

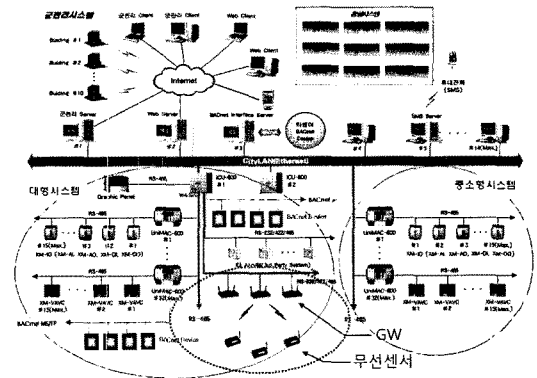
## 1. 서 론

Green IT의 분야 중 하나는 건물의 친환경 자동 제어이다. 건물 내에서 사용되는 공조 에너지를 절약하기 위해서는, 꼭 필요한 곳에만 냉방 및 난방을 해야 한다. 이것이 가능하려면 실내의 정확한 온도 분포를 파악해야 한다. 이를 위한 좋은 방법은 센서를 조밀하게 설치하는 것인데, 기존에는 건물 내 배선 및 배관 비용이 상당하여 다수의 센서를 설치하기가 어려웠다. 무선 방식이 대안이었으나, 기존의 무선 센서들은 가까운 거리가 아니면 수신율에 큰 문제가 있었다. 하지만, USN(Ubiquitous Sensor Network) 분야의 Ad-hoc Mesh Networking 기술을 적용하면 각각의 센서들이 중계기 역할까지 겸하게 되어 수신율이 대폭 개선된다.

본 고에서는 삼성물산, 삼성SDS, 전자부품연구원에서 공동으로 개발한 실내환경 모니터링용 대규모 USN 기술의 연구 추이에 대해 설명한다. 요구사항, 개발된 기술, 그리고 실측된 성능에 대해 설명한다. 끝으로, 연구개발을 통하여 얻었던 교훈들을 이야기하고, 후속 연구 과제인 그린

데이터센터 모니터링 과제를 소개하면서 마친다.

## 2. 요구사항



(그림 1) Control City의 시스템 구성도 및 무선 센서 도입 위치 (반투명 타원으로 표기한 부분이 과제 범위이다)

삼성SDS에는 15년 이상의 노하우가 축적된 Control City라 명명된 종합 IBS(Intelligent Building System) 솔루션이 있다[1]. 연구개발 과제의 목표는 이 Control City 시스템에 상용 수준의 무선 센서를 접목하는 것이었다. 무선 센서

는 대형 건물에 주로 사용이 되는데, Control City가 대형 건물에 설치될 시에는 모든 현장 장비가 ICU-600이라는 제어기에 연결된다. 따라서, 유선과 무선 기능을 겸비한 GW가 무선 센서의 데이터를 받아서 RS-485 상으로 ICU-600에 보내주게끔 구성하였다(그림 1).

대형건물에 사용되는 공조장비(냉각탑 등)는 운전상태 변경에 걸리는 시간이 통상 30분이어서 수 분 단위로 온·습도를 측정하여도 된다. Control City를 주관하는 현업 부서 및 현장 관리 조직은 5분 주기로 온·습도가 측정되기를 요구하였고, 아래와 같이 성능에 대한 정량적 요구사항을 명시하였다.

① 95% 이상 보장되는 데이터 취합율:

무선 센서가 5분 × 100회 = 500분간 켜 있으면, 적어도 95회는 GW까지 기한(5분) 이내에 센서 값이 전달되어야 한다.

② 1년 이상의 전지 수명:

통상적인 AA전지 2개를 쓸 때 1년 동안 정상적인 온습도 정보가 읽히고, 동시에 조건 ①이 만족되어야 한다.

이 두 가지 요구사항은 비단 건물 제어 시스템에서뿐 아니라, 일반적인 USN 응용에서 항상 거론되는 요구사항이다. 특히 ①번의 데이터 취합율이 가장 중요하다. USN 분야(미국에서는 Wireless Sensor Network, 즉 WSN이라는 표현을 더 즐겨 사용한다)에서 세계 최초의 정부 연구과제를 수행하고, 세계 최초의 벤처기업을 설립했던 미국 University of California, Berkeley의 Kris Pister 교수는, 강연에서 고객의 USN 관련 요구사항은 첫째도, 둘째도, 셋째도 데이터 취합율이라고 강조할 정도이다[2].

여기서 문제는 데이터 취합율(①번 요구사항)과 전지 수명(②번 요구사항)은 반비례 관계에 있다는 것이다. 한 예로, 데이터 취합율을 향상시키기 위하여 송신 전파 강도나 최대 재시도 횟수를 늘리면 전지 수명은 줄어들게 된다. 따라서,

두 개 성능지표 사이에 절충이 필요하다. 본 연구과제에서는 취합율이 최우선이기 때문에, 취합율을 특정 수준, 즉 95% 이상으로 무조건 보장하고, 수명은 취합율이 보장되는 범위 내에서 최선의 노력(best-effort)으로 늘리는 전략을 선택하였다.

### 3. 실내용 고취합율 저전력 USN 기술

#### 3.1 분산 Routing 기술

Mesh Networking의 핵심적인 문제는 목적지까지의 경로, 즉 route를 계산하는 것이다. 본 연구과제에서는 기본 취합율을 우선적으로 만족하는 범위 하에서 수명을 최대화하는 전략을 선택하였기 때문에, route의 결정은 전송에 드는 전력을 최소화하는 것을 기준으로 하면 된다. 언뜻 생각하기에 이는 route의 결정에 취합율에 대한 고려를 전혀 넣지 않는 것으로 보일 수 있다. 이후 설명에 나오지만, 결국 전송 전력을 최소화하는 과정에서 재전송이 많이 발생하는 취약 구간을 회피하게 되기 때문에, 간접적으로 반영이 된다. 취합율과 전력소모 간의 trade-off 관계 때문에 나오는 결과이다.

본 연구에서뿐 아니라, 모든 학계 및 산업계에서 USN Routing에 공히 쓰는 알고리즘이 Bellman-Ford 알고리즘이다[3]. 각 센서를 node로 보고, 서로 송수신이 가능한 센서 쌍들을 edge로 간주하면, 전체 USN을 그래프로 표현할 수 있다. 각 edge의 weight를 전송에 드는 전력에 비례하게끔 설정하면, Bellman-Ford 알고리즘을 통해서 모든 센서에서 GW까지 최소한의 전력을 사용하여 패킷을 전달하는 경로를 찾게 된다. 본 연구에서 각 edge의 weight는, 해당 송신자가 취합율을 만족하는 설정하에서 하나의 패킷을 수신자에게 전달하는데 드는 전력으로 설정하였다. 이는 (송신출력) × (평균전송 횟수)와 같다.

Bellman-Ford 알고리즘은 분산화하기 쉽다. 각 센서는 자신으로부터 GW까지의 distance를 각자 저장한다. 모든 노드는 처음에 distance를  $\infty$ 로 초기화한다. 또한 GW까지의 최소 경로의 첫 단계 node인 predecessor를 각자 저장하며, NULL 값으로 초기화한다. Bellman-Ford 알고리즘에서의 relaxation은 각 센서에서 beacon이라는 패킷을 broadcast하면서 이루어진다. Beacon에는 항상 송신자의 distance가 하면서로서 실려서 보내어진다. 알고리즘은 GW가 beacon을 송신함으로써 시작된다. GW의 distance는 0이기 때문에, 이 beacon에는 distance=0이라는 정보가 실려서 방송된다.

각 센서에서 beacon을 수신할 시에는, 혹시 해당 beacon의 송신자를 predecessor로 삼는 것이, 현재 자신의 predecessor보다 나은 선택인지를 검사한다. 현재 자신의 predecessor 쪽으로 가는 비용이 현재 distance이기 때문에, 아래 부등식이 참이면 beacon 송신자로 predecessor를 바꾼다.

$$\text{distance} > \begin{matrix} (\text{beacon에 기록된 distance}) + \\ (\text{beacon 송신자까지의 전송비용}) \end{matrix}$$

각 센서는 위의 절차에 따라 자신의 distance 값이 갱신되면 자신도 beacon을 broadcast한다. 따라서, 전체적인 양상은, GW 주변 센서들의 beacon 전송을 시작으로 해서, 점차 바깥쪽으로 각 센서의 distance 값의 변경 및 beacon 전송이 연쇄반응이 일어나듯이 퍼져나가는 것이다. 각 센서는 언젠가는 자신으로부터 GW까지 가는 최소 경로의 역순에 따라 내려온 beacon을 받게 되므로, 이때 최소 경로로 향하는 predecessor를 찾게 된다. 그러므로, 결국에는 모든 센서들이 최소경로를 찾아, distance 값이 최소화되어 beacon 전송을 안 하게 되고, 알고리즘은 종료된다.

### 3.2 동기화 기반 저전력 기술

대부분의 소형 전자 기기들은 최소한도의 전력만을 소모하는 수면 mode를 제공한다. 무선 센서 또한 1년 이상의 전지 수명을 가지려면 수면 mode를 사용해야만 한다. 본 연구에서 사용한 무선 센서는 비수면 mode에서 약 3~4일의 수명을 가지므로, 1년 이상의 수명을 가지려면 전체 시간의 99%를 수면하고 1% 동안만 켜 있어야 3~4일의 약 100배, 즉 약 1년의 수명을 가질 수 있다.

문제는 수면 모드에서는 무선 신호의 송수신이 불가하다는 것이다. 해결 방법은 약속된 시간에 센서들이 동시에 일어나서 교신을 하고 다시 수면을 취하는 것이다.

본 연구에서는 1차적으로 간단한 flooding 기반의 프로토콜[4]에 clock 및 시차 정보를 실어서 센서들 전체를 GW의 clock에 동기화시키는 전체 동기화 방식을 사용하였다. 이 방식의 단점은 센서들의 개수가 증가함에 따라 전체를 동기화하는 전력 비용이 기하급수적으로 증가한다는 것이다. 따라서, 2차적으로는 서로 교신을 하는 센서들만 서로의 clock을 기억하는 개별 동기화 방식을 사용하였다. 이로 인한 성능 개선에 대해서는 4절에 설명되어 있다.

## 4. 실측 성능

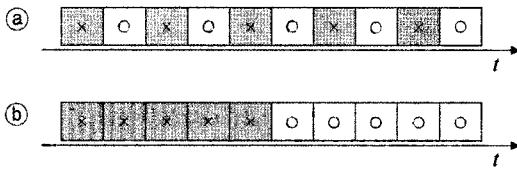
### 4.1 데이터 취합율

실제 사무실 1개층에 100개의 센서를 시범 운영하여, 전체 동기화 방식을 사용하고자도 취합율 96.02%를 달성하였다. 자세한 실험 환경에 대해서는 5절에 설명되어 있다.

취합율과 관련하여 흔히 간과되는 성능 지표가 누락된 패킷의 시간상 분포이다. 예를 들어, 똑같이 10개 패킷 중 5개만 들어왔다 하더라도, 누락이 간헐적으로 일어나는 경우(그림 2의 ㉠)와,

연속적으로 일어나는 경우(그림 2의 ⑥), 센싱 정보 없이 대기해야 하는 시간의 길이가 다르다.

따라서, 실측된 데이터에서 패킷이 몇 회까지 연속으로 누락되는지 통계를 낸 결과, <표 1>을 얻었다. 연속 누락 횟수가 길어질수록 발생 빈도가 적어진다는 것을 볼 수 있다. 특히 5회 이상 연속으로 데이터가 안 들어오는 경우가 없어, 마지막 데이터가 들어온 시각으로부터 적어도 30분 이내에는 데이터가 들어온다는 것을 볼 수 있다. 대형공조기기의 제어에 이미 적당한 성능이다(2절의 두번째 문단 참조).



(그림 2) 누락 패킷의 분포의 중요성 예시 (O는 성공적으로 취합된 패킷을 나타내고, X는 실패를 나타낸다)

<표 1> 전체 동기화 방식 사용 시, 연속 누락 횟수 별 빈도

연속된 에러의 횟수	발생 빈도(%)
1	2.10
2	1.09
3	0.52
4	0.27
합계	3.98

개별 동기화 방식을 적용하였을 때에는 동일한 환경에서 99.8%의 취합율을 달성하였다. 특히, 2회 이상 연속으로 패킷이 누락되는 경우가 전혀 없었다. 이는 개별 동기화의 특성상 센서들이 동시에 송신을 하는 경우가 현저하게 줄어들어서 얻은 결과이다.

## 4.2 전지 수명

제품의 전지 수명은 몇 년을 사용할 수 있는가로 판가름되나, 사용되는 전지가 무엇인지에 따라 크게 변하기 때문에, 제품 자체의 성능을 비

교하기에는 객관적이지 못한 지표가 될 수 있다. 예를 들어, 시중에 나와 있는 기존의 실내용 무선 센서들은 대부분 고가의 고용량 리튬 전지를 사용한다.

본 연구에서는 객관적인 저전력 성능을 가능하기 위하여, 평균 전류를 성능 지표로 삼았다. 평균 전류(Average Current)란, 순간 전류가 일정하지 않은 회로의 순간 전류 그래프를 적분하여 측정 시간으로 나눈 수치를 말한다. 이는 전통적으로 Oscilloscope을 사용하여 많이 계산되어 왔으며, 최근에는 자동으로 계산해주는 제품들이 나와 있다[5].

본 연구에서 실측 실험을 통하여 얻은 전력 소모 성능은 <표 2>와 같다. 각 센서는 위치에 따라 중계해야 하는 센서 데이터의 양이 다르기 때문에 평균 전류 또한 다르다. 따라서 <표 2>에는 전체 센서들의 평균 전류를 다시 평균 낸 통계치와, 가장 전기를 많이 소모하는 센서의 평균 전류를 함께 표기하였다.

<표 2> 각 방식 별 평균 전류량.

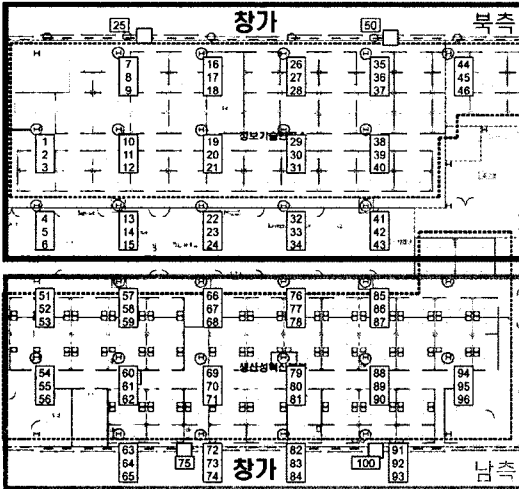
동기화 방식	통계치	평균전류 ( $\mu A$ )
전체	최대	420
	평균	314
개별	최대	370
	평균	251

전체 동기화 방식의 센서들을 실제 사무실에서 장기 운영하였을 때, 10개월 동안 정상 운영되다가 일부 센서에서 오동작을 하기 시작하였다. 위의 모든 결과치들은 모든 센서에 일반 알카라인 AA 전지 2개를 넣고, 5분 간격으로 각 센서에서 온·습도 데이터가 발생할 때의 실측치이다.

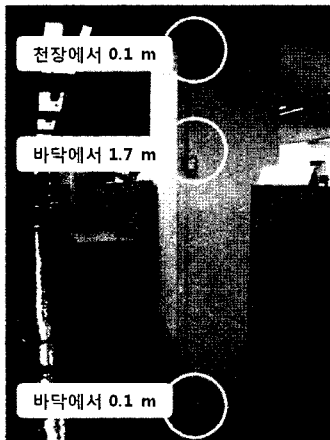
## 5. 건물 내 시범 운영

건물 에너지를 가장 최소화하는 방법은 냉/난

방을 아예 하지 않는 것이다. 하지만, 사람이 거주하는 건물에서 이것은 비현실적이다. 따라서, 에너지 절감이라는 지표도 실내 쾌적도라는 지표와 절충이 필요하다.



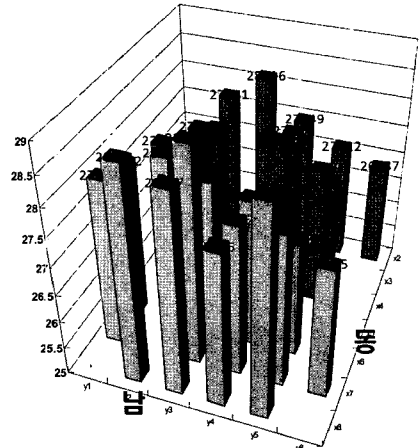
(그림 3) ASHRAE 표준에 준한 수평 배치 (창측으로부터 세가지 거리에 센서를 설치하였다.)



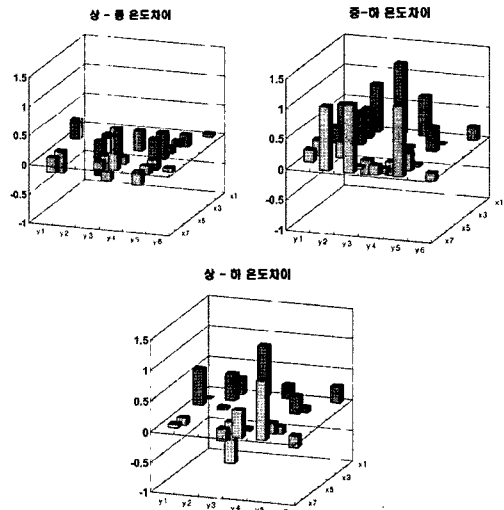
(그림 4) ASHRAE 표준에 준한 수직 배치

세계적인 권위를 가지고 있는 미국의 공조 시스템 협회인 ASHRAE<sup>1)</sup>에서는 재실자의 쾌적도에 대한 표준을 제정하고 있다[6]. 본 연구에서는 삼성SDS 정보기술연구소 사무실에 ASHRAE 표준에 준하여, 창가에서 먼 곳, 가까운 곳,

중간 거리에 있는 위치에 센서들을 설치하였다(그림 3). 그리고, 이 각각의 수평 지점에 상/중/하 세가지 높이로 센서들을 설치하였다(그림 4).



(그림 5) 1.7 m 높이에 설치했던 센서들의 온도값



(그림 6) 상/중/하 온도차

시험 운영 결과, 예상했던 것보다 훨씬 다채로운 온도 분포를 볼 수 있었다. 평면도 상으로 보았을 때 남향이 더 따뜻했을 뿐만이 아니라, 여러 환경적 요인으로 각 위치에 있는 온도값들이 쉽게 2도 이상 차이가 났다(그림 5). 또한, 높이

1) American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers

에 따라서도 온도차가 심하게 나는 것을 볼 수 있었다(그림 6). 특이한 점은 상부 온도가 중간 높이보다 낮았다는 것인데, 이는 측정 기간이 여름이고, 사무실이 천장 통풍구를 통하여 냉방을 함에 따른 결과인 것으로 분석된다.

## 6. 건물 관리 시스템과 연동

무선 센서도 Control City IBS의 관점에서는 무수한 종류의 건물 내 센서 중 한 종류에 불과하므로, 연동하는데에 큰 어려움은 없었다. 다만, 무선 센서들은 대기 전력 절감을 위하여 주기적으로 깨어나서 일방적으로 데이터를 보내는 반면, IBS는 시스템의 확장성을 위하여 polling 방식으로 설계가 되어 있다. 따라서, 중간에서 센서 데이터를 Control City로 중계하는 GW로 하여금, 무선 센서들이 전송한 정보를 최대 24시간 까지 저장을 하고, 중앙 제어기인 ICU-600에서 polling을 하면 요청받으대로 가공·처리하여 제공하게끔 개발하였다.

센싱 정보를 모아도 제어에 반영이 안 되면 에너지 절감 효과는 없을 것이다. Control City의 구성요소 중에 XM-VAV라는 VAV(Variable Air Volume) 제어기가 있다. 이는 대형 건물의 각 통풍구를 통하여 제공되는 냉·난방 기류의 양을 제어할 수 있다. 삼성SDS의 SOC사업부에서는 본 연구에서 개발된 무선 센서의 데이터를 VAV 제어에 반영하여 에너지를 절감하는 시스템을 구축하여 삼성 그룹사 건물에 현재 운영 중이다. 특히, XM-VAV-USN이라 명명된 파생 기기를 개발하여, 제어기가 자체 안테나를 통하여 무선 센서 데이터를 직접 수신하여, 중앙 제어 시스템 없이도 스스로 판단하여 공조 기류의 양을 제어할 수 있게끔 하였다.

## 7. 결론

본 연구는 기술을 실제로 사용할 기업, 원천

기술을 보유한 연구소, 그리고 SI(System Integration) 업체가 합심하여 하나의 제품을 완성한 대표적인 사례라고 생각한다. 특히, 본 연구과제를 수행하며 기술개발의 방향성은 고객의 요구사항에 따라 구체화되고 실용화될 수 있다는 것을 느꼈다. 막연한 분산 네트워킹 기술 개발에서, 연속 패킷 누락을 최소화하는 시스템 개발로 방향을 잡을 수 있었다.

또한 USN의 가치는 가까운 곳에 있을 수 있다는 것을 느꼈다. 실내 환경 모니터링 용 USN의 경우도, 다수의 센서를 실내에 설치하는 경우 뿐 아니라, 원하는 장소 및 시간에 자유롭게 센서를 설치할 수 있다는 것 또한 큰 가치를 지닌다고 현장 담당자들은 강조한다. 벽면에 설치한 기존 온도계에 비하여 재실자가 있는 곳의 온도는 섭씨 2~3도 차가 나는 것은 보통이며, 재실자 바로 옆에 센서를 설치하려면 무선 말고는 대안이 없다.

후속 연구과제로 데이터센터 전산실의 온도 분포를 모니터링하는 과제를 현재 수행 중에 있다. 전세계 데이터센터들의 탄소 배출량은 전체의 3%에 육박하여 항공산업계의 배출량에 가까워지고 있는 추세이다. 무선센서와 CFD(Computation Fluid Dynamics) 기술을 접목하여, CFD의 온도분포 예측치와 무선센서의 실측치를 점차 수렴시킴으로써, 종전에 볼 수 없었던 정확한 기류분석 모델을 통하여 전산실 공조에너지를 최소화하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] 삼성SDS, "Control City 카탈로그"; [http://www.sds.samsung.co.kr/data/Control\\_City.pdf](http://www.sds.samsung.co.kr/data/Control_City.pdf).
- [2] Microsoft Research, "Sensor Networks Workshop 2005," Oct. 2005; <http://research.microsoft.com/enus/events/sensor>

ws2005/.

- [3] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, Second Edition, The MIT Press, 2001; Section 24.1: The Bellman Ford algorithm, pp.588 - 592.
- [4] "Flooding algorithm Wikipedia, the free encyclopedia"; [http://en.wikipedia.org/wiki/Flooding\\_algorithm](http://en.wikipedia.org/wiki/Flooding_algorithm).
- [5] "Agilent | 66311B 모바일 통신 dc 소스, 15V, 3A"; <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?id=1000001614%3Aepsg%3Apro&pageMode=OV&pid=1000001614%3Aepsg%3Apro&lc=kor&ct=PRODUCT&cc=KR>.
- [6] ASHRAE, "Standard 55 2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy"; <http://301.ashrae.biz/?c=190>.
- [7] J. Chang, J. Kim, O. Kwon, C. Lee, W.I. Lee, M. Oh, U.H. Paek, H. Yoon, J. Kang, J.K. Ko, W. Ko, and C. Lee, "Demo abstract: ControlCity Integrating wireless sensor networks and building management systems," Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks Volume 00, IEEE Computer Society, 2009, pp. 421 422; <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1602228&jmp=cit&coll=ACM&dl=ACM&CFID=57022365&CFTOKEN=69678232#CIT>.

### 저자약력



**장진엽**

2000년 서울대학교 전산과학과 학사  
 2005년 University of Illinois at Urbana Champaign 박사 수료  
 2006년~현재 삼성SDS 정보기술연구소 연구원  
 관심분야 : 센서네트워크  
 이 메 일 : jinyeop.chang@samsung.com



**이상근**

1995년 홍익대학교 전기제어공학과 석사  
 2004년 University of Strathclyde 박사 수료  
 1995년~2001년 대한주택공사 주택연구소 연구원  
 2005년~현재 삼성물산 기술연구센터 과장  
 관심분야 : 센서네트워크, 지능형건축물(IBS),  
 에너지메니지먼트, 스마트그리드  
 이 메 일 : ck.ace.lee@samsung.com



**강정운**

1997년 단국대학교 전자공학과 학사  
 1999년 단국대학교 전자공학과 석사  
 1999년~현재 전자부품연구원 U 임베디드융합 연구센터  
 선임연구원  
 2004년~현재 TinyOS Korea Forum 관리자  
 2006년~현재 TinyOS Alliance Working Group Member  
 관심분야 : 센서네트워크, 네트워크 임베디드 시스템,  
 Smart Object Networking, Cyber physical Internet  
 이 메 일 : budge@keti.re.kr