

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.1.193>

IIBC 2016-1-26

플랜트 시설에서 지연시간 감소를 위한 동적 듀티사이클 조절 기법

A Dynamic Duty Cycle Adjustment Mechanism for Reduced Latency in Industrial Plants

정진만*, 윤지섭**, 윤영선***, 소선섭****, 은성배*****

Jinman Jung*, Jisup Yoon**, Young-Sun Yun***, Sunsup So****, Seongbae Eun*****

요약 안전한 플랜트 설비의 상태 감시 및 장애 진단을 위해 무선 센서를 이용한 플랜트 설비용 모니터링 시스템이 연구되고 있다. 플랜트 설비에서는 저전력 뿐만 아니라 안전사고와 직결된 긴급 상황시 실시간성도 고려해야 한다. 본 논문에서는 플랜트 시설에서 지연시간 감소를 위한 동적 듀티사이클 조절 기법을 제안한다. 제안된 동적 듀티사이클 조절 기법은 센싱된 데이터 값의 긴급한 정도에 따라 미리 정의된 위험 그룹으로 구분하여 적용적으로 듀티사이클 주기를 조절한다. 실시간성을 평가하기 위해 고정 듀티사이클 기법과 동적 듀티사이클의 예상 지연시간을 확률적으로 분석하였다. 비교 결과, 플랜트 시설과 같이 이상 징후 발생 시 에너지를 소모하더라도 실시간성을 제공해야 하는 상황에서 제안 동적 듀티사이클 기법이 더 효과적임을 확인하였다.

Abstract For environmental monitoring and risk identification of industrial plants, several monitoring systems using Wireless Sensor Networks (WSNs) have been developed. In this paper, we propose a dynamic duty cycle adjustment mechanism for reduced latency in industrial plants. The proposed method adjusts the duty cycle among predefined risk groups depending on the urgency of sensed data values. To demonstrate its efficacy, we analyze the expected transmission latency model and then discuss the characteristics in detail. We show that the proposed dynamic duty cycle mechanism is a more effective than a periodic mechanism by analyzing the expected latency of them in industrial plants where there are various types of sensory data with different levels of reliability.

Key Words : Wireless Sensor Network, Latency, Duty Cycle, Dynamic Adjustment

1. 서론

플랜트 시설에서는 이상 징후 발생이 간헐적으로 발생하므로 일반적인 상황에서는 저전력에 초점을 맞춘다.

하지만 이상 징후 발생 시 에너지를 소모하더라도 실시간성을 제공해야 하는 것이 더 중요하다. 대부분 상용 플랜트 모니터링 시스템은 유선 전송 방식으로 복잡한 배선으로 관리의 어려움이 있으며, 중장기 사용되는 플랜

*정희원, 한남대학교 정보통신공학과

**준희원, 한남대학교 정보통신공학과

***정희원, 한남대학교 정보통신공학과

****정희원, 공주대학교 컴퓨터공학과

*****정희원, 한남대학교 정보통신공학과

접수일자: 2016년 1월 15일, 수정완료: 2016년 1월 31일

계재확정일자: 2016년 2월 5일

Received: 15 January, 2016 / Revised: 31 January, 2016 /

Accepted: 5 February, 2016

****Corresponding Author: sbeun@hnu.kr

Department of Information and Communication Engineering,
Hannam University, Korea.

*본 논문은 2015년도 한국스마트미디어학회 추계학술대회에 발표한 논문을 수정 및 확장한 논문임

트 시설 특성상 노후화된 유선 시스템은 위험한 장애를 일으킬 수 있다. 최근 안전한 플랜트 설비의 상태 감시 및 장애 진단을 위해 그림 1과 같이 무선 센서를 이용한 플랜트 설비용 모니터링 시스템이 연구되고 있다. 플랜트 설비용 모니터링 시스템에서 가장 중요한 문제는 무선 센서로 인한 배터리 문제로 이를 해결하기 위해 듀티 사이클 기반 저전력 MAC 프로토콜에 초점이 맞춰져 연구되고 있다^[1-7].

MAC 프로토콜은 동기식과 비동기식 센서로 구분할 수 있다. S-MAC (Sensor-MAC)^[2]은 활성구간과 수면구간으로 나누어 주기적으로 반복함으로써 대부분의 시간을 수면구간으로 동작시키고 통신 전원을 차단함으로써 에너지 소모를 줄이는 방법이다. T-MAC (Timeout-MAC)^[3]은 타이머를 동작하여 송수신 데이터가 없는 경우, 일찍 휴면 구간으로 전환하도록 S-MAC을 개선시킨 방법이다. S-MAC, T-MAC 프로토콜은 동기식으로 주변 노드들과 활성구간의 스케줄링을 위해 제어 메시지를 유발 시킨다.

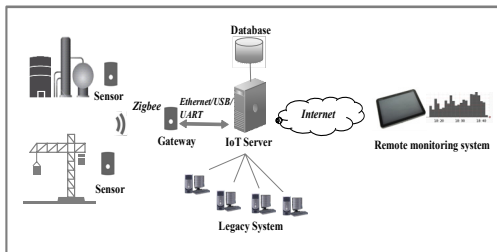


그림 1. 플랜트 설비에서 무선센서네트워크
Fig. 1. Wireless sensor networks in industrial plants

반면 B-MAC(Berkeley-MAC)^[4]과 X-MAC^[5]은 비동기 방식으로 송수신 노드들이 서로 독립적인 듀티 사이클을 가지고 동작한다. B-MAC은 데이터 전송 시 활성구간 사이의 시간 간격보다 긴 프리앰블(long preamble)을 미리 전송하여 수신노드에게 알린 후 전송하는 방법이다. 이 방법은 동기를 위한 별도의 제어 메시지 유발 없이 프리앰블만으로 통신이 효율적이다. 하지만 수신 노드가 긴 프리앰블을 모두 수신할 때까지 기다려야 하며, 수신 노드가 아닌 다른 노드들도 프리앰블을 모두 오버헤어링 해야 하는 문제가 발생한다. X-MAC은 짧은 프리앰블(short preamble)을 사용하여 수신 노드가 더 빠른 응답(early ACK)을 가능하게 하였다. 또한 다른

노드들도 짧은 프리앰블 내 목적지 주소를 수신하여 자기를 대상으로 하는지를 더 빨리 판단할 수 있게 하였다.

사물인터넷에 사용되고 Contiki OS^[6]에 구현되어 있는 듀티 사이클 기반 Contiki-MAC^[8]은 짧은 프리앰블이 아닌 데이터를 반복적으로 전송하여 통신한다. 에너지 효율을 높이기 위해 수면 구간의 비율을 길게 하여 대부분 시간은 휴면 구간에서 동작한다.

컨텐츠에 기반한 동적 듀티사이클 연구^[9]에서는 동적으로 듀티사이클을 제어하는 방법을 소개했다. 하지만, 고정된 T_{long} , T_{medium} 및 T_{short} 3 가지 값을 정의하여 제어하는 개념적인 내용을 다루었다. 본 논문에서는 센싱된 데이터 값의 긴급한 정도에 따라 다양한 위험 그룹으로 구분하여 적용범위를 넓힌다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가정하는 시스템 모델을 살펴보고 3장에서는 센싱된 데이터 값의 긴급한 정도에 따라 듀티사이클을 동적으로 조절하는 기법을 설명한다. 4장에서는 제안 기법과 고정 주기 듀티사이클 기법의 예상 전송 지연시간을 비교하여 평가한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 플랜트 설비에서 센서 노드들은 애드혹(ad-hoc) 통신을 한다고 가정한다. 센서 노드들은 플랜트 구조물에 부착되어 센싱 및 전송을 하는 기능이 있는 송신 노드와 게이트웨이로 라우팅하는 중간 노드들로 구분될 수 있다. 모든 노드들은 에너지 효율성을 위해 Sleep과 Wake-up을 주기적으로 반복한다고 가정한다. 센서 노드들은 Sleep 상태에 있다가 매 T_n 시간마다 Wake-up 상태로 활성화되어 센싱 및 송수신 작업을 한 후 Sleep 상태로 전이되는 과정을 반복한다. 송신 노드에서 수집한 센싱 값을 전송하는 과정에서 프레임 전송 처리를 위한 t_s 의 지연시간이 걸린다고 한다. 이 프레임 전송은 수신측의 응답 프레임을 받을 때까지 응답 프레임을 받을 시간 간격 t_i 을 두고 반복한다. 수신노드가 τ 시간 동안의 Wake-up 상태에서 바로 응답하게 되면 t_i 보다 빠른 t_a 의 시간이 걸린다. 일반적으로 수신측이 응답 프레임을 전송할 때까지 송신측은 충분히 기다려야 하므로 $t_i > t_a$ 가 되도록 설계된다. 그림 2는 송신측과

수신측의 센싱 데이터 프레임을 처리하는 과정에서 나타나는 송신측의 전송 지연시간을 나타낸다.

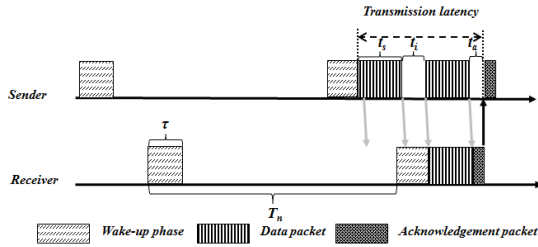


그림 2. 전송 지연시간 모델
 Fig. 2. Transmission Latency Model

본 논문에서는 플랜트 시설을 위한 비동기식 프로토콜을 가정한다. 플랜트 시설에서는 이상 징후 발생이 간헐적으로 발생하므로 일반적인 상황에서는 저전력에 초점을 맞춘다. 하지만, 이상 징후 발생 시 에너지를 소모하더라도 실시간성을 제공해야 하는 것이 더 중요하다. 비동기식 센서 프로토콜에서는 센서 노드 간에 어떠한 협의도 없이 송수신하기 때문에 수신측의 Wake-up 상태를 보장하지 않는다. 송신측이 센싱 데이터를 전송 시 수신측이 Wake-up 상태에 있다면 송신측은 $t_s + t_a$ 의 지연 시간 만에 전송을 완료한다. 반면, 수신측이 Sleep 상태에 있었다면 몇 번의 시간 간격 t_i 를 반복하고 응답할 것이다. 따라서 송신측이 센싱 데이터를 전달할 때 유발되는 지연시간은 확률적으로 정의될 수 있다. 본 논문에서 사용되는 용어를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 논문에서 사용된 용어
 Table 1. The notations used in the paper

Notation	Description
T_n	wake-up 상태 간 시간간격, 즉 duty-cycle 주기
τ	wake-up 상태 시간
t_s	데이터 프레임 전송시간
t_i	동일 데이터 프레임간 지연시간
t_a	ACK 프레임 전송 지연시간
$E[t]$	예상 전송 지연시간

III. 동적 듀티사이클 조절 기법 제안

1. 동적 듀티사이클 조절 기법

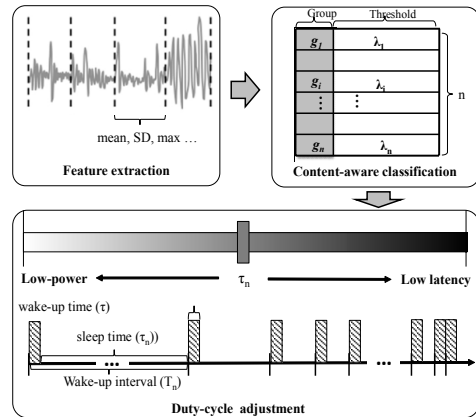


그림 3. 제안 동적 듀티사이클 조절 기법
 Fig. 3. Proposed duty cycle adjustment mechanism

비동기식 듀티사이클 기반 프로토콜은 수신 노드의 Sleep 상태 동안 지연시간이 발생할 수 있다. 따라서 플랜트 시설과 같은 고위험군 시설에서는 지연 시간을 줄이는 것이 중요하다.

제안 기법은 센싱된 데이터 값의 긴급한 정도에 따라 미리 정의된 임계값 λ_n 에 따라 n 개의 위험 그룹 (g_n)으로 구분한다. 이 값은 센서 응용에 따라 달라질 수 있다. 플랜트 시설에서는 진동, 유량, 온도 센서와 같이 물리량의 변화 정도가 다르므로 λ_n 값은 도메인 전문가에서 미리 경험적인 값으로 설정하거나 학습하는 방식으로 설정할 수 있다. 또한 각 그룹 g_n 에는 wake-up의 시간간격 T_n 이 정의된다. 위험 단계가 높아질수록 시간간격 T_n 은 더 작은 값으로 설정되어야 한다. 센서 값의 범위에 따라 정의된 T_n 로 적응적으로 변화하는 방식이다.

그림 3은 제안된 동적 듀티사이클 제어 기법을 보여준다. 센싱된 값을 참조하여 평상시에는 저전력으로 동작하고 긴급 상황 발생 시 T_n 의 최소 지연시간을 가지고 동작하도록 설계되었다.

2. 지연시간 분석

수신 노드도 듀티 사이클 기반에서 송신 측 데이터 프레임의 전송 실패가 반복적으로 발생할 수 있다고 가정하면 데이터 프레임 재전송에 의한 예상 전송 지연시간은 재귀적으로 표현해야 한다. X를 송신 노드가 전송한 데이터 프레임의 시작 부분이 수신 노드에 도착하는 시

간을 나타내는 확률 변수로 두고 $f_X(x)$ 를 X의 확률 밀도 함수(probability density function)이라고 하자. $X = x$ 인 경우, 예상 전송 지연시간의 조건부 확률과정은 다음과 같이 주어진다.

$$E[t] = \begin{cases} t_s + t_a & 0 \leq x \leq \tau \\ t_s + t_i + E[t] & \tau < x \leq T_n \end{cases} \quad (1)$$

즉, 송신 노드가 전송 시에 수신 노드가 wake-up 상태 ($0 \leq x \leq \tau$) 에 있는 경우, 모든 데이터 프레임이 수신가능하고 ACK 프레임을 전송하여 전송이 완료되므로 $t_s + t_a$ 의 지연시간을 갖는다. 반면, sleep 상태 ($\tau < x \leq T_n$)에 있는 경우 전송 시간 t_s 과 지연시간 t_i 을 소모한 후 추가적인 재전송 과정의 시간을 반복한다. 이 과정을 조건부 확률의 전체 기댓값의 정리(law of total expectation)을 이용해 정리하면 다음 수식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[t] &= \int_0^\tau (t_s + t_a) f_X(x) dx + \int_\tau^{T_n} (t_s + t_i + E[t]) f_X(x) dx \\ &= (t_s + t_a) \int_0^\tau f_X(x) dx + (t_s + t_i + E[t]) \int_\tau^{T_n} f_X(x) dx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\int_0^{T_n} f_X(x) dx = 1$ 이므로, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[t](1 - \int_\tau^{T_n} f_X(x) dx) &= (t_s + t_a) \int_0^\tau f_X(x) dx + (t_s + t_i)(1 - \int_0^\tau f_X(x) dx) \\ &= (t_a - t_i) \int_0^\tau f_X(x) dx + t_s + t_i \end{aligned} \quad (3)$$

정리하면 송신노드의 예상 전송 지연시간 $E[t]$ 은 다음과 같다.

$$E[t] = \frac{(t_a - t_i) \int_0^\tau f_X(x) dx + t_s + t_i}{1 - \int_\tau^{T_n} f_X(x) dx} \quad (4)$$

그리고 데이터 프레임의 도착 시간을 나타내는 확률 변수 X가 $[0, T_n]$ 연속균등분포(continuous uniform distribution)을 나타낸다고 할 때 예상 지연시간은 더욱

간단하게 계산될 수 있다. 먼저 $f_X(x) = \frac{1}{T_n}$ 을 수식 (4)에 대체하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} E[t] &= \frac{(t_a - t_i) \int_0^\tau \frac{1}{T_n} dx + t_s + t_i}{1 - \int_\tau^{T_n} \frac{1}{T_n} dx} \\ &= \frac{(t_a - t_i) \frac{\tau}{T_n} + t_s + t_i}{1 - (1 - \frac{\tau}{T_n})} \\ &= (t_a - t_i) + (t_s + t_i) \frac{T_n}{\tau} \\ &= (\frac{T_n}{\tau} - 1)(t_s + t_i) + t_s + t_a \end{aligned} \quad (5)$$

듀티 사이클 기반 센서 프로토콜에서 송신 노드가 데이터 프레임 전송 시 수신 노드가 시작 데이터 프레임을 수신할 기하적인 확률은 $\frac{\tau}{T_n}$ 이므로 평균 $(\frac{T_n}{\tau} - 1)$ 번의 재전송 실패 과정을 갖고 성공한다는 직관적인 의미를 갖는다. 플랜트 설비처럼 높은 실시간성 요구하는 응용에서 예상 전송 지연시간은 매우 중요한 요소로 wakeup 시간인 τ 와 wake-up 상태 간 시간간격 T_n 의 비율이 예상 전송 지연시간에 어떻게 영향을 주는지를 수학적으로 분석 가능함을 의미한다.

IV. 평가

본 장에서는 위험 단계와 전송 데이터의 크기가 변함에 따라 3장에서 구한 수식 (5)의 예상 전송 지연시간을 고정 듀티사이클 기반 프로토콜과 제안된 동적 듀티사이클 기반 프로토콜 ($n = 12$)을 비교한다. 비교를 위하여 다음과 같은 주기를 가진다고 가정하였다.

표 2. 파라미터 환경
Table 2. Parameter environment

듀티사이클 방법	주기
고정 듀티사이클 주기 (T)	2048 ms
동적 듀티사이클 주기(T_n)	[4096, 2048, 1024, 512, 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2] ms

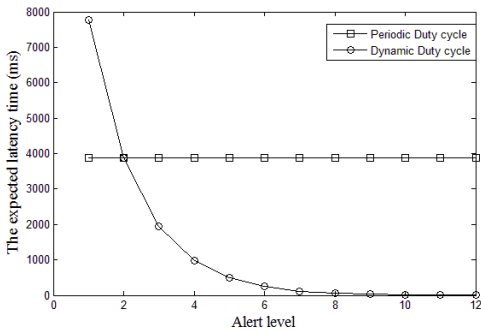


그림 4. 위험 단계에 따른 예상 전송 지연시간
 Fig. 4. Expected latency according to alert levels

그림 4는 t_s 가 1024 ms 일 때, 센싱 데이터 값의 위험 단계가 커짐에 따른 예상 전송 지연시간의 차이를 보여 준다. 고정 듀티사이클 주기인 경우는 위험 단계와 상관 없이 상수 시간의 지연시간이 보인다. 이는 수식 (5)에서 T_n 이 고정되어 재전송 확률이 일정하기 때문이다. 반면, 동적 듀티사이클 기반 프로토콜은 위험 단계가 12까지 증가함에 따라 지연시간이 5 ms 이하까지 감소하였다. 이 결과는 3장에서 위험 단계가 높을수록 적응적으로 변화하는 T_n 으로 인해 최소의 전송 지연시간을 확인했던 것과는 일치한다.

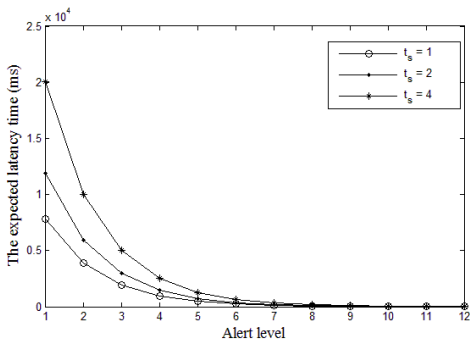


그림 5. 데이터 전송 시간의 영향
 Fig. 5. Impact of transmission time

그림 5에서는 센싱 데이터의 크기를 변화시켜 서로 다른 t_s (1024, 2048, 4096ms) 적용했을 때, 데이터 프레임 전송시간에 따른 예상 전송 지연시간을 비교하였다. 이 실험 환경에서는 위험 단계가 9단계를 넘어서 모든 100ms 이하의 전송 지연시간을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 데이터 전송 시간에 따라 초기에는 큰 차이를 보이

지만 이상 징후가 뚜렷해질수록 모두 실시간성 특성을 보일 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 센싱된 데이터 값의 긴급한 정도에 따라 동적으로 조절 가능한 듀티사이클 기법을 제안하였다. 또한 제안 기법의 유효성을 검증하기 위하여 예상 지연 시간 모델을 제시하고 동적 듀티사이클 프로토콜과 고정 듀티사이클 프로토콜의 지연시간을 비교하였다. 특정 위험 단계 후에는 동적 듀티사이클의 예상 지연시간이 더 짧음을 보였다. 따라서 플랜트 설비와 같이 지전력과 실시간성이 동시에 강조되는 응용에서 데이터 값의 위험 정도에 따라서 듀티사이클 주기를 유동적으로 결정해야 함을 알 수 있으며, 위험 정도를 구분하는 λ_n 결정의 중요성을 알 수 있다. 또한 듀티사이클 프로토콜에서 데이터 전송 크기가 예상 지연 시간에 미치는 영향을 고려할 때 데이터 프레임 간 지연시간, ACK 프레임 전송 지연시간에 대한 깊이 있는 향후 연구가 필요하다.

References

- [1] Huang, Pei, et al. "The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey." Communications Surveys & Tutorials, IEEE 15.1, 2013 pp.101-120
- [2] Ye, Wei, John Heidemann, and Deborah Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. Vol. 3. 2002. pp.1567-1576
- [3] Van Dam, Tijs, and Koen Langendoen. "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2003. pp.171-180
- [4] Polastre, Joseph, Jason Hill, and David Culler. "Versatile low power media access for wireless

sensor networks." Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2004. pp.95-107

- [5] Buettner, M., Yee, G. V., Anderson, E., & Han, R, "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems", Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. SenSys'06, 2006. pp.307-320
- [6] Dunkels, Adam, Björn Grönvall, and Thiemo Voigt. "Contiki—a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors." Local Computer Networks, 29th Annual IEEE International Conference on. IEEE, 2004. pp.455-462
- [7] P. Ahn, and H. Jang, "A Power Saving Communication Architecture for Mobile Ad-hoc Senesor Networks", The journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 6, No. 1, pp. 1-12, 2016
- [8] Dunkels, Adam. "The contikimac radio duty cycling protocol." SICS Technical Report, 2011
- [9] J.Yoon, J. Jung, Y. Yun, S. So, S. Eun, A dynamic duty cycle control mechanism for industrial plants, KISM Fall Conference, 2015

저자 소개

정 진 만(정회원)



- 2008년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사)
 - 2014년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학과 졸업(박사)
 - 2014년 ~ 현재 : 한남대학교 정보통신공학과 조교수
- <주관심 분야 : 운영체제, 임베디드 시스템, 시스템 보안>

윤 지 섭 (준회원)



- 2015년 : 한남대학교 정보통신공학과 졸업(학사)
 - 2015년 ~ 현재 : 한남대학교 정보통신공학과 석사과정
- <주관심 분야 : 운영체제, 임베디드 시스템, 시스템 보안>

윤 영 선 (정회원)



- 2001년 : 학국과학기술원 전자전산학과 전산학전공 졸업(박사)
 - 2001년 ~ 현재 : 한남대학교 정보통신공학과 교수
 - 2006년 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
- <주관심분야 : 음성인식, 음성처리, 웹 접근성, 내장형 시스템>

소 선 섭(정회원)



- 1986년 : 이화여자대학교 전산학과 졸업(학사)
 - 2001년 : KAIST 전산학과 졸업(박사)
 - 현재 : 공주대학교 컴퓨터공학부 교수
- <주관심분야 : 소프트웨어 테스트, 임베디드 소프트웨어, USN>

은 성 배(정회원)



- 1985년 : 서울대학교 전산학과 졸업(학사)
 - 1995년 : KAIST 전산학과 졸업(박사)
 - 1995년 ~ 현재 : 한남대학교 정보통신공학과 교수
- <주관심분야 : 실시간 시스템, USN, IoT>

※ 이 논문은 2015년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음