

# 공장 자동화용 혼합형 네트워크를 위한 실시간 동기화 알고리즘의 성능 분석: CAN과 센서 네트워크

## Real-time Synchronization Algorithm for Industrial Hybrid Networks: CAN and Sensor Networks

정 지원, 김 동 성\*  
(Ji-Won Jung and Dong-Sung Kim)

**Abstract:** This paper discuss a performance evaluation of the synchronization algorithm for hybrid networks in industrial environments. The proposed algorithms minimizes synchronization errors which were caused from channel, propagation, and frequency delays. The modified RBS and offset synchronization methods can be operated by adjustment parameters. The differential BP (Back-off Period) adjustment can synchronize the local time of each node with master node's time in hybrid networks. For the performance analysis, the data transmission time between the wired and wireless devices are investigated. The experimental results show the performance evaluations in terms of the polling service time and an average end-to-end delay.

**Keywords:** Industrial Hybrid Networks, Real-time Synchronization Algorithm, Offset synchronization methods, RBS (Reference Broadcast Synchronization)

### I. 서론

공장 자동화 시스템에서 제어기와 센서/구동기를 연결시키는 제어용 네트워크는 중요한 요소이다. 이들 장치들은 유기적으로 동작해야 하므로 장치간의 통신 및 제어를 위한 네트워크 기반 실시간 제어 시스템이 필요하게 된다.

산업용 제어 통신망에서는 실시간 및 신뢰성이 보장되는 필드버스망을 사용한다. 유선망의 경우 안정적 통신이 가능하지만 배선과 시설 유지 등이 어려워 무선 통신 기술을 이용한 제어 네트워크에 대한 연구들이 최근 들어 발표되었다[1].

무선 통신 기술은 공장 환경에서 효율적인 장치 연결 및 배선 비용 등을 절감한다. 하지만 전송의 부정확성 때문에 실시간성이 감소되고 채널의 대역폭이 작아 적용이 어려웠다. 최근에 무선 통신 기술의 성능과 신뢰성이 향상되고 가격이 저렴해지면서 이를 이용한 산업용 네트워크 장치에 대한 연구가 진행 되었다[1-3].

산업용 제어 통신망에 무선 기술을 적용하기 위해 유무선 게이트웨이를 사용할 수 있다[2]. 유무선 게이트웨이는 매체접근 방식에 따른 통신 우선순위와 최대지연 요소를 고려해 양측 네트워크의 메시지 전송과 노드 제어 역할을 수행 한다[4].

기존의 유선망과 무선망에 사용되어지는 동기화 알고리즘은 서로 유사하지만, 무선망은 매체의 공간적인 제약으로 인해 각 노드의 동기화가 유선에 비해 상대적으로 어렵다. 무선망의 노드는 메시지 전송 간격에 따라 동기화가

이루어지므로 장시간 전송이 없을 경우 시간적인 오차가 커진다. 이렇게 누적된 오차는 전달하는 제어 메시지의 시간에 영향을 주어 네트워크 오작동 및 채널 이용률이 감소 시킨다.

이러한 문제들을 해결하기 위해서 다양한 동기화 알고리즘들이 각각의 망 기술에 사용되었지만, 이중의 유무선 네트워크가 공존하게 되면 정확한 동기화가 어렵다. 그러므로 유무선 네트워크 간에 동기화 메시지 전송과 제어를 위해서 유무선 게이트웨이의 내부적 알고리즘을 통해 네트워크 간에 시간 동기화를 고려해 볼 수 있다.

본 논문에서는 실시간이 요구되는 산업용 환경에서 양측의 네트워크를 통해 전달되는 메시지에 대해 중간 제어 계층인 게이트웨이 내부에서 실시간적인 동기화를 보장하는 3단계의 순차적 알고리즘을 제시한다.

본 논문에서 CAN (Control Area Network)과 IEEE 802.15.4가 혼용될 때 공유 채널에서의 동기화 문제로 인한 오차를 해결하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 동기화 알고리즘은 다음과 같다. 개선된 RBS (Reference Broadcast Synchronization) 알고리즘으로 채널의 전파 지연을 해결하고, 가중치 기반의 오프셋 알고리즘의 적용을 통해 각 노드 간 주파수 오차를 개선하여 노드 간에 동기화를 수행한다. 그리고 차등 BP (Back-off Period) 값의 감소를 통해 이중 네트워크간의 오차 개선으로 이중 네트워크의 동기화를 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 현재 사용되고 있는 실시간 유무선 공유 네트워크 동기화 알고리즘에 대해 기술하였고 III 장에서는 본 논문에서 제안하는 이중의 제어 네트워크를 연결하는 유무선 게이트웨이를 위한 3 단계 동기화 알고리즘에 대한 성능을 평가하고 마지막으로 IV 장에서 결론을 맺는다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 13., 수정: 2009. 11. 10., 채택확정: 2009. 12. 7.

정지원: i3system Co.(jwjung@i3system.com)

김동성: 금오공과대학교 전자공학부(dskim@kumoh.ac.kr)

※ 본 논문은 금오공대 교내 학술연구비에서 지원하여 연구하였음.

**II. 실시간 유무선 공유 네트워크 동기화 알고리즘**

**1. 유무선 공유 네트워크 환경**

혼합 네트워크는 그림 1과 같이 네트워크 A는 유선으로 구성되며, 네트워크 B는 무선으로 구성된다. 중간 계층의 역할인 게이트웨이는 네트워크 A와 B의 마스터 역할을 하게 되며, 센싱 데이터를 얻거나 제어를 위한 데이터를 전송한다.

네트워크 A의 특정 메시지는 네트워크 B의 구성 노드들에게 양방향 영향을 줄 수 있다.

네트워크 A의 경우 네트워크 B에 비해 상대적으로 매체 접속을 위한 시간이 작고, 전송속도도 크다. 그러므로 A에서 B로의 메시지 및 제어신호 전파는 네트워크 B의 채널 상황에 의해 제한된다.

유선 네트워크에서의 각 노드 동기화와 채널 접근 지연은 무선 네트워크에 비해 작다. 그러므로 본 연구에서는 무선 네트워크의 채널 접속 지연과 각 노드의 동기 오차를 위한 보정 알고리즘에 중점을 두었다.

**2. 기존의 동기화 알고리즘과 문제점**

유무선 혼합형 네트워크에서 동기화 문제는 채널지연과 주파수 지연이 있을 수 있다. 각각의 지연에 대해 CAN에서는 NTP (Network Time Protocol)를 이용하여 동기화로 문제들을 해결된다.

IEEE 802.15.4에서는 저전력을 위해 노드 트랜시버의 전력을 송수신에만 사용하기 때문에 전송 간격이 큰 비주기 노드의 경우에는 동기화가 어렵다[5,6].

센서네트워크에 적용되는 동기화 알고리즘들은 내부적 클럭 보정방식과 이벤트 순서화 방식, 클럭 참조방식으로 나누어지며, 각각 장단점들은 아래와 같다.

TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks)은 각 노드의 레벨 설정으로 순차적 동기화를 수행하는 구조를 가진다. 유무선 공유 네트워크의 경우 게이트웨이와 유선과 무선 양측의 계층만을 가지므로 TPSN의 레벨 설정 방식은 비효율적이다[7]. 이것을 개선한 TSync (Time Synchronization service)는 마스터 노드에서 하위 노드와의 타임스탬프 계산으로 클럭 오차 값을 브로드 캐스팅하여 각 노드가 동기화를 수행하는 알고리즘이다. 구조적으로 유무선 공유 네트워크에 적용 가능한 알고리즘이지만 IEEE 802.15.4의 경우 오차 값의 브로드 캐스팅을 위해 타 노드와 경쟁이 필요하고, 긴 시간 동안 채널을 이용하지 않는 노드는 동기화가 어렵다[8]. Global Sync (Global Clock Synchronization)는 클러스터 구조에 적합한 동기화 알고리즘으로 유무선 공유

네트워크처럼 연결정치의 지연이 큰 경우 적용하기 어렵다 [9]. FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol)는 기준 시간을 플러딩 기법을 통해 망에 알려 동기화 하는 방식으로 유선 및 유무선 공유 네트워크에서는 비효율적이다[10].

이벤트 순서화 방식의 예로는 이벤트나 메시지의 순서 및 시간적 관계를 유추해내는 TS-adhoc (Time Synchronization in ad hoc networks) 알고리즘이 있다. 이는 마스터 노드를 이용해 상대적인 시간차만을 이용하는 알고리즘이다. 유무선 공유 네트워크의 경우 각각의 노드가 서로 참조되어 센싱/구동 되어야 하기 때문에 적합하지 않다[11].

클럭 참조 방식은 시간 동기화를 위해 각 노드의 시간 정보를 이용해 개별 노드에서 시간 차이를 계산하고 유지하는 알고리즘이다. RBS가 대표적이며, 이를 변형한 Tiny/mini-sync와 LTS, Adaptive sync[12]가 있다. LTS (Lightweight Time Synchronization)는 높은 에너지 효율을 위한 알고리즘이다. 공장 환경에 적용될 유무선 공유 게이트웨이의 경우 한정된 공간에서의 네트워크를 유지하므로 에너지 효율보다는 시간적인 정확성이 요구된다[13]. Tiny/mini-sync는 센서 노드에 효율적인 동기화 알고리즘으로 LTS와 마찬가지로 공장 환경에서의 요구되는 노드 특성과 차이가 있다[14].

**3. 전파지연 보정을 위한 개선된 RBS 알고리즘(1단계)**

CAN은 데이터 변화를 비주기적으로 전달하기 위해 COS (Change of State) 연결 서비스를 제공한다. IEEE 802.15.4의 경우에는 CAP (Contention Access Period)를 이용하여 비주기적 메시지들을 처리할 수 있다[3]. CAP에서는 비주기 급 데이터 및 비실시간 메시지 데이터의 전송이 동시에 이루어진다. 조정자 노드는 망을 구성하고, 노드의 추가 탈퇴 등을 확인하는 메시지 데이터를 송수신한다[15]. 두 연결은 공통적으로 채널 접근 간격이 커질수록 기준시간에 대한 오차가 누적된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 IEEE 802.15.4의 경우 비콘을 이용하여 수퍼프레임 마다 노드의 시간을 초기화 한다. 이것은 단 방향 전송 지연만을 포함하므로, 정밀한 동기화 방법으로는 적합하지 않다.

RBS는 버스형 네트워크에 적합한 알고리즘으로 채널 접근이 제한되는 COS와 CAP에 적용 가능하다. 두 서비스들은 채널의 접근 없이 인접한 Polling(순차발생서비스)과 GTS (Guaranteed Time Slot)의 브로드 캐스팅 신호를 참조함으로써 양방향 채널 전파 지연을 계산할 수 있다. CAN의 경우 모든 노드에서 지연이 동일하므로, 근거리의 노드를 참조한다. IEEE 802.15.4의 경우 무선에서의 잠음으로 인한 전송 오류 및 송수신 감도의 감소가 발생한다. 그러므로 일정주기마다 수신 감도가 큰 노드를 참조하여 동기화에 적용한다.

게이트웨이 내부에서는 메시지의 변환 과정으로 인한 지연을 고려해야 한다. 그림 2는 IEEE 802.15.4 노드에서 CAN 노드로 메시지 전달 과정을 나타낸 것이다. IEEE 802.15.4 노드에서 CAN 노드까지 총 전송지연( $D_{I-C}$ )은 식 1과 같이 나타낸다.

$$D_{I-C} = D_{P1} + D_C + D_{P2} \tag{1}$$

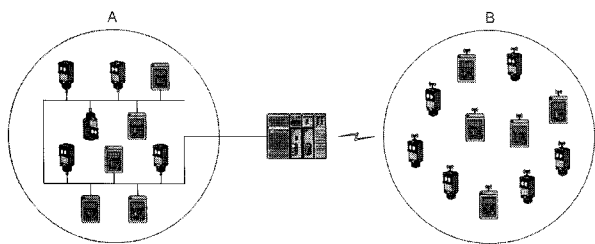


그림 1. 산업용 유무선 혼합 네트워크 구성의 예.  
Fig. 1. Example of Industrial wired/wireless hybrid networks.

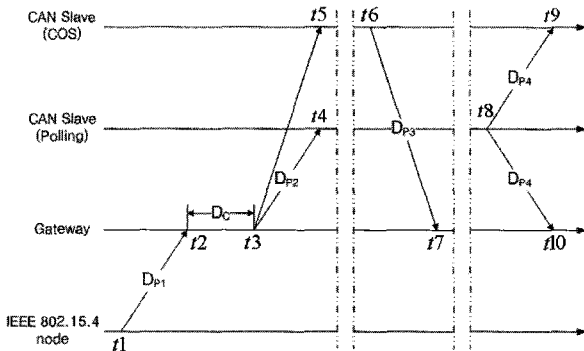


그림 2. IEEE 802.15.4 기반 노드에서 CAN 기반 노드로 메시지 전달과정.

Fig. 2. Message exchange procedure from IEEE 802.15.4 to node to CAN node.

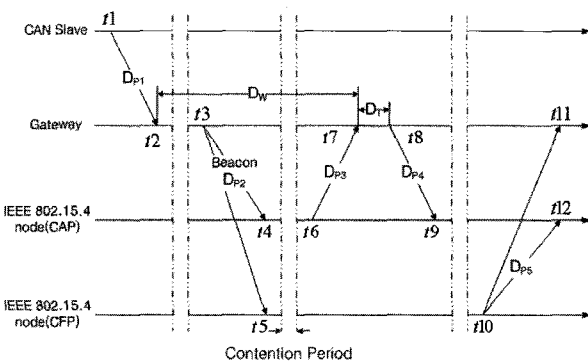


그림 3. CAN 기반 노드에서 IEEE 802.15.4 기반 노드로 메시지 전달 과정.

Fig. 3. Message exchange procedure from CAN node to IEEE 802.15.4 node.

각각의 지연은 타임스텝  $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ 의 차로 구하고  $D_{Pn}$ 는 전송지연,  $D_C$ 는 변환지연을 나타낸다.  $D_C$ 는 게이트웨이 내부의 메시지 데이터를 CAN 프레임으로 변환하는 시간을 나타낸다. 게이트웨이와 CAN 노드간의 양방향 전송 지연( $D_{G-C}$ )은 식 2와 같이 계산된다.

$$D_{G-C} = (D_{P2} + D_{P3}) / 2 \quad (2)$$

시간  $t_3$ 에서 CAN 노드로 전송한 메시지에 대한 각 노드의 지연시간이 수  $\mu s$ 내에서 거의 동일하므로  $D_{P2}$ 로 나타낸다. COS 연결은 채널접근간격이 일정하지 않으므로 긴 시간동안 전송이 없을 때 polling 연결 노드를 참조한다. 그림 3의 시간  $t_8$ 에서 전송하는 메시지의 전송지연을 COS 연결의 노드가 지연  $D_{P4}$ 로 참조하여 동기화한다.

그림 3은 CAN 노드에서 IEEE 802.15.4 노드로 메시지 전달과정을 보여준다. IEEE 802.15.4는 조정자 노드가 메시지를 전송하기 위해 메시지 수신 요청을 하는 절차를 가진다. 그림 3의 시간  $t_2$ 는 게이트웨이에 도착한 CAN의 메시지를 다음 비콘 전송까지 버퍼에 대기 상태가 된다. 그리고 비콘 전송에서 메시지의 크기와 도착 주소를 전송주소영역에 기록하여 해당 노드로 전송된다. 비콘을 받은 노드가

CFP (Contention Free Period) 노드일 경우 자신의 GTS 슬롯에서 전송요청을 한다. CAP 노드의 경우 경쟁구간에 참여하여 채널을 선점하고, 전송을 요청한다. 게이트웨이 내부에서 총 지연  $D_W$  후 시간  $t_7$ 에서 전송 요청을 받고, 트랜시버의 지연  $D_T$  후 시간  $t_8$ 에 전송한다. 그림 3에서는 CAP 노드가 도착 노드로 전송요청을 한다. 메시지의 시간 동기화를 위한 전송지연( $D_{C-I}$ )은 식 3으로 구한다.

$$D_{C-I} = D_{P1} + D_W + D_T + D_{P4} \quad (3)$$

게이트웨이와 IEEE 802.15.4 노드 간 양방향 전송지연( $D_{G-I}$ )은 식 4와 같이 두 가지 방식으로 적용한다.

$$D_{G-I} = (D_{P3} + D_{P4}) / 2 \\ = (D_{P2} + D_{P5}) / 2 \quad (4)$$

그림 2의 경우에는 식 (1)이 적용하여 수신요청시간  $t_6$ 과 수신시간  $t_9$  사이에서 동기화가 진행된다. 두 번째 식의 적용은 메시지 수신에 없을 경우이며, 비콘의 전송지연  $D_{P2}$ 와 노드의 메시지 전송지연을 통해 동기화한다. CFP 노드는 최소 15.36 ms 주기로 데이터 송수신이 이루어지므로 지속적인 동기화가 가능하고, CAP 노드는 인접 CFP 노드를 참조하는 RBS 방식을 통하여 동기화가 가능하다.

그림 2와 3에서 시간 동기화와 양방향간의 채널전송지연을 해결될 수 있지만 각 노드들의 주파수 지연 요소를 제거하기는 어렵다. 주파수 지연은 각 노드에서 동일한 진동소자로 구동되더라도 시간, 온도, 압력 등의 요소에 따라 오차가 발생하여 기준시에 대해 서로 지연이 발생한다. 이는 전송지연과는 독립적이며 노드 자체적으로 주파수 지연을 보정하는 알고리즘이 필요하다. 노드 내부의 주파수 지연이 누적되면, 센싱/구동을 위한 메시지들은 시간 오차가 발생하고 이는 주파수 오차가 된다. 누적된 주파수 오차는 노드의 전송시간에 영향을 주어 각 노드들이 하나의 채널을 공유할 경우 채널 효율을 감소시킨다.

#### 4. 주파수 오차를 개선 위한 가중치 기반의 오프셋 알고리즘(2단계)

두 번째 단계로 가중치 기반의 오프셋 알고리즘 사용한다. 채널 지연을 해결하기 위해 타임스텝 동기화 알고리즘으로 평균 채널 지연을 구한다. 평균 채널 지연을 통해 상대 노드와 주파수 오차를 구하고, 오차의 평균값을 계속

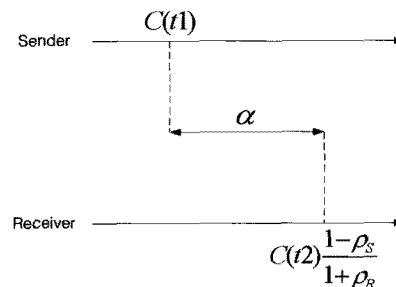


그림 4. 마스터 노드의 시간 기준에 대한 슬레이브 노드에서의 주파수 오차.

Fig. 4. Frequency error from sender to receiver node.

유지시킨다. 이는 장기간 채널을 사용하지 않는 노드의 주파수 오차를 해결할 수 있다. 그림 4는 마스터 노드(sender)를 기준으로 슬레이브 노드(receiver)에서 주파수 오차( $\alpha$ )를 나타낸다. 슬레이브 노드의 주파수는 마스터 노드를 기준으로 일정한 비율로 나타나며, 이에 따라 가변하는 주파수 오차  $\alpha$ 가 존재한다.

마스터 노드가  $t1$ 에서  $\alpha$ 의 오차를 가지고 있었으므로  $t2$ 에서도 동일하게 오차  $\alpha$ 를 가지게 된다. 그러므로 두 노드가 시간  $t2$ 에서의 가지는 오차  $\alpha$ 는 식 5, 6과 같이 계산되어진다.

$$C(t2) + \alpha = C(t2) \frac{1 - \rho_S}{1 + \rho_R} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{-(\rho_S + \rho_R) C(t2)}{1 + \rho_R} \quad (6)$$

여기서  $\rho$ 는 시간  $C(t1)$ 과  $C(t2)$ 의 오차 비율이다[7]. 여기서  $\rho_S$  및  $\rho_R$ 은 송신자와 수신자의 오차 비율이다. 클럭에 대한 오차 비율을 이용하여  $\alpha$ 를 구하는 것은 계산량의 증가로 비효율적이다.  $\alpha$ 를 간단히 구하기 위해서 평균 채널 지연  $E[D_{P_i}]$ 을 이용하여 식 7과 같이 구한다.

$$C(t2) + \alpha - C(t1) = E[D_{P_i}] + \alpha \quad (7)$$

평균 채널 지연  $E[D_{P_i}]$ 는 타임스탬프 동기화 알고리즘에서와 같이 주파수 오차에 영향을 받지 않으므로 지연의 평균값을 구하면  $\alpha$ 를 구할 수 있다. 평균 채널 지연  $E[D_{P_i}]$ 은 식 8을 이용하여 구할 수 있다.

$$E[D_{P_i}] = \frac{E[D_P] + D_{P\_Current}}{2} \quad (8)$$

식 9는 모든 지연 값들에 대한 평균 채널 지연  $E[D_{P_{i-tot}}]$ 를 구하는 식이다.

$$E[D_{P_{i-tot}}] = \left( \sum_{i=0}^{N-1} D_{P_i} \right) / N = \frac{D_{P_0} + D_{P_1} + \dots + D_{P_{N-1}}}{N} \quad (9)$$

새로운 채널 전송지연  $D_{P_N}$ 과  $E[D_{P_i}]$ 를 더하여  $N+1$ 로 나누면 새로운  $E[D_{P_{i \neq w}}]$ 를 적용할 수 있다. 하지만 모든  $N$ 에 대한  $E[D_{P_{i \neq w}}]$ 를 계산하는 것은 변화하는 채널 지연으로 적용을 느리게 하므로 전체  $N$ 에 대한 적용 범위의 가중치 값  $W$ 가 필요하다.

$$E[D_{P_{i-new}}] = W \times \frac{E[D_{P_i}] + D_{P_N}}{N+1} \quad (10)$$

$W$ 는 시변 채널 지연을 포함하므로 노드의 채널 접근까지 지연되는 시간과 메시지 전송 간격을 이용한다.

IEEE 802.15.4에서 경쟁구간의 노드들은 충돌 회피를 위해 백오프(back-off) 과정을 통해 채널 접근까지 지연 정도를 알 수 있다. 식 11은 백오프 값  $BP$ 를 구하는 식이다. 경쟁 노드는 채널 접속까지의 총  $BP$  값을 통해 채널 접근 지연을 알 수 있다.

$$BP = \text{Random}(2^{BE} - 1) \quad (11)$$

$BP$ 는 단위 백오프 구간이며, 이는 20 symbols에 해당하며 IEEE 802.15.4는 62.5 Ksymbols/s의 전송 속도를 가진다[16]. 노드의 기본적인 주파수는 표준에 권장된 32 MHz이고 오차 정도는  $\pm 40$  ppm이다. 이것을 1 Hz 오차에 대한 심볼수를 구하고,  $BP$ 에 적용하여 1 Hz 오차를 가중치 1로 적용한다.

32 MHz동안 총 2560 Hz의 최대 오차가 나타날 수 있으며, 1 symbol은 512 Hz에 해당하므로 약 24.414 symbol 당 1 Hz의 오차가 생긴다. 이것을 적용하여 식 12로 가중치  $W$ 를 구한다.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N BP_i \times 20 \text{ symbols} \times 512}{12500} \quad (12)$$

전송 간격이 큰 노드와 비주기 노드의 경우 동기화 간격도 커진다. 그러므로 긴 동기화 간격에 비례하여 가중치  $W$ 의 적용이 필요하다. 식 12에서  $BP_i * \text{symbols}$ 의 값을 동기화 간격의 심볼 개수로 바꾸어 적용한다.

가중치를 통해 구한  $\alpha$ 가 주파수 오차 범위를 벗어나는 경우 오차의 최대값을 적용한다. IEEE 802.15.4 표준에서 정한 동기화 오차  $\alpha$ 의 범위는 다음과 같다.

$$-40 \text{ ppm} \leq \alpha \leq 40 \text{ ppm} \quad (13)$$

#### 5. 차등 BP 값의 감소를 통한 네트워크 동기화(3단계)

IEEE 802.15.4는 메시지를 수신하기 위해서 각 노드들간의 경쟁을 통해 충돌을 회피하는 방식을 사용한다. 이 방식은 경쟁에서 실패할 경우 다음 수퍼 프레임으로 수신이 넘어가 CFP의 전송 구간과 비콘의 브로드 캐스팅 시간 동안 대기시간이 발생한다. 이 시간은 약 7.7 ms가 소요되므로 CAN에 비해 실시간성이 떨어지고 전송실패가 많이 일어난다.

유선과 무선 네트워크 간의 실시간 메시지 전송을 위해 게이트웨이에서 각 네트워크의 노드에 등급을 준다. CAN에서는 전송을 위한 우선순위를 높여주고 충돌 시에 대기 시간을 줄여 채널접근시간을 감소시켰다. IEEE 802.15.4에서는 충돌회피를 위해 대기시간을 일정하게 줄여 타 노드보다 채널접근이 빠르게 하였다.

CAN에서의 메시지 송수신은 노드 ID와 메시지 종류에 따라 채널접근 우선순위가 달라진다. IEEE 802.15.4에서 CAN으로 메시지를 전달하게 된다면, 게이트웨이에서는 IEEE 802.15.4의 노드에 선정된 등급에 따라 CAN에서의 전송 우선순위를 결정한다. CAN에서 IEEE 802.15.4로의 메시지 전달은 게이트웨이가 먼저 보낼 메시지가 있음을 알리는 과정이 필요하다. 해당 노드는 메시지 수신을 위한 채널 접근을 해야 하며 다른 노드와 경쟁이 필요하다. 그러므로 게이트웨이는 CAN에서 선정된 등급의 노드의 메시지 송신을 위해 비콘의 수신 목적지 주소에 등급을 첨부한다. 수신 알림을 받은 노드는 등급에 따라 차등적으로 BP의 최대값이 제한되며, 채널접근 시간이 줄어들게 된다.

하나의 노드가 전송하는 동안 채널을 선점하면, BP의 제

한값을 받게 된 노드가 채널을 선점할 기회를 높이는 것이다. 하지만 무선의 특성상 단위 수퍼프레임에서 단일 노드만이 우선순위를 가지는 것이 적절하다. 유무선 네트워크에 대한 차등 BP 적용 절차는 다음과 같다.

- (1) 초기화시에 최소 BP와 CW(선점대기값)값을 설정한다.
- (2) 무선에서 유선으로의 긴급 메시지 발생 시에 게이트웨이는 무선 네트워크의 메시지를 받아 유선 네트워크로 최우선 메시지 ID를 부여하여 전송한다.
- (3) 유선에서 무선으로의 긴급 메시지 발생 시에 게이트웨이는 무선 네트워크로 비콘의 확장 주소영역에 긴급 전달 메시지가 있음을 대상 노드 ID와 함께 전송한다.
- (4) 대상 노드는 빠른 채널접근을 위해 기 설정된 최소 BP와 CW를 적용하여 채널에 접근한다.
- (5) 대상 노드가 채널을 선점 후에 게이트웨이로 메시지 요청을 전송하고 게이트웨이는 긴급 메시지를 전송한다.

### III. 모의실험 및 성능평가

#### 1. 모의실험 환경

모의실험에서는 양측 네트워크의 마스터인 유무선 게이트웨이의 시간을 기준으로 하며, 게이트웨이 내부의 오차로 인한 기준시간의 변화는 고려하지 않는다. 각 노드의 수는 표 1과 같다.

모의실험에 사용된 각 주기노드의 메시지 발생 주기는 다음의 표 2와 같다.

COS노드와 CAP(sporadic)노드의 경우 확률모델 포아송분포에 따라 임의의 시간에 전송을 한다. 재전송은 고려하지 않으며, 전송 간 채널 지연은 표준의 허용가능오차  $\pm 40 ppm$ ,  $250 bps \pm 10\%$ 와 모의실험결과와 평균값으로 적용한다. 전송 간 채널 지연은 0.048 ms-0.08 ms의 오차를 가진다.

표 1. 모의실험에서의 각 네트워크 구성.

Table 1. Configuration for hybrid networks.

CAN node		IEEE 802.15.4 node		
Polling	COS	CAP		CFP
		periodic	sporadic	
20	10	10	10	7

표 2. 각노드의 메시지 발생 주기.

Table 2. Message generation period of nodes.

	Channel access interval(ms)	Node number
Polling node	20	0, 1, 2, 3
	30	4, 5, 6
	40	7, 8, 9
	50	10, 11, 12
	60	13, 14, 15
	70	16, 17, 18
	80	19
CAP node (periodic)	50	0, 1, 2
	100	3, 4, 5
	150	6, 7, 8
	200	9

CAN의 메시지 프레임 길이는 111 bits 이고, IEEE 802.15.4는 320 bits를 적용하였다. CAN의 각 노드에서 진동소자의 시각 정밀도는  $16 MHz \pm 50 ppm$  이고, IEEE 802.15.4는  $32 MHz \pm 40 ppm$ 이다. 주파수 오차 확률모델은 가우시안 분포로서 모든 노드의 시각이 독립적으로 동작되며, 주파수 오차에 따라 임의로 변한다.

#### 2. 모의실험 절차

모의실험에서는 각 프로토콜의 동기화 오차 개선과 제안된 알고리즘의 성능을 분석한다. 이를 위하여 MAC 계층 및 트래픽 발생 모듈들을 NS 2에 구현되어진 모델들을 참조하여 C로 구현하고, 각 노드에 대한 노이즈 모델은 공개 소스 코드를 이용하여 구성하였다. 이를 이용해 네트워크 각 노드에서의 채널접속 시간을 알아보고 효율성을 검증한다.

첫 단계로 동기화 알고리즘이 적용되지 않은 노드에 대해 동기화 오차 값을 측정하고, 두 번째로 기존의 동기화 알고리즘을 적용하여 비교한다. 세 번째로 개선된 RBS 알고리즘과 가중치 기반의 오프셋 동기화 알고리즘을 적용하고, 앞선 두 결과들과 비교한다. 마지막으로 제안된 알고리즘의 시간당 처리량을 비교한다. 우선순위에 따른 차등 BP 적용 실험과정은 적용여부와 우선순위 분배에 따라 두 부분으로 나누어진다. 첫 번째로 모든 노드에서의 채널접근시간을 측정하고 평균을 구한다. 두 번째로 하나의 지정 노드에 차등 BP 감소를 적용하여 평균 채널 접근시간을 측정하고, 앞의 결과와 비교한다.

#### 3. 모의실험 결과

본 절에서는 기존의 동기화 알고리즘을 통한 동기화 오차를 측정한다. CAN에서는 일반적으로 사용되는 기존의 동기화 알고리즘이 없으므로, 개선된 RBS 알고리즘을 적용하여 일반적인 유무선 네트워크 동기화 오차와 비교한다. IEEE 802.15.4에서 사용된 동기화 알고리즘은 각 노드에서 MLME-SYNC.request 값에 따라 작동하며, 비콘을 받은 시각과 비콘 사이의 간격으로 노드의 시각을 동기화 하는 방식이다.

그림 5는 각 노드에 대한 기존 동기화 알고리즘의 적용 결과이다. 최대 16 ms의 오차가 발생하고, 8 ms 내에서 동기화가 이루어진다. 일반적인 네트워크에서의 동기화 오차

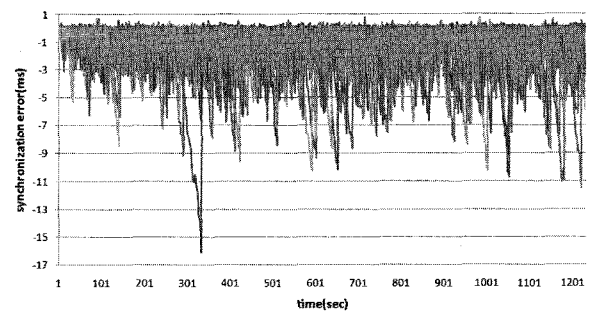


그림 5. IEEE 802.15.4에서 각 노드에 대한 동기화 알고리즘의 적용결과.

Fig. 5. Result of synchronization algorithm of IEEE 802.15.4 nodes.

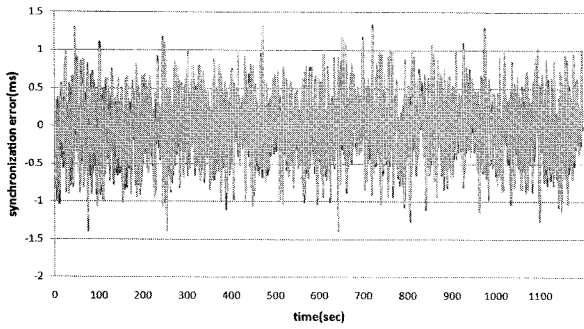


그림 6. CAN에서 개선된 RBS 알고리즘의 적용 결과.  
Fig. 6. Result of modified RBS algorithm on CAN.

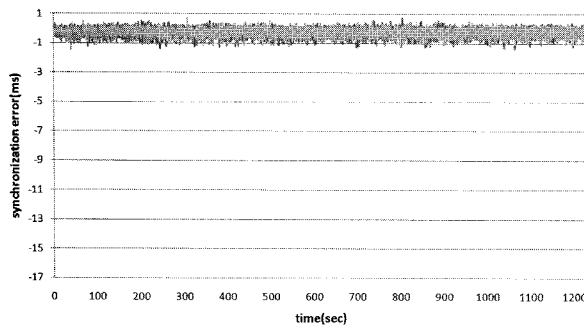


그림 7. IEEE 802.15.4에서 제안된 동기화 알고리즘의 적용 결과.  
Fig. 7. Result of proposed synchronization algorithm on IEEE 802.15.4.

와 다르게 주파수 오차가 일정한 수준을 넘어가지 않음을 알 수 있다. 그림 5에서와 같이 기존 동기화 알고리즘은 동기화 오차의 누적 정도에 따라 오차가 큰 구간이 빈번히 나타난다.

그림 6은 CAN에서 개선된 RBS 알고리즘을 적용한 결과이고, 동기화 오차 정도가 일정한 범위 내에서 벗어나지 않음을 알 수 있다. 모든 노드에 대해서 최대 1.4 ms의 동기화 오차가 발생하며, 대부분 1 ms 이내에서 동기화된다.

CAN에서 개선된 RBS 알고리즘과 가중치 기반의 오프셋 보정 동기화 알고리즘을 함께 적용할 경우 무선보다 빈번한 송수신으로 인해 부하가 커지게 된다. 개선된 RBS 알고리즘의 적용으로 동기화 정도가 충분히 개선되었으므로 다른 알고리즘의 적용이 필요치 않다. 그리고 가중치 기반의 오프셋 보정 동기화 알고리즘을 적용하기 위해서는 가중치 요소가 필요하게 되며, CAN에서는 전송간격을 통해 가중치를 도출하여야 한다.

그림 7은 IEEE 802.15.4의 각 노드에 대해 개선된 RBS 알고리즘과 가중치 기반의 오프셋 보정 동기화 알고리즘이 적용된 모의실험결과이다. 위의 결과와 일반적인 네트워크 동기화 오차와 비교해 보면, 누적 동기화 오차가 일정한 범위 내로 안정화함을 알 수 있다. 그리고 각 노드에 대한 기존 동기화 알고리즘 적용 결과를 비교하면 오차의 범위가 줄었으며 변동 폭이 큰 구간이 감소했다. 최대 1.5 ms의 오차가 발생하고, 대부분의 노드가 1 ms 이하의 오차가 발생한다.

실험을 통한 네트워크 이득은 채널의 이용효율을 통해

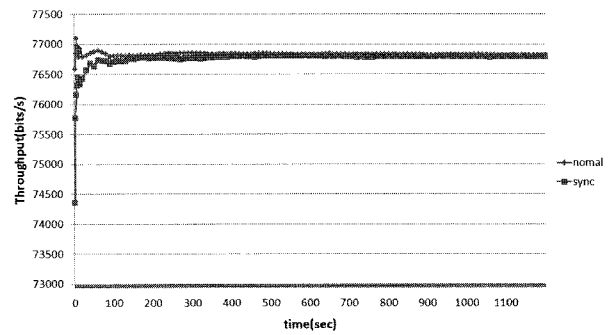


그림 8. CAN에서의 동기화 적용에 따른 처리량 비교.  
Fig. 8. Throughput analysis of an applied algorithm on CAN.

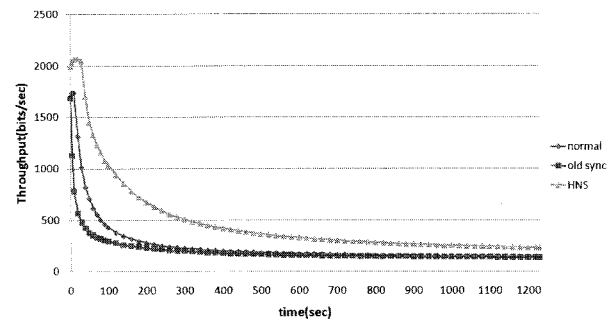


그림 9. IEEE 802.15.4에서의 동기화 적용에 따른 처리량 비교.  
Fig. 9. Throughput analysis of an applied algorithm on IEEE 802.15.4.

확인할 수 있다.

그림 8은 CAN에서의 동기화 적용에 따른 시간당 처리량을 비교한 것이다. CAN의 경우 IEEE 802.15.4에 비해 송수신의 정확성이 높고, 전송의 대역폭이 크기 때문에 시간에 따라 일정한 처리량을 보여준다.

동기화의 적용 여부가 처리량에 영향을 주지는 않지만, 노드 자체의 센싱/구동 시간에는 영향을 미치게 된다. 그러므로 동기화 알고리즘의 적용이 효율적인 제어 네트워크 운영을 가능하게 한다.

그림 9는 IEEE 802.15.4에서의 동기화 적용에 따른 처리량 비교 결과이다. 네트워크 초기에는 전송 경쟁이 많아짐을 알 수 있고, 각 노드의 경쟁창이 순서를 찾아감에 따라 일정한 처리량으로 수렴한다. 제안된 알고리즘은 가장 큰 처리량을 보여주는 상단 곡선이고, 중간정도의 처리량인 두 번째 곡선이 동기화가 적용되지 않은 네트워크이다. 아래의 세 번째 곡선이 기존의 동기화 알고리즘이 적용된 예이다. 제안된 알고리즘은 수렴되는 구간에서 알고리즘이 적용되지 않은 네트워크에 비해 성능이 약 1.7배 향상된다.

### 3.1 차등 BP 값의 감소를 통한 네트워크 동기화 모의실험 결과

차등 BP 값의 감소를 통한 네트워크 동기화 모의 실험의 첫 단계로 CAN에서부터 IEEE 802.15.4까지 각 노드에서의 채널접근시간과 평균 채널접근시간을 측정한다. 게이트웨이의 프로토콜 변환 시간은 1 ms로 고정하였다. 측정 기준 노드는 IEEE 802.15.4의 CAP 노드이며, CAN과 IEEE 802.15.4 사이의 송수신에 대한 채널접근시간을 측정하였다.

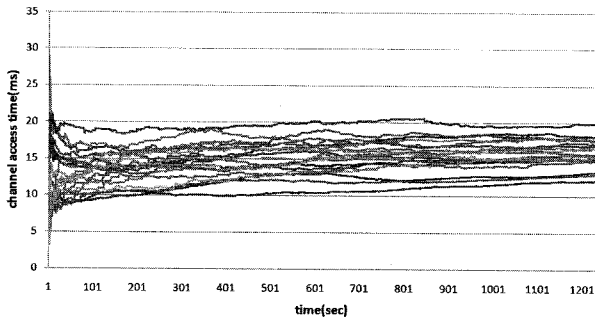


그림 10. 유무선 네트워크 간의 채널접근시간.  
Fig. 10. Channel access time on wired/wireless hybrid networks.

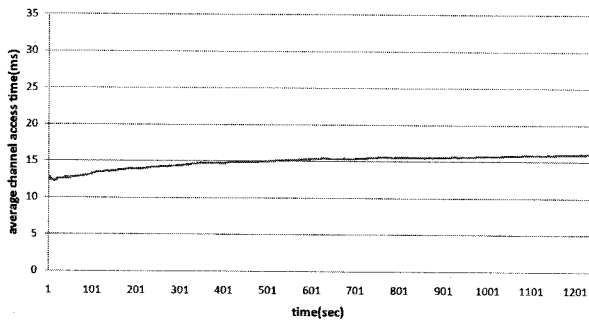


그림 11. 유무선 네트워크 간의 평균 채널접근시간.  
Fig. 11. Average channel access time on wired/wireless hybrid networks.

그림 10은 유무선 네트워크 간의 채널접근시간이다. 네트워크 초기에는 각 노드의 경쟁에 따라 채널접근시간의 변동이 크게 나타난다. 시간이 흐름에 따라 각 노드가 일정한 시간으로 수렴함을 볼 수 있다. 대부분의 전송성공 노드는 10 ms ~ 20 ms에서 채널에 접근을 한다. IEEE 802.15.4의 주기 노드의 최소 메시지 발생주기가 50 ms이므로 대부분의 노드가 다음 주기의 메시지 발생에 영향이 없음을 알 수 있다.

두 번째 실험과정으로 IEEE 802.15.4에서 하나의 노드에 최우선 순위의 채널접근 조건을 주어 실험을 하였다.

조건이 주어진 노드는 50 ms의 주기노드이다. 우선순위 조건은 비콘을 통해 하나의 수퍼 프레임에서 하나의 노드에 대해서만 설정될 수 있으며, 실험의 경우 고정적으로 노드 3에 지속적으로 적용하였다.

그림 11은 유무선 네트워크 간의 평균 채널접근시간을 측정하는 것이며, 평균 16 ms로 수렴하고 있다. 대부분 노드가 채널선점을 위해 수퍼 프레임 하나의 길이 15.36 ms를 넘어서고 있다. 이를 통해 평균적으로 최소 두 개의 수퍼 프레임을 거쳐 채널 선점이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 12의 모의실험결과를 보면 채널접근시간의 변동이 크게 발생한 것을 알 수 있다. 각 노드들의 채널접근시간이 수렴하기까지 추가 시간이 요구되며 전체적으로 5 ms정도가 상승했다. 그림 12에서 하단부의 8 ms이하의 낮은 채널접근 시간을 유지하는 노드 3이다. 이것은 CAN을 통해 게이트웨이로 들어온 긴급 메시지를 최대 8 ms안에 IEEE 802.15.4로 전달할 수 있음을 알 수 있다. 노드 3에 적용된 조건은

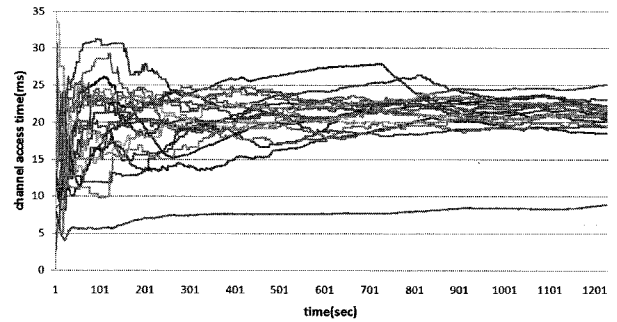


그림 12. 차등 BP가 적용된 유무선 네트워크 간의 채널접근시간.  
Fig. 12. Channel access time on wired/wireless hybrid networks using difference BP.

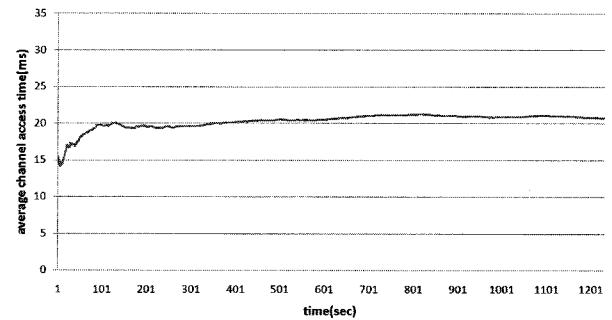


그림 13. 차등 BP가 적용된 유무선 네트워크 간의 평균 채널접근시간.  
Fig. 13. Average channel access time on wired/wireless hybrid networks using difference BP.

고정된 BP값 1과 CW값 1이다. 이 값은 우선순위를 결정하는 최상위 값으로서 네트워크의 노드수와 메시지 발생 빈도에 따라 달라 질수 있다. 실험에서는 최소값에서부터 증가시키며 최적의 조건을 구하였다.

그림 13은 차등 BP가 적용된 유무선 네트워크 간의 평균 채널접근시간을 보여준다. 그림 11의 채널접근시간과 비교하여 5 ms정도가 상승하였다. 이는 차등 BP 적용의 단점으로 하나의 노드에 우선권을 주게 되면 다른 모든 노드들의 접속시간을 증가시키기 때문이다. 차등 BP가 적용된 노드의 경우, IEEE 802.15.4에서 메시지 발생빈도가 높으므로, 긴급 메시지를 위한 노드에 할당하게 되면 향상된 효율을 기대할 수 있다.

#### IV. 결론

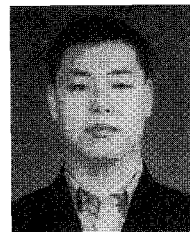
본 논문에서는 이중의 유무선 혼합 제어 네트워크를 연결하는 게이트웨이를 위한 동기화 알고리즘을 분석하고 개선 방법을 제안하였다. 이를 위해 개선된 RBS 알고리즘으로 채널의 전파 지연을 해결하고, 가중치 기반의 오프셋 알고리즘의 적용을 통해 각 노드간의 주파수 오차를 개선한다. 그리고 마지막 단계로 차등 BP 값의 감소를 통해 이중의 네트워크 간에 오차를 개선시켰다.

모의실험을 통해 제안된 알고리즘이 기존의 동기화 알고리즘에 비해 각 노드의 주파수 오차 값을 효율적으로 감소시켜 동기화에 효율적임을 살펴보았다.

향후 연구를 통해 채널 효율 증가에 대해 분석을 토대로 보완된 동기화 알고리즘이 적용된 유무선 혼합형 게이트웨이를 설계 및 구현하고자 한다.

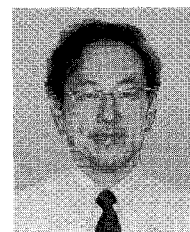
### 참고문헌

- [1] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz, "Wireless technology in industrial network," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, issue 6, 2005.
- [2] P. Morel and A. Croisier, "A wireless gateway for fieldbus," *IEEE International Symposium of Wireless: Merging onto the Information Superhighway, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, pp. 105-109, Sep. 1995.
- [3] D.-H. Choi and D.-S. Kim, "Wireless fieldbus for networked control system using IEEE 802.15.4," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 1-7, Feb. 2007.
- [4] J.-W. Jung, S.-K. Lee, and D.-S. Kim, "Performance analysis of wired/wireless hybrid network based on common industrial protocol," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 13, no. 11, Nov. 2007.
- [5] J. Elson and K. Romer, "Wireless Sensor networks: A new regime for time synchronization," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 33, issue 1, pp. 149-154, Jan. 2003.
- [6] J. Elson and D. Estrin, "Time synchronization for wireless sensor networks," *Proceedings of the 15th International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, pp. 1965-1970, Apr. 2001.
- [7] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync Protocol for Sensor Networks," *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 138-149, Nov. 2003.
- [8] H. Dai and R. Han, "TSync: a lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks," *ACM Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, issue 1, pp. 125-139, Jan. 2004.
- [9] Q. Li and D. Rus, "Global clock synchronization in sensor networks," *IEEE Infocom 2004*, Mar. 2004.
- [11] K. Romer, "Time synchronization in ad hoc networks," *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 173-182, Oct. 2001.
- [12] S. PalChaudhuri, A. K. Saha, and David B. Johnson, "Adaptive clock synchronization in sensor networks," *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, Apr. 2004.
- [13] J. V. Greunen and J. Rabaey, "Lightweight time synchronization for sensor networks," *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 11-19, 2004.
- [14] M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications and Networking*, vol. 2, pp. 1266-1273, Mar. 2003.
- [15] 이정일, 김동성, "공장 환경에서의 무선 제어 시스템을 위한 센서네트워크의 동적 스케줄링 기법에 대한 연구(Dynamic Scheduling Method of Wireless Control System in Factory Environment)," *대한전자공학회 논문지*, 제45권 SC편 제2호, pp. 45-54, Mar. 2008.
- [16] IEEE 802.15.4 Standard-2003, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE-SA Standards Board*, 2003.



### 정지원

2006년 금오공과대학 전자공학과(공학사). 2008년 금오공과 대학교 전자공학과(공학석사). 2008년~현재 i3system Co. 연구원. 관심분야는 산업용 통신망, 발전소 제어망, 적외선 영상센서.



### 김동성

1992년 한양대학교 전자공학과(공학사). 2003년 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학부(공학박사). 1994년~1998년 서울대학교 ERC-ACI, 선임 연구원. 2003년~2004년 Cornell 대학교 전기 및 컴퓨터공학부(박사후 연구원). 2008년~2009년 U.C. Davis 전산학부 방문교수. 2004년 3월~현재 금오공과 대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 산업용 통신망, 네트워크 기반 임베디드 시스템 설계 및 성능분석.