

무선 네트워크 제어 시스템을 위한 클럭 동기화 메커니즘

트링 홉도*, 전문길*, 유명식^o

A Mechanism of Clock Synchronization for Wireless Networked Control System

Trong-Hop Do*, Wenji Quan*, Myungsik Yoo^o

요 약

최근 무선 네트워크 기술이 많이 발전됨에 따라 많은 단말과 애플리케이션들은 무선 네트워크를 기반으로 연구되고 있다. 무선 네트워크는 유선 네트워크에 비해 편의성, 유동성, 확장성과 저렴한 가격으로 인하여 많이 사용되고 있지만, 안정성이 떨어지므로 실시간 제어시스템에서의 적용은 제한적이다. 무선 제어시스템에 있어서 가장 중요한 것은 클럭 동기화이다. 비록 기존 유선 네트워크와 무선 네트워크에서 많은 동기화 기법들이 제안되었지만, 이러한 기법들은 무선 제어 시스템에 직접적으로 적용하기에는 부적절하다. 이에 본 논문에서는 무선 제어 시스템에서의 동기화 문제를 제기하고, 무선 네트워크의 특성들을 이용하여 클럭 동기화 기법을 제안하였다. 이와 더불어 제안 알고리즘의 성능 분석을 위한 모의실험을 수행하였고, 기존 동기화 기법과 제안한 기법을 패킷 손실과 패킷 손실을 제외한 환경에서 비교 분석하였다.

Key Words : Wireless Network, Synchronization, Wireless Control System, Clock Synchronization

ABSTRACT

Wireless network has been used in many applications due to its advantages such as convenience, mobility, productivity, easy deployment, easy expandability and low cost. When it comes to stability, wireless network still shows its limitation which makes it difficult to be used for real-time control system. One of the first problems of using wireless network for control system is clock synchronization. There have been synchronization schemes proposed for wired networked control system as well as wireless network. But these should not be applied directly in wireless network control system. In this paper, we point out the importance of clock synchronization in wireless network control system. Then based on the characteristic of wireless networked control system, we propose a clock synchronization scheme for it. Furthermore, we simulate our scheme and compare with previous synchronization scheme in wired and wireless environments.

I. 서 론

최근 무선 네트워크 기술이 발전됨에 따라 많은

응용 서비스들이 무선 네트워크 기반으로 제공된다. 이러한 무선 네트워크는 유선 네트워크에 비해 편의성, 유동성, 확장성과 저렴한 가격으로 인하여 많

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2012R1A1A2042995)

• 주저자 : 송실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, dotronghop@gmail.com, 학생회원

° 교신저자 : 송실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, myoo@ssu.ac.kr, 종신회원

* 송실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, moongill2008@gmail.com, 정회원
논문번호 : KICS2013-06-257, 접수일자 : 2013년 6월 17일, 최종논문접수일자 : 2013년 6월 24일

이 활용되고 있지만, 안정성이 떨어지므로 실시간 제어 시스템에서의 적용은 제한적이다. 일반적으로 무선 네트워크 제어 시스템에서는 실시간 데이터 전송이 필수적인데 무선 환경에서 데이터를 실시간으로 전송하기 위해서는 제어기(Controller)와 플랜트(Plant)간의 클럭 동기화(Clock Synchronization)가 필수적이다¹⁻⁵⁾.

기존 클럭 동기화 기법은 전역 클럭(Global Clock)과 지역 클럭(Local Clock)을 기반으로 하는 동기화 기법으로 분류될 수 있다. 먼저 전역 클럭 동기화 기법은 하나의 클럭(Clock)으로 전체 시스템의 동기화를 관리하기 때문에 사용의 편리성이 있지만, 여러 단말에서 동일한 클럭 신호를 얻기 위해 별도의 보정 기술이 요구된다.

반면, 지역 클럭 동기화 기법에서 모든 노드들은 하나의 클럭에 의하여 동기화된다. 이를 위해 모든 노드들은 클럭 메시지를 교환해야하지만 무선 네트워크 환경에서는 두 노드 사이에 메시지를 교환할 때 패킷 손실이 발생할 수 있으므로 정확한 클럭 메시지의 전달이 어렵다. 이러한 무선 네트워크의 패킷 손실을 해결하기 위하여 기존 많은 연구들이 진행하여 왔다⁶⁻⁸⁾. 일례로 전송과정에서 패킷 손실이 발생하면 재전송하는 방법으로 패킷 손실을 보완할 수 있다. 하지만 실시간 제어 시스템의 관점에서 볼 때 재전송을 위한 시간이 없으므로 기존 무선 네트워크에서 사용하던 재전송 기법을 사용할 수 없다. 따라서 무선 네트워크 제어 시스템의 안정적인 운용을 위해 효과적인 동기화 기법이 요구된다⁹⁻¹¹⁾.

이에 본 논문에서는 무선 네트워크 제어 시스템의 동기화를 위하여 상대적 클럭 동기화 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘에서 각 플랜트들은 단일 홉을 통하여 제어기와 연결된 환경을 고려하였고, 클럭 메시지 교환 시 오프셋의 변화 값을 고려하여 교차 상관을 통해 무선 네트워크 환경의 패킷 손실로 인한 클럭 동기화 오차 발생의 문제점을 해결하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 클럭 동기화의 기본 개념에 대해 살펴보고, 3장에서는 제안한 무선 네트워크 제어 시스템의 클럭 동기화 기법을 설명한다. 이어 4장에서는 제안한 기법의 성능을 평가 수행하고, 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 클럭 동기화의 기본 개념

2.1. 수정 발진기를 이용한 클럭 동기화의 문제

수정 발진기(Crystal Oscillator)는 하나의 전자 발진기로서 기계적 공진을 이용하여 특정 주파수의 전자신호를 생성한다. 또한 이러한 전자 신호를 시간 단위로 측정하여 클럭 속도(Clock Rate)라고도 하는데, 이를 정확히 측정하기 위해 클럭 속도의 측정 시간은 언제나 같게 설정되어야 한다. 하지만 무선 네트워크에서 클럭 속도는 많은 원인에 의하여 수시로 변할 수 있다. 이러한 클럭속도의 변화를 표류율(Drift Rate)라고 하는데 이는 체계적인 표류(Systematic Drift)와 확률적 표류(Stochastic Drift)에 영향을 받는다.

먼저, 체계적 표류의 경우 제조 표류(Manufacturing Drift)와 환경 표류(Environmental Drift)의 두 가지 표류의 형태로 구성되는데, 제조 표류는 수정 발진기를 제조 시 발생하는 오류를 의미하며, 환경 표류는 수정 발진기의 온도에 따라 변하는 것을 의미한다. 수식 1은 이러한 체계적 표류(ρ_{syst})의 계산식을 나타낸 것이다.

$$\rho_{syst} = \rho_{mann} + R_{syst}(temp) \quad (1)$$

이때 ρ_{mann} 와 $R_{syst}(temp)$ 는 각각 제작 표류와 온도에 의한 환경 표류 값을 의미한다.

이와 달리 확률적 표류(ρ_{stoch})는 제작 표류 대신 임의의 값을 설정한 표류와 환경 표류를 수식 2와 같이 구성하여 계산한다.

$$\rho_{stoch} = rand \times (\rho_{stoch,max} + R_{stoch,max}(temp)) \quad (2)$$

이때 $rand$ 는 -1과 1사이의 랜덤 값이고, $\rho_{stoch,max}$ 는 확률 표류의 상한 값이며, $R_{stoch}(temp)$ 는 온도에 의한 환경 표류 값을 의미한다. 이를 토대로 무선 네트워크 제어 시스템에서 발생할 표류 i 번째 클럭을 수식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho^i = \rho_{syst}^i + \rho_{stoch}^i \quad (3)$$

앞서 표류 속도에 따른 영향 분석에서도 볼 수 있듯이 제조 표류나 확률 표류를 사용자가 임의로 설정할 수 없는 부분이라 무시한다면, 온도가 수정

발진기 표류에 미치는 중요한 요소가 된다. 이에 일정한 온도에서 표류 영향을 살펴본 결과 그림 1과 같이 온도에 따라 수정 발진기의 표류 영향이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 각 발진기는 같은 온도에 서로 다른 표류 값으로 나타난다. 즉 각 수정 발진기는 자신만의 속성으로 온도에 의하여 클럭표류를 변화할 수 있는데, 같은 종류의 발진기라도 다른 발진기의 속성을 예측할 수 없기 때문에 온도에 의한 클럭 표류를 계산하기 어렵다.

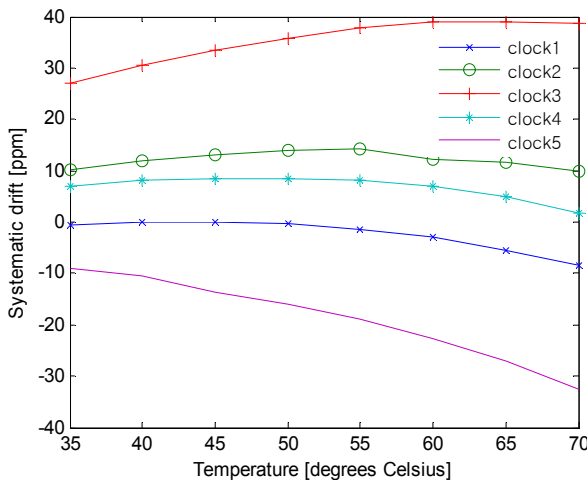


그림 1. 일정한 온도에서 수정 발진기 표류
Fig. 1. Drift of Crystal Oscillators at Constant Temp

2.2. 다중 단말 환경에서의 동기화 문제

비록 클럭 주파수는 수시로 변하지만 짧은 시간에는 고정된 것이라고 가정할 수 있다. 그러므로 노드 i 에 근사한 클럭 값($C_i(t)$)을 수식 4와 같이 계산할 수 있다.

$$C_i(t) = a_i(t) \times t + b_i(t) \quad (4)$$

이때 t 는 현재 시각을 가리키고, $a_i(t)$ 는 순간의 클럭 표류 값이며, $b_i(t)$ 는 현재 시각 즉 t 에서의 오프셋 값이다. 따라서 이상적인 경우(Ideal Case), 표류율은 $a_i = d_c/d_i$ 로 표시할 수 있는데 이는 값 1과 같고, 오프셋 값 b_i 는 0으로 나타난다. 그러므로 클럭의 값은 시간 t 와 같다. 이를 기반으로 두 노드 간의 지역 클럭의 표류 값을 수식 5를 통해 계산할 수 있다.

$$C_2(t) = a_{21}(t) \times C_1(t) + b_{21}(t) \quad (5)$$

이때 $a_{21}(t)$ 은 순간의 상대적 표류 값이고, $b_{21}(t)$ 은 순간 노드들사이의 상대적 오프셋 값이다.

III. 제안하는 무선 네트워크 제어 시스템의 클럭 동기화 기법

3.1. 클럭 동기화의 쟁점

제어 시스템은 하나 또는 다수의 플랜트와 이들을 제어하는 제어기로 구성 되었다. 또한 제어 시스템에서는 동작 제어를 위한 클럭 동기화 기반의 스케줄링 기법을 사용하였는데, 만약 클럭 동기화가 맞지 않은 경우 시스템 붕괴가 발생할 수 있다.

그림 2는 클럭 동기화가 문제점을 도시한 것이다. 먼저, 이상적인 경우(a) 제어기에서 전송하는 제어 명령과 플랜트에서 전송하는 궤환(Feedback) 정보는 선차 순으로 전송된다. 하지만 클럭 동기화가 맞지 않아 제어기의 제어 명령이 빨리 전송될 경우(b) 제어기의 제어 명령이 플랜트의 궤환 정보가 도착하기 전에 전송될 수 있다. 이 경우 제어 명령이 현재 상황을 반영하지 못해 오차를 발생시킨다. 또한 제어기의 제어 명령이 늦게 전송될 경우(c) 제어 명령의 정확한 제어가 불가능하여 시스템의 안정성에 심각한 영향을 초래할 수 있다.

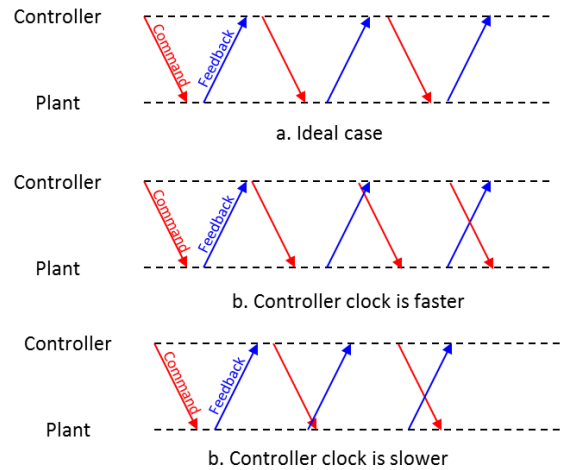


그림 2. 클럭동기화 문제점
Fig. 2. Problem of Clock Synchronization

기존 클럭 동기화 기법들은 노드 간 시간 정보 교환 기법을 사용하기 때문에 패킷 손실이 발생할 경우 클럭 동기화의 표류 발생이 불가피 하다. 특히 무선 네트워크는 매우 높은 패킷 손실 확률을 가지

고 있으며, 이러한 패킷 손실이 발생하는 동기화 기법을 무선 제어 네트워크 환경에 사용할 경우 플랜트의 오류와 시스템 붕괴의 원인으로 작용한다. 이에 본 논문에서는 무선 네트워크 제어 시스템의 환경을 고려한 패킷 손실 보정 기반의 클럭 동기화 기법을 제안한다.

3.2. 제안하는 클럭 동기화 기법

본 논문에서 제안하는 무선 네트워크 제어 시스템의 클럭 동기화 기법을 위해 클럭 정보는 제어기와 플랜트 사이에서 전송되는 각 정보에 첨부되어 전송된다고 가정하며, 시간 정보에는 전송자의 지역 클럭 정보를 포함한다.

이를 기반으로 제어기는 서로 다른 플랜트에서 교환한 클럭 정보와 자신의 시간 정보를 토대로 상대적 표류값을 산출한다. 또한 제어기와 플랜트의 메시지 교환과 표류율에 근거하여 제어기는 상대적 오프셋을 계산한다. 이후 제어기는 표류값과 오프셋을 이용해 각 플랜트의 시간 표류 정보를 산출할 수 있다. 이를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다.

먼저 신호가 전송될 때 패킷 손실이 발생했을 경우, 제어기는 클럭 표류와 교차 상관 기법을 이용하여 손실된 클럭 값을 추측하여 낼 수 있다. 이러한 기법은 각 클럭은 온도 변화에 따라 자신만의 표류율을 변화시키는 패턴이 있기 때문이다.

3.2.1. 클럭 표류율 계산

그림 3은 제어기와 플랜트 사이에서 클럭 동기화를 위한 신호 교환 과정을 도시한 것으로, T_1, T_4, T_5, T_8 은 제어기 측면에서 제어 명령 송신과 교환 정보의 수신 클럭을 의미하며, T_2, T_3, T_6, T_7 은 플랜트측면에서 제어 명령의 수신 및 교환 정보의 송신 클럭을 의미한다.

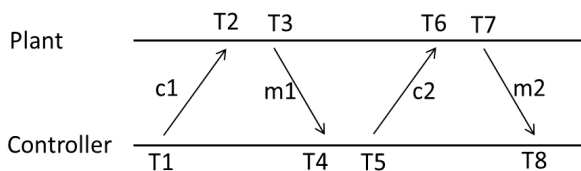


그림 3. 제어기와 플랜트의 메시지 교환
Fig. 3. Message Exchange Between Controller and Plant

이러한 메시지 교환 환경을 기반으로 제어기는 플랜트가 전송한 메시지 m_1, m_2 에 근거하여 클럭

표류 값 a_{21} 을 계산한다. 제어기와 플랜트의 거리가 고정되었다고 가정하였을 때, 메시지 m_1, m_2 의 전송시간은 동일하다. 그러므로 제어기와 플랜트 사이의 상대적인 클럭 표류 값은 수식 6과 같이 계산할 수 있다.

$$a_{21} = \frac{T7 - T3}{T8 - T4} \quad (6)$$

3.2.2. 상대적 오프셋 값과 전파 시간의 계산

기존 클럭 동기화 기법에서는 여러 노드 사이의 상대적 클럭 표류와 오프셋 값을 상수로 가정 하였다. 이러한 가정 하에 상대적 오프셋(Relative Offset)과 전파 지연(Propagation Delay)은 각각 수식 7, 8과 같이 계산할 수 있다. 이때 b_{21} 은 c_1 과 c_2 의 상대적 오프셋 값을 나타내고, d 는 메시지의 전파시간을 나타낸다.

$$b_{21} = \frac{(T2 - T1) - (T4 - T3)}{2} \quad (7)$$

$$d = \frac{(T2 - T1) + (T4 - T3)}{2} \quad (8)$$

그림 3에서 메시지가 전송할 때 제어기의 시간을 $T_1 = C_1(t_1)$ 라고 하고, 제어기가 메시지를 전송할 때 플랜트에서의 시간을 $a_{21} \times C_1(t_1) + b_{21}(t_1)$ 라고 한다. 메시지의 전파 시간을 d 라고 가정하면, 플랜트는 시간 $T_2 = a_{21}(t_1) \times (C_1(t_1) + d) + b_{21}(t_1)$ 에 메시지를 수신할 수 있다. 또한 플랜트가 제어기에게 응답하는 시간을 $T_3 = C_3(t_3)$ 이라고 하고, 플랜트가 메시지를 송신할 때 제어기에서의 시간을 $a_{12}(t_3) \times C_3(t_3) + b_{12}(t_3)$ 이라고 하면 제어기는 시간 $T_4 = a_{12}(t_3) \times (C_3(t_3) + d) + b_{12}(t_3)$ 메시지를 수신한다.

이때 제어기와 플랜트 사이에는 한 주기 동안의 클럭 표류와 상대적인 오프셋은 변하지 않고, 수식 $a_{12}(t_1) = a_{12}(t_3) = a_{12}, b_{12}(t_1) = b_{12}(t_3) = b_{12}$ 을 만족한다면, 수식 9의 관계가 성립된다.

$$\begin{cases} T_2 - T_1 a_{21} = b_{21} + da_{21} \\ T_4 - T_3 a_{12} = -b_{21} + da_{12} \end{cases} \quad (9)$$

따라서 메시지 전파시간 d 와 제어기와 플랜트 사이의 상대적 오프셋 b_{21} 을 수식 9과 같은 이차방정식을 이용하여 계산하면 수식 10과 수식 11과 같다.

$$d = \frac{T_2 - T_1 a_{21} + T_4 - T_3 a_{12}}{a_{21} + a_{12}} \quad (10)$$

$$b_{21} = T_2 - T_1 a_{21} - da_{12} \quad (11)$$

수식 10와 수식 11에서 나타내듯이 제어기와 플랜트는 서로의 클럭 표류값과 오프셋을 계산할 수 있다.

3.2.3. 패킷 손실로 인한 클럭 표류의 손실 값 계산

패킷 손실 하에서 실종된 값을 계산하기 위하여 많은 기법들이 가중치 이동 평균(Weighted Moving Average ; WMA) 기법을 사용한다. 하지만 일반적인 수정 발진기에서 온도의 값과 클럭 표류의 값의 관계는 선형값 아니며, 각 발진기의 특성이 매우 상이하다. 따라서 가중치 이동 평균을 통해 손실된 클럭 정보를 예측할 경우 정확성의 문제가 발생한다. 이에 본 논문에서는 클럭의 표류값이 가지는 특성을 고려하여 교차 상관(Cross-Correlation ; CC)를 기반으로 패킷 손실로 인해 손실된 클럭 정보를 예측하는 클럭 동기화 기법을 제안한다.

그림 4는 본 논문에서 제안한 손실된 클럭 표류 값을 계산하는 과정의 개념을 도시하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 패킷 손실이 발생하면, 기존의 클럭 표류의 패턴을 추출하여 현재의 패턴과 인접한 값을 계산하여 실종된 값을 복구한다. 이를 보다 자세히 설명하면 다음과 같다.

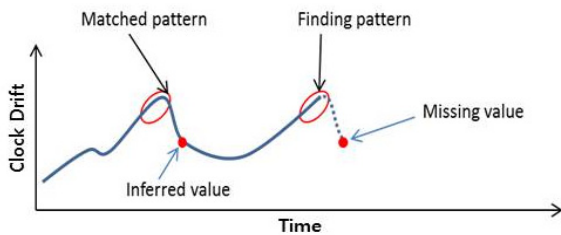


그림 4. 교차 상관 기법을 이용한 클럭 표류 손실 값 추출
Fig. 4. Using Cross-correlation to Find Missing Value of Clock Drift

그림 4에서 클럭 표류의 첫 번째 지수(Index)를 1이라고 가정하고, n 을 마지막 지수 즉, 실종된 값의 지수라고 가정한다. 또한 $f[i]$ 를 i 번째 클럭 표류 값이라고 설정한다.

이때 그림에서 보듯이 패킷 손실이 발생했을 때 패킷 손실이 발생한 시점과 가까운 k 개의 값을 추출한 패턴(Finding Patten)으로 설정하면, 추출한 패턴은 $g[i] = f[n - k + i]$ 과 같이 표시할 수 있다.

또한 손실된 패킷과 패턴의 교차 상관 기법은 수식 12와 같이 표시된다.

$$(g \otimes f)[i] = \sum_{j=1}^k g[j]f[i+j] \quad (12)$$

수식 12에서 함수 $(g \otimes f)[i]$ 는 검색된 표류의 값과 기존의 패턴을 교차 상관 기법으로 계산하는 과정을 표시하는데, 이는 패킷 손실이 발생했을 때의 추출된 패턴 $g[j]$ 와 기존의 패턴 $f[i+j]$ 로 구성되었다. 즉 $g[i]$ 와 기존의 k 개의 패턴 $f[i+j]$ 의 교차 상관을 계산하고, $(g \otimes f)[i]$ 의 최대치를 추출하여 손실된 패킷의 값으로 설정한다.

IV. 모의실험 및 성능 분석

앞서 설명한 제안 클럭 동기화 기법의 성능 평가를 위해 본 논문에서는 그림 5와 같이 30분의 실험 시간 동안 섭씨 35도에서 70도 사이의 온도 변화를 가정하였다.

그림 6은 제어기와 클럭의 수정 발진기에 대한 체계적 표류값을 온도 변화에 따라 측정된 결과이다. 이때 Clock 1은 제어기의 클럭을 나타내고, Clock 2, Clock 3, Clock 4, Clock 5는 각각 Plant 2, Plant 3, Plant 4, Plant 5의 클럭을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 제어기와 플랜트들의 표류값은 온도의 변화에 따라 서로 다르게 나타나는데, 이는 그림 1에서의 클럭 변화를 그림 5와 같은 온도 하에서 측정된 결과이다.

그림 7은 제어기와 플랜트들의 오프셋 값을 계산한 결과이다. 제어기와 플랜트들의 오프셋 값은 수식 4에서 현재 시각 t 를 감산한 값인데, 그림에서

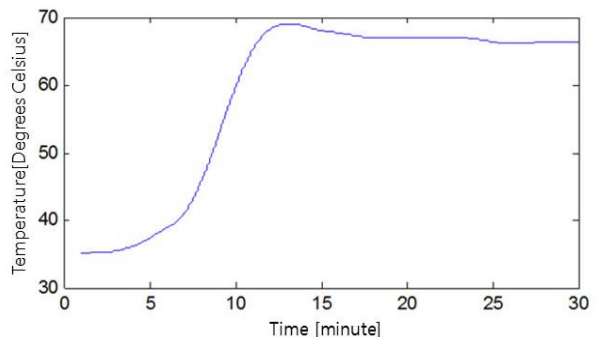


그림 5. 30분 동안의 온도 변화
Fig. 5. Changing of Temperature During 30 Minutes

볼 수 있듯이 시간이 흐름에 따라 각 클럭의 오프

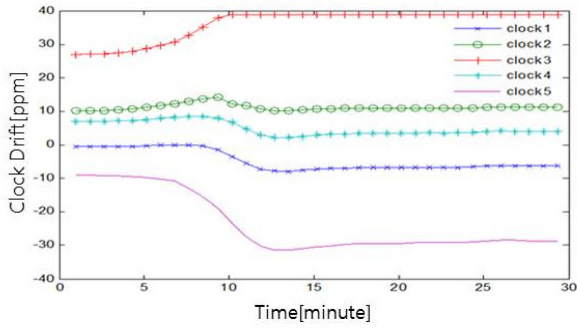


그림 6. 클럭의 체계적 표류
Fig. 6. Systematic drift of clock

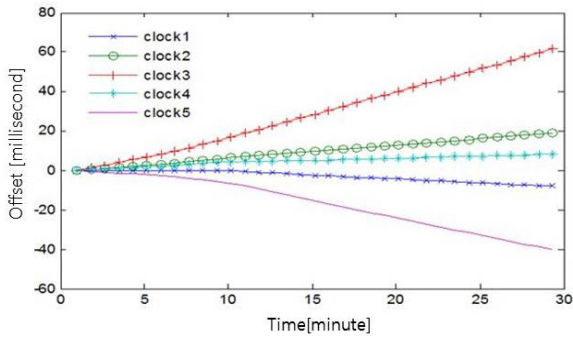


그림 7 클럭의 오프셋
Fig. 7. Offset of Clocks

셋값은 실제 클럭 값에 비하여 간격이 벌어지는 것을 확인할 수 있다.

그림 8과 9는 각각 플랜트들이 제어기에 대한 상대적인 표류값과 오프셋을 산출한 것이다. 이때 그림 8은 그림 6에서의 제어기(클럭 1) 표류값에 플랜트(클럭 2, 클럭 3, 클럭 4, 클럭 5)의 표류 값을 감산한 결과이고, 그림 9는 그림 7에서의 제어기 오프셋 값에서 플랜트의 오프셋 값을 감산한 결과이다.

또한 본 논문에서는 제안한 알고리즘의 성능을 측정하기 위하여 제어기와 클럭 사이의 전파 지연 (Average Delay)과 지연의 표준 편차(Standard Deviation)를 표 1과 같이 설정하고, 클럭들의 상대 표류값과 오프셋값을 측정하였다. 그림 10에서는 패킷 손실이 없는 경우(a)와 패킷 손실을 고려한 경우 (b)에 제어기와 플랜트(클럭 2)사이의 상대적 표류 값을 추정하였다. 그림 (a)에서 볼 수 있듯이 패킷 손실이 없는 경우, 제안한 기법으로 계산한 상대적 표류는 실제 표류의 값에 비해 1.9915ppm의 오차율을 지니고, 0.1%의 패킷 손실률을 고려한 (b)에서도 실제 클럭 표류 값보다 2.0922ppm의 오차율을 측정할 수 있었다. 따라서 패킷 손실이 있는 환

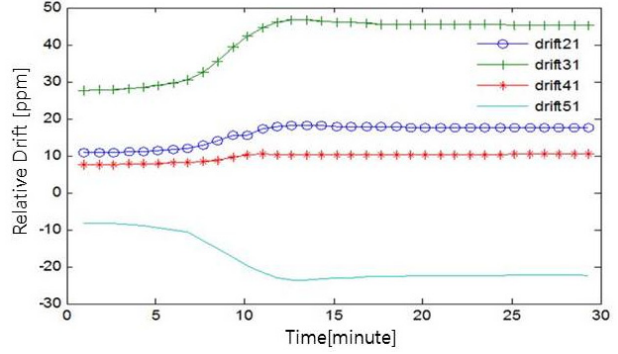


그림 8. 제어기와 플랜트들의 상대적인 표류
Fig. 8. Relative Clock Drift Between Controller and Plants

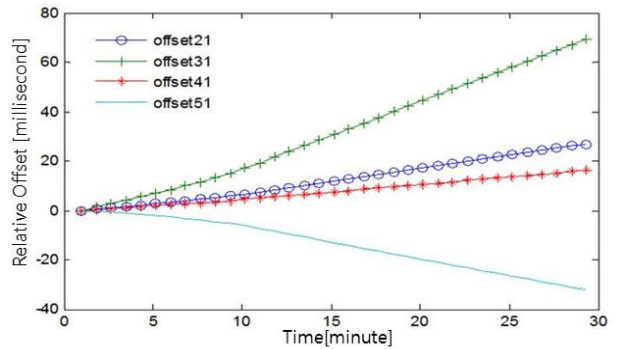


그림 9. 제어기와 플랜트의 상대적 오프셋 값
Fig. 9. Relative Offset Between Controller and Plants

경에서 제안 기법을 사용할 경우 패킷 손실이 없는

표 1. 제어기와 플랜트의 평균 지연 및 표준 편차
Table 1. Average and Standard Deviation of Transmission Delay from Controller and plants

	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5
Average Delay (μs)	38.3	38.4	28.1	38.2
Standard Deviation	0.05	0.1	0.06	0.04

환경과 매우 유사한 클럭 오차 제공이 가능함을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 본 논문에서는 제안한 기법과 실제 오프셋을 비교 분석하기 위하여 클럭의 오프셋을 패킷손실이 있는 환경과 없는 환경을 바탕으로 측정하였다. 그림 11은 패킷 손실이 없는 환경(a)과 패킷 손실이 있는 환경(b)에서의 클럭의 오프셋을 비교한 결과이다. (a)에서 제안한 기법으로 계산한 오프셋은 실제 클럭의 오프셋에 비해 3.1205msec의 평균 오차율을 보였으며, (b)에서는 3.2116msec의 평균 오차율이 있는 것을 확인할 있다.

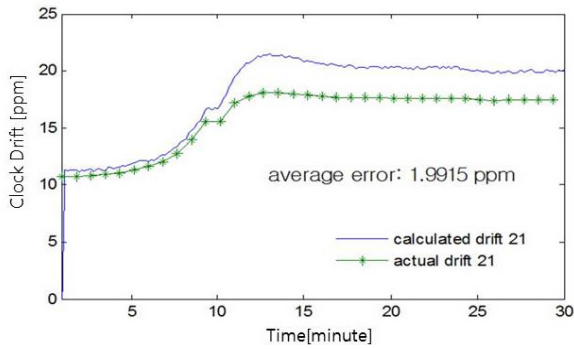


그림 10.a. 패킷 손실이 없는 환경에서 제어기와 플랜트의 상대적 표류 추정
 Fig. 10.a. Estimated relative drift between controller and plant in case no packet loss

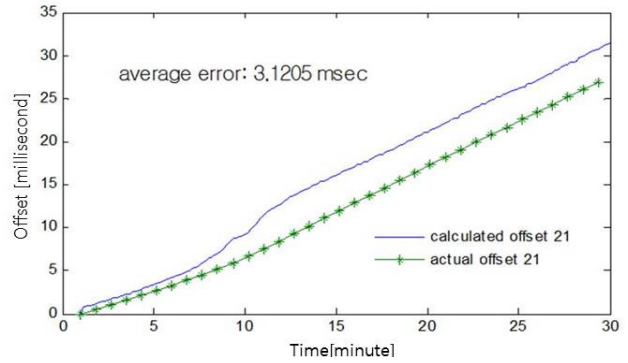


그림 11.a. 패킷 손실이 없는 환경에서 제어기와 플랜트의 오프셋 추정
 Fig. 11.a. Estimated relative offset between controller and plant without packet loss

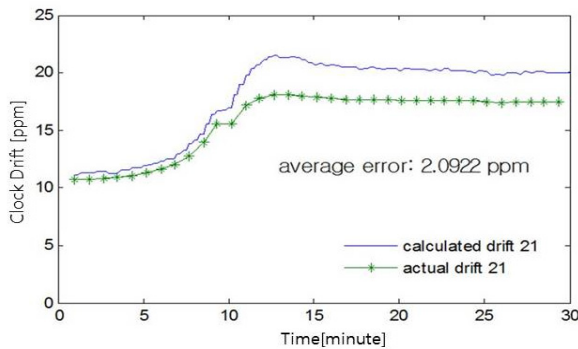


그림 10.b. 패킷 손실 환경에서 제어기와 플랜트의 상대적 표류 추정
 Fig. 10.b. Estimated relative drift between controller and plant in case packet loss

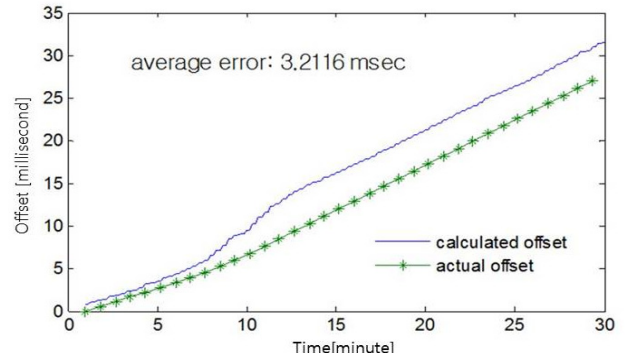


그림 11.b. 패킷 손실 환경에서 제어기와 플랜트의 오프셋 추정
 Fig. 11.b. Estimated relative offset between controller and plants with packet loss

이와 같이 제안한 알고리즘으로 표류값과 오프셋 값을 계산하면 패킷 손실이 있는 환경과 패킷 손실이 없는 환경에서의 평균 오차율은 큰 차이를 나타내지 않는다. 따라서 패킷 손실이 있는 환경에서 제안 알고리즘을 사용할 경우, 패킷 손실이 없는 환경과 비슷한 성능으로 무선 환경에서의 데이터 손실을 보완할 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

무선 제어 네트워크 환경은 산업용 통신 환경에서 그 활용도가 점차 증가하고 있으며, 보다 신뢰적인 데이터 통신을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그중 클럭 동기화 기법은 신뢰적인 무선 제어 네트워크 운용에 가장 핵심이 되는 기술로 인식되고 있다. 이에 본 논문에서는 빈번한 패킷 손실이 발생하는 무선 제어 네트워크 환경에서 클럭 정보

손실로 인한 동기화 표류값 증가의 문제점을 해결하기 위해 교차 상관 기반의 추정 알고리즘을 제안하였으며, 실제 환경에서의 클럭 표류와 오프셋으로 제안한 알고리즘의 성능을 비교분석하였다.

본 논문에서 제안하는 클럭 동기화 기법은 향후 산업용 환경에서 무선 제어 네트워크의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] L. Lamport, "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system," *Commun. ACM*, vol. 21, no.1, pp. 558-565, July 1978.
- [2] H.-G. Lim, Y. J. Nam, J. W. Baek, S. Y. Ko, and D.-W. Seo "A Byzantine fault-tolerant clock synchronization scheme in wireless sensor networks," *J. KISS*, vol. 14, no. 5, pp. 487-491, July 2008.
- [3] E. Daeipour, "Clock compensation in a data/fax relay system," in *Proc. IEEE Int.*

- Conf. Acoustics Speech Signal Process.*, vol. 4, no. 7, pp. 2199-2202, Phoenix, U.S.A., Mar. 1999.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor network: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [5] F. Sivrikaya, and B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: a survey," *IEEE Network*, vol. 18, no. 4, pp. 45-50, July-Aug. 2004.
- [6] J. Elson and K. Romer, "Wireless sensor networks: a new regime for time synchronization," *ACM SIGGOMM Comput. Commun. Review*, vol. 33, no. 1, pp. 149-154, Jan. 2003.
- [7] A. R. Swain and R. C. Hansdah, "A weighted average based external clock synchronization protocol for wireless sensor networks," *Int. J. Sensor Networks*, vol. 12, no. 2, pp. 89-105, Oct. 2012.
- [8] J. E. Elson and D. Estrin, "Time synchronization for wireless sensor networks," in *Proc. 2011 Int. Parallel Distributed Process. Symp. (IPDPS)*, vol. 28, no. 1, pp. 124-138, Alaska, U.S.A., Jan. 2011.
- [9] M. L. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf.*, vol. 2, pp. 1266-1273, New Orleans, U.S.A., Mar. 2003.
- [10] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," in *Proc. 5th Symp. Operating Syst. Design Implementation*, pp. 147-163, New York, U.S.A., Dec. 2002.
- [11] D. Doley, J. Y. Halpern, B. Simons, and R. Strong, "Dynamic fault-tolerant clock synchronization," *J. ACM (JACM)*, vol. 42, no. 1, pp. 143-185, Jan. 1995.

트 령 홉 도 (Trong-Hop Do)



2009년 University of Science Ho Chi Minh City 공학 학사
 2009년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석박통합과정
 <관심분야> Optical Access Network, Wireless MAC Protocol, Visible Light Communication, Social Network Services

전 문 길 (Wenji Quan)



2010년 7월 연변대학교 컴퓨터공학부 학사
 2012년 9월~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> Social Network Service, Security

유 명 식 (Myungsik Yoo)



1989년 2월 고려대학교 전자공학과 학사
 1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
 2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사
 2000년 09월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수

<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, QoS, Wireless MAC Protocol, MANET, RFID, USN, CR, Visible Light Communication, Social Network Services, Wired/Wireless Networked Control System