

# 네트워크 제어시스템의 연구 동향 및 무선 NCS 구현 사례

최근 십여년 간 통신 네트워크를 제어시스템에 도입한 네트워크 제어시스템(Networked Control Systems : NCS)에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 이러한 NCS에 대한 최근의 연구동향을 살펴본다. NCS의 정의와 분류, NCS에서 발생하는 지연, 패킷손실, 양자화 오차, 이들을 해결하기 위한 제어기법, 스케줄링 등 여러 NCS와 관련한 제반 사항들의 동향을 살펴본다. 또, 현재 사용되고 있는 무선 네트워크의 종류, 실제로 무선네트워크 제어시스템(Wireless NCS : WNCS)을 구현한 예를 보인다.

■ Ulugbek Umirov, 박정일\*  
(\*영남대학교 전자공학과)

## I. 서론

제어공학자들은 십여 년 이상 어려운 환경 속에 있는 시스템(원자로 파워 플랜트, 우주 프로젝트, 요양원, 군사응용 등)을 원격으로 제어하기 위해서 통신네트워크를 제어시스템에 도입하려고 시도해 왔다. 이러한 목적으로 만들어진 것이 네트워크 제어시스템(Networked Control Systems : NCS)으로, 그림 1처럼 제어루프가 통신네트워크로 이루어져 있다. 제어네트워크의 특징은 통신네트워크와는 달리 비교적 큰 노드 사이에 작은 패킷을 자주 주고 받는다[1]. 제어공학자들은 NCS의 안정도와 성능

에 주안점을 두고 연구를 해왔다. 여기에서는 이러한 NCS에 사용되어온 관련 기술 즉, 네트워크 기술, 네트워크 지연, 패킷손실을 고려한 NCS의 설계 기법, 네트워크의 자원을 배분하는 스케줄링 기법, 멀티에이전트 시스템 등의 동향에 대해 살펴 보고자 한다. 또, 현재 사용되고 있는 무선 네트워크의 종류, 무선네트워크 제어시스템(Wireless NCS : WNCS)의 동향을 고찰하며 실제로 구현한 예를 보인다.

I 절 서론에서는 NCS의 정의와 본 고에서의 기술방향을, II 절에서는 NCS의 연구분야 및 그 동안의 연구동향을, III 절에서는 요즘 관심 이 대두되고 있는 WNCS의 동향과 Bluetooth를 사

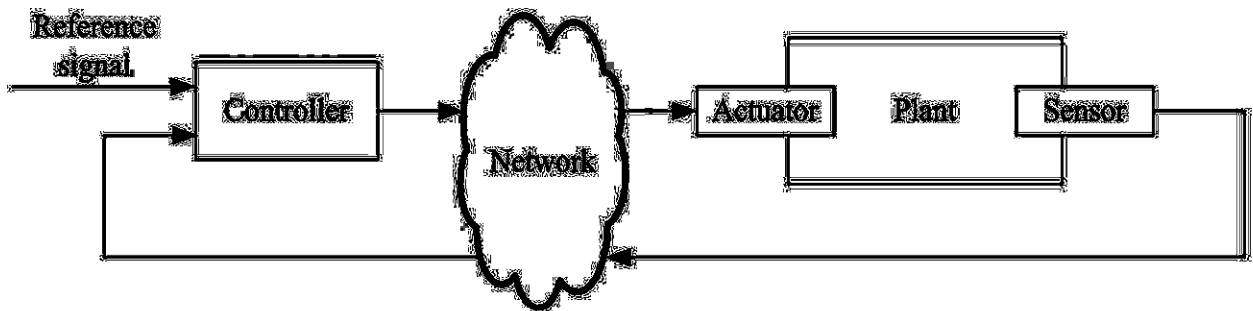


그림 1. NCS의 구조.

용한 구현 예를 보이고 IV절에서 결론을 맺는다.

## II. NCS 연구분야 및 추세

NCS의 연구분야는 네트워크 제어, 네트워크를 통한 제어, 멀티 에이전트 시스템으로 분류한다[2,3]. 먼저 NCS에서 가장 중요한 부분을 차지하는 통신 네트워크 기술의 발전사를 살펴보기로 한다. 1969년 미 국방성이 ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network)을 개발했다. 이것이 세계 최초의 패킷 스위칭 네트워크로 인터넷의 전신이다. 1988년에는 실시간 분산제어를 위한 산업 네트워크 시스템으로 Fieldbus가 개발되었다. 이것이 오늘날의 산업현장에 쓰이는 디지털통신 네트워크가 되었으며, 자동화 생산 공정에서 멀리 떨어져 있는 디바이스들을 연결하기 위한 디지털, 양방향, 다분기 직렬버스이다. 1989년 BMBF (German department of education and research)에서 자동화 기술 필드버스 통신의 표준인 Profibus (Process Field Bus)를 개발하였다. CAN (Control Area Network)은 1980년대 자동차내의 통신을 위해서 Robert Bosch GmbH에 의해서 도입되었다. 이는 필드버스의 다른 한 형태로, 1Mbit/s 이상의 데이터 전송과 높은 레벨의 데이터 통합이 필요한 곳에 적용하기 위해서 설계한 직렬, 비동기, 다중 마스터 통신 프로토콜이다. 또, LAN을 위한 컴퓨터 네트워크인 Ethernet이 개발되어 이의 물리계층 프로토콜로 NCS를 구현하였다. 현대에 와서는 WNCS가 개발되어, 교통도로 시스템의 안전한 주행과, 유연하고 빠른 설치의 장점 때문에 공장 등에 경제적으로 도입하고 있다[3]. 센싱 하드웨어와 저전력의 통신소자 덕분에 상업적으로 무선센서 노드를 사용할 수 있게 되었으며, 무선센서 노드에 관한 연구는 그 자체만으로도 광대한 분야이다.

### 1. 네트워크 제어

네트워크 제어는 네트워크 자체의 자원을 효율적으로 사용하고, 데이터 흐름의 성능을 일정 수준 이상으로 유지하기 위해서 통신공학자들이 주로 다룬다. Call admission, 스케줄링 (Scheduling), 라우팅(Routing), 흐름제어, 전력제어, 각종 자원 배분 문제가 주요 연구분야이다. 궁극적인 목표는 네트워크 자원을 효율적이고 공정하게 활용하여 높은 서비스의 품질(Quality of Service : QoS)을 제공하는 것이다. 인터넷 프로토콜(IP)의 Transport 계층의 데이터 전송을 제어하는 피드백 메커니즘 덕분에 전세계를 연결하는 인터넷이 가능하게 되었다. 그러나 인터넷의 거대한 복잡성 때문에 수학 이론으로 이를 모델링과 분

석해서 개선할 수 있을지 의문시 되어 왔다. Mascolo는 네트워크의 Congestion 제어를 수행하였다[4]. 최근에는 자원 제어의 관점에서 무선 네트워크의 관심이 대두되고 있다. 유선 네트워크가 Cross-layer 링크의 용량이 한정적인 반면에, 무선 링크의 용량은 송신 파워, 대역폭, Time-slot fraction과 같은 통신 자원을 배분하여, 링크 용량을 바꿀 수 있고, 최적의 데이터 흐름의 라우팅을 설계할 수 있어서, 네트워크의 전체 유용성을 증가시킬 수 있다. 이를 Cross-layer 최적화라고 하며, 네트워크의 Congestion 제어와 자원 할당이 중요하게 되었다.

### 2. 네트워크를 통한 제어

NCS는 협의적으로 이 분야를 말하며 주로 제어공학자들이 다룬다. 신뢰할 수 없는 통신링크를 통해 제어 데이터가 교환되는 제어시스템의 피드백 전략을 설계하는 것이다. 즉, 네트워크 지연과 같은 NCS성능에 불리한 파라미터들의 영향을 최소화 하는 제어전략과 제어시스템을 설계하는 것을 말한다.

NCS의 제어모델에 대해서 많은 연구들이 진행되어 왔다. 예를 들면, 안정도를 확보할 수 있는 가장 긴 샘플링 시간을 얻는 것이 주목적인 Sampled data model을 사용하기도 했으며[5], Model-based NCS를 사용하기도 했다[6]. 또 Perturbation 모델 이론을 사용하여 안정도를 해석하기도 했다[7]. 플랜트는 연속적 동특성 시스템이고, 네트워크를 사용하는 제어루프는 이산 동특성을 가지므로 이를 하이브리드 시스템 모델로 보고 해석을 하기도 하였다[8].

NCS에서 제어장치는 유무선 네트워크 통해 원격으로 떨어진 센서, 액추에이터와 서로 통신한다. 이로 인해서 시간지연, 데이터 정체, 데이터 충돌이나 간섭으로 인한 패킷 손실이 일어난다. 이러한 지연, 패킷 손실, 데이터 양자화를 고려한 많은 연구들이 진행되어 오고 있다. 에너지 소비를 절약하기 위해서는 이벤트가 발생할 때까지는 액추에이터와 센서가 동작하지 않는 이벤트 기반의 제어 전략을 채택하는 것이 바람직하다. 또 무선 통신 네트워크를 사용할 때는 보안 문제에 관심을 가져야 한다.

#### (1) 지연(delay)

지연에 의한 악영향을 최소화하기 위해서는 네트워크의 지연을 먼저 정확히 모델링하고 지연시간을 보상하는 방법도 도입한다. 일정한 지연, Independent random 지연, Markov chain으로 나타내어지는 확률분포를 갖는 지연으로 모델링 된다[9,11]. Random, 패킷손실과 같은 unbounded 지연을 다룬 연구들이 있

다[8,9]. 이 경우 NCS는 연속 플랜트, 샘플러(Sampler), Zero-order 홀더, 이산 제어기와 지연 네트워크로 이루어진다. 지연에 대처하기 위해서는, 한 주기 샘플링 시간 동안에 두 개 이상의 정보가 샘플링 되는 경우와, 한 샘플링 시간 동안에 정보가 도달하지 않아서 이전 샘플 된 값을 그대로 사용하는 두 가지 경우를 고려한다. 이런 관점에서, 지연시간이 샘플링 주기의 정수배인 경우, 지연시간이 샘플링 주기보다 짧은 경우, 두 가지 경우가 혼합된 경우로 해석을 한다[8].

지연에 대처하기 위한 또 다른 하나의 구조는 네트워크에 Queue를 갖는 NCS구조로 해석하는 것이다 [9,10]. Queuing/buffering을 사용하여 NCS를 시불변 시스템으로 바꾼다. Queuing의 이점은 기존의 예측제어기를 다시 설계하거나, 클럭을 동기화할 필요성이 없으며, 패킷 손실의 영향이 경미하다는 것이다. 또, 지연을 시스템의 multiplicative 외란으로서 고려하는 Robust 제어 방식과 시스템의 성능을 유지하면서 외란의 효과를 줄이는 건설제어를 사용하기도 하였다[12]. 이 방식은 사전에 네트워크 지연의 확률적 분포에 관한 정보가 필요치 않다.

지연을 모델링한 다음 이를 보상하기 위한 여러 제어 기법들이 사용되었다. 예로서, 예측기 기반의 제어기를 설계하기도 하고, LQG의 이득 행렬을 네트워크 지연 통계를 기초로 해서 최적으로 선택하는 최적 Stochastic 방식이 있다[9]. 하지만 아직도 지연에 대한 NCS를 건설하게 만들기 위해서는 많은 노력이 필요하며, 가능하면 일반적인 경우에 대해서 적용가능하도록 일반화해야 한다. 예를 들면, Penalizing 버퍼 전략을 피하는 법, 모델 없이 지연을 예측하는 방법, 적응 전략을 통하여 제어를 개선하기 위한 지연 식별 알고리즘을 사용, 제어/프로토콜 협조 설계를 하는 것이 그 예들이다[2].

(2) 패킷 손실(Packet loss)

패킷 손실은 Packet dropout, Data loss, Data dropout 등의 여러 다른 용어들로 혼용되어 사용되고 있으며, 이는 네트워크에서 전송시간 초과, 전송 에러, 제한된 버퍼 사이즈 등에 의해서 일어난다.

NCS의 안정도와 성능상에서 패킷 손실의 효과를 다룬 연구들은 크게 3가지 범주로 나눌 수 있는데[13], 데이터 손실이 있는 경우와 없는 경우 두 개의 플랜트 모델을 스위칭하는 방식인 Discrete time switched system[8,14], 비동기적으로 발생하는 이벤트에 의해서 구동되는 동적 시스템을 다루는 Asynchronous dynamical systems : ADSs[8], 데이터 손실을 확률

적으로 모델링 하는 Jump linear systems with Markov chains[9]으로 나눌 수 있다.

통신 네트워크 측면에서 보면, 제어기에서 패킷 손실 인식이 가능한 TCP (Transmission Control Protocol) 통신 프로토콜을 사용한 경우에는 분리해서 설계가 가능한 반면, UDP (User Datagram Protocol) 통신 프로토콜에 대해서는 분리해서 설계가 불가능하다[15].

(3) 양자화와 코딩(Quantization과 coding)

네트워크를 제어시스템에 도입함으로써, 채널/네트워크 용량, 엔코딩/디코딩, 양자화에 관심을 갖게 되었다. 양자화와 코딩은 잡음이 존재하는 디지털 채널을 통해서 데이터가 전송될 때 고려되어야 할 사항이다. 무선 통신 네트워크를 사용할 때는 잡음을 무시할 수 없기 때문에 더욱 고려해야 할 사항이다. 제어시스템의 안정도를 보장하기 위해서는 합당한 양의 정보를 전달해야 하기 때문에 채널/네트워크의 용량이 중요하고[16], 측정된 시스템 출력은 패킷 형태로 전송되기 때문에 샘플링, 양자화[17]와 엔코딩/디코딩[18]이 필요하게 되었다.

(4) 스케줄링

지금까지의 많은 연구들은 단일 센서-제어기-액추에이터의 NCS를 다루었다 여러 개의 센서-제어기-액추에이터의 NCS를 다루는 경우에는 해결해야 할 많은 문제점들이 있다. 당연히 제어기들이 분산되어 있어서 국소 정보들을 받아서 공통의 목표를 달성하기 위한 협조가 필요하다. 스케줄링은 여러 개의 분산 NCS를 제어할 경우에 대역폭을 최적으로 사용하여 NCS의 제어 순서를 정하는 문제이다. 유한한 대역폭내에서 여러 개의 NCS를 제어 하기 위해서는 대역폭이 효과적으로 최적으로 사용되어야 한다. 이를 위해 Max-min fair (MMF) 원리가 널리 사용된다. 또 NCS의 안정도를 위해서 최대 허용할 수 있는 지연한계(Maximum allowable delay bound: MADB)를 찾는 것이 필요하다. Kim 등은 LMI를 이용하여 안정도를 보장하는 MADB를 얻는 방식을 제안하였다[19]. Branicky 등은 대역폭, 영자화, 생존성(Survivability), 신뢰성과 같은 네트워크 이슈를 연구했다[14]. 그들은 RMS (Rate monotonic) 알고리즘을 적용하여 NCS들을 스케줄링 했다. 이러한 패킷 스케줄링 알고리즘으로 네트워크의 QoS를 최적화하여 네트워크의 영향을 줄인다[20]. 특히 무선 네트워크에서는 메시지 스케줄링에 대한 동적 우선순위에 대한 계획이 필요하다. 물론 우선순위는 제어성능에 기반을 뒤야 한다.

### 3. 멀티 에이전트(Multi-agent) 시스템

이 분야는 네트워크 구조와 네트워크 컴포넌트 사이의 상호 작용이 전체 제어 목표에 어떻게 영향을 끼치는지를 연구하는 분야이며, 각 에이전트의 지역적 법칙이 네트워크의 전체 특성에 어떻게 영향을 끼치는지를 연구하는 것이다. 크게 두 분야로 나눌 수 있는데, 첫째는 센서 네트워크 기술의 뼈대에 적용 가능한 분산추정기술을 설계하는 분야이며, 둘째는 자율 주행 로봇들의 제어를 다루는 분야이다. 센서 네트워크는 넓은 영역의 감시를 위해서 사용할 수 있는 수많은 움직이는 목표물의 위치를 찾아내어 추적하고 포착하는 네트워크이다[21]. 센서 네트워크 자체만으로도 연구해야 할 것이 많은 광대한 분야이다.

아직도 정해진 전체의 행위를 얻기 위한 국소 제어법칙을 어떻게 설계하는지가 명확하지 않다. 예를 들면, 어떤 네트워크 토폴로지가 실패와 유연성, 신뢰성, 적응성 면에서 가장 좋은 성능을 내는지 명확하지가 않다. 수학적인 도구도 아직 미흡하다. 센서 네트워크의 분산 추정에 대한 시스템 이론적 접근을 가능케 하는 솔루션이 필요하다.

### III. 무선 NCS(Wireless NCS : WNCS)

지금까지의 NCS가 유선 네트워크를 사용했다면, 네트워크 기술이 발달되어 지난 수년간 무선 시스템이 개발되어 이의 도움으로 요즘에 와서 NCS가 D-NCS (Distributed NCS)로 옮겨가고 있다. 분산된 센서와 분산된 액추에이터, 제어 알고리즘을 실시간으로 통신 네트워크를 통하여 통합하는 네트워크 구조를 만들어 내는데 노력하고 있다.

표 1. 무선 네트워크 특성비교.

항목	ZigBee	Bluetooth	Wireless LAN
통신거리	10 m (고정시 1~100m)	10~100m	최대 150m
Device 및 확장성	65,536개 이상	7 개	2,048개, 1개 AP에 대해서 24개 이하의 endpoint 추천
전송속도	2.4GHz : 250kbps 915MHz : 40kbps 868 MHz : 20kbps	1.0, 1.1 : 1Mbps 2.0+EDR : 3Mbps	802.11n : 300Mbps 802.11a/802.11g : 54Mbps
채널 수	2.4GHz : 11~26 915 MHz : 10 868 MHz : 1	2.4GHz : 79	-
기반규격	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11

### 1. 무선 네트워크 표준

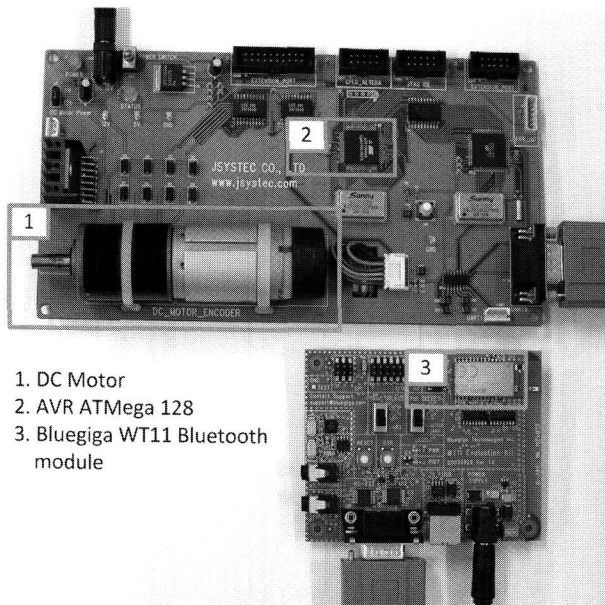
무선 네트워크 표준에는 WiFi(802.11\*), Cellular(GSM, CDMA, LTE 등), Bluetooth, ZigBee 등이 있다. 간편성, 저가, 저전력 때문에 Bluetooth와 ZigBee 표준이 널리 사용되고 있다. ZigBee는 가정용 네트워크의 무선기술로 각광을 받았던 HomeRF의 저가용으로 1998년에 시작되었다. ZigBee는 Bluetooth의 영역 중에서 저주파수 대역, 저전력에 치중한 목표를 갖고 시작되었다. 그로 인해 응용범위가 Bluetooth에 비해 좁아졌지만 오히려 이것이 복잡성과 단가를 낮추는 요인이 되어 많은 관심을 받게 되었다. Bluetooth는 Wi-Fi 보다도 전력을 적게 소모하고, Zigbee 보다는 넓은 동작 영역 및 고속 전송이 가능하며, 또 여러 포트 프로파일들이 지원되어 프로그래밍이 간편하다. ZigBee 모듈은 공급업체들 사이에 호환성이 부족한 면이 있다[22]. 또한 ZigBee는 전력을 적게 소모하지만 지연시간이 짧지 않은 문제가 있다. 이에 반해 Bluetooth 표준은 공급업체간에 완벽히 호환이 되며 또한 지연시간이 짧다는 이점이 있다. 이 때문에 WNCS에는 Bluetooth가 ZigBee보다 적용이 용이하다. 전송시간이 엄격하지 않은 저전력 ZigBee 송수신기를 센서(동작, 빛, 압력, 기온, 습도)와 결합한 대규모 센서 네트워크에서는 ZigBee 표준이 많이 사용되고 있다. 무선네트워크 표준들의 특성을 표 1에 나타내었다.

### 2. WNCS 구현사례

본 절에서는 Bluetooth의 여러 포트 프로파일을 사용하여 NCS를 구현한 예를 보이고자 한다. 현재까지 발표된 대부분의 WNCS들은 ACL (Asynchronous Connectionless) Bluetooth 링크의 상위층에서 동작하는 SPP (Serial Port Profile)을 사용해서 구현

되었다. 이는 SPP를 사용해서 구현하는 방법이 쉽기 때문이다. 그러나 SPP를 이용하면 네트워크의 패킷의 분리와 재결합 등의 문제로 지연시간(약 100ms 정도)이 길어지는 문제가 발생한다. 2005년 이러한 문제점을 해결하기 위하여 SCO (Synchronous Connection Oriented) 링크의 Voice 채널을 통해서 제어/데이터 패킷을 전송하는 아이디어를 제시하였다[23]. 2012년 저자들은 이 아이디어를 실제로 DC 모터를 제어하는 WNCS를 구현하였다 [24]. 구성된 WNCS 사진을 그림 2에 나타내었다. 이 실험에서 약 20ms의 왕복 지연시간을 달성 할 수 있었으며, 만족할 만한 제어 성능을 얻었다.

그러나 모든 Bluetooth 모듈이 SCO 링크를 제공하지 않는다는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 모든 Bluetooth 모듈에서 제공하고 있는, joystick, keyboard 등에 사용되는 Bluetooth의 HID (Human Interface Device) 프로파일을 사용하여 WNCS를 구현하였다[25]. 이 방법으로 33~41ms의 왕복 지연시간을 얻을 수 있었다. 각 Bluetooth의 포트 프로파일에 대한 왕복



1. DC Motor  
2. AVR ATmega 128  
3. Bluegiga WT11 Bluetooth module

그림 2. 원격 I/O 시스템과 Bluegiga WT11 Bluetooth 모듈.

표 2. Bluetooth를 이용한 WNCS에서의 왕복 지연시간 비교.

포트 프로파일 종류	지연시간[msec]
SPP	65~95
HID	33~41
SCO	~20

지연시간을 측정 한 값을 표 2에 나타내었다. 또 DC모터의 위치 제어를 수행한 결과를 그림3,4,5에 나타내었는데 왕복 지연시간이 짧을수록 좋은 성능을 보임을 확인 할 수 있었다.

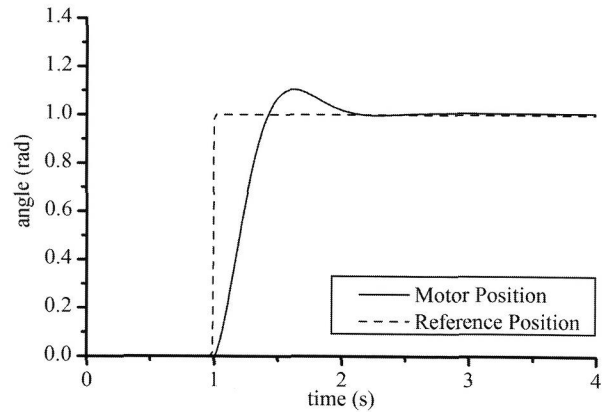


그림 3. 유선연결에서의 DC 모터의 PID제어 결과.

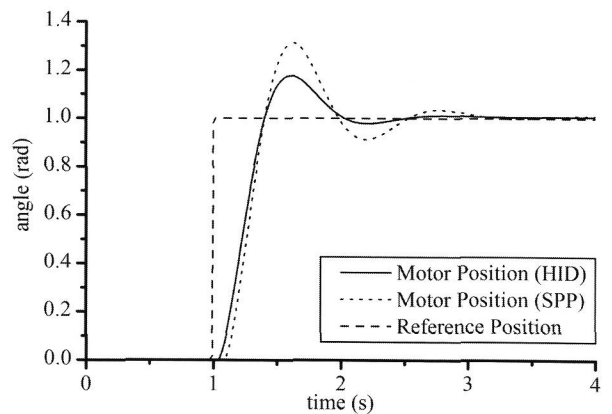


그림 4. HID와 SPP를 통한 DC모터의 PID 제어결과 비교.

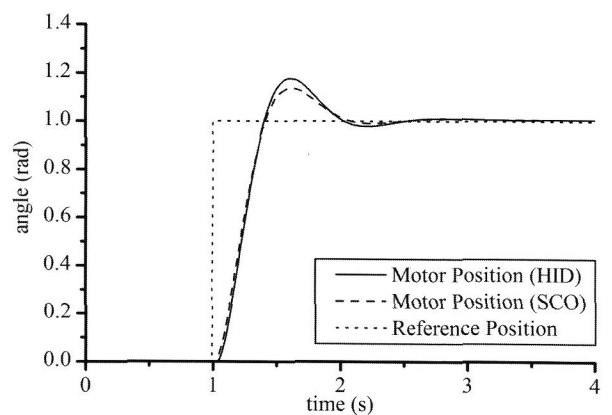


그림 5. HID와 SCO를 통한 DC모터의 PID 제어결과 비교.

#### IV. 결론 및 향후 방향

네트워크 제어시스템과 관련한 여러 제반 연구들의 동향을 살펴보았으며, 또 현재 사용되고 있는 무선 NCS의 동향을 간단히 고찰하였으며 실제로 구현한 예를 보였다. NCS는 어려운 환경 속에 있는 시스템을 원격으로 제어할 수 있고, 설치, 유지 보수가 편리한 장점은 있다. 그러나 현존하는 대부분의 제어대상들은 짧은 시정수를 가지고 빠르게 동작하고 있어서, NCS에 사용되는 네트워크로 작은 용량의 패킷이 샘플링 타임마다 실시간으로 전송되어 제어가 이루어져야만 한다. 그러나 살펴본 바와 같이 네트워크를 사용함으로써 기존의 유선을 사용한 제어에서는 없었던 여러 가지의 문제점들이 발생한다. 따라서 이러한 여러 가지의 문제점들이 완벽히 해결되어 실시간으로 안전하게 제어되는 스마트한 NCS가 구현되기까지는 많은 시간이 필요할 것으로 보인다. 그러나 센서 네트워크와 같은 실시간의 피드백 요구 조건이 엄격하지 않은 WNCS의 활용도는 향후 급속도로 증가할 것으로 보인다.

#### 참고문헌

[1] Peter F. Al-Hokayem, "Stability of networked control systems," MS. Thesis, University of New Mexico, 2003.

[2] Sandro Zampieri, "Trends in networked control systems," *Proc. of the 17<sup>th</sup> World Congress, The International Federation of Automatic Control*, pp.2886-2894, Seoul, Korea, July 2008.

[3] Rachana A. Gupta and M. Y. Chow, "Networked control system: Overview and research trends," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no.7, pp.2527-2535, July 2010.

[4] S. Mascolo, "Congestion control in high-speed communication networks using the smith principle," *Automatica*, vol.35, no.12, pp. 1921-1935, 1999.

[5] H. Ishii and B.A. Francis, "Limited data rate in control systems with networks," *Lectures Notes in Control and Information Sciences*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, vol.275, 2002.

[6] L. A. Montestruque and P. J. Antsaklis, "Model based networked control system - stability," ISIS Technical Report ISIS-2002-001, Notre Dame, IN, January 2001.

[7] H.K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

[8] W. Zhang, M.S. Branicky, and S. M. Phillips, "Stability analysis of networked control systems," *IEEE Control Systems Magazine*,

pp. 84-89, February, 2001.

[9] J. Nilsson, "Real Time control systems delays," Ph.D. dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1998.

[10] H. Chan and Ü. Özgüner, "Closed-loop control of systems over a communication network with queues," *International Journal of Control*, vol.62, no.3, pp.493-510, 1995.

[11] F. Goktas, J.M. Smith, R. Bajcsy, "Modeling and analysis of networked control systems using hidden Markov models," *Proc. of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol.2, pp.928-931, 2005.

[12] Goktas, F., Smith, J. M., and Bajcsy, R., "Mu-synthesis for distributed control systems with network-induced delays," *Proc. of the 35<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, pp.813-814, 1996.

[13] Y. Sun and S. Qin, "Stability of networked control systems with packet dropout : an average dwell time approach," *IET Control Theory and Application*, vol.5, no.1, pp.47-53, 2011.

[14] M. S. Branicky, S. M. Phillips, and W. Zhang , "Scheduling and Feedback Co-Design for Networked Control Systems," *Proc. of the 41<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, Nevada USA, December 2002.

[15] L. Schenato, B. Sinopoli, M. Franceschetti, K. Poolla, and S.S. Sastry, "Foundations of control and estimation over lossy networks," *Proc.ofIEEE*, vol.95, no.1, pp.163-187, 2007.

[16] A. Sahai, "Evaluation channels for control: Capacity reconsidered," *Proc. of the American Control Conference*, vol.4, pp. 2358-2362, 2000.

[17] N. Elia and S.K. Mitter, "Stabilization of linear systems with limited information," *IEEE Transactions on Automation Control*, vol. 46, no. 9, pp.1384-1400, Sep. 2001.

[18] S.C. Tatikonda, "Control under communication constraints," Ph.D. Thesis, Massachusetts institute of Technology, Sep. 2000.

[19] D.S. Kim, Y.S. Lee, W.H. Kwon, H.S. Park, "Maximum allowable delay bounds in networked control systems," *International Journal of Control Engineering Practice*, 2003.

[20] I. Diouri, J.-P. Georges and E. Rondeau, "Accommodation of delays for networked control systems using classification of service," *Proc. of International Conference on Networking, Sensing and Control*, London, UK, pp.410-415, 2007.

- [21] S. Oh, L. Schenato, P. Chen, and S. Sastry, "Tracking and coordination of multiple agents using sensor networks: system design, algorithms and experiments," *Proc. of the IEEE*, vol.95, no.1, pp.234-254, 2007.
- [22] P. Ling, "Mixed signals - ZigBee aims to be a standard for industrial low-power radio, but we might never see full compatibility between modules that support it," *Electronics Systems and Software*, vol.5, no.1, pp.34-37, Feb.-March 2007.
- [23] U. Bilstrup, P.-A. Wiberg, "Bluetooth in industrial environment," *Proceedings of IEEE International Workshop on Communication Systems*, pp.239-246, 2000.
- [24] U. Umirov, J.I. Park, "Bluetooth synchronous connection oriented Link usage in networked control systems," *Journal of ICROS*, vol.18, no.8, pp.731-737, 2012.
- [25] U. Umirov, and J.I. Park, "Efficient use of bluetooth in networked control systems," *Submitted to 12<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and systems*, Oct. 2012.

◎ 저 자 약 력



**Ulugbek Umirov**

- 2003년 우즈베키스탄, 타슈켄트 정보기술대학 (TUIT) 정보기술학과 졸업.
- 2006년 영남대학교 대학원 전자공학과(공학 석사.)
- 2006년~현재 영남대학교 대학원 전자공학과 박사과정.

· 관심분야 : 무선 네트워크 제어시스템, 기계학습.



**박 정 일**

- 1981년 경북대학교 전자공학과(공학사).
- 1983년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학 석사).
- 1989년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학 박사).
- 1989년~1992년 삼성종합기술원 선임연구원.

· 1992년~현재 영남대학교 전자공학과 교수.

· 관심분야 : 지능제어, 정밀모션제어, 네트워크 제어시스템.