

# IEEE 1451.0 기반 스마트 센서에서 CANopen 을 이용한 다중 접속 기능의 구현

## Implementation of Multiple Connectivity using CANopen in IEEE 1451.0-based Smart Sensor

박지훈<sup>1</sup>, 이석<sup>2</sup>, 송영훈<sup>2</sup>, 이경창<sup>3</sup>✉  
Jee Hun Park<sup>1</sup>, Suk Lee<sup>2</sup>, Young Hun Song<sup>2</sup> and Kyung Chang Lee<sup>3</sup>✉

1 부산대학교 지능기계공학과 (Department of Intelligent and Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

2 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

3 부경대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National Univ.)

✉ Corresponding author: glee@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6332

Manuscript received: 2010.5.4 / Revised: 2010.11.22 / Accepted: 2011.1.18

*As automation systems become intelligent and autonomous for productibility, industrial networks (fieldbuses) and network-based devices are essential components of intelligent manufacturing systems. However, there are obstacles for the wide acceptance of the network-based devices such as smart sensor and network-based actuator. First, there exist numerous fieldbus protocols that a network-based devcie should be able to support. Second, the whole network-based device has to be replaced when only the sensor of the module fails. In order to overcome these obstacles, a smart sensor/actuator is implemented as two units; one responsible for network communication and the other for sensor/actuator operations using IEEE 1451.0 standard. This paper presents a structure of the 1451.0-based smart sensor with multiple connectivity function designed by CANopen.*

Key Words: Industrial Network (산업용 네트워크), Smart Sensor (스마트 센서), Controller Area Network (CAN), Multiple Connectivity Fuction (다중 접속 기능), Plug-and-Play Function (PNP 기능)

### 1. 서론

컴퓨터 및 통신 기술의 발달에 따라 공장 자동화 시스템 및 생산 시스템은 지능화, 자율화되었으며, 정보들이 분산되어 관리되는 지능 생산 시스템(IMS: Intelligent Manufacturing Systems)으로 발전되었다.<sup>1,2</sup> 특히, 최근의 생산 시스템에서는 인간에 의해 수행되던 반복된 작업들이 24 시간 가동될 수 있는 컨베이어 벨트(conveyor belt)와 같은 자동화 장비나 AGV(Automatic Guided Vehicle)와 같은 무인화 장비로 대체되는 추세에 있다.<sup>3,5</sup> 이러한 자

동화, 무인화 장비들은 다수의 센서와 제어기 같은 필드 장치(Field device)를 사용하여 스스로 상황을 판단하고 동작을 결정할 수 있도록 미리 프로그램 되어 있으며, 시스템의 성능이 필드 장치의 성능과 사용량에 의해 상당 부분 좌우되고 있다.<sup>6</sup> 더욱이 생산량을 증가시키기 위해 더욱 높은 수준의 지능화가 자동화 시스템에 요구되면서, 필드 장치의 성능 향상과 함께 사용되는 필드 장치의 수도 급속히 증가되어 가고 있다.

그러나, 필드 장치의 수가 증가 될수록, 필드 장치를 일대일로 연결하는 전통적인 점대점(point-

to-point) 방식은 시스템의 성능 향상이나, 유지 보수 등에서 한계를 가지게 되었다. 이러한 점대점 방식의 문제점을 해결하기 위하여, 공유된 전송 매체를 사용하여 필드 장치의 정보를 공유하기 위한 산업용 네트워크인 필드버스가 개발되었으며, 1999 년 말 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 6 개의 프로토콜을 포함하는 IEC 61158 필드버스가 국제 표준으로 제정 되었다.<sup>7</sup> 이후 CAN(Controller Area Network)을 기반으로 하는 DeviceNet, CANopen 과 같은 프로토콜이 개발되었으며, 2000 년대 이후 인터넷의 보급과 발전으로 인해 Ethernet 을 기반으로 하는 ProfiNet, EtherNet/IP, EtherCAT 과 같은 프로토콜도 표준으로 제정되어 산업용 네트워크로 사용되고 있다.<sup>8</sup>

그러나, 위에서 언급한 것과 같이 수 많은 필드버스 프로토콜이 산업 전반에 걸쳐 확대되고 있기 때문에, 센서 제조사는 모든 종류의 필드버스를 지원하는 네트워크 센서를 개발해야 하는 문제점에 봉착하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1993 년 NIST 와 IEEE 에서 스마트 센서 기술에 대한 표준화를 추진하게 되었으며, 그 결과 1997 년 스마트 센서 국제표준안으로 IEEE 1451 을 발표하였다. IEEE 1451 표준은 미국의 NIST (National Institute of Standards and Technology)와 IEEE(Electrical and Electronics Engineers)에 의해서 1993 년부터 진행되었으며, 1997 년에 국제 표준으로 발표되었다.<sup>10</sup>

하지만 현재까지 표준화된 IEEE 1451 스마트 센서 인터페이스 표준은 대부분 하나의 NCAP 과 하나의 TIM 간의 점대점 인터페이스에 대해서만 규정하고 있다. 비록 IEEE 1451.3 표준이 하나의 NCAP 에 다수의 TBIM 을 연결할 수 있는 버스 구조의 하드웨어 인터페이스에 대해 정의하고 있지

만, 물리 계층에 HomePNA 프로토콜을 적용하고 있어 산업용에 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.

그림 1 은 현재까지 표준화된 IEEE 1451 스마트 센서 인터페이스 표준을 이용하여 다수의 TIM 을 네트워크에 접속했을 경우의 시스템 구성을 도식적으로 나타낸 것이다.<sup>10</sup> 그림에서 나타낸 것과 같이 전통적인 IEEE 1451.2 인터페이스를 사용하면, 한 개의 트랜스듀서 모듈(STIM)을 네트워크에 접속시키기 위해서 10 가닥의 배선으로 구성된 TIH 를 이용하여 한 개의 네트워크 모듈(NCAP)을 사용해야 한다. 따라서, 네트워크에 다수의 트랜스듀서 모듈을 연결하기 위해서는 이와 같은 수의 네트워크 모듈을 사용해야 하는 문제점이 발생하게 된다.

이러한 문제를 개선하기 위하여 물리계층에 CAN 을 기반으로 한 CANopen 프로토콜을 적용한 스마트 센서 인터페이스 표준인 IEEE p1451.6 표준의 제정이 추진되었으나, 표준 제정에 필요한 기간 및 비용의 부족 등의 이유로 취소되었다. 그러나 트랜스듀서 모듈에 비해 직접회로의 사용이 많은 NCAP 의 설계 비용이 상대적으로 높기 때문에, 하나의 NCAP 을 이용하여 다수의 트랜스듀서 모듈을 사용하기 위한 다중 접속이 가능한 스마트 센서 시스템의 필요성은 꾸준히 제기되었다.<sup>12,13</sup>

본 논문에서는 CANopen 프로토콜을 이용하여 다중 접속이 가능한 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 설계에 대하여 제안하고자 한다. CANopen 프로토콜은 CAN-in-Automation(Cia)에서 개발한 국제 표준으로 유럽 지역을 중심으로 CAN 기반 산업용 네트워크의 선도적인 표준으로 인정받고 있다. 또한, CANopen 프로토콜은 마스터-슬레이브 구조의 통신 방식으로 최대 127 개의 슬레이브 모듈을 하나의 마스터 모듈에서 관리할 수 있으며, 송수신 데이터를 OD(Object Dictionary)에 미리 정의하여 사용하도록 규정하고 있다. 따라서, CANopen 프로토콜의 OD 에 IEEE 1451.0 의 지령(common command)을 매핑하면, 다중 접속이 가능한 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서를 쉽게 설계할 수 있다.

본 논문은 서론을 포함하여 5 장으로 구성되어 있다. 2 장에서는 IEEE 1451.0 과 CANopen 프로토콜에 대하여 간략하게 서술하였으며, 3 장에서는 CANopen 프로토콜을 이용한 다중 접속이 가능한 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 설계 방법에 대하여 서술하였다. 4 장에서는 제안된 스마트 센서의 성능을 평가하였으며, 5 장에서는 결론과 향후 과제를 제시하였다.

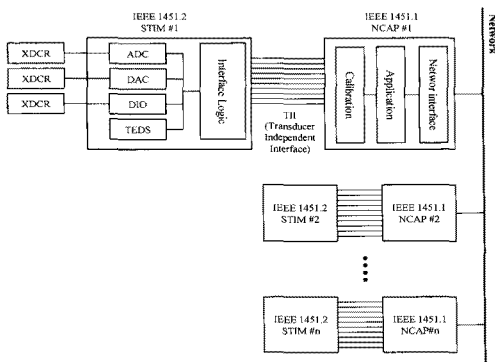


Fig. 1 System of traditional IEEE 1451 Smart Sensor

## 2. IEEE 1451.0 및 CANopen

### 2.1 IEEE 1451.0 개요

스마트 센서 인터페이스의 국제 표준인 IEEE 1451 은 크게 네트워크 모듈인 NCAP, 트랜스듀서 모듈인 TIM(Transducer Independent Module), NCAP 과 TIM 의 인터페이스를 정의한 TII(Transducer Independent Interface), 트랜스듀서의 데이터시트를 전자적으로 명시한 TEDS(Transducer Electronic Data Sheet)로 구성되어 있다.<sup>10</sup>

먼저 TIM 은 트랜스듀서와의 인터페이스, 신호 변환 그리고 신호 처리 기능을 수행한다. 즉, TIM 은 트랜스듀서로부터 아날로그 신호를 측정하고, 측정된 아날로그 신호를 A/D 변환기를 이용하여 디지털 데이터로 변환한 후, 이를 NCAP 으로 전달하는 역할을 한다. 그리고 NCAP 으로부터 전달받은 디지털 데이터를 D/A 변환기를 이용하여 아날로그 신호로 변환한 후 트랜스듀서에 전달하는 역할도 함께 수행한다. 반면, NCAP 은 TIM 에게 지령을 전달하는 역할과 TIM 에서 받은 데이터를 연산 처리한 후 상위의 네트워크를 통하여 디지털의 형태로 전송하는 기능을 수행한다. NCAP 과 TIM 의 인터페이스인 TII 는 상호 데이터 교환을 위해 요구되는 논리적, 물리적 규격에 대해 정의하고 있으며, 개별 모듈의 독립적인 설계를 보장해준다. 마지막으로 TEDS 는 TIM 내부의 메모리에서 트랜스듀서의 종류나 보정 데이터와 같은 센서에 관한 정보를 전자적으로 기록한 트랜스듀서의 규격이다. NCAP 이 초기화 되거나 TIM 이 재설치 된 경우에, NCAP 은 이 TEDS 정보를 읽어 들여 관리자의 특별한 보정없이도 즉시 스마트 센서의 사용을 가능하게 한다.<sup>14</sup>

표 1 과 2 는 IEEE 1451.0 에서 정의하고 있는 NCAP 과 TIM 간의 지령 메시지의 구조와 공통 지령을 나타내고 있다.<sup>15</sup> NCAP 에서 TIM 으로 전달되는 지령 메시지와 TIM 에서 NCAP 으로 전달되는

응답 메시지는 1 바이트 단위를 기본으로 한다. NCAP 이 TIM 에게 지령을 내리기 위해서는 표 1 에 나타난 것과 같이 목적지 TIM 의 채널 번호 (destination transducer channel number) 2 바이트, 지령 클래스(commnad class) 1 바이트, 공통 지령 (command function) 1 바이트, 메시지 길이 2 바이트, 지령의 내용에 따라 추가적으로 부가되는 N 바이트를 순차적으로 전송하면 된다. 표 2 는 공통 지령의 내용을 요약한 것으로써, TEDS 읽기/쓰기, self-test 수행, 서비스 request 의 읽기/쓰기 등과 같은 지령들이 0 에서 255 의 값으로 정의되어 있다. 특히, IEEE 1451.0 에서는 제조사가 자체적으로 정의하여 사용할 수 있도록 128-255 은 공개되어 있다.

### 2.2 CANopen 개요

CANopen 프로토콜은 CiA 의 표준으로 다양한 벤더의 하드웨어 특성에 의존적인 개발 과정을 따르는 CAN 기반 응용 시스템 개발의 문제점을 해결하고자 제안되었다.<sup>16</sup> CANopen 프로토콜에서는 11bit 의 아이디를 노드의 기능을 설명하기 위한 4bit 의 function code part 와 노드식별을 위한 7bit 의 Node-ID part 로 구분하여 사용하고 있다. 이러한 노드식별 ID 를 이용하여 CANopen 프로토콜에서는 단일 네트워크에서 최대 127 개의 통신노드를 한 번에 접속할 수 있다.

CANopen 프로토콜의 핵심 요소는 OD (Object Dictionary), SDO (Service Data Object) 및 PDO (Process Data Object)를 통한 디바이스 기능성(device functionality)의 서술이다. 그림 2 는 CANopen 디바이스의 일반적인 구조를 나타낸 것으로서, CANopen 디바이스는 통신 인터페이스(communication interface), 객체 명세(object dictionary), 응용 계층(application)의

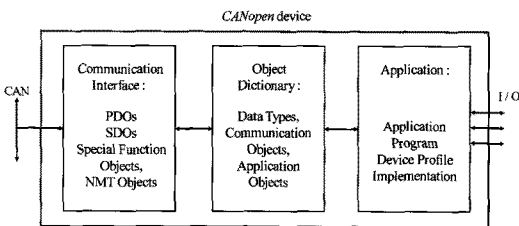


Fig. 2 Architecture of CANopen device

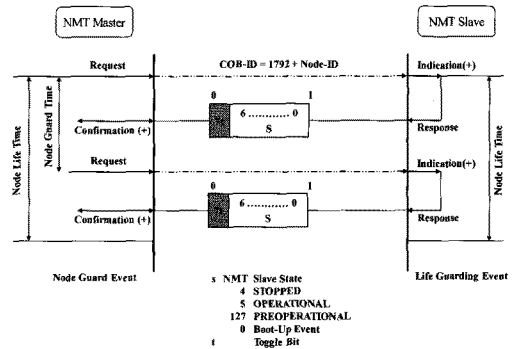


Fig. 3 Flowchart of node guarding protocol

Table 1 Command message structure of IEEE 1451.0

|                                                                    |   |   |   |   |   |   |   |
|--------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-Octet                                                            |   |   |   |   |   |   |   |
| 7                                                                  | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Destination Transducer Channel Number<br>(most significant octet)  |   |   |   |   |   |   |   |
| Destination Transducer Channel Number<br>(least significant octet) |   |   |   |   |   |   |   |
| Command class                                                      |   |   |   |   |   |   |   |
| Command function                                                   |   |   |   |   |   |   |   |
| Length (most significant octet)                                    |   |   |   |   |   |   |   |
| Length (least significant octet)                                   |   |   |   |   |   |   |   |
| Command-dependent octets                                           |   |   |   |   |   |   |   |
| :                                                                  |   |   |   |   |   |   |   |

Table 2 Common command function of IEEE 1451.0

| cmd<br>Function Id | Command                    | Reply<br>expected | TIM state |
|--------------------|----------------------------|-------------------|-----------|
| 0                  | Reserved                   | -                 | -         |
| 1                  | Query TEDS                 | Yes               | Active    |
| 2                  | Read TEDS segment          | Yes               | Active    |
| 3                  | Write TEDS segment         | No                | Active    |
| 4                  | Update TEDS                | Yes               | Active    |
| 5                  | Run self-test              | No                | Active    |
| 6                  | Write service request mask | No                | Active    |
| 7                  | Read service request mask  | Yes               | Active    |
| :                  | :                          | :                 | :         |
| 13-127             | Reserved                   | -                 | -         |
| 128-255            | Open for manufacturers     | -                 | -         |

세 부분으로 구분된다. 우선 통신 인터페이스에서는 CAN 버스와 물리 계층을 구성하기 위한 파라미터, 디바이스 ID, 제조업체 등과 같은 일반적인 정보와 함께, PDO 와 SDO 에 대해 정의하고 있다. 일반적으로 PDO 는 CAN 에서 사용할 수 있는 데이터의 최대 크기인 8 바이트 데이터의 실시간 교환에 사용되며, SDO 는 데이터 전송 이외의 별도의 서비스를 제공하기 위한 8 바이트 이상의 대용량 데이터 교환에 사용된다. 다음으로 객체 명세에서는 데이터 타입과 CAL(CAN Application Layer)에서 동작하는 모든 하드웨어 장치를 지원하기 위한 프로파일링(Profiling) 개념에 대해 정의하고 있다. 마지막 응용 계층은 앞에서 기술한 디바이스 프로파일을 이용하여 사용자가 응용 프로그램을 작성하기 위해 사용하는 I/O 와 API 에 대해 정의하고 있다.<sup>17,18</sup>

CANopen 프로토콜의 또 하나의 특징적인 기능

은 네트워크에 연결되어 있는 슬레이브 노드들의 에러를 감지하기 위한 노드 감시 프로토콜(node guarding protocol)의 사용이다. 그림 3은 노드 감시 프로토콜의 흐름도를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 NMT 마스터(master)는 CANopen 네트워크에서 마스터의 역할을 하는 노드를 의미하며, NMT 슬레이브(slave)는 네트워크에 연결되어 있는 슬레이브 노드를 의미한다. 노드 감시 프로토콜은 일정한 주기로 미리 규정되어 있는 노드 감시 시간(node guard time)마다 요청 프리미티브(request primitive)를 발생하여, 슬레이브 노드의 상태 정보를 수집한다. 슬레이브 노드는 상태에 변경이 생겼을 경우에 t(toggle bit) 비트를 셋하고 상태 정보를 s(state of the NMT slave) 필드에 기록하여 마스터 노드로 전송한다. 이러한 절차를 통해서 노드 감시 프로토콜은 슬레이브 노드에서 발생한 에러의 감시 기능 외에도 네트워크에 연결된 신규 노드의 정보 수집과 연결 해제된 노드의 정보를 갱신하는 네트워크 유지 보수의 기능에도 사용된다.

### 3. CANopen 을 이용한 다중 접속 기능의 설계

그림 4 는 본 논문에서 제안하는 CANopen 을 이용한 다중 접속 기능을 가지는 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 구조도를 나타낸 것이다. 제안된 시스템은 CANopen 네트워크에서 마스터의 역할을 하는 NCAP 모듈 1 개와 슬레이브 역할을 하는 TIM 모듈 여러 개로 구성되며, 센서 인터페이스인 TH1 의 물리계층으로는 CAN 이 사용되고 있다. 제안된 구조에서는 스마트 센서에서 요구되는 기능들이 모듈별로 독립적으로 동작되고, 각 TIM 모듈들은 네트워크를 통하여 전송되는 NCAP 에서 송신되는 지령 정보를 이용하여 해당 기능을 동작시키게 된다.

그림에서, TIM 의 정보를 수집하고 네트워크를 관리하는 NCAP 모듈은 3 개의 계층으로 구성된다. IEEE 1451.0 통신 계층에서는 OD 에 의거하여 데이터를 PDO 와 SDO 로 패키징하고, CAN 트랜시버와 CAN 컨트롤러를 이용하여 네트워크에 송신하거나 수신하는 역할을 담당한다. IEEE 1451.0 서비스 계층에서는 상위 계층에서 전달받은 메시지와 네트워크를 통해 수신된 메시지를 IEEE 1451.0 표준에서 규정하고 있는 지령 메시지의 구조와 공통 지령의 내용으로 변환하는 역할을 한다. 마지막으로 응용 계층에서는 CiA DS 301 에서 규정하고 있는

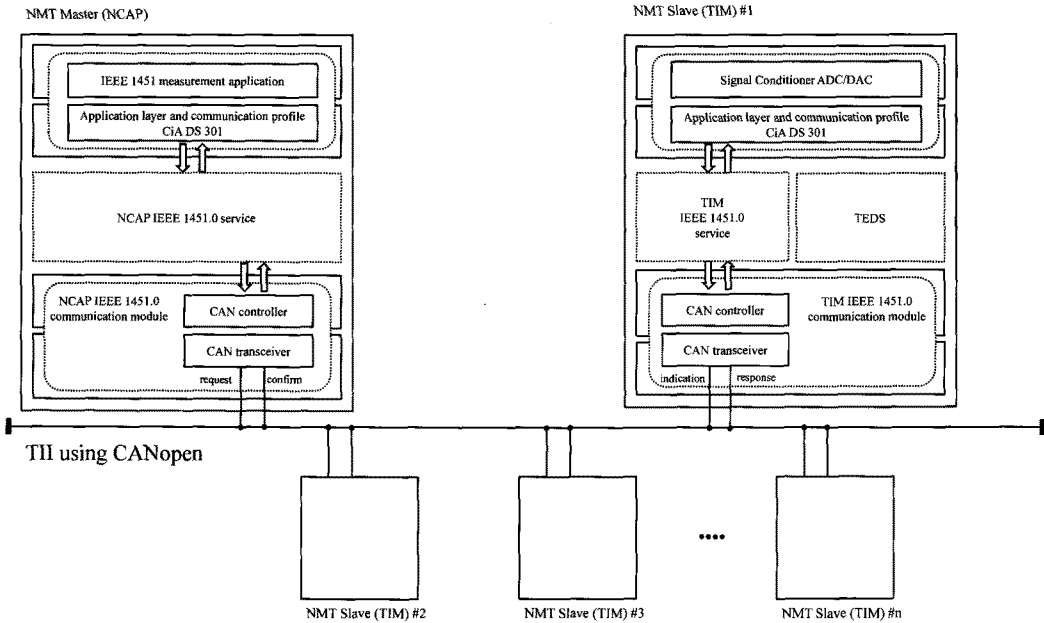


Fig. 4 Schematic Architecture of CANOpen-based Smart Sensor with multiple connectivity

CANopen 통신 프로파일과 사용자가 스마트 센서의 정보를 수집하기 위해 설계한 응용 프로그램이 동작된다.

NCAP 모듈로부터 지령을 전달받아 센서의 정보를 수집하거나 전송하는 TIM 모듈도 NCAP 모듈과 같이 3 부분으로 구성 되어 있다. IEEE 1451.0 통신 계층은 위에서 기술한 것과 같이 데이터를 OD 에 의거하여 PDO 와 SDO 로 패키징하고, CAN 트랜시버와 CAN 컨트롤러를 이용하여 네트워크에 송신하거나 수신하는 역할을 담당한다. IEEE 1451.0 서비스 계층에서는 메시지를 표준에서 정의한 지령 메시지의 구조와 공통 지령으로 변환하는 역할과 함께, 센서의 정보를 전자적으로 정의한 TEDS의 관리를 담당한다. TEDS 에는 센서의 물리적인 입·출력 전압 범위와 수집 주기, 보정 데이터와 같은 센서 고유의 특성에 대한 정보를 포함하고 있다. 마지막으로 응용 계층에서는 CANopen 통신 프로파일과 센서를 계측하고 전자적인 신호로 변환하는 신호 처리와 관련된 응용 프로그램이 동작된다.

그림 5 는 NCAP 모듈의 동작 절차를 흐름도로 나타낸 것이다. NCAP 모듈은 전원이 인가되면 응용 프로그램과 주변 장치를 초기화하고, CANopen 프로파일에 IEEE 1451.0 의 지령을 매핑하는 과정

을 수행한다. NCAP 모듈은 CANopen 네트워크를 관리하는 마스터의 역할을 수행하기 때문에 공유 매체에 연결되어 있는지를 스스로 체크하고, 연결이 되어 있다면 동작이 가능한 “OPERATION 모드”로 설정한다. 이후 네트워크에 신규로 추가된 TIM 모듈과 삭제된 TIM 모듈을 확인하기 위한 노드 감시 절차를 수행한다. 노드 감시 절차에서는 미리 규정되어 있는 일정한 주기(node guarding time)로 TIM 모듈을 체크하여 신규로 추가된 TIM 모듈의 상태를 “OPERATION 모드”로 변경시킨다. 만약 TIM 모듈이 네트워크에 최초로 연결되었다면 트랜스듀서의 정보를 수집하기 위해 TIM 의 TEDS 정보를 읽고, 주기적으로 센서의 정보를 수집하기 위해 타이머를 가동한다. 이후 주기적으로 센서의 정보를 읽기 위한 지령을 송신하고, 수신된 센서 데이터를 처리하는 과정을 반복한다.

그림 6 은 TIM 모듈의 동작 절차를 흐름도로 나타낸 것이다. TIM 모듈은 전원이 인가되면 응용 프로그램과 ADC, I/O 와 같은 주변 장치를 초기화하고, “PRE-OPERATION 모드”로 설정한다. 이 과정이 완료되면, NCAP 모듈과 마찬가지로 CANopen 의 프로파일에 IEEE 1451.0 의 지령을 매핑하는 과정을 수행하고, NCAP 모듈로부터 “OPERATION 모드 변경” 지령을 수신하여 자신의 상태를 “OPERATION

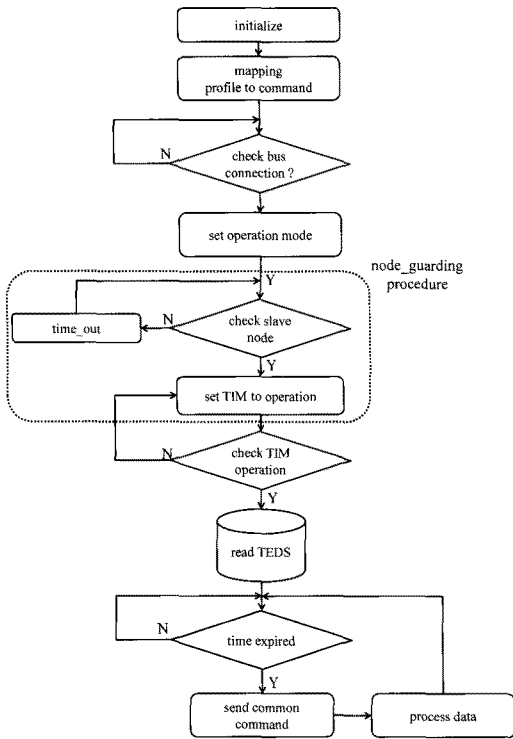


Fig. 5 Flowchart of NCAP module

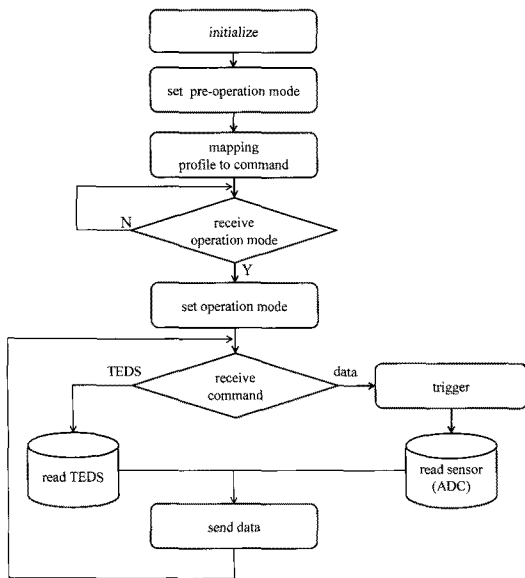


Fig. 6 Flowchart of TIM module

모드"로 변경한다. 이후 TIM 모듈은 NCAP 모듈의 지령에 따라 TEDS 를 NCAP 모듈로 전송하거나,

센서를 트리거하여 센서를 수집한 후 NCAP 모듈로 전송하는 역할을 반복적으로 수행하게 된다.

표 3 은 전통적인 IEEE 1451 표준을 이용한 스마트 센서 시스템과 본 논문에서 제안하고 있는 다중 접속 기능이 구현된 스마트 시스템의 배선 수 및 설계비용을 비교한 것이다. 표에서 나타내고 있는 배선의 수는 NCAP 과 TIM 간의 TII 를 기준으로 하였으며, 비용은 NCAP 과 TIM 의 설계비용을 단위값으로 표현한 것이다. 기존의 구조에서는 한 개의 TIM 을 네트워크에 접속하기 위해 한 개의 NCAP 을 사용하기 때문에 TII 가 TIM 의 개수만큼 증가하게 된다. 반면에 본 논문에서 제안하고 있는 구조에서는 NCAP 과 TIM 을 CANopen 을 이용하여 연결하게 되므로 최대 127 개까지는 TIM 의 개수와 상관없이 데이터 전송을 위한 Tx, Rx 선과 전원을 인가하기 위한 Vcc, GND 만을 사용하게 된다. 이와 함께 기존의 구조에서는 TIM 의 개수만큼 TIM 과 NCAP 의 비용이 발생하는데 반해서 제안하고 있는 구조에서는 하나의 NCAP 비용과 TIM 의 개수만큼의 비용만 발생하게 된다.

Table 3 Comparison of Traditional system and proposed system

| No. of TIM      | Traditional System |           | Proposed System            |                 |
|-----------------|--------------------|-----------|----------------------------|-----------------|
|                 | No. of wire        | Cost      | No. of wire                | Cost            |
| 1               | 10                 | 300       | 4<br>(Tx, Rx,<br>Vcc, GND) | 300             |
| 2               | 20                 | 600       |                            | 400             |
| 3               | 30                 | 900       |                            | 500             |
| :               | :                  | :         |                            | :               |
| $N(N \leq 127)$ | $10 * N$           | $300 * N$ |                            | $100 * (N + 2)$ |

\*Cost : 200 unit (NCAP), 100 unit (TIM)

#### 4. 다중 접속 기능을 가진 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 성능 평가

본 논문에서 제안한 CANopen 을 이용한 다중 접속 기능을 가진 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 성능을 평가하기 위하여, 그림 7 과 같은 테스트베드를 구성하였다. 시스템의 성능 평가를 위한 테스트베드는 마스터 역할을 하는 하나의 NCAP 모듈과 0~100kPa 범위의 압력을 측정할 수 있는 ㈜오토닉스사의 디지털 압력센서가 연결되어 있는 6 개의 TIM 모듈로 구성되었다. 또한, CAN 버스에서의 데이터 상태를 관찰하기 위하여 네트워크 모니터링 툴인 CANoE 를 연결하였다. 마지막으로 CANopen

네트워크의 전송 속도는 125kbps 로 설정하였다.

CANopen 을 이용한 IEEE 1451 스마트 센서의 TIM 모듈은 ATMEL 사의 8bit 마이크로컨트롤러인 AT90CAN128 을 사용하였다. AT90CAN128 은 CAN, ADC, SPI 포트 등을 지원하고 플래시 메모리 타입의 프로그램 메모리를 가지고 있으며, 내부에 4K 바이트의 EEPROM 을 가지고 있다.<sup>19</sup> 또한, 센서의 입력을 위해서 A/D 포트를 사용하였고, TEDS 는 읽기 쓰기가 가능한 EEPROM 을 이용하여 설계하였다. NCAP 모듈은 TIM 모듈과 마찬가지로 AT90CAN128 마이크로 컨트롤러를 사용하였으며, 센서의 데이터를 수집하기 위한 응용프로그램을 설계하였다. NCAP 모듈과 TIM 모듈의 인터페이스인 TII 로 사용되는 CAN 통신을 위하여 CANRX, CANTX 의 CAN 포트가 사용되고, CAN 트랜시버로는 필립스사의 PCA82C250 을 사용하였다. 마지막으로 NCAP 모듈과 TIM 모듈의 CANopen 프로파일을 구성하기 위해 IXXAT 사의 상용 CANopen 스택 버전 4.21 을 사용하여 CiA DS 301 통신 프로파일을 구현하였다.

표 4 는 CANopen 프로파일에 매핑된 IEEE 1451.0 의 공통 지령을 요약한 것이다. 표에서 사용되고 있는 모든 메시지는 NCAP 모듈과 TIM 모듈의 OD 에 등록하였으며, 전송되는 데이터의 크기와 주기를 고려하여 PDO, SDO 그리고 NMT 로 구분하였다. 먼저 인덱스 0x100B 는 “ChannelNumber”로 변환되어 TIM 모듈의 주소를 획득하기 위한 명세로 사용되었다. 그리고 0x100C 와 0x100D 는 TIM 모듈의 plug-and-play 기능을 구현하기 위해 요구되는 “Read status-event value”와 “Read status-condition value”로 변환되어 TIM 모듈의 상태 변화를 감시

Table 4 Mapping table between OD and FunctionId

| Idx    | S-Idx | Name             | IEEE 1451 Function Id         |
|--------|-------|------------------|-------------------------------|
| 0x100B | 0     | Node ID          | Channel Number                |
| 0x100C | 0     | Guard Time       | Read status-event value       |
| 0x100D | 0     | Life Time Factor | Read status-condition value   |
| 0x1200 | 0     | Server SDO       | Read Meta-TEDS segment        |
|        | 1     | Server SDO       | Read Channel-TEDS segment     |
|        | 2     | Server SDO       | Read Calibration-TEDS segment |
| 0x1280 | 0     | Client SDO       | Read Meta-TEDS segment        |
|        | 1     | Client SDO       | Read Channel-TEDS segment     |
|        | 2     | Client SDO       | Read Calibration-TEDS segment |
| 0x1400 | 0     | Sensor data PDO  | Read-data                     |
|        | 0     | PDO              | Read service-request mask     |
| 0x1401 | 0     | PDO              | Read status-event register    |
| 0x1402 | 0     | PDO              | Run self-test                 |
| 0x1800 | 0     | PDO              | Run self-test                 |
| -      | -     | NMT              | Operation                     |

하는 용도로 사용되었다. 다음으로 0x1200 인덱스는 TIM 모듈에 저장되어 있는 센서의 정보인 TEDS 를 읽어오기 위해 대용량의 데이터 송수신에 적합한 SDO 로 사용하였으며, 서브 인덱스는 TEDS 의 종류에 따라 분류하였다. 이와 함께 0x1280 인덱스는 NCAP 모듈에서 수신된 0x1200 인덱스의 지령에 따른 TIM 모듈의 응답으로 정의하였다. 또한, 데이터의 실시간성이 요구되는 센서의 데이터를 수집하기 위한 인덱스는 0x1400 의 PDO 로 정의하였고, 0x1401 과 0x1402 는 TIM 모듈에서 발생하는 인터럽트를 처리하기 위한 인덱스로 정의하였다. 마지막으로 TIM 모듈을 “PRE-OPERATION 모드”에서 동작 가능한 “OPERATION 모드”로 변경하기 위한 지령은 CANopen 프로토콜의 NMT 로 데이터를 송수신 할 수 있도록 설계하였다.

그림 8 은 CANopen 을 이용한 다중 접속 기능을 가진 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서의 트랙픽에 따른 전송지연을 나타내고 있다. 전송지연을 평가하기 위하여 6 개의 TIM 에서 PDO 를 이용한 5byte 의 센서 데이터를 100msec(9.6%), 50msec(14.0%), 10msec(49.5%)의 주기로 전송하였다. 또한, 보다 명확한 실험 결과의 확인을 위하여 TIM 의 전송주기를 10msec 로 고정한 상태에서 CANoE 를 사용하

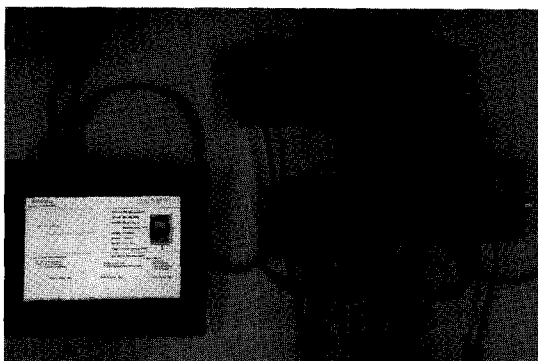


Fig. 7 Experimental setup for IEEE 1451.0-based smart sensor

여 54.0%, 68.0%, 88.0%의 트래픽을 추가적으로 발생시켜 전송지연을 측정하였다. 전송지연은 TIM 모듈의 응용계층에서 센서 데이터를 전송하는 시점과 NCAP 모듈의 응용계층에서 데이터를 수신한 시점에 I/O 시그널을 별도의 전송지연 측정 모듈의 인터럽터에 연결하여 측정하였다. 실험결과에서 나타난 것과 같이 트래픽 발생량에 따라 최소 전송지연과 평균 전송지연은 최대 2.0msec 이내를 유지하였으며, 최대 전송지연은 8.57msec 였다. 이는 경쟁을 기반으로 데이터를 전송하는 CAN 의 CSMA/NBA(Carrier Sense Multiple Access/Non destructive Bitwise Arbitration) 알고리즘의 특징으로 트래픽이 증가하면서 반복된 충돌이 발생하기 때문이다.

그림 9 는 TIM 모듈에서 NCAP 모듈로 트랜스듀서의 정보인 TEDS 를 전송하였을 경우의 전송지연을 평가한 결과이다. TEDS 는 센서 데이터와는 달리 데이터 교환의 주기가 일정하지 않고, 실시간성이 요구되지 않기 때문에 대용량 서비스 데이터의 전송에 적합한 SDO 를 이용하여 전송하였다. IEEE 1451.0 에서 정의하고 있는 TEDS 의 크기를 고려하여 SDO 데이터의 크기는 40byte, 80byte, 120byte, 160byte 로 설정하였고, 네트워크 트래픽은 25.07%, 51.37%, 82.64%로 점차 증가시켰다. 그림 9(a), 9(b), 9(c)는 각각 위에서 언급한 실험 조건에서의 최소, 평균, 최대 전송지연을 나타낸 것이다. SDO 데이터는 CAN 에서 수용 가능한 최대 데이터 크기인 8byte 로 데이터를 분리하여 전송하고, 수신측에서 재구성하기 때문에 PDO 데이터에 비해 데이터의 크기와 트래픽에 따라 높은 전송지연을 나타내는 것을 알 수 있다.

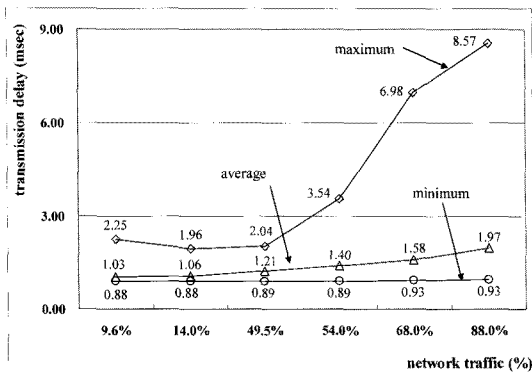
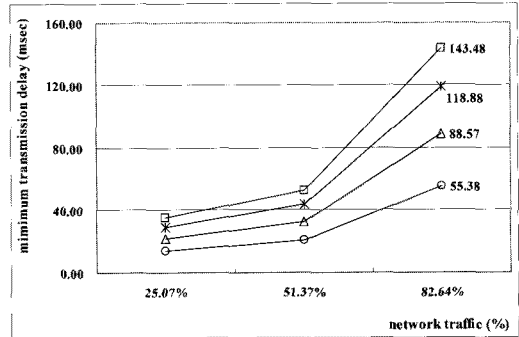
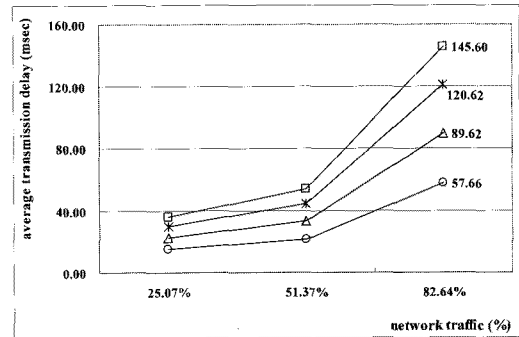


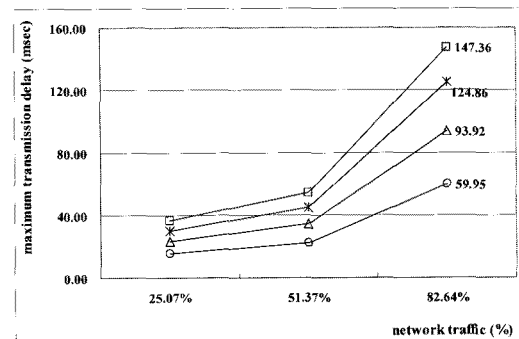
Fig. 8 Transmission delay of PDO in IEEE 1451.0-based smart sensor



(a) minimum transmission delay



(b) average transmission delay

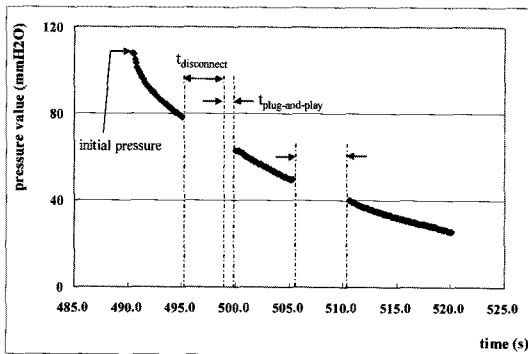


(c) maximum transmission delay

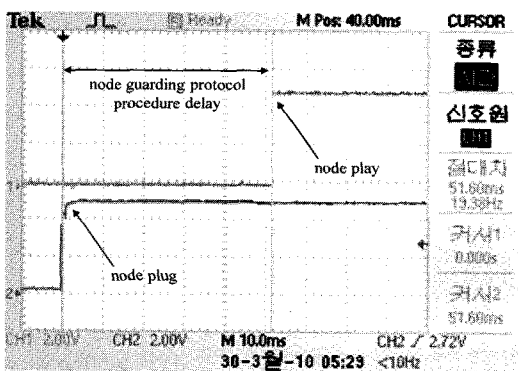
Fig. 9 Transmission delay of SDO in IEEE 1451.0-based smart sensor

그림 10 은 스마트 센서의 필수 기능 중의 하나인 plug-and-play 의 성능을 평가한 결과를 나타낸 것이다. 스마트 센서의 plug-and-play 성능을 평가하기 위하여 테스트베드에 사용된 압력센서에 108.1mmH2O 의 상대압력을 가한 뒤 센서 데이터의 변화 추이를 수집하였으며, 실험과정에서 2 번에 걸쳐 약 5 초간 센서를 네트워크에서 분리하였다가 다시 연결하였다. 그림 10(a)에서 나타난 것과 같이 압력센서는 상대압력이 가한 시점부터 대





(a) pressure sensor value



(b) execution time for plug-and-play function

Fig. 10 Evaluation of plug-and-play delay function

기압으로 천천히 압력이 감소되었으며, 실험이 진행되고 나서 약 495 초에 TIM 을 네트워크에서 분리하였다. 네트워크에서 센서가 분리된 시점부터는 센서 데이터가 나타나지 않았으며, 약 5 초 후 다시 TIM 을 네트워크에 연결하였을 때, 일정한 plug-and-play 시간을 거치고 나서 다시 정상적으로 센서 데이터가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 10(b)는 노드가 다시 네트워크에 연결되는 순간부터 노드가 동작하는 순간까지를 오실로스코프로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 노드에 전원이 인가되면 앞 절에서 언급한 node guarding protocol 에 따른 절차를 수행하고, 이후 NCAP 의 지령에 따라 데이터를 네트워크로 전송하게 된다. 측정은 10 번 반복하였으며, 실험결과 plug-and-play 시간은 평균 50.48msec 로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 자동화 시스템의 지능화를 향상

시키기 위해 필수적인 산업용 필드장치의 배선 및 유지 보수의 편리성 향상을 위해 CANopen 을 이용하여 다중 접속이 가능한 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서에 대해 제안하였다. 또한, 본 논문에서는 제안한 시스템의 운영을 위해 IEEE 1451.0 표준에서 정의하고 있는 지령 메시지의 구조와 공통 지령을 CANopen 프로토콜로 전송하기 위한 방안에 대해 제안하였다. 마지막으로 압력 센서를 이용한 테스트베드를 구성하여 제안한 시스템의 성능을 평가하였다. 이상과 같은 실험 결과로부터 본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기존의 스마트 센서 인터페이스 표준인 IEEE 1451.0 은 점대점 연결 방식에 대해서만 규정하고 있기 때문에, 다수의 TIM 을 사용하기 위해서는 TIM 에 비해 상대적으로 가격이 높은 NCAP 을 여러 개 사용해야 하는 문제점이 있다. 본 논문에서 제안한 CANopen 을 이용한 다중 접속이 가능한 IEEE 1451.0 기반 스마트 센서 시스템은 물리 계층으로 CANopen 프로토콜을 사용하고 있어 이론적으로 하나의 NCAP 에 최대 127 개의 TIM 을 다중 접속하는 것이 가능하다.

둘째, 스마트 센서는 TIM 모듈에 결함이 발생하였을 경우, 네트워크 프로그램의 재 설계나 교체 없이 TIM 모듈만을 교체하여 사용하기 위한 plug-and-play 기능이 지원되어야 한다. 본 논문에서 제안한 시스템은 물리계층으로 CANopen 프로토콜을 사용하고 있기 때문에, node guarding protocol 을 이용하여 plug-and-play 기능을 구현할 수 있다.

그러나, 본 연구에서는 CANopen 프로토콜을 이용하여 다중 접속이 가능한 스마트 센서 시스템의 설계에 대해서만 초점을 맞추었기에 보다 실용적인 결과를 도출하기 위한 다양한 센서 및 접속 조건에 대한 평가가 부족하다. 향후에는 이러한 연구 결과를 확장하여 본 시스템을 다양한 필드 장치를 가진 계층제어 자동화 장비에 적용하여 원격 계측 및 제어 시스템을 설계하고 성능을 평가하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년) 및 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

1. van Leeuwen, E. H. and Norrie, D., "Holons and holarchies [intelligent manufacturing systems]," *Manufacturing Engineer*, Vol. 76, No. 2, pp. 86-88, 1997.
2. Choi, B. W., "New Manufacturing and Intelligent Manufacturing Systems," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 7-12, 2003.
3. Jun, S. J., Cho, Y. S. and Park, H. S., "PC Based Distributed Control System of AGV with Multi-Thread Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 107-114, 2005.
4. Wu, N. and Zhou, M. C., "Modeling and deadlock avoidance of automated manufacturing systems with multiple automated guided vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 35, No. 6, pp. 1193-1202, 2005.
5. Liao, D. Y. and Fu, H. S., "Speedy delivery - dynamic OHT allocation and dispatching in large-scale, 300-mm AMHS management," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 3, pp. 22-32, 2004.
6. Capetta, L., Mella, A. and Russo, F., "Intelligent field devices: user expectations," *IEE Colloquium on Fieldbus Devices - A Changing Future*, pp. 6/1-6/4, 1994.
7. IEC 61158-4, "Digital data communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems-Part 4:Data link protocol specification," 1999.
8. Thomesse, J. P., "Fieldbus Technology in Industrial Automation," *IEEE Proceedings*, Vol. 93, No. 6, pp. 1073-1101, 2005.
9. Wobschall, D., "Networked sensor monitoring using the universal IEEE 1451 Standard," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 11, No. 2, pp. 18-22, 2008.
10. Lee, K. C., Kim, M. H., Lee, S. and Lee, H. H., "IEEE-1451-based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 6, pp. 1150-1158, 2002.
11. Song, E. Y. and Kang L., "Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer?" *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 11, No. 2, pp. 11-17, 2008.
12. Cortes, F., Barrero, F., Toral, S., Prieto, J. and Guevara, J., "Multi-sensor integration in the vehicular system using the IEEE1451 Std.: A case study," *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-6, 2009.
13. Wobschall, D., Stepanenko, A., Maykiv, I., Kochan, R., Sachenko, A. and Kochan, V., "A multi-port serial NCAP using the IEEE 1451 smart transducer standard," *IEEE Sensors Applications Symposium*, pp. 293-297, 2009.
14. Kim, H. H., Bae, Y. K., Lee, K. C. and Lee, S., "Development of IEEE 1451.2 based smart module for industrial robot," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 567-568, 2009.
15. IEEE Std. 1451.0, "IEEE Standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-common functions, communication protocols, and transducer electronic data sheet(TEDS) formats," 2007.
16. CAN in Automation e.V., "CANopen-Application layer and communication profile-CiA draft standard 301," 2002.
17. Kang, M. K., Park, K. J. and Kim, J. C., "PDO Packing Mechanism for Reducing CANopen Network Utilization," *Journal of KIISE: System and Theory*, Vol. 36, No. 2, pp. 124-133, 2009.
18. Cena, G. and Valenzano, A., "A Protocol for Automatic Node Discovery in CANopen Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 3, pp. 419-430, 2008.
19. Atmel Corporation, "AT90CAN128 data sheet-Rev. 7682C-AUTO-04/08," 2008.