

ATO 장치의 자동 열차속도 조절 알고리즘에 관한 연구

A Study for Automatic Train Speed Regulation Algorithm of ATO

김중환*
Kim, Jung-Hwan

강리택**
Kang, Lee-Teak

ABSTRACT

The ATO(Automatic Train Operation) System is used for train operation instead of drivers. It is interfaced with TCMS(Train Control and Monitoring System) and ATC/TWC system in the train and wayside facilities. In this paper describes configuration of ATO, specification of ATO hardware, construction of ATO software and the algorithm for automatic train speed regulation in the carborn ATO system.

ATO Application Software is consist of ART, SPR, REG, SRV and PSM tasks. ART task is main control part of the ATO that determine ATO control, ATO mode, state transition. SPR determine speed reference according to train motion status, track data, train data and restricted train speed. REG task regulated train speed form the starting of one station to the precision stop at the other station under the result of ART and SPR tasks. In this paper, a algorithm for the train speed regulation while running is described.

1. ATO 장치의 개요

ATO 장치(열차 자동운전 장치)는 운전자의 조작을 최소화하여 전동차를 자동 혹은 무인으로 운전하기 위한 제어 및 감시 장치로써 전동차내 추진 시스템 및 제동시스템 그리고 TCMS, ATC 장치 등과 상호 연관성을 갖고 운행하는 컴퓨터시스템이다.

ATO 장치는 열차가 자동 및 무인 운전을 수행하는 일련의 제어 과정 중에서 ATC로부터의 속도값, TWC로부터의 진로 정보(현재 역과 다음역 정보)와 TCMS로부터의 열차상태(현재속도, 열차가 사용한 추진/제동력, ...)등을 수신하고, 그 정보 및 제어 신호들을 근거로 하여 ATC, TWC 로 열차 도착 정보, 열차 정지 상태 정보 등을 송신하며, TCMS로 ATO 제어신호(추진력, 제동력)를 송신하여 자동/무인운전을 수행하게 되는데. ATO 장치에는 미리 입력된 선로 상태정보(Track Database)가 저장되어 있어 주행중 TCMS로부터 입력되는 열차상태와 지상에 설치된 정밀 정지 표시기(PSM)로부터의 입력 데이터를 비교, 적용함으로써 역간 주행 및 정위치 정차를 수행한다. ATO 장치와 타 장치간 인터페이스는 그림1.과 같다.

* 현대정공(주) 기술연구소, 선임연구원

** 현대정공(주) 기술연구소, 주임연구원

ATO장치의 정상적 동작을 위하여는 신호보안장치(ATC)와 추진장치 및 제동장치등 열차운행에 필요한 각종 기기는 정상상태로 유지 되어야한다. 운전중에 발생될 수 있는 비정상 상황 발생 시는 ATO에 의한 운전중이라도 운전자의 개입이 가능하며, 특히, TCMS에 의한 "ATO Deactivation" 등의 조치도 가능하게 설계된 장치이다. 비상 상황(열차추돌 위험, 출입문 비정상상태등)에 대한 감시 및 제어는 최종적으로 ATC와 TCMS에 의해 수행된다.

2. ATO 장치의 주요 기능

ATO 장치는 자동/무인운전을 원활히 수행하기 위하여 열차출발제어, 목표속도제어, 열차운행 Pattern 제어, 가감속 제어, 정속도 제어, 정위치정차 제어, ATC등에 의한 간섭조정, 역 정지인식등 일련의 모듈화된 기능을 포함하고 있다.

ATO 장치는 TCMS의 "ATO Control On" 및 "ATO Activation" 명령에 따라 자기진단, 시스템 초기화와 내/외부 통신의 초기화 등의 기동 Procedure와 자동/무인운전시 예기치 않은 Error에 대한 감시를 지속적으로 수행한다. ATO 장치 내부에는 선로 상태 데이터(Track Database)뿐만 아니라, Event Log, Fault Log등도 기록 저장된다. 열차운행시 외부기기(Personal Computer등)를 통한 Run Time Log도 제공하고 있다.

3. ATO 장치의 구성

ATO 장치의 H/W는 CPU Board, Interface Board, Daughter Board로 구성되어 있으며, S/W는 System S/W, RTOS Based Application S/W로 대별할 수 있다

3.1 ATO 하드웨어의 사양 및 구성

ATO 장치는 주제어 연산부는 열차의 자동운전을 위한 연산을 담당하는 부분으로써 ATO 내부의 각종 연산, 제어 Logic, 목표속도 선정, 속도 조절등 열차의 속도 명령값 결정을 수행한다. 통신 및 I/O부는 ATO 장치와 타 장치간의 인터페이스를 담당하는 부분으로써 TCMS, ATC, TWC 및 Wayside 정보를 송, 수신하여 주제어 연산부의 연산, 제어 작업을 위한 자료제공 및 그 결과를 실제 수행할 수 있도록 외부와의 인터페이스를 수행한다. 메모리부는 각종 자료의 저장, 기록을 위한 부분으로써 주제어 연산부의 결과, 각종 입출력 데이터의 관리, Track Data, Fault Data, Log Data등 일련의 ATO 장치에서 필요로 하는 자료를 보관, 기록, 저장, 관리하는 기능을 수행한다. ATO 장치의 핵심인 CPU Board의 구성도는 그림 2.에 Interface Board의 구성도는 그림3.에 나타내었다.

3.2 ATO 소프트웨어의 구조

ATO 장치의 소프트웨어는 Communication부, Kernel, ATO Application부 등으로 구성되며, Communication부는 TC_COM, ATC_COM, TWC_COM, PC_COM등의 TASK로 구분되어 지며, ATO Application부는 ART, SPR, REG, SRV, PSM등의 TASK로 나눌 수 있다. Communication부에서는 TCMS, ATC, TWC등과의 RS485 통신과 Personal Computer와의 RS232 통신을 제공하고 있다. TC_COM, ATC_COM, TWC_COM TASK는 별도의 S/W module으로써 각각의 TASK는 매 50msec 간격으로 통신을 수행하고 있으며, 수집된 Data는 ATO Application부에서 즉시 이용이 가능한 형태로 보관, 관리된다.

ATO Application부의 SRV TASK는 Track Database, TCMS에서 수신된 Train Data 및 실제열차속도 등을 보관, 관리하며 필요한 TASK에 Track Data, Train Data, Train Motion Status의 형태로 제공한다. SPR TASK는 SRV로부터 제공된 현재운행상태, 즉 Train Motion Status와 Track Data, Train Data를 이용하여 열차가 추종하여야할 목표속도(Speed Reference)를 결정한다. ART TASK는 ATO의 핵심 프로그램으로써, ATO Control 과 ATO Mode 선정, ATO 상태 결정등 ATO가 자동운전을 구현함에 있어 가장 근본적인 판단을 결정하는 상태 천이를 결정하는 기능을 수행하는 TASK이다. REG TASK는 SPR, ART로부터 결정된 목표속도와 Regulation Command 그리고 현재 열차 운행상태에 따라 자동 열차속도 조절을 수행한다. PSM(Precision Stop Marker) TASK는 지상에 설치된 PSM을 검지하고, 현재 열차위치를 보정하고 다음역의 정밀정차를 위한 남은 거리등의 연산을 수행한다.

4. 자동 열차속도 조절

ATO 장치는 전술한 바와 같이 열차의 자동운전을 위한 컴퓨터 시스템으로써 열차의 출발로부터 다음역까지의 정위치 정차를 수행한다. 이를 위하여 열차의 현재 속도와 열차상태 및 선로 상태에 따라 열차의 목표 속도를 결정하고, 결정된 목표 속도를 추종할 수 있도록 추진력 및 제동력을 계산, 그 결과를 TCMS에 전송하여 열차의 자동운전을 수행한다. 자동 열차속도 조절기능은 결정된 목표 속도를 정확히 추종하는 기능이다. 즉, 열차의 증량과 가감속 성능, 열차의 각종 저항, 승객의 승차감, 그리고 전방 선로상태에 따라 추진력과 제동력을 조절하는 것이다. 이와 같은 자동 열차속도 조절은 REG TASK에 의해 수행된다.

4.1 TASK 구성

3.2절에서 언급한 바와 같이 ATO Application부는 ART, SPR, REG, SRV, PSM등의 TASK로 구성되어 있다. ATO Application부의 TASK 구성 및 TASK간 데이터 흐름을 그림 4.에 나타내었다.

4.2 ART와 SPR

ART는 ATO 장치에서 가장 상위의 제어개념을 가진 TASK로서 외부 및 내부조건에 따라 하위의 제어개념을 가진 TASK들을 제어한다. 하위의 제어개념을 가진 TASK들은 ART TASK의 제어신호에 따라 기능을 수행한다. ART의 내부 Process는 Supervision, Input, Output 및 Logic Process로 구성되며, Logic Process에는 ART의 모든 기능 모듈이 포함되며, H/W Status, S/W Status, Communication Status, Error Status등을 포함한 Status 판단용 모듈들과 State, Stage, Route, Mode Control등의 Control 모듈들이 있어서 ATO의 주 기능을 수행하게 된다.

이들 모든 기능들은 철저히 상태 천이의 개념으로 판단하게 되고, 원하지 않는 상태로의 천이를 방지하고, 이들 논리적인 판단의 근거는 부울대수으로써 검증한다. 상태 천이를 결정하는 요소로서 각 모듈은 상태 천이를 일으키게 하는 요소를 Event로 설정하고, 동작 및 상태의 결과를 Action으로 설정한다. 각 모듈의 구분과 배치는 모듈의 세분화, 조합하고 다양한 조합 등으로 실험하는 논리적이고 소프트웨어적 실험과 실제 차량의 시험에서 획득하게 되는 운행경험에 의거 판단한다.

H/W Status, S/W Status, Communication Status, Error Status등을 포함한 Status 판단용 모듈들은 입력된 혹은 검지된 신호로 현재의 각 상태를 판단한다. 만약 이들 기능 모듈들이 판단하여 정상적 동작을 수행하지 못할 것으로 판단되면 이를 Supervision Processor에 이 사실을 통보하게 되고, Supervision Processor는 미리 설정된 fail-safe값을 설정하도록 Output Process를 동작시킨다. State,

Stage, Route, Mode Control 모듈들은 각각의 Status 판단용 모듈들이 ATO가 정상적 동작을 수행할 수 있다는 전제가 성립 한 후에 고유한 ATO의 기능들을 수행하게 된다. ART내에서의 고유 기능은 ATO 운행의 설정 또는 해제 여부, Target Route의 설정, 재설정, 유효화, 무효화를 통해 자동운전을 위한 대기, 설정, 출발여부, 주행여부, 도착여부 등을 계속적으로 감시하여 제어상의 하위 TASK들의 자동운전을 위한 제어 동작을 지시한다.

ART의 내부 Process는 Input, Output 및 Control Process로 구성되며, SPR은 ART로 부터의 제어에 따라 동작하는 Task로써, 주행중 차량의 감속시점(거리 기준) 및 추종 해야할 목표 속도, 목표 가감속도, 목표 저크 제한량등을 계산한다. 출발 및 역간 운행중의 추종 속도, 가감속도는 지상 신호 장치로 부터 ATC를 경유하여 ATO로 전달되는 Speed Restriction Command와 TWC를 경유하여 ATO로 전달되는 운행 전략 (회복운행/정상운행)에 근거하여 산출된다. 그러나, 거리 기준으로 산출되는 주행 패턴은 실제적으로 상기의 추종속도 결정 판단을 기준으로 하되 선로 데이터베이스 정보 및 미리 그 위치에 설정된 제한속도에 의거 다음의 Permanent Speed Restriction Command 변화점 및 가상으로 설정된 위치, 정지점 위치에 이르러서 제한 속도를 초과하지 않도록 예비감속을 전제로 다시 한번 Control Process의 제한을 받게 되며 추종속도는 이런 예비감속의 요소들을 고려하게 된다. 이때 실제 열차 운행에서의 운동 역학적 모델에서 생각할 수 있는 선로 조건(구배, 선로 반경..)에 따라 열차가 진행하려는 방향과 반대되는 힘이 작용하게 되는데 이는 상구배 또는 하구배에 따른 열차 추진력에 저항의 요소로 작용하게 되며, 선로의 곡선부를 달리게될 때 발생하는 차륜과 레일의 답면, 측면과 발생하는 저항등 외부적인 요소에 의한 저항이 발생하게 된다.

또한, 이러한 외부적 요소에서 기인되지 않고도 열차가 운행해 나가는 과정에서 레일과의 상관관계로 볼 수 있는 차륜과 레일간의 마찰계수, 점착 한계력등을 고려한 주행저항을 고려하여야 한다. 이 주행저항은 열차가 속도를 증가시키에 따라 발생하는 레일과 차륜의 마찰력 및 공기저항과 기어 및 회전축등이 가지고 있는 고유마찰력에 기인하는 열차 진행방향과 반대로 작용하는 힘이며 이들 요소들은 나누어 계산에 사용되어야 한다. 즉, 출발 저항의 영향을 받는 0 에서 5 km/h 구간, 이후 속도가 증가함에 따라 단계별로 주행저항의 기준치를 정하고 속도에 대비하여 주행저항을 산출한다.

상기의 선로의 상태에 따른 간접적 요소와 열차와 레일간의 직접적 상관 요소를 고려하여 다음의 동력학적 주행방정식이 산출되는데, 열차가 진행함에 있어 만나게 되는 구배 변화 시작점에서 부터 평균구배 만큼의 가감속도의 영향을 가지게 되며, 이는 일반적인 경사면에서의 중량에 관계되는 벡터 성분으로 산출된다. 가용 추진력, 주행저항, 구배저항등을 고려한 기본적인 주행 방정식은 아래와 같다.

$$(1 + \lambda m)(M + m)(ds^2/dt^2) = T - R - (M + m)gi$$

- 여기서, λm : 동적부하계수
 M : Motor가 설치된 차량 중량
 m : Motor가 설치되지 않은 차량 중량
 T : 추진력
 R : 주행저항
 gi : 중력가속도

만약 열차가 35퍼밀 상구배를 동반하는 경우 열차가 평탄선로에서 가질 수 있는 최대 감속도 (β max) 최대값이 0.9 m/s/s이지만, 35퍼밀 구배 자체의 β gradient에서 약 0.35 m/s/s를 보상할 수 있을 것이며 실제로 열차가 0.9의 감속도를 인가한다면 35퍼밀 구배에서는 1.25의 감속도로 낼 수 있다. 따라서, 35퍼밀의 상구배인 경우 평탄선로에 비해 같은 지점에서의 Speed Reference는 더 높은 값을 갖게되며 결과적으로 좀 더 늦게 제동인가가 이루어져야 한다. 그러나, 최대감속도 0.9를

유지하기 위하여 0.55의 감속도를 인가하면 평탄선로에서의 0.9를 인가한 경우와 같은 제동력을 가지므로 0.9로 계산된 속도와 0.55의 감속도를 Speed Reference로 발생시켜야 한다. 반대로 열차가 35 퍼밀 하구배를 내려가는 경우 열차가 평탄선로에서 가질 수 있는 최대 감속도 (β_{max}) 최대값이 0.9 m/s/s이지만, 35퍼밀 구배 자체의 $\beta_{gradient}$ 에서 약 - 0.35 m/s/s를 감쇠할 것이며 실제로 열차가 0.9의 감속도를 인가 한다면 35퍼밀 구배에서는 0.55의 감속도를 낼 수 있다. 따라서, 35퍼밀의 하구배인 경우 평탄선로에 비해 같은 지점에서의 Speed Reference는 더 낮은 값을 갖게되며 결과적으로 좀 더 일찍 제동인가가 이루어져야 한다. 그러나 열차의 최대감속도 0.9를 추종하기 위하여, 0.9의 감속도를 인가하면 0.55의 경우와 같은 제동력을 가지므로 0.55로 계산된 속도와 0.9의 감속도를 Speed Reference로 발생시키되 평탄 선로에 비해 상대적으로 제동인가 시점은 더 일찍 이루어 져야 한다.

이런 구배 및 주행시 저항으로 영향을 미치는 요소를 고려하고, 이를 열차의 추진/제동력의 한계(가용범위)로 결정한 전제하에서 Profile Speed Reference를 생성하여 그 값을 추종하게될 때, 선로의 각 구간에서 최대로 제한되어 있는 ATC Speed Command가 바뀌는 지점의 좌표, 속도를 기준으로 Profile Speed Reference를 생성한다.

현재 열차의 진행 절대 좌표 지점을 S present, 속도가 변화되는 좌표 지점을 S1, S2, ..., Sn로 정의하면 단위 거리별로 S1에서의 거리와 속도를 기준으로 한 감속 Pattern이 생기며, 그 최대제한값은 열차의 최고속도를 기준으로 하여 정한다. 즉, 열차의 가용 β (감속도)를 유지하며 감속했을 경우의 각 단위거리별로 생성한다.

$$V_{reference} = \text{SQR} \left((V_{target1})^2 + 2 \times \beta \times (S_{present} - S1) \right)$$

최종적으로 Speed Reference 선정 및 전송은 아래의 속도 중 가장 하한값을 기준으로 선정되고 제어요소로 사용된다.

4.3 REG

REG는 ART로부터 Reference Speed를 받아 현재속도와 비교하여 추종해야할 속도차이를 산출한다. 이때 속도 차이를 추종하기 위해 가속 또는 제동력에 필요한 힘을 계산한다. 이에 반하여 현재 속도에서 사용할 수 있는 최대견인력, 최대제동력을 산출하게 되면 가속(감속)에 필요로 하는 힘과 현재속도에서 가용할 수 있는 힘과의 비율을 산출한다. 이때, 필요 견인력(제동력)이 클 경우 최대값은 현재속도에서 가용한 최대견인력으로 하고, 현재 열차속도와 Speed Reference와 일치하도록 추진/제동력명령 해당하는 값을 추종할 값을 계산하고 명령을 내보낸다. 이때 비정상적인 상태가 검지되어 더 이상의 자동운전을 수행할 수 없거나, FSB(Full Service Brake)요구를 인지하여 REG가 InActive되었을 때 추진/제동력 명령은 전상용 제동(FSB)에 해당하는 값을 낸다. 또한, Speed Reference가 "0 Km", 현재속도가 "0 Km", 열차 정지가 인식되면 REG의 추진/제동 명령은 정차제동에 해당하는 값을 출력한다.

현재 열차의 속도와 Speed Reference로써 받은 매 단위시간의 목표 속도를 비교하여 ATO는 추진/제어의 상태를 결정하게 되는데, 이 상태천이의 기본적 요소는 열차속도와 목표속도의 차이이며, 열차 자동운전에 있어 비정상 상태 검지여부, 도착점까지의 거리와 연관되는 요소들에 의해 상태 천이가 결정된다. 상태 천이가 결정되면 더욱더 세밀한 추종 속도/가속도에 의거 제어량이 결정되게 되는데 이는 아래의 조건들을 고려한다.

1) SPR로부터 계산된 추종 가속도와 선로, 주행 운영전략, 열차조건을 감안한 가용 가속도 한계 값 중 최소값을 구하여 이를 목표 가속도로 정한다. 가용 가속도 한계값은 속도대별로 가중치를 두어 저속상태에서 필요 이상의 가감속의 변화를 줄이려는 시도이다. 또한 가감속 Pattern에서 열차의 최고 가감속도를 참고로 목표속도를 추산하지만, 열차가 목표속도에 접근함에 따라 완만한 변화가 일어나도록 한다.

2) 전 단위 시간에 명령한 제어량(Use_Cur_Acc)과 전 단위 시간에 명령한 제어량에 대한 열차의 반응(Motion_Status_Acc)을 비교하여 REG가 수행하여야할 실제 가감속도를 추종하는지를 감시하게 되는데 이때 이 추종도 여부를 판단하여 만족할 경우 현재의 제어 Parameter들을 유지시킨다.

3) Use_Cur_Acc와 Motion_Status_Acc를 비교하여 REG가 수행하여야할 실제 가감속도를 추종하는지의 여부를 감지함에 있어, 만약 Motion_Status_Acc 값이 Use_Cur_Acc를 추종하여 그 가속도에 미치지 못할 경우, 현재 부족한 가감속도의 값의 가중치를 첨가 보상되도록 한다. 이와는 반대의 경우로, Motion_Status_Acc 값이 Use_Cur_Acc를 추종하여 그 가속도를 넘어설 경우, 현재의 잉여 가감속도 값의 가중치를 감소 보상되도록 한다.

4) 생성된 Target_Acc와 Diff_Acc의 합산된 값을 목표값으로 하여, 각 샘플주기마다 Jerk Rate를 기본 단위로 Cmd_Acc를 증가/감소시킨다. 0.833 m/s/s의 가속도에 도달하기 위해 단위 시간별 가속도 변화율은 0.2 m/s/s/s 이하로 제한한다.

5) 생성된 Cmd_Acc와 만차 조건의 차량을 기준으로 한 필요 추진/제동력을 계산한다.

6) 속도도 대별 최대 가용할 수 있는 추진/제동력 대비 현재 필요 추진/제동력과의 비율을 산출하여 PB_Order를 생성하여 출력한다.

여기서 REG에서 출력된 가속도를 Propulsion/Brake Force로의 환산은 먼저 필요견인력을 산출하게 되는데 SPR로 부터의 Speed Reference에 의해 차량속도와 비교하여 역행이 결정되면, 현재의 차량속도에서 가용할 수 있는 최대 견인력을 구하고, 주행중 열차저항이 없는 이상적 상태에서 열차를 움직인다고 가정할 때 열차의 무게에 따른 필요 견인력을 구한다.

$$F (\text{Traction}) = m \times a$$

여기서, m 을 동적부하계수 $m (1 + \lambda)$ 으로 치환하면

$$F (\text{Traction}) = m (1 + \lambda) \times a$$

계산된 추진력 값에 출발 및 주행 중에 발생하는 주행저항값을 더하면 실제열차가 주행하는데 필요한 실제견인력을 산출할 수 있다. 현재속도의 인버터 가용견인력의 100%를 초과할 시 100%로 제한한다. 결국 제어의 요소는 현재속도의 최대가속도를 100%로 정하고 단계적으로 가속비율을 증가시킨다. 즉, SPR로 부터의 Speed Reference중 추종가속도가 0.811이라 할지라도 일반적인 인버터의 설계에서 보듯이 속도대비 추진력은 44 km/h정도 이상인 경우 최대가속도는 그 이하이므로 현재속도의 최대가속도를 100%로 제한하고, 그 최대가속도를 100%로 설정한다. 필요 제동력에 대하여도 마찬가지로 산출할 수 있다

이는 단순한 장치간의 인터페이스의 문제가 아니라 열차 시스템 전체, 예를 들자면 ATO에서 통

신을 통해 TCMS, 추진장치로 전달되는 경로에서 발생하는 제어 양상과 제어 시간, 응답시간, 모터와 기어 커플링을 통해 차륜에 전달되는 경로, 저속 혹은 고속상태에서의 공기의 압력 변화에 따른 제동 디스크나, 제동슈의 마찰력등 전체적인 차량의 기계적, 전기적 요소들을 고려해야 한다. 이론적으로 제어량의 결정은 수학적 모델링과 주변 요소에 영향을 적게 받는 제어기를 설계하게 된다. 그러나, 실제 자동운전 Commissioning과정에서 발생하는 문제점은 거의가 기계적, 전기적으로 복합된 차량 및 선로의 전체 시스템 요소들에 의한 문제가 대부분이므로, 전 선로와 역사의 상태에 따라 자동운전의 성능은 영향을 받게 된다. 그림 6에 전체적 제어 개념을 도식화한 개념도를 보여 주고 있다.

5. 결론

금번 개발한 ATO 장치에 대한 성능을 평가하기 위하여 ATO Simulator를 별도로 개발하여 모의 주행 시뮬레이션을 실시하였다. 모의 주행 시뮬레이션 결과 열차 자동 속도조절에 대한 추종력은 상당히 양호한 것으로 나타났다. 열차 자동운전 장치에 대한 성능 향상을 위하여 열차의 상태에 따른 주행현상을 명확히 파악하고, 선로 및 공기저항 등에 따른 열차의 운동특성에 대한 연구를 계속적으로 진행할 계획이다.

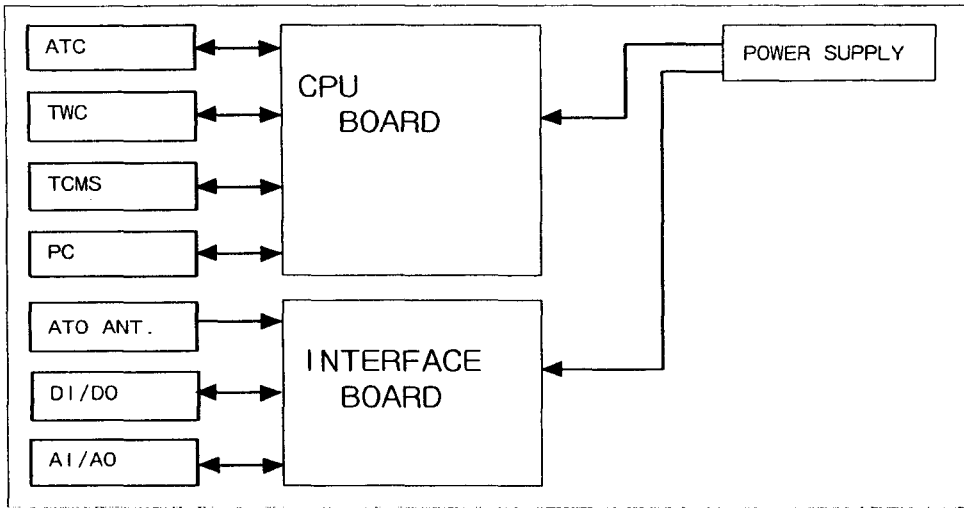


그림 1. ATO 장치와 타 장치간 인터페이스도

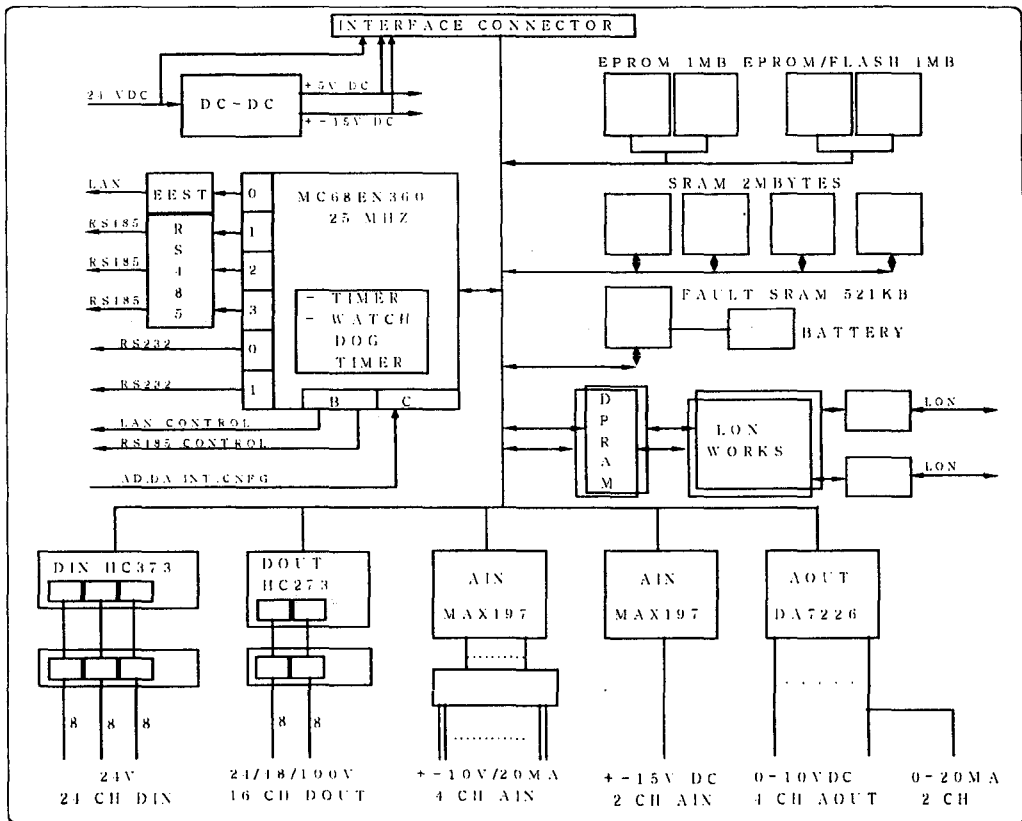


그림 2. ATO 장치 CPU Board 구성도

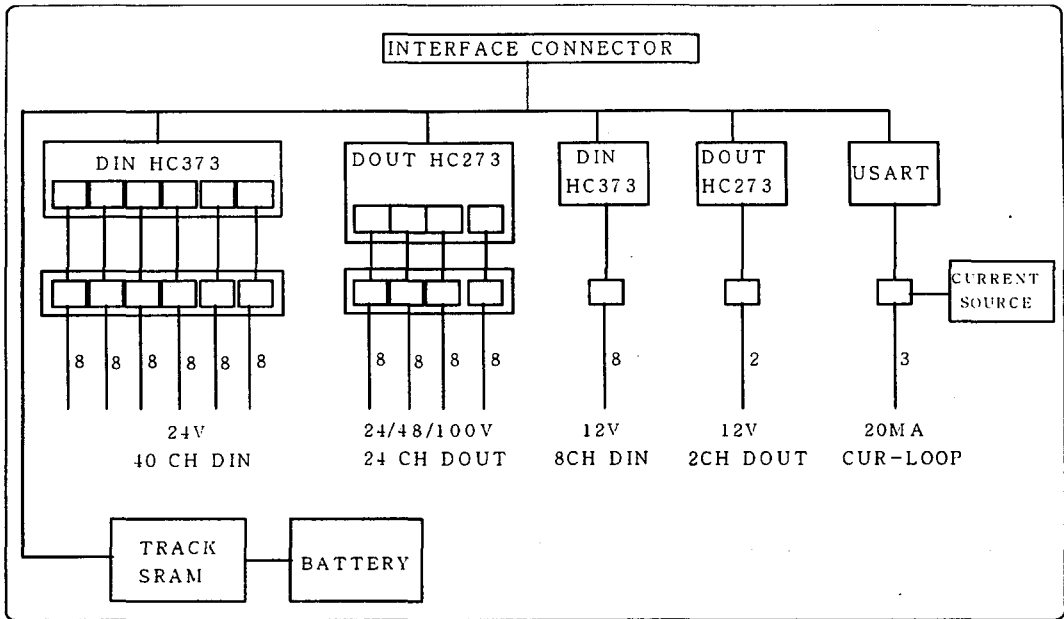


그림 3. ATO 장치 Interface Board 구성도

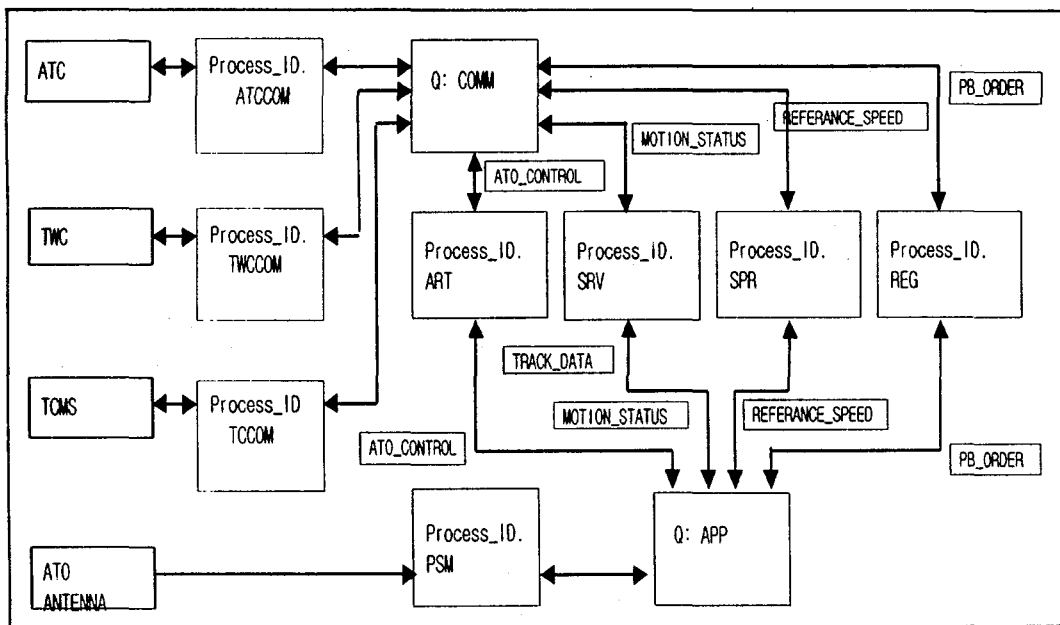


그림 4. ATO Application부의 TASK 구성 및 TASK간 데이터 흐름도