

論文2001-38SC-1-1

유압식 인버터 엘리베이터의 속도제어를 위한 하이브리드 퍼지제어기의 설계

(Design of a Hybrid Fuzzy Controller for Speed Control of a Hydraulic Elevator Controlled by Inverters)

韓 權 相*, 金 炳 華**, 安 鉉 植*, 金 道 鉉*

(Gueon-Sang Han, Byoung-Hwa Kim, Hyun-Sik Ahn, and Do-Hyun Kim)

요 약

인버터를 적용한 유압식 엘리베이터 시스템은 펌프의 마찰과 실린더 패킹 및 탑승카와 레일의 마찰특성으로 인하여 PID 제어기로는 제어가 되지 않는 데드존이 생기게 된다. 본 논문에서는, 이러한 문제를 해결하기 위하여 먼저, 퍼지제어기와 PID제어기를 혼용하는 하이브리드제어기를 이용하는 방법을 시도한다. 그러나, 인버터를 적용한 유압식 엘리베이터는 비선형성이 강한 시스템이므로 두 제어기의 출력이 절환되어야 하는 경계층이 다수인 경우가 대부분인데 반하여, 기존의 하이브리드제어기는 두 제어기의 출력이 절환되는 특정 구간의 경계층을 제외하고는 전체 운전구간에서는 어느 한 제어기에만 영향을 받게 되므로 제어성능에 문제를 가지게 된다. 이에 따라 본 논문에서는, 출력혼합기의 출력비를 퍼지로직에 의하여 변경시키는 새로운 퍼지하이브리드제어기를 제안하여 기존의 하이브리드제어기의 문제점을 해결한다. 제안된 퍼지하이브리드제어기는 시스템의 상태에 따라서 두 제어기의 출력비를 달리하여 사용하는 방법으로 향상된 제어성능을 달성한다. 시뮬레이션 결과를 통하여, 제안된 퍼지하이브리드제어기가 극저속 속도영역에서 뿐 아니라 정상상태를 포함한 전 운전 영역에서의 제어 성능이 우수함을 보인다.

Abstract

Due to the friction characteristics of cylinders and the rail of a passenger car, in the elevator actuated with hydraulic systems, there exist dead zones, which can not be controlled by a PID controller. To overcome the drawbacks, in this paper, we first try a hybrid controller which switches between a fuzzy logic controller and a PID controller. However, because the hybrid control scheme uses only a single type controller, except the switched layer, the high control performance can not be achieved. To solve this problem, we propose a new type fuzzy hybrid control scheme, which outputs of the output mixer are controlled by a fuzzy logic. The hydraulic elevator system controlled by inverters has more than one switched layers due to the highly nonlinear characteristics. The proposed fuzzy hybrid control scheme achieves improved control performances by using both controllers with weighted outputs depend on the system status, to achieve improved control performances. The effectiveness of the proposed control scheme are shown by simulation results, which the proposed fuzzy hybrid control method yields good control performance not only in the zero-crossing speed region but also in the overall control region including steady-state region.

* 正會員, 國民大學校 電子工學科

(School of Electrical Engineering, Kookmin University)

** 正會員, 東元大學 電子科

(Dept. of Electronics, Tong Won College.)

接受日字: 2000年 7月5日, 수정완료일: 2000年 12月6日

I. 서 론

유압식 엘리베이터는 유압잭에 의해 탑승카를 직접 또는 간접적으로 지지하고, 잭으로 공급, 배출되는 오

일의 유량을 조정하여 탑승카를 상하로 이동시키는 장치이다. 유압식 엘리베이터는 로프식 엘리베이터에 비하여 기계실을 건물 상부에 위치시키지 않고 자유롭게 배치할 수 있고, 탑승카 중량을 유압잭을 통해서 모두 승강로 바닥에서 지지하기 때문에 건물에 대한 부담을 적게 할 수 있는 등 여러 장점이 있다. 특히, 최근에 일조권 침해 방지 문제가 대두되어, 도시를 중심으로 해서 유압식 엘리베이터의 수요가 증가하고 있다^[18]. 그러나 유압식 엘리베이터는 모터를 회전시킬 때 전원을 직접시켜 회전시키므로 소비 전력이 로프식보다 훨씬 크고, 갑작스러운 모터의 기동, 정지로 인한 쇼크를 탑승객들이 그대로 느끼게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 적용하고, 유압모터를 벡터제어하여 전동기를 연속적으로 가변속운전을 시킴으로써, 유압펌프의 회전수 제어로 유량을 제어하는 유압식 인버터 엘리베이터가 최근에 개발되기 시작하였다^[2]. 유압식 인버터 엘리베이터는 일반 유압식 엘리베이터보다 소비 전력이 작고 부드러운 승차 감을 얻을 수 있으나 전동기, 유압펌프, 유압실린더, 로프, 카 구조물을 포함한 유압시스템의 기계적인 공진과 온도 및 부하에 따라 변동하는 비선형성을 갖는 복잡한 시스템으로 특히, 극저속 속도영역에서 펌프의 마찰력과 실린더의 패킹 마찰력으로 인한 모터의 속도가 제어되지 않아 급작스러운 쇼크가 발생하는 단점이 있다^[3].

일반적으로 이러한 비선형 쿨롱마찰 특성을 제어하기 위해 Bang Bang 제어기법, 또는 관측기 등을 이용한 제어기법이 소개되었으나 실 시스템에 적용하는 경우 Bang Bang 제어기법은 정확한 파라미터 선정 및 마찰 모델의 변동문제가, 관측기를 사용한 방법은 관측기의 응답대역의 제한에 의한 마찰추정오차가 문제점으로 대두되었다^[7].

이러한 문제점들을 해결하기 위해 퍼지제어기를 이용한 마찰 보상 기법이 제시되었다^[4]. 일반적으로 퍼지 제어기는 입력력 관계가 비선형이고 큰 오차에 대해 처리 능력이 뛰어나기 때문에 비선형특성을 나타내는 시스템에 적합하나 오차가 매우 작을 때는 오차에 둔감하고 PID제어기가 갖고 있는 적분능력이 없기 때문에 정상상태 에러가 PID제어기에 비하여 클 수밖에 없다^[5]. 오차 에러가 작은 정상상태 응답 특성을 개선하기 위하여 줌잉퍼지제어기를 사용하나, 제어 출력이 퍼지룰에 의존하기 때문에 영역을 세분화하여 제어하려면 많은 퍼지 제어 규칙을 필요로 하여 연산 량이

많아져 제어기구현에 속도가 빠른 CPU를 요구하게 된다^[6]. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 비선형제어기인 퍼지제어기와 선형제어기인 PID제어기의 장점만을 취한 하이브리드제어기가 제시되었으나^[12], 하이브리드제어기는 출력이 절환 되는 특정 구간의 경계 층을 제외하고는 전체 운전영역에서 어느 한 제어기에만 영향을 받게 된다.

유압식 엘리베이터와 같이 적용되는 시스템이 비선형시스템일 경우에는 하이브리드제어기에 있어서 어느 한 제어기의 출력이 다른 제어기의 출력으로 절환되어야 하는 경계 층이 다수 구간일 경우도 있고, 운전상태(엘리베이터의 경우 상승 또는 하강)에 따라 같은 구간에서의 두 제어기의 출력비가 달라야 될 경우가 있을 수 있게 된다. 이러한 경우, 기존의 하이브리드제어기로서는 제어가 어려운 구간이 존재하게 된다.

이에 따라 본 논문에서는, 시스템의 상태에 따라 두 제어기의 출력혼합의 출력 비를 다르게 적용하여 유압식 엘리베이터시스템을 최적으로 제어될 수 있도록 하는 퍼지하이브리드제어기를 제안한다. 제안된 퍼지하이브리드제어기는 특정한 한 구간에서 뿐 아니라 전 운전구간에서 출력비를 최적으로 조절할 수 있고, 비선형시스템에 있어서 전문가의 전문지식을 수용할 수 있도록 퍼지로지제어기로 구성된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장 및 3장에서, 극저속 속도영역에서 속도가 제어되지 않는 원인이 되는 실린더의 마찰특성을 고찰한다. 4장에서 실린더의 마찰특성으로 인하여 PID 속도제어기로 제어시 발생하는 문제점을 분석하고, 줌잉 퍼지룰을 포함한 퍼지제어기, 퍼지제어기와 PID제어기를 결합한 하이브리드제어기를 설계하며, 이를 바탕으로 하이브리드제어기의 출력혼합기의 출력 비율을 가변시킬 수 있는 퍼지하이브리드제어기를 제안한다. 5장에서, 제안된 퍼지하이브리드제어기가 인버터로 구동되는 유압식 엘리베이터 실린더의 마찰특성으로 인하여 극저속 속도영역에서 속도가 제어되지 않는 문제를 해결하고, 극저속 속도영역에서 뿐 아니라 정상상태를 포함한 전 운전영역에서의 제어 성능이 우수함을 시뮬레이션으로 검증하도록 하며 6장에서 결론을 맺는다.

II. 인버터 제어 유압식 엘리베이터 시스템의 모델링

1. 시스템 구성

유압식 엘리베이터는 크게 모터와 제어반을 포함하는 전기 시스템, 유압펌프와 유압실린더를 포함하는 유압 시스템, 그리고 카와 로프 등을 포함하는 기계 시스템으로 나누어 생각할 수 있다. 유압 모터의 회전에 의해 유압 펌프로부터 토출된 유량은 체크밸브를 거쳐서 유압잭으로 유입되어 유압잭을 상승시켜 카를 이동시킨다. 또한 유압 모터의 역회전에 의해서 유압잭으로부터 체크밸브를 거쳐 탱크로 배출되는 유량을 조절하여 카를 하강시킨다. 그림 1은 유압식 인버터 엘리베이터의 구성이다. 오일탱크는 모터가 오일 속에서 회전하는 오일내장형 구조이고, 체크밸브에는 펌프 측과 실린더 측 압력을 측정할 수 있는 압력센서가 취부된다. 또한 오일탱크 속의 모터는 펌프와 오일침적형 엔코더가 취부되어 모터의 속도를 검출할 수 있고, 카의 상부에도 엔코더가 취부되어 카의 속도를 검출할 수 있다. 모터는 3상 380V, 48kw이고, IGBT 컨버터, IGBT 인버터로 전력변환회로를 구성하였다.

그림 1에서 오일탱크 내 모터의 회전 토크에 의해서 회전하여 오일을 관로를 통해 실린더로 토출하는 유압

펌프의 유량 특성 방정식은 식 (1)과 같고 유압펌프의 토크 관계식은 식 (2)와 같다.

$$Q = V_o \cdot \dot{\theta}_p - \frac{C_1 \cdot P_1^{0.85}}{\sqrt{\nu}} \quad (1)$$

$$T_p = J_p \ddot{\theta}_p + C_p \sqrt{\nu} \dot{\theta}_p + V_o P_1 \quad (2)$$

여기서,

Q : 유량 [m³/sec]

V_o : 유압 펌프의 단위 체적 [m³/rad]

$\dot{\theta}_p$: 유압 펌프의 회전 각속도 [rad/sec]

P_1 : 유압 펌프의 토출 압력 [N/m²]

ν : 오일 점도 [cSt]

T_p : 유압 펌프의 구동 토크 [N·m]

J_p : 유압 펌프+전동기의 회전 관성 모멘트 [kg·m²]

C_1 : 유압 펌프의 누유 계수

C_p : 점성 마찰 토크 계수이다

그림 2는 유압식 엘리베이터의 기계적 구성을 모델화한 것으로 실린더는 바닥에 고정되고 풀리가 실린더 상부에 취부된다. 로프의 한쪽 면은 바닥에 고정되며 반대쪽은 실린더 상부의 풀리를 거쳐서 카 바닥에 연결되는 구조이다. 실린더에 오일이 유입되어 실린더 압

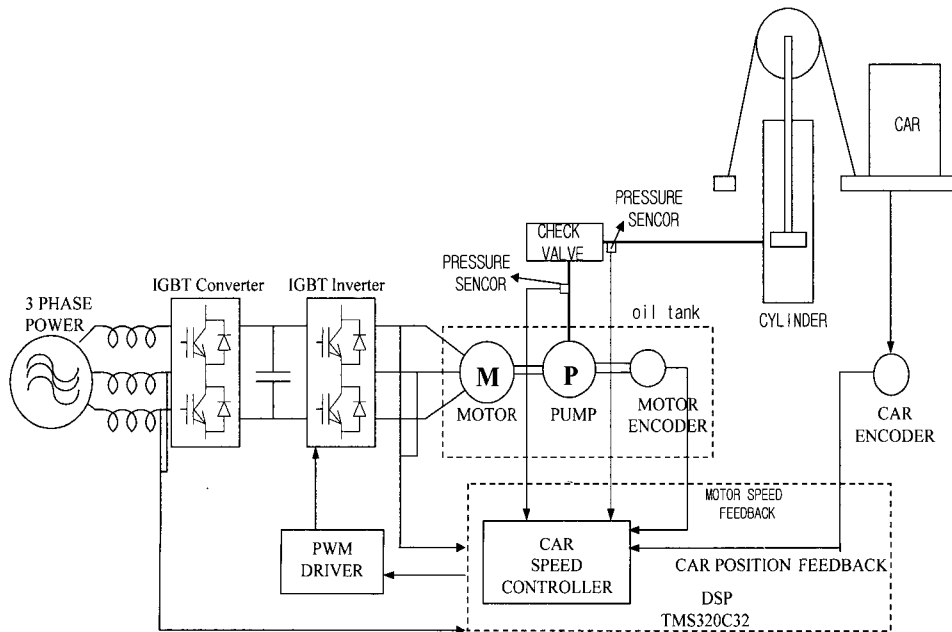


그림 1. 유압식 인버터 엘리베이터의 구성

Fig. 1. Configuration of a hydraulic elevator controlled by inverter.

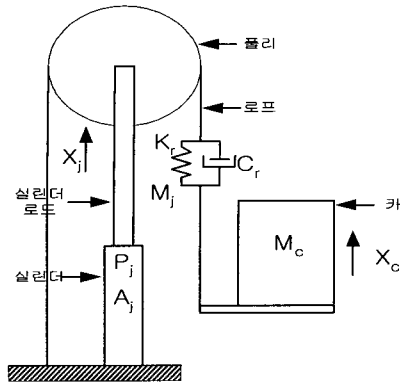


그림 2. 유압식 엘리베이터의 기계적인 모델링

Fig. 2. Mechanical modeling of a hydraulic elevator.

력이 상승하게 되면 실린더 로드가 상승하게 되고, 로프에 의해 지지된 카가 상승하게 되며, 반대로 하강 시는 실린더의 오일이 빠지게 되면, 실린더의 압력이 떨어져 카의 무게에 의해 탑승카가 하강하게 되는 구조이다. 카(car)를 하나의 강체로 취급하고, 풀리(sheave)의 관성은 작으며, 로프(rope)는 질량이 없고 단순히 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 구성되어 있다고 가정하면, 기계 시스템의 운동 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} M_c \ddot{x}_c + C_r (\dot{x}_c - 2\dot{x}_j) + K_r (x_c - 2x_j) &= -M_c \cdot g \\ M_j \ddot{x}_j + 2C_r (2\dot{x}_j - \dot{x}_c) + 2K_r (2x_j - x_c) &= P_j A_j - M_j \cdot g \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, K_r : 로프의 등가 스프링 상수 [N/m]

C_r : 로프의 등가 댐핑 상수 [N·sec/m]

M_c : 카 무게+부하 하중 [kg]

x_c : 카의 변위 [m]

x_j : 실린더 로드의 변위 [m]

P_j : 실린더 내 압력 [N/m²]

A_j : 실린더 로드의 단면적[m²]

M_j : 실린더로드의 무게+풀리의 무게[kg]이다.

2. 속도제어 시스템의 전달함수

식 (1)에서 θ_p 을 구하고 식 (2)에 대입하여 라플라스 변환하면, 변환된 전동기 발생 토크 $T(s)$ 와 유압 실린더 내 압력 $P(s)$ 와의 관계는 식 (4)과 같이 주어지게 된다. 식 (3)을 라플라스 변환한 후, 식 (4)을 대입하여 전동기 발생 토크 $T(s)$ 와 카 속도 $s \cdot X_c(s)$ 로 정리하면 유압식 엘리베이터의 속도제어 시스템의 전

달함수는 다음 식 (5)과 같다^[10].

$$\frac{P(s)}{T(s)} = \frac{V_o \cdot s \cdot B_f(s)}{\Delta_c(s)} \quad (4)$$

$$\frac{s \cdot X_c(s)}{T(s)} = \frac{2A_j \cdot V_o \cdot (C_r \cdot s + K_r)}{\Delta_c(s)} \quad (5)$$

단, K_1 은 압력손실계수, V_j 는 실린더의 단위 체적이며, $B_r(s)$ 는 유압 실린더 로드가 고정되어 있을 때 카와 로프 계의 특성방정식이고, $B_f(s)$ 는 실린더 내에 오일이 없고 유압 실린더 로드가 자유로울 때의 특성방정식이다. $\Delta_c(s)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta_c(s) &= [J_p \cdot s^2 + C_p \cdot \sqrt{\nu}] \cdot \left[\left(A_j^2 + \frac{C_1}{\sqrt{\nu}} \cdot K_1 \cdot A_j^2 \right) \cdot B_r(s) + \left\{ V_j \cdot s + \frac{C_1}{\sqrt{\nu}} \cdot (K_1 \cdot V_j \cdot s + 1) \right\} \cdot s \cdot B_r(s) \right] \\ &+ V_o^2 \cdot [K_1 \cdot A_j^2 \cdot B_r(s) + (K_1 \cdot V_j \cdot s + 1) \cdot s \cdot B_r(s)] \end{aligned}$$

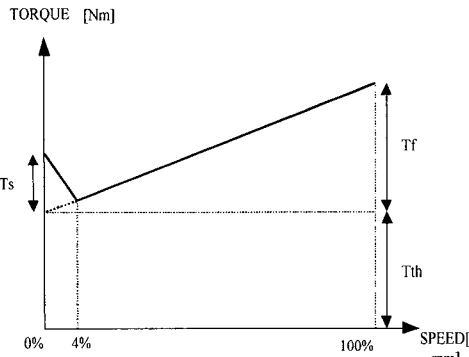
III. 유압펌프의 극저속(zero-crossing speed) 모델 및 마찰특성

일반적으로 모든 기계 부품들은 스틱션, 점성, 쿨롱 마찰로 나누어지는 마찰특성이 존재한다. 유압식 엘리베이터에서 나타나는 마찰은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 첫째는 실린더의 패킹저항으로 인한 쿨롱마찰과 카와 레일의 마찰이다. 둘째는 펌프의 저속 운전시에 나타나는 스틱션 마찰이 존재하게 된다^[9,11]. 유압식 엘리베이터에서 사용하는 펌프는 스크류 펌프이며, 이 펌프는 한쪽에만 부하압력이 작용하게 되면 스크류의 축방향으로 힘의 균형이 상실되어 스크류의 접촉으로 인한 펌프 내측면과의 마찰이 존재하게 된다. 이러한 마찰력은 일반적인 기계 시스템의 마찰력보다 훨씬 크게 되어 시스템의 진동에 심각한 영향을 끼치게 된다. 정상상태에서의 펌프의 토크 관계식은 식 (2)과 같다. 펌프의 저속 회전 시에는 펌프의 회전 속도에 비례하는 점성 마찰 토크 이외의 실린더의 패킹으로 인한 큰 마찰 토크가 존재하여 추가적인 마찰 성분 T_s 를 펌프의 토크 관계식에 더하여 주면 식 (2)은 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

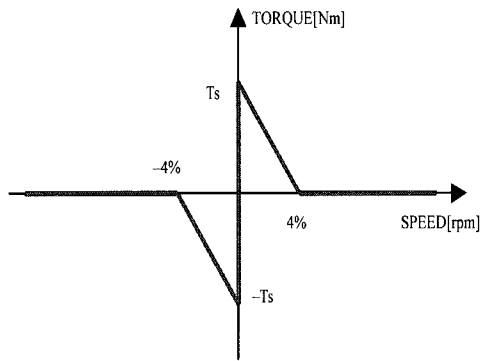
$$T_m = J_p \ddot{\theta}_p + C_p \cdot \sqrt{\nu} \dot{\theta}_p + V_o P_1 + T_s \quad (6)$$

유압펌프의 부하토크는 그림 3의 a)와 같은 특성을 가진다^[9]. 그림 3의 a)에서 보듯이 펌프 정격 속도의

4%까지는 펌프 자체의 마찰력이 존재하게 된다. 여기에 실린더 패킹 마찰력까지 더하여 그림 3의 b)와 같은 유압엘리베이터에서의 마찰특성을 모델링할 수 있으며, 온도와 부하의 변동에 따라 마찰력 크기 T_s 가 변동한다. 그림 3의 b)와 같은 마찰특성은 모터의 극저속 속도영역에서 모터의 속도가 제어되지 않고 마찰력으로 인하여 정지되고 큰 토크가 인가되어야만 급작스럽게 기동하는 데드존(dead zone)이 존재하게 되며, 이 순간에 쇼크가 발생된다. 이 현상은 부하보상을 완료하고 체크밸브를 열고 하강을 시작하는 경우에 특히 심하게 나타난다.



(a) 유압펌프의 마찰특성



(b) 유압시스템의 마찰모델

그림 3. 유압시스템의 마찰특성 및 마찰모델.
Fig. 3. Friction characteristics and modeling of a hydraulic elevator.

IV. 속도제어를 위한 하이브리드 퍼지제어기 설계

1. PID제어기

PID제어기는 적분능력을 갖고 있어 정상상태 에러를

추종하는데 제어 성능이 뛰어난 것으로 평가받고 있다. 그러나 일반적으로 입력력 관계가 비선형이고 오차가 큰 비선형시스템에 적용할 경우에 제어 성능을 보장할 수 없고 발진할 가능성이 높다. 본 논문에서 적용한 PID제어기는 엘리베이터의 카속도제어기에 적용하였으며, PID 카속도제어기의 게인은 식 (5)에 PID 카속도제어기를 부가한 후 개루프 전달함수를 구하고, 보드선도로 주파수 특성을 파악하여 차단주파수 10rad/sec에서 적당한 게인 마진과 위상 마진을 갖도록 설계하였다. 또한, 설계된 PID게인은 시뮬레이션을 통하여 적절히 조정하여 적용하였다. PID제어기의 입력은 카속도 에러이고, 출력은 모터에 인가되는 토크전류이다. PID 카속도제어기를 적용한 유압식 인버터 엘리베이터 시스템에서 모터속도를 살펴보면, 그림 3의 b)에서의 비선형 부하특성이 나타나는 극저속 속도영역에서 제어가 되지 않게 되며 멈추었다가 갑작스럽게 기동하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 문제점은 카가 기동할 때뿐 아니라 착상하고자 하는 층에 도달하여 정지할 때도 나타나게 되고, 승차감에 악 영향을 줄뿐만 아니라 정착상도 어렵게 하는 문제점이 나타난다.

2. 줌잉 퍼지제어기 설계

PID제어기로는 비선형시스템인 유압식 인버터 엘리베이터의 극저속 속도영역에서 제어되지 않으므로 이 절에서는, 유압시스템의 비선형특성을 효과적으로 제어하기 위해 시스템 특성 파라미터가 필요없는 퍼지로직제어기를 설계한다. PID제어기는 제어기의 출력이 선형적이므로 콜롱마찰과 같은 비선형 부하 구간에서는 모터기동전까지는 출력이 선형적으로 변하기 때문에 임계토크점을 지나기 전까지는 모터가 기동하지 못하므로 응답 시간이 느리게 된다. 또한, 에러가 계속적으로 누적되어 다음 출력에 영향을 주기 때문에 모터가 기동하여 갑작스럽게 마찰이 사라지는 구간에서는 출력을 급격하게 줄이지 못한다. 반면에, 퍼지제어기는 모터가 기동하지 않으면 다음 출력에서 바로 최대 출력을 내 보낼 수 있으므로 응답 속도가 빠르고, 임계토크점을 지나 모터가 기동을 시작하여 정지마찰력이 사라지는 다음 출력에서도 마이너스 토크를 출력할 수 있어서 오버슈트가 없게 된다.

제어 법칙에 관련된 퍼지추론을 결정하기 전에 다음과 같이 퍼지로직제어기의 입력으로써 카속도의 오차 및 카속도의 오차의 변화율을 식 (7)과 식 (8)과 같이 정의한다.

$$e(k) = N(k) * -N(k) \quad (7)$$

$$\Delta e(k) = (e(k) - e(k-1)) / T \quad (8)$$

여기서 $N(k)*$ 은 카의 기준 속도이며, $N(k)$ 은 실제 카속도, $e(k)$ 는 카의 속도 편차, $\Delta e(k)$ 는 k차 샘플링 간격에 있어 속도 편차, T는 샘플링시간이다. 퍼지제어기의 출력은 유압모터에 인가되는 토크 전류이며, 출력 전류의 최대 출력 범위는 모터의 정격 전류로 제한하였다. 퍼지제어규칙을 위해 다음식 (9)와 같이 언어 변수를 설정하였다.

$$L = [NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB] \quad (9)$$

단, NB : Negative Big NM : Negative Medium
NS : Negative Small ZO : Zero
PS : Positive Small PM : Positive Medium
PB : Positive Big 이다.

퍼지화방법은 퍼지싱글톤방법(fuzzy singleton method)을 적용하였고, 멤버쉽함수(membership functions)는 이등변삼각형법을, 퍼지추론은 Min-Max법을, 비퍼지화기는 무게중심법을 사용하였다. 퍼지제어기는 입력오차가 큰 시스템에서 우수한 성능을 나타내나 입력오차가 작은 영역에서는 오차에 둔감하기 때문에 정상상태 에러가 클 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 오차에러가 작은 구간에서는 퍼지제어롤을 좀더 세분화하여 제어하는 줌잉방법을 사용한다^[5]. 본 논문에서 사용된 퍼지제어기는 오차에러가 큰 구간에서 동작하는 퍼지제어규칙과 오차에러가 작은 정상상태 영역에서 동작하는 줌잉방법을 이용한 퍼지제어기를 사용하였으며, 줌잉 제어규칙에는 카속도 에러, 카속도 에러의 변화율뿐만 아니라 모터의 속도 $Wp(k)$ 을 입력으로 하였으며, 모터의 속도 $Wp(k)$ 을 입력받아 극저속 속도영역, 또는 정상상태 영역 내인지를 판단하여 세부적인 퍼지룰을 설정하였다. 퍼지제어규칙은 표 1에, 줌잉퍼지 제어규칙은 표 2에 나타냈다. 표 1과 표 2의 퍼지제어규칙은 PID 속도제어기로 제어할 경우에 카속도 오차 및 오차의 변화율, 모터속도 오차 및 오차의 변화율을 토대로 제어규칙을 설정하였다.

3. 유압식엘리베이터 제어를 위한 하이브리드제어기

일반적으로 퍼지제어기는 입출력 관계가 비선형이고 큰 오차에 대해 처리 능력이 뛰어나기 때문에 비선형 특성을 나타내는 시스템에 적합하나 오차가 작을 때는

표 1. 퍼지 제어규칙

Table 1. Fuzzy rule base.

$\Delta e(k)$ e(k)	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PS	PM
ZO	NB	NM	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PM	PB
PS	NM	NS	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 2. 줌잉 제어규칙(표 1에서 ZOOM표시)

Table 2. Zooming fuzzy rule base.

$e(k), \Delta e(k)$	$Wp(k)$	NS	ZO	PS
$e(k)=NS, \Delta e(k)=NS$		NS	NM	NM
$e(k)=NS, \Delta e(k)=ZO$		NS	NS	NM
$e(k)=NS, \Delta e(k)=PS$		NS	NS	NS
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=NS$		ZO	NS	NS
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=ZO$		ZO	ZO	ZO
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=PS$		PS	ZO	ZO
$e(k)=PS, \Delta e(k)=NS$		PS	PS	PS
$e(k)=PS, \Delta e(k)=ZO$		PS	PS	PS
$e(k)=PS, \Delta e(k)=PS$		PM	PM	PS

오차에 둔감하고, PID제어기가 갖고 있는 적분 능력이 없기 때문에 정상상태 에러가 클 수밖에 없다^[5,6]. 퍼지 제어기는 전문가적인 경험과 지식을 요구하게 되고, 시행오차법으로 퍼지 제어규칙을 만들어야 하므로 많은 실험 시간을 필요로 한다. 때문에 적용되는 시스템의 선형특성을 나타내는 구간에서는 선형제어기인 PID제어기를, 비선형 특성을 나타내는 구간에서는 비선형제어기인 퍼지제어기를 적용한 하이브리드제어기가 많이 연구되어 오고 있다^[12]. 이 절에서는 기존의 하이브리드 제어기를 유압식 인버터 엘리베이터 제어에 이용하는 설계방법을 제시한다. 이러한 하이브리드 제어기는, 유압식 인버터 엘리베이터 제어를 위하여 퍼지제어기 단독으로 사용할 때 보다 적은 수의 퍼지룰 베이스를 사용하고, 전문적인 지식이 부족하여 퍼지 룰베이스나 입출력 소속 함수의 튜닝이 정밀하지 않아도 PID제어기에 의하여 보상을 받을 수 있는 장점이 있다. 하이브

리드 제어기를 유압식 엘리베이터 제어에 이용하기 위하여 먼저, 다음의 세종류의 제어기를 설계한다. i) 엘리베이터의 탑승카를 움직이기 전에 실린더 압력과 유압펌프의 압력이 같도록 제어하는 부하보상 제어기(load compensation controller)를 설계한다. ii) 카속도 에러를 입력받아 모터의 출력토크 P_ref를 생성하는 PID제어기(PID controller)를 설계한다. 여기서 사용되는 PID제어기는 1절의 PID제어기 설계방법을 사용하였다.iii) 모터속도, 카속도에러, 카속도에러의 변화율을 입력으로 하고 모터의 출력토크 F_ref를 생성하는 줌잉 퍼지제어기(fuzzy logic controller with zooming rule)를 설계한다. 여기서 사용되는 줌잉퍼지제어기는 2절의 줌잉퍼지제어기 설계방법을 사용하였으며, 줌잉 퍼지 제어규칙과 퍼지화, 비퍼지화 방법은 표 2, 표 3을 동일하게 적용하였다.

이들 세종류의 제어기를 설계한후, 비선형구간에서는 줌잉퍼지제어기를 적용하고 선형구간에서는 PID제어기를 적용할 수 있는 하이브리드제어기를 설계한다. 하이브리드제어기는 PID제어기의 출력 P_ref와 줌잉 퍼지제어기의 출력 F_ref를 입력받아 하이브리드제어기의 최종 출력인 모터토크 지령치를 출력하는 출력혼합기(output mixer)로 구성되어 있다. 이들 구성방법을 그림 4의 블록도에 나타내었다. 그림 4에서, 하이브리드제어기의 출력 C_ref는 퍼지제어기의 출력 F_ref와 PID제어기의 출력 P_ref로 부터 식 (10)과 같이 구한다^[5,6].

$$C_{ref} = \frac{close(e, de) F_{ref} + faraway(e, de) P_{ref}}{close(e, de) + faraway(e, de)} \quad (10)$$

4. 제안된 퍼지하이브리드 제어기의 설계

3절에서의 하이브리드제어기는 오차의 영역에 따라 퍼지제어기와 PID제어기의 장점을 사용하기는 하지만, 퍼지제어기와 PID제어기의 출력이 혼합되는 과정에서 출력이 절환 되는 특정 구간의 경계층을 제외하고는, 전체 운전영역에서는 어느 한 제어기에만 영향을 받게 된다. 유압식인버터 엘리베이터와 같은 비선형시스템의 경우, 최적으로 제어하기 위해서는 어느 한 제어기의 출력이 다른 제어기의 출력으로 절환 되어야 하는 경계 층이 다수 구간일 경우도 있고, 운전 상태(엘리베이터의 경우 상승 또는 하강)에 따라 같은 구간에서의 두 제어기의 출력비가 달라야 될 경우가 존재하게 되어 하이브리드제어기로는 최적제어가 어렵다.

따라서, 이 절에서는 하이브리드제어기에 있어서 출력혼합기의 출력을 같은 운전영역이라 해도 시스템의 상태에 따라 두 제어기의 출력 비를 다르게 적용하여 비선형시스템을 최적으로 제어될 수 있도록 하는 퍼지 하이브리드제어기를 제안한다.

제안된 퍼지하이브리드제어기의 출력혼합기 출력비를 변경하는 제어기는 특정한 한 구간에서 뿐 아니라 전 운전구간에서 출력비를 최적으로 조절할 수 있고, 비선형시스템에 있어서 전문가의 전문지식을 수용할 수 있도록 퍼지로지제어기로 구성한다. 퍼지하이브리드 제어기의 퍼지로지부 입력은 카속도오차와 모터의 속

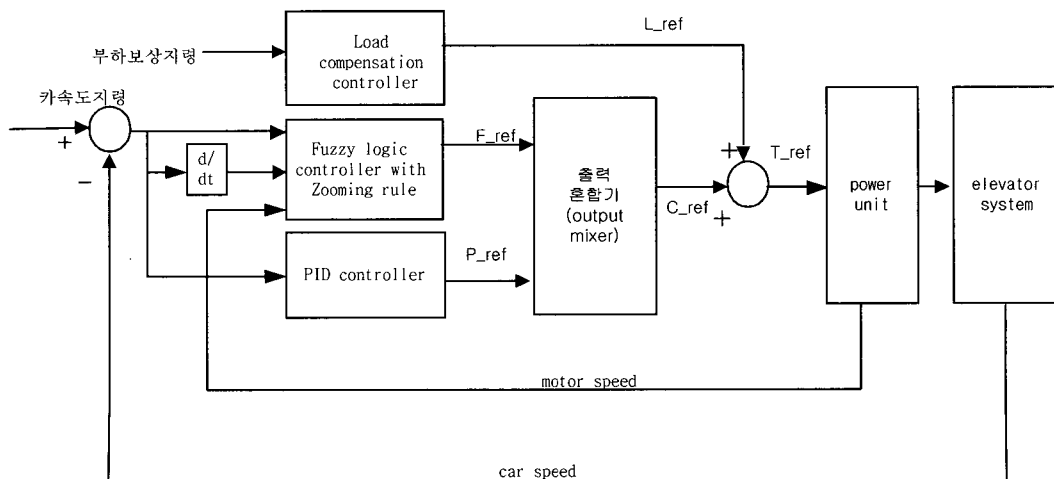


그림 4. 유압식엘리베이터 제어를 위한 하이브리드제어기의 블록도
Fig.4. Block diagram of a conventional hybrid controller.

도 $W_p(k)$ 이며, 출력은 PID제어기와 퍼지제어기의 출력 가중치가 된다. 이러한 구조로, 속도 오차가 작거나 모터속도가 클 경우는 PID제어기의 출력가중치를 높이고, 이와 반대의 경우 퍼지제어기의 출력가중치를 높이며, 또한 운전 상태에 따라 가중치를 변경할 수 있도록 카속도 오차와 모터속도의 상태에 따라 PID제어기와 퍼지제어기의 가중치를 퍼지로직에 의하여 구하여 사용한다. 이에 따라, 두 형태제어기의 장점을 적절히 취하는 퍼지하이브리드제어기를 설계할 수 있다. 제안된 제어기는 리플이 없고 모터속도가 극저속 속도영역에서 제어될 수 있으며, 전 운전 구간에서 속도 추종이 우수한 제어가 될 것이다.

그림 5는 제안된 퍼지하이브리드제어기의 구조를 보여준다. 제안된 퍼지하이브리드제어기는 그림 4의 전형적인 하이브리드제어기에 모터속도, 카속도에러를 입력받아 출력 가중치 계인 K_h 를 구하는 퍼지로직제어부를 부가하였으며, 가중치계인 K_h 에 따라 퍼지하이브리드제어기의 최종 출력인 모터토크 지령치를 출력하는 출력혼합기로 구성되어 있다. 퍼지하이브리드제어기의 출력 C_{ref} 는 퍼지제어기의 출력 F_{ref} 와 PID제어기의 출력 P_{ref} 로 부터 출력 가중치 계인 K_h 를 이용하여 식 (11)과 같이 구한다. 오일탱크 내에 있는 모터에 전달되는 전체 제어기의 출력토크 T_{ref} 는 퍼지하이브리드제어기 출력 C_{ref} 와 부하보상제어기 출력 L_{ref} 를 더하여 구하게 되며 이 관계는

식 (12)와 같다.

$$C_{ref} = P_{ref} \times (1 - K_h) + F_{ref} \times K_h \quad (11)$$

$$T_{ref} = C_{ref} + L_{ref} \quad (12)$$

식 (11)에서 출력 가중치를 구하기 위한 퍼지제어부의 입력은 속도 오차와 모터속도이며, 출력은 하이브리드 계인 가중치 K_h 이고, 언어 변수는 다음 식 (13)과 같다. 단, 가중치 K_h 는 0과 1사이의 값을 취하게 된다.

$$L = [NH, NM, NL, ZO, PL, PM, PH] \quad (13)$$

단, NH: Negative High NM: Negative Medium
 NL: Negative Low ZO: Zero
 PL: Positive Low PM: Positive Medium
 PH: Positive High

제어규칙은 표 3과 같이 하였고, 퍼지화방법은 퍼지싱글톤방법(fuzzy singleton method)을 적용하였으며, 멤버쉽함수(membership functions)는 이등변삼각형법을, 퍼지추론은 Min-Max법을, 비퍼지화기는 무게중심법을 사용하였다. 모터속도 입력 범위는 0~3400rpm이며, 제어규칙은 극저속 속도영역에서의 모터가 제어되지 않는 현상이 일어나는 모터속도를 분석하여 결정하였다.

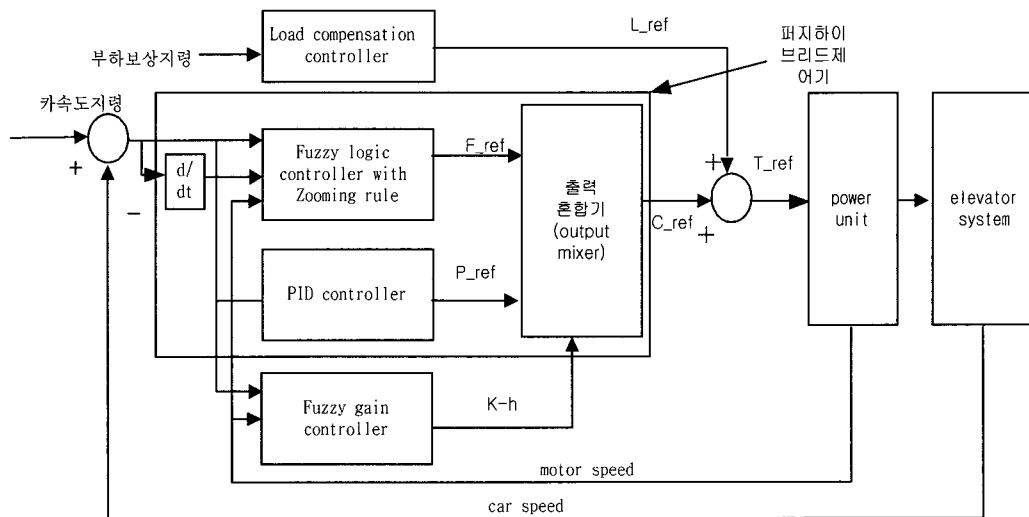


그림 5. 제안된 퍼지하이브리드제어기의 블록도

Fig. 5. Block diagram of a proposed fuzzy hybrid controller.

표 3. 퍼지하이브리드제어기 제어규칙.

Table.3. Fuzzy rule base of fuzzy hybrid controller.

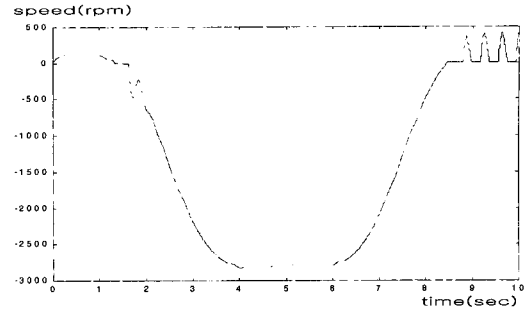
Wpl e(k)	NH	NM	NL	ZO	PL	PM	PH
NB	ZO	PL	PM	PH	PM	PL	ZO
NM	ZO	PL	PM	PH	PM	PL	ZO
NS	ZO	ZO	PL	PM	PL	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	PL	PM	PL	ZO	ZO
PM	ZO	PL	PM	PH	PM	PL	ZO
PB	ZO	PL	PM	PH	PM	PL	ZO

V. 시뮬레이션 결과

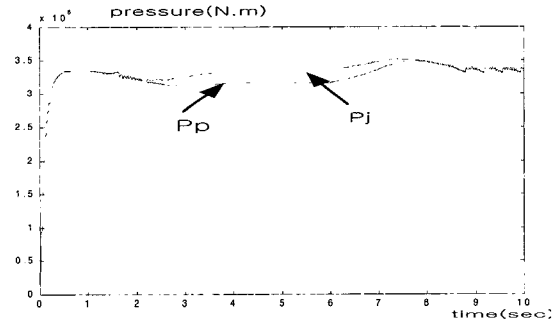
본 논문에서 제시한 제어 알고리즘의 효율성을 고찰하고 제어 특성을 검토하기 위하여 MATLAB 5.3을 사용하여 유압식 인버터 엘리베이터 제어시스템을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 i) PID제어기 ii) 줌잉 퍼지제어기 iii) PID제어기와 퍼지제어기를 혼합한 하이브리드제어기, 그리고 iv) 본 논문에서 제안한 퍼지하이브리드제어기를 비교하였으며, 샘플링시간은 1ms로 하였다. 모터가 극저속 속도영역에서 제어되지 않는 현상은 카가 하강할 때 심하게 나타나므로 카가 하강할 때를 기준으로 하였으며, 운전모드는 기동후 1초간은 부하보상운전을 실시하고 이후부터 카가 움직이도록 하였으며, 10초에 정지하도록 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션은 식 (1)부터 식 (3)까지의 방정식을 기초로 하여 구현되었으며, 유압모터는 이상적인 토크원으로 가정하였다.

적용한 PID제어기는 엘리베이터의 카속도제어기에 적용하였으며, PID 카속도제어기의 게인은 속도제어 시스템의 전달함수 식 (5)에 카속도제어기를 부가한 후, 전체 개루프 전달함수를 구하고, 보드 선도로 주파수 특성을 파악하여 차단주파수 10rad/sec에서 적당한 게인 마진과 위상 마진을 갖도록 설계하였다.

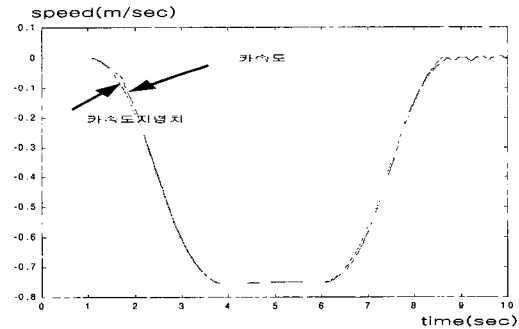
그림 6의 a)는 PID 속도제어기로 카 속도제어를 행하였을 시의 모터속도를 나타낸 것이다. 모터속도가 극저속 속도영역에서 제어가 되지 않고 멈추었다가 갑작스럽게 기동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제점은 카가 기동할 때뿐 아니라 착상하고자 하는 층에 도달하여 정지할 때도 나타나게 되어 승차 감에 악영향을 줄 뿐만 아니라 정착상도 어렵게 한다. 그림 6의 b)는 펌프압력 Pp와 실린더압력 Pj를 나타낸 것으로 기동 시



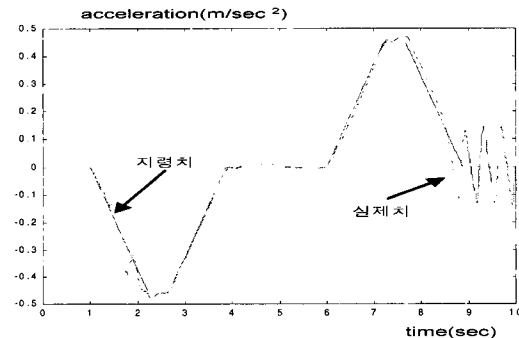
(a) motor speed



(b) pressure of pump and cylinder



(c) car speed reference and real car speed

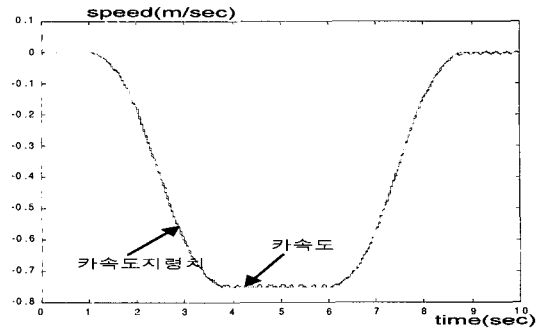


(d) car acceleration

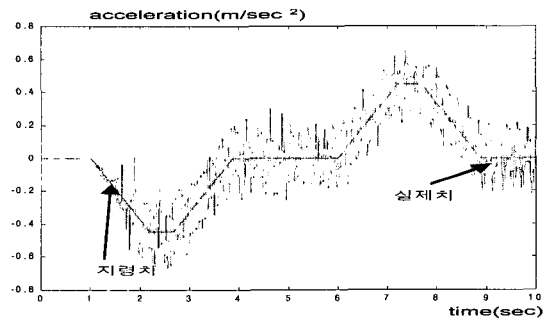
그림 6. PID 카속도제어기 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of PID controller.

와 착상시 압력이 흔들리는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 c)는 카속도 지령치와 실제 카속도를 나타낸 것으로 그림 6의 a)에서 보이듯이 극저속 속도영역에서 모터가 회전하지 않음으로 인해 카속도가 카속도지령치를 추종하지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 그림 6의 d)는 가속도지령치와 실제 가속도를 나타낸 것으로 정상 속도에서는 오차 없이 잘 지령치를 추종하고 있으나 기동 시와 감속시 극저속 속도영역에서 심한 진동이 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 7의 a)는 줌잉 퍼지로직 속도제어기로 카 속도 제어를 행하였을 시의 모터속도를 나타낸 것으로 모터 속도에 리플이 존재하나 극저속 속도영역에서 제어되지 않는 현상은 보이지 않고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7의 b)는 펌프압력 P_p 와 실린더압력 P_j 를 나타낸 것으로 전 운전 구간에서 압력에 고주파 성분의 리플이 존재하는 것을 알 수 있으며, 이는 고주파의 진동을 유발한다. 그림 7의 c)는 카속도 지령치와 실제 카속도를 나타낸다. 실제 카속도가 카속도지령치를 잘 추종하고 있으나 정속주행구간에서 정상상태 에러가 수렴되지 못하고 있다. 또한 그림 7의 d)는 가속도지령치와 실제가속도를 나타낸 것으로 지령치를 충실히 추종하



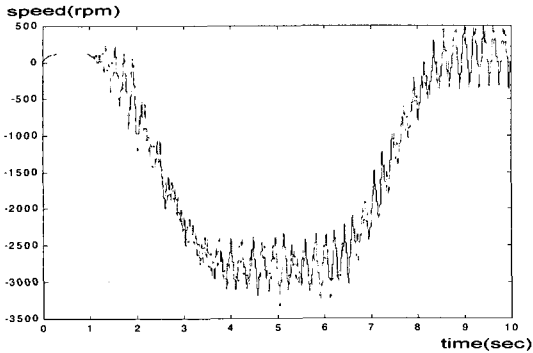
(c) car speed reference and real car speed



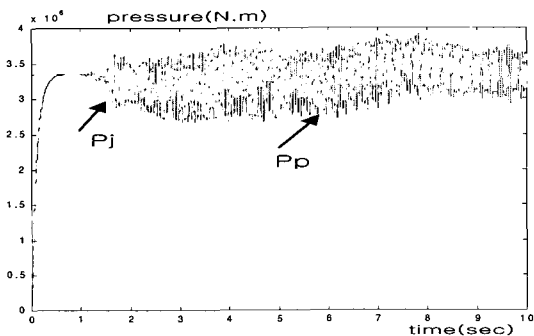
(d) car acceleration

그림 7. 퍼지제어기 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation results of fuzzy controller.



(a) motor speed

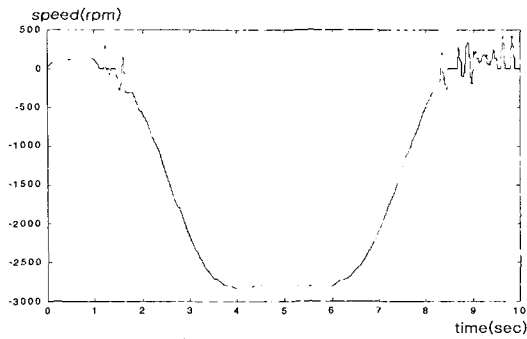


(b) pressure of pump and cylinder

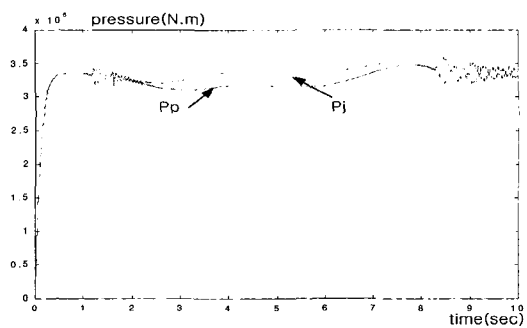
고 큰 기동쇼크나 착상쇼크는 보이지 않으나 고주파의 진동 성분이 전 운전영역에서 나타남을 알 수 있다.

그림 8의 a)는 하이브리드제어기로 카 속도제어를 행하였을 시의 모터속도를 나타낸 것으로 극저속 속도영역에서 모터속도에 리플이 존재하나 제어되지 않는 현상은 보이지 않고, 정상상태에서도 잘 제어됨을 확인할 수 있다. 그림 8의 b)는 펌프압력 P_p 와 실린더압력 P_j 를 나타낸 것으로 극저속 속도구간에서 압력의 고주파 성분의 리플이 존재하며, 이는 고주파의 진동을 유발한다. 그러나, 전반적인 속도영역은 PID제어기의 영향으로 부드럽게 제어되고 있다. 그림 8의 c)는 카속도 지령치와 실제 카속도를 나타낸다. 실제 카속도가 카속도지령치를 잘 추종하고 있고 정속주행구간에서도 정상상태 에러가 수렴하고 있다. 또한 그림 8의 d)는 가속도지령치와 실제 가속도를 나타낸 것으로 지령치를 충실히 추종하고 큰 기동쇼크나 착상쇼크는 보이지 않으나 퍼지제어기가 동작하는 극저속 속도영역에서는 고주파의 진동성분이 나타남을 알 수 있다.

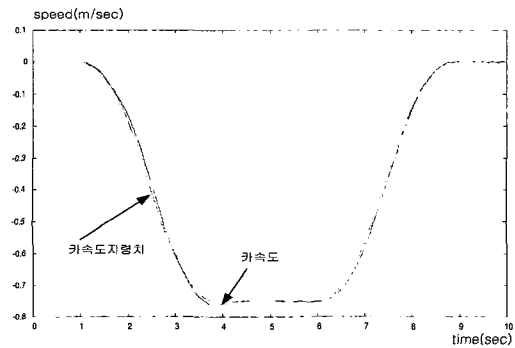
그림 9의 a)는 본 논문에서 제안된 퍼지하이브리드 제어기로 카 속도제어를 행하였을 시의 모터속도를 나



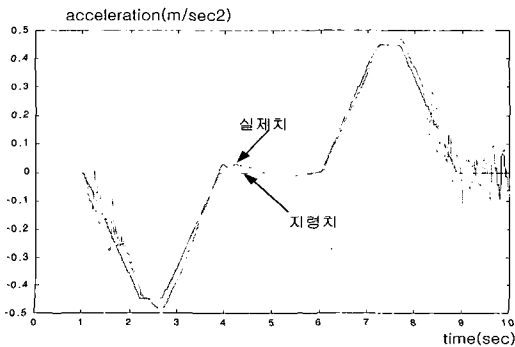
(a) motor speed



(b) pressure of pump and cylinder

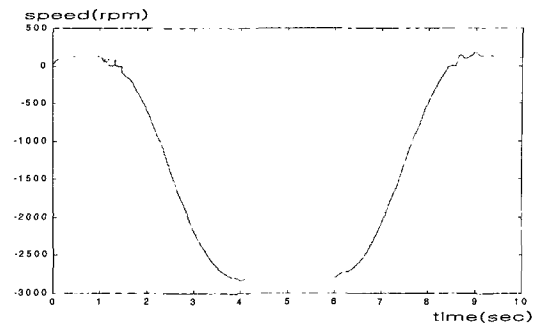


(c) car speed reference and real car speed

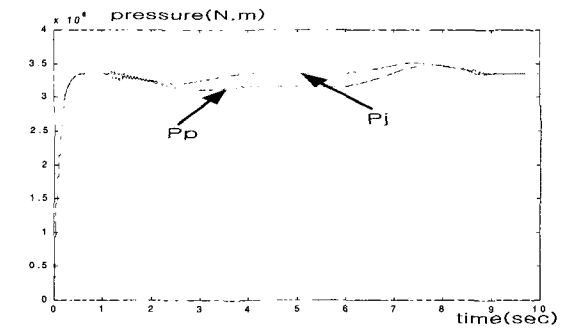


(d) acceleration

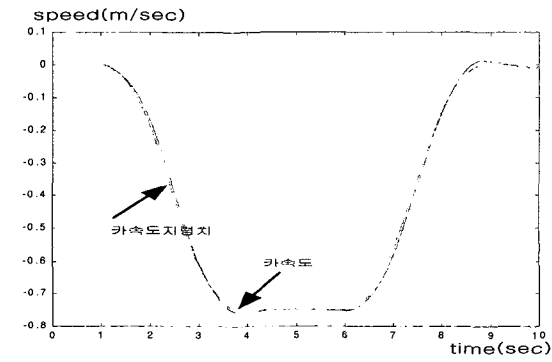
그림 8. 하이브리드제어기 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation results of hybrid controller.



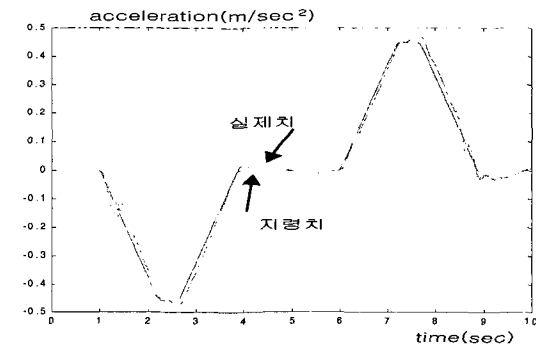
(a) motor speed



(b) pressure of pump and cylinder



(c) car speed reference and real car speed



(d) acceleration

그림 9. 제안된 퍼지하이브리드제어기 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation results of proposed fuzzy hybrid controller.

타낸 것으로 퍼지제어기에서 보였던 리플이 없어지고, PID제어기에서의 모터속도가 극저속 속도영역에서 제어되지 않는 현상도 보이지 않고 있다. 그림 9의 b)는 펌프압력 P_p 와 실린더압력 P_j 를 나타낸 것으로 극저속 속도영역에서만 리플이 약하게 존재하고 전 운전구간에서는 깨끗하게 나타나고 있다. 그림 9의 c)는 카속도 지령치와 실제 카속도를 나타낸다. 극저속 속도영역에서 실제 카속도가 카속도지령치를 잘 추종하고 있고 정속주행구간에서도 지령치를 잘 추종하고 있다. 또한 그림 9의 d)는 가속도지령치와 실제 가속도를 나타낸 것으로, 그림 8의 a-d)와 같은 기존의 하이브리드제어기에서 보았던 극저속 속도영역의 고주파 진동성분은 물론 제거되었으며, 가/감속 시에 기동쇼크나 착상쇼크가 전혀 나타나지 않고 전 운전영역에서 부드러운 승차감을 보이고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 유압식 엘리베이터 시스템에 인버터를 적용한 유압식 인버터 엘리베이터제어를 위한 향상된 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는, 기존의 PID 속도제어기로는 속도제어가 되지 않는 극저속 속도영역에서뿐 아니라 정상상태에서도 제어 성능이 우수한 퍼지하이브리드제어기로서, PID제어기의 출력과 퍼지제어기의 출력 가중치를 퍼지모직에 의하여 제어한다. 유압식 인버터 엘리베이터 카속도제어기의 제어를 위하여, 유압시스템으로 구동되는 엘리베이터의 수학적 모델링을 제시하였고, 극저속 속도영역에서 속도가 제어되지 않는 원인이 되는 실린더의 마찰특성을 고찰함으로써, 기존의 제어기의 문제점과 해결 방향을 분석하였고, 이에 따라, 기존의 제어기로 제어시 발생하는 문제점을 상당 부분 해결할 수 있는 우수한 퍼지하이브리드제어기를 설계하였다. 제안된 퍼지하이브리드제어기의 제어 성능을 확인하기 위하여 i) PID제어기 ii) 퍼지제어기 iii) 하이브리드제어기, 그리고 iv) 제안된 퍼지하이브리드제어기를 시뮬레이션으로 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 보면, 제안된 퍼지하이브리드제어기가 유압식 인버터 엘리베이터 시스템에서 비선형특성을 나타내는 극 저속영역에서뿐 아니라 에러가 작은 정격 속도영역에서도 부드러운 승차감을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] E. Sasaki, T. Matsudo, I. Nakamura and K. Hida, "Hydraulic elevator to answer the needs of smooth and energy saving," *The Hitachi Hyoron*, Vol. 75, No. 7, 1993.
- [2] E. Sasaki, I. Nakamura and N. Arabori, "Hydraulic elevators controlled by Inverter," *Japan Machinery Institute, Anthology of Lectures of Dynamics*, No. 910-3, pp. 52-54, 1991.
- [3] K. Hatano and H. Kobayashi, "Advanced control hydraulic elevator," *Japan Machinery Institute, Anthology of Lectures of Dynamics*, No. 910-3, pp. 59-62, 1991.
- [4] J. T. Teeter, Mo-yuen Chow, J. J. Brickley, "ANovel Fuzzy Friction Computation Approach to Improve the Performance of a DC Motor Control System." *IEEE Trans. Industrial Electronics.*, vol. 43, no. 1, pp. 113-120, 1996.
- [5] Witold Pedrycz, "Fuzzy control and Fuzzy systems", Research studies press LTD., 2nd Edition, pp. 197-199, 1993,
- [6] 변증남, 퍼지논리제어, 홍릉과학출판사, pp. 175-177, 1997
- [7] T. Teramoto, I. Nakamura, H. Watanabe, S. Kojima and T. Toba, "A high-accuracy car level compensation device for hydraulic elevators: Stabilization with estimated acceleration feed-back," *Proceedings of ELEVCON '96, Elevator Technology 7,*, pp. 257-266, 1996.
- [8] T. Matsudo, T. Mine, I. Nakamura, and H. Watanabe, "Valve Displacement Feedback Control Hydraulic Elevator," *Proceedings of ELEVCON '96, Elevator Technology 7,* pp. 287-296, 1996.
- [9] ALLWEILER사 SM,SN series Hydraulic PUMP catalog, 1998
- [10] 한권상, 김병화, 이우철, 장태호, 이진학, 사공석진, 안현식, 김도현, "유압인버터 엘리베이터에서의 극저속 속도제어를 위한 퍼지논리 제어기의 설계," *대한전자공학회 하계학술대회논문지*, 1999

[11] C. CANUDAS, K. J. ASTROM, K. BRAUN, "Adaptive Friction Compensation in DC_Motor Drives." *IEEE Journal of Robotics and Automation.*, vol. RA-3, no. 6, pp. 681-685, Dec. 1987.

[12] Wei. Li, "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller." *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. Nov., 1998.

저 자 소 개



韓 權 相(正會員)

1988년 2월 국민대학교 전자공학과(공학사). 1990년 2월 국민대학원 전자공학과 석사. 1999년 2월 국민대학원 전자공학과 박사수료
현재 LG-OTIS 엘리베이터 설계

실 과장. 주관심분야 : 모터제어, 의용신호처리, 음향신호처리

金 炳 華(正會員) 第 32卷 B編 第 3號 參照

현재 동원대학 전자과 조교수

安 鉉 植(正會員) 第 33卷 B編 第 11號 參照

현재 국민대학교 전자공학부 교수

金 道 鉉(正會員) 第 32卷 B編 第 3號 參照

현재 국민대학교 전자공학부 교수