

건설장비용 동력전달계의 관성영역에서의 자기학습 제어기법

최길우* · 한진오** · 허재웅*** · 조영만**** · 이교일****

Self-Learning Supervisory Control of a Power Transmission System in a Construction Vehicle during Inertia Phase

Gil-Woo Choi, Jin-Oh Hahn, Jae-Woong Hur, Young Man Cho and Kyo Il Lee

Key Words : Self-learning control, Shift control, Automatic transmission, Construction vehicle, Observer

Abstract

Electro-hydraulic shift control of a vehicle automatic transmission has been predominantly carried out via an open-loop control based on numerous time-consuming calibrations. Despite remarkable success in practice, the variations of system characteristics inevitably deteriorate the performance of the tuned open-loop controller. As a result, the controller parameters need to be continuously updated in order to maintain satisfactory shift quality. This paper presents a self-learning algorithm for automatic transmission shift control in a construction vehicle during inertia phase. First, an observer reconstructs the turbine acceleration signal (impossible to measure in a construction vehicle) from the readily accessible turbine speed measurement. Then, a control algorithm based on a quadratic function of the turbine acceleration is shown to guarantee the asymptotic convergence (within a specified target bound) of the error between the actual and the desired turbine accelerations. A Lyapunov argument plays a crucial role in deriving adaptive laws for control parameters. The simulation and hardware-in-the-loop simulation (HILS) studies show that the proposed algorithm actually delivers the promise of satisfactory performance despite the system characteristics variations and uncertainties.

기호설명

T_t : 터빈토크
 T_c : 접속마찰요소의 마찰토크
 ω_t : 터빈축 각속도
 α_t : 터빈축 각가속도
 α_1, α_2 : (1)의 계수들
 P_c : 마찰요소에 작용하는 압력
 $duty$: 솔레노이드 밸브 인가 듀티율
 β_1, β_2 : (2)의 계수들
 λ_1 : 마찰요소 제원에 따른 이득
 λ_2 : 스프링력에 의한 오프셋

$\hat{\omega}_t$: 터빈 각속도의 추정치
 $\hat{\alpha}_t$: 터빈 각가속도의 추정치
 θ_1, θ_2 : 제어 파라메터
 $\bar{\alpha}_l, \bar{\alpha}_u$: 기준 터빈 각가속도의 상한 및 하한
 e : 터빈 각가속도 오차
 $V(e)$: e 에 대한 Lyapunov 함수
 $\gamma, \bar{\gamma}$: 양의 상수들
 γ_1, γ_2 : 학습법칙의 이득들

1. 서론

최근에 연료소비율 저감과 승차감의 향상을 위하여 승용차용 자동변속기의 전자제어에 대한 많은 연구가 진행되었다. 기존의 연구들은 변속제어 알고리즘 [7,15,9], 변속 상위제어 [10], 압력의 능동제어를 위한 새로운 유압 회로의 개발 및 해석 [3,5], 연료소비율 저감을 위한 진보된 변속시점의 결정 알고리즘 [14], 그리고 토크컨버터 록업 클러

* 해군사관학교 교수부 기계공학과
 ** 공군사관학교 교수부 기계공학과
 *** 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 **** 서울대학교 기계항공공학부

치의 피드백 제어에 초점을 맞추어 왔다. 반면에 건설장비의 자동변속기에 대해서는 승용차의 자동변속기에 비하여 심도 있는 연구가 미비한 실정이다. 건설장비는 토사 상차 및 운반작업을 주목적으로 하므로 토사처리 작업시에는 큰 구동력을 요구하며, 운반작업시에는 구동축의 높은 회전속도를 요구한다. 이를 위해 작업자는 장비의 구동성을 최대한 유용하게 이용하기 위하여 빈번한 변속조작을 하게 되며, 또한 토사처리 작업시에는 버킷 및 붐의 조작레버로 작업장치를 조종하면서 동시에 변속레버를 적절히 조작하여야 하므로 작업량이 작업자의 숙련도에 크게 의존하게 된다. 따라서 보다 효율적인 작업을 수행하기 위해서는 작업 또는 주행시 요구되는 빈번한 변속조작을 숙련된 작업자의 수준으로 자동제어할 수 있는 자동변속기를 필요로 한다.

본 논문에서는 건설장비의 자동변속기를 위한 자기학습 변속제어기법을 제안하였다. 학습법칙은 실제 터빈속도와 기준 터빈속도 사이의 오차의 2차의 목적함수에 기반한 Lyapunov 해석을 통하여 유도하였다. 또한 본 연구에서 유도된 학습제어법칙은 터빈 각가속도를 변속품질의 판단지표로 이용하기 때문에 센서로부터 측정된 터빈 각속도를 통하여 터빈 각가속도를 추정하기 위한 관측기를 제안하였다. 시뮬레이션과 HILS 결과를 통하여 제안된 자기학습 변속제어기가 기저와 미지의 시스템 특성 변동에 대하여 능동적으로 대응할 수 있으며 만족할 만한 성능을 가짐을 보였다.

2. 변속제어 개요

Fig. 1 에 건설장비의 동력전달계를 간략하게 도시하였다. 동력전달계는 크게 엔진, 토크컨버터, 자동변속기, 유압 액츄에이터 등 4 개의 요소로 구성된다. 엔진은 전체 시스템의 동력원이며, 토크컨버터는 엔진의 출력토크를 증배하여 자동변속기로 전달한다. 유압 액츄에이터는 마찰 요소의 접속 및 해제를 통하여 자동변속기의 변속과정을 제어한다. 자동변속기의 입력축과 출력축의 속도비는 기어비에 의하여 결정되는데, 기어비 변화에 대한 상세한 설명은 Brejcha [1]에 기술되어 있다.

Fig. 2 에 도시된 바와 같이, 변속과정은 입력축과 출력축의 속도비 변화여부에 따라 토크영역과 관성영역으로 구분된다. 토크영역에서 입력축과 출력축의 속도비는 변속전의 속도비를 유지한다. 반면에, 관성영역에서는 변속전의 속도비에서 변속 후의 속도비로 천이된다. 변속과정 중에는 동력전달계의 출력축에 연결된 차량 관성이 엔진의 회전부 관성에 비하여 매우 크므로 차속은 거의 일정한 상태에서 엔진 및 토크컨버터 터빈의 회전수 변화에 의하여 회전 속도비가 결정되게 된다. 변

속과정에 대한 상세한 설명은 Shin [11]에 기술되어 있다.

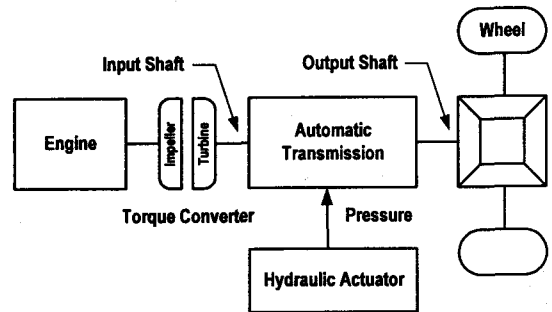


Fig. 1 Power train system for a construction vehicle

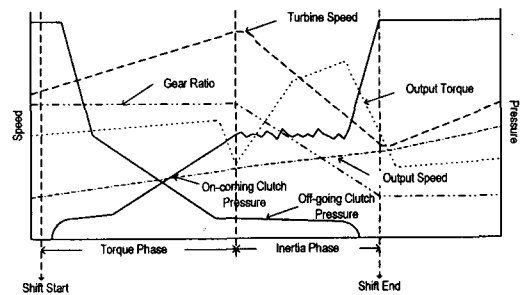


Fig. 2 A typical shift process

승용차의 자동변속기에 대한 기존의 연구 [7]에서 관성영역에서 일정한 수준의 터빈 각가속도를 유지함으로써 변속충격을 효과적으로 저감할 수 있다는 결과가 발표되었다. 터빈축의 동역학 모델로부터 유도된 Jung et al. [7]의 결과는 접속 마찰요소 압력의 개루프 제어에 의한 실험을 통하여 검증되었다. 비록 건설장비의 자동변속기가 승용차의 자동변속기에 비하여 유성기어 대신 Lay-shaft 기어열을 사용하는 점에 있어서는 상이하나, 유도된 터빈 동역학식은 승용차의 터빈 동역학식과 유사하므로, 본 논문에서는 기본 제어기로 Jung et al. [7]에서 제안된 개루프 제어에 의한 변속제어 알고리즘을 적용하였다. 그러나 건설장비의 극한 동작조건 변화를 고려하여 이를 극복할 수 있는 학습제어 알고리즘을 개발하였다.

뉴턴의 제 2 법칙을 터빈축의 회전방정식에 적용하면 관성영역에서의 터빈축의 동역학을 다음과 같이 기술할 수 있다 [8].

$$\frac{d}{dt}\omega_t = \alpha_t = \alpha_1 T_t + \alpha_2 T_c \quad (1)$$

3. 유압 액츄에이터 분석

Fig. 3 에 대상 건설장비의 마찰요소를 제어하기 위한 유압 액츄에이터를 도시하였다. 대상 자동변

속기는 4 개의 전진 변속단과 3 개의 후진 변속단을 구현하기 위한 6 개의 마찰요소가 장착되어 있다. 각각의 마찰요소는 Fig. 3 에 도시된 액츄에이터에 의하여 서로 독립적으로 제어된다. 유압 액츄에이터는 비례제어 솔레노이드 밸브, 부스터 밸브와 오실레이션 댐퍼로 구성된다. 비례제어 솔레노이드 밸브의 출력압은 부스터 밸브에 작용하여 마찰요소를 제어하기에 충분한 수준으로 증폭되며, 오실레이션 댐퍼는 비례제어 솔레노이드 밸브 출력압의 맥동을 감소시키는 역할을 한다.

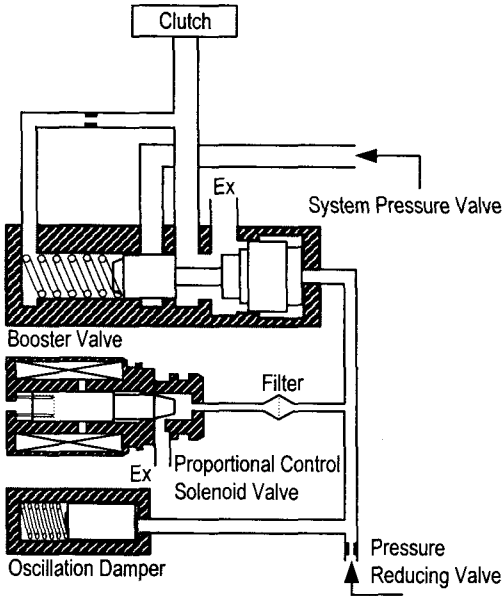


Fig. 3 Friction element pressure control system

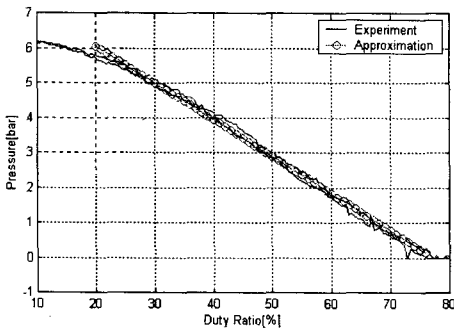


Fig. 4 Hydraulic actuator characteristics

Fig. 4 에 비례제어 솔레노이드 밸브의 듀티율 입력과 마찰요소에 작용하는 압력의 정상상태 관계를 도시하였다. 압력제어가 가능한 구간에서 듀티율과 압력은 선형관계를 보이므로, 이를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$P_c = \beta_1 \text{duty} + \beta_2 \quad (2)$$

유압 액츄에이터의 출력압은 마찰요소를 제어하게 되며, 마찰요소에 작용하는 압력 및 토크는 다음과 같이 기술할 수 있다 [1].

$$T_c = \lambda_1 P_c + \lambda_2 \quad (3)$$

4. 자기학습 제어 알고리즘

변속과정의 특성으로 인하여 변속제어 알고리즘은 토크영역과 관성영역에 대하여 독립적으로 개발하는 것이 바람직하다. 본 논문의 주된 관심사는 관성영역 제어에 있으므로, 토크영역은 기존 TCU 에 장착된 알고리즘에 의하여 수행된다고 가정한다.

4.1 제어 목적

변속시간이 너무 짧을 경우에는 과도한 변속충격이 발생하며, 너무 길 경우에는 마찰요소의 수명이 단축된다. 이러한 관점에서 변속제어의 목적은 승차감과 시스템 내구도 사이의 적절한 타협이라고 할 수 있다. 기존에는 변속충격과의 긴밀한 관계성에 의하여 변속기의 출력축 토크가 변속품질의 판단지표로 이용되었다. 하지만 변속기 출력축 토크는 실시간으로 정확하게 추정하기가 곤란한 단점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 정밀한 제어 알고리즘의 구현을 위하여 관측 가능한 터빈 각가속도를 변속품질의 새로운 판단지표로 제안한다. 이는 Fig. 2 의 변속기 출력축 토크와 터빈 각가속도 사이의 상관관계에 의하여 관성영역 제어의 목적을 터빈 각가속도를 적절한 수준으로 조절하는 것이라고 기술할 수 있기 때문이다. 기존의 변속기 출력축 토크와 비교했을 때 터빈의 각가속도는 관측기를 이용하여 정확하게 추정할 수 있다는 장점을 갖는다.

4.2 터빈 각가속도 관측기

터빈 각가속도의 변화가 크지 않다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \alpha_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그러면 각가속도 추정을 위한 관측기는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_t \\ \hat{\alpha}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_t \\ \hat{\alpha}_t \end{bmatrix} - L \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t - \hat{\omega}_t \\ \alpha_t - \hat{\alpha}_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

각속도 출력을 갖는 시스템 (4)는 가관측성을 만족하므로, 페루프 행렬이 안정하도록 관측기 이득을 선정할 수 있다 [2]. Fig. 5 에 두 종류의 실험

데이터에 대한 터빈 각가속도 관측기의 성능을 보였으며, 관측기가 변속제어기에 정확한 실시간 터빈 각가속도 정보를 제공할 수 있음을 보여준다.

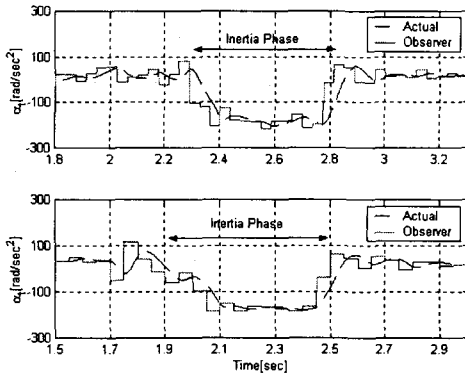


Fig. 5 Measured & estimated turbine accelerations

4.3 제어 전략

변속제어기는 기지, 미지의 시스템 변동에 대응할 수 있도록 설계가 되어야 한다. 우선, 터빈축 동역학 (1)을 살펴보면 터빈토크(추정이 가능하므로 기지의 불확실성으로 분류된다)가 접속 마찰요소 토크의 크기에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 따라서 변속제어기는 변속품질에 대한 터빈토크의 부정적 영향을 상쇄시킬 수 있어야 한다. 또한, 대상 시스템에는 차량 무게, 액츄에이터 이득, 마찰요소의 스프링력 등과 같은 미지의 시스템 특성변화도 존재한다. 본 논문에서는 추정된 터빈토크에 따라서 개루프 듀티율을 명시적으로 조정하는 한편, 미지의 불확실성은 제어 파라미터들의 학습에 의하여 극복하는 제어 전략을 제안한다. 변속제어에 대한 터빈토크의 영향을 살펴보기 위하여 (1)에 (2), (3)을 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\omega_i = \alpha_1 T_i + \alpha_2 \{\lambda_1(\beta_1 \text{duty} + \beta_2) + \lambda_2\} \quad (6)$$

터빈 각가속도가 일정하게 조절된다는 가정 하에서 (6)을 제어입력에 대하여 정리하면 (7)과 같다.

$$\text{duty} = \frac{-\alpha_1 T_i - \alpha_2 \lambda_2 + \frac{d}{dt}\omega_i}{\alpha_2 \beta_1 \lambda_1} - \frac{\beta_2}{\beta_1} = \theta_1 T_i + \theta_2 \quad (7)$$

따라서 변속제어기는 추정된 터빈토크와 (7)에 의하여 터빈토크의 영향을 제거할 수 있다. 터빈토크는 Shin et al. [9,10] 등에서 제안한 방법에 의하여 추정이 가능하다.

제어법칙 (7)의 구현에 있어서의 문제점은 θ_1 과

θ_2 가 불확실하며 동시에 변한다는 것이며, 이 부분이 바로 학습제어의 이점이 부각되는 부분인데, 이는 θ_1 과 θ_2 의 학습에 의하여 미지의 불확실성에 의한 영향을 보상할 수 있기 때문이다. 따라서, 제어법칙 (7)은 터빈토크의 영향을 (7)에 명시적으로 고려하고, θ_1 과 θ_2 의 학습에 의하여 미지의 불확실성을 보상함으로써 앞서 언급한 기지와 미지의 시스템 변동 모두에 대응할 수 있다.

4.4 학습제어 법칙

전술한 바와 같이, 기존 연구 [7]에서 접속 마찰요소의 압력을 일정하게 제어함으로써(즉, 입력 듀티율을 일정하게 인가함으로써) 관성영역에서 근사적으로 일정한 수준의 터빈 각가속도를 발생시킬 수 있다. 엄격한 관점에서 터빈 각가속도는 토크영역에서의 천이 등으로 인하여 상수라고 볼 수는 없지만, 그러한 과도상태의 지속시간은 관성영역 자체의 지속시간에 비하면 미미하며, 관성영역에서 샘플링된 터빈 각가속도들의 평균값 등을 그에 해당하는 변속과정의 터빈 각가속도 대표값으로 사용할 수 있다. 이러한 관점에서 관성영역 시작시에 추정된 터빈토크와 제어법칙 (7)을 사용하면 관성영역에서 근사적으로 일정한 터빈 각가속도를 구현할 수 있다. 이 때 제어 파라미터 θ_1 과 θ_2 에 대한 학습법칙의 역할은 미지의 시스템 변동에 의한 제어성능의 저하를 보상하는 것이다. 학습제어 법칙의 유도시에 관성영역에서의 터빈 각가속도는 일정한 수준으로 제어되며, 기존 터빈 각가속도의 영역도 정해져 있다고 가정한다. 그러면 제어 목적은 다음과 같이 기술할 수 있다. 여기서 터빈 각가속도의 절대값은 관성영역에서 터빈 각가속도가 음수임을 고려한 것이다.

$$\bar{\alpha}_i \leq |\alpha_i| \leq \bar{\alpha}_u \quad (8)$$

특정 기준 터빈 각가속도를 설정하지 않고 (8)과 같이 범위를 정의함으로써 제어 파라미터의 채터링을 유발할 수 있는 기준 터빈 각가속도 근처에서의 불필요한 학습과정을 억제할 수 있다. 목적함수는 터빈 각가속도의 크기에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$V(e) = e^2/2 = (|\alpha_i| - \bar{\alpha}_u)^2/2, \quad |\alpha_i| < \bar{\alpha}_i \quad (9)$$

$$V(e) = e^2/2 = (|\alpha_i| - \bar{\alpha}_i)^2/2, \quad |\alpha_i| > \bar{\alpha}_u \quad (10)$$

θ_1 과 θ_2 에 대한 파라미터 적응법칙은 Lyapunov 방법에 의하여 유도된다. Chain Rule 을 이용하면 (11)을 얻는다. 여기서 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 로 정의한다.

$$\dot{V}(e) = e\dot{e} = e \frac{\partial e}{\partial \alpha_i} \frac{\partial \alpha_i}{\partial T_c} \frac{\partial T_c}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial \text{duty}} \frac{\partial \text{duty}}{\partial \theta} \dot{\theta} \quad (11)$$

(1), (2), (3)을 이용하여 (11)을 정리하면,

$$\dot{V}(e) = e\dot{e} = -\alpha_2 \beta_1 \lambda_1 e [T_i \quad 1] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = -\gamma e (\dot{\theta}_1 T_i + \dot{\theta}_2) \quad (12)$$

여기서, $\alpha_2 < 0$, $\beta_1 < 0$, and $\lambda_1 > 0$ 이다. 따라서 학습법칙은 다음과 같이 유도되는데, 여기서 γ_1 , γ_2 는 양의 이득이다.

$$\dot{\theta}_1 = \gamma_1 e, \quad \dot{\theta}_2 = \gamma_2 e \quad (13)$$

(13)에 의하여 Lyapunov 함수의 미분값은 음한정이 되며, 터빈 각가속도 오차의 점근적 안정성, 즉 $e \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ 이 보장된다.

$$\dot{V}(e) = -\gamma(\gamma_1 T_i + \gamma_2) e^2 = -\bar{\gamma} e^2 < 0 \quad (14)$$

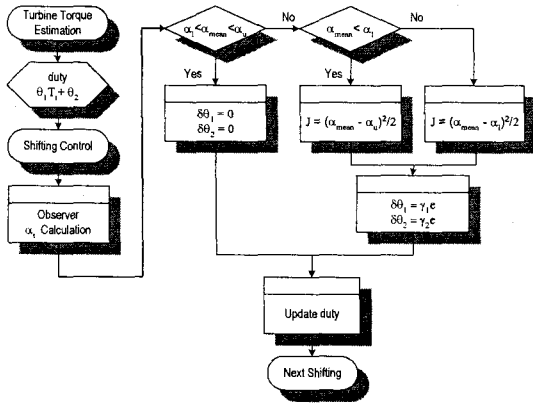


Fig. 6 Block diagram of the proposed control algorithm

유도된 학습법칙 (13)의 물리적인 의미를 분석해 보면, 우선 $|\alpha_i| < \bar{\alpha}_i$, 즉 터빈 각가속도가 너무 작아서 관성영역 지속시간이 너무 긴 경우에는 (9)에 의하여 $e = |\alpha_i| - \bar{\alpha}_i < 0$ 가 되며, 그러면 $\dot{\theta}_1 < 0$, $\dot{\theta}_2 < 0$ 가 되고, 다음 관성영역 제어시의 듀티율 입력은 (13)에 의하여 음의 방향으로 조정된다(즉, 작아진다). Fig. 4에 보인 바와 같이 마찰요소에 작용하는 압력은 듀티율과 반비례하므로, 전술한 학습작용에 의하여 다음 변속과정의 관성영역에서 더욱 큰 터빈 각가속도를 얻을 수 있다. 반대로, 터빈 각가속도가 너무 커서 관성영역 지속시간이 너무 짧은 경우에는 (10)에 의하여 $e = |\alpha_i| - \bar{\alpha}_i > 0$ 이고, $\dot{\theta}_1 > 0$ and $\dot{\theta}_2 > 0$ 이므로, 다음 관성영역 제어시의 듀티율 입력은 (13)에 의하여 양의 방향으로 조정되며(즉, 커지며), 따라서 다음 변속과정의 관성영역에서 더욱 작은 터빈 각가속도를 얻을 수

있다. 즉 모든 경우에 터빈 각가속도가 (8)에서 설정된 범위로 접근하도록 제어 파라미터들의 학습이 진행된다.

제안된 알고리즘은 안정성이 보장될 뿐만 아니라 간단하고 직관적이며 구현이 용이하다는 장점을 갖는다. Fig. 6에 제안된 학습제어 알고리즘의 블록선도를 도시하였다.

5. 시뮬레이션 및 HILS 결과

제안된 자기학습제어 알고리즘의 성능은 시뮬레이션과 HILS를 통하여 검증되었다. (13)에서 오차를 계산하기 위한 터빈 각가속도는 상수여야 하므로 관측기로부터 샘플링된 관성영역 터빈 각가속도의 산술평균을 제어 알고리즘에 이용하였다.

5.1 시뮬레이션 결과

제안된 제어 알고리즘의 변속품질 저하 판단 및 파라미터 학습 능력을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 SIMULINK [13]과 STATEFLOW [12]를 이용하여 구현하였으며, 주 관심부분인 자동변속기와 유압 액츄에이터는 상세한 모델을, 나머지 부분에 대해서는 간략화된 모델을 사용하였다 [8].

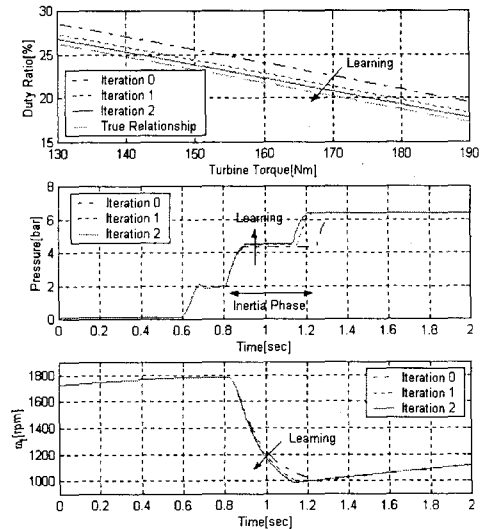


Fig. 7 Simulation result: too slow turbine acceleration

Fig. 7과 Fig. 8에 시뮬레이션 결과를 보였다. 시뮬레이션시에 (13)의 이득들은 학습과정을 확연하게 보이기 위하여 작은 값으로 설정하였으며, 기준 터빈 각가속도는 관성영역 지속시간이 0.3~0.4 초

사이의 값에 해당하는 값들을 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 학습법칙이 미지의 시스템 변동으로 인한 제어성능의 저하를 적절히 보상해 줄 수 있다는 것을 보여준다. Fig. 7 과 Fig. 8 에서 학습속도는 (13)의 이득들을 조정함으로써 원하는 수준으로 조절할 수 있다. 결론적으로 제안된 학습제어 알고리즘에 의하여 변속과정의 신뢰성 있는 상위 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

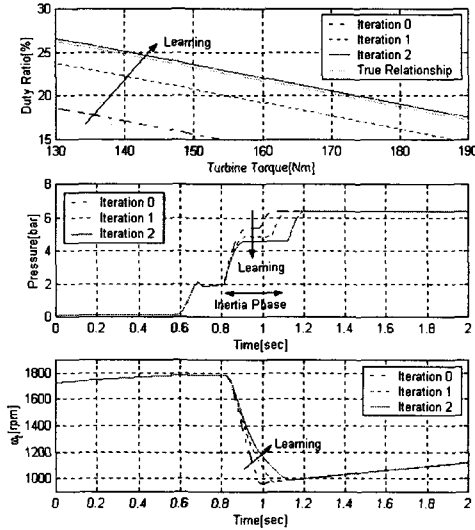


Fig. 8 Simulation result: too steep turbine acceleration

5.2 HILS 결과

본 논문에서 이용된 HILS 환경은 Fig. 9 에 보인 바와 같이 기계적 동력전달계의 시뮬레이션 모델과 실제 유압 액츄에이터로 구성되어 있다. 액츄에이터의 압력은 마찰요소 모델에 작용하여 변속 과정을 야기하며, 학습법칙은 변속과정을 감시하여 제어 파라미터들을 (13)에 의해 학습시킨다.

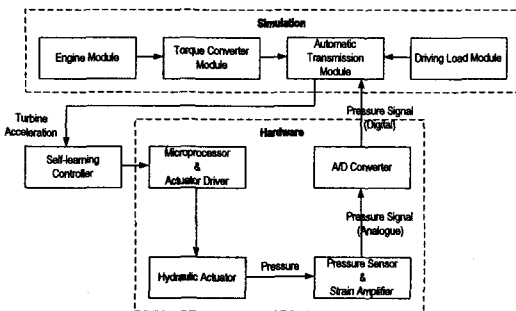


Fig. 9 Scheme of HILS

HILS 결과를 Fig. 10 과 Fig. 11 에 보였다. 시뮬레이션 결과와는 달리 제어 파라미터들의 학습과정

을 보이지 않았는데, 이는 유압 액츄에이터의 불확실성으로 인하여 (7)의 터빈토크와 듀티율 사이의 정확한 관계를 알 수 없기 때문이다. Fig. 10 과 Fig. 11 의 결과들을 통하여 제안된 학습제어 알고리즘이 터빈 각가속도의 조절이라는 제어 목적을 효과적으로 달성할 수 있다는 것을 알 수 있다.

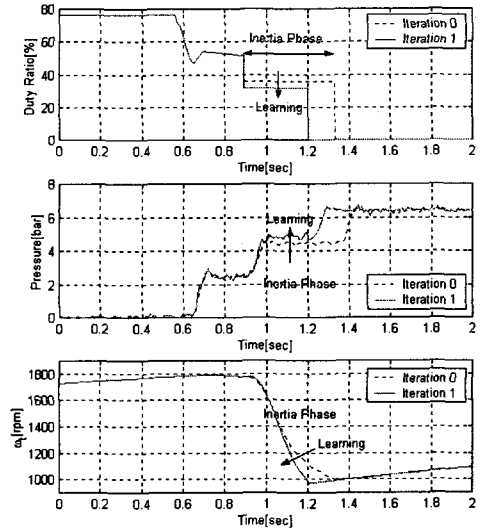


Fig. 10 HILS result: too slow turbine acceleration

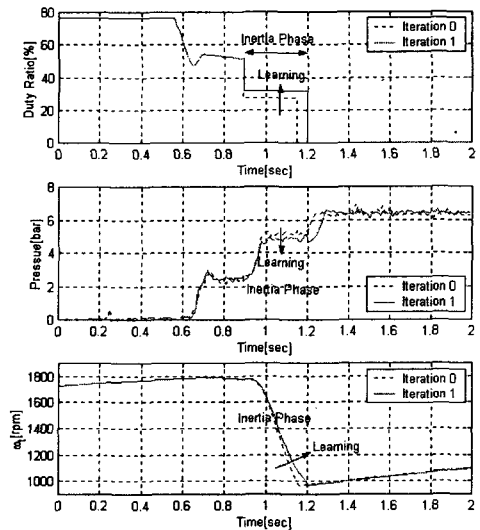


Fig. 11 HILS result: too steep turbine acceleration

6. 결론

본 논문에서는 숙련된 운전자의 수준으로 변속을

할 수 있는 건설장비용 동력전달계의 새로운 자기 학습 제어 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘을 구현하는데 있어서 출력축 토크와 달리 관측기를 이용해 쉽게 추정이 가능한 터빈 각가속도를 변속품질의 새로운 지표로 제안하였다.

Lyapunov 방법과 터빈 각가속도 오차의 2 차 목적 함수를 적용하여 터빈 각가속도를 조절할 수 있는 자기 학습 제어 알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션과 HILS 결과를 통하여 설계된 제어기의 성능과 적응성을 보였다.

본 논문에서는 하나의 상향변속과정에 대한 학습 제어 알고리즘을 고려하였으나, 대상 건설장비의 자동변속기는 마찰요소가 각각의 유압 액츄에이터에 의하여 독립적으로 제어되므로, 제안된 알고리즘은 전 변속단으로 확장이 가능하다.

제안된 알고리즘은 안정성이 보장되는 동시에 간단하고 직관적이며 구현하기 쉬운 장점을 갖고 있어 건설장비 동력전달계의 제어에 널리 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Brejcha, M.F. Automatic transmissions and transaxles. Prentice-Hall, 1993.
- (2) Chen, C.T. Linear system theory and design, Saunders College Publishing, 1984.
- (3) Cho, B.H., Lee, H.W., Oh, J.S., Jung, G.H. and Lee, K.I. A study on full electronic control of automatic transmission: direct active shift control. In '2000 FISITA World Automotive Congress, Seoul, 12-15 June 2000, paper F2000 A101.
- (4) Hahn, J.O., Shin, B.K., Jo, H.S. and Lee, K.I. Fuzzy logic slip control of torque converter clutch system for passenger car considering road grade resistance. Transactions of KSME (A), 2000, 24(3), 718~727.
- (5) Hur, J.W. Development and analysis of automatic transmission hydraulic system using a directly driven clutch circuit. Master's Dissertation, 1999, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University.
- (6) Jauch, F. Model-based application of a slip-controlled converter lock-up clutch in automatic car transmissions. In SAE In SAE Transmission and Driveline System Symposium, Detroit, 3-7 March 1999, paper SAE 1999-01-1057, pp. 287-293.
- (7) Jung, G.H., Cho, B.H. and Lee, K.I. Dynamic analysis and closed-loop shifting control of EF-automatic transmission with proportional control solenoid valves. In '2000 FISITA World Automotive Congress, Seoul, 12-15 June 2000, paper F2000 A104.
- (8) Park, J.Y., Hur, J.W., Jung, G.H., Lee, K.I. and Kim, K.S. The modeling and analysis of the powertrain in an automatic transmission for the construction vehicle. In Proc. '1999 KSAE Fall Annual Meeting, Daegu, 26-27 November 1999, pp. 748-754.
- (9) Shin, B.K., Hahn, J.O. and Lee, K.I. Development of shift control algorithm using estimated turbine torque. In '2000 SAE Transmission and Driveline System Symposium, Detroit, 3-7 March 2000, paper SAE 2000-01-1150, pp. 183-189.
- (10) Shin, B.K., Hahn, J.O., Yi, K. and Lee, K.I. A supervisor-based neural-adaptive shift controller for automatic transmissions considering throttle opening and driving load. KSME Int'l Journal, 2000, 14(4), 418-425.
- (11) Shin, B.K. Analysis of shifting characteristics and design of an intelligent controller for automatic transmissions. Ph.D. Dissertation, 2000, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University.
- (12) STATEFLOW User's guide, Math Works, 1997.
- (13) Using SIMULINK, Math Works, 1996.
- (14) Yamaguchi, H., Narita, Y., Takahashi, H. and Katou, Y. Automatic transmission shift schedule control using fuzzy logic. In SAE Transmission and Driveline System Symposium, Detroit, 3-7 March 1993, paper SAE 930674, pp. 617-627.
- (15) Zheng, Q., Srinivasan, K. and Rizzoni, G. Transmission shift controller design based on a dynamic model of transmission response. Control Engineering Practice, 1999, 7(8), 1007-1014.