

입력 성형기의 고차 시스템 적용을 위한 GA활용

An Application of the Genetic Algorithm for the Input Shaper on the High Order System

정황훈^{1*} · 윤소남² · 이상헌³

Hwang Hun Jeong^{1*}, So Nam Yun² and Sang Hun Lee³

Received: 23 Mar. 2020, Accepted: 10 Apr. 2020

Key Words : Input Shaper(입력성형기), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Modeling Error Compensation(모델링 오차 보상)

Abstract: Recently, industrial systems are becoming quicker and lighter to enable the reduction of energy consumption and increase productivity. So the latest systems are more flexible and rapid than the previous systems. But, with this improvement, another problem has emerged, such as the increase in residual vibration when a system is started or stopped. The input shaper is a command generation method that can remove residual vibration. It can provide a solution to the problem of residual vibration in industrial systems. However, it is difficult to generate the input shaper in high order systems, such as a typical industrial system because the input shaper is induced from the system's vibration characteristics. This study focused on the extra insensitivity shaper that can compensate for the system's modeling error such as input dynamics, and the high order's system affection. A genetic algorithm was deployed to adjust a vibration limitation for the extra insensitivity of the input shaper. A plant is a low damping system that includes one zero and a pole. The fitness functions are an error signal of the system's response with normalized frequency variations. Verification of the suggested system is satisfied by comparison between the zero vibration derivative input shaper's response and the suggested one.

기호 설명

V_{lim} : available vibration tolerance
 $y(t)$: step response with normalized frequency
 ζ : damping ratio
 ω_n : natural frequency, rad/s
 ω_{no} : normalized frequency

1. 서 론

유압시스템은 시스템을 이루는 재료의 발달과 액추에이터 기술의 발전에 따라 보다 가벼우면서도 빠르고, 정확한 형태로 개발되어지고 있다. 하지만, 액추에이터의 경량화와 속응성 향상을 이루기 위해서 유압 시스템은 고압화가 이루어지고 있으며, 이에 따라 보다 진동에 취약한 형태의 시스템으로 변화하고 있다¹⁾.

유연 기계시스템(flexible mechanical system)의 진동을 제어하는 방법에는 크게 피드포워드 제어와 피드백 제어가 있다. 피드백 제어는 시스템의 상태를 측정하고 예측하여 시스템의 진동을 제거하는 방법이다. 대부분의 피드백 제어는 적용하고자 하는 시스템에 센서나 액추에이터를 추가적으로 설치하여야 하며, 별도의 계산 시간과 함께 불안정한 거동을 유발할 수 있는 단점이 있다²⁾. 이에 비하여 피드포워드

* Corresponding author: hwanghun@koceti.re.kr

1 System Technology Department, Korea Construction Equipment Technology Institute, Gunsan 54004, Korea

2 Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 34103, Korea

3 Industrial Technology Department, Korea Construction Equipment Technology Institute, Gunsan 54004, Korea

Copyright © 2020, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제어는 시스템의 물리적인 특성이나 진동 특성으로부터 기준입력에 대한 시스템의 진동을 줄이는 방법이다. 이 방법의 경우 기존의 시스템에 대한 변경없이 입력 신호만을 변경하여 진동을 줄일 수 있는 장점이 있다^{3,4)}.

입력 성형기(Input shaper)는 경감쇠 시스템의 스텝 응답에 대하여 기준입력을 분할하는 방법을 통해 시스템의 진동을 상쇄하는 피드포워드 제어기이다. 대표적인 입력성형기에는 스텝형태의 기준입력을 두 개의 스텝으로 구현하여 진동을 제거한 ZV(zero vibration) 입력성형기^{2,5)}, ZVD(zero vibration and derivative), ZVDD, ZVDDD와 같은 도함수를 활용한 방법^{2,6)}, 진동에 대한 일정한 여유를 둬으로써 시스템의 강인성(robust)을 부여한 EI(extra intensive) 입력성형기, multi hump EI 입력성형기 등과 같은 강인한 입력성형기⁷⁾, 다수의 임펄스를 활용하여 ZV, ZVD의 입력을 수정한 MIS(modified input shaping) 기법³⁾ 등이 있다. 각각의 입력성형기들은 기준입력을 지연된 몇 개의 분할된 입력으로 변환하여 플랜트에 공급함으로써 시스템의 잔여진동을 상쇄하는 방법이다. 하지만, 분할된 입력의 개수가 증가할수록 시스템 응답이 지연되며, 시스템의 모델링 오차에 민감한 특성을 가진다. 민감성 곡선(sensitivity curves)의 비교를 통해 two hump EI 입력성형기가 가장 강인한 입력성형기로 선정되었으나⁸⁾, 시스템의 응답특성을 고려하여 본 연구에서는 EI 입력성형기를 기본으로 고차시스템에 강인한 입력성형기를 유도한다.

EI 및 multi hump EI 입력성형기는 잔류 진동의 한계를 넘겨 전체 시스템의 강인성을 향상시킨 기법이다. 하지만, 각 입력성형기의 허용 가능 진동의 크기를 선정하기 위한 구체적인 방안이 존재하지 않기 때문에 시행착오법(trial and error)을 제외한 별도의 방안이 존재하지 않는다. 본 연구에서는 모델링과 실제 시스템 사이의 정규화된(normalized) 고유진동수에 따른 시스템의 오버슈트를 목적함수로 하는 RCGA(real coded genetic algorithm)를 활용하여 EI 입력성형기의 허용 가능 진동의 크기를 선정하는 방법에 대하여 설명하고, EI 입력성형기의 스텝 입력의 허용 가능 진동의 크기를 개별로 선정하여 잔류 진동을 줄이는 방안에 대하여 제안한다. 제안된 방법의 타당성은 민감성 곡선을 통한 비교 및 영점과 극점이 추가된 별도의 시스템 응답 비교를 통해 검증한다.

2. Input Shaper

2.1 Input Shaper의 정의

단순 2차 시스템에 대하여 크기가 A 이고, 입력 시간이 t_0 인 임펄스 신호를 가하였을 때, 시스템의 응답은 식 (1)과 같다.

$$y(t) = A \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \quad (1)$$

이 시스템에 n 개의 임펄스 신호를 가한다면, 시스템 응답의 진폭 A_{amp} 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n B_i \sin \Phi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n B_i \cos \Phi_i\right)^2} \quad (2)$$

여기서, $B_i = A_i e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)}$, $\Phi_i = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i$ 이다. 시스템의 임펄스 응답이 0이 되기 위해서는 다음의 제약조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \cos \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i = 0 \quad (4)$$

만약, 기준입력이 스텝입력일 경우에는 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (5)$$

즉, 입력성형기는 다수의 임펄스 응답으로부터 시스템의 잔류 진동을 제거하는 입력 신호 생성 기법이다.

본 논문의 목적은 유연 기계시스템으로 가정되는 고차시스템의 진동을 억제하기 위하여 선정된 EI 입력성형기의 최적의 허용 가능 진동 크기를 RCGA를 통해 선정하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 먼저, 모델링 오차에 대한 영향을 확인한다.

모델링 오차의 영향을 확인하기 위해 선정하는 입력성형기는 ZV, ZVD, EI로 한정한다. 이는 ZVDD, ZVDDD, multi hump EI, MIS 등의 입력성형기가 4개 이상의 임펄스를 사용하여 강인성을 증가시키는 장점은 있으나 시스템의 응답속도가 늦어지는 단점이 존재하기 때문이다.

ZV, ZVD, EI 입력 성형기는 각각 식 (6)^{2,5)}, 식 (7)⁶⁾, 식 (8)⁷⁾과 같다.

$$ZV = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & 0.5 T_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$ZVD = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & 0.5 T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$EI = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(1+V_{lim}) & A_2(1-V_{lim}) & A_3(1+V_{lim}) \\ 0 & 0.5 T_d & T_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$, $T_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$,

$$A_1 = \frac{1}{1+2K+K^2}, \quad A_2 = \frac{2K}{1+2K+K^2},$$

$$A_3 = \frac{K^2}{1+2K+K^2} \text{이다.}$$

입력성형기를 적용할 임의의 시스템은 고유진동수 ω_n 이 2(rad/s)이며, 감쇠비 ζ 가 0.1인 단순 2차시스템으로 식(9)와 같이 정의한다.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{4}{s^2 + 0.4s + 4} \quad (9)$$

물리적으로 식 (9)는 질량 1 kg의 물체가 감쇠계수가 0.4 Ns/m인 댐퍼와 스프링 상수가 4 N/m인 스프링에 의해 지지되고 있는 시스템으로 계인 4는 크기가 1 m인 스텝에 대한 시스템 응답을 1 m로 고정하기 위한 값이다. Fig. 1은 식 (9)와 같은 질량-스프링-

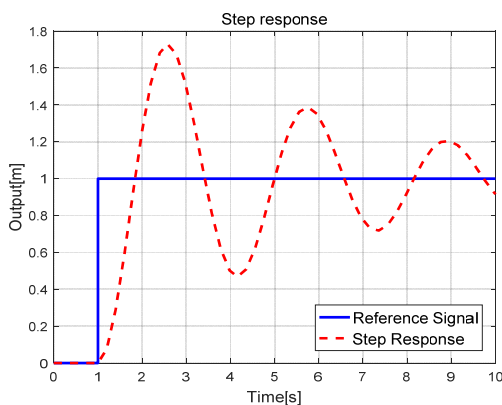
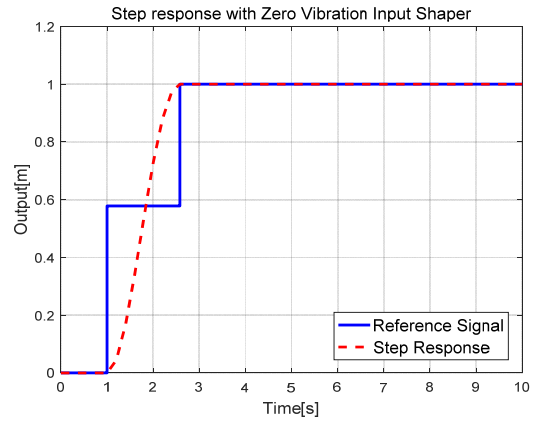
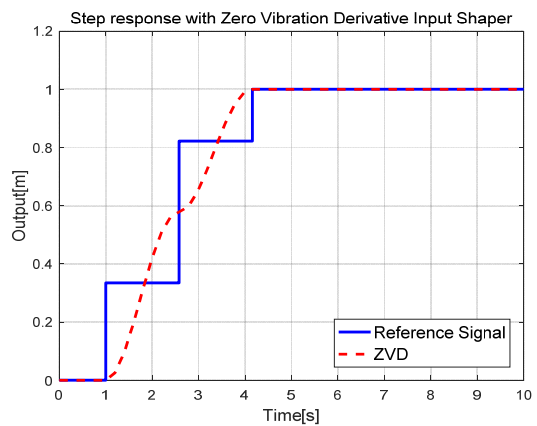


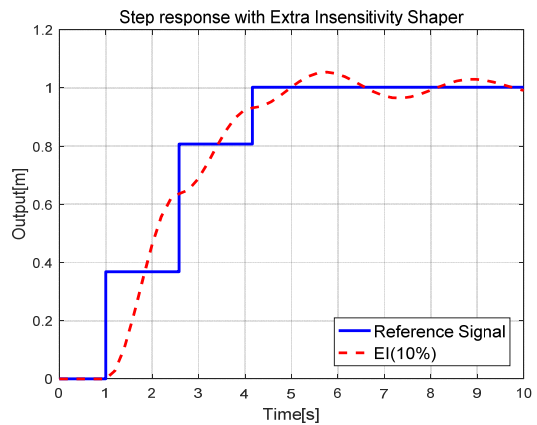
Fig. 1 Step response of mass-spring-damper system



(a) ZV input shaper



(b) ZVD input shaper



(c) EI input shaper ($V_{tol}=10\%$)

Fig. 2 Step response of input shaper

댐퍼 시스템의 스텝응답을 나타낸 것이며, Fig. 2는 각 입력성형기의 변경된 입력 신호와 이에 따른 시스템의 응답을 나타낸 것이다.

2.2 모델링 오차의 영향

실제 시스템과 모델링된 시스템과의 차이점은 크

계 시스템의 응답 지연, 기준입력의 동특성, 고차항의 영향으로 볼 수 있다. 시스템의 응답 지연의 경우 피드백 제어시스템에서 시스템을 불안정하게 만드는 요소⁹⁾로 피드포워드 제어시스템에서는 고려할 필요가 없는 요소이다. 기준입력의 동특성의 경우 식 (10)

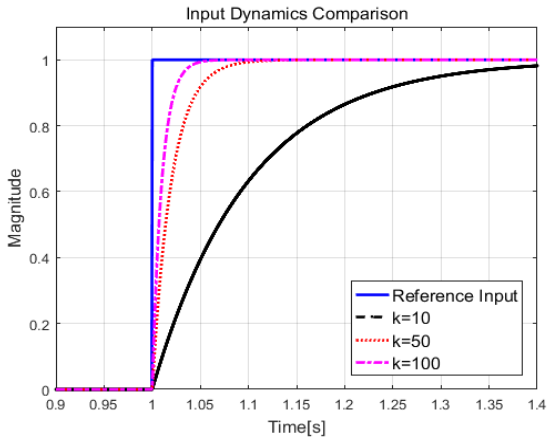
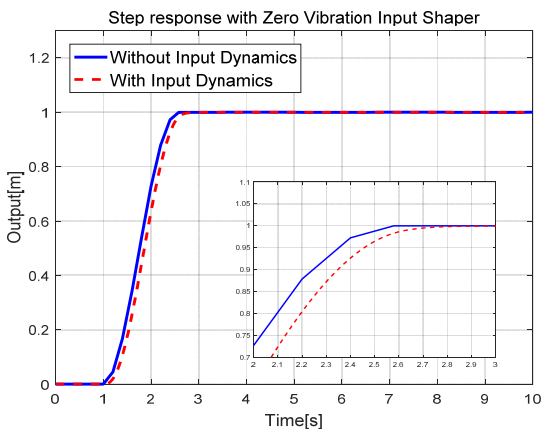
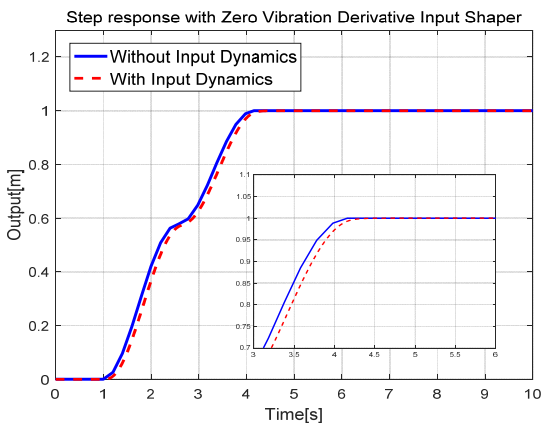


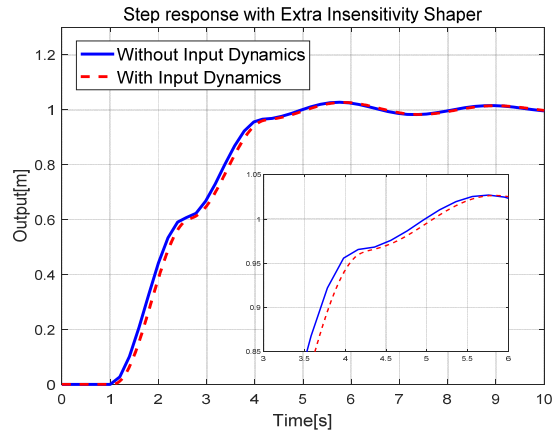
Fig. 3 Input signal's delay



(a) ZV input shaper



(b) ZVD input shaper



(c) EI input shaper

Fig. 4 Influence of input signal's delay

과 같은 임의의 지연요소로 정의할 수 있으며, Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 입력성형기를 가지는 시스템의 응답에 있어 지연요소의 영향은 Fig. 4와 같이 출력을 단순히 지연하는 형태로 나타나며, 이는 전체 시스템의 안정도에 큰 영향을 미치지 못한다.

$$G_I(s) = \frac{k}{s+k} \quad (10)$$

고차항의 경우 다른 두 개의 요소에 비해 큰 영향을 끼치며, 이는 시스템의 고유주파수를 변경시키기 때문이다. 식 (9)와 같은 단순 2차 시스템에 영점(2.5)과 극점(10)을 추가할 경우 시스템의 스텝 응답은 Fig. 5와 같이 변경되며, 이 때 각 입력성형기를 포함한 시스템의 응답은 Fig. 6과 같이 변동된다. 고유주파수의 변경에 따른 시스템의 영향은 식 (9)와 같이 주어진 시스템에 따른 ZV, ZVD, EI의 민감성 곡선으로부터 유추할 수 있다.

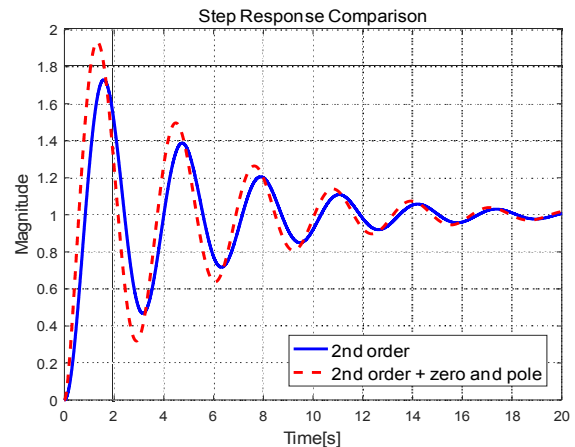


Fig. 5 Step response of mass-spring-damper system with zero and pole

3. 모델링 오차 보상

3.1 모델링 오차 보상 방안

모델링 오차에 따른 시스템의 진동을 제어하기 위해서는 모델링 오차를 줄이거나, 모델링 오차에 강한 제어를 사용할 필요가 있다. 모델링 오차를 줄이기 위해서는 고차 시스템의 스텝 응답으로부터 가장 근사화 된 2차 시스템을 동정(identification)한 후 입력성형기를 설계할 필요가 있으며, 모델링 오차에 강한 제어를 설계하기 위해서는 정규화된 주파수의 변화에 따른 오버슈트와 언더슈트 크기를 목적함수로 가지는 입력성형기의 파라미터를 최적 설계할 필요가 있다.

본 연구에서는 모든 제어대상은 스텝응답에 대하여 고유의 응답을 가지고 있다는 가정 하에 고차 시스템의 응답에 가장 근사화 된 2차 시스템을 RCGA를 활용하여 구한다. 또한, 정규화된 주파수의 변화에 따른 오버슈트와 언더슈트 크기를 목적함수로 가지는 EI 입력성형기의 허용 가능 진동의 크기를 RCGA(real coded genetic algorithm)를 활용하여 구한다.

3.2 RCGA의 정의

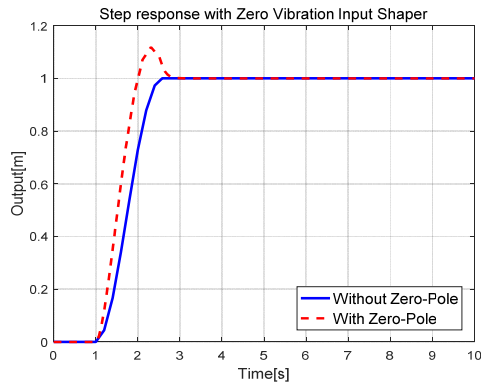
유전알고리즘(genetic algorithm)은 다윈의 적자생존이라는 자연 현상을 모방하여 목적함수에 최적의 해를 확률적으로 탐색하는 최적 알고리즘으로 방대한 탐색영역에서 최적의 해를 구하는데 장점을 가지고 있다¹⁰⁾. 본 연구에서는 시스템의 스텝응답으로부터 2차 시스템을 동정하는 것과 EI 입력성형기의 허용 가능 진동의 크기를 선정하는 곳에 활용된다.

3.3 단순 2차 시스템 동정을 통한 방법

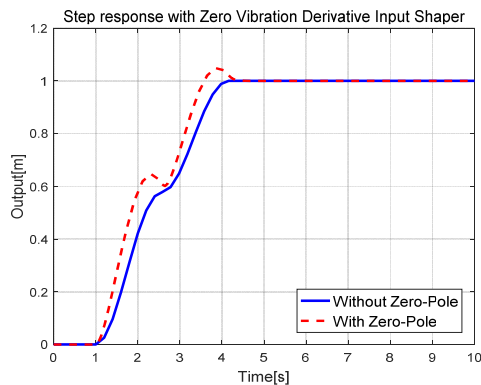
설계된 입력성형기가 잔여 진동을 줄이지 못하는 근본적인 원인은 모델링 오차에 있다. 따라서 실제 시스템에 보다 가까운 모델을 동정할 수 있다면, 잔류 진동의 크기를 줄일 수 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 스텝응답의 오차를 목적함수로 하는 RCGA를 설계하고, 이를 통해 2차 시스템을 동정하고자 한다. 식 (11)은 RCGA의 목적함수이다.

$$f_{obj1}(t) = \int_0^{10} |e(t)| dt \quad (11)$$

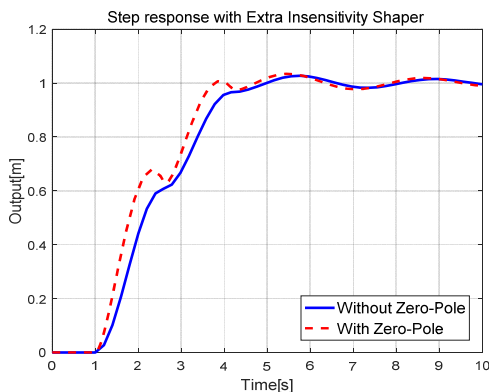
여기서, $e(t)$ 는 실험 스텝응답과 시뮬레이션 스텝응답의 오차이다. RCGA를 구성하기 위한 유전 연산



(a) ZV input shaper



(b) ZVD input shaper



(c) EI input shaper

Fig. 6 Influence of modeling error

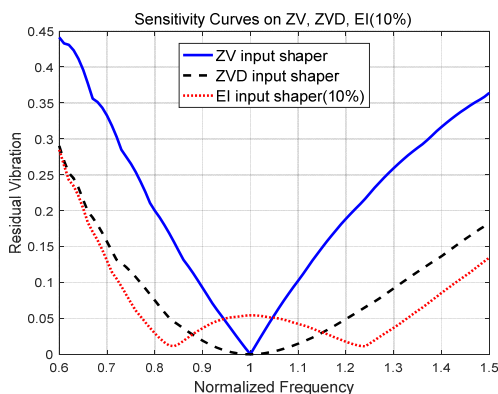


Fig. 7 Sensitivity curve for 2nd order system

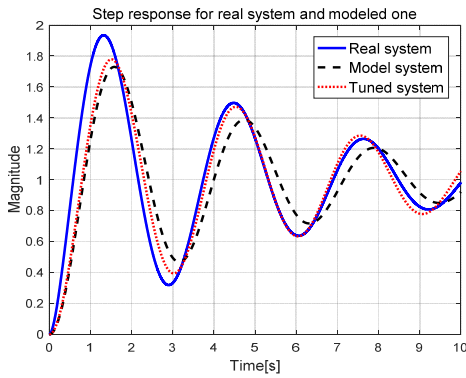
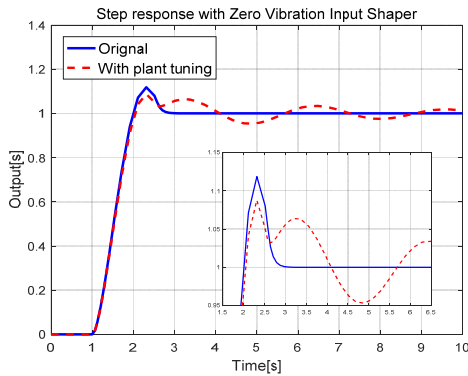
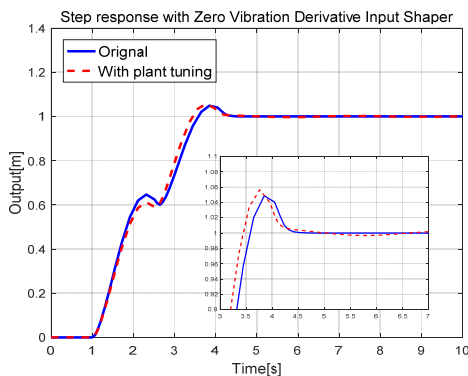


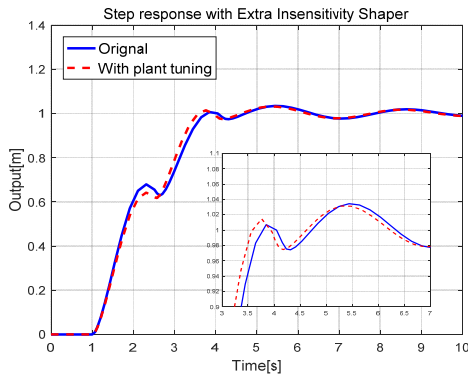
Fig. 8 Step response on tuning system



(a) ZV input shaper



(b) ZVD input shaper



(c) EI input shaper

Fig. 9 Influence of modeling error on tuned system

자료는 Gradient - like selection, Modified simple crossover (교배 확률 0.9), Dynamic mutation(돌연변이 확률 0.1)을 사용하였으며, Elitism 및 scaling window scheme를 사용하였다. 변수는 고유진동수와 감쇠비로 선정하였으며, 초기 개체집단은 100개, 100세대에 걸쳐 RCGA를 수행하였다.¹⁰⁾

Fig. 8은 RCGA를 통해 찾아낸 고유진동수($\omega_n=2.0859$)와 감쇠비($\zeta=0.0796$)에 따른 스텝응답을 나타낸 그래프이다. 구해진 2차시스템의 스텝응답이 실제 시스템의 스텝응답과 일치하지 않는 이유는 동정을 위해 선정된 시스템의 구조가 실제 시스템과 다르기 때문이다. 이는 제어기의 강인성을 바탕으로 보상해야 하는 부분이기도 하다. Fig. 9는 동정된 2차 시스템을 바탕으로 ZV, ZVD, EI(10%) 입력성형기를 설계하여 모델링 오차를 가지는 시스템의 스텝응답을 기존 시스템과 비교한 것으로 일부 변화는 확인할 수 있으나, 잔류 진동 제거에는 큰 효과가 없는 것으로 판단된다. 특히 ZV의 설계에 있어 고유주파수의 변동에 따라 잔류 진동이 크게 남는 것을 알 수 있다.

3.4 정규화된 주파수를 활용한 방법

일반적으로 실제 시스템과 수학적으로 모델링된 시스템 사이에는 모델링 오차가 항상 존재하며, 피드포워드 제어기의 경우 모델링 오차를 보상하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 EI 입력성형기를 설계하는데 있어 정규화된 주파수에 따른 잔류 진동의 크기를 줄일 수 있는 형태의 목적함수를 정의하고, 이 목적함수를 최적으로 하는 허용 가능 진동의 크기를 찾음으로써 모델링 오차의 영향을 줄이고자 한다.

식(9)와 같이 주어진 시스템에 대하여 정규화된 주파수($\omega_{no} = \omega_n / \omega_{model}$)의 값을 0.6에서 1.4까지 변동할 때, 시스템의 잔류 진동의 크기의 합을 식(12)와 같은 목적함수로 정의하였다.

$$f_{obj2}(t) = \sum_{\omega_{no}=0.6}^{1.4} abs(1 - \max(y(t))) + \sum_{\omega_n=0.6}^{1.4} abs(1 - \min(y(t))) \quad (12)$$

RCGA를 구현하기 위한 유전알고리즘 및 세대수, 초기 개체수는 이전의 알고리즘과 동일하며, 변수는 허용 가능 진동의 크기(V_{lim})로 선정하였으며, 그 결과는 0.051이었다.

다음으로, 식 (13)과 같이 EI를 수정한 입력성형기에 대하여 변수가 3개인 조건에서 동일한 목적함수를 최적으로 하는 허용 가능 진동의 크기(V_{lim1} , V_{lim2} , V_{lim3})를 각각 0.0111, 0.0454, 0.0270으로 선정하였다. 식 (13)과 같은 수정된 EI는 기존의 EI의 경우 허용 가능 진동의 크기를 선정하기 위한 기준이 없기 때문에 각각의 임펄스에 대한 허용 가능 진동의 크기를 변수로 두어 입력 성형기의 강인성을 향상시키는 것을 목적으로 설계되었다.

$$EI_{mo} = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} A_1(1 + V_{lim1}) & A_2(1 - V_{lim2}) & A_3(1 + V_{lim3}) \\ 0 & 0.5T_d & T_d \end{bmatrix}$$

Fig. 10은 기존의 EI($V_{lim} = 10\%$)와 RCGA를 통해 선정된 EI($V_{lim} = 5.1\%$), 수정된 EI($V_{lim1} = 1.11\%$, $V_{lim2} = 4.54\%$, $V_{lim3} = 2.7\%$)에 따른 민감성 곡선이다. 결과로부터 RCGA를 통해 선정된 EI($V_{lim} = 5.1\%$)는 기존의 EI($V_{lim} = 10\%$)에 비해 정규화된 주파수의 변동에 대해서도 낮은 잔류 진동을 가지며, 특히 수정된 EI($V_{lim1} = 1.11\%$, $V_{lim2} = 4.54\%$, $V_{lim3} = 2.7\%$)는 정규화된 주파수 변동에 대하여 일정 영역에서 비교 대상 입력성형기 중 가장 작은 잔류 진동을 가진다. Fig. 11은 정규화된 주파수의 값이 0.95, 1, 1.05일 때의 스텝 응답을 비교한 그림이며, Fig. 12는 모델링 오차를 가지는 시스템의 응답을 비교한 것이다. 실제 시스템의 출력으로부터 시스템을 동정한다면, 실제 시스템과 유사한 동특성을 얻을 수 있다고 할 때, 제안하는 수정된 EI는 일정 영역 내에서 모델링 오차에 대해 잔류 진동을 충분히 제거할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

유연 기계시스템의 잔류 진동을 제거하기 위한 하나의 방법으로 본 연구에서는 피드포워드 제어 기법인 입력성형기를 활용하였다. 하지만, 제어 시스템을 꾸미는데 있어 제어 대상의 모델링 오차는 항상 존재하고 있으며, 보다 강인한 제어기를 활용할 필요가 있다. 모델링 오차로부터 발생하는 잔류 진동을 줄이기 위하여 본 연구에서는 다음을 확인하였다.

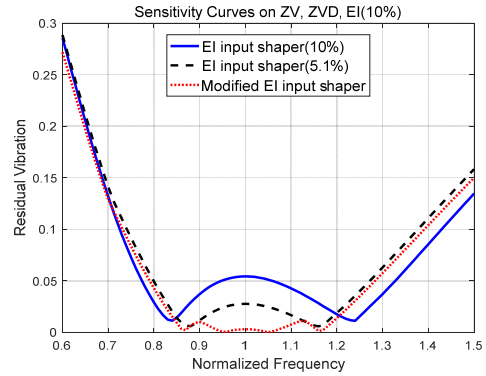
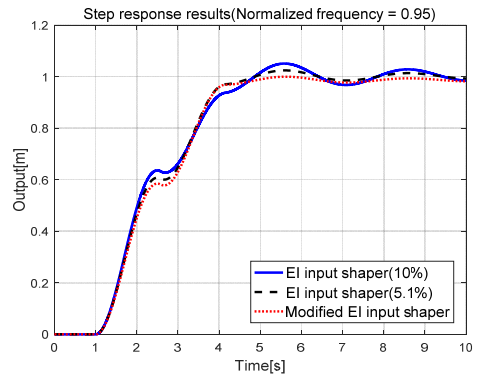
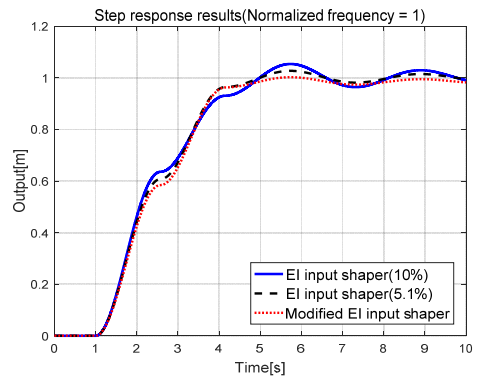


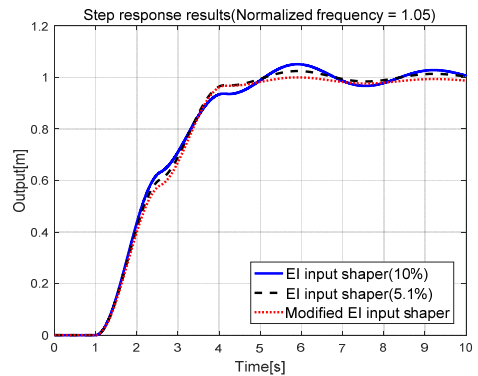
Fig. 10 Sensitivity curve for tuned system



(a) $\omega_{no} = 0.95$



(b) $\omega_{no} = 1$



(c) $\omega_{no} = 1.05$

Fig. 11 System's step response with normalized frequency's variation

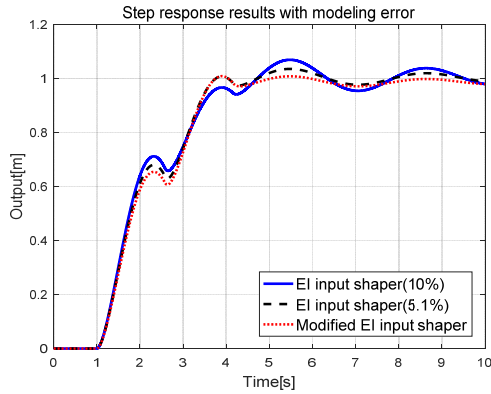


Fig. 12 Step response with modeling error

- 입력성형기를 사용하는 제어시스템은 고유진동수 변경에 따른 모델링 오차에 크게 민감하며, 이를 민감성 곡선을 통해 확인할 수 있다.
- 모델링 오차를 줄이기 위해 시스템을 동정하고 동정된 시스템으로부터 입력성형기를 설계하였으나, 큰 효과를 볼 수 없었다.
- 정규화된 주파수 영역에서의 잔류 진동의 크기를 목적함수로 하는 EI 입력성형기의 최적 허용 가능 진동 크기를 RCGA를 통해 구하였으며, 일정 영역에서 진동의 제거가 가능함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임.(과제 번호 : 10067705)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

1) D. T. Kim and K. S. Park, "Comparison of Control Performance in Electro-hydraulic Servo System",

Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, Vol.3, No.2, pp.14-20, 2006.

2) J. Vaughan, A. Yano and W. Singhose, "Comparison of robust input shapers", Journal of Sound and Vibration, Vol.315, pp.797-815, 2008.

3) J. Shan, H.-T. Liu and D. Sun, "Modified input shaping for a rotating single-link flexible manipulator", Journal of Sound and Vibration, Vol.285, pp.187-207, 2005.

4) K. S. Kim, J. B. Jeong and B. S. Ryuh, "A Study of Peak Pressure Reduction Control of Electro Hydraulic System using Convolution", Journal of Drive and Control, Vol.16, No.3, pp.59-66, 2019.

5) N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.112, No.1, pp.76-82, 1990.

6) W. E. Singhose, L. J. Porter and N. C. Singer, "Vibration Reduction Using Multi-Hump Extra-Insensitive Input Shapers", Proceedings of the American Control Conference, Vol.5, pp.3830-3834, 1995.

7) W. Singhose, W. Seering and N. Singer, "Residual Vibration Reduction Using Vector Diagrams to Generate Shaped Inputs", Journal of Mechanical Design, Vol.116, No.2, pp.654-659, 1994.

8) C. Conker, H. Yavuz and H. H. Bilgic, "A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators", Journal of Vibroengineering, Vol.18, No.5, pp.2947-2958, 2016.

9) W. Gao and J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear System: A New Approach", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.40, No.1, pp.45-55, 1993.

10) G. G. Jin, Genetic Algorithms and Their Applications, 1st edition, Kyo Woo Sa, Seoul, pp.245-259, 2000.