

가상모드 입력성형기를 이용한 감쇠 진동계 잔류진동 제거 Virtual Mode Based Input Shaper Design for Damped Vibration Systems to Eliminate Residual Vibration

#홍성욱¹, *서용규², 최훈석³, 박상원³

[#]S. W. Hong(swhong@kumoh.ac.kr)¹, ^{*}Y. G. Seo², H. S. Choi³, S. W. Park³

¹ 금오공과대학교 기계공학부, ² ㈜탑엔지니어링, 금오공과대학교 대학원, ³ 금오공과대학교 대학원

Key words : Input shaping, Virtual mode, Input shaper duration, Damped vibration system

1. 서론

최근 LCD 생산장비에서는 고속화와 대형화가 동시에 이루어지면서 잔류진동 (Residual vibration) 억제가 핵심적인 과제가 되고 있다. 입력성형기법(Input shaping method)은 최근 활발히 연구되고 있는 잔류진동 제거기법 중 하나이다.^(1,2) 입력성형기법은 시스템의 진동특성에 따라 결정되는 입력성형기(Input shaper)와 기준입력명령을 컨볼루션(Convolution)하여 시스템에 인가하여 잔류진동을 억제하는 방법이다.

입력성형기법은 잔류진동을 제거하는데 효과적이거나 응답속도의 지연이라는 손실이 발생한다. 대량생산 체계를 필요로 하는 반도체, LCD 등의 제조공정에서는 이송계에서의 이런 시간지연이 큰 결점으로 작용할 수 있다. 이와같은 문제점을 개선하기 위해 참고문헌[5]에서는 가상모드 개념을 도입하여 입력성형기의 지속시간을 단축할 수 있는 방법을 제안하였으며 그 유용성을 검증하였다. 그러나 이 논문에서는 감쇠를 무시할 수 있는 비감쇠계에 대해서만 적용이 가능한 방법만을 다루고 있다.

본 논문에서는 일반적인 감쇠진동시스템에서 발생하는 잔류진동을 효과적으로 제거하면서 응답속도를 개선할 수 있는 입력성형 방법을 제안하고자 한다. 감쇠가 있는 경우에는 비감쇠계에서와는 달리 감쇠계수가 추가적인 설계변수가 되므로 복잡한 양상을 띠게 된다. 본 논문에서는 감쇠계수를 활용하여 감쇠계에 대한 가상모드 입력성형기가 비감쇠계 및 기존 입력성형기와 일관성을 갖도록 하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안한 입력성형기법을 평가하였다. 이와같은 과정을 통해 실제 입력성형기의 지속시간을 결정하는 변수는 가상모드의 주파수만으로 가능하다.

본 논문에서 사용된 다모드(Multi-mode) 입력성형기설계법은 저자들이 제안한 방법을 사용하였다.^(3,4)

2. 가상모드를 이용한 감쇠진동계 입력성형기 설계

2 개 이상의 모드에 의한 진동을 효과적으로 제거하면서 지속시간을 줄이기 위한 방법들이 연구되었는데 그 중의 하나가 임펄스의 수를 최소화하여 지속시간을 줄이는 방법이다.^(3,4) 이 방법은 n 개의 모드에 대하여 n+1 개의 임펄스 열을 취하는 방법으로서 주파수대역별로 다양한 해가 구해지는데, 특히 입력성형기의 지속시간에 관하여 의미있는 결과를 얻을 수 있다.

단일모드 시스템에 실존하지 않는 가상의 두 번째 모드가 있다고 가정하여 입력성형기를 설계함으로써 입력성형기의 지속시간을 줄이는 방법이다. 이와 같이 도입된 가상모드의 고유주파수를 가상주파수라 정의하였고, 가상주파수를 증가시키면 입력성형기의 지속시간을 줄일 수 있다. 따라서 입력성형기 지속시간(Input shaper duration)을 변경할 수 있는 설계변수가 된다.

다중모드 시스템에 대한 새로운 입력성형기는 서로 다른 시간간격을 가지는 다음과 같은 임펄스들의 조합으로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$i_n(t) = A_0\delta(t-T_0) + A_1\delta(t-T_1) + A_2\delta(t-T_2) + \dots + A_n\delta(t-T_n) \quad (1)$$

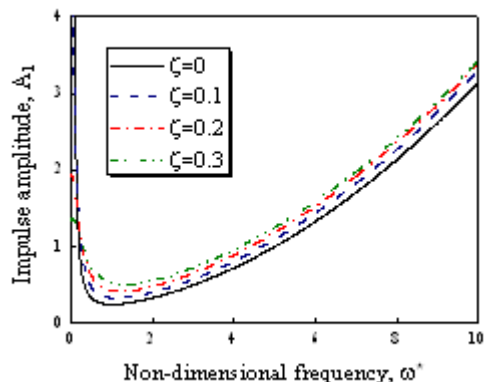
여기에서 $A_k, k = 0, 1, \dots, n$, k 번째 임펄스 크기(Impulse amplitude), $T_k, k = 0, 1, \dots, n$, k 번째 임펄스 시간간격(Impulse time spacing)이다. $T_k - 1 < T_k, k = 1, \dots, n$,의 관계가 성립되어야 하며, 시간 0에서의 첫번째 임펄스는 0으로 두었다.

따라서, 2 모드 입력성형기 설계를 위한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

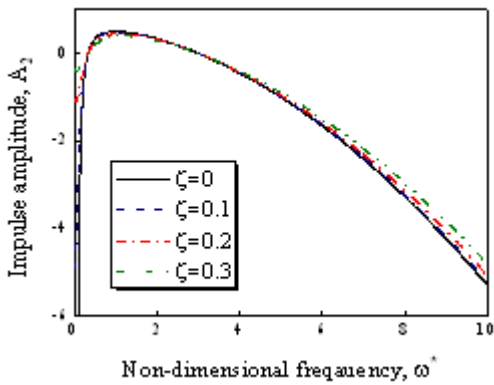
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-t_2s_1} & e^{-t_3s_1} \\ 1 & e^{-t_2s_2} & e^{-t_3s_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 s_1 는 실제모드의 고유치, s_2 는 가상모드의 고유치를 의미한다. 또, t_2, t_3 는 각각 두 번째와 세 번째 임펄스의 인가시간을 의미하며, t_3 는 입력성형기 지속시간이 된다.

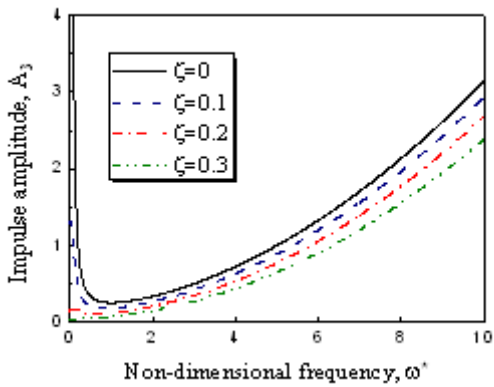
Fig. 1은 무차원 가상진동수를 0부터 10까지 증가시켰을 때 입력성형기 임펄스 크기 변화를 나타낸 그림이다. 감쇠에 따른 변화를 보기 위해 시스템의 감쇠가 바뀔 때의 변화를 도시하였다. 감쇠가 없을 경우 A_1, A_3 의 크기가 동일하게 나타나지만 감쇠가 커짐에 따라 A_1 은 그 크기가 증가하고 A_3 는 그 크기가 감소하는 경향을 보인다. 반면 A_2 는 상대적으로 감쇠에 영향을 덜 받고 있음을 알 수 있다. 감쇠가 커짐에 따라 A_1 의 크기가 1이 되는 주파수가 낮아지게 된다. 이러한 주파수의 값보다 높은 주파수에서는 기준입력과 임펄스의 컨볼루션으로 생성된 성형입력이 기준입력보다 그 절대치가 커지게 됨으로써 입력장치에서 포화(Saturation)가 발생할 수 있게 된다. 그러나 실제적으로 대부분의 시스템은 입력장치에 대해 어느 정도의 여유를 두게 되므로 임펄스 크기가 1을 초과하게 되더라도 일정한 부분까지는 포화없이 적절한 동작을 할 수 있을 것으로 생각된다.



(a) A_1



(b) A_2



(c) A_3

Fig. 1 Impulse amplitudes with respect to non-dimensional frequency

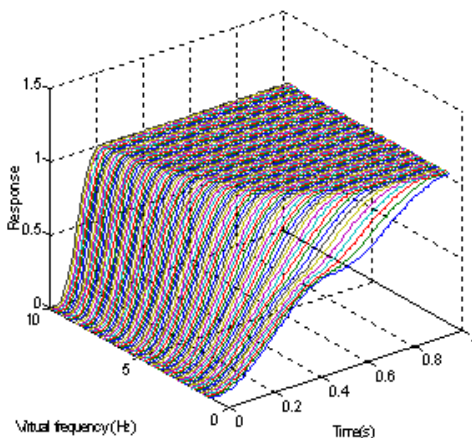


Fig. 2 3-D shaped step response with the virtual frequency varied

3. 입력성형기의 특성

Fig. 2를 보면 조건에 상관없이 응답이 오버슈트나 잔류 진동이 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 가상주파수가 증가할수록 응답속도가 향상됨을 알 수 있다.

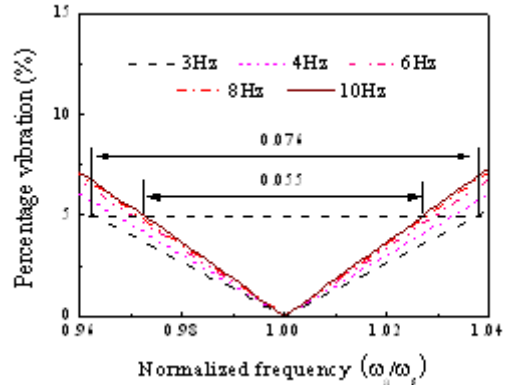


Fig. 3 3-D shaped step response with the virtual frequency varied

Fig. 3 처럼 5% 잔류진동의 허용범위는 가상주파수가 3Hz 일 때 0.076 정도이고 가상주파수가 10Hz 일 때 0.055 까지 감소하였다. 결국 강건성(Robustness)에 있어 약 18%의 감소를 보였다. 그러나 지속시간의 경우 0.5 초에서 0.091 초로 단축됨으로서 ZV 에 비해 1/5 미만의 지속시간을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 감쇠 진동계에 대해 입력성형기 지속시간 단축을 위한 새로운 입력성형기 설계 방법을 제안하였다. 이를 위해 단일모드 시스템에 대해 가상모드를 설정하여 2 모드 시스템으로 가정하여 설계하는 방법을 제안하였다. 다모드 입력성형기 설계방법으로는 n 개의 모드에 대해 n+1 개의 임펄스를 취하는 다모드 입력성형 방법을 이용하였다. 도입된 가상주파수가 증가할수록 입력성형기의 지속시간을 단축할 수 있음을 이론 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 가상모드 도입에 따른 입력성형기 지속시간 단축효과가 강건성 감소 보다 더 크게 작용하는 것을 확인하였다. 한편, 가상주파수의 증가에 따라 입력성형기의 시간길이 단축이 가능하지만 임펄스의 크기가 증가하기 때문에 시스템의 출력 한계치를 초과하지 않는 범위에서 적절한 가상주파수의 결정이 필요하다

참고문헌

1. Singer, N. C. and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 112, 76~82, 1990.
2. Singhose, W. E. and Seering, W. P., *Command Generation for Dynamic Systems*, Lulu.com, 2007.
3. Hong, S. W., Park, S. W. and Danielson, J., "A New Method for Manufacturing Machine Vibration Reduction Using Multi-mode Input Shapers," *Proc. of the 2008 International Symposium on Flexible Automation*, Atlanta, GA, USA., 2008.
4. Park, S.W., Hong, S.W. and Danielson, J., "A New Design Method of Multi-mode Input Shapers to Eliminate Residual Vibration in Dynamic Systems," submitted to *J. of the KSPE*, 2008.
5. Hong, S.W., Choi, H.S., Seo, Y.G. and Park, S.W., "A Method of Input Shaper Design Using Virtual Mode for Undamped Vibration Systems," submitted to *Trans. of the KSMTE*, 2008.