

◆ 특집 ◆ 입력성형기법의 응용

고속운동 플라스틱 금형사출 부품 취출 로봇의 잔류진동 제어

Residual Vibration Control of High Speed Take-out Robot Used for Handling of Injection Mold Plastic Part

임성수<sup>1,✉</sup>, 박주한<sup>2</sup>  
Sungsoo Rhim<sup>1,✉</sup> and Joo-Han Park<sup>2</sup>

1 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.)

2 신성 FA 기술연구소 (Research and Development Center, Shinsung FA)

✉ Corresponding author: ssrhim@khu.ac.kr, Tel: 031-201-3248

Manuscript received: 2011.7.15 / Accepted: 2011.8.3

Take-out robots used for handling of the plastic parts manufactured with the injection mold are usually the gantry type that consists of long and thin links. The performance of the take-out robot is determined by the speed of the motion and the positioning accuracy to grab the part out of the mold. As the speed of the robot increases the flexure in the links of the take-out robot becomes more significant and it results in more residual vibration. The residual vibration deteriorates the positioning accuracy and compels the operator to slow down the motion of the robot. The typical method to reduce the vibration in the robot requires stiffening the links and/or slowing down the robot. Vibration control could achieve the desired performance without increasing the manufacturing cost or the operation cost that would be incurred otherwise. Considering the point-to-point nature of the task to be performed by the take-out robot the time-delay command (or input) shaping filter approach would be the most effective control method to be adopted among a few available control schemes. In this paper a direct adaptive command shaping filter (ACSF) algorithm has been modified and applied to design the optimal command shaping filters for various configuration of the take-out robot. Optimal filters designed by ACSF algorithm have been implemented on a take-out robot and the effectiveness of the designed filters in terms of vibration suppression has been verified for multiple positions of the robot.

Key Words: Time-delay Command Shaping Filter (시간지연 입력성형 필터), Vibration Control (진동제어), Take-out Robot (취출 로봇)

기호설명

$c(t)$  = time-delay command shaping filter in continuous time domain

$c_k$  = impulse coefficients of time-delay command shaping filter

$C(z)$  = time-delay command shaping filter in discrete time

domain

$z$  = time-delay operator and z-transform variable

$\omega_n$  = natural frequency of elastic mode

$\zeta$  = damping ratio of elastic mode

$\omega_d$  = damped natural frequency of elastic mode

$\delta(t)$  = unit impulse function

$T_d$  = time delay between impulses in command shaping

filter

$T_s$  = sampling time of discrete control system

$n$  = sample time in discrete time control system

$C(z,n)$  = adaptive time-delay command shaping filter for sample time  $n$  in discrete time domain

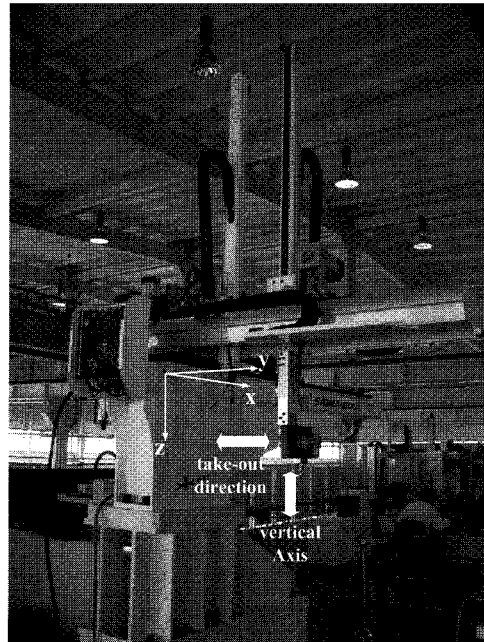
### 1. 서론

성형된 플라스틱 부품을 사출기에서 취출하여 일정한 위치로 이송하여 낙하시키는 작업을 반복해서 진행하는 취출로봇은 일반 로봇에 비하여 비교적 가볍고, 긴 cantilever(외팔보) 구조의 링크를 갖는 직교좌표형 로봇의 형태를 갖는다. 이러한 로봇들은 큰 가속도로 넓은 작업영역을 빠른 시간 내에 왕복 운동하여야 하는데, 이동 후 정지 시에, 특히 상하운동 축 링크의 끝단(end-effector)에서 큰 잔류진동이 발생한다. 이 잔류진동은 취출로봇의 정밀작업과 고속작업을 방해하는 주요원인이다.

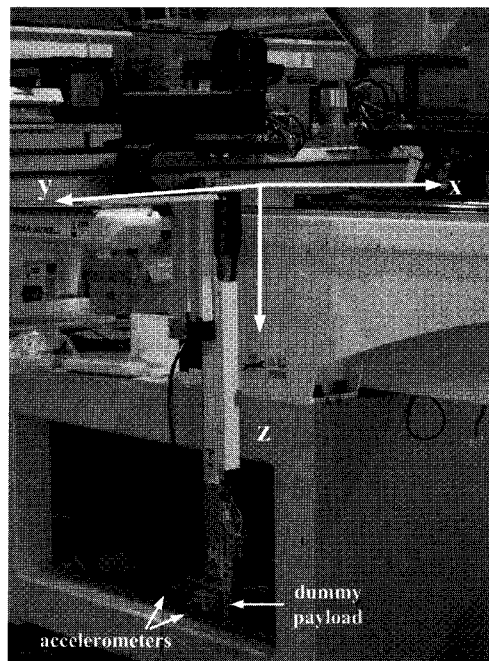
취출로봇의 동작에 의해 발생하는 잔류진동의 진폭을 감소시켜 적절한 작업정밀도를 보장하기 위해서, 취출로봇의 각 링크들의 강성을 높이거나 로봇의 이동 감/가속도를 낮추는 방법을 사용하기도 하는데 이는 로봇의 제작비용을 증대시키거나 취출작업 시간의 증가를 초래하고 생산성을 저하시킨다. 나날이 증대되는 생산성 향상 요구에 대응하여 취출로봇의 정밀도와 운동속도를 증가시키기 위해서는, 다양한 작업조건에서 발생하는 취출로봇 링크 끝단의 잔류진동을 억제하는 제어기법의 적용이 가장 효과적이다.

본 논문은, 그림 1 에 보인 휴대폰용 플라스틱 부품의 취출에 사용되는 3 축 직교좌표형 취출로봇 끝단의 잔류진동을 감소시키기 위해, 시간지연 입력성형필터 기반의 제어시스템을 개발하고 (Singer<sup>1</sup>, Singer<sup>2</sup>, Magee<sup>3</sup>) 실제 로봇에 적용하여 그 유효성을 검증한다. 시간지연 입력성형(또는 명령성형) 필터를 이용한 진동제어법은 이미 여러 시스템에 적용되어 그 효율성이 증명되었으며, 취출로봇과 같이 point-to-point 작업을 수행하는 시스템에 더욱 효과적이다. 입력성형필터를 이용하여 진동을 억제하기 위해서는 유효한 필터를 설계하여야만 하는데, 이 과정에서 시스템 동특성 파라미터를 구해야하는 작업은 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 입력성형필터의 설계과정을 보다 간편하게 하기 위해, 실시간 온라인 학습을 위해 개발된 직접적응형 입력성형필터 알고

리즘(Rhim,<sup>4</sup> Rhim,<sup>5</sup> Park<sup>6</sup>)을 응용하여 입력성형필터의 오프라인 설계과정을 진행한다.



(a) Configuration with full contraction of z axis



(b) Configuration with full extension of z axis

Fig. 1 Pictures of take-out robot system considered in the paper

## 2. 시스템 구성

### 2.1 취출로봇 동특성

그림 1 은 본 연구의 대상이 되는 취출로봇 사진을 보여주고 있다. 그림 1 에서 (a)는 수직운동을 하는 z 축이 최대한 위로 올려진 상태의 로봇 위치이고, (b)는 z 축이 최대한 아래로 내려온 상태의 로봇 위치이다. z 축의 최대 운동 변위는 800mm 이다. 수평축 x 축 방향의 최대 운동 변위는 1,400 mm 이고, 또 다른 수평축 y 축 방향의 운동 변위는 최대 500 mm 이다. 취출로봇은 작업영역 내에서 사출 플라스틱 부품을 취출하고, 이 부품을 집적상자에 낙하시키는 운동을 고속으로 반복한다. 부품의 취출작업은 로봇의 y 축 방향으로 이루어진다. 즉, 수직축 링크의 끝단이 +y 방향으로 이동하여 사출기에서 성형된 플라스틱 부품에 접근하여 부품을 붙잡고 난 후, -y 방향으로 이동하면서 부품을 사출기로부터 빼내게 된다. 따라서, 취출로봇의 성능을 결정하는 인자는 반복운동의 속도와 취출시 취출대상 부품과 접촉하게 되는 y 방향 운동의 위치 제어 성능이 된다.

이 취출로봇은 실제 작업환경에서, z 축 링크의 끝단에 3~5 kg 의 작업부하를 부착하고 움직이게 되는데, 본 연구에서는 작업부하를 대체하는 알루미늄 블록(dummy payload)을 부착하여 연구를 진행하였다.

그림 1 에서 보이는 바와 같이, 본 연구에서 고려하는 취출로봇은 매우 길고 가느다란 z 축 링크를 포함하는데, 이러한 구조는 넓은 작업영역을 보다 빠르게 움직이기 위한 경량화/대형화 설계 노력의 결과이다.

경량화/대형화 설계는 로봇 제작 및 운용 비용의 감소 면에서는 긍정적인 결과를 가져왔으나, 필연적으로 로봇의 유연성을 증대시켜 진동문제를 악화시킨다. 특히, 취출작업의 속도를 증가시키고자 할 때는 더욱 그렇다.

그림 2 는 실제로 취출 로봇의 수직방향 운동 링크의 끝단에서 측정된 y 축 방향 운동가속도이다. 수직 링크가 y 축 방향으로 100 mm 변위를 왕복운동할 때 측정된 신호이며, 잔류진동의 감쇠를 위해 200 샘플 시간, 즉 0.8 초 이상의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 1~2 초의 왕복운동 싸이클 시간을 요구하는 취출 작업을 고려할 때 이 정도의 잔류진동 감쇠시간 값은 큰 의미를 갖는다.

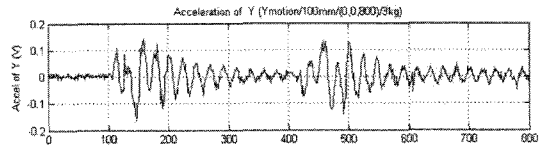


Fig. 2 Acceleration in y direction measured at the dummy payload (payload = 3 kg, y-axis travel distance = 100 mm, z-axis length = 800 mm)

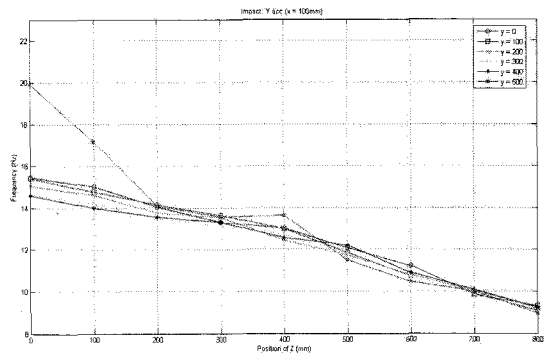


Fig. 3 Variation of natural frequency of the residual vibration in y direction measured at the dummy payload (z-axis length change = 0~800 mm, payload = 3 kg, each line represents different y position)

링크 끝단의 진동 특성은 z 축 링크의 위치에 따라서 변화하는데, 그림 3 에는 z 축 링크가 수직운동을 하여, 링크 길이가 변화할 때, 이에 따라 y 방향 진동의 고유주파수가 거의 선형적으로 변화하는 것을 보여준다. 표 1 은 그림 3 의 그래프 결과를 정량적으로 나타낸다.

### 2.2 제어시스템 구성

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 시스템의 잔류진동억제를 위해 시간지연 입력성형필터를 포함하는 제어시스템을 구성하여 실제 로봇에 적용하였다. 그림 4 는 실제로봇의 제어시스템 블록 선도를 보여준다. 제어시스템은 이중 샘플링 속도로 구성되는데, 명령제적 생성과 시간지연 입력성형필터작업은 저속 샘플링 영역에서 이루어지며, 조인트 제한제어는 고속 샘플링 영역에서 이루어진다. 필터에 의해 새로이 생성된 명령제적은 선형보간 블록에 의해서 고속 샘플링 제어에 맞도록 보간되어진다. 저속 샘플링 제어 시스템의 샘플링

Table 1 Variation of natural frequency along the change of z-axis length (payload = 3 kg, x position = 0 mm)

Position (mm)		Natural Frequency (Hz)	
y axis	z axis	y direction	z direction
0	0	20.83	23.81
	100	20.51	
	200	18.52	
	300	16.67	27.78
	400	14.29	
	500	13.61	25.64
	550	13.33	
	600	12.12	25.00
	650	11.77	
	700	11.11	24.39
	750	10.81	
800	10.53	28.57	

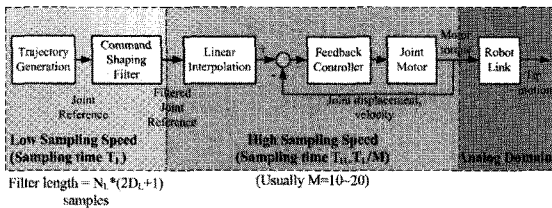


Fig. 4 Control system block diagram

주기는 4 msec 이고, 고속 샘플링 제어 시스템의 샘플링 주기는 0.4 msec 이다.

### 3. 시간지연 입력성형필터의 효율적 설계

#### 3.1 시간지연 입력성형필터

시간지연 입력성형필터는 탄성시스템의 공진이 발생하지 않도록 시스템의 입력 값(desired input)을 성형하는 Finite Impulse Response(FIR) 필터이고, 필터의 파라미터는 시스템 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비 등 동특성 파라미터 값에 의해서 결정된다(Singer,<sup>1</sup> Singer<sup>2</sup>).

\$M+1\$ 개의 임펄스 항을 갖는 시간지연 입력성형필터의 일반적인 형태는 연속시간영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$c(t) = c_0 + c_1\delta(t - T_d) + c_2\delta(t - 2T_d) + \dots + c_M\delta(t - MT_d) \quad (1)$$

여기서 필터 계수 \$c\_k\$ 는 지연된 입력의 크기 변환 비율을 나타내고, \$\delta(t)\$는 단위 임펄스 함수, \$T\_d\$는 필터 내 임펄스들 간의 시간지연 값이다. 이 필터는 이산시간영역에서 아래와 같이 표현된다.

$$C(z) = c_0 + c_1z^{-\Delta} + c_2z^{-2\Delta} + \dots + c_Mz^{-M\Delta} \quad (2)$$

여기서, 시간지연 값 \$\Delta=T\_d/T\_s\$=정수이고, \$z\$ 는 이산시간 신호에서의 시간지연 작용자(\$z^{-1}\$)와 \$z\$ 변환의 변수 등 두 가지로 병용된다. 이산시간영역에서 시간지연 값 \$T\_d\$ 는 임의의 값을 가질 수 없으며, 이산시간 시스템의 샘플링시간 \$T\_s\$ 의 정수배여야 한다.

본 논문에서 시간지연 입력성형필터의 시간지연 값은 필터의 성능과 입력시간의 길이에 영향을 끼치는 중요한 설계변수이며, 보다 강인한 필터의 설계를 위해서는 시간지연값 선택의 자유가 매우 중요한 인자이다(Magee<sup>3</sup>). 일반적으로, 시간지연 값을 자유로이 선택할 수 있게 하는 조건하에서 \$N\$ 개의 탄성모드로 이루어진 시스템의 잔류진동을 완전히 제거하기 위해서는 입력성형필터가 최소 \$2N+1\$ 개의 계수(즉, 식 (1)에서 \$M=2N\$)를 가져야 한다는 것이 알려져 있다(Rhim,<sup>4</sup> Rhim<sup>5</sup>). 이 해석 결과에 따르면, 한 개의 탄성모드를 갖는 시스템의 잔류진동을 억제하는 최소의 필터 계수 수는 3 이 되며, 이 필터는 Rhim<sup>5</sup> 에서 제시된 입력성형필터의 엄밀해 결과로부터 아래와 같이 표현된다.

$$c(t) = \frac{1}{M} \{ \delta(t) - 2 \cos(\omega_d T_d) e^{-\zeta \omega_n T_d} \delta(t - T_d) + e^{-2\zeta \omega_n T_d} \delta(t - 2T_d) \} \quad (3)$$

여기서 \$M = 1 - 2 \cos(\omega\_d T\_d) e^{-\zeta \omega\_n T\_d} + e^{-2\zeta \omega\_n T\_d}\$ 이다. 식 (3)의 형태를 갖는 모든 입력성형필터는 주어진 시간지연 값과 관계없이 억제 대상이 되는 한 개의 탄성모드 공진주파수에서 stopband 를 가진다.

#### 3.2 필터설계의 현실적 문제점 및 해결방안

만약, \$\omega\_n, \zeta, \omega\_d\$ 등의 시스템 동특성 파라미터 정보가 온전하게 알려져 있다면, 이미 알려진 해석

방법에 의해 잔류진동 제거 조건을 만족하는 엄밀해(즉 완벽한 입력성형필터)를 구하는 것이 가능하다. 시스템 동특성 파라미터가 알려져 있지 않은 경우, 측정된 진동신호에 대한 시간영역 해석 또는 주파수 영역 해석을 통해 시스템 파라미터를 찾아내는 다양한 방법이 연구 개발되어 있으나(Tzes,<sup>7</sup> Bodson<sup>8</sup>), 여전히 측정신호로부터 제어 대상 시스템의 동특성 파라미터들을 정확하게 알아낸다는 것은 많은 시간과 노력을 필요로 하는 현실적으로 매우 어려운 작업이다.

시스템 파라미터의 불확실성을 극복하기 위해서, 시스템 파라미터에 대한 정보 없이 최적의 입력성형필터의 계수 값을 학습하는 적응형 시간지연 입력성형필터(Adaptive Time-delay Command Shaping Filter: ACSF)가 개발되었으며, 다양한 시스템에 적용되어 그 유효성이 검증되었다(Rhim<sup>4</sup>, Rhim<sup>5</sup>).

ACSF의 기본 개념은 그림 4에 보인 바와 같이, 진동시스템의 진동신호를 최소화하기 위해 아래 식 (4)와 같은 비용함수  $J(L)$ 를 구성하고, 이를 최소화하는 방법이라고 설명할 수 있다.

$$J(L) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |y_f(n)|^2 = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \left| \sum_{k=0}^M c_k y(n-k\Delta) \right|^2 \quad (4)$$

여기서  $L$ 은 진동시스템의 잔류진동 주기보다 충분히 (2~3 배) 큰 샘플 수를 나타낸다.

앞에서도 언급한 바와 같이 ACSF 방법은 시스템 파라미터를 구하지 않고 입력성형필터의 계수를 직접 구하는 방법으로, 시스템에 노이즈가 존재하는 경우 또는 복수의 탄성모드가 존재하는 경우 등에 매우 효과적으로 적용될 수 있다(Rhim,<sup>4</sup> Rhim<sup>5</sup>).

식 (4)를 최소화하는 필터계수 값  $c_k$ 가 바로 우리가 원하는 최적의 입력성형필터 계수이며, 식 (4)의 최소화 작업에 대한 해답은 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 아래의 귀납식으로 구할 수 있다(Haykin,<sup>9</sup> Ljung<sup>10</sup>).

$$\kappa(n) = \frac{P(n-1)\psi(n)}{1 + \psi(n)P(n-1)\psi(n)} \quad (5)$$

$$P(n) = P(n-1) - \kappa(n)\psi^T(n)P(n-1) \quad (6)$$

$$\theta(n) = \frac{1}{h^T P(n)h} P(n)h \quad (7)$$

$$h^T \theta(n) = 1 \quad (8)$$

여기서 필터계수 벡터인  $\alpha(n)$ , 입력신호 벡터인  $\psi(n)$ , DC 계인 제한조건 벡터  $h$ 는 아래와 같이 각각 정의되고,

$$\begin{aligned} \psi(n) &= [y(n) \ y(n-\Delta) \ \dots \ y(n-M\Delta)]^T, \\ \theta(n) &= [c_0(n) \ c_1(n) \ \dots \ c_M(n)]^T, \\ h &= [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T, \end{aligned}$$

$\psi(n)$ 는 실험적으로 측정 또는 비교적 정밀한 추정치가 가능한 값이다.

또한,  $P^{-1}(n) = \sum_{i=1}^n \psi(n)\psi^T(n)$ 로 정의된다.

일반적인 RLS 귀납식과 달리 식 (8)이 추가된 이유는, 필터계수 벡터  $\alpha(n)$ 는 ‘DC 계인=1’이라는 조건을 만족하여야 하기 때문이다.

위에 설명한 ACSF 귀납식은 실시간 온라인으로 시스템에 적용되어 적응형 입력성형필터로 사용하기 위해 개발된 것이지만, 수집된 진동신호에 오프라인으로 적용되어 입력성형필터를 설계하는 방법으로도 사용될 수 있다. 이러한 설계방법은, 시스템 파라미터를 추정하고 추정된 파라미터 값을 이용하여 필터를 설계하는 것보다 더 빠르고, 더 정확하고, 더 강인한 결과를 갖는다(Rhim,<sup>4</sup> Rhim,<sup>5</sup> Park<sup>6</sup>). 본 논문에서는 ACSF 방법을 오프라인으로 적용하여 시스템 파라미터를 구하지 않고, 바로 필터를 설계한다(Park<sup>6</sup>).

#### 4. 실험결과

$y$  축 방향의 잔류진동을 측정하기 위해 로봇의 끝단에 가속도계를 부착한다. 로봇의 각 축을 움직여 매니퓰레이터 끝단이 원하는 위치(취출위치 혹은 낙하위치)에 오도록 한 후, 축방향 동작을하도록 하여 이 때 발생하는 잔류진동신호를 측정한다.

다. 취출로봇의 다양한 자세에 대해 이러한 측정 과정을 수행한다.

측정한 잔류진동신호데이터(가속도신호)에 식 (5)~(8)의 귀납알고리즘을 적용하여 각 위치 별로 최적의 입력성형필터를 설계한다. 본 논문에서는 ACSF 입력성형필터 설계의 자세한 이론은 배제하였으며, ACSF 를 이용한 필터설계과정은 Rhim,<sup>4</sup> Rhim,<sup>5</sup> Park<sup>6</sup> 을 참조하기 바란다.

ACSF 알고리즘을 이용하여, 취출로봇의 다양한 자세에 대해 최적의 입력성형필터가 설계되었으며, 로봇 위치와 그에 해당하는 입력성형필터를 DB 화 하여, 로봇의 운동에 따라 제어시스템이 적합한 필터를 선택하여 적용하도록 제어시스템이 구축되었다. 설계된 입력성형필터를 취출로봇 제어시스템에 적용하여, 필터 적용 전후의 진동 특성 변화를 로봇의 전체 작업영역에 대해 측정하였다. 진동 특성 비교 결과 z 축이 400mm 이상 내려가 있는 경우의 진동억제 성능은 매우 우수하였으나, z 축 길이가 400mm 이하인 경우에는 필터 미적용시의 잔류진동량이 미세하여 진동억제 효과가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

그림 5 와 6 은 대표적인 취출 위치(1400, 100,800)에서 5 kg 의 작업부하를 부착하고, y 방향으로 100mm 전진 시 측정된 링크 끝단의 가속도, 변위, 속도, 토크 파형을 나타낸다. 그림 5 는 필터가 적용되지 않은 경우, 그림 6 은 필터가 적용된 경우를 나타낸다. 앞 절에서 ACSF 알고리즘을 이용한 설계한 입력성형필터의 진동억제 효과가 두드러짐을 볼 수 있다. 끝단의 변위는 레이저 변위 센서를 이용하여 측정하였다.

입력성형필터 사용 전후의 잔류진동량을 정량적으로 비교하기 위해서 잔류진동 구간 시작 지점(즉, y 축방향 모터의 속도신호가 처음 0 을 지나는 점)에서의 신호를 비교한 결과 기존의 진동량을 80%이상 억제하는 것으로 계산되었다. 표 3 은 그 비교 결과이다.

입력성형필터 사용 전후의 잔류진동량을 정량적으로 비교하기 위해서 잔류진동 구간 시작 지점(즉, y 축방향 모터의 속도신호가 처음 0 을 지나는 점)에서의 신호를 비교한 결과 기존의 진동량을 80%이상 억제하는 것으로 계산되었다. 표 3 은 그 비교 결과이다.

취출위치 이외의 모든 지점에서도 우수한 진동억제 효과를 얻었으며, 그림 7 과 8 은 그 중 두 가지 대표적 경우에 대한 결과를 보여준다.

### 5. 결론

본 연구에서는 금형사출 플라스틱 부품의 취출 작업에 사용되는 직교좌표형 로봇의 작업 시 발생하는 진동의 특성을 조사하고, 작업 시 발생하는 진동을 감소시키기 위한 시간지연 입력성형필터 기반 진동제어법을 적용하였다. 취출로봇의 작업위치 및 부하조건에 따라 광범위하게 변화하는 진동 특성에 맞도록 다양한 입력성형필터를 설계하였다.

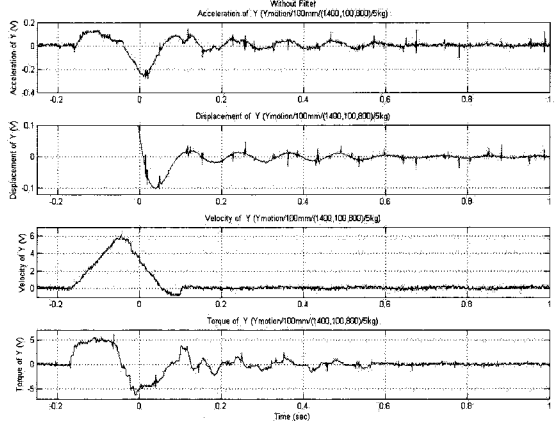


Fig. 5 Measured signals at the take-out position with 5 kg payload without command shaping filter (acceleration, displacement, y-axis joint velocity, y-axis motor torque, from the top)

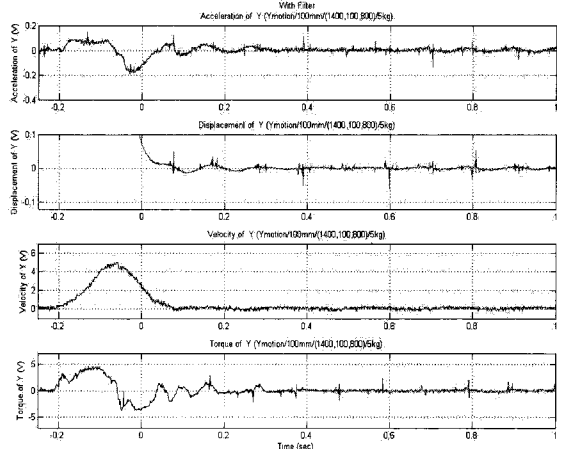


Fig. 6 Measured signals at the take-out position with 5 kg payload with command shaping filter (acceleration, displacement, y-axis joint velocity, y-axis motor torque, from the top)

Table 2 Comparison of measured residual vibration amplitude with/without command shaping filter

Robot configuration (x, y, z)	Acceleration amplitude		Suppressed vibration (%)
	Without filter (volt)	With filter (volt)	
Part Take-out Position (0,100,800)	0.090	0.016	82.2
Part Drop Position (1400,100,800)	0.102	0.014	86.3

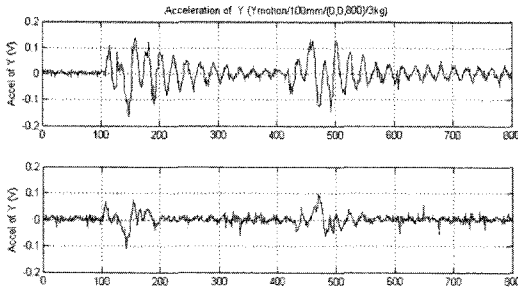


Fig. 7 Measured signals at (0, 0, 800) position with 3 kg payload (top: acceleration without filter, bottom: acceleration with filter)

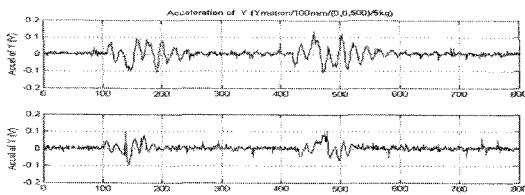


Fig. 8 Measured signals at (0, 0, 500) position with 5 kg payload (top: acceleration without filter, bottom: acceleration with filter)

필터의 설계를 위해 직접 적응형 입력성형필터(ACSF) 알고리즘을 응용하여, 시스템 파라미터를 구하는 복잡한 과정을 생략하고, 최적화된 입력성형필터를 직접 설계하였다.

최적설계된 입력성형필터를 적용한 결과, 취출 로봇의 수직축 길이가 400mm 이상일 경우에 두드러진 진동억제 효과를 얻을 수 있었으며, 특히 대표적인 취출 지점(1400, 100,800)에서 잔류진동량을 최대 80%까지 억제할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부분적으로 지식경제부 연구개발 과제(과제번호: 20111077)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Singer, N. C. and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, No. 1, pp. 76-82, 1990.
2. Singer, N. C., Singhose, W. and Seering, W., "Comparison of Filtering Methods for Reducing Residual Vibrations," European J. of Control, Vol. 5, No. 2, pp. 208-218, 1999.
3. Magee, D. P. and Book, W. J., "Optimal Filtering to Minimize Elastic Behavior in Serial Link Manipulators," Proc. of American Control Conference, pp. 2652-2656, 1998.
4. Rhim, S. and Book, W. J., "Adaptive Time-delay Command Shaping Filter for Flexible Manipulator Control," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 9, No. 4, pp. 619-626, 2004.
5. Rhim, S., and Book, W. J., "Noise Effect on Time-domain Adaptive Command Shaping Methods for Flexible Manipulator Control," IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 84-92, 2001.
6. Park, J. and Rhim, S., "Extraction of Optimal Time-Delay in Adaptive Command Shaping Filter for Flexible Manipulator Control," J. of Inst. of Control, Robotics and Systems, Vol. 14, No. 6, pp. 564-572, 2008.
7. Tzes, A. and Yurkovich, S., "An Adaptive Input Shaping Control Scheme for Vibration Suppression in Slewing Flexible Structures," IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 114-121, 1993.
8. Bodson, M., "An Adaptive Algorithm for the Tuning of Two Input Shaping Methods," Automatica, Vol. 34, No. 6, pp. 771-776, 1998.
9. Haykin, S., "Adaptive Filter Theory," Prentice Hall, 1996.
10. Ljung, L., "System Identification-Theory for the User," Prentice Hall, 1996.