

입력 다듬기를 이용한 사용후핵연료 수송용기 취급장치의 회전 위치제어

Rotational Position Control of RCGLUD using Input Shaping Algorithm

°김동기*, 박영수**, 윤지섭***

*충남대학교 기계설계공학과 (Tel: (042)821-6647; Fax: (042)822-7366)

**한국원자력 연구소 (Tel: (042)868-8259 Fax: (042)868-8254; E-mail: nyspark1@nanum.kaeri.re.kr)

***한국원자력 연구소 (Tel: (042)868-2855 Fax: (042)868-8254; E-mail: jsyoon@nemacnis.kaeri.re.kr)

Abstracts Remote Cask Grappling and Lid Unbolting Device (RCGLUD) is developed as a dedicated device capable of performing complete procedure of handling nuclear spent fuel transport cask. Since RCGLUD is suspended to an overhead crane, its body should undergo prolonged vibration upon actuation in rotational direction and it becomes difficult to achieve precise grappling of the cask. Therefore, this paper presents an adoption of input shaping technique to effectively suppress the rotational vibration of RCGLUD and achieve precise positioning in rotational direction. This technique has a practical merit in that it requires only the information on the system natural frequency and the damping ratio. Its performance is verified by both simulation and experimental studies, and revealed that the method is also insensitive to modeling error.

Keywords Input Shaping, Residual Vibration, Rotational Position Control

1. 서 론

우리 나라에서는 원자력발전소에서 발생한 사용후핵연료를 수송하기 위한 목적으로 1988년 KSC-1 수송용기를 국산화한 이래 KSC-4 수송용기 및 KSC-7의 개발을 완료하였으나, 수송용기의 취급을 위한 각종 장비의 개발 연구는 상대적으로 미약하였다. 특히, 사용후핵연료 이송 작업에 사용하기 위하여 제작되었던 취급 장비, 내부 제염 장비, 고정 용구 장비 및 기타 유지 보수 장비 등은 모두 수동조작에 의존하고 있으나, 방사선 피폭의 위험성이 크므로 공정의 자동화가 요구된다. 따라서, 한국원자력연구소에서는 취급 작업 중 수송용기를 걸어 잡고 이송하는 작업과 수송용기의 뚜껑을 체결하고 있는 볼트를 풀고 조이는 작업을 원격 조작으로 수행할 수 있는 수송용기 원격취급장치 (Remote Cask Grappling and Lid Unbolting Device (RCGLUD))를 개발하였다.

RCGLUD는 크레인에 매달려 수송용기로 이동되며, 본체를 회전시켜 수송용기를 정확한 위치에서 파지하여야하나, 회전시 크레인 줄에 대한 본체의 회전관성으로 인하여 수송용기의 위치정밀도가 낮아지고, 지속적인 잔류진동이 발생하여 작업이 상당히 지체된다. 따라서 잔류진동을 효과적으로 억제하고 위치제어를 구현할 수 있는 제어기의 개발이 요구된다.

잔류 진동 제어를 위한 연구로는 Book이 두개의 링크 모델의 끝점위치를 제어하는 연구를 수행한 이후[1], 여러가지 케환제어방식의 연구가 행해졌다[2]. 하지만 이러한 형태의 대부분의 제어기는 상당히 복잡한 기법으로 설계되어 있어 실제 산업시설에 적용하기에 어려운 점이 많으며, 보다 실용적인 입력 다듬기 기법이 제안되었다. 1989년 O. J. M. Smith[3]는 진폭이 있는 계단 입력을 작은 두 단계의 입력으로 나누고 이중 하나에 시간 차이를 두는 방식으로 시스템에 대한 정착 시간을 감소시켜 입력 다듬기의 기초를 마련하였으며, N. C. Singer와 W. P. Seering은 시스템의 입력을 보다 구체화하는 방법에 대하여 연

구하였다[4][5].

본 논문에서는 RCGLUD의 회전진동을 효과적으로 줄이고 정밀한 회전위치를 구현하기 위하여 시스템 입력의 형태를 구체화하는 입력다듬기(input shaping)기법을 적용하였다. 입력다듬기 기법은 개루프 제어방식으로서, 별도의 케환 루프를 구성하기 위한 센서나 기존의 하드웨어를 변경할 필요가 없는 장점이 있다. 또한 시스템의 복잡한 모델링 전개나 수식 계산이 불필요하며 단순히 고유진동수와 감쇠비만을 고려하여 제어입력을 보다 쉽게 결정할 수 있다는 장점이 있다.

2. 장치 개요

수송용기 원격 파지/뚜껑 개폐 장치는 무진동크레인에 매달린 채, 수송용기(KSC-4)가 놓여 있는 곳으로 이송되며, 수송용기를 자동으로 걸어 잡고, 이를 이송하거나 수송용기의 뚜껑을 체결하고 있는 볼트를 풀어내는 기능을 가진다.

그림 1에서 보인 바와 같이 수송용기 취급장치는 길이 1,798 mm인 몸체의 양끝에 그레플이 설치되고, 중심축 상의 약간 아래에는 몸체의 길이 방향으로 평행하게 렌치가이드가 설치되며, 중심축 끝에는 볼트 수집관이 설치된다. 그레플(grapple)은 수송용기의 트러니언을 걸어 잡는 부분으로, 그레플 모터를 구동하면 몸체의 길이 방향 축을 따라 몸체의 가운데로 움직이며, 아래 부분의 그레플 구멍이 수송용기의 좌·우 트러니언(trunnion)을 걸어 잡는다. 이 때 그레플을 트러니언에 조심시켜주기 위해서 몸체를 원하는 위치로 회전시켜주어야 한다. 즉 그림에서 보인 바와 같이 RCGLUD 몸체에 고정된 좌표계(x', y', z')의 x'축과 두 개의 트러니언을 연결하는 좌표축(x)와 일치하도록 $\theta=0$ 가 되어야 한다. 몸체 회전은 교류 서보모터로 구동되며, RCGLUD는 구동제어를 위해서 Motion Engineering사에서 개발한 DSP형 다축제어기를 도입하여 모터의 위치 (θ)를 제어할

수 있도록 하였다.

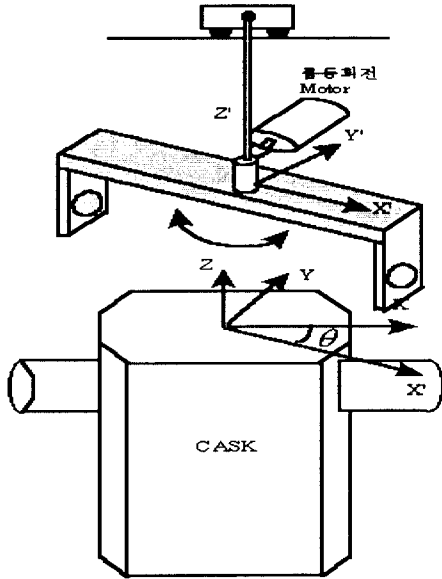


그림 1. RCGLUD의 구조
Fig.1. Structure of RCGLUD

3. 입력 다듬기

본 연구에서는 회전진동을 감쇄 시키기 위해 Singer의 입력 다듬기 기법을 도입하였다. 입력 다듬기 기법을 설명하기 위하여 다음과 같은 전달함수로 나타난 안정된 2차 선형 시스템을 고려하자.

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{\Theta_{ref}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서 ω_n 은 시스템의 비감쇠 고유진동수, ζ 는 감쇠비이고 t 는 입력이 가해지는 전체 시간 t_0 는 임펄스가 가해지는 시각을 각각 나타낸다. 이 시스템의 진폭이 A 인 사인과 입력에 대한 정상상태 출력은

$$\theta(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

로 나타낸다. 입력 다듬기 기법은 시스템의 임펄스 응답에 기초를 두고 설계한다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 이 시스템에 진폭이 A 인 임펄스 입력이 $t=t_0$ 인 순간에 가해지면 응답은 다음 형태와 같이 나타난다.

$$\theta(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \right] \quad (3)$$

또한 두개의 임펄스 입력이 순차적으로 가해졌을 때, 시스템의 응답은 다음과 같이 나타난다.

$$A \sin(\omega t + \phi) = B_1 \sin(\omega t + \phi_1) + B_2 \sin(\omega t + \phi_2) \quad (4)$$

식 (4)의 B_1, B_2, ϕ_1, ϕ_2 는 임펄스의 진폭과 위상각이다. 여기서,

$$A = \sqrt{(B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2)^2 + (B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2}{B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2} \right)$$

이다. 이를 식 (4)와 비교해서 N 개의 임펄스 입력에 대한 진동의 크기를 일반화된 식으로 표현하면

$$A = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2} \quad (5)$$

이고, 여기서

$$\phi_j = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_j$$

$$B_j = \frac{A_j \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t_N - t_j)}$$

이다. 이때 t_j 와 A_j 는 각각 j 번째 임펄스가 발생하는 시각과 크기이며 ω_n 은 고유진동수이다. 만약 그림 2(a)와 같은 응답을 보이는 시스템의 감쇠비 ζ 가 0이면 순수한 사인 형태의 곡선일 것이고 첫 위상이 180° 되는 지점에서 크기가 이와 반대인 임펄스를 정확히 입력시키면 180° 이후의 출력은 0이 될 것이다. 따라서, 두 번째 임펄스가 입력된 이후에는 그림 2(b)와 같이 시스템 진동이 남아 있지 않게 된다.

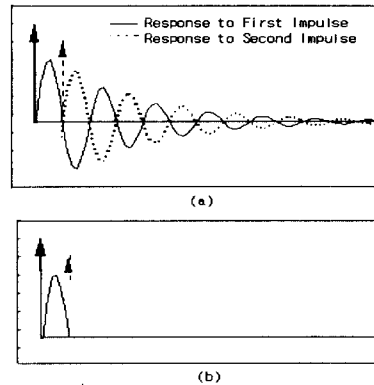


그림 2. 2차 선형시스템의 중첩된 임펄스 응답
Fig. 2. Impulse response of linear System

이 같은 조건을 만족하기 위해서는 ω 가 ω_n 과 같다고 가정하면 마지막 N 번째의 임펄스가 가해진 이후에는 식 (5)의 각항이 0이 되어야 하므로 다음 조건이 요구된다.

$$B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2 + \dots + B_N \cos \phi_N = 0 \quad (6)$$

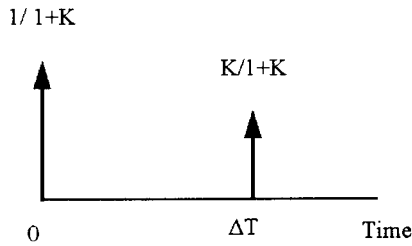
$$B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2 + \dots + B_N \sin \phi_N = 0 \quad (7)$$

따라서, 식 (1)에 정의된 시스템의 N 개 임펄스 입력에 대해 출력 형태는 식 (8), (9)와 같이 나타난다.

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta \omega_n (t_N - t_j)} \sin(t_j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta \omega_n (t_N - t_j)} \cos(t_j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (9)$$

위의 식에서 두개의 임펄스를 구하기 위한 예를 들면, 처음의 임펄스가 발생하는 시간 $t_1=0$ 과 진폭의 크기 A_1 과 선형적으로 축척된 A_2 는 $\sum_{j=1}^2 A_j=1$ 이라는 조건을 추가하여 A_j 와 t_j 를 구할 있다. 이러한 이유는 가해지는 입력이 시간차이를 두는 임펄스 열과 콘볼루션 적분되더라도 전체 입력의 합은 같기 때문이다. 다음 그림 3은 임펄스의 크기가 A_j 이고 시간간격이 t_j 인 두 임펄스의 관계를 보여주고 있으며 여기서 시간지연으로 ΔT 만큼을 갖게 된다.



$$K = e^{\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad \Delta T = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

그림 3. 2단 임펄스 입력

Fig. 3. Two step impulse input

그림 4(a)의 계단입력이 그림 3의 임펄스 열과 콘볼루션 적분되었을 때 시스템에 가해지는 최종 입력은 그림 4(b)와 같다.

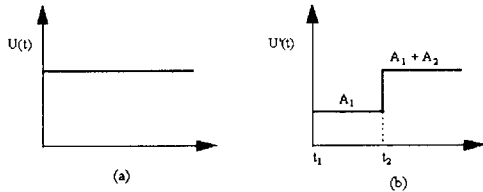


그림 4. 2단 입력 다듬기를 거친 계단파 입력

Fig. 4. Convolution of step input with impulse

여기서 고유진동수와 감쇠비가 모델링시 부정확하거나 제어하는 경우 변화가 일어나면 위와 같은 두개의 임펄스 열을 콘볼루션하는 방법으로는 여전히 잔류진동이 존재하게 된다. 따라서 입력다듬기 기법을 이용시 이에 대한 강인성을 부여하기 위해 임펄스 열의 갯수를 늘려 잔류진동의 진폭이 0에 가깝게 접근하도록 할 수 있다. 임펄스의 갯수를 늘리기 위해서는 식(8), (9)를 ω_n 에 대해 미분하여 다음과 같은 조건을 얻게 된다.

$$\sum_{j=1}^N A_j t_j e^{-\zeta \omega_n (t_N - t_j)} \cos(t_j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (10)$$

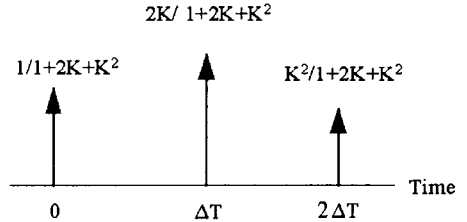
$$\sum_{j=1}^N A_j t_j e^{-\zeta \omega_n (t_N - t_j)} \sin(t_j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (11)$$

세 개의 임펄스 경우(N=3) 위에서 언급한 $A_1=1$ 과 $t_1=0$ 을 이용하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}, \quad t_3 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = 2t_2 = 2\Delta T, \quad (12)$$

$$A_2 = 2e^{-\zeta \omega_n t_2} = 2K, \quad A_3 = (e^{-\zeta \omega_n t_2})^2 = K^2 \quad (13)$$

펄스의 크기 및 ΔT 는 그림 5와 같다.



$$K = e^{\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad \Delta T = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

그림 5. 3단 임펄스 입력
Fig. 5. Three step impulse

$N > 3$ 인 경우 위와 같은 방법으로 임펄스 열의 갯수를 늘려 나가면 t_i 와 A_i 는 다음과 같이 정리된다.

표 1. 입력 다듬기 변수 결정 방법
Table 1. List of shaped impulse input

N	t_i	A_i
1	0	$A_1=1$
2	ΔT	$A_1=1/1+K, A_2=K/1+K$
3	$2\Delta T$	$A_1=1/1+2K+K^2,$ $A_2=2K/1+2K+K^2,$ $A_3=K^2/1+2K+K^2$
4	$3\Delta T$	$A_1=1/1+3K+3K^2+K^3,$ $A_2=3K/1+3K+3K^2+K^3,$ $A_3=3K^2/1+3K+3K^2+K^3,$ $A_4=K^3/1+3K+3K^2+K^3$

4. 실험 및 고찰

본 연구에서 적용한 제어기의 성능 실험을 위하여 RCGLUD의 몸체 회전제어에 적용하였으며 몸체 회전각 측정을 위해 Plohemus 3차원 위치 측정센서를 이용하였다. 실험장치의 전체 개략도는 그림 6과 같다.

RCGLUD 몸체는 페루프 시스템으로 구성된 서보모터에 의해 회전이 이루어지지만 몸체회전 관성으로 회전진동이 발생하며 정착시간이 상당히 길어진다. 따라서 본 실험에서는 앞절에서 언급한 입력다듬기 기법을 이용하여 제어입력이 임펄스열과 콘볼루션 적분되도록 전체 시스템을 그림 7과 같이 구성하였다.

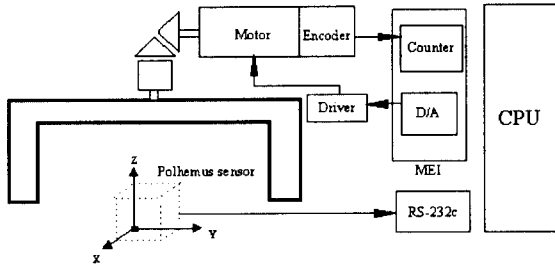


그림 6. RCGLUD 제어 시스템 구성도

Fig. 6. Control system structure of RCGLUD

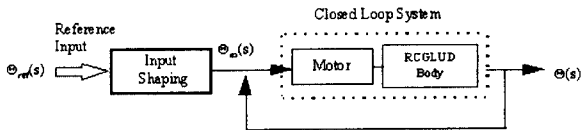


그림 7. 입력다듬기를 포함한 제어계 블록선도

Fig. 7. Control system with input shaping

전체 전달함수 $\Theta(s)$ 는 식(1)과 임펄스열이 콘볼루션 적분된 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\Theta(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \Theta_m'(s) \quad (14)$$

시스템의 고유진동수와 감쇠비를 추정하기 위하여 계단과 위치 기준 입력 (Θ_{ref})에 대한 개루프 응답특성을 실험적으로 살펴본 결과 그림 8과 같이 나타났다. 이 개루프 응답특성으로부터 시스템의 고유진동수 $\omega_n=0.52$ 와 감쇠비 $\zeta=0.01$ 를 추정하였다. 따라서 입력다듬기 기법을 이용하여 표 2와 같이 임펄스열의 t_i 와 A_i 를 산정하였다.

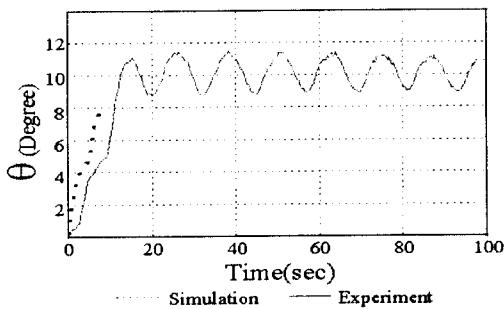


그림 8. 계단과 입력에 대한 개루프 응답

Fig. 8. Open loop step response

그림 9는 입력다듬기 기법을 이용하여 얻은 3개의 임펄스열로 계단입력에 대해 다듬기한 결과를 보여준다. 그림 8과 비교하여 잔류진동이 효과적으로 제거되었으나, 실제로 미소한 잔류진동이 존재함을 알 수 있다. 이 정도의 미소한 잔류진동은 RCGLUD의 파지공정에 영향을 주지 않으므로 성공적인 제어 특성이 얻어진 것으로 볼 수 있다. 실제로 추정된 고유진동수와 감쇠비가 실제 시스템의 값에 거의 근접한 경우는 두개의 임펄스열로도 잔류진동을 제거할 수 있지만 계속 잔류진동이 존재할 경우는 임펄스열의 수를 늘려야 한다. 하지만 임펄스열

표 2. 실험에 사용된 임펄스 입력변수 값

Table 2. Impulse sequence for experiment

N	t_i	A_i			
		A_1	A_2	A_3	A_4
1	0	1			
2	6.2	0.511	0.489		
3	12.4	0.263	0.499	0.238	
4	18.6	0.134	0.383	0.367	0.116

의 증가는 ΔT 만큼의 시간 지연이 발생함으로 원하고자하는 정착시간을 충분히 고려해서 임펄스열을 결정해야 한다.

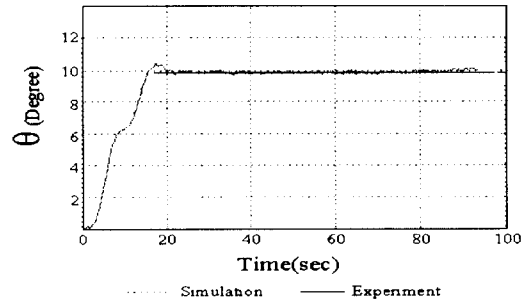


그림 9. 입력다듬기를 통한 계단과 응답특성

Fig. 9. Step response with input shaping

6. 결론

$\theta_{ref}(s)$ 가 계단입력인 경우에 대해서 전산모사와 실험을 실시하였다. 그림 9에 나타난바와 같이 입력다듬기를 적용함으로써 개루프 시스템에서 잔류진동이 줄어드는 결과를 얻을 수 있었다. 임펄스열의 갯수를 증가시킴으로써 잔류진동의 폭을 점차 줄일 수 있었으며 이는 시스템의 실제 고유진동수 ω_n 이 시스템 모델링이나 실험측정시 결정한 값과 다소 오차가 있어도 이를 극복하는데 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Alberts, T.E. ; Hastings, G. G. ; Book, W. j. ; and Dickerson, S. L. "Experiments in Optimal Control of a Flexible Arm with Passive Damping". "Fifth VPI &SU/AIAA Symposium on Dynamics and Control of Large Structures, Blacksburg, VA(June 12, 1985)
- [2] Kotnik, P. T. ; Yurkovich, S. ; Ozguner, U. "Acceleration Feedback for Control of a Flexible Manipulator Arm". *Journal of Robotic System* 5, 3(June 1988).
- [3] Smith, O. J. M. *Feedback Control Systems*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1958.
- [4] N. C. Singer, W. P. Seering, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 76-82, March 1990.
- [5] W. E. Singhose, W. P. Seering, N. C. Singer, "Shaping Inputs to Reduce Vibration : A Vector Diagram Approach", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 922-927, 1990.