

# 입력성형기법을 이용한 핵연료이송시스템의 수중이동 시의 진동제어

## Input Shaping Control of a Refueling System Operating in Water

박 명 옥, 샤 우머 하미드, 전 재 영, 홍 금 식\*  
(Mingxu Piao<sup>1</sup>, Umer Hameed Shah<sup>1</sup>, Jae Young Jeon<sup>2</sup>, and Keum-Shik Hong<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University

<sup>2</sup>POWER MnC, Busan

**Abstract:** In this paper, residual sway control of objects that are moved underwater is investigated. The fuel transfer system in a nuclear power plant transfers the nuclear fuel rods underwater. The research on the dynamics of the loads transferred in different mediums (water and air) and their control methods have not been fully developed yet. The attenuation characteristics of the fuel transfer system have been studied to minimize its residual vibration by considering the effects of hydrodynamic forces acting on the fuel rod. First, a mathematical model is derived for the underwater fuel transfer system, and then experiments have been conducted to study the dynamic behavior of the rod while it travels underwater. Lastly, the residual vibration at the end point is minimized using the input shaping technique.

**Keywords:** nuclear fuel transfer system, transfer underwater, vibration control, input shaping

### I. 서론

핵연료이송장치는 원자로에서 핵연료봉을 교체하는 장비이다. 집합체의 수평/수직운동 시 진동이 발생하게 되며 매질에 따른 저항차이로 인해 공기 중에서 이송 시와는 진동이 달라진다. 물속에서의 진동제어가 어려우므로 진동을 효과적으로 감소시키기 위해서는 새로운 제어방법을 개발할 필요가 있다.

핵연료봉이 물의 저항과 이를 이송하는 기계시스템으로부터 외란을 받아서 트롤리의 이동이 끝난 후에 봉의 잔류진동이 발생할 수 있다. 이런 잔류진동은 핵연료이송시스템의 연료이송과정의 정확성, 경제성, 운전자의 피로와 안전성에게 위해가 됨으로 이러한 잔류진동을 효과적으로 제어하여야만 한다.

Sakawa와 Shindo[1]는 시간최적제어 대신 컨테이너의 이동궤적을 5부분으로 나누고 이송되는 화물이 경계조건들을 각각 만족하도록 하는 구간별 최적의 속도기준입력을 설계하였다. Fliss 외 2인[2] 및 Boustany와 Novel[3]은 일반화된 상태공간모델을 통하여 선형화하는 제어법칙 및 크레인의 적응제어를 논하였다. 그리고 홍금식 외 2인[4]은 공기중에서 이송 시에 적합한 사다리꼴 속도선도, 계단형 속도선도

그리고 노치형 속도선도를 논하였다. 현철[5]은 수중운동체에 대한 비연성제어기 설계를 논하였다. 노진표 외 2인[6]은 원자력발전소의 주요 안전시스템을 제어하는 내고장성 다중화 제어기의 신뢰도를 분석하였다.

본 논문에서는 핵연료봉을 수중에서 이동할 때와 이동이 끝난 직후의 시스템 응답을 연구하였다. 이의 핵심은 진동 시스템이 이동할 때와 이동이 끝난 후에 생기는 잔류진동을 최소화하는 것이다[7]. 막대의 진동은 시스템이 운영되는 환경에 따라 달라진다. 예를 들어, 막대를 깊은 바다속 험한 환경에서 운반할 때 자연적 요소에 의한 외란이 존재한다. 하지만, 막대가 상대적으로 덜 열악한 환경에서 운반될 때에는 제어기술을 사용한다면 비교적 낮은 수준의 진동이 발생되게 할 수 있다. 그동안 전통적으로 시스템의 진동에 대처하기 위해서는 피드백 제어기술이 사용되어 왔다. 하지만 이 구현은 주로 센서의 기능 및 통합과 관련하여 실제적인 적용에 있어서는 어려움이 있는 것으로 입증되었다[8].

본 논문은 먼저 수중이송시스템의 수학적 모델을 정립하고 수조실험을 통해서 시스템의 저항을 분석하여 수평운동 시 발생하는 진동을 해석한다. 또한 연료봉의 진동을 줄이기 위해 제어방법을 유도한다. 수중연료이송시스템의 진동 제어를 위한 입력성형(input shaping) 기법의 사용에 초점을 맞추었다. 입력성형기법은 기준명령(reference command)과 임펄스의 조합에 의해 이송시스템의 잔류진동을 최소화하거나 제거하는 기술이다. 시스템의 진동모드를 알고 있다면, 이 모드에 따라 시스템의 진동을 최소화하기 위한 임펄스의 집합을 input shaper라고 부른다. 이러한 임펄스들은 시스템에 들어가는 입력힘들과 합성시킬 수 있고, 그 결과로 만들어진 합성된 명령이 시스템의 새로운 기준명령으로

\* Corresponding Author

Manuscript received August 22, 2013 / revised December 6, 2013 / accepted January 2, 2014

박명옥, 샤 우머 하미드, 홍금식: 부산대학교 인지메카트로닉스공학과(piaomx@pusan.ac.kr/umersah@pusan.ac.kr/kshong@pusan.ac.kr)

전재영: Power MnC 부산광역시(jjy@powermnc.or.kr)

\* 본 연구는 산업통상자원부 우수기술연구센터 (ATC)사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

\* 본 논문은 2013년 ICROS 부울경지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

주어졌을 때, 최소한 진동만 가지는 시스템응답을 얻어진다 [9,10].

입력성형제어를 구현하는 방법에는 여러가지가 있다. 예를들어 zero vibration (ZV) shaper, zero vibration derivative (ZVD) shaper, extra-insensitive (EI) shaper, specified intensity (SI) shaper 그리고 multi-mode input shaper 등이 있다[10,11]. 이들의 구체적인 장점과 단점은 참고문헌[10,11]을 참조하기로 한다.

본 논문의 II 절에서는 연료이송시스템의 동특성을 분석하고 제어목적의 시스템의 모델을 구한다. III 절에서는 수조실험의 장치를 기술한다. IV 절에서는 연료봉의 진동을 줄이기 위해 입력성형기법을 적용하고, 이에 따른 최적의 이송패턴을 유도한다.

### II. 시스템모델링

본 논문에서는 수중에서 핵연료봉을 목표위치로 직선경로를 따라 이송하기 위해서 핵연료봉을 내장하고 있는 막대(rod) 및 수직으로 막대를 매단 트롤리로 구성된 연료이송시스템을 고려하였다. 이송 후 남아 있는 잔류진동은 시스템 전체의 효율을 저하하게 됨으로 이를 최소화해야 한다. 본 논문의 목적은 적절한 제어를 설계하여 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 막대의 흔들림이 최소한 시간 안에 감쇠되도록 하는 것이다. 막대가 수중에서 이동하므로 유체로 인한 항력을 받을 수 있다. 또한, 물의 부력, 물속의 저항력 및 추가질량효과에 의한 힘이 막대의 동역학 특성에 영향을 줄 수 있다[12,13].

연료이송시스템은 그림 1(a)와 같다. 그림 1(b)에서 부력에 의한 힘은 물건이 물속에 있는 부분을 치환한 물의 무게이다. 이 힘은  $F_B = \rho Vg$  와 같은 수학적식으로 표현될 수 있다. 여기서  $\rho$  는 물의 밀도이고  $V$  는 물속에 있는 막대의 체적이다. 저항력은 표면마찰항력, 압력항력 및 소용돌이 방출의 도력으로 구성되어 있다. 물속의 저항력은 아래의 식으로 나타낸다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho A_D v_r |v_r| \quad (1)$$

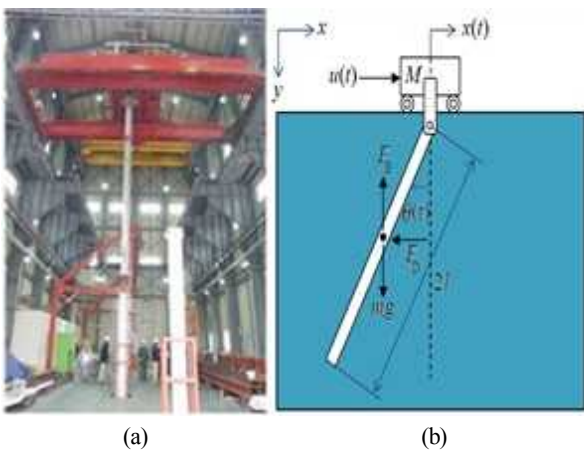


그림 1. 연료이송시스템과 단순화된 모델.  
Fig. 1. Model of the fuel transfer system.

여기서  $C_d$ 는 저항력의 계수,  $\rho$  는 물의 밀도,  $A_D$ 는 투사면의 면적, 그리고  $v_r$ 는 물체와 물 사이의 상대속도이다. 추가질량(added mass)은 막대와 함께 가속이나 감속할 때 발생하는 유체의 관성 부분을 얘기하는데, 물의 가속도 때문에 생긴 저항력은 추가질량을 포함하여 아래와 같이 표현된다.

$$F_a = m_a \frac{dv_r}{dt} \quad (2)$$

그리고 추가질량은 아래와 같다.

$$m_a = C_m \rho V \quad (3)$$

여기서  $C_m$ 은 추가질량의 계수이다. 연료이송시스템의 수학적 모델은 Lagrange 방법을 사용하여 얻을 수 있다. 막대가 수중에서 이동할 때 물운동이 없고 흔들림만 있는 것으로 가정하면 핵연료이송시스템은 2자유도를 갖는 시스템이 된다.

핵연료봉의 일반화된 좌표는  $q = [x(t) \theta(t)]^T$ 로 표시할 수 있다. 따라서 막대의 무게중심의 좌표는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_c = x - l \sin \theta \quad (4)$$

$$y_c = l \cos \theta \quad (5)$$

시스템의 전체 운동에너지  $T$ 와 위치에너지  $P$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

$$P = (mg - F_B)l(1 - \cos \theta) \quad (7)$$

여기서  $J$ 는 핵연료봉의 관성모멘트이다. 이 막대는 직경이  $D$ 이고 길이가  $2l$ 인 원형 실린더로 간주한다. 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$J = \frac{3}{4} ml^2 \quad (8)$$

$$\dot{x}_c = \dot{x} - l \dot{\theta} \cos \theta \quad (9)$$

$$y_c = -l \dot{\theta} \sin \theta \quad (10)$$

Lagrangian  $L$  은  $L = T - P$ 로 표시하고, 아래의 식을 이용하여 전체 시스템의 수학모델을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q} \right) = Q \quad (11)$$

여기서  $Q$ 는 일반화된 힘이고  $Q = [Q(x) \ Q(\theta)]^T$ 로 나타낸다. 그리고  $Q_x$ 와  $Q_\theta$ 는 각각  $Q_x = u(t) + F_D$  및  $Q_\theta = 0$ 으로 표시할 수 있다.

식 (6)-(10)을 (11)에 대입한 후 정리하면 연료이송시스템의 수학적 모델을 아래와 같은 상미분방정식으로 얻어진다.

$$(M+m)\ddot{x} - (ml \cos \theta)\ddot{\theta} + (ml \sin \theta)\dot{\theta}^2 = u - F_D \quad (12)$$

$$\frac{7}{3} ml^2 \ddot{\theta} - (ml \cos \theta)\ddot{x} - (mg - F_B)l \sin \theta = 0 \quad (13)$$

여기서  $M$ 은 트롤리의 질량,  $x$ 는 트롤리의 위치,  $g$ 는 중력 가속도,  $F_B$ 는 부력,  $F_D$ 는 막대에 작용하는 항력이다. 시스템의 움직임은 두 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째는 트롤리가 로드를 목표지점까지 이송하는 것과 관련된 움직임이고, 두 번째는 목표지점에서 트롤리가 정지 후 생기는 핵연료봉의 잔류진동이다.

여러 연구자들이 수중에서 이동하는 물체에 작용한 유체역학적인 힘의 영향을 연구하였다[12,13]. 원형 실린더가 정적 유체 안에서 가속운동하는 경우에 관한 Morison 방정식은 아래와 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d D |v_r| v_r + \rho C_m \frac{\pi D^2}{4} \frac{dv_r}{dt} \quad (14)$$

여기서  $F$ 는 단위 길이에 작용하는 유체역학적인 힘이다. 유체역학적인 힘의 정확한 값은 유체역학 계수의 정확한 계산에 달려있다. McLain[13]은  $C_d$ 와  $C_m$ 은 상태 의존 매개변수이고 실린더의 이동거리에 관한 함수로서 두 개의 매개변수의 변화를 보여준다고 주장하였다.  $C_d$ 와  $C_m$ 의 값은 후류가 완전히 발달하기 전까지 일정하지 않고 계속 변한다. 본 논문의 초점은 막대의 잔류진동을 줄이기 위하여 제어법칙 개발하는 것이다. 그리고  $C_d$ 와  $C_m$ 의 수치는 트롤리를 따라 이동할 때 변화하지 않는다고 가정한다. 이제, 막대가 수중에서 이동할 때 유체역학적인 힘의 영향을 살펴보기 위해 수조실험을 실행한다.

**III. 수조실험**

실험을 위해 핵연료이송장치와 유사한 메커니즘으로 작동하는 3축 크레인을 이용한다. 실험은 아래 그림 2의 실험장치를 사용하여 실시되었다. 이동브리지와 같은 운동을 할 수 있는 메커니즘으로써 수조를 설치하여 핵연료이송시스템과 유사한 실험환경을 구축하였다.

질량이 0.165 kg, 직경이 0.01 m 그리고 길이가 0.98 m인 원형 막대를 이동브리지에 매달고 수중에서 이동시켰다. 이동브리지의 최대속도는 0.33 m/s이었다. 실험에서 막대를 가속 후 최대속도로 1.4 m의 직선거리를 이동시켰다. 먼저 물로 인해 가해지는 힘 때문에 트롤리가 목표위치에 도착하기 전까지는 막대가 트롤리 움직임의 반대방향으로 기울어

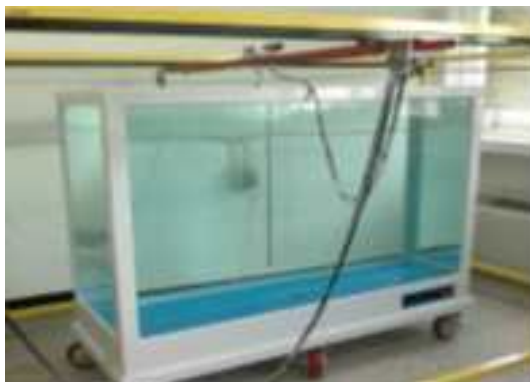


그림 2. 연료봉이송시스템의 실험장치.  
Fig. 2. Experimental setup of the fuel transfer system.

졌고, 목표위치에 도착한 후에는 연료봉의 잔류진동이 시작되었다.

**IV. 입력성형제어**

본 논문에서 세 가지 속도선도가 기준명령으로 이용하여 input shaper가 없는 시스템의 응답을 연구하였다. 최소한 잔류진동이 발생하여 최소한 시간에 막대를 전송하는 기준명령을 얻기 위해 입력성형기법을 이용하였다. 본 논문에서 이용한 input shaper는 아래와 같다.

• ZV shaper:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & \frac{\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

• ZVD shaper:

$$\text{ZVD} = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ 1+2K+K^2 & 1+2K+K^2 & 1+2K+K^2 \\ 0 & \frac{2K}{2\omega\sqrt{1-\zeta^2}} & \frac{K^2}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서  $\omega$ 는 시스템의 고유주파수이고  $\zeta$ 는 시스템의 댐핑 계수이다. 그리고 변수  $K$ 는 아래와 같다.

$$K = e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (17)$$

임펄스입력에 따라서 2차 시스템의 응답은 아래와 같다.

$$\theta(t) = \frac{A\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega t} \sin \omega \sqrt{1-\zeta^2} t, \forall t \geq 0 \quad (18)$$

식 (18)을 이용하여 시뮬레이션을 하고 실험결과와 비교해서 시스템의 고유주파수  $\omega$ 와 저항  $\zeta$ 를 얻을 수 있다. 그리고  $\omega$ 와  $\zeta$ 를 이용하여 ZV shaper와 ZVD shaper를 얻을 수 있다.

그림 3~8은 기준명령과 각각 명령에 대한 시스템의 응답을 보여주고 있다. 그림 3에서 보인 속도선도는 트롤리가 일정한 최대속도로 이동거리의 절반까지 이동한 다음에 남

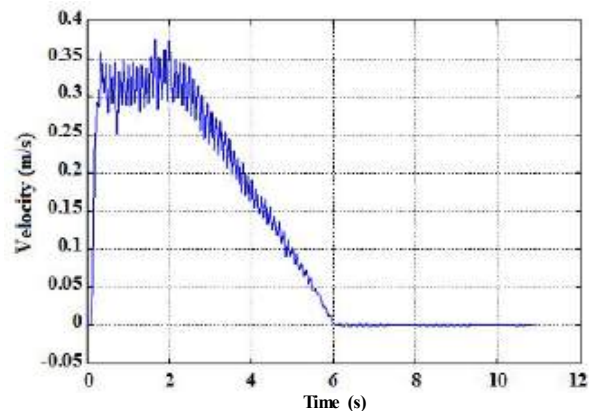


그림 3. 트롤리 속도선도(실험 1).  
Fig. 3. Trolley velocity (experiment 1).

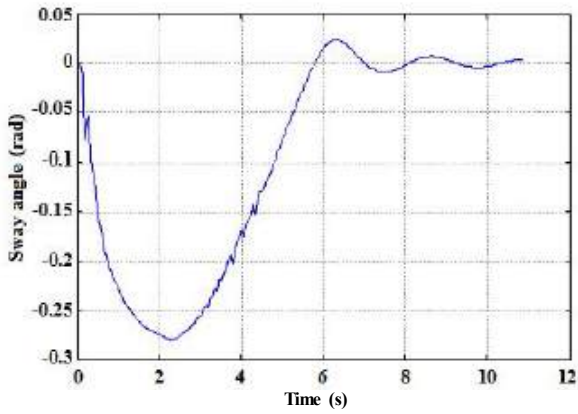


그림 4. 막대가 수중 이동할 때의 흔들림각 (실험 1).  
Fig. 4. Sway angle of the rod in underwater (experiment 1).

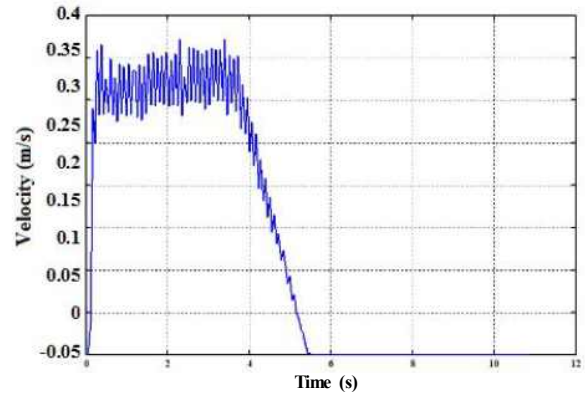


그림 7. 트롤리 속도선도 (실험 3).  
Fig. 7. Trolley velocity (experiment 3).

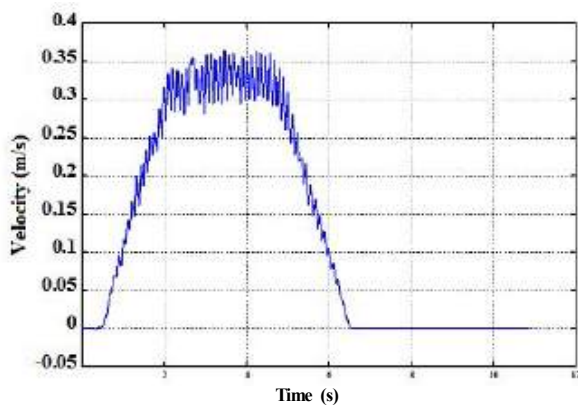


그림 5. 트롤리 속도선도 (실험 2).  
Fig. 5. Trolley velocity (experiment 2).

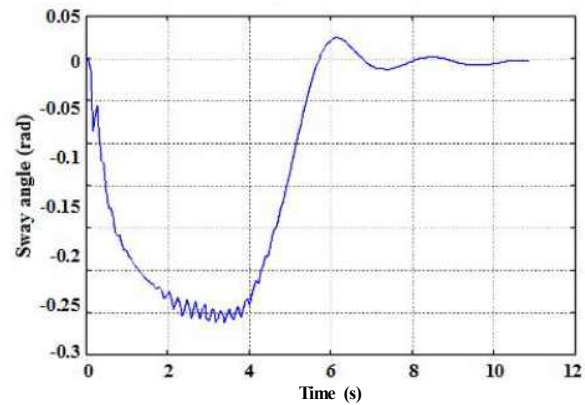


그림 8. 막대가 수중 이동할 때의 흔들림각 (실험 3).  
Fig. 8. Sway angle of the rod in underwater (experiment 3).

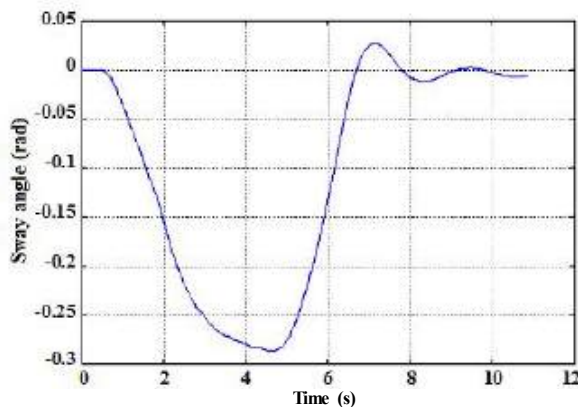


그림 6. 막대가 수중 이동할 때의 흔들림각 (실험 2).  
Fig. 6. Sway angle of the rod in underwater (experiment 2).

은 거리를 이동하면서 속도가 최대속도에서 0으로 감소하는 것이다. 그림 5에서 보인 속도선도는 사다리꼴 속도선도이고 이의 초기 속도기울기를 제거하여 그림 7과 같은 속도선도를 얻을 수 있다.

이 세 가지 속도선도를 살펴볼 때 그림 8에서 보인 응답이 제일 좋다는 것을 알 수 있다. 이것을 보면 막대가 최소 시간에 목표위치를 도착하여 잔류진동의 진폭도 다른 것보

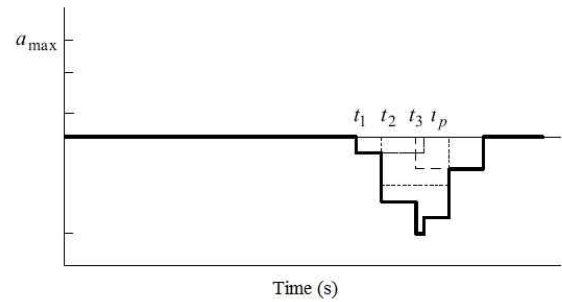


그림 9. 성형된 입력.  
Fig. 9. Shaped command.

다 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 실험3의 결과가 우수함으로 이를 바탕으로 ZVD shaper를 이용하여 성형된 입력을 그림 9와 같이 얻었다.

• ZV shaper:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0 & 1.18 \end{bmatrix} \quad (19)$$

• ZVD shaper:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.16 & 0.2 \\ 0 & 1.18 & 2.36 \end{bmatrix} \quad (20)$$



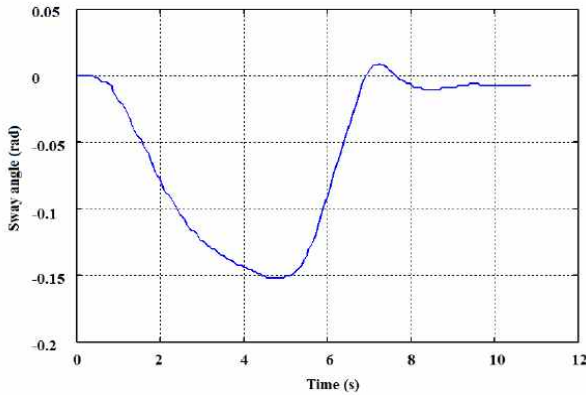


그림 10. ZVD input shaper (20)을 적용할 시의 흔들림각.

Fig. 10. Sway angle of the rod with ZVD input shaper (20).

이러한 성형된 신호를 시스템의 입력으로 이용하여 그림 9과 같은 입력가속도를 얻었다. 그림 9를 이용하면 그림 10과 같은 시스템의 응답을 얻을 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 수중에서 마스트의 진동을 줄이기 위해 핵연료이송시스템 수중운동의 동특성을 해석하고 수중 이송시스템의 수학적 모델을 구하였다. 핵연료이송시스템 수중운동의 실험환경을 만들고 여러 제어방법을 이용해서 수조실험을 실시하였다. 시스템의 수학적모델을 바탕으로 연료봉의 진동을 줄이기 위해 입력성형 제어기를 유도하였다. 물의 부력을 핵연료봉에 작용하는 힘으로 고려하였다. 시스템의 동역학적인 특성을 파악하기 위하여 막대를 먼저 일정한 최대속도(성형된 입력이 없는 경우)로 이동시키고, 그 다음에 시스템의 응답은 세 가지 속도선도를 이용하여 받은 응답과 비교하였다. 시스템의 응답들을 비교해본 결과가 ZVD shaper을 이용했을 때 최소한 잔류진동이 일어나므로 ZVD shaper가 제일 좋은 것으로 나타났다.

### REFERENCES

- [1] Y. Sakawa and Y. Shindo, "Optimal control of container cranes," *Automatica*, vol. 18, no. 3, pp. 257-266, May 1982.
- [2] Y. Fliss, J. Levine, and P. Rouchon, "A simplified approach of crane control via generalized state-space model," *Proc. of 30th Conference on Decision and Control*, England, pp. 736-741, Dec. 1991.
- [3] P. Boustany and B. D'Andrea-Novell, "Adaptive control of non-completely controlled mechanical systems using dynamic feedback linearization and estimation design," *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 6, pp. 589-610, Jul. 1992.
- [4] K.-S. Hong, S. C. Sohn, and M. H. Lee, "Sway control of a container crane (Part I): Modeling, control strategy, error feedback control via reference velocity profiles," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 3, no. 1, pp. 23-31, Feb. 1997.
- [5] C. Hyun, "Decoupled controller design of an autonomous underwater vehicle and performance test results," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 9, pp. 768-773, Sep. 2013.
- [6] J. Noh, J. Park, K.-S. Son, D.-H. Kim, "Reliability analysis of redundant architecture of dependable control system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 4, pp. 328-333, Sep. 2013.
- [7] K. T. Hong, C. D. Huh, and K.-S. Hong, "Command shaping control for limiting the transient sway angle of crane systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 43-53, Mar. 2003.
- [8] J. Brogan, J. Fortgang, and W. Singhose, "Experimental verification of vibration absorbers combined with input shaping for oscillatory systems," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 3160-3165, Jun. 2003.
- [9] J. Fortgang and W. Singhose, "Concurrent design of vibration absorbers and input shapers," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 127, no. 3, pp. 325-335, Sep. 2005.
- [10] W. Singhose, "Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 4, pp. 153-168, Oct. 2009.
- [11] T. Singh and W. Singhose, "Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures," *Proc. of the American Control Conference*, vol. 3, pp. 1717-1731, May 2002.
- [12] M. Rahman and D. D. Bhatta, "Evaluation of added mass and damping coefficient of an oscillating circular cylinder," *Applied Mathematical Modeling*, vol. 17, no. 2, pp. 70-79, Feb. 1993.
- [13] T. W. McLain, *Modeling of Underwater Manipulator Hydrodynamics with Application to the Coordinated Control of an Arm/Vehicle System*, Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Aug. 1995.
- [14] M. Piao, U. H. Shah, J.-Y. Jeon, and K.-S. Hong, "Input shaping control of a refueling system operating in water," *Proc. of the ICROS/KROS/KIIS Busan, Ulsan, and Kyounghnam Joint Conference*, pp. 23-26, Aug. 22, 2013.

### 박명욱



2010년 6월 상해해사대학교 기계전자공학과 공학사. 2012년 3월부터 부산대학교 인지메카트로닉스공학과 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 항만 자동화, 크레인 제어, 수중체의 제어, 및 수중로봇공학.



### 샤 우머 하미드

2005년 파키스탄 National University of Sciences and Technology 기계공학과 공학사. 2012년 동 대학원 공학석사. 2013년 3월부터 부산대학교 인지메카트로닉스 박사과정 재학중. 관심분야는 길이방향으로 이송하는 시스템의 경계제어, 복합구조물의 진동제어, 해양로봇의 적응제어.



### 전 재 영

1983년 서울대학교 공과대학 항공공학과 공학사. 1985년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사. 1994년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사. 1997년~현재 (주)파워엔씨 대표이사/기술연구소장. 관심분야는 정밀계측기기, 기계설계, 고온기기, 원자력발전.



### 홍 금 식

1979년 서울대학교 기계설계학과 공학사. 1987년 Columbia University 기계공학과 공학석사. 1991년 University of Illinois at Urbana (UIUC) 수학과 이학석사. 1991년 UIUC 기계공학과 공학박사. 1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 뇌공학, 뇌-기계접속, 로봇공학, 항만 자동화, 시스템이론 등.