

## 샘플-홀드 방식과 햅틱 장치 물성치에 따른 햅틱 시스템의 안정성 분석

이경노<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국교통대학교 에너지시스템공학과

### Stability of Haptic System with consideration for Sample-and-Hold Methods and Properties of Haptic Device

Kyungno Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation

**요 약** 햅틱 시스템에서 가상 벽의 스프링상수 ( $K_w$ )가 크면 클수록 사용자는 실제 벽처럼 느끼지만 햅틱 시스템은 그만큼 불안정해진다. 그래서 시스템의 안정성을 유지하면서 가상 벽에 대한 사용자 몰입감을 향상시키기 위해서 일차 홀드 방식을 이용한 방법을 제시하고자 한다. 특히 가상 벽 (virtual wall)로 구성된 가상 환경과 상호 작용할 때 일차홀드 (FOH) 방식을 이용하는 경우 햅틱 장치의 물성치인 질량 ( $M_d$ )과 댐핑 상수 ( $B_d$ )가 시스템의 안정성에 미치는 영향을 분석한다. 시뮬레이션을 통해 시스템의 안정성을 유지하는 가상 벽의 스프링 상수 ( $K_w$ )가 햅틱 장치의 질량 ( $M_d$ )과 댐핑 상수 ( $B_d$ )의 제곱근에 비례한다는 것을 보이고, 이를 통해 기존의 영차홀드 (ZOH) 방식보다 큰 가상 스프링의 구현이 가능함을 보인다. 따라서 사용자의 몰입감 높은 햅틱 시스템 구현이 가능함을 보인다. 그리고 시뮬레이션 결과분석을 통해 시스템 안정성을 보장하는 가상 스프링 상수 ( $K_w$ )의 범위를 샘플링 주기 ( $T$ ), 햅틱 장치의 질량 ( $M_d$ ), 댐핑 상수 ( $B_d$ )의 관계로 유도한 결과가  $K_w \leq 1.611M_d^{0.50} B_d^{0.50} T^{-1.51}$ 임을 보인다. 이 때 시뮬레이션 결과와의 상대 오차가 평균 0.53%로 매우 작다.

**Abstract** In a haptic system, a virtual wall is modeled as a virtual spring. The larger the stiffness of the virtual spring is, the more improved the reality of the virtual wall is, but the more unstable the haptic system becomes. This paper shows how to increase the stiffness of the virtual spring while the stability of the haptic system is guaranteed and shows the effects of a mass ( $M_d$ ) and a damper ( $B_d$ ) of a haptic device on the stability when first-order hold method is applied and a virtual wall is modeled as a virtual spring ( $K_w$ ). The simulation results show the boundary of the virtual spring is proportional to the square root of the mass ( $M_d$ ) and the damper ( $B_d$ ) while maintaining the stability. The relation among the virtual spring ( $K_w$ ), the mass ( $M_d$ ) and the damper ( $B_d$ ) of the haptic device, and sampling time ( $T$ ) is inferred as  $K_w \leq 1.611M_d^{0.50} B_d^{0.50} T^{-1.51}$ , by using the simulation results. The maximum available stiffness of the virtual spring in first-order hold method is larger than in zero-order hold method. So the reality of the virtual wall can be improved.

**Key Words** : Data-Hold Method, Haptic System, Stability, Virtual Environment.

### 1. 서론

햅틱 장치는 햅틱 시스템에서 사용자와 가상 환경 또는 컴퓨터 그래픽 환경을 연결하는 매개체이다. 사용자는

햅틱 장치를 통해서 가상 물체의 위치를 조종하는 동시에 가상 물체와의 상호작용에서 발생하는 역감을 되돌려 받게 된다. 이러한 양방향 상호작용 효과를 이용하여 햅틱 시스템을 인간의 인지능력 향상을 위한 도구로 활용

\*Corresponding Author : Kyungno Lee (Korea National Univ. of Transportation)

Tel: +82-43-841-5285 email: klee@ut.ac.kr

Received August 5, 2013

Revised October 1, 2013

Accepted November 7, 2013

하기도 한다[1]. 또한 햅틱 시스템은 원격 로봇시스템에서 슬레이브 로봇에서 발생하는 반력을 사용자에게 전달해주는 시스템으로도 사용되며, 특히 가상현실 시스템과의 상호작용에서 폭넓게 사용된다.

햅틱 시스템에서는 가상 벽의 스프링상수 ( $K_w$ )가 크면 클수록 사용자는 실제 벽처럼 느끼지만 햅틱 시스템은 그만큼 불안정해진다. 이처럼 시스템이 불안정해지는 원인 중 하나는 샘플-홀드 과정에서 발생하는 에너지 때문이며, 생성되는 에너지가 클수록 햅틱 시스템은 더 불안정해진다. 그래서 시스템의 안정성을 유지하면서 가상 벽에 대한 사용자 몰입감을 향상시키기 위해서 일차 홀드 방식을 이용한 방법을 제시하고자 한다. 샘플-홀드 방법 중 영차 홀드 방식 (ZOH; Zero-Order Hold)과 일차 홀드 방식 (FOH; First-Order Hold)이 일반적인 방식이다.

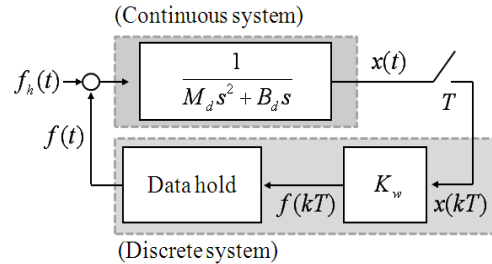
햅틱 시스템의 안정성에 대한 연구들은 주로 영차 홀드 방식 기반에서 수동성 (passivity) 또는 안정성 (stability) 측면으로 분석되었다. Colgate[2]는 가상 커플링 (virtual coupling)의 개념을 도입하여 햅틱 시스템을 안정화시키기 위한 가상 커플링의 범위를 햅틱 장치의 댐퍼, 샘플링 주기, 그리고 스프링 상수와와의 관계로 유도하였다. Abbott와 Okamura[3]는 가상벽 모델에서 샘플링 주기, 햅틱 장치의 쿨롱 마찰력, 그리고 엔코더의 분해능을 고려한 수동성(passivity) 조건을 제시하였다. Diolaiti[4]는 햅틱 인터페이스에서 샘플링 주기 (sampling time), 시간지연 (time delay), 양자화 (quantization), 그리고 햅틱 장치의 쿨롱 마찰 (Coulomb friction)과 시스템 안정성의 관계를 분석하였다. Gil[5]은 루드-후르비쯔 (Routh-Hurwitz) 판별법을 이용하여 햅틱 시스템의 안정성 (stability)측면에서 분석하였으며, 안정성을 보장하는 가상 스프링과 가상 댐퍼의 범위에 대한 조건 유도 및 사람 모델에 대한 영향을 분석하였다. Lee와 Lee[6]는 비선형 가상 커플링을 이용하여 보다 큰 스프링상수 설계방법을 제안했다. 이러한 기존 연구는 반력을 사용자에게 전달할 때 영차 홀드 방식을 이용한다는 전제에서 분석되었으며, 최근 1 kHz 샘플링 주기에서 샘플-홀드 방식을 일차 홀드 방식으로 바꿀 경우 가상 스프링 상수를 영차 홀드 방식을 사용한 경우보다 60배 증가시킬 수 있다는 결과가 제시되었다[7]. 그렇지만 샘플링 주기와 가상 벽 모델의 스프링 상수와의 관계만이 제시되었을 뿐, 햅틱 장치의 물성치가 시스템 안정성에 미치는 영향에 대한 분석은 미진했다.

본 논문에서는 일차홀드 방식을 사용하고, 가상 벽과 상호작용하는 가상 환경에서 기존의 가상 스프링 상수와 샘플링 주기와의 관계 결과를 확장하여, 햅틱 시스템의 안정성을 보장하는 범위 내에서 가상 벽의 스프링 상수

와 햅틱 장치의 질량, 댐핑 상수가 시스템의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 햅틱 시스템 구성

햅틱 시스템은 Fig. 1과 같이 연속 시스템과 이산 시스템으로 구성되어 있으며, 일반적으로 햅틱 장치는 질량 ( $M_d$ )과 댐퍼 ( $B_d$ )로 구성된 2차 시스템으로 모델화된다. 본 논문에서 다루고자 하는 가상환경은 가상 스프링 상수 ( $K_w$ )으로만 구성된 가상 벽 (virtual wall) 모델이며, 샘플링 주기는  $T$ 이다.



[Fig. 1] Control block diagram of haptic system with a virtual spring.[7]

샘플-홀드를 통하여 이산 데이터가 연속 데이터로 변환되며, 영차홀드(ZOH)의 라플라스 전달함수 ( $G_{h0}(s)$ )는 (1)이고, 일차홀드(FOH)의 라플라스 전달함수 ( $G_{h1}(s)$ )는 (2)이다.[7] 여기서  $T$ 는 샘플링 주기이다.

$$\text{영차홀드: } G_{h0}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (1)$$

$$\text{일차홀드: } G_{h1}(s) = \left( \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \right)^2 \frac{Ts + 1}{T} \quad (2)$$

영차홀드 (ZOH)를 사용한 가상 벽에서의 시스템 안정성 분석에 대한 기존 연구 결과[2][5]는 (3)과 같이 가상 벽의 스프링 상수가 샘플링주기에 반비례하고, 햅틱 장치의 댐핑 상수에 비례함을 보여준다. 햅틱 장치의 질량은 시스템 안정성과 무관하다.

$$B_d > \frac{K_w T}{2} \quad (3)$$

일차홀드 (FOH)를 사용한 가상 벽에서의 안정성 분석 결과는 Table 1 및 (4)와 같다[7]. 식 (4)에서  $R$ 은 상관계

수로서, 1에 가까울수록 측정 데이터와 근사식 사이의 오차가 작다는 것을 의미한다. 가상 스프링 상수가 샘플링 주기의 1.5배에 반비례하며, 그 결과 영차홀드방식보다 1 kHz 샘플링에서 60배 더 큰 가상 벽을 안정적으로 구현할 수 있다.

$$K_w = 0.3615 T^{-1.51} (R^2 = 1) [7] \quad (4)$$

[Table 1] Maximum stable stiffness, Kw according to sampling time; T. (Md=0.5 kg, Bd=0.1 Ns/m) [7]

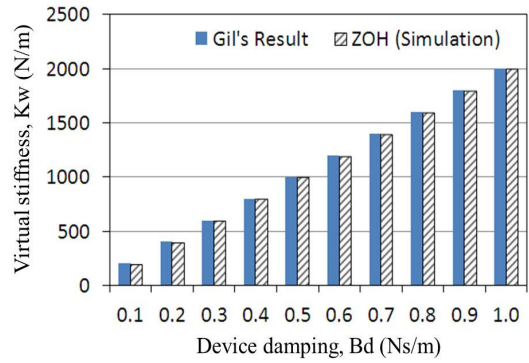
Sampling Time, T (s)	Max. virtual spring, Kw (N/m)
0.001	12210
0.002	4310
0.003	2340
0.004	1520
0.005	1080
0.006	820
0.007	650
0.008	530
0.009	440
0.010	380

### 3. 햅틱 장치 물성치에 따른 시스템 안정성 분석

햅틱 장치 물성치 변화에 따라 햅틱 시스템의 안정성이 보장되는 가상 벽의 스프링 상수 범위를 분석한 후, 분석된 데이터를 토대로 시스템 내 변수들 사이의 상호관계를 분석하고자 한다.

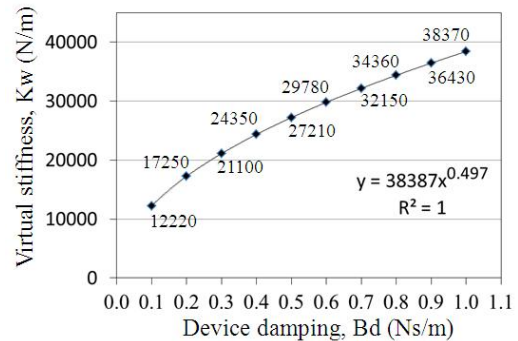
시스템의 안정성을 분석하기 위한 시뮬레이션 모델은 MATLAB Simulink를 이용하며 Fig. 1의 제어블록을 토대로 설계된다. 설계된 시뮬레이터를 통한 안정성 분석의 타당성을 검증하기 위하여 샘플-홀드 방식을 영차홀드로 설계한 후 시뮬레이션을 수행하여 시스템의 안정성을 유지하는 가상 스프링 상수의 최대값을 구해낸다. 이때, 시뮬레이션 결과에서 진동의 진폭이 시간의 흐름에 따라 감소하면 시스템이 안정적인 것으로 판단한다.

영차홀드 방식을 이용할 때 가상스프링 상수 (Kw), 장치 댐퍼 (Bd)와 샘플링주기 (T) 사이의 관계는 (3)과 같다.[2][5] 시뮬레이션에서 영차홀드 방식으로 모델화한 후 장치 댐퍼 (Bd)의 변화에 따라 시스템이 안정되는 가상스프링 상수 (Kw)의 최대값을 구하여 (3)을 통한 계산값과 비교한 것이 Fig. 2이며, 이 때 값의 차이가 없다. 따라서 설계된 시뮬레이터를 통한 시스템의 안정성 분석이 타당하다.



[Fig. 2] Comparison between Gil's results[5] and MATLAB Simulink Simulation results.

Fig. 3은 샘플링 주기 1 kHz, 햅틱 장치의 질량은 0.5 kg에서 햅틱 장치의 댐핑 상수 변화에 따른 가상 스프링 상수의 최대값을 시뮬레이션을 통해 구해낸 것이다. 시뮬레이션에서 가상 스프링 상수의 분해능을 10으로 설정한다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 3과 같이 추세선 분석을 통해 그 상관관계를 산출하면 (5)와 같다. 즉 안정성을 유지한 상태에서 가상 스프링 상수의 최대값은 햅틱 장치의 댐핑 상수 제곱근에 비례한다.



[Fig. 3] Relation between max. virtual stiffness and device damping.

$$K_w = 38387 B_d^{0.497} (R^2 = 1) \quad (5)$$

샘플링 주기 1 kHz, 햅틱 장치의 질량 0.5 kg에 대하여 영차 홀드 (ZOH) 방식에 의한 스프링 상수의 최대값과 일차 홀드 (FOH) 방식에 의한 스프링 상수의 최대값의 비율을 햅틱 장치의 댐핑 상수 변화에 따라 분석해 보면 Table 2와 같다. 일차 홀드 방식을 사용할 때 햅틱 장치의 댐핑 상수가 작을수록 일차 홀드 (FOH) 방식과 영차 홀드 (ZOH) 방식에서의 가상 스프링의 최대값 비율이 커지

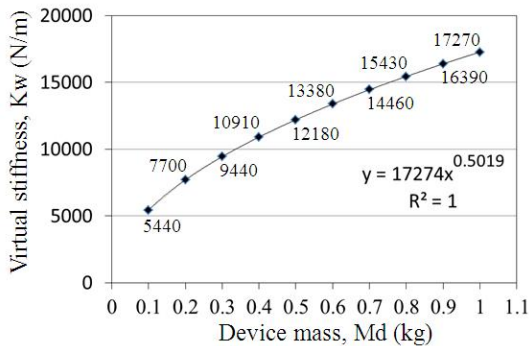
는 것을 볼 수 있다. 시스템의 안정성을 유지하면서 수십 배 큰 가상 벽 스프링 상수를 구현할 수 있음을 의미하며, 이는 사용자가 가상 벽을 더 단단하게 느끼게 된다는 것을 의미한다. 따라서 일차 홀드(FOH) 방식을 사용함으로써 가상 벽에 대한 몰입감, 현실감을 증강시킬 수 있다.

[Table 2] Comparison of FOH and ZOH effect on stable margin of virtual stiffness, Kw with 1 kHz sampling and 0.5 kg mass.

Device damping, Bd (Ns/m)	Kw (N/m) @FOH	Kw (N/m) @ZOH	$\frac{Kw@FOH}{Kw@ZOH}$
0.1	12220	200	61
0.2	17250	400	43
0.3	21100	600	35
0.4	24350	800	30
0.5	27210	1000	27
0.6	29780	1200	25
0.7	32150	1400	23
0.8	34360	1600	21
0.9	36430	1800	20
1.0	38370	2000	19

샘플링 주기를 1 kHz, 햅틱 장치의 댐핑 상수를 0.1 Ns/m로 고정한 상태에서 햅틱 장치의 질량 변화에 따른 가상 벽 스프링 상수의 최대값을 시뮬레이션을 통해 구해낸 결과가 Fig. 4이다. 그리고 이를 추세선 분석을 통해 상관관계를 유추한 결과가 (6)이다. 추세선 분석에 따르면 안정성을 유지하는 상태에서 가상 벽 스프링 상수의 최대값은 햅틱 장치의 질량의 제곱근에 비례한다.

$$K_w = 17274M_d^{0.5019} \quad (R^2 = 1) \quad (6)$$



[Fig. 4] Relation between max. virtual stiffness and device mass.

영차홀드 (ZOH) 방식의 경우에는 (3)과 같이 햅틱 장치의 질량이 증가하더라도 가상 벽의 스프링 상수 최대

값이 변하지 않는다. 그러나 일차 홀드 (FOH) 방식의 경우에는 (6)과 같이 햅틱 질량의 제곱근에 비례해서 가상 스프링 상수 최대값이 증가한다. 따라서 Table 3과 같이 일차 홀드 (FOH) 방식을 활용하면 햅틱 장치의 질량 증가를 통해 시스템의 안정성을 유지하면서 사용자에게 전달해줄 수 있는 가상 벽의 강성을 더 증가시킬 수 있다. 이로서 가상 벽에 대한 현실감을 증강시킬 수 있다.

[Table 3] Comparison of FOH and ZOH effect on stable margin of virtual stiffness, Kw with 1 kHz sampling and 0.1 Ns/m device damping.

Device mass, Md (kg)	Kw (N/m) @FOH	Kw (N/m) @ZOH	$\frac{Kw@FOH}{Kw@ZOH}$
0.1	5440	200	27
0.2	7700	200	39
0.3	9440	200	47
0.4	10910	200	55
0.5	12180	200	61
0.6	13380	200	67
0.7	14460	200	72
0.8	15430	200	77
0.9	16390	200	82
1.0	17270	200	86

본 논문에서 모델링한 햅틱 시스템에서의 변수는 샘플링 주기 (T), 햅틱 장치의 질량 (Md)과 댐핑 상수 (Bd), 그리고 가상 스프링 상수 (Kw)이다. 가상 스프링 상수 (Kw)를 중심으로 햅틱 장치의 질량 (Md)와의 관계, 댐핑 상수 (Bd)와의 관계, 그리고 샘플링 주기 (T)와의 관계[7]가 시뮬레이션을 통해 각각 (5)-(7)로 구해진다. 그리고 (5)-(7)의 상수 값들은 시뮬레이션 수행 시 주어진 제한 조건들, 샘플링 주기, 햅틱 장치의 물성치에 따라 달라진다. 따라서 상기 (5)-(7)을 통합하여 간단히 (8)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 c는 상수값으로 매개변수들 사이의 관계식과 시뮬레이션 결과를 맞춰주는 비례상수이다. 시뮬레이션 결과 Table 1, Figs. 3-4의 데이터 30개를 (8)에 대입하여 비례상수 c 값을 구한다. 이렇게 구해진 30개 c 값에 대한 평균이 1.611이다. 따라서 시뮬레이션을 통해서 유도된 일차 홀드 (FOH) 방식에서 안정성을 보장하는 가상 스프링 (Kw)와 샘플링 주기 (T), 햅틱 장치의 질량 (Md), 댐핑 상수 (Bd)와의 최종 관계식은 (9)와 같다.

$$K_w = 0.3615 T^{-1.51} \quad (R^2 = 1) \quad [7] \quad (7)$$

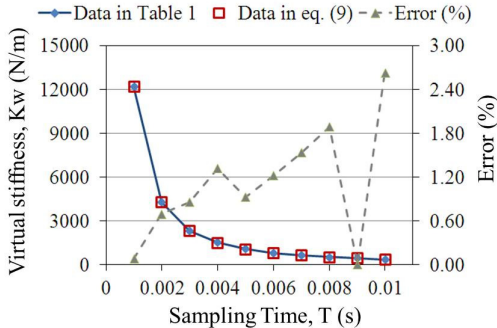
$$K_w = cM_d^{0.50} B_d^{0.50} T^{-1.51} \quad (c = const.) \quad (8)$$

$$K_w \leq 1.611M_d^{0.50} B_d^{0.50} T^{-1.51} \quad (9)$$

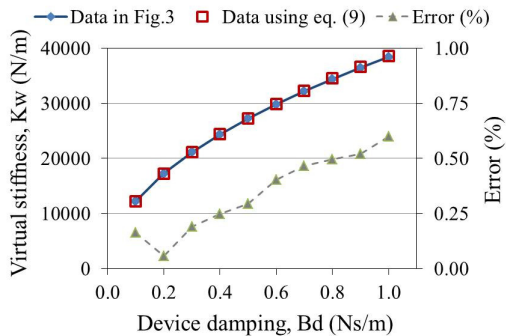
식 (9)로 계산된 가상 스프링 (Kw)와 시뮬레이션 결과를 비교하여 (9)의 타당성을 살펴본다. 가상 스프링 상수 (Kw)와 샘플링 주기 (T)와의 관계를 (9)와 시뮬레이션 결과인 Table 1과 비교하면 Fig. 5와 같다. 상대오차의 최대값은 2.63 %, 평균값은 1.12 %이다. 샘플링 주기 0.01 초에서 시뮬레이션에 의한 가상 스프링 상수 (Kw)는 380 N/m 이고, (9)에 의한 계산 값은 370 N/m이다. 시뮬레이션에서의 가상 스프링 상수의 분해능이 10 N/m임을 감안하면 비록 상대오차는 2.63%로 이지만 실제 값의 측면에서는 차이가 거의 없으며 측정오차 범위 내이다.

가상 스프링 상수 (Kw)와 햅틱 장치의 댐핑 상수 (Bd)와의 관계인 Fig. 3과 (9)의 결과를 비교하면 Fig. 6과 같다. 상대오차의 최대값은 0.6%이며, 평균값은 0.34%이다. 댐핑 상수가 커지면서 오차가 증가하지만, 1%미만의 오차이다.

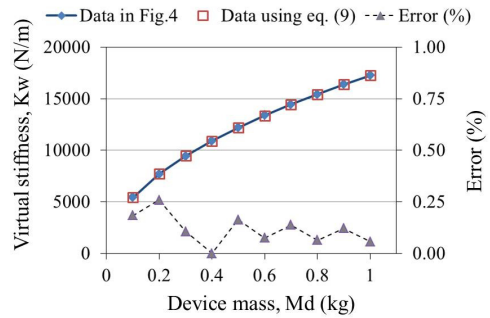
또한 가상 스프링 상수 (Kw)와 햅틱 장치의 질량 (Md)와의 관계를 Fig. 4와 (9)의 결과를 비교하면 Fig. 7과 같다. 상대오차의 최대값은 0.26%이며, 평균값은 0.12%이다. 시뮬레이션 결과와 거의 같다.



[Fig. 5] Comparison between data in Table 1 and Data using eq. (9). Md=0.5 kg, Bd=0.1 Ns/m.



[Fig. 6] Comparison between data in Table 2 and Data using eq. (9). T=1 kHz, Md=0.5 kg.



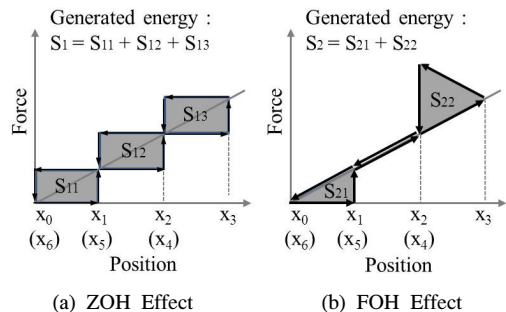
[Fig. 7] Comparison between data in Table 4 and Data using eq. (9). T=1 kHz, Bd=0.1 Ns/m.

앞의 Figs. 5-7의 결과를 종합하면, 30개 데이터에 대한 전체 상대 오차의 평균값이 0.53%일 정도로, 관계식 (9)가 가상 스프링 상수 (Kw), 샘플링 주기 (T), 햅틱 장치의 질량 (Md), 댐핑 상수 (Bd)와의 관계를 비교적 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

햅틱 시스템에서 일차홀드 (FOH)를 이용하여 샘플-홀드를 하는 경우에 햅틱 장치의 질량 (Md), 댐핑 상수 (Bd)와 시스템의 안정성을 유지하기 위한 가상 벽의 스프링 상수 (Kw)와의 관계를 시뮬레이션을 통해 해석한다.

샘플-홀드 과정에서 발생하는 에너지가 햅틱 시스템을 불안정하게 만든다. 정속으로 가상 벽과 상호작용하는 경우를 예로 들어보자. 이 경우 Fig. 8과 같이 일차홀드 방식을 이용하는 경우가 영차홀드 방식을 이용하는 경우보다 샘플-홀드 과정에서 발생하는 에너지가 더 작다. ( $S_1 > S_2$ ) 여기서  $X_0$ , ( $X_6$ )가 가상 벽의 외벽 위치이고  $X_1$  -  $X_5$ 은 가상 벽 안쪽으로 침투된 깊이이며, ( $X_i$ )는 가상 벽에서 빠져나오는 방향을 의미한다. 발생한 에너지가 작은 만큼, 안정적으로 더 큰 가상 스프링의 구현이 가능하며, 이것이 시뮬레이션을 통해 검증되었다.



[Fig. 8] Examples of the generated energy by ZOH and FOH effect respectively.

영차홀드 (ZOH)를 이용하는 경우에는 햅틱 장치의 질량 (Md)가 가상 스프링 상수 (Kw)와 관계가 없다. 그러나 일차홀드 (FOH)를 이용하는 경우에는 가상 스프링 상수 (Kw)가 햅틱 장치의 질량 (Md)의 제곱근에 비례한다. 또한 가상 스프링 상수 (Kw)가 햅틱 장치의 댐핑 상수 (Bd)의 제곱근에 비례한다. 따라서 가상 스프링 상수 (Kw)와 샘플링 주기 (T), 햅틱 장치의 질량 (Md), 댐핑 상수 (Bd)와의 관계는  $K_w \leq 1.611M_d^{0.50} B_d^{0.50} T^{-1.51}$  와 같다. 그리고 시뮬레이션 결과와 비교한 결과, 상대 오차가 평균 0.53%로 매우 작으므로 관계식이 타당함을 알 수 있다.

## References

- [1] H-S. Kim, S-J. Lee, and B-W. Kim, "A study on the multi-sensory usability evaluation of haptic device in vehicle," Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society, vol. 13, no. 11, pp. 4968-4974, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.11.4968>
- [2] J. E. Colgate and G. Schenkel, "Passivity of a class of sampled-data systems: Application to Haptic Interfaces," Journal of Robotic Systems, vol.14, no. 1, pp.37 - 47, 1997.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199701\)14:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199701)14:1<37::AID-ROB4>3.0.CO;2-V)
- [3] J. J. Abbott and A. M. Okamura, "Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity," IEEE Trans. Robotics, vol. 21, no. 5, pp. 952- 964, Oct. 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2005.851377>
- [4] N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli, and J. K. Salisbury, "Stability of haptic rendering: discretization, quantization, time delay, and coulomb effects," IEEE Trans. on Robotics, vol. 22, no. 2, pp. 256 - 268, Apr. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2005.862487>
- [5] J. J. Gil, A. Avello, A. Rubio, and J. Florez, "Stability analysis of a 1 DOF haptic interface using the Routh-Hurwitz criterion," IEEE Trans. on control systems technology, vol. 12, no. 4, pp. 583 - 588, July 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2004.825134>
- [6] M. H. Lee and D. Y. Lee, "Stability of haptic interface using nonlinear virtual coupling," Proc. of the 2003

IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4, Washington, D.C., Oct. 5-8, pp. 3420 - 3424, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244418>

- [7] K. Lee, "Effect on data-hold methods on stability of haptic system," Journal of Institute of Convergence Technology, vol. 2, no. 2, pp. 35-39, 2012.

이 경 노(Kyungno Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 연세대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 1998년 2월 : KAIST 기계공학과 졸업 (석사)
- 2007년 2월 : KAIST 기계공학과 졸업 (박사)
- 2008년 3월 ~ 2012년 8월 : 삼성전기 수석연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국고통대학교 조교수

<관심분야>

가상현실, 햅틱 인터페이스, 원격제어