< 논문 >

나노 스케일 가상환경에서의 나노-원격 조작의 임피던스 스케일링에 관한 연구

김 성 관†

(2006 년 3 월 6 일 접수, 2006 년 9 월 3 일 심사완료)

A Study on the Impedance Scaled Tele-Nanomanipulation in a Nanoscale Virtual Environment

Sung-Gaun Kim

Key Words : Haptic Interfaces(햅틱), Scaled Teleoperation Control(원격제어), Nanotechnology(나노기술)

Abstract

In a haptic interface system with a nanoscale virtual environment (NVE) using an atomic force microscope (AFM), impedance scaling is important. In order to explicitly derive the relationship between performance and impedance scaling factors, a nanoscale virtual coupling (NSVC) concept and a selection method of scaling factors of velocity (or position) and force are introduced. An available scaling factor region is represented based on Llewellyn's absolute stability criteria and the physical limitation of the haptic device. Experiments have been performed for tele-nanomanipulation tasks such as positioning, indenting and nanolithography with available force scaling factor in the NVE.

1. 서 론

'차세대 산업혁명'으로 불리우는 나노기술(NT)에서 나노 스케일 구동 및 제어를 다루는 나노로보틱스 기술은 나노 단위의 연구에 핵심이 되는 기반 기술이다. 특히 나노 메니퓰레이터를 통한 나노 스케일 물체의 정확한 구동 및 제어는 나노 구조물 제작/변형/합성, DNA 조작, 양자 소자 개발, 나노 기계, 새로운 센서개발, 테라 바이트 메모리 분자 조작 등 그 응용분야가 매우 크다.[1]

이러한 나노스케일 작업시 사용자가 직접 나노스케일 세계에 접근하기 어려운 단점을 보완하고, 신뢰성 있는 조작을 위하여 최근에는 시각, 촉각, 역감과 같은 인간의 감성으로 이루어진 햅틱 인터페이스를 이용하고 있다. 즉 매크로스케일인 인간의 동작이나 조작을 감지하여 이를 나노 스케일의 원격-나노조작에 구현하려는 노력들이 활발하게 진행되고 있다.[2-6]

AFM(Atomic Force Microscope)을 나노 메뉴퓰레이터로 이용할 때, 나노 조작시 실시간 시각 피드백을 받을 수 없다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 최근 나노스케일 가상환경을 구현하여 이용하는 연구가 진행되고 있다.[6-8]

원격제어자의 매크로스케일과 실제 작업이 이루어지는 나노스케일 가상환경과는 길이차원의 차이가 대단히 커서 서로 물리적 지배 방정식이 상이하다. 그러므로, 매크로-나노 햅틱 인터페이스시에 나노스케일에서의 힘 반향감을 매크로 스케일의 원격조작자에게 느끼게 해 줄 때 임피던스 스케일링(Impedance Scaling)은 어렵고 중요

† 책임저자, 회원, 공주대학교 기계자동차공학부
E-mail : kimsg@kongju.ac.kr
TEL : (041)850-0611 FAX : (041)854-1449

한 문제이다.[9] 그런데 매크로-나노 원격 조작시 요구되는 안정하고 효율적인 임피던스 스케일링에 관한 체계적인 연구가 부족하다. 또한 나노스케일 가상환경과 연계된 실험은 미흡한 실정이다.

나노스케일 가상환경에서의 작업(예,태핑모드에서의 AFM 작업, AFM 을 이용한 나노 조작 및 세포조작 등)들은 일반적인 가상환경에서의 딱딱한 접촉과는 달리, 매우 높은 수준의 반향힘 재현이 요구된다.[10~12] 이러한 힘 반향감 성능 지수를 위하여 본 논문에서는 NSVC(nano scale virtual coupling)과 *Z-width*[13] 개념을 도입한다. 그리고 나노스케일 가상환경의 효과적인 힘반향과 안정성이 보장된 임피던스 스케일링 선정 범위를 제안한다. 또한 *Omega*® 햅틱장치와 Carnegie Mellon 대학의 Nanorobotics 실험실에서 구축한 나노스케일 가상환경을 이용하여 실험을 수행한다.

2. 원격-나노 메니퓰레이션

2.1 시스템 개요

Fig. 1 은 나노-원격조작을 위한 전체시스템을 2 포트 네트워크모델로[14~16] 표현한 그림으로, 사람, 햅틱 인터페이스, 나노스케일 가상환경으로 구성되어 있다.

여기서 원격조작자(사람)는 전체 시스템의 불안정을 인위적으로 야기하지 않는다고 가정할 수 있다. 이는 Hogan 의 실험을 근거로 하여 볼 때 타당한 가정이다.[17]

Fig. 1 에서 나타낸 바와 같이, 햅틱 인터페이스는 햅틱장치와 NSVC 로 이루어져 있다. 나노스케일 가상환경의 접촉 표면과 *Omega*® 햅틱장치는 NSVC 와 Fig. 2 에 나타난 것처럼 연계되어 있다. 여기서 v_c^*는 햅틱장치에서의 출력이고, f_c^*는 햅틱 장치로의 입력이다. 이 때 '*' 는 이산 파라미터를 나타낸다. 또한 NVE 는 임피던스 디스플레이로써, 위치(혹은 속도)가 입력이고, 힘이 출력이다. *Omega*® 햅틱 장치는 delta 병렬로봇 매커니즘으로 구성되어 있는 3 자유도 장비로써, 그 작업영역은 88mm 직사면체이고, 최대 반력은 20N 정도이다.

나노스케일 가상환경은 AFM 과 나노표면과의 상호반응을 모사하기 위하여 개발 되었으며, Fig. 3 에 나타나 있다. 여기서, AFM 팁은 구로 모사되어 있고, 구 위의 화살표는 팁에 작용하는 힘의 방향과 크기를 나타낸다. 또한 cantilever 의 변위와 나노 표면을 모사 하였다. 선형 굽힘 빔 모델이 AFM 프로브 모델링에 시용되었으며, 나노 샘플 표면은 스플라인(spline)을 이용하여 모델링 하였다. AFM 팁과 나노 표면과의 상호 작용 힘을 모델링 하기 위하여, 접촉 모델은 MD (Maugis-Dugdale) 접촉모델을 사용하였고, 비접촉 나노 힘(반데르발스힘과 모세관 힘 등) 을 모델링 하였다[7] (Fig. 4 참조). AFM 팁이 나노 샘플에 접근해 감에 따라서 비접촉력에서 접촉력으로 천이되는 과정이 Fig. 4(a)-(d)에 나타나 있다.

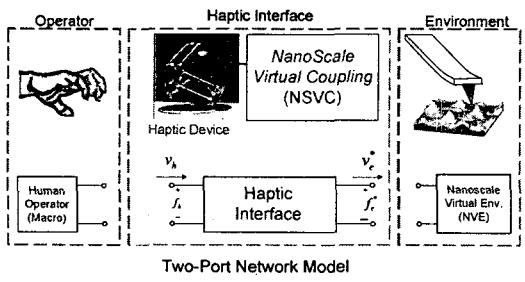

Fig. 1 Tele-nanomanipulation overall system as a two-port network model

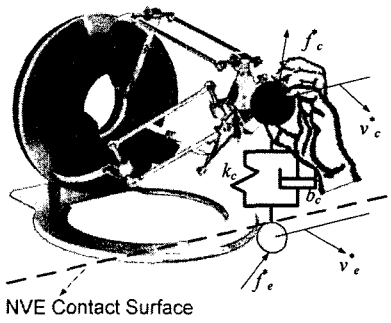

Fig. 2 Nano scale virtual coupling (NSVC) – spring and damper model

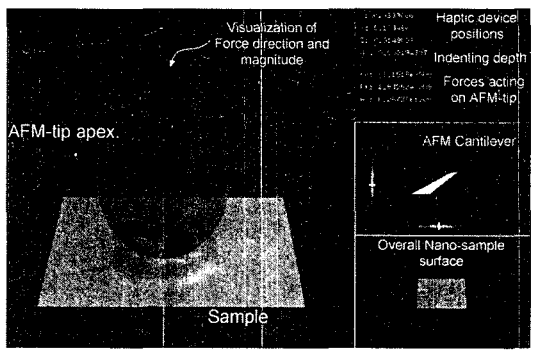

Fig. 3 Nanoscale virtual environment (NVE) [7]

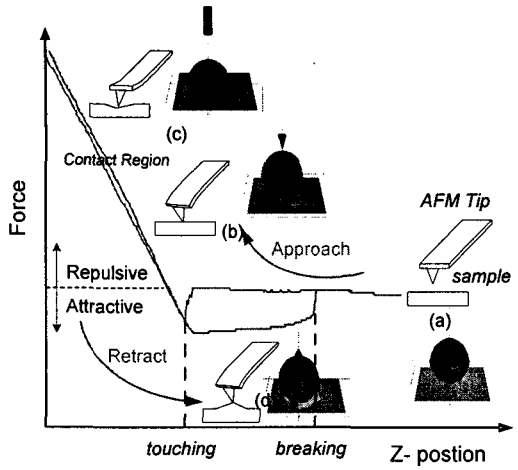

Fig. 4 Non-contact and contact MD force models in the NVE

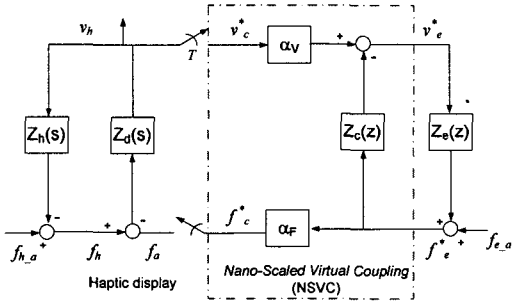

Fig. 5 Tele-nanomanipulation control architecture

2.2 원격-나노 제어

Fig. 5 는 원격-나노 조작을 위한 전체 제어 구성도이다. 여기서 햅틱 인터페이스는 2 포트 네트워크로 모델링 되었으며, 조작자와 가상환경의 동역학은 임피던스 $Z_h(s)$, $Z_e(z)$ 와 외력 f_{h_a} 와 f_{e_a} 로 다음 식과 같다.[18]

$$f_h = f_{h_a} - Z_h(s)v_h$$
$$f_e^* = f_{e_a}^* + Z_e(z)v_e^* \quad (1)$$

여기서, v_h 와 v_e^* 는 조작자와 나노메뉴퓰레이터의 속도를 각각 나타내고, f_h 는 조작자에 의한 햅틱장비에 가해지는 힘과 f_e^* 는 나노스케일 가상환경에서 AFM 팁으로 가해지는 힘을 나타낸다.

Omega® 햅틱장치의 동역학은 Tustin 방법을 사용하여 다음과 같은 임피던스로 모델링을 할 수 있다.[14]

$$Z_d(z) = (ms+b)\Big|_{s\to\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)} \quad (2)$$

여기서, aliasing 효과는 무시할 수 있고, 샘플러는 $1/T$ 의 정적게인으로 가정할 수 있다. 따라서 이산화된 하이브리드 행렬은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -v_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & ZOH(z) \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ f_c^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, zero order holder 는 다음과 같이 표현된다.

$$ZOH(z) = \frac{1}{2}\frac{(z+1)}{z}$$

또한, 햅틱 장치와 나노스케일 가상환경과의 속도(위치) 및 힘의 정보는 아래와 같다.

$$v_e^* = \alpha_v v_c^* - \frac{1}{Z_c(Z)} f_e^*$$
$$f_c^* = \alpha_F f_e^* \quad (4)$$

여기서, α_v 와 α_F 는 각각 속도와 힘의 스케일링 계수를 나타낸다. Z_c 는 virtual coupling 임피던스를 나타내고, 아래와 같이 모델링 될 수 있다.

$$Z_c(z) = \left(b_c + \frac{k_c}{s}\right)\Big|_{s\to\left(\frac{z-1}{Tz}\right)} \quad (5)$$

따라서, NSVC 가 포함된 전체 하이브리드 행렬은 아래의 식과 같이 유도 된다.

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -v_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & \alpha_F \cdot ZOH(z) \\ -\alpha_v & \dfrac{1}{Z_c(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ f_e^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 임피던스 스케일링 계수선정

3.1 허용 임피던스 범위

원격작업자(teleoperator) 없이 마치 직접적으로 작업할 때의 느낌을 조작자에게 전달할 수 있는 정도를 transparency 혹은 fidelity 라고 정의한다.[12] 이는 햅틱 인터페이스시의 성능을 나타내는 개념이기도 하다. Colgate 와 Brown[13]은 이러한 성능지수를 나타내기 위하여, 임피던스 범위를 *Z-width* 라는 개념으로 도입하였다. 따라서, 본 논문에서도 나노스케일 가상환경과 햅틱 인

터페이스 작업시, 원격 조작자에게 전달되는 임피던스 (Z_t)의 허용 상하범위를 성능지수로 한다.

Fig. 5 에서 나노스케일 가상환경의 포트를 단락 시키면($f_e^* = Z_e(z)v_e^*$), 가상환경의 임피던스 (Z_e)는 다음과 같은 임피던스(Z_t)로 전달된다.

$$Z_t = Z_d(z) + \frac{\alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) Z_e}{Z_c(z) + Z_e} \qquad (7)$$

Z-width 의 허용 하향 범위는 $Z_e \to 0$ 일 경우,(즉, $f_e^* = 0$, short circuit) 다음과 같이 유도 할 수 있다.

$$Z_{t,\min} = Z_d(z) \qquad (8)$$

또한 *Z-width* 의 허용 상향 범위는 $Z_e \to \infty$ 일 경우,(즉, $v_e^* = 0$, open circuit) 다음과 같이 유도 할 수 있다.

$$Z_{t,\max} = Z_d(z) + \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) \qquad (9)$$

따라서, *Z-width* 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Z_{t,\max} = Z_{t,\min} + \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) \qquad (10)$$

식 (10)에서 *Z-width* 는 임피던스 스케일링 계수($\alpha_v \alpha_F$) 와 버츄얼 커플링 임피던스 ($Z_c(z)$)로 표현 된다. 따라서 NSVC 는 다음과 같이 정의 된다.

$$NSVC = \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \qquad (11)$$

사람의 인지 범위에 대해, transparency 의 성능을 향상 시키기 위해서는 햅틱인터페이스시에 넓은 임피던스 범위(*Z-width*)를 재현할 수 있어야 한다. 이러한 *Z-width* 를 증가하기 위해서는 식 (10)에서 나타난 바와 같이, 임피던스 스케일링 계수 ($\alpha_v \alpha_F$)크게 하거나, 버츄얼 커플링 임피던스 ($Z_c(z)$)를 크게 하면 된다. 만약 햅틱인터페이스가 절대안정(absolutely stable) 하면, *Z-width* 는 구현 가능한 상하향 범위의 임피던스 영역을 나타낸다.[13] 다음 장에서 임피던스 스케일 계수 선정에 관하여 살펴 본다.

3.2 임피던스 스케일링 계수선정

Fig. 6 은 햅틱장치, 비쥬얼 디스플레이와 나노

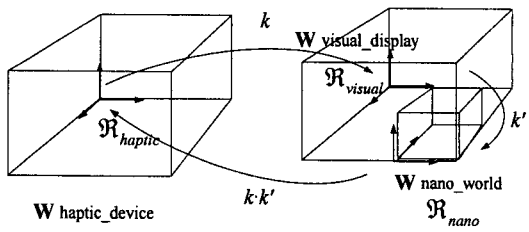

Fig. 6 The workspace mapping haptic device, visual display and nano world

스케일 각각의 작업영역을 도식화 한 것이다. 단순화 하기 위하여, 직육면체 작업영역으로의 매핑으로 가정한다. 이는 AFM 장비에서 3 방향의 직진운동형 스테이지의 모션과, 3 자유도의 햅틱 장치의 운동을 고려 하여 볼 때, 타당한 가정이다. Fig. 6 에서 보듯이 각각의 작업영역에서의 매핑은 기하학적(geometrical) 정보의 매핑임을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 기하학적 매핑을 쉽게 서술하기 위하여 특성길이비 (*characteristic length ratio*) k 개념을 다음과 같이 도입한다.

$$\frac{\mathbf{W}_{Haptic_device}}{\mathbf{W}_{Visual_display}} = \left(\frac{\ell_{Haptic_device}}{\ell_{Visual_display}} \right)^3 = k^3 \qquad (12)$$

비슷한 방법으로 비쥬얼 디스플레이와 나노 world 작업영역 사이의 매핑을 서술하기 위하여, k'를 다음과 같이 정의 한다.

$$k'^3 = \frac{\mathbf{W}_{Visual_display}}{\mathbf{W}_{Nano_world}} \qquad (13)$$

만약 나노스케일 가상환경의 비쥬얼 디스플레이가 실제 나노 작업영역의 환경을 일정 계수 $k \cdot k'$로 확대한 것이면(Fig. 6 참조), 매크로와 나노 환경 사이의 속도(혹은 위치) 스케일링 계수는 다음과 같이 표현 할 수 있다.[19]

$$\alpha_v = \frac{1}{k \cdot k'} \qquad (14)$$

따라서, 속도(혹은 위치) 스케일 계수선정은 식 (14)와 같이 할 수 있다. 이제 임피던스 스케일링 계수 ($\alpha_v \alpha_F$) 선정 문제는 힘 스케일링 계수(α_F) 선정 문제로 단순화 된다. 그러므로, 햅틱 인터페이스의 성능지수인 *Z-width* 를 증가하기 위하여, 힘 스케일링 계수를 증가 시키면 된다고

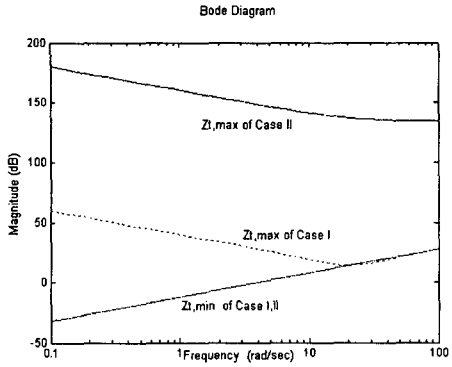

Fig. 7 *Z-width* with varying force scaling factor

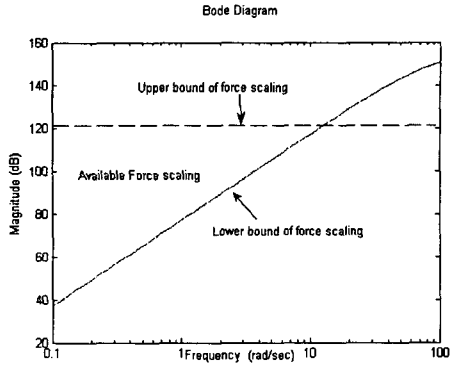

Fig. 8 Available region of force scaling factor based on absolute stability criteria and the physical limitation of the haptic device

생각 할 수 있다. 그러나, 재현 할 수 있는 햅틱 장비의 한계성 및 햅틱 인터페이스의 안정성 문제 때문에 그 한계가 있다.[14]

Goldfarb[20]은 차원해석법을 통하여 힘 스케일링 계수(α_F) 선정하였다. 높은 표면 점착, 즉, 큰 AFM 팁의 반경과 높은 점착에너지 일 경우는 $\alpha_F = 1/\alpha_v$ (Case I: Fig. 7 점선)를, 작은 점착력일 경우는 $\alpha_F = 1/\alpha_v^2$ (Case II: Fig. 7 실선)으로 선정할 때 더 좋은 성능이 나타남을 보였다.

Fig. 7 에 나타난 바와 같이, *Z-width* 는 임피던스 스케일링 계수에 비례함을 확인 할 수 있다. 나노 샘플의 경도나 작업에 따라서 이러한 힘 스케일링 계수(α_F) 다르게 선정 하여야 한다.

본 논문에서는 힘 스케일링 계수의 상하향 범위를 선정하기 위하여, Llewellyn's stability criteria [14]를 사용한다. 2-포트 네트워크 시스템의 이미턴스 행렬(Immittance matrix) **P** 는 식 (6)의 하이브리드 행렬이 될 수 있다. 또한 속도 스케일링 계수 및 버츄얼 커플링의 모든 게인은 고정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

이미턴스 행렬 **P** 는 다음의 조건을 만족할 때, 절대안정(*absolutely stable*) 하다.

$$\begin{aligned} &\mathrm{Re}(p_{11}) \geq 0 \\ &2\mathrm{Re}(p_{11})\mathrm{Re}(p_{22}) \geq |p_{12}p_{21}| + \mathrm{Re}(p_{12}p_{21}) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} Z_d(z) + \gamma \cdot ZOH(z) & \alpha_F \cdot ZOH(z) \\ -\alpha_v & \dfrac{1}{Z_c(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}$$

또한, 햅틱장치의 재현 반력의 한계성을 고려하기 위하여 다음과 같이 고려한다.

$$\alpha_F \leq \varepsilon \cdot |\hat{f}_a| / |\hat{f}_e| \quad (16)$$

여기서, $\hat{f}_a$ 와 $\hat{f}_e$ 는 햅틱장치와 나노스케일 가상환경의 최대 Cartesian forces 를 각각 나타내고, ε $(0 < \varepsilon < 1)$ 는 햅틱장치의 safety-factor 이다. 식 (15)와 (16)으로 부터 안정성이 보장된 힘 스케일링 계수의 범위를 Fig. 8 에 나타내었다.

4. 실 험

Fig. 9 는 Table 1 의 나노샘플들에 대하여 AFM 팁을 접근하는 실험을 나타내고, 이는 나노 인덴팅 등과 같은 나노 스케일 작업이다. Fig. 10 은 딱딱한 표면(silicon oxide sample)에 대한 실험 결과를 나타내고 있으며, 점선은 실선에 비교하여 10 배 작은 힘 스케일링 계수(α_F)가 사용된 결과이다. 비슷한 AFM 팁의 궤적에도 불구하고, 반향되는 힘의 크기가 다른 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11 은 부드러운 표면(polystyrene sample)에 대한 실험결과를 나타낸다. 이는 같은 임피던스 스케일링 계수일 경우에도 각 샘플의 물성에 따라서 햅틱 인터페이스에서 재현되는 힘이 달라짐을 알 수 있다. 비접촉 반향력은 접촉 반향력에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에, 원격조작자가 비접촉 힘을 느끼기 어려웠다.

만약 Fig. 8 의 안정한 힘 스케일링 계수영역에서 좀더 큰 값을 선정한다면, 소프트한 나노 표면에서 보다 큰 반향력을 느낄 수 있을 것이다. 따라서, 작업 및 재료의 물성에 따라서 에 따라서 Fig. 8 의 가능한 힘 스케일링 계수영역에서 선정하여야 한다.

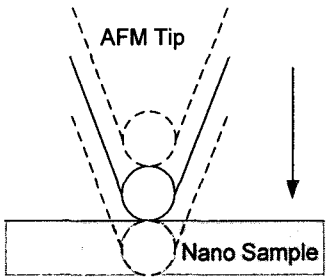

Fig. 9 Nanomanipulation tasks

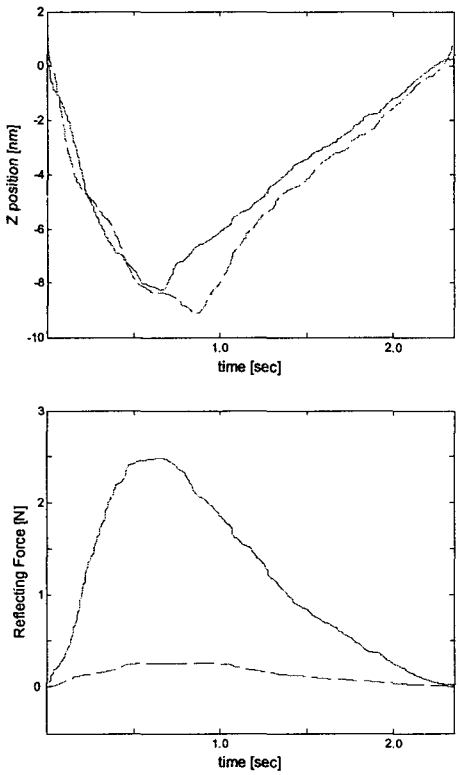

Fig. 10 Contact on a silicon oxide sample in a NVE with the haptic interface (bold line - α_F ; dash line - $0.1\,\alpha_F$)

5. 결 론

실제 작업이 이루어지는 나노스케일과 원격조작이 이루어지는 매크로스케일 사이의 매우 큰 길이차원의 차이는 나노스케일 힘 반향감을 매크로 환경의 원격조작자에게 효과적으로 느끼게 하기 어렵다. 즉 매크로-나노 햅틱인터페이스시에 임피던스 스케일링은 어렵지만 고려해야 할 중요한 문제이다.

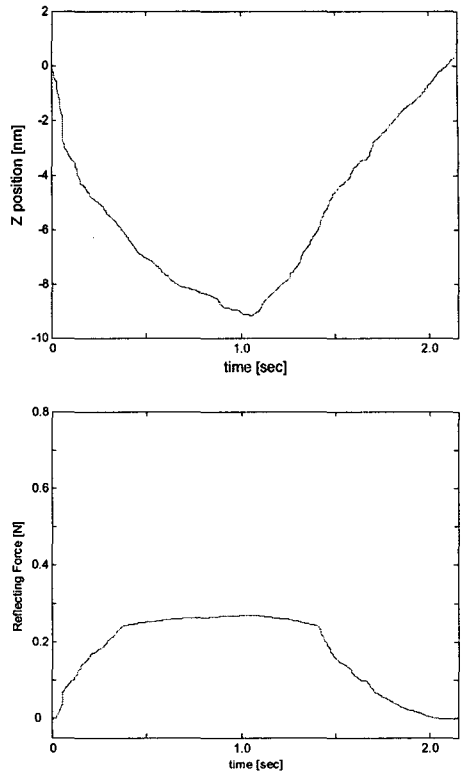

Fig. 11 Contact on a polystyrene sample in a NVE with the haptic interface

Table 1 Sampled Material Properties [21]

Material	YOUNG'S MODULUS (GPA)	Surface ENERGY (J/M^2)	Poisson's Ratio
Silicon Oxide	70	0.2	0.27
Polystyrene	2	0.066	0.4

이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 나노스케일 버츄얼 커플링의 개념을 도입하였고, 햅틱 인터페이스 성능지수로 *Z-width* 개념을 이용하였다. 또한 나노스케일 가상환경의 효과적인 힘반향과 안정성을 보장하는 임피던스 스케일링 선정 범위를 Llewellyn's absolute stability 기준을 이용하여 선정하였다. 또한 나노 샘플의 물성과 힘 스케일링 계수에 따른 실험을 통하여 나노 작업시에 반향되는 힘을 살펴 보았다. 향후 다양한 나노 작업 실험에 본 논문의 결과를 이용하면 안정적이고 신뢰성이 보장된 나노-원격제어를 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수 지원 및 공주대학교 자체학술지원에 의하여 연구 되었습니다.

NVE 구축과 연구에 도움을 준 CMU Nanorobotics LAB. 구성원들에게 감사합니다.

참고문헌

(1) Ahn, K-H., 2003, "Nanotechnology," *Journal of the KSME*, Vol. 43, No. 3, pp. 32~38.

(2) Sitti, M. and Hashimoto, H., 2003, "Teleoperated Touch Feedback from the Surfaces at the Nanoscale: Modeling and Experiments," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 287~298.

(3) Hollis, R. L., Salcudean, S. and Abraham, D. W., 1990, "Toward a Tele-Nanorobotic Manipulation System with Atomic Scale Force Feedback and Motion Resolution," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 115~119

(4) Falvo, M. *et al.*, 1995, "The NanoManipulator: A Teleoperator for Manipulating Materials at the Nanometer Scale," in *Proc. of the Int. Symp. Science and Technology of Atomically Engineered Materials*, Richmond, VA, pp. 579~586.

(5) Guthold, M. *et al.*, 2000, "Controlled Manipulation of Molecular Samples with the NanoManipulator," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 189~198.

(6) Vogl, W., Sitti, M., Ehrenstrasser, M. and Zäh, M.F., 2004, "Augmented Reality User Interface for Nanomanipulation using Atomic Force Microscopes," in *Proc. of the EuroHaptics 2004*, Technische Universitaet in Munich, Germany.

(7) Vogl, W., 2003, *Telepresence at the Nano Scale: Augmented Reality Interface for Scanning Probe Microscopes*, Tech. Univ. of Munich, MSc Diploma Thesis.

(8) Li, G., Xi, N., Yu, M. and Fung, W.-K., 2004, "Development of Augmented Reality System for AFM-Based Nanomanipulation," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 358~365.

(9) Hwang, D. Y., Blake Hannaford, Choi, H. R., 2001, "Identification of Feasible Scaled Teleoperation Region Based on Scaling Factors and Sampling Rates," *Transactions of the KSME*, Vol. 15, No. 1.

(10) Nain, A. S., Goldman, D. H. and Sitti, M., 2004, "Three-Dimensional Nanoscale Manipulation and Manufacturing Using Proximal Probes: Controlled Pulling of Polymer Micro/Nanofibers," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 04)*, Vol. 1, pp. 434~439.

(11) Li, G., Xi, N., Yu, M., Salem, F., Wang, D. and Li, J., 2003, "Manipulation of Living Cells by Atomic Force Microscopy," in *Proc. of the IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 862~867.

(12) Cavusoglu, M.C., Sherman, A. and Tendick, F., 2002, "Design of Bilateral Teleoperation Controllers for Haptic Exploration and Telemanipulation of Soft Environments," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 641~647.

(13) Colgate J. E., and Brown, J., 1994, "Factors Affecting the Width of a Haptic Display," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 94)*, IEEE CS Press, pp. 3205~3210.

(14) Adams, R. J. and Hannaford, B., 1999, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3, pp. 465~474.

(15) Miller, B. E., Colgate, J. E., and Freeman, R. A., 2000, "Guaranteed Stability of Haptic Systems with Nonlinear Virtual Environments," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, pp. 712~719.

(16) Ryu, J.-H., Kim, Y.-S. and Hannaford, B., 2004, "Sampled- and Continuous – Time Passivity and Stability of Virtual Environments," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 20, No. 4, pp. 772~776.

(17) Hogan, N., 1989, "Controlling Impedance at the Man/Machine Interface," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol. 3, Scottsdale, AZ, IEEE CS Press, pp. 1626~1631.

(18) Salcudean, S. E., *et al.*, 1999, "Bilateral Matched Impedance Teleoperation with Application to Excavator Control," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 6, pp. 29~37.

(19) Colgate, J. E., 1993, "Robust Impedance Shaping Telemanipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 374~384.

(20) Goldfarb, M., 1998, "Dimensional Analysis and Selective Distortion in Scaled Bilateral Telemanipulation," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 98)*, Leuven, Belgium, pp.1609~1641.

(21) Whitesides, Ostuni, G., E., Takayama, S., Jiang, X. and Ingber, D., 2001, "Soft Lithography in Biology and Biochemistry," *Annual Review of Biomedical Engineering*, Vol. 3, pp. 335~373.