

Nano-Laboratory 설계환경 조절에 관한 연구

이응석*, 염영일**

A Study on the Design of Nano-Laboratory for the Control of Environmental Parameters

Eung Suk Lee*, Young IL Youm**

ABSTRACT

To design and build a ultra-precision laboratory which has been required for high technology in many areas, the environmental parameters such as temperature, humidity, vibration and noise are controlled precisely. To absorb the outside vibration, particular concrete blocks were designed and set under the laboratory. The inside room temperature were controlled in local area within ± 0.3 C°. It was efficient to induce laminar flow in air conditioning system for the control of room temperature, humidity etc. The control conditions should be determined according to their specific purposes. Also, the control method will be different for their respective environmental conditions.

1. 서 론

지난 십수년간 모든 기계의 소형화 작업이 꾸준히 진행되어 왔으며, 이는 기계의 성능을 유지해야 한다면 결국 부품의 정밀도를 높여야 하는 문제로 귀착된다. 정밀도 문제는 부품의 정밀가공기술 뿐만 아니라, 정밀제어 및 측정까지를 모두 포함 할 것이다. 현재 반도체, 전자, 광학, 의학 및 통신 등 여러 산업분야에서 요구되는 정밀도는 Micrometer (μm , 10^{-6} m)급에서 0.1 - 100 Nanometer (nm, 10^{-9} m)급으로 감소되고 있으며, 우리나라가 경쟁력을 확보하고 있는 반도체 산업에서도 RAM의 직접도는 정밀도에 비례함은 익히 알려져있다. 영국, 미국 및 일본 등의 선진 각국에서는 수년전부터 Nano-Technology 연구를 국가 연구 project로 수행중에 있으며, 현재 Precision grinding, Diamond turning 등 초정밀 공작기계의 특정분야에서 적용중이다. 재료과학 등에서 분자 또는 원자레벨의 계측 및 제어를 위해서 필요로하는 Scanning

Tunnelling Microscopy, Atomic Force Microscopy 및 X-ray interferometer 등은 \AA (10^{-10} m) 급까지의 정밀도를 요구한다.

우리나라의 경우는 표준과학연구원, 일부업체 및 대학 등에서 소규모로 μm 급의 연구 및 장치제작을 수행하고 있지만 nm급의 연구는 아직활성화 되지않고있는 실정이다. 특히 앞서 언급한 nm급의 가공 및 측정 장비는 전량 수입에 의존하고 있으며, 이들 장비의 구입가격은 국내의 다른 생산품에 비하면 가히 천문학적으로 높은 것이 사실이다.

초정밀 연구는 실험장치의 열팽창, 진동 등을 제거하기위하여 기본적으로 온/습도 및 압력 등의 정밀 환경조절을 필요로 한다. 국내에서도 μm 급의 실험을 수행하기위한 정밀 환경제어실험실이 설치, 운영되고 있으나 Nano-Technology를 위한 실험실 환경 조절연구는 시도되지않았다. 본 연구는 Nano-Technology를위한 온/습도, 압력, 소음 및 진동 등의 환경요인 들을 정밀 제어하기위하여 필요한 실험실 (본문에서는 Nano-Laboratory 또는 Nano-Lab으로 부름)을 설계 및 건설하고 실험실 내부의 환경요인들을 정밀조절하는 연구를 수행하였다.

* 산업기계연구소 (RIST), 자동화연구본부

** 포항공과대학, 기계공학과

2. 실험실 환경조절 인자

Nano-Lab의 목적은 μm 부터 \AA 단위까지의 정밀측정을 가능하게 하는 것이다. 지난 십수년간 정밀전자, 광학 및 의공실험실 등에서 사용되어온 Clean Room (또는 White Room)의 용어는, 주로 실험실 내부의 먼지, 온도 조절에 관련된 공기의 흐름과 압력조절 등을 위한 것이었다. Nano-Technology를 가능하게 하는 실험실은 이들 인자 이외도 진동/소음 및 실험실 각부의 정밀 온도조절 등을 추가로 요구한다. Table 1은 정밀전자 산업 및 광학실험실 등을 위하여 추천되는 보통의 환경제어 인자들에 대한 국제규정의 한 예이다. 특별히 개별적으로 요구되는 Nano-Technology를 위해서는 이들 인자들의 재 정의와 필요한 인자들의 추가 및 가능한 정밀제어 등이 필요 할 것이다. 본 연구에서는 일반적인 Clean Room의 요구이외에 실험실 바닥의 진동을 흡수하기 위한 특수 콘크리트 설계와 제작, 실험실 각 지역온도 제어, 압력과 습도 조절 등에 관해 보고하였다. 또한, 소음 및 온도 등 외부 환경을 차단하기 위한 실험실 벽의 재질과 구조에 관해서도 기술하였다.

3. Nano-Laboratory 설계

3.1 실험실 전체구성

Nano-Lab은 Fig.1과같이 4개의 방으로 구성되었으며, 정밀환경제어가 가능한 주실험실, 실내온도 변화를 최소한으로 하기 위한 Air Lock과 Control Room 및 입구공간(Lobby)이다. 실험실 입구를 출입하기 위해서는 개인의 열쇠를 필요로 하며, 이것은 Clean Room 상태를 유지하기 위해 여러 사람의 출입을 통제하기 위한 것이다. 입구공간에서 실험자는 주실험실로 입실하기 위해 먼지방지옷을 착용 해야한다. 아래위가 연결된 옷, 신발덮개, Hood, 마스크, 장갑 등이 별도로 포장되어 보관되며, 8시간 사용후 세탁되어 재포장된다. 주실험실과 Control Room사이는 3중의 유리로 되어있어 실험지도자 및 참관인이 지켜볼 수 있게하였다. Control Room은 모니터링 시스템과 데이터 조절 및 보관을 위한 PC들이 놓여있다. 주실험실은 약간의 정압(positive pressure)으로 되어있어, 소형의 기기 및 실험자가 Air Lock를 통과시 먼지와 외부온도가 주실험실로 유입되는 것을 방지하였다. 본 실험실은 기존의 건물에 설치되었으므로 창문을 두지않았다.

Table 1 Recommended Environments for Type I Standards Laboratories

Environmental Parameters	Contents
Acoustic Noise	≤ 45 dB(decibels)
Dust Particles Count	$< 4 \times 10^5$ particles larger than $1 \mu\text{m}/\text{M}^3$ of room volume.
	$< 2 \times 10^6$ particles large than $0.5 \mu\text{m}/\text{M}^3$ of room volume.
	no particles lager than $50 \mu\text{m}$.
Air pressure	positive differential of 10 Pascal's, or 0.1 millibar, or 0.08 mmHg.
Relative Humidity	$\leq 45\%$ around a regulated temperature of 20°C .
Temperature	$20 \pm 0.3^\circ\text{C}$ at gauging point.
Vibration	$\leq 0.25 \mu\text{m}$ in displacement amplitude from 0.1Hz to 30 Hz
Lighting	1000 Lux at bench level or reading surface.

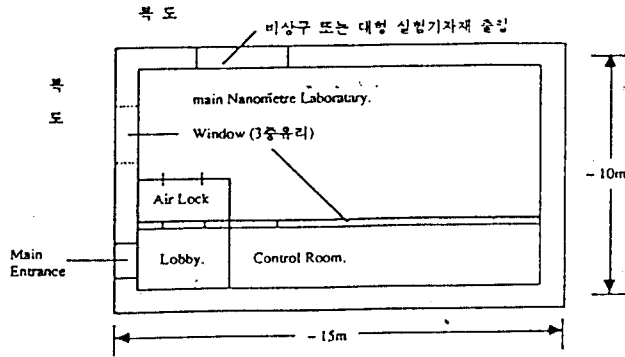


Fig. 1 General Layout of Nano-Laboratory

3.2 공기조화 장치

실험실은 두개의 필터가 장치된 천장으로부터 바닥 전체면적으로 층류(Laminar flow)로 공기가 이동된다. 두개의 필터는 천장 전체를 커버하고, 천장 전면에 구멍이 뚫린 방음 및 방열 타일로 구성되어있다.

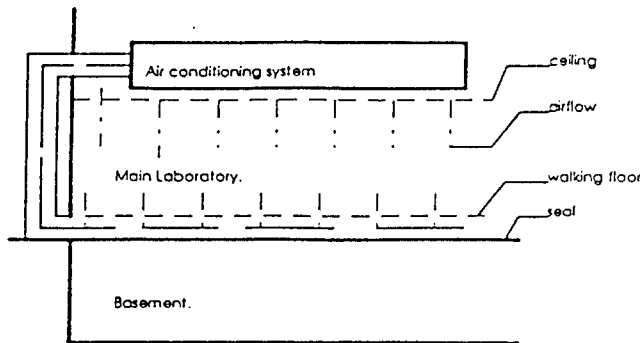


Fig. 2 Schematic Construction of the Laboratory

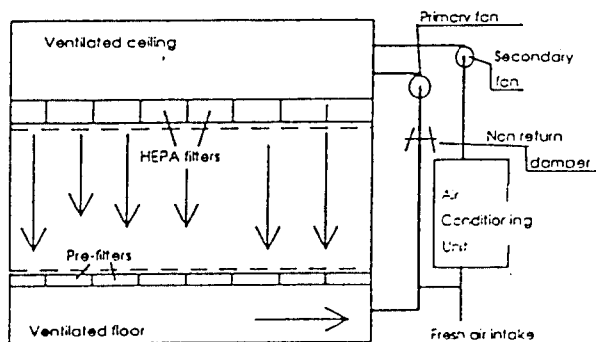


Fig. 3 Representation of Laminar Down-Flow Air Conditioning System

실험실의 바닥에도 Fig.2와같이 환기를 위하여 구멍이 뚫린 비닐타일로 되어있다. 이와같은 방법으로 조절가능한 공기온도 변화는 같은 높이에서는 0.05 C° 이하로 가능하였으나 실험실 전체는 0.3 C°정도 까지 조절되었다. 사용된 HEPA(High Efficiency Particulate Air filter)는 온/습도 조절과 먼지제거에 효과적으로 작용하였다. Fig.3에서 보여주는 층류공기 흐름 장치는 주요한 열원인 실험장치로부터 효과적으로 열을 제거하여 정밀한 온도조절을 가능하게하였으며, 또한 실험실 내부로부터 외부로의 먼지제거에도 효과적이었다. 공기조화 장치는 실험실의 온도 변화를 감지하여 자동적으로 동작한다. 수직의 아래방향으로(Ceiling-to-Floor) 흐르는 공기 흐름은 부분적인 난류가 형성되는 실험자 및 장치주위로 부터 가능한 층류흐름을 유지시키는데 효과적이었으며, 정밀 온/습도 제어와 먼지 제거에 필수적인 시스템으로 보인다. Fig.4는 Nano-Lab 공기조화 시스템의 구성도이다. 실험실로 유입되는 공기온도를 감지하는 센서는 일반적인 실험온도조건인 20 C°에서 냉각 또는 가열 장치를 가동시킨다. HEPA 필터 뒤에 장치된 가습장치는 상대습도 50% ±5에서 작동한다. 목재 받침대로 지지되는 HEPA 필터와 적은 구멍이 뚫린 천장구조는 공기의 흐름을 층류로 만드는데 효과적이였다. 바닥아래쪽의 공기 순환공간 (return box)으로는 실험실 외부로부터 항상 1/10의 새로운 공기가 유입되도록 하였으며, 이 비율은 변경시킬수 있도록 되어있다.

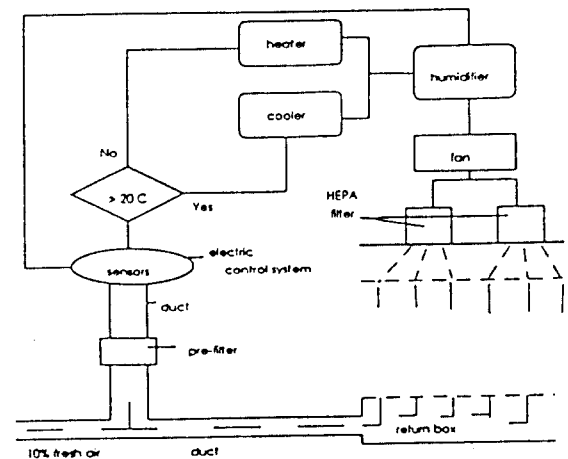
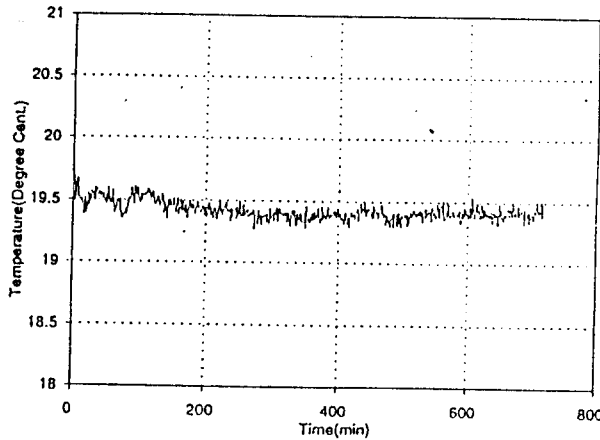
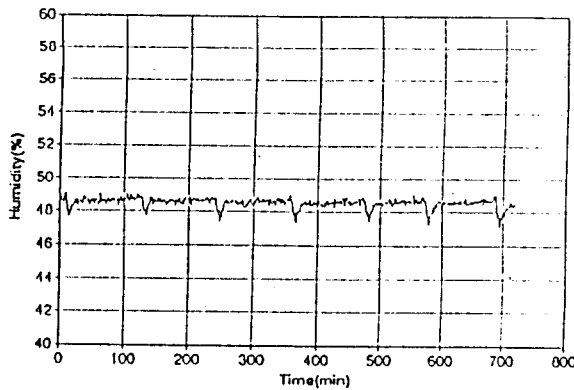


Fig. 4 Schematic Nanometer Laboratory Air Conditioning System

공기유입 입구의 예비 필터와 또한 전체공기 순환을 위하여, HEPA 뒤쪽에 팬(fan)이 장치되었다. 모든 공기 순환 덕터(duct)와 특히 온/습도 조절장치의 뒤쪽에 외부기상조건을 차단하도록 단열재로 감싸졌다. Fig 5는 12시간 동안 측정된 실험실 내부의 평균 온도 및 습도 조절 데이터이다.



(a) Mean temperature



(b) Relative humidity

Fig.5 Experimental data for mean temperature and relative humidity in the Nano-Laboratory

3.3 실험실 벽 구성

Nano-Lab의 벽, 바닥 및 천장의 모든 연결부분과 통로는 심각한 소음, 먼지 및 열원의 유입구가 될 것이다. 이러한 이유로 공기 순환 출입구를 제외한 실험실 주위의 모든 면을 일체로 밀봉하였다. 앞서 언급한 바와같이 본 연구에서 설계된 Nano-Lab은 기존 건물의 내부에 지어졌으므로 실험실의

한면을 제외하고는 모두 기존의 방 또는 통로와 접촉되었다. 따라서 Fig.6과같이 기존의 벽으로부터 단열을 위한 일정거리를 두고 이중의 비닐보드로 시공하였다. 한개의 비닐보드 두께는 1 mm 코팅을 포함하여 10 mm가 되고, 이중 비닐벽의 전체두께는 46 mm 이다. 각각의 비닐보드(크기 2.4m x 1.2m)는 바닥과 알루미늄 지지대로 고정되었고, 수축 방지와 먼지 및 공기 유입을 차단시키기위해 부드러운 고무로 접속시켰다.

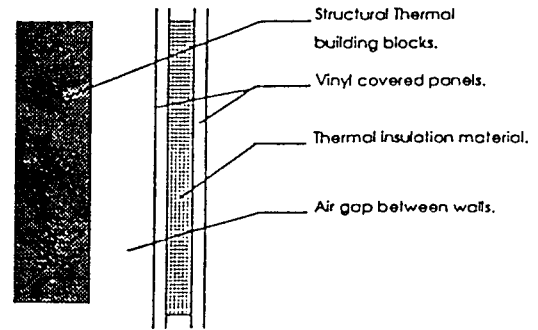


Fig.6 Construction of Laboratory Walls and Partitions

3.4 진동제어

Nanometer급의 측정을 위해 진동제어는 중요한 변수가된다. 실험실의 주요한 진동 환경은 바닥으로부터 전달되는 외부 진동과 실험자에 의한 내부진동을 들수있다. 실험자에 의한 내부진동과 실험장치를 분리시키기 위하여 본 실험실의 바닥은 실험자가 서있는 층과 장치가 놓인 층을 분리시키고, 실험장치는 외부진동을 제거하기위해 스프링으로 지지된 콘크리트 블록위에 설치되었다. 실험실의 지하실바닥에 설치된 실험장치 베이스인 보강(reinforced) 콘크리트 블

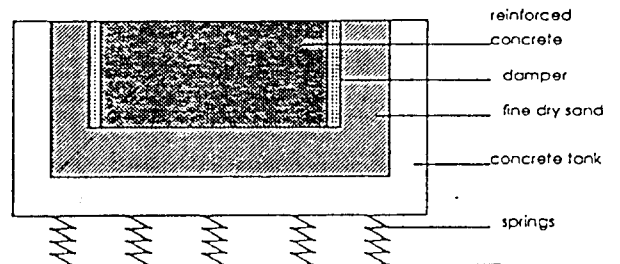


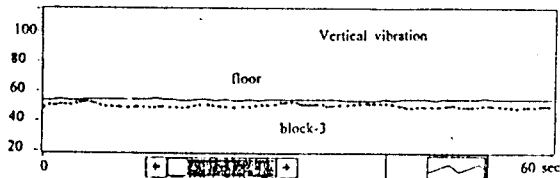
Fig.7 Schematic Construction of the Concrete Block

특은 Fig. 7과 비슷한 구조의 3개로 구성되었으며, 바닥에 모두 여러개의 스프링 셋트로 지지되어있다. 베이스 콘크리트 블록 1은 모두 40개의 스프링으로 지지하고, 1.6m x 0.9m 간격의 4개씩 한조로 병렬로 구성되었다. 또한 콘크리트 블록내부는 다른 종류의 재질로 채워 블록의 고유진동수를 바꿀 수 있도록 하였으며, 이것은 다른 외부진동에 대하여 보다 효과적인 감쇄를 얻기위함이다. 블록 2와 3은 각각 48개 및 24개의 스프링으로 지지되었다. 병렬로 연결된 스프링 상수 k 는 다음 식과같이 각 스프링 상수 ($k_1 \dots k_n$)의 합으로 계산되었다.

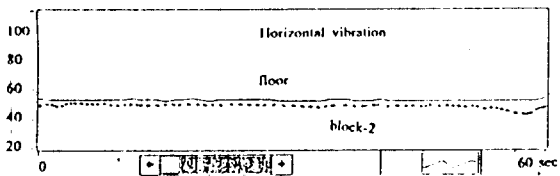
$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n = \sum_{i=1}^n k_i$$

Table 2는 사용된 베이스 콘크리트 블록의 사양이고, 스프링 및 Damping 상수와 고유진동수는 모두 블록의 수직방향의 값이다. Fig. 8은 베이스 콘크리트 블록의 수직 및 수평 외부진동을 실험실 바닥 진동과 비교한 것이다.

Fig. 9는 3개의 베이스 콘크리트 블록의 진동센서를 포함하는 실험실 전체의 환경 모니터링 시스템 구성도이다.



(a) Vertical vibration



(b) Horizontal vibration

Fig. 8 Experimental data of external vibration in floor(solid line) and blocks(dot line) for 1 minute in dB unit

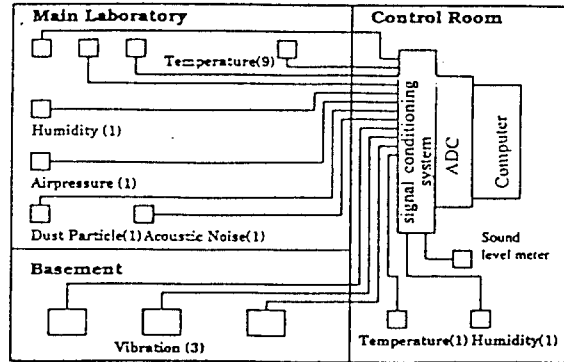


Fig. 9 Schematic diagram of monitoring system in Nano-Laboratory

3.5 실험장치의 지지

앞서 언급한 바와같이 실험장치들은 모두 베이스 콘크리트 블록위에 Fig. 10과같이 직접 고정되었다. 실험장치 지지대는 알루미늄 튜브로 강철 프레임에 고정되었으며, 프레임과 블록사이에는 진동 흡수를 위해 Damper가 끼워져있다.

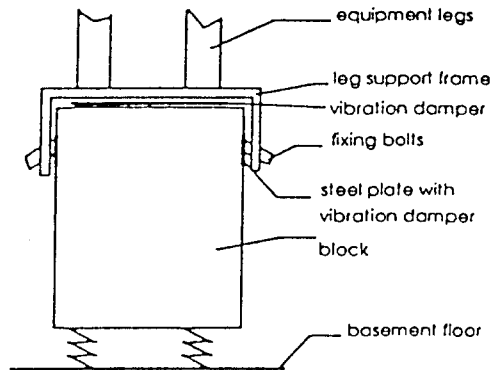


Fig. 10 Schematic of Support leg mounting

Table 2 Specifications of the Concrete Blocks

	Weight (kg)	Dimensions (mm) LxWxD	Number of spring	Spring constant (N/mm)	Dampin g constant	Natural frequency (s ⁻¹)
Concrete block 1	26506-33133	6800x1220x1775	10	800	0	2.5 → 2.8
Concrete block 2	35341	6800x1220x1775	12			2.6
Concrete block 3	18093	3100x1370x1775	6			2.6

4. Local Environmental Control Cell (LECC)

LECC는 일반 실험실에서도 초정밀 측정 및 제어가 가능하도록 설계된 '작은 공간의 Control Cell'이다. Fig.11은 현재 본 연구에서 설계중인 LECC의 모형이며, 가운데의 실험 Cell은 약 1m x 1m x 1m 크기로 실험 중 내부를 볼수 있도록 이중 유리로 제작되었다. Controll Cell은 알루미늄 프레임에 와이어로 매달려 있고 대리석(Granite) 바닥은 4개의 공압 실린더위에 올려져서 Cell의 평형유지와 진동흡수에 도움을 준다. 이러한 구조는 외부 진동을 직렬 감쇄방식으로 제어하므로 보다 효과적일 것이다. 현재 약간의 설계변경 및 재질 선택문제가 남아있다.

5. Nano-Laboratory에서의 연구

현재 본 연구의 결과로 설치된 Nano-Lab에서 진행중인 연구는 초정밀 표면조도 측정과 광학을 이용한 인간피부 및 치아 관찰 등이다. 광학 측정예의한 인간 피부 관찰은 3차원 topography에의한 표피 홈의 부피계산으로 피부암의 발생과 진행의 관찰에 도움을 준다. 치아 표면 관찰은 scaling에의한 치아의 마모상태를 관찰하는데 사용된다. 또한 금속분야에서 의뢰한 초전도체의 변형 거리 측정도 수행되고 있으며, 이것은 sub-nanometer의 측정이 가능한 Phase Shifting Interferometer의 사용을 요구한다.

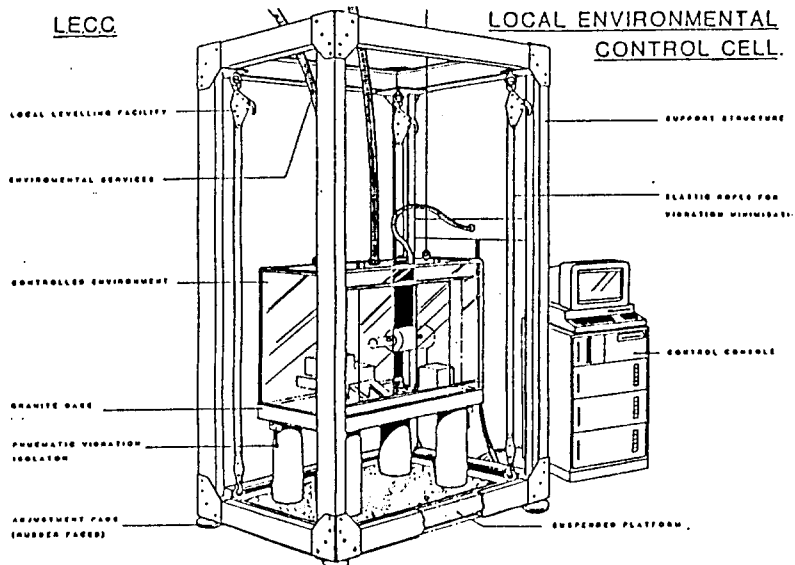


Fig.11 Local Environmental Control Cell