

Micro/Meso부품 대응형 마이크로 기계가공시스템 기술 연구

박종권*, 경진호+, 노승국+, 김병섭+, 박중호+

Design of Micro-Machining System for Micro/Meso Mechanical Component

J.K.Park*, J.H.Kyung+, S.K.Ro+, B.S.Kim+, J.H.Park+

Abstract

This paper describes the design of micro machine tools system for mechanical machining of micro/meso scale mechanical parts. The micro machining systems such as μ -Late, μ -milling/drilling machine and μ -grinding machine are the basic elements constructing μ -factory which gains more attention recently because of increasing needs of mico and nano-parts in various industrial and medical area. A miniaturized 3-axis milling machine with VCM stage and air spindle and palm-top size micro-late are designed, and air bearing stage and stepwise linear motion system with PZT are studied for motion system. The micro cutting characteristics are investigated experimentally, and reconfigurable machine structures are also considered.

Key Words : Micro machine tool, Magnetic/Air bearing, Shape memory alloy clamping system,

1. 서론

μ -Factory는 IT, BT, NT, ST 등 신산업이 등장하면서 이를 구성하는 Micro/Meso 크기의 핵심 기계부품을 생산하기 위하여, 공간, 자원, 에너지, 유연성, 가반성 등의 효율화를 도모하기 위한 초소형 생산시스템이다. 이 중에서 “Micro/Meso부품 대응형 μ -기계가공시스템”은 초미세 μ -선삭시스템, 초미세 μ -밀링/드릴링시스템, 초미세 μ -연삭시스템 등으로 구성이 되며, μ -Factory의 근간을 이루는 첫 번째 공정 시스템이다.

여기서 μ -기계가공시스템을 구성하는 주요기술은, 초소형 공작기계를 구성하기 위한 300,000rpm

이상의 공기정압 터빈스핀들과 같은 초고속 주축 시스템, 피에조 구동기와 같은 miniature device를 활용한 이송기술, μ -리니어 엔코더 채용의 고정도 습동기구, force-loop에 기초한 유니트 구조물의 최적배치와 본체 구조물 설계기술, 비전응용 시스템 및 가공공정 감시 등을 이용하는 제어 및 계측시스템 기술, 미소부품 제작을 위한 마이크로 전주 가공기술, 그리고 2차원 μ -콘베이어와 로봇 핸들러 등의 조립기술로 이루어진 총합 기술이다.

이와 같이 마이크로화 된 시스템을 이용하여 μ -Factory 시스템을 구성하고 IT, BT, NT기술의 근간이 되는 각종 Micro/Meso크기의 공작물을 기계적 미세가공으로 Intelligent하게 생산하고자 하는 것이 본 기술의 정의이다.

* 주저자, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 (jkpark@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전광역시 유성구 장동171

+ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

따라서 본 연구는 마이크로 기계가공시스템을 구현 하는데 필요한 핵심구동요소 및 모듈러 구조시스템 (RMT) 등의 설계기술을 비롯해 시스템구현의 선행 기술로서 마이크로 선반을 시험모델로 제작을 해보 았다.

2. 마이크로 가공기 구조설계

2.1 상용 구동요소를 이용한 가공기 구조설계

마이크로 공작기계는 기계가공에 충분한 강성 을 유지하면서 가공 정밀도를 최대한 보장할 수 있 도록 설계될 것이 요구되며, 이를 위하여 본 연구에 서는 이송계의 마찰을 최소화할 수 있는 공기정압베 어링을 이용하고 리니어 모터를 적용한 이송계를 설 계하였다. 일반적으로 초소형 공작기계의 연구에서 사용되어진 이송계는 피에조 액츄에이터를 이용한 시스템과 Voice Coil Motor이나 Ballscrew 등을 이 용한 시스템 등이 있다.

본 연구의 1차년도에 있어서는 마이크로 가공기에 대한 기본적 성능시험을 하기위한 일환으로 상용화 된 구동요소를 이용하여 마이크로 밀링 머신을 구성 하였으며 Fig. 1은 가공기의 구성 상태를 나타내고 있다. 즉 수직으로 장착된 XY 스테이지는 VCM을 이용한 이송시스템을 채용하였으며, 또한 Z축에는 에어베어링을 이송 스테이지로 장착한 후 여기에 최 대 16,000rpm 공기 스피ن들을 채용하여 정밀 가공이 가능하도록 설계하였다.

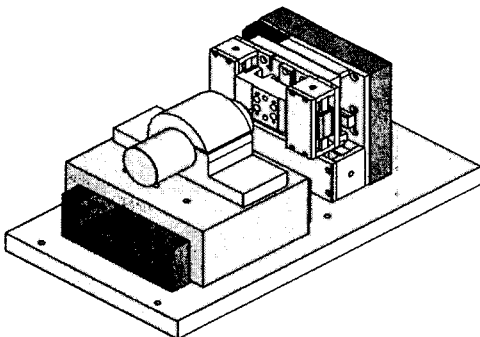


Fig. 1. Schematic diagram of first prototype of micro milling machine.

2.2 자기예압 공기베어링 이송계 구조설계

공기베어링의 장점은 마찰이 없으면서 표면의 평균화 효과를 통해 가이드면의 표면상태에 따른 마 찰계수 등에 영향을 받지 않기 때문에 미소이송시 나타나는 스틱슬립 등의 불안정 영향을 받지 않는 장점이 있으며, 단점으로는 높은 하중능력을 위해서 는 큰 면적이 요구되는 것과 LM 가이드등과 비교하여 크기가 커지는 점을 들 수 있다. 그러나 마이크로 공작기계의 절삭력이 최대 5N 이내임을 감안하면 200x200 mm²의 크기에서 충분한 하중 능력을 얻어 낼 수 있다. Fig. 2는 개념설계를 통하여 결정된 자 기예압 공기베어링 XY 스테이지의 구성도를 나타내 고 있다. 1축의 시스템을 기반으로 구성되는 것이 아니라 XY의 가이드 동일 평면에서 구성될 수 있도 록 설계하였다. 적용된 리니어모터는 최대 50N의 추력을 가지고 있으며 50nm이하의 분해능을 갖는 엔코더를 이용하여 위치제어를 수행한다.

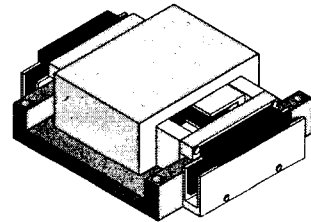


Fig. 2 2-axis air bearing stage with liner motor drives

밀링 절삭을 위해서는 최소한 3개의 제어축이 필 요하다. 이 경우 수직축이 필연적이게 되는데, 수직 축의 자중 보정을 위한 Counter balancer를 적용하 지 않는 방법에 대하여 개념 설계를 진행하고 있으 며, 향후 정, 동특성 및 정밀도의 해석을 통해 상세 설계를 확정하고, 시제품 제작을 통한 특성 분석을 수행할 예정이다.

2.3 3축 마이크로 가공기의 정동특성 시험

1축 공기베어링 이송계를 이용하여 자기예압 3-axis 마이크로 가공시스템을 구성하였으며 구성된 이송계는 Fig. 3과 같고 정, 동 특성을 실험을 통하 여 구조성능을 확인하였으며, Table 1은 XY 테이블 의 정강성을 나타내고 있고 Table 2는 XY 테이블의 고유진동수를 나타낸다.

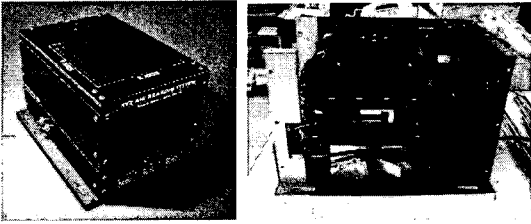


Fig. 3. the 3-axis micro machine tool with air bearing stages

공기베어링의 강성은 한 개의 스테이지에 대하여 약 $18 \text{ N}/\mu\text{m}$ 의 값을 가지고 있음을 알 수 있으며, 자기압이 작용하는 부분에서는 공기 압력이 작을 수록 강성이 크게 나타나는 경향을 나타내었다. 특히 수직 축의 경우 가공력의 작용점이 테이블의 중심점에서 상대적으로 멀리 떨어져 있음으로 인해 모멘트가 작용하게 되어 강성이 상대적으로 매우 작게 나타나게 됨을 알 수 있었다.

Table 1. Vertical stiffness of XY table

Air pressure	Stiffness [N/ μm]	
	Down force	Up force
60 psi	9.3	9.6
80 psi	8.1	9.4
95 psi	7.2	7.6

Table 2. Natural frequencies of XY table from vertical impact

Air pressure (psi)	First natural frequency [Hz]		
	Z motion	θ_y motion	θ_x motion
60	281	198	379
80	256	181	355
95	242	169	339

Table 3 Natural frequencies of XY table from horizontal impact

Natural frequencies from X impacts			Natural frequencies from Y impacts		
Air pressure (psi)	First natural frequency [Hz]		Air pressure (psi)	First natural frequency [Hz]	
	x motion	θ_x motion		y motion	θ_y motion
60	198	110	60	386	112
80	183	119	80	365	122
95	169	126	95	350	127

XY 테이블 및 수직축(Z) 테이블의 고유진동수를 측정된 결과에서는 대체로 공기베어링 부상에 의한 강체모우드 고유진동수가 200~350 Hz 부근에 위치

하고 있음을 알 수 있었으며, 자기압 공기베어링의 강성에 영향을 받는 모우드에 대해서는 압력에 따라 진동수가 약간 작아지는 경향을 나타냈고 이는 정강성의 변화와 일치하는 경향이다. 그러나 공기베어링으로 예압된 강성에 영향을 받는 모우드에 대해서는 공기압력에 따라 고유진동수가 약간 증가하는 특성을 나타내었다.

테이블 및 구조물의 유연 모우드에 의한 고유진동수는 대체로 1.5kHz 이상에 위치하고 있으며, 강제 고유진동수에서 유연 모우드까지는 공진을 발생시킬 모우드가 없는 것으로 나타났다.

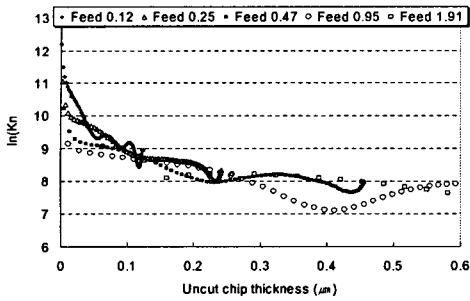
제작된 가공시스템은 향후 가공실험을 수행할 예정이며, 이에 앞서 정밀도 및 오차에 대한 분석을 수행하고 있다.

2.4 Micro/Meso 스케일 절삭특성

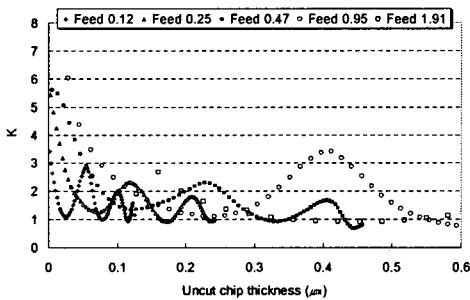
마이크로 머시닝을 통해 3차원 미세 구조물을 제작하기 위해서는 적절한 가공 조건을 제시할 수 있는 기술이 요구된다. 그러므로 절삭을 이용하는 Micro/Meso 기계가공에서는 가공 시 발생하는 절삭력을 예측함으로써 적절한 가공 조건을 선정할 수 있다.

모든 절삭 공구는 날 끝단에 일정한 반경을 가지고 있다. 미세 엔드밀은 가공하는 칩의 크기에 비하여 공구 날 끝단의 반경이 상대적으로 매우 크기 때문에 일정한 이송속도 이하에서는 가공이 이루어지지 않는다. 마이크로 가공의 절삭력을 예측하기 위해서는 이러한 마이크로 가공의 절삭 특성을 정확히 파악하여야 한다.

본 연구에서는 마이크로 가공의 절삭력을 예측하기 위하여 미세 엔드밀을 이용한 마이크로 절삭 가공의 절삭력을 측정하고, 이에 대한 절삭력 계수를 구하여 마이크로 절삭 가공의 특성을 분석하였다. Fig.4는 마이크로 절삭 가공으로부터 얻어진 절삭력 계수이다. 미변형 칩두께가 매우 작은 마이크로 절삭에서는 절삭에 필요한 힘 뿐 아니라 공구와 가공물 간의 마찰력이 크게 작용하므로 치수효과를 적절히 고려한 절삭력 계수를 사용하여야 하며, 최소 칩두께 효과에 의해 매 회전에서 칩이 발생하지 않음을 고려하여야 정확한 절삭력을 예측할 수 있다.



(a) K_x



(b) K_y

Fig. 4 Cutting force coefficients at low feed condition

3. 모듈러 가공기의 구조창성 기술

공작기계는 각각의 기능을 가진 여러 개의 모듈 조합으로 이루어져 있으며, 이 모듈들의 자유로운 조합에 의해 무수히 많은 구조형태가 결정될 수 있다. 최근 구조형태 생성에 관한 연구를 보면 미시간 대학의 ERC-RMS는 사용자가 원하는 가공기능을 가진 재구성형 가공시스템(Reconfigurable Manufacturing System)을 개발하였으며, 일본의 동경공업대학에서는 몇 개의 지정된 모듈들을 Directed path 방법을 이용하여 재구성형 공작기계를 만들었다. 본 연구에서는 몇 가지의 기본 모듈을 조합하여 다양한 형태의 RMT 구조가 생성될 수 있음을 보였다. 기존의 구조형태 생성방법은 대체로 모듈간의 결합 순서만을 중요시하였으나, 본 연구에서는 모듈간의 결합가능한 면과 결합방향도 고려하여 보다 다양한 구조형태가 생성될 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

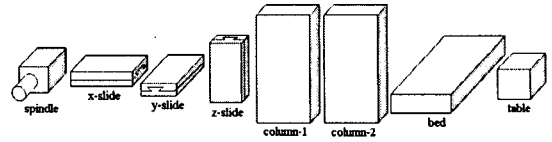


Fig.5 Modules for reconfiguration

Fig. 5는 구조형태 생성에 사용된 기본 모듈들을 나타낸다. 즉 n 개의 모듈이 각각 m 개의 결합요소(결합가능한 면과 방향)를 가질 때 조합가능한 모든 경우의 수는 $n! \times (m^2)^n$ 개이다. 본 연구에서는 임의의 모듈이 가지는 결합면과 결합 방향을 결합능 벡터 (combinability vector)로 표현하고, 두 개의 모듈이 결합할 때 결합 가능한 구조형태의 경우를 결합능 벡터의 이차형식 (quadratic form)으로 표현하여 구하였다. 예를 들어, 스펀들과 슬라이드 모듈이 결합할 때 가능한 구조형태는 다음의 (1)식과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \begin{pmatrix} s_1^1 \\ s_2^1 \\ s_3^1 \\ s_2^2 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S^T A X = \begin{bmatrix} a_{11}^1 s_1^1 x_1 & 0 & 0 \\ a_{11}^2 s_2^1 x_1 & 0 & 0 \\ a_{22}^2 s_2^2 x_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 A는 두 모듈의 결합 면끼리의 결합가능성을 나타내는 상호결합능 계수행렬(mutual combinability coefficient matrix)이다. Fig 6은 식 (1)에 의해 생성된 두 모듈의 결합 형태이다.

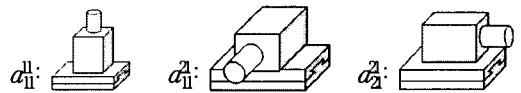


Fig. 6 Generated configurations from spindle and slide modules

여러 개의 모듈이 순차적으로 결합되는 경우의 생성 가능한 구조형태의 총 수는 연속된 두 모듈 간의 결합능 벡터의 이차형식을 축차적으로 곱하여 구할 수 있다. Fig 7은 위 Fig. 5의 모듈들을 사용해서 생성 가능한 구조형태 중 일부를 보여준다. 본 연구에서 제안한 새로운 구조형태 생성방법을 이용하면 기존의 구조창성 방법에 비해 발생 가능한 모든 경우의 구조형태를 생성할 수 있다.

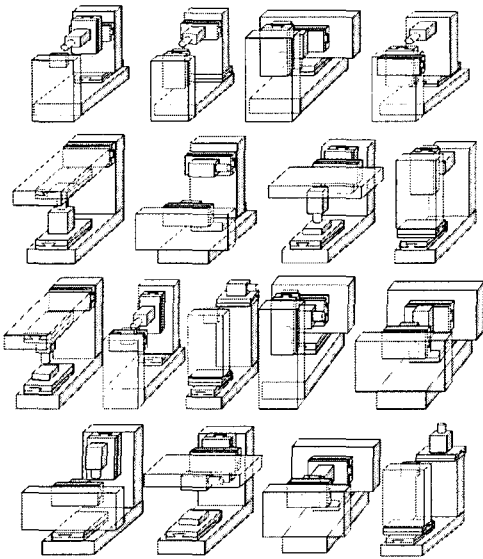


Fig.7 Some of RMT structure generated by this paper

4. 마이크로 선반 구성

마이크로 공작 기계의 성능특성을 조사하기 위해서 Fig.9와 같이 마이크로 선반을 시험제작 하였다. 이송계는 미크론 이하의 미소 이송을 위해 PZT를 이용한 인치웸 구동 방식의 압전 구동기로 설계를 하였으며 측정결과 최소 250nm의 단위 이송과 1 μ m의 이송 정밀도를 획득하였다.

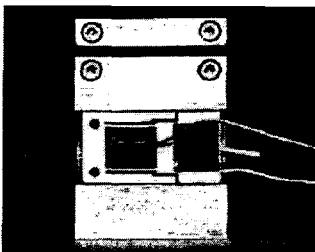
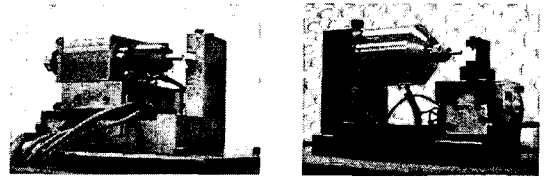


Fig. 8 PZT Stepwise Actuator

즉 마이크로 선반은 max.5,000 rpm의 마이크로 모터 구동식(Fig. 9-a 참조)과 미세 직경의 가공물에 있어서 적절한 절삭 속도를 구현하기 위해 max.130,000 rpm의 에어 터빈 스피들 장착의 마이크로 선반(Fig. 9-b 참조)을 제작하여 선삭 실험을 수행 중에 있다.



(a) Motor-driven micro lathe (b) Air turbine spindle micro lathe

Fig. 9 Micro Lathes

단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 Al합금 및 황동 등 연질재료에 대한 절삭성 고찰을 위해 절삭력 및 표면 조도 측정, 칩 관찰 등을 수행하고 있다.

5. 고온용 Nitinol 형상기억합금의 특성평가

최근 많은 관심을 갖게 된 마이크로팩토리, 액추에이터에 형상기억합금을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 형상기억합금을 마이크로팩토리에 적용하기 위해서는 합금의 온도의존성과 역학적 특성을 잘 알아야하며 이들 특성이 실제 응용하고자 하는 목적에 부합되어야 활용이 가능할 것이며 궁극적으로는 3원계 형상기억합금인 (Cu-Ni-Al or Cu-Zn-Al) 단결정을 육성하여 직접 실험실에서 개발된 물질로 응용하고자 하는 소자를 가공하는데 그 목적이 있다. 우선 본 연구에서는 2원계 형상기억합금인 Ni-Ti 에 대해 XRD(X-ray diffraction)를 사용하여 상 전이에 따라 달라지는 상의 구조적 특성을 파악하였다. 또한 DSC(differential scanning calorimeter)를 사용하여 구조적으로 조사한 상 전이 온도를 확인하였으며 TMA/ss(thermo mechanical analyzer)로 온도에 따른 시료의 길이변화를 측정하였다. 그리고 DMA(dynamic mechanical analyzer)를 이용하여 탄성률을 측정하였다. 주파수는 합성파를 주입하였고, 다양한 주파수로 저장탄성률과 손실탄성률을 측정함으로써 형상기억합금의 효율을 알 수 있었다. 상전이는 M_s , M_f , R_s , R_f , A_s , A_f 로 구분되는데, 조성비에 따라 Ni-Ti 는 상전이 온도가 매우 민감하게 변하며 온도에 따라 cubic, rhombohedral, monoclinic 등 세 가지 상을 가진다. 상온에서 200 $^{\circ}$ C까지 heating, cooling에 따라 modulus값이 최저가 되는 지점의 온도가 변화함을 알았고, 특정 주파수영역에서 탄성률의 손실값이 최저로 낮아짐을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구는 1차년도에 수행중인 연구내용의 중간 결과들을 정리한 것으로서 아래와 같이 정리해볼 수 있다.

(1) 2축 VCM 스테이지와 1축 공기베어링 스테이지 및 160,000 rpm급 공기주축계를 이용한 3축 마이크로 가공기계를 설계하였다.

(2) 3축 공기베어링 스테이지를 이용한 마이크로 밀링머신의 성능평가 결과 수직방향으로 약 9 N/um의 강성을 나타내었다.

(3) 마이크로 절삭 특성을 예측하기 위하여 미세 공구를 이용한 절삭실험을 통해 절삭계수를 구하고 가공특성 예측을 수행하였다.

(4) 가공기 기본 유니트를 모듈화하여 이를 조합배치 함으로써 최적의 가공기가 창성될 수 있는 재구성형 가공시스템 창성기술(RMT)을 제안하였다.

(5) 마이크로 공작기계의 성능특성을 조사하기 위해서 마이크로 선반을 시험제작 하여 운동정밀도 및 가공특성을 평가하였다.

(6) 마이크로 가공시스템의 미소액츄에이터 구현을 위해 형상기억합금을 이용하는 방법을 제안하고 합금의 온도의존성과 상 전이에 따라 달라지는 구조의 역학적 특성을 파악하였다.

참고문헌

- (1) Vogler, M. P., X. Liu, S. G. Kapoor, R. E. DeVor and K. F. Ehmman, 2002, "Development of meso scale machine tool (mMT) systems," Transactions of NAMRI/SME, 30, pp. 653-661.
- (2) Slocum, A., Badaran, M., Cortesi, R. and Hart, A. J. 2003, "Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded inclined iron core linear electric motor", Precision Engineering, Vol. 27, pp. 382~394.
- (3) Moon, Y., and Kota, S., 2002, "Design of Reconfigurable Machine Tool," Transaction of the ASME, J. of Manuf. Sci. Eng., Vol. 124, pp.480-483.
- (4) S. I. Kim, D. B. Choi, J. P. Kang and N. K. Kim, 1995, "Design Technique of the Latest Machine Tool," Bando Press, Seoul.

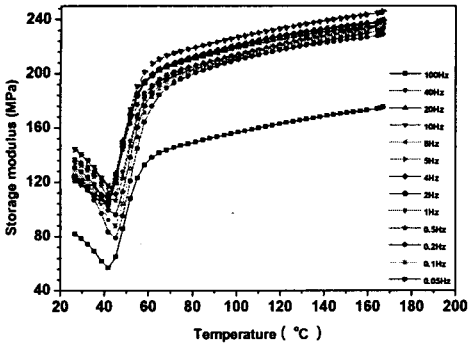


Fig. 10 온도에 따른 저장탄성을 관계

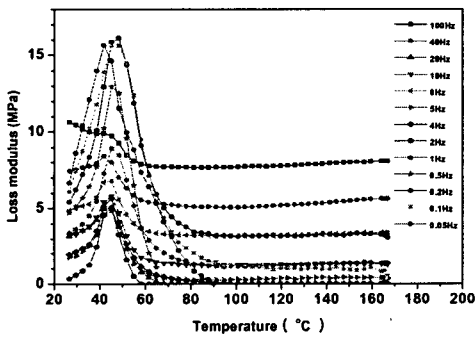


Fig. 11 온도에 따른 손실탄성을 관계

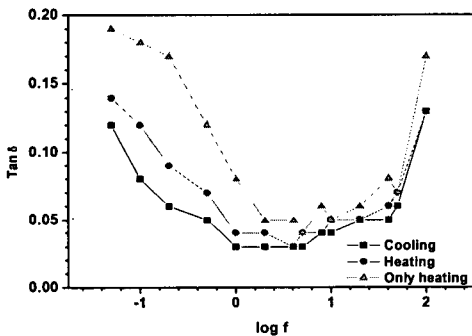


Fig.12 주파수영역에 따른 탄성률 손실값