

UNSM 위한 20 kHz급 초음파 장치 개발

신현근^a, 김현세^{a*}, 임의수^a

Development of 20-kHz Ultrasonic Equipment for UNSM

Hyun-Geun Shin^a, Hyunse Kim^{a*}, Euisu Lim^a^a Extreme Mechanical Engineering Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials,
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103 Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|---------|------|
| Received | 31 | July | 2015 |
| Revised | 8 | October | 2015 |
| Accepted | 8 | October | 2015 |

Keywords:

Ultrasonic resonator
Ultrasonic nanocrystal surface
modification (UNSM)
Resonance frequency
Static force

ABSTRACT

Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) is an example of a nanoscale-surface modification that has become noticeable because of its effects on the mechanical improvement of metallic materials. UNSM equipment needs to be both utilized and improved. The equipment is based on an ultrasonic waveguide whose role is to strike surfaces of metallic materials to achieve nanoscale deformation. In this paper, we introduce the development of one kind of UNSM equipment. Using piezoelectric elements, we repeatedly design and fabricate a 20-kHz ultrasonic waveguide. With respect to the composition of the equipment, the waveguide is automatically transferred by two axial stages automatically. In addition, a static force is constantly applied by pneumatic devices. We perform an experiment to verify the feasibility of the equipment.

1. 서론

UNSM(ultrasonic nanocrystal surface modification)은 초음파를 사용하여 금속 표면에 나노 수준의 작은 변형을 일으켜 재료의 기계적 성질을 향상시키는 기술이다. 최근 이 기술을 여러 분야와 부품에 적용한 연구들이 활발히 수행되고 있으며 피로강도, 표면거칠기, 경도 등 기계적 물성치 향상을 보여주고 있다^[1-8]. 이러한 향상들은 정적 힘, 웨이브가이드의 진동 거리 및 주파수 등의 실험 조건들에 따라 달라지므로 체계적인 연구를 위해 UNSM을 위한 장치 개발이 필요하다. 이 장치는 Fig. 1과 같이 정적 힘을 가하는 공압장치, 초음파 발진장치, 초음파를 방출하는 진동자, 진동자를 지그재그로 이송하는 스테이지, 시편 거치대 등으로 구성되어 있다^[3]. 특히, 초음파 발진장치와 진동자는 UNSM 장치의 핵심

개발 장치로서 매우 중요하다.

본 연구는 UNSM 장치 개발을 위한 기초 연구를 수행하였으며 초음파 영역 중에서 20 kHz 영역의 주파수를 선택하여 초음파 진동자를 개발하였다. 진동자는 압전소자들을 여러 개 묶어 제작하는데 금속 시편에 직접 타격하기 위해 티타늄 재질을 사용하였다. 먼저, 웨이브가이드의 설계는 소재의 성분이나 구조에 따라 주파수와 진동 손실이 달라지므로 반복하여 수정 가공을 하였다^[9-12]. 웨이브가이드의 압전소자 부분을 감싸고 있는 케이스는 진동이 없는 노드 부분에 연결하여 완성된 웨이브가이드의 주파수에 영향이 없도록 하였다. 개발된 웨이브가이드에 정적 힘을 가하기 위해 공압장치를 사용하였고 공압실린더 끝에 로드셀을 붙여 정적 힘을 측정하도록 구성하였다. 시편은 수직으로 설치된 강판에 설치하여 실험하였고 진동자는 컴퓨터로 제어할 수 있는 2축 스테이지로 이송하였다. 본 연구팀은 수행

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7967

Fax: +82-42-868-7355

E-mail address: hkim@kimm.re.kr (Hyunse Kim).

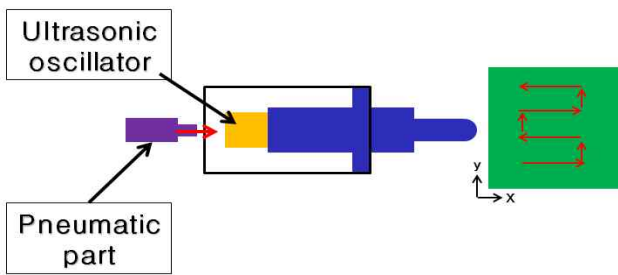


Fig. 1 Schematic of UNSM equipment



Fig. 2 Piezoelectric element (outer dia.: 5 cm, inner dia.: 2 cm, t: 0.5 cm)

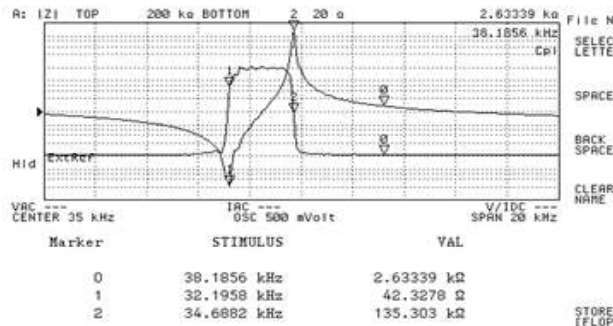


Fig. 3 Frequency measure of piezoelectric element

한 연구가 UNSM을 위한 장비 제작에 도움이 되기를 바란다.

2. 진동자 제작

2.1 제작을 위한 준비사항

웨이브가이드는 압전소자에서 나오는 진동을 전달하는 역할을 하므로 진동을 효율적으로 전달하도록 설계하는 것이 중요하다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 압전소자를 나타내며 PI사의 제품이다. 이 소자는 지름방향과 두께방향의 진동모드를 가지며 각 진동 모드에 대해 여러 주파수가 존재한다. Fig. 3은 사용한 압전소자의 주파수를 측정하는 결과이다. 아래쪽 정점은 반공진주파수이며 위쪽 정점은 공진주파수이다. 20 kHz급 주파수를 얻기 위해 본 연구에서는 반공진 주파수를 이용하는데 이 소자가 가지고 있는 주파수

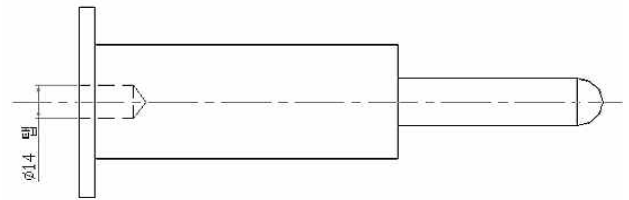


Fig. 4 Shape design of first waveguide

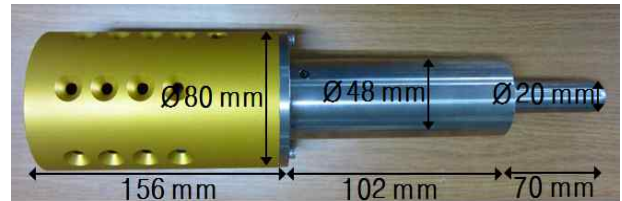


Fig. 5 First resonator

중 근접한 값인 약 32 kHz를 이용하였다. 웨이브가이드의 주파수는 압전소자와 웨이브가이드의 배치 및 조립 조건에 따라 달라진다. 또한, 소재 성분에 매우 민감하다. 개발된 진동자의 평가는 진동자의 끝단에 아무것도 없이 주파수 신호만 가하는 무부하 조건과 진동자의 끝단에 금속을 대고 공압장치로 진동자에 압력을 가하는 부하 조건으로 시험하였다. 공압은 약 39.2 N의 힘을 적용하였다. 사용된 주파수 발전장치는 최대 2.5 kW의 출력에서 20 μm의 변위량을 발생한다. 제작된 진동자 실험에서는 30%에 해당하는 6 μm 변위량을 사용하였다.

2.2 1차 진동자 제작

웨이브가이드의 주파수는 그 구조에 따라 민감하게 반응하기 때문에 유한구조해석법을 이용한 전산해석을 수행하여 대략적인 웨이브가이드의 설계치를 구하였다. 제조회사에 따라 판매되는 티타늄의 성분들이 다르므로 실제 제작은 전산해석 결과와 달리 여러 번 길이 변화를 시도하여 원하는 주파수에 맞춰야 한다. 압전소자의 조립은 Fig. 4의 왼쪽에서 압전소자 4개를 위치시키고 압전소자의 중앙 구멍에 M14 일반나사를 넣고 토크렌치로 조였다. 그 후, 웨이브가이드의 주파수를 측정하고 다시 수정 가공을 하였다. 이런 절차를 반복하여 웨이브가이드가 20 kHz에 근접한 주파수가 될 때까지 여러 번 반복하였다. Fig. 5는 압전소자의 전극 처리 및 케이스를 씌운 진동자의 모습이다. Fig. 6에서 보듯이 1차 진동자는 반공진 주파수가 19.95 kHz로 확인되었다. 케이스를 연결한 웨이브가이드의 플랜지 부분은 웨이브가이드의 진동이 최소가 되는 지점으로서 웨이브가이드의 주파수에 대한 영향이 거의 없다.

그러므로 플랜지에서는 진동이 발생되지 않으며 케이스의 질량이 웨이브가이드의 주파수에 영향을 주지 않는다. 웨이브가이드의 끝에서 진동을 증가시키기 위해 중간부분에 단면적을 줄였다. 그

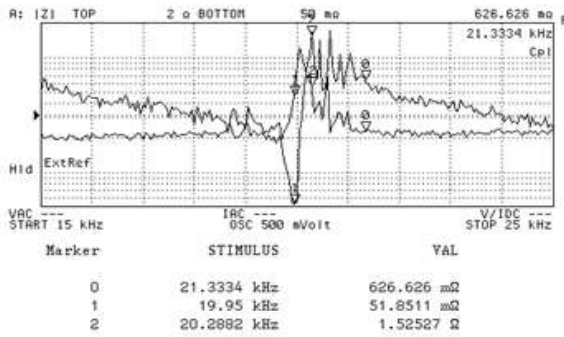


Fig. 6 Frequency measure of first resonator

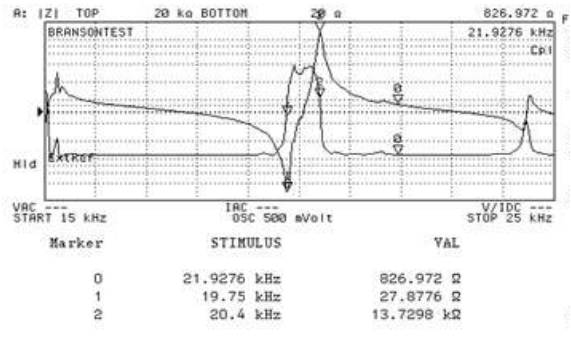


Fig. 8 Frequency measure of second resonator

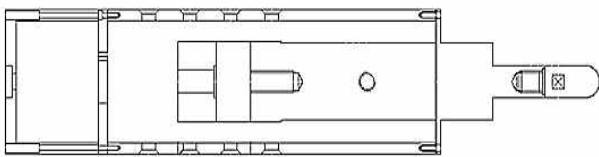


Fig. 7 Shape design of second waveguide

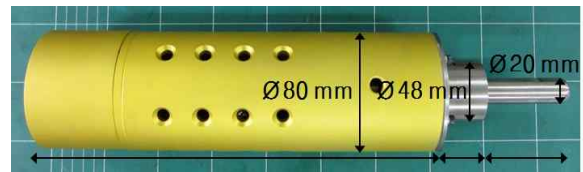


Fig. 9 Second resonator

이유는 단면적과 진동파위가 반비례하기 때문이다.

주파수 발진장치를 이용하여 제작된 1차 진동자를 실험하였다. 먼저, 무부하상태에서 실험했을 때, 플랜지에서 진동이 강하게 나타났고 우리는 2차 진동자 설계에 재료들의 치수 및 성분들을 더 정확한 값을 반영하였다. 부하상태에서는 1차 진동자가 짧은 시간 동안 동작 후 정지하였다. 정지 원인은 압전소자를 조인 나사가 안전소자의 진동힘을 견디지 못하고 풀려 진동자의 주파수가 초음파 발생장치의 범위에서 벗어나 있었기 때문이다. 그래서 2차 진동자에서는 인장력이 더 강한 볼트를 사용하였다.

2.2 2차 진동자 제작

1차 진동자는 플랜지의 위치 오류와 압전소자들을 체결하는 나사의 잘못된 선정으로 인해 동작이 거의 되지 않았다. 그래서 2차 제작에서는 플랜지의 위치를 진동 최소 지점을 재설계하고 옮겼고 압전소자의 체결나사는 규격은 같고 인장력이 더 높은 재질의 나사로 교체하여 제작하였다. 웨이브가이드 제작은 플랜지의 위치 변경으로 인해 1차 진동자의 길이를 사용할 수 없고 조금씩 길이를 조정해가며 20 kHz 근처의 주파수를 찾았다. Fig. 7은 두 번째 웨이브가이드의 설계 도면이며 시편을 가격하는 부분을 교체할 수 있다. 웨이브가이드의 뒷부분은 케이스로 싸여 보호된다.

Fig. 8은 2차 진동자의 주파수 측정 결과이며 19.75 kHz를 이용하여 성능 실험을 하였다. 무부하 조건에서 플랜지와 케이스의 연결 부분은 진동은 1차 진동자와 비교했을 때 매우 감소하였다. 그리고 부하 조건에서는 압전소자의 체결나사가 풀리지 않고 정상적으로 동작하였다.

2.3 파워 테스트

진동자는 진동하면서 시편 표면을 타격하는데 진동이 너무 작으면 타격이 불가능하여 스테이지가 이동하면서 시편 표면을 긁게 된다. 금속 시편에 가해지는 진동의 거리는 주파수 발진장치의 파워와 비례하기 때문에 주파수 발진장치의 파워를 증가시켜 진동자의 진동 거리를 살펴보았다. 최대 변위량의 30% (6 μm)에서 40% (8 μm)까지 증가시켰을 때, 초기에는 진동자가 작동하였으나 시간이 지나면서 동작이 멈추었다. 원인은 열로 인해 진동자의 특성이 바뀌었고 진동자의 주파수가 발진장치의 주파수 범위를 넘어 진동자의 작동이 중단된 것이다. 1차 진동자와 달리 압전소자의 체결나사는 풀리지 않았지만 웨이브가이드에서 발생한 열이 체결나사의 인장력을 낮추는 데 영향을 준다고 추측된다. 또한, 웨이브가이드의 구조 및 여러 부품들의 조립 등의 비효율적인 부분들도 열발생에 영향을 끼쳤을 것으로 판단되어 앞으로 효율이 향상된 UNSM용 웨이브가이드를 개선시켜 나갈 것이다.

3. UNSM 장치 실험

3.1 UNSM 장치 소개

Fig. 10은 본 연구에서 제작된 웨이브가이드의 동작 및 성능을 확인하기 위해 간단히 구성한 UNSM 테스트베드를 보여준다. 이 장치는 방진테이블 위에 2축 스테이지와 Natioanl Instrument사의 제어모듈을 연결하였다. 시편은 수직으로 세운 강철판에 고정하는데 진동을 견디기 위한 구조물을 강철판 뒤에 설치하였다. 그리고 웨이브가이드에 가하는 정적 힘은 공압실린더를 조작하여 조절하며 공압실린더 앞에 로드셀을 부착하여 정적 힘의 수치를 kgf

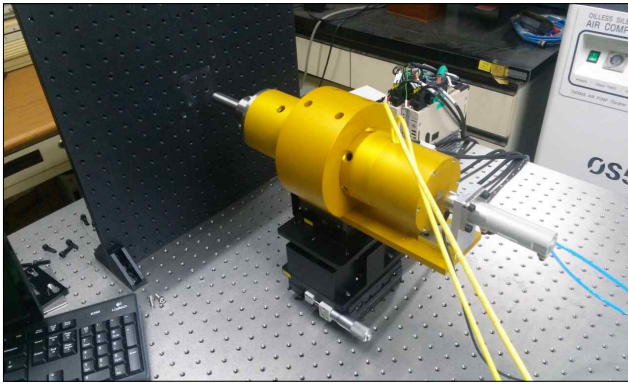


Fig. 10 Established UNSM equipment

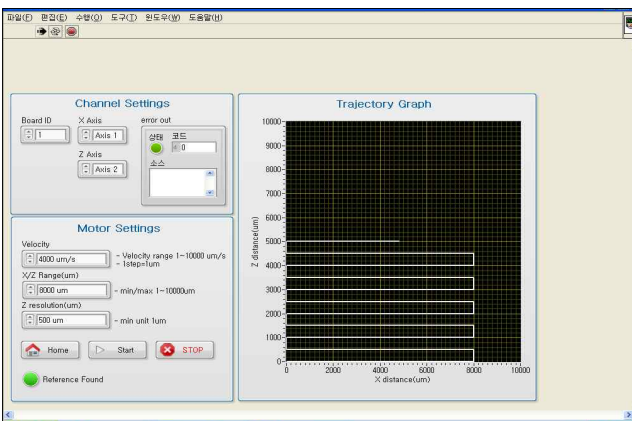


Fig. 11 Manipulation software of two-axes stage

Table 1 Experimental conditions

| | |
|--------------|---------------|
| Area | 10 mm × 10 mm |
| Velocity | 2 mm/s |
| Static force | 39.2 N |
| Amplitude | 6 μm |

[9.8 N] 단위로 확인하도록 설계하였다. 공압실린더로 유입되는 공기량은 실험 시작 전 손으로 레귤레이터를 이용하여 조절하였다. Fig. 11은 2축 스테이지의 소프트웨어 조작 화면을 보여준다. 이것은 스테이지의 이동 속도, 이동 영역 및 간격을 입력하여 움직이고 이동 진로를 오른쪽 화면상에 나선으로 표시한다.

3.2 실험

제작된 UNSM 장치의 기능을 검사하기 위해 Table 1의 조건으로 장치를 동작시켰다. 시편은 합금인 SUS304와 SCM435를 이용하였고 UNSM의 효과를 검증하기 위해 경도 측정을 하였다. 스테이지는 지그재그로 진동자를 이동시키고 진동자는 시편에 정적 힘과 진동압을 가하여 Fig. 12에서 보듯이 변색시킨다. Fig. 13은 현미경으로 관찰한 표면 사진이며 진동자의 조밀한 이동경로를 보여준다. 경도계를 이용하여 UNSM 전후 시편의 경도를 조사하였

Table 2 Hardness results

| Unit (HLD) | Before UNSM | After UNSM |
|------------|-------------|------------|
| SUS304 | 353 | 420 |
| SCM435 | 317 | 360 |

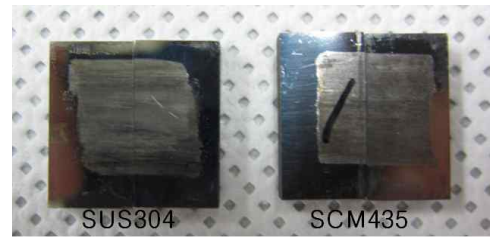


Fig. 12 Specimens surface after UNSM

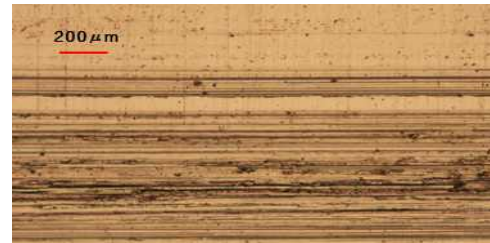


Fig. 13 Microscopic image of specimen surface

다. UNSM은 두 시편에 대해 경도를 증가시키는 것을 확인하였다. SUS304 경도는 약 19% 증가하였고 SCM435 경도는 약 12% 증가하였다. 이 실험을 통하여 본 연구에서 개발된 진동자 및 UNSM 장치의 기능을 검증할 수 있었다.

4. 결론

UNSM은 진동 현상을 금속 표면에 적용하여 금속의 기계적 성질을 향상시키는 기술로서 관련 연구들이 수행되고 있다. 이 기술을 활용하기 위해 UNSM 장치 개발이 필수적이다. UNSM 장치는 공압장치, 초음파 발전장치, 진동자, 스테이지, 시편 거치대 등으로 구성되어 있고 진동자 개발이 핵심이다. 웨이브가이드는 압전소자의 진동을 전달하는 부분으로 구조 및 형상, 재료 등에 따라 초음파가 민감하게 달라진다. 먼저, 전산해석으로 기초 설계를 한 후, 제작된 웨이브가이드에 압전소자를 조립하여 주파수 확인 및 길이 조절을 하였다. 진동자 제작은 성공하였으나 진동 거리를 높이기 위해 높은 파위에서는 발생된 열로 인해 동작이 멈추었다. 개발된 UNSM 장치 실험은 6 μm의 진폭, 39.2 N의 힘을 사용하였다. 실험 후, 경도 측정 결과에서 SUS304 경도는 약 19% 증가하였고 SCM435 경도는 약 12% 증가하였다. 차후의 연구는 표면가공의 신뢰성을 높이기 위해 균일한 정적 힘을 가하는 장치와 균일한 진폭을 가지고 내구성이 높은 진동자를 개발하는 데 주력할 것이다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술 평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Amanov, A., Penkov, O. V., Pyun, Y.-S., Kim, D.-E., 2012, Effects of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on the Tribological Properties of AZ91D Magnesium Alloy, *Tribology International*, 54 106-113.
- [2] Amanov, A., Cho, I.-S., Kim, D.-E., Pyun, Y.-S., 2012, Fretting Wear and Friction Reduction of CP Titanium and Ti-6Al-4V Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification, *Surface & Coatings Technology*, 207 135-142.
- [3] Yasuoka, M., Wang, P., Zhang, K., Qiu, Z., Kusaka, K., Pyoun, Y.-S., Murakami, R.-i., 2013, Improvement of the Fatigue Strength of SUS304 Austenite Stainless Steel using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, *Surface & Coatings Technology*, 218 93-98.
- [4] Tominaga, Y., Kim, J., Pyun, Y., Kayumov, R., Kim, J., Woo, J., 2013, A Study on the Restoration Method of Friction, Wear and Fatigue Performance of Remanufactured Crankshaft, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27:10 3047-3051.
- [5] Amanov, A., Pyun, Y.-S., Kim, J.-H., Sasaki, S., 2014, The Usability and Preliminary Effectiveness of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification Technique on Surface Properties of Silicon Carbide, *Applied Surface Science*, 311 448-460.
- [6] Amanov, A., Pyun, Y.-S., Sasaki, S., 2014, Effects of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification (UNSM) Technique on the Tribological Behavior of Sintered Cu-based Alloy, *Tribology International*, 72 187-197.
- [7] Hong, S. J., Kim, Y. D., Lee, G. H., Cho, I. S., Lee, C. S., Kang, S. G., 2014, The Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) on Pack Aluminizing for the Fabrication of Pt-modified Aluminide Coatings at Low Temperatures, *Intermetallics*, 46 65-71.
- [8] Darisuren, S., Pyun, Y. S., Kim, J. H., 2014, Method for Remanufacturing of Bearing by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology, *KSMTE Annual Spring Conference 2014*, 176-176.
- [9] Kim, H., Lee, Y., Lim, E., 2009, Design and Fabrication of an L-type Waveguide Megasonic System for Cleaning of Nano-scale Patterns, *Current Applied Physics*, 9:2 189-192.
- [10] Shin, H.-G., Kim, H., Lim, E., 2015, Development of a 20 kHz Ultrasonic Device for Nano-surface Modification, *KSPE 2015 Spring Conference*, 1046.
- [11] Bond, L. J., 2012, *Ultrasonics*, CRC Press, USA.
- [12] Nakamura, K., 2012, *Ultrasonic Transducers*, Woodhead Publishing, USA.