



AISI 4140 시편의 미세단조 공정 충격력 및 표면 변형량 측정

정창호^a, 홍민성^a, 전용호^{a*}Impact Force and Surface Deformation Measurement
of Micro-forging Process on AISI 4140 SpecimenChang-ho Jung^a, Min-Sung Hong^a, Youngho Jeon^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University,
206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 September 2018
Revised 18 September 2018
Accepted 1 October 2018

Keywords:

Micro-forging
Impact force
AISI 4140
Deformation

ABSTRACT

The micro-forging process improves the surface quality of the workpiece by micro tip impacting. In this study, the impact force is generated using a terfenol-D oscillator (ETREMA Product. Inc.), and it is measured when the actual impact is in action. The experimental results show that the amplitude of the force in the no-load state is approximately 325.6 N, and the impact force is 116.6 N and 118.6 N when the static load is changed. As the output of the oscillator was changed by energy loss and structural damping, the impact force was found to be as 29.1 N and 36.4 N, respectively. The impact test was performed on the AISI 4140 specimen under these conditions, and the deformation of the surface was measured and compared. Hence, the impact force measurement results obtained in this study can be used as an important parameter for the optimization of micro-forging process.

1. 서론

1.1 연구의 필요성

고주파 진동 장치를 활용한 미세 단조 공정기술은 금속 표면을 개질하는 방법으로, 산업계 전반에 널리 사용할 수 있다. 기존의 금속 표면 처리 공정으로는 소재를 로에 넣어 열처리 하거나, 경질의 금속 구를 소재의 표면에 충돌시키는 쇼트피닝(shot peening) 공법이 있으나, 이러한 공법들은 금속 소재의 일부 면적에 선택적인 후처리를 적용하기에는 어려움이 많다. 열처리 공법으로는 레이저를 활용한 금속 열처리 기술이 개발되어 있지만, 물리적인 충격을 활용한 단조 기술로써는 미세 단조 기술이 그 해결책으로 제시

되고 있다^[1].

고주파 미세 단조 공정은 금속의 표면에 초경재질의 팁이 충격을 가하게 하여 금속 표면 결정립의 미세화와 압축 잔류 응력을 부여하는 과정으로 이루어진다. 이 공정을 위해 빠른 속도와 강한 힘을 내는 고주파수 발전기가 필요하며 일반적으로 압전소자를 활용하거나 자왜소자를 활용하여 발전기를 구성한다. 그 구동 주파수는 3~20 kHz 의 영역이고, 발전된 힘은 1~3 kN 의 힘으로 충격을 가하게 된다^[2].

본 연구에서는 이러한 고주파수 미세 단조 공정에서 중요한 요소인 고주파수 발전기로부터 발생하는 충격량을 확인하고, 소재에 전달되는 충격량을 확인 하고자한다. 발전기로는 자왜소자를 활용한

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-3652

Fax: +82-31-219-1611

E-mail address: princaps@ajou.ac.kr (Yongho Jeon).

발진기가 사용되었고, 각 위치에 압전소자 센서를 결합, 부착하여 실제 충격량을 측정 하였다.

2. 실험 구성

2.1 실험 장치

본 연구에서는 고주파 미세 단조 공정 시 사용되는 발진기로부터 나오는 힘을 각 위치에 부착된 센서를 이용하여 측정하고 소재에 전달되는 충격력을 측정하였다.

충격력을 구체적으로 측정하기 위해 실험 장치를 구성하였고 그 구조는 Fig. 1과 같다. 알루미늄 바 사이에 센서를 볼트체결로 연결하여 힘의 손실 없이 발진기로부터 센서로 전달되는 힘을 직접적으로 측정할 수 있다.

팁과 맞닿는 센서는 충격센서로 팁과 센서 표면간의 충격 시 발생하는 충격력을 측정하며, 충격 시 손실되는 에너지를 제외한 값을 측정한다. 충격 팁은 센서를 보호하고 센서의 변형에 의한 에너지 손실을 제거하기 위해 끝 반경 16.5 mm의 구형 팁을 사용하였다.

발진기는 ETREMA사의 Terfenol-D를 사용한 Sonic Actuator AA-050L을 사용했으며, 발진기의 전원으로는 같은 회사에서 제조한 ACP-01을 사용하였다. 본 연구에 사용된 발진기는 최대 50 μm (Peak to Peak)의 구동 범위를 갖고, 무부하 상태에서 약

1,110 N의 힘을 내는 제품이다^[3].

발진되는 힘을 측정하는 센서는 PCB Piezotronics사의 208C03 모델을 사용하였고, 충격력을 측정하는 센서는 동일한 회사의 200C50 모델을 사용하였다. 관련된 세부적인 사양은 Table 1에 정리하였다.

센서에서 나온 신호는 증폭을 위해 PCB Piezotronics사의 Sensor Signal Conditioner (모델명 : 480E09)를 사용하였다. 증폭된 신호는 Oscilloscope 에 연결하여 측정 및 데이터를 수집하였고, 이러한 장치들을 Fig. 2와 같이 구성하여 실험을 진행 하였다.

2.2 실험 초기 조건 및 변수 설정

기존의 관련된 연구^[6]에 제시된 이론 모델을 바탕으로 고주파 미세 단조 공정 시 단조 팁 끝에서 발생하는 충격력을 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$F = F_s + F_a \tag{1}$$

여기서 F_s 는 발진기에 가해지는 정적 하중이며, F_a 는 발진기로부터 가진되는 주기적인 힘이다. 이 두 가지의 힘이 합하여져서 팁에 가해지게 되고 이 힘을 바탕으로 시편 표면에 충격력이 전달되게 된다. 이 식에서 F 값이 음수를 갖게 될 때 순간적으로 충격 팁과 센서가 떨어지게 되며, 공정과정에서 충격 팁이 공정 적용 소재의 표면을 긁으며 이동하는 것이 아닌 인접한 위치에 충격을 가하며 움직이게 된다.

충격력 측정에 앞서 구성한 수식의 각 값들을 설정하고 측정하였다. 먼저 고주파수 발진기가 가장 큰 힘을 내도록 설정하기 위해 공진 주파수를 측정하였다. 공진 주파수는 운동 질량에 따라 바뀌기 때문에 발진기에 센서, 충격 팁, 연결용 부품들을 장착한 상태에서 측정하였다. 측정 방법은 전원의 최대 출력 상태에서 주파수를 변경하며 진동 변위가 최대가 되도록 하는 주파수를 찾아 결정하였다. 진동 변위에 대한 측정은 Polytec사의 Laser Doppler Velocimeter (LDV) OFV-5000, OFV-551 제품을 사용하여 측정하였으며 최대 공진 측정 결과는 Fig. 3와 같다. 측정결과 시험용

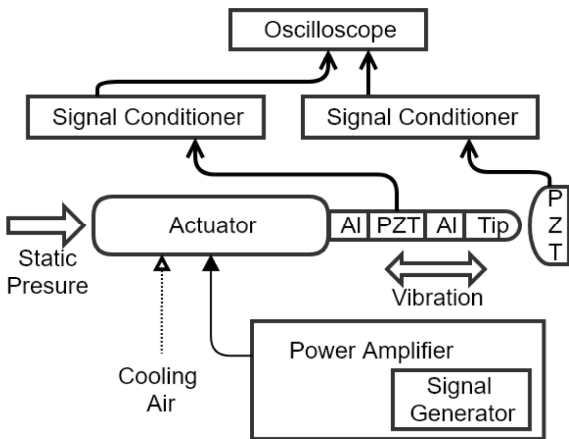


Fig. 1 Structure diagram

Table 1 Sensor specification

Performance	Actuator Sensor ^[4]	Impact Sensor ^[5]	Unit
Sensitivity	2248	22.48	mV/kN
Measurement Range	2.224	222.4	kN
Upper Frequency Limit	36	30	kHz
Stiffness	1.05	17	kN/um

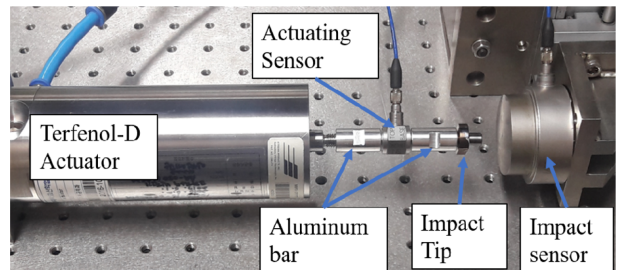


Fig. 2 Equipment components

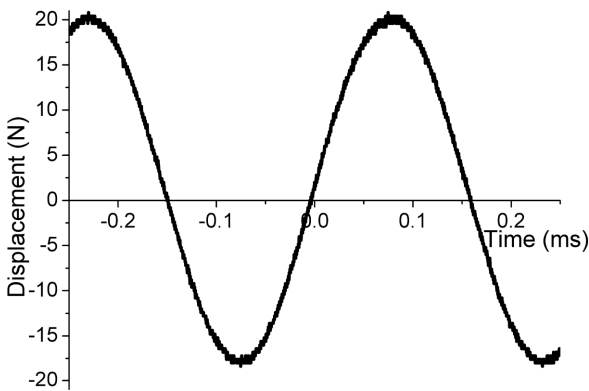


Fig. 3 Results of resonance displacement measurement

장치들을 부착한 상태에서의 공진주파수는 약 3.23 kHz이며, 공진 변위는 39.2 μm 이다.

측정된 결과를 바탕으로 구동력을 계산하고 측정하였다. 먼저 진동 변위를 바탕으로 생성되는 힘을 식 (2)를 통해 계산하였다.

$$F_t = m_t \cdot (2\pi \cdot f_t)^2 \cdot d_t \quad (2)$$

본 연구에 사용된 발진기는 발진기 내부에 83.3 g의 내부 구동 질량이 있고, 연결을 위한 알루미늄 바와 센서를 합하여 55.67 g 이 측정 되었다. 결과적으로 총 구동 질량은 138.97 g이며 구동력은 공진주파수 상태에서 1,132.39 N으로 계산되었다.

정적 하중은 충격 센서를 발진기 방향으로 움직여 측정하였다. 실제 공정에서는 발진기 뒤편에 정하중을 부여하지만, 본 연구에서는 보다 정밀하게 하중을 부여하기 위해 센서를 마이크로미터로 움직여 정적 하중을 부여하였다.

실험 과정은 발진기의 구동주파수가 공진 주파수에서 안정화된 후 진행 하였다. 서로 다른 정하중에서 발생하는 힘을 측정 하였으며, 약 25 μm 와 45 μm 만큼 센서를 이동하여 정하중을 부여하였다. 이후 발진기의 출력량을 변경하여 이에 대한 힘의 변화를 측정 하였으며, 최대 출력을 기준으로 50%와 100%를 비교하였다.

3. 실험 결과

3.1 측정 결과 신호 처리

2개의 센서를 통해 측정된 값이 필요한 신호 대비 잡음이 심하여 Fast Fourier Transform (FFT) Filter를 사용하여 후처리를 하였다. Low Pass Filter를 사용 하였고, Cut-off 주파수를 50 kHz로 설정하여 본 연구와 관련이 없는 주파수는 실험 결과에 영향을 주지 않도록 하였다. 본 연구에서 측정된 모든 그래프는 FFT Filter로 처리한 그래프이다.

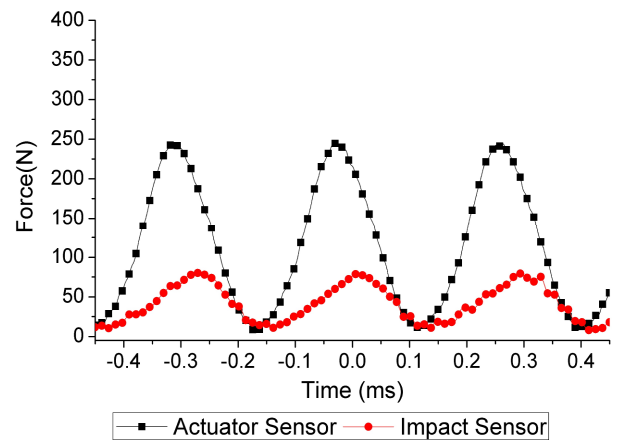


Fig. 4 Impact force measurement after moving the sensor by 25 μm

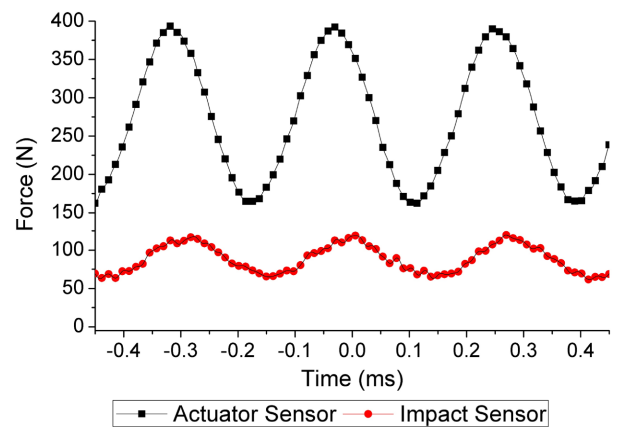


Fig. 5 Impact force measurement after moving the sensor by 45 μm

3.2 정하중 변경에 따른 충격력 변화

먼저 약 25 μm 만큼 충격 센서를 이동하여 정적하중을 부여 하였을 때, 각 센서에서 측정된 힘을 Fig. 4와 같이 확인 하였다. 발진기의 구동조건은 앞서 측정된 공진 주파수인 3.23 kHz에서 전원의 최대 출력 값으로 설정하였다. 발진기에 부착된 센서에서 측정된 값은 최대 245.9 N, 최소 8.7 N이 측정되었고, 이 결과 127.3 N을 중심 값으로 진폭 118.6 N으로 진동하는 것으로 측정 되었다. 충격 센서에서 측정된 값은 최대 80.8 N, 최소 8.0 N이며, 44.4 N을 중심 값으로 36.4 N 진폭의 충격력이 측정되었다.

다음으로는 45 μm 만큼 정적하중을 부여 하였을 때, 각 센서에서 측정된 힘을 Fig. 5와 같이 확인 하였다. 정적 하중외의 모든 구동 조건은 동일하게 유지하였다. 발진기에 부착된 센서에서 측정된 값은 최대 393.8 N, 최소 160.7 N이 측정되었고, 이 결과 277.2 N을 중심 값으로 진폭 116.6 N으로 진동하는 것으로 측정 되었다. 충격 센서에서 측정된 값은 최대 119.7 N, 최소 61.6 N이며, 90.6 N을 중심 값으로 29.1 N 진폭의 충격력이 측정되었다.

측정 결과 정적하중이 차이가 있더라도 각 센서에서 측정되는 진폭 값이 크게 차이 나지 않는 것을 확인하였고, 정적하중의 차이에 따라 진폭의 중심 값이 변경된 것을 확인하였다. 또한 발진기 센서 대비 충격 센서의 측정값을 비교해 보았을 때 낮은 정적하중에서는 약 30.7%의 충격력이 발생하였지만 높은 정적하중에서는 약 24.9%의 충격력만 발생 한 것으로 측정되었다.

3.3 출력 변경에 따른 충격력 변화

다음으로는 전원의 출력을 변경하여 충격력을 측정하였다. 앞서 설정했던 발진기의 최대 출력을 100%로 기준하여 50% 전원 출력으로 설정한 뒤 센서로 충격력을 측정하였다. 정적 하중은 앞의 조건과 동일하게 25 μm 와 45 μm 이동하여 부여하였다.

50% 출력 및 25 μm 만큼 정적하중을 부여한 상태에서 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. 기존의 100% 출력을 부여했을 때에 비하여 Actuator Sensor의 측정값은 최대 136.6 N, 최소 38.0 N으로 발진기의 구동력은 약 41.6%로 감소하였다. 정적 하중 값인 중심 값은 87.3 N 값을 기준으로 주기적으로 하중이 부여되었다. Impact

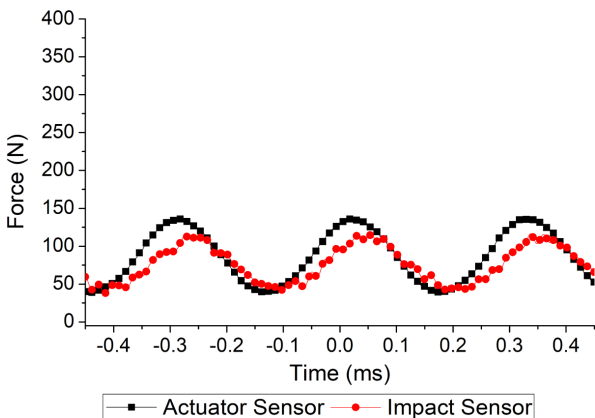


Fig. 6 Impact force measurement result after moving the sensor by 25 μm at 50% output power

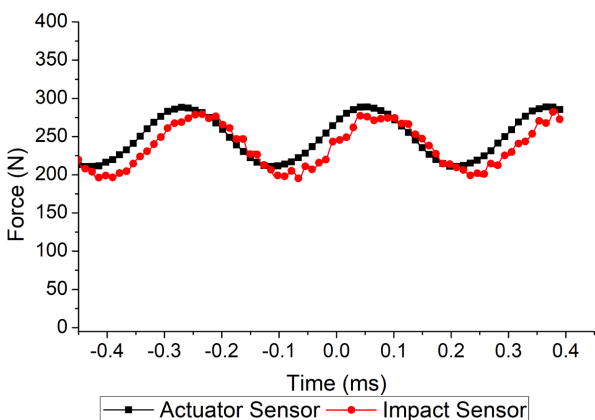


Fig. 7 Impact force measurement result after moving the sensor by 45 μm at 50% output power

sensor 측정값은 최대 116.4 N, 최소 37.9 N으로 측정되었고 진폭은 39.2 N으로 측정되었다. 센서가 받는 충격의 진폭은 약 39.2 N으로 100% 출력과 비교 했을 때 큰 차이가 나타나지 않았다.

50% 출력 및 45 μm 변위만큼 정적 하중을 부여한 상태에서 센서에서 측정된 값은 Fig. 7과 같다. 앞서 측정했던 50% 출력, 25 μm 압축한 조건과 진폭은 크게 차이 나지 않았지만 정적 하중이 크게 상승 한 것을 확인 할 수 있었다. Actuator Sensor 측정값의 최대값은 288.9 N, 최소값은 210.3 N으로 측정 되어 중간 값은 249.6 N이며, 진폭은 39.3 N 이다. 앞서 측정한 100% 출력과 비교 하면 약 39.3%로 감소한 것으로 보인다. Impact sensor 측정값은 최대 286.2 N, 최소 195.2 N 측정되었고, 정하중 값을 제외하면 25 μm 측정치와 유사한 것을 확인하였다.

3.4 각 조건별 충격량 비교

이렇게 측정된 4가지 조건에 대해 각조건 별 결과를 Table 2에 정리 하였다. 각 실험 결과에 대해 출력 및 압축 변위별 정하중 및 진폭을 비교하였다.

각 결과를 볼 때에 Actuator sensor에서 측정된 값은 발진기의 구동 조건에 대해 유사하게 변경 되는 것을 확인하였다. 발진기 출력이 늘어날 경우 정적 하중 또한 늘어났으며, 발진기 출력을 낮출 경우 동적 하중인 진동의 진폭도 같이 낮아지는 것을 확인 하였다. 하지만 Impact Sensor에서 측정된 결과는 정적 하중은 발진기와 압축 변위가 동일하게 증가하였지만, 동적 하중은 조건에 따라 다르게 적용 되는 것을 확인하였다.

이는 이러한 원인은 발진기의 구동 조건이 변경됨에 따라 여러 가지 요인이 복합적으로 적용되어 일어나는 것으로 보이며, 추후 보다 자세한 실험을 통해 알아보려 한다.

3.5 충격력 변화에 따른 소재 변형 측정 결과

앞서 충격력을 측정했던 4가지 조건에 대해 실제 금속 표면에 동일한 충격을 가하고 소재 표면의 단조에 의한 변형을 측정하였다. AISI 4140 소재의 금속 바를 지름 10 mm, 높이 10 mm의 원통형 시편으로 가공하여 사용하였다. 이 금속 시편을 발진기 팁

Table 2 Experiment result

Case	Condition		Actuator sensor		Impact sensor	
	Power (%)	Compress (μm)	Static Load (N)	Amp. (N)	Static Load (N)	Amp. (N)
1	100%	25 μm	127.3	118.6	44.4	36.4
2	100%	45 μm	277.2	116.6	90.6	29.1
3	50%	25 μm	87.3	49.3	77.2	39.2
4	50%	45 μm	249.6	39.3	240.7	45.5

Table 3 Surface measurement result

Case	Indentation Area [mm ²]	Indentation Depth [μm]
1	0.67	97.58
2	0.83	116.42
3	0.28	84.28
4	0.35	103.65

과 맞닿게 하여 시험을 진행 하였다. 발전기 끝에 부착된 팁의 재질은 텅스텐 합금 재질의 팁이며, 표면 변형을 보다 깊게 발생시키기 위해 팁 끝의 반경이 2.5 mm인 팁으로 변경하여 공정을 진행하였다. 단조 가공은 한 지점에 1초씩 시편에 충격을 가하도록 하였다. 각 조건별로 단조장치를 설정하여 금속 표면에 충격을 가한 후 공 초점 레이저 현미경을 사용하여 표면의 변화를 측정하였고, 측정된 금속 표면은 Fig. 8, 9 이다. 측정에 사용한 장비는 Olympus사의 OLS3000 모델로 측정하였으며, 단조 장치에 의한 압흔을 3차원으로 측정하였다. 측정 결과 시편 가공 시 발생한 일정한 줄무늬 흔적을 덮도록 단조 장치에 의한 압흔이 난 것을 확인하였다.

이렇게 측정된 결과를 Table 3에 정리하였다. 발전기의 출력이 클수록 보다 넓은 면적에 압력이 가해진 것을 확인 할 수 있고, 또한 정하중이 클수록 압흔의 면적이 크게 나타나는 것을 확인하였다.

이후 단조 팁이 금속에 부딪친 원점 위치에서 측정값을 바탕으로 압입 깊이를 확인 하였다. 금속 표면을 기준으로 압입된 깊이를 측정하였고 가장 깊게 들어간 위치를 비교 하였다. 금속 가공 시 발생한 표면 거칠기로 인해 기본적으로 약 15 μm의 깊이를 갖고 있었으며, 압입 후에도 초기의 흔적이 남아 있는 것을 확인 할 수 있었다.

결과적으로 팁과 금속간의 접촉 면적은 정하중의 증가보다 출력의 증가에 따라 확연히 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 정하중이 높을 경우 낮은 정하중을 적용한 조건에 비하여 면적은 유사하게 약 24% 증가하였지만, 출력을 최대로 적용 할 경우 50% 출력에 비하여 138% 증가하였다.

하지만 압입 깊이는 접촉 면적과 반대로 출력의 증가보다 정하중의 증가가 크게 작용하는 것을 확인 하였다. 정하중을 증가 할 경우 약 21.4%의 압입 깊이의 증가를 확인하였고, 출력을 변경할 경우 50% 출력에 대비하여 약 14.1%의 증가만 적용되었다.

4. 결론

본 논문에서는 고주파 미세 단조 장치에 사용되는 Terfenol-D에 의한 충격력을 측정하였다. 발전기에서 구동되는 힘과 시편에 전달되는 힘을 측정하기 위해 PZT Sensor를 2개 사용하였으며, 공정

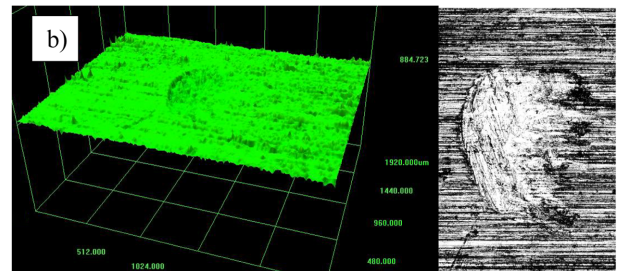
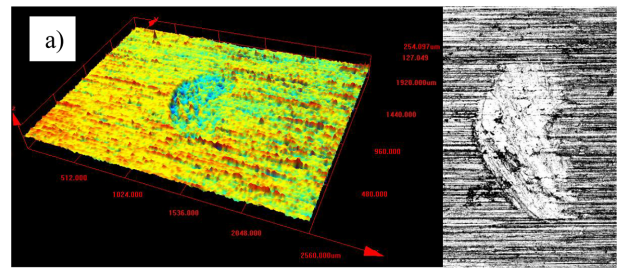


Fig. 8 Surface condition of specimen after 100% power forging: (a) 25 μm case, (b) 45 μm case

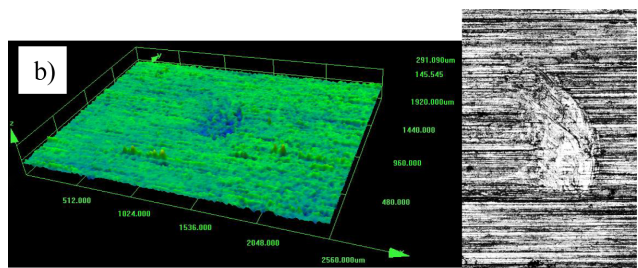
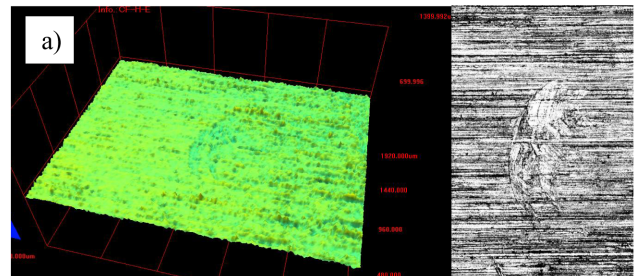


Fig. 9 Surface condition of specimen after 50% power forging: (a) 25 μm case, (b) 45 μm case

조건을 변경해 가며 충격력을 측정하였다. 이후 실제 시편을 가공하여 앞서 측정된 공정조건과 동일하게 적용하였다. 이 시편을 공 초점 현미경을 사용하여 표면의 변형량을 3차원으로 측정하고 그 값을 비교하였다.

고주파 미세 단조 공정은 발전기에 시편 방향으로 예압이 적용된 상태에서 주기적인 진동을 통한 충격력을 전달하기 때문에 2가지 힘이 동시에 적용되게 된다. 이러한 내용에 대해 앞서 연구된 결과를 바탕으로 실험 및 연구를 진행 하였으며 공정 조건을 서로 다르게 변경하면서 금속 시편에 전달될 충격력을 측정해 보았다.

측정값을 비교하기 위한 공정 조건으로는 최대 출력을 기준으로 하여 100%, 50% 출력으로 발전기를 구동하여 시험 하였고, 센서

의 위치를 이동하여 미세 단조 공정에서의 정적 하중을 구현하였다. 정적하중은 센서의 이동 변위를 기준으로 하였으며 25 μm , 45 μm 만큼 센서를 이동하여 압축력을 구동하였다.

각 조건에 대한 actuator 센서의 하중변화와 금속 시편이 받을 하중에 대한 측정 결과를 정리하였고, 앞서 연구되었던 내용의 정하중(F_s) 값과 동하중(F_d) 값을 확인 하였다. Actuator sensor와 impact sensor의 측정값에 대해 각 조건별로 유사한 상관관계를 갖고 특정한 계수 값을 도출 할 수 있을 것이라 판단하고 연구를 진행하였지만, 측정결과 유의미한 결과를 찾을 수는 없었다. 출력 조건과 정적 하중에 따라 충격력의 전달 비율이 서로 다르게 나타났으며 이는 공정 장치전체의 감쇠 계수가 영향을 미친 것으로 보인다. 추후 공정 조건에 대한 최적화 연구를 통해 금속 시편에 하중이 가장 효율적으로 전달 될 수 있는 조건을 찾으려 한다.

이후 공초점 현미경을 사용하여 발진기의 공정 조건에 대한 금속 표면의 변형량을 확인 하였다. 공초점 현미경을 사용하여 표면에 생성된 단조로 인한 압흔을 측정하였다. 압입 면적과 압입 깊이를 측정 하였으며 결과를 바탕으로 공정 조건과 금속 표면의 단조 결과 사이의 유사성을 확인하였다. 압입 면적에 주요한 영향을 주는 요소는 발진기의 출력이며 정하중 값에 의해 증가한 면적은 24%인 것에 반해 약 138%로 크게 증가한 것을 볼 수 있었다. 반대로 압입 깊이에 주요하게 영향을 미치는 요소는 정하중이며 출력을 증가 하였을 때 깊이가 약 14% 증가하였으나, 정하중을 증가하였을 때 21.4% 증가 한 것을 확인 하였다. 이러한 결과를 통해 공정 조건에 따른 하중과 금속 표면의 변화에 대한 상관관계를 연구하였다.

본 측정 결과를 바탕으로 Terfenol-D 발진기의 공정 조건에 따른 충격력과 금속의 표면의 변화를 확인하였다. 본 측정 결과를 바탕으로 미세단조 공정 장치 구성과 공정 조건을 설정하는 기초 자료로써 사용 될 수 있을 것으로 판단한다.

하지만 미세 단조 공정에 적용하기에 앞서 몇 가지 최적화된 조건을 확인해야 할 것으로 보인다. 발진기의 출력 및 정하중 값에 따라 실제 금속에 전달되는 충격력이 차이가 있으며 발진기의 구동 조건과 비례하여 거동하지 않는 것으로 확인하였다. 이후 추가적인 연구를 통해 발진 주파수, 출력, 정하중에 대한 최적화 조건에 대한 구성이 필요 할 것으로 보인다.

또한 금속의 변형량에 대한 차이도 최적화가 필요할 것으로 보인다. 공정이 효과적으로 금속에 적용되기 위해서는 단조 면적 및 깊이를 최적화하여 공정 시간대비 단조 면적에 대한 최적화가 필요하다. 이러한 공정 조건은 금속의 종류에 따라 차이가 있을 것으로 보인다. 현재 논문에서는 텅스텐 팁과 AISI 4140 강재를 사용하였지만, 공정을 상용화하여 다른 금속을 사용할 경우 압흔의 형성이 다를 것으로 보이고, 이에 대해 기초 실험 및 최적화 또한 필요하다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1C1A1A02036547).

References

- [1] Jung, C., Song, H., Lee, G. L., Jeon, Y., 2017, Numerical Simulation of Surface Residual Stress on Laser-Assisted Micro-Forged SCM440 Steel, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 26:6 550-557.
- [2] Choi, B., Jeon, Y., Lee, M. G., Kim, H., Kim, D., 2015, Analysis of Micro Forging System for Straightness of Vibration Tip, Korea Society for Precision Engineering 2016 Autumn Conference, 863-863.
- [3] ETREMA Products, Inc., n.d., viewed 6 September 2018, 050-LH Sonic Actuator, <www.etrema.com/sonic-actuator/>.
- [4] PCB Piezotronics, Inc., n.d., viewed 6 September 2018, 208C03, ICP® quartz force sensor, <www.pcb.com/products.aspx?m=208c03>.
- [5] PCB Piezotronics, Inc., n.d., viewed 6 September 2018, 200C50, ICP® quartz force sensor, <www.pcb.com/products.aspx?m=200c50>.
- [6] Wu, B., Zhang, L., Zhang, J., Murakami, R., Pyoun, Y., 2015, An Investigation of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Machining Process by Numerical Simulation, Advances in Engineering Software, 83 59-69.