

# 극초단 레이저 펄스 간격 조절을 통한 나노 홀 생성

## Nano hole generation via ultrashort pulsed laser system

안상훈<sup>1,\*</sup>, 최지연<sup>1</sup>, 조성학<sup>1</sup>

S. Ahn(shahn@kimm.re.kr)<sup>1,\*</sup>, Y.H.Kim, J. Choi<sup>1</sup>, S. H. Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 첨단생산장비연구본부 광응용기계연구실

**Keywords** : Ultrashort pulsed laser, Nanohole, Pule interval, high aspect ratio

### 1. Introduction

1994년 D.Du et al.에 의해 펨토초 레이저를 이용하여 마이크로미터 크기의 가공을 하는 연구가 처음으로 수행되고<sup>1</sup> 10년이 지나지 않아서 나노미터 크기의 가공을 하는 연구가 A. Joglekar et al.과 A.Chimmalgi et al.에 의해 시도되었다.<sup>2,3</sup> 이후 펨토초 레이저 펄스를 Bessel beam의 형태로 재료에 조사하여 높은 종횡비를 가지는 나노 홀 가공이 여러 연구자들에 의해 수행되었다.<sup>4,5,6</sup> 기존 연구에서는 Bessel beam을 만들기 위하여 Axicon 또는 spatial light modulator (SLM) 등의 광학계를 사용하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 사용하였던 Axicon이나 SLM등의 광학계를 사용하지 않고, 1 나노초 이하의 간격으로 펨토초 레이저 펄스를 재료에 조사함으로써 높은 종횡비의 나노 홀을 가공할 수 있었다.

### 2. Experimental

높은 종횡비 (>13:1)를 가지는 나노 홀을 가공하기 위해서 1030 nm 파장, 350 펨토초 레이저 (Amplitude Satsuma HP3)가 사용되었다. 나노 홀 가공을 위한 레이저 펄스는 외부에서 5V TTL 신호를 인가하여 발진시킬 수 있었다. 발진된 레이저 펄스는 Polarization beam splitter (PBS)를 통해 s-편광과 p-편광으로 분리되어 서로 다른 길이의 광경로를 통하여 유리(Asahi glass, AN100) 표면에 집속렌즈(Mitutoyo, M Plan Apo, 50X, NA 0.55)를 통해 조사되었다. s-편광 펄스와 p-편광 펄스의 시간간격은 s-편광 펄스의 광경로 길이를 변화시키면서 조절하였다. 본 연구에서 두 펄스 간의 시간간격은 0초에서 1 나노초까지 100 피코초의 간격으로 조절하였다. 두 펄스가 일치하는 time zero 지점은 autocorrelator를 이용하여 선정하였고, time zero부터의 시간은 광경로 길이의 차이를 빛의 속도로 나누어서 계산한 값을 사용하였다. 나노 홀의 깊이 및 직경은 focused ion beam (FIB) milling 및 Scanning electron microstope (SEM)을 이용하여 측정하였다.

### 3. Results and discussion

Fig1.에서 보는 바와 같이 펄스간 시간간격이 100 피코초에서 1 나노초 일 때, 종횡비 13:1이 넘는 나노 홀이 생성되었다. 이때, 나노 홀의 직경은 200-300 nm가 됨을 확인하였고, 깊이는 4.7-6.3  $\mu\text{m}$ 가 됨을 확인 하였다. 나노 홀은 펄스간 시간 간격이 증가함에 따라 직경은 증가하고, 깊이는 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 반면, 펄스 에너지의 변화에 따라서는 9  $\mu\text{J}$ 를 기준으로 나노 홀이 생성되는 것을 제외하고는 직경 및 깊이 변화에 경향성을 보이지 않았다.

두 개의 펄스가 하나로 조사되는 time zero에서 나노 홀이 생성되지 않음을 통해 본 연구에서 생성된 나노 홀이 self focusing 또는 fillametation에 의한 것이 아님을 주장할 수 있다. 또한 나노 홀 생성에 시간간격과 펄스 에너지가 필요하다는 사실을 바탕으로 먼저 도달한 펄스가 생성한 플라즈마에 의해 두 번째 펄스가 영향을 받아 Bessel beam에 의해 형성되는 것과 비슷한 형태의 가공이 이루어졌음을 추측할 수 있다. 시간분해 연구를 통해 첫 번째 펄스가 공기 중에 플라즈마를 형성하였음을 관측하였고, 형성된 플라즈마에 의한 충격파가 약 100 나노초까지 존재하였다가 소멸되는 것을 관측하였다. 이를 토대로 첫 번째 펄스가 형성한 플라즈마가 두 번째 펄스에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였으나, 정확하게 어떤 영향을 주었는지에 대한 추가 연구가 필요하다.

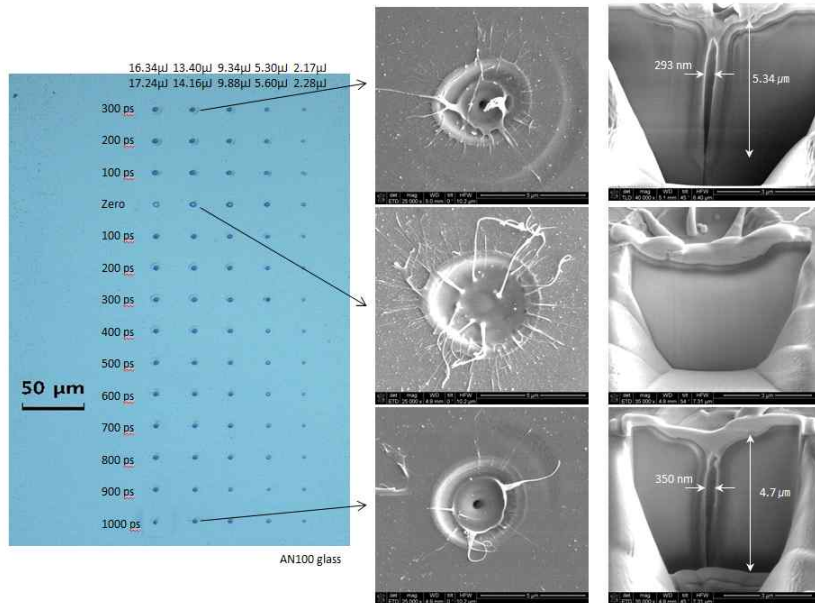


Fig. 1 시간간격 및 펄스 에너지에 따른 나노 홀 생성

#### 4. Conclusions

펄스 레이저 펄스를 100 피코초부터 1 나노초까지 시간 간격을 두고 유리에 조사하여 종횡비 13:1이 넘는 나노홀을 생성하였다. 이때, 직경은 200-300 nm, 깊이는 4.7-6.3 μm임을 확인하였다. 첫 번째 펄스가 생성하는 플라즈마에 의해서 두 번째 펄스가 영향을 받아 나노 홀이 생성된 것으로 추측하고 있고 좀 더 명확한 원리를 증명하기 위한 추가 연구를 진행할 계획이다. 본 연구에서 생성한 나노 홀은 유리 절단, 메타 물질 생성 등에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] D. Du, X. Liu, G. Korn, J. Squier, G. Mourou, "Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs", *Applied Physics Letters*, 64, pp.3071-3073, 1994.
- [2] A. P. Joglekar, H. Liu, G. J. Spooner, E. Meyhoufer, G. Mourou, A. J. Hunt, "A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining", *Applied Physics B*, 77, pp. 25-30, 2003.
- [3] A. Chimmalgi, T. Y. Choi, C. P. Grigoropoulos, K. Komvopoulos, "Femtosecond laser aperturless near-field nanomachining of metals assisted by scanning probe microscopy", *Applied physics letters*, 82, pp. 1146-1148, 2003.
- [4] S. I. Kudryashov, G. Mourou, A. Joglekar, J. F. Herbstman, A. J. Hunt, "Nanochannels fabricated by high-intensity femtosecond laser pulses on dielectric surfaces", *Applied Physics Letters*, 91, pp.45-48, 2007.
- [5] F. Courvoisier, P. A. Lacourt, M. Jacquot, M. K. Bhuyan, L. Furfaro, J. M. Dudley, "Surface nanoprocessing with nondiffracting femtosecond Bessel beams", *Optics Letters*, 34, pp. 3163-3165, 2009.
- [6] M. K. Bhuyan, F. Courvoisier, P. A. Lacourt, M. Jacquot, R. Salut, L. Furfaro, J. M. Dudley, "High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams.", *Applied Physics Letters*, 97, pp.8-10, 2010.