

레이저 빔의 흡수 액체 내 침투에 의해 생성된 키홀 구조와 안정성

Keyhole-Structure and Stability in Laser-Beam Penetration into an Absorbing Liquid

포항공과대학교 기계공학과 김동식, 장덕석

I. 서론

고에너지의 레이저 가공은 재료 가공의 여러 분야에 이용되고 있다. 레이저 가공 분야 중에서 용입 용접(penetration welding)은 다음과 같은 이점으로 인해서 특히 중요시 되고 있다. 1) 용접 되는 부위와 용접 주변의 열 영향부가 매우 좁다. 2) 재료의 내부에 깊은 용입이 가능하다. 3) 전자 빔 용접과는 달리, 진공 조건과 같은 까다로운 사전 조건을 필요로 하지 않는다.^[1] 레이저 또는 전자 빔이 용입 용접의 열원으로 이용될 때 재료의 표면에 공동(cavity)이 형성되는데 이러한 공동을 키홀(keyhole)이라고 한다. 키홀의 생성은 레이저 드릴링 과정, 용접 과정, 절단 과정 등에서 레이저의 복사 에너지가 열로 변환되는 중간 과정이다. 키홀은 용접 후의 제품의 상태를 결정짓는 중요한 요인 중의 하나이므로 주어진 레이저의 특성(파워와 빔의 반지름 등)에 따른 용입의 깊이를 예상하는 것은 상당히 중요하다 따라서 용입 용접 시에 발생하는 키홀의 형상과 깊이에 관련된 연구는 이론적으로^[1-6] 또는 실험적으로^[7-9] 많이 이루어졌다. 키홀의 깊이와 형상은 재료의 표면에 입사 되는 레이저 에너지에 의해서 형성되는 plume 분출에 의한 반동 압력(recoil pressure)과 중력, 그리고 표면 장력의 3가지 힘의 균형에 의해서 결정 된다. 여태까지 키홀과 관련하여 이루어진 연구들에서는 이러한 3가지의 힘의 균형에 기초하여 용융된 재료의 자유 표면에 레이저 빔이 입사 되었을 때 발생할 수 있는 키홀의 형상과 깊이를 이론적으로 모델링 하였다. 이론 과정을 통하여 키홀을 모델링 할 때에는 일정하게 유지되는 정상 상태와 같은 가정들을 전제 하기 때문에 실제 용접 시에 나타나는 키홀과는 많은 차이를 보이고 있다. 이론 상으로 가정한 정상 상태는 키홀의 생성과 발전 과정에서 어떤 일정한 상태에 도달할 때까지는 유지되나, 어느 시점을 지나게 되면서 깨어지게 되고, 그 이후에 불안정한 상태로 시간에 따라 변화하게 된다. 이번 실험에서는 연속파(CW) CO₂ 레이저를 이용하여, 레이저의 복사 에너지가 물의 자유 표면에 입사 되었을 때 형성되는 공동을 용입 용접 시에 형성되는 키홀과 비교하고, 어떠한 상태에서 이론적으로 가정하는 정상 상태가 유지되고, 이후에 깨어지게 되는지를 알아 보았다. 그리고 키홀이 형성 됨에 따라 레이저의 강도가 그 깊이의 변화와 함께 변화한다고 할 때, 이전까지 키홀 전체에 걸쳐 레이저의 강도가 일정하다는 가정 하에 모델링 되었던 키홀의 단면과 어떠한 차이를 보이는지도 알아보았다.

II. 실험

실험은 Fig. 1과 같이 10.6 μ m의 파장을 가지는 CW CO₂ 레이저를 물의 자유 표면 위에 수직으로 위치시킨 후, 물의 표면에 레이저를 입사 시켜서 이루어 진다. 레이저의 파워는 4.4W이고, 파워 밀도는 0.22MW/cm² 이고, 입사 되는 레이저 빔의 지름은 50 μ m이다. 10.3 μ m의 파장을 지니는 레이저에 대해서 물은 강한 흡수력 (굴절율: 1.168, 흡광 계수: 0.0715)을 지닌다. 따라서 물의 표면에서 급속한 온도 상승이 이루어 지고, 기화 현상이 발생하게 된다. 기화된 증기에 의해서 수면에 반동 압력이 형성되어, 용입 용접 시에 발생하는 키홀과 같은 형태의 공동을 만들어 내게 된다. 레이저 가열을 시작한 후 생성되는 키홀의 형상과 깊이의 변화를 관찰하고, 어떠한 시점까지 정상 상태가 유지되고, 그 이후에 어떻게 불안정한 상태로 전환되어 키홀이 소멸되고 다시 성장하는 지를 레이저 섬광 사진법(laser-flash photography)을 이용하여 관찰하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

실험결과 중 가장 주목할 것은 키홀의 형상이 정상상태에 이르지 못하고 길이와 지름의 비가 일정한 값을 넘어서면 키홀이 불안정성으로 인해 파열된다는 것이다. 본 실험에서 레이저 조사 시간이 0.2ms를 넘어서게 되면, 키홀이 파열되어 아래 부분에서 전체 공동과 분리된 작은 공동이 형성된다. 이렇게 표면 공동에서 분리된 공동은 곧 내파하여 여러 개의 다른 작은 공동들을 만들어 내게 된다. 0.2ms 이후의 공동은 안정된 상태가 아닌 동적인 진동의 현상을 보여주고 있다.^[2] 결과적으로 연속파 레이저 어블레이션(ablation)에 의한 공동의 발생과 성장에서 어떠한 정상 상태의 도달은 일어나지 않음을 알 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 표면 공동은 서로 다른 레이저 펄스 조사 시간에 대해 계속적으로 변화하는 형태를 가지고 있으며, 공동의 길이 성장은 입사 되는 에너지에 따라서 달라진다. 이번 실험에서 사용된 4.4W의 에너지를 가지는 레이저에 대한 최대 깊이는 0.2ms보다 짧은 시간 구간 내에서 형성되고, 지속시간이 0.2ms를 넘어서는 경우에는 0.2ms부근에서 형성되는 것을 보여주고 있다. 또한 최대 깊이가 형성된 이후에는 불안정하게 변화하는 것을 잘 나타내고 있다. 이번 실험에서 실험적으로 얻어진 공동의 최대 깊이는 0.2ms 부근에서 형성되는 0.7mm이다.

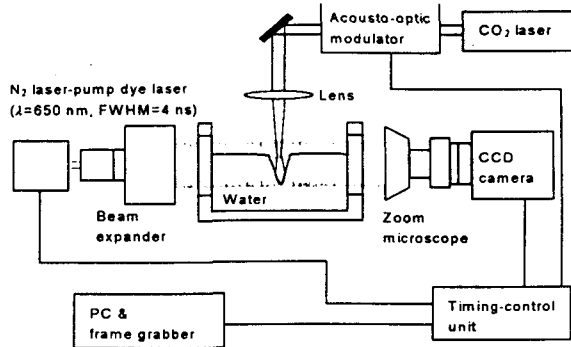


Fig. 1 Experimental setup.

CW 레이저 빔에 의해서 형성되는 키홀의 형태를 결정하는 힘의 요소가 반동 압력, 중력, 그리고 표면 장력이라 할 때, 정상 상태의 키홀의 구조를 이론적으로 계산할 수 있다.^[8] 기존의 연구에서 일반적으로 키홀을 모델링할 때 아래와 같은 공간분포를 갖는 가우시안 빔을 가정하였다.

$$q_0(r) = \frac{2I}{\pi a^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{a}\right)^2\right] \quad (1)$$

(I : 레이저빔 출력, a : 빔 반지름, r : 중심으로부터의 거리)

따라서 키홀 전체에서 어떤 r 에서의 빔의 에너지 밀도는 키홀의 깊이와는 상관없이 일정하다. 즉 전파되는 축에 따른 빔의 확산현상을 고려하지 않았다. 그러나 실제로 빔의 지름은

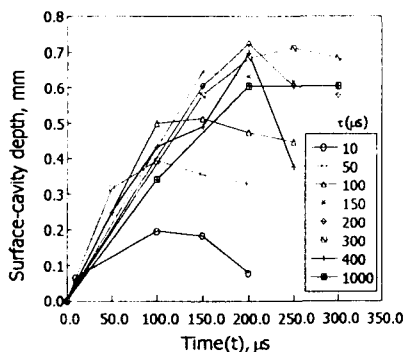


Fig. 2 Surface-cavity depths obtained by shadowgraph imaging as a function of time for several laser-pulse durations τ .

빔 초점면으로부터 0.5mm의 거리에서 약 3배의 값으로 증가하게 된다. 따라서 어떤 지점(축에서부터의 거리가 r 인 곳)에서 빔의 강도는 초점면에서부터 빔이 진행함에 따라 변화하게 된다. 초점면에서 z 만큼 떨어진 지점에서 가우시안 분포를 가지는 빔의 폭은 다음과 같은 식에 의해서 구하여 질 수 있다.

$$a = a_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi a_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

(λ : 파장, z : 초점면으로부터 거리, a_0 : 최소 반경)

식 (2)과 같이 진행 거리에 따라서 달라지는 빔의 강도는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

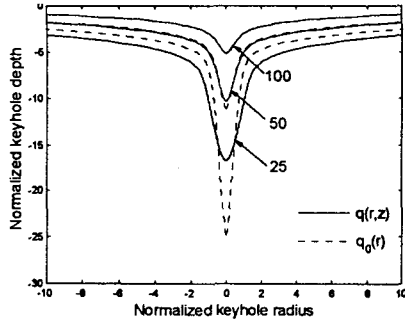


Fig. 3 Normalized steady-state surface-cavity profiles calculated for several laser-beam radii, α , on the focal plane.

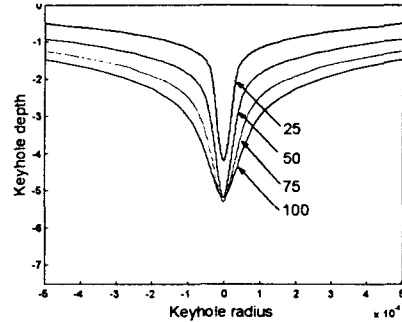


Fig. 4 Steady-state surface-cavity profiles calculated by new beam intensity $q(r,z)$

$$q(r,z) = \frac{2I}{\pi m^2 a_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{ma_0}\right)^2\right], \quad m = \left[1 + (\lambda z/\pi a_0)^2\right]^{1/2} \quad (3)$$

정상 상태에서 $q_0(r)$ 와 $q(r,z)$ 에 의해서 구하여지는 키홀의 단면은 Fig. 3과 같다. 빔의 확산 현상이 고려되지 않을 때에는 빔의 초점면에서의 반지름을 작게 할수록 키홀의 깊이는 무한히 깊어지게 된다. 그러나 빔의 확산 현상을 고려할 때, 빔의 반지름이 매우 작은 경우에는 빔의 확산 현상이 크게 작용하여 오히려 키홀의 깊이가 감소한다. Fig. 4를 살펴보면 빔의 반지름이 100 μm 에서 75 μm 로 감소할 때에는 깊이가 증가하게 되나, 빔의 반지름이 50, 25 μm 와 같이 더 감소할 때에는 깊이도 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 두 가지 식에 의해서 계산된 값과 실험값을 비교해 보면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림을 비교해 보면 실험값과 계산값의 비교에서 두 가지 식 모두 키홀의 깊이에서는 어느 정도 근사한 값을 나타내고 있지만 키홀의 폭 면에서는 상당히 다른 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 키홀의 깊이에서 빔의 확산만을 고려하여, 깊이에 따라서 빔의 강도가 달라지는 것은 빔이 키홀 내에서 다중으로 반사되는 영향 등을 무시하기 때문에 깊이의 감소를 가져올 수 있음을 볼 수 있다.^[4]

키홀의 불안정성은 입사 되는 레이저 에너지와 유체 역학적 압력, 그리고 표면 장력을 고려할 때 이해될 수 있다. 위의 3가지 요소 중 뒤의 2가지 요소가 불안정성을 야기하게 된다. 그러나 표면 공동에서 고려되는 기준 길이(키홀의 깊이)는 그 크기가 매우 작으므로 중력에 의해 작용하는 정수압은 표면 장력에 비해서 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 긴 실린더 형태의 공동의 불안정성은 표면장력에 의한 Rayleigh-Taylor 불안정성으로 설명되어질 수 있다.^[10] 이 불안정성은 섭동의 파장이 지름의 약 13배일 경우 최대값을 가진다. 본 실험에서 키홀이 불안정성에 의해 파괴되기 시작하는 최대 깊이를 반지름의 약 10배로 측정되었는데 형상 등의 불완전성을 고려하면 이론에 대체로 부합하는 결과라고 할 수 있다. 그리고, 이번 실험에서 구하여지는 정상 상태의 키홀이 형성된 이후에 파괴가 일어날 때까지의 표준 시간 구간은 약 55 μs 이다. 실험에서 최대 깊이의 키홀이 약 0.2ms에서 형성된 이후에 약 0.25ms 이전의 약 50 μs 의 시간 구간 내에서 공동이 파괴되는 것을 보여주고 있다. 즉 공동의 폭발이 이론상으로 계산된 시간 구간(수십 마이크로 초) 내에서 발생하는 것을 증명하고 있다.

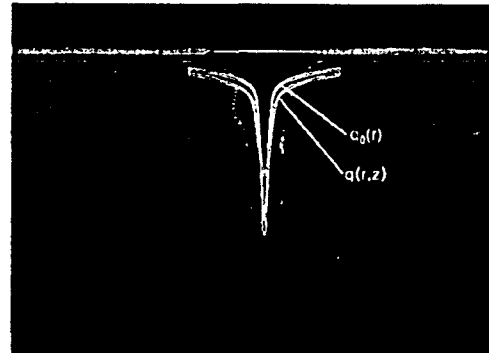


Fig. 5 Keyhole radius comparison between calculated keyhole profiles and experimental result at $t=200\mu\text{s}$ (steady-state keyhole shape)

IV. 결론

CW CO₂ 레이저에 의해서 물의 자유 표면에 형성된 공동은 용입 용접 시에 발생하는 키홀과 연관시켜 키홀의 생성, 형상의 변화, 형태, 그리고 소멸 등의 현상을 설명하는 것을 가능하게 한다. 이번 연구에서의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 물의 자유 표면에서 만들어진 표면 공동은 특정 시간까지는 정상상태를 유지하며 성장하지만 어느 시점을 기준으로 불안정한 상태로 전이되어 파괴된다. 이러한 공동의 파괴는 Rayleigh에 의해서 해석된 액상에서 속이 빈 공기 기둥이 형성될 때 야기되는 불안정성과 관련하여 설명되어질 수 있다.
- 2) 이론적인 키홀 형상 계산 결과는 깊이를 비교적 정확히 예측하지만 키홀의 폭을 실제보다 작게 예측하는 것으로 나타났다. 특히, 키홀의 형상을 예측하는데 있어서 레이저 빔의 확산을 고려하여야 한다. 기존의 모델에서와 같이 레이저 빔의 확산을 고려하지 않으면 레이저 빔의 초점 크기를 감소시킴에 따라 키홀의 깊이가 무한정으로 성장하는 것으로 나타나 키홀의 최대값을 예측할 수 없다.

V. 참고 문헌

1. J. Kroos, U. Gratzke, M. Vicanek and G. Simon, "Dynamic Behaviour of the Keyhole in Laser Welding," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.26, pp. 481-486 (1993)
2. T. Klein, M. Vicanek, J. Kroos, I. Decker and G. Simon, "Oscillations of the Keyhole in Penetration Laser Beam Welding," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.27, pp. 2023-2030 (1994)
3. J. G. Andrews and D. R. Atthey, "Hydrodynamic Limit to Penetration of a Material by a High-Power Beam," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.9, pp. 2182-2194 (1976)
4. P. Solana and G. Negro, "A Study of the Effect of Multiple Reflections on the Shape of the Keyhole in the Laser Processing of Materials," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol 30, pp. 3216-3222 (1997)
5. R. Fabbro and K. Chouf, "Keyhole Modeling during Laser Welding," *J. Appl. Phys.*, Vol.87, pp. 4075-4083 (2000)
6. J. Dowden, W. S. Chang, P. Kapadia and C. Strange, "Dynamics of the Vapour Flow in the Keyhole in Penetration Welding with a Laser at Medium Welding Speeds," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.24, pp. 519-532 (1991)
7. S. Fujinaga, H. Takenaka, T. Narikiyo, S. Katayama and A. Matsunawa, "Direct Observation of Keyhole Behavior during Pulse Modulated High-Power Nd:YAG Laser Irradiation," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.33, pp. 492-497 (2000)
8. R. Bonollo, A. Tiziani and A. Zambon, "Model for CO₂ Laser Welding of Stainless, Titanium, and Nickel: Parametric Study," *Materials Science and Tech.*, Vol.9, pp. 1137-1144 (1993)
9. R. E. Mueller, J. Bird and W. W. Duley, "Laser Drilling into an Absorbing Liquid," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71 (2), pp. 551-556 (1992)
10. S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Dover, New York (1961)