

레이저 빔의 흡수 액체 내 침투에 의해 생성된 키홀 구조와 안정성

김동식, 장덕석

Keyhole-structure and Stability in Laser-beam Penetration Into an Absorbing Liquid (Water)

D. Kim, D. Jang

포항공과대학교 기계공학과

ABSTRACT

When a high-power laser beam is irradiated on the surface of material, it is well known that a cavity, called a keyhole induced by the pressure action of the vapor plume, is generated in the molten material. This paper describes the interaction between a pulsed CO₂ laser beam and water. The laser-beam is used to generate and maintain a conical depression in the water surface similar to the keyhole created during laser penetration welding. Experimental results show that the depth of laser-beam penetration is limited by hydrodynamic instability. The instability of the surface cavity can be understood by the capillary instability of a hollow jet. Theoretical computation of the steady keyhole shape has been performed, modifying the model suggested by Andrews et al. (1976). The model predicts the qualitative behavior of the keyhole but significantly underestimates the average diameter.

Key words: CO₂ laser, keyhole, penetration welding, keyhole instability, keyhole modeling, penetration depth

1. 서 론

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 재료에 깊은 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 특성에 따른 용입의 깊이를 예상하는 것은 상당히 중요하다. 따라서 용입 용접 시에 발생하는 키홀의 형상과 깊이에 관련된 연구는 이론적으로¹⁻⁶⁾ 또는 실험적으로⁷⁻⁹⁾ 많이 이루어졌다. 지금 키홀과 관련하여 이루어진 연구들에서는 용융된 재료의 자유 표면에 레이저 빔이 입사 되었을 때 발생할 수 있는 키홀의 형상과 깊이를 이론적으로 모델링하였다. 그러나 이론상으로 키홀의 형상과 깊이를 예측할 때에는 어떤 균일한 특성을 지니는 대상과 평형 상태를 가정한다. 또한 키홀 형성의 원인이 되는 plume으로 인해 발생하는 변화, 키홀의 깊이에 따른 레이저 빔의 강도 변화, 빔 에너지의 전도 등의 현상을 일반적으로 무시하였다. 따라서 이론 과정을 통하여 구하여진 키홀의 깊이와 형상은 실제 용접 시에 나타나는 키홀과는 많은 차이를 보이고 있다. 이론상으로 가정한 정상 상태는 키홀의 생성과 발전 과정에서 어떤 상태에 도달할 때 까지는 유지되나, 어느 시점을 지나게 되면서 깨어지게 되고, 그 이후에 불안정한 상태로 전환되어 시간에 따라 변화하게 된다. 이번 실험에서는 펄스파 CO₂ 레이저 빔을 이용하여, 빔의 복사 에너지가 물의 자유 표면에 입사 되었을 때 형성되는 공동을 용입 용접 시에 형성되는 키홀과 비교하고, 어떠한 상태에서 이론적으로 가정하는 정상 상태가 유지 되고, 이후에 깨어지게 되는지를 알아 보았다. 그리고 키홀이 성장함에 따라서 레이저 빔이 키홀의 깊이에 따라서 확산

된다고 할 때 나타나는 결과를 살펴 보았다.

2. 실험

실험은 Fig. 1과 같이 10.6 μm의 파장을 가지는 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 초점 지름은 50 μm이다. 물의 자유 표면에 입사 되는 10.6 μm의 파장을 지니는 레이저에 대해서 물은 강한 흡수력 (흡수율 약 99.3%)을 지닌다. 따라서 물의 표면에서 급속한 온도 상승이 이루어 지고, 기화 현상이 발생하게 된다. 기화된 증기에 의해서 발생하는 운동량의 변화로 인해 수면에 반동 압력이 형성되어, 용입 용접 시에 발생하는 키홀과 같은 형태의 공동을 만들어 내게 된다. 0.4ms동안 지속되는 레이저 펄스에 대해서 키홀의 발생, 형상과 깊이의 변화 그리고 정상 상태에서 불안정한 상태로의 전환 현상을 레이저 섬광 사진법(laser-flash photography)을 이용하여 관찰하였다.

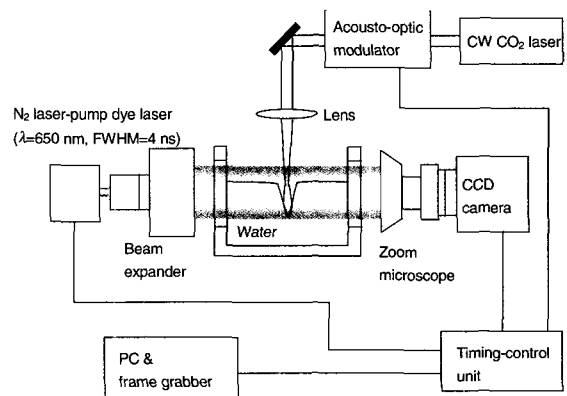


Fig. 1 Experimental setup.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Shadowgraph imaging에 의한 표면 공동의 가시화

Fig. 2는 0.4ms CO₂ 레이저 펄스가 수면에 입사 될 때 표면 공동의 발생과 변화를 직접 촬영한 것이다. 실험 결과 중 가장 주목할 것은 기홀의 형상이 정상상태에 이르지 못하고 길이와 지름의 비가 일정한 값을 넘어서면 기홀의 불안정성으로 인해 파열된다는 것이다. 본 실험에서 레이저 조사 시간이 0.2ms를 넘어서게 되면, 기홀이 파열되어 아래 부분에서 전체 공동과 분리

된 작은 공동이 형성된다. 이렇게 분리된 공동은 곧 내파하여 여러 개의 다른 작은 공동들을 만들어 내게 된다. 0.2ms 이후의 파열된 공동은 불안정한 상태까지 다시 성장하고, 그 이후에 파열되는 동적인 진동의 현상을 보여주고 있다.2) 결과적으로 레이저 어블레이션(ablation)에 의한 공동의 발생과 성장에서 어떠한 정상 상태의 도달은 일어나지 않음을 알 수 있다. 또한 기홀의 시간에 따른 거동은 기홀의 하단부에서 발생하는 기홀의 넥킹에 인하여 불안정하게 되므로, 기홀의 불안정성의 요소가 액체상태에서 존재하는 표면장력에 의한 것임을 알 수 있다.

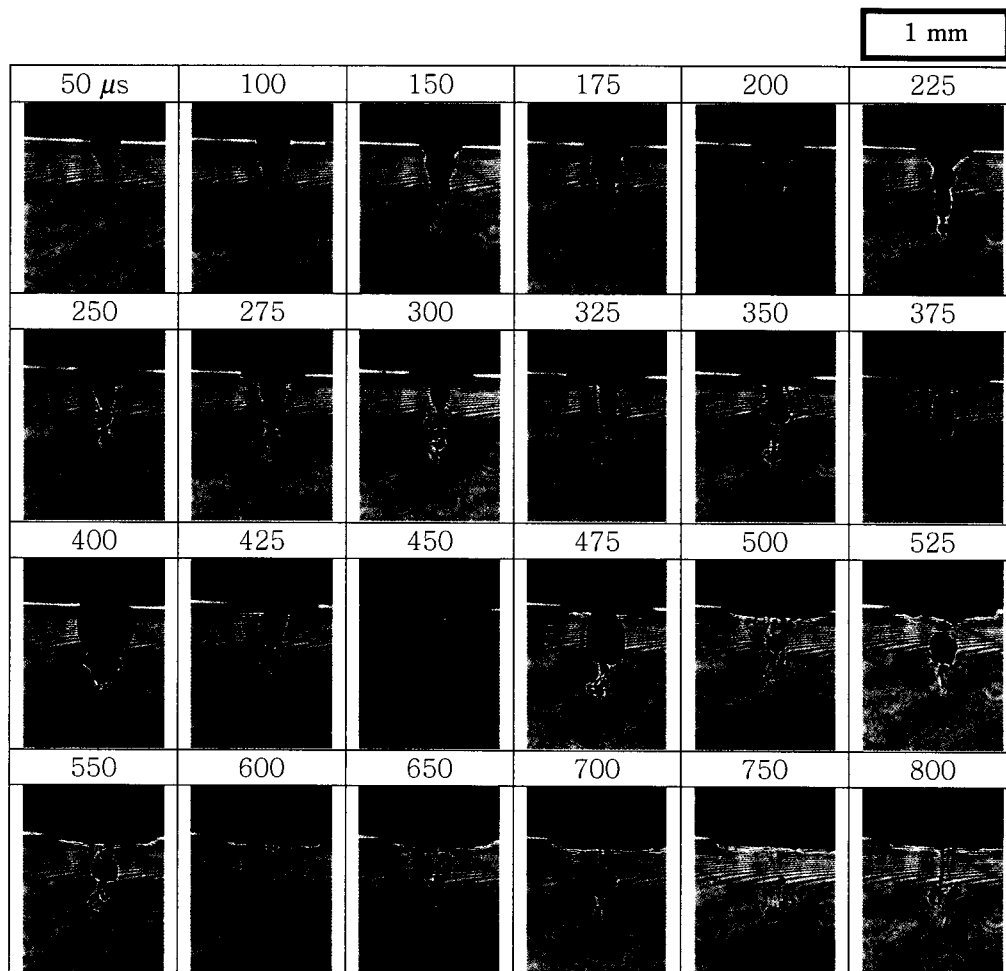


Fig. 2 Sequence of images obtained by laser flash photography in the ablation of water by a CO₂-laser pulse in the liquid. The laser beam is focused on the surface and the diameter of the beam is 50 μ m. The pulse duration and the power of the CO₂ laser are 0.4 ms and 4.4 W, respectively.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 표면 공동은 서로 다른 레이저 펄스 조건에 대해서 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 형성되는 것을 보여 주고 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.

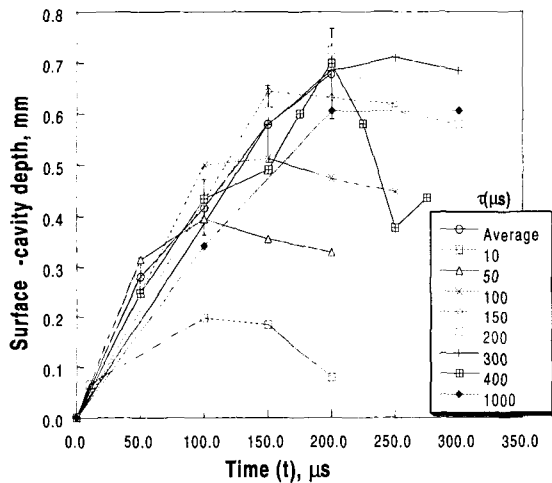


Fig. 3 Surface-cavity depths obtained by shadowgraph imaging as a function of time for several laser-pulse durations τ .

3.2 정상 상태에서의 표면 공동의 단면의 계산

어떤 CW 레이저 빔이 용융 상태인 재료의 자유 표면에 입사 될 때 기공의 형태를 결정하는 힘의 요소가 반동 압력, 중력, 그리고 표면 장력이라 할 때, 정상 상태의 기공의 구조를 다음과 같은 지배 방정식과 경계 조건을 이용하여 이론적으로 모델링 할 수 있다. (Andrews and Atthey *et al.* 1976)

$$\psi \left\{ \frac{d^2 S}{dR^2} + \left(\frac{1}{R} \right) \left[1 + \left(\frac{dS}{dR} \right)^2 \right] \frac{dS}{dR} \right\} - S \left[1 + \left(\frac{dS}{dR} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = Q^2(R) \left[1 + \left(\frac{dS}{dR} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dR} = 0 \text{ at } R=0 \quad S \rightarrow 0 \text{ as } R \rightarrow \infty \quad (2)$$

$$S = s(r)/a \quad R = r/a \quad (3)$$

$$Q(R) = q(r) / \sqrt{g \rho_l \rho_v h_{lv}^2 a} \quad (4)$$

$$\psi = \sigma / \rho_l g a^2 \quad (5)$$

- a : Beam radius at focal plane
- ρ_l : Density of liquid
- ρ_v : Density of vapor
- h_{lv} : Latent heat of vaporization

S는 입사 되는 빔의 반지름에 대한 기공 깊이의 무차원 수이며, R은 입사 되는 빔의 반지름에 대한 기공 반지름의 무차원 수이다. 그리고, Q(R)은 빔 파워의 무차원 수이고, ψ 는 용융 상태의 재료에서 나타나는 표면 장력의 무차원 수이다.

$$q_0(r) [W/cm^2] = \frac{2I}{\pi a^2} \exp \left[-2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (6)$$

I : beam power

식 (6)과 같은 어떤 r에 대해서 일정한 강도를 가지는 가우시안 빔을 가정하여 기공을 모델링할 때, 빔의 에너지 밀도는 기공의 깊이와는 상관없이 일정하다. 즉 전파되는 축에 따른 빔의 확산 현상을 고려하지 않았다. 그러나 빔의 폭은 빔의 초점 면에서 멀어질수록 커지게 된다. 따라서 어떤 지점(축에서부터의 거리가 r인 곳)에서 빔의 강도는 초점면에서부터 빔이 진행함에 따라 함께 변화하게 된다. 진행 거리에 따라서 달라지

는 빔의 강도는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$q(r, z) [W/cm^2] = \frac{2I}{\pi m^2 a_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{r}{ma_0}\right)^2\right]$$

$$m = \left[1 + (\lambda z / \pi a_0^2)^2\right]^{1/2} \quad (7)$$

λ : Beam wavelength

z : Beam propagation direction

a_0 : Beam radius at focal plane (beam focal waist)

정상 상태에서 $q_0(r)$ 와 $q(r, z)$ 에 의해서 구하여지는 키홀의 단면은 Fig. 4와 같다. 빔의 확산 현상이 고려되지 않을 때에는 빔의 초점면에서의 반지름을 작게 할수록 키홀의 깊이는 무한정 깊어지게 된다. 그러나 빔의 확산 현상을 고려할 때, 빔의 반지름이 매우 작은 경우에는 빔의 확산 현상이 크게 작용하여 오히려 키홀의 깊이가 감소한다.

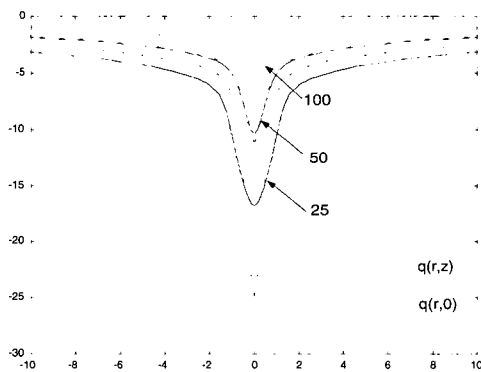


Fig. 4 Normalized steady-state surface-cavity profiles calculated for several laser-beam radii, a , on the focal plane.

Fig. 5을 살펴보면 빔의 반지름의 감소에 따른 키홀의 깊이의 변화를 알 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 빔의 초점면에서의 반지름이 100m에

서 75m로 감소할 때 빔의 강도의 증가로 인하여 키홀의 깊이는 증가하게 되나, 빔의 반지름이 50, 25m와 같이 더 작게 할 때에는 빔 강도의 증가가 발생하지만 빔의 확산현상이 더 크게 작용하여 깊이도 따라 감소하는 것을 볼 수 있다.

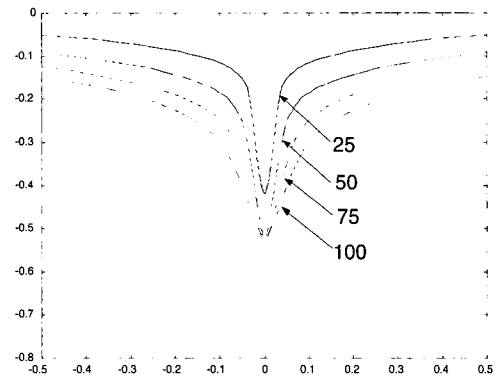


Fig. 5 Steady-state keyhole depths calculated for new beam intensity $q(r,z)W/cm^2$

두 가지 식의 의해서 계산된 값과 실험값을 비교해 보면 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 두 가지 식에 의한 키홀 깊이의 계산값은 어느 정도 실험값을 설명할 수 있는 범위 이내에서 결정되지만, 키홀의 폭에서는 키홀의 윗쪽과 아래쪽의 값이 많은 차이를 가지고 있어 이론적인 값을 도출해 내는데는 부적절함을 알 수 있다. 다중 반사와 초점면의 위치에 의한 영향 등을 무시하였기 때문에 키홀의 깊이가 계산한 값에 비해서 작게 나타남을 짐작할 수 있다.

3.3 깊은 키홀의 불안정성

키홀의 불안정성은 입사 되는 레이저 에너지와 유체 역학적 압력, 그리고 표면 장력을 고려할 때 이해될 수 있다. 중력의 효과에 의한 정수압은 키홀의 깊이가 매우 작으므로 무시될 수 있다. 긴 실린더 형태의 공동의 불안정성은 표면 장력에 의한 Rayleigh-Taylor 불안정성으로

설명되어질 수 있다.¹⁰⁾ 그의 이론에 따르면, 공기 중에서 형성된 액체의 기둥은 그 축 상에서 액체의 표면 장력이 표면의 넓이를 최소화 하기 위해서 불안정성을 야기한다는 것이다. 그의 결과에 따르면, 액상에서 형성된 공기 기둥에서 최대의 불안정성이 야기되는 시점은 속이 빈 기둥에서 만들어진 섭동의 파장(λ_{max} : 즉 기둥의 깊이)이 형성된 기둥의 반지름의 13배가 될 때이다. 본 실험에서 키홀이 불안정성에 의해 파괴되기 시작하는 최대 깊이는 반지름의 약 10배로 측정되었는데 형상 등의 불완전성을 고려하면 이론에 대체로 부합하는 결과라고 할 수 있다. 그리고, Tayer의 불안정성의 이론에 따르면 정상상태의 키홀, 즉 최대 깊이의 키홀이 형성된 이후에 파괴가 일어날 때까지의 표준 시간 구간은 약 $55s^{10)}$ 이다. Fig. 2는 최대 깊이의 키홀이 약 200s에서 형성된 이후에 약 250s 이전의 약 50s의 시간 구간 내에서 공동이 파괴되는 것을 보여주고 있다. 즉 공동의 폭발이 이론상으로 계산된 시간 구간(수십 마이크로 초) 내에서 발생하는 것을 증명하고 있다.

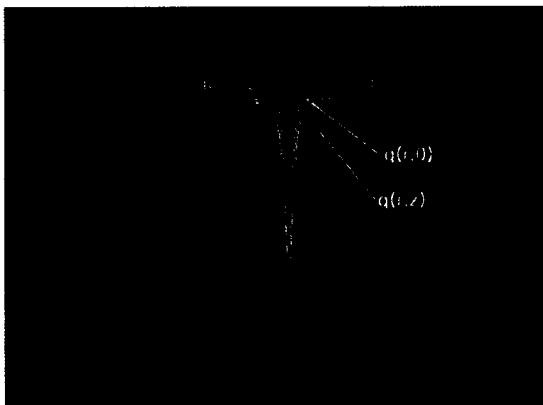


Fig. 6 Keyhole radius comparison between calculated keyhole profiles and experimental result at $t=200s$ (steady-state keyhole shape)

4. 결 론

펄스파 CO₂ 레이저빔에 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 설명되어 질 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.

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, pp481-486 (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, pp2023-2030 (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, pp2182-2194 (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, pp3216-3222 (1997)
5. R. Fabbro and K. Chouf, "Keyhole Modeling during Laser Welding," *J. Appl. Phys.*, Vol.87, pp4075-4083 (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, pp519-532 (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, pp1137-1144 (1993)
9. R. E. Mueller, J. Bird and W. W. Duley, "Laser Drilling into an Absorbing Liquid," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71 (2), pp551-556 (1992)
10. S. Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Dover, New York (1961)