

레이저 절단 공정에서의 열전달



●1952년생.
●열전달을 전공하였으며, 레이저 가공에서의 열전달 가스터빈블레이드 냉각, 입자유동 및 복사열전달에 관심을 가지고 있다.

이 준 식

서울대학교 기계공학과 교수



●1943년생.
●재료공학(Laser Material Interaction)을 전공하였으며, 레이저 재료 가공, 레이저를 이용한 신소재 개발에 관심이 있다.

김 도 훈

연세대학교 금속공학과 교수

1. 머리말

레이저는 1960년에 인간이 만든 첫번째 레이저인 루비붕으로부터 694nm의 파장을 가진 빨간 빛의 펄스로 작동되면서 30년이 지난 오늘날까지 폭넓게 개발되어 왔다. 레이저의 발달과 더불어 공업적인 재질들의 가공분야에 레이저가 사용되면서 오늘날은 거의 모든 기술 영역에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 이러한 재질의 가공분야로의 급속한 확장을 이끌었던 원동력은 고강도의 복사에너지를 만드는 레이저의 능력 때문이었으며, 아울러 단조성, 직진성, 응집성이 기존의 열광원보다 훨씬 우수하기 때문이다.

레이저빔이 금속표면상에 조사되는 경우에 레이저의 에너지 강도에 따라 가열, 용융, 증발 및 플라즈마 발생이 있다. 사용하는 레이저의 파장과 금속의 종류에 따라 차이가 있으나 대체로 레이저 출력 밀도가 $\sim 10^5 \text{W/cm}^2$ 정도 이하에서는 레이저빔의 대부분은 표면에서 반사되나 일부분이 금속표면 및 수백 내지 수천 Å 정도의 구역에서 열에너지로 바뀐다. 이 열에너지는 금속의 용융 정도에 미치지 못하며 정상적인 열전도기구에 의하여 금속 내부로 침투하게 된다. 따라서 금속의 가열을 초래하며 이러한 가열기구가 철강재료의 고상변태에 의한 표면경화 열처리 등에 이용된다. 레이저 출력

밀도가 $\sim 10^6 \text{W/cm}^2$ 이상에서부터는 금속표면의 온도가 용융점 이상으로 증가되어 용융금속의 경계가 내부로 전파된다. 이러한 경우가 레이저에 의한 표면합금화와 용접 등의 과정에 해당하게 된다. 레이저 출력 밀도가 $\sim 10^7 \text{W/cm}^2$ 정도에서부터는 금속표면이 용융점을 지나 비등점 이상이 되어 금속의 증발이 일어나게 된다. 이러한 경우에 용융구역은 상대적으로 작아지며 증발에 의한 금속의 제거가 일어나게 된다. 이러한 경우가 재료의 절단과 천공 등의 과정에 해당된다. 레이저 출력 밀도가 10^8W/cm^2 이상으로 증가되면 증발되는 금속 원자 및 방출되는 입자들이 인입되는 레이저 에너지를 흡수하여 플라즈마를 형성하게 된다. 이 플라즈마의 양이 적은 경우에는 레이저빔을 통과시켜 금속표면에 도달시키나 플라즈마의 양이 많은 경우에는 인입되는 레이저빔을 흡수하므로 레이저빔이 금속표면상에 조사되는 것을 차장시킨다. 따라서 레이저의 출력밀도가 매우 큰 경우에는 플라즈마 발생이 지배적이 되어 재료가공의 역할을 수행하지 못한다. 여러가지 금속재료 가공기구와 관련된 구역은 금속의 가열, 용융 및 증발에 관한 구역이므로 플라즈마가 발생되지 않는 레이저 출력 밀도 즉 $\sim 10^7 \text{W/cm}^2$ 정도 이하의 구역에 해당한다. 따라서 레이저 출력 밀도와 레이저 조사시간 혹은 펄스시간의 함수로써 여러가지 가공구역을 나타내면 대체로 그림 1과 같이 나타낼

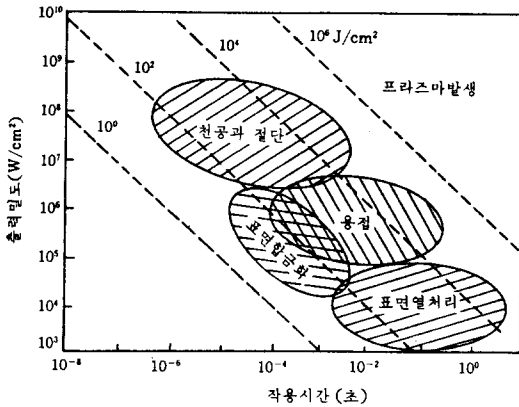


그림 1 레이저 빔에 의한 재료가공의 구역

수 있다. 여기에서 보면 레이저 에너지 밀도는 레이저 출력밀도에 조사시간을 곱한 것이므로 모든 재료가공의 경우에 그 가공기구에 관계없이 레이저 에너지 밀도는 대체로 비슷하다.

레이저에 의한 재료가공에서는 금속의 표면 경화, 금속의 용접, 여러가지 금속과 비금속 재료의 절단과 천공, 반도체의 아닐링과 박막의 미소가공 등 매우 다양하다. 그러나 이들 여러가지 재료가공 방법에서 공통적인 점은 레이저를 열원으로 이용하는 것이다. 따라서 레이저 재료가공의 특성은 가공하려는 재료에서 레이저빔을 흡수하여 얻게 되는 열원의 특성에 직접 관계되므로 여러가지 레이저빔의 특성과 가공하려는 재료의 성질에 크게 좌우된다. 그리고 레이저빔은 광학부품으로 초점위치에 매우 큰 에너지 밀도를 주도록 집중시킬 수 있다. 따라서 가공하려는 부분에만 매우 큰 에너지를 유지시킬 수 있어 많은 부분을 균일하게 가열시켜야 하는 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 독특한 조적을 얻을 수 있다. 또한 재료의 내부에 열로 인하여 야기되는 열응력, 뒤틀림 및 균열 등을 방지할 수 있어 재료의 손상을 최소한으로 할 수 있고 복잡한 부품의 가공도 가능하다.

레이저 가공의 한 분야로서, 레이저 절단가공은 레이저빔이 작업재질의 두께 전체에 침투

하여 절단영역의 표면들과 거의 평행하게 진행하면서 완전한 절단을 이룩하게 된다. 이 가공 방법은 레이저가 가장 폭 넓게 사용되는 방법으로서 레이저빔이 작업재질을 가열, 용융 또는 증발시키면서 동시에 강한 가스제트가 용융된 재질이나 증발된 재질을 절단영역으로부터 제거시키는데 사용된다. 레이저 절단가공에서는 재질의 제거가 중요한 프로세스로 간주되는데 용융에 의한 제거와 증발에 의한 제거가 전체 물질 제거에 미치는 기여도에 따라 레이저 절단가공의 종류를 구분하게 된다. 증발이 주가 되는 경우에는 레이저 승화 절단(laser sublimation cutting)이라 부르며, 용융이 주가 되는 경우에는 레이저 용융 절단(laser fusion cutting)이라 부른다. 그리고 사용되는 가스제트에 산소와 같은 반응기체가 포함되어 있으면 레이저 산소 절단가공(laser oxygen cutting 또는 reactive gas assisted laser cutting)이라 부르며 이 경우에는 산소와의 반응에너지가 레이저 빔으로부터 흡수된 열량 이외에 또 하나의 열원으로서는 역할을 하게 된다.

레이저 전달가공의 종합적이고 실제적인 이론 모델은 Bunting 등⁽¹⁾에 의해 처음 제안되었다. 이들은 재료에 입사되는 출력밀도와 그에 따른 절단속도 사이의 관계를 재질의 열적 물성치들에 대하여 개발했는데, 구해진 관계식은 일반적인 절단가공에 모두 적용할 수 있었다. 그 이후 Arata 등⁽²⁾에 의해 절단가공 중에 절단면은 얇은 액체 용융층으로 덮혀 있음이 고속 필름에 의해 발견이 되면서 절단 특성의 연구에 대한 이정표가 되었고 보다 더 정교한 모델이 이러한 절단면에 근거하여 이후로 얻어졌다.

Decker 등⁽³⁾은 연강과 스테인레스강의 최대 절단가능속도를 열역학적 모델로부터 산출했고, Schuöcker 등^(4,5)은 증발과 용융상태의 배출에 의해 용융된 재질을 제거하는 얇은 용융층에 덮혀 있는 절단면에 근거한 절단 모델을 개발하였다. 그리고 Schulz 등⁽⁶⁾은 고전적인 Fresnel공식으로 레이저 빔의 흡수율을 가정하

여 높은 절단속도의 경우에 대한 금속의 레이저 용융 절단가공을 이론적으로 연구하였다.

레이저 절단가공의 이론적인 모델의 또 하나의 줄기는 절단품질과 관련이 있는 주기적인 줄무늬(striation)에 대한 동적 모델이다. 이 모델에 대한 연구는 주로 Schuöcker^(5,7)에 의해 이루어 졌는데, Schuöcker의 이론 모델의 핵심은 섭동 이론으로서 정상 상태의 물리량들(용융 액체층의 온도와 용융 액체층의 두께)에 섭동량을 부가시켜서 얻어지는 미분 방정식으로부터 줄무늬들의 파장을 계산한 것이었다.

이상과 같은 사실로 미루어 볼 때 레이저 절단가공에 대한 이론적인 연구의 목적은 절단속도, 절단두께 그리고 절단품질에 대한 한계성을 극복하기 위함이었으며 이와 같은 세 가지 항목에서 구체적인 연구 목표를 선택하게 되는 기준은 연구자나 가공자의 관심이었음을 알 수 있다.

이 글에서는 재료가공에 주로 사용되는 레이저와 그 특성, 레이저 재료가공상의 매개변수 등에 대하여 언급하고 절단가공에 초점을 맞추어 CW CO₂ 레이저를 이용한 저탄소 304 스테인레스강의 절단에 있어서 절단속도와 줄무늬형성을 예측하기 위하여 적용한 열전달 해석 방법을 소개하고자 한다.

2. 레이저 절단 가공상의 주요 변수

레이저를 이용한 모든 재료가공에 있어서 레이저 에너지가 열로 작용하는 것이므로 레이저 빔은 조절된 표면 열원으로 사용된다. 따라서 레이저에 의한 재료가공에서는 레이저의 특성과 재료의 열적 성질이 매우 중요하다. 일반적으로 재료가공에 사용될 레이저 장치와 가공시 킬 재료가 선정되면 본질적인 레이저 성질과 가공 재료의 열적 성질이 결정된다. 그러나 레이저 빔의 주사속도, 집속조건과 가공재료의 표면상태 등 외부적인 가공조건을 변화시킬 수 있다. 이들 레이저 가공에 고려되어야 할 항목들과 각종 변수들을 그림 2에 나타내었다.

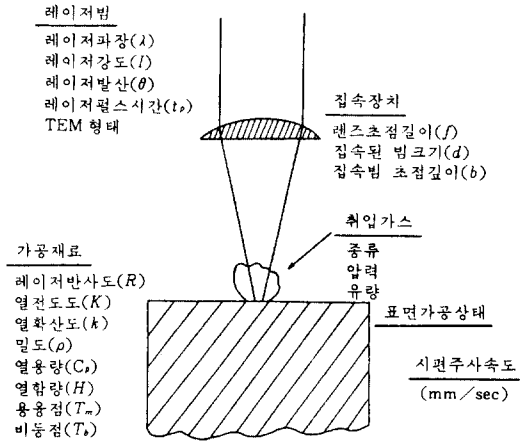


그림 2 레이저 가공에서 고려되어야 할 각종변수

2.1 레이저의 종류

레이저의 종류는 대단히 많으며 그 분류방법도 다양하나 가장 보편적인 분류방법인 레이저를 발진시키는 능동매질에 따라 분류하면 크게 고체레이저, 기체레이저, 기타 레이저로 분류할 수 있고 고체레이저에는 루비레이저, Nd:YAG 레이저, Nd:유리 레이저 등이 있고 기체레이저에는 He-Ne 레이저, Ar 레이저, CO₂ 레이저 등이 있으며 기타 레이저로는 반도체 레이저, dye 레이저, excimer 레이저, 화학 레이저 등을 예로 들 수 있다. 이 중 재료가공에 사용되는 레이저를 표 1에 나타내었는데 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저가 가장 널리 이용되고 있다.

Nd:YAG 레이저는 레이저 매질로서 YAG (Yttrium Aluminum Garnet: Y₃Al₅O₁₂)에 희토류금속인 Nd를 약 0.5%내외로 첨가시킨 단결정을 사용한다. Nd:YAG 레이저는 4준위 기구로서 적외선 구역의 파장을 방출시키므로 루비 레이저에 비하여 광자의 에너지가 약간 적으나 지속파 또는 반복속도가 큰 펄스 등 여러가지 모드로 동작이 가능하므로 공업적으로 가장 많이 사용되는 레이저 중의 하나이다.

CO₂ 레이저는 적외선구역인 10.6μm 파장의 고출력 펄스 또는 지속파를 방출시킬 수 있는

표 1 재료가공에 사용되는 레이저의 파장과 출력 범위

레이저	파장	평균동력 혹은 펄스 에너지
CO ₂	10.6μm	≤20kW : CW, 펄스
Nd : YAG	1.06μm	≤1kW : CW, 펄스
루비	0.694μm	≤100J : 펄스
엑시머	0.308μm	≤1J : 펄스

며 약 15% 이상의 높은 효율을 주기 때문에 Nd : YAG 레이저와 함께 재료가공에 가장 중요하고 많이 사용되는 레이저이다. CO₂ 레이저는 원자기체 또는 이온기체들의 전자적인 에너지 준위들 사이의 전이에 의하지 않고 레이저의 능동매질인 CO₂분자들의 진동 및 회전준위들 사이의 전이에 의한 분자기체 레이저이다.

2.2 레이저 빔의 모드와 발산

레이저 빔의 모드는 레이저 공진기 양단을 반복하여 왕복하는 광자들의 전자기장에 의하여 결정된다. 이 전자기장의 모양은 광자의 파장, 공진기 양단의 반사거울위 배열 상태, 곡률반경과 거리 및 방전관의 직경 등에 의존한다. 이 전자기장은 위의 조건들에 따라 조사된 표면에 그림 3과 같은 여러가지 모양의 단면 에너지 분포 형태를 가진 TEM(transverse electro magnetic) 모드를 가지고 있다. 이 TEM 모드는 레이저 빔의 에너지 분포와 발산 정도를 결정하며 렌즈에 의해 집속되는 조건들을 결정하므로 매우 중요하다.

재료가공에 사용되는 레이저는 보통 기본적인 모드에서 동작하도록 설계되어 있다. 즉 모드의 차수가 작을수록 렌즈의 초점 위치에서 얻어지는 빔의 점직경이 작아 큰 출력 밀도를 줄 수 있고 주어진 빔의 직경에 대하여 초점 깊이를 크게 할 수 있으며 레이저빔을 광학적으로 조절하기 쉽다. TEM₀₀ 모드는 가장 큰

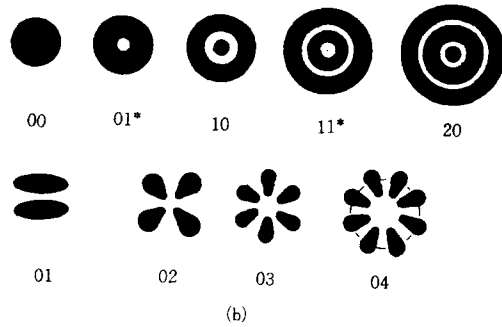
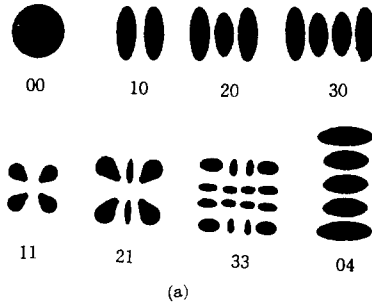


그림 3 여러가지 횡적모드에 대한 에너지 분포도

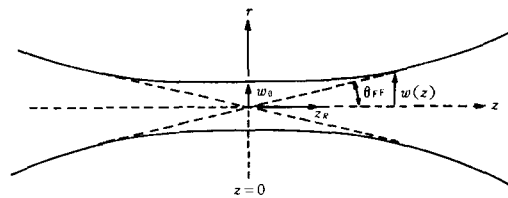


그림 4 구형 가우시안 빔의 점크기 근방에서 기하학적 구조

에너지 밀도를 주며 대부분의 재료가공에서 사용되고 있다. 이 모드는 동일한 위상의 파면을 가지며 그 출력은 가우시안 분포이다. 그림 4는 TEM₀₀ 모드의 레이저 빔에 대한 전파방향의 거리에 따른 빔직경의 관계를 나타낸다. 위치에 따른 빔반경은 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, z_R 은 Rayleigh length로서 $\pi w_0^2 / \lambda$ 의

값을 가지며 λ 는 레이저 빔의 파장이다.

가우시안 빔에서 발산은 빔의 최저직경 위치로부터 나온 후 빔이 퍼지는 크기로 정의된다. 원거리전자장 ($z > z_R$)에서 빔의 반경 w_{FF} 과 발산 각도 θ_{FF} 는 다음 식으로 정의된다.

$$w_{FF} \cong w_D \left(\frac{z}{z_R} \right) = \frac{\lambda z}{\pi w_0} \quad (2)$$

$$\theta_{FF} \cong \frac{w_{FF}}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3)$$

정밀한 레이저 가공을 위한 경우에는 집속된 빔의 크기를 작게 하여야 하므로 발산각이 작은 TEM₀₀ 모드가 사용된다.

2.3 레이저 빔의 점크기와 초점 깊이

렌즈로 집속된 레이저 빔의 초점 위치에서 점크기의 직경과 초점 깊이는 가공되는 구역의 레이저 에너지 밀도와 작업부분의 두께를 결정하므로 매우 중요하다. TEM₀₀ 모드의 가우시안 빔을 렌즈로 집속시키면 기하광학적으로 한 점에 초점이 형성되지 않고 그림 5와 같이 빔의 직경 d_0 과 초점 깊이 b 를 주게 된다. 이 그림에서 보듯이 집속된 빔은 초점에서 만나지 않음은 물론 초점면의 양측에서 약간의 곡선 모양으로 들어오고 나간다. 이것은 레이저빔의 자연적인 발산현상과 함께 집속렌즈의 구면수차에 기인한다. 레이저 빔에 존재하는 빔발산의 정도가 초점면에서 출력밀도에 직접적으로 영향을 주므로 렌즈의 초점거리에 따른 레이저 빔의 집속된 빔직경과 초점깊이는 집속된 레이저 에너지밀도와 밀접한 관계가 있다.

대부분의 재료가공에서 집속렌즈로 들어오는 레이저 빔 직경 d 는 알고 있으므로 초점거리

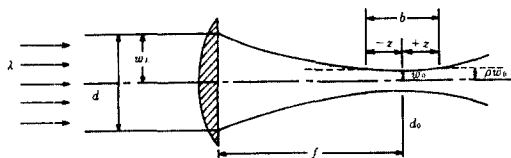


그림 5 TEM₀₀ 모드의 빔을 렌즈로 집속시키는 경우에 초점면에서 얻어지는 빔의 크기와 초점 깊이

f 인 렌즈로 집속된 점 크기는 식 (1)로부터 구할 수 있으며 식 (2)를 이용하면 다음과 같다.

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{w_L} = f \cdot \theta_{FF} \quad (4)$$

여기서, w_L 은 입사되는 빔의 반경이다. 식 (4)로부터 주어진 점 크기는 전적으로 회절효과에 의하여 결정된 것이며 렌즈의 구면 수차로 약간 차이가 날 수 있다.

집속된 레이저 빔의 초점깊이 b 는 그림 5에서 보는 바와 같이 임의로 정의되며 레이저의 파장 λ , 집속된 빔의 직경 d_0 과 빔의 크기 허용도 ρ 에 의존한다. 이 레이저 빔의 초점깊이에 대한 식은 식 (1)에서 w 를 $w_0\rho$ 로 대치시킴으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= \pm \pi \sqrt{\rho^2 - 1} \frac{w_0^2}{\lambda} \\ &= \pm \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \\ &= \pm \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\rho^2 - 1} \left(\frac{f}{w_L} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

집속된 빔의 반경이 중심반경보다 5% 큰 경우에 $\rho=1.05$ 가 되며 그 사이의 거리를 b 라 할 때 $b=2z$ 가 되며 흔히 이 거리를 초점깊이라고 한다.

레이저 가공에서 집속된 빔의 초점깊이는 통상적으로 초점위치에서 에너지밀도의 약 90% 정도되는 위치로 선정하므로 초점에서 레이저 빔보다 반경이 5% 증가되는 위치로 정의한다. 이 경우에 초점깊이의 양측 위치는 대체로 다음과 같이 주어진다.

$$z = \pm \frac{w_0^2}{\lambda} = \pm \frac{d_0^2}{4\lambda} \quad (6)$$

따라서 초점깊이는 $2z$ 가 되므로 레이저의 파장과 집속된 빔 직경만 알면 곧 구할 수 있다.

2.4 레이저 빔의 에너지

기본적인 TEM₀₀ 모드는 가장 높은 에너지 밀도를 주며 대부분의 재료가공에서 가장 바람

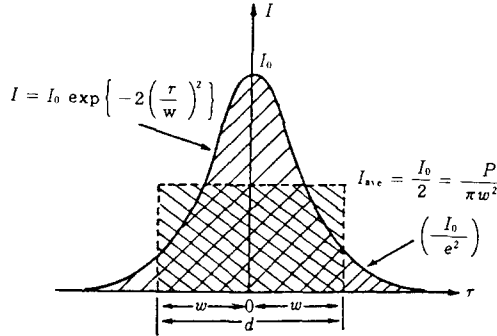


그림 6 TEM₀₀ 모드의 거리에 따른 레이저 강도분포

직한 모드이므로 매우 중요하다. 이 모드는 동일한 위상의 파면을 가지며 그 에너지 강도 분포 $I(r)$ 은 그림 6과 같이 빔이 조사되는 표면의 중심으로부터 원주방향으로 가우시안 분포를 가지며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2\right\} \quad (7)$$

레이저빔의 직경 d 는 $I(r)$ 가 보통 빔의 최고 출력밀도 I_0 의 e^{-2} 로 되는 위치의 크기로 정의한다. 이것은 레이저빔의 출력의 86%가 $r = w$ 인 반경내에 포함됨을 의미한다. TEM₀₀ 모드의 레이저 빔이 재료표면에 조사될 때 빔의 전체출력 P_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_t &= \int_0^\infty I(r) \cdot 2\pi r dr \\ &= \int I_0 \exp\left\{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2\right\} 2\pi r dr \\ &= I_0 \frac{\pi w^2}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 중심에서 최고출력밀도 I_0 는 다음과 같다.

$$I_0 = \frac{2P_t}{\pi w^2} \quad (9)$$

일반적인 계산에서는 모든 레이저 에너지가 빔 직경내에 포함된다고 하여도 큰 무리는 없다. 그러므로 레이저빔의 직경내에서 평균출력 밀도는 다음과 같이 중심에서의 최고출력밀도

의 반이다.

$$I_{ave} = \frac{P_t}{\pi w^2} = \frac{I_0}{2} \quad (10)$$

레이저빔 내에서 얻어지는 에너지 밀도 E 는 평균출력밀도에 조사시간을 곱한 것이므로 다음과 같이 나타낸다.

$$E = I_{ave} t = \frac{P_t}{\pi w^2} t \quad (11)$$

2.5 편광된 빔의 영향

일반적으로 편광된 레이저 빔을 사용할 때는 가공방향에 따라 매우 큰 차이를 나타낸다. 그림 7과 같이 한 방향으로 직선적인 절단에서 절단길이 방향으로 선형적으로 편광된 레이저 빔을 사용하면 절단폭을 줄일 수 있다. 반면에 선형적으로 편광된 레이저 빔의 방향이 절단방향과 수직이면 절단폭이 크고 나쁜 결과를 준다. 따라서 여러가지 방향으로 절단되는 일반적인 절단에서는 편광되지 않은 레이저 빔 혹은 원형적으로 편광시킨 레이저 빔을 사용하여야 한다. 그림 8은 두께 2mm의 철판을 선형

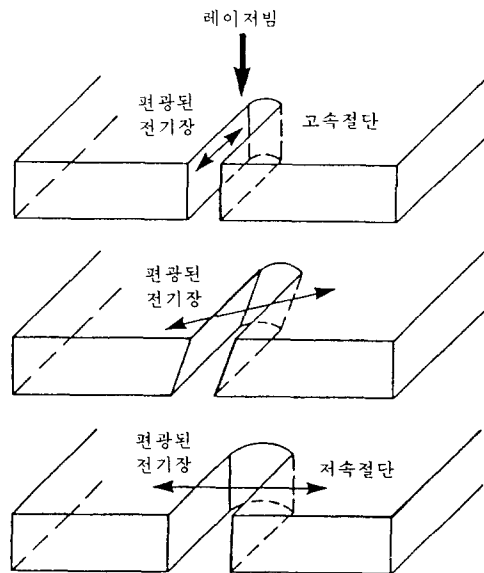


그림 7 금속 절단시 레이저 빔의 편광 방향에 따른 절단폭과 절단 모양



(a) 시편상부



(b) 시편 하부

그림 8 45도 편광된 레이저 빔에 의한 저탄소강판의 원형절단(두께 2mm)

적으로 45도 편광된 레이저 빔을 사용하여 원형으로 절단시 철판의 상부와 하부에서 절단된 모양을 보여주고 있다. 그림 8에서 보듯이 절단된 원형 철판의 상부에서는 정확한 원모양을 보여주고 있으나 하부에서는 타원모양을 보여주고 있다. 특히 두께가 큰 경우에는 더욱 심각하여 하부타원의 이심률이 커서 절단된 부품이 빠져 나오지 못하게 된다.

재료의 절단시 경사진 면에서 레이저 빔이 흡수될 때 그 흡수 정도는 편광된 방향과 경사각도에 의존한다. 절단방향에 수직인 편광의 경우에는 큰 Fresnel 반사가 일어나며 이것은 입사각에 약간 의존한다. 그러나 절단 방향에 평행한 편광면에서는 그 반사가 입사각에 크게 의존한다. 철강재에서 CO₂ 레이저를 사용할 때에는 85도의 입사각인 때 거의 80% 정도의 흡수능을 얻는다. 따라서 침식면에서 절단의

순간적인 상황을 보면 재료의 깊이의 중간 정도에서 비교적 경사지므로 입사빔의 많은 부분이 흡수된다. 그리고 밑의 부분에서는 절단면의 경사가 비교적 작아지므로 흡수가 적게 된다.

그리고 절단구역에서는 많은 원자들이 증발되나 절단시 취입시키는 산소 혹은 불활성가스의 유속이 크므로 침식면으로부터 증발된 금속을 날려 보낸다. 따라서 레이저 절단시 플라즈마 형성에 필요한 증기 밀도가 되지 못한다. 그러므로 레이저에 의한 금속의 절단에서는 일반적으로 플라즈마에 의한 레이저 빔의 차장 및 반사가 큰 문제가 못 된다.

2.6 절단면의 줄무늬와 동역학적 영향

절단면의 품질은 절단면의 거칠기에 의하여 결정되며 이 거칠기는 레이저 절단에서 필연적으로 나타나는 거의 주기적인 줄무늬에 의한 것이다. 이들 줄무늬는 사용하는 레이저빔이 펄스 혹은 지속파인 경우에도 나타나며 또한 절단시 보조적인 반응가스를 취입하거나 혹은 취입하지 않아도 나타난다. 이러한 줄무늬의 형성에 관하여는 여러가지 설이 있으나 용융금속의 동역학적 효과에 기인한다는 설이 가장 유력시되고 있다. 즉, 절단의 줄무늬는 기본적으로 단위 길이당 에너지, 반응가스 유속, 절단속도의 요동에 의한 것이다.

만일 레이저 빔과 재료 사이에 상대적인 이동이 없다면 재료의 줄무늬를 야기시킬 수 있는 것은 재료에 인입되는 레이저 빔의 강도의 공간적 변화에 의하여만 가능하다. 그리고 이러한 공간적 변화는 인입되는 레이저 빔과 재료로부터 후방산란되는 전자파 사이에서의 간섭에 의하여 야기된다. 그러나 줄무늬는 용융층의 요동과 진동에 의하여서도 야기될 수 있다. 레이저 절단시 절단속도에 따라 용융층이 이동되므로 이들 용융층의 요동은 절단표면에 공간적인 섭동을 유발한다. 이들 용융층의 요동은 용융금속의 불안정성에 의하여 야기될 수도 있고 또는 에너지 입력의 요동과 용융층 사

이의 공진에 의하여 야기될 수도 있다. 따라서 레이저 절단의 동역학적 효과가 줄무늬의 발생을 기술하는 여러가지 관계에 중요하며 또한 절단면의 품질을 결정하는 데 매우 중요하다.

그리고 위의 영향에 추가되는 다른 한 가지 가능성은 절단구역에서 주기적으로 증발된 금속입자들이 팽창되는 것이다. 즉, 레이저빔의 흡수로 금속표면에서 증발된 입자들이 어느 한계 이상이 되면 외부로 분출된다. 그 후 일정 시간이 지나면 같은 과정이 반복되므로 증발된 입자들의 팽창이 주기적으로 일어날 때마다 줄무늬의 형성에 기인한다.

2.7 취입가스의 영향

레이저 빔에 의한 금속의 절단에서는 일반적으로 고속의 취입가스를 불어주며 철강재와 티나늄 합금에서는 흔히 산소를 사용하며 비금속에서는 불활성가스를 사용한다. 레이저 빔은 취입가스와 함께 순간적으로 절단부 내로 들어가며 주로 용융층에 의하여 흡수되며 고체상태의 절단벽에 의하여는 적게 흡수된다. 또한 반응가스의 집중적인 흐름은 부분적인 냉각효과도 있으나 큰 문제는 되지 못하고 절단부에서 금속과 반응하여 발열반응에 의한 열을 방출한다. 그리고 반응가스의 일부가 용융층에 들어가게 되므로 용융층은 흡수된 레이저 빔과 충돌하는 가스입자와 반응하게 된다. 그러므로 재료제거는 일반적으로 절단부분의 밑부분에서 용융금속과 취입가스 사이의 마찰로 인한 용융금속의 분출과 침식면에서 증발에 의한다.

일반적으로 절단시에 취입가스는 집속광학계와 동축노즐이거나 절단구역으로 향하여 배치된 경사진 노즐을 통하여 취입시킨다. 절단구역으로부터 용융금속과 찌꺼기(debris)의 제거에 대한 효율과 재현성은 재료상의 효과적인 절단가스 제트압력에 크게 관련된다. 일반적으로 노즐에서 가스의 속도가 초음속이면 밑부분에서 가스압력이 주기적으로 변한다. 이런 경우에 가스압력의 크기에 따라 절단면의 품질에 차이가 난다. 그리고 레이저의 출력에 따라 재

료가 절단될 수 있는 가스압력의 범위가 다르다. 가스압력이 증가되면 절단속도가 증가되며 절단면의 품질이 양호하여 진다. 보통 최대의 절단속도를 얻는 것은 약 5 기압 정도의 압력에서 이러한 조건을 만족시키므로 일반적인 레이저 절단장치는 5 기압까지의 저압 절단 헤드으로써 이루어진다.

반응가스를 취입시키면서 절단시에는 용융금속층의 면은 많은 산소의 흐름에 접하게 되므로 산화물인 프라그가 용융층의 표면과 용융금속 내에서 형성된다. 따라서 용융층은 얇은 산화물층에 의하여 덮여질 수 있다. 산화물은 전기전도도가 작으므로 산화물층이 형성되면 레이저 빔의 흡수를 증가시킨다. 즉 반응가스를 취입시키면서 철강재를 절단시에는 용융금속이 거의 산화됨을 가정할 수 있으므로 산화물층의 두께는 거의 $10\mu m$ 정도가 될 수 있고 레이저 빔의 흡수는 60% 정도가 될 수 있다. 또한 침식면에서 레이저 빔의 입사각이 작아 흡수를 증가시키므로 거의 80% 정도를 흡수할 수 있다.

3. 절단공정에서의 열전달 해석

레이저에 의한 재료의 절단은 증발에 의한 재료의 제거가 중요하므로 용접의 경우에 비하여 더욱 큰 에너지가 요망된다. 이 절단 방법에 의하면 매우 단단하거나 혹은 연하여 기계적인 방법으로 힘든 재료의 절단도 용이하며 레이저 빔은 작은 크기로 집속시킬 수 있어 재료의 손실이 적으며 복잡한 형상의 절단도 쉽게 이루어진다. 또한 이 방법에서는 진동, 소음 및 먼지 등이 없고 발연의 감소와 여러가지 고가의 절단공구의 비축이 필요없다. 그리고 절단속도가 대단히 빠르며 전자회로에 의한 조절이 용이하여 융통성과 생산성이 크다.

레이저에 의한 재료의 절단에서 양호한 절단면을 얻기 위하여는 다음과 같은 사항이 만족되어야 한다.

○레이저빔 입구측과 출구측의 절단면이 표

- 면과 직각을 이룰 것.
- 일정하고 좁은 절단폭을 줄 것.
- 열영향 구역이 작을 것.
- 양측 절단면이 평행할 것.
- 부유물(dross) 등이 절단면과 및 면에 부착하지 말 것.
- 절단면이 거칠지 않고 굴곡이 없이 평행할 것.

위의 만족되어야 하는 사항들은 물론 레이저 빔의 변수, 절단시킬 재료의 열적성질, 취입가스 및 작업방법 등의 영향을 받는다.

레이저를 이용한 금속재료의 절단에 기여하는 절단기구로서는 금속의 증발, 취입가스에 의한 용융금속의 분출과 활성화기체에 의한 금속의 산화 등 세 가지이다. 보통은 절단시키려는 금속의 특성과 용도에 따라 이들 세 가지의 중요한 기구들 중에서 한 가지 혹은 두 가지 이상의 방법에 의해 수행된다.

금속의 증발에 의한 기구는 절단시킬 부분의 금속을 비등점 이상으로 가열시켜 증발시킴으로써 제거시키는 방법이다. 증발에 필요한 에너지는 용융에 요구되는 에너지보다 매우 크므로 두꺼운 금속의 절단을 이러한 기구에 의존하는 경우에는 대부분의 에너지가 증발잠열에 소요되므로 절단속도가 느리다. 이 경우에 증발된 금속이 이온화하여 플라즈마를 형성시킴으로 레이저 에너지를 흡수 및 차장시켜 효율적이 못 된다.

용융액체층은 레이저 복사 에너지의 흡수뿐만 아니라 용융층에 부딪히는 산소가스 입자들의 연소 에너지에 의해서도 가열이 이루어지며 이러한 흡수된 레이저 복사 에너지와 발열반응 에너지의 결합작용에 의해서 최고 증발온도까지 도달하게 된다. 이러한 높은 온도는 강한 물질 제거에 기여하는 강력한 증발현상을 용융액체층의 표면인 절단면 상에서 발생하도록 하며, 또한 가스 유동과 용융층 표면 사이의 마찰과 절단영역 내의 압력 구배에 의해서 용융 재질을 용융층의 하단면을 통하여 배출시킨다. 그리하여 용융층의 절단면 상에서의 강력한 증

발과 하단면에서의 액체 상태의 배출은 용융층 내의 지속적인 질량 손실을 초래하게 되며, 이러한 질량 손실은 절단 방향으로의 용융층의 운동에 의해 용융면에서 고체 재질이 녹아서 용융층으로 들어오으로써 보상이 된다. 그러므로 어떤 정상 상태 하에서 용융액체층의 질량은 계속적으로 일정하게 유지되고 이 용융층이 절단된 영역에서 아직 절단되지 않은 부분으로 이동하면서 절단 프로세스를 수행하게 된다.

3.1 최적절단 속도의 예측

앞서 언급한 바와 같이 고온의 용융액체층이 실제적으로 절단가공을 수행하고 있는 절단 도구라는 개념을 받아들일 수가 있으며 용융액체층의 에너지 균형과 용융액체층의 질량과 운동량 균형을 통하여 이론적인 해석을 수행할 수 있다.

(1) 용융 액체층의 에너지 균형식

레이저 산소 절단 가공에서의 용융 액체층의 에너지 프로세서들은 앞에서 논의가 된 바와 같이 레이저빔으로부터 흡수된 열량과 산소와 금속의 발열 반응에 의한 열량과 같이 두 가지 에너지 이득이 있으며, 열량 손실로서는 자신의 하단면에서 용융 금속의 배출로 잃어 버리는 열량, 금속 재질의 용융에 소모되는 열량, 강한 가스 제트에 의한 대류 냉각으로 잃어버리는 열량, 용융 액체층의 표면에서 발생하는 증발에 소모되는 열량, 그리고 마지막으로 열전도에 의한 열 손실이 있다. 손실 열량들 중에서 용융 금속의 배출로 잃어버리는 열량과 금속의 용융에 소모된 열량, 강한 가스 제트에 의한 대류 냉각으로 잃어버리는 열량은 나머지 두 개에 비하여 무시할 만하다.^(9,10)

따라서 어떤 정상상태 하에서는 이상과 같은 열량들의 이득과 손실 사이에서 다음과 같은 에너지 균형 관계식이 성립하게 된다.

$$P_{abs} + P_{rea} = P_{con} + P_{evp} \quad (12)$$

식 (12)의 각 항들에 대하여 정리하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

○레이저빔으로부터 흡수한 열량 P_{abs} 는 식 (13a)와 같다.

$$P_{abs} = a_{avg} P_L \quad (13a)$$

$$a_{avg} = 0.365 (r_e/\lambda)^{1/2} - 0.067 (r_e/\lambda) + 0.006 (r_e/\lambda)^{3/2} \quad (13b)$$

$$r_e(T_s) \approx r_{e293} \frac{T_s}{293} \quad (13c)$$

○연소 반응에 의한 열량 P_{rea} 는 식 (14)와 같다.

$$P_{rea} = e_R W D u n_0 \quad (14)$$

○작업재질의 가열에 사용된 전도열 P_{con} 은 식 (15a)와 같다.

$$P_{con} = \frac{(1-e^2) \pi^2 D k (T_s - T_\infty)}{I_1(uR_0/2a)} \quad (15a)$$

$$I_1(uR_0/2a) = \int_0^1 r' \exp(-2r'^2)$$

$$dr' \int_0^{2\pi} \exp\left(-\frac{uR_0}{2a} r' \cos \theta\right)$$

$$K_0\left(\frac{uR_0}{2a} r'\right) d\theta \quad (15b)$$

○증발에 소모된 열량 P_{evp} (Clausius-Clapeyron eq.)⁽⁴⁾는 식 (16)과 같다.

$$P_{evp} = e_v \frac{133.3}{\sqrt{2\pi k_B T_s m_s}} 10^{A/T_s} 10^B T_s^C W D \quad (16)$$

여기서, e_v 는 원자당 증발에너지(=3.31eV), k_B 는 Boltzmann 상수(=1.38×10⁻²³J/K), m_s 는 금속 원자의 질량(=9.27×10⁻²⁶kg), A, B, C 는 증발상수($A=-19710K, B=13.27, C=-1.27$)를 나타낸다.

이상으로부터 식 (12)의 미지수는 임의의 주어진 레이저 출력 P_L 와 작업재질의 두께 D 에 대해서 용융층의 표면 온도 T_s , 절단 속도 u , 절단 폭 W 임을 알 수 있다. 최종적인 미지수로서 용융층의 표면 온도 T_s 와 절단 속도 u 를 선택하여 질량/운동량 균형식과 연계할 것이므로 절단 영역의 폭 W 는 다음에 있는 약간 수정된 열전도 모델에서 계산한다.

(2) 절단폭의 계산

작업재질의 상부표면의 용융 등온선을 알게

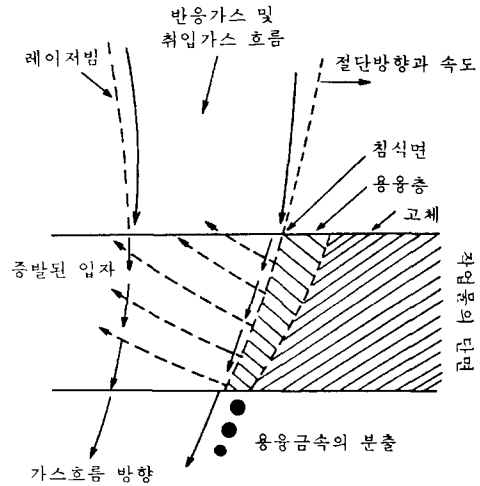


그림 9 레이저 빔 절단의 기구와 여러가지 영향

되면 그림 9에 표시되어 있는 절단 영역의 상부 모서리의 위치를 구할 수 있으며, 이 상부 모서리는 재질의 상부 표면의 고체 영역의 경계선에 해당하며 고체 영역으로서는 가장 높은 온도인 작업재질의 용융 온도의 등온선과 일치한다. 그리고 이 등온선으로부터 절단폭을 구할 수 있다.

고체 부분의 열전도문제를 지배하는 3차원 열전도 방정식에서 적분방법을 이용하면 다음의 방정식을 구할 수 있다⁽¹¹⁾

$$\frac{d\Phi}{d\xi} =$$

$$\frac{3Bi_g^2 [\exp(-\xi^2) - \Phi]^3 - 2\xi\Phi^2 \exp(-\xi^2)}{\Phi [2\exp(-\xi^2) - \Phi]} \quad (17a)$$

$$\Phi = N_c Bi_g \theta_0 \exp(\eta^2) \quad (17b)$$

$$\Phi(\xi \rightarrow -\infty) = 0 \quad (17c)$$

식 (17a)는 4차 Runge-Kutta 방법으로 풀 수 있으나, 식 (17c)의 경계조건을 적용하기가 어려우므로 다음 식에 의해 구할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\Phi = \frac{\exp(-\xi^2)}{1 + \frac{2}{Bi_g} \left(-\frac{1}{3} U \xi\right)^{1/2}}, \quad \xi \ll 0 \quad (18)$$

$d\Phi/d\xi=0$ 이 되는 곳은 절단폭이 형성된 위치

이므로 이 위치의 η 값, 즉 η_{max} 값으로부터 구한 y 값의 두 배가 절단폭이 된다.

(3) 용융액체층의 질량과 운동량 균형

그림 10에 보여진 용융액체층의 미소검사체적에 대해서 질량보존식과 유동을 빼기 형태의 유동으로 가정하여 운동량보존법칙을 적용하면 식 (19)를 얻을 수 있다. ⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{P}}{dx'} &= \frac{1}{0.9(D/\cos\gamma)} \int_{0.1D/\cos\gamma}^{D/\cos\gamma} \\ &\quad - \frac{dP}{dx'} dx' \\ &= \frac{P_s - P_a \cos\gamma}{D} \frac{1}{0.9} (1 - 0.1^{2n-2}) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)으로부터 용융층의 두께를 계산할 수 있으며 앞의 에너지균형을 적용하여 구한 식과 연계하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{T_m - T_\infty}{T_s - T_\infty} &= \frac{(1 - e^2) \pi}{2I_1(uR_0/2\alpha)} \\ &\quad \exp\left(-\frac{uh}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{uh}{2\alpha}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

(4) 계산 결과

그림 11에서 실선에 의해 표현되는 곡선은 에너지 균형식을 만족하는 값들을 표현해 주고 있으며, 점선으로 표시된 곡선은 질량과 운동량 균형식을 만족하는 값들을 나타내고 있는데, 주어진 레이저 빔의 출력과 작업재질의 두께에 대하여, 어떤 절단속도에서 두 개의 균형곡선이 만남을 알 수 있다. 이 교점에서는 에너지와 질량과 운동량이 모두 평형상태에 있으며 정체 용융층을 가지는 정상상태 절단가공에 대한 필요조건이 된다. 그리고 일점쇄선에 의해 표현되고 있는 곡선이 있는데, 이 곡선은 레이저 승화절단 가공의 경우에 대한 질량평형상태를 묘사해 주고 있다. 다시 말하면 용융에 의한 재질의 제거가 하나도 없으며, 순전히 증발에 의해서만 재질이 제거되는 경우에 해당되는데 이 경우의 질량 균형도 역시 또 하나의 교차점을 만들게 됨을 확인할 수 있으며, 이 교차점에서의 속도는 최소절단 가능속도를 의

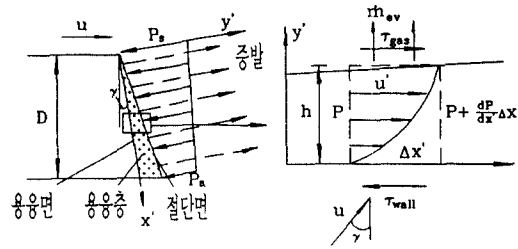


그림 10 용융층과 미소검사체적

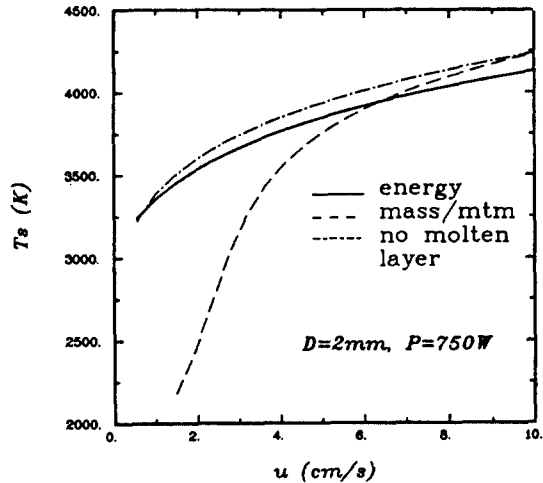


그림 11 에너지 및 질량/운동량 균형(두께 2mm, 출력 750W)

미하게 된다. 왜냐하면 용융층의 입장에서는 더 이상의 에너지를 받아들일 수 없으므로 이보다 작은 절단속도로 절단을 수행하게 되면 과다 입열로 인해서 self-burning이 일어나게 될 것이다. 물론 이 경우에도 절단은 된다. 또한 실선과 점선의 교차점에서의 절단속도는 최대절단가능속도에 해당하게 되는데, 주어진 레이저 출력과 작업재질의 두께에 대하여 이 속도보다 높은 절단속도로 절단가공을 수행하게 되면 완전한 절단이 이루어지지 않는 상태가 될 것이다. 따라서 절단수행이 아무런 문제 없이 이루어지려면 이러한 최소와 최대절단속도 사이의 어떤 값에서 절단 가공을 수행해야 할 것이다.

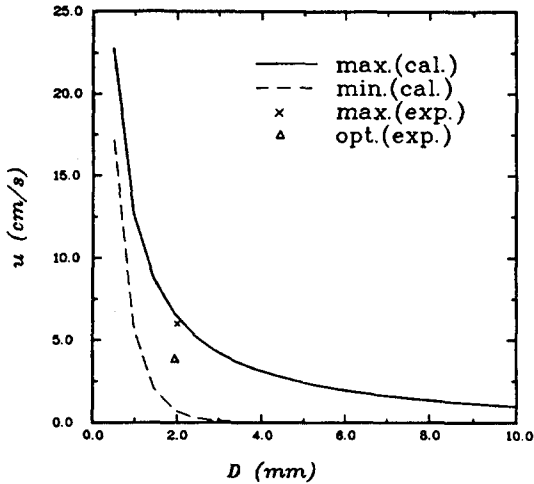


그림 12 재료의 두께에 따른 최소 및 최대 절단속도 (750W)

그림 12에서 실선으로 표시된 곡선은 작업재질의 두께의 변화에 따른 최대절단속도이며, 점선으로 된 곡선은 최소절단속도 즉 증발의 기여도를 나타내주는 속도값을 보여주고 있다. 작업재질의 두께가 줄어들수록 증발의 기여도가 급격히 증가하며, 두꺼워질수록 용융의 기여도가 증가함을 알 수 있다. 또한, 절단두께가 3mm와 4mm에서 최소절단 속도값이 사라지게 되며, self-burning은 일어나지 않게 될 수 있으며 재질의 두께가 증가할수록 절단 가능 속도구간은 점점 좁아지고, 낮은 속도영

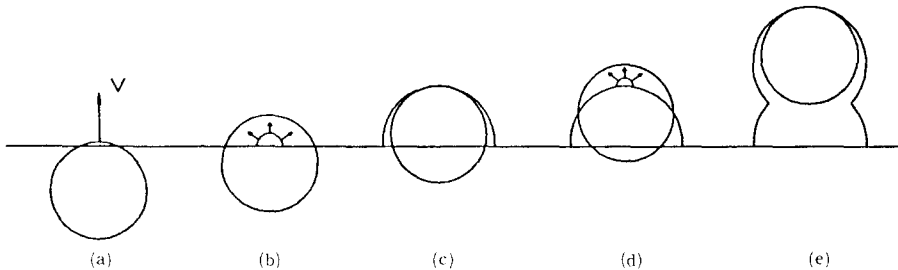
역으로 이동하며, 결국 소멸할 것이라는 사실을 한 눈에 볼 수 있다. 이 사실은 실험치와 잘 일치하고 있는 사실이다. 그리고 실험에 의해 구한 작업재질의 두께가 2mm일 때의 최대 및 최적절단속도값⁽¹³⁾을 그래프에 표현하였는데 상당한 일치를 보여 주고 있다. 그리고 그림으로부터 알 수 있듯이 두께가 1mm인 경우에 약 12.5cm/s라는 높은 최대절단속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.2 줄무늬 형성예측

레이저 진행 속도와 절단면의 진행속도의 차이에 의해 주기적 줄무늬가 형성됨을 가정하여, Arata 등이 처음으로 제안했던 모델을 검증하고 절단면에 영향을 미치는 인자(레이저 출력, 노즐 압력, 레이저 진행 속도, 레이저 점크기 등)를 살펴보고자 한다.

(1) 해석 모델

그림 13은 속도 V 로 평판의 표면을 움직이는 레이저 점크기의 평면도이다. 레이저는 재질 표면을 속도 V 로 움직이고 그에 따라 재질의 온도는 계속적으로 상승하게 된다. 절단면 표면온도가 높아짐에 따라 표면에서의 증발의 영향이 커져서 온도상승은 둔화되고 증발에 의한 물질 제거가 증가되어 절단면의 이동속도는 계속적으로 커진다. 계속적으로 증가한 절단면의 표면온도가 발열반응을 일으키기에 충분한 온도가 되면 또 다른 에너지원으로서 발열반응



(a) 가열 (b) 레이저 열원에 의한 물질제어 (c) 화학반응에 의한 물질제거 (d) 반복과정 (e) 줄무늬 형성

그림 13 절단과정에서의 주기적 줄무늬 형성모델

이 강하게 일어난다. 발열반응으로 얻어진 열은 절단면 표면온도를 급속히 올리고 그에 따른 표면에서의 증발에 의한 물질제거는 절단면의 속도를 레이저 이동 속도보다 크게 하여 최종적으로 그림 13(c)의 상태에 도달하게 된다. 이러한 과정이 반복됨으로써 주기적 줄무늬가 형성되고 이로부터 평균 파장과 평균 깊이로 특징지어지는 절단면 거칠기를 측정한다.

외부로부터의 열원인 레이저가 작업재료에 입사하는 부분에 인입되는 레이저에너지와 등가인 에너지원 $g(x, t)$ 가 작업재료 내에서 발생한다고 가정하고 Green function을 이용하여 최종적인 온도 분포를 구하면 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$T(x, t) = \int_{x'=0}^{\infty} G(x, t|x', \tau)|_{\tau=0} F(x') dx' + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t \int_{x'=0}^{\infty} G(x, t|x', \tau) \cdot g(x', \tau) dx' + \alpha \int_{\tau=0}^t G(x, t|x', \tau)|_{x'=0} \frac{1}{k} f(\tau) d\tau \quad (21a)$$

$$G(x, t|x', \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha(t-\tau)}} \left[\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4\alpha(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4\alpha(t-\tau)}\right) \right] \quad (21b)$$

여기서, $F(x)$ 는 초기조건이며 절단면에서의 열유속 $F(t)$ 는 절단면에서의 증발열과 발열 반응에 의해 결정된다.

$$f(t) = P_{rea} - P_{evp} \quad (22)$$

따라서 에너지원 $g(x, t)$ 는 표면에 흡수된 위와 같은 가우시안 분포의 레이저 빔 에너지와 같은 양의 에너지가 작업재질에서 발생한다는 가정하에 다음과 같다.

$$g(x, t) = \frac{P_{laser} \cdot \alpha_{avg}}{\pi R_0^2} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi D}} \frac{1}{\text{erf}(\sqrt{2})} e^{-2\frac{[R_0 - (u \cdot t + D) + x]^2}{R_0^2}} \quad (23)$$

절단면의 위치는 다음과 같은 질량 균형식으로부터 구한다. 질량 균형식은 용융에 의한 물질제거와 증발에 의한 제거 그리고 반응에 의해 소모된 질량은 절단면의 이동에 의해 얻어지는 질량과 같아야 하므로 다음과 같다.

$$\frac{dl}{dt} \rho = \dot{m}_{ev} + \dot{m}_{vel} + \dot{m}_{rea} \quad (24)$$

(2) 계산결과

레이저 절단시 발생하는 시간에 따른 절단면에서 레이저 선단까지의 거리의 변화 과정을 그림 14에 나타내었으며 각 시간단계에서의 절단면의 온도값을 그림 15에 나타내었다. 이 두 결과를 비교해 보면 거의 같은 주기를 가짐을 알 수 있고 결국 에너지 유입의 변화에 따른 절단면의 온도 변화가 줄무늬 형성에 주도적인 영향을 끼침을 알 수 있다. 초기에 그다지 높지 않은 온도를 가지는 절단면의 진행속도는

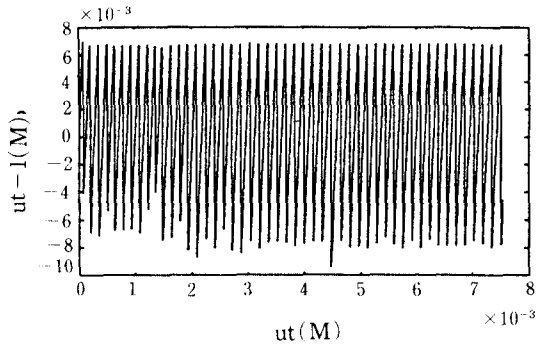


그림 14 레이저 빔과 절단면 사이의 거리변화

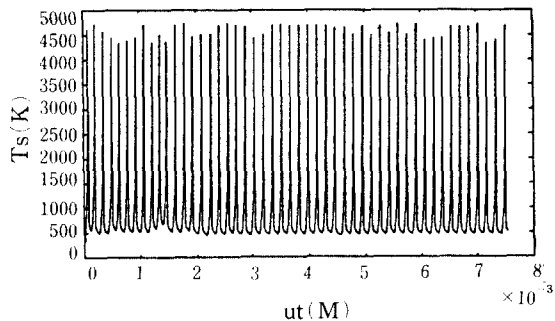


그림 15 절단면에서의 온도 변화

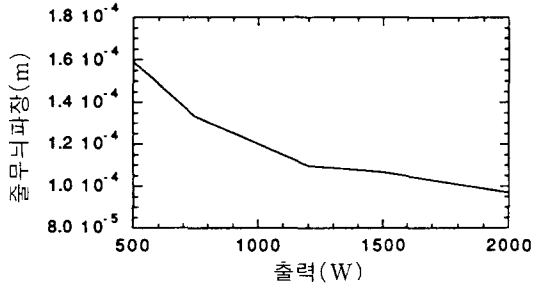


그림 16 레이저 출력에 따른 줄무늬 파장

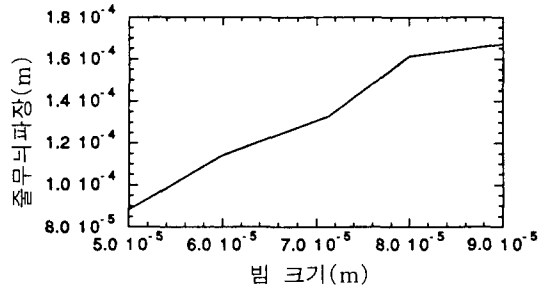


그림 18 레이저 빔의 크기에 따른 줄무늬 파장

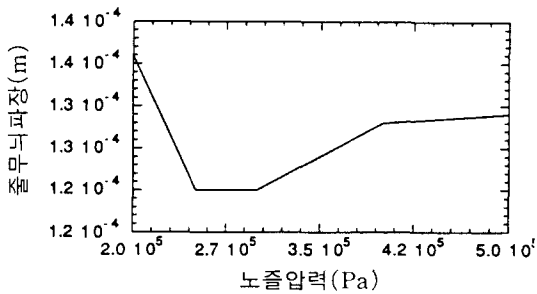


그림 17 노즐 압력에 따른 줄무늬 파장

레이저 진행 속도보다 작고 따라서 레이저에 의한 에너지 유입은 계속적으로 커지게 된다. 이에 따라 절단면의 온도는 계속적으로 올라가고 절단면에서 레이저 선단까지의 거리의 증가율은 감소하다가 어느 시점부터는 음수가 된다. 그에 따라 절단면에서 레이저 선단까지의 거리는 감소하게 되지만 약간의 시간지연을 가지는 절단면의 온도는 아직도 상승하게 된다. 절단면의 온도가 반응을 일으키기에 충분한 온도가 되면 레이저와 같이 불어준 보조가스와 반응하여 급속히 상승된 절단면의 온도는 증발에 의한 강한 물질제거를 야기한다. 결국 절단면은 빠른 속도로 레이저 선단을 따라 가게 되며 이러한 과정이 반복됨으로써 주기적 줄무늬가 형성된다.

그림 16에서 레이저 출력이 커짐에 따라 줄무늬 파장은 작아짐을 알 수 있다. 이는 Arata의 주장과 같은 결론이다. 그림 17은 노즐 압력에 따른 줄무늬 파장을 나타내고 절단면 거칠기 개선에 최적의 노즐 압력이 존재함을 보

이고 있다. 그림 18에는 레이저 크기가 커짐에 따라 줄무늬 파장이 커짐을 알 수 있다. 이는 Arata의 주장과 같은 결론이다.

절단면 거칠기에 영향을 미치는 중요한 인자는 레이저 출력과 레이저 점크기이고 상대적으로 절단 속도와 노즐 압력은 영향이 작음을 알 수 있으나 절단면 품질 개선을 위해 레이저 출력과 레이저 점크기를 조절함에는 비용의 증가 폭이 크나 상대적으로 절단 속도와 노즐의 압력이 용이하므로 실용적인 측면에서 이들 인자의 영향은 중요하다.

4. 맺음말

레이저가공 분야는 앞으로도 계속적인 관심과 함께 개발에 대한 연구가 지속될 것으로 전망된다. 실제 재료가공에 있어서의 시행착오를 줄이기 위해서는 이에 대한 열전달해석이 뒷받침이 되어야 하며 2차원해석, 산화반응열의 정확한 계산, 레이저 흡수율의 모델링 등이 앞으로 연구되어야 할 과제라 생각된다.

참고문헌

- (1) Bunting, K.A. and Cornfield, G., 1975, Toward General Theory of Cutting: A Relationship between the Incident Power Density and the Cut Speed, ASME, J. Heat Transfer, pp. 116~122.
- (2) Arata, Y., Maruo, H. and Takeachi, S.,

- 1979, Dynamic Behavior in Laser Cutting of Mild Steel, Trans. Japan Welding Research Institute Osaka Univ., 8, No.2, pp. 15~26.
- (3) Decker, I. and Ruge, J., 1982, Physical Models and Technological Aspects of Laser Gas Cutting, 455, SPIE, pp. 81~85.
- (4) Schuöcker, D. and Abel, W., 1984, Material Removal Mechanism of Laser Cutting, Industrial Application of High Power Lasers, SPIE, 455, pp. 88~95.
- (5) Schuöcker, D. and Walter, B., 1985, Theoretical Model of Oxygen Assisted Laser Cutting, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 72, Adam Hilger Ltd., pp. 111~116.
- (6) Schulz, W., Simon, G., Urbassek, H.M. and Decker, I., 1987, On Laser Fusion Cutting of Metals, J. Phys.D : Appl.Phys., 20, pp.481~488.
- (7) Schuöcker, D., 1986, Dynamic Phenomena in Laser Cutting and Cut Quality, Appl. Phys. B, 40, pp. 9~14.
- (8) 김도훈, 1990, 레이저 가공학, 경문사.
- (9) Schuöcker, D., 1986, Physical Mechanism and Modelling of Laser Cutting, SPIE, 701, ECOOSA, pp. 390~398.
- (10) Phillips, R. L. and Andrews, L. C., 1983, Spot Size and Divergence for Laguerre Gaussian Beams of Any Order, Applied Optics, 22, pp. 643~644.
- (11) Whang, K.H., Lee, J.S. and Yoo, K.H., 1991, Heat Transfer Analysis for the Evaluation of Laser Material Cutting Speeds, 4th International Symposium on Transport Phenomena, Vol.2, pp. 451~462, University of New South Wales, Sydney, Australia
- (12) Modest, M.F. and Abakians, H., 1986, Evaporative Cutting of a Semi-Infinite Body with a Moving CW Laser, ASME, J. Heat Transfer, 108, pp. 602~607.
- (13) 황경현, 1989, 레이저를 이용한 가공 기술 개발, 한국 기계 연구소
- (14) 정재동, 1992, 레이저 절단가공에서의 절단면 줄무늬 형성 기작에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문. 