

# 레이저 절단에서의 노즐 및 가스제트의 영향

방 세 윤\* · 한 유 희\*

## Nozzle and Gas Jet Flow in Laser Cutting

S.Y.Bang\* and Y.H.Han\*

### 1. 서 론

레이저절단은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, 용융상태의 재료를 가스제트에 의해 제거하는 레이저 용융절단(laser fusion cutting), 재료의 승화 또는 증발에 의해 제거하는 레이저 승화절단(laser sublimation cutting), 그리고 반응성가스와의 상호작용에 의한 반응열을 추가로 이용하는 레이저 연소절단(oxygen assisted cutting)으로 대별할 수 있다. 이중 특히 연소절단은 절단가능 두께와 절단속도면에서 여타 방법에 비해 유리하고 경제적이어서 산업계에서 가장 널리 쓰이고 있다.

레이저 절단성에 영향을 미치는 주요 인자에는 레이저출력, 재료의 특성, 절단가스, 절단 head, 노즐 등 여러가지를 들 수 있다. 일반적으로 레이저 절단에서의 재료제거의 mechanism은(그림 1 참고) (i)레이저에 의해 대상재료를 용융점이상으로 가열하고, (ii)가스 제트를 이용해 용융 또는 증발된 재료를 불어내는 두 단계로 이루어진다. 절단에 있어서 이 가스제트는 1차적으로 용융된 재료의 제거, 2차적으로는 렌즈나 거울 등의 광학계를 보호하고 냉각효과를 갖는 목적이 있고, 금속의 증발등에 의해 야기되는 플라즈마의 제거로 beam-material coupling을 원활하게 하는 용도도 있다.

실제 산업현장에서 레이저절단을 이용할 경우, 가스제트를 불어 주기 위한 노즐의 사용이 필수적

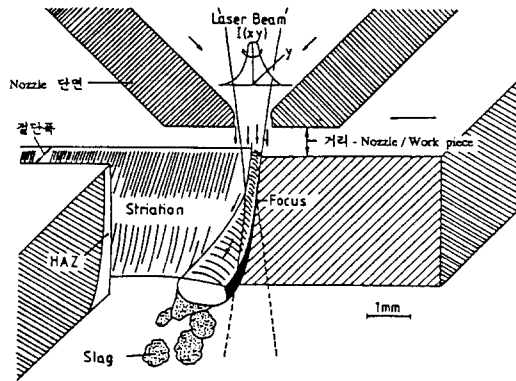
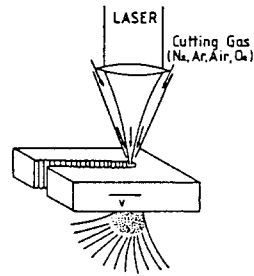


그림 1. 레이저 절단의 원리<sup>1)</sup>

이다. 이때 필연적으로 깨닫게 되는 것이, 단순히 노즐 압력을 높여 주는 것이 반드시 절단부위의 압력증가를 가져 오지는 않는다는 사실이다. 또한 절단하고자 하는 대상 재료에 따라 고품질의 절단

\* 정회원, 한국기계연구원 레이저가공연구그룹

부를 얻기 위해서는 사용가스의 종류나 노즐압력을 달리 해야 한다. 본고에서는 이에 대한 내용을 전반적으로 review해 보고, 레이저절단시 필수적으로 대하게 되는 노즐의 분사 거동 및 절단에 미치는 영향을 중점적으로 살펴 보고자 한다. 최종적으로 특히 후판의 레이저 절단성을 증가하기 위한 연구 결과를 소개한다.

## 2. 일반적인 Guideline

연강이나 low carbon steel에서는 산소절단이 여러 모로 유리하다. Stainless steel의 경우는 chrome산화물의 생성으로 오히려 불리하다. 특히 후판의 clean cut은 불활성 가스를 이용한 용융절단이 오히려 적합하다.

강의 산화반응시 반응에 의해 생성되는 산화용융물은 점도가 낮고 주위의 강에 부착되는 정도도 낮다. 즉 산소제트의 압력에 의해 쉽게 제거되며, 따라서 dross가 없는 절단면을 형성한다. Powell<sup>2)</sup>에 의하면 일반적으로 연강의 두께가 증가할 수록 절단 edge부위의 연소를 피하기 위해 큰 직경의 노즐과 낮은 산소압력이 필요하다. 절단속도 및 절단두께의 관계를 그림 2에 보인다. Beyer<sup>3)</sup>도 10t 이상의 강재의 경우 산소절단시는 가스압의 감소가 필요하다고 밝혔는데, 두께 20mm의 연강을 3.5kW의 레이저 파워와 0.08MPa의 산소를 이용해 1m/min의 절단이 가능하였다. 그러나 용융절단을 사용할 경우는 오히려 두께가 증가할 수록 가스압이 증가되어야 하는 것으로 나타났는데, 두께 15mm의 stainless steel을 5kW 출력의 레이저와 2MPa의 가스압으로 절단하였다.

Stainless steel의 산소절단시는 크롬산화물이 생성되어 절단면 하단부위를 따라서 dross가 생성된다. 이를 제거하기 위해서 (i)2차의 보조 가스제트를 사용하거나, (ii)매우 고압의(6기압 이상) 산소 제트를 이용해 dross를 최소화하기도 한다. Stainless steel의 경우에 대해 절단속도 및 절단두께의 관계를 그림 3에 보인다.

2차 보조가스제트(또는 dross 제트)의 목적은 절단 하부에서 생기는 모든 dross를 절단후 사용하지 않는 쪽으로 붙여주기 위함이다. Titanium의 경우에 이러한 형태의 dross 제트를 사용할 경우 절단부의 산소 오염도가 기계적 절단시보다 오히려 줄어드는 것을 알 수 있었다<sup>2)</sup>. 또한 매우 광범위한 영역의

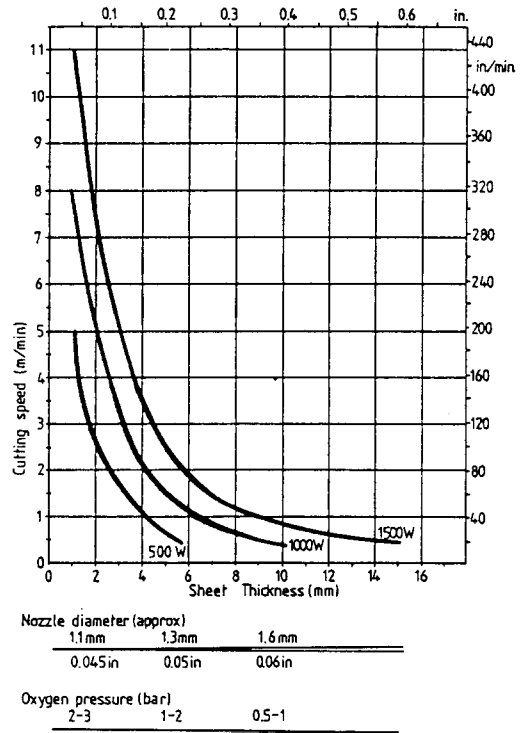


그림 2. Cutting speeds for mild steel for a number of laser powers<sup>2)</sup>

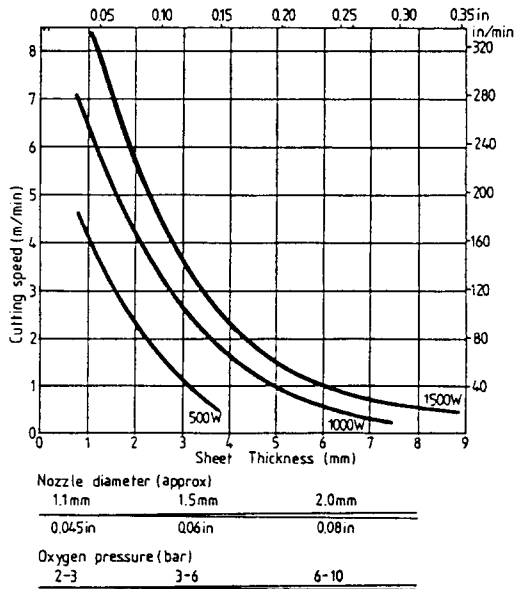


그림 3. Typical cutting speeds for stainless steels at a number of laser powers<sup>2)</sup>

dross 제트 변수 영역에서 이러한 개선 경향을 볼 수 있었으며, 이는 dross 제트 공급압력과 제트-절단부와의 거리는 크게 중요하지 않음을 시사한다. 이 결과를 이용해 절단 하부에 컴퓨터로 제어되는 노즐군을 장착하거나, 또는 slit이 있는 copper tube를 장착해 실제 가공시 깨끗한 절단부를 얻기도 한다.

고압의 불활성 가스제트를 사용하면 일반적으로 사용되는 산소제트의 경우보다 고품질을 얻을 수 있다. 즉 절단부는 dross가 없고 산화되지 않은 깨끗한 형태를 보인다. 주로 질소가 많이 사용되는데, 주된 이유는 화학적 활량(chemical activity)이 낮으면서도, 알콘과 같은 진짜 불활성가스에 비해 저렴하기 때문이다. 일반적으로 산소절단에 비해 25%의 절단속도를 얻을 수 있어 경비가 증가되는 외에 렌즈가 고압에 견딜 수 있도록 고려해야 하지만, 고품질의 절단이 가능하다.

비금속절단에서 특히 아크릴은 승화작용에 의해 고품질의 절단면을 얻을 수 있다<sup>2)</sup>. 이 경우에는 가스제트의 압력이 너무 낮아서도, 또 너무 높아서도 곤란하다. 아크릴-즉 PMMA(polymethyl methacrylate)는 용융되어 무색의 독특한 냄새가 나는 methyl methacrylate 증기로 분해된다. 이 가스층은 레이저빔 흡수율이 매우 높아 인화되기 쉬우므로 이를 방지하기 위해서는 절단부에서 나오는 가스층의 속도가 화염의 전파속도보다 빨라야 한다. 이를 위해서는 (i) 절단속도를 빠르게 하거나 (ii) 절단가스제트 압력을 높이는 방법이 있다. 그러나 절단부위가 매끄럽게 연마된 형태를 원한다면 최대 절단가스압은 제한을 받게 된다. 즉 고품질의 절단부를 얻기 위해서는 절단부에 남아 있는 여분의 용융층이 가스제트에 방해받지 않고 재용되고도록 해야 한다. 만약 절단부를 통과하는 공기 유량이 정해진 (낮은) 값을 넘게 되면 용융층의 난류유동에 의해 최종절단부는 동결된(frosted) 형태를 보이게 된다. 따라서 특히 간판용 아크릴판을 절단할 때에는 절단부위를 지나가는 공기유량은 절단 edge부위의 frosting을 피하도록 낮아야 하지만, 또한 가스의 인화를 피할 수 있을 정도로 높아야 한다. 적절한 공기량을 얻기 위해서는 금속의 경우에 사용되는 것보다는 큰 직경의 구멍을 갖는 노즐이 적절하다.

Nielsen<sup>4)</sup>은 혼합가스를 사용한 절단성 연구를 수행하였는데, 특히 stainless steel을 절단할 경우 적당한 조성의 혼합가스를 이용하면 절단속도가 크게

감소하지 않으면서도, 절단후의 용접성도 양호한 것으로 밝히고 있다. 또한 레이저빔을 절단노즐의 중심축에서 벗어나게(off-axis) 조정하면 고품질의 절단을 얻을 수 있는 변수의 영역이 확대된다는 연구결과도 있다<sup>5, 6)</sup>. Ketting등<sup>5)</sup>은 레이저빔을 절단노즐의 중심축보다 앞쪽으로 (절단진행방향으로) 할 경우 중심축에 위치할 때보다 넓은 압력범위에서 절단이 가능하고 절단품질도 좋다고 보고하고 있다.

### 3. 노즐에서의 제트유동

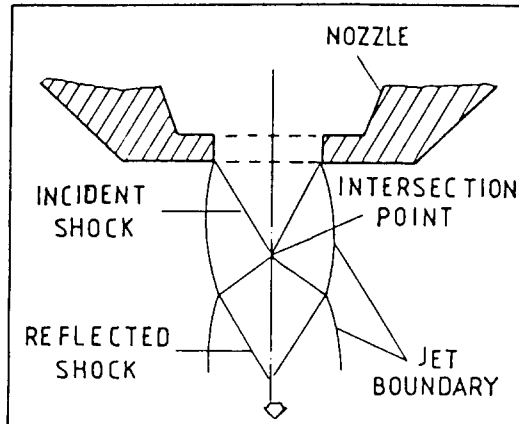
레이저 절단을 돕기 위해 노즐의 형상이나 가스의 조성/혼합비 등을 최적화하고자 하는 시도가 일찍이 80년대 초부터 진행되어 왔다. 노즐을 통해 분사되는 가스제트의 유동은 속도에 따라 아음속 유동(subsonic flow) 또는 초음속 유동(supersonic flow)으로 나뉘어진다. 일반적으로 많이 사용되는 가스제트는 아음속 유동으로 노즐과 재료사이의 거리(nozzle-to-workpiece distance : 절단거리 NW)를 가능한 작게 유지하여야 절단성이 좋지만 spatter에 의해 노즐과 렌즈의 손상위험이 있다. 이를 피하기 위해 노즐 압력을 높여 초음속유동을 얻어 절단거리를 증가시키고자 하는 시도가 진행되어 왔다.

#### 3.1 자유제트 유동

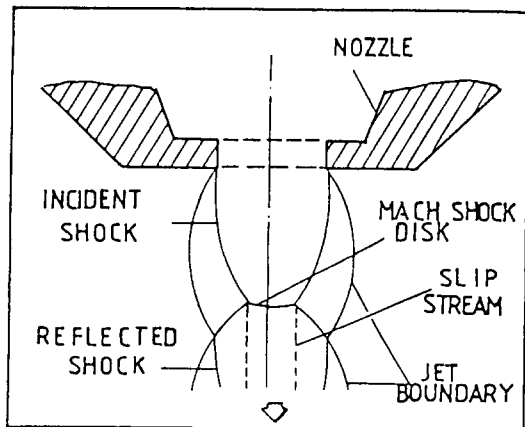
레이저 절단에서의 노즐유동을 이해하기 위한 연구는 크게 세 가지, 즉 (i)노즐에서 분사되는 자유제트(free jet)의 거동, (ii) 특히 박판에서의 성능을 이해하기 위한 충돌제트(impinging jet) 거동의 연구, 마지막으로 (iii)후판에서의 절단성 이해를 위한 절단면(cutting kerf) 내에서의 제트거동의 연구로 나눌 수 있다. 이 중 자유제트의 유동에 대해서는 일찍이 Prandtl<sup>7)</sup>, Ward<sup>8)</sup>등에 의해서 연구되었으며 노즐의 Head 압력에 따른 분사제트의 구조-특히 초음속제트의 경우-와 shock structure를 밝히고 있다.

이론적으로 2원자구조의 가스(diatomic gases)는 노즐 head(또는 저장탱크)의 절대압력을  $P_n$ , 제트 주위의 절대압력(absolute ambient pressure)을  $P_a$  라 하면  $P_n/P_a > 1.89$ 의 경우에 노즐 출구에서 초음속이 된다. 일반적인 형상의 레이저 절단노즐(즉 convergent 또는 convergent-straight type)에서는

제트는 underexpanded 되며, 이론적인 convergent-divergent 노즐(de Laval 노즐)에서는  $P_n/P_a$ 가 노즐 throat와 출구의 면적에 의해 결정되는 Design condition보다 클 경우에 underexpanded 된 초음속유동 현상을 보인다. 미소하게 underexpanded 된 제트의 경우, 경사 충격파 구조가 제트 가장자리에서 반사해 conical shock 구조를 형성하며 계속 후류에서 주기적으로 반복됨을 알 수 있다 (그림 4(a) 참조). 노즐 압력이 보다 높아지면 ( $P_n/P_a > 4$ ) 유동은 강한 underexpansion이 되어 먼저와 같은 구조는 더 이상 존재하지 않게 된다. 제트의 중심축상에서 충격파가 서로 교차하는 대신에, 유동방향에 수직한 강한 Mach shock disk (MSD 또는 normal shock)을 형



(a)



(b)

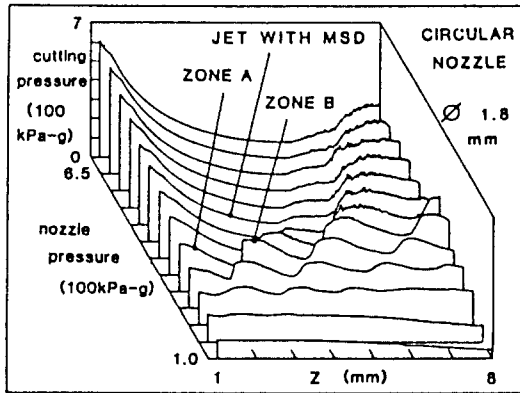
그림 4. 노즐에서의 초음속 유동<sup>12)</sup>

성하게 되며 이를 가로지를 때의 stagnation pressure의 손실로 인해 그 후방에서는 아음속이 되지만 충격파의 영향을 받지 않은 외부유동에 의해 다시 초음속으로 가속이 된다(그림 4(b) 참조).

### 3.2 박판에서의 제트유동

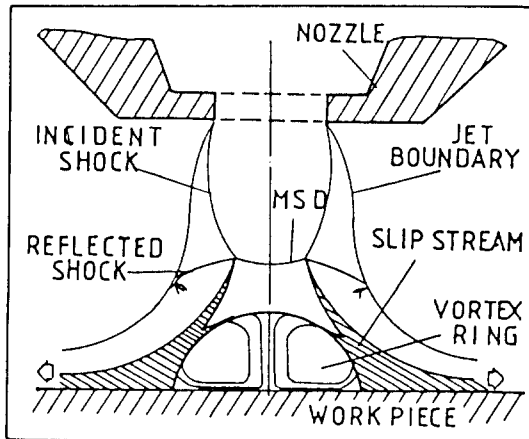
실제의 레이저 절단과정은 평판에 원형의 제트가 충돌하는 충돌제트의 현상으로 해석할 수 있으며, 특히 박판의 경우 절단면을 따라서의 유동보다는 평판 표면에 작용하는 제트압력(stagnation pressure) 즉 절단압력(cutting pressure)의 변화에 좌우된다. 절단압력은 실제 절단시에 측정할 수는 없지만 노즐-재료간의 거리, 노즐 head의 압력 등에 의해 변화하게 되며, 평판에 pressure transducer를 장착, 실험적으로 밝힐 수 있다. 유동이 아음속인 경우는 노즐 head의 압력을 높일 수록, 즉 제트의 속도가 증가 할수록 절단압력이 증가, 절단속도가 빨라지는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 절단에 이용할만한 절단 압력을 얻기 위해서는 노즐 끝부분과 재료와의 거리가 가까와야 하는데 (보통 1mm 이내), 이는 절단시의 spatter 등에 의해 렌즈나 mirror가 손상되는 가장 큰 원인이 되며, 평면이 아닌 곡면의 절단에서는 nozzle-to-workpiece distance를 정밀하게 제어해야 하는 제약이 있다. 이를 감안하여 초음속유동을 이용해<sup>9)</sup> 상당히 떨어진 위치에서도 충분한 절단압력을 얻고자 하는 목적하에 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이미 앞에서 자유제트의 경우에 고려한 바와 같이 초음속 유동에서는 충격파의 영향으로 노즐압 및 거리에 따라 압력이 변화하는 양상을 보이며, 절단압력도 이에 의존한다. 이를 밝히기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며<sup>9-13)</sup> 간략히 종합해 보면 아래와 같다.

노즐 head 압력을 높여 초음속유동을 얻을 때, MSD가 생기기 전까지는 주기적인 conical shock 구조를 가짐을 앞에 서술하였다. 이때 절단압은 결국 평판에서의 유동의 stagnation pressure로 나타나는데, 노즐 head의 압력과 NW-거리에 따라 주기적인 변화를 보인다. 그림 5에 전형적인 원형 노즐(dia = 1.8mm)에서 분출되는 제트유동의 절단압력과 노즐 head 압력 및 NW-거리의 관계를 나타내었다<sup>12)</sup>. 노즐압력이 0.3-0.35 MPa까지는 절단압이 NW-거리에 따라 주기적으로 변화함을 볼 수 있다. 절단압이 높은 영역을 차례대로 zone A, zone B 라고

그림 5. 절단압력<sup>12)</sup>

하면, zone A는 노즐 끝에서 매우 가까와 레이저 절단시 손상을 받기 쉽다. 두번째의 고압 영역(zone B)은 노즐끝에서 약 3mm 정도에 위치해, 실제 절단시 손상위험도 적고, NW-거리의 변화에 따른 절단압 변화가 별로 없는 구역이 zone A 보다 큰, 즉 tolerance가 큰 것을 알 수 있다. Zone B 보다 뒤에 나타나는 고압영역은 노즐에서 너무 멀어 실제 절단시 렌즈 등의 optics를 이용해 빔을 집중시키는데 곤란하다.

노즐압력이 보다 높아지게 되면 강한 MSD가 형성되고 유동이 이 MSD를 가로지르때 stagnation pressure가 감소하게 된다. 따라서 절단압력도 감소하게 된다. 그림 5에서 MSD가 발생할 때 제트가 주기적인 구조를 잃어버리고 낮은 절단압을 갖게 됨을 알 수 있다. 평판에의 충돌제트에서 MSD가

그림 6. MSD와 stagnation bubble<sup>13)</sup>

발생하면 stagnation bubble이 형성된다고 보고되고 있다<sup>9, 14)</sup>. 그림 6에 이 stagnation bubble(또는 vortex ring)을 보이는데, 이로 말미암아 절단시의 찌꺼기 제거가 비효율적으로 될 뿐 아니라, debris를 가두어 놓게 되어 레이저빔을 흡수, plasma의 형성에도 기여하는 것으로 생각되고 있다.

### 3.3 후판에서의 제트유동

후판에 레이저 절단을 이용할 경우, 제트유동의 특성길이(characteristic length, 보통 nozzle diameter 또는 jet width)에 비해 절단 깊이가 상대적으로 크게 되므로 절단면 내에서의 유동의 이해가 절단 성능의 연구에 매우 중요하게 된다. 특히 초음속 유동의 경우 충격파의 존재로 인해 현상이 복잡하게 되어 해석이 어렵다. 거의 대부분의 연구가 Schlieren 가시화를 통해 현상의 이해에 주안점을 두고 있으며, 이론적인 연구로는 아음속유동의 경우 2차원으로 단순화해 conformal mapping 방법으로 절단면에 따른 압력분포를 구한 예<sup>15)</sup>를 들 수 있다.

Schlieren 가시화를 통한 연구에서는 절단폭을 모사하거나 절단면의 형상을 만들고 그 위를 흐르는 제트의 유동을 관찰하고<sup>3, 6, 16)</sup>, 모사 절단면(simulated cutting kerf)에서의 압력분포를 측정해<sup>16)</sup> 실험적으로 접근하고 있다.

Beyer 와 Petring<sup>3)</sup>은 모사 절단면에서의 유동을 Schlieren diagnostic 방법으로 분석하였는데, 그에 따르면 특히 초음속 제트의 경우 유동의 현상은 각각의 특성구역(characteristic region)으로 나눌 수 있으며, 이 특성구역은 초음속 유동의 영향을 크게 받는다. 결과적으로 경계층(boundary layer)의 특성 및 유동박리(separation)가 특히 용융부의 방출 효율에 강한 영향을 끼친다. 즉 경계층의 박리가 일어나지 않는다면 절단 가스로부터 절단면 내부의 용융 표면부위로의 momentum transfer가 최적화될 수 있다. 기본적으로 경계층의 박리는 매우 불안정한 과정이며 때로 절단면의 한쪽 벽면에서 반대편으로 번갈아 발생하는 것이 관찰된다. 이런 현상은 곧 절단중의 spark shower의 진동과 절단면 하부에 dross와 burr가 이쪽 저쪽으로 부착되는 것 과도 연관된다고 보고하고 있다.

한편 Berger등<sup>16)</sup>은 일반적인 형태의 conical 노즐(convergent-straight)과 Laval 노즐(convergent-divergent)을 Schlieren사진을 통해 비교해 보고,

아울러 모사 절단면에서의 실험을 통해 유동의 특성을 연구하였다. 그 결과 일반 conical 노즐에 비해 작업영역 (working range)가 월등히 큰 ( $\approx 5\text{mm}$ ) dual-beam Laval노즐을 개발하였다. 여기서는 기본적으로 두개의 경사지게 설치된 Laval 노즐을 통해 분출된 두 초음속 제트가 서로 부딪쳐 합쳐지면서 하나의 main flow를 형성하게 되는데 MSD가 없는 제트 유동을 얻을 수 있었다<sup>17)</sup>.

Zefferer<sup>6)</sup>은 Schlieren diagnostic을 통해 레이저빔 절단에서의 gasdynamic 영향에 대해 연구하고, 절단 가스 유동의 기본적인 pattern과 노즐형상 및 조정, 절단압과 절단형상의 영향에 대해 고찰하였다. 특히 모사 절단면에서의 Schlieren 가시화를 통해 절단면내의 유동영역이 5가지의 특성구역— approach, admission, overexpansion, boundary layer separation and compression, outflow region—으로 나뉘어지며 경계층의 박리위치가 가스유동의 용융물 제거작업 (clean-out operation)과 절단효율의 중요한 척도가 된다고 주장하였다. 그림 7에 상기한 특성구역을 보인다.

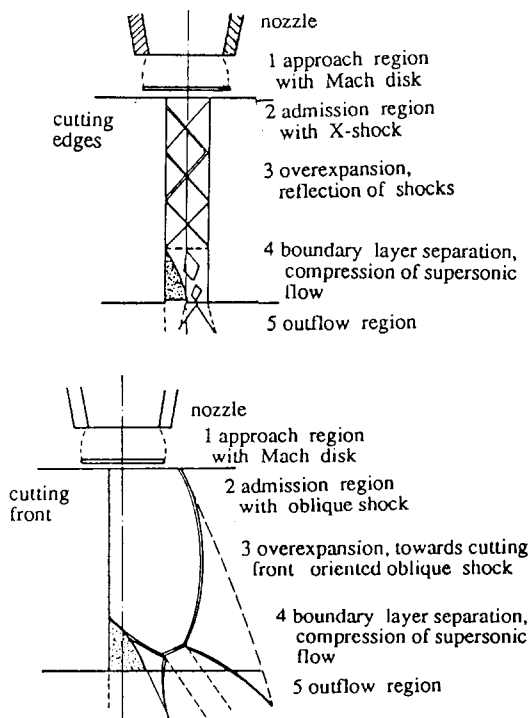


그림 7. 절단면 내의 유동<sup>6)</sup>

### 3.4 노즐의 개선을 위한 시도

여러가지 다른 형상의 노즐을 이용해 절단성을 향상시키고자 하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 모두 실험이나 경험에 의존해 노즐을 design하고 평판에서의 절단압력 측정과 실제 절단을 수행함으로써 절단성을 평가하고 있다.

노즐은 용융금속이 쉽게 달라 붙지 않고, 빔 정렬시에 레이저빔에 의해 쉽게 손상되지 않는 재질을 사용할 것이 요구되며, 일반적으로 구리가 레이저빔의 반사율이 높고 위의 조건을 충족해 가장 많이 사용된다. 또한 현장에서 가장 많이 쓰이는 절단용 노즐의 형태는 동축 노즐— 즉 레이저 빔과 가스 제트가 동일 중심축상에서 흘러 나오는 형태이다. 동축 노즐은 그 내부의 형상이나 가스통로의 형태 또는 노즐 끝부분의 형상에 따라 parallel, conical, convergent, convergent-divergent, ring, flat-tipped, non-circular 등 여러 가지로 분류할 수 있다. 그림 8에 그 형태를 보인다.

초음속유동을 얻기 위해 노즐의 압력을 높일 경우 보통 1.0MPa 이상이 되면 렌즈에 무리가 오게 되므로 이를 피하기 위해 (i)ring 노즐을 이용해 고

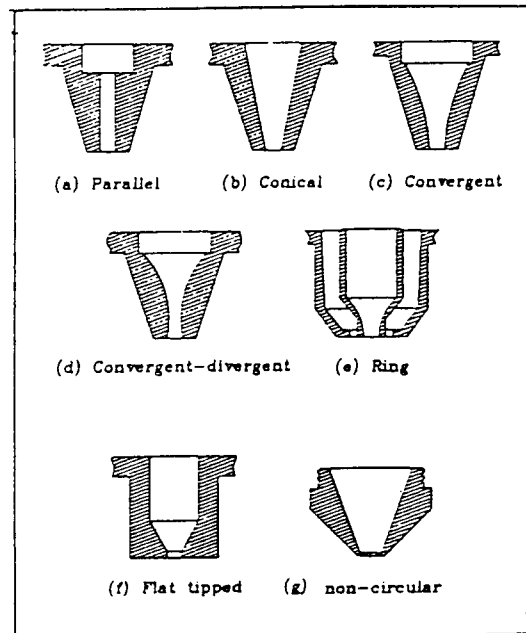


그림 8. 일반적인 노즐<sup>12)</sup>

입가스의 통로를 별도로 하거나 (ii) 렌즈 아래부분에 window를 설치해 고압부와 렌즈를 격리시키게 된다. 또는 아예 focusing mirror를 이용해 문제를 해결하기도 한다.

원형의 동축 노즐에서는 노즐 압력이 증가함에 따라 MSD가 생성되어 절단압력의 저하를 가져오게 됨은 앞에서 서술한 바 있다. Fieret 등<sup>18)</sup>은 이 MSD의 형성을 방지하기 위해 노즐 끝부분을 비원형으로 제작해 성능을 조사하였다. 총 34가지의 노즐중 3가지는 0.65 MPa 이하의 노즐압력에서는 MSD가 형성되지 않고 zone B의 고압영역이 나타났다. 이는 원형노즐의 대칭성을 효과적으로 차단해 edge부에서 비롯되는 shock구조가 변화, MSD가 형성되지 못하는 것으로 사료되나, 특별히 3가지의 형상이 더 효과적인 것은 설명하기 힘들다. 한가지 특기할 것은 노즐 끝부분의 형상이 아주 정교해야 하고 매우 작아서, 제작상 또는 사용상의 부주의로 쉽게 유동의 구조가 변화할 수 있어 관리에 극히 주의를 요하는 점이다. 이는 즉 실제적인 사용에는 적합하지 못함을 시사한다.

Ring 노즐의 환형(annular)노즐을 이용해 절단성에 영향을 끼칠 수 있는 가능성을 보인 연구도 발표되고 있으며<sup>12, 19)</sup>, 잘 알려진 Coanda effect-제트가 곡면 형상의 stream line을 따라 흐르는 현상을 응용하여 원형노즐과 annular 노즐을 조합, 높은 노즐 압력하에서도 MSD의 형성을 억제할 수 있는 Coanda 노즐도 발표되고 있다<sup>12)</sup>. 이 Coanda 노즐은 4-5mm의 절단거리에서도 0.5 MPa의 절단압력을 낼 수 있다고 보고되고 있다.

Sepold 등<sup>20)</sup>은 3개의 경사 노즐을 이용해 mirror를 사용할 때 효과적으로 절단거리를 3-4mm 정도로 늘일 수 있었다. 단 절단압력은 0.2 MPa 정도로 낮은 영역에 국한되고 있다.

최근들어 공기역학의 이론을 이용해 초음속제트의 design condition에 맞는 convergent-divergent, 소위 Laval 노즐을 제작해 이용을 시도하고 있다. Zefferer 등<sup>6)</sup>은 일명 parallel jet Laval 노즐의 실험 결과 0.6 MPa의 노즐압에서도 shock이 형성되지 않는 유동을 얻을 수 있었다고 보고하고 있다. 또한 Hügel 등<sup>21)</sup>은 2개의 경사지게 설치된 Laval 노즐을 통해 초음속제트를 분출, 충돌시켜 shock없이 5mm 정도의 절단거리를 얻을 수 있었던 것으로 보고되고 있다.

## 4. 후판의 레이저절단

박판 절단의 경우 효과적으로 알려진 Laval 노즐(초음속노즐)을 후판에도 적용할 수 있는지의 여부를 조사해 보고, 가스조성이 절단품질에 미치는 영향을 알아 보았다<sup>22)</sup>.

### 4.1 절단변수

예비실험을 통해 결정된 변수는 다음과 같다.

Focusing : 10" ZnSe lens

Laser : Rofin-Sinar multi-mode CO<sub>2</sub> laser  
(Lp=2-4kW)

Cutting gas : gas - O<sub>2</sub> only (압력 0.1 MPa 이상)  
O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> (압력 0.1 MPa 이상)

노즐 - convergent-straight 노즐 (dia = 2.0mm)

supersonic 노즐(독일 K사)  
0.5, 1.0, 1.5 MPa용

노즐과 재료사이의 거리(NW)

C-S 노즐; 1mm

supersonic 노즐; 가변

노즐과 촛점사이의 거리(NF)

C-S 노즐; 1mm(촛점은 표면에 위치)

supersonic노즐; 가변

Process : speed - 가변

재료 - S45C 22mm

### 4.2 노즐의 영향고찰

산소만을 보조가스로 사용할 경우 uncontrolled burning이 일어나고 절단면은 매우 거칠다. 혼합가스를 사용하면 질소가 소량 첨가될 경우 절단면의 품질(roughness)은 개선된다. 단 이때 dross는 산소만을 사용할 경우에 비해 viscosity가 증가해 용융된 금속의 제거가 보다 어렵고, 이런 경향은 질소의 함량이 증가할 수록 뚜렷해진다. 실험에서는 먼저 supersonic노즐의 압력을 0.5, 1.0, 1.5 MPa로 점차 증가시켜가며 제트 momentum의 증가가 dross의 제거에 미치는 영향을 살펴보았다(그림 9 참조).

특히 1.0 MPa 과 1.5 MPa 노즐의 경우에 사진에서

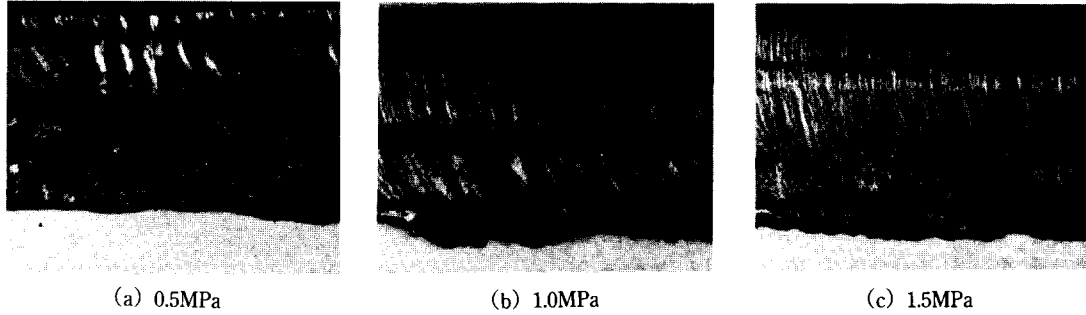


그림 9. 제트 momentum 증가의 영향(supersonic 노즐/혼합가스 사용시)

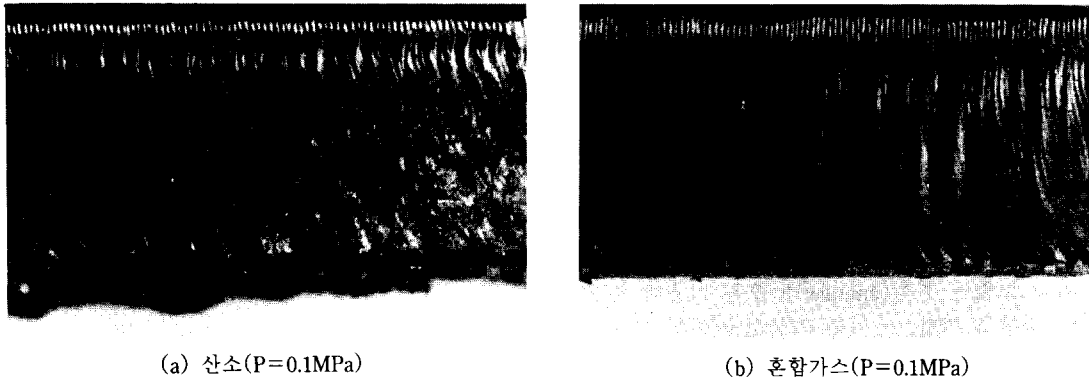


그림 10. C-S 노즐 사용시의 절단면

보듯이 2/3지점에서 돌연한 유동의 변화가 있음을 알 수 있다. 상부와 하부의 확연한 유동의 불연속으로 인해 가로방향으로 줄무늬가 있는 듯이 보인다. 이는 Zefferer 등<sup>6)</sup>의 논문에서 밝혔던 유동의 박리 현상(flow separation)에 의한 것으로 판단된다. 노즐 압력이 1.0 MPa에서 1.5 MPa로 50% 증가함에도 불구하고 유동박리는 큰 변화가 없으므로 미루어, 이러한 형태는 초음속 제트의 후판 절단면내에서의 전형적인 pattern으로 간주된다. 즉 후판의 경우 초음속제트의 사용은 유량의 급격한 증가에도 불구하고 절단면의 질 개선에는 한계가 있다. 다만 큰 제트momentum의 작용으로 대부분의 용융층은 달라붙지 못하고 제거되며 일부의 dross만이 남아 있으나 이는 절단면의 상부에서 경사지게 분출되는 2차 보조 제트의 사용으로 손쉽게 제거가 가능하였다.

이에 비해 통상 사용되는 C-S type의 노즐을 채택할 경우의 절단면을 그림 10에 보인다. 이때 보

조가스로는 각각 산소와 혼합가스를 0.1MPa의 압력으로 사용하였다. 특히 혼합가스를 사용할 때의 절단면은 supersonic 노즐을 사용했을 때보다 좋을 수 있다. 즉 후판의 절단에서는 초음속제트는 비록 잘 고안된 Laval 노즐에서 분출되는 경우에도 절단면내에서 유동의 박리로 인해 깨끗한 절단면을 얻기 곤란하며, 오히려 통상의 convergent-straight 노즐과 낮은 압력의 제트를 사용하는 것이 바람직함을 보이고 있다.

#### 4.3 가스 조성의 영향 고찰

산소만을 사용할 경우보다 혼합가스를 사용할 경우 절단면의 거칠기가 개선된다. 그림 10(b)에 산소와 질소의 혼합가스를 0.1 MPa의 압력으로 분사할 때의 절단면을 보인다.

산소만을 사용할 경우 uncontrolled burning의 영향으로 면은 좋지 않으나 dross는 상대적으로 제



거하기 쉽다. 이에 비해 혼합가스를 사용하면 면의 품질은 개선되지만, 용융층의 viscosity가 증가해 부착된 dross는 응고상태에서 상대적으로 제거하기 힘들다. 이의 제거를 위해 2차 보조제트를 노즐 후방에서 사용할 경우 거의 대부분의 dross를 제거할 수 있었으며 완전히 분리된다.

#### 4.4 30mm 후판 절단 시도

이상에서 파악된 혼합 가스와 2차 보조 가스제트의 역할을 최적화해 장갑판재(armour plate)로 쓰이는 고크롬망간강(High Cr-Mn Steel)을 성공적으로 절단할 수 있었다. 레이저 출력은 4kW였으며, 통상의 convergent-straight 노즐을 사용하였다. 이때 절단속도는 0.2m/min을 얻을 수 있었으며, 2차 보조제트(압축공기 분사)를 사용해 dross없는 절단면을 얻을 수 있었다.

### 5. 결 언

노즐에서 분사되는 제트의 거동에 대해 전반적으로 고찰해보고, 실제 후판의 레이저 절단성 실험을 통해 노즐의 영향 및 혼합가스의 절단면 질 향상효과 등을 살펴보았다. 간략히 요약하면 다음과 같다.

아음속제트는 노즐압력을 증가함에 따라 절단압력도 증가하지만 노즐과 재료사이의 거리를 가능한 작게 유지하여야 하는 제약이 있다. 따라서 사용중에 손상이 가기 쉽다. 이를 해결하고자 초음속제트의 사용이 연구되고 있지만 shock의 형성으로 인해 노즐압과 절단압은 매우 비선형적인 관계를 갖는다. 따라서 (i)고압에서도 MSD가 형성되지 않고 주기적인 압력 재상승이 나타나도록 하거나, (ii)Laval 노즐을 이용해 shock 구조가 형성되지 않고 큰 절단거리를 얻도록 하는 방법이 제시되고 있다.

초음속노즐의 후판 절단 적용 가능성을 분석해 본 결과 유동 박리 현상으로 인해 후판보다는 박판의 용융절단에 적합할 것으로 판단된다. 절단품질의 향상을 위해서는 적절한 조성의 혼합가스를 사용하는 것이 아주 효과적이었으며, 보조 가스 제트를 채용해 slag제거를 효율적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. 한유희 : "레이저 가공기술", 용접학회지 8권 3호, pp 13-23, 1990.9
2. J. Powell : CO<sub>2</sub> Laser Cutting, Springer-Verlag, Germany, 1993
3. E. Beyer and D. Petring : "State of the art in laser cutting with CO<sub>2</sub> lasers," ICALEO'90, 1990
4. S. E. Nielsen : "Laser cutting with high pressure cutting gases and mixed gases," LIM 3, 1986
5. H. O. Ketting and F. O. Olsen : High pressure off-axis laser cutting of stainless steel and aluminum, Proceedings of LAMP '92, pp 607-612, 1992
6. H. Zefferer, D. Petring and E. Beyer : "Investigations of the gas flow in laser beam cutting", 3rd Beam Technology Conference, 1991
7. L. Prandtl : The Essentials of Fluid Dynamics, Blackie & Son, Glasgow, 1952
8. B. A. Ward : "Supersonic characteristics of nozzles used with lasers for cutting", ICALEO '84, 1984
9. C. Dup. Donaldson and R. S. Snedeker : "A study of free jet impingement. part 1. Mean properties of free and impinging jets", J. Fluid Mech. Vol.45, No.2, pp 281-319, 1971
10. M. Abett : "The Mach disk in underexpanded exhaust plumes", AIAA paper No. 70-231.
11. I. S. Chang and W. L. Chow : "Mach disk from underexpanded axisymmetric nozzle flow", AIAA J. Vol.12, No.8, pp 1079-1082, 1974
12. J. Fieret, M. J. Terry and B. A. Ward : "Overview of flow dynamics in gas-assisted laser cutting", SPIE Vol.801 High Power Lasers, 1987.
13. 김민환, 박승오, 방세윤 : "레이저 가공을 위한 노즐의 기체역학적 고찰", 제 4차 레이저 가공 기술 심포지움, 대전, pp 105-111, 1993. 10
14. G. T. Kalghati and B. K. Hunt : "The occurrence of stagnation bubbles in supersonic jet impingement flows", Aeronautical Quarterly (Aug. 1976), pp 169-185
15. M. Vicanek and G. Simon : "Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in

- laser cutting", J. Phys. D : Appl. Phys. 20, pp 1191-1196, 1987
16. P. Berger, M. Herrmann and H. Hügel : "Untersuchungen von Laserschneiddüsen", LASER 89 Optoelectronics in Engineering, 1989
  17. Laser Focusing Head LK2 Catalog, Kugler.
  18. J. Fieret and B. A. Ward : "Circular and non-circular nozzle exits for supersonic gas jet assist in CO<sub>2</sub> laser cutting", LIM 3, 1986
  19. W. Masuda and T. Nakamura : "A Feasibility study on aerodynamic characteristics of underexpanded annular impinging jets for assisting laser cutting", Proceedings of LAMP '92, Nagasaki, Japan, 1992
  20. G. Sepold and R. Rothe : "Laser beam cutting of thick steel", ICALEO '83, LIA Vol.38, 1983
  21. H. Hügel and D. Dausinger : "Recent developments to increase efficiency and flexibility of laser material processing", 제3회 국제 레이저 가공기술 심포지움, 대전, 1992.6
  22. 방세윤, 한유회, 김정오 : "후판 강재의 레이저 절단", 제 4차 레이저 가공기술 심포지움, 대전, pp 65-73, 1993. 10