

고출력 광섬유 레이저를 이용한 60 mm 두께의 금속 후판 절단 실험 변수 고찰

오승용*, 김택수, 박현민, 이림, 신재성, 정진만, 선상우, 최병선, 문제권
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*syoh73@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력 시설물에서 압력용기, 열교환기, 습분분리기, 증기발생기 등의 대형 구조물들은 다량의 탄소강(carbon steel), 스테인리스강 (stainless steel) 및 인코넬(inconel) 합금 등을 포함하고 있다. [1] 이들 시설물을 해체하는 기술에는 절단 공구를 이용한 기계적 절단 기술, 연마제가 혼합된 고압의 물을 노즐을 통하여 빠른 유속으로 분사하여 절단하는 워터 제트 기술, 플라즈마 아크 절단 기술, 레이저 절단 기술 등이 있다[1]. 열거된 해체 기술 중에서, 선정 기준에는 원격 조작도, 이차 폐기물 발생량, 절단 성능, 투입비용 등이 고려되어야 한다.

레이저 절단 기술은 레이저 빔을 절단 대상물에 집광하여 국소부분만을 녹여서 절단이 이루어지므로, 해체 과정에서 발생하는 이차폐기물 발생량이 다른 해체기술과 비교하여 적은 장점이 있다. 특히 고출력 광섬유 레이저를 이용한 절단 기술은 레이저 빔을 절단 대상물까지 광섬유를 통해서 전송하므로 극한 고방사능 환경에서 놓여 있는 절단 대상물을 원격으로 원거리에서 해체 작업이 가능한 기술이다. 이러한 원격 조작 능력은 작업자 안전 확보 측면에서 해체 기술 선정 기준에 중요한 항목으로 작용한다.

프랑스, 일본 등의 원자력 선진국에서는 광섬유 레이저를 이용한 원자력 시설물 해체 기술 개발 연구가 심도 있게 진행 중에 있다. 최근 일본 WERC 연구소에서는 30 kW급 광섬유 레이저를 이용하여 300 mm 두께의 탄소강과 스테인레스 강 후판 절단 실험을 성공하였으며[2], 이를 통해 레이저 절단 기술이 우수한 절단 성능을 갖추고 있음을 입증하였다. 고가의 레이저 장비는 투입비용 측면에서 초기 많은 비용 소요가 요구되는 단점이 있으나, 유지보수가 용이하고, 유지비용이 적게 소요되는 장점이 있다.

한국원자력연구원에서는 원자력시설물 해체 기술 개발의 일환으로 2015년도에 6 kW급 고출력 광섬유 레이저 기반의 절단 시스템을 구축하였으며, 현재 금속 후판 절단 실험 연구를 진행하고 있다. 레이저 절단 기술 성능에 영향을 미치는 항목에는 절단 헤드 광학

계, 노즐과 시편 사이의 거리(Standoff distance), 금속물성, 노즐의 기하학적 형태, 용융물 제거에 사용되는 보조가스 분출 특성 등의 다양한 설계변수들이 있으며, 이들 변수들을 고려하여 최적의 절단 조건 도출이 요구된다. 본 논문에서는 구축된 절단 시스템을 이용하여 60 mm 두께의 스테인레스 강 절단 실험 결과와 변수에 대하여 설명하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 장치

절단 시스템에는 광섬유레이저(IPG, YLS 6000)와 절단 헤드가 있으며, 이들 장치 사이에는 25 m 길이의 공정 파이버를 통해서 연결되어 있다. 레이저 본체에서 발진한 레이저 빔은 구경이 100 μm 인 공정 파이버를 통해 절단 헤드에 전송이 되며, 헤드 상부에는 전송된 레이저 빔을 시편에 집광하는 기능을 수행하는 광학계가 있으며, 집광되는 레이저 빔은 헤드 하부에 결합된 직경 2 mm의 노즐을 통과하여 시편에 전송되도록 하였다. 광학계는 콜리메이션 렌즈($f:160$ mm)와 포물경($f:600$ mm), 반사경으로 구성되어 있다. 헤드 하부에는 고압가스 배관과 직접 연결되어 있어서, 외부에서 유입된 보조가스(압축공기)가 노즐을 따라 빠른 유속으로 시편에 분사하도록 고안되었으며, 이들 장치들은 절단 과정에서 발생하는 용융 금속을 시편 바깥쪽으로 밀어내는 기능을 수행한다. 본 실험에서는 10기압의 압축공기가 배관을 따라 노즐에 공급 되도록 하였다.

절단 속도와 방향은 헤드 본체와 결합된 x-y-z축 이동 스테이지를 통해서 제어되었다. 레이저 절단 실험 과정에서는 많은 양의 분진이 발생을 동반하기 때문에, 절단 대상물 근처에 설치된 덕트관을 따라 집진기에 흡입되어 필터를 통과한 후에 실외로 배기하도록 하였다.

2.2 결과 및 토의

시편 표면으로 입사되는 레이저 빔의 크기 증가는 절단 폭의 증가와 더불어 절단되는 홈 사이로 유입

되는 보조가스 유량 증가를 수반하므로, 절단 폭의 크기는 절단효율에 직접적인 영향을 미친다[3]. 시편 표면에 입사되는 빔의 크기는 초점 위치 이동을 통하여 쉽게 조절이 가능하지만, 실험에 사용된 노즐 직경이 2 mm여서, 초점 위치 이동에는 제한이 있다. 본 실험 연구에서는 레이저 빔이 노즐 내부면과 접촉하지 않는 범위 내에서 레이저 광 초점을 노즐 내부에 위치하도록 하여, 즉, 초점 위치를 시편 표면에서 최대한 떨어뜨려, 시편 표면에 입사되는 빔의 직경이 커지도록 하여 절단 실험을 수행하였다. Fig. 1은 6 kW 출력을 이용하여 절단된 60 mm 두께의 스테인레스 강(SUS304L) 전면과 후면을 나타내며, 적용된 절단 속도는 20 mm/min이다. 초점은 노즐 내부에 위치하였으며, 레이저 광 초점과 시편 표면사이의 거리는 29 mm, standoff 거리는 15 mm 실험변수가 적용되었다. 측정된 절단 폭은 약 2 mm 이다.

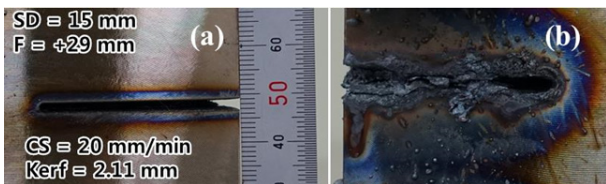


Fig. 1. Stainless steel after cutting (t=60 mm), Front face(a), Rear face(b), SD: Standoff distance, F: distance between focal point position and specimen surface, CS: cutting speed (mm/min).

레이저 빔 초점 위치를 시편 표면에 가깝게 하면 시편을 녹는점 이상으로 가열하는 데에는 효과적이지만, 집광된 빔의 크기가 매우 작기 때문에 절단되는 폭은 ~1mm 이내로 작은 경향이 있다. 노즐에서 초음속으로 분사되는 보조가스의 단면적은 일반적으로 절단 폭보다 크므로 일부는 절단되는 홈으로 [4] 유입되어 금속 용융물 제거 역할을 하지만, 반면에 유입되지 못한 보조가스는 시편 표면에서 반사되어 용융물 제거 역할을 수행하지 못한다. 두께가 얇은 박판 금속을 절단하는 경우에는 보조가스 유속과 얇은 시편 두께를 고려하였을 때, 노즐과 집광되는 초점 위치를 시편에서 매우 가깝게 하는 것이 바람직할 수 있으나, 후판 절단인 경우에는 노즐을 통과한 보조가스가 박판 절단보다는 절단되는 홈을 따라 장거리 유동을 요구하므로, 작은 절단 폭으로 인한 절단 홈에 유입되는 보조가스 유량 감소는 절단 효율 저하 요인이 될 수 있다. 결론적으로 후판 절단에는 절단 폭 증가를 통하여 보조가스 유입을 원활하게 하는 것이 중요하다. 그

러나 이를 위해서는 레이저 빔 초점 위치를 시편 표면에서 일정 부분 떨어뜨려야 하므로, 시편 표면에 가해지는 레이저 출력 밀도(W/cm^2) 감소가 수반되어 시편을 녹는점 이상으로 가열하는 효율이 저하될 수 있다. 따라서 후판 절단에는 레이저 빔 초점 위치와 시편 표면에 가해지는 레이저 출력 밀도를 동시에 고려하는 것이 바람직하다.

3. 결론

후판 절단에는 절단되는 홈을 따라 유입되는 보조가스 유량과 시편에 가해지는 레이저 출력 밀도는 중요한 변수로 작용한다. 본 논문에서는 레이저 빔 초점 위치 이동을 통하여 이 두 변수가 절단 효율에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

4. 감사의 글

The research was supported by the Nuclear R&D Program through the Ministry of Science, ICT & Future Planning.

5. 참고문헌

- [1] 문제권, "원자력시설 제염해체 기술 개발 현황", 원자력 산업, 2012년 7,8월호, 34 (2012).
- [2] K. Tamura, R. Ishigami, and R. Yamagishi, "Laser cutting of thick steel plates and simulated steel components using a 30 kW fiber laser", J. Nucl. Sci. Technol. 53, 916 (2016).
- [3] K. Tamura and R. Yamagishi, "Laser cutting conditions for steel plates having a thickness of more than 100mm using a 30 kW fiber laser for nuclear decommissioning.", Mechanical Engineering Journal 3, 15-00590 (2016).
- [4] Sun S, Brandt M, "Comparative study of the influence of the gas injection system on the Nd:yttrium aluminum-garnet laser cutting of advanced oxide ceramics", Rev. Sci. Instrum., 74, 4199 (2003).