

원자력 시설 해체용 고출력 레이저 절단 헤드 설계

신재성*, 정진만, 박현민, 최병선, 문제권, 정도영
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*jsshin12@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력 시설 해체를 위한 금속재 절단에는 기계적 절단 공법, 플라즈마 절단 공법, AWJ(Abrasive water jet) 절단 공법, 레이저 절단 공법 등 다양한 공법들이 개발되고 있다. 그 중 레이저 절단 공법은 타 공법에 비해 커프 폭(kerf width)이 작기 때문에 이차폐기물 발생량이 적게 발생한다. 또한 비접촉식 절단이므로 반력이 없고, 다른 복잡한 전기장치 없이 광섬유 전송 레이저 헤드만 작업공간에 놓이게 되므로 원격 절단에 매우 유리하다. 레이저 절단은 수증 절단에 적용 가능하다는 장점도 있다. 이러한 이유로 전 세계적으로 원자력 시설 해체를 목표로 레이저 절단 연구를 수행하고 있다 [1-3].

원자력 시설 중 해체에 가장 큰 어려움을 겪고 있는 부분이 고방사성의 원자로 본체이다. 원자로의 경우 다양한 두께의 금속재로 구성된 복잡한 구조로 이루어져 있다. 얇은 금속재의 경우 저출력 레이저를 통해 고속으로 쉽게 절단 가능하나, 수백 mm 수준의 두꺼운 금속재에 대해서는 수십 kW 이상의 고출력 레이저와 고도의 절단 기술이 요구된다. 전 세계적으로 레이저를 이용해 현재까지 발표된 최대 절단 두께는 스테인레스 강 100 mm 이다 [1,2].

한국원자력연구원(KAERI)에서는 원자로 해체를 최종 목표로 하여 레이저 절단 연구가 수행되고 있으며, 수년 내 200 mm 이상의 탄소강 절단을 목표로 하고 있다. 일반적으로 고출력 레이저를 이용하면 kW 당 10 mm 두께로 절단된다고 알려져 있으며[1], 원자로 내 200 mm 이상의 탄소강 절단을 위해서는 20 kW 이상의 고출력 레이저가 필요하다. 이러한 20 kW 급 고출력 레이저는 열적 문제로 인해 일반 산업에서 사용되고 있는 상용 레이저 헤드를 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 20 kW 급 고출력 레이저에 적용 가능하고 두꺼운 금속판재를 절단할 수 있는 레이저 헤드를 설계하였다.

2. 본론

2.1 집속 광학계 설계

레이저 절단 헤드는 광섬유로부터 방사되는 빔을 모으기 위한 시준기(collimator)와 시준된 빔을 한 점에 집속시키기 위한 집속기(focusing object)로 구성된다. 시준기의 경우 상용 시준기를 활용하도록 설계하였고, 집속기에 대한 설계를 주로 수행하였다. 일반적으로 저출력 헤드의 경우 렌즈를 활용한 투과형 집속기를 사용한다. 투과형 집속기를 사용할 경우 그 구조가 단순하고, 렌즈의 가격이 저렴하며 가볍기 때문에 소형 헤드 제작에 유리하다. 그러나 20 kW 급 고출력 구동 시에 렌즈 내 흡수열 부하에 의해 굴절률 변화가 생기고 이로 인해 초점 거리가 변동하는 문제가 발생하게 된다. 또한 열 부하가 크게 발생할 경우 렌즈 자체가 열적 스트레스에 의해 깨질 수 있는 위험성이 있다. 그러므로 20 kW 급 고출력 레이저 구동 시에는 광원 흡수가 거의 없고, 소자 냉각이 쉬운 반사형 집속기가 유리하다. 이러한 이유로 집속기 형태는 반사형 집속기로 결정하였다.

Fig. 1은 설계된 반사형 고출력 집속 헤드의 개념도이다. 헤드의 소형화를 위해 집속경과 평면경을 조합하여 Z자 형태로 광경로를 구성하였다.

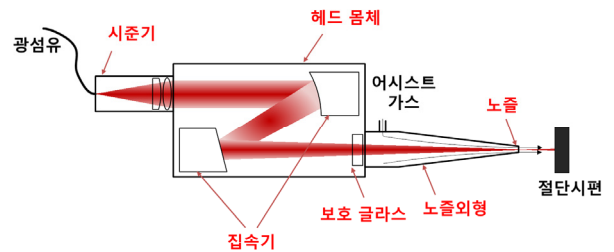


Fig. 1. Conceptual scheme of the reflective high power laser cutting head.

2.5.1 집속 광학계 구성

앞서 언급된 것처럼 집속 광학계는 시준기와 집속기로 구성된다. 시준기의 경우 광섬유로부터 시준된 빔의 직경이 집속경 사이즈를 벗어나지 않도록 초점거리 160 mm로 구성하였다. 집속기는 집

속경과 평면경으로 이루어져 있는데, 집속경의 경우 두꺼운 금속재 절단에 유리하도록 초점 깊이(depth of focus)가 큰 초점거리 600 mm의 장초점으로 구성하였다. 집속경 형상은 수차가 없도록 포물경으로 선정하였고, 수냉식으로 구성하여 20 kW 급의 고출력에서 열적 손상 없이 동작하도록 설계하였다. Z자 형태의 광경로를 위해 사용되는 평면경 또한 수냉식 금속경으로 구성하였다. 각각의 금속경은 유전체(dielectric) 막으로 반사율 99.5% 이상의 고반사 코팅하여 광 손실에 의한 열 발생을 최소화하였다.

설계된 집속 광학계에서 초점거리 160 mm의 시준기와 초점거리 600 mm의 집속기를 조합하였을 때 배율은 3.75가 된다. 이때 레이저 빔 전송 과정에서 코어 직경 100 μm 의 광섬유를 사용하게 되면 빔 크기는 375 μm 가 된다. 이 조합으로 광선 추적 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 2와 같이 초점 위치에서 빔 크기가 375 μm 로 계산한 결과와 일치함을 확인하였다.

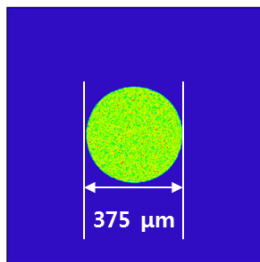


Fig. 2. Focused beam profile.

2.5.2 보호 글라스

절단 헤드에는 집속 광학계 뿐 아니라 절단 시편에서 발생하는 오염원으로부터 광학 소자를 보호하기 위한 보호 글라스가 필요하다. 보호 글라스(Protection glass)는 광원 흡수가 적은 퓨즈드 실리카(fused silica) 재질로 선정하였고, 20 기압의 어시스트 가스 압력으로부터 견딜 수 있도록 두께 9 mm 이상으로 설계하였다.

2.2 헤드 몸체 설계

헤드 몸체는 집속 광학계가 위치하고 있는 기구부를 의미하며, 열전도율이 높고 가벼운 알루미늄 합금으로 설계하였다. 또한 유일한 투과형 광학소자인 보호 글라스를 냉각시키기 위한 유로를 내부에 구축하였다. 헤드 몸체는 전체 길이 약 240 mm, 세로폭 160 mm, 가로폭 80 mm를 갖도록 설계되었고, 시준기와 노즐부를 포함하게 되면 약 600 mm 길이를 갖는다.

2.3 노즐부 설계

노즐부는 기본적으로 어시스트 가스가 레이저 빔과 같은 경로로 진행하도록 설계하였다. 노즐 외형은 절단 시편과 초점 위치 간 거리, 스탠드오프(stand-off) 거리를 조절할 수 있도록 여러 단으로 분리 장착할 수 있도록 하였으며, 노즐은 여러 가지 노즐 크기, 다양한 노즐 형태 등으로 교체 적용 가능하도록 설계하였다.

3. 결론

본 연구에서는 원자력 시설 해체용 고출력 레이저 헤드를 설계하였다. 설계된 레이저 헤드는 20 kW급 고출력 레이저를 적용하여 200 mm 이상의 두꺼운 탄소강 절단을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 장초점 거리를 가진 수냉식 반사형 광학 소자로 구성되었다. 절단 헤드는 소형화를 위해 Z자형 광경로로 레이저 빔이 집속되도록 구성하였으며, 설계된 헤드의 전체 길이는 약 600 mm이다. 향후 이 레이저 헤드가 제작되면 6 kW 광섬유 레이저에 적용되어 절단 시험 연구가 진행될 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 원자력기술개발사업 “해체공정 통합평가 및 원격 제어기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] C. Chagnot, G. de Dinechin, and G. Canneau, “Cutting performances with new industrial continuous wave ND:YAG high power lasers: For dismantling of former nuclear workshop, the performance of recently introduced high power continuous wave ND:YAG lasers are assessed”, Nucl. Eng. Des. 240, 2604-2613, 2010.
- [2] N. Mori, and H. Iwai, “Current status of the decommissioning of FUGEN,” 52nd Meeting of the technical advisory group, 2012.
- [3] <http://www.lasersnake.co.uk/>