

광섬유전송에 의한 하단 봉단마개 레이저용접기술 연구

김수성, 우윤명, 송훈, 김기환, 이찬복

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

sskim7@kaeri.re.kr

긴 광섬유를 사용하여 정밀용접방법으로 수행하였다.

1. 서론

최근 선진국에서는 이미 새로운 차세대핵연료 개발 및 조사시험용 캡슐 제작 등이 활발히 진행되고 있음에 따라 고성능 핵연료제조 및 특수용도의 연료봉 제작에 대한 용접공정이 수행되어지고 있다.^[1,2] 이때 기존의 용접방법에 비해 우수한 가공능력을 가진 레이저는 현재 광섬유(fiber)의 전송방법이 널리 보급되면서부터 활발히 응용되고 있는 실정이다. 여기서 레이저용접은 원격으로 광섬유전송이 가능하다는 특성 때문에 용접작업이 용이하나 그 반면에 보다 높은 용접품질을 확보해야 한다는 까다로운 점도 있다.^[3] 핵연료 제조공정에 있어서 봉단마개용접(end cap welding)은 주요 공정으로서 HT9 (ferrite-martensitic steel)의 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단마개로 밀봉하여 제조하는 작업이다. 또한 용접부의 품질면에서도 연료봉의 원주방향 어느 한 지점에서라도 결함이 있을 경우 연소 중에 핵분열 물질이 누출되어 안전성과 직결되는 문제를 야기한다는 것을 고려하면 높은 신뢰성이 요구된다.^[3] 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저의 광섬유를 이용하여 SFR용 하단 봉단마개 연료봉을 위한 이음형상의 최적화, 레이저용접특성 조사 그리고 하단 연료봉의 샘플제작을 위한 것이다.

2. 본론

2.1 용접시편 및 실험장비

본 실험에서 사용되는 용접시편은 SFR용 연료봉인 HT9 피복관과 하단 봉단마개가 맞닿는 접지기 이음방식으로 구성되었으며, 용접될 피복관은 외경 9.5mm, 두께 0.6mm 및 길이 150mm이며, 그리고 용접실험에 사용될 HT9 시편의 이음형상은 Fig. 1에서와 같다. 본 실험장비는 SFR용 연료봉의 하단 봉단마개용접을 위해서 500W Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 여기서 Nd:YAG 레이저에서 발진된 빔은 유연성이 좋고 가늘고

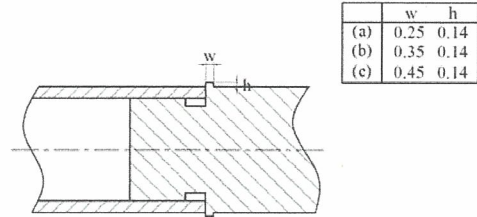


Fig. 1. Joint geometry for bottom end cap welding.

2.2 실험결과 및 고찰

핵연료 연료봉의 봉단마개용접에 있어서 기하학적 형상이음(joint geometry)은 매우 중요한 의미를 갖는다. 실제로 연료봉에 사용될 봉단마개는 Fig. 1의 이음형상에서의 같이 joint design을 고려하여 레이저용접에 적합하도록 시편을 준비하였다. 본 실험에서는 하단 봉단마개와 직경이 9.5 mm인 피복관을 이용하는 광섬유 전송방식의 레이저용접이 수행되었다.

Fig. 2는 레이저용접실험 후 하단 봉단마개의 이음형상을 가진 (a), (b) 및 (c)를 사용했을 때 봉단마개 표면의 언더컷 깊이(undercut depth)를 측정 비교하여 각각의 용입 상태를 보여주고 있다. 여기서 Fig. 1 (a)를 사용했을 때의 언더컷 깊이는 0.04 mm에서 0.06 mm를 얻었으며, Fig. 1 (b)를 사용 할때의 언더컷 깊이는 0.07 mm에서 0.09 mm 정도에서 얻었다. 그리고 Fig. 1 (c)를 사용 시의 언더컷 깊이는 0.06 mm에서 0.09 mm로 나타났다. Fig. 3, 4 및 5는 레이저용접의 하단 봉단마개의 이음형상에 따른 언더컷 깊이와 용입을 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 3 및 4의 이음형상 (a)와 (b)에서는 레이저 출력이 증가할수록 언더컷 깊이는 대체로 약간 증가하는 경향을 보이고 있고, 용접 깊이도 대체로 증가하고 있었다. 반면에 Fig. 5의 이음형상 (c) 경우에는 레이저출력이 증가함에 따라 언더컷 깊이는 다소 감소하

고 있었고 용접 깊이에서도 크게 차이를 보이고 있지 않았다. 본 실험에서는 Fig. 1 (a), (b) 및 (c)의 이음형상에서 볼 때 레이저용접 시 언더컷 발생량을 줄이는 것도 중요하지만 피복관 두께만큼의 용접 깊이도 동시에 고려되어야 하기 때문에 소량의 언더컷 깊이가 존재하더라도 적정 용접 깊이가 반드시 유지되어야 한다. 따라서 Fig. 2 (b) 및 Fig. 4의 경우에서 나타내듯이 레이저출력 185W에서 언더컷 깊이가 0.08mm이고, 피복관 두께가 0.6mm 입을 감안할 때 하단 봉단마개의 용접 깊이는 적어도 0.9mm 정도에서 적절함을 알 수 있었다.

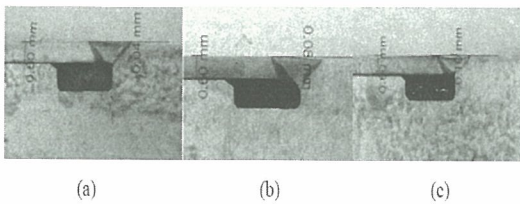


Fig. 2. Macro-cross sections of laser welded specimens using type (a), (b), and ©.

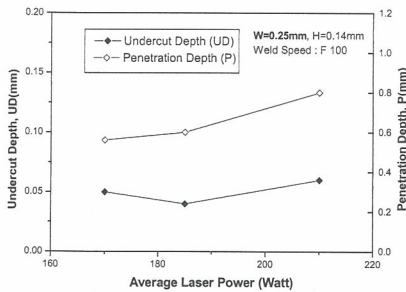


Fig. 3. Undercut depths vs. penetration depths using type (a).

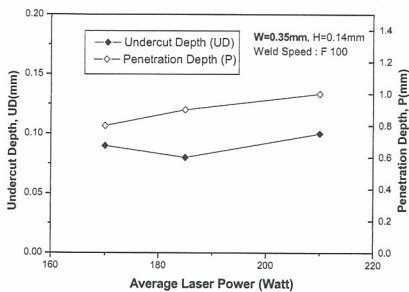


Fig. 4. Undercut depths vs. penetration depths using type (b).

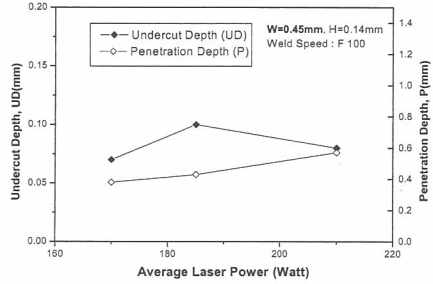


Fig. 5. Undercut depths vs. penetration depths using type (c).

3. 결론

본 실험에서는 SFR 연료봉의 하단봉단마개 레이저용접하기 위하여 이음형상의 최적화, 용입특성을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 연료봉 하단봉단마개 레이저용접을 위해서는 피복관 두께의 0.6 mm 이상에서 유지되어야 하고, 이음형상 (b)인 $w=0.35$ 및 $h=0.14$ 로 설계하면 적절할 것으로 판단된다.
2. 광섬유전송의 레이저용접 시 하단 봉단마개용접의 적정 용입을 얻기 위해서는 레이저 출력이 적어도 185 watt가 되어야하며, 이때 회전 속도는 F100으로 하였다.
3. 향후 TRU 연료봉 및 연료집합체의 상· 하단 봉단마개 용접공정의 선정 및 원격장치 개발 시 유익한 기술 자료가 제시될 것으로 기대된다.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

5. 참고문헌

- [1] V. Ram, G. Kohn, A. Stern, "CO₂ Laser Beam Weldability of Zircaloy-2," *Welding Journal*, July, pp.33-37, 1986.
- [2] P. Modern, K. Schneider, "Laser and Laser Material Processing Research and Development at BNFL plc., UK., *Proceeding of LAMP '92*, Nagaoka, pp.963-968, 1992.
- [3] Welding Handbook, "Welding Processes, part II," *American Welding Society*, pp.504-530, 20.