2000 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로용 핵연료의 봉단마개 전자빔용접부 기포발생을 억제하기 위한 용접방법의 개선

An Improvement of Welding Method to Reduce Pores in the End Plug Weld of HANARO Fuels

이 돈배, 우윤명, 고영모, 박희대, 박종만, 김창규,
한국원자력연구소

요 약

전자빔용접을 이용한 하나로 핵연료 봉단마개 용접에서 용접부에 발생하는 기포의 원인을 조사하고 기포의 발생을 줄일 수 있는 용접방법을 찾기 위해서 일련의 실험을 수행하였다. 가속전압, 빔전류, 용접속도는 일정하게 하고 시편그룹을 10개로 나누어 각각 다른 방법으로 용접을 수행하여 기포의 발생 수와 크기의 변화를 조사하였다. 실험결과 120° 씩 3회로 나누어 용접한 시편 그룹에서 기포발생이 가장 적은 것으로 나타났다. 또 3회분할 용접에서는 빔전류 상승 시간과 하강 시간, 빔 조사 위치가 기포의 발생에 영향을 주는 것으로 나타났다.

Abstract

An investigation was performed to analyze the origin of pores formed at the end plug welds with nuclear fuels for HANARO, and to find a welding method which can reduce the formation of pores. The occurrence frequency and sizes of pores were investigated for various welding methods with a fixed condition of accelerating voltage, beam current and welding speed. The three-step welding method of rotating 120 degree per each time was shown to have the least pore formation among 4 kinds of methods. The formation of pores appeared to be affected by the up-slope time and down-slope time of beam current and beam radiation position in the three-step welding.

1. 서론

하나로 핵연료 제조공정 중에서 봉단마개 접합은 연소도중 핵물질의 누출을 차단하기 위하여 피복층과 봉단마개를 밀봉하는 기술로서 피복층이 얇고(0.76mm) 접합 부위의 칫수(φ7.87mm)도 비교적 작으며 재료도 순수 알루미늄(Al1060)을 사용하고 있기 때문에 용접 열영향부가 적고 미세한 출력조정으로 정밀용접이 가능한 전자빔 용접(electron beam welding) 방법을 이용하고 있다. 전자빔 용접은 진공 중에서(1×10^{-4} mmHg 이하) 필라멘트를 전기저항으로 가열할 때 표면으로부터 방출되는 전자를 큰 전압으로 가속하여 피 용접물에 조사시킴으로서 전자의 운동에너지가 열에너지로 바뀌게 되는 것을 용접 열원으로 이용하는 것이다. 이 전자빔 열원은 에너지 집중도가 매우 높기 때문에 비드폭이 좁고 용입이 깊은 심용입 특성을 나타내어 고속 용접과 열변형이 아주 적은 용접을 가능하게 한다

지금까지 봉단마개 접합부의 치수와 형태를 그대로 유지하면서 원자로 내에서 안전한 강도를 유지할 수 있는 적합한 용입 깊이와 비드폭(bead width)을 형성할 수 있는 용접 조건을 찾아내고 용접조건에 따른 비드 특성을 평가하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 연구 결과 적합한 용접 비드를 형성하기 위한 용접 조건(가속전압, 빔전류, 용접속도)들은 어느 정도 확립되었으나 실제로 핵연료 봉단마개 용접에서 부딪히는 가장 큰 문제점은 피복관과 봉단마개 틈새 근처에 발생하는 200-400㎛ 크기의 pore 들이다[1]. 이러한 pore가 봉단마개 용접부 내에 존재하게 되면 용접부의 결합력이 약하게 되어 원자로 내에서 연소중 핵물질 누출에 대한 안전성을 보장할 수 없게된다. 또한 봉단마개 용접은 핵연료 제조 공정의 마지막 공정이므로 생산성 유지를 위하여 불량률을 최소화 해야한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 기포발생의 원인을 분석하고 기포의 발생을 줄일 수 있는 용접방법을 찾아내고자 하였다.

2. 실험방법

1) 용접 시편 제작

핵연료 봉의 피복재와 봉단 마개의 재료는 ASTM No Al 1060을 사용하며 대표적인 화학 조성은 표 1과 같다. 본 연구에서 용접시편의 제작에 사용한 재료는 φ38mm인 Al 1060 환봉이며 하나로 핵연료 봉과 동일한 형상과 칫수로 제작하였다. 다만 핵연료심 대신 Al 1060 billet을 압출 및 인발하여 심재를 제작하고 이것을 동심 피복 압출(cladding)하여 용접시편을 제작하였다. 기공 발생의 원인을 제공 할 수 있는 불순물이 게재되는 것을 최소화하기 위해서 심재를 인발 할 때 다이의 윤

활제는 메틸 알콜을 사용하였으며 동심압출 전에 심재를 아세톤에 침수시키고 초음파를 가하여 세척한 후 200℃에서 2시간 동안 진공 건조시켰다. 봉단가공(peeling) 작업에서도 광물성 절삭유 대신 메틸 알콜을 스프레이를 이용하여 공구와 절삭면에 분무하면서 가공하였다. 가공이 끝난 시편은 용접하기 전에 진공 건조로를 이용하여 200℃에서 2시간 동안 건조하였다.

Table 1. Chemical composition of Al 1060(wt%)

Al	Si	Cu	Fe	Mn	Ti	others
99.6	0.25	0.05	0.35	0.03	0.03	0.03

2) 용접 실험

이 용접 실험에서 사용한 용접기는 가속전압 150kV, 빔출력 6kW 용량의 전자빔 용접기를 사용하였다. 가속전압, 빔 전류, 용접 속도, 빔 초점 거리는 모두 일정하게 유지하고 용접 방법을 다르게 하여 기포(pore)의 발생이 어떻게 변하는지 관찰하였다. 용접 방법은 빔의 발생을 중단하지 않고 연속하여 온둘레 용접을 실시하는 방법, 용접 구간을 180° 씩 2회로 나누어 용접하는 방법, 120° 씩 3회로 나누어 용접하는 방법, 연속용접 후 그 위에 다시 3회로 나누어 용접하는 방법(Fig. 2) 등 4가지 방법을 적용하여 비교하였다. 용접 cycle은 빔 전류 상승→정상 전류 용접→빔 전류 하강→용접 종료의 cycle로 이루어지는데 3회 분할 용접에서는 또한 빔 전류 상승 시간(up-slope)과 하강 시간(down-slope)을 다르게 하여 비교하였으며 빔의 조사위치(off-set)를 변화 시켜 결과를 비교하였다. 전자빔의 조사 각도는 피 용접물(봉단 마개 원주면)에 대하여 수직이 되도록 하였으며 용접 시작점 (start point)을 시편에 표시하여 결함이 발생하는 위치를 확인 할 수 있도록 하였다. 용접이 진행되는 동안 work chamber의 진공은 5×10^{-4} torr가 유지 되도록 하였다. 각 group에 대하여 시편의 수는 10개씩으로 하였으며 용접조건은 table 2와 같다. 실험 결과는 Real Time X-ray Radiography 장치를 이용하여 pore의 수와 크기를 측정하고 용접부위를 절단하여 결함의 발생 위치와 형태를 확인하였다.

Table 2 Electron beam welding condition for the experiments

시편 group	용접 방법	가속전압 (kV)	빔 전류 (mA)	용접속도 (mm/min)	up slope (sec)	down slope (sec)	off-set (mm)
Gr 1	연속용접	90	5	494	0.5	0.5	0.4
Gr 2	2회분할	〃	4.2	494	0.5	0.5	0.4
Gr 3	3회분할	〃	4.2	494	0.5	0.5	0.4
Gr 4	연속용접 후 3회분할	〃	4.2	494	0.5	0.5	0.4
Gr 5	3회분할	〃	4.2	494	0.2	0.2	0.4
Gr 6	3회분할	〃	4.2	494	0.4	0.4	0.4
Gr 7	3회분할	〃	4.2	494	0.6	0.6	0.4
Gr 8	3회분할	〃	4.2	494	2.0	2.0	0.4
Gr 9	3회분할	〃	4.2	494	0.5	0.5	0.0
Gr 10	3회분할	〃	4.2	494	0.5	0.5	0.5

3. 실험결과 및 고찰

1) 연속용접과 분할 용접

연속 용접에서 발생하는 결함은 Fig. 3(a)에 볼 수 있는 바와 같이 발생위치가 일정하지 않으며 여러 개의 기포가 용접부 내에 존재한다. 발생 빈도는 약 70-80% 정도이며 기포의 평균 크기는 약 0.4mm이고 그 형태는 구형이다. 일반적으로 알루미늄 재료의 용접부에 발생하는 기공(pore)은 시편 표면의 산화막과 부식된 표면, 시편 표면에 묻어있는 오일, 물, 그리스 등의 이물질로부터 발생한 수소 또는 모재 내부에 존재하는 수소에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다[2]. 또한 다이캐스팅 제품의 용접에서 다이 캐스팅 공정 중에 포획(entrappment)된 공기나 개스 등이 용접 중에 많은 기공을 발생시키는 것으로 알려져 있다[3]. 하나로 핵연료 제조에서 동심피 복압출 과정에서도 피복재와 심봉 사이에 공기가 포함될 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 기공의 발생을 완벽하게 원천적으로 방지하기는 어려울 것으로 생각된다. 본 실험의 용접부에 나타난 결함도 봉단마개와 피복재의 계면에 존재하던 어떤 기체가 용융 금속이 급속하게 응고되면서 포획된 것으로 생각된다. 이러한 기체의 발생으로 인한 기공을 방지하기 위해 봉단마개 용접부위의 일부구간을 용접하는 동안 아직 용접되지 않은 쪽으로 기체가 빠져나갈 수 있는 시간을 제공하

기 위하여 봉단 마개 용접부위를 180° 씩 2등분과 120° 씩 3등분으로 나누어 용접한 결과 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 2회 분할 용접은 기포 발생 수에서 연속 용접과 큰 차이가 없었으나 3회 분할 용접은 기포 발생 수가 현저히 감소하였다. 그러나 여전히 30-40%의 시편에서 Fig. 3(b)와 같은 용접결함이 항상 일정한 위치에 1-2개 발생하였다. 또한 이때의 기공들은 3-4개가 발생 할 때도 Fig. 3(b)의 우측 그림과 같이 항상 일정한 위치에 발생하였다. 3회 분할용접은 시작점으로부터 60° 까지 빔전류 상승 구간이며 60-180° 까지 첫 번째 용접구간, 180-240° 빔전류 하강 구간, 120-180° 까지 빔전류 상승구간 180-300° 두 번째 용접구간, 300-360° 빔전류 하강 구간, 240-300° 빔전류 상승, 300-60° 세 번째 용접구간, 60-120° 빔전류 하강, 용접 종료의 순서로 용접이 진행되도록 하였다. 3번째 구간의 용접이 끝나는 지점은 시작점으로부터 60° 진행된 지점이며, X-ray radiography와 용접부위를 절단(cutting)하여 관찰한 결과 결함은 3회째 용접 구간인 360-60° 사이에서 발생하는 것으로 확인하였다. 결함의 형태는 반구형이며 Fig. 3(b) 좌측 그림에서 볼 수 있는 것처럼 피복재와 봉단 마개가 융합되지 않고 피복재만 용융 되면서 부풀어 오른 것을 볼 수 있다. 이때의 결함은 피복재와 봉단마개의 계면에 발생하는 것이 특징이며 연속 용접과는 달리 기체의 포획으로 발생하는 것이 아니라 피복재의 열팽창으로 인한 것으로 생각된다.

2) 빔전류 상승시간 과 하강시간의 영향

또한 시편 그룹 5에서 8은 3회 분할용접에서 용접을 시작 할 때 빔전류 상승(up-slope)시간과 종료시 빔전류 하강(down-slope)시간을 변화시켜서 용접을 수행한 것이다. Fig 5에서 볼 수 있는 것처럼 빔전류 상승 시간과 하강시간을 길게 하여 용접한 경우에 결함의 발생이 많은 것으로 나타났다.

이것은 용접 초기와 종료시에 빔전류가 낮은 상태에서 시간을 지체하면 정상전류 용접 전과 후에 피복재의 온도가 상승하여 열팽창을 일으켜 부풀게 되어 봉단마개와 피복재 사이에 공간이 형성되고 이 부분에서 빔이 산란을 일으켜 용접결함을 일으키는 것으로 생각된다.

3) 빔조사 위치(offset) 에따른 영향

시편 그룹 9와 10의 용접 결과를 Real Time X-ray radiography 장치를 이용하여 분석한 결과 시편 그룹 9의 경우 발생된 기포의 평균 직경이 약 0.2mm, 시편 그룹 10의 경우 약 0.4mm 정도였다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 빔의 조사위치(offset)를 용접부 선단으로부터 0으로 하여 용접한 시편에 발생한 결함의 크기가

훨씬 작은 것을 알 수 있다. 그러나 Offset량을 작게 하면 용접 살 두께가 얇아지므로 용접부의 강도가 약해진다 따라서 피복재의 열영향을 최소로 할 수 있는 용접방법이 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

하나로 핵연료 전자빔 용접부에 발생하는 기포를 감소 시키기 위해서는 용접부를 120° 씩 3회로 나누어 용접하는 방법을 선택하고 빔전류 상승시간과 하강시간을 가능하면 짧게 하고 빔조사 위치를 용접부 선단으로부터 가능하면 짧게 선택하는 것이 바람직하며 피복재의 원주 방향 열팽창을 최소화 할 수 있는 용접방법을 강구해야 할것으로 생각된다.

5. 참고문헌

1) 김창규 등, 연구로용 핵연료 재료개발, KAERI/RR-1756/96

2) 대한 용접학회지 Vol. 11. No 1, Mar. 1993, p 19

3) J. Ruge, P. Lutze, "Welding of Aluminum and Zinc Die Castings", Third International Conference on Aluminum Weldments, Munich, F.R.G., 15 to 17 April 1985

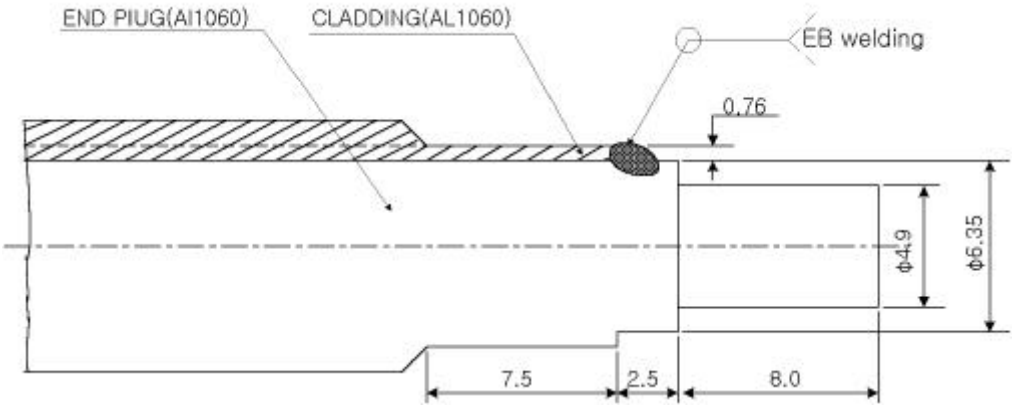


Fig. 1 Weld joint design for end plug and cladding

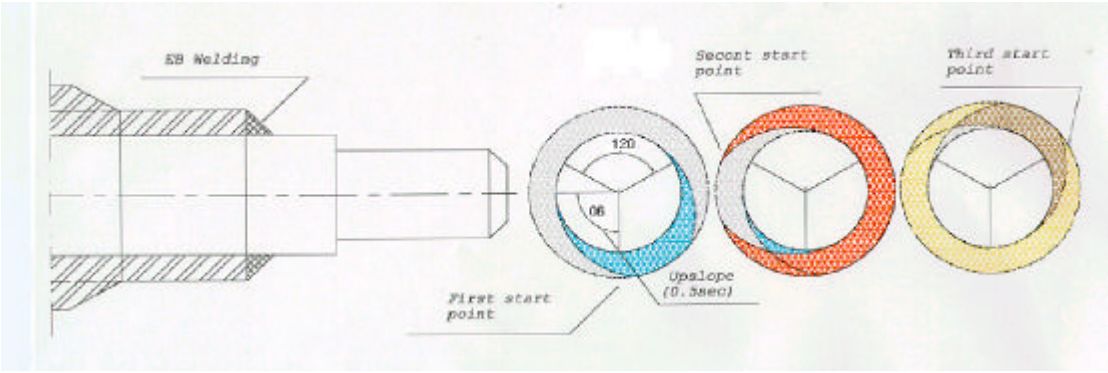
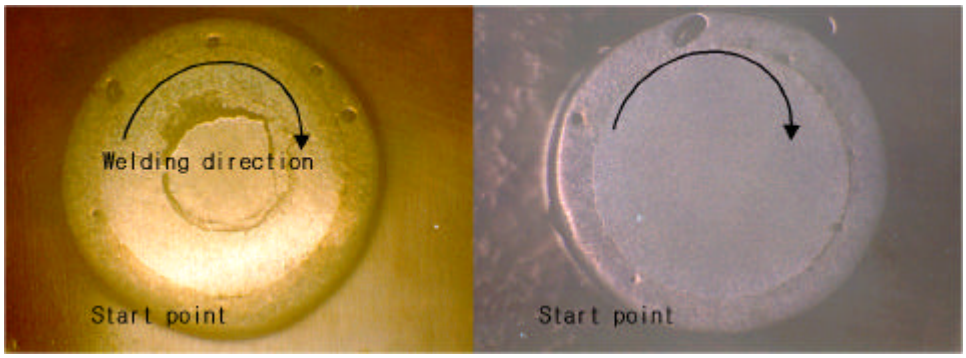
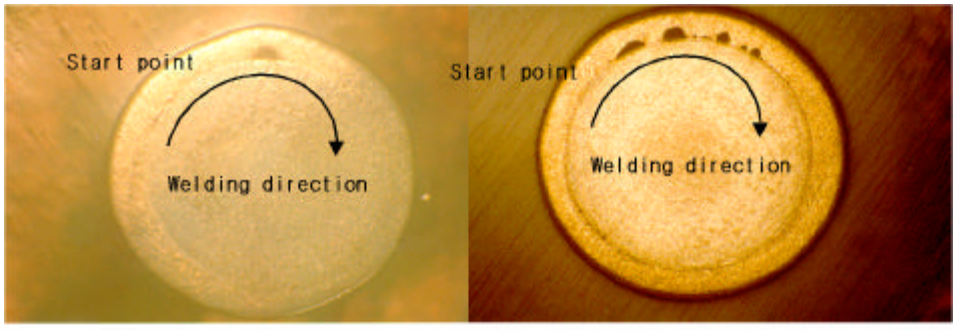


Fig 2. Three-step welding method for end plug



(a) continuous welding



(b) three-step welding

Fig. 3 The shape of pores in continuous welding and three-step welding

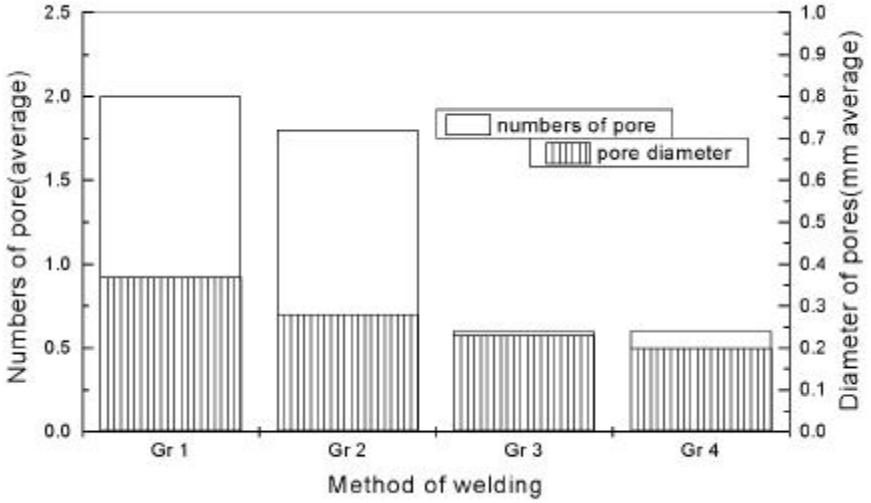


Fig. 4 Variation for the pores with welding method

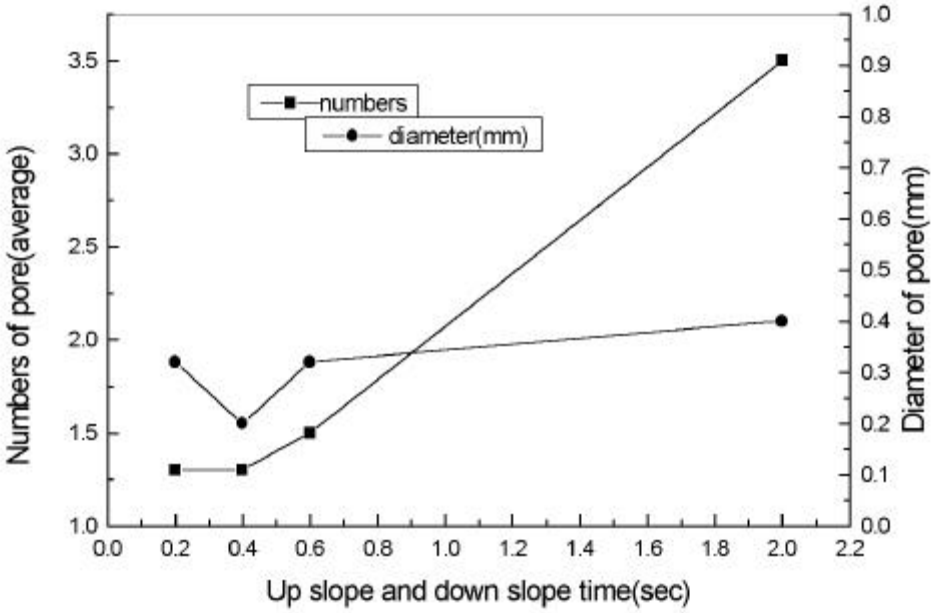


Fig. 5 Variation for the pores with up-slope and down-slope

Fig. 6 X-ray radiography image with different beam position in weld of end plug