

**Zircaloy-4의 PAW에서 보호가스와 입열량의 영향에 대한 연구**  
A Study on Effects of Shielding and Plasma Gases and Heat Input on the Zircaloy-4  
by Plasma Arc Welding

고 진 현\*, 김 수 성\*\*, 양 명 승\*\*, 이 영 호\*\*\*

\* 한국기술교육대학교, \*\* 한국원자력연구소, \*\*\* 충남대학교

### 1. 서론

Zr 합금의 용접에 대한 연구는 주로 핵연료 제조와 화학공업 분야에서 수행되고 있다. 핵연료 제조시 용접의 중요성은 결함이 없는 건전한 용접부를 얻어함이 필수적이기 때문이다. 이것은 핵연료가 예상된 기간 동안 원자로 내에서 연소될 때 발생하는 핵분열 생성물(fission products)이 용접결함을 통해 외부로 누출됨이 없어야 하기 때문이다. 따라서 신뢰성 있고 안전한 핵연료를 제조하기 위해서는 건전한 용접부를 얻을 수 있는 용접법의 선택과 용접기술 개발의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 본 실험에서는 키홀모드용접(keyhole mode welding)을 이용할 수 있는 일종의 고에너지 밀도(high energy density) 용접법으로도 분류가 가능한 플라즈마 아크 용접법에서 플라즈마 가스(plasma gas) 및 보호가스(shielding gas)에 대하여 지금까지 연구된 결과들을 통하여 조사하고 또 이 용접법을 이용한 핵연료 피복재인 Zircaloy-4를 위한 용접기술을 개발하기 위하여 용접변수에 따른 입열량과 플라즈마 및 보호가스가 Zircaloy-4 용접에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 재료

본 실험에 사용된 Zircaloy-4는 두께 2mm 판재로 증수로형 핵연료에서 방향지지체(bearing pad)용으로 실험목적에 따라 두 가지로 절단하여 사용하였다. 인장시험용으로 30x150x2mm와 굽힘시험용으로 100x150x2mm 크기로 절단하였다.

#### 2.2 용접장비 및 시편용접

실험에 사용된 플라즈마 아크 용접 시스템은 250DC 전원(power supply), 제어 콘솔(control console), 냉각장치와 가스 공급 실린더로 구성된다. 용접토치는 직류 정극성 이행형(DCSP transferred mode)으로 직경 2.5mm의 텅스텐 전극이 노즐로부터 3.2mm 후퇴(setback)되어 전극 끝에서 발생된 플라즈마 아크가 직경 1.57mm의 노즐구멍(nozzle orifice)을 통해 수축집중된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 플라즈마 및 보호가스의 영향

본 실험에서는 보호가스가 Zircaloy-4의 용접에 미치는 영향을 조사하기 위하여 플라즈마 가스로는 Ar을 보호가스로는 Ar 또는 He을 사용하여 유량을 변화시키면서 이들이 용접비드 폭과 형상에 미치는 영향을 조사한 결과 Fig. 1과 같이 He경우가 Ar경우보다 용접비드폭이 더 넓었으나 유량 8l/min 이상에서는 용접비드폭이 거의 증가하지 않았다. 또 Fig. 2와 같이 He 경우가 Ar 경우보다 열영향부도 더 컸다. 이것은 He과 Ar을 물리적 특성으로 비교할 때 He이 Ar보다 열전도도가 상당히 크기 때문에 용접시 아크열이 모재로 잘 전달되므로 용융풀(molten pool)이 컸고 또 용융금속이 응고중 횡방향으로 잘 퍼져서 Ar 용접비드 보다 더욱

균일한 용접비드를 형성한 것으로 사료된다.

### 3.2 입열량의 영향

두께 2mm의 Zircaloy-4의 플라즈마 아크용접에서 용접속도를 일정하게 유지하고 전압 및 전류만을 변화시켜 입열량을 변화시켜 용접부를 조사한 결과 입열량 2.2kj/cm 이상에서는 어떤 비드가 나타나기 시작하였고, 입열량 2.4kj/cm 이상에서는 용접결함인 큰 기공이 발생하기 시작하였으며 입열량 3.0kj/cm에서는 절단되었다.

### 3.3 보호가스와의 전극 스탠드오프와의 관계

Fig. 3은 보호가스 유량과 노즐과 모재 사이 거리인 전극 스탠드오프(electrode standoff) 거리와의 관계를 보여주고 있다. Ar과 He 두 보호가스 모두에서 이 거리가 3-8mm 범위로 증가함에 따라 전압이 증가함을 보여주고 있으며 Ar보다 He 경우가 더욱 크게 증가하고 있다. 이것으로부터 동일 전극 스탠드오프 거리에서 He경우가 Ar 경우 보다 물론 열전도도가 크지만 높은 전압 때문에 입열량이 더 클것으로 예상된다.

### 3.4 기계적 시험

Zircaloy-4의 플라즈마 아크 용접부와 모재의 인장시험을 수행하였다. 종방향 및 횡방향 모두에서 용접부의 인장강도 및 항복강도는 모재의 인장 및 항복강도 보다 상당히 높았으나 연신율은 상당히 낮다. 또한 입열량에서 보호가스만 다르게하여 제작된 종방향 Zircaloy-4 플라즈마 아크 용접부의 인장성질을 비교한 것으로 이음효율을 계산하였다. He 및 Ar 보호가스에 의한 용접부의 이음효율은 136%와 121%로 He 경우가 더 높았다. 이것은 용접 비드폭이 더 넓은 등 용접금속량이 더 많았기 때문으로 생각된다. Fig. 4는 용접시편의 경도시험결과로 열영향부 크기를 결정하기 위한 것으로 동시에 용접부, 열영향부 및 모재의 대표적인 경도치를 비교하여 주고 있다.

### 3.5 미세조직 및 파단면 검사

Zircaloy-4의 플라즈마 아크 용접에서 보호가스에 따른 용접부와 열영향부의 미세조직이다. 두 보호가스에서 용접부는 모두 전형적인 주상정(columnar) 조직을 보여주고 있고 주상정내에서는 마치 페라이트강의 용접부에 아시클러 페라이트가 형성되듯이  $\alpha$ -판상들이 상호 연결되는 바스켓위브(basketweave) 조직으로 구성되고 있고 열영향부는 빠른 냉각속도에 의해  $\beta$ 입자내  $\alpha$ 상들이 서로 평행한 침상의 Widmanstätten  $\alpha$ 조직이 형성되고 있다. 두 보호가스 차이에 따른 용접부 및 열영향부에서의 미세조직에는 큰 차이는 없으나 보호가스 He 경우의 용접부의 주상정 조직이 Ar경우에서 보다 더 크다.

## 4. 결론

핵연료 재료인 Zircaloy-4 판재의 PAW에서 플라즈마 가스 및 Ar과 He에 의한 보호가스와 입열량이 용접에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플라즈마 가스로 Ar을 사용하여 유량이 0.45l/min일 때 적당량의 용융금속과 응고속도 때문에 용접비드 형상 및 폭이 균일하였다.
- 2) He 보호가스인 경우 Ar과 비교하여 용접비드, 용접부 및 열영향부가 조금 컸다. 또 보호가스가 Ar인 경우 용접비드가 불룩하고 언더컷이 발생하였으나 He인 경우 가스유량이 4.5-6l/min 범위에서 평활하고 언더컷이 없는 용접비드를 얻었다.
- 3) He, Ar보호가스 모두에서 전극 스탠드오프 거리가 증가함에 따라 전압이 증가하였는데 He경우가 Ar경우보다 전압이 더 높았다.
- 4) 보호가스에 따라 용접부의 미세조직은 basketweave 조직을 포함하는 주상정 조직과 열영향부에서는 Widmanstätten  $\alpha$ 조직을 가졌으나 보호가스에 따라 조직의 크기에는 큰 차이가 없었다.

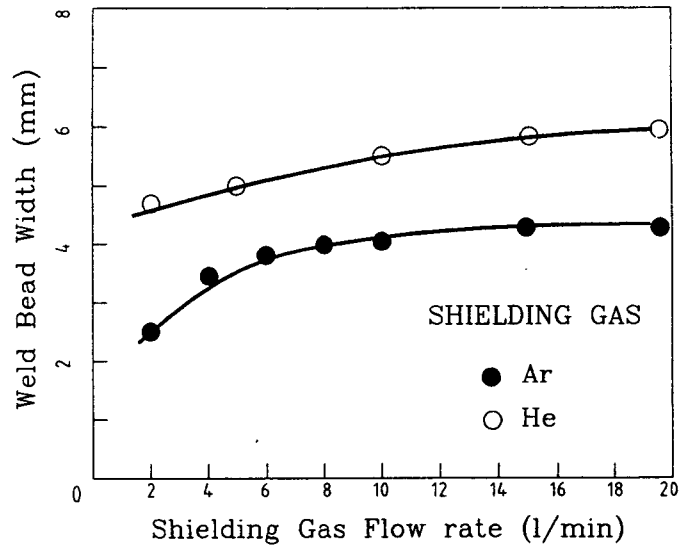


Fig. 1 Weld bead width of Zr-4 with plasma arc welding as a function of shielding gas flow rate

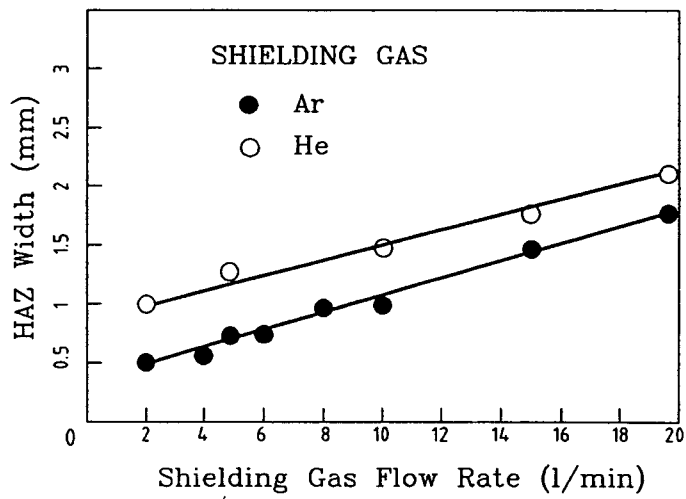


Fig. 2 Effect of shielding gas on the HAZ width of Zr-4 welds with plasma arc welding

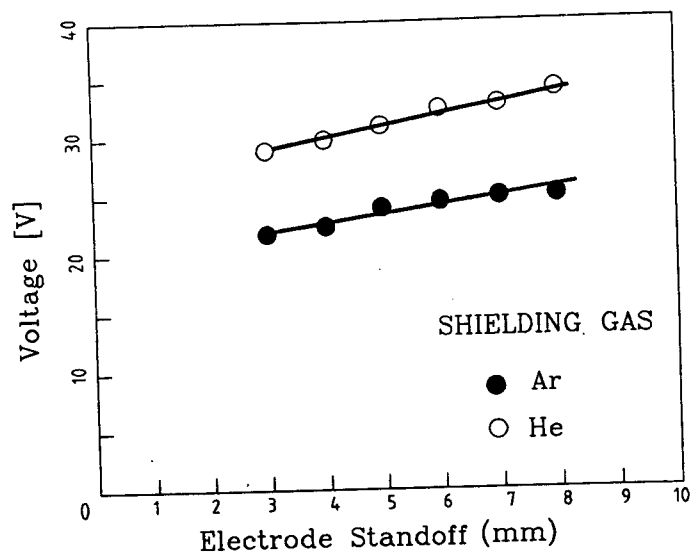


Fig. 3 Voltage change in Zr-4 welds with plasma arc welding as a function of electrode standoff distance

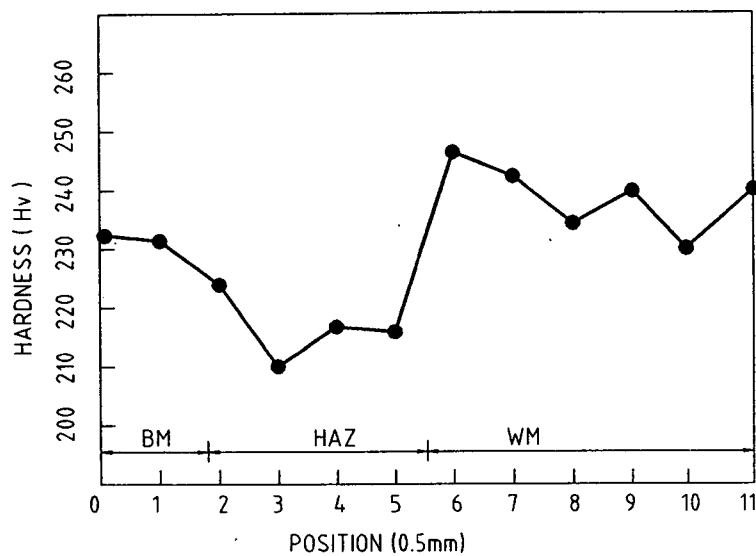


Fig. 4 A typical hardness profile of plasma arc welded Zr-4 specimen to determine the width of HAZ