

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第7卷第2號 1989年6月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.7, No.2, Jun., 1989

## 중수로 핵연료 봉단마개의 저항업셋 용접을 위한 용접변수\*

이정원\*\* · 박춘호\*\*\* · 고진현\*\* · 정성훈\*\*\* · 정문규\*\*\*

### An Investigation of Welding Variables on Resistance Upset Welding for End Capping of HWR Fuel Elements\*

J.W. Lee\*\* · C.H. Park \*\*\* · J.H. Koh\*\* · S.H. Jung \*\*\* · M.K. Chung\*\*\*

**Key Words :** Resistance Upset Welding(저항업셋용접), End Cap(봉단마개), Cladding Tube(피복관), Weld Flash(용접덧살), Squeeze Force or Electrode Force(가압력), Weld Interface Failure(용접계면파괴), Sound Weld(건전용접량)

#### Abstract

The present study was aimed at investigating the effect of welding parameters such as welding current, electrode force(or squeeze force) and parts cleaning on the sound weld, and establishing the most reliable weld conditions for HWR(Heavy Water Reactor) fuel end capping with the resistance upset butt welding. Major results obtained are as follows.

1. The amount of sound weld was increased with increasing weld current(5.0~11KA) because the activated diffusion with increasing heat generation played an important role in eliminating the porosity and weld line in the weld interface.
2. It was found that weld current was not significantly influenced by the electrode force although the increase of it caused a slight increase of weld current and upset deformation.
3. Acetone rinsing before drying for the Zircaloy-4 end cap cleaning produced the reliable sound weld because it would remove the remaining solvent and surface films, and provided the uniform contact between the end cap and the tube.
4. The optimum welding conditions for fuel end capping by a resistance upset butt welding are obtained as follows.

weld current : 10~11KA, electrode force : 62~90KPa

parts cleaning : vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying.

\* 1989년 춘계 학술 발표 대회 발표

\*\* 정회원, 한국에너지 연구소

\*\*\* 한국에너지 연구소

## 1. 서 론

중수로 핵연료 봉단마개용접은 내면이 흑연으로 도포된 Zircaloy-4 피복관에 UO<sub>2</sub> 소결체를 장전 한후 피복관과 봉단마개를 맞닿게하고 원주방향으로 용접하여 밀봉하는 공정이다. 이렇게 제조된 37개의 연료봉을 조립한것이 중수로형 핵연료 집합체이며 이것이 원자로내에서 연소된다. 그리고 이 집합체가 원자로에서 연소되는 동안 핵분열 물질의 누출가능성이 가장 높은 부위가 용접부이기 때문에 이는 원자력의 안전성과 직결된다고 할수 있겠다<sup>1)</sup>.

이러한 용접부의 중요성 때문에 핵연료 봉단마개용접에 대하여 많은 연구가 수행되고 있으며 이중 연구 및 상용화단계의 용접방식은 크게 용융용접, 고상용접 또는 저항용접으로 분류될 수 있다. 용융용접방식에는 TIG(tungsten inert gas)용접<sup>2)</sup>, EBW(electron beam welding)<sup>3)</sup> 및 LBW(laser beam welding) 등이 있으며, 고상용접방식에는 upset butt 저항용접<sup>4),5)</sup>, 자력저항용접(magnetic force resistance welding)<sup>6),7)</sup>, percussion welding, 플래시용접(flash welding) 및 brazing 등<sup>8)</sup> 이다.

이상의 용접방식을 재료, 용접성, 용접이음설계, 경제적인 관점에서 고려할 때 TIG 용접은 용접부의 기공 및 언더컷등의 발생<sup>9)</sup>이 단점이고, 전자빔 용접은 Zircaloy 산화 때문에 고진공<sup>9)</sup>이 필요하고, flash 및 percussion 용접등은 expulsion 발생<sup>9)</sup>이 문제로 핵연료 제조에는 적합치 못하다. 핵연료 봉단마개 밀봉 관련 연구개발은 용융용접에서 시작되었지만 핵연료 특성상 거의 무결함 용접부가 요구되므로, 고상용접이 더 적합함을 인식하게 되었다.

저항업셋 용접은 가열 및 냉각시간 뿐 아니라 용접시간이 아주 짧고 또 재료가 용융됨이 없이 고상에서 용접되므로 열영향부가 작고, 단조효과 때문에 결정립자 크기도 작다. 이러한 장점 때문에 저항업셋용접은 구형 실린더 및 관통형의 용접에 사용되고 있다<sup>10)</sup>. 그러나 저항업셋용접에 의한 Zircaloy 용접 및 특히 핵연료봉단마개와 같은 용접이음설계 특성에서의 용접연구 보고는 거의 없다.

본 연구에서는 저항업셋 용접으로 얇은 두께의 Zircaloy-4 피복관을 용접할때 이음설계, 용접전류 및 전극가압력, 부품세척등이 용접결과에 미치는 영향을 조사하고 또 신뢰할 수 있는 봉단마개 용접을 얻을 수 있는 최적조건을 확립하는데 그 목적이 있다.

## 2. 재료 및 실험순서

### 2.1. 재료

중수로형 핵연료의 피복관 및 봉단마개의 재료는 Zr에 Sn, Fe, Cr등의 원소들이 첨가된 합금인 Zircaloy-4로 그 화학조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical Composition of Zircaloy-4

Alloying Elements	Sn	Fe	Cr	Zr
W/O	1.20~1.70	0.18~0.24	0.07~0.13	Balance

피복관은 냉간가공후 510~520°C 온도범위에서 2시간 동안 stress-relief annealing하여 제조되었고, 그 치수는, 길이 50cm, 직경 13.08mm, 두께 0.4mm 이고, 봉단마개는 지름이 13.85mm로, 700°C에서 2시간 full annealing된 봉을 사용하여 가공 제작 하였다. 전극재료로는 봉단마개를 지지하는 전극으로는 RWMA 분류 class 3인 Cu-Be 합금이었고 피복관을 clamping 하면서 동시 전류를 흘려주는 전극(collet)은 RWMA 분류 class 12인 Cu-30%W 합금으로 도전율(IACS)은 48%였다.

### 2.2. 용접장비

본 실험에서 사용된 장비는 반자동 저항업셋용접기로 용접전류, 시퀀스 및 기계적 동작이 microprocessor에 의하여 제어되고 line voltage를 보정해주는 기능이 있다. 이 용접기는 440V, 60Hz 1차 공급전압을 가진 100KVA의 단상 수냉 변압기를 전원으로 사용한다. 그리고 전극이 부착되고 봉단마개를 지지하는 weld head는 공기실린더와 가압격판(squeeze diaphragm)에 연결되어 이들의 연속동작으로 전극가압력이 작동된다. 그러나 실제 전극가압력은 가압격판에서 weld head

가 용접될 피복관쪽으로 이동 및 가압한 결과에 의한 forging force로 용접이 되며 이때 가압력은 force gage를 사용하여 측정되었다.

그리고 피복관은 collet assembly에 의해 고정되며, 용접에 따른 시편길이 변화는 weld head에 부착된 linear variable differential transformer (LVDT)로 monitor되어 digital 장치로 그 수치를 읽을 수가 있었다.

### 2.3. 용접

피복관은 collet으로 clamping되고, 봉단마개는 end cap feeder를 통해 weld head에 부착되었다. weld head가 피복관쪽으로 이동함으로 가압력이 작동되고 봉단마개와 피복관의 접촉면에서 발생된 열에 의해 가열되어 업셋을 형성하여 용접되었다. 용접중 He 가스를 흘려 피복관 내부에 He 가스를 충전할 뿐 아니라 용접부의 산화가 방지되었다.

### 2.4. 용접인자

#### 2.4.1. 용접이음설계

Fig. 1a는 중수로형 핵연료집합체의 봉단마개 용접부이고 Fig. 1b는 봉단마개와 피복관의 단면으로 이들은 용접시 접촉되며 이를 straight butt joint형 이음설계라 한다. Fig. 1a의 봉단마개 돌출부 ①은 용접될 봉단마개와 피복관의 상대적인 질량 차이에 의한 열불균형을 줄이고 용접시 돌출부에 전류밀도를 높혀 열균형을 개선하기 위함이고, 홈(groove) ②는 업셋 용접으로 형성되는

용접덧살(weld flash)을 수용한다. 그리고 Fig. 1b와 같이 피복관끝 가운데를 120° 각도로 가공하였는데 이는 원주방향으로 균일한 용접을 얻기 위함이다.

#### 2.4.2. 용접전류

전류의 변화가 용접결과에 미치는 영향을 조사하는 한편 봉단마개 용접을 위한 최적전류를 선정하기 위하여 가압력을 72KPa (10.5psi)로 일정하게 유지하고, 전류를 5.0, 6.6, 8.1, 9.2, 10.0, 11.1KA로 변화하였으며 각 조건마다 10개의 시편을 준비하여 용접하였다. 본 실험에서 사용된 용접전류의 파형은 Fig. 2a의 용접사이클과 같이 가압시간은 30 사이클로 연속 가열냉각하여 예열하였고, 용접시간은 4사이클 이었다. 용접후 용접부를 냉각하기 위한 hold 시간은 30사이클을 사용하였다. 이때 봉단마개와 피복관이 가열냉각되면서 용접온도에 도달하는 온도분포를 가상하면 Fig. 2b와 같다. 여기서 사용된 예열은 피용접재들을 원주방향으로 약간 업셋시켜 표면을 완전 밀착함으로 균일한 접촉저항을 형성함과 동시에 질량이 상대적으로 큰 봉단마개에 발생열을 잔류시켜 열균형을 유지하기 위함이었다.

#### 2.4.3. 전극가압력

전극가압력의 변화가 용접에 미치는 영향을 조사하고 또 최적 가압력 범위를 선정하기 위하여 62, 76, 90KPa로 전극가압력을 변화하였으며 이때 용접전류는 10KA였고 조건당 10개씩 시편을 준비하였다.

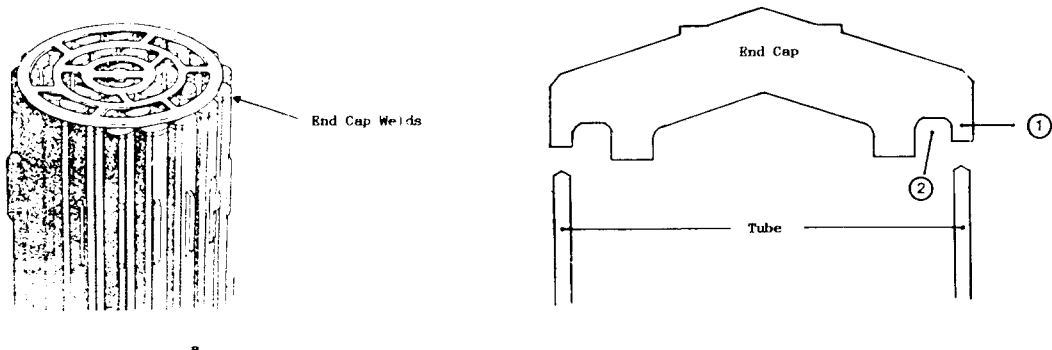


Fig.1 Detail diagrams of end cap welding  
a. A fuel assembly showing end cap welds  
b. Joint design for end cap welding

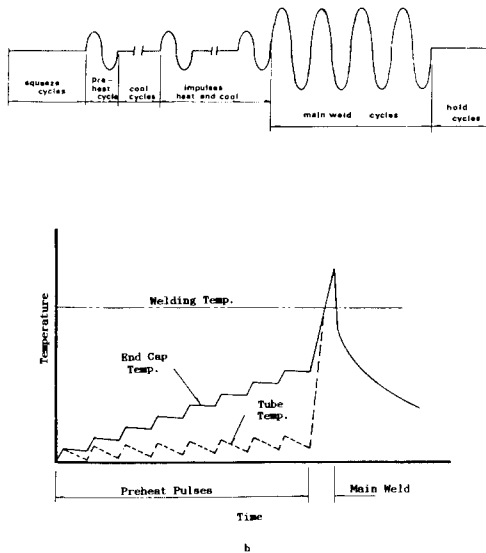


Fig.2 a. Weld cycle for end cap resistance upset welding  
 b. Temperature distribution both end cap and tube during welding

2.4.4. 부품세척

용접부품은 그 준비중 표면요철 및 산화 또는 유류등에 의해 피막을 형성하며 이들은 저항용접에 큰 영향을 미친다. 봉단마개 가공후 세척방법은 dipping in hot water - ultrasonic cleaning - rinsing-vapor degreasing의 순서로 수행되었다. Vapor degreasing의 용액은 trichlorethane이었다. 본 실험에서는 vapor degreasing이후 세척조건의 변화가 용접결과에 미치는 영향을 조사하고 또 최적방법을 선정하기 위하여 아래와 같이 세척하였다. 이때 용접조건은 전류가 10KA, 가압력이 76KPa였다.

- (a) vapor degreasing→drying(80℃, 1hr)
- (b) vapor degreasing→ultrasonic in cold demi-water(10~60sec)→drying
- (c) vapor degreasing→hot demi - water spray (70℃, 2min)→ultrasonic in acetone (50~60 sec)→drying

2.5. 용접부 평가

Zircaloy 봉단마개 용접에서 용접인자들의 영향을 조사하고 최적용접조건을 확립하기 위하여 용접부를 비파괴 및 파괴검사에 의하여 평가하였다.

2.5.1. 비파괴 검사

부적합한 용접변수에 의하여 발생하는 불균일한 업셋모양 및 expulsion 발생등은 육안 및 저배율로 확대하여 검사되었고, 또 연료봉내에 충전된 헬륨가스의 누출검사는 용접부의 원주방향에서 기밀성(氣密性)을 보증하기 위하여 mass spectrometer를 사용하여 수행되었으며, 이때 헬륨가스가  $3 \times 10^{-7}$ cc/sec보다 적게 누출되면 건전용접으로 평가하였다.

2.5.2. 파괴검사

용접부의 건전성은 필, 파열, 인장시험 및 금속조직 시험등 파괴방법으로 조사하였다.

• 필시험 (peel test)

육안검사후 용접부를 Fig.3과 같이 반으로 절단하여 봉단마개 부분을 바이스(vise)에 고정후 plier를 이용하여 피복관 부분을 잡아당겨 파단하였다. 이때 용접계면파괴(weld interface failure)상태를 조사하여 용접계면에서 파괴가 발생하지 않으면 건전용접으로 평가하였다.

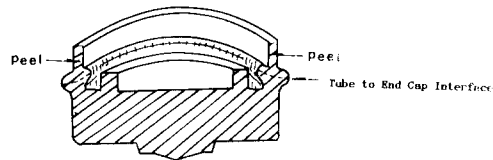


Fig.3 Peel test specimen

• 파열시험 (burst test)

한쪽만 봉단마개 용접된 길이 20cm의 시편의 내부를 0.23MPa/sec속도의 유압으로 가압하여 시편을 파열하였다. 이때 용접계면에서 파괴가 발생되지 않으면 건전용접으로 평가하였다.

• 인장시험 (tension test)

한쪽만 봉단마개 용접된 시편의 봉단마개 중앙에 구멍을 뚫어 볼트를 피복관 내부로 삽입하여 볼트 머리부분을 봉단마개와 접촉시킨 후 볼트를 인장시험기에 grip 하였으며, 동시에 피복관 내부에 지지봉을 삽입하여 인장시험중 피복관이 collapse 되는것을 방지하였다. 이시험도 위의 시험들과 마찬가지로 용접계면에서 파괴가 발생하지 않으면 건전용접으로

로 평가하였다.

· 금속조직검사(metallography)

이상의 세가지 파괴검사방법은 시험중 용접계면에서 파괴가 발생되지 않으면 건전용접량으로 평가하는 정성적인 방법에 불과하나 이 검사는 용접중 접합계면이 소멸되지 않고 존재하는 불연속 즉 weld line이 조사될 수 있어 정량적인 방법이라고 할 수 있다. weld line을 조사하기 위해 용접부를 절단, 연마하여 45% HNO<sub>3</sub>, 10% HF 및 45% H<sub>2</sub>O 용액에 30초 동안 부식한후, 광학현미경에서 500배로 확대하여 Fig. 4의 A, B영역에서 용접계면을 따라 결정립자가 coalescence 되지 않은 모든 계면의 길이를 합산하였다. 여기서 용접단면을 A, B, C 영역으로 구분한 기준은 A영역

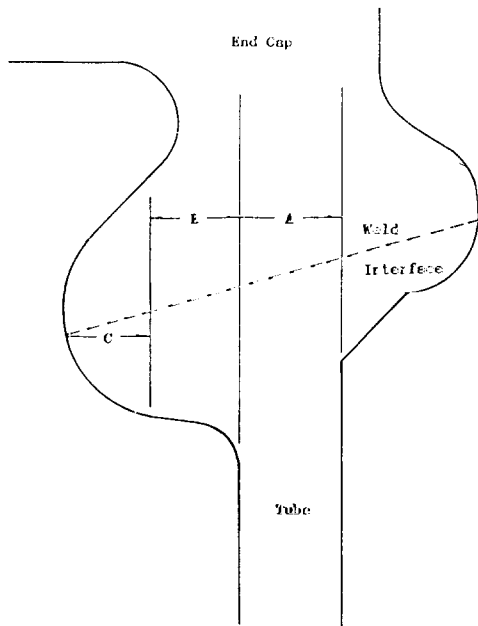


Fig. 4 Weld line evaluation by metallography

- A: Projected Tube Wall
- B: Width of Inner Upset(1/2 of Total Upset)
- C: Upset Width of Innermost(1/2 of Total Upset)

은 Fig. 1에서 돌출부가 성형된 피복관 두께에 해당되고, B영역은 내부 업셋덧살의 두께 방향으로의 최대폭의 1/2에 해당되는 부분이고, 나머지 안쪽의 업셋은 C영역으로 분류되었다. 그리고 외부업셋은 용접후 기계가공으

로 제거되기 때문에 weld line 조사에서 제외되었다.

이 금속조직검사를 토대로 건전용접량(sound weld) S는 다음식을 이용하여 구하였다.

$$S = T - X \quad (1)$$

여기서

S: 건전용접량( $\mu$ m)

T: 피복관 두께(A) + 내부업셋폭의 1/2(B)

X: A 및 B 영역에서 weld line의 합

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용접전류

용접전류의 변화가 봉단마개용접에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용접부의 건전용접량을 측정된 결과를 평균 및 그 표준편차를 구하여 통계적으로 처리한것이 Fig. 5A이고 또 이 조건범위에서의 전형적인 용접부의 형상은 Fig. 5B이다.

용접전류가 증가함에 따라 건전용접량은 점차 증가하는 반면 표준편차는 5~9KA 전류범위에서 급격히 감소되고, 9KA 이상에서는 거의 최소치에 머무르고 있음을 보여주고 있다. 이는 저항용접에서 용접전류, 시간 및 저항과 이들에 의한 발생열과의 관계로부터 설명 될 수 있다.

$$H = I^2 R t \quad (2)$$

여기서 H: 발생열(joules), I: 전류(amperes)

R: 저항(ohm), t: 시간(sec)

식(2)에서와 같이 용접이음에 흘러준 전류가 증가하면 발생열은 전류의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 피용접재의 접촉면에서 확산이 활성화되어 계면 이동의 증가 및 기공 소멸로 용접계면에서의 불연속인 weld line이 소멸되었기 때문이다. 또한 전류증가에 따른 발생열 증가는 용접계면 인접영역의 큰 소성변형을 초래하여 Fig. 5B와 같이 B 영역이 증가되었다. 그리고 용접전류가 9KA 이상일때 건전용접량의 표준편차의 산란도는 다소 있지만 최저치를 유지하고 있다. 그러나 용접전류가 11.1KA 이상으로 증가하면 국부적으로 과다한 열발생으로 용융금속이 용접계면 밖으로 튀어나오는 현상인 expulsion 발생 때문에 이 이

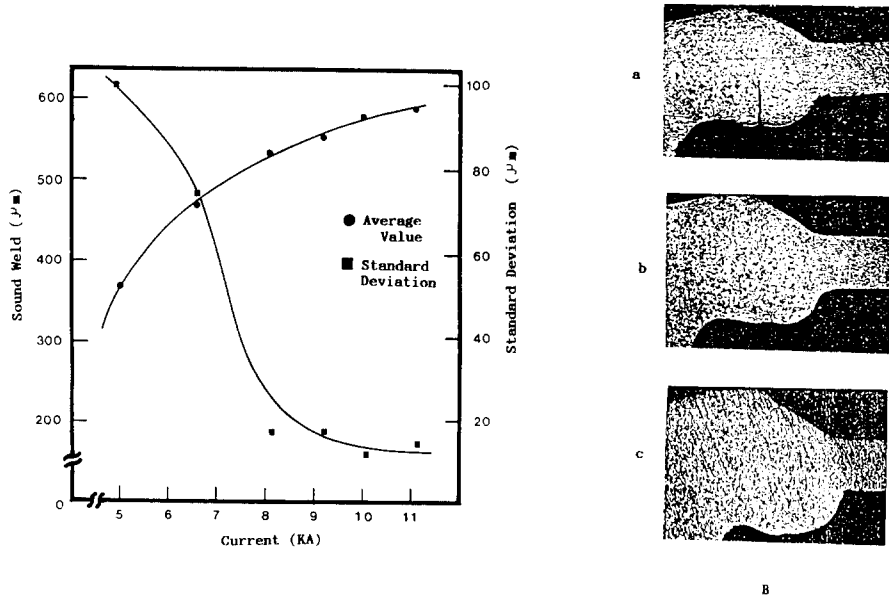


Fig.5 A. The average value and standard deviation of sound weld as a function of weld current  
 B. Weld upset contour. a. 6.6KA b. 8.1KA c. 10KA

상의 전류는 사용하지 않았다.

핵연료 봉단마개 용접에서 바람직한 용접부의 형상은 Fig. 6과 같이 피복관과 봉단마개사이 업셋변형 부분인 용접덧살이 90°보다 큰 둔각을 이루며 완만한 둥근 형상으로 Fig. 5B와 같이 용접 전류가 10KA일때 이와 유사한 형상의 용접부임을 알 수 있다. 따라서 피복관과 덧살사이에 notch같은 형상이 존재해서는 안될 뿐 아니라 용접덧살을 따라 국부적인 notch 형상이 존재하지 않는것이 바람직하다. 이것은 이부분이 응력집중장소가 되어 용접중 용접결함을 발생할 원인이될

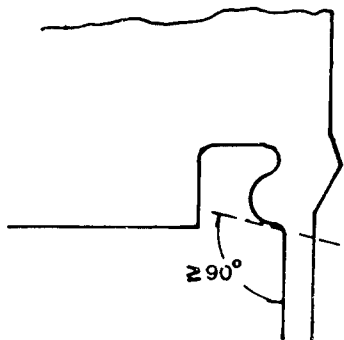


Fig.6 Ideal contour of upset for end cap welding

뿐 아니라 또 원자로에서 핵연료 연소시 고온에서 부과되는 응력과 UO<sub>2</sub> 소결체의 연소과정에서 발생하는 핵분열가스인 요오드(iodine)에 의한 응력부식균열생성 장소가 될 수 있기 때문이다<sup>11),12)</sup>.

Fig. 7은 전류변화에 따라 용접부 업셋변형으로 인한 시편의 길이변화를 보여 주고 있다. 용접전류 증가에 따라 시편의 길이는 거의 직선적으로 감소하고 있다. 이것은 이미 언급된 바와같이 용접전류 증가에 의한 접합이음에서의 발생열 증가로 용접부에서 더 큰 소성변형이 발생하였기 때문이다. 위에서 언급되었듯이 바람직한 용접형상을 얻기 위해서는 길이 감소량이 860~950μm이 적절하며 이때의 용접전류는 10~11KA이다.

본 실험에서 사용된 전류범위에서 준비된 시편들을 필, 파열 및 인장시험한 결과 용접계면에서의 파괴는 없었고 모든시편의 피복관에서 파괴가 발생하였다. 또 헬륨누출검사에서도 모든 시편은 건전용접부를 갖고 있음이 평가되었다.

이는 저항업셋 용접은 용융용접과는 달리 접합계면의 초기 요철부가 접촉하여 결정립계확산 및 체적확산에 따른 기공소멸의 확산접합기구에 의하여 용접 되기 때문이다<sup>13),14)</sup>. Fig. 8은 용접부의 미세조직으로 일부 초기 결정립 성장이 발생하였

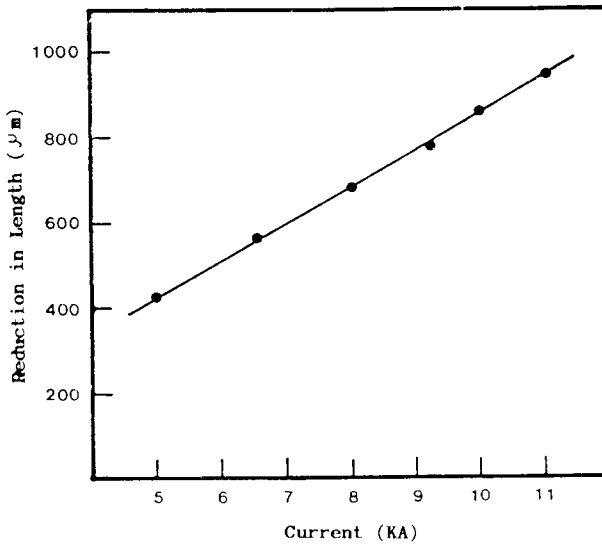


Fig.7 Specimen length reduction resulting from upsetting as a function of weld current

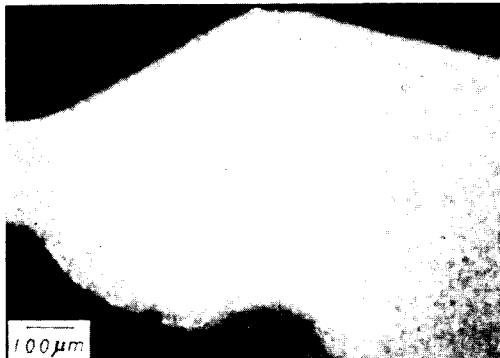


Fig.8 Microstructure of resistance upset weld in Zircaloy-4

지만 재결정조직을 보이고 있다.

본 실험에서 사용된 전류의 범위에서 준비된 시편들이 기계적 시험에서 용접부가 파괴되지 않고 용접되지 않은 피복관이 파괴된것은 업셋소성변형된 용접덧살의 두께가 피복관보다 두껍기 때문에 하중지지만면적이 컸기 때문이다. 이것이 저항업셋용접부에서 weld line이 불연속적으로 존재하더라도 용접부의 강도가 용접되지 않은 피복관 보다 클수있는 이유이다.

이상의 실험결과에서 건전용접량과 용접덧살형상과 시편길이감소등을 토대로 이들을 가장 적합

하게 조합할 수 있는 용접전류는 10KA 및 11KA였다.

### 3.2. 전극 가압력

Fig. 9A는 전극가압력의 변화에 따라 용접중 필요한 전류와의 관계를 보여주고있다. 전극가압력이 증가하면 용접에 필요한 전류는 증가하는데, 이는 저항용접에서는 가압력이 증가하면 피용접재 사이의 저항이 감소되기 때문이다. 용접될 피용접재의 표면을 기계가공후 세척을 하더라도 미세한 요철까지 제거하여 평평한 표면을 얻기란 실질적으로 어렵다. 이 피용접재의 표면요철들이 가압력에 의하여 collapse되어 더 큰 면적에서 접촉하기 때문에 전류 밀도는 감소하게 된다. 그러므로 전극가압력이 증가할수록 더 큰 용접전류를 흘려 주어야 한다.

Fig. 9A는 또한 전극가압력이 증가함에 따라 시편의 길이가 감소함을 보여 주고 있으며, 즉 62 KPa일때 820μ m에서 90KPa일때 950μ m으로 시편의 길이가 감소하였다. 이는 앞에서 언급하였듯이 전극가압력의 증가로 용접에 필요한 전류가 증가하였기 때문이다. 이 결과로 용접부의 발생열 또한 증가되어 용접업셋변형이 증가되었다. 시편의 길이감소는 업셋발생에 따른 금속의 소성변형 때문으로 이를 위해서는 업셋변형량이 정량적으로 조사되어야 하겠지만 실제로 이것을 측정하기는 어렵다.

본 실험에서 사용된 전극 가압력의 범위는 62~90KPa로 이 범위에서는 expulsion이나 전극과 피용접재가 접촉하는 부분에서 피용접재 표면이 용융되어 전극에 부착되는 pick up등 용접결함은 발생되지는 않았지만, Fig. 9B와 같이 피복관 내부로 용접덧살이 가압력이 증가함에 따라 증가하였으며, 가압력이 90KPa이상으로 증가하면 용접덧살 형상이 완만하지 못하고 울퉁불퉁하게 된다. 이것은 전류증가에 따라 발생열이 과대하게 증가하여 용접접합부의 인접금속이 크게 소성변형되었기 때문이다. 저항용접에서 이음설계, 재료 및 피용접재의 표면조건이 적당할때 전극가압력의 증가는 용접부의 단조효과로 기공형성 및 균열발생을 방지하여 용접품질을 개선한다<sup>14)</sup>. 그러나 과대한 전극가압력은 이러한 효과를 감소하고 expulsion 발생 및 불규칙 형상의 용접업셋을 초

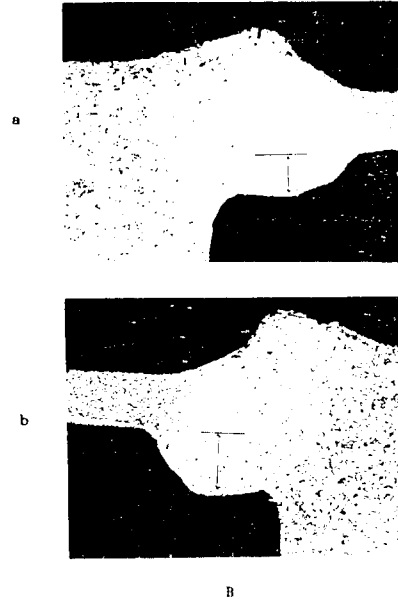
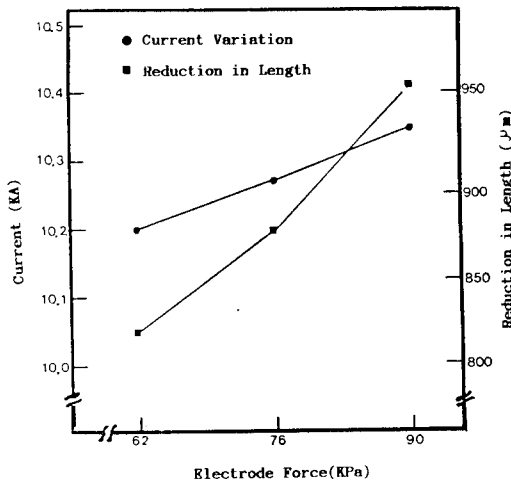


Fig.9 Effect of electrode force on weld current and specimen length(A), and weld upset contour (a. 62KPa b. 90KPa)

래할것이다. 그리고 이 실험에서 사용된 전극가압력 조건에서 준비된 시편은 파괴.뒹 비파괴시험결과 모두 건전용접으로 평가되었다. 전극가압력은 용접전류, 시간과 함께 저항용접 3대 요소인데 본 실험에서는 전극가압력만 조사되었으며 전극가압력이 용접전류 및 용접형상에 영향을 미침이 확인되었다.

3. 3. 부품세척

Fig. 10은 세척조건에 따라 용접부의 건전용접량(sound weld)을 금속조직검사에 의해 조사된 자료를 통계적으로 처리한 결과이다. 본 실험에서는 봉단마개만 세척하였고, 피복관은 끝 중앙에 돌출부를 형성하였기 때문에 세척하지 않았다. 이것은 projection 용접에서 피용접재를 국부적으로 돌출시켜 boss를 성형하여<sup>15)</sup>, 표면산화 및 기계가공시 잔류할 수 있는 oil, grease등에 의한 표면막에 용접전류를 집중시켜 파쇄하여 전류를 흐르게 하는 원리와 비슷하다.

Fig. 10에서와 같이 봉단마개 세척조건 (a) vapor degreasing→drying, (b) vapor degreasing→water rinsing→drying, (c) vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying의 순

서로 평균 건전용접량은 535, 540, 558μ m으로 각각 증가하고 반면 각 조건에서 평균 건전용접량

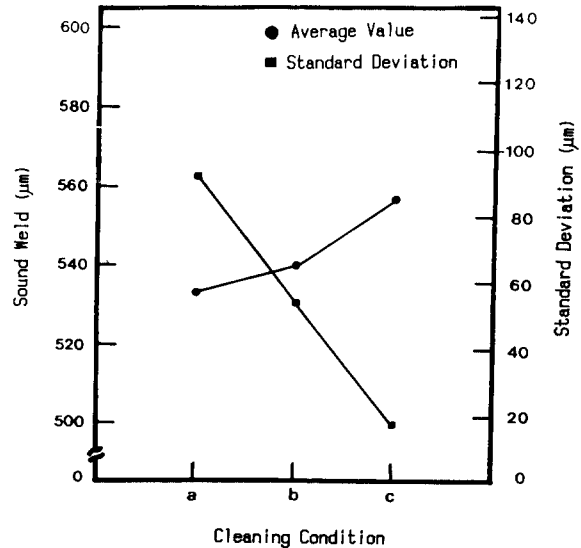


Fig.10 Effect of end cap cleaning conditions on the sound weld  
 a. V.D.→Drying  
 b. V.D.→Water Rinsing→Drying  
 c. V.D.→Water, Acetone Rinsing→Drying



의 산란도를 나타내는 표준편차는 (c), (b), (a) 조건순서로 증가한다. 이와같이 vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying 조건에서 건전용접량이 가장 크고 표준편차가 가장 작은 우수한 용접결과를 얻었다.

Vapor degreasing으로 봉단마개를 세척할때 용액은 trichlorethane을 사용하기 때문에 (c) 이외 기타 두조건에서는 세척용액에 포함된 유기용매가 봉단마개 표면에 잔류 및 표면산화막을 형성하였을 것이고, 이들은 부도체이기 때문에 용접전류 흐름의 통로를 제한하여 용접부의 원주방향 전 접촉면적에서 균일한 전류흐름이 발생되지 못했기 때문일 것이다. 또 유기용매는 (b) 조건인 물헝 굵으로도 완전히 제거되지 못한다.

그러나 봉단마개를 vapor degreasing→water acetone rinsing→drying하였을때는 상기한 표면 피막 및 잔류유기용매가 아세톤으로 행구는 단계에서 상당히 제거되었기 때문에 원주방향에서 고른 용접전류가 흘러 건전용접량도 컸고 또한 신뢰성 있는 용접결과 즉, 표준편차도 적었던 것으로 생각된다.

저항용접에서 피용접재의 표면상태가 용접성에 미치는 영향은 피용접재를 놓고 접촉시켜 일정한 전극가압력하에서 전류를 흘려 정적저항을 측정하여 조사되고 있지만<sup>16)</sup> 본 실험에서 사용된 피용접재는 비록 동일 재료이지만 시편의 형상이 복잡하고 특히 두께가 현저히 차이가 나기 때문에 정적 저항 또는 동적저항<sup>17)</sup>을 측정하지 못하였다. 이러한 점을 고려하여 본 실험에서는 표면세척조건에 따른 용접결과를 통계적으로 처리하였고, 그 결과 vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying 순서로 봉단마개를 세척한 조건에서 가장 신뢰할 수 있는 건전용접을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

중수로 핵연료 봉단마개용접을 저항업셋방식을 이용하여 용접결과에 미치는 용접전류, 전극가압력 및 부품세척등의 용접인자들의 영향을 조사하여 신뢰성 있는 최적용접조건을 확립하였으며 본 연구에서 도달한 결론은 다음과 같다.

1. 핵연료 봉단마개 용접을 저항업셋 방식으로 수행한 결과 신뢰성있는 건전용접을 얻을 수 있

었다.

2. 용접전류(5.0~11.1KA)가 증가 할수록 건전 용접량은 증가하였다. 이는 전류 증가로 발생 열이 증가되어 확산이 활성화되고 용접계면에서 기공 및 weld line이 소멸되었기 때문이다.
3. 전극가압력이 증가하면 용접에 필요한 전류는 증가하였으며 이로 인하여 용접업셋변형도 증가하였다. 그러나 가압력변화는 전류에 큰 영향을 미치지 않았다.
4. 봉단마개 세척조건을 vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying 순서로 하였을 때 건전용접량이 컸고 또 가장 신뢰성 있는 용접결과를 보였다.
5. 봉단용접을 straight butt joint의 이음설계로 밀봉용접될때 건전용접량, 용접덧살형상, 시편 길이 감소량등을 고려한 최적용접조건은 다음과 같다.

- 용접전류 : 10~11KA
- 전극가압력 : 62~90KPa
- 부품세척 : vapor degreasing→water, acetone rinsing→drying

#### 참고문헌

- 1) Truant, P.T., "CANDU Fuel Performance: Power Reactor Experience", AECL-MISC-250-3 Rev.1(1983)
- 2) Bordoni, R. A. and Olmedo, A.M., "Microstructure in the Weld Region in Seam Welded and Resistance Welded Zircaloy-4 Tubing" J. of Mat. Sci. 16(1981), pp. 1527-1532
- 3) Mills, L.E. Welding Journal, 40(2), (1961)141
- 4) Vagi, J.J. and Martin, D.C., "Development of Methods for End Capping PWR Fuel Elements", Welding J. Nov. 1958, pp.499-S~506-s
- 5) Vagi, J.J., Koppenhofer, R.L. and Martine, D.C., "Methods for End Capping Zirconium-Clad Reactor Fuel Pins", Weld. J., Feb. 1959 pp.78-s~84-s
- 6) Coolen, R.F., "Magnetic Force Welding Applications at Battelle Northwest", BNWL-422, May 1967.

- 7) Funk, E.J., "Recent Developments in Magnetic-Force Welding", Weld.J., June 1957, pp.576-582
- 8) Vagi, J.J. and Koppenhofer, P.L. Weld.J.38(2) 78S(1959).
- 9) 박춘호, "GTAW, RW방식에 의한 피복관 봉합시 발생하는 용접결함 형성과 용접부 성질 평가에 대한 연구", 석사학위논문 : KAIST (1985)
- 10) Kanne, W.R.Jr., "Solid-State Resistance Welding of cylinders and Spheres", Weld.J May 1986, pp.33-38.
- 11) Cubicciotti, D., Jones, R.L., and Syrett, B.C, "Chemical Aspects of Iodine-Induced Stress Corrosion Cracking of Zircalloys," ASTM STP 754, 1982, pp. 146-157
- 12) Brunisholz, L. and Lemaignan, C., "Iodine - Induced Stress Corrosion of Zircaloy Fuel Cladding ; ASTM STP 939, 1987, pp.700-716
- 13) Schueler, A.W., "Magnetic Force Butt Welding for Nuclear Cladding", Welding Journal, Aug. 1968, pp.638-643
- 14) American Welding Society, "Welding Handbook" Vol.3. 7th ed.
- 15) Harris, J.F. and Riley, I.J., "Projection Welding Low Carbon Steel Using Embossed Projects", Weld.J. April. 1961, pp.363-376
- 16) Cohen, R.L. and West, K.W., "Characterization of Metals and Alloys by Electrical Resistivity Measurements", Materials Evaluation, Aug.1983, pp.1074 ~1077
- 17) Dickinson, D.W., Franklin, J.E. and Stanya, A., "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring", Weld.J., June 1980, pp.170-s ~176-s