



저항 업셋 용접방식에 따른 Zircaloy-4 핵연료 피복재 용접부의 미세조직 특성

고진현* · 김상호* · 박춘호** · 김수성***

*한국기술교육대학교 신소재공학과

**한진 원자력연료주식회사

***한국원자력연구소

Microstructural Characteristics of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Cladding Welds by Resistance Upset Welding Processes

Jin-Hyun Koh*, Sang-Ho Kim*, Choon-Ho Park** and Soo-Sung Kim***

*Department of materials engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea

**KEPCO Nuclear Fuel Company, Daejeon 305-353, Korea

***Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract

A study on microstructures of welds for Zircaloy-4 sheath end closure by the resistance upset welding methods was carried out. Two upset welding process variations such as magnetic force and multi-impulse resistance welding were used. Grain size and microhardness across welds were analysed in terms of welding parameters. Magnetic force resistance weld with one cycle of unbalanced mode has smaller upset length and α -grain size in heat affected zone than those of multi-impulse resistance weld because of lower heat input and shorter welding time. Heat affected zone formed by two upset resistance welding variations revealed fine Widmanstatten structure or martensitic α' structure due to the high heating rate and faster cooling rate. Magnetic force resistance welds showed recrystallized grains before grain growth, whereas multi-impulse resistance welds showed full grain growth

(Received January 19, 2002)

Key Words : Zircaloy-4, Magnetic force resistance welding, Multi-impulse resistance welding, Welding cycle, Forging force, Widmanstatten structure

1. 서 론

Zircaloy-4는 열중성자 흡수 단면적이 적고 고온강도와 내식성이 우수하므로 핵연료 피복재와 구조재료 사용되고 있다. 여기서 핵연료 피복재란 Zircaloy-4 관에 UO_2 소결체를 장입하고 양끝을 봉단마개로 용접하여 밀봉시킨 핵연료봉들을 만들 때 사용되는 관과 봉단마개를 뜻한다. 이 핵연료 피복재가 원자로에 장입되어 핵분열반응을 일으키게 되는데, 핵분열 물질의 누출가능성이 높은 부위가 용접부이므로^{1,2)} 용접부의 신뢰도는 핵연료의 안전성과 직결된다. 이와같이 핵연료제조

과정에서 봉단마개 용접은 매우 중요하기 때문에 용접부의 신뢰도를 높이도록 용접방식과 이에 따른 용접변수에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 핵연료 제조과정에서 사용되고 있는 봉단마개 용접방식은 용융용접과 고상용접의 두가지로 분류할 수 있는데, 0.4mm 두께의 얇은 Zircaloy-4 피복관을 밀봉하는 용접으로는 용접부의 신뢰도와 생산성을 고려하여 고상용접인 저항용접 방법이 주로 연구되고 있다³⁻⁶⁾. 저항용접방법 중에는 자력 저항용접(magnetic force resistance welding)과 다중 임펄스 저항용접(multi-impulse resistance welding)이 널리 사용되고 있는데, 용접방식에 따라 용접부의 입열량과 냉각속도가 달라지므로

용접부 및 열영향부의 내식성 및 기계적성질이 달라진다. 재료의 내식성과 기계적성질은 미세조직에 따라서 크게 변화되어 Zircaloy-4의 경우에는 미세한 α 결정립을 가질 때 인성과 항복강도가 증가된다고 알려져 있다⁷⁻¹⁰⁾. 그러나 Zircaloy-4의 저항용접부의 미세조직에 대한 연구보고는 매우 드물고 특히 Zircaloy-4 봉단마개의 저항용접 방식에 따른 용접부의 미세조직에 대한 연구는 발표된 바가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 0.4mm 두께 Zircaloy-4 피복관을 밀봉시키기 위한 저항용접 방식으로 자력 저항용접과 다중 임펄스 저항용접 방식을 사용하여 각 용접부를 미세조직의 관점에서 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 용접시편

용접에 사용된 재료는 Zircaloy-4로써 순수 Zr에 Sn, Fe, Cr 등의 합금원소를 첨가한 Zr 합금이며 Table 1에 그 화학조성을 나타내었다. Zircaloy-4 피복관은 냉간가공 후 510°C~520°C 온도에서 약 2시간 동안 응력제거 열처리하고 Fig. 1과 같이 직경 13.08mm, 두께 0.4mm, 길이 100mm의 치수로 준비되었고, 봉단마개는 냉간가공 후 650°C~700°C 온도에서 2시간 동안 어닐링된 Zircaloy-4봉을 Fig. 2와 같은 치수로 절삭가공하여 용접시편으로 사용하였다.

2.2 용접방법

본 실험에서는 자력 저항 용접 방식과 다중 임펄스 용접 방식의 두 종류의 용접기가 사용되었다. 용접전류가 흐르는 시간은 자력 저항용접에서는 1/60sec (2 펄스) 이었고, 다중 임펄스 용접에서는 12/60sec (24 펄스) 로 자력저항 용접이 더 짧았다. 그리고 자력저항 용접

Table 1 Chemical composition of Zircaloy-4

Alloying element	Sn	Fe	Cr	Zr & permitted impurities
w/o	1.20~1.70	1.18~0.24	0.07~0.13	Bal.

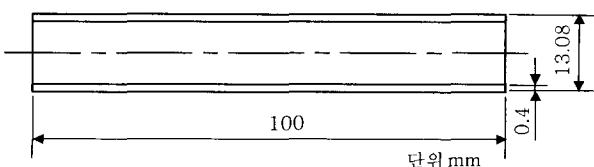


Fig. 1 Specimen dimension of Zircaloy-4 sheath

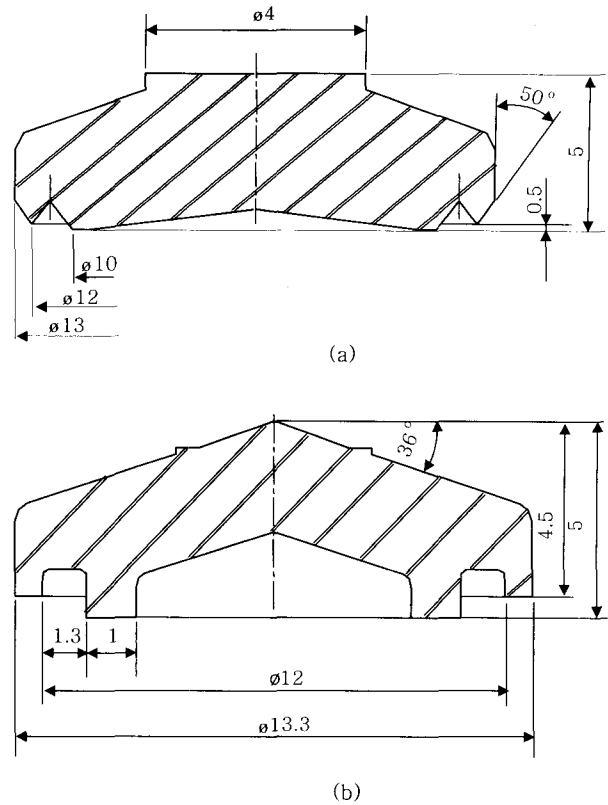


Fig. 2 Dimension of end cap (a) End cap for magnetic force resistance welding (b) End cap for multi-impulse resistance welding

은 He 분위기의 챔버내에서 용접이 되었고 다중 임펄스 용접은 용접 중 일정량의 He 기체를 용접부에 흘러주면서 용접하였다. 자력저항 용접실험에서 사용된 용접전류와 용접압력은 Table 2와 같으며 길이감소량은 피복관 길이 방향으로 약 0.4mm 정도였다.

다중 임펄스 저항용접에 사용된 전류는 8번의 예열 사이클과 4번의 주 가열 사이클로 구성되었다. 주 가열 사이클 전류가 흐를 때 피복관과 봉단마개의 접합부위가 원주방향으로 균일한 최고온도로 가열된 상태에서 소성변형이 일어나도록 예열 사이클을 두었으며 이는 1 사이클의 가열시간과 3 사이클의 냉각시간으로 구성되었다. 실험에서 사용된 용접전류와 용접압력은 Table 3과 같으며 이 때 피복관 길이 방향으로의 길이감소량은 약 0.8mm 정도였다.

Table 2 Magnetic force resistance welding parameters

Welding variables	Welding current kA(RMS)	Magnet current kA(RMS)
First half cycle	7~8	14~15
Second half cycle	19~20	22~23
Forging force	Up to 70MPa(10,000psi) (15mm Air gap)	

Table 3 Multi-impulse resistance welding parameters

Welding variables	Number of cycle	Current kA(RMS)
Preheat	8 cycles (1 cycle heat, 3 cycle cool)	3~4
Main heat	4 cycles	8~9
Forging force	45~52 MPa(7,000~7,500psi)	

2.3 미세조직 관찰

용접된 시편은 원주방향의 용접부 중 임의의 한 단면을 절단하고, 마운팅과 연마과정을 거쳐 H₂O 50%, HNO₃ 46%, HF 4%(v/o)의 용액으로 화학에칭 한 후 광학현미경을 사용하여 용접부의 미세조직과 결정립 크기를 관찰하였다.

2.4 미세경도 측정

미세조직을 관찰한 시편은 Knoop 미세경도기를 사용하여 500g의 하중으로 접합 계면으로부터 모재의 방향으로 미세경도의 변화를 측정하였다. 용접부의 크기가 매우 작으므로 각각 10개씩의 용접부에서 미세경도를 측정하여 그 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저항용접 방식에 대한 고찰

3.1.1 자력 저항용접

Fig. 3(a)는 다중 임펄스 용접과 비교하여 더 복잡한 형태의 봉단마개와 피복관 사이에 더 짧은 시간에 용접이 이루어지는 자력 저항 용접 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)-(1)은 용접전류가 흐르기 전에 봉단마개와 피복관을 접촉시킨 다음 최초 1 펄스(1/120초) 동안의 예열 단계로서 얇은 두께의 Zircaloy-4 피복관이 봉단마개보다 먼저 가열되어 부분적인 소성변형이 일어났고, Fig. 3(a)-(2)는 나중 1 펄스(1/120초) 동안에 용접전류를 통전하여 완전한 접합(Fig. 3(a)-(3))이 이루어 지는 중간 단계이다. Fig. 3의 (b)와 (c)는 Fig. 3(a)-(2)와 Fig. 3(a)-(3)에 해당되는 실제 용접부를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 자력 저항용접은 다중 임펄스 용접보다 용접시간이 짧기 때문에 건전한 용접부를 형성하기 위해서는 빠른 변형속도가 필요하고 빠른 변형속도를 얻기 위해 전자석이 이용된다^{11,12}.

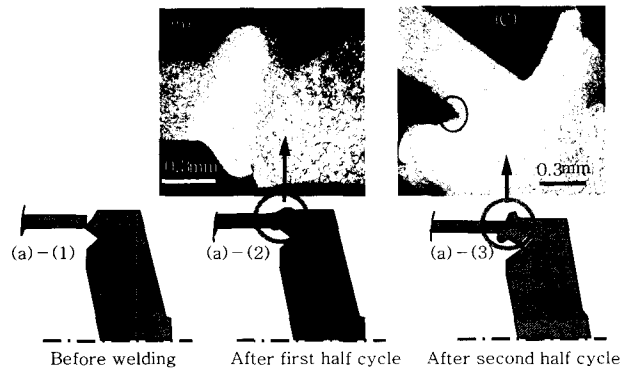


Fig. 3 Magnetic force resistance welds (a) schematics of joining process, (b) weld corresponding to (a)-2, (c) weld corresponding to (a)-3

3.1.2 다중 임펄스 저항용접

Fig. 4는 다중 임펄스 저항용접 과정에서 8개의 예열 사이클이 지나고 난 다음 각 4개의 주 가열 사이클 동안에 진행되는 용접부의 형성과정을 나타낸 것이다. 8번의 예열 사이클과 1번의 주 가열 사이클이 지났을 때 두께가 얇은 피복관의 돌출부위가 변형되면서 봉단마개와 균일한 접촉을 하게된다(Fig. 4(a)). 2번의 주 가열 사이클이 지난 후 길이감소량이 약 0.6mm 일 때의 용접부가 Fig. 4(b)이다. Fig. 4(c)는 3번의 주 가열 사이클이 지난 후 접합이 이루어진 용접부이고 Fig. 4(d)는 4번의 주 가열 사이클이 지난 후 완전히 접합이 진행된 용접부의 전체 단면을 관찰한 사진이다. 다중 임펄스 저항 용접 시 사용된 봉단마개와 피복관의 끼워맞춤에서 접촉되는 초기 단면적이 자력 저항 용접 시의 봉단마개와 피복관의 접촉 초기 단면적 보다 크기 때문에 가열속도 및 가압력에 따른 변형속도가 낮았다¹³⁻¹⁵.

3.1.3 용접부 형상(Weld contour)의 비교

두가지 용접방식에서 형성되는 용접부의 형상은 Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이 서로 다른 모양을 갖게 된다. 자력 저항용접에 의한 용접부의 형상은 Fig. 3(c)에서 원내에 나타낸 것과 같이 피복관과 용접덧살 사이가 예리한 예각을 이루어 응력이 크게 집중될 수 있기 때문에 균열생성에 민감한 형상을 가지고 있다. 반면에 다중 임펄스 저항용접부는 Fig. 4(c)의 원내와 같이 피복관과 용접덧살 사이가 완만한 둔각을 이루고 있다. 이와같이 용접부의 형상이 크게 다른 것은 용접이음 설계가 다르기 때문이다. 자력 저항용접의 용접이음 설계방식은 Fig. 2(a)와 같이 피복관과 맞닿는 봉단마개 부분에 경사를 둔 프레스 끼워맞춤 접치기 이음이었고, 다중 임펄스 저항용접의 용접 이음 설계방식은 Fig. 2(b)와 같이 피복관과 맞닿는 봉단마개 부분이 편평한 모양인 직선 맞대기 이음의 형태이기 때문

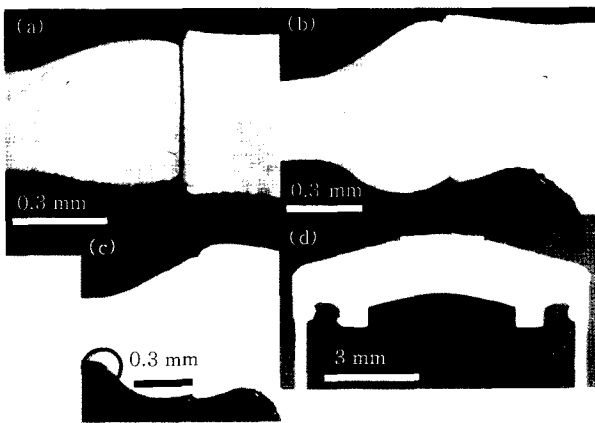


Fig. 4 Multi-impulse resistance weld(a~c) and cross section of end cap(d)

- (a) 8 preheat cycles and 1 mainheat cycle
- (b) 8 preheat cycles and 2 mainheat cycle
- (c) 8 preheat cycles and 3 mainheat cycle
- (d) 8 preheat cycles and 4 mainheat cycle

이다. 따라서 용접이음 설계방식에 따라 용접전류가 흐를 때 용접부가 형성되는 과정을 나타낸 Fig. 3과 Fig. 4를 보면 용접부 형상에 대한 차이를 잘 알 수 있다.

3.2 용접부의 미세조직

3.2.1 변태조직

순수 Zr은 862°C에서 HCP 구조의 α 상에서 BCC 구조의 β 상으로 동소변태를 하는데 합금원소가 첨가되면 α 상과 β 상이 안정하게 되는 온도범위가 변화하게 된다. Zircaloy-4의 경우에는 약 825°C 온도까지는 α 상이, 975°C까지는 α 상과 β 상이 공존하며, 975°C 이상 용융점 이하에서는 β 상이 안정하게 존재한다⁷⁻¹⁰⁾. 그리고 Zircaloy-4는 β 상 영역으로 가열된 다음 냉각속도가 증가함에 따라 lenticular, Widmanstätten, martensite α' 의 조직을 갖게 되는데 가열과 냉각속도가 빠른 저항용접에서는 주로 미세한 Widmanstätten 조직이나 martensite α' 조직을 형성하는 것으로 보고되고 있다^{7,8,10)}. 또한 Zircaloy-4에서 형성되는 Widmanstätten 조직은 형상에 따라 basket weave와 parallel plate 두가지 형태로 구분될 수 있는데, 이는 상변태 시에 핵생성기구의 차이에 의한 것으로 알려져 있다⁷⁻⁹⁾. 고온의 β 상에 존재하는 제2상에서 α 상이 핵생성되어 성장될 경우 β 결정립내에서 생성되는 α 상이 연결되어 basket weave 조직을 나타내며, 제2상이 매우 적은 경우에는 β 결정립계에서 α 상의 핵이 생성되어 성장하는 parallel plate 조직을 형성한다는 것이다⁹⁾. 두가지 저항 용접방식에 의해 형성되는 Zircaloy-4 용접부는 용접전류의 사이클에 따라 국부적으로 $\alpha + \beta$ 상 영역 및

β 상 이상 영역까지 가열되어 냉각되기 때문에 용접부는 각각 다른 범위의 냉각속도를 갖게 된다. 이와 같이 용접부에서의 가열 및 냉각속도의 차이는 각기 다른 상변태를 유발하여 결과적으로 미세조직을 복잡하게 한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 자력 저항용접과 다중 임펄스 저항용접에 의한 각각의 용접부 미세조직이다. Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)와 같은 두 저항 용접방식에 따른 용접부에서 접합계면을 포함한 용접부의 미세조직변화를 ㉠㉡㉢㉣ 등으로 표시된 각각의 위치에서 조사하였다. Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)는 두 용접방식에서 피복관과 용접부 사이의 경계로서 ㉠로 표시된 부분의 미세조직이다. 피복관모재의 미세조직은 α 결정립이 길이방향으로 연신된 상태인데 비하여 용접부 쪽의 미세조직은 α 결정립 모양이 가압 변형 및 $\alpha + \beta$ 상 영역으로 가열됨에 따라 동적인 가공경화 및 재결정을 거쳐 결정입자 모양이 불규칙한 미세조직을 보여주고 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 6(c)는 ㉢로 표시된 부분의 미세조직인데 β 상 영역으로 가열된 후 냉각된 것이다. Fig. 5(c)는 α 상이 판상으로 핵생성되었고 일부 가공경화된 조직이 완전히 소멸되지 않고 남아있는 반면에 Fig. 6(c)에서는 상변태에 따라 생성된 Widmanstätten α 와 β 상이 공존하는 것으로 사료된다. 그러나 ㉣로 표시된 피복관과 봉단마개가 맞닿아 용접된 접합계면의 미세조직을 보면 Fig. 5(d)의 자력 저항용접부 미세조직은 빠른 가열속도 및 빠른 냉각속도 때문에 침상의 martensitic α' 조직이고, 다중 임펄스 저항용접부 미세조직(Fig. 6(d))은 초기 β 결정내에서 Widmanstätten α 상이 서로 평행하게 생성된 조직으로 생각된다. Fig. 5(e)와 Fig. 6(e)는 봉단마개 모재와 용접부사이의 경계로서 ㉣로 표시된 부위의 미세조직이다. α 결정립이 가압 변형되고 $\alpha + \beta$ 상 영역으로 가열된 다음 냉각된 용접부는 동적인 재결정과 결정립 성장이 되어 결정립의 모양과 크기가 다소 불규칙하지만 어닐링된 봉단마개 모재의 결정립의 모양과 비슷하게 나타난 것으로 사료된다. 두 가지 저항용접에서 용접은 1초 이내에 수행되기 때문

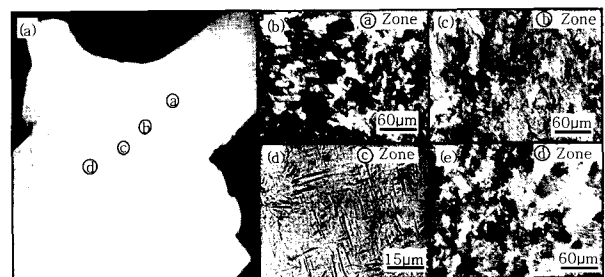


Fig. 5 Microstructure of weld by magnetic force resistance welding

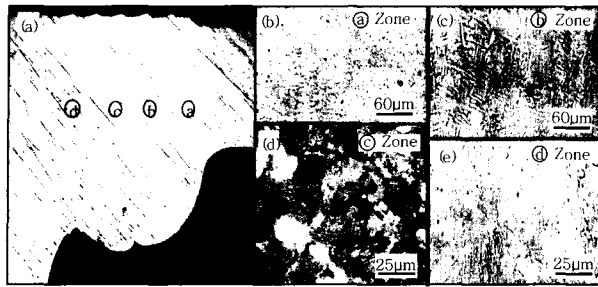


Fig. 6 Microstructure of weld by multi-impulse resistance welding

에 접합계면은 β 상이 안정한 영역의 온도인 약 975°C 이상으로 가열되어 냉각되는 것으로 추정되는데 냉각속도는 약 $10^3\text{C}/\text{sec}$ 이상이라고 할 수 있다^{7,8)}. 그런데 이와 같이 용접방식에 따른 미세조직의 차이는 용접시간이 $1/60\text{sec}$ 인 자력 저항용접부의 냉각속도가 $12/60\text{sec}$ 의 다중 임펄스 용접부의 냉각속도보다 빠르기 때문이다. 결과적으로 접합계면에서의 미세조직 형성은 다음과 같이 요약될 수 있다. 자력 저항용접의 경우 용접시간이 짧고 냉각속도가 빠르기 때문에 무확산 상변태에 따른 martensitic α' 조직이 접합계면에 발생한 반면 다중 임펄스 저항용접부는 자력 저항 용접부보다 용접시간이 길기 때문에 초기 β 결정립계에서 α 상이 핵생성되어 어떤 특정한 결정학적인 방향으로 α 상들이 평행하게 성장 배열된 parallel plate 형태를 갖는 Widmanstätten 조직을 나타내는 것으로 사료된다. β 결정립계에서 핵생성된 α 상은 횡방향으로 확장되고 동시에 두꺼워지게 되는데, Fe 및 Cr 등의 원소들의 확산이 판상의 성장속도를 지배한다고 알려져 있다⁷⁾. 이러한 핵생성 및 성장은 Aaronson 등에 의해 제안된 강의 오스테나이트에서 Widmanstätten ferrite plate들의 성장이 오스테나이트에서의 탄소 확산에 의해 지배되는 것과 비슷하다고 할 수 있겠다¹⁶⁾.

3.2.2 재결정 조직

Fig. 7과 Fig. 8은 두 방법의 저항용접부에서 관찰된 α -결정립의 크기를 보여주고 있다. 자력 저항용접에서는 열영향부의 크기가 약 0.6mm 이고 열영향부에서 α -결정립의 크기가 약 $3\sim 5\mu\text{m}$ 정도이었으며, 다중 임펄스 용접에서는 열영향부의 크기가 약 0.8mm 이고 열영향부에서 α -결정립의 크기는 $15\sim 18\mu\text{m}$ 정도였다. 이것은 피복판 모재의 결정립 크기가 길이방향으로 평균 $15\mu\text{m}$, 두께방향으로 평균 $4\sim 5\mu\text{m}$ 정도이고 봉단마개 모재의 결정립크기가 $12\sim 15\mu\text{m}$ 인 것과 비교해 볼 때 자력 저항용접부는 결정립이 미세화되었고, 다중 임펄스 용접부는 결정립이 성장되었음을 나타낸다. 이와

같은 α -결정립 크기의 차이는 자력저항용접이 다중 임펄스 저항용접에 비해 입열량이 적고 용접시간이 빠르기 때문으로 사료된다. 다시 말해 자력 저항용접은 다중 임펄스 저항용접에 비해 가열속도가 커서 β 결정립의 성장이 억제되어 β 결정립계가 많아지므로 α 상의 핵생성 장소가 많을 것이고, 냉각속도 또한 크므로 α 상이 충분히 성장하지 못해 미세한 판상을 형성하는 것으로 생각된다. 따라서 자력 저항용접부는 재결정 후 초기의 결정립 성장이 일어나기 전까지의 단계이고 다중 임펄스 용접부는 재결정 후 충분한 결정립성장이 일어난 상태로 분류된다.

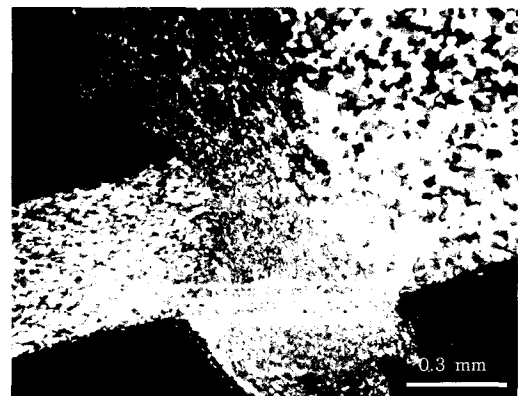


Fig. 7 Optical micrograph of magnetic force resistance weld

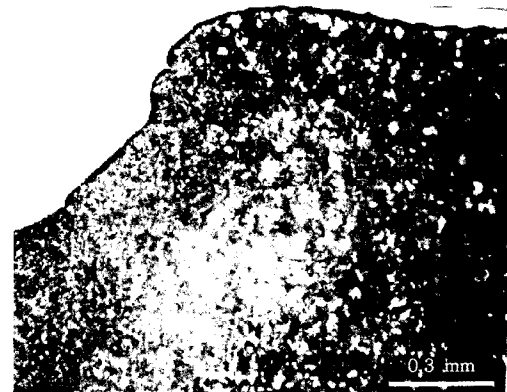


Fig. 8 Optical micrograph of multi-impulse resistance weld

3.3 미세경도

자력 저항용접과 다중 임펄스 용접으로 이루어진 용접부의 미세경도(500g Load Knoop Number) 측정값을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보면 완전 어닐링 된 봉단마개 모재부위에서 $170\sim 190\text{KHN}$, 응력 제거 열처리된 피복판 모재부위에서 $180\sim 200\text{KHN}$ 그리고 β -열처리된 용접부에서 $230\sim 280\text{KHN}$ 범위의 경도값을 나타내었다. 용접부의 미세경도 증가에 대

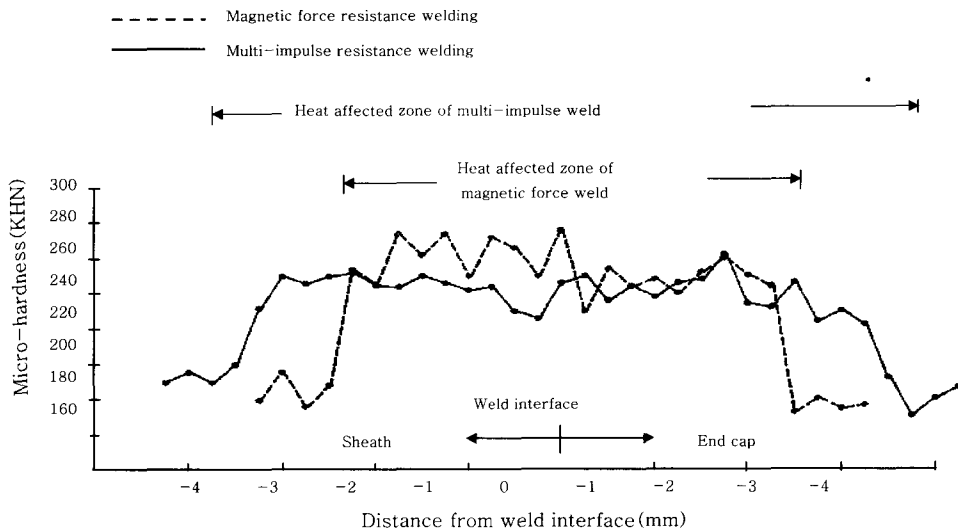


Fig. 9 Microhardness variation along sheath/HAZ/end cap

한 이유는 다중 임펄스 저항용접에서는 $\beta \rightarrow \alpha$ 상변태 결과 초기 β 결정립내에 미세한 Widmanstatten α 의 생성 때문이고 자력 저항용접부는 용접에 의한 $\beta \rightarrow \alpha$ 로의 급냉으로 α 결정립의 미세화와 martensitic α' 의 생성 때문으로 사료된다. 이들 저항용접부는 피복관과 봉단마개를 가열한 후 가압에 따른 소성변형과 확산에 의해 형성되는데, 자력 저항용접부의 미세경도 측정결과를 Fig. 9에서 살펴보면 피복관 쪽에서 소성변형이 되어 이루어진 용접부가 봉단마개 쪽에서 소성변형되어 이루어진 용접부에 비해 미세경도값이 조금 높게 나타났다. 이것은 자력 저항용접부의 경우 피복관이 봉단마개보다 훨씬 얇기 때문에 더 많은 소성변형량에 의한 가공경화 때문으로 생각된다. 왜냐하면 저항용접 과정을 연속적인 소성변형과 재결정으로 간주할 때 용접시간이 1/60sec로 매우 짧고 또한 결정립 성장이 일어나지 않는 상태이므로 동적인 재결정이 일어나지만 소성변형에 의한 변형 에너지가 잔존하기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

Zircaloy-4 피복관을 밀봉시키는 2가지의 전기저항 용접방식을 고찰하고, 각각의 용접부에서 미세조직을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1 사이클의 용접전류를 사용하는 자력 저항용접은 8 사이클의 용접전류를 사용하는 다중 임펄스 저항용접에 비해 열입량이 적고 용접시간이 빠르기 때문에, 실험에서 사용된 용접조건에서 자력 저항용접과 다중 임펄스 저항용접에 의한 열영향부의 크기가 각각 0.6mm, 0.8mm 정도이고 열영향부에서 α 결정립의

크기가 각각 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, $15 \sim 18 \mu\text{m}$ 정도이었다.

2) 자력 저항용접부의 미세조직은 재결정 후 초기의 결정립 성장이 일어나기 전까지의 단계이고, 다중 임펄스 저항용접부의 미세조직은 재결정 후 충분한 결정립 성장이 일어난 상태로 사료된다.

3) 다중 임펄스 저항용접부 접합 계면의 미세조직은 β 결정립계에서 α 상이 핵생성, 성장되어 형성되는 parallel plate 형태의 Widmanstatten 조직이었고, 자력 저항용접부는 접합계면에서 빠른 냉각속도에 기인한 martensitic α' 조직이었다.

4) 용접부의 미세경도는 230~280KHN의 범위로써 Zircaloy-4 피복관과 봉단마개 모재의 미세경도보다 높았으며 이는 $\beta \rightarrow \alpha$ 상변태에 따라 β 결정립이 미세화되거나 β 결정립내에 미세한 판상이 형성되었기 때문이다.

참 고 문 헌

1. W. C. Durant : Manufacturing CANDU fuel, Canadian General Electric Company Limited, Sept (1972)
2. J. W. Lee, J. H. Koh : Mechanical Strength and Ultrasonic Testing of End Cap Welds in Pressurized Heavy Water Reactor Fuel, J. of the Korean Welding Society, 7-12 (1989), 60~69 (in Korean)
3. K. T. Bates : Resistance Welding of Zircaloy end Closure Joints, AECL-2814, (1966)
4. R. F. Boolean : Magnetic Force Welding Application at Battle Northwest, BNWL-422 (1967), 15~21
5. L. E. Mills : Zircaloy Welding Techniques for Plutonium Recycle Program UO₂ Fuel Element Fabrication, Welding Journal, 40-2(1961), 141~151
6. J. J. Vage : Methods for End Capping Zirconium-

- Clad Reactor Fuel Pins, *Welding Journal*, **38-2** (1959), 78~84
7. A. M. Olmedo : Microstructure of the Weld Region in Resistance Welded Zircaloy-4, *J. of Mat. Sci.*, **15** (1980), 1527~1532
 8. R. A. Bordoni : Microstructure in the Weld Region in Seam Welded and Resistance Welded Zircaloy-4 Tubing, *J. of Mat. Sci.*, **16** (1981), 1527~1535
 9. R. A. Holt : The Beta to Alpha Phase Transformation in Zircaloy-4, *J. of Nucl. Mat.*, **35** (1970), 322~334
 10. G. Ostberg : Metallographic Study of Isothermal Transformation of Beta Phase in Zircaloy-2, *Jernkont. Ann.*, **145** (1961), 119~131
 11. A. W. Schueleer : Magnetic Force Butt Welding for Nuclear Cladding, *Welding Journal*, **47-8** (1968), 638~643
 12. E. J. Funk : Recent Development in Magnetic Force Welding, *Welding Journal*, **36-6** (1957), 576~582
 13. American Welding Society, *Welding Handbook*, **Vol. 3**, 7th ed. (1980), Ch.1~3
 14. American Welding Society, *Resistance Welding Theory and Use*, 4th ed., (1973), 60~90
 15. Westinghouse Canada Inc., *End Cap Welding Manual*, **Vol. 6** (1985), 115~150
 16. J. M. Rigsbee and H. T. Aaronson : Growth Mechanism of Widmanstätten Ferrite Plate in the Austenitic Steels, *Acta Met.*, **27** (1979), 365~373