

研究論文

大韓熔接學會誌
第9卷第4號 1991年12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.9, No.4, Dec., 1991

중수로핵연료 봉단마개 용접부의 기계적 특성과 초음파 시험

이정원* · 최명선* · 정성훈* · 고진현**

Mechanical Strength and Ultrasonic Testing of End Cap Welds in Pressurized Heavy Water Reactor Fuel.

J.W. Lee*, M.S. Choi*, S.H. Jung*, J.H. Koh**

Key Words : Resistance Upset Welding(저항업셋용접), Weld Line(용접선결함), Ultrasonic Testing(초음파시험), Phase Shift(위상지연), Micro Fissure(미소균열), Mechanical Strength(기계적강도)

Abstract

The weld quality of end cap welds in Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) Fuel is extremely important for the fuel performance in the nuclear reactor. The quality of resistance upset welds is currently evaluated mainly by the metallographic examination although it reveals only two weld cross-sections in a circumference welds.

This investigation was, firstly, carried out to determine whether the ultrasonic examination would be applied to detect weld defects in the end cap welds and, secondly, to measure the mechanical strength of upset butt welds as a function of phase shift percentage.

The major results obtained in this study are as follows:

1. The weld current and amount of upset shrinkage linearly increased with increasing the phase shift percentage.
2. Above the phase shift 55%, the defects in the welds were completely eliminated and the amount of sound weld was over the thickness of cladding tube.
3. The ultrasonic testing well detected such defects in the end cap welds as upset external crack, upset split, corner crack and irregular weld flash comparing with the results of metallography.
4. The micro-fissure in the corner of the end cap welds was reliably detected by ultrasonic testing.
5. The mechanical strength in the welds increased with increasing phase shift percentage but the fracture didn't occur in the welds above 55%.

* 정회원, 한국원자력연구소

** 정회원, 한국산업기술대학

1. 서 론

가압중수형 원자로(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR)는 우리나라 상업용 원자로의 주종을 이루고 있는 가압경수로에 비해 중수(D₂O)를 감속재 및 냉각재로 또, 천연우라늄을 핵연료로 사용하는 것이 그 특징이다.

중수로형 핵연료 제조는 이산화우라늄을 압분, 성형한후 약 1700°C의 온도에서 소결된 펠렛(Pellet)을 지르코늄(Zirconium)합금인 지르칼로이(Zircaloy)-4 피복관 내부에 장전한 후 피복관 양단을 동일 재료로 제조된 봉단마개로 밀봉 용접하여 핵연료봉을 만든다. 이 핵연료봉 37개를 모아 양단에 접합판을 용접하여 원통형의 집합체로 조립한 것을 핵연료다발(fuel bundle)이라고 하며 이것이 원자로에 장전 연소된다. 이 때 실제로 원자로에서 연소되는 것은 이산화우라늄 소결체이며 피복관은 연소중 핵생성 물질의 확산을 차단하는 역할을 한다. 따라서 원자로 가동중 연료봉에서의 결함은 피복관내 핵분열 물질을 냉각수로 직접 누출할 수 있어 원자로 오염 확산의 문제를 야기할 수 있다. 그러므로 원자로 내에서 양호한 상태로 핵연료를 유지하고 핵분열 물질의 누출을 방지하기 위해서는 연료봉에서 어떤 물질도 빠져 나올 수 없도록 피복관 및 봉단용접부의 건전성 향상을 위한 철저한 품질관리와 기술개발이 요구된다.

중수로형 핵연료의 봉단마개 용접은 저항업셋버트(resistance upset butt)용접방법이 널리 사용되고 있다¹⁻³⁾. 용접물인 피복관과 봉단마개의 고유저항과 접촉저항에 의하여 발생하는 용접열과 가압력에 의한 소성변형 결과에 따른 단조효과로 용접덧살(weld flash)이 발생하여 모서리(re-entrant corner)가 형성되며 이 부분은 응력집중을 야기하고 미소균열의 발생소가 된다. 또 용접접합 계면에서 용접되지 않은 부분인 용접선결합(weld line)의 생성과 용접부의 미세조직 및 결정학적 조직변화 등은 장기간 원자로 분위기에서 요오도 유인 응력부식균열(Iodine Induced Stress Corrosion Cracking, I-SCC)생성의 원인이 된다^{4,5)}. 이와같이 용접부의 용접결합 특히 용접선결합은 균열전파를 조장하고 원자로 가동중 핵분열 물질의 누출과 직결되므로 용접부 건전성은 원자력발전소

의 안전성에 아주 중요하다⁶⁾.

핵연료 제조시 봉단마개 용접부의 품질관리는 미세조직검사에 주로 의존하고 있으나 이는 용접부의 원주방향에서 단지 두 단면만이 확인될 뿐이므로 용접중 발생하는 미소균열 및 불연속 등으로 인한 원자로내 연소중 균열의 생성 및 성장에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 조사하기에는 충분하다고 할 수 없다. 그래서 용접부위의 100% 검사가 가능한 비파괴 검사가 요구된다.

봉단마개 용접부의 비파괴검사는 덧살발생과 복잡한 형상때문에 방사선투과시험(radiographic examination)보다는 초음파시험(ultrasonic testing)이 원주방향의 용접부를 검사하는데 더욱 적합하다.

본 실험에서는 중수로 핵연료봉 봉단마개 용접부를 원주방향으로 초음파 검사를 행하여 그 탐지능력(detectability)을 조사하였으며 또 봉단마개 용접공정 감시(in-process monitoring)기술로의 개발 가능성을 검토하였다. 이를 위하여 용접조건을 변화시켜 용접부 형상 및 용접선결합 등을 다양하게 생성케하여 초음파 시험으로 측정된 결과를 분석하고 미세조직 검사 결과와 비교 해석하였다. 또 용접 조건에 따른 용접 건전성과 초음파 시험에서 탐지된 결함의 영향을 기계적 시험으로 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편 용접

봉단마개 용접부는 두께 0.4mm, 외경 13.08mm, 길이 50cm의 지르칼로이-4 피복관과 봉단마개가 맞닿는 버티움으로 용접될 피복관 끝을 120°로 돌출되게 가공하였다(Fig. 1). 이산화우라늄 소결체를 피복관에 장전한후 용접 밀봉하였으며 용접은 다중사이클 저항업셋 용접기로 수행되었다⁷⁾. 용접부의 업셋(또는 덧살)모양을 변화시키고 또 용접계면에 용접선결합을 생성하기 위해 용접열 생성을 지배하는 위상지연(phase shift)이외의 조건들은 고정후 위상지연(phaes shift)을 40%에서 75%사이로 변화시켰다. 용접후 초음파검사 및 기계적성질 조사를 위하여 용접부의 외부 덧살은 기계가공으로 제거하였다.

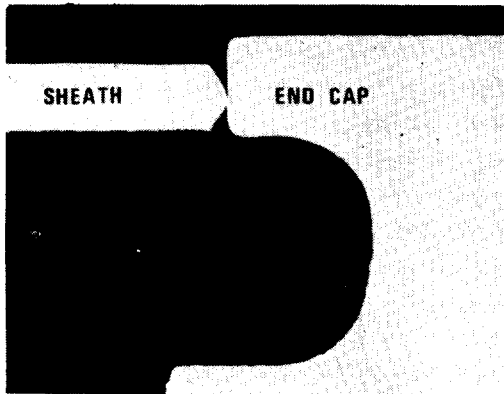


Fig. 1 Butt joint design for resistance upset welding in the HWR fuel

2.2. 초음파 검사

2.2.1. 초음파 장비 및 탐촉자

저항업셋 용접부에 존재하는 불연속 및 불규칙한 용접덜살 형상과 모서리를 탐지하기 위한 초음파 검사는 수침 펄스에코 (immersion pulse-echo) 방법을 사용하였으며 감도 (sensitivity)를 증가시키기 위해 집속된 초음파빔이 피검체내에서는 횡파 (shearwave)로만 진행되도록 경사빔 시험 (angle beam test)을 수행하였다. 사용된 초음파빔의 특성은 다음과 같다⁸⁾.

- 중심부 주파수 (central frequency) : 15MHz
- 주파수밴드폭 (frequency band-width) : 10 MHz
- 펄스폭 (pulse width) : 100nSec
- 수중 초점거리 (focal length in water) : 29mm
- 빔직경 (beam diameter) : 0, 6mm (at 6dB down amplitude)

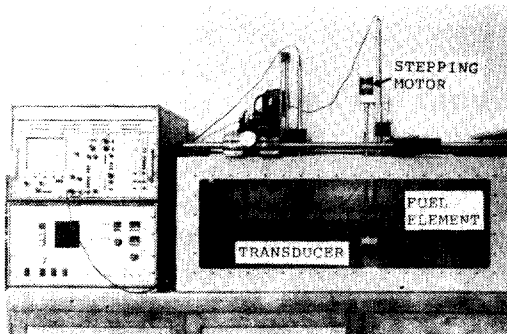


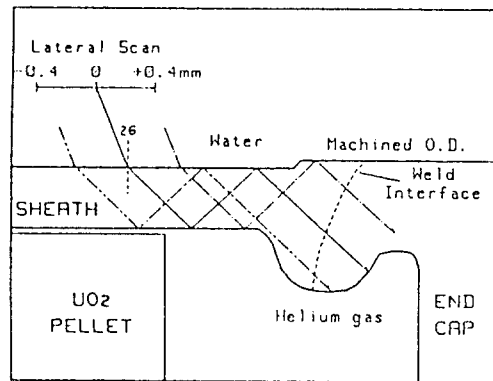
Fig. 2 Ultrasonic testing equipment

여기서 수중 초점거리와 빔 직경은 직경 0.6mm의 강구 (steel ball)를 사용하여 측정하였다. Fig. 2는 저항업셋 용접부를 시험하기 위한 초음파 탐상 장비이다.

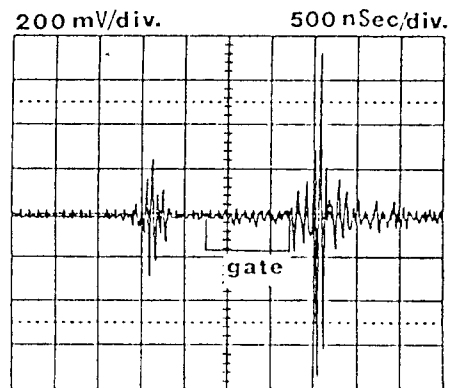
핵연료봉은 물탱크 내에 설치된 고정치구를 이용하여 수직으로 위치되며 검사되는 용접부만이 물속에 잠기고 반대편 끝은 연료봉을 회전시키기 위한 스텝핑모터 (steppingmotor)에 연결된다.

2.2.2. 초음파 주사 (Ultrasonic scanning)

Fig. 3(a)에서 보는 바와같이 초음파빔은 26°로 입사된다. 지르칼로이와 물속에서의 초음파의 속도가 각각 2340m/sec와 1480m/sec인 것을 고려하면, 이때의 초음파빔의 굴절각은 Snell의 법칙에 의해 45°가 된다. 그래서 횡파빔이 피복관 내부에 1/2 스킵거리



(a)



(b)

Fig. 3 Illustration of ultrasonic scanning principle for end cap welded fuel elements(a) and oscilloscope trace of sound weld(b)

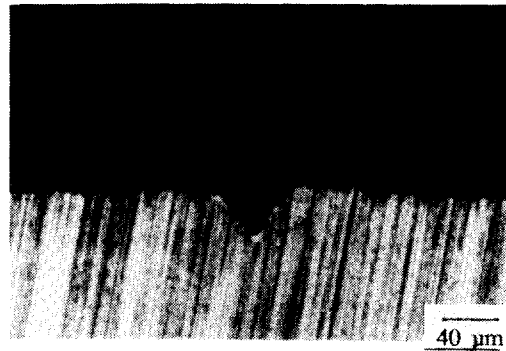
(skip distance)를 진행하는데 약 500nsec가 소요된다. 모든 초음파빔은 피복관을 1스킵한 후 용접부로 입사된다. 이것은 입사빔의 크기가 유한함으로 기계가 공시 생성된 피복관과 봉단마개 사이의 계단형상 부근으로 부터의 직접반사에 의한 어떤 방해물을 피하기 위함이다. 그리고 초음파빔으로 용접부위 전체를 탐상하기 위해서는 그 입사점이 연료봉의 축을 따라 어느 정도 이동되어야 한다. 이 같은 길이방향 주사(lateral scan)의 중심위치 "0"는 내면 용접덧살과 헬륨가스의 경계에서 반사된 뒷벽반향(back wall echo)이 가장 크게 되는 위치로 정하였다. 정상적인 경우 내면 용접부 덧살의 두께는 피복관의 두께와 거의 같다. 그래서 길이방향 주사의 폭은 피복관 두께의 두배이다.

Fig. 3(b)는 초음파빔이 길이방향 주사의 "0"점으로 입사될때 건전한 용접부위에서 얻어지는 전형적인 오실로스코프 트레이스(oscilloscope trace)이다. 왼쪽의 작은 신호는 입사점에서의 표면거칠기 때문에 생긴 표면반향(surface echo)이고 이로부터 2스킵거리인 2 μ sec정도 떨어져 있는 우측의 큰 신호가 뒷벽반향이다. 그러므로 용접결함을 탐지하기 위한 gate pulse는 1스킵거리에서 시작하여 뒷벽반향(back wall echo)앞에서 끝나도록 설치된다.

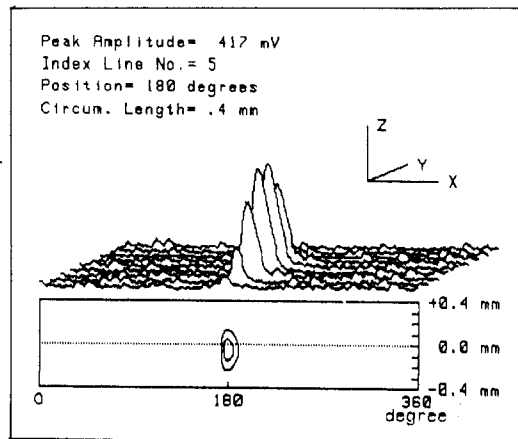
2.2.3. 감도교정 및 거리진폭수정 (Sensitivity calibration and distance amplitude correction)

감도교정은 Fig. 4(a)에서 보는 바와같이 인공결함이 피복관 외면에 가공된 표준시편을 이용하여 수행하였다. 이 표준결함은 깊이가 피복관 두께의 10%에 해당되는 0.04mm이며 길이가 원주방향으로 0.4mm인 V자형 노치(notch)이다.

Fig. 4(b)는 표준시편에 대한 초음파검사 결과로 modified C-scan map과 equi-amplitude contour map으로 나타낸 것이다. Modified C-scan map의 X, Y, Z 축은 각각 핵연료봉의 원주방향(circumferential scan), 길이방향(lateral scan)과 용접결함 에코높이를 나타내고 equi-amplitude contour map은 X, Y평면에서 결함 신호의 크기가 같은 위치들을 서로 연결한 것으로 결함의 위치, 크기 및 분포 등을 직관적으로 알 수 있게 한다. 거리진폭교정(DAC) 곡선 또한 Fig. 4(a)에서 보여진 것과 같은 인공 표준노치를 관내 외면에 가공된 표준시편을 이용하여 작성되었으며 이의 수행은 실험에 사용된 초



(a)



(b)

Fig. 4 The reference notch on the outer surface of a tube(a) and its echo height by a modified c-scan map(b)

음파 탐상기에 내장된 전자회로에 의해 자동적으로 수행되게 하였다.

그래서 핵연료봉에 대한 자동초음파 탐상결과를 Fig. 4(b)의 인공표준 시편에 대한 결과와 비교함으로써 용접결함의 위치, 크기 및 분포 등의 특성을 평가할 수 있게된다.

2.3. 용접부의 기계적 강도시험 및 미세조직검사

초음파검사에 사용되었던 시편을 봉단마개 끝에서 20cm 길이로 절단하여 인장 및 밀봉파열 등 기계적 강도시험에 사용되었다. 인장시험을 위해 봉단마개에 구멍을 뚫어 길이 8cm, 직경 7mm의 스크류볼트를,

피복관 내부에는 환봉을 삽입하여 인장시험하였으며, 이 때의 크로스헤드(crosshead)속도는 0.5mm/min였다. 밀봉과열시험은 피복관에 스웰지록 핏팅(swagelock fitting)으로 밀봉한후 유압시스템에 연결하여 피복관 내부를 0.23MPa/sec로 가압하여 파열시켰다. 두 시험에서 강도의 값은 각 용접조건에서 5개의 시편을 사용 그 평균값을 사용하였다.

용접부의 용접조건 변화에 따른 용접선결함, 용접업셋현상을 조사하기 위해 50% H₂O, 47% HNO₃, 3% HF(Vol. %)의 화학용액에 부식하여 광학현미경으로 용접부를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용접업셋 현상 및 용접건전성

저항업셋 용접기의 제어장치에서 위상지연(phase shift)을 40%에서 75%사이로 조절함에 따른 용접전류 및 업셋량과의 관계를 보여준 것이 Fig. 5이다. 위상지연이 증가함에 따라 실제 용접시 사용된 용접전류는 증가하며 이때의 소성변형량인 업셋량도 증가함을 보여준다.

이는 위상지연이 40%에서 75%로 증가함에 따라 용접중 통전되는 전류의 이용율이 증가하였기 때문이다⁹⁾. 따라서 통전 용접전류가 증가하였으며 또, 이로 인해 용접열 발생이 많아져 용접중 소성변형도 증가하게 된 것이다. 특히 용접전류 및 업셋량 변화는 위상지연에 대해 거의 선형적 관계를 유지하고 있어 이들

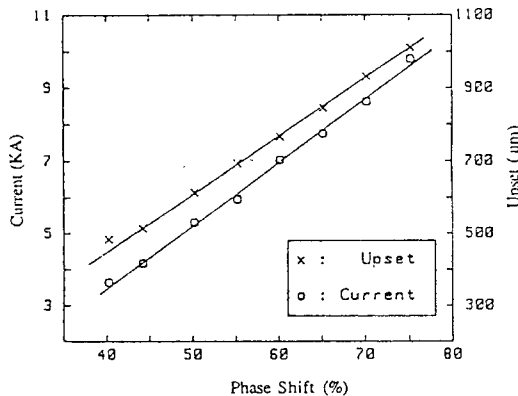


Fig. 5 Effects of phase shift in the main weld cycle on the weld current and the amount of upset

변수간 관계를 구해보면 다음 (1), (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = 0.17X - 3.3 \quad (1)$$

$$L = 15.8X - 135 \quad (2) \quad 40\% \leq X \leq 75\%$$

여기서 I는 용접시 사용된 전류(kA), X는 위상지연(phase shift%), L은 업셋량(µm)이다.

상기의 용접변수간 관계식은 실제 용접작업에 있어 아주 유용하다. 조정 가능한 변수인 위상지연 제어에 따른 용접시의 용접전류와 업셋량을 예측할 수 있어 건전한 용접성 확보를 위한 최적 용접변수 모색에 좋은 지침이 된다.

Fig. 6은 위상지연의 봉단마개 용접에서 건전용접(sound weld)에 미칠 수 있는 영향을 조사한 결과이다. 위상지연이 증가함에 따라 봉단마개와 피복관사이 계면에서의 용접되지 않는 용접선결함(weld line)은 급격히 감소했으며, 위상지연이 약 50%에서는 완전히 소멸되었다. 이것은 위상지연이 증가할수록 건전용접량은 증가함을 의미하는 것으로,

$$Q = I^2 R t \quad (3)$$

여기서 Q: 발생열(joule), I: 전류(ampere), R: 저항(ohms), t: 통전시간(sec)

(3)식과 같이 용접발생열은 용접전류의 제곱에 비례하므로 위상지연 증가에 따라 발생열이 크게 증가하였기 때문에, 이에 따른 용접계면에서의 원자들의 확산이 증대되고 또 업셋발생을 위한 높은 소성변형은 용접계면에서의 전위생성에 의한 확산도 촉진되었기 때문이라 사료된다.

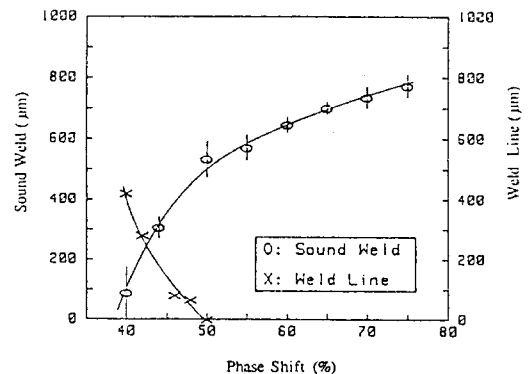


Fig. 6 Effects of phase shift in the main weld cycle on the sound weld in the end cap welding

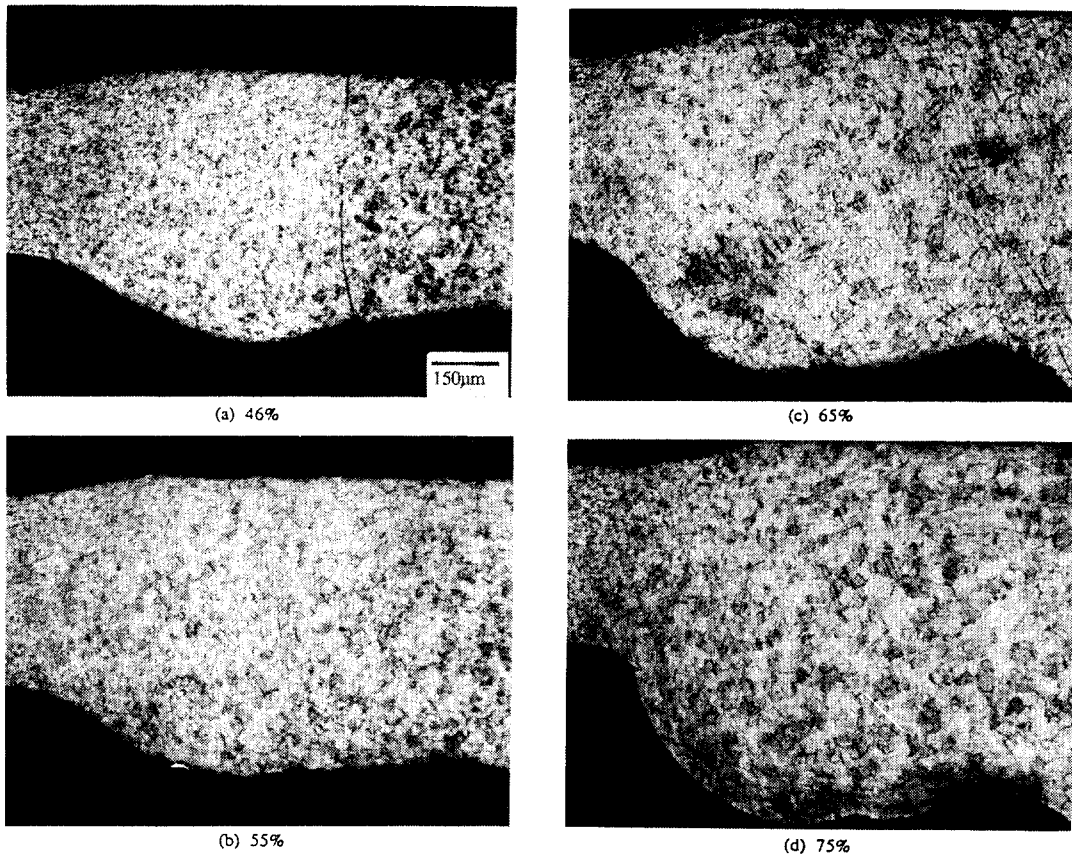


Fig. 7 The variation of the weld upset contour with phase shift in the main weld cycle

Fig. 7은 위상지연 변화에 따른 용접업셋 형상의 변화를 보여준 것으로 위상지연 46%에서는 용접선결함이 발생하였으나 위상지연 55%에서 피복관 두께에 해당되는 건전용접이 0.42mm로서 용접선결함이 거의 소멸되었다(Fig. 7(b)). 그러나 위상지연 증가로 업셋크기가 증가하고 특히 피복관과 업셋사이 용접덧살 크기에 따른 모서리 형상에서의 곡률구배가 용접열이 증가함에 따라 작아졌다(Fig. 7(d)).

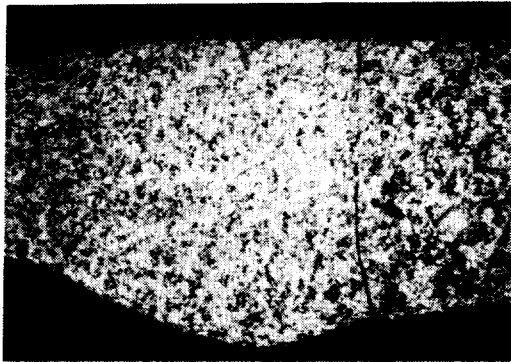
이와같이 곡률구배가 작은 용접업셋은 모서리 형상 때문에 응력집중의 장소가 되고 또 미소균열이 이미 생성된 경우에는 핵분열 물질로서 재료를 취화시키는 요오드(iodine)등의 분위기에서 점점 성장하여 용접부를 파괴할 수 있다^{4,5)}. 따라서 과도한 위상지연으로 용접한 봉단마개 용접부는 곡률구배가 작은 모서리 형상 때문에 원자로내 연소중 미소균열의 생성 및 전파 가능성이 높아져 오히려 용접부 건전성을 해칠 위험성이 있다.

3.2. 초음파 검사

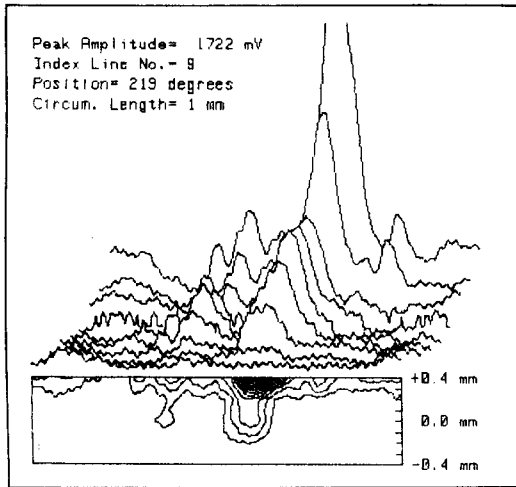
Fig. 8(a)은 봉단마개와 피복관 사이의 계면에서 용접되지 않은 부분인 용접선결함으로 위상지연 46% 조건에서 용접된 시편이다. Fig. 8(b)는 이 용접선결함에 대한 초음파 검사에 의한 C-scan map으로서 미세조직 사진이 얻어진 위치에서의 최고진폭의 에코높이는 1722mV로 표준시편의 417mV보다 4배 이상이며 원주방향으로 길이가 1mm나 된다.

더우기 최고 진폭 위치에서의 길이방향 주사에는 -0.2mm에서+0.4mm까지의 영역에 걸쳐 표준 노치보다 큰 신호들이 나타난다. 이것은 용접부 두께 방향으로 거의 용접되지 않은 결함을 암시하는 것으로 미세조직 검사와 잘 일치하고 있다.

이와같은 용접선결함은 봉단마개와 피복관 사이의 불균일한 가열결과 때문에 용접계면에서 발생된 열이 낮았기 때문으로 이러한 용접결함을 저온용접(cold



(a)



(b)

Fig. 8 Metallographic cross-section of a weld containing weld line(a) and its modified c-scan map(b)

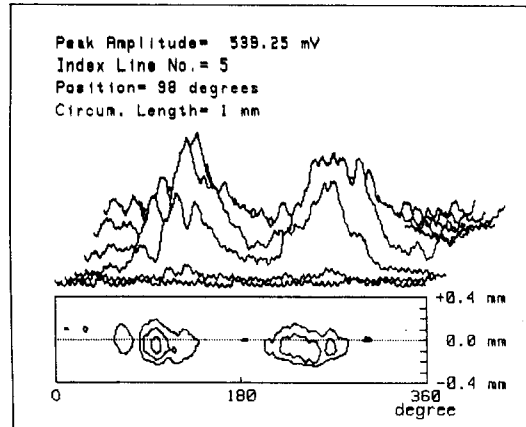
weld)이라 부르며 보통 용접계면 전역에서 용접선결함이 존재하기 쉬우며 때로는 용접계면을 따라 내부 업셋 접촉면이 보다 넓게 फै는 용접결함, 즉 업셋스프리트(weld split)이 자주 나타난다. 이는 용접부의 미세조직 결과에서 결정립 성장이 되지 않았음이 이를 뒷받침 해 준다. 이것은 용접부의 오염, 용접에 영향을 미치는 장비의 기계적인 배열 불량 및 전극마모 등이 그 원인이 될 수 있다.

이러한 저온용접에 의한 업셋스프리트은 초음파 시험 결과에서는 +0.4mm 근처의 길이방향주사에서 결함 신호로 나타나며 원주방향주사에서는 그 폭이 매우 넓

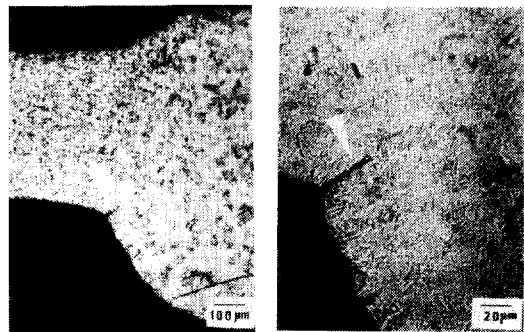
게 나타나는 것이 보통이며 초음파 검사 이외에도 육안 또는 헬륨누출검사(Helium leak test)에 의해서도 탐지가능한 경우도 있다¹⁰⁾. 그리고 용접계면이 부분적으로 기공상태로 불연속적으로 남아있는 용접선결함은 본 실험에서 사용한 초음파 검사로서는 탐지 되지 않을 수도 있다.

한편, 위에서 언급된 핵연료봉의 초음파검사 과정에서 우리는 지금까지의 미세조직 시험에서는 전혀 보고된 적이 없으나 원자로내에서 핵연료봉의 건전성에 매우 큰 영향을 미칠 수 있는 새로운 용접불연속을 발견하였다. 이 불연속은 피복관의 모재와 열영향부위의 내부경계인 모서리에서 국부적으로 관측되는 미소균열(microfissure)이다.

Fig. 9(a)는 이러한 미소균열들을 함유한 용접부위



(a) A modified c-scan map



(b) Micro-fissure

(c) Enlargement of micro-fissure.

Fig. 9 Ultrasonic test results and metallographic cross sections for micro-fissures

의 초음파검사 결과를 보여준다. 이들 결함신호의 최고 진폭은 약간 음(-)의 길이 방향 주사 위치에서 나타난다. Fig. 9(b)는 최고진폭의 위치에서의 미세조직 시험결과이며 Fig. 9(c)는 이를 확대한 것이다. Fig. 9에서 관측된 미소균열의 크기는 인공표준 결함보다 약간 크다. 그러나 정상작업조건에서 용접된 대부분의 용접부위에서 관측된 미소균열의 크기는 인공표준 결함보다 작았다. 용접부가 비록 인공표준 결함보다 작은 크기의 미소균열을 포함하고 있어도 이는 원자로내에서 장기간의 핵분열성 분위기에 노출되면 응력집중이 될 기하학적 형상과 수소나 요오드 같은 핵분열 생성물질에 의해 야기되는 균열 생성 및 전파 장소가 될 수 있으며 이는 원자력 발전소에서 발생했던 봉단마개 용접부의 균열전파 및 봉단마개 분리 등의 파괴 원인이 될 가능성이 크다. 그러므로 이 미소균열과 봉단 용접부위의 원주방향 균열과의 상관관계는 앞으로 보다 체계적으로 연구되어야 할 과제로 생각된다. 더욱이 핵연료봉 파손의 대부분은 용접면에서의 불연속 또는 용접선결합에서 보다는 바로 이 미소균열이 존재하는 부분에서 발생하였다는 사실은 이 연구의 좋은 결과를 기대케 하기에 충분하다¹¹⁾.

그러나 현재 핵연료제조 품질보증절차에서 초음파 검사는 필수불가결한 것은 아니다. 이는 피복관이 아주 얇고 또 봉단마개 용접부의 형상이 복잡하여 그 결과의 해석과 신뢰성에 아직은 의문이 제기되고 있기 때문이다. 본 실험에서는 봉단마개 용접부에 가장 큰 문제가 되는 원주방향 균열을 예방하기 위한 하나의 방안으로 초음파검사의 가능성을 확인한 것에 큰 의의가 있다 하겠다.

3.3. 기계적 강도

Fig. 10, 11은 각각 위상지연 변화에 따른 인장시험과 밀봉파열시험 결과이다. 비록 두 시험에서 용접부의 강도는 하중방법 (loading mode)이 다르기 때문에 차이는 있지만 위상지연 50%까지는 급격히 증가하였고 그 이상에서는 거의 변화가 없는 같은 경향을 보여주었다.

위상지연 50%까지의 시편들은 큰 용접선결합 존재로 용접계면에서 파괴가 발생하였지만 50% 이상에서는 용접부가 아닌 모재인 피복관에서 파괴가 발생하였으며, 55% 이상에서의 강도는 피복관의 인장 및 파열 강도에 각각 해당되는 것으로 의도한 용접부의 기계적

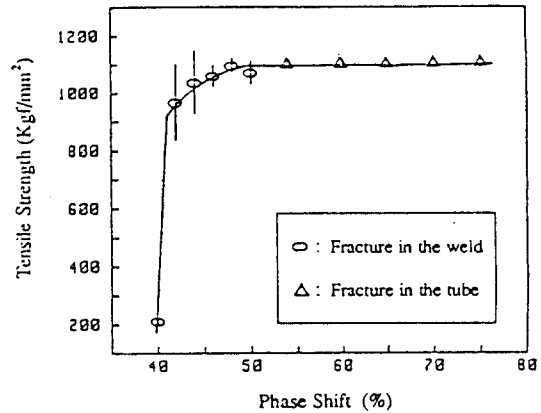


Fig. 10 Tensile strength as a function of phase shift in the main weld cycle

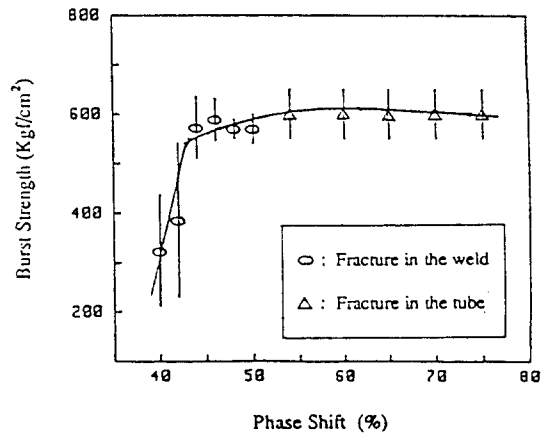


Fig. 11 Burst strength as a function of phase shift in the main weld cycle

강도가 아니므로 큰 의미는 없다. 그러므로 앞서 언급한 초음파 시험에 의해 탐지된 모서리 부위의 미소균열은 사실상 용접부의 기계적 특성에는 별 영향이 없음을 알 수 있겠다.

이들 기계적강도 시험결과를 토대로 지르칼로이-4 중수로핵연료 봉단마개 용접에서 양질의 건전용접을 얻기 위한 위상지연은 55% 이상이 가장 적합하다. 그러나 지나친 위상지연(75%)은 오히려 용접부와 피복관 사이 곡률구배가 작은 모서리 형상때문에 연소중 응력집중 및 용접잔류응력 등에 의한 균열생성 및 전파장소가 될 위험성이 있으므로 과도한 위상지연 또한 지양되어야 하겠다.

4. 결 론

중수로핵연료 봉단마개 용접부의 용접건전성 및 품질 향상을 위해 초음파 검사를 적용하여 용접부결함에 대한 탐지능력을 조사하고 그 결과를 미세조직 검사결과와 비교 해석하였으며 또 용접조건에 따른 용접성 평가 및 기계적 시험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 핵연료 봉단마개 용접에 있어 조정가능한 변수인 위상지연(X)증가에 따른 용접전류(I) 및 업셋량(L)은 선형적으로 증가하며 다음의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\begin{aligned} I &= 0.17X - 3.3 \\ L &= 15.8X - 135 \end{aligned} \quad 40\% \leq X \leq 75\%$$

2) 위상지연 변화에 따른 용접건전성은 위상지연 55% 이상부터는 용접결합들이 완전히 소멸되며 건전용접량이 피복관 두께 이상이 되었다.

3) 용접부에 대한 초음파 검사결과 미세 용접선결함을 제외한 용접결함에 대한 탐지 능력이 인정되며 특히, 업셋스프리트 결함 및 용접부 형상에 대한 해석은 미세조직검사 결과와 잘 일치된다.

4) 초음파 검사에 의해 과도한 용접업셋으로 인한 피복관의 모재와 용접열영향부의 내부경계에 국부적으로 존재하는 미소균열(micro-fissure)을 탐지할 수 있었다.

5) 용접부에 대한 인장시험 및 밀봉파열 시험결과 위상지연 55%까지는 위상지연 증가에 따라 급격히 강도가 증가하나 그 이상에서는 용접부 파괴가 아닌 피복관 파괴가 발생했다.

Reference

- 1) Vagi, J.J. and Martin, D.C.: Development of methods for end capping PWR fuel elements, *Welding Journal*, Nov. (1958), pp. 499s~506s.
- 2) Vagi, J.J., Koppenhofer, R.L. and Martine, D.

- C.: Methods for end capping Zirconium-clad reactor fuel pins, *Welding Journal*, Feb. (1959), pp. 78-s~84-s.
- 3) Kanne, W.R. Jr.: Solid - state resistance welding of cylinders and spheres, *Welding Journal*, May, (1986), pp. 33-38.
- 4) 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.
- 5) Brunisholz, L. and Lemaignan, C.: Iodine induced stress corrosion of Zircaloy fuel cladding, *ASTM-STP 933*, (1987), pp. 700-716.
- 6) Truant, P.T.: CNADU fuel performance: power reactor experience, *AECL-MISC-250-3 Rev. 1*(1983).
- 7) J.H. Koh, et al.: An investigation of welding variables on resistance upset welding for end capping of HWR fuel elements, *J. Kor. Wel. Soc. Vol. 7, No. 2*, (1989), pp. 60-69.
- 8) M.S. Choi, M.S. Yang and K.S. Suh: Development of the automated ultrasonic flaw detection system for HWR nuclear fuel cladding tubes, *J. Kor. Nucl. Soc. Vol.20, No.3*, (1988), pp. 170-178.
- 9) A.F. Manz: *Welding power handbook*, Union Carbide Corporation, New York, N.Y(1973), p. 29.
- 10) A.S. Bain, W.R. Tarasuk, K.T. Bates and D.G. Hardy: The influence of design on fuel performance, *IAEA-SM-233/31*, (1979), pp. 79-95.
- 11) A.J. Hanis, J. Novak: Ontario hydro high burnup power Reactor fuel performance proceedings, *International Conference on CANDU Fuel*, CNS, (1989), pp. 227-269.