

핵연료 가공에 있어서 비파괴 검사기술의 응용

양명승, 서경수

한국에너지연구소

1984년 12월 20일 접수

Application of NDT Techniques in Nuclear Fuel Fabrication

Myung Seung Yang, Kyung Soo Suh

1. 서론

핵연료의 성능 및 건전성은 원자로의 안전운전 및 경제성에 직결되므로 Zero defect 를 요구하며 핵연료의 품질검사는 이러한 요구를 만족시켜야 한다.

본고에서는 현재 가동중인 월성원자력 발전소에 사용되는 CANDU 로용 핵연료에 대해서 언급하였다. CANDU(Canada Deuterium Uranium)형 원자로는 천연 이산화우라늄을 연료로 하고 냉각수와 감속재로서 중수를 이용하는 방법으로 원자로심은 약 380개의 압력관으로 구성되어 있으며 각각의 압력관에는 12개의 핵연료 다발이 장진되어 있다.

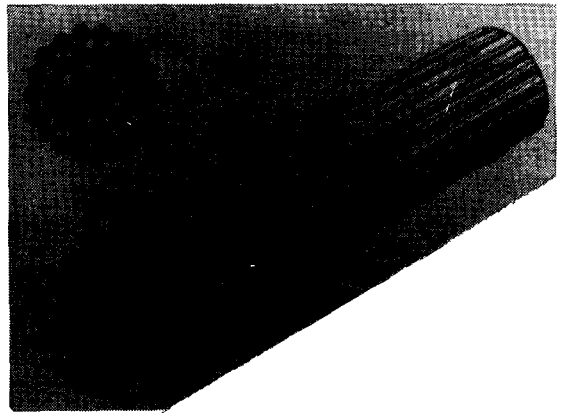
본고에서는 핵연료 다발의 구성요소와 제조공정을 간단히 설명한후에 핵연료 제조시 사용되는 비파괴 검사기술을 (A) 헬륨음 누출검사 (B) β -선 후방산란 (C) 초음파검사 (D) X-선 투과사진법 순으로 설명한다.

2. 핵연료의 구성 및 제조공정

Fig.1에 CANDU형 핵연료의 구성요소를 표시하였다.

하나의 핵연료 다발은 37개의 연료봉을 봉단 접합판으로 양단을 용접함으로써 구성된다.

각각의 연료봉은 이산화우라늄 소결체와 He 가스로서 채워져 있으며 피복관의 내면은 흑연으로 도포되어 있다. 연료봉은 봉단 양단에 마개를 끼우고 용접하여 밀봉한다. 연료봉의 외부에는



1. ZIRCALOY BEARING PADS
2. ZIRCALOY FUEL SHEATH
3. ZIRCALOY END SUPPORT PLATE
4. URANIUM DIOXIDE PELLETS
5. INTER ELEMENT SPACERS
6. END CAPS

Fig.1. CANDU fuel bundle

지지체와 간격체가 경납땜 방법으로 부착되어 피복관 사이에 일정한 간격을 유지시켜 냉각수의 흐름을 원활히 하고, 연료다발을 압력관 내에서 지지하는 역할을 하고 있다. 여기서 언급한 핵연료 가공이란 이산화우라늄분말을 핵연료다발로 제조하는 전공정 기술을 말한다.

Fig.2는 핵연료 제조공정을 간단히 보여주고 있다.

사용되는 핵연료는 천연 이산화우라늄 분말이며 그밖에 부품의 재료는 Zircaloy-4로 된 봉, 관, 판으로서, 이산화우라늄 분말은 성분검사등을 행

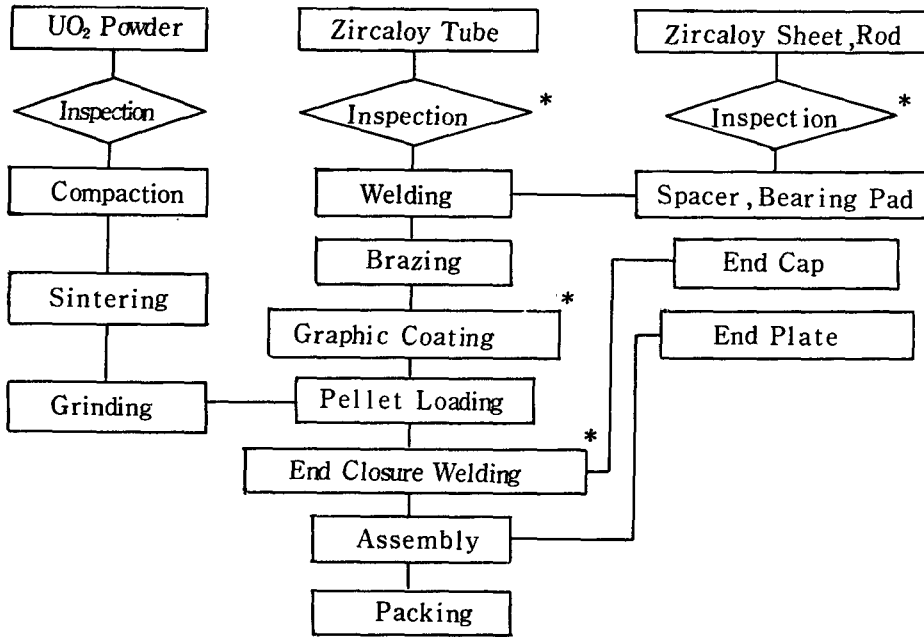


Fig. 2. Schematic flow diagram for nuclear fuel fabrication

한후에 윤활제를 섞은후 압분한다. 이 압분체를 1700℃의 수소분위기에서 4시간 소결하여 소결체를 제조한후 표면을 연삭 및 세척 건조시킨다.

또한 Zircaloy 판 및 봉으로부터 지지체, 간격체, 봉단접합판을 가공한후, 지지체와 간격체를 점용접에 의해서 피복관 외부의 지정된 위치에 고정시킨후, Be 을 이용하여 경납땜 방법으로 고정시킨다. 그후 피복관 내부를 흑연으로 도포시킨 후 소결체를 장전하고 He 을 충전시키면서 봉단마개를 용접하여 밀봉시킨다. 이러한 핵연료봉 37개를 봉단 접합판에 용접하여 조립함으로써 하나의 핵연료 다발을 제조한다.

이러한 제조과정중 비파괴 검사기술이 이용되고 있는곳은 구입된 Zircaloy 판, 봉, 판의 초음파를 이용한 결함검사와 Zircaloy 판의 내경, 외경, 두께 측정, 밀봉된 핵연료봉의 Leak-tight 여부 결정을 위한 헬륨 누출검사, 연료봉 내부에 도포된 흑연 두께 측정을 위한 β-선 후방 산란법 및 장전된 소결체의 장전 상태 측정을 위한 X-선 투과 사진법 등이다.

3. 핵연료 제조공정에 이용되는 비파괴 검사기술

A. 헬륨 누출검사

일반적으로 leak-tight 라 함은 "keep something out" 또는 "keep something in" 을 의미한다. 전자의 예로서는 진공장치를 들수있고 후자의 예로서는 방사성물질의 용기 또는 인간이 타고있는 우주선등을 들 수 있다. 이와같은 관점에서 볼때 핵연료봉은 두가지 부류에 다 해당된다고 할 수 있다. 즉 전자의 경우로서는 핵연료를 냉각수로 부터 보호하여야 하고 또 후자의 관점에서는 핵분열시 생성된 방사성물질의 누출을 방지하는 것이다. 특히 핵연료봉의 밀봉여부는 원자로의 안전성에 큰 영향을 미치므로 모든 제조된 핵연료 봉에 대하여 누출검사를 수행하여야 한다. 누출검사는 Fig.3에 보인바와 같이 일반적으로 10개의 분류로 나눌 수 있다.

이중 방법 (a)-(c)는 개스의 유입을 검출하는 방법, 방법 (d)-(g)는 개스의 유출을 검출하는 방법, 방법 (h)는 개스의 유입과 유출을 이용하는 방법

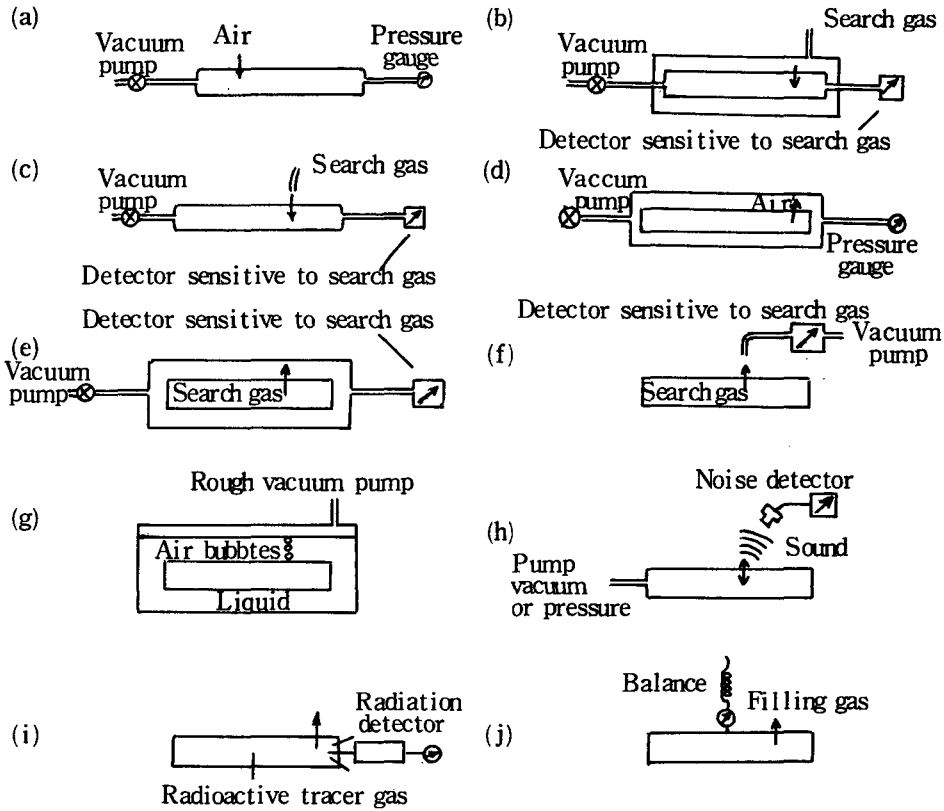


Fig. 3. Categories of leak test

이며 (i)-(j)는 잔류한 개스를 이용하는 방법이다. 이들 방법중 핵연료 봉에 적용하는 방법은 방법(e)으로서 chamber 속에 연료봉을 넣고 diffusion pump를 이용하여 약 10^{-5} torr 까지 진공을 만든후 핵연료봉에서 누출되어나온 He를 질량 분석기를 이용하여 검출하는 방법이다.

이경우 본 측정전에, 표준 누출을 이용하여 시험장치와 시험절차의 신뢰도를 확인할 필요가 있으며 사용되고 있는 표준 leak로서는 2.3×10^{-7} torr-liter/sec의 누출율을 갖는 ULVAC(일본) 제품을 이용하였다. 측정시 He를 검출할 수 없었다면 연료봉의 밀봉상태가 완전하였거나 또는 leak크기가 너무커서 모든 헬륨이 chamber의 pumping시 빠져나온 경우일 것이다. 후자의 경우와 같은 문제점을 해결하기 위하여 밀봉후 시간이 오래 경과한 시료는 방법 (i)를 적용하여 filling gas의 잔류여부를 확인하거나

또는 back-pressurizing 방법을 적용할 수도 있다. 특히 아주 작은 누출기공은 쉽게 막힐 수 있으므로 연료봉은 항상 깨끗이 다루어져야 하며, 작은 solvent 분자들도 누출기공을 막을 수 있으므로 세척은 가능한한 피하는 것이 좋다.

B. β -선 후방산란

원자로 내에서 핵연료봉의 파괴의 70% 이상은 power ramping시 발생되고 있으며, 이러한 파괴의 주 원인은 fission product 즉 I_2, Cs, Cd 에 의한 응력부식에 의한 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 현상의 예방책으로서 즉 UO_2 소결체와 Zircaloy 피복관 사이의 기계적 반응의 방지를 위한 윤활제로서 또 응력부식과 같은 화학적 반응의 방지를 위해 피복관 내부에 흑연도포를 실시하고 있다.

이때 흑연도포 두께의 조절을 위한 도포층 두께측정을 비파괴 검사법으로 실시하고 있다. 도포

층의 두께 측정을 위한 여러가지 동위원소이용 방법이 알려져 있으나, 현재 이용되고 있는 것은 β -선 후방산란을 이용한 방법이다. 현재 사용하고 있는 기기는 UPA(미국)사 제품이다.

Fig.4는 probe의 구조를 보여주고 있다.

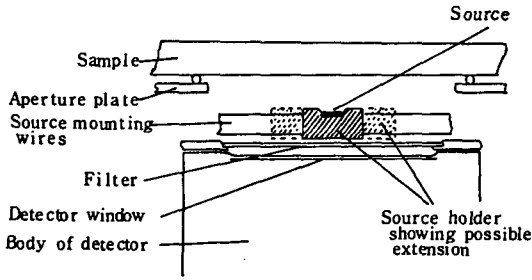


Fig. 4. Typical arrangement of central source probe

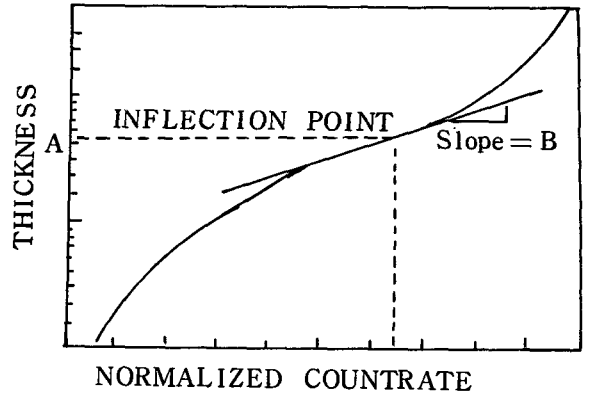
source로 부터 나온 β -선은 시편에 부딪쳐 반사되고, 이 후방산란된 강도를 Geiger-Muller (G-M) 관으로서 전기적인 신호로 바꾸게 되고 이러한 값을 Microprocessor가 장치된 Micro-derm에 보내어 분석함으로써 도포된 흑연의 두께를 측정할 수 있다.

Micro-derm의 근본 원리로서는 (1) 후방 산란된 β -선의 양은 물질의 원자량에 비례하므로, base와 도포된 재료와 20% 이상의 원자량 차이가 있으면 검출할 수 있다. (2) 도포된 재료의 원자량이 더 크다면 도포층 두께가 증가할수록 후방 산란은 증가하고, 그 반대의 경우는 감소한다. 일반적으로 도포층 두께의 logarithm과 count rate는 Fig.5에 보인바와 같은 관계를 가지고 있고, 상수 A, B는 변곡점에 있어서의 두께와 slope이다.

따라서 주어진 system에 대해서 A, B 값을 결정하면 normalized count (X)를 측정함으로써 도포층 두께를 결정할 수 있다.

C. 초음파 검사

핵연료 가공공정에 이용되는 초음파 검사로서는 Zircaloy 봉, 관 및 관의 결합검사, zircaloy



THICKNESS = FUNCTION OF (A, B, X)

A, B: SYSTEM CONSTANTS

X: NORMALIZED COUNT ON SAMPLE

$$X = \frac{(\text{count on sample}) - (\text{count on bare base})}{(\text{count on "infinitely" thick coating}) - (\text{count on base})} \times 100$$

Fig. 5. Relationship between thickness and normalized count rate

관의 외경 내경 두께 측정 및 봉단마개 용접부위의 결합 검사등이 있으나 본고에서는 zircaloy 관의 결합검사에 관하여 설명한다.

핵연료 피복관으로서 이용되는 Zircaloy 관의 건전성 유무는 원자로의 안전성에 큰 영향을 미치므로 모든 구입된 Zircaloy 관은 초음파 탐상검사를 받고 있다. 그러나 핵연료의 품질검사에서 초음파 탐상은 실제 결합의 크기를 측정함의 목적이 아니라, 표준결합으로부터의 echo의 높이와 비교함으로써 구입된 자재의 accept 또는 reject를 결정함이 목적이므로 표준결합은 일종의 Go/No-Go gauge로서 작용하고 있다. Zircaloy 피복관은 seamless 관으로서 외경은 13.2mm 내경은 12.4mm 두께는 0.4mm으로서, 핵연료 사양서에서 주어지는 초음파 탐상의 조건은 두께의 10% (40 μ m) 이상되는 중결합과 횡결합을 검출할 수 있어야 한다. 이와같은 결합을 검출하기 위해서 표준시편을 사용하여 시험전

에 기기의 성능을 검정하는데 이 표준시편의 인공결함의 크기는 관두께의 1/10이며 notch는 V형으로서 notch 각도는 60° 이고 관의 외부와 내부에 있는 결함을 공히 검출할 수 있어야 한다. 따라서 사용된 초음파 탐상법은 pulse-echo, 수침법으로서 횡파를 이용하였다.

종축결함과 횡축결함을 함께 검출하기 위하여 2개의 탐촉자를 이용하였으며 사용한 탐촉자는 $40 \mu m$ 의 결함 검출을 위하여 집중형의 10MHz로서 초점거리는 15mm인것을 사용하였다. 입자파와 반사파간의 간섭을 피하기 위하여 초점면적의 직경은 1/2 skip 거리보다 작아야 하며 초점면적의 직경이 0.5mm 이면 위 조건은 만족하였다. 피복관의 외부 및 내부의 결함을 공히 검출하기 위하여 표준시편의 피복관 외부와 내부에 표준결함을 만들고, 외부와 내부의 표준결함으로부터 동일한 강도를 얻는 조건으로 부터 최적입사각을 결정하였다.

피복관의 자동 탐상장치에서 시편은 전진운동과 회전운동을 동시에 하게 되며 회전속도와 inspection spiral 시 pitch 거리는 탐상된 면적 직경의 1/4 이 다음번 탐상에서 겹치는 조건으로부터 계산되었으며 최대 회전속도와 검사속도는 2000 rpm 와 60 m/hr 이었다.

D. X-선 투과사진법

연료봉 내에 UO_2 소결체의 장진시 장전상태와 부스러기 유무 및 소결체간의 간격을 측정하기 위하여 무작위 시료채취 방법에 의해 채취된 연료봉에 대하여 X-선 투과사진법을 행하고 있다. 그러나 소결체 간의 간격등을 정확히 측정하기 위해서는 많은 연구개발이 필요한 실정이다.

Fig.6에 전형적인 X-선 투과사진을 보여주고 있다.

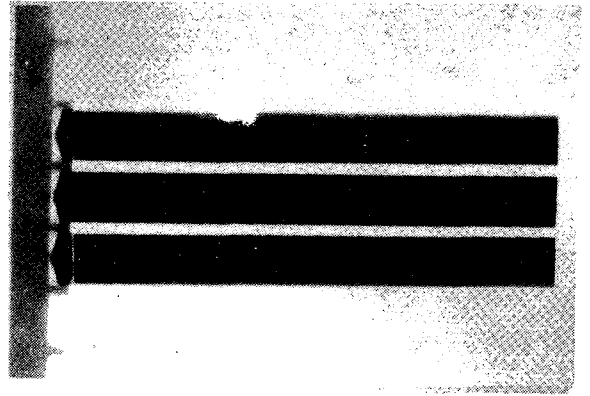


Fig. 6. X- ray radiography of fuel rods

음파 검사, X-선 투과사진법에 대하여 간단히 설명하였다.

B. 앞으로 초음파 탐상법에 의한 봉단용접부위의 결함 검사법 및 질카로이 관의 수소화 부위의 탐상, Autoradiography 법에 의한 UO_2 소결체의 건전성, 밀도 및 농축도 측정등에 관한 기술은 개발의 여지가 있으며 원자로의 안정성 및 경제성 제고를 위하여 이와같은 비파괴 검사기술의 정확성과 stability를 증가시키기 위한 연구 노력은 계속되어야 할것이다.

4. 결론

A. 핵연료 가공공정중 이용되고 있는 비파괴 검사기술인 헬륨 누출검사, β -선 후방산란, 초