

DUPIC 핵연료봉 원격 헬륨누출시험
Remote Helium Leak Test of The DUPIC Fuel Rod

김웅기, 김수성, 임성팔, 이정원, 양명승
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor)은 사용후 PWR 핵연료를 건식으로 재처리하여 중수로 핵연료로 재사용하는 핵연료 주기기술이다. DUPIC 핵연료는 방사능이 매우 높기 때문에 방사능 차폐 및 원격조작이 가능한 IMEF 핫셀에서 원격으로 제조된다. 본 연구에서는 IMEF 핫셀을 모방한 모의 핫셀에서 봉단이 Nd:YAG 레이저로 용접된 모의 DUPIC 핵연료봉에 대해 헬륨누출검사를 수행하여 새로운 개념으로 제조된 핵연료봉의 건전성을 평가하는 원격검사기술을 개발하였다. 진공챔버는 핫셀에서 원격조작기를 이용하여 원격조작이 가능하도록 개발되었다. 모의 핫셀에서의 원격시험결과, DUPIC 연료봉의 헬륨누출정도는 배경준위와 거의 같게 측정됨으로써 CANDU 기준을 만족하였다. 연구결과, 모의 핫셀에서 원격 헬륨누출시험을 성공적으로 수행하였으며 Nd:YAG 레이저에 의해 양단이 용접된 DUPIC 연료봉의 건전성을 확인하였다.

Abstract

DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor) is one of dry reprocessing fuel cycles to reuse irradiated PWR fuel in CANDU power plant. DUPIC fuel is so radioactive that DUPIC fuel is remotely fabricated at hot cell such as IMEF hot cell in which radiation is shielded and remote operation is possible. In this study, Helium leakage has been tested for the simulated DUPIC fuel rod manufactured by Nd:YAG laser end-cap welding at simulated hot cell. The remote inspection technique has been developed to evaluate the soundness of DUPIC fuel fabricated through new processes. Vacuum chamber has been developed to be remotely operated by manipulators at hot cell. As the result of remote test, Helium leakage of DUPIC fuel rod is around background level, CANDU specification has been satisfied. In the result of the study, remote test has been successfully performed at the simulated hot cell, and the soundness of DUPIC fuel rod welded by Nd:YAG laser has been confirmed.

1. 서론

경.중수로 연계 핵연료주기기술인 DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU reactor) 핵연료주기에서는 사용후 PWR 핵연료를 건식으로 재처리하여 중수로 원자력발전소의 연료로 재사용하는 것을 목표로 하고 있다. DUPIC 핵연료는 방사능이 매우 높기 때문에 방사능 차폐 및 원격조작이 가능한 IMEF 핫셀에서 원격으로 제조된다. DUPIC 핵연료 제조공정은 그림 1과 같다^[1].

DUPIC 핵연료는 새로운 개념의 핵연료이기 때문에 경제성도 중요하지만 무엇보다도 안전성이 검증되어야 한다. 즉 핵연료로서 갖추어야 할 품질 특성을 입증하는 작업이 필요하며 특히 안전성 측면에서 핵연료의 건전성을 평가하는 작업은 무엇보다도 중요한 부분중 하나이다. 현재까지 DUPIC 핵연료에 대한 사양 및 검사지침은 확립되지 않았지만 중수로 발전소의 연료로 사용될 예정인 DUPIC 핵연료의 특성상 중수로 핵연료와 같은 기본적인 특성을 갖추어야 한다는 개념으로 기존의 중수로 핵연료의 사양 및 검사지침을 참조하였다.

제조된 DUPIC 연료봉에 대한 품질 특성을 평가하기 위한 검사 항목에는 헬륨누출검사, 메탈로그래피 검사, 인장시험 등이 포함된다. DUPIC에 관한 국제공동연구를 추진중인 캐나다의 AECL 연구소는 DUPIC 연료봉의 TIG용접부 건전성을 확인하기 위하여 헬륨누출검사를 100% 수행하였으며^[2] 본 연구에서도 봉단마개가 삽입된 후 광섬유에 의해 원격 전송된 Nd:YAG 레이저빔에 의해 용접된 모의 DUPIC 핵연료봉에 대해 봉단마개 레이저 용접부의 기밀성을 검증하기 위해 IMEF를 모방한 모의 핫셀에서 헬륨누출검사를 수행함으로써 DUPIC 핵연료봉의 건전성을 평가하였다.

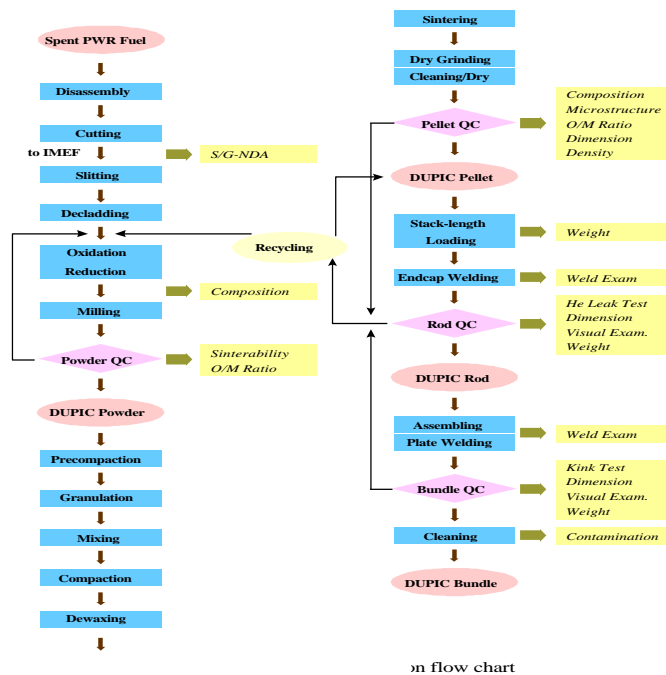


그림 1. DUPIC 핵연료 제조공정

2. DUPIC 핵연료봉 헬륨누출검사

2.1 DUPIC 핵연료봉단 레이저용접

DUPIC 핵연료는 중수로 원자력 발전소의 연료로 사용되는 것을 목표로 하고 있기 때문에 DUPIC 연료봉의 기본적인 사양은 CANDU 연료봉과 거의 같다. CANDU 연료봉의 봉단은 저항용접 방법으로 밀봉되며, DUPIC 연료봉의 봉단은 레이저용접 방법으로 밀봉되기 때문에 봉단마개의 기하학적 형상이 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 상이하지만 용접후의 전체적인 외형에는 큰 차이가 없다. CANDU 연료봉의 저항용접기술은 신뢰성이 입증되어 있고 DUPIC 연료봉에 대한 레이저용접 방법은 아직 신뢰성이 입증되어 있지 않지만, DUPIC 핵연료는 핫셀에서 원격으로 제조되는 특성을 가지고 있기 때문에 시스템 구성이 복잡하고 용접후 표면 연마가 필요한 저항용접 방법보다는 광섬유전송에 의해 원격용접이 용이하고 표면가공 공정이 불필요한 레이저용접 방법을 적용하였다.

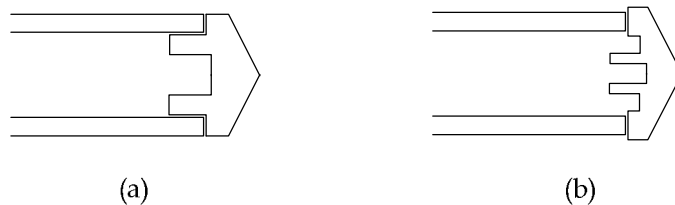


그림 2. (a) 레이저용접용 DUPIC 연료봉 봉단마개, (b) 저항용접용 CANDU 연료봉 봉단마개

2.2 헬륨누출검사 시스템 구성

헬륨누출검사 시스템은 진공챔버, 연결 호스, 글로브 박스 및 헬륨누출 감지기로 구성되어 있다. 헬륨누출 검사 시스템 구성도는 그림 3과 같다.

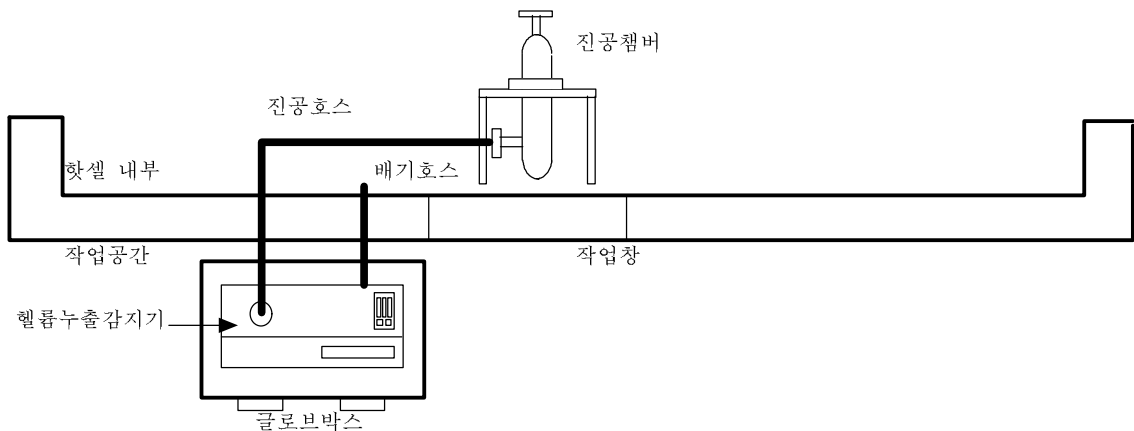


그림 3. 헬륨누출검사 시스템 구성도

진공챔버는 길이 약 60 cm, 내경 40 cm의 캡슐형태로 길이 약 50 cm, 외경 13.5 mm의 DUPIC 연료봉을 포함할 수 있도록 제작되었다. 재질은 스테인레스강이다. 진공챔버는 챔버 상단부 개폐, 연료봉 설치 및 제거작업이 원격조작기에 의해 조작이 용이하도록 설계제작되었다. DUPIC 핵연료봉의 헬륨누출검사는 핫셀내에서 수행되므로 통상적인 누출검사보다 어려움이 따른다. 연료봉의 취급과 오-링의 교체, 유지 관리 등은 원격조작기를 사용하여 원격으로 조작된다. 진공 챔버는 연료봉의 장전/추출 장치의 유지 보수가 용이하고 오-링을 쉽게 분리하여 교체할 수 있는 구조로 설계제작되었다. 그림 4는 모의핫셀에 설치된 헬륨누출검사시스템을 보여주며 모의 핫셀 내부에 설치된 진공챔버를 볼 수 있다. 진공챔버는 핫셀 내부에 설치되며 유연한 진공호스와 연결될 수 있도록 연결구를 가지고 있다. 진공호스로는 약 1.1m 두께의 IMEF 핫셀벽에 내장된 1인치 내경의 굴곡관을 통과할 수 있을 뿐만 아니라 고진공에 견디고 내구성을 갖추기 위하여 스테인레스강 재질의 유연한 금속 호스를 사용하였다. 금속호스의 내경은 1/4 인치, 외경은 20mm, 길이는 약 4m 이다. 헬륨누출 감지기는 핫셀 외부에 설치된 글로브박스의 내부에 설치된다. 글로브박스는 핫셀의 오염된 공기가 핫셀 외부의 작업공간에 직접 노출될 가능성을 차단하기 위한 안전 장치이다.

헬륨누출 감지기는 헬륨누출검사 시스템의 핵심 장치로 진공챔버와 진공호스로 연결되어 있으며 진공펌핑 기능 및 헬륨누출레벨 측정기능을 수행한다. 헬륨누출감지기는 ALCATEL의 ASM 180TD 모델이며 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 펌핑능력을 가진 membrane 펌프와 10 l/h 의 펌핑능력을 가진 molecular drag 펌프로 구성된 진공펌핑기능, 자체교정기능을 갖추고 있으며 검출감도는 $2 \times 10^{-11} \text{ mbar.l/s}$ 이다.



그림 4. 헬륨누출검사 시스템

2.3 DUPIC 핵연료봉 헬륨누출검사 방법

헬륨누출검사는 DUPIC핵연료봉에서 봉단마개용접부위 또는 피복관에 존재하는 결함을 비파괴 방법을 사용하여 100% 검사하는 유일한 방법이다. 헬륨누출은 질량분석 원리에 의해 감지된다. 전기적으로 중성인 가스분자가 이온챔버를 통과하면서 가열된 텅스텐 필라멘트로 부터 튀어 나온 전자빔과 충돌하여 이온화되고 이 이온들이 전자장에서 가속되면서 이온의 질량에 따라 이온이 지나가는 궤도의 회전반경이 다른 원리를 이용하여 가스를 종류에 따라 분리한다. 그림 5는 헬륨누출검사 원리를 보여준다. 원형패스의 반경은 다음 식에 의해 결정된다^[3].

$$R = KV \frac{M}{H}$$

여기서, R : 원형패스의 반경,

K : 상수,

V : 이온의 속도,

M : 이온의 질량,

H : 자장의 강도

이다.

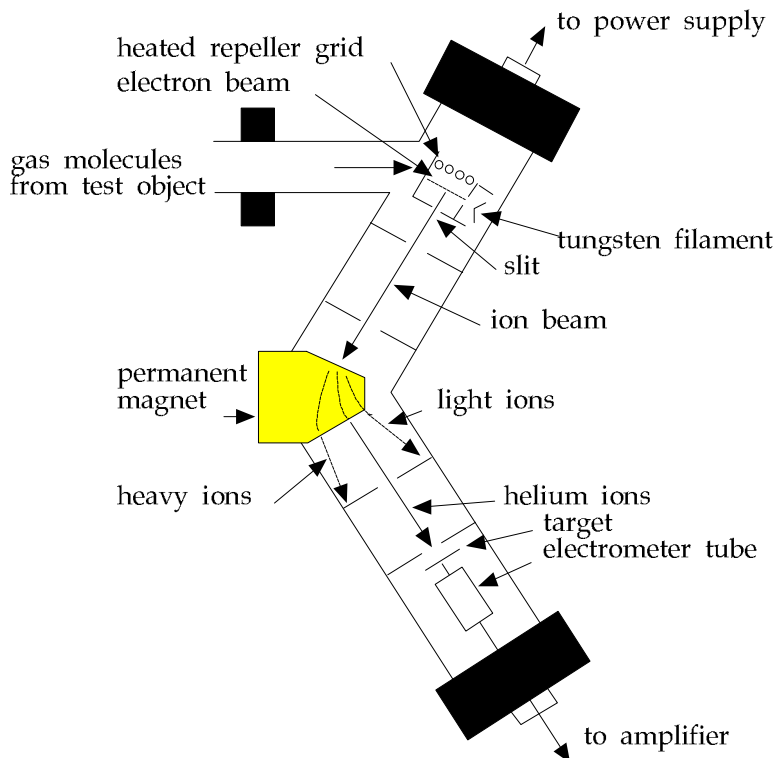


그림 5. 헬륨누출 감지 원리

헬륨가스는 불활성 가스로 다른 가스 또는 물질과 반응하지 않는다. 또한 대기에 거의 존재하지 않으므로 예민한 누출검사작업에 방해를 받지 않고 경량이기 때문에 작은 누출도 감지할 수 있다. 헬륨누출 검사를 위해서는 청정검사환경이 요구된다. 먼지, 습기, 및 기름기 등이 비교적 큰 누출을 일시적으로 차단시킬 수 있기 때문이다. 인간의 호흡에도 작은 누출을 막을 수 있을 정도로 충분한 습기가 포함되어 있으므로 검사시에 주의해야 한다. 헬륨누출검사 방법에는 일반적으로 스프레이 방법, 스니퍼 방법 및 Bombing 방법이 사용된다^[4].

스프레이 방법은 검사시편에 헬륨을 분사하는 방식으로 표준누출량을 이용하여 누출의 크기 측정 및 누출부의 정확한 위치측정이 가능하다. 스니퍼 방법은 프로브를 이용하여 측정하며 시간의 경과에 따라 누적되는 헬륨누출량을 계산하여 누출의 크기 측정 및 프로브의 이동에 따른 누출부의 위치 측정이 가능하나 정밀도가 떨어지는 특징이 있다. Bombing 방법에서는 헬륨가스분위기의 챔버에 놓인 검사시편을 검사용 챔버로 옮기고 검사용 챔버를 진공상태로 유지하여 검사시편에 결함이 있을 경우에 검사시편에 유입된 헬륨가스가 검사시편 밖의 검사용 진공챔버로 유출되는 양을 측정한다. 이 방법은 검사시편을 검사장비에 직접 연결할 수 없는 기밀시편에 많이 사용되며 본 연구에서도 Bombing 방법을 적용하였다. 그림 6은 Bombing 방법을 이용한 검사시스템 구성도를 보여준다.

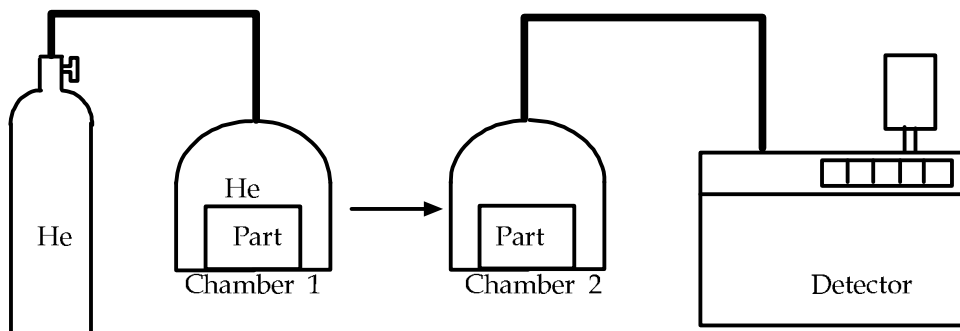


그림 6. Bombing 방법을 이용한 검사시스템 구성도

2.4 DUPIC 핵연료 헬륨누출시험 및 분석

DUPIC 연료봉에 대한 헬륨누출검사이침으로 CANDU 연료봉에 대한 검사이침을 적용하였다. 헬륨누출감지기의 검출감도는 2×10^{-11} mbar.l/s이며 1×10^{-9} mbar.l/s이하의 검사이침을 만족하였으며 봉단용접이 완료된 후 21시간 경과후 헬륨누출검사를 수행함으로써 48시간 이내에 수행되어야 하는 검사이침을 만족하였다. 대기중의 헬륨이나 누출검사장치에 흡착된 헬륨 등에 의한 배경 누출을 측정결과, 10^{-4} torr의 시험압력에서 2×10^{-7} mbar.l/s이며 6×10^{-6} torr의 시험압력에서 3×10^{-9} mbar.l/s로서 배경 헬륨누출율은 5×10^{-7} mbar.l/s 이하이어야 한다는 검사이침도 만족되었다. 합격 및 불합격 판정은 DUPIC 핵연료봉에 대한 헬륨누출율이 배경 헬륨누출율보다 크면 불합격으로 평가되며 그렇지 않으면 합격으로 판정된다^[5].

DUPIC 연료봉에 대한 헬륨누출시험에서는 헬륨분위기의 용접챔버내에서 광섬유에 의해 원격전

송된 Nd:YAG 레이저빔에 의해 용접된 9개의 연료봉을 사용하였다.

표 1. 헬륨누출시험 결과

| No | 시험압력 10^{-4} torr | | 시험압력 6×10^{-6} torr | | 판정 |
|----|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------|
| | 연료봉 누출 ($\times 10^{-7}$ mbar.l/s) | 배경누출 ($\times 10^{-7}$ mbar.l/s) | 연료봉 누출 ($\times 10^{-9}$ mbar.l/s) | 배경누출 ($\times 10^{-9}$ mbar.l/s) | |
| 1 | 2 | 2 | 5 | 5 | 합격 |
| 2 | 2.5 | 2.5 | 4 | 4 | " |
| 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | " |
| 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | " |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 3 | " |
| 6 | 2 | 2 | 3 | 3 | " |
| 7 | 2 | 2 | 3 | 3 | " |
| 8 | 2 | 2 | 3 | 3 | " |
| 9 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | " |
| | 합격율 | | | | 100 % |

9개 연료봉에 대한 헬륨누출시험결과는 표1과 같다. 헬륨누출율은 10^{-4} torr의 시험압력 및 6×10^{-6} torr의 최소시험압력에서 측정되었으며 배경누출율의 변화를 고려하여 각각의 샘플에 대해 배경누출율을 측정하였다.

본 실험에서는 모의 핫셀에 설치된 원격조작기를 이용하여 진공챔버와 연료봉을 조작하였으며 글로브박스내에 헬륨누출감지기를 내장하여 글로브를 이용하여 제어버튼을 조작하면서 헬륨누출 검사를 원격으로 수행하였다. 진공챔버커버의 개폐, 연료봉의 삽입 및 제거작업을 원격조작기를 이용하여 수행한 결과 작업이 원활하지 못했지만 점차 숙달되어 갔으며 방사능에 민감한 소모품인 진공챔버의 오-링 교체실험을 원격조작기를 이용하여 성공적으로 수행하였다.

헬륨누출측정 실험결과, 6×10^{-6} torr의 최소시험압력에서 배경누출이 약간 감소하였지만 큰 변화는 나타나지 않았고 10^{-4} torr의 시험압력에서는 거의 일정하였다. 6×10^{-6} torr에서 연료봉의 누출은 배경누출과 거의 일치하였으며, 10^{-4} torr에서 2번 연료봉의 경우 배경누출과 연료봉의 누출이 그 외의 경우보다 다소 큰 값을 나타내었지만 배경누출과 연료봉누출이 일치하므로 결함은 없다고 판단된다. 따라서 합격률은 100%를 나타내었으며 본 실험에 사용된 DUPIC 연료봉의 레이저 용접부에는 헬륨이 누출될 정도의 큰 결함은 없었다고 판단된다.

3. 결 론

DUPIC 핵연료는 새로운 개념의 핵연료로서 경제성 뿐만 아니라 무엇보다도 안전성이 검증되어

야 한다. 즉 핵연료로서 갖추어야 할 품질 특성을 입증하는 작업이 필요하며 특히 안전성 측면에서 핵연료의 건전성을 평가하는 작업은 무엇보다도 중요한 부분중 하나이다. 현재까지 DUPIC 핵연료에 대한 사양 및 검사지침은 확립되지 않았지만 중수로 발전소의 연료로 사용될 예정인 DUPIC 핵연료의 특성상 중수로 핵연료와 같은 기본적인 특성을 갖추어야 한다는 개념으로 기존의 중수로 핵연료의 사양 및 검사지침을 참조하였다.

본 연구에서는 모의 핫셀에서 CANDU 연료봉에 봉단마개를 삽입한 후 헬륨이 충전된 용접챔버에서 Nd:YAG 레이저로 용접된 DUPIC 핵연료봉에 대해 봉단마개 레이저 용접부의 기밀성을 검증하기 위해 헬륨누출검사를 수행함으로써 DUPIC 핵연료봉의 건전성을 평가하였다. 진공챔버에서의 연료봉 설치 및 제거, 진공챔버 커버 조작 등은 실제 핫셀 환경과 유사하게 원격조작기에 의해 조작되었다.

DUPIC 연료봉에 대한 원격 헬륨누출시험은 성공적으로 수행되었으며 실험결과 연료봉의 헬륨누출정도는 배경누출 준위와 거의 같게 측정됨으로써 CANDU 기준을 만족하였다. 따라서 개발된 헬륨누출검사장치를 이용하여 일차적으로 DUPIC 연료봉에 대한 레이저 용접부의 건전성을 확인할 수 있었다. 앞으로 실제 핫셀에서 사용후 핵연료가 장전되고 봉단이 레이저로 용접된 실질적인 DUPIC 핵연료봉에 대한 시험을 수행하고 고방사능에의 노출 등에 따른 문제점을 보완하여 DUPIC 핵연료의 건전성을 원격으로 확인할 수 있는 검사시스템으로 활용할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 양명승 등, "DUPIC 핵연료제조 및 품질관리 기술개발", KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, pp592-601, (1997)
- [2] Marvin Ryz and Jim Sullivan, "Manufacture, Inspection and Test Plan for Fabrication of DUPIC Pellets and Elements", p.3, AECL, Canada, (1997)
- [3] W. J. McGonnagle, "Nondestructive Testing," 2nd ed., GORDON AND BREACH Science Publishers, Inc., pp.50-54, (1961)
- [4] ASM 180 Series Mass Spectrometer Manual, ALCATEL, (1996)
- [5] 양명승 등, "중수로핵연료 품질관리지침서", (1988)