

# 초음파 핵연료 세정장비의 시스템 구성과 제거된 크러드의 정량적 무게 측정법

신중철<sup>†</sup> · 이학윤\* · 성운학\*\* · 주영종\*\*\* · 김용찬\*\*\* · 한욱진\*\*\*

## System Configuration of Ultrasonic Nuclear Fuel Cleaner and Quantitative Weight Measurement of Removed CRUD

Jung Cheol Shin<sup>†</sup>, Hak Yun Lee\*, Un Hak Seong\*\*, Yeong Jong Joo\*\*\*, Yong Chan Kim\*\*\*, and Wook Jin Han\*\*\*

(Received 13 November 2023, Revised 29 December 2023, Accepted 3 June 2024)

### ABSTRACT

Crud is a corrosion deposit that forms in equipments and piping of nuclear reactor's primary systems. When crud circulates through the reactor's primary system coolant and adheres to the surface of the nuclear fuel cladding tube, it can lead to the Axial Offset Anomaly (AOA) phenomenon. This occurrence is known to potentially reduce the output of a nuclear power plant or to necessitate an early shutdown. Consequently, worldwide nuclear power plants have employed ultrasonic cleaning methods since 2000 to mitigate crud deposition, ensuring stable operation and economic efficiency.

This paper details the system configuration of ultrasonic nuclear fuel cleaning equipment, outlining the function of each component. The objective is to contribute to the local domestic production of ultrasonic nuclear fuel cleaning equipment. Additionally, the paper introduces a method for accurately measuring the weight of removed crud, a crucial factor in assessing cleaning effectiveness and providing input data for the BOA code used in core safety evaluations. Accurate measurement of highly radioactive filters containing crud is essential, and weighing them underwater is a common practice. However, the buoyancy effect during underwater weighing may lead to an overestimation of the collected crud's weight. To address this issue, the paper proposes a formula correcting for buoyancy errors, enhancing measurement accuracy. This improved weight measurement method, accounting for buoyancy effects in water, is expected to facilitate the quantitative assessment of filter weights generated during chemical decontamination and system operations in nuclear power plants.

**Key Words :** AOA, CRUD, Filter Skid, Nuclear Fuel Assembly, Ultrasonic Fuel Cleaning, Ultrasonic Transducer

### 기호설명

$W_0$	The Corrected filter weight
$\Delta W$	The Weight variation
$P_{up}, P_{down}$	The local hydrostatic pressure (absolute) at the top of the filter at depths of 4 ft and 38 ft
$W_{up}, W_{down}$	The weight of the filter at depths of 4 ft and 38 ft

### 1. 서 론

원자력발전소에서 냉각재, 감속재 등으로 사용되는 경수는 다양한 용도로 활용되고 있으며 원자력발전소에서 고온의 환경에 의해 화학적으로 활성화되어 있다. 그러므로 금속재질의 특성에 따른 방사화, 부식, 침식, 침적 등의 다양한 현상이 계통 표면에서 발생되며 냉각수를 따라 용해된 상태로 이동하다가 1차계통 및 기기 표면에 불용성 금속산화물 형태의 방사화된 물질로 존재하게 된다. 이를 크러드 (Chalk River Unidentified Deposit :

<sup>†</sup> 신중철, 회원, (주)에네스지 기업부설연구소  
E-mail : jungcheol.shin@enesg.co.kr

TEL : (042)718-5096 FAX : (042)718-5121

\* (주)에네스지 기업부설연구소

\*\* 충남대학교 공과대학 메카트로닉스공학과

\*\*\* 한전원자력연료주식회사

CRUD)라 한다. 크러드는 원자로의 1차 계통 냉각수에 의해 순환하면서 핵연료 피복관 표면에 부착되는데 과도한 크러드는 핵연료 피복관과 냉각수 사이의 열전도율이 저하되어 피복관 온도가 증가하고, 냉각수의 미포화비등 (Sub-cooled Nucleated Boiling, SNB)과 비정상 수직출력경사도 (Axial Offset Anomaly, AOA)를 유발시켜 출력감발, 발전소 조기정지, 조기 연료방출 등을 초래 할 수 있으며<sup>(1)</sup>, 피복관에 크러드 유도 국부 부식 (CRUD Induced Localization Corrosion, CILC)을 일으켜 핵연료 손상으로 이어지기도 한다<sup>(2)</sup>. 또한 1차 계통에서 크러드의 순환은 각종 기기 및 배관 등에 방사선량을 증가시켜 작업자의 피폭선량 여유도를 감소시키기 때문에 기기의 장비 유지보수를 어렵게 하는 등 발전소의 안전성 및 경제성에 많은 영향을 미치고 있으며, 고연소도 연료로 가면서 더 심해지는 경향이다<sup>(3)</sup>. 따라서 정상 출력 운전과 작업자의 피폭 저감을 위한 핵연료 크러드 세정작업이 2000년 이후부터 세계 각 원전에서 수행되고 있다. 핵연료 표면에 침적된 크러드 세정방법에는 얼음을 이용하는 ICEDECTM 방법<sup>(4)</sup>, 화학적으로 세정하는 HP CORD UV 방법 및 초음파에 의한 크러드 세정방법이 있다. 초음파를 이용한 크러드 세정방법은 미국 EPRI에서 1998년부터 개발을 시작하여 2000년, 미국의 Callaway 발전소에서의 실증실험이 성공한 이후 현재 세계 여러 가압경수로 (Pressurized Water Reactor, PWR) 및 비등수로 (Boiling Water Reactor)에서 핵연료에 침착된 크러드 제거에 활용되고 있다<sup>(5)</sup>.

본 논문에서는 초음파 핵연료 세정장비 (Ultrasonic Fuel Cleaning, UFC)의 시스템 구성과 각 구성품의 기능을 기술하고, 세정 효과의 척도인자가 되고 노심 안전성 평가 BOA (Boron-Induced Offset Anomaly)코드 입력 자료로도 활용되는 크러드 무게 값을 수중에서 정량적으로 측정하는 방법을 소개를 함으로써 국내 원전의 안전 운전과 해외에 의존하고 있는 초음파 핵연료 세정기술 국산화 개발에 기여하고자 한다.

## 2. 초음파 핵연료 세정장비 시스템

### 2.1 시스템 개요

크러드 세정장비는 Fig. 1과 같이 크러드 세정장비 본체 (Cleaning Fixture), 크러드 포집장치 (Filtration Skid) 및

제어모듈 (Control Module)로 크게 3부분으로 구분할 수 있다.

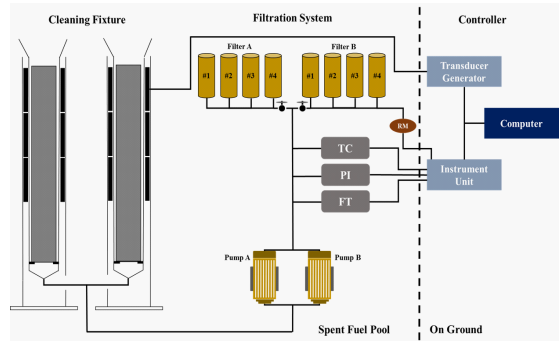


Fig. 1 System Configuration of UFC

Cleaning Fixture의 챔버에 핵연료집합체를 장입하고 초음파 진동자 (Transducer)를 발진시키면 핵연료봉 표면에 침착되어 있는 크러드를 제거할 수 있다. Fig. 2<sup>(6)</sup>는 크러드 세정 전/후의 핵연료 집합체를 보여주고 있다.

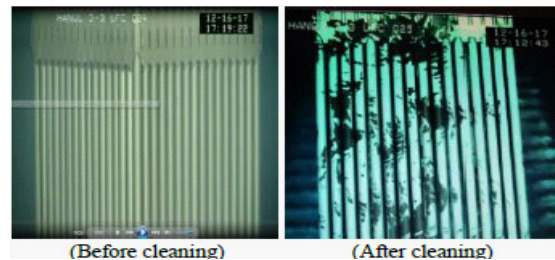


Fig. 2 Before and after ultrasonic cleaning

제거된 크러드는 챔버 하부의 배관을 통해 포집장치로 이동되어 필터에 포집된다. 진동자의 성능, 필터교체, 유량, 수온 등 모든 운전상황이 제어모듈의 컴퓨터에 모니터링 되고 이상 발생 시 경고 알람과 함께 조치 메시지가 표시되도록 설계되어 있다. 또한, 두 세트의 챔버와 포집장치로 구성되어 있어 크러드 세정시간을 효과적으로 활용하여 작업시간을 줄일 수 있도록 고안되었다. Fig. 3(a)<sup>(6)</sup>는 발전소에 설치된 세정장비 본체와 포집장치이고, Figure 3(b)는 제어모듈이다<sup>(7)</sup>.

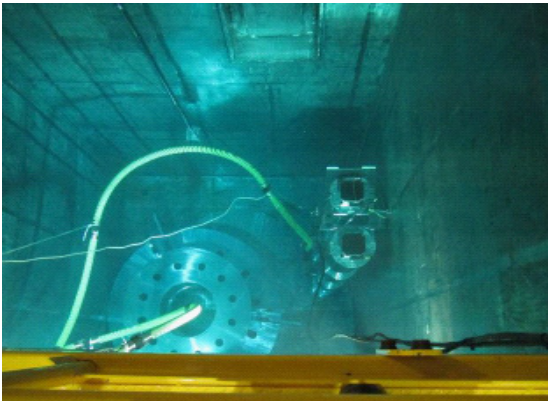


Fig. 3(a) UFC Chamber and Filtration Skid

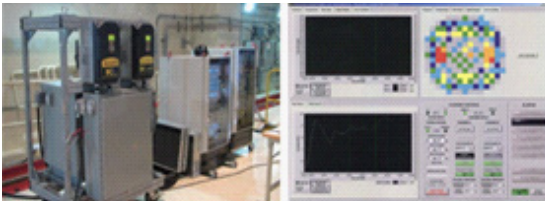


Fig. 3(a) UFC Chamber and Filtration Skid

## 2.1 시스템 구성

### 2.1.1 크러드 세정장비 본체

크러드 세정장비 본체는 Reflector Tube, Transducer Basket, Transducer 및 Flow Diverter로 구성되어 있다. Transducer Basket 외부 4면에는 Transducer가 10개 부착되어 있다. Transducer의 공진주파수는 25 kHz이고 운전전력은 1,500 W이며, 주파수 공진범위가 500 mm가되는 Push-Pull type의 Radiation Resistance Transducer를 사용한다. Transducer가 포함된 Transducer Basket은 Figure 3과 같이 원통형 Reflector Tube에 조립되어 하나의 챔버를 구성한다. 초음파 에너지 효율을 최대한 높이기 위해서 Reflector 내면과 Transducer Basket의 표면은 Mirror Polishing으로 처리된다. Flow Diverter는 핵연료가 챔버에 삽입되면 연료무게에 의해 스프링이 압축되어 Transducer basket 내부의 냉각수와 배관이 자동으로 연결되고, 제거된 크러드가 이 배관을 통하여 포집장치로 이송된다. 핵연료와 챔버가 분리되는 경우에는 스프링이 다시 인장되어 냉각수가 챔버 외부로 자연스럽게 통과할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 크러드 세정장비의 본체의

크기는 1.3m(W) x 1.2m(L) x 6.3m(H)이며, 무게는 약 1,800 kg이다 (Fig. 4).

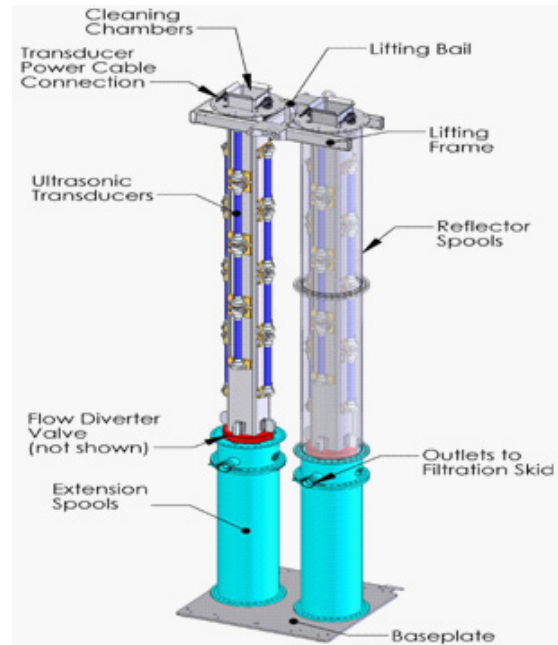


Fig. 4 Configuration of Cleaning Fixture

### 2.1.2 크러드 포집장치

크러드 세정장비 본체에서 초음파에 의해 제거된 크러드는 포집장치를 통해 여과된다. 포집장치는 수중 필터 8개와 펌프 2대 및 온도, 압력, 유량을 측정할 수 있는 계측센서, 필터의 누적 방사선량을 측정할 수 있는 방사선 센서가 설치되어 있다. 또한, 다중성 (Redundancy) 개념으로 제작되어 1개의 펌프와 4개의 필터용기만으로도 운전이 가능하도록 하여, 장치의 고장 등으로 크러드 세정 작업이 원활히 이루어지지 않을 경우에도 발전소 예방정비 공기에 미치는 영향을 최소화하도록 설계되었다. 포집장치에 설치된 각각의 계측기는 필터에 포집된 크러드 양과 방사선량, 필터의 압력 등에 대한 정보를 수집하여 필터의 교체 여부 판단을 위해 활용된다. 교체 대상이 되는 필터는 카트리지에 담아서 사용후핵연료 저장조 랙에 보관된다. 크러드 포집장치는 챔버와 인접한 Cask Loading Pit 벽면에 설치되며 크기는 0.8m(W) x 1.5m(L) x 3.0m(H)이고, 무게는 약 650kg이다.

### 2.2.3 제어모듈

제어 모듈 패키지는 Figure 5와 같이 크러드 초음파 세정장비의 운전 상황을 감시 및 제어하는 통합 모듈 패키지로서 제어 모듈, 펌프 제어기, 초음파 발진기, 계측기 매니폴드 (Manifold), 제어용 컴퓨터 및 전원조절장치로 구성된다. 펌프 제어기는 필터 포집장치의 수중펌프에 460 V, 3상, 60 Hz, 60 A의 전원을 안정적으로 공급하도록 설계되었고, 자동 주파수 조정 (Auto Tuning) 기능을 갖춘 초음파 발진기는 1,500 W, 25 KHz의 Transducer를 구동시키는데 필요한 전원과 발진주파수를 공급한다. 제어용 컴퓨터에서는 세정의 모든 작업 상황을 모니터링 할 수 있도록 Softwareization 되어 있다. 유량, 압력, 온도 및 방사선 계측기로부터 신호를 입력 받아 실시간으로 운전 상황을 표시하며, 특이 사항 발생 시에는 경보 알람과 함께 운전원이 바로 대처할 수 있도록 작업 가이드라인을 제시한다. 또한, 이러한 모든 행위들은 컴퓨터에 자동 기록 보관되도록 설계 되어 있다.

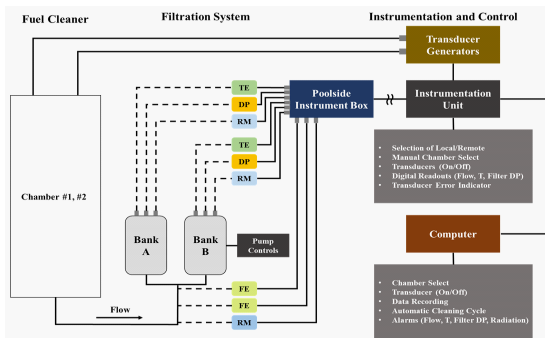


Fig. 5 Diagram of Control Module Package

## 3. 크러드 무게측정법

### 3.1 무게 측정 원리

크러드 세정장비의 제거 성능은 크러드가 포집된 필터의 전후 무게를 통하여 도출할 수 있다. 일반적으로 공기 중에서의 필터 성능은 포집 전 후의 무게차이를 통해 도출이 가능하지만, 수중에서는 부력, 수압 및 유량 등의 외부 인자로 인해 측정 오차가 발생할 수 있다. 따라서 정확하고 객관적인 필터 성능을 확인하기 위해서는 크러드 포집 전 후의 무게 차이에 부력 보정인자를 적용하여

계산하는 방법이 요구된다(8).

수중에서의 필터는 설계상으로 항상 일정량의 공기가 내부에 포집되어 있으며, 필터의 운영이력에 따라 내부 공기의 부피가 다양하게 변하는 것이 특징이다. 특히 이와 관련된 대표적인 인자로는 수압과 부력이 있으며, 해당 인자는 필터의 설계 특성으로 인해 상호연계 되는 특징을 가지고 있다. 수압은 필터 내부에 포집된 공기의 부피를 변화시키고, 변화된 공기 부피는 부력에 영향을 미치게 된다. 부력의 영향은 결론적으로 필터 무게에 오차를 발생시키기 때문에, 수중에서의 부력보정은 정확한 무게 측정의 필수적인 과정이라 할 수 있다.

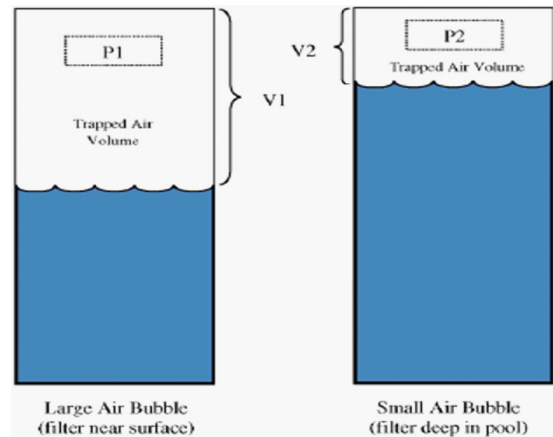


Fig. 6 Illustration of Trapped Air in Filter Module

일반적으로 수심이 깊어질수록 필터에 포집된 공기가 수압으로 인해 외부로 방출되거나 압축되어 내부의 공기 부피가 감소하게 된다. 필터 내부의 공기 부피가 수압으로 인해 감소하게 되면, 부력의 영향도 감소하게 되고 이에 따라 필터 전체의 무게는 상대적으로 증가하게 된다. Fig. 6은 수압에 따라 변화하는 필터 내부의 공기 부피 변화를 나타내고 있으며, P1과 P2는 각각 수심 상부와 수심 하부일 때의 절대 수압을 의미한다.

### 3.2 보정 공식

보정인자가 적용된 필터의 무게 ( $W_0$ )은 포집된 공기를 포함한 필터의 무게로 정의되고, 이에 대한 계산을 적용하기 위해서는 수심 상부에서의 사용 전/후 필터의 무게와 수심 하부에서의 사용 전/후 필터의 무게 측정이



요구된다. 수심 상부에서의 무게와 절대 수압이  $W_{up}$ ,  $P_{up}$ , 수심 하부에서의 무게와 절대 수압이  $W_{down}$ ,  $P_{down}$  일 때 보정 인자가 적용된 필터의 무게( $W_0$ )는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$W_0 = W_{up} + \frac{(W_{down} - W_{up})}{[1 - \frac{P_{up}}{P_{down}}]} = W_{up} + \frac{\Delta W}{[1 - \frac{P_{up}}{P_{down}}]} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 수심 상부에서의 사용 전 필터의 무게를  $W_{up-clean}$ , 사용 후 필터의 무게를  $W_{up-dirty}$ , 수심하부에서의 사용 전 필터의 무게를  $W_{down-clean}$ , 사용 후 필터의 무게를  $W_{down-dirty}$ 으로 정의하고 사용 전/후의 필터 무게를 이용한 크러드의 무게를 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{0-dirty} - W_{0-clean} = W_{up-dirty} + \frac{\Delta W_{dirty}}{[1 - \frac{P_{up}}{P_{down}}]} - W_{up-clean} + \frac{\Delta W_{clean}}{[1 - \frac{P_{up}}{P_{down}}]} \quad (2)$$

### 3.3 측정 오차 검증

앞에서 언급했듯이, 수중에서의 필터 무게 측정 시, 부력 보정인자의 적용은 객관적이고 정확한 필터 성능 도출을 위해 필수적인 과정이다. 부력에 대한 오차범위를 확인하기 위해 본 연구에서는 한전원자력연료(KNF)에서 수행한 초음파 세정장치 실증시험 데이터를 참조하였다. 실증시험 데이터는 얇은 수심 (4 ft)와 깊은 수심 (38 ft)로 나누어 2개의 필터에 대하여 분석되었으며, Table 1에 나타내었다<sup>(8)</sup>.

**Table 1** Measured Filter Weight Data<sup>(6)</sup>

Weight	Filter #1 (kg)	Filter #2 (kg)
$W_{up-clean}$	4.666	4.691
$W_{down-clean}$	5.248	5.271
$W_{up-dirt}$	4.840	4.895
$W_{down-dirty}$	5.376	5.423

먼저, 부력 보정을 수행하지 않을 경우, 얇은 수심에서의 Filter #1의 무게는 0.134 kg이 도출이 되고, 깊은 수심에서는 0.128 kg이 도출된다. Filter #2의 경우에는 얇은 수심에서 0.204 kg, 깊은 수심에서는 0.152 kg이

도출된다. 이를 정리하면, Table 2로 나타낼 수 있다.

**Table 2** CRUD Weighing before Buoyancy Correction

Weight	Filter #1 (kg)	Filter #2 (kg)
4 ft - CRUD	0.134	0.128
38 ft - CRUD	0.204	0.152
Average	0.169	0.14

4 ft와 38 ft 수심에서의 부력을 보정하여 크러드의 무게를 측정하는 방법은 앞의 절에서 설명한 식 (2)로써 도출이 가능하다. Table 1에 나타낸 수치와 식 (2)를 이용하여 Filter #1의 크러드 무게를 도출하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Filter1 (CRUD) = [4.84 + \frac{(5.376 - 4.84)}{(1 - \frac{16.4}{31.1})}] - [4.666 + \frac{(5.248 - 4.666)}{(1 - \frac{16.4}{31.1})}] \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 Filter #1에 포집된 CRUD 무게를 도출한 결과, 0.076 kg이 계산되었으며, Filter #2의 경우에는 동일한 계산식을 이용하여 0.093 kg이 도출되었다. 이를 보정하기 전의 크러드 평균 무게와 비교하면 Table 3과 같이 각각 0.093 kg, 0.047 kg의 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

**Table 3** Error in Weight before and after Correction

	Filter #1 (kg)	Filter #2 (kg)
Uncorrected Crud Weight (kg)	0.169	0.14
Corrected Crud Weight (kg)	0.076	0.093
Error (%)	222	150

오차의 경우, 보정 전 CRUD와 보정 후 CRUD는 각각 222%, 150%의 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 실제 포집된 CRUD의 양을 과대평가할 가능성이 있다.

## 4. 결 론

원자로 1차 계통의 설비 및 배관 등에서 부식 용출된 크러드는 원자로의 1차 계통 냉각수에 의해 순환하면서

핵연료 피복관 표면에 부착되어 AOA를 유발시켜 원전 출력감발 또는 발전소 조기정지등을 초래 할 수 있는 것으로 보고되어 2000년 이후부터 세계 각 원전에서는 초음파를 이용한 핵연료 크러드 세정작업을 수행하고 있다.

본 논문에서는 초음파 핵연료 세정장비의 시스템 구성과 각 구성품의 기능에 대해 기술하였는데, 이는 해외에 의존하고 있는 초음파 핵연료 세정기술의 국산화 개발에 보탬이 되고자 정리하였다.

또한, 세정 효과의 척도인자가 되고, 노심 안전성 평가 BOA (Boron-Induced Offset Anomaly) 코드의 입력 자료로도 활용되는 제거된 크러드 무게를 정확히 측정하는 방법을 소개 하였다. 크러드가 포집된 고풍사능 필터는 수중에서 무게를 측정해야 하며 이때 발생하는 부력으로 측정오차가 발생하는데, 이를 보정시켜주는 공식을 유도하였다. 측정 결과 부력 보정을 적용한 Filter #1에 포집된 CRUD 무게는 0.076kg, Filter #2에서는 0.093kg이었고, 보정하기 전의 크러드 무게와 비교하면 각각 0.093kg, 0.047 kg만큼의 오차가 발생하여 222%, 150%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 부력 보정없이 데이터를 수용할 경우 실제 포집된 CRUD의 양을 과대평가할 가능성이 있기 때문에, 장주기 측면에서 핵연료 건전성이 저해될 것으로 판단된다. 특히 이와 같이 수중에서 부력효과를 반영한 무게 측정방법은 원전의 화학계엄 또는 계통계엄에서 발생하는 필터류의 정량적 무게측정에도 활용 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) Uh, H. S., Kim, J. H., Gwon, T. J., Kim, Y. G., Jeong, I. S., and Kim, S. D., 2002, "Study on rootcause analysis and reduction method in design base for AOA," *Transactions of Korean Nuclear Society 2002 Autumn Meeting*, Pyeongchang, Oct. 01, pp.70.1.
- (2) Shin, J. C., Yang, J. D., Seong, U. H., Ryu, S. W., and Part, Y. W., 2020, "Sipping Test Technology for Leak Detection of Fission Products from Spent Fuel Nuclear Fuel," *Trans. of the KPVP*, Vol. 16, No. 2, pp. 18-24. doi:<https://doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.2.018>
- (3) EPRI, 2000, "Pressurized Water Reactor Fuel Cleaning Using Advanced Ultrasonics," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1001052.
- (4) Ivars, Roland., Fredriksson, Eva., Rosengren, Anders., and Hallgren, Peter., 2002, "Decruding of PWR Fuel with the ICEDEC™ technique," *Proceedings of the 17th KAIF/KNS Annual Conference*, Seoul, Apr. 17-19, pp. 618.
- (5) EPRI, 2001, "Characterization of Corrosion Products on the Callaway Cycle 9 PWR Core," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1003129.
- (6) Kim, S. W., Park, S. Y., Kim, G. H., Han, W. J., and Woo, S. K., 2019, "Ultrasonic Cleaning for Reloaded Nuclear Fuel in Domestic NPP," *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, May. 22-24.
- (7) KEPKO NF, 2018, "Ultrasonic Cleaning Technology for Nuclear Fuel Crud," Korea Electric Power Corporation Nuclear Fuel, Daejeon, *KNF-ENG-01*.
- (8) EPRI, 2009, "Quantifying Corrosion Products Removed from Fuel Assemblies by Ultrasonic Fuel Cleaning," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1018718.