

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.2.149>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 가중평균을 이용한 핵연료 이물질 여과성능 평가에 관한 연구<sup>§</sup>

박준규\* · 이성기\* · 김재훈\*\*†

\* (주)한전원자력연료 핵연료연구실, \*\* 충남대학교 기계공학부

### A Study on the Performance Assessment of Nuclear Fuel Debris Filtration Using the Weighted Mean

Joon Kyoo Park\*, Seong Ki Lee\* and Jae Hoon Kim\*\*†

\* Nuclear Fuel Technology Dept., KEPCO Nuclear Fuel Co. Ltd,

\*\* School of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received July 25, 2016 ; Revised September 30, 2016 ; Accepted October 17, 2016)

**Key Words:** Failure-Inducing Debris(손상유발 이물질), Weighted Mean(가중평균), Debris Filtering Efficiency(이물질여과 효율), Nuclear Fuel(핵연료)

**초록:** 핵연료는 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되는 구조물로서 손상유발 이물질이 유입되지 않도록 이물질여과 기구를 포함하고 있다. 핵연료의 이물질여과 성능은 건전성에 가장 중요한 영향 인자로 합리적이고 객관적으로 평가되어야 하는 지표이다. 본 연구에서는 표준 여과효율 성능지수를 수립하고자 가중평균을 이용하여 종합 이물질여과 효율 계산 방법을 제시하였다. 제안된 방법의 적합성을 확인하기 위해 대표 이물질 시편을 선정하고 이물질여과 실험을 통해 가중평균 여과 효율을 산술평균 여과 효율과 비교하였다. 가중평균법은 성능의 변별력을 강화하고자 이물질의 통과 가능 정도를 가중인자로 사용하였다. 부가적으로 이물질 시편의 크기와 여과 기구의 주요 치수에 따른 상용 핵연료의 여과 거동 분석을 수행하였다.

**Abstract:** Nuclear fuel requires high reliability and safety and therefore contains debris filtering devices to prevent failure-inducing debris from entering it. The debris filtering performance of nuclear fuel is one of the most important factors for fuel integrity. Therefore, the performance must be evaluated and the measurement must be reasonable. In this study, a calculation method of the comprehensive filtering efficiency using the weighted mean was proposed to establish a standard filtering efficiency index. To confirm the suitability of the proposed method, representative debris specimens were selected and the filtering efficiency with the weighted mean was compared with the efficiency of the arithmetic mean. The weighting factor of the weighted mean was introduced to produce a fair evaluation. In addition, the analysis of the debris filtering mechanism was performed according to the size of debris specimens, and the main dimensions of the filtering feature for commercial nuclear fuel.

- 기호설명 -

$p_i$  :  $i$ 그룹 이물질 시편 여과효율  
 $m_i$  : 여과된  $i$ 그룹 이물질 개수  
 $N_i$  :  $i$ 그룹 이물질의 총 개수  
 $M$  : 실험에 사용된 이물질 그룹의 개수

$P_{c,r}$  : 비율을 이용한 이물질여과 효율  
 $P_{c,m}$  : 산술평균을 이용한 이물질여과 효율  
 $P_{c,w}$  : 가중평균을 이용한 이물질여과 효율  
 $W_i$  :  $i$ 그룹 이물질의 가중인자  
 $t_\alpha$  : 단측  $1 - \alpha$  신뢰구간에 해당되는  $t$ 값  
 $\beta$  : 여과효율 오차 범위  
 $D$  : 원자로 하부노심 모사관의 유로구멍 지름 [mm]  
 $l$  : 이물질 시편의 특성 길이 [mm]

§ 이 논문은 대한기계학회 충청지회 2016년도 춘계학술대회(2016.5.27., 한밭대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

### 1. 서론

통계적 방법을 이용하는 평가척도로 산술평균(arithmetic mean)은 산업분야에 널리 적용되어 왔으며, 자료의 중심을 확인하는 유용한 대푯값중의 하나로 사용되어 왔다. 하지만 분석 자료에 극단값이 존재할 경우 의미 있는 대푯값 추정에 크게 영향을 받게 되는 단점이 있다. 가중평균은 변량의 합계를 총 개수로 나누어 계산하는 산술평균과는 다른 방법으로 각 변량에 중요도 정도에 해당하는 가중치를 곱한 평균을 의미한다. 가중평균은 극단값의 영향을 덜 받으며 서로 다른 중요성을 갖는 변량을 보다 합리적으로 표현할 수 있다. 따라서 자료 분포의 왜도가 심하고 극단값이 존재하는 실험 관측값 분석에 산술평균을 사용하기 보다는 가중평균을 이용하면 보다 합리적인 평가를 수행할 수 있다. 또한 가중평균은 실험값의 모든 정보를 활용하여 대푯값을 추정하므로 중앙값(median) 또는 절사평균(trimmed mean)보다는 충족적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 주로 극단값과 비대칭 분포를 갖는 경수로형 핵연료의 이물질여과 실험 결과 분석에 국제 표준화 지수를 제시하기 위한 일환으로 가중평균법을 적용하였다.

핵연료는 원자로 내에서 방사성물질을 함유하고 있는 구조물로서 고도의 신뢰성과 안전성이 요구된다. 핵연료는 핵분열에 의해 열을 방출하게 되고 냉각수(coolant)는 원자로를 고속으로 순환하며 발생한 열을 흡수하여 증기발생기에 전달하는 역할을 한다. 이러한 냉각수의 순환과정에서 건설 및 정비 중에 발생한 금속 파편 및 와이어 등의 다양한 이물질은 냉각수속으로 혼입되고 이동하여 핵연료 하부로 유입 될 수 있다. 유입된 이물질들은 연료봉(fuel rod)과 지지격자 사이의 좁은 공간에 위치하여 장시간 미세 진동으로 연료봉 프레팅 마모 손상을 발생시킨다.

핵연료 공급사들은 이물질에 의한 손상을 방지하기 위해 핵연료의 이물질여과 기능 향상을 주요 목표로 하여 다양한 설계개념의 이물질여과 기구를 개발하고 있으며, 성능을 평가하기 위해 각 사 고유의 실험시설과 방법으로 여과효율을 평가하고 있다. Fig. 1은 세계적으로 많이 적용하고 있는 이물질여과 개념으로 현재 국내 경수로형 상용 공급 핵연료에도 적용된 하단고정체(bottom nozzle)와 보호지지격자(protective grid) 이물질여과 기구를 보여주고 있다.

각 공급사 마다 개발된 여과기구 평가를 위해 수행된 실험에는 상이한 이물질 시편이 사용되었

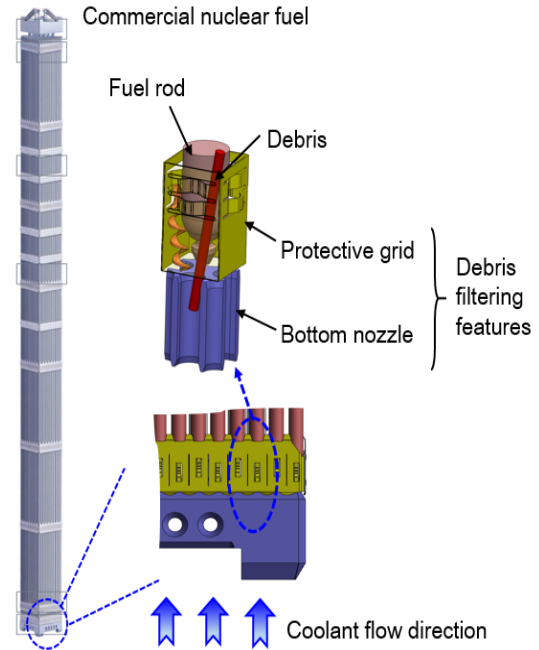


Fig. 1 Debris filtering features for commercial nuclear fuel

으며, 해당 시설을 이용한 실험방법 또한 서로 다르다.<sup>(1-5)</sup> 즉, 핵연료의 이물질여과 성능 평가 방법이 제조사 마다 달라 객관적 평가가 어려운 실정이다. 실험결과의 신뢰성 및 평가방법을 제고하기 위해 Park 등<sup>(6)</sup>은 이물질여과 실험방법을 제안하였다. 제안된 방법은 통계적으로 유효한 결과를 산출하기 위한 방법으로 이물질 시편 크기에 따른 반복 실험횟수와 동시에 투입 가능한 이물질개수 선정방법에 대하여 정립하였다. 여과효율 분석을 위해 본 연구에서는 제안된 실험방법을 적용하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 가중평균을 이용한 종합 이물질여과 효율 평가방법을 제안하고 상용 핵연료를 이용한 실험결과 분석에 적용함으로써 제안한 여과 성능 평가 방법의 적합성을 확인하였다. 부가적으로 이물질 시편의 크기와 이물질여과 기구의 주요 치수에 따른 상용 공급 핵연료의 여과 특성에 대하여도 분석하였다.

### 2. 이물질여과 효율 평가방법

이물질여과 실험에는 다양한 형상과 크기를 갖는 이물질 시편이 사용된다. 동일한 종류와 크기의 이물질 시편을 이용한 실험에 대한 여과효율은 투입된 이물질 시편의 총 개수 중에 여과된 이물질 개수의 비율로 식 (1)과 같이 계산된다.

$$p_i = \frac{m_i}{N_i} \quad (1) \quad \text{같이 쓸 수 있다.}$$

식 (1)은  $i$ 그룹의 이물질 시편에 대한 여과효율로 투입한 이물질 시편 그룹에 따라 효율이 다르며, 다른 핵연료와 상대비교를 위해서는 동일한 이물질을 사용해야만 해당 이물질 종류에 대한 여과 성능을 비교할 수 있다. 다양한 종류의 이물질 시편을 사용하는 실험에서는 여과성능 수준 비교를 위해 각 이물질 시편 그룹의 여과 효율을 종합하여 하나의 대푯값으로 표현해야 한다. 기존 방법에는 대푯값으로 식 (2)의 비율(proportion)<sup>(5)</sup> 또는 식 (3)의 산술평균<sup>(1)</sup>이 사용되었다.

$$P_{c,r} = \frac{\sum_{i=1}^M m_i}{\sum_{i=1}^M N_i} \quad (2)$$

$$P_{c,m} = \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{M} \quad (3)$$

상대적으로 큰 극단값이 존재하는 이물질여과 실험자료를 보다 합리적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 가중평균을 이용하여 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$P_{c,w} = \sum_{i=1}^M W_i p_i \quad (4)$$

식 (4)의 가중인자  $W_i$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$W_i = \frac{1-p_i}{\sum_{i=1}^M (1-p_i)} \quad (5)$$

여기서,  $1-p_i$ 는  $i$ 그룹의 이물질이 여과되기 어려운 정도로 이물질의 통과효율을 나타낸다. 따라서  $W_i$ 는 실험에 사용된  $M$ 개 그룹의 전체 이물질 통과효율과 각 그룹의 통과효율 비를 나타낸 것으로 항상  $\sum_{i=1}^M W_i = 1$ 이 만족되며, 여과되기 쉬운 이물질에는 작은 값을 부여하고 여과되기 어려운 이물질에는 큰 값을 부여하도록 하였다. 즉, 각 이물질 시편 그룹의 여과되기 어려운 정도를 가중하여 대푯값을 산출한 것이다. 식 (4)의 종합 이물질 여과 효율은 항상 0과 1 사이에 존재하며, 1에 가까울수록 여과성능 수준이 높게 평가된다.

$p_i = 1$ 인 극댓값을 갖는 이물질 그룹은 식 (5)의  $W_i$ 가 0이 되어 식 (4)의 종합 이물질여과 효율 계산에서 제외된다. 반대로  $p_i = 0$ 인 극솟값의 경우, 식 (4)의 합에서 제외된다. 따라서 모두 여과되는 큰 이물질과 모두 통과되는 아주 작은 이물질은 종합 여과효율 계산에서 배제되도록 하였다.

가중평균을 이용한 종합 이물질여과 효율과 산술평균 효율과의 관계를 비교하기 위해 식 (6)과

$$\begin{aligned} P_{c,w} &= \frac{\sum_{i=1}^M p_i(1-p_i)}{\sum_{i=1}^M (1-p_i)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M p_i - \sum_{i=1}^M p_i^2}{M - \sum_{i=1}^M p_i} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{M} \frac{1}{1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^M p_i^2}{\sum_{i=1}^M p_i} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 항상  $0 \leq p_i \leq 1$ 이므로  $\sum_{i=1}^M p_i \leq M$ 과  $\sum_{i=1}^M p_i \geq \sum_{i=1}^M p_i^2$ 의 대소관계를 적용하면 식 (7)과 같은 부등식이 성립된다.

$$\begin{aligned} P_{c,w} &= \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{M} \frac{1}{1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^M p_i^2}{\sum_{i=1}^M p_i} \right) \\ &\leq \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{M} \frac{1}{1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^M p_i^2}{M} \right) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{M} \cdot \alpha \quad (\alpha \geq 1) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\alpha$ 는 항상 1보다 크므로 최솟값인  $\alpha = 1$ 인 경우가 최소상계값(supremum)이 되어 가중평균을 이용한 종합 이물질여과 효율은 항상 산술평균 효율보다 작음을 알 수 있다. 따라서 가중평균은 극단값에 의해 비보수적으로 우수하게 평가되는 산술평균 여과 효율을 낮추어 보수적이고 보다 변별력 있게 평가할 수 있다.

### 3. 실험장비 및 방법

#### 3.1 실험 장비

가중평균을 적용한 종합 이물질여과 성능을 분석하기 위해 연료봉 배열이 17x17인 상용 공급 핵연료<sup>(7)</sup>를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 장비와 모의 핵연료 시편을 나타내었다. 실험장비는 냉각수가 흐르는 원자로 조건을 모사하기 위해 대형 수조(water tank), 여과기(strainer), 펌프(pump), 밸브(valve), 이물질 투입구(debris injection), 실험 하우징(test housing)으로 구성되어 있다. 실험 하우징은 실험도중 핵연료에 여과된 이물질 개수와 위치를 육안으로 확인하기 위해 4면이 투명한 판으로 제작되었으며, 이물질 여과 기구가 포함된 상용 공급 핵연료 하부모형 시편 1다발이 수용 가능하도록 제작되었다. 여과

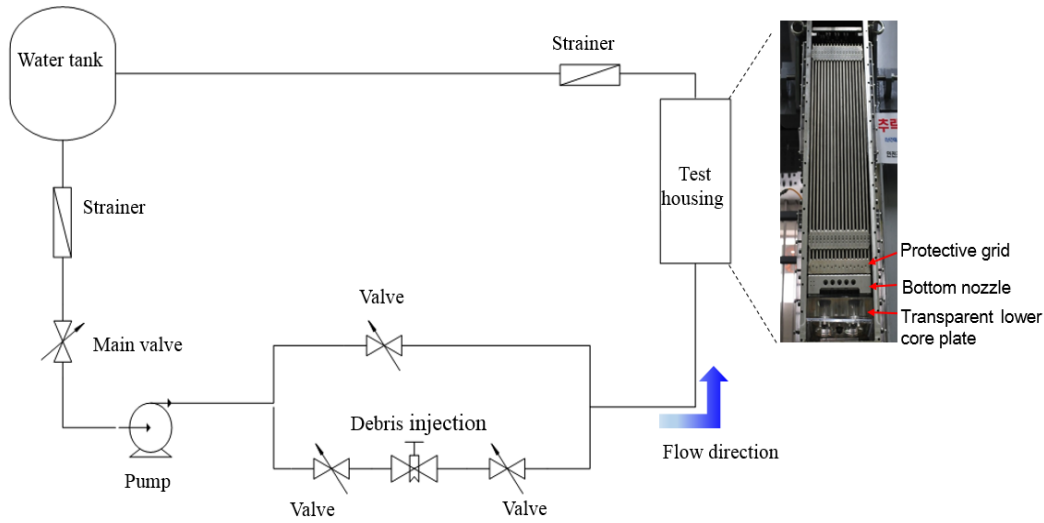


Fig. 2 Schematic diagram of the debris filtering test facility and commercial nuclear fuel specimen

기는 핵연료를 통과한 이물질 시편을 포획 및 확인하기 위해 실험 하우징 상부에 설치하였다. 또한 원자로 하부의 수력적 구조형상을 실제와 유사하게 모사하기 위해 투명한 하부노심 모사판 (transparent lower core plate)을 모의 핵연료 시편 하부에 설치하였다. 배관은 냉각수가 실험 요구 유량조건에 도달 하였을 때 이물질이 하우징에 유입 되도록 분배하여 구성하였다.

3.2 이물질 시편

원자력발전소 현장에서 확인된 이물질들은 주로 작은 금속성 조각으로 그 크기와 형태가 매우 다양하다. 하지만, 성능평가 실험에서는 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 표준 이물질 시편 종류와 크기를 선정해야 하며, 이는 노심에서 발견되는 손상유발 이물질 형상을 대표할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이물질 표준 시편형태를 Fig. 3과 같이 와이어(wire)와 판형 (plate)으로 선정하고 크기에 따라 와이어 20종, 판형 27종을 포함한 총 47종으로 분류하였다.

와이어 형태는 대표적인 손상유발 이물질로 발전소 정비기간 중에 주로 금속 와이어 휠이나 브러시<sup>(8)</sup> 등에서 발생하며, 판형 형태의 이물질은 핵연료 부품인 지지격자 및 발전소 기계부품 또는 배관 손상으로부터 발생할 수 있는 얇은 박판의 이물질을 모사하기 위해 선정하였다. 선정된 이물질 시편의 크기는 성능 변별력을 높이기 위해 하부노심 모사판과 하단고정체 유로구멍을 통과 가능하도록 선정하였으며, 육안으로 확인이 용이하도록 이물질 표면을 붉은색으로 도색 하였다. 와이어 이물질 시편의 경우, 직경은 1.0~2.5 mm이며

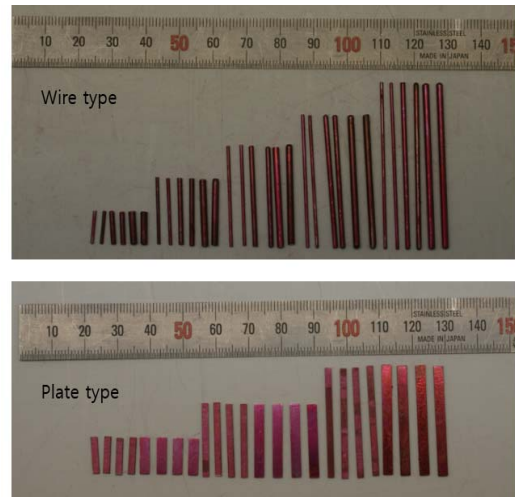


Fig. 3 Wire and plate debris specimens

길이는 10~50 mm이다. 판형 이물질 시편의 경우, 두께는 0.3~0.9 mm, 폭은 2.0~4.0 mm, 길이는 10~30 mm이다.

3.3 실험 방법

이물질여과 효율 실험 방법은 Park 등<sup>(6)</sup>이 제시한 방법에 따라 수행하였다. 각 이물질 그룹에 따른 총 요구 이물질 투입개수는 여과 효율이 오차 5% 범위 내에 존재하도록 식 (8)에 따라 선정 하였다.

$$N_i = \frac{t_\alpha}{\beta} \sqrt{\frac{1-p_i}{p_i}} \tag{8}$$

한 번의 실험에 총 요구 수량  $N_i$ 를 모두 투입할 경우 이물질간의 간섭이 발생하여 신뢰성 있는 실

**Table 1** Debris filtering test conditions

Parameter	Values
Test flow rate[GPM]	1900
Total number of debris types	47
Min. test duration[min]	5
Temperature	Room temperature

험결과에 영향을 주게 된다. 따라서 이물질 간에 서로 독립성이 보장하도록 식 (9)에 따라 투입 개수를 선정하였다.

$$N_{i,S} = \frac{2D^2}{l^2} \quad (9)$$

즉, 한 번의 실험에  $N_{i,S}$ 개의 동종 이물질 시편을 투입하여 총 투입된 이물질 시편이 총 요구수량  $N_i$ 를 만족할 때까지 반복 실험을 수행하였다.

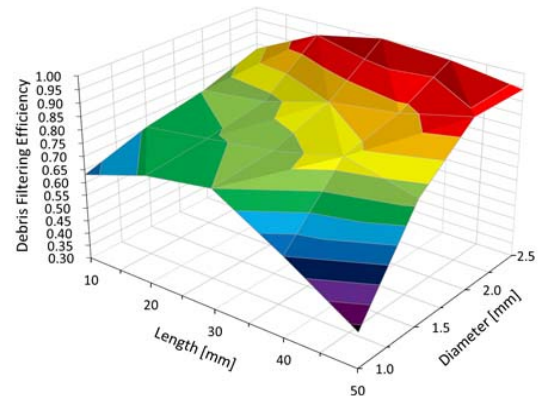
본 연구의 실험 조건은 Table 1과 같으며, 실험 유량은 원자로내 조건과 동일하게 하였다. 실험 중 유량은 투입된 이물질이 여과된 후 이동이 없을 때까지 일정하게 유지하였다. 여과된 개수는 실험 중에 육안으로 개수와 위치를 파악하고, 확인이 불가능한 이물질은 핵연료 시편을 실험 하우징으로부터 분리하여 확인하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

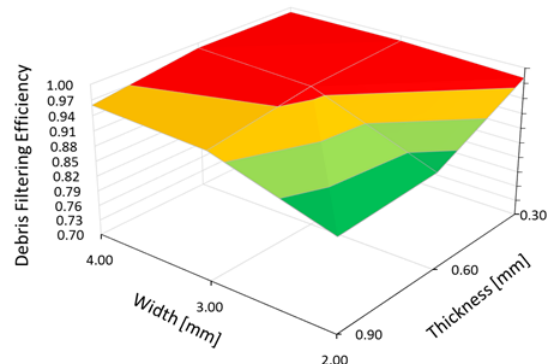
##### 4.1 이물질여과 특성

식 (1)에 의하여 계산된 각 이물질 종류에 따른 상용 공급 핵연료의 여과효율은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 와이어 이물질 길이와 직경에 따른 여과효율의 경향으로 직경이 증가할수록 여과효율이 증가하지만, 길이는 증가할수록 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 판형 이물질 크기에 따른 여과효율 경향으로 길이에 따른 효율 변화량이 작아 두께와 폭에 대해서 나타냈으며, 폭이 감소하고 두께가 증가할수록 여과효율이 감소하는 것으로 확인되었다. 전반적으로 폭이나 직경이 증가할수록 여과효율은 증가하지만, 길이와 두께는 증가하더라도 효율이 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 이유는 유로방향과 이물질의 길이방향이 정렬되어 여과 기구를 쉽게 통과할 수 있었던 것으로 판단되며, 이물질이 유로 흐름 방향으로 정렬되더라도 폭과 직경이 커지면 통과하기 어렵기 때문에 효율이 증가한 것으로 판단된다.

이물질여과 효율은 여과기구의 형상에 영향을 많이 받는다. 특히 이물질여과 기구의 통과 가능

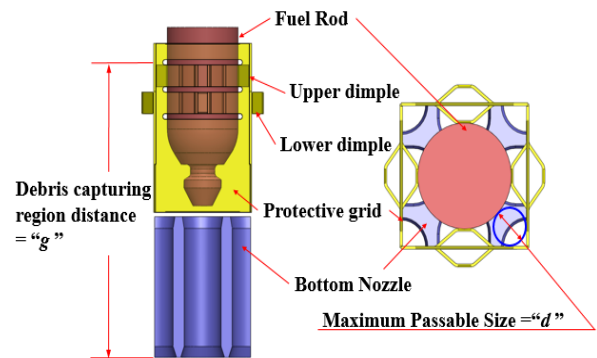


(a) Wire debris



(b) Plate debris

**Fig. 4** Debris filtering efficiency depending on debris dimensions



**Fig. 5** Debris filtering structural configuration

한 최대 원의 크기와 냉각수 유로방향 이물질 포획 영역 길이는 주요 영향치수로 고려된다.<sup>(5)</sup> Fig. 5는 상용 공급 핵연료의 이물질 여과 기구 구조형태와 치수를 나타낸 것이다. 이물질 포획 구간의 길이 “g”는 하단고정체 하부면에서부터 보호지지격자 상부 뒤편까지의 거리이며, 최대통과 크기 “d”는 원형의 이물질이 통과할 수 있는 최대 크기를 의미한다.

Fig. 6은 전체평균에 대한 이물질 상대치수의 주

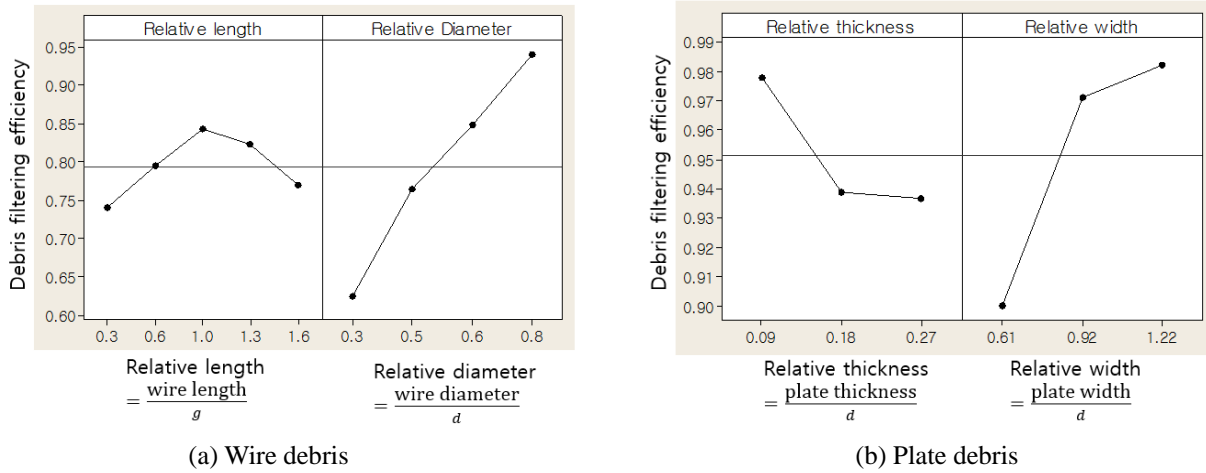


Fig. 6 Main effects plots for debris filtering efficiency

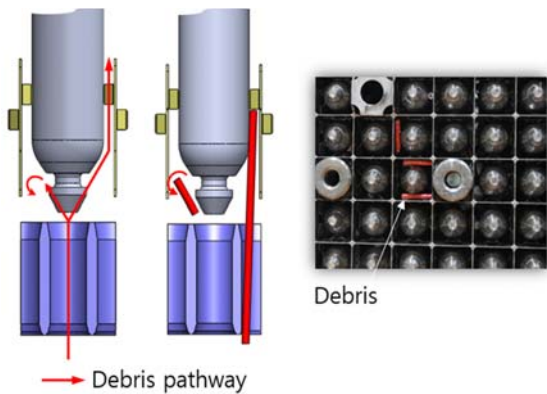


Fig. 7 Debris behavior

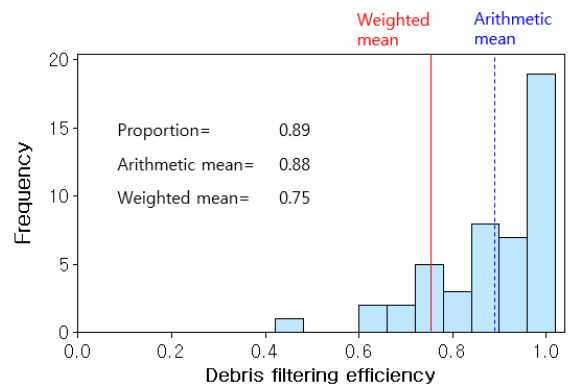


Fig. 8 Comprehensive debris filtering efficiency

효과도를 통계분석 프로그램인 MINITAB R14<sup>9)</sup>를 이용하여 나타내었다. 주 효과도는 전체 평균과 관심인자 평균과의 관계를 나타낸 것으로 서로간의 반응정도를 확인하는데 주로 사용된다.

와이어의 상대길이는 이물질 길이와 포획구간 길이 “g”와의 비이며, 상대직경은 이물질 직경과 최대통과 크기 “d”와의 비로 정의한다. 판형 상대 두께와 상대폭은 최대통과 크기 “d”와의 비로 정의한다. Fig. 6(a)에서 보듯이 와이어 상대길이는 1.0까지 증가하다가 감소하며, 상대직경은 증가할수록 여과효율이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 와이어 직경이 길이보다 여과효율에 더 큰 영향을 주며, 포획구간 길이보다 긴 와이어는 쉽게 여과 기구를 통과하는 것을 의미한다. Fig. 6(b)의 판형 이물질의 상대두께는 증가할수록 여과효율이 감소하며, 상대폭은 증가할수록 상대두께 효율보다 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 판의 폭이 두께보다 상대적으로 여과

효율에 영향을 많이 주며, 두께가 증가할수록 판형 길이방향보다 쉽게 유로 흐름방향으로 정렬되어 효율이 감소하는 것으로 판단된다.

이물질별 여과효율 특성을 종합 분석하여 상용 공급 핵연료 여과기구 내에서의 이물질 거동을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 하단고정체의 유로구멍을 통과한 이물질은 연료봉 하부봉단 마개의 챔퍼에 충돌 후 회전하게 되며 통과 가능한 길이 방향으로 정렬되어 여과 기구를 통과하게 된다. 하단고정체를 통과한 작은 이물질은 연료봉과 하단고정체 사이 공간에서 회전하게 되어 보호 지지격자의 덤플 하부에 포획될 수 있으나 하단고정체를 통과한 길이가 긴 이물질은 보다 쉽게 통과되는 것으로 관측되었다. 또한 하단고정체를 통과한 이물질의 폭이나 직경이 증가할수록 여과효율이 증가하며, 그 크기가 여과기구 최대통과 크기와 유사하거나 큰 경우에는 여과기구를 통과하기 어려운 것으로 확인되었다.

**Table 2** Weighting factors for wire and plate debris

	Length [mm]	Diameter [mm]			
		1.0	1.5	2.0	2.5
Wire	10	0.068	0.054	0.045	0.031
	20	0.053	0.048	0.040	0.009
	30	0.046	0.042	0.027	0.000
	40	0.073	0.031	0.021	0.003
	50	0.104	0.042	0.010	0.010

	Length [mm]	Thickness=0.3 mm			Thickness=0.6 mm			Thickness=0.9 mm		
		Width [mm]			Width [mm]			Width [mm]		
		2.0	3.0	4.0	2.0	3.0	4.0	2.0	3.0	4.0
Plate	10	0.015	0.005	0.005	0.022	0.004	0.009	0.027	0.004	0.004
	20	0.004	0.005	0.002	0.020	0.004	0.002	0.022	0.009	0.007
	30	0.002	0.002	0.000	0.029	0.011	0.000	0.024	0.007	0.000

4.2 종합 이물질여과 효율 평가

각 이물질 종류별 여과효율  $p_i$ 를 이용하여 히스토그램을 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보듯이 본 연구에서 사용된 각 이물질에 대한 효율은 대칭분포가 아니며, 자료가 대부분 오른쪽으로 치우친 음의 왜도를 갖는 분포이다. 한 방향으로 기울어진 분포의 경우 극단값이 존재하며, 산술평균은 극단값에 영향을 받게 되어 대푯값으로 사용하기에 적절하지 않게 된다. 이러한 이유로 본 연구에서 제시한 가중평균은 식 (4)와 (5)에 의해 극단값 1이 배제되고 가중인자를 부여하여 한쪽으로 치우친 값을 보상하도록 하였다. 식 (2)의 비율, 식 (3)의 산술평균, 식 (4)의 가중평균을 이용한 종합 이물질여과 효율을 Fig. 8에 나타내었다. 비율과 산술평균은 값이 유사하고 가중평균보다 크며 극단값에 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8의 이물질여과 효율 분포는 실험에 사용된 각 이물질 그룹이 동일한 확률로 발전소에서 발견되는 경우에 한하여 나타낸 것이며, 특정 이물질 그룹의 발생 확률이 다르게 될 경우에는 해당 이물질 그룹의 여과효율에 추가적인 중요도를 부과하여 평가를 수행할 수 있을 것이다.

Table 2는 가중평균 계산에 사용된 47종 이물질 시편의 가중인자를 정리한 것이다. 전반적으로 와이어의 가중인자가 판형 보다 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 와이어가 판형보다 상대적으로 이물질 통과 가능성이 높음을 의미한다. Table 2의 가중인자를 기준값으로 사용하면 다른 핵연료와 상용 공급 핵연료의 종합 이물질여과 효율을 상대비교할 수 있으며, 이는 향후 개발되는 이물질여과 기구의 성능향상 정도를 측정하는 기준으로도 사용

될 수 있을 것이다.

5. 결론

가중평균을 이용하면 각 변수에 중요도 정도를 고려한 가중치를 적용하여 왜도가 심하고 극단값이 존재하는 자료 분석에 합리적인 대푯값을 산출할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 분포가 비대칭이며 극대값이 존재하는 경수로형 핵연료 이물질여과 실험결과 분석에 가중평균을 이용하는 방법을 제안하였다. 제안된 평가방법의 적합성을 확인하기 위해 국내 상용 공급 핵연료를 이용하여 이물질여과 실험을 수행하였다. 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 와이어와 판형의 대표 이물질 시편 47종을 선정하여 크기별로 반복실험을 수행 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

이물질의 길이가 여과 기구의 포획구간 보다 긴 경우 효율은 감소하지만, 이물질의 직경이나 폭이 증가하면 비례적으로 효율이 증가하는 것으로 확인되었다. 그 원인은 이물질의 길이방향이 유량흐름 방향으로 정렬되어 긴 이물질이 보다 쉽게 통과되는 것으로 판단되며, 폭과 직경은 여과기구의 최대통과 크기에 가까워질수록 여과기구를 통과하기 어려워지는 것으로 확인되었다.

가중평균 종합이물질여과 성능 평가 방법론을 이용하여 여과성능을 대표할 수 있는 종합 이물질여과 효율을 산출하였다. 성능의 변별력을 강화하고자 각 이물질 47종의 통과 가능 정도를 가중인자로 정의하였으며, 다른 핵연료의 여과성능과 상대비교 할 수 있도록 국내 상용 공급 핵연료의 가

중인자를 기준으로 제시하였다.

참고문헌  
(References)

- (1) Brown, C.A., Ford, K.L. and Yates, J., 1992, "Development of a Solution to the Debris Fretting Problem," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 135, pp. 297~305.
- (2) Wilson, H. W., Scherpereel, L. R. and Sieradzki, G. B., 1996, "Debris Mitigation Features and Their Impact on Fuel Performance," *Specialist Meeting on Nuclear Fuel and Control Rods*, November 1996, Madrid, Spain, pp. 133~138.
- (3) Linden, S. and Rudolph, M., 1996, "Development and Experience of Debris Resistant Lower Tie Plates for BWR and PWR Fuel," *Specialist Meeting on Nuclear Fuel and Control Rods*, November 1996, Madrid, Spain, pp. 139~148.
- (4) Gotoh, K., 1999, "Development of Anti-Debris Fuel for PWR," ICONE-7222, April 19-23, Tokyo, Japan.
- (5) Jung, M.-S. and Kim, K.-T., 2013, "Debris Filtering Efficiency and Its Effect on Long Term Cooling Capability," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 261, pp. 1~9.
- (6) Park, N.-G., Park, J.-K., Kim, J.-I. and Jeon, K.-L., 2015, "PWR Fuel Debris Filtering Performance Measurement Method and Its Application," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 281, pp. 96~102.
- (7) Jang, Y. K. and Jeon, K. L., 2010, "In-reactor Irradiation Performances of Advanced Fuels, ACE7<sup>TM</sup>, for Westinghouse Type Nuclear Power Plants," *The 2010 fall conference of the Korean Society of Mechanical Engineering*, pp. 343~344.
- (8) Camilli, N., 2009, "Nuclear Maintenance Applications Center: Assessment of Replacement Wire Brushes," EPRI 1018488.
- (9) Ryan, B. F., Joiner, B. L. and Cryer, J. D., 2005, "Minitab Handbook," 5th Ed., Thomson Brooks/Cole, pp. 292~296.