

An Assessment of Air Sampling Location for Stack Monitoring in Nuclear Facility

원자력시설 굴뚝 내 공기사료채취 위치의 적절성 평가

JungBok Lee^{1*}, TaeHyoung Kim², JongIl Lee², and BongHwan Kim²

¹University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이정복^{1*}, 김태형², 이종일², 김봉환²

¹과학기술연합대학원대학교, 대전광역시 유성구 가정로 217

²한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received April 12, 2017 / Revised June 14, 2017 / Approved June 23, 2017)

In this study, air sampling locations in the stack of the Advanced Fuel Science Building (AFSB) at the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) were assessed according to the ANSI/HPS N13.1-1999 specification. The velocity profile, flow angle and 10 μm aerosol particle profile at the cross-section as functions of stack height L and stack diameter D (L/D) were assessed according to the sampling location criteria using COMSOL. The criteria for the velocity profile were found to be met at 5 L/D or more for the height, and the criteria for the average flow angle were met at all locations through this assessment. The criteria for the particle profile were met at 5 L/D and 9 L/D. However, the particle profile at the cross-section of each sampling location was found to be non-uniform. In order to establish uniformity of the particle profile, a static mixer and a perimeter ring were modeled, after which the degrees of effectiveness of these components were compared. Modeling using the static mixer indicated that the sampling locations that met the criteria for the particle profile were 5-10 L/D. When modeling using the perimeter ring, the sampling locations that met the criteria for particle profile were 5 L/D and 7-10 L/D. The criteria for the velocity profile and the average flow angle were also met at the sampling locations that met the criteria for the particle profile. The methodologies used in this study can also be applied during assessments of air sampling locations when monitoring stacks at new nuclear facilities as well as existing nuclear facilities.

Keywords: Airborne radioactive effluent, Sampling location, Sampling system, CFD

*Corresponding Author.

JungBok Lee, University of Science and Technology, E-mail: jblee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2013

ORCID

JungBok Lee <http://orcid.org/0000-0001-6234-0455>

JongIl Lee <http://orcid.org/0000-0001-6376-4903>

TaeHyoung Kim <http://orcid.org/0000-0003-0641-8793>

BongHwan Kim <http://orcid.org/0000-0002-7945-0594>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

본 연구에서는 한국원자력연구원의 핵연료가공시설 굴뚝 내에서 9곳의 시료채취 위치를 선정하여 ANSI/HPS N13.1-1999 지침에서 제시하는 기준에 따라 그 적절성을 평가하였다. 유체를 포함한 다중물리 해석 소프트웨어인 COMSOL을 활용하여 유동교란 지점으로부터 굴뚝 직경의 배수 높이 위치(L/D) 단면에서의 속도분포, 유동각 및 10 μm 크기의 입자분포 등의 항목에 대하여 기준만족 여부를 평가하였다. 평가 결과, 5 L/D 이상에서 속도분포에 대한 기준을 만족했으며, 평균 유동각에 대한 기준은 모든 위치에서 만족했다. 입자분포에 대한 기준은 5 L/D 와 9 L/D 에서 만족하였으나, 그 분포가 일부에서 기준을 만족하지 못하였다. 균일한 입자분포를 얻기 위한 방법으로 굴뚝 내 정적 혼합장치(static mixer)와 둘레링(perimeter ring)을 추가하는 것을 제안하고, 이에 대한 평가를 수행하였다. 정적 혼합장치를 추가한 경우에는 5-10 L/D, 둘레링을 추가한 경우에는 5 L/D 및 7-10 L/D 에서 입자분포에 대한 기준을 만족하였다. 보완을 위하여 추가한 2 가지 조건에서, 입자분포에 대한 기준을 만족하는 지점은 속도분포 및 평균 유동각에 대한 기준 역시 만족하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 방법은 신규시설뿐만 아니라, 현장입증시험 수행이 어려운 운영중인 시설에 대하여 시료채취 위치의 적절성을 평가하기 위한 방법으로 활용될 수 있다.

중심단어: 기체 방사성 유출물, 시료 채취 위치, 시료 채취 계통, CFD

1. 서론

한국원자력연구원 내 핵연료가공시설(Advanced Fuel Science Building, AFSB)에서는 부유성 개봉 우라늄을 취급하는 시설로, 외부로 배출되는 입자상 방사성 물질을 감시하기 위해 굴뚝에서 시료를 채취한 후 방사능을 측정하는 방법을 사용한다. 굴뚝 내 시료채취는 ANSI N13.1-1969의 지침에 따라 선정된 지점에서 등속도 다중 노즐(isokinetic multi nozzle)을 통해 이루어진다[1]. 다만, 상기 지침은 ANSI/HPS N13.1-1999로 개정되어 시료채취 위치에 대한 다양한 기준을 제시하고, 이를 만족하는 위치에 단일 쉬라우드 노즐(single shrouded nozzle)을 설치할 것을 권고하고 있다[2]. 이에 따라 AFSB의 굴뚝 내 시료채취 위치는 개정된 지침에서 제시하고 있는 기준에 적합한지 평가되어야 하며, 평가된 결과가 기준을 만족하지 못하는 경우에는 필요한 개선을 하여야 한다.

시료채취 위치 기준에 대한 평가는 40CFR60 Appendix A[3]에 제시된 방법에 따라 현장에서 직접 수행한다. 다만, 측정자가 방사성 기체에 직접 피폭할 가능성과 안전사고에 대한 우려 등이 있기 때문에 AFSB와 같이 실제 운영 중인 시설에서 수행하기 어렵다. 이 경우 현장입증시험 대신, 축소모형 또는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기법을 활용하여 평가한다. Ballinger et al. (2011) 및

Geraldi (2014)는 CFD 기법을 활용하여 시료채취 위치에 대한 평가를 수행한 바 있다[4,5]. CFD 기법을 활용한 평가방법은 별다른 제약 없이 수행할 수 있으며, 다양한 조건을 반영할 수 있기 때문에 사전 평가방법으로 유용하다.

본 연구에서는 AFSB의 시료채취 위치에 대한 사전 평가 방법으로, CFD 모듈이 포함된 COMSOL을 활용하여 수치해석 하였다. 해석된 결과를 바탕으로 ANSI/HPS N13.1-1999에서 제시하고 있는 시료채취 위치에 대한 허용기준과 비교 하였다. 기준을 만족하지 못하는 항목의 경우, 이를 해결하기 위한 개선방안을 제시하였다.

2. 시료채취 위치의 기준

AFSB는 부유성 개봉 우라늄을 취급하는 시설로, 기체상의 유출물에 입자 형태의 방사성 물질이 동반될 수 있으며, 이를 감시하기 위해 대표성 있는 시료를 확보해야 한다. 대표성 있는 입자 형태의 방사성 물질을 채취하기 위한 시료채취 위치의 기준은 Table 1과 같다.

변이계수(Coefficient of Variation, COV)는 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\text{COV}(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Summary of acceptance criteria for a sampling location

| Characteristic | Acceptance Criteria |
|---|--|
| Measurement to determine if flow in a stack or duct is cyclonic | The average resultant angle shall be less than 20° |
| Velocity profile | COV shall not exceed 20% over the center region of the stack that encompasses at least 2/3 of the stack area |
| Aerosol particle concentration | COV shall not exceed 20% over the center region of the stack that encompasses at least 2/3 of the stack area |

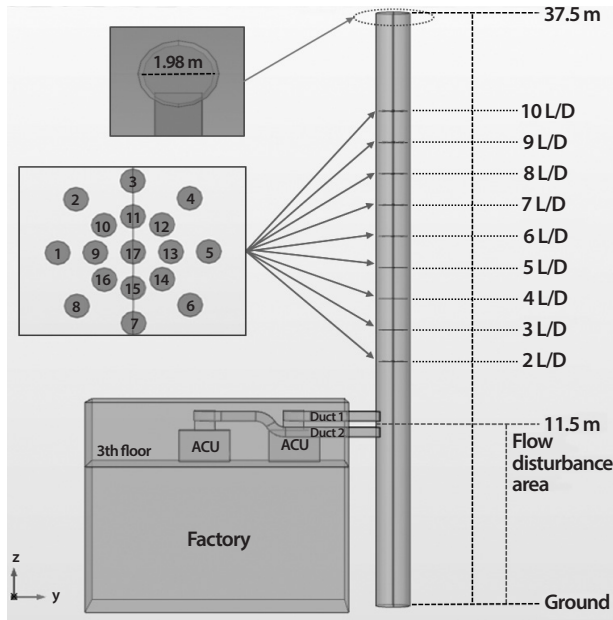


Fig. 1. Modeling of the Advanced Fuel Science Building (AFSB).

n 은 측정지점의 수, x_i 는 i 번째 측정지점에서의 입자의 농도 또는 속도의 값, \bar{x} 는 모든 측정지점에서의 입자의 농도 또는 속도의 평균값을 나타낸다.

3. 기준 평가

3.1 평가 방법

3.1.1 대상의 모델링

Fig. 1과 같이 AFSB의 덕트 및 굴뚝을 1:1 축척의 3차원으로 모델링 하였다. 공기정화기(air cleaning unit, ACU)를

거친 유출물은 2 개의 사각덕트(각 지름 1.2 m, 높이 0.6 m)를 통해 직경 2 m (내경 1.98 m), 지표면에서의 높이 37.5 m의 강제 원통형 독립구조의 굴뚝으로 이동하여 외부 환경으로 배출된다. 유동의 교란이 시작되는 지점을 지표면에서 11.5 m 높이로 설정하고, 해당 지점으로부터 굴뚝 직경의 배수 높이 위치(L/D)에 따라 총 9 곳의 시료채취 위치(2-10 L/D)를 선정하였다. 또한 평가를 위해 각 위치에 17 개의 측정지점을 형상화하였다. 모든 형상은 해석결과에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 해석시간 및 오류의 발생 확률을 줄이기 위해 단순화하였다.

3.1.2 지배방정식

(1) 굴뚝 내 유동 해석

굴뚝 내 유동을 해석하기 위해 정상상태 비압축성 유체에 대한 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes' equation)을 적용하였으며 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \eta (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) + F \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (3)$$

여기서 ρ , η 는 각각 유체의 밀도 및 점도, p 는 압력, T 는 절대온도, \bar{u} 는 속도벡터를 나타낸다. F 는 중력에 의한 효과력을 나타낸다. 심볼 ∇ 는 gradient로 3차원일 경우 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \quad (4)$$

(2) 입자분포 해석

시간 변화에 따른 각 측정지점에서의 입자분포를

해석하기 위해 뉴턴 제2법칙을 적용하였으며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\frac{d}{dt}(m_p \cdot v) = F_D + F_g \quad (5)$$

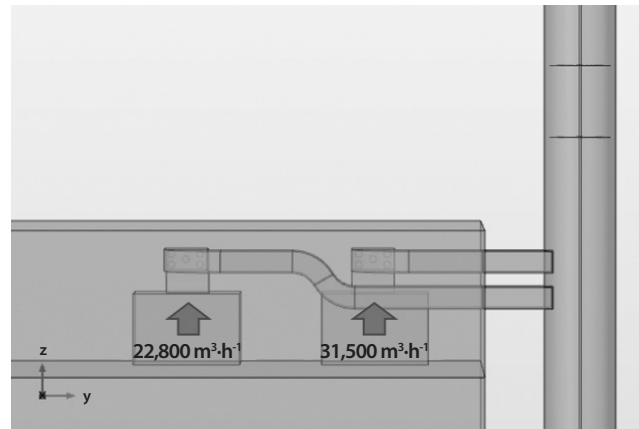
여기서 m_p 는 입자의 질량, F_D 는 항력, F_g 는 중력을 나타낸다. 입자는 굴뚝 내 유동의 영향을 고려하여 나비에-스톡스 방정식과 연동하여 해석하였다.

3.1.3 초기조건 설정

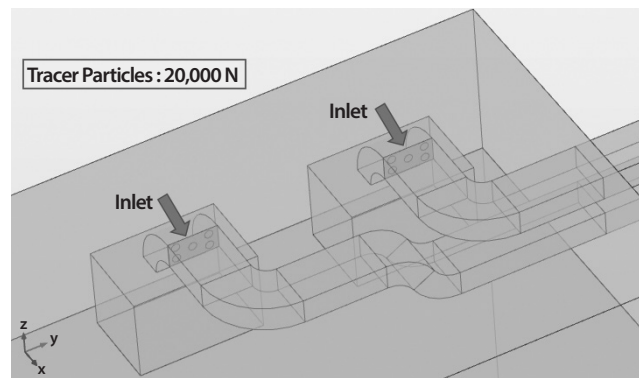
Fig. 2와 같이 초기 사각덕트 입구에서의 풍량 및 입자에 대한 초기조건을 설정하였다. 풍량은 각 ACU의 최대 풍량인 $22,800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 및 $31,500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 로 설정하였다. 굴뚝 내부의 온도 및 압력은 ISO 2889에서 제시하는 시설의 정상상태 조건인 25°C 및 101.325 kPa 로 설정하였다[8]. 입자는 덕트 내 지정된 단면에서 각 10,000 개, 총 20,000 개가 균일하게 주입되도록 설정하였으며, Drag Force 및 Gravity Force를 적용하였다. 해당 시설의 주 감시핵종인 우라늄의 밀도($19.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)를 적용하고 평가 조건인 $10 \mu\text{m}$ 입자 크기로 설정하였다.

3.1.4 수치해석방법

수치해석은 유체를 포함한 다중물리 해석 소프트웨어인 COMSOL을 사용하였다. 유동의 특성을 평가하기 위해



(a) Air volume

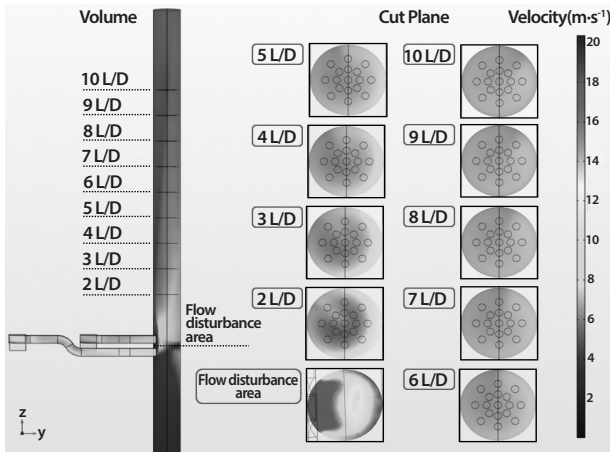


(b) Particle inlet

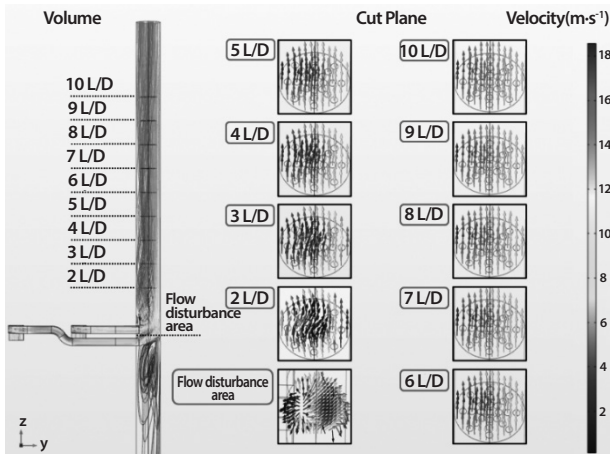
Fig. 2. Initial conditions for simulation.

Table 2. Results of ANSI/HPS N13.1-1999 criteria assessment

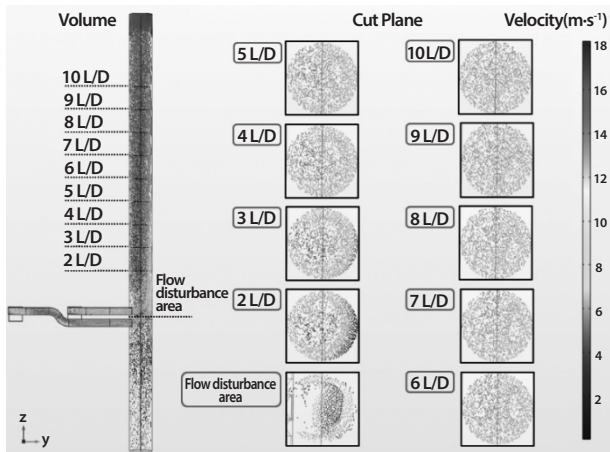
| Sampling Locations | Velocity Profile | | Flow Angle | | Particle Profile | |
|--------------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
| | COV [%] | Acceptable | Average [degree] | Acceptable | COV [%] | Acceptable |
| 2 L/D | 43.9 | × | 11.2 | ○ | 54.8 | × |
| 3 L/D | 27.9 | × | 6.6 | ○ | 31.0 | × |
| 4 L/D | 22.2 | × | 4.6 | ○ | 23.6 | × |
| 5 L/D | 18.5 | ○ | 3.5 | ○ | 17.6 | ○ |
| 6 L/D | 15.3 | ○ | 2.9 | ○ | 21.7 | × |
| 7 L/D | 12.7 | ○ | 2.4 | ○ | 24.9 | × |
| 8 L/D | 10.7 | ○ | 2.1 | ○ | 21.8 | × |
| 9 L/D | 9.4 | ○ | 1.9 | ○ | 15.9 | ○ |
| 10 L/D | 8.7 | ○ | 1.7 | ○ | 21.3 | × |



(a) Velocity profiles



(b) Streamlines



(c) Particle profiles

Fig. 3. 3 Dimension analysis result.

‘Turbulent Flow - Turbulent Flow, k-ε’를 ‘Stationary’ 방법으로 해석하였으며, 입자의 분포를 평가하기 위해 ‘Particle Tracing for Fluid Flow’를 ‘Time dependent’ 방법으로 해석하였다. 시간에 따른 입자의 궤적을 확인하기 위해 초기시간(t=0)에 20,000 개의 입자가 동시에 방출 되도록 설정하였으며, 굴뚝의 배출면 또는 굴뚝의 벽과 충돌하여 모든 입자의 거동이 멈추는 시간을 고려하여 해석 시간을 150 초로 설정하였다. 해석되는 영역의 격자모양은 ‘Tetrahedral’이며, 유동해석에 적합한 ‘Fluid dynamics’의 ‘Finer’ 크기를 적용하였다.

3.2 평가결과

해석된 결과 및 기준만족 여부를 Fig. 3과 Table 2에 각각 나타냈다. 2 개의 사각덕트에서 배출된 유출물은 굴뚝 수직 방향의 벽과 충돌하면서 난류를 형성하였다. 형성된 불규칙한 흐름은 배출면 방향으로 향할수록 점차 안정화되어 일정한 흐름을 보였다. 유동교란 지점으로부터 굴뚝 직경 배수의 높이 위치(L/D)에서의 속도분포 COV 평가 결과, 2 L/D 에서 43.9%로 가장 높았으며, 10 L/D 에서 8.7%로 가장 낮았다. 속도분포에 대한 기준을 만족하는 위치는 5 L/D 이상으로 나타났다. 굴뚝의 바닥면을 기준으로 평균 유동각을 평가한 결과, 모든 시료채취 위치에서 허용기준을 만족하였다. 입자분포에 대한 COV 평가 결과, 교란지점과 가장 가까운 2 L/D 에서의 54.8%로 가장 높았으며, 9 L/D 에서 15.9%로 가장 낮게 나타났다. 입자분포는 5 L/D 와 9 L/D 에서 기준을 만족하고 있으나, 다소 균일하지 못한 모습을 보였다.

4. 균일한 입자분포를 얻기 위한 개선방안

입자분포 평가 결과, 2 곳을 제외한 모든 시료채취 위치에서 입자분포에 대한 기준을 만족하지 못하고 있음을 확인하였다. 굴뚝 내 균일한 입자분포를 얻기 위해 대형 난류를 생성하여 입자의 섞임을 높이는 방법이 사용된다. 난류를 형성하기 위해 90° 회전(turns), 기류모음(converging air-streams), 혼합상자(mixing box), 둘레링(perimeter ring) 및 혼합장치(mixer) 등이 사용될 수 있으며, 상기 제시된 장치들은 시설의 특성 및 시료채취환경에 따라 설치되어야 한다.

4.1 정적 혼합장치(Static Mixer)

굴뚝 내 난류를 형성하여 입자의 섞임을 높이기 위한 방법으로 Fig. 4와 같이 굴뚝 내 지표면에서 13 m 높이 지점에 직경 0.7 m, 높이 0.2 m 의 정적 혼합장치를 모델링하였다. 해당 장치는 중심부와 둘레에 서로 다른 형태의 날개로 구성되어 회전을 생성한다. 혼합장치 중심에 있는 12 개의 날개는 길이 0.4 m, 넓이 0.1 m 이며 Y 축을 기준으로 45°의 경사를 가지며, 둘레에 있는 12 개의 날개는 길이 0.2 m, 넓이 0.2 m 이며 Z 축을 기준으로 45°의 경사를 갖는다. 평가방법은 앞서 수행된 것과 동일하다.

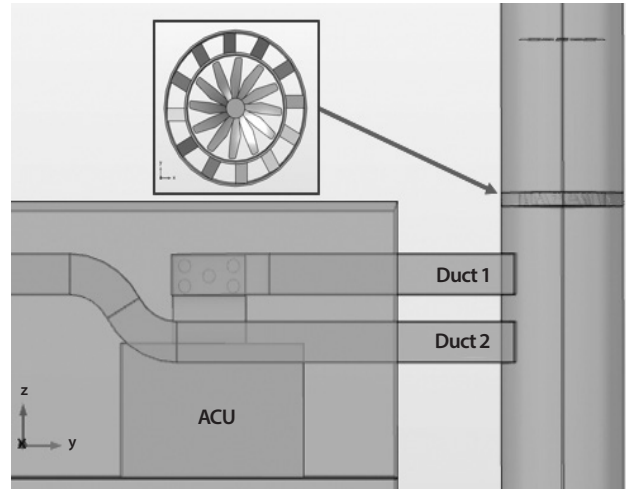


Fig. 4. Modeling of the static mixer.

4.2 둘레링(Perimeter Ring)

굴뚝 내 한쪽으로 치우친 유동으로 생기는 불균일한 입자분포를 개선하기 위해 Fig. 5와 같이 굴뚝 내 지표면에서 13 m 높이 지점에 둘레링을 모델링하였다. 둘레링의 높이는 0.4 m 이며, 반원의 형태로 굴뚝 내부의 둘레를 감싸고 있다. 평가방법은 앞서 수행된 것과 동일하다.

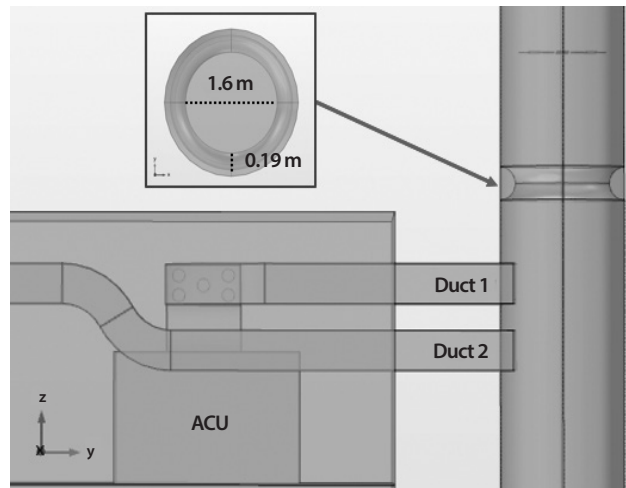


Fig. 5. Modeling of the perimeter ring.

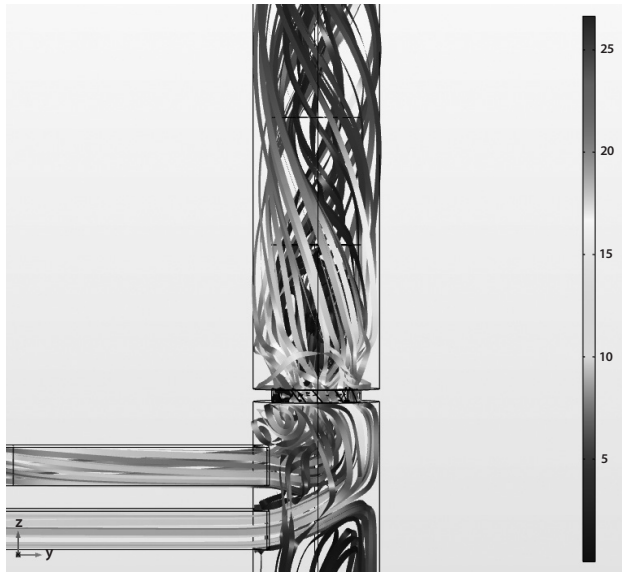
5. 평가결과의 비교

Fig. 6는 정적 혼합장치와 둘레링을 통과하는 유출물의 흐름을 나타낸다. 둘레링보다 정적 혼합장치를 지나가는 유출물에서 상대적으로 많은 소용돌이를 형성하며 혼합되는 모습을 나타냈다. 정적 혼합장치 모델링 결과에 따른 속도분포 COV는 2 L/D 에서 51.9%로 이전 평가보다 높은 값을 보였으나, 3 L/D 에서 21%로 크게 감소하였으며, 4 L/D 에서 13.2%로 기준을 만족하였다. 배출면으로 향할수록 COV가 점차 감소하였으며, 10 L/D 에서 4.5%로 가장 낮았다. 둘레링을 모델링 한 경우에는 2 L/D 에서 19.2%로 기준을 만족하였으며, 각 위치 COV의 차이가 정적 혼합장치를 모델링 한 결과보다 상대적으로 작았다.

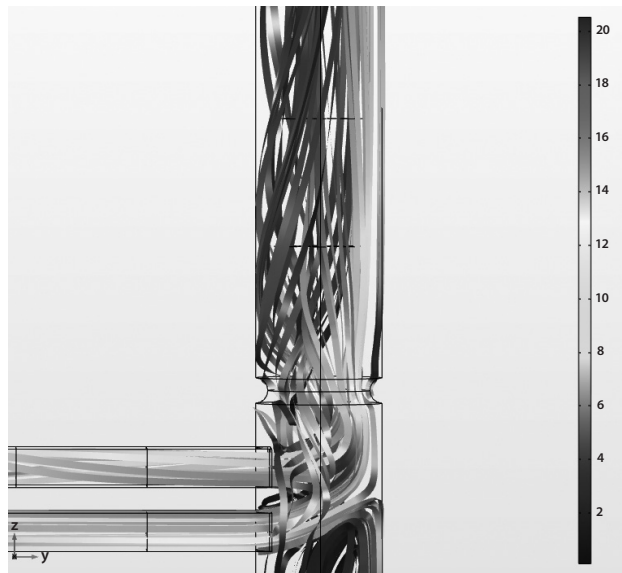
둘레링 모델링 결과에 따른 평균 유동각은 이전 평가와 유사한 값을 보이며 모든 위치에서 기준을 만족하고 있었다. 정적 혼합장치를 모델링 한 경우에는 날개에 따라 유동의 변화가 심하게 발생하면서 상당히 높은 값을 나타냈다. 2 L/D 에서 22.2°를 나타내며 기준을 만족하지 못하였으며,

3 L/D 이상에서 기준을 만족하였다.

입자에 대한 COV 확인결과, 정적 혼합장치 또는 둘레링을 모델링 했을 때 기존 평가보다 더 많은 위치에서 기준을 만족하고 있음을 확인하였다. 정적 혼합장치를 모델링 한 경우에는 5 L/D 에서 15.8%, 6 L/D 에서 15.1%, 7 L/D 에서 18.2%, 8 L/D 에서 18.3%, 9 L/D 에서 17%, 10 L/D 에서 15.5%, 총 6곳에서 기준을 만족하고 있음을 확인하였다. 둘레링을 모델링 한 경우에는 5 L/D 에서 18.6%, 7 L/D 에서 18.6%, 8 L/D 에서 15.2%, 9 L/D 에서 17.5%, 10 L/D 에서 17.8%, 총 5 곳에서 기준을 만족하고 있음을 확인하였다.



(a) Static mixer

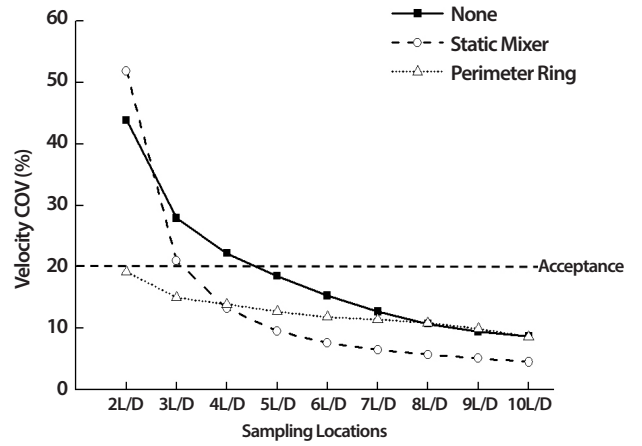


(b) Perimeter ring

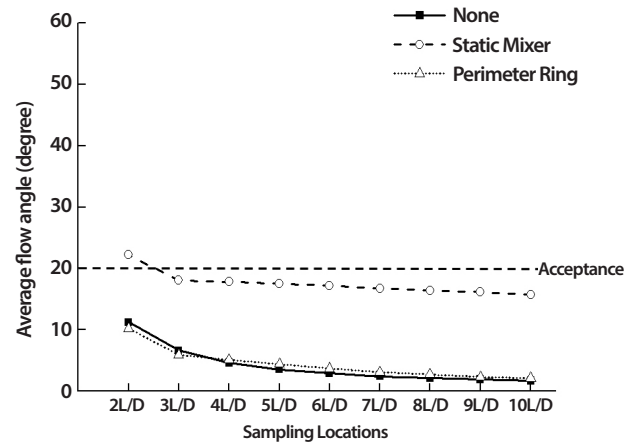
Fig. 6. Streamlines passing the static mixer (a) and perimeter ring (b).

6. 결론

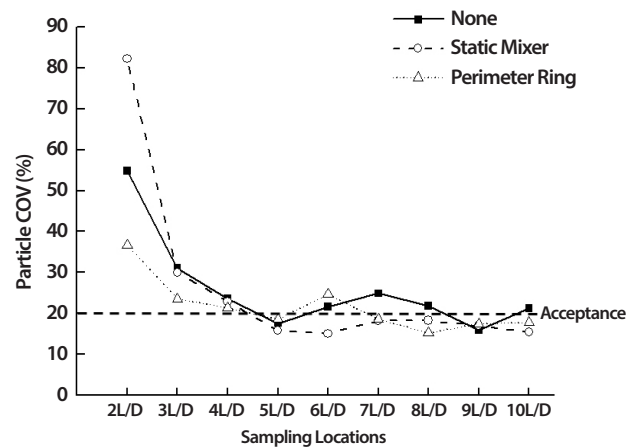
기체상 방사성 유출물을 감시할 경우 대표시료의 채취가 필수적이며, 대표시료 채취를 위한 지점의 적절성을 평가해야 한다. 한국원자력연구원 핵연료가공시설의 굴뚝 내



(a) Velocity COV



(b) Average flow angle



(c) Particle COV

Fig. 7. Comparison of results of ANSI/HPS N13.1-1999 criteria assessment.

시료채취 위치를 전산 유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기법을 활용하여 평가한 결과, 속도분포에 대한 기준은 5 L/D 이상에서 만족하였으며, 평균 유동각에 대한 기준은 모든 위치에서 만족하고 있음을 확인하였다. 입자 분포에 대한 기준은 5 L/D 와 9 L/D 에서 만족하였으나, 그 분포가 일부에서 기준을 만족하지 못하였다. 균일한 입자 분포를 얻기 위한 방법으로 굴뚝 내 정적 혼합장치와 돌레링을 추가하는 것을 제안하고, 이에 대한 평가를 수행하였다. 정적 혼합장치를 추가한 경우에는 5-10 L/D, 돌레링을 추가한 경우에는 5 L/D 및 7-10 L/D 에서 입자분포에 대한 기준을 만족하였다. 보완을 위하여 추가한 2 가지 조건에서, 입자 분포에 대한 기준을 만족하는 지점은 속도분포 및 평균 유동각에 대한 기준 역시 만족하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 방법은 신규시설뿐만 아니라, 현장입증시험 수행이 어려운 운영중인 시설에 대하여 시료채취 위치의 적절성을 평가하기 위한 방법으로 활용될 수 있다.

REFERENCES

- [1] American national Standards Institute (ANSI), Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities, ANSI N13.1, New York (1969).
- [2] American national Standards Institute/Health Physics Society (ANSI/HPS), Sampling and Monitoring Release of Airborne Radioactive Substances from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities, ANSI/HPS N13.1, New York (1999).
- [3] United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA), Sample and velocity traverses for stationary sources, 40CFR60, Appendix. A, Method 1, Washington, D.C. (1995).
- [4] M.Y. Ballinger, K.P. Recknagle, J.A.Glissmeyer, S.T Yokuda, and J.M.Barnett, "Sampling Point Compliance Tests for 325 Building at Set-Back Flow Conditions", Pacific Northwest National Laboratory Report, PNNL-20397, Washington D.C. (2011).
- [5] P. Geraldini, "Numerical Modeling of Sampling Airborne Radioactive Particles Methods from the Stacks of Nuclear Facilities in Compliance with ISO 2889", Proc. of The 2014 COMSOL Conference, Cambridge (2014).
- [6] COMSOL, "CFD Module User's Guide", 147-153, COMSOL AB, Stockholm, Sweden (2016).
- [7] COMSOL, "Particle Tracing Module User's Guide", 195-222, COMSOL AB, Stockholm, Sweden (2016).
- [8] International Organization for Standardization (ISO), Sampling airborne radioactive materials from the stacks and ducts of nuclear facilities, ISO 2889, Switzerland (2010).