Journal of Radiation Industry 11(4) : 265~275(2017)

ANSI N13.1(신규 기준)을 적용한 원전 RMS 유효성 검증

최 건 규[1] · 강 선 행[2] · 정 운 관[1,*]

[1]조선대학교, [2]한국필터시험원

Validation Check for Application of ANSI N13.1 (New Criteria) to Radiation Monitoring System of Nuclear Plant

Kun-kyu Choi[1], Sun-Hang Kang[2] and Woon-Kwan Chung[1,*]

[1]*Chosun University, 375, Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*
[2]*Korea Filter Testing Laboratory, 34, 208 Beon Gil, CheomDanGwaGi-Ro, Buk-Gu, Gwangju Metropolitan-City, Republic of Korea*

Abstract - After the Fukushima Nuclear Power Plant accident (2011), the public's interest in the radiation safety management of the nuclear power plant explosively increased. Therefore, the importance of radiation monitors that can detect the operation status of nuclear power plants is increasing day by day. Furthermore, the validity of the values measured by the radiation monitor is very important. ANSI N13.1 (1969), a technical standard for emission monitors in radiation monitors, has been revised in 1999 to face the challenge of validating existing radiation monitors. An important aspect of validation is whether the gaseous samples captured in the exhaust pipeline are representative. As a method for checking whether the emission gas monitor meets the revised technical standards, The validity of the sampling location was verified by Computational Fluid Dynamics (CFD). It was confirmed that the transfer rate of the sample transfer pipe was 50% or more through the transfer rate calculation program verified by the NRC. The result of checking a part of the RMS of a nuclear power plant designed with the technical standard ANSI N13.1 (1969) was performed and it has been confirmed that some facilities do not meet new technical standards. Through this study, the validity of RMS without applying the new technical standard is verified . And it was confirmed that the development of the design standard was necessary.

Key words : Gaseous radioactive emission, Sampling position, Sample transfer rate

서 론

원자력발전소의 기체방사선감시계통(Radiation Monitoring System)은 통상 공정방사선감시기와 배출물방사선감시기로 구분하고 있다. 이 중 기체배출물방사선감시기(또는 샘플러)는 ACU 덕트 후단에 설치되어 배출물의 대기 배출량 평가 등에 활용된다.

덕트에서 시료를 채취하여 시료이송배관을 거쳐 방사선감시기로 보내지는 일련의 과정은 Sampling System을 통해 이루어지고 있다. Sampling System은 덕트에서 시료를 채취하는 노즐과 감시기까지 시료를 이송하는 시료이송배관과 포집용기로 구성되어 있다. 방사능감시를 위해서는 덕트에서 대표성있는 시료채취와 적절한 이송배관의 이송률은 대단히 중요하다.

* Corresponding author: Woon-Kwan Chung, Tel. +82-62-230-7166, Fax. +82-62-232-9218, E-mail. wkchung@Chosun.ac.kr

Table 1. Diffence of design criteria for RMS sampling system

Item	ANSI N13.1 (1969)	ANSI N13.1 (1999년)
Scope	Duck and stack / working environment	Duct and stack
Nomber of nozzle	8′ below: single nozzle, 8′ over : a numbers of Isokinectic nozzle	Single point shrouded nozzle
Design criteria for nozzle	None	Roughness: inside nozzle (0.8 μm below), outside nozzle (1.6 μm below), shroud (3.2 μm below) 10 μm particle transmission ratios (0.8∼1.3), aspiration ratios (1.5 below)
Location of sampling point (nozzle location)	5D over at point of cyclonic flow	40 CFR 60, App. A, Method 1 (Velocity profile, Flow abgle, Tracer gas concentration profiles, Maximum tracer gas concentration, Aerosol particle concentration profile)
Design criteria for transport line	Maxinum short line	Curvature ratio 3.0 over, bend Flatness 15% below, 10 μm loss of Aerosol particle 50% below etc.
Loss of transport line	N/A	Flow Rate ≥10 μm particle 50%
Length of sampling particle	2∼5 μm	10 μm
Test (Performance)	–	Field verification test / Lab. test / Modeling test

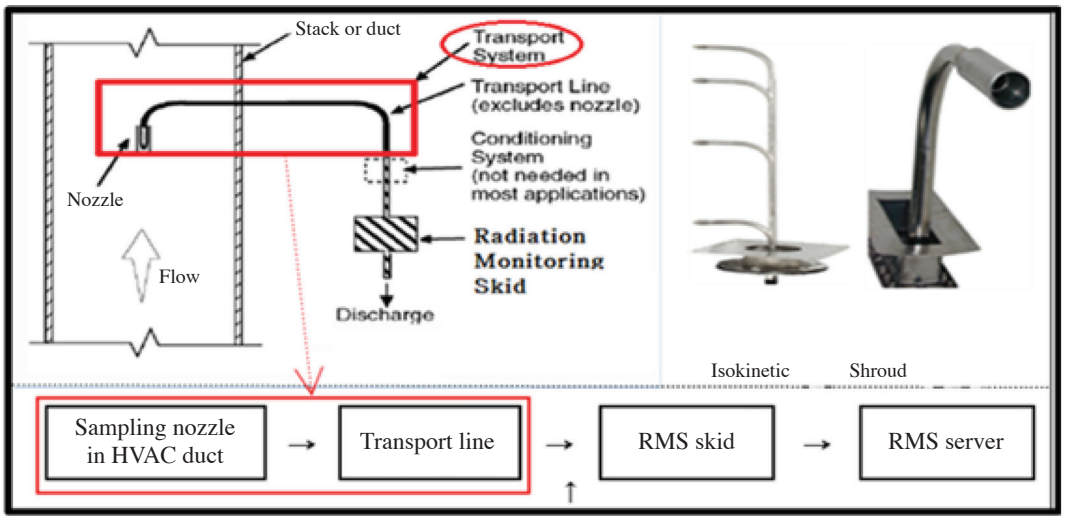


Fig. 1. Sampling System of RMS.

Sampling System의 설계기준은 ANSI N13.1로서 1969년에 제정된 후, ANSI N13.1-1999 (이하 최신기술 기준)으로 개정되었다. 1969년 기술기준과 1999년 기술기준 사이에는 시료를 채취하는 노즐도 기본적으로 Fig. 1처럼 Shroud 노즐로 변경되었고, 기술기준도 Table 1처럼 상당한 차이가 발생하고 있다. 따라서 이전 기술기준으로 설계된 2000년대 이전에 건설된 발전소의 경우, 기체방사선감시기 계통이 변경된 ANSI N13.1-1999년 기술기준을 만족하는지가 불투명해 졌다.

따라서 시료채취계통이 신규 기술기준에 부합하는지를 검증할 필요성이 발생하였다. 이 유효성의 결과는 실시간으로 발전소 방사선(능) 정보를 제공하는 원전의 신뢰도와 직결되는 문제이기도하다. 또한 검증결과가 ANSI N13.1-1999에 적합하지 않을 경우 동 기술기준에 맞도록 설계기술 기준을 개발하여야 한다.

재료 및 방법

1. 연구 대상

기체방사선감시기에 대한 기술기준인 ANSI N13.1는

1969년에서 1999년에 새롭게 변경되었고, 그 기술기준은 배출물감시기에 초점이 맞추어져 있다. 따라서 원전 중 최신기술기준 이전에 건설된 RMS 배출물감시기 중 특정 발전소(이하 A발전소)의 임의의 2개의 기체배출물 방사선감시기를 선정하였다. 연구 대상 방사선감시기는 Table 2와 같다.

2. ANSI N13.1 적용을 위한 요건 분석

기존의 ANSI N13.1 (1969년; Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities)과 ANSI/HPS N13.1 (1999년; Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities)을 비교하였을 때, RMS에 유입되는 채취시료의 계통 대표성 검증이 코드의 주요 요건이다.

ANSI N13.1 (1969년)은 Table 1과 같이 샘플링위치를 직관부의 형상 변형지점에서 노즐위치까지의 거리가 직관부 직경의 5배 이상을 유지하고 직관부는 덕트 직경의 10배의 길이를 유지하도록 정의하였고, 8인치 이상의 덕트에 복수의 isokinetic 노즐 설치를 제시하였으며, 덕트내 유동에 대한 유속분포 측정을 명시하였다. 시료채취는 2~5 μm의 입자와 최대 10 μm 입자를 대상으로 하며, 이송관 설계는 최대한 짧게라는 약간의 기준을 제시하였다.

ANSI N13.1 (1999년)은 Table 3과 같이 대표시료채취위치에 대한 덕트나 스택 내의 유속분포, 유동각, 추적가스 농도 분포, 에어로졸 입자 분포 등에 대한 검증을 요구하고 있다. 또한 복수의 소직경 isokinetic 노즐에 의한 입자손실율 증가를 방지하기 위해 단일 쉬라우드노즐 설치를 제시하는 한편, 거친입자에 속하는 10 μm 입자의 이송관 이송율이 50% 이상 조건을 만족하도록 제시하였다.

Table 2. The research target of RMS equipment

Item	Detector (Name)	Remarks
RMS for releases of airborne radioactive substances	RE-001 (01Bldg HVAC outlet detector) RE-002 (02Bldg HVAC outlet sampler)	ANSI N13.1 (1999)

3. 현장조사

A발전소 기체방사선감시기 시료채취위치를 형상화하고, 이송배관을 3차원 입체화하기 위해 몇 개월에 걸쳐 덕트 레이아웃과 이송관 설계도면, 각 HVAC 계통의 유동해석에 관련된 댐퍼의 자료, 계통별 HVAC 가동유량 및 댐퍼 개도율, 건설 초기의 단위덕트의 제작을 위한 덕트 제작도면, 이송관 설계환경자료를 수집하였다. 정확한 계산을 위해 도면과 현장이 일치되는지 여부를 확인하기 위해 오랜 기간 현장조사도 병행하여 실시하였다. 현장 조사 후 덕트 레이아웃 및 시료채취위치에 대해 3D화 하였다. 40 CFR 60, App. A Method 1의 시료채취위치에 대한 정의에 따라서 유효 직관부를 지정하고 시료채취위치를 기준으로 유체 유입구와 유

Table 3. Summary of acceptance criteria for a sampling location

Characteristic	Methodology	Acceptance criteria
Measurement to determine if flow in a stack or duct is cyclonic	40 CFR 60, App. A Method 1	The average resultant angle shall be less than 20°.
Velocity profile in a large duct (> about 0.3 m diameter) and small stacks and ducts (< about 0.3 m).	Select traverse points from 40CFR60, Appendix A, Method 1 (figure 1-2) for the center 2/3 of the area of the stack or duct. Additional points or area may be needed to adequately cover the region.	COV shall not exceed 20% over the center region of the stack that encompasses at least 2/3 of the stack area.
Tracer gas concentration profiles in large and small stacks and ducts.	Select traverse points from 40CFR60, Appendix A, Method 1 (figure 1-2) for the center 2/3 of the area of the stack or duct. Additional points or area may be needed to adequately cover the region.	COV shall not exceed 20% over the center region of the stack that encompasses at least 2/3 of the stack area.
Maximum tracer gas concentration in large and small stacks and ducts.	Select traverse points from 40CFR60, Appendix A, Method 1 (figure 1-2) for the entire cross sectional area.	The maximum value of tracer gas concentration shall not exceed the mean value by more than 30% of the mean value at any point on a complete Method 1 set of velocity traverse points.
Aerosol particle concentration profile in large and small ducts.	Select traverse points from 40CFR60, Appendix A, Method 1 (figure 1-2). Additional points or area may be needed to adequately cover the region.	COV shall not exceed 20% over the center region of the stack that encompasses at least 2/3 of the stack area.

* COV (Coeffiencient of variation) = standard deviation / Average × 100.

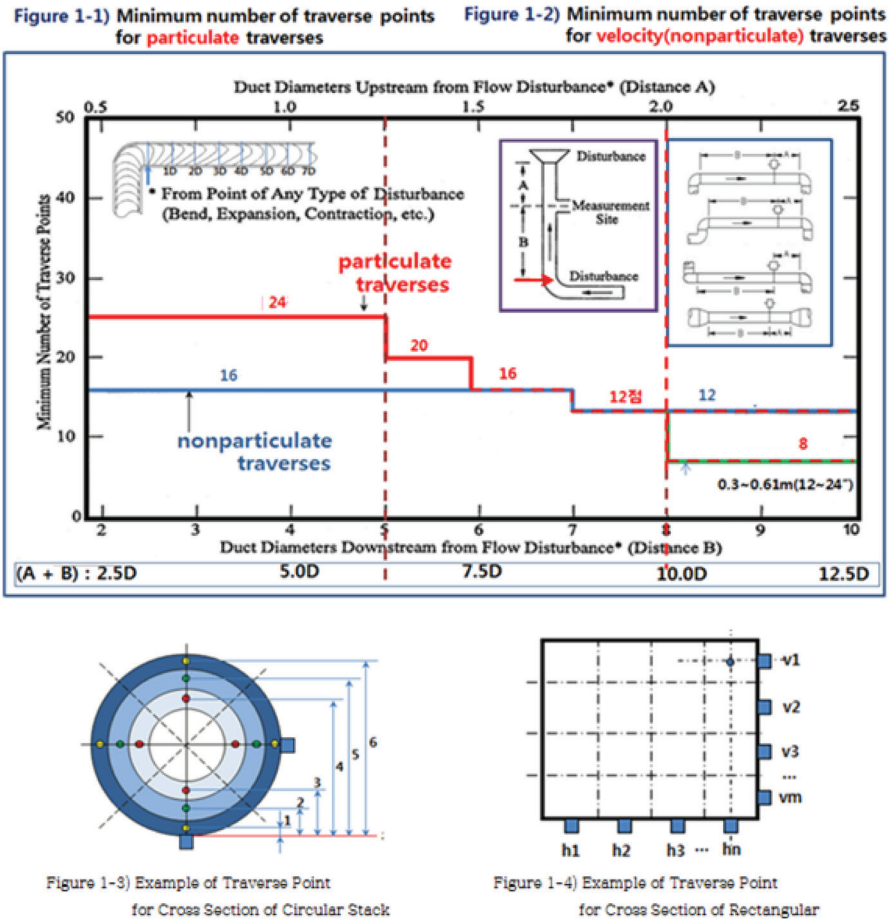


Fig. 2. Selection method of sampling location for '40 CFR 60, App. A Method 1'.

체 배출구를 구분하여 각 대상 감시기별 시료채취위치를 3차원 그림으로 작성하였다.

시료이송배관에 대해서도 특별히 각종 도면과 현장 실사를 통해 샘플링 노즐 타입, 시료이송 배관의 사이즈, 곡관의 곡률반경(Curvature ratio), 시료채취위치에서 시료이송배관으로 유입되는 시료의 속도, 시료이송배관의 샘플링 유량 등을 파악하였다. 해당 위치의 ISO 그림 자료를 참조하여 시료채취위치에서부터 RMS까지의 이송관 형상을 현장조사하고 이송관 규격그림도 작성하였다.

4. 유효성 검증 방법

4.1 시료 채취위치

원자력발전소 내의 ACU(Air Cleaning Unit)로 유입된 공기는 배기 덕트를 통하여 대기로 배출된다. 각 계통에 설치된 샘플링 노즐을 통하여 공기 시료는 채취되고, 채취된 공기 시료 샘플에 대하여 분석 작업을 수행하게 된다. 이때 배출 공기에 방사성 물질 포함 여부를 감시하고 방사성 물질의 양을 예측한다. 방사성 물질의 정확한 감지와 측정을 위해서는 채취된 시료의 대표성이 담보되어야 하는데, 이를 위해서는 샘플링 위치의 선정이 매우 중요하다.

샘플링 위치의 적정성을 평가하기 위하여 ANSI N13.1-1999에서는 시료채취위치의 적정성을 평가하는 기준으로 시료 샘플링 위치에서의 속도분포의 균일성, 평균유동각의 적정성, 추적가스 농도 분포와 에어로졸 입자 분포의 균일성에 대한 허용기준(Acceptance criteria)을 제시하고 있다. 이 허용여부의 만족 여부를 평가하기 위해서는 이송 덕트 내, 시료채취위치에서의 시료의 속도, 유동각도, 추적가스의 농도, 에어로졸 입자농도가 측정/계산되어야 한다. 이를 위해 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 분석과 해석을 통하여 유효성을 평가하였다. 또한 CFD 분석을 통해 시료채취위치에서 상기 변수들에 대한 COV (Coefficient of variation)를 평가하기 위해서는 덕트 내에서 공기의 흐름, 추적가스와 공기의 혼합 및 거동, 에어로졸 입자의 거동이 예측되어야 한다.

전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 해석을 위해 사용된 코드는 유한체적법(Finite volume method)을 사용하는 상용 CFD 코드인 FLUENT(ANSYS, USA)가

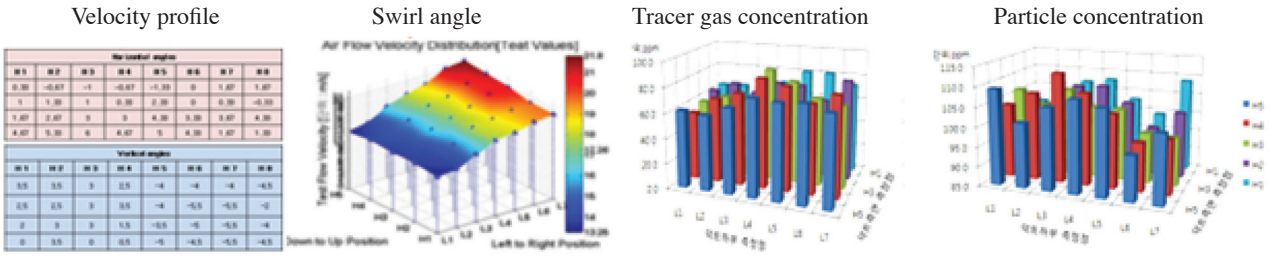


Fig. 3. Example of validation test for sampling location.

사용되었다. 수치해석 계산 시, 대류항의 처리는 상류도식을 사용하였고, 압력장에 대해서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 해의 수렴은 모든 종속 변수에 대해 10^{-6} 이하가 되면 수렴한 것으로 판정하였다. 덕트 내에서 공기의 흐름을 수치 해석적으로 계산하기 위해서는 공기에 대한 연속방정식(Continuity equation)과 운동량 방정식(Momentum equation)이 함께 풀어야 한다. 또한 정확한 거동 예측을 위해서는 덕트 내에서 공기의 난류 특성을 고려하여야 하는데 이를 포함하기 위해 난류에 대한 추가적인 모델링이 필요하다.

추적가스와 공기의 혼합 및 거동을 예측하기 위해서는 이성분 유체 해석이 필요하다. 이를 위해서 공기와 추적가스를 각각의 유체로 간주하여 해석을 수행하여야 한다. 이성분 유체의 해석을 위해서는 각 성분에 대한 보존방정식들(연속 방정식과 운동량 방정식)을 풀 때 각 성분에 대한 대류-확산 방정식(Convection-diffusion equation)을 풀어서 각 성분의 질량분율(Mass fraction)을 계산하고, 각 성분에 대한 수송방정식(Species transport equation)을 풀어서 각 상의 거동을 계산한다. 에어로졸 입자의 거동을 예측하기 위한 해석방법으로 Lagrangian discrete phase model을 사용하였다. Euler-Lagrangian approach에 기초한 해석방법으로서 유체상(공기)은 연속체로서 처리하여 Navier-stokes equation을 풀어서 유동을 해석하고, 입자상에 대해서는 계산된 유동장에 대하여 다수의 입자를 추적(Tracking)하여 궤적(Trajectory)을 계산한다. 이 과정에서 입자상과 유체상 간의 운동량 교환을 고려한다. 이 방법은 유동장 내에서 입자상의 궤적을 예측할 수 있기 때문에 시료채취위치에서 각 영역을 지나는 입자의 개수를 정확히 예측할 수 있다는 장점이 있으나, 입자의 수가 많은 경우에 계산 시간이 많이 소요되는 단점이 있고, 입자상의 체적분율(Volume fraction)이 적은 경우에만 적용이 가능하다. 이 기법은 입자분포의 COV 평가 시 매우 보수적인 결과를 예측한다고 알려져 있다.

구체적으로 현장의 샘플링 노즐위치가 대표 시료채취위치임을 검증하기 위해 Table 3의 허용기준에 적합함을 검증해야 한다. Fig. 2와 같이 유동방향의 직각 단면 측정점에 대해 Fig. 3과 같은 각 측정항목의 허용기준을 만족해야 한다. 본 연구에서는 전산유체해석(CFD)을 통해 배출물감시기의 시료채취위치의 적합성을 검증하였다.

Fig. 3의 그래프를 보면 대표시료채취위치의 부적합한 사례는 덕트의 형상변형이 있는 지점으로부터 시료채취위치 지점(B지점)까지의 거리가 짧거나 시료채취 노즐과 가까운 위치에 덕트 형상의 변형 및 덕트 내의 오염물에 의한 유동장애물 등에 의해 유체가 난류에 편승하여 과도한 방향성을 갖는 현상으로 유체 혼합이 불균일하여 시료채취 성능이 저하되는 경우이다. 각 감시기별로 전산유체해석(CFD)을 통해 검증하며 신규 코드에서 요구하는 항목별 판정 기준은 다음과 같다.

- 유동각 : 시료채취지점 유동방향의 직각단면(traverse)에 위치한 측정점 중 1개의 측정점이라도 유동각이 20° 이상일 때는 스택이나 덕트 내에 유동이 균일하지 않다고 판정한다.
- 속도 분포 : 유체의 유속이 스택 단면적의 내부 2/3 영역에서 COV가 20%를 초과하였을 경우 시료채취시 대표성이 없다고 판정한다.
- 추적자 가스 농도 분포, 입자 농도 분포 : 스택 단면적의 내부 2/3 영역에서 농도 COV가 20%를 초과하였을 경우 시료채취시 대표성이 없다고 판정한다.
- 추적자 가스 최대농도 분포 : 유체의 유속이 스택 단면적의 모든 측정점의 한지점이라도 평균값의 30%를 초과시 시료채취시 대표성이 없다고 판정한다.

4.2 시료이송배관 유효성 검증 방법

시료채취계통에서 샘플링 노즐을 통하여 채취된 공기 시료는 시료이송배관을 통하여 기체배출물방사선감시기로 이송된다. ANSI N13.1-1999의 설계요건에 따르면 노즐을 통해 기체배출물방사선감시기로 이송된 입자의 이송률은 50% 이상이 되어야 한다.

시료이송계통에서 입자 시료의 이송률을 평가하기 위하여 미국 NRC(Nuclear regulatory commission)에서 기체 배출 계통에서의 입자들의 손실 계산을 개인용 컴퓨터에서 구할 수 있도록 만든 Deposition 프로그램인 'Deposition

2001a'를 사용하였다. 이 프로그램은 국내 원자력시설 방사선감시계통 설계 시, 시료이송계통에서 시료 이송률을 평가하는 공인된 프로그램이다. 이 Deposition 프로그램은 일정 형태의 노즐(Nozzle), 직관(Tube), 곡관(Bend) 및 구경 변화 맞춤 장치(Fitting) 등에 따른 손실을 구할 수 있는 수치 모델들이 포함되어 있다.

결 과

1. RMS 시료채취위치 유효성

1.1 RE-001

1.1.1 CFD 해석

CFD 해석을 수행하기 위해 3차원 모델의 격자시스템을 Fig. 4와 같이 구성하였다. Exhaust ACU (AH05 (AH06))에서의 공기흐름은 Fig. 5와 같다. 덕트 내 공기흐름은 곡관에서 공기의 유속이 빨라지며, 곡관 통과하면서 일부 스월 유동 현상이 발생되기도 한다. 그러나 시료채취위치로 갈수록 안정적인 유동 흐름을 보인다.

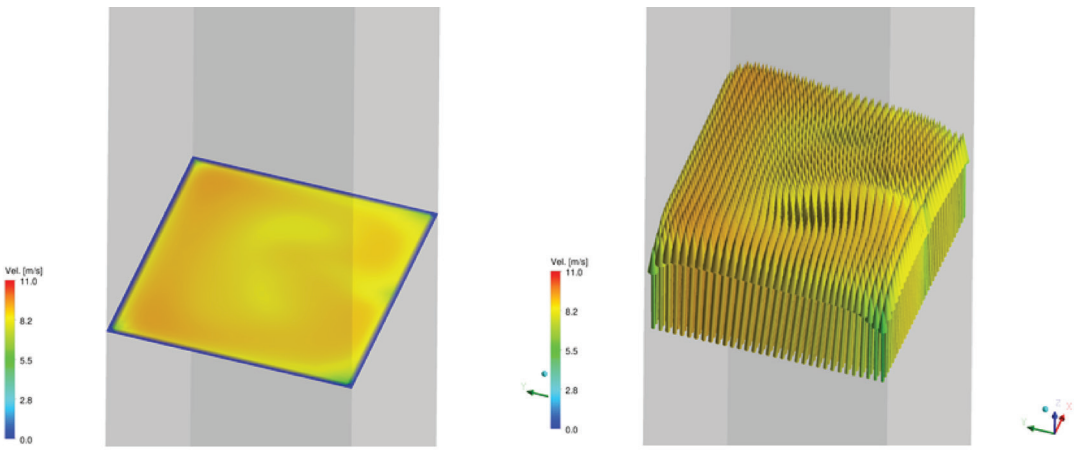
덕트 내 시료채취위치에서 속도분포 및 속도벡터를 Fig. 6에 나타내었다. 시료채취위치에서 공기의 속도분포는 비교적 균일하고, 유동각은 평균 20° 이하로 설계요건을 만족한다. 덕트 내 시료채취위치에서 추적가스의 농도분포는 Fig. 7과 같다.

1.1.2 평가

RE-001의 시료채취위치가 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Exhaust ACU (AH05 (AH06)) 운전 시, 시료채취위치에서의 속도분포 COV, 유동각 및 추적가스 농도분포 COV는 ANSI N13.1-

Fig. 4. RE-001 mesh generation.

Fig. 5. RE-001 streamline.



(a) Velocity (b) Vector

Fig. 6. RE-001 velocity profile at test section.

1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었다.

1.2 RE-002

1.2.1 운전조건

• RE-002, 02BLDG. Normal Exhaust ACU 운전 조건
- 공조기 운전 조건: AH01 & AH02 운전
- 시료채취위치에서의 유량: 52,800 CFM
- 시료채취위치에서의 덕트 사이즈: 60 inch × 48 inch
- 시료채취 덕트의 위치: EL. 126′-3″

• RE-002, 02BLDG. Emergency Exhaust ACU 운전 조건
- 공조기 운전 조건: AH03 & AH04 운전
- 시료채취위치에서의 유량: 52,800 CFM
- 시료채취위치에서의 덕트 사이즈: 60 inch × 48 inch
- 시료채취 덕트의 위치: EL. 126′-3″

1.2.2 해석결과

(가) 02BLDG. Normal Exhaust ACU 운전 시 (AH01 & AH02 운전 조건)

CFD 해석을 수행하기 위해 3차원 모델의 격자시스템을 Fig. 8과 같이 구성하였다. 02BLDG. Normal Exhaust ACU (AH01 & AH02)에서의 공기흐름은 Fig. 9 ((a) Overall (b) From AH01, (c) From AH02)와 같다. 덕트 내 공기흐름은

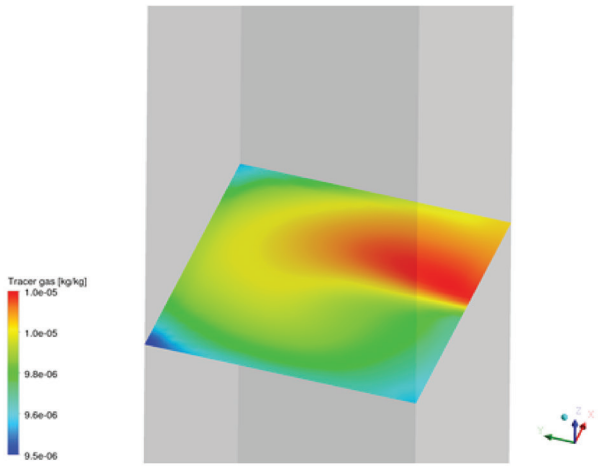


Fig. 7. RE-001 tracer gas.

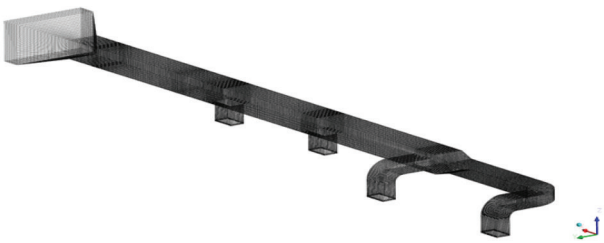


Fig. 8. RE-002 mesh generation for operation of AH01 & AH02.

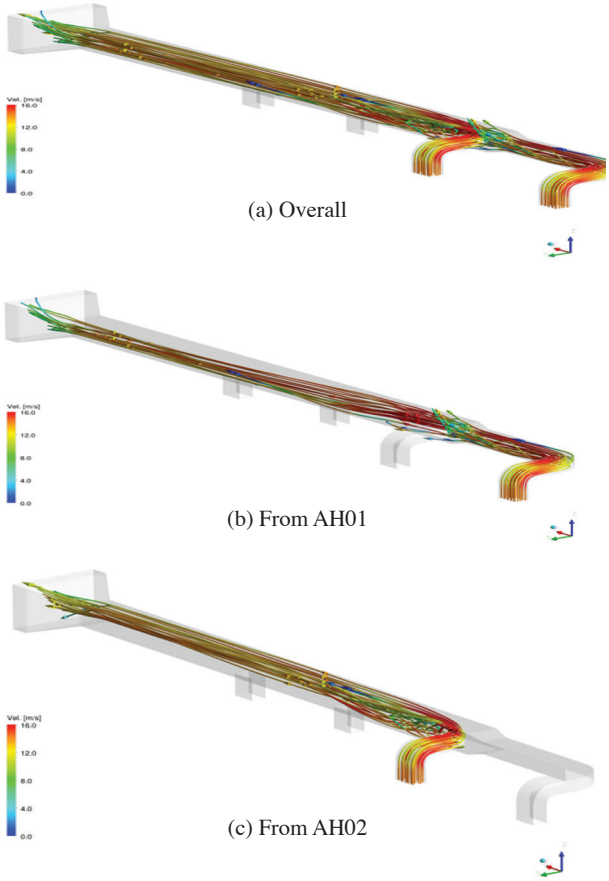
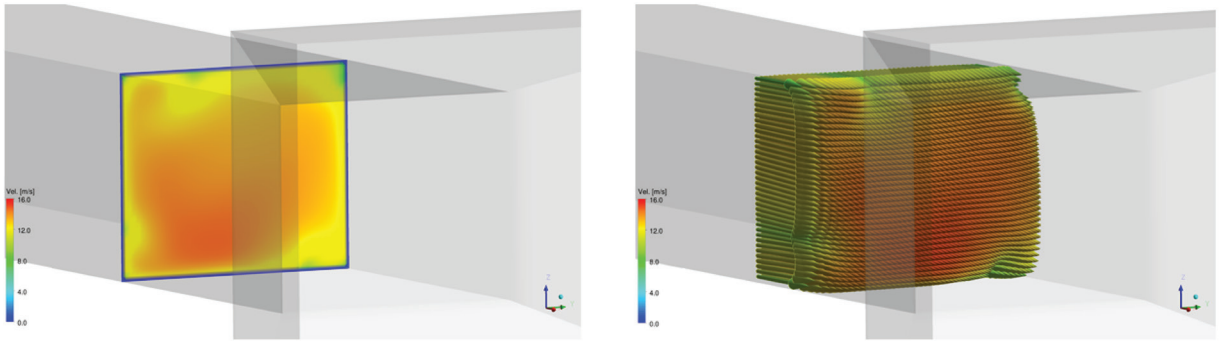


Fig. 9. RE-002 streamline for operation of AH01 & AH02.

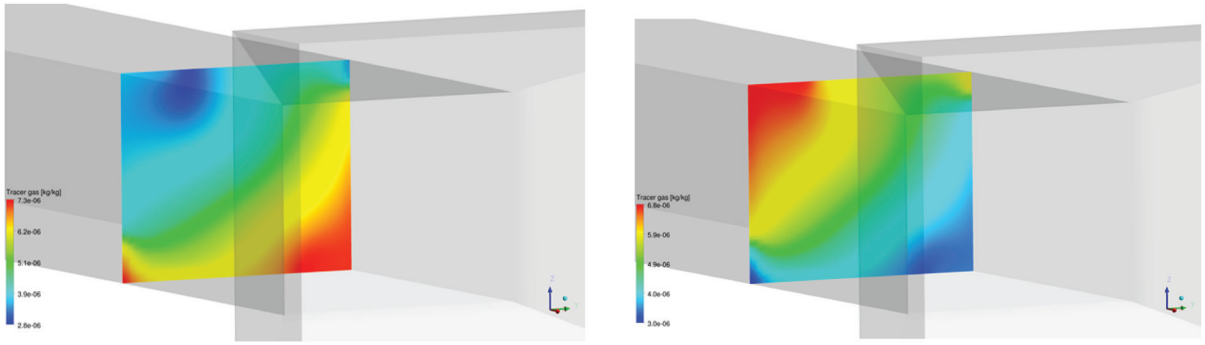
Table 4. RE-001 results

Item		ANSI/HPS N13.1-1999 criteria	Injection location	All area	Center 2/3 area	Acceptance
Velocity profile	COV [%]	< 20%	–	4.6	2.5	O
Swirl angle	[°]	< 20° (average)	–	2.9	3	O
Tracer gas	COV [%]	< 20%	AH06	1.4	1.1	O
	Max. Ratio	Not to exceed mean by > 30%	AH06	2.4	1.9	O



(a) Velocity (b) Vector

Fig. 10. RE-002 velocity profile at test section for operation of AH01 & AH02.



(a) From AH01 (b) From AH02

Fig. 11. RE-002 tracer gas for operation of AH01 & AH02.

곡관 및 각 지관의 합류지점에서 공기의 유속이 빨라지고, 스월 유동 현상이 발생된다. 그러나 시료채취위치로 갈수록 안정적인 유동 흐름을 보인다. 덕트 내 시료채취위치에서 속도분포 및 속도벡터를 Fig. 10에 나타내었다. 시료채취위치에서 공기의 속도분포는 비교적 균일하고, 유동각은 평균 20° 이하로 설계요건을 만족한다. 덕트 내 시료채취위치에서 추적가스의 농도분포는 Fig. 11 ((a) From AH01, (b) From AH02)과 같다.

(나) 02BLDG. Emergency Exhaust ACU 운전 시 (AH03 & AH04 운전 조건)

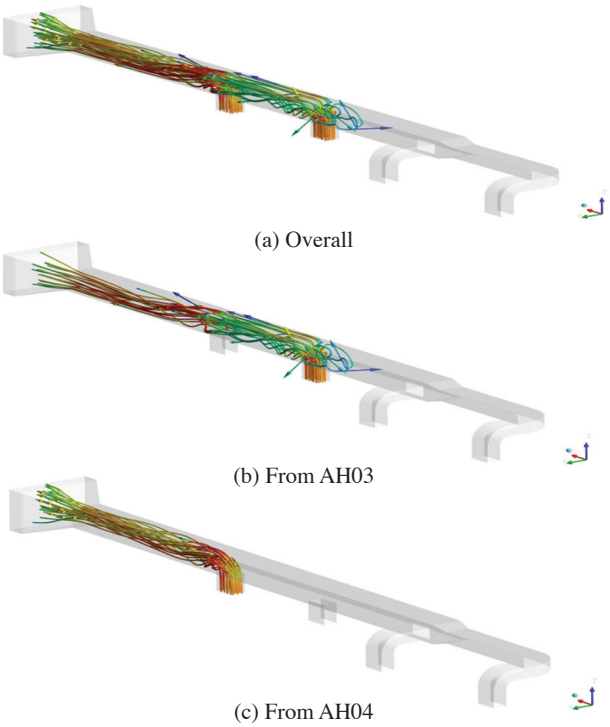
02BLDG. Emergency Exhaust ACU (AH03 &AH04) 운전 시, CFD 해석을 수행하기 위해 3차원 모델의 격자시스템을 Fig. 12와 같이 구성하였다. 02BLDG. Emergency Exhaust ACU (AH03 &AH04)에서의 공기흐름은 Fig. 13 ((a) Overall, (b) From AH01, (c) From AH02)과 같다. 덕트 내 공기흐름은 각 지관이 합류되는 지점에서 유속이 빨라지고, 일부 스월 유동 현상이 발생된다. 그러나 시료채취위치로 갈수록 안정적인 유동 흐름을 보인다. 덕트 내 시료채취위치에서 속도분포 및 속도벡터를 Fig. 14에 나타내었다. 시

Fig. 12. RE-002 mesh generation for Operation of AH03 & AH04.

료채취위치에서 공기의 속도분포는 균일하고, 유동각은 평균 20° 이하로 설계요건을 만족한다. 덕트 내 시료채취위치에서 추적가스의 농도분포는 Fig. 15((a) From AH03, (b) From AH04)와 같다.

1.2.3 평가

RE-002의 시료채취위치가 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하였고, 그 결과를 Table 5(a) (02BLDG. Normal Exhaust ACU (AH01 & AH02))와 Table 5(b) (02BLDG. Emergency Exhaust ACU (AH03 & AH04))에 나타내었다.



(a) Overall

(b) From AH03

(c) From AH04

Fig. 13. RE-002 streamline for operation of AH03 & AH04.

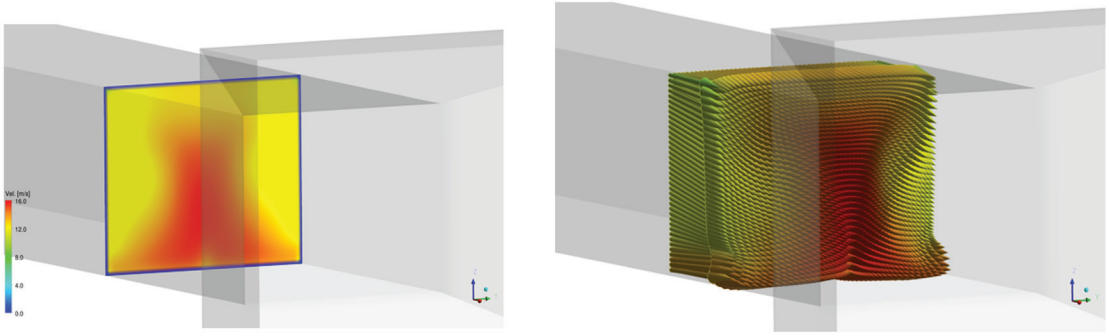
02BLDG. Normal Exhaust ACU (AH01 & AH02) 운전 조건에서 시료채취위치에서의 속도분포 COV와 유동각은 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었지만 추적가스의 농도분포 COV는 설계요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다. 02BLDG. Emergency Exhaust ACU (AH03 & AH04) 운전 조건에서 시료채취위치에서의 속도분포 COV, 유동각 및 추적가스 농도분포 COV는 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었다.

2. RMS 시료채취계통 이송률

시료채취위치에서 샘플링 노즐을 통해 채취된 시료 입자는 시료이송배관을 통과하여 기체배출물감시기(GEM)로 이송된다. 시료이송배관에서 이송된 시료 입자의 시료이송률을 계산하기 위하여 Deposition 프로그램을 사용하여 계산을 수행하였다. ANSI N13.1-1999의 설계요건은 시료이송계통에서 시료이송률이 50% 이상 되어야 한다.

2.1 RE-001 시료이송률 계산 결과

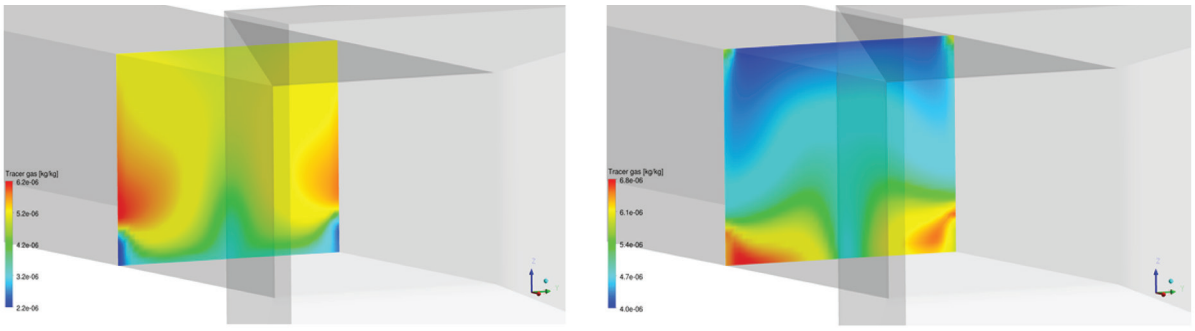
RE-001 시료이송배관의 이송률 계산 결과를 Table 6에 나타내었다. RE-001의 시료이송률 계산 결과는 아래와 같



(a) Velocity

(b) Vector

Fig. 14. RE-002 velocity profile at test section for operation of AH03 & AH04.



(a) From AH03

(b) From AH04

Fig. 15. RE-002 tracer gas for operation of AH03 & AH04.

Table 5. (a) RE-002 results (02BLDG. Normal exhaust ACU (AH01 & AH02))

Item		ANSI/HPS N13.1-1999 criteria	Injection location	All area	Center 2/3 area	Acceptance
Velocity profile	COV [%]	＜20%	−	8.3	4.4	O
Swirl angle	[°]	＜20 (average)	−	1.5	1.3	O
Tracer gas	COV [%]	＜20%	AH01	23.6	20.6	X
			AH02	19.7	16.2	O
	Max. ratio	Not to exceed mean by ＞30%	AH01	46.1	46.8	X
			AH02	37.2	33.2	X

Table 5. (b) RE-002 results (02BLDG. Emergency exhaust ACU (AH03 & AH04))

Item		ANSI/HPS N13.1-1999 criteria	Injection location	All area	Center 2/3 area	Acceptance
Velocity profile	COV [%]	＜20%	−	9.5	8.2	O
Swirl angle	[°]	＜20 (average)	−	5.5	5.4	O
Tracer gas	COV [%]	＜20%	AH03	13.3	10.3	O
			AH04	10.7	7.5	O
	Max. ratio	Not to exceed mean by ＞30%	AH03	35.2	28	O
			AH04	20.6	16	O

Table 6. RE-001 results for sample flow rate (Iso-kinetic nozzle, 1 CFM, Unit 5)

No.	Component	Direction	Length (ft-in)	Angle (°)	Penetration (%)	Total penetration (%)
1	Iso-kinetic				86.6	86.6
2	Tube	Horizontal	16″		96.0	83.1
3	Bend	H→H		25	100.0	83.1
4	Tube	Horizontal	8. 13/16″		98.2	81.6
5	Bend	H→V		90	94.1	76.8
6	Tube	Vertical	15″		99.8	76.7
7	Bend	V→H		90	94.1	72.1
8	Tube	Horizontal	8′ 1. 1/8″		78.3	56.5
9	Bend	H→V		90	94.1	53.2
10	Tube	Vertical	4′ 4. 5/8″		99.3	52.8
		Total penetration (%)				52.8

Table 7. RE-002 Results for sample flow rate (Iso-kinetic nozzle, 1 CFM)

No.	Component	Direction	Length (ft-in)	Angle (°)	Penetration (%)	Total penetration (%)
1	Iso-kinetic				81.9	81.9
2	Tube	Horizontal	17' 9. 1/8″		57.6	47.2
3	Bend	H→H		90	94.1	44.4
4	Tube	Horizontal	9' 2. 5/16″		75.6	33.6
5	Bend	H→V		90	94.1	31.6
6	Tube	Vertical	6' 10. 9/16″		99.0	31.3
7	Tube	Vertical	6. 1/2"		99.9	31.2
8	Tube	Vertical	6"		99.9	31.2
		Total penetration (%)		31.2		

고, 현재 설치되어 있는 상태(Iso-kinetic nozzle, 1 CFM 운전 조건)에서는 50% 이상으로 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었지만, 이송률 여유도를 확보할 필요가 있다.

2.2 RE-002 시료이송률 계산 결과

RE-002 시료이송배관의 이송률 계산 결과를 Table 7에 나타내었다. RE-002의 시료이송률 계산 결과는 아래와 같고, 모든 운전 조건에서 50% 이하로 ANSI/HPS N13.1-1999

Table 8. Results for RMS sampling location at HVAC duct

Item	Operating condition	Sampling location
RE-001	–	Satisfied
RE-002	Normal Emergency	UnSatisfied Satisfied

Table 9. Results for sample flow rate at transport line

Item	Operating condition	Sample flow rate
RE-001	–	Satisfied
RE-002	Normal Emergency	UnSatisfied

의 설계요건에는 미치지 않는 것으로 평가되었다.

고 찰

1. RMS 시료채취위치의 적절성

최신 기술기준인 ANSI/HPS N13.1-1999에서는 기체방사성유출관로에서의 시료채취위치에 대한 허용기준은 평균유동각은 20° 이내, 속도분포는 COV가 20% 미만, 추적자가스농도분포는 COV가 20% 미만 그리고 최대 추적자기체농도도 평균값의 30% 미만을 요구하고 있다.

본 연구에서는 RMS 시료채취위치가 신규 기술기준을 만족하는지 여부에 대한 최종 평가 결과는 Table 8과 같음을 확인하였다. 즉, 배출관로에서의 시료채취위치 적정성 평가에서는 RMS RE-001 및 RMS RE-002 (Emergency)는 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었다. 즉, 속도분포, 유동각, 추적가스 등에 관한 신규 기술기준을 만족하였다. 그러나 RMS RE-002 (Normal)는 일부 항목에 대해서 신규 기술기준에는 미치지 않음을 확인할 수 있었고, 이에 대해서는 추가적인 설계개선 도출이 필요함을 확인할 수 있었다.

2. RMS 시료채취계통 이송률 평가

최신 기술기준인 ANSI/HPS N13.1-1999에서는 기체방사성유출관로에서 RMS까지의 시료채취이송관의 손실률은 50%가 넘어서는 않된다고 요구하고 있다.

본 연구 결과에서는 기체배출물방사선감시기의 시료채취이송관에 대한 유효성을 평가한 결과는 Table 8과 같음을 확인하였다. 즉, RMS RE-001의 시료이송률은 ANSI/HPS N13.1-1999 요건을 만족하였다. 그러나 RMS RE-002의 시료이송률은 50% 이하로 신규 기술기준의 요건에는 미치지 않았다. 이를 해결하기 위한 추가적인 개선방안이 도출되어야 함을 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구의 목적은 신규 기술기준인 ANSI/HPS N13.1-1999 이전에 설치된 원전 RMS가 최신 기술기준을 적용하였을 경우의 유효성을 분석하고자 함이었다. 연구 결과에서 나타난 것처럼 일부 RMS 설비는 ANSI/HPS N13.1-1999에서 요구하는 기술기준에는 미치지 못한 것으로 나타났다. 따라서 건설시 신규 기술기준을 적용하지 않은 원전 RMS에 대해서는 유효성을 평가하고, 그 결과 신규 기술기준을 만족하지 못한 RMS 설비에 대해서는 설계변경 기준을 마련하여야 할 것으로 사료된다. 시료채취위치가 부적절한 부분은 신규 기술을 만족하는 시료채취위치를 찾고, 새로 설정한 시료채취위치가 적절한지를 실증시험을 통해 검증하며, 검증이 완료된 RMS 시료채취위치를 설계변경에 반영하는 절차가 필요하다.

시료이송률이 신규 기술기준에 미흡한 시료이송관에 대해서도 감시기의 위치를 시료채취위치에 최대한 가깝게 이전 설치를 하거나 시료이송배관을 단순화 하는 등 개선작업이 요구된다. 향후 본 연구가 원전의 방사선감시기의 신뢰성 제고에 기여할 것으로 확신한다.

참 고 문 헌

A발전소 RMS (Radiation Monitoring System) Handbook.

A발전소 RMS (Radiation Monitoring System) 규매규격서 & 관련 도면.

신고리 3,4호기 기체방사능감시기 시료채취위치 적정성 검증을 위한 기술자문, 한국전력기술 (주), May, 2012.

40 CFR 60, Appendix A, Method 1, Method 1-Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources, Code of Federal Regulations, U.S. Environmental Protection Agency.

ANSI N13.1. 1969. “Guide to Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities”, American National Standards Institute and the Health Physics Society. Washington.

ANSI N13.1. 1999. Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities, American National Standards Institute and the Health Physics Society. Washington.

Received: 3 November 2017
Revised: 25 November 2017
Revision accepted: 12 December 2017