



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018年 8月

博士學位 論文

국제 기준에 따른 RMS 성능검증 및 효율적인 설비 개선방안에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

崔 建 圭

국제 기준에 따른 RMS 성능검증 및 효율적인 설비 개선방안에 관한 연구

A Study on the Verification of RMS Performance by International
Standards and the Efficient Improvement of Facilities

2018年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

崔 建 圭

국제 기준에 따른 RMS 성능검증 및 효율적인 설비 개선방안에 관한 연구

指導教授 鄭 運 官

이 論文을 工學博士 學位申請 論文으로 提出함

2018年 4月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原子力工學科

崔 建 圭

崔建圭의 博士學位論文을 認准함

委員長 韓國原子力研究院 博士 金振奎(印)

委員 韓國原子力研究院 博士 李允鍾(印)

委員 朝鮮大學校 教授 李庚鎭(印)

委員 朝鮮大學校 教授 宋鐘淳(印)

委員 朝鮮大學校 教授 鄭運官(印)

2018 年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

표 목 차	iii
그림목차	iv
ABSTRACT	vi
제1장 개요	1
제1절 연구배경	1
제2절 연구필요성	3
제3절 연구목표	4
제2장 유효성 검증 및 설비 개선방안 도출 방법	5
제1절 ANSI N13.1 코드 적용을 위한 요건 분석	5
제2절 현장 조사	8
제3절 시료 채취 위치 유효성 검증 방법	9
제4절 시료 이송배관 유효성 검증 방법	13
제5절 설비 개선방안	15
제3장 연구대상 선정	17
제1절 연구대상 선정 방법	17
제2절 연구대상 선정	18

제4장 시료채취 위치 유효성 검증 및 설비 개선방안	25
제1절 유효성 검증	25
제2절 ANSI N13.1(1999)를 만족하는 설비 개선방안	36
제5장 시료채취계통 이송률 검증 및 설비 개선방안	41
제1절 유효성 검증	41
제2절 ANSI N13.1(1999)를 만족하는 설비 개선방안	45
제6장 결론 및 향후 연구	53
제1절 결론	53
제2절 향후 연구	55
참고문헌	58

표 목 차

Table 1.1 Difference of design criteria for RMS sampling system	2
Table 2.1 Summary of acceptance criteria for a sampling location	6
Table 2.2 Design criteria of ANSI N13.1(1999) for sampling system	7
Table 2.3 Object of equipment improvement for RMS of B Plant	8
Table 3.1 The research target of RMS equipment	18
Table 3.2 Summary of RMS sampling point	18
Table 3.3 Distance from RMS skid to sampling point	19
Table 4.1 Duct size and flow condition at Inlet and sampling parts	25
Table 4.2 CFD results (PAB Normal Exhaust ACU)	34
Table 4.3 CFD results (PAB Emergency Exhaust ACU)	35
Table 4.4 General results of simulation evaluation for present sampling point	36
Table 5.1 RE-015 Calculation conditions for sample flow rate	41
Table 5.2 RE-015 Results for sample flow rate	43
Table 5.3 RE-015 Results of simulation evaluation for present sample flow rate	44
Table 5.4 Scale model conditions for verification of sampling location ..	47
Table 5.5 Installation size of measurement point for scale model	47
Table 5.6 Result of RE-015 verification check	49
Table 6.1 RE-015 results of simulation evaluation for present sampling point & sample flow rate	53

그림 목 차

Figure 1.1 Sampling system of RMS	3
Figure 2.1 Selection method of sampling location for '40 CFR 60, App. A Method 1'	12
Figure 2.2 Example of validation test for sampling location	13
Figure 2.3(a) Initial screen of deposition program	14
Figure 2.3(b) Deposition program (system properties and parameter)	14
Figure 2.3(c) Deposition program (transport system)	14
Figure 2.3(d) Deposition program (particle distribution)	14
Figure 2.3(e) Deposition program (transport system view)	14
Figure 2.3(f) Deposition program (results)	14
Figure 3.1(a) RE-002 ISO drawing for HVAC duct & flow	19
Figure 3.1(b) RE-002 Sampling location & duct shape	20
Figure 3.2(a) RE-037 ISO drawing for HVAC duct & flow	21
Figure 3.2(b) RE-037 Sampling location & duct shape	21
Figure 3.3(a) RE-043 ISO drawing for HVAC duct & flow	22
Figure 3.3(b) RE-043 Sampling location & duct shape	23
Figure 3.4(a) RE-082 ISO drawing for HVAC duct & flow	23
Figure 3.4(b) RE-082 Sampling location & duct shape	24
Figure 4.1 RE-015 ISO drawing for HVAC duct & flow	26
Figure 4.2 RE-015 Sampling location & duct shape	26
Figure 4.3(a) RE-015 Mesh generation(AU09 & AU31)	28
Figure 4.3(b) RE-015 Streamline(AU09 & AU31)	29
Figure 4.3(c) RE-015 Velocity profile (AU09 & AU31)	30
Figure 4.3(d) RE-015 Tracer gas(AU09 & AU31)	30
Figure 4.3(e) RE-015 Mesh generation(AU08 & AU10)	31
Figure 4.3(f) RE-015 Streamline(AU08 & AU10)	33
Figure 4.3(g) RE-015 Velocity profile (AU08 & AU10)	33

Figure 4.3(h) RE-015 Tracer gas(AU08 & AU10)	34
Figure 4.4 Drawing of RE-015 sample location & duct	37
Figure 4.5(a) Velocity COV of each location	38
Figure 4.5(b) Swirl angle of each location	38
Figure 4.5(c) Tracer gas COV of each location(Normal process)	39
Figure 4.5(d) Tracer gas Max. ratio of each location(Normal process)	39
Figure 4.5(e) Tracer gas COV of each location(Emergency process)	40
Figure 4.5(f) Tracer gas Max. ratio of each location(Emergency process) ..	40
Figure 5.1 RE-015 ISO drawing of sample transfer line	42
Figure 5.2 Drawing for relocation of RE-015 sampling point	46
Figure 5.3 Duct installation for geometrical similarity with measurement point	48
Figure 5.4 Fan arrangement for the flow rate according to the two operating conditions	49
Figure 5.5 ISO drawing reflected RE-015 verification check	50
Figure 5.6 RE-015 Design plan of sample transfer line	51
Figure 5.7 RE-015 Flow rate of resetting sampling point	51

ABSTRACT

A Study on the Verification of RMS Performance by International Standards and the Efficient Improvement of Facilities

Kun-Kyu, Choi

Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

In Fukushima nuclear power plant accident in 2011, people's interest in the management of radioactive materials emitted from nuclear power plants to the outside environment increased. For this reason, the role of radiation monitors is becoming important to the credibility of nuclear power plants to the public. As this result, the effectiveness of the value measured by the radiation monitor becomes very important. ANSI N13.1, a global technical standard for monitoring substances emitted through radiation monitors, was changed in 1999. However, there has been no conformity assessment of the revised regulations for radiation monitors already installed and operated. The key to validation is to demonstrate the representativeness of the airflow of the gaseous samples collected for analysis to the RMS equipment within the discharge line of the air conditioning system as collection samples.

Verification of the conformity of the revised technical standards shall ensure that the sample collection position, i.e. velocity distribution coefficient of variation, average flow angle, tracking gas concentration distribution COV, and trace gas maximum concentration in the HVAC duct meet the technical standards. It is also important to ensure that the transfer rate of

the sample transfer piping from the HVAC duct to the RMS facility is at least 50%.

To verify the validity of the sampling location, one kind of emission radiation monitors installed and operated at the "B" nuclear power plant were verified using computational fluid dynamics (CFD). It was confirmed that the revised technical requirements were not satisfied. For RMS plants where the sampling location did not meet the revised technical standards, the CFD analysis was used to find an effective sampling location for the HVAC vent ducts at intervals of 0.5 m.

Fundamentally, the flow rate through the exhaust venting capillary for each system is significantly different for different modes of operation. In addition, a plurality of discharge pipes for exhaust are connected to one capillary, and the exhaust gas behavior is different for each position. This study confirms that it is not possible to obtain representative air samples for all operating conditions at the sampling location.

The transfer rate of the sample pipeline is checked by NRC and other countries using a transfer rate calculation program to confirm that the ratio is 50% or more. Sample transfer piping transfer rates were evaluated for currently operating RMS installations, but did not meet the technical standards. Accordingly, it was confirmed that it was necessary to increase the transfer rate by more than 50 % by means of RMS facility differentiations and simplified transport piping. Installation of pre-inspectors was not easy due to various steel structures and various fluid piping. This study confirms that these obstacles are concerned with the improvement of the sample transfer piping. This study will be of great help to improve the reliability of power plants by studying whether existing facilities meet the revised technical standards for gas effluent radiation monitors.

In addition, this study attempted to present design criteria for equipment that does not meet the new technical standards. In order to meet this technical standard in the future, it was recognized that additional research is needed such as "Study for establishing sample transfer piping per operation mode" and "Development of correction factor according to sample transfer rate difference".

제1장 개요

제1절 연구 배경

2011년 후쿠시마 원자력발전 사고로 인해 원자력발전소에서 외부환경으로 배출되는 방사성물질의 관리에 국민의 관심이 증가되었다. 특히 최근에는 원전에 대한 국민의 알권리 충족을 위해 상당한 수량의 방사선감시기 측정값을 실시간으로 공개하고 있다. 이로 인해 방사선감시기의 측정값에 대한 유효성은 매우 중요하게 되었다. 이러한 방사선감시기에 대해 적용하는 기술기준이 변경되어 기존 방사선감시기 설비에 대한 유효성을 검증해야 하는 현실에 직면해 있다.

원자력발전소의 기체방사선감시계통(Radiation Monitoring System)은 공정 방사선 감시기와 배출물 방사선감시기로 구분하고 있다. 시료 채취는 덕트에서 노즐을 통해 시료를 채취하여 시료이송배관을 거쳐 감시기까지 이송한다. 기체공정 방사선감시기는 대기로 배출되기 전 최종적으로 입자성 및 옥소(Iodine)방사능 방출을 막기 위해 공기 조화설비 (HVAC Heating, Ventilation, and Air Conditioning)출구 ACU(Air Cleaning Unit) 전단 덕트(Duct)에 설치되어 배출물 차단 및 유로 변경 신호를 제공한다. 기체 배출물 방사선감시기(또는 샘플러)는 ACU 후단 덕트에 설치되어 배출물의 대기 배출량 평가 등에 활용된다.[1,2]

덕트에서 시료를 채취하여 방사선감시기로 보내지는 일련의 과정은 채집시스템을 통해 이루어 지고 있다. 채집시스템은 덕트에서 시료를 채취하는 노즐과 감시기까지 시료를 이송하는 시료 이송배관과 포집용기로 구성되어 있다. 방사능감시를 위해서는 덕트에서 대표성있는 시료채취와 이송배관의 이송률을 아는 것이 대단히 중요하다.[3]

채집시스템의 설계기준은 ANSI N13.1로서 1969년에 제정된 후, ANSI N13.1-1999으로 대폭 개정되었다. 1969년 기술기준과 1999년 기술기준 사이에는 시료를 채취하는 노즐도 기본적으로 Figure 1.1처럼 Shroud 노즐로 변경되었고, 기술기준도 Table 1.1 처럼 상당한 차이가 발생하고 있다. [4,5,6]

이후 2011년에 기술기준 중 일부가 추가로 개정되어 현재에 이르고 있다.

따라서 ANSI N13.1-1969년 기술기준으로 설계된 2000년대 이전에 건설된 발전소의 경우, 기체방사선감시기 계통이 기술기준의 기본 개념이 변경된 ANSI N13.1-1999을 만족하는지가 불투명해 졌다.[7]

Table 1.1 Difference 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
Number of nozzle	8' below : single nozzle, 8' over : a numbers of Isokinetic 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 angle, Tracer gas concentration profiles, Maximum tracer gas concentration, Aerosol particle concentration profile)
Design criteria for transport line	maximum 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 $\geq 10 \mu\text{m}$ particle 50%
Length of sampling particle	2-5 μm	10 μm
Test(Performance)	-	Field verification test / Lab. test / Modeling test

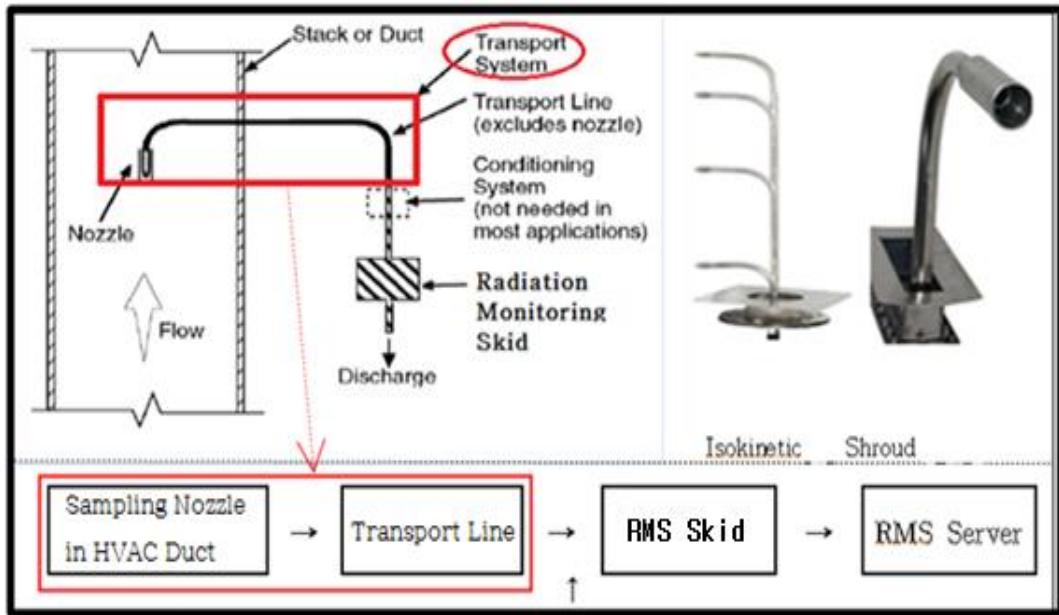


Figure 1.1 Sampling system of RMS

제2절 연구 필요성

방사선감시기 시료 채취계통에 대한 기술기준이 ANSI N13.1-1999년으로 대폭 변경됨에 따라 ANSI N13.1-1969년 기술기준에 따라 설계된 원전의 방사선감시기 시료 채취계통의 채취위치와 시료 이송배관의 유효성을 검증할 필요성이 발생하였다. 이 유효성의 결과는 방사선(능) 정보를 제공하는 감시기의 신뢰도와 직결되는 문제이기도 하다. 따라서 검증결과가 ANSI N13.1-1999에 적합하지 않을 경우 동 기술기준에 맞도록 설비 개선방안을 개발하여야 한다.

또한 규제기관은 원전 B발전소 주기적안정성평가(PSR, 2015년)시 기체공정방사선감시기의 시료 채취시스템의 개선 및 유효성 확인과 기체배출물 방사선감시기의 최신 기술기준의 적용을 안전성 증진사항으로 제시하였다. 즉, 기체공정감시기에 대해서는 ANSI N13.1-1969에 따른 최적화와 기체배출물 감시기에는 최신 기술기준인 ANSI N13.1-1999 적용을 요구하였다. [8,9]

원자력안전법에서도 원자로 기술기준에 관한 규칙 제20조(계측제어장치), 제34조(방사선방호설비) 등에 원전의 운전상태 및 사고상황시 방사선(능) 및 배출을 감시하

도록 규정되어 있고, 구체적으로 원안위 고시 제49호(방사선방호등에 관한 기술기준) 제20조(계측 및 제어장치)에서 “원전의 안전하고 신뢰성있는 운전에 필요한 정보를 얻기 위하여 예상되는 모든 범위에 걸쳐서 관련 변수 및 계통 등을 감시할 수 있는 계측장치를 설치하여야 한다.” 라고 명시함으로써 방사선감시기의 신뢰성 확보는 필수불가결한 사항이다.[10, 11]

제3절 연구 목표

규제기관이 원전 B발전소 기체방사선감시기에 대한 주기적 안전성평가에서 요구한 사항중 기체공정방사선감시기의 ANSI N13.1-1969년에 따른 최적화는 설계 당시의 기술기준대로 건설되었는지를 확인하는 것에 불과하지만, 기체배출물 방사선감시기는 설계 당시와 지금의 기술기준이 일부 상이하므로 기체배출물 감시기의 유효성을 검증하고 확보하라는 것이다. 따라서 기체유물출 방사선감시기의 유효성 검증과 설비 개선방안을 연구 목표로 설정하였다. 즉, 방사선감시기의 시료 채취위치의 적절성과 시료이송 배관 이송률이 신규 코드에 맞는지를 검증한다. 나아가 검증결과가 부적합한 경우 설계 변경이 이루어지도록 설비 개선방안을 제시한다. 연구를 위해 선정한 발전소는 ANSI N13.1-1969년 기술기준에 따라 설계된 발전소 중 한 곳인 B발전소를 선정하여 연구를 진행하였다.

제2장 유효성 검증 및 설비 개선방안 도출방법

제1절 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 1.1와 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. 시료 채취는 2~5 μ m의 입자와 최대 10 μ m 입자를 대상으로 하며, 이송관 설계는 최대한 짧게라는 약간의 기준을 제시하였다. [3]

ANSI N13.1(1999년)은 Table 2.1과 같이 대표시료 채취위치에 대한 덕트 나 스택 내의 유속분포, 유동각, 추적가스 농도 분포, 에어로졸 입자 분포 등에 대한 허용기준을 제시함과 함께 검증을 요구하고 있다. 필요시 현장실증시험을 대체할 수 있는 스케일모델 시험안도 제시하였다. 또한 복수의 소직경 isokinetic 노즐에 의한 입자손실을 증가를 방지하기 위해 단일 쉬라우드 노즐 설치를 제시하는 한편, Table 2.2 시료이송 계통의 설계요건에서 거친입자에 속하는 10 μ m 입자의 이송관 이송율이 50% 이상 조건을 만족하도록 제시하였다. [4,5]

Table 2.1 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 2-1) 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 40 CFR60, Appendix A, Method 1(figure 2-1) 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 2-1) 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(Coefficient of variation) = standard deviation / Average x 100

Table 2.2 Design criteria of ANSI N13.1(1999) for sampling system

Items	Technical Details
Flow rate of sample	flow rate of continuous sampling system: 25 ~ 100 LPM operating range (gas flow rate): 0.1 to 100 LPM
Bulk stream volumetric flow	<ul style="list-style-type: none"> - accuracy of emissions estimates is directly related to the accuracy of flow rate measurements. - continuous monitoring if periodic measurements are required and significant emissions are possible. - volumetric flow rate based on mass flow rate 760 mmHg 25°C
Measurement apparatus	- thermal anemometers / Pitot / Acoustic flowmeter
Surface roughness	- inside nozzle(0.8 μm below), outside nozzle(1.6 μm below), shroud(3.2 μm below)
Nozzle performance	<ul style="list-style-type: none"> - evaluating the effectiveness of the sampling depending on nozzle transmission - under normal & accident, 10μm particle transmission ratios(0.8~1.3), aspiration ratios(1.5 below) - shroud nozzle with lower wall loss recommended - the front area of nozzle not greater than 15% of the stack or duct cross section area 이하
Consideration on nozzle selection	<ul style="list-style-type: none"> - orientation : aligned parall to the temporal mean flow stream direction - transmission & aspiration ratios : design to experimental verification of performance about particle of 10 μm <ul style="list-style-type: none"> - nozzle configuration - materials : not react with either the aerosol or the vaporous constituents of the gas stream
Depositional losses of transfer lines	under normal & accident, estimate for 10 μm Aerosol particle
Sample transfer lines	<ul style="list-style-type: none"> - horizontal tubing sections as short as possible - tubing connections reduction < 1% - tubing end have nothing burr - recommended not more than one 90 ° bend <ul style="list-style-type: none"> - curvature ratio : at least 3.0 - flattening of the bend not exceed 15 % - penetration of 10 μm aerosol particles less than 50 %
Material transfer lines	<ul style="list-style-type: none"> - material recommend stainless - transfer lines casing static electricity not permitted <ul style="list-style-type: none"> - using for conductive plastics or metal - nonconductive tubing, not exceed 2 times the internal diameter of tube <ul style="list-style-type: none"> - drawn tube: inside nozzle 0.8 μm below

제2절 현장조사

B 발전소 기체방사선감시기 시료 채취위치를 형상화하고, 이송배관을 3차원 입체화하기 위해 장기간에 걸쳐 덕트 레이아웃과 이송관 설계도면, 각 HVAC 계통의 유동해석에 관련된 덤퍼의 자료, 계통별 HVAC 가동유량 및 덤퍼 개도율, 건설 초기의 단위덕트의 제작을 위한 덕트 제작도면, 이송관 설계환경자료를 수집했다. 정확한 계산을 위해 도면과 현장이 일치되는지 여부를 확인하기 위해 오랜 기간 현장조사도 병행하여 실시하였다. 40 CFR 60, App. A Method 1의 시료 채취 위치에 대한 정의에 따라서 유효 직관부를 지정하고 시료 채취 위치를 기준으로 유체 유입구와 유체 배출구를 구분하여 연구대상으로 선정 할 감시기에 대해서는 시료채취 위치를 3차원 그림을 작성하고, 최종 연구 대상을 선정하기 위한 감시기 목록을 항목별로 Table 2.3에 정리하였다. [12]

Table 2.3 Object of equipment improvement for RMS of B Plant

Verification items	RMS		RMS Locations	Collection Locations
Sampling locations CFD Analysis	RE-002	SAB & HELB area emissions sampler	SAB 100'	SAB 125'
	RE-015	PAB HVAC emissions sampler	PAB 165'	PAB 182'
	RE-037	CV, ECCS HVAC emission monitor	PAB 165'	PAB 182'
	RE-043	FB HVAC emission monitor	FHB 142'	FHB 142'
	RE-053	ACB Laboratory HVAC emission monitor	ACB 120'	ACB 120'
	RE-082	RWB HVAC emissions sampler	RWB 115'	RWB 115'
Conveying Pipes Transfer Rate Analysis	RE-002	SAB & HELB area emissions sampler	SAB 100'	SAB 125'
	RE-015	PAB HVAC emissions sampler	PAB 165'	PAB 182'
	RE-037	CV, ECCS HVAC emission monitor	PAB 165'	PAB 182'
	RE-043	FB HVAC emission monitor	FHB 142'	FHB 142'
	RE-053	ACB Laboratory HVAC emission monitor	ACB 120'	ACB 120'
	RE-061	Deaerator vent monitor	TBN 165	TBN 165
	RE-063	Condenser vacuum vent monitor	TBN 165	TBN 165
	RE-064	Steam sealing vent monitor	TBN 135'	TBN 135'
RE-082	RWB HVAC emissions sampler	RWB 115'	RWB 115'	

시료이송배관에 대해서도 특별히 각종 도면과 현장 실사를 통해 샘플링 노즐 타잎, 시료이송 배관의 사이즈, 곡관의 곡률반경(Curvature ratio), 시료 채취 위치에서 시료이송배관으로 유입되는 시료의 속도, 시료이송배관의 샘플링 유량 등을 파악하였다. 해당 위치의 ISO 도면자료를 참조하여 시료 채취 위치에서부터 RMS까지의 이송관 형상을 현장조사하고 이송관 규격도면도 작성하였다.

제3절 시료 채취 위치 유효성 검증 방법

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 샘플에 대하여 분석 작업을 수행하게 된다. 이때 배출 공기에 방사성물질 포함 여부를 감시하고 방사성 물질의 양을 예측한다. 방사성물질의 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 시료 채취 위치의 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 허용 기준 만족 여부를 평가하기 위해서는 이송 덕트 내, 시료 채취 위치에서의 시료의 속도, 유동각도, 추적가스의 농도, 에어로졸 입자농도가 측정/계산되어야 한다. 이를 위해 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 분석과 해석을 통하여 유효성을 평가한다. 또한 CFD분석을 통해 시료 채취 위치에서 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 사용되었다. 동 프로그램의 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 해

석적으로 계산하기 위해서는 공기에 대한 연속 방정식(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. [13, 15]

대표적인 난류 모델로는 Standard $k-\epsilon$ model과 RSM(Reynolds stress model)을 들 수가 있다. 전자는 강한 난류흐름이 나타나는 유동해석에 적합하고 일반적으로 많이 사용되는 대표적인 난류모델이다. 후자는 곡관을 포함하는 유동변화가 심한 난류흐름이 나타나는 유동해석에 적합한 모델로서 B발전소의 시료 채취계통은 곡관부가 여러 곳에 존재하고 지관으로부터 주관으로의 합류 또한 여러 곳에서 존재하므로 현재 진행 중인 해석에 보다 더 적합한 난류모델이다. B발전소의 시료 채취계통과 유사한 Duct 형태에서 수행된 난류 모델에 따른 정확성 평가 자료를 보면 RSM이 standard $k-\epsilon$ model에 비하여 보다 더 실험값에 근접한 결과를 예측한다는 것을 알 수 있다.

추적가스와 공기의 혼합 및 거동을 예측하기 위해서는 이성분 유체 해석도 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 시료 채취 위치에서 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.[13]

구체적으로 현장의 샘플링 노즐위치가 대표시료 채취 위치임을 검증하기 위해 Table 2.1의 허용기준에 적합함을 검증해야 한다. Figure 2.1와 같이 유동방향의 직각 단면 측정점에 대해 Figure 2.2와 같은 각 측정항목의 허용기준을 만족해야 한다. 측

정점은 ‘40CFR60 APPENDIX A METHOD 1’ 에 따른다.

본 연구에서는 전산유체해석(CFD)을 통해 배출물감시기의 시료 채취 위치의 적합성을 검증하고, Table 2.1의 대표시료 채취 위치에 대한 허용기준을 만족하는 지점을 선정한다. 이 선정된 지점을 설비 개선방안으로 제시한다.

Figure 2.2의 그래프를 보면 대표시료 채취 위치의 부적합한 사례는 덕트의 형상 변형이 있는 지점으로부터 시료 채취 위치지점(B지점)까지의 거리가 짧거나 시료 채취 노즐과 가까운 위치에 덕트 형상의 변형 및 덕트 내의 오염물에 의한 유동 장애물 등에 의해 유체가 난류에 편승하여 과도한 방향성을 갖는 현상으로 유체 혼합이 불균일하여 시료 채취 성능이 저하되는 경우이다.

RMS 시공단계에서 B지점이 짧게 설계되어 편향된 유동이나 과도한 난류가 발생하면 시료 채취 위치 허용기준을 만족시킬 목적으로 유체 유동이 균일하게 형성되도록 시료 채취 위치로부터 일정거리 이상의 전단부에 베인을 설치한다. 이러한 베인 설치 는 CFD분석을 통하여 베인의 위치와 규격을 설계하고 적용할 수 있다.

각 감시기별로 전산유체해석(CFD)을 통해 검증하며 신규 코드에서 요구하는 항목 별 판정 기준은 다음과 같다.[5]

- 유동각 : 시료 채취지점 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 시료 채취시 대표성이 없다고 판정한다.
- 추적자 가스 농도 분포, 입자 농도 분포 : 스택 단면적의 내부 2/3 영역에서 농도 COV가 20%를 초과하였을 경우 시료 채취시 대표성이 없다고 판정한다.
- 추적자 가스 최대농도 분포 : 유체의 농도가 스택 단면적의 모든 측정점의 한 지점이라도 평균값의 30%를 초과시 시료 채취시 대표성이 없다고 판정한다.

Figure 1-1) Minimum number of traverse points for **particulate** traverses

Figure 1-2) Minimum number of traverse points for **velocity(nonparticulate)** traverses

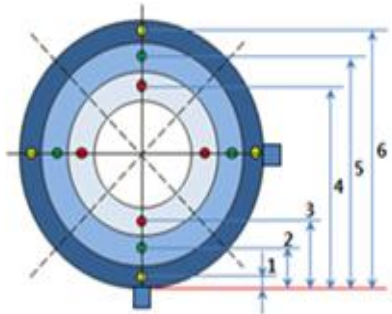
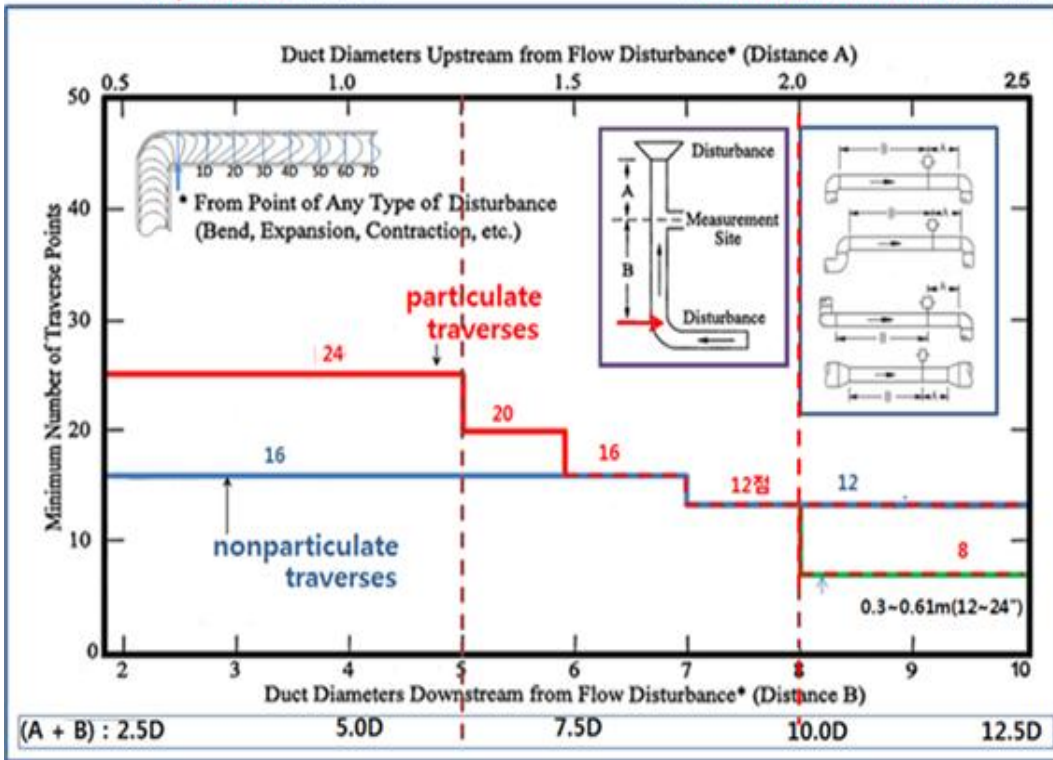


Figure 1-3) Example of Traverse Point for Cross Section of Circular Stack

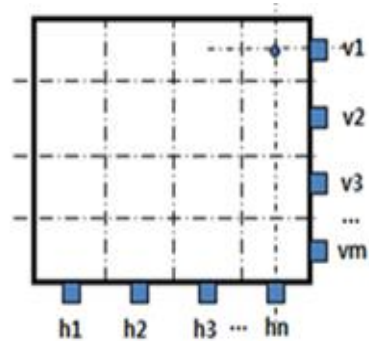


Figure 1-4) Example of Traverse Point for Cross Section of Rectangular

Figure 2.1 Selection method of sampling location for '40 CFR 60, App. A Method 1'

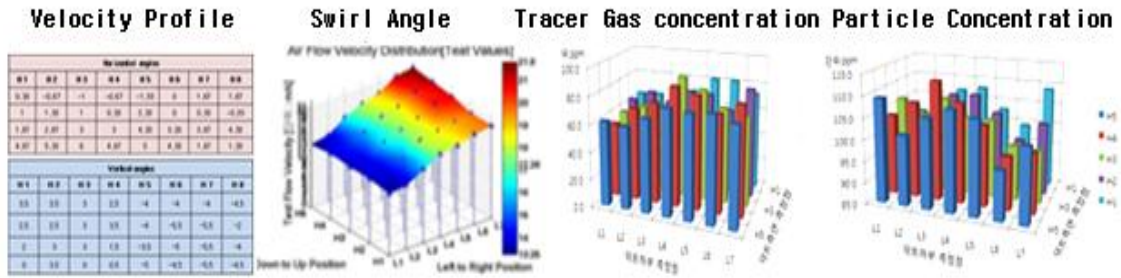


Figure 2.2 Example of validation test for sampling location

제4절 시료 이송배관 유효성 검증 방법

시료 채취계통에서 샘플링 노즐을 통하여 채취된 공기 시료는 시료이송배관을 통하여 기체배출물 방사선감시기로 이송된다. ANSI N13.1-1999의 설계요건에 따르면 노즐을 통해 기체배출물방사선감시기로 이송된 입자의 이송률은 50%이상이어야 한다.[5]

시료 이송계통에서 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 사용한다.(Figure 2.3(a)~ Figure 2.3(f)) 동 프로그램을 통해 이송율의 적정성을 검증한다. 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.[14]

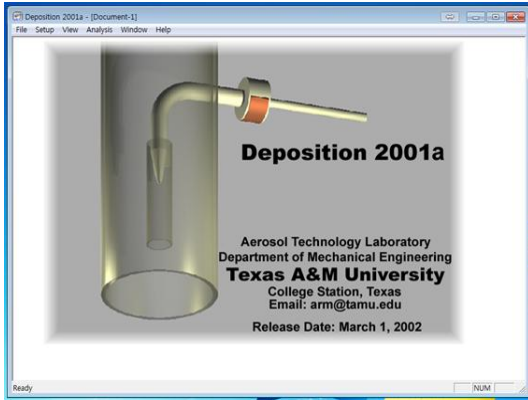


Figure 2.3(a) Initial screen of deposition program

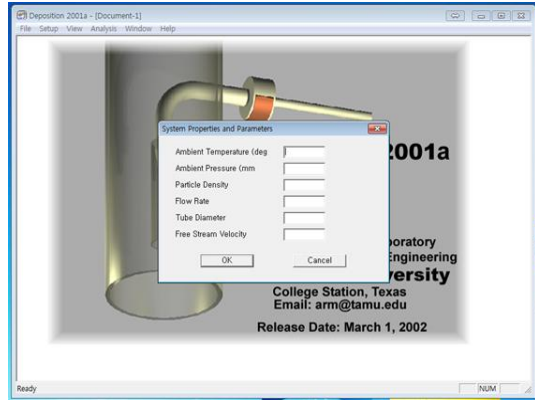


Figure 2.3(b) Deposition program (system properties and parameter)

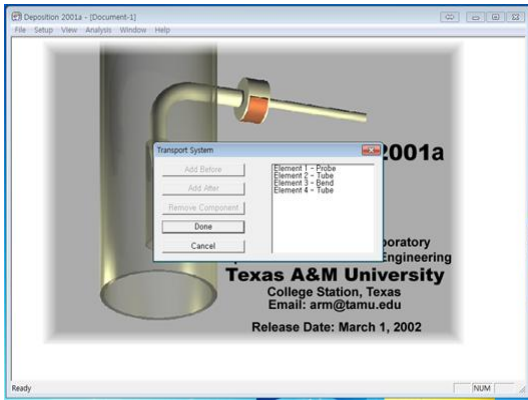


Figure 2.3(c) Deposition program (transport system)

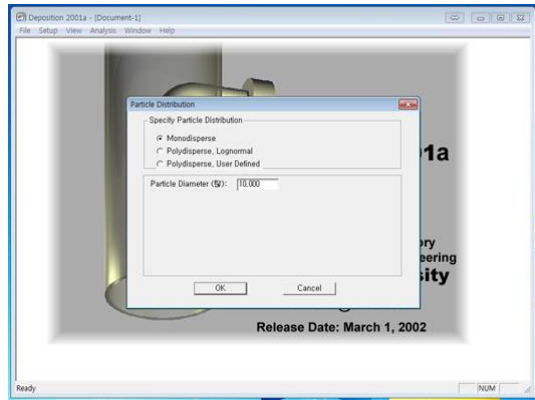


Figure 2.3(d) Deposition program (particle distribution)

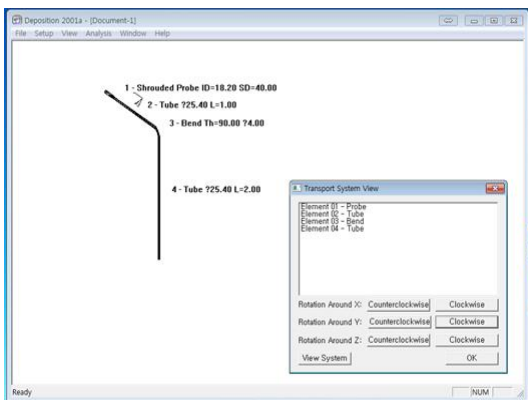


Figure 2.3(e) Deposition program (transport system view)

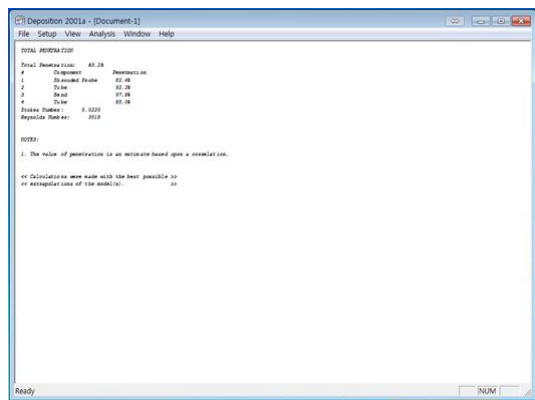


Figure 2.3(f) Deposition program (results)

제5절 설비 개선방안

1. 시료 채취 위치 설비 개선방안

기체배출물 방사선감시기의 시료 채취 과정은 덕트나 스택에 설치되어 있는 시료 채취노즐로부터 유동 중인 유체 시료를 채취하여 노즐과 연결된 시료이송관을 통해 감시기(또는 샘플러)로 이송된다. 이 때 감시기로 들어오는 기체는 배출관로를 흐르는 기체의 대표성을 가져야 한다. RMS HVAC 덕트에서 제2장 제3절에서 규정한 방법을 통해 시료 채취 위치 유효성 평가를 만족하지 못한 RMS 설비는 시료의 대표성을 가지는 시료 채취 위치로 재선정해야 한다.

재선정 방법은 HVAC 배출관로에서 최신 기술기준을 적용한 CFD 분석을 통해 유효성을 만족하는 위치를 찾아야 한다. 본 연구에서는 배출관로 수직직경의 5D 이후의 기체 유동방향 관로에 대해 약 0.5m 간격으로 CFD 분석을 실시하여 기술기준을 만족하는 최적의 위치를 찾고자 하였다. 좀 더 짧은 구간별로 CFD분석을 수행하여 최적의 위치를 찾을 수도 있으나, 현실적으로 한 포인트에 대한 분석시간이 슈퍼컴퓨터를 활용하여도 48시간 정도 소요되므로 재선정 작업에만 RMS 설비당 2달 정도 소요된다. 따라서 0.5m 간격으로 각 기술기준 항목별로 분석 결과를 도출한 후 그래프상 트렌드(외삽)를 통하여 평가하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

이후 재선정된 유효한 시료 채취 위치를 찾으면 그 포인트에서 설비 개선안을 제시하고, 만약 기존 HVAC 배출관로에서 유효한 지점을 찾지 못한 경우는 관로내 덤퍼를 고려한 재평가 또는 배출관로의 구조적 변경 필요시 건축구조물의 변경도 고려할 수 있을 것이다. 그러나 배출관로나 건축구조물의 변경은 기존 발전소 설계개념을 원론적으로 변경할 여지가 있어 본 연구에서는 개괄적인 방향만 제시하고, 추후 원자력발전 사업자와 규제기관과의 정책적 협의를 통해 설비 개선 방향을 결정해야만 할 것이다.

2. 시료 이송배관 설비 개선방안 개발

현 상태의 시료이송관에 대한 평가를 수행한 결과가 최신기술기준을 충족하지 못하는 시료이송관에 대해 시료 이송률이 50% 이상을 보증할 수 있는 시료 이송관으로 개선을 수행하여야 한다.

시료이송관 개선을 위해서는 먼저 덕트에서 시료 채취 위치 선정이 선행되어야만 그곳에서부터 감시기까지 이송배관 ISO를 Draft 할 수 있다. 현 시료 채취 위치의 적절성 평가는 CFD를 통해 확인 한 후, CFD분석과 해석을 통해 방사선감시기의 최적의 유효한 시료 채취 위치를 찾고자 하였다. 그 최적의 위치에서 현 방사선감시기까지의 이송률을 재평가하고, 그럼에도 이송률을 만족하지 못하는 경우는 감시기 이설 또는 시료 이송관 최적화를 통해 시료 이송률 향상을 위한 방향을 제시하고자 한다.

발전소 여건상 감시기 이설은 대단히 큰 설계 변경 사항일 뿐 아니라, 각종 발전소내 구조물들로 인해 감시기 이설 자체가 녹록하지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 이송률을 만족하지 않을 경우 개략적인 설비개선 방향을 제시하고자 한다

아울러 시료이송률을 만족하지 못한 경우 발전소 여건상 구체적인 설비 개선안 제시에는 한계가 있는 바, 추후 규제기관과의 협의를 통해 설비 개선을 시도해야 한다.

제3장 연구대상 선정

제1절 연구 대상 선정 방법

연구 대상은 발전소 RMS 설치시 반영되었던 기술기준이 ANSI N13.1(1969)인 발전소 중 한 곳을 선정하였다. 그리고 동 발전소의 기체 배출물 감시를 담당하는 방사선감시기는 Table 3.1과 같다. 하지만 이 모든 감시기를 대상으로 유효성을 평가하고 설비개선 방안을 제시하기에는 연구 규모와 비용의 측면에서 우리가 따를 수밖에 없다.

또한 기체 배출물 HVAC 관로에서의 유효한 시료 채취 위치선정에 있어서 중요한 관건은 배출모관의 직선의 길이이다. 이 직선거리가 유효한 시료 채취 위치 선정에 상당한 영향을 준다. 그러나 각종 기술기준에 따른 설계 기준 등을 충족해야 하는 발전소 여건상 HVAC 배출관로를 연장하기는 불가능하다. 궁극적으로는 설비 개선(안) 제시는 시료이송율 50% 이상도 만족해야 하므로 RMS 설비(SKID)를 이설 가능한 감시기여야 한다. 그러나 RMS RE-061, 063, 064등 방사선감시기는 TBN 건물 내에 있고, 그 위치는 각종 철골 구조물 및 각종 계통 유체 배관들로 인해 감시기 이설이 불가하다. 따라서 RMS RE-061, 063, 064등은 연구 대상에서 제외하였다.

따라서 연구 대상 감시기 선정은 유효한 시료채취위치를 선정할 수 있어야 하며, RMS 설비(SKID)를 이설 가능한 감시기를 선정하여야 한다. 유효한 시료이송률을 얻기 위해서는 시료이송배관의 직관(Tube)은 짧아야 하며, 곡관(Bend)의 수는 최대한 적게 설계가 가능한 감시기를 선정하여야 한다.

최종적으로 연구대상 감시기는 시료채취위치 평가 결과 유효하지 않으며, 기체 배출 HVAC 관로 중 시료채취위치 이후 유동 방향의 직선거리가 상당한 여유가 있어 유효한 시료 채취 위치를 선정할 수 있어야 한다. 또한 유효한 시료채취위치 선정 후, RMS 설비를 변경하여 유효한 시료이송률을 만족할 수 있어야 한다. 만약 연구를 위해 시료 채취위치에 대한 유효성 평가가 만족할 경우 다른 감시기 순으로 연구를 진행한다.

Table 3.1 The Research target of RMS equipment

Part	Monitor Name	Remark
Gaseous Emission Radiation Monitors (B Nuclear Power Plant: total 17ea)	RE-037 (CV, ECCS HVAC emission monitor)	Application of ANSI N13.1 (1969)
	RE-043 (FB HVAC emission monitor)	
	RE-053 (ACB Laboratory HVAC emission monitor)	
	RE-002 (SAB&HELB area emissions sampler)	
	RE-015 (PAB HVAC emissions sampler)	
	RE-082 (RWB HVAC emissions sampler) (common)	
	RE-061 (Deaerator vent monitor)	
	RE-063 (Condenser vacuum vent monitor)	
	RE-064 (Steam sealing vent monitor)	

제2절 연구 대상 선정

기체배출물 감시기에 대한 덕트 규격 및 시료 채취 위치 노즐위치는 Table 3.2과 같다.

Table 3.2 Summary of RMS sampling point

RMS	Duct size(inch)		The sampling nozzle position on the effective straight pipe section of the duct		
	Section	Hydraulic Diameter (D)	Straight pipe length	Front end length (B)	Back end length (A)
RE-002	54×36	43.2	371" (8.6D)	244" (5.6D)	127" (2.9D)
RE-015	66×30	41.3	830.3"(20.1D)	297" (7.2D)	538.3" (13D)
RE-082	60×48	53.3	305" (5.7D)	239" (4.5D)	66" (1.2D)
RE-037	∅52	∅52	201.45"(3.9D)	118" (2.3D)	83.46"(1.6D)
RE-043	36×28	31.5	185.9" (5.9D)	131.9"(4.2D)	54" (1.7D)
RE-053	42×40	41	630" (15.4D)	348" (8.5D)	282" (6.9D)

* (Hydraulic Diameter : D) = (2×Duct Wide×Duct height) / (Duct Wide + Duct height)

또한 기체배출물 HVAC 관로의 시료채취위치에서 방사선감시기까지의 거리는 Table 3.3과 같다.

Table 3.3 Distance(m) from RMS skid to Sampling point

RMS	dx(m)	dy(m)	dh(m)	dl(m)
RE-002	9.3	3.8	7.1	12.3
RE-015	7.3	6.0	8.2	12.5
RE-082	2.8	5.4	2.5	6.6
RE-037	8.6	9.0	5.4	13.6
RE-043	0.5	0.0	2.2	2.3
RE-053	3.1	0.1	1.8	3.5

이를 바탕으로 방사선감시기 별로 세부적인 최적의 연구대상 방사선감시기에 대한 탐색 결과는 다음과 같다.

RE-002의 경우, Figure 3.1(a), (b)와 같이 기체 배출 HVAC 들의 대부분이 정상 및 비상 등 2가지 운전 모두가 존재하고, 그 운전 모드별로 배출관로의 유량이 정상 배기 팬 30,340cfm, 비상배기팬 10,000cfm 으로서 현격한 차이가 있어 시료의 대표성을 갖는 시료 채취 위치를 선정하기가 매우 어렵다.

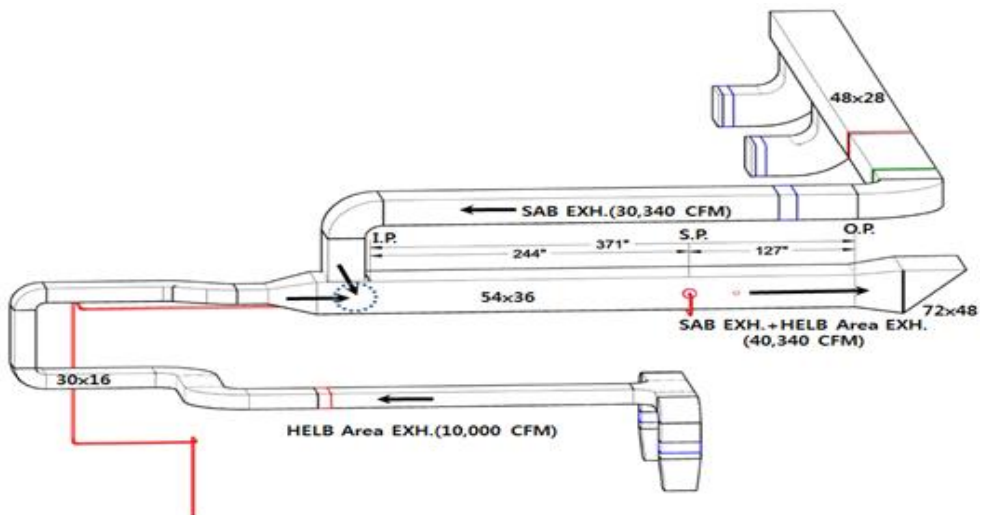


Figure 3.1(a) RE-002 ISO drawing for HVAC duct & flow

중요한 관건중 하나인 배출모관의 직선의 길이도 짧아 유효한 시료 채취 위치 선정도 어려울 것으로 보인다. Table 3.3 에서와 같이 시료 채취위치에서 감시기 까지의 거리도 12.3m에 달할 뿐 아니라, 콘크리트 구조물로 인해 시료 이송 배관의 단순화 작업도 어렵다.

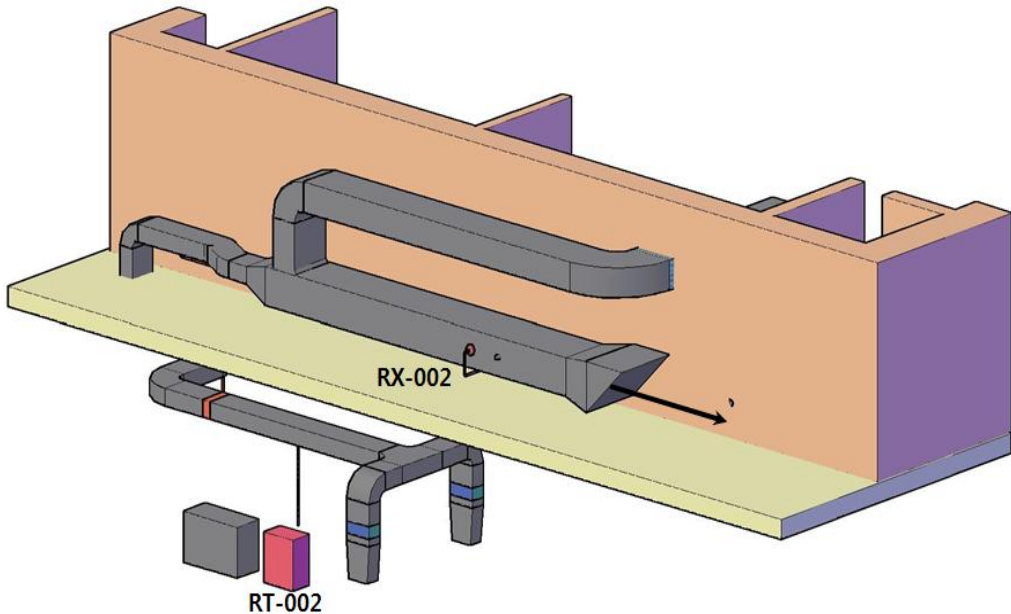


Figure 3.1(b) RE-002 Sampling location & duct shape

RE-015의 경우, Figure 4.1, 4.2 와 같이 시료 채취 위치에서 유량 진행 방향으로 HVAC 배출관로 출구까지 12.7m에 달해 CFD 분석을 통해 유효한 시료 채취 위치 재설정 이 가능할 것으로 사료된다. 배출 모관의 시료 채취 위치 근처로 감시기 이설을 위한 공간도 충분하다.

RE-037의 경우, Figure 3.2(a), (b)와 같이 RE-002처럼 배출모관에 다양한 운전모드 와 그 운전모드에 따른 다양한 유량(고체적 배출 팬 47,00cfm, 저체적 배출팬 1,500cfm 등)이 존재함에 따라 각 운전모드에 따른 시료의 대표성을 확보하기는 매우 어렵다.

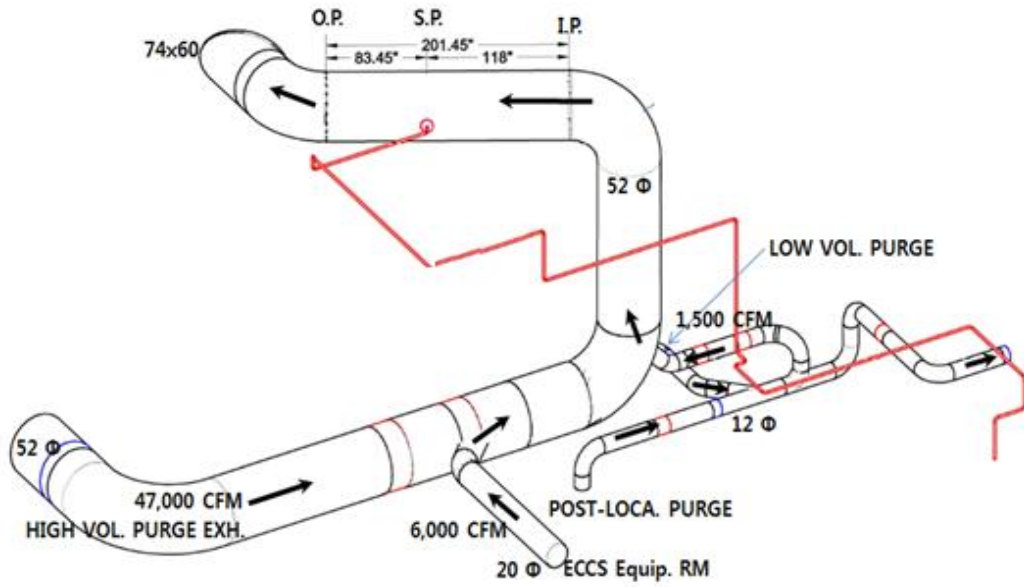


Figure 3.2(a) RE-037 ISO drawing for HVAC duct & flow

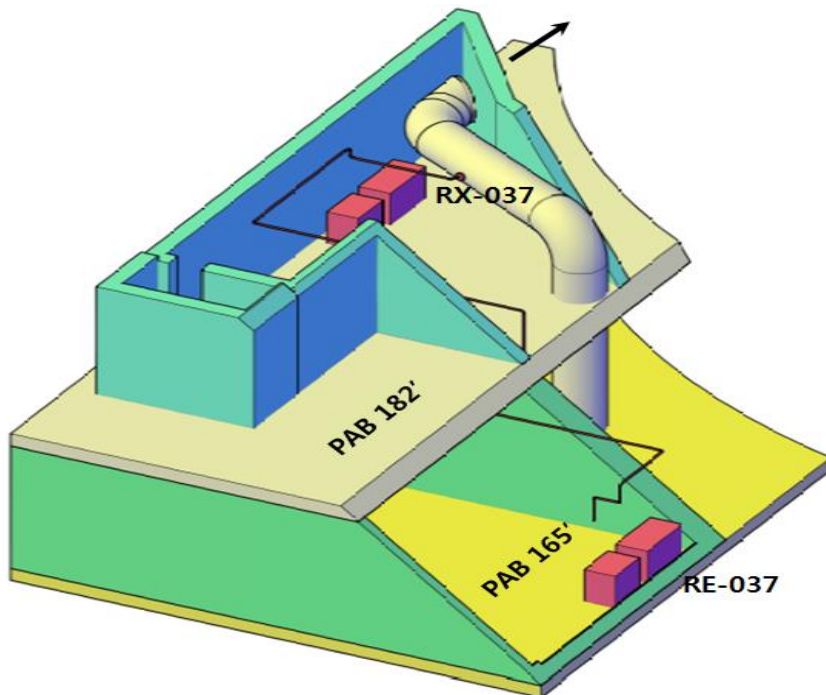


Figure 3.2(b) RE-037 Sampling location & duct shape

RE-043의 경우, Figure 3.3(a), (b)와 같이 시료채취위치에서 감시기까지의 거리가 2.3m로 매우 짧아 시료이송률은 매우 좋을 것으로 판단되지만, 배출모관에 다양한 운전모드와 그 운전모드에 따른 다양한 유량(정상 배출팬 27,300cfm, 비상 배출팬 5,000cfm)이 흘러들어 올뿐 아니라, HVAC 덕트 모관에 접속하는 위치가 달라 기체 유동이 모드별로 상당할 것으로 판단된다. 또한 배출 HVAC 모관의 직선 거리도 짧아 각 운전모드에 따른 시료의 대표성을 확보하기가 어렵고 개선도 쉽지 않다.

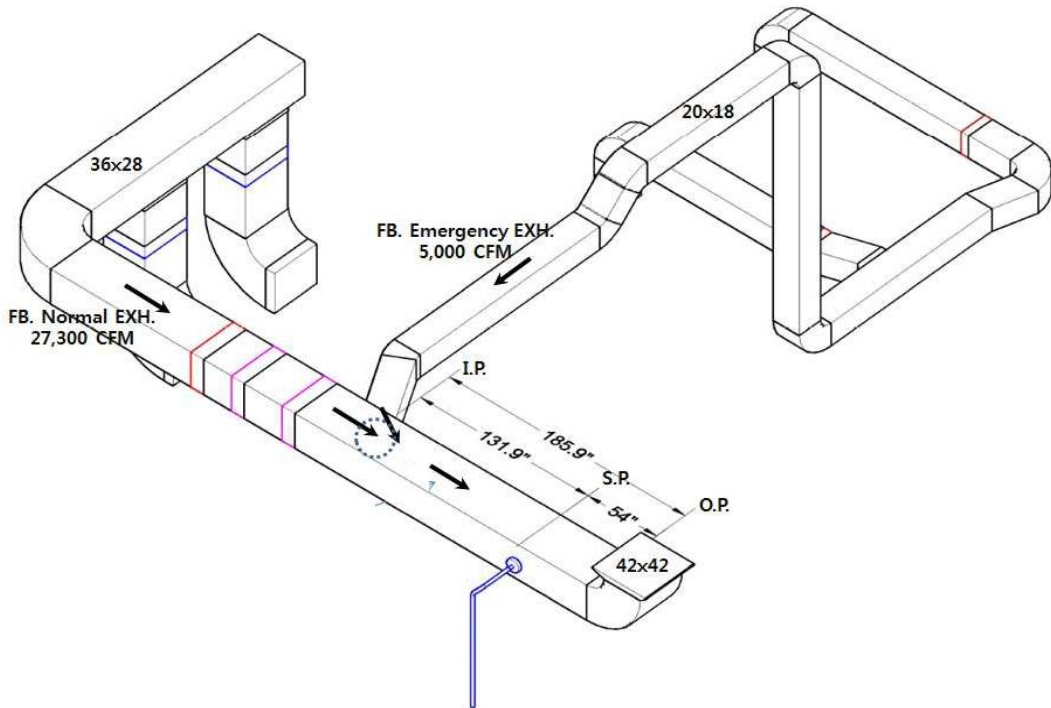


Figure 3.3(a) RE-043 ISO drawing for HVAC duct & flow

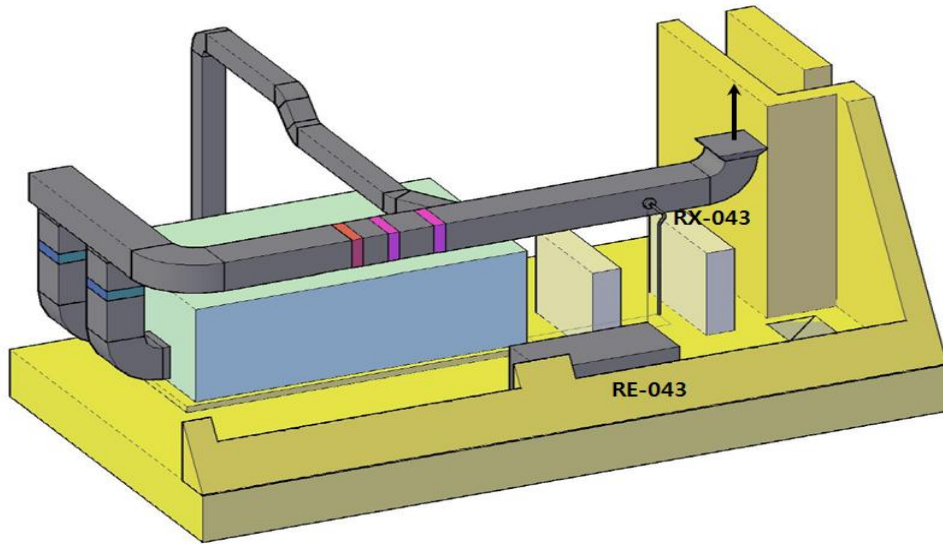


Figure 3.3(b) RE-043 Sampling location & duct shape

RE-082의 경우, Figure 3.4(a), (b)와 같이 시료 채취 위치 이후의 HVAC 배출관로가 너무 짧아 유효성을 확보하기가 불가능하다.

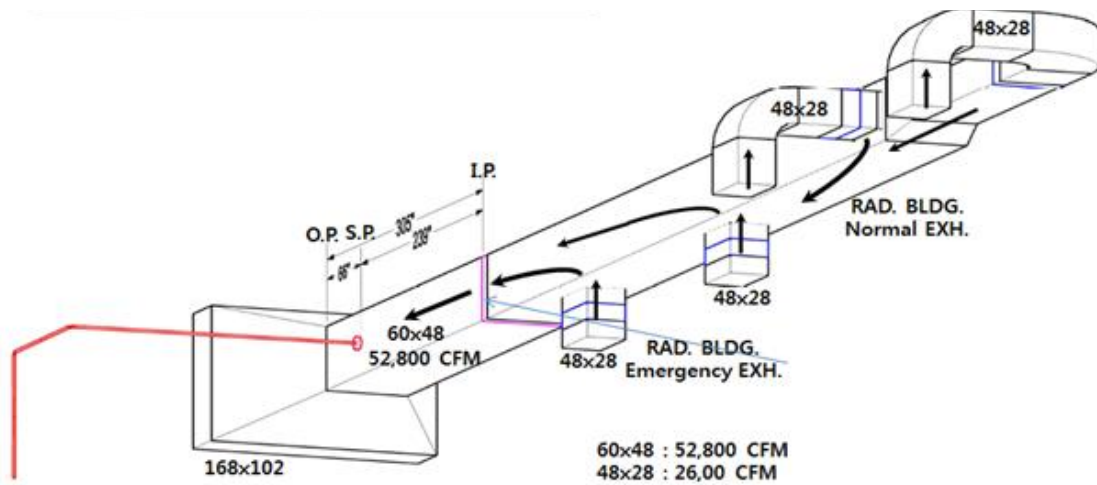


Figure 3.4(a) RE-082 ISO drawing for HVAC duct & flow

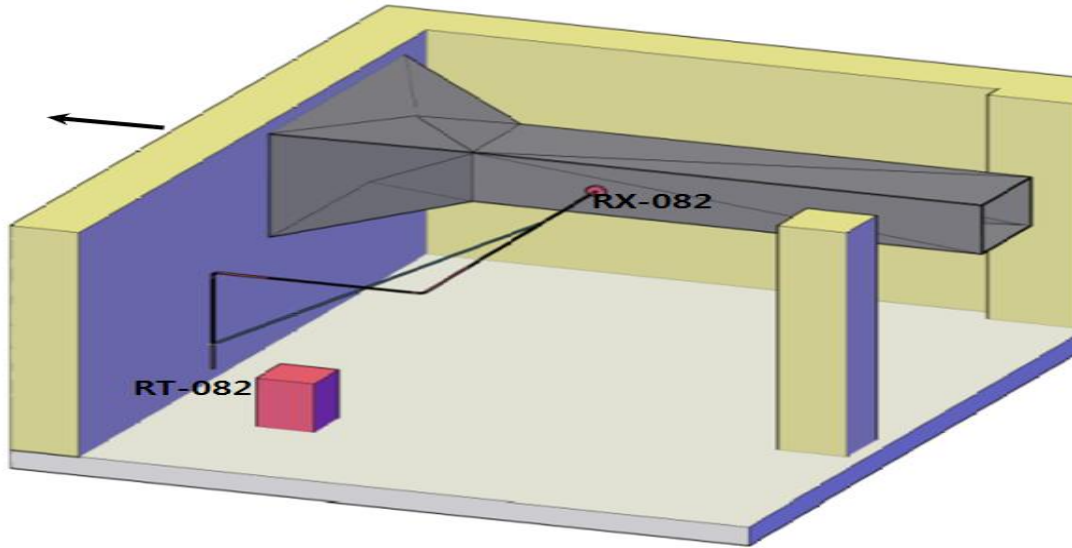


Figure 3.4(b) RE-082 Sampling location & duct shape

RE-053의 경우 단일한 배출 팬과 기체 배출 HVAC관로의 적절한 직선거리로 인해 유효한 시료 채취위치로 판단되고, 시료 채취위치에서 감시기 까지의 거리도 3.5m에 불과해 시료이송률도 매우 좋을 것으로 판단되어 연구 대상에서는 제외하였다.

따라서 RE-015를 연구대상 감시기로 선정하고, 시료의 대표성을 평가하고, 시료의 대표성이 유효하지 않을 경우 설비 개선 방안을 내기로 하였다.

제4장 시료 채취 위치 유효성 검증 및 설비 개선방안

제1절 유효성 검증

1. RE-015 시료 채취 위치 현장조사 및 3차원 형상화

PAB 기체 배출물 HVAC은 각 2기의 Normal Exhaust ACU와 Emergency Exhaust ACU에서 합류되어 유량 40,000 cfm이 48"x40" 규격의 덕트로 합류되고, 곡률반경 50의 90° 곡관부를 지나면 덕트 규격 66"x30"로 덕트형상 변경이 있다. 유체 유량 40,000 cfm의 덕트 규격 66"x30"를 유지하는 영역을 덕트 유효직관부로 설정하고, 덕트 직관부 길이는 20.10 이며, 시료 채취 위치는 7.20 이다.

구체적인 덕트 크기, 유량 그리고 속도는 Table 4.1와 같으며, 현장 조사를 통해 확인한 덕트의 시료 채취 위치는 Figure 4.1과 같고, 관련 덕트 모양, 시료 채취 위치 및 감시기 위치 등에 대한 입체 구조는 Figure 4.2와 같다.

Table 4.1 Dct size and flow condition at Inlet and sampling parts

Item	Part		Duct size		Flow rate	Velocity	
			H [Inch]	V [Inch]	[CFM]	[m/s]	
RX-015	Inlet	Normal	AU09	36	32	20,000	12.7
			AU31	36	32	20,000	12.7
		Total		-	-	40,000	-
		Emergency	AU08	36	32	20,000	12.7
			AU10	36	32	20,000	12.7
		Total		-	-	40,000	-
	Sampling(Normal/Emergency)		66	30	40,000	14.8	

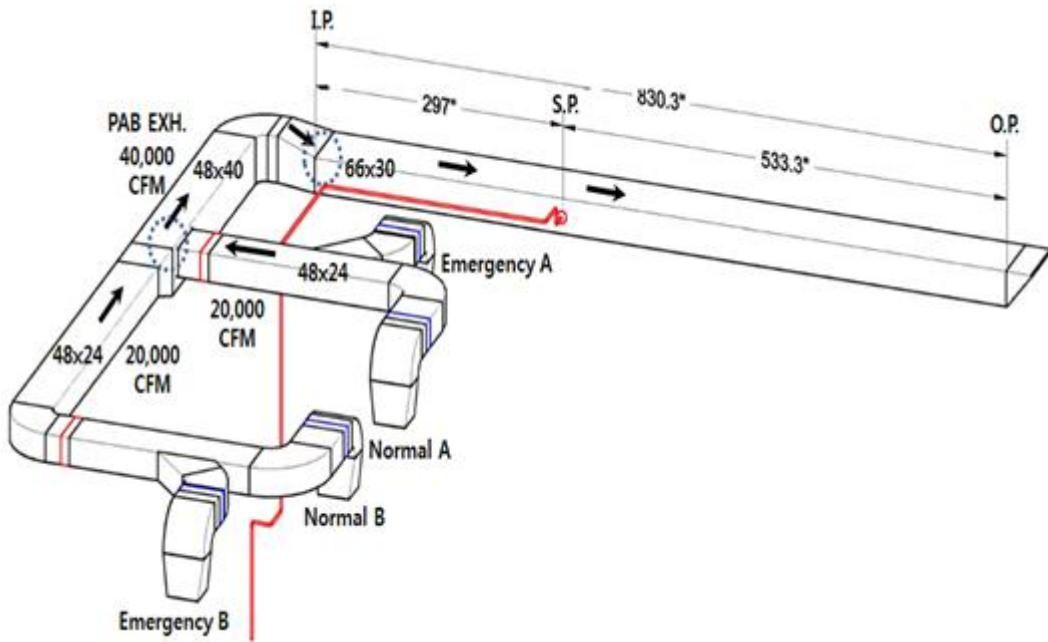


Figure 4.1 RE-015 ISO drawing for HVAC duct & flow

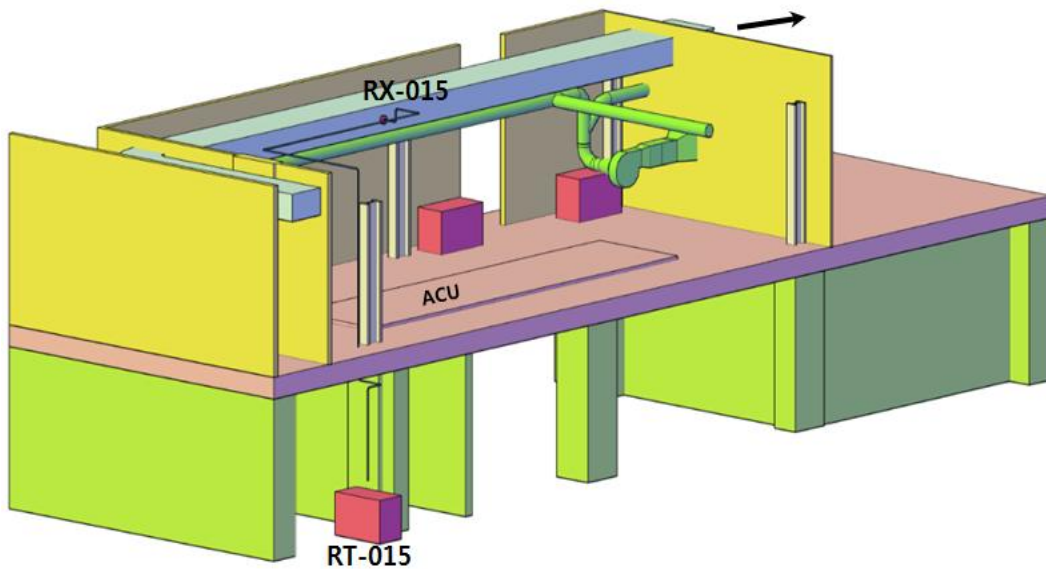


Figure 4.2 RE-015 Sampling location & duct shape

2. 현 시료 채취 위치 적합성에 대한 시뮬레이션 평가

(1) ACU 운전 조건

● PAB Normal Exhaust ACU 운전 조건

- 공조기 운전 조건: AU09와 AU31이 동시에 운전
- 시료 채취 위치에서의 유량: 40,000 CFM
- 시료 채취 위치에서의 덕트 사이즈: 66 inch X 30 inch
- 시료 채취 덕트의 위치: TOD 198' -6"

● PAB Emergency Exhaust ACU 운전 조건

- 공조기 운전 조건: AU08과 AU10이 동시에 운전
- 시료 채취 위치에서의 유량: 40,000 CFM
- 시료 채취 위치에서의 덕트 사이즈: 66 inch X 30 inch
- 시료 채취 덕트의 위치: TOD 198' -6"

(2) 해석 및 평가

(가) PAB Normal Exhaust ACU 운전 시 (AU09 & AU31)

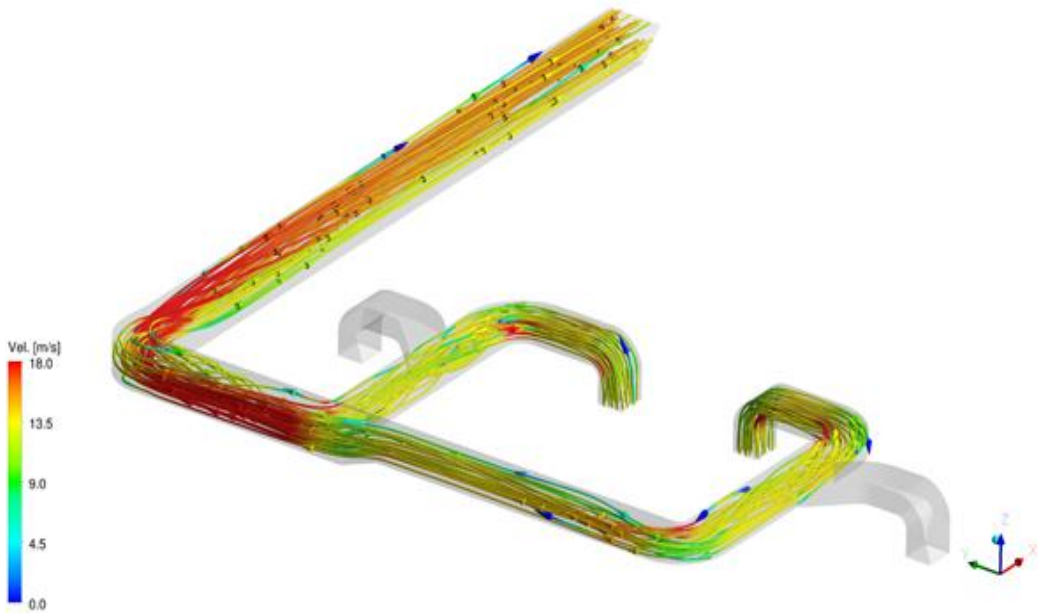
PAB Normal Exhaust ACU(AU09 & AU31) 운전 시, RE-015의 시료 채취 위치가 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하였다.

CFD 해석을 수행하기 위해 3차원 모델의 격자시스템을 Figure 4.3(a)와 같이 구성하였다. 덕트 내 공기의 흐름은 Figure 4.3(b) (a)와 같고, 공조기 AU09와 공조기 AU31에서의 각 공기흐름은 Figure 4.3(b) (b)와 (c)에 나타내었다. 덕트 내 공기흐름은 각 지관이 합류되는 지점과 곡관의 후류에서 공기의 유속이 빨라지는 것이 관찰되며, 곡관 후류에서는 일부 스웰 유동 현상이 발생되기도 한다. 그러나 시료 채취 위치로 갈수록 안정된 유동 흐름을 보인다.

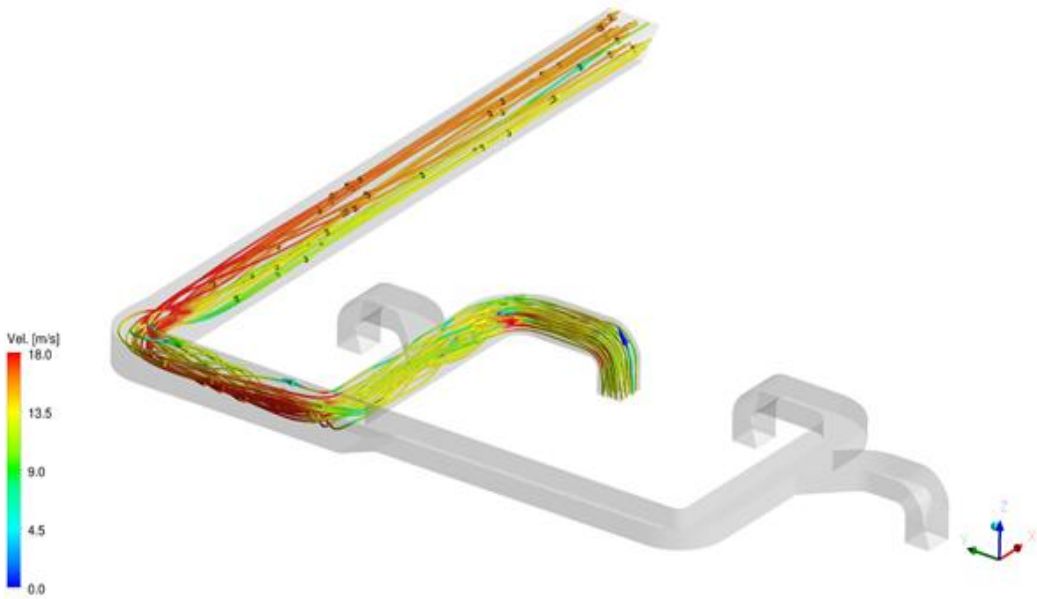
덕트 내 시료 채취 위치에서 속도분포 및 속도벡터를 Figure 4.3(c)에 나타내었다. 시료 채취 위치에서 공기의 속도분포는 비교적 균일하다. 유동각은 평균 20° 미만으로 설계요건을 만족한다. 덕트 내 시료 채취 위치에서 추적가스의 농도분포는 Figure 4.3(d) (a) (From AU09)와 Figure 4.3(d) (b) (From AU31)와 같다.



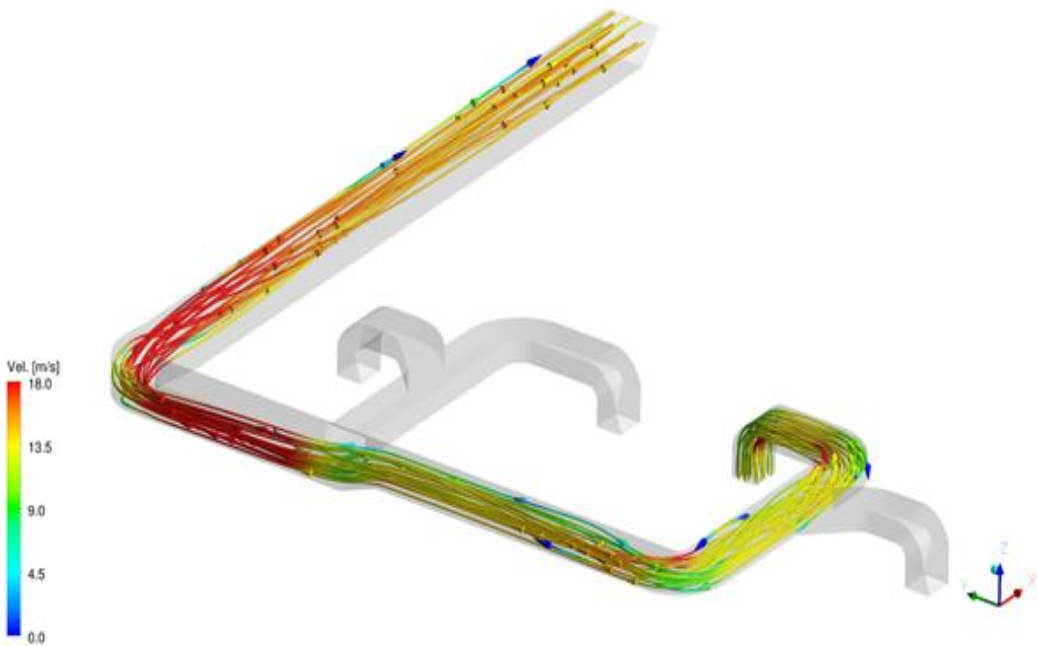
Figure 4.3(a) Mesh generation(AU09 & AU31)



(a) Overall



(b) From AU09



(c) From AU31

Figure 4.3(b) Streamline(AU09 & AU31)

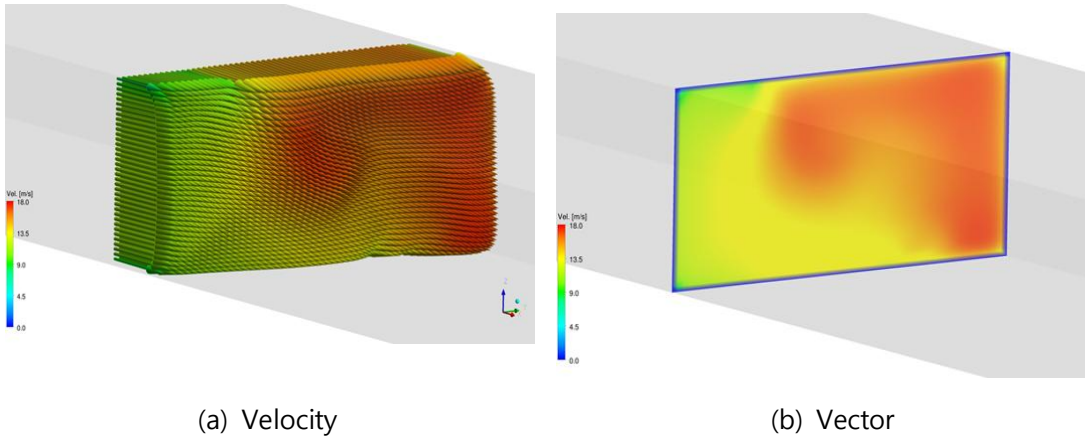


Figure 4.3(c) Velocity profile (AU09 & AU31)

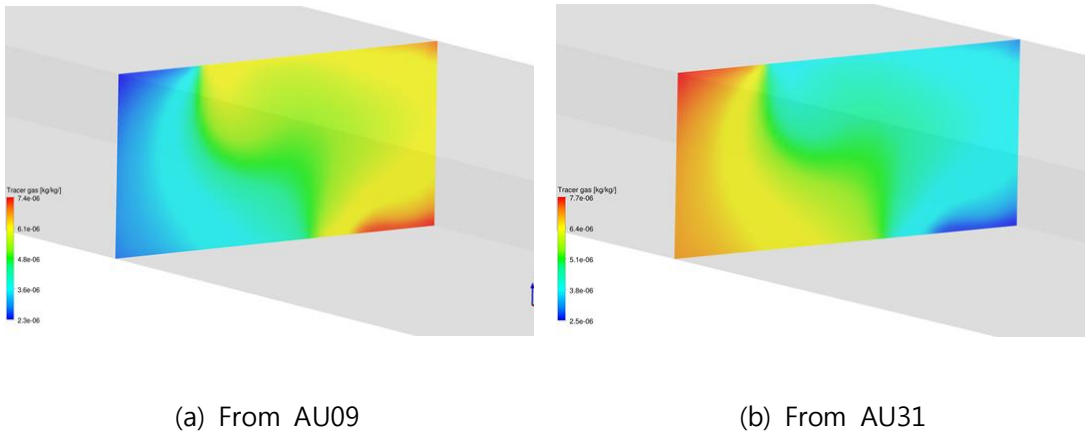


Figure 4.3(d) Tracer gas(AU09 & AU31)

(나) PAB Emergency Exhaust ACU 운전 시 (AU08 & AU10)

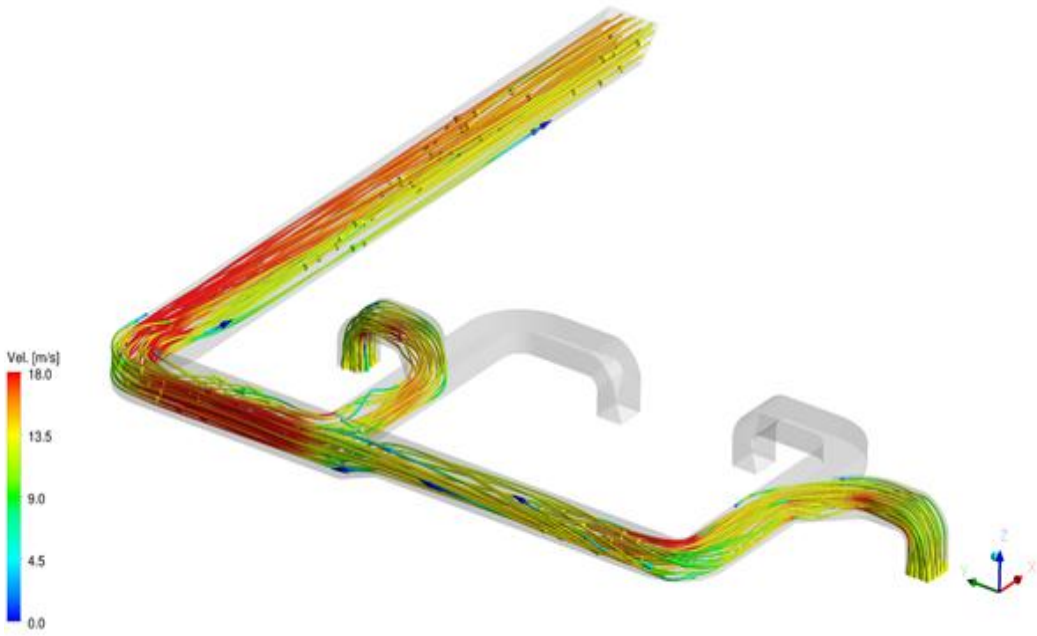
PAB Emergency Exhaust ACU(AU08 & AU10) 운전 시, RE-015의 시료 채취 위치가 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석을 수행하기 위해 3차원 모델의 격자시스템을 Figure 4.3(e)과 같이 구성하였다. 덕트 내 공기의 흐름은 Figure 4.3(f) (a)와 같고, 공조기 AU08과 공조기 AU10에서의 각 공기흐름은 Figure 4.3(f) (b) (From AU08)와 Figure 4.3(f) (c) (From AU10)에 나타내었다. 덕트 내 공기흐름은 각 지관이 합류되는 지점과 곡관의 후류에서

공기의 유속이 빨라지는 것이 관찰되며, 곡관 후류에서는 일부 스웰 유동 현상이 발생되기도 한다. 그러나 시료 채취 위치로 갈수록 안정된 유동 흐름을 보인다.

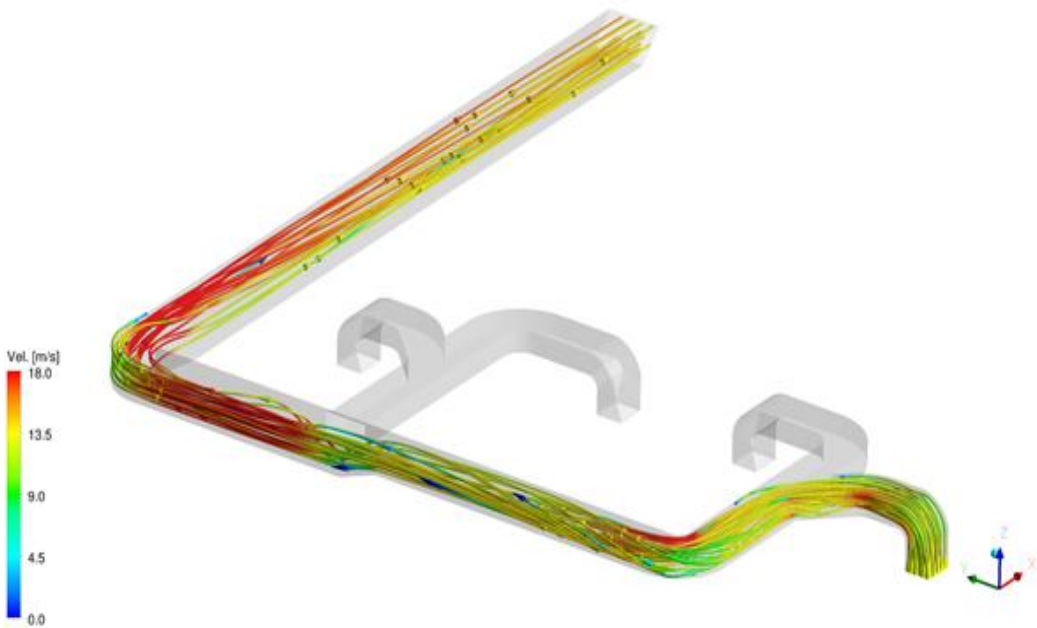
덕트 내 시료 채취 위치에서 속도분포 및 속도벡터를 Figure 4.2(g)에 나타내었다. 시료 채취 위치에서 공기의 속도분포는 비교적 균일하고, 유동각은 평균 20° 미만으로 설계요건을 만족한다. 덕트 내 시료 채취 위치에서 추적가스의 농도분포는 Figure 4.3(h) (a) (From AU08)와 Figure 4.3(h) (b) (From AU10)와 같다.



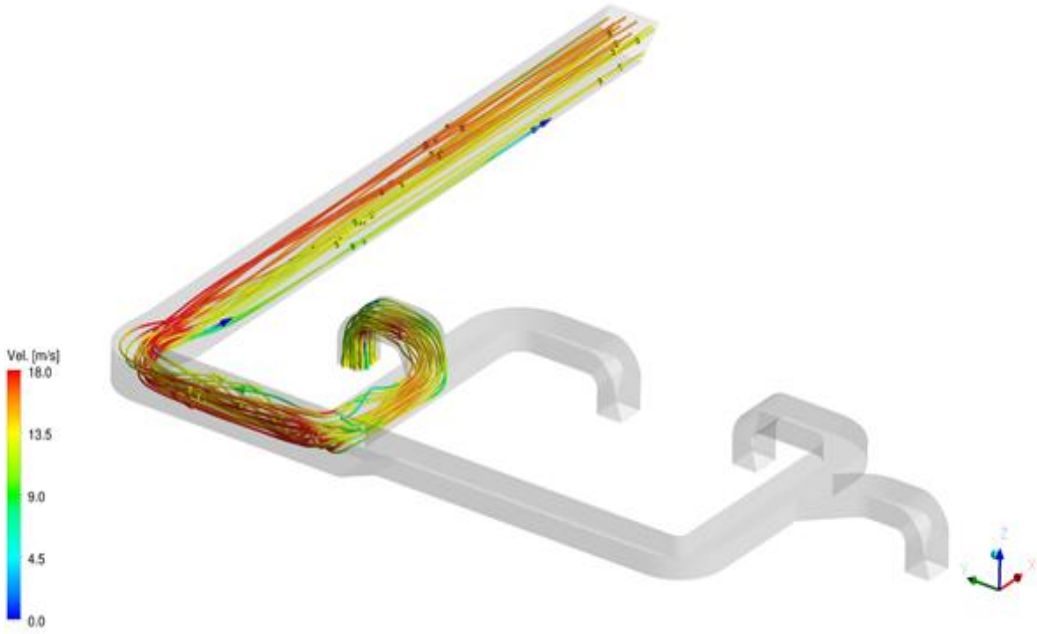
Figure 4.3(e) Mesh generation(AU08 & AU10)



(a) Overall

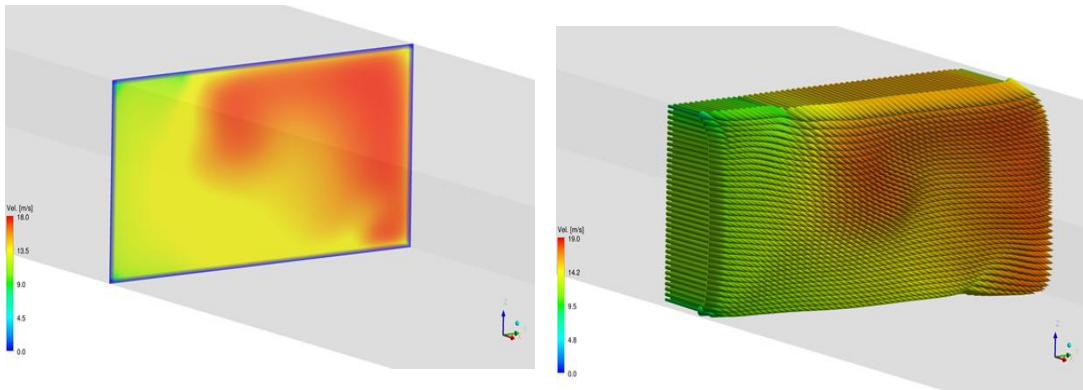


(b) From AU08



(c) From AU10

Figure 4.3(f) Streamline(AU08 & AU10)



(a) Velocity

(b) Vector

Figure 4.3(g) Velocity profile (AU08 & AU10)

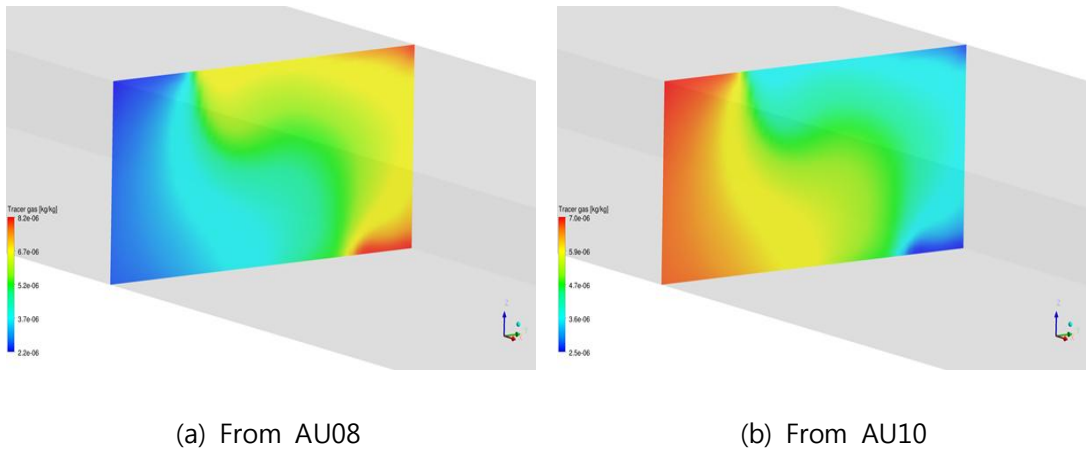


Figure 4.3(h) Tracer gas(AU08 & AU10)

(3) 결과

RE-015가 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하기 위해 CFD 해석을 수행하였고, 그 결과를 Table 4.2 (PAB Normal Exhaust ACU (AU09 & AU31))와 Table 4.3 (PAB Emergency Exhaust ACU (AU08 & AU10))에 나타내었다.

PAB Normal Exhaust ACU 및 PAB Emergency Exhaust ACU 운전 조건에서 시료 채취 위치에서의 속도분포 COV와 유동각은 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하는 것으로 평가되었지만 추적가스의 농도분포 COV는 설계요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다.

Table 4.2 CFD results (PAB Normal Exhaust ACU)

Item		ANSI/HPS N13.1-1999 Criteria	Injection Location	All Area	Center 2/3 Area	Acceptance	Final Judgement
Velocity Profile	COV [%]	< 20%	-	13.9	11	O	X
Swirl Angle	[°]	< 20° (average)	-	2.7	3	O	
Tracer Gas	COV [%]	< 20%	AU09	23.5	17.9	O	
			AU31	24.4	18.1	O	
	Max. Ratio	not to exceed mean by > 30%	AU09	47.4	37.6	X	
			AU31	47.7	33.1	X	

Table 4.3 CFD results (PAB Emergency Exhaust ACU)

Item		ANSI/HPS N13.1-1999 Criteria	Injection Location	All Area	Center 2/3 Area	Acceptance	Final Judgement
Velocity Profile	COV [%]	< 20%	-	14.4	11.8	O	X
Swirl Angle	[°]	< 20° (average)	-	2.6	2.7	O	
Tracer Gas	COV [%]	< 20%	AU08	31.1	23.8	X	
			AU10	21.3	15.9	O	
	Max. Ratio	not to exceed mean by > 30%	AU08	64.9	44.3	X	
			AU10	35.5	29.3	O	

3. 평가

B 발전소 기체배출물 방사선감시기 중 한 대인 RE-015에 대해 시료 채취 위치 적정성 검증을 위하여 현 설계안을 바탕으로 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD) 해석을 수행하였다. 이를 통하여 현재 설계된 시료 채취 위치가 Sampling location 선정 방법에 대한 설계요건 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하였다.

RE-015에 대한 시료 채취 위치 최종 평가 결과를 Table 4.4에 나타내었다. 시료 채취 위치 적정성 평가에서는 Normal 및 Emergency 모드 모두에서 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다. 이에 따라 국제 기준을 만족하는 설비 개선 변경이 요구된다.

본 시뮬레이션 평가 결과에서 설계요건을 만족하지 않았으므로 개선방안 도출이 필요하며, 이 개선안에 대한 연구는 다음 장에서 진행하였다.

Table 4.4 General results of simulation evaluation for present sampling point

Item	Operating condition	ANSI/HPS N113.1-1999 Criteria
		Sampling point at present duct
RE-015	Normal	Not-Satisfied
	Emergency	Not-Satisfied

제2절 ANSI N13.1(1999)를 만족하는 설비 개선방안

1. 최적의 설비 개선방안 기준 탐색

Table 4.3의 시료 채취 위치 평가 결과 현재의 시료 채취 위치가 유효하지 않았다. 따라서 최신 기술기준을 만족하는 유효한 시료 채취 위치에 대한 설비 개선 방안을 제시하여야 한다.

RE-015의 경우 기체 배출 HVAC 계통이 정상 및 비상 2가지 운전 모두가 존재하고, 그 운전 모드별로 기체 배출물이 지나가는 HVAC 덕트관로의 길이와 시료 채취위치와의 거리에 차이가 많이 있다. 따라서 시료채취 위치에서 기체의 유동의 차이가 큼에 따라 시료의 대표성을 갖는 시료 채취 위치를 선정하기가 매우 어렵다. 중요한 관건은 배출 모관의 직선의 길이가 유효한 시료 채취 위치 선정에 상당한 영향을 준다.

RE-015의 경우 현 시료 채취 위치에서 유량 진행 방향으로 HVAC 배출관로 출구까지 12.7m에 달해 CFD 분석을 통해 유효한 시료 채취 위치 재설정이 가능할 것으로 사료된다. 따라서 이를 HVAC 배출관로의 기체 유량을 따라 현 시료채취위치에서부터 0.5m 마다 CFD 분석과 평가를 통해 유효한 시료 채취 위치를 선정할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 설비 개선 방안 제시

RE-015의 시료채취 위치에 대한 유효성 평가 결과(현 설치상태)가 ANSI/HPS

N13.1-1999의 설계요건을 만족하지 못함에 따라 RE-015의 시료 채취계통에서 최신 기술기준을 만족하는 시료 채취위치를 찾기 위하여 CFD 해석을 수행하였다. 현 설치되어 있는 RE-015 시료 채취 위치는 Figure 4.4와 같고 시료 채취 위치에서 벽까지는 12.7m로 상당히 여유가 있다. 현 시료 채취 위치에서 HVAC 유량 방향으로 벽까지 0.5m 간격으로 CFD 분석을 통해 속도분포 COV, 평균 유동각, 농도분포 COV, 추적가스 최대농도 등을 분석하였다.

그 결과는 Figure 4.5(a) ~ (f) 와 같다. 평가 결과는 현 설치되어 있는 시료 채취 위치에서 약 6.0m 이상의 위치에서 속도분포 COV, 평균 유동각, 추적가스 농도분포 COV, 추적가스 최대농도 등 전체 영역에서 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하였다. 통상 시료 채취 위치를 선정하기 위한 실증시험은 샘플링 위치의 전단 (21" ~36")에서 수행되는 점과 설계요건의 여유도(약 5%)를 고려하여 약 10.0 m 이후에 설치하는 것이 무난할 것으로 판단된다.

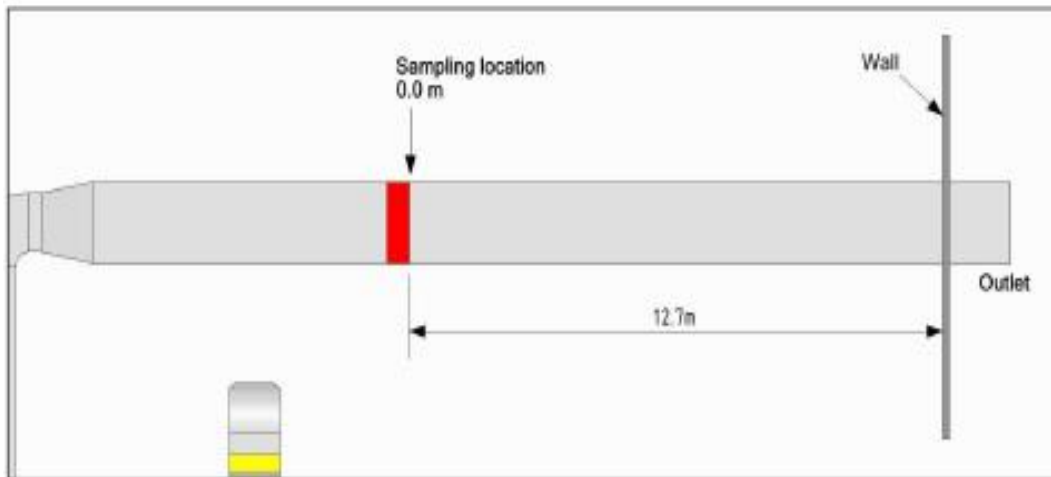


Figure 4.4 Drawing of RE-015 Sample location & duct

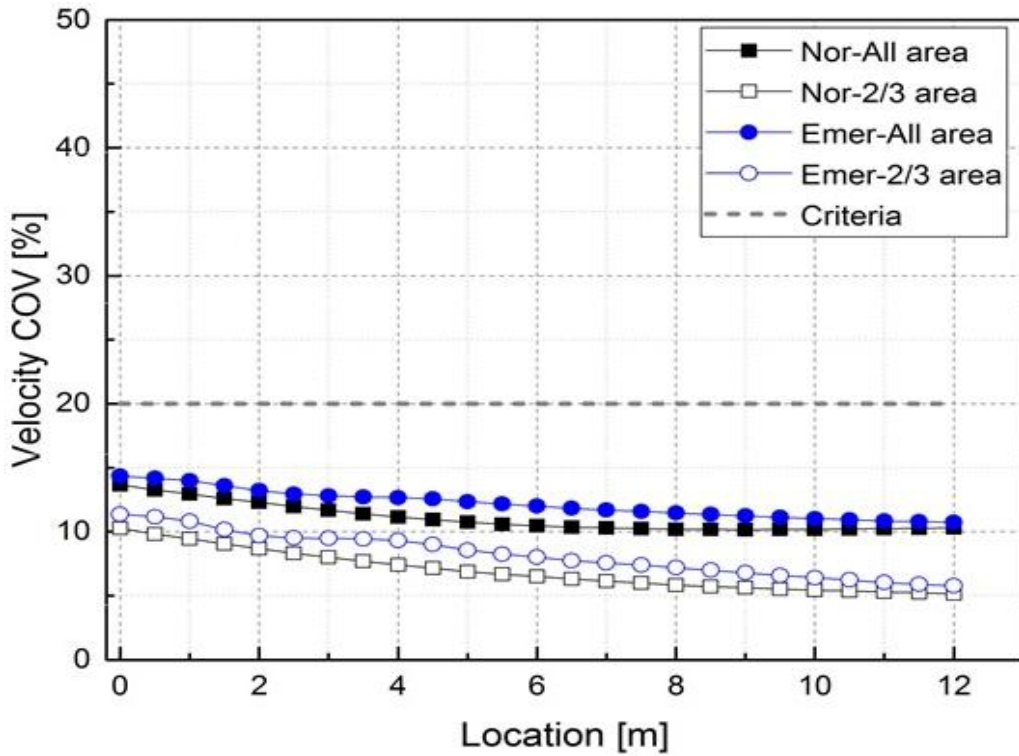


Figure 4.5 (a) Velocity COV of each location

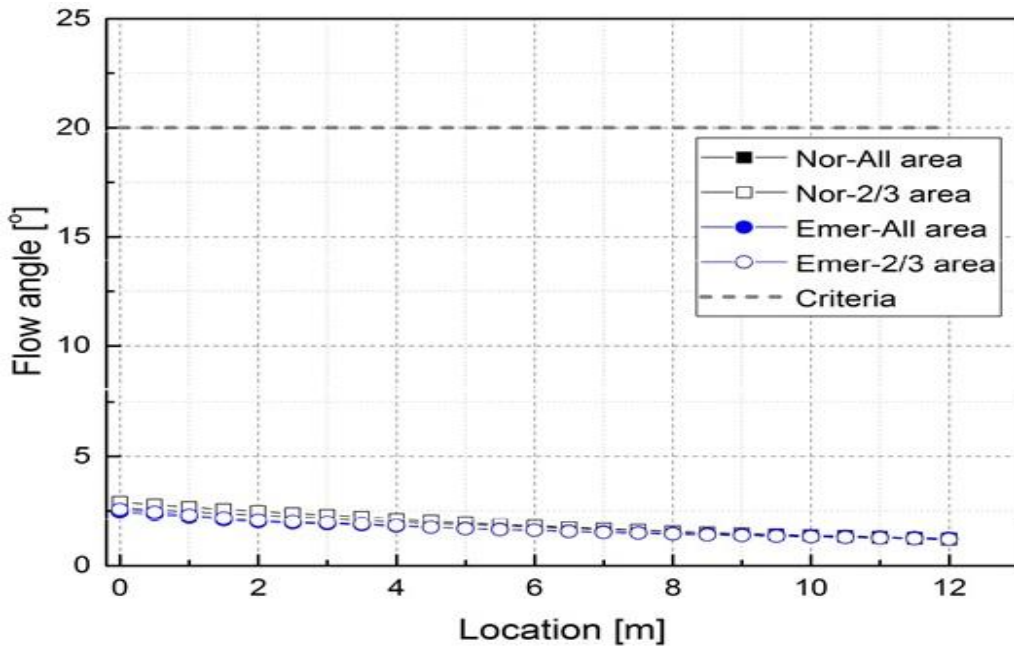


Figure 4.5 (b) Swirl angle of each location

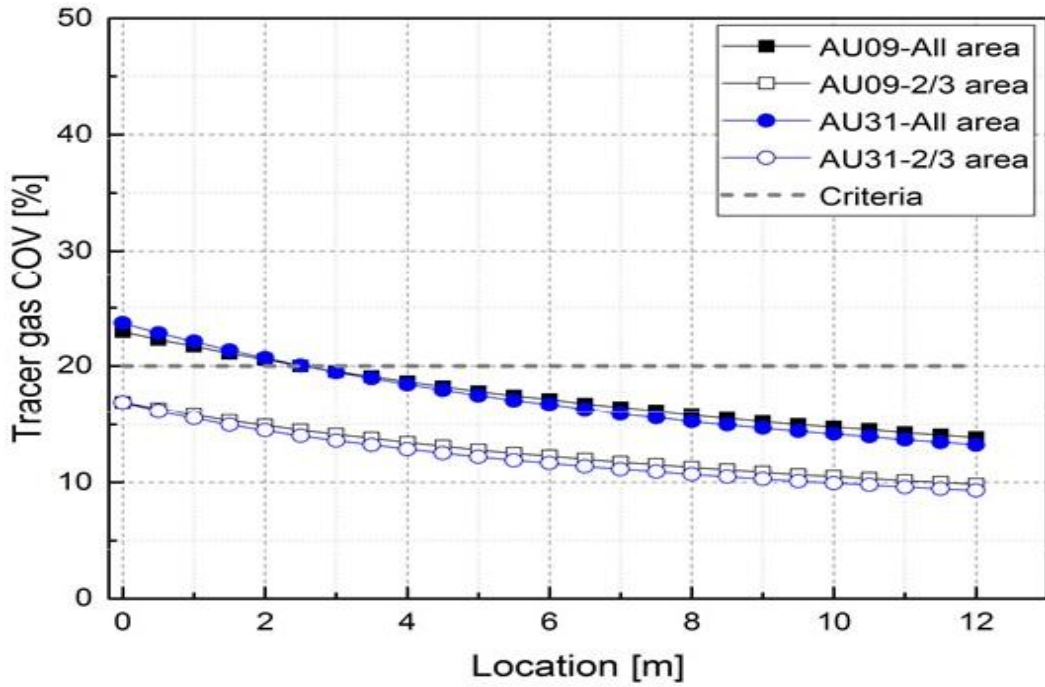


Figure 4.5(c) Tracer gas COV of each location (Normal process)

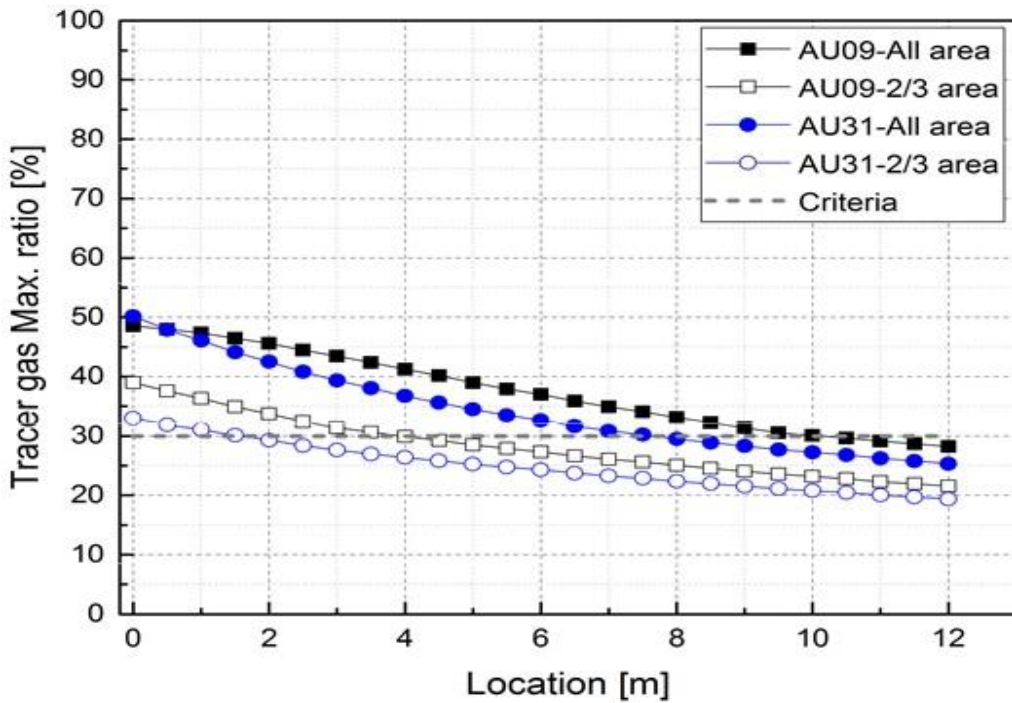


Figure 4.5(d) Tracer gas Max. ratio of each location (Normal process)

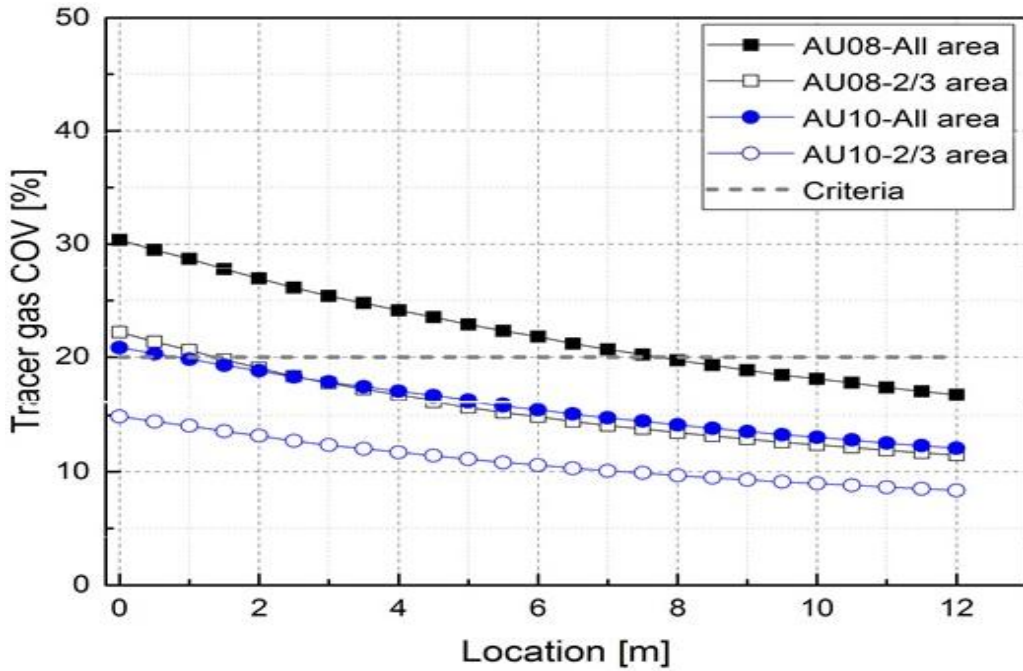


Figure 4.5(e) Tracer gas COV of each location (Emergency process)

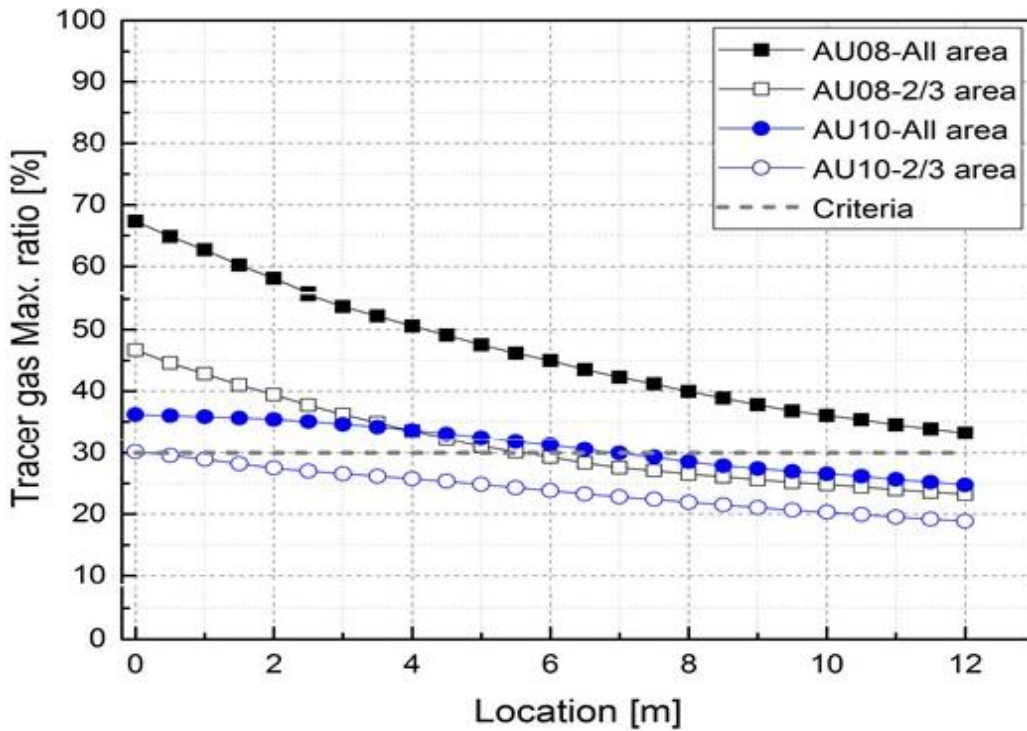


Figure 4.5(f) Tracer gas Max. ratio of each location (Emergency process)

제5장 시료 채취계통 이송률 검증 및 설비 개선방안

제1절 유효성 검증

1. 시료 이송배관 현장조사 및 3차원 입체화

B 발전소 ISO 도면자료 등을 참조하여 시료 채취 위치에서부터 RMS까지의 이송관 형상, 노즐 타워, 배관사이즈, 곡관 등을 현장 조사하였고, 이송관 입체 도면을 작성하였다

RE-015 시료이송배관은 샘플링 노즐, 이송배관으로 구성되어 있으며, RE-015에 설치되어 있는 샘플링 노즐은 Iso-kinetic type이고, 시료이송 배관의 사이즈는 3/4" , 곡관의 곡률반경(Curvature ratio)은 5D이다. RE-015 시료 채취 위치에서 시료이송배관으로 유입되는 시료의 속도는 14.8 m/s이고, 시료 이송배관의 샘플링 유량은 1 CFM(28.3 L/min) 이다. 이송률 평가에 사용된 시료의 온도는 25.0℃이다. 시료 이송률 계산에 사용된 계산 조건을 Table 5.1에 나타내었다. 시료 이송계통의 시료 이송률 계산에 사용된 시료 이송배관 배치는 Figure 5.1과 같다.

Table 5.1 RE-015 Calculation conditions for sample flow rate

Item		Contents
Nozzle type		Iso-kinetic
Tube	Diameter (inch)	3/4
	Curvature ratio	5
Flow rate	CFM	1 (28.3 L/min)
Velocity	m/s	14.8
Air temperature	℃	25.0

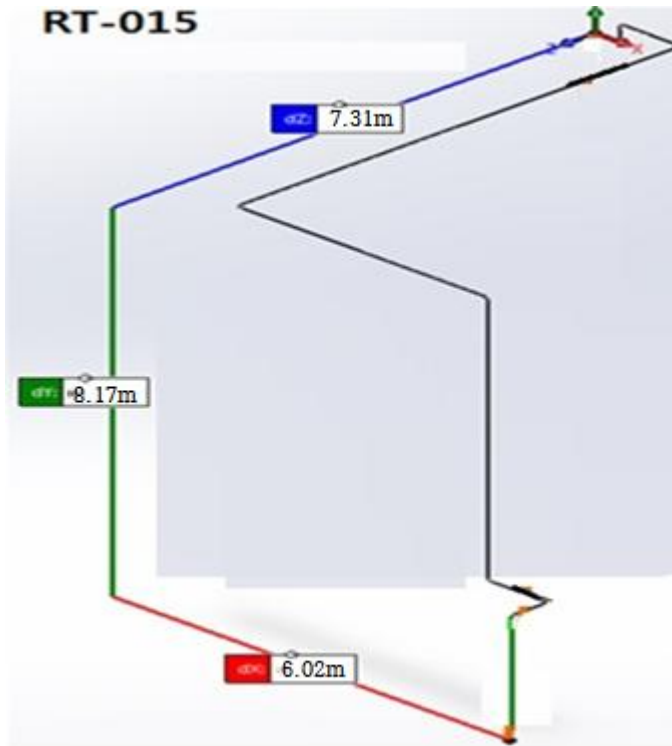


Figure 5.1 RE-015 ISO drawing of sample transfer line

2. 이송률 시뮬레이션 평가 결과

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

RE-015 시료이송배관의 이송률 계산 결과를 Table 5.2에 나타내었다. 모든 운전 조건에서 50%이하로 ANSI N13.1-1999의 설계요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다.

Table 5.2 RE-015 Results for sample flow rate

No.	Component	Direction	Length	Angle	Penetration	Total penetration
			ft-in	°	%	%
1	Iso-kinetic				80.8	80.8
2	Tube	Horizontal	14. 1/2"		97.2	78.5
3	Bend	H --> V		90	94.1	73.9
4	Tube	Vertical	15"		99.9	73.8
5	Bend	V --> H		90	94.1	69.5
6	Tube	Horizontal	3' 0. 1/2"		92.4	64.2
7	Bend	H --> H		90	94.1	60.4
8	Tube	Horizontal	22' 1"		50.9	30.7
9	Bend	H --> H		90	94.1	28.9
10	Tube	Horizontal	12' 6"		68.7	19.9
11	Bend	H --> V		90	94.1	18.7
12	Tube	Vertical	19' 6"		97.1	18.2
13	Bend	V --> H		90	94.1	17.1
14	Tube	Horizontal	2' 11. 7/8"		92.6	15.8
15	Bend	H --> H		90	94.1	14.9
16	Tube	Horizontal	23. 13/16"		94.7	14.1
17	Bend	H --> V		90	94.1	13.3
18	Tube	Vertical	8' 10. 3/16"		98.7	13.1
Total penetration (%)					13.1	

3. 평가

B발전소 기체배출물 방사선감시기의 시료 채취이송관의 유효성을 검증하기 위해 Deposition 2001a 코드를 이용 시료이송배관에서 시료이송률을 계산하였다. 이를 통하여 현재 설계된 시료 이송배관 이송률 설계요건인 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하였다.

시료이송배관의 시료이송률 평가는 Table 5.3와 같으며, RE-015의 시료이송률은 13.1%에 불과해, 설계 기준인 50% 이하로 설계요건을 만족하지 않았다. 이를 해결하기

위해서는 감시기의 위치를 시료 채취 위치에 최대한 가깝게 이전 설치를 하거나, 시료 이송배관을 단순화 하는 개선작업이 요구된다.

시뮬레이션 평가 결과에서 설계요건을 만족하지 않음에 따라 제2절에서 시료 채취 위치에 대해 최적 위치를 찾고, 그 위치에서 이송률 재평가를 진행하여야 한다. 이때 시료 채취 위치를 고정한 채로 이송배관 또는 RMS 스킴(SKID) 위치를 적절히 변동하여 시료 이송률 50%인 지점을 찾아서 설비 개선안을 제시하고자 한다.

Table 5.3 RE-015 results of simulation evaluation for present sample flow rate

Item	Operating condition	ANSI/HPS N113.1-1999 Criteria
		Sample Flow Rate
RE-015	Normal	Not-Satisfied
	Emergency	

제2절 ANSI N13.1(1999)를 만족하는 설비 개선방안

Deposition 코드를 이용하여 수행된 현 상태의 시료이송배관 시료이송률 평가 결과는 Table 5.3과 같다. 시료이송률이 50% 미만이어서 시료이송률을 만족하지 못함에 따라 시료이송배관을 개선해야 한다.

제4장 2절 시료 채취 위치 설계기준 제시 연구에서 시료 채취 위치를 재선정하였다. 따라서 위치를 기준으로 시료이송율 개선 연구를 수행하였다.

가. 시료 채취 위치 선정 CFD 결과

RE-015 시료 채취계통의 ANSI/HPS N13.1-1999 설계요건을 만족하는 최적의 시료 채취 위치를 선정하기 위해 CFD 해석을 실시하였고, 그 결과는 Figure 4.4 ~ 4.5에서와 같이 현재의 시료 채취 위치에서 약 6m 후방이고, CFD분석의 불확도와 설계요건의 여유도 약 5%를 감안한 시료 채취 위치는 현 RE-015 시료채취 위치로부터 유동방향 약 10m 지점이다.

나. 시료 채취 위치 재선정

그러나 RE-015에서 유동방향으로 8m 거리 이상부터는 유체배관 간섭, 모터 간섭 등의 발전소 현장의 여건 그리고 이송률 만족을 고려한 RMS 스킴드위치 변경안 등을 고려하여 시료 채취 위치를 선정할 수밖에 없다. 이에 따라 CFD 분석결과에서 권고한 현 시료 채취 위치에서 6m 후방(안)에서 1.4m를 당겨서 Figure 5.2 와 같이 시료 채취 위치를 재설정하고, 실증시험으로 위치를 재확정하기로 하였다.

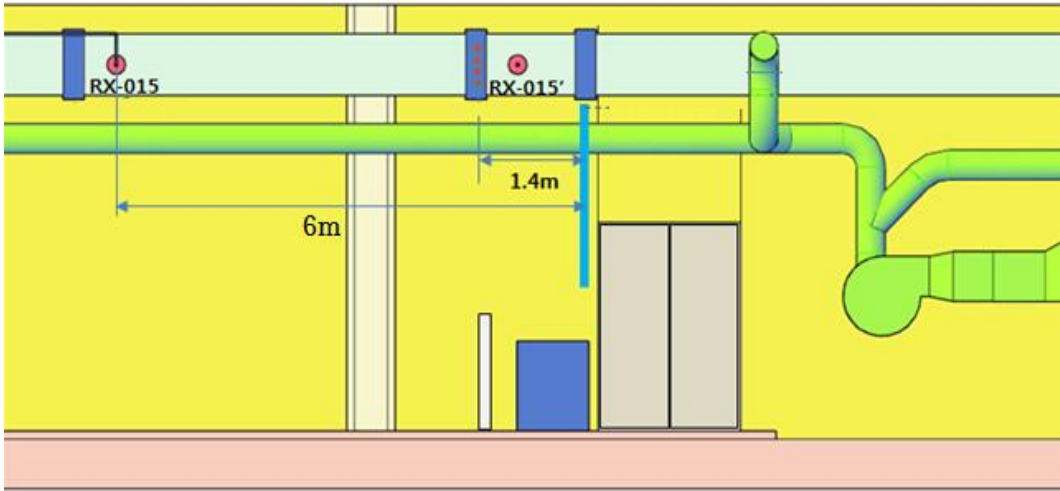


Figure 5.2 Drawing for Relocation of RE-015 sampling point

다. 재선정한 시료 채취 위치 실증시험

1) 실증시험 방법

현실적으로 발전소내에서 기체배출물 공기조화설비 덕트에서 실증 시험을 할 수가 없다. 불가피하게 발전소가 아닌 실험실에서 발전소 실제(원형: Actual) 공기조화설비(HVAC) 덕트를 Scale down 덕트로 제작하고, 동 설비에서 실증시험을 수행하였다. 실제 덕트와 Scale down 설비와의 유사성을 확보하고, 각각 설비에서 유속, 유동각, 추적가스 농도분포, 최대추적가스농도를 측정하고 그 상사성(similarity)을 확인하여야 한다. 이 때 적절한 Scale down 모델 축소비를 지정하고, 레이놀즈 수를 10,000 이상을 유지하며, 실제 덕트와 Scale down 모델의 수력직경과 유속의 곱의 비가 6.0 이하로 함으로써 설계상의 Scale down 모델 요건에 부합시켜 상사성을 확보하여야 한다. 또한 스케일 모델에 직접 측정구를 삽입하여 측정값의 유효성 조건은 실제 스택의 유속 균일성은 시료 채취 위치 승인 조건 5가지를 모두 만족해야 함은 물론 실제 스택과 스케일 모델의 유속 COV값의 차이는 5% 이하여야 한다. [16, 17, 18]

이러한 유효성이 확인되어 제작된 기체배출물 공기조화설비 배출관로 Scale down 설비 측정구에 직접 계측기를 삽입하여 유속, 유동각, 추적가스 농도분포, 최대추적가스 농도 등을 측정하여 실증 시험을 수행한다.[19]

2) 시료 채취위치 실증시험용 HVAC 덕트설치

시료 채취위치 실증시험을 위한 원형(prototype) 덕트규격(24.9m × 24.3m × 1.8m)은 실험실 규모에서는 설치가 어렵기 때문에 스케일 모델을 적용하여 실험실 실증시험을 수행하였다.

Table 5.4의 조건들과 같이 원형(실제) 덕트의 기하학적 상사성을 확보하는 덕트를 제작하였으며, 이때 원형 덕트에 대한 스케일모델 축소비를 2.54 : 1로 적용하여 figure 5.3와 같이 실증시험용 덕트를 제작하였다.

Table 5.4 Scale model conditions for verification of sampling location

Model	Process	Size(mm)		flow (cfm)	Velocity (m/s)	Reynolds number	hydraulic diameter (m)	V*D	V*D Ratio
		W	H						
Prototype	Normal	1,676	762	40,000	14.78	1,001,528	1.05	15.48	
	Emergency	1,676	762	40,000	14.78	1,001,528	1.05	15.48	
Scale down (2.54:1)	Normal	660	300	5,124	12.21	325,871	0.41	5.04	3.073
	Emergency	660	300	5,156	12.29	327,906	0.41	5.07	3.054

원형 덕트의 수력직경(D)과 평균유속(V)의 곱이 스케일 모델의 곱의 6배 이하조건을 만족하도록 Normal process는 3.073, Emergency process는 3.054으로 설정하였고, figure 5.4과 같이 송풍기를 배치하였다.

시료채취위치의 측정 트레버스는 수직방향 7점과 수평방향 4점으로 정 중앙점이 포함되는 총 28점의 측정점을 Table 5.5와 같이 제작하였다.

Table 5.5 Installation size of Measurement point for scale model

Duct Size (mm)		Number of Measurement point			Cross section of duct (m ²)	2/3 Cross section of duct (m ²)	Measurement Cross section of duct (m ²)
W	H	Bottom	Side	Total			
660	300	7	4	28	0.198	0.132	0.134

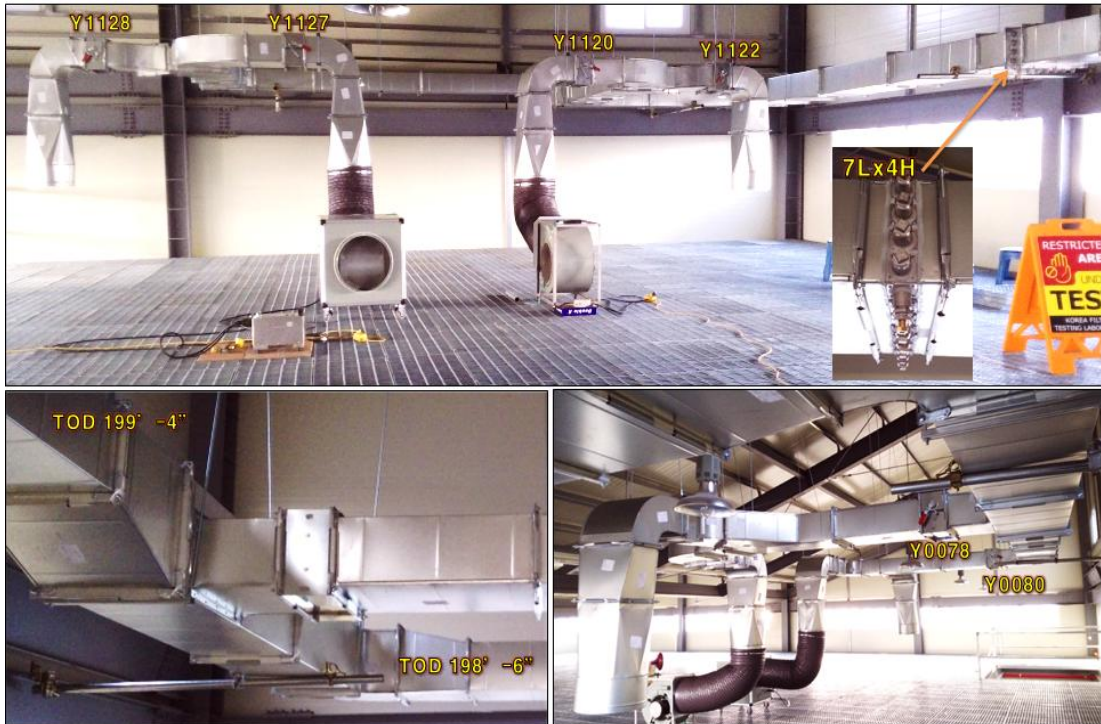


figure 5.3 Duct installation for geometrical similarity with Measurement point

3) 시료 채취 위치의 ANSI/HPS N13.1-1999 설계요건 적합성

시료 채취 위치를 기존의 위치에서 유동방향으로 4.6m 이동시킨 후, 관로에 측정기를 삽입하여 각 변수를 직접 측정하였다. 그 결과는 Table 5.6와 같이 ANSI/HPS N13.1-1999의 시료 채취 위치 설계요건 4가지(유속, 유동각, 추적가스 농도분포, 최대 추적가스농도)를 모두 만족하였으므로 RE-015 시료 채취 위치 변경안은 ANSI/HPS N13.1-1999의 설계요건에 적합하다.

Table 5.6 Result of RE-015 verification check

RMS	MODE	Velocity profile		Swirl angle	tracer gas concentration		
		Average (m/sec)	COV (%)		Average (ppm)	COV (%)	Max. (%)
RE-015	Normal	12.29	14.2	7.0	63.3	4.52	8.90
	Emergevcy	12.21	14.8	9.0	67.7	8.09	12.99
ANSI N13.1			<20%	<20		<20%	<30%
Fitness of Sampling point		Satisfied		Satisfied	Satisfied		

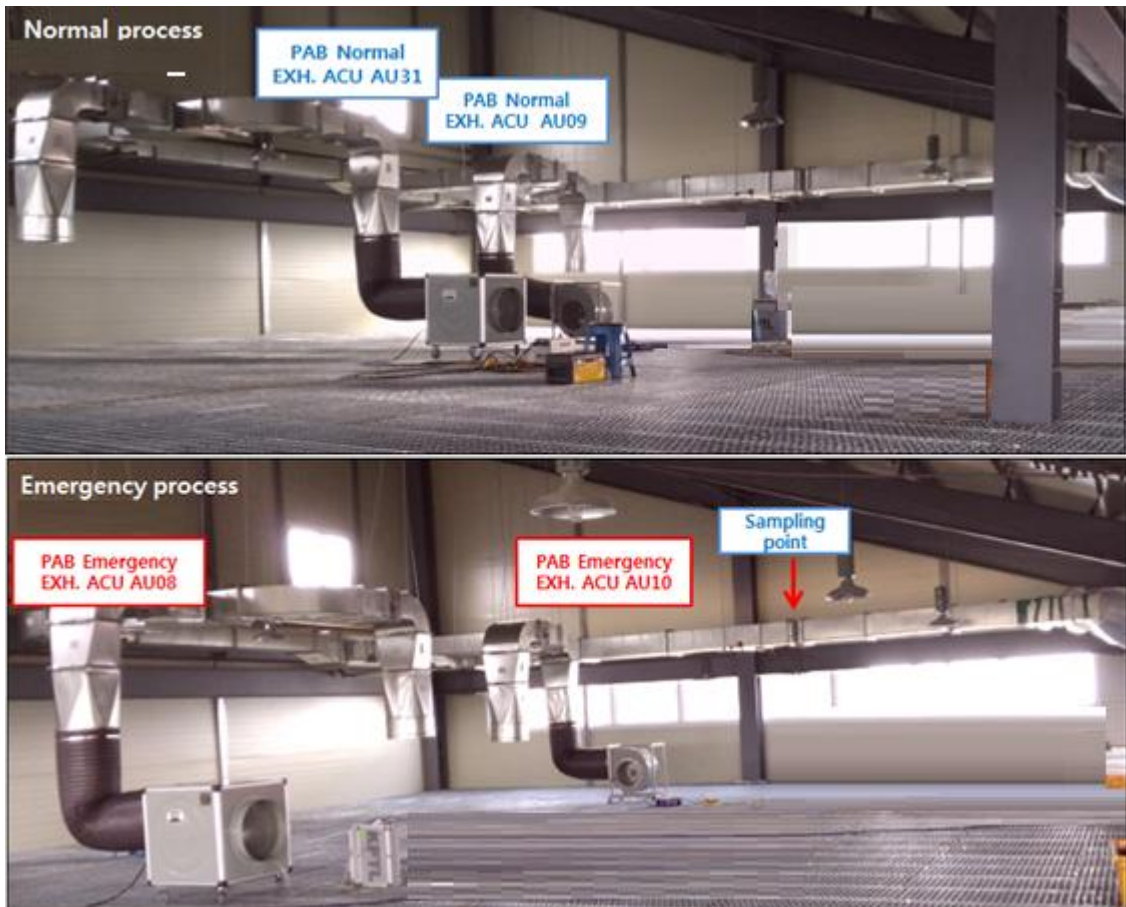


figure 5.4 Fan arrangement for the flow rate according to the two operating conditions

4) RE-015 시료 채취 위치 변경안

Figure 5.5과 같이 직관부 유체 인입지점으로부터 297 “ 위치의 RX-015를 유동방향으로 5133.34mm(16 ‘10.1/8” = 202.1 “) 이동시킨 RX-015' 지점으로 이설하기 위한 설계가 요구된다. 또한 PAB 165'에 설치되어 있는 RMS 스킴드위치 Figure 5.6과 같이 RX-015'의 하부로 이설하여 시료이송관 최적화 설계가 추가적으로 요구된다.

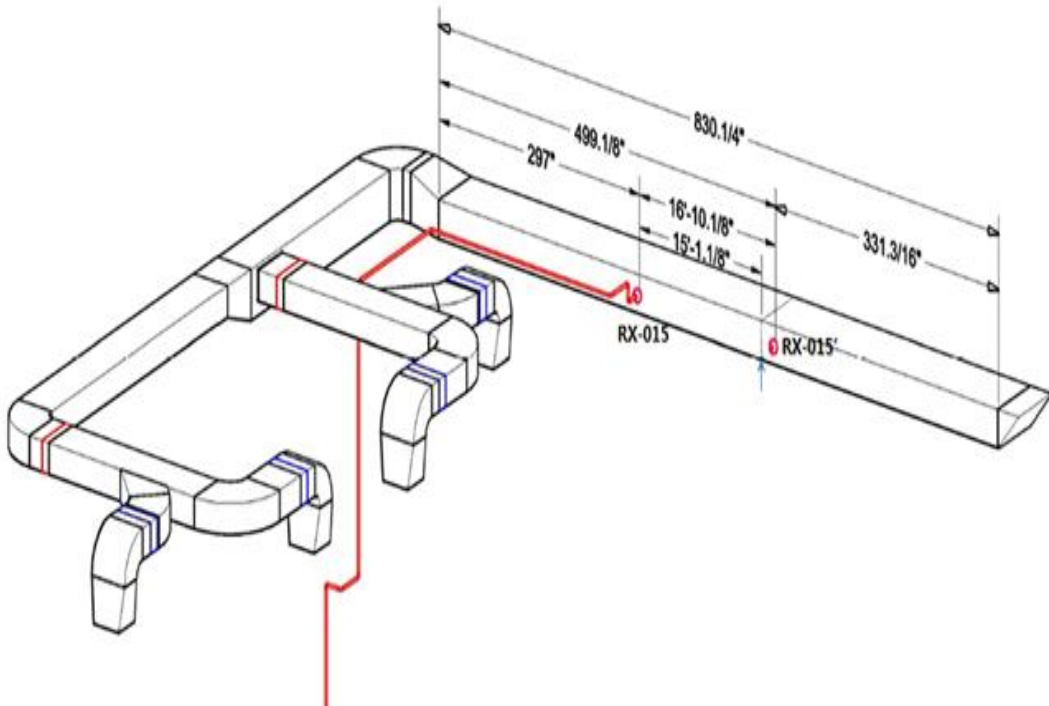


Figure 5.5 ISO drawing reflected RE-015 verification check

5) RE-015 시료이송배관 설비 개선(안) 평가

RMS 스킴드위치를 Figure 5.6과 같이 변경된 시료 채취위치 밑으로 시료이송배관을 설계 변경 한 후, 시료이송률을 계산한 결과 Figure 5.7과 같이 58.9%이므로 시료 채취위치 및 시료이송배관이 적절하게 설계된 것으로 판단되었다.

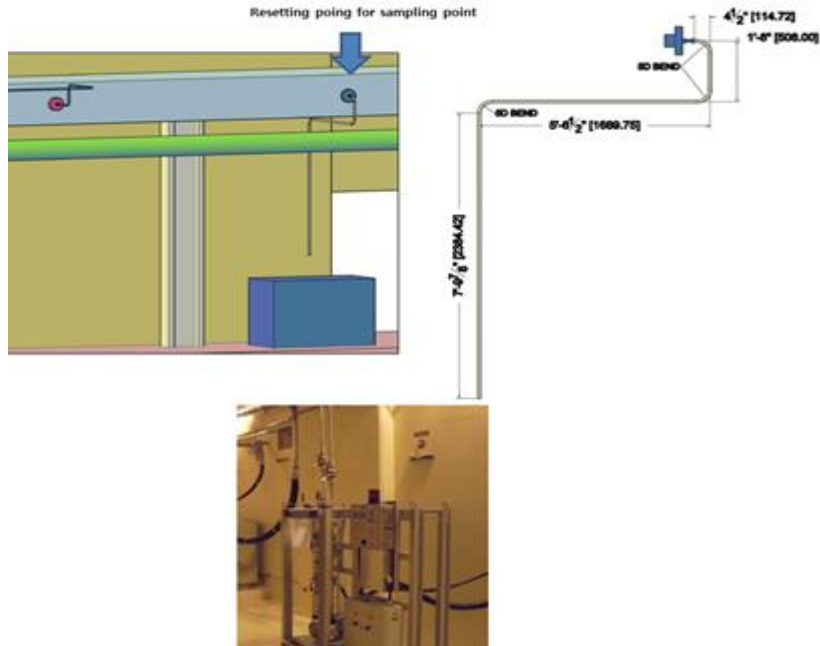
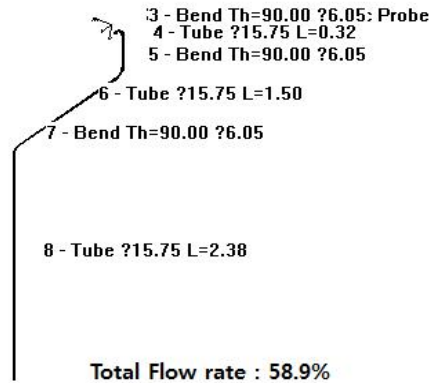


Figure 5.6 RE-015 Design plan of sample transfer line

System Properties and Parameters

Ambient Temperature (deg)	25
Ambient Pressure (mm)	760
Particle Density	1
Flow Rate	28.30
Tube Diameter	15.75
Free Stream Velocity	10

OK Cancel



Stokes #	Reynolds #	Total Penetration
0.0462	2433	58.9%

Element #	Element	Penetration	Notes
1.	Probe	85.1%	
2.	Tube	99.8%	Length: 0.020 m, At 0.000 degrees from horizontal.
3.	Bend	93.6%	Bend angle: 90.000 degrees.
4.	Tube	99.8%	Length: 0.320 m, At 90.000 degrees from horizontal.
5.	Bend	93.6%	Bend angle: 90.000 degrees.
6.	Tube	85.7%	Length: 1.500 m, At 0.000 degrees from horizontal.
7.	Bend	93.6%	Bend angle: 90.000 degrees.
8.	Tube	98.8%	Length: 2.380 m, At 90.000 degrees from horizontal.

Ambient temperature (deg.C) : 25.0
 Ambient pressure (mm Hg) : 760.0
 Flow rate (L/min) : 28.3
 Free stream velocity (m/s) : 10.0
 Particle diameter (micro-meter) : 10.0

Figure 5.7 RE-015 Flow rate of resetting sampling point

6) CFD분석과 실증시험 결과와의 비교

유효한 시료 채취위치를 찾기위한 RE-015 HVAC 덕트의 CFD 분석은 Figure 4.5과 같았고, 덕트의 유량 방향으로 6.0m 이후에서 기술기준의 대부분 조건을 만족하였다. 제 5장 2절 설비 개선에서는 현 시료채취 위치에서 기체유동 방향으로 4.6m 이동하는 시료 채취위치를 제시하였고, 동 지점에서의 실증시험 결과도 만족하였다. 일반적으로 CFD분석 결과와 실증시험의 결과 중 추적자 농도 COV와 최대농도 분포의 평가에서 차이가 많이 발생한다. 본 연구에서도 현 시료채취 위치에서 유량 방향으로 4.6m 부근에서의 최대농도분포가 30%에 근접하였으나, 실증시험결과 약 10% 정도였고, 추적자 가스농도 COV도 CFD 분석결과 약 13% 였으나, 실제 측정결과 6%에 불과하였다. 본 연구를 통해 상용 CFD 프로그램이 상당히 보수적으로 평가됨을 확인할 수 있었다. 즉, CFD 분석 결과가 기술기준을 만족하지 못하여도 실증시험을 통해 ANSI N13.1 기술기준 조건을 만족함을 본 연구를 통해 입증할 수 있는 단초도 제공하게 되었다.

제6장 결론 및 향후 연구

제1절 결론

1. 유효성 검증 결과

B 발전소의 현 기체배출물 방사선감시기 중 하나를 선정하여 시료 채취 위치에 대한 적정성 검증을 위하여 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD) 해석을 수행하였고, 한편으로는 Deposition 2001a 코드를 활용하여 시료이송배관에서 방사선 감시기까지의 시료이송률을 계산하였다. 이를 통하여 현재 설계된 시료 채취 위치가 Sampling location 선정 방법에 대한 설계요건 및 시료 이송배관 이송률 설계요건인 ANSI/HPS N13.1(1999)의 설계요건을 만족하는지 여부를 평가하였다.

시료 채취 위치 최종 종합 평가 결과는 Table 5.1과 같다. RE-015에 대한 시료 채취 위치 적정성 평가 및 분석에서는 ANSI/HPS N13.1(1999)의 설계요건을 만족하지 않는 것으로 평가되었다. 따라서 설계요건을 만족하지 않는 RE-015 (Normal/ Emergency)에 대해서는 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD) 해석을 수행하여 기술기준을 만족하는 시료 채취 위치의 재설정이 필요함을 확인하였다.

RE-015에 대한 시료이송배관의 시료이송률 평가에서도 시료이송률이 50% 미만으로 ANSI/HPS N13.1(1999) 기술기준을 만족하지 못하였다. 이를 해결하기 위해서는 감시기의 위치를 시료 채취 위치에 최대한 가깝게 이전 설치를 하거나 시료이송배관을 단순화하는 설계 개선 작업이 요구됨을 확인하였다.

Table 6.1 RE-015 results of simulation evaluation for present sample flow rate & sampling point

Item	Operating condition	ANSI/HPS N113.1-1999 Criteria	
		Sampling point	Sample flow rate
RE-015	Normal	Not-Satisfied	Not-Satisfied
	Emergency	Not-Satisfied	

2. 설비 개선방안 제시

가. 시료 채취 위치 설비 개선방안 제시

RMS 설비에 대한 시료 채취 위치에 대한 유효성 평가는 Table 6.1의 결과처럼 설비가 ANSI N13.1 신규 기술기준을 만족하지 못하였다. 특히 각 계통별 배출가스 배출모관을 통과하는 기체유량의 흐름은 비상 및 정상 운전 모드별로 현격하게 차이가 날 뿐 아니라, 동일한 모관에 다양한 배기팬의 토출 배관이 접속하여 기체 유량이 형성됨에 따라 배기가스 거동이 위치마다 다 달라 시료 채취 위치에서 운전 모드별로 그리고 각 배출팬마다 공기의 시료 대표성을 확보하기는 매우 어렵다는 것을 연구를 통해 확인하였다.

따라서 RE-015의 HVAC 배출관로에 대해 조밀한 간격으로 CFD 분석을 하여서 각 배출팬의 기체가 잘 혼합되는 시료의 대표성을 확보할 수 있는 유효한 시료 채취 위치를 재선정하였다.

현 설치되어 있는 시료 채취 위치에서 배출 덕트를 따라 벽까지는 12.7m로 상당히 여유가 있어 현 시료 채취 위치에서 벽까지 0.5m 간격으로 CFD 분석을 통해 신규 기술기준을 만족하는지를 분석하였다. 그 결과는 현 설치되어 있는 시료 채취 위치에서 배출 덕트를 따라 약 6.0m 이상의 위치에서 속도분포 COV, 평균 유동각, 추적가스 농도 분포 COV, 추적가스 최대농도 등 전체 영역에서 만족하였다. 통상 시료 채취 위치를 선정 선정하기 위한 실증시험은 샘플링 위치의 전단(21" ~36")에서 수행되는 점과 설계요건의 여유도(약 5%)를 고려하여 약 10.0 m 이후에 설치하는 것으로 설계 변경(안)을 제시하였다.

연구 결과, 각 배출계통의 배출 팬들이 배출 운전 모드에 따라 동일한 관로로 흘러들게 되고, 시료 채취위치에서는 유체의 흐름에 변동이 심하므로 시료 채취 위치에서 운전 모드별로 시료의 대표성을 확보하기는 매우 어렵다. 더욱이 다른 RMS 등도 각각 정상 운전 및 비상 운전 등 다양한 운전 모드별로 배출팬 등의 유량도 현격하게 차이가 남에 따라 이에 대한 유효성 평가도 필요함을 확인하였다. 따라서 각 배출 운전 모드에 따라 RMS 설비와 연동된 운전 모드별로 적절한 시료 채취 배관을 각각 구성하는 것이 더욱 합리적이므로 이에 대한 연구개발도 필요하다.

나. 시료이송배관 설계기준 제시

Deposition 코드를 이용하여 현 상태의 시료이송배관 시료이송률 평가 결과 시료이송률이 50%미만이어서 ANSI N13.1 신규 기술기준을 만족하지 못함에 따라 시료 이송 배관을 개선해야 한다.

일반적으로 시료 채취계통의 설비 개선이 어려운 이유는 건물내 각종 철골 구조물 및 각종 계통 유체 배관들로 인해 감시기 이설이 불가하는 경우가 많다. 따라서 곡관 및 수평 길이 최소화 등을 통한 시료 이송배관의 최적화로 시료이송률의 극대화를 추구할 수밖에 없다.

시료 이송배관이 이송률을 만족하지 못하더라도, 단독으로 이송배관을 개선할 수가 없다. 전제 조건으로, 반드시 유효한 시료 채취 위치가 결정되어야 한다.

따라서 CFD분석을 통해 시료 채취 위치를 재설정할 RE-015에 대해 시료이송률 개선을 위한 연구를 진행하였다. RE-015 시료 채취계통의 ANSI/HPS N13.1-1999 설계요건을 만족하는 최적의 시료 채취 위치를 선정하기 위해 CFD 해석을 실시하였고, 그 결과는 현재의 시료 채취 위치에서 약 6m 후방에서부터 유효하였다. 그러나 발전소 내부의 각종 유체배관 간섭, 설치된 타 계통의 모터 간섭 등의 현장의 여건 그리고 이송률 만족을 고려한 스킵위치 변경안 등을 고려하여 시료 채취 위치를 재설정할 수밖에 없었다. 이에 유효한 시료 채취 위치 6m에서 1.4m를 당겨서 시료 채취 위치를 재설정하고, 실증 시험을 통해 설비개선 방안이 유효함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과에 따라 RMS 설비(SKID)를 이동 설계하였으며, 이에 맞추어 유효한 이송배관을 재설계하였다.

제2절 향후 연구

1. 재설정된 대표시료위치 및 재평가된 이송률의 실증시험

ANSI N13.1(1969) 국제 기준에 따라 설계된 많은 방사선감시기에 대해서는 본 연구에서처럼 유효성 평가를 시행해야 함은 물론이거니와 이후 시료 채취위치 및 시료

이송배관을 재평가하였다면 이 위치와 이송률이 적정한지를 실증시험을 수행해야 한다. 즉, 재선정된 시료 채취 위치에 대한 시뮬레이션 결과를 가지고 CFD분석을 통해 산출된 위치가 정확하게 선정되었는지를 실증시험으로 확인해야 한다. 실증시험은 세 가지 방법 중 하나를 선택하여 수행해야 한다.

- 실제 배기 시스템에 대한 전체 실증시험
- 배기 시스템의 스케일 모델에 대한 실증시험 후 스케일 모델의 유효성을 확인하기 위해 실제 배기 시스템의 부분적인 실증시험의 수행
- 이전에 수행된 실증시험 결과와 유사한 시스템이면 실제 시스템에 부분적인 실증시험만을 실시하고 이전에 수행된 결과를 적용하여 검증.

ANSI N13.1(1999년)은 대표시료 채취 위치에 대한 덕트나 스택 내의 유속분포, 유동각, 추적가스 농도 분포, 에어로졸 입자 분포 등에 대한 허용기준을 제시하고 ‘40 CFR 60, App. A Method 1’의 대표시료 채취 위치 측정점의 선정 방법에 따라 검증을 요구하고 있다. 시료이송배관의 이송률에 대해서도 이송률 프로그램으로 산정된 이송률이 적합한지를 실증시험을 통해 확인해야 한다. 현재 Scale down HVAC 덕트를 제작하고, 이 Scale down 덕트에서 실증시험을 하는 것이 최선의 방법으로 평가받고 있다.

2. 시료 이송률 실증시험 대체 방법론 개발

최신 기술 코드가 적용된 2000년 이후 건설 원전에서는 건설 설계 시부터 최신기술기준에 부합하도록 하였고, 발전소 설치 전에 실제의 시료 이송배관을 실증시험 기관에서 시료이송률 평가를 진행 후 50% 이상임을 확인하고 시공하였다.

그 이전 기술 기준으로 설계된 발전소의 RMS에 대해서 최신기술기준인 ANSI N13.1-1999을 적용하기 위해서는 설계된 이후에 시료 이송배관에 대한 실증시험을 통해 시료이송률이 50% 이상임을 입증해야 한다. 하지만 발전소 현장에서 이미 설치되어 운영 중인 방사선감시기별로 실증시험을 시행한다는 것은 여러 번거로움으로 인해 시간과 비용이 많이 소요될 뿐 아니라, 출력 운전중인 발전소는 현실적으로 실증시험하기가 어렵다.

따라서 시료이송률 시뮬레이션 코드인 Deposition 2001a의 수학적 산식을 이해하고, 그 계산 방식에 따라 시료이송관의 요소별 실증시험을 통해 배관요소별 이송률

과 코드의 계산식을 비교분석하여 상관관계를 도출하는 방법을 통해 실증시험을 대체할 수 있다. 이처럼 향후 개선되는 원전에서는 이런 상관관계를 이용하여 실증시험 대신 시뮬레이션 코드를 이용하여 이송관 설계개선에 활용하는 실증시험 대체방법론 개발이 필요하다.

3. 기타 연구

- 운전 모드별로 별도의 시료이송배관 설치를 위한 연구

기체배출 HVAC 에서 배출 운전 모드에 따라 유량이 현격하게 차이가 나고, 이에 따라 시료 채취 위치에서 시료의 대표성을 확보하기는 매우 어렵다. 오히려 각 배출 운전 모드에 따라 RMS 설비와 연동된 모드별로 시료 채취배관을 각각 구성하는 것이 모든 모드별로 신규기술기준을 만족하도록 설계(안)을 개발하는 것보다도 시간 측면에서 낫다. 개발비용 측면에서도 더욱 합리적일 것으로 판단된다.

- 시료이송률 차이에 따른 보정계수 개발 연구

시료이송률을 만족하지 못할 경우, 시료이송률에 따른 보정계수를 개발하여 RMS 방사선(능) 값에 보상해주도록 하는 연구가 필요하다.

참고문헌

1. B 발전소 RMS(Radiation Monitoring System) Handbook.
2. B 발전소 RMS(Radiation Monitoring System) 구매규격서 & 관련 도면.
3. NRC(Nuclear regulatory commission), 2007, SRP(Standard Review Plan) 11.3(Gaseous Waste Management Systems).
4. ANSI N13.1, 1969, "Guide to Sampling Airborne Radioactive Materials in Nuclear Facilities", American National Standards Institute and the Health Physics Society. Washington.
5. 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.
6. KEPIC, 원자력시설의 배기구를 통해 배출되는 공기 중 방사능의 시료채취 및 감시, NRB 6000, 2005.
7. 한국전력기술(주), 2012, 신고리 3,4호기 기체방사능감시기 시료 채취 위치 적정성 검증을 위한 기술자문.
8. 원자력안전기술원, 2008, 기체배출물 감시시스템 설계기준 동향 및 규제 적용연구.
9. 원자력안전위원회, 2015, B발전소 제1주기 PSR검토 결과.
10. 원자력안전위원회, 2016, 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 원자력안전위원회 규칙 제17호.
11. 원자력안전위원회, 2017, 방사선방호 등에 관한 기준(2017-36호)
12. 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.
13. Fluent(ANSYS, USA) Manual(V15.0)
14. Deposition 2001a User's Manual
15. Kun-kyu Choi, Sun-Hang Kang, Woon-Kwan Chung, 2017. Validation Check for Application of ANSI N13.1 (New Criteria) to Radiation Monitoring System of Nuclear Plant, Journal of Radiation Industry(2017).
16. J. A. Glissmeyer, 2006, Assessment of the 296-S-21 Stack Sampling Probe Location, PNNL-16014

17. JA Glissmeyer, EJ Antonio, JE Flaherty, 2015, Assessment of the LV-C2 Stack Sampling Probe Location for Compliance with ANSI/HPS N13.1-1999, PNNL-24467
18. JA Glissmeyer, EJ Antonio, JE Flaherty, BG Amidan, 2014, Assessment of the LV-S2 & LV-S3 Stack Sampling Probe Locations for Compliance with ANSI/HPS N13.1-1999, PNNL-23386
19. Woon-Kwan Chung, Kun-kyu Choi, Byung-Nam Kim, Yun-Jong Lee, 2018, A Study on the Scale Down Production of the Verification Test Facility for the Application of the New Standard ANSI N13.1, Journal of Radiation Industry(2017).