

Improved sulfur hexafluoride(SF₆) gas analysis method for quality management of cryogenic refinement system

극저온 정제시스템의 품질관리를 위한 SF₆ 가스 분석방법 개선

Jeong Eun Lee, Min-ho Cho, Won Seok Lee
이정은, 조민, 이원석

Abstract

Because sulfur hexafluoride(SF₆) is classified as one of the six major greenhouse gases, SF₆ handling in power plant such as recovery, purification, and reuse is considered to be important. KEPCO has focused to develop the advanced recovery and purification technology of SF₆ reuse. SF₆ analysis includes the on-site analyses and on-line analyzer; i.e., (1) on-site analysis has an error rate of $\pm 0.5\%$ and (2) on-line analysis has an error rate of $\pm 0.1\%$, which is possible to adjust operating conditions and to make the work more conveniently by analyzing SF₆ concentration before and after purification step. This paper presents an online analysis method in the SF₆ purification and reuse system. In addition, the analysis results and quality guarantees for each section of the analysis system were presented.

Keywords: SF₆, purification, Cryogenic solidification, SF₆ analysis, Gas Chromatography

1. Introduction

SF₆ 가스는 높은 절연 내압(공기의 약 3배), 높은 열 차단 능력(공기의 약 10배) 및 높은 열전달 성능(공기의 약 2배)으로 인해 1960년 이후로 고압 및 중압 스위치 기어, GIS(gas insulated switchgear), 환상 주회로, 자동차단기, 변압기, 케이블 등의 전기설비에 사용되고 있다. 또한, 알루미늄 생산, 마그네슘 제련, 반도체 생산, 평판 스크린 생산, 핵연료 주기, 소음 방지 창문, 타이어, 고성능 레이더, 기후 측정을 위한 추적용 가스, 발전소 파이프 내 및 군사적 응용을 포함해서 전기산업이 아닌 다른 분야에서도 널리 이용되고 있다.

SF₆ 가스는 지구온난화 계수(GWP, global warming potential)가 CO₂의 23,900배로 매우 높고, 대기 중 잔존기간이 3,200년이므로 SF₆를 대기 중에 배출하지 않고 재활용은 환경적 및 경제적으로 중요하다. 따라서 대기 내의 방출을 방지하고, 개발, 설계, 생산, 서비스, 보수 및 회수 등의 일련의 과정에서 환경적으로 부합되게 방출해야 한다. [1-4] 현재 SF₆ 회수/정제를 위해 산업현장에서 발생한 오염된 SF₆ 가스를 흡착법(PSA, pressure swing adsorption), 막 분리법, 냉동기 혹은 냉매를 사용한 침냉법, 액화법, 고화법 및 가스 하이드레이트 등을 포함한 다양한 기술을 개선하거나 연구되고 있다. [5-14]

한편에서는 전력설비에 사용 중인 SF₆를 심냉식 정제장치 개발하여 현재 설비진단처 기후변화대응센터에서 운전되고 있다. 심냉식 정제방법은 액화 질소를 사용하여 저 순도 SF₆의 불순물(CF₄, N₂,

O₂)을 고화점 차이를 이용하여 극저온(cryogenic)으로 냉각 후 고화된 SF₆ 가스만 추출하는 방법이다. 그 외 HF, SO₂ 등의 산성가스 및 오일 등 불순물은 각종 필터로 정제된다. 육불화황을 절연체로 사용하는 전력설비에서 절연체 내에 아크가 발생하게 되면, 온도상승, 전기방사, 전기방전 및 불소 원자 분리에 의해 이온, 라디칼 및 중성 분자 등의 다양한 부산물이 연속적으로 발생한다. 이러한 부산물 중 대부분은 육불화황을 형성하기 위해 재결합하는 반면에 일부는 산소, 물 등과 같이 장비 제조에 사용된 다른 물질과 결합한다. 따라서, 육불화황 가스 내 HF, SO₂, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂, SF₄, CF₄ 등 불순물이 포함될 수 있다. 또한, 전력설비의 유지보수 및 취급을 위해 육불화황을 충전 또는 배출시키는 경우 공기와 수증기의 유입으로 발생하는 질소, 산소, 물 등이 주요한 불순물이 될 수 있다. 이전에는 육불화황의 불순물을 분석하기 위해 Air, CF₄, H₂O, HF 등의 성분을 중심으로 적외선 흡수 분석 또는 기체크로마토그래피 분석하는 방법이 사용되었다. 그러나, HF, SO₂, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂ 등의 불순물의 농도는 극히 낮아서 분석 신뢰도를 확보가 쉽지 않다. 또한, SF₄, SO₂F₂, SOF₂, SO₂, HF 등의 불순물은 유해성이 있는 SO₂ 과 HF로 전환되어 배출될 수 있으며, 미량이지만 하나 HF, SO₂ 등이 지속 방출되는 경우 누적 방출량이 증가할 수 있으므로 유해 불순물의 대기 중 방출을 방지하기 위한 대책 마련이 필요한 실정이다. 종래의 분석을 포함하는 장치는 탈황설비에서 나오는 기체상 분석 또는 변전소에서 실시간으로 절연 개폐 장치 내에서 육불화황 가스의 상태를 모니터링을 하고 이상 진단하는 방법이 있지만, 육불화황 재사

Article Information

Manuscript Received March 8, 2022, Accepted April 28, 2022, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Jeong Eun Lee (je.lee@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

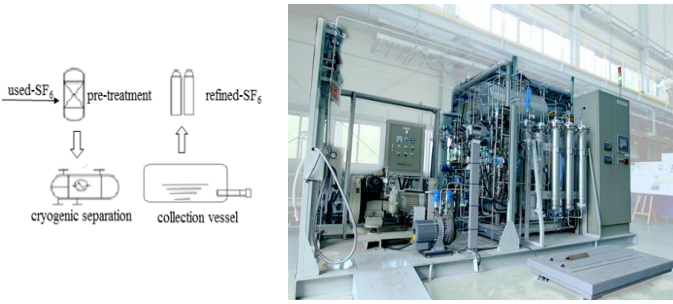


Fig. 1. SF₆ separation/refinement concept and facility by cryogenic Solidification

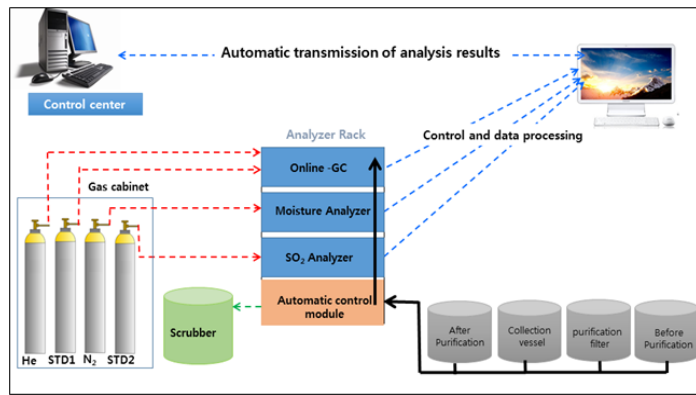


Fig. 2. SF₆ on-line analysis system configuration

용 정제장치에서 실시간으로 분석할 수 있는 시스템이 부족하다. 따라서, 전력설비 사용된 SF₆를 회수·정제하여 재사용하는 장치에서 실시간 분석을 통해 정제장치 이상 진단 및 분석 신뢰도를 높일 수 있는 육불화황 분석시스템에 대해 논하고자 한다.

II. Experimental

A. SF₆ 정제장치

SF₆ 정제장치는 심냉식 응고법을 이용한 정제방법이다. SF₆ 분리는 SF₆와 불순물 간의 응고점/액화점 차이를 이용하여 분리·정제하는 방식이다. 전력기기에서 사용 후 회수한 SF₆의 주요 불순물은 수분과 공기이며, 공기의 주성분인 질소와 산소의 액화점은 각각 -196℃, -183℃이며, SF₆의 응고점 -64℃보다 훨씬 낮아 SF₆가 응고할 때도 기체상으로 존재하여 기체상 배출 분리가 가능하다.

액체질소를 이용하여 냉각된 SF₆를 고체로 열교환기에 부착한 다음, 기체 상태의 불순물을 배출하고, 고화된 SF₆를 용해하여 저장/재충전한다. 본 장치는 크게 정화계통, 분리/정제계통 및 재충전/저장 계통으로 나눌 수 있으며, 정화계통에서는 정제 전 가스의 미량불순물(산 가스, 수분, 입자)을 제거한다. 분리/정제계통에서는 SF₆와 불순물(공기)의 분리가 이루어지며, 재충전/저장 계통에서는 분리된 SF₆의 저장 탱크로 이송하는 작업이 이루어진다. 아래 Fig. 1은 심냉식 고화 정제장치의 개념도 및 장치이다.

B. 실시간 분석시스템의 분석방법

Fig. 2 분석시스템은 SF₆의 순도 및 불순물을 분석하기 위한 가스 크로마토그래피, 수분, 이산화황 분석기 및 스크러버 장치로 구성된 시스템의 전체 구성도이다.

TABLE 1
Maximum acceptable impurity level for reuse of SF₆ gas

구분		최대 허용 레벨	
수분	분해 가스 발생기	관리치	150ppm
		허용치	300ppm
	분해 가스 미 발생기	관리치	300ppm
		허용치	1,000ppm
SO ₂		1ppmv 미만	
순도		99.7 vol% 이상	

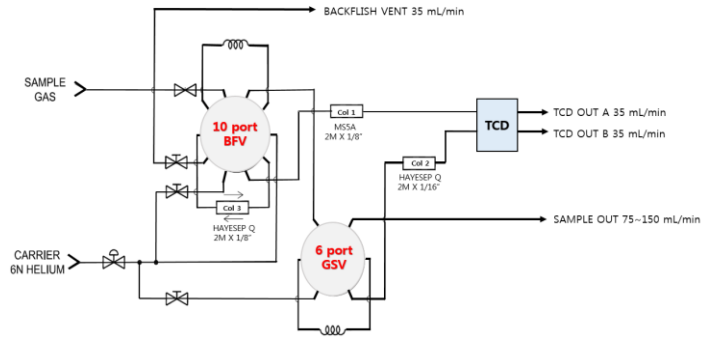


Fig. 3. Valve configuration of GC-TCD

TABLE 2
Analytical conditions of GC-TCD

	conditions
Oven temperature	80 °C
Carrier gas, flow	He, 2 mL/min
Sample flow	2 mL/min

실시간 분석시스템은 정제 운전 시 자동으로 정성 및 정량 분석을 할 수 있다. Table 1은 한전의 재사용 SF₆ 관리기준안이다. 온라인 분석시스템은 한전 관리기준안의 최대허용농도를 분석할 수 있는 성능으로 구성하였다.

SF₆ 순도분석은 가스 크로마토그래피(AGC Ins., Novachrom 4000)의 TCD (thermal conductivity detector) 검출기를 사용하였으며, 감도는 5 ppm 미만의 검출기 반응속도는 0.5초 이내로 빠르며 O₂, N₂ 분석을 한다. GC-TCD는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 샘플이 주입되면 10 port GSV back flush valve(BFV)의 sampling loop를 통과한 후 SS 재질의 packed column(Molecular sieve 5A)을 통과한 후 O₂와 N₂를 분석하고 6 port column switching valve(CSV)의 sampling loop를 통과한 후 SS 재질의 packed column(hayesep)에서 SF₆가 분석된다. 이때 사용한 분석조건을 Table 2에 정리하였다. 분석 시료는 SF₆ 가스가 대부분이고, 시료 중에 포함된 극미량의 불순물을 분석하기 위해서 대부분을 차지하는 SF₆ 피크가 뒷부분에서 나오므로 heart cut method 중에서 back flush method를 선택하여, SF₆ 피크로 인한 방해 없이 불순물을 분석할 수 있다.

실시간 수분분석기(MEECO Ins., Aquavolt)는 P₂O₅ 센서 방식이며, 0~1000ppm의 수분을 분석한다. ppm 단위의 수분을 정확히 분석하기 위해서는 장치 내 수분 제거를 위해 10회 이상 퍼징을 한다. 장비 내 수분이 제거된 후 분석해야 정확한 분석결과를 얻을 수 있으며 Table 3은 수분분석기 분석조건이다.

TABLE 3
Analytical conditions of moisture analyzer and SO₂ analyzer

	Conditions	
	Moisture Analyzer	SO ₂ Analyzer
Flow	1 mL/min	0.5 mL/min
Purge time	10 min	10 min
Analytical time	> 5 min	> 5 min

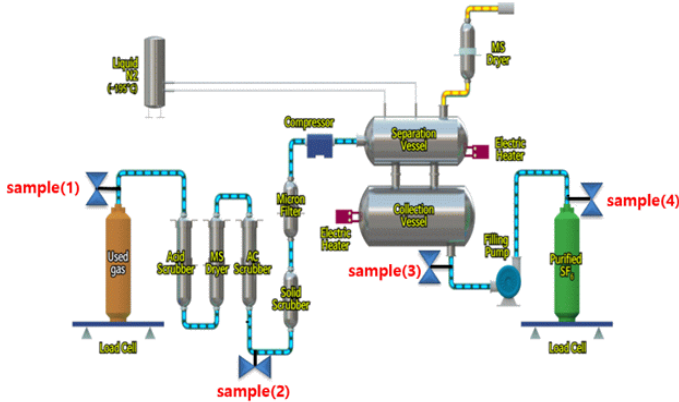


Fig. 4. On-line analysis sample composition by cryogenic coagulation SF₆ purification equipment

SF₆ 가스의 중요한 분해물 중 하나인 SO₂ 분석기(Thermo Ins., 43iQ)는 UV 형광 분석방법을 사용하며 분석 범위는 0~10ppm 이다. 이때 사용한 분석조건을 Table 3에 나타내었다. SO₂ 분석 검출농도는 0.1ppm, 정확도는 0.1ppm 이내로 한전의 재사용 기준을 적용하였다.

분석에 필요한 표준가스는 2종류이며, GC 표준가스는 0.25% O₂, 0.25% N₂, 99.5% SF₆이며, SO₂ 표준가스는 5~8ppm를 사용한다. 분석 후 배출되는 가스는 스크리버에 연결하여 외부로 배기하며, 이때 분석 후 가스는 흡착탑으로 보내 5초 이상 체류하여 산 가스(SO₂, HF)를 추가로 제거 후 배출한다. 흡착탑은 SO₂, HF, SF₆를 흡착 가능한 AA(activated alumina), MS-13X(molecular sieve-13X), AC(activated carbon) 등의 흡착제를 사용하며, AA의 수명을 육안으로 확인할 수 있도록 AA 상부에 수분 indicator를 추가한다. 흡착탑 전단에서 바로 fan blower로 가스가 배출될 수 있도록 bypass 배관을 설치하며, fan blower 전 후단에서 가스의 시료 채취가 가능하도록 sampling port를 제작하였다.

C. 분석 샘플링 위치

SF₆ 정제장치의 구간별 장치의 상태 확인이 어려운 문제점과 부정확한 순도분석 시 품질보장 문제해결이 필요하다. 운전 중 장치 구간별 상태 확인과 SF₆를 분석할 수 있도록 실시간 분석시스템의 분석 위치는 다음 Fig. 3과 같다. 첫째, 정제 전의 상태를 확인할 수 있는 곳, 둘째, 필터의 상태를 진단할 수 있는 필터 후단, 셋째, SF₆ 저장조로써 시료를 실린더에 충전하기 전에 정제 상태를 진단할 수 있는 위치이며, 넷째, SF₆ 정제 후의 시료를 분석할 수 있는 위치로 분석 위치를 선정했다.

첫 번째 분석 위치는 정제 전 SF₆의 순도를 확인할 수 있는 곳이다. 정제장치에 주입되는 SF₆의 순도는 50~70 vol%로 다양하며, 정확한 순도분석이 되지 않으면 운전의 품질보장을 할 수 없다. 기존 현장 간이분석기로 분석 시 오차율이 ± 0.5% 이상으로 정확한

분석이 어렵고 잦은 교정이 필요하다. 정제 운전 시 정제 전 시료 분석을 통해 SF₆의 순도가 높은 경우 배출(vent) 단계가 생략된다. SF₆의 순도가 낮은 경우에는 배출단계 후 정제되기 때문에 운전조건 및 시간을 조정할 수 있다. 최종 정제량은 SF₆의 순도에 따라 실제 정제량(kg)이 달라지기 때문에, 정확한 순도분석이 이루어지지 않으면 정제 후 정제량을 확인할 수 없는 문제점이 있다. 두 번째 분석 위치는 정제장치에 주입될 때 정화계통의 정제 필터 후단(purification filter)에서 분석한다. 필터 내의 흡착제 상태를 진단함으로써 흡착제의 교체 주기를 확인할 수 있으며, 실시간 측정이 가능하므로 필터의 수명을 감시할 수 있다. 세 번째 분석 위치는 실린더에 충전하기 전에 정제 상태를 진단할 수 있는 저장조(collection vessel)에서 분석한다. 정제 운전 중 정제결과를 확인할 수 있어 목표 하는 SF₆ 순도를 얻지 못하면 정제 중에 분리·정제 공정을 다시 시작할 수 있어 전체적으로 정제시간을 줄일 수 있다. 그러나 저장조 액체상태의 SF₆가 쉽게 승화되어 고체화되기 때문에 분석라인의 막힘과 이로 인해 불규칙한 유량공급 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 히팅 감압장치(heating regulator)를 부착하여 일정한 유량으로 공급하도록 구성하였다. 마지막 분석 위치는 정제 완료된 SF₆를 충전한 시료에서 분석한다. 이는 배관에서 불순물 유입으로 인해 정제가 완료된 시료의 순도에 영향을 줄 수 있으며, 최종 충전되는 SF₆ 순도까지 보증하기 위하여 분석이 필요하기 때문이다. 또한, 분석을 통해 밸브의 교체 시기 및 수명을 확인할 수 있다. 충전 배관에는 충전 시 압력을 조절하는 수동밸브가 있다. 이 수동밸브는 SUS 재질로 되어 있으므로 잦은 밸브의 열고/닫힘으로 인하여 배관의 수명에 영향을 주며 이로 인해 불순물이 유입될 수 있다.

III. Results and Discussion

A. 간이분석과 실시간 순도분석

실시간 분석시스템의 성능 검증을 위해 SF₆ 실시간 분석과 간이분석을 비교했다. 간이분석은 휴대용 SF₆ 분석기(SF₆-3100 pump back gas analyzer, Rapidox)를 사용, 실시간 분석은 GC-TCD, 수분분석기 및 SO₂ 분석기를 사용하여 휴대용 간이분석과 비교하였다. 실시간 분석은 SF₆ 정제 운전 시 실시간으로 상태진단이 가능하도록 각 분석 구간에 밸브를 체결하며 SF₆ 정제 운전을 하면서 분석한다. Table 4는 SF₆ 순도분석을 휴대용 간이분석과 실시간 분석한 결과이다. SF₆ 순도 결과 약 0.13~0.57 vol%의 농도가 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 분석 차이는 실시간 순도분석기와 휴대용 SF₆ 간이분석기의 오차율에 있다. 휴대용 SF₆ 분석기의 오차율범위는 ±0.5 vol%이며, 실시간 순도분석기의 오차율은 ±0.1 vol% 이다. 따라서 휴대용 SF₆ 간이분석기의 결과값 신뢰가 어렵고 분석기에 따라 순도 결과에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

분석이 가장 중요한 곳은 SF₆ 정제장치의 SF₆ 저장조(collection vessel)이다. SF₆ 저장조 분석은 정제된 SF₆ 정제결과를 가장 먼저 확인할 수 있는 곳이며, 저장조의 결과가 재사용 기준에 부적합한 경우에는 재정제해야 하므로 저장조에서 분석은 매우 중요하다. 저장조의 SF₆는 냉각 응축되어 액화된 상태로 저장되어 있다. 분석기로 주입될 때 SF₆가 쉽게 승화되어 고체화되기 때문에 분석라인의 막힘과 이로 인한 불규칙한 유량공급 문제점이 있다. 이러한 문제점으로 인하여 저장조에서 간이분석용인 휴대용 SF₆ 분석기로는 어려움이 있다. 또한, 휴대용 SF₆ 간이분석기의 경우 기체상 분석 시 일정한 유량이 공급되지 않으면 분석할 수 없다. 실시간분석기의

TABLE 4
Purity results for portable analysis and on-line analysis

Number	Cylinder No.	Analysis		Uncertainty (vol%)
		Portable analysis Portable SF ₆ analyzer (vol%)	On-line analysis GC-TCD (vol%)	
1	8264596	95.9	95.52	0.38
2	8265048	99.4	99.97	0.57
3	8265723	99.1	98.97	0.13

TABLE 5
Purity and impurity online analysis of collection vessels

GC-TCD			Moisture Analyzer (ppm)	SO ₂ Analyzer (ppm)
SF ₆ (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)		
99.9974	0.0010	0.0016	1.8750	0.0825

TABLE 6
Purity results for portable analysis and on-line analysis

Portable analysis	On-line analysis	Uncertainty (vol%)
Portable SF ₆ analyzer (vol%)	GC-TCD (vol%)	
100	99.50	0.5

경우 분석시스템으로 주입 전 히팅 감압장치 (heating regulator)를 설치하여 일정한 유량으로 시료를 공급할 수 있도록 하였다. 저장조의 실시간 분석결과는 Table 5과 같다.

SF₆ 정제장치의 저장조의 SF₆ 순도 및 수분, SO₂ 분석결과이다. 저장조에 있는 SF₆의 순도는 한전의 재사용 기준 이상이며, 수분 및 SO₂는 기준치 이하임을 확인할 수 있어, 본 분석결과로 볼 때 재정제를 하지 않아도 된다. 최종 정제된 시료는 액체펌프를 이용하여 실린더에 충전하며, 이때 배관에서의 외부 불순물 유입으로 SF₆ 순도 저하 문제가 발생 되므로 순도 확인이 필요하다. Table 6은 정제 완료 후 실린더에 저장된 SF₆ 순도 분석결과이다.

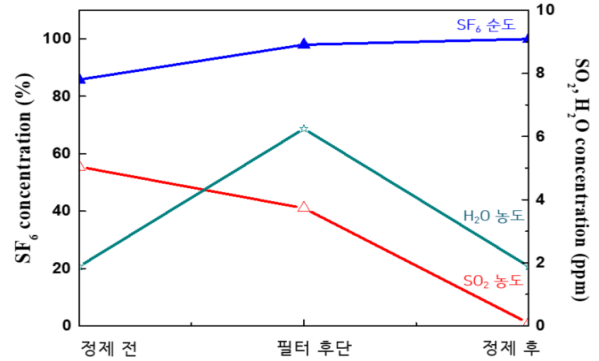
실시간 온라인분석과 휴대용 SF₆ 간이분석기의 분석결과는 0.5% 차이를 보이며,

결과값을 신뢰하기 어렵고 보다 정확한 분석을 위해서는 간이 분석기인 휴대용 SF₆ 분석보다 실시간 순도분석을 해야 한다.

B. 실시간 정제 운전을 통한 분석결과

SF₆ 정제 운전을 하는 동안 실시간 SF₆ 순도와 불순물을 분석하였다. 분석 시료는 회수기 내 탱크에 저장된 SF₆ 가스를 사용한다. SF₆ 시료는 약 80kg을 정제장치에 주입하면서 정제 전, 필터 후단, 저장조 시료를 분석한다. Fig. 5는 구간별 분석결과이다.

SF₆ 순도의 경우, 정제 전 85 vol%에서 필터 후단에서 98.02 vol%로 약 12% 정제율이 증가 되었으며, 필터 후단을 거쳐 정제 완료까지 약 1.97% 증가 된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 전처리 필터에서 필터 역할이 정상적이며, SF₆ 정제에 있어서 필터에서의 불순물 제거역할이 매우 중요함을 의미한다. 그러나 수분 농도의 경우 필터 후단에서 증가하는 결과를 보였다. 이는 필터 후단 분석 시 회수장치에서 시료 주입 압력이 낮아지는 문제로 인하



Sampling	SF ₆ concentration (vol%)	SO ₂ concentration (ppmv)	H ₂ O concentration (ppmv)
Before purification	85.84	5.04	1.88
Purification filter	98.02	3.73	6.25
Collection vessel	99.99	0.08	1.88

Fig. 5. Online analysis result according to sample location of SF₆ purification equipment

여 시료 공급이 일정하지 않은 문제로 인해 분석결과에 영향을 준 것으로 판단되며 향후 개선해야 할 부분이다. SO₂의 농도는 정제 전보다 정제후 4.96 ppm 감소 된다. 결국, 심냉식 정제장치를 통해 불순물 제거가 가능하며, 정제 후 SF₆ 순도 및 불순물은 SF₆ 재사용 기준에 적합하므로 재사용이 가능하다.

IV. CONCLUSION

실시간 정제장치 온라인분석은 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 실시간 분석설비로 SF₆ 정제 운전 시 정제결과를 확인할 수 있어 목표로 하는 SF₆ 순도를 얻지 못하면 운전 중 정제 공정을 다시 시작할 수 있다. 또한, 필요한 곳에 분석 구간을 설치하여 정제 중 혹은 정제 전·후 분석결과를 반영하여 적기에 운전조건을 조정할 수 있어 효율적으로 정제 작업을 수행할 수 있다. 전력설비에서 회수한 SF₆ 가스에 포함된 산성 물질, 입자성 물질 및 다량의 수분을 제거하는데 흡착제의 교체 주기를 수시 혹은 원하는 시기에 확인할 수 있어 SF₆ 정제장치의 정화계통은 물론 전체 SF₆ 정제장치를 효율적으로 관리할 수 있다. 마지막으로 SF₆ 정제장치에서 배출가스의 대기로 방출 시 일부 SF₆ 가스 및 SO₂를 포함한 산성 가스를 실시간 분석 이후에 별도의 스크리버를 통과한 뒤 대기로 방출함으로써 SF₆ 가스 및 기타 불순물 가스를 효과적으로 제거할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Internal R&D program (No. R16VA06) of Korea Electric Power Corporation (KEPCO) in 2016.

References

[1] W.T. Tsai, "The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis", Journal of Fluorine Chemistry, Vol. 128, 2007, pp. 1345-1352.

- [2] C.T. Dervos, J.A. Mergos, M.D. Palaiologopoulou, "Environmental effects of electrically-stressed sulfur hexafluoride", EPJ Web of Conferences 33, 2012, 04004-pp. 1-8. <http://epj-conferences.org> or <http://dx.doi/10.1051/epjconf/20123304004>.
- [3] M. Maiss, C.A.M. Brenninkmeijer, "Atmospheric SF₆: trends, sources, and prospects", Environmental Science Technology, Vo.32, 1988, pp.3077-3086.
- [4] C.T. Dervos, P. Vassiliou, "Sulfur hexafluoride (SF₆): global environmental effects and toxic by product formation", Journal of Air & Waste Management Association, Vol.50, 2000, pp.137-141.
- [5] I. Cha, S. Lee, J.D. Lee, G.-W. Lee, Y. Seo, "Separation of SF₆ from gas mixtures using gas hydrate formation", Environmental Science & Technology, Vol. 244, 2010, pp. 6117-6122.
- [6] P. Babu, P. Linga, R. Kumar, P. Englezos, "A review of the hydrate based gas separation (HBGS) process for carbon dioxide pre-combustion capture", Energy Vol. 85, 2015, pp. 261-279.
- [7] C.K. Ahn, G.H. Kim, J.E. Lee, K.S. Kim, K. Kim, "An SF₆ purification process utilizing gas hydrate formation developed for electric power industry", Separation and Purification Technology, Vol. 217, 2019, pp. 221-228.
- [8] M. Toyoda, H. Murase, T. Inohara, H. Naotsuka, A. Kobayashi, K. Takano, K. Ohkuma, "Application of pressure swing adsorption to SF₆ separation and liquefaction from SF₆/N₂ mixtures", In 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings 3, 2000, pp. 2156-2161.
- [9] K. Kim, K.S. Kim, J.E. Lee, S. Park, C.K. Ahn, G.H. Kim, "Status of SF₆ separation/refining technology development for electric industry in Korea", Separation and Purification Technology, Vol. 200, 2018, pp.29-35.
- [10] H. Cho, D. Woo, Y. Cho, M. Han, "Characteristics of SF₆ gas recycling processes", Clean Technology, Vol. 1793, 2011, pp.329-335.
- [11] J.E. Lee, K.S. Kim, A.R. Kim, S. Park, K. Kim, "Installation and test run of comprehensive analysis system for SF₆ in power equipment", KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Vol.3, 2017, pp. 41-47.
- [12] G. Dagan, G. Agam, V. Krakov, L. Kaplan, "A tailor-made membrane for SF₆ recycling: An environmentally friendly method to reduce costs", Carbon Membrane Ltd., Israel(https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/conf00_dagan2_paper.pdf)
- [13] S. Lee, J.W. Choi, S.-H. Lee, "Separation of greenhouse gases(SF₆,CF₄ and CO₂) in an industrial flue gas using pilot-scale membrane", Separation and Purification Technology, Vol. 148, 2015, pp. 15-24.
- [14] S.-J. Kim, Y.-I. Park, S.-E. Nam, H. Park, P.S. Lee, "Separations of f-gases from nitrogen through thin carbon membranes", Separation and Purification Technology, Vol. 158, 2016, pp. 108-114.