

Preliminary Design of the Forced Gas Drying System for Spent Nuclear Fuel Dry Storage

사용후핵연료 건식저장을 위한 기체강제순환 건조장치 예비설계

Gyung-sun Chae*, Kyung-wook Shin, Byeong-mok Park, Jae-hyun Han, Geon-hui Lee, and Jae-seok Park
SAE-AN Engineering Corp., R910, 184 Gasan Digital 2ro, Geumcheon-gu, Seoul, Republic of Korea

채경선*, 신경욱, 박병목, 한재현, 이진희, 박재석
세안기술(주), 서울특별시 금천구 가산디지털2로184, 910

(Received September 7, 2017 / Revised October 27, 2017 / Approved November 29, 2017)

For dry storage of the spent nuclear fuel (SNF) stored in the storage pool of a nuclear power plant, essentially all moisture must be removed to prevent corrosion of the assembly and canister internals and/or degradation of fuel cladding integrity after SNF canister loading operation. R&D work is now in progress on a forced gas drying system that can be used to remove residual water in canisters. In this work, preliminary design is performed to manufacture the forced gas drying system. This process includes a case study of dry methods for canister moisture removal, relative codes and standards, confirmation of adequate dryness, needs analysis at plant sites, and characteristics of SNF stored in pools. Through this preliminary design work, we obtained a conceptual flow diagram and preliminary P&ID of the forced gas drying system. The results of this study can be used to determine details of the design to manufacture the forced gas drying system.

Keywords: Forced gas drying system, Spent nuclear fuel, Dry storage, Dry method, Canister

*Corresponding Author.

Gyung-sun Chae, SAE-AN Engineering Corp., E-mail: gschae7@sae-an.co.kr, Tel: +82-2-2102-2890

ORCID

Gyung-sun Chae <http://orcid.org/0000-0002-9879-1482>

Byeong-mok Park <http://orcid.org/0000-0001-5469-4851>

Geon-hui Lee <http://orcid.org/0000-0002-1971-5220>

Kyung-wook Shin <http://orcid.org/0000-0001-6531-9934>

Jae-hyun Han <http://orcid.org/0000-0002-3514-3090>

Jae-seok Park <http://orcid.org/0000-0002-4073-8814>

원자력발전소내 습식저장중인 사용후핵연료의 건식저장을 위해서는 캐니스터 내부에 사용후핵연료를 옮겨 담은 이후, 건식저장 캐니스터 내장품이나 사용후핵연료 다발의 부식방지 및 피복관의 열화방지를 위해 모든 수분은 제거해야 한다. 캐니스터 내부의 수분을 제거하는데 사용할 수 있는 기체강제순환 건조시스템 개발을 위한 연구개발이 진행 중이다. 본 연구에서는 기체강제순환 건조시스템 설계, 제작을 위한 예비설계를 수행하였다. 예비설계에는 캐니스터 내부 잔존수분 제거를 위한 건조사례조사, 건조관련 규격이나 표준, 건조합격기준, 건조장치구성, 현장요구분석, 습식저장중인 사용후핵연료 특성을 포함하였다. 예비설계를 통하여 기체강제순환 건조시스템의 설계 개념도와 P&ID를 도출하였고, 이를 활용하여 건조시스템 제작을 위한 상세설계를 수행할 것이다.

중심단어: 기체강제순환건조, 사용후핵연료, 건식저장, 건조방법, 캐니스터

1. 서론

국내 원자력발전소 가동년수 증가에 따라 사용후핵연료 발생 및 저장량은 매년 증가추세에 있다. 경수로형 원자력발전소 저장수조내 보관 관리중인 사용후핵연료는 조밀저장이나 원전 호기간 이송저장을 고려하더라도, 고리 및 한빛 원전의 경우 2024년에 포화가 예상됨으로서, 정부에서는 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획을 제시하였다. 이에 따라 2035년 중간저장시설 건설이전까지 원전내 단기 건식저장시설이 설치, 운영될 것으로 예상된다[1]. 수조내 습식저장중인 사용후핵연료의 건식저장을 위해서는 수분에 의한 건식저장용기내 내장품의 재료부식이나 사용후핵연료 피복관 열화손상방지를 위한 건조과정이 필수적이다. 국내는 경수로형 사용후핵연료의 건식저장 사례가 없어서 이에 대한 건조 경험은 없지만, 한국원자력환경공단 등의 국내기술진에 의해 개발되어 상용 인허가 추진중인 KORAD-21 사용후핵연료 운반저장용기의 경우, 용기설계특성에 적절한 방법으로 채택한 건조기술은 진공건조에 의한 방법이다[2]. 이것은 건식저장이 일반화된 해외에서는 사용후핵연료 건식저장을 위한 건조방법으로서 가장 적용사례가 많다.

국내 경수로형 원자력발전소내 보관 관리중인 사용후핵연료 가운데 2000년대 초반부터 시작하여 이후 발생한 것들을 보면, 농축도가 4.5wt%로서 최대연소도가 고연소도 기준(45 GWd/MtU)을 상회하고 있는 것이 특징이며, 장주기운전 등의 원전연료 이용률 향상에 따라 향후 고연소도 사용후핵연료 발생량이 증가할 것으로 예상된다. 사용후핵연료 건식저장을 위한 안전성 측면에서 중요하고,

건조기술 적용 과정에서 큰 비중을 차지하는 것은 사용후핵연료를 감싸고 있는 피복관의 건전성 확보여부와 관련된 것이다. 건조를 위해 적용한 기술적방법으로 인해 사용후핵연료 피복관에 열화손상을 유발시킨다거나, 열화손상확률을 높여서는 않된다. 최근 수행되는 다양한 사용후핵연료 건조관련 연구나 문헌[3,4]에서는 진공건조방법에 비해 사용후핵연료 피복관의 온도상승률을 낮출 수 있고, 건조시간을 줄일 수 있는 장점을 갖는 기체강제순환 건조방식이 제시되고 있다. 기체강제순환 건조방법에 대한 국제적 관심증가와 더불어 국내에서도 사용후핵연료 건식저장을 위한 건조관련 연구가 진행중으로서, 국내 사용후핵연료 발생특성을 고려한 건조과정과 건조 종료후 피복관 건전성영향을 평가하기 위한 데이터 축적이 필수적이므로, 기체강제순환 건조시험장치를 제작 활용하여 다양한 시험을 실시하고 관련데이터를 확보해나갈 필요가 있다. 건조장치 운영사례, 건조관련 규격이나 표준, 건조합격기준, 건조장치구성, 현장요구분석, 사용후핵연료 특성을 고려한 운전조건 설계변수 등에 대한 자료조사 및 내용분석을 통하여 기체강제순환 건조시험장치 예비설계를 수행하였다.

2. 적용사례

사용후핵연료를 캐니스터(Canister)에 담아 보관 관리하는 방식으로 국내의 상용화된 건식저장 용기모델들은 콘크리트나 금속과 같은 사용재질과 사용후핵연료 저장량 및 사용후핵연료 특성에 따라 다양하게 분류하고 있으며,

NUHOMS, CASTOR, NAC, VSC, TN, HI-STAR, HI-STORM 등을 모델명으로 하는 다양한 건식저장 시스템들이 개발되어 사용 중에 있다. 이들 시스템의 대부분은 건식저장을 위한 건조방법으로서 진공건조방법을 사용하고 있으나, HI-STAR, HI-STORM 모델들은 연소도, 열발생률, 손상연료여부 등의 사용후핵연료 특성에 따라 헬륨강제순환건조를 병용하거나 전용하고 있다. 헬륨강제순환건조 방법은 Table 1에 나타낸 것처럼 고연소도 사용후핵연료나 열부하가 높은 연료를 포함하는 사용후핵연료의 건조를 위해 Holtec International 사가 개발하였다[5].

3. 건조합격기준

사용후핵연료 건식저장을 위한 피복관 안전성기준은 미국 원자력규제위원회(NRC) 규제지침(NUREG-1536 R1) [6]에 제시되어있고, 건조와 관련하여 NRC에서 수용하고 있는 건조가 완료된 상태를 판단할 수 있는 건조합격기준이 ASTM C1553-16에 명시하고 있다[7]. 규제지침에서는 지르코늄 합금기반의 연소도 45 GWd/MtU 이하 저연소도를 갖는 사용후핵연료 피복관의 최대온도를 정상저장조건에서 400℃ 이하, 비정상 또는 사고시에도 570℃를 넘지 않도록 하고 있고, 봉내압은 90 MPa (13.1 ksi)미만, 건조시 피복관의 온도변화를 65℃로 제한하며, 온도변화 제한치 초과시 열주기를 10회 미만으로 제한하고 있다. 이와

같은 피복관에 대한 온도, 압력, 열주기 제한치 등의 요건 만족를 기본전제로 하는 건조방법을 적용한 건조합격기준은 진공건조방법의 경우, 사용후핵연료 다발을 수용하는 캐니스터 내부가 격리된 상태, 즉 진공펌프 작동정지후 3 torr의 진공압에서 30분이상 압력변화가 없는 상태를 유지하는 것이다. 기체강제순환건조방법을 적용할 경우에도 캐니스터 내부가 건조계통과 격리된 상태에서 3 torr의 진공압에 상응하는 조건에서 30분이상 변화가 없는 상태를 유지할 때, 건조가 완료된 것으로 명시하고 있다. HI-STAR 모델의 경우 안전성보고서나 설계보고서 등에서 언급하고 있는 3 torr에 상응하는 조건으로 제시한 방법은 헬륨강제순환 건조방법으로서 제습장치 출구단에서 순환기체의 온도가 30분이상 -6.1℃ (21°F)이하를 유지하거나, 캐니스터 출구단에서 30분이상 이슬점 온도가 약 -5℃ (22.9°F)이하를 유지하는 상태로 하고 있다.

4. 기체강제순환 건조시스템 구성 및 기능설계

경수로형 원자력발전소내 습식저장시설로부터 사용후핵연료를 옮겨담은 캐니스터내의 냉각수 제거공정인 배수공정과 연계하여 후속적으로 실시될 수 있는 캐니스터내 수분을 기준치 이하로 제거하기 위한 기체강제순환건조시스템 구성을 위한 시험장치는 ASTM C1553-16에 제시된 기체순환 건조공정 표준흐름도를 참고하였다. 표준흐름도에서는

Table 1. Multi-purpose canister (MPC) cavity drying limits

Fuel Burnup (GWd/MtU)	MPC type	MPC Heat Load (kW)	Method of Moisture Removal
All assemblies ≤ 45	MPC-37	≤47.05	VDS or FHD
	MPC-89	≤46.36	
One or more assemblies > 45	MPC-37	≤29.6	VDS or FHD
	MPC-89	≤30.0	
One or more assemblies > 45	MPC-37	≤47.05	FHD
	MPC-89	≤46.36	

* VDS (Vacuum drying system), FHD (Forced helium dehydration system)

Fig. 1에 나타난 것 처럼 캐니스터 내부의 수증기를 동반하는 순환기체를 냉각시키는 냉각장치(Condensing module), 냉각된 순환기체내의 수분을 제거하는 제습장치(Demoisturizer), 건조공정내 기체순환을 위한 순환장치(Gas circulator module), 캐니스터 내부의 건조를 위한 공정기체의 온도를 상승시키는 예열장치(Pre-heater module)로 구성하고 있다.

표준흐름도의 구성을 참고로 하여 기체강제순환건조장치의 주요 기능분석을 수행하였다. 공정기체를 일정압력과 유량으로 강제 순환시키는 순환기능(Gas circulator), 캐니스터내의 수분 증발을 위한 공정기체 가열기능(Heater), 공정기체에 동반되는 수증기를 분리(Condenser), 제거(Demoisturizer), 배수하는 기능, 건조완료 상태를 계측하고 확인하는

기능, 공정기체의 공급 및 회수를 차단하고 우회 운전하는 기능(Flow controller), 각종 운전변수 감시, 표시(T-sensor, Flow sensor) 및 비상 정지기능, 공정기체를 장치에 공급하고 배기하는 기능을 갖도록 설계하였다. 공정기체의 흐름으로서, 기체강제순환기에서 압력을 받아 가열기(Heater)로 들어간 공정기체는 일정온도까지 가열된 후 유량조절기(Flow controller)를 거쳐 캐니스터내로 들어가도록 하였다. 캐니스터 내부의 배수관(Drain port)을 통해 하부로 유입된 공정기체는 사용후핵연료 자체 붕괴열에 의해 가열되면서 상부로 흐르며 수증기를 동반하고, 캐니스터 상부 배기관(Vent port)을 통해 냉각 및 제습장치로 흐르며 수분이 제거되고 다시 기체강제순환기로 유입되는 폐루프형 건조유로를 형성하도록 설계하였다. 건조장치구성의 기능적 특징과 공정기체 흐름을 분석하여 예비 설계한 일련의 건조과정을 Fig. 2에 도시하였다.

5. 현장 요구분석

건조장치 설계시 현장여건을 반영하기 위한 것으로서 경수로형 원자력발전소 사용후핵연료 저장수조지역에서 기체강제순환건조장치를 사용할 경우를 가정하여 장치 운영과 관련한 주요 요구분석을 실시하였다. 건조장치의 현장 설치용이성, 장치 정비 및 운전편의성과 작업자 안전성, 현장에 설치된 기존설비 및 장치와의 연계 활용성, 연료장전 등의 기존작업과의 간섭성 등을 조사하여 대략적인 장치크기를

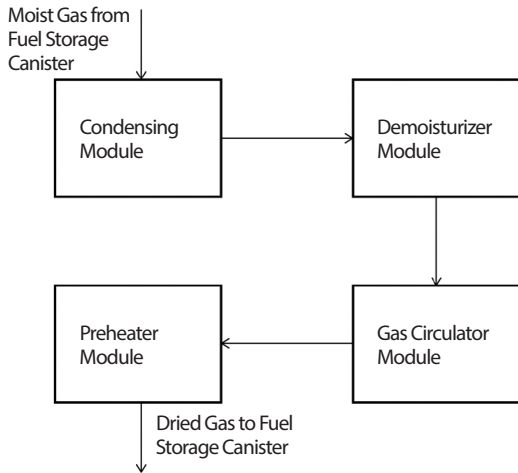


Fig. 1. Block flow diagram of the forced gas drying process.

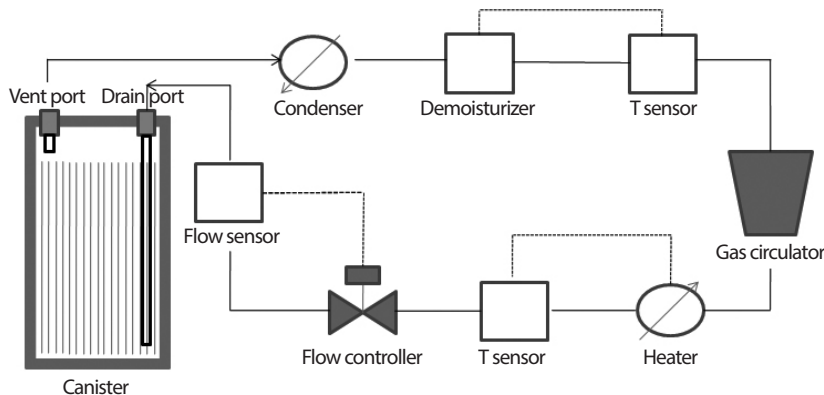


Fig. 2. Conceptual flow diagram of the forced gas drying process.

정하였고, Fig.3에 사선으로 나타낸 것처럼 건조장치 설치지역을 예비 선정하였다. 발전소내에 설치된 호이스트나 크레인을 기체강제순환건조장치의 현장 설치 등에 활용할 수 있고, 220 V 단상 및 380~460 V 삼상 전원부의 위치와 공급전원 및 건조장치의 전기용량을 고려하여 냉각장치를 중심으로 하는 스킴(W120×L340×H200)와 순환장치를 중심으로 하는 스킴(W210×L250×H180) 형태로 이동설치와 취급이 용이하게 하였다. 원자력발전소 동일 노형일지라도 현장여건에 따라 건조장치를 설치하여 활용할 수 있는 공간이 다양할 수 있으므로 실제 건조작업을 수행할 경우에는 이를 고려하여 강제순환 기체배관의 규격결정과 압력강하 등을 고려한 운전조건 설정 등의 상세설계와 실증이 필요할 것이다.

6. 설계변수 분석

기체강제순환건조장치의 건조운전 및 건조성능과 관련한 정성적 설계변수를 분석하였다. 건조운전에 영향을 줄 수

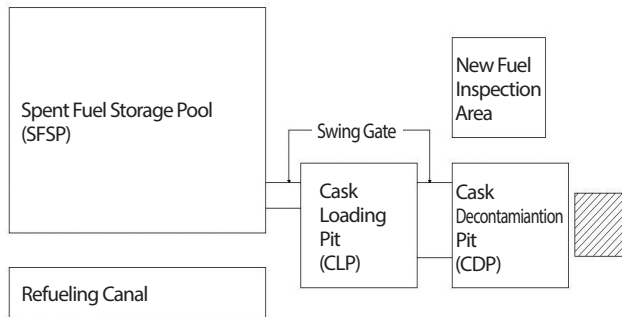


Fig. 3. Temporary working stage for drying equipments at fuel building in nuclear power plant (Diagonal line).

있는 주요변수 4가지로서, 공정순환기체, 공정순환기체온도, 공정순환기체압력, 공정순환기체유량을 도출하였고, 사용후 핵연료 특성별 설계변수의 정량적 범위 및 상세 건조운전조건은 향후 건조시험장치를 활용한 성능시험결과를 통하여 구체적으로 제시할 수 있을 것이다.

6.1 공정순환기체

기체강제순환건조를 위해 공정순환기체로 사용할 수 있는 희유기체는 비열이 높고, 물리 화학적으로 캐니스터 내부 구조물이나 사용후핵연료 피복관과 반응이 일어나지 않도록 안정하고 환경 및 인체에 유해하지 않는 것이 바람직하다. 건조목적으로 사용할 수 있는 희유기체를 조사하여 Table 2에 나타내었다. 다른 기체에 비해 물에 대한 용해도가 낮고 열전도도가 높은 헬륨을 공정순환기체로 사용할 경우, 건조에 더 적합하며 건조공정 이후 헬륨 충전 공정과 바로 연계할 수 있으므로 유리할 것으로 판단된다.

6.2 공정순환기체 온도

캐니스터 내부로 유입되는 공정순환기체는 사용후핵연료 피복관 온도 제한치를 초과하지 않도록 하고, 온도변화는 허용온도 범위내 있도록 설계해야 한다. 캐니스터의 배기구통을 통해 순환하는 공정순환기체에 동반된 수분제거를 위해 냉각장치에서 공정순환기체가 이슬점온도 이하로 낮춰졌다면, 배수구통을 통해 캐니스터 내부로 유입되는 공정순환기체는 사용후핵연료 피복관의 온도변화가 65℃ 이하가 되도록 예열장치로 예열시킨다. 공정순환기체는 캐니스터 내부 건조가 완료될 때까지 온도변화를 반복하게 되는데 그

Table 2. Available gas for drying circulation

Characteristics	Helium	Neon	Argon	Krypton	Xenon	Radon
Density (g/l, 0℃, 1 atm)	0.17847	0.89994	1.78403	3.733	5.8811	9.73
Solubility (20℃, cm ³ /1,000 g Water)	8.61	10.5	33.6	59.4	108.1	230
Heat vaporization (cal/mol)	19.4	414	1,557.5	2,158	3,020	4,325
Specific heat (cal/mol/℃)	4.9680	4.9680	4.9680	4.9680	4.9680	4.9680
Thermal conductivity (0℃, 1atm cal/cm-sec-℃)	33.90×10 ⁻⁵	11.00×10 ⁻⁵	3.92×10 ⁻⁵	2.09×10 ⁻⁵	1.21×10 ⁻⁵	-

변화상태를 Fig. 4에 나타내었다. 공정순환기체가 초기온도 T1의 상태에서 냉각 및 제습장치를 지나며 냉각 응축되어 T3까지 떨어졌다가 예열장치를 통해 T3에서 T4까지 상승한 후에 캐니스터 내부로 유입되고, 유입된 공정순환기체는 사용후핵연료 자체발열에 의해 T4에서 T5까지 온도가 상승하는 온도변화 주기를 형성한다. 현재까지 수행된 연구사례에서 보면[1,4,8], 사용후핵연료 특성에 따라 캐니스터로부터 배출되는 공정순환기체는 약 100~190℃, 캐니스터로 인입되는 공정순환기체는 80~140℃ 범위가 될 것으로 예상된다. 향후 건조장치 상세설계 내용을 반영한 전산해석 결과로 구체화 할 예정이다.

6.3 공정순환기체 압력

캐니스터 내부 사용후핵연료 자체 발열과 공정기체 순환기의 가압에 의해 압력이 형성되며, 공정순환기체의 최대압력은 캐니스터 자체 설계압력 이하로 제한한다. 공정순환기체 압력으로 인하여 사용후핵연료 다발이나 캐니스터 내장품이 영향을 받아서는 안되며 과압력을 방지하기 위한 안전밸브나 보조탱크 등의 장치도 필요할 수 있다. 공정순환기체의 최소압력은 공정순환기체가 순환되지 않더라도 사용후핵연료 피복관이 사용후핵연료에서 발생하는 열에 의하여 피복관 온도제한치를 벗어나지 않는 정도의 순환량을 가지는 압력, 즉 건식저장을 위한 헬륨 충전 설계압력(Helium backfill pressure) 범위에 해당한다. 헬륨 충전압력은 KORAD-21 모델의 경우, 캐니스터 내부 헬륨 충전압력, 핵분열성가스, 봉내압 등에 의한 압력을 통합하여 계산된 최대압력은 정상조건에서 약 2 bar (약 29 psig) 정도이다[8]. 고연소도 사용후핵연료 저장모델인 Holtec International사의 MPC-37이나 MPC-89의 경우 헬륨 충전압력은 약 42~50 psig 범위로 하고 있다. 헬륨 기체의 압력이 낮을 수록 열전달률이 떨어지는 경향이 있으므로[9], 피복관의 온도급상승 방지를 위해 기체순환건조공정 초기 캐니스터 내부의 헬륨 압력을 헬륨 충전압력

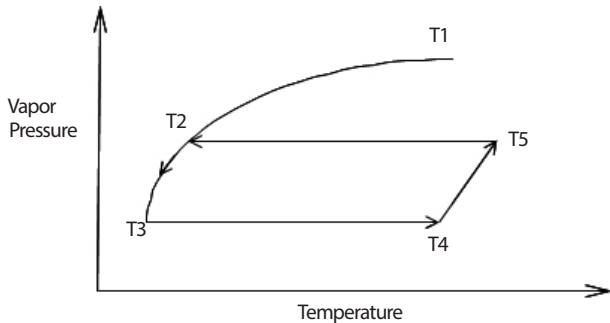


Fig. 4. Thermal cycling of circulated process gas.

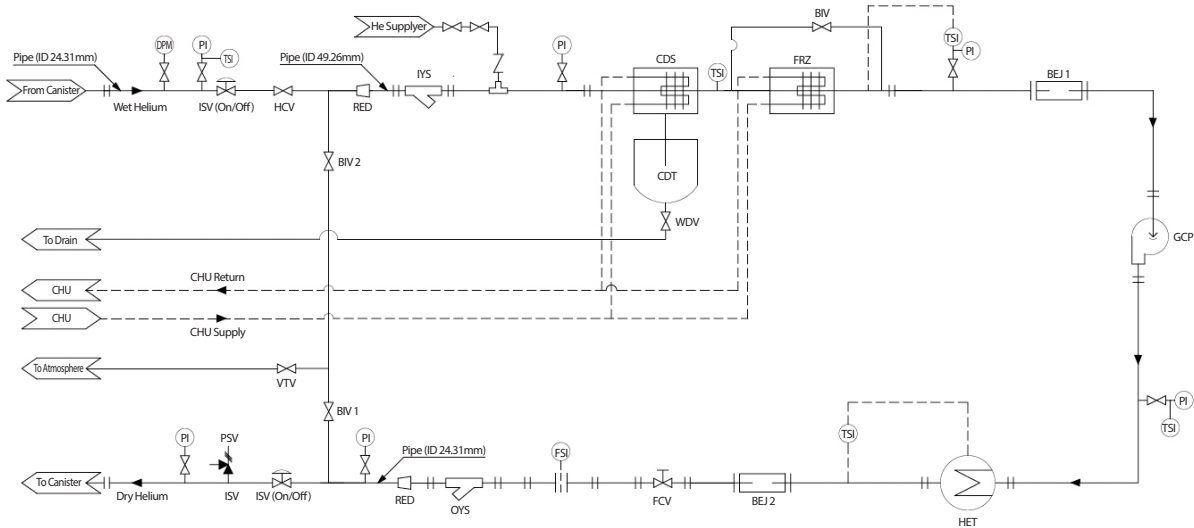


Fig. 5. Preliminary system design for the forced gas drying system.

이상으로 할 필요가 있으며 정량적 압력범위와 압력변화에 따른 경향성을 분석하여 향후 건조운전을 위한 자료로 활용할 것이다.

6.4 공정기체 순환유량

캐니스터 내부와 기체강제순환건조장치 내부를 순환하는 공정순환기체 유량의 결정은 캐니스터 내부를 포함하여 각 순환계통을 구성하는 장치 각각에 의한 전체 압력강하량을 고려하여 기체순환기의 순환유량을 결정 할 수 있다. 순환계통의 초기 헬륨 가압에 의해 일정압력이 유지된 상태에서 기체순환기의 토출압력에 의해 순환유량을 형성하도록 한다. 건조운전 이전에 헬륨 충전압력을 높이면 피복관 온도상승률이 낮아지는 경향이 있고, 건조공정기체유량이 클수록 건조속도가 빠를 것이므로, 온도제한 목표치 및 건조목표시간 등을 고려하여 건조기체순환유량을 적절하게 조절할 수 있도록 할 것이다.

7. 결론

원자력발전소내 습식저장중인 사용후핵연료의 건식저장을 위해서는 캐니스터 내부에 사용후핵연료를 옮겨 담은 이후, 건식저장용기내 내장품이나 사용후핵연료 피복관의 재료부식과 피복관 열화손상방지를 위해 모든 수분을 제거해야 한다. 캐니스터 내부의 수분을 제거하는데 사용될 수 있는 기체강제순환 건조시스템 개발을 위한 연구개발이 진행 중이며, 본 연구에서는 기체강제순환 건조시스템 설계, 제작을 위한 예비설계를 수행하였다. 예비설계에는 캐니스터 내부 잔존수분 제거를 위한 건조사례조사, 건조관련 규격이나 표준, 건조합격기준, 현장요구분석, 습식보관중인 건조대상 사용후핵연료 특성 조사분석을 포함하였다. 예비설계를 통하여 기체강제순환 건조시스템의 설계개념도와 P&ID를 도출하였다. ASTM C1553-16에 제시된 건조방법 및 건조합격기준을 표준으로 하여 수행한 기체강제순환건조장치의 기능 분석 및 설계변수 분석을 통해 도출한 건조시험장치를 Fig. 5에 도면으로 나타내었다. 후속적으로 사용후핵연료 특성에 따른 설계변수변화와 건조운전조건 설정을 위한 상세설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행중인 연구과제입니다 (No.20161720200930)

REFERENCES

- [1] National Assembly Research Service, “Issues and Tasks on Spent Nuclear Fuel Management Policy”, Pending Report 31-9735025-000637-14 (2017).
- [2] C.Y. Baeg and C.H. Cho, “Development of the Vacuum Drying Process for the PWR Spent Nuclear Fuel Dry Storage”, J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol., 14(4), 435-443 (2016).
- [3] C. Patterson, F. Garzarolli, R. Adamson, and K. Coleman, Dry Storage Handbook, Fuel Performance in Dry Storage, Advanced Nuclear Technology International (2015).
- [4] M. Greiner, “Development and Experimental Benchmark of Simulations to Predict Used Nuclear Fuel Cladding Temperatures during Drying and Transfer Operations”, CFP 12-3660, Nuclear Energy University Programs, U.S. DOE (2017).
- [5] Holtec International HI-STORM FW Cask System, USNRC Docket No.72-1032 License Revision Request(1032-0 R1), ML14262A070, U.S. NRC (2014).
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility”, NUREG-1536 Revision 1, U.S. NRC (2010).
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM), “Standard Guide for Drying Behavior of Spent Nuclear Fuel”, ASTM C1553-16 (2016).
- [8] Korea Radioactive Waste Agency, “Thermal Safety Analysis Report of Metal Storage System”, 14220-P1-N-TR-043 (2014).
- [9] M. Hadj-Nacer, T. Manzo, M. Ho, I. Graur, and M. Greiner, “Phenomena Affecting used nuclear fuel cladding temperatures during vacuum drying operations”, IHLRWM2015, April 12-16, 2015, Charleston, SC.