한국압력기기공학회 논문집
제12권 제1호 2016년 6월 pp. 78-84

ISSN 1738-8333
http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2016.12.1.078

소듐냉각고속로 잔열제거계통 강제대류 소듐-공기 열교환기의 구조개념 설계

김낙현†·이사용*·김성균*

Structural design concept of the forced-draft sodium-to-air heat exchanger in the decay heat removal system of PGSFR

Nak Hyun Kim†, Sa Yong Lee* and Sung Kyun Kim**

(Received 1 June 2016, Revised 17 June 2016, Accepted 27 June 2016)

ABSTRACT

The FHX (Forced-draft sodium-to-air Heat Exchanger) employed in the ADHRS (active decay heat removal system) is a shell-and-tube type counter-current flow heat exchanger with M-shape finned-tube arrangement. Liquid sodium flows inside the heat transfer tubes and atmospheric air flows over the finned tubes. The unit is placed in the upper region of the reactor building and has function of dumping the system heat load into the final heat sink, i.e., the atmosphere. Heat is transmitted from the primary cold sodium pool into the ADHRS sodium loop via DHX (decay heat exchanger), and a direct heat exchange occurs between the tube-side sodium and the shell-side air through the FHX tube wall. This paper describes the DHRS and the structural design of the FHX.

Key Words : PGSFR (소듐냉각고속로 원형로), DHRS (잔열제거계통), ADHRS (능동잔열제거계통), FHX (강제대류소듐-공기열교환기)

기호설명

ADHRS = active decay heat removal system
DHRS = decay heat removal system
DHX = decay heat exchanger
FHX = forced-draft sodium-to-air heat exchanger
IHTS = intermediate heat transport system
PDHRS = passive decay heat removal system
PGSFR = prototype Gen-IV sodium-cooled fast reactor
PHTS = primary heat transport system
SWRPRS = sodium-water reaction pressure relief system

† 회원, 한국원자력연구원
nhk@kaeri.re.kr
TEL : (042)866-6085 FAX : (042)868-2857
* 한국원자력연구원

1. 서 론

소듐냉각고속로 원형로(PGSFR)는 소듐을 원자로 냉각재로 사용하는 고속로이다.[1] 기존 가압경수로의 냉각재로 사용되는 물과는 달리 소듐은 운전온도에 비해 높은 비등점과 매우 우수한 열전달 특성을 가지고 있어 소듐냉각고속로 원형로는 자연대류를 활용하는 피동 냉각 기능을 극대화할 수 있으며, 대기압 수준에서 운전되므로, 사고 대처 안전설비가 단순하다.

소듐냉각고속로 원형로 원자로계통은 원자로냉각재 경계를 형성하는 일차열전달계통(PHTS)과 정상 및 사고 시 일차열전달계통을 보조하는 중간열전달계통(IHTS), 잔열제거계통(DHRS) 및 소듐-물 반응 압력완화계통(SWRPRS)으로 구성된다.

소듐냉각고속로 원형로는 원자로용기 내에 일차

열전달계통의 모든 주기기가 배치되는 풀 형 원자로이다. 즉, 핵연료 및 노심, 4대의 중간열교환기, 2대의 일차열전달계통 펌프가 원자로용기 내부에 설치된다. 주기기를 원자로용기 내에 설치함으로써 냉각재상실사고 가능성이 최소화되며, 원자로용기 내부의 원자로냉각재 재고량이 풍부하여 사고 시 과도특성이 완만하다.

잔열제거계통은 원자로용기 내부에 설치된 잔열열교환기(DHX)와 원자로건물 상부에 위치한 소듐-공기 열교환기 사이의 소듐 유동을 이용한다. 피동 잔열제거계통은 자연순환유동을 이용해 냉각기능을 수행하며, 능동 잔열제거계통은 송풍기의 강제순환유동을 활용한다.

능동 잔열제거계통의 강제대류 소듐-공기 열교환기는 고온배관으로부터 약 380°C의 소듐이 강제대류 소듐-공기 열교환기 상부 소듐 고온챔버로 유입된 후, 각각의 소듐 전열관으로 분배된다. 각각의 전열관으로 유입된 고온 소듐은 핀형 전열관 내부를 따라 아래방향으로 유동하면서 공기 교차유동에 의해 약 350°C로 냉각되어 하부 소듐 저온챔버로 들어가고 다시 루프의 저온배관으로 흐른다. 강제대류 소듐-공기 열교환기는 9Cr-1Mo-V로 제작되기 때문에 약 380°C의 소듐에 노출될 경우 금속온도가 375°C(700oF) 이상이므로 고온기기에 해당된다.[2] 또한, 강제대류 소듐-공기 열교환기는 300°C이상의 고온 소듐과 상온의 공기가 접촉하는 열교환기이므로 매우 큰 열응력이 발생할 수 있다. 따라서 이를 최대한 완화할 수 있는 구조개념이 설정되어야 한다. 본 논문은 이러한 점을 고려해 결정된 강제대류 소듐-공기 열교환기의 구조개념을 설명한다.

2. 계통 설명

2.1 잔열제거계통

잔열제거계통은 공학적안전계통 작동신호에 의해 잔열제거 작동신호가 발생한 경우나 운전원의 수동조작에 의해 잔열제거 운전이 개시된다. 잔열제거계통은 일차열전달계통을 고온정지운전이나 재장전운전이 가능한 상태에 도달할 때까지 잔열 열교환기(DHX)를 통해 전달된 노심의 잔열과 일차열전달계통의 현열을 제거하는 기능을 수행한다.[3]

잔열제거계통은 단일고장을 고려하여 모두 네 계열로 구성한다. 어떠한 출력준위에서 원자로가 정지되어도 두 계열을 이용해 일차열전달계통 펌프가 정지된 상태에서 72시간 이내에 원자로냉각재계통의 온도를 고온정지운전 온도까지 냉각시킬 수 있도록 설계한다.

잔열제거계통은 원자로냉각재경계를 유지하고 잔열을 제거하는 안전기능을 수행하므로 안전등급으로 설계한다. 발전소 수명기간 동안에 어떠한 형태의 설계기준 사고가 발생하더라도 원자로의 열을 안정적으로 최종 열침원인 대기 중으로 제거할 수 있도록 설계한다.

잔열제거계통은 다양성과 다중성 요건을 만족시키기 위해 피동 잔열제거계통 2계열, 능동 잔열제거계통 2계열의 총 4계열 잔열제거 루프로 구성되며 각 계열은 상호 독립적으로 배치 및 운전한다.

노심 붕괴열을 포함하는 일차열전달계통의 열제거를 위해 원자로용기 내 저온풀에 잔열 열교환기가 설치된다. 잔열 열교환기의 동축배관은 원자로 헤드를 관통해 잔열제거계통의 저온관 및 고온관에 연결되고 이는 원자로건물 상단에 위치한 소듐-공기열교환기로 연결된다. 이렇게 구성된 폐회로를 통해 전달된 일차열전달계통의 열은 소듐-공기열교환기와 연결된 공기굴뚝을 통해 최종 열침원인 대기 중으로 방출된다.

일차열전달계통의 방사화된 소듐은 잔열 열교환기에서 방사화되지 않은 소듐인 잔열제거계통 폐회로의 소듐과 물리적으로 분리된 상태에서 열교환을 수행하므로, 소듐-공기 열교환기에서의 소듐 누출이 발생하더라도 대기 중으로의 방사능 누출이 원천적으로 방지된다.

잔열제거계통은 다양성을 확보하고 공통모드고장(common mode failure)을 방지하기 위하여 피동 및 능동 잔열제거계통에 서로 다른 형태의 소듐-공기 열교환기가 도입된다. 피동 잔열제거계통에는 나선형 전열관을 다중열로 배치하는 개념의 자연대류 소듐-공기 열교환기(AHX), 능동 잔열제거계통에는 직관형 전열관에 핀이 부착된 강제대류 소듐-공기 열교환기(FHX)를 적용한다.

잔열제거계통의 소듐 냉각재는 발전소 수명기간 동안 수많은 온도 및 압력 과도를 겪게 된다. 배관 및 기기 내의 소듐 체적변화 및 이에 따른 압력변화를 수용하여 배관 및 기기의 건전성을 보호하기 위해 고온관 상부에 팽창탱크가 설치된다. 용기내부 자유액면 상부에 커버가스를 충전시켜 소듐의 체적변화에 따른 압력변화를 수용하도록 설계된다.

2.2 능동 잔열제거계통

능동 잔열제거계통은 독립된 2개의 계열로 구성된다. 각 계열은 잔열 열교환기 1대, 강제대류 소듐-공기 열교환기 1대, 고온관 최상부에 설치되는 팽창탱크 1대로 구성되며 강제대류 소듐-공기 열교환기는 입구의 송풍기 1대, 댐퍼 2대, 출구의 댐퍼 2대, 기기의 연결배관 및 계측기 등으로 구성한다.

능동 잔열제거계통은 능동형 기기인 송풍기를 사용하여 일차열전달계통의 열을 최종 열침원인 대기로 방출한다. 잔열 열교환기 쉘 측의 일차열전달계통 소듐으로부터 잔열 열교환기 전열관을 통해 열을 전달받은 잔열제거 루프의 소듐은 강제대류 소듐-공기 열교환기 전열관으로 이송되며 송풍기를 이용한 공기의 강제대류에 의해 냉각된 후 다시 잔열 열교환기로 순환되는 일련의 과정을 통해 계통 냉각기능을 수행한다.

능동 잔열제거계통의 유로는 잔열 열교환기 쉘 측 일차열전달계통 소듐 유로, 잔열열교환기 및 강제대류 소듐-공기 열교환기 전열관과 능동 잔열제거계통 배관으로 구성된 폐회로 소듐 유로, 강제대류 소듐-공기 열교환기 공기측과 공기굴뚝으로 이어지는 공기유로의 3 가지로 구성한다. 잔열 열교환기 쉘 측 일차열전달계통 소듐 유로에서는 잔열 열교환기 쉘 측 입/출구의 높이차와 소듐 밀도차에 따라 자연대류가 일어난다. 능동잔열제거계통 소듐의 로에서는 열원인 잔열 열교환기와 열침원인 강제대류 소듐-공기 열교환기 사이의 열중심 높이차와 소듐 밀도차에 따른 자연 순환에 의해 운전한다. 공기유로에서는 운전모드에 따라 송풍기에 의한 강제대류 또는 공기굴뚝의 높이와 공기 밀도차에 따라 자연대류에 의해 유동이 형성된다.

능동 잔열제거계통은 주증기/급수계통을 통한 정상 열제거 기능 상실에 따른 계통과도 시 72 시간 내에 원자로냉각재계통을 고온정지 상태로 냉각시키는 기능을 수행한다. 계획 정지 시에는 주증기/급수계통을 통한 정상 열제거를 통해 재장전운전 온도에 이른 원자로냉각재계통을 재장전운전 온도로 유지시키는 기능도 수행한다.

3. 기기 및 구조 설명

3.1 기기 설명

능동 잔열제거계통의 강제대류 소듐-공기 열교환기는 Fig. 1과 같이 능동 잔열제거계통 배관에 연결되어 일차열전달계통의 원자로용기 저온풀에 설치된 잔열 열교환기로부터 능동 잔열제거계통 배관으로 유입된 노심의 붕괴열을 최종 열침원인 공기로 제거하는 역할을 수행한다.

능동잔열제거계통 루프 소듐은 루프의 고온배관으로부터 약 380°C의 소듐이 강제대류 소듐-공기 열교환기 상부 소듐 고온챔버로 유입된 후, 각각의 소듐 전열관으로 분배된다. 각각의 전열관으로 유입된 고온 소듐은 핀형 전열관 내부를 따라 아래방향으로 유동하면서 공기 교차유동에 의해 약 350°C로 냉각되어 하부 소듐 저온챔버로 들어가고 다시 루프의 저온배관으로 흐른다.

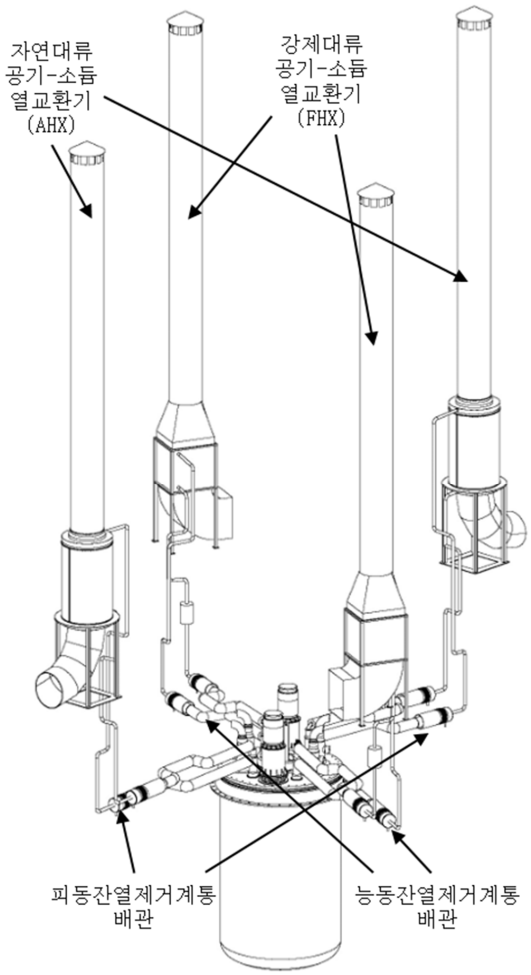

Fig. 1 Layout of pipes and components of residual heat removal system

공기 흡입구를 통해 유입된 외부 공기는 덕트를 따라 이동하여 강제대류 소듐-공기 열교환기 바닥면의 입구를 통해 쉘 측으로 유입되고 전열관 다발을 통과하며 전열관 측 소듐과 열교환으로 가열되고 윗면의 출구를 통해 공기굴뚝으로 빠져 나간다.

강제대류 소듐-공기 열교환기 쉘 측 출구는 공기굴뚝과 연결한다. 강제대류 소듐-공기 열교환기는 다양성을 고려하여 자연대류 소듐-공기 열교환기와 달리, 핀이 부착된 전열관을 사용한다. 핀형 전열관은 공기와의 접촉 면적을 극대화할 수 있으며, 과도운전 시 고온 소듐 유입에 의한 급격한 전열관 다발의 열팽창 및 수축 현상을 수용할 수 있도록 중간에 곡관부를 갖는 구조로 설계한다.

강제대류 소듐-공기 열교환기는 대향류 방식의 열교환 기로서 열교환기 상부 및 하부에 설치되는 수평 원통형 소듐챔버에 전열관을 연결한다. 3개의 전열관은 하나의 다발을 구성하며 가운데 전열관은 나머지 전열관 대비 1/2 피치만큼 수평으로 이동되어 엇갈림 배열을 갖게 된다. 이 다발이 다중으로 수평 배치되어 총 전열관 수는 3의 배수가 된다. 각 전열관은 수평대비 약 7~9도의 경사를 가지고 공기유동에 직교하도록 배치되며, 곡관부가 3회인 M자 형태를 갖는다. 공기 유로 외부는 각종 계측장비를 설치한다. 챔버에는 소듐의 고화방지를 위한 가열설비를 설치한다.

강제대류 소듐-공기 열교환기기 지지구조물은 배기구를 포함한 강제대류 소듐-공기 열교환기의 모든 자중을 지지한다. 지지구조물과 전열관지지판은 용접되며, 열교환기 장착볼트를 이용하여 원자로건물 바닥에 고정한다.

전열관집합체의 수평지지는 송풍기를 통해 불어오는 강제 공기유동에 의한 전열관의 유동기인진동을 방지하기 위해 필요하다. 전열관의 수평지지를 위해 2개의 전열관지지판을 배치하였다. 동일열에 있는 전열관은 전열관 관통홀을 갖고 있는 두 개의 전열관 지지판 스트랩에 의해 고정된다. 전열관지지판은 공기유로의 역할도 수행한다. 소듐-공기 열교환기의 유지보수성을 고려동안내판 및 공기유입/유출덕트에 볼트체결을 이용한 장·탈착 개념을 적용한다. 유지보수 시 체결볼트만 풀면 쉽게 분리되어 유지보수 및 가동중검사가 가능하도록 설계한다.

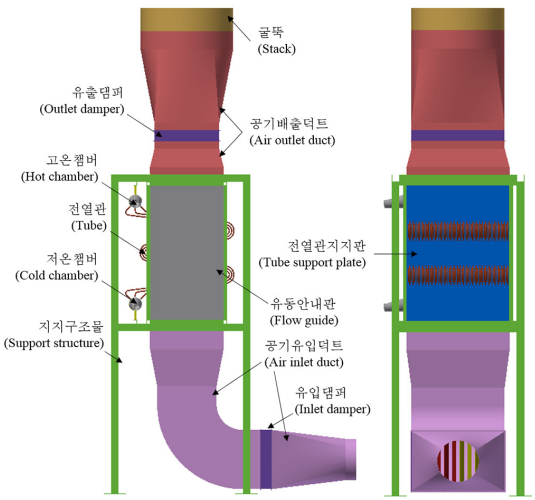

Fig. 2 Geometry and name of sodium-air heat exchanger

3.2 구조 설명

강제대류 소듐-공기 열교환기는 소듐-공기 열교환기 중 능동형 열교환기로 핵연료교환 및 트립사고 시 원자로 정지 후 발생되는 잔열을 송풍기를 통해 외부공기를 강제송풍하여 일차계통의 축적열과 노심잔열을 제거하는 열교환기이다. Fig. 2는 강제대류 소듐-공기 열교환기 구조 설명을 위한 개념도를 나타내고 있다.

3.2.1 전열관

강제대류 소듐-공기 열교환기의 전열관은 M자 형태이며 전열관에는 열교환 면적을 증가시키기 위한 원판형 핀을 일정한 간격으로 용접한다. 전열관의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. ASME B&PV Sec.III

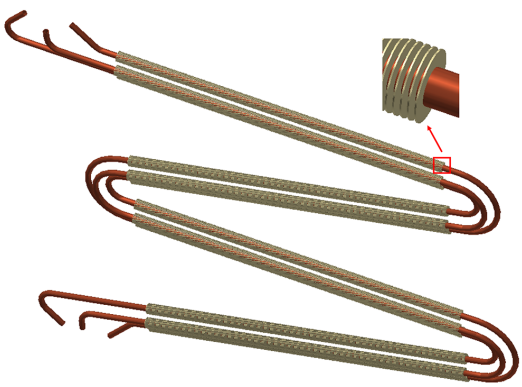

Fig. 3 Heat exchange tube

NH에는 압력기기의 최소 벽두께를 계산하는 별도의 규정이 없으므로 전열관의 최소 두께는 ASME B&PV Sec. III NB-3640(4)에 따라서 계산하였다. 이때 허용응력강도(Sm)대신 시간의존 허용응력강도(Smt)를 적용하여 고온설계 특성을 반영하였다. 전열관의 두께는 계산된 최소 두께대비 충분한 여유도를 갖도록 설계한다. 전열관은 수평대비 약 7~9도의 경사를 가지고 일정한 수직, 수평간격으로 공기유동에 직교하도록 배치한다.

3.2.2 전열관지지판

강제대류 소듐-공기 열교환기의 M자 전열관 지지와 외부공기 유동안내를 위해 Fig. 4와 같이 전열관의 길이 방향으로 2개의 전열관지지판(tube support plate)을 배치하였다. 전열관지지판의 두께는 전열관을 지지하고 강성을 충분히 확보할 수 있도록 설계하였다. 전열관이 모든 전열관지지판 관통부에서 지지 및 고정될 경우 열팽창에 의한 응력이 매우 크게 발생할 수 있다. 따라서 전열관의 열팽창을 최대한 허용할 수 있도록 전열관은 일부 관통부에서만 지지한다. 전열관을 지지하지 않는 관통부는 전열관 외경보다 크고 전열관 중심과 동심원인 구멍을 배치하여 전열관을 구속하지 않도록 하였다. 전열관을 지지하는 관통부의 전열관지지판에는 전열관 외경보다 크고 전열관 하부면과 접하는 구멍을 배치하여 자중은 지지하고, 전열관의 축방향 열팽창은 허용할 수 있도록 하였다. 전열관과 전열관지지판사이 공간은 연성재질로 밀봉하여 의도치 않은 공기 유출을 최대한 방지한다. 전열관과 전열관지지판의 마모는 마모방지 코팅 등으로 해결한다.

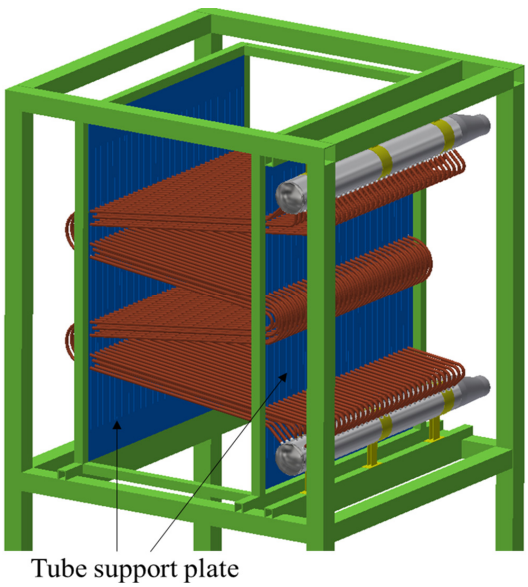

Fig. 4 Layout of heat exchange tube support plate

3.2.3 챔버

강제대류 소듐-공기 열교환기 지지구조물 상부에는 고온 소듐이 채워지는 고온챔버가 사각형강에 고정되며, 하부에는 저온 소듐이 채워지는 저온챔버가 고정된다. 고온 및 저온챔버의 배치와 고정방법을 Fig. 5에 나타내었다. 고온챔버와 저온챔버 모두 잔열제거계통 배관 노즐과 가까운 챔버지지구조물(chamber support)은 배관에서 작용하는 하중을 충분히 지지할 수 있도록 사각형강에 용접되어 고정되며 이외의 챔버지지구조물은 챔버의 축방향 열팽창을 허용하기 위하여 축방향으로 슬라이딩 할 수 있도록 고정한다. 챔버에는 수압확관 방법을 통한 전열관 연결이 불가능하므로 Fig. 5와 같이 스피곳(spigot)을 제작하여 전열관과 용접하여 연결하도록 설계하였다. 스피곳은 용접형태의 헤더를 적용하며 챔버의 중심을 기준으로 대칭하여 45°, 90°, 135° 방향으로 배치하였다. 챔버 헤드와 노즐을 포함한 총 길이는 약 3.5 m 이다.

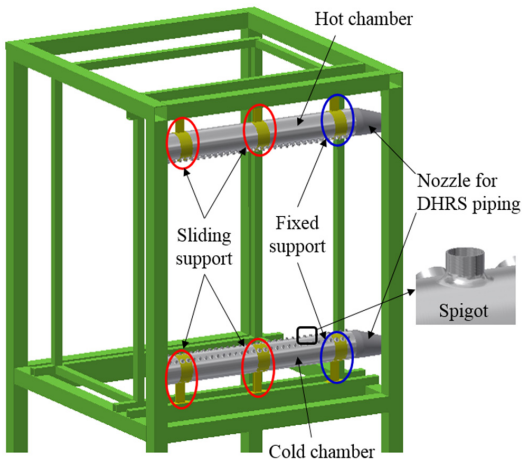

Fig. 5 Layout of chamber and fixing method

3.2.4 공기유입/유출댐퍼

공기 유입부에 장착되는 댐퍼는 엇갈림(opposed) 블레이드 형 댐퍼 2개가 병렬로 설치되며, 출구부에는 병렬(parallel) 블레이드 형 댐퍼 2개가 병렬로 설

치된다(5). 댐퍼의 대략적인 위치는 Fig. 2에 나타내었다. 댐퍼 1개당 액추에이터를 1개씩 설치한다.

3.2.5 공기유입/유출덕트

공기 유입덕트는 송풍기와 유입댐퍼를 연결하는 덕트, 유입댐퍼와 열교환부를 연결하는 덕트로 구성된다. 송풍기에서 유입댐퍼를 연결하는 덕트는 원형인 송풍기 단면에서 사각형인 유입댐퍼 단면으로 단면형상을 변형하는 역할을 한다. 유입댐퍼에서 열교환부를 연결하는 덕트는 유입댐퍼 단면을 열교환 단면으로 단면형상을 변경하는 역할을 한다. 유출덕트는 열교환부와 유출댐퍼를 연결하는 덕트, 유출댐퍼와 굴뚝을 연결하는 덕트로 구성한다. 열교환부와 유출댐퍼를 연결하는 덕트는 열교환 단면을 유출댐퍼 단면으로 단면형상을 변경하는 역할을 한다. 유출댐퍼와 굴뚝을 연결하는 덕트는 유출댐퍼 단면을 굴뚝 단면으로 단면형상을 변경하는 역할을 한다. Fig. 2의 최상단 유출덕트 위에는 굴뚝이 위치한다. 모든 덕트는 플랜지에 볼트로 체결되어 유지보수 시 분리 할 수 있다.

3.2.6 굴뚝

굴뚝은 내경 2500 mm, 높이 30 m 로 설계한다. 굴뚝은 강제대류 소듐-공기 열교환기의 지지구조물에만 고정되지 않고 건물에 연결되는 지지구조물로 자중을 지지한다.

3.2.7 송풍기

강제대류 소듐-공기 열교환기에는 직동식 베인 축류형 송풍기(variable air volume vane axial fans)를 적용한다. 송풍기 요건이 결정되면 요건에 맞는 상용품을 적용한다.

3.2.8 지지구조물

지지구조물은 굴뚝, 전열관집합체, 전열관지지판, 챔버 및 내부 소듐 등의 자중을 지지하는 구조물이다. 사각봉을 용접하여 제작하며 구조물 자중뿐만 아니라 지진하중과 같은 외부하중에 충분히 견딜 수 있도록 설계한다. 지지구조물 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 덕트과 유동안내판은 지지구조물에 볼트로 체결하여 전열관 집합체 유지보수 시 볼트를 풀어 전열관 집합체에 접근할 수 있도록 하였다.

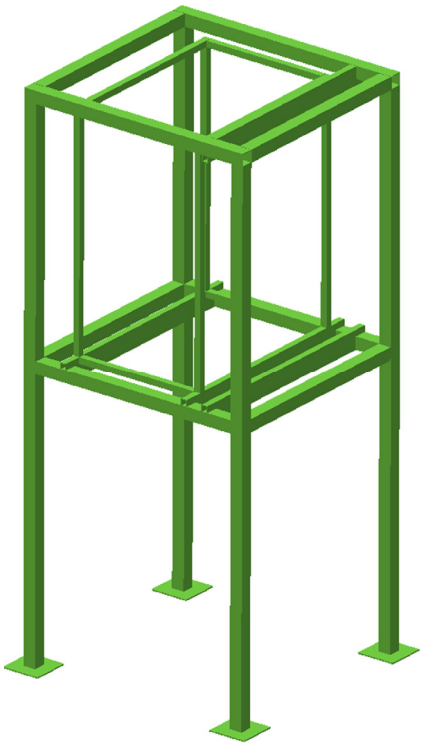

Fig. 6 Geometry of support structure

4. 결 론

본 논문은 소듐냉각고속로 원형로 잔열제거계통과 능동 잔열제거계통에 대해 설명하였고, 능동 잔열제거계통의 강제대류 소듐-공기 열교환기의 구조설계에 대해 기술하였다.

잔열제거계통은 일차열전달계통을 고온정지운전이나 재장전운전이 가능한 상태에 도달할 때까지 잔열열교환기를 통해 전달된 노심의 잔열과 일차열전달계통의 현열을 제거하는 기능을 수행한다.

능동 잔열제거계통은 독립된 2개의 계열로 구성한다. 각 계열은 잔열열교환기 1대, 강제대류 소듐-공기 열교환기 1대, 고온관 최상부에 설치되는 팽창탱크 1대로 구성되며 강제대류 소듐-공기열교환는 입구의 송풍기 1대, 강제대류소듐-공기열교환기 입구의 댐퍼 2대, 강제대류소듐-공기열교환기 출구의 댐퍼 2대로 구성하였다. 능동 잔열제거계통은 능동형 기기인 송풍기를 사용하여 일차열전달계통의 열을 최종 열침원인 대기로 방출한다.

능동 잔열제거계통의 강제대류 소듐-공기 열교환

기는 능동 잔열제거계통 배관에 연결되어 일차열전달계통의 원자로용기 저온풀에 설치된 잔열 열교환기로부터 능동 잔열제거계통 배관으로 유입된 노심의 붕괴열을 최종 열침원인 공기로 제거하는 역할을 수행하도록 설계하였다. 강제대류 소듐-공기 열교환기는 전열관, 전열관지지판, 챔버, 댐퍼, 덕트, 굴뚝, 송풍기 및 지지구조물 등으로 구성한다.

설계가 완료된 강제대류 소듐-공기 열교환기는 설계코드에[2,6] 따라 평가를 수행하고 평가결과를 바탕으로 설계를 보완할 예정이다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Kim, Y. I., Chang, J., Lee, Y. B., Lee, C. B. and Hahn, D., 2013, "Status of SFR Development in Korea," *Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13),* Paris, France.

(2) ASME, 2013, "Rules for construction of nuclear facility components," *ASME B&PV Sec. III,* Div.5, 2013ed.

(3) Kim, D., Eoh, J. H. and Lee, T. H., 2013, "ADecay Heat Removal System Design of the Prototype Sodium-cooled Fast Reactor," *Trans. of KNS Autumn Meet*, Gyeongju, Korea.

(4) ASME, 2013, "Rules for construction of nuclear facility components," *ASME B&PV Sec. III,* Div.1, Sub. NB, 2013ed.

(5) Kim, D., and Lee, T.H., 2014, "Air Damper Sizing for the Decay Heat Removal System of the PGSFR," *Trans. of KNS Autumn Meet.*, Pyeongchang, Korea.

(6) ASME, "Rules for construction of nuclear facility components," *ASME B&PV Sec.III,* Div. 1, Sub. NF, 2013ed.