

## 일체형원자로 주냉각재펌프 설계기술개발

# Design Technology Development of the Main Coolant Pump for an Integral Reactor

박진석, 이재선, 김민환, 김동욱, 김종인  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

국내의 상용 원자력발전소에서 사용하는 원자로 냉각재펌프는 모두 수입되었기 때문에 국내에서는 원자로 냉각재펌프 설계에 관한 설계기술이 축적되어 있지 않았으며, 지금에 이르러 원자로 냉각재펌프 국산화 기반기술 개발을 시작하고 있다. 이러한 시점에서 국내 원자력법령의 원자로시설규칙에 준하여 일체형원자로 주냉각재펌프 설계기술개발을 수행한 것은 일차냉각재 계통에 사용될 펌프 설계를 위한 국내의 기반기술력을 향상시킬 수 있는 계기를 제공하였다고 할 수 있다. 일체형원자로 계통에서 요구하는 제한조건을 모두 수용하여 캔드모터 형 직립식 축류펌프로 작동하는 주냉각재펌프를 설계하였다. 전동기의 회전축과 임펠러의 회전축이 일체이며, 회전축에 별도의 플라이휠이 부착되지 않는 주냉각재펌프로서 전원상실 사고시 관성서행시간이 짧은 특성을 가진다.

### Abstract

All of the reactor coolant pump currently used in commercial nuclear power plant were imported from foreign country. Now, the developing program of design technology for the reactor coolant pump will be started in a few future by domestic researchers. At this stage, the design technology of the main coolant pump for an integral reactor is developed based on the regulation of domestic nuclear power plant facilities. The main coolant pump is a canned motor axial pump, which accommodates all constraints required from the integral reactor system. The main coolant pump does not have mechanical seal device because the rotor of motor and the shaft of impeller are the same one. There is no flywheel on the rotating shaft of main coolant pump so that the coastdown duration time is short when the electricity supply is cut off.

## 1. 서론

주냉각재펌프는 캔드모터형 축류펌프로서 원자로 환형덮개에 직립으로 2대가 설치된다. 전동기의 회전축과 임펠러의 회전축은 일체로서 일차냉각재에 잠긴 상태에서 운전되므로 누수 방지를 위한 기계적 밀봉장치가 불필요하여 밀봉장치의 손상으로 인한 소형냉각재 상실사고가 근원적으로 배제된다. 주냉각재펌프는 그림 1과 같이 상부덮개, 플랜지, 전동기, 냉각기, 회전축집합체, 유로안내관, 역류방지장치, 회전속도측정기 등으로 구성되어 있다.<sup>1~10)</sup> 일차냉각재의 압력경계는 환형덮개에 설치된 펌프노즐과 주냉각재펌프의 플랜지 및 상부덮개와 냉각기의 튜브로 구성되며 나머지 부분은 펌프노즐에 삽입되어 일차냉각재에 잠긴 상태에서 운전된다. 임펠러의 회전속도는 일차냉각재의 유량을 간접적으로 측정하는 안전등급 신호이기 때문에 회전속도측정기에 의해서 물리적 전기적으로 독립된 4채널의 신호가 제공된다. 역류방지장치는 2대의 주냉각재펌프가 운전하다 1대의 펌프가 정지되었을 때 정지된 주냉각재펌프의 유로를 통하여 원자로냉각재가 역류되는 것을 방지하기 위하여 주냉각재펌프 토출구에 설치된다. 역류방지장치는 원자로 정상출력운전 시 항상 열려 있으며, 역류가 발생하면 자동으로 닫히는 구조이다. 주냉각재펌프의 회전축에는 별도의 관성바퀴(flywheel)를 부착되지 않기 때문에 관성서행(coastdown) 시간이 짧아서 전원이 상실될 경우 원자로 냉각재 유량이 급격히 감소하는 특성이 있으나, 큰 음의 반응도계수를 갖는 일체형원자로이기 때문에 안전해석 결과로 임계열속비(critical heat flux ratio)가 허용기준 이내에 있음을 보일 것이다.

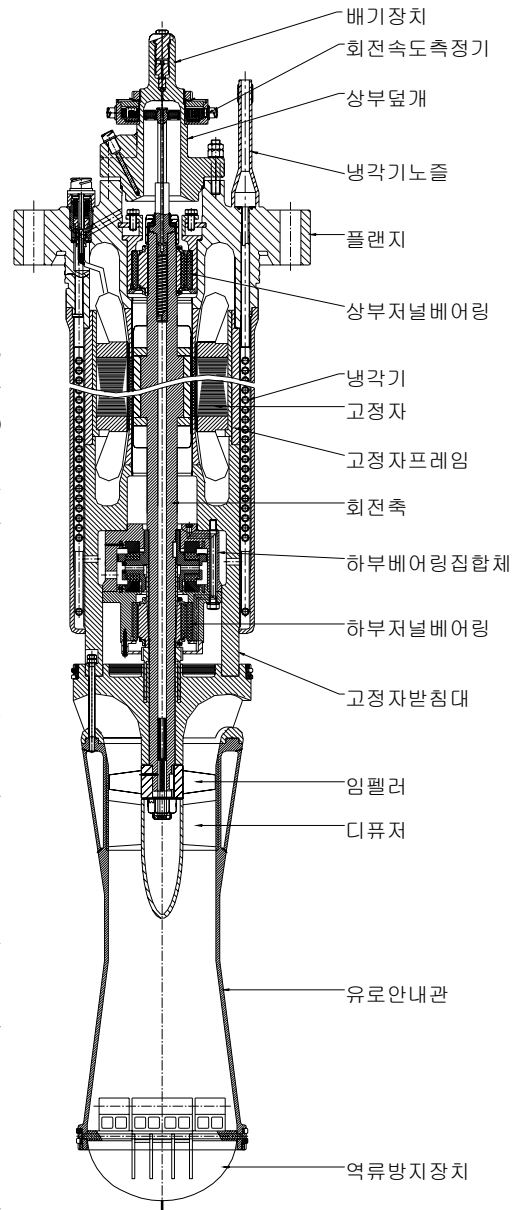


그림 1. 주냉각재펌프의 형상

## 2. 설계 관련 규정

일체형원자로의 환형덮개에 설치되는 주냉각재펌프는 일차냉각재 압력경계를 이루는 부

품으로 구성되어있다. 압력경계 부품은 국내 원자력법령 원자로시설규칙 제21조에 준하여 설계한다. 주냉각재펌프 압력경계를 이루는 부품들은 모두 KEPIC에서 규정하는 재료들을 적용하고 있다. 상용원자로 냉각재펌프는 회전축에 플라이휠이 장착되어 있기 때문에 국내 원자력법령 원자로시설규칙 제15조에 준하여 설계하여야 하지만, 일체형원자로 주냉각재펌프의 회전축은 압력경계 내부에서 회전하고 별도의 플라이휠이 없다. 따라서 이 규칙을 따르지 않아도 된다. 주냉각재펌프 상단에 설치된 회전속도측정기 센서에서 측정되는 회전속도는 노심보호계통용 신호로서 원자력법령 원자력시설규칙 제21조에 준하여 4 채널(channel)이 전기적 및 물리적으로 독립되도록 설계하여야 한다.

표 1. 주냉각재펌프 설계를 위한 적용 규정

미국	한국	평가항목
10 CFR 50 Appendix A	원자력법령/ 원자로시설규칙	
GDC 4	제15조	내환경 및 비산물 설계기준
GDC 14	제21조	원자로 냉각재 압력경계
GDC 22	제26조	보호계통의 독립성
GDC 32	제21조	원자로 냉각재 압력경계에 대한 검사

### 3. 주냉각재펌프 설계사양 및 일반배치

주냉각재펌프는 원자로가 정상운전동안 원자로 노심으로부터 발생하는 열을 적절하게 제거하기 위하여 원자로 냉각재계에 충분한 강제유량을 제공하여야 한다. 유량은 원자로 출력의 크기에 의해서 결정되고, 강제유량을 제공하기 위하여 요구되는 수두는 원자로 내부계통을 순환하는 원자로 냉각재의 유동으로 발생하는 수력학 손실에 의해서 결정된다. 펌프의 유량과 수두에 의해서 전동기의 축동력이 결정된다. 전동기의 축동력과 더불어 전동기의 회전속도는 전동기 크기와 임펠러 크기를 결정하는 중요한 변수이다. 따라서 원자로의 크기를 고려하여 적합한 전동기의 회전수를 결정하여야 한다. 그림 2는 주냉각재펌프 설계기술개발 절차를 보여주고 있다.

전동기의 축동력은 전동기의 회전토크×회전속도로 표시되며, 전동기의 크기를 결정하는 변수이다. 전동기의 회전토크는 고온의 일차냉각재를 고속으로 펌핑할 수 있는 회전토크를 임펠러에 전달할 수 있어야 하며, 펌프의 수두와 유량에 의해서 결정된다. 전동기의 회전속도는 전동기에 공급되는 전원주파수와 전동기 극수에 따라 결정되는 값이다. 일반적으로 전동기의 축동력이 일정할 때 회전속도가 낮아지면 회전토크는 증가한다. 회전토크의 증가는 회전축의 직경을 증가시킨다. 따라서 전동기의 회전속도는 전동기의 크기 제한에 따라 적절히 결정하여야 한다. 전동기의 회전속도는 전원 주파수와 전동기 극수에 좌우되며, 60Hz 전원 주파수와 2극인 전동기인 경우에 전동기의 회전속도는 3600 rpm 이

다. 일체형원자로 계통에서 요구되는 고유량 및 저수두의 성능을 내는 펌프로는 비속도가 큰 축류펌프가 적합하다. 임펠러 익형 형상은 캐비테이션을 최소화 할 수 있고 유동의 박리(separation)에 따른 실속(stall) 현상의 발생 가능성이 일반 익형보다 적은 DCA(double circular arc)가 적합하다. 임펠러 허브의 직경은 전동기 축직경의 크기에 비례한다. 따라서 익형 외경은 전동기 축직경의 크기에 비례한다고 할 수 있다.

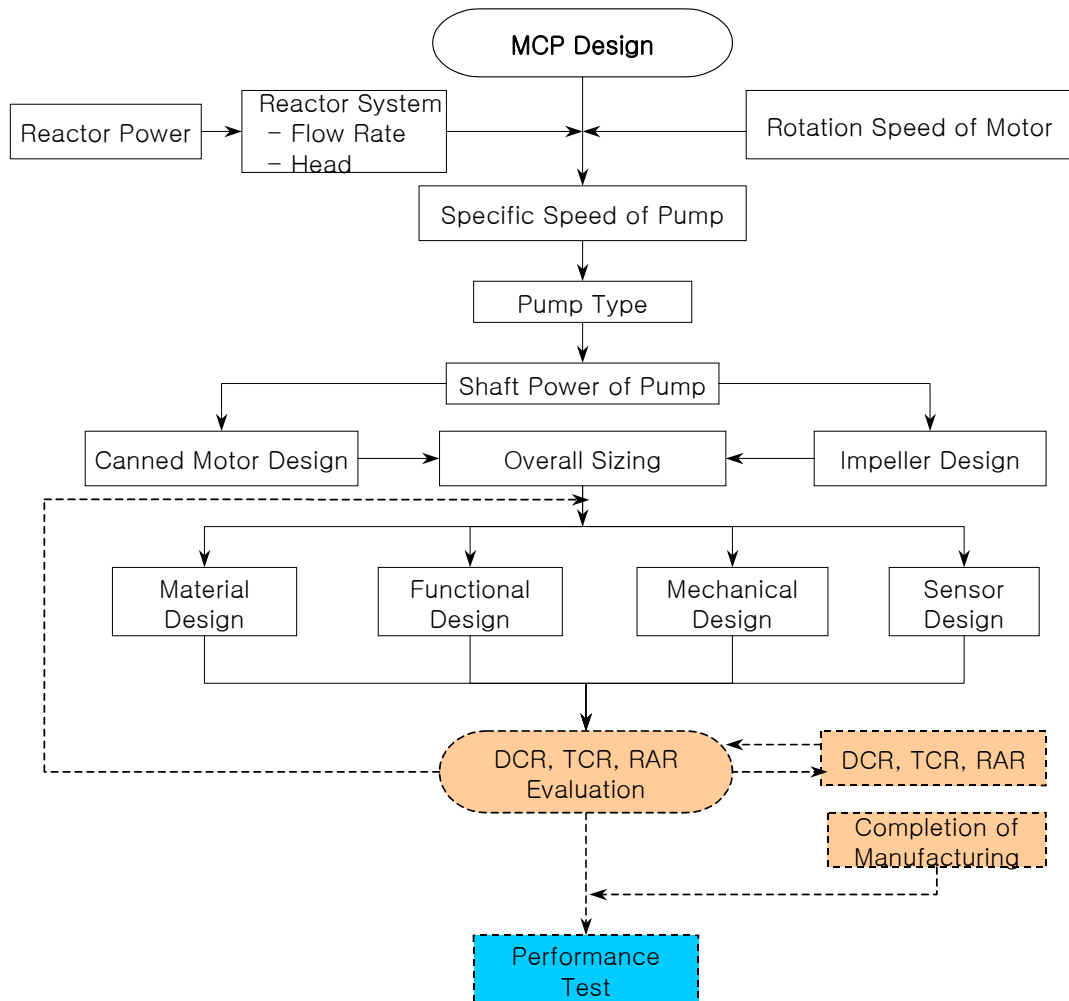


그림 2. 주냉각재펌프 설계기술개발 절차

#### 4. 재질선정

주냉각재펌프 재질은 고온에서의 내부식성, 강도, 기능성을 고려하여 선정하였다. 상부덮개 및 플랜지와 같이 압력경계 부품으로는 고온 고압에서 내부식성이 우수한 STS 321을

사용하였다. 유체를 펌핑하는 임펠러의 회전축과 캔드모터의 회전자는 일체로서 전자기 특성이 우수하면서 기계적 강도를 가지는 STS 430을 회전축의 재질로 사용하였다. 펌프 내부에 고정되는 베어링 하우징을 체결하는 스테드는 일차냉각수와 직접 접촉하기 때문에 강도와 내부식성을 가져야 하며, 스테드 체결시 STS321 재질과 마찰력이 적은 Incoloy 925를 사용하였다. 플랜지 체결용으로 사용하는 스테드는 주냉각재펌프 외부에서 사용되기 때문에 내부에 사용되는 스테드에 비해 내부식성 보다는 고강도 재질인 ASTM A540 B24 Class3을 사용하였다. 그러나 주냉각재펌프 외부 습도를 고려할 때 스테드 표면에 도금하여 부식을 방지하여야 한다. 고온 고압에서 내마모성이 요구되는 베어링의 재질은 SiC30을 사용하였다. 주냉각재펌프 내부 일차냉각수 누수를 방지하기 위한 패킹 재질로는 구리와 STS304L을 사용한다. 상부덮개와 플랜지사이의 누수를 방지하는 패킹의 재질은 구리(Cu)이며, 플랜지와 펌프 노즐사이의 누수를 방지하는 환형밀봉링의 재질은 STS304L로서 STS321보다 상대적으로 강도가 약하기 때문에 STS321과 접촉하면 STS304L의 표면에 탄성변형이 생기면서 누수를 방지한다. 전자기 특성이 우수한 SE15C를 고정자 철심으로 사용하였으며, 철심의 권선은 구리선에 유리섬유(glass fiber)를 편조하고 불소수지를 도포하여 220℃의 작동 온도에서도 사용할 수 있는 내열성이 우수한 것을 사용하였다. 고정자 밀봉캔은 내부식성이 강하고 전자기 특성이 우수한 Nimonic 75를 사용하였다.

표 2 주냉각재펌프 부품 재질

순번	재질	MCP 부품	기타
1	STS321	플랜지, 프레임, 상부덮개 유로안내체, 냉각기, 로터밀봉캔	고온 고압용 내부 식성 재질
2	STS430	회전자	전자기 특성 및 강도
3	Incoloy 925	펌프 내부 체결볼트 및 스테드 냉각재 우회류 제한 분할링	내부식성 강도 및 STS321과 anti-friction
4	ASTM A540 B24 Class3	플랜지 체결스테드 및 볼트	고강도
5	SiC30	베어링	고온 고압용 내마모성
6	SE15C	고정자 철심	우수한 전자기 특성
7	Nimonic 75	고정자 밀봉캔	내부식성
8	STS316L	고정자 밀봉캔	내부식성
9	Cu	펌프 패킹	내부식성 패킹
10	Glass Fiber Teflon 피복동선	고정자 권선	내열 동선
11	Glass Fiber Epoxy	고정자 썬기	내압 충전재
12	NdFeB N33UH	회전속도 측정기	내열자석
13	STS304L	환형밀봉링	내부식성, STS321 보다 저강도

## 5. 계통설계

### 5.1 가스제거 통로

원자로 운전 모드의 변화는 원자로 내부의 온도와 압력의 변화를 초래하여 질소( $N_2$ ) 가스의 용해도를 변화시킨다. 질소 가스의 용해도 변화로 인하여 원자로 냉각재에 용해되어 있는 질소 가스가 원자로 내부에 발생할 수 있으며, 발생한 가스는 원자로 내부구조물 중에서 가장 높은 위치인 주냉각재펌프 상단에 포집된다. 주냉각재펌프 상단에 가스 포집량이 증가되면 상부 저널베어링이 가스에 노출되어 냉각재의 윤활없이 건조마찰(dry friction) 운동을 하게 되어 저널베어링의 수명에 치명적으로 나쁜 영향을 줄 수 있다. 따라서 펌프 상부공동에 포집되는 가스를 제거하기 위한 가스제거유로가 캔드모터의 냉각을 위한 독립순환유로와 함께 보조임펠러에 병렬로 연결되어 있다.

그림 3은 주냉각재펌프 내부순환 유로와 가스제거 통로를 나타낸 것이다. 내부순환 유로에서 보조임펠러를 통과한 냉각재는 하부베어링하우징과 고정자 받침대에 뚫린 반경방향의 구멍들을 통하여 냉각기로 공급된다. 냉각재는 냉각기와 열교환에 의해 냉각되고, 상부 플랜지에서 제공하는 유로구멍을 통하여 펌프상부공동으로 유입된다. 펌프상부공동에서 상부저널베어링의 틈새를 지난 냉각재는 상부 회전자실을 지나고 고정자와 회전자의 간극을 통해 하부 회전자실로 공급된다. 하부 회전자실에서 하부베어링하우징에 연결된 내부순환연결통로를 지나고 하부저널베어링의 틈새를 통과한 냉각재는 보조임펠러로 다시 유입되어 계속 순환된다.

가스제거유로에서는 펌프상부공동으로 유입된 냉각재의 일부가 영구자석이 부착된 회전축 끝에서 가스와 함께 가스제거통로로 유입되고, 회전축 하단에 부착된 임펠러의 허브에 뚫린 가스배출구멍으로 원자로 내부로 보내어진다. 가스제거유로로 배출된 양만큼의 냉각재가 유로안내체와 회전축 사이에 존재하는 틈새를 통하여 펌프 내부로 유입되고, 펌프하

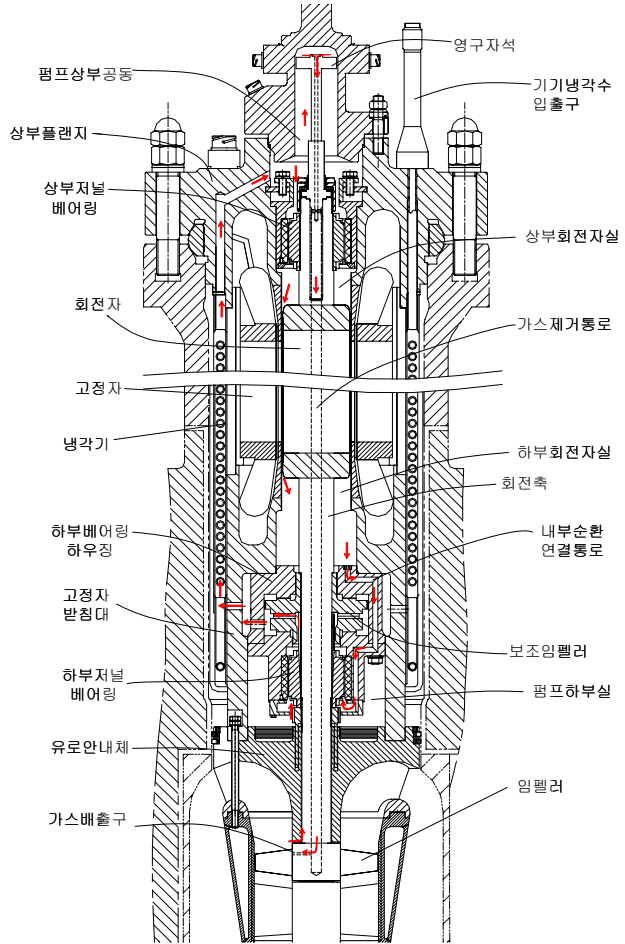


그림 3. 주냉각재펌프 내부 가스제거 통로

부실을 통하여 내부순환 냉각재와 합류하여 보조임펠러로 들어간다.

## 5.2 감시계통

주냉각재펌프 운전중 건전성을 감시하는 설비는 전류센서, 회전속도 측정기, 진동센서, 온도 등이 있으며, 설치 위치는 그림 4와 같다. 캔드모터의 입력단에서 측정된 전류가 정상조건에서 측정되는 전류값 보다 20%가 증가할 때 경보가 발생하며, 운전원은 경보가 발생하면 일련의 조치를 한다. 회전속도 측정기에서 측정되는 펌프의 회전속도가 요구된 운전속도의 20% 이하로 감소할 때 원자로 정지신호가 발생한다. 플랜지 상단에 설치된 3개의 가속도계에서 x, y, z 방향의 펌프진동을 감시하며, 펌프 상단에 부착된 열전대에서 펌프 내부의 온도를 감시하고, 펌프 냉각기의 출구에서 기기냉각수 온도를 감시한다. 비정상 펌프진동, 펌프내부의 온도상승, 기기냉각수 출구 온도상승 등과 같은 비정상 상태에 해당하는 신호가 발생하면 주냉각재펌프 운전을 제한하며 운전제한 조건은 추후에 결정될 예정이다.

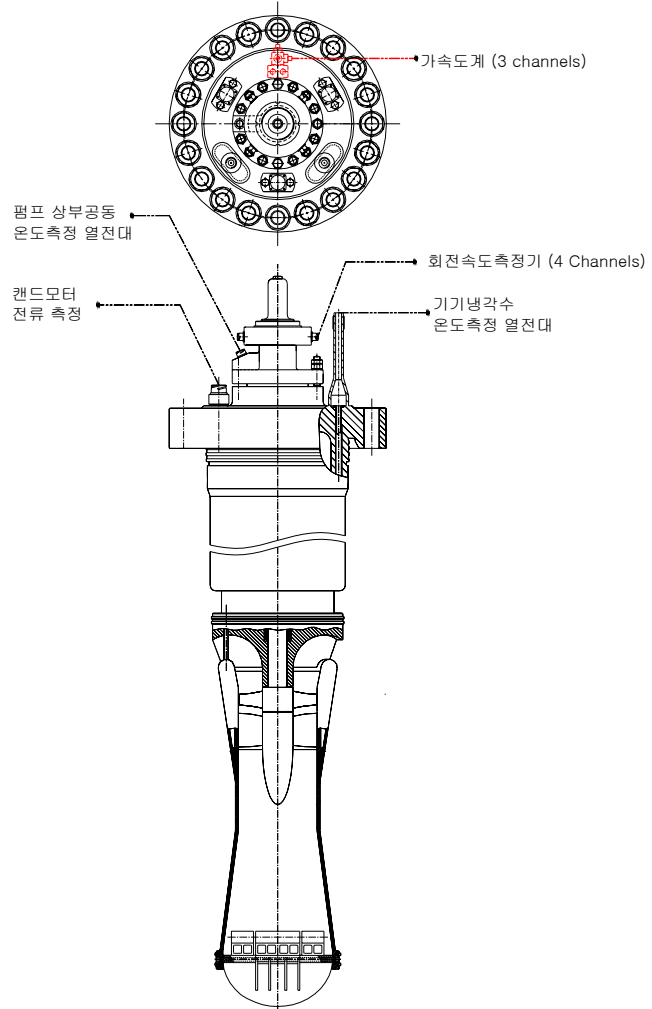


그림 4. 주냉각재펌프 감시계통을 위한 센서 위치

## 6. 기계설계

### 6.1 구조설계

주냉각재펌프의 상부덮개 및 플랜지는 ANSI/ANS 51.1의 안전등급 1등급으로 분류되며, 일차계통의 압력경계에 해당하는 부품은 설계등급 1등급 기기로 분류되어 ASME Section III NB 혹은 KEPIC MNB의 요건을 만족해야 한다. 품질등급은 Reg. Guide 1.26에 따라 1등급으로 분류하고 ASME NQA를 준용한다. 주냉각재펌프는 ASME Section XI 또는 KEPIC MI에서 요구하는 가동중 검사가 가능하여야 한다. 주냉각재펌프는 이용 10년의 설계수명을 가지며 원자로 수명기간동안 필요시 주기적인 교체가 가능하도록 설계되어야 한다. 표 3은 주냉각재펌프 주요부품의 설계 등급을 나타낸 것이다.

표 3. 주냉각재펌프 주요부품의 설계 등급

Components	Safety Class	Quality Class	Seismic Category
Cover, Flange, Cooler, Flange Stud, Cooler Nozzle	1	A	I
Rotor, Impeller	3	C	I

### 6.2 회전축계 설계

회전축에는 상부와 하부에 저널 베어링이 설치되어 축방향 하중을 지지하며, 추력베어링이 하부 저널 베어링 위에 설치되어 자중 및 임펠러에 의한 추력을 지지한다. 주냉각재펌프의 베어링들은 고온, 고압의 낮은 점도를 갖는 냉각재로 윤활되므로 마찰 및 마모가 적고 자기 윤활성이 우수한 그라파이트를 함유한 실리콘 재질로 제작된다. 저널 베어링은 유체동역학 베어링으로 독립순환 냉각재가 전동기 주위를 순환할 수 있도록 축방향으로 홈(groove)이 있다. 추력베어링은 베어링 표면에서 동수압을 발생시키지 않고 베어링 재질의 자기 윤활성만으로 축방향 하중을 지지한다. 추력베어링에도 냉각재의 순환통로를 제공하기 위하여 반경방향으로 깊은 홈이 있지만 베어링의 윤활특성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 주냉각재펌프는 수직 설치되어 작동하는 축류펌프로써 캔드모터로 작동하며 전동기의 회전자와 임펠러의 회전축은 일체이다. 회전축의 상단에 설치된 영구자석은 회전축이 회전할 때 펌프의 외부에 설치된 회전속도 측정기의 코일센서에 역기전력을 발생시켜 회전속도를 측정할 수 있도록 한다. 회전축에 부착된 보조임펠러는 원심형 펌프로써 펌프내부 독립순환 일차냉각수 유동을 형성하여 펌프의 외부에서 공급되는 기기냉각수와 열교환이 이루어진다.

### 6.3 냉각기 설계

정상 운전 중에 캔드모터 고정자 권선에서 발생하는 열은 냉각기에 의해 냉각되며, 냉각기는 다열 나선형 튜브, 튜브 지지판, 기기냉각수, 독립순환 냉각재로 구성된다. 다열 나선형 튜브는 캔드모터 고정자 바깥을 둘러싸고 있는 환형공간에 나선형으로 감겨있으며, 나선형 튜브 내부로 BOP(balance of plant)에서 공급되는 기기냉각수가 흐른다. 주냉각재펌프 내부를 순환하는 독립순환 냉각재는 그림 3에서와 같이 펌프 내부에 설치된 보조임펠러의 원심력에 의해 펌프 내부를 순환하면서 캔드모터의 내부를 냉각한다. 독립순환 냉각재는 나선형 튜브 외부를 직교차(cross) 하면서 기기냉각수와 열전달이 이루어진다.

### 6.4 역류방지장치

2대의 주냉각재펌프가 운전하다 1대의 펌프가 정지되었을 때 정지한 주냉각재펌프의 유로를 통하여 원자로냉각재의 역류가 발생할 수 있다. 역류가 발생하면 노심으로 공급되는 유량이 감소할 뿐만 아니라 냉각재의 역유동에 의한 관성이 임펠러에 작용하여 회전축의



역회전 현상이 발생한다. 이런 현상을 방지하기 위하여 주냉각재펌프 토출구에 그림 5와 같은 역류방지장치가 설치된다. 역류방지장치는 원자로 정상출력운전 시 항상 열려 있으며, 역류가 발생하면 자동으로 닫히는 구조이다. 역류방지장치는 두개의 유동개폐판을 갖고 있으며 역류방지장치의 동작을 위하여 각 유동개폐판에는 상부균형추와 하부균형추가 일정한 각도를 갖고 일체로 고정되어 있다. 주냉각재

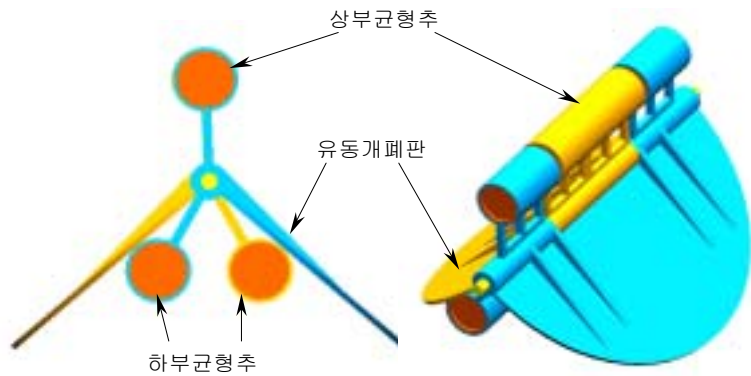


그림 5. 역류방지장치의 형상

펌프가 정상운전 중에는 임펠러가 생성하는 유동의 관성이 유동개폐판에 작용하여 항상 열려진 상태로 있다. 주냉각재펌프가 정지되면 중력에 의한 모멘트로 하부균형추에 복원력이 발생하여 유동개폐판이 닫히기 시작하며, 하부균형추가 중력방향과 일치하는 곳에 이르면 상부균형추에 중력에 의한 모멘트가 발생하여 유동개폐판이 완전히 닫힌다.

## 7. 회전속도측정기

펌프 상단에 설치된 회전속도 측정기는 그림 6과 같은 구조로 구성된다. 회전속도 측정기는 코일센서로 작동하는 비접촉 센서로서 일차냉각수의 압력경계를 손상하지 않고 임펠러의 회전속도를 측정할 수 있다. 즉 압력경계 내부에서 회전하는 회전축에 부착된 영구자석이 회전함에 따라 코일에 유도되는 기전력의 주파수 주기를 카운트하여 회전수를 측정한다. 주냉각재펌프 임펠러의 회전속도와 유량은 비례하기 때문에 원자로 노심의 유량을 간접적으로 측정하는 수단으로 활용할 수도 있다. 펌프의 회전속도 신호는 원자로보호계통의 입력으로 사용되는 안전등급 신호로서 펌프당 4개의 코일센서가 장착되며 전기적 및 물리적으로 서로 분리되어 있다.

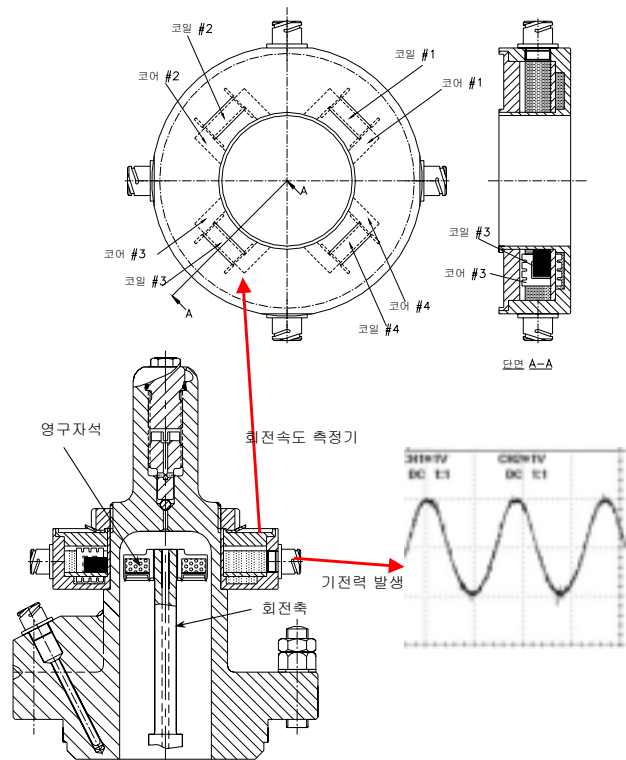


그림 6. 회전속도측정기 구조형상

## 8. 결론

국내 원자력법령의 원자력시설 규칙에 준하여 일체형원자로에 사용될 주냉각재펌프의 주요계통인 전동기, 임펠러, 냉각기, 가스제거계통, 회전축계통, 회전속도측정기 계통 등의 설계기술개발을 완료하였다. 일체형원자로 주냉각재펌프는 전동기의 회전축과 임펠러의 회전축은 일체로서 일차냉각재에 잠긴 상태에서 운전되므로 누수 방지를 위한 기계적 밀봉장치가 불필요하여 밀봉장치의 손상으로 인한 소형냉각재 상실사고가 근원적으로 배제된 캔드모터 형 축류펌프이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문서

- [1] 박진석 외 다수, “Design of Main Coolant Pump for Integral Reactor Using CAE,” 대한기계학회 2003 고체 및 구조역학부문 추계학술발표회.
- [2] 김민환 외 다수, “Computational Performance Prediction of Main Coolant Pump for the Integral Reactor SMART,” 전산유체공학회지 제 8권 3호, 2003. 9.
- [3] 김민환 외 다수, “일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 코스트다운 곡선 예측,” 2002 춘계학술발표회.
- [4] 임영빈 외 다수, “SMART 냉각재순환펌프 상부덮개의 열 및 응력해석,” 한국원자력학회 2001, 추계학술대회, 2001. 10.
- [5] 유환동 외 다수, “SMART 냉각재순환펌프 임펠러의 구조해석,” ‘99 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [6] J. S. Park, et al, “A Rotordynamic Analysis Model for Rotor Shaft of SMART MCP,” Transactions of the 15th International Conference on SMiRT-15, Seoul, Korea, August 15-20, 1999.
- [7] 이재선 외 다수, “고온/고압 환경 하에서 물로 윤활되는 그루브 저어널 베어링의 윤활 해석,” Journal of the KSTLE, 18권 2호, 2002. 5.
- [8] 박진석 외 다수, “Design of Canned Motor Cooler of Main Coolant Pump for Integral Reactor,” 한국원자력학회 2003, 추계학술대회.
- [9] 허 형 외 다수, “Thermal Analysis of a Canned Induction Motor for MCP in SMART,” 대한전기학회 영문논문집 VOL.3-B NO.2, 2003. 2.
- [10] 허 형외, “SMART 냉각재순환펌프에 장착되는 회전속도측정기의 전자기장해석”, 2000년 추계 한국원자력학회학술대회