

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

SMART 주냉각재펌프 시스템 설계 (I)

System Design of SMART Main Coolant Pump (I)

박진석, 허 형, 김지호, 김용완, 김종인

한국원자력연구소

요 약

SMART 주냉각재펌프 시스템 설계는 구조설계, 재료설계, 전자기 설계, 수리학 설계, 측정센서 설계, 제작기술, 성능시험 기술 등을 종합적으로 연구하여 궁극적으로 원형을 제작한 후 펌프 성능시험과 펌프특성 곡선을 생산하는 것이다. 본 연구에서는 주냉각재펌프 구조의 3차원 형상설계와 주요부품의 구조설계, 전자기 설계, 수리학 설계와 같은 이론적 결과를 근거로 제작 후 개별 성능시험으로 설계기술의 신뢰도를 높여 주냉각재펌프 시스템 설계기술의 수준을 한 차원 높였다. 앞으로 진행될 주요 연구는 SAMRT 주냉각재펌프 시스템 설계기술의 최종 목표인 펌프의 원형제작과 성능시험 기술개발에 대한 연구를 수행하는 것이다.

Abstract

The system design technology of SMART main coolant pump (MCP) has to be accomplished with variety engineering fields such as structural design, material design, electromagnetic design, hydrodynamic design, sensor design, manufacturing technology, and performance test technology. The aim of the system design of MCP is to carry out performance test and to obtain characteristic curves of MCP through a performance test. Main components of MCP have been carried out on the basis of theoretical analysis and individual performance test of subassemblies has been also done to verify the reliability of the design technology. The MCP system design of SMART will be continued until the prototype of MCP is manufactured and the performance test of MCP is completed.

1. 서론

본 연구에서 개발하고자 하는 SMART 주냉각재펌프 설계기술은 국내에서 처음으로

개발되고 있다. 국내 상용 원전에 사용되는 주냉각재펌프 경우 국외의 선진국에서 설계/제작된 후 국내로 공급되었다. 이와 같은 이유로 주냉각재펌프 설계방법, 제작방법, 성능시험에 관련된 기술이 체계적으로 정리되어 있지 않고 단편적 기술만 여기저기 흩어져 있기 때문에 중요한 문제가 발생하면 독자적 기술로 해결할 수 있는 능력이 부족한 실정이다. 따라서 SMART 주냉각재펌프를 개발하기 위해서는 설계기술, 제작기술, 성능시험 기술개발은 기본개념을 정하는 문제부터 상세설계까지 모두 수행해야 한다. 주냉각재펌프 설계 기술개발은 특정 기술 한 분야를 개발함으로써 이루어지는 것이 아니고, 기계구조, 재료설계, 전자기 해석, 수리학 해석, 측정센서 설계, 제작방법, 시험방법 등을 종합적으로 연구하는 시스템 설계이다. 주냉각재펌프 시스템 설계의 궁극적 목표는 원형을 제작한 후 성능시험을 통하여 펌프기능 시험, 펌프특성 곡선 생산, 내구성 시험에 있다. 주냉각재펌프 시스템 설계기술을 개발하기 위하여 크게 4 단계 과정으로 나누어보면 첫째, 주냉각재펌프의 주요부품들의 이론적 설계기술 확립이다. 둘째, 이론적으로 설계된 주요부품들의 개별 제작과 성능 시험을 통하여 각 부품들의 이론적 설계 결과를 검증하고 수정한다. 셋째, 주냉각재펌프 원형 제작기술 개발 및 원형 제작이다. 원형 제작기술은 각 각 부품의 상호간의 제작절차, 조립절차, 용접절차, 누수시험 절차 등이 이루어 져야 한다. 넷째로, 펌프성능 시험이다. 펌프성능 시험은 펌프의 유량, 수두, 진동수준, 소음수준, 펌프효율, 펌프특성 곡선, 회전속도 측정기 성능, 펌프감시 계통 성능, coastdown 곡선, 캐비테이션 시험 등이 이루어져야 한다. 본 연구는 SMART 주냉각재펌프 시스템 설계기술을 개발하면서 구조설계, 전자기 설계, 센서설계, 수리학 설계, 제작기술, 성능시험 기술개발 등을 체계적으로 개발하기 시작했다. 지금까지 주냉각재펌프 구조의 3차원 형상설계(그림 1)와 주요부품의 구조설계, 전자기 설계, 수리학 설계와 같은 이론적 결과를 근거로 제작 후 개별 성능시험까지 진행되었다[1 ~ 6]. 이와 같은 노력으로 주냉각재펌프 시스템 설계기술의 수준을 한 차원 높였으며, 주냉각재펌프 시스템 설계기술을 축적하였다. 앞으로 중점적으로 진행될 연구내용은 주요부품의 이론적 기술확립이 부족한 펌프 상단에 포집된 개스 제거 해석기술, 전동기 냉각 열교환기 설계, 역전방지 장치 수리학 해석 등이다. 그리고 주요부품 성능시험 결과를 토대로 상세 설계를 수행하여 수정 보완된 성능시험이 더 수행된다. SMART 주냉각재펌프 시스템 설계기술의 최종 목표인 원형제작과 성능시험은 당연히 계속 진행되어야 하는 연구내용이다.

2. 국외 주냉각재펌프 설계 기술현황

원자로와 주요 기기인 증기발생기와 원자로 주냉각재펌프(main coolant pump)가 원자

로 내부에 장착되는 것은 일체형 원자로이고 원자로 외부에 있는 증기발생기 및 냉각재 펌프가 배관으로 원자로에 연결되어 일차 냉각수의 순환 루프(loop)를 이루는 것을 분리형 원자로이다. 국내의 기술로 개발된 분리형 또는 일체형 원자로 주냉각재펌프는 없지만 국외에서 개발된 분리형 원자로인 AP600 주냉각재펌프, 그리고 일체형 원자로인 SIR, SPWR, VPBER-600 등의 특성(표 1)은 다음과 같다.

21 AP600

분리형 원자로에 사용되는 AP600의 주냉각재펌프는 수직으로 설치된 4대의 펌프가 가동하며 캔드모터 펌프로서 펌프의 구동력은 회전속도 1770 rpm에서 3000 축마력(*shaft horse power*)이고 유도모터의 단자전압은 4000 볼트로 설계되었다. 펌프의 수두 73.2 m에서 85%의 효율로 $3.22 \text{ m}^3/\text{s}$ (51,000 GPM)의 냉각재 유량을 송출한다. 캔드모터 펌프는 기계적 실(*mechanical seal*)이 없고 펌프의 회전축과 전동기의 회전자가 일체이다. 펌프의 추력베어링(*thrust bearing*)은 펌프의 정지 시에 요구되는 관성서행에 필요한 회전관성을 위하여 우라늄 합금을 펌프 회전축에 부착하여 얻은 펌프의 회전관성은 $210.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이다. 베어링의 윤활을 위해 별도의 윤활제를 사용하지 않고 일차 냉각수를 윤활유로 사용한다. 전동기의 냉각은 회전축에 부착된 보조임펠러에 의해 펌프내부를 순환하는 일차 냉각수와 외부에서 공급되는 기기 냉각수에 의해 이루어진다. 그리고 외부에서 공급되는 기기 냉각수가 없을 경우에 최소 10분간 펌프 손상 없이 작동할 수 있도록 설계되었다.

22 SIR

일체형 원자로인 SIR는 미국 내의 여러 회사와 영국이 함께 개발하였던 원자로로서 6대의 주냉각재펌프가 수평으로 원자로에 설치된다. 펌프의 유량은 1250 kg/s , 수두는 37.2 m, 회전속도는 1750 rpm, 회전관성은 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이다. 모터의 권선이 일차 냉각수에 젖은 상태에서도 작동되며 독립된 개체로 원자로 노심을 해체하지 않고 원자로 압력용기 뚜껑과 함께 해체할 수 있다. 펌프에 설치된 역전방지장치는 다른 펌프로 유량이 흘러 동력손실이 생기는 것을 방지하는 것으로 정상운전 중에 역전 잠금장치는 원심력으로 인해 풀려진다. 회전축과 임펠러에 질량을 추가하여 회전축의 관성이 증가 시켰으며, 열수력 저항, 반응도 피드백 그리고 열마진(*thermal margin*) 등은 펌프의 회전축 관성이 크지 않더라도 펌프의 *coastdown* 특성이 원자로의 DNBR 조건을 만족시킬 수 있도록 설계되었다.

23 기타 주냉각재펌프

일본에서 연구가 진행된 일체형 원자로인 SPWR에 설치된 주냉각재펌프는 캔드모터 펌프로서 유량은 12300 kg/s, 수두는 24 m, 회전속도는 870 rpm, 전동기 동력은 3600 kW 이다. SPWR에 한 대의 주냉각재펌프가 수평으로 설치되어 원자로 내부의 일차 냉각수를 펌프 아래에 설치된 증기발생기로 순환시킨다. 열출력 1800 MWt를 낼수 있는 일체형 원자로 VPBER-600에 사용되는 주냉각재펌프는 러시아에서 설계된 것으로 펌프의 유량은 1690 kg/s 이며 운전압력과 운전온도는 각각 15.7 MPa 및 325°C 이다. 이 캔드모터 펌프는 원자로 하부에 6대의 펌프가 설치되어 펌프 위쪽에 위치한 증기발생기로 일차 냉각수를 순환 시킨다. KLT-40 주냉각재펌프 러시아의 쇠빙선에 사용된 원자로와 동일한 개념으로 설계된 분리형 원자로의 주냉각재펌프로써 2단 동기(synchronous) 속도로 작동하는 캔드모터인 원심펌프이다. 펌프의 속도가 저속일 때 펌프의 유량은 290 m³/h 이며 소요동력은 13 kW 이다. 그리고 펌프가 고속으로 운전할 때 유량은 870 m³/h 이고 소요동력은 155 kW 이다.

3. SMART 주냉각재펌프 시스템 설계

3.1 주냉각재펌프 연계설계

일체형원자로 구조가 정해지면, 주냉각재펌프, 제어봉구동장치, 증기발생기와 같이 주기가 설치될 공간이 확보하면, 주냉각재펌프의 종류는 자연스럽게 결정된다. 즉, 원심펌프, 사류펌프, 축류펌프, 수직설치, 수평설치 등과 같은 펌프종류와 펌프설치 방법 중에서 SMART 주냉각재펌프로써 가장 적합한 형태를 선택한다. 주냉각재펌프 설계에 중요한 변수인 유량(Q), 수두(H)는 요구된 원자로의 용량으로부터 계산된다. 먼저 원자로 동력(power)이 정해지면, 원자로 동력은 유량과 관계에서 주냉각재펌프에 요구된 유량이 계산된다[7].

$$Q = \frac{\text{power}}{h_{\text{노상입구}} - h_{\text{노상출구}}}$$

원자로 내부를 계속 순환하는 냉각수는 핵연료 등과 같은 내부구조물 사이로 흐르면서 발생하는 유체저항이 있다. 이 유체저항을 계산하면 주냉각재펌프에서 요구되는 수두가 된다.

3.2 원자로 안전관련 설계

SMART 주냉각재펌프의 작동상태는 원자로 성능에 중요한 영향을 주기 때문에 주냉각재펌프 회전축의 회전속도를 감시하는 센서를 설치한다. 예기치 않은 고장이나 사고로 임펠러의 회전속도가 떨어지면 유량이 감소하여 원자로 노심의 온도가 상승하여 사고가 발생할 수 있기 때문에 원자로 운전 전략과 밀접한 관련이 있다. 그러므로 임펠러 회전속도가 정상운전 범위를 벗어날 때 원자로를 정지하는 운전전략을 세운다. 일반 산업용 펌프와 달리 원자로 주냉각재펌프는 coastdown 특성곡선을 제공해야 한다. Coastdown 특성곡선은 전원공급이 중단되었을 때 주냉각재펌프의 회전축이 관성으로 회전하면서 냉각수 순환을 서서히 멈추게 하여 노심의 온도가 급격히 상승되는 것을 방지하는 역할과 관계가 있다. 주냉각재펌프 설계는 구조설계와 전기설계로 구분되며, 주요부품은 KEPIC 또는 ASME 코드에 따라 등급을 분류하고 코드의 규정에 의해 구조설계를 한다(표 2). 캔드모터 및 권선입력단자 등은 IEEE 코드에 따라 전기등급을 분류하고 전기설계를 수행한다.

3.3 주냉각재펌프 주요부품 설계

주냉각재펌프의 용량이 결정된 후 고온에 의한 열응력 해석과 고압에 의한 내압설계를 수행하기 위한 구조설계, 유체동역학 베어링(그림 2)으로 지지되어 회전하는 회전축의 동특성 해석, 펌프의 수두를 결정하는 중요한 임펠러(그림 3)의 수리학 해석, 장시간 운전할 때 펌프의 수명에 직접 영향을 주는 베어링의 마모해석, 펌프의 용량을 결정하는 전동기 설계에 필요한 전자기 해석, 회전속도를 감시하는 회전속도 측정기의 전자기 해석, 전동기의 온도상승을 방지하기 위한 냉각장치, 펌프 상부에 누적된 개스를 원자로 내부로 순환시킬 수 있는 수리학구조, 펌프내부의 일차 냉각수 누설을 효과적으로 방지하는 구조설계 등을 수행해야 한다.

(1) 구조설계

주냉각재펌프 케이싱의 벽두께 내부와 외부의 온도차이로 인해 열응력이 발생한다. 열응력은 케이싱 내면과 외면 압력차이로 발생하는 응력과 중첩하여 구조강도를 평가한다. 특히 펌프 케이싱과 전동기의 재질이 서로 다르기 때문에 온도가 상승함에 따라 열팽창 차이로 펌프 케이싱 또는 전동기 프레임에 과도한 응력이 발생할 수 있다. 스프링 구조물을 적절히 설치하여 불필요한 열변형을 흡수하는 구조설계가 병행되어야 한다. 일차냉각수를 순환시키는 임펠러 구조설계는 매우 중요하다. 임펠러 날개의 앞 뒤 면에 작용하는 압력차로 인한 굽힘응력, 원심력으로 발생하는 인장응력 등을 해석한다[8]. 그리고 임펠러

날개의 고유진동수 영역이 회전주파수와 달라야 한다. 임펠러 날개의 원주방향으로 불균일한 압력분포로 발생하는 피로응력 때문에 펌프의 수명기간 동안에 임펠러의 구조에 손상을 주지 않아야 한다. 임펠러 날개와 날개를 둘러싸고 있는 유로 안내관 내벽 사이의 틈새는 매우 작다. 주냉각재펌프가 작동 중일 때 외부에서 가해진 충격으로 임펠러 날개가 안내관 내벽에 닿아 손상되는 사고가 발생하지 않아야 한다.

(2) 회전축 동특성 해석

주냉각재펌프 회전축의 진동은 펌프수명, 소음, 고장 등에 직접 영향을 주기 때문에 설계단계에서 필수적으로 회전축 동특성 해석을 통하여 진동수준 및 안정성을 예측하여 설계에 반영해야 한다. 주냉각재펌프는 유체속에 잠긴 수직형 회전축, 임펠러, 유체베어링 및 캔드모터로 구성되어 있는 복잡한 구조로 임펠러를 통한 수력학적인 부하, 모터에 의한 전자기력, 주변유체유동, 불균형력 등 역학적 힘 등이 원인이 되어 축 진동을 야기할 수 있으며 또한 지지구조물인 원자로에 전달되게 된다. 특히, 위험속도 여유가 적게 설계되어 운용될 경우는 과도한 진동이 발생하여 주변 구조물에도 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 합리적인 해석을 통한 위험속도 예측 및 가진력 해석은 개발 및 설계단계에서 필수적이다. 따라서 주냉각재펌프 회전축의 위험속도 예측, 회전축의 안정성 해석, 회전축의 가진력 성분 및 진동수준을 해석하여 주냉각재펌프 운전속도 범위 내에 위험속도에 대한 평가를 수행하였다[9, 10].

(3) 임펠러 수력학 해석

주냉각재펌프의 유량 ($Q=33.03 \text{ m}^3/\text{min}$), 양정 ($H=13.5\text{m}$), 회전수 ($n=3600\text{rpm}$)은 앞에서 설명한 원자로의 출력 및 원자로 내부 유동에 의한 유로 손실에서 결정되어진 값이다. 일반적으로 펌프의 형태(type)는 다음과 같이 정의되는 비속도(specific speed)에 따라 구분되어진다.

$$n_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

주냉각재펌프 n_s 는 약 2940의 값을 갖는다. 일반적으로 n_s 의 값이 1500 이상이면 축류형 펌프가 사용된다. 축류형 펌프 임펠러의 날개 형상[11]은 효율과 직결되는 중요한 변수로 그림 4에서 반경방향의 위치에 따른 단면의 형상들 그리고 각 형상에 대한 코드의 길이(l)와 설치각(ξ)이다. β_1 , β_2 , θ 는 입구각, 출구각 및 캠버(camber) 일 때 설치각 ξ 는 $(\beta_1' + \beta_2')/2$ 이다. 입구각은 회전속도, 유량, 유량이 통과하는 단면적을 알면 구할

수 있고, 출구각은 날개를 지나는 유동이 자유와류로 가정하여 구한다.

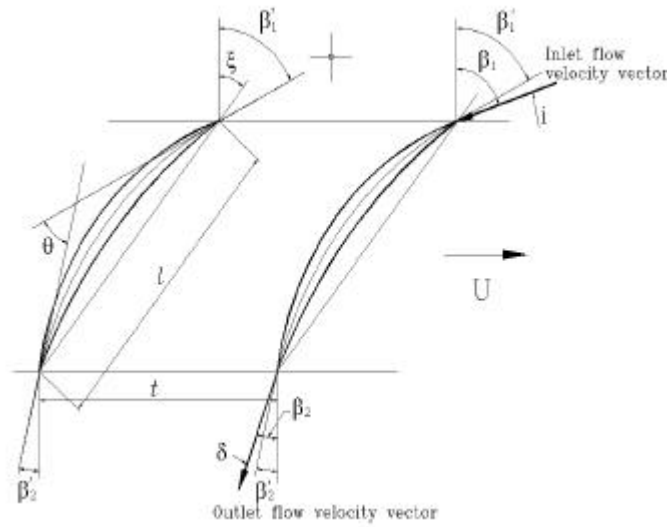


그림 4 임펠러 캐스케이드 및 블레이드 형상

축류 펌프의 손실은 크게 형상 손실(profile loss), 환형 손실(annulus loss), 2차 손실(secondary loss) 및 팁 간격 손실(tip leakage loss)로 구분된다. 이러한 손실은 실험식을 이용하여 구한다. DCA(double-circular-arc)는 캐비테이션을 최소화 할 수 있고 유동의 박리(separation)에 따른 실속(stall)현상의 발생 가능성이 일반 익형보다 적은 DCA를 주냉각재펌프 임펠러 익형으로 결정한다. 실제 유동은 캠버선을 따라 유입과 유출이 이루어지질 않고 그림 4에 나타난 바와 같이 입구각에서는 i (incidence), 출구각에서 δ (deviation)을 갖게 된다. 따라서 캠버선의 입구각과 출구각은 i 와 δ 을 고려하여 결정한다.

$$\beta'_1 = \beta_1 - i, \quad \beta'_2 = \beta_2 - \delta$$

i 는 DCA에 대한 실험에서 익형의 형상 손실이 작은 값으로 결정하며 δ 은 i , 유동 입구각 β_1 과 솔리디티의 함수로 주어져 있다. i 는 설계자가 자신의 설계의도에 따라 조정할 수 있는 값이지만 δ 은 실험에 의해 주어진 값을 사용한다. 코드의 길이를 결정하기 위해서는 솔리디티를 결정해야 되는데 양력계수(C_L)와 솔리디티(l/t)의 관계식은 에어포일 이론에서 다음과 같다.

$$C_L \cdot \frac{l}{t} = 2(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cdot \cos \beta_\infty$$

솔리디티는 양력계수를 가정하여 위 식에서 결정하든지 아니면 설계자가 임의로 솔리디티를 가정하고 위 식에서 양력계수를 결정한다. 양력계수는 임펠러의 경우 허브에서 큰

값을 갖게 하고 톱으로 가면서 점차 작아지게 한다. 너무 큰 양력계수 값은 실속을 일으킬 수 있기 때문에 임펠러의 허브에서 대략 1.0 정도의 값을 사용한다.

(4) 전동기 설계

SMART 주냉각재펌프는 일차 냉각수 내에서 작동하는 환경상의 조건으로 캔드모터를 사용해야 한다. 캔드모터는 회전자와 고정자에 밀봉캔이 용접되어 있어서 일차 냉각수가 회전자 혹은 고정자 내부로 스며드는 것을 막아 준다. 일반적으로 여러 종류의 모터가 있으나, 농형유도 전동기는 취급, 안전성, 효율이 우수하기 때문에 주냉각재펌프의 캔드모터로 결정하였다[12]. 주냉각재펌프의 운전속도가 가변이기 때문에 입력 전원 및 전원 주파수를 가변할 수 있는 인버터가 필요하다. 인버터는 3상 440[V]의 AC전원을 입력받아 이를 다이오드 및 싸이리스터로 구성된 컨버터를 통해 직류로 변환하고, 이를 다시 6개의 IGBT로 구성된 3상 인버터를 구성하여 가변전압 가변주파수(VVVF)출력의 교류로 변환하여 전동기에 공급한다. 캔드모터의 극수는 캔에서의 와전류 손실을 최소화 하기 위하여 2극으로 설정하였으며, 전동기 권선의 결선은 Y결선으로 한다. 앞에서 결정된 변수를 사용하여 전동기의 고정자와 회전자 주요치수는 장하분배법으로 상세설계를 할 수 있다.

(5) 회전속도 측정기 설계

주냉각재펌프 회전축의 회전속도는 원자로심 안전보호 논리와 밀접한 연관을 가진다. 안전신호 채널로 사용되는 센서는 4개의 센서를 각각 물리적, 전기적 독립성을 유지하면서 회전속도를 측정할 수 있어야 한다. SMART 주냉각재펌프의 회전축은 원자로의 일차 냉각수 속에 잠겨서 회전하기 때문에 고압과 고온의 경계에 둘러 쌓여있다. 그러므로 근접센서를 회전축에 설치하려면 고압과 고온의 경계면을 뚫고 설치하여야 하기 때문에 센서를 설치 후에 패킹 혹은 가스킷 등으로 누수방지를 해야하는 어려운 문제가 있다. 즉, 이러한 난점을 해결하고 회전속도를 측정할 수 있는 회전속도 측정기가 필요하다. 코일형 회전속도 측정기는 압력경계면을 뚫지 않고 설치할 수 있기 때문에 일차 냉각수의 누수 문제를 걱정하지 않아도 된다. 그리고 좁은 장소에 설치되어 여러 채널에서 동시에 회전속도를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 자계를 시간적으로 변화시키면 폐회로에 전류를 흐르게 하는 기전력을 일으킨다. 이 유도기전력(induced electromotive force)은 자계를 변화시키거나, 자계내에서 도체가 움직일 때 일어나는 전압을 말하며, Faraday의 법칙과 Lenz의 법칙에 따라 선도체에 N 회 감아서 만든 폐회로에 발생하는 기전력은 다음과 같다.

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

코일형 회전속도 측정원리는 영구자석이 회전할 때 철심 코어 권선에서 발생하는 유도기전력의 변화를 디지털 카운트로 회전속도를 측정하는 방식이다.

4 결론

주냉각재펌프 개발기술은 해석기술, 제작기술, 성능시험 기술들이 체계적으로 수행되어야 하는 시스템 설계이며 국내에서 처음으로 연구 개발되고 있다. 앞으로 주냉각재펌프 시스템 설계 중에서 제작기술 개발과 성능시험 기술개발이 집중적으로 수행될 것이며, 지금까지 주냉각재펌프 주요부품의 해석기술과 일부 성능시험으로 기술축적이 이루어진 것은 다음과 같다.

- (1) 주냉각재펌프 설계절차, 설계개념, 3차원 형상설계에 관련된 독자적 설계기술을 확립하였다.
- (2) 장하분배법으로 캔드모터의 고정자, 회전자 설계기술을 개발하였으며 전동기 회전수를 제어하는 인버터 설계기술을 확립하였다. 그리고 전동기 원형 제작 후 성능시험 결과와 해석결과를 비교하여 전동기 설계기술을 검증하였다.
- (3) 회전축의 위험속도 해석을 통하여 주냉각재펌프의 운전속도 범위에서 회전축의 안정성을 분석하였다.
- (4) 수력학 이론을 근거로 임펠러 익형 설계기술을 개발하였으며, 임펠러 제작 후 유체유동 시험으로 임펠러 설계기술을 검증하였다.
- (5) Faraday의 법칙과 Lenz의 법칙을 응용하여 회전속도 측정기를 설계 및 제작하여 회전속도 측정기 성능을 시험하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- [2] 이종원 외 다수, 냉각재순환펌프 회전축 동특성 해석코드 개발, 한국원자력연구소, KAERI/CM-247/98, 1999.

- [3] 정명균 외 다수, 냉각재순환펌프의 임펠러 설계/성능해석 코드개발 및 검증시험 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-248/98, 1999.
- [4] 정군석 외 다수, 냉각재순환펌프 제작기술개발 및 원형제작 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-249/98, 1999.
- [5] 강도현 외 다수, 냉각재순환펌프 및 제어봉 구동장치의 전동기와 제어기기 개발 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/CM-250/98, 1999.
- [6] 박진석 외 다수, SMART 냉각재순환펌프 개념설계, '98 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.
- [7] 장문희 외 다수, 신형원자로 계통 개념연구 보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1483/94, 1999.
- [8] 유환동 외 다수, SMART 냉각재순환펌프 임펠러의 구조해석, '99 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [9] 박진석 외 다수, SMART용 냉각재순환펌프의 회전축 동특성 해석모델 개발, '98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.
- [10] 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.
- [11] 김민환 외 다수, FLUENT를 이용한 축류펌프 임펠러의 3차원 유동해석, '99 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [12] 허형 외 다수, SMART용 냉각재순환펌프의 농형유도 전동기 전자기 및 열해석, '99 한국전기학회 하계학술발표회, 1999.

표 1 원자로 종류에 따른 주냉각재펌프의 특징

펌프 종류		울진 3&4 (루프형)	AP600 (루프형)	SIR (일체형)	SPWR (일체형)	VPBER-600 (일체형)	SMART (일체형)
설계변수	열 (MWt)		1940	1000	1800	1800	330
	전기 (MWe)	1000	600	320	600	630	75
일차계통 압력 (MPa)		15.3	15.5	15.5	15	15.7	15
냉각재 온도 (°C)							
-원자로입구 온도		295	276.1	294	288	294.4	270
-원자로출구 온도		327	312.4	318	314	325	310
특징		캔드모터	캔드모터	w e t winding	캔드모터	캔드모터	캔드모터
설치방법		수직설치	수직설치	수평설치	수평설치	수직설치	수직설치
개수		4	4	6	1	6	4
유량 (kg/s)		5380	4970	1250	12300	1690	387
수두 (m)		105	73.2	37.2	24		13.5
회전 속도 (rpm)		1200	1770	1750	870		900/3600

표 2 주냉각재펌프 주요부품의 기기 안전등급 및 전기 안전등급

등급	기기 안전등급	전기 안전등급
주냉각재펌프 부품		
펌프 케이싱	1	N/A
회전축	3	N/A
임펠러	3	N/A
압력경계 연결볼트	1	N/A
전동기 냉각튜브	1	N/A
베어링	3	N/A
플랜지 체결볼트	1	N/A
전동기	3	1 E
권선입력단자	2	1 E

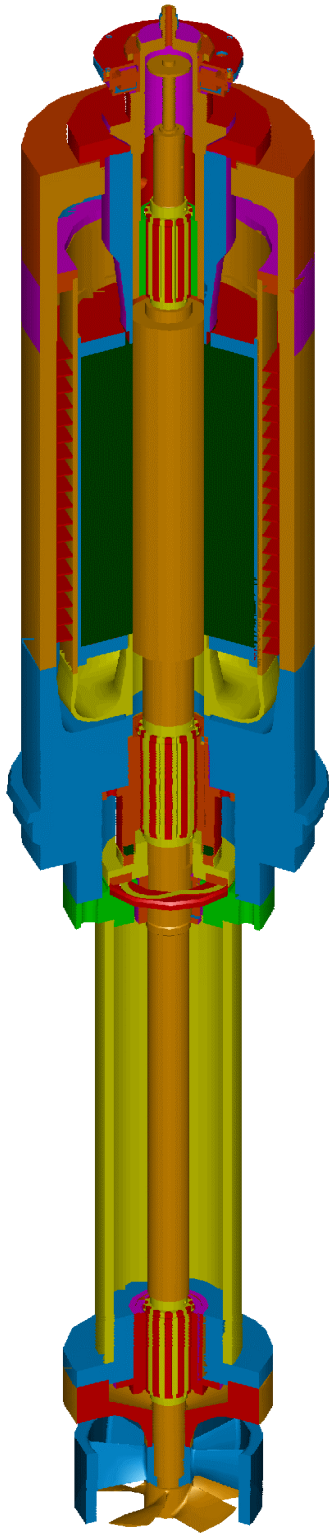


그림 1 주냉각재펌프 3차원 형상

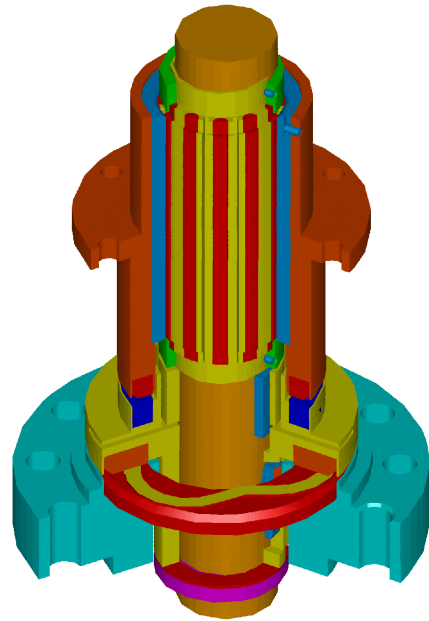


그림 2 주냉각재펌프 베어링집합체 형상

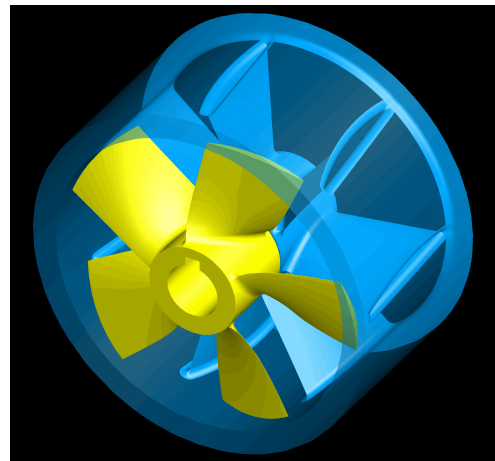


그림 3 주냉각재펌프 임펠러 형상