

중소형 일체형원자로 SMART의 유체계통 설계

Small and Medium Integral Reactor, SMART-Fluid System Design



김성훈*



박천태**

* 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부 선임연구원
** 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부 책임연구원

1. 머리말

중소형원자로 SMART의 유체계통은 유체의 순환을 통해 노심에서 발생한 열에너지를 전기 또는 담수생산 설비로 보내는 계통이다. 이와 같은 유체계통의 설계시에는 노심에서 필요한 요구사항을 만족시키고 원자로용기 및 관련 기기 배치와 같은 기계구조 및 기계설계와 밀접한 연계사항을 고려하여야 한다. 여기에서는 유체계통 설계 중에서 원자로냉각재계통의 설계시 기계구조 및 설계와 연관된 연계설계에 대하여 기술한다.

2. 원자로냉각재계통

원자로냉각재계통은 원자로내부에서 원자로냉각재의 강제순환 또는 자연순환에 의해 노심에서 생성된 열을 증기발생기를 통해 이차계통으로 전달하는 기능을 하며, 제어봉구동장치, 원자로냉각재펌프, 증기발생기카세트, 가압기 공간(이하 가압기)을 제공하는 원자로덮개집합체 등의 주요 기기 및 이들이 위치하고 있는 원자로용기 등으로 구성되어 있다. 원자로냉각재계통내 원자로냉각재 유로는 노심, 원자로냉각재펌프, 증기발생기, 노심순으로 형성된다. 원자로용기 측면에 장착된 원자로냉각재펌프에 의해 원자로용기 중앙하부에 위치하는 노심과, 노심지지배럴과

원자로용기 내벽사이의 환형공간에 위치하는 증기발생기 사이에 원자로냉각재의 강제순환유동이 형성되어 노심에서 발생된 열이 증기발생기 전열관내의 이차측으로 전달된다. 그림 1은 중소형원자로의 원자로집합체 개략도를 보여준다.

원자로용기, 제어봉구동장치, 원자로냉각재펌프, 증기발생기, 가압기, 안전밸브 등 주요 원자로냉각재계통 기기는 다음과 같다.

원자로용기는 내부에 노심, 증기발생기, 가압기, 제어봉구동장치, 내부구조물을 수용하는 압력용기이며 방사선이 외부로 유출되는 것을 막는 방호용기 역할을 수행한다. 또한 정상운전과 과도상태 및 사고시 발생하는 각종 하중으로부터 노심과 각종 기기를 보호하여 내부에 장착된 기기를 지지하는 역할을 한다. 그리고 원자로덮개와 함께 원자로집합체의 압력유지경계이며, 원자로냉각재가 외부로 누출되지 않도록 압력경계를 유지한다.

제어봉구동장치는 원자로가 정상운전중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심의 핵반응을 적절히 제어하며, 또한 원자로계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때 제어봉을 신속하고 정확하게 노심 내부로 삽입시켜 운전을 정지시키는 기능을 한다.

원자로냉각재펌프는 원자로가 정상운전중일 때 노심에서 가열된 냉각재를 증기발생기로 순환시키는 기능을 한

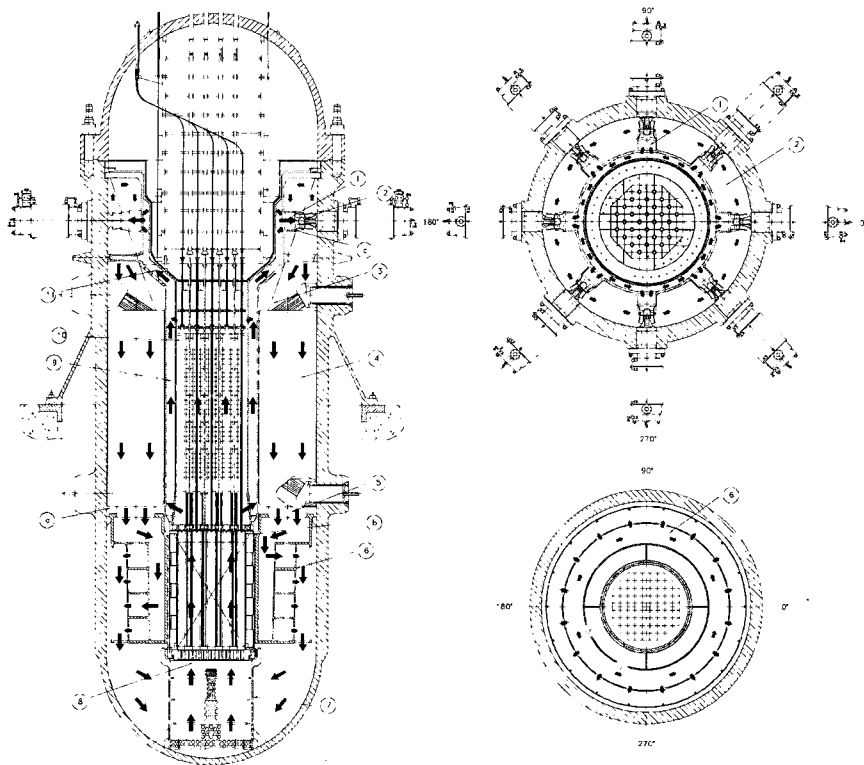


그림 1 원자로냉각재계통 및 유로

다. 원자로냉각재펌프의 형태는 캔드모터펌프이며 원자로 용기 환형공간 상부에 설치된다. 캔드모터펌프는 stuffing box 와 기계적 밀봉 장치를 사용하지 않고 펌프와 전동기가 1개의 밀폐된 용기 안에서 결합되어 있기 때문에, 상용로의 원자로냉각재펌프와는 달리 축 밀봉이 필요 없다.

증기발생기는 노심에서 생성된 열을 이차측으로 전달하는 증기공급계통의 주요 열수력 현상이 결정되는 핵심 기기이다. 증기발생기의 형태는 이차측 급수가 전열관의 내부로 흐르고 원자로냉각재측 냉각재가 전열관 사이로 흐르는 관류식(once-through type)이다. 증기발생기의 전열관은 나선형으로 감겨 있다. 증기발생기 카세트들은 원자로 용기 내의 환형 공간에 배치된다. 또한 증기발생기 카세트 하부 이차측 헤더내에 각 전열관마다 오리피스가 설치되어 있다. 이 오리피스의 목적은 유량을 균일하게 분배하고 운전중에 유동이 불안정해지는 것을 방지하기 위함이다.

가압기는 상용로와는 달리 원자로용기내 상부에 위치하며, 상용로에 비해 원자로출력 대비 가압기 용량이 상대적으로 크다. 가압기는 원자로의 과도상태시 원자로냉각재의 체적팽창 및 수축 등의 열수력 현상에 의해 야기되는 원자로냉각재계통의 압력변동을 최소화하는 기능을 수행한다. 가압기 유형은 압력이 가압기 내 증기량에 의해 결정되는 증기가압기이다. 상용로에 비해 원자로 출력 대비 증기체적이 상대적으로 매우 크기 때문에 과도상태시 증

기압력을 제어하기 위한 분무기가 필요 없다. 다만 냉각운전시 플랜트 압력-온도 제한선을 만족하는 압력제어 운전 을 위해 화학 및 체적제어 계통으로부터의 보조분무기가 사용된다. 가압기의 포화증기는 전열기에 의해 생성되고 유지된다. 가압기는 원자로용기내에 위치하고 있기 때문에 가압기 벽면을 통한 열손실을 최소화하기 위한 단열재가 필요하다. 이를 위해 가압기 하부의 상부안내구조물 위 쪽에는 여러 겹의 습식단열재를 설치한다.

안전밸브는 가압기 상부에 설치되어 원자로냉각재 압력 경계에 대한 과압방지 기능을 수행한다. 안전밸브는 가장 심각한 비정상 운전과도상태 및 원자로가 정지되어 있을 동안에 원자로냉각재 압력경계 설계압력의 110% 이내로 압력을 제한할 수 있는 충분한 용량으로 설계한다. 한편 설계기준초과사고인 완전급수 상실사고시 원격 수동운전을 통하여 원자로냉각재계통의 신속한 감압기능을 수행할 수 있도록 안전감압계통을 설치한다. 안전감압기능은 원자로용기 내부에 설치된 증기발생기 카세트 모두에 급수 및 피동잔열제거계통 유로가 완전히 상실되어 노심 붕괴 열을 제거할 수 없을 때 원격 수동 안전등급의 원자로냉각재계통 신속 감압 기능을 제공한다. 설계기준 초과사고인 완전급수 상실사고에 의해 원자로냉각재계통의 냉각재 재고량이 점차적으로 상실되고 원자로냉각재계통이 고압으로 유지될 때, 안전감압계통 밸브를 개방하여 원자로냉각

재계통을 제어된 상태에서 신속히 감압할 수 있다.

3. 가압기 설계

OPR-1000을 비롯한 상용원자로에서는 대부분 분리형 가압기가 사용되는 반면에, 중소형 원자로에서는 고온증기가 압기의 형태로서 원자로용기 상부 영역이 가압기로 사용된다. 가압기는 습식단열재가 장착된 가압기 중앙하부판, 측면판, 환형하부판에 의해 원자로냉각재 순환유로 영역과 분리된다. 원자로용기 상부 헤드는 대기로의 열손실을 최소화하기 위해 단열재로 감싸진다. 가압기 전열기는 내밀림 및 외밀림 과도상태에서 작동이 요구된다. 내밀림시에는 과냉 밀림수를 포화 온도로 가열하기 위해 전열기가 가동되며 외밀림시에는 증기의 팽창으로 인한 증기온도의 하락을 보상해 주기 위해 전열기의 작동이 요구된다. 가압기 공간 효율을 높이고 전열기의 개수를 최소화하기 위해서는 단위 높이 당 물체적의 비가 상대적으로 작은 가압기 하부 공간을 전열기 보호를 위한 최소 물체적으로 활용하는 것이 바람직하다. 즉, 정상운전중 가압기 최저 수위는 가압기 환형하부판 근방으로 설정된다. 가압기 상부 공간에서 구조물을 제외한 자유체적이 과도상태 압력을 완충하는 증기체적으로 활용된다. 일체형원자로에서는 그 구조적 특성으로 인해 상용로에서와 같은 스프레이 계통을 설치하기가 어렵다. 이와 함께 과압 과도사건에서 스프레이 계통의 작동이 요구되지 않기 위해서 가압기 증기공간을 충분히 키우는 것이 요구된다. 이러한 이유 때문에 출력과 물체적에 근거하여 비교할 때 스프레이가 장착되지 않는 내장형 증기가압기의 크기는 상용로에 비해 훨씬 크게 된다.

척도법을 적용하여 가압기 용량 및 전열기 용량을 예비산정한 후 공학적 판단으로 적절한 여부를 더해 용량에 대한 최종 결정한다. 가압기의 용량을 계산하는데 다음과 같은 사항이 고려된다. 내밀림 과도 상태에서 가압기 전열기는 과냉각 밀림수를 포화수로 가열할 수 있을 정도로 커야 하며, 가압기 증기체적은 안전벨트가 개방되지 않을 정도로 충분히 커야 한다. 또한 외밀림시에는 가압기 전열기는 증기의 팽창에 의한 압력저하를 보상하기위해 필요한 증기를 충분히 생산할 있는 용량을 가져야 하며, 가압기 물체적은 전열기가 노출되지 않을 정도로 충분히 커야한다. 가압기는 위의 조건을 만족시킬 수 있도록 설계 압력/온도, 운전압력/온도, 가압기 물/증기체적/가열기 열출력 등이 결정된다.

이와 같이 도출된 가압기 용량 및 전열기 수량은 원자로 용기 내부 설치의 적정성과 원자로용기 크기에 영향을 미

치므로 기계구조 및 설계의 관점에서 평가를 거쳐 확인되어야 한다.

4. 증기발생기 설계

증기발생기의 설계는 기본적으로 SMART 핵증기공급 계통의 설계/운전 요건과 원자로용기 내/외부의 기하학적 형태가 결정된 후 시작된다. 상위 요건에 의해 요구되는 열수력학적 성능을 내기 위한 전열면적 산정은 ONCESG 코드를 이용해 수행되며 그 결과로서 얻어진 전열면적을 얻기 위한 전열관 배치 및 증기/급수 헤더의 형상설계가 이루어진다.

SMART의 증기발생기 설계는 인허가 및 경제성 등 다양한 측면을 고려해 수행된다. 인허가 측면에서 가동 중 검사가 가능하도록 전열관 및 증기/급수 헤더가 선택/배치되어야 한다. 이와 관련되는 설계변수는 전열관 직경, 전열관 코일링 직경, 노즐 및 헤더 형상이다. 전열관 재료 선정시 가능한 한 산업계 표준에 등재된 재료가 사용될 경우 인허가 과정이 좀 더 용이해진다. 증기발생기가 원자로 내부에 설치되어 운전 중에 고장/파손이 발생하거나 열수력학적 성능이 제대로 나오지 않을 경우 보수 또는 교체가 가능하도록 설계되어야 한다. 한편 증기발생기가 원자로 내부에 설치되므로 증기발생기 높이 및 직경에 대한 제한요건이 존재한다.

증기발생기 관련 법규 및 표준을 준수하면서 증기발생기가 최고의 성능을 내기 위한 설계변수 최적화 수행을 위해 고려된 설계변수는 카세트 및 전열관 개수, 전열관 ID/OD, 피치 등이다. 한국원자력연구원에서 개발된 관류형증기발생기 전열면적 산정 코드인 ONCESG 코드를 이용하여 증기발생기 설계변수 최적화를 위해 필요한 계산을 수행하였다. ONCESG 코드는 관류형(직관 및 나선전열관형) 증기발생기의 열수력학적 설계 및 성능분석을 위해 개발된 프로그램이다. ONCESG 코드에서는 관류형증기발생기를 하나의 특성전열관으로 모델링하며, 이차측의 물과 증기의 혼합상태에 따라 단상액체대류 열전달 영역(subcooled heat transfer), 과냉비등영역(subcooled nucleate boiling), 포화비등영역(saturated boiling), 액체결핍영역(mist evaporation), 과열증기 강제열전달영역(superheating)으로 구분되어 열전달 및 압력강하 모델이 프로그램 되어있다. ONCESG 코드는 사용목적에 따라 주어진 경계조건에서 주어진 열용량을 낼 수 있도록 하는 필요 열전달면적을 계산할 수 있고, 반대로 주어진 열전달면적으로 전달할 수 있는 증기발생기의 열

용량을 결정할 수 있다.

증기발생기 카세트가 최적의 열역학적 특성을 가지기 위해서는 한 카세트 내부에 설치되는 전열관의 개수가 적절히 선정되어야 한다. 전열관 개수가 너무 감소하면 전열관 내부에서의 유속이 증가하여 압력강하가 커지고 이상 영역에서의 증기압력의 증가에 의해 열전달 효율이 감소한다. 반대로 전열관 개수가 너무 증가하면 유속의 감소에 의한 이차측 열전달계수의 감소 효과가 커져 열전달효율이 감소한다. 따라서 전열관 개수 결정시에 증기발생기 성능해석 프로그램을 활용하여 최적의 전열관 개수를 찾는 것이 요구된다. 관류형증기발생기 전열면적 산정 코드인 ONCESG를 이용하여 최적의 전열관 개수를 결정하였다. 이렇게 찾아진 전열관 개수는 증기발생기 카세트의 급수/증기 헤더 설치 요건과의 연계업무를 통해 수정될 수 있다.

5. RCS 유로 해석

원자로냉각재계통내 유로는 노심, 원자로냉각재펌프, 증기발생기, 노심 순으로 형성된다. 원자로용기 측면에 장착된 원자로냉각재펌프에 의해 원자로용기 중앙하부에 위치하는 노심과, 노심지지배럴과 원자로용기 내벽사이의 환형공간에 위치하는 증기발생기 사이에 원자로냉각재의 강제순환유동이 형성되어 노심에서 발생된 열이 증기발생기 전열관내의 이차측으로 전달된다. 그림 1은 원자로냉각재계통내 유로를 보여준다. 각 유로에서의 압력강하량은 HydraNet 코드를 이용하여 계산한다. 본 계산에 사용되는 HydraNet code는 집약형 프로그램 방식의 수력학적 네트워크(Integrated Software System (ISS) Hydraulic Networks)로 이는 개별적인 기기뿐만 아니라 복잡하게 구성된 수력학적 계통의 압력손실을 계산하기 위하여 개발된 프로그램이다.

원자로냉각재계통의 압력강하 수력학적 계산은 정상운전조건에서 운전되는 원자로의 유로 및 유로상에 있는 기기들의 압력강하량을 결정하고, 각 유로의 유동분포 및 구조물 내에 존재하는 유로단면적 싸이징이 적절한가를 평가할 수 있다. 또한 전체 계통압력강하량과 원자로냉각재펌프 특성곡선을 이용 최적설계유량 및 최대설계유량을 산정할 수 있다.

6. 원자로하부공동 유동장 해석

원자로 하부공동은 유동혼합헤더 하부에서 노심입구가

지의 영역이다. 노심으로 들어오는 원자로냉각재는 유속 및 온도가 균일하여야 한다. 노심입구에서 유동이 균일한지 확인하기 위하여 유동장을 해석하여야 한다. 해석결과, 유동이 불균일할 경우에는 노심입구영역의 원자로하부공동에 유동을 균일화시키는 다공의 원통형 Flow skirt를 설치한다. 그리고 Flow skirt의 구멍의 수와 크기를 적절히 조절하여 형상을 결정한다.

SMART 원자로 하부 공동의 기하학적 형상은 CAD 프로그램인 Gambit을 이용하여 구현하였으며, 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 계산하였다. FLUENT 프로그램은 전산유체역학 기법을 사용하여 유체, 열 및 질량 전달 유동장을 해석하며, 난류, 화학반응, 다상 유동 등과 같은 복잡한 유동현상에 대해서도 해석할 수 있다.

SMART 원자로 하부 공동 내 유동의 압력을 결정하는 방법은 FLUENT 프로그램에 의해서 해석된 결과에서 기준 단면의 평균 압력을 대표 압력으로 결정하는 것이다. 형상손실계수는 각 station의 단면적을 기준으로 하여 FLUENT에 의해서 해석된 압력 결과를 적용하여 도출한다. 해석 결과를 그림 2에 나타내었다. Flow skirt의 설치, 형상, 배치 등은 기계설계와 연계하여 결정한다.

7. 유동혼합헤더 유로 설계

유동혼합헤더집합체는 증기발생기의 부분적 냉각기능 이상으로 원자로냉각재가 국부적으로 불균일하게 냉각되어 노심으로 유입되는 냉각재의 온도가 불균일해 지는 것을 방지하는 기능을 수행한다. 유동혼합집합체는 노심지지배럴과 원자로용기 사이의 증기발생기 하부공간에 설치되는 원통 및 원추형 실린더가 동심원을 이루는 구조물로

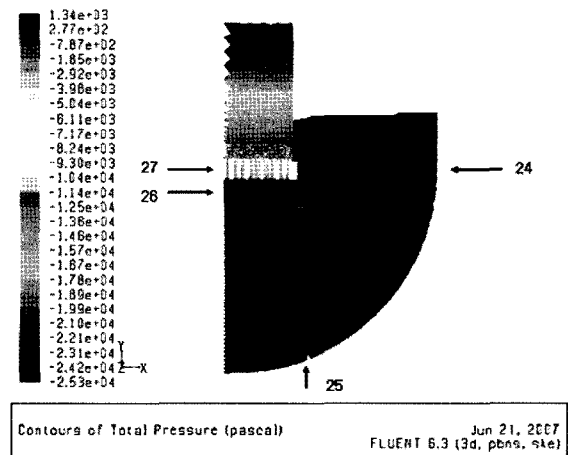


그림 2 원자로 하부 공동 상대 압력 분포

서 증기발생기카세트를 통과한 냉각재를 혼합하여 노심으로 유도한다.

유동혼합헤더집합체는 4개의 유동혼합헤더로 구성된다. 각각의 유동혼합헤더는 증기발생기카세트 3개로 구성되는 한 구역의 증기발생기를 통과한 냉각수를 회전시켜 360도 원주방향으로 균일하게 분배해 하향수로로 방출한다. 유동혼합헤더의 방출부에는 방출되는 유량을 균일화하기 위해 서로 다른 크기의 여러 개의 유로구가 설치된다. 유동혼합헤더 설치를 위하여 기계설계 및 구조해석과 연계하여 설계한다. 그림 3에 유동혼합헤더의 형상을 나타내었다.

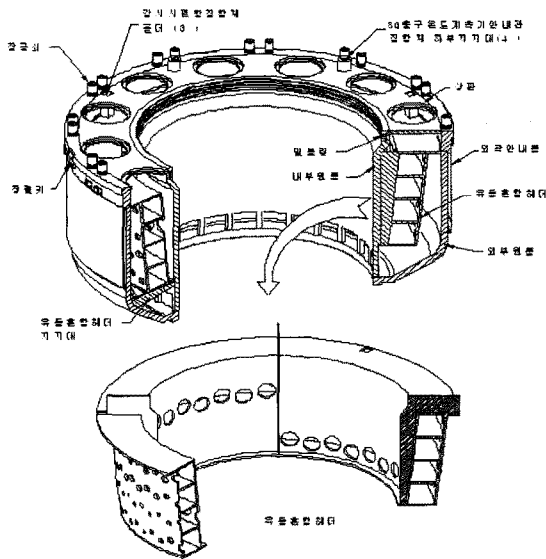


그림 3 유동혼합헤더

8. 원자로냉각재펌프 입·출구 유로 설계

원자로냉각재펌프의 입출구 유로에 대한 압력강하를 산정하기 위해 FLUENT코드를 사용하여 전산유체해석을 수행한다.

원자로냉각재펌프의 토출유로는 수평으로 설치되어 공간 제약을 많이 받는 단점이 있으나, 초기의 원자로냉각재펌프의 토출유로는 일반적인 펌프 토출유로에 비해 압력강하가 너무 크다. 이에 따라 입출구 유로에 대한 압력강하를 줄이는 개선 작업을 수행하였다. 한편 증기발생기 및 노심 등의 압력강하가 많아 원자로냉각재펌프의 펌프 유형이 변경되었다. 원자로냉각재펌프 유로의 주요 변경사항은 입구유로 면적 증대와 출구유로 방향 변경이다. 개선 결과, 입구유로는 면적이 약 4배 증가하였으며, 출구 유로는 유로방향이 축방향에서 반경방향 변경되었다.

그림 4는 유로개선 작업 후의 원자로냉각재펌프의 입출

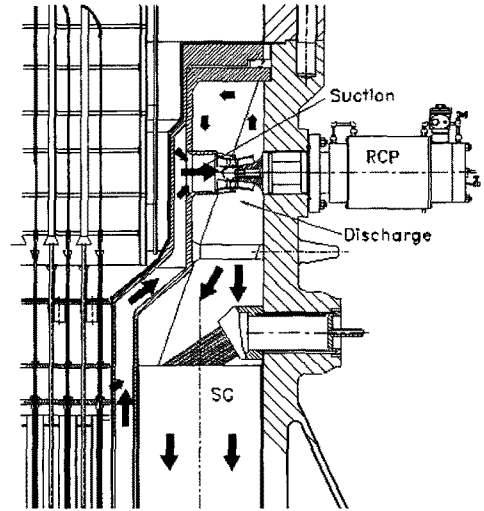
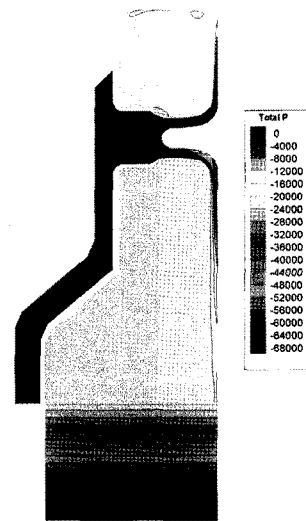
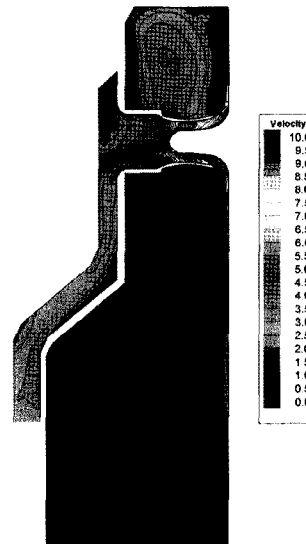


그림 4 원자로냉각재펌프의 입출구 유로형상(개선)



(a) 압력



(b) 속도

그림 5 원자로냉각재펌프 입출구 압력 및 속도 분포(개선)

구 유로형상을 나타낸다. 개선된 원자로냉각재펌프의 입출구 유로에 대한 압력강하를 산정하기 위한 전산유체해석이 수행되었다.

그림 5에는 전산유체해석을 통해 구한 대칭평면의 압력분포와 속도분포를 도시하였다. 이상과 같은 원자로냉각

재펌프 입출구유로의 설계개선을 통해 초기의 원자로냉각재펌프 유로보다 압력강하가 50% 이상 감소하였다. 이와 같은 설계개선사항은 원자로 전체 압력강하, 원자로냉각재펌프의 기계구조적 설계에 반영하여야 한다. [2]