일체형원자로의 신개념 안전계통 실증을 위한 실험적 연구

정문기† · 최기용* · 박현식* · 조석* · 박춘경* · 이성재* · 송철화*

Experimental Study on Design Verification of New Concept for Integral Reactor Safety System

Moon-Ki Chung, Ki-Yong Choi, Hyun-Sik Park, Seok Cho, Choon-Kyung Park, Sung-Jae Lee, and Chul-Hwa Song

Key Words: seawater desalination(해수담수화), SMART-P(일체형원자로), VISTA(고온고압실험장치), dynamic characteristics(동특성), PRHRS(피동잔열제거계통)

Abstract

The pressurized light water cooled, medium power (330 MWt) SMART (System-integrated Modular Advanced ReacTor) has been under development at KAERI for a dual purpose : seawater desalination and electricity generation. The SMART design verification phase was followed to conduct various separate effects tests and comprehensive integral effect tests. The high temperature / high pressure thermal-hydraulic test facility, VISTA(Experimental Verification by Integral Simulation of Transient and Accidents) has been constructed to simulate the SMART-P (the one fifth scaled pilot plant) by KAERI. Experimental tests have been performed to investigate the thermal-hydraulic dynamic characteristics of the primary and the secondary systems. Heat transfer characteristics and natural circulation performance of the PRHRS (Passive Residual Heat Removal System) of SMART-P were also investigated using the VISTA facility. The coolant flows steadily in the natural circulation loop which is composed of the steam generator (SG) primary side, the secondary system, and the PRHRS. The heat transfers through the PRHRS heat exchanger and ECT are sufficient enough to enable the natural circulation of the coolant.

1.서 론

최근 세계적으로 원자력 에너지이용의 다원화를 위해 안전성이 획기적으로 향상되고 경제성이 제고될 수 있는 원자로 개발이 활발히 추진되고 있다[1].

국내에서도 원자력 해수담수화 에너지원으로 활용과 소규모 전력생산을 병행할 수 있는 열병합 목적의 열출력 330MWt급 일체형원자로인 SMART를 개발하고 있다.

최근 발족된 일체형원자로 사업단에서는 SMART의 기술을 검증하기위하여 SMART의 1/5 축소판 pilot plant인 SMART-P건설을 추진하고 있다. 그 동안 원자로계통에 대한 설계개발 뿐만 아니라 고유안전기술, 피동안전기술, 모듈화기술 등이 개발되었으며 기존 원자로에 사용되는 기기와는 다른 개념의 증기발생기, 제어봉 구동장치, 주냉각재 펌프 등을 개발하고 있다. SMART 개발의 기본원칙은 기존 원자로기술을 최대한 활용하되 신기술 접목에 필요한 기술은 국내의 기술 능력을 활용하여 독자적으로 개발하

† 한국원자력연구소
E-mail :mkchung@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2946 FAX : (042)686-8362
* 한국원자력연구소

는 것이다.

SMART 원자로는 압력용기내에 노심, 증기발생기, 주냉각재펌프, 가압기와 제어봉을 설치한 소위 일체형원자로(integral reactor)로써 주기기간에 대형배관이 없어서 대형냉각재 상실사고를 근원적으로 방지하여 안전성을 개선시켰다[3].

SMART에 적용되는 주계통의 열수력 특성과 새로운 개념의 안전계통 설계를 실험으로 실증하기 위하여 종합 실증 실험장치를 제작하였다. 본 논문에서는 SMART-P를 축소 모의한 실험장치를 활용, 주계통 및 안전계통의 열수력 특성에 관한 실험 결과를 분석하였다.

2. 시험장치

본 고온고압 열수력 실험장치 VISTA[4-7]는 SMART-P를 기준 원자로로 하며, 기준 원자로 대비 높이비가 1/1, 면적비가 1/96, 체적비가 1/96이며, 온도 및 압력은 SMART-P의 정상상태 (350℃, 17.2MPa)를 모의할 수 있도록 설계하였다. 그림 1은 VISTA 실험장치의 개략도를 보여준다. VISTA는 종합실험장치로서 일차계통, 이차계통, 피동잔열제거계통 등의 주요 계통과 보충수계통, 기기냉각수계통, 질소공급계통 등의 보조계통으로 구성되었다. 각 계통에는 SMART-P의 열수력 특성을 모사하기 위하여 노심 모의 가열봉, 히터, 펌프, 제어 밸브, 열교환기 등의 주요 기기들이 설치되었다.

일차계통은 모의 노심 압력용기, 주냉각재펌프, 고온관, 증기발생기 일차측, 및 강수관으로 구성되었다. 또한 고온관의 상부에 환형공동, 주변공동 및 중앙공동의 3개 가압기가 차례로 연결되어 있다. 실험장치의 주냉각재펌프, 가압기 계통 및 증기발생기는 외부에 따로 장착되며, 강수관은 단일관으로 설계되어 증기발생기와 모의 노심 압력용기 사이를 연결한다. 또한 모의 노심 압력용기와 주냉각재펌프 사이를 연결하기 위해 주냉각재펌프 흡입관이 모의 노심 압력용기 상부에 설치된다. 주냉각재펌프와 증기발생기는 주냉각재펌프 방출관(고온관)에 의해 연결되며, 이 고온관에 가압기로의 연결 노즐이 설치된다.

이차계통은 이차 냉각재를 증기발생기로 공급하기 위한 급수공급계통과 증기발생기로부터 발생된 증기를 대기로 방출시키기 위한 증기공급계

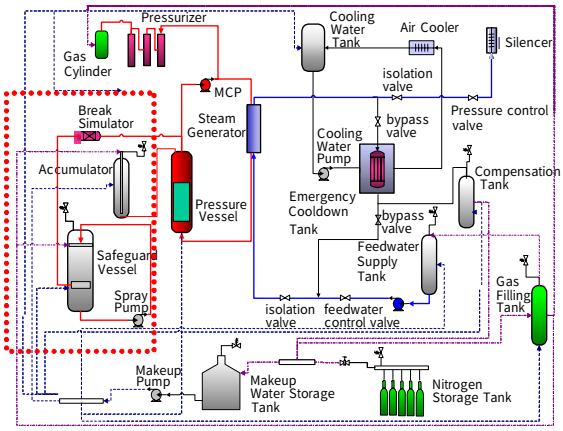

Figure 1. Schematic diagram of the VISTA facility

통으로 구성되어 있다.

증기공급계통에는 피동잔열제거계통으로 연결되는 분기배관과 보충수 저장탱크 또는 소음기로 연결되는 배관이 있다. 급수공급계통의 배관에는 급수공급탱크로부터 급수가 공급되는 배관과 피동잔열제거계통에서 응축수가 회수되는 배관이 부착된다.

이차계통의 냉각재는 증기발생기를 통과하면서 약 283.4℃, 3.55MPa의 과열증기로 전환된 후 증기배관을 통해 방출된다. 증기배관은 증기가 소음기를 통해 대기로 바로 방출되도록 설계되었다.

피동잔열제거계통은 사고가 발생했을 경우 원자로가 과열 및 과압되는 것을 방지하는 계통이다. 실험장치의 피동잔열제거계통은 1 train의 냉각계통으로 이루어져 있고, 비상냉각탱크, 응축열교환기, 보상탱크 및 밸브와 배관으로 구성된다. 또한 정상운전시 열기관을 냉각시키기 위한 보수냉각펌프가 별도로 설치된다.

자연순환에 의해 유입된 증기가 PRHRS 열교환기 내부에서 응축되면서 비상냉각탱크로 응축열을 전달하며, 응축열은 비상냉각탱크를 통해 흐르는 기기냉각수에 의해 제거된다. 이차계통의 증기 배관에서 분기된 배관은 비상냉각탱크 내부에 설치된 열교환기의 상부 헤더로 연결된다. 과열 증기는 열교환기 튜브를 지나면서 응축되어 하부 헤더로 모였다가 계통 배관을 거쳐 이차계통의 급수 배관으로 다시 들어간다.

PRHRS 열교환기는 비상냉각탱크 내부에 수직으로 설치되며, 열교환기의 기울기가 변경될 경

우에도 유지 및 보수가 용이하게 기기가 배치되었다. 열교환기는 6개의 튜브와 상부 및 하부 헤더로 구성되었다. 각 열교환 튜브는 Inconel-600으로 제작되었으며, 길이는 1200 mm, 내경은 13 mm, 외경은 18 mm이다. 열교환기 튜브 벽에는 열전대가 부착되어 튜브 온도가 측정되며 상부와 하부 헤더에서의 압력 및 온도가 측정되도록 측정 포트가 설치되었다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 정상상태 실험

3.1.1 Test Matrix 및 계측변수

총 17회의 정상상태 실험이 수행되었다. 인가 전원을 각각 10, 25, 36, 50, 75, 및 100%로 변화시켰으며, 유량을 각각 25, 36, 50, 75, 100%로 변화시켰다. 일차계통과 이차계통의 압력, 차압, 온도 및 유량을 측정하기 위하여 전체 52개의 계측기가 사용되었다. 실험에 사용된 계측기의 구체적인 사양은 고온고압 열수력 실험장치의 계측기 관련 보고서[7]에 제시되어 있다. 실험 데이터의 불확실도는 정상상태 실험자료에 대한 고온고압 열수력 실험자료의 불확실도 해석 보고서[8]에 정리되었다.

3.1.2 실험 결과

그림 2는 정상상태 실험에서의 유량의 변화에 따른 일차계통 차압의 변화를 보여준다. 일차계통에서 모의 노심 압력용기 부분의 차압은 4개의 차압계를 이용하여 구간별로 측정되었고, 또한 주냉각재펌프, 증기발생기 일차측 및 강수부의 차압이 측정되었다. 일차계통은 주냉각재펌프에 의해 순환된다. 각 부분의 차압은 일차계통의 유량의 증가에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보인다. 일차계통의 유량이 100%일 때 일차계통의 전체 차압은 약 22kPa임을 알 수 있다. 이 차압은 SMART-P의 일차계통 차압에 비해 낮은 것으로 주냉각재펌프와 증기발생기 사이의 고온관에 차압보정 오리피스가 추가로 설치되었다.

그림 3은 정상상태 실험에서의 유량의 변화에 따른 이차계통 차압의 변화를 보여준다. 이차계통의 증기발생기 이차측, 급수 배관 및 증기 배관의 위 부분과 아래 부분에서의 차압이 측정되었다. 이차계통에서는 급수펌프를 이용하여 급수

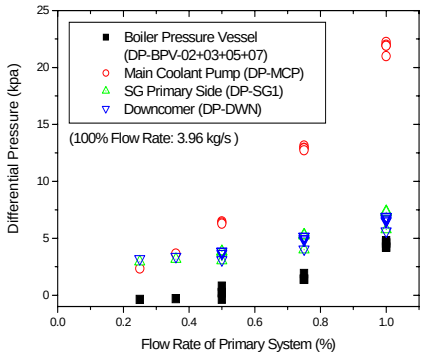

Figure 2. Primary pressure drop variation with respect to the flow rate

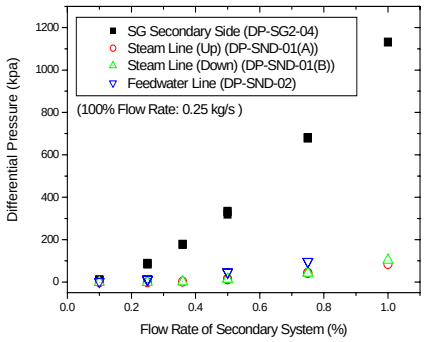

Figure 3. Secondary pressure drop variation with respect to the flow rate

공급탱크에 있는 급수를 주급수 배관을 통해 증기발생기로 연속적으로 공급한다. 공급된 급수는 증기발생기 이차측에서 과열증기로 바뀌어 증기 배관을 거쳐 소음기를 통해 대기로 방출된다. 급수 배관과 증기 배관에서의 차압은 유량의 증가에 따라 완만히 증가하고 있다. 또한 증기발생기 이차측의 차압은 계통의 유량의 변화에 따라 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이차계통의 유량이 100%이면 증기발생기의 이차측에서의 차압은 약 1.2MPa가 발생됨을 알 수 있다.

3.2 출력증가/감소 특성 실험

3.2.1 제어계통 및 Test Matrix

VISTA 실험장치를 이용하여 계통 동특성 실험을 수행하기 위해서는 열수력 변수들을 운전원의 요구에 따라 제어하기 위한 자동제어계통이 구축되어야 한다. 실험장치의 제어 계통의 구성은 하

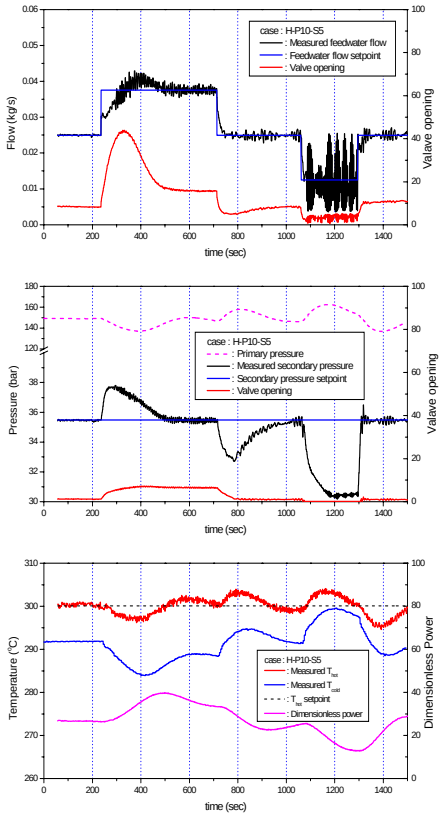

Figure 4. Experimental results for the power variation in case of H-P10-S5

드웨어적 구성 요소, 이를 구동하고 통제하는 소프트웨어로 구성되어 있다. 자동제어 로직이 설치된 주요기기들은 가열봉 히터 그룹 1,2,3, 주냉각재 펌프(MCP), 주급수제어 밸브 1, 2, 주증기압력 제어밸브, 주급수공급탱크 히터, 보충수 펌프다. 동특성 실험은 출력 변화에 따른 실험장치의 일이차측 주요 열수력 변수 및 주요 기기들의 동적 변화를 고찰하기 위한 것이다. 출력의 변화는 이차계통의 주급수 유량의 변화를 통해 이루어졌다. 본 연구에서는 동특성 실험을 시작하기 전의 정상상태 기준출력, 출력변화방법 및 출력변화율을 고려하여 총 14가지의 동특성 실험 경우를 도출하여 실험을 수행하였다.

3.2.2 실험 결과

VISTA실험장치의 출력증가/감소 운전에 대한 응답반응은 각 제어기기들에 설정되어 있는 비례상수 P, 적분상수 I, 미분상수 D 값 및 제어기기 유동 상류측 열수력 경계 조건들에 의존하게 된다. Test Matrix에 선정되어 있는 모든 실험 경우들에 대해서 동일한 P, I, D 값 및 경계조건을 사용하는 것은 실제적으로 불가능하며 0 ~ 100%의 전 출력범위의 실험을 통하여 경험적으로 획득되었다. 사전 실험적 연구를 통해 주요 제어기기들의 P, I, D 값들을 독립적으로 결정되었으며, 이렇게 도출된 각 제어기기들의 P, I, D 값들을 초기 추정값으로 사용하여, 각 계통의 상류 경계조건 및 출력에 따라 제어가 가능/용이하도록 최적화하였다.

그림 4는 기준출력 10%에서 출력을 절대출력 증가율 5%로 Step 증가 및 감소를 수행한 경우의 실험결과다. 우선 상단 그래프를 보면, 기준출력 10%에 해당하는 0.025kg/s의 주급수유량이 초기조건으로 유지되고 있다가 약 220초경 주급수유량 설정값을 출력 15%에 해당하는 0.0375kg/s로 Step 증가시켰다. 주급수유량 설정값의 갑작스런 증가는 측정되는 주급수유량과의 차이(error)를 유발시키며, 이 차이는 PLC (Programmable Logic Controller)에 인식된 자동제어로직에 의해 주급수제어밸브가 열리게 된다. 주급수제어밸브의 초기에 5%에서 40%로 급격히 열린 후 시간이 경과함에 따라 새로운 정상상태 12% 개도로 수렴하게 된다. 즉, 밸브의 개도는 과도한 과잉응답(overshoot)이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 측정된 이차측 급수유량 또한 밸브의 동특성과 유사한 과잉응답과정을 통해 새로운 정상상태로 도달하게 된다.

이차측 압력의 응답특성은 중간 그래프에서 볼 수 있는데, 갑작스런 주급수유량의 증가는 동시에 주증기유량의 증가로 이어지고, 이는 주증기압의 증가를 유발하게 된다. 그래프에서 볼 수 있듯이 주증기압력이 초기 35.5bar에서 약 38bar까지 순간적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 주증기 압력은 주증기 배관에 부착되어 있는 제어밸브로 제어되는데, 증가된 주증기압력은 설정값 35.5bar와의 차이(error)를 유발하고 PLC에 인식된 자동제어로직에 의하여, 주증기제어밸브가 열림으로써 차이가 제거된다. 중간 그래프에서 주증기제어밸브의 열리는 응답특성을 확인할 수 있다. 이 경우 주증기 제어밸브는 과잉응답특성을 거의 보이지 않으면서 새로운 정상상태로 잘 따라감을 볼 수 있다.

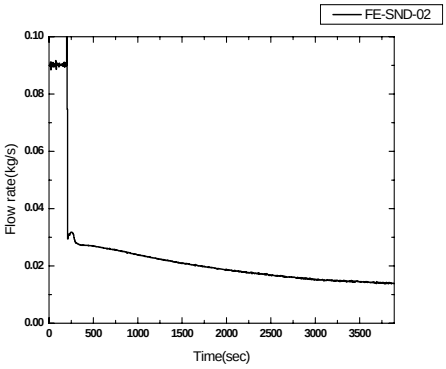

Figure 5. Natural circulation flow trend of PRHRS

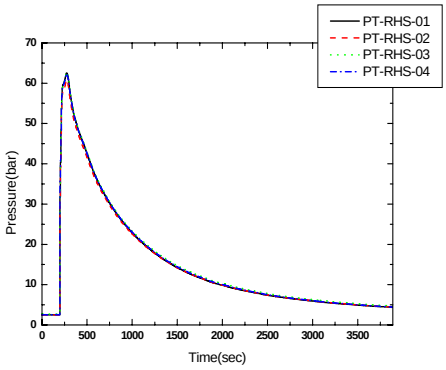

Figure 6. Pressure trend of PRHRS

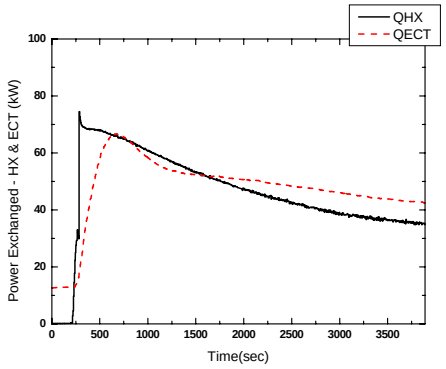

Figure 7. Exchanged heat trend through the inside the heat exchanger of the ECT

3.3 피동잔열제거계통의 열전달 특성 실험

3.3.1 Test Matrix 및 계측변수

정상상태 운전 조건에서 모의 노심으로의 전원 공급이 중단되고 펌프가 정지되면 자연순환 실험이 시작된다. 전원 공급이 중단된 이후에는 노심 붕괴열이 모의되었다. 정격 전원은 682.3kW이며, 노심 붕괴열의 모의를 위해 ANS 73 곡선이 사용되었고, 추정된 열손실 10.25kW가 반영되었다.

PRHRS의 열교환기, 증기배관과 급수배관, 증기발생기 이차측과 이차계통의 증기배관과 급수배관, 일차계통의 압력용기, 배관, 및 증기발생기 일차측에 계측기가 설치되었다. 자연순환 유량, PRHRS와 이차계통의 압력, 온도와 차압, 응축 열교환기의 표면 온도, 비상냉각탱크 내부의 유체 온도, 냉각탑의 입/출구 온도, 냉각수의 입/출구 온도와 유량, 일차계통의 압력과 유량, 및 증기발생기 일차측의 압력과 온도를 측정하기 위하여 전체 46개의 계측기가 사용되었다.

3.3.2 실험 결과

피동잔열제거계통이 작동되면, 증기발생기 이차측에서의 비등과 피동잔열제거계통 응축 열교환기에서의 응축에 의한 온도차에 의하여 계통 내부 유체는 자연순환을 하게 된다. 실험 결과를 Test ID가 H-P36-Q100-D-PRHR인 경우를 중심으로 설명하고자 한다. H-P36-Q100-D-PRHR의 실험은 노심 붕괴열이 모의된 실험으로써 정상상태에서 노심 모의 히터에 공급되는 전원과 피동잔열제거계통이 작동되기 전의 이차계통의 급수 유량은 각각 정격 전원 및 유량의 36%이었고, 일차계통 내부의 유량은 정격 유량의 100%이었다. 모든 실험 결과는 실험 초기조건이 다른 몇 경우를 제외하고는 각 변수의 시간에 따른 변화가 초기 이차계통 급수 유량 및 공급 전원량과는 큰 관련성이 없는 것으로 나타났다.

피동잔열제거계통에서 자연순환 성능은 일차계통으로부터의 잔열 제거를 위한 가장 주요한 열수력 현상이다. 그림 5는 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통의 자연순환 유량을 보여준다. 초기에 고온고압 열수력 실험장치의 일차계통 및 이차계통은 정상상태로 운전된다. 피동잔열제거계통이 작동되면서 초기에 급격한 유량의 변동이 있고, 몇 초 이내에 자연순환이 이루어진다. 이후 자연순환 유량은 일정한 속도로 감소하는 경향을 보여 준다. 그림 6은 피동잔열제거계통이 작동되었을 때의 피동잔열제거계통 열교환기 내부의 압력을 보여준다. 초기에 대기압 상태에 있던 계통 압력은 피동잔열제거계통의 작동과 동시에 급격히 상승하였으며, 최대값

에 도달한 이후에 점차적으로 감소한다. 초기에는 자연순환 유량과 냉각능력이 매우 크기 때문에 계통압력이 급격하게 떨어지나, 시간의 경과와 함께 자연순환 유량과 냉각 능력이 감소하기 때문에 압력의 하락율은 점차적으로 감소한다. 자연순환 회로 내부의 최대 계통압력은 약 6.2MPa이다.

피동잔열제거계통에서 자연순환이 발생되면 피동잔열제거계통 열교환기는 최종적인 열제거원으로써의 역할을 한다. 그림 7은 계산을 통해 얻어진 비상냉각탱크 내부 열교환기를 통한 열교환량을 보여준다. 자연순환 유량의 엔탈피 변화로부터 계산된 열전달량은 열교환기를 통한 열전달량을 신속하게 반영하고 있으나, 비상냉각탱크를 통과하는 기기냉각수의 온도변화로부터 계산된 열전달량은 실제 현상보다 느린 반응을 보인다. 이는 비상냉각탱크를 통과해 흐르는 기기냉각수의 유체 속도가 최대 0.3 m/min으로 매우 느리기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Test Matrix에 설정된 동특성 실험을 통해 열수력 주요 변수의 동특성을 실험적으로 관찰하였다. Test Matrix 중 가장 급격한 변동인 10% Step 증가 요인에 대해서 가열봉 출력, 일차계통 압력 및 온도, 이차계통 주증기압력 등을 포함하는 주요 열수력 변수들이 잘 제어되는 것이 확인되었다.

피동잔열제거계통 열전달 특성 및 자연순환 실험에서는 PRHRS의 자연순환 성능, PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부에서의 열전달 및 일차계통 내부의 열수력적 거동을 관찰하였다. 전체적으로 증기발생기 이차측, 이차계통, 및 피동잔열제거계통에 걸쳐 형성되는 자연순환회로에서 안정적인 자연순환이 일어남을 확인하였다. PRHRS 열교환기와 비상냉각탱크 내부를 통한 열전달은 자연순환을 가능하게 할 만큼 충분하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 산하 일체형원자로개발단 사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드린다.

참고문헌

(1) IAEA, 1996, "Design and Development Status of Small and Medium Reactor System", IAEA-TECDOC-881,Vienna.

(2) M.H. Chang, 1999, "SMART-An Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation," Proc. of Global 99, Jackson Hole, USA.

(3) M.H. Chang, 2002, Basic Design Report of SMART, KAERI/TR-2142/2002.

(4) H.S. Park, 2004, Analysis report of the thermal-hydraulic characteristics of the high temperature/high pressure thermal-hydraulic test facility (VISTA) in steady state conditions, KAERI/TR-2657.

(5) K.Y. Choi, 2003, Dynamic system characteristics report of the high temperature/high pressure test facility (VISTA) for the power variation, KAERI/TR-2605.

(6) H.S. Park, 2004, Experiments for heat transfer characteristics and natural circulation performance of PRHRS of the high temperature/high pressure thermal-hydraulic test facility (VISTA), KAERI/TR-2656.

(7) S. Cho, 2003, Instrumentation of VISTA Test Facility," KAERI/TR-2584/2003.

(8) S. Cho, 2003, Uncertainty Analysis of HTHP Test Data (1) - Steady State Data, KAERI/TR-2591/2003.