

하나로 유동모의 설비의 유체순환계통 해석

박 용철*

The Analysis of Flow Circulation System for HANARO Flow Simulated Test Facility

Yong-Chul Park*

ABSTRACT

The HANARO, a multi-purpose research reactor of 30 MWth open-tank-in-pool type, has been under normal operation since its initial criticality in February, 1995. Many experiments should be safely performed to activate the utilization of the HANARO. A flow simulation facility is being developed for the endurance test of reactivity control units for extended life times and the verification of structural integrity of those experimental facilities prior to loading in the HANARO. This test facility is composed of three major parts; a half-core structure assembly, flow circulation system and support system. The flow circulation system is composed of a circulation pump, a core flow pipe, a core bypass flow pipe and instruments. The system is to be filled with de-mineralized water and the flow should be met the design flow to simulate similar flow characteristics in the core channel of the half-core test facility to the HANARO. This paper, therefore, describes an analytical analysis to study the flow behavior of the system. The computational flow analysis has been performed for the verification of system pressure variation through the three-dimensional analysis program with standard $k-\epsilon$ turbulence model and for the verification of the structural piping integrity through the finite element method. The results of the analysis are satisfied the design requirements and structural piping integrity of flow circulation system.

Keywords: Flow analysis, Flow simulation test facility, HANARO, Flow circulation system.

1. 서론

30 MW의 연구용 원자로인 하나로는 1995년 2월에 초임계에 도달한 이후, 정상운전을 하고 있다. 하나로

의 이용을 활성화하기 위해 많은 실험들이 안전하게 수행할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 하나로에 실험장치를 설치하기 전에 하나로와 유사한 유동특성을 모의할 수 있는 실험설비에서 성능과 구조적 건전성을 확인한다면 하나로를 보다 안전하게 이용할 수 있을 것이다. 이를 위해 하나의 유동특성을 모의할 수 있

* 한국원자력연구소
ycpark@kaeri.re.kr

는 유동모의설비를 개발하고 있다.

이 설비는 1/2 노심 구조물 집합체, 유체순환계통과 보조계통으로 구성되며 1/2 노심 구조물 집합체 (이하 집합체)는 플레넘, 그리드 플레이트, 노심 채널, 침니 및 모의수조로 구성된다. 노심 채널은 하나로의 1/2 노심으로 구성되고, 13개의 육각 유동관과 7개의 원형 유동관이 설치된다. 그 속에 핵연료 대신에 유량모의 오리피스⁽¹⁾가 설치되어 있어 하나로와 유사한 유동특성을 모의할 수 있으며 핵반응을 하지 않으므로 방사능에 의한 위험이 없이 이 설비를 쉽게 이용할 수 있다.

유체순환계통은 총유량 410 kg/s의 유량을 1/2 노심 구조물 집합체에 노심 유량과 노심 우회유량을 순환시키는 장치로서 배관의 건전성을 확인하기 위해 응력해석을 수행하였다.

본 논문에서는 응력해석을 수행한 과정에 대해 이론적 고찰, 해석 방법, 결과 및 고찰과 결론을 기술하였으며 해석결과들을 통해 얻어진 각 지지점의 반력에 견디는 배관의 지지물을 설계, 해석하여 유체순환계통의 건전성을 확인하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 유체순환계통

유체순환계통은 육각과 원형 유동관에 각각 19.6 kg/s와 12.7 kg/s의 노심 유량, 369 kg/s가 흐를 수 있도록 순환펌프, 16 인치 흡입관, 14 인치 송출관 및 4 인치 노심 우회관으로 구성된다. 하부에 있는 플레넘으로 유입된 유체는 상부에 있는 노심을 지나 침니로 흐르며 단면적의 변화로 인해 제트 유동이 형성된다. 4 인치 노심 우회관은 순환펌프의 송출관에서 분기되어 총유량의 10 %인 41 kg/s의 유량이 노심을 우회하여 침니의 상부 유입구로 유입된다. 침니 하부에 출구 노즐이 있으며 순환펌프의 흡입구가 연결되어 있어 펌프 흡입력에 의해 침니 상부에 있는 노심 우회유량이 노심의 제트유동 솟구침을 억제한다⁽²⁾.

이러한 기능을 수행할 수 있도록 유체순환계통의 설계요건은 사용온도가 최대 50 °C, 최저 5 °C이며, 설계압력과 온도는 각각 1000 kPa와 93 °C이다⁽³⁾.

순환계통의 배관은 그림 1과 같이 형성되며 14 인치 이상은 ASTM A358 Gr TP304, 12인치 이하는

ASTM A312 Gr TP304로 각각 제작한다. 배관의 벽 두께는 14 인치 이상은 스케줄 10에 상응하는 두께 (0.25 인치), 12 인치 이하는 스케줄 40S를 사용한다⁽³⁾.

2.2 배관해석

유체순환계통의 배관은 ANSI B31.1에 따라 응력을 해석하고 건전성이 입증되어야 하므로 전산 시뮬레이션을 통해 배관의 응력을 해석하였고, 이 결과를 토대로 하여 각 배관의 지지물을 설계하였다. 먼저 관내로 흐르는 유체의 동압이 배관계에 미치는 하중을 계산하기 위해 전산유체해석 프로그램인 FLUENT 5.4^{(4), (5)}를 사용하여 배관 내 유동현상을 해석하였고, 해석결과로 배관 내부 표면에 발생하는 압력을 확인할 수 있었다. 다음으로 각 지지대의 위치를 선정하여 앞선 유동해석 결과를 가지고 전산구조해석 프로그램인 ANSYS 5.6⁽⁶⁾을 통해 배관의 응력을 해석하였다. 또한 배관의 자중에 의한 영향과 배관의 열팽창에 의한 열응력의 해석도 포함하였다. 그리고 이를 만족할 수 있도록 배관지지대의 주요 구조물을 해석하여 소재를 결정하였다.

3. 해석

3.1 계산 조건 및 범위

집합체 침니하부와 연결된 출구관으로 유입된 유동이 직경 16" 및 14" 배관을 거쳐 노심 유입관을 통해 집합체 하부 플레넘으로 유입되는 과정을 살펴보기 위하여 유체순환계통 배관에 대하여 유동해석을 하여 배관표면에 작용하는 압력을 확인하여 설계된 배관의 각 지지점에 대한 응력해석을 위한 구조해석의 자료로 사용하였다.

그림 2는 배관에 설치되는 밸브 등의 주변장치에 의한 압력이득과 손실이다. 주배관의 입구로 유입되는 유량을 410 kg/s로 고정하고, 펌프 및 각종 주변장치들을 Porous Media로 적용함으로써 압력의 이득과 손실을 적용하였다.

자중과 유동의 영향 그리고 배관의 열팽창을 고려하여 그림 3과 4와 같이 노심 유량배관 (주배관)과 노심 우회배관 (우회배관)의 지지점을 선정하였으며, 각 지지점의 구속조건은 실제 지지물의 설치 시 배관의

구속 방향과 같은 방향으로 주었다. 주배관의 1, 4, 5, 6, 7번 지지물은 Y-방향 (자중방향)을 지지하였으며, 2, 3번 지지물은 각 방향을 완전 구속하였다. 우회배관의 모든 지지점은 배관의 길이방향을 뺀 나머지 방향을 지지하도록 하였다. 구조해석 시 유체의 해석결과 (유체의 동압)와 배관 자중의 효과를 같이 고려하였으며, 배관의 열팽창에 의한 배관의 응력해석을 수행하였다. 배관의 열팽창 계수 및 재료의 물성치는 ANSI B31.1 CODE를 참고하였으며, 아래의 표와 같다.

Table 1 Material properties of pipe

Description	Property (A358 TP304, A312 TP304)
Modules of Elasticity	195GPa(21℃)
	190GPa(93℃)
Possion's Ratio	0.3
Thermal Expansion Coef.	16.81mm/mm/℃
Max. Allowable Stress	92.4MPa

3.2. 계산 방법

전산해석은 세 단계로 나누어 시행하였다. 첫 번째로써 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic)을 이용한 전산해석을 통하여 배관 내부를 유동하는 유체의 정적하중과 유체가 유동하면서 발생하는 동적 하중을 계산하였다. 전산유체해석을 통하여 도출된 결과를 토대로 두 번째 단계인 전산구조해석을 시행하였다. 전산구조해석은 전산유체해석에서 도출된 결과에 배관 자중의 영향을 합산하여 경계조건을 적용하여 해석하였고, 배관의 열팽창에 의한 열응력해석도 수행하였다. 위와 같은 결과를 바탕으로 각 배관의 지지물을 설계 및 해석하여 배관 및 각 지지점에서의 구조적 안정성을 검증하였다.

전산유동해석을 위하여 미국 Fluent Inc.의 CFD 코드인 FLUENT5.4 소프트웨어를 사용하였고, 전산구조해석을 위하여 ANSYS, Inc.에서 개발한 유한요소해석 및 설계 프로그램인 ANSYS 5.6 소프트웨어를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 유동해석

그림 5는 전산유동해석의 결과로 도출된 배관의 압력분포이다. 펌프에서의 압력이득이 높기 때문에 펌프 전후의 구분이 확연하게 나타나고 있다.

유체순환장치의 양 끝단은 모두 1/2 노심 구조물 집합체와 연결되어 있으며, 그림의 좌측 상단에 위치한 끝단을 통해 유체가 유입된다. 이 입구면의 수두를 확인하여 초기 압력 값으로 적용하였으며, 이 유동이 배관을 따라 유동하면서 밸브 등의 장치류 및 곡관의 영향과 유체 점성에 의한 영향을 받으며 조금씩 압력손실을 입게 된다.

펌프 흡입관은 유동이 진행할수록 유체 점성으로 인한 압력손실이 발생하여 정압이 낮아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 곡관의 경우 유체의 관성에 의해 바깥쪽 벽면에 높은 압력이 작용하고 안쪽 벽면에는 바깥쪽 벽면보다 약 5000 Pa 정도 낮은 압력분포가 나타나고 있다. 배관에는 밸브와 스트레이너가 하나씩 위치하여 있으며 이 장치들에 의한 압력손실도 각각 -853 Pa과 -25,000 Pa을 고려하였다.

펌프 출구관은 펌프 출구에서 약 3.5기압의 높은 압력을 나타내며 이후로 밸브와 유량계 등의 장치를 지나면서 압력 손실이 발생하고 유체 점성에 의한 손실 또한 발생하여 집합체 하부로 약 3.3기압의 정압력을 나타내며 유입되고 있다. 체크 밸브를 통한 압력손실은 -19,766Pa을 적용하였으며, 밸브는 -1482Pa, 유량계는 -330Pa을 적용하여 해석하였다.

해석으로 얻은 배관 표면의 압력분포 데이터를 구조해석이 가능토록 출력하여 배관 응력해석의 경계조건으로 사용하였다.

4.2. 구조해석

유동해석결과를 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.6의 유한요소로 전환하여 배관 자체의 자중과 그림 3과 4의 지지점 위치에 구속조건을 주고 주배관의 응력해석을 하여 그림 6에 나타내었다. 최대 응력이 발생하는 지점은 4" 배관이 분기되는 지점으로써 약 23 MPa의 응력이 집중된다. 이는 배관 형상의 급격한 변화와 유동흐름의 정체가 그 원인으로 보인다 하지만 배관의 허용응력에 비해 낮은 응력을 보이므로 안전하다고 말할 수 있을 것이다. 표 2는 유동의 동압과 자중을 고려한 해석에서 각 지지점의 하중을 표시하였다.

Table 2 The loads of flow dynamic and dead weights at pipe supports in main piping

Support No.	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
①	4314.2	2985.9	70.479
②	0	-3034.5	0
③	-5601.4	-894.5	-85.959
④	26092	-756.62	130.96
⑤	0	-920.58	0
⑥	0	-6732.3	0
⑦	0	-2827.4	0
⑧	0	-1077.6	0
⑨	14563	-1461	-25339

Table 3 The thermal extension loads at pipe supports in main piping

Support No.	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
①	-18903	11585	-5002.8
②	0	0	0
③	18903	-11585	5002.8
④	1447.8	4349.2	-459.77
⑤	0	-6001.3	0
⑥	0	1401.9	0
⑦	0	2517.7	0
⑧	0	-8632	0
⑨	-1447.8	6364.5	-459.77

Table 4 The thermal extension loads at pipe supports in bypass piping

Support No	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
③	541.30	-782.22	-31.768
⑧	0	-57.763	93.05
⑨	-407.10	-2426.3	0
⑩	0	213.61	-101.77
⑪	0	-1066.7	13.456
⑫	-1056.1	-5799.1	0
⑭	921.86	4107.0	27.035

주배관의 배관계가 열팽창을 하였을 때의 응력 분포와 변위를 그림 7에 나타내었다. 배관의 열팽창 해석은 ANSYS의 Line Element를 사용하여 해석하였다.

주배관의 열팽창에 의한 열응력해석 결과는 앞의

결과에 비해 응력 및 변위가 크게 나타났다. 하지만 열팽창에 의한 배관의 변위를 최대한 구속하지 않는지를 함으로써 열응력 또한 배관의 허용응력을 넘지 않는다. 펌프 양단의 지지점을 제외한 주배관의 모든 지지점은 배관의 하중 방향만을 지지하도록 하였다. 표 3은 열응력 해석에서의 각 지지점의 하중을 표시하였다.

다음은 우회배관에 대해 자중과 열팽창에 의한 열응력해석을 하여 그림 8에 나타내었다. 열응력에 의한 배관의 변위가 매우 크게 나타나며, 이러한 변위에 대해 과도한 구속을 피하는 지지가 중요하다. 따라서 이러한 배관의 변위에 대해 우회배관의 지지물은 배관의 길이 방향의 구속을 피하는 설계를 하여야 하며 각 지지점에 대한 하중은 표 4에 정리하였다.

지지대는 H-beam을 기준으로 하였으며 재질은 배관과 같은 물성치를 갖는 것으로 하였다. 각 지지대의 응력은 지지점의 하중으로 인해 발생하는 모멘트로 인해 하단부의 수직부재에 가장 큰 응력을 발생시키므로 지지대 응력해석은 지지대의 수직부재에 대해 수행하였다. 주배관의 지지대 해석은 지지하중 중 가장 큰 3번 지지하중을 적용하였으며, 그 결과는 그림 9와 10에서 볼 수 있다. 또한 지지대의 기초 플레이트는 설계지지대의 하중 중 가장 큰 모멘트를 견딜 수 있도록 설계하였다.

Table 5 Main material size for pipe support

Description	Main pipe, mm	Bypass pipe, mm
H-Beam	200×200 100×100	100×100
Base Plate	500×500×25	200×200×10
Anchor Bolt	M16	M8

6. 결론

하나로 유동모의장치의 유체순환계통의 설계를 위해서 전산 시뮬레이션을 통해 배관의 응력을 해석하였으며, 결과를 토대로 하여 각 배관의 지지물을 설계하였다. 먼저 관내로 흐르는 유체의 동압이 배관계에 미치는 하중을 계산하기 위해 유동현상을 해석하였고 해석결과로 배관 내부 표면에 발생하는 압력을 확인하였다. 다음으로 각 지지대의 위치를 선정하여 앞선 유동

해석 결과를 가지고 구조해석을 하였으며 동하중이나 자중보다 열팽창에 의한 응력이 크게 발생함을 확인하였다. 위의 해석결과들을 통해 얻어진 각 지지점의 반력을 토대로 배관의 지지물을 설계, 해석하여 하나로 유동모의설비의 유체순환계통이 건전하게 설계되어 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Y.C.Park, et. al., "Flow Analysis of Simulation Nuclear Fuel Loaded in the HANARO Flow Simulation Test Facility", Proceedings of the 2nd National Congress on Fluid Engineering", 2002. 8.
- (2) Y.C.Park, et. al., "Flow Analysis of HANARO Flow Simulated Test Facility", Proceedings of the fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference, Nagoya, Japan, 2002. 11.
- (3) Y.C.Park, et. al., " Technical Specification for Fabrication of Flow Circulation System in HANARO Flow Simulation Facility", KAERI, TR-2290-2002, 2002. 11.
- (4) Fluent Inc. Users Manual of FLUENT 5.4
- (5) CF Tech. Inc., Users Manual of Computational Analysis Program , Version 1.0
- (6) ANSYS Inc. ANSYS V5.0 User's Manual, 2001.

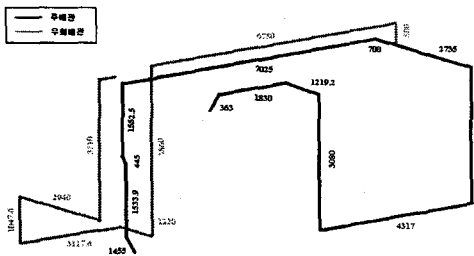


Fig. 1 Out dimension of piping

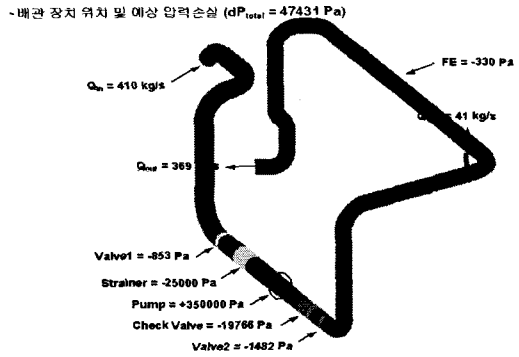


Fig. 2 Predicted pressure distribution of core flow piping

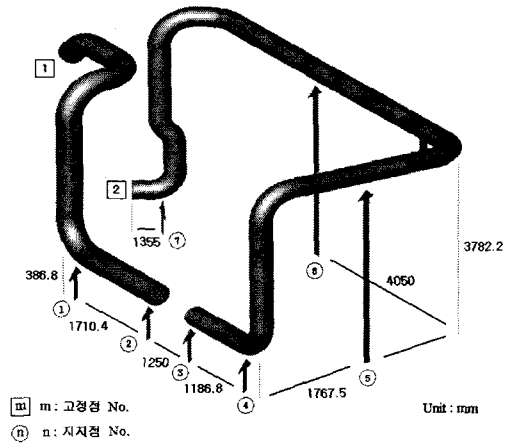


Fig. 3 Pipe support location of core flow piping

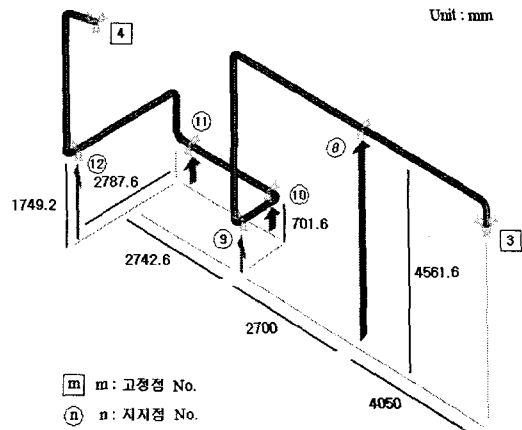


Fig. 4 Pipe support location of core bypass flow piping

-표면 압력 분포

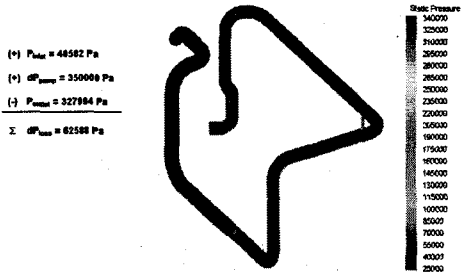


Fig. 5 Pressure distribution in core flow piping

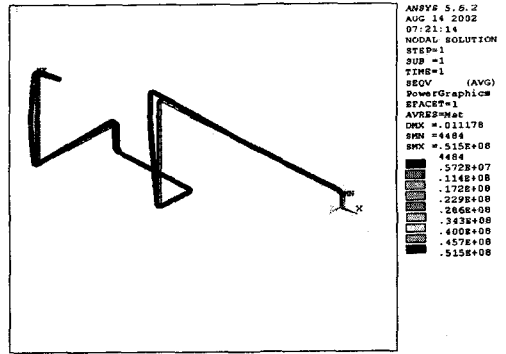


Fig. 8 Strength distribution due to dead weight and thermal expansion in core bypass flow piping

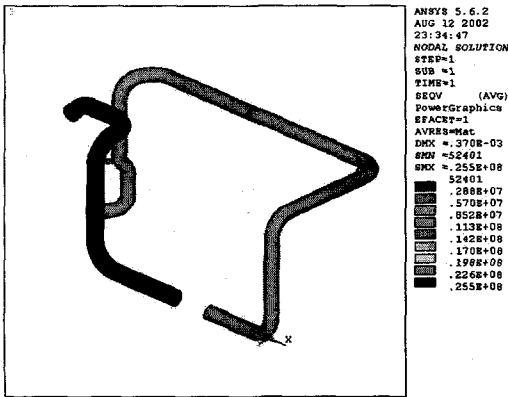


Fig. 6 Strength distribution due to flow dynamic and dead weight in core flow piping

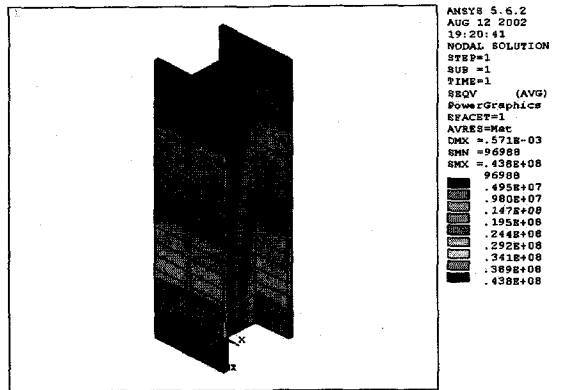


Fig. 9 Analysis results of H-beam

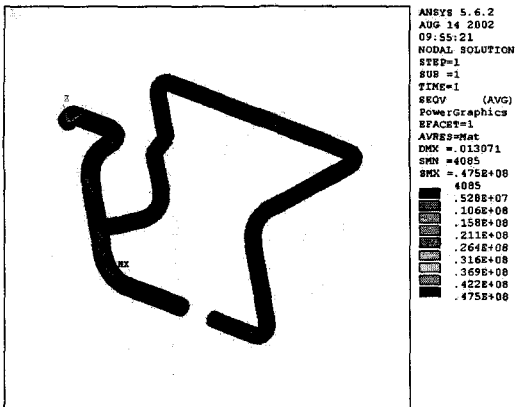


Fig. 7 Stress distribution due to thermal expansion in core flow piping

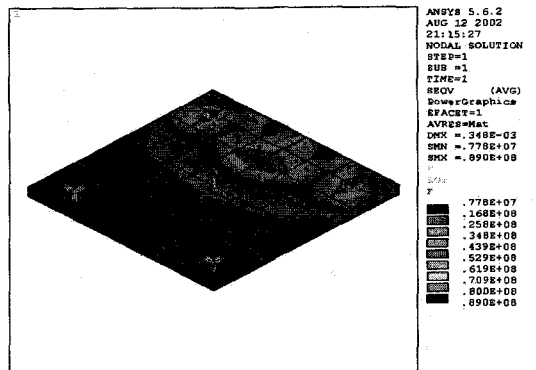


Fig. 10 Analysis results of base plate