

하나로에서 Fission Moly 표적 장전 인출시의 노심유량 특성 해석

The Analysis of Core Flow Characteristics When Fission Moly Target is Loaded or Unloaded in HANARO

박용철, 이병철, 우종섭, 전병진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

30MWth의 개방수조형 다목적 원자로인 하나로는 1995년 2월 초임계에 도달한 이후 정상적으로 가동되고 있다. 하나로를 이용하여 의료용 동위원소인 fission moly를 생산하기 위해 표적 취급장치를 개발하고 있다. 표적을 조사공에 장전 또는 인출하는 경우, 노심에서의 유량변화로 인하여 유동특성의 변화가 예상된다. 본 논문은 하나로가 정상적으로 운전되고 있을 때 표적을 장전하거나 인출하는 경우, 전산해석기법을 이용하여 노심의 유동특성 해석에 대해 기술하고 있다. 그 결과, 표적 조사공이 완전히 개방되거나 막히어도 노심의 유량분포는 평균유량의 95% 이상을 유지하고 있어 하나로는 안전하게 운전할 수 있음을 확인하였다.

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. To produce fission moly, medical isotope, by using the HANARO a target handling tool is developed. When the target is loaded or unloaded, under the HANARO normal operation, it is predicted that the flow characteristics in the core are varied by the variation of the flow rate. This paper describes an analytical analysis to confirm the flow characteristics of the core by loading or unloading the target at the OR-5, a circular flow tube in the core. As results, it is confirmed that the HANARO is safely operated through the analysis results that the flow distribution of the core is maintained above 95% of the average flow rate in the core though the target is completely loaded or unloaded under the HANARO normal operation.

1. 서론

Fission Mo-99는 의료용 방사성 동위원소인 Tc-99m의 모 핵종으로 U-235의 핵분열에 의해 생산된다. 이를 하나로에서 생산하기 위해 표적 취급장치가 개발 중에 있다. 이 장치는 하나로가 운전 중일 때 작업수조에서 fission moly 표적 (이하 표적)을 장착하여 조사공 상부까지 이송되면 수조덮개가 덮인 상태에서 안내관을 통해 조사공에 장전되고 조사가 끝나면 역순으로 제거된다.

하나로가 정상적으로 작동되고 있을 때 fission moly의 표적을 조사하기 위한 설계요건은 다음과 같이 정하였다⁽¹⁾.

첫째, 표적은 충분히 냉각되어야 하며 과도한 진동이 없어야 한다.

둘째, 표적장치의 안내관을 통해 제트유동이 침니 상부로 분출되지 않도록 한다.

셋째, 여하한 경우에도 표적의 조사관을 통한 냉각수의 유량이 노심의 다른 핵연료에서의 유량을 감소시키지 않아야 한다.

본 논문에서는 셋째 요건을 검증하기 위하여 노심 냉각수에 대하여 유동해석을 하였다. 유동해석 방법은 하나로가 정상적으로 가동중일 때, 전산해석기법을 이용하여 노심유량분포를 해석하고, 이를 실험결과와 비교하여 해석 방법을 검증하였다. 그리고 이를 바탕으로 표적이 인출되어 완전히 개방되었을 때와 장전시 조사공이 막히었을 때를 가정하여 유동해석을 하였다.

그 결과는 설계요건인 노심의 유량분포가 평균유량의 95% 이상을 만족하는지를 검토하였다⁽²⁾.

2. 전산 유동해석의 이론적 고찰

3차원 비압축성 정상유동에 대한 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식과 비압축성 Navier-Stokes 방정식 이다. 스칼라에 대한 일반 미분방정식은 식 (1)과 같다^{(3),(4)}.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + Sm \quad (1)$$

이 때의 연속방정식은 $\Phi=1$, $S_m=0$ 이므로 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

비압축성 정상유동의 Navier-Stokes 방정식은 ρ =상수, $\Phi = u$, $\Gamma = \mu$,
 $S_m = -\partial P/\partial x + \rho g + Vx$ 로 표현되므로 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (3)$$

여기서, u_i 는 유체의 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 층류 동점성계수, u'_i 은 유체의 난류섭동 성분을 의미한다.

부시네스크 가설 (Boussinesq eddy-viscosity hypothesis)에 의하여 레이놀즈 응력과 난류 동점성계수는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서, $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$, k 는 난류운동에너지, ε 은 난류소산율, δ_{ij} 는 Kronecker Delta (단위행렬)를 의미한다.

표준 난류모델에 관한 난류 운동에너지 및 난류소산율 전달방정식은 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서, G_k 는 평균속도 변화에 의한 난류 운동에너지 생성을 나타내고, G_b 는 부력으로 인한 난류 운동에너지 생성을 나타낸다. 그리고 Y_M 은 압축성 난류에서 전반적인 소산율에 대하여 변동되는 확산의 기여를 나타낸다. 또한 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 은 상수이고, Pr_k 와, Pr_ε 은 난류 Prandtl 수이다. 해석에 사용되어진 계수 값들은 관련 전산해석 시방에 따라 다음의 값들을 적용하였다⁽³⁾.

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{3\varepsilon}=0.09, Pr_k=1.0, Pr_\varepsilon=1.3 \text{ 이다.}$$

그리고 난류점성계수 μ_t 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

3. 계산조건 및 유동해석 방법

해석형상은 Fig. 1과 같이 좌측하부에 있는 주 유입구로 노심유량이 유입되면 플레넘, 칸막이 (baffle), 노심채널을 거쳐 침니 하부에 있는 출구를 통해 순환펌프에 의해 재순환된다. 그리고 노심 상부에서 바라본 각 유동관의 배열은 Fig. 2와 같으며 표적이 장전되는 조사공은 원형 유동관인 OR 5이다.

형상은 정렬 및 비정렬 격자를 혼용하여 약 150만개의 cell로 구성하였다. 중력을 고려하였으며, 플레넘의 입구를 통해 노심으로 유입되는 설계유량은 703 kg/s가 유입되나, TPTH (two pumps and two heat exchangers) 운전상태의 실험결과와 마찬가지로 갭 유량을 제외한 654 kg/s를 적용하였다. 그 이유는 계산을 단순화하기 위한 것이다. 또한, 갭 유량은 육각 및 원형 채널과는 별도로 갭을 통해 유동관 외부로 흐르기 때문에 유동관 내부유동에 미치는 영향이 미미하기 때문이다.

플레넘 내부의 칸막이도 모델링에 포함하여 플레넘에서 생성되는 와류의 영향도 고려하였다. 각 유동관들은 모두 porous media⁽³⁾로 처리하였는데, 노심의 하부는 노심을 지지하기 위한 구조물이 설치되어 있어 모든 조사공이 동일하지만 상부 핵연료 부분은 조사공이 완전히 개방되는 경우와 막히는 경우를 고려하여 상하부를 나누어 표 1과 같이 각각 실험결과에 맞도록 압력손실계수를 적용하였다.

노심유동의 해석은 3단계로 나누어 계산하였으며 계산조건은 다음과 같다.

State #1: 하나로가 TPTH의 정상운전 모드에서 각 노심에 핵연료가 장전된 것으로 가정

Table 1 Pressure loss coefficients

Description		Pressure loss (kPa)	Length (m)	Coefficients	Total pressure loss (kPa)
Circular flow tube	Fixed structure	88.9	0.158	53.9975	210
	Fuel	137.3	1.042	10.3949	
Hexagonal flow tube	Fixed structure	89.7	0.158	22.8785	210
	Fuel	127.4	1.042	12.5556	

하여 유동상태를 해석한다. (이하 정상운전상태의 유동해석)

State #2: 정상운전상태에서 표적 장전 중에 조사공이 막히는 경우를 가정하여 유동상태를 해석한다.

State #3: 마지막 단계로 표적이 조사공에서 인출되어 조사공이 완전히 개방되었을 때의 유동상태를 해석한다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 정상운전상태의 유동해석

핵연료가 모두 정상적으로 장전된 상태에서 유입유동의 거동은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 원통형으로 형성된 플레넘의 영향으로 두개의 반원 형태의 와류유동을 나타내었다. 반원 형태의 두 와류는 플레넘 상단에 설치된 칸막이에 저항을 받아 와류강도가 다소 약해진 상태로 하부 고정장치 (receptacle)를 지나 각 유동관으로 진행된다. 그림에서 각 유선 (stream line)의 색은 정압력을 나타내며 유동관 출구의 압력을 0 Pa로 기준할 때 약 237 kPa의 정압차이를 보이고 있다. 이는 노심의 하부 고정장치와 상부 핵연료 부분의 설계차압과 플레넘 입구에서 노심입구까지 걸리는 차압이 포함되어 있다.

Fig. 4는 정상운전상태에서 하부 구조물과 핵연료를 해석한 표면 압력분포이다. 마찬가지로 유동관의 출구압력을 0 kPa로 정하고 이를 기준으로 표면압력을 나타내고 있다. Fig. 3과 같이 각 유동관까지 약 237 kPa의 압력변동이 발생하였다.

Fig. 5는 노심 상부에서 본 유동관 출구의 속도분포를 나타내고 있다. 23개의 육각 유동관과 16개의 원형 유동관은 약 4~5m/s의 유속으로 분출되고 있으며 원형 유동관은 육각 유동관보다 더 빠른 유속을 보이고 있다.

Fig. 6은 노심 상부에서 본 각 유동관 출구의 유량을 나타내고 있다. 각 유동관 출구에 표시된 수치는 해당 유량을 각 유동관별로 구한 평균유량으로 나눈 값으로 평균비율을 나타낸다. 그림에서 회색으로 칠한 유동관은 평균유량의 99% 미만의 유량이 발생하는 곳이며 빛금으로 표현된 채널은 최소 유량이 발생하는 곳이다.

육각 유동관의 경우 12, 15, 18번 채널에서 평균 유량의 99% 미만이 유동하고 있으며 최소 값은 15번 채널에서 평균유량의 97.3%를 나타내었다. 원형 유동관의 경우 C4 채널과 OR 1, 2, 3 및 6에서 평균유량의 99% 미만이 유동하고 최소 값은 OR 3에서 평균유량의 97.4%를 나타내었다.

Fig. 7은 하나로가 TPTH운전 모드로 운전하는 경우의 실험결과이다. 해석결과를 실험결과와 비교하면 다음과 같이 요약된다.

- 1) 해석결과는 실험결과와 마찬가지로 입출구 부근에서 유량분포가 낮게 나타나고 있다.
- 2) 해석결과와 실험결과의 최대 오차율은 7.04%이며 OR 6 유동관에서 발생하였다.
- 3) 실험결과와 비교하여 육각 유동관과 원형 유동관의 오차율 평균은 각각 1.443%와 3.444%로 나타내었다.
- 4) 육각 유동관의 경우 설계기준 유량보다 적은 평균유량이 분포하였으나 원형 유동관의 경우는 설계치보다 높은 유량이 형성되었다.

이와 같은 차이는 실험결과의 압력손실계수가 원형 및 육각 유동관에 대해 각각 3개의 유량 측정장치⁽⁵⁾로 구한 반면에 전산해석에서는 각각의 평균으로 구한 각 유동관의 단일 관계식으로 해석하였기 때문에 최소유량 지점이 다르고, 오차율이 다르게 발생하는 것으로 추정된다. 그리고 실제 측정값은 육각과 원형 유동관에서 217.1 kPa 및 226.2 kPa의 차압이 각각 발생하여 설계기준 차압 ($210 \pm 10\%$)의 오차범위에 있으나 전산해석에서는 설계기준 차압을 210 kPa로 고정하였기 때문에 원형 유동관에서 더 많은 유량이 흐르고 오차 범위도 크게 나타나는 것으로 추정된다. 그러나 각 유동관의 유량분포에 대한 설계조건과 비교하면 실험결과와 마찬가지로 평균유량의 95%이상을 유지하였다.

4.2 표적 조사공 폐쇄상태의 유동해석

표적이 장전되는 조사공이 폐쇄되는 경우를 가정하여 각 유동관의 유동상태를 모의하였을 때 Fig. 8과 같이 유체의 거동은 플레넘 내에서 회전유동을 보이고 있다. 그리고 플레넘 입구에서 노심 출구까지의 차압은 정상운전상태의 해석결과와 비교하면 9 kPa의 압력상승이 관찰되었다. 이는 조사공이 폐쇄되면 여기에 흐르던 유량이 이웃하는 조사공으로 더 많

이 흐르기 때문이다.

이 때의 노심내의 유량분포는 표 2와 같이 정상운전상태의 해석과 비교하여 동일한 방식으로 평균 유량비율을 나타내었다. 가장 큰 증가율을 나타내는 것은 육각 유동관 19번으로 3.412 % 증가하였으나 육각 유동관 8번과 15번에서는 감소를 보였지만 그 차이는 크지 않았다. 원형 유동관에서는 전반적으로 유량이 상승하는 특성을 보이고 있다.

따라서 표적장전 중에 조사공이 막히는 경우가 발생하여도 심하게 유량 분포의 불균형은 발생하지 않는 것으로 판단된다.

4.3 표적 조사공 개방상태의 유동해석

조사공이 개방되는 상태는 표적이 안내관을 따라 인출되거나, 장전 초기에 발생할 수 있으므로 안내관이 설치된 상태에서 조사공이 개방된 경우에 대해 유동해석을 하였다.

표적 조사공이 개방되면 다른 유동관과 달리 핵연료가 구성되지 않기 때문에 상부의 압력 손실은 0 kPa로 정하였다.

플레넘 내에서의 유체의 거동은 Fig. 9에서 보여 주는 바와 같이 앞서 해석한 것과 마찬가지로 회전유동을 하였으며 전체 차압은 정상운전상태와 동일한 237 kPa가 발생하였다. 이는 조사공이 개방되었지만 상부에 안내관이 설치되어 있어 유동관 단면적 변화에 의한 압력손실 및 유체점성에 의한 압력손실이 가산되어 핵연료가 장전된 정상적인 운전상태의 해석결과와 우연히 일치하였다.

Fig. 10은 노심 상부에서 바라본 각 유동관 출구에서의 유속분포이다. OR 5 조사공에서 단면 평균 7.35 m/s로 가장 빠른 유속을 나타내었으며 유량은 16.3 kg/s로 계산되었다.

Fig. 11은 State #1의 해석결과를 기준하였을 때 조사공이 개방되었을 때의 유동관별 유량 증감율을 나타내었다. 그림에서 회색으로 도색된 것은 증감율이 1% 이상인 곳이며 빛금으로 표시된 것은 육각과 원형 유동관 중에서 최대 증감율을 나타내는 곳이다.

유량 감소가 가장 큰 채널은 원형 유동관 C4이며 3.644% 감소되었으나 설계유량의 약 98%이므로 하나로는 안전하게 운전할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

Fission Moly를 생산하기 위해 표적 취급장치를 설계하기 위하여 하나로 노심에 대하여 정상적인 운전상태, 조사공이 막힌 상태와 완전히 개방되는 상태에 대하여 유동해석을 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 하나로 TPTH 운전 상태에서의 측정유량과 전산해석 결과를 비교할 때 핵연료 유동관의 유량 편차는 육각 유동관에서 1.443% 원형 유동관에서 3.444%로 나타내어 실험값과 잘 일치하므로 전산해석 방법은 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 하나로 TPTH 운전 상태에서의 실험결과와 마찬가지로 전산해석 결과도 육각 및 원형 채널 별 질량 유량은 입출구 부근에서 낮은 유량분포를 보였다.

3) 표적 조사공이 막히는 경우, 플레넘 입구에서 노심 출구까지 246 kPa의 차압이 발생하였으며 정상운전상태와 비교하여 약 9 kPa의 차압 상승을 보였으나 유량 분포의 심한 불균형은 관찰되지 않았다.

4) 표적을 장전하기 위해 조사공이 개방되었을 때 이 조사공으로 16.3 kg/s의 유량이 흐르는 것으로 계산되었다.

5) 조사공이 개방되었을 때 냉각유량이 가장 많이 감소되는 곳은 원형 유동관 C4이나, 설계유량의 95%이상을 유지하므로 안전하게 냉각될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 박용철, "표적취급장치 개발계획", 한국원자력연구소, HAN-RS-CR-02-04, 2002
- [2] Heonil Kim et. al., "HANARO Core Channel Flow Rate Measurement", 한국원자력연구소, KAERI/TR-717/96, 1996.
- [3] Fluent Inc., "Manual of FLUENT 5.4", Vol.2 9-15~30.
- [4] Y. C., Park, et al., 2002, "Flow Analysis of HANARO Flow Simulated Test Facility, the Abstracts of The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, pp. 309.
- [5] Heonil Kim et. al., "Pressure Drop Measurement for Flow-Measuring Dummy Fuel Assemblies in HANARO Core", KAERI/TR-717/96, 1996.

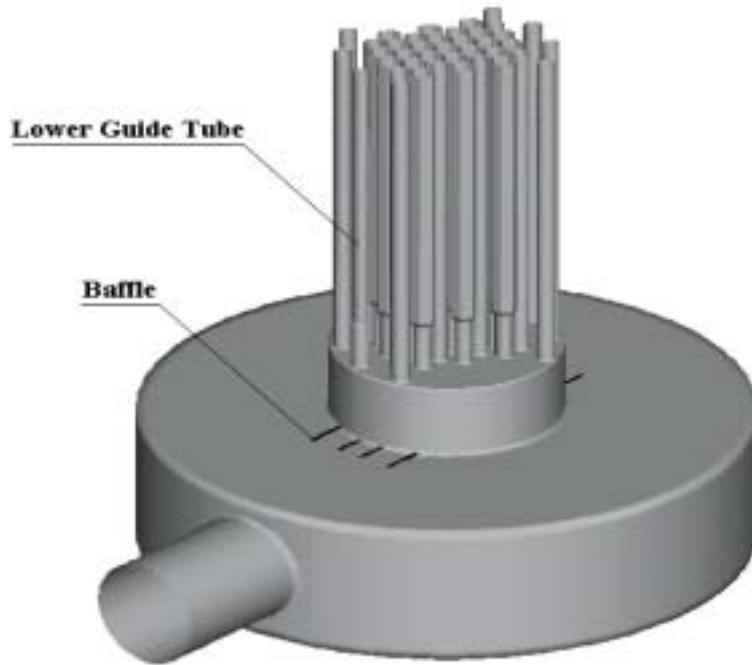


Fig. 1 Analysis model for inlet plenum and core of HANARO

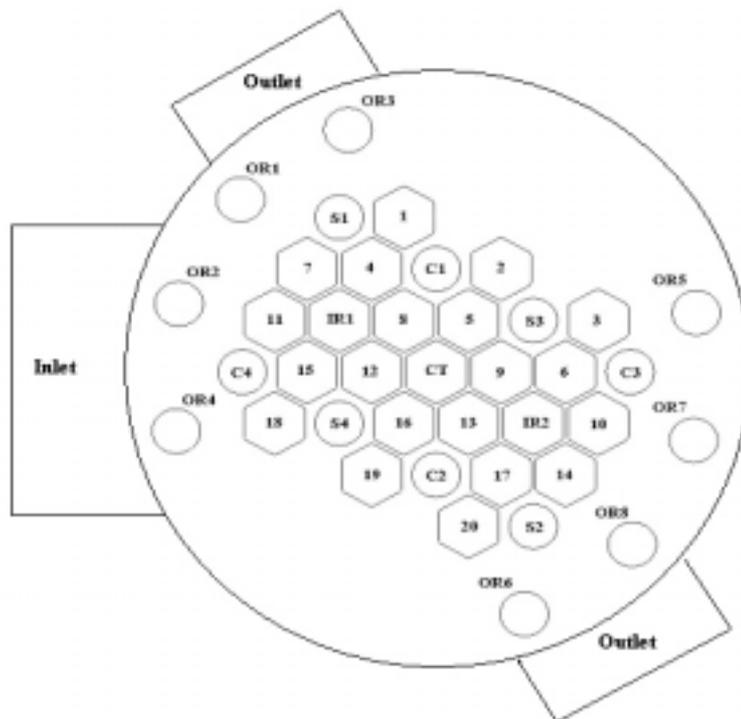


Fig. 2 Index of flow tube

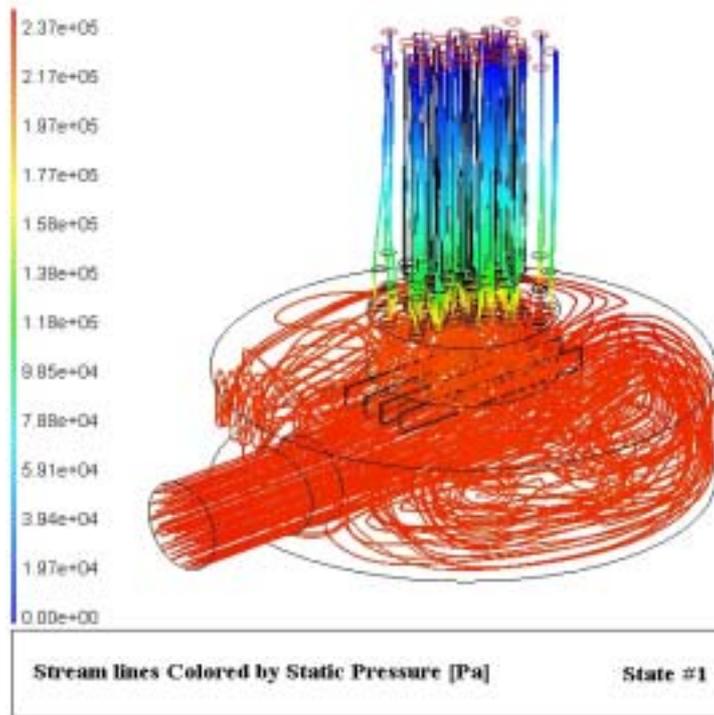


Figure 3 Stream line of State #1

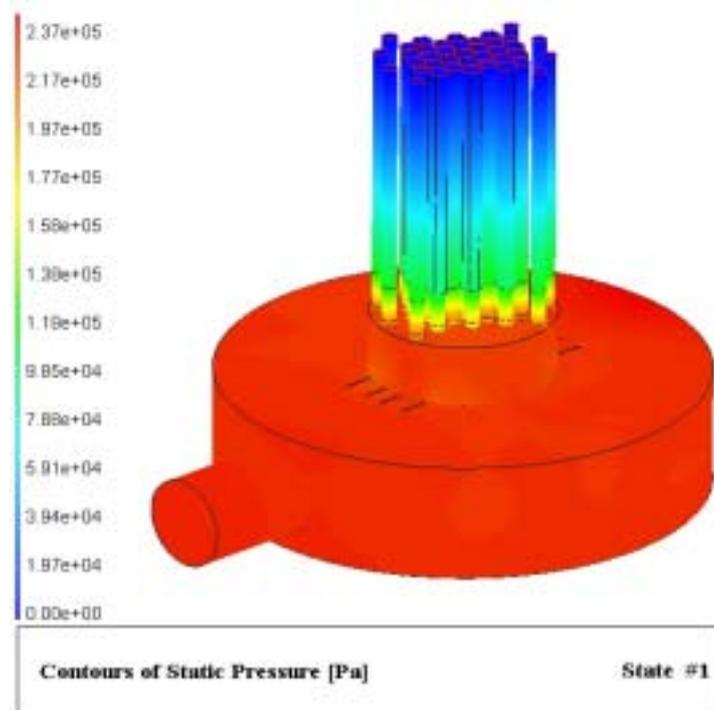


Figure 4 Static pressure of State #1

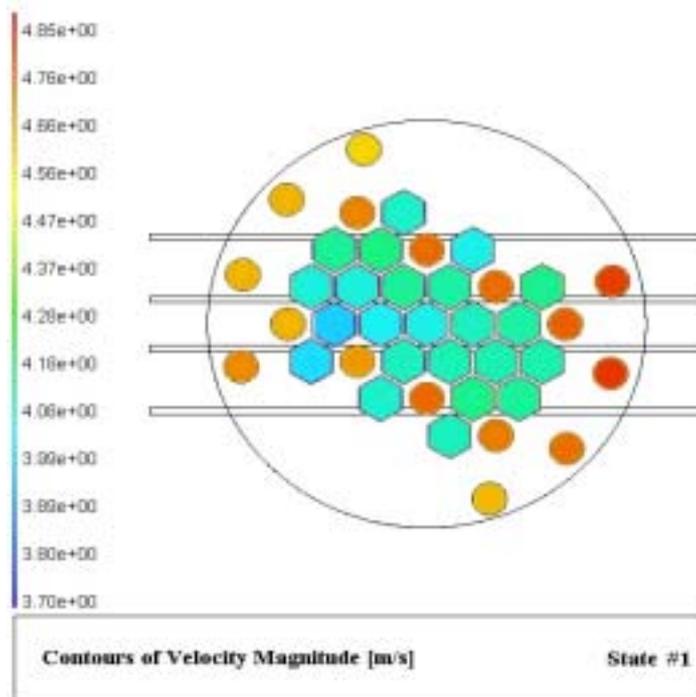


Figure 5 Contours of velocity magnitude at flow tube exit under state #1

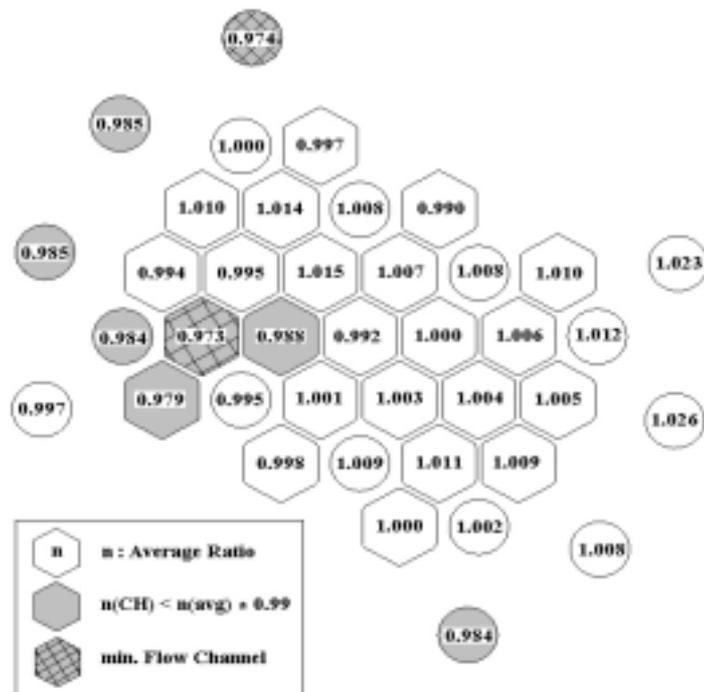


Figure 6 Flow distribution at flow tube exit under state #1

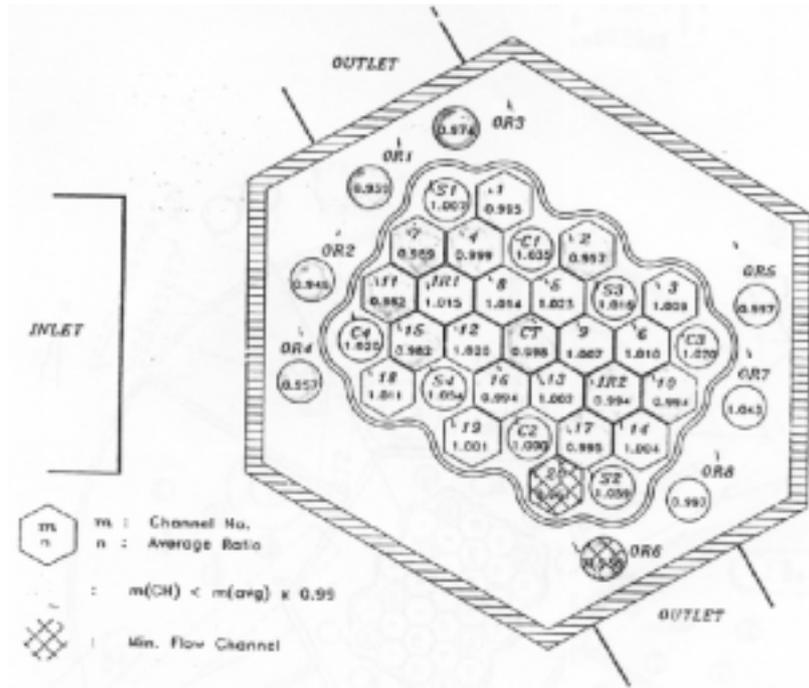


Figure 7 Flow distribution at flow tube exit under HANARO TPTH operation

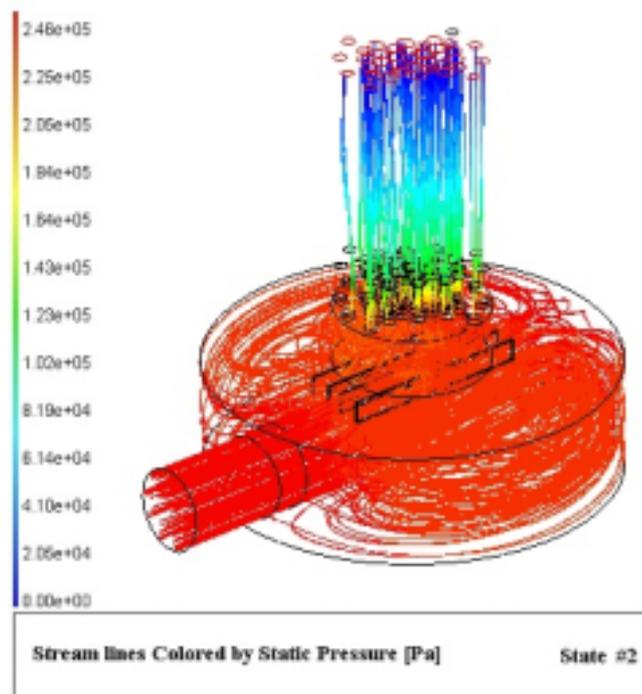


Fig. 8 Stream line colored by static pressure under state #2

Table 2 Flow ratio of each channel under State #2 based on those of State #1

Hexagonal flow tube	Flow rate (kg/s)	Flow ratio (%) based on State #1	Circular flow tube	Flow rate (kg/s)	Flow ratio (%) based on State #1
1	19.888697	2.839%	S1	13.314853	2.311%
2	19.768303	2.950%	C1	13.530202	3.132%
3	20.207132	3.154%	S3	13.484560	2.827%
4	20.311590	3.296%	C3	13.566113	3.022%
5	19.788727	1.373%	C4	12.843627	0.313%
6	20.012228	2.529%	S4	13.147562	1.576%
7	20.256350	3.405%	C2	13.454015	2.512%
8	19.644157	-0.210%	S2	13.313631	2.100%
9	19.715300	1.711%	OR1	12.859370	0.376%
10	20.074139	3.036%	OR2	12.883746	0.518%
11	19.613091	1.791%	OR3	12.807697	1.084%
12	19.251621	0.502%	OR4	13.090472	0.920%
13	19.916100	2.433%	OR5	0	-100.000%
14	20.137545	2.911%	OR6	13.045320	1.864%
15	18.859976	-0.078%	OR7	13.737023	2.920%
16	19.783470	1.875%	OR8	13.477943	2.808%
17	20.086729	2.454%	증감율 = $\frac{\{(State \#2)-(State \#1)\}}{(State \#1)}$ 최대 증가율 = 3.812% (Hexa 19)		
18	19.165321	0.951%			
19	20.011703	3.412%			
20	19.718184	1.642%			
CT	19.449236	1.066%			
IR1	19.510719	1.143%			
IR2	20.033911	2.892%			

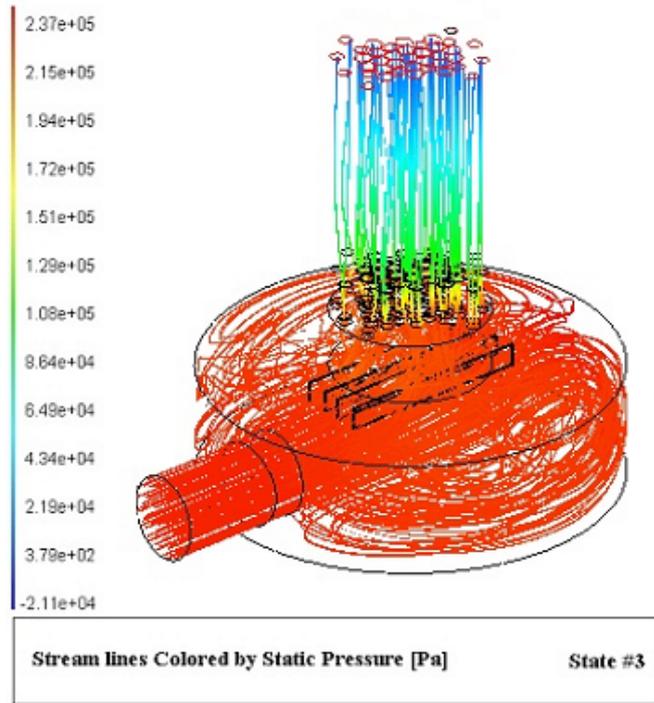


Fig. 9 Stream line colored by static pressure under state #3

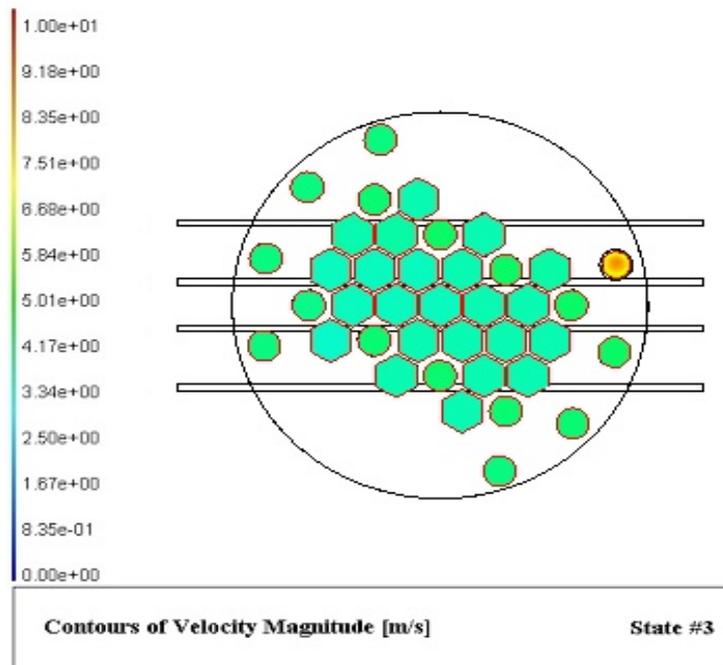


Figure 10 Flow velocity distribution at the flow tube exit under state #3

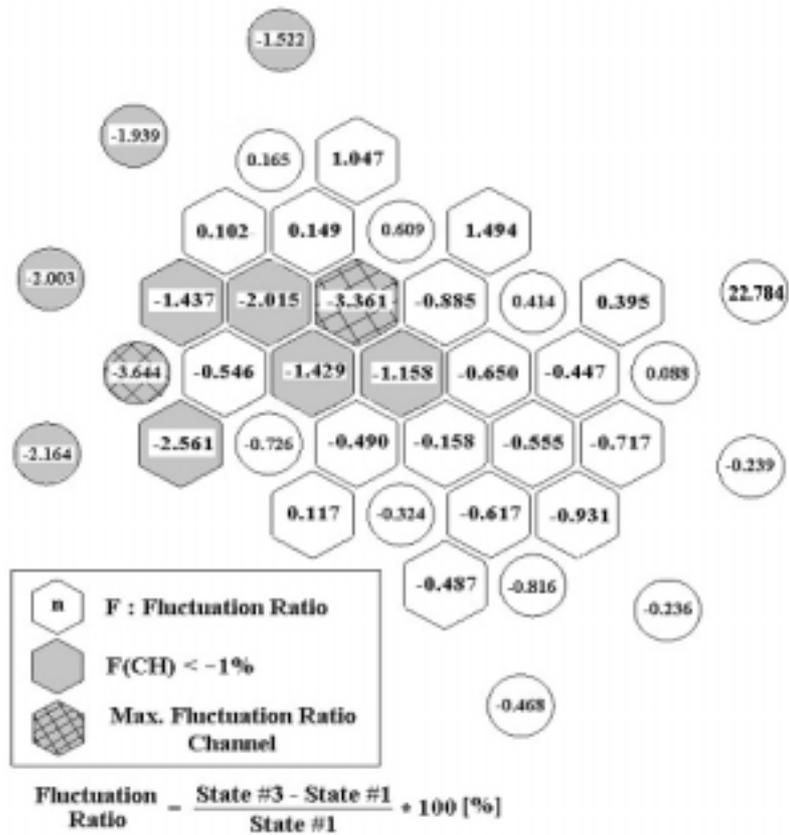


Fig. 11 Comparison of state #3 flow fluctuation ratio based on state #1