

피동형 유량조절장치의 유동특성 평가방법론 개선 Improvement of Assessment Methodology for Fluid Flow Characteristics of Passive Flow Control Device

김만웅, 이상규, 이계휘, 안상규, 김효정

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

유성연

충남대학교 기계설계공학과
대전광역시 유성구 궁동 220번지

요 약

차세대 원자로 (APR 1400)에서는 Fluidic Device (FD)라는 피동형 유량조절장치인 와류형 2단 유량제어장치를 안전주입탱크 내에 설치함으로써 피동적으로 안전주입수 주입유량을 조절하도록 설계에 반영하고 있어, Fluidic Device에 대한 유동특성 및 성능은 원자로심의 안전성에 직접적인 영향을 주게된다. 따라서 본 연구에서는 APR 1400 원자로의 피동형 유량조절장치인 FD내부의 유동특성을 분석, 평가할 수 있는 3차원적인 열유동을 평가 방법론 및 모델을 개발하였으며, 해석결과를 실험값과 비교하여 해석 방법론 및 모델의 타당성을 확인하였다.

FD 유동특성 최적평가를 위한 민감도 분석결과 Grid 수는 약 90,000개 정도로 제시되었으며, 난류모델은 레이놀드응력모델(RSM)을 적용할 경우 실험값과 0.5% ~ 9.3%의 오차범위를 갖는 매우 근사한 값을 나타내었다. 그러나 해석모델에 있어 제어구쪽에서 공급된 유량 중 일부가 압력차이에 의해 주입구로 역류해 들어가는 복잡한 유동현상을 묘사하기 위한 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The objective of this study is to establish evaluation and verification guideline for the APR 1400 and to investigate the thermal-hydraulic characteristics for fluidic device is analyzed using FLUENT. The scope and major results of research are flow characteristics for fluidic device. In this study, three-dimensional numerical model for fluidic device is developed adequately for , and results are compared with experimental data performed by VAPER (VALve Performance Evaluation test Rig) in KAERI with an aim to verify numerical simulation. In addition, the parametric study has also carried out to investigate the effect of major parameters such as velocity and pressure inside FD chamber.

I. 서 론

원자력발전소에서는 원자로냉각재계통의 압력경계면 파단에 의한 냉각재 상실사고 (LOCA: Loss-Of-Coolant Accident)가 발생할 경우, 이에 대한 대처 시설로 안전주입계통 (또는 비상노심냉각계통)을 설치하고 있다. 한편 안전주입계통은 신뢰성이 높은 피동형 안전주입 개념을 설계에 반영하고 있으며, 이를 위하여 안전주입탱크 (SIT: Safety Injection Tank) 또는 축압기 (Accumulator)를 설치하고 있어 냉각재 상실사고 발생 시 안전주입 펌프가 작동하기 전에 탱크 내에 질소개스로 가압된 압력을 이용하여 탱크 내의 물을 원자로심으로 신속히 주입하여 사고를 완화하거나 방지하는 목적으로 설계되어 있다 [1].

안전주입계통은 냉각재 상실사고 발생 후 초기 방출기간 (Blow-down Phase) 및 재충수 기간 (Refill Phase)에서는 파단부를 통해 방출된 냉각재를 보충하기 위해 대유량의 냉각수가 공급되지만, 공급이 시작되면 유량이 제어되지 않으므로 재관수 단계 (Reflood Phase)에서는 과도한 냉각수가 원자로용기에 주입되게 된다 [2, 3].

따라서 이러한 문제점을 개선하기 위하여 차세대 원자로 (APR 1400)에서는 Fluidic Device (FD)라는 피동형 유량조절장치인 와류형 2단 유량제어장치를 안전주입탱크 내에 설치함으로써 피동적으로 안전주입수 주입유량을 조절하도록 설계에 반영하고 있다.

본 연구에서는 APR 1400 원자로의 피동형 유량조절장치인 FD내부의 유동특성을 분석, 평가할 수 있는 3차원적인 열유동 평가 방법론 개발과 검증평가시스템을 구축하는 데 그 목적이 있다. Fluidic Device의 내부 유동특성을 평가하기 위해서 한국원자력연구소에서 수행중인 실험현황 및 결과를 분석하였다. 평가 방법론 및 모델개발을 위하여 모델실험에 대한 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 실규모 실험에 대한 해석을 수행, 실험값과 비교하여 해석 방법론 및 모델의 타당성을 확인하였다 [4-9].

II. Fluidic Device 유동특성평가

Fluidic Device는 형상에 따라 유동특성이 다르지만 일반적인 유동특성을 보면 크게 2가지의 경우로 구분할 수 있는데 주입구의 유동의 영향이 제어구의 유동보다 지배적인 경우 (대유량이 배출되는 경우)와 제어구의 유동영향만 지배적인 경우 (소유량이 배출되는 경우)로 나눌 수 있다 [10].

본 연구에서는 주입구와 제어구, 배출구의 경계조건으로 실험의 압력값을 사용하여 Fluidic Device의 내부 유동장과 유량을 해석하였다. 이를 위하여 먼저 한국원자력연구소에서 수행한 모델실험결과를 분석하여, 검증평가 모델 및 방법론을 수립한 바 있으며, 본 연구에서는 실규모 실험결과에 대한 해석을 수행하여 모델실험에 대해서 수립한 평가 모델 및 방법론을 개선하였다. 또한 Fluidic Device의 유동을 해석하기 위하여 SIT 내의 수위의 변화에 따른 방출유량을 상용전산해석 코드를 사용하여 해석하고 그 결과를 실험값과 비교하였다.

1. Fluidic Device 실험모 실험

실 규모 FD의 성능실험장치 (VAPER : VAlve Performance Evaluation test Rig)는 모델실험을 통해 얻은 실험 결과를 토대로 설계되었으며, 개략도는 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 실 규모의 성능실험 장치는 안전주입탱크, FD 및 방출배관계통으로 구성되는 실험장치 본체와 압축공기 공급계통, 순수 공급계통, 방출수 저장탱크 (stock tank), 데이터 획득장치 (DAS) 및 제어계통 유압 이송기기 등으로 구성된다 [11].

FD를 통한 유량전환 성능에 가장 큰 영향을 주는 것은 FD 전·후단에 걸리는 압력이므로 실 규모 실험에서도 모델실험에서와 같이 압력 및 수위 조건이 실제 APR1400 시스템 환경과 최대한 동일하게 모의하도록 실험장치가 설계되었다. 실험용 탱크는 내경 2.74m, 높이 11.95m로 실제 APR 1400원자로의 안전주입탱크와 동일하게 제작하였고, FD는 모델실험에서와 달리 실제의 형태를 모의하도록 탱크의 내부에 설치되었으며, 수관은 탱크의 중앙에 위치시켜 지지대를 붙여 탱크에 고정시켰다. 탱크의 수위 측정을 위해 차압형 수위계를 설치하였고, 탱크 내 기체의 압력 및 온도 측정을 위해 압력계 및 온도계를 탱크의 상부에 설치하였다. 실험용 FD의 설치위치와 모양은 그림 3과 같으며 FD는 교체 및 취급이 용이하도록 4쌍의 삽입판 (insert plate)과 방출구 삽입노즐 (exit nozzle insert) 구조로 설계되었으며, 원통형 와류실 측면 외곽에 있는 원주방향으로 등 간격으로 배치된 각각 4조의 반경방향 주입구 (Supply Port)와 접선방향 제어구 (Control Port)를 통해 물이 와류실로 들어오고, 와류실 하부에 있는 축 방향 (Exit Port)의 방출구를 통해 물이 빠져나가도록 설계되어 있다.

2. Fluidic Device 유동해석

본 연구에서는 FD내 유동 및 열전달 특성을 구하기 위하여 표준 $k-\epsilon$ 모델과 함께 RNG $k-\epsilon$ 모델, Reynolds Stress 모델을 사용하여 각각의 모델에 대하여 계산하고 그 결과를 비교하였으며, 이를 위하여 범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석을 수행하였다 [12].

가. 전산해석모델

본 연구에서는 Fluidic Device 내부에서 최대 유량 배출시 복잡한 유동장이 형성되고 중심부분에서는 강한 와류가 형성되므로 RNG $k-\epsilon$ 모델, Reynolds Stress 모델 및 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 대한 영향을 분석하였으며, Fluidic Device 내부의 유동장과 속도 분포, 압력분포를 비교하였으며, 1차 풍상 차분법(First order upwind scheme), 그리고 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

한편 모델 실험에 대한 해석 결과를 바탕으로 실험에 대해서도 grid 수 및 난류모

텔의 영향에 대해서 해석을 수행하였으며, 최적 모델선정을 위하여 여러 Case에 대해서 민감도 분석을 수행하여, 이를 실험값과 비교를 하여 타당성을 확인하였다. 해석에 사용된 FD의 계산격자는 모델 실험과는 달리 그림 4와 같이 FD 전체를 모델링하였다.

나. 전산해석 결과 및 논의

Fluidic Device의 유로구조에 대한 개략도가 그림 3의 (a)에 제시되어 있다. 수위가 stand-pipe위에 있으면 물은 stand-pipe 입구 “가”와 연결된 FD의 주입구 “나”와 제어구 “다”를 통하여 FD의 내부로 들어와 “라” 출구로 빠져나가도록 되어 있다. 이때 물은 주입구와 제어구, 양쪽으로 들어오기 때문에 대유량이 배출된다. FD에서의 압력강하는 FD로 유입되는 접선 및 반경방향의 속도분포 즉, swirl의 크기에 의해 결정된다. 따라서, SIT 내의 수위가 stand-pipe 선단 이하로 떨어지면 제어구 “다”를 통해서만 FD 내로 물이 유입되게 되므로 high swirl이 형성되고 또한 주입구를 통해 FD 내로 유입되는 유량이 상실되므로 출구로 배출되는 유량이 급격하게 줄어들게 된다. (그림 1 참조)

(1) Grid 수의 영향

Fluidic Device의 Grid에 의한 영향을 검토하기 위하여 3가지 Case에 대하여 해석을 수행하였다. 첫 번째 Case의 Cell수는 87,788 cell이고 두 번째 및 세 번째 Case에서는 Grid 간격을 더욱 세밀하게 구분하여 각각 131,133 Cell과 473,126 Cell이 되도록 하였으며, 그 결과를 표 1에 제시하였다. 각 Case 별로 표준 $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, RSM 3가지 난류모델에 대해서 해석을 수행한 결과 3가지 모두 Case 1의 경우가 실험값에 가장 잘 일치함을 보였다. 특히 Case 1의 경우 Reynolds Stress 모델 (RSM)을 사용한 결과, 배출유량은 559.54 kg/s로서 실험값 562.11 kg/s와 1% 미만의 오차로 잘 일치함을 보였다. 이는 실 규모 실험에서는 모델실험과 달리 실험설비 규모가 커서 전반적으로 저 Reynolds 수를 갖기 RSM 모델이 잘 묘사하는 것으로 판단되며, 와류유동에 대해서도 잘 묘사하는 특성이 있기 때문이다.

(2) Turbulent Model의 영향

난류 모델에 의한 영향을 검토하기 위하여 Case 1에 대하여 표준 $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, 및 RSM을 사용하였으며 결과는 표 2와 같다. 세가지 경우 다소 시간의 차이는 있었으나 모두 계산값이 잘 수렴하였다. 계산값과 실험값의 배출유량을 비교한 결과, 주입구와 제어구 모두에서 유량이 공급되는 경우에는 RSM을 사용했을 때, 0.5% ~ 9.3%의 오차 범위를 나타내었으며, 표준 $k-\epsilon$ 의 경우 5.8% ~ 13.4% 및 RNG $k-\epsilon$ 의 1.8% ~ 10.2%보다 실험값과 매우 근사한 값을 나타내었다. 그러나 SIT의 수위가 Stand Pipe 밑으로 내려간 소유량일 때는 세가지 모두 실험값과 차이를 보이거나 이는 Stand Pipe를 통한 공기의 유입 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 난류 민감도 분석결과 RSM이 실규모 실험의 유동해석에 적절함을 알 수 있었다.

(3) 실험 결과와 비교

실험값을 살펴보면 배출량은 안전주입수가 주입되기 시작하여 10초에서 30초 사이에 대유량이 배출되며, 수위가 standpipe 이하로 내려간 이후 배출량이 급격히 감소하여 40초부터 220초가 될 때까지 소유량이 지속되는 것으로 나타나고 있다.

그림 5는 안전주입수가 주입되기 시작한 후 10, 20, 30, 40, 70, 100, 150, 190초에서의 배출량을 계산하여 실험값과 비교한 것을 보여준다. 모델은 Case 1을 이용하였고 난류 모델은 RSM을 사용하였다. 실험값과 계산값은 표 3에 제시되어 있다.

안전 주입수 주입 후 10초일 때 배출구의 유량은 756.50 kg/s이다. 이때의 배출구 유량 실험값은 799.21 kg/s로 오차는 5.34%정도이다. 30초가 되었을 때의 배출구 유량은 599.54 kg/s이고 이때의 실험값은 562.11 kg/s으로 0.46%의 차이를 보이고 있어 비교적 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다.

40초가 되었을 때는 안전 주입수의 수위가 Stand Pipe 밑으로 내려가게 되며, 이때 배출구 유량의 계산값은 230.17 kg/s이며 실험값은 177.59 kg/s으로서 29.7%의 차이를 보이고 있다. 70초와 150초의 경우 계산값은 228.05 kg/s과 111.6 kg/s로서 이때의 실험값 188.33 kg/s와 122.79 kg/s과 비교하여 각각 21.1%와 9.1%의 차이를 보이고 있다.

배출구의 유량이 소유량일 경우 실험값과 해석값 사이에 차이가 대유량의 경우 보다 많이 나는 이유는, 주입구로부터 제어구로 주입 유량이 전환 (Turndown) 된 이후 급격하게 낮아진 Stand Pipe를 통하여 공기와 물이 주입되는 이상유동(two phase flow)이 발생하게 되며, 또한 제어구쪽에서 공급된 유량 중 일부가 주입구로 들어가 이차유동을 형성하기 때문에 배출 유량이 감소하는 것으로 판단된다. 이에 대한 정확한 해석모델 개발을 위하여 향후 추가적인 연구가 필요하다.

그림 6은 대유량(10초)과 소유량(70초)일 때 Fluidic Device 중심평면에서 속도장을 보여준다. 그림 6의 (a)는 밸브 개방 후 10초가 지나 대유량이 공급되는 시점으로서, 주입구와 제어구로부터 나온 유체가 Chamber 내부에서 발생한 와류유동을 따라 원만하게 출구로 배출됨을 알 수 있으며, Fluidic Device 외측면에서는 2차 유동이 발생함을 알 수 있다. 한편 밸브 개방 후 70초 시점에서는 소유량이 공급되며, Fluidic Device 내부는 대유량 배출 시와 마찬가지로 유사한 형태의 유동 구조를 보여주고 있으나, Fluidic Device 내부의 전 영역이 강한 와류 유동 구조를 나타내고 있고, 주입구 근방에서는 작은 이차유동이 발생함을 볼 수 있다 [13-19].

그림 7은 대유량(10초)과 소유량(70초)일 때 Fluidic Device의 압력분포를 나타낸다.

III. 결 론

APR-1400 원자로 안전주입탱크내 피동형 유량조절장치 (Fluidic Device)의 유동특성을 모

사하기 위하여 모델 및 방법론을 개발하여 FLUENT 전산코드를 사용하여 해석하고 그 결과를 한국원자력연구소에서 수행한 실험값들과 비교하였다. 본 연구에서는 Fluidic Device의 내부 유동장과 유량을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적 FD 유동특성 평가를 위한 모델의 민감도 분석결과 Grid 수는 약 90,000개 정도로 계산영역(Computational Domain)을 확보하여야 하며, 난류모델의 영향을 검토하기 위하여 배출유량에 대한 계산값과 실험값과 비교한 결과, RSM 모델은 0.5% ~ 9.3%의 오차 범위를 갖으며, 표준 $k-\epsilon$ 모델은 5.8% ~ 13.4%, RNG $k-\epsilon$ 모델은 1.8% ~ 10.2%보다 실험값과 매우 근사한 값을 나타내었다.
2. 안전 주입수의 수두가 Stand Pipe밑으로 내려가 주입구에서 제어구로 유량이 절체된 상태에서 압력차에 의해 Stand Pipe를 통한 유입유량이 발생하도록 모델을 개선하였으며, 향후 공기와 물이 이상유체유동(two phase flow) 상태로 주입되도록 모델개발을 위한 추가적인 연구가 필요하다.
3. RSM 난류모델과 개선된 모델을 적용하여 각 안전주입 시간(10, 20, 30, 40, 70, 100, 150, 190)에 따라 유동특성해석을 수행한 결과 대유량의 경우에는 실험값과 잘 일치하였으나, 소유량이 공급되는 시점인 40초 이후부터는 실험값과 20 ~ 30% 범위의 오차로 실제 실험에서 발생한 공기와 물이 주입시 발생하는 측정오차 등을 고려할 때 비교적 잘 모사하는 것으로 나타났다. 그러나 제어구쪽에서 공급된 유량 중 일부가 압력차이에 의해 주입구로 역류해 들어가는 복잡한 유동현상을 모사하기 위한 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사, “APR 1400 표준안전성분석보고서”, 2000.
- [2] 한국원자력연구소, “Fluidic Device를 장치한 안전주입탱크가 대형 냉각재상실사고의 열수력학적 거동에 미치는 영향에 관한 연구”, 정영종 외, KAERI/TR-1232/99
- [3] Jae-Hoon Lee, et al., "A Large-Break Loss-of-Coolant Accident Analysis using TRAC-M/F90 to evaluate the performance of Emergency Core Cooling System of APR1400" Proceeding of the 14th KAIF/KNS Annual Conference, Embedded Special Meeting on APR1400, pp. 293-302
- [4] K. W. Lee, et al., 2002, "Advanced Design Features of SIS/SCS for APR1400", Preceeding of the 14th KAIF/KNS Annual Conference, Embedded Special Meeting on APR1400, pp. 201-208
- [5] 한전전력연구소, “차세대원자로 기술개발 2단계 보고서, NSSS 설계기반기술개발”, 1997
- [6] 한국원자력연구소, “실규모 Fluidic Device 성능평가 실험절차서”, 주인철 외,

KAERI/TR-2040/2002.

- [7] 한국원자력연구소, “APR1400 피동 안전주입탱크의 성능평가 실험”, 주인철 외, KAERI/TR-2094/2002.
- [8] 충남대학교, “와류형 2단 유량제어 장치의 성능특성에 관한 연구”, 조봉현, 충남대학교 박사학위 논문, 2002
- [9] 한국원자력안전기술원, “APR-1400 원자로 Fluidic Device 유동특성평가”, 김만웅 외, 2001 추계원자력학회.
- [10] 한국원자력안전기술원, “차세대원전 피동안전설비의 열유동 특성평가”, KINS/HR-405, 2001.
- [11] 한국원자력연구소, “피동형 유량조절기구 성능평가 실험장치 구축”, 정홍준 외, KAERI/TR-2080/2002.
- [12] FLUENT User's Guide, Version 5, 1998
- [13] T.J. Lawley, "Vortex Fluid Amplifier-an Experimental Study of Flow Characteristics and Internal Flow Field", pp. 11-57, pp.151-155, paper of Ph.D paper, southern Methodist University, 1970.
- [14] F.W. Paul, "Survey of Steady-state Fluidic Diode Performance", ASME Winter Annual Meeting, November, Los Angeles, 1969.
- [15] Moyer, "Large single vortex valve analysis", pp. 233-250, the 1967 Fluidics Symposium, Chicago, Illinois, May, 1967.
- [16] D. N. Wormley "A Design Basis for Vortex-Type Fluid Amplifier Operating in the Incompressible Flow Regime", *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, June, pp. 369-376, 1970
- [17] D. N. Wormley "An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chamber," *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, Vol. 91, pp. 264~276, 1969.
- [18] A. Ogawa, "Vortex Flow", pp. 129~152, CRC Press, 1993.
- [19] C. W. Forsberg, "A Process Inherent Ultimate Safety Boiling Water Reactor", *Nuclear Technology*. Vol.72, pp. 121-134, 1986.

표 1 모델 및 격자조건별 분석결과

Case (Grid number)	Turbulent model	Discharge flowrate (kg/s)	Experimental Data (kg/s)
case 1 (87,788)	k-e model	529.90	562.11
	RNG k-e model	551.92	
	RS model	559.54	
case 2 (131,133)	k-e model	513.04	
	RNG k-e model	541.68	
	RS model	549.29	
case 3 (473,126)	k-e model	641.61	
	RNG k-e model	604.86	
	RS model	500.07	

표 2 계산 조건별 실험결과와의 비교

Turbulent model	Discharge port flowrate (10 sec)			Discharge port flowrate (50 sec)		
	Experiment (kg/s)	Computation (kg/s)	오 차 (%)	Experiment (kg/s)	Computation (kg/s)	오 차 (%)
$k-\epsilon$	799.21	711.10	11.02	176.64	259.81	47.1
RNG $k-\epsilon$		749.64	6.2		252.88	43.16
RSM		756.50	5.34		245.38	38.9

표 3 배출량에 대한 계산값과 실험값의 비교표

Time		10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	70 sec	100 sec	150 sec	190 sec
Experimental data	Discharge port flowrate(m ³ /hr)	799.21	690.31	562.11	177.49	188.33	154.29	122.79	83.33
Computational data	Discharge port flowrate(m ³ /hr)	756.50	625.92	559.54	230.17	228.05	169.51	111.6	59.93
error (%)		5.3	9.3	0.5	29.7	21.1	9.9	9.1	28.1

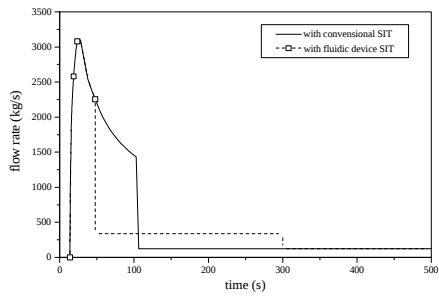


그림 1 APR 1400의 대형
LOCA시 안전주입유량

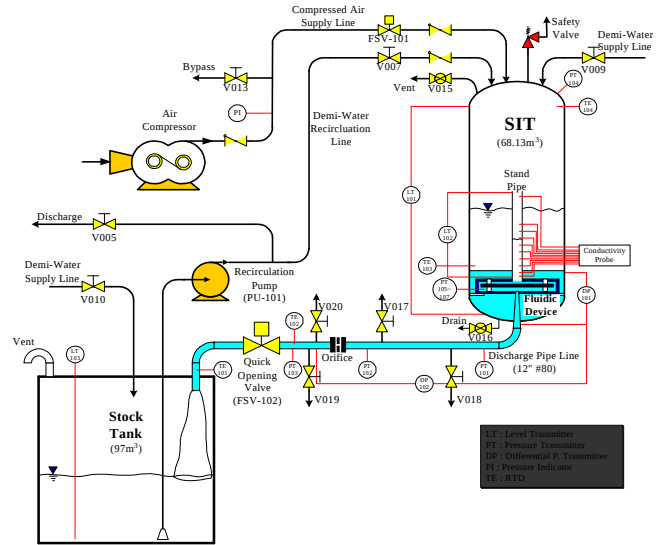
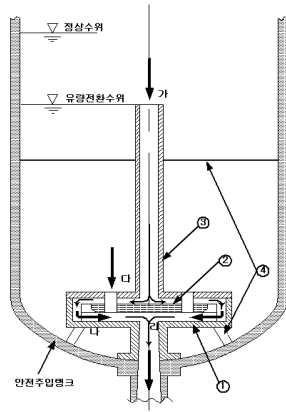
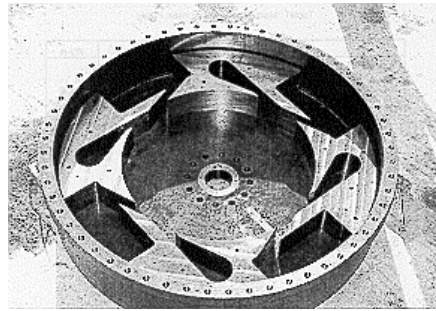


그림 2 실규모 실험장치 (VAPER) 개략도



(a) FD의 유로구조



(b) FD의 내부 형상

그림 3 FD의 유로구조 및 내부 형상

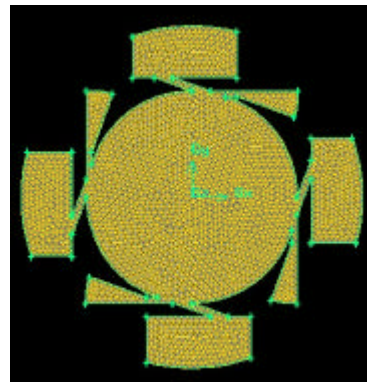
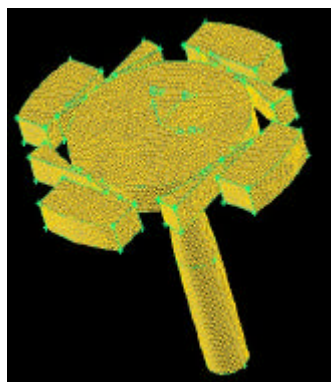


그림 4 실규모 Fluidic Device 계산격자

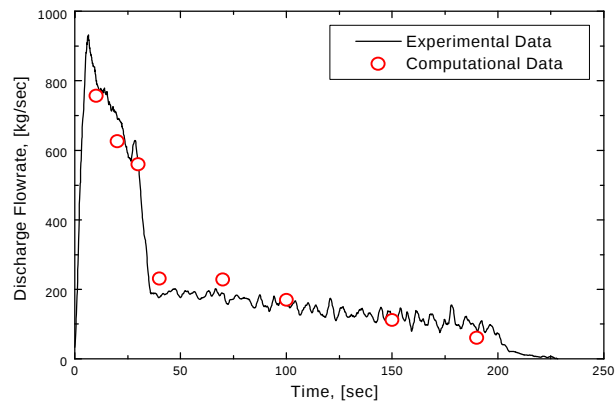
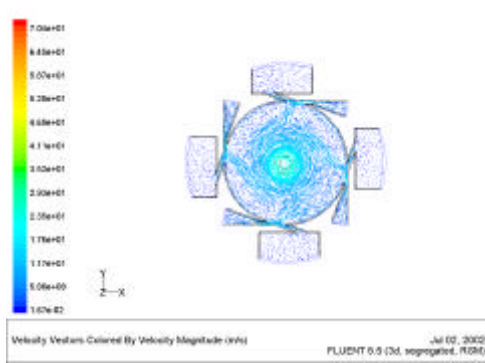
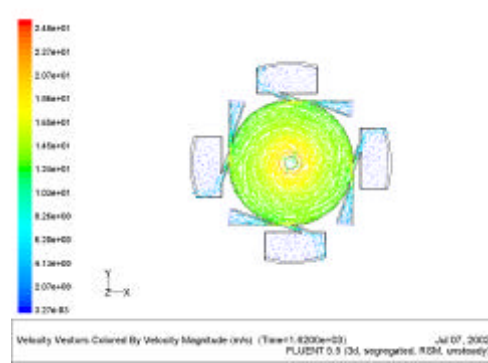


그림 5 배출량에 대한 계산값과 실험값의 비교



(a) 10초

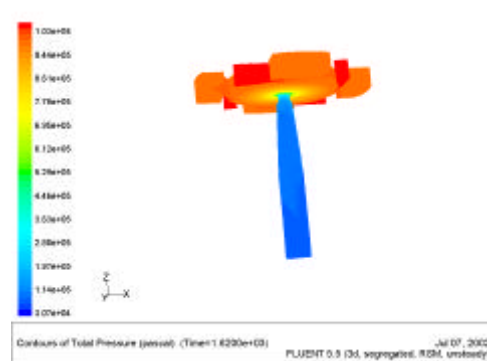


(a) 70초

그림 6 Fluidic Device에서의 속도분포



(a) 10초



(b) (70초)

그림 7 Fluidic Device에서의 압력분포