2004 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 635~640
인하대학교 정석학술정보관 및 2북호관 2004. 12. 3~4

대용량 피동형 유량제어 와류 밸브

최남현* • 주인철** • 정장환** • 조봉현** • 송철화**

Large Capacity Passive Flow Control Vortex Valve

N. H. Choi*, I.-C. Chu**, C. H. Chung**, B. H. Cho**, C.-H. Song**

Key Words : Vortex Valve(와류밸브), Passive Flow Controller(피동형 유량제어기), Fluidic Device(유체기구), VAPER(밸브성능평가시험시설), Safety Injection Tank(안전주입탱크), APR1400(차세대원자로1400)

ABSTRACT

The present paper provides the design specifications and working principle of flow controlling vortex valve which will be adopted in a Korean next generation reactor (APR1400). The vortex valve is installed inside the pressurized safety injection tank of APR1400, and it passively controls the water discharge flowrate from the tank. In the present study, the performance of the vortex valve have been evaluated throughout the repeated experiments in the full-scale test facility called VAPER(VAlve Performance Evaluation Rig). Based on the experimental results, it is confirmed that the currently developed vortex valve satisfies the major performance requirements of APR1400 plant design in view of the peak discharge flowrate, pressure loss coefficient, and total discharge duration time. To achieve the highest quality of the experimental results, a quality assurance program for vortex valve tests has been strictly applied.

1. 서 론

1980년대 이후로, 원자력발전의 경쟁력을 재고하고 안전성을 증진하기 위하여 전세계적으로 차세대원자로에 대한 개발이 수행되어왔다. 안전성 증진과 관련된 차세대원자로의 특징 중 하나는 안전주입계통의 독립성과 피동 작동 계통의 도입이다.

대형 냉각재상실 사고시 기존 원자력 발전소는 사고 초기의 blowdown 및 재충수(refill) 단계에서는 안전주입탱크로부터 비상노심냉각수를 원자로용기에 공급하고, 이 후 재관수(reflood) 단계에서는 저압 및 고압 안전주입펌프를 작동시켜 비상노심냉각수를 공급하도록 설계되었다.

* 한국원자력연구소
** 한국원자력연구소
nhchoi@kaeri.re.kr

안전주입탱크내의 비상노심냉각수는 재충수 및 초기 재관수 단계에서는 강수관내 수위를 원자로용기 저온관 바닥까지 급속히 상승시키는 역할을 하고, 이후의 단계에서는 원자로심에서 발생하는 붕괴열과 핵연료 및 기타 구조물에서 발생하는 잠열을 제거하는 역할을 한다.

하지만 유량조절기능이 없는 기존 원자력발전소의 안전주입탱크는 원자로용기의 수위가 저온관 바닥까지 증가한 이후에도 필요 이상으로 많은 양의 비상노심냉각수를 원자로용기에 공급함으로써, 비상노심냉각수의 유용성을 감소시킬 뿐만 아니라 격납용기의 압력을 낮춤으로 인하여 재관수율을 감소시킨다.

국내에서는 2010년에 가압경수형 차세대원자로(APR1400)의 상용 운전이 계획되어 있다.

APR1400은 발전출력이 1400MWe로 증대되었을 뿐만 아니라 새로운 설계 특성을 도입하고 있다. 이러한 설계 특성에는 DVI 방식의 독립된 4개의 train을 갖는 안전주입계통이 포함된다. 안전주입계통의 각 train은 안전주입펌프와 피동 안전주입탱크로 구성된다. 한국원자력연구소에서는 APR1400의 이러한 신 설계특성의 성능 평가 및 검증을 위한 열수력 실험을 수행한바 있다[1].

각각의 안전주입탱크에는 재충수 및 재관수 기간동안 원자로용기로의 주입 유량을 조절하는 피동 유량조절기구(vortex valve 또는 fluidic device라 명명)가 설치되어 있어서, 재충수 단계에서는 많은 양의 비상노심냉각수를 공급하고 재관수 단계에는 적은 양의 비상노심냉각수를 원자로용기에 공급한다.

Vortex valve는 장치 자체내에 구동전원이 전혀 필요없으며, 또한 유량조절을 위한 어떠한 moving part도 없는 순수한 피동형 유량조절 장치이다. Vortex valve는 내부의 vortex chamber로 유입되는 유로의 방향에 따라 chamber내에서 형성되는 와류의 강도를 변화시키고, 이에 따라 유동저항이 크게 변화되는 현상을 이용하여 유량을 조절하는 장치이다.

와류(vortex flow) 효과를 이용하는 votex 기구는 1928년 D. Thoma[2]에 의해 처음으로 고안되었고, 이 후 다양한 분야에서 응용되었다.

한국원자력연구소에서는 APR1400 안전주입탱크의 vortex valve에 대한 성능평가를 위한 실규모 실험장치 (VAPER: VAlve Performance Evaluation test Rig)을 구축하였고[3], 일련의 성능평가 실험을 통하여 APR1400의 설계 요건을 만족하는 vortex valve를 개발하였다.

2. APR1400의 Vortex Valve

"Fig. 1"과 "Fig. 2"는 한국원자력연구소에서 구축한 실규모 APR1400 안전주입탱크 성능평가 실험장치의 vortex valve에 대한 설계도이다. "Figure 1"은 안전주입탱크 하단의 vortex valve 장착상태를 보여주며, "Fig. 2"는 vortex valve로의 유동 주입 경로와 유동 주입구에 따른 vortex chamber에서의 유동장을 도식적으로 보여준다.

안전주입탱크의 하단에 장착된 vortex valve의 상부 표면에는 1개의 공급구(supply port)와 4개의 제어구(control port)의 서로 다른 두 가지 형태의 주입구가 있으며, 하부에는 방출구(exit or discharge port)가 있다. 공급구는 주입수관(stand pipe)에 연결되어 있으며, 방출구에는 방출 튜브가 부착되어 있다. Vortex valve내의 vortex chamber내에는 공급구와 제어구로부터 연결된 각각 4개의 주입 노즐이 설치되어 있다.

제어구로부터 연결되는 노즐은 vortex chamber에 접선방향으로 비상노심냉각수가 주입되도록 설계되어 있다. 따라서 vortex chamber에 주입되는 비상노심냉각수는 강한 vortex flow를 유발하며 이에 따라 높은 유동 저항을 발생한다. 공급구로부터 연결되는 각각의 노즐은 vortex flow의 강도를 감소시키기 위하여 제어구로부터 연결되는 각각의 노즐과 160°의 각도를 이루도록 설계되었다.

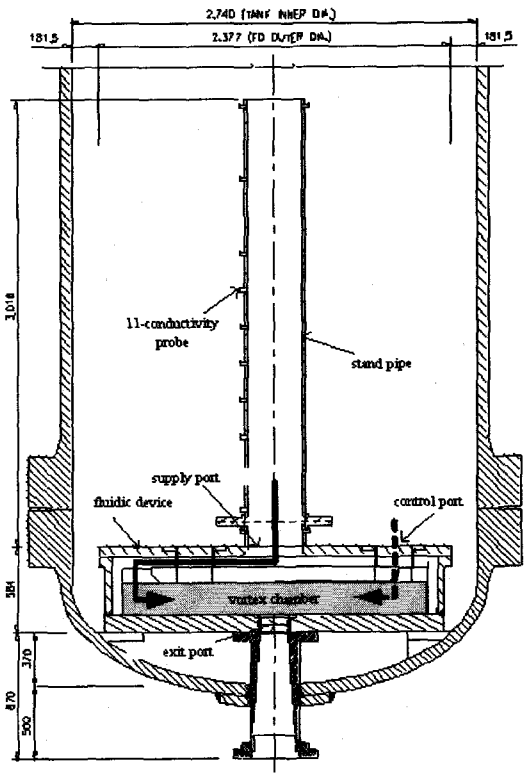

Fig. 1 Arrangement of vortex valve in safety injection tank

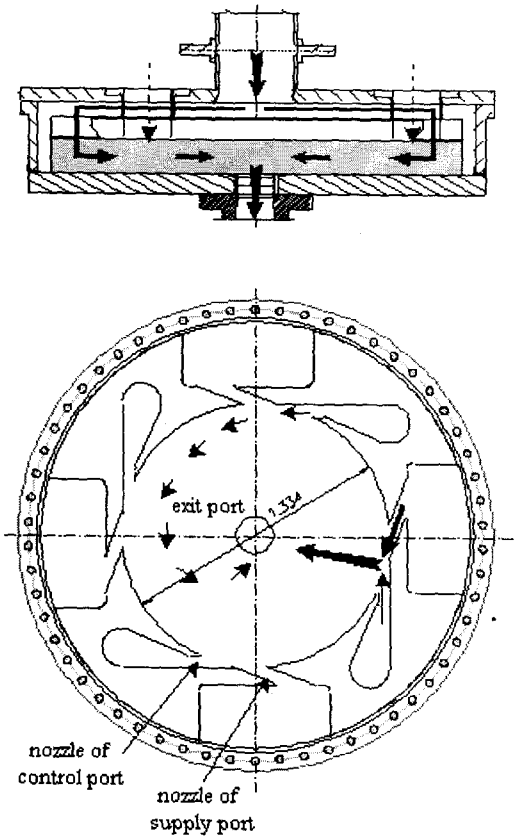

Fig. 2 A front view of vortex valve (top) and a plan view of vortex chamber (bottom)

안전주입탱크의 수위가 주입수관의 상단보다 높은 경우에는 공급구와 제어구를 통해 비상노심냉각수가 vortex valve의 vortex chamber에 유입된다. 이 경우 vortex chamber내의 유동 저항이 작기 때문에 높은 방출유량을 얻게 된다. 반면에 안전주입탱크의 수위가 주입수관의 상단보다 낮아지는 유량전환 시점 이후에는 공급구를 통한 비상노심냉각수의 유입은 더 이상 발생하지 않으며, 모든 비상노심냉각수는 제어구를 통해서만 vortex chamber로 유입된다. 이 경우 vortex chamber내의 높은 유동 저항에 의해 낮은 방출유량을 얻게 된다.

본 연구에서 사용된 vortex valve의 주요 제원은 다음의 "Table 1"과 같다.

Table 1 Dimensions of vortex valve

vortex valve 직경	2,377mm
vortex valve 높이	584mm
vortex chamber 직경	1,334mm
vortex chamber 높이	229mm
supply port nozzle 폭	62.4mm
control port nozzle 폭	62.4mm
exit nozzle 내경	175mm

3. VAPER 실험장치 및 실험 조건

3.1. 실험장치

VAPER 실험장치는 다양한 종류의 유체 밸브(fluidic valve)의 성능평가 실험이 수행될 수 있도록 설계되었으며, accumulator (또는 안전주입탱크), 방출배관계통, 압축공기 공급계통, 순환수 공급계통, 순환수 저장탱크, 그리고 자료획득 및 제어계통 등으로 구성된다.

안전주입탱크의 내경은 2.74m이고 높이는 11.95m, 그리고 체적은 68.13m^{3}으로써, 실제 APR1400 안전주입탱크와 동일하며, 안전주입탱크의 설계 내압은 50bar이다. Vortex valve의 supply port와 연결되는 주입수관(stand pipe)의 내경은 0.397m이고 높이는4.066m이다. 방출배관의 치수는 12″ Sch. 80이다. 공기압축기의 용량은 206m^3/hr이며 토출압력은 50bar이다.

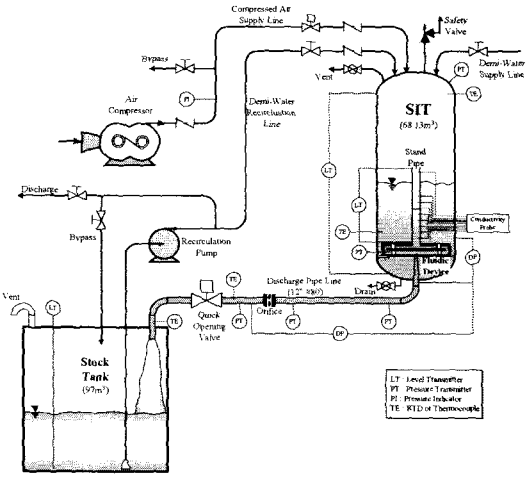

Fig. 3 Schematic of VAPER test facility

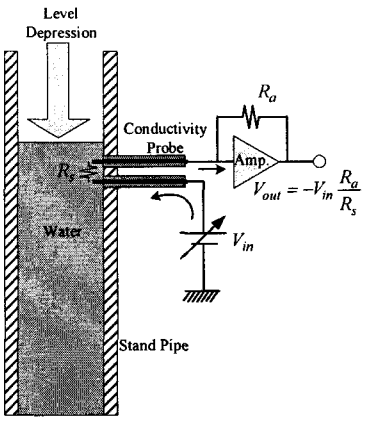

Fig. 4 Measurement principle of conductivity probe

VAPER 실험장치에 설치된 계측기기들은 다음과 같다.

SIT의 수위 측정을 위한 두 개의 차압형 수위계(differential pressure level transmitter)가 설치되어 있으며, SIT내의 압력 및 온도 측정을 위한 압력계(pressure transmitter)와 온도계(thermocouple)가 SIT 상부에 설치되어 있다. Vortex valve와 방출배관에는 각각 두 개 및 한 개의 차압계(differential pressure transmitter) 설치되어 있어서, 유량 방출시 각각의 압력 손실 특성을 측정한다. 또한 세 개의 압력계가 방출배관에 설치되어 있어서 차압계 측정값의 정확성을 확인할 수 있다.

여러 개의 저항온도계(RTD)가 SIT 및 방출배관에 설치되어 있어서 비상노심냉각수의 온도를 측정한다. 주입수관에는 1개의 차압형수위계와 11개의 phase switch 개념의 conductivity probe가 설치되어 있어서, 유량 전환 시점에서 주입수관내 급격한 수위 거동을 측정한다.

Conductivity probe는 주입수관 안으로 삽입된 두 개의 탐침과 외장형 신호 처리기로 구성된다. 외부 여기 전압이 인가되면 두 개의 탐침 사이의 매질의 전기전도도 또는 전기저항에 따라 이에 해당하는 전류가 전체 루프에 흐르게 된다. 물과 공기의 전기전도도가 크게 차이나기 때문에, 특정 conductivity probe가 물과 공기중 어떤 매질에 노출되어 있는지 판별할 수 있다. 또한 11개의 conductivity probe의 신호를 종합하여 분석하면 주입수관내 수위 변화를 추적할 수 있다. "Fig. 4"는 conductivity probe의 측정원리를 보여준다.

압력계/차압계는 Rosemount Ltd.의 model 3051 smart transmitter 제품을 사용하였으며, 제작사가 보증하는 압력계 및 차압계의 정확도는 각각 ±0.05% of span 및 ±0.075% of span이다. 또한 압력계/차압계의 응답시간은 100ms이다. 모든 압력계 및 차압계는 두 대의 Drug Ltd.의 DPI515 pressure controller/calibrator를 이용하여 실험장치 현장에서 교정을 수행하였으며, DPI515 pressure controller/calibrator는 압력계/차압계의 교정범위에 맞추어 한국표준연구원에 의뢰하여 교정하였다.

3.2. 실험 조건

APR1400 vortex valve의 성능 평가/검증을 위한 기준 실험조건은 다음과 같다.

- 안전주입탱크 초기 압력 : 4025 kPa
- 안전주입탱크 초기 수위 : 8.9 m
- 비상노심냉각수 초기 온도 : 상온
- 방출배관 압력손실계수(K) : 9.5

4. 실험 결과

APR1400 안전주입탱크 vortex valve의 성능 평가/검증을 위해 총 4회의 반복 실험이 수행되었다.

4.1. 안전주입탱크 수위 및 주입수관 수위

"Fig. 5"는 quick opening valve의 개방 이후 차압형 수위계에 의해 측정된 안전주입탱크와 주입수관의 수위변화이다. 안전주입탱크의 수위가 주입수관 상부에 도달하는 유량전환 시점에서, 안전주입탱크의 수위감소율은 크게 감소하며 주입수관의 수위는 급격히 하락한 후 다시 회복하여 서서히 감소하는 특성을 보인다.

"Fig. 6"은 차압형 수위계와 11개의 conductivity probe에 의한 주입수관 수위 측정에 관한 예비 실험결과로써, 차압형 수위계가 주입수관의 급격한 수위 변화를 비교적 정확하게 측정함을 확인하였다.

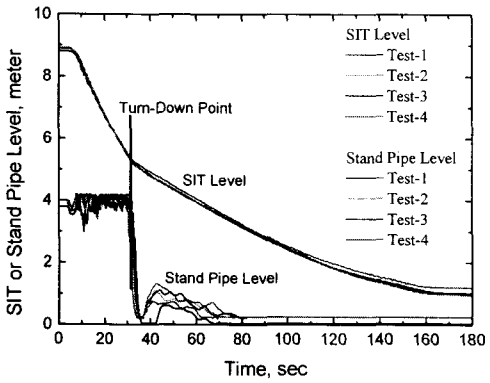

Fig. 5 Water level in SIT and Stand Pipe

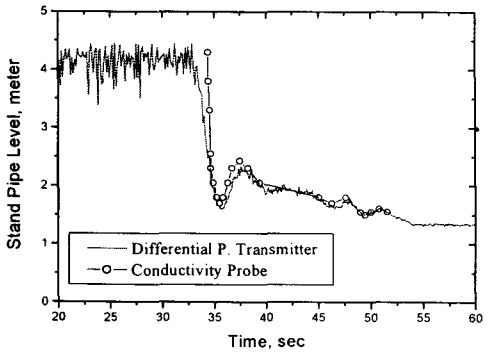

Fig. 6 Stand pipe water level from DP transmitter and conductivity probes

4.2. 비상노심냉각수 방출 유량

방출배관에서의 비상노심냉각수의 최대 유속은 15m/s 이상이다. 많은 압력강하를 유발하지 않으면서 이와 같은 높은 유량 측정범위를 갖는 상용 유량계는 쉽게 찾을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 안전주입수의 수위 변화로부터 다음과 같이 비상노심냉각수의 방출유량을 구하였다.

$$W_{SIT}(t) = \rho_{water} A_{SIT} \frac{dh_{SIT}(t)}{dt} \cong \rho_{water} A_{SIT} \frac{h_{SIT}(t) - h_{SIT}(t+\Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

"Fig. 5"에서 보듯이 안전주입탱크의 수위는 거의 선형적으로 감소하기 때문에, 순간적인 수위 변화율은 1차 도함수로 근사하여도 무리가 없다.

비상노심냉각수의 최대 방출유량은 약 1010 kg/s이고, 총 방출시간은 약 165초이다.

4.3. Vortex Valve의 압력손실 특성

Vortex valve의 압력손실계수는 다음의 식 (2)로부터 계산된다.

$$K = \Delta P \frac{2}{\rho_{water} v_{water}^2} = \Delta P \frac{2\rho_{water} A_{Pipe}^2}{W_{SIT}^2} \quad (2)$$

방출유량은 식 (1)로부터 계산되며, 방출유속은 방출배관에서의 유속이 사용된다.

"Fig. 8"은 측정된 압력손실계수로써, 유량전환 이전에는 약 16이며 유량전환 이후에는 약 160이다.

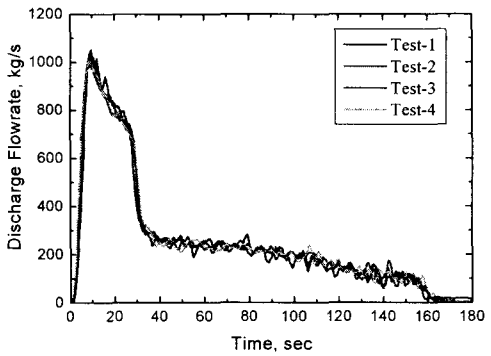

Fig. 7 Discharge flowrate of emergency core cooling water from SIT

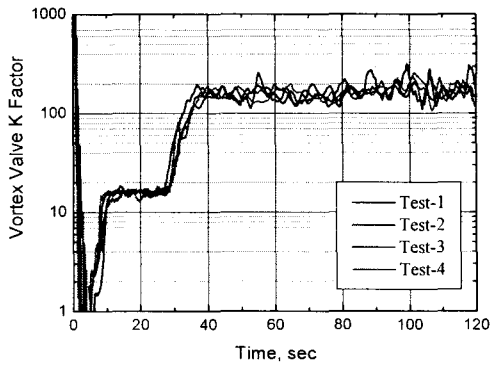

Fig. 8 Pressure loss coefficient of vortex valve

4.4. 불확실도 분석

비상노심냉각수의 방출유량에 대한 측정 불확실도 계산은 참고문헌[4]의 지침에 따라 수행되었다. 식 (1)로부터 다음의 식 (3)의 불확실도 전파식을 이용하여 방출유량에 대한 bias 불확실도를 계산하였다.

$$B(W_{SIT}) = \pm\left[\left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial \rho_w} B_{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial A_{SIT}} B_{A_{SIT}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial h} B_{h_{SIT}(t)}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial h} B_{h_{SIT}(t+\Delta t)}\right)^2 - 2\left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial h} B'_{h_{SIT}(t)} B'_{h_{SIT}(t+\Delta t)}\right)\right]^{1/2}$$

$$\approx \pm\left[\left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial \rho_w} B_{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial A_{SIT}} B_{A_{SIT}}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{SIT}}{\partial h} B_{\Delta h_{SIT}}\right)^2\right]^{1/2}$$

$$= \pm\left[\left(\frac{W_{SIT}}{\rho_w} B_{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{W_{SIT}}{A_{SIT}} B_{A_{SIT}}\right)^2 + \left(\frac{W_{SIT}}{h_{SIT}(t) - h_{SIT}(t+\Delta t)} B_{\Delta h_{SIT}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (3)$$

안전주입탱크의 수위 변화에 대한 bias 오차는 차압형 수위계의 상세 교정결과로부터 결정하였다. 차압형 수위계의 경우, 총 52개의 기준 압력 값에 대하여 상세 교정을 수행하였다. 교정 결과 수위 변화 측정에 대한 최대 bias 오차는 ±0.005m 미만이었다.

"Fig. 9"는 비상노심냉각수 방출유량에 대한 95% 신뢰도 범위에서의 bias 오차를 보여준다.

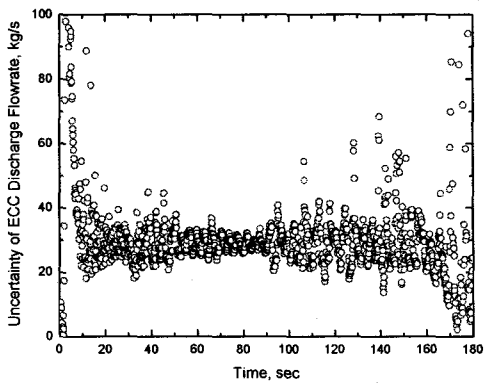

Fig. 9 Bias uncertainty of ECC water discharge flowrate

5. 결 론

APR1400 원자력발전소의 비상노심냉각수의 효율성을 증진하고 비상노심냉각계통을 단순화하기 위하여, 운전원의 조작이 필요없으며 구동을 위한 moving part가 전혀 없는 피동형 유량조절 기구인 대용량 vortex valve를 개발하였다.

또한 APR1400 vortex valve 뿐만 아니라 다양한 유체밸브의 성능 평가/검증을 위해 대형 실험시설인 VAPER(VAlve Performance Evaluation test Rig)를 구축하였다.

VAPER를 이용한 실규모 vortex valve에 대한 반복 실증실험을 통하여, 본 연구에서 개발한 vortex valve의 성능이 APR1400 원자력발전소의 설계 요건을 만족함을 확인하였고 vortex valve의 올바른 작동에 대한 신뢰성을 확보하였다.

또한 APR1400 vortex valve 실증실험에 대한 품질보증 프로그램을 개발하여 매회의 반복실험 과정에 적용하였고, 주요 계측기기에 대한 철저한 검/교정을 수행함으로써, 획득한 실험결과의 건전성을 최대한 확보하였다.

참고문헌

(1) C.-H. Song et al., 2002, "Overview of Thermal Hydraulic Test Program for Evaluating or Verifying the Performance of New Design Features in APR1400 Reactor," ICAPP, Embedded International Topical Meeting, 2002 ANS Annual Meeting, Hollywood, Florida, June 9~13, 2002.

(2) D. Thoma, 1928, "Vorrichtung zur Behinderung des Ruchstromens," Deutsche Patentschrift No. 507 713, June 1928.

(3) H. J. Chung et al., 2002, "Construction of the Passive Fluidic Device Performance Evaluation Test Facility," KAERI/TR-2080/2002, KAERI Technical Report.

(4) ANSI/ASME PTC 19.1, 1985, "Measurement Uncertainty," Instruments and Apparatus Supplement to the ASME Performance Test Codes, ASME.