

볼텍스챔버의 유동 특성에 관한 실험

조 석, 서정식, 송철화, 천세영, 정문기

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

차세대 원자로(KNGR : Korea Next Generation Reactor)에는 새로운 안전개념으로서 피동형 안전주입탱크(Safety Injection Tank, SIT)의 도입을 고려하고 있는데, 이러한 피동형 유량조절기능은 안전주입탱크내의 유체기구(fluidic device)인 볼텍스챔버(vortex chamber)에 의해 이루어진다. 볼텍스챔버는 내부에서 발생하는 와류강도에 따라 유동저항의 강도가 달라짐을 이용하여 유량을 피동적으로 조절할 수 있는 유체기구이다. 본 연구에서는 볼텍스챔버의 유동특성을 관찰하기 위하여 소규모 실험장치를 구축하고, 이를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구는 두 단계로 수행되었다. 제1단계 실험에서는 볼텍스챔버의 기하학적 특성이 안전주입탱크의 안전주입수 방출특성에 미치는 영향에 대한 거시적 관점에서의 연구로서, 볼텍스챔버의 기하학적 변수(유입구 및 방출구의 직경)가 안전주입수의 방출과정에서 발생하는 SIT 내의 수위 거동, 안전주입수의 방출유량 특성등에 미치는 영향에 대해 중점적으로 고찰하였다. 제2단계 실험에서는 1단계 실험에서 관찰된 안전주입탱크의 여러 가지 방출특성과 볼텍스챔버 내부 유동장의 유동특성과의 관련성을 규명하기 위해, PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 볼텍스챔버의 기하학적 변수에 따른 유동장 내부의 국소 유속분포를 측정하였다.

1. 서 론

원자력발전소의 냉각수 상실사고의 발생시 원자로 노심을 냉각시키기 위한 안전장치에 관한 연구가 오랫동안 계속되어 왔다. 최근에는 기존의 원자로계통보다 안전성이 강화된 설계개념을 채택하는 차세대원자로(KNGR)의 개발이 착수됨에 따라, 인위적 조작방법을 배제한 피동적인 원리에 따라 자동으로 작동되는 안전주입장치에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 차세대 원자로에서는 피동형 SIT(SIT: Safety Injection Tank)의 도입을 고려하고 있는데, 이는 냉각수 상실사고 발생시 초기에는 파단부를 통해 방출된 냉각수를 보충하기 위해 대유량의 냉각수 공급이 필요하고, 일정 기간 이후에는 소유량 (대유량의 20% 정도)의 냉각수를 오랜 기간동안 공급할 수 있는 기능등의 두 가지 유량공급 상황을 제공할 수 있다. 이러한 유량조절기능은 SIT 내의 유체기구인 볼텍스챔버(vortex chamber)에 의하여 이루어진다. 즉 볼텍스챔버에 부착된 2개의 주입구(주유입구, 조절유입구)를 통한 주입유량에 따라서 볼텍스챔버 내부에 와류가 발생

하게 되고, 결국 유동저항이 달라짐으로서 피동적으로 방출유량을 조절하게 된다. 기존의 SIT는 이와같은 유체기구를 갖추고 있지 않음으로 인하여, 사고발생 초기에는 소요 유량보다 더 많은 냉각수를 공급하게 되고, 일정 기간 이후에는 SIT 내의 냉각수가 고갈되어 원자로 계통의 냉각에 전혀 기여하지 못하게 된다.

볼텍스챔버에 대한 연구는 1960년대 초부터 광범위하게 수행되었으나, 측정방법의 제한성과 복잡한 유동현상으로 인하여 거시적인 측면에서의 연구만이 이루어졌다. 따라서 이러한 연구결과를 피동형 SIT내의 유량조절용 유체기구의 개발에 직접 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 피동형 SIT 내부에 설치되는 유체기구(볼텍스챔버)의 유동특성을 규명하기 위하여 관련 계통을 모의한 소형실험장치를 설치하고, 실험을 통하여 볼텍스챔버의 기하학적 변수(유입구 및 방출구의 직경)가 안전주입수의 방출과정에서 발생하는 SIT내의 수위 거동, 안전주입수의 방출유량 특성등에 미치는 영향에 대해 고찰하였고, PIV를 사용하여 볼텍스챔버 유동장 내부의 국소 유속분포를 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 그림 1에 표시한 바와같이 SIT를 모의한 가압탱크, 저장수조, 볼텍스챔버(test section), 각종 계측기, 그리고 배관과 펌프로 구성되었다. 원자력발전소의 피동형 SIT에서는 방출유량을 조절하는 유체기구가 SIT의 내부에 설치되어 있으나, 본 실험에서는 PIV(Particle Image Velocimetry)를 사용하여 유체기구 내부의 유동장을 측정하기 위하여 아크릴 재질의 유량조절용 유체기구인 볼텍스챔버를 가압탱크의 외부에 설치하였다. 특히 선명한 유동이미지를 촬영하기 위하여 카메라에 비춰지는 윗면을 투명한 강화유리를 사용하여 제작하였다. 볼텍스챔버의 옆면에 반경방향의 주유입구(supply port)와 접선방향(90°)의 제어유입구(control port)를 각각 설치하고, 챔버의 밑면 중앙에 방출구를 설치하였다. 또한 각각의 유입구와 방출구는 내경이 8, 11, 14, 24, 32mm의 5종류로 제작하여 교체할 수 있도록 제작하였다. 주유입구는 가압탱크의 주입수관(stand pipe)과 연결되었고, 제어유입구는 탱크의 바닥면에 연결하였다. 볼텍스챔버는 내경이 150mm, 높이 60mm의 원통형으로 제작하였다. 가압탱크의 내부에는 밑면으로부터 52cm 높이의 주입수관을 설치하여 수위의 변동에 따라 시험대 내로 유입되는 유체가 주유입구에서 제어유입구로 전환될 수 있도록 하였다. 가압탱크의 가압을 위하여 탱크의 상부에 공기 가압라인과 압력조절기를 설치하였다. 유량의 측정을 위하여 방출라인에 Coriolis-형 질량유량계를 설치하였고, 주입유량은 초음파유량계를 사용하여 측정하였다. 자료취득장치는 PC와 연결된 자료취득전용 변환기(DT-2839 A/D converter board)를 사용하였다.

그림 2에 본 실험에서 사용한 PIV를 표시하였다. 본 PIV(TSI 사)는 레이저 쉬트(laser sheet) 발생용 Dual Head Nd:YAG Laser, 유동 영상 이미지의 취득을 위한 CCD Camera(1k×1k), Synchronizer, 유동 영상 이미지를 취득하고 이를 해석하는 PIV 용 PC로 구성되어 있다. 자료처리용 PC에는 8-bit Gray Scale로 이미지를 받아들이는 Frame Grabber 보드와 이미지를 처리 할 수 있는 Array Processor 보드가 내장되어 있으며, 인텔 166MHz 중앙처리장치와 128MB의 램이 장착되었다. 레이저 빔(laser beam)은 광학렌즈(spherical & cylindrical lens)를 통과하면서 레이저 쉬트(laser sheet)로 바뀌게된다. 본 실험장치에서 사용된 Nd:YAG Laser의 경우 빔 쉬트(light sheet)의 waist부근에서의 폭은 20~900mm, 두께는 11~200 μm , 초점거리는 100~2000mm 정도이다. 또한 본 실험에서 사

용한 CCD 카메라의 초점거리는 100 ~ 300mm이고 촬영 가능한 이미지의 폭이 100mm인 데 비해 볼텍스챔버의 내경은 150mm이므로, 이를 고려하여 볼텍스챔버를 4등분하여 유동이미지를 촬영하였고, 실험조건에 따라 챔버 바닥면으로부터 15mm와 45mm의 평면에 laser sheet를 투사하였다.

실험방법은 다음과 같다. 실험 시작전 가압수조 내부의 초기조건을 압력 300kPa, 수위 1000mm로 유지한 상태에서 주입구와 방출구의 밸브를 개방한 뒤, 볼텍스 챔버의 유동저항에 따라 변화하는 가압수조 내부의 압력(PT-01) 및 수위(LT-01), 주입구 및 방출구 각각에서의 압력(PT-02, 03, 04) 및 유량 변화(FT-01, FT-02), 가압수조 내부 주입수관 내의 수위(LT-02)변화를 측정하였고, 이와는 별도로 볼텍스챔버 내부의 유속분포를 PIV를 사용하여 측정하였다. 표 1과 2에는 1단계와 2단계 실험의 실험조건을 표시하였다.

3. 실험결과

본 실험을 통하여 얻어진 시간에 따른 대표적인 유량, 압력변동을 그림 3과 4(표 1의 Case No. 10 경우)에 표시하였다. 탱크내의 수위가 주입수관 보다 높을때는 주유입수가 제어유입수에 비해 많은 양이 주입되고 있으나, 수위가 주입수관 이하로 낮아진 경우에는 제어유입수만이 방출유량에 기여하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 주유입수만이 주입될 때의 유량곡선(그림 3의 역삼각형마크)과 비교해보면 주유입수의 유동은 제어유입수의 유동에 의해 방해받게되어 유량이 제어유입 유량만큼 감소함을 관찰할 수 있다. 볼텍스챔버에서의 압력강하특성은 그림 4에서 관찰할 수 있다. 주유입수와 제어유입수가 모두 주입될 경우(정상상태)에는 압력강하는 30kPa 정도이나 제어유입수만 주입될 경우(제어유입상태)에는 80kPa로 큰 폭의 차이를 보이고 있다. 이는 수위와 주입수관과의 상호관계에 의하여 챔버 내부의 유동양식이 달라짐을 의미하고, 제어유입수의 유량에 따라서 내부의 유동저항의 크기가 결정됨을 의미한다. 즉 정상상태시에는 주유입 유량이 제어유입 유량에 비해 상대적으로 많아 제어유량에 기인한 와류의 영향이 작으나, 천이상태나 제어유입상태에서는 상대적으로 큰 제어유량(또는 모멘텀)이 주입되므로 이로인한 와류강도가 커져 챔버내 유동저항을 증가시키므로 결과적으로 큰 압력강하량을 보이게된다.

방출구의 직경(D_E)변화가 볼텍스챔버에 의한 압력손실특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 주유입구 직경(D_S)이 24mm, 제어유입구 직경(D_C)이 24mm로 동일한 두가지 경우(표 1의 Case No. 6과 13)의 유량과 압력변화를 그림 5와 6에 표시하였다. 방출구의 직경변화를 비교한 이유는 방출유량특성과 압력손실특성에 가장 큰 영향을 미치는 주요인이 바로 방출구의 직경이기 때문이다[6]. 방출유량은 방출압력과 유사한 경향을 보이고 있으며, 천이상태에서 방출압력은 위에서 살펴본 바와같이 제어유량의 모멘텀에 의해 발생된 유동저항의 영향으로 큰 폭의 감소를 보인다. 방출구직경이 유입구직경과 동일한 그림 5의 경우 정상상태시에는 볼텍스챔버에 의한 압력강하가 매우 작지만, 천이상태가 시작되면서 압력강하량은 더욱 커져 30kPa의 차이를 보이고 있다. 그러나 방출구직경이 8mm 경우인 그림 6에서는 130kPa의 큰 차이를 보이고 있으며, 정상상태에서도 그림 5와는 달리 100kPa 정도의 큰 차이를 관찰할 수 있다. 방출구의 직경은 볼텍스챔버의 유동특성에 큰 영향을 미치고 있으며, 유입구의 직경이 일정한 경우 방출구직경이 작을수록 큰 압력강하를 나타낸다. 반대의 경우로서 방출구의 직경이 유입구의 직경보다 더욱 클 때에는 천이상태 이후에도 압력강하가 거의 발생하지 않고, 방출유량에도 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 경향은 방출구의 직경이 주유입구의 직경보다 작아서 주유입유량을 충분히

방출하지 못하고, 이때 제어유입수의 접선방향 회전 모멘텀의 영향으로 챔버 내부에는 주로 회전 유동이 지배하기 때문이다.

유입구의 직경이 일정한 경우 방출구의 직경은 방출유량을 결정하는 주요 변수임을 위에 설명하였다. 따라서 방출구 직경과 방출유량 사이의 상호관계를 관찰하기 위하여 방출구의 직경비의 제공근을 사용하여 그림 7에 표시하였다. 그림 7은 표 1의 case 8과 11을 비교한 것으로서 case 11의 결과에 방출구 직경비의 제공근을 곱한 것으로서, 방출유량이 거의 일치하고 있다. 그림 8에 방출구 직경이 8mm, 제어유입구 직경이 24mm이고, 주유입구 직경이 24mm와 14mm인 경우 주입수관 내의 수위변동을 표시하였다. 방출구의 직경이 작아질수록 수위위축현상은 더욱 크게 관찰되었고, 챔버내부의 유동저항 변화가 주입수관에도 영향이 있음을 의미한다.

그림 9와 10에 표 2의 B-1과 B-2 경우에 대한 속도분포를 표시하였다. 위에서 설명하였듯이 CCD 카메라의 성능을 고려하여 원형의 챔버를 그림 9와 10에서와 같이 4등분하여 유속을 측정하였으며, laser sheet의 높이를 주입구의 중심 높이인 45mm(그림 9)와 15mm(그림 10)의 두 경우만 측정하였다. 그림 9에서는 주유입수가 제어유입수의 영향으로 45° 정도 기울어져 유동하고 있으며, 이 영향으로 벽면과 주입유동 사이에 작은 와류가 형성됨을 관찰할 수 있다. 중심부로 접근할수록 회전속도는 더욱 빨라져 4 ~ 5m/sec의 속도를 관찰하였고, 중심부에서는 평면에서의 회전유속보다는 방출구로의 수직방향 유속이 커져 유속을 측정할 수 없었다. 이러한 경향은 그림 10에서도 관찰할 수 있다. 그림 10에서도 확인할 수 있듯이 챔버 바닥으로부터 15mm 상방의 수평면에서는 주입수의 영향은 없고, 완전히 발달된 회전유동만이 관찰되었다.

4. 결 론

본 연구는 볼텍스챔버의 기하학적 변수에 따른 챔버의 방출유량과 압력강하특성을 관찰하기 위하여 소형의 실험장치를 사용하여 실험을 수행하였고, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 주유입구, 제어유입구 지름을 가지는 경우의 유량곡선은 각 방출구의 지름 비의 제공근에 비례한다.
- (2) 방출구의 직경이 제어유입구나 주유입구의 직경보다 큰 경우 유체기구에 의한 압력강하가 거의 발생하지 않으며, 주입구의 직경이 일정한 경우 방출구의 직경이 작아질수록 압력강하와 유량변동이 크게 나타났다.
- (3) 방출구와 주유입구의 지름비에 따라 주입수관내의 수위위축 정도가 차이가 나며, 주유입구와 제어유입구의 지름이 일정한 경우 방출구의 지름이 감소할수록 주입수관에서의 수위위축이 더욱 커졌다. 본 실험에서 최대 수위위축은 약 60mm로 관찰되었다.

5. 참고문헌

- (1) D. N. Wormley, "A Design Basis for Vortex Type Fluid Amplifiers Operating in the Incompressible Flow Regime", J. Basic Engineering, pp. 369~376, Jun, 1970.
- (2) D. N. Wormley, "An Analytical Model for the Incompressible Flow in Short Vortex Chambers", Trans. ASME, pp. 264~276, 1969.
- (3) C. W. Forsberg, "A Process Inherent Ultimate Safety Boiling Water Reactor", Nucl. Technol., Vol. 72, pp.121~134, 1986.
- (4) C. W. Forsberg, "Passive Emergency Cooling Systems for Boiling Water Reactors

(PECOS-BWR)", Nucl. Technol., Vol. 76, pp. 185~192, 1987.

(5) T. Shiraishi, et al. "Characteristics of the Flow Controlled Accumulator", Nucl. Technol., Vol. 108, pp. 181~190, 1994.

(6) T. Shiraishi, et al., "Development of the Flow Controlled Accumulator", Mitsubishi Heavy Industry, 1993.

Table 1 Test Matrix for Phase-I

Case No.	D_E	D_S	D_C	Case No.	D_E	D_S	D_C
1	32	14	24	8	11	14	14
2	14	24	14	9	8	14	11
3	14	20	14	10	14	24	24
4	14	14	14	11	8	14	14
5	24	14	24	12	11	24	24
6	24	24	24	13	8	24	24
7	11	24	14	14	8	14	24

Table 2 Test Matrix for Phase-2

Case	Diameter [mm]			Height [mm]	Plane No.	Pulse Separation Time [μ sec]
	D_E	D_S	D_C	Z		Δt
A-1	11	24	14	45	12	150
B-1	8	24	24	45	12	170
B-2	8	24	24	15	12	170
B-3	8	24	24	45	12	100

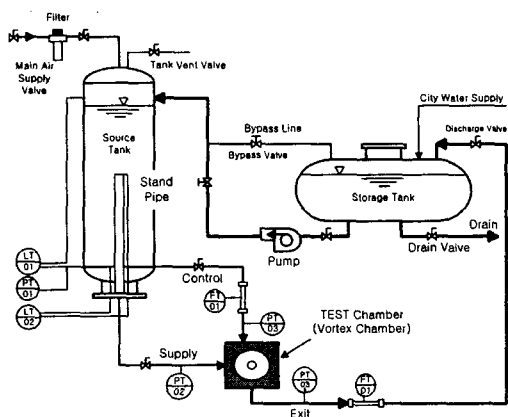


Fig. 1 Schematic Diagram of the Test Facility

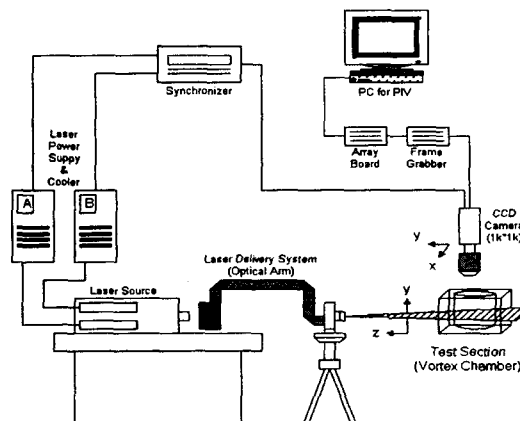


Fig. 2 Layout of the PIV System

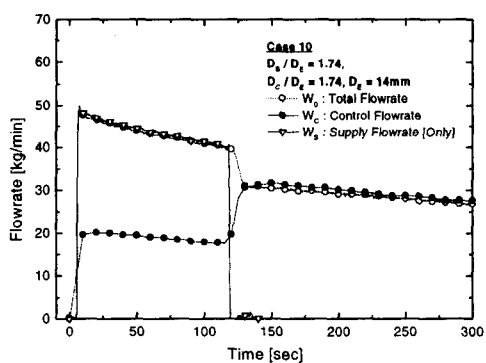


Fig. 3 Variation of Control & Exit Flow Rate

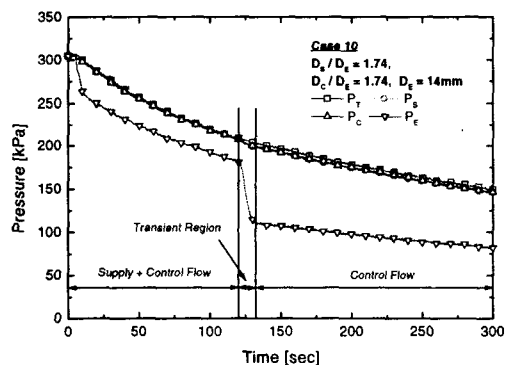


Fig. 4 Typical Characteristic Curve of Pressure

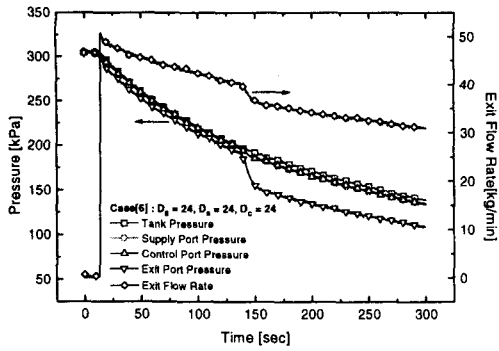


Fig. 5 Variation of Pressure & Flow Rate
($D_E = 24, D_S = 24, D_C = 24$)

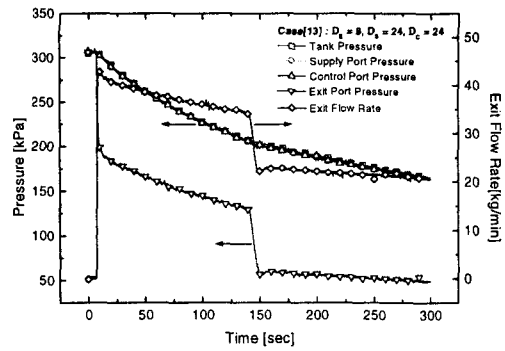


Fig. 6 Variation of Pressure & Flow Rate
($D_E = 8, D_S = 24, D_C = 24$)

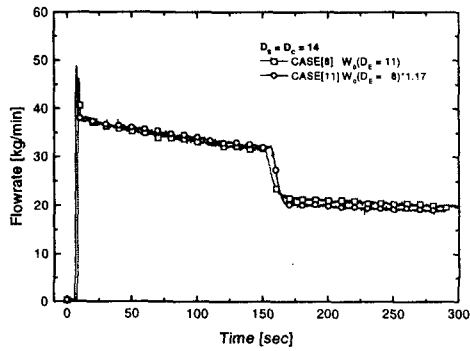


Fig. 7 Comparison of Flow Rate of Case 8 with
that of Case 11 multiplied by 1.17

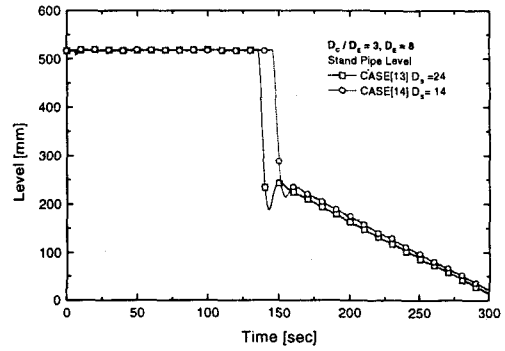


Fig. 8 Variation of Water Level in
the Stand-Pipe

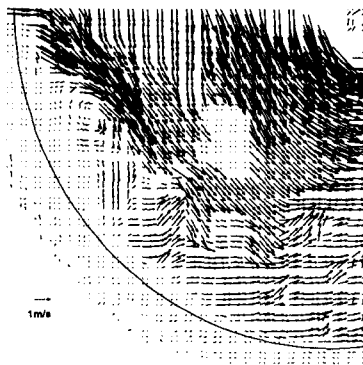


Fig. 9 View of Velocity Field
at Plane-12, $h = 45\text{mm}$

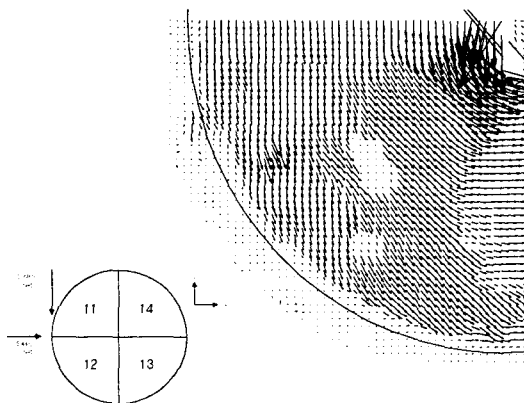


Fig. 10 View of Velocity Field
at Plane-12, $h = 15\text{mm}$