

한국 표준형 원전의 POSRV 하부 배관 유동해석

권순범[†] · 김인구^{*} · 안형준^{*} · 이동은^{**} · 백승철^{**} · 이병은^{***}
(2003년 5월 9일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

Flow Analysis of POSRV Subsystem of Standard Korean Nuclear Reactor

Soon-Bum Kwon, In-Goo Kim, Hyung-Joon Ahn,
Dong-Eun Lee, Seung-Cheol Baek and Byeong-Eun Lee

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Diffraction(회절), Mach Reflection(마하반사),
Regular Reflection(정상반사), Shock Mach Number(충격파 마하수)

Abstract

In order to investigate the flows with shock wave in branch, 108° elbow and T-junction of the IRWST system of standard Korean nuclear reactor, detail time dependent behaviors of unsteady flow with shock wave, vortex and so on are obtained by numerical method using compressible three-dimensional Navier-Stokes equations. At first, the complex flow including the incident and reflected shock waves, vortex and expansion waves which are generated at the corner of T-junction is calculated by the commercial code of FLUENT6 and is compared with the experimental result to obtain the validation of numerical method. Then the flow fields in above mentioned units are analyzed by numerical method of finite volume method. In numerical analysis, the distributions of flow properties with the moving of shock wave and the forces acting on the wall of each unit which can be used to calculate the size of supporting structure in future are calculated specially. It is found that the initial shock wave of normal type is re-established its type from an oblique one having the same strength of the initial shock wave at the 4 times hydraulic diameters of downstream from the branch point of each unit. Finally, it is turned out that the maximum force acting on the pipe wall becomes in order of the T-junction, 108° elbow and branch in magnitude, respectively.

1. 서론

어떤 원인에 의해 원자로 냉각계통(RCS: Reactor Coolant System)에서 냉각재의 누설이 일어나면 계통중의 압력이 낮아지고 냉각재는 순간적으로 고온 고압의 과열 수증기로 되며 노 내의 온도 또한 급격히 증가하여 전 시스템의 안정성이 심각한 위험에 처하게 된다. 이와 같은 위험은 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)가

작동됨으로서 해소된다. 즉, POSRV가 개방됨과 동시에 냉각계통 내 고온·고압의 과열수증기는 방출배관계통을 통해 IRWST(In-containment Refueling Water Storage Tank) 내부에 잠겨있는 스파저(sparger)를 통하여 방출되고 새로운 냉각재가 계통내로 유입됨에 의해 RCS내의 온도가 내려감으로서 위험은 해소된다. 스파저를 통하여 방출된 과열 수증기는 열 흡수 기능이 있는 IRWST 수조에서 응축물로 변하면서 가지고 있던 높은 에너지를 잃게 된다.

한편, 냉각시스템 내의 고온·고압의 증기가 POSRV를 통하여 순간적(개방시간 약 0.007초)방출될 때 방출배관 내의 임의의 위치에서는 압축파의 집적에 의해 충격파가 발생되고 발생된 충격파는 스파저에 도달할 때까지 다양한 배관 unit을 통과하게 된다. 이러한 다양한 형태의 배관을

[†] 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : sbkwon@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5578 FAX : (053)950-6550

^{*} 한국 원자력 안전기술원

^{**} 경북대학교 대학원 기계공학과

^{***} 한국항공기능대학

통과하는 충격파는 곡관 혹은 분지관등의 임의의 위치에서는 충격파의 반사(reflection)나 회절(diffraction)현상 혹은 팽창파를 발생시킨다.^(1~4)

지금까지 충격파가 개방된 고체벽면을 따라 전파하는 경우에 발생하는 충격파의 반사형태나 삼중점(triple point)의 궤적변화, rolling-up, kink 현상 문제 등에 미치는 벽면의 형상이나 각도, 입사충격파의 마하수, 기체매질의 종류 등의 영향은 상세하게 조사되어 충격파의 역학적 특성이 비교적 잘 알려져 있다.^(5,6)

그러나 아직까지 충격파가 다양한 배관계를 전파하는 경우에 대한 연구는 완전하다고는 할 수 없다. 특히 원전의 POSRV와 같이 압력비와 온도가 대단히 큰 경우에 대한 연구는 장치 설계상의 어려움, 충격파 전파 마하수가 너무 크게 됨에 따른 각종 센서의 정도상의 문제, 높은 충격파 마하수에 기인된 온도 압력의 갑작스런 증가에 따른 측정 장치의 인내성 때문에 연구가 거의 이루어져 있지 않은 실정이다. 따라서 지금까지 충격파가 관내를 전파하는 유동장에 관한 연구는 압력비가 낮은 경우에 대하여 고체 벽면에서 측정된 비정상 압력이나 가시화 결과로부터 전파하는 충격파 유동장을 단지 정성적으로 이해하여 왔을 뿐이다.

본 연구는 PWR 원전 냉각배관 계통의 안정성을 확보하기 위해 설치한 POSRV가 급개방된 경우 하류의 다양한 배관계통에 대한 유동해석을 상용코드를 사용한 수치해석으로 수행하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 먼저 본 연구의 수치해석 기법의 타당성은 충격파관을 사용하여 유로가 4각 단면으로 된 T-junction에서의 충격파 거동을 가시화하여 실험하고, 이를 상용코드를 사용하여 구한 수치해석결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 확보한 후 이를 실제 POSRV의 작동조건을 적용하여 POSRV가 순간 개방되는 경우, T-junction, 108° elbow, branch에 있어서 충격파 거동과 관 벽면에 작용하는 비정상 하중을 구하여 배관 시스템을 지지하는 구조물을 설계하는데 필요한 자료로 삼도록 하였다.

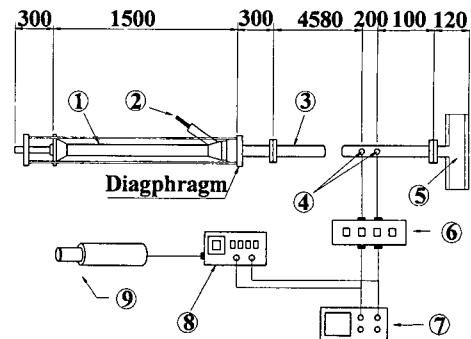
2. 실험 장치 및 방법

2.1 충격파관

Fig. 1은 실험에 사용한 충격파관과 계측장치의

개략을 나타낸 것이다. 고압실은 내경 100mm, 길이 1.5m의 원형관이고 저압부는 60×60mm²인 스테인리스로 제작된 2중의 정방형 단면으로 길이는 6m이다. 고압실의 압력을 소정의 압력으로 채우고 격막으로 분리한 다음 격침(needle)에 의해 격막을 순간적으로 파막하면 저압실쪽으로는 압축파의 집적에 의해 충격파가 형성되어 전파되고 고압실은 팽창파가 전파되어 냉각된다. 저압실에는 격막하류 5.5m인 위치에 2개의 압력변환기가 200mm 간격으로 설치되어 단발광원의 발광 격발용 및 충격파 마하수 측정용으로 사용되었다. 가시화에 사용된 단발광원은 광원지속시간이 20ns인 Xe 광원이다.

고압실과 저압실에 일정한 압력비의 기체를 채운 후 격막을 파막하면 충격파는 저압실로 전파하여 저압실에 설치된 2개의 압력변환기에 도달한다. 본 연구에 사용된 압력변환기는 충격파의 전파에 의한 압력상승을 측정할 수 있는 동적 특성을 가진 것으로서, 각각의 출력신호는 디지털 오실로스코프에 기록된다. 200mm 간격으로 설치된 2개의 압력변환기에서 오실로스코프로 입력된 압력신호의 시간차로부터 전파충격파의 마하수 및 속도가 계산된다. 계산된 충격파의 속도로부터 압력변환기를 통과한 충격파가 측정부의 소정의 위치에 도달하는 시간이 계산되므로 광원의 발광시점이 정해진다. 충격파가 압력변환기를 통과함과 동시에 유기된 신호를 지연회로장치(delay unit)에 보내어 앞에서 계산된 시간 혹은 일정거리만큼 신호를 지연시킨 후 단발광원인 Xe lamp를 격발시킴으로써 가시화가 완성된다. 본 실험에 사용된 지연회로의 시간 제어는 1μs까지 가능



①고압실 ②격침 ③저압실 ④압력변환기 ⑤측정부
⑥충격기 ⑦오실로스코프 ⑧지연회로장치 ⑨광원
Fig. 1 Schematic of shock tube apparatus(Unit:mm)

하며, 오차값은 $\pm 1\%$ 이다. 한편 슈리렌 가시화에 사용된 필름은 고감도인 ASA-400의 흑백 필름이다.

2.1.1 측정부와 경계조건

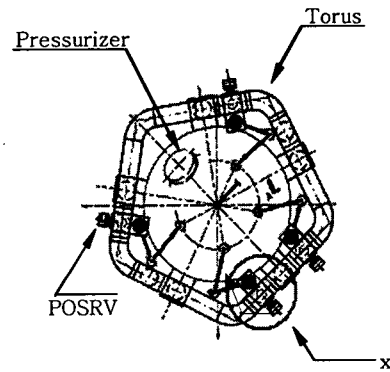
Fig. 2는 실험과 수치해석에 사용된 측정부의 개략을 나타낸 그림이다. T형 측정부의 단면은 $60 \times 60 \text{mm}^2$ 인 축대칭 사각 덕트이다. 또한, 수치해석은 실험에 사용된 측정부와 동일한 실측크기로 수행하였으며, 과도한 계산시간을 줄이고 측정부의 대칭성을 고려하여 측정부의 절반만 계산하였다. 수치해석에 사용된 상용코드는 FLUENT6이며, 압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법(finite volume method)을 적용하였다. 난류유동장을 해석하기 위해 k- ϵ standard model을 채택하였으며, 유체의 점도는 Sutherland 식을 사용하여 구하였다. 또 충격파의 전파속도가 매우 빠르기 때문에 고체 벽은 단열 벽조건을 적용하였으며 no-slip condition을 부여하였다. 본 연구에 사용된 격자수는 얻어진 해에 대한 격자의존성을 조사하여 약 6만개로 하였으며, 작동유체는 고압실과 저압실 모두 온도가 298K인 공기로 하였다.

2.2 POSRV의 하부 배관 시스템

Fig. 3은 한국형 원전 POSRV의 하부 배관 시스템의 개략을 나타낸 그림이다. POSRV는 원자로의 상부에 위치하고 있으며, POSRV의 개방과 동시에 유동은 A부분의 T-junction, B부분의 108° elbow, C부분의 branch를 통하여 하부 배관계

로 전달되고 최종적으로 스파저를 거쳐 저기조의 물에 유입된다. 세 unit의 상세도를 그림(b)에 나타내었다. 본 연구는 이 세 부분의 기하학적 형상에 대하여 POSRV가 순간적으로 개방되었을 경우 각 unit에 있어서의 유동을 해석하고 unit 관벽면에 작용하는 하중을 구하였다. 관직경은 305mm로 일정하며, POSRV로부터 각 배관 unit까지의 거리는 밸브를 순간적으로 열었을 때 충격파가 형성되기에 충분한 거리이므로(7) 충격파가 각 unit에 지나갈 때의 유동장을 해석하는 것을 연구의 대상으로 하였다.

POSRV가 개방되는 경우의 원자로내의 수증기 압력과 온도는 각 15.4MPa, 626K이고 개방에 걸리는 시간은 충격파관에서의 격막 파막에 걸리는



(a) Plane view of a pressurizer

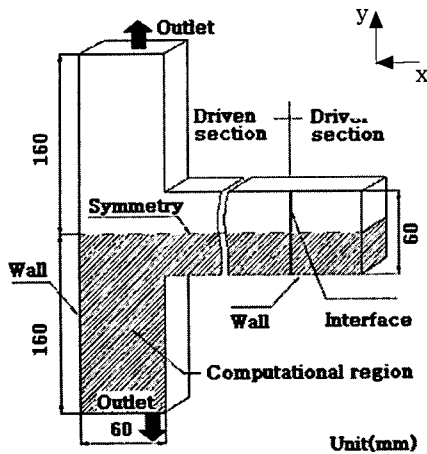
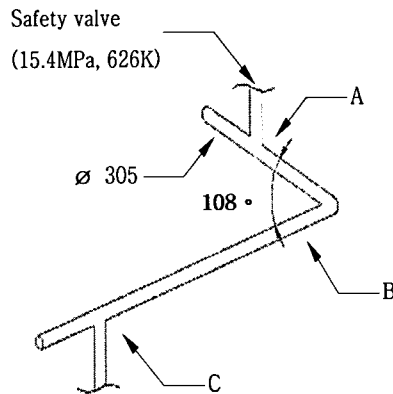


Fig. 2 Geometry of T-junction



(b) Detail x

Fig. 3 Subsystem of POSRV

시간과 비슷한 0.007초이다. 그러나 본 연구에서 사용한 수치해석용 상용프로그램은 응축을 수반하는 압축성 유동을 모사할 수 없기 때문에 고압실과 저압실에서의 작동기체를 상변화가 없는 건공기로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

실제 원자로의 POSRV 개방은 RCS의 압력과 온도가 상당히 고온, 고압인 상태에서 작동하므로 POSRV 전·후의 압력 및 온도차는 대단히 크다. 따라서 실제 유동장에 대한 실험은 거의 불가능하므로 수치해석에 의한 접근밖에 할 수 없다. 본 연구에서의 실험은 실제 POSRV의 개방에 따른 유동장을 해석하기 위한 수치해석기법의 타당성을 확보하기 위한 것이다. 고압실의 압력 온도를 각각 $p_4=800\text{kPa(abs)}$, $T_4=298\text{K}$ 로 고정하고, 저압실을 대기상태 $p_1=0.1\text{MPa}$, $T_1=298\text{K}$ 로 한 후 격침을 이용하여 격막을 순간적으로 파막할 때 형성된 평면충격파가 4각 덕트로 된 T-junction을 전파하는 경우 충격파의 비정상 거동을 슈리렌 가시화 장치로 가시화하고 이를 2차원 적으로 수치해석한 결과와 비교하여 본 연구에 사용한 수치해석의 타당성을 확보하는 것이다. 실험을 통해 얻어진 입사충격파 마하수 $M_s=1.54$ 이고, 이는

충격파 이론식으로부터 얻어진 마하수와 거의 동일하다. 이 때의 충격파 속도는 약 532m/s이다.

Fig. 4는 4각 덕트로 된 T-junction에 대하여 실험과 2차원적으로 계산한 결과를 나타낸 그림이다.

윗부분의 사진은 슈리렌 가시화장치를 이용한 시간에 따른 충격파 가시화 사진이며, 가운데 부분의 이미지는 수치계산을 통해 얻어진 압력 선도이고, 아랫부분의 이미지는 유동장의 흐름을 보다 잘 이해하기 위해 압력 선도를 사용하여 구한 등압선도(Iso-pressure plot)이다. 슈리렌 가시화 사진은 실험에 사용된 오목경 직경의 한계로 인해 측정부를 두 부분으로 나누어 가시화하여 이를 합성하였다. 고압실과 저압실의 경계를 격침을 사용하여 순간적으로 파막하면 Fig. 4(a)와 같이 입사충격파가 형성되어 T-junction부분으로 전파되고, (b)에 보이는 바와 같이 전파된 충격파가 관 내벽 모서리부위에서 회절한다. 이 때 모서리 부분에서 발생한 팽창파의 영향으로 유동은 국소적으로 가속된다.

Fig. 4(c)는 관 외벽에 입사한 후 반사한 충격파가 관 외벽의 출구쪽에서 정상반사하는 경우로서 이론식으로 구한 반사충격파의 마하수는 $M_R=1.45$ 이다. 반사된 충격파의 일부는 관 입구를 향하고, 나머지 일부는 관 출구를 향한다. 시간의 경과와 더불어 관 출구로 향하는 충격파는 관 외

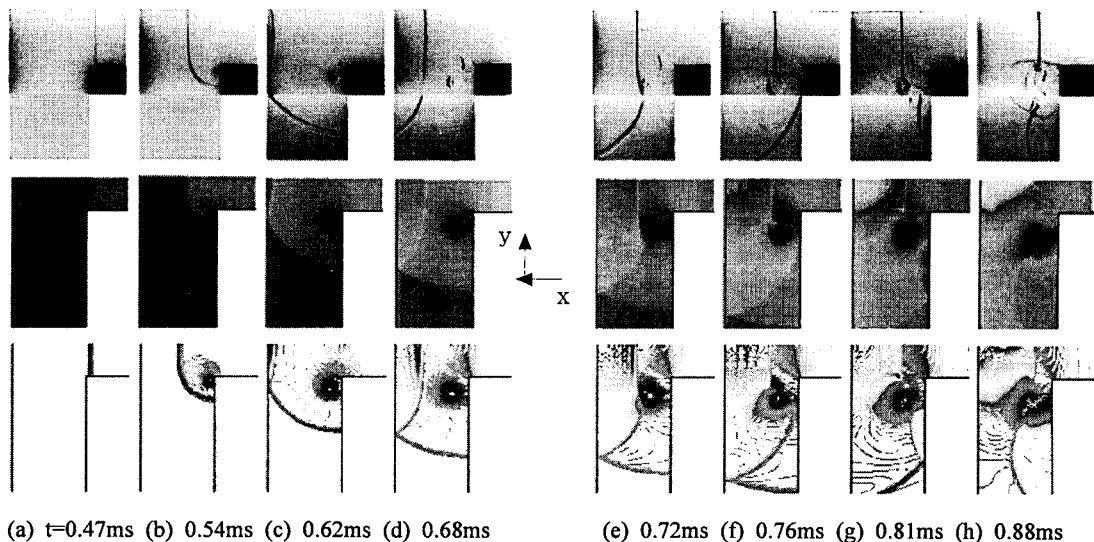
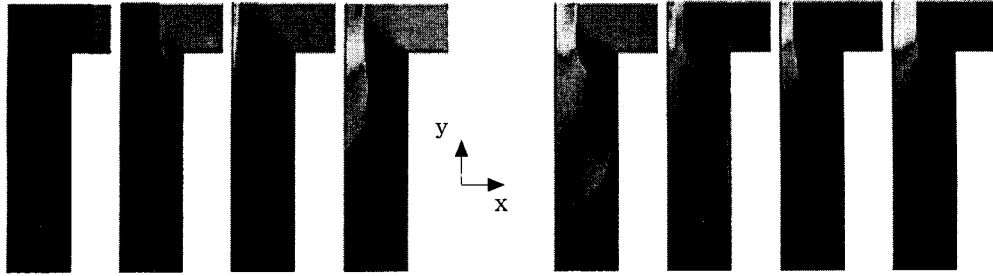


Fig. 4 Experimental Schlieren photos and computed pressure contour images at T-junction($M_s=1.54$, $p_4/p_1=8.0$)



(a) $t=1.70\text{ms}$ (b) 1.91ms (c) 2.17ms (d) 2.38ms (e) 2.62ms (f) 2.73ms (g) 2.98ms (h) 3.70ms
Fig. 5 Computed images of pressure contour at T-junction($M_s=3.07$, $p_4/p_1=154$, $T_4=626\text{K}$, $T_1=298\text{K}$)

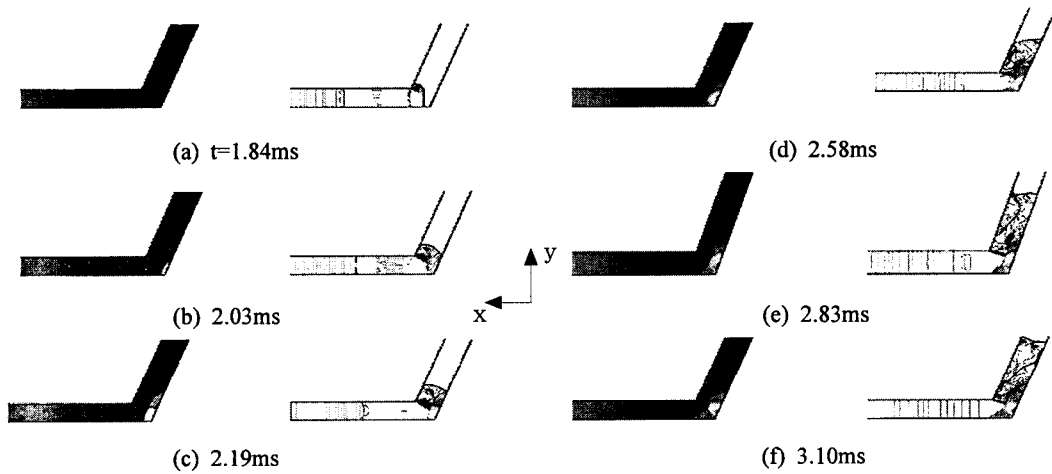


Fig. 6 Computed images of pressure contour at 108° elbow ($M_s=3.07$, $p_4/p_1=154$, $T_4=626\text{K}$, $T_1=298\text{K}$)

벽에서 정상반사하는 반사충격파에 의한 압축 효과에 의해 정상반사에서 마하반사로 천이하며, 마하반사한 반사충격파는 그림(g)에서 보이는 바와 같이 관 내벽에서 다시 정상반사를 한다. 관 입구를 향하여 전파하는 반사충격파는 관 모서리 부분에서 발생한 와류(vortex)와 간섭을 하면서 관 상류 방향으로 이동한다(Fig.(e)~(h)).

한편, 관 모서리에서 발생한 와류는 시간의 경과함에 따라 모서리부분에서 이탈하여 관의 하류 방향으로 향하며, 관 출구로 향하는 반사충격파와 간섭하여 유동장은 매우 복잡하게 된다. 본 연구의 4각 덕트로 된 T-junction의 경우, 평면충격파가 분지관에 입사한 후, 관 등가 직경의 약 3배(분지거리 18cm)로 되는 분지관 하류에서 초기 입사충격파의 강도와 거의 동일한 수직충격파가 형성되는 것으로 나타났다.⁽¹⁾ 이는 선두충격파

하류에서 발생한 압축파들이 선두충격파를 강화시켜 거의 수직충격파의 형태로 되기 때문으로 판단된다. 그림에 나타난 바와 같이 파막과 더불어 임의의 시간 간격마다 실험한 결과와 수치해석 결과는 대단히 잘 일치하는 것으로부터 본 연구에서 사용된 수치해석의 타당성을 확보할 수 있었다.

3.2 수치해석결과

3.2.1 T-junction

Fig. 5는 실제 POSRV의 하부 배관계의 T-junction에 상술의 수치해석법을 적용하여 얻어진 수치해석 결과를 T-junction 대칭면에 대하여 2차원적으로 나타낸 그림이다. 이 경우 POSRV 상류 즉, 고압실의 압력 및 온도는 $p_4=15.4\text{MPa}$,

$T_4=626K$ 이고 하류, 저압실의 압력과 온도는 각 $p_1=0.1MPa$, $T_1=298K$ 이다. 관 직경은 305mm로 동일하며, 수치해석에 사용된 기법은 3차원 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였고, 격자수는 약 6만개이다. POSRV의 개방조건 즉, $p_4/p_1=154$, $T_4=626K$ 및 $T_1=298K$ 를 사용하여 이론식으로부터 얻어진 초기 입사 충격파 마하수 $M_s=3.07$ 이며, 충격파의 전파 속도 U_s 는 1062m/s이다. 이 경우 초기 반사 충격파 마하수는 $M_R=2.12$ 로 된다. POSRV의 개방과 동시에 형성된 초기 입사 충격파는 $t=1.70ms$ 조금 지나 T-junction의 모서리에 도달한다. 관의 모서리에 도달한 충격파는 모서리에서 회절하고, 관 외벽에서 정상반사를 한다. 정상반사한 반사충격파는 관 모서리에서 발생한 와류와 간섭하며 관 출구로 향한다. POSRV하부의 T-junction의 경우(분지거리 120cm), 평면충격파가 분지관에 입사한 후, 관직경의 약 4배되는 분지관 하류에서 초기입사충격파의 강도와 거의 동일한 수직충격파가 형성되는 것으로 나타났다.

3.2.2 108° elbow

Fig. 6은 POSRV의 하부 배관계의 108° elbow에 전술의 수치해석법을 적용하여 얻어진 수치해

석 결과를 elbow 대칭면에 대하여 2차원적으로 나타낸 그림이다. T-junction의 유동해석에서 확인된 바와 같이 T-junction을 지나 관직경의 약 4배되는 하류에서 T-junction에 유입될 때의 충격파 강도와 거의 같은 강도로 되는 것으로부터 108° elbow에 유입하는 충격파도 T-junction에 유입하는 충격파와 동일한 강도의 것으로 하였다. 왼쪽 그림은 수치해석을 통해 얻어진 압력선도이고 오른쪽 그림은 압력선도를 사용하여 보다 정확한 충격파의 거동을 파악하기 위해 등압선도로 나타낸 그림이다.

POSRV의 개방과 동시에 형성된 초기 입사 충격파는 관의 내벽 코너에서 회절하고 관의 외벽에서 정상반사한다. 정상반사 이후에 마하반사로 천이를 하고 관의 내벽과 외벽에서 정상반사와 마하반사를 번갈아 겪으며 관의 출구로 나아간다. 또한, 삼중점의 형성과 더불어 코너로부터 관 직경의 약 3배 되는 지점에서 하나의 수직충격파 형태로 된다. 회절부의 굴절각이 90° junction에 비해 상대적으로 완만한 각도를 가지고 있으므로, 와류의 강도가 감소하고, 반사 충격파의 영향으로 인한 압력상승 또한 감소하였다.

3.2.3 Branch

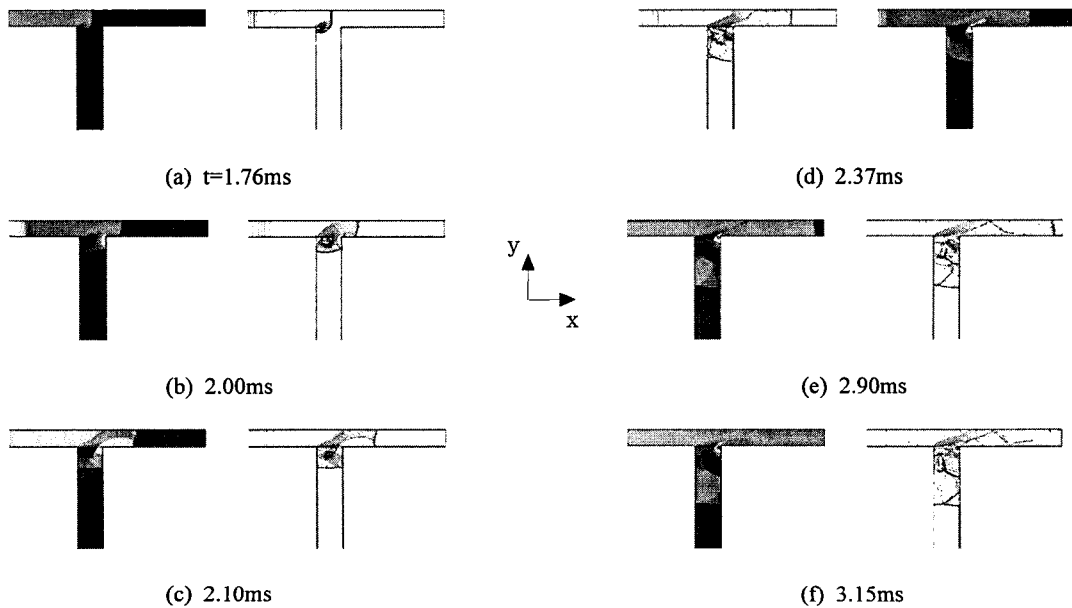
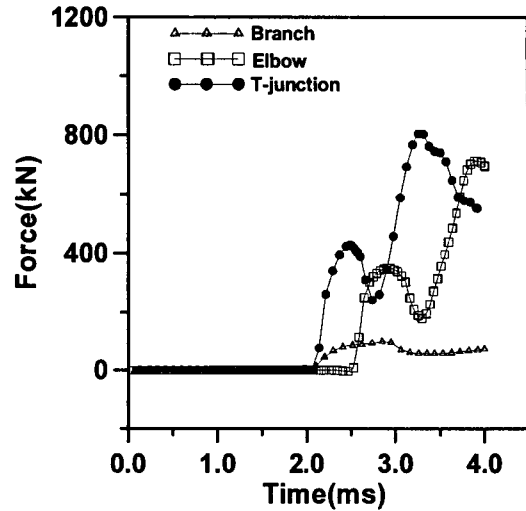


Fig. 7 Computed images of pressure contour at branch ($M_s=3.07$, $p_4/p_1=154$, $T_4=626K$, $T_1=298K$)

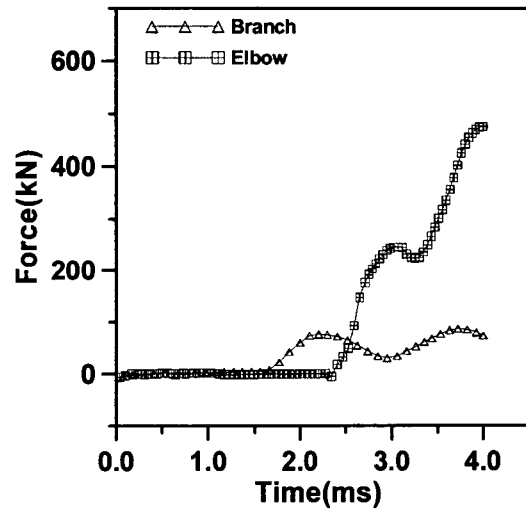
Fig. 7은 실제 POSRV의 하부 배관계의 branch에 대한 수치해석 결과를 branch 대칭면에 대하여 2차원적으로 나타낸 그림이다. POSRV의 개방과 동시에 형성된 초기 입사 충격파는 수직분지관의 오른쪽 모서리에서 회절한 후, 시간의 경과와 더불어 회절충격파는 수직분지관으로 전파하고 입사충격파는 수평분지관을 따라 전파한다. $t=2.0\text{ms}$ 에서 충격파는 수직분지관의 오른쪽 벽에서 정상반사하고 수평분지관의 아래 벽에서 마하반사한다. $t=2.37\text{ms}$ 로 되면 수평분지관의 마하반사에 의해 형성된 삼중점은 수평분지관 윗벽으로 이동하고 반사충격파는 수평분지관 윗벽에서 정상반사한다. 또한 수직분지관의 왼쪽 벽면에서 반사한 반사충격파는 분지관의 모서리에서 발생한 와류와 간섭을 일으키고 유동은 대단히 복잡한 형태로 된다. 수평분지관의 경우, 분지관을 지나 직경의 약 2배로 되는 수평분지관 하류에서 새로운 하나의 수직충격파 형태가 됨에 비하여 수직분지관의 경우는 직경의 약 3배 이상되는 분지관 하류에서 거의 수직형태의 충격파가 형성되는 것으로 나타났다. 이는 수평분지관으로 입사하는 충격파가 초기 입사충격파와 동일한데 반해 수직분지관으로 입사하는 초기 충격파는 관 모서리에서 발생한 회절충격파이기 때문이다.

Fig. 8은 동일한 분지 거리에 대하여 충격파가 T-junction, 108° elbow 및 branch에 통과할 때 각 unit에 작용하는 하중을 시간의 경과와 더불어 나타낸 그림이다. 먼저 T-junction의 경우 POSRV의 개방 이후 약 2ms에서 x-방향 하중이 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 초기 입사 충격파가 관 외벽에 입사하여 반사한 때이다. 이후 관 모서리부분에서 발생한 팽창파가 관 외벽에 입사하는 효과에 의해 일시적으로 하중은 감소되다가 관 외벽에서 반사하는 충격파가 거의 수직충격파로 됨으로써 하중은 급격히 증대하여 최대가 된다.

한편, 동일한 충격파 강도와 관직경인 경우 108° elbow에 작용하는 x-방향 최대 하중은 분지관이 108° 경사져 있으므로, T-junction의 경우에 비해 조금 적은 약 700kN으로 나타났다. 그러나 하중의 변동 경향은 동일하다. y-방향으로 작용하는 최대하중은 x-방향으로 작용하는 최대하중보다 엘보의 기하학적 형상 때문에 적게 나타났다. 분지관에 작용하는 x 및 y-방향 최대하중은 분지



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 8 Computed forces acting on the wall

관의 기하학적 형상 때문에 T-junction 및 108° elbow에 비하여 대단히 적게 나타났다. POSRV 하부시스템의 각 unit에 작용하는 하중의 시간에 따른 변화가 존재하는 것으로부터 각 unit 지지시스템을 설계하는 경우, 각 unit에 작용하는 최대 및 충격 하중을 구하여 설계할 필요가 있다고 결론 지을 수 있다. 각 unit에 작용하는 최대하중은 T-junction, 108° elbow, branch의 순서로 나타났다.

4. 결론

충격파관에 T-junction을 설치하여 실험하고 상용코드를 이용한 수치해석 결과와 비교한 결과 매우 잘 일치하는 것으로부터 수치해석의 타당성을 확보한 후 이를 한국형 차세대원전의 원자로 냉각시스템 사고 시 작동되는 POSRV 하부배관계의 각 unit에 적용하여 유동을 해석하고 관 벽면에 작용하는 하중을 구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실제 POSRV의 하부 배관계의 T-junction, 108° elbow, branch에 수치해석을 적용하여 얻어진 초기 입사 충격파는 관내에서 반사와 회절, 와류와 간섭 등의 현상을 겪은 후, 관직경의 약 3배 이상 되는 지점에서 입사충격파와 강도가 거의 같은 새로운 수직충격파 형태가 되는 것으로 나타났다.

(2) POSRV 하부배관의 각 unit에 작용하는 최대하중을 수치해석한 결과, T-junction, 108° elbow, branch의 순서로 나타났다.

본 연구에서는 작동기체를 공기로 하여 수치해석을 수행하였으나 실제 POSRV 내의 작동기체는 과열증기이므로 상변화를 수반하는 충격파를 포함한 비정상 유동에 대한 추후 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 과기부 원자력 중장기 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Igra, O., Wang, L., Falcovitz, J. and Heilig, W., 1998, "Shock Wave Propagation in a Branched Duct," *Shock Wave Journal*, No. 8, p. 375.
- (2) Kage, K., Hamakawa, H., Ishimatsu, K. and Gunawan, Y., 1997, "Numerical Study of the Stabilizing Process of Nonuniform Shock Waves Propagating in Branched Ducts," *JSME Journal*, ICFE97-214. p. 391.
- (3) Heilig, W. H., 1975, "Propagation of Shock Waves in Various Branched Ducts," *Proc 10th Intl. Shock Tube Symp.*, p. 273.
- (4) Kim, H. S. and Kim, H. D., 2002, "Study of the Shock Wave Propagating through a Branched Pipe Bend," ISSN1229-9014, p. 165.
- (5) Li, H. and Ben-Dor, G., 1999, "Analysis of Double-Mach-Reflection Wave Configurations with Convexly Curved Mach Stems," *Shock Waves Journal*, No. 9, p. 319.
- (6) Watanabe, M., Saito, T. and Takayama, K., 1990, "Study of Shock Wave Propagation Past a Circular Cross Sectional 90 Degree Bend," *Shock Wave Symp.*, p.329.
- (7) Matsuo, K. and Ikui, T., 1983, "Mechanics of Shock Waves," Corona Press, p. 179.