

## RELAP5/MOD3.2.2 $\gamma$ 코드를 이용한 유출관 차단밸브 동작시의 차압 평가

### Evaluation of the Differential Pressure through the Letdown Stop Valve using RELAP5/MOD3.2.2 $\gamma$ Code

정해용, 김인환

전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

#### 요약

원자력발전소의 화학및체적제어계통 (CVCS)에 위치한 유출차단밸브의 작동성을 확인하기 위한 일차적인 작업으로 밸브 동작시 양단에 걸리는 차압을 RELAP5/MOD 3.2.2  $\gamma$  코드로 평가하였다. 이러한 평가는 일반적으로 사용되는 보수적인 방법으로 예측한 쓰러스트 (Thrust)가 너무 커서 밸브 구동기의 동작이 보장되지 않을 때 중요한 의미를 가진다. 본 연구에서는 과도한 보수성을 배제하고 밸브가 닫히는 동안에 실제로 형성되는 차압을 계산하였다. 계산된 결과는 밸브가 완전히 닫히는 순간의 차압이 1231 psid인 것으로 나타났는데, 이는 기존의 보수적인 가정보다 훨씬 낮은 값이다. 그러므로 RELAP5/MOD3와 같은 이상 열유동 코드를 이용할 경우 보다 복잡하고 동적인 거동을 보이는 상황하에서도 모터구동밸브의 작동성을 보장할 수 있음을 알 수 있다.

#### Abstract

As a preliminary work to validate the operability of a letdown stop valve of chemical and volume control system (CVCS) in a pressurized water reactor type nuclear power plant, the differential pressure through the valve is evaluated with RELAP5/MOD 3.2.2  $\gamma$  PC-version. This kind of evaluation is important when the thrust force predicted with simple conservative method is too high to allow the operation of actuator. The excessive conservatism is removed and more realistic differential pressure during the valve closure is calculated in the present study. The calculated differential pressure is about 1231 psid at the moment of valve closure, which is much less than the value obtained in the conventional method. The results show that the operability of a motor-operated valve can be guaranteed for more complicated and dynamic situation when we use two-phase thermal-hydraulic code such as RELAP5/MOD3.

#### 1. 서론

원자력발전소에 설치되어 있는 모터구동밸브 (MOV)의 작동성은 주기적으로 점검되며, 그 안전성은 주로 시험 결과를 기초로 평가된다. 그런데 특정 밸브에 대해서는 설계 압력이 매우 높고 동작이 보장되어야 하는 차압 또한 높기 때문에 시험 조건을 만족하기가 거의 불가능하다. 이러

한 경우 보수적인 가정에 기초한 해석적인 방법으로써 밸브의 쓰러스트(thrust)와 밸브에 작용하는 압력차를 평가한다. 하지만 문제를 단순화하기 위해 적용한 가정으로 인해 구동기의 동작을 보장하는 범위를 초과하는 과도한 쓰러스트가 작용하는 것으로 평가되기도 한다.

원자로냉각재계통 (RCS)에서 화학및체적제어계통 (CVCS)으로의 유량을 필요시 차단하는 역할을 수행하는 유출차단밸브(Letdown Stop Valve)가 위에서 언급한 과도한 구동력이 요구되는 예이다. 이 밸브의 상단에는 보통 2250 psia 이상의 압력이 작용하며 정상 상태에서는 밸브에 걸리는 압력차가 크지 않다. 그렇지만 밸브가 폐쇄되는 시점에는 상당한 차압이 작용하게 되므로 단순한 보수적인 평가 모델을 사용할 경우 밸브 스템을 움직이기 위해서 요구되는 구동력을 구동기가 제공할 수 없는 것으로 평가된다. 그러므로 밸브 폐쇄 동안의 압력차를 보다 현실적으로 평가하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 RELAP5/MOD 3.2.2 $\gamma$  코드를 사용하여 압력차를 계산하였다.

## 2. 분석

### 2.1 기초 자료

대상 밸브인 BG-LV459, 460은 가압기 저-저 수위 신호 발생 시 유출수를 차단하여 냉각재 재고량을 유지시키는 기능을 하는 안전 등급 1로 분류되는 중요한 밸브이다. 대상 밸브와 관련된 운전 상태 자료는 표 1에 정리되어 있다. 그리고 표 2에 대상 밸브의 주요 설계 자료를 정리하였다.

표 1 BG-LV459, 460의 운전 상태

항 목		운 전 상 태	
		1	2
		후단배관과단	가압기 저수위
유체형태		붕산수	붕산수
유체흐름 방향		정상	정상
유량 (gpm)	설계값	-	120
	운전값	-	75
운전압력 (psig)		2485	2485
운전온도 (°F)		588	588
환경 조건	온도 (°F)	50~120	50~120
	압력 (psig)	8~15	8~15
	습도 (%)	0~100	0~100

표 2 BG-LV459, 460 주요 설계 자료

항 목	내 용
밸브 유형/크기	Gate/ 3 in
설계코드	ASME SEC.III CLASS 1
설계 압력 (psia)	2500
설계 온도 (°F)	650
몸체 재질	SA182-F304
안전 등급	1
행정 시간	6.1초 (LV460 6.0 초)

대상 밸브가 위치한 유출관의 개략도는 그림 1과 같다. RCS의 압력은 보수적으로 2500 psia, 588 °F로 유지되는 것으로 가정하며, 차단밸브인 BG-LV460을 지나 #3 배관에는 Regenerative Heat Exchanger (RGHX) 가 위치한다. RGHX를 통하여 유출수는 300 °F 이하로 냉각되며, 유출 Orifice를 통하여 1525 psid 정도의 압력 강하가 이루어진다. #4 배관에는 Letdown Heat Exchanger (LDHX) 가 위치하며 이 열교환기를 통하여 115 °F까지 냉각이 진행된다. LDHX 후 단에는 Flow Control Valve가 위치하여 이 지점의 압력을 약 300 ~ 400 psia로 유지함으로써 배관에서의 voiding을 방지하는 기능을 한다. 이후 Volume Control Tank (VCT)에 이르기까지 Filter 및 Ion Exchanger 등의 기기들이 위치한다.

배관에서의 압력 분포를 계산하기 위해서는 배관의 길이, 배관에 위치하는 밸브, Orifice, Elbow, Tee 등에 대한 정보가 필요하다. 그림 1의 배관별 배관 요소가 표 3에 정리되어 있다. 그리고 RGHX, LDHX의 설계 및 운전 정보가 표 4, 5에 각각 정리되어 있다.

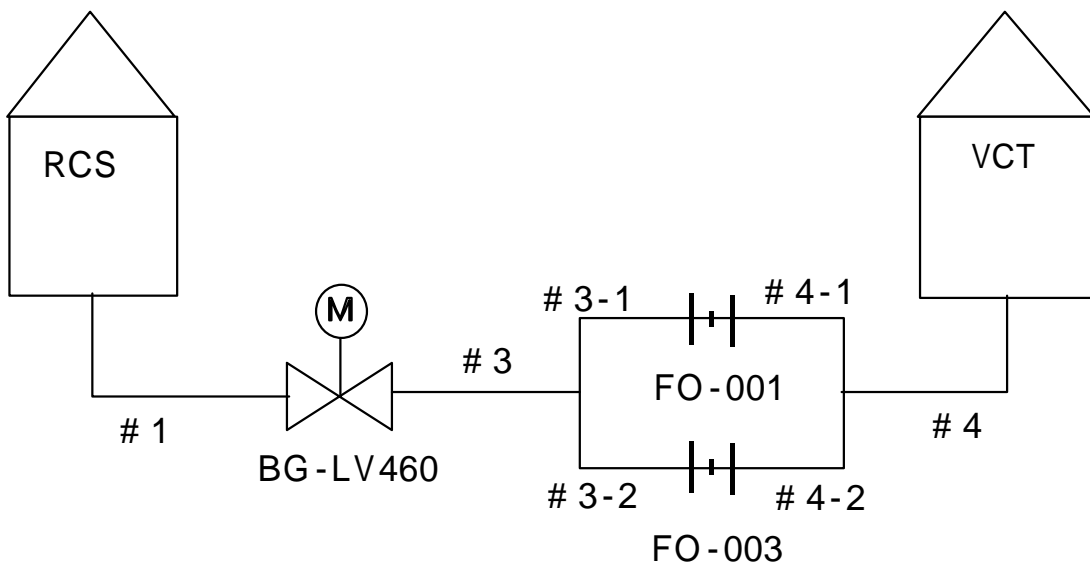


그림 1 영광 1호기 유출관의 개략도

표 3 등가길이 계산을 위한 배관 구성 요소

배관 요소	구성기기
pipe#1	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(3",sch:160,23.7ft)</li> <li>· ELBOW(3",90° ,4개)</li> <li>· TEE(3"×3"×3",1개,branch)</li> <li>· 밸브(3",gate,1개)</li> </ul>
pipe#2	N/A
pipe#3	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(3",sch:160,85ft),(4",sch:160,6.8ft)</li> <li>· ELBOW(3",90° ,12개),(3",45° ,3개),(4",90° ,1개)</li> <li>· 밸브(3",gate,1개)</li> <li>· Hx(Regen. Heat ex.)</li> <li>· Reducer(4"×3",2개), · Enlarge(3"×4",2개)</li> </ul>
pipe#3-1 (FO-001측)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(2",sch:160,3ft)</li> </ul>
pipe#3-2 (FO-003측)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(2",sch:160,3ft)</li> <li>· ELBOW(2",90° ,1개)</li> </ul>
pipe#4	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(3",sch:40S,774.4ft)</li> <li>· ELBOW(3",90° ,70개),(3",45° ,8개)</li> <li>· TEE(3"×3"×3",5개,branch),(3"×3"×3",1개,run)</li> <li>· 밸브(3",check,1개)(3",gate,6개),(3",globe,4개)</li> <li>· Hx(Letdown heat ex. S-X042)</li> <li>· Filter(Reactor Coolant Filter S-Z024)</li> <li>· Orifice(BG-FE150)</li> </ul>
pipe #4-1 (FO-001측)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(2",sch:160,18.8ft)(2",sch:40S,0.7ft)</li> <li>· 밸브(2",globe,1개)</li> <li>· Orifice(BG-FO461/462/463)</li> </ul>
pipe #4-2 (FO-003측)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(2",sch:160,13.4ft)(2",sch:40S,3.2ft)</li> <li>· ELBOW(3",90° ,4개)</li> <li>· TEE(2"×2"×2",1개,branch)</li> <li>· 밸브(2",globe,1개)</li> <li>· Orifice(BG-FO467/468)</li> </ul>
pipe#4' (Pressure Control Valve 전단까지)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 배관(3",sch:40S, 398.1ft)</li> <li>· ELBOW(3",90° , 40개),(3",45° ,5개)</li> <li>· TEE(3"×3"×3",3개,branch)</li> <li>· 밸브(3",gate,5개),(3",globe,1개)</li> <li>· Hx(Letdown heat ex. S-X042)</li> </ul>

표 4 재생열교환기 (RGHX) 설계 및 운전 자료

GENERAL				
Type		Counterflow (hairpin)		
Heat transfer at normal condition, Btu/hr		$11 \times 10^6$		
Approximate UA, Btu/hr °F		$1.3 \times 10^9$		
Operating Parameters				
Shell Side (Letdown)		Normal	Maximum (Purification)	Heatup
Flow	lb/hr	37,300	59,600	59,600
	gpm	75	120	120
Inlet temperature, °F		560	560	560
Outlet temperature, °F		290	≤ 290	≤ 380
Tube Side (Charging)		Normal	Maximum (Purification)	Heatup
Flow	lb/hr	29,800	52,200	39,800
	gpm	60	105	80
Inlet temperature, °F		130	130	130
Outlet temperature, °F		≥ 485	≥ 455	≥ 425

표 5 유출열교환기 (LDHX) 설계 및 운전 자료

GENERAL				
Type		U-tube		
Heat transfer rate at design condition (heatup), Btu/hr °F		$16 \times 10^6$		
Approximate UA, Btu/hr °F		$2.4 \times 10^9$		
Operating Parameters				
Shell Side (CCW)		Normal	Maximum (Purification)	Heatup
Flow	lb/hr	170,000	350,000	498,000
	gpm	340	700	1000
Inlet temperature, °F		105	105	105
Outlet temperature, °F		143	135	137
Tube Side (Letdown)		Normal	Maximum (Purification)	Heatup
Flow	lb/hr	37,300	59,600	59,600
	gpm	75	120	120
Inlet temperature, °F		290	290	380
Outlet temperature, °F		115	115	115

## 2.2 RELAP 모델링

그림 1과 표 1~5의 자료를 기초로 RELAP5/MOD3.2.2  $\gamma$  version의 입력을 계산하였다. 먼저 그림 1의 대상 배관을 다음 그림 2와 같은 Nodalization에 맞추어서 세분화하였다. RCS와 VCT의 조건은 표 1에 주어진 조건에 맞추어서 Time-Dependent Volume (TMDPVOL)으로 모델링하였다. 그리고 표 3에 기술된 각 배관요소가 가지는 K-factor를 Crane-book [1]에 주어진 상관식을 이용하여 계산하여 원하는 압력 분포를 얻도록 하였다.

본 계산에서 가장 중요한 요소는 유출 오리피스의 모델링으로 판단된다. 참고 문헌 [1]이나 [2]에 기술된 상관식을 사용하여 유출 오리피스의 K-factor를 평가할 경우 과도하게 큰 값이 얻어지고 원하는 차압을 얻기가 어렵다. 이는 대상 오리피스가 참고 문헌에서 제공되고 있는 상관식의 유효 범위를 벗어나기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 본 계산에서는 다음의 차압 계산식을 기초로 K-factor를 평가하여 계산에 적용하였다.

$$K = 9266.112 \rho \left( \frac{A}{W} \right)^2 \Delta P \quad (1)$$

이 식에 사용된 각 변수의 단위는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \text{psia}, \\ \rho &= \text{lbm/ft}^3, \\ W &= \text{lbm/s}, \\ A &= \text{ft}^2. \end{aligned}$$

예를 들어, Orifice-001에서 원하는 차압이 1525 psid라면 약 2,400 psia, 290 °F 조건에서의 밀도와 유량 측정 지점에서의 유량 45 gpm에 해당되는 질량 유속을 기준으로 평가되는 K-factor는 약 5149 이다. 이와 동일한 방법으로 배관에 위치한 여러 Orifice를 통하여 우리가 원하는 차압이 형성되어 정상 상태의 압력이 얻어지도록 하였다.

본 계산에서 중요한 다른 요소는 열교환기를 통한 열전달량을 적절하게 모델링함으로써 원하는 온도 분포를 형성하는 것이다. 왜냐하면 급격한 압력 변화가 수반되는 경우 온도에 따라서 배관의 유체가 voiding 되는 시점이 달리 평가될 수 있고 이는 압력 거동에 영향을 줄 수 있기 때문이다. RELAP의 Heat Structure Component를 사용하여 열전달 면적과 냉각수의 양을 임의로 조절하여 원하는 온도 분포가 얻어지도록 RGHX와 LDHX를 모사하였다.

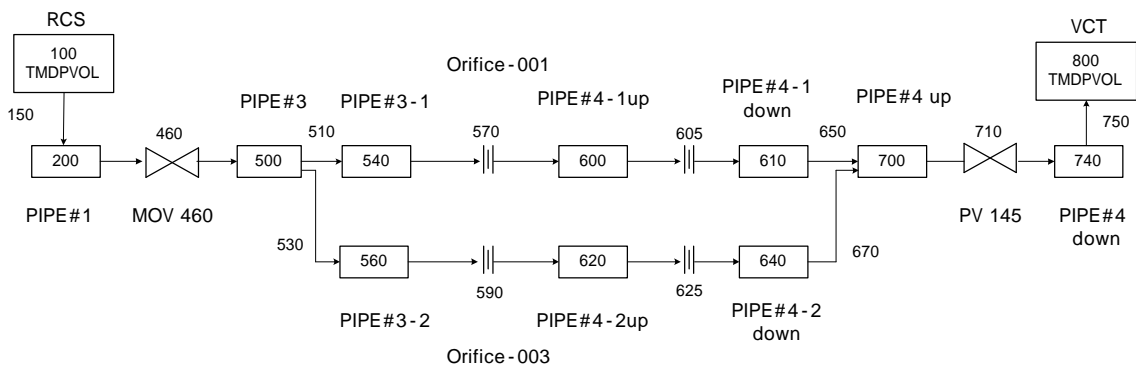


그림 2 RELAP 계산을 위한 영광 1호기 유출관의 Nodalization

위에서 기술된 모델링을 사용하여 얻어진 정상 상태의 온도 및 압력 분포가 그림 3과 4에 주어  
 져 있다. 그림 3에 보이는 것과 같이 재생열교환기 입구 및 출구에서의 유출수 온도는 RCS의 온  
 도를 588 °F로 높게 가정함으로 인해 정상 운전 조건에 비해 입구 온도는 약 28 °F, 출구 온도는  
 약 7.6 °F 정도 높게 형성되었다. 동일한 이유로 인해 유출 열교환기 입구 및 출구 온도도 정상  
 운전 조건에 비해 입구 온도는 약 4.9 °F, 출구 온도는 약 2.6 °F 정도 높게 형성되었다. 이러한  
 온도 범위는 밸브 닫힘 시의 차압 계산에 요구되는 정확도 범위 내에 든다고 판단된다.

원하는 정상 상태의 압력 분포를 얻는 것은 밸브 동작 시의 압력 차이를 정확하게 계산하기 위  
 한 일단계 목표가 된다. 그림 4에 얻어진 Orifice-001을 통한 차압은 약 1677 psid로 설계 값  
 1525 psid보다는 약 150 psi가 높게 평가된다. 이 차이는 실제 발전소 RCS 운전 조건이 2250  
 psia 이고 가정한 초기 RCS 압력이 2500 psia인 것을 감안하면 충분히 타당성을 가진다. 정상  
 상태 계산에서는 주어진 Orifice 설계치를 비롯한 자료를 최대한 활용하여 Letdown Flow Control  
 Valve, PV-145 전단 압력이 약 350 psia로 유지되도록 하였다. 실제 계산된 PV-145 전단 압력은  
 353.13 psia로서 그 차이는 1% 이내의 정확도를 가지도록 유출관의 압력 분포가 모사되었다. 유  
 량조절밸브 후단 배관의 길이는 약 115m에 달하고 이 부분에 위치하는 Filter나 Ion Exchanger에  
 의한 유동 저항을 정확하게 평가하기는 거의 불가능하다. 그러므로 이 부분의 유동 저항은 원하  
 는 압력 분포를 얻을 수 있도록 정해 졌다.

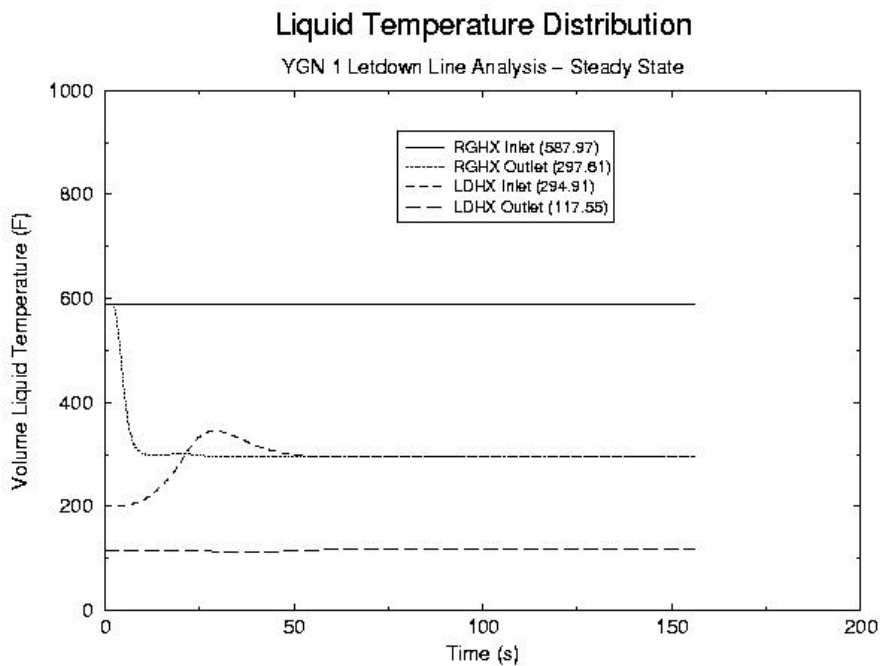


그림 3 RELAP에 의해 평가된 정상 조건에서의 유출관 온도 분포

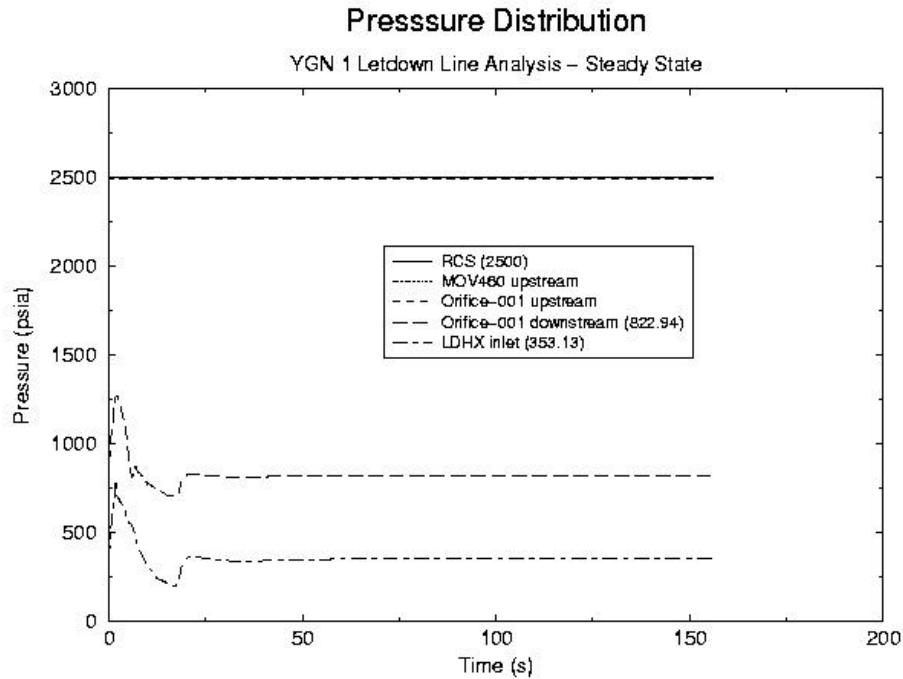


그림 4 RELAP에 의해 평가된 정상 조건에서의 유출관 압력 분포

### 3. 결과 및 논의

그림 1의 BG-LV460 밸브가 가압기 저-저 수위 신호에 의해 닫히는 동안에 밸브 양단에 형성되는 압력 차이를 계산하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 대상 밸브의 행정 시간은 6.1초를 사용하였다. 그리고 이 밸브에 대한 특성 곡선이나 Table이 제공되지 않았기 때문에 선형적인 특성을 가지는 일반적인 Gate 밸브로 모델하였다.

그림 5에 밸브가 닫히는 동안의 유출관 각 지점에서의 압력 분포가 도시되어 있다. BG-LV460 후단 압력은 밸브가 닫히기 시작한 후 약 5초 동안은 거의 변화가 없다. 이 후 6.1초까지 전 유출관에 걸쳐서 압력이 급격히 감소하는 경향을 가지고 밸브가 완전히 닫히게 되면 압력 감소 추세는 완화되어 나타난다. 본 해석에서는 과도 상태 동안에 얻어지는 PV-145에 의한 압력 조절 기능이 모사되지 않았기 때문에 밸브가 닫히는 동안의 차압은 약간 보수적으로 평가된 것으로 판단된다. 약 13초 이후에 보이는 바와 같이 BG-LV460 후단의 압력이 오리피스 후단이나 압력조절 밸브 전단 압력보다 낮아지게 평가되는 것은 유출관 내에서의 void 발생 거동과 연관이 깊다. 밸브가 닫히는 6.1초 직후 밸브 후단은 상대적으로 온도가 높고 압력이 낮은 조건이 형성되므로 급격히 voiding 된다. 그렇지만 고온의 유출수가 더 이상 공급되지 않기 때문에 RGHX를 통한 열전달에 의해 이 지점의 void는 응축되거나 유출관의 다른 지점으로 흐르게 되어 밸브 후단에는 20초 이후에는 거의 물이 존재하게 된다. RGHX 후단을 비롯한 타 지점은 15~20 초 사이에 voiding 되어 상당 기간 존재하게 된다. 그러므로 증기의 유동과 응축에 거동에 따라 밸브 후단



압력이 타 지점보다 낮게 평가되었다. 만약 압력 조절 밸브 PV-145가 적절하게 동작하여 LDHX 후단을 조기에 차단한다면 이러한 거동은 나타나지 않을 것이다. 본 해석에서는 PV-145의 실제 거동은 고려되지 않았다. 위에서 설명된 밸브가 닫힌 후 유출관 각 지점에서 나타나는 void 변화가 그림 6에 보이고 있다.

그림 7에는 본 계산을 통하여 얻고자 하는 최종 변수인 밸브 양단의 압력 차이가 주어져 있으며, 그림 8에서는 밸브가 닫히는 시점에서의 값을 확대하여 보이고 있다. 밸브 닫힘 시의 최대 차압은 약 1,231 psid인 것으로 평가되었다. 밸브가 완전히 닫힌 후 밸브 후단의 지속적인 압력 강하로 인해 더 큰 차압이 형성되어 약 14초 경에 최대 2,500 psia 근처에 이르게 된다. 그렇지만 밸브가 닫힌 후에는 구동기의 동작이 더 이상 요구되지 않기 때문에 모터구동밸브의 동작과는 무관하게 되므로 이 시점에서의 차압은 의미를 가지지 않는다.

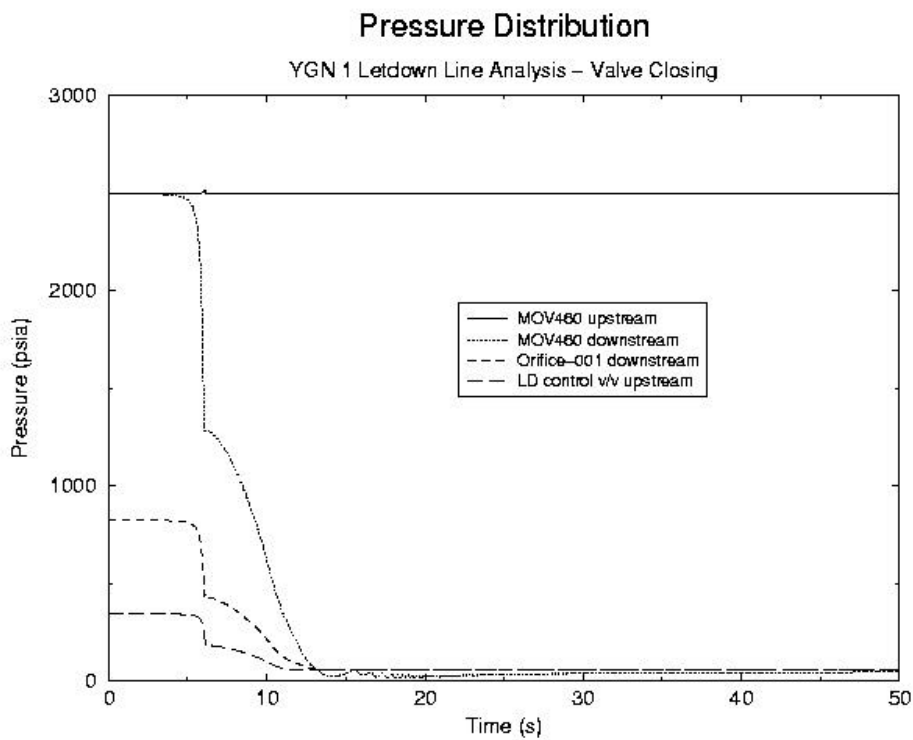


그림 5 밸브 동작시의 유출관 내의 압력 분포

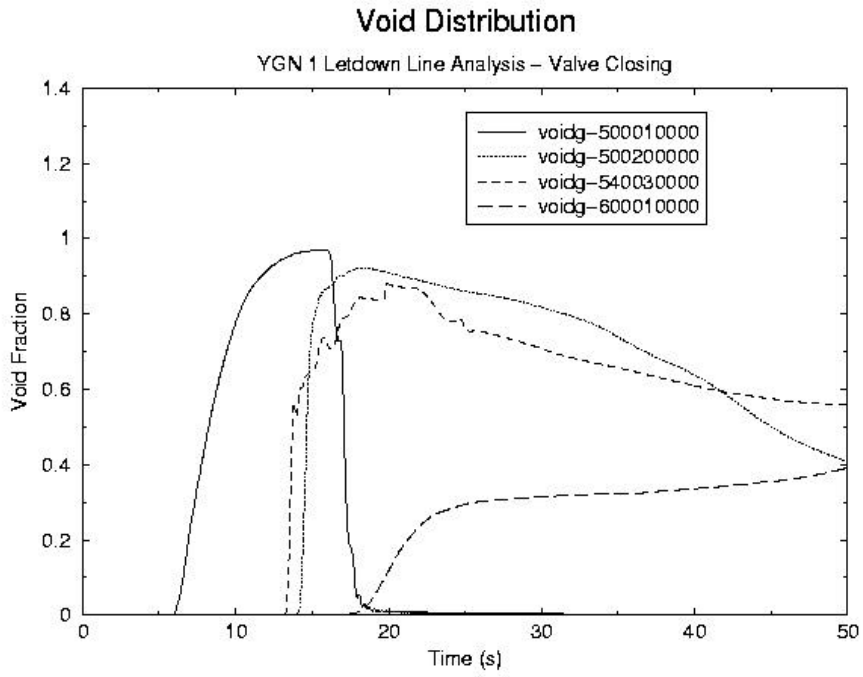


그림 6 밸브 닫힘 후 유출관 내 각 지점의 기공율 변화

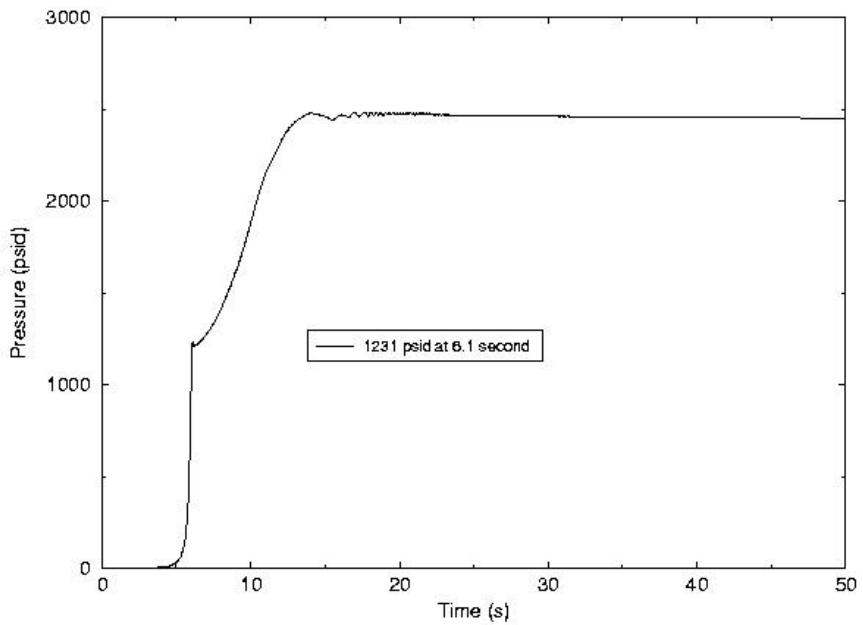


그림 7 밸브 동작 시의 BG-LV460 전후단에 걸리는 압력차

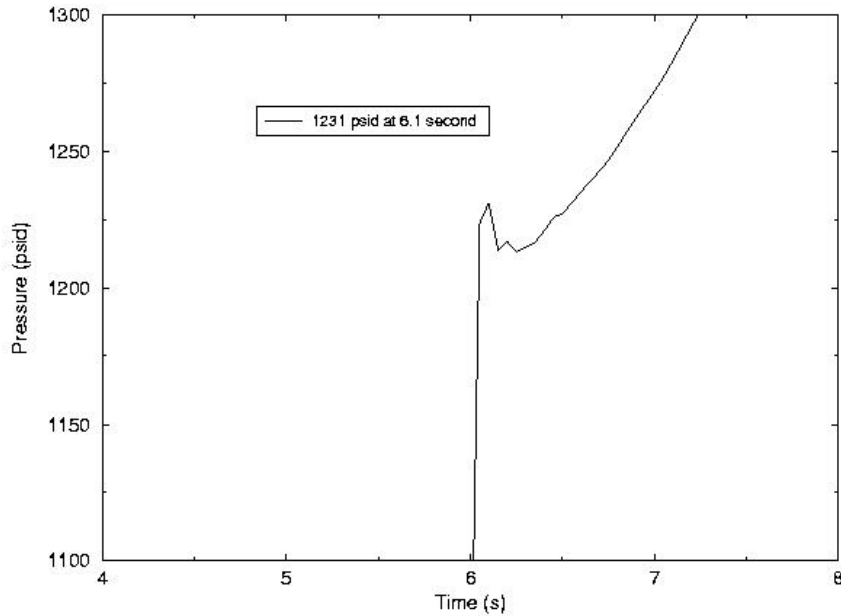


그림 8 밸브 닫힘 순간의 BG-LV460 전후단 압력차

#### 4. 결론

영광 1호기 유출관에 위치한 BG-LV459,460 밸브의 안전성 평가를 위한 기초 자료인 가압기 저-저 수위에 의한 차단시의 밸브 양단 차압을 계산하였다. 급격한 압력 변화에 따른 이상유동을 고려하기 위해서 RELAP5/MOD3.2.2 $\gamma$  코드를 사용하였다. 제공된 설계 자료와 운전 자료를 토대로 차압을 허용할 수 있는 한도 내에서 보수적으로 계산하였다. 평가된 차압은 밸브 차단 시간인 6.1초에 약 1231 psid였으며 이 값은 기존의 표준 차압계산법에 의한 결과보다 상당히 낮은 값이다. 이러한 결과는 기존의 차압계산법이 지나치게 보수적으로 평가되는 밸브에 대해 이상 유동을 모사할 수 있는 코드를 응용하여 밸브의 동적 거동에 따른 차압을 평가할 경우 상당한 잇점을 가질 수 있음을 의미한다.

보다 현실적인 차압 계산을 위해서는 유출관의 압력 조절 밸브의 거동과 이 밸브 후단 배관과 필터들의 영향을 추가로 고려하여야 하며 충전 유량의 제어와 각 열 교환기의 운전 상태도 반영되어야 할 것이다.

#### References

- [1] Flow of Fluids through valves, fittings, and pipe, Engineering Division of CRANE, 1985.
- [2] I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, CRC Press, Inc., 1994.