



화력발전소 주증기배관에서 밸브 차단에 따른 수증기 충격 특성에 관한 연구

†하지수 · 이부윤*

계명대학교 환경과학과, *계명대학교 기계자동차공학과
(2012년 12월 31일 접수, 2013년 4월 23일 수정, 2013년 4월 23일 채택)

A Study on the Steam Hammering Characteristics by Sudden Closure of Main Stop Valve in the Main Steam Piping System of a Power Plant

† Ji-Soo Ha · Boo-Youn Lee*

Dept. of Environmental Science, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**Dept. of Mechanical and Automobile Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea*

(Received December 31, 2012; Revised April 23, 2013; Accepted April 23, 2013)

요약

본 연구는 화력발전소 최종과열기에서 고압터빈 사이 배관과 고압터빈을 지난 곳에 있는 체크밸브와 1차 재열기 사이 배관을 포함한 수증기 배관시스템에서 터빈의 급작스런 사고로 인해 터빈으로 들어가는 수증기를 차단할 때 발생하는 수증기 충격이 배관시스템에 미치는 영향을 분석하는 연구이다. 이를 위해서 수격현상 해석에 많이 사용하는 Flowmaster 소프트웨어로 배관시스템을 모델링하고 시간 변화에 따라 배관 내부의 압력, 질량유량의 특성을 파악하였다. 이러한 특성으로부터 수증기 충격이 주로 영향을 미치는 곡관에서 수증기 충격에 의한 힘을 도출하였다. 본 연구를 통해서 수증기 충격은 주증기 차단 밸브 직전의 곡관과 체크밸브 이후에 바이패스 배관과 연결되는 곡관에서 수증기 충격에 의한 힘이 가장 크게 나타남을 밝혀냈다. 본 연구에서는 이렇게 도출한 힘의 기본 자료를 이용하여 차후 연구에서 화력발전소 수증기 배관시스템의 수증기 충격 시 곡관과 지지대의 안전성을 진단하는 토대를 구축하였다.

Abstract - The present study has been carried out to analyze the effect of steam hammering on the steam piping system including the final superheater, the high pressure turbine, check valve and the first reheater by sudden stopping of main stop valve in a power plant. For the present steam hammering analysis, the well known Flowmaster software has been used to model the steam piping system and the time dependent characteristics of pressure and steam mass flow rate has been conducted. Using the result of the unsteady pressure and steam mass flow rate, the forces acting on the elbows in the piping system has been derived. From the present analysis, it has been elucidated that the elbow just before the main stop valve and the elbow near the connection pipe between bypass pipe and check valve had the largest force among the elbows in the steam piping system. The structural safety diagnostics study on the elbow and the supporting structures of the steam piping system of a power plant will be conducted in the future by the present results of the forces acting on the elbow.

Key words : steam hammering, steam piping system, power plant, final superheater, first reheater, main stop valve, check valve, elbow, pressure, steam mass flow rate, force

†Corresponding author: jisooaha@kmu.ac.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

취수지에서부터 처리지 까지 몇 백 km에 이르는 곳에 상수도 물을 정수 처리하기 위해 펌프를 이용하여 송수하게 된다. 이렇게 할 경우에 급작스런 사고가 발생하여 펌프 가동을 순간적으로 중단하게 되면 배관내의 상수 물의 이동이 한 곳에서 막히게 되어 압력파가 발생하게 되는데 이러한 압력파에 의해 수격현상(water hammering)이 발생한다. 수격현상이 발생하면 배관이나 펌프에 손상을 입혀 이를 견디지 못할 경우는 배관이나 펌프의 파손을 불러와서 막대한 손실을 입히게 된다. 이러한 것과 마찬가지로 화력발전소 보일러의 과열기와 재열기에서도 터빈으로 가는 과열증기가 긴급 상황에서 밸브에 의해 차단되게 되면 수격현상과 유사하게 과열기와 재열기에서 터빈으로 가는 배관에서 수증기 충격(steam hammering)이 발생하게 된다. 이렇게 되면 내부 압력의 변동에 의해 압력이 증가하는 경우가 발생하는데 터빈에 있는 밸브나 배관에서 이러한 급작스런 압력 증가에 따라 파손의 우려가 있어서 대형 사고를 유발할 수 있다. 이러한 사고를 예방하기 위해 많은 연구가 진행 되고 있다. 수격현상에 대한 연구는 펌프와 밸브가 있는 시스템에서 비정상상태 압력거동해석에 관한 연구[1-3]가 기본적으로 수행되었다. 수증기 충격에 관한 발생과 치유에 대한 기본적인 설명은 W. J. Coad[4]가 간단명료하게 설명하였다. 수격현상에 대한 연구는 원전 관로에서의 수격현상을 상용코드 두 가지에 대한 검정 해석 연구[5]가 진행되었고 화력발전소 주증기 관로에서 수증기 충격현상에 대한 구조건성 평가에 관한 연구[6]도 활발히 이루어지고 있다.

수격현상을 해석하기 위해서는 비정상상태 압력과 거동에 대한 해석을 수행하여야 한다. 복잡한 배관과 밸브시스템에서는 널리 이용하고 있는 해석틀인 Flowmaster 소프트웨어를 이용하거나 ANSYS CFX를 이용하여 비정상상태 유동해석을 통해 규명하기도 한다. 간단한 배관 시스템의 경우는 ANSYS CFX를 이용하여 자세한 유동 경향과 함께 압력파 거동도 해석하는 것이 효과적이지만 복잡한 배관시스템의 경우는 비정상상태 1차원 해석 틀인 Flowmaster 소프트웨어를 사용하는 것이 효과적이다.

본 연구에서는 화력발전소 주증기와 재열기 배관, 주증기 밸브, 바이패스밸브, 체크밸브등 여러 가지 밸브 그리고 스팀 터빈이 있는 화력발전 증기시스템에서 급작스런 운전 정지 시에 각 배관과 밸브에서의 압력 변동과 질량유량을 변화 특성을 살펴보고 있다. 이를 토대로 각 부분에서 압력변동과 질량유

량을 변화에 따른 곡관에 미치는 힘을 도출하여 주증기와 재열기 배관에서의 안전성을 진단하는 기초 자료를 도출하였고 이를 이용하여 향후 연구에서 수증기 배관시스템의 구조적 안전성 진단의 토대를 마련하는 것을 목적으로 하여 연구를 수행하였다.

II. 수증기 충격 해석 방법

본 연구에서 수증기 충격 현상을 해석하기 위해서 비정상상태 1차원 해석 소프트웨어인 Flowmaster를 사용하기로 하였다. 이것을 이용하여 해석하기 위해서는 수증기가 발생하고 있는 보일러를 시작점으로 하고 이곳에서부터 스팀터빈까지의 직선배관, 곡관, 각종 밸브, 터빈을 모델링한다. 모델링에 필요한 배관의 직경, 압력, 온도 등을 시작점의 보일러와 터빈에 입력 값으로 설정한다. 본 연구에서는 배관의 탄성 효과는 고려하지 않았으며 수증기의 압력변동에 따른 유동만 고려하였다.

본 연구에 사용한 화력발전소 보일러와 배관, 밸브, 스팀터빈에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 각 배관에 표시한 숫자는 배관의 직선길이이다. 영문약자로 FSH(Final Superheater)는 최종 과열기를 나타내고 HP TBN(High Pressure Turbine)은 고압터빈, Pri. RH(Primary Reheater)는 1차 재열기를 나타낸다. 고압터빈 전단에 있는 MSV(Main Stop Valve)는 주차단밸브, HP Bypass V/V는 고압 바이패스 밸브, CHECK V/V는 체크밸브를 나타낸다.

비정상상태 수증기 충격의 시나리오는 먼저 고압터빈에서 문제가 발생하는 것으로 시작한다. 고압터

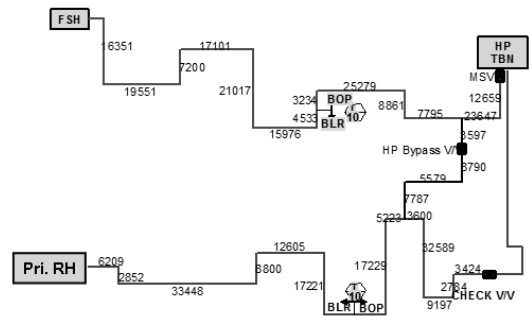


Fig. 1. The schematic diagram of the present steam hammering system including first superheater, high pressure turbine, primary reheater, pipe, valves.

Table 1. Specification of the steam piping system

Item	PSH-HP TBN	Bypass-Pri. RH
Pressure (bar)	264.0	61.6
Steam flow rate (kg/sec)	297.0	297.0
Temperature (°C)	547.0	358.0
Pipe inner dia. (mm)	33.5	62.7
Bypass inner dia. (mm)	before V/V 27.5	after V/V 50.2

빈에서 문제가 발생하면 MSV가 차단되는데 차단시간은 0.07초로 설정하였다. 이렇게 차단되는 동안에 HP Bypass V/V는 2초 동안에 완전히 열리는 작동을 하게 된다. 이렇게 HP Bypass V/V가 열리면, 고압터빈으로 가는 수증기는 터빈을 거치지 않고 바이패스 밸브를 거쳐 1차 재열기로 흐르게 되어 있다. CHECK V/V는 이렇게 될 때 바이패스 밸브를 거쳐서 오는 고압의 수증기가 터빈으로 흘러가지 않도록 하는 기능을 가지고 있다.

위의 수증기 배관시스템의 배관직경 과 작동 조건 등은 Table 1에 정리하였다. 최종 과열기에서 고압 터빈까지의 조건을 보면 압력이 264bar로 매우 높다. 1차 재열기의 압력은 61.6bar인데 이 차이로 인해 터빈을 거치거나 바이패스 밸브를 거쳐 재열기로 스팀이 흘러가게 된다.

위의 배관 형상 자료와 운전 조건을 토대로 하여 수증기 충격 현상을 해석하기 위해 Flowmaster 소프트웨어로 모델링 하여 Fig. 2에 나타내었다. Flowmaster 소프트웨어는 비정상상태 1차원 유동계산 프로그램인데, 압력 및 유동계산을 위해서는 배관길이와 곡관 그리고 사용된 밸브에서의 압력손실 특성 수증기의 물성, 배관 시스템 입구와 출구에서의 압력 특성에 관한 입력 설정으로 시간에 따른 유동과 압력 변화 특성을 해석한다. 본 연구에서 모델링한 최종 과열기와 1차 재열기는 압력입력기호(P)로 표현되어 있고 각 부분은 직선 배관과 곡관으로 연결하였으며 고압터빈은 압력손실 작용이 있는 것으로 모델링 하였다. 고압터빈에서 문제가 발생하면 고압의 수증기가 터빈에 유입되는 것을 짧은 시간 내에 차단하여 터빈에 충격을 주는 것을 방지하여야 하는데 이를 위해서 고압차단 밸브인 MSV가 닫히는 시간을 안정성을 고려하여 0.07초에 완전히 닫히는 것으로 하였으며 고압의 수증기 충격을 완화하기 위하여 Bypass V/V는 2초 동안에 완전히 열리는 것으로

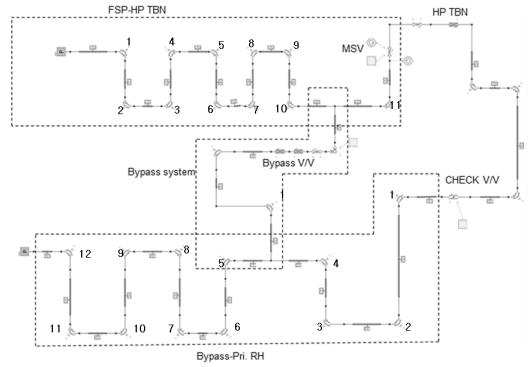


Fig. 2. Steam hammering modeling for the present piping system by using Flowmaster software.

설정하였다. MSV와 Bypass V/V는 선형적으로 닫히거나 열리는 것으로 모델링하였다.

이렇게 모델링된 것을 이용하여 본 연구에서의 화력발전소 보일러와 수증기 배관시스템에서 급작스런 운전 정지에 따른 수증기 충격에 대한 해석을 통해 배관시스템 내의 시간에 따른 압력, 질량유량을 변화를 관찰하고 이에 따라 발생하는 곡관에서 미치는 힘을 계산하여 배관시스템에서 배관과 이를 지지하는 지지대의 안전성을 진단할 수 있는 자료를 마련하기로 한다. 본 연구의 해석 검증을 위해 배관과 MSV를 포함한 간단한 배관시스템에서 물리적으로 타당한지의 여부를 사전 계산을 통해 정성적으로 검증하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 배관에서 압력, 유량 변동 특성

발전소 보일러에서 급작스런 운전 정지에 따른 수증기 충격으로 배관시스템에서 안전성에 문제를 일으키는 곳은 주로 배관에서 곡관에서 일어난다. 직관으로 되어 있는 부분은 내부 압력과 배관 외부 압력 차이에 의한 힘만 작용하는데 이는 배관 강도에 의해 충분히 강건하고 평형을 이루고 있다고 판단하여도 된다. 곡관의 경우는 시간에 따른 압력변동에 따라 곡관의 입출구에서 압력과 운동에너지 등이 변하게 되는데 이것이 곡관에서 외부 힘으로 작용하게 된다. 이러한 힘이 현재의 배관시스템을 지지하고 있는 지지대에서 충분히 안전하지 여부가 수증기 충격에 따른 안전성 평가의 판단기준이 된다.

위와 같이 평가하기 위해서 우선, Fig. 2에 나타난

각 곡관에서 시간에 따른 압력과 유량 변화 특성을 살펴보기로 한다. 최종 과열기에서 고압터빈까지의 곡관은 11개이고 체크밸브에서 1차 재열기까지의 곡관은 12개로 구성되어 있으며 Fig. 2에 각 번호를 부여하였다.

Fig. 3에 최종과열기와 고압터빈 사이(a,b), 체크밸브와 1차 재열기 사이(c,d)에 있는 각 곡관에서 시간에 따른 압력 변화를 나타내었다. 그래프를 살펴보면 최종과열기와 고압터빈 사이 배관에서의 압력이 체크밸브와 1차 재열기 사이의 압력보다 높음을 알 수 있다.

최종 과열기와 고압터빈 사이의 압력 변화(a,b)를 살펴보면 고압터빈 앞에서 0.07초 동안 MSV 밸브가 닫히면서 264bar로 운전되던 압력이 차단 초기에

275bar이상으로 상승하는 것을 관찰할 수 있다. MSV가 닫히는 동시에 2초 동안 바이패스 밸브가 완전히 열리기 때문에 압력상승은 시간이 감에 따라 일정한 값으로 되는 것을 알 수 있다. 압력 변동 폭은 MSV에 가까이 있는 10, 11번 곡관에 가장 크게 나타나고 있으며 바이패스 되는 곳과 인접한 9, 10번 곡관에서는 압력 진동수가 다른 곳 보다 큰 영역이 있는 것을 관찰할 수 있다. 체크밸브에서 1차 재열기까지에서의 압력변동(c,d)를 살펴보면 최종 과열기에서 고압터빈까지의 배관에서 보다 전체적인 압력이 낮음을 관찰할 수 있고 최대 67bar 에서 최소 57bar 영역에서 진동하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 압력 정보와 함께 질량유량이 어떻게 변하는지를 Fig. 4에 나타내었다. 정상상태에서의

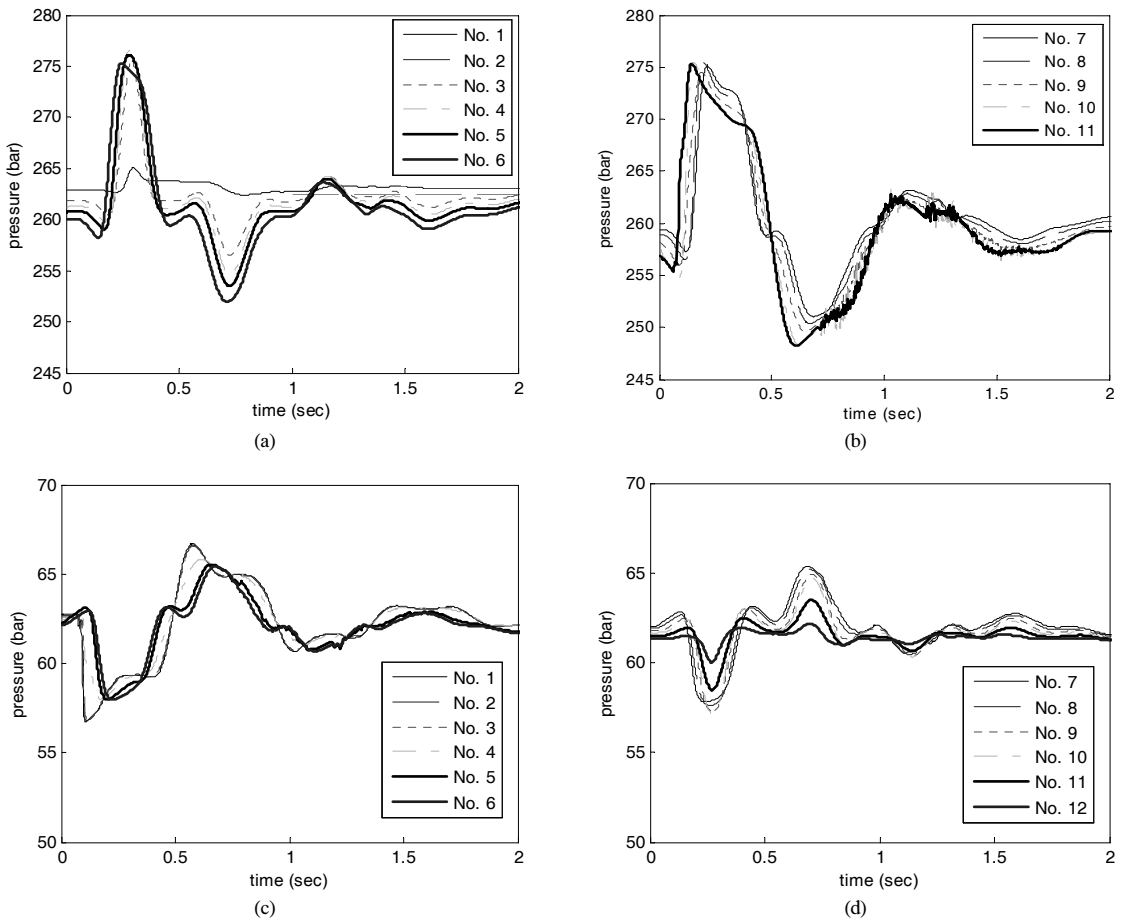


Fig. 3. Time history of pressures at the elbows in the piping system from FSH to HP TBN for (a), (b) and from CHECK V/V to Pri. RH for (c), (d).

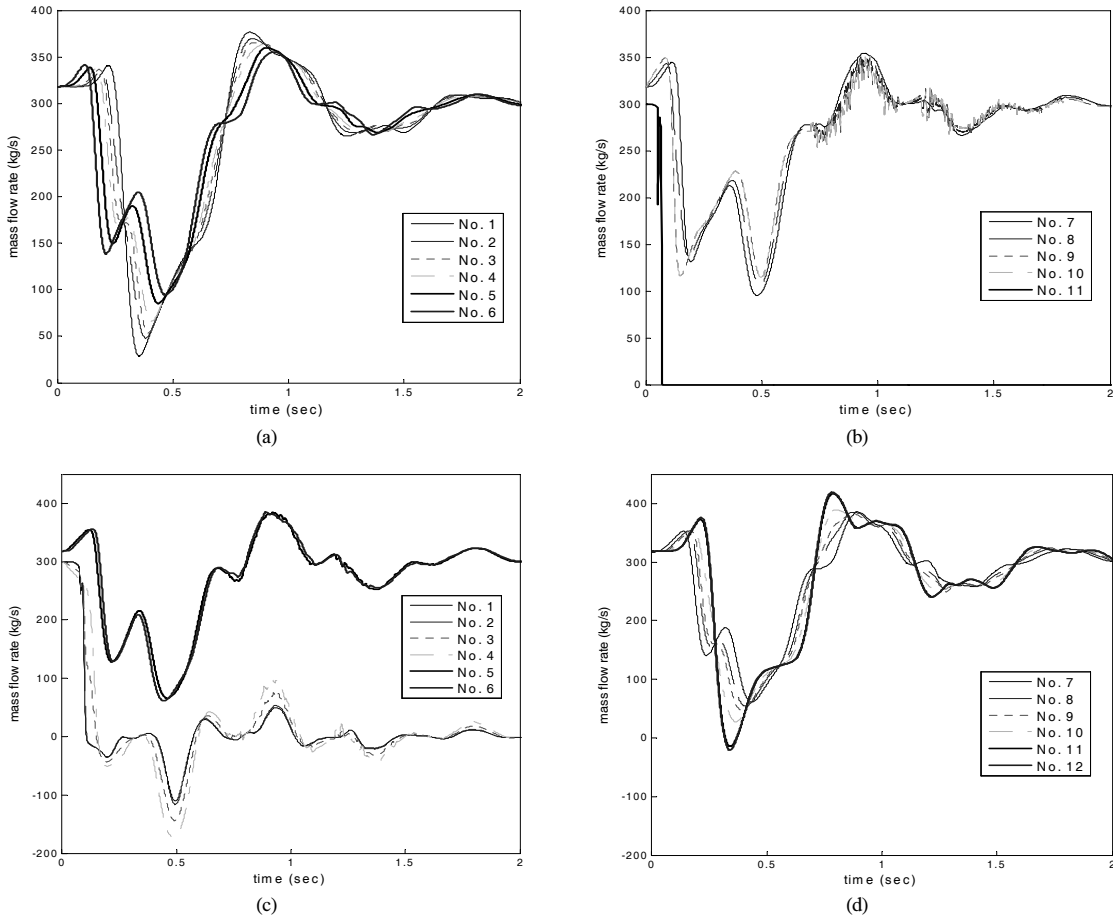


Fig. 4. Time history of mass flow rates at the elbows in the piping system from FSH to HP TBN for (a), (b) and from CHECK V/V to Pri. RH for (c), (d).

질량유량률은 297kg/s인데 Fig. 4(a)와 (b)에서 보면 최종 과열기와 고압터빈 사이의 곡관에서 MSV가 닫히는 초기에 질량유량률이 갑자기 크게 요동을 치는 것을 관찰할 수 있다.

곡관 11번은 MSV 직전에 있는 곡관으로 바이패스 밸브 쪽으로 흐르는 곳이 아니기 때문에 MSV 밸브가 닫히자 바로 질량유량률이 0으로 되는 것을 볼 수 있다. 체크밸브에서 1차 재열기까지의 배관에서 살펴보면(c,d), 바이패스 밸브에서 1차 과열기까지의 흐름에 있지 않은 1,2,3,4번 곡관은 시간에 따라 약간의 질량유량률 변동이 있지만 0으로 수렴할 것으로 예측된다. 다른 곡관은 초기시간에서는 유량이 진동을 하지만 정상상태의 질량유량률로 수렴해 감을 관찰할 수 있다.

3.2. 수증기 충격에 의한 곡관에 미치는 힘 변화 특성

지금까지 화력발전소에서 급작스런 운전 정지에 따른 수증기 충격 현상을 압력과 질량유량률 변화 특성을 분석하면서 관찰하였다. 이번에는 이러한 압력, 질량유량률의 결과로부터 곡관이 받는 힘을 산출하고 이로부터 배관시스템의 지지대의 안전성을 검증하는 기본 자료를 도출하기로 한다.

배관의 직관 영역은 압력 변동에 따라 배관에 외부 힘으로 작용하는 것은 거의 무시할 정도이지만 곡관에서는 외부로 작용하는 힘이 상당한 크기이다. 곡관에서 외부로 작용하는 힘은 아래의 Fig. 5에 표현한 압력, 속도, 각도를 이용하여 표현할 수 있는데 그렇게 표현한 힘을 식 (1)에 나타내었다.

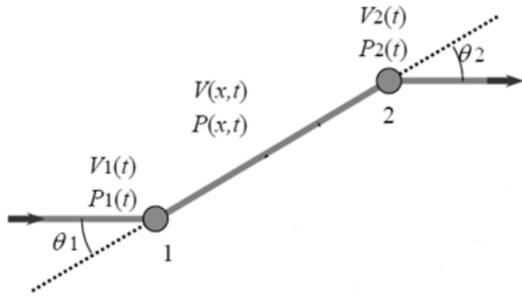
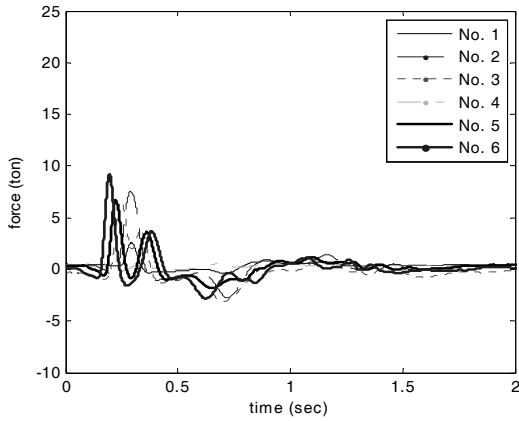


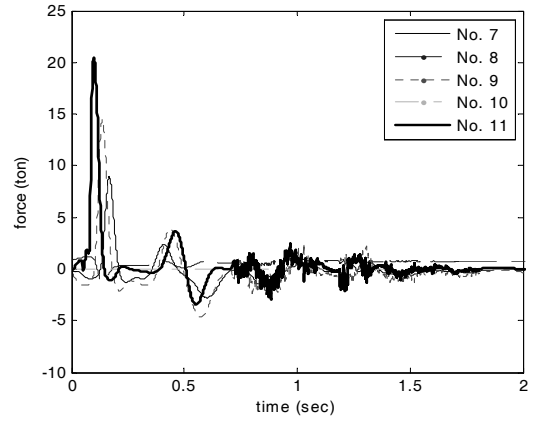
Fig. 5. Schematic configuration of elbow with pressures, velocities and angles.

$$F(t) = A(P_2(t) - P_1(t)) + \frac{\lambda \rho A}{2D} \int_{x_1}^{x_2} V(x,t) |V(x,t)| dx + \rho A (V_2(t) |V_2(t)| (1 - \cos \theta_2) - V_1(t) |V_1(t)| (1 - \cos \theta_1)) \quad (1)$$

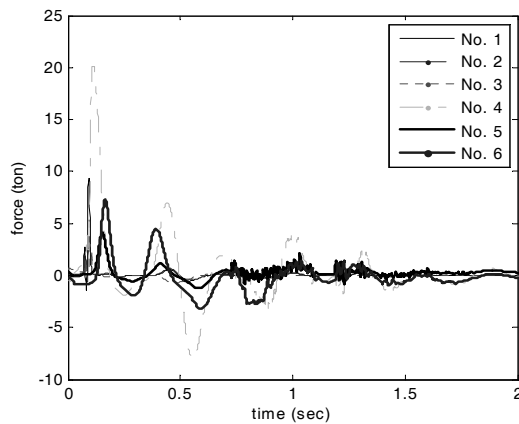
윗식에서 F는 힘, P는 압력, V는 속도, λ 는 마찰 계수, ρ 는 밀도, A는 단면적, D는 배관 직경을 표현한 것이다. 곡관에 미치는 힘은 곡관 전후의 압력차, 곡관에서의 관내 마찰력 그리고 곡관의 방향 전환에 따른 운동량 변화에 의한 힘으로 구성되는데 첫째 항은 압력차에 의한 힘이고 두 번째 항은 마찰에 의한 힘 그리고 세 번째 항은 운동량 변화에 따른 힘을 나타내고 있다. 본 연구에서의 관내 마찰계수는 0.02로 설정하였다.



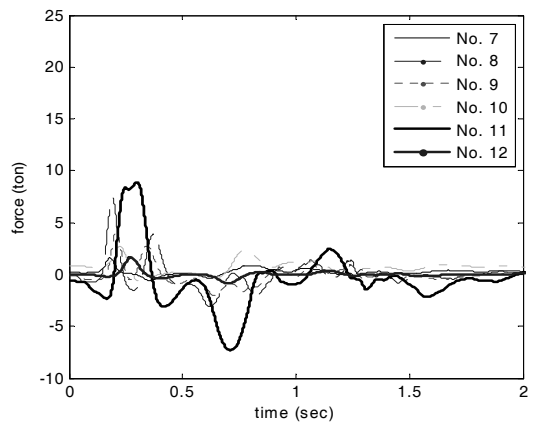
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Time history of forces at the elbows in the piping system from FSH to HP TBN for (a), (b) and from CHECK V/V to Pri. RH for (c), (d).

Table 2. Resultant maximum forces and time acting on the elbow from FSH to HP TBN

No.	1	2	3	4	5	6
time (sec)	0.09	0.10	0.10	0.11	0.15	0.17
force (ton)	2.61	7.56	6.51	0.64	6.69	9.24
No.	7	8	9	10	11	
time (sec)	0.17	0.08	0.14	0.59	0.10	
force (ton)	8.94	1.18	14.58	15.21	20.43	

Table 3. Resultant maximum forces and time acting on the elbow from CHECK V/V to Pri. RH

No.	1	2	3	4	5	6
time (sec)	0.09	0.10	0.10	0.11	0.15	0.17
force (ton)	9.37	5.35	2.97	20.23	4.07	7.29
No.	7	8	9	10	11	12
time (sec)	0.18	0.19	0.21	0.23	0.30	0.27
force (ton)	1.60	7.48	4.06	2.69	8.93	1.64

위식을 이용하여 각 곡관에서의 힘을 계산한 것을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3과 4에서 살펴보면 계산된 압력과 유량이 각 곡관에서 유사하게 나타나지만 곡관에서 방향이 90°로 바뀌기 때문에 이에 따른 힘은 크게 나타날 수 있다. Fig. 6 (a)와 (b)를 살펴보면 최종 과열기에서 고압터빈 사이의 곡관에서는 최종 과열기 가까이 있는 곡관보다 MSV에 가까이 있는 곡관에 수증기 충격에 따른 힘이 큼을 알 수 있다. 이는 MSV의 급작스런 차단에 따라 가장 영향을 많이 받는 곳이 이곳에 가까이 있는 곳임으로 예상할 수 있다. 가장 크게 나타나는 곡관은 MSV에 가장 인접한 11번 곡관이며 최대 힘은 차단초기에 약 20ton임을 알 수 있다. 체크밸브에서 1차 재열기 사이의 곡관(c,d)에서 계산된 힘은 다른 부분은 상대적

으로 크지 않으나 4번 곡관에서의 순간적인 힘이 앞에서 MSV 직전의 곡관과 같은 크기로 약 20ton으로 나타났는데 이는 MSV가 차단될 때 바이패스 밸브가 열리고 1차 과열기로 수증기가 흘러가지만 체크밸브 방향으로는 체크밸브의 영향으로 흐르지 못하기 때문에 그러한 영향이 4번 곡관에 가장 크게 미치기 때문으로 판단된다.

앞에서 계산한 각 곡관에서 크기가 최대인 힘이 발생하는 시각과 힘을 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 최종 과열기에서 고압터빈사이의 배관시스템 사이에서의 곡관의 결과인 Table 2에서 보면 가장 힘이 큰 곳은 11번 곡관이며 이와 인접한 9번과 10번 곡관에서도 큰 값이 나타났다. 체크밸브와 1차 재열기 사이의 배관시스템에서는 4번 곡관에서 나타났다으며 이는 앞서 그래프에서 언급한 바와 같은 곳이다.

지금까지 산출한 곡관에 미치는 힘은 곡관 자체의 안전성과 약 60개의 배관시스템을 지지하는 지지대의 안전성을 진단하는 기본 자료로 활용할 예정이다. 각 시간별로 곡관에 미치는 힘의 크기와 방향이 다르기 때문에 여러 가지 시간 경우에 대하여 진단할 예정이다. 이에 대한 결과는 본 연구의 차 후 연구에서 계속할 예정이다.

IV. 결론

지금까지 화력발전소 주증기와 재열기 배관 시스템에서 급작스런 운전 정지 시에 각 배관에서의 압력 변동과 질량유량률 변동 특성을 살펴보았고 이를 토대로 각 부분에서 곡관에 미치는 힘을 산출하였으며 아래와 같은 결과를 정리할 수 있다.

- (1) 최종과열기와 고압터빈 사이와 체크밸브와 1차 재열기 사이 배관에 대하여 Flowmaster 소프트웨어를 이용하여 주증기 차단밸브(MSV)에서 0.07동안 차단이 진행되고 동시에 바이패스밸브가 2초 동안 완전히 열리는 시나리오를 모델링하였다.
- (2) 최종 과열기에서 고압터빈 사이, 체크밸브와 1차 재열기 사이의 곡관에서 시간에 따른 압력과 질량유량률 변화를 살펴보았으며 최종 과열기에서 고압터빈 사이 곡관에서 압력 상승이 체크밸브와 1차 재열기 사이 곡관에서의 압력 상승보다 높은 것을 관찰하였다. 또한 시간이 지나면서 수증기가 바이패스 되면서 정상상태 운전 압력과 유량으로 수렴하는 것을 확인하였다.
- (3) 급작스런 밸브의 차단에 따라 곡관에 미치는 힘을 정리하였으며 시간 변화에 따른 각 곡관에서

힘을 산출하였다. 가장 큰 힘이 작용하는 곳은 MSV 직전의 곡관이며 20.23ton으로 나타났는데 이는 MSV에서 0.07초 동안 짧은 시간에 차단됨에 따라 가장 영향을 많이 받는 곳이기 때문으로 판단된다. 체크밸브에서 1차 과열기 사이 배관에서는 바이패스 흐름에 인접한 4번 곡관에서 20.43ton으로 나타났는데 이는 바이패스 흐름에서 체크밸브로 가는 흐름이 체크밸브의 존재로 막히기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Wylie, E. B. Streeter, V. L., Suo, L., *Fluid Transients in Systems*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, (1993)
- [2] Martin, C. S., "Experimental Investigation of Column Separation with Rapid Closure of Downstrewam Valve", Proc. 4th Int. Conf. on Pressure Surges, 77-88, (1983)
- [3] Kim, K.Y., "Waterhammer in the Transmission Pipeline with an Air Chamber", Transactions of the KSME B, Vol. 26, No. 7, 177-183, (2002)
- [4] William, J. C., "Steam Hammer: causes and cures", Heating/Piping/Air Conditioning, 214-217, (1986)
- [5] Kim, N. S., Lee, S. K., Seoul, K. W., Choi, Y. J., "Preliminary Analysis of Simulation Codes for Water hammer in pipeline of Nuclear Power Plant", Spring Conf. of Korea Society for Computational Fluids Engineering, 335-339, (2012)
- [6] Jo, J. H., Lee, Y. S., Kim, Y. W., Jin, H. L., "Structural Integrity Evaluation of large Main Piping by Water Hammering", Transactions of the KSME A, Vol. 36, No. 9, 1103-1108, (2012)