

## 화학 플랜트용 칼럼믹서의 ADINA/FSI 해석

### ADINA/FSI Analysis of Petrochemical Plant Column Mixer

이 원 석\* · 정 구 충\*\* · 최 연 선†

Won-Suk Lee, Goo-Choong Jung and Yeon-Sun Choi

(2006년 10월 30일 접수 ; 2007년 3월 7일 심사완료)

Key Words : Column Mixer(칼럼 믹서), Rib Plate(리브 플레이트), Fluid Structure Interaction(유체 구조 연성), Vortex-induced Vibration(와류 진동), Reynolds Number(레이놀즈 수)

#### ABSTRACT

Column mixer is one of the facilities to mix fluids at petrochemical plants. The vibration of column mixer is usually caused by pumps for fluid inflow and mixing of inside fluids. This fluid induced vibration is mainly responsible for the reduction of column life. Measurements were performed for understanding the vibration characteristics of the column. First measurement results showed the need of stiffness reinforcement. After the reinforcement work, second measurement confirmed the difference between two results. Modal analysis was also performed to investigate the resonance of the column vibration and the damage of the rib plate. To confirm fluid induced vibration at the column mixer fluid structure interaction analysis using ADINA/FSI was performed, which showed the necessity of the modification of the rotary valve.

#### 1. 서 론

석유화학산업은 원유를 원료로 하여 다양한 원자재를 생산하는 산업이다. 이러한 석유화학 플랜트의 설비들은 연속적으로 가동되기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. 그러나 석유화학 플랜트의 설비는 구조물 내에서 유체의 혼합, 분류 및 운송 등에 의하여 진동 발생이 불가피하다. 이러한 구조물에서 진동의 발생은 플랜트의 배관이나 베어링, 기어 등의 파손에 의한 고장을 일으키며, 설비의 수명을 단축하는 원인으로 작용한다. 따라서 설비를 보전하기 위하여 유지 보수에 많은 노력을 기울여야 한다. 실제 플랜트에서 발생하는 진동의 대부분은 유체 유동에 기인한다. 따라서 플랜트의 가동 상황에서 진동

을 해석하고 설계하기 위해서는 반드시 유체와 구조물 사이의 상호 작용을 고려하여야 한다.

플랜트의 진동에 관하여 김민철<sup>(1)</sup>은 석유화학 플랜트의 대형 압력 용기를 대상으로 진동을 저감하기 위한 동흡진기 설계에 관하여 연구하였다. 유한요소법을 사용하여 구조물의 모드 형상을 파악하여 취약부를 분석하고, 조화응답해석을 통하여 구조물이 받는 응력을 구하였다. 이 결과를 바탕으로 동흡진기를 설계하고, 동흡진기 설치 이전과 진동 특성을 비교하였다. 플랜트 내의 대형 구조물의 진동 특성을 전산 해석을 통하여 확인하였으나 내부 유체에 의한 영향은 고려가 되지 않았다.

유체 구조 상호 해석과 관련하여 Wang<sup>(2)</sup>은 유체가 흐르는 관 내부에 존재하는 판에 대하여 유체 구조 상호 해석을 수행하였다. 2차원 층류 유동에서 내부의 판(plate)에 작은 변형이 발생하는 것으로 가정하고, 판에 대한 운동방정식을 유도하여 계산하고, ADINA를 이용한 해석 결과와 비교하였다. 이민형<sup>(3)</sup>은 유체 구조 상호 해석을 이용하여 다수의 실

\* 교신저자; 정희원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5889

\*\* 성균관대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 정희원, 대림산업(주)

린더 형태 구조물의 유체 유발 진동을 해석하였다. 이 해석 결과를 실험 결과와 비교하고, 이를 통해 유체 불안정을 유체 구조 상호 해석을 통하여 예측할 수 있음을 확인하였다. Yosibash<sup>(4)</sup>는 항공기 날개의 버프팅(buffeting) 현상에 관하여 유체 구조 상호 해석을 수행하였다. 유체 해석을 위한 Windows 기반의 시스템과 구조 해석을 위한 Unix 시스템을 연결하여 유체 해석 결과로 속도 응답을 구조 해석에 반영하고 구조 해석 결과의 압력을 유체 해석에 반영하였다. 해석 결과를 고유진동수를 통하여 검증하고, 날개의 응답을 계산하였다.

이 연구에서는 나일론수지의 원료를 생산하는 플랜트 칼럼 믹서(column mixer) (Fig. 1)의 진동 발생과 플랜트 칼럼 믹서에 부착된 로터리 밸브(rotary valve)의 파손에 관하여 연구하였다. 칼럼 믹서의 진동을 측정하고 모드 해석을 수행하여 진동 특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 칼럼 믹서의 진동을 저감하기 위하여 수직 방향 강성을 보강하고, 진동을 측정하여 결과를 비교하였다. 다음 칼럼의 진동 원인을 확인하기 위하여 유체 구조 상호 해석을 수행하여 내부 유체의 압력 및 속도 분포를 조사하고 검토하였다.

## 2. 칼럼 진동

### 2.1 칼럼 믹서

진동 측정대상인 칼럼은 하부 콘크리트와 원형 셀 형상의 스커트 타입 구조로 지지 되어있다. 칼럼



Fig. 1 Column mixer

하부는 Fig. 2와 같은 형태로 4개의 관이 각각 90°의 간격으로 설치되어 있으며 로터리 밸브와 모터가 연결되어 있다.

마주보는 2개의 관을 통해 원료인 유체가 내부로 유입되며 혼합된 유체는 다른 2개의 관을 통해 유출이 이루어진다. 유체의 유입 및 유출은 칼럼 내부의 로터리 밸브의 회전에 의해 조절된다. 또한 로터리

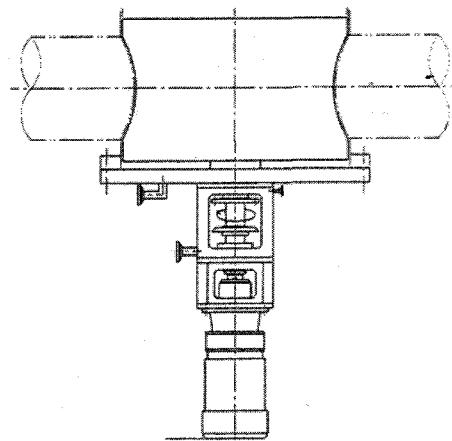


Fig. 2 Flushing equipment

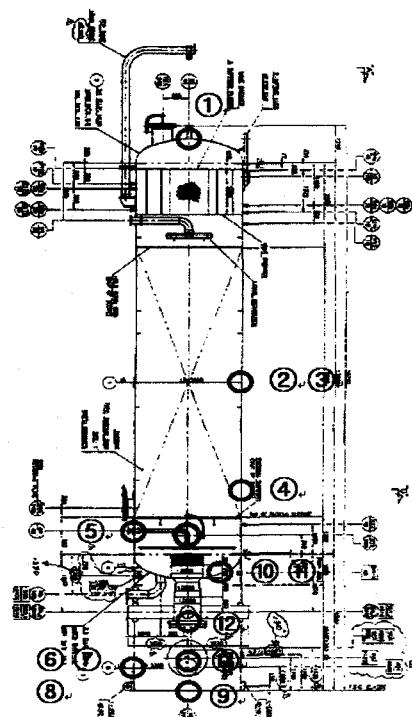


Fig. 3 Measured point

밸브는 칼럼 내부의 유체를 순환시켜 반응 효과를 높이는 역할을 수행한다. 로터리 밸브에는 강성을 보강하기 위하여 4개의 리브 플레이트(rib plate)가 설치되어 있다.

## 2.2 진동 측정

칼럼의 진동측정은 가속도계를 이용하여 Fig. 3에 보인바와 같이 칼럼의 상부, 중간, 하부와 모터의 13개 위치에서 진동을 측정하였다. 1번, 10번, 11번, 13번은 수직 방향의 가속도를 측정하였으며, 5번과 12번은 수직 방향과 수평 방향 모두 측정하였다. 나머지 위치는 모두 수평 방향의 가속도만을 측정하였다. 진동 측정 결과를 Fig. 4에 수록하였으며 진동의 주파수 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

칼럼의 진동은 측정 위치에 관계없이 RMS값이 유사한 크기를 나타냈다. 또한 수직 방향의 진동이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 전체 측정 위치에서 10 Hz 이하의 성분이 나타나고 있으며 수직 방향은 20~30 Hz 사이의 성분이 나타나고 있었다.

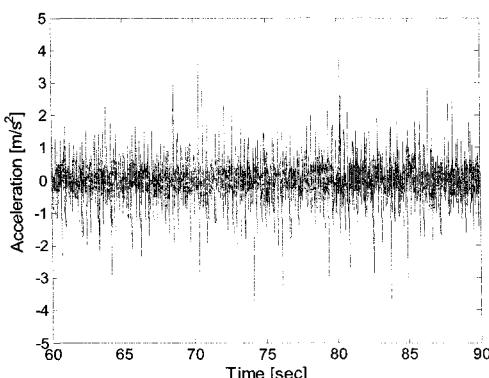


Fig. 4 Vibration acceleration at position 2

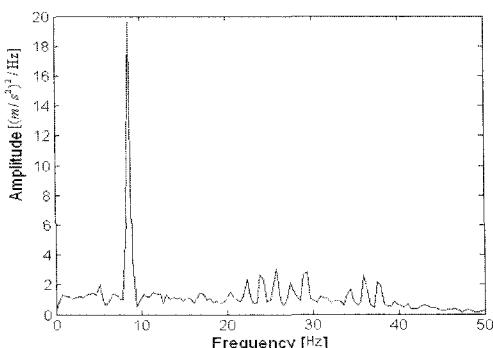


Fig. 5 Power spectrum at position 2

이외에도 넓은 주파수 영역에 걸쳐 진동이 고르게 발생하는 것으로 나타났다.

## 2.3 모드 해석

칼럼의 진동 측정 결과 다양한 주파수의 성분이 나타나고 있었으나 10 Hz와 20~30 Hz 사이의 성분이 전체적으로 나타나고 있었다. 칼럼의 진동이 공진에 기인하는지 판단하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SAMCEF<sup>(5)</sup>를 이용하여 모드해석을 수행하였다. 칼럼을 지지하는 외부 구조물을 제외한 칼럼을 모델링하여 모드해석을 수행한 결과를 Table 1과 Fig. 6에 나타내었다.

칼럼에는 내부 유체의 유동과 같은 다양한 가진원이 존재하는데, 주요 가진원 중 하나는 펌프에 의한 유체의 유입이고, 로터리 밸브의 회전에 따라 유체가 유입되는 주파수는 1.667 Hz이다. Table 1의 모드 해석 결과에서 보듯이 칼럼의 고유진동수는 유체 유입 주파수에 비하여 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 펌프의 임펠러 베인의 수와 rpm의 배수 성분에 따른 가진에 의한 공진 또한 발생하지 않는 것을

Table 1 Modal analysis of the structure

Mode	1st	2nd	3rd	4th	5th
Frequency [Hz]	9	14	18	21	26

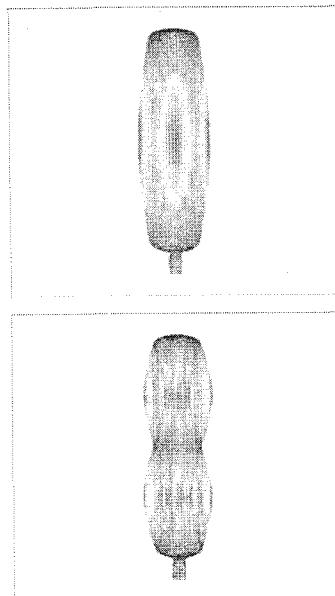


Fig. 7 1st and 2nd mode shapes of the structure

확인할 수 있었다. 따라서 칼럼의 진동이 공진에 기인한 것은 아닌 것으로 판단된다. 또한 측정 결과에서 나타난 10 Hz와 20~30 Hz 사이의 성분은 칼럼 구조물의 고유진동수로 인하여 나타나는 성분으로 확인되었다.

#### 2.4 강성 보강

진동을 저감하기 위해서는 시스템의 동특성을 변경하거나 가진원을 차단하는 방법이 사용된다. 이 시스템의 경우 유체의 혼합을 위한 구조물이므로 가진원 자체를 모두 제거 또는 차단하는 것은 불가능하다. 따라서 칼럼의 구조 변경을 통하여 진동 저감을 시도하였다. 칼럼의 높이는 약 18 m로 하부 콘크리트와 원형 셀 형상의 스커트 구조로 지지되어 있다. 전체 시스템은 수직 방향의 외팔보와 같은 구조로 볼 수 있다. 칼럼이 수직 방향 진동이 크게 나타나고 있으므로 수직 방향의 강성을 보강하여 진동을 저감하기 위해서 Fig. 7과 같이 칼럼 하부에 I-beam을 이용하여 구조물의 수직 방향 강성을 보강하였다. 보강 이후의 진동을 측정하고 측정된 신호를 이용하여 보강 전, 후의 RMS값을 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.



Fig. 8 Stiffness reinforcement

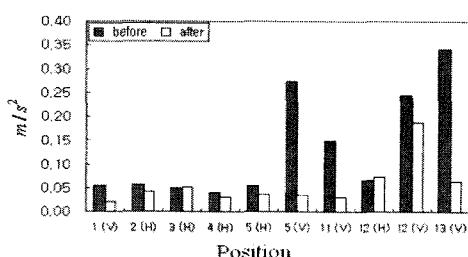


Fig. 9 Acceleration RMS levels before and after stiffening

칼럼의 강성을 보강한 결과 수직 방향의 진동이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 일부 위치를 제외하고 변위의 RMS값과 최대값 또한 전체적으로 감소한 것을 알 수 있었다. 그러나 진동의 원인은 밝히지 못하였으며 수직 방향 강성 보강은 근본적인 해결 방법이 될 수 없었다.

#### 3. FSI 해석

칼럼의 주요 가진원은 유체의 유입에 따른 압력 변화에 있다고 판단하고 유체의 압력이 구조물에 미치는 영향을 해석하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ADINA<sup>(6)</sup>의 ADINA/FSI(fluid structure interaction) 모듈을 이용하여 해석하였다. FSI 해석은 Fig. 9와 같이 유체와 구조물의 상호 작용을 고려한 수치해석이다. 즉 유체 혹은 구조물의 하중조건과 경계조건을 고려하여 유체의 움직임을 해석하고, 다음으로 유체가 구조물에 미치는 영향을 고려하여 구조물의 변형과 움직임을 해석한다. 이 결과가 다시 유체의 거동에 반영되는 반복 해석 과정을 밟는다. 유체와 구조물은 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 경계조건으로 연성이 이루어진다<sup>(7)</sup>.

유체로 인한 하중을 받는 구조물의 진동 및 파손의 원인으로는 유체 유동의 불안정성이나 난류의 비정상 압력 변동에 의한 가진, 난류 유동에 의한 주기적 진동, 유동에 따른 구조물과의 마찰 등이 있다<sup>(8)</sup>. 칼럼의 진동 및 로터리 벨브의 리브 플레이트 파손의 원인이 유체의 유입 과정에서 발생하는 불안정과 같은 유체 유동에 의한 것인지를 확인하기 위하여 유체의 유입 과정을 해석하였다. 유체가 유입

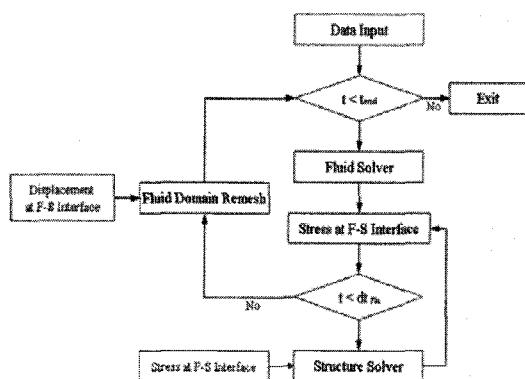


Fig. 10 FSI analysis procedure

되는 칼럼 하부의 형상은 Fig. 2와 같다. 양쪽의 관으로부터 유체가 유입되며 내부에 로터리 벨브가 있다. 로터리 벨브는 하부의 모터와 연결되어 회전하게 된다. 유체의 유입 및 유출에 따른 유동이 로터리 벨브에 미치는 영향을 확인하기 위하여 로터리 벨브와 유체가 유입되는 관 및 칼럼 하부를 모델링하여 해석을 수행하였다.

먼저 리브 플레이트가 없는 모델에 대한 해석을 수행하였다. 이를 해석하기 위하여 칼럼 하부와 유체의 유입이 일어나는 관을 단순화하여 모델링하였다. 원심펌프(centrifugal pump)에 의한 압력을 정현과 형태로 고려하여 유입관과 유출관 끝에 압력을 가하였고, 칼럼의 상부에는 유체의 하중에 따른 압력을 가하였다. 유체의 유입이 로터리 벨브에 미치는 영향을 확인하기 위하여 로터리 벨브의 축에 FSI 경계조건을 설정하였다. FSI 경계조건은 유체와 구조가 접하는 면에서의 노드와 선을 연결하여 각각의 노드 점에 미치는 영향을 고려하여 해석이 이루어진다. FSI 해석을 위하여 유체와 고체 모두 동일한 해석 시간을 설정하여 FSI 해석을 수행하였다.

FSI 해석 결과 내부 유체의 속력이 최대일 때 단면의 속도 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 상부의 유체 압력과 펌프에 의한 압력으로 인하여 유출 시 속도가 더 크게 나타났다. 상부 칼럼과 연결 부위에서 속도가 최대로 나타나고 있으며 중심축을 거쳐 유출관에서의 속도는 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 유체의 압력은 칼럼의 중심부에서 높게 나타나며 유출관 방향으로 점차 압력이 감소하는 것으로 나타났다.

칼럼의 리브 플레이트는 유체가 펌프를 통하여 파이프로부터 칼럼으로 유입되는 입구에 설치되어 있다. 따라서 리브 플레이트는 유체가 칼럼 내부로 유입 및 유출이 이루어짐에 따라 주기적으로 정현과 형태의 가진을 받게 된다. 이러한 유체에 의한 가진이

로터리 벨브에 미치는 영향과 리브 플레이트에 의한 유체 유발 진동의 발생을 확인하기 위하여 FSI 해석을 수행하였다. 해석의 주된 관심은 리브 플레이트가 유체에 미치는 영향이기 때문에 리브 플레이트와 로터리 벨브의 축을 모델링하고, 유체와 접하는 면에 FSI 경계조건을 지정하였다. 리브 플레이트와 중심축은 바로 연결되어 있으나 해석을 위해 각각에 별도의 구속 조건을 부여하였다.

ADINA/FSI를 이용하여 내부 유체의 압력이 최대일 때 유체의 압력 분포를 나타낸 결과는 Fig. 11과 같다. 정현과 형태의 압력에 따라 칼럼으로 유체가 유입 시 최대 압력이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 가장 위쪽 두 개의 리브 플레이트와 가장 아래쪽 리브 플레이트 주위에 압력이 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 내부 유체의 속도 분포를 Fig. 12에 나타내었다.

리브 플레이트에 의해 유체가 나누어져 관으로 흐르는 모습을 보인다. 중심축 주위에서 속도가 증가하며 리브 플레이트를 통과한 후 유출이 되며 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 리브 플레이트가 설치된 경우 유체의 최대 속도는 159 m/s로 설치되지 않은 경우의 62 m/s에 비하여 매우 크게 나타나고 있다.

리브 플레이트의 영향에 따른 유체 유동 특성을

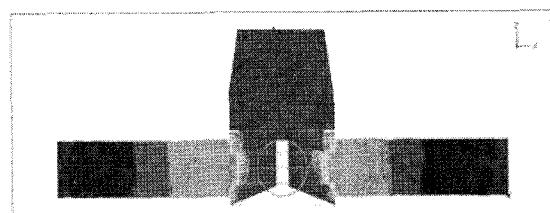


Fig. 12 Pressure distribution of the section of the inlet part

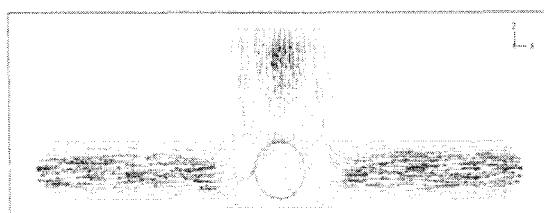


Fig. 11 Velocity distribution of the section of the inlet part

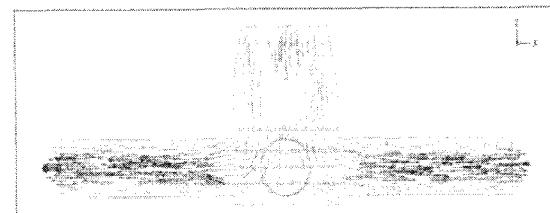


Fig. 13 Velocity distribution of the section of the inlet part

확인해보기 위하여 리브 플레이트의 크기와 숫자 및 압력을 변경하여 각각의 결과를 비교하였다. 리브 플레이트는 로터리 밸브의 강성을 보강하기 위하여 설치하였으나 이 연구에서는 리브 플레이트의 강도 보다는 유체 유동에 미치는 영향에 관심이 있는 관계로 별도의 구조 해석 없이 유체가 유입되는 넓이가 동일하도록 리브 플레이트의 개수에 따라 두께만을 변경하였다. 따라서 2개의 리브 플레이트 모델은 기존의 리브 플레이트에 비하여 두께를 0.05 m 늘렸고, 4개의 경우에는 두께를 0.03 m 줄였다. 해석 결과 리브 플레이트의 갯수가 2개인 경우 127 m/s 의 최대 속도를 나타냈으며, 리브 플레이트가 4개인 경우는 174 m/s로 나타났다. 리브 플레이트가 없는 경우에 비하여 속도는 매우 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 3개인 경우와 4개인 경우의 속도는 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

칼럼의 유동 특성을 확인하기 위하여 내부 유체의 Reynolds 수를 구하여 보았다. Reynolds 수가 45 이하인 경우 원통 주변의 유선(stream line)들은 대칭적으로 나타나며,  $10^2 \sim 10^5$  사이일 경우 Karman 와열(vortex street)은 부서지고 뒤따르는 흐름은 비주기적인 난류 상태로 바뀌게 된다. 이러한 유체가 흐르는 사이에 설치된 구조물에서 발생되는 와류는 구조물에 큰 진동을 일으킨다. 칼럼 내부의 유동 특성을 확인하기 위하여 Table 2와 같이 Reynolds 수를 구하였다.

Reynolds 수를 구한 결과 모두  $10^2$  이상으로 비주기적인 난류의 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 와류 진동이 발생하는 경우 주기적인 양력이 구조물에 작용하게 되며, 이 주기가 구조물의 고유진동수와 일치하는 경우 공진이 발생하게 된다.

Table 2 Reynolds number

2 rib plate	523.403
3 rib plate	658.758
4 rib plate	721.051

Table 3 Oscillating lift force frequency

2 rib plate	174 Hz
3 rib plate	318 Hz
4 rib plate	479 Hz

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L D L J \sin(2\phi f_s t)$$

$$f_s = \frac{SV}{D}$$

위 식에서  $S$ 는 Strouhal 수로 0.14에서 0.25 사이의 값을 갖는다. 일반적으로 Reynolds 수가 증가함에 따라 0.22로 수렴하는 것으로 알려져 있다. 따라서 Strouhal 수를 0.22로 하여 앞에서 구한 유속과 구조물의 단면의 크기를 대입하여 구조물에 작용하는 양력의 주기를 구하여 Table 3에 나타내었다.

로터리 밸브의 첫 번째 고유진동수는 586 Hz로 리브 플레이트의 설치 및 개수의 증가에 따른 유속의 증가가 와류 진동을 야기하지는 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 칼럼의 진동은 유체 유동에 따른 불안정 현상 보다는 리브 플레이트에 의한 유속

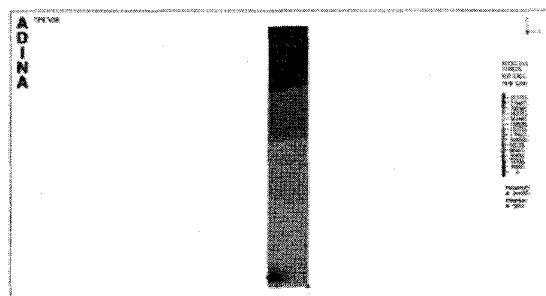


Fig. 14 Stress of the axis



Fig. 16 Breakdown of the rotary valve parts

및 압력의 증가에 의해 구조물에 가해지는 하중이 원인인 것을 알 수 있다. 로터리 밸브는 모터와 연결된 축에 고정되어 회전한다. FSI 해석을 통해 얻어진 구조물의 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 로터리 밸브의 축 하부에서 응력이 최대로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Shut down 기간에 로터리 밸브를 분해하여 확인한 결과 Fig. 14와 같이 축의 패킹이 설치된 부분에 마모가 발생하였으며 로터리 밸브의 하단 베어링에서 파손이 발생한 것으로 나타났다. 상기와 같이 FSI 해석 결과를 종합 검토한 결과 리브 플레이트의 설치에 따른 하중의 증가로 인하여 로터리 밸브의 회전 불균형이 발생하여 전체적인 칼럼의 진동이 발생한 것으로 보인다.

로터리 밸브와 축을 연결하는 라운드 바 용접 부위와 리브 플레이트에서의 크랙 발생을 비파괴 검사를 통해 확인할 수 있었다. 리브 플레이트의 크랙이 발생한 위치는 FSI 해석 결과를 통해 확인한 유체의 압력이 높게 작용하는 위치와 일치하였다. 따라서 리브 플레이트의 파손은 유체의 압력 하중에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 유체에 의한 진동이 발생하는 석유화학 플랜트 칼럼믹서의 진동에 대하여 연구하였다. 칼럼의 진동 특성을 파악하기 위하여 가속도계를 이용하여 진동을 측정하고 모드 해석을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 진동의 저감을 위하여 칼럼의 수직방향 강성을 보강하고, 측정을 통해 진동이 저감된 것을 확인하였다. 그러나 진동의 원인을 파악하지 않은 단순한 구조물 보강은 진동저감을 위한 근본적인 방법이 될 수 없다. 따라서 칼럼의 진동 및 로터리 밸브의 파손 원인을 파악하기 위하여 유체 구조 상호 해석을 수행하였다. 유체 구조 상호 해석을 통하여 내부 유체의 압력 분포 및 유속을 조사하고, 리브 플레이트에 따른 속도 변화를 검토하였다. 또한 리브 플레이트의 설치로 인하여 와류 진동이 발생하는지 확인하였다. 해석 결과와 크랙 발

생 검사 결과 등을 고려하면 리브 플레이트의 설치가 중심축에 가해지는 하중을 증가시키는 것을 알 수 있다. 따라서 칼럼의 진동을 저감하기 위해서는 로터리 밸브의 리브 플레이트를 제거하여 중심축에 가해지는 하중 및 유속을 줄이는 것이 필요함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kim, M. C., Lee, B. Y. and Kim, W. J., 2005, "Optimal Design of a Dynamic Absorber for the Large-size Pressure Vessel of the Petrochemical Plant", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 743~749.
- (2) Wang, X., 1999, "Analytical and Computational Approaches for Some Fluid–structure Interaction Analyses", Computers & Structures, Vol. 72, pp. 423~433.
- (3) Lee, M. H. and Kim, Y. C. 2004, "Multi-Physics Simulations of Fluidelastic Instability for Tube Bundles in Cross-Flow," Transactions of the KSME B, Vol. 28, No. 2, pp. 174~180.
- (4) Yosibash, Z., Kirby, R. M., Myers, K., Szabó, B. and Karniadakis, G., 2003, "High-order Finite Elements for Fluid–structure Interaction Problems", 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- (5) Samtech International Inc., 2003, SAMCEF User Manual-10.1, Samtech International Inc.
- (6) ADINA R&D, Inc., 2003, ADINA System Online Manuals.
- (7) Nitikitpaiboon, C., Bathe, K. J., 1993, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Velocity Potential Formulation for Fluid–structure Interaction", Computers & Structures, Vol. 47, No. 4/5, pp. 871~891.
- (8) Chang, H. W. and Kim, B. S. 1991, "Fluid–Elastic Instability of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow," Transactions of the KSME, Vol. 15, No. 6, pp. 1943~1966.