

화학 플랜트용 칼럼 믹서의 ADINA/FSI 해석 ADINA/FSI Analysis of Petrochemical Plant Column Mixer

이원석*·정구충**·최연선†

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

Key Words : Fluid structure interaction(유체 구조 연성), Fluid Induced Vibration(유체 유발 진동), Instability(불안정) Resonance(공진), Mode Shape(모드 형상), Rib Plate(리브 플레이트)

ABSTRACT

Column mixer is one of the facility to mix fluids at petrochemical plants. The column vibration is 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 three times for understanding the vibration characteristics of the column. First experimental results showed the need of stiffness reinforcement. After the reinforcement work, second measurement conformed 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 the generation of the fluid instability in the column mixer fluid structure interaction analysis using ADINA/FSI was performed which showed the necessity of the modification of the rotary valve.

1. 서론

석유 화학 산업은 원유를 원료로 하여 다양한 원자재를 생산하는 산업이다. 이러한 석유 화학 플랜트의 설비들은 연속적으로 가동되기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. 그러나 석유 화학 플랜트의 설비는 구조물 내에서 유체의 혼합, 분류 및 운송 등에 의하여 진동의 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 기울이고 있다. 실제 플랜트에서 발생하는 진동의 대부분은 유체의 유동에 기인한다. 따라서 플랜트의 가동 상황에서의 진동을 해석하고 설계하기 위해서는 반드시 유체와 구조물 사이의 상호 작용을 고려하여야 한다.

플랜트의 진동에 관하여 김원진[1]은 석유 화학 플랜트의 대형 압력 용기를 대상으로 진동을 저감하기 위한 동흡

진기 설계에 관하여 연구하였다. 유한요소법을 사용하여 구조물의 모드 형상을 파악하여 취약부를 분석하고, 조화응답 해석을 통하여 구조물이 받는 응력을 구하였다. 이 결과를 바탕으로 동흡진기를 설계하고, 동흡진기 설치 이전과 진동 특성을 비교하였다. 플랜트와 같은 대형 구조물의 진동 특성을 전산 해석을 통하여 확인하였으나 내부 유체에 의한 영향은 고려가 되지 않았다.

유체 구조 상호 해석에 관하여서 Wang[2]은 유체가 흐르는 관 내부에 존재하는 판에 대하여 유체 구조 상호 해석을 수행하였다. 2차원 층류 유동에서 내부에 판은 작은 변형이 발생하는 것으로 가정하고, 판에 대한 운동방정식을 유도하여 그 결과를 ADINA를 이용한 해석 결과와 비교하였다. 이인[3]은 교량 단면의 공탄성 시스템에 대하여 유체 구조 상호 해석을 이용하여 유체 유발 진동을 해석하였다. 이 해석을 통해 구조물의 진동에 따른 변위를 구하고, 이러한 진동이 구조물에 피로를 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 이민형[4]은 유체 구조 상호 해석을 이용하여 다수의 실린더 형태 구조물의 유체 유발 진동을 해석하였다. 이 해석 결과를 실험 결과와 비교하고, 이를 통해 유체 탄성 불안정을 유체 구조 상호 해석을 통하여 예측할 수 있음을 확인하였다.

† 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr
Tel: (031) 290-7440, Fax: (031) 290-5849

* 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 대림산업주식회사

본 연구에서는 나일론 수지의 원료를 생산하는 플랜트 칼럼 믹서(column mixer)의 진동 저감과 로터리 밸브(rotary valve)의 파손에 관하여 연구하였다. 전체 칼럼 믹서의 진동을 측정하여 특성을 파악하고, 강성을 보강한 후, 측정을 통하여 진동 특성의 변화를 살폈다. 다음으로, 진동의 원인을 파악하기 위하여 모드해석을 통해 공진 여부를 살폈다. 칼럼의 진동 및 로터리 밸브의 파손 원인을 확인하기 위하여 유체 구조 상호 해석을 수행하여 내부 유체의 압력 및 속도 변화를 살폈다. 이를 통해 진동의 발생 및 로터리 밸브 파손의 원인이 유체 불안정에 기인하는지 확인하였다.

2. 칼럼 진동

2.1 칼럼 믹서

진동 측정 대상인 칼럼은 하부 콘크리트와 원형 셀 형상의 스킵트 타입 구조로 지지 되어있다. 칼럼의 구조물 위로 펌프를 통해 원료인 유체가 2개의 관을 통해 유입되고, 내부에서 혼합된 유체는 다른 2개의 관을 통해 유출된다. 4개의 관은 칼럼 하부에 각각 90°의 간격으로 설치되어 있으며 칼럼 내부의 로터리 밸브에 의해 유입이 조절된다. 로터리 밸브는 칼럼 내부의 유체를 순환시켜 반응 효과를 높이는 역할을 수행한다. 유체 유출입에 대한 밸브의 강성 보강을 위하여 리브 플레이트(rib plate)가 설치되어 있다.

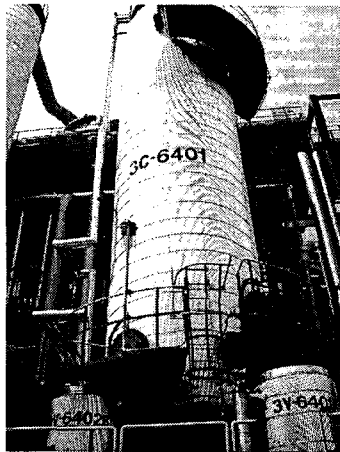


Fig. 1 Column Mixer

2.2 진동 측정

칼럼의 진동은 4차레에 걸쳐 측정되었다. 가동률이 60%인 조건에서 1차 측정이 이루어졌으며, 2차와 3차 측정은 가동률이 90%에서 이루어졌다. 4차 측정은 실제 보강이 이루어진 후 90%의 가동률에서 측정하였다. 측정은 가속도계를 이용하여 칼럼의 상부, 중간, 하부와 모터의 13개 포인트에서의 진동을 측정을 하였다. 1번, 10번, 11번, 13번은

수직방향의 가속도를 측정하였으며, 5번과 12번은 수직방향과 수평방향 모두 측정하였다. 나머지 위치는 모두 수평방향의 가속도만을 측정하였다.

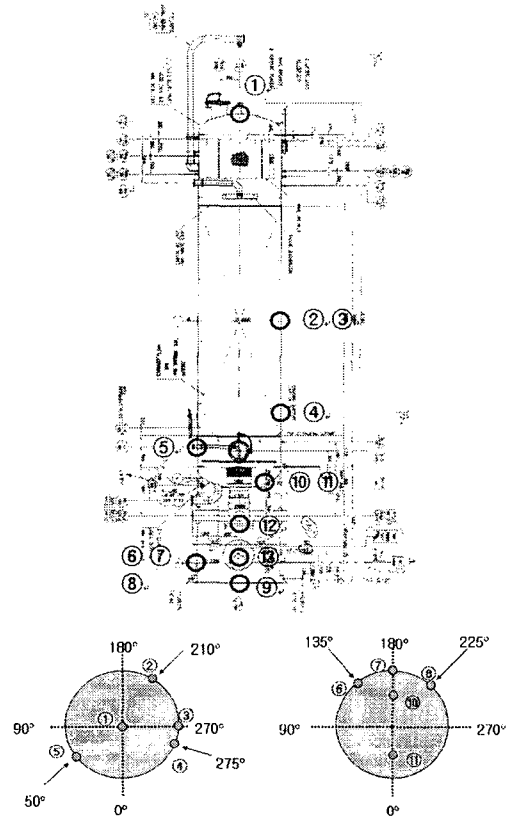


Fig. 2 Measured points

측정 결과는 가동률에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 90% 가동 조건에서의 측정 결과와 주파수 분석 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

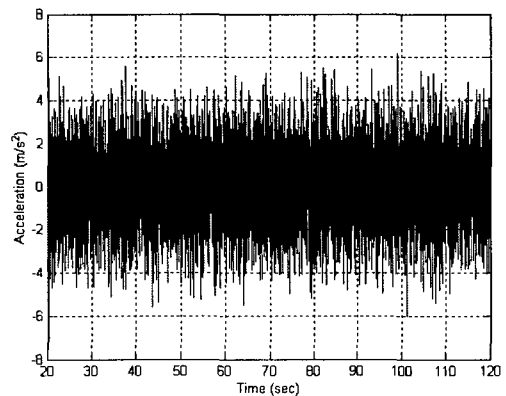


Fig. 3 Displacement at position 2

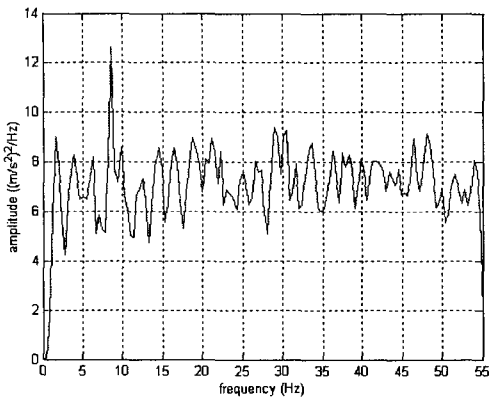


Fig. 4 Power spectrum at position 2

칼럼의 진동은 가동률이 증가함에 따라 매우 증가하였으며 칼럼의 측정 위치에 따라 RMS 값이 유사한 크기를 나타냈다. 또한, 수직방향의 진동이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 전체 측정 위치에서 10 Hz 이하의 성분이 나타나고 있으며 수직방향은 경우 20~30 Hz 사이의 성분이 나타나고 있었다. 이외에도 넓은 주파수 영역에 걸쳐 진동이 고르게 발생하는 것으로 나타났다. 칼럼의 수직방향 진동이 매우 크게 발생하고 있으므로 수직방향의 강성을 보강하기 위하여 칼럼의 하부를 구조물로 지지하였다. 보강 이후의 진동 크기의 변화를 확인하기 위하여 동일한 위치를 대상으로 진동을 측정하였다. 강성 보강 이후의 주파수 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

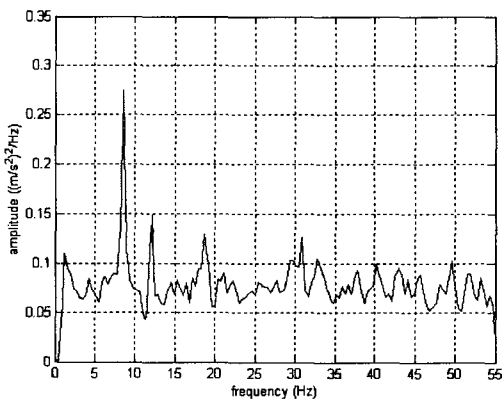


Fig. 5 Power spectrum at position 2

칼럼의 강성을 보강한 결과 수직방향의 진동이 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 일부 위치를 제외하고 변위의 RMS 값과 최대값 또한 전체적으로 감소한 것을 측정 결과를 통해 알 수 있었다. 측정 위치에 따른 보강 전과 후의 변위의 RMS 값을 Fig. 6에 나타내었다.

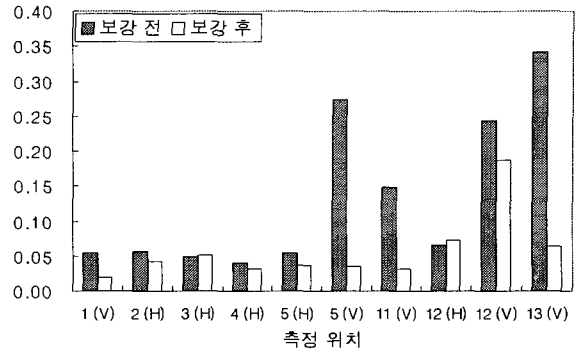


Fig. 6 Displacement RMS level

3. 모드해석

칼럼의 진동 측정 결과를 바탕으로 강성의 보강을 통해 수직방향의 진동을 저감할 수 있었다. 그러나 칼럼 하부의 유체가 유입되는 부분의 진동의 저감은 이루어지지 않았다. 따라서 칼럼의 진동 발생이 펌프를 통한 유체 유입에 의한 공진 여부를 판단하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 Samcef[5]를 이용하여 모드해석을 수행하였다. 칼럼을 지지하는 외부 구조물을 제외한 칼럼의 모델을 생성하였다. 칼럼의 내부 유체를 제외한 모델의 모드해석 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Modal analysis of structure

Mode No.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Frequency	9Hz	12Hz	14Hz	18Hz	21Hz	26Hz

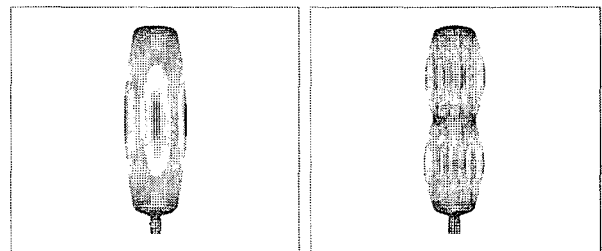


Fig. 7 Mode shape of structure

다음 내부의 유체를 포함한 칼럼을 모델링하고, 유체의 물성치를 반영하여 모드해석을 수행하였다. 내부의 유체를 포함한 모드해석의 결과는 다음과 같다.

Table 2 Modal analysis of structure with fluid

Mode No.	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Frequency	28Hz	50Hz	62Hz	67Hz	82Hz	98Hz

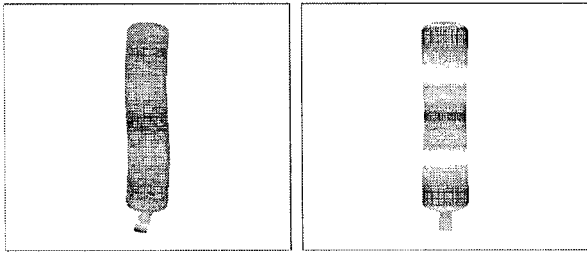


Fig. 8 Mode shape of the structure with fluid

칼럼은 하단에 설치된 펌프에 의하여 1.667 Hz의 정현파 형태로 유체가 유입된다. 위의 결과를 통해 유체 및 구조물의 고유진동수는 펌프의 가진 주파수에 비하여 상대적으로 매우 높은 것을 알 수 있다. 내부 유체의 유동과 같은 다양한 가진이 존재하나 실제 칼럼에 가장 큰 가진원은 펌프에 의한 유체의 유입이므로 칼럼의 진동 및 로터리 밸브의 파손 원인이 공진은 아닌 것으로 판단되었다.

4. FSI 해석

현재 칼럼의 주요 가진원은 유체의 유입에 따른 압력 변화에 있다. 따라서 유체의 압력이 구조물에 미치는 영향을 해석하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ADINA[6]의 ADINA/FSI(fluid structure interaction) 모듈을 이용하여 해석하였다. FSI 해석은 유체와 구조물의 상호 작용을 고려하여 해석이 수행된다. 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 과정을 밟는다. 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.[7-10]

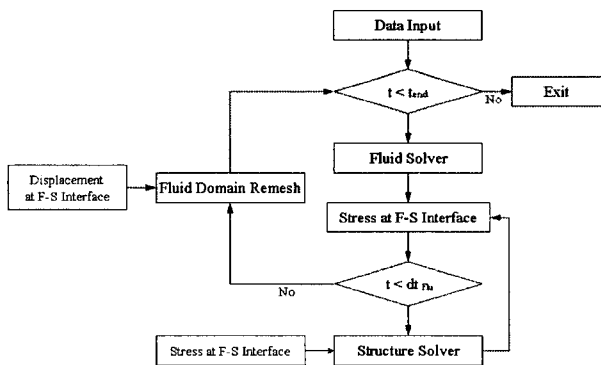


Fig. 9 FSI analysis procedure

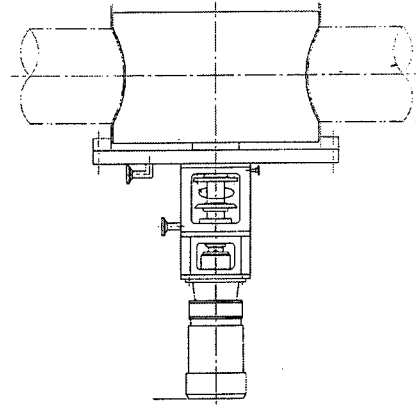


Fig. 10 Flushing equipment

칼럼의 진동 및 로터리 밸브의 리브 플레이트 파손의 원인이 유체의 유입 과정에서 발생하는 불안정과 같은 유체 유동에 의한 것인지를 확인하기 위하여 유체의 유입 과정을 해석하였다. 유체가 유입되는 칼럼 하부의 형상은 Fig. 10과 같다. 양쪽의 관으로부터 유체가 유입되며 내부에 로터리 밸브가 설치되어있다. 로터리 밸브는 하부의 모터와 연결되어 회전하게 된다. 유체의 누수를 막기 위하여 칼럼과 로터리 밸브의 축 사이에 패킹이 되어있다. 유체의 유입 및 유출에 따른 유동에 칼럼에 미치는 영향을 확인하기 위하여 로터리 밸브와 유체가 유입되는 관을 해석하였다.

먼저 리브 플레이트가 없는 모델에 대한 해석을 수행하였다. 이를 해석하기 위하여 칼럼 하부와 유체의 유입이 일어나는 관을 2차원 축대칭으로 단순화하여 모델링하였다. 관 끝에 정현파로 압력을 가하였고, 칼럼의 상부에는 유체의 하중에 따른 압력을 가하였다. 유체의 유입이 로터리 밸브에 미치는 영향을 확인하기 위하여 로터리 밸브의 축에 FSI 경계조건을 설정하였다. FSI 경계조건은 유체와 구조가 접하는 면에서의 노드와 선을 연결하여 각각의 노드 점에 미치는 영향을 고려하여 해석이 이루어진다. 다음으로, FSI 해석을 위하여 유체와 고체 모두 동일한 해석 시간을 설정하여 FSI 해석을 수행하였다.

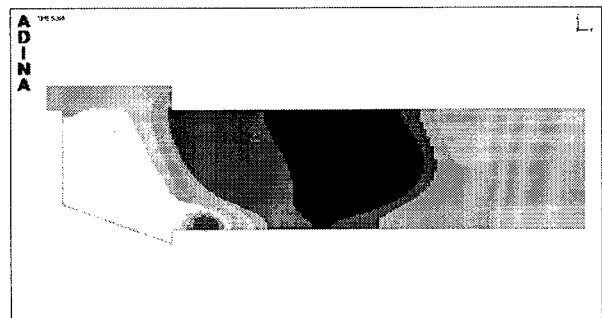


Fig. 11 Pressure distribution without the rib plate

ADINA/FSI를 이용하여 내부 유체의 압력이 최대일 때 유체의 압력을 나타낸 결과는 Fig. 11과 같다. 정현파 형태의 압력에 따라 칼럼으로 유체가 정상적으로 유입되고 있는 것을 알 수 있다.

칼럼의 리브 플레이트는 유체가 펌프를 통하여 칼럼으로 유입되는 입구에 설치되어있다. 따라서 리브 플레이트는 유체가 칼럼 내부로 유입 및 유출이 이루어짐에 따라 주기적으로 정현파 형태의 가진을 받게 된다. 이러한 유체에 의한 가진이 로터리 밸브에 미치는 영향과 리브 플레이트에 의한 유체 불안정의 발생을 확인하기 위하여 FSI 해석을 수행하였다. 실제 칼럼은 외부의 셸 구조와 내부의 리브 플레이트가 설치된 로터리 밸브로 이루어져 있다. 해석의 주된 관심은 리브 플레이트가 유체에 미치는 영향이 있기 때문에 리브 플레이트와 로터리 밸브의 축을 모델링하고, 유체와 접하는 면에 FSI 경계조건을 지정하였다.

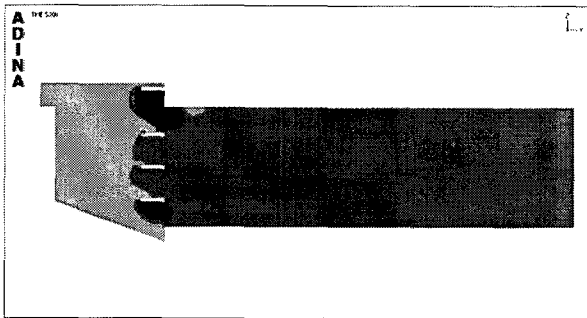


Fig. 12 Pressure distribution with the rib plate

ADINA/FSI를 이용하여 내부 유체의 압력이 최대일 때 유체의 압력 분포를 나타낸 결과는 Fig. 12과 같다. 정현파 형태의 압력에 따라 칼럼으로 유체가 유입되는 과정에서 리브 플레이트 주변의 압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 중심부와 위에서 2번째 그리고 가장 아래 리브 플레이트에 압력이 크게 걸리는 것으로 나타난다. 그러나 난류에 의한 비정상적인 압력의 발생은 나타나고 있지 않다. 리브 플레이트 주변에서의 압력 또한 유체 해석의 결과와 큰 차이를 보이지 않는다.

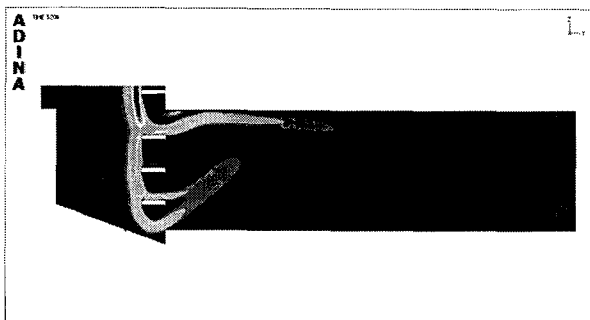


Fig. 13 Velocity distribution of the section

내부 유체의 속도 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 리브 플레이트에 의해 유체가 나누어져 관으로 흐르는 모습을 보인다. 리브 플레이트가 없는 경우에는 유체의 속도는 상부에서 가장 큰 값을 보이며 유체가 자연스럽게 유출되는 형상을 보인다. 그러나 유체의 비정상적인 속도 분포나 난류는 나타나지 않는다.

유체 불안정이 나타날 경우 해의 발산으로 인하여 해석의 결과를 얻을 수 없다. 또한, 내부 유속이나 압력이 특정 부분에서 비정상적으로 크게 증가하는 모습을 보인다. 칼럼 내부 유체의 압력과 속도에 대한 유체 구조 상호 해석의 결과를 통해 칼럼의 내부에서 유체 불안정은 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 칼럼의 진동과 리브 플레이트의 파손이 유체 불안정에 기인하지 않는 것으로 보인다.

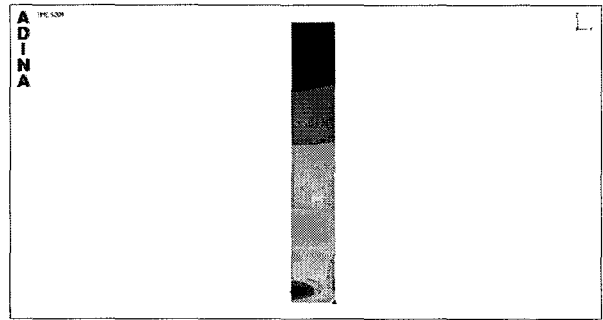


Fig. 14 Stress distribution at central axis

칼럼의 진동 원인을 파악하기 위하여 유체가 로터리 밸브에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 14에 로터리 밸브의 축에 작용하는 응력 분포를 나타내었다. 리브 플레이트가 없는 경우 유체의 흐름에 의한 하중만이 작용하여 아래 고정된 위치에서 최대 응력인 240 kPa이 작용하고 있다. 다음으로 리브 플레이트가 있는 경우의 응력 분포를 Fig. 15에 나타내었다. 이 경우 로터리 밸브의 축은 유체에 의한 하중과 함께 리브 플레이트에 작용하는 유체의 압력으로 인한 하중을 동시에 받는 것으로 나타났다. 최대 응력은 리브 플레이트와 연결된 부위에서 1,168 MPa이 작용하고 있다.

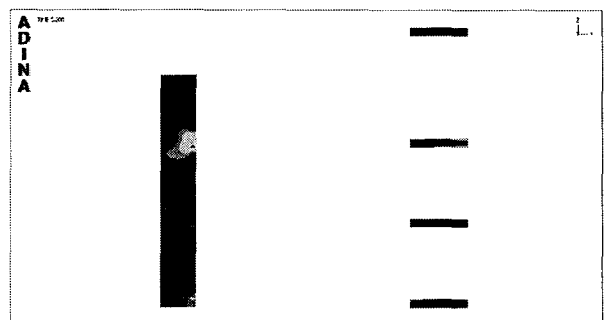


Fig. 15 Stress distribution at central axis and rib plate

로터리 밸브는 모터와 연결된 축에 고정되어 회전한다. 이 축은 칼럼의 누수를 막는 패킹과 로터리 밸브의 회전을 위한 베어링이 설치되어 있으며 칼럼의 하부 지지 구조물에 연결되어 있다. 이 축은 유체에 의한 가진을 받으며 하부가 고정된 외팔보와 같은 형태로 해석이 가능하다. shut down 기간에 로터리 밸브를 분해하여 확인한 결과, 축의 패킹이 설치된 부분에 마모가 발생하였으며 로터리 밸브의 하단 베어링에서 파손이 발생한 것으로 나타났다. 따라서 리브 플레이트의 설치에 따른 하중의 증가로 인하여 로터리 밸브의 회전 불균형이 발생하였으며 전체적인 칼럼의 진동이 발생한 것으로 보인다.

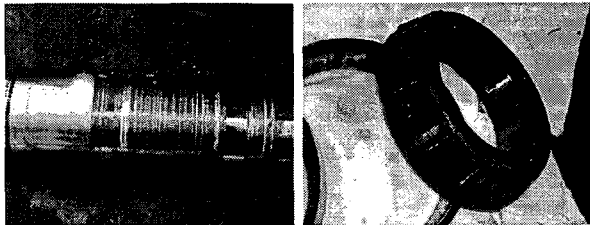


Fig. 16 Breakdown of the rotary valve

로터리 밸브와 축을 연결하는 라운드 바 용접 부위와 리브 플레이트에서의 크랙 또한 비파괴 검사를 통해 확인할 수 있었다. 리브 플레이트의 크랙이 발생한 위치는 유체 구조 상호 해석 결과를 통해 확인한 유체의 압력이 많이 작용하는 위치와 일치하였다. 따라서 리브 플레이트의 파손은 유체의 하중에 의한 피로 파괴인 것으로 판단된다.



Fig. 17 Rib plate crack

5. 결론

본 연구에서는 유체에 의한 진동이 발생하는 석유화학 플랜트 칼럼믹서의 진동 및 로터리 밸브의 파손 원인에 대하여 연구하였다. 칼럼의 진동 특성을 파악하기 위하여 가속도계를 이용하여 진동을 측정하였고, 이 결과를 바탕으로 진동의 저감을 위하여 칼럼의 수직방향 강성을 보강하고, 측정

을 통해 진동이 저감된 것을 확인하였다. 칼럼의 진동 및 리브 플레이트의 파손은 모드해석을 수행하여 유체 유입에 따른 가진 주파수와 비교하였으나 공진은 아님이 확인되었다. 리브 플레이트의 유무에 따른 내부 유체의 압력 및 속도 분포를 유체와 구조물의 상호 관계를 고려한 ADINA/FSI 해석한 결과, 유체 불안정은 발생하지 않았지만 리브 플레이트가 있는 경우, 로터리 밸브에 작용하는 압력이 크게 증가하여 회전 불균형이 유발되어 로터리 밸브의 파손과 칼럼의 진동을 발생시킴을 확인하였다. 따라서 칼럼의 진동을 저감하고 로터리 밸브의 파손을 방지하기 위해서는 리브 플레이트의 두께를 보강하여함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) 김민철, 이부윤, 김원진, 2005, "석유화학 플랜트의 대형 압력용기에 대한 동흡진기의 설계," 한국소음진동공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 743-749.
- (2) X. Wang, 1999, "Analytical and computational approaches for some fluid-structure interaction analyses," Computer and Structure, Vol. 72, pp. 423-433.
- (3) 박성중, 권혁준, 이인, 한재홍, 2004, "교량 구조물의 유체유발 진동해석," 한국소음진동공학회논문집, 제 14권 제 5호, pp. 402-409.
- (4) 이민형, 김용찬, 2004, "유체-구조 상호작용을 적용한 튜브다발의 유체탄성불안정성 과도적 전산해석," 대한기계학회논문집 B권, 제 28권 제 2호, pp. 174-180.
- (5) Samtech International Inc., 2003, SAMCEF User Manual-10.1, Samtech International Inc.
- (6) ADINA R&D, Inc., 2003, ADINA System Online Manuals.
- (7) 김범식, 장효환, 1991, "2상 횡유동을 받는 튜브군의 유체탄성 불안정성," 대한기계학회논문집, 제 15권 제 6호, pp. 1948-1966.
- (8) 유기완, 박치용, 2002, "CE형 증기발생기 전열관에 대한 유체탄성 불안정성 해석," 한국소음진동공학회논문집 제12권 제4호 pp. 261-271.
- (9) 조봉호, 유기완, 박치용, 박수기, 2003, "집단 관막음 된 한국표준원전 증기발생기 전열관의 유체탄성불안정성 특성 평가," 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 670-676.
- (10) 유기완, 박치용, 박수기, 이종호, 2003, "증기발생기 전열관의 유체탄성불안정성 및 난류가진 특성 연구," 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 1400-1405.