

프로세스 배관계의 3차원 유동해석

양희천* · 박상규*

3-D Flow Simulation of Process Piping System

Hei-Cheon Yang and Sang-Kyoo Park

Key Words: Process Piping System(프로세스 배관계), 3-Dimensional Flow Phenomena(3차원 유동 현상), Optimum Design Requirement(최적설계조건), Wall Shear Stress(벽면전단응력)

Abstract

It is very important that piping system shall meet the optimum design requirement as predicted in designing system. If the piping system proved not to meet the requirement in commission it shall be redesigned and corrected till the required capacity is satisfied, which costs much expense. The objective of this study is to understand steady 3-dimensional flow phenomena in a process piping system numerically. 3-dimensional numerical simulations with standard k- ϵ model were carried out by using ALGOR code for three cases of Reynolds number, 2500, 3500 and 4500, based on inlet pipe diameter and three cases of inflow air temperature, 20°C, 50°C and 100°C.

1. 서론

산업배관설비는 유체, 분말, 고체 등을 필요한 장소로 이송하는 관의 제반설비로, 원유수송 배관, 화학공장내 배관, 집진장치 배관, 발전소 배관 등 모든 산업목적에 위한 배관을 포함하는데, 프로세스(process) 배관과 유틸리티(utility) 배관으로 분류할 수 있다⁽¹⁾. 프로세스배관은 생산의 출발점인 원료로부터 최종 제품까지 취급하는 물질이 단위 조작 기기에 의해 단계적 처리를 받는 일련의 공정에 이용되는 설비로, 원료를 정제해서 반응의 조건에 맞추고, 반응시에는 혼합, 가열, 가압, 냉각 조작에 의해 반응의 목적을 달성하고, 반응 생성물은 증류, 증발, 추출, 분리, 건조 등에 의해 정제되며, 미반응 물질은 원료로 되돌려서 순환시키는 공정과 관련되는 제반 배관

설비이다. 반면에 반응에는 직접 관여하지 않지만 프로세스 반응에 필요한 열을 공급하는 증기, 가열로의 연료유, 연료가스와 열흡수를 위한 냉각수, 계통내의 가스배출을 위한 증기나 공기, 청소 등에 사용되는 물 등 장치의 운전에 중대한 영향을 미치는 유체를 수송하기 위한 설비가 유틸리티 배관이다. 특히 화학 플랜트에서 주종을 이루는 프로세스 배관의 경우 이송 물체가 각종의 산, 알칼리, 기타 유·무기물질 등의 액체나 기체이거나 이들의 혼합물이고, 적용온도 및 압력의 범위가 매우 넓으므로 배관의 재질, 설계조건, 연결부의 용접조건 등에 대한 고려가 필요하다. 또한 시스템이 대규모화, 대용량화되므로 단위 조작기들이 최적설계조건에 배관으로 연결되어 상호 유기적인 관련 작용을 할 때 비로소 소기의 목적을 달성할 수 있게 된다.

일반적으로 배관계에는 유체의 내압, 배관자체의 무게 등의 내력과 바람, 눈 등의 외부충격에 의해 발생하는 외력으로 정의되는 1차응력(primary stress)과 배관계 내부에 흐르는 유체의

* 여수대학교 기계자동차공학부

온도에 의한 열팽창 응력인 2차응력(second stress)이 작용하게 된다. 따라서 배관의 설계에서는 임의 재료의 배관이 온도조건에 따라 1차 응력에 대해 안전하게 견딜 수 있고, 배관계의 반복적인 운전상태에 따른 응력이완 현상에 의해 발생하는 응력 범위내에 있도록 설계조건을 설정하여야 한다. 그리고 펌프, 압축기, 터빈 등과 같은 연결기기의 운전특성에 따른 배관계의 맥동 및 진동현상에 대한 고려가 필요하며, 배관계의 안전성을 유지시키기 위한 배관지지물인 hanger 및 support에 대한 설계해석이 필요하다. 한편 화학 플랜트내의 기 설치된 배관계에는 다른 배관설비와는 달리 화학공업의 특성상 가혹한 운전조건에 노출되므로 유지 및 보수에도 높은 기술력이 요구된다.

일반적인 덕트 및 배관망에서 최적설계의 주된 목적은 수송 물체를 사용목적에 맞게 원하는 곳에 적절히 분배하는 것이므로, 배관계의 실제계에서는 각종 부속설비로 인한 손실 등을 고려해야 하기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 숙련된 설계자가 배관자료집^(2,3)을 이용하여 설계하는 것이 일반적이다. 이정혜 등⁽⁴⁾은 액체용 배관설계와 공기조화용 덕트설계, 선박의 고정식 CO₂ 소화설비계통의 최적설계를 위한 S/W를 개발하는 연구를 수행하였다. 서상호 등⁽⁵⁾은 입자영상유속계와 수치시뮬레이션을 이용하여 분기관내 3차원 유동 해석을 수행하였다. 노형운 등⁽⁶⁾은 AOM을 사용하지 않고 맥동유동을 가시화할 수 있도록 개발된 탐색영역이동 제조치상호상관법을 적용하여 분기관내 뉴턴유체의 맥동유동 특성을 해석하고 가시화하였다.

본 연구는 화학 플랜트내 프로세스 배관의 설계 및 분석시스템 개발 과제의 일부로써, 프로세스 배관계의 3차원 모델링과 열 및 유동특성의 정성적 해석을 목적으로 한다.

2. 배관계의 모델링 및 수치해석

형상이 복잡한 배관계의 유동현상에 대해 가장 믿을 수 있는 정보는 실험적인 측정을 통하여 얻을 수 있지만 배관계의 복잡성으로 인한 실험 장치의 제약과 측정상의 어려움, 그리고 실험에 따른 많은 비용부담 등으로 인하여 실험은 제한

된 경우에 한하여 수행되고 있다. 또한 수치계산으로 유동문제를 해석하는 방법은 실제현상을 수학적으로 모델링한 지배방정식을 푸는 것이므로, 유동현상을 관찰하는 실험적 연구와 비교하여 타당성과 정확성이 검증될 때 해석결과의 유용성을 인정받게 된다. 따라서 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 프로세스 배관내의 유동에 대한 실험자료가 필요하지만 복잡한 구조의 프로세스 배관내의 유동에 대한 실험자료는 거의 발표된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 3차원 배관계를 모델링하여 유동장, 압력분포, 전단응력분포 등에 대해 수치계산하였다. Fig. 1은 3차원 배관계 모델의 사양을 나타낸다. 작동유체인 공기는 직경 600mm의 T자부의 두 방향에서 유입되며, 직경 400mm의 주 배관의 출구와 직경 300mm인 6곳의 분기관을 통해서 유출된다. T자부의 흡입관 길이는 5000mm이고 주 배관의 길이는 대략 10000mm이다. 주 배관의 연결부는 45°로 모델링하였다. Fig. 2는 3차원 배관계 모델의 격자계를 나타낸다. 계산격자는 약 10만개 정도로 구성하였다.

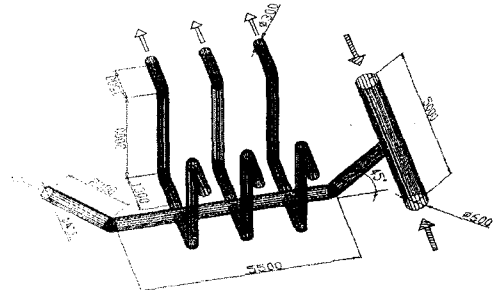


Fig. 1 Schematic diagram of 3-D piping system model

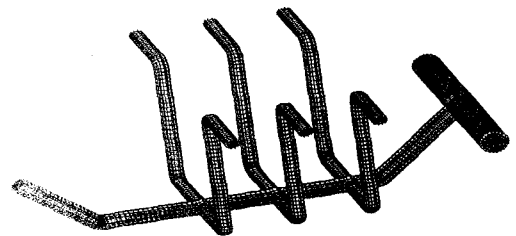


Fig. 2 Mesh of 3-D piping system model

본 연구에서는 유동장의 지배방정식을 풀기 위해서 FEM 상용코드인 ALGOR를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

계산에서 흡입배관의 입구조건은 균일한 속도 분포로 가정하였으며, 흡입배관의 직경을 기준으로 한 Re수는 2500, 3500, 4500이며, 유입공기의 온도는 25°C, 50°C, 100°C로 설정하였다. 계산조건을 Table 1에 case별로 나타내었다.

Table 1 Computational conditions

| | Re No. | inflow air temperature |
|--------|--------|------------------------|
| Case 1 | 2500 | 50°C |
| Case 2 | 3500 | 50°C |
| Case 3 | 4500 | 50°C |
| Case 4 | 2500 | 20°C |
| Case 5 | 2500 | 100°C |

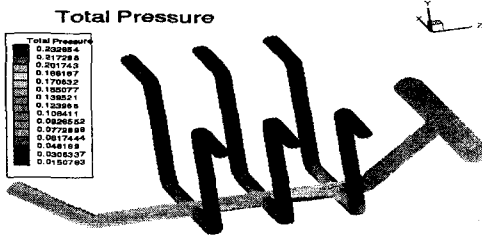
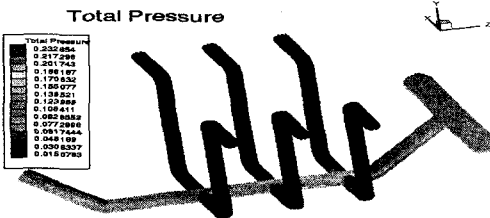
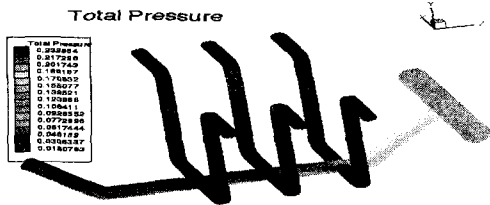


Fig. 3 Pressure contour for case 1, 2, 3

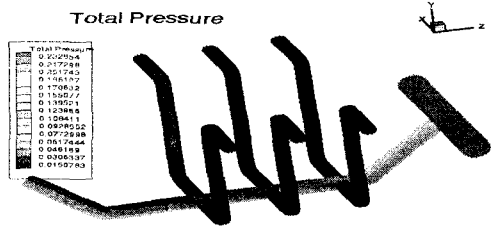
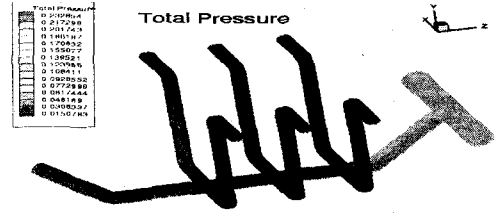


Fig. 4 Pressure contour for case 4, 1, 5

본 논문에서는 계산조건에 따른 배관 계내의 압력분포와 벽면전단응력분포에 대해 정성적으로 해석하였다.

Fig. 3은 유입공기의 온도가 50°C일 때, Re수의 변화에 따른 압력분포를 나타낸다. Fig. 4는 Re가 2500일 때, 유입공기의 온도 변화에 따른 압력분포를 나타낸다. Fig. 3의 경우에는 유입공기의 온도가 일정하므로 Re수가 증가함에 따라서 유입공기의 속도가 증가하여 동압이 커지므로 압력분포가 전체적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 T자부의 배관과 45도로 연결되는 주 배관부의 상하부의 압력차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 45도로 연결되는 부분의 기하학적 형상변화에 따라 유동박리가 발생하여 상부 쪽에는 재순환영역이 형성되고, 하부쪽은 유동이 가속되기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 4의 경우에는 Re수가 일정할 때 유입공기의 온도가 증가함에 따라 공기밀도의 감소에 기인한 유속증가로

동압이 커지므로 높은 압력분포를 나타낸다. 특히 유입공기의 온도가 100°C인 경우에는 T자부 및 주배관부의 압력분포가 상당히 높게 나타나는 것을 알 수 있으며, 유속이 증가함에 따라 6곳의 분기관 시작부에도 유동박리에 의한 압력분포의 상하 차이를 볼 수 있다. 화학 플랜트내 프로세스 배관은 많은 분기관과 곡관으로 구성되어 있다. 이러한 관들을 장기간 사용하면 유체내의 부유물과 스케일 등이 관벽에 침착하여 관의 직경이 감소하거나 내부가 막히게 된다. 일단 관내에 협착이 발생하면 펌핑동력 및 에너지 손실이 증가하여 시스템의 효율이 저하된다. 협착현상은 관의 단면과 형상이 급격히 변하는 지점 특히, 관이 분기되는 지점과 같이 유동박리에 의해 재순환영역이 발생하는 곳에서 주로 형성되는 것으로 알려져 있다^(5, 7). 본 연구의 결과에서는 T자관과 45도로 연결되는 주 배관부와 6곳의 분기관에서 유동박리에 의해 압력분포가 불균일하게 나타나는 것을 알 수 있으므로, 설계과정에서 이런 곳의 협착현상 발생 가능성에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

Fig. 5는 유입공기의 온도가 50°C일 때, Re수의 변화에 따른 벽면전단응력분포를 나타낸다. Fig. 6은 Re가 2500일 때, 유입공기의 온도 변화에 따른 벽면전단응력분포를 나타낸다. 압력분포에서와 마찬가지로 유입공기의 온도가 일정하고 Re수가 증가하는 경우에는 유량의 증가에 따라 유속이 커지므로 벽면전단응력분포가 전체적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Re수가 일정하고 유입공기의 온도가 높아짐에 따라 공기밀도의 감소에 기인한 유속증가로 높은 전단응력분포를 나타낸다.

배관계에는 배관의 자중과 유체의 내압 등에 의한 1차응력과 배관계 내부에 흐르는 유체의 온도에 의한 열팽창 응력인 2차응력이 복합적으로 작용하게 된다. 따라서 상세 설계과정에서 구조 해석 등을 통하여 최대 허용응력 이상의 배관계가 설계되도록 고려되었지만, 복합 배관계의 연결부의 설계조건과 실제의 운전조건에 따라서는 설계치를 초과하는 응력이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 계산변수를 Re수와 유입공기의 온도로 단순화시켜 계산을 수행하였으나 계속 진행되는 연구에서는 배관계의 설계조건, 특히 분기되는 부분의 설계조건을 다양하게 모델링하고 운전

조건 등에 대한 parameter 연구를 수행할 것이다.

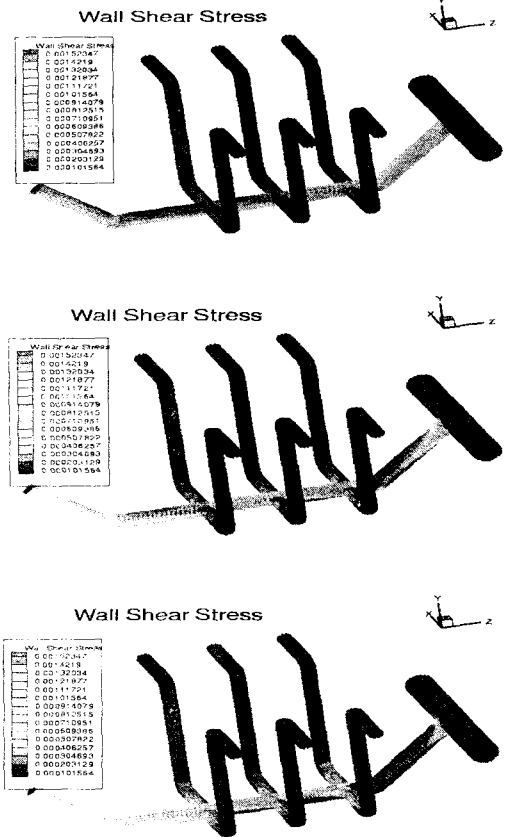


Fig. 5 Wall shear stress contour for case 1, 2, 3

4. 결론

화학 플랜트내 프로세스 배관의 설계 및 분석 시스템 개발 과제의 일부로써, 프로세스 배관계의 3차원 모델링과 열 및 유동특성 해석을 위해 배관계내의 압력분포와 벽면전단응력분포에 대해 수치계산한 결과를 요약하면 다음과 같다. 유입공기의 온도가 일정하고 Re수가 증가하는 경우에는 유량의 증가에 따라 배관내의 유속이 커지므로 동압과 벽면전단응력분포가 전체적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 Re수가 일정하고 유입공기의 온도가 높아짐에 따라 공기밀도의 감소에 기인한 유속증가로 높은 압력분포 및 전

단응력분포를 나타낸다.

참고문헌

후기

본 연구는 여수대학교 설비자동화 및 정보시스템 연구개발센터의 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

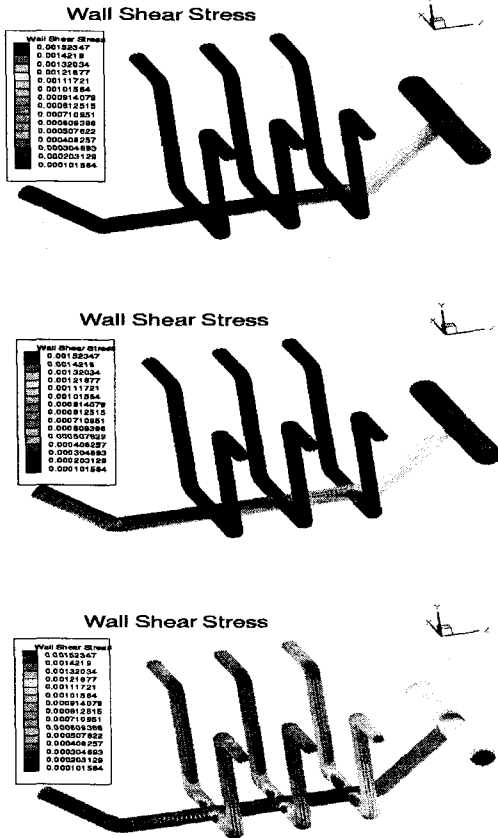


Fig. 6 Wall shear stress contour for case 4, 1, 5

- (1) 김동우, 김선정, 국정한, 1996, 산업배관공학, 도서출판 세진사.
- (2) Parsons, R. A, 1989, ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.
- (3) Warring, R. H, 1982, Handbook of Valves, Piping and Pipelines, Gulf Pub. Co.
- (4) 이정혜, 김경석, 김종현, 김경근, 최순호, 1997, "제반 배관손실과 펌프성능을 고려한 배관망의 컴퓨터지원 설계," 공기조화 냉동공학회 '97하계학술대회 논문집, pp. 33-38.
- (5) 서상호, 최철, 노형운, 유상신, 1998, "입자영상유속계와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석," 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회논문집, pp. 349-352.
- (6) 노형운, 서상호, 유상신, 2000, "PIV와 수치해석을 이용한 분기관내 맥동유동의 가시화," 대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 349-352.
- (7) Cho, Y. I., Back, L. and Crawford, D. W., 1985, "Experimental Investigation of Branch Flow Ratio, Angle and Reynolds Number Effects on the Pressure and Flow Field in Arterial Branch Models," ASME J. Biomech. Eng., Vol. 107, pp. 257-267.