

에틸렌 반응로에 대한 복합 열전달 해석

Conjugate Heat Transfer Analysis of an Ethylene Furnace

안 준(Joon Ahn)^{1*}, 박진우(Jin Woo Park)²

¹국민대학교 기계시스템공학부, ²국민대학교 대학원 기계공학과

¹School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

(Received July 21, 2015; revision received August 23, 2015; Accepted: August 24, 2015)

Abstract Conjugate heat transfer analysis for an ethylene furnace was carried out based on numerical simulation. Detailed distributions of velocity vectors, chemical species, and temperature inside the furnace are presented and discussed. Von Mises stress and heat flux at the tube surface were also evaluated to elucidate mechanisms regarding failure of the tube. Maximum stress was found at the upstream elbow of the tube, which did not coincide with the location of maximum heat flux. This implies that thermal stress at a steady state would not be a dominant component of the stress. Degradation of the material, as well as the system arrangement, should be considered in order to accurately predict the lifetime of the tube material in the furnace.

Key words Ethylene furnace(에틸렌 반응로), CFD(Computational Fluid Dynamics), Conjugate heat transfer(복합열전달), von Mises stress(von Mises 응력)

† Corresponding author, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

1. 서 론

정유 및 석유화학산업은 국가기간 산업으로서 우리나라에서는 1960년대에 태동하여 1970년대 정부의 중화학공업 우선 정책과 맞물려 크게 성장하였다. 최근까지도 꾸준한 성장세를 보여 2000년대에 들어서면서 에틸렌이나 일반 플라스틱의 생산량은 독일, 프랑스를 제치로 세계 3위로 발돋움하였다. 이와 같은 외형적 성장에도 불구하고 비산유국이라는 태생적 한계로 국제유가에 취약한 수익구조를 가질 수 밖에 없는 상태에서 설비노후화, 신흥국의 공격적인 투자 등으로 새로운 도전에 직면하고 있다.⁽¹⁾

석유화학 플랜트는 고온, 고압 환경에 노출된 배관에 인화성 폭발성 물질이 흐르게 되고 우리나라의 경우 지난 수십년간 개보수 및 증설을 반복하여 복잡한 형태로 형성되어 왔다.⁽²⁾ 국내의 석유화학 설비들은 가혹한 조건에서 20년 이상 가동된 경우가 많아 사고 위험이 증가하고 있다.⁽³⁾ 최근에도 2015년 7월 13일 울산의 석유화학 공장에서 인명피해가 발생한 사고가 보도되었고 2014년 7월 11일 인천에서 나프타가 유출되는 사고가 발생하는 등 크고 작은 사고가 끊이지 않고 있다. 석유화학 플랜트에서의 사고는 규모에 따라서 막대한 인

명 및 재산피해를 가져오고 생산설비의 가동을 중단시켜 회사의 존립을 위협하기도 하므로 높은 수준의 안전대책이 요구된다.⁽¹⁾

국내에서 1996년부터 2008년까지 발생한 중대 산업사고 130건 중 51건이 정유 및 석유화학 시설에 집중되어 있다. 석유화학 시설 중에는 저장탱크, 배관 및 반응로가 전체 사고설비의 55%를 차지하고 있는 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ 사고 원인으로는 우리나라의 경우 안전철차 미준수 등의 인적 오류가 62%로 가장 크고 기계 손상이 25%로 나타나고 있으나⁽⁴⁾ 비슷한 기간 동안 미국에서는 기계 손상이 44%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다.⁽⁵⁾ 이러한 추세를 볼 때 우리나라도 노후 설비가 파괴되면서 발생하는 사고의 비율이 높아질 것으로 전망된다.

사고가 집중적으로 발생하여 고위험 시설로 볼 수 있는 저장탱크, 배관, 반응로 중에서는 반응로가 가장 고온 조건에 노출되어 있고 값비싼 내열재료로 제작하고 있다. 국내에서도 1999년 울산에 위치한 석유화학 공장의 증질유 분해공정에서 열교환기로 연결되는 재순환 배관이 파열되는 사고가 발생한 사례가 보고되고 있다.⁽⁶⁾ 대표적인 석유화학 플랜트의 반응로인 에틸렌 분해 튜브의 경우 10만 시간(11.4년)의 수명으로 설계되

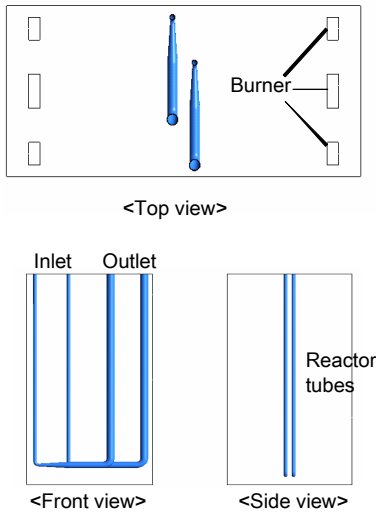


Fig. 1 Numerical modeling of reactor.

지만 설치 형태나 운전 조건 등에 따라 실제 수명은 3만에서 18만 시간까지 분포한다.⁽⁷⁾ 따라서 배관 파열에 따른 사고 예방을 위해서는 응력이 집중되어 설계 수명보다 빠르게 손상되는 부분을 찾아 적절한 안전 대책을 수립해야 한다.

사고가 발생한 에틸렌 분해를 위한 반응로 배관에 대해서는 사고 후에 파열된 배관을 회수하여 미세 조직을 분석하여 사고 원인을 파열에 의한 침탄⁽⁸⁾ 또는 조직변성⁽⁷⁾으로 제시하고 적절한 버너의 배치, 주기적인 온도 모니터링 등을 해결책으로 제안하였다.⁽⁸⁾ 그러나 실제 반응로 내부 및 튜브의 온도분포를 제시하지는 못하였다. 버너 배치를 변경하여 배관의 파열 문제를 해결하면서 석유화학 제품의 수율을 확보하기 위해서는 분해로 내부의 자세한 온도분포 자료가 필요하게 된다.

에틸렌 분해 반응로 내부의 온도 분포는 측정이 어렵고 주로 수치해석을 통한 연구가 발표되고 있다. Lan et al.⁽⁹⁾은 에틸렌 분해로에 대해 연소 반응을 포함한 전산유체해석을 수행하였고 배가스 온도 및 화학 반응 생성물을 잘 예측할 수 있음을 보였다. 그러나 사고가 발생하는 반응로 튜브의 열응력을 포함한 응력을 제시하지 않았다. 이에 본 연구에서는 에틸렌 반응로에 대해 복합열전달 해석을 수행하여 열응력을 포함한 응력 분포를 구하고 사고 취약 부위를 찾아 사고 예방 대책을 수립하는 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 기법

계산 영역은 Lan et al.⁽⁹⁾의 논문을 참조하여 Fig. 1과 같이 실제 에틸렌 분해로의 1/4이 되도록 구성하였다. 결

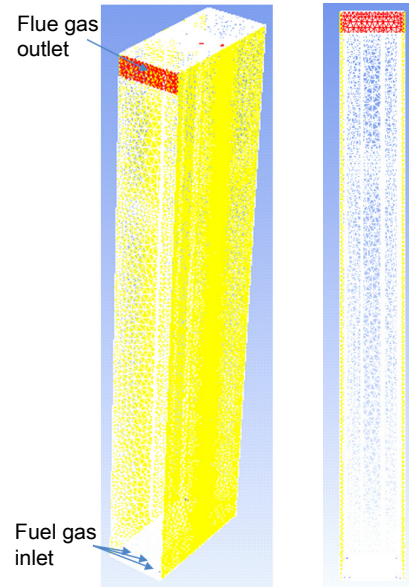
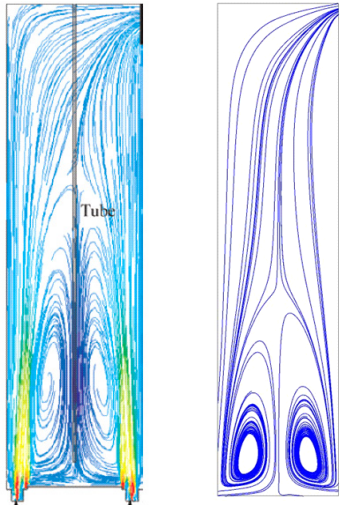


Fig. 2 Grid system.

격적으로 분해로는 13.2 m×1.5 m×3.2 m 크기의 직육면체로 모형화하였다. 분해로에는 6개의 직사각형 형태의 버너를 배치하였고 2개의 U관 형태의 반응관을 넣었다. 튜브의 직경은 논문의 도면을 참조하여 입구에서는 50 mm, 출구에서는 100 mm가 되도록 하였고 두께는 6 mm로 설정하였다. 튜브의 재질은 실제 석유화학 플랜트에 사용되는 KHR 45 A로 설정하여 해당 재료의 물성을 계산에 반영하였다.

격자는 Fig. 2에 보인 것과 같이 67만 개의 비정렬 격자로 구성하였다. 경계조건으로 버너 및 튜브 입구에 질량유량 조건을 부과하였고 튜브 출구 및 로 출구에는 출구 조건을 부과하였다. 앞 뒤 벽면 및 위 아래 벽면에는 표준 벽함수 조건을 주었고 튜브가 반복되는 좌우 면에는 주기조건을 부과하였다. 연료의 경우 버너 위치에서 예혼합 상태로 공급하였고 연료인 메탄(CH₄)의 유량을 0.01 kg/s, 과잉공기비 1.15가 되도록 질량유량을 부과하였다. 연료-공기 혼합물의 온도는 버너 위치에서 300 K로 설정하였다. 튜브에서는 에틸렌 대신 공기를 공급하였고 입구온도 400 K, 유량 3 kg/s로 경계조건을 부과하였다.

지배방정식으로는 연속방정식과 비압축성 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 화학종 방정식을 해석하였다. 연속방정식과 운동량방정식은 압력기반의 SIMPLE 알고리즘으로 연결하였다. 운동량방정식에서 난류모형은 유사한 문제에 대하여 검증된⁽⁹⁾ 표준 *k*-*e*모형을 사용하였다. 복사열전달은 복사전달 방정식을 해석하여 고려하였다. 복사모형은 에너지 방정식과 연계하기 쉽고 정확도를 갖춘 2×2의 구분종좌법(DO : Discrete Ordinate)



Lan et al.⁽⁹⁾ Present study
Fig. 3 Flue gas streamlines.

모형⁽¹⁰⁾을 도입하여 고려하였다. 복사 물성은 회체기체가중 모형(WSGGM : Weighted sum of gray gases model)으로 계산하였다.⁽¹¹⁾ 버너에서의 연소는 선행 연구⁽⁹⁾에서 적용한 확률밀도 함수법보다 정밀하고 자세한 화학종 정보를 제공하는 CH₄-Air 2 Step 방법으로 묘사하였고 난류-화학반응 관계는 EDC(Eddy Diffusivity Concept) 모형으로 고려하였다.

3. 결과 및 토의

수치해석을 통해 구한 반응로 내부의 속도분포를 보면(Fig. 3) 반응로 튜브 외부에서 버너에서 공급된 혼합기는 연소과정을 거치며 출구로 나가고 반응로 튜브에 공급된 공기는 튜브를 통해 출구로 빠져나가는 형태를 보인다. 튜브 내부의 화학반응을 고려하지 않았음에도 불구하고 전체적인 유동형태는 Fig. 3에 비교한 것과 같이 선행연구⁽⁹⁾와 유사하게 나타났다.

선행연구⁽⁹⁾에서는 튜브 내부의 속도분포를 제시하지 않고 있으나 튜브의 응력을 해석하기 위해서는 내부의 속도 분포가 중요하다. Fig. 4(a)에 제시한 속도 벡터 분포를 보면 튜브 외부에 비해 내부의 속도가 훨씬 빠른 것을 확인할 수 있다. 반응로 튜브의 곡관 부위에서 발생하는 2차 유동을 확인하기 위하여 해당 부위의 유선을 Fig. 3(b)에 제시하였다. U자관 형태의 튜브에서 첫 번째 꺾어지는 부위에 유동 박리가 발생하고 주유동이 가속되는 것을 관찰할 수 있다.

반응로 연소실 내부의 화학종 분포로부터 연소 특성을 살펴보면, 연료인 CH₄는 (Fig. 5(a)), 버너 주변에 분포하고 연소과정을 거치면서 사라지는 분포를 보이며

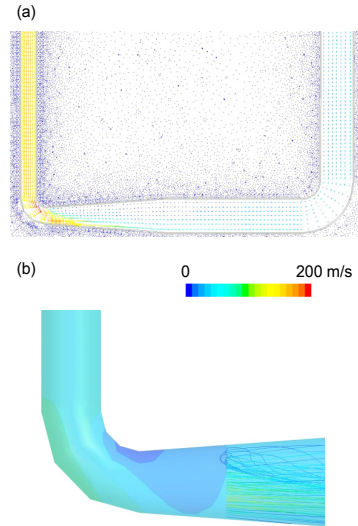


Fig. 4 Flow field from CFD; (a) Velocity vectors; (b) Streamlines inside the reactor tube.

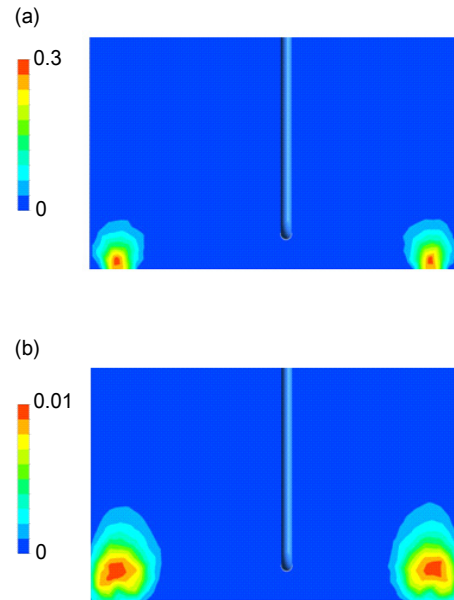


Fig. 5 Chemical species distribution(mass fraction); (a) CH₄; (b) CO.

선행연구⁽⁹⁾와 같이 최고 농도는 바닥면으로부터 약 20 cm 떨어진 위치에서 관찰되었다. 연소 안정성을 나타내는 CO의 경우(Fig. 5(b)), 최대값이 연료보다는 하류 위치인 화염면 부근에서 나타나고 하류로 진행하면서 사라지는 분포를 보여 안정적인 연소가 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

반응로 연소실 내부의 온도분포(Fig. 6) 또한 선행연구⁽⁹⁾에 제시된 온도분포의 등온선 범위가 다소 넓어

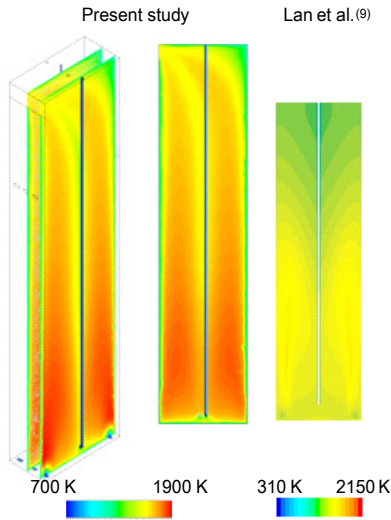


Fig. 6 Temperature distribution.

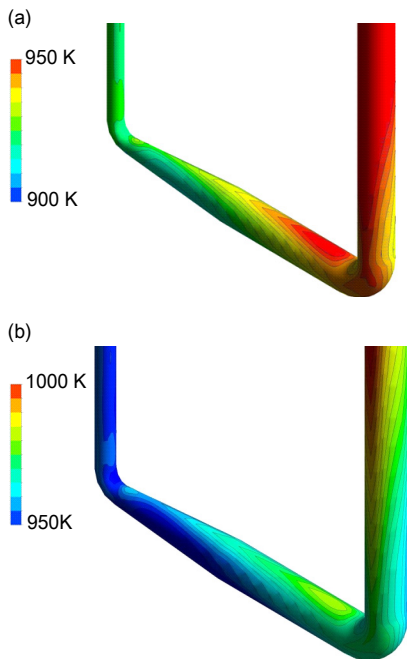


Fig. 7 Temperature distribution on the reactor pipe surface; (a) inner surface; (b) outer surface.

정확한 비교는 어렵지만 전체적으로 유사한 형태를 보인다. 화염온도인 최고 온도는 약 2,000 K로 유사하지만 연소실 출구온도는 약 200 K 높게 계산되었다. 이와 같은 차이는 본 해석에서 흡열 반응인 반응관 내부의 열분해 반응을 고려하지 않아 발생한 것으로 생각된다. 반응관이 보다 고온에 노출되어 보수적으로 열응력을 예측할 수 있을 것으로 기대하고 계산을 수행하였으나 온도 불균일성에 의해서도 열응력이 발생할

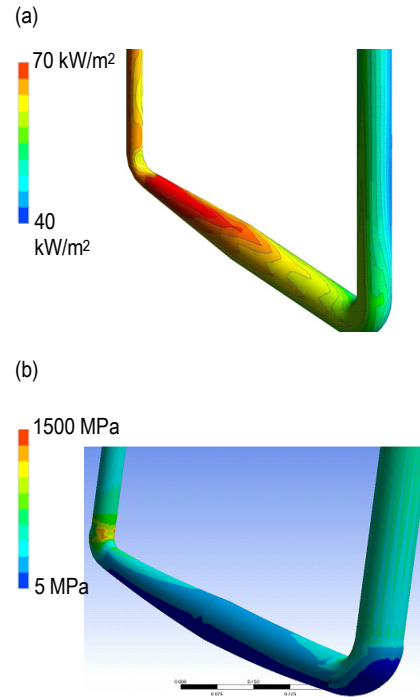


Fig. 8 Stress distribution on the reactor pip surface; (a) heat flux; (b) von Mises stress.

수 있으므로 향후 반응관 내부의 화학반응을 포함한 해석을 수행할 것이다.

반응관 표면 및 안쪽 면에서의 온도 분포를 Fig. 7에 제시하였다. 파이프 내부의 유체가 가열되면서 하류로 갈수록 온도가 높아지는 경향을 보인다. 재순환 유동 등으로 열전달이 활발하지 않을 것으로 예상되는 파이프 하류에서 연소가스 유동의 반대편을 중심으로 고온 영역이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 6 mm 두께의 파이프에서 내부, 외부의 온도 차가 30 K 정도 발생하는 것을 볼 수 있고 내부보다 외부에서 유동방향의 온도변화가 큰 분포를 보이고 있다.

반응관의 열유속 및 응력분포를 Fig. 8에 제시하였다. 열유속(Fig. 8(a))은 외부유동과 상대적으로 온도차가 큰 파이프 상류쪽에서 대체로 크게 나타나고 있다. 열응력과 기계적응력을 포함한 von Mises 응력 분포를 보면(Fig. 8(b)), 최대 응력은 U자 관의 상류쪽 관절 부위에서 발생하는 것으로 나타났다. 응력분포가 열유속 분포와 상이하게 나오는 것으로 보아 전체 응력에서 열응력이 절대적이지는 않은 것으로 판단된다. 따라서 고온 조건에서 설계 수명보다 3배 이상 빠르게 파괴가 진행되는 것은 순간적인 열응력보다 조직 변성이 원인으로 생각되고 반응관 내부의 화학종, 온도, 속도 분포를 통해 침탄 속도 등을 예측하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 에틸렌 반응로에 대하여 복합열전달 해석을 수행하여 반응관에서 최대응력이 작용하는 부위를 찾아보았다. 해석결과 U자 관에서 상류 관절 부위에서 최대응력이 발생하는 것을 확인하였고 종합응력분포는 열유속분포와 상이하게 나타나는 것을 관찰하였다. 정상상태 해석 결과로 열응력이 전체 응력에서 차지하는 비중은 절대적이지 않으나 재료의 변성 등에 큰 영향을 미치므로 재료의 변성, Creep 등을 고려하여 종합적인 수명예측이 필요할 것이다. 향후, 본 연구에서 고려하지 않았던 반응관 내부의 화학반응을 고려한 해석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 산업기술혁신사업의 일환으로 수행한 결과이며 지원에 감사드립니다(No. 20132 010500060).

References

1. Kim, T. G., Kim, J. H., Kim, Y. D., and Kim, K. I., 2002, Current risk management status of the Korean petrochemical industry, *J. Loss Prevention*, Vol. 15, pp. 311-318.
2. Jeong, S. Y., Yoon, K. B., Duyet P. V., Yu, J. M., and Kim, J. Y., 2013, Structural integrity evaluation by system stress analysis for fuel piping in a process plant, *J. Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 3, pp. 44-50.
3. Jeong, G. S. and Baik, E. S., 2014, A study on the improvement of safety management of hazardous chemicals handling in the workplace, *J. Korean Institute of Fire Sci. Eng.*, Vol. 28, No. 1, pp. 12-19.
4. Kim, K. R., Hwang, S. Y., and Kim B. H., 2012, A study on the safety management of the petrochemical complex area, *J. Korean Institute of Fire Sci. Eng.*, Vol. 26, No. 1, pp. 38-42.
5. Huang, R. H., Yang, C. L., and Kao, C. S., 2012, Assessment model for equipment risk management : petrochemical industry cases, *Safety Sci.*, Vol. 50, pp. 1056-1066.
6. Fire Insurance Association of Korea, 1999, Fire case report, *J. Korean Institute of Fire Sci. Eng.*, Vol. 13, No. 2, pp. 33-36.
7. Guan, K., Xu, H. and Wang, Z., 2005, Analysis of failed ethylene cracking tubes, *Eng. Failure Analysis*, Vol. 12, pp. 420-431.
8. Khodamorad, S. H., Fatmehsari, D. H., Rezaie, H. and Sadeghipour, A., 2012, Analysis of ethylene cracking furnace tubes, *Eng. Failure Analysis*, Vol. 21, pp. 1-8.
9. Lan, X., Gao, J., Xu, C., and Zhang, H., 2007, Numerical simulation of transfer and reaction process in ethylene furnaces, *Trans. IChemE, Part A*, Vol. 85, pp. 1565-1579.
10. Howell, J. R., Menguc, M. P. and Siegel, R., 2010, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th Ed., Taylor and Francis, pp. 640-654.
11. Smith, T. F., Shen, Z. F., and Friedman, J. N., 1982, Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, No. 4, pp. 602-608.