



가정용 연료전지 시스템 내부 수소 누출의 비정상 및 정상 상태에 관한 전산 해석

안재욱 · 남진현 · 신동훈 · 김영규* · †정태용

국민대학교 기계자동차공학부, *한국가스안전공사 가스안전연구원
(2007년 9월 6일 접수, 2007년 11월 27일 채택)

A CFD Study on Unsteady and Steady State of the Hydrogen Leakage for Residential Fuel Cell System

Jae Uk Ahn · Jin Hyun Nam · Donghoon Shin · Young-Gyu Kim* · †Tae-Yong Chung

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received September 6 2007, Accepted November 27 2007)

요 약

본 연구는 국내 F사의 가정용 연료전지 시스템의 실제 크기를 모델로 하여, 시스템 내부에 4가지 구성품(개질기, 연료전지 스택, 가습기, 탈황기)이 시스템 체적 중 약 30%를 차지하고 있을 때, 환기 면적과 수소 누출량을 변화시키면서 전산 해석을 수행하였다. 환기 면적 1%, 수소 누출량 1%인 경우, 비정상 상태 전산 해석 결과, 수소는 약 50초 후 누출 지점 근처에서 농도 변화를 확연히 감지할 수 있었으며, 200초 후, 시스템 하부에 비해 상부에서 농도 증가를 뚜렷하게 알 수 있었다. 환기 면적 1%, 수소 누출량 1%, 3%, 5%의 정상 상태 해석 결과, 수소 누출량이 5%가 되면 시스템 전 영역에서 수소의 인화 하한(4%, 체적기준)에 도달하는 것을 확인하였다. 환기 면적 2%, 수소 누출량 1%인 경우, 비정상 상태 전산 해석 결과, 수소는 약 60초 동안은 누출 지점에서 하부측으로 농도 증가를 보이다가, 점차 상부측 환기구를 통해 배출되어 약 250초가 지난 후 정상 상태에 도달하였다. 환기 면적 2%, 수소 누출량 1%, 3%, 5%의 정상 상태 해석 결과, 수소 누출량이 5%가 되더라도 대부분의 영역에서 경보 농도 수준(1%, 체적기준) 이하임을 확인할 수 있었으나, 누출 지점으로부터 상부쪽으로 위험 영역이 존재함을 알 수 있었다.

Abstract – The residential fuel cell system was modeled as a box-shaped chamber with vent openings, filled with various components such as reformer, desulfurizer, fuel cell stack and humidifier. When the vent openings are 1% of the total surface and hydrogen leakage 1%, hydrogen concentration is around 0.1% higher than the other regions from leak points in the chamber at 30 seconds and hydrogen concentration is increased from 0.3% to 0.7% in the upper region of the system after 200 seconds. When the vent openings are 1% of the total surface and hydrogen leakage 1%, 3%, 5%, the steady state result of CFD, 5% of hydrogen leakage is reached the lowest ignition limit in the system. When the vent openings are 2% of the total surface and hydrogen leakage 1%, hydrogen concentration is increased in the bottom of the system for 60 seconds. After 250 seconds, hydrogen concentration is reached the steady state in the system. As the vent opening of the total surface increased from 1% to 2%, averaged hydrogen mole fraction is under 1% in the system, however, upper regions of the system from the hydrogen leakage points are shown over 1% of hydrogen mole fraction.

Key words : Hydrogen, Hydrogen safety, Hydrogen leakage, Hydrogen CFD

I. 서 론

지속적인 에너지 사용량 증가에 따른 에너지 자원의

확보 및 온실가스 배출 억제를 위한 청정에너지로서 수소 에너지의 개발이 가속화되고 있다[1]. 수소에너지는 친환경적인 특성 뿐만 아니라 다양한 에너지원으로부터 제조 가능하지만, 폭발 범위가 넓고 폭발 화염 전파 속도가 매우 빠른 가연성 가스로 제조, 저장, 시스템 운

†주저자:tychung@kookmin.ac.kr

전 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 가지고 있다[2]. 따라서, 수소 에너지의 이용을 위해서는 안전에 관한 충분한 이해와 이에 따른 안전성을 확보해야 한다. 선진국에서는 수소 생산, 저장 및 이용 시스템에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 그 기술이 어느 정도 축적되어 있으며, 일부 기술은 상업화를 위한 연구에 박차를 가하고 있다[3]. 그러나 수소의 안전에 대한 연구는 일부 진행되어 있지만, 아직 많은 부분에서 밝혀지지 않은 상태이다. 미국의 경우, 2003년 에너지성(DOE) 과제로 수소 안전 코드 관련 현황 파악 및 위험성 감소를 위한 연구가 시작되었다[4]. 국내에서는 수소 안전에 대한 자체 기술개발은 미약한 실정으로 해외 기술의 검토가 이루어지고 있는 상황이다. 본 연구에서는 막연하게 인식되고 있는 수소 에너지의 위험성에 대하여 상용화가 추진 중인 국내 F사의 가정용 연료전지 시스템 내부에서 수소가 누출되었을 경우에 대하여 전산 해석을 통하여 알아보고자 하였다.

II. 전산 해석

2.1. 해석 대상

본 연구에서는 현재 가정용 연료전지 시스템이 완전히 공개되지 않은 상황에서 1kW 급 가정용 연료전지 시스템의 실제 체적 0.8 m(width)×0.99 m(hei-ght)×0.35 m(depth)을 모델로 하여 한국가스공사와 연료전지 제작 업체인 국내 O사의 연료전지 실험 모델을 기초로 하여 1kW급 가정용 연료전지 시스템에서 전력 생산을 위한 최소의 부품들로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 내부에 개질기, 연료전지 스택, 가습기 및 탈황기가 전체 체적의 약 30%를 차지하고 있을 것으로 가정하였다. 수소 누출 지점은 확인 가능했던 실험 모델의 환기구와

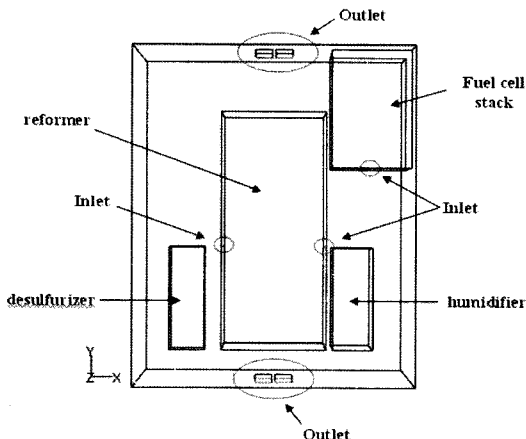


Fig. 1. Control volume for simulation.

윗면과 아랫면에 위치하여 환기구와 비교적 먼 곳으로 누출 지점을 잡기 위하여 연료전지 시스템의 바닥면에서 높이 0.4 m, 폭 0.175 m의 좌, 우 위치에서 1/8 인치 관의 단면을 통해 직각 방향으로 개질기로부터 누출되고, 시스템 바닥면에서 높이 0.64 m, 폭 0.175 m의 위치에서 연료전지 스택 아랫면으로부터 1/8인치 관의 단면을 통해 직각 방향으로 누출될 경우로 가정하였다. 이 3곳에서 수소가 누출되었을 경우, 환기 면적과 누출량의 변화가 시스템 내부에서 수소의 경보 농도 수준(1%, 체적 기준)[5]과 인화 하한(4%, 체적기준)[5]에 미치는 영향에 대하여 알아보고자 비정상 및 정상 상태로 전산 해석을 수행 하였다.

2.2. 해석 방법

전산 해석에는 CFD 상용코드인 Fluent 6.2(Fluent Inc.)를 사용하였다. 시스템 내 난류 영향을 고려하기 위하여 standard k-epsilon 모델을 사용하였으며, Y축 방향으로 중력가속도 9.81 m/s²을 주었다. 수소의 물성치는 상온(300 K)에서 열전도율 0.198 W/m²K, 점성을 8.93×10⁻⁶ kg/m²s, 물질확산을 109.9×10⁻⁶ m²/s를 적용하였다[6]. 수소는 누출 지점에서 유속을 통해 누출량을 조절하였고, 난류강도 5%, 수력직경 3 mm의 조건을 적용하였다. 환기구(outlet)는 1atm의 대기 상태로 설정하여 환기구를 통해 수소와 공기의 유입 및 유출이 이루어질 수 있도록 하였다.

2.3. 해석 조건

2.3.1. 수소의 이용율

1kW 급 가정용 연료전지를 기준으로 하여 실제 유입되는 수소의 약 40%가 1kW 전력 생산에 이용될 것으로 추측하였다. 이 경우, 수소의 발열량이 242.76 kJ/mol이므로[6], 수소는 약 2.54×10⁻⁴ m³/s의 유량으로 시스템 내부에 유입될 것으로 판단하였다.

2.3.2. 환기 면적

수소를 대기로 방출시키는 지점은 주위의 모든 구성품들 보다 가장 높은 지점에 위치해야 한다[5]는 결론으로부터 환기구를 시스템의 윗면에 위치하도록 하였고, 아랫면에서 공기가 유입되어 윗면 환기구를 통해 방출될 수 있도록 아랫면에도 환기구를 고려하였다. 1kW급 가정용 연료전지 시스템 외부 전체 면적은 2.8370 m²이다. 환기 면적이 전체 면적의 약 1%를 차지하고 있을 경우, 윗면 0.0147 m², 아랫면 0.0147 m²으로 하였고, 환기 면적이 전체 면적의 약 2%일 경우, 윗면 0.04998 m², 아랫면 0.0147 m²으로 하였다.

2.3.3. 수소의 누출 유속

수소는 개질기에서 2지점, 연료전지 스택에서 1지점, 총 3지점에서 누출된다고 가정하였으며, 누출 유속은 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s로 하였다. 각각의 유속은 전력 생산에 사용된 수소량의 1%, 3%, 5%에 해당한다.

III. 전산 해석 결과

3.1. 비정상 상태 전산 해석 결과

3.1.1. 환기 면적 1%, 수소 누출량 1%

Fig. 2에서 Fig. 5까지는 환기면적 1%, 수소 누출량 1%에 대한 비정상 상태 전산 해석 결과를 누출 지점인 z=0인 면에서 확인하였다. Fig. 2에서 약 50초가 지난 후 누출량이 많은 오른쪽 부분에서 농도가 높아지기 시작하여 Fig. 3에서 100초가 지난 후부터 개질기 왼쪽에서 누출된 수소의 확산을 확연히 볼 수 있었으며, Fig. 4에서 누출량이 많은 시스템 오른쪽에서 위쪽 환기구로 수소가 상승하는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 4에서 155초를 전후로 개질기 왼쪽에서 누출되어 시스템 왼쪽에서 확산되던 수소 역시 상승을 시작하였다.

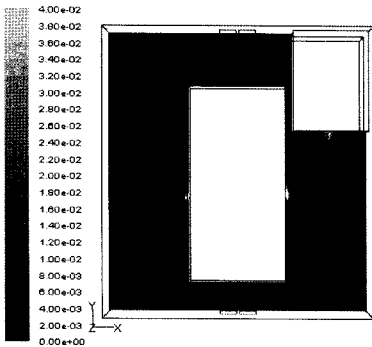


Fig. 2. H₂ mole concentration with ventilation area 1%, hydrogen leakage 1% at 50 sec.

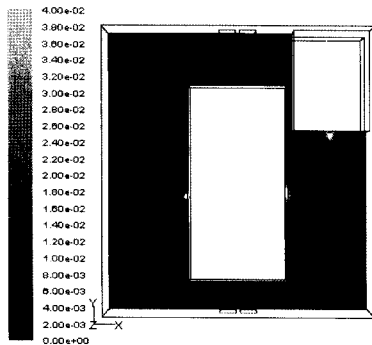


Fig. 3. H₂ mole concentration with ventilation area 1%, hydrogen leakage 1% at 100 sec.

Fig. 5에서 200초가 되었을 경우 시스템 윗부분에서 수소의 농도 증가를 인식할 수 있었다.

3.1.2. 환기 면적 2%, 수소 누출량 1%

Fig. 6에서부터 Fig. 9까지는 환기 면적 2%, 수소 누출량 1%인 경우에 대한 비정상 상태 전산 해석 결과를 누출 지점인 z=0인 면에서 확인하였다. Fig. 6에서

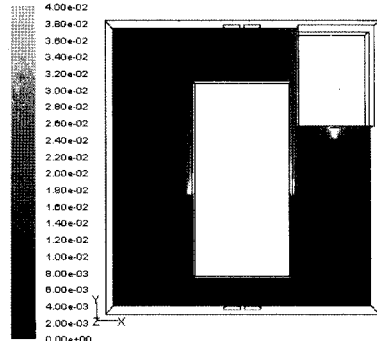


Fig. 4. H₂ mole concentration with ventilation area 1%, hydrogen leakage 1% at 155 sec.

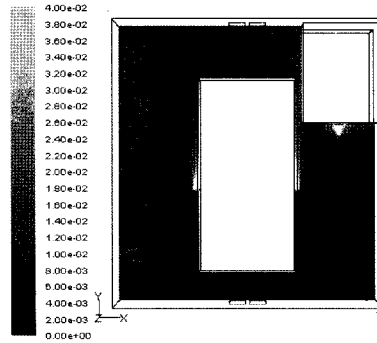


Fig. 5. H₂ mole concentration with ventilation area 1%, hydrogen leakage 1% at 200 sec.

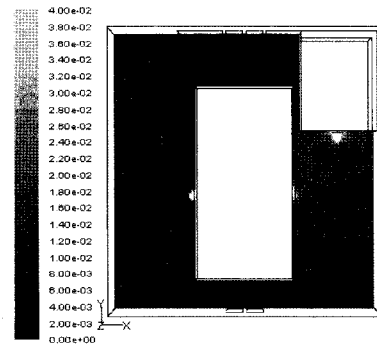


Fig. 6. H₂ mole concentration with ventilation area 2%, hydrogen leakage 1% at 60 sec.

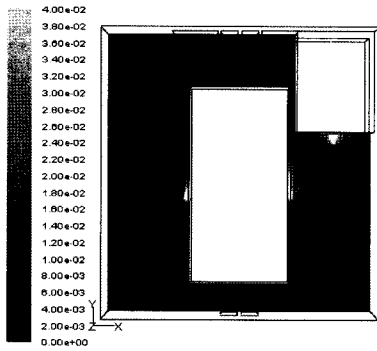


Fig. 7. H₂ mole concentration with ventilation area 2%, hydrogen leakage 1% at 150 sec.

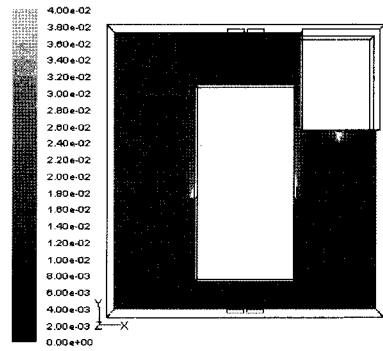


Fig. 10. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 1%, hydrogen leakage 1%.

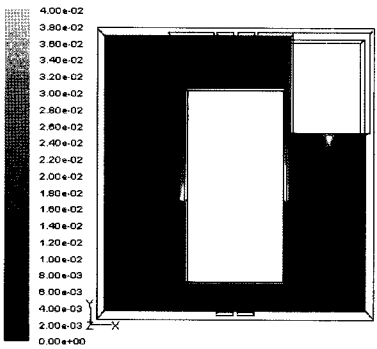


Fig. 8. H₂ mole concentration with ventilation area 2%, hydrogen leakage 1% at 200 sec.

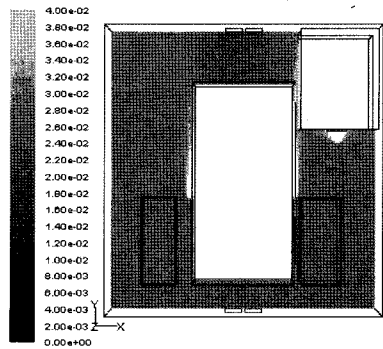


Fig. 11. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 1%, hydrogen leakage 3%.

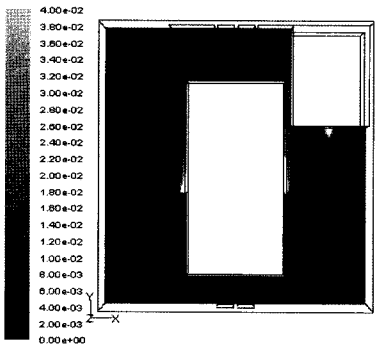


Fig. 9. H₂ mole concentration with ventilation area 2%, hydrogen leakage 1% at 250 sec.

약 60초 정도까지 수소 농도는 시스템 상부측에서 하부측으로 증가하다가, 수소는 점차 상부측 환기구를 통해 빠져 나가면서 Fig. 7에서 약 150초를 전후로 하여 하부측 수소의 농도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 150초가 지난 후부터 계속 하부측에서 상부측으로 농도가 증가하다가 Fig. 8에서 200초를 전후로 환기되는 수소의 양이 많아지면서 상부측 농도가 점차 줄어

드는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9에서 약 250초가 지난 후 누출된 수소는 시스템 내에서 정상 상태에 도달하는 것을 확인하였다.

3.2. 정상 상태 전산 해석 결과

Fig. 10에서 Fig. 15까지는 환기면적 1%, 2% 모델에 따른 수소 누출량 1%, 3%, 5%에 대한 정상 상태 전산 해석 결과를 누출 지점인 z=0인 면에서 확인하였다.

3.2.1. 환기 면적 1%, 수소 누출량 1%

Fig. 10에서 수소가 3곳의 누출 지점으로부터 누출되었을 경우, 시스템 대부분 영역에서 수소는 체적 평균 1.3%를 나타내어 공통적으로 사용되는 경보 농도인 1% 수준에 도달하였음을 알 수 있었으며, 누출이 시작되는 지점에서는 수소의 인화 하한인 4%(체적기준)를 나타내었다.

3.2.2. 환기 면적 1%, 수소 누출량 3%

Fig. 11에서 시스템 내부의 수소는 체적 평균 2.3%를 나타내었으며, 누출 지점에서부터 위쪽으로 인화 하한

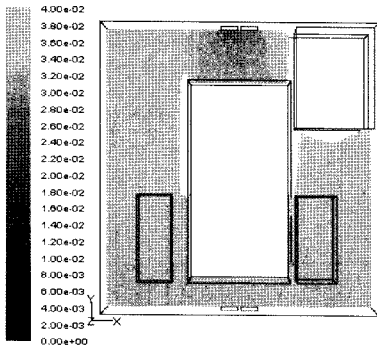


Fig. 12. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 1%, hydrogen leakage 5%.

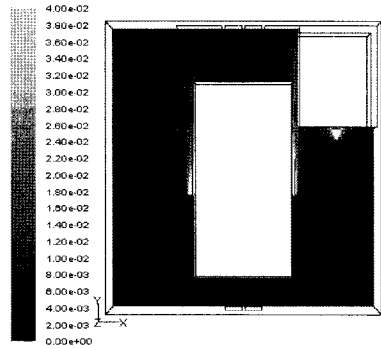


Fig. 14. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 2%, hydrogen leakage 3%.

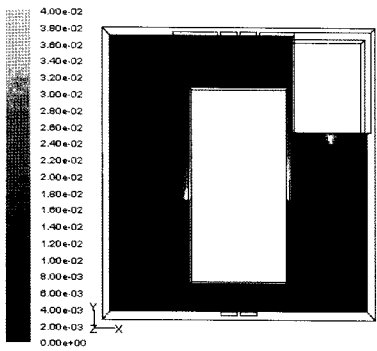


Fig. 13. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 2%, hydrogen leakage 1%.

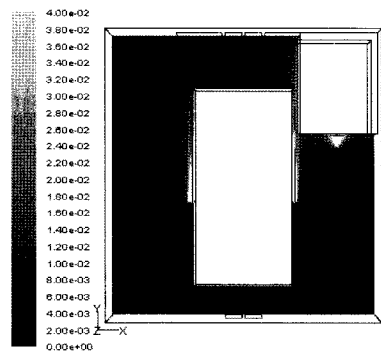


Fig. 15. Distribution of H₂ mole fraction for ventilation area 2%, hydrogen leakage 5%.

에 이르는 영역이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 사각지역(모서리 부근)에서는 수소의 몰분율이 평균보다 0.5% 정도 높게 나타남을 알 수 있었다.

3.2.3. 환기 면적 1%, 수소 누출량 5%

Fig. 12에서 시스템 내부의 전 영역에 걸쳐 수소는 체적 평균 3%를 나타내었으며, 인화 하한을 초과하는 영역이 앞서의 두 경우에 비하여 넓게 분포함을 확인할 수 있었다.

3.2.4. 환기 면적 2%, 수소 누출량 1%

Fig. 13에서 누출 지점에서 위쪽 방향으로 경보 농도 수준을 넘는 지역이 나타남을 볼 수 있었으나, 환기 면적이 1%에서 2%로 증가하여 수소 환기량이 많아져 시스템 대부분 영역에서 환기면적 1%인 경우 보다 적은 체적 평균 0.15%를 나타내었다.

3.2.5. 환기 면적 2%, 수소 누출량 3%

Fig. 14에서 시스템 내에서 수소는 체적 평균 0.28%를 나타내고 있었으며, 누출 지점으로부터 상부쪽으로

수소의 농도(체적기준)가 1%에서 3% 사이의 영역을 보이는 지역은 Fig. 13과 같이 누출점 부근임을 확인하였다.

3.2.6. 환기 면적 2%, 수소 누출량 5%

Fig. 15에서 수소는 상부쪽에서 몰분율이 높게 나타났지만, 체적 평균 0.37%를 나타내었으며, 누출량이 1%, 3%, 5%인 경우 모두 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에서 환기구 부근에서 유입 공기의 영향에 의해 수소의 몰분율이 적게 나타남을 확인하였다.

IV. 결 론

가정용 연료전지 시스템에서 수소가 누출되었을 경우에 대하여 전산 해석을 수행해 본 결과, 환기 면적이 1%이고, 전력 생산에 필요한 수소량 중 약 1%가 누출될 경우, 시스템 내부에서 수소는 보통의 경보 농도 수준(1%, 체적기준)에 도달함을 알 수 있었으며, 5%가 누출되었을 경우에는 수소의 인화 하한(4%, 체적기준)에 도달함을 알 수 있었다. 시스템의 환기 면적을 1%에서

2%로 증가시켰을 경우 수소 누출량이 5%가 되더라도 수소는 시스템의 대부분의 영역에서 경보 농도 수준(1%, 체적기준) 이하임을 확인할 수 있었으나, 누출 지점으로부터 상부쪽으로 위험 영역이 존재함을 확인할 수 있었다.

수소가 가볍기 때문에 막연하게 작은 환기구만이 존재하더라도 수소가 충분히 빠져 나갈 것으로 인식되고 있으나, 본 전산 해석 수행 결과 시스템 내부에서 강제 배기 방식이 아닌 자연 배기 방식을 사용했을 경우 충분한 환기 면적이 존재하지 못한다면, 시스템 내부에서 수소가 인화 하한에 도달할 가능성이 상당히 높음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 국민대학교 교내연구비의 지원과 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2006-N-HY12-P-01)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Winebrake, J.J. and B.P. Creswick, "The Future of Hydrogen Fueling Systems for Transportation: An Application of Perspective-based Scenario Analysis Using the Hierachy Process", *Technological Forecasting & Social Change*, **70**, 359, (2003)
- [2] Borman, G.L. and K.W. Ragland, "Combustion Engineering", McGraw Hill, New York, (1998)
- [3] Momirlan, M., T.N. Veziroglu, "Current Status of Hydrogen Energy", (2002)
- [4] U.S. Department of Energy, "Regulator Guide to Permitting Hydrogen Technologies", U.S.A., (2004)
- [5] International Organization for Standardization, ISO/TR 15916, "Technical Report", New York 10036, (2004)
- [6] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, "Thermodynamics; An Engineering Approach", 4th edition, McGraw-Hill, North Carolina State University, (2002)