

초임계 상태 이산화탄소의 정사각 직덕트 내 압축성 유동 크기 열전달의 전산해석

주광섭*·최영돈**·전건호*·김동철*·배두호*

Numerical Simulation of Carbon Dioxide Compressible Fluid Flow and Heat Transfer under Supercritical State in a Straight Duct with Square Cross Section

Kwang Sup Joo, Young Don Choi, Kun Ho Chun, Dong Chul Kim and Doo Ho Bae

Key Words: Supercritical(초임계), Carbon Dioxide(이산화탄소), Heat Transfer(열전달)

Abstract

Because of the ozone layer depletion and global warming, new alternative refrigerants are being developed. Among them, HFC refrigerants are thought promising, but some European countries are arguing that these refrigerants are also harmful to the global warming. Therefore, natural refrigerants should be considered as an eventual alternative in refrigerators and heat pumps. In the present study, the supercritical gas cooling process are computationally analysed by employing various turbulence models of carbon dioxide in a transcritical refrigeration cycle. The gas cooling process near the critical point experiences a drastic change in thermodynamic and transport properties, thus the heat transfer characteristics would be different from those of two or single phases. Based on the computational results, the correlations to estimate the near-critical heat transfer characteristics will be obtained.

기호설명

U_i : 주유동 속도

h : 열전달 계수

C_f : 마찰 계수

1. 서 론

지구 온난화 및 오존층 파괴에 따른 CFCs 사용금지 협약과 HCFCs 단계적 사용금지 지침에 따라 세계 각국은 CFCs와 HCFCs 계열 냉매의

생산 및 공급 감소 계획을 세워 놓았으며, 궁극적으로 환경친화성이 없는 냉매는 더 이상 생산하지 않으려 하고 있다. 현재 국내에서는 CFCs 및 HCFCs의 대체냉매로 HFCs 계열 냉매의 지구 온난화 지수(global warming potential, GWP)가 1300에서 3800의 범위를 나타내고 있으므로 기후협약이 강화될 경우 사용이 규제될 전망이다. 따라서 유럽의 여러 나라에서는 대체냉매로서의 천연냉매에 대한 관심이 크게 고조되고 있으며, 이를 적용하는 시스템이 매년 크게 늘고 있는 추세이다. 대체냉매로 고려되고 있는 주요 천연냉매는 이산화탄소(CO₂), 탄화수소(hydrocarbons, HCs), 암모니아(NH₃), 및 물(H₂O) 등을 포함하고 있다. 본 연구에서 고려하고 있는 이산화탄소는 환경에 미치는 영향이 거의 없어 앞으로 냉매로 각광을 받고 있으며 선진 각국에서는 환경규제에 대비하

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

여 천연냉매를 사용하는 냉동기 및 열펌프 시장을 선점하기 위해 많은 연구를 하고 있지만 아직 상용화 되어있지는 않다.

CO₂의 임계점 부근의 열전달(가열, 냉각)과정의 해석 및 실험에서 가장 중요한 사항은 임계점 부근의 열역학적 물성치가 급격하게 변하는 것이다. 유체의 비열이 급격하게 커지는 것을 비롯하여 전달물성인 열전도율도 임계점에서 대단히 커진다. 또한 점성계수도 임계점을 지나면서 급격히 감소한다. 이러한 물성치의 급격한 변화에 의해서 임계점 부근에서 열전달 특성은 기존의 열전달 특성과는 현격히 차이가 나며 일반적으로 국소 상승효과가 나타날 뿐만 아니라, 현재까지 알려진 상관식들도 적용할 수 없게 된다. 임계압력에서 액체가 기체로 되는 경우 각 상간의 구별은 없어지게 되며, 따라서 표면장력도 없어지게 된다. 비등 형태도 핵비등에서 막비등으로 변하게 되며, 시스템은 불안정해져 이 두 비등모드가 간헐적으로 반복되는 가상비등(pseudo boiling)현상도 나타나게 된다. 이와 같은 임계점 부근의 복잡한 현상과 CO₂의 증발압력이 100기압 가량으로 높기 때문에 전체적으로 임계점 부근에서 CO₂의 증발열전달 특성에 관한 연구는 미흡한 상태이다. 따라서 CO₂를 적용한 경우 임계점 이하 및 임계점 부근에서 많은 증발 열전달 실험 데이터의 확보 및 증발 열전달 경험식의 개발이 요구되고 있다. 참고적으로 지난 비압축성 유동의 수치해석 결과 (5)에서는 덕트에서의 이산화탄소의 유동은 일반 난류유동과 차이가 없으며 Dittus 와 Boelter 식의 유용성을 확인할수 있었다. 본 연구의 목적은 초임계 상태의 이산화탄소 압축성 유동에서의 열전달 해석을 통하여 비압축성 유동과 압축성 유동에 대한 열전달 특성에 대한 수치해석 결과를 비교하고 기존 상관식의 유용성 여부를 확인하며 결과적으로 차후 실험 데이터와의 비교를 통해 상관식 도출을 위한 수치해석 데이터를 확보하는 것이다.

2. 이론해석

2.1 계산모델

1cm×1cm 의 정사각 단면 직덕트에서의 난류 유동을 입구에서의 입구의 온도와 압력을 변화시키며 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 난류모

형은 대수응력 모형, 저레이놀즈수 k-ε 모형 그리고 표준 k-ε 모형이며 난류 열유속 모형은 일반적인 구배(gradient) 모형을 도입하였다.

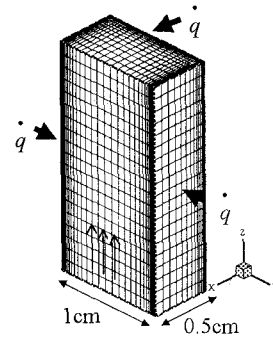


Fig.1 Model of physical system and boundary condition

2.2 지배방정식

시간 평균된 정상상태 압축성 점성유동에 대한 Navier Stokes 방정식의 형태는 다음과 같다.

평균 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (2-1)$$

평균 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-2)$$

레이놀즈응력 방정식

$$\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial t} + C_{ij} = P_{ij} + D_{ij} + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} + F_{ij} + R_{ij} \quad (2-3)$$

여기서

$$C_{ij} = U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} : \text{대류항}$$

$$P_{ij} = - \left\{ \overline{u_k u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_k u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right\} : \text{생성항}$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} - \overline{u_i u_j u_k} - \frac{p}{\rho} (\overline{u_i \delta_{ik}} + \overline{u_j \delta_{jk}}) \right\}$$

: 확산항

$$\phi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} : \text{압력 변형 응력}$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} : \text{소멸 항}$$

$$F_{ij} = \left\{ f_{ij} u_j + f_j u_i \right\} : \text{체적력 생성 항}$$

$$R_{ij} = -\Omega_k \left(u_j u_m e_{ikm} + u_i u_m e_{ijk} \right) : \text{회전 생성 항}$$

2.3 물성치 결정

압축성 유동의 특성 중 하나는 모든 격자점에서 온도와 압력에 따라 물성치가 변화하는 것이다. 하지만, 이산화탄소에 대한 물성치 상관식이 널리 알려져 있지 않은 상태로 코드 작성에 어려움이 있다. 본 수치해석에서는 유동의 압력이 일정하다는 가정하에 온도에 따른 물성치의 변화를 curve-fitting을 실시하여 코드화하였다. 현 유동장에서 이산화탄소의 밀도 범위는 대략 300kg/m^3 - 1000kg/m^3 로써 가정에 비교적 부합된다. 온도를 통해 구하여지는 물성치는 밀도, 비열, 열전도계수, 점성계수 그리고 엔탈피이다. 사용되어진 물성치는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 REPROP version 6.01에 의한 것이다.

3. 결과 및 고찰

압축성 유동해석을 위해 입구조건은 입구압력 10Mpa에서 입구온도를 110℃, 출구온도를 15℃로 일정하게 고정시킨 후 모형(ASM, 저레이놀즈수 k-ε, 표준 k-ε)과 입구 레이놀즈수, 벽면 열전달 조건의 변화에 따른 열전달계수 변화 특성을 고찰하였다. 벽면 열전달 조건의 변화를 위해 벽면 온도를 0℃, 15℃, 30℃ 일정조건으로 계산하였으며 일정 열유속 조건에 대해서도 계산하였다.

3.1 유동특성

Fig. 2는 입구조건이 입구압력 10Mpa, 입구온도 110℃, 입구 레이놀즈수 360,000에서 단면별 평균 온도에 따른 평균 주유동 속도를 나타낸 것이다. 단면에 대한 평균 질량유량이 일정함으로 온도가 낮아짐으로써 밀도가 크게 증가하여 속도가 줄어듦을 알 수 있다. 특히, 임계점 부근인 50℃에서 주유동 속도의 감속 기울기가 변화함을 알 수 있다. 주유동 속도는 난류모형 차이에 따라 변화가

거의 없이 일정한 값을 예측하였다.

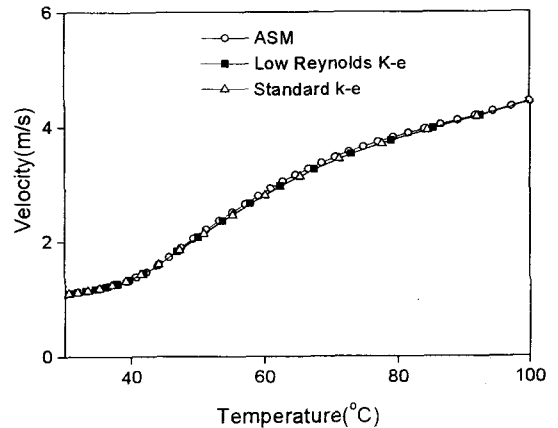


Fig. 2 Change of Average Velocity distribution in main flow direction

3.1 평균온도 단면에서의 속도 및 물성치 분포

단면 평균 온도가 임계점에 가까운 50℃ 임계점 전후인 40℃, 70℃에 대한 단면에서의 주유동의 변화 및 물성치의 변화를 고찰하였다.

Fig. 3은 평균온도별 단면에서의 주유동 속도와 온도를 단면 평균 주유동 속도와 평균 온도로 무차원하여 나타낸 것이다. 전체적으로 주유동의 발달 분포와 온도 발달분포가 비슷함을 알 수 있다. 또한 평균 단면온도가 50℃에서 주유동의 속도 기울기가 가장 큼을 알 수 있으며 온도 기울기 또한 가장 큼을 알 수 있다.

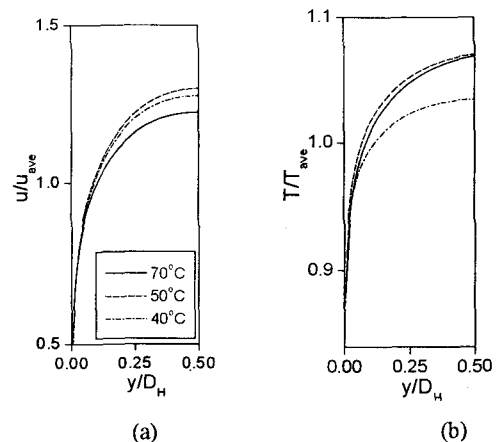


Fig. 3 Change of (a) Velocity and (b) Temperature distribution from wall

Fig. 4와 Fig. 5는 단면에서 밀도, 점성계수, 비열, 그리고 열전도계수를 단면에서의 평균 물성치로 무차원하여 나타낸 것이다. 네가지 물성치 모두 임계점 부근에서 가장 큰 기울기를 가짐을 알 수 있다. 특히, Fig. 5 (a)비열에서 평균 온도가 40℃와 50℃ 일부분의 역전 모습은 벽에서의 물성치 값이 더 작으므로써 나타나는 현상이다. 이를 통해 물성치의 적용이 제대로 이루어졌음을 알 수 있다.

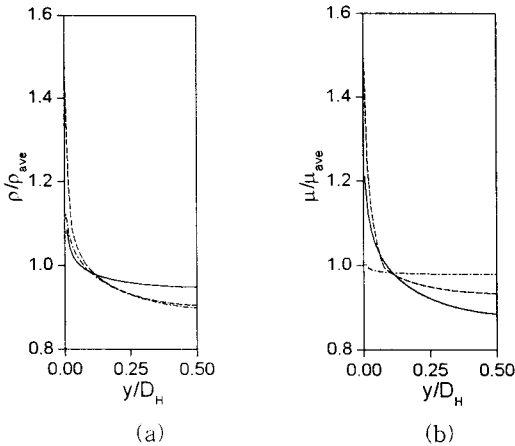


Fig. 4 Change of (a)Density and (b) Viscosity distribution from wall

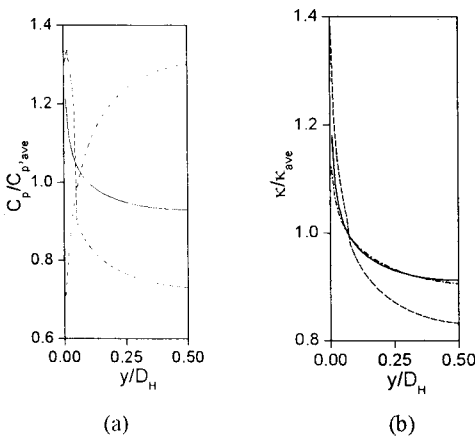


Fig. 5 Change of (a)Specific Heat and (b) Conductivity distribution from wall

3.2 마찰계수

Fig. 6은 단면별 평균 온도 발달에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 실선은 일반적으로 알려진 마찰계수 상관식인 Blasius Eq.이며 Low-Reynolds $k-\epsilon$ 모형과 수치해석 결과를 비교하였다. 기존에 알려진 레이놀즈수만의 함수인 상관식과 다른 차이를 보이고 있는데 초임계 이산화탄소의 특성 즉, 물성치의 영향인지는 좀더 많은 연구를 필요로 한다.

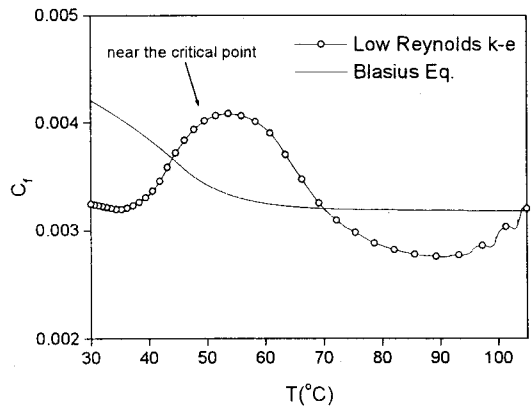


Fig. 6 Change of friction coefficient with respect to Temperature

3.3 열전달계수

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 입구 레이놀즈수, 모형별 열전달계수를 수치해석한 결과이다. $Re=130,000, 200,000$ 에서는 Low-Reynolds $k-\epsilon$ 과 Standard $k-\epsilon$ 모형은 거의 일치하나 $Re=360,000$ 에서는 차이를 보이며 전체적으로 ASM결과를 $k-\epsilon$ 모형과 비교하면 $Re=130,000, 200,000$ 에서는 40℃ 이하 액체 영역에서는 비슷한 결과를 보이지만 기체영역으로 변하여 압축성 효과가 커지면 차이가 커지고 특히 레이놀즈수가 커질수록 차이가 커짐을 알 수 있다.

실선은 Dittus & Boelter 상관식을 나타내는데 압축성 유동의 수치해석 결과와 큰 차이가 있음을 알 수 있고 실제 큰 열전달율을 갖는 이산화탄소 열교환기에서 Dittus & Boelter 식의 사용은 무리가 있음을 알 수 있다.

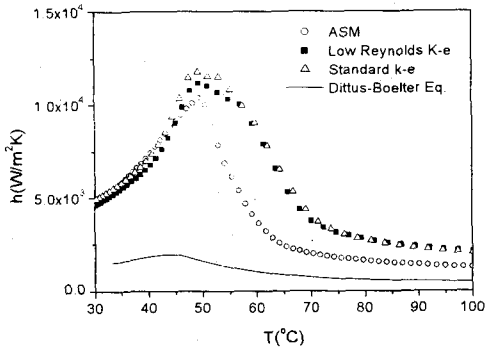


Fig. 7 Change of heat transfer coefficient with respect to temperature at Reynolds number 130,000

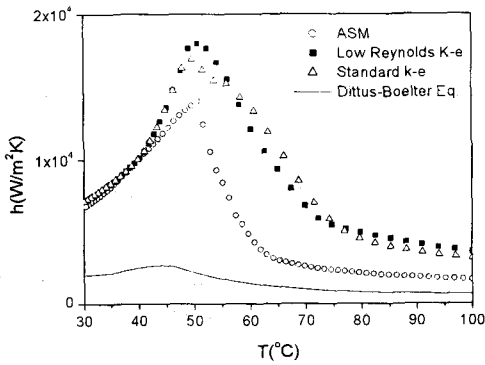


Fig. 8 Change of heat transfer coefficient with respect to temperature at Reynolds number 200,000

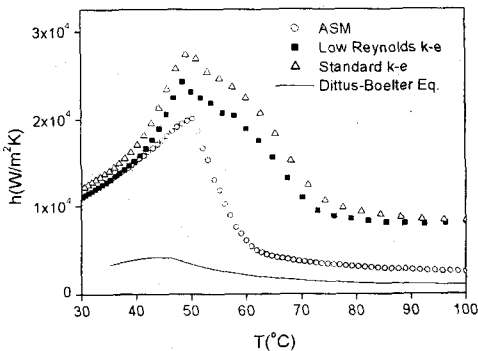


Fig. 9 Change of heat transfer coefficient with respect to temperature at Reynolds number 360,000

벽면온도의 영향을 고려하기 위해 일정한 벽면 온도 값을 0°C, 15°C, 30°C로 변화시키며 대수응력모형을 사용하여 계산을 하였다. 계산 결과 Fig. 10에서 경계조건의 벽면온도가 높을수록 즉, 입구온도와의 차이가 더 작을수록 열전달계수가 더 작아짐을 알 수 있다.

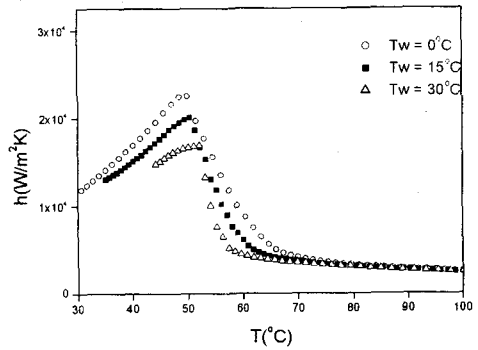


Fig. 10 Change of heat transfer coefficient with respect to constant wall temperature at Reynolds number 360,000

Fig. 11은 저레이놀즈수 대수 응력 모형 사용하여 벽면 경계 조건을 50KW/m², 40KW/m², -10KW/m², -5KW/m² 의 일정 열유속으로 변화시켰을 때 유체 온도의 변화에 따른 벽면 열전달 계수 계산한 결과이다. 현재까지의 결과로는 Dittus & Boelter 식의 2-3배 값으로 예측되었다. 벽면온도에 대한 영향과 마찬가지로 가해지는 일정 열유속의 크기가 클수록 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 따라서 압축성 유동의 열전달에서는 벽면온도나 일정 열유속 벽면 조건에서 열전달 계수의 상관식에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

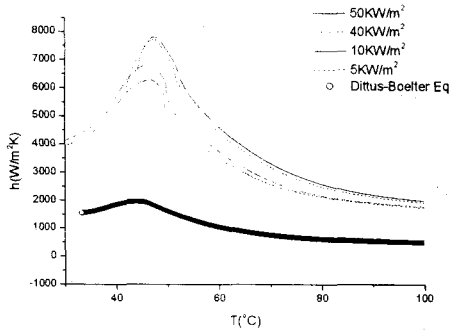


Fig. 11 Change of heat transfer coefficient with respect to constant heat flux at Reynolds number 130,000

4. 결론

초임계 영역에서의 이산화탄소에 대한 유동 및 열전달 특성을 압축성 전산코드를 개발 사용하여 수치해석에 사용함으로써 다음의 결론을 얻었다.

열전달계수를 계산한 결과 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모형과 표준 $k-\epsilon$ 모형은 거의 일치하지만 레이놀즈수가 커질수록 차이를 보였으며 ASM 모형과는 전체적으로 차이를 보였다. 또한, 덕트의 조건이 상이하지만 동일한 레이놀즈수 (360,000)에서 Robinson 등에 [1][2][3][4] 의해 제시되어진 열전달계수 실험자료와 비슷한 결과를 얻었으며 일반적인 Dittus & Boelter 식은 적용될 수 없음을 알았다.

결론적으로 비압축성 유동 해석은^[5] 순간적인 물성치의 변화가 없이 매 단계마다 입구온도 단위별로 각각의 물성치에 따라 수렴시켜 연결해 나가는 과정이며, 압축성 유동 해석은 순간적인 물성치의 변화가 유동에 연속적으로 반영되어 수렴되는 과정으로 두 수치해석의 결과는 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있었다. CO_2 유동에 대한 비압축성 유동의 수치해석 결과는 기존 Dittus & Boelter 식과 거의 일치하는 결과를 보여주지만 압축성 유동 해석 결과는 전혀 다른 결과를 나타내었다. 따라서, 초임계 이산화탄소 유동에서의 새로운 열전달 상관식에 대한 연구는 필연적이라 하겠다.

후기

본 연구는 한국 과학 재단 1999년 특정 기초 연구 과제 “이산화탄소 이용 초임계 냉동기의 임계점 부근 냉각 및 미세관내 증발 열전달 연구”(1999-1-304-006-3)의 지원으로 이루어진 것이며 이에 감사 드린다.

참고문헌

- [1] Douglas M. Robinson and Eckhard A. Groll, Efficiencies of transcritical CO_2 cycles with and without an expansion turbine, *Int J. Refrig.* Vol. 21, No.7(1998), pp577-589.
- [2] Pitla, S., Robinson, D., Groll, E. and Ramadhyani, S., Heat transfer from supercritical carbon dioxide in tube flow, 1998.
- [3] Robinson, D. and Groll, E., Efficiencies of transcritical carbon dioxide cycles with and without an expansion turbine, *International Journal of Refrigeration*, 1998.
- [4] Douglas M. Robinson, Srinivas Pitla, Eckhard A. Groll, and Satish Ramadhyani, Determination of Heat Transfer Coefficients During In-Tube Gas Cooling of Supercritical Carbon Dioxide, 1999.
- [5] 주광섭, 최영돈, 전건호, 초임계 이산화탄소의 사각덕트내 유동 및 열전달 전산해석, 유체공학학술대회, 2000.