

R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템 개발에 관한 연구(2)

- 최대 성능계수에 관한 예측과 비교 -

오후규¹ · 손창효[†]

(원고접수일 : 2010년 12월 6일, 원고수정일 : 2011년 2월 8일, 심사완료일 : 2011년 2월 18일)

Development of cascade refrigeration system using R744 and R404A

- Prediction and comparison on maximum COP(Coefficient of Performance) -

Hoo-Kyu Oh¹ · Chang-Hyo Son[†]

요약 : 본 논문은 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 기초 설계자료를 제공하기 위해서 COP 예측 상관식을 제안하고 그 결과를 타 상관식과 비교하였다. 작동변수로는 R404A용 고온사이클과 R744용 저온사이클의 과냉각도와 과열도, 압축기효율, 응축과 증발온도이다. 이에 대한 주요결과를 요약하면 다음과 같다. 다중회귀 분석을 통해 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 성능 예측식을 제안하였고, 그 결과를 타 연구자들의 상관식과 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 성능 예측식은 타 연구자들의 상관식과 일치하지 않았다. 따라서 향후 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템에 대한 추가 실험 데이터와 본 연구에서 제안한 COP 예측 상관식을 비교하여 그 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

주제어 : 이산화탄소, 캐스케이드 냉동시스템, 증기 압축식 냉동시스템, 성능예측과 비교

Abstract: In this paper, prediction and comparison on COP(coefficient of performance) of R744-R404A cascade refrigeration system are presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include subcooling and superheating degree, compressor efficiency, and condensing and evaporating temperature in the R404A high- and R744 low-temperature cycle, respectively. The main results were summarized as follows : The prediction for performance of R744-R404A cascade refrigeration system have been proposed through multiple regression analysis and compared with other researcher's correlations. As a result, prediction proposed in the study shows disagreement with existing equations. Therefore, it is necessary to propose the more accurate correlation predicting the COP of R744-R404A cascade refrigeration system through an addition experiments.

Key words: Carbon dioxide, Cascade refrigeration system, Vapor compression refrigeration system, Performance prediction and comparison

기호설명

COP : 성적계수

h : 엔탈피 [kJ/kg]

m : 질량유량 [kg/s]

P : 압력 [Pa]

RC : 압축비

Q : 전열량 [kW]

s : 엔트로피 [kJ/kgK]

[†] 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail:sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-621-6802)

¹ 부경대학교 냉동공조공학과

T : 온도 [°C]
 W : 압축일량 [kW]
 Δ : 변화량
 η : 효율

하첨자

c : 응축기, 압축
 cas : 캐스케이드 열교환기
 e : 증발기
 F : 냉동공간
 H : 고온사이클
 L : 저온사이클
 m : 기계
 max : 최대값
 o : 응축매체
 opt : 최적
 suc : 과냉각도
 suh : 과열도

템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면, 우선 [1]은 저온사이클내 R744의 응축온도를 최적화하기 위해 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 이론적으로 분석하였다. [2]는 고온사이클내 R744의 증발온도를 최적화하기 위해 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 연구하였다. 그리고, [3]은 저온부에 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능을 열역학적으로 분석하였다. 이러한 종래의 연구로부터 알 수 있듯이, 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석에 대한 자료가 부족하며, 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 "R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템 개발에 관한 연구"의 일환으로 제 1보[4]에서 발표한 성능 특성에 대한 예측결과를 바탕으로, R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 최대 성능계수(COP) 예측식을 제안하고 타 상관식과 비교함으로써 R744-R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

1. 서 론

지금까지의 캐스케이드 냉동장치는 R22, R134a와 같은 고비점 냉매를 고온사이클에, R23, R170, R115의 저비점 냉매를 저온사이클에 사용해왔다. 그러나 향후 이러한 프레온계 냉매는 오존층 파괴와 지구온난화로 인해 사용이 규제됨에 따라 환경에 무해한 R1270, R290, R717, R744와 같은 자연냉매로 대체될 가능성이 높아지고 있다.

이러한 자연냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스

2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver)[5] 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 고온사이클에는 R404A 냉매를, 저온사이클에는 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

Table 1: Balance equation for each component of R404A and R744 cascade refrigeration system.

Cycle	Component	Energy	Mass
High temperature refrigeration cycle (R404A circuit)	Evaporator(8→5)	$Q_{cas,e} = m_H (h_5 - h_8)$	$m_H = m_5 = m_6$ $= m_7 = m_8$
	Compressor(5→6)	$W_H = m_H (h_6 - h_5) / \eta_{cH} \eta_{cL}$	
	Condenser(6→7)	$Q_c = m_H (h_6 - h_7)$	
	Expansion valve(7→8)	$h_7 = h_8$	
Low temperature refrigeration cycle (R744 circuit)	Evaporator(4→1)	$Q_e = m_L (h_1 - h_2)$	$m_L = m_1 = m_2$ $= m_3 = m_4$
	Compressor(1→2)	$W_L = m_L (h_2 - h_1) / \eta_{cL} \eta_{cH}$	
	Condenser(2→3)	$Q_{cas,c} = m_L (h_2 - h_3)$	
	Expansion valve(3→4)	$h_3 = h_4$	

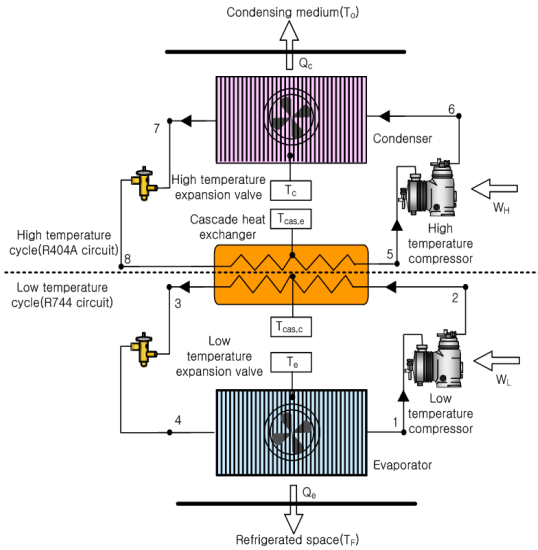


Figure 1: Schematic diagram of a cascade system.

- 저온과 고온사이클의 압축기내 냉매는 단열압축 과정이고, 압축효율과 기계효율은 각각 0.8과 1이다.
- 저온과 고온사이클의 열교환기(증발기, 응축기, 캐스케이드 열교환기)내 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 배관내 냉매의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 팽창밸브내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

그림 1은 본 연구에서 적용하는 캐스케이드 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 이의 분석에 필요한 식들은 표 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기내 R404A와 R744의 전열량(Q_{cas})은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아래의 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{cas} = Q_{cas,c} = Q_{cas,e} \quad (1)$$

$$Q_{cas} = m_L (h_2 - h_3) = m_H (h_5 - h_8) \quad (2)$$

캐스케이드 냉동시스템의 전체 COP는 아래의 식 (3)으로 계산한다.

$$COP = \frac{Q_e}{W_H + W_L} = \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_6)(h_2 - h_1)} \quad (3)$$

R404A와 R744의 캐스케이드 냉동사이클의 각 상태점에서의 열물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등)와 COP는 EES를 이용하여 계산하였다. 이렇게 해서 나온 결과값을 이용하여 R404A와 R744용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 변수들에 대해서 살펴보고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 예측식 제안

제 1보에서는 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 살펴보고, 그 결과 이들 각각의 인자들에 대해 캐스케이드 냉동사이클의 COP를 최대로 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다. 따라서, 본 절에서는 다중 회귀분석을 통해 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 최대 성적계수(COP_{max})와 최적 증발온도($T_{cas,e,opt}$)에 대한 수학적 방정식을 개발하였다. COP_{max} 와 $T_{cas,e,opt}$ 는 제 1보에서 살펴본 결과, 과열도(ΔT_{suh}), 과냉도(ΔT_{suc}), 증발온도(T_e), 응축온도(T_c), 캐스케이드 온도차(ΔT_{cas})에 영향을 받음을 알 수 있었기 때문에 이에 대한 함수로서 나타낼 수 있고, 이들 함수에 대해 다중 회귀분석을 실시하였다.

Table 2: Statistical information for Eqs. (5)~(6).

	COP_{max}		$T_{cas,e,opt}$	
	Value	Standard error	Value	Standard error
a_0	-6.96296		17.50025	
a_1	-0.01018	0.0023331	0.04877	0.0058879
a_2	0.01617	0.0015206	-0.10931	0.0038376
a_3	0.02971	0.0024840	0.41476	0.0062688
a_4	-0.02533	0.0021054	0.55654	0.0053133
a_5	2.13474		-5.81438	
	No. point : 25 rms = 0.057761 $R^2 = 96.10\%$		No. point = 25 rms = 0.14577 $R^2 = 99.88\%$	

$$COP_{max} \cdot T_{cas,e,opt} = f(\Delta T_{suc}, \Delta T_{suh}, T_e, T_c, \Delta T_{cas}) \quad (4)$$

COP_{max} 와 $T_{cas,e,opt}$ 의 수식은 아래의 식과 같고, 상수인 $a_0 \sim a_5$ 에 대한 값은 Table 2에 나타내었다.

$$T_{cas,e,opt} = a_0 + a_1 \Delta T_{suh} + a_2 \Delta T_{suc} + a_3 T_e + a_4 T_c + a_5 \Delta T_{cas} \quad (5)$$

$$COP_{max} = a_0 + a_1 \Delta T_{suh} + a_2 \Delta T_{suc} + a_3 T_e + a_4 T_c + a_5 \Delta T_{cas} \quad (6)$$

3.2 종래의 예측식과의 비교

본 연구에서 제안한 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 최대 COP와 최적의 캐스케이드 증발온도에 대한 상관식의 신뢰성 확보를 위해 [6], [1], [7]이 제안된 종래의 예측식과 비교·검토했다.

3.2.1 Dopazo의 예측식

[6]은 R717과 R744를 고온과 저온사이클에 각각 적용한 캐스케이드 냉동장치의 성능특성을 파악하였다. 그 결과, R744의 증발온도가 증가할수록 COP는 증가하고, R717의 응축온도와 캐스케이드 온도차(DT : R744의 응축온도와 R717의 증발온도차)가 증가할수록 COP는 감소하였으며, R744의 응축온도가 증가할수록 COP는 증가하다가 감소한다고 하였다. 또한, R717-R744용 캐스케이드 냉동장치의 최적온전에 필요한 최적의 R744 응축온도와 최대 COP를 구하기 위한 예측식을 다중 회귀법 분석을 통해 다음과 같이 제안하였다.

$$T_{cond,R744,opt} = -218.78 + 0.3965 \cdot T_{evap,R744} + 0.39064 \cdot T_{cond,R717} + 0.60747 \cdot DT \quad (7)$$

$$COP_{max} = \left(\frac{-27.76 + 0.15944 \cdot T_{evap,R717}}{-15.33 + 0.06438 \cdot T_{cond,R744}} \right) - 0.03279 \cdot DT - 0.3422 \quad (8)$$

3.2.2 Lee 등의 예측식

[1]은 R744-R717용 캐스케이드 냉동시스템에 대한 몇몇 가정과 평형식(질량, 에너지, 엔트로피, 엑서지)을 이용하여 열역학적 모델링을 수행하고, 이를 통해 최적의 R744 응축온도($T_{m,c,opt}$)와 최대

COP(COP_{max})에 영향을 미치는 응축온도(T_c), 증발온도(T_e), 캐스케이드 온도차(ΔT_{cas})에 대해서 알아보았다. 그 결과 R717 응축온도가 증가할수록 $T_{m,c,opt}$ 는 증가하는 반면 COP_{max} 는 감소하고, 증발온도가 증가할수록 $T_{m,c,opt}$ 와 COP_{max} 는 증가하며, ΔT_{cas} 가 증가할수록 $T_{m,c,opt}$ 는 감소하나 COP_{max} 는 증가하였다. 이러한 결과로부터 COP를 극대화하고 엑서지 파괴율을 최소화하는 조건에서 최적의 R744 응축온도($T_{m,c,opt}$)를 다음과 같이 결정하였다.

$$T_{m,c,opt} = 40.63 + 0.4T_c + 0.4T_e + \Delta T_{cas} \quad (9)$$

이때 최대 COP는 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$COP_{max} = 1.0818 - 0.0221T_c + 0.0315T_e - 0.0283\Delta T_{cas} \quad (10)$$

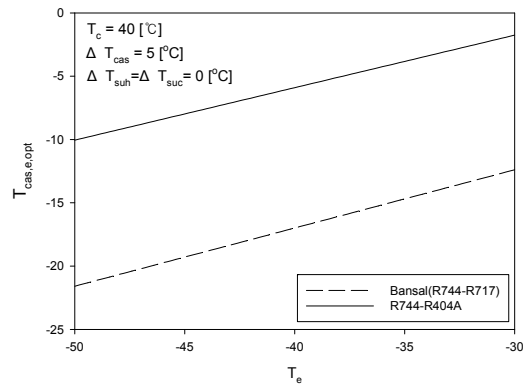


Figure 2: Comparison of optimum evaporation temperature in cascade heat exchanger predicting by this study and other correlation.

3.2.3 Getu-Bansal의 예측식

[7]은 고온과 저온사이클에 R717과 R744를 각각 적용한 캐스케이드 냉동시스템의 성능을 이론적으로 평가하기 위해서 과열도, 과냉도, 증발온도, 응축온도, 캐스케이드 온도차 등에 대한 영향을 살펴보았다. 과냉각도는 증가할수록 사이클 전체의 COP는 증가하고, 고온과 저온사이클 모두에 과냉각도를 적용했을 경우 COP가 가장 높게 나타났다. 과열도는 증가할수록 캐스케이드 사이클의 전체 COP는 감소하고, R717용 고온사이클에만 과열도를 적용했을 경우에 가장 높은 COP를 나타났다. 캐스케이드 증발온도(R717용 사이

클)는 증가할수록 COP는 감소하고, 압축효율은 증가할수록 전체 시스템의 COP는 증가하는 경향을 보였다.

본 연구의 실험결과로부터 R717과 R744용 캐스케이드 캐스케이드 냉동시스템의 최적 캐스케이드 증발온도와 냉매유량비, 최대 COP를 예측할 수 있는 식을 과열도, 과냉도, 증발온도, 캐스케이드 증발온도, 응축온도의 함수로서 제안하였다.

$$T_{cas,e,opt} = a_0 + a_1\Delta T_{sup} + a_2T_c + a_3T_e + a_4\Delta T_{cas} + a_5\Delta T_{sub} \quad (11)$$

$$COP_{max} = a_0 + a_1\Delta T_{sup} + a_2T_c + a_3T_e + a_4\Delta T_{cas} + a_5\Delta T_{sub} \quad (12)$$

그림 2는 종래의 성능예측식과 유사한 조건에서 얻어진 $T_{cas,e,opt}$ 를 비교한 것이다. 시뮬레이션을 통해 얻은 예측식과 종래의 예측식 모두 증발온도가 증가할수록 $T_{cas,e,opt}$ 가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 시뮬레이션을 얻어진 예측식과 기존의 예측식과는 큰 차이를 보였고, 기존의 예측식의 값이 낮게 나타났다. 이는 타 연구자들이 제안한 상관식의 적용조건이 본 연구와 다르기 때문이다.

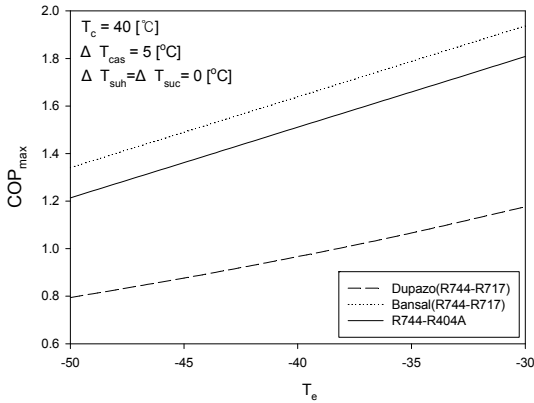


Figure 3: Comparison of maximum COP predicting by this study and other correlation.

그림 3은 종래의 성능예측식과 같은 조건에서 얻어진 COP_{max} 를 비교한 것이다. 시뮬레이션을 통해 얻은 예측식과 종래의 예측식 모두 증발온도가 증가할수록 COP_{max} 가 증가하는 것을 알 수 있었

다. 그러나 시뮬레이션을 얻어진 예측식과 기존의 예측식과는 큰 차이를 보였고, 기존 예측식의 COP_{max} 값이 낮게 나타났다. 이는 고온사이클에 적용되는 냉매가 다르기 때문이라고 판단된다. 그림 3에서 제시한 상관식들은 모두 고온사이클에 R717 냉매를 적용하여 제시한 것들입니다. 따라서 고온사이클에 다른 냉매를 적용한 타 연구자들의 상관식과는 다소 차이를 보일 수 밖에 없을 것으로 판단된다.

지금까지의 종래 문헌을 통해 파악한 예측 상관식들에는 압축기의 압축효율에 대한 것을 전혀 고려하지 않았다. 이는 압축기 효율이 전체 시스템의 COP에 미치는 영향이 극히 작기 때문이라고 판단할 수 있다. 하지만, 제 1보에서도 제시한 것처럼 압축기의 압축효율이 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 COP에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 압축기의 압축효율이 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동장치의 COP에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다.

[6]에서 제시한 R744용 압축기의 압축효율식은 다음과 같고 여기서 RC는 압축비를 나타낸다.

- (a) $\eta_c = 1 - 0.04 \cdot RC$
- (b) $\eta_c = 1.003 - 0.121 \cdot RC$
- (c) $\eta_c = 0.9343 - 0.04478 \cdot RC$
- (d) $\eta_c = 0.815 + 0.022 \cdot RC - 0.0041 \cdot RC^2 + 0.0001 \cdot RC^3$
- (e) $\eta_c = 0.89810 - 0.09238 \cdot RC + 0.00476 \cdot RC^2$

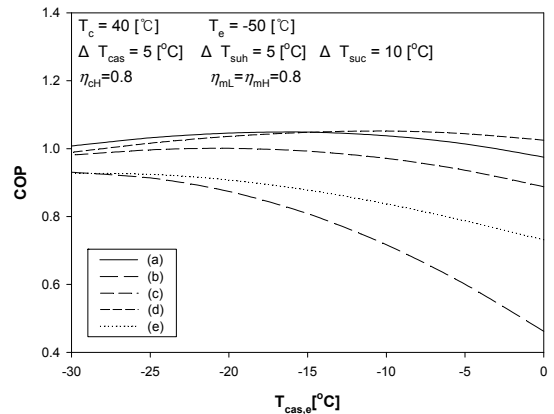


Figure 4: System COP vs. $T_{cond,R744}$ using different combinations of correlations to calculate the compressor isentropic efficiency.

그림 4는 위의 압축효율식들을 적용하여 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 COP를 비교한 것이다. 전체 시스템의 COP는 압축효율식에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 향후 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동시스템의 최대 COP와 최적의 캐스케이드 증발온도를 예측할 수 있는 상관식을 제안할 경우 반드시 압축효율에 대한 것을 고려해야만 할 것이다.

4. 결 론

R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 최대 COP와 최적의 캐스케이드 증발온도를 예측할 수 있는 상관식을 제안하였고, 그 결과를 종래의 예측식과 비교하였다. 이에 대한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R744와 R404A용 캐스케이드 냉동사이클의 COP에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 인자들은 캐스케이드 냉동사이클의 성능을 최대화 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 다중 회귀분석을 통해 최대 성적계수와 최적의 캐스케이드 증발온도에 대한 수학적 방정식을 제안하였다.

2. 종래의 예측식과 비교한 결과, $T_{cas,e,opt}$ 와 COP_{max} 모두 비슷한 경향을 보이나, 기존의 예측식과 큰 차이를 보였다. 이는 타 연구자들의 사용 냉매와 운전조건이 다르기 때문인 것으로 판단됩니다. 따라서 보다 정확한 비교를 위해서는 동일한 조건과 냉매에 대해서 제안한 상관식과의 비교가 필요한 실정이다.

3. 전체 시스템의 COP는 압축효율식에 따라 다를 수 있었다. 따라서 캐스케이드 냉동시스템의 최대 COP를 예측할 경우 압축기의 압축효율을 정확하게 평가하여 고려할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 한국연구재단 일반연구지원 기본유형 I의 “하이브리드형 CO₂ 캐스케이드 냉동 시스템 개발(1663000201003800)”사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. S. Lee, C. H. Liu and T. W. Chen, “Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems”, Int. J. Refrigeration, vol. 29, pp. 1100-1108, 2006.
- [2] S. Bhattacharyya, S. Mukhopadhyay, A. Kumar, R. K. Khurana and J. Sarkar, “Optimization of a CO₂-C₃H₈ cascade system for refrigeration and heating”. Int. J. Refrigeration, vol. 28, pp. 1284-1292, 2005.
- [3] P. K. Bansal and S. Jain, “Cascade systems: past, present, and future”. ASHRAE Trans. vol. 113, no. 1, pp. 245-252, 2007.
- [4] H. K. Oh and C. H. Son, “Development of cascade refrigeration system using R744 and R404A -Analysis on performance characteristics-”, The Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 2, pp. 182-188, 2011.
- [5] EES: Engineering Equation Solver, fChart Software Inc., 2006.
- [6] J. A. Dopazo, J. Fernandez-Seara, J. Sieres and F. J. Uxia, “Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures”, Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 1577-1583, 2009.
- [7] H. M. Getu, P. K. Bansal, “Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system”, International Journal of Refrigeration, vol. 31, pp. 45-54, 2008.

저 자 소 개



오후규(吳厚圭)

1975년 부산 수산대학교 식품공학과 졸업(공학사), 1983년 와세다 대학교 졸업(공학박사), 1987년 - 현재 부경대학교 냉동공조공학과(교수). 관심분야: 이산화탄소용 열교환기 및 시스템의 성능 특성



손창효(孫昌孝)

1991년 여수 수산대학교 냉동공조공학과 졸업(공학사), 2000년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2004년 부경대학교 졸업(공학박사), 2007년 - 현재 부경대학교 선도사업단 연구교수. 관심분야: 이산화탄소용 가스냉각기내 전열특성과 압력강하