

# 대체 프레온 및 자연 냉매를 이용하는 이원 냉동시스템의 성능 예측

김종열<sup>1\*</sup>, 노건상<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>동명대학교 냉동공조공학과

## Prediction on Performance of Cascade Refrigeration System using Alternative Freon and Natural Refrigerants

Jong-Ryeol Kim<sup>1\*</sup> and Geon-Sang Roh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Tongmyung University

**요 약** 본 연구에서는 이원냉동시스템에서 사용되던 저온용 규제프레온냉매 R13 및 고온용 규제프레온냉매 R503의 대체냉매로서 프레온혼합냉매 및 친환경적 자연냉매를 사용하는 이원냉동시스템의 성능특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 일반적인 이원냉동시스템의 운전범위에서 과냉각도, 과열도, 응축온도, 증발온도, 캐스케이드 열교환기에서의 온도변화를 고려하였다. 고온시스템 및 저온시스템의 작동유체의 종류에 상관없이 이원냉동시스템의 COP는 캐스케이드의 온도영향을 받고 있으며, 또한 과냉각도가 증가할수록 COP는 높아지지만, 과열도의 영향은 크게 받지 않았다. 따라서 본 연구에서 고온용 시스템 및 저온용 시스템의 작동유체로 대체 프레온혼합냉매 및 자연냉매의 냉매조합 중에서 (R23/R290), (R23/R600), (R23/R600a), (R23/R717), (R744/R404A) 냉매를 사용하는 이원냉동시스템의 COP는 저온측에 R23, 고온측에 R22를 사용하는 시스템에 비해 20 ~ 36% 높게 나타났다.

**Abstract** In this paper, cycle performance analysis of cascade refrigeration system using alternative FREON refrigerants and natural refrigerants are presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include subcooled and superheated degree, and condensing and evaporating temperature, temperature difference of cascade heat exchanger in cascade refrigeration system. The COP of cascade refrigeration system increases with the increasing subcooled degree, but there is no significant changes with the increasing superheated degree. The COP of cascade refrigeration system depends on evaporating and condensing temperatures of cascade heat exchanger. Therefore, subcooled degree, evaporating and condensing temperature of cascade heat exchanger using alternative FREON refrigerants and natural refrigerants have an effect on the COP of this system. In this paper, COP of cascade refrigeration system using (R23 / R290), (R23 / R600), (R23 / R600a), (R23 / R717), (R744 / R404A) are higher 20 ~ 36 % than (R23 / R22), using R23 for low temperature system and R22 for high temperature system.

**Key Words** : Freon, Natural Refrigerant, Alternative refrigerants, Cascade Refrigeration, COP

### 1. 서론

생활양식 및 산업환경 변화에 따른 초저온 영역 등의 극한분야에 대한 요구가 증가되면서 냉동시스템의 기술 혁신에 많은 변화가 이루어지고 있다.

기계적인 측면에서는 왕복동식 압축기보다 고효율 스크류 압축기의 사용이 증가하고 있으며, 또한 1930년대 개발되어 냉매뿐만 아니라 발포제 등으로 폭넓게 사용되던 프레온계 냉매는 오존층파괴 및 지구온난화의 원일물질로 규명됨에 따라 생산 및 사용 규제[1]가 이루어지고

\*Corresponding Author : Jong-Ryeol Kim

Tel: +82-10-3861-7027 email: kgy804@tu.ac.kr

접수일 12년 02월 16일

수정일 (1차 12년 03월 12일, 2차 12년 03월 29일)

게재확정일 12년 04월 12일

있다. 특히 급속동결 냉동식품 보관, 반도체 웨이퍼 (wafer) 소자의 불량여부 판단을 위한 환경온도[2]는 일반적으로 -40 ℃ ~ -70 ℃ 온도가 유지되어야 한다. 이와 같은 초저온 온도를 유지하기 위해서는 이원 냉동시스템이 사용되어야 한다. -20 ℃ 정도의 온도를 얻기 위해 사용되는 단단압축 냉동시스템으로 -40 ℃ 이하의 온도를 조성하고자 하는 경우에는 저온특성을 가진 냉매의 임계점(규제 프레온냉매 R13의 경우 약 28.8 ℃)이 낮기 때문에 상온의 냉각매체로는 응축과정이 구성되지 않으므로 냉동시스템의 운전이 이루어지지 않고, 또한 응축과정이 구성되는 냉매를 선택하더라도 압축비 증대에 의한 성능계수 저하, 경제적인 손실 등의 문제점이 발생된다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 이원 냉동시스템은 저온용 냉매를 사용하는 저온부 냉동시스템과 고온용 냉매를 사용하는 고온부 냉동시스템을 조합하고 있다. 즉, 이원 냉동시스템에서는 온도측면에서 고온부와 저온부로 구분하여 저온측 냉동시스템의 응축기와 고온측 냉동시스템의 증발기를 조합시켜 임계점이 낮은 저온용 냉매를 냉각시키고 있다. 이와 같은 저온측 냉동시스템의 응축기와 고온측 냉동시스템의 증발기를 열교환시키기 위해 캐스케이드(cascade) 열교환기가 사용된다. 이와 같은 이원 냉동시스템에서 사용되던 저온용 냉매 R13, R503, 고온용 냉매 R502 등은 지구환경 보호를 위해 사용이 금지되고 있다. 이를 대처하기 위해 친환경냉매를 사용하는 이원냉동시스템의 캐스케이드에서의 열역학적 분석[3] 및 일반적인 히트펌프 등에서의 CO<sub>2</sub>를 비롯한 탄화수소계 냉매를 적용한 성능특성에 대한 연구[4-6] 결과가 보고되고 있으나, 실제 이원냉동시스템의 저온측 시스템 및 고온측 시스템에 친환경냉매를 적용한 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 이원 냉동시스템의 저온측 시스템 및 고온측 시스템의 작동유체로서 대체프레온계 냉매 및 자연냉매를 적용한 시스템에서의 과냉각도, 과열도,

캐스케이드 열교환기에서의 온도차에 의한 성능계수 (cop) 에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분석하고, 이를 통해 대체 프레온계 냉매와 자연냉매를 사용하는 이원냉동 시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 대체 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES[7](Engineering Equation Solver) 소프트웨어를 이용하여 계산하였고, 이원 냉동시스템의 성능 분석을 위한 EES 계산 과정에서 다음과 같은 조건을 가정하였다.

- 저온과 고온 시스템의 냉매 압축과정은 단열압축과정이고, 압축기의 압축효율( $\eta_c$ )과 기계효율( $\eta_m$ )은 각각 0.8로 가정하였다.
- 저온과 고온 시스템의 팽창과정은 등엔탈피 과정으로 가정하였다.
- 저온 시스템의 증발기, 고온 시스템의 응축기, 캐스케이드(cascade) 열교환기에서의 냉매 및 배관에서의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온 시스템의 운동에너지와 위치에너지 변화는 없는 것으로 가정하였다.

그림 1은 본 연구에서 적용하는 이원 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 이원 냉동시스템의 분석에 사용된 식은 표 1과 같다.

캐스케이드 열교환기내 저온 냉매와 고온 냉매의 전열량( $Q_{CAS}$ )은 주위로의 열손실이 없는 것으로 가정하였으므로 식 (1), 식 (2)와 같이 정리된다.

$$Q_{CAS} = Q_{CAS,C} = Q_{CAS,E} \quad (1)$$

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

[표 1] 이원냉동시스템의 평형방정식  
[Table 1] Balance equation for cascade refrigeration system

사이클	구성요소	에너지	물질
고온측 냉매사이클	증발기(8→5)	$Q_{CAS,E} = m_H(h_5 - h_8)$	$m_H = m_5 = m_6$ $= m_7 = m_8$
	압축기(5→6)	$W_H = m_H(h_6 - h_5)/\eta_{cH}\eta_{cH}$	
	응축기(6→7)	$Q_c = m_H(h_6 - h_7)$	
	팽창밸브(7→8)	$h_7 = h_8$	
저온측 냉매사이클	증발기(4→1)	$Q_E = m_L(h_1 - h_4)$	$m_L = m_1 = m_2$ $= m_3 = m_4$
	압축기(1→2)	$W_L = m_L(h_2 - h_1)/\eta_{cL}\eta_{cL}$	
	응축기(2→3)	$Q_{CAS,E} = m_L(h_2 - h_3)$	
	팽창밸브(3→4)	$h_3 = h_4$	



그림에서 증발온도( $T_E$ )  $-70$  °C, 응축온도( $T_C$ )  $40$  °C, 캐스케이드 증발온도( $T_{CAS,E}$ )  $-30$  °C, 저온측 증발기와 고온측 응축기의 열평형이 완전한 캐스케이드 온도차( $\Delta T_{CAS}$ )  $0$  °C, 과열도( $\Delta T_{SUP} = \Delta T_{SUP,L} = \Delta T_{SUP,H}$ )  $20$  °C로 일정하게 유지한 상태에서 저온 시스템과 고온 시스템의 과냉각도(응축기 출구온도 - 팽창밸브 입구온도) 변화에 따른 이원 냉동시스템의 COP를 비교한 것이다. 그림에서 과냉각도가 증가할수록 이원 냉동시스템의 COP가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 과냉각도 증가할수록 저온측 및 고온측 압축일량은 거의 일정한 반면, 전열량이 증가하기 때문으로 고려된다.

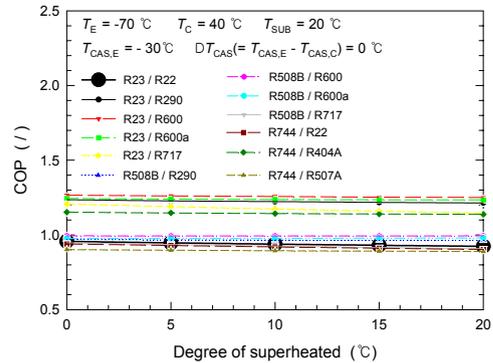
또한 그림에서 저온 시스템과 고온 시스템에 현재 상용화되고 있는 제품에 사용되는 (R23 / R22)를 사용하는 경우의 COP와 본 논문에서 고려하고 있는 대체 프레온 냉매와 자연냉매를 조합한 시스템의 COP를 비교하면 일반적으로 저온 시스템에 R23를 사용하는 경우에는 과냉각도 온도 영역에 걸쳐 23 ~ 40 % 이상의 COP가 상승되고 있음을 알 수 있으며, 특히 과냉각도  $10$  °C에서 (R23 / R600)를 사용하게 되면 약 40 %의 COP 상승을 기대할 수 있다. 또한, 저온 시스템에 공비 혼합냉매 R508B를 사용하는 경우에는 고온 냉매에 상관없이 (R23 / R22)의 COP에 비해 0 ~ 10 %의 COP 상승을 기대할 수 있으나, 저온 시스템에 R744를 사용하는 경우에는 (R744 / R404A)를 제외하고는 (R23 / R22)보다 일반적으로 COP가 저하되는 경향을 보이고 있다. 따라서 R744를 사용하고자 하는 경우에는 아직 R744의 압축기, 열교환기, 부속기기 등의 부품개발의 미비, 또한 (R744 / R404A)의 경우에도 R404A는 비공비 혼합냉매이므로 시스템 사용과정에서의 문제점을 고려하면 (R744 / R404A)의 적용에 대해서는 많은 검토가 필요할 것으로 고려된다.

### 3.2 과열도의 영향

그림 3은 증발온도  $-70$  °C, 응축온도  $40$  °C, 캐스케이드 증발온도  $-30$  °C, 캐스케이드 온도차  $0$  °C, 과냉각도( $\Delta T_{SUB} = \Delta T_{SUB,L} = \Delta T_{SUB,H}$ )  $20$  °C로 일정하게 유지한 상태에서 저온 시스템과 고온 시스템의 과열도(압축기 입구온도 - 증발기 출구온도) 변화에 따른 이원 냉동시스템의 COP를 비교한 것이다.

이원 냉동시스템의 COP는 과열도 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 저온 시스템에 R23를 사용하는 경우의 COP가 최근 많은 연구의 대상이 되고 있는 자연냉매 R744를 사용하는 경우보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후  $-70$  °C 정도의 초저온을 얻기 위한

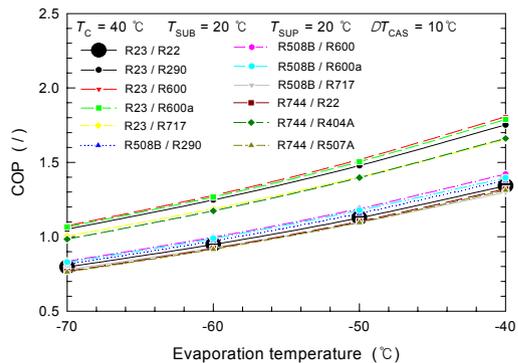
이원 냉동시스템의 저온 시스템 냉매로 R23을 적용하는 것에 대해 많은 고려가 필요할 것으로 생각된다.



[그림 3] 이원냉동시스템의 성능계수에 대한 과열도의 영향 [Fig. 3] The effect of superheated degree for cascade refrigeration system COP

### 3.3 증발온도의 영향

그림 4는 응축온도  $+40$  °C, 캐스케이드 증발온도  $-20$  °C, 캐스케이드 온도차  $10$  °C, 과냉각도  $20$  °C, 과열도  $20$  °C로 일정하게 유지한 상태에서 이원 냉동시스템의 증발온도 변화에 따른 COP를 비교한 것이다.



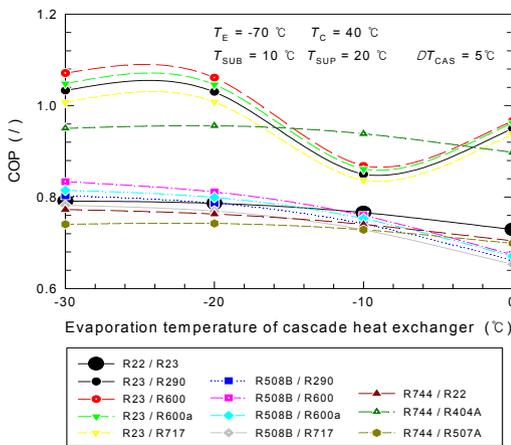
[그림 4] 이원냉동시스템의 증발온도 변화에 따른 COP [Fig. 4] The effect of evaporation temperature for cascade refrigeration system COP

그림에서 알 수 있는 바와 같이 증발온도가 증가할수록 COP가 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있으며, 이는 증발온도가 증가할수록 냉동효과 및 고온 시스템의 압축일량은 거의 일정한 반면, 저온 시스템의 압축일량이 감소하기 때문이다. 일반적으로 초저온 대상 공간 온도가  $-60$  °C로 조성되기 위해서는 이원 냉동시스템 증발온도가  $-70$  °C 전후로 유지되어야 하므로, 증발온도  $-70$  °C 에

서의 COP를 비교하면 저온 시스템에 대체 프레온냉매 R23을 사용하는 경우에는 COP가 26 ~ 32 % 상승, R508B를 사용하는 경우에는 -3 ~ 5 % 변화, R744를 사용하는 경우에는 -5 ~ 24 % 변화를 보이고 있다. 따라서, 증발온도를 -70 °C로 조성하고자 하는 경우에는 저온 시스템에 대체 프레온냉매 R23을 사용하는 것이 COP 측면에서 가장 유리할 것으로 고려되었다.

### 3.4 캐스케이드 열교환기의 영향

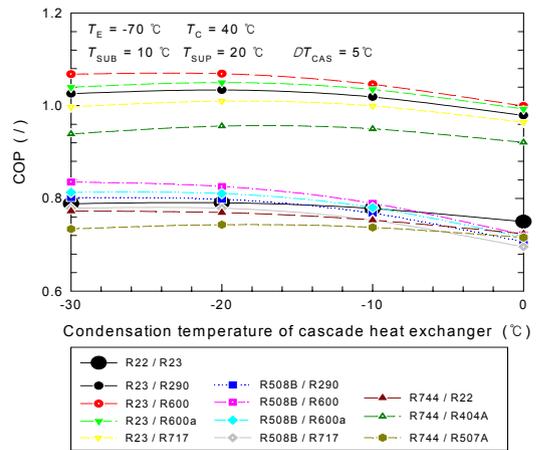
그림 5는 증발온도 -70 °C, 응축온도 40 °C, 과냉각도 10 °C, 과열도 20 °C, 캐스케이드 온도차 5 °C로 일정하게 유지한 상태에서 캐스케이드 열교환기의 증발온도 변화에 따른 COP의 변화를 나타낸 것이다.



[그림 5] 이원냉동시스템의 캐스케이드 열교환기의 증발 온도 변화에 따른 COP 변화  
 [Fig. 5] The effect of evaporation temperature at cascade heat exchanger for cascade refrigeration system COP

그림에서 알 수 있는 바와 같이 저온 시스템에 R23을 사용하는 경우, 캐스케이드 열교환기의 증발온도를 -30 ~ -20 °C로 유지하는 경우의 COP가 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있으나, 그 외의 냉매 조합에서는 증발온도가 상승함에 따라 COP가 조금씩 저하되는 경향을 나타내고 있다. 이는 캐스케이드 온도차를 5 °C로 일정하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도가 상승하는 것은 저온 시스템에서의 응축온도도 동일하게 상승되어야 하므로 저온 시스템의 압축비 증대에 따른 COP가 급격하게 감소되기 때문이라 생각된다. 또한, 저온용 프레온냉매 R23을 사용하는 경우에는 고온용 냉매의 종류에 상관없이 증발온도 -10 °C에서 급격한 COP 감소를 나타내고 있으며, 이에 대한 원인 규명을 위해서는 실제 이원냉동장치에서

의 실험을 통해 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

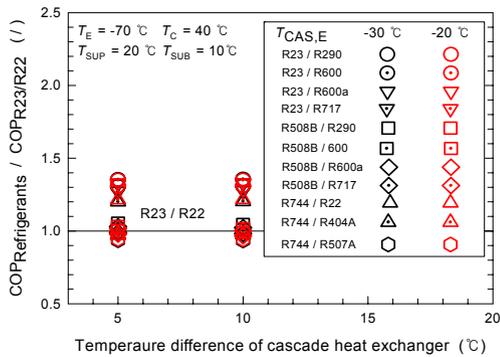


[그림 6] 이원냉동시스템의 캐스케이드 열교환기의 응축 온도 변화에 따른 COP 변화  
 [Fig. 6] The effect of condensation temperature at cascade heat exchanger for cascade refrigeration system COP

그림 6는 증발온도 -70 °C, 응축온도 40 °C, 과냉각도 10 °C, 과열도 20 °C, 캐스케이드 온도차 5 °C로 일정하게 유지한 상태에서 캐스케이드 열교환기의 응축온도 변화에 따른 COP의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 증발온도 -70 °C에 대한 캐스케이드 열교환기의 응축온도가 상승할수록 COP가 조금씩 저하되는 경향을 보이고 있으나, 이원냉동시스템의 COP에 미치는 응축온도의 영향은 증발온도의 경우에 비해 작다는 것을 알 수 있다.

따라서 이원 냉동시스템의 COP는 저온 시스템에서의 응축열량을 단시간에 최대한 제거할 수 있는 증발온도 설정에 따라 좌우되고 있는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 캐스케이드 열교환기의 응축온도는 증발온도와 5 ~ 10 °C의 온도차가 있는 -20 ~ -15 °C 정도의 온도를 유지하는 것이 가장 효율적일 것으로 고려된다.

그림 7는 증발온도 -70 °C, 응축온도 40 °C, 과냉각도 10 °C, 과열도 20 °C로 유지한 상태에서 캐스케이드 열교환기의 증발온도 -20 °C, -30 °C에 대한 캐스케이드 온도차 5 °C, 10 °C로 변화시킨 경우, 현재 상용화되고 있는 (R23 / R22)용 이원 냉동시스템의 COP에 대한 대체 프레온냉매 및 자연냉매를 사용하는 이원 냉동시스템의 COP 변화를 비교한 것이다.



[그림 7] 이원냉동시스템의 캐스케이드 열교환기의 온도 변화에 따른 COP 변화

[Fig. 7] The effect of temperature difference at cascade heat exchanger for cascade refrigeration system COP

그림에서 실선은 (R23 / R22)를 사용하는 이원 냉동시스템의 COP를 기준으로 나타낸 것이다. 그림 5 ~ 그림 6에서 고려된 캐스케이드 증발온도 -20 °C, -30 °C에서의 COP는 저온냉매 R23 및 고온냉매로 자연냉매를 사용하는 경우에는 (R23 / R22)에 비해 28 ~ 35 %의 증가를 보이고 있으나, 저온냉매 R508B 및 고온냉매로 자연냉매를 사용할 경우에는 (R23 / R22)에 비해 뚜렷한 COP 증가는 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 저온냉매로서 자연냉매인 R744를 사용하고 고온냉매로 대체 프레온냉매로 비공비 혼합냉매인 R404A를 사용할 경우에는 20 % 정도의 COP 상승을 나타내었으나, 고온냉매로 단일 및 공비 혼합냉매인 R22 및 R507A를 사용할 경우에는 (R23 / R22)를 사용하는 경우보다 3 ~ 7 % 정도의 COP 저하를 나타내고 있다.

따라서 대체 프레온냉매 및 자연냉매를 조합한 이원 냉동시스템의 작동유체로서는 (R23 / R22)에 비해 약 28 %의 COP 상승을 기대할 수 있으며, 또한 저온냉매로서의 열물성치가 우수한 대체 프레온냉매 R23을 저온 시스템의 냉매로 사용하고, 친환경적인 자연냉매로서 운전실적이 풍부한 R717을 사용하는 실제 이원냉동시스템에서의 실제 운전특성에 대한 연구가 향후 지속되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

-70 °C 정도의 초저온을 얻기 위해 규제냉매 (R13 / R22)의 대체 프레온냉매 및 자연냉매를 각각 저온측 시스템과 고온측 시스템 혹은 고온측 시스템과 저온측 시

스템에 적용시킨 이원 냉동시스템에서의 과열도, 과냉각도, 증발온도, 캐스케이드 열교환기의 증발온도, 응축온도, 온도차 등이 운전 요소가 COP에 미치는 영향에 대한 계산 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이원 냉동시스템의 COP는 과냉각도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 이원 냉동시스템에서 과열도가 증가하여도 COP는 큰 변화가 나타나고 있지 않기 때문에 이원 냉동시스템의 COP 향상을 위해서는 과열도보다는 과냉각도에 대한 고려가 우선되어야 할 것으로 고려된다.
- 2) -70 °C의 초저온을 얻기 위한 이원 냉동시스템에서 캐스케이드 열교환기의 증발온도 -20 °C ~ -30, 응축온도 -20 °C ~ -10 °C로 운전하는 것이 COP 측면에서 가장 유리한 것으로 판단된다.
- 3) 저온냉매로서 규제냉매 R13 및 고온냉매로 규제대상냉매인 R22를 대체할 수 있는 친환경적인 냉매를 고려할 경우, 저온냉매로서의 열물성치가 우수한 R23과 상용화되어 있는 자연냉매 R717을 사용하는 이원 냉동시스템의 적용 가능성이 가장 높을 것으로 고려된다.

#### References

- [1] UNEP, Copenhagen, Decision, The Fourth Meeting of the Parties to the Montreal protocol, 1992.
- [2] Jonghoon Park, Keumnam Cho, "Study on the Performance of the Cascade System Using Alternative Refrigerants", SAREK, Vol. 13, No. 7, pp. 564-571, 2001.
- [3] Lee, T. S., Liu, C. H. and Chen, T. W., "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade condenser in CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> cascade refrigeration systems". Int. J. Refrigeration 29, 1100-1108, 2006.
- [4] Sawalha, S., "Using CO<sub>2</sub> in supermarket refrigeration". ASHRAE J. 47 (8), 26-30, 2005.
- [5] Wilson, I. and Maier, D., "Carbon dioxide for use as a refrigerant. In: Refrigeration Science and Technology, Proceedings", IIR-IRHACE Conference, Innovative Equipment and Systems for Comfort and Food Preservation. The University of Auckland, pp. 305-311, 2006.
- [6] Bhattacharyya, S., Mukhopadhyay, S., Kumar, A. and Khurana, R. K., Sarkar, J., "Optimization of a CO<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> cascade system for refrigeration and heating", Int.

J. Refrigeration 28, 1284-1292, 2005.

[7] fChart Software Inc. "Engineering Equation Solver", 2006.

---

**김 종 열**(Jong-Ryeol Kim)

[정회원]



- 1992년 2월 : 부경대학교 공과대학 냉동공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과(공학석사)
- 1997년 8월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 전임강사

<관심분야>

친환경 소화약제를 이용한 소화기 개발, 신재생에너지를 이용한 공조시스템 개발 등

---

**노 건 상**(Geon-Sang Roh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부경대학교 공과대학 냉동공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 부경대학교 대학원 냉동공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 부교수

<관심분야>

대체냉매용 냉동공조시스템의 성능향상 및 열교환기 개발 등