

곡물 냉각기의 시뮬레이션

Simulation of a Grain Cooler

박진호* 정중훈*
정희원 정희원
J.H.Park J.H.Chung

1. 서론

곡물냉각기는 곡물을 중저온 상태에서 저장해 곡물 품질을 안전하게 유지시키기 위해 개발된 공기조화장치이다. 곡물냉각기는 곡물을 약 10~15℃ 그리고 상대습도 60~70%에서 냉각·저장해 곡물 호흡을 억제하고 균과 해충의 번식을 막아준다. 이러한 냉각시스템을 분석하기 위해 EES(Engineering equation Solver) 프로그램을 이용해 시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였다.

EES는 비선형 대수방정식과 미분방정식을 구할 수 있는 프로그램이며 또한 물이나 건 공기, 습공기, 냉매, 연소가스 등 여러 가지 유체의 열역학적 유체역학적 상태량(property)을 함수 형태로 자유로이 사용할 수 있다.

본 연구에서는 EES(Engineering equation Solver) 프로그램을 사용해 냉각기의 표준 사이클을 분석하였고 여기에 비가역적인 요소들을 고려한 증기압축 냉동사이클을 분석하고 검증하고자 하였다.

본 연구의 구체적 목적은 다음과 같았다.

1. EES(Engineering equation Solver) 프로그램을 이용하여 냉각시스템의 이상적인 표준 사이클, 비가역적인 요소들을 고려한 증기압축사이클을 이론적으로 분석한 후 냉각기의 주요 지점의 냉매의 온도, 압력, 냉각공기의 온도를 실제로 측정된 후 이를 비교하여 냉각기 성능분석용 모델을 개발한다.
2. 냉각기 주요장치의 냉매상태 즉 엔탈피를 예측하여 냉각기의 냉각능력과 성적계수, 압축기에서의 일, 응축기에서의 발열량 등을 산출해 곡물냉각기의 가역·비가역적인 사이클을 분석한다.
3. 냉각효과(증발기의 발열량)와 압축기의 일량을 이용해서 냉각공기의 온도를 예측한다. 또한 냉각기 성능에 큰 영향을 주는 주요소를 파악한다.

2. 재료 및 방법

가. 시뮬레이션 모델 개발에는 WCB/McGraw-Hill 사의 EES 프로그램을 사용하였다.

1) 곡물냉각기의 가정

본 연구에 사용된 곡물냉각기는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기 등으로 구성되어 있다(그림 1). 냉각기는 냉매(R22)를 사용하며 응축기의 응축온도가 43℃이고 증발기의

=====

* : 전남대학교 농과대학

증발온도 4°C 일 때 25kW 이상의 냉각능력을 갖도록 설계되어 있다.

그림 2는 실제 냉각기에 적용되는 증기압축사이클을 나타낸 것으로 표준사이클 ABCD와 실제 비가역성을 고려한 증기압축사이클 123456781의 차이점으로 첫째, 팽창 밸브에서 등엔트로피 과정이 일어나지 않으며 둘째, 증발기 응축기에서 등온공정과 압축기에서 가역단열공정이 이루어지지 않으며 마지막으로 응축기 및 증발기에서 필요한 온도차 때문에 상당한 손실이 있다.

표준사이클에서는 응축온도 35°C, 증발온도 0°C와 대기온도 30°C, 상대습도 80%, 송풍량 40 m³/min 인 공기를 사용하였다. 비가역성을 고려한 증기압축사이클에서는 표준사이클의 가정을 기초로 하여 비가역적인 요소(압축효율, 과열도, 과냉도, 압력강하 등)를 첨가하였다.

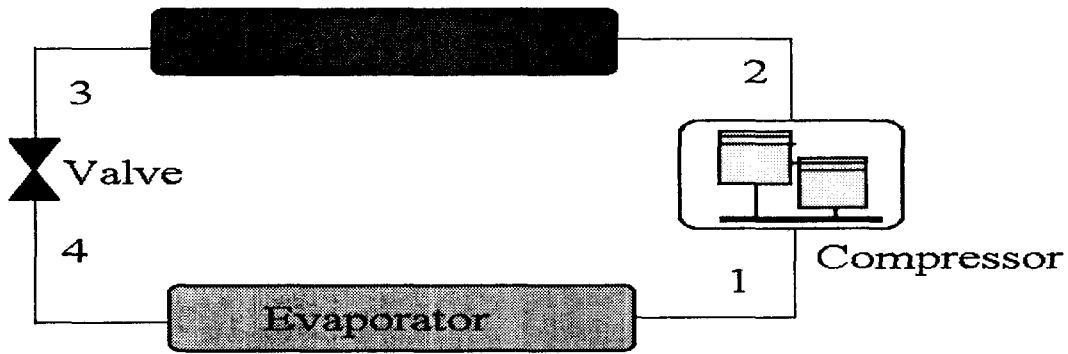


그림 1. 곡물냉각기의 주요부

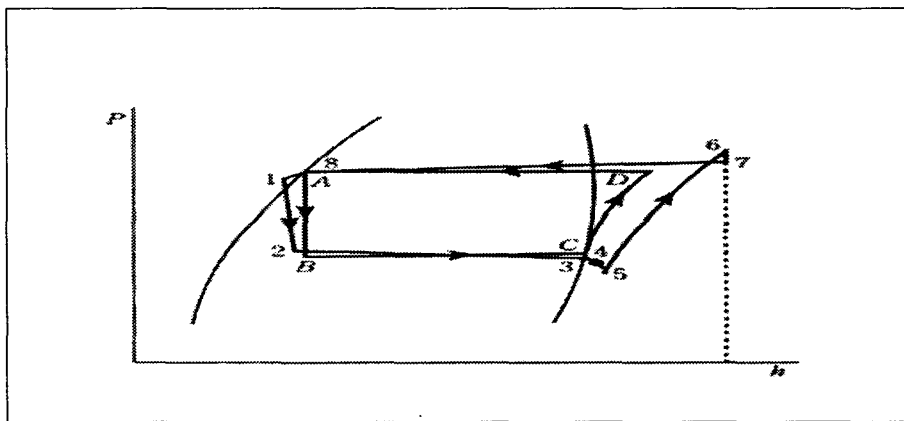


그림 2. 실제 사이클과 표준 사이클의 비교

2) 모델의 변수 및 함수

아래의 표(표1~3)에서는 EES 프로그램을 이용하여 개발된 모델에 사용된 변수 및 함수를 나타내고 있다.

표 1. 냉각기 주요부의 변수

주요부	변수명	값	설명
증발기	EvapTemp	0(°C)	증발기의 냉매 온도
	PressDropE1	0.99	압력강하 (증발기 출구)
	PressDropE2	1.05	압력강하 (증발기 내)
	OverHeat_Temp	3(°C)	과열도로 인한 온도 상승
압축기	Com_Press	0.995	압력강하 (압축기 출구)
	CompEff	0.5	압축기의 효율
응축기	ConTemp	30(°C)	응축기의 냉매 온도
	PressDropC	0.985	압력강하 (응축기내)
	OverCool_Temp	5(°C)	과냉에 의한 온도 강하
팽창 밸브	Expan_Entaphy	1.03	비가역성을 고려한 엔탈피 증가
	Expan_Entropy	1.03	비가역성을 고려한 엔트로피 증가

표 2. 냉각기 성능을 표현하는 변수

변수	설명	변수	설명
Qchill	냉각능력(kW)	Q_con	응축기의 발열량(kJ/kg)
Q_evap	증발기의 발열량(kJ/kg)	Wc	압축기의 일량(kJ/kg)
T_air	냉각 공기의 온도(°C)	COP	성적계수

표 3. 함수

함수	설명
Temperature(R22, H=h[1], P=P[1])	온도 (예: T[1])
PRESSURE(R22, T=T[2], x=x[2])	압력 (예: P[2])
Enthalpy(R22, T=T[3], P=P[3])	엔탈피 (예: h[3])
Entropy(R22, T=T[4], P=P[4])	엔트로피 (예: s[4])
Humrat(AirH2O, T=T[1], P=P[1], R=R[1])	절대습도 (예: w[1])
SpecHeat(AirH2O, T=T[1], P=P[1], R=R[1])	비열 (예: C[air])

나. PROGRAM

본 연구를 위해 사용된 EES 프로그램을 이용해 개발한 모델은 표 4와 같다.

표 4. 냉각기 성능 분석을 위한 모델의 프로그램

```

"Analysis of vapor Compression Refrigeration System Using Engineering Equation Solver"
"Before Compression"
x1_ISEN=1                                "quality of saturated vapor"
T1_ISEN=EvapTemp
s1_ISEN=ENTROPY(R22,T=T1_ISEN,x=x1_ISEN)
T[1]=T1_ISEN+ OverHeat_Temp              "temperature of evaporator outlet"
P[1]=P1_ISEN*PressDropE                  "properties of state 1 before compression"
h[1]=ENTHALPY(R22,T=T[1],P=P[1])
s[1]= ENTROPY(R22,T=T[1],P=P[1])
    
```

"After Compression"

P2_ISEN=pressure(R22,T=T3_ISEN,x=0)

P[2]=P2_ISEN*Com_Press "the pressure in the condenser after compression"

h2_REAL=ENTHALPY(R22,P=P[2],s=s[1]) "h2REAL means real enthalpy of stste2"

Wc=(h2_REAL-h[1])/CompEff "real work of compressor"

h[2]=h[1]+Wc "real enthalpy after adiabatic compression"

s[2]=ENTROPY(R22,T=T[2],P=P[2]) "properties of state 2 after compression"

T[2]=temperature(R22,H=h[2],P=P[2])

"After Condensing"

T3_ISEN=ConTemp "known temperature of sat'd liquid at condenser outlet"

T[3]=T3_ISEN-OverCool_Temp

P[3]=P[2]*PressDropC "pressure drops across condenser"

h[3]=ENTHALPY(R22,T=T[3],P=P[3]) "real enthalpy after condensing"

s[3]=ENTROPY(R22,T=T[3],P=P[3]) "entropy after condensing"

q_Con=h[2]-h[3] "heat removed at condenser"

"After Expansion"

h[4]=h[3]*Expan_Enthalpy "expansion process"

x[4]=quality(R22,H=h[4],s=s[4]) "quality after expansion"

s[4]=s[3]*Expan_Entropy "entropy after expansion"

T[4]=temperature(R22,H=h[4],P=P[4]) "temperature after expansion"

"After Evaporation"

P[4]=P[1]*PressDropExp "considering pressure increase across evaporator"

q_Evap=h[1]-h[4] "cooling capacity per unit refrigerant"

COP=abs(q_Evap/Wc) "coefficient of performance"

"Moisture removal(AIR)"

DEN=DENSITY(AirH2O,T=T_AMB,P=P_air,w=w1) "density of ambient air, kg/m³"

MassRate_air=(40/60)*DEN "air flow rate, 20cmm. mass rate of air, kg/s"

REMOVAL=MassRate_air*(w1-w2) "removed water from air, kg/s"

"Capacity of Cooling"

SV_refri=VOLUME(R22,T=T[1],P=P[1]) " specific volume of refrigerant, m³/kg "

VolumRate_refri=177.44*3500*0.000001/60 " volume flow rate of refrigerant, m³/s "

MassRate_refri=VolumRate_refri/SV_refri " mass rate of refrigerant, kg/s "

Q_chill=q_Evap*MassRate_refri*0.7 " capacity of cooling, kw. Refrigerant Efficiency=0.7 "

"Properties of Chilled Air"

P_air=(10/10332+1)*101.325

w1=HUMRAT(AirH2O,T=T_AMB,P=101.325,R=RH_AMB)

w2=HUMRAT(AirH2O,T=T_chill,P=P_air,R=1)

C_air=SPECHEAT(AirH2O,T=T_AMB,P=101.325,R=RH_AMB)

T_chill=T_AMB - Q_chill/(MassRate_air*C_air)*0.7

"temperature of chilled air,fin efficiency=0.5, air specific heat, 1.005 kj/kg-c"

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션의 결과

EES 프로그램 실행 결과 비가역적인 요소를 고려한 증기압축사이클에서 팽창밸브 출구를 제외하고 각 주요지점에서 압력은 표준사이클보다 약간 낮게 나타났다. 특히 비가역의 실제 사이클에서 압축후 온도가 표준사이클에서보다 약 3.6℃ 높게 나타났다. 또한 비가역적인 요소에 의해 압축기의 일량(W_c)의 증가로 인해 실제 성적계수(COP)는 약 3.3으로 표준사이클의 성적계수 6.5보다 낮게 나타났으며 냉각 후 공기의 온도는 약 7℃로 유사하였다.

표 5. 냉각기 주요지점의 냉매 상태 예측

	압력(kPa)		온도(℃)		엔탈피(kJ/kg)		엔트로피(kJ/K-kg)	
	표준	비가역	표준	비가역	표준	비가역	표준	비가역
증발기 출구(1)	497.4	492.5	0	1.9	250.0	252.2	0.9269	0.936
압축기 출구(2)	1354	1352	51.45	85.38	274.8	303.3	0.9269	1.01
응축기 출구(3)	1354	1345	35	30	87.7	81.38	0.321	0.3004
팽창변 출구(4)	497.4	517.1	0	1.194	87.7	83.82	0.3329	0.3094

표 6. 냉각기의 성능 및 냉각공기 온도 예측

	표준 사이클	비가역성을 고려한 증기압축사이클
성적계수 (COP)	6.536	3.304
응축기의 발열량 (Q_{con})	187.1 kJ/kg	221.8 kJ/kg
증발기의 발열량 (Q_{evap})	162.3 kJ/kg	168.4 kJ/kg
압축기의 일량 (W_c)	24.83 kJ/kg	50.97 kJ/kg
냉각능력 (Q_{chill})	24.55 kW	25.19 kW
냉각 공기 온도 (T_{air})	7.229 ℃	7.842 ℃

표 7. 주요지점에서 실제 곡물냉각기와 성능비교

		비가역성을 고려한 증기압축사이클	실제 사이클
압력(kPa)	압축기 출구(입구)	1352(492.5)	1369(506.3)
온도(℃)	증발기 출구	3	5
	압축기 출구	85.38	89
	응축기 출구	30	31
	팽창변 출구	1.194	0
	냉각된 공기	7.842	8

나. 냉각기 감도분석

냉각시스템에 적용하는 감도(Sensitivity)분석 중 하나는 각각의 장치(압축기, 응축기, 증발기, 팽창밸브)의 능력변화가 냉동능력이나 성적계수에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 이 감도분석 결과 압축기의 능력이 냉각시스템에 지배적인 영향을 주며 다음으로 증발기의 능력이 중요하다고 연구·조사되었다.

이에 본 연구에서는 냉각시스템에 영향을 주는 주요인자로 압축기 효율 및 증발기의 압력강하를 변화 했을 경우 나타나는 현상을 살펴보았다.

표 8. 압축효율 선정시

압축효율	COP	압축후 예측 온도(℃)	압축후 실제온도(℃)
0.5	3.304	85.23	89
0.6	3.965	75.07	
0.7	4.626	67.77	

표 9. 증발기의 압력강하 선정시(압축효율 0.5인 경우)

압력강하(%)	COP	압력강하(kPa)	전형적인 압력강하(kPa)
5	3.304	19.6	15~30
6	3.965	24.6	
7	4.626	29.2	

표 10. 냉동능력이나 성적계수에 영향을 미치는 비가역적인 요소

각 지점	변수	성능
1. 압축기	압축효율 증가	COP 증가
2. 증발기	압력강하(2개 변수) 감소	COP, 냉각능력, 냉각온도 증가
3. 압축기	압력강하(2개) 증가	COP 증가
4. 팽창밸브	엔탈피 증가	COP 감소
	엔트로피 증가	

4. 요약 및 결론

1. 냉각기 각지점에서의 비가역적인 요소를 직접 측정하여 실제 사이클의 성능을 분석할 수 있는 모델을 개발하였다.
2. 냉각장치에서의 냉동능력이나 성적계수는 주로 응축온도, 증발온도, 압축기 효율, 냉매의 과냉각도, 냉매증기의 과열도에 따라 변화하며 그 중 성능에 큰 영향을 미치는 것은 압축기 효율이었다. 압축기 효율이 0.5 일 때 냉각기의 압축 후 실제 냉매의 온도는 약 89℃로서 모델의 예측온도 85℃에 근접함을 알 수 있었다.
3. 표준사이클과 비가역성을 고려한 증기압축사이클에서 냉각기 주요지점의 냉매 상태를 예측해 본 결과, 압력손실로 인한 증발기 출구에서 압력이 약 4.9kPa 감소하였고, 응축기에서 팽창밸브 사이에서는 엔탈피가 약 2.44kJ/kg의 상승하였으며, 증발기와 압축기 사이에서는 엔트로피가 약 0.074kJ/K·kg 상승하였다. 이는 각 주요지점에서 비가역적인 요소가 충분히 고려되었음을 나타낸다.
4. 비가역성을 고려한 모델에서의 증기압축사이클과 실제 사이클과의 비교에서 압축기 입구(출구)에서 압력차가 약 17kPa(13.8kPa) 정도로 그 차이는 미소하게 나타났고, 각 주요지점에서의 온도도 거의 유사했으며 냉각된 공기는 모두 약 8℃로 유사하게 나타나 개발한 모델은 냉각시스템 분석에 사용할 수 있음을 보여주었다.

5. 참고문헌

1. 金世榮, 1988. 최신 표준냉동공학, 0 한미출판사.
2. 金東鎭 외 3명, 1991. 냉동공학 및 공기조화, 동명사.
3. 李漢伯, 1997. 열역학. 영운출판사.
4. 서명교, 1998. 냉동 및 공기조화, 에드텍
5. 만민기 외 4명, 1997. 공기조화 및 냉동. 회중당.