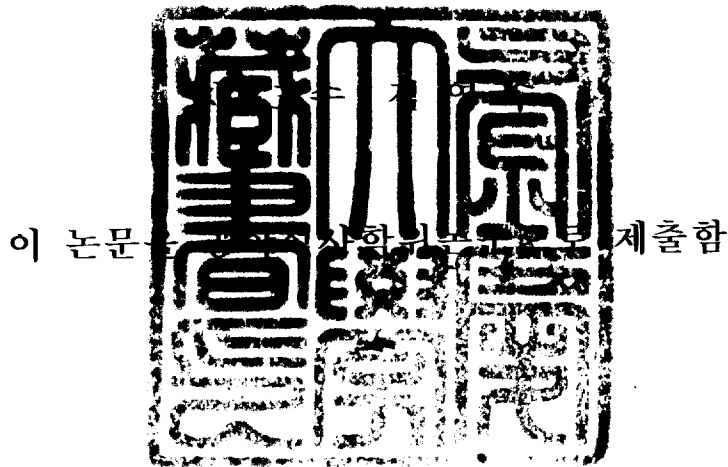


공 학 석 사 학 위 논 문

열전도성 플라스틱을 이용한 김치냉장고용
열교환기에 관한 연구



2005년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

백 정 용

백정용의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월

주 심 공학박사 금 종 수



위 원 공학박사 최 광 환



위 원 공학박사 김 영 수



백정용의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월

주 심 공학박사 금 종 수 (인)

위 원 공학박사 최 광 환 (인)

위 원 공학박사 김 영 수 (인)

목 차

ABSTRACT	I
NOMENCLATURE	III
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 종래의 연구	2
1.3 기초이론	3
제 2 장 실험장치 및 방법	10
제 3 장 수치해석 이론 및 방법	13
3.1 지배 방정식	13
3.2 경계 조건	15
제 4 장 실험장치 및 방법	20
4.1 수치해석 결과	20

4.2 실험결과와 수치해석 결과 비교	23
4.3 수치해석 결과비교	27
4.4 열교환기 내벽온도 비교	43
4.5 알루미늄과 열전도성 플라스틱의 열적 성능 비교	46
 제 5 장 결론	 56
 참고문헌	 57
 감사의글	 59

Research on the Heat exchanger for Kimchi Refrigerator Using Thermal
Conductive Plastic

Jong-Yong, Baek

*Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Graduate
School, Pukyong National University*

Abstract

The kimchi refrigerator is the electric home appliance which is used for the maturing and perserving of the kimchi in domestic and foreign market. The kimchi refrigerator is composed in 3 main parts as insulation, kimchi container, machinery room. The heat exchanger of kimchi refrigerator is made of aluminum and the other parts are made of steel and polymer. Also, kimchi refrigerator is expensive and heavy as compared with same class of refrigerator until now. In this study the possibility to replace heat exchanger from aluminum to thermal conductive plastic was analyzed and experimented. The thermal conductive plastic has 10~100 times heat conductivity than that of normal plastic. We know that heat transfer process is not dependent only conduction but convection or radiation. Thermal conductivity of the applied material in this research is over than 2 W/mK, thermal conductivity doesn't play a vital role on heat transfer. In this study, temperature is the most important parameter on the kimchi refrigerator and the temperature of kimchi refrigerator's heat exchanger was

measured and compared with the temperature calibrated by CFD analysis on the inside wall of the kimchi refrigerator. It is important to keep constantly the inside temperature of the Kimchi refrigerator. Besides numerical analyses for the new thermal conductive plastic for heat exchanger were executed with the various height of evaporation tube. A series of experiments were conducted to compare the performance of the two heat exchanger made of aluminum and thermal conductive plastic at the same condition and certify the possibility of the thermal conductive plastic. According to these results, it was confirmed that the conventional aluminium heat exchanger can be replaced by thermal conductive plastic successfully.

NOMENCLATURE

SYMBOLS

g	: Gravity acceleration	$[\text{m/s}^2]$
h	: Heat transfer coefficient	$[\text{W/m}^2\text{K}]$
Ra	: Rayleigh number	
Re	: Reynolds number	
α	: Thermal diffusivity	$[\text{m}^2/\text{s}]$
β	: Thermal expansion coefficient	$[\text{m}^3/\text{K}]$
C_p	: Specific heat	$[\text{J/kgK}]$
k	: Heat conductivity	$[\text{W/mK}]$
u	: Velocity	$[\text{m/s}]$
ρ	: Density	$[\text{kg/m}^3]$
v	: Specific volume	$[\text{m}^3/\text{kg}]$
T	: Temperature	$[\text{K}]$
L	: Length	$[\text{m}]$
μ	: Viscous coefficient	$[\text{kg/ms}]$

GREEK SYMBOLS

$\Delta \rho$	: density difference	$[\text{kg/m}^3]$
ΔT	: Temperature difference	$[\text{°C}]$

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

오랜 전통을 이어온 우리의 전통 음식인 김치에는 각종 유기산이 존재한다. 김치가 익는 데에는 원료성분의 삼투작용, 미생물의 발효 작용, 저장온도 등이 많은 영향을 미친다. 이 때 소금과 부재료에 의한 용해 성분이 많아 삼투압의 차이가 클수록, 또 온도가 높을수록 빨리 익는다. 김치냉장고는 이런 김치만을 위한 냉장고로서 김치의 맛을 유지시키면서 장기간 보관하는 것을 목적으로 하여 100% 국내 기술로 제작된 가전제품이다. 김치냉장고의 냉각방식은 열교환기에 의해 냉각된 공기가 자연대류를 일으키면서 김치보관고를 냉각시키는 방식이다.

현재의 김치냉장고 제작방식은 동으로 된 증발관과 알루미늄으로 된 열교환기를 따로 만들어 열교환기 주위로 증발관을 배열하는 방식으로, 이는 접촉부의 저항 및 열손실이 발생할 수 있고 제작비도 이중으로 들어가는 문제점이 있다. 이로 인해 생산비용이 높아져 김치냉장고는 동급 용량의 냉장고와 비교할 때 2 ~ 3배 정도 가격이 높다.

열전도성 플라스틱은 일반 플라스틱이 가지고 있는 뛰어난 성형성과 경제성을 가짐과 동시에 우수한 열전달 능력을 가진 물질이다. 열전도성 플라스틱은 열전도도($2 \sim 20 \text{ W/mK}$)가 일반적인 플라스틱의 열전도도(0.2 W/mK)의 10 ~ 100배 정도로 열전달에 있어 많은 가능성을 가진 소재이다.

이에 본 연구는 알루미늄보다 가볍고, 부식성이 덜한 열전도성 플라스틱을 이용하여 기존의 알루미늄 열교환기와 동등한 성능을 가지

는 김치냉장고용 열교환기를 개발하고자 하는 목적으로 실시되었다. 본 연구에서는 기존의 알루미늄으로 제작되던 김치냉장고용 열교환기를 열전도성 플라스틱으로 대체하기 위해서, 알루미늄 열교환기의 내벽 온도를 측정하여 그 결과를 FLUENT를 사용해 얻은 수치해석 결과와 비교·검토하고, 알루미늄과 열전도성 플라스틱 열교환기에 대한 수치해석을 실시하여, 그 내부 온도를 비교함으로써 열교환기의 대체 가능성을 확인하고 실제 적용품의 성능을 비교하였다. 또한 이를 직접냉각방식을 사용하는 쌀냉장고, 화장품냉장고등에 적용할 계획이다.

1.2 종래의 연구

김치냉장고 내부의 열적 유동이나 증발관의 위치 변화에 따른 내부 공기 유동의 변화에 대한 종래의 연구는 거의 전무한 실정이다. 이는 김치냉장고가 국내에서만 사용된다는 점이 그 주원인이라 할 것이다. 하지만 김치냉장고 내부의 유동분포와 열전달 특성에 관해서는 약간의 연구가 이루어지고 있다.

Yoon¹⁾은 상용 열유동 해석코드인 CFX를 사용하여 김치냉장고 내부의 유동 및 열전달 특성에 대해 연구하여 김치냉장고 내부에서의 공기 유동에 대해 규명하였다.

또한 김치냉장고 내의 냉각에 관여하는 자연대류 유동에 관해서는 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다.

오종윤²⁾은 수직사각형 밀폐공간 내부에서의 자연대류에 의한 열전달 및 유동특성에 대해 연구하였고, 이승만³⁾은 정사각형 밀폐실내의 비정상 자연대류에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

1.3 기초이론

1.3.1 열전도성 플라스틱의 알루미늄 대체 가능성

현재 김치냉장고의 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체하기 위해서 간단한 1차원 열전도 모델을 Fig. 1과 같이 가정하면,

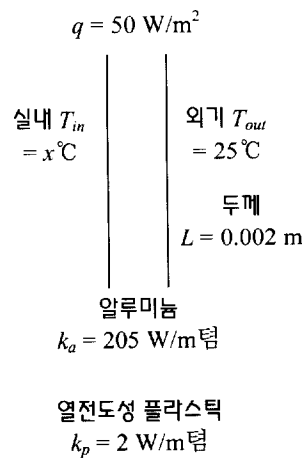


Fig. 1 열전도 모델

전도에 의한 열유속 q [W/m^2]는 아래의 식으로 계산되어진다.

$$q = \frac{k}{L} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

여기서, k 는 열전도도 [$\text{W/m} \cdot \text{K}$], L 은 두께 [m], T_{out} 은 외기온도 [$^\circ\text{C}$], T_{in} 은 실내온도 [$^\circ\text{C}$]이다.

알루미늄의 경우와 열전도성 플라스틱의 경우에 대하여 식 (1)을 사용하여 실내온도를 계산해보면,

알루미늄의 경우

$$50 = \frac{205}{0.002} \times (25 - T_{in})$$

$$T_{in} = 24.99^{\circ}\text{C}$$

열전도성 플라스틱의 경우

$$50 = \frac{2}{0.002} \times (25 - T_{in})$$

$$T_{in} = 24.95^{\circ}\text{C}$$

위의 결과와 같이 비록 알루미늄과 열전도성 플라스틱의 열전도도는 약 20배의 차이가 나지만 전도에 의한 실제 온도에는 0.04°C 밖에 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있다.

또한 열전도도가 2 W/mK 이상의 경우에 열전달은 전도보다는 주로 대류에 의해 영향을 받는다는 것이 알려져 있다.^{4,5)}

1.3.2 기존 열전도성 플라스틱 제품의 특성 비교

현재 열전도성 플라스틱은 L사와 C사에서 생산되고 있으며 그 특성은 Table 1, 2에 비교해서 나타내었다.

열전도성 플라스틱은 기존의 플라스틱에 열전도성 특성을 부여하

기 위해서 첨가제로 세라믹을 40~50% (volume) 또는 20%wt 첨가하여 제작된다. 그리고 강도를 유지하기 위해서 유리섬유(Glass Fiber) 10~20% (volume) 또는 30wt% 첨가한다. 그 외에 착색제, 열안정제와 같은 각종 첨가제와 베이스(base) 수지를 블렌딩(blending)하여 열전도성 플라스틱을 제조한다.

Table 1 Comparison properties of LG Chem. goods

제품명	PN-9007	PN-9008	PN-9019	PX-9001FE	PX-9009F
수지	PPS	PPS	PPS	PBT	PBT
열전도도(W/mK)	1.6	1.7	15	1.9	1.6
비중	1.96	1.95	1.95	1.8	2.03
인장강도 (kg/cm ²)	1000	750	500	750	690
신율	< 5%	1%	1%	2%	1%
굴곡강도 (kg/cm ²)	1400	1300	900	1200	1130
Inorganic filler (세라믹)	40 ~ 50	40 ~ 50	40 ~ 50	20wt%	20wt%
Glass fiber	10 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 20	30wt%	30wt%
Others	-	-	-	-	-

Table 2 Comparison properties of Coolpolymer goods

제품명	D3602	D3604	D5104	D5106	D5108
수지	PA 4, 6	PA 4, 6	PPS	PPS	PPS
열전도도(W/mK)	1.2	1.75	4.5	2.0	10
비중	1.4	2.2	1.9	2.8	1.8
인장강도 (kg/cm ²)	877	785	560	214	408
신율	1.8%	0.94%	0.28%	0.66%	
굴곡강도 (kg/cm ²)	1326	1326	897	704	

제품명	D5502	E1501	E4503	E5101
수지	LCP	PP	PC	PPS
열전도도(W/mK)	1.5	10	10	20
비중	1.7	1.2	1.4	1.7
인장강도 (kg/cm ²)	704kg/cm2	255kg/cm2	306kg/cm2	592kg/cm2
신율	0.6%	1.5%	0.35%	0.46%
굴곡강도 (kg/cm ²)	1325kg/cm2	408kg/cm2	510kg/cm2	846kg/cm2

1.3.3 블렌딩 (Blending)

블렌딩은 플라스틱의 최종 용도에 있어서 적용되어지는 고분자 중합물의 유용성을 증대시키기 위한 조작과정 중의 하나로 플라스틱의 성질을 변화시켜 특정의 최종용도에 적용할 수 있는 화학변화 혹은 첨가제를 사용해서 행하는 플라스틱 재료의 변성이다.

석재나 목재의 응용처럼 천연으로부터 얻을 수 있는 여러 가지 종류의 재료 성질을 변화하는 것 없이 그대로 실용에 가장 적합한 형태로 성형가공하여 이용하는 것과는 달리, 플라스틱의 성형가공은 본래의 합성 고분자 화합물의 성질을 그대로 실용하는 것이 아니고, 그 성형가공단계에 있어서 최종 용도에 적용하기 위한 특성을 유지하도록 재질의 변성을 행하는 것이 일반적이다.

플라스틱 재료의 배합의 기본적 사항은 금속재료에 있어서의 재료 배합과 마찬가지로 본질적으로 유기재료인 것과 또한 그것이 고분자 화합물로부터 플라스틱 특성의 취급상의 한계가 있는 점으로 양자에 큰 차이가 있고, 이것이 플라스틱 재료의 배합조작을 복잡하게 하고 있다. 즉, 플라스틱을 기본적으로 구성하는 고분자 중합물은 일반적으로 용융 온도가 300℃ 이상의 것은 없고 또한 연화 온도는 용융 온도보다 훨씬 낮고 더구나 유동성도 양호하다.

또한 고분자 중합물 또는 초기 축합물로부터 얻을 수 있는 단독조성의 플라스틱의 종류로는 최종용도에 있어서 요구되는 제특성을 구비할 수 없기 때문에 금속 재료의 경우와는 다른 훨씬 광범위한 배합제가 복잡하게 이용되어 플라스틱의 실용 특성을 개선하여 유용성을 증대시키는데 그 목적이 있다.

플라스틱의 성형 가공의 준비단계로서의 재료 배합에는 크게 나누어서 2개의 목적이 있다. 그 하나는 유기 고분자 중합물의 성형가공에서 발생하는 열의 영향으로부터 부분적 분해를 피하기 위한 열안

정제, 또는 그때의 고분자를 진행시키기 위한 경화제 내지 경화촉진제, 가열 온도를 가능한 저하시키고 유동성 향상에 유용한 가소제 혹은 그 외의 약제, 금형이나 다이(Die) 등의 마찰 저항을 낮추고 금형분리를 양호하게 하기 위한 윤활제 등 이른바 플라스틱 재료의 성형가공성을 향상시키기 위한 물질을 배합하는 것이다.

다른 하나의 목적은 그와 같은 배합의 노하우를 얻어 적정하게 성형가공 시킨 플라스틱 최종 제품이 그 실용환경에 있어서 견딜 수 있는 각종 요구 특성의 발현과 그 지속에 필요한 약제를 배합한 것으로, 특히 기계적 특성이나 물리적 특성, 전기적, 열적 특성에 대응시키기 위해서 보강제 내지 충전제 등 각종 약제를 적정 배합하는 것이다.

열경화성 플라스틱이나 열가소성 플라스틱의 단량체에 소정의 배합제를 배합해서 균일한 액상 혼합물을 만들어 주형 내지는 발포성형으로 제품을 만들지만, 일부의 열가소성 플라스틱의 경우에 분말상으로 고분자 중합물에 소정의 각종 배합제를 배합해서 간단히 혼합한 후 그대로 직접 압출기나 롤러에 넣은 것도 있다.

블렌딩은 그 주성분인 고분자 중합물 또는 초기 축합물에 대해서 필요한 각종 배합제를 적정하게 편성해서 혼합해서 그들의 균일분산을 충분하게 예측하고, 적용 성형 방법에 따라 원하는 재료 형태를 구비하도록 하는 것이다.

제 2 장 실험 장치 및 방법

김치냉장고의 개략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 김치냉장고는 크게 단열재와 김치보관고, 그리고 기기실로 나눌 수 있다. 단열재는 우레탄 폼(urethane form)으로 열교환기를 둘러싸고 밀착되어 있으며, 열교환기의 위에는 상부덮개가 있어 냉기를 단속하게 된다. 열교환기는 알루미늄으로 제작되어 있으며 외부에는 냉각을 위한 동으로 된 증발관과 김치 숙성을 위한 열선이 감겨져 있다. 증발관은 열교환기의 바닥으로부터 260 mm 높이에서부터 45 mm 간격으로 4열 그리고 상부에는 2 mm 간격으로 3열, 총 7열로 감겨져 있다. 그리고 용접에 의해 고정된 것이 아니기 때문에 접촉 면적을 크게 하기 위해서 증발관을 가공해 증발관은 타원형의 모양을 이룬다. 그리고 열교환기의 아랫부분에는 김치의 숙성을 위한 열선이 감겨져 있으며, 김치냉장고의 하부에는 냉동을 위한 압축기, 응축기 등이 있는 기기실이 있다.

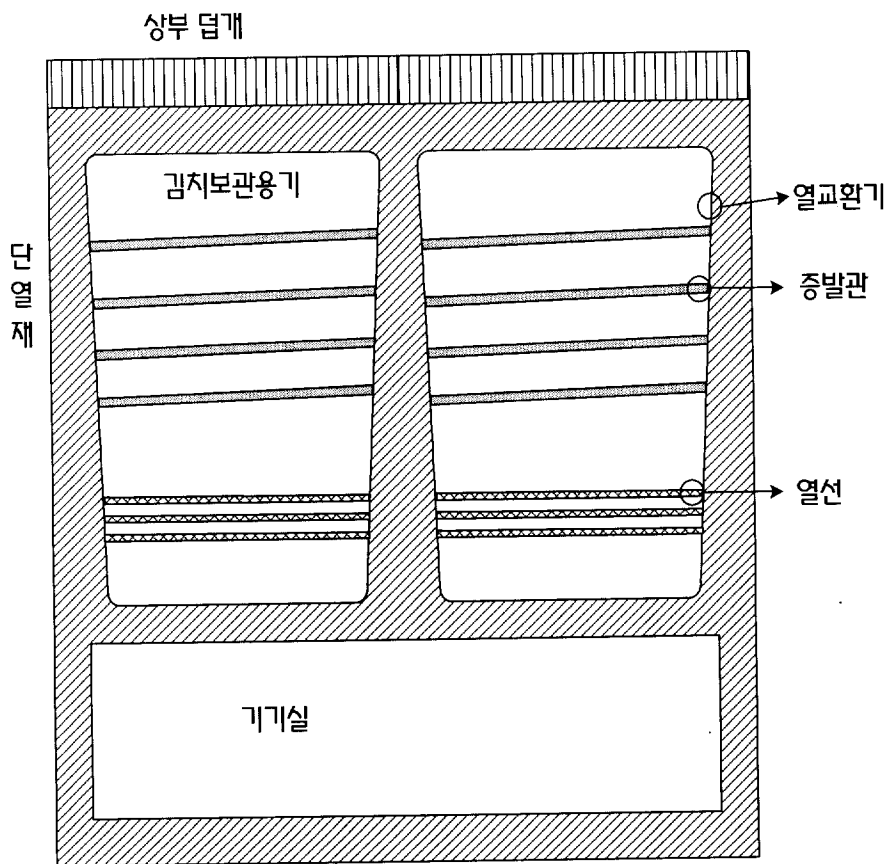


Fig. 1 Schematic of kimchi refrigerator

실제 김치냉장고의 열교환기 내벽 온도를 측정하기 위해서 Fig. 2와 같이 40개 지점에서 온도를 측정하였다. 그리고 동일 높이 10개소의 온도를 시간 평균한 값을 각 지점의 온도로 사용하였다. 온도 측정은 보정된 T-type 열전대를 사용하였으며, 측정데이터는 FLUKE사의 NetDAQ을 사용하여 실시간으로 PC로 전송, 처리하였다.

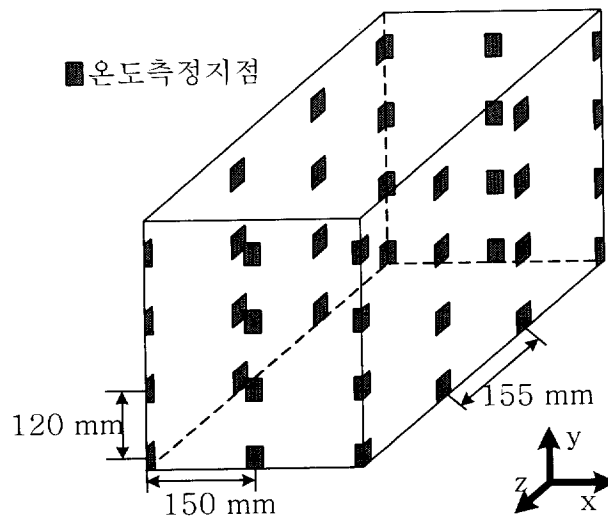


Fig. 2 positions of measuring temperatures

제 3 장 수치해석 이론 및 방법

3.1 지배방정식

대류유동에서의 부력의 영향은 Grashof수와 Reynolds수의 비로써 측정할 수 있다.

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\Delta\rho gh}{\rho v^2} \quad (2)$$

이 수가 1에 접근하거나 초과할 때는 유동에 대한 큰 부력의 영향이 기대되고, 반대로 이 수가 아주 작을 때는 부력은 무시될 수 있다. 순수한 자연대류에서 부력에 의해 야기된 유동의 크기는 Rayleigh수에 의해 측정된다.

$$Ra = g\beta\Delta TL^3 \frac{\rho}{\mu\alpha} \quad (3)$$

여기서 β : 열팽창 계수 [1/K]

$$\beta = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T} \quad (4)$$

그리고 α : 열확산성 [m^2/s]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (5)$$

3.1.1 보시니스크 모델 (Boussinesq Model)

많은 자연대류 유동에서 보시니스크 모델을 사용함으로써 유체의 밀도를 온도의 함수로 정한 것보다 더 빠르게 수렴할 수 있다. 이 모델은 운동량 방정식에서의 부력항을 제외하고는 모든 알려진 방정식에서의 밀도를 일정한 값으로 취급한다.

$$(\rho - \rho_0)g \cong -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (6)$$

여기서 ρ_0 는 유체의 밀도(일정), T_0 는 동작 온도, 그리고 β 는 열 팽창계수다. 식 (8)는 부력항으로부터 ρ 를 계산하기 위해서 보시니스크 근사 $\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T)$ 를 사용함으로써 얻어진다.

3.1.2 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (7)$$

$$(\nabla \cdot U) = 0 \quad (8)$$

여기서, $U = (u, v)$, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$

3.1.3 운동량 방정식

자연대류에서 Navier-Stokes 방정식을 보시니스크 근사를 사용하면 아래의 식과 같이 나타난다.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

$$\rho \frac{dU}{dt} = - \nabla p + \mu \nabla^2 U + g(\rho_0 - \rho) \quad (10)$$

여기서 U , p 는 각각 공기의 속도와 압력이며, ρ , μ 및 g 는 공기의 밀도, 점성계수, 중력가속도를 나타낸다. 공기유동의 속도 및 온도차가 크지 않기 때문에 부력항은 Boussinesq 근사를 이용하였다.

3.1.4 에너지 방정식

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S \quad (11)$$

여기서 T 는 공기의 온도이며, C 와 k 는 공기의 정압비열, 열전도도를 나타낸다. S 는 압력구배와 비정상항을 의미하는 생성항이고, 오직 시간에 대한 변화율을 고려한다면 $u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ 이다. 그리고, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \nabla^2 T$ 이고, $S = 0$ ($\because$ 비정상항과 압력구배는 무시)이므로 에너지 방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\rho C \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (12)$$

3-2. 경계조건

해석모델은 Fig. 3과 같으며 해석 격자는 Fig. 4와 같다. 수치해석을 위해 기기실을 제외한 김치냉장고 내부만을 2차원으로 단순화시키고, 열교환기와 증발관, 단열재 그리고 김치보관고만을 고려하였으며, 김치냉장고는 좌우 대칭이므로 한 쪽만을 해석하였다. 김치보관고 내부(김치)는 2.5%의 유동이 없는 소금물로 가정하였다. 본 해석에서는 증발관과 열교환기 사이의 접촉면을 4 mm로 일정하게 접촉한다고 가정하였다. 계산의 정확도를 높이기 위해서 열교환기에서 증발관이 감겨있는 부분은 정렬격자를 사용하여 다른 곳보다 조밀하게 격자를 분포시켰다. 계산에 사용된 격자의 개수는 약 13만 개이며, 수렴판정 기준은 지배방정식의 잔류량을 10^{-3} 이하로 하였다.

Table 3에 해석에 필요한 물질의 물성치를 나타내었고, Table 4에는 수치해석의 경계조건을 나타내었다.

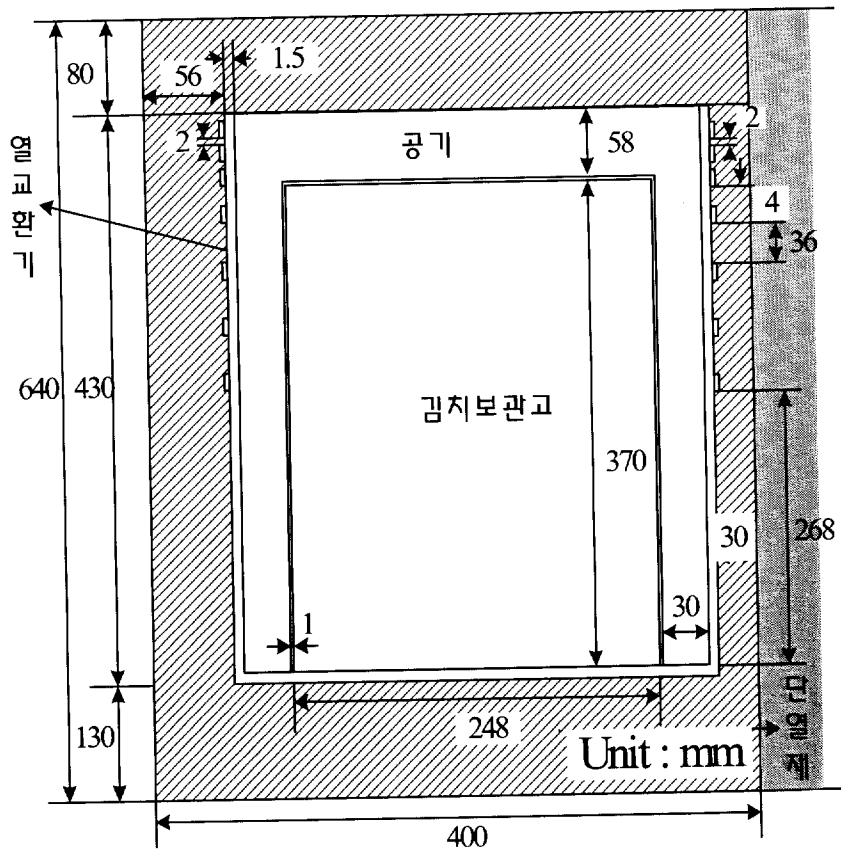


Fig. 3 Schematic of modeling

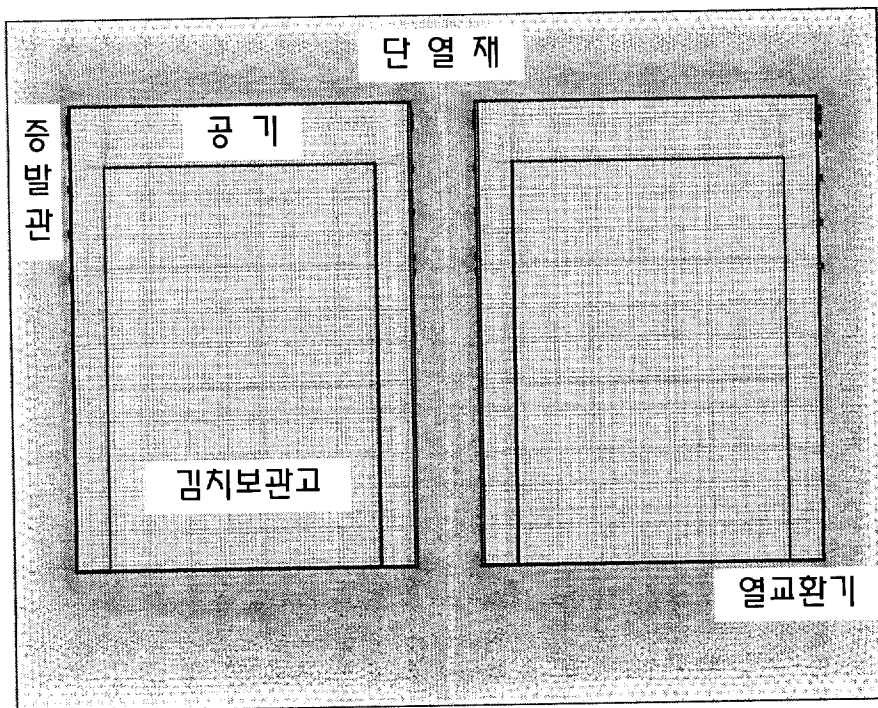


Fig. 4 Grid configuration

Table 4 Material properties

Material	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)
Air 0℃, 1 atm	1.2874	1006.08	0.002267
Heat absorbing Plate (Thermal plastic)	1190	1500	20
Insulation (우레탄 폼)	38	1590	0.021
Kimchi container (Plastic)	1190	1500	0.2
Kimchi (Salt water)	1155.1	33.85	0.454

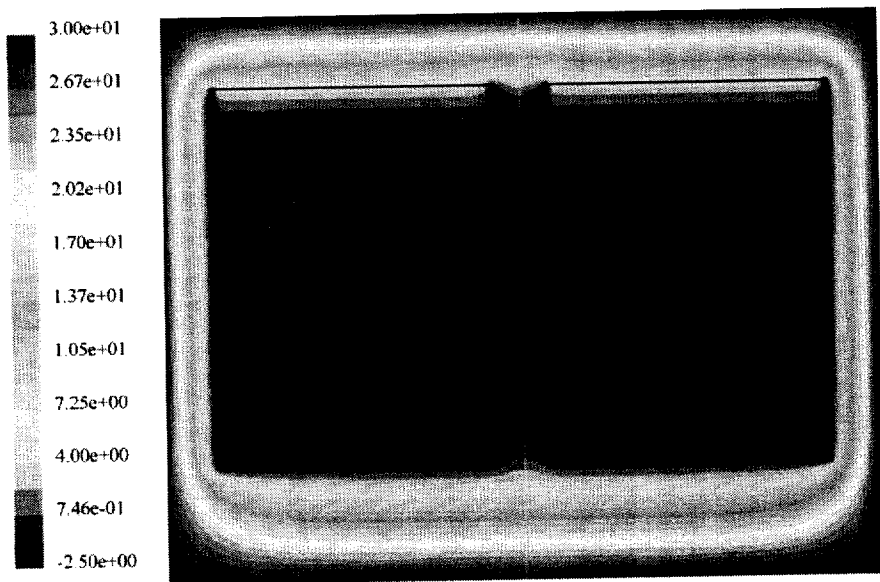
Table 5 Boundary conditions of CASE 1

CASE 1	Boundary conditions
증발관 김치냉장고 외부 중력 가속도	-2.5℃ 30℃ -9.81 m/s ²

제 4 장 실험 결과

4.1 수치해석 결과

기존 알루미늄 열교환기의 수치해석 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 알루미늄의 열전도도가 뛰어나기 때문에 증발관을 통해 열교환기로 전달된 냉기가 공기층 전체에 걸쳐서 고루 분포되고 있는 것을 알 수 있다. 유동분포도 공기층 전체에서 활발히 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.



Contours of Static Temperature (c)

Apr 02, 2004
FLUENT 6.0 (2d, segregated, lam)

Fig. 5 Temperature distribution of aluminum heat exchanger

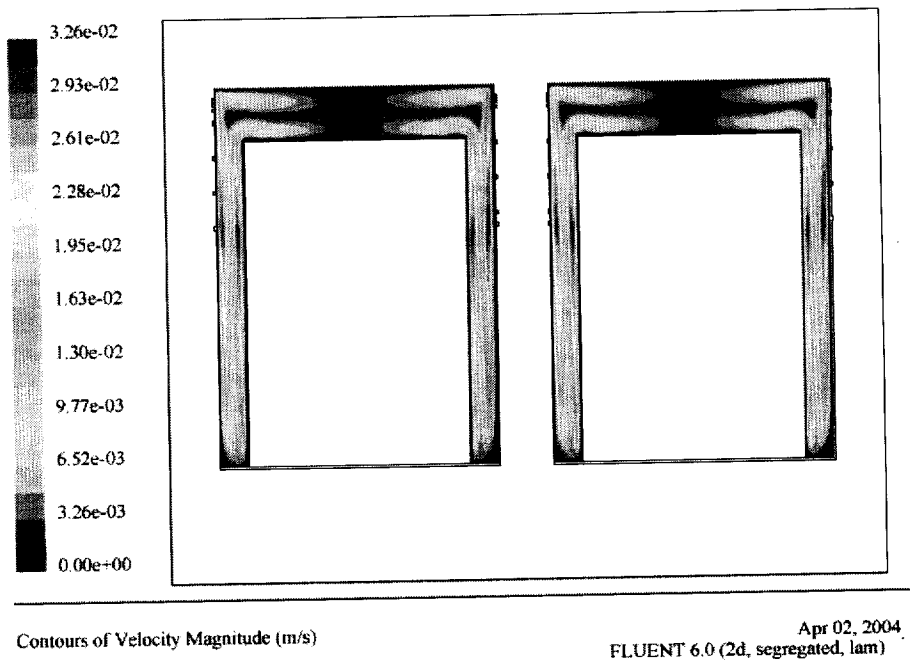


Fig. 6 Velocity distribution of aluminum heat exchanger

4.2 실험결과 및 수치해석 결과 비교

Fig. 7에서 열교환기 내벽의 온도를 측정한 결과와 해석결과를 비교해 보면, 열교환기 하부에서는 0.2°C 정도의 온도차를 보이지만, 증발관이 감기기 시작하는 부분과 열교환기 상부에서는 측정결과와 해석 결과가 잘 일치하는 모습을 보여주고 있다. 이 결과로 본 수치 해석 결과는 신뢰할 만하다고 할 수 있다.

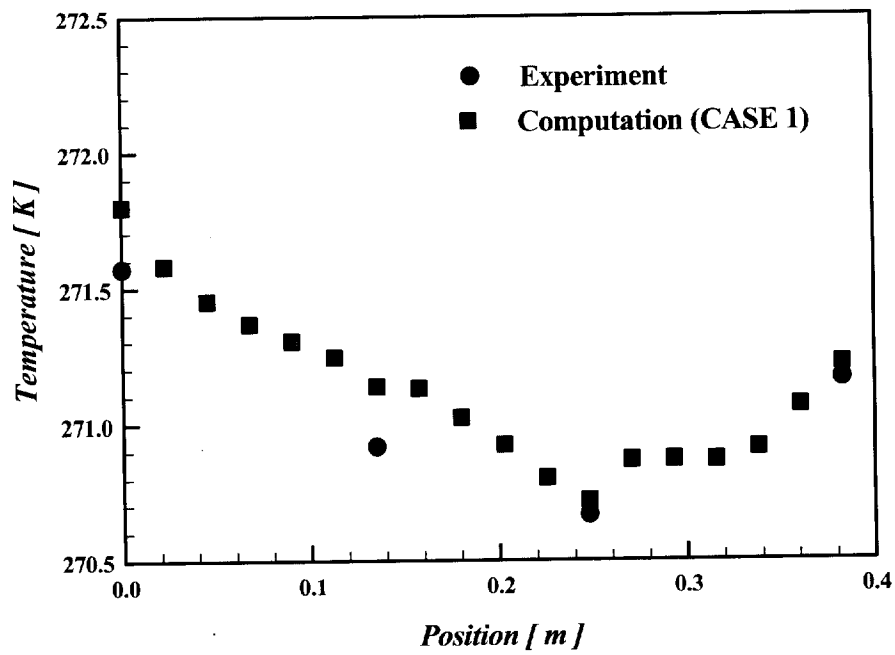


Fig. 7 Comparison of temperature of experiment vs numerical analysis

이에 김치냉장고의 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체시와 증발관의 위치를 변화시켜 보다 나은 증발관 높이를 찾기 위해서 열교환기의 재질과 증발관의 위치에 따른 수치해석을 실시하였다. 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체할 경우 얇은 두께 방향으로의 열전달에는 문제가 없지만, 길이방향으로는 열전달량에 차이가 생길 것으로 생각돼 열전도성 플라스틱으로 대체시에는 증발관의 위치를 전체적으로 23 mm, 45 mm 하향 조정하였다. 그리고 Table 5에는 기존의 알루미늄 열교환기와 비교해서 각 CASE 별 조건의 변화를 나타내었다.

Table 6 Comparison boundary conditions of each CASE

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
증발관 위치	기존	기존	하향 23mm	하향 45mm
열교환기 재질	알루미늄	열전도성 플라스틱		

4.3. 수치해석 결과비교

본 해석에서는 동일 해석모델에서의 증발관의 위치를 변화시켜가며 3가지 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 열전도성 플라스틱으로 대체된 열교환기와 보관용기 사이의 공기층에서 발생하는 자연대류 열전달과 온도, 유동 분포를 살펴볼 수 있다.

그리고 그 결과로 얻어진 데이터에서 Fig. 8에 나타낸 $x = 65.5, 73, 80.5 \text{ mm}$ 와 $y = 516.5, 531, 545.5 \text{ mm}$ 의 6곳에서의 온도 및 속도 분포를 구하였다.

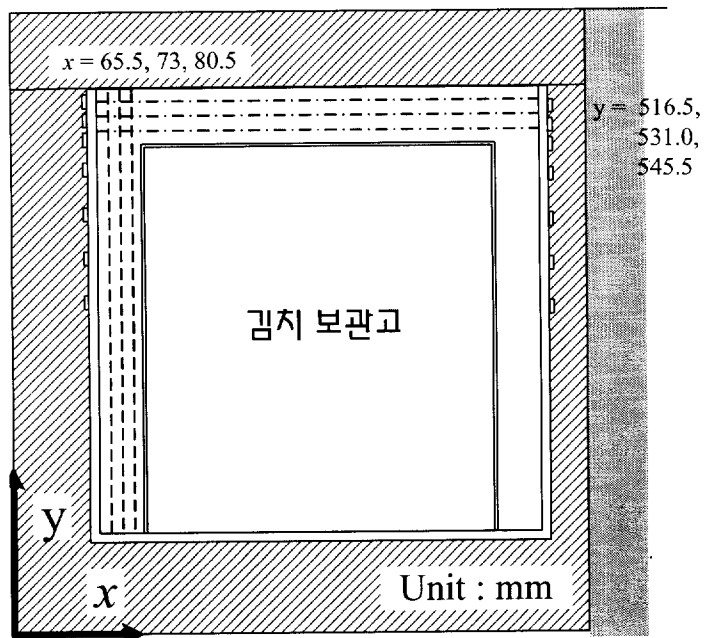
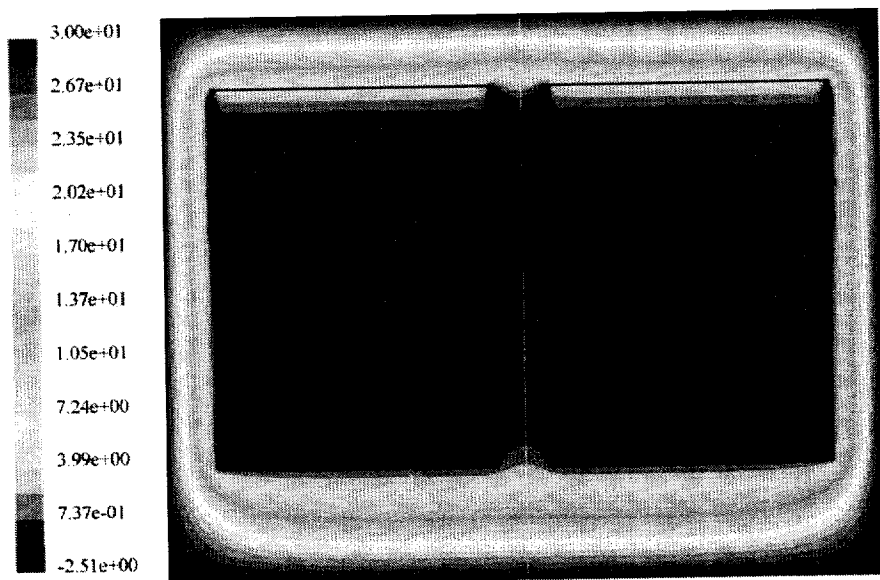


Fig. 8 Measuring lines of temperature and velocity

4.3.1 온도 분포

Fig. 9~11에 각 CASE별 온도분포를 나타내었다. Fig. 9~11의 CASE 2~4는 열전도성 플라스틱 열교환기의 경우로서 Fig. 5의 CASE 1과 비교해 볼 때 알루미늄보다 열전도도가 낮은 열전도성 플라스틱의 특성상 냉기가 아래까지 충분하게 전달되지 못하는 것을 알 수 있다.

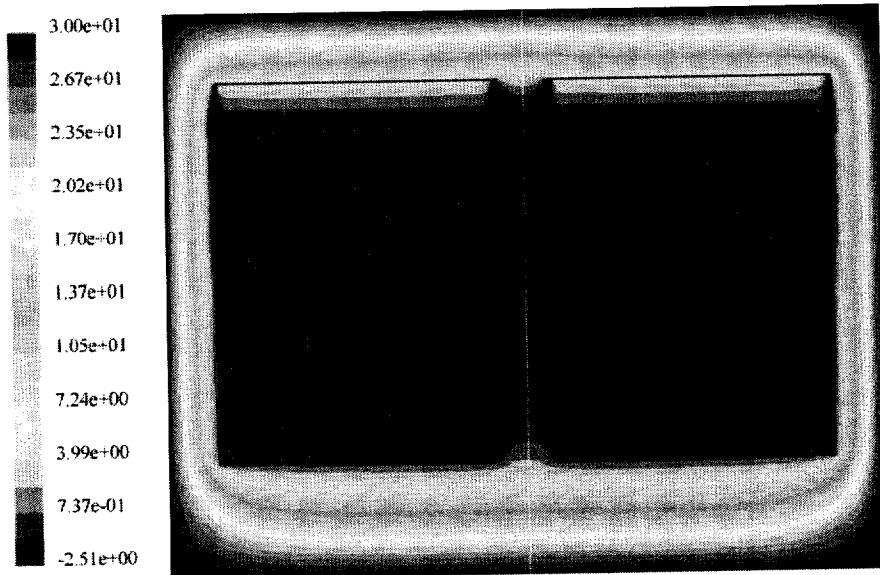
또 Fig. 9~11의 CASE 2~4를 비교해 볼 때 Fig. 10~11의 CASE 3, 4는 증발관의 위치를 Fig. 9의 CASE 2보다 23 mm, 45 mm 하향 조정해준 경우로서 공기층 하부에서는 냉기가 일정부분 하향되는 반면에 공기층 상부의 온도가 높아지고 있다. 하지만 전체적으로 볼 때는 Fig. 9~11에서의 CASE 2~4가 큰 차이가 없어 증발관의 하향은 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.



Contours of Static Temperature (c)

Apr 02, 2004
FLUENT 6.0 (2d, segregated, lam)

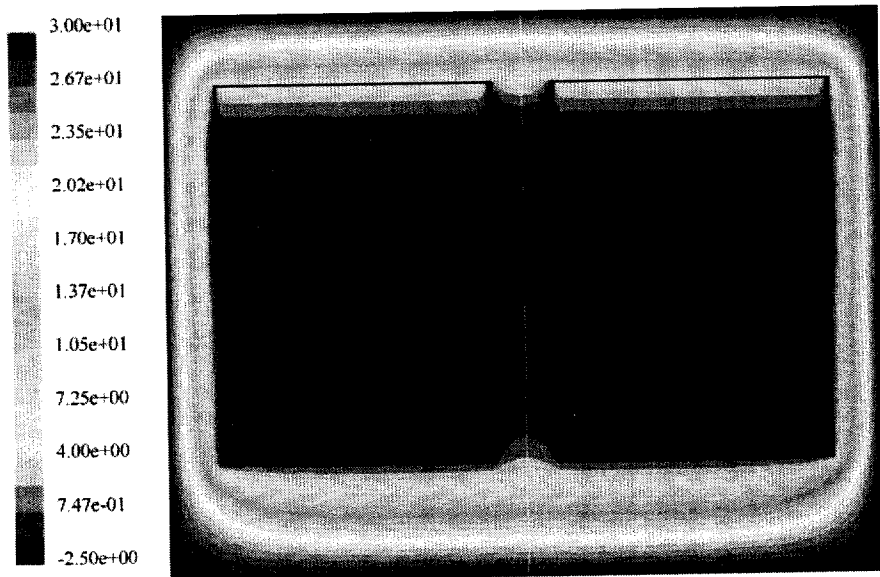
Fig. 9 Temperature distribution of CASE 2



Contours of Static Temperature (c)

Apr 02, 2004
FLUENT 6.0 (2d, segregated, lam)

Fig. 10 Temperature distribution of CASE 3



Contours of Static Temperature (c)

Apr 02, 2004
FLUENT 6.0 (2d, segregated, lam)

Fig. 11 Temperature distribution of CASE 4

그리고 Fig. 12, 13에 각 CASE별 $x = 65.5, 73, 80.5 \text{ mm}$ 와 $y = 516.5, 531, 545.5 \text{ mm}$ 의 6곳에서의 온도분포를 비교해서 나타내었다.

증발관의 위치를 전체적으로 하향조정한 CASE 4의 경우가 공기층 상부에서 가장 높은 온도를 보이고 있으며, CASE 1의 경우가 전체적으로 가장 고른 온도분포를 나타내고 있다.

하지만 전체적으로 볼 때 증발관의 위치 하향은 전체 온도에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 생각된다.

그리고 CASE 1과 비교하여 CASE 2, 3, 4의 경우는 알루미늄과 열전도성 플라스틱의 열전도도 차이로 인해서 하부와 상부의 온도가 약간의 차이를 나타내고 있다.

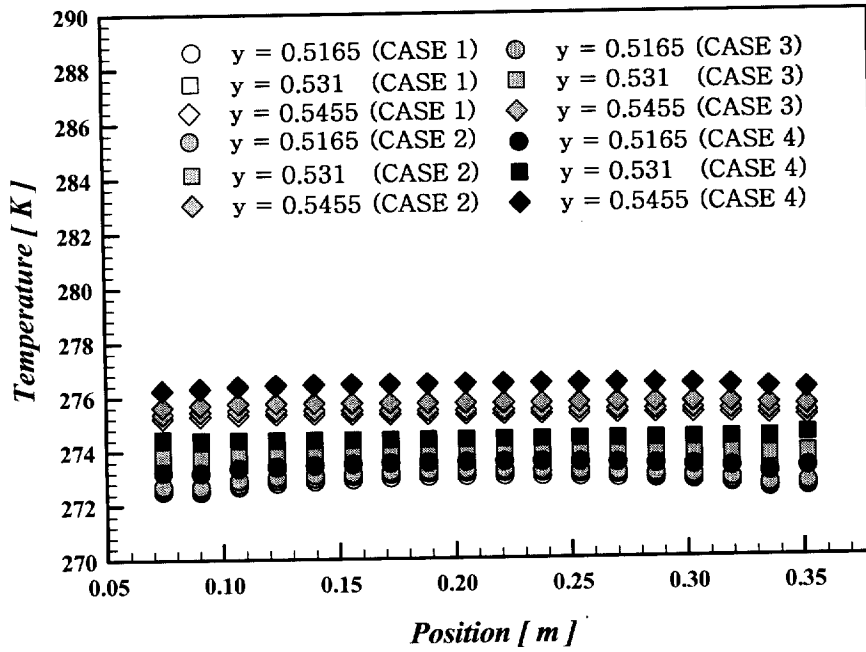


Fig. 12 Comparison of air temperature distribution (y direction)

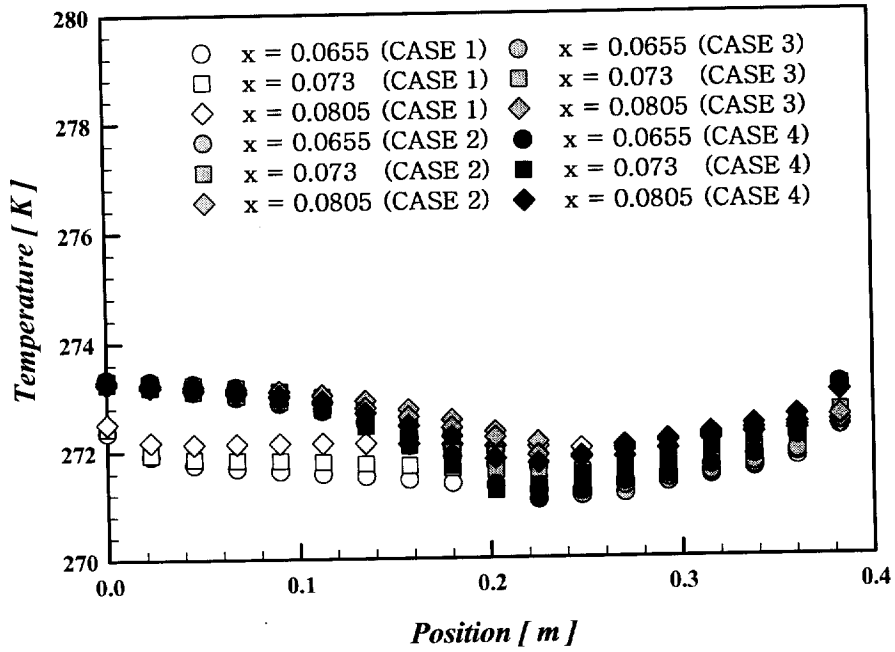


Fig. 13 Comparison of air temperature distribution (x direction)

4.3.2. 속도 분포

Fig. 14~16에 각 CASE별 공기층의 속도분포를 나타내었다. 역시 온도분포 결과와 마찬가지로 Fig. 6의 CASE 1의 경우가 Fig. 14~16의 CASE 2~4에 비해 전체적으로 공기층에서의 유동이 가장 활발히 일어나는 것을 알 수 있다. 공기층에서의 속도분포 또한 온도분포와 같은 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 그 원인도 마찬가지로 열전도성 플라스틱의 열전도도가 알루미늄에 비해 낮기 때문에 길이가 길어지는 길이 방향으로의 열전달량의 차이로 사료된다.

또 Fig. 14~16의 CASE 2~4를 비교해 볼 때 Fig. 15~16의 CASE 3, 4는 증발관의 위치를 Fig. 14의 CASE 2보다 23 mm, 45 mm 하향 조정해준 경우로서 공기의 유동이 공기층 하부로 일정부분 하강하는 모습을 나타내고 있지만 전체적으로 볼 때 증발관의 하향에는 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

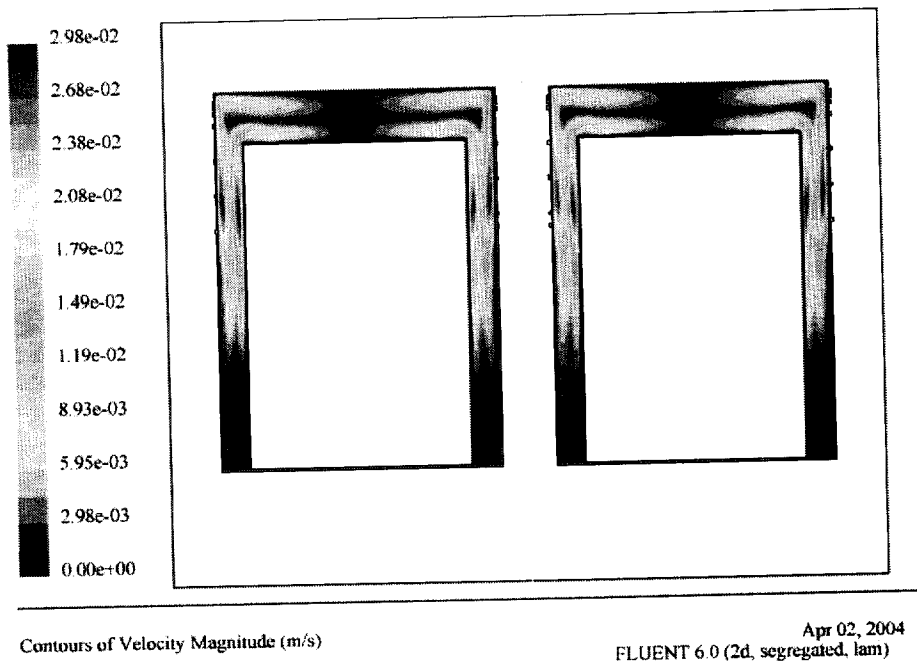


Fig. 14 Velocity distribution of CASE 2

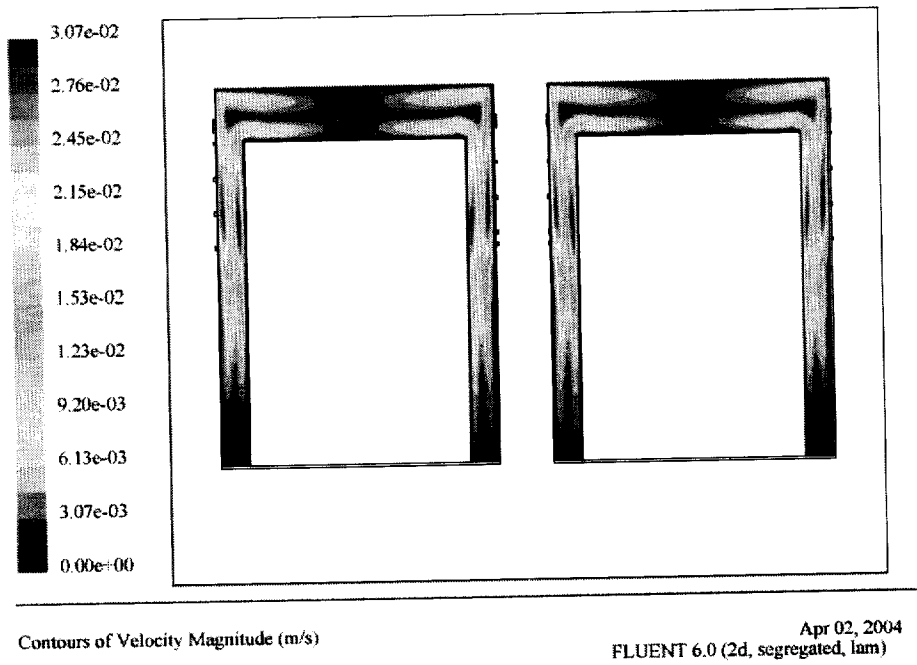


Fig. 15 Velocity distribution of CASE 3

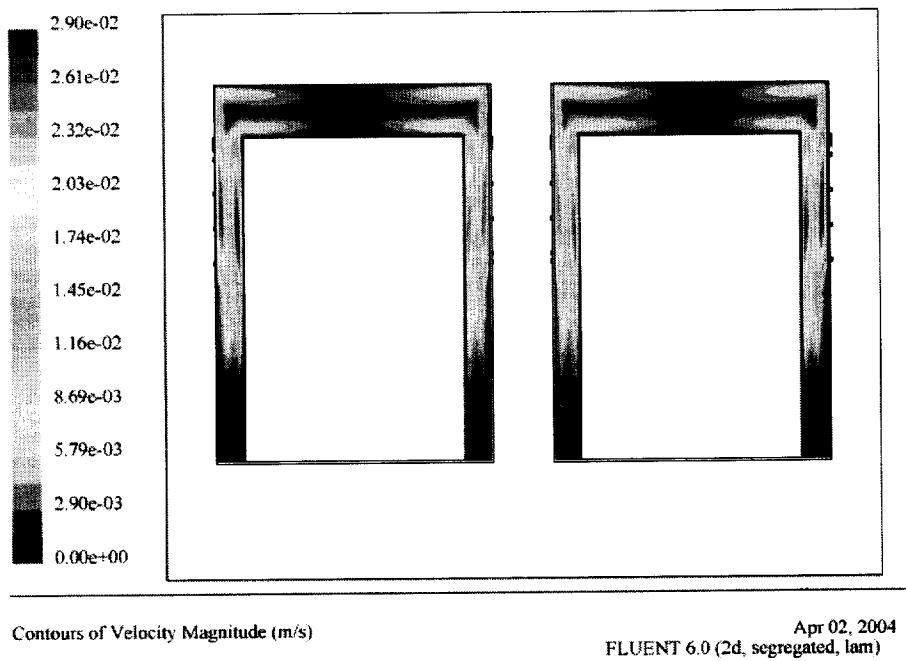


Fig. 16 Velocity distribution of CASE 4

Fig. 17, 18에 각 CASE별 $x = 65.5, 73, 80.5 \text{ mm}$ 와 $y = 516.5, 531, 545.5 \text{ mm}$ 의 6곳에서의 속도분포를 비교해서 나타내었다.

CASE 1의 경우가 공기층의 수직 방향에서 전체적으로 고른 유동 분포를 나타내고 있음을 알 수 있으며 CASE 2~4의 경우는 열전도성 플라스틱의 열전도도가 낮기 때문에 열교환기 하부까지는 냉기가 충분히 전달되지 않아 공기층의 상부에서의 공기 유동은 알루미늄과 거의 차이가 없으나 공기층의 하부에서는 유동이 거의 없는 것을 알 수 있다.

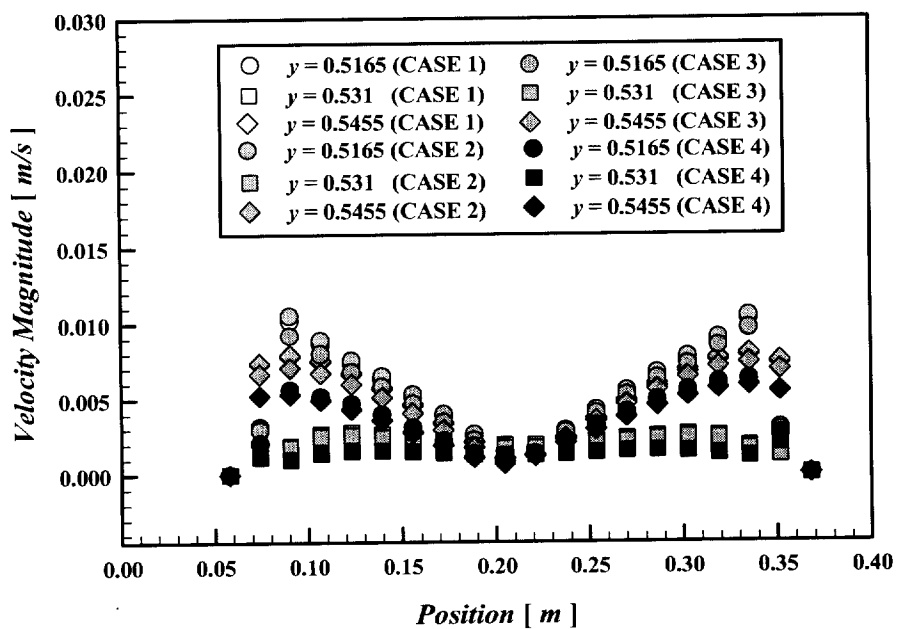


Fig. 17 Comparison of air velocity distribution (y direction)

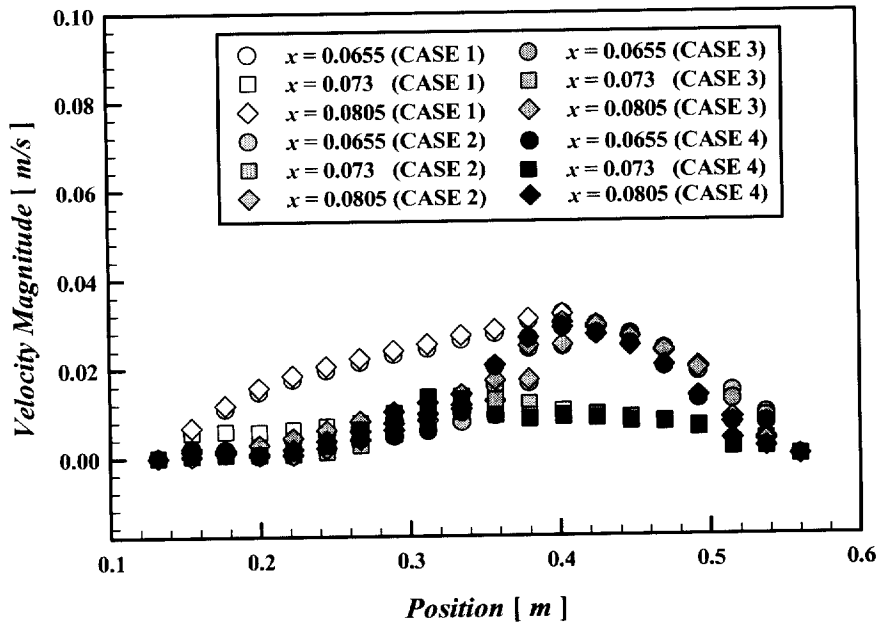


Fig. 18 Comparison of air velocity distribution (x direction)

4.4 열교환기 내벽 온도 비교

각 CASE별 해석결과 중 열교환기 내벽 온도를 Fig. 19에 비교하였다. 열교환기의 내벽온도는 실제 김치냉장고의 보관에 가장 중요한 요소이다. 열전도성 플라스틱의 경우 알루미늄에 비해 상대적으로 낮은 열전도도로 인해 열교환기 하부에서의 온도가 알루미늄에 비해 1℃ 정도 높게 나타났다.

CASE 3과 4와 같이 증발관의 위치를 하향 조정해준 경우 열교환기의 아랫부분의 온도는 CASE 2에 비해 낮아지고 상부의 온도는 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 증발관으로부터의 거리와 열전도성 플라스틱의 낮은 열전도도에 따른 전열량의 차이 때문이다.

공기층에서의 온도 분포와 마찬가지로 증발관의 높이를 전체적으로 하향 조정해준 CASE 3, 4의 경우와 기존의 위치인 CASE 2를 비교해 볼 때, 증발관의 높이 변경에 따라 증발관이 감기는 지점의 온도가 최저점이긴 하지만, 반대로 열교환기 상부에서의 온도가 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서 열교환기 전체적으로 볼 때는 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 이에 기존의 열교환기 위치가 최적의 위치인 것으로 사료된다.

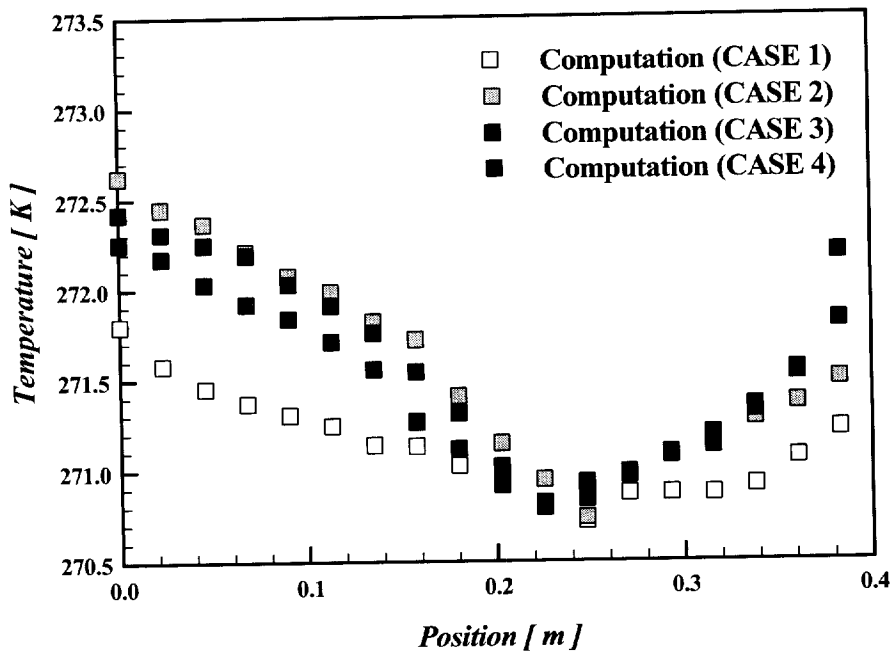


Fig. 19 Comparison of inside wall temperature each CASE

각 CASE별 김치보관고 내의 평균온도를 구한 결과를 Table 6에 나타내었다. 김치냉장고의 열교환기 재질을 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체해도 알루미늄과 열전도성 플라스틱 열교환기의 김치보관고 내 온도차는 최대 약 0.3℃이며, 각 CASE별 김치보관고 내 온도는 모두 김치를 장기간 보관할 수 있는 온도인 $0\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 포함된다.

Table 6 각 CASE 별 김치보관용기 내의 평균온도

	김치보관고 내의 평균온도 (K)
CASE 1	272.67
CASE 2	272.99
CASE 3	272.98
CASE 4	272.99

이상의 결과로 미루어 보아 김치냉장고용 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체하는 것은 충분히 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.5 알루미늄과 열전도성 플라스틱의 열적 성능 비교

실제 열전도성 플라스틱을 김치냉장고에 적용하기 위해서 알루미늄과 열전도성 플라스틱(LG화학, PX-9010F)의 열적 성능을 비교해 보았다. 알루미늄과 열전도성 플라스틱을 동일 규격으로 제작하여 각 부에 온도센서를 부착하여 그 온도변화를 측정했다. 온도센서 부착 지점은 Fig. 20과 같다.

열전소자의 발열량을 24W로 했을 경우의 각 지점의 온도 변화를 Fig. 21, 22에 나타내었다.

그 결과를 보면 알루미늄의 경우 전체 지점에서의 온도가 거의 고르게 변화하는 것을 알 수 있다. 열전도성 플라스틱의 경우 열전소자가 부착된 부근의 온도는 알루미늄에 비해 큰 차이가 없지만 알루미늄과의 열전도도 차이로 인해 거리가 멀어질수록 온도차가 커지는 것을 알 수 있다. 알루미늄과 열전도성 플라스틱의 경우 열전도도차가 크기 때문에 전도에 의한 열전달량의 차이는 상당히 크다는 것이 나타났다.

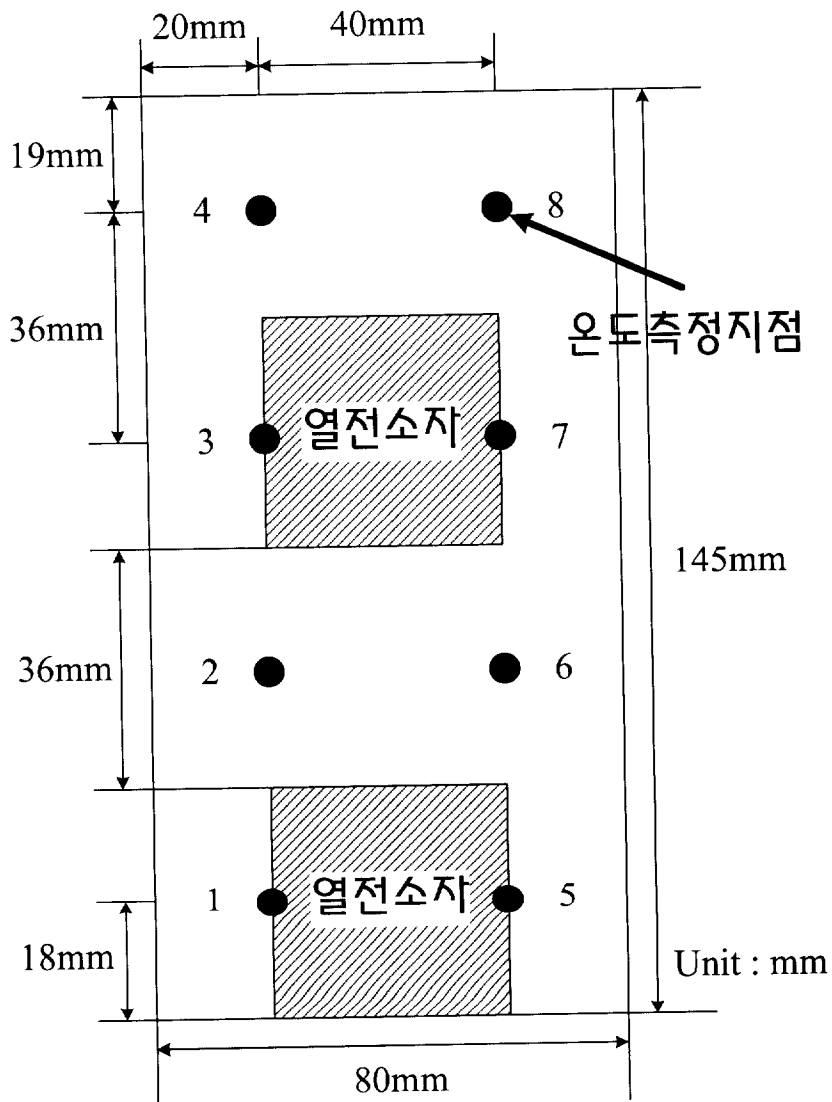


Fig. 20 Positions of temperature measurment

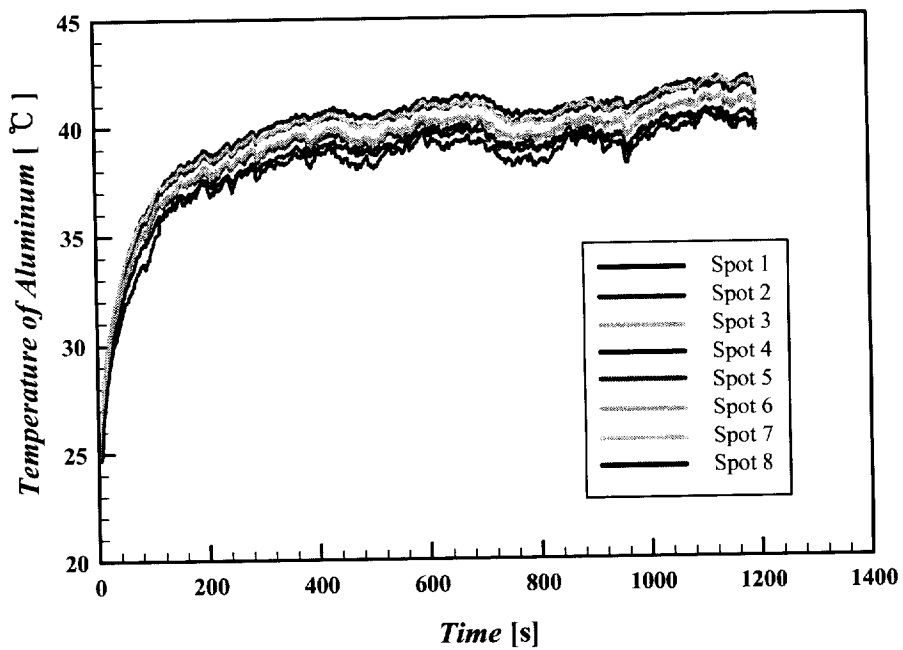


Fig. 21 Temperature distribution of Aluminium

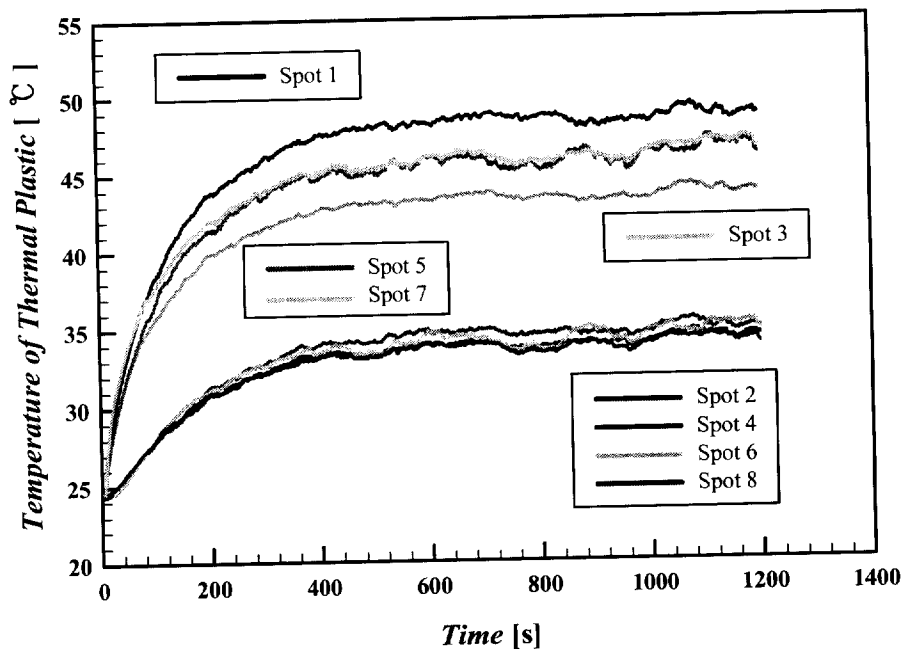


Fig. 22 Temperature distribution of Thermal conductive plastic

그리고 알루미늄과 열전도성 플라스틱을 김치냉장고의 내부(증발관 부분)에 부착하여 그 온도변화 추이를 살펴보았다. 김치냉장고의 내부에 부착하면 전도뿐만 아니라 대류에 의한 열전달량의 영향을 알아보고자 했으며 알루미늄과 열전도성 플라스틱 각 시편의 온도변화 추이를 Fig. 23~26에 나타내었다.

그 결과를 살펴보면 두께 방향으로의 열전달에는 알루미늄과 열전도성 플라스틱에 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 두께가 얇을 경우 열전도도가 일정 수준 (2 W/mK) 이상이면 열전달에는 크게 영향을 미치지 않으며 전도보다는 대류에 의한 영향이 크다는 사실을 알 수 있다.

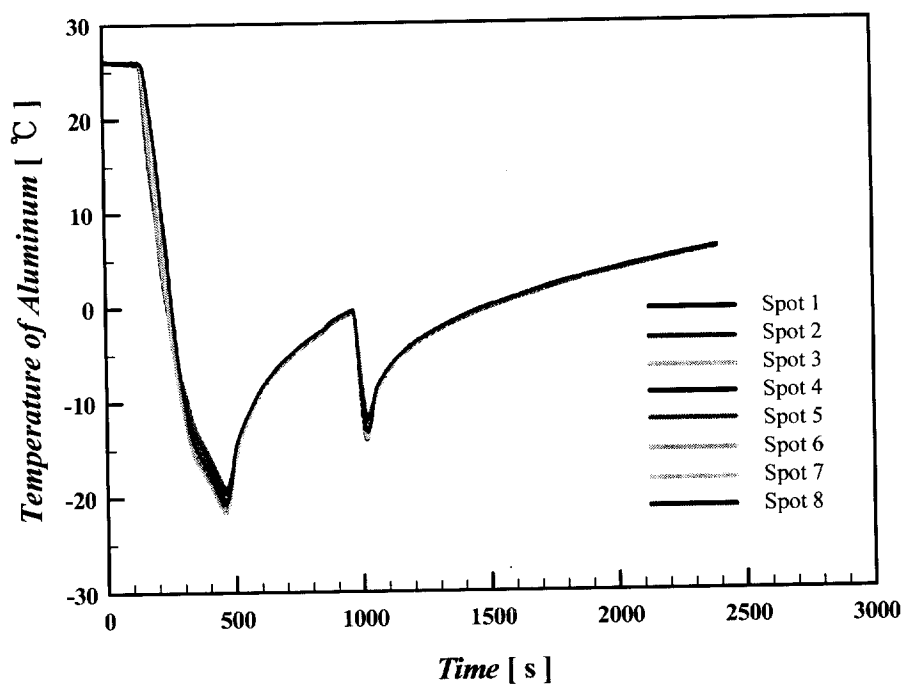


Fig. 23 Temperature conjugation of aluminium

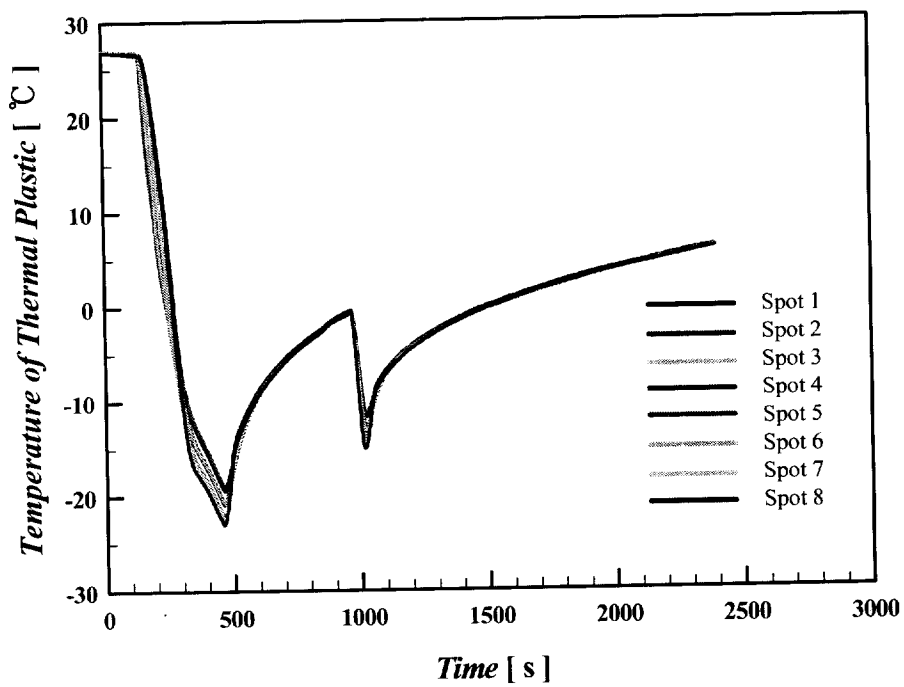


Fig. 24 Temperature conjugation of thermal conductive plastic

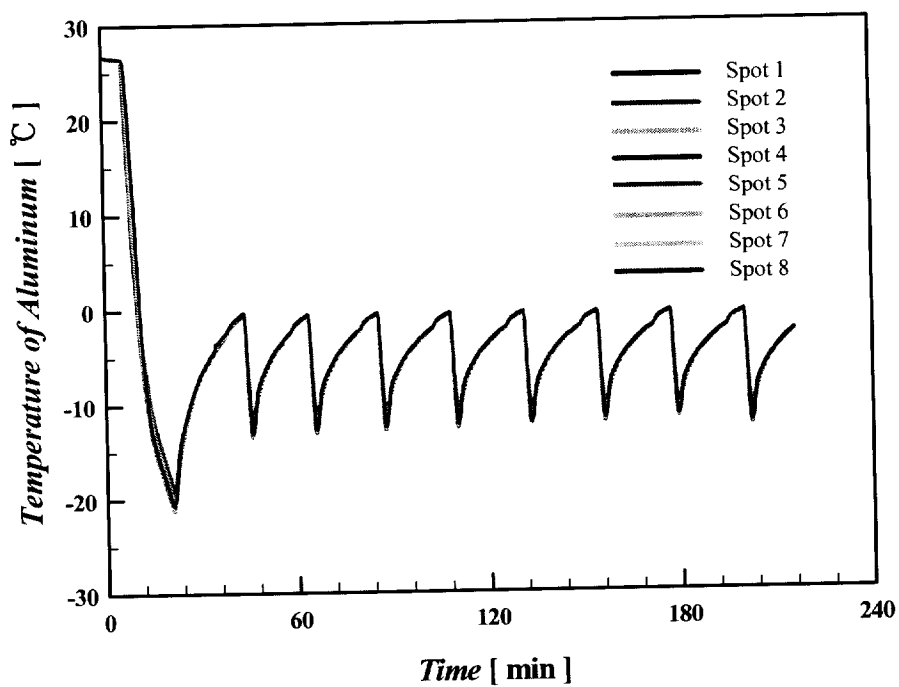


Fig. 25 Temperature conjugation of aluminium

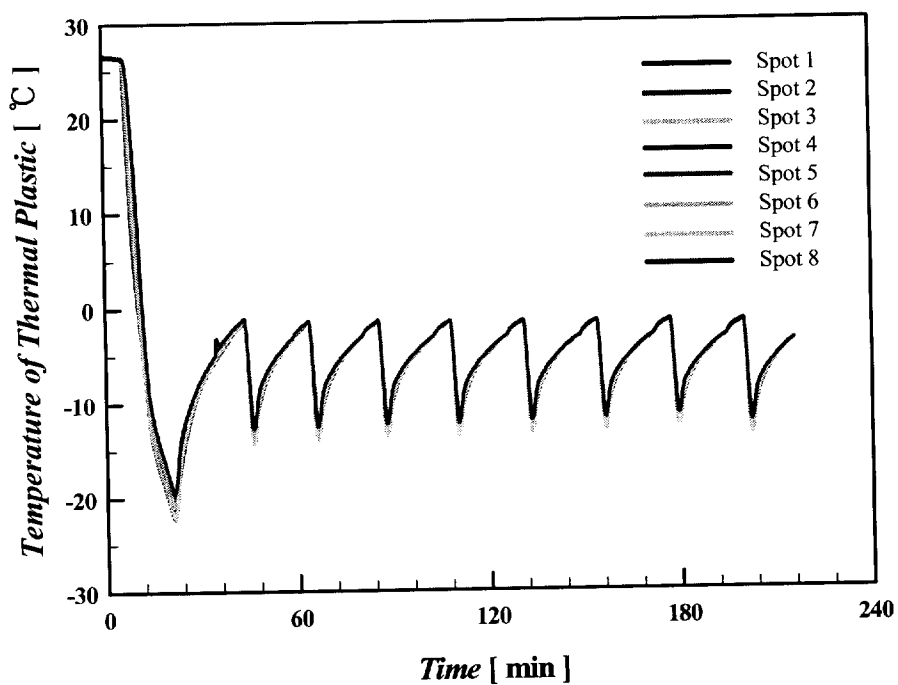


Fig. 26 Temperature conjugation of thermal conductive plastic

Fig. 23~26의 결과를 비교해 보면 열교환기를 열전도성 플라스틱으로 대체한 경우 알루미늄 열교환기에 비해서 압축기의 간헐운전에 온도 변화 폭이 알루미늄에 비해서 작은 것을 알 수 있는데 이는 열전도성 플라스틱의 비열이 알루미늄에 비해서 크기 때문이다.

이상의 결과를 비교해 볼 때, 김치냉장고의 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체하더라도 그 성능은 기존의 김치냉장고와 크게 차이가 나지 않을 것이며, 길이 방향으로의 열전달량에 차이가 있어 최초 가동시간은 오래 걸리더라도 일단 정상상태에 도달하게 되면 김치의 보관 및 숙성에는 기존의 김치냉장고와 차이가 없을 것이다. 김치냉장고 내의 온도 변화 및 환경 변화에 따른 대응이 기존의 알루미늄 열교환기를 사용한 김치냉장고보다 우수할 것으로 생각된다.

그래서 실제로 열전도성 플라스틱 열교환기를 적용한 김치냉장고를 제작해서 그 성능을 알루미늄 열교환기와 비교해 보았다. Fig. 27에 그 적용품을 나타내었다. 적용품의 왼쪽 김치보관고는 열전도성 플라스틱 열교환기를 채용한 것이고 오른쪽 김치보관고는 알루미늄 열교환기를 채용한 것이다. 그리하여 각 열교환기의 성능을 비교하였다. 성능비교는 열교환기 내벽의 온도와 김치보관용기내의 온도를 비교하였다. 그 결과를 Fig. 28, 29에 나타내었다.



Fig. 27 Picture of experiment equipment

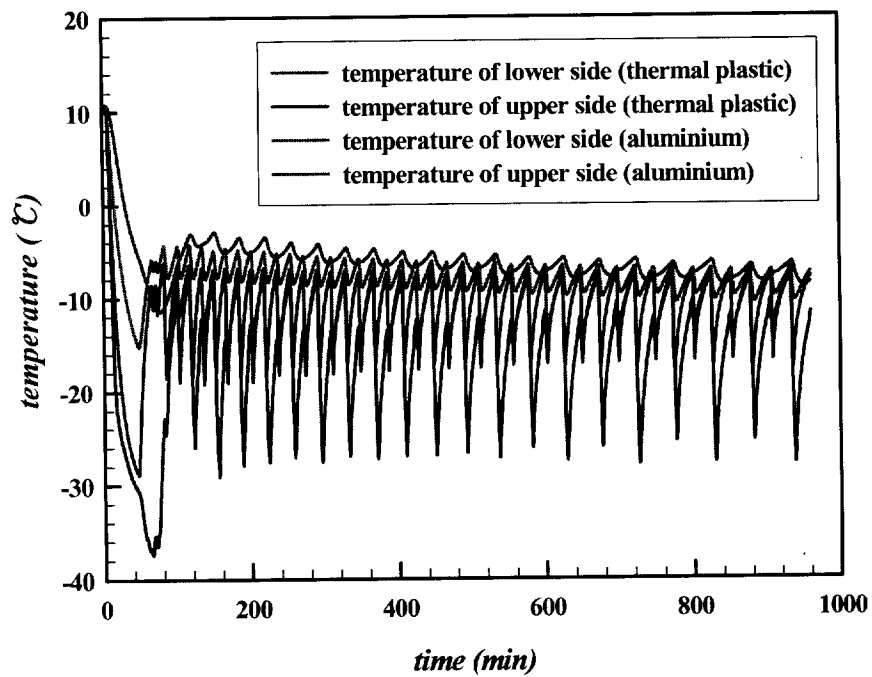


Fig. 28 Temperature comparison of heat exchanger inner side

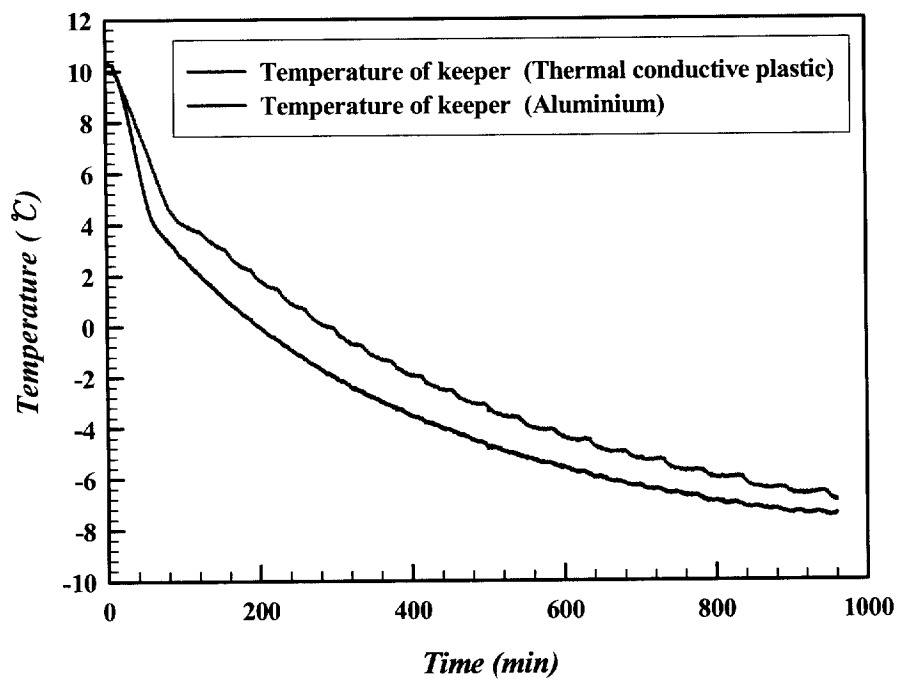


Fig. 29 Temperature comparison of kimchi keeper

온도측정 지점은 높이를 4등분해서 아래 1/4지점과 위1/4지점에서 측정하였다. Fig. 28을 보면 열전도도의 차이로 인한 전열량의 차이로 인해서 온도분포의 차이가 심하다는 것을 알 수 있다. 하지만 전체적인 동작 그래프를 고려할 때, 그 주기는 차이가 거의 없음 또한 알 수 있다.

Fig. 29에 각각 열교환기 적용시의 김치보관용기 내부의 온도를 나타내었다. 알루미늄과 열전도성 플라스틱 모두 김치보관용기에서는 초기에는 급격한 온도 감소를 보이다가 완만한 냉각을 보이는데, 이때까지 소요되는 시간은 알루미늄 열교환기의 경우 30분, 열전도성 플라스틱 열교환기의 경우에는 60분 정도 소요되었다. 그리고 시간이 지남에 따라 점점 그 차이가 작아지는 것 또한 알 수 있다. 이는 열교환기의 내벽에서의 온도는 열교환기 재질에 따라 차이가 생기지만, 김치보관용기의 냉각에는 자연대류가 관여함에 따라 전도에 의한 영향보다는 대류의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

최초 가동시까지의 시간은 차이가 있지만, 전체 온도 변화 곡선을 고려할 때, 알루미늄과 열전도성 플라스틱 열교환기의 차이는 크지 않고 보관을 주로 하는 김치냉장고의 특성상 알루미늄 열교환기의 열전도성 플라스틱으로의 대체는 가능하다고 생각된다.

제 5 장 결 론

열전도성 플라스틱을 이용한 신형 김치냉장고용 열교환기 개발에 관한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실제 온도 측정 결과와 수치해석 결과를 비교하여, 기존의 김치냉장고의 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로의 대체가 가능함을 알았다.

(2) 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체하였을 경우, 열교환기의 상부(증발관이 감기는 부분)에서의 온도는 큰 차이가 없었으나, 열교환기 하부에서의 온도는 약 1℃ 정도 차이가 나타났다.

(3) 열교환기를 열전도성 플라스틱으로 교체하더라도 김치보관고 내의 온도는 알루미늄일 경우와 약 0.3℃ 정도의 온도차를 보이며 이는 충분히 김치를 보관하기에 적절한 온도 범위에 속한다.

(4) 김치냉장고의 열교환기를 알루미늄에서 열전도성 플라스틱으로 대체시 길이 방향으로의 열전달량에 차이가 있어 최초 가동시까지의 시간은 오래 걸리지만, 정상상태에 도달하면 성능의 차이는 크지 않으며, 이는 보관을 주로 하는 김치냉장고의 특성에 잘 부합하며, 열전도성 플라스틱의 열용량이 알루미늄의 2배 정도로 온도 변화나 환경변화에 대한 대처능력이 뛰어나다.

참 고 문 헌

1. Jun Won Yun, 2003, A numerical study on the flow and heat transfer characteristics in a kimchi refrigerator, SAREK, Vol. 15, No. 12, pp. 1078-1087
2. 오종윤 외 2명, 1995, 밀폐공간 내부에 발열 전도체가 존재하는 자연대류의 열유동 수치해석, 대한기계학회 추계학술대회논문집(II), pp. 187-192
3. 이승만, 이병곤, 1999, 밀면이 부분 가열되는 정사각형 밀폐공간 내의 비정상 자연대류, 공기조화냉동공학회 하계학술대회논문집, pp 838-843
4. LG화학 기술자료, 열전도성 플라스틱 물성표
5. 이승현, 2004, 엔지니어링 플라스틱에서의 열전도성, polymer 저널, 7-11
5. Yunus, A, 1999, Heat transfer ; A practical approach, McGraw - Hill, pp. 424-448
6. Kirk D. Hagen, 2000, Heat transfer, Intervision, pp. 409-453
7. 한국플라스틱기술정보센터, 1996, 플라스틱가공기술편람, pp. 32-50
8. 정효민, 2000, 사각형 공간내의 난류 자연대류 수치해석 모델에 관한 연구, 공기조화·냉동공학 논문집 제 12권 1호, pp. 33-39
9. Y. Shu, B.Q. Li and B.R. Ramaprian, 2005, Convection in modulated thermal gradients and gravity: experimental measurements and numerical simulations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 48, Issue 1, January 2005, pp 145-160
10. C. O. Popiel and J. Wojtkowiak, 2004, Experiments on free

convective heat transfer from side walls of a vertical square cylinder in air, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 29, Issue 1, December 2004, pp 1-8

11. J. K. Sigey, F. K. Gatheri and M. Kinyanjui, 2004, Numerical study of free convection turbulent heat transfer in an enclosure, *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issues 15-16, September 2004, pp 2571-2582

12. I. E. Sarris, I. Lekakis and N. S. Vlachos, 2004, Natural convection in rectangular tanks heated locally from below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 47, Issues 14-16, July 2004, pp 3549-3563

13. K. Choukairy, R. Bennacer and P. Vasseur, 2004, NATURAL CONVECTION IN A VERTICAL ANNULUS BOARDED BY AN INNER WALL OF FINITE THICKNESS , *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 31, Issue 4, May 2004, pp 501-512

14. Donald V. Rosato, David P. Dimattia and Dominick V. Rosato, 1991, *Designing with plastics and composites A handbook*, Van Nostrand Reinhold, pp 447-449

15. Jacob Aboudi, 1991, *Mechanics of composite materials*, Elsevier, pp 279-283

16. R. B. Seymour and R. D. Deanin, 1987, *History of polymeric composites*, VNU sciencepress, pp 27-58

17. C. R. H. I. De Jonge, 1990, *New concepts in polymer science*, VSP, pp 2-31

감 사 의 글

이 논문이 완성되기까지 물심양면으로 도움을 주시고 지도해 주신 김영수 지도교수님께 감사드립니다. 그리고 미처 생각하지 못했던 점들을 일깨워주셨던 오후규 교수님, 김종수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께 감사드립니다.

그리고 연구진행 상황을 확인해 가며 함께 고민해 준 박재홍 선배님, 대학원 생활을 즐겁게 해준 용하, 짜증나면서도 웃기게 했던 종환, 그리고 같은 실험실의 동기인 광수, 정원에게도 감사드립니다. 함께 김치냉장고에 대해 연구했던 종보, 다방면에 관심이 많은 호성, 지금은 실험실을 그만뒀지만 항상 열심이던 지환, 승부욕이 강한 재정에게도 고마움의 마음을 표합니다. 그리고 대학원 생활을 즐겁게 할 수 있게 도와준 냉동공학과 모든 동기 선배 후배들에게도 감사드립니다.

또한 석사과정 동안 묵묵히 지원해주신 사랑하는 부모님, 든든한 버팀목이 되어주었던 동생 정수, 항상 나를 즐겁게 해주던 여자친구에게도 깊이 감사드립니다.

2004년 12월

백 정 용