

소형 흡착식 냉동기에 대한 실험적 연구

고 준 석[†], 정 상 권

한국과학기술원 기계공학과

Experimental Investigation on Small-scale Sorption Refrigerator

Junseok Ko[†], Sangkwon Jeong

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received January 29, 2003; revision received March 13, 2003)

ABSTRACT: This paper describes an experimental study on small-scale sorption refrigerator. Silica gel (type A) as an adsorbent, HFC-134a as a refrigerant were selected for a sorption refrigerator. The focus of the design was to reduce the cycle time of the sorption refrigerator. Through the experiment, pressure and temperature variations in the adsorber were measured and the performance of refrigerator was predicted. In this paper, the small-scale sorption refrigerator operates with the cycle time of 480 s. Its predicted cooling capacity is 25 W at -15°C and COP is 0.23.

Key words: Sorption refrigerator(흡착식 냉동기), Silica gel(실리카 겔), HFC-134a, Adsorber(흡착기)

기 호 설 명

a	: 단위 흡착제 질량당 흡착된 냉매질량
A	: 흡착 포텐셜 [J/kg]
L	: 증발잠열 [kJ/kg]
m	: 질량 [kg]
M_{ad}	: 흡착제의 질량 [kg]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
P	: 압력 [kPa]
Q_{ref}	: 냉동능력(cooling capacity) [W]
R	: 기체상수 [J/kg · K]
T	: 온도 [K]
t_1	: step 1 시간 [s]
t_2	: step 2 시간 [s]

t_{cycle}	: 작동주기 [s]
V	: 체적 [m^3]
W_{ref}	: 냉동효과(cooling effect) [J]

그리스 문자

ϵ	: 공극률
ρ_a	: 흡착제의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

$a1$: 흡착기 1(AD 1)
$a2$: 흡착기 2(AD 2)
ai	: 흡착기의 중심
cr	: 임계점
$r1$: J-T 팽창 전 냉매
$r2$: J-T 팽창 후 냉매
s	: 흡착기의 외벽
sat	: 포화상태

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-869-3079; fax: +82-42-869-3095

E-mail address: dori@kaist.ac.kr

1. 서 론

현재 상온에서 소형 냉동기로서 주로 적용되는 것은 열전소자(thermoelectric module)이다. 열전소자는 움직이는 부분이 없고, 매우 간단한 구조를 갖는 장점이 있는 반면에, 낮은 성능계수(COP)를 보이고, 열전소자를 구성하는 재료의 특성상 150 K 이하의 극저온을 생성할 수 없는 단점이 있기 때문에 극저온 영역에서는 다른 형태의 소형 냉동기가 필요하다.

Joule-Thomson 냉동기의 경우에는 응축기, 증발기, 팽창기구의 소형화에 대한 연구가 많이 진행되어 왔지만, 압축기의 소형화에는 많은 어려움이 따르고 있다. 기계식 압축기는 고속 운동을 해야 하기 때문에 소형이 될수록 그 신뢰성(reliability) 확보나 제작의 어려움에 직면하게 된다.

냉동기의 소형화를 위해서 가장 중요한 것은 압축기의 소형화 기술이다. 흡착식 냉동기에서는 기계적인 압축기의 역할을 흡착식 압축기가 담당한다. 흡착식 압축기는 열에너지를 이용하여 냉매를 압축하기 때문에 움직이는 부분이 전혀 없고 비교적 단순한 구조를 갖는 장점이 있다. 움직이는 부분이 없기 때문에 신뢰성을 향상시킬 수 있고, 초소형 가공에서 미소기전집적시스템(MEMS) 가공방식을 이용하여 제작을 할 수 있으면, 큰 장점을 가질 수 있다.

본 연구의 궁극적인 목표는 초소형 극저온 냉동기의 구현이지만, 본 논문에서는 선행 연구 단계로서 소형 상온 흡착식 냉동기에 대한 실험적인 연구를 수행하여, 소형 흡착식 냉동기의 특성을 연구하고 이론적인 해석을 통하여 냉동효과를 예측하였다.

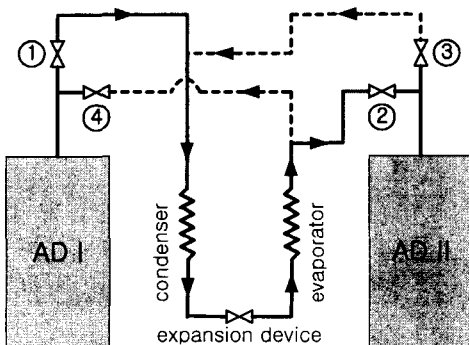


Fig. 1 Schematic diagram of sorption cooler.

2. 흡착식 냉동기의 원리

흡착식 냉동기는 고체 표면과 기체 사이의 흡착 현상을 이용한다. 흡착제와 흡착되는 기체의 양은 압력이 높고 온도가 낮을수록 증가하며, 압력이 낮고 온도가 높을수록 감소하며, 흡착제 냉매조합에 따라 여러 형태의 흡착 특성을 보인다.

Fig. 1은 흡착식 냉동기의 개략도이다. 응축기, 증발기, 팽창기구는 일반적인 Joule-Thomson 냉동기와 같은 구조를 보이고, 두 기의 흡착기(adsorber)와 네 개의 솔레노이드 밸브가 압축기로서 작동한다.

두 기의 흡착기는 서로 주기적으로 가열과 냉각이 반복되어 고압과 저압이 형성되면서 압축기의 토출부와 흡입부의 역할을 반복한다. 즉, 고압의 흡착기에서 저압의 흡착기로 냉매의 유동이 발생되고 J-T 팽창을 통하여 냉동효과가 발생한다.

Fig. 2는 한 기의 흡착기 내부에서의 한 주기 동안의 압력과 온도의 이상적인 변화를 나타낸다. 흡착기가 닫힌 상태인 상태 1의 저온, 저압 상태에서부터 시작하여 가열에 의한 탈착에 의해 고압이 형성되어 상태 2가 된다(step 1). 고압이 형성되면 흡착기는 계속되는 가열에 의하여, 고압이 형성되면서 솔레노이드 밸브가 열리고 응축기와 연결되어, 탈착되어 나오는 고압의 냉매를 흘려보내 냉동효과를 발생하게 한다(step 2). 충분한 양이 탈착되었을 때, 흡착기는 닫힌 상태에서 냉각이 되어 흡착에 의해 저압을 형성한다(step 3). 저압을 형성한 후에 흡착기는 계속 냉각이 되면서, 증발기와 연결되어 다른 쪽 흡착기로부터 냉동 일을 마치고 온 냉매를 흡착한다(step 4).

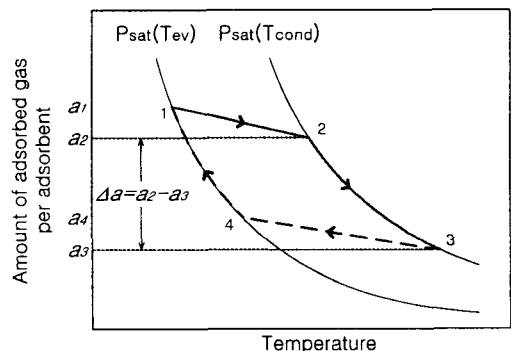


Fig. 2 Pressure cycle in the adsorber.

한 주기 동안 한기의 흡착기에 의해 생성되는 냉동효과(cooling effect)와 흡착식 냉동기의 냉동능력(cooling capacity)은 식(1)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

$$Q_{ref} = \frac{2 \cdot W_{ref}}{\Delta t} = \frac{\Delta a \cdot M_{ad} \cdot L}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

흡착식 냉동기의 냉동능력을 증가시키기 위해서는, 냉동효과를 증가시키거나 작동주기를 감소시켜야 한다. 흡착량의 차이(Δa)와 냉매의 증발잠열(L)은 물질의 특성이기 때문에 흡착제-냉매 조합이 결정되면 주어진 조건에서 정해진 값이 된다. 이 때문에 냉동효과를 증가시키기 위해서는 흡착제의 질량(M_{ad})을 증가시켜야 하지만, 소형 흡착식 냉동기에서는 흡착기의 크기에 제한을 받기 때문에 냉동효과를 증가시켜 냉동능력을 증가시키는 것은 어렵다. 따라서, 소형 흡착식 냉동기에서는 흡착기 내부에서의 효율적인 열전달을 통하여 작동주기를 줄임으로써 냉동능력을 증가시켜야 한다.

3. 실험장치의 제작

흡착기는 흡착식 냉동기의 성능과 직접적인 관계가 있다. 작동주기를 줄이기 위해서는 흡착기 내부에서 흡착제로의 빠른 열전달이 필요하다. 본

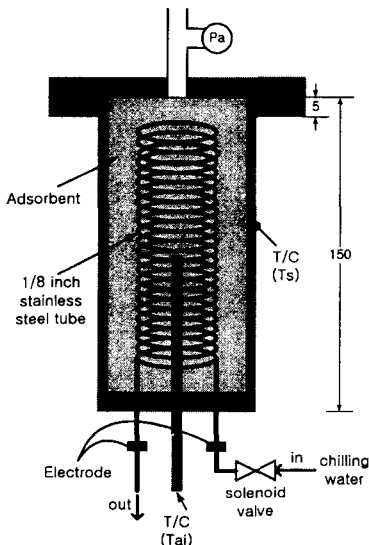


Fig. 3 Schematic diagram of adsorber.

논문에서는 소형 흡착식 냉동기의 구현에 초점을 맞추었기 때문에 제한된 흡착기의 크기 내에서 열전달 효율을 높이는 방향으로 흡착기를 설계하였다.

Fig. 3은 이러한 목적으로 제작된 흡착기의 개략도이다. 흡착기는 내경이 36 mm이고, 길이가 150 mm인 스테인리스 스틸 관을 이용하여 제작하였다. 흡착기 내부에는 1/8 inch 스테인리스 스틸 관으로 열교환기를 설치하여 흡착기를 가열하고 또한 냉각할 수 있도록 하였다. 흡착제의 열전도도(thermal conductivity)는 0.1~1 W/m·K⁽²⁾ 정도로 매우 낮아, 발열 부위와 냉각 부위가 동일하여야 효율적인 냉각을 할 수 있기 때문에, 가열 시에는 내부 열교환기에 직접 전류를 인가하여 히터로서 작동하도록 하였으며, 냉각 시에는 열교환기로 냉각수를 흘려 주어 내부를 냉각할 수 있도록 하였다.

실험에서는 흡착기의 중심(T_{ai}), 흡착기의 외벽(T_s)에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 또한, 흡착기의 입, 출구에 압력센서를 설치하여 압력을 측정하였다.

본 논문의 실험에서는 제작된 두 기의 흡착기와 네 개의 솔레노이드 밸브, 팽창기구를 이용하여 Fig. 4와 같은 형태로 전체 시스템을 구성하였다.

냉매는 질량유량을 크게 하기 위하여 작동압력이 높은 프레온계 냉매 중에서, 오존파괴 효과가 없는 HFC-134a를 사용하였다. 적합한 흡착제 조합을 선정하기 위하여 실리카 겔(A형과 B형), 제올라이트 13X에 대한 HFC-134a의 압축과정 실험

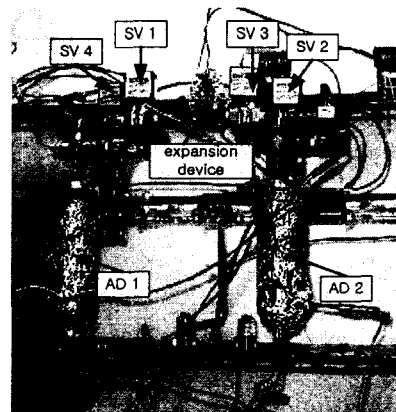


Fig. 4 Photo of the sorption refrigerator.

험을 먼저 선행 연구로서 수행하였으며, 그 실험 결과를 바탕으로 실리카 겔(A형)을 흡착제로 선택하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험조건

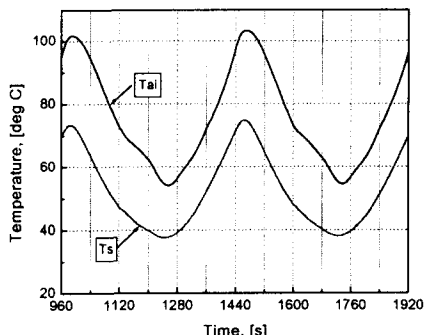
초기에 냉매를 65 kPa로 충전하여 실험을 수행하였으며 여러 번의 실험을 통하여 t_1 은 160 s이고, t_2 는 80 s로 설정하였다. 즉, 작동주기(t_{cycle})는 480초로 설정하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

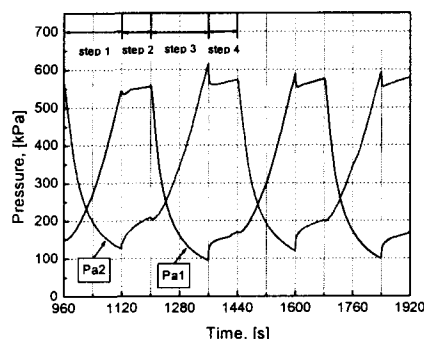
Fig. 5는 실험결과인데, 흡착기 중심부의 온도, 흡착기 외벽의 온도변화는 (a)와 같이 나타났다. T_{ai} 는 105℃와 55℃ 사이를, T_s 는 75℃와 40℃ 사이에서 주기적인 변화를 보이면서 흡착기 내부에는 항상 반경 방향으로 온도구배가 존재하고 냉각 시에 흡착기 내부의 온도가 균일하게 상온으로 냉각되지 않아 흡착제의 능력을 충분히 사용하지 못하는 결과를 볼 수 있다.

(b)는 두 흡착기의 압력변화를 나타낸다. 냉각 시에 작동 초기보다 내부의 온도가 높아 초기에 흡착했던 만큼을 흡착하지 못하여 초기 충전압력보다 저압이 높게 형성되었다. 가열 시에 t_1 시간 동안은 압력이 빠르게 증가하지만, 솔레노이드 밸브가 열려 흡착기와 응축기가 연결된 t_2 의 시간 동안에는 압력 증가가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 고압이 유지되면서 탈착되어 나오는 냉매가 응축기로 흘러 냉동효과를 생성한 때를 나타냄을 알 수 있다. 한편 냉매의 유동이 있는 t_2 의 시간 동안 고압부의 압력 증가율에 비해 저압부의 압력 증가율이 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 저압의 흡착기에서는 시간이 지날수록 냉매량이 줄어들기 때문에 고압의 흡착기에서 냉매가 탈착되는 양에 비해 저압의 흡착기에서 유입되는 양을 충분히 흡착하지 못하기 때문이다.

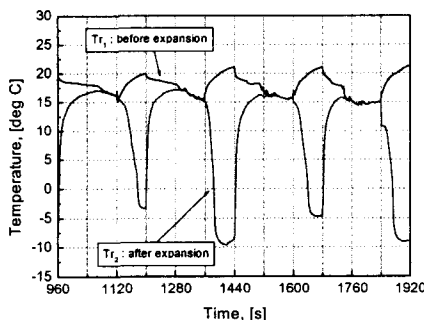
(c)는 고압의 냉매가 팽창기구를 통과하여 저압상태의 흡착기로 유입되면서 팽창 전(T_{r1})과 팽창 후(T_{r2})의 냉매의 온도를 나타낸다. 냉매의



(a) Temperature in the adsorber 2



(b) Pressure in the adsorber 1 (Pa1) and 2 (Pa2)



(c) Temperature of the refrigerant

Fig. 5 Experimental results with initial charging pressure 65 kPa.

유동이 있는 동안에 T_{r1} 은 고압부 압력의 포화 온도 근처까지 증가하고 T_{r2} 는 -10~-3℃까지 감소하였다. 즉, 팽창에 의한 온도 감소 효과는 약 20~30℃이다. 솔레노이드 밸브가 닫혀 있는 동안에는 팽창부 내부의 통로를 통하여 고온과 저온의 냉매가 섞이기 때문에 온도가 평형을 이루는 것을 확인할 수 있다.

5. 성능예측

5.1 계산과정

5.1.1 흡착 평형 특성

본 논문의 흡착식 냉동기의 냉동 특성을 고찰하기 위하여 먼저 실험을 통해서 실리카 겔(A형)과 HFC-134a 사이의 흡착 평형 특성을 구하였다. 식(2)는 Dubinin-Astakhov 관계식을 이용한 흡착 평형 관계식이며 이를 HFC-134a와 실리카 겔 조합에 적용하였다.⁽¹⁾ 식(2)에서 a_0 , E , n 는 실험상수로서 실험을 통해 구한다.

$$a(P, T) = a_0 \cdot \text{Exp}[-(A/E)^n] \quad (2)$$

여기에서,

$T < T_{cr}$ 의 경우,

$$A = -RT \ln(P/P_{sat})$$

$T > T_{cr}$ 의 경우,

$$A = RT \ln \left[\frac{P_{cr}}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_{cr}} \right)^2 \right]$$

Fig. 6은 흡착 평형 측정 실험 결과로서 여러 온도·압력 조건에서 실리카 겔(A형)에 흡착된 HFC-134a의 질량을 측정하여 흡착 에너지의 함수로 표현하였다. 흡착 평형 측정 실험을 통하여 측정된 실험상수 a_0 , E , n 은 각각 0.430, 34654.34, 0.79이다.

5.1.2 냉매의 질량 지배방정식

흡착식 냉동기의 성능을 예측하기 위해서는 냉

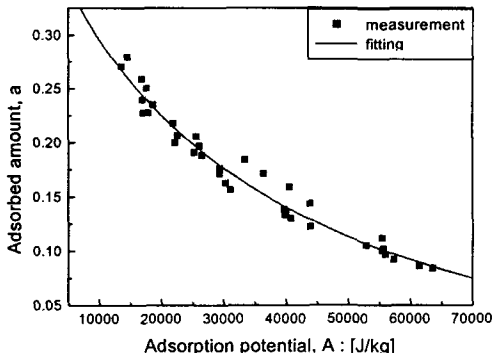


Fig. 6 Adsorption characteristics.

동기가 작동하는 동안 시간에 대한 $a(P, T)$ 의 변화를 알아야 한다. 실험에서 확인한 바와 같이 흡착기 내부의 온도는 공간에 대해서 균일하지 않기 때문에 $a(P, T)$ 를 구하기 위해서는, 흡착기의 온도를 대표할 수 있는 대표온도가 필요하다. 따라서, 냉매의 질량보존법칙을 이용하여 흡착기의 대표온도를 구한 후에 냉동능력을 예측하였다.

두 기의 흡착기 내부에 존재하는 냉매의 총 질량(m_{tot})은 식(3)과 같이 자유공간 내에 기체상태로 존재하는 질량(m_{free})과 흡착제에 흡착된 질량(m_{ad})의 합으로 표현된다.

$$m_{tot} = m_{free} + m_{ad} = \frac{\varepsilon P_a V_a}{RT_a} + a \rho_a V_a \quad (3)$$

m_{free} 는 기체상태방정식으로부터 구할 수 있으며 온도와 압력의 함수이다. 식(2)에 의해 m_{ad} 는 압력과 온도의 함수로 표현되기 때문에 식(3)에서 m_{tot} 은 압력과 온도의 함수로 표현된다.

Step 1과 step 3에서 두 기의 흡착기는 밀폐되어 있기 때문에 각각의 m_{tot} 은 일정하고, 초기 온도와 압력조건에서 구할 수 있다. 실험에서 얻은 압력조건을 이용하여 각각의 흡착기에 대하여 식(3)을 적용하면 각각의 대표온도 T_{a1} , T_{a2} 에 대한 방정식으로 표현되어 T_{a1} , T_{a2} 를 구할 수 있다.

Step 2와 step 4에서는 두 기의 흡착기 사이에 냉매의 유동이 있기 때문에, 각각의 m_{tot} 은 일정하지 않다. 고압의 흡착기의 m_{tot} 는 감소하고 저압의 흡착기의 m_{tot} 는 증가하며, 감소하고 증가하는 양은 같다. 즉, 두 기의 흡착기의 m_{tot} 의 합은 일정하다. 이 조건을 이용하면 방정식은 하나이고, 미지수는 T_{a1} , T_{a2} 로 둘이 되기 때문에 한 기의 흡착기의 대표온도를 이전 step에서 계산된 온도변화를 외간법을 이용하여 가정한 후에 다른 한 기의 대표온도를 구하였다.

계산을 통하여 구한 두 기의 흡착기의 대표온도 T_{a1} , T_{a2} 를 이용하여 step 2와 step 4 동안의 각각의 흡착기의 m_{tot} 의 변화를 구할 수 있고, 냉매의 질량유량 변화를 구할 수 있다.

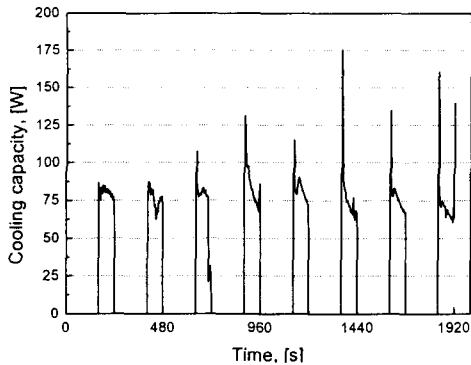


Fig. 7 Cooling capacity during 4 cycles.

5.2 계산결과

앞서 구한 냉매의 질량유량 변화를 이용하고, 두 흡착기 사이에는 이상적인 응축기, 팽창기, 증발기가 부착되어 있다고 가정하면 흡착식 냉동기의 냉동능력을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 4주기 동안 발생하는 이상적인 냉동능력의 시간에 대한 변화를 보여준다. Step 1과 step 3에서는 냉매의 유동이 없기 때문에 냉동효과가 발생하지 않고, step 2와 step 4에서는 냉매의 유동이 있고, 대략 75 W의 냉동능력을 보인다.

$$Q_{ref} = \frac{\int_0^{t_{cycle}} dW_{ref}}{t_{cycle}} \quad (4)$$

$$COP = \frac{\text{cooling capacity}}{\text{heating power}} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 이용하면 이상적인 평균 냉동능력과 성능계수를 구할 수 있으며 각각 25 W, 0.23으로 나타났다.

저온부의 온도는 저압의 흡착기의 압력에서의 포화온도라고 가정하면 약 -15°C 로 예측된다. 실제 실험결과에서 팽창 후의 냉매의 온도는 $-10 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 로, 예측되는 온도보다 높게 나타났는데, 이는 실제 제작된 응축기, 팽창기, 증발기의 설계가

소형 냉동기로서 최적화되어 있지 않기 때문이라고 사료된다.

6. 결 론

실리카 겔(A형)-HFC134a 조합을 이용한 소형 흡착식 냉동기에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흡착식 냉동기의 작동주기를 480초로 크게 줄여 작동시키는 데 성공하였다. 작동주기를 줄이기 위하여 히터를 이용한 결과 가열원은 등열량 조건이고, 냉각원은 등온 조건이었기 때문에 필연적으로 흡착기 내부의 온도는 상온보다 높은 온도로 유지되어 흡착제의 흡착능력을 충분히 사용하지 못하는 결과를 초래하였다.

(2) Joule-Thomson 팽창효과에 의해 약 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 의 온도 감소효과를 보이는 흡착식 냉동기를 구현할 수 있음을 확인하였다.

(3) 측정된 압력과 흡착 평형 특성을 이용하여 이상적으로 계산한 냉동능력은 약 -15°C 에서 25 W, COP는 0.23으로 나타났다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Motoyuki Suzuki, 1990, Adsorption Engineering, Kodansha LTD & Elsevier science publishers B. V.
2. Eun, T., Song, H., Han, J., Lee, K. and Kim, J., 2000, Enhancement of Heat and Mass Transfer in Silica-expanded Graphite Composite Blocks for Adsorption Heat Pumps: Part I. Characterization of the Composite Blocks, Int. J. Refrigeration, Vol. 23, pp. 64-73.