

맥동압력조건에서 재생기를 통한 왕복유동의 압력강하 특성에 대한 연구

Investigation on the pressure drop characteristics of oscillating flow through regenerators under pulsating pressure conditions

최성열*, 남관우**, 정상권***

Sungryel Choi, Kwanwoo Nam, Sangkwon Jeong

Abstract: This paper proposes a new oscillating flow model of the pressure drop through the regenerator under pulsating pressure. In this oscillating flow model, pressure drop is expressed by the amplitude and the phase angle with respect to the inlet mass flow rate. In order to generalize the oscillating flow model, non-dimensional parameters, which are Reynolds number, Valensi number, gas domain length ratio, oscillating flow friction factor and phase angle of pressure drop, are derived from the capillary tube model of the regenerator. Correlations for the oscillating flow friction factor and the phase angle are obtained from the experiments for the twill-square screen regenerators under various operating frequencies and inlet mass flow rates. The oscillating friction factor is a function of the Reynolds number alone and the phase angle of pressure drop is a function of the Valensi number and the gas domain length ratio. Experiment is also performed to examine the effect of the weave style of screen. Experimental data demonstrate the superiority of the oscillating flow model over the previous steady flow model.

Key Words: oscillating flow, pressure drop, regenerator, friction factor, phase angle

기호설명

A	단면적 [m ²]
$A_{\Delta P}$	압력강하의 진폭 [Pa]
D	재생기의 직경 [m]
d_h	수력직경 [m]
d_w	스크린의 선경 [m]
f_{osc}	왕복유동 마찰계수
i	$\sqrt{-1}$
L	재생기의 길이 [m]
Ma	Mach수(= $U_1/\sqrt{\gamma RT_m}$)

M	유량의 진폭 [kg/s]
\dot{m}	유량 [kg/s]
P	압력 [Pa]
R	기체상수 [J/kg · K]
Re	Reynolds수(= $U_1 d_h/\nu$)
r, θ, z	원통형 좌표계
T	온도 [K]
t	시간 [s]
U	축방향 유속의 진폭 [m/s]
u	축방향 유속 [m/s]
Va	Valensi수(= $d_h^2 \omega/\nu$)

그리스 문자

γ	비열비
ΔP	압력강하 [Pa]
ϵ	팽창계수
μ	점도 [Pa · s]
ν	동점도 [m ² /s]
ρ	밀도 [kg/m ³]
$\phi_{\Delta P}$	압력강하와 입구측 유량 사이의 위상차 [rad]
ψ	공극률
ω	각속도 [rad/s]

하첨자

1	재생기의 입구측
2	재생기의 출구측
avg	재생기 양단간의 평균
c	모세관
m	시간에 대한 평균

상첨자

* 무차원 변수

* 비회원 : 한국과학기술원 기계공학과 석사졸업
 ** 학생회원 : 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
 *** 정회원 : 한국과학기술원 기계공학과 부교수
 원고접수 : 2003년 2월 27일
 심사완료 : 2003년 8월 25일

1. 서론

최근, 환경 문제에 관한 높은 관심과 고효율의 미래 에너지 시스템의 필요성이 대두되어 스틸링 사이클 기판에 대한 깊은 연구가 행해지고 있다. 이러한 스틸링

엔진과 냉동기의 설계는 재생기를 통한 압력강하의 정확한 예측이 매우 중요하다. 기존의 많은 연구들은 정상유동에서 얻어진 마찰계수를 이용하여 압력강하를 예측하고자 하였다.[1],[2] 하지만, 스텔링 기관의 재생기에서 일어나는 실제 유동은 왕복유동일 뿐만 아니라 맥동압력이 복합적으로 발생하므로 그 부적절한 가정에 의해 실제와의 불일치가 나타나는 것은 당연한 사실이다. 왕복유동의 압력강하를 표현하기 위한 노력으로서 Zhao 등[3]은 최대 마찰계수와 싸이클 평균 마찰계수를 각각 정의하여 그 상관식들을 얻었으며, Ju 등[4]은 50 Hz 주파수에서만 유속과 압력과 사이의 위상차에 관한 상관식을 언급한바 있다. 남관우 등[5]은 9 Hz 이하와 60 Hz의 작동 주파수에 대하여, 최대 마찰계수를 실험적으로 구하였다.

본 연구에서는 입구측 유량을 기준으로 하여 압력강하를 마찰계수와 위상각의 두 가지 변수들로 표현하여 실제의 왕복유동을 더욱 정확히 표현하고자 하였다. 이 두 변수에 대한 상관식을 얻기 위한 실험에 앞서, 재생기에 관한 모세관 모델로부터 무차원화를 수행하여 상관식의 유용성을 높이고자 하였다. 네 가지 종류의 스크린 재생기들에 대하여 작동 주파수와 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였으며 그 중 한 종류의 스크린에 대해서는 두개의 동일한 재생기를 제작하여 실험 결과의 일관성을 확인하였다. 또한, 측정된 압력강하 및 질량유량으로부터 왕복유동 모델과 정상유동 모델의 차이점을 비교하였다.

2. 이 론

2.1 정상유동 모델과 왕복유동 모델

스텔링 냉동기의 재생기에서 발생하는 실제 유동은 맥동압력 하에서 주기적으로 왕복하지만, 많은 기존의 연구들은 다음 식(1)과 같은 정상유동의 압력강하 모델을 사용하고 있다.

$$\Delta P = A_{\Delta P} \cdot \frac{\dot{m}_{avg}}{M_{avg}} \quad (1)$$

여기서, $\dot{m}_{avg} = \dot{M}_{avg} \cdot \exp(i\omega t)$ 이다.

식 (1)과 같은 정상유동 모델은 압력 강하가 입구와 출구측 유량의 평균과 위상이 같다고 가정하였다. 본 연구에서는 실제 왕복 유동을 더욱 정확히 묘사하기 위한 방법으로서 다음 식(2)와 같은 왕복유동 모델을 제안한다.

$$\Delta P = A_{\Delta P} \cdot \exp(-i\phi_{\Delta P}) \cdot \frac{\dot{m}_1}{M_1} \quad (2)$$

여기서, $\dot{m}_1 = \dot{M}_1 \cdot \exp(i\omega t)$ 이다.

왕복유동 모델은 입구측 유량을 기준으로 하여 압력강하를 진폭($A_{\Delta P}$)과 위상각($\phi_{\Delta P}$)의 두 변수로 표현하는 방식이다.

2.2 왕복유동 모델의 무차원화

왕복유동 모델을 일반적으로 사용하기 위해서는 실험에 앞서 그 모델에 포함되는 무차원수를 유도해야 한다. 스크린 재생기를 모세관 다발로 가정하여 한 개의 모세관을 통해 흐르는 유체에 대한 지배 방정식은

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (4)$$

위 식들에 사용된 변수들은 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_m}, P^* = \frac{P}{P_m}, u^* = \frac{u}{U_1}, v^* = \frac{v}{U_1 d_c / L}, r^* = \frac{r}{d_c}, z^* = \frac{z}{L}, t^* = t \cdot \omega$$

무차원 변수들을 식(3), (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 무차원화된 지배 방정식을 유도할 수 있다.[6]

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \epsilon \cdot \left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial(\rho^* v^* r^*)}{\partial r^*} + \frac{\partial(\rho^* u^*)}{\partial z^*} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\rho^* \left[\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \epsilon \cdot \left(v^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right) \right] = -\frac{\epsilon}{\gamma \cdot \text{Ma}^2} \cdot \frac{\partial P^*}{\partial z^*} + \frac{1}{\text{Va}} \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} \right) \quad (6)$$

여기서, 팽창계수(ϵ)는 Reynolds수, Valensi 수 그리고 d_c/L 로 정의되는 가스 영역 길이 비(gas domain length ratio)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \text{Re}/\text{Va} \cdot d_c/L \quad (7)$$

따라서, 모세관내부에서의 압력강하는 Reynolds 수, Mach수, Valensi 수 그리고 d_c/L 와 같은 무차원수에 함수일 것이다. 이와 같은 무차원수들을 스크린 재생기에 적용하기 위하여, 모세관의 직경은 다음과 같이 스크린의 수력 직경으로 나타내었다.[3]

$$d_c = d_h = d_u \cdot \frac{\psi}{1-\psi} \quad (8)$$

압력강하의 진폭은 Fanning 마찰계수와 유사한 왕복유동 마찰계수를 정의하여 무차원화 하였다.

$$f_{osc} \equiv \frac{A_{\Delta P} d_h}{2 \rho_m U_1^2 L} \quad (9)$$

결과적으로, 압력강하에 대한 왕복 유동 모델은 다음과 같은 두개의 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{osc} = \text{function}(\text{Re}, \text{Va}, \text{Ma} \text{ and } d_h/L) \quad (10)$$

$$\phi_{\Delta P} = \text{function} (\text{Re}, \text{Va}, \text{Ma} \text{ and } d_h/L) \quad (11)$$

여기서, 극저온 냉동기의 재생기를 통해 흐르는 유동은 작은 Ma 수 영역에 있으므로, [6] 식(10), (11)은 다시 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$f_{osc} = \text{function} (\text{Re}, \text{Va} \text{ and } d_h/L) \quad (12)$$

$$\phi_{\Delta P} = \text{function} (\text{Re}, \text{Va} \text{ and } d_h/L) \quad (13)$$

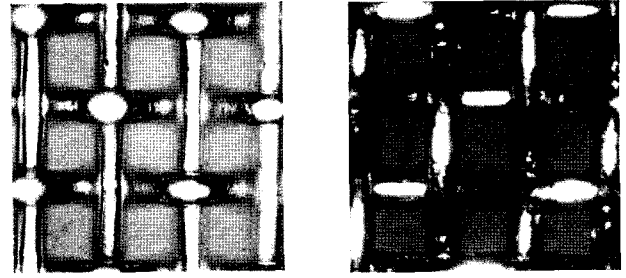


그림 1. 평직과 능직 스크린의 현미경 사진($\times 500$, 좌: 평직, 우: 능직)

Fig. 1. Microscopic photos of plain and twill mesh screen($\times 500$, left: plain, right: twill)

3. 실험

3.1 재생기

재생기에 일반적으로 사용되는 스테인리스 스틸 스크린은 선경(wire diameter)과 직조형태(weave style)에 따라 분류할 수 있다. 스크린의 선경은 공극률과 함께 식(8)에 의해 모세관 모델의 수력직경을 결정하게 된다. 본 연구에서는 선경에 따라서 세 가지 종류의 재생기(#400 능직, #250 능직, #200 능직)를 선택하여 제작하였다. 또한, 직조 형태에 따라서 평직(plain square)과 능직(twill square)으로 구분할 수 있는데, Fig. 1에서 볼 수 있는 것같이 평직은 하나의 선 간격으로 직조된 반면, 능직은 두 개의 선 간격으로 직조되어 있다. 직조형태에 따른 영향을 알아보기 위하여 #200 평직 스크린 재생기를 제작하여 #200 능직 스크린 재생기와 비교하였다. 또한, 추가적으로 하나의 #400 능직 스크린 재생기를 제작·실험하여 결과의 반복성(Repeatability)과 신뢰성(Reliability)을 확인하고자 하였다. 이상의 다섯 가지의 재생기에 대한 특성은 Table 1에 나타나 있는데, 공극률 차이에 의한 실험 결과의 불확도(uncertainty)를 배제하기 위하여 모든 재생기의 공극률을 3% 이내로 일치 시킨 것을 볼 수 있다.

3.2 실험 장치 및 측정

Fig. 2는 재생기 양단의 유량, 압력, 온도를 측정하는 실험장치의 개략도이다. 선형 압축기(linear compressor)는 실험장치에 장착되는 내부 직경 12.25 mm, 길이 85 mm의 재생기 시편 내부에 왕복유동과 맥동압력을 형성 시킨다. 이러한 선형 압축기는 인버터(45 ~ 80 Hz)와 변압기에 의해 제어되어 작동 주파수와 유량의 변화에 따른 측정 데이터를 얻을 수 있

다. 재생기 양단에는 두쌍의 열선(hot wire: TSI model 1260A-T1.5)과 압전 압력센서(piezoelectric pressure transducer: Kistler model 601A)가 설치되어 있어 각 양단의 유량과 동압을 측정하도록 하였다. 이 센서들은 응답속도가 빠르므로 시간지연(time lag)을 보상할 필요가 없다. 실험장치에 관한 내용은 참고문헌[7]에 자세하게 기술되어 있다. 왕복유동 모델은 압력과 유량 변화를 1차 조화함수(first harmonic function)형태로 가정하고 있지만, 그 실제 변화는 고차 성분을 포함한다. 그러므로, 실제의 압력과 유량 파형의 일차성분만을 선택함으로써 압력강하의 진폭과 위상각을 계산하고 무차원화 된 왕복유동 모델의 상관식을 유도하였다. Fig. 3은 70 Hz에서 작동하는 #400 능직 스크린 재생기에서 압력강하와 유량의 1차 조화 성분과 실제 측정값을 나타낸 그래프이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 능직 스크린 재생기에 대한 결과와 상관식

#400 능직 스크린 재생기에 대한 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 왕복유동 마찰계수는 정상유동에서의 마찰계수와 유사하게 Reynolds 수와의 함수관계를 가지고 있지만 Valensi 수에는 무관함을 확인할 수 있다. 반면, 위상각은 Valensi 수와는 선형적인 관계가 있지만 Reynolds 수에는 독립적이다. 두 무차원수의 데이터 분산은 일차성분을 선택하는 과정에서 발생하는 오차로 보인다. #250 능직, #200 능직 스크린 재생기에

표 1. 재생기 시편의 형상 변수들

Table 1. Geometric properties of regenerator specimens

Type of wire mesh	Number of screens packed in regenerator tube	Wire diameter d_w [μm]	Porosity ψ	Hydraulic diameter d_h [μm]	Note
#400 twill 1st	1261	30	0.679	63.5	
#250 twill	1039	38	0.697	87.4	
#200 twill	691	52	0.679	110.0	
#200 plain	827	52	0.680	110.5	Effect of weave style (Effect of shape)
#400 twill 2nd	1261	30	0.679	63.5	Effect of fabrication (Repeatability test)



그림 2. 실험 장치의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

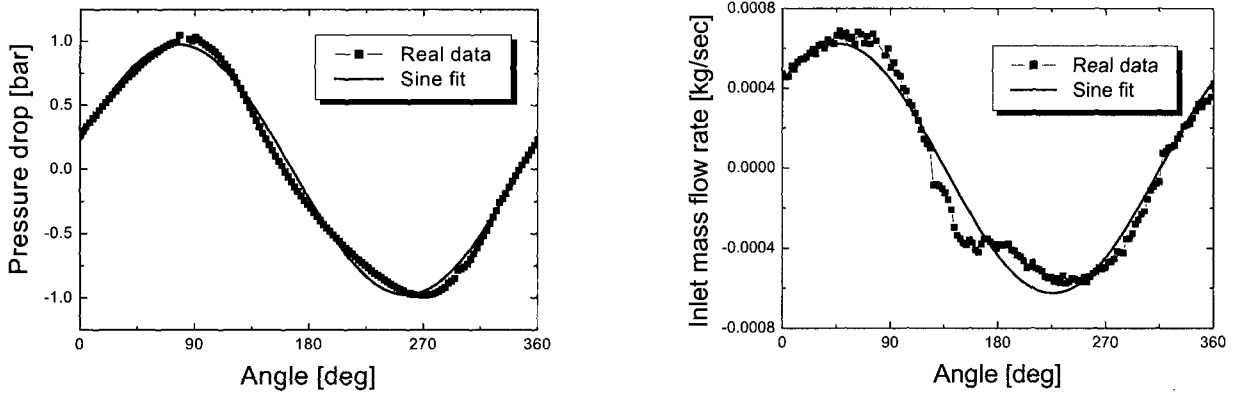


그림 3. 압력 강하 및 입구측 질량유량 측정값의 1차 조화 성분
Fig. 3. 1st order harmonic component of pressure drop and inlet mass flow rate

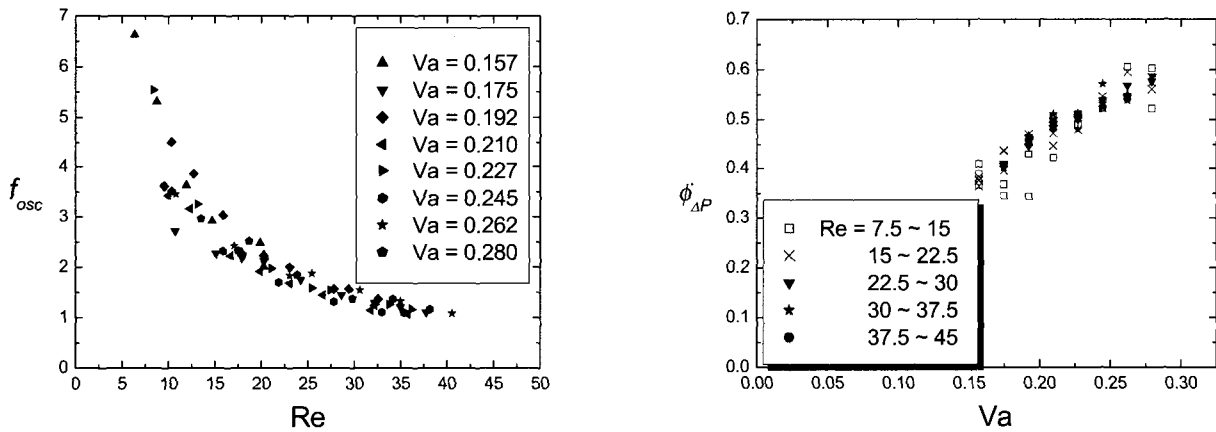


그림 4. #400 능직 스크린에 대한 왕복유동 마찰계수 및 위상각
Fig. 4. Oscillating friction factor and phase angle of #400 twill mesh

대해서도 같은 경향을 볼 수 있었다. Fig. 5는 #400, #250, #200 능직 재생기들에 대한 결과를 상호 비교한 것으로서, 이로부터 식(12), (13)에 나타나 있는 가스 영역 길이 비의 영향을 볼 수 있다. 이는 재생기들이 선경에 따라 수력직경이 변하고 따라서, 다른 가스 영역 길이 비를 갖기 때문이다. 왕복유동 마찰계수는 가스영역 길이 비에 무관한 반면, 위상각은 그것에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 식(12), (13)은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$f_{osc} = function (Re) \quad (14)$$

$$\phi_{\Delta P} = function (Va \text{ and } d_h/L) \quad (15)$$

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 능직 스크린 재생기에 대한 마찰계수의 측정 결과를 곡선 근사하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$f_{osc} = \frac{39.52}{Re} + 0.008 \quad (16)$$

반면에, 위상각의 모든 실험값들은 가스 영역 길이 비에 의한 영향으로 한 곡선으로 표현할 수 없지만, $\phi_{\Delta P} \cdot (d_h/L)^{2.621}$ 로 정의되는 $\phi_{\Delta P}^*$ 를 Valensi 수에

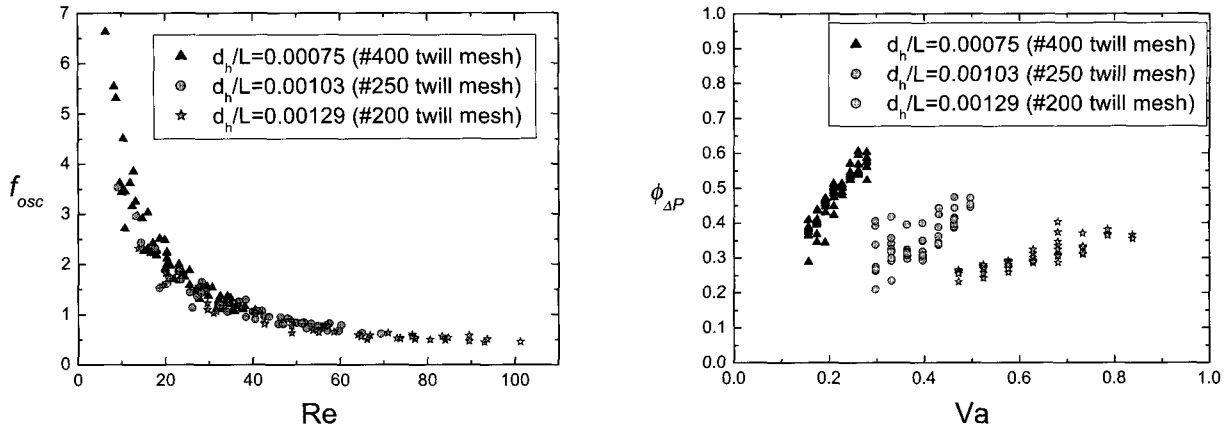


그림 5. 망치수 번호에 따른 왕복유동 마찰계수와 위상각의 비교
 Fig. 5. Comparison of oscillating friction factor and phase angle for different mesh number

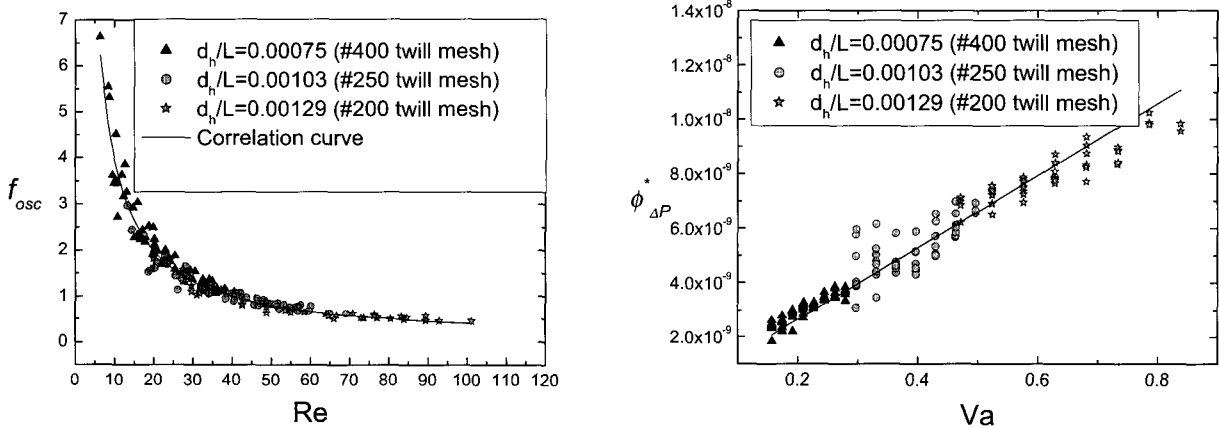


그림 6. 왕복유동 마찰계수와 위상각의 상관식 곡선
 Fig. 6. Correlation curves of oscillating friction factor and phase angle

대하여 나타내 보면 하나의 직선에 잘 들어오는 것을 확인할 수 있다.[8] 따라서 위상각은 다음과 같은 상관식으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{\Delta P} = 1.321 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{d_h}{L}\right)^{-2.621} \cdot Va \quad (17)$$

Fig. 6은 이러한 상관식들이 실험값들과 잘 일치함을 보여주고 있다.

4.2 능직과 평직 스크린에 대한 결과 비교

#200 능직 스크린 재생기와 #200 평직 스크린 재생기는 직조형태를 제외하고 선경과 공극률을 포함한 다른 재생기 물성들은 모두 일치하므로 그들 결과를 비교함으로써 직조형태의 영향을 알 수 있다. Fig. 7은 이러한 결과 비교를 나타내고 있는데, 위상각은 두 재생기가 거의 일치하여 직조형태에 따른 영향이 없는 것으로 보인다. 마찰계수는 평직 스크린 재생기가 능직 스크린 재생기보다 다소 큰 값을 가지는 것으로 보아 마찰계수는 직조 형태 즉, 재생물질의 형상에 영향

을 받는 것으로 보인다. 이렇게 왕복유동모델의 상관식들이 형상에 대한 정보를 가지고 있지 못한 것은 무차원수 도출과정에서 사용된 모세관 모델의 한계성에 기인한 것으로 보인다.

4.3 신뢰성 및 반복성 실험 결과

앞에서 얻은 상관식들을 포함한 실험결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 모든 물성들이 같은 두 개의 재생기에 대해 실험을 수행하여 그 결과들을 비교하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 두 개의 #400 능직 스크린 재생기를 제작하여 실험결과를 비교하였는데, 그 결과들이 완전히 일치하는 것을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 따라서, 제작에 기인한 결과의 비일관성은 없으며, 측정의 신뢰성도 확보할 수 있었다.

4.4 정상유동 모델과 왕복유동 모델의 비교

Fig. 9는 맥동압력 및 왕복유동 조건에서 재생기의 전형적인 압력강하 및 평균유량을 나타낸 것이다. 여기서, 평균유량은 식(1)에서 언급한 바와 같이, 재생기 양단의 유량의 평균을 의미한다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, 압력강하의 위상과 평균유량의 위상이 차이가

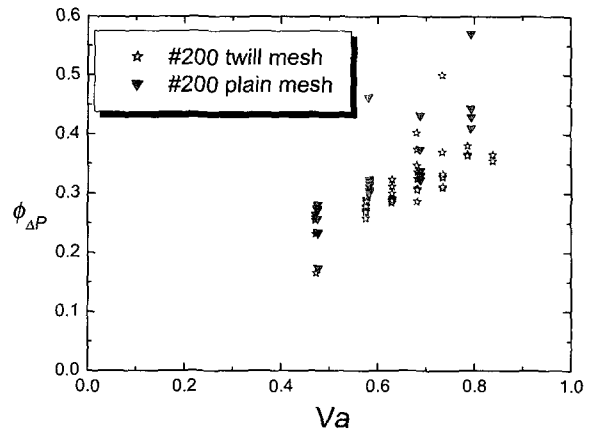
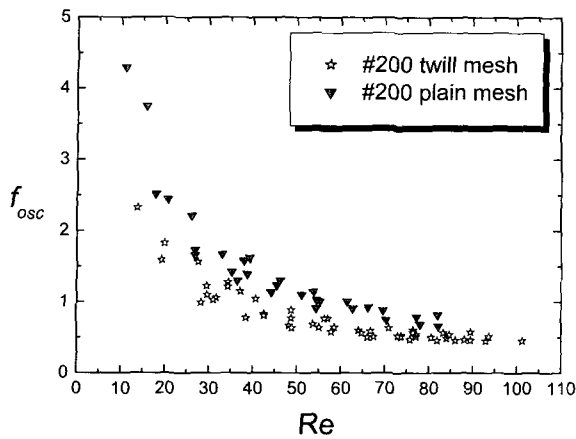


그림 7. 직조 형태에 따른 왕복유동 마찰계수 및 위상각의 비교

Fig. 7. Effect of weave style on oscillating friction factor and phase angle

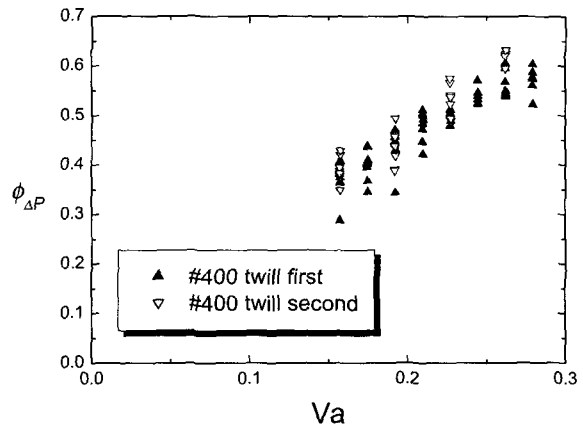
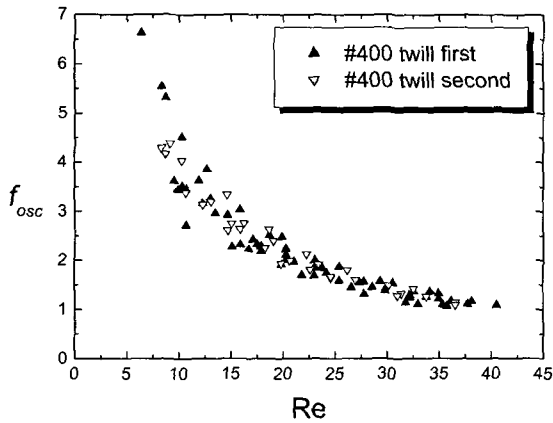


그림 8. 왕복유동 마찰계수 및 위상각의 반복성 및 신뢰성 실험 결과

Fig. 8. Repeatability and reliability test result of oscillating friction factor and phase angle

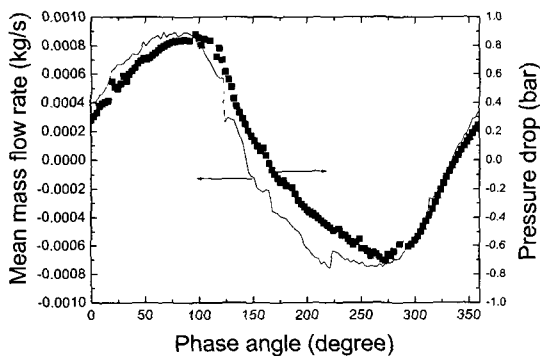


그림 9. 평균 질량유량과 압력강하 실험 데이터 (#200 평직 스크린, 75Hz)

Fig. 9. Experimental data of the mean mass flow rate and the pressure drop (#200 plain screen regenerator at 75 Hz)

나는 것을 알 수 있다. 기존의 정상유동 모델은 식(1)

과 같이 압력강하와 평균유량의 위상이 동일하다고 가정하므로, Fig. 9와 같은 실제 현상을 정확하게 묘사할 수 없다. 반면에, 왕복유동 모델에서는 압력강하의 위상각이 재생기 고온측의 위상에 대하여 표현되므로, 압력강하의 위상을 평균유량과 같다고 가정할 필요가 없다. Fig. 9는 왕복유동 모델이 실제 현상을 좀더 정확하게 묘사할 수 있다는 것을 명백하게 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 맥동압력조건에서 재생기를 통한 왕복유동의 압력강하를 더욱 사실적으로 기술하기 위해서 기존의 정상상태의 압력강하 모델과 다른 왕복유동 모델을 제안하고 그 모델의 무차원화된 상관식을 실험으로부터 얻었는데, 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 제안된 왕복유동 모델의 일반화된 사용을 위해서 실험에 앞서 재생기의 모세관 모델로부터 무차원수를 유도하였다. 그 유도된 무차원수 그룹은 Reynolds수 (Re), Valensi수 (Va), 가스영역 길이비 (d_h/L), 왕

복유동 마찰계수(f_{osc}), 압력강하 위상각($\phi_{\Delta P}$)으로 구성되어 있다.

2) 세가지 종류의 능직 스크린 재생기(#400, #250, #200)에 대한 실험으로부터 얻은 왕복유동 모델의 상관식은 다음과 같다.

$$f_{osc} = \frac{39.52}{Re} + 0.008$$

$$\phi_{\Delta P} = 1.321 \times 10^{-8} \cdot \left(\frac{d_h}{L}\right)^{-2.621} \cdot Va$$

적용 가능한 무차원 변수의 범위는 $5 \leq Re \leq 100$, $0.15 \leq Va \leq 0.8$, $0.00075 \leq d_h/L \leq 0.00129$ 이다.

3) 재생물질 형상의 영향을 알아보기 위해 #200 능직과 평직 스크린 재생기의 결과를 비교하였다. 압력강하 위상각에는 형상의 영향이 없는 반면, 왕복유동 마찰계수의 경우에는 평직 스크린의 마찰계수가 능직보다 증가하였다.

4) 왕복유동 모델이 기존의 정상유동 모델보다 실제 현상을 좀더 정확하게 묘사할 수 있다는 것을 측정된 압력강하와 평균유량 데이터로부터 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 LG전자(주)와 1999년도 민간겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] I. Urieli and D.M. Berchowitz, "Stirling cycle engine analysis", Adam Hilger Ltd, 1984
 [2] Kays and London, "Compact heat exchanger" 3rd. ed., McGraw-Hill, 1984
 [3] T. S. Zhao and P. Cheng, "Oscillatory pressure drops through a woven-screen packed column subjected to a cyclic flow", Cryogenics, Vol. 36, No. 5, pp. 333-341, 1996

[4] Y. Ju, Y. Jiang and Y. Zhou, "Experimental study of the oscillating flow characteristics for a regenerator in a pulse tube cryocooler", Cryogenics, Vol. 38, No. 6, pp. 649-656, 1998
 [5] 남관우, 정상권, "극저온 맥동 압력 조건에서의 재생기에 대한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 B 권, 제26권, 제8호, pp. 1095-1101, 2002
 [6] J. M. Lee, P. Kittel, K. D. Timmerhaus and R. Radebaugh, "Useful scaling parameters for the pulse tube", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 41, pp. 1347-1355, 1996
 [7] K. Nam and S. Jeong, "Measurement of the cryogenic regenerator characteristics under oscillating flow and pulsating pressure", Cryogenics, accepted for publication. having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate", Renewable Energy, Vol. 25, pp. 341-369, 2001
 [8] J. L. Bhagoria, J. S. Saini and S. C. Solanki, "Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct

저 자 소 개



최성열(崔誠烈)
 1974년 2월 25일생, 2001년 연세대 공대 기계공학과 졸업, 2003년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사)



남관우(南寬祐)
 1973년 10월 25일생, 1996년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1998년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기계공학과 박사과정



정상권(丁常權)
 1962년 8월 16일생, 1985년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 MIT 기계공학과 졸업(공학박사), 1992~1995년 MIT Plasma Fusion Center 연구원, 2000~2001년 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory 방문교수, 1996~현재 KAIST 기계공학과 교수