

스크롤 선회에 따른 압축 공간내의 유동 특성

강 동 진*, 전 현 주**, 오 미 애***

Flow Characteristics inside a Compression Chamber due to the Orbiting Motion of a Scroll

Dong Jin Kang*, Hyun Joo Jeon**

Key words: Compression chamber (압축공간), Orbiting motion(선회운동), Incompressible flow (비압축성 유동)

ABSTRACT

The detailed flow characteristics inside a compression chamber due to the orbiting motion of a scroll is studied numerically. The orbiting motion of a scroll is modelled at 7 orbiting angles. At each orbit angle, the central compression chamber is modelled. All computations are carried by using an in-house code. It is based on the SIMPLE algorithm. Computation results show that the flow structure inside the compression chamber is dependent on the orbit angle. The pressure variation inside the compression chamber also shows great dependence on the orbit angle. The pressure variation shows local maxima when the orbiting motion of a scroll directs toward the center of the compression chamber.

1. 서론

스크롤 압축기(scroll compressor)는 용적형 압축기에 비해 효율이 높고 운전이 정숙하여 이미 공조용 압축기로 널리 사용되고 있으며, 여러 분야로 그 응용이 확대되고 있다. 따라서, 넓은 영역에서 작동하는 스크롤 압축기의 성능에 대한 이해가 요구되며 압축기 성능을 정확히 예측하기 위한 연구가 폭넓게 수행되고 있다.

현재까지 연구문헌⁽¹⁻⁵⁾으로 발표된 압축기 성능예측 방법들은 스크롤 압축기 내에서 작동 유체가 압축되는 일련의 과정을 간단한 열역학적 시스템으로 가정하는 단순한 모델을 사용하는데, 본 연구에서도 동일한 모델을 사용하였다. 이러한 단순한 열역학적 모

델은 본질적으로 여러 가지 가정을 담고 있는데, 간단히 정리하면 다음과 같다. 우선, 스크롤 치형의 운동에 따른 작동 유체의 운동(운동에너지와 비정상성 등)을 무시하며, 압축실 내의 열역학적 특성 (압력, 온도 등)이 균일하다고 가정한다. 이는 스크롤의 선회에 따라 압축 공간의 형태가 달라짐과 동시에 운동을 하는 특성 때문에 모델링 자체가 쉽지 않기 때문이기도 하다. 따라서, 본 연구에서는 스크롤의 선회에 따른 압축 공간 내의 열 및 유체역학적 특성을 자세히 연구하는 것을 최종 목표로 수행된 연구의¹⁾ 초기 연구 결과에 관한 것이다.

기본적으로 스크롤 내의 유동은 3차원 비정상 압축성 유동이지만, 스크롤의 형상이 긴 원통형 구조를 가지고 있으므로 개략적인 유동 특성을 2차원 유동으로 가정하였다. 또한, 압축 공간 내의 열 및 유체역학적 특성은 스크롤의 운동에 따른 유동 발생, 압축 공

* 영남대학교 기계공학부
** 영남대학교 대학원
*** 영남대학교

간 형상 변화와 운동에 따른 비정상성, 그리고 작동 유체의 압축성 효과 등이 복합적으로 작용한다고 판단된다. 본 연구는 이들 3가지 영향중에서 가장 기본적인 인자인 스크롤의 선회에 따른 유동 발생 특성을 수치 해석적으로 연구하였다. 이러한 연구는 궁극적으로 스크롤 압축기의 성능 예측 모델에 대한 평가뿐만 아니라 압축기의 운동학적 안정성을 평가하는데도 도움을 줄 것으로 기대된다.

수치해석은 SIMPLE 알고리즘에 기초하여 저자들이 선행 연구⁽⁶⁾에서 개발한 코드를 이용하였다. 이 코드는 유한 체적법을 사용하여 지배 방정식을 근사하고 MPI(message passing interface)에 기초한 병렬 계산법을 채택하고 있다.

2. 스크롤 압축기 성능예측

본 연구에서 예제로 선택한 스크롤 압축기는 일본의 Mitsubishi사가 자동차 에어컨용으로 제작한 150cc 급 압축기이다. 스크롤 압축기의 주요 제원은 Table 1에 정리되어 있다. 또 "Fig. 1"은 스크롤 선회에 따른 압축 공간의 형성, 성장 및 소멸 특성을 살펴보기 위해 도시한 압축 공간 단면도이다. 본 논문에서는 #4 압축 공간 내의 유동 특성을 자세히 연구하였다.

스크롤 압축기의 성능예측은 저자들이 선행 연구에서 개발한 성능 예측 프로그램을 이용하여 수행하였다. 작동유체는 이상기체로 가정하였으며, 기타 성능예측 프로그램에 대한 자세한 내용은 참고문헌^[7]에 정리되어 있다.

"Fig. 2"는 스크롤이 2000rpm으로 선회할 경우 얻은 압축 공간 내의 평균압력 변화를 도시한 그림이다. 압축 공간 #4의 경우 약 0.312~1.098 MPa 사이의 압력 변화를 가지게 된다. 본 논문에서는 그림에 도시한 바와 같이 9가지 선회 각도에서의 압축 공간 내의 유동 특성을 연구하였다.

3. 수치해석 방법

본 논문에서는 압축 공간 내의 유동을 비압축성으로 가정하였다. 따라서, 다음의 식 (1)과 (2)를 지배 방정식으로 사용하였다. 또, 압축 공간 폭과 스크롤 선회 속도에 기초한 레이놀즈 수가 수백인 점을 감안하여 층류 유동으로 가정하였다. 이는 압축 공간의 폭과 선회 속도 등으로 계산한 레이놀즈 수가 약 500이기 때문이다.

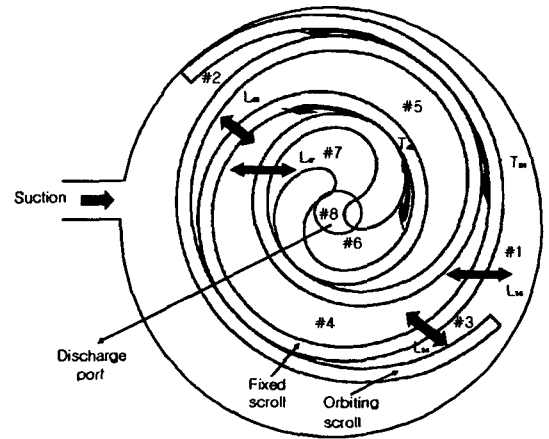


Fig. 1 Schematic diagram of a scroll compressor

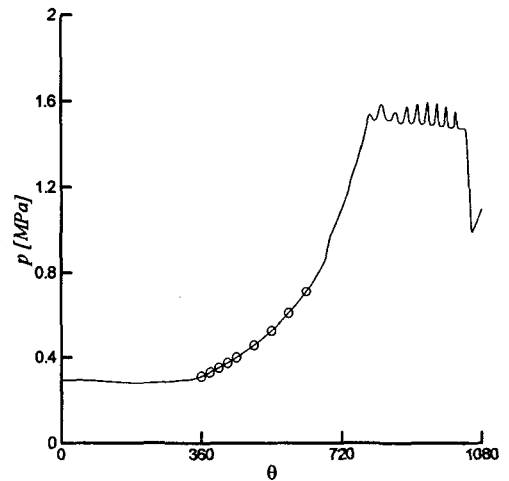


Fig. 2 Pressure variation inside compression chamber with orbiting angle

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi} (J U u_i + J_p \frac{\partial \xi}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J V u_i + J_p \frac{\partial \eta}{\partial x_i}) \\ & = \frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_g^{11} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (J \Gamma_g^{12} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \\ & + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_g^{21} \frac{\partial u_i}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J \Gamma_g^{22} \frac{\partial u_i}{\partial \eta}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 하첨자 i 는 1 혹은 2로 각각 x -방향과 y -방향을 가리킨다. 또 Γ 는 유체의 동점성 계수 (kinematic viscosity) 이며, (ξ, η) 는 일반 비직교

표면 좌표계의 축이며 나머지 좌표변환 함수들은 다음과 같이 정의된다.

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - y_{\xi} x_{\eta}, \quad g^{\ddot{i}} = (\xi_{\dot{i}})_x (\xi_{\dot{j}})_x + (\xi_{\dot{i}})_y (\xi_{\dot{j}})_y$$

$$\xi_x = \frac{y_{\eta}}{J}, \quad \xi_y = \frac{x_{\eta}}{J}, \quad \eta_x = -\frac{y_{\xi}}{J}, \quad \eta_y = \frac{x_{\xi}}{J}$$

또 U 와 V 는 각각 $\frac{y_{\eta}u - x_{\eta}v}{J}$ 와 $\frac{-y_{\xi}u + x_{\xi}v}{J}$ 로 정의되는 반변 속도 성분(contravariant velocity component)이다.

연속 방정식은 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial IU}{\partial \xi} + \frac{\partial IV}{\partial \eta} = 0 \quad (2)$$

앞서 서술한 바와 같이, 지배 방정식 식 (1)과 (2)를 유한 체적법으로 근사하고 SIMPLE에 따라 수치해를 얻었는데, 이 과정을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (a) 속도성분과 압력장을 적절히 가정한다.
- (b) 지배 방정식 식(1)을 근사하여 얻은 대수 운동량 방정식으로부터 속도성분을 수정한다.
- (c) 연속 방정식 식 (2)을 조작하여 얻은 압력 방정식으로부터 압력을 수정한다.
- (e) 과정 (b)와 (c)에서 구한 속도성분과 압력의 변화가 충분히 작지 않으면 과정 (b)로 되돌아간다.

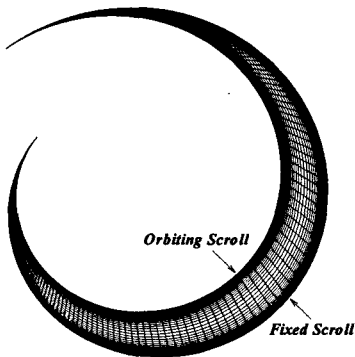


Fig. 3 Mesh Generation

	Parameter	Value	Parameter	Value
Scroll design parameter	Displacement	150 cc/rev	Scroll height	445 mm
	Scroll thickness	40 mm	Basic circle radius	34 mm
	Involute maximum Angle	94°	Orbiting radius	65 mm
	$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 68.4, \theta_A = 354.4, \theta_C = 354.4$ $\gamma = 112.4, \beta = 14, r_1 = 3.9mm, r_2 = 10.4mm$			
Scroll compressor design parameter	Suction plenum	340 cc	Discharge plenum	150 cc
	Suction port area	1.8 cm ²	Discharge port area	0.8 cm ²
	Discharge port periphery	41 mm	Discharge port volume	2.6 cc
Discharge valve	Natural frequency	2187 Hz	Damping coefficient	0.02
	Stop height	31 mm	Mass	0.5 g
	Thickness	0.4 mm		
Operating conditions	Refrigerant	R-134a	Suction pressure	294.3kPa
	Discharge pressure	1471.3kPa	Superheat	10
	Compressor speed	2000 rpm	Suction temperature	11
	Radial clearance	15 μ m	Axial clearance	10 μ m

Table. 1 Summary of specification of a scroll compressor

위의 과정 (e)에서 수렴판정은 반복계산간 속도성분과 압력의 최대변화가 10^{-4} 보다 작을 때를 기준으로 하였다. 보다 자세한 내용은 참고문헌^[6]에 잘 정리되어 있다.

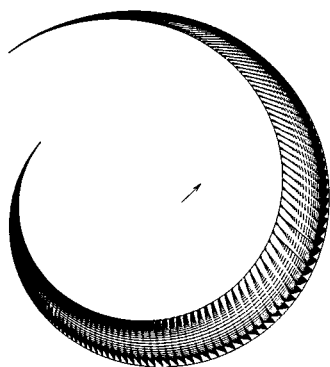
“Fig. 3”은 case 1의 경우에 사용한 압축 공간 #4를 격자 구성한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이, 벽면에 격자를 밀집하여 급격한 속도 변화를 감안하였다.

수치해석에 사용된 경계 조건은 다음과 같다. 먼저, “Fig. 3”에서 안쪽 벽면에서는 선회 스크롤의 운동 속도를 가정하였다. 바깥 벽면은 고정 스크롤 벽면이므로 벽면조건을 가정하였다. 그리고 양쪽 끝에서는 Neumann조건을 사용하였다. 이는 반경 방향 흐름새로의 누설 유동을 무시한 경우에 해당한다.

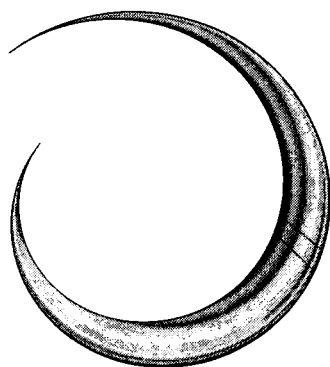
4. 결과 및 토의

앞서 서술한 바와 같이, “Table 1”과 같은 스크롤 압축기의 4번 압축 공간 내의 유동을 선회각도 변화에 따라 살펴보았다. 계산을 수행한 선회각도는 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° 등 모두 9가지이다.

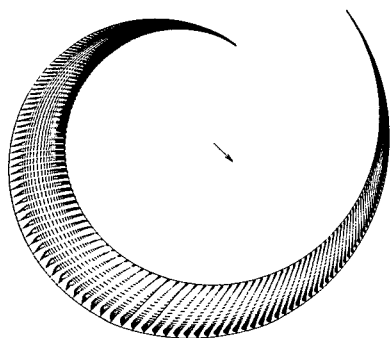
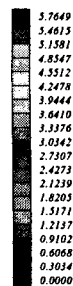
“Fig. 4”는 선회각 변화에 따른 압축공간 내의 유동 변화를 속도장의 형태로 표현한 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 선회 스크롤의 작용으로 압축 공간 내에 강한 유동장이 형성됨을 확인할 수 있다. 유동은 선회각도에 따라 크게 달라지며, 특히 선회 스크롤 운동방향이 압축공간의 중심부를 향할 경우는 유동이 양 쪽지점으로 나누어지는 복잡한 유동이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 5는 선회각의 변화



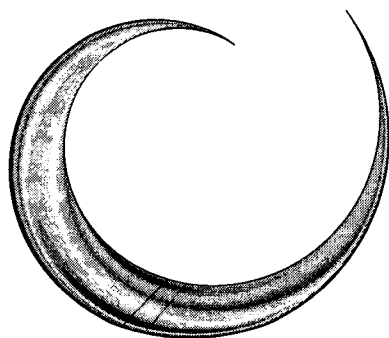
(a) at 0°



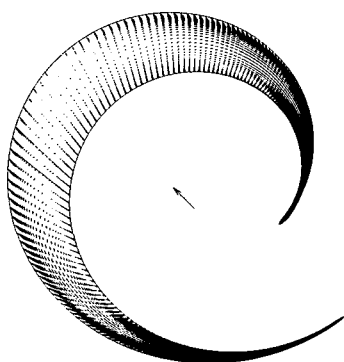
(a) at 0°



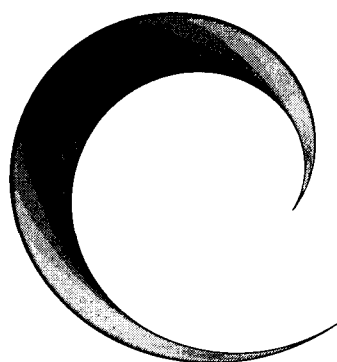
(b) at 90°



(b) at 90°



(c) at 270°



(c) at 270°

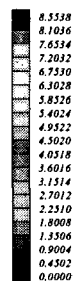
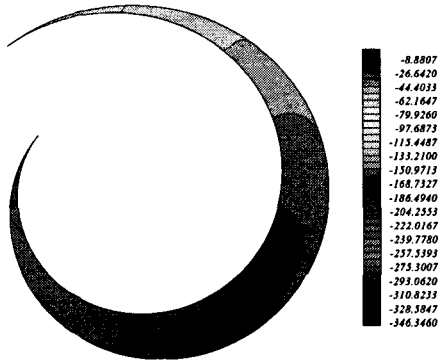
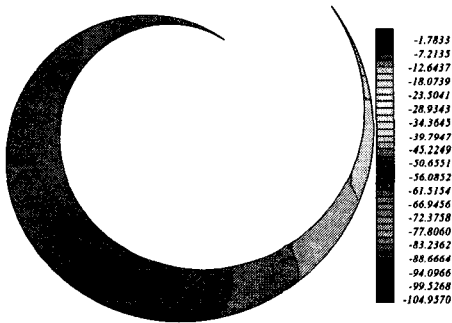


Fig. 4 Variation of velocity field inside the compression chamber with orbit angle

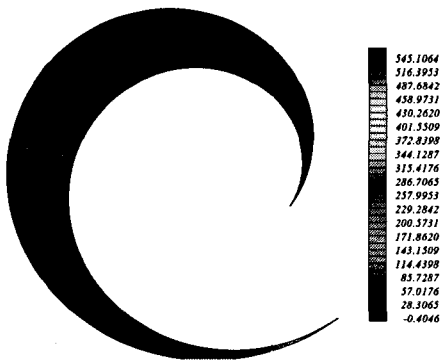
Fig. 5 Contour plots of velocity magnitude with orbit angle



(a) at 0°



(b) at 90°



(c) at 270°

Fig. 6 Contour plots of pressure inside the compression chamber with orbit angle

에 따라 압축 공간내의 유속의 크기를 등고선의 형태로 표현한 그림이다. 그림을 살펴보면, 선회 스크롤의 운동에 따라 고정 스크롤 면을 따라 강한 유동이 유발됨을 알 수 있다. 이렇게 형성된 유동의 최대 유속 지점은 원심력 작용에 의해 고정 스크롤 쪽으로 치우쳐 있다.

“Fig. 6”은 선회각 변화에 따른 압축 공간 내의 압력분포를 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면 상하부 꼭지점 부근에서 강한 압력 구배가 형성됨을 알 수 있다. 이는 선회 스크롤이 정지 스크롤과 접하는 영역에서 상대적으로 큰 압력 변동치를 가짐을 의미하는 것으로, 스크롤의 운동학적 안정성 측면에서는 좋지 않은 현상이라 하겠다. 다만, 이 때 형성되는 압력 변동이 압축 공간 내의 압력의 절대치에 비해 그 크기가 작은 것은 다행이라 하겠다.

“Fig. 7”은 선회각 변화에 따른 압축 공간 내의 압력 변동 크기를 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면 스크롤 선회에 따라 압축 공간 내 압력이 큰 변동을 보임을 알 수 있다. 특이할 사항은 45°와 135° 등에서 극부적으로 극대치를 보인다는 것이다. 이러한 압력 변동은 스크롤의 선회방향과 관계가 있는 것으로 판단된다. “Fig. 3”을 살펴보면 선회각 45°와 135° 등에서 스크롤의 운동방향은 압축공간의 중간을 향하고 있다. 즉, 선회 스크롤의 운동으로 압축공간이 전체적으로 압축되는 형태임을 알 수 있다. 이에 비해 상대적으로 작은 압력 변동을 보이는 90°와 180° 등에서는 압축공간의 양 끝의 한 쪽과 동일한 방향으로 선회 스크롤이 운동하고 있다. 이에 따라, 선회 스크롤의 운동방향과 반대쪽에 있는 압축공간은 확대되는

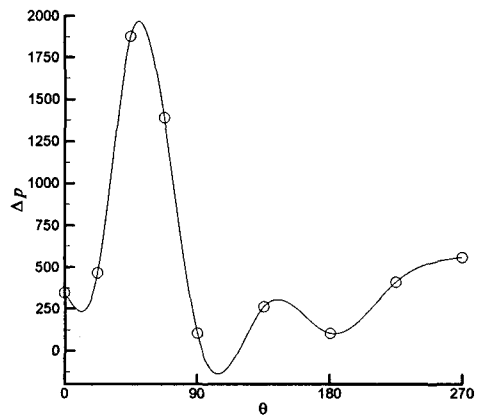


Fig. 7 Variation of pressure difference inside the compression chamber with orbit angle

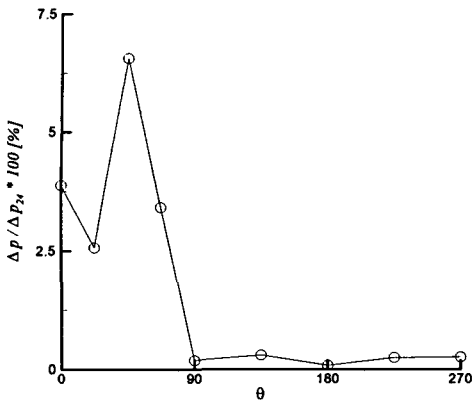


Fig. 8 Effects on the pressure difference between two adjoining compression chamber

효과가 있어 압축 공간 내의 유동이 상대적으로 자연스럽게 형성되는 것으로 판단된다. 이는 압력 변동의 상대적 저하의 원인으로 판단된다.

“Fig. 8”은 선회 스크롤의 운동에 따른 압축 공간 내의 압력 변동이 누설유동을 결정하는 압력 차에 미치는 영향을 설명하는 그림이다. 그림은 유동 계산을 수행한 압축 공간 #4번에서의 압력변동을 인접한 압축 공간 #2사이의 압력 차이에 대한 백분율로 표현한 그림이다. 그림을 살펴보면, 선회 스크롤 운동이 누설 유량을 결정하는 압축 공간 사이의 압력 차이에 약 6%에 이르는 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 스크롤 압축기의 압축 공간 내의 유동 특성을 다양한 선회 각도에 대하여 전산유체 역학적 연구하였다. 다양한 선회각도와 운전조건의 변화에 따른 수치해석 결과를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

압축 공간 내의 유동과 압력은 선회각도 변화에 따라 큰 차이를 보였다. 특히, 선회 방향이 압축 공간의 중앙부를 향하는 선회각도에서 강한 유동이 형성되며 압축 공간 내의 압력 변화도 극대치를 가짐을 알 수 있었다. 본 논문에서 다룬 #4번 압축 공간의 경우 90°에서 극대치를 가졌다. 또한, 선회 운동에 의한 압력 변동은 압축 공간 사이의 누설

유량을 결정하는 압력 차이에 약 6%에 이르는 큰 변화를 줄 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 스크롤 압축기의 정확한 성능예측을 위해서는 누설 유량의 정확한 예측이 필요하며 누설 유량의 예측에는 선회 운동도 고려되어야 함을 알 수 있다. 다만, 본 연구는 선회 운동에 따른 비정상성과 압축성 효과를 무시한 연구이어서 후속 연구를 통해 이들의 영향도 판명되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단 지정 선문대학교 공조기술 지역협력연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

1. Caillat J. L., Ni, S. and Daniels, M., 1988, A Computer Model for Scroll Compressor, Proceedings of 1988 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 47-55.
2. Morishita, E., Sugihara, M., Inaba, T. and Nakamura, T., 1984, Scroll Compressor Analytical Model, Proceedings of 1984 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 487-495.
3. Tojo, K., Ikegawa, M., maeda, N., machida, S. and Shiibayashi, M., 1986, Computer Modeling of Scroll Compressor with Self Adjusting Back Pressure Mechanism, Proceedings of 1986 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 872-885.
4. 강 태규, 박 경우, 박 희용, 정 연구, 1997, 준 1차원 누설모델링 및 열전달 손실을 고려한 스크롤압축기의 성능해석, 대한기계학회논문집, 제 21권 제 10호, pp. 1339-1349.
5. 이 건호, 김 학수, 조 금남, 유 정열, 1998, R-134a를 사용한 자동차용 스크롤 압축기의 스크롤 형상 변화가 성능에 미치는 영향, 대한기계학회논문집, 제 22권 제 11호, pp. 1635-1645.
6. 강 동진, 손 정락, 1998, “병렬 컴퓨터에서 다중 블록 유한 체적법을 이용한 비압축성 유동해석,” 유체기계저널, 제 1권 제 1호, pp. 72-80.
7. 강 동진, 전 현주, 홍 석준, 2003, “스크롤 압축기 누설모델의 CFD 해와의 비교연구” 대한설비공학회 논문집, Vol. 15, no. 10, pp. 843-852.