

스크롤 압축기 해석 모델 개발 및 검증

임상식¹, 이영선², 박성영³, 김기범^{1*}

¹충북대학교 기계공학부, ²한국기계연구원 재료연구소, ³공주대학교 공과대학 생산기술연구소

Development and Validation of Simulation Model for A Scroll Compressor

Sang-Sik Yim¹, Young-Seon Lee², Sung-Young Park³ and Ki-Bum Kim^{1*}

¹Division of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

²Korea Institute of Machinery & Materials

³Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요약 압축기는 다양한 유체기계에 널리 사용되고 있으며, 특히 압축기의 성능은 냉동공조 시스템의 성능계수에 직접적인 영향을 미치므로 압축기의 효율을 높이기 위한 노력이 계속되어 왔다. 용도에 맞게 다양한 종류의 압축기가 개발되었고, 그 중 스크롤 압축기는 그 크기에 비하여 압축 성능이 우수하여 여러 분야에서 선호하는 압축기이다. 스크롤 압축기의 개발을 위하여 실험적인 연구는 많이 수행되어 온 반면, 개발 목적에 맞게 압축기를 해석할 수 있는 모델은 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 스크롤 압축기를 기하학적으로 모델링하여 해석할 수 있는 모델을 1-D 상용 프로그램인 AMESim을 이용하여 개발하였으며, 실험 데이터를 이용하여 모델의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구 결과는 추후 스크롤 압축기를 개발하는 과정에서 압축기의 성능을 예상하고 최적화 할 수 있는 방법을 제공할 것으로 기대된다.

Abstract Compressor is one of the most widely employed component in fluid machinery system. It takes tremendous efforts to improve compressor efficiency which affects the coefficient of performance of air-conditioning and refrigeration systems directly. Among various types of compressor, scroll-type compressor is commonly prevalent one with its high compression capability despite relatively small size and weight. Numerous experimental studies have been done to develop for the scroll-type compressor; however, computational models to evaluate the compressor performance or efficiency are not much available in the course of compressor designing process. In this study, a computational model was developed on the basis of geometrical theory using 1-D commercial software AMESim. A simulation study was carried out using the model, and the simulation result was validated with analytical data. This research is expected to provide a viable tool for developing and optimizing a scroll-type compressor.

Key Words : Scroll compressor, Computational models, AMESim

1. 서론

산업이 발전함에 따라 냉동-공조기기의 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 대형 냉동-공조기기에 대한 연구 및 상용화가 빠르게 이루어지고 있다. 최근 LG전자에서는 ‘인

버티 스크롤 칠러’를 개발하여 상용화 하였다. 이는 대형 빌딩의 냉동-공조를 위한 시스템으로 에어컨용 브이 스크롤 압축기가 탑재되어있다. 이처럼 대형 압축기의 성능을 향상시키기 위한 연구가 많이 수행되어 왔다.

소형 압축기는 주로 수송 시스템의 냉동 및 흡입공

본 논문은 한국대산업기술연구회 협동연구사업(B551179-11-02-00)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kibum Kim

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

접수일 12년 02월 28일

수정일 (1차 12년 03월 26일, 2차 12년 04월 05일)

게재확정일 12년 05월 10일

기 압축에 많이 사용되고 있다. 최근 상용화 된 전기자동차에서 실내난방을 위한 전열 시스템의 큰 전력소비량 때문에 이를 히트펌프 시스템으로 바꾸기 위한 방안이 논의되고 있으며, 히트펌프에 사용되는 압축기의 최적화가 중요한 이슈로 대두되고 있다[1]. 이에 대형 냉동-공조 기기에 사용되던 스크롤 압축기를 소형화하여 전기 자동차용 히트펌프에 적용할 필요가 있다.

스크롤 압축기는 1905년에 Cruex에 의해 제안된 이래 1980년대 후반에 들어와서 실용화가 되었다[2]. 구조적 특성상 효율이 높고, 소음이 적으며, 진동이 작은 장점이 있다. 무엇보다도 구조적으로 간단하기 때문에, 소형화에 있어서 제약이 크지 않다는 점이 스크롤 압축기의 큰 장점이다[3].

그러나 30여년이 지난 현재에도 소형 스크롤 압축기에 관한 연구는 다양한 분야에서 실행되고 있지 않다. 국내외에서 스크롤 압축기에 대한 실험적 연구는 많이 수행되어 왔지만, 해석 연구가 가능한 시뮬레이션 모델은 찾아보기 쉽지 않다.[4,5]

본 연구에서는 스크롤 압축기의 구조적-동적 특성과 압축 양상을 물리적으로 규명한 후, 상용프로그램인 AMESim을 이용하여 신뢰성 있는 스크롤 압축기 해석 모델을 개발하였다. 이 연구에서 개발한 해석 모델은 향후 스크롤 압축기를 설계하고 최적화 하는데 있어서 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 스크롤 압축기의 작동 원리

스크롤 압축기의 압축 원리는 두 개의 나선형 블레이드를 가진 판이 상호 운동을 하여, 체적이 감소하면서 압력은 상승하게 되는 것이다.

X-Y평면상에서 인벌루트(involute) 곡선은 식 (1)과 (2)와 같다[6].

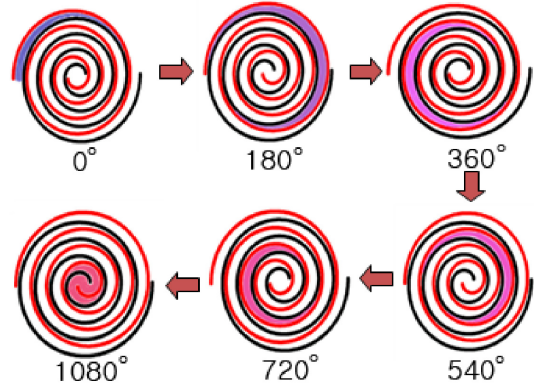
$$x = a(\cos\theta + \theta\sin\theta) \quad \text{식(1)}$$

$$y = a(\sin\theta - \theta\cos\theta) \quad \text{식(2)}$$

고정 스크롤이 0°부터 구동을 시작하면 선회스크롤은 180°도부터 구동을 시작하게 되는, 서로 X축과 Y축 대칭인 기하학적 형상을 띤다. 형상의 특성상 선회스크롤은 회전운동을 유발해서는 안 된다. 순수 병진운동만으로 좌표 변환이 일어나야만, 두 나선 사이의 단면적이 줄어든다.

그림 1은 가장 기본적인 스크롤 형상의 압축과정을 묘사한 그림으로, 크랭크축이 각각 0°, 180°, 360°, 540°, 720°, 1080°일 때의 모습이다.

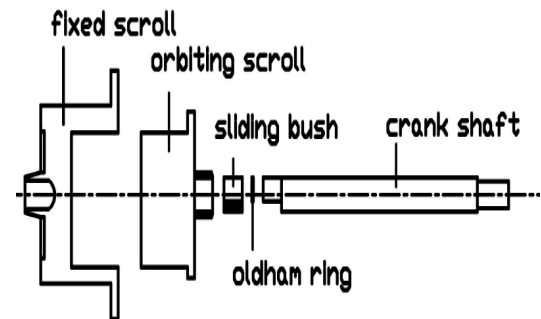
이처럼 스크롤 압축기는 순수 병진운동을 필요로 한다. 하지만 대부분의 공학적 동력원은 회전 운동을 기본으로 하고 있다. 압축기의 동력원인 엔진, 모터등도 동력원을 회전운동으로 전달하는데, 이 회전운동을 병진 운동으로 바꾸기 위해서는 몇 가지 장치가 필요하다.



[그림 1] 스크롤 압축기의 압축 과정
[Fig. 1] Compression process of a scroll compressor

스크롤 압축기는 고정스크롤, 선회 스크롤 및 병진 운동을 유발하기 위하여 슬라이딩 부시, 올담링, 크랭크축이 그림 2와 같이 구성 된다.

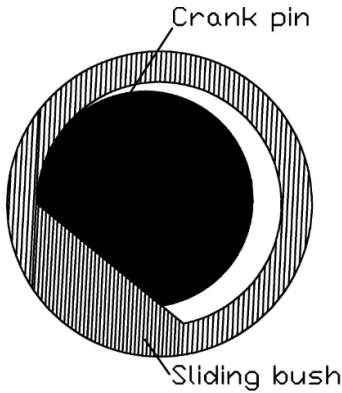
그림 2에서 보는 것과 같이, 크랭크축의 동력 전달 부는 편심 되어있다. 이는 회전운동으로 전해지는 동력을 원운동으로 변환해주는 역할을 한다. 원 궤적을 따라 움직이는 크랭크 핀은 회전운동과 병진운동을 동시에 유발하는 복합운동을 한다.



[그림 2] 스크롤 압축기의 구조
[Fig. 2] Structure of scroll compressor

그림 3은 크랭크축의 편심 된 크랭크 핀이 슬라이딩 부시에 연결된 모습으로 슬라이딩 부시는 크랭크축에서 발생하는 복합운동을 순수 병진운동으로 바꾸는 역할을

한다. 슬라이딩 부시와 크랭크 핀 사이에는 크랭크 핀이 자유롭게 미끄럼 운동을 할 수 있는 공간이 있다.



[그림 3] 슬라이딩 부시 단면
[Fig. 3] A cross section of sliding bush

이 공간에서 크랭크 핀의 복합운동을 유발하는 힘 중 회전력은 미끄럼 운동으로 상쇄되고, 병진운동을 유발하는 힘만 슬라이딩 부시에 전달된다[7]. 이 슬라이딩 부시의 병진운동이 선회스크롤의 순수 병진운동을 일으키게 된다.

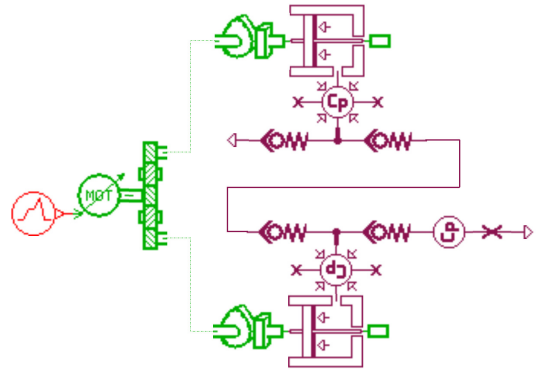
3. 해석 모델 개발 과정

3.1 직렬 피스톤을 이용한 압축기 모델링

스크롤 압축기의 압축 특성 중 가장 두드러지는 부분은 선회스크롤이 순수 병진 운동을 하며, 부피의 감소를 통한 압력의 상승이다. 기존의 사판식 압축기와 가장 두드러지는 차이는 각각의 압축실에서 압력이 순차적으로 증가하는 것이다. 앞에서 언급했던 바와 같이 유사한 압축 메커니즘을 가진 해석 모델이 존재하지 않기에 AMESim에서 제공하는 가장 기본적인 요소들을 이용하여 스크롤 압축기를 모델링하였다.

그림 4는 두 개의 피스톤을 직렬로 연결하여 스크롤 압축기를 구현한 해석 모델이다. 첫 번째 피스톤에서 공기를 흡입하여 압축된 공기가 두 번째 피스톤으로 유입되어 최종 압축되는 원리이다.

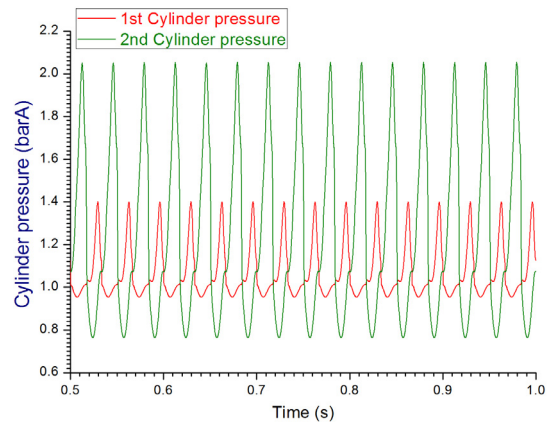
그림 5는 각각의 실린더 압축압력을 나타내며 진폭이 작게 맥동하는 압력이 첫 번째 실린더의 내부 압력이며, 큰 폭으로 맥동하는 압력이 두 번째 실린더에서의 내부 압력이다.



[그림 4] 2개의 플런저를 직렬로 연결하여 스크롤 압축기를 구현한 모델

[Fig. 4] A scroll compressor model with two plungers in series

그림 5는 각각의 실린더 압축압력을 나타내며 진폭이 작게 맥동하는 압력이 첫 번째 실린더의 내부 압력이며, 큰 폭으로 맥동하는 압력이 두 번째 실린더에서의 내부 압력이다. 두 개의 맥동 사이에 위상차가 존재하는데 이것은 캠의 설정 위상차 때문이다. 첫 번째 피스톤이 압축될 때 두 번째 피스톤은 흡기 상태이어야 하고 이를 구현하기 위해서 두 개의 캠 간 위상차는 180°로 설정하였다.



[그림 5] 스크롤 압축기를 구성하고 있는 2개 실린더 내부의 압축압력

[Fig. 5] Pressure in each plunger of the model

3.2 직렬 피스톤을 이용한 모델링의 물리적 모순

앞서 언급한 스크롤 압축기 모델은 압축이 진행됨에 따라 각각의 실린더 내부 압력이 증가하였다. 하지만, 최종 토출 압력은 상용화 되어 있는 압축기의 토출 압력과 많은 차이가 있다. 직렬 피스톤 압축기와 상용 피스톤 압

축기를 비교하기 위하여 식 3을 이용하여 피스톤 실린더의 체적을 계산 하였다.

$$V_{cym} = Bore^2 \times \frac{\pi}{4} \times Stroke \times N_{cym} \quad (식 3)$$

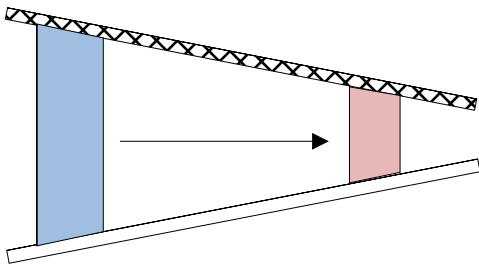
해석 모델에서 피스톤의 총 부피는 1254.7cm³인 반면, YF 소나타의 압축기(97701-3R000)의 경우 147.9cm³에 불과하다. 모델의 최대 토출 압력이 2.56bar인 것을 고려하면 공학적으로 의미가 없는 수치이다.

가장 큰 모순은 부피의 감소가 없다는 점이다. 스크롤 압축기의 경우 순수 병진 운동에 따라 유체의 부피가 감소하며 압력이 상승하는 원리인 것에 반해, 구현한 모델에서 압력은 상승하되 부피는 일정하다. 만일 피스톤의 부피 감소를 위해 길이 또는 직경을 감소 시켰을 경우, 피스톤에 연결된 3-node에서 공기의 흐름이 한 방향으로 이루어지지 않게 된다.

3.3 스크롤 압축기의 기하학적 형상 해석

스크롤 압축기의 기하학적 구성은 고정 스크롤과 선회 스크롤이 기초원을 시작으로 인벌루트(involute) 곡선을 이룬다. 이 두 개의 인벌루트(involute) 곡선은 선회 스크롤이 순수 병진 운동을 함에 따라 부피가 감소하는 원리이다.

스크롤 압축기의 압축 행정을 기하학적 형상으로 단순화 하면 노즐과 같다. 고정 스크롤과 선회 스크롤의 인벌루트(involute) 곡선을 직선으로 가정하면 그림 6의 형상과 같이 된다.



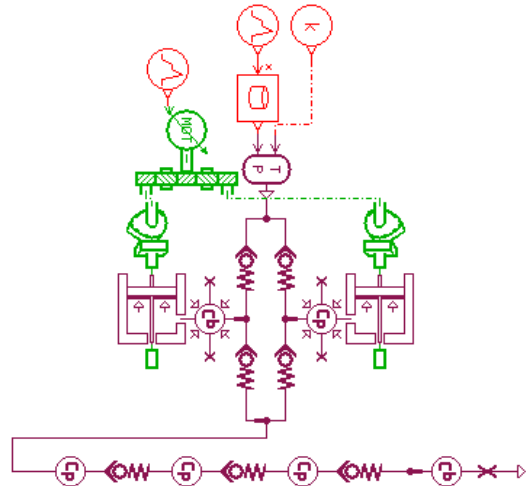
[그림 6] 노즐 형상으로 표현한 압축 과정
[Fig. 6] A compression process in a nozzle

흡입구로 유입된 공기가 토출구로 이동하면서 부피가 감소하는 원리이다. 실제 스크롤 압축기는 반경방향과 접선방향에서 미량의 공기가 누설되어 효율에 영향을 미친다[8]. 또한 선회 스크롤의 편심 질량 등 여러 가지 요인이 성능에 영향을 끼친다[9]. 하지만 해석을 하기위해 누

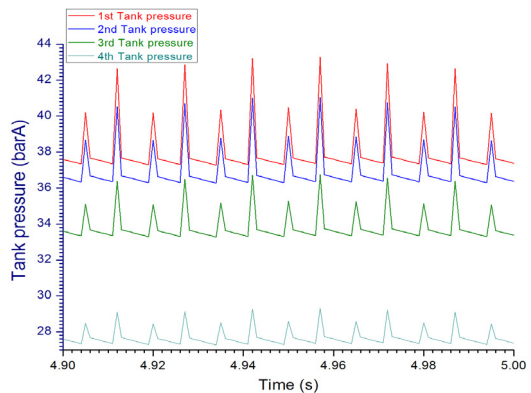
설과 편심 질량 등을 무시하면, 한쪽 방향으로만 유로가 형성되어 있는 여러 개의 피스톤으로 모사 할 수 있다. 이에 착안하여 압축 모델을 구현하였다.

3.4 노즐 형상 압축기모델

그림 6과 같은 스크롤 압축기의 압축 매커니즘을 구현하기 위해 AMESim에서 제공하는 공압 탱크의 부피를 순차적으로 감소시킨 모델을 그림 7과 같이 구현하였다. 지속적인 공기의 강제적 유입을 위해, 두 개의 피스톤을 적용하였다. 두 피스톤의 캠 간 위상차는 180°로써, 지속적인 공기의 유입이 가능하다. 이렇게 공급되는 공기는 부피가 순차적으로 감소하는 탱크에 강제적으로 유입되어 압축 공기를 토출해 낸다.



[그림 7] 노즐 형상 압축기
[Fig. 7] A compressor model built based on compressing principle of nozzle

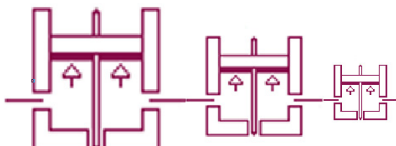


[그림 8] 노즐 압축기의 탱크에서 내부 압력
[Fig. 8] Internal pressure in a tank of the model

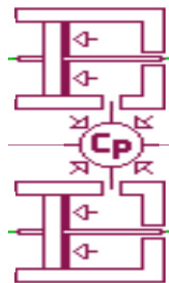
그림 8은 압축이 진행됨에 따라 각각의 탱크에서 압력 변화를 나타낸 것이다. 압축이 진행됨에 따라 압력이 점차 감소하는 양상을 보인다. 이러한 현상은 베르누이 원리를 이용하여 설명 할 수 있다. 본래 노즐은 유체의 속도를 증가시키는 장치로 노즐안의 유체가 비압축성이라면 속도 변화만 있을 뿐 부피의 변화는 없다. 앞서 얘기한 바와 같이 실제 스크롤 압축기에서는 부피가 감소하지만 유체의 속도 변화는 크지 않다.

3.5 스크롤 압축기

노즐의 기하학적 해석 결과와 내부에서 압축 거동을 동시에 만족시키기 위해서는 새로운 모델을 개발해야한다. AMESim에서 제공하는 공압 피스톤은 3노드를 연결해야한다. 이 모델은 유로가 2방향으로 생성된다는 단점이 있다. 따라서 한 방향으로만 유체를 이동 시키는 피스톤을 구성하였다.



[그림 9] 직렬로 연결된 플런저
[Fig. 9] Plunger in series



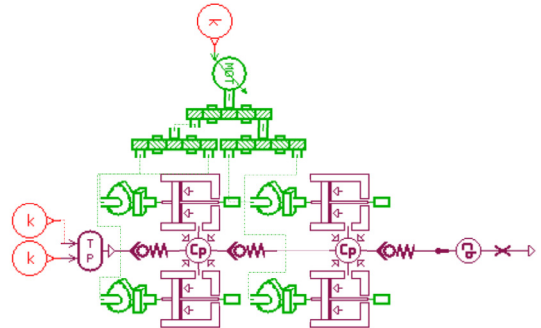
[그림 10] 한방향의 유로를 가진 플런저 모델
[Fig. 10] A plunger model having only one path

그림 9는 스크롤 압축기의 압축 메커니즘을 가장 유사하게 모사한 것이다. 그러나 AMESim에서는 위와 같은 컴포넌트를 제공하지 않기 때문에 그림 10과 같은 모델을 구성하였다. 그림10과 같이 구성된 플런저 모델에서 두 개의 피스톤이 동일한 운동을 하면 두 개의 컴포넌트는 하나의 요소처럼 작동한다.

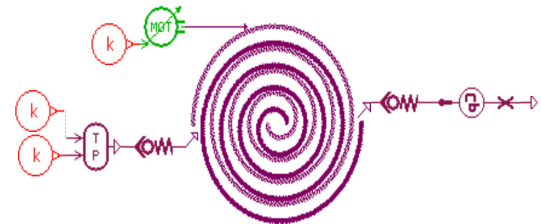
위의 구성을 이용하여 스크롤 압축기의 압축비를 임의로 정하고, 압축기를 모델링하면 그림 11과 같다.

그림 11은 플런저만 이용해 스크롤 압축기를 구현한

것이다. 그림 11의 가장 좌측 플런저는 스크롤 압축기에서 흡입 순간의 체적과 유사한 체적을 갖게 된다. 우측의 플런저는 좌측 플런저 직경에 압축비를 고려한 값만큼 축소한 값을 설정한다. 위의 모델이 스크롤 압축기의 압축 메커니즘을 모사한 것이 확실하지만, 스크롤 압축기의 형상을 정확히 표현한 것은 아니기 때문에 오해의 소지가 있다.



[그림 11] 두 개의 플런저로 구현한 스크롤 압축기
[Fig. 11] A scroll compressor model using dual plungers



[그림 12] 최종 스크롤 압축기 모델
[Fig. 12] A final scroll compressor model

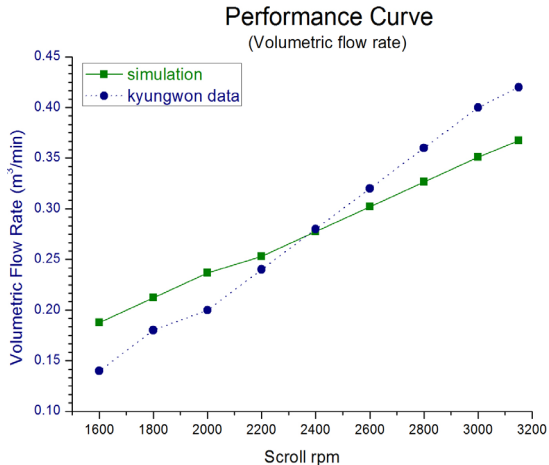
따라서 플런저 부분을 AMESim 프로그램에서 제공하는 슈퍼컴포넌트 기능을 이용하여 스크롤 압축기로 형상화하였다. 그림 12는 스크롤 압축기로 형상화한 최종 모델이다.

4. 해석 결과 및 검증

모델링의 신뢰성을 평가하기 위하여, 경원기계공업(주)의 스크롤 압축기 데이터를 이용하여 검증하였다. 상기 데이터는 실험을 토대로 작성된 것이 아니며, 이론적으로 도출된 값이다. 운전 조건은 흡입 압력이 1 barA이며, 토출압력은 8 barA이다.

그림 13는 rpm에 따른 토출 부피 유량을 나타낸 그래프이다. 실선이 본 연구에서 개발한 모델을 이용하여 해석한 결과이고, 점선은 경원기계공업(주)의 해석 결과이

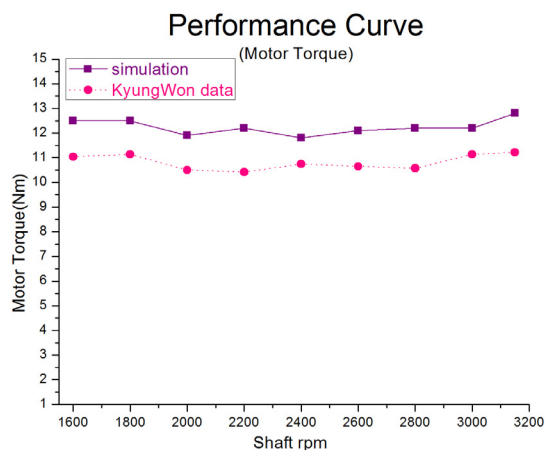
다. 압축기의 회전수가 200rpm씩 상승함에 따라 부피 유량은 AMESim 모델에서는 약 $0.025\text{m}^3/\text{min}$ 씩 증가하는 반면에, 경원의 데이터는 약 $0.04\text{m}^3/\text{min}$ 씩 증가한다.



[그림 13] 부피 유량 특성 그래프

[Fig. 13] Performance curve for volumetric flow rate

그림 14는 rpm에 따른 모터 토크를 나타낸 그래프이다. 실선이 본 연구에서 개발한 모델을 이용하여 해석한 결과이고, 점선은 경원기계공업(주)의 해석 결과이다. 모터에 부하되는 토크의 평균값은 본 연구의 해석 모델과 경원데이터에서 각각 $12\text{N}\cdot\text{m}$ 와 $11\text{N}\cdot\text{m}$ 로 일정함을 알 수 있다. 각각의 rpm에서 토크의 차이는 $1\text{N}\cdot\text{m}$ 로 경향성이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



[그림 14] 모터 토크 특성 그래프

[Fig. 14] Performance curve for motor torque

5. 결론

본 연구에서는 스크롤 압축기의 성능 해석 및 최적화가 가능한 해석모델을 일차원 해석 프로그램인 AMESim을 이용하여 개발하고, 모델의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 두 개의 dual 플린저를 이용하여 모델링 한 해석 모델이 실제 압축기의 거동을 가장 유사하게 모사하였다.
- (2) 다른 연구 분석 데이터와 비교 하였을 때, 토크 차이는 $1\text{N}\cdot\text{m}$ 미만으로 경향성이 잘 일치하였다.
- (3) 스크롤 압축기의 거동을 구현하기 위해 슈터컴포넌트 기능을 이용하여 스크롤 압축기 요소를 직접 디자인 했다.
- (4) 본 연구에서 개발된 스크롤 압축기 해석모델은 실제 압축기의 행동을 잘 모사하는 것으로 판단되며, 압축기 개발 과정에서 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

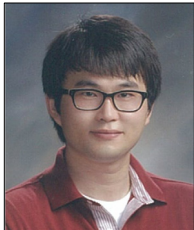
References

- [1] C. H. Park, et al., "Development Trends of Heat-pump System for Electric Driven Vehicles", Auto Journal, pp. 29-35, December, 2011.
- [2] Y. J. Ahn, et al., "Dynamic Analysis of a Scroll Compressor", KSME-spring, vol(1), pp. 688-691, 1992.
- [3] I. H. Koo, et al., "Thermal and Mechanical Behavior Analysis of Scroll Compressor", KSME-autumn, 96F080, pp. 477-482, 1996.
- [4] I. Y. Lee, et al., "Study on the Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System Using Inverter Scroll Compressor", Journal of the Korea Academia-Industrial, vol(12), No(10), pp. 4308-4313, 1996.
- [5] H. S. Lee, et al., "Study on Cooling Performance Characteristics of Air Conditioning System Using R774 for a Passenger Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial, vol(12), No(12), pp. 5457-5463, 1996.
- [6] H. J. Min, et al, "Dynamic Analysis of Scroll Compressor Considered Eccentric Mass", KSME-spring, 98S098, pp. 572-576, 1998.
- [7] G. W. Kim, et al., "Dynamic performance analysis of scroll refrigerant compressor with characteristics of motor", SAREK-summer, 99S187, pp. 1144-1149, 1999.

- [8] K. T. Jang, et al, "Investigation on the Heat Transfer Effect to Compression Process of Scroll Compressor", SAREK-winter, 2001W119, pp. 726-731, 2001.
- [9] S. C. Park, et al., "Performance analysis of scroll compressor considering eccentric mass of orbiting scroll", SAREK, vol(11), no.5, pp. 605-614, 1999.

임 상 식(Sang-Sik Yim)

[준회원]



- 2006년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과

<관심분야>
친환경 에너지 시스템

이 영 선(Young-Seon Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 5월 : 나고야 대학교, 생산공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 부설 재료연구소, 변형계어연구실, 실장, 책임연구원

<관심분야>
소성이론, 소성가공기술, 재료변형해석

박 성 영(Sung-Young Park)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 부교수

<관심분야>
열유체 해석, 내연기관 성능개발

김 기 범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충남대학교 선박해양공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 조교수

<관심분야>
친환경 에너지 시스템