

자동차용 사판식 압축기의 흡, 토출밸브 설계

권윤기* · 이건호**

The Design of Suction and Discharge Valve of Automotive Swash Plate Type Compressor

Yun-ki Kwon*, Geon-ho Lee**

Key Words: Suction valve (흡입밸브), Discharge valve (토출밸브), CO₂ (이산화탄소), Bending stress (굽힘응력), Natural frequency (고유진동수), Fatigue strength (피로강도), Valve velocity (밸브속도), Impact fatigue (충격피로), Performance simulation (성능해석)

ABSTRACT

This paper was studied to design process considered flexibility and reliability of suction and discharge valves. Flexibility and reliability of valves are main important factors in compressor valves design. And they are incompatible with efficiency of compressor. In this study, we have performed the optimal design of CO₂ compressor valves to consider these factors. At first, we analyzed performance simulation of compressor to obtain optimal flexibility level of valves. From this simulation, we could get some important data at valve design like the optimal natural frequency and the height of retainer. After that we studied to reliability of valves corresponding to optimal flexibility level by finite element method. For each case bending stress and natural frequency were obtained by it. Also we investigated the fatigue stability to obtain optimal valve shape that ensured to reliability.

1. 서론

압축기에서 흡입밸브와 토출밸브는 일정 압력조건에서 냉매의 이동을 가능하게 해줌으로 압축기가 일정한 압력을 지속적으로 발생시키는데 가장 핵심적인 역할을 하는 부분이다. 밸브 메커니즘을 개략적으로 살펴보면 저압의 조건에서 흡입밸브의 운동을 통해 냉매가 실린더에 유입되고 이후 피스톤에 의해 냉매의 압축이 일어나며 일정한 고압에 도달하게 되면 토출밸브를 통해 실린더를 떠나 토출실로 빠져나가게 된다. 따

라서 냉매의 원활한 유입과 토출은 압축기의 성능에 매우 중요한 인자로 작용하고 있는데, 이런 측면에서 고려해 볼 때 흡입밸브와 토출밸브가 확보해야 할 설계 인자들은 매우 여러 가지가 있다. 많은 설계 인자를 가장 단순하게 요약하면 최적의 내구성과 유연성 확보를 들 수 있다. 냉매의 누설 또는 역류 등이 최소화되는 환경에서 최대한의 흡입 또는 토출이 이루어져야 최고의 압축기 성능을 보장 할 수 있기 때문이다. 즉 원활한 밸브의 개폐가 요구되고 이를 위해 적절한 유연성이 확보되어야 하는 것이다. 아울러 자동차용 압축기는 고속의 운전 조건에서 구동되기 때문에 운전 중 흡, 토출 밸브는 항상 충격 또는 굽힘 피로하중 상태에 놓이게 된다. 따라서 이에 대한 강도 안전성이

* 두원 공과 대학

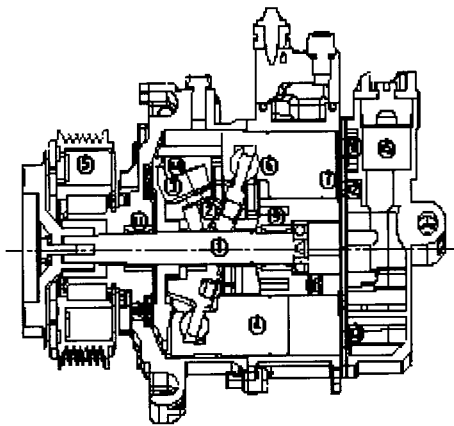
** 두원 공과 대학

책임저자 E-mail : ykkwon@doowon.ac.kr

확보된 설계 또한 흡, 토출 밸브의 개발에 있어 기본적인 요구사항이라 할 수 있다. 본 연구는 CO₂를 냉매로 사용하는 압축기의 흡, 토출 밸브를 설계함에 있어 몇 가지 중요한 설계 변수들을 검토함으로써 밸브설계의 방향을 제시함을 목적으로 한다. 알려진 대로 CO₂를 냉매로 사용하는 압축기는 기존의 R134의 경우와는 달리 매우 고압의 환경에서 구동되어 지는데 이와 같은 구동환경의 악화로 인해 밸브 시스템에 있어서도 매우 다양하고도 정밀한 검토가 요구된다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 가변형 자동차용 사판식 압축기의 구조를 나타낸다. 연구는 두 가지 방향에서 진행되었는데, 우선 압축기의 성능해석을 통해 적절한 밸브의 설계인자를 도출하였다. 즉 밸브의 고유진동수, 리테이너의 높이 등이 CO₂ 냉매를 사용하는 사판식 압축기의 성능을 극대화 할 수 있는 조건에서 결정되었고, 성능해석의 결과를 토대로 밸브의 내구성을 확보하기 위하여 유한요소 해석을 통한 내구성 검토가 이루어졌다. 그리고 이들 해석들이 반복적으로 수행됨으로 유연성과 내구성이 확보된 최적의 설계 인자를 확보할 수 있었다.

2. 성능해석

먼저 최적의 밸브 스톱퍼 높이와 고유진동수를 얻



- | | |
|-------------------|---------------------|
| ①. SHAFT | ②. SWASH PLATE |
| ③. LUG PLATE | ④. PISTON |
| ⑤. CLUTCH | ⑥. SHOE |
| ⑦. SUC. VALVE | ⑧. DIS. VALVE |
| ⑨. NEDDLE BEARING | ⑩. THRUST BEARING |
| ⑪. NEDDLE BEARING | ⑫. SUC. MUFFLER |
| ⑬. DIS. MUFFLER | ⑭. SWASH PLATE ROOM |
| ⑮. CONTROL VALVE | ⑯. CYLINDER BLOCK |

Fig. 1 Variable swash plate compressor

기 위해 다음과 같이 성능해석을 수행하였다. 검사체적 내의 냉매 상태는 검사체적에서 질량보존 법칙과 에너지 보존 법칙 및 기체의 상태 방정식 등을 통하여 구할 수 있다. 질량 보존 법칙을 만족하는 질량 평형 방정식은 식 (1)과 같으며, 여기서 하첨자 *i*는 검사체적 내로 들어오는 것을 의미하고, 하첨자 *o*는 검사체적 바깥으로 나가는 것을 의미한다. 또한 에너지 보존 법칙을 만족하는 에너지 평형 방정식은 식 (2)와 같으며, 여기서 *Q*와 *W*는 각각 단위시간에 검사 체적 내로 들어오는 미소 열량과 검사체적이 행하는 미소 일을 의미하고 *dU*는 내부에너지의 미소 변화량을 *dE_i*와 *dE_o*는 각각 검사체적 내로 유출입하는 시간당 에너지를 의미한다. 이 식에서 내부에너지와 유동에너지를 온도와 엔탈피로 바꾸면 식(3)과 같은 시간에 대한 온도 변화율 관계식을 얻는다. 여기에서 *P*, *v*, *T*, *G*, *h*는 각각 냉매의 압력, 비체적, 온도, 질량, 및 엔탈피, *V*와 *t*는 체적과 시간을 의미한다.

$$\frac{dG}{dt} = \sum \left(\frac{dG}{dt} \right)_i - \sum \left(\frac{dG}{dt} \right)_o \quad (1)$$

$$\delta Q = dU + \delta W - [dU_i - dE_o] \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{\partial Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} + \sum (h_i - h_o) \left(\frac{dG}{dt} \right)_i - \left(\frac{dV}{dt} - v \frac{dG}{dt} \right) \left(\frac{\partial h}{\partial v} \right)_T - \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T v}{G \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_v - \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v v} \quad (3)$$

본 연구에서 사용된 가변 사판식 압축기는 Fig. 2에서 보듯이 7개의 실린더와 3개의 검사 체적으로 구성되어 있고, 따라서 각각에 관하여 질량과 온도변화에 관한 1차 미분식 20개, 흡/토출 밸브에 대한 밸브거동

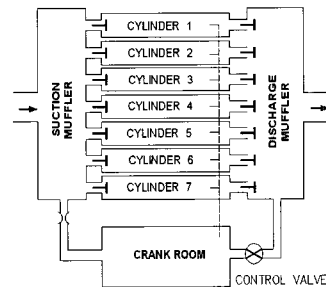


Fig. 2 Performance simulation model of variable swash plate compressor

Table 1 Design Factors of Valves by Performance Simulation

	Natural frequency (w1)	Height of stopper (H, mm)
Suction	580	0.57
Discharge	1300	0.5

2차 방정식은 각각 7개로 구성된다. 따라서 본 연구는 20개의 1차 미분 방정식과 14개의 2차 미분 방정식을 동시에 연립으로 풀기 위하여 14개의 2차 미분 방정식을 28개의 1차 미분 방정식으로 변환시킨 후 총 48개의 상미분방정식을 4계 Runge-kutta method를 사용하여 해를 구하였다.

해석조건은 R134 냉매를 사용하는 압축기의 경우와 같이 1800rpm에서 약 70%의 체적효율을 유지할 수 있는 조건에서 결정하였다. 성능해석 결과 흡입밸브와 토출밸브가 유지해야 할 고유진동수의 범위와 스톱퍼의 높이는 Fig. 3과 같았고 이의 결과를 Table 1에 정리하였다.

3. 유한요소해석

성능해석의 결과를 토대로 밸브의 적절한 치수 및 형상을 결정하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 운전 중 압축기에 있어 밸브가 경험하게 되는 역학적 상황을 도시하면 다음과 같다. Fig. 4에서 보듯이 밸브에서 열림과 닫힘의 과정시 나타나는 현상은 매우 다양하고 아울러 그에 따른 복잡한 역학적 배경을 수반하는데, 이 중 밸브의 안정성에 가장 많은 영향을 미치는 경우는 굽힘의 경우와 충격에 의한 경우라 할 수 있으며 흡입의 경우는 굽힘 하중이 구조안정성에 지배적인 인자로 작용하게 되고, 토출의 경우는 Fig. 4의 다섯번째인 충격하중이 지배적인 인자로 작용할 것으

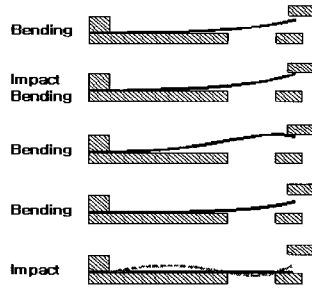


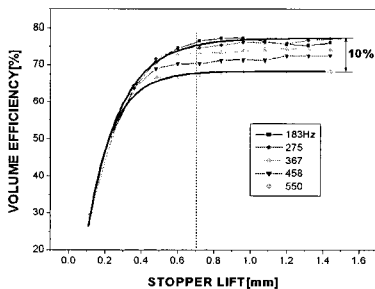
Fig. 4 The Loading types of Valve

로 판단된다. 본 연구에서는 이들 두 가지의 가장 기본적인 경우에 대해 고찰하였다. 한편 밸브의 유연성은 앞에서도 설명했듯이 압축기의 효율에 매우 중요한 인자로 작용하고 있는데 이에 대한 검토로 구현된 밸브 형상에 대한 고유진동수를 고찰함으로써 강도의 안정성을 확보한 최적의 압축기 효율을 극대화시킬 수 있는 설계 인자를 찾아내기 위한 반복적 해석을 수행했다.

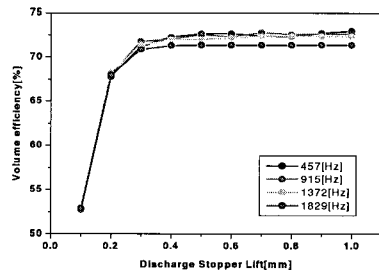
사용 요소는 3차원 shell 요소를 사용했고 모델링과 해석은 IDEAS를 이용했다. 해석을 통해 밸브의 굽힘과 스톱퍼와 접촉할 때의 역학적 현상들이 검토되었다. 해석 변수로는 상용화되어 있는 사용소재 두께가 일정 두께로 제한되어 있는 관계로 모델의 두께는 0.305 mm, 0.381 mm로 하였고 각각에 대한 형상변화를 통해 밸브의 응력분포와 고유진동수 등이 고찰되었다.

해석에 사용된 밸브의 소재는 Sandvik 20C를 사용했고 주요 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Fig. 5는 사용소재의 조직사진으로 침상의 마르텐사이트 조직이 주류를 이루는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 본 해석에 사용된 흡입밸브와 토출밸브의 형상이며 Fig. 7은 압축기 상단에 밸브가 장착되어 있는 밸브 조립부의 구조를 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 3 Volume efficiency vs. valve stopper height and natural frequency : (a) Suction Valve, (b) Discharge Valve

Table 2 Mechanical Properties.

Material	Tensile Strength	Fatigue limit	Impact fatigue
Sandvik20C	1900Mpa	800Mpa	8m/s

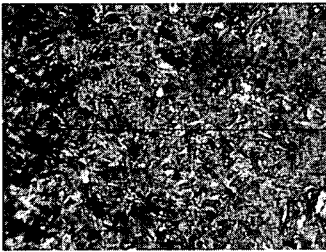
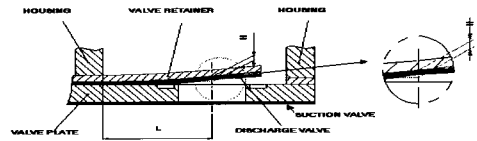


Fig. 5 Microstructure of Sandvik 20C

Table 3 The shape variable factor of analysis

Valve type	variable lengths, mm
Suction (hs)	0.5, 1.0, 2.0, 2.2
Discharge (hd)	3, 4, 5, 6, 7



H : Height of stopper
Fig. 7 Valve assembly structure.

3.1. 고유진동수의 결정

밸브의 고유진동수는 낮으면 낮을수록 압축기의 성능은 증가하게 된다. 그러나 밸브의 고유진동수가 과도하게 낮아지게 되면 밸브의 구조 안정성이 유지될 수 없게 된다. 따라서 적절한 수준의 고유진동수 결정이 밸브의 설계에 있어 매우 중요한 결정 사항이라 판단된다. 한편 흡, 토출 밸브의 스톱퍼 높이 또한 압축기 성능과 직결되는 설계 변수로 성능해석에서 결정되어 왔는데, 구조안정성의 측면에서 보면 스톱퍼의 높이는 작을수록 좋지만 압축기 성능의 측면에서는 그 반대라 할 수 있다. 따라서 밸브의 적절한 고유진동수와 스톱퍼 높이는 밸브의 구조안정성을 고려하여 압축기의 운전성능에서 결정되어야 할 문제라 할 수 있다. 본 해석에서는 성능해석의 결과인 Table 1의 결과를 목표치로 설정하여 해석 모델의 기본형상의 변수를 Table 3과 같이 변화시킴으로 성능해석에서 제시한 고유진동수의 수준을 찾아나갔다.

Fig. 8은 흡입밸브의 경우 형상 변화에 따른 고유진동수의 변화로 밸브의 폭이 커짐에 따라 고유진동수가 증가하

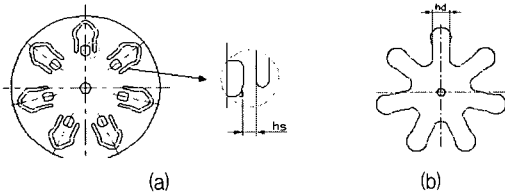
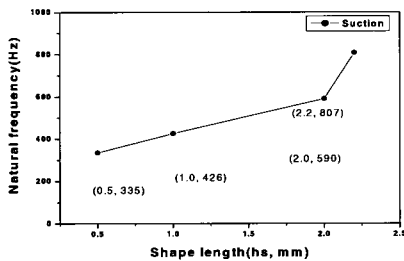


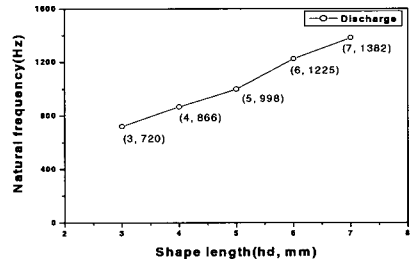
Fig. 6 The shape of suction and discharge valve
(a) suction valve (b) discharge valve

Fig. 7에서 스톱퍼의 높이 H는 압축기의 체적효율과 밸브의 내구성을 결정하는 것으로 밸브 설계에서 매우 중요한 설계 변수라 할 수 있다. 여기서 스톱퍼의 높이는 Fig. 7의 상세도에서 나타난 바와 같이 토출구 중앙의 밸브 플레이트에서 리테이너 까지의 거리로 정의 된다.

본 연구에서는 성능해석에서 결정된 스톱퍼 높이 H에 대하여 밸브의 폭을 변화하여 밸브 형상 변화에 따른 역학적 인자들의 변화를 검토하였다. Table 3은 해석에 사용한 형상의 변화값을 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 8 The relation of natural frequency and shape length : (a) Suction valve (b) Discharge valve

여 목표치인 580 부근으로 접근하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 이상의 반복적인 과정을 거쳐 도출된 흡입 밸브와 토출밸브의 형상과 1차 고유진동수의 결과이다.

흡입밸브와 토출밸브의 경우 각각에서 성능해석에서의 목표 결과와 근접하는 결과를 얻을 수 있었는데 이때의 폭은 흡입밸브의 경우 $h_s=2.0\text{mm}$ 였고 토출밸브의 경우 $h_d=7\text{mm}$ 였다.

3.2. Bending stress

흡, 토출 밸브에 있어 밸브가 스톱퍼에 도달했을 때 즉 최대변위를 갖을 때 밸브 뿌리부의 굽힘응력을 고찰했다. 밸브 설계 시 굽힘강도의 중요도는 다른 설계 인자들 예를 들어 접촉강도나 몇 종류의 피로강도 등과 비교해 볼 때 다소 떨어지지만 강도 설계의 가장 기본적인 인자라는 데 의의가 있다. 흡입밸브의 경우는 밸브 플레이트와 실린더 윗부분에 장착되는 가스켓 사이 접촉부분을 구속하였고 스톱퍼 까지 최대의 변위가 발생했을 때를 하중조건으로 했다. 최대 변위가 발생했을 때의 하중 조건은 압축기가 구동 시 흡입 포트와 연결되어 있는 머플러의 압력과 실린더 압력 차의 최대 값으로 하였다. 이것의 결정은 성능해석의 결과에서 산출하였는데, 압축기의 운전 중 발생할 수 있는 최대 압력차는 0.7Mpa 이었다. 토출 밸브의 경우는 대부분의 토출 압력을 밸브 리테이너가 흡수해 주기 때문에 하중 조건을 밸브 끝이 리테이너에 도달하는 경우의 변위로 하중을 부하하였다. Fig. 10은 흡입 밸브의 굽힘응력 분포를 나타낸다.

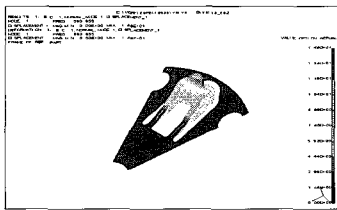
응력의 분포는 밸브 뿌리부에서 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 그 값은 약 500Mpa 정도의 수준으로 나타났다. 응력 수준을 소재의 피로강도 값 (약 650Mpa)과 비교해 볼 때 다소 높은 값이라 할 수 있으나, 실제 흡입밸브에 작용하는 압력이 밸브의 열림 초기에만 높은 값을 나타내다 밸브의 열림과 동시에 흡입 머플러에서 냉매가 실린더로 유입되면서 압력값도 떨어지는 것을 감안해 볼 때 500Mpa의 수준은 밸브의 구조적 안전을 보장할 수 있는 정도라 판단된다.

Fig. 11은 토출밸브의 경우로 응력의 수준은 최대 400Mpa로 소재의 피로 강도와 비교해 볼 때 안전한 범위로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

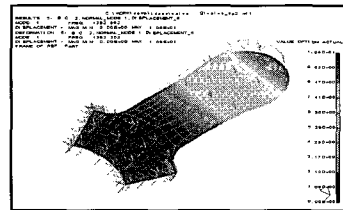
3.3. Impact Fatigue

밸브의 파손사례로 가장 문제가 되는 것은 충격 피로에 의한 것으로 특히 상대적으로 고압 환경에 있는 토출밸브에서 집중적으로 보고되고 있다. 구조적 관점에서 밸브의 파손 인자를 정리하면 흡입 밸브의 경우는 굽힘응력에 피로손상이 문제가 된다면 토출 밸브의 경우는 충격 피로에 의한 요인이 파손의 주된 요인이라 할 수 있다. 본 연구에서는 압축기의 운전 조건에 따라 밸브가 구동할 때 밸브가 열리고 닫힐 때의 속도를 계산하였다. Table 4와 Fig. 12는 성능해석에서 얻은 압축기의 구동 시 밸브의 속도를 나타낸다.

위의 결과를 소재의 충격 피로강도와 비교하여 밸브의 안전성을 검토하였다. 본 연구에서 사용된 밸브



(a)



(b)

Fig. 9 Natural frequency and Valve shape : (a) suction alve(590) (b) discharge valve (1384)

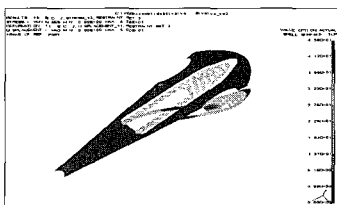


Fig. 10 Bending stress of suction valve

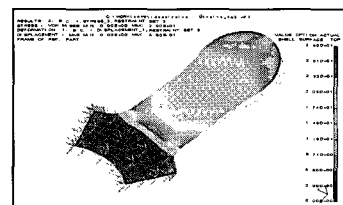


Fig. 11 Bending stress of discharge

Table 4 Valve velocity at 5000 rpm

	Stopper height [mm]	Velocity[m/sec]	
		open	close
Suction	0.57	5.08	0.927
Discharge	0.5	5.58	1.69

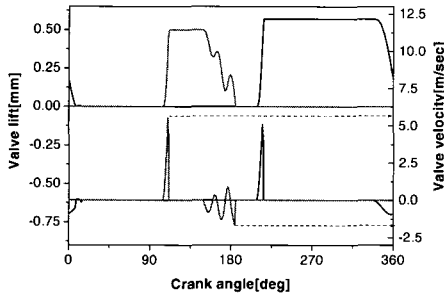


Fig. 12 The impact velocity of discharge valve at 5000 rpm

소재의 경우 impact fatigue의 범위가 약 8 m/sec 부근으로 나타나고 있는데⁽⁹⁾, 이 값은 성능해석에서 나타난 5000 rpm의 5.58 m/sec의 경우 보다는 다소 높게 나타나고 있지만 압축기의 운전속도의 증가에 따라서는 안전을 보장할 수 없는 값이라 판단된다. 따라서 향후 충격 피로강도의 안전성을 보장하기 위해서는 기계적 성질이 향상된 소재의 선택이 요구된다.

4. 결론

CO₂용 압축기의 흡, 토출 밸브 설계를 위한 해석적 연구를 수행하였다. 해석의 방법은 우선 성능해석을 수행하여 요구되는 체적효율에 대한 밸브의 설계 목표 값을 도출하였다. 이후 유한요소법을 이용한 반복적 구조해석을 통해 설계목표 값에 수렴하는 형상을 도출하였다. 그 결과 일정 유연성이 확보된 고유진동수와 강도 안정성이 보장된 응력분포를 나타내는 형상을 얻

을 수 있었다. 다만 충격에 의한 피로강도는 고속의 조건에서는 안전을 보장하기 어려운 수준으로 판단되며 이에 대한 보완이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- (1) Werner Soedel, 1984, "Design and Mechanics of Compressor Valves," Purdue University Press.
- (2) Werner Soedel, 1984, "Introduction to Computer Simulation of Positive Displacement Type Compressor," Purdue University Press.
- (3) J.Y.Bae, J.W.Suk, 1994, "A Study on the Fatigue Failure of Valve System in Rotary Compressor," Proceeding of International Compressor Engineering Conference at Purdue pp409~414.
- (4) Jan-Olof Nilsson, 1988, "Impact Stress in Flapper Valves a Finite Element Analysis," Proceeding of International Compressor Engineering Conference at Purdue.
- (5) Jan-Olof Nilsson, 1980, "Bending Fatigue Failures in Valve Steel," Proceeding of International Compressor Engineering Conference at Purdue.
- (6) Yunki Kwon, Geoho Lee, Taejin Lee, 2004, "The Design of Compressor Valve to Consider the Flexibility and Reliability", Proceeding of International Compressor Engineering Conference at Purdue vol I, c127.
- (7) N. Kammer, 2003, "Method of Design and Reliability Assessment in the Development of Refrigerant Compressor," Proceeding of International Compressor Engineering Conference at Purdue.
- (8) Casini, Dorin, 2001, "CO₂ Compressor and Equipment Use and Availability," Euro Cooling and Heating Politecnico di Milano.
- (9) 2003, Sandvik Technical Note.