

CO2압축기의 흡입, 토출 밸브 설계 방향

권 윤 기*

1. 서 론

교토의정서가 발의 된 이래로 지구 온난화(global warming)의 문제는 해마다 그 중요성이 증대되고 있는 상황이다. 환경문제에 있어 한국도 예외는 아니며 벌써 몇 년 전부터는 기후의 상황이 사계절이 뚜렷했던 온대성 기후에서 봄과 가을이 없어지고 여름과 겨울이 길어지는 아열대성 기후로 변화하고 있는 것을 누구나 느끼고 있는 상황이다. 이런 환경의 문제는 단순한 기후대를 변화시키는 것으로 끝나는 것이 아니라 실로 경험해 보지 못했던 대규모의 자연재해로 이어지게 되는데, 이제 환경 문제는 우리가 살고 있는 지구를 잘 보전하는 차원을 넘어서 이 땅에서 사는 동안의 생존을 영위하는 문제로 넘어가 있는 것으로 판단된다. 주지하는 바와 같이 교토의정서의 발의로 제기된 지구온난화의 문제는 그동안 미국의 서명거부로 별 진전을 보이지 못하고 있다가 2004년 러시아가 전격적으로 서명함으로써 다시 활기를 띠기 시작했고 미국이 주도하는 서명 거부국가 몇몇 나라들을 명분상에서 상당한 궁지로 몰아넣고 있는 상황이다.

그 동안 일본이나 유럽의 몇몇 국가들은 교토의정서 개시 시점을 여러 가지로 예측하며 이에 발맞춰 도래할 여러 가지 산업적 상황에 대한 대응을 체계적이고 치밀하게 준비해오고 있는 것으로 판단되는데, 그 중 하나가 냉방기 등에 사용되는 냉매의 개선을 들 수 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 냉매는 프레온 가스 계열의 냉매가 주류를 이루고 있지만 이것을 천연 냉매인 CO2가스로 대체하여 지구온난화의 주범으로 지목되는 이산화탄소와 또 다른 주범인 프레온 가스를 획기적으로 줄여 보자는 것이다.

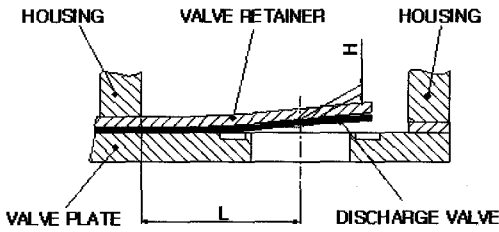
현재 이와 관련된 연구와 개발은 일본과 유럽을 중심으로 활발히 전개되고 있는 것으로 판단된다. 천연

냉매인 CO2를 사용하는 에어컨 분야에서 현재 개발되고 있는 상황을 정리해 보면 크게 에어컨 시스템의 개발과 에어컨에 이용되는 압축기의 개발로 나눌 수 있다. 특히 압축기의 개발은 CO2를 사용하는 압축기에 있어서 가장 중요한 분야라 할 수 있는데, 언급한 국가들의 몇몇 회사들은 벌써 CO2용 압축기를 개발하여 에어컨 시스템에 장착하여 전체시스템의 안정성과 크고 작은 문제들을 해결하여 실제의 자동차에 장착 할 수 있는 모델들을 발표하고 있는 상황이다. CO2용 압축기의 개발은 CO2를 대체 냉매로 사용함에 있어 매우 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 실제로 냉매를 CO2로 대체함에 있어 압축기의 작동환경이 획기적으로 바뀌기 때문에 이에 따른 여러 가지 문제가 나타나게 되는데, 이들 문제의 해결은 그리 간단한 문제가 아닌 매우 고도의 공학적 연구가 수반되어야 하는 부분이라 판단된다. 이들 문제들은 많은 것이 있겠지만 냉매의 흡입과 토출을 조절하는 흡, 토출 밸브는 압축기의 시작과 끝을 결정짓는 부분으로 압축기의 성능에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다고 할 수 있다. 냉매의 환경이 CO2로 바뀌면서 이에 따른 밸브의 설계에 있어서도 고려해야 할 여러 가지 문제가 대두되는데 이 글에서는 이들 문제에 대해 정리해 보았다. 즉 CO2 냉매를 사용하는 압축기의 밸브를 설계함에 있어 어떤 문제를 예상 할 수 있고 이런 것들을 해결하기 위해서는 어떤 방법들을 사용하여야 하는지를 검토 해보았다.

2. 밸브 설계 시 고려할 인자들.

압축기에서 흡입밸브와 토출밸브는 일정 압력조건에서 냉매의 이동을 가능하게 해줌으로 압축기가 일정한 압력을 지속적으로 발생 시키는데 가장 핵심적인 역할을 하는 부분이다. 밸브 메커니즘을 개략적으로 살펴보면 저압의 조건에서 흡입밸브의 운동을 통해 냉매가 실린더에 유입되고 이후 피스톤에 의해 냉매의

* 두원공과대학 기계설계과
E-mail : ykkwon@doowon.ac.kr



H : Height of Stopper
Fig. 1 Valve assembly structure

Table 1 The driving conditions of R134a and R744(CO2)

	R134a	R744
Volume (cc)	170 cc	25 cc
Suction Pressure(bar)	3 bar	40 bar
Discharge Pressure(bar)	15 bar	120 bar

압축이 일어나며 일정한 고압에 도달하게 되면 토출밸브를 통해 실린더를 떠나 토출실로 빠져나가게 된다. Fig. 1은 자동차용으로 폭 넓게 사용되고 있는 왕복동 압축기의 토출밸브 조립 예이다.

냉매의 원활한 유입과 토출은 압축기의 성능에 매우 중요한 인자로 작용하고 있는데, 이런 측면에서 고려해 볼 때 흡입밸브와 토출밸브가 확보해야 할 설계인자 들은 매우 여러 가지가 있다. 밸브 설계의 기본 방향을 단순하게 정리하면 압축기의 성능을 극대화 하면서 내구 수명을 보장할 수 있는 흡, 토출 밸브를 구현하는 것이라 할 수 있다. 그러나 Table 1에서 볼 수 있듯이 CO2 냉매를 사용함에 있어 체적은 현격히 줄어들고 있지만 압력은 거의 8배 이상으로 증가하는 초고압 상태에 놓이게 된다.

이와 같은 사용조건 악화는 여러 가지 문제를 야기 할 수 있는데, 무엇보다도 내구성의 문제가 가장 핵심적으로 대두되리라 판단된다. 따라서 압축기의 성능에 영향을 미치는 밸브의 설계 인자를 정리하고 밸브가 압축과정에서 겪게 되는 기계적 환경을 고찰해 본다.

2.1 압축기의 성능에 미치는 밸브의 설계인자들

2.1.1 고유진동수

고유 진동수는 밸브가 열리고 닫히는 작용의 원활함을 결정하는 인자로 압축기의 성능을 결정짓는 부분

중 하나라 할 수 있다. 식(1),(2)에서 알 수 있듯이 흡, 토출 과정에서 밸브가 열리는 변위의 양은 감쇄계수와 밸브의 고유진동수에 의해 결정되어 진다. 밸브의 구조상 감쇄계수가 재료에 의해 결정되어진다고 하면 실제 밸브의 열림과 닫힘을 지배하는 주된 인자는 밸브의 고유진동수라 할 수 있다.

$$\sum F_y = m\ddot{y} + c\dot{y} + ky - \Delta P \cdot A = 0 \quad (1)$$

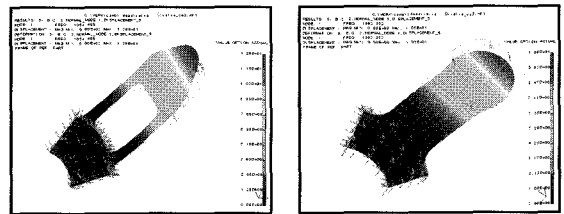
$$\ddot{y} = \frac{A \cdot \Delta P}{m} - 2\xi \cdot \omega \cdot \dot{y} - \omega^2 y \quad (2)$$

성능의 측면에서 고유진동수는 작을수록 밸브가 잘 열리고 닫힌다고 할 수 있으나 고유진동수가 너무 작아지면 내구성의 문제가 심각한 문제로 대두 될 수 있게 되고 또한 흡, 토출의 과정에서 밸브의 거동이 불규칙한 형태로 나타날 수 있다. 이런 현상은 소음의 원인이 될 수 있고 냉매의 유동에도 영향을 미치게 되어 압축기 성능 저하의 원인이 될 수 있다. 따라서 적절한 수준의 고유진동수를 결정하는 것이 필요한데 적절한 수준의 고유진동수를 결정하는 방법은 여러 가지가 있겠지만 수치 해석적 기법을 이용하면 간편하게 구할 수 있는데, 우선 성능해석이나 실험 등을 통하여 성능을 극대화 할 수 있는 수준의 고유진동수를 결정하고 이 고유 진동수를 나타내는 밸브형상을 유한요소법 등을 활용하여 구할 수 있다.

Fig. 2는 이와 같은 방법에 의해 결정된 흡, 토출 밸브의 한 예이다.

2.1.2 밸브의 유효 유로 면적

전술한 바와 같이 밸브의 형상을 결정하는 데는 압축기 성능의 측면과 밸브의 내구성 측면 두 가지를 들 수 있는데 이때 압축기의 성능을 결정 짓는 요인 중 한 가지가 밸브의 유로 면적과 유효 힘 면적이다.



(a) (b)
Fig. 2 Natural frequency and Valve shape : (a) suction valve (1054) and (b) discharge valve (1384)

$$A_e = C_v \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{A_0}{A_y}\right)^2}} \quad (3)$$

유효 유효면적은 식(3)과 같이 표현되는데, 여기서 A_0 는 포트의 단면적, A_y 는 포트의 들레길이와 밸브의 변위 y 의 곱을 의미하고, C_v 는 실제 값과의 차를 보정해 주기 위한 유량계수이다. 이 값의 정확한 값은 실험을 통하여 구할 수 있는데 토출된 밸브를 이용하여 실험을 통하여 결정된 후 그 결과와 식(3)의 결과를 이용하여 적절한 보정 계수를 결정하면 된다.

2.1.3 유효 힘 면적

밸브의 유효 힘 면적은 밸브의 변위에 대한 토출 포트 면적과 유효 힘 면적의 비로 정의 되는데, 여기서 D 는 밸브의 직경이고 d 는 포트의 직경이다. A_{geo} 는 포트의 면적이고 A_{eff} 는 유효 힘 작용 면적이며, 실험식의 적용 범위는 직경 비 $1.1 < D/d < 1.3$ 이다.

CO2를 냉매로 사용하는 경우에 있어서도 밸브를 설계함에 있어 이들 인자들이 갖는 의미와 설계에서 차지하는 비중은 여전히 유효하다고 판단된다.

2.2 밸브의 내구성과 관계된 인자들

2.2.1 밸브의 운동

흡, 토출 과정에서 나타나는 밸브의 현상은 다양한 형태로 나타나게 되는데, Fig. 4에 정리하였다.

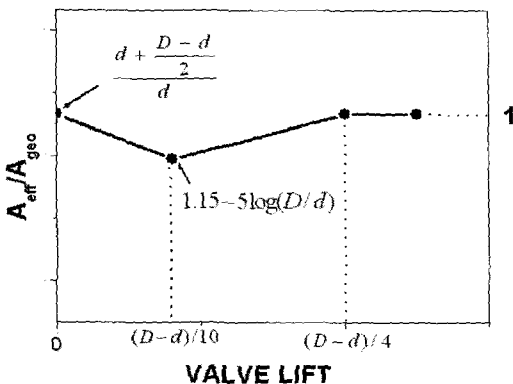


Fig. 3 Effective force area about valve lift

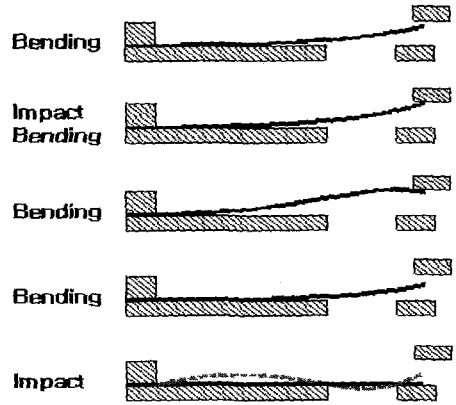


Fig. 4 The Valve behavior in compressor

밸브의 내구성을 검토하기 위하여 부하되는 하중의 형태로 밸브의 거동을 분류하면 굽힘과 충격 하중의 경우로 정리 할 수 있다. 경우에 따라서는 굽힘과 충격의 경우가 동시에 작용하는 형태로 나타날 수 있는데, 전술한 바와 같이 CO2 냉매의 경우에는 초고압의 상태로 유지되기 때문에 밸브의 입장에서는 내구성의 문제가 R134a의 경우 보다 매우 심각한 상황이라 할 수 있다. 즉 이들 상황에 대한 내구성을 확보하기 위한 설계의 조건이 좀 더 보수적으로 적용되어야 한다고 판단된다. 물론 설계의 기준 뿐만 아니라 이들 기준을 만족 할 수 있는 고강도의 소재의 적용 또한 병행해서 검토해야할 사항이라 판단된다.

2.2.2 굽힘강도

밸브 설계 시 굽힘강도의 중요도는 다른 설계 인자들 예를 들어 접촉강도나 몇 종류의 피로강도등과 비교해 볼 때 다소 떨어지지만 강도 설계의 가장 기본적인 인자라는 데 의의가 있다. 굽힘 강도에 대한 평가는 수치 해석적 방법으로 평가 할 수 있는데, CO2의 경우에 있어서는 전술한바와 같이 보수적 경계조건을 사용하여 해석하는 것이 필요하다고 판단된다. 따라서 흡입밸브의 경우는 밸브가 가장 작해지는 부분을 구속하고 스톱퍼 까지 최대의 변위가 발생했을 때를 하중조건으로 결정하는 것이 적절하다고 판단된다. 토출 밸브의 경우는 대부분의 토출 압력을 밸브 리테이너가 흡수해 주기 때문에 하중 조건을 밸브 끝이 리테이너에 도달하는 경우의 변위로 하중을 부하 할 수 있겠다. Fig. 5는 이와 같은 조건으로 해석된 흡입 밸브의 굽힘응력 분포를 나타낸다. 이때 설계의 기준은 굽힘 강도

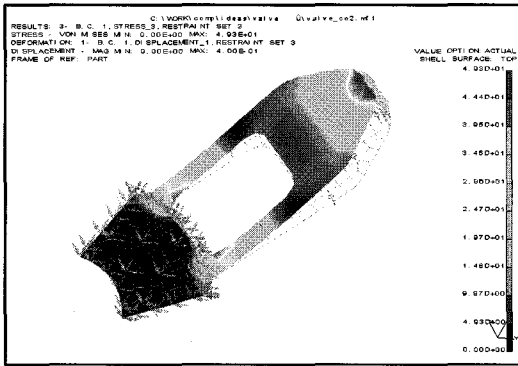


Fig. 5 Bending stress of suction valve

보다는 소재의 피로 강도를 사용하는 것이 필요하다고 판단되는데 Fig. 5의 결과를 소재의 굽힘 피로강도와 비교하여 밸브의 안전성을 판단 할 수 있겠다. 일반적으로 소재의 경우 피로강도에 대한 기본적인 데이터가 제시 되지만 만약 제시가 되지 않을 경우 소재의 경도를 이용하여 피로강도를 추정하는 방법도 가능하다. 식 (4)의 경우는 소재의 경도를 이용하여 피로 한도를 결정하는 방법이다.

$$Se \approx 0.25 HB \quad (HB \leq 400),$$

$$690 \text{ Mpa} \quad (HB \geq 400), \quad (4)$$

2.2.3 충격피로

구조적 관점에서 흡입 밸브의 경우가 굽힘응력에 의한 피로손상이 문제가 된다면 토출 밸브의 경우는 충격 피로에 의한 요인이 파손의 주된 요인이라 할 수 있다. 충격피로는 밸브의 내구성 설계에 있어 가장 지배적인 인자라 할 수 있는데, 밸브의 파손사례로 가장 문제가 되는 것도 충격 피로에 의한 것으로 특히 상대적으로 고압 환경에 있는 토출밸브에서 집중적으로 보고 되고 있다. 특히 고압 환경인 CO2의 경우에 있어서는 충격 피로에 대한 설계가 매우 중요한 요인이 될 것으로 판단된다. 그러나 이것에 대한 역학적 평가는 매우 어려운 문제 중 하나라고 할 수 있는데 해석적 방법과 실험적 방법을 조화하는 방법으로 적절한 수준의 설계 범위를 결정할 수 있다.

우선 토출 밸브에 있어 운전 중 밸브의 속도를 해석적 방법으로 결정해야 하는데, Fig. 6은 이와 같은 성능해석의 결과로 얻은 밸브 속도의 한 예를 나타낸다.

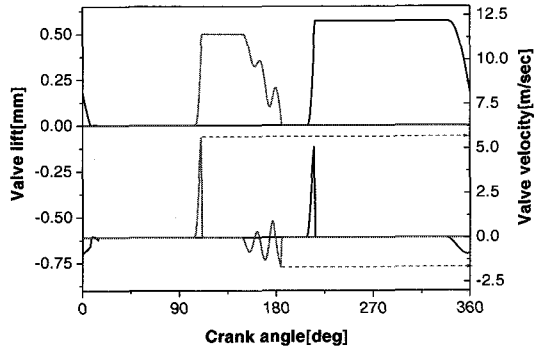


Fig. 6 Valve velocity at 5000 rpm

밸브의 속도가 구해졌으면 실험을 통해 얻은 밸브 소재의 충격 피로 강도 값과 비교하여 적절한 설계 범위를 결정할 수 있게 된다.

3. 맺음말

CO2 냉매를 사용하는 압축기에 장착될 흡, 배기 밸브의 설계 인자들에 대해 몇 가지 검토해 보았다. 그동안 CO2 냉매는 사용조건외의 가혹함으로 실제 압축기에의 적용이 유보되어 왔지만 심각한 환경문제의 대두로 인해 그 사용은 이제 시간의 문제로 된 상황이라 판단된다. 따라서 산업적 측면에서 볼 때 이에 따른 CO2용 압축기의 개발은 새로운 환경에 대응해야 하여 산업적 가치 창출을 확보해야하는 필연적 문제로 대두되고 있는 것이다. 이를 위해 해결해야 할 과제가 많이 있겠지만 CO2용 압축기의 밸브 시스템 또한 그 중 중요한 하나의 문제라 판단된다. 많은 연구적 노력과 공학적 탐구가 이 분야에 집중되어 내구적 안정성과 고 효율의 CO2 압축기를 보장하는 밸브 시스템의 구현을 기대해 본다.

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 pp. 409~414.
- (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) 이건호, 권윤기, 이태진, 2004, 자동차용 가변사판식 압축기의 흡입밸브 설계.
- (7) Casini, Dorin, 2001, CO2 Compressor and Equipment Use and Availability, Euro Cooling and Heating Politecnico di Milano.
- (8) Julie A. Bannantine, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall.
- (9) 2003, Sandvik Technical Note