



대형 냉동기용 냉매압축기

중형 및 대형 냉동기에 사용되는 스크류 냉매압축기의 역사 및 현재의 기술, 그리고 향후 발전 방향에 대해 기술하고자 한다.

심재길

(주)롤텍 기술연구소 (jkshim@ecentury.co.kr)

서론

대형 냉동기용 압축기는 압축 방식에 따라 왕복동식 압축기, 스크류식 압축기, 원심식압축기로 나눌 수 있다. 종래에는 왕복동식 압축기를 이용한 냉동 시스템이 주류를 이루었으나 최근에는 스크류식으로 대체되고 있으며, 초대형 냉동 시스템에서는 원심식이 주류를 이루고 있다. 또한, 대체냉매에 대한 연구 및 기술개발이 폭 넓게 이루어지고 있어 대체냉매로의 빠른 전환이 이루어질 것으로 사료된다.

스크류 압축기

개요

스크류 압축기는 현대에 공기, 가스 그리고, 냉매등을 압축하는데 널리 쓰이고 있다. 스크류 압축기는 왕복동식 압축기등과 마찬가지로 용적형 압축기지만 한쌍의 스크류 로터의 회전에 의해 압축이 진행되므로, 원심식 압축기와 같이 고속회전이 가능하여 압축기의 용량이 30 ~ 250RT급에서는 타압축기에 비해 체적효율 및 단열효율상의 이점이 있으며, 압축기의 용량제어 메커니즘에 따라 연속적인 25 ~ 100 %의 용량제어가 가능한 장점이 있어 에너지 절약의 측면에서 왕복동식 압축기에 비해 월등하다. 냉동장치에 널리 사용되는 각각의 압축기의 특성 및 장단점은 아래의 표 1과 같다.

역사

스크류압축기의 원리는 1878년 독일의 Krigar에 의해 발명되었으나 실용화되지 못하였고 1934년 스

웨덴의 A. Lysholm에 의해 공기압축기로서 개발되었다. A. Lysholm은 스웨덴의 SRM(Svenska Rotor Maskiner AB)사의 전신인 Ljunstroms Angsturbin사의 사장으로 스크류압축기의 개발에 종사하며 그 기초를 확립하고, 노하우를 특허로 공개하였다.

현재 SRM사는 스크류압축기에 관한 다수의 특허권을 전 세계적으로 보유하고 있다. 일본에서는 1955년 SRM사로부터 기술을 도입하여 1956년경부터 무급유식 가스압축기의 생산을 시작하여 1966년경부터 냉동 및 공조용으로 사용되기 시작했다. 오늘날의 스크류 냉매압축기는 일반적으로 급유식 스크류압축기로 만들어지고 있다.

작동원리

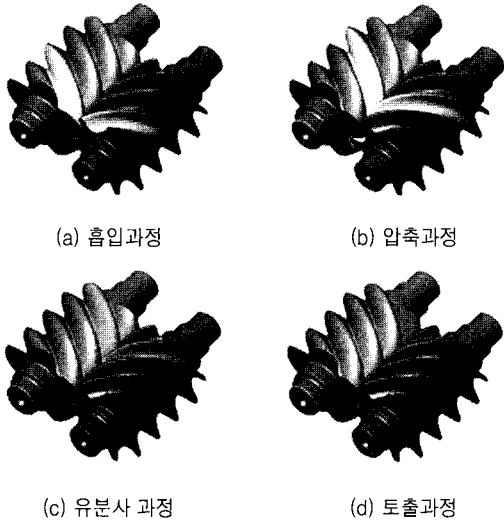
일정한 크기를 지니며 케이싱내에서 서로 맞물려 있는 두개의 나선형 로터들의 회전에 의해 야기되는 치

<표 1> 압축기별 특성 및 장단점

항 목	스크류 압축기	고속 다기통 왕복동 압축기	회전 용적형 압축기	터보 압축기
압축능력	고속 회전식 (소용량~대용량)	저속 왕복동식 (소용량~중용량)	저속 회전식 (소용량~중용량)	고속 회전식 (중용량~대용량)
압축비	중압축비~고압축비	중압축비	중압축비~고압축비	저압축비
운전온도	낮음(70~90℃)	높음(120~180℃)	낮음(70~90℃)	낮 음
유활유 변화	거의 없음	토출온도에 의한 열화가 일어남	거의 없음	거의 없음
용량제어	연속제어 (10~100%)	단계제어 (25,50,75,100%)	할수 없음	연속제어 (10~100%)
입력변화에 따른 운전의 안전성	안 정	비교적 안정	안 정	불 안정
기계적 승동부	거의 없음	피스톤링 및 실린더주위의 마모	회전피스톤, 트러 스트랄브 등의 마모	거의 없음
작 동 번	없 음	흡입밸브, 토출밸브	토출밸브	없 음
진 동	거의 없음	불규칙 진동	편심운동에 의한 진동	거의 없음



형의 결합 및 케이싱에 의한 공유공간들의 증가 및 감소를 이용하여 가스를 흡입, 압축 및 유분사 과정, 토출과정을 연속적으로 행하여 압축가스를 얻어낸다 (그림 2).



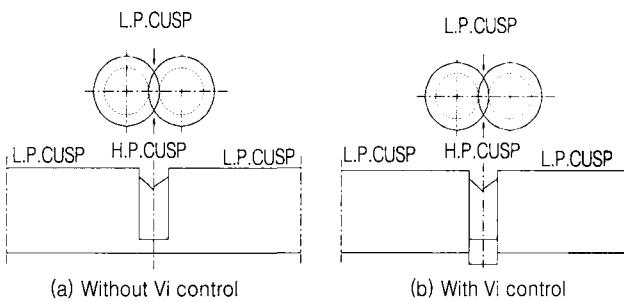
[그림 2] 스크류 압축기의 압축원리

용량조절 방법

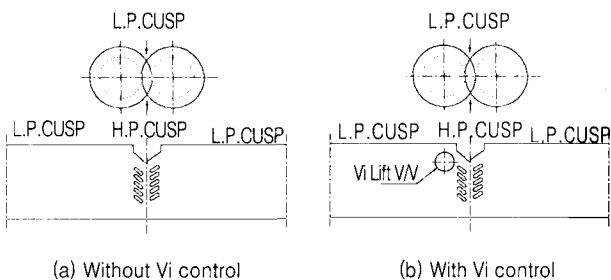
스크류 압축기는 스토터 상부 케이싱에 위치한 용량 제어용 피스톤 밸브를 축방향으로 움직여 바이패스 구멍을 개폐함으로써 흡입가스를 바이패스 하는 방식을 채택하고 있으며 100 %에서 25 %까지 용량 조절이 가능하다. 이 유압 피스톤 밸브는 고압과 저압의 차압에 의해 구동된다. 따라서, 왕복동식 압축기의 경우는 구조상 단계적인 용량 조절 밖에 할 수 없지만 스크류 압축기에서는 부하조건에 따라 피스톤 밸브가 임의의 위치로 움직여 연속 조절뿐만 아니라 단계 조절(100 %, 75 %, 50 %, 25 %)도 가능하다.

• 슬라이드 밸브방식

슬라이드밸브 방식의 용량제어 장치는 그림 3에서와 같이 스크류 압축기의 로터 보어(Bore)에 용량조절을 가능하게 하는 슬라이드 밸브를 장치함으로써, 슬라이드밸브가 움직임에 따라 흡입가스의 바이패스량을 조절함으로써 용량을 조절한다. 독일의 Grasso, 영국의 Howden등의 압축기 제작사에서는 내부 체적비 조절장치를 장착하는 경우도 있다.



[그림 3] 슬라이드 밸브방식 용량조절장치



[그림 4] 피스톤 밸브방식 용량조절장치

• 피스톤 밸브방식

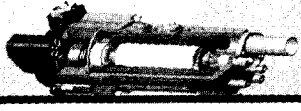
피스톤밸브 방식의 용량제어 장치는 그림 4에서와 같이 스크류 냉매압축기의 로터 보어(Bore)에 용량조절을 가능하게 하는 바이패스용 슬롯을 가공하고 이 슬롯을 슬롯의 상부에 위치한 슬라이딩 피스톤이 가공된 슬롯을 개폐하면서 압축기의 용량을 조절한다. 이러한 방식은 국내의 압축기 제작사인 (주)롤텍, 이태리의 Frascold 등이 널리 사용하고 있다.

• 리프트밸브

리프트밸브 방식의 용량제어 장치는 그림 5에서와 같이 스크류 냉매압축기의 로터 보어(Bore)에 용량조절을 가능하게 하는 바이패스용 구멍을 가공하고 이 구멍에 상하로 움직이는 밸브를 조립하여 압축기의 용량을 조절한다. 이러한 방식은 독일의 스크류 냉매압축기 제작사인 Bitzer에서 널리 사용하고 있다.

• 용량조절방식의 비교

그림 6은 각각의 용량조절 방식을 비교한 것이



다. 그림에서 보듯이 가장 용량조절의 효율이 우수한 방식은 내부 체적비 조절을 함께 하는 슬라이드 밸브 방식이다. 내부 체적비를 조절하면 용량증가와 함께 냉동 사이클의 조건도 함께 변화하므로 약 70% 이하의 부분부하의 운전의 경우에 매우 우수한 부분부하 성능을 보여주고 있다. 하지만 대부분의 냉동 장치들은 대부분의 운전시간을 70% 이상의 부하를 가지고 운전하므로 70% 이하의 부분부하 효율은 크게 중요하지 않다.

윤활 시스템 및 윤활유

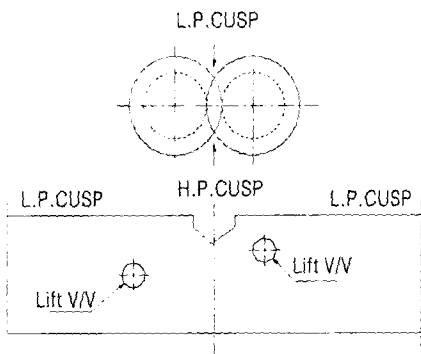
• 윤활 시스템

스크류 냉매압축기는 왕복동식 압축기에 비해 습동 부위는 적지만 스크류 로터가 고속으로 회전하면서

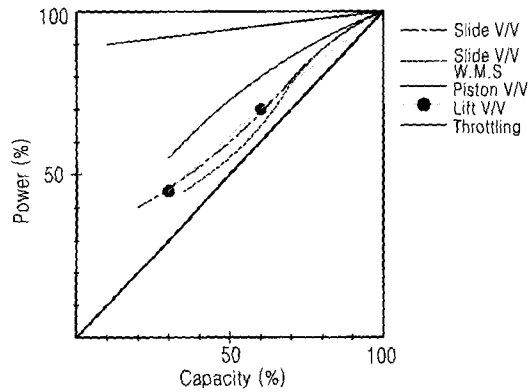
압축이 이루어지므로 윤활상태가 불량할 시에는 단 시간내에 압축기가 고착될 우려가 있다. 그림 7은 국내의 (주)롤텍에서 생산되는 스크류 냉매압축기의 윤활시스템을 나타내고 있다. 윤활유는 베어링과 축봉장치등을 냉각하고 윤활시킨 후 스크류 로터의 흡입측으로 유입되며 유분사된 윤활유와 동시에 로터사이의 틈새와 로터와 케이싱 사이의 틈새를 밀봉하게 된다. 또한 용량제어용 실린더에 공급되는 윤활유는 작동조건에 따라 로터 흡입측으로 회수된다. 결과적으로, 압축기를 빠져나가는 토출냉매와 혼합된 윤활유는 오일분리기에서 분리된다.

• 윤활유

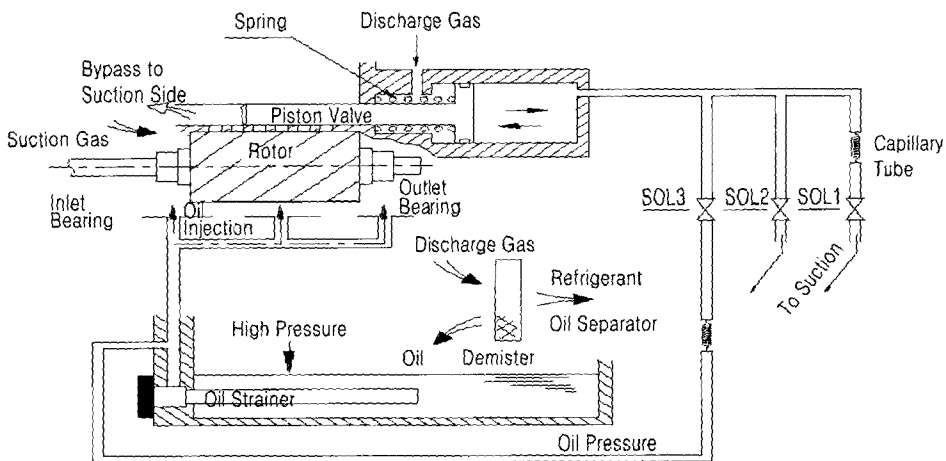
스크류 냉매압축기는 윤활유가 자리하는 오일 셉프



[그림 5] 피스톤 밸브방식 용량조절장치



[그림 6] 용량조절방식의 비교





(Sump)가 압축기의 고온부에 위치하고 있고, 한쌍의 스크류 로터가 맞물려 회전하므로 실링 라인이 길므로 고점도의 윤활유를 사용해야 한다. 전 세계적의 대부분 스크류 냉매압축기의 제작사들은 ISO-VG100 ~ ISO-VG220사이의 윤활유를 자사의 압축기 순정유로 지정하고 있다. 압축기 외부에 별도의 유분리기와 유냉각기가 장착된 경우에 ISO-VG68의 윤활유를 추천하고 있다.

지금까지는 스크류 냉매압축기용 윤활유를 광유, 혹은 알킬벤젠계열의 윤활유를 널리 사용했으나, 현재에는 대부분의 스크류 냉매압축기 제작사들이 고온에서의 점도특성과 극압특성이 우수한 합성유, 특히 에스테르계열의 POE 윤활유를 사용하고 있다.

스크류 냉매압축기의 구조

숫로터(Male Rotor)와 암로터(Female Rotor)가 맞물려져 있는 상태로 로터 케이싱내에 위치하며 각각의 로터의 양측은 베어링으로 지지된다. 숫로터 상부에는 용량 제어용 피스톤 밸브가 설치되어 있어 용량 조절기의 신호에 의해서 용량이 조절된다.

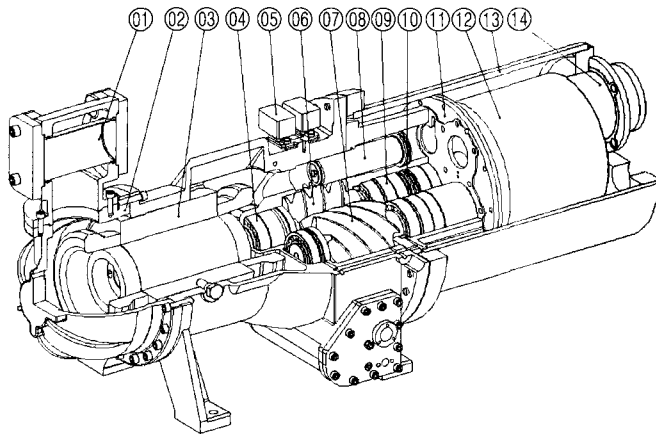
숫로터의 한 쪽은 2극 전동기로 직접 구동되며 암로터는 숫로터와의 맞물림에 의해 구동된다. 흡입 냉매증기는 전동기를 냉각시킨 후 로터 치형 사이로 유입·압축되면서 베어링 등에 공급되는 윤활유와 함께 토출된다. 오일분리기에는 윤활유 분리용 Demister가 있어 혼합냉매가스에서 윤활유는 분리되고 냉매만을 토출한다. 분리된 윤활유는 오일분리기내의 압력과 로터 치형 공간의 압력, 베어링부위

의 압력 등에 의한 압력차이를 이용하여 각부에 공급·윤활되며 부분 부하 운전이 가능토록 피스톤 밸브에도 공급되어 진다(그림 8).

스크류 냉매압축기의 개선 및 개발

스크류 냉매압축기는 비록 그 개념은 오래된 구식의 개념이지만, 현재까지, 그리고 미래에도 30 ~ 250RT급의 용량에서는 가장 경쟁력이 있는 압축기이다. 이에 세계적인 스크류 냉매압축기제작사들은 스크류 냉매압축기의 효율을 더욱 향상시키고자 아래와 같은 연구를 진행하고 있다.

- 새로운 로터 치형의 개발 : 스크류 압축기의 전세계적인 선두주자인 Svenska Rotor Maskiner AB에서는 미래의 대체냉매에 대처하기 위해 R-410A, 이산화탄소 등의 고압냉매에서도 사용이 가능한 로터 치형을 개발하고 있다. 개발사의 주장에 의하면 스크류 로터의 고압부 실링 라인의 단순화와 길이의 감소로 압축기의 내부누설이 적어 더욱 우수한 압축기 효율을 발휘한다고 한다.
- Oil-free 스크류 냉매압축기 : 윤활유는 압축기에 필수 불가결한 요소이지만, 냉동시스템에서는 냉동시스템의 효율을 저하시키고 냉매의 질량유량을 감소시키는 요소이다. 이에 압축기 제작사 및 베어링 제작사들은 윤활유가 없이 냉매만으로 윤활이 가능한 재질을 발견 혹은, 제작하기 위해 혼신의 노력을 하고 있다.
- 가변속 스크류 냉매압축기 : 현재까지 알려진 바에 의하면 압축기의 부분부하 효율은 압축기의 회



No.	Part Name	No.	Part Name
01	Suction Strainer	08	Piston Valve
02	Motor Cover	09	Ball Bearing
03	Motor Set	10	Balancing piston
04	Roller Bearing	11	Bearing Cover
05	Solenoid Valve	12	Oil Separator
06	Male Rotor	13	Oil Sep. Cover
07	Female Rotor	14	Check Valve

[그림 8] 압축기의 단면 구조



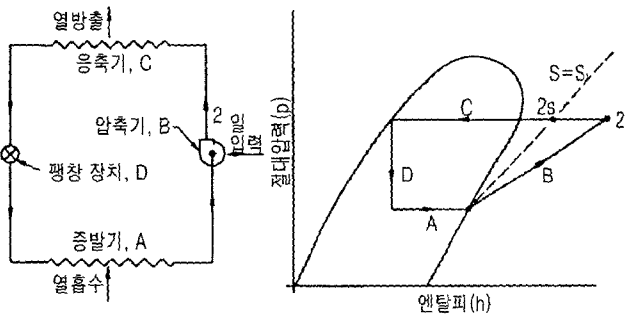
전속도를 변화시키면 가장 효율이 좋으며, 부분부하 범위도 가장 넓다고 알려져 있다. 이에 가변속 모터를 각각 PM(Permanent Magnetic) 전동기와 SR(Switched Reluctance) 전동기, 그리고 인버터를 사용하는 유도전동기를 사용하여 압축기의 성능을 향상시키려고 노력하고 있다.

원심식 압축기

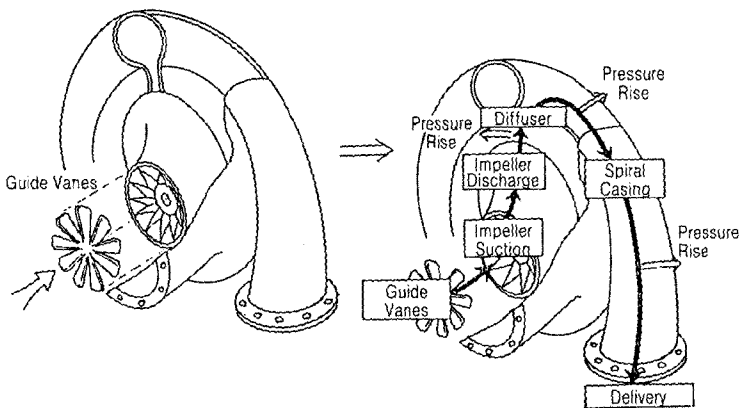
개요

터보압축기라고도 불리는 원심식 압축기는 팬, 프로펠러, 터빈을 포함하는 터보기계류에 속한다. 이 터보압축기는 회전하는 기계 요소와 정상적인 유체 유동 사이의 각운동량을 연속적으로 변화시키며 연속적인 유동 때문에 터보기계는 용적식 압축기보다 더욱 큰 체적 용량과 크기를 가진다. 효과적인 운동량 교환을 위해 회전속도가 높으나 운동의 안정성과 접촉부위가

없기 때문에 작은 진동이나 마모가 거의 없다. 원심식 압축기는 다른 압축기와 비교할 때 높은 압축비 때문에 냉동기와 냉동응용분야에 아주 적합하며 냉매가스는 축방향으로 임펠러로 유입되며 높은 속도로 원주방향으로 토출된다. 유입된 가스의 임펠러를 통한 지름방향으로의 변화는 가스 유동의 속도를 증가시키고 발생된 동압은 확산 과정을 통해 정압으로 바뀌게 된다. 확산과정은 일반적으로 임펠러, 원주방향 디퓨저의 끝부분, 임펠러의 스크롤 바깥경계에서 시작된다. 원심식 압축기는 흡입유량 1.7-850 m³/min 범위이며 회전속도는 1,800-90,000 rpm으로 다양한 냉동 공조설비에 사용되고 있다.



[그림 9] 기본증기압축사이클



[그림 10] 냉매가스 흐름도(Refrigerant Gas Flow)

냉동 사이클

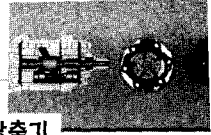
일반냉동사이클의 증발, 압축, 응축, 팽창과정중 1점과 2점사이에서 작동하는 원심식 압축기에서의 기본 증기압축사이클은 그림 9와 같으며 1단, 2단, 다단 할로젠화탄소 압축기나 7단 암모니아 압축기를 포함하는 전형적인 것들이 응용된다.

1단 이상의 플래시냉각(flash cooling)은 2개 이상의 임펠러를 갖는 압축기에 응용될 수 있으며 과냉각과 이코노마이저도 효율적으로 사용된다.

일반적으로 흡입가스는 임펠러로 유입되기 전에 가변흡입 가이드 베인이나 흡입댐퍼를 거쳐게 되며 이러한 베인이나 흡입 댐퍼는 원심식압축기의 용량조절장치로써 사용된다.

임펠러로부터 토출된 빠른 속도의 가스는 디퓨저로 토출된다. 베인이 있는 디퓨저는 전형적으로 높은 압력을 요구하는 압축기에 사용되며 베인은 일반적으로 고정되어 있으나 조정이 가능한 구조도 있다. 가변형 디퓨저는 흡입가이드 베인과 조합하여 용량 조절을 할 수 있다.

다단 압축기에서 1단으로부터 토출된 가스는 중간통로를 통해 2단 임펠러의 입구로 유입되며 중간통로는 고정유동 베인이나 가변흡입가이드베인을 포함하고 있으며 냉매가스는 최종단에 이르고 볼류트로 토출되게 되고 압축된 높은 압력의 가스가 볼류트를 통해 토출측 연결부로 보내지게 된다(그림 10).



압축기 특징

압축기의 열역학적 성능은 냉매의 정체성분과 정적 성분으로 평가될 수 있으며 정체 효율(stagnation efficiency)은 정적 효율(static efficiency)보다 높을 수 있다. 성능을 평가하는 가장 안전한 방법은 정적성분을 이용하고 별도로 운동에너지 변화량을 평가하는 것이다.

• 서어징(surging)

서어징이 발생하는 그림 11에서 선의 오른쪽 영역이 부분부하 범위로서 한정되어지며 서어징 구역에서의 운전은 냉매가 압축기를 통하여 번갈아가며 앞뒤로 유동하는 불안정한 서어징이나 헨팅을 유발시키게 된다. 또한 증가된 소음과 진동 및 열을 수반하며 이 상태에서의 연속된 운전은 압축기를 손상시킬 수 있다.

약 2초마다 한번씩 서어징이 발생하는 동안에 유동은 반대로 되고 작은 시스템은 높은 주파수에서, 큰 시스템은 낮은 주파수에서 서어징이 일어난다. 역유동이 구동축에 부하와 무부하를 교대로 준다는 사실에 의해서 다른 종류의 소음과 진동과 구분될 수 있으며 전동기의 전류는 서어징 발생하는 동안에 뚜렷하게 변한다.

• 시스템 균형

만일 냉동 시스템 특성을 압축기 성능 도표에 포개어 놓으면 특정한 영역에서 작동하는 압축기의 속도와 효율을 볼 수 있다. 전형적인 브라인 냉각 시스템 곡선은 그림 11에서와 같이 B, C, D, E, F, G, H점을 지나게 되며 속도가 증가함에 따라 H점에서의 압축기의 냉동용량은 증가하게 되고 C, D점에서 속도를 감소시킬 경우 냉동능력은 감소하게 된다. 아울러 서어징으로 인하여 압축기는 E, F, G점에서 만족스럽게 운전될 수 없게 된다.

E, F, G점 영역에서도 핫가스 바이패스(hot gas bypass)를 사용하여 시스템을 운전시킬 수는 있으며 압축기 흡입에서의 체적유량은 최소한 그림 11에서의 D점에서의 유량만큼은 되어야 한다 이때 요구되는 체적유량은 압축기 토출로부터 증발기나 압축기 흡입덕트로 추가되는 핫가스에 의해 충만된다. 핫가스 바이패스(hot gas bypass)가 사용되는 경우 부하가 감소하더라도 소요동력의 감소는 일어나지 않으며 이와 같은 경우 압축기는 서어징이 발생하는 영역 밖으로 운전되기 위하여 인위적으로 부족한 만큼이 핫가스 바이패스로써 부하를 받게 되고 핫가스의 재순환으로

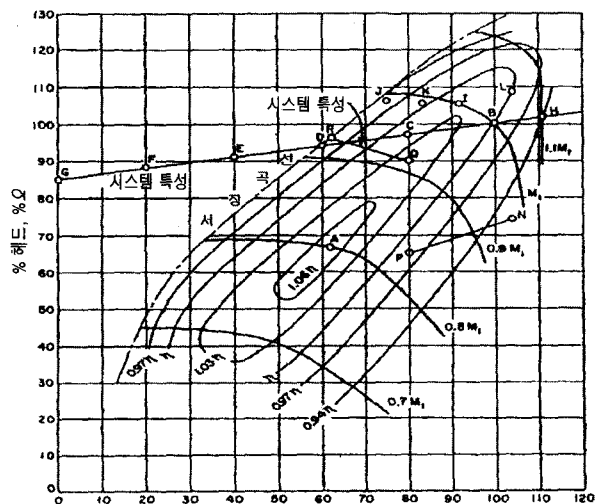
인한 증가된 체적은 유용한 냉동으로 작용하지 않기 때문에 실제에 있어서 손실로 작용된다.

• 용량 제어

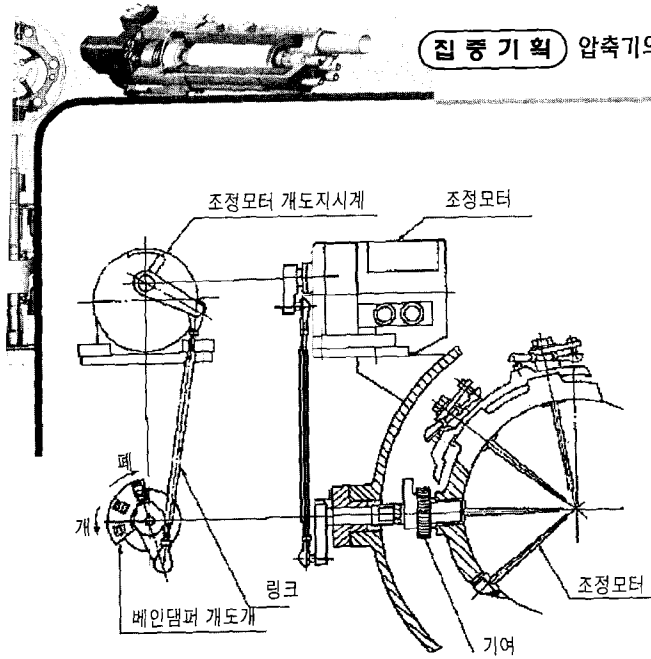
운전 속도가 일정할 때 용량을 바꾸는 일반적인 방법은 하나 또는 그 이상의 임펠러로 들어오는 냉매량을 조절하는 것이며 실제에 있어서 가변흡입안내베인(adjustable inlet guide vane)이나 회전베인(prerotation vane)을 회전시켜 흡입가스를 회전시킴으로써 흡입량을 조절하게 된다. 이러한 베인을 설치하여 임펠러의 회전방향으로 유동을 선회시킴으로써 속력의 변화 없이 새로운 압축기의 성능 곡선을 얻을 수 있는 것이며 베인의 설정 위치는 공압식, 전기식, 유압식에 의해 구성되어 있다.

두 가지 제어방법에 대한 가스압축힘은 압축기와 시스템에 있어서 속도제어방식은 부분부하운전으로 약 55%의 용량까지 가스압축힘을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 회전 흡입베인을 제어하는 것은 55% 이하까지 힘을 감소시킬 수 있다고 할 수 있다. 더욱 효율을 높이기 위하여 가변속도제어의 경우 유량(용량)을 감소함에 따라 폴리트로프 일(압력)을 감소시킬 필요가 있다. 폴리트로프 일의 감소는 일반적으로 응축압력을 줄임으로써 이루어지며 임펠러 선단속도는 양력의 요구량이 변하지 않으면 일정하게 유지되어야 한다.

냉동 용량은 압축기의 속도와 직접적인 관계가 있으



[그림 11] 전형적인 압축기 성능곡선



[그림 12] 용량제어장치기구

나 압력을 형성시키는 압축기의 능력은 압축기 회전 속도의 변화량의 제곱에 비례하며 예를 들면, 압축기 회전속도의 50% 감소는 냉동 용량의 50% 감소로 이어지며 압축기를 위한 실제적인 압력은 100% 회전속도일 때 값의 1/4이 될 것이다. 만일 압축기의 작동상태와 실제 냉동시스템의 작동상태가 일치하지 않는다면 압축기에 불필요한 부하를 필요로 하게 되고 핫가스 바이패스에 의해 서어징 상태를 방지하도록 작동하게 된다(그림 12).

정속도의 전동기가 원심식 압축기에 일반적으로 많이 사용되고 있기 때문에 회전흡입베인으로 제어하는 것이 가변속도조절하는 것보다 더욱 일반적으로 사용되고 있다. 흡입베인 제어방식은 압력의 요구량이 부분 부하에서 현저하게 변하지 않는 적용에 있어서 일반적인 최적의 제어방식이 압력의 요구량이 부분 부하에서 현저하게 변하지 않는 적용에 있어서 일반적인 최적의 제어방식이라 할 수 있다.

다른 일반적인 제어방식은 (1) 흡입교축을 이용하는 방법, (2) 조정 디퓨저 베인을 사용하는 방법, (3) 가동디퓨저 벽을 사용한 방법, (4) 임펠러 교축 슬리브를 사용하는 방법, (5) 회전베인과 회전수를 조절하는 방법 등이 있다. 각각의 방법은 성능, 복잡성, 비용 등의 면에서 장단점을 가지고 있다.

결론 및 향후 추진방향

산업이 발달되고 생활이 윤택해짐과 더불어 냉동공조산업 및 일반산업의 냉동공조분야에 적용되는 냉매압축기에 대한 국내외적으로 그 수요가 증가할 것으로 예상되지만 대체냉매적용 냉매압축기 관련한 국내의 연구개발 활동은 상대적으로 미약한 실정이다. 따라서 냉매압축기 및 전동기의 고효율화 및 대체냉매적용에 대한 연구개발에 한층 더 박차를 가해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이진호, 1994, "스크류압축기의 치형설계 및 성능해석에 관한 연구", 두원공과대학논문집, 제1권, pp119 ~ pp130.
2. N. Stosic, 1999, "Recent development in screw compressors.", IMechE Conference Transactions-Compressors and their system, pp3 ~ pp13.
3. 주식회사 룰텍 스크류압축기 데이터북, 2001.
4. 주식회사 경원세기 스크류압축기 데이터북, 1996.
5. 신정관, 2001, "가스안전공사 스크류 냉매압축기 교육자료" 