

<특별강연>

밀폐형 압축기의 소음진동에 대한 연구 예와 시급한 연구과제에 관하여

김 종 혁

<미국 신시내티대학 기계공학과 교수, 현재 KAIST방무교수; '98. 1~8월>

1. 압축기의 종류

압축기의 종류는 크게 dynamic type과 positive displacement type으로 우선 나눌 수 있다. 전자는 제트엔진에 사용되는 압축기에서 보는 바와 같이 기체의 속도를 변화시켜 동압을 정압으로 바꾸어 압력을 얻는 경우이다. 후자는 기체를 둘러싼 체적을 줄여서 압력을 얻는데 가전제품에 쓰이는 냉각용 압축기의 대부분의 종류가 이에 해당된다. 압축 기체의 종류에 따라 공기 압축기, 가스 압축기, 냉각용 압축기로도 나눌 수 있겠다. 냉각용 압축기는 다시 여러 가지 방법으로 분류할 수 있겠지만, 구동 모터의 용량이나 냉각 용량에 따라, 대형, 소형으로 분류하거나, 압축기를 둘러싼 셀의 구조에 따라 밀폐형과 반 밀폐형으로 나눌 수 있다. 밀폐형은 냉매를 반 영구적으로 보충할 필요가 없도록 용접형 셀을 가진 구조로 압축기를 다시 열어서 보수할 수가 없다. 냉장고나 냉방기 같은 가전 제품에 쓰이는 압축기는 대부분 소형 밀폐형이 되겠다. 산업용의 중, 대형 압축기는 보수의 목적으로, 자동차 냉방용 압축기는 동력이 엔진축에서 공급되는 구조 상의 이유로 반 밀폐형이 채택된다. 보수가 사실상 불가능한 밀폐형의 구조 상 소형 냉장용 압축기는 거의 무한 수명을 감안한 설계를 요하게 되고, 이것이 압축기의 보수적인 설계 및 개발 성향에 어느 정도 영향을 주었다고 볼 수 있다. 이런 소형 밀폐형 압축기(positive displacement, fractional horsepower, hermetic compressor)에 관한 연구의 소개가 이 글의 주 관심이 되겠다.

압력을 얻기 위해 체적을 변화 시키는 mechanism도 여러 가지가 있는 바, 왕복동식 피스톤(reciprocating piston) 압축기가 가장 오랫동안 사용되어 온 구조이다. 회전식으로 압축을 얻는 방식으로는 로타리 피스톤식, 스크류식, 스크롤식 압축기가 있다. 로타리 피스톤(rotary piston)식 압축기는 약 20여년 전 부터 냉방용 압축기에서 부터 널리 쓰이게 되었다. 약 10여년전부터 상용화 된 스크롤(scroll)형 압축기도 현재 상대적으로 용량이 큰 가정용 냉방기를 중심으로 많이 쓰이고 있다. 스크류형 압축기는 보통 중대형 상업용에 주로 쓰인다. 그림 1은 가전제품에 흔히 쓰이는 왕복동식 구조의 압축기의 개괄도이다.

2. 관련 문헌 및 학술대회

1960년도 말에 압축기의 구동용으로 쓰이는 모터의 속도가 1800 rpm에서 3600 rpm으로 증가하면서 압축기 업체 들은 그때까지 보지 못했던 많은 문제에 봉착하게 되었다. 같은 크기의 압축기로 두 배의 냉각용량을 얻는 대신, 높아진 속도에 따라 밸브의 파손이나 기타 구동 부분의 마모 및 손실, 높아

진 주파수 대역에 따른 소음문제 등은 그 때까지의 단순한 trial and error 식의 노력을 넘는 체계적인 연구의 필요성을 증대 시켰다. 구미에서 본격적인 대학이나 연구소에서의 산학 협동에 의한 압축기 연구가 이때 썸을 즈음하여 시작되게 되었다. 특히 퍼듀 대학의 헤릭 연구소(Herrick Laboratory, Purdue University)에서 많은 연구가 진행되었고 1972년에는 국제 압축기 학회 (International Compressor Engineering Conference)가 시작되었다. 이 학회는 격년제로 열려서 금년 (1998년)에 14회 째를 거듭하게 되었다. 이보다 작은 규모로 유럽이나 중국에서 압축기 학회가 비정기적으로 열리고 있고, ASME의 설계분야 학회나 냉동 공기조화 시스템을 다루는 학회에 압축기에 대한 session이 자주 포함 되어있다. 하지만, 실제 압축기에 대한 대부분의 문헌은 역대의 국제 압축기학회의 학회지들[1]에서 발견할 수 있다고 보면 된다. 물론 Journal of Sound and Vibration, J. of Acoustic Society of America, ASME Trans. of Vibration and Acoustics같은 학술지에 발표된, 압축기와 직접 관련된 논문이나 압축기에서 동기를 부여 받은 기초적 문제에 관한 논문들이 있고, 다른 학회에서 발표된 논문들도 많을 것이나 거의 모든 경우 압축기에 관련된 논문은 이 압축기 학회의 논문집에서 시작하여 추적할 수 있다고 본다.

압축기와 관련된 기술을 종합적으로 다룬 책은, 역대의 압축기학회 때에 같이 진행된 단기 강좌 들의 교재로 만들어 진 한정본 책들[2] 외에는, 필자가 알기로는 거의 없는 실정이다. Chlumski의 "Reciprocating and Rotary Compressors"[3] 가 있으나, 1969년에 발행된 오래된 책으로 이후 약 30년 동안 실용화된 새로운 형식의 압축기 들이나 그동안 도입된 많은 신기술 들을 생각할 때에, 그 효용도가 극히 제한이 되어 있는 셈이다. 현재로서는 압축기학회 단기강좌의 교재 들이 가장 좋은 참고서적의 역할을 하고 있다. 열역학적인 시스템의 논의와 진동, 소음 문제를 광범위하게 다루고 최근의 기술 동향을 포함하는 압축기에 관한 종합적인 책의 출현이 필요한 시점이라고 생각한다.

### 3. 압축기 진동 소음 문제의 특징

압축기는 이미 백여년 동안 만들어져 왔고, 우리나라에서도 양산된지가 오래되어 압축기 산업은 대표적인 성숙산업이라고 볼 수 있다. 미국이나 유럽은 대부분 독립된 압축기 전문 업체에서, 우리나라나 일본에서는 가전업체에서 만들고 있다. 설비 집약형 양산품인 관계로 새로운 모델의 채용에는 많은 투자와 위험 부담이 따르기 마련이다. 압축기의 고장은 그보다 훨씬 비싼 가전기기 전체의 total loss를 가져 오게 되고 보통 가전제품은 10여년 이상의 수명기간을 가상하여야 하므로 새로운 개념을 시장에 내어 놓기 위해서 필요한 성능 시험의 기간이 극히 길게 된다. 직접 제품에 관련된 연구과제인 지라 국내외를 막론 거의 대부분의 연구가 산학 협동으로 이루어 지게 된다. 필자의 의견으로는 이것이 실용성과 학문성을 균형있게 연구할 수 있는 등 좋은 점도 많으나, 장기간을 요하는 기본적 과제의 연구에는 상대적으로 장애가 되고 있다고 본다.

압축기의 진동소음 문제의 가장 중요한 관심은 결국 최종 방사 소음의 저감에 있다. 밸브의 파손 방지를 위한 해석을 제외하면, 진동해석의 목적도 소음 저감에 있게된다. 소형 압축기는 외형상 단순해 보이지만 조금 자세히 들여다 보면 열, 유체, 고체, 진동분야를 망라한 역학적 문제, 모터와 관련

된 전기적 문제 등 실로 광범위한 분야가 모두 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 진동 소음 분야의 연구를 위해서도 이런 다양한 분야의 이해가 어느 정도 필요하게 된다. 압축기는 냉동 시스템의 한 부분인 동시에 그 자체가 구동부와 복잡한 전달계를 가진 동력학적 시스템을 이루고 있다. 따라서 모타 구동 시의 전자기적인 가진, 압축가스의 맥동 흐름, 구동부의 운동에 의한 충격 등 다양한 음원이 존재하며 이런 음원에서 발생하는 소음의 전달경로도 아주 복잡하다.

압축기의 소음 연구의 어려움 중에서 많은 부분은 압축기를 둘러싼 밀폐형 셀 구조에서 기인한다고 볼 수 있다. 그림 2는 압축기 소음의 발생-전달 경로를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 어떤 종류의 소음원에서 발생한 소음이라도 셀이라는 전달 경로를 지나가게 되어 있다. 이 과정을 거치며 각기 다른 종류의 소음 들의 증폭이나 저감이 이루어지면서 서로 섞이게 되어 실험적으로나 해석적으로나 소음원의 파악이 힘들게 된다. 또한 밀폐형 셀은 압축기 내에 실험용 센서를 설치할 공간을 협소하게 만들어 실험에도 많은 어려움을 가져다 준다.

왕복동식 압축기는 그림 1에서 보는 바와 같이 내부 구동부가 소프트한 스프링으로 셀에 현가되어 있어 구동부가 동력학 적으로 셀에서 분리되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 적어도 구동부와 셀의 동적 해석은 따로 수행될 수 있다. 이에 비해 로타리 형이나 스크롤 형의 압축기처럼 회전형 구조를 가진 압축기는 셀과 내부 구동기계가 강접 되어 있어서 두 가지 계의 동적 거동을 같이 해석하여야 만 한다. 뿐만 아니라 어떤 경우이든 셀의 내부공간에는 윤활유와 냉매가스가 차 있게 된다. 따라서 해석 모델에는 자유면을 가진 유체와 냉매 기체, 셀이 모두 포함되어야 할 것이다. 이러한 모델의 해석은 단성체, 유체, 기체로 된 세계의 sub-system 간에 에너지가 교환되는 과정을 이해할 수 있게 해서 소음 발생 및 전달에 대한 좀더 정확한 예측을 가능하게 할 것이다. 현재의 연구 수준으로는 이러한 통합 모델을 해석하는 것이 힘든 실정이다. 이런 완전한 모델로 가기 위한 중간 단계로서 셀과 내외부 기체의 통합 거동, 기계부와 셀의 통합 거동에 대한 연구 결과는 필자의 것을 포함하여 최근 문헌에서 발견된다[4].

#### 4. 연구의 예

##### 압축기 행정의 전산시뮬레이션

압축기의 한 행정의 압력선도를 수치적으로 구하는 전산 시뮬레이션은 압축기의 진동소음 문제를 다루는 데에 필요한 여러 가지 기초자료를 제공한다. 잘 만들어진 시뮬레이션 프로그램은 압축기 내의 소음기를 설계하는데에 필요한 음원과 음원 임피던스에 대한 정보와 밸브의 임팩트 해석, 압축기 구동부의 운동해석, 셀의 진동해석 등에 쓰일 수 있는 기본정보를 제공한다. 시뮬레이션의 가장 중요한 결과라고 할 수 있는 압력 선도로 부터는 압축기의 단위 행정 당 소요 일량이나 각종 손실의 예측과 이러한 손실의 정량, 정성적인 원인분석까지도 어느 정도 가능하게 한다. 측정된 압력선도와 이런 계산된 압력선도를 비교해서 시뮬레이션 프로그램을 보정하거나 개량할 수 있다. 이러한 시뮬레이션 프로그램은 그 기본 모델에 따라 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 하나는 실린더의 열역학적 과정을 polytropic process로 간단화한 모델이고 다른 하나는 열역학 제일 법칙에 따라 이를 해석하는 모델이다[2]. 어느

모델을 따르건 실용성 있는 시뮬레이션을 위해서는 실린더의 열역학적 과정 외에 밸브의 동력학적 모델과 냉매가스의 유입, 배출로에 대한 음향학적 모델을 포함해야 한다. polytropic process 모델에 의한 시뮬레이션으로 얻어진 압력선도와 측정된 압력선도를 비교한 것이 그림 3에 보여져 있다.

### 밸브의 동력학적 거동

밀폐형 압축기에서는 실제 어떤 작은 부품의 파손도 압축기 전체의 손실을 의미하게 되는데 밸브가 쓰이지 않는 스크롤 형외에는 보통 밸브가 압축기에서 가장 손실 빈도가 높은 부품이다. 밸브의 설계해석에는 밸브에 걸리는 정력학적 응력 및 충격에 의한 응력이 고려되어야 한다. 충격에 의한 응력의 해석은 최신의 충격 해석용 유한요소법 소프트웨어를 쓰더라도 많은 계산이 소요되고 정확한 가진력과 경계조건의 파악이 힘든 점 등 많은 난제가 남아 있다. 계산결과가 나온 뒤에도 이를 이해하여 응력평가를 하고 설계에 적용하는 것은 더 어려운 문제이다. 밸브 설계에 대한 일반적인 고려사항에 대한 논의는 [2]에서, 충격에 대한 동력학적 해석은 [5]에서 찾아 볼 수 있다.

### 음향해석과 소음기 설계

압축기의 소음기 해석 및 설계를 위해서 Helmholtz resonator model 같은 lumped parameter model이 많이 쓰여져 왔다[2]. 소형 압축기에 쓰이는 소음기는 그 크기가 매우 작아서 이러한 간단한 모델이 잘 적용된다. 이런 경우 소음기의 일반적인 성능에 관한 parameter들이 해석해로 얻어지기 때문에 실제 설계에 적용하기에 매우 편리하다. 일차원 또는 삼차원 연속체 모델을 쓰면 좀더 넓은 주파수 대역에서 정확히 적용할 수 있는 소음기의 모델을 얻을 수 있다[2]. 셀의 내부 공간이나 accumulator 같은 비교적 큰 공간의 해석을 위해서는 삼차원 모델이 필요하게 된다. 이러한 여러 가지 음향모델 들은 전달행렬의 개념을 사용하면 편리하게 조합되어 전체 시스템 연구에 적용할 수 있다[6].

압축기의 소음기 설계의 가장 큰 어려움은 압축기의 밀폐형 구조에 있다고 볼 수 있다. 자동차 용 소음기의 경우에는 소음기의 출구에서의 음압이 최종적으로 외부에서 느끼는 소음에 직접 비례하지만 압축기의 소음기 출구에서의 음압은 셀 내부 공간에 작용하기 때문에 그렇지 않다. 그림 2의 소음 전달 경로에서 보는 바와 같이 그 음압이 다시 셀 내부 공간의 가진력으로 작용하게 되어서 냉각유와 그 자유면의 진동, 셀의 구조진동, 셀 외부면의 운동에 따른 외부로의 소음방사등의 복잡한 계의 거동이 참여하게 된다. 따라서 소음기 자체만을 생각한 설계해석은 그 효율도가 한계가 있기 마련이고 이것이 소음기 설계 시 예상외의 결과에 많이 봉착하는 원인이 된다. 언급된 모든 것을 고려하는 경우 모델이 극히 복잡하게 되어 그 해석 자체가 아직까지의 지식으로는 매우 어려운 상태이다. 필자의 생각으로는 해석적 방법과 실험적 방법을 결합한 방법이 쓰여야 할 것이라 본다.

앞서 기술한 문제에 접근하기 위한 일환으로 압축기의 내부의 냉매로 채워진 공간의 자유 모드나 강제 응답을 얻기 위한 음향 진동 해석이 유한 요소법과 경계 요소법을 써서 많이 이루어져 왔다. 셀의 내부공간은 그 내면이 기계구동부의 형상으로 되기 때문에 기하학적으로 극히 복잡해져서 최신 소프트웨어로도 기하학적 모델링이 쉽지 않고, 또한 그 결과의 표현도 아주 어렵게 된다. 음향 매체

의 거동은 일반적으로 곡률의 영향을 탄성체의 경우보다 훨씬 적게 받으므로 국소적으로 미소한 기하학적 모양을 무시하고 그 형상을 단순화 할 수 있다고 생각한다. 효율적인 수치해석 모델링을 위해서는 실제 이러한 단순화의 영향에 대한 검토가 좀 더 필요하다고 보인다.

압축기의 셀은 소음 전달 단계의 가장 중요한 요소이므로 그에 대한 진동 실험이나 해석이 많이 수행되었다. 일반적으로 압축기처럼 불규칙한 모양을 가진 셀은 유한 요소법을 이용한 진동해석이나 실험적인 모드 측정이 가능하더라도 그 응답 특성을 이해하고 결과를 알맞게 이용하기 위해서는 상당한 지식이 요하게 된다. 압축기의 경우는 셀이 다시 내부의 유체 및 기계부와 동력학 적으로 연결이 되어 있기 때문에 셀 자체의 진동 측정이나 해석의 결과가 곧바로 유효한 설계정보로 쓰이기 어렵다. 예를 들면, 셀 단품에서는 거동에서 큰 차이를 가져오는 설계 변경이 조립된 압축기에서는 큰 영향이 없는 경우가 많고, 그 반대의 경우도 생각할 수 있다.

## 5. 필요한 연구의 방향

현재까지의 논의로 필자가 나름으로 생각하는 압축기에 대한 시급한 연구과제 들은 비교적 명료하게 된 셈이라고 본다. 그 중 가장 중요하다고 생각되는 것은 셀의 내부 공간의 비교적 완전한 음향학적 해석이다. 냉매 가스, 자유면을 가진 유체(냉각유), 셀로 이루어진 전체 계를 효과적으로 해석할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것이다. 세 개의 다른 계 들이 서로 에너지를 주고 받는 과정에 대한 확실한 해석 방법과 이해가 이루어지면 압축기의 소음진동 감소를 위한 연구가 근본적으로 한단계 더 진보할 수 있을 것이다. 현재로서는 이러한 해석이 가능하지 않기 때문에 내부 음원과 외부 소음 사이의 직접적인 관계를 알 수 없고, 따라서 소음기나 셀의 설계 시에 상당부분을 추측이나 직관에 의존해야 하게 된다. 이러한 해석에는 이론해석, 수치해석과 실험해석이 잘 조화를 이룬 방법이 동원되어야 할 것이다. 유체, 기체, 탄성체로 이루어진 아주 간단한 계를 이용한 정성적인 연구를 선행하는 것도 바람직한 방안일 것이다.

기계품과 셀의 동력학적인 거동도 더 많은 연구를 필요로 하는 분야로 보인다. 특히 로타리 형이나 스크롤 형 같은 회전식 압축기의 경우는 셀과 내부 구동부가 일체로 연결되어 있어서 구동시 생기는 진동이 훨씬 강하게 외부로 전달 된다고 볼 수 있다. 따라서 셀과 여타 압축기 전체를 회전기로 해석하는 것이 필요하다고 생각된다. 이러한 해석의 결과는 압축기의 현가, 셀의 설계 등에 필요한 기본 자료를 제공할 것이다.

앞서 언급한 여러 가지 해석, 연구를 효과적으로 하기 위하여 전체적인 설계해석 시스템을 생각해 볼 수 있을 것이다. 이러한 시스템은 압축기의 전산 시뮬레이션 프로그램을 중심으로 구축하는 것이 좋은 방안이라고 생각한다. 시뮬레이션 프로그램은 다른 해석 프로그램이나 설계 파트에 기본 자료를 제공하게 된다. 따라서 시뮬레이션 프로그램 자체의 개선과 그 용도의 확장도 계속 되어야할 연구 과제이다.

## 6. 후기

필자가 모자라는 능력으로 연가를 나온 기간 중에 충분한 시간이 없이 필요한 자료 등에서 떨어져서 쓴 글이 되어 미흡한 점이 많습니다. 자료 조사를 제대로 하지 못한 관계로 참고 문헌의 역할을 하도록 쓰기 보다는 이 글이 연구 주제에 대한 개략적 소개, 필자의 개인적인 경험과 현재 시급히 필요하다고 생각되는 과제를 설명하게 만들기 위해서 노력했습니다. 또한 진동 소음 문제로 그 논의를 국한했기 때문에 대체냉매라든지 마모, 윤활 같은 다른 분야의 중요한 과제에 대해서는 언급하지 않았습니다. 이 글에 본의 아니게 잘못 기술된 점이 있거나 필요하다고 생각되는 과제에 대해 상반되는 의견이 있으시면 언제라도 들려 주시면 합니다. 앞으로 이분야에서 많은 연구 진전이 한국 소음 진동학회를 중심으로 이루어져서 국내 관련업계의 많은 발전이 있기를 바랍니다.

## 참고 문헌

1. Proceedings of International Compressor Engineering Conference from 1972-1996
2. Past 10 Short Course Text Books, including "Mechanics, Simulation and Design of Compressor Valves, Gas Passages and Pulsation Mufflers", by W. Soedel, 1992, Ray W. Herrick Lab., Purdue University
3. V. Chlumski, "Reciprocating and Rotary Compressors," E&FN, London, 1969
4. W. Zhou and J. Kim, "Prediction of Noise Radiation from Hermetic Compressors Utilizing the Computer Simulation Program and BEM/FEM Analysis," Proc. of 1996 Int. Compressor Eng. Conference, pp 587-592
5. C. Wang and J. Kim, "Dynamic Analysis of a Thin Beam Impacting Against a Stop of General Three-Dimensional Geometry," vol. 203(2), pp237-249, J. of Sound and Vibrations, 1997
6. J. Kim and W. Soedel, "Analysis of Gas Pulsations of Multiply Connected Three-Dimensional Acoustic Cavity with Special Attention to the Annular Cylinder," J. of Sound and Vibrations, vol. 131(1), 1989, pp 103-114

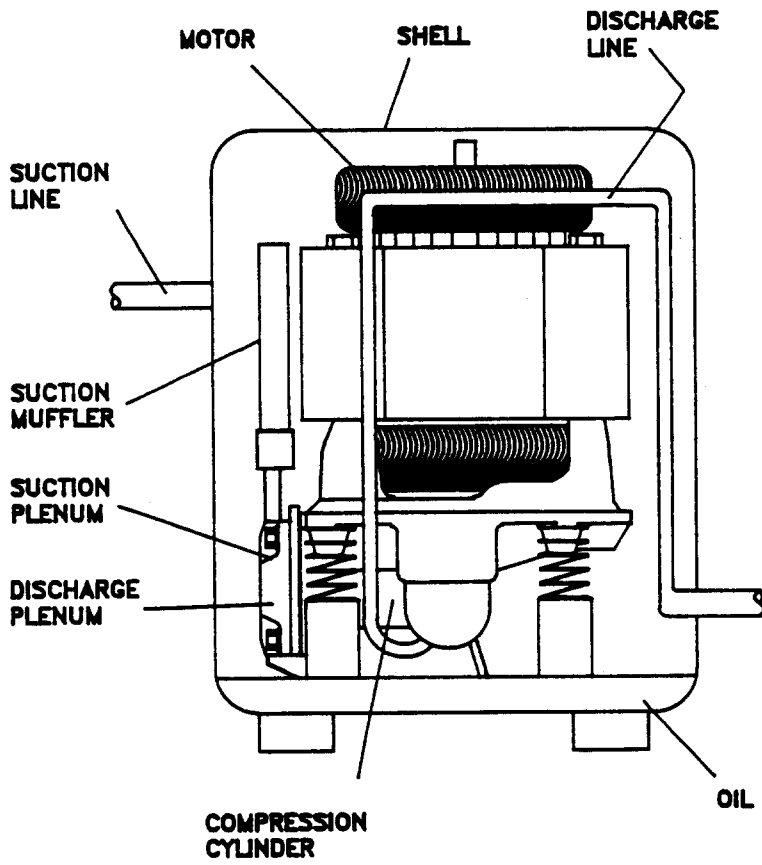


그림 1. 왕복동식 압축기의 구조 개략도

