

터어보 공기기계에서 발생하는 제반현상

Phenomena Occurring in Aero - Turbo Machinery



김 만 응

M. E. Kim

- 한국선급협회, 주무검사원
- 전산유체역학 전공



김 진 구

J. K. Kim

- 한국선급협회 주무검사원
- 유체공학 전공

1. 송풍기에서의 각종 현상

송풍기는 최고 효율점의 풍량 또는 그 부근에서 운전하는 것이 일반적이나 용도에 따라서는 부분 풍량으로 운전할 수 밖에 없는 경우도 있다. 부분 풍량으로 운전할 때에는 서징 및 선회실속을 발생하는 경우가 있다. 한편 송풍기의 소음도 최고 효율점 풍량 또는 그 부근에서 운전할 때는 특별한 문제가 없으나 부분풍량 운전에서는 몇가지의 현상이 발생한다. 이외에도 편류한 흐름을 흡입할 때에도 성능저하, 소음증대를 수반하게 된다. 이와 같은 관점에서 송풍기에서 발생하는 제반 현상을 설명한다.

1.1 써어징

송풍기에 있는 토출밸브를 조이면 운전점은 그림 1의 A점에서부터 B점으로 이동한다. 더욱 밸브를 닫으면 운전점은 C점에 이른다. 여기는 압력곡

선의 우측증가영역이며 풍향 및 압력이 정상적이지 않고 맥동을 일으킨다. 송풍기가 대형 대출력의 경우에는 송풍기 본체 및 배관계의 진동이 크게 된다. 이와 같은 현상을 써어징(serging)이라고 한다. 압력이 높은 압축기 등에서는 맥동이 상당히 크게 되어 시스템전체가 진동하여 운전불능이 된다. 이와 같은 써어징현상의 원인은 실제문제로서 일찍 부터 알려져 왔으나 현상을 충분히 이해하는 데는 불충분하다. 이 현상을 펌프의 압력-수량의 특수성으로부터 생기는 배관계내의 유체가 구성하는 자력진동으로서 이론적으로 설명한 연구결과가 보고되고 있다. 또한 물의 관성, 원동기의 특성을 고려하고 더우기 유동손실 중에서 토출밸브에 의한 것으로 나누어서 이론을 전개하여 안정판별식을 유도하여 실험결과와 비교하고 있다. 써어징에 관해서는 여러 가지 연구결과가 발표되어 있지만 써어징은 저압의 송풍기에서는 문제가 되지않고 압축기에 있어서 보다 중요하다.

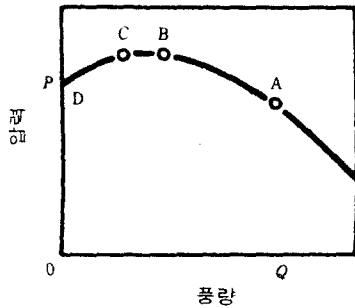


그림 1 압력곡선

1.2 싸어징의 방지방법

송풍기에서도 대형, 대출력의 것은 파손까지 가지 않더라도 풍량의 맥동이 바람직하지 않은 결과를 가져오는 경우에는 다음과 같은 싸어징의 방지 방법 있으나 압축기의 항에서 상술하기로 하고 간략히 언급한다.

우선 송풍기 자체의 방지방법이 있다. 압력곡선에서 우측증가영역이 없으면 싸어징은 발생하지 않기 때문에 익근출구각 β_2 를 작게 하면 좋다. 이 경우에 β_2 는 대략 30도 이하로 한다. 그림 2는 그 한 예로 체절점으로부터 하강곡선(falling curve)으로 바뀐다. 이 방법의 결점은 β_2 를 작게 함으로서 Euler식에서 알 수 있는 것과 같이 압력이 저하한다. 따라서 규정의 압력을 확보하기 위해서는 익근차외경을 크게 하지 않으면 안된다. 즉 코스트가 증가하게 된다. 다음으로 바이패스 방식이 있다. 이것은 放風밸브로부터의 바람을 흡입측으로 되돌려 순환시키는 방법으로 운전점을 최고효율점

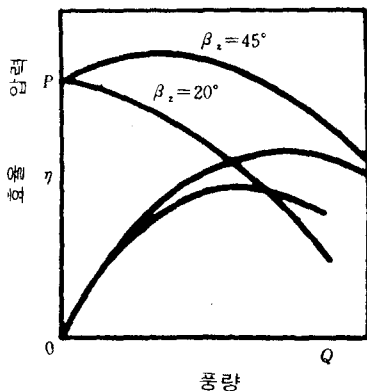


그림 2 출구각도변화

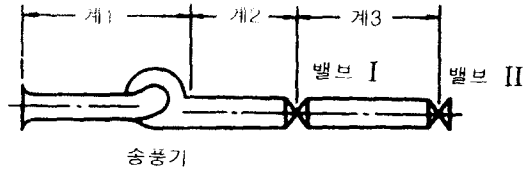


그림 3 2밸브조작방식

풍량으로 이동시켜 싸어징을 피하는 방법이다. 그리고 放風방식이 있다. 즉 토출시 풍량의 일부를 방출해 주면 장치시스템에는 필요한 풍량이 흐르고 송풍기로서는 방풍하는 양도 함께 처리하기 위해 싸어징 한계역(최고의 효율점 풍량에 가까운 측)에서 운전할 수 있다. 이 결점은 유해가스에서는 위험을 수반하기 때문에 사용할 수 없는 점이다. 마지막으로 2밸브 조작방식이 있다. 그림 3과 같이 송풍기의 토출배관에 2개의 밸브를 부착하고 이 밸브사이의 용적을 일정값 이상으로 해서 송풍기에 가까운 쪽의 밸브를 약간 조임으로서 싸어징을 감소시킬 수 있다.

1.3 선회실속

제트엔진, 제철소의 고로용 등에 사용되고 있는 축류압축기는 압축비가 크게 됨에 따라 진동피로에 의해 동익, 정익의 파손사고가 발생한다. 이러한 피로의 여진력이 되는 것이 선회실속(rotating stall)이며 많은 연구가 행해져 왔다. 싸어징은 송풍기와 관로계로 부터의 진동계의 자려진동이며 그 발생과 주기가 관로계의 영향을 받는 것에 반하여 선회실속은 관로계에 관계없이 송풍기(압축기) 자체의 현상이다. 자주 동일현상으로 간주되고 있으나 전혀 이질적인 내용이다. 알기쉽게 말하면 싸어징은 공장시험시에 발생하여도 현지설치시에는 발생하지 않을 수도 있다. 이것은 관로계가 다르기 때문이다. 이에 대하여 선회실속은 공장시험시에 발생하면 현지에서도 발생한다.

1.4 소음에서 발생하는 현상

송풍기의 소음은 익통과주파수(익매수와 회전수의 곱) 및 이 고주파수의 성분을 갖는 회전소음과 랜덤한 압력변동에 의한 연속적인 광대역의 난류소음으로 구성된다. 그러나 부분풍량에 있어서

표 1 시험송풍기의 주요제원

입펠러 기호	A1	A2	P1	P2
익근형상	익형	익형	원호형	원호형
번호	No. 3	No. 4	No. 3	No. 4
익근차직경 D_2 mm	450	604	450	604
익근차출구폭 B_2 mm	113	150	113	150
익근매수 Z	12	15 - 17	12	12 - 28

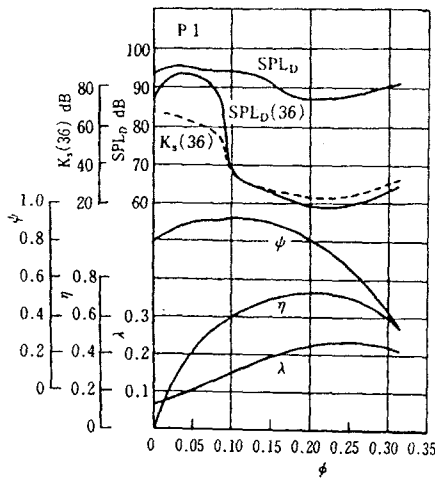


그림 4 특성곡선

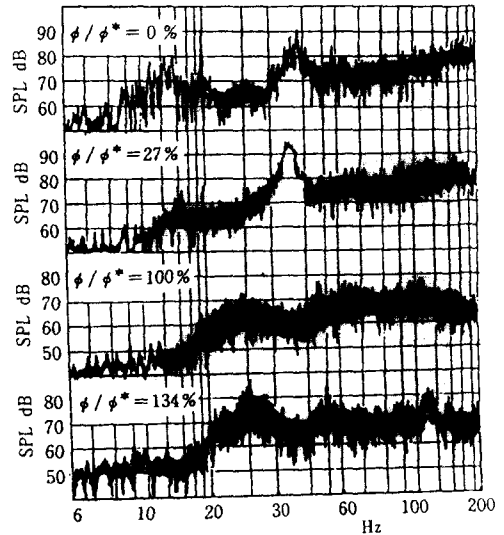


그림 5 소음스펙트럼(P1)

저주파수의 이산소음을 발생하는 것도 있다. 이 원인에 관해서 여러 가지 각도에서 검토한 결과 최종적으로 발생원인은 축류압축기와 같이 선회실속임이 알려져 있다. 실험에 사용된 터보송풍기는 얇은 판의 원호익과 익형단면을 갖는 익형익이며 주요제원은 표 1에 표시하였다.

원호익(P1)의 특성곡선을 그림 4에 표시한다. 흡입구에서 455mm인 D점에 있어서의 전체음압레벨 SPL_D 는 거의 최고 효율점 유량계수 ϕ^* 에서 최소치를 표시한다. 임의의 유량계수 ϕ 가 ϕ^* 보다 작아지면 SPL_D 는 증가한다. 그림 5는 여러 가지의 유량계수비 ϕ/ϕ^* 에 있어서 소음 스펙트럼을 표시한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 ϕ/ϕ^* 가 0%, 27%에 있어서는 36Hz의 이산(discrete)소음의 발생이 나타난다. 이것을 상세히 조사해서 36Hz의 레벨(정확히는 6%의 定比 분석기로 주파수 분석했을 때의 36Hz의 음압레벨) $SPL_D(36)$ 과 ϕ 의 관계를 그림 4에 표시하고 있다. ϕ 가 0.1 보다 작아지

면 급격히 $SPL_D(36)$ 은 증대하고 그 최대치와 최고 효율점의 $\phi/\phi^*=100\%$ 에 있어서의 최소치와의 차는 35dB에 이른다. 그림 6에 표시된 것처럼 익근부의 E점, F점에 열선프로브를 설치하여 실속에 수반하는 셀의 원주방향의 이동을 조사해 보면 그림 7과 같은 파형이 얻어진다. 결론적으로 선회실속의 주파수는 $f_s=0.72ni$ 로 표시됨을 알 수 있다. 여기에서 n은 매초 회전수, i는 셀수이다. 이 결론은 대단히 중요한 의미를 가지고 있다. 즉 고도 경제 성장과 더불어 오래동안 플랜트의 송풍기도 초대형으로 되고 조업조건에 의해 부분풍량으로 운전하면 10 - 14Hz 정도의 범위의 초저주파음(인간의 귀로 청취하지 못하는 범위의 음)이 검출되어 주변 민가의 창유리, 문살같은 것을 진동케 하는 현상이 발생하였다. 대형이 되면 n은 작아지고 f_s 도 작게 되어 우연하게도 상기의 주파수 범위에 들

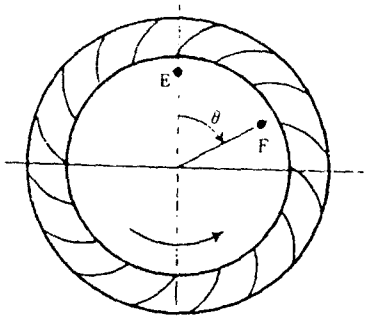


그림 6 입펠러 입구부의 프로브 위치

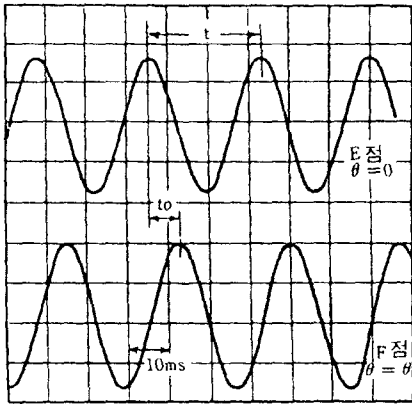


그림 7 파형의 위상차 설명도

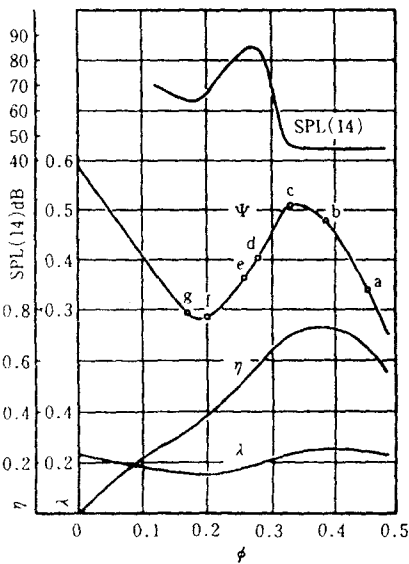


그림 8 송풍기의 특성곡선

어가는 경우가 많아졌다. 또한 많은 선행연구에 의해 초저주파음의 원인이 송풍기 부분풍랑에서 발생하는 선회실속이라는 것이 판명되어 운전점의 이동에 의해 영향을 피할 수가 있게 되었다. 그림 8은 축류 송풍기에 관하여 특성곡선과 14Hz의 선회실속을 동반하는 음압레벨 SPL(14)와의 관계이다. 14Hz는 물론 초저주파음(infra-sound)이다. 실험에 의하면 $f_s = 0.577n$ 를 얻고 있다. 그러나 원심 송풍기와 달리 축류 송풍기에서는 초대형기 플랜트에 사용되지 않았기 때문에 초저주파음 공해에 관해서 발생예가 알려져 있지 않다. 축류 송풍기의 경우에는 흡입림에 의해 infra-sound를 저감시킬 수가 있다. 또한 선회실속을 발생하지 않도록 설계하면 된다.

1.5 Karman渦에 의해 발생하는 현상

송풍기 본체에도 카르만와음에 의해 생기는 현상이 발생하는 케이스가 있다. 정익이 없는 모터내장의 축류 송풍기에 있어서 모터는 둥근봉으로 지탱되어 있는 구조의 것이 현지에 납입된 후 문제가 되는 경우가 있다. 이 때에 측정점은 현지의 상황으로 인하여 송풍기에서 10m 떨어진 위치에서 행해졌다. 그 결과를 그림 9의 실선으로 표시한다. 여기에서는 500Hz의 익통과 주파수가 탁월하여 시끄러운 감이 들었다. 여러 가지로 검토한 결과 익통과 주파수가 둥근봉의 후방에서 생기는 카르만와음의 주파수와 일치하여 공명하기 때문에 회전소음 레벨이 증대한 것으로 판명되었다. 이에 대한 대책으로서 둥근봉 대신 평판으로 하고 그 평판

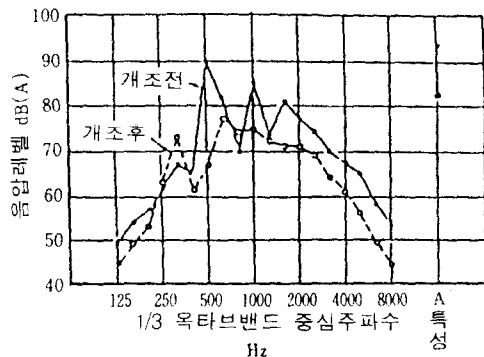


그림 9 축류송풍기의 소음스펙트럼

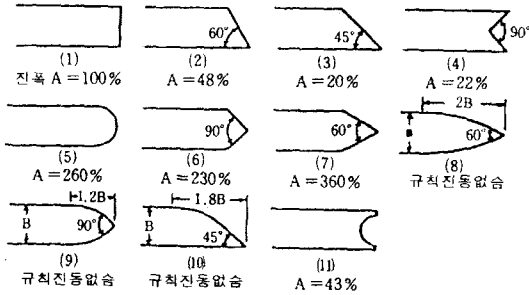


그림 10 공진시의 진동진폭

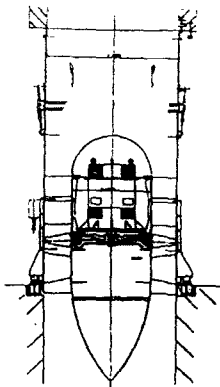


그림 11 축류송풍기의 단면도

후단부에 각도를 주었다. 이것과 병행하여 익의 매수를 바꾸어서 카르만와음의 주파수를 피하였다. 물론 익의 현장은 크게 하여 성능은 변하지 않도록 하였다. 이러한 개조를 행하여 측정된 것이 그림 9의 파선이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 익통과 주파수는 315Hz로 옮겨져서 공명이 없어졌기 때문에 이 음압레벨은 72dB로 되어 18dB이 감소하여 문제를 해결하였다. 그림 10에는 평판후단의 형상과 진동진폭의 관계를 보여준다. 그림중 (1)이 기본으로 되어 있고 이에 대한 진동진폭비를 표시하고 있다. (10), (3) 등이 실용적이다. 무음기류풍동을 사용하여 행한 실험으로는 비대칭형이 좋으며 (3) 또는 (3)의 형상에서 각도가 30° 전후이면 소음의 저감량이 증가하였다. 상기외에 다음과 같은 경우도 있다. 그림 11에 표시되어 있는 대형 축류송풍기에서 정익 부분의 프레임 내부에 모터가 내장되어 있는 경우가 자주 있으나 여기서 취급하는 것은 구경 300mm의 축류 송풍기이다. 송풍기

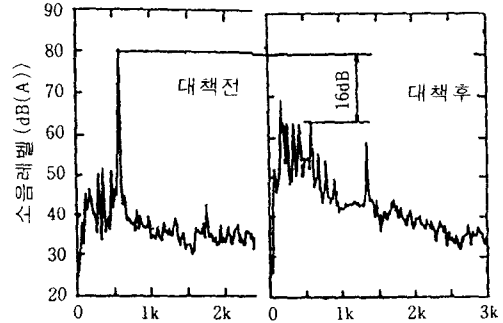


그림 12 대책전후의 송풍기축 소음 스펙트럼

축 소음이 고속운전시 보다 저속운전시 더 높았다. 그림 12에는 송풍기축에 있어서의 소음 스펙트럼을 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 580Hz 부근에 피크가 존재하고 있다. 기체측면의 진동 가속도 스펙트럼에서도 같은 결과가 얻어졌다. 여러 가지의 검토 결과 모터프레임의 고유진동수(570Hz)가 모터 로터의 slot수에 기인한 가진주파수 58Hz와 일치하여 공명한 것임을 알게 되었다. 현실적인 대책으로서 모터프레임 외측의 8개소에 角棒을 설치하여 프레임의 고유 진동수를 바꾸는 방법을 채용하였다. 대책 후의 결과를 그림 12에 표시한다. 그림에서 밝혀진 대로 580Hz에서 16dB의 소음저감이 이루어졌다.

이와 같이 송풍기에 생기는 현상에는 여러 가지가 있으나 카르만와음과의 공명현상이 송풍기 본체외에 열교환기 같은 장치에서도 발생하는 경우가 있다. 이 밖에도 흡입호름의 편류에 의한 소음 증가, 선회실속 소음 등이 있다.

2. 압축기에 발생하는 여러가지 현상

압축기는 유량을 줄여서 압력비를 올려가면 써어징 또는 선회실속 등의 비정상 현상이 발생한다. 어느 경우에도 익열에서의 실속에 기인한 유동의 불안정현상이다. 써어징은 축류방향으로의 유동의 맥동현상이며 관로를 포함하는 압축기 전체유로내에서 발생한다. 한편 선회실속은 주로 익열과 그 주변유로내에서 발생하고 그림 13에 보인 것과 같이 부분적으로 실속한 영역이 원주방향에 전파하는 현상이다. 후자에 대해서는 산업용 가스터빈

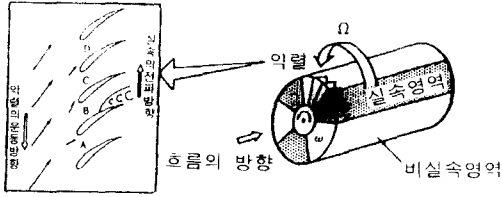


그림 13 선회실속현상

의 다단압축기의 기동도중의 저속영역에 있어서 발생하는 선회실속이 잘 알려져 있다. 써어징이나 선회실속에 관해서는 이전부터 실험 및 해석적인 연구가 행해져 왔다. 이러한 현상은 성능저하를 유도할 뿐 아니라 날개와 축 등에 과대한 진동을 일으키고 경우에 따라서는 날개의 파손을 일으킬 가능성이 있다. 압축기를 설계하는 경우 정격운전점에 있어서는 써어징이나 선회실속의 발생한계를 예측하고 발생마진을 충분히 확보할 필요가 있다. 또한 기동도중의 저속운전영역에서는 선회실속 발생시의 변동유속과 변동압력의 정량평가에 기초하여 날개진동을 예측하고 강도상 문제없음을 보증하여야 한다. 한편 압축기를 설계하는 때에 고려해야만 하는 유동에 기인한 현상으로서 써어징과 선회실속 외에도 동정익열간섭, 입구불균일유입, 카르만와, 플래터현상 등이 있다. 어느 경우에도 유동에 기인한 익과 익근 등의 구조물의 진동을 고려할 필요가 있는 현상이다.

2.1 써어징과 선회실속의 실측예와 그 특징

써어징이나 선회실속의 발생을 정확하게 예측하기 위해서는 비교할 수 있는 실측기가 있는 것이 바람직하다. 그러나 고 압력비의 다단압축기에 있어서의 실측 데이터의 발표예가 적다. 여기에서는 17단 축류압축기에서 실측된 써어징과 선회속도를 설명하고 이들의 몇가지 특징을 정리한다. 압축기의 압력비-유량특성과 A, B, C, D, E의 각 운전점에서 실측된 변동압력의 시각별파형을 그림 14에 나타낸다. 정격회전수에서는 압력이 높아 위험하므로 압축기 입구에서의 압력을 낮춘 감압운전시의 실측결과이다. 실속선상의 정격회전수의 50% 회전수(A점)에서는 써어징과 함께 선회실속이 발생한다. 선회실속의 셀(실속영역) 수는 1이며 전파속도는 압축기 회전수의 거의 반이다. 이 선회

실속은 압축기의 모든단에 발생한다. 이것은 써어징에 의해 유량이 감소할 때에 모든 익열에서 실속을 유발하기 때문으로 생각된다. 이러한 선회실속은 실속의 정도도 크고 통상 large stall 또는 full-span stall이라고 부른다. 기동라인상의 65%회전수(B)에서는 다수 셀을 접하는 선회실속이 발생한다. 주요한 셀수는 승속시가 4, 하속시가 3이며 발생최고 회전수가 하속시의 쪽이 승속시 보다도 높은 히스테리시스가 관측된다. 본선회실속은 압축기의 후단축의 익열에서의 초크에 의해 전단축의 익열에서 발생하는 것으로, 다단압축기의 특유의 것이다. 익실속의 정도는 large stall에 비해 작으며 통상 small stall 또는 part-span stall로 불려진다. 실속라인 부근의 70% 회전수(C점)에서는 선회실속의 크기가 급증한다. 본선회실속의 셀수는 변화의 전후에서 1이다. 실속라인상의 80%회전수(D점)에서는 선회실속의 셀수가 4에서1로 변화하며 이와 함께 선회실속에 의한 변동압력의 크기도 증가한다. C점 및 D점에서의 선회실속은 익에서의 실속의 정도가 급증하여 small stall이 large stall로 변화한 것으로도 생각된다. 이와 같은 large stall이 발생하면 유량이 급감하기 때문에 터어빈의 작용이 되지 않거나 가스터빈의 회전수가 상승하지 않을 가능성이 있다. 압축기의 설계에서는 이와 같은 사태를 피하기 위하여 small stall과 large stall의 발생 경계를 파악하고 large stall이 발생하지 않는 운전라인을 설정하는 것이 중요하다. 일반적으로는 입구안내익의 각도를 제어하여 유량을 조절한다거나 중간단으로 부터의 추기에 의해 large stall을 방지하는 것이 가능하다. 이것은 후단축의 익열에서의 초크상태를 완화하고 전단축의 익열에서의 영각을 되도록 작게 억제함으로써 실속의 크기를 작게 하는 것을 목적으로 한다. 실속라인100% 회전수(E점)에서는 단발의 써어징에 이어서 셀수 1의 선회실속이 발생한다. 전파속도는 압축기회전수의 거의 반이다. 이와 같은 併發현상은 써어징과 선회실속의 발생한계가 근접해 있는 것을 뒷받침 해주고 있다. 이상의 실측 결과로부터 다단축류압축기의 써어징과 선회실속의 특징을 정리하면 다음과 같다.

(1) 써어징과 선회실속의 병발할 가능성이 있다.

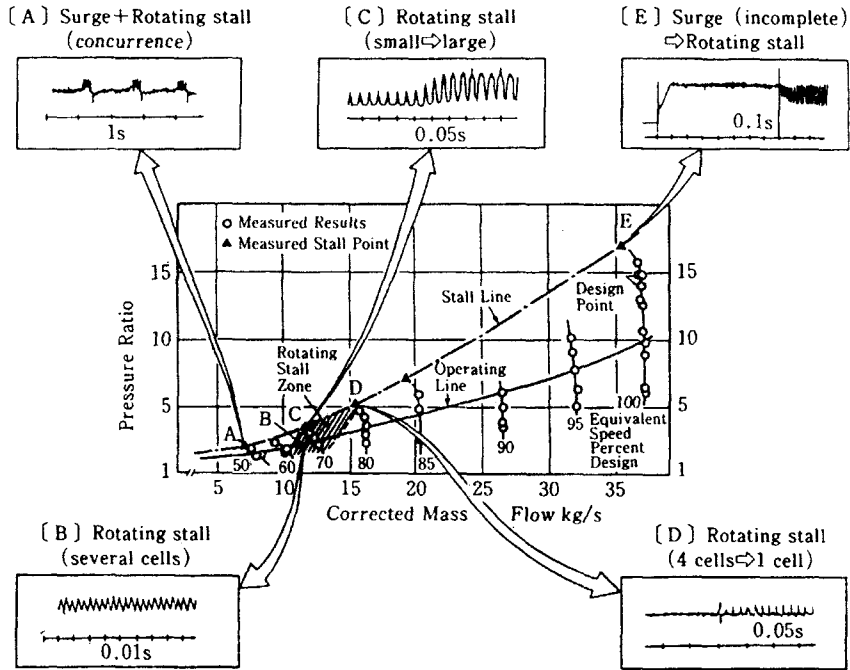


그림 14 17단 압축기의 압력비 - 유량특성 및 비정상현상

(2) 씨어징은 선회실속을 유발할 가능성이 있다.

(3) 선회실속은 그 셀수나 크기가 급격히 변화할 가능성이 있다.

씨어징과 선회실속은 함께 익의 실속에 기인하여 발생하는 현상이며 양자의 발생한계는 근접해 있다고 생각되기 때문에 이들간의 상호작용은 당연히 존재한다고 생각된다. 축류압축기의 설계에서는 씨어징과 선회실속의 양자를 동시에 평가할 수 있는 해석기법이 바람직하다. 특히 압축기 입구에서의 원주방향 불균일 흐름이나 익의 오손에 의한 성능열화가 발생한계에 미치는 영향, 압축기의 설계과라메터와 발생한계 및 발생시의 거동과의 정량적 관계의 파악 등이 실용상 필요하다.

2.2 씨어징과 선회실속의 해석 예

씨어징과 선회실속의 양방을 예측하기 위하여 적어도 축방향과 원주방향의 2차원의 압축성유동을 해석할 필요가 있는데 이들을 비교적 간단하게 수치적인 시뮬레이션하는 방법으로서 Moor 등이 제한한 집중정수 모델이 유효하다. 본 해석모델은 압축성의 효과를 익열부와 토출덕트로 막혀진

plenum에 집중화하여 그 내부에 있어서 단일변화를 가정한 압축성 공기용수철과 그 전후의 유체관성으로 부터 이루어진 진동계로서 취급한 것이다. 선회실속이 발생하는 익열부와 익열의 전후의 덕트에서는 축방향과 원주방향의 2차원의 비압축성 유동을, 그 밖의 덕트에서는 축방향의 1차원의 비압축성 흐름을 가정한다. 또 익열부의 유동에 관해서는 준정상적인 변화를 가정하고 압축기의 특성으로서 축류속도에 대한 압력상승이 기지인 액츄에이터·디스크로 치환한다. 같은 방법으로 토출밸브에 대해서도 축류속도에 대한 압력강하가 기지인 밸브특성을 갖는 액츄에이터·디스크로 치환한다. 이 분석모델에서는 유속 씨어징을 나타내는 원주방향에 균일한 성분(시간의 함수)과 선회실속을 나타내는 원주방향으로 변화하는 성분(시간과 각도의 함수)으로 분리된다. 원주방향으로 변화하는 속도포텐셜을 푸리에급수로 나타내고 각도변수의 이산화에는 갈라킨법을, 시간변수의 이산화에는 전진차분법을 이용한다. 다음에 이에 따른 해석예를 보인다. 그림 15는 기본 해석모델의 계산 예로서 B파라메터와 Φ_{co} (축류속도가 0

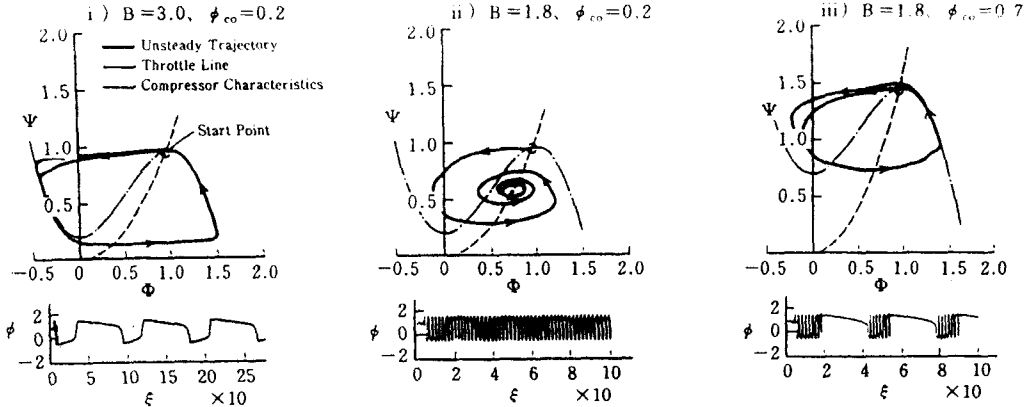


그림 15 압축기 파라미터와 비정상현상 패턴관계(대표예)

일 때의 압력상승 계수)를 파라미터로 한 경우 실속후에 발생하는 비정상현상이 어떻게 변화하는가를 표시한 것이다. 여기서 B파라미터는 다음 식으로 주어지고 압축성의 대소를 나타내고 있다.

$$B = \frac{U}{2a} \sqrt{\frac{V_p}{AcLc}} \quad (1)$$

여기서 U : 압축기 원주속도, a : 음속, Vp : plenum체적, Ac : 압축기면적, Lc : 압축기 유로길이이다.

그림 15의 상단에는 Ψ(압력계수) - Φ(유량계수) 선도상에서의 궤적을, 하단에는 변동유속 Φ의 시각별 파형을 표시하고 있다. 여기에서 ε는 압축기 축이 1 라디안 회전하는 시간으로 무차원화한 시간이다. 케이스 i)에서는 궤적은 실속점을 출발한 후에 Φ가 급격히 감소하고 부의 역류영역을 거쳐서 다시 Φ가 상승하여 출발점부근으로 되돌아오는 사이클을 반복한다. 시각별파형은 台形파가 반복하는 패턴이다. 이 케이스에서는 써어징이 발생한다. 케이스 i)에 있어서 Φco를 바꾸지 않고 B파라미터를 작게 한 것이 케이스ii)이다. 이 케이스에서는 궤적이 실속점을 출발한 후에 루프가 점점 줄어들어 최종적으로는 토출밸브 특성곡선상의 한 점의 주위에 작은 루프를 그린다. 시각별파형은 짧은 주기의 台形수이고 이 케이스에서는 선회실속이 발생한다. 케이스iii)은 케이스ii)에 있어서 B파라미터를 바꾸지 않고 Φco를 크게 한 것이다. Φco는 익열의 단수에 비례하므로 일단마다의 압력

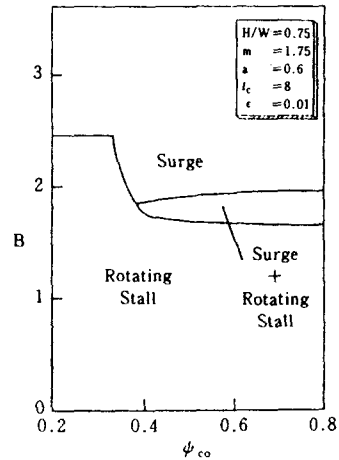


그림 16 압축기 파라미터와 비정상패턴관계

상승(부하)은 케이스iii)의 쪽이 케이스ii)보다 작은 경우에 해당한다. 이 때에 궤적은 Ψ가 Φo보다도 큰 영역에서 케이스i)보다 약간 작은 루프를 그리고 실속 하강시에는 압축기의 정상특성 곡선상을 따르지 않는다. 시각별파형은 주기적으로 큰 台形파에 짧은 주기의 台數波가 혼재하고 이 케이스에서는 써어징과 선회실속이 병발해 있음을 알 수 있다. 그림 16은 압축기의 파라미터와 유체불안정현상의 패턴 관계를 정리한 한 가지의 예를 표시하고 있다. 써어징과 선회실속의 발생한계는 B파라미터의 값에 의존하고 B파라미터가 크면 써어징이 발생하는 경향이 있고 작으면 선회실속이 발생하는 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 또한 Φco

의 값이 비교적 큰 경우 써어징과 선회실속발생영역의 중간에 양자가 병발하는 영역이 있다는 것을 알 수 있다. 이상에서 언급한 것과 같이 기본해석 모델에 의해 축류압축기의 써어징과 선회실속의 양방 발생한계의 예측이나 발생후의 유속변동의 정량평가 등을 포함한 기본적인 시뮬레이션이 가능하다. 게다가 압축성의 효과를 압축기 전체에 분포시키는 개량기법을 더하면 다단압축기로의 적용도 가능하다.

2.3 써어징과 선회실속시의 익진동

압축기의 선회실속의 발생현상에 관련한 유체역학관점의 검토는 많지만 선회실속시의 날개진동 발생의 원인에 관련한 보고는 적은 실정이다. 선회실속시의 유동변동에 수반하는 날개 진동에 축에 관해서는 유체의 감쇠력 작용 양력변동과 가진력작용에 대한 실험에 기초한 보고가 행해지고 있다. 통상 다단압축기에 있어서 선회실속의 셀수는 회전수가 낮은 범위에는 다수이지만 회전수가 증가함에 따라 감소한다. 후단날개열에서의 초크상태가 해소되면 선회실속은 소멸하지만 소멸직전의 셀수는 1인 경우가 많다. 선회실속에 의한 익가진진동수는 셀수 M과 익에 대한 셀의 전파속도 Ω 의 적 즉 이 곱의 정수배가 된다. 예를 들면 회전수 50rps에 있어서 셀수가 3, 전파속도비(셀의 선회속도/압축기의 회전속도)가 0.4인 경우 정익에 대한 가진진동수는 60Hz(=50×3×0.4), 동익에 대한 가진진동수는 90Hz(=50×3×0.6)가 된다. 익진동 설계에서는 선회실속에 의한 익가진진동수와 익고유진동수와의 일치에 의한 공진을 회피하는 것이 바람직하다. 한편 써어징의 진동수는 수 Hz이고 익고유진동수와의 일치에 의한 공진의 가능성은 없지만 가진력이 크므로 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 한 예로서 다단축류압축기에서 실측된 선회실속의 가진주파수와 익고유진동수와의 관계를 그림 17에 보인다.

익고유진동수는 선회실속에 의한 기본 가진진동수보다도 높게 공진을 회피하는 것을 알 수 있다. 한편 기본 가진진동수의 2배와 일치하는 회전수가 존재하지만 이 진동수의 가진력은 기본진동수의 가진력보다도 매우 작으며 그 회전수에서 유

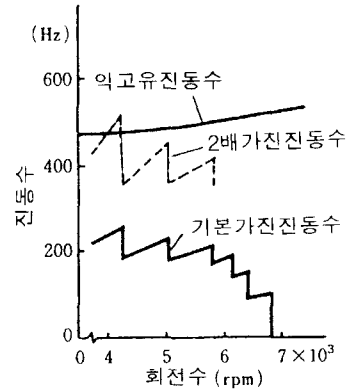


그림 17 선회실속 가진진동수와 익고유진동수와의 관계

지되지 않는 한 문제는 없다. 근래에 압축기는 고효율화와 고용량화의 필요에 따라서 얇은 날개를 채택하고 있으며 익 고유진동수의 저하에 의하여 기본가진진동수에서 공진할 가능성이 높다. 선회실속의 셀수나 전파속도의 고정도예측이 필요하게 된다. 어쨌든 선회실속시에 있어서 상기와 같은 공진시 이외에도 익진동이 크게 되는 경우가 있다. 그림 18은 3단 실험 압축기에서의 써어징실험을 행했을 때의 실측된 익진동왜와 벽면에서의 변동압력파형을 표시한 것이다. 하반부의 파형은 상파형의 시간축을 확대한 것이다. 써어징 발생영역에서의 운전이므로 써어징 특유의 주기적 맥동을 동반하는 변동압력이 나타난다. 이 주기는 약 0.6s이다. 한편 맥동시의 변동압력의 파형은 몇 개의 날카로운 피크(peak)로 구성된다. 하반부의 파형으로부터 이 주기는 2.3회전 펄스에 해당한다. 실속 상태에서의 운전인 점이나 이 주기로 부터 판단해보면 1개의 실속 셀이 회전수의 약 0.43의 속도로 전파하는 선회실속이 발생되었다고 생각된다. 즉, 이 실측 예에서는 써어징과 함께 선회실속이 발생한 것을 알 수 있다. 그림 18의 상반부 측에 나타난 각파형으로부터 선회실속에 수반하여 펄스상의 압력변동이 발생하고 이에 따른 익진동이 커지게 되는 것을 알 수 있다. 시간축을 확대해 파형으로 알 수 있는 것은 이 펄스상의 압력파형이 나아가 몇 개의 펄스상의 변동압력으로부터 이루어진 점이다. 또한 실속영역의 통과에 따라 날개가 여진력을 받아 그 후 자유진동상태에 가까운 진동파형이

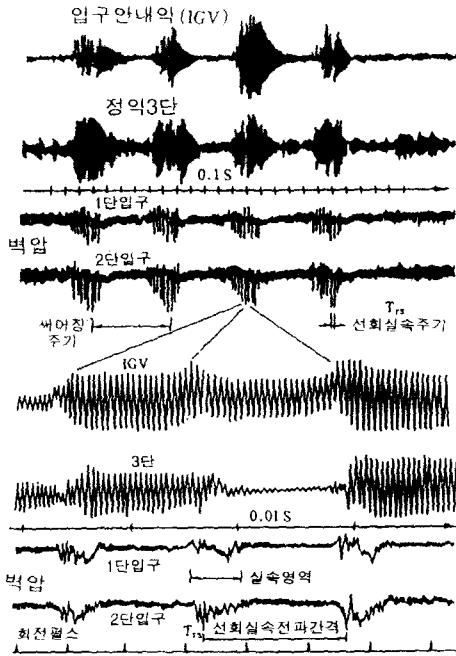


그림 18 3단압축기에서의 비정상현상 발생시의 익진동과 변동압력

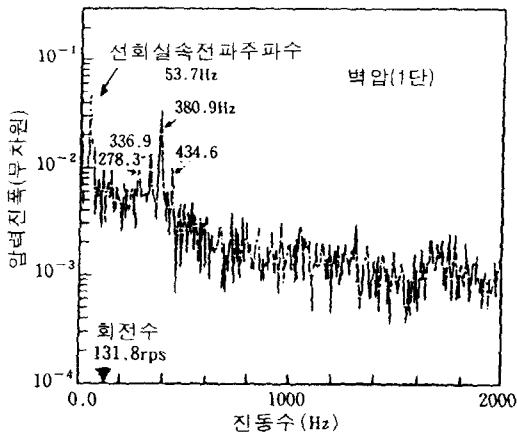


그림 19 3단압축기에서의 선회실속발생시의 변동압력 스펙트럼

되는 것을 알 수 있다. 그림 19는 변동압력을 스펙트럼분석한 결과이다. 회전수의 약 40%의 전과속도를 가진 선회실속 셀에 의한 가진진동수 53.7Hz와 380.9Hz의 성분이 탁월한 것을 알 수 있다. 이외에도 380.9Hz를 중심으로 해서 거의 실속셀의 전과진동수인 53.7Hz 피치의 스펙트럼도 존재하고 이들 각 성분은 회전수의 증가에 비례해서 진동수가 증가하는 특징이 있음을 실측으로부터 알 수 있다. 따라서 380.9Hz를 중심으로 하는 고주파의 변동성분이 익의 고유진동수에 접근하면 그림 18에 표시한 것처럼 큰 익진동 발생현상이 된다고 추정할 수가 있다. 다시 말하면 선회실속의 셀내에서 발생하는 몇 개의 펄스상의 유동변동에 따라 익진동이 여기되고 실속셀이 지나간 비실속역에서 자유감쇄진동이 되어 이들이 반복되는 현상을 나타낸다. 따라서 선회실속시의 익진동은 변동압력의 고주파수성분도 무시할 수 없다는 것을 의미한다.

최근에는 관련연구로서, CFD를 이용하여 실속의 메카니즘의 해명을 꾀하고 있으며, 종래의 추기나 케이싱 트리트먼트 등의 수동적인 방지방법으로부터 능동적인 제어를 이용한 방법도 행해지고 있다. 한편 새어질과 선회실속 등의 불안정현상 이외에도 플래터링을 포함한 유체와 구조물과의 연성진동 등을 포함한 여러 연구과제가 남아 있다.

후 기

이 해설은 일본 터어보기계협회에서 발행하는 "터어보기계" 96년 5월호에서 발췌하여 정리한 것이며 상세한 참고문헌은 원본을 참고하도록 한다. 그리고 일어번역에 도움을 준 한국해양대학교 이영호 교수에게 사의를 표한다.