

원심압축기의 개발과정 및 설계개념

오종식*

1. 머리말

실제 산업현장이나 해당 전문업체에서 원심압축기(centrifugal compressor)를 새로이 개발하는데 필요한 전체의 과정을 소개함으로써, 경험이 없는 신규업체에게는 개발계획을 세우는데, 그리고 실전경험이 부족한 일부 연구소나 학계에게는 연구방향을 정립하는데 도움을 주고자 한다. 여기서의 “개발”이란 Prototype에 대한 설계와 시제작, 그리고 시험에 이르는 일련의 전체과정을 뜻한다. Fig. 1은 이러한 개발과정을 도식화하여 나타낸 그림으로서, 전체과정이 순차적으로 한번에 완료되는 것이 아니라 단계별로 국소적 혹은 전체적인 수많은 반복과정이 수반된다는 점에 유의해야 한다. 본 내용은 원심압축기에 초점을 맞추어 있으나 거의 대부분은 축류압축기나 축류/구심터빈, 축류/원심송풍기 및 펌프 등의 일반적인 터보기계와 첨단기계인 가스터빈의 경우에도 해당된다.

2. 시스템 설계(System Design)

시스템 설계는 크게 다음의 3가지 단계로 이루어진다.

- 설계점(Design Point) 해석
- 탈설계점(Off-design Point) 해석
- 천이(Transient) 해석

2.1 설계점 해석

원심압축기는 자체가 주로 하나의 단위기계로서 이용되는 경우(예 : 터보압축기, 터보냉동기 등)와 작은 구성품으로 귀속되어 있는 경우(예 : 가스터빈, 터보차저 등)가 있는데, 어느 경우에서나 전체 시스템에 대한 설계와 설계점 성능해석을 통해 압축기 자체에 대한

설계사양을 도출해야 한다. 성능해석은 전체 시스템을 구성하는 각 구성품별로 열역학적인 1차원 모델링을 취하고 서로 연결함으로써 유기적인 해석이 가능하게 한다. 시스템 설계결과로부터 압축기 설계자가 우선 필요로 하는 설계사양으로는 다음의 3가지가 있다.

- 압축비(total-to-total 혹은 total-to-static)
- 단열효율(total-to-total 혹은 total-to-static)
- 유량(질량 혹은 체적유량)

여기서 압축비와 단열효율 정의를 total-to-total 혹은 total-to-static 중의 어느 하나로 정할 것인가는 시스템 설계자가 주어진 압축기 출구부의 특성을 파악하여 정해야 한다. 대개 가스터빈의 경우 total 조건을, 터보차저의 경우 static 조건을 적용한다. 필자가 과거에 설계 의뢰를 받을 때 효율에 대한 사양이 없어서 되물어본 적이 있다. 답변하길 “효율값은 높으면 높을수록 좋다”이었는데, 그 순간 필자는 우리나라의 전문인력에게 터보기계 시스템에 대한 이해와 교육이 절실히 필요하다는 것을 느낀 적이 있다. 위의 3가지 사양에 대한 특정값이 만족되지 않으면 해당 시스템은 당초 의도했던 성능으로 매칭(matching)되지 않는다는 점을 명심해야 한다.

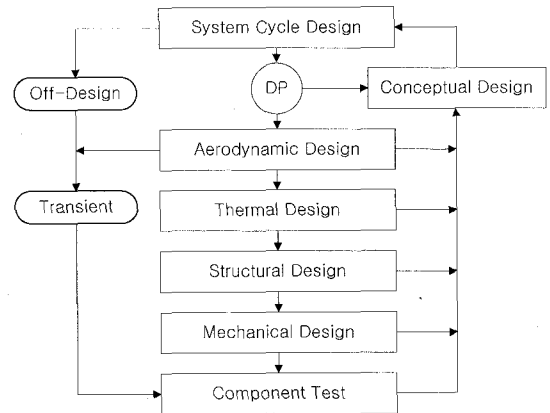


Fig. 1 Development Procedure

* 한국기계연구원 유체기계그룹 선임연구원
E-mail : ojs@mailgw.kimm.re.kr

압축기 공력설계를 위해서는 위의 3가지 설계사양 이외에 다음에 대한 사양이 추가로 필요하다.

- 회전수
- 입구 허브(hub)직경

회전수는 공력설계자가 주어진 단일효율을 만족시킬 수 있는 범위내에서 1차적으로 제시한다. 이는 압축기가 달성할 수 있는 효율값이 회전수와 관련되어 있는 비속도(specific speed)와 관계되어 있기 때문이다. 그러나 공력설계자가 제시한 회전수값은 후에 진행될 열설계와 구조설계 과정에서 적절히 수정되어야 한다. 만일 가스터빈이나 터보차저와 같이 압축기 축을 터빈이 공유하는 경우에는 터빈의 공력설계자가 원하는 회전수와 다를 수 있기 때문에 열/구조설계 단계로 넘어가기 전에 서로간에 타협을 해야 한다. 입구 허브직경 역시 우선은 공력설계자가 1차적으로 가정하여 시작하는데 나중의 시행착오를 줄이기 위해서는 비슷한 종류의 타제품(해외제품) 도면이나 스케치를 통해 참고하여 결정한다. 이는 후에 진행될 구조설계시 로터진동해석과 응력해석의 결과를 통해 적절히 수정될 수도 있다. Fig. 2는 산업용 3단 터보압축기에 대한 시스템 설계

결과의 한 예를 보여주고 있다.

2.2 탈설계점 해석

탈설계점 해석이란 설계점 매칭점이 아닌 다른 점, 즉 부분부하(Part Load)운전시 시스템 성능이 어떻게 변화하는가를 예측하는 일이다. 한 예로서, 터보압축기나 터보냉동기의 경우에는 IGV(Inlet Guide Vane)의 개도(Opening Angle)변화에 따라, 그리고 가스터빈이나 터보차저의 경우에는 회전수가 변화함에 따라 성능변화를 예측한다. 또한 입구조건(온도와 습도)의 변화에 따른 성능특성도 주요 관심대상이 된다. 이를 위해서는 시스템을 구성하는 각 구성품의 성능곡선도가 미리 준비되어 시스템 해석자에게 전달되어야 한다. 압축기의 경우에는 잘 알려진 유량-압력-효율-동력 간의 특성곡선이 이에 해당하며, 이는 1차원 성능해석법(Meanline Performance Analysis)을 통해 제공된다.

2.3 천이해석

천이해석은 시스템의 시동과 정지시 각 구성품이 서로 매칭되는 운전점의 경로를 설계하고 특성을 파악하는 일이다. 이는 모터로 구동되는 대개의 단순한 기계인 경우에는 큰 어려움이 없으나 가스터빈이나 터보차저와 같은 경우에는 압축기의 surge margin을 확보하면서 시동 및 정지요구조건을 만족시키는 세심한 해석이 요구된다.

3. 개념설계(Conceptual Design)

개념설계란 설계사양을 최종적으로 확정하기까지 소요되는 일련의 단순화된 개발설계과정이라고 정의할 수 있다. 앞서 2.1절에서 시스템 설계자가 1차로 제시한 설계사양은 각 구성품 설계자(압축기(- 공력/구조/상세), 모터, 증속기어, 터빈, 연소기 등)의 의견이 아직 반영된 것이 아니기에 이들로부터 예비검토(시스템에 대한 대략적인 layout 작업까지 진행)를 받아 수정해야 한다. 가스터빈의 개발인 경우에는 보통 10-20회 정도의 반복과정을 통해 설계사양이 최종적으로 확정되기 때문에, 단시간내에 반복과정을 충분히 갖기 위해서는 각 구성품별로 단순화된 설계방법을 미리 확보해야 한다. 압축기의 경우에는 1차원 설계 및 성능해석(Meanline Design & Analysis)이 이에 해당한다.

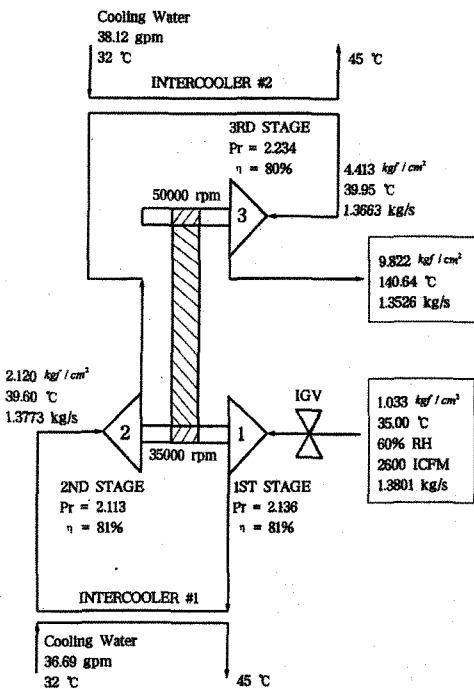


Fig. 2 System Design of Turbocompressor

4. 공력설계(Aerodynamic Design)

압축기의 공력설계는 다음의 5가지 단계로 구분된다.

- 1차원 설계 및 성능해석
- 임펠러의 3차원 형상설계
- 디퓨저의 2차원 형상설계
- 압축기 Layout 설계(기타 요소부 설계)
- 임펠러의 3차원 CFD해석

4.1 1차원 설계 및 성능해석

1차원 설계 및 성능해석은 압축기 설계시 가장 기본적이면서도 가장 중요한 단계이기도 하다. 압축기를 구성하는 모든 요소(예 : IGV, 임펠러, 디퓨저, 스크롤 등)에 대해 1차원적인 열역학/유체역학적 모델링을 취하고 경험적인 손실모델들을 적용하여 실제에 근접한 성능예측이 가능하게 한다. 주어진 설계사양에 대해 성능해석의 역과정을 이용해 설계방법으로 변환한 후 1차원 설계를 수행한다. 다시 성능해석 모드로 바꾸어 설계점에서의 성능을 예측하게 되며 그 결과를 주어진 설계사양과 비교하여 만족할 때까지 반복계산한다. 설계점 뿐만 아니라 탈설계점 예측 또한 정확성과 신속성이 요구되며 압축기 개발과정의 효율성을 좌우하는

중요한 작업이다. 탈설계점 해석을 통해 얻게 되는 압축기의 성능곡선도(Fig. 3 참조)map은 다시 싸이클 설계자에게 보내져서 싸이클의 탈설계점해석과 천이해석이 가능하게 해주어야 하고 이로부터 열/구조/상세설계시에 필요한 입력정보를 제공하는데에 이용된다. 따라서 보다 정확하고 신뢰성 높은 성능예측이 필수적이어서 이를 위해서는 임펠러와 디퓨저, 및 기타 요소부에 대한 성능 모델링의 개선작업이 꾸준히 진행되어야 한다.

4.2 임펠러의 3차원 형상설계

임펠러의 3차원 형상설계는 1차원 설계결과로부터 얻은 임펠러의 입출구 정보를 이용해 수행하는 3차원 블레이드 CAD작업이다. 그러나 설계된 형상의 적합성을 판단하기 위해서는 유동해석 과정이 필요하게 되고 수많은 시행착오를 통해 반복적인 설계가 단시간내에 이루어져야 하기 때문에 매우 단순화된 유동해석법이

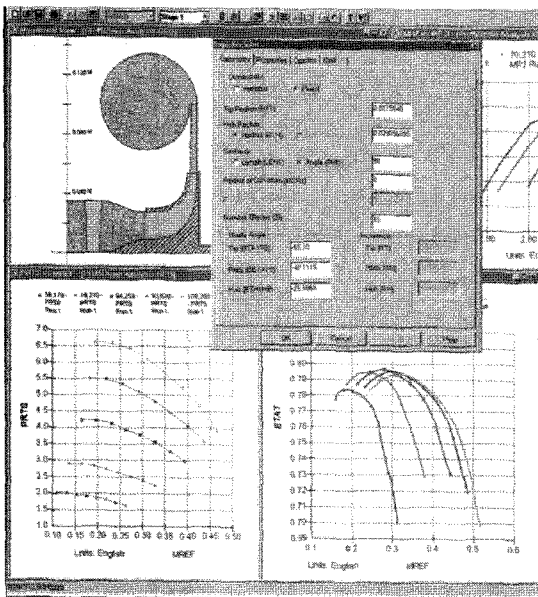


Fig. 3 1차원 설계/해석(CETI사의 COMPAL)

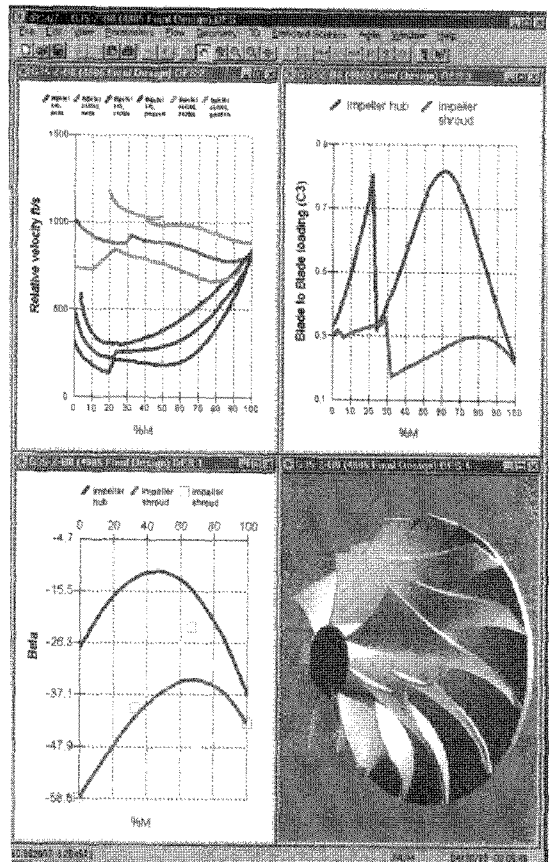


Fig. 4 임펠러의 3차원 형상설계(CCAD)

요구된다. 이를 보통 Rapid Loading Check 혹은 Approximate Loading Analysis라고 부르는데 자오면(Meridional Plane) 방향으로는 유선곡률법(Streamline Curvature Method)을, 그리고 B-B면(Blade-to-Blade)에서는 단순화된 공력하중 계산법을 이용한다. 최근의 상용프로그램(CETI사의 CCAD) 경우에는 버튼을 누르는 순간 유동해석결과가 나타나 설계시간을 획기적으로 단축할 수 있지만 그 정확성과 신뢰도는 매우 낮아 후에 진행되는 3차원 압축성 난류 CFD 결과와 많은 차이를 보이는 단점이 있다.

4.3 디퓨저 및 기타부 설계

디퓨저는 고효율 압축기를 위해 베인디퓨저(Vaned Diffuser)를 채택하는 것이 최근의 필연적인 경향이다. 과거에는 베인의 수가 많은 High Solidity 베인을 채택하였으나 최근에는 Low Solidity 베인을 채택하여 고효율 및 양호한 surge margin을 동시에 확보하려는 경향이 증가하고 있다. 가공의 편리성을 위해 파이프(Pipe) 디퓨저를 채택하는 것도 좋은 선택일 수 있으나 설계경험자료가 공개되지 않은 어려움이 있다.

출구부가 스크롤(Scroll/Volute)인 경우 1차원 설계 단계에서 이미 내부형상에 대한 기본정보가 정해지며, 가스터빈인 경우에는 90도 곡관과 연소기 입구의 swirl을 제거하는 축류안내깃(AGV)에 대한 형상설계가 필요하다. 축류안내깃의 형상설계는 보통 축류압축기의 정익(Stator) 설계방법을 응용한다. 입구에 안내깃(IGV)이 있는 경우에는 안내깃에 대한 형상설계 또한 필요하다.

4.4 임펠러의 3차원 CFD해석

3차원 압축성 난류 유동해석법을 이용해 설계결과를 최종 점검하는데 보통 가장 중요한 부분인 임펠러에 대한 CFD만을 수행한다. 가장 우선적인 목적은 1차원 설계 및 해석단계에서 예측하였던 임펠러의 성능을 충분히 확보하였는가에 있다. 즉, 임펠러의 직접적인 성능 변수(압축비와 단열효율)와 디퓨저 성능에 영향을 주는 변수(출구유속과 방향)등을 확인해야 한다. 다음으로는 임펠러의 3차원 형상설계시 얻었던 공력하중분포와 여기서의 공력하중분포를 비교하여 차이가 클 경우 재설계에 반영해야 한다. 최근에는 임펠러와 디퓨저간의 상호작용을 고려한 CFD 결과가 발표되고 있는 추세여서 보다 정확한 모델링이 가능할 전망이다. 또한 사용하기 편리한 상용프로그램의 개발과 보급이 활발해

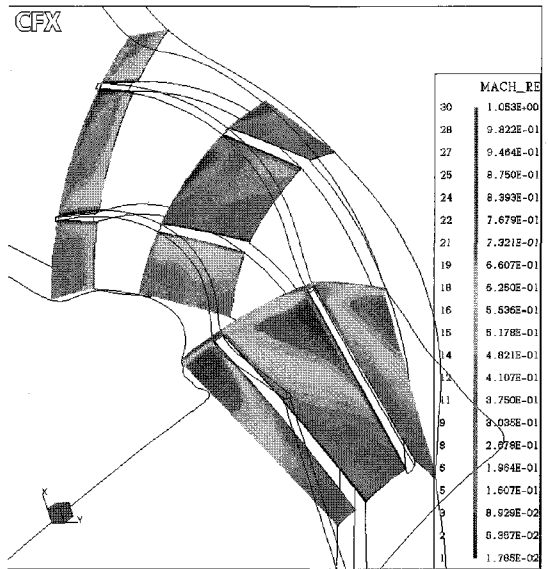


Fig. 5 3차원 압축성 난류 CFD(CFX-TASCFlow)

지면서 기술적으로 취약한 중소기업에서도 활용 가능성이 높아지고 있다.

일반적으로 관련 CFD 방법은 크게 2가지 부류로 구분되는데 현재 주로 쓰이는 상용프로그램은 다음과 같다.

- 시간진행법(Time Marching Method)
BTOB3D(Dawes), LOSS3D36(Denton), FineTurbo 외
- 압력보정법(Pressure Correction Method)
FLUENT, CFX-TASCFlow, STAR-CD 외

5. 열설계(Thermal Design)

열설계는 크게 임펠러의 열전달 해석과 이차유로(Secondary Flow) 해석으로 구분된다. 열전달 해석의 대부분은 구조해석시 필요한 열응력 계산을 위해 고온 부품(임펠러 디스크) 전체에 대한 열해석을 수행하여 온도분포를 얻는 일이다. 이를 위해서는 공력설계자로부터 임펠러 내부 유동해석으로부터 구한 압력과 온도 의 분포를 미리 받아야 하며, 또한 적당한 모델링을 통해 열전달계수를 구해 열해석을 위한 경계조건을 확보해야 한다. 이러한 열응력은 특히 천이상태에서 더욱 심각하기 때문에 정상상태뿐만 아니라 천이상태에서의 열해석도 무엇보다도 중요하다고 볼 수 있다.

이차유로란 회전하는 임펠러 디스크 후면과 정지된

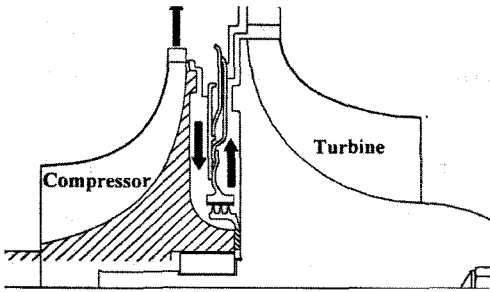


Fig. 6 Secondary Flow Example

외벽사이에 필수적으로 존재하는 작은 간극의 공동(cavity) 유로를 뜻한다. 이는 단순한 누설유동이라기 보다는 air seal에서의 가압공기로 이용되거나 가스터빈인 경우에는 터빈부 냉각공기로 사용되기 때문에 간과해서는 안 된다. 각단별로 종합적인 이차유로를 설계하고 이에 대해 hydro-dynamic modeling을 통해 공력설계자로부터 받은 경계조건을 이용해 내부 지점별로 온도와 압력 그리고 유량등을 구한다. 이로부터 로터 조립체가 받는 축하중(축방향 추력 : Thrust)을 계산할 수 있고 따라서 적절한 축하중과 seal의 형상, 그리고 추출공기량 및 간극의 크기 등을 반복적으로 해석함으로써 최종 설계를 확정하게 된다.

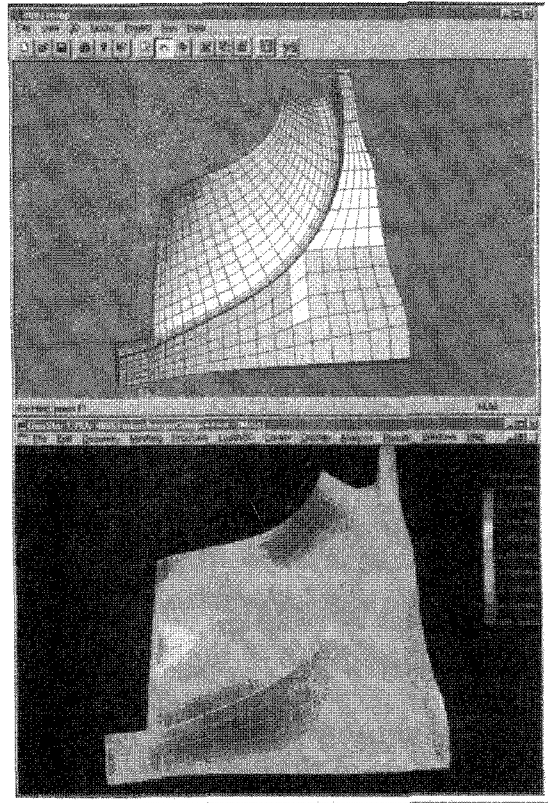


Fig. 7 임펠러 디스크의 3D 응력해석결과

6. 구조설계(Structural Design)

구조설계 단계는 크게 다음의 4가지로 세분화된다.

- 응력해석(Stress Analysis)
- 블레이드 진동해석(Aeromechanics)
- 수명해석(Life Analysis)
- 로터 동특성해석(Rotor Dynamics)

6.1 응력해석

원심압축기의 구성요소(특히, 임펠러)에 대한 응력 해석을 통해 (1) 선정된 재료와 회전수의 적합성을 판단하는 일, (2) 요소부품의 3차원 형상설계(임펠러의 디스크 형상)를 마무리하는 일, (3) Hot-to-Cold 변환 작업을 통한 상세설계 정보를 얻는 것 등을 목적으로 한다. 선형탄성이라는 가정하에서 압축유체로부터 받는 공력(Aerodynamic Force)과 온도상승으로 발생하는 열응력(Thermal Stress), 그리고 회전함으로써 받게되는 원심력(Centrifugal Force)등의 3가지 외력에

의해 발생하는 응력과 변형량을 예측하는데, 앞서 언급한 개념설계 단계에서 이용하는 2차원 해석법과 본 설계에서 적용하는 3차원 해석법으로 구성된다.

임펠러의 경우, 2차원 해석법은 디스크 허브부위에 대해서는 축대칭 가정을 적용하고 블레이드에 대해서는 평면응력을 가정한 요소 혹은 shell 요소를 적용하여 equivalent density와 shell 요소두께를 구하여 간단화하는 방법이다. 보통 유동방향으로 5-7등분하여 구하게 되며 이는 개념설계 단계에서 이용하는 데에 목적이 있기 때문에 모델링의 편이성과 시간단축 등이 요구된다. 3차원 해석법은 임펠러 블레이드의 주기성을 이용해 하나의 주기영역에 대해 3차원 유한요소법(예 : ABAQUS, COSMOS, ANSYS 등)을 이용하여 해석하는 방법으로서 비교적 상세하고 정확한 해석결과를 주지만 준비과정(Pre-process)이 매우 복잡하고 시간이 오래 걸리는 어려움이 있다.

선정된 재료의 적합성은 예측된 최대응력수준이 재료의 항복강도에 대해 일관적인 여유(margin)를 갖고

있는가로 판단하는데, 설계여유의 크기는 주어진 수명 조건에 따라 달라진다. 또한 최대응력집중은 보통 허브의 bore 부위에서 나타나는데, burst를 방지하기 위해서는 최대후프응력값에 대한 설계여유를 조절해야 한다. 만족할만한 응력집중 분포를 얻을 때까지 이러한 해석을 반복하여 요소부품의 3차원 형상(임펠러 디스크)을 재설계한다. 이 과정에서 필요하다면 공력설계 자료부터 제시되었던 회전수를 수정하기도 한다.

Hot-to-Cold 변환이란, 임펠러의 경우, 공력설계결과(Hot 상태=정상회전상태)로부터 정지상태(Cold 상태)에서의 블레이드와 허브면의 형상을 변형량 결과를 통해 역으로 예측하는 과정을 말한다. 열응력과 원심력 등에 의해 Hot 상태와 Cold 상태에서의 형상좌표는 많은 차이를 갖고 있으며, 특히 unshrouded 임펠러의 경우 공력설계자가 원하는 틱간극(Tip Clearance)을 정상회전시에 확보하기 위해서는 이에 상응하는 cold clearance 값을 예측하여 상세설계시 제작도면에 반영해야 한다.

6.2 블레이드 진동해석

임펠러 블레이드의 피로수명은 LCF(Low Cycle Fatigue)뿐만 아니라 주로 HCF(High Cycle Fatigue)에 의한 블레이드 공진현상에 의해 좌우되기 때문에, 블레이드 자체에 대한 진동해석이 필요하다. 여기에 작용하는 외력으로는 원심력외에 압축유체의 압력변동에 따른 영향, 그리고 입구요소기계(예 : IGV)의 간섭효과 등이 외부 가진요인에 포함되어야 하기 때문에 기초적인 공탄성 해석의 하나라고 볼 수 있다. 주로 후류(wake)에 의한 강제진동과 블레이드 flutter에 의한 자가가진(Self Excitation)에 의한 진동해석을 수행

하며 Campbell 선도에서 블레이드의 자유진동해석으로부터 얻은 고유진동수중 최저 고유진동수(제1차 모드)가 회전수에 대해 얼마만큼의 설계여유를 갖는가에 대해 설계 적합성을 판단한다. 보통 HCF margin으로 4배 이상의 설계기준을 사용하지만 이러한 값들은 해당업체나 연구소등에서 개발특성에 맞는 고유 설계자료로서 일정하지 않다. 심각한 경우에는 IGV 베인이나 디퓨저 베인의 개수를 조절함으로써 문제를 해결할 수 있다.

6.3 수명해석

임펠러의 수명은 보통 피로에 의한 수명과 burst에 의한 수명으로 구분된다. 피로수명은 다시 디스크(허브) 피로수명과 블레이드 피로수명으로 나눌 수 있는데, 블레이드 피로수명은 앞서 6.2절에서 언급한 바와 같으며, 디스크 피로수명은 주로 최대응력수준과 반복사이클 수에 의해 결정되는 LCF 특성에 좌우된다. 저주기(Low Cycle) 특성은 주로 기계의 시동과 정지 과정에 의해 이루어지는데 이를 위해서는 천이(Transient) 응력해석이 필요하다. 이러한 피로수명은 보통 Goodman 선도나 Coffin 방정식을 이용하여 주어진 응력과 변형을 범위에 대한 피로수명을 예측하게 된다. burst에 의한 수명은 앞서 언급한 바와 같이 응력해석 과정을 통해 예측할 수 있다. 이 부분은 학계나 연구소에서는 별로 관심이 없을 수 있으나 해당업체에서는 개발제품의 신뢰도(Reliability)와 밀접한 관련이 있기 때문에 초유의 관심을 갖게 된다.

6.4 로터 동특성해석

회전체(임펠러와 로터류)와 회전축, 그리고 이를 지지하는 베어링과 damper 등을 합하여 로터 조립체(Rotor Assembly)라고 하는데, 회전속도와 whirling 속도가 일치하는 경우 임계속도(Critical Speed)가 발생하여 공진현상이 발생한다. 이 경우 과도한 변형으로 인해 로터조립체와 베어링의 파손이 일어나게 되기 때문에, 적절한 안전 임계속도를 갖도록 조립체의 형상과 재료, 그리고 베어링의 강성 등을 선정해야 한다. 또한 조립체가 작동유체의 공력에 의해 받게 되는 축방향 추력을 예측하여 베어링의 피로수명을 계산하게 되며 이를 근거로 가장 적절한 베어링을 선정하게 된다.

주요 해석내용은 임계속도해석과 진동모드해석, 그리고 불균형응답(Unbalance Response)으로 나눌 수

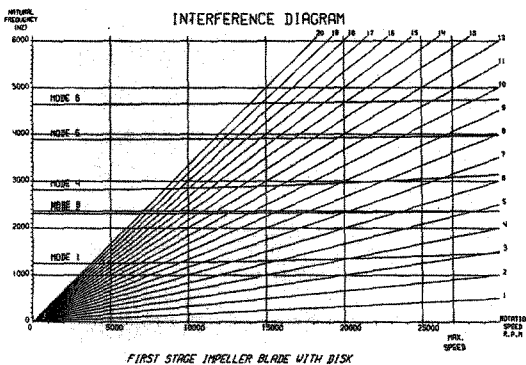


Fig. 8 블레이드 진동 Campbell 선도

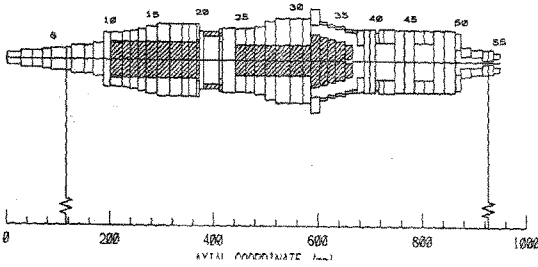


Fig. 9 로터조립체의 모델링

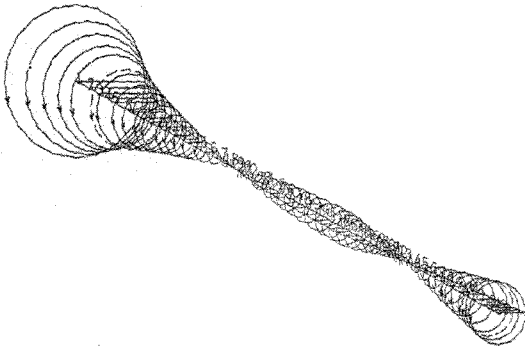


Fig. 10 Bending Mode Example

있다. 임펠러의 회전수가 임계속도영역에서 충분한 여유를 갖도록 베어링의 탄성계수를 조절(예 : Squirrel Cage)해야 하고 damping(예 : Squeeze Film Damper)을 통해 임계속도 부근에서의 불균형응답을 감소시켜야 한다. 또한 시동후부터 정상회전수 사이에 bending 모드가 존재하지 않도록 설계하는 것이 중요한데, 이렇게 bending 모드가 존재하는 super-critical rotor를 성공적으로 설계회전수까지 도달시키는 일은 최고의 기술력 없이는 거의 불가능하다. 로터 조립체에 대한 balancing을 한 후에도 항상 어느 정도의 질량불균형량이 잔존하기 때문에 이에 따르는 dynamic force가 작용하게 된다. 대개 단위 질량당 0.3~0.5 g-mm/kg 수준의 정확도 이내로 balancing을 보아야 하며, 그 후에는 balancing으로 해결하지 못한 잔존 질량불균형량을 여러 요인(디스크의 편심, seal, blade, aero-coupled stiffness/damping 등)으로부터 가정하여 사전에 불균형응답 해석을 수행하여야 한다.

7. 세부설계(Subsystem Design)

세부설계는 다음과 같은 내용으로 구성되며 자세한 내용은 지면관계상 언급하지 않기로 한다.

- 윤활(Lubrication) 설계
- 제어(Control) 설계

8. 상세설계(Mechanical Design)

상세설계란 각 구성품의 기본설계 결과를 바탕으로 최종 제작도면이 나오기까지 수행되는 일련의 기계제부설계를 뜻한다. 주요 내용은 제작성과 조립/분해성, 그리고 유지보수 용이성 등에 초점을 두어 전체 조립도(Layout) 및 각 부품도 작성을 위한 기계설계를 수행한다. 이 과정은 아직까지는 공개되어 있는 표준이 있지 않고 기존의 개발업체별로 고유의 설계기준(Design Practice)을 정립하여 고도의 기술과 수십년간의 경험을 지닌 전문가들이 수행한다.

9. 구성품시험(Component Test)

압축기의 구성품시험은 국내에서도 학계와 연구소 등을 중심으로 과거부터 주요 연구대상이 되어왔으나 대부분은 내부유동의 국부적인 현상파악에 집중된 것이 사실이다. 물론, 기초적인 원인규명과 현상파악 등이 궁극적으로는 설계방법의 개선에 크게 이바지하는 것은 자명한 사실이다. 그러나 여기서 초점을 두고 있는 개발과정의 관점에서 본다면 압축기 시험의 1차적인 목표는 무엇보다도 앞서 4.1절에서 언급한 성능곡선도의 예측치를 실제로 검증하는 일이다. 일반적으로 Fig. 11과 같이 예측치와 차이가 있는 결과를 얻게 되고 따라서 이러한 시험곡선도는 다시 싸이클 설계자에게 보내져서 당초에 예상했던 탈설계 성능과 과도상태 성능을 수정해야 하며 이는 공력/열/구조/상세설계쪽에도 영향을 주어 수정설계 작업을 해야 한다.

시험설비는 전기모터와 증속기어를 이용하는 방법과 외부가압공기와 구동터빈을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자가 가장 안정적인 설비이지만 소비동력과 요구회전수가 높을 경우에는 증속기어의 설계와 제작이 어려운 단점이 있다. 후자의 경우(Fig. 12)에는 구동시스템의 구조적 안정성만 보장된다면 요구회전수의 크기에 크게 제약받지는 않지만 일정한 회전수로 제어하는 일이 어렵고 구동동력이 부족한 경우에는 전기히터나 외부의 연소기 등으로 가압공기의 온도를 높여주어야 하는 어려움이 있다. 연소기를 사용할 경우에는 별도의 신뢰성 있는 연소제어 시스템이 확보되어야만 안정적인 설비를 보장할 수 있다.

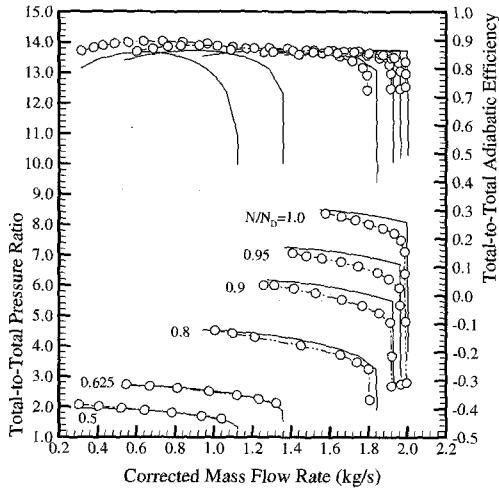


Fig. 11(a) 압축기 성능곡선도(예1)

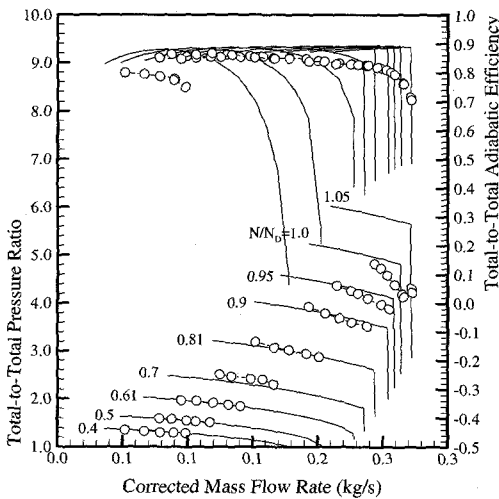


Fig. 11(b) 압축기 성능곡선도(예2)

측정변수로는 우선적으로는 압축기 최종 출구부(성능 곡선도를 예측할 때 적용한 출구부)에서의 압력과 온도를 측정해야 하고, 입구에서는 대기압과 대기온도, 그리고 습도를 측정하여 후에 입구보정작업(Inlet Correction)을 해주어야 한다. total-to-total 조건인 경우에는 출구부에서 전압(total pressure)을 측정해야 하며 이는 적절한 rake를 설계/제작하여 사용한다. 가장 중요하면서도 측정하기에 까다로운 변수가 유량이다. 보통의 상용 유량계(오리피스, V-cone형, 터빈형 등)만으로는 만족할만한 수준의 정확도를 얻기 어려우며, 가장 추천할만한 방법은 상용유량계 외에 입구 전방부에 stilling

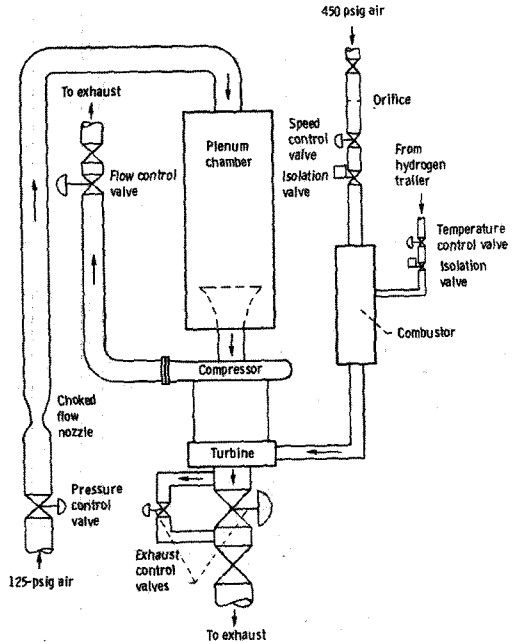


Fig. 12 Test Rig with Turbine Drive

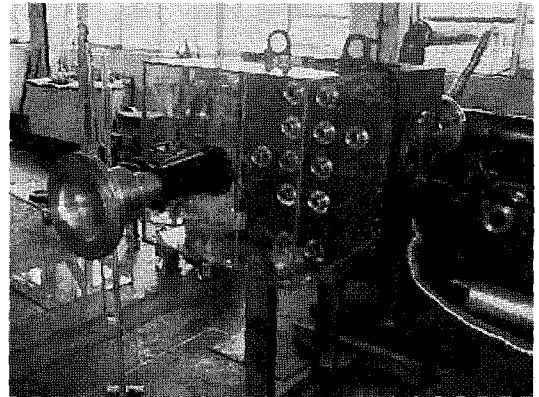


Fig. 13 Bellmouth Calibration Rig

chamber를 설치하고 압축기 입구부에 bellmouth를 설계/제작하여 2중으로 유량을 측정하는 방법이다. KS규격을 참고로 하여 제작할 수 있지만 정확도(0.1% 오차 이내)를 위해서는 음속노즐(sonic nozzle)을 이용한 별도의 보정(calibration)실험을 통해 보정방식을 얻어야 한다. 특히, 압축기 후방에서 일반유량계를 설치하려는 경우에는 출구부에서 충분히 멀리 후방으로 떨어져 설치하여 압력변동에 의한 영향이 없도록 주의해야 한다. 임펠러 출구부에서 전압은 매우 불균일하고 비정상적인 유동으로 인해 직접 측정하지는 않고 벽에서 측

정한 정압을 이용하여 이론적으로 추정하는 것이 보통이다. 케이싱 벽면을 따라 유동방향으로, 그리고 회전방향으로도 여러개의 탭을 만들어 정압분포를 측정할 수 있으며 이는 공력설계방법에 대한 검증 및 보완작업에 유용한 정보를 준다.

10. 맺음말

지금까지 필자가 경험한 사례로부터 개발을 위해 필수적으로 필요한 여러 과정들을 간략하게나마 소개하였으며, 조금이나마 유체기계 발전에 도움이 되길 바란다. 하나의 성공적인 압축기(혹은 터보기계)가 탄생하기 위해서는 공력 하나만으로는 절대로 가능하지 않으며 무엇보다도 구조적 안정성을 먼저 확보한 후 공력적 그리고 열적 성능확보에 주력해야한다는 점을 반드시 명심해야 한다.