

이산화탄소용 압축기 부품의 강도해석 및 내마모 설계

석창성 · 성균관대학교 기계공학과, 교수
이영재 · 성균관대학교 기계공학과, 교수

_e-mail : seok@skku.edu

CO₂를 압축기 및 냉동 시스템에 냉매로 사용하기 위해서는 이에 맞는 적절한 압축기 설계가 필요하다. 이 글에서는 CO₂용 압축기 부품의 강도해석 및 내마모 설계에 대해 소개하고자 한다.

CO₂는 안정성이 뛰어나고, 무취, 무독하고 부식성이 없으며, 연소 및 폭발성이 없는 물질로서 이를 냉동기의 냉매로 사용할 경우 냉매 회수가 필요 없는 장점을 갖고 있기 때문에 환경친화용 냉매로 각광을 받고 있다. 그러나 이를 냉동기용 압축기에 적용시키기 위해서는 냉동 사이클이 고압으로 작동하기 때문에 강도해석을 통한 시스템 전체의 내압 설계뿐만 아니라, 윤활해석을 통한 내마모 설계를 하여야 한다.

로터리 압축기는 모터부, 축, 상부 플랜지, 하부 플랜지, 실린더, 셀 등으로 구성되어 있으며 냉방기기에 폭넓게 사용되고 있다. 로터리 압축기에서 축은 사용 기간 동안 피로하중을 받을 뿐만

아니라 축의 변형은 모터와 압축기 구동부의 설계에 중요한 영향을 미친다. 또한 셀은 고압에서 파손 시 심각한 사고를 발생시키기 때문에 내구성 및 안전성에 대한 고려가 매우 중요하다. 따라서 이들 부품에 대한 신뢰성 확보를 위하여 응력과 피로내구해석 및 실구조물의 내구성 평가가 수행되어야 한다. 또한 마멸은 주로 베인과 롤러, 롤러와 플랜지, 베인과 플랜지에서 발생하는데, 특히 압축기의 롤러 외경에 대한 베인노즈(vane nose) 접촉영역은 압축기 구동부에서 가장 중요하며 가혹한 조건에서 운전된다. 따라서 최대한 유체윤활이 존재할 수 있도록 접촉면 마멸 거동 해석을 통해 응력수준 저감이나, 윤활막을 형성할 수 있는 기하학적 설계

의 제시가 필요하다.

CO₂용 압축기 부품의 기계적 특성 평가

압축기의 압축효율을 높이기 위해서는 고압상태에서 냉매를 압축해야 한다. 그러나 압축기의 주요 재료로 주물재가 사용되기 때문에 주물의 특성상 인장강도, 항복강도, 피로강도가 불균일하지만 10년 이상 가동될 수 있는 신뢰성이 필요하다. 이를 위해서는 주요 부품 소재의 기계적 특성 및 피로특성 등을 평가하여 적절한 재료를 선정하고, 설계개선을 통하여 작용응력을 감소시키는 것이 매우 중요하다. 기계적 특성 중 인장특성이 가장 중요하며, 피로내구성 평가를 위해서는 소재의 응력-내

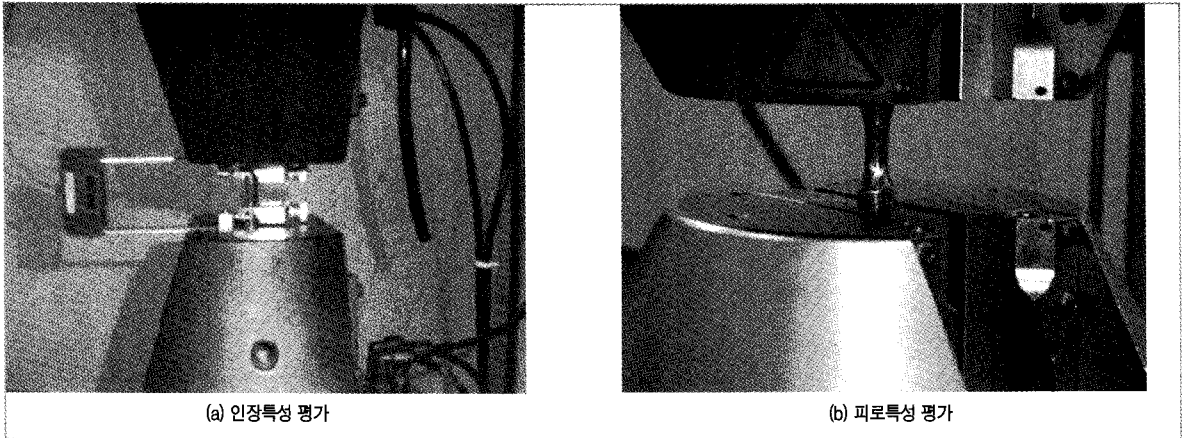


그림 1 기계적 특성 및 피로 특성 평가 시험

구수명(S-N)선도를 구해야 한다. 따라서 압축기 주요 부품의 후보 재료들에 대한 인장시험과 피로시험을 수행하여 응력-변형률선도와 응력-내구수명선도 등을 확보하였다. 그림 1은 인장시험기와 피로시험기를 이용하여 CO₂ 냉매용 압축기 주요 부품의 후보 소재에 대한 기계적 특성 및 피로 특성 평가 시험을 수행하고 있는 그림이다.

CO₂용 압축기 부품의 실구조물 피로 특성 평가

CO₂ 냉매를 이용한 압축기의 경우 기존의 압축기보다 높은 압력과 온도에서 반복하중을 받을 뿐만 아니라, 입출력 축의 압력차, 불규칙한 pull force로 인한 축의 변형이 발생한다. 따라서 기계적 특성 시험결과를 바탕으로 응력 조건에 맞는 실구조물의 피로 내구 시험을 수행하여 축에 대

한 신뢰성을 확보해야 한다. 또한 압축기의 셸부는 축, 상하부 플랜지, 실린더 등을 보호하고 기밀을 유지하는 역할을 하며 부품들과 용접으로 접합되어 있다. 포화압력이 대단히 높은 CO₂를 압축하는 경우 고압으로 인해 셸 부분의 변형 및 접합부가 파손될 수 있어 내압에 의한 안전성 확보가 매우 중요하다. 따라서 용접된 셸에 내압시험 기준 압력에서 내압시험을 실시하여 안전성이 입증되면, 내압 피로 내구시험을 실시하여 내압에 대한 신뢰성을 확보하는 것 또한 필수적이다.

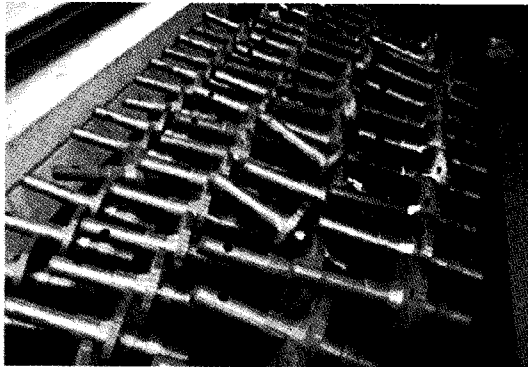
이를 위하여 축이나 셸 등의 주요부품에 대한 피로내구성 평가를 수행하여 확률밀도함수를 획득하고 작용응력 간섭 모델을 적용하여 파손확률을 평가한다면 보다 정확한 피로파손 안전성을 평가할 수 있다. 그림 2는 축계와 셸의 실구조물을 이용하여 피로 내구 시험을 수행하고 있는 그림을 나타낸 것이다. 이렇게 하여 주요 부품

의 내구시험이 완료되면 압축기 세트에 대한 내구시험을 실시한다.

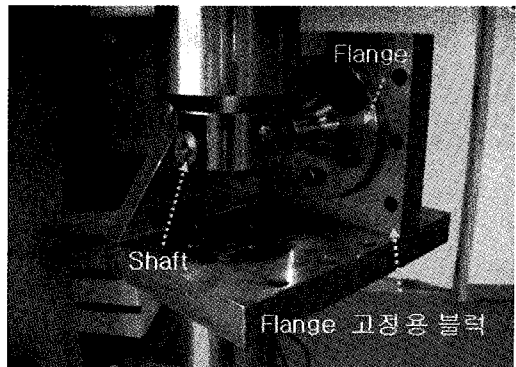
CO₂용 압축기 부품의 강도해석

CO₂ 압축기의 내압성능은 작동 압력기준으로 3~4배의 내압성능을 요구하고 있다. 따라서 내압에 의한 변형을 억제하고 파손을 방지할 수 있는 설계기술이 필수적이다.

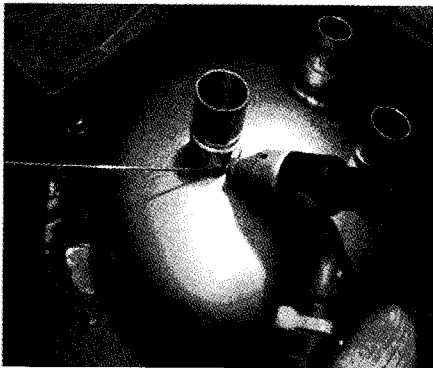
냉매를 압축하는 데 중요한 역할을 하는 샤프트는 베인 양면에 걸리는 압력차와 불규칙한 pull force를 받고 있고, 초기 구동 시 약간 기울어진 상태에서 작동하기 때문에 해머락 현상이 발생할 수 있다. 따라서 유한요소해석을 수행하여 pull force에 의한 샤프트의 변형과 이때 발생하는 응력의 변화를 재료의 기계적 특성 및 실구조물의 피로 특성과 비교·평가한 후, 압축기 부품 설계 시 반영하여야 시간 및 비용을 절감시



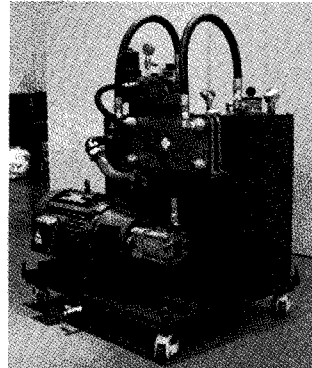
(a) 축계 신뢰성 평가 시험을 위한 시편들



(b) 축계 피로 내구 시험 평가



(c) 셀의 신뢰성 평가를 위한 시험



(d) 셀의 내압 신뢰성 평가 시험기

실 구조물을 이용한 피로 내구 시험

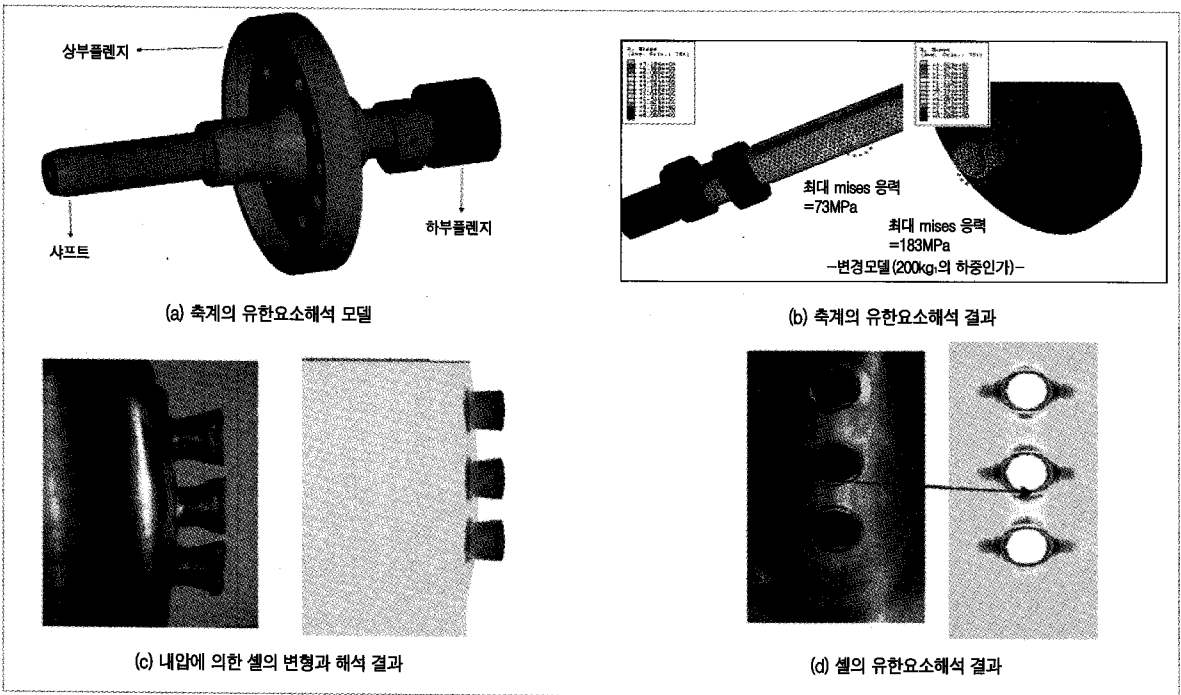
킬 수 있을 뿐만 아니라 안전 여유를 확보할 수 있다. 또한 셀 구조물은 압력에 의한 파손이 중요하기 때문에 셀에 대한 유한요소 해석을 수행하여 형상을 최적화하고 접합부나 토출구 등의 취약부에 대한 보강설계를 통하여 셀의 내압성능을 확보하는 것도 매우 중요하다. 또한 많은 변형이 발생하고 응력이 높은 다른 압축기 부품에 대해서도 최적 설계 개념을 적용함으로써 변형 및 응력을 최소화시킬 수 있다.

CO₂용 압축기 부품의 내마모 설계

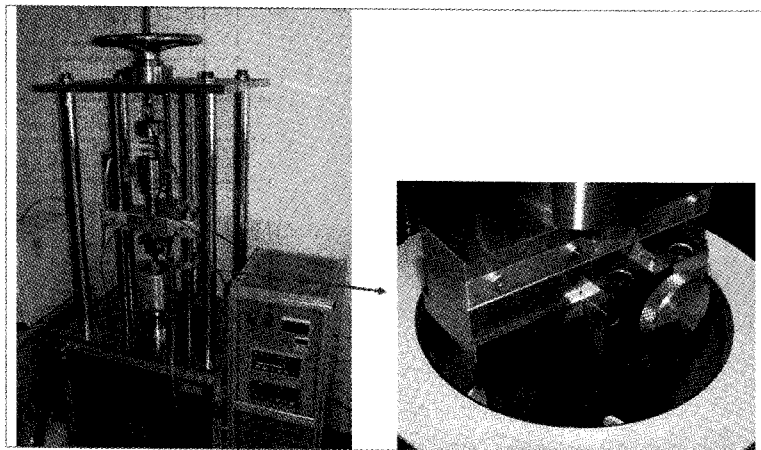
모든 종류의 압축기에 있어서 공통된 과제는 효율을 높이고 진동과 소음을 줄이는 것이다. 접촉 상태에서 상대운동을 하는 모든 기계요소에서는 반드시 마찰이 발생하기 때문에, 기계적 효율은 마찰 손실을 얼마나 최소화 할 수 있는 가에 달려 있다. 따라서 재료의 수명 또한 접촉면에서의 마찰, 마멸과 직결되어 있다.

경계윤활 조건에서 작동하는 기

계요소의 표면은 마멸에 의해 점차적으로 손상을 받을 뿐만 아니라 이로 인한 치명적인 표면 파괴로 이어질 수 있는데, 이러한 표면 파괴의 대표적인 현상이 스커핑(scuffing)이다. 스커핑은 화학적 효과뿐만 아니라 역학적인 효과의 복잡한 작용에 의해 발생하며, 마찰력의 증가와 표면 거칠어짐을 수반하게 된다. 특히, 스커핑과 같은 갑작스런 표면파괴는 운전 중 기계를 멈추게 하거나 심한 마멸을 일으키게 되어서 접촉 상대운동을 하는 재료의 수명과



실 구조물 유한요소해석 모델



스커핑 수명 평가를 위한 고하중 마찰 시험기

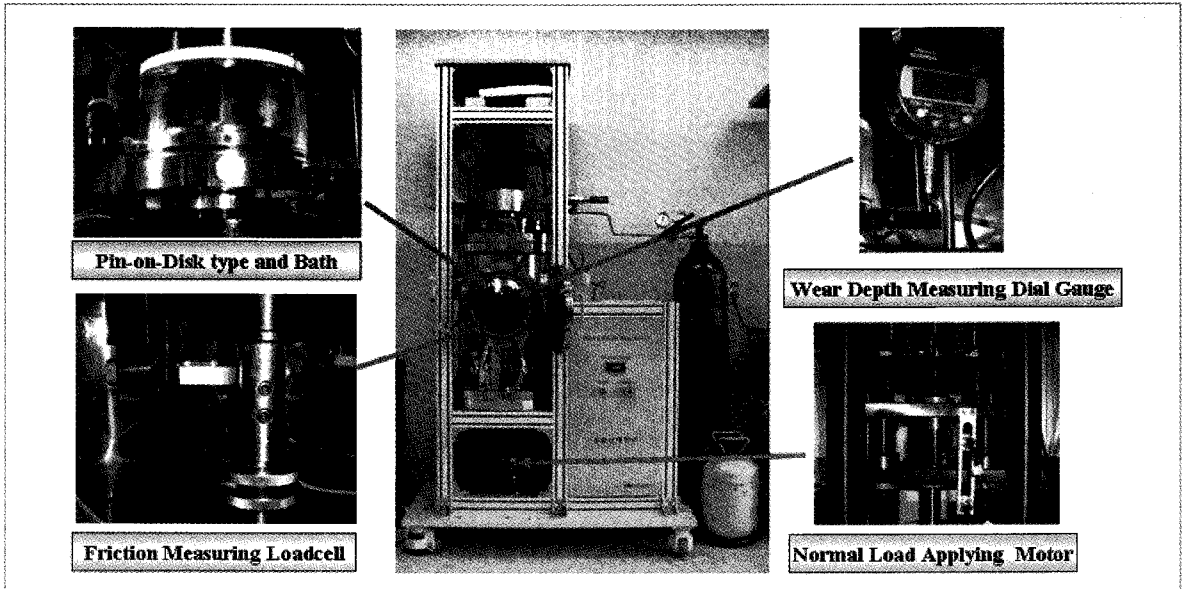
성능에 매우 큰 악영향을 끼치게 한다. 그림 4는 고하중 마찰 시험기로서 상호 접촉 재료의 스커핑 수명 평가를 할 수 있는 시험기이다. 경계윤활 환경과 유체윤활 환경을 실험 시편과 실험 조건에 따

라 알맞게 설정하여 구현할 수 있다. 대략적인 시험기 구동 원리는 고압 마멸 시험기와 동일하지만, 보다 높은 하중을 가하여 재료의 표면 파괴현상인 스커핑 현상을 구현하는 데 용이하다.

회전식 압축기의 경우, 롤러 외경에 대한 베인 노즈의 접촉영역은 압축기 구동부에서 가장 중요하며 가혹한 운전조건 영역으로서 최대한 경계윤활이 존재할 수 있도록 접촉면의 마모 거동 해석을 통해 응력수준을 저감하거나, 적절한 윤활막을 형성할 수 있는 형상 설계가 절실히 요구되고 있다.

압축기 환경에서의 마찰 및 마멸 평가

고압, 고온 조건에서 미끄럼 접촉면은 재료의 열적 성질이나 냉매 및 윤활유의 열화학적 특성 때문에 상온, 대기압 조건에서 나타난 마찰, 마멸 특성과는 다른 결과를 보이게 된다. 따라서 이러한 실



압축기 환경에서 마찰 및 마멸 평가를 위한 고압 마멸 시험기

제 작동환경을 모사하기 위해서 고압, 고온 조건을 설정할 수 있는 고압 마모시험기(high-pressure wear tester)를 사용하여 마찰 및 마멸 특성을 평가하였다.

그림 5의 고압 마멸 시험기는 압자와 시편의 형상을 바꿀 수 있는 multi-type의 마찰 및 마멸 시험기로서, pin-on-disk 형태의 미끄럼 실험을 수행할 수 있다. 그리고 압력용기를 가지고 있어서 냉매를 주입하여 냉매와 오일의 혼합 환경을 구현할 수 있다. 이 압력용기 안에서 핀과 디스크 시편은 각각 시험편 홀더에 고정되고, 디스크 시편을 통하여 수직하중이 작용되며, 핀 시편이 미끄럼 회전을 함으로써 접촉환경을 형성한다. 수직하중은 압자에 연결된 스프링을 통해 가해지도록 하여 수직하중의 변동을 줄였으

며, 로드셀을 자료획득 장치에 연결하여 미끄럼 실험 동안 수직하중과 마찰력을 온라인으로 처리할 수 있도록 하였다. 또한 마찰력에 의한 회전속도의 감소를 최소화하기 위해서 DC모터에 감속기를 연결하여 사용하였다. 오일 배스 바닥에 히터를 부착하여 초기 오일의 온도를 실험 조건에 맞게 설정할 수 있으며, 열전대를 이용하여 미끄럼 실험동안 오일의 온도 변화를 관찰할 수 있다.

코팅을 이용한 접촉면의 내마멸성 향상

미끄럼 접촉면의 내마멸성 향상을 위해 접촉면에 코팅을 증착하는 방법을 이용하였다. 연삭마멸과 응착마멸에 대한 내마멸성을 향상시키는 여러 코팅 중 경질 코팅

이 보다 효과적이다. 따라서 압축기 부품 중 베인 표면에 증착이 용이한 몇 가지 코팅을 선정하였다. 코팅의 마멸특성은 대부분 증착방법에 의해 결정된다. 다양한 증착방법 중 PVD(physical vapor deposition) 방법은 낮은 증착온도로 인하여 기질의 왜곡이 적고, 정교한 표면처리가 가능하다. 또한, PVD 방법으로 증착한 코팅 표면은 표면 마무리가 매우 적은 공차로 정밀한 치수 제어를 제공하기 때문에 코팅 후의 machining 처리를 건너뛸 수 있는 장점이 있다.

베인 표면에 PVD 방법으로 증착된 코팅을 적용할 경우 40~50%의 내마멸성 향상 효과가 나타났으며, 현재 보다 경제적이고 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 코팅에 대한 연구가 진행되고 있다.