유공압시스템학회지 제3권 제2호 pp. 2~7 2006년 6월

공기압시스템의 에너지절약에 관한 문제와 대책
Problems and Measures for Energy Saving in Pneumatic Systems

香川 利春・蔡 茂林 / 이일영 譯
T. Kagawa and M. Sai / I. Y. Lee

1. 서 론

공기압 구동시스템이 미래 산업사회에서도 살아남을 수 있을지 관계자들이 검토하기 시작[1]한 1996년으로부터 10년이 경과하였다. 최근 10년간 공기압시스템의 에너지절약 문제는 일본플루이드파워시스템학회, 일본플루이드파워공업회를 시작으로 압축기 제조업체, 공기압기기 제조업체, 일본자동차공업회 등에서도 활발하게 논의하였고, 다양한 방안이 적용되어 왔다. 그 결과, 각공장・사업소에서 10~30% 정도의 에너지가 절약된 것으로 밝혀졌다.[2] 또한, 최근 10년간 일본내의 공기압기기 판매액은 배 이상으로 늘어났다.

그러나, 현재까지의 노력에도 불구하고 공기압 구동시스템의 에너지 변환 효율이 낮은 상황은 별다른 변화가 없고, 2005년부터 상승한 원유 가격이 이후에도 지속될 것이라는 전망이 우세하므로 각공장・사업소 전체의 전력소비량 중 약 10~20%를 차지하고 있는 공기압 시스템의 에너지 절약에 대한 요구가 점점 강해질 것으로 예상된다.

현재와 같은 상황에서 공기압 시스템의 저효율에 대한 논의를 시작하면 공기압 시스템이 현장에서 배제될 것을 우려하는 공기압 시스템 관련 연구자들과 제조업체 기술자들은 공기압 시스템의 저효율에 관한 언급을 회피하고 있지만, 이러한 상황이 지속된다면 근본적인 개선이 이루어 질수 없다. 그러므로, 향후에 예상되는 에너지 절약 요청에 부응하기 위해서는 공기압 시스템의 저효율에 대한 근본적인 원인을 명확하게 밝혀야 한다.

또한, 지금까지의 에너지 절약 방안은 단순히 기기 또는 설비를 대상으로 소비전력과 공기소비량을 저감하기 위한 것이 대부분이었지만, 지금부터는 압축기를 포함한 공기압 시스템 전체를 대상으로 공급압력의 합리적 설정 등을 통한 시스템 전체의 문제 해결 방안을 모색해야 한다.

본 해설에서는 에너지 절약형 공기압 시스템을 실현하기 위해서는 에너지 손실 규명이 필요함을 기술한다. 그리고, 관련 내용 중에서 현재까지 밝혀진 주된 손실요인을 설명하고, 마지막으로 향후에 논의 될 에너지 절약 대책을 소개한다.

2. 전기기기와 공기압기기

공기압 시스템의 에너지 손실을 기술하기 전에 공기압 시스템 불가론에 대한 우려를 해소하기 위하여 전기기기와의 비교 결과를 복습하기로 한다. 다양한 논점은 일본플루이드파워시스템학회지 2003년 3월호에 특집으로 개제된 "전기구동? 유체구동?"에 개제되어 있다. 동 특집호의 저자들은 다음과 같은 3가지 사항을 거론하여 공기압 시스템존속론을 기술하였다.

(1) 구동조건에 따라서 공기압 실린더가 전기 액추에이터보다 에너지를 적게 소비하는 경우도 있다.

일정한 힘으로 부하를 유지하는 작업은 현장에서 많이 사용하는 작업형태 중의 하나고, 이러한 경우에 공기압 실린더를 사용한다면 제어밸브를 오프상태로 하여 실린더가 일정한 힘을 유지하도록 할 수 있으므로 소비동력은 거의 0이 된다. 동일한 작업을 전기 액추에이터로 진행한다면 일정한 출력을 내도록하기 위하여 항상 전류를 공급해야 하므로 공기압 구동방식보다 많은 전력이 소비된다.

또한, 전기모터는 연속회전효율이 상당히 우수하지만 가감속을 반복하는 왕복구동에서는 구동효율이 정격효율보다 상당히 낮다. 공기압 실린더 구동방식을 가감속을 반복하는 왕복구동 작업에 적용한다면 소비에너지를 전기 액추에이터 구동방식보다 절약할 수 있다.[3]

(2) 공기압 구동방식이 전기 또는 유압 구동방식과 비교하여 설치, 조작, 보수 등 취급이 용이하다.

(3) LAC(Life Cycle Assessment)에 의한 전체 비용을 기준으로 하면 공기압 구동방식이 전기구동 방식 보다 비용이 적게 든다.

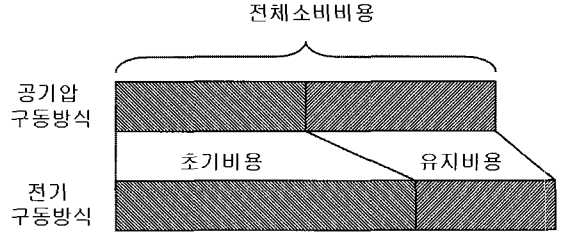


그림 1 공기압 구동방식과 전기 구동방식의 소비 비용 비교

유지비를 기준으로 하면 전기구동 방식이 에너지는 적게 소비하지만 구동장비의 조립, 보수 등에 필요한 비용이 공기압 구동방식보다 많이 소비된다. 또한, 기기 가격으로 비교할 수 있는 초기설치비용은 공기압 구동방식이 훨씬 적게 든다. 그러므로, 설비투자 시의 초기설치비용을 중시하는 경영자 입장에서는 공기압 구동시스템의 존속가치가 아직 크다고 생각된다.

3. 에너지절약의 방향성에 관한 재검토

2002년에 실시한 설문 조사 결과 공기압 기기 중에서 에너지 절약이 요구되는 기기를 압축기로 응답한 회사가 85%, 공기압 구동장치 · 기기로 응답한 회사가 70%, 배관 및 핏팅으로 응답한 회사가 65%였다.[2] 상기 기기의 에너지 절약효과를 판정하는 기준으로는 압축기는 소비전력, 공기압 구동장치 · 기기와 배관 및 핏팅은 공기소비량이 사용되고 있다. 공기소비량을 사용하는 경우에는 압축기의 비에너지(또는 비동력)을 이용하여 소비전력으로 변환할 수 있다.

그러나, 상기한 평가체계에서는 전체 에너지소비량을 파악할 수 있을 뿐이고 각 요소기기의 손실, 기기 내부의 에너지 배분 등은 알 수가 없다. 예를 들면, 지금까지의 이론에 의하면 관로에서 발생하는 누설이 없는 한 관로를 통과하는 공기소비량이 변하지 않으므로 관로 내부에서 발생한 압력 손실은 손실이 아닌 것으로 평가할 수 있다. 또한, 감압밸브는 공기압 실린더로 공급하는 공급압력을 낮추어서 공기소비량을 감소시킬 수 있기 때문에 에너지 절약요소라고 할 수 있지만, 감압자체는 동력을 필요로 하는 압축과정과 반대과정이므로 손실요소로 간주해야 하는 것이 아닌가 하는 의혹도 있다.

상기 내용으로부터 지금까지의 에너지절약 노력은 가능한 한 공기소비량을 줄이는 것에 지나지 않았음을 알 수 있다. 그러므로 에너지절약에 대한 새로운 전환점을 만들기 위해서는 지금까지 진행해왔던 에너지절약에 대한 내용을 재검토해야할 필요가 있다.

우선은 에너지변환의 관점으로부터 저효율 문제를 직시하고 공기압 시스템에 존재하는 다양한 손실 및 낭비를 규명해야 한다. 다음으로 압축기를 포함한 시스템 전체의 효율을 올릴 수 있도록 공급압력, 시스템 배치 등을 검토해야 한다.

공기압 에너지의 손실과 배분, 공급과 소비를 명확하게 하기 위해서는 공기동력에 대한 개념[11]과 공기동력측정기[12]가 유효할 것으로 생각된다. 공기동력측정기(air power meter)는 공기압에 있어서의 전력계에 해당하고 공기압배관망에 대한 에너지 조사, 관리 등에 유효하게 사용할 수 있다.

4. 공기압시스템의 손실

4.1 공기동력의 손실 요인

공기압시스템에서 발생하는 손실을 살펴보면 실질적으로는 공기동력의 손실이라고 할 수 있다. 그러므로, 공기압시스템에서 발생하는 손실을 파악하기 위해서는 공기동력의 손실을 초래하는 원인을 알아야 한다.

공기동력의 유효에너지는 엔트로피 증가 법칙인 열역학 제2법칙을 이용하면 불가역변화로 정의할 수 있다. 공기압시스템에서 발생하는 불가역변화를 크게 분류하면 기계적 불가역변화와 열적 불가역변화로 구분할 수 있다.

4.1.1 기계적 불가역변화

(1) 외부마찰

공기가 관로내부를 유동할 때에는 관 내벽에서 마찰이 발생하여 공기 유동에 대한 저항력이 발생한다. 공기가 관로내에서 유동할 때의 압력손실은 주로 이러한 마찰에 의하여 발생한다.

(2) 내부요인

유체가 관로내부를 흐를 때에는 점성에 의한 내부마찰력은 무시할 수 있지만, 압축공기가 오리피스, 핏팅 등을 통과할 때 발생하는 와류 등의 내부 요인에 의한 손실은 무시할 수 없다.

4.1.2 열적 불가역변화

(1) 외부 열교환

공기압시스템에서는 공기의 온도가 압축, 팽창에 의하여 변화하기 쉬우므로 외부환경과의 열교환이 많이 발생한다. 열교환량이 가장 많은 것은 공기가 압축기로 압축된 직후의 냉각처리 과정이다. 또한, 용기로 공급하는 가압공기 및 용기로부터 방출되는 방출공기가 오리피스를 통과한 후의 온도회복과정 등에서 외부와 열교환이 발생하기도 한다.

공기가 단열압축된 후에 대기온도까지 냉각되는 등압과정을 대상으로 유효에너지 손실량을 계산하면 절대압력이 0.6[MPa]인 경우에 23.4[%]가 된다.

(2) 내부요인

용기내부를 가압하는 경우에는 고압공기가 저압공기로 흘러들어가서 내부혼류가 발생한다. 이러한 혼합은 불가역이기 때문에 유효에너지의 손실이 발생한다. 예를 들면, 절대압력이 0.6[MPa]이고, 체적이 1[dm^3]인 압축공기를 절대압력 0.3[MPa]로 가압되어 있는 10[dm^3]인 용기에 등온변화로 공급하면 공급 공기의 약 30[%]에 해당하는 359[J]의 유효에너지가 감소된다.

4.2 공기압 사이클로부터의 추정 손실

공기압시스템의 에너지변환을 고찰하면 압축기에서 전동기 축동력을 공기동력으로 변환하고 배관을 통하여 액추에이터 등의 말단기기로 수송하여 기계동력으로 전환하는 과정을 거친다. 이러한 에너지흐름에서는 공기가 대기상태→압축상태→대기상태의 사이클 변화를 하고 있다. 이러한 사이클 변화를 PV선도로 나타내면 그림 2와 같다.

압축공기의 제조에 해당하는 과정은 ①→②→③이다. 이 과정에서 공기가 전동기로부터 받은 에너지는

$$W_{in} = \text{Area of } ①②③A① \quad (1)$$

이 된다. 한편 공기압 실린더를 대상으로 압축공기의 소비에 해당하는 과정은 ④→⑤→⑥→①로 나타낼 수 있고, 이때의 에너지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

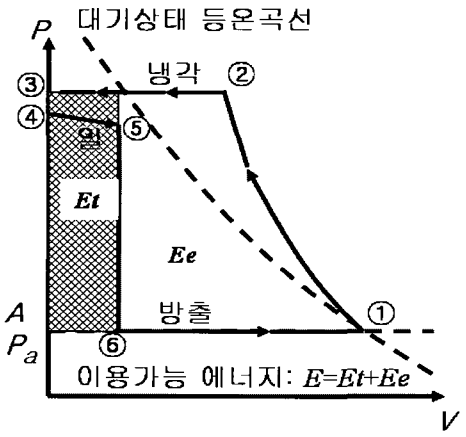


그림 2 공기압 사이클로 추정한 손실

$$W_{out} = \text{Area of } ④⑤⑥A④ \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 차는 시스템의 손실이 된다.

$$\Delta W = W_{in} - W_{out} = \text{Area of } ①②③④⑤⑥① \quad (3)$$

그림 2에 나타낸 바와 같이 공기압시스템의 사이클 변화 방향은 ①②③④⑤⑥이므로 열기관과 정반대가 되고 일을 열로 변환하고 있음을 알 수 있다. 변환된 열은 대기로 방출된다. 이러한 방열량을 이상적으로 없애기 위해서는 사이클이 둘러싼 면적을 0으로 해야만 한다. 그러므로, 사이클을 그림 2에 나타낸 대기상태 등온곡선상에서 실현하여 압축과 일을 등온변화로 할 필요가 있다. 이렇게 한다면 압축과정에서 소비되는 기계에너지가 전부 압축공기의 유효에너지로 변환되고, 그 결과 액추에이터를 경유하여 완전히 일로 환원된다. 이러한 시스템에서는 전효율이 100[%]가 되므로 이상적인 시스템이 된다. 그러나, 실제 공기압시스템에서는 등온변화라고 하는 가역변화를 압축 등의 단계에서는 실현이 곤란하다. 또한, 오리피스를 통과할 때나 배기 등에서의 불가역요소가 있기 때문에 다양한 곳에서 손실이 발생한다.

4.3 공기압시스템에서의 주요한 손실

공기압시스템의 손실 중에서는 압축기의 단열손실과 잔여공기에 의한 체적효율손실, 구동기기와 배관내의 잔여공기 배출에 의한 손실이 비교적 크다는 지적이 있다[14].

아라키 등이 실시한 공기압실린더 구동시스템의 효율조사 결과에 의하면 효율이 6[%] 정도로 밝혀져 있다[15]. 이 결과는 네덜란드와 호주의 조사 결과인 4~5[%]와 유사한 결과이다[16~17]. 네덜란드와 호주의 조사 결과에서는 누설 15[%], 열이탈 80[%] 등의 손실을 기술하고 있지만, 아라키 등은 전동기 4[%], 압축기 40[%], 배관계통 5[%], 제어장치 30[%], 마찰 2[%], 열역학적 손실 13[%] 정도의 견해를 나타내었다. 우리들의 연구결과에 의하면 손실이 주로 발생하는 부분은 다음과 같다.

4.3.1 압축기

축동력에 따라서 수치가 변화하지만 마찰, 열역학적 손실, 누설 등의 손실요인을 전부 포함하면 대체로 50[%] 전후의 손실이 발생한다[18].

4.3.2 공기압 실린더

공급한 에너지는 미터인, 미터아웃 회로에서 일부가 속도제어에 사용되고 속도제어와 일 이외에 약 40[%]가 배기, 열역학적 손실, 마찰 등에 소비된다.

4.3.3 배관누설

공급 공기량의 10[%] 정도가 누설되는 것이 보편적인 것 같고, 심한 곳에서는 40[%] 정도 누설이 발생하는 곳도 있다[18].

현장에서는 시스템의 배관과 사용상황에 따라서 어느 정도의 에너지가 공급되고 어느 정도가 실제 사용되는지 변화하기 때문에 현장조사를 할 필요가 있다.

5. 향후의 에너지절약 대책

공기압시스템의 에너지 절약 대책에 관해서는 이전부터 많이 방안이 제안되어 왔다. 지면 관계로 본 해설에서는 향후에 즉시 사용가능한 대책에 대해서만 기술한다.

5.1 압축공기 제조

압축기의 에너지 절약에 관해서는 다양한 활동이

진행되고 있고, 현장에서도 용량제어, 압축기 대수제어 등 많은 대책이 실시되고 있다.

압축기의 에너지절약을 위하여 지금까지 실시한 다양한 방법들의 유효성을 조사해보면 그림 3으로 나타낼 수 있다[2]. 현 단계에서는 운전제어방식의 개선, 토출압력 저감, 고효율의 압축기 도입 등 상위 3개의 방안이 전체의 78[%]를 차지하고, 에너지절약 효과가 현저함을 알 수 있다.

상기 방안 이외에 압축기를 고효율로 이용하기 위해서는 하기 3개의 방안을 추가로 추천할 수 있다.

5.1.1 말단압력의 피드백에 의한 토출압력 저감[21]

현재는 압축공기를 사용하는 구동기기의 공급 압력을 확보하기 위하여 압축기 토출압력을 구동기기에서 필요한 압력보다 0.2~0.3[MPa] 정도 높게 설정한 후, 감압밸브를 사용하여 공급라인으로 부터 감압하고 있다.

보수, 관리를 전담하는 담당자에게는 압력저하를 방지하는 것이 가장 중요하지만 압축기 토출압력을 구동기기에서 필요한 압력보다 필요 이상으로 높게 설정하는 것은 에너지 낭비를 초래하므로 바람직하지 않다. 최근에는 라인압력을 저압화하는 대책이 제안되고 있고, 유럽에서 이러한 대책을 실시한 예도 있다.

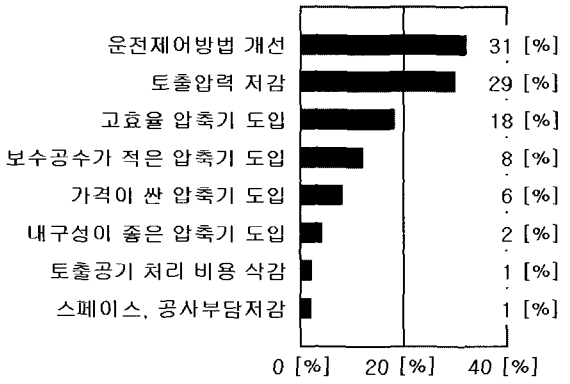


그림 3 압축기 에너지절약 대책의 효과

유럽에서 실시한 방법은 말단설비 직전에 저장탱크를 설치하고 탱크 내부 압력을 피드백하여 압축기 인버터의 회전속도를 제어하는 것으로 탱크 내부 압력을 필요압력보다 약간 높은 상태로 제어한다. 이렇게 하면 현재 사용하고 있는 압축기 토출압력을 낮출 수 있다.

5.1.2 저압라인과 고압라인에 의한 공급체계의 재검토

블로워 등의 공기공구는 공급압력을 저압으로 유지하는 것이 바람직하다. 분류에너지의 능력 즉 유속과 운동량을 최대로 하기 위해서는 유속이 음속에 도달할 때까지 노즐 상류압력을 절대압력 0.2[MPa]까지만 가압할 필요가 있다. 이 이상 가압하면 유속이 음속으로 유지되므로 분류 유량과 운동량이 절대압력에 비례하여 증가하지만, 공기 동력이 그 이상으로 증가하기 때문에 임계압력 이상으로 가압하는 것 보다 노즐을 크게 하는 편이 고효율의 큰 운동량을 얻을 수 있다[22].

현재는 0.8[MPa]로 공급하는 고압으로부터 감압하여 공기를 사용하므로 많은 동력손실을 초래하고 있다. 그러므로, 공기공구를 많이 사용하는 공장에서는 저압라인을 증설하여 압축기 소비전력을 삭감할 수 있다. 이 때에는 현재 사용하고 있는 압축기가 아닌 저압 튜닝을 실시한 저압 압축기를 사용하는 것이 바람직하다.

또한, 저압라인이 존재하면 공기압 실린더의 복귀에도 사용할 수 있다. 현재 사용하고 있는 에너지절약형 회로 중에서는 복귀압력을 고압으로부터 감압하여 사용하는 방법도 있지만, 저압라인으로부터 직접 공급하는 편이 에너지절약에 더 유리하다.

5.1.3 압축폐열의 회수

공기를 단시간에 압축하면 폐열이 많이 배출된다. 이러한 폐열을 공장의 난방 등에 사용한다면 난방에 사용되는 소비전력을 크게 절약할 수 있다. 또한, 폐열을 고효율로 회수할 수 있다면 압축공기의 온도상승이 억제되므로 원동기의 축동력을 저감할 수도 있다.

5.2 공기 청정기기

드라이어, 필터 등 공기 청정기기는 압력손실이 무시할 수 있을 만큼 작은 기기가 대부분이다. 에너지절약을 위해서는 애플리케이션에 적합한 기기를 선정해야 한다. 현재 판매되고 있는 기기 중에서 개선의 여지가 있는 기기는 다음과 같다.

5.2.1 필터 엘리멘트 메시가 5[㎛]이하인 공기필터

최대유량이 공급될 때의 압력손실이 라인압력의 약 10[%]정도에 해당하는 기기가 많이 있고, 이것을 공기동력의 손실로 환산하면 약 5[%]에 해당한다. 이러한 압력손실은 엘리멘트 단면적의 확대 등에 의하여 절반 이하로 저감할 수 있다.

5.2.2 히트레스식 드라이어

공급공기의 20[%] 정도가 재생에 사용되기 때문에 과도하게 사용하지 말고 노점(이슬점온도)을 낮게 유지해야 되는 장소에만 사용해야 한다. 또한 재생시에는 다음과 같이 에너지소비를 보다 줄일 수 있는 방법을 채택해야 한다.

(1) 고압공기를 피하고 저압공기를 사용한다
(2) 히터 등 전기식을 이용한 재생법을 사용한다.

5.3 공기의 수송

공기를 수송할 때 가장 손실이 큰 요인은 공기의 누설이다. 전술한 바와 같이 공장에서는 공급공기의 10~20[%]를 누설에 의하여 소비하는 것이 보통이다. 누설에 대한 기준이 제정되어 있는 공기압 실린더, 전자밸브 보다는 배관의 접속부에서 누설이 보다 많이 발생하는 것으로 생각된다. 누설 이외에 배관에 의한 압력손실도 무시할 수 없다. 특히 분기가 많은 회로망에서는 압력손실이 의외로 크게 발생한다. 상기한 2가지 손실요인에 대해서는 다음과 같은 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

5.3.1 공기동력측정기를 이용한 배관망 손실조사

공기압의 전력계에 해당하는 공기동력측정기를 사용하면 누설유량 뿐만 아니라 압력손실에 의한 동력손실도 모니터링 할 수 있다. 에너지 손실을 줄이기 위해서는 배관망에 대한 공기동력의 공급, 배분, 손실 등을 조사해야만 한다.

5.3.2 누설유량 저감

설비가 정지상태로 있을 때 압축기의 운전을 정지시키는 등 다양한 대책이 논의되고 있지만 누설을 없앨 수 있는 근본적인 방안이 필요하다.

(1) 누설 발생 부위를 파악하여 누설을 방지한다.
(2) 원터치 핏팅의 밀봉성능을 향상시킨다.

5.3.3 압력손실 저감

공기는 점도가 낮기 때문에 배관을 적절하게 선정하면 직관 내벽에서 발생하는 마찰손실을 용이하게 줄일 수 있다. 그러므로, 현 단계에서는 분기부분의 손실을 줄이기 위한 대책을 논의해야 한다.

일반적으로 공기가 T자형 핏팅에서 90°방향으로 분기할 때 운동에너지의 100~200[%]에 해당하는 에너지 손실이 발생한다. 또한, 이 손실은 운동속도의 2배에 비례한다. 관내부의 압력 손실을 줄일 수 있는 방법은 다음과 같다.

(1) 배관직경을 확대하여 유속을 저속으로 유지한다.
(2) 압력손실을 최소화 할 수 있는 분기용 핏팅을 개발한다.

5.4 공기의 소비

현장에서 가장 공기를 많이 소비하는 기기는 공기압 실린더와 블로워이고, 이 두개의 기기를 대상으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 해설에서는 공기압 실린더를 대상으로 고찰한다.

5.4.1 사용압력의 저감

공기압 실린더를 구동할 때에는 팽창에너지(0.42 [MPa]에서는 총에너지의 절반)가 이용되지 않고 있다. 구동 압력이 고압이 될 수록 팽창에너지가 차지하는 비율이 커지므로 공기압 실린더의 효율을 향상시키기 위해서는 구동압력을 저압화해야 한다.

5.4.2 미터인 구동회로의 사용확대

현장에서 많이 사용하는 PTP(Point To Point) 구동에서는 미터아웃 구동회로가 대부분을 차지하고 있다. 그러나, 외란의 영향을 받지 않아야 하는 안정된 이동속도를 반드시 필요로 하지 않는 구동형태도 많이 있다. 이러한 작업에서는 미터인 구동회로를 사용하여 과도한 공기소비를 줄일 필요가 있다[23].

6. 결 론

공기압 구동시스템의 에너지절약에 대해서는 과거로부터 다양한 방법을 검토하고 있었지만, 단순히 공기소비량을 감소시키기 위한 기존의 방법은 재검토해야할 필요가 있다. 향후에도 소비공기량을 감소시키기 위한 노력을 지속적으로 진행해야 하는 것은 물론이지만 이제부터는 시스템의 에너지 공급과 소비간의 관계를 조사하여 공기압시스템으로 공급된 에너지가 어떤 형태로 소비되는 지를 명확하게 하는 것이 가장 중요한 과제로 생각된다.

후 기

본 해설은 일본플루이드파워시스템학회지(구 일본유공압학회지)에 실린 해설을 번역한 내용이다. 원문의 출처 및 원저자는 다음과 같다.

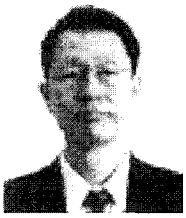
香川利春, 蔡茂林, "空氣壓システムの省エネルギー化における問題と方策", 日本フルードパワーシステム學會誌, Vol. 37, No. 3, pp. 149~154, 2006

참고 문헌

1) 河合, "空氣壓システムは生き殘れるか?", 油壓と空氣壓, Vol. 27, No. 3, pp. 55~62, 1996.
2) 本機械工業連合會, 日本フルードパワー工業界, "空氣壓システムの使用者及び製造業者に對する空氣壓システムの省エネルギー動向のアンケート調査", 平成13年度空氣壓機器複合システムの省エネルギー化に關する調査研究報告書, pp. 2~21, 2002.

3) 蔡, "空氣壓システムのエネルギー評価", 2002年度 東京工業大學學位論文, 2002.
4) 小川, "空氣壓機器およびシステムの省エネ對策", 油壓と空氣壓, Vol. 27, No. 3, pp. 50~54, 1996.
5) 中村, 楊, "省エネ化/コンパクト化に挑む我が社の技術-PFC&QFCバルブの進化", 油空壓技術, Vol. 40, No. 11, 2001.
6) 小根山, "空氣壓メーカは省エネルギーについてどのような試みをしてきたか", 油壓と空氣壓, Vol. 27, No. 3, pp. 44~49, 1996.
7) 則次, "空氣壓驅動システムのエネルギー回生制御-アクテイブエアサスペンションへの適用", 油空壓技術, Vol. 38, No. 4, pp. 1~4, 1999.
8) 宮地, 小山, 吉滿, "空氣壓 シリンダにおける空氣壓回生回路の効果", 平成13年秋季フルードパワーシステム講演會講演論文集, 2001.
9) Oyama, Yoshimitsu, "Minimal time control of pneumatic cylinder and its performance", Proceedings of the 4th JHPS International Symposium, 1999.
10) 藤田, 蔡, 香川, "空氣壓シリンダの消費エネルギーと電動アクチュエータとの比較", フルードパワーシステム, Vol. 34, No. 2, pp. 125~130, 2003.
11) 蔡, 藤田, 香川, "空氣壓驅動システムにおけるエネルギー消費とその評価", 日本油空壓學會論文集, Vol. 32, No. 5, pp. 118~123, 2001.
12) 蔡, 船木, 川嶋, 香川, "省エネのためのエアパワーメータの開發", 平成15年春季フルードパワーシステム講演會講演論文集, pp. 119~121, 2003.
13) 谷下, "工業熱力學", 東京裳,華房, 1981.
14) 光岡 "驅動システムの現狀と動向", 油壓と空氣壓, Vol. 19, No. 6, 1988.
15) 荒木, "空氣壓システムにおける省エネルギーの現狀-4.3空氣壓回路の省エネルギー對策", 油空壓システム省エネルギー調査研究の研究成果報告書Ⅰ, 日本機械學會, 1985.
16) 12 measures possible with compressed air systems, Energie-en Milieuspectrum E&M 6/7, 1996.
17) Compressed air workshop/Seminar September 15th, Pacific Power Energy Service, Silverwater, Australia, 1994.
18) 香川, 蔡, "環境を考慮したコンプレッサの最新動向", 油空壓技術, Vol. 45, No. 4, 2006.
19) 蔡, 藤田, 香川, "空氣壓シリンダの作動における有効エネルギー收支", 日本フルードパワーシステム學會論文集, Vol. 33, No. 4, pp. 91~98, 2002.
20) Van Leer (UK) Ltd, "Compressed air savings by leakage reduction and efficient air nozzles", CADDET Energy Efficiency, Result 402, 2001.
21) 松隅, "空氣壓縮機", 省エネルギーセンター, 2005.
22) 高橋, "空氣壓システムの省エネルギー", 油壓と空氣壓, Vol. 27, No. 3, pp. 34~37, 1996.
23) 寺島, 川上, 河合, "空氣壓システムの省エネルギーに關する試み(第1報)", 日本フルードパワーシステム學會論文集, Vol. 31, No. 6, pp. 157~163, 2000.

[저자 소개]



T. Kagawa

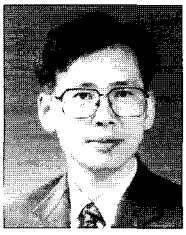
E-mail : kagawa@k-k.pi.titech.ac.jp
1950년생
1974년 동경공업대학 제어공학과 졸업, 동년 北辰電機製作所입사, 1976년 동경공업대학 제어공학과 조수, 현재 동대학 정밀공학연구소 교수, 일본기계학회, SICE 등의 회원, 공학박사

[저자 소개]

M. Sai

E-mail : caiml@k-k.pi.titech.ac.jp
1972년생
1996년 북경이공대학 자동제어계 석사과정 졸업, 동년 동대학 조수, 2002년 동경공업대학 이공학연구과 박사과정 졸업, 현재 동경공업대학 정밀공학연구소 조교수, 일본기계학회, SICE 등의 회원, 공학박사

[역자 소개]



이일영

E-mail : iylee@pknu.ac.kr
Tel : 051-620-1612
1954년 8월 4일생
1986년 3월 동경공업대학 제어공학과 박사과정 졸업, 현재 부경대학교 기계공학부 교수, 우리학회 편집위원회 부위원장, 공학박사