

고효율 압축공기 에너지 절약 시스템 개발

Development of Compressed Air Energy Saving System for High Efficiency

김동수 · 배상규

D. S. Kim and S. K. Bae

1. 서 언

공기압 기기란 대기 중의 공기를 압축기를 이용하여 압축 시키고, 압축된 공기를 제어밸브 등으로 압축 공기의 방향, 유량, 압력 등을 제어하여 액추에이터에 공급함으로써, 그 출력을 부하의 요구에 적합한 기계적 에너지로 사용하는 일련의 기기 및 응용기기를 말한다. 이러한 공기압 기술은 자동화시스템 추진에 있어서 일익을 담당하고 있으며, 고도로 발전한 공장자동화 시스템에서 중요한 역할을 수행하고 있다.

공기압 기기는 전동기에 비하여 소형, 경량이고 상대적으로 출력이 크므로 소형, 경량화의 시대적 요구와 일치하고 있으며, 더욱이 유압기에 비해 환경오염을 줄일 수 있기 때문에 전자, 식품, 의료업 분야에서 청정기기로서의 비중이 점차 증가하고 있다.

최근의 공기압 기기는 씰(seal) 및 재료기술의 발전으로 내구성이 크게 향상되었을 뿐만 아니라, 메카트로닉스 기술과의 결합으로 소형, 경량화 되어 신뢰성이 높고 제어성이 뛰어난 다양한 제품들이 시장에 출시되고 있다. 또한 다품종 소량생산을 지향하는 공장자동화 시스템에 부응할 수 있는 공기압 기기가 급격히 증가하고 있다. 특히, 국가주도 6T기술 중 IT, BT, ET, RT 등의 첨단기술의 발전과 더불어 공기압 기기 기술 또한 함께 성장하고 있으며, 이러한 대표적인 공기압 기기들로는 필드버스, 마이크로 밸브, 서보밸브, 인공근육 실린더, 씰리스 실린더 등을 들 수 있다.

공기압을 이용하는 기기는 현재 산업계와 사업장에서 흔히 볼 수 있는 기술이며, 거의 모든 회사에서 사용되며 여러 형태로 적용되고 있다. 즉, 공기압 기술은 거의 모든 산업분야를 포괄하는 기술이라고 볼 수 있다. 그러나 압축된 공기를 매체로 사용할 때 상당한 주의와 노하우가 필요하다. 현재 안전 기술적인 주의는 대부분 이루어지고 있지만, 매우 높은 에너지

함유량을 가지고 있는 공기압을 충분히 활용하는 기술력은 부족한 실정이다. 그리고 많은 경우에는 공기압을 만들기 위해 소요되는 에너지와 비용을 제대로 평가하고 있지 못하고 있다. 공기압 설비를 이용할 경우 약 5~50%까지의 에너지 절약 효과를 볼 수 있으며 평균 감가상각 기간은 2년 미만이기 때문에 기업들에게 상당히 매력적일 수가 있다. 본 해설에서는 이러한 압축공기 에너지절약 시스템에 관하여 소개한다.

2. 압축공기 에너지 절약 시스템 개요

2.1 압축공기 에너지 절약 시스템 원리

고효율 압축공기에너지절약(CAES, Compressed Air Energy Saving) System 기술은 압축공기를 작동유체로 하여 공기압 동력을 기계동력으로 변환시켜주는 공기압 핵심부품인 공기압 제어밸브, 공기압 액추에이터 및 공기압 모터, 정밀제어 등의 핵심요소기술의 해석기법, 최적설계, 시험평가에 의한 검증 및 생산기술 개발에 대한 것이며, 이들 기술의 핵심은 고응답화, 고속화, 저소비전력화, 고유출능력화, 고정밀제어화 및 고성능, 고신뢰성화에 있다.

각각의 핵심기술은 공기압 밸브 그리고 고속 저마찰 실린더 및 공기압 모터, 이중압력조절기 등으로 압축공기 에너지 절약 시스템의 요소 개발의 초석이 됨은 물론이고 자동차, 우주항공, 방산, 선박, 일반산업기계(인쇄, 섬유, 식품, 의료, 공작기계, 농기계, 프레스, 사출기 등) 및 반도체장비 등의 자동화 라인 등 전 산업분야에 광범위하게 응용되고 있는 핵심기반 기술이다.

공기압 기술은 전기기술에 비해 큰 출력을 낼 수 있고, 전기 스파크에 의한 화재방지 및 에너지 낭비가 적고 장치의 Compact화가 가능하다는 점과 유압 기술에 비해 보수유지가 쉽고 청결하며 동력원을 격리시킬 수가 있어서 진동, 소음이 적을 뿐 아니라,

에너지 가격은 전기:유압:공기의 비율이 1:4:10으로 비싸지만, 장치비 등의 가격이 저렴하여 성능대비 가격이 가장 우수한 기술이다.

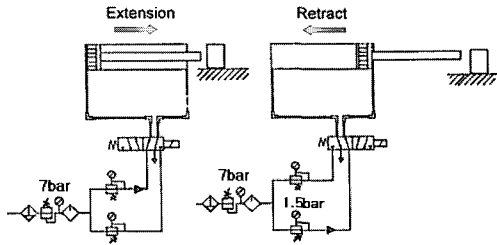


그림 1 이중압력 조절기능의 압축공기 에너지 절약 시스템 회로도 구성

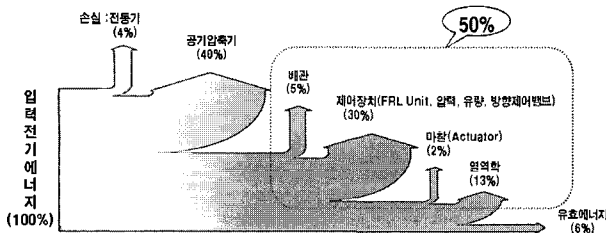


그림 2 유효에너지 6%인 공기압 시스템의 에너지 손실 현황

차세대 고효율 압축공기 절약에너지 시스템은 저가격성, 간편성, 빠른 응답성, 비폭발성, 열악한 환경에 대한 내노이즈성, 정밀제어성 등의 특징 때문에 전 산업분야에 응용되며 약방의 감초역할을 하나, 에너지가격이 다른 에너지에 비해 매우 높으며, 현재의 공기압 제어 시스템은 에너지 회수가 불가능하며 손실이 매우 크다. 그림 2와 같이 공기압 시스템의 에너지 손실은 전동기, 압축기, 배관, 제어장치, 마찰, 열 손실 등에 의해 유효 에너지는 6%에 불과하다. 따라서 미래형 차세대 고효율 압축공기 에너지 절약 시스템의 이중압력조절 시스템 개발 및 각 부품의 효율을 극대화하여 배관, 제어, 마찰, 열 손실 등을 줄여줌으로써 유효에너지를 향상 시킬 수 있으며, 이러한 개발은 이미 선진국에서는 일본 JFPS, 미국 NFPA, 독일 Fraunhofer 연구소와 미국의 Numatic, 일본의 SMC, 프랑스 Legris 회사 등에서 개발 완료한 상태로 국내에서도 연구개발이 절실히 요구된다.

2.2 압축공기 에너지절약 기술추세

압축공기 에너지 절약 시스템의 기술 추세는 전반

적으로 소형화 및 고정밀화를 추구하고 있으며, 대표적인 소형화 기술로 마이크로 밸브를 들 수 있다. 초절전형 마이크로 밸브 기술은 작동유체인 공기의 특성상 청결성 및 비폭발성을 가지며, 소형 경량화로 저가격화에 성공한 기술일 뿐만 아니라 전기, 전자, 기계의 복합기술이며 IT, NT, BT, ET기술의 근간이 되는 기술이라 할 수 있다.

대표적인 제조업체는 일본의 SMC, Koganei, CKD 등이며, 솔레노이드를 이용한 액추에이터 기술은 구조가 간단하고 경제적이며, 정밀 제어가 가능한 기술이기 때문에 유공압 밸브, 자동차 연료 분사기, 자동차 브레이크 등에 직접적으로 사용될 수 있는 중요한 기반 기술이다. 최근에는 액추에이터의 고속화와 솔레노이드의 저소비전력화 기술이 개폐형 솔레노이드 액추에이터 분야에서 강력히 대두되고 있다. 지연 시간이 짧은 고속형 솔레노이드 액추에이터에서는 빠른 자화 때문에 와전류와 같은 동적 효과를 고려한 시변계 유한요소 해석이 필요하다.

포핏 메카니즘(poppet mechanism) 기술은 우선 에너지 절약 및 온도상승 저감을 통하여 제어능력을 향상시키기 위한 연구로 유량 특성의 해석/설계 기술이 중요하다.

공기압 서보밸브의 기술은 고성능 및 고신뢰성화, 저소비 전력화, 가격경쟁력 등이며, 선진국의 경우 이를 앞세워 전세계 시장을 독식하고 있다. 대표적인 제조업체는 미국의 Atchley Controls, Dyval, Textron이고 독일의 Kolvenbach와 Festo등이 있다. 국내의 경우 일반산업용 On-Off 공압 솔레노이드 밸브와 유압 서보 밸브에 대하여 연구개발한 경험은 있으나, 공기압 서보 밸브 개발은 미흡한 실정이다.

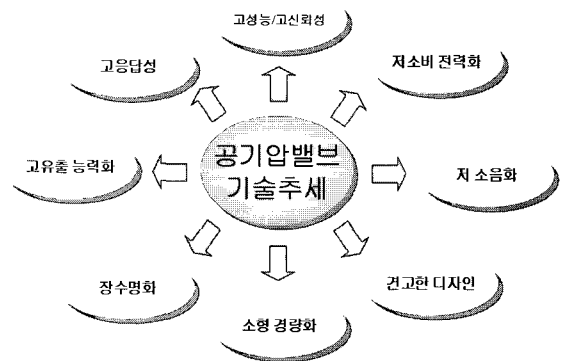


그림 3 공기압 마이크로 및 서보밸브 기술추세

인공근육 실린더 기술은 누설유량, 스틱슬립, 마찰, 쉘 등이 없는 신 개념의 액추에이터로써, 경량

화, 저가격화, 고응답, 유연성, 고출력 이외에도 Smooth, Damped, Compliant 등의 특징을 가지는 청정기술일 뿐만 아니라 국가주도 차세대 전략기술인 BT, RT 등을 만족시켜주는 혁신적인 기술이다. 인공근육의 수요는 기하급수적으로 증가하고 있으나, 국내 산업계에서 요구되는 인공근육 실린더 수요량의 전량을 독일의 FESTO, 영국의 Shadow Robot사 등의 기술 선진국으로부터 수입에 의존하고 있어 국산화가 시급한 실정이다.

셀리스 실린더의 기술 특성 또한 고성능화, 저누설 유량화, 저마찰화, 고정밀제어화, 고속화를 지향하고 있으며, 베어링해석, 쿠션해석, 베어링 정밀가공기술 및 평가기술 등 어려움이 내재되어 있는 고도의 첨단기술에 해당된다. 최근 반도체산업 등 기술집약적 공정의 개발에 있어서 핵심기술로 자리 잡고 있다. 이의 대표적인 회사는 독일의 FESTO, 미국의 Parker, Instron 회사 등이 주도하고 있다.

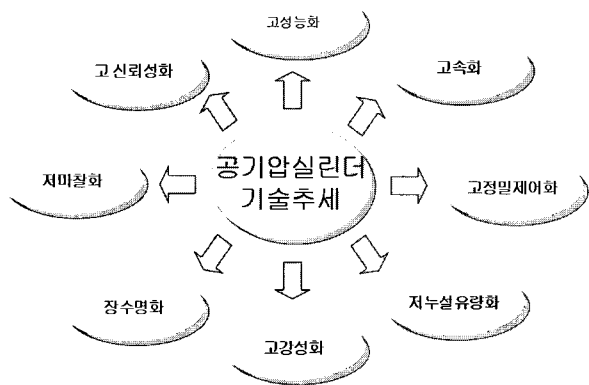


그림 4 공기압 인공근육 및 셀리스 실린더 기술추세

이외에도, 필드버스 시스템의 기술은 1990년 중반부터 연구개발이 시작되어 선진국에서 앞 다투어 개발하였으며 독일의 FESTO, 지멘스를 시작으로 일본의 SMC, CKD, Koganei, Kuroda 등에서 전 세계 시장을 독식하고 있다. 초기에는 100meter, 8개의 밸브를 제어하던 기술에서 현재는 2km 거리에서 16개의 밸브를 제어하는 기술수준으로 성장하였으며 거의 모든 Protocol은 PC와 PLC를 만족하는 수준이다.

2.3 압축공기 에너지절약 핵심 기술

이중압력제어 조절장치는 공기압 회로내의 압력을 제어하는 밸브로써 공기압 시스템의 작동 안정성 내구성 및 에너지 절약을 목적으로 사용되고 있는 고

효율 CAES 시스템의 핵심기술 이다. 압력제어 밸브의 핵심기술은 설정된 일정압력을 유지하기 위해서 유체의 일부 또는 전부를 배출시키는 릴리프 밸브 기술, 고압의 공기를 감압하여 입구압력에 관계없이 출구 압을 입구 압보다 낮은 일정한 설정 압력으로 유지시켜주는 감압밸브 기술, 회로내의 압력상승을 감지하여 작업순서를 제어하는 밸브 기술로 입구 압력이나 외부 파일럿 압력이 소정의 압력에 도달하면 입구에서 출구로 고압공기를 흐르게 한다. 공기가 배기되면 밸브 체는 닫히고 체크 밸브가 열려서 출구측 공기는 입구 측으로 배출되는 시퀀스 밸브 기술, 이외에도 제어 전류에 비례하여 공기압력을 제어하는 압력비례제어 밸브 기술, 작업자의 안전을 위해서 회로압력이 허용한도를 넘는 공기를 배제하여 기기나 관로의 파괴를 막는 안전밸브 기술, 파일럿 공기압력에 비례하는 압력을 공급하는 대용량 감압밸브 기술이 핵심기술이다.

마이크로 밸브는 슬레노이드와 포핏 메카니즘으로 구성되며, 핵심기술은 슬레노이드 액추에이터의 저소비 전력화 및 초소형화와 포핏 메카니즘의 고유출력능력화 및 고응답화이다. 이외에도 정밀 가공기술과, 신뢰성 시험기술 등이 요구된다. 또한 이와 유사한 공기압 서보밸브의 핵심기술로는 슬레노이드 코일과 영구자석을 이용한 리니어 모터에 대한 설계 및 자장 해석기술을 들 수 있다. 서보 밸브에서 안정된 고주파 응답을 얻기 위해서는 리니어 모터의 경량화 및 강한 전자기력이 요구 된다. 그리고 공기의 방향과 유량을 결정짓는 스펴 절환 메카니즘의 유체력 해석 및 스펴과 슬리브의 Hydrostatic Bearing기술, 알루미늄 하드 코팅 및 정밀 래핑 가공기술, 센서기술, 전용 제어기 개발기술 등의 공기압 첨단기술이라 할 수 있다.

그리고 인공근육 실린더의 핵심기술은 장수명화, 고파워화, 저가격화, 고성능화, 경량화 등을 위한 위한 Rubber & Fiber 최적 배합 기술 및 설계 생산기술, 액추에이터의 선형성 보장을 위한 온도변화에 둔감한 Rubber 설계기술, 신뢰성 시험기술 등이며, 셀리스 실린더는 저누설유량화, 고강성화, 저마찰화, 고성능화를 위한 Hybrid Bearing 해석, 설계, 가공 및 시험평가 기술, 고속화를 위한 High Cushioning 해석, 설계 및 시험 평가 기술, 고정밀화를 위한 일정유량 및 압력 공급 시스템 설계 및 제작기술 시험기 설계, 제작 및 시험평가 기술 등이 핵심기술이다.

3. 압축공기 에너지 절약 기술 개발 내용

국내 연구진에 의해 개발된 마이크로 밸브, 서보 밸브, 인공근육 실린더 및 쥘리스 실린더, 필드버스의 기술내용에 대해 요약해보았다.

소비전력 0.1watt, 응답시간 3msec, 1억만회 정상 작동한 마이크로 밸브는 포켓이 고응답의 반응 속도로 풀 스트로크를 낼 수 있도록 설계 하였으며, 이를 위해 솔레노이드에서 충분한 전자력의 힘이 발생 되도록 설계 하였다. 또한, 해석과 실험으로 설계의 타당성을 증명하여 시제품을 제작 하였으며, 포켓의 스트로크 변화에 따른 마이크로밸브 내부의 유동장 특성을 수치해석 하였다. 그 결과 마이크로 밸브 내부의 Pathline과 정압분포, 동압분포를 그림 5에 나타내었다. 또한 포켓의 변위가 0.4mm 이내에서는 포켓 벽면에 작용하는 동압의 감소가 거의 없음을 확인 하였으며, 해석과 실험으로 설계의 타당성을 증명하여 시제품을 제작 하였다.

공기압 서보밸브의 핵심기술인 리니어 모터를 주파수 100Hz, 유량 800 l/min 급인 개발 사양에 맞춰 설계 후, 전자장 해석 및 시스템의 과도응답을 확인하여 리니어 모터를 최적설계 하였으며, 서보밸브의 기구부 최적 설계를 위하여 스펴의 위치 변화에 대한 밸브내의 수치해석을 다양하게 수행하였다. 해석 결과를 기반으로 스펴 및 슬리브의 조합으로 이루어지는 밸브 기구 부 최적설계, 제작 및 실험을 완료하였다. 스펴 및 슬리브와 밸브 Body 등의 시제품을 제작하여 100Hz 공기압 서보밸브용 리니어 모터 전용 디지털 제어기와 위치 측정을 위한 홀 센서를 개발하였으며, 기존의 공기압 서보 밸브의 제어 방식을 분석하고 이를 바탕으로 응답성능을 개선할 수 있는 디지털 제어 방식을 사용하여 설계, 제작 및 특성을 시험하였다. 또한 종합성능 및 신뢰성 시험을 수행할 수 있는 시험기를 설계 및 제작하였으며, 국내 공기압 서보밸브의 성능시험 규격이 없어, 외국의 JIS, MIL, ISO 등의 국제 규격을 기반으로 공기압 서보밸브의 종합성능 및 신뢰성 평가 항목을 결정하고, 성능시험 방법 및 세부 기술에 대해 정리하였으며, 성능시험을 위해 전용 S/W를 개발하여 시제품의 평가를 수행하였다.

아라미드 대신 값싼 나일론을 섬유(Fiber)로 사용한 인공근육 실린더는 고무 및 섬유의 최적설계를 위하여 고무의 물성치 시험(내열, 내유성, 내오존성, 내한성)등의 시험을 통하여 CR재질의 고무를 선정

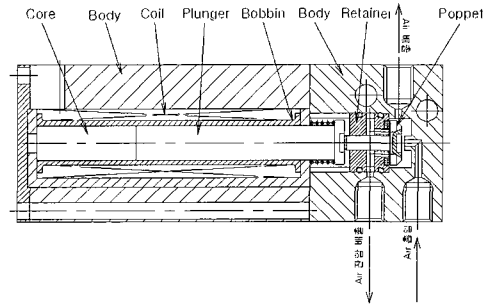


그림 5 마이크로 밸브 구조도

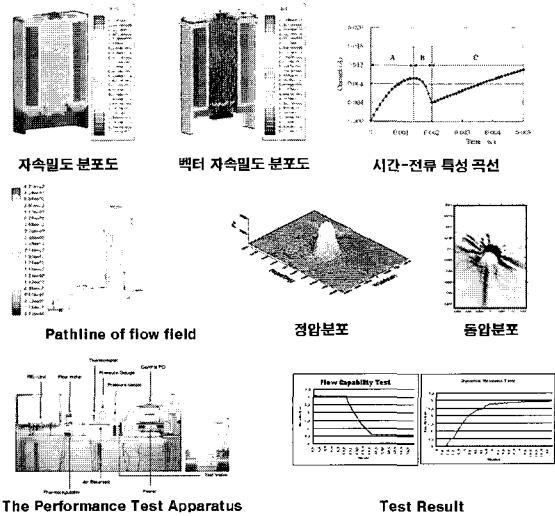


그림 6 마이크로 밸브의 특성해석 및 실험결과^{1),5)}

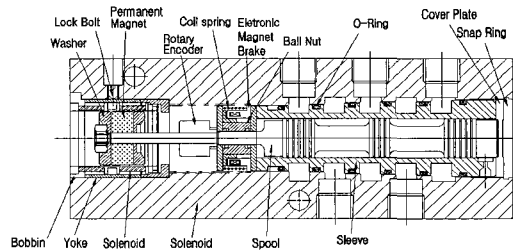


그림 7 서보 밸브 구조도

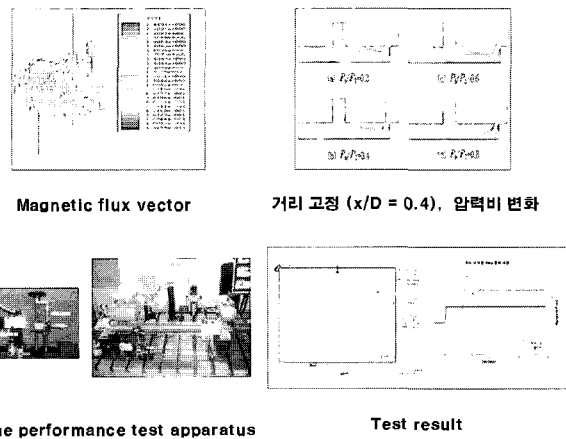


그림 8 서보밸브의 특성해석 및 실험결과 2)

하였으며, 인공근육실린더의 기능에 가장 영향을 주는 섬유 각도 선정에 FEM 해석을 통하여 실시함으로써 최적의 각도를 선정하여 시제품을 제작한 후 길이방향 수축률, 반경방향 팽창률, 수축력에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과 해석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있으므로 해서 추후 다른 사양의 인공근육 실린더 개발 시 해석결과를 활용 할 수 있게 되었다.

100% Seal이 없는 고성능 쉘리스 실린더의 핵심 기술인 Hybrid Bearing 기술을 개발에 맞춰 누설유량을 최소화하기 위하여 왕복 운동하는 쉘리스 실린더에 대한 2차원적 레이놀즈 방정식을 유도하고, 유한차분법에 의해 그 해를 구하는 방식으로 해석을 수행 하였다. 또한, 정밀가공 기술을 통하여 실린더 직경 50mm, 스트로크 500mm, 작동압력 8bar의 쉘리스 실린더를 제작 및 특성을 시험하였다.

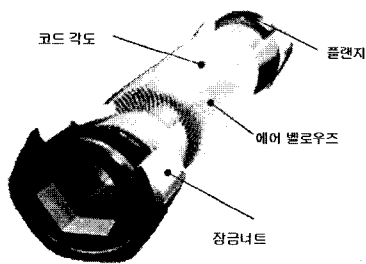


그림 9 인공근육 실린더의 구조도

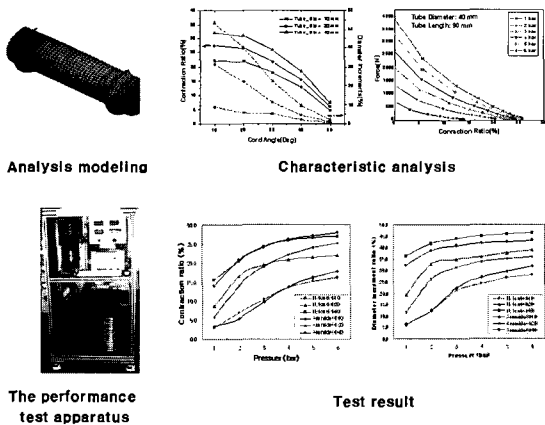


그림 10 인공근육 실린더의 특성해석 및 실험결과⁽³⁾

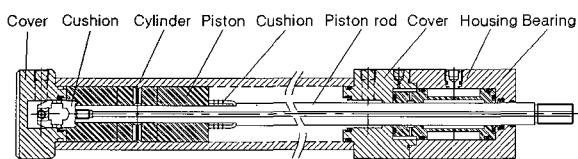


그림 11 쉘리스 실린더 구조도

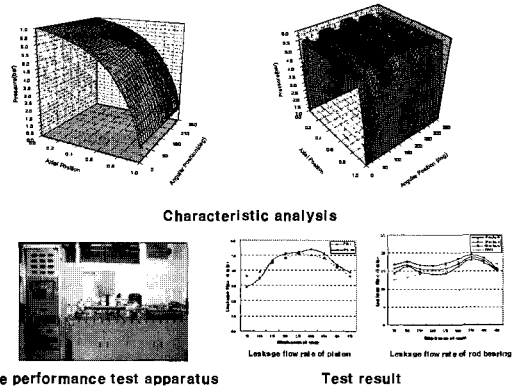
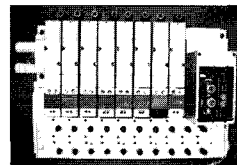
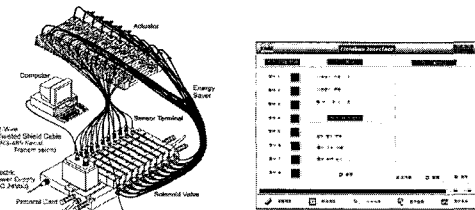


그림 12 쉘리스 실린더 특성해석 및 실험결과⁽⁴⁾

종합성능 및 신뢰성 시험을 수행할 수 있는 시험기를 설계 및 제작하였으며, 향후 피스톤의 유형 및 특성 등을 분석하여 다양한 실험을 하고 발생하는 누설유량을 감소시키고 고 정밀 가공을 통하여 고성능의 쉘리스 실린더를 제작할 수 있는 최적의 설계조건을 제시하고자 한다.



통신케이블 길이(m)	500	700	900	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
솔레노이드 밸브의 정상 작동 여부	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상	정상

그림 13 필드버스 시스템 개발결과⁽⁵⁾

필드버스 시스템 구성을 위하여 RS-485멀티 드롭 방식에 의한 네트워크를 구축하고 중앙의 제어 컴퓨터에서 각 솔레노이드 밸브 및 센서 신호를 1.5km까지 원거리를 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다.

통신망 구축을 위하여 중앙 제어 장치 및 공기압 시스템 사이의 인터페이스를 위한 하드웨어 모듈을 설계/제작 하였으며, 체계적이고 효율적인 시스템 구축이 가능하며 또한 시스템의 확장이 용이하도록 사용자 인터페이스를 설계/제작 하였다. 또한 수집된 데이터로부터 시스템을 효율적으로 제어할 수 있는 응용 프로그램을 개발하였다

4. 결 언

압축공기 에너지 절약시스템에 대한 선진 업체의 경우 일본 JFPS, 미국 NFPA, 독일 Fraunhofer, 프랑스 CETIM 등 국가 차원의 막대한 예산 지원을 바탕으로 공기압 회사인 프랑스의 Legris(주), 미국의 Numatic(주) 및 일본의 SMC(주), PISCO(주), 독일의 FESTO(주) 등에서 제품 생산 및 연구개발에 많은 투자를 하고 있다. 그러나 우리나라의 경우를 보면 에너지 해외 의존도가 97% 이상인데도 불구하고 에너지의 사용이 가장 많은 산업 분야에 대한 에너지의 효율적인 신기술 개발보다는 관리부문에 많은 지원을 하고 있다. 더욱이 산업 전반에 폭넓게 사용되고 있는 압축공기는 국내 거의 모든 산업체에서 사용의 편리성과 유지보수의 간편함과 작동 매체인 공기의 친환경적인 안전성 등의 이유로 전기에너지 및 유압에너지 등에 비해 최고 10배가 넘는 에너지 가격을 고려하지 않고 사용하고 있는 실정이다.

상기의 공기압 기기들의 핵심기술 개발을 수행함으로써 시대적 부응에의 국산화 개발 및 세계 공기압 기기의 수요경쟁에 맞는 제품설계기술 및 생산기술을 정립시키고, 국내 독자기술 확보에 의한 기술 선진국으로의 진입을 위한 교두보를 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 일반 산업계의 응용은 물론 기계, 전기, 전자, 열 유체 기기 등의 핵심 부품 개발에 기술적용이 가능함으로 산업체 전반에 파급효과가 큰 기술로 정착 할 수 있을 것이다. 그리고 국내 산업체에 기술이전으로 고 신뢰성 있는 국산화 제품 생산에 의한 국제경쟁력 향상에도 기여 할 것으로 사료된다. 향후, 공기압 기기의 발전을 위해서 정부기관 및 관련업체의 지속적인 관심과 연구노력이 필요할 것이다.

참고 문헌

- 1) 김동수, “초절전형 마이크로 밸브 개발 보고서”, 에너지 관리공단, 2005.
- 2) 김동수, “100Hz 이하급 직동식 공압 서보밸브 개발 최종보고서”, 산업자원부, 2003.
- 3) 김동수, “산업용 Fluidic Muscle 실린더 개발 최종보고서”, 산업자원부, 2005.
- 4) 김동수, “고성능 썰리스 실린더 개발 최종보고서”, 산업자원부, 2005.
- 5) 김동수, “에너지 절약형 Fluid power system 개발 최종보고서”, 에너지 관리공단, 2004

[저자 소개]



김동수(책임저자)

E-mail : kds671@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7152

1960년 02월 15일생

2000년 영남대학교 기계공학과 박사 과정 졸업, 1991년 한국기계연구원 입사, 1991년~현재 책임연구원, 정보장비연구센터 팀장, 공학박사, 산업자원부, 과학기술부, 중소기업청, 기술표준원 등 R&D 평가위원, 첨단공압 제어시스템 기술 및 정보장비 기술개발 연구에 종사, 유공압 시스템학회, 대한기계학회, 한국정밀공학회 등의 회원

[저자 소개]



배상규

E-mail : skbae@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7165

1968년 1월 11일생

2006년 충남대학교 기계공학과 석사 과정 졸업, (주)만도, 현재 한국기계연구원 정보장비연구센터 근무, 첨단 공압 특수 액추에이터 기술 및 정보장비 기술개발 연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원