

공압설계를 위한 전문가시스템

신흥열* · 이재원**

Expert System for the Design of Pneumatic Systems

Shin Heung Yeoul*, Lee Jae Won**

요 약

인공지능 분야 중 하나인 전문가시스템 기술은 현재 산업현장에서 여러 가지 분야의 문제 해결에 이용되고 있다. 본 논문은 공압설계를 자동화하기 위한 전문가시스템 PDES(Pneumatic Design Expert System)의 프로토타입 개발에 관한 것이다. 공압설계를 위한 요구 조건이 시스템의 입력정보로 제공되면 공압설계 시방과 공압회로도, 공압작업요소의 영상이 시스템의 출력으로 제시된다. PDES의 지식 베이스는 산업분야 전문가의 전문지식과 경험적 지식을 획득, 분석하여 전문가 시스템 셸을 이용하여 구성하였으며 추론전략으로는 전향추론을 적용한 규칙기반추론(Rule-Based Reasoning)을 이용하였다. PDES는 공압 설계시 설계 업무를 자동화하여 능률을 향상시켜 줄 뿐만 아니라 공압 관련 비전문가가 공압설계를 할 때에도 큰 도움을 줄 수 있다.

주제어 : 공압설계, 공압시스템, 설계시방

I. 서 론

일반적으로 설계는 근간(根幹)설계를 위한 부품 선정, 정해진 부품들의 배치, 설계변수의 고정, 그

리고 일시적인 스케치로부터의 설계도 구성 등으로 분류된다(Hinrichs and Kolodner, 1991). 그러나 많은 설계 업무들이 개념설계 단계에서는 이와 같이 확연히 분리되기 어렵고, 설계업무 자체가 잘 정의되지 않는 경우에는 탐색 공간이 모호해질

* 인하공업전문대학 자동화기계과

** 인하대학교 자동화공학과

수 있다. 그리고 평가 기준도 주관적으로 흐를 우려가 있다. 반면에 공압설계는 대상이 공압이라는 특화된 영역으로 한정되고 설계 업무 자체도 명확할 뿐더러 설계단계도 상세설계 단계에 속하게 된다. 따라서 궁극적 목표인 공압설계 전문가시스템은 잘 정의된 탐색공간을 갖고 객관적인 평가기준을 수반할 수 있는 대상 영역을 갖게 된다. 따라서 어떤 시스템에 공압요소들이 필요할 때 공압의 설계를 위한 부품의 선정과 선정된 부품들의 배치가 필요한데 이 과정을 자동화, 전산화하기 위해서는 궁극적으로 공압설계를 위한 전문가시스템의 개발이 요구된다.

공압(pneumatics)은 압축공기로 작동되는 실린더, 모터 등의 작동기와 이를 제어하는 기기를 산업체에서 이용하는 기술로서 전세계적으로 산업에 소개된 것은 공정의 자동화와 합리화의 문제가 증가하기 시작한 1950년경부터이다(Meixner and Kobler, 1990; 김장호, 신홍열, 1993;). 공압에너지는 작업용 매체 에너지는 물론 제어용 매체에너지로도 사용되므로 작업현장에서 PLC나 마이크로컴퓨터 등의 전자장치를 이용하여 제어를 하는 경우에도 최종 작업은 공압장치를 이용하는 경우가 많이 있다. 공압을 활용한 기술은 산업체 제조 공정의 넓은 분야에 걸쳐 다양하게 사용되고 있는데, 산업체의 일반적인 기계나 장치에의 응용을 넘어서 가정, 농업, 원자력 연구는 물론 우주선에까지도 이용되고 있다(Meiner and Kobler, 1990; 한국생산성 본부, 1994). 그러나 공압에너지는 생산과 저장에 상당한 경비를 요하는 값비싼 에너지이며(Deppert and Stoll, 1988) 공압기술 자체도 경험적인 요소가 많아 부품선정이나 회로설계를 하는데 있어서 기존의 제조업체들이 제공하는 기술적인 정보를 이용하므로 자신의 지식이나 경험에 의존하는 일관된 설계방법이 정착되고 있지 않다. 이와

같은 이유로 설계된 공압시스템은 작업기능의 충족만을 추구하는 경향이 크게 나타나 과잉 설계로 인한 과잉 설비 투자 및 많은 에너지의 손실을 초래하고 있으므로 공압요소의 적정 선정은 시급히 해결하여야 할 최우선 과제라고 할 수 있다(Festo KG, 1987).

현재까지 수행된 연구들은 공압실린더 자체에 대한 설계 및 성능 평가에 국한되고 있고(Brown and Chandrasekaran, 1985; Brown and Chandrasekaran, 1992; 원병희, 1988) 공압 시스템의 구성이나 설계방법에 대한 연구는 드물다. 본 연구에서는 이 점을 고려하여 공압기기가 포함되는 시스템에 대하여 부여되는 일반화된 작업조건을 만족하면서 에너지 비용을 최소화할 수 있는 공압설계 전문가시스템 프로토타입을 개발하였다. PDES는 선형작업요소, 회전작업요소, 진공요소, 서비스 유니트 등의 부품 선정과 이들을 제어해주는 각종 밸브들, 액세서리, 속도제어 방법 등에 대한 설계정보를 제공하며 선정된 부품들의 배치를 공압회로도도 출력하여 공압 부품들의 유기적인 관계를 설명하고 공압 작업요소의 영상을 사용자에게 제공한다. 시스템 개발을 위해 공압설계와 관련된 기존의 방법들을 조사 분석하여 지식베이스화 하였으며 추론전략으로는 규칙 기반 추론을 이용하였다.

II. 공압시스템의 구성

공압은 전동기나 내연기관으로 압축기를 구동해서 기계적 에너지를 공기의 압력 에너지로 변환시키고, 이 압력을 제어하여 공압 작동요소에 공급하여 각종 기계적 작업을 하는데에 사용된다. 이러한

작업에 관계되는 일련의 요소를 공압기기라고 부르며 공압요소의 결합체를 공압시스템이라고 한다. 공압시스템의 기본 구성은 공압 발생 장치, 신호 입력 요소, 신호처리요소, 작업 요소로 구성되며 구성 요소간의 신호 흐름을 나타내면 그림1과 같다(Croser, 1989).

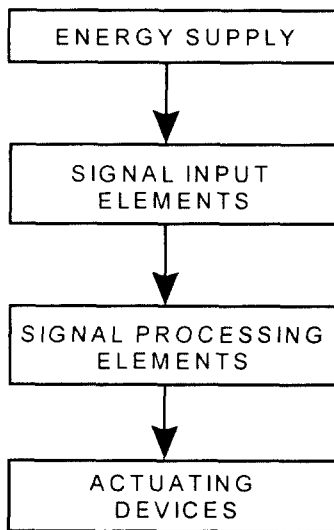


Fig. 1. Signal flow of pneumatic system

2.1 선형 작업 시스템

공압을 이용한 선형 작업은 일반적으로 실린더를 이용하여 수행된다. 공압 실린더는 직선왕복을 하면서 이송, 공급, 축출, 리프팅, 클램핑 등의 작업을 하며, 실린더가 내는 힘은 공급 공기의 압력과 실린더의 직경, 밀봉 요소의 마찰 저항, 배압 등에 의하여 결정된다. 공압 실린더는 기본적으로 피스톤의 전진운동, 후진운동에 의해서 작업을 하므로 실린더를 제어하는 방향제어밸브는 제어위치가 두 개인 밸브가 사용된다. 때에 따라서 피스톤이 중간에 정지하면서 작업을 하는 경우도 있을 수 있는데

이러한 경우에는 제어위치가 세 개인 방향제어밸브가 사용될 수도 있다. 그 밖에도 피스톤의 속도를 조절해 주는 유량제어밸브와 속도 제어 방법, 급속 배기밸브 등이 필요하고 소음기, 연결구, 배관 등의 액세서리 등도 필요하다.

2.2 회전 작업 시스템

공압을 이용하는 회전 작업은 일정한 회전각도 내에서 왕복회전 운동을 하는 요동형 작업요소, 회전각도의 제한을 받지 않는 공압모터 등이 있다. 일반적으로 공압시스템에 사용되는 회전 작업 요소는 요동형으로서, 공압 에너지를 직접 회전력으로 변환시키는 베인(vane)형과 피스톤 로드와 기어를 구동시켜 직선운동을 회전운동으로 변환시키는 랙-피니언(rack-pinion)형이 있다. 회전 작업 요소가 내는 토크는 공급 공기의 압력, 피스톤의 단면적과 기어의 비에 의해 결정되며 공작물의 회전, 굽힘 작업 등에 활용된다. 공압회전요소에 사용되는 제어밸브는 정회전과 역회전을 시켜주는 제어위치가 두 개인 제어밸브가 사용되며 선형작업요소와는 달리 중간정지 작업은 거의 사용되지 않으므로 제어위치가 세 개인 제어밸브는 필요치 않다. 선형 작업요소와 마찬가지로 속도 조절에 관계되는 밸브와 액세서리 등이 필요하다.

2.3 진공 작업 시스템

진공 작업은 진공을 발생시켜 주는 진공발생기와 발생된 진공을 이용하여 작업을 할 수 있게 만들어 주는 흡착컵에 의하여 수행된다. 진공발생기는 벤츄리(venturi) 원리를 이용한 장치로서 생산현장에서 사용되는 5bar에서 7bar사이의 공압을 공급해 주면 -0.7bar에서 -0.8bar 사이의 진공을 형성시키게 되며 공급 공기의 압력이 상승하더라도

더 이상 진공도가 커지지 않는다(Festo KG, 1994). 흡착컵에 발생한 진공을 연결하여 작업대상물의 이송, 포장, 조립 등의 작업을 수행할 수 있게 된다. 진공의 형성 여부는 진공발생기의 공기 공급 여부에 따라 결정되므로 사용되는 제어 밸브는 제어위치가 두 개이면 된다. 진공 작업에서는 속도 조절 밸브 등이 필요치 않으나 소음기 등의 액세서리는 반드시 필요하다.

2.4 에너지 공급 요소

압축공기를 생산하기 위해서는 요구되는 작업압력 까지 공기를 압축시켜 주는 압축기가 필요하지만 대부분의 생산현장에서는 압축기와 저장탱크, 건조기 등을 한데 모아 공압 플랜트를 세우고 배관을 통하여 공압을 공급해 준다. 따라서 공압장치 설계자의 입장에서는 공압을 공급해 주는 최초 요소를 일반적으로 서비스 유니트로 간주하고 공압시스템을 설계하게 된다. 서비스 유니트는 이물질을 제거해주는 공압 필터, 공기의 압력을 일정하게 유지시켜 공급해 주는 공압 레귤레이터, 윤활유를 미세화 시키는 윤활기로 구성된다.

III. 공압 설계 전문가 시스템의 구축

3.1 시스템의 기본 기능과 구조

1960년대 이후 인공지능의 응용분야 중의 하나로 탄생한 전문가시스템(expert system)은 전문가가 갖고 있는 분석, 판단, 계획 등의 지식을 인위적으로 컴퓨터에 부여하고 그 분야의 비전문가도 시스템에 구축된 전문가의 지식을 이용하여 문제를 해결할 수 있도록 하는 컴퓨터 시스템이다. 공압 설계를 위한 전문가시스템은 기존의 공압 제조사가 제공하는 기술적 데이터와 공압 시스템 설계 정보를 공압 설계 전문가의 지식을 이용하여 추론엔진과 지식베이스로 구성된다. 사용자의 요구 조건을 입력화면을 통하여 넣어주면 추론을 거쳐 입력 요구 조건을 만족시키는 적절한 설계 시방을 출력하도록 한다. 이와 같은 사항들을 만족시키도록 개발된 공압 설계 전문가 시스템의 기본 구조는 그림 2와 같다.

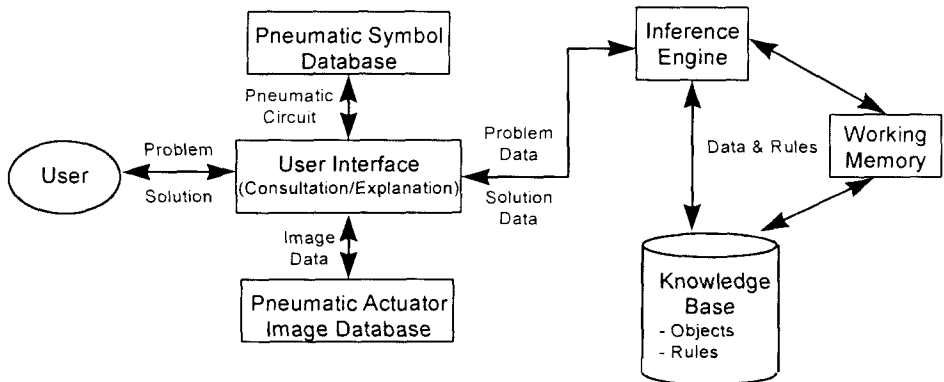


Fig. 2. Structure of PDES

3.2 시스템의 구축 전략

공압설계 전문가시스템을 효과적으로 구축하기 위하여 채택한 전략은 다음과 같다.

3.2.1 전문가시스템 개발을 위한 전용 툴의 사용

1992년도 조사에 따르면 대부분의 전문가시스템이 전문가시스템 툴을 사용하여 개발되었는데 그 비율이 43%에 달하고 있고, Lisp를 사용한 것이 22%, Prolog를 사용한 것이 10%, Ops를 사용한 것이 9% 정도이다(Durkin, 1994). 일반적으로 전문가시스템을 개발하기 위하여 상업용 시스템인 전용 툴을 사용하면 신뢰성이 우수하고 유지성이 뛰어나다. 전용 툴은 지식베이스 편집 장치, 디버깅 보조장치, 입출력 장치 등의 지원 장치를 제공하여 시간과 비용을 절감하게 해준다. 그리고 그래픽 환경을 지원하므로 규칙 구조나 객체 구조를 쉽게 조망할 수 있고 지식베이스가 분리되므로 전문가의 지식을 첨가하거나 수정하기가 용이하다. 또한 일반 프로그래밍 언어로 작성된 프로그램의 호출을 가능하게 하여 시스템의 확장성을 제공한다. 이와 같은 이유로 공압설계 전문가시스템 구축에 상업용 전문가시스템 개발 전용 툴을 사용한다.

3.2.2 규칙기반추론의 적용

공압설계 전문가시스템에서는 이론적인 지식과 경험 지식을 규칙으로 표현하고 추론하는 규칙기반 추론을 적용하였는데 이는 규칙이 문제 영역에서 광범위한 추세를 결정할 수 있기 때문이다. 추론도 중 패턴매칭에 실패하는 경우에는 설명 기능을 이용하여 매칭에 실패한 이유를 설명하고 공압설계에 필요한 설계조건을 수정하도록 하여 규칙기반추론의 단점을 보완한다.

3.2.3 전향추론의 적용

전향추론(forward reasoning)은 data driven 추론이라고도 하는데 초기 문제의 기술에서 모든 자료가 주어진다(Luger and Stubblefield, 1993). 공압설계 전문가시스템에서는 설계문제의 입력 조건 자료들로부터 조건부가 만족되는 규칙을 찾아가며 적절한 설계 시방을 찾도록 규칙이 구성되고 전향추론을 하였을 때 test goal 의 개수가 소수이므로 전향추론을 채택한다.

3.2.4 지식베이스의 분리 구성 및 모듈화

공압시스템을 작업내용으로 분류하면 선형작업, 회전작업, 진공작업으로 나뉜다. 그리고 작업의 내용과 더불어 공압 공급을 책임지는 서비스 유니트의 선정작업도 병행된다. 따라서 효과적인 지식베이스의 구축을 위하여 선형작업 지식베이스, 회전작업 지식베이스, 진공작업 지식베이스, 서비스 유니트 지식베이스 등의 네 개의 지식베이스로 분리하여 구성한다. 각각의 작업은 모두 다른 작업에 영향을 미치지 않으므로 독립적으로 구성되는 것이 바람직하다고 판단된다.

그리고 분리된 네 개의 지식베이스 내에서는 지식의 구성을 모듈화한다. 예를 들면 선형작업 지식베이스의 경우 실린더 직경 결정부, 행정거리 결정부, 속도제어 결정부 등과 같이 기능별로 지식베이스를 모듈화하여 구성함으로써 추후에 전문가의 지식이 용이하게 부가되고 수정될 수 있도록 한다. 모듈화 구성은 지식의 추가로 발생할 수 있는 지식간의 충돌을 감소시킬 수 있다.

또한 추론이 성공적으로 수행되어 설계시방이 확정되면 공압설계시방과 대응되는 공압기호를 정하고 공압요소 기호간의 배관 연결을 결정해 주는 규칙들이 필요한데 이에 대한 공압회로도 구성 지식베이스는 별도로 구성하였다.

3.2.5 혼합형 지식표현의 채택

객체를 이용한 지식표현은 공압시스템 설계에 필요한 조건과 그 조건을 만족시켜 주는 설계시방, 그리고 공압 설계 영역에서 필요한 사실(fact)을 표현하는데 사용되며 생성규칙에 의한 지식표현은 추론에 사용되는 전문가의 경험지식과 공압설계영역에서 사용되는 심층지식을 표현하는데 사용한다.

3.2.6 공압요소의 표준 데이터의 활용

공압 제조회사에서 생산하는 공압부품들은 나름대로의 규격을 갖고 있는데 이러한 규격들은 임의로 정해지는 것이 아니고 국제 표준화 기구(ISO)에서 정한 규격에 준하여 정해지게 된다. 공압설계시 여러 가지 상황을 고려하여 실린더의 직경을 선정하고자 할 때, 필요한 힘을 충분히 낼 수 있는 실린더의 직경이 구해지면 실린더 제조회사의 규격에 그 직경이 있는지를 살펴보고 없으면 필요한 직경보다 큰 규격품을 선정하여야 한다. 또한 실린더의 직경에 따른 행정거리도 제한이 따르고, 직경에 따른 규격화된 행정거리가 정해져 있다. 이러한 상황은 공압회전요소와 공압진공요소도 마찬가지이다.

공압설계 전문가시스템에서는 이러한 상황을 고려하여 공압요소에 대한 표준 데이터를 데이터베이스화하여 실제 문제 해결시 표준 공압부품이 해로서 출력되도록 하였다. 그리고 실린더의 직경과는 달리 실린더의 행정거리의 경우는 주문자의 요구에 따라 행정거리를 맞추어 줄 수 있으므로 이러한 경우에는 표준 행정거리의 출력과 더불어 주문자의 요구대로 행정거리를 조정해 줄 수 있다는 설명을 덧붙이도록 한다.

3.2.7 공압회로도와 공압작동요소의 영상 출력

공압설계 전문가시스템은 입력조건을 만족시키

는 설계시방을 해(solution)로서 출력한다. 그런데 설계시방만으로는 공압요소간의 유기적 관계를 알아보기 힘들다. 예를 들어 실린더와 솔레노이드 밸브, 속도제어밸브, 속도제어 방법에 대한 시방이 결정되어도 실제로 이들을 어떻게 연결시켜야 하는가에 대한 정보가 없으므로 단순한 시방의 결정만으로는 공압설계에 대한 만족도가 떨어지게 된다. 따라서 설계시방을 이용하여 공압회로도를 작성하면 공압요소간의 배치를 확인할 수 있고, 추후에 배관시에도 활용할 수 있게 된다. 또한 공압작동요소의 이미지 출력으로 사용할 작동요소에 대한 이해를 높일 수 있게 한다.

3.2.8 설명기능

공압설계시 입력조건을 만족시키는 설계시방을 출력할 수 없는 경우에는 추론이 중단된다. 이러한 경우에 추론이 중단된 이유를 설명해 주고 입력조건 어떤 속성이 추론에 장애가 되는지를 사용자에게 알려주어 입력조건을 변경할 수 있게 한다.

3.3 지식베이스의 구성

본 공압시스템 설계 연구에서의 심층 지식으로는 공압 시스템에서 사용하는 공학적 지식으로 정리, 법칙 등을 의미하며, 표층 지식으로는 업무상의 체험이나 선배 경험자로부터 얻은 지식으로서 공압요소의 선정 지식(heuristic knowledge)이 있다. 공압설계 전문가시스템에서의 지식획득은 인쇄물로부터 이론적인 지식과 실험지식이 획득되었고 경험적인 지식은 연구팀의 직접적인 업무수행 경험과 전문가와의 직접적인 상담을 통하여 획득하였다. 이론과 실험을 통하여 얻어지는 심층지식으로는 선형구동요소의 힘 계산, 회전운동요소의 토크 계산, 진공요소의 흡착력 계산, 공압작동요소의 공기소모

량 계산 등이 있고 경험지식으로는 공압작동요소의 선정, 공압작동요소의 제어요소 선정, 속도제어 방법, 공압 액세서리 선정 등이 존재한다. 특히 경험적인 지식은 공압설계와 관련하여 중요한 비중을 차지한다.

공압설계에 대한 설계지식과 데이터는 규칙(rule)과 객체(object) 형태로 표현하였다. 따라서 전문가의 경험적 지식들을 컴퓨터에 저장, 입력 및 출력하기 위하여 공압 선정에 필요한 각종 요구 조건에 대한 정보를 O-A-V (Object-Attribute-Value) triplets(Durkin, 1994)로 표현하였다. 입력된 설계 요구 조건은 추론을 거쳐 설계시방을 생성하게 되는데, 설계시방에는 공압 요소의 시방(specification)과 작업요소 제어방법이 마찬가지로 O-A-V 형태로 제시된다. 본 시스템에서는 공압영역을 선형작업, 회전작업, 진공작업, 서비스유니트의 네 분야로 나누어 각 영역의 설계 요구 조건과 그에 대한 설계시방을 정의하는 attribute를 정의하였다. 표1은 선형작업 분야에 대한 설계 요구 조건과 설계 시방에 대한 attribute의 구성을 보여준다.

그리고 각 작업영역에서 추론에 사용되는 규칙을 정리하면 다음과 같다.

3.3.1 선형작업을 위한 규칙

공압선형작업 설계를 하기 위해서 구축된 지식베이스에는 다음과 같은 규칙들이 포함되어 있다.

- 사용압력 제한에 관한 규칙
- 속도에 관한 제한과 평가에 관한 규칙
- 행정거리 제한과 평가에 관한 규칙
- 힘의 제한과 평가에 관한 규칙
- 안전을 결정에 대한 규칙
- 중간정지 평가에 관한 규칙
- 피스톤로드 회전유무에 관한 규칙

Table 1. Attributes needed in linear pneumatic design

| Attribute의 종류 | Attribute 명칭 | Attribute 서술 | |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| Attributes of linear pneumatic design | 설계 조건 | motiontype | 작업 종류 |
| | | pressure | 사용압력 |
| | | numOfPosition | 실린더 동작 |
| | | midStop | 중간정지 방법 |
| | | worktype | 실린더 운동시 부하상태 |
| | | force | 필요한 힘 |
| | | speed_f | 피스톤의 전진속도 |
| | | speed_b | 피스톤의 후진속도 |
| | | stroke | 실린더의 행정거리 |
| | | mountSpace | 실린더 설치공간 |
| | | availableFB | 실린더 이용방향 |
| | | mountReed | 리드스위치 설치 여부 |
| | | pistonRot | 피스톤 회전유무 |
| | | pistonShape | 피스톤 모양 |
| | e_failure | 정전시 밸브의 위치 | |
| | cycles | 분당 운전 회수 | |
| | cyl_Init | 실린더 초기 상태 | |
| | 설계 시방 | Actuator | 실린더 시방 |
| | | Diameter | 실린더 공칭경 |
| | | Stroke | 실린더 행정거리 |
| Sol_valve_spec | | 솔레노이드 밸브 시방 | |
| Sol_valve_type | | 솔레노이드 종류 | |
| Sol_valve_size | | 솔레노이드 밸브 공칭경 | |
| Flow_control_valve_f | | 전진속도 제어용 유량제어밸브 공칭경 | |
| Flow_control_valve_b | | 후진속도 제어용 유량제어밸브 공칭경 | |
| Method_flow_control | | 유량제어방법 | |
| Quick_exhaust_valve_f | | 전진속도 제어용 급속배기밸브 공칭경 | |
| Quick_exhaust_valve_b | 후진속도 제어용 급속배기밸브 공칭경 | | |
| Silencer | 소음기 공칭경 | | |
| Tube | 튜브 내경 | | |
| Fitting | 연결구 공칭경 | | |
| Air_consumption | 공기 소모량 | | |

- 피스톤로드 형상 평가에 관한 규칙
- 전후진운동 유효성 평가에 관한 규칙
- 부하 및 무부하 운동 평가에 관한 규칙

- 실린더 직경과 시방 결정에 대한 규칙
- 행정거리 결정에 대한 규칙
- 실린더 설치 공간 평가에 관한 규칙
- 리드 스위치 설치 평가에 대한 규칙
- 속도제어방법 결정에 대한 규칙
- 솔레노이드 밸브 시방 결정에 대한 규칙
- 유량제어밸브와 급속배기밸브 시방 결정에 대한 규칙
- 공기소모량 계산에 관한 규칙
- 공압 액세서리 결정에 대한 규칙
- 표준 공압요소 데이터베이스 활용에 관한 규칙

3.3.2 회전작업을 위한 규칙

공압회전작업 설계를 하기 위해서 구축된 지식 베이스에는 다음과 같은 규칙들이 포함되어 있다.

- 사용압력 제한에 관한 규칙
- 토크에 관한 제한과 평가에 관한 규칙
- 안전율 결정에 대한 규칙
- 회전각의 제한과 평가에 관한 규칙
- 리드 스위치 설치 평가에 대한 규칙
- 공압회전요소 시방 결정에 대한 규칙
- 속도제어방법 결정에 대한 규칙
- 솔레노이드 밸브 시방 결정에 대한 규칙
- 유량제어밸브 시방 결정에 대한 규칙
- 공기소모량 계산에 관한 규칙
- 공압 액세서리 결정에 대한 규칙
- 표준 공압요소 데이터베이스 활용에 관한 규칙

3.3.3 진공작업을 위한 규칙

진공작업 설계를 하기 위해서 구축된 지식베이스에는 다음과 같은 규칙들이 포함되어 있다.

- 사용압력 제한에 관한 규칙

- 흡착력의 제한과 평가에 관한 규칙
- 흡착컵 시방 결정에 대한 규칙
- 안전율 결정에 관한 규칙
- 흡착컵의 개수 증가에 관한 규칙
- 진공 노즐 시방 결정에 대한 규칙
- 솔레노이드 밸브 시방 결정에 대한 규칙
- 공기소모량 계산에 관한 규칙
- 공압 액세서리 결정에 대한 규칙
- 표준 공압요소 데이터베이스 활용에 관한 규칙

3.3.4 서비스 유니트 선정작업을 위한 규칙

서비스 유니트 선정작업을 하기 위해서 구축된 지식베이스에는 다음과 같은 규칙들이 포함되어 있다.

- 사용압력 제한에 관한 규칙
- 필요 공기소모량 평가에 관한 규칙
- 서비스 유니트 시방 결정에 대한 규칙
- 공압 액세서리 결정에 대한 규칙
- 표준 공압요소 데이터베이스 활용에 관한 규칙

3.4 시스템의 자료 흐름(data flow)

공압 시스템을 설계할 때에는 우선 작업 내용을 충분히 검토하여 설계 요구 조건을 명확히 한후 설계요구조건 attribute에 attribute 값을 입력한다. 입력이 종료되면 설계조건 attribute와 attribute 값은 파일 형태로 전환되어 추론엔진으로 입력되어 추론이 이루어진다. 지식 베이스는 선형 작업, 회전 작업, 진공 작업, 서비스 유니트 선정의 4개로 구성되며 입력 문제에 따라 입력 문제에 해당하는 지식 베이스를 활용하여 추론이 수행된다. 추론이 종료되면 두 개의 출력 파일이 생성되는데 첫 번째 파일은 입력 문제를 만족시키는 공압 요소의 시방과 작업요소 제어방법이며 또 하나는 공압 회로도를 작성하고 공압 작업 요소의 이미지를 출

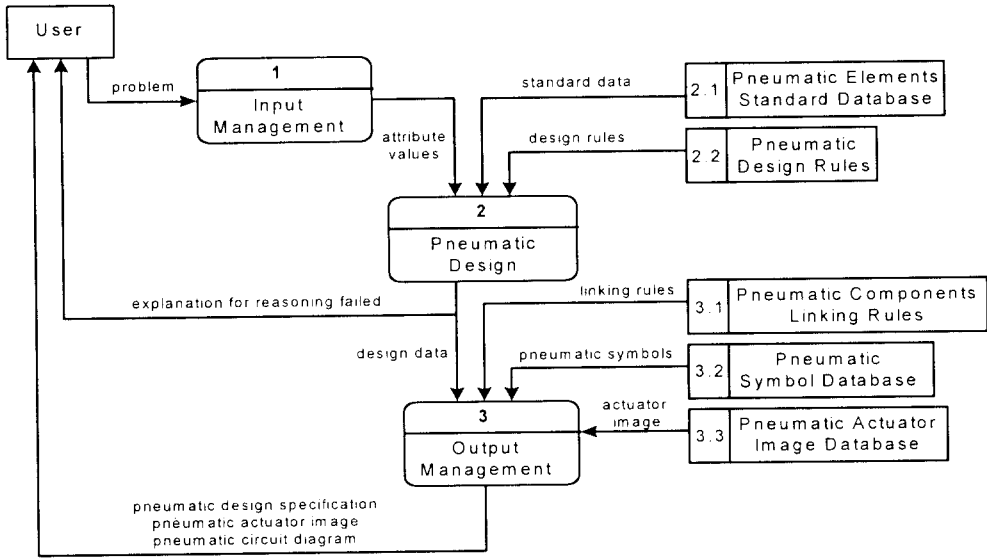


Fig. 3. Data flow of PDES

력하는데 필요한 파일이다. 출력 파일은 SUI 윈도우를 통하여 사용자에게 공압 설계 시방과 공압회로도, 공압 작업 요소의 이미지를 보여준다. 그림 3은 시스템의 자료흐름을 나타낸다.

IV. 공압 설계 전문가 시스템의 구현

4.1 시스템의 개발 환경과 구성

공압 설계 전문가 시스템은 Windows 95 환경에서 개발되었으며 추론 부분과 지식 베이스 구축은 전문가 시스템 개발 셸인 Elements Environments 2.0을 사용하였고 사용자 인터페이스와 공압회로도 구성부는 Visual Basic 4.0을 사용하였다. 공압 설계 전문가 시스템의 구성은 일반적인

전문가 시스템의 구성과 기본적으로 동일하다. 시스템의 구성을 모듈화하여 각 모듈의 기능을 기술한 기능도(function chart)는 그림 4와 같다.

4.1.1 입력 관리부

입력 관리부에서는 사용자로부터 공압 설계에 필요한 정보를 입력받아 추론에 필요한 내부 자료 구조로 입력 데이터를 변환시켜 주고 선형 작업, 회전 작업, 진공 작업, 서비스 유니트 선정 중에서 어떤 지식 베이스를 사용할 것인지를 결정해 준다.

4.1.2 추론 엔진

추론엔진은 전문가 시스템의 두뇌의 역할을 하는 부분으로서 새로운 지식을 유추해 내기 위해 규칙들을 어떻게 적용할 것인지를 결정하는 해석기(interpreter)와 규칙들이 적용되는 순서를 결정하는 스케줄러(scheduler)를 포함한다. 본 시스템에서는 전향추론에 의해서 추론이 수행된다.

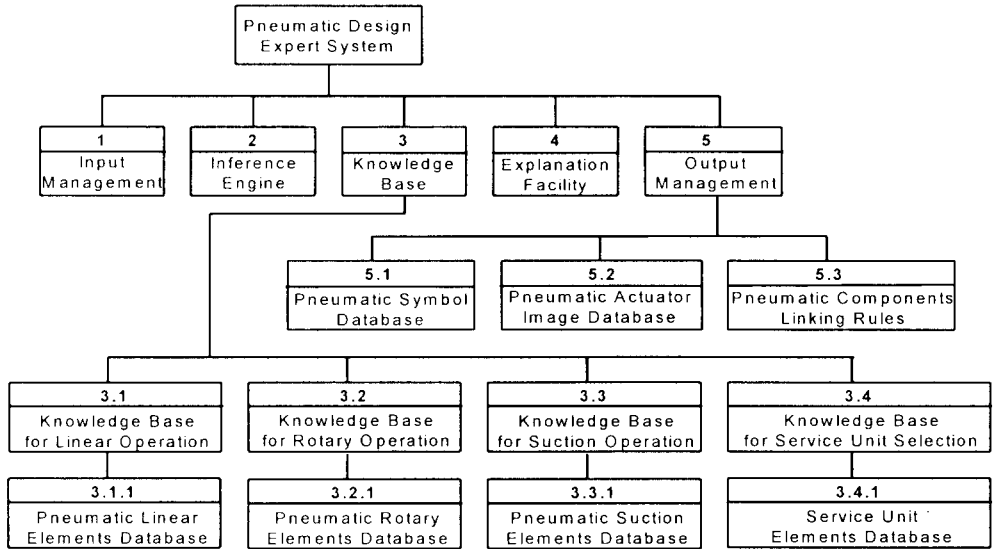


Fig. 4. Function chart of PDES

4.1.3 지식 베이스

지식 베이스에는 공압 설계 영역에서 필요한 사실(fact)과 의사 결정의 근거로서 이들 사실들을 사용하여 문제를 해결하는데 필요한 규칙(rule) 또는 경험 지식들이 포함된다. 본 논문에서는 설계 요구 조건과 설계시방은 객체로서 표현하고 각 작업영역에서 추론에 사용되는 지식은 규칙으로 표현한다. 그림 5는 선형작업 지식베이스에 구축된 규칙의 일부를 나타낸다.

4.1.4 표준 공압요소 데이터베이스

공압 설계시 입력 요구 조건을 만족시키는 공압 요소의 단순한 선정은 무의미하다. 그 이유는 공압 요소들이 공압 제조사에서 만들어지는 규격품이기 때문이다. 따라서 추론을 거쳐 공압 요소의 시방이 일차적으로 결정되면 표준 공압 데이터베이스에서 실제 사용할 수 있는 규격의 공압 요소가 선정될 수 있도록 한다. 표준 공압요소 데이터베이스에는

공압 요소에 설계에 필요한 규격이 포함된다.

4.1.5 설명 기능

설명 기능에는 입력 요구 조건을 만족하는 공압 설계가 불가능할 경우에 설명을 통하여 입력 요구 조건의 어떤 부분이 추론을 수행하는데 장애가 되는지에 대한 설명을 포함한다.

4.1.6 출력 관리부

출력 관리부에서는 추론이 끝나 생성된 출력 과일을 이용하여 사용자에게 설계 시방을 출력해 주고 그에 대응되는 공압회로와 공압 작업요소의 이미지도 출력해 준다. 또한 추론 중 입력 조건을 만족시키는 설계 시방을 출력할 수 없어서 중간에서 추론이 중단되는 경우에는 그 때의 상황 설명을 사용자에게 알려주는 기능을 포함한다.

4.1.7 공압 기호 데이터베이스

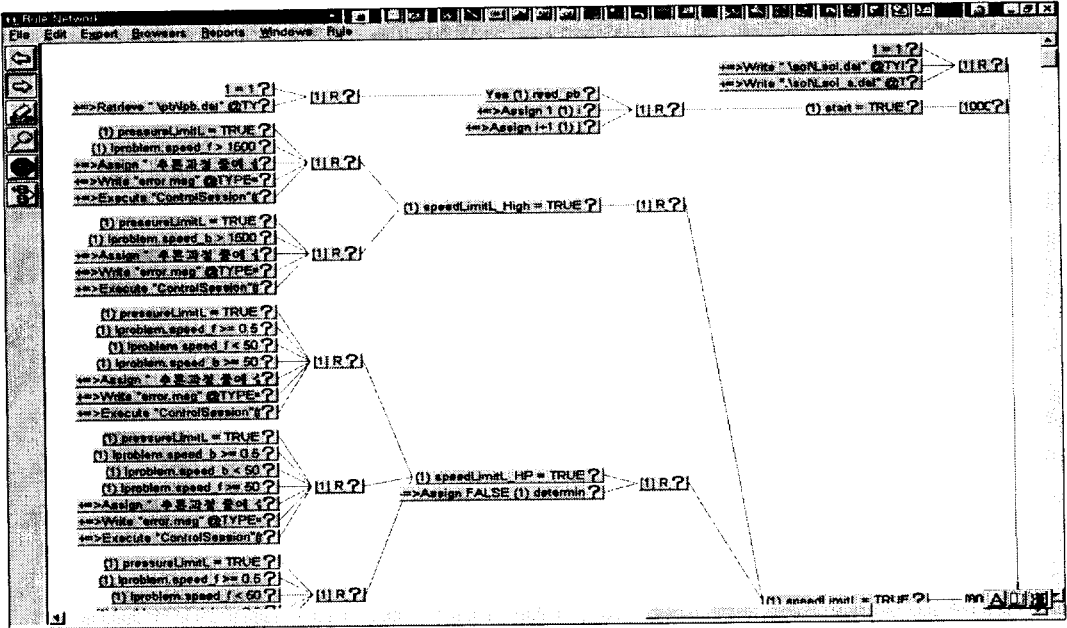


Fig. 5. The rules used in pneumatic linear knowledge base

공압 기호 데이터베이스에는 추론이 성공적으로 수행되어 입력요구 조건을 만족시키는 공압 설계의 시방이 결정되었을 때, 공압 요소들의 유기적인 연결을 공압 회로도를 통하여 보여 줄 수 있도록 공압 회로도 작성에 필요한 공압 요소에 대한 기호가 포함되어 있다.

4.1.8 공압 작업요소 이미지 데이터베이스

공압 작업요소 이미지 데이터베이스에는 공압 설계 시방이 결정되었을 때 실제 작업을 담당하는 공압 작업요소의 이미지를 사용자에게 제공할 수 있도록 공압 작업요소에 대한 이미지가 파일 형태로 저장되어 있다.

4.1.9 공압요소 연결규칙

공압요소 연결규칙들은 해로서 출력된 공압설계

시방과 대응되는 공압기호를 정하고 SUI 윈도우의 출력화면에 공압요소의 기호를 정위치시켜 주며 공압요소 기호간의 배관 연결을 결정해 주는 규칙들로 구성된다. 공압기호들 간의 상호 유기적인 연결을 통하여 공압회로도가 완성된다. 공압회로도는 추후 공압장치 배관시 이용될 수 있다.

4.2 시스템의 실행

사용자가 SUI 윈도우를 통하여 공압 설계에 필요한 설계 조건을 입력하면 추론이 수행된다. 추론이 성공적으로 수행되면 공압 설계 시방과 공압 회로도, 공압 작동 요소의 이미지가 출력된다. 설계 조건에 맞는 설계시방을 찾을 수 없어서 추론이 실패하면 추론이 더 이상 진행되지 않는 이유를 설명을 통하여 알리고 사용자로 하여금 SUI 윈도우를

통하여 필요한 설계 조건을 다시 입력하도록 한다.

그림 6은 시스템의 초기화면으로서 공압설계 영역을 선택할 수 있도록 한다.

그림 7과 그림 8은 공압설계중 선형작업 설계에 대한 설계조건 입력화면과 설계시방과 공압화로도, 공압 작업요소를 출력해 주는 결과화면을 나타낸다.

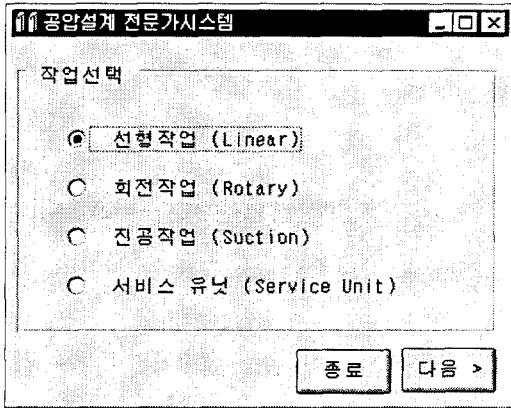


Fig. 6. Initial window of PDES

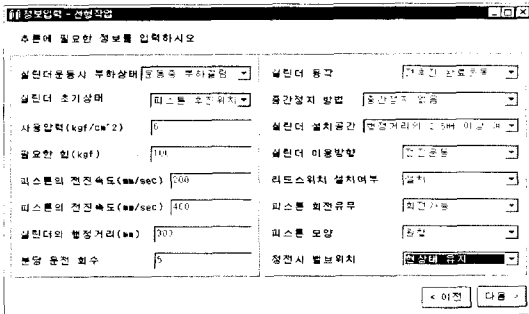


Fig. 7. Input window of PDES

V. 시스템의 적용 예

시스템을 검증하기 위하여 현장의 공압설계 문제에 직접 공압설계 전문가시스템을 적용하였다. 공압 기술자가 설계한 내용과 전문가시스템을 이용하여 설계한 내용이 비교될 수 있도록 하기 위하여 기존에 설계된 공압시스템과 같은 설계 조건을 공압설계 전문가시스템에 입력하여 그 결과치를 비교하였다.

5.1 자동차 caliper housing 가공라인

Caliper housing은 자동차의 브레이크 장치에 속하는 부품이다. 대상 시스템은 M사의 caliper housing 가공라인에 사용된 공압시스템으로서 공압 작업요소는 부품의 이송, 클램핑, 리프팅 작업을 담당하고 있다.

Caliper housing의 가공라인에 대한 대략적인 배치도는 그림9와 같다. Caliper housing 가공라인에 사용되는 공압작동요소는 작업물을 이송하여 번갈아 공급하는 두 개의 linear drive와 팔레트를 클램핑해 주는 두 개의 clamp 실린더, 그리고 팔레트를 conveyor2로 이동시켜 주는 lifter 실린더로 구성되어 있다. 작업물이 work feeding1 실린더에 의하여 공급되고 전공정에서 작업물을 공급했던 work feeding2 실린더는 후진하여 작업물 공급 준비를 한다. Conveyor1에 의해서 팔레트가 공급되면 work clamp 실린더가 팔레트를 고정한다. 그 동안 로봇은 work feeding1 실린더에 의하여 공급된 작업물을 가공기에 물려 가공기가 작업을 하도록 해준다. 가공이 끝난 시점에서 팔레트가 work lifter 실린더에 의하여 상승되면 가공된 작

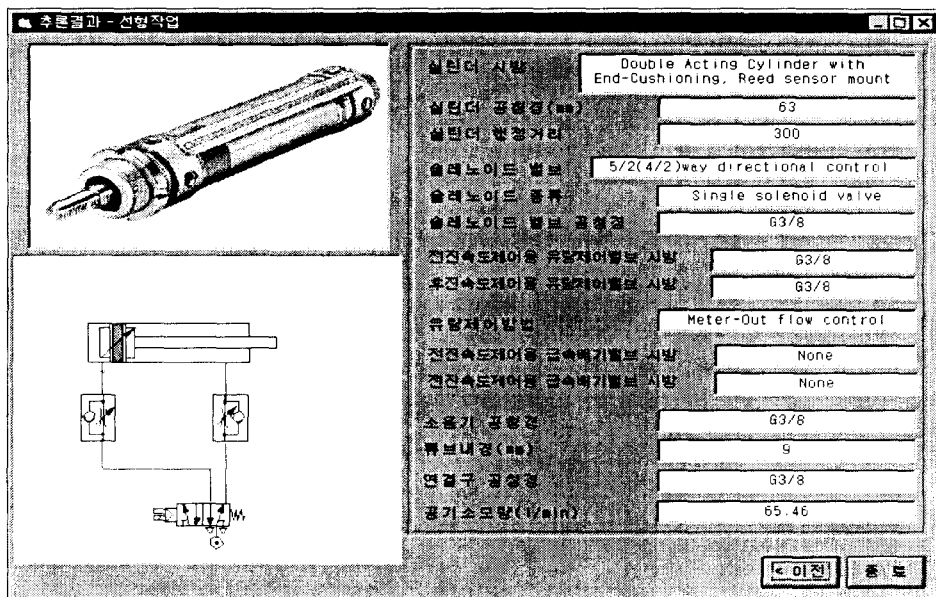


Fig. 8. Output window of PDES

업물이 팔레트에 놓여진다. 동시에 work feeding1 실린더는 작업을 공급하기 위하여 후진하고 work feeding2 실린더는 새로운 작업물을 갖고 전진한다. Work clamp 실린더가 후진하면 팔레트의 클램핑이 풀리고 conveyor2에 의해서 다

음 공정으로 이동된다. Work lifter 실린더는 후진 운동하여 한 사이클의 작업을 종료하게 된다. 이와 같은 동작순서를 쉽게 알 수 있도록 각 단계에서의 실린더의 동작상태를 보여 주는 그림이 변위 단계 선도인데 caliper housing 가공라인에 대한 변위

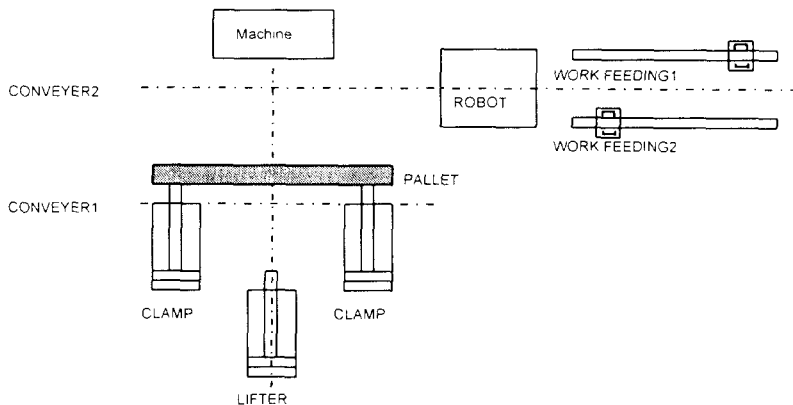


Fig. 9. Layout of pneumatic components in caliper housing machining line

단계 선도를 그리면 그림 10과 같다. 그림 10의 변위 단계 선도에서 좌측에는 실린더의 이름이 주어져 있고, 각 실린더에 대해서 X축은 동작 단계를 나타내고 Y축은 실린더의 동작 상태를 표시한다. 실린더의 동작 상태에서 하단의 직선부는 실린더의 후진 상태를 나타내고 상단의 직선부는 실린더의 전진된 상태를 나타낸다. 그리고 상승하는 사선부는 실린더의 전진운동을 나타내고 하강하는 사선부는 실린더의 후진운동을 나타내게 된다. 이러한 변위 단계 선도를 통하여 공압시스템을 구성하는 실린더들이 어떠한 순서대로 동작하는지를 쉽게

파악할 수 있다.

5.2 설계시방의 비교

Caliper housing 가공라인에 사용된 clamp, lifter 그리고 feed 실린더와 그와 관련된 공압요소에 대하여 기존에 설계된 공압시스템과 같은 설계 조건을 공압설계 전문가시스템에 입력하여 그 결과치를 비교하였다. 공압 기술자가 설계한 내용과 전문가시스템을 이용한 설계 내용을 다음에 비교하였다.

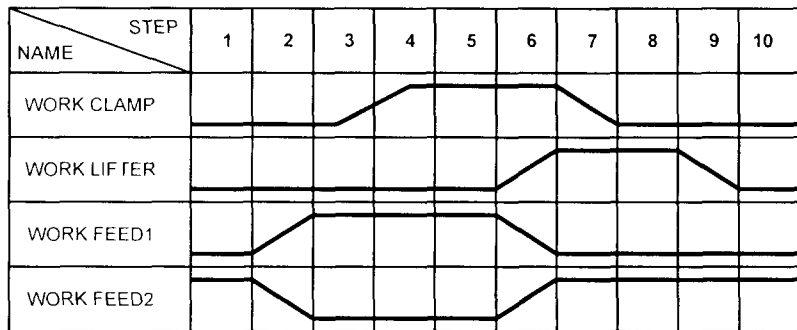


Fig. 10. Motion step diagram

5.2.1 Clamp 실린더

Clamp 실린더와 그와 관계되는 공압요소를 살펴보면 기술자에 의해서 설계된 시방과 PDES에 의한 결과가 대체로 일치한다. 다만 기술자가 설계했을 때 유량제어밸브는 G1/4를 사용하고 솔레노이드 밸브는 M5를 사용해서 밸브간에 부조화가 보인다. 행정거리의 경우는 설계자가 35mm를 원했지만 PDES의 결과는 40mm가 출력되었다. 그 이유는 행정거리 35mm가 표준 행정거리가 아니기 때문에 35mm 보다 한 단계 긴 표준 행정거리 40mm가 제시되었고, 설명을 통하여 35mm의 행정거리가 주문 생산될 수 있음이 PDES의 출력화

면을 통하여 제공된다. Clamp 실린더에 대한 설계 시방의 비교는 표2와 같고 기술자가 설계한 시방과 PDES의 결과가 다른 항에 대해서는 PDES 설계시방에 굵은 글자로 표현하였다.

5.2.2 Lifter 실린더

Lifter 실린더와 그와 관계되는 공압요소를 살펴보면 기술자에 의해서 설계된 시방과 PDES에 의한 결과가 대체로 일치한다. 전문가가 설계한 설계 시방에서는 솔레노이드 밸브의 크기가 유량제어밸브의 크기와 차이가 나므로 두 공압요소를 연결할 때에는 reducer를 사용해야 한다. Clamp 실린더

Table 2. Comparison of clamp cylinder design specifications

| 설계 요구 조건 | | 설계 시방 | | |
|---------------|--------------|----------|------------|------------|
| 속성 | 속성 값 | 속성 | 기술자 | PDES |
| motiontype | linear | Tube | 6 | 4 |
| pressure | 5 | Stroke | 35 | 40 |
| numOfPosition | two | SV_tvpe | Single | Single |
| midStop | nil | SV_spec | 5/2 | 5/2(4/2) |
| worktype | after | SV_size | M5 | G1/8 |
| force | 40 | Silencer | - | G1/8 |
| speed_f | 5 | QEV_f | None | None |
| speed_b | 5 | QEV_b | None | None |
| stroke | 35 | FC | M_out | M_out |
| mountSpace | free | FCV_f | G1/4 | G1/8 |
| availableFB | forward | FCV_b | G1/4 | G1/8 |
| mountReed | reed | Fitting | G1/4 | G1/8 |
| pistonRot | notrot | Dia. | 40 | 40 |
| pistonShape | circle_guide | Air_cons | - | 1.21 |
| el_failure | return | Actuator | NRSSDAC_RD | NRSSDAC_RD |
| cycles | 2 | | | |
| cvl_Init | In | | | |

와 마찬가지로 행정거리의 경우 설계자가 370mm를 원했지만 PDES의 결과는 400mm가 출력되었다. 그 이유는 행정거리 370mm가 표준 행정거리

Table 3. Comparison of lifter cylinder design specifications

| 설계 요구 조건 | | 설계 시방 | | |
|---------------|---------|----------|-----------|-----------|
| 속성 | 속성 값 | 속성 | 기술자 | PDES |
| motiontype | linear | Tube | 6 | 9 |
| pressure | 5 | Stroke | 370 | 400 |
| numOfPosition | two | SV_tvpe | Double | Double |
| midStop | nil | SV_spec | 5/2 | 5/2(4/2) |
| worktype | on | SV_size | G1/4 | G3/8 |
| force | 100 | Silencer | - | G3/8 |
| speed_f | 20 | QEV_f | None | None |
| speed_b | 20 | QEV_b | None | None |
| stroke | 370 | FC | M_out | M_out |
| mountSpace | free | FCV_f | G3/8 | G3/8 |
| availableFB | forward | FCV_b | G3/8 | G3/8 |
| mountReed | reed | Fitting | G3/8 | G3/8 |
| pistonRot | rot | Dia | 80 | 80 |
| pistonShape | circle | Air_cons | - | 48.25 |
| el_failure | memory | Actuator | DAC_EC_RD | DAC_EC_RD |
| cycles | 2 | | | |
| cvl_Init | In | | | |

가 아니기 때문에 370mm 보다 한 단계 긴 표준 행정거리 400mm가 제시되었고, 설명을 통하여 370mm의 행정거리가 주문 생산될 수 있음이 PDES의 출력화면을 통하여 제공된다. Lifter 실린더에 대한 설계시방의 비교는 표3과 같고 기술자가 설계한 시방과 PDES의 결과가 다른 항에 대해서는 굵은 글자로 표현하였다

5.2.3 Feed 실린더

Feed 실린더와 그와 관계되는 공압요소를 살펴보면 기술자에 의해서 설계된 시방과 PDES에 의한 결과가 완전히 일치함을 알 수 있다. Feed 실린더에 대한 설계시방의 비교는 표4와 같다.

Table 4. Comparison of feed cylinder design specifications

| 설계 요구 조건 | | 설계 시방 | | |
|---------------|----------------|----------|------------|------------|
| 속성 | 속성 값 | 속성 | 기술자 | PDES |
| motiontype | linear | Tube | 6 | 6 |
| pressure | 5 | Stroke | 1130 | 1130 |
| numOfPosition | two | SV_tvpe | Double | Double |
| midStop | nil | SV_spec | 5/2 | 5/2(4/2) |
| worktype | on | SV_size | G1/4 | G1/4 |
| force | 50 | Silencer | - | G1/4 |
| speed_f | 35 | QEV_f | None | None |
| speed_b | 35 | QEV_b | None | None |
| stroke | 1130 | FC | M_out | M_out |
| mountSpace | limited | FCV_f | G1/4 | G1/4 |
| availableFB | bi_directional | FCV_b | G1/4 | G1/4 |
| mountReed | reed | Fitting | G1/4 | G1/4 |
| pistonRot | notrot | Dia | 40 | 40 |
| pistonShape | circle_guide | Air_cons | - | 34.08 |
| el_failure | memory | Actuator | NRLD_EC_RD | NRLD_EC_RD |
| cycles | 2 | | | |
| cvl_Init | In | | | |

Caliper housing 가공라인에 사용되는 공압요소 에 대해서 PDES를 적용시킨 결과 기술자가 설계한 설계시방과 PDES에 의한 설계시방이 거의 일치함을 보였다. 다만 기술자가 설계한 시방의 경우

유량제어밸브와 솔레노이드 밸브 그리고 그에 따른 튜브에서 한 단계 큰 시방이 결정되어 비용상승이 예상된다.

기설계된 공압시스템은 공압공급라인과 배기라인을 함께 처리하는 manifold 블록을 사용하여 소음기의 시방을 직접적으로 비교하지는 못하였다. 기 설계된 시스템에서는 세 개의 실린더로부터 배기되는 공압을 합쳐서 처리해야하므로 G1/2 크기의 소음기를 사용한 반면에 PDES에서는 실린더 한 개씩을 대상으로 소음기 시방이 결정되었다. PDES는 부가적으로 공기소모량을 알려줌으로서 공압장치에 공기를 공급해주는 서비스 유니트 선정에 필요한 자료를 제공해 준다.

VI. 결 론

본 연구에서는 공압 설계를 위한 전문가 시스템 프로토타입을 개발하였다. 개발된 시스템은 공압장치 설계에 대한 설계 요구 조건을 입력받아 설계시방, 공압회로도 그리고 공압작업 요소의 이미지를 출력한다. PDES에 구축된 지식베이스와 데이터베이스는 선형작업시스템, 회전작업시스템, 진공작업시스템, 서비스 유니트 선정작업에 따라 각각의 영역에 대하여 별도로 구성하였는데 그 이유는 각 지식베이스 간에는 서로 영향을 미치지 않기 때문이다. 또한 각 지식베이스 내에서는 지식이 쉽게 부가되고 수정되며, 지식의 추가로 발생할 수 있는 지식간의 충돌을 최소화하기 위하여 지식의 구성을 모듈화하였다. 선형작업시스템 설계를 위한 지식베이스는 695개의 규칙으로 구성되어 있고, 회전작업시스템 설계를 위한 지식베이스는 60개의 규칙으로, 진공작업시스템 설계를 위한 지식베이스는

70개의 규칙으로, 서비스 유니트 선정작업을 위한 지식베이스는 10개의 규칙으로 각각 구성되어 있으며 본 시스템에 사용된 공압 설계 지식은 전문가의 경험 지식과 문헌 자료 및 실제 설계 사례의 분석을 통하여 획득하였다. 그리고 시스템이 필요로 하는 많은 데이터들이 효과적으로 관리되고, 시스템에서 사용자에게 표준 규격품을 최종적으로 제공할도록 데이터베이스를 구축하였는데 지식베이스와 마찬가지로 데이터베이스도 각 영역에 대하여 독립적으로 구성하였다. 또한 공압회로도 와 공압작업요소의 영상에 대한 출력을 위해서 각종 공압기호와 공압작업요소의 영상을 별도의 데이터베이스로 구축하였다. PDES는 대부분의 공압요소를 사용하는 시스템 설계에 유효하지만 특수하게 사용되는 공압요소들, 예를 들어 벨로우즈 실린더, 그리퍼(gripper), 스톱퍼(stopper) 등에 대해서는 유효하지 않다. 그리고 신제품의 공압요소에 대해서도 이용될 수 없으므로 이러한 경우에는 지속적인 지식의 추가가 필요하다고 판단된다. 본 시스템에 사용된 많은 데이터들은 공압전문회사인 F사의 자료를 이용하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 공압 설계 전문가시스템이 기타 회사의 제품에 효율적으로 적용되기 위해서는 그 회사에 맞게끔 공압요소 데이터베이스의 부분적인 수정과 추가가 필요하고 공압작업요소의 이미지 데이터베이스도 수정되어야 한다. 개발된 PDES를 적용시킨 사례연구를 5장에서 기술하였는데 그 예에서 보듯이 공압 기술자가 설계한 시방과 PDES가 설계한 시방이 공압작업요소의 시방에서는 완전히 일치하고 다른 시방에서도 대부분 일치함으로써 시스템의 유효성이 관찰되었다. 다만 PDES를 통하여 설계한 유량제어밸브와 솔레노이드 밸브, 그리고 이에 따른 액세서리에서 크기가 한 단계 차이가 있는데 이는 공압기술자의 과잉설계로 판단된다. 그리고 PDES는 공

압회로도들 자동으로 출력해준다. 이를 통하여 시스템의 출력인 설계시방과 공압요소간의 유기적 관계를 그래픽으로 용이하게 보여주고 이 공압회로도는 추후 배관작업시 효과적으로 이용될 수 있다. 공압요소의 이미지 출력은 사용자에게 물상적 정보를 제공하여 설계할 공압작업요소에 대한 이해를 증진시켜 준다.

본 연구의 결과인 공압설계 전문가시스템을 통하여 공압설계를 단순화하고, 동일한 기능을 발휘하는 공압요소 중에서 비용을 최소화할 수 있는 설계시방을 제공받음으로서 추후 시공될 공압시스템의 초기투자 비용과 시스템 운영비를 절감할 수 있다.

공압설계 전문가시스템은 우선적으로 공압시스템 설계자가 활용할 수 있고, 공압부품 제조사도 자기회사 환경에 맞게 지식의 추가와 공압부품 데이터의 수정을 통하여 공압시스템을 설계하거나 판매할 때 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 시스템은 공압설계 초보자에게 교육용으로도 사용될 수 있을 것이다.

향후 연구로는 현장의 유효성 검증(validation)을 위한 계획을 가지고 있으며 또한 공압 설계의 소프트웨어에 해당하는 제어 회로의 자동화를 위한 설계 전문가시스템에 대한 개발을 통하여 시스템의 활용가치를 높이려 한다.

참 고 문 헌

1. 김화수, 조용범, 최종욱, *전문가시스템*, 집문당, 1995.
2. 김장호, 신홍열, *공장자동화를 위한 공압기술*, 성안당, 1993.
3. 원병희, "공기압 시스템의 설계 알고리즘 및 CAD Software 개발", *한양대 석사 논문*, 1988.
4. 한국 생산성 본부, *국내 자동화 현황조사 보고서*, 94-01호, 17-18.
5. Badiru, A. B., *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*, Prentice Hall, 1992.
6. Brown, D. C. and B. Chandrasekaran, "Expert Systems for a Class of Mechanical Design Activity", *Knowledge Engineering in Computer-Aided Design*, Elsevier Science Publishers B. V., (1985) 259-290.
7. Brown, D. C. and B. Chandrasekaran, "Investigating Routine Design Problem Solving", *Artificial Intelligence in Engineering Design*, Academic Press, Inc., (1992), 221-249.
8. Croser, P., *Pneumatics*, Festo Didactic KG, 1989.
9. Deppert, W. and K. Stoll, *Cutting Costs with Pneumatics*, VogelBuchverlag Wurzburg, 1988.
10. Durkin, J., *Expert Systems Design and Development*, Macmillan Publishing Corp., 1994.
11. Festo KG, *FIS International*, 1994.
12. Festo KG, *SELECT-Technical Information of FESTO*, Vol.50, 1987.
13. Hinrichs, T. R. and J. L. Kolodner, "The Roles of Adaptation in Case-Based Design", *AAAI-91 Proceedings Ninth National Conference on Artificial Intelligence*, Vol.1, (1991), 28-33.
14. Luger, G. F. and W. A. Stubblefield, *Artificial Intelligence; Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, The

- Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1993.
15. Meiner, H. and R. Kobler, *Fundamentals of Pneumatic Control Engineering*, FESTO DIDACTIC KG, 1990.
16. Meixner, H. and R. Kobler, *Introduction to Pneumatics*, FESTO DIDACTIC GmbH, 1990.
17. Microsoft Co., *Visual Basic Programmer's Guide*, 1995.
18. Neuron Data, *Elements Environments 2.0 User's Guide*, Neuron Data Inc., USA, 1996.