

공작기계 고장 진단 전문가 시스템 개발

서동규*, 강무진**

Development of an Expert System for Diagnosing Machine Tool Failures

Dong-Kyu Seo*, Mujin Kang**

ABSTRACT

Trouble shooting of modern machine tools equipped with sophisticated electronic as well as mechanical parts is so difficult that it usually depends upon the experience and accumulated knowledge of the diagnosing persons. On the other hand, machine tool users are scattered in wide area, which makes it expensive for a machine tool maker to run a vast service network. An unmanned diagnosis system to which users can have access at all times could be an efficient alternative. For this purpose, a rule-based expert system for diagnosing machine tools is developed. This paper describes the structure of diagnostic knowledge, the rule firing mechanism, the diagnosis flow, and user query process. An example shows the feasibility of problem solving on site without help of a service expert from machine tool maker.

Key Words : Machine Tools Diagnosis(공작기계 진단), Knowledge Base(지식 베이스), Object Model(객체 모델), Expert system(전문가 시스템)

1. 서론

현대의 경쟁 환경에서 고객의 단납기 요구에 부응하기 위하여, 제조업체는 보유하고 있는 생산 설비의 가동률을 극대화함으로써 제조의 리드타임을 단축할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 효율적인 공정 관리 및 설비 운용이 필요한데, 특히 보유 설비의 가동 능력(Availability)을 최대로 유지하고, 설비 고장시 신속하게 문제를 해결하여 MTTR(Mean Time To Repair)을 줄여야 한다. 대체로 공작기계의 사용자들은 문제 발생시 공작기계 제조업체의 지원에 크게 의존하고 있으며, 이에 부응하기 위해 공작기계 메이커는 A/S(After Service) 전담 인력을 운용하고 있지만, 전자제품과 같은 소비재와는 달리 상대적으로 소수의 제품이 넓은

지역에서 사용되고 있다는 공작기계의 특성을 고려할 때, 사용자의 요구에 따라 신속하게 지원 인력을 파견할 수 있는 광역 서비스망을 운영하는 것은 거의 불가능한 일이다.

기계 진단은 고장 발생시 그 원인을 규명하는 '진단'과 작동의 고장 유무를 모니터링하는 '감시'를 포함한다. 기계에 고장이 발생하기 전에 미리 예방적인 보전을 해 주거나 온라인 감시를 통하여 고장을 방지하는 것이 바람직하므로 상태 감시나 통계적 공정제어 분야에서 이에 관한 연구가 많았고 어느 정도 실용화가 가능해졌으나, 기계의 직접적인 고장이나 정밀도 불량과 같은 간접 불량 발생시 그 원인을 진단하여 대책을 제시하는 체계에 관한 연구는 찾아 보기 힘든 실정이다.¹⁾ 본 연구는 온라인 '감시'와는 보완적인 기능이라 할

* LG EDS

** 성균관대학교 기계공학부 기계기술연구소

수 있는 고장 '진단'을 위한 지식 기반 시스템을 대상으로 하고 있다.

오늘날의 자동화된 공작기계는 시스템 구성이 복잡하므로 고장 증상에 대한 원인이 다양하고 복잡하여 충분한 보수 지식과 경험을 가진 숙련공이 아니면 고장에 대하여 정확하게 대처하기가 어려우며 또한, 공작기계 고장 진단 전문가를 육성하는 일은 많은 비용을 요하고 용이하지 않기 때문에 공작기계의 보급이 증가함에 따라 고장 대처 문제는 점점 더 심각한 문제가 될 수 있다. 따라서, 공작기계 메이커는 고장 원인을 신속히 진단하고 체계적인 대처방안을 제시할 수 있는 고장진단에 대한 논리체계를 정립하여 사용자에게 전달해 줄 수 있는 방법을 찾아야 하는 데, 오늘날의 정보 기술(Information Technology)이 제공하는 지식공학은 이에 대한 한 가지 해결책이 될 수 있다. 즉, A/S 요원들은 공작기계에서 발생하는 다양한 고장 증상에 대해 시행착오(Trial and Error)적인 경험적 추론과 검증을 통해서 문제를 해결하고 있으므로, 이러한 경험적 지식(Heuristics)을 체계화할 수 있는 것이다.

경험적 지식의 체계화에 대한 선행연구로는 FTA(Fault Tree Analysis)나 DT(Decision Table)등을 이용한 연구²⁾, 지식베이스(Knowledge Base)를 이용한 전문가 시스템의 연구가 수행되어 왔다. FTA 와 DT는 고장 진단의 초기 연구와 전문가 시스템의 연구의 초기에 사용되어왔으며 고장 진단의 체계를 시각적으로 볼 수 있다는 장점이 있다. 지식베이스를 이용한 전문가 시스템에 관한 연구로는 추론 방식에 따라 CBR(Case-Based Reasoning) 및 RBR(Rule-Based Reasoning)방식 등으로 나눌 수 있다. 사례 기반 시스템³⁾은 주어진 문제와 유사한 사례를 추출하기 때문에 필요한 사례베이스의 효과적인 탐색을 위해 사례 베이스의 구조의 체계화가 요구되며 과거의 경험에 의한 사실을 이용하기 때문에 지식 획득(Knowledge Acquisition)이 규칙 기반 추론에 비해 비교적 용이하기 때문에 새로운 사례의 추가가 쉽고 추론 과정에 대한 학습기능이 가능하다는 점이 장점이지만 이 기법으로는 정확히 사례에 맞는 경우를 제외하고는 일부분의 경험의 일치에 대한 사례의 유사도 결정이 용이하지 않다는 단점이 있다. 규칙 기반 추론(RBR)을 이용한 전문가 시스템⁴⁾은 대상 영역의 전문가로부터 고장 증상과 원인에 대한 경험이나 지식 등을 IF

~ THEN ~ 의 Production Rule 방식으로 표현한 후 이를 규칙베이스에 저장하고 이를 전방향 또는 후방향 추론을 수행함으로써 해를 찾아내는 시스템이다. 따라서 대상영역의 전문가로부터 체계적으로 지식을 획득하는 것이 어렵고 전문가로부터 습득한 지식에 대한 규칙이 대상 시스템에 따라 필요하다는 단점이 있지만 지식의 표현이 사례 기반 추론 방식보다는 쉽고 시스템 개발 소요 시간이 짧으며 고수준으로 추상화된 지식을 표현할 수 있다는 장점이 있다.

또한 고장 진단 전문가 시스템의 연구는 진단 시스템의 분리 여부에 따라 Stand-alone 방식과 원격 진단 방식으로 나눌 수 있다. 후자의 경우로 공중전화망을 이용하여 공작기계의 Controller의 Error Message 를 원격지에서 수신하거나⁵⁾ 인터넷을 이용한 방식을 들 수 있는데⁶⁾ 전자는 Controller에서 처리할 수 없는 에러의 경우에 대처할 수 없다는 단점이, 후자의 경우는 처리할 수 있는 정보가 텍스트라는 단점이 있다.

본 연구에서는 공작기계의 고장 증상과 원인을 분석하여 고장 진단 모델을 정립하고 이를 규칙 기반 추론 방식의 지식베이스로 구축하고 Stand-Alone 타입의 고장 진단 전문가 시스템의 프로토타입을 제시하고자 한다.

2. 공작기계의 고장진단

공작기계의 고장 증상은 매우 다양하여 그 체계를 확립하기가 매우 까다롭다. 하지만 크게 미작동(No Operation), 오작동(Bad Operation), 가공 불량(Poor Precision) 기타(ETC) 등으로 나눌 수 있다. 미작동은 공작기계 요소 중 어느 하나라도 움직이지 않는 증상을 의미하고, 오작동은 자동공구교환장치(ATC)의 인덱싱이 어긋나거나 심압대의 운동이 NC 명령과 일치하지 않는 등과 같이 공작기계 요소의 어느 하나라도 비정상적인 운동을 하는 증상을 말한다. 가공 불량은 기계가 정상적으로 작동하지만 정밀도가 불량하거나 가공 후 테이퍼가 발생하는 등의 다양한 증상을 포함한다. Fig.1은 국내 한 공작기계 메이커의 Turn-mill 기종에 대한 고장 증상 통계를 보여 주는 데, 미작동 증상이 가장 빈도가 높음을 알 수 있다. ATC 나 스핀들, 유압척의 미작동 등이 여기에 속한다. 이러한 외부에 드러나는 증상들은 다양한 원인에서 기인할

수 있으므로, 고장 증상과 원인 간의 인과관계를 추론하는 것이 고장 진단 과정이라 할 수 있다.

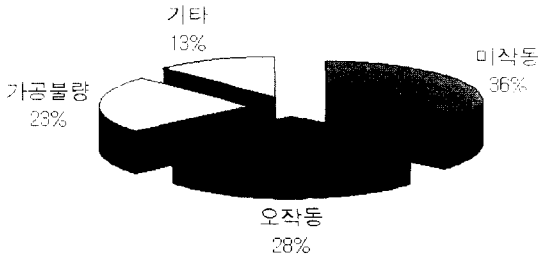


Fig. 1 Classification of faults in machine tools

따라서, 고장 증상의 분류에 따라 각 증상 에 대한 가능한 원인들을 정리하고, 고장의 세부 원인을 추적하는 체계를 정립하는 것이 필요하다. 이를 위하여는 고장 진단 전문가들의 추론 방식을 파악해야 하는 데, Fig.2 는 그 한 예를 보여주고 있다.

즉, 테이퍼 불량 의 경우, NC 프로그램 재입력, 파라미터 재설정, DGN(Diagnosis Number)값 점검 등 일련의 사항을 논리적 흐름을 따라 점검하여 문제의 원인에 도달할 때까지 계속한다. 이상의 제어부 점검으로 원인이 검출되지 않으면, 리드스크류의 백래쉬를 보정하여 재가공해 보고, 그래도 테이퍼 불량이 계속 발생하면 주축대와 테이블의 평행도를 점검하거나 심압대와 테이블의 평행도를 점검하고 공구대의 수평도를 점검하는 등 기계부 이상 유무를 확인하는 순서를 거친다. 공작기계에 자주 발생하는 제 불량 또는 고장 증상들에 대하여 이와 같은 진단 흐름을 분석하여 그 체계를 지식베이스로 구축하였다.

3. 공작기계 고장진단 지식베이스작성

객체(Object) 모델은 실세계를 표현할 수 있고 상속성이나 캡슐화 등 많은 장점을 가지고 있어 현대의 프로그래밍에서 많이 사용되고 있다. 전문 A/S 전문가의 문제 해결 과정에 관한 지식을 객체 모델로 표현하면 Fig.3 과 같다.¹⁶⁾ 고장 증상 에 대한 객체 모델로서 '고장증상'이라는 클래스가 생성되고 그 하부 객체로 '정밀도 불량'이라는

객체가, 또 그 하위에는 '테이퍼 발생', '줄무늬 발생' 등과 같은 Property 들이 구성된다.

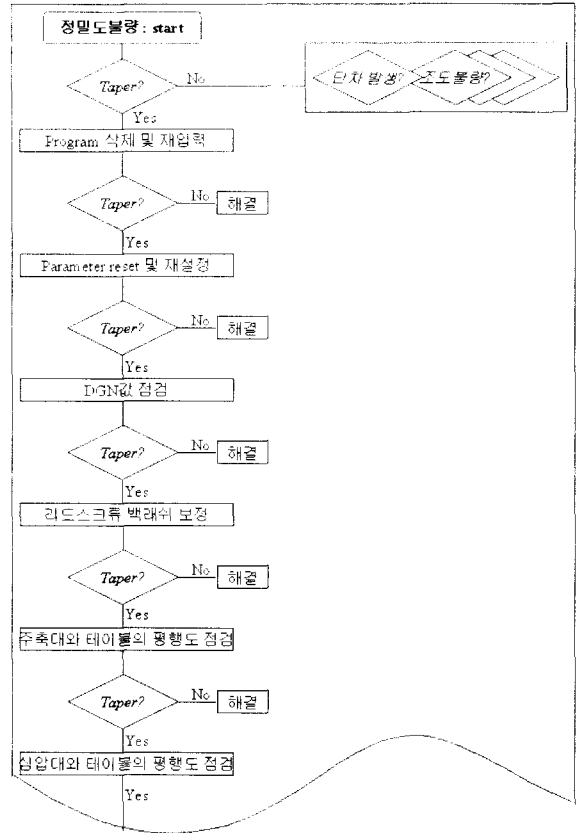


Fig. 2 Example of conceptual A/S work of fault for machine tools

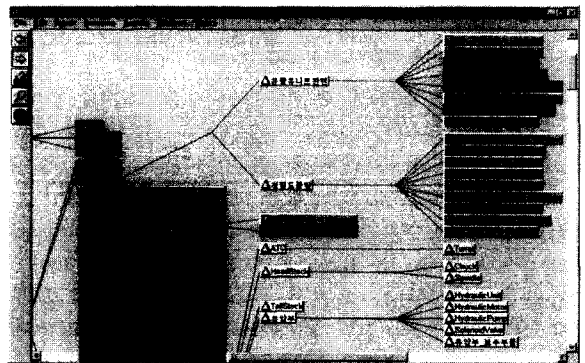


Fig. 3 Object network on the knowledge base of the expert system

각 Property 에 대한 자료형(Data Type)은 미리 결정 되어야 하는데, 예를 들어 '테이퍼 발생'이란 Property 는 String, '소음 발생'이란 Property 는 Boolean, '펌프 유압' Property 는 Integer 의 자료형으로 정의된다.

정의된 객체들은 시스템의 지식베이스 적재시 인식되어 사용자의 응답이 저장될 수 있도록 메모리가 할당된다. 이 메모리에는 사용자가 입력하거나 선택하는 값이 저장되어 Rule Base 탐색 결과에 따라 해당 Rule 이 점화(Firing)되어 그 결과에 따라 필요한 질의가 잇따라 추가되고 Rule 을 점화하는 과정이 반복됨으로써 추론이 수행된다.

이와 같은 객체 모델을 이용하면 패턴 매칭 (Pattern Matching)의 결과에 따라 지식베이스 내의 각 Rule 에 대한 빈도를 나타내는 Property 를 갱신함으로써 고장 증상들의 발생 빈도를 관리할 수 있는 등 다양한 활용이 가능하다.

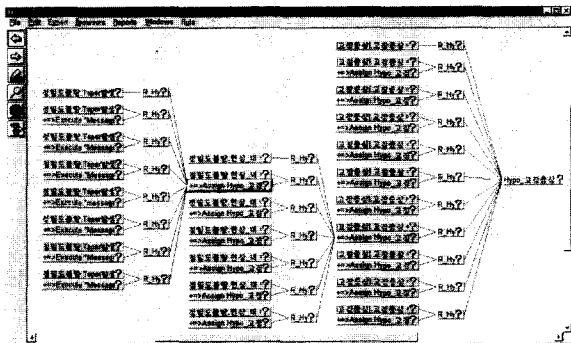


Fig. 4 Rule network on the knowledge base in case of 'precision error'

Fig.4는 '정밀도 불량' 중 '테이퍼 발생' 경우의 Rule Network 을 보여 준다. 추론 엔진은 'Hypo_고장증상'이라는 슬롯의 값이 참인지를 알아내기 위하여 [IF (condition) THEN do (actions)]의 Rule 을 탐색한다. 여기서 condition 은 사용자로부터 입력되거나 다른 Rule 의 결과로부터 결정될 수 있는데, 예제에서는 '고장증상.고장증상 (Classname. Propertyname)'이라는 슬롯에 "정밀도 불량"이라는 값이 사용자로부터 입력되어 "정밀도

불량"과 관계된 Rule 들에 대해 추론이 실행된다. 또 이 Rule 의 condition 에 있는 '정밀도불량.현상_대(Object-name.Propertyname)'라는 슬롯의 값을 알아내기 위해 Rule 들을 탐색하다가 값을 찾을 수 없으면 현재 일어나는 현상이 무엇인지를 다시 사용자에게 물어보게 된다. 사용자로부터 "테이퍼 발생"이라는 응답이 들어오면 추론 엔진은 "테이퍼 발생"이라는 값을 '정밀도불량.현상_대' 슬롯에 입력하고, '정밀도불량.Taper 발생' 슬롯의 값을 얻기 위하여 관련 Rule 들이 미리 정해진 우선순위에 맞추어 수행된다. 즉, 'Program 을 모두 삭제 후 테이퍼 발생?', 'Parameter 값을 reset 한 후 재가공시 테이퍼 발생?', 'DGN(Diagnosis Number)값이 List 대로 되어 있음?' 등의 순서로 이어지는 일련의 질문들과 점검사항으로 Rule 이 구성되어 있다. 마지막 질문 사항에 대해서는 응답 결과에 따라 'List 대로 입력 시킨 후 테이퍼 발생?' 또는 '제어부에서는 결론을 찾지 못하였으므로 기계부로 탐색 공간을 이동하라'는 Rule 이 점화 된다. Fig.5 와 Fig.6 은 'DGN 값 오류'라는 결론에 도달하기까지의 추론 과정을 보여준다.

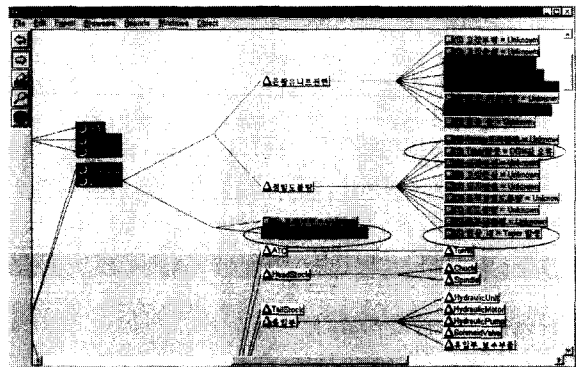


Fig. 5 Change of the properties on the object network

Fig. 5 는 '고장증상' 클래스 밑의 '고장 증상'이라는 슬롯 값에는 "정밀도 불량"이, 그 하위의 '현상_대'라는 슬롯에는 "테이퍼 발생"이, '테이퍼 발생'이라는 슬롯에는 "DGN 값 오류"가 Rule 에 의해 결정되어 추론이 끝난 과정을 보여준다. Fig.6 은 추론 과정 후의 실행된 Rule 고리를 보여준다.

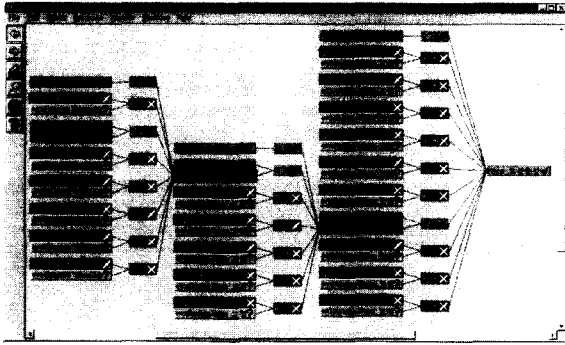


Fig. 6 Change on the rule network in case of firing rule

4. 공작기계 고장진단 전문가시스템

전술한 객체 모델을 기반으로 하는 고장 진단 전문가 시스템은 Win95/98 운영체제에서 Expert System Shell EE(Element Environment)2.11, 개발 언어 VC++ 5.0, GUI 개발 도구 Open Interface Element(Win32 SDK 사용)를 사용하여 개발되었다. Fig.7 은 개발된 공작기계 고장진단 전문가 시스템의 구조도를 보여 준다.

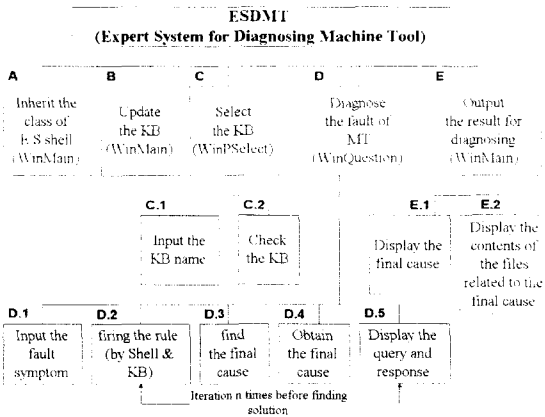


Fig. 7 Structured chart of ESDMT

'Inherit the class of Expert System shell' 모듈은 전문가 시스템 셸 중 GUI 및 추론 엔진의 클래스를 상속 받아 OIE 로부터 생성된 GUI를 윈도우 시스템 및 전문가 시스템 셸과 연동하고 추론 엔진으로부터는 추론의 명령어들을 제어하고 이를

프로그램에 연동할 수 있도록 한다. 'Update the KB'는 전문가 시스템 셸의 개발 환경을 실행하는 모듈로 지식베이스(KB: Knowledge Base)를 입력과 수정을 담당한다. 'Select the KB'는 KB를 선택할 수 있는 윈도우를 생성하고 사용자가 선택한 KB를 입력 받고 이의 적재 가능성 여부를 점검하는 모듈이다. 'Diagnose the fault of MT'은 고장 증상을 입력 받는 부분, 규칙을 점화하는 부분, 최종 원인의 도출까지 KB를 탐색하는 부분, 최종 원인을 얻는 부분, 시스템의 질문과 사용자의 응답을 메인 화면에 출력하는 부분으로 구성된다. 특히, 마지막에 언급된 부분은 사용자에게 main frame을 통해 질문과 대담, 순서를 보여줌으로써 진단 체계 및 추론 이유를 알려주는 설명 기능을 갖추고 있다. 'Output the result for diagnosing'이라는 부분은 최종 추론 원인과 문제 해결 파일의 이름을 'Diagnosing the fault of MT' 모듈로부터 받아 추론 결과는 main frame 화면 상에 출력하고, 문제 해결 파일의 이름을 토대로 파일을 찾아서 그 파일의 내용을 역시 main frame 화면에 보여준다.

5. 공작기계 고장진단 전문가시스템 실행 예

Fig. 2에 보여진 '정밀도 불량 중 테이퍼 발생'에 대한 고장 진단의 경우, 시스템이 실행되면 시스템은 전문가 시스템 셸로부터 각 클래스를 상속 받아 Fig.8과 같이 main frame 화면을 생성한다.

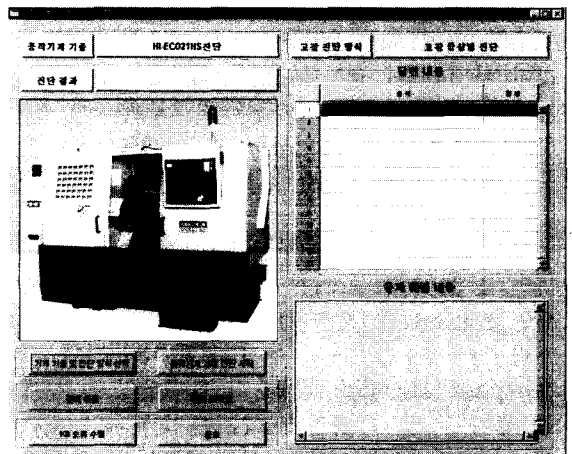


Fig. 8 System main frame

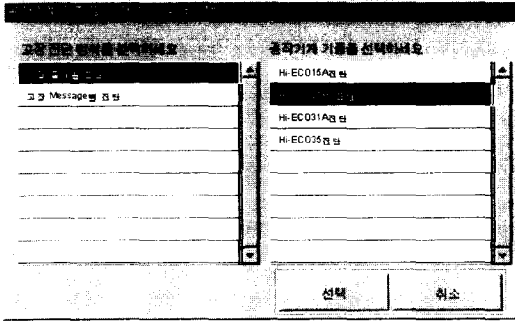


Fig. 9 Selection of knowledge base

이 main frame 에서 '기계 기종 및 진단 방식 선택' 버튼을 클릭하면 Fig. 9 와 같이 '고장 진단 방식'과 '기계 기종 선택'의 값을 선택할 수 있는 KB 선택 윈도우가 생성 된다. 고장 진단 대상으로 H 사의 Turn-mill 모델을, 진단 방식은 '고장 증상별 진단'을 선택하고 '선택'버튼을 누른다. 생성되었던 KB 선택 윈도우가 소멸되며 시스템에 KB 가 적재된다. '공작기계 고장진단 시작'버튼을 클릭하여 시스템에 추론 시작을 알리면 Fig. 10 과 같이 'Diagnose the fault of MT'내에 정의된 Question handler 윈도우가 KB 상의 규칙에 따라 규칙 내의 slot 의 값을 찾을 수 없기 때문에 추론을 만족시키지 못하는 조건이나 규칙, Hypothesis 에 대해 자료가 필요한 순간마다 생성되어 사용자로부터 값을 얻는다. Fig. 2 의 진단 작업 방식과 비교한다면 시스템은 규칙 베이스 상의 처음 단계인 '고장증상,고장증상'의 값을 알 수 없으므로 이를 사용자로부터 얻게 되는데 이를 바로 화면에 출력하는 것이 아니라 이 슬롯에 대한 Meta-slot 값("공작기계에서 나타나는 증상은?")을 윈도우의 오른쪽 상단에 출력하고 이와 연관된 그림파일은 윈도우의 우측에 표시한다. 또한 사용자로부터의 응답은 슬롯의 자료형에 따라 String 에는 Combo box(연결된 증상이 다수인 경우)와 Edit box(연결된 증상이 하나인 경우)가, Boolean 에는 Radio button 이, Integer 에는 Edit box 가 출력된다. 윈도우 상에 출력되는 그림 파일들은 추론을 돕기 위해 전문가가 만들 수 있으며 시스템에 적재하기 위해서는 지식 베이스 상에 미리 그 파일의 이름이 입력되어 있어야 한다. Fig.10 과 같이 시스템 질문의 첫 단계에서 '정밀도 불량'을 선택하면 시스템은 관련 규칙을 점화하고 다음 슬롯인 '정밀도불량.현상_대'의 값

을 규칙베이스의 탐색만으로는 알 수 없으므로 Fig. 11 과 같이 윈도우를 생성하여 "공작물에 발생하는 증상은?"이라는 Meta-slot 값과 관련 그림 파일의 이름을 화면에 출력한다.

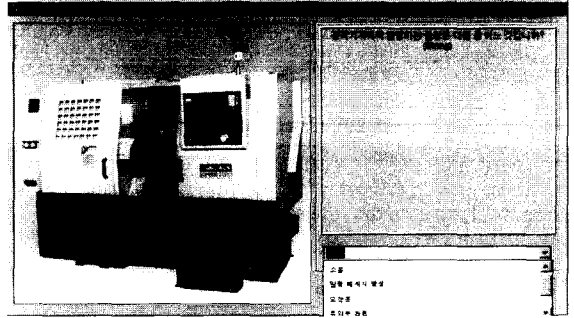


Fig. 10 Question handler window in case of 'fault symptom of machine tools'

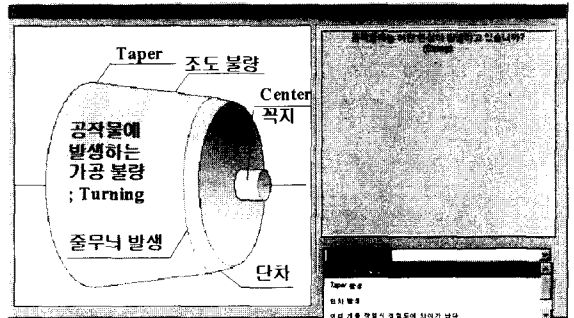


Fig. 11 Question handler window in case of 'poor precision'

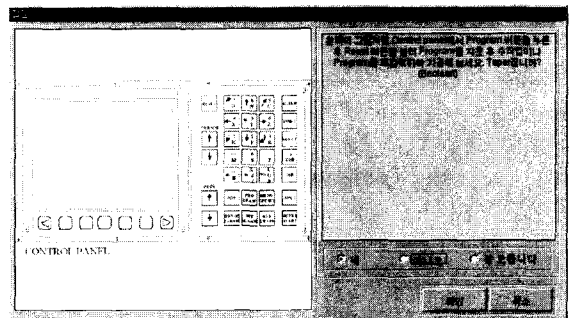


Fig. 12 Question handler window in case of 'workpiece taper'

기척의 점화 및 추론 과정은 3 상에서 작성한 지식베이스와 같으며 Fig. 12 ~ Fig. 16 은 이에 부응하는 Question handler window 를 보여준다. 즉, Fig. 12 는 공작물에 테이퍼 발생의 경우에 제어계의 첫 번째 점검 대상인 'Program 오류 점검' 여부를 확인하는 윈도우이며, Fig. 13 은 두 번째인 'Parameter 값 점검' 여부를, Fig. 14 는 마지막으로 'DGN 값 점검' 여부를 확인하는 윈도우이다. 이상과 같은 제어계의 점검으로 원인을 알 수 없을 때는 기계계의 점검으로 넘어가게 되는데, Fig. 15 는 기계계의 처음 점검 대상인 '리드 스크류 백래쉬 오차량 점검' 여부를, Fig. 16 은 '주축대와 테이블의 정밀도 점검' 여부를 묻는 등의 일련의 추론 흐름이 생성된다. 만약 주축대와 테이블의 정밀도 점검 단계를 수행한 후 공작물에 테이퍼가 발생하지 않았다면 주축대와 테이블의 정밀도 문제라는 결론을 도출하고(Fig.16) 시스템은 이의 해결책을 도시하게 된다 (Fig. 17).

또한 추론에 사용된 질문과 대답도 main frame 에 출력하여 사용자가 추론의 흐름을 알 수 있다.

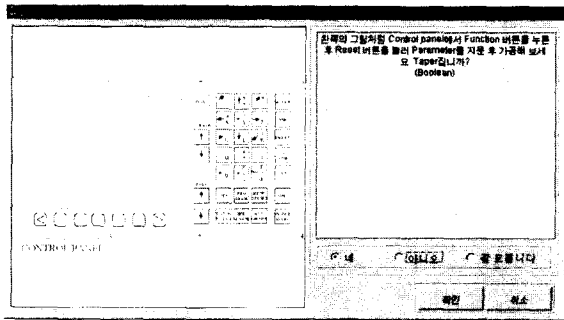


Fig. 13 Question handler window in case of 'input program error'

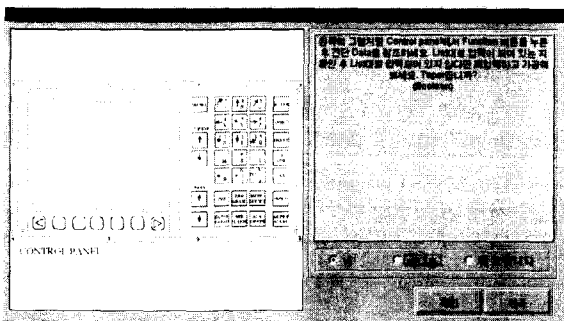


Fig. 14 Question handler window in case of 'parameter error'

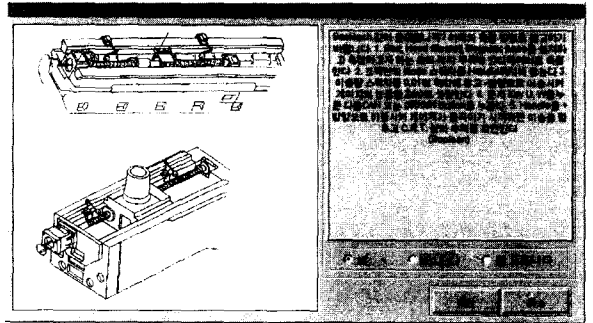


Fig. 15 Question handler window in case of 'DGN detect error'

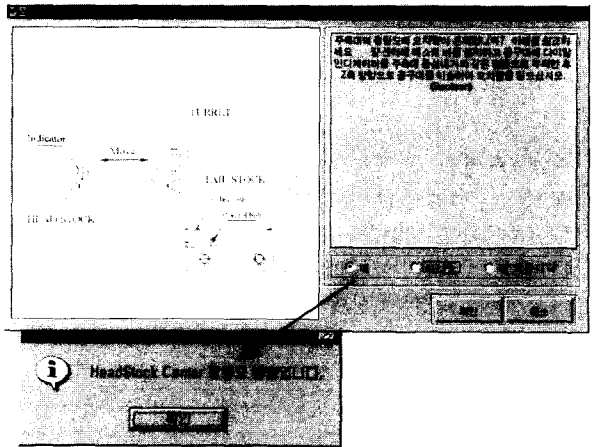


Fig. 16 Question handler window showing the cause of 'workpiece taper error'

최종 결론 값에 도달하였지만 문제가 해결이 안 됐을 경우에는 '문제 미해결' 버튼을 클릭하면 추론이 다시 시작된다. KB 상에 문제가 발생하거나 새로운 지식이 추가될 때는 'KB 오류 수정' 버튼을 클릭하여 Element Environment(EE) 개발 환경 윈도우를 생성하여 현재 추론 중인 KB를 확인하고, 동시에 Rule Editor를 사용하여 KB를 갱신할 수 있다. 갱신된 KB를 저장하면 다음 진단에는 새로 저장된 지식베이스가 적재되어 새로운 추론의 흐름을 만들어 내게 된다.

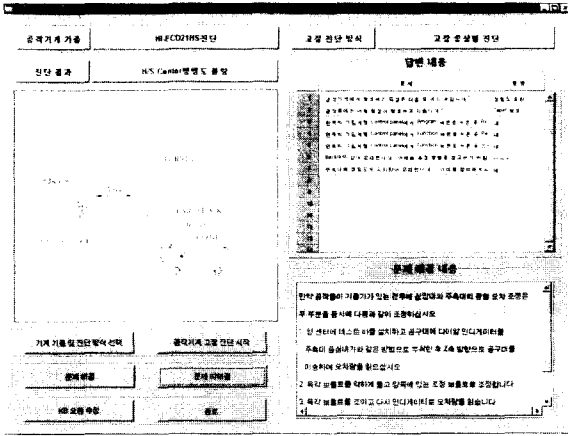


Fig. 17 Display the cause and solution in main frame

6. 결론

공작기계의 고장 진단을 위해 지식체계의 객체 모델링을 기반으로 하여 전문가 시스템 프로토타입을 구현하였다. 고장 진단 전문가들의 문제 해결 과정을 분석하여, 중요한 고장 증상들을 ‘클래스’로 정의하고 각각에 대한 가능한 원인과 세부 원인들을 객체와 Property로 표현하였으며 전문가의 지식을 규칙베이스로 구축하는 과정의 인과관계를 고장 증상에 따라 체계화하였다. 전문가 시스템 셸의 도움으로 지식의 편집 및 갱신이 용이하여 고장 진단 지식의 체계화 정도에 따라 보다 지능적인 시스템으로 진화할 수 있는 프레임워크를 제시할 수 있었고, 사용자와의 대화식 작업이 편리하여 공작기계 사용자들이 A/S 인력의 파견 없이도 상당 부분의 고장문제를 해결할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 프로토타입 시스템의 구축으로 얻을 수 있었던 결론은 다음과 같다.

- 고장 증상과 원인의 관계를 증상의 선택과 증상의 존재유무로 모델링하고 전문가 시스템 셸을 이용하여 고장 진단 시스템을 구축하여 비전문가도 대화식으로 공작기계의 고장 원인을 진단할 수 있음을 확인하였다.
- 규칙 기반 추론은 사례 기반 추론과는 달리 추상화 수준이 높은 지식 표현이 가능하기 때문에 전문가의 지식을 초기에 모델링하는 단계는 쉽지만, 개발과정이 심화될수록 전문

가의 지식의 분류, 일반화, 그리고 새로운 인과관계를 부여하는 등의 규칙으로 표현하는 일이 시스템 구축의 가장 어려운 부분이므로 사례를 통해 지식획득 및 관리가 용이한 사례 기반 추론 방식과 사례가 희귀한 경우에 대한 규칙 기반 추론 방식의 Hybrid 시스템이 하나의 해결 방법이 될 수 있다.

- 전문가의 고장 진단 작업을 증상 선택과 가정 검증의 질문으로 체계화하였으며 이를 위해 고장 진단 작업에 필요한 증상입력의 기본 표현을 제한하여 사용자의 응답을 제어함으로써 추론 근거의 모호성을 제거할 수 있었다.
- 개발된 시스템은 Stand-alone 형식으로 개발되었으나 인터넷을 통한 정보 교환 환경을 갖춘다면 원격지의 다수의 사용자로의 급격한 보급을 기대할 수 있다.

참고문헌

1. Westkaemper, E., et.al., "The diagnosis and monitoring system DIAMANT," Production Engineering. Vol.I/1, pp. 131-134, 1993.
2. 배용환, 이형국 외, "FTA(Fault Tree Analysis)기법을 이용한 이송용 대부하 베어링 고장 진단," pp. 110~123, 한국 정밀공학회지, 제 11 권, 제 5 호, 1994.
3. 최승영, 김선호, "지식베이스를 이용한 천정크레인의 전기 고장 진단 및 처방 시스템 개발," pp. 71~85, 대한 산업 공학회지, 제 20 권, 제 1 호, 1994.
4. 강대천, 강무진, "Internet을 이용한 공작기계 원격 고장 진단 시스템 구축에 관한 연구," 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 868~871, 1997.
5. 신동수, 현웅근, 정성종, "NC 공작기계용 원격 고장진단 및 보수 시스템," 한국 정밀공학회지, 15 권, 제 1 호, pp. 19~25, 1998.
6. 서동규, 강무진, "공작기계의 고장진단을 위한 전문가 시스템 구축 방안에 관한 연구," 한국 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 442-445, 1999.
7. 서동규, 공작기계 고장 진단 전문가 시스템 구축에 관한 연구, 성균관대학교 석사학위 논문, 1999.