

◎ 研究論文

용접 결함 진단 전문가시스템의 개발

박 주 용*

Development of Expert System for Diagnosis of Weld Defects

J. Y. Park

Key words : Weld defect(용접결함), Expert system(전문가시스템), Diagnosis(진단), Causal model(인과모델), Knowledge base(지식베이스)

Abstract

Weld defects degrade the strength and safety of a structure and are resulted from the various causes. The complexity of causal relation of weld defects requires an expert for the analysis of weld defects and the measures counter to them. An expert system has the intelligent functions such as the representation of knowledge and the inference. On this research, weld defect are systematically analysed and their causal model is developed. This information is saved to the knowledge base. The suitable inference algorithm for the diagnosis of weld defects is developed and realized with C++ programming.

서 론

용접 결함은 용접 중에 또는 용접 후에 용접부 및 그 주위에 나타나는 결함으로써 용접구조물의 강도와 안전성을 해치는 중요한 요인이다. 용접 결함은 크게 균열(Crack), 기공(Porosity), 용융 및 용입 불량(Lack of fusion or incomplete penetration), 이물질 혼입(Inclusion), 비드형상 불량(Improper bead form)의 5가지로 크게 구분할 수 있으며 이들은 다시 Fig. 1과 같이 17 종류의 결함으로 세분할 수 있다¹⁾. 용접 결함은 부적절한 용접

재료의 사용, 용접변수의 잘못된 설정, 부적절한 이음부 형태, 기타 용접 환경의 부적절함 등의 다양한 원인에 의해서 비롯된다. 따라서 용접 결함을 방지하기 위해서는 발생한 용접 결함의 종류와 그것을 초래한 원인에 대한 정확한 진단에 기초하여 적절한 대책을 마련하여야 한다. 그러나 용접 결함의 분석과 대책마련을 위해서는 용접에 관련된 다양한 지식과 경험을 필요로 하기 때문에 전문적 지식과 오랜 경험을 가진 용접기술자가 아니면 이러한 작업을 할 수 없다. 전문가시스템은 인공지능의 지식처리 기법을 적용하여 수치화 또는 수학적으

* 정회원, 한국해양대학교

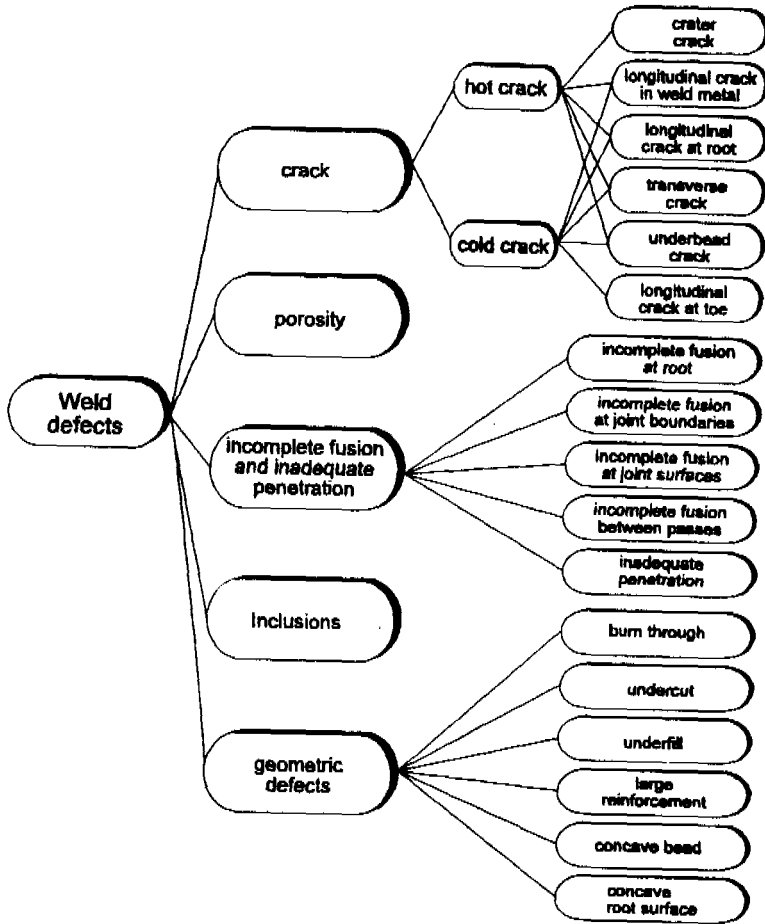


Fig. 1 Classification of weld defects

로 표시되기 어려운 경험적인 지식이나 서술적인 지식을 표현하여 컴퓨터에 저장하고 추론기능에 의해 저장된 지식에서부터 필요한 정보를 추출하는 프로그램으로써 전문가의 지식을 비전문가도 활용할 수 있게 하는 새로운 소프트웨어 시스템이다²⁾. 본 연구에서는 용접 결함의 인과관계를 분석하여 인과모델을 정립하여 이를 지식베이스로 구축하고 용접결함 관련 지식을 운용하기에 적합한 추론기구를 개발하여 용접결함의 원인과 대책을 제시함으로써 용접 기술자에게 필요한 지식을 제공하고 용접 관련 비전문가도 용접 결함의 문제를 해결할 수 있는 용접 결함 진단용 전문가시스템을 개발하였다³⁾.

2. 용접 결함의 인과 모델(Causal model)의 정립

용접 결함의 가능한 원인을 밝혀내고 그에 따른 대책을 세우기 위해서는 무엇보다도 용접 결함의 인과관계를 파악하는 것이 중요하다. 용접결함은 대부분 여러 가지 요인이 복합되어 나타나고 이러한 복합된 원인이 여러 단계의 연쇄반응을 일으켜 최종적인 용접 결함에 이르게 하므로 인과관계의 파악을 위해서는 최초의 요인에서부터 용접 결함에 이르기까지의 경로를 조사하고 각 경로에서의 원인과 결과의 상황을 밝혀야 한다. 인과 모델은 최초의 원인에서부터 최종의 결과에 이르는 각 과정에서의 인과관계를 도표로 나타낸 것으로써 용접

결합의 발생과정과 원인을 밝히고 대책을 구하는데 매우 유용한 모델이다. 본 연구에서는 대표적인 용접결함 각각에 대해서 여러단계로 구분하여 인과관계를 분석하고 이를 논리적으로 연결하여 체계적인 용접결함 인과모델을 정립하였다. 본 연구를 통해서 정립된 용접결함 인과모델은 인공지능 분야의 지식 표현에 적합한 구조를 취하고 있으며 본 전문가시스템의 지식베이스의 핵심을 이루고 있다.

2.1 균열

균열은 그 주위에 강력한 응력집중을 수반하여

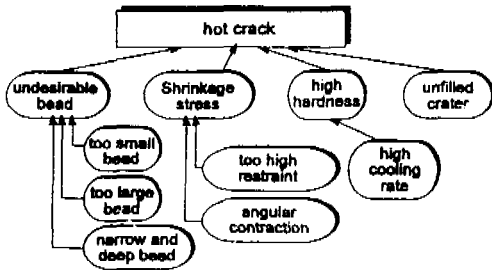


Fig. 2 Causal model for hot crack

점차 큰 균열로 성장하여 전체 구조물을 파괴하는 가장 위험한 용접 결함으로써 일반적으로 용접부의 시험 검사에서 허용되지 않는 결함이다. 용접균열은 발생하는 시점 또는 온도에 따라 고온균열과 저온균열의 두가지 유형으로 구분되며 이들의 발생 기구와 발생 원인은 상이하므로 각기 독립적인 인과모델로 구성하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 고온균열과 저온균열에 대해 설정된 인과모델을 보여준다.

2.2 기공

용접과정에서 생성된 가스의 일부는 용융금속에 용해된 상태로 머물러 있지만 용융금속이 냉각 되면 가스에 대한 용해도가 급격히 줄어들면서 기

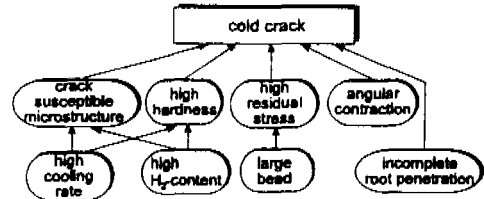


Fig. 3 Causal model for cold crack

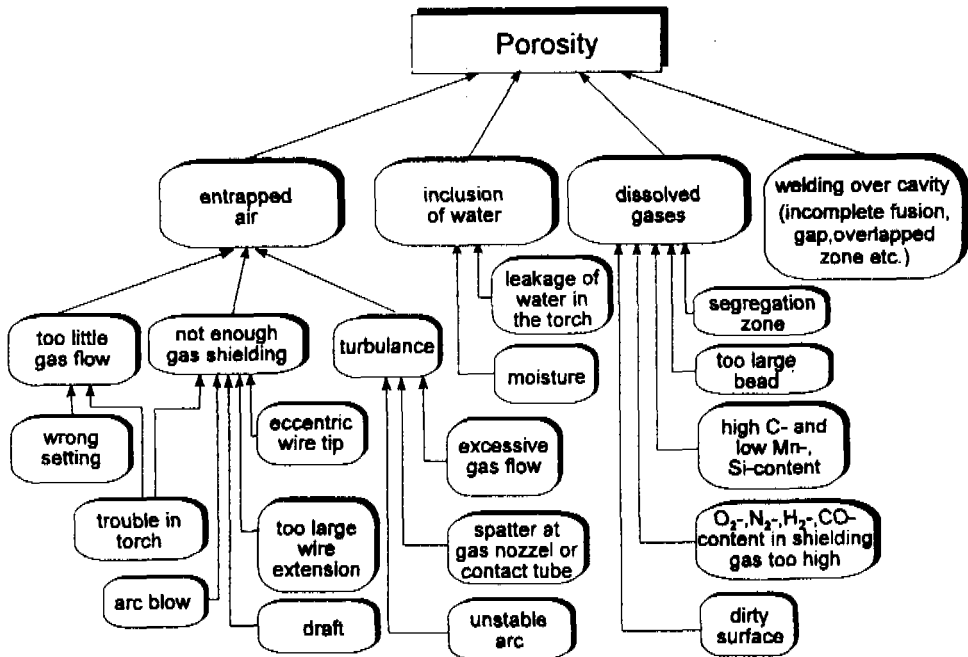


Fig. 4 Causal model of porosity

포의 형태로 외부로 배출된다. 이 때 냉각속도가 빠르면 기포가 미처 외부로 배출되기 전에 용융금속이 응고되어 기포가 용접금속안에 남게 되어 기공이 형성된다. 용접부의 시험 검사시에 각 기공의 크기와 전 용착금속의 용적에 대한 기공이 차지하는 용적의 비에 의해 용접품질의 등급과 결함에 대한 허용여부가 결정된다. 기공은 공기유입, 수분, 용해가스, 기타요인에 의해 야기되며 이들은 또 각기 상이한 요인에 의해 유발되어 기공의 인과모델은 Fig. 4와 같이 비교적 복잡한 형태로 구성된다.

2.3 용융 및 용입 불량

주로 용접 작업자의 오류나 부적절한 용접변수 선정 또는 이음부 설계에서 비롯되는 용융 및 용입 불량은 균열과 마찬가지로 응력집중을 유발하여 구조물의 강도와 안전에 악영향을 주는 중요한 결함이다. 용융 및 용융불량도 비드가 너무 작거나 용융지가 너무 커서 아크선단부까지 형성될 경우, 또 여러 원인에 의해 용접부가 오염되어 있는 경우에 야기된다. 이를 분석하면 Fig. 5와 같이 인과모델을 설정할 수 있다.

2.4 이물질 혼입

용융금속이 급속히 냉각되면 슬래그나 구리, 텅스텐 같은 불순물들은 응고된 용접금속 내부에 갇히게 되어 이물질 혼입의 결함을 초래한다. 이물질

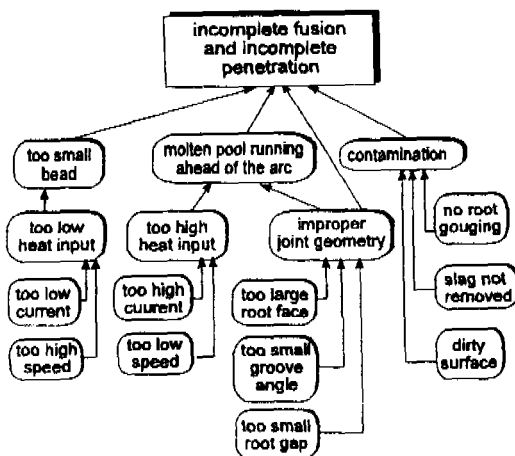


Fig. 5 Causal model for incomplete fusion and incomplete penetration

혼입도 응력집중을 유발하는 요인이 되어 용접부의 강도에 악영향을 미치게 된다. 이물질 혼입에 대한 인과 모델은 Fig. 6과 같이 구성하였다.

2.5 비드 형상 불량

비드 형상의 불량은 여러 가지 요인에 의해 발생되며 형태도 매우 다양하다. 전형적인 비드 형상 불량 형태는 대략 용락(Burn through), 언더컷(Undercut), 과볼록비드(Too convex bead), 과오목비드(Too concave bead), 루트부불량(Root suck-up), 이음부 적층불량(Underfill) 등을 들 수 있다. 이들 각각의 인과 모델은 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 구성하였다.

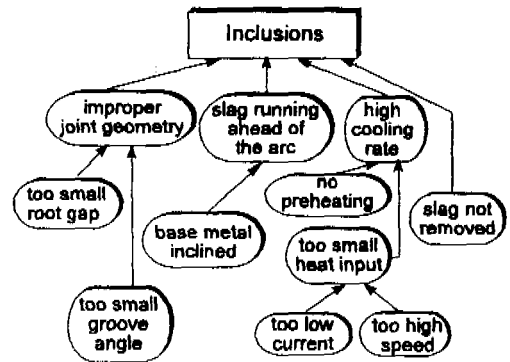


Fig. 6 Causal model for inclusions

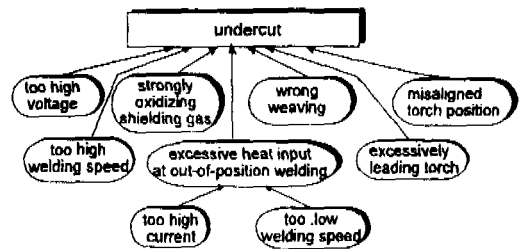


Fig. 7 Causal model for undercut

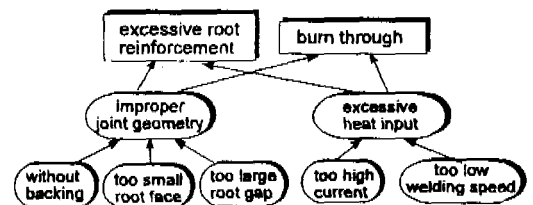


Fig. 8 Causal model for excessive root reinforcement and burn through

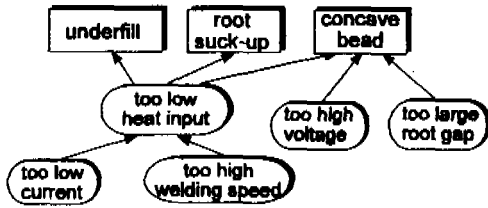


Fig. 9 Causal model for underfill, root suck-up and too concave bead

3. 용접 결함 진단 전문가시스템의 구성

3.1 용접 결함 관련 지식의 표현

2절에 표시된 용접 결함의 인과 모델은 대표적인 인공지능의 지식 표현 방법으로써 if... then... 의 형식을 취하는 규칙(Rule)으로 표현이 가능하다. 이 규칙을 구현하기 위해 객체 지향 언어인 C++에서 객체표현을 위해 제공되는 클래스를 이용하여 클래스 "Rule"을 정의하였다. 클래스 "Rule"은 Fig. 10에서 표현한 것과 같이 if-절 및 then-절을 표현하는 데이터구조, 규칙번호, 규칙의 적용의 우선순위 등의 데이터 성분(Data elements)을 갖게 하여 용접 결함이 초래되기까지 각 단계에서 발생하는 현상에 대한 원인은 if-절에 표현하고 그 결과는 then-절에 표현하였다. 또한 우선순위를 활용하여 각 인과관계의 발생 가능성

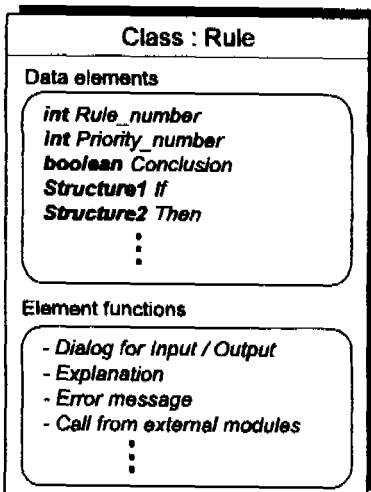


Fig. 10 Base class "Rule" for representation of causal relation of weld defects

의 높고 낮은 정도도 표현하였다. 용접결함의 인식이나 원인 규명은 사용자와의 계속적인 질의, 응답, 설명등을 통해 이루어질 수 있으므로 대화기능, 설명기능 및 입출력제어의 구현을 위해 다양한 성분함수들(Element functions)을 포함시켰다. 본 연구를 통해 구축된 지식베이스는 클래스 "Rule"을 근간으로 하여 2장에 기술되어 있는 각 용접 결함의 인과 관계와 거기에 관련된 대화 및 설명 기능을 표현한 수백개의 규칙으로 구성되어 있다.

3.2 추론엔진(Inference engine)

전문가시스템의 추론엔진은 지식베이스에 저장되어 있는 규칙들로부터 적절한 결론을 도출하는 도구로써 추론 및 탐색제어의 기능을 수행하는 부분이다. 추론 및 탐색은 각 규칙의 if-절과 다른 규칙의 then-절의 패턴부합(Pattern matching)에 의해 이루어진다. 추론은 추론의 방향에 따라 주어진 다수의 사실들에서부터 결론을 찾아가는 전향추론(Forward chaining)과 목표점을 미리 정해두고 목표점을 만족하기 위한 사실들을 찾아가는 후향추론(Backward chaining)이 있다. 탐색의 경우는 여러 층으로 구성된 규칙들에서 한 층에서 패턴부합되는 규칙을 모두 찾은 후 다음 층으로 진행하는 폭 우선 탐색(Breadth-first search)과 일단 패턴부합된 규칙을 찾으면 바로 다음 층으로 진행하여 한 결론에 이르기까지 계속하는 깊이 우선 탐색(Depth-first search)이 있다(Fig. 11 참조). 일반적으로 최적화 및 통합 과정은 전향추론과 폭 우선 탐색이, 진단 및 분석 과정에는 후향추론과 깊이 우선 탐색을 가미한 절충형 탐색기법이 활용된다.

3.3 추론 과정의 구현

본 연구를 통해 구축된 지식베이스의 Rule들을 이용하여 용접결함의 진단과정을 구현하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 독자적인 추론기구를 개발하였다.

지식베이스의 Rule들은 Fig. 12와 같이 연결리스트(Linked list)를 이용하여 각 Rule이 포함하고 있는 우선순위값의 순서로 Main list를 형성한다. 초기조건이 주어지면 Main list의 Rule의 if-절

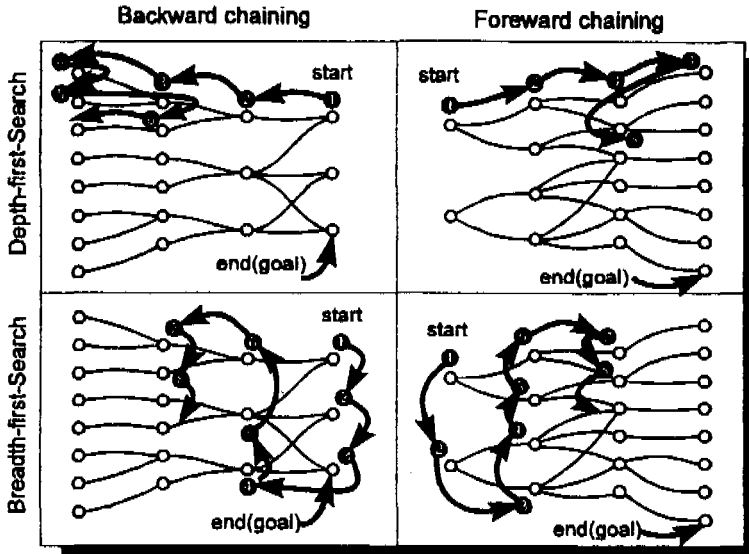


Fig. 11 Inference mechanism

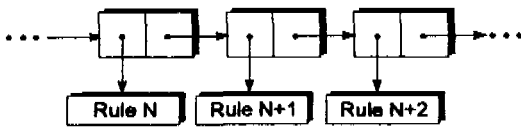
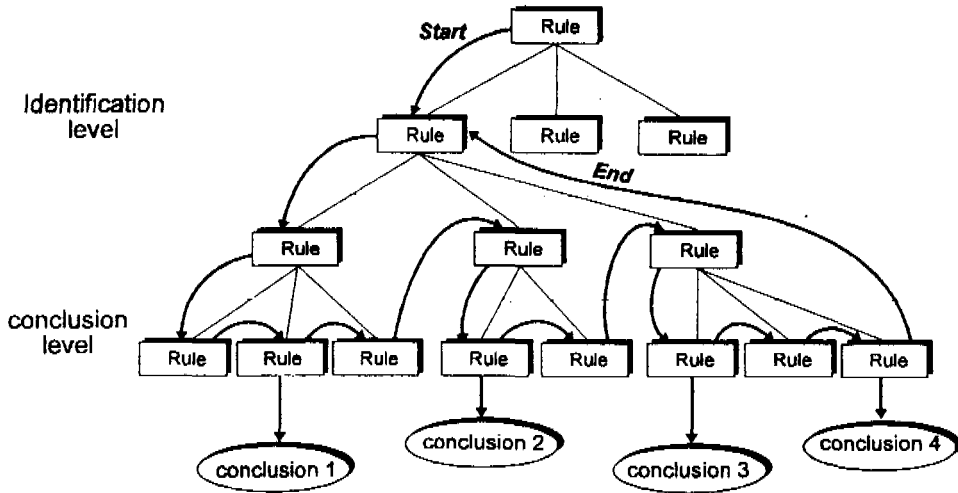


Fig. 12 Linked list

과 초기조건과의 패턴비교 과정이 수행되어 패턴 부합된 Rule들에 의해 새로운 첫번째 Sublist가 생성된다. 첫번째 Sublist의 첫번째 Rule의 then-절은 다시 Main list의 Rule의 if-절과 패턴 비교 작업이 이루어져 두번째 Sublist가 생성되고 이 과정이 되풀이되어 결론에 해당되는 Rule에 이르게 된다. 또한 추론방식으로는 결합진단에 적합한 후향추론을 적용하되 용접결합이 대부분 여러 원인이 복합적으로 작용하여 발생하는 만큼 깊이 우선 탐색에 폭 우선 탐색을 가미한 새로운 절충형 탐색기법을 고안하여 적용하였다.

용접결합의 진단과정은 크게 용접결합 종류의 인식과정, 중간 단계의 인과관계 규명과정 및 최초의 유발원인 확정과정의 3과정으로 구분할 수 있

으므로 본 연구에서도 용접결합의 인과관계를 표현하고 있는 각 규칙들을 Fig. 13과 같이 3그룹으로 구분하여 첫 번째 그룹은 용접결합의 종류를 인식하기 위한 규칙들로 구성하여 폭 우선 탐색을 적용하고 두 번째 그룹과 세 번째 그룹은 깊이 우선 탐색을 적용하되 두 번째 그룹은 결론에 도달하기 위한 중간단계의 인과 관계를 표현한 규칙들, 마지막 그룹은 결론을 제시하는 규칙들로써 최초 유발원인과 대책을 나타내는 규칙들로 구성하였다. 이러한 유사성질의 규칙을 그룹화하고 각 그룹에 적절한 탐색방법을 적용함으로써 탐색작업의 효율성을 높여 전문가시스템의 문제점의 하나인 느린 추론속도 문제를 개선시켰다. 한 종류의 용접결합을 야기하는 원인은 통상 여러 가지이며 그에 따른 대책도 다양하므로 본 연구에서 개발한 추론기구에서는 한가지 원인과 그에 따른 대책을 제시하는 결론에 도달할 때 추론과정이 종료되는 일반적인 전문가시스템과는 달리 또 다른 원인과 대책을 찾기위한 탐색을 수행하여 더 이상의 원인이 없을 때까지 탐색 작업을 계속하도록 하였다. 따라서 용접결합의 진단 결과는 복합적인 원인과 그에 대한 여러 가지의 대책을 제시할 수 있도록 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 다수의 결론이 모여 최종적인 결론을 구성하는 형태로 출력된다⁷⁾.



a solution = conclusion 1 + conclusion2 + conclusion3 + conclusion 4

Fig. 13 Inference procedure

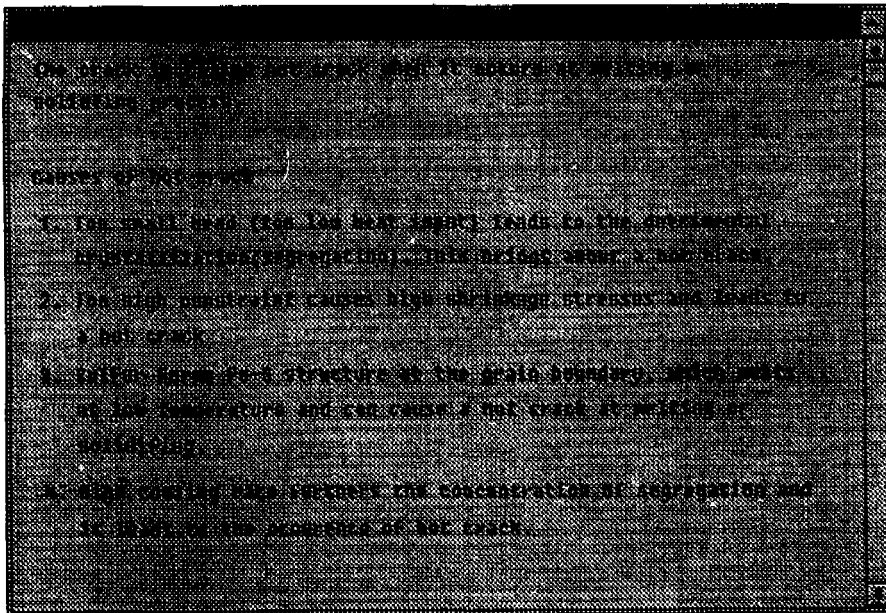


Fig. 14 Example of explanation

3.4 대화 및 설명기능(Dialog and explanation function)

대화 및 설명기능은 전문가시스템의 중요한 기능으로써 사용자의 응답에 대응하여 주어지는 많

은 질문을 통해서 단계적으로 문제를 정확히 인식 하고 문제에 대한 최적의 해결책에 접근할 수 있게 한다. 또한 결론에 도달한 과정이나 근거를 설명하는 설명 기능에 의해 결론에 대한 신뢰성을 높이고 혹시 있을 수도 있는 논리적 오류에 대해 사용자가

점점할 수도 있다. 대화 기능은 4장의 적용 예에 나타나 있으며 Fig. 14는 본 시스템의 설명기능을 보여주고 있다.

4. 적 용 예

본 연구를 통해 구축된 전문가시스템은 C++ 언어로 작성되었으며 MS-Windows 환경에서 운용되도록 프로그래밍되었다. 또한 다양한 그래픽 입출력을 도입하여 사용자의 편의를 도모하였다⁹⁾.

용접결함의 진단 및 대책을 위해서는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같은 다양한 용접결함 중 어디에 속하는가를 파악하여야 한다. 용접결함은 통상 기하학적 형상으로 구분이 가능하므로 Fig. 15 및 Fig. 16과 같이 그래픽 대화창을 이용하여 용접결함의 종류를 파악하는 것이 효과적이다. Fig. 15와 Fig. 16을 통해서 용접결함의 종류가 인식되면 다음 과정으로 2장의 인과모델에 기초하여 Fig. 17과 Fig. 18과 같이 용접결함을 야기한 원인을 단계적으로 분석해 나간다. 주어진 용접결함에 대한 대책으로서 최종 결론은 Fig. 19에서 보여주고 있는

바와 같이 4개의 결론이 모여 구성된다.

5. 결 론

본 연구에서는 용접결함에 관련되는 인자들과 그들의 인과관계를 체계적으로 분석하여 다양한 용접결함에 대한 인과모델을 정립하였다. 또한 고가이며 방대한 용량의 전문가시스템 개발도구인 전문가시스템 셸을 사용하지 않고 C++언어를 사용하여 독자적으로 개발한 지식표현 기법과 추론기구를 사용하여 다양한 원인이 복합적으로 연관되어 있는 용접결함의 원인을 분석하고 그 대책을 강구하는데 효과적으로 활용될 수 있는 전문가시스템을 개발하였다. 최근의 프로그래밍 추세를 고려하여 MS-Windows 환경에서 프로그래밍함으로써 사용자의 편의와 시스템의 확장성 및 호환성을 도모하였다. 앞으로 용접결함에 관련되는 정보 중 정량화가 가능한 부분을 정량화하여 용접결함의 원인 및 대책에 더욱 구체화되고 정량화된 정보를 제공할 수 있는 방향으로의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

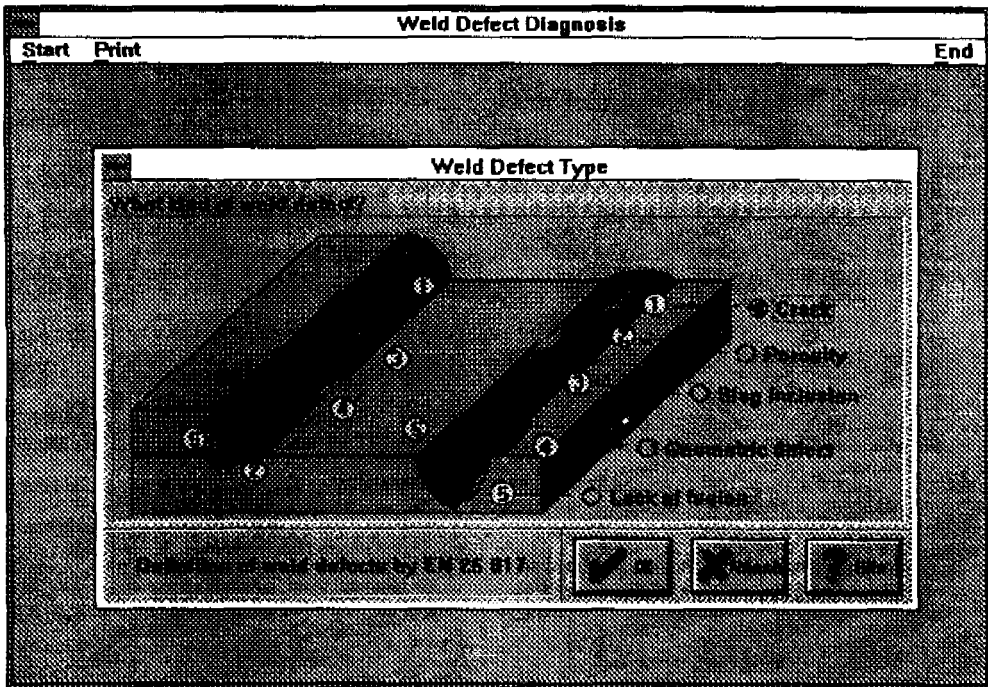


Fig. 15 Selection of weld defect type

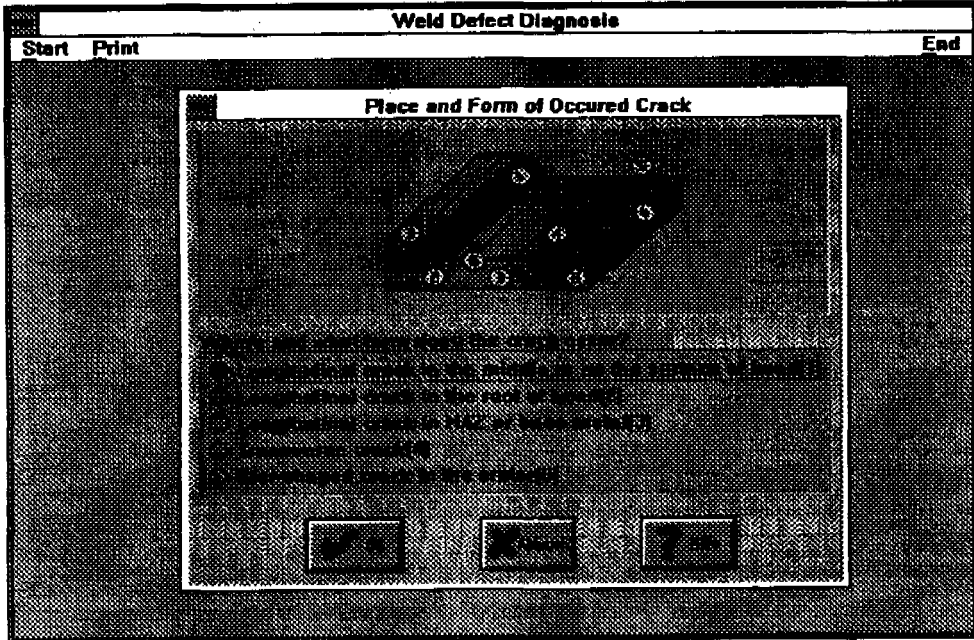


Fig. 16 Determination of place and form of the crack

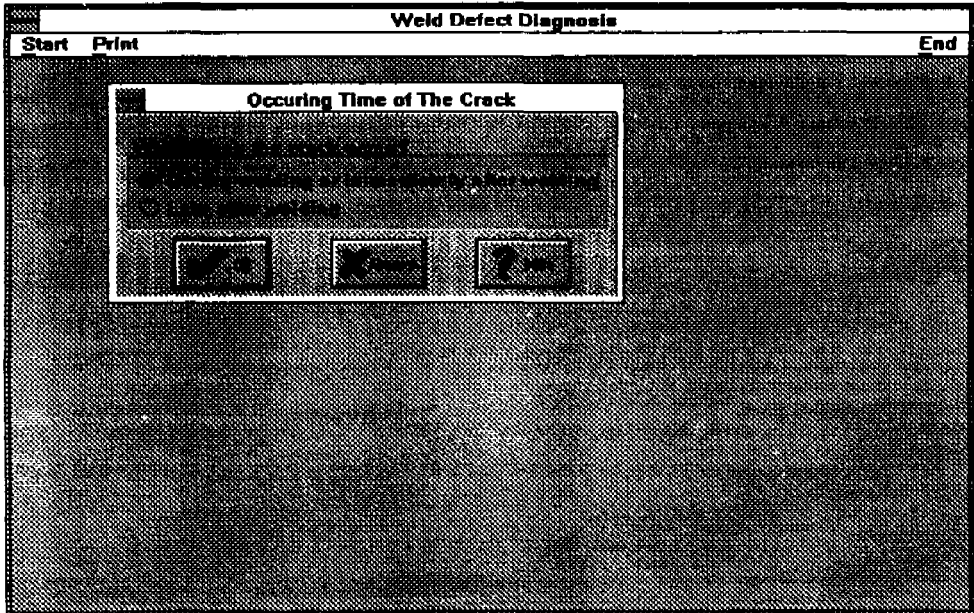


Fig. 17 Dialog for analysis of weld defect(1)

6. 참고문헌

1) AWS : Welding Handbook. 8th edition (1987),

Vol. 1, pp. 350 - 369

2) P. Harmon, D. King : Expertensysteme in der Praxis - Perspektiven, Werkzeuge, Erfahrungen. R. Oldenburg Verlag GmbH, München, 1987

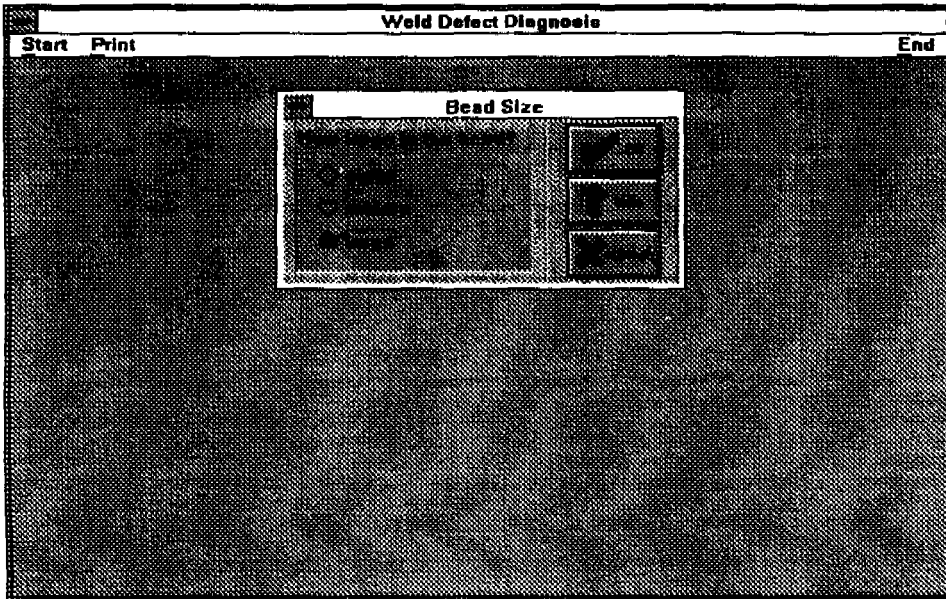


Fig. 18 Dialog for analysis of weld defect(2)

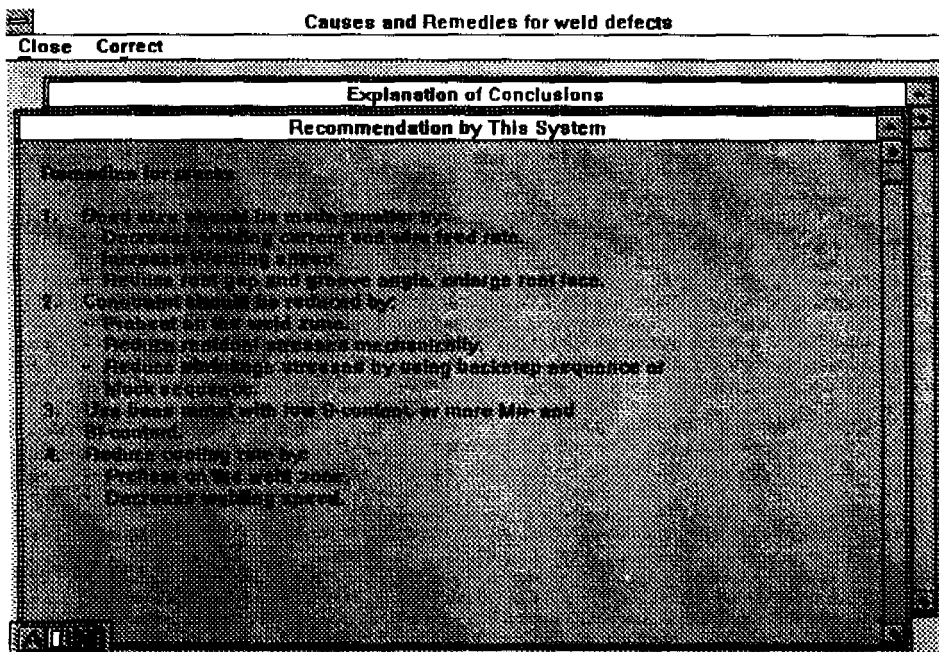


Fig. 19 Conclusion of weld defect diagnosis

- 3) P. De Bonniere, u. a. : A knowledge based diagnosis system for welding machine problem solving. Int. Conf. "Computer technology in welding", Welding Institute, London, Juni 1986
- 4) M Xie, G Bolmsj : A model for quality assurance in robotized GMA welding. Automated Welding Systems in Manufacturing, Paper 16, Gatehead, North East UK, 17 - 19 November 1991

- 5) H F Shaw, M A Bourton : Knowledge acquisition and a design philosophy for diagnostic expert systems. Int. Conf. "Computer technology in Welding", June 1990, pp. 310 - 317.
- 6) P. Jackson : Expertensysteme : Eine Einführung. Addison - Wesley Publishing Company, Bonn Massachusetts, 1987
- 7) J. Y. Park : Fuzzy - logic - basiertes Beratungssystem zur Prozeßoptimierung und Fehler diagnose beim MAG - Schweißen, Dissertation RWTH Aachen, Germany, 1993.
- 8) C. Petzold : Programming Windows. Microsoft Press, Redmond, 1990