

용접 정보 시스템의 현황과 전망

박 주 용

The State-of-the-Art and a Prospect of Welding Information System

Ju-Yong Park



박주용 / 한국해양대학교 조선해양공학부 / 1956년생 / 용접용 DB시스템 및 전문가시스템, 용접자동화 분야 연구

1. 서 언

1950년대에 최초의 상용 컴퓨터가 도입된 이래 컴퓨터는 모든 사회 분야에 있어서 필수 불가결한 도구가 되었고 현대의 산업 사회는 정보 산업 사회라고 할 만큼 정보의 신속한 획득과 정보의 보유량은 산업 경쟁력의 핵심이 되고 있다. 용접 분야에서도 적절한 용접 정보의 신속한 제공이 용접의 품질과 생산성 향상의 관건이 되고 있으며 최근 용접의 자동화가 급속히 이루어지고 컴퓨터에 의한 통합 생산 시스템(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)의 구축이 활발해짐에 따라 그들의 핵심요소의 한 부분으로서 용접 정보 처리 시스템의 역할과 중요성은 더욱 커지고 있다.

2. 용접용 소프트웨어 시스템의 해외 및 국내 현황

용접 정보 시스템은 1970년대 구동독의 용접중앙연구소에서 다양한 용접용 계산프로그램 및 용

접데이터를 컴퓨터에 수록하여 개인 및 기업체가 공동으로 활용할 수 있는 시스템을 구축한 것을 시작으로 1980년대 일본, 유럽, 미국 등지에서 본격적인 연구 개발이 시작되었고 일부는 상용화되어 실질적으로 활용되기도 하였다. 그러나 1980년대까지는 PC의 기능이 강력하지 못하여 주로 중대형 컴퓨터용으로 개발되었고 사용자 환경이 까다로와 널리 활용되지는 못하였다. 1990년대에 들어서 데스크톱 및 노트북 PC의 성능이 고도화되고 그래픽 사용자 환경인 윈도시스템이 표준 OS로 사용되면서 막강한 기능과 편리한 사용성을 지닌 많은 PC용 용접 소프트웨어가 개발되어 여러 산업 현장에 사용되고 있다.

일본에서는 1980년대 초반 용접 정보 처리 시스템의 중요성이 인식되면서 일본용접협회 산하에 용접 데이터 시스템 위원회가 결성되어 다양한 용접용 소프트웨어와 용접 전문가 시스템 등에 대한 본격적인 연구 개발이 시작되었다¹⁾. 이 때 개발된 프로그램으로 CO₂ 용접용 적정 용접조건 산출 프로그램, 용접시공 데이터베이스 프로그램, 예열 온도 계산 프로그램, 용접설계 지원 전문가시스템 등 십수종이 있다^{2,3)}.

유럽에서는 1980년대 후반부터 영국의 용접연구소(TWI, The Welding Institute), 독일의 용접학회(DVS, Deutsche Verband fuer Schweisstechnik)를 중심으로 용접시공 관리 프로그램, 용접경비 산출 프로그램, 아크 신호 분석 프로그램, 용착 금속 성분 추정 프로그램 등의 수십종의 PC용 프로그램을 개발하여 상용화시킨 바 있고 현재 다양한 종류의 용접 데이터베이스 시스템, 용접 전문가시스템 및 용접기술 지원 소프트웨어를 개발하고 있다⁴⁻⁶⁾.

또한, 미국에서는 미국 용접 연구소(AWI, American Welding Institute), 에디슨 용접연구소(EWI, Edison Welding Institute), 미국기계공학협회(ASME, American Society of Mechanical Engineering) 등에서 각종 용접관련 데이터베이스 시스템, 용접사 관리 프로그램, 용접 금속 성분 추정 프로그램 등을 비롯하여 다양한 용접관련 계산 프로그램 및 용접기술자 지원 전문가시스템 등을 개발하였다^{7,8)}.

한편 국내에서는 1980년대 후반 한국기계연구원에서 용접 데이터베이스 시스템 연구개발에 착수한 이래 주로 조선, 플랜트 및 자동차 분야의 대기업에서 자체의 필요에 의해 부분적으로 용접 관련 정보의 데이터베이스화를 추진하여 실용화 단계에 와 있고 몇몇 대학에서 용접 데이터베이스 및 용접 전문가시스템에 관한 연구를 계속하고 있다. 국내 기술로 상품화된 용접용 소프트웨어는 아직은 드물지만 특히 최근 조선 및 자동차분야를 중심으로 CIMS구축을 활발히 추진함에 따라 다양한 용접용 소프트웨어의 개발의 필요성이 증대되고 있어 용접 정보 처리 시스템의 연구 개발이 활기를 띠고 있다.

3. 용접 정보 처리 시스템의 종류와 특징

용접 정보 처리 시스템은 용접 소프트웨어 중에서도 다량의 용접 데이터 및 정보를 컴퓨터를 이용하여 관리하고 가공함으로써 필요한 용접 정보를 획득하거나 창출하는 소프트웨어 시스템을 의미한다. 용접 정보 처리 시스템은 사용 목적이나 개발 도구에 따라 다양한 종류가 있으나, 방대한 용접 정보를 데이터베이스화하고 데이터베이스를 관리하는 다양한 기능을 구현하여 원하는 정보를 신속

하게 제공하는 용접 데이터베이스 시스템(Welding database system), 용접 데이터와 다양한 경험적 지식을 인공지능 기법으로 처리하여 유용한 정보를 도출하는 용접 전문가시스템(Welding expert system), 상관 관계가 불확실하거나 알려져 있지 않은 경험적 정보로부터 신뢰성 있는 정보를 창출하는 퍼지시스템 및 인공신경망 시스템(Fuzzy system and neural network system) 등이 대표적인 용접 정보처리 시스템에 속한다.

3.1 용접 데이터베이스 시스템

용접 데이터베이스 시스템은 용접 정보처리 시스템 중 가장 활발히 개발되고 있고 현재 수십종이 상용화되어 활용되고 있는 소프트웨어 시스템으로서 Fig. 1과 같이 방대한 용접 정보를 수록하고 있는 데이터베이스와 데이터베이스를 운용하는 데이터베이스 관리 시스템 및 사용자가 데이터베이스에 관한 지식없이도 누구든지 쉽게 사용할 수 있도록 도와주는 응용 프로그램으로 구성되어 있다⁹⁾. 데이터베이스 시스템은 계층구조형, 네트워크형, 관계형 및 객체지향형 데이터베이스 시스템으로 구분되지만 계층구조형이나 네트워크형은 구조의 복잡함과 운용의 불편함으로 현재는 거의 적용되지 않고 있고 주로 관계형 데이터베이스 시스템이 주종을 이루고 있다. 객체지향형 데이터베이스 시스템은 현재 소프트웨어 기술을 선도하고 있는 객체지향 기법을 데이터베이스 시스템에 도입한 새로운 데이터베이스 시스템으로 미래의 주된 데이터베이스 시스템으로 전망하지만 아직은 기술의

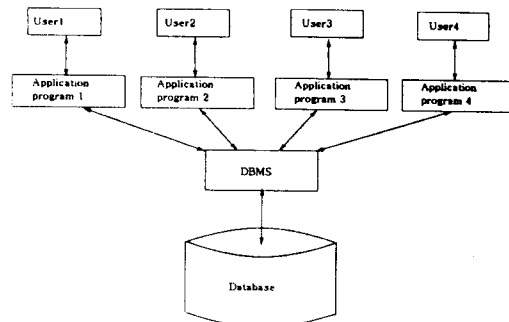


Fig. 1 Components of Database System

완성도가 충분하지 못하여 본격적으로 적용되지는 않고 있다. 관계형 데이터베이스 시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 인간의 익숙한 데이터 표현 방법인 표의 형태로 데이터를 나타내어 데이터의 속성을 Field에 표현하고 한 대상을 표현하는 속성의 집합을 Record로 표현한다. 현재 상용화되어 있거나 개발중인 다수의 용접용 데이터베이스 시스템은 관계형 데이터베이스 시스템을 채용하고 있다.

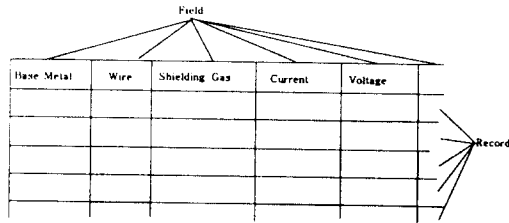


Fig. 2 Structure of database

용접용 데이터베이스 시스템은 용접모재 데이터베이스 시스템, 용접재료 데이터베이스 시스템, 용접 시공 데이터베이스 시스템, WPS 및 PQR 관리 데이터베이스 시스템, 용접사 관리 DB 시스템, NDT DB 시스템 등 용접의 다양한 분야에서 개발 활용되고 있다. Table 1은 현재 상용화되어 사용되고 있는 용접용 데이터베이스 시스템을 보여주고 있다.

3.2 용접용 전문가 시스템 (Welding expert system)

용접 정보는 명확한 데이터로 표현되는 것도 있지만 기호나 수식 또는 논리적인 표현으로 나타나는 유용한 정보들도 많이 있다. 이러한 정보들은 기존의 데이터베이스로는 다루어질 수 없지만 인공지능 지식 처리 기법을 적용하면 컴퓨터에 의한 처리가 가능하다. 전문가시스템은 인공지능 분야의 한 부분으로 인간의 지식을 표현하고 추론을 이용하여 저장된 지식으로부터 유용한 정보를 제공하는 소프트웨어 시스템이다¹⁰⁾. 전문가시스템은 Fig. 3에서와 같이 각종 지식을 인공지능 지식 표현 기법으로 처리하여 저장한 지식베이스

(Knowledge base), 지식베이스의 지식을 해석하고 이를 논리적으로 연결한 후 새로운 정보를 추론해 내는 추론기구(Inference engine), 적절한 추론을 수행하기 위해 필요한 사용자와의 질의 응답을 담당하는 대화모듈(Dialog module), 지식베이스에 저장된 지식이나 추론 과정을 사용자가 이해할 수 있는 형태로 제시하는 설명기능(Explanation module)으로 구성되어 있다. 인공지능 지식표현 기법은 프레임(Frame) 또는 객체(Object), 의미네트워크(Semantic Nets), 규칙(Rule) 등이 있으며 그 중 논리적 표현의 구현이 용이한 규칙이 가장 널리 활용되며 보통 프레임 또는 객체와 함께 사용되는 것이 보통이다. Fig. 4는 용접 관련 지식을 규칙을 사용하여 표현한 예를 보여준다.

용접용 전문가시스템은 용접의 대부분의 분야에서 활용되고 있으며 특히 용접부 품질예측, 용접이

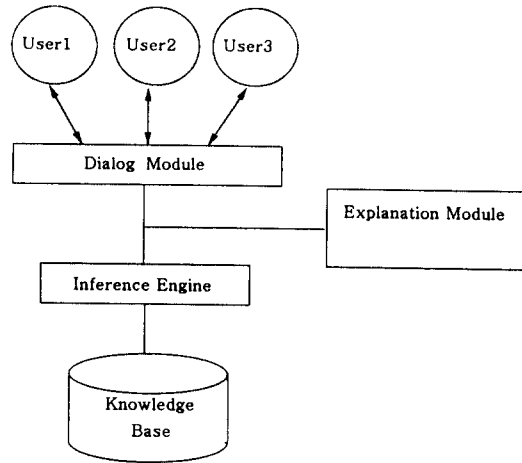


Fig. 3 Structure of expert system

- IF Bead is narrow AND high
- THEN increase Voltage AND decrease Speed
- IF Bead is small AND Penetration is small
- THEN increase Current AND decrease Speed
- IF Bead is wide AND Penetration is small
- THEN decrease Voltage

Fig. 4 Examples of rules representing welding information

Table 1. List of welding database system

No	Name	Supplier	Feature
1	WELDERQUAL	The Welding Institute, UK	Record of qualified welder personnel
2	WELDSPEC	The Welding Institute, UK	Record of qualified procedures
3		American Welding Institute, USA	Manages welders and records
4	WELDPRO	Galaxy computer services, USA	Program determines welder's qualifications
5	SPECPRO	Galaxy computer services, USA	Program maintains WPS and PQR files
6	TURBO-IX	C-Spec, USA	A review of welding procedure specifications
7	EM2000	Servo-Robot Inc., CANADA	Optimization of the welding procedure for automatic welding
8	WELDATA	American Welding Institute, USA	Welding procedure data and forms
9	WELDplan	FORCE Institute, Denmark	Program for application in welding production
10	XWELD	Norweld AS, Norway	Computer system for storing, retrieval and distribution of information in welding technology
11	WELDTECHN	Computer partner, Hungary	Modular software package for welding
12	WPSELECT	The Netherlands Institute for Welding, The Netherlands	Program for organizing welding procedure specifications
13	DAST09	German Welding Society, Germany	Program for investigation of group of steel grades in accordance with DAST-Regulation 009
14	DAST14	German Welding Society, Germany	Program for investigation of group of steel grades in accordance with DAST-Regulation 014
15	Mat. DB	AMS International, USA	Material properties database management system
16	X-Weld	Marshall Marlow, USA	Procedure design, database and analysis
17	Soudage PWMS	SICAP, France	Storage and retrieval of welding procedure specifications
18	Welding Pro-Write	Computer Engineering Inc., USA	Creates and maintains welding procedure specifications, welder performance qualifications and continuity logs

음부의 강도 및 수명 추정, 최적 용접 조건 결정, 적정 용접법 및 용접재료 선정, 용접기호 분석 및 생성, 용접결함 진단 및 대책, 용접기기 고장 진단 등의 분야에 적용되고 있다¹⁹⁾. Table 2는 현재 활용되고 있는 대표적인 용접 전문가시스템의 목록과 간략한 내용을 보여준다.

3.3 퍼지시스템(Fuzzy system) 및 인공신경망 시스템(Artificial neural network system)을 이용한 용접용 소프트웨어

용접 기술은 아크 등의 열원, 용융 및 응고 등 명확히 규명되지 않은 물리적인 현상을 많이 포함하고 있어 용접 정보의 많은 부분이 경험적인 지식에 의존하고 있다. 이 경험적 지식은 부정확하거나 모호한 표현이 많고 때로는 용접 변수와 비드

Table 2. List of welding expert systems

No	Name	Supplier	Feature
1	WELDSLECTOR	American Welding Institute, USA	System for electrode selection
2	WELDSYMPLE	American Welding Institute, USA	Symbol generator
3	WELD ASSIST	Hobart Brothers Company, USA	A diagnostic expert system for GMAW welds on mild steel
4	WELDCRACK EXPERT	The Welding Institute, UK	Expert system for diagnosis of fabrication cracks
5	WELPLAN	Toyo Engineering Corp., Japan	Expert system for welding procedures of chemical plant equipment
6	WELDSYS2	Welding Research Institute, Japan	Welding condition support system
7	INFOWELD	Wijtek, UK	Welding parameter generator
8	Welding Procedure Selection Expert System	Ston & Webster Engineering, USA	Procedure generator
9	Welder Qualification Test Selection Expert System	Ston & Webster Engineering, USA	Test selector
10	Weld Defect Diagnosis Expert System	Ston & Webster Engineering, USA	Diagnostic
11	Weld Estimating Expert System	Ston & Webster Engineering, USA	Cost analysis
12	Miller Expert Program	Miller Electric Mfg. Co., USA	Diagnostic
13	WES	CIGWELD, Australia	The use of expert knowledge in the selection of CIG welding consumables
14	Hot-wire TIG Expert System	Framatome Heavy Fabrication Facility, France	Diagnostic
15	Newcs	General Digital Industries, USA	Real-time monitoring diagnostics
16	Weldex	Technical University of Berlin, Germany	Procedure generator
17	SAW Expert System	Queen's University Belfast, UK	Procedure generator
18	Weld Scheduler Expert System	Badcock & Wilcox, USA	Procedure generator
19	Weldgen	Edision Welding Institute, USA	Generates guideline welding procedures, where no proven procedure exists
20	MagXpert	Aachen University, Germany	Optimization of welding parameter and defect analysis

형상과의 상관 관계처럼 변수들의 상관관계가 거의 알려져 있지 않은 경우도 적지 않다. 이러한 정보들은 오랜 경험을 갖춘 숙련 기술자들외에는 활용이 불가능하며 컴퓨터에 의한 처리도 매우 어렵다.

퍼지 시스템은 퍼지 이론을 기반으로 한 정보처리 시스템으로 불명확하거나 불확실한 정보로부터도 비교적 신뢰도가 높은 정보를 추출할 수 있게 해준다. 퍼지 시스템에서는 변수의 크기에 대한 평가를 퍼지집합으로 표현한다. 퍼지집합은 어떤 원소가 한 집합에 100% 소속되거나 아니면 전혀 소속되지 않는 일반 집합과 달리 조금이라도 그 집합에 소속되는 것을 모두 그 집합의 원소로 하되 원소를 그 집합에 소속된 정도와 함께 표현한다. 예를 들어 용접 전류의 크기를 정의할 때 Fig. 5와 같이 "very low", "low", "middle", "high", "very high"의 5부분의 삼각형 형상의 퍼지집합으로 표현하면 280 Amp는 "high current"에 100% 소속되거나 240 Amp는 "high current"영역에 50%, "middle current" 영역에 50% 소속된다. 이를 언어적인 표현으로 바꾸면 "quite high current"로 표현할 수 있다. 퍼지 시스템은 모든 변수를 이와 같은

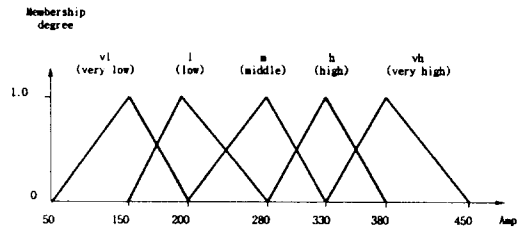


Fig. 5 Evaluation of welding current using fuzzy set

퍼지 집합으로 표현하고 그들의 상관관계를 Table 3과 같은 퍼지룰로 기술함으로써 경험적인 정보를 실제와 유사하게 표현한다. 이와 같이 표현된 정보들은 Fig. 6에서 보여주는 퍼지 시스템의 근접추론 (Approximate reasoning)에 의해 신뢰도가 높은 새로운 유용한 정보를 얻어낼 수 있다¹²⁾.

한편, 인공지능망 시스템은 뇌에 존재하는 생물학적 신경세포와 그것들의 연결 관계, 정보 처리 및 전달 과정을 수학적으로 모델링함으로써 뇌가 나타내는 지능적 형태를 구현하고자 하는 새로운 정보 처리 방법이다. 인공지능망의 가장 큰 특징은 학습 능력과 지식의 분산 표현에 있다. 인공 신

Table 3. Representation of relationship between welding parameters by fuzzy rules

Rule No	IF	THEN
10	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=quite small AND Bead width=middle AND Reinforcement=middle
11	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=middle AND Weaving=small	Penetration=middle AND Bead width=small AND Reinforcement=small
12	Current=middle AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=large AND Weaving=small	Penetration=large AND Bead width=very small AND Reinforcement=very small
13	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=middle AND Bead width=middle AND Reinforcement=middle
14	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=small AND Weaving=small	Penetration=quite high AND Bead width=middle AND Reinforcement=small
15	Current=high AND Voltage=middle AND Speed=middle AND Gap=large AND Weaving=small	Penetration=large AND Bead width=small AND Reinforcement=very small

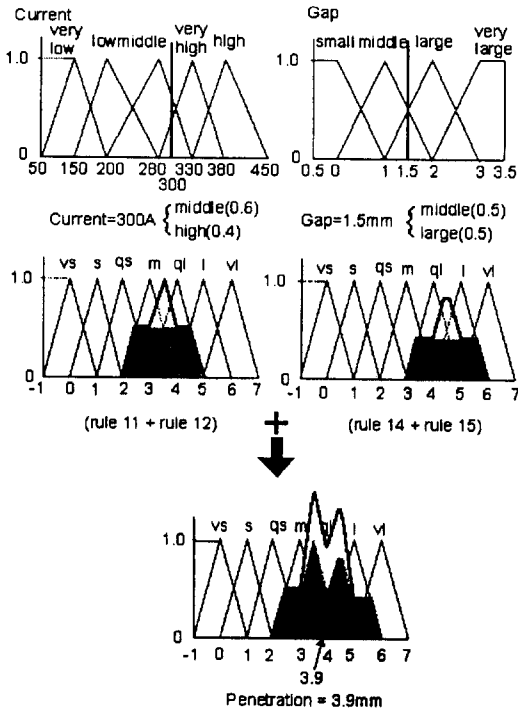


Fig. 6 Approximate reasoning of fuzzy system

경망은 자신이 경험하는 환경에 따라 자신의 내적 상태를 간단한 규칙에 의해 변화시킴으로써 스스로 내적 지식을 만들어 간다. 즉 신경망은 프로그램 되어지는 것이 아니고 예제를 통하여 학습을 한다. 학습이 성공적이면 신경망은 자신이 경험했던 예제가 아닌 다른 형태의 입력에 대해서도 적당히 반응할 수 있도록 내부적인 변수들이 조정된다. 즉 경험을 통해 축적된 내적 지식을 새로운 형태의 입력에까지 일반화시켜 적용할 수 있게 한다. 두 번째로는 인공신경망에서는 지식의 내부적인 표현이 신경망의 일부 또는 전체에 걸쳐 분산되어 있다. 기존의 기억장치의 경우 기억장치 일부의 파손은 그곳에 기억된 자료의 완전한 손실을 가져오지만 신경망의 경우는 신경망의 일부가 파손되더라도 그 정도가 약해질 뿐 작동은 가능하다. 또한 자료의 일부에 오류가 있더라도 그것으로 인해 최종 결과에 미치는 영향은 그리 크지 않다. 신경망의 구조는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 보통 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 그리고 은닉

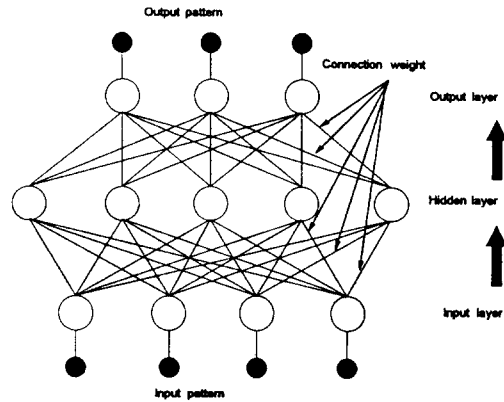


Fig. 7 Structure of artificial neural network

층(hidden layer)으로 구성이 된다. 입력층은 시스템의 외부로부터 입력을 받아들이는 층으로 사람의 감각 기관에 존재하는 신경세포들에 해당하고, 출력층은 시스템의 외부로 출력을 내보내는 층으로 뇌의 명령을 운동기관에 전달하는 신경세포에 해당하며 은닉층은 감각 기관들로부터 전달된 자료들을 통해 반응을 결정하는 뇌에 해당한다. 각 층의 신경세포는 정보전달정도를 나타내는 연결가중치라는 실수값으로 연결되어 있다. 인공신경망의 학습 과정은 신경망으로 하여금 일련의 자료들을 경험하도록 하여 신경망이 주어진 규칙에 따라 스스로 자신의 연결가중치를 조절하는 과정이다. 충분한 학습을 통해 연결가중치가 결정되면 신경망은 Fig. 8과 같은 동작을 거쳐 학습과정에서 경험했던 자료들에 대해서 정확한 출력을 내어줄뿐만 아니라 자신이 경험하지 못했던 새로운 자료에 대해서도 타당한 출력을 제시한다¹³⁾.

퍼지시스템과 인공신경망 시스템은 비선형적이고 불확실하며 부정확한 상호관계를 갖고 있는 용접현상 및 용접변수 관련 정보를 취급하는 데 둘다 유용하게 적용될 수 있다^{14,15)}. 그 중에서도 변수들 사이의 정량적인 상관 관계가 명확하게 규명되어 있지는 않으나 경험적으로 또는 정성적으로 어느 정도 밝혀져 있는 데이터의 경우에는 퍼지집합과 퍼지룰에 의한 표현이 용이하므로 퍼지시스템으로 효과적으로 처리할 수 있다. 실험 또는 경험에 의한 데이터는 있지만 이들의 상관관계가 전혀 알려져 있지 않거나 정성적으로도 나타내기 어려운 경

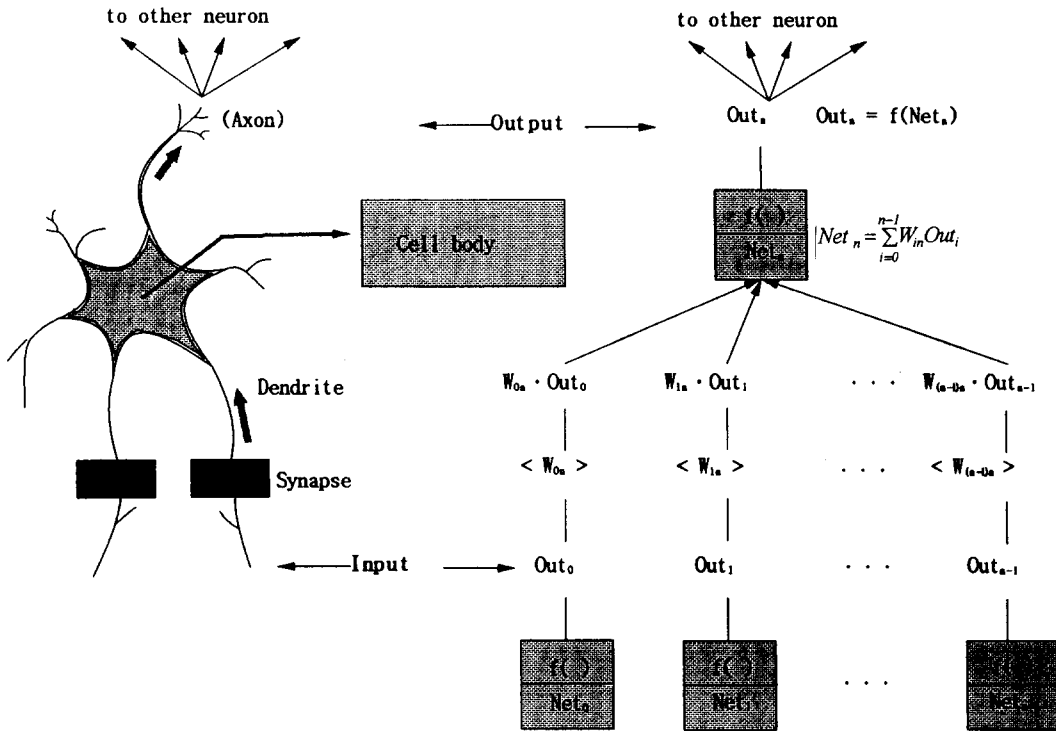


Fig. 8 Operating process of neural network

우에는 학습을 통해 데이터의 상관관계를 스스로 정립할 수 있는 인공지능 시스템이 유효하다. 이와같이 퍼지시스템과 인공지능망은 상호 보완적인 기능을 갖고 있기 때문에 단독으로 시스템이 구축되기 보다는 두 방법이 혼합된 뉴로퍼지시스템으로 구축되는 경우가 많다. 또한 이들은 다량의 데이터 또는 지식을 필요로 하는 경우가 많으므로 데이터베이스 시스템 또는 전문가시스템과 통합된 복합 정보처리 시스템으로 개발되기도 한다. Fig. 9는 데이터베이스 시스템, 각종 계산프로그램, 전문가시스템, 퍼지시스템 및 인공지능망 시스템이 통합된 종합 용접 정보처리 시스템의 예를 보여주고 있다. 용접용 퍼지시스템 및 인공지능망 시스템은 아직 상용화된 것은 없으나 연구기관 및 기업체에서 개발하여 실용적으로 사용된 시스템은 수종류가 있다. Table 4는 실용적으로 사용되고 있는 퍼지시스템 및 인공지능망 시스템의 목록이다.

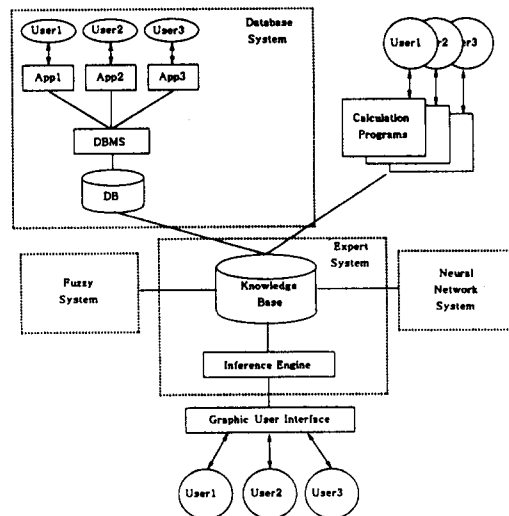


Fig. 9 Integrated welding information system

Table 4. List of fuzzy systems and neural network systems for welding

No	Name	Developer	Feature
1	Fuzzy Control of Weld Pool in Pulsed MIG Welding	Himeji Institute of Technology, Japan	Control of welding parameter
2	MagWin	Aachen University, Germany	Optimization of welding parameter in MAG Welding
3	Fuzzy Control of Arc Length in GMA Welding	Maizuru College of Technology, Japan	Control of arc length
4	SHIWELD	Samsung Heavy Industry & Korea Maritime University, Korea	Generation and optimization of welding parameter
5	FUCS	Chemnitz University, Germany	Analysis of arc signal
6	ANS-Based Penetration Monitoring system	American Welding Institute, USA	Monitoring of weld bead

4. 결 언

참 고 문 헌

용접기술은 다양한 분야가 복합되어 있고 복잡한 물리적 야금학적 현상이 동반되어 타분야에 비해 경험에 의존하는 비중이 높아 컴퓨터가 산업현장에 필수 도구로 자리잡은 1980년대까지도 용접분야의 소프트웨어는 일부 간단한 계산프로그램과 단순한 데이터베이스의 개발 정도에 머무르는 미미한 수준이었다. 그나마도 상용화되거나 용접현장에 직접 활용되는 경우는 별로 없었다. 그러나 1990년대에 이르러 PC의 급속한 가격하락과 기능향상으로 모든 산업의 일반 업무 및 생산 업무에 PC가 널리 활용되면서 용접 관련 정보를 효율적으로 이용하기 위한 많은 용접 정보처리 시스템이 개발되고 상용화되었다. 지금까지의 대부분의 용접 정보처리 시스템은 다른 공정과 연계되지 않은 상태로 독자적으로 운용되는 시스템이었으나 앞으로는 다른 공정, 즉, CAD시스템이나 구조해석 시스템 또는 로봇 용접 시스템등과 통합된 형태의 시스템이 많이 개발될 것으로 생각된다. 또한 초기설계에서 최종 생산단계에 이르기까지 컴퓨터에 의해 관리되는 통합 생산 시스템의 구축이 조선, 자동차, 플랜트 산업 전반으로 확산되고 있어 용접 정보처리 시스템의 개발과 활용은 더욱 가속화될 것으로 전망된다.

1. 益本 功：“溶接 データシステム研究委員會の活動と課題”，日本溶接學會誌，第55卷 第4號，1986年，pp.41-48
2. I. Masumoto, T. Shinoda, J. Takano：“Program for CO₂ - Welding Parameters of V-butt One-Pass Joint”，Japan Welding Society 48, 1979, No. 2, pp 30-33
3. 三宅 洋：“ガスシールドアーク溶接のパラメータ設定アルゴリズムと自動化に関する研究”，名古屋大學 博士學位論文，1987
4. W. Lucas, A. D. Brightmore：Expert system for welding engineers. Metal Construction 19, 1987, No. 5, pp. 254-260
5. W. A. Taylor：Expert System to generate arc welding procedure. Metal Construction 18, 1986, No. 7, pp. 426-431
6. O. Blodgett：Schweissprogramme fuer Taschenrechner. Welding and Metal Fabrication 49, 1976, No. 5, pp. 58-59 and No. 8, pp. 86-87
7. J. Jones：“Weld Parameter Modelling”，International Trends in Welding Science and Technology, ASM Proc. of the 3rd Int. Conf. on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, USA, 1992, pp 895-898

8. T. Siewert : "Computer Aided Welding Software in the Americas", IIW XII-1396-95
9. J. Martin : Computer Database Organization, Prentice-Hall, 1977
10. P. Jackson : Expertensysteme: Eine Einfuehrung. Addison-Wesley, 1987
11. L. Dorn, S. Majumder : Expertensysteme fuer die Schweissechnik - Grundlagen und Anwendungsmoeglichkeiten. Schweissen und Schneiden 41 (1989), No. 2, pp.75-78
12. H. -J. Zimmermann : Fuzzy Set Theory and Its Applications Second. Revised Edition, Kluwer Academic Publishers, 1990
13. H. Ritter, T. Martinez, K. Schulten : Neuronale Netze, Addison-Wesley, 1990
14. U. Dilthey, W. Scheller, J. Borowka : "Trainable Arc Sensor for Varying Welding Joint Geometries -Use of Artificial Neural Networks-", IIW-Doc. XII-1265-91, 1991
15. J. Burmeister : Fuzzy-Logic - nicht nur ein Modetrend. Schweissen und Schneiden 43, 1991, No. 9, pp.533-538.