

Fuzzy제어기술의 응용 현황과 전망



김 기 업
(자동제어실 선임연구원)

- '77. 서울대학교(학사)
- '86. 한국과학기술원(석사)
- '78. 10-현재 한국기계연구소 선임연구원



양 윤 모
(자동제어실장)

- '79. 고려대학교(학사)
- '84. 일본 東北대학(석사)
- '88. 일본 東北대학(박사)
- '78.11.-80.3. 금성사 중앙연구소
- '80.3.-현재 한국기계연구소 선임연구원

1. 서 론

자동제어를 공업적으로 이용한 최초의 것은 영국의 J.Watt가 발명한 증기기관에서, 속도를 일정하게 유지시키기 위해 1784년에 개발한 조속기(speed governor)라고 한다. 그후 양대 세계대전중 각종 무기와 방위제품들을 개발하는 과정에서 실용적인 제어이론들이 개발되었고, 전후에 많은 연구성과들이 공개되면서 일반적인 제어계의 해석과 설계에 큰 역할을 하는 feedback 제어이론이 체계화 되었다. 또한 전자공업과 컴퓨터기술이 비약적으로 발전되면서 산업구조가 고도화 되고 자동화에 대한 필요성이 급증하였고 반도체 기술의 향상으로 복잡한 현대제어 이론들이 실용화 되기 시작하였다.

현재 상업적으로 사용되고 있는 대부분의 제어기는 잘 정리된 제어이론의 개념을 바탕으로 구성되어 있다. 제어이론은 근본적으로 제어할 대상 플랜트의 모델을 정확하게 수식화 하는 것을 수반한다.

그러나 사실 거의 모든 제어대상들이 종래의 제어이론을 적용하기 위한 정확한 수식모델을 구하기 어렵다. 특히 시스템이 cement kiln, 오물처리 플랜트 또는 DNA 생산과 같은 생화학적 반응계처럼 대규모이거나 복잡한 경우, 아예 수학적 모델링이 현실적으로 불가능해진다. 그렇지만 이와같이 수식모델이 없거나 부정확한 경우에도 인간 조작자(human operator)는 시스템을 성공적으로 잘 제어하고 있다. 인간은 종래의 고전제어이론이나 현대제어이론에서 도외시 하고 있는 정성적(qualitative)인 정보를 사용하여 전통적인

제어방법으로는 실현이 불가능한 제어를 할 수 있는 것이다.

제어와 관련한 인간의 행위는 제어대상과 환경으로부터 “크다”든지 또는 “높다”등과 같은 수학적으로는 모호한 정성적인 정보를 추출하여 언어적으로 표현할 수 있는 제어규칙을 사용하여 시스템을 제어한다.

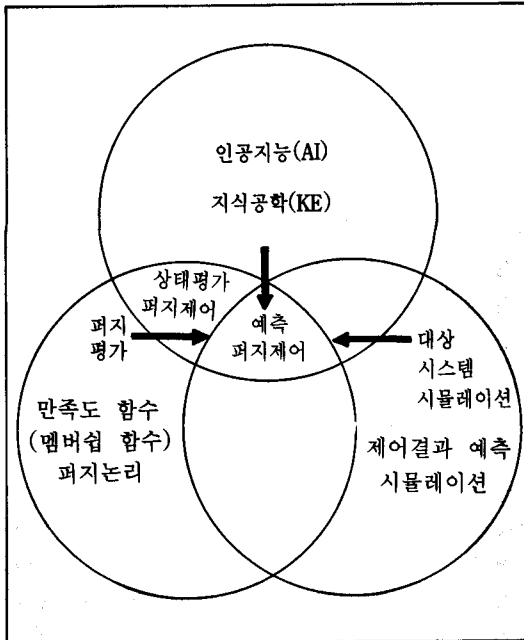
이와같이 모호한 정보를 사용하여 복잡한 시스템을 제어할 수 있는 것이 사실이며, 모호한 정보나 자료를 다루는 이론이 곧 모호이론(fuzzy theory)이다. Fuzzy제어는 모호이론을 이용하는 제어기술로서 인간의 제어행위를 모방하고 있으므로 인간에게 가장 친숙한 기술이라 할 수 있으며, 역시 인간의 언어로 표현할 수 있는 제어규칙을 이용하므로 언어적 제어기(linguistic controller) 또는 규칙기반형 제어기(rule-based controller)라고도 한다.

Fuzzy제어는 숙련된 인간 조작자의 경험을 바탕으로 한 지식을 토대로 하여 제어하는 기술로서,

fuzzy집합의 개념이 1965년 California대학 Berkeley교의 L. A. Zadeh교수에 의해 제창된 [1] 이래 fuzzy이론의 응용분야로서 가장 먼저 주목 받았다.

Fuzzy이론은 초기에 구체적인 응용예가 쉽사리 보이지 않고 또한 기존 방법과 달리 모호한 문제를 취급하는 것에 대한 거부감 때문에 잘 받아들여지기 어려웠으나, 1974년 London대학 Queen Mary 교의 E.H. Mamdani에 의해 실험용 스팀엔진의 제어[2,3]에 처음 적용되고, 이를 계기로 급속히 실용화 연구가 진행되어 1980년 덴마크의 Smidth. F.L사에서 cement kiln제어의 산업응용 사례가 최초로 발표된[4] 이래, 최근에는 일본을 중심으로 산업응용이 활발히 전개되고 있다. Fuzzy이론은 제어분야 이외에도 전문가 시스템, 패턴인식, 생명공학, 의료진단, 경영의사 결정, 경제분석, 심리학 등 광범위한 분야에서 응용 연구사례가 발표되고 있다[5].

본고에서는 이렇듯 응용범위를 넓히고 있는 fuzzy제어이론에 대하여 간단히 소개하고 연구·응용 현황과 전망에 대하여 기술하고자 한다.



자료) 일본 정보처리 학회지 '89. 8

<Fuzzy 제어의 위상>

2. Fuzzy제어이론 개요

2.1. Fuzzy집합

현대수학의 기초를 이루고 있는 통상의 집합 이론에서는 어느 요소 x 가 특정한 집합 A 에 속하는가 아닌가가 명확하다. 즉 $x \in A$ 이거나 $x \notin A$ 이다. 이렇게 구분이 명확한 집합을 crisp집합이라고 한다. 이에 반하여 fuzzy집합은 경계가 불명확하여 x 가 A 에 속하는지 아닌지가 모호하다. 사실 현실적으로는 어느 집합의 경계를 명확히 구분지을 수 없는 경우가 많다. 예를 들어 어느 센서로부터 받아 들인 신호의 전압이 “높다”로 판정하는 경우 통상은 기준전압을 정하고 이 전압보다 높은 전압의 영역을 “높은 전압 집합”, 낮은 전압의 영역을 “낮은 전압 집합”으로 하여 각각 1, 0에 대응 시킨다. 그러나 “높다”고 하는 말은 의미나 개념에 불명확한 성질이 포함되어 있어 기준전압을 결정하는데 모호성이 내재 한다.

Zadeh는 이와같은 인간의 언어의 의미나 개념

중에 들어 있는 모호성을 정량적으로 표현하는 방법으로서 자격함수(membership function)를 도입하여 fuzzy집합의 개념을 세웠다. 자격함수는 요소 x 가 fuzzy집합 A 에 속하는 자격등급(grade of membership)을 나타내며 전체집합 U 에서 fuzzy부분집합 A 를 정의하는 역할을 한다. 자격등급은 어느 요소가 fuzzy집합 A 에 속하는 가능성(possibility)을 나타내며 완전히 속하면 1로 하고, 전혀 속하지 않으면 0으로 하여 그 사이의 값으로 정해진다. 자격함수가 모호한 값을 갖는 경우는 ultrafuzzy집합이라고 한다[6].

Fuzzy집합 A 의 표기법은 전체집합 U 가 이산적인 경우 즉 $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 인 경우

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i$$

U 가 연속인 경우

$$A = \int \mu_A(x) / x$$

와 같은데 여기서 x_i 나 x 는 전체집합의 요소 $\mu_A(x)$ 는 요소 x 의 자격함수값, 즉 x 가 A 에 속하는 자격등급을 나타낸다.

Fuzzy집합에서의 기본적인 연산은 다음과 같이 정의 된다.

보집합 : $\bar{A} \leftarrow \rightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

합집합 : $A \cup B \leftarrow \rightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

교집합 : $A \cap B \leftarrow \rightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

포 함 : $A \subset B \leftarrow \rightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)^v, x \in U$

2.2. Fuzzy관계

통상적인「관계」는 「 x 는 y 와 같다」라든가「 y 는 x 보다 크다」와 같이 분명한 관계를 가리키는데 반하여 「fuzzy관계」는 「 x 와 y 는 거의 같다」, 「 y 는 x 보다 조금 크다」와 같이 애매모호한 관계를 말한다. 이러한 fuzzy관계는 일상생활에서 흔히 쓰

이는 것으로 통상의 관계를 확장한 것이라고 말할 수 있다. Fuzzy관계는 fuzzy제어, 진단, 전문가 시스템 등에서 사용하는 IF~THEN~형의 조건문을 표현하는 중요한 수단이 되며 fuzzy관계의 합성은 fuzzy추론에서 쓰이는 한 방법이 된다.

집합 X 와 Y 간의 fuzzy관계 R 은

$$R : \int_{x \times y} \mu_R(x,y) / (x,y) \quad x \in X, y \in Y$$

이고, R 을 $X \times Y$, S 를 $Y \times Z$ 에 대한 fuzzy관계라 할 때 R 과 S 의 합성 $R \cdot S$ 는

$$\mu_{R \cdot S}(x,z) = \max[\min\{\mu_R(x,y), \mu_S(y,z)\}]$$

로 정의 된다.

2.3. Fuzzy추론

인간의 추론형태는 정량적으로 엄밀한 것이 아니라 정성적이고 감각적이다.

이를테면,

전제 : If a tomato is red then the tomato is ripe.

관측 : This tomato is very red.

결론 : This tomato is very ripe.

와 같은 식이다. 이와같은 추론은 통상적인 2치 논리나 다치논리로는 적절한 추론규칙을 만들 수가 없다.

Fuzzy추론은 fuzzy집합과 fuzzy논리를 이용하여 몇개의 fuzzy명제로부터 어느 하나의 명제를 도출해내는 것으로 가장 간단한 예로 다음과 같은 형식을 들 수 있다.

전제1 : If x is A then y is B .

전제2 : x is A'

결론 : y is B'

여기서 x 와 y 는 대상명(name of object)이라 하고 A, A' 및 B, B' 는 fuzzy술어로, fuzzy변수, fuzzy concepts 또는 언어변수라고 부르며 각각 전체집합 X, X' 및 Y, Y' 의 fuzzy집합이 된다.

Fuzzy추론의 방법은 여러가지 제안되어 있지만 [7] fuzzy집합의 자격등급을 진리치로 해석하여 추론을 행하는 직접법과 그 진리치를 fuzzy화 하여

fuzzy진리치를 사용하는 간접법으로 대별한다[8].

2.4. Fuzzy제어

Fuzzy제어는 제어대상에 관한 대강의 지식과 숙련자의 노하우로부터 언어적인 제어규칙을 도출하여 Fuzzy추론을 써서 제어를 행하는 것으로, 제어규칙은 제어대상의 조작방법과 판단방법 등을 if~then~의 형식으로 표현한다. 조건부의 if~에는 제어대상 플랜트의 상태가 기술되고 결론부 then~에는 그 상태에 대응하는 조작의 내용이 기술된다. 예를들면 자동차의 속도를 제어할 때, 「목표 속도와 편차가 '크고' 편차의 시간변화가 '작아'지면, 가속페달을 '조금' 밟는다」와 같은 식이다. 여기서 '크다', '작다', '조금'과 같은 모호한 말이 사용되고 있는데 이런 언어들은 fuzzy집합으로 표현할 수 있으며 이점이 일반 지식공학이나 production rule과 다른 점이다.

일반적으로 fuzzy제어규칙 R은 복수개이며 다음과 같이 표현된다.

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } B_i \text{ then } y \text{ is } C_i. \\ i=1,2,\dots,n$$

i 는 제어규칙의 번호, x_1 과 x_2 는 fuzzy제어기의 입력변수로 제어할 플랜트의 상태에 관한 정보를 나타내며 y 는 플랜트의 제어입력인 조작량을 나타내는 변수이다. A_i, B_i, C_i 는 fuzzy집합으로 표현되기 때문에 fuzzy변수라고 하며 언어로 기술할 수 있으므로 언어치라고도 한다. Fuzzy변수인 언어치는 자격함수로 정량화되는 정성적인 표현으로 예를 그림1에 보였다.

변수 y 는 제어기의 출력으로서 fuzzy제어기의 입력 x_1, x_2 가 주어졌을 때 적용가능한 제어규칙들로부터 fuzzy추론부에서 계산·결정된다. 추론에 의해 계산된 출력 y 는 fuzzy값이 아닌 정량적인 crisp한 값으로 출력된다.

언어치 : NB=Negative Big
 NM=Negative Medium
 NS=Negative Small

ZO=Zero
 PS=Positive Small
 PM=Positive Medium
 PB=Positive Big

자격함수

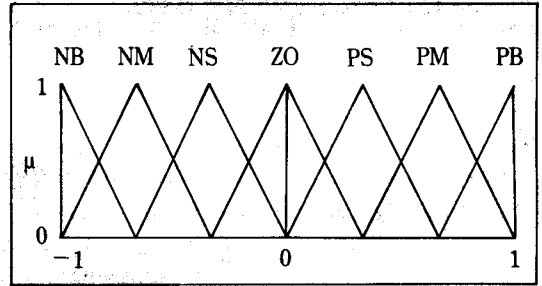


그림1) 언어치 및 자격함수의 예

Fuzzy제어기의 특징과 장점으로서는 논리 제어형 제어이며, 언어적 제어로서[9] 인간-기계간 인터페이스가 용이하고 또한 제어성능이 기존의 해석적 제어기(analytic controller)에 비해 손색이 없으면서도 적용가능한 초기조건의 범위가 광범위하며 제어의 강건성(robustness)이 매우 높다는 점이다[10]. 반면에 응용역사가 짧은 관계로 응용설계 지침이 거의 없고 설계의 유효성을 검증할 일반적인 방법론이 미비하다는 문제점이 남아 있다.

3. 연구동향과 전망

3.1. 각국의 연구동향[11]

3.1.1. 일 본

Fuzzy기술의 실용화 및 산업응용은 일본이 가장 활발한 것으로 알려져 있다. 기업을 중심으로 산업응용 개발연구가 진행되고 있으며 2개의 국가 프로젝트가 개시 되었다.

국가 프로젝트의 하나는 통산성 주도하에 민간 48개사의 출자로 설립한 기업기술조합 국제 fuzzy공학연구소이다. 이 연구소는 fuzzy제어, fuzzy정보처리, fuzzy컴퓨터의 3개 연구실로 구성되어

1989년 4월부터 활동을 개시하고 있다.

다른 하나는 과학기술청이 1989년 4월부터 5개년 계획으로 11억엔을 투입할 「Fuzzy시스템과 이의 인간·자연계에의 적용에 관한 연구」프로젝트로 ①기초이론과 기반기술에 관한 연구, ②인간의 제기능의 실현과 휴먼 인터페이스에 관한 연구, ③인간의 지적정보 처리과정 및 자연현상·사회현상의 해명과 같은 3개의 주요 테마를 가지고 대학과 연구소를 중심으로 20개 정도의 기관에서 연구를 수행할 예정이다.

3.1.2. 중 국

일본에 비하면 실용화 사례수가 그다지 많지 않지만 중국은 일본에 이어 2번째로 fuzzy실용화 연구가 많은 국가로 알려져 있다. 문화혁명이후 많은 연구자들이 모여 fuzzy학회를 형성하였고, 모호수학(模糊數學)이라는 학회지도 정기적으로 간행하고 있다. 회지 발행부수는 7,000부 연구자수는 2,000명 정도인 것으로 전해진다. 실용화의 면에서도 이미 독자적인 fuzzy제어기의 하드웨어를 개발하여 플랜트에서 사용되고 있고, 각종 fuzzy 소프트웨어도 개발되고 있다. 1988년 8월에는 정부의 지도아래 동경에 fuzzy관련 회사도 설립하였고 현재 북경에 fuzzy시스템 연구소를 설립하기 위하여 건물을 건설중이며 1990년 7월경 개소예정이라고 한다.

3.1.3. 미 국

Fuzzy이론의 제창자 Zadeh교수가 활동하고 있는 미국은 fuzzy정보 처리분야에 가장 큰 관심을 갖고 있는 것으로 보인다. 1985년에 북미 fuzzy학회가 설립되었고 fuzzy프로세서를 생산하는 벤처기업도 설립되었다. NASA에서는 스페이스 셔틀계획에 fuzzy제어를 적용할 것을 검토하고 있다. 1988년 5월에는 휴스턴에서 제 1회 fuzzy-neuro국제회의가 개최되어 큰 호응을 받았으며, 일본에서의 실용화 사례가 차차 알려지면서 fuzzy연구에의 대응이 급속히 변하고 있다.

3.1.4. 유 럽

1960년대 또는 1970년대부터 연구활동을 계속

활발하게 하여 영국에서는 1987년말 본격적인 fuzzy expert shell FRIL이 발표되었고, 1988년에는 프랑스의 마르세이유에 neuro-fuzzy시스템연구소가 설립되었다.

3.1.5. 소련·동유럽

소련 국내에서의 fuzzy분야 연구활동은 활발한 것 같으나 서방측과의 연구교류는 거의 없었다. 그런데 페레스트로이카 등의 개방정책에 따라 연구교류가 시작되어 1988년 9월 모스크바에서 제 1회 fuzzy국제회의가 개최되었다. 소련 국내에는 모스크바 과학아카데미와 리가공대에 두개의 큰 fuzzy연구 그룹이 존재하며 원자로의 이상진단과 집적회로의 설계지원 등 구체적인 응용도 상당히 진행된 것으로 알려졌다. 소련 국내에는 약200명 정도의 fuzzy연구자가 있으며 연 1회가량 동구의 연구자들과 심포지움을 개최하고 있다.

3.2. 실용화 사례[11, 12, 13]

1980년 시멘트 킬른 제어에 fuzzy이론이 적용되면서 시작된 산업응용은 최근 표 1과 같이 100건 이상 알려져 있다. 이의 대부분이 일본에서 실용화된 것으로 8할정도가 제어분야에서 응용된 것이다. 이중 잘 알려져 있는 사례를 들어 보면 다음과 같다.

표1) 산업응용 fuzzy적용 누적수[11]

연 월 일	사례 건수
'86. 8. 27	20
'87. 6. 1	50
'87. 9. 12	65
'87. 11. 5	72
'87. 12. 28	79
'88. 3. 3	86
'88. 5. 5	92
'88. 8. 24	100
'88. 12. 28	112
'89. 3. 15	124

◦ 불특정화자 단어음성 인식장치 RV100I (리코

중앙연구소)

- 범용 fuzzy제어 시스템 FRUITAX(富士電機)
- 예건 fuzzy제어 방식에 의한 열차제어(日立製作所 시스템개발연구소)
- 가정용 욕실 급탕장치 AX-1(松下住宅設備)
- 전문가 시스템 구축 셸(shell)
FLOPS (Kemp-Carraway Heart Institute)
- Fuzzy 추론 칩 (Togai Infraclogic Inc.)
- 워크스테이션용 범용 fuzzy제어기 구축 셸(東芝시스템 소프트웨어 기술연구소)
- 유리용융로의 온도제어 및 용융유리의 액위 제어(日本電氣글라스)
- 도시 쓰레기 소각로 제어(三菱중공업 요코하마 연구소)
- 냉연프로세스제어(新日鉄)
- 자동차의 정속주행제어(日産자동차)
- 자동차의 antilock braking system제어(日本電裝)[14]
- 고속범용fuzzy제어기 FZ-1000(立石電機)
- 터널 굴삭장치의 굴삭방향과 챔버내 토압제어(東京電力)
- 해저준설선 제어(明電舎)
- Fuzzy추론에 의한 자기동조 PID제어기(日立製作所, 三菱電機)
- 정수장의 약품주입제어(富士電機·富士FA-COM制御)

3.3. 금후의 연구과제

Fuzzy제어에 의한 제어결과는 전문가의 제어지식과 경험을 바탕으로 언어적 제어규칙과 자격함수(membership function)의 파라미터에 크게 의존한다. 그러나 전문가의 제어지식이나 경험을 완전하게 규칙화하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 제어규칙 설계의 자동화가 최대의 기술과제가 된다. 이외에도 개발되어야 할 과제들은 다음과 같다.

- 추론방식의 정비
- 개발지원 툴의 개발
- 대규모 시스템에의 적용
- 고속화를 위한 하드웨어 개발

4. 결 론

Fuzzy제어의 실용화의 측면에서 이론의 개요를 소개하였고, 산업응용 사례와 각국의 연구활동 실태를 간략하게 살펴봄으로써 현황과 전망을 가능케 보았다.

지금까지 fuzzy제어기술은 주로 프로세스 제어 분야에 응용이 집중되어 있는 것을 볼 수 있는데, 차후 지능제어기(intelligent controller)의 하나로써 광범위한 산업응용이 기대된다. 특히 제어분야에서 유효성이 입증된 fuzzy이론은 동양인의 사고형태와 유사한 정성적인 자료를 다룰 수 있는 수단이 되므로 일본·중국을 비롯한 동양권에서 응용연구가 활발한 것 같다.

참고문헌

- [1] Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, pp 338-353, 1965.
- [2] Mamdani, E. H., "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant", Proc. of IEEE. 121, pp. 1585-1588, 1974.
- [3] Mamdani, E. H., Assilian, S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machne Studies, 7, pp1-13, 1975
- [4] Holmblad, L. P., Ostergaad, J. J., "Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic", Fuzzy Information and Decision Processes (M. M Gupta and E. Sanchez eds.), North-Holland, Amsterdam, pp. 389-399, 1982
- [5] Maiers, J., Sherif, Y. S., "Applications of Fuzzy Set Theory", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 175-189, 1985
- [6] Zadeh, L. A., "Making computers think like people", IEEE Spectrum August 1984, pp. 26-32
- [7] Mizumoto, M., "Fuzzy Reasoning Methods", Systems and Control Encyclopedia (M. G Singh et al. ed.), Vol. 3 pp. 1847-1852, Pegamon Press, 1987
- [8] 村上周太, "フuzzy制御", Computrol, No. 22, pp. 51

-58, 1988

- [9]菅野道夫, ファジィ制御, 日刊工業新聞社 1988
- [10] Bernard, J.A., "Use of a Rule-based System for Process Control", Proc. IECON'87, pp.835-847, 1987
- [11] 廣田 薫, "ファジィ情報處理應用の現狀と展望", 情報處理 Vol.30, No.8, pp.913-921, Aug.1989
- [12] 廣田 薫, "ファジィ制御の現狀と展望", 計測と制御, Vol.27, No.5, pp.59-67, 1988
- [13] オートメーション 1988년 6월호, 日刊工業新聞社
- [14] Matsumoto N. 外, "Expert antiskid system", Proc. IECON'87, pp.810-816, IEEE 1987

◎ 멜버른 국제자동차 박람회
〈Int'1 Motor Show〉

- 1) 개최기간(주기) : '90. 3. 8-18(매년)
- 2) 개최국(도시, 전시장명) : 호주(멜버른 Royal Exhibition Building)
- 3) 전시면적 : 147,470 S/F
- 4) 전시품내용 : 최신모델의 승용차, 4륜차, 스포츠카
- 5) 성격 및 현황 : 신청마감은 '89. 7. 30. 일반인 관람 가능
(150,000 관람객입장)
출품업체수(자국5, 외국20)
- 6) 주 최 : Victorian Automobile Chamber of Commerce 464 st. Kilda Road Melbourne
3004, Tel : 03/829111 Telex : 35994 Fax : 03/2673159

◎ 싱델펜겐 국제자동차 산업세미나
〈AUTECH/Int'1 Congress Fair for Automotive Technology〉

- 1) 개최기간(주기) : '90. 10. 25-27(격년)
- 2) 개최국(도시, 전시장명) : 서독(Sindelfingen, Messehalle)
- 3) 전시면적 : 8,516 S/F
- 4) 전시품내용 : 자동차관련정보 및 기술전시
- 5) 성격 및 현황 : 출품업체는 총 48개사, 일반인에게 공개,
자동차 산업관련 세미나 개최
- 6) 주 최 : P.E Schall GmbH Gustav-Werner-Str 6 7443 Fricken hausen 3,07025/2061
Tel : 7267781, Fax : 07025/5452, Btx : 1417179