퍼지이론의 소개 및 응용

홍 갑 표*

1. 서론

오늘날 많은 공학적인 문제들이 지난 수십년간 발전되어온 확률이론에 근거하여 점차적으로 개선되고 있다. 그러나 공학분야에서의 불확실성(Uncertainties)을 확률론에 의거하여 해결하는 방법이 많은 분야에서 발전을 가져왔지만, 정확히 규명되지 않은 분야에서의 불확실성의 취급에는 확률론과 같은 전통적인 방법만으로는 해결하기 곤란한 분야가 있다. 퍼그리(Pugsley)[1]는 이러한 불확실성을 "Engineering Climatology"라고 표현하였으며, 기술자의 경험과 판단에 의하여 평가되어야 한다고 하였다. 본 글에서는 퍼지이론의 기본 개념을 설명하고, 퍼지이론의 응용에 관하여 고찰해 보기로 한다.

2. 퍼지니스(Fuzziness)와 불규칙성(Randomness)

공학분야에 있어서의 불확실성은 크게 퍼지니스와 불규칙성으로 구분될 수 있는데, 불규칙성이란 복잡한 현상의 불규칙(random)한 성격을 나타내며, 퍼지니스란 불규칙한 성격을 갖고 있지 않는 불확실성을 의미한다. 퍼지니스의 특징은 그 자연현상에 대한 지식이 명확하지 않으며 불완전하고 주관적인데 있다. 퍼지니스와 불규칙성의 두 개념을 구별하기 위하여 그림1을 통해 살펴보자.

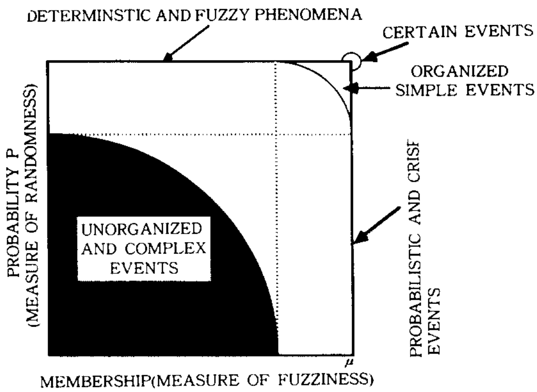


그림1. 퍼지니스와 불규칙성의 비교

그림1에서 우측상단의 빗금친 부분은 퍼지니스나 불규칙성과 같은 불확실성을 전혀 갖지 않는 확실한 현상을 나타낸다. 이런 조건하에서는 확정론적인 방법을 사용하여도 만족할만한 결과를 구할 수 있다. 반면에 좌측하단의 빗금친 부분은 매우 복잡하고 불확실한 현상을 나타내며, 전통적인 수학적인 모형으로는 나타낼 수 없다.

3. 퍼지이론의 기본 개념

퍼지이론은 맨 처음 퍼지집합에서 시작되었으나 여러분야에서 응용되는 과정에서 점차 발전을 거듭하고 있다. 일반적으로 퍼지이론은 크게

* 정회원, 연세대학교 건축공학과 조교수

퍼지 집합, 퍼지 논리(fuzzy logic), 퍼지 추론(fuzzy reasoning), 퍼지 측정(fuzzy measure) 등으로 구분된다. 퍼지집합을 기본으로 각각에 대하여 간단히 설명하여 독자의 이해를 돕기로 한다.

3.1 퍼지 집합

자데(Zadeh)[2]는 퍼지이론을 시작할 때에 퍼지집합에서부터 불확실성을 도입하였다. 퍼지집합을 설명하기 위하여 건축물의 안전을 예로 들어 보기로 하자. 먼저 집합이란 같은 성질을 갖는 요소(object)들을 한데 모아 놓은 것이라 할 수 있다. 예를 들어 X를 건축물의 집합이라 하고 기호를 사용하여 표시하면 다음과 같다.

$X=\{x \mid x$는 건축물$\}$

다음에는 집합 X의 부분집합인 "안전한 건축물" A를 고려해 보자. 일반 집합이론에서는 건축물 x가 A에 속하거나 속하지 않는다.(퍼지집합에 반하여 일반집합을 크리스프(crisp)집합이라고도 한다.) x가 부분집합 A에 속할때 속하는 정도를 1이라 하고, 속하지 않을 때 0이라 표시할 수 있을 것이다. 이 값(0 또는 1)을 x의 특성함수(characteristic function)라 한다. 일반 집합이론에 의하면 부분집합 A는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$A=\{x \mid x$는 안전한 건축물$\}$

반면에 퍼지집합에서는 특성함수가 0 또는 1이 아니라 0에서 1사이의 값을 가질 수 있다. 특성함수가 0.2인 경우는 별로 안전하지 않은(또는 매우 불안전한) 건물이며, 0.8이면 어느정도 안전한 건물이라 할 수 있다. 퍼지집합에서는 부분집합 A를 표시할 때 특성함수를 같이 표시하여 다음과 같이 나타낸다.

$A=\{x,\ \mu_A(x)\} \quad x \in X$

$\mu_A(x)$는 x가 A에 속하는 정도 즉 x의 특성함수를 나타내며, 퍼지이론에서는 멤버쉽함수(membership function)라 한다. $\mu_A(x)$는 [0, 1]사이의 값이며, 기호[·]는 0과 1을 포함한다. 멤버쉽함수는 특성함수의 일반화로서 퍼지집합이란 집합이론의 일반적인 경우이며, 일반적으로 사용하는 집합은 퍼지집합의 특수한 경우라 할 수 있다. 일반집합에서 사용하는 연산법칙들이 퍼지집합에도 존재할 뿐 아니라, 퍼지집합의 이론들이 일반집합에도 적용될 수 있다.

퍼지집합의 또다른 예로써 0보다 매우 큰 실수의 집합 A를 나타내 보자. 집합 A를 기호로 나타내면 다음과 같다.

$A=\{x \mid x$는 실수, $x \gg 0\}$

어떤 값 x가 집합 A에 속하는지의 여부를 알아보자. 만약 x가 음수이면 x는 절대적으로 A집합에 속하지 않을 것이다. 즉, 멤버쉽은 0이다. 그러나 x가 10이라면 0보다 크므로 x는 A집합에 어느 정도는 속할 것이지만, 100보다는 작으므로 멤버쉽은 1보다는 작을 것이다. 만약에 x가 100이라면 멤버쉽은 얼마일까? x가 1000이라면 어떨까? x의 멤버쉽은 x의 값이 증가할수록 커질 것이다.

0보다 큰 실수의 퍼지집합 A의 멤버쉽함수를 그림2와 같이 나타낼 수 있다.

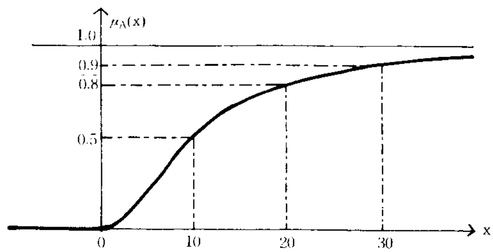


그림 2. 0 보다 큰 실수의 집합의 멤버쉽함수

$x \leqq 0$이면 $\quad \mu_A(x)=0$

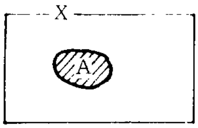
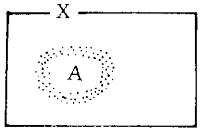
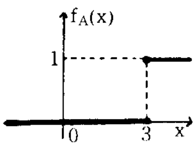
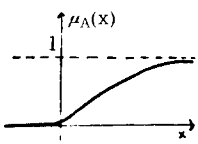
$x>0$이면 $\quad \mu_A(x)=\dfrac{1}{1+100/x^2}$

퍼지집합과 일반집합과의 차이점을 쉽게 비교하기 위하여 표로 나타내면 표1과 같다.

3.2 퍼지논리(Fuzzy Logic) 및 퍼지 추론(Fuzzy Reasoning)

논리란 일반적으로 인간 사고의 규칙성을 파악하는 것이라 할 수 있다. 우리가 일반적으로 접하는 부울논리(Boolean Logic)는 일반집합의 부울대

표1. 일반집합과 퍼지집합과의 차이

	일 반 집 합	퍼 지 집 합
집합의 경계 상태		
요소가 집합에 속하는 정도	0 또는 1	0 부터 1
함수표시	특성함수 $F_A(x)$	membership 함수 $\mu_A(x)$
보 기	$A=\{x \mid x \geq 3\},\ x \in X$ 	$A=\{x \mid x$는 안전한 건축물$\}$ 

수에 의하며, yes와 no 혹은 true와 false의 2치(値)세계의 이야기이다.

그러나 공학의 문제에서는 경험이 풍부한 기술자나 연구자들이 그들의 경험과 지식을 기초로 판단을 하고 결정을 내리는 경우가 많이 있다. 이러한 결정들은 대부분 그들의 사고를 "매우", "약간", "별로"등의 언어를 이용하여 표현하지만, 실험이나 진단등에 있어서는 수치적인 변수에 대하여도 불확실성이 존재할 수 있다. 이러한 언어 또는 수치적인 변수의 불확실성을 퍼지집합에 근거하여 논리연산을 하는 것이 퍼지논리이며, AI기법으로 구축된 전문가시스템에서의 추론과정에 퍼지논리를 도입한 것이 퍼지추론이다.

3.3 퍼지 측정(Fuzzy Measure)

퍼지이론에서는 불확실성이 멤버쉽함수를 이용하여 표시되는 것이 일반적이다. 그러므로 실제 설계과정이나 추정문제에 퍼지이론을 적용하려면 어떤 변수들의 멤버쉽함수를 이용하여 새로운 결과치인 변수의 멤버쉽함수를 구하게 된다. 그러나 확정론적인 방법에 익숙한 사람들은 멤버쉽함수보다는 특정한 어떤 값이 보다 익숙하며 이를 선호하게 된다. 멤버쉽함수를 대표할 수 있는 특정한 값을 구하는 방법으로 자데[3]가 처음 possibility measure를 제안하였으며, 스게노[4]등에 의하여 퍼지적분(fuzzy integral)으로 발전되었다.

4. 건축 및 토목분야에서의 퍼지이론 발전과정 및 응용

퍼지집합이론은 1965년 자데(L.A. Zadeh)에 의해서 처음으로 발표된[2] 이후 전세계적으로 여러분야에서 적용되고 있으나, 이 글에서는 건축 및 토목분야의 응용에 대해서 주로 언급하기로 한다.

4.1 퍼지이론의 발전과정

퍼지이론의 토목분야에의 응용에 관하여는 1971년 4월 브라운과 레오나드[11]가 ASCE모임에서 처음으로 소개하였다. 1975년 브로크리[5]는 건물사고에 대한 주관적평가를 퍼지집합의 멤버쉽함수를 이용하여 표현하였으며, 브라운[6]은 1977년에 주관적인 퍼지정보와 퍼지측정을 이용하여 구조물의 실제적인 파괴율(failure rate)을 구하였다. 1977년 드보아[12, 13]는 교통 조건에 관한 발표를 하였으며 먼로[14]는 공학적인 결정과정에서 퍼지집합의 적용을 종합적으로 토의하였다.

퍼지이론은 이론의 성격상 수학적 모형이 가능한 설이나 해석보다는 불확실성이 많고 개인의 경험과 주관적 판단이 요구되는 평가나 진단분야에 많이 적용되었다. 특히 기존 구조물의 거동평가 및 예측에는 설계, 시공, 사용용도, 사용년한 등의 여러 요소들에 불확실성이 존재하기 때문에, 기존 구조물의 안전평가분야에서의 퍼지이론의 적용은 퍼지이론이 처음 개발되었을 때부터 시작되었다.

퍼지이론의 도입초기에는 퍼지이론을 직접적으로 응용함으로써, 실용단계라기보다는 퍼지이론의 적용가능성을 타진하는 수준이었다. 그러나 전문가시스템의 개발과 더불어 전문가시스템에 있어서 필요불가결한 퍼지니스를 해결하기 위하여

퍼지이론이 적용되기 시작하였다.

4.2 응용 예

건축 및 토목분야에서의 응용의 예로써 보의 설계, 신뢰도해석과 같은 확정론적인 또는 확률론적인 분야에서의 적용 예와 퍼지이론을 이용한 전문가시스템 및 쉘의 예를 소개하면 다음과 같다.

철근콘크리트 보설계에의 응용[9]:

단근보의 극한강도설계시, 인장강도와 압축강도의 산정에 필요한 계수인 k_1과 k_3는 $0.7<k_1<0.9$, $0.85<k_3<1.0$의 값을 갖는다. 후루따 등은[9] 위 계수들에 영향을 미치는 재료의 가변성, 시공오차, 계산오차, 모형화의 불완전성, 구조물의 중요도 등의 불확실성을 고려하여 설계에 이용하였다. 위에 나열한 요소들은 재료의 가변성 외에는 모두 객관적 자료에 의하여 취급될 수 없다는 특징을 갖고 있으므로, 불확실성을 주관적인 것과 객관적인 것으로 구분하여 k_1과 k_3를 구하였다.

구조신뢰도이론에의 응용[10]:

브로크리[5]는 구조물의 파괴를 예측하기 위하여 표2와 같이 11개의 요소를 고려하였다. 각각의 변수들의 값들을 "크다" "작다"와 같은 언어를 이용하여 크기와 중요도에 대하여 평가하였다. 예를 들면, "매우 크다"는 $(크다)^2$등으로 하는 멤버쉽함수의 연산에 의하여 설계된 구조물에 대한 전체효과를 계산한 다음, 퍼지화(fuzzification), 퍼지관계(fuzzy ralation), 퍼지작성(fuzzy composition)등을 이용하여 구조물의 신뢰도를 구하였다.

브로크리이외에도 후루따 등은[10] 퍼지확률의 개념을 일반적으로 사용하는 신뢰도식에서 적용하였다. 그는 하중효과와 저항효과에 대한 보정계수(correction factor)에 주관적 불확실성을 고려하여, 보정계수를 결정하는 근거를 제공하였다.

폭발하중에 의한 건축물의 손상예측–DAPS:

충격하중이나 폭발하중 등에 대한 지하 벙커와 같은 방어 건축물의 손상을 측정하기 위해 미공군에서 제작한 전문가시스템이다. DAPS란 Damage Assessment of Protective Structure의 줄인말로서, EXSYS라는 쉘을 사용하였고 후진추론을

표 2. 구조물의 사고를 예측하기 위한 변수들

Materials	1. The lack of confidence in the analytical model used to describe the bahavior and variability of the parameters(e.g. elasticity). 2. The size of uncatered for effects(e.g. residual stresses).
Type of Structures	3. The lack of confidence in the analytical model used to analyse the structure(e.g. so–called 'fixed' beam column connections, empirical research and development information). 4. The complexity of the calculations(arithmetic errors).
Design Experience	5. The lack of experience of the design organization in similar types of structure.
Time	6. The amount of pressure on the designers due to shortage of time.
Construction	7. The lack of confidence in the construction methods to be used. 8. The lack of experience of the various contractors in similar types of structure.
Externals	9. The industrial climate. 10. The financial climate 11. The political climate

사용한다. 프로그램 진행의 어느 순간에도 "why" 기능을 제공하고, 퍼지논리를 사용하여 개략적인 추론을 자체적으로 만드는 능력이 있다. 퍼지논리를 사용하므로 신뢰도(CF, Conidence Factor)를 데이타와 추론결과에 부여하고 결론적으로 제시되는 대안들을 신뢰도가 조합되어서 최종의 신뢰도와 함께 제시된다. 참고로 EXSYS는 규칙을 보다 자연적인 언어로 표현해주고 불확실한 문제의 프로그램을 쉽게 해준다.

지진에 대한 기존구조물의 손상 예측–SPERIL–Ⅱ[7]:

지진에 대한 기존구조물의 손상 정도를 진단하는 전문가 시스템으로 손상된 구조물의 가시적인 조사 자료와 특정 경우의 가속도 기록이 입력된다. SPERIL–Ⅱ란 Structural PERIL–Ⅱ의 줄인말이다. 퍼듀(Purdue) 대학에서 개발되었으며, 후진추론을 사용하고 C 언어로 작성되었다. 뎀스터–샤퍼(Dempster–Shafer)의 조합규칙과 퍼지이론이 사용되었다. 퍼지집합의 인자는 추론과정중에 지정되고 최종의 결론은 뎀스퍼–샤퍼의

저급 확률론에 기초하고 있다. SPERIL－Ⅱ는 전진추론과 메타규칙을 사용한다.

퍼지추론 쉘－FRIL[8]:

복잡한 계산을 배제하기 위하여 퍼지추론의 방식을 이용한쉘로써 FRIL이란 Fuzzy Relational Inference Language의 줄인말이다. 이 퍼지추론은 일반적인 형태로 정의되어 있기 때문에 의료, 경제, 사회문제 등에 응용할 수도 있다. 기본적으로는 룰 베이스와 자동 퍼지추론부로 구성되어 있고 필요한 정보는 사용자가 그때마다 입력하는 것으로 되어있으며, 이 시스템의 가장 특징적인 곳은 추론부에 부정논리(modus tollens)를 사용하고 있는 것이다.

5. 맺는 말

앞부분에서 언급한 바와 같이 공학에서 다루는 불확실성은 크게 퍼지니스와 불규칙성으로 나눌 수 있다. 그러나 두가지 불확실성은 서로 다른 개념하에서 출발하고 있으므로, 서로 상충되기보다는 보완적이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1]. Pugsley. A. G., "The Prediction of the Proneness to Structural Accidents, " Structural Engineer, Vol. 51, No. 3, 1973, pp.195－196

[2] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets", *Information and Control*, 8, pp.338－353, 1965

[3] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets as a Basis for a theory of possibility," Fuzzy Sets and Systems, Vol.1, 1978

[4] Onisawa, T., Sugeno, M., Nishiwaki, Y., Kawai, H., and Harima, Y., "Fuzzy Measure Analysis of Public Attitude Towards the use of Nuclear Energy," Fuzzy Sets and Systems, 20, 1986, pp.261－289.

[5] Blockley, D. I., "Predicting the Likelihood of Structural Accidents", *Proceeding of the Institute of Civil Engineering*, London, England, Part 2, Vol. 59, 1975.

[6] Brown, C. B., "A Fuzzy Safety Measure", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 106, EM4, 1980.

[7] Ogawa, H., Fu, K. S., and Yao, J. T. P., " SPERIL－ Ⅱ : An Expert System for Structural Damage Assessment of Existing Structures" Technical Report No., CE－STR－84－11, School of Civil Engineering, Purdue University, 1984

[8] 寺野, 淺居, 菅野, **퍼지 시스템의 응용입문**, 박민용, 최항식 譯, 1990, 대영사

[9] Shiraishi, N., Furuta, H., and Kawamura, Y., "Application of Fuzzy Set Theory to the Design of Reinforced Concrete Beams," Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 31, 1981, pp.173－179.

[10] Shiraishi, N., and Furuta, H., "Reliability Analysis Based on Fuzzy Probability," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, EM6, 1983, pp.1445－1459.

[11] Brown, C.B. and Leonard, R.S., "Subjective Uncertainty Analysis", presented at the ASCE National Structural Engineering Meeting, Baltimore., MD, Preprint No. 1388, 19－23 April, 1971.

[12] Dubois, D., *Quelques Outils Methodologiques Pour la Concrption de Reseau de Transport*, Doctorial Dissertation, Centre d'etutes et de recherches de l'ecole nationale superieure de l'aeronautictue et de l'espase a'Toulouse, France, Oct. 1977.

[13] Dubois, D. and Prade, H., *Fuzzy Sets and System Theory and Applications*, Academic Press, New York, 1980.

[14] Munro, J., "Uncertainty and Fuzziness in Engineering Decision Making", *Proceeings*, First Canadian Seminar on System theory for the Civil Engineer, Calgary, 1979.