

퍼지추론방식에 의한 기존시설물 내진성능평가

Seismic Evaluation of Existing Buildings Based on Fuzzy Inference System

김 남 희*
Kim, Nam Hee

홍 성 곁**
Hong, Sung Gul

장 승 필***
Chang, Sung Pil

국문요약

내진성능평가 시스템은 구조시스템의 합리적인 분류, 적절한 평가 기준, 그리고 종합적인 평가 방법을 포함하여야 한다. 외국의 현행 내진성능 평가방법은 데이터의 수집과 주요 평가 항목을 위한 약산식 그리고 평가 점수를 이용하여 전문가의 판단에 근거한 평가 방법을 제시하고 있다.

본 연구는 국내 건축구조물에 대한 예비 내진평가 방법에 중점을 두고 퍼지추론 시스템에 근거한 내진평가방법의 진형을 개발한다. 평가항목의 위계는 건물의 수직, 수평방향의 불규칙성, 비대칭성, 여유성, 그리고 건물 연한을 포함한 전체적인 특성과 부재 단계에서의 상세한 평가 항목으로 구성한다. 퍼지추론방법에 대한 기존의 연구 결과를 근거하여 이용한 내진성능 평가방법에 적절히 적용하기 위하여 4 가지 주요 모듈을 설정한다. (1) 퍼지 입력 (2) 퍼지에 근거한 규칙기반 (3) 퍼지추론, 그리고 (4) 퍼지출력으로 구성된다. 더욱이 개별적인 성능수준에서 종합적인 평가지수를 끌어내기 위하여 퍼지추론방법을 적용하였다.

주요어 : 내진성능평가, 평가항목의 위계구조, 가중치, 퍼지추론, 퍼지규칙기반

ABSTRACT

A seismic performance evaluation system requires rational classification of structural systems, proper evaluation criteria, and its scoring index for synthesis. Current seismic performance systems need expert judgments based on collection of available data, approximate analysis of important items, and various scoring system. This study presents a prototype of fuzzy inference system for the evaluation of seismic performance of building structures in Korea mainly focusing on the stage of preliminary evaluation. A hierarchy of evaluation items consisting of global attributes of structural behavior such as vertical irregularity, asymmetric plan, redundancy, and age of structures at the higher level while detailed evaluation items at lower levels. Based on the previous study, a fuzzy-rule base system has been established from which fuzzy inference engine can be executed at the time when new problem is given.

The prototype of the fuzzy inference system in this study includes the 4 major modules, (1) fuzzy input, (2) fuzzy rule-base, (3) fuzzy inference, and (4) fuzzy output. Moreover, the fuzzy synthetic theory to a scoring method enables us to draw a representative and comprehensive value from individual quantity.

Key words : seismic performance evaluation, a hierarchy of evaluation items, weighting factor, fuzzy inference, fuzzy-rule base

1. 서 론

근래에 발생한 미국, 일본, 터키, 대만등지에서 발생한 대지진은 인명과 재산에 엄청난 피해를 발생시켜 지진다발 지역의 국가 뿐 만 아니라 우리나라와 같은 중약진 지진발생 지역에서 체계적인 지진에 대한 재해 경감책에 관심이 고조되고 있다. 대부분 지진발생에 따른 피해정도를 살펴보면 개연적인 자연재해에 대하여 준비의 정도에 따라서 그 피해도 상당히 줄일 수 있다는 것이 중요한 교훈으로 볼 수 있다. 지진재해 경감대책으로는 지진예방, 지진발생시 응급대책과 지진 발생 후 신속한 복구대책이 포함될 수 있으며, 구조물과 관련하여 주요 구조물의 내진성능 확보는 지진재해 경감에 기여하는 바가 매우 크다. 신축 시공된 구조물의 경우에는 각 지역 및 구조시스템의 특수성에 따라서 적합한 내진설계기준을 근거로 설계-시공 함으로서 내진성능을 확보할 수 있다. 한편 기존 구조물의 경우에는 내진성능 수준에 대

한 평가가 우선적으로 선행되어야만 지진재해 피해를 추정할 수 있으며, 내진성능확보에 필요한 보수 보강 계획을 마련할 수 있다. 이러한 이유로 지진 피해경험이 특히 많았던 미국과 일본에서는 기존 구조물의 내진성능평가에 대한 연구가 다각적으로 이루어지고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

내진평가 방법으로는 전문가의 직관이나 경험을 이용하는 예비평가 또는 육안평가방법에서부터 3차원 비선형 동적 구조해석을 포함한 고급기술에 이르기까지 다양하다. 주로 예비평가는 비교적 간단하면서 종합적인 평가를 근거로 여러 종류의 구조물들을 대상으로 지진위험성이 큰 구조물을 식별해 내는데 초점을 두고 있으며, 비선형 고급해석의 경우에는 개별적인 구조물 대해서 보다 정확한 구조물의 거동을 살펴 보는데 그 목적이 있다. 최근 비선형 해석에 의한 내진성능 평가기법으로는 pushover해석을 이용한 capacity/demand spectrum method 방법⁽⁶⁾이 여러 방면에 다양하게 이용되고 있다. 이러한 해석적 평가방법은 체계적이고 일정한 방법으로 구조물의 거동을 하중-변형관계를 1자유도계 시스템의 변위-외력의 단순한 형태로 제공하기 때문에 대표적인 구조 특성을 근거로 하여 내진 평가에 이용할 수 있으나, 번거로운 절차와 부재의 특성에 대한 정보가 필요하기 때문에 모

* 정회원 · 서울대 지구환경시스템 공학부, 계약교수(대표저자 : namheek@gong.snu.ac.kr)

** 정회원 · 서울대 건축학과, 조교수

*** 정회원 · 서울대 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

든 구조물의 평가를 비선형 해석에만 의존한다는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 1차 적인 예비평가의 중요성이 많이 인식 되어 이에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 그러나, 예비평가 특성상, 전문가의 경험이나 지식의 의존도가 매우 높고, 사용되는 구조해석 방법도 경험식 및 약산식이 대부분이고, 평가결과와 도출방법도 참/거짓의 나열식 등 매우 다양하기 때문에 평가결과와 확실성 및 신뢰성면에서는 많은 의문점을 갖고 있다.

표 1에 미국과 일본의 예비평가방법에 대해서 평가순서, 평가항목, 항목별 평가방법과 그 결과값의 정리, 최종평가, 구조시스템분류방법과 국내 실정에 대한 적합성여부에 대해서 분석하였다.

표 1에서 정리한 내용을 살펴보면 외국의 내진평가 방법의 도입의 문제점은 지표설정과 구조 시스템의 분류가 우리나라 구조형식과 관행에 적합하지 않아 여러 가지 측면에서 수정이 필요하다.

그러나 평가항목, 구조물 평가에 대한 약산식 및 경험식 그리고 전체적인 체계 등의 상당부분을 적절하게 이용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 기존건축물에 대한 내진성능평가를 위해 체계적인 평가 시스템 개발을 주요목적으로 하며, 지진피해경험이 많았던 미국과 일본에서 선행된 구조물에 대한 피해평가방법을 토대로 우리나라 실정에 적합한 평가방법을 제시하고자 한다. 특히, 불확실한 평가지수의 선정이 필요한 예비평가단계에서 체계적이고 종합적인 평가지수의 대표 값의 신뢰성 높은 결과를 얻기 위하여, 퍼지개념을 도입한 내진성능 평가방법을 제시하고자 한다. 구조공학에서의 퍼지개념의 이용은 주로 불확실성 및 언어변수에 대한 의존도가 높은 분야인 기존구조물의 상태 평가⁽⁷⁾, 구조물의 최적설계에 대한 의사결정⁽⁸⁾, 구조물의 손상평가⁽⁹⁾ 등에서 다양하게 연구 사용되어 오고 있다.

본 연구에서는 피해경험이 많은 미국과 일본의 내진성능 평가방법을 토대로 주요한 평가 항목을 선정하고, 퍼지개념 도입에 적합한 평가 항목의 위계구조를 제시한다. 이러한 위계구조를 근거로 퍼지규칙기반을 구축한 퍼지추론시스템을

개발한다. 평가대상구조물은 중-저층 전형적인 구조물에 적용할 수 있는 것으로 제한하였다. 제안한 시스템을 합리적으로 이용하기 위하여 지진공학 및 내진설계에 대한 기본지식이 필요하다. 본 연구에서 개발된 시스템은 구조물의 내진에 대한 정책마련이나, 시설물 관리 또는 보수보강계획의 근거로 마련하는데 기초자료로 사용될 수 있다.

2. 평가항목 분류체계

구조물의 내진평가는 개개 구조부재의 성능과 평가 주관점을 고려한 종합적인 평가를 요구한다.

각 구조시스템에 따라서 구조물의 주요 성능변수는 다양하고 상세의 정도에 따라 다양하다. 본 연구에서는 예비평가 단계에서의 구조물 평가에 대한 주관점을 1)종합적인 평가를 위한 평가항목 체계의 설정 2)단계와 항목 별 일관성을 유지에 두고, 이에 필요한 평가항목을 선정하고 관계되는 구조물의 성능 변수들을 포함시켰다. 따라서 특정한 시스템의 세부적인 구조성능 변수 보다는, 대부분의 구조시스템에서 발견할 수 있는 공통적인 구조물의 성능변수를 상위 평가항목으로 선정하고 각 상위 평가항목을 구성하는 세부사항은 하위레벨에서 표현할 수 있는 항목의 위계구조를 구성한다. 이러한 평가항목의 위계구조는 평가항목의 다양성 및 복잡성, 전문가의 경험이나 지식의 의존도가 매우 높아서 종합적인 평가 값을 추론해내기 어려운 예비평가단계에서 보다 합리적인 종합평가를 위해서 매우 중요하다. 본 연구에서는 다음과 같은 사항들을 고려하여 그림 1과 같은 평가항목 분류체계를 제시한다.

- 구조물의 내진성능의 최종평가를 종합화 할 수 있도록 개별적인 평가항목에 대한 평가 위계구조를 만든다.
- 평가항목에 대한 변수는 지진하중에 대해서 구조물의 거동에 영향을 크게 미치는 구조물의 성능 변수들을 포함한다.
- 각 층의 내진성능이 구조물의 전체적인 거동과 붕괴에

표 1 구조물 내진성능평가시스템의 비교

	미 국	일 본	본 연구
평가순서	현장조사 및 자료수집/ 시스템 조사/비선형 해석/ 부재 및 접합부조사/비구조재	수직부재의 단면형상/ 수직부재 단면형상 및 배근/ 수직부재 단면형상 및 배근, 수평 부재포함	시스템종합적평가/ 선형해석에 의한 평가/ 비선형 해석에 의한 평가
평가항목	포괄적인 평가	강도/인성/경년/형상	필수적인 항목 채택
항목별 평가방법	기본점수제/적절, 부적절 판단문 (경험식 및 약산식 이용)	평가지수화 (경험식 및 약산식 이용)	평가결과와 구간별 평가점수화 (경험식 및 약산식 이용)
항목별 평가결과값	단일점수/적절, 부적절 판단	평가지수값	단일점수
최종평가	점수제/각 항목별 나열식/ 전문가의 최종결론	구조내진지표식 (평가 항목들의 조합)	종합점수/ 5개 등급으로 유도
구조 시스템 분류	15가지의 재료 및 형식에 의한 종합적 분류	시공재료별 분류	미국방식에 근거해서 국내실정 에 적합한 구조시스템만 수용
국내 실정에 대한 적합성	나열식으로 종합적 평가를 내리기 어려움	평가지수화 관련 국내자료의 부재 로 인하여 평가지수제는 불가능	국내기준에 근거한 종합적 평가

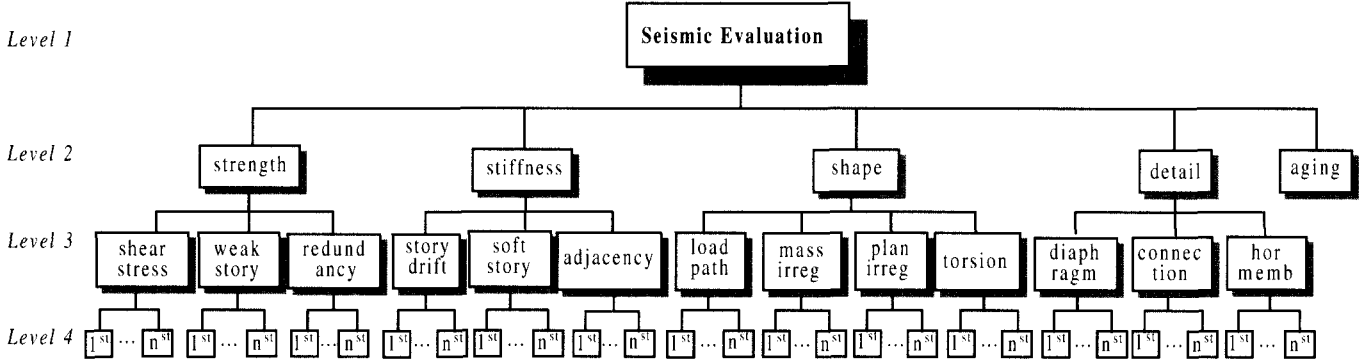


그림 1 내진성능 평가항목에 대한 위계구조

영향을 미치는 정도를 고려하여 층 가중치를 이용한다. 예를 들어서, 약 층이나 층간 변위에 대한 문제점이 저층에 발생하였을 경우 그 위험도는 상부 층에 발생했을 경우에 비해서 그 위험도가 큰 것은 기존의 피해사례에서 잘 알려진 사항들이다.

- 다양한 평가항목을 합리적으로 고려하기 위해서 단계적으로 세분화하고 같은 레벨에 속하는 평가항목 사이에는 가급적 등가성을 유지하도록 한다.
- 내진성능평가 결과를 토대로 보수보강에 대한 해결책을 마련하고자 할 때 시작점의 자료로 사용되도록 한다. 일반적으로 구조물의 보수보강은 대부분 내진성능평가를 시작점으로 하며, 그 결과 강성이 부족할 경우와 강도가 부족할 경우에는 해결방안이 달리 적용될 수 있다.

3. 내진성능평가

종합적인 평가는 평가항목의 위계구조에 나열된 각 세부항목의 평가를 어떻게 합성하느냐가 중요한 과제이다. 각 세부항목 평가단계에서는 기존연구에서 제시된 약산식과 경험식을 이용하고, 단계별 세부항목 결과들의 중간에서 종합하기 위해서는 다음 사항들을 고려하도록 한다.

- 각 항목평가의 절대적인 수치의 결과값을 다른 평가항목

의 결과치 간의 종합화를 위해 정규화 시킨다. 각 평가항목의 특성에 따라서 그 결과값이 숫자, 참, 거짓 등 다양할 수 있으나, 본 연구에서는 구조물의 거동과 관련된 범위를 먼저 규정하고, 평가결과 수치가 0~1사이의 정규화 값을 갖도록 한다.

- 구조물의 내진성능에 보다 큰 영향을 미치는 요소들에 대해서 상대적 중요성을 갖을 수 있도록 가중치를 적용하도록 한다. 특히, 구조물의 위험성이 발생한 층에 따라서 그 영향력이 크게 달라지는 경우에 대해서 층 가중치를 사용하도록 한다. 이러한 층 가중치는 사용하는 분배식에 따라서 결과값도 많은 차이를 보여준다(표 2).
- 평가방법과 평가지수의 선정에서 기존피해사례에서 얻은 경험적 지식들을⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾ 이용한다. 예를 들어서, 저층의 강성이나 강도가 현저히 부족한 경우나, 형상의 비정형성이 매우 심한 경우 구조물의 경우에는 그 피해가 매우 컸다. 따라서 이러한 위험성이 내재되어 있는 구조시스템에 대해서는 이러한 기존의 경험적 지식을 근거로 평가가 쉽게 이루어질 수 있도록 한다.
- 내진성능평가방법과 평가지수 결정시 내재한 애매함과 부정확성의 논리적인 추론을 위해서 퍼지개념을 적용한다. 예비 내진성능평가에서 사용되는 경험적 지식이나 언어적 변수 및 약산식이 가지고 있는 불확실성과 평가지수의 결정시 부정확한 등급에 대한 종합적인 평가를 위한 적절한 수단으로 판단된다.

표 2 층가중치 분포의 예

층	점수	등분포 : $W_i = \frac{1}{n}$			삼각형분포 : $W_i = \frac{n-i+1}{\sum_{k=1}^n k}$			지수형분포 : $W_i = \frac{(n-i+1)^2}{\sum_{k=1}^n (k)^2}$		
	S (a)	W (b)	(c)	Sw (d)	W (e)	(f)	Sw (g)	W (h)	(i)	Sw (i)
6	1.0	1/6		0.1667	1/21		0.0476	1/91		0.0110
5	1.0	1/6		0.1667	2/21		0.0952	4/91		0.0440
4	1.0	1/6		0.1667	3/21		0.1429	9/91		0.0989
3	0.6	1/6		0.1000	4/21		0.1143	16/91		0.1055
2	0.4	1/6		0.0667	5/21		0.0952	25/91		0.1099
1	0.8	1/6		0.1333	6/21		0.2286	36/91		0.3165
Σ		1.0		0.8001	1.0		0.7238	1.0		0.6858

3.1 단순합성방식

위에서 언급한 사항 중 4)항을 제외하면 개별적인 평가항목의 결과를 취합하여 최종적인 종합평가에 도달하기 위한 가장 간편한 방법으로 단순합성방식을 들 수 있다. 이 방법은 평가항목에 속하는 각 세부항목에 대한 평가결과값에 평가항목의 중요성을 고려한 상대적인 가중치를 단순히 곱하여 모두 단순 합으로 최종결과값을 구하는 방식이다. 이러한 단순합성방식에 있어서는 가중치의 결정에서 경험적 규칙을 적용하는데 어려운 점이 있으나, 본 연구에서는 퍼지추론방식과의 비교를 위해서 사용하였다. 두 방식에 대한 차이점은 이 장의 마지막 부분의 예제에서 설명하겠다.

단순합성방식에 의한 내진성능평가에 대한 순서도는 그림 2에, 관련식은 식(1) 과 (2)에 설명되어 있다. 표 3에서는 전반적으로 구조적 상태가 양호한 4층 구조물에 대해서 단순합성방식을 이용한 내진성능평가 예제를 보여주고 있다. 본 예제에서는 삼각형분포의 총 가중치를 사용한다.

$$X_i = \sum w_{si} x_{si} \quad (1)$$

$$Y = \sum W_i X_i \quad (2)$$

여기서 X_i , w_{si} , x_{si} 는 평가항목 위계구조의 하부단계에서의 평가 값, 가중치, 세부항목 점수를 각각 나타내고, Y , W_i , X_i 는 상부단계에서의 평가 값, 가중치, 세부항목점수를 각각 나타내고 있다. 하부단계에서 구한 결과 값은 계속적으로 상부단계 평가에 사용된다.

3.2 퍼지추론방식

본 연구에서는 경험적 지식의 이용뿐만 아니라 사용된 정보 및 지식의 부정확성이나 애매함의 문제점에 대한 해결방안으로서 퍼지추론방식을 이용한 내진성능평가방식을 제시한다. 퍼지이론은 평가대상에 대해서 예 또는 아니오 만으로는 평가하기 어려운 애매한 경우에 대한 문제점을 수학적

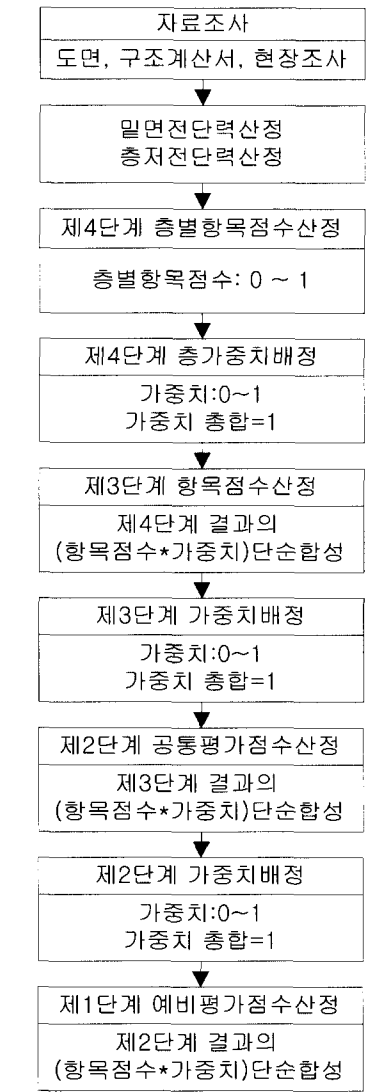


그림 2 단순합성방식에 의한 평가순서

접근방법으로 해결하고자 한 것이다. 즉 정성적인 퍼지개념과 정량적인 수학사이를 연결하는 중간적인 역할을 한다.⁽¹⁰⁾ 퍼지추론방식에 의한 구조물 평가를 위해서는 평가항목의 값의 범위와 평가결과값의 범위들을 퍼지조건명제(또는 퍼

표 3 단순합성방식에 의한 구조물 내진성능평가의 예

Eval. item2	Strength						Stiffness						Shape						Aging	
Wgt2	0.3						0.3						0.2						0.2	
Eval. item3	Shear stress	Weak story	redundancy	Story drift	Soft story	adjacency	Load path	Mass irreg.	Plan irreg.	torsion										
Wgt3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2										
Floor	X4	Ws	X4	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws	X	Ws
4	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	0.9	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1	1.0	0.1
3	0.9	0.2	0.9	0.2	1.0	0.2	0.9	0.2	0.9	0.2	1.0	0.2	1.0	0.2	1.0	0.2	0.9	0.2	1.0	0.2
2	0.8	0.3	0.8	0.3	1.0	0.3	0.7	0.3	0.7	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	0.9	0.3	0.9	0.3
1	0.7	0.4	0.8	0.4	0.8	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	1.0	0.4	0.9	0.4	1.0	0.4	0.8	0.4	0.9	0.4
X3	0.72		0.91		0.96		0.77		0.76		1.0		0.96		1.0		0.87		0.93	
X2	0.868						0.812						0.939						0.8	
Y	(0.868x0.3)+(0.812x0.3)+(0.939x0.2)+(0.8x0.2)=0.852(제2등급)																			

식 (1)과 (2)를 이용해서 X3 ->X2 -> Y의 순서로 계산한다.

지규칙)로 정의하고, 이들을 퍼지관계로 나타낸 후, 논리적인 근사추론에 의해서 최종 결과값을 구한다. 퍼지추론에 의한 내진성능평가의 효율성을 위해서 시스템으로 구현할 경우에는 1)입력처리 모듈, 2)경험적 및 이론적 지식에 근거한 규칙들의 지식기반 모듈, 3)입력에 대해 출력을 만들어내는 추론기관모듈과 4)출력모듈이 포함된다.

3.2.1 퍼지추론위계구조

평가시스템에서 규칙의 표현은 평가 추론계획을 묘사한다. 기존의 경험적 및 전문적 지식에 근거하여 이러한 규칙을 작성해야 한다. 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 기존의 피해사례에서 얻은 지식들을 근거로 구조물의 붕괴 위험성이 높은 구조 시스템 및 그 이외의 일반구조시스템에 대한 평가가 용이하게 되도록 그림 3과 같은 퍼지위계구조를 정의할 수 있다. 이 위계구조는 일반적인 추론시스템의 규칙 전개방식인 AND/OR의 사결정구조의 기본개념을 도입한 것이다. 위계구조의 도식적 표현에는 평가항목 이름, 퍼지구간 및 가중치를 표현하도록 되어 있다. 가중치의 값은 세부항목 간에 배타적인 관계를 갖는 OR관계에서는 1.0으로, 상호 의존적인 관계를 갖는 AND관계에서는 상대적 중요성에 따라서 규칙에 대한 가중치를 적용한다.

3.2.2 평가항목에 대한 퍼지함수

우리는 불확실한 상황을 표현할 때 숫자보다는 일반적인 언어적인 구분식 표현을 사용하며, 이와 같이 퍼지이론에서는 어떤 범주를 표현할 때는 집합(즉, 퍼지집합)으로 표현한다. 또한, 퍼지집합 내에 포함되는 모든 정보(원소)는 정의한 퍼지집합에 속할 가능성(소속함수 값)을 소속함수로 표현한다. 즉, 퍼지집합은 다양한 소속정도를 가지는 원소들을 포함하는 집합이다. 만일 X 가 전체 집합이고 그 원소들을

x 로 나타내고, X 의 퍼지집합이 다음식과 같이 정의된다면,

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\} \tag{3}$$

여기서, $\mu_A(x)$ 는 퍼지집합 A 에서 x 에 대한 소속 함수이다. 소속함수의 각 요소는 0~1사이의 소속값을 갖는다. 소속함수로 자주 사용되는 함수들은 삼각형함수, 사다리꼴 함수, 가우스 함수 등으로 다양하다.^{(10),(11)}

본 연구에서는 세부항목에 대한 평가단계에서는 단순합성방식에서와 같이 경험식 및 약산식을 이용한다. 단지 그 결과를 퍼지 형태로 표현하며 이를 퍼지화라고 부른다. 즉 퍼지화란 각 항목별로 평가기준의 만족도를 근거로 퍼지집합의 소속함수로 표현하는 것이다. 퍼지집합의 원소들은 식 (4)를 이용하여서 모두 0~1까지의 값을 사용하도록 한다. 이와 같은 변수 정규화된 평가지수는 모든 평가항목의 평가지수에 대해서도 같은 퍼지화 방식이 가능하며 소속함수의 클래스 수정을 쉽게 해준다.

$$V_{norm} = \frac{V_{true} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \tag{4}$$

여기서, V_{norm} 은 정규화된 실제 값 변수, V_{true} 는 실제 값 변수, V_{max} 는 최고 값, V_{min} 은 최저 값을 의한다. 예를 들어서 연약층 평가에 대한 실제 값의 범위가 최저값 0.4에서 최고값 0.9인 경우에, 주어진 입력 값이 0.7이라면 $0.7 / (0.9 - 0.4) = 0.6$ 이 퍼지입력이 되며, 이에 해당하는 소속 값은 정의된 퍼지함수의 $\mu_A(0.6)$ 값이 된다.

3.2.3 퍼지연산 및 추론

퍼지추론이란 퍼지집합으로 정의된 퍼지조건명제 "If (x is A) Then (y is B)"의 조건부와 결론부에 대해서 퍼지관계 R

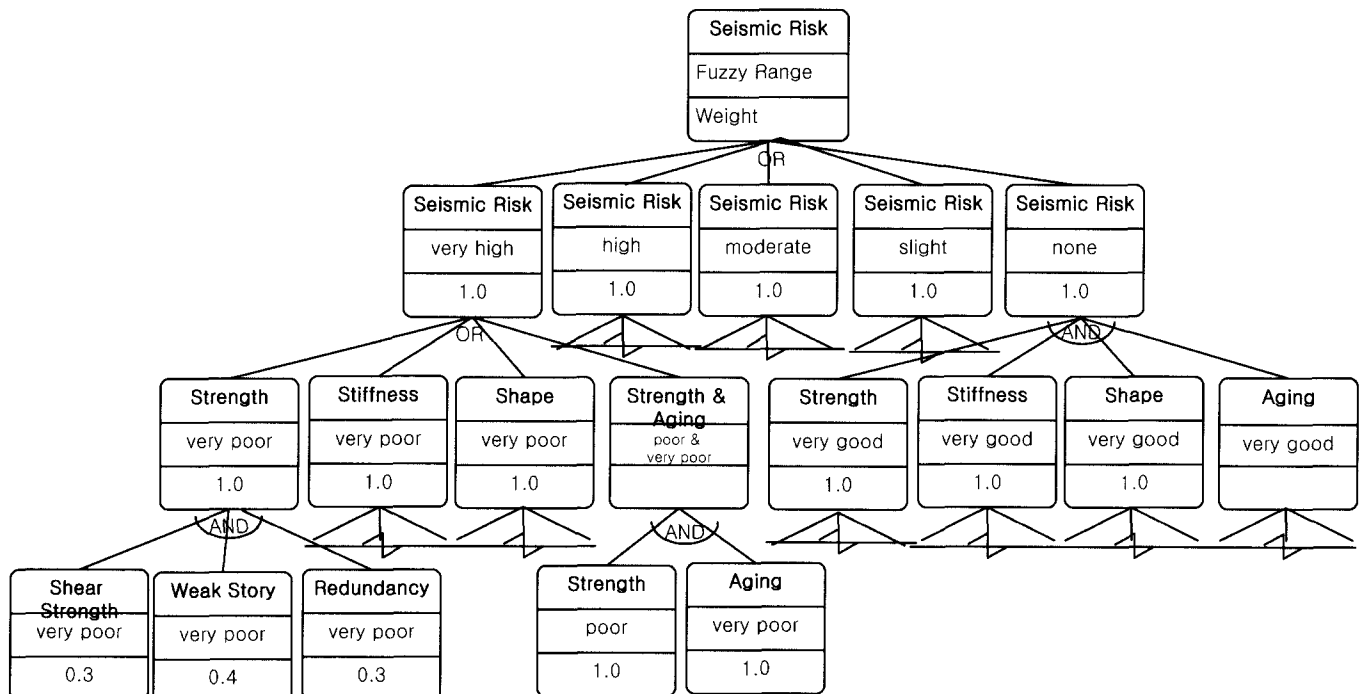


그림 3 퍼지추론 위계구조도

(relation)을 구하고, 이를 이용해서 새로운 입력에 대한 결과값을 근사추론(approximate reasoning)으로 구하는 것이다. 퍼지관계 R을 구하는 방법은 다양하나, 본 연구에서는 가장 일반화된 추론방식의 하나인 Mamdani 함의(Mamdani implication) 방식⁽¹¹⁾을 이용하여 퍼지관계 방정식을 풀도록 한다. Mamdani 함의에서는 다음식들에서 설명하는 바와 같이 상관최소방식을 이용하여 퍼지관계 R을 구축한다.

$$A \rightarrow B = A \wedge B \quad (5)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x))/x \in X\} \quad (6)$$

$$B = \{(y, \mu_B(y))/y \in Y\} \quad (7)$$

$$R(x, y) = \{(x, \mu_R(x, y))/(x, y) \in X \times Y\} \quad (8)$$

$$\mu_R(x, y) = \text{Min}[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (9)$$

여기서, μ_A 는 퍼지집합 A, μ_B 는 퍼지집합 B, μ_R 는 퍼지관계 R의 소속함수를 각각 의미한다.

앞에서 설명한 식을 이용해서 정의된 퍼지관계를 이용해서 새로운 조건부 A'에 대해서 식 (10)과 같은 합성연산에 의해서 새로운 결론 B'을 구한다.

$$B' = A' \circ R \quad (10)$$

여기서, 부호 \circ 는 퍼지 최대-최소 합성을 의미하며, 두 관계의 소속함수는 식 (11)와 같다.

$$\mu_{B'}(x, y) = \bigvee_{y \in Y} (\mu_{A'}(x, y) \wedge \mu_R(x, y)) \quad (11)$$

여기서, $\mu_{B'}(x, y)$ 는 추론하여 새로이 얻은 퍼지집합 B'의 소속함수를 의미한다.

본 연구에서는 하나의 최종평가에 이르는데 고려해야 될 평가항목이 다양하며, 또한 하나의 평가항목에 대해서도 세부항목 또한 다양하다. 따라서 평가위계구조의 상부 평가항목에 대한 결론을 구하기 위해서 여러 개의 규칙들이 정의되고, 하나의 규칙정의에 대해서도 하나이상의 조건부를 갖게 되는 경우가 있다. 이러한 관계들은 "AND"나 "OR"의 논리 연산자를 사용하여 표현하게 되고, 퍼지연산에 대한 소속함수는 다음식들과 같이 나타난다. 사용된 접속사가 "AND"이면 출력집합의 소속함수는 식 (12)와 같이 표현되고, 접속사가 "OR"이면 식 (13)과 같다.

$$y = (Y^1) \text{ AND } (Y^2) \text{ AND } \dots \text{ AND } (Y^r) \quad (12a)$$

$$\mu_y(y) = \text{Min}[\mu_y^1(y), \mu_y^2(y), \dots, \mu_y^r(y)], y \in Y \quad (12b)$$

$$y = (y^1) \text{ OR } (y^2) \text{ OR } \dots \text{ OR } (y^r) \quad (13a)$$

$$\mu_y(y) = \text{Max}[\mu_y^1(y), \mu_y^2(y), \dots, \mu_y^r(y)], y \in Y \quad (13b)$$

여러 개의 퍼지규칙을 사용하는 경우에는 퍼지관계의 합성방식을 이용해서 퍼지관계를 구하게 된다. 퍼지관계 합성의 방법에도 "Max-Min", "Max-Product"등 다양하며 나름대로의 의미가 있다.

본 연구에서는 "Max-Min" 방법을 사용하며, 식 (14)와 같이 소속함수를 구할 수 있다.

$$\mu_y(y) = \text{Max}_k \left\{ \text{Max}_{x \in X} \{ \text{Min}[\mu_x(x), \mu_R^k(x, y)] \} \right\} \quad (14)$$

$\mu_y(y)$ 는 퍼지입력 x에 응답하는 모든 규칙에 대해서 출력을 표현하는 퍼지 소속함수이다.

3.2.4 평가결과의 비퍼지화

주어진 입력에 대한 퍼지추론결과는 관계된 규칙들을 종합화하여 구조물의 내진성능에 대한 위험도를 결정한다. 이러한 과정을 비퍼지화라고 하며, 비퍼지화 방식에는 무게 중심법, 최대법, 최대평균법등이 있다. 본 연구에서는 무게 중심법을 사용하며 비퍼지화 값 \bar{y} 를 다음식과 같이 구한다.

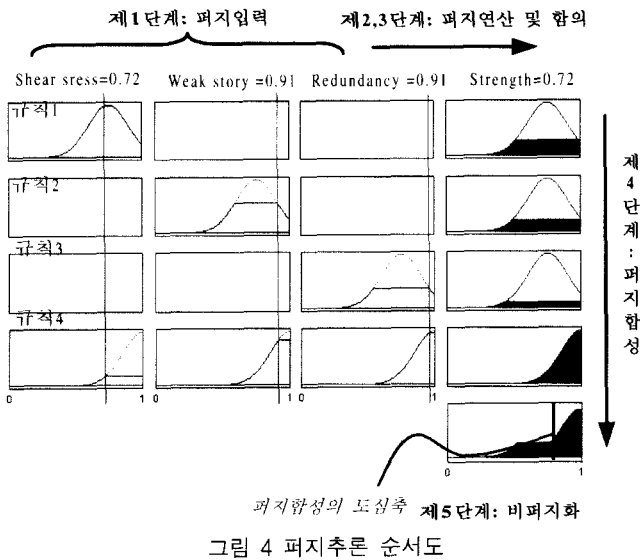
$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i A_i}{\sum_{i=1}^N w_i A_i} \quad (15)$$

여기서, w_i 는 i번째 규칙의 가중치와 입력소속함수에서 발생한 소속정도와의 곱, h_i 는 출력클래스의 중심, A_i 는 출력클래스의 합의결과로 얻어진 면적이다.

비퍼지화 값이 구해지면, 이에 따른 평가는 퍼지화 과정에서 명시된 최소값/최대값 범위를 사용하여 원래의 값으로 만들어 준다. 예를 들어서 강도, 강성, 형상 및 노후화 항목에 대해서 주어진 입력값에 대해서 퍼지추론을 통하여 구해진 결과는 비퍼지화를 통해서 종합적인 평가에 대한 지수를 얻을 수 있으며, 이를 예상되는 위험성의 정도에 따라서 등급화 된 결과값으로 변환한다.

3.2.5 퍼지추론시스템

퍼지개념을 이용해서 구조물의 내진성능을 평가하기 위해서는 이상에서 언급한 일련의 과정들이 그림 4에서와 같이 주어진 입력의 퍼지화, 정의된 퍼지규칙을 이용한 퍼지연산 및 함의, 퍼지합성과 비퍼지화과정을 수행해야 된다. 본 연구에서는 앞에서 제시한 퍼지추론위계구조에 의해서 세부항목평가에서 최종평가에 이르기까지 4단계로 분류되어 있지만, 제 4단계에서의 총 별평가 및 총가중치의 결합은 단순 합성방식에 의해서 우선적으로 평가하고, 제 3단계 부터에서 퍼지추론방식을 통하여 최종 결과값을 얻도록 퍼지시스템을 구성하였다. 퍼지시스템에 의한 내진성능 평가순서도는 그림 7과 같으며 이에 부합되는 퍼지시스템은 다변수-다층구조이다.



입력처리모듈의 기능은 제 3단계에 속하는 세부평가항목 (예: shear strength, weak story)에 대한 입력값의 퍼지화를 위한 기능을 수행한다. 입력값에 대한 퍼지함수는 각 평가항목의 최고값과 최저값을 근거로 "very poor, poor, good, very good, excellent"의 5가지 구역을 가우시안함수로 표현하도록 하였다. 표 4는 본 연구에서 사용한 평가항목에 대한 변수 및 약산식에 대한 예제를 설명하고 있다. 각 평가항목에 대한 실제값의 최저값과 최고값을 가지고 퍼지클래스를 정의할 수 있다. 표 5와 그림 5, 6은 입력 및 출력자료에 대해서 사용한 5개의 퍼지클래스의 소개 및 각 퍼지클래스가 의미하는 것을 설명하고 있다. 표 6은 입력에 대한 퍼지소속함수를 정의하는데 필요한 매개변수를 설명하고 있다. 출력 처리모듈에는 주어진 입력 값에 대해서 퍼지추론을 통하여 구해진 결과들을 비퍼지화를 통하여 구조물의 내진성능을 등급화 할 수 있도록 한다. 출력 값은 0~1까지의 정규화한 값들에 근거한 퍼지함수를 이용한다. 특히, 최종평가에 대한

표 5 입력 퍼지소속함수에 대한 퍼지클래스

입력 퍼지소속함수		출력 퍼지소속함수	
퍼지클래스	설명	퍼지클래스	설명
VP	Very poor	VH	Very high
P	Poor	H	High
G	Good	M	Moderate
VG	Very good	S	Slight
E	Excellent	N	None

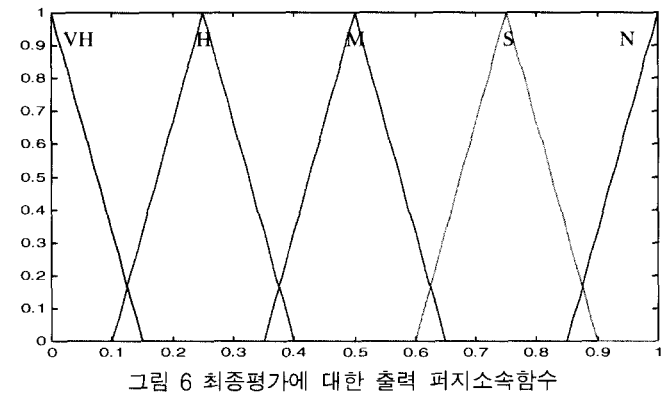
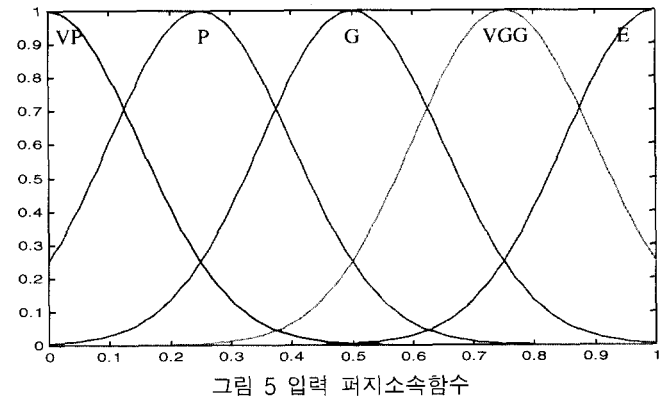


표 4 세부평가항목에 사용되는 약산식의 예

변수	평가항목	평가기준에 대한 약산식	실제값범위
A	Shear stress	$v_{avg} = V_j / A_w$, V_j = 총전단력 A_w = 하중방향에 위치한 모든 전단벽 단면적의 총합	4.2~5.46
B	Weak story	$V_i \geq 0.8 V_{i+1}$, V_i = i층의 강도	0.44~0.92
C	Redundancy	$\rho = 2 - \frac{6.1}{\gamma_{max} \sqrt{A_B}} \leq 1.25$ ρ = 잉여계수, γ_{max} = 최대부재력/총전단력, A_B = 바닥면적	1.1~1.625
D	Story drift	$DR = \frac{k_b + k_c}{k_b k_c} \frac{h}{12E} V_c R \leq 0.015$ k_b = 보의 I/L , k_c = 기둥의 I/h , I = 단면2차모멘트, L = 중심간거리, E = 재료의 탄성계수, V_c = 평균전단력, R = 반응수정계수	0.008~0.04
E	Soft story	$k_i \geq 0.8 \left(\frac{k_{i+1} + k_{i-2} + k_{i+3}}{3} \right)$, k_i = i층의 강성	0.58~0.97
F	Mass irregularity	$\frac{M_i}{M_{i-1}} \leq 1.5$, M_i = i층의 질량	0.9~1.7
G	Plan irregularity	$\frac{L_i - L_{i-1}}{L_{i-1}} \leq 0.3$, L_i = 1층의 수평길이	0.25~0.43

표 6 퍼지함수 정의에 사용되는 매개변수

변수	최저값	최고값	Poor의 중심	Good의 중심	Very good의 중심
A	0.54	1.8	0.25	0.5	0.75
B	0.44	0.92	0.25	0.5	0.75
C	1.25	1.625	0.25	0.5	0.75
D	0.087	0.072	0.25	0.5	0.75
E	0.44	0.92	0.25	0.5	0.75
F	0.3	1.325	0.25	0.5	0.75
G	0.65	0.75	0.25	0.5	0.75

소속함수는 예상되는 위험성의 정도를 “very high, high, moderate, slight, none”의 5가지 등급으로 구별하기 위해서 삼각형 형태의 퍼지함수를 이용한 5개의 퍼지클래스를 정의한다(표 5, 그림 6).

지식기반 모듈은 세부항목 및 평가항목별 평가지수에 근거해서 입력함수들을 적절한 구간으로 나누어서 퍼지클래스로 정의된 것과, 또한, 최종평가에 대한 등급화에 따라서 출력함수를 적절한 구간으로 나누어서 퍼지클래스로 정의된 것을 보유한다. 제 3단계 세부평가항목과 제 2단계 평가항목 간의 관계에 대한 퍼지규칙과, 제 2단계 평가항목과 제 1단계 최종평가에 대한 관계를 표현하는 퍼지규칙들을 담고 있다. 이에 대한 관계들은 대부분 기존의 경험적 및 전문적 지식에 근거한 것이다. 그림 3의 퍼지위계구조에 대한 퍼지규칙들은 표 7과 같이 정의된다.

퍼지추론 모듈은 주어진 입력에 대해서 해당하는 규칙들을 지식기반 모듈에서 찾아서 이들에 대한 합성을 수행한다. 앞서 언급한대로 Mamdani 합의 (Mamdani implication) 방

식에 근거한 근사추론을 수행한다.

4. 단순합성방식과 퍼지추론방식에 의한 내진성능평가방법의 비교

퍼지추론시스템에 의한 구조물의 내진성능평가 결과의 적합성을 살펴보기 위해서 앞서 단순합성방식에서 사용한 동일한 자료에 대해서 그 결과를 구하여 보았다. 표 8에서와 같이 2가지 방법에 대한 결과는 대체로 비슷하다. 여기서 예제로 사용한 구조물은 어느 특정한 평가항목에 대해서 결함이 상대적으로 두드러지게 발생하지 않고 전반적으로 양호한 경우이다.

이번에는 실제 구조물에 있어서는 강도나 강성이 다른 평가항목에 비해서 현저히 취약한 경우의 예를 살펴보기로 한다. 이러한 구조적 결함은 전체 구조물의 붕괴로 발전하여 내진성이 매우 떨어질 수 있다. 표 9에서는 평가항목 전반에 걸쳐서 양호한 경우, 강도가 현저히 부족한 경우와 강성이 현저히 부족한 세가지 구조물에 대해서 단순합성방식과 퍼지추론방식을 각각 적용해서 구한 평가결과를 비교 정리 하였다. 단순합성방식으로는 어느 특정항목이 전체적인 평가에 영향을 주는 경우에 대해서는 올바른 결과를 주지 못하는 반면에, 퍼지추론방식에서는 세가지 구조물의 예제에서 지니고 있는 구조적 양호함 및 결함 등을 모두 다 잘 반영하여 평가결과를 주고 있다.

단순합성방식에서는 이러한 전문적 지식을 표현하는데 많은 어려움이 있으나, 본 연구에서 제시하는 퍼지추론 시스템의 경우는 그림 3에서와 같은 위계구조를 이용해서 추론할 경우 이러한 문제점은 쉽게 해결된다.

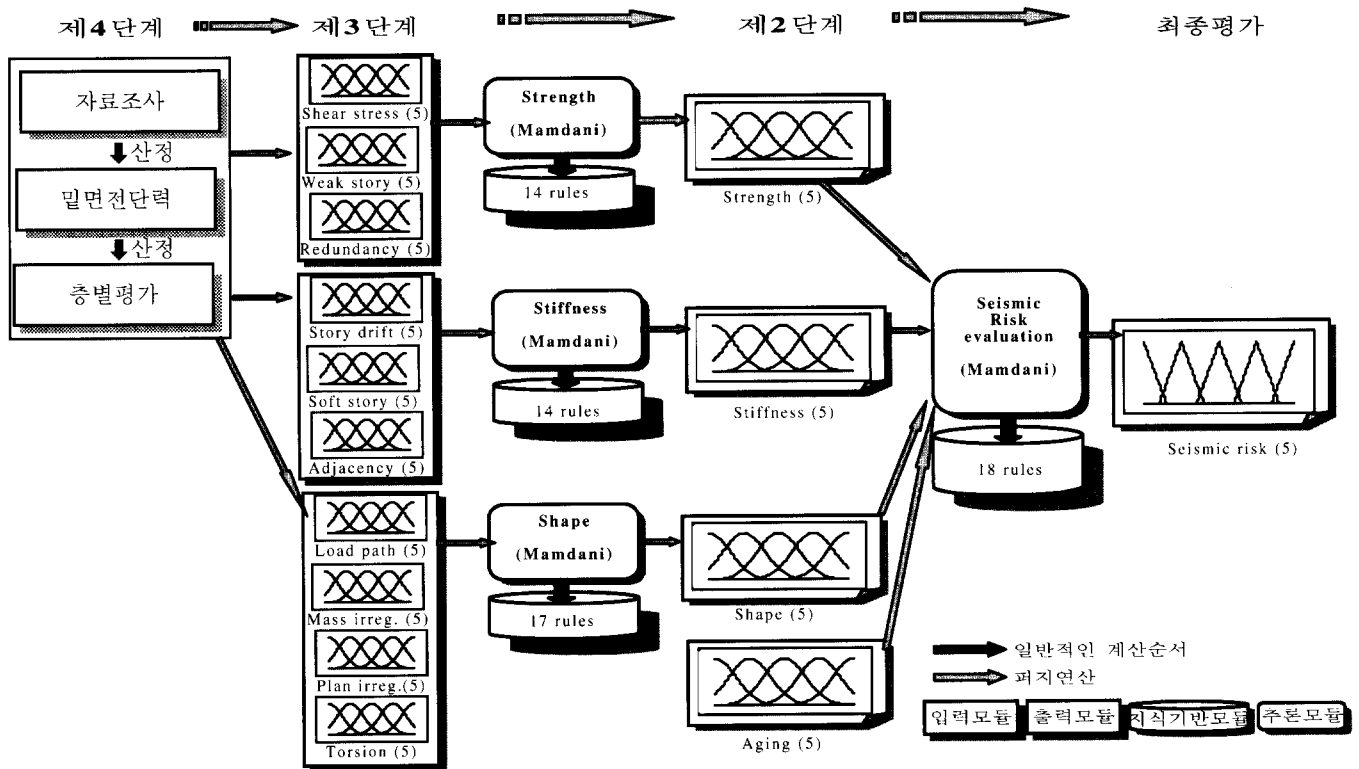


그림 7 다단계 퍼지추론 시스템

표 7 퍼지추론에 사용된 퍼지명제와 가중치

규칙	내용
Strength	R1. (shear stress==very poor) (weak story==very poor) (redundancy==very poor) => (strength=very poor) (1) R2. (shear stress==poor) => (strength=poor) (0.3) R3. (weak story==poor) => (strength=poor) (0.4) R4. (redundancy==poor) => (strength=poor) (0.3) R5. (shear stress==good) => (strength=good) (0.3) R6. (weak story==good) => (strength=good) (0.4) R7. (redundancy==good) => (strength=good) (0.3) R8. (shear stress==very good) => (strength=very good) (0.3) R9. (weak story==very good) => (strength=very good) (0.4) R10. (redundancy==very good) => (strength=very good) (0.3) R11. (shear stress==excellent) (weak story==excellent) (redundancy==excellent) => (strength=excellent) (1)
Strength-critical	R1. (shear stress==very poor) => (strength=very poor) (1) R2. (weak story==very poor) => (strength=very poor) (1) R3. (shear stress==poor) & (weak story==poor) & (redundancy==very poor) => (strength=very poor) (1)
Stiffness	R1. (story drift==very poor) (soft story==very poor) (adjacency==very poor) => (shape=very poor) (1) R2. (story drift==poor) => (shape=poor) (0.3) R3. (soft story==poor) => (shape=poor) (0.4) R4. (adjacency==poor) => (shape=poor) (0.3) R5. (story drift==good) => (shape=good) (0.3) R6. (soft story==good) => (shape=good) (0.4) R7. (adjacency==good) => (shape=good) (0.3) R8. (story drift==very good) => (shape=very good) (0.3) R9. (soft story==very good) => (shape=very good) (0.4) R10. (adjacency==very good) => (shape=very good) (0.3) R11. (story drift==excellent) (soft story==excellent) (adjacency==excellent) => (shape=excellent) (1)
Stiffness-critical	R1. (story drift==very poor) => (shape=very poor) (1) R2. (soft story==very poor) => (shape=very poor) (1) R3. (story drift==poor) & (soft story==poor) & (adjacency==very poor) => (shape=very poor) (1)
shape	R1. (load path==very poor) (mass irregularity==very poor) (plan irregularity==very poor) (torsion==very poor) => (shape=very poor) (1) R2. (load path==poor) => (shape=poor) (0.2) R3. (mass irregularity==poor) => (shape=poor) (0.3) R4. (plan irregularity==poor) => (shape=poor) (0.3) R5. (torsion==poor) => (shape=poor) (0.2) R6. (load path==good) => (shape=good) (0.2) R7. (mass irregularity==good) => (shape=good) (0.3) R8. (plan irregularity==good) => (shape=good) (0.3) R9. (torsion==good) => (shape=good) (0.2) R10. (load path==very good) => (shape=very good) (0.2) R11. (mass irregularity==very good) => (shape=very good) (0.3) R12. (plan irregularity==very good) => (shape=very good) (0.3) R13. (torsion==very good) => (shape=very good) (0.2) R14. (load path==excellent) (mass irregularity==excellent) (plan irregularity==excellent) (torsion==excellent) => (shape=excellent) (1)
Shape-critical	R1. (load path==very poor) => (stiffness=very poor) (1) R2. (mass irregularity==very poor) => (stiffness=very poor) (1) R3. (plan irregularity==very poor) => (stiffness=very poor) (1)
Risk	R1. (strength==very poor) (stiffness==very poor) (shape==very poor) (aging==very poor) => (risk=veryhigh) (1) R2. (strength==poor) => (risk=high) (0.3) R3. (stiffness==poor) => (risk=high) (0.3) R4. (shape==poor) => (risk=high) (0.2) R5. (aging==poor) => (risk=high) (0.2) R6. (strength==good) => (risk=moderate) (0.3) R7. (stiffness==good) => (risk=moderate) (0.3) R8. (shape==good) => (risk=moderate) (0.2) R9. (aging==good) => (risk=moderate) (0.2) R10. (strength==very good) => (risk=slight) (0.3) R11. (stiffness==very good) => (risk=slight) (0.3) R12. (shape==very good) => (risk=slight) (0.2) R13. (aging==very good) => (risk=slight) (0.2) R14. (strength==excellent) (stiffness==excellent) (shape==excellent) (aging==excellent) => (risk=none) (1)
Risk-critical	R1. (strength==very poor) => (risk=veryhigh) (1) R2. (stiffness==very poor) => (risk=veryhigh) (1) R3. (shape==very poor) => (risk=veryhigh) (1) R4. (strength==poor) & (stiffness==poor) & (shape==very poor) & (aging==very poor) => (risk=veryhigh) (1)

표 8 퍼지추론시스템 결과예제

제3단계				제2단계	최종평가	
세부평가항목	퍼지입력	사용된 규칙	평가결과	사용된 규칙	퍼지 출력	비퍼지화결과
Shear stress	0.72	Strength R5, R8, R9, R10, R11	0.75	Risk R6, R7, R9, R10, R11, R12, R13, R14	0.78	"Risk is slight"의 소속함수의 소속도가 $\mu(0.77)=0.98$ 에 의해서 98%에 해당하므로, 단순합성방식에 의한 결과(제2등급)와 동일하다
Weak story	0.91					
Redundancy	0.96					
Story drift	0.77	Stiffness R5, R8, R9, R10, R11	0.73			
Soft story	0.76					
Adjacency	1.0					
Load path	0.96	Shape R10, R11, R12, R13, R14	0.77			
Mass irreg.	1.0					
Plan irreg.	0.87					
Torsion	0.93					
Aging	0.8					

표 9 단순합성방식과 퍼지추론방식 결과들의 비교

	Strength (0.3)	Stiffness (0.3)	형상 (0.2)	노후화 (0.2)	단순합성		퍼지추론	
					결과	등급	결과	비고
Case 1	0.783	1.0	0.894	0.9	0.8937	제1등급	0.825	Risk is slight와 Risk is none의 경계영역
Case 2	0.3	0.7	0.9	0.9	0.66	제2등급	0.07	Risk is very high Strength-critical
Case 3	0.73	0.4	0.8	0.9	0.70	제2등급	0.07	Risk is very high Stiffness-critical

5. 결 론

예비적인 내진성능평가의 특성상 주관적이고 불확실성이 크므로 가능한 이러한 문제점을 최소화하기 위하여 퍼지추론방식에 의한 내진성능평가시스템 개발에 대한 방법론 및 시스템 구현에 대한 원형을 제시하였다.

- 종합적이고 일관성 있는 예비평가가 이루어질 수 있도록 평가항목을 선정하고 체계적인 위계구조로 제시하였다. 평가항목의 선정은 지진하중에 대한 구조물의 거동을 근거로 대표적인 구조물의 성능 변수들을 상위 레벨에 우선적으로 정의하고, 하위레벨로 내려가면서 각 항목에 대한 구체적인 평가가 이루어지도록 설정하였다. 특히, 건축물의 부재의 위치가 구조물 전체거동에 미치는 영향을 반영할 수 있도록 층 가중치를 적용하였다.
- 본 연구에서 제시한 평가항목의 위계구조에 적합한 평가 기법으로 단순합성방식과 퍼지추론방식을 제시하였다. 사실상, 단순합성방식은 퍼지추론방식에 의한 평가결과의 적합성을 살펴보는 데 사용된 것이다.
- 기존연구에서 얻은 구조물 평가에 대한 경험식 및 약산식을 근거로 퍼지추론시스템에 필요한 퍼지 입출력 함수의 클래스 정의 및 퍼지규칙 기반시스템을 구축하였다.

퍼지추론시스템에 의한 내진성능평가방법은 기존연구나 본 연구에서 참고적으로 제시한 단순합성방식과 비교해 볼

때 다음 사항들에 대해서 만족할 만한 결론을 내릴 수 있다.

- 내진평가의 복잡함을 기존평가방법에 의한 나열식이나 전문가의 판단에 의존하거나 특정적 지역에서만 적용되는 평가지수법과는 달리, 단계별 항목별 평가결과를 퍼지개념을 이용하여 최종적인 평가결과를 객관화하였다. 이는 기존의 평가방법을 체계적으로 적용하는 데 첫 걸음으로 생각할 수 있다.
- 불확정적이고 불확실성이 내재된 정성적인 평가를 하나의 단일 점수로 표현하는 것 보다는 퍼지이론에 의한 가능성으로 정량화 함으로서 보다 객관적인 평가결과를 줄 수 있다. 본 연구에서 설정한 평가항목의 대부분은 내진성능향상에 대한 기본방향을 정할 때 고려하는 주요항목과 많은 공통성을 지니고 있으므로, 본 연구에서 제시하는 내진성능평가 방법으로 구한 평가결과를 근거로 보수 및 보강계획의 기초자료로 삼을 수 있다.

앞으로 실무적용 가능한 평가시스템으로 발전시키기 위해서는 평가항목에 대한 설정 및 세부평가항목에 대한 통계적인 자료가 더욱 많이 확보되어야 한다. 평가항목의 분류체계는 경제적, 공학적, 그리고 통계적인 근거로 설정하여야 하나 본 연구에서는 구조 공학적인 측면에서 통상적으로 수용하고 있는 분류와 그 위계를 삼는 범주에 따랐다. 이에 대한 분류 및 체계는 많은 시설물의 데이터와 평가 결과의 비교를 통해 재조정되어야 한다. 특히 가중치에 대한 계수분배는

시스템의 특성, 안정성에 기여하는 요소의 중요성에 대한 전문가의 식견에 따라 다를 수 있다. 현재 연구와 실제 적용 단계에 있는 성능기초 설계법에서 추구하는 방향과 같이 설계자의 설계요구조건의 중요도 선택에 따라 가중치의 선택과 평가방향에 따라 계수를 선택할 수 있다. 변위에 근거한 설계에 그 중요성을 두게 되면 강성에 관련된 항목에 가중치를 둘 수 있으며 에너지 측면에 가중치를 두게 되면 에너지 소산기구와 관련된 항목에 가중치를 두어 특성별 성능평가가 가능하다.

감사의 글

본 과제는 2000년도 건교부와 시설안전기술공단에서 지원한 “기존 시설물 내진성 평가”의 연구과제 와 두뇌한국 21의 연구비로 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

1. Applied Technology Council, “Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: handbook (FEMA 154),” *ATC Report 21*, 1988.
2. Applied Technology Council, “Evaluating the seismic resistance of existing buildings,” *Report ATC-14*, 1987.

3. BSSC, *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings (FEMA-178)*, 1992.
4. Applied Technology Council, “FEMA 306 evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings; basic procedures manual (FEMA 306),” *ATC-43 Report*, 1999.
5. 기존 철골조건축물의 내진진단기준/개수설계지침 해설, 일본.
6. Applied Technology Council, “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Vol.1, 2),” *ATC-40 Report*, 1996.
7. Chao, C. J. and Cheng, F. R., “Fuzzy pattern recognition model for diagnostic cracks in RC structures,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 12, 1998. 4.
8. 모재근, 강문명, “퍼지의사결정에 의한 구조물의 최적화”, 대한건축학회논문집, 제13권, 제12호, 1997.
9. Revadigar, S. and Mau, S. T., “Automated multicriterion building damage assement from seismic data,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 2, 1999. 12.
10. Kir, G. J. and Folger, T. A., *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
11. TheMathWorks Inc., *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide for Use with MATLAB*, 1995.