

기존시설물 내진성능평가를 위한 평가항목 분류체계와 평가방법

Seismic Performance Level Criteria and Evaluation Methods

김남희*

홍성걸**

장승필***

Namhee Kim Hong

Hong, Sung-Gul

Sung-Pil Chang

ABSTRACT

Seismic performance evaluation systems require rational classification of structure systems, proper evaluation criteria, and their 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 three-step seismic performance evaluation system for building structures in Korea. Each evaluation step determines the seismic performance and the method depends on the degree of refinement of analysis. The preliminary step evaluation involves the global attributes of structures such as vertical irregularity, asymmetric plan, redundancy, and age of structures. The second step requires an elastic analysis for estimation of forces acting on critical sections and checks the strength and ductility. The final step requires inelastic capacity of structures. Each step has own evaluation scheme with proper weighing factor dependent on the importance and consequence. This study applies the fuzzy theory to a scoring method that synthesizes the individual quantity to a representative value.

1. 서론

최근에 발생한 미국, 일본, 터키, 대만등지에서의 대지진은 인명과 재산에 엄청난 피해로 지진다발 지역의 국가 뿐 만 아니라 우리나라와 같은 약진 지진발생지역에서 체계적인 지진에 대한 재해 경감책에 관심이 고조되고 있다. 대부분 지진발생에 따른 피해정도를 살펴 보면 개연적인 자연재해에 대하여 준비의 정도에 따라서 그 피해도 상당히 줄일 수 있다는 것이 중요한 교훈으로 볼 수 있다. 따라서, 국내에서는 학.연.산.관 모두 지진에 대한 대처 방안을 연구 검토하여 설계기준, 주요정책 및 교육자료에 반영하려는 움직임이 보다 적극적으로 일어나고 있다. 지난 세기동안 인명이나 재산에 심각한 지진피해를 크지 않았던 우리나라에서는 내진설계에 대한 관심이 뒤늦게 조성되었고 1989년에서야 건축법규에 내진설계에 대한 규정이 제한적으로 제시되었고 1998년에 보다 수정 보완된 규정이 마련되었다. 이와 같이 내진설계에 대한 관심이 부족했던 우리나라에서는 대부분의 기존 건물들이 내진

* 서울대 지구환경시스템 공학부 계약교수, 정회원

** 서울대 건축학과 조교수, 정회원

*** 서울대 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

설계가 규준에 명시되기 이전에 설계 시공되었으며, 이러한 구조물들이 지니고 있는 내진 성능 수준에 대한 평가가 우선적으로 필요하다.

미국의 내진평가방법으로는 ATC 14에서 제시한 방법과 FEMA-178의 방법이 대부분의 설계 기준과 실무에 광범위하게 적용되고 있다. 구조시스템별로 지진의 거동 및 내진 특성이 다르기 때문에 시스템을 분류하여 그 특성에 맞는 평가 방법을 제시하고 있다. 시스템별로 분류하더라도 공통적인 사항으로 지진에 취약한 약층(weak story), 연약층(soft story), 비대칭성, 부정정성 정도, 하중전달 등의 항목을 분류하여 평가하도록 하고 있다. 내진평가 방법이 상당한 전문성과 작업량을 요구하는 예비평가 방법으로 제시하고 있다. 예비평가 방법은 주로 외관에 나타난 내진특성을 수량화하여 안전성을 평가하는 방법이다. 한편, 일본의 내진평가방법은 통상적인 5-6 층 이하 철근 콘크리트 구조물에 대하여 1차, 2차 그리고 3차에 걸쳐 지표로 내진성을 평가하여 지역별 위험도와 비교하도록 하고 있다. 표1에 미국과 일본의 내진평가방법에 대해서 평가순서, 평가항목, 항목별 평가방법과 그 결과값의 정리, 최종평가, 구조시스템분류방법과 국내 실정에 대한 적합성여부에 대해서 분석하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 외국의 내진평가 방법의 도입의 문제점은 지표설정과 구조 시스템의 분류가 우리나라 실정에 적합하지 않아 수정이 필요하다. 그러나 평가항목, 구조물평가에 대한 약산식 및 경험식들은 상당부분 이용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 기존시설물에 대한 내진성능평가에 대한 체계적인 시스템 개발을 주요목적으로 하며, 지진피해경험이 많았던 미국과 일본에서 선행된 구조물에 대한 피해평가방법을 토대로 우리나라 실정에 적합한 평가방법을 제시하고자 한다.

기존연구결과를 토대로 본 연구에서 시작점으로 설정한 평가시스템의 요소들의 기본 틀은 표1에서 제시하는 바와 같다. 내진성능평가 대상구조물은 1987년 이전에 세워진 중저층 전형적인 구조물에 대해서만 우선적으로 대상범위를 제한하였다. 또한 시스템 개발시 이를 이용하는 전문가의 자격도 지진공학 및 내진설계에 대한 전문지식을 갖을 것을 요구한다. 왜냐하면 아직은 구체적인 평가항목에 대한 정립된 지식이나 자료가 시스템화 하기에는 너무나 불충분하므로 전문적 지식이 부족한 평가자가 신뢰할만한 평가를 한다는 것은 매우 어렵기 때문이다. 본 연구에서 개발된 시스템은 구조물의 내진에 대한 정책마련이나, 시설물 관리 또는 보수보강계획의 근거로 마련하는데 기초자료로 사용되도록 한다.

2. 평가절차

기존구조물의 평가는 전문가의 직관이나 경험을 이용하는 방법에서부터 3차원 비선형 동적 해석의 고급기술에 이르기까지 다양하나, 본 연구에서는 이러한 방법들을 그림 1과 같이 1차 평가, 2차 평가와 3차 평가로 단계적으로 나누어서 체계화하였다. 1차 평가에서는 가급적 간단하면서 종합적인 평가에 초점을 맞추고 점차 2차, 3차에 이르면서 상세하고 고급의 구조해석에 근거한 응력 및 변위에 대하여 상세평가를 할 수 있도록 한다. 비교적 간단한 구조물에 대한 평가는 지금까지 연구된 많은 약산식과 경험식에 의해서 평면이나 입면적 특성의 대표 값을 이용한 구조적 거동에 대한 평가가 가능하므로 모든 구조물의 평가를 위해 고급 구조해석에 의존한다는 것은 시간 및 경제적으로 부적절할 수 있으므로 이러한 단계

적 평가방법을 채택한 것이다. 1차 평가는 모든 평가절차에 있어서 가장 먼저 수행하게 되므로 평가하고자 하는 구조물에 대한 평가 시 필요한 입력자료로 기하학적인 형태, 대표적인 물성치, 간략한 하중, 대표적인 취약성, 노후정도와 요구되는 입력지진 산정이 포함되어 있다. 2차 평가 수행 시에는 지진하중에 대한 구조물의 거동을 선형탄성해석을 수행한 결과를 그리고 3차 평가 수행에서 pushover 해석을 이용한 비선형 해석을 수행한 결과를 근거로 각각 구조물의 종합적인 평가를 하도록 한다. 평가순서는 먼저 1차 평가를 수행하고, 그 결과가 요구 정도에 만족스럽지 못하거나 또는 신뢰도가 많이 떨어지는 경우에 다음 단계에서 구조해석을 통한 응력에 대한 부재별 강도 및 변위 등으로 이루어진 2차 평가를 수행하게 된다. 만일, 2차 평가에서도 그 결과가 계속해서 만족스럽지 못하거나 내진성능의 보유 상태를 보다 구체적으로 알고자 할 때는 3차 평가를 수행한다. 예를 들어 capacity spectrum method를 사용한 3차 평가에서는 구조물의 성능점을 찾아내고 그에 따른 부재별 예상 피해를 추적하여 1차와 2차 평가에서 사용한 지수를 조정하여 새로운 종합평가지수를 결정한다.

3. 평가항목 및 기준

예비평가에서는 모든 구조물에 대해서 공통적으로 평가해야 될 공통평가항목과 각 구조시스템에 따라서 달라지는 주요평가항목으로 나누어서 평가하도록 하고 있으며, 그 항목들은 그림 2와 같은 구조도를 갖게 된다.

구조물의 평가를 위해서는 앞 절에서 언급한 여러 가지 평가항목에 대해서 합리적인 평가가 필요하다. 2차 평가 및 3차 평가에 대해서는 구조해석을 통한 평가이므로 그 평가가 약산식 및 경험식에 의존하는 예비평가에 대해서 비교적 수월하다고 할 수 있다. 그러나 예비평가의 경우는 평가항목의 다양성 및 복잡성, 전문가의 경험이나 지식의 의존도가 매우 높아서 종합적인 평가 값을 추론해내는 것은 대단히 어려운 문제이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여, 미국과 일본의 기존 연구에서는 기존피해사례를 통해서 주요항목별로 피해지수를 설정해서 평가 시 사용할 수 있도록 하거나, 또는 주요항목과 관련된 세부 평가 문제에 대해서 적절 또는 부적절 판단을 나열식으로 제시하고 전문가로 하여금 종합적인 결론을 내리게 한다. 본 연구에서는 우리나라의 특성상 이미 설정된 주요항목별 피해지수가 마련되어 있지 않은 점을 감안하고, 기존연구에 비해서 보다 합리적인 종합평가를 위해서 다음과 같은 사항들을 평가방법에 도입한다.

- 1) 구조물의 평가항목을 단계적으로 세분화하고 같은 레벨에 속하는 평가항목 사이에는 가급적 등가성을 유지하도록 한다.
- 2) 각 항목평가는 가급적 수학적 함수식으로 표현되도록 한다. 이때 함수식은 신뢰성이 높은 경험식이나 약산식을 사용한다.
- 3) 각 항목평가 결과값은 숫자, 참, 거짓 등 다양할 수 있으나, 본 연구에서는 구조물의 거동과 관련된 범위를 먼저 규정하고, 평가결과값의 존재구간에 따라서 0~1사이의 정규화 값을 갖도록 한다. 평가결과 값의 정규화 하는 것은 각 평가항목 결과의 값의 특성이나 범위가 달라 문제점으로 발생할 수 있는 상대적 지배성을 배제하기 위한 것이다.

- 4) 각 평가항목을 구성하고 있는 세부항목의 주어진 평가항목에 대한 기여도는 각 세부항목에 가중치를 부여해서 표현하도록 한다. 가중치의 범위는 0~1까지의 값을 갖도록 하며, 각 세부항목에 부여된 가중치의 합이 1이 되도록 한다.
- 5) 구조물의 거동이 층별로 위험도가 가중될 수 있는 경우는 층 가중치를 적용하도록 한다. 층 가중치의 이용은 구조물의 입면적 거동이 종합평가에 미치는 영향을 보다 실질적으로 반영하기 위한 것이다. 예를 들어서, 약 층이나 층간 변위에 대한 문제점이 저층에 발생하였을 경우 그 위험도는 상부 층에 발생했을 경우에 비해서 그 위험도가 더욱 가중되는 것은 기존의 많은 연구에서도 검토되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 층에 따라서 다음 식과 같은 삼각형 분포의 가중치를 가정할 수 있다.

$$w_n = (n - i + 1) / \text{sum}(i, i = 1, n); i \quad (1)$$

- 6) 평가결과와 합성방식은 평가자의 기호에 따라서 다음절에서 소개하는 방식들을 포함한 다양한 방법들이 가능하도록 한다.
- 7) 구조물의 등급은 5단계로 나눈다. 현행 국내에서 구조물의 안전진단결과 평가에서 보편적으로 적용하고 있는 5단계 등급화에 준한 것이다.

4. 종합평가 실용화 방안

본 절에서는 앞 절에서 언급한 종합평가에 대한 기본적인 개념을 바탕으로 실제구조물을 평가시 실용 가능한 방법들에 대해서 고찰한다.

4.1 단순합성방식

이는 평가항목에 속하는 각 세부항목에 대해서 평가결과값과 해당하는 가중치를 각각 단순히 곱하고[식.(2)], 각 세부항목에 대해서 계산된 결과값들을 모두 단순합으로 구한 결과값을 최종결과값[식.(3)]으로 하는 방식이다. 각 세부항목 평가자체는 동등하게 취급되고 최종 결과에 대한 기여도는 가중치에 따라서 달라진다.

$$X_i = \sum w_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$Y = \sum W_i X_i \quad (3)$$

여기서 X_i , w_{ij} , x_{ij} 는 각각 하부단계 평가값, 가중치, 세부항목점수이고, Y , W_i , X_i 는 각각 상부단계 평가값, 가중치, 세부항목점수이며, 단, 세부항목점수는 하부단계 평가값으로 사용한다. 본 연구에서 제시한 평가항목에 대해서 단순합성 방식을 이용할 경우 그림 3과 같은 절차를 따를 수 있으며, 그 결과 표2와 같은 예제를 얻을 수 있다.

4.2 최대-최소합성방식

이는 평가항목에 속하는 각 세부항목에 대해서 평가결과값과 해당하는 가중치를 각각 비교해서 작은 값을 먼저 택하고, 각 세부항목에 대해서 선택된 값 중 가장 큰 값을 최종결과

값으로 하는 방식이다. 이 방식은 고려할 변수 및 가중치가 다양할 때 퍼지집합에서 가장 많이 사용되는 합성방식이다.

$$Y = \text{Max}[\text{Min}(W_1, X_1), \text{Min}(W_2, X_2), \dots, \text{Min}(W_n, X_n)] \quad (4)$$

4.3 최대값방식

이는 평가항목에 속하는 각 세부항목에 대해서 평가결과값과 해당하는 가중치를 각각 단순히 곱하고, 각 세부항목에 대해서 계산된 결과값들을 비교해서 이중 가장 큰 값을 최종 결과값으로 하는 방식이다[식.(5)]. 이는 평가결과값에 가장 지배적인 영향을 주는 요소에 의해서만 구조물을 평가하고자 할 때 사용한다.

$$Y = \text{Max}[W_1X_1, W_2X_2, \dots, W_nX_n] \quad (5)$$

4.4 퍼지추론 (Fuzzy Inference)

이는 평가항목의 값의 범위와 평가결과값의 범위들을 퍼지조건명제(또는 퍼지규칙)로 정의하고, 이들을 퍼지관계로 나타낸 후, 논리적인 추론에 의해서 최종 결과값을 구하는 방식이다. 퍼지이론은 평가대상에 대해서 예 또는 아니오 만으로는 평가하기 어려운 애매한 경우에 대한 문제점을 수학적 접근방법으로 해결하고자 한 것이다. 즉 정성적인 퍼지개념과 정량적인 수학사이를 연결하는 중간적인 역할을 한다. 본 연구에서는 앞서 언급한 단순합성방식을 시스템화하는 방안으로서 그림 4와 같은 퍼지추론시스템을 구축하였다. 퍼지추론시스템에는 1) 입력처리 모듈, 2) 경험적 및 이론적 지식에 근거한 규칙들의 지식기반 모듈, 3) 입력에 대해 출력을 만들어내는 추론기관모듈과 4) 출력모듈이 포함된다.

입력처리모듈에는 강도, 강성, 형상 및 노후화 항목으로 대별하고, 각 항목별로 평가기준의 만족도를 퍼지집합의 소속함수로 표현하였다. 입력값들은 모두 0~1까지의 정규화된 값들을 사용하도록 한다. 이와 같은 변수 정규화는 모든 변수들에 대해서 같은 퍼지화 방식을 사용할 수 있게 해주고, 소속함수의 클래스 수정을 쉽게 해준다. 각 변수에 사용된 소속함수는 “very poor, , poor, good, very good, excellent”의 5가지의 구역을 가우스함수로 표현하였으며, 표4와 같다.

지식기반모듈에는 그림 4와 같이 25가지의 규칙을 정의하고 주어진 입력에 대해서 결과값을 구하기 위해서 일반화된 추론방식의 하나인 Mamdani 함의 (Mamdani Implication) 방식을 이용하여 퍼지관계 방정식을 풀도록 하였다. Mamdani 함의에서는 퍼지조건 명제 “p이면 q이다”의 조건부와 결론부의 집합을 바탕으로 상관최소방식을 이용하여 퍼지관계 R을 구축하며, 카테시안 곱 X x Y공간에서 정의되는 퍼지관계 R의 소속함수 값을 구하는 과정이 식 (6)~(9)에 설명되어 있다.

$$p \rightarrow q = p \wedge q \quad (6)$$

$$R = \{(x, y), \mu_R(x, y) | (x, y) \in X * Y\} \quad (7)$$

$$Q = \{(x, y), \mu_Q(x, y) | (x, y) \in X * Y\} \quad (8)$$

$$\mu_{R \cap Q}(x, y) = \text{Min}[\mu_R(x, y), \mu_Q(x, y)] = \mu_R(x, y) \wedge \mu_Q(x, y) \quad (9)$$

퍼지규칙의 처음 20가지는 항목별로 가중치를 적용하기 위해서 각 소속함수 구간별로 단순 명제를 정의한 것이다. 표3에 단순 규칙에 대한 내용 및 가중치가 설명되어 있다.

출력처리모듈에는 강도, 강성, 형상 및 노후화 항목에 대해서 주어진 입력값에 대해서 퍼지 추론을 통하여 구해진 결과를 등급화 할 수 있도록 하였다. 출력값은 0~1까지의 정규화된 값들을 사용하도록 한다. 사용된 소속함수는 예상되는 위험성의 정도를 “very high, high, moderate, slight, none”의 5가지의 구역으로 나뉘어서 표현될 수 있도록 5가지의 삼각형함수로 표현하였으며, 표5와 같다. 퍼지출력결과로 얻은값은 비퍼지화를 통하여 실제로 원하는 결과를 구한다.

앞서 단순합성방식에서 사용한 동일한 자료에 대해서 퍼지추론시스템을 이용해서 구한 결과값을 표6에 정리하였으며, 두 방식의 결과를 비교해 보았다.

5. 결론

평가항목의 분류체계는 경제적, 공학적, 그리고 통계적인 근거로 설정하여야 하나 본 연구에서는 구조공학적인 측면에서 통상적으로 수용하고 있는 분류와 그 위계를 삼는 범주에 따랐다. 이에 대한 분류 및 체계는 많은 시설물의 데이터와 평가 결과의 비교를 통해 재조정되어야 한다. 그러나 내진평가의 복잡함을 나열식으로 그리고 전적으로 전문가의 판단에 맡기기보다 단계별 항목별 평가결과를 지수화하여 최종적인 평가결과를 객관화하는 데 그 목적이 있으므로 기존의 평가방법을 체계적으로 적용하는 데 첫 걸음으로 생각할 수 있다. 특히 가중치에 대한 계수의 분배는 시스템의 특성, 안정성에 기여하는 요소의 서열 등에 대한 전문가의 식견에 따라 다를 수 있다. 현재 연구 진행 중에 있는 성능기초 설계법에서 추구하는 방향과 같이 설계자의 설계요구조건외 중요도 선택에 따라 가중치의 선택과 평가 방향에 따라 계수를 선택할 수 있다. 예를 들어 변위에 근거한 설계에 그 중요성을 두게 되면 강성에 관련된 항목에 가중치를 둘 수 있으며 에너지 측면에 가중치를 두게 되면 에너지 소산기구에 관련된 항목에 가중치를 둘 수 있다.

감사의 글

본 과제는 2000년도 건교부와 시설안전기술공단의 기존 시설물 내진성 평가 과제의 연구비를 이루어진 것입니다.

참고도서

1. Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (Vol.1, 2), ATC-40 Report, 1996.

2. Applied Technology Council, Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Handbook (FEMA 154), ATC Report 21, 1988.
3. BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings; Part1, Provision (FEMA 222 A), 1994.
4. Applied Technology Council, Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings, Report ATC-14, 1987.
5. BSSC, NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings (FEMA-178), 1992.
6. Applied Technology Council, FEMA 306 Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings; Basic Procedures Manual (FEMA 306), ATC-43 Report, 1999.
7. Applied Technology Council, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings; Technical Resources (FEMA-307), ATC-43 report, 1999.
8. Applied Technology Council, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-273).
9. Applied Technology Council, NEHRP Commentary on Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-274).
10. 기존 철골조건축물의 내진진단기준/개수설계지침 해설 (일본)
11. 내진설계기준연구 (한국지진공학회)

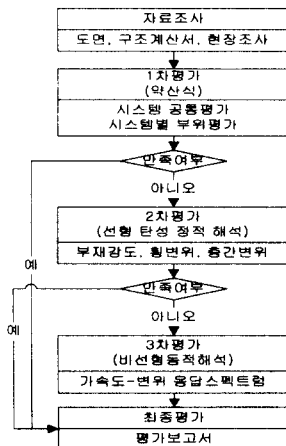


그림 1. 기존시설물 내진성능평가절차

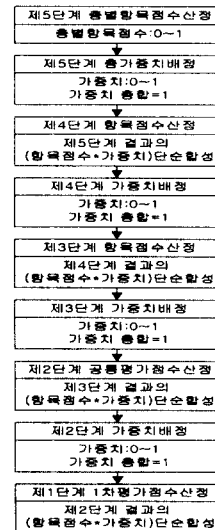


그림 3. 단순합성방식 평가절차

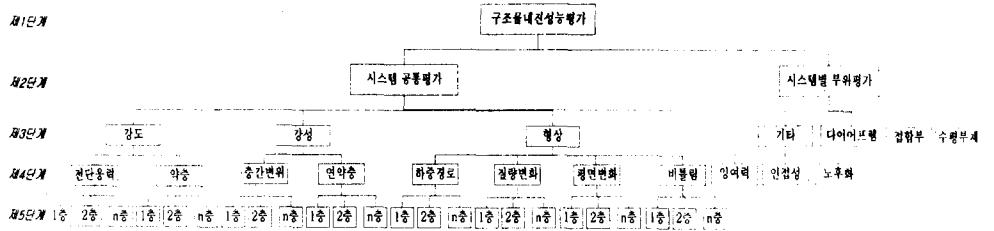
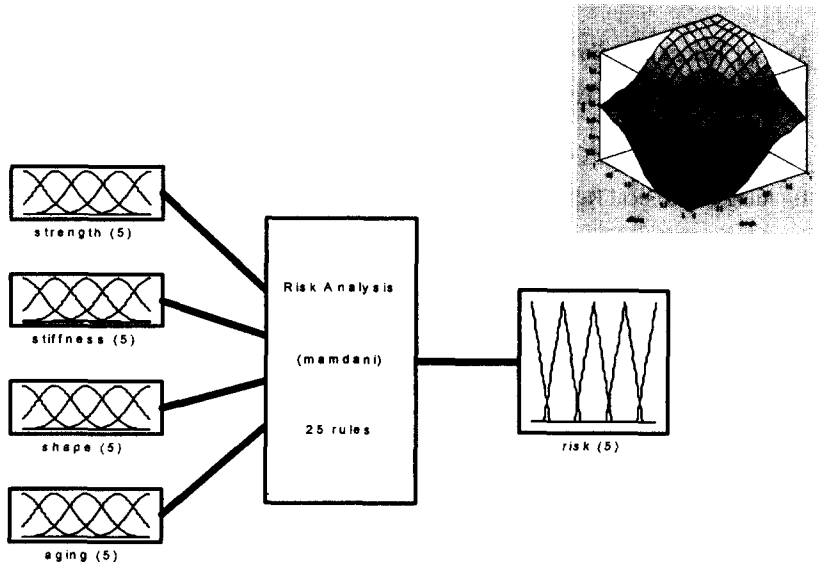


그림 2. 평가항목 분류체계



System Risk Analysis: 4 inputs, 1 outputs, 25 rules

그림 4. 퍼지추론시스템구성도

표1. 구조물 내진성능평가시스템의 비교

	미국	일본	본 연구
평가순서	현장조사 및 자료수집/ 시스템 조사/ 비선형 해석/ 부재 및 접합부조사/ 비구조재	수직부재의 단면형상/ 수직부재 단면형상 및 배근/ 수직부재 단면형상 및 배근, 수평부재포함	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)	평가결과의 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 국내 실정에 적합한 구조시스템 만들 수용

국내 실정에 대한 적합성	나열식으로 종합적 평가를 내리기 어려움	평가지수화 관련 국내자료의 부재로 인하여 평가지수제는 불가능	국내기준에 근거한 종합적 평가
---------------	-----------------------	-----------------------------------	------------------

표2. 단순합성방식에 의한 구조물 내진성능평가의 예

층	강도				강성				형상								기타		
	전단 응력		약층		층간 변위		연약층		하중 경로		질량 변화		평면 변화		비틀림		임여력	노후화	인접성
	x	w	x	w	x	w	x	w	x	w	x	w	x	w	x	w			
3	1.0	1/6		1/6	0.8	1/6		1/6	1.0	1/6	1.0	1/6	0.8	1/6	1.0	1/6			
2	0.9	2/6	1.0	2/6	0.9	2/6	0.8	2/6	1.0	2/6	0.7	2/6	0.9	2/6	1.0	2/6			
1	0.6	3/6	0.7	3/6	0.7	3/6	0.8	3/6	0.8	3/6		3/6		3/6		3/6			
x	1.0*(1/6)+0.9*(2/6)+0.6*(3/6)=0.77		0.68+0.17=0.85		0.8		0.67+0.17=0.84		0.9		0.4+0.5=0.9		0.43+0.5=0.95		0.5+0.5=1.0		0.7	0.8	0.7
w	0.6		0.4		0.6		0.4		0.25		0.25		0.25		0.25		0.4	0.4	0.2
x	0.77*0.6+0.85*0.4=0.8				0.8*0.6+0.84*0.4=0.82				0.9*0.25+0.9*0.25+0.95*0.25+1.0*0.25=0.94								0.7*0.4+0.8*0.4+0.7*0.2=0.74		
w	0.3				0.3				0.2								0.2		
Y	0.8*0.3+0.82*0.3+0.94*0.2+0.74*0.2 = 0.82 (2등급)																		

x: 항목점수, w: 가중치, Y: 최종점수

표3. 퍼지추론에 사용된 단순명제와 가중치

규칙	내용	가중치	규칙	내용	가중치
1	If (strength is very poor) then (risk is very high)	0.3	11	If (shape is good) then (risk is moderate)	0.2
2	If (stiffness is very poor) then (risk is very high)	0.3	12	If (aging is good) then (risk is moderate)	0.2
3	If (shape is very poor) then (risk is very high)	0.2	13	If (strength is very good) then (risk is slight)	0.3
4	If (aging is very poor) then (risk is very high)	0.2	14	If (stiffness is very good) then (risk is slight)	0.3
5	If (strength is poor) then (risk is high)	0.3	15	If (shape is very good) then (risk is slight)	0.2
6	If (stiffness is poor) then (risk is high)	0.3	16	If (aging is very good) then (risk is slight)	0.2
7	If (shape is poor) then (risk is high)	0.2	17	If (strength is excellent) then (risk is none)	0.3
8	If (aging is poor) then (risk is high)	0.2	18	If (stiffness is excellent) then (risk is none)	0.3
9	If (strength is good) then (risk is moderate)	0.3	19	If (shape is excellent) then (risk is none)	0.2
10	If (stiffness is good) then (risk is moderate)	0.3	20	If (aging is excellent) then (risk is none)	0.2

표4. 입력 퍼지함수에 대한 소속값 분포

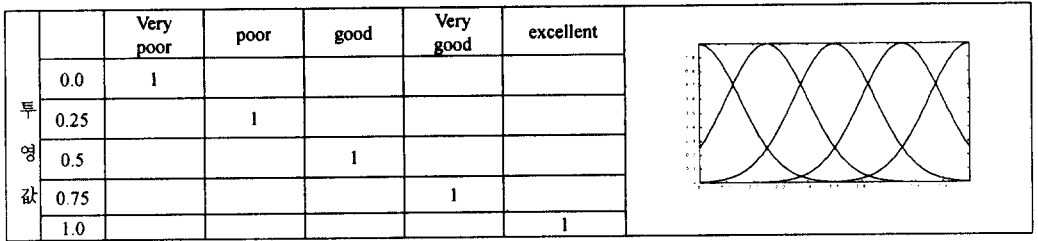


표5. 출력 퍼지함수에 대한 소속값 분포

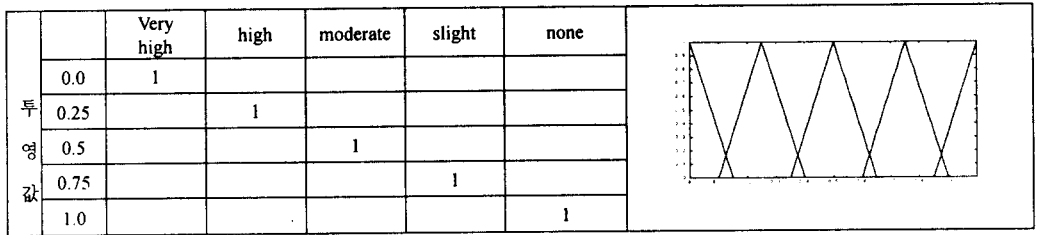


표6. 퍼지추론시스템 결과예제

퍼지입력값		사용된 규칙	퍼지출력값	비퍼지화결과
강도	0.8	R9, R13, R17, R23, R24, R25	0.7591	"Risk is slight"의 함수의 소속도가 100%에 해당되므로, 단순합성방식에 의한 결과와 동일하다.
강성	0.82	R10, R14, R18, R23, R24, R25		
형상	0.94	R11, R15, R19, R23, R24, R25		
기타	0.74	R12, R16, R20, R23, R24, R25		