ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2017.17.2.053

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 17, No. 2 (통권 68호), pp.53~62, June, 2017

# 퍼지이론을 적용한 기존 중저층 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가기법 연구

## Study of Seismic Resistance Performance Evaluation Method for Existing Mid-Low Story RC Structure Buildings by Applying Fuzzy Theory

김 동 희*
Kim, Dong-Hee

김 현 수**
Kim, Hyun-Su

**Abstract**

This study aims to establish a seismic resistance performance evaluation method that makes sure to secure the seismic resistance performance of the existing mid-low story reinforced concrete structures. This study focuses on the development of the seismic resistance performance evaluation method for the overall seismic resistance performance evaluation on the buildings by applying fuzzy theory. This seismic resistance performance evaluation method considers the mutual relations among the type of force, the type of member, the type of story, and the states of deterioration of the buildings. The total seismic resistance performance index from this method was calculated by the intensity weight of each evaluation item, fuzzy measure, fuzzy integration. Moreover, the evaluation methodology was established in this study to identify the performance level of the Immediate Occupancy, Life Safe, Collapse Prevention by applying the fuzzy theory.

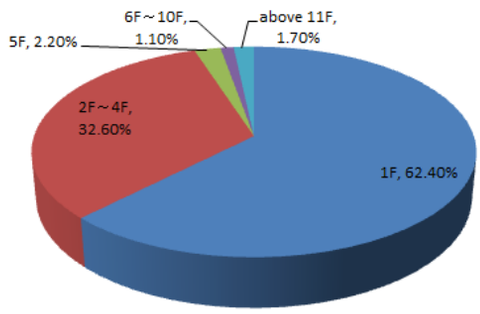
*Keywords : Seismic resistance performance evaluation method, Total seismic resistance performance evaluation index, Fuzzy measure, Fuzzy integration, Intensity weight of evaluation item*

## 1. 서론

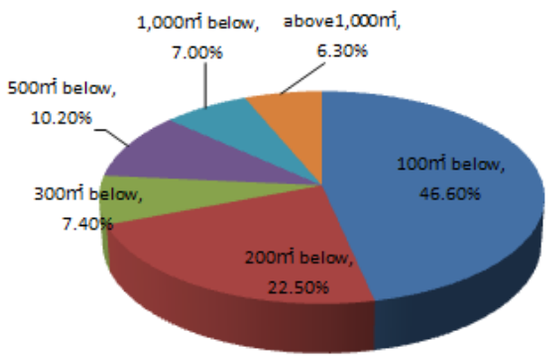
우리나라는 지질학적 위치에 따라 환태평양 지진대에 위치하여 그동안 지진에 대해 비교적 안전하다고 생각하고 있었으나, 최근 발생된 경주지진(규모 5.8, 2016.9.12)과 계속 이어지는 여진으로 크고 작은 피해가 발생하여 더 이상 지진에 대하여 안전하다고 장담할 수 없는 상황이다. 최근 기상청 통계자료에 의하면 우리나라에서 지난 39년(1978~2008년)간 총 1,466회의 지진이 관측되었고, 2016년 한 해에만 254회의 지진이 관측되었다. 특히, 디지털 관측이 가능한 1999년 이후부터는 매년 59.6회의 지진이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 내진설계기준은 1988년에 최초 제정되었으며, 이후 4번의 개정을 거치면서 강화되었고, 현재는 건축구조설계기준이 개정되어 KBC 2016을 기준으로 적용하고 있다. 특히, 2016년 9월 12일 발생한 경주지진으로 내진설계 의무대상이 3층 이상, 500㎡ 이상에서 2층 이상, 500㎡ 이상으로 확대되었다. 우리나라 건축물 총 동수는 2015년 기준 6,986,913동(2015년 세움터 통계자료 참고)[1]으로서 약 700백만 동에 육박하고 있으며, <Fig. 1>, <Fig. 2>에서와 같이 1층 이하의 건물이 전체 대비 62.4%(4,356,666동)이며, 500㎡ 미만의 건축물이 전체 대비 86.6%(6,056,301동)를 차지하고 있다. 1988년 최초 내진설계기준 제정 후 2005년 기준 개정까지 약 17년간 6층 이상, 100,000㎡ 이상 건축물만 내진설계 의무대상인 점을 감안하면 2005년 이전에 신축된 건축물은 90% 이상 내진설계가 반영되지 않았음을 확인할 수 있다. 따라

* 정회원, 한국시설안전공단 건설안전본부 처장
Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, Construction Safety Division
** 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture & Civil Eng., Sunmoon University
Tel: 041-530-2315 Fax: 041-530-2839
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

서 2016년 9월 12일의 경주지진과 같이 대규모의 지진이 발생한다면 대부분의 건축물이 큰 피해를 받을 수 있어 국가적으로 기존 건축물에 대한 적극적인 내진성능 확보가 매우 중요한 상황이다.




〈Fig. 1〉 Building numbers by story in 2015 (Total 6,986,913 ea)[1)]




〈Fig. 2〉 Building numbers by area in 2015 (Total 6,986,913 ea)[1)]

우리나라 건축물은 대부분이 중저층 건축물로 이루어져 있고, 내진설계 의무대상에서 제외되는 건축물이 대부분이다.

본 연구는 기존의 중저층 철근콘크리트 건축물을 대상으로 현재의 내진설계기준으로 신축되어지는 건축물과 동등한 수준의 내진성능을 확보하고자 내진성능평가기법을 제안하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 퍼지이론을 적용하여 내진해석에 따른 결과를 통합하여 종합평가할 수 있는 평가기법을 개발하는 데에 중점을 두었다.

## 2. 퍼지이론 평가기법 개요

퍼지이론(Fuzzy theory)은 최근 건축물 평가 외에 타 분야에서도 많이 활용되고 있으며, 최초 이론은 약 50년 전 1965년에 미국에 소재하고 있는 버클리대학의 자데(Lofti A. Zadh)교수가 처음으로 소개하였다. 불확실한 정보를 처리할 수 있는 퍼지이론은 다양한 분야에서 응용이 가능하다.

퍼지이론은 하나의 현상에 대해 모호한 상태를 수치적으로 처리할 수 있는 기법으로 퍼지집합이론과 퍼지척도이론, 퍼지적분이론으로 구분할 수 있다. 이 중에서 퍼지척도이론은 불확실성을 가지고 있는 정보에 대해서 신뢰성의 정도를 수치적으로 표현하며, 퍼지적분이론은 평가하고자 하는 대상에 대해 평가 후 그 결과를 종합적으로 계산하는 방법으로서 Sugeno의 퍼지적분이론, Choquet의 퍼지적분이론을 많이 사용한다.

본 연구에서는 내진성능평가대상의 항목과 평가의 경계를 정의한 후 평가의 후처리 과정에 해당하는 퍼지척도와 퍼지적분이론을 고찰하여 내진성능평가기법에 적용한다.

### 2.1 퍼지척도(Fuzzy measure)

퍼지척도이론은 불확실성을 가지고 있는 정보에 대해서 신뢰성의 정도를 수치적으로 표현한 후 이 정보를 가지고 평가 대상의 상태 또는 현상을 수치적으로 처리한다.

#### 2.1.1 λ-퍼지척도

퍼지척도는 항목과 항목 간의 상호관계를 일정한 법칙 하에 구할 수 있도록 고안되었다. Sugeno는 2개 이상의 집합을 합집합으로 계산할 때 평가 항목 간의 상호관계를 고려하기 위하여 λ-퍼지척도를 식 (2.1)과 같이 제시하였다.

$$g(X \cup Y) = g(X) + g(Y) + \lambda g(X) g(Y) \quad ; (\lambda > -1) \tag{2.1}$$

여기서, X, Y는 X, Y 평가항목의 평가점수를 말한다.

λ-퍼지척도에서 λ 값은 집합(평가대상 항목)들 간의 상호관계를 수치적으로 표현한 것으로서 아래와 같이 λ 값에 따라 상승적(Super additivity), 가법적(Additivity), 대체적(Sub-additivity)인 성질을 나타낸다.

λ >0 경우 $g(X\cup Y) > g(X)+g(Y)$
(상승적인 상호관계 작용)
λ =0 경우 $g(X\cup Y) = g(X)+g(Y)$
(가법적인 상호관계 작용)
λ <0 경우 $g(X\cup Y) < g(X)+g(Y)$
(대체적인 상호관계 작용)

λ >0 경우는 각 집합의 요소를 동시 고려할 때 그 영향이 해당 요소들의 개별적 결과를 단순하게 합산할 때보다 크게 결과에 미치는 것으로 나타난다. λ =0 경우는 각 집합의 요소가 상호 독립하여 작용됨을 나타내며, 서로 상호관계의 영향을 미치지 않는다. λ <0 경우는 각 집합의 요소를 동시 고려할 때 그 영향이 해당 요소들의 개별적 결과를 단순하게 합산할 때보다 더 작게 결과에 미치는 것으로 나타난다.

건축물의 평가에서 평가 항목 간의 상호관계를 고려할 때, 항목 간의 상호관계가 상승적인 경우 단순 합산한 경우보다 더 큰 결과가 나타날 수 있기 때문에 왜곡된 평가가 될 수 있다. 가법적인 경우는 상호관계가 고려되지 않기 때문에 상호관계를 고려하는 평가 취지에 맞지 않는다. 그러므로, 건축물의 평가는 대체적인 상호관계를 고려하여 적용할 수 있으며, λ-퍼지척도는 상호관계를 적정하게 고려할 수 있도록 -1< λ <0의 구간 값을 갖는 것으로 정의한다.

#### 2.1.2 λ-퍼지척도 중요도 산정방법

평가에 있어서 중요도의 상호작용관계를 고려하기 위해 Sugeno가 제안한 λ-퍼지척도의 중요도를 사용하며, 중요도의 산정방법은 아래와 같다[2].

- $g(\phi) = 0$
- $g(Q) = 1$
- $g(X\cup Y) < g(X)+g(Y)\ (-1<\lambda<0)$경우
- $g(X\cup Y) = g(X)+g(Y)+\lambda g(X)g(Y)$
- $g(X\cup Y\cup Z) = g(X)+g(Y)+g(Z) + \lambda[g(X)g(Y) + g(X)g(Z) + g(Y)g(Z)] + \lambda^2 g(X)g(Y)g(Z)$
- $g(W\cup X\cup Y\cup Z) = g(W)+g(X)+g(Y)+g(Z)+ \lambda[g(W)g(X) + g(W)g(Y)+g(W)g(Z)+g(X)g(Y)+g(X)g(Z) + g(Y)g(Z)] + \lambda^2[g(W)g(X)g(Y)+ g(W)g(Y)g(Z)+g(X)g(Y)g(Z)] + \lambda^3 g(W)g(X)g(Y)g(Z)$

### 2.2 퍼지적분(Fuzzy integration)

퍼지적분이론은 평가하고자 하는 대상에 대해 평가 후 그 결과를 종합적으로 계산하는 이론으로서 Sugeno의 퍼지적분이론, Choquet 퍼지적분이론을 많이 사용한다.

#### 2.2.1 Sugeno fuzzy integration

건축물의 평가 대상의 평가항목에 대한 집합을 $A=\{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$ 라 하고, A집합의 역집합 $P(A)$에 대해서 해당 역집합의 원소 $M(M\in P(A))$에 의해 퍼지척도 g(M)을 정의한다. 이 때 퍼지척도 g(M)은 건축물 전체 평가에 있어서 평가 항목 M의 평가값이 전체 평가에 기여하는 정도를 수치적으로 표시할 수 있다. 이 때 퍼지척도 g(M)를 평가 항목의 항목별 집합 M의 중요도라고 정의한다.

Sugeno의 퍼지적분 방식은 평가 함수 $h(a)(a\in A)$와 평가 항목 요소 a를 평가하기 위해 평가 함수 h와 중요도 g 함수를 적용하여 적분한다. 그 방식은 식 (2.2)와 같다.

$$\int_a h(a)\circ g(\cdot) = Max(Min\,[Min\,h(a), g(M)]) = Max(Min\,[h(a_i), g(M_i)]) \quad (2.2)$$
$$M=(a_k \mid k=1,\ldots,n)$$

#### 2.2.2 Choquet fuzzy integration

Choquet 퍼지적분(Fuzzy integration)은 건축물 평가대상의 평가항목에 대한 집합 $A=\{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$에 대해서 퍼지척도를 g:P(A) → {0, 1}로 정의한다.

집합 A에 대해서 {0, 1}로 구성되어 있는 구간을 치역하는 함수 h:A → {0, 1}로 정의한다.

이 때 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \ldots \geq h(x_n)$인 경우, 집합 A에서의 함수 h에 대한 퍼지척도 g와의 관계를 Choquet의 퍼지적분식으로 표현하면, 식 (2.3), <Fig. 3>과 같다.

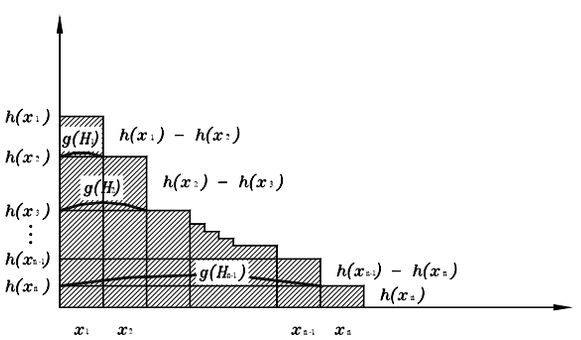
$$\int_a h(x) \circ g(\cdot) = h(x_n)g(H_n) + [h(x_{n-1}) - h(x_n)]g(H_{n-1}) + \ldots + [h(x_1) - h(x_2)]g(H_1) \quad (2.3)$$

$H_i = \{x_1, x_2, \ldots x_i)$

$h(x)$ : 평가항목 평가점수

$g(\cdot)$ : 평가항목 중요도

Choquet의 퍼지적분식에서 g의 퍼지척도가 가법적인 경우($\lambda$=0)는 일반적으로 이용되고 있는 가중합으로 구해지는 값과 동일한 결과가 나온다. Choquet의 퍼지적분방식은 중요도의 크기에 따라 연산을 하는데 <Fig. 3>에서처럼 평가값이 높은 항목을 우선적으로 적용하고, 순차적으로 중요도의 크기에 따라 차순위 항목의 영향을 적용하면서 그 전 단계의 평가값을 보정한다.




〈Fig. 3〉 Choquet fuzzy integration concept

Sugeno의 퍼지적분방식은 최소-최대(Min-Max)에 대해 계산을 수행하므로 해당 구간에서 한계위치에 있는 특정한 항목이 전체 평가결과를 지배할 수 있는 문제가 발생하게 된다.

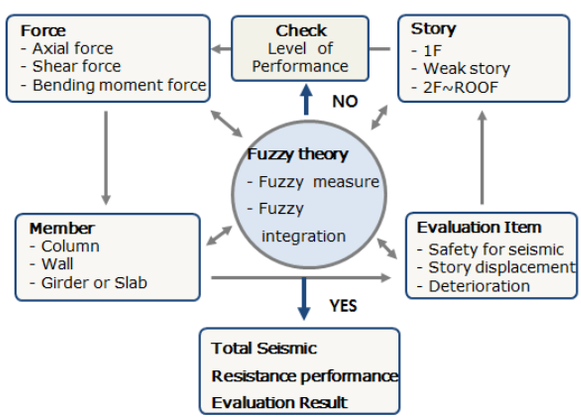
그런 반면, Choquet의 적분방식은 연속적으로 계산을 수행하면서 평가항목들 간의 상호영향을 동시에 반영한다. 이러한 평가방식은 평가결과의 급격한 변동과 왜곡된 평가결과를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 건축물 내진성능평가 시 부재 간의 상호관계, 층별에 있어서 상호관계, 평가 항목 간의 상호관계를 고려하여 평가하기 위해서 Choquet의 퍼지적분방식을 적용한다.

## 3. 퍼지이론을 적용한 내진성능평가기법

### 3.1 내진성능평가항목 평가기준

본 연구에서 제안하는 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가체계의 1단계 평가는 각 부재에 대하여 지진에 의해 작용되는 하중강도를 내력비로 검토하여 부재별로 평가한다. 2단계 평가는 해당 층에 포함되는 평가항목의 상호관계를 고려하여 평가한다. 3단계 평가는 층별 결과를 전체 종합하는 방식으로 평가한다<Fig. 4>.



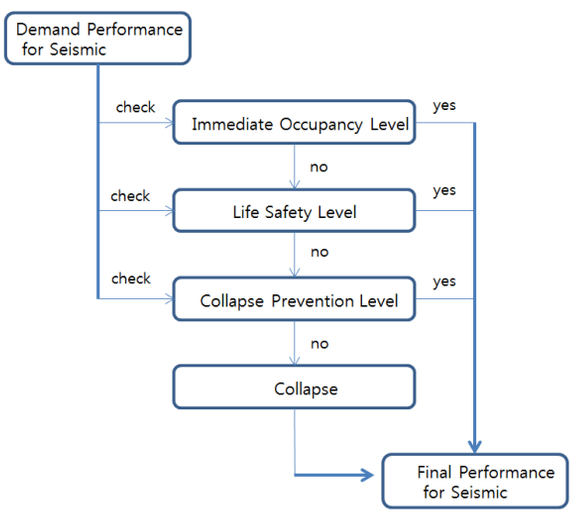

〈Fig. 4〉 Seismic resistance performance evaluation system

최종 평가는 <Table 1>과 같이 목표 요구성능에 대해서 적합한 상태, 위험한 상태, 심각한 상태 등 3개의 등급으로 구분하고 평가점수 범위에 해당하는 등급을 부여하여 최종 등급을 결정한다.

〈Table 1〉 Evaluation level & grade range

| Evaluation level | Evaluation grade | |
|---|---|---|
| | Range | Key grade |
| Adequateness | 0≤x<2 | 1 |
| Danger | 2≤x<4 | 3 |
| Serious danger | 4≤x<6 | 5 |

또한, 본 연구에서의 평가기법은 내진성능평가결과의 적용성을 확보하기 위하여 대상건축물의 목표요구성능을 '기존 시설물(건축물) 내진성능 평가 및 향상요령(국토교통부·한국시설안전공단,2013.12)'[3]에 따라 거주가능(Immediate Occupancy, I.O.), 인명안전(Life Safety, L.S.), 붕괴방지(Collapse Prevention, C.P.)로 구분한 후 <Fig. 5>와 같이 단계별 성능수준에 따라 평가한다.




〈Fig. 5〉 Evaluation flow
(Level of demand performance for seismic)

### 3.1.1 내진안전성 평가기준

내진안전성은 해석프로그램을 이용하여 지진하중에 대해서 구조해석을 실시하고 건축물을 구성하고 있는 기둥, 벽체, 보 또는 슬래브에 대하여 각 부재별 내력비를 산정하여 <Table 2>와 같이 평가한다. 여기서, 내력비는 "안전율(Safety Ratio, SR) = (지진하중강도 ÷ 부재강도)"로 표현한다.

<Table 2>의 평가기준은 '건축물 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침'[4]의 부재 내력의 평가기준을 준용하나, 5단계의 평가기준을 3단계의 평가기준으로 단순화한다. 평가등급 a~c단계는 건축물 내력에 큰 영향을 미치지 않는 단계로서 적합한 단계로 평가하고, d등급은 위험한 단계, e등급은 심각한 단계로 정의한다.

〈Table 2〉 Evaluation criterion of safety for seismic in members

| Evaluation level | Evaluation criterion | Key grade |
|---|---|---|
| Adequateness | SR ≤ 1.11 | 1 |
| Danger | 1.11 < SR ≤ 1.33 | 3 |
| Serious danger | SR > 1.33 | 5 |

또한, 세부지침의 내력평가 기준의 내력비는 '안전율(SR) = (부재강도 ÷ 하중강도)×100%'로 규정되어 d등급은 90% 이상, e등급은 75% 이상으로 구분하였으나, 평가의 용이성, 해석프로그램과의 호환을 위해 역수로 산정한 결과인 $\frac{1}{0.9}$=1.11, $\frac{1}{0.75}$=1.33을 평가기준으로 정한다.

각 부재별로 계산된 내력비는 <Table 3>의 16개 하중조합 결과 중 안전측으로 평가하기 위하여 최대값(내력비중 가장 큰 값을 대표값으로 선정)을 적용하여 평가한다.

〈Table 3〉 Load combination for seismic

| No. | Load combination | Remark |
|---|---|---|
| C1 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)+1.0EX+0.3EY | DL : Dead Load<br>LL : Live Load<br>EX,EY:Earthquake Load |
| C2 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)+1.0EX-0.3EY | |
| C3 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)-1.0EX+0.3EY | |
| C4 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)-1.0EX-0.3EY | |
| C5 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)+0.3EX+1.0EY | |
| C6 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)+0.3EX-1.0EY | |
| C7 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)-0.3EX+1.0EY | |
| C8 | U=1.1(1.0DL+0.25LL)-0.3EX-1.0EY | |
| C9 | U=0.9DL+1.0EX+0.3EY | |
| C10 | U=0.9DL+1.0EX-0.3EY | |
| C11 | U=0.9DL-1.0EX+0.3EY | |
| C12 | U=0.9DL-1.0EX-0.3EY | |
| C13 | U=0.9DL+0.3EX+1.0EY | |
| C14 | U=0.9DL+0.3EX-1.0EY | |
| C15 | U=0.9DL-0.3EX+1.0EY | |
| C16 | U=0.9DL-0.3EX-1.0EY | |

각 부재별로 계산된 내력비의 검토결과 내력비중 가장 큰 값을 대표값으로 선정한 예는 <Table 4>와 같다.

〈Table 4〉 Example of safety ratio for seismic

| Member | Load comb | S.R(Safety Ratio) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Axial | Moment | Shear |
| Column (3F) | C4 | 1.16 | 1.15 | 0.65 |
| Column (2F) | C1 | 1.31 | 1.33 | 0.49 |
| Column (1F) | C1 | 2.46 | 2.48 | 0.81 |

| Member | Load comb | S.R(Safety Ratio) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Moment | | Shear |
| | | End | Mid | |
| Girder (3F) | C8 | 1.09 | 0.44 | 0.65 |
| Girder (2F) | C8 | 1.47 | 0.48 | 0.69 |
| Girder (1F) | C4 | 1.85 | 0.74 | 0.78 |

### 3.1.2 층간변위 평가기준

KBC의 내진등급 특, Ⅰ, Ⅱ를 "기존 시설물(건축물) 내진성능 평가 및 향상요령(국토교통부·한국시설안전공단, 2013.12)"[3]의 성능수준으로 구분한 층간변위의 평가기준은 <Table 5>와 같다.

〈Table 5〉 Evaluation criterion of story displacement

| Evaluation level | Evaluation criterion | | | Key grade |
|---|---|---|---|---|
| | I.O. | L.S. | C.P. | |
| Adequateness | $\delta \leq 0.01hx$ | $\delta \leq 0.015hx$ | $\delta \leq 0.02hx$ | 1 |
| Danger | $0.01hx < \delta \leq 0.0105hx$ | $0.015hx < \delta \leq 0.01575hx$ | $0.02hx < \delta \leq 0.021hx$ | 3 |
| Serious danger | $\delta \geq 0.0105hx$ | $\delta \geq 0.01575hx$ | $\delta \geq 0.021hx$ | 5 |

$\delta$ : Story displacement, hx : Story height

### 3.1.3 노후도 평가기준

'건축물 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토교통부·한국시설안전공단, 2011.12)'[4]에서 철근콘크리트 구조물의 노후도는 부재의 내구성 또는 상태로 평가한다. 내구성 평가에 해당되는 항목은 콘크리트 강도저하, 염화물함유량, 중성화, 균열, 철근부식, 표면노후의 항목으로 구분하고 퍼지집합을 이용하여 내구성을 평가한다.

건축구조물 노후로 인한 내구성과 구조체 안전성의 상호관계에 있어 구조체 안전성에 직접 영향을 미치고 있는 항목은 철근 부식에 의한 단면손실이 가장 크게 해당되므로 본 연구에서의 노후도에 따른 상호관계 정의는 철근의 부식량을 중심으로 하여 평가기준을 <Table 6>과 같이 설정한다.

〈Table 6〉 Evaluation criterion of deterioration

| Evaluation level | Evaluation criterion | | Key grade |
|---|---|---|---|
| | Non-destructive ASTM(㎷) | Visual inspection | |
| Adequateness | E>0, -350<E≦0 | Surface corrosion | 1 |
| Danger | -500<E≦-350 | Section area loss by corrosion (20% below) | 3 |
| Serious danger | E≦-500 | Section area loss by corrosion (20% above) | 5 |

## 3.2 내진성능평가요소별 중요도 설정

<Fig. 4>와 같이 단계별로 실시하는 건축물 내진성능평가는 평가과정에서 축력, 전단력, 휨모멘트 등 하중강도 항목간의 상호작용관계 그리고 기둥, 보, 벽체 등 부재들의 상호작용관계와 1층, 2층, 약층 등 층별 상호작용관계를 정의할 수 있는 척도 마련이 반드시 필요하다.

이를 위해서 건축물 내진성능평가는 건축물 구성요소의 상호작용관계로 인한 영향을 고려하여야 하므로 우선 위의 각 평가개체에 대하여 정의된 중요도가 마련되어야 한다. 각 평가개체의 상호작용관계의 영향은 <Table 7>과 같이 중요도가 부여됨으로서 반영이 가능하게 된다.

〈Table 7〉 Definition of intensity for force

| Member | Force | Definition of intensity | Key grade of intensity | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Column, wall | Axial | Over-whelmingly | 0.9 | Force controlled |
| | Shear | Over-whelmingly | 0.9 | Force controlled |
| | Moment | Greatly | 0.7 | Deformation controlled |
| Girder, slab | Shear | Over-whelmingly | 0.9 | Force controlled |
| | Moment | Greatly | 0.7 | Deformation controlled |

평가항목 및 평가요소들의 상호작용관계를 정의하기 위해 설정되는 중요도는 평가를 수행함에 있어 평가항목 및 평가요소들이 얼마나 중요한지를 언어로서 정의하고 각 언어에 해당되는 계량치의 범위를 결정하여 대표값을 선정할 수 있다.

내진성능평가를 수행하기 위한 중요도 산정은 '건축물 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토교통부·한국시설안전공단, 2011.12)'[4]의 평가체계와 호환될 수 있는 내진성능평가 체계를 마련하기 위하여 <Table 7>과 같이 산정한다.

### 3.2.1 내진안전성 지진하중강도 중요도

기둥, 벽체, 보, 슬래브 등 각 층을 구성하고 있는 부재에 대하여 작용하고 있는 지진하중강도별 상호관계의 영향을 고려하기 위해서 각 부재에 작용하고 있는 외력에 대하여 <Table 7>에서와 같이 파괴형상을 고려하여 중요도를 설정한다.

### 3.2.2 부재 중요도

각 부재의 중요도는 그 부재가 가지고 있는 구조적 기능, 역할을 고려하여 결정하여야 하며, 대표적으로 수식화하여 표현할 수 있는 방법으로 해당 부재가 부담하는 하중면적을 구하여 비율로 표현하여 중요도를 설정한다<Table 8>.

〈Table 8〉 Key grade of intensity for story

| Safety for seismic (0.9)* | | Story displacement (0.7)* | Dete-rioration (0.7)* |
|---|---|---|---|
| Member | Column, wall (0.9)* | | |
| | Girder, slab (0.7)* | | |

( )* : Key grade of intensity

일반적으로 건축물의 경우 수평부재에 비해 수직부재의 중요도를 크게 보고 있다. 이는 수평부재가 파괴되더라도 수직부재가 안전하면 건축물의 붕괴를 방지할 수 있기 때문이다.

### 3.2.3 층별 평가항목 중요도

각 층별 평가항목은 내진안전성, 층간변위, 노후도상태로 구분한다.

각 층의 평가항목을 고려하여 평가하기 위해서는 위 평가항목에 대한 중요도를 선정하여한다.

내진안전성은 내진성능에 가장 직접적인 영향을 미치므로 압도적으로 중요한 중요도(0.9)를 부여하고, 층간변위는 층간변위로 인해 2차 부가하중이 발생될 수 있어 이를 방지하고자 제한을 둔 기준으로서 대단히 중요한 중요도(0.7)를 부여한다.

노후도상태는 철근부식으로 인해 내력저하의 영향을 방지하고자 적용하는 기준으로서 대단히 중요한 중요도(0.7)를 부여한다<Table 8>.

### 3.2.4 각 층별 중요도

각 층별 중요도는 해당 층이 상부층을 얼마만큼 부담하고 있는지를 나타내는 부담비율을 기준으로 <Table 9>와 같이 산정한다.

〈Table 9〉 Definition of intensity for story

| Story | Definition of intensity | Key grade of intensity |
|---|---|---|
| 1F | Overwhelmingly | 0.9 |
| 2F | Greatly | 0.7 |
| nF | Greatly | 0.7 |
| Weak stroy | Overwhelmingly | 0.9 |
| RF | Greatly | 0.7 |

지진으로 인하여 건축물의 피해는 가장 큰 힘을 받고 있는 1층의 내력확보가 가장 중요하지만 상층부에서의 파괴로 인한 연쇄 파괴가 우려되기 때문에 상층부의 중요성도 무시할 수 없다.

그러므로, 본 연구에서의 층별 중요도는 1층을 압도적으로 중요한 것으로 중요도(0.9)를 설정하고, 상부층은 대단히 중요(0.7)한 것으로 설정한다.

또한, 층강도의 불연속으로 약층이 있는 층은 각 층중에서 매우 취약한 층이기 때문에 압도적으로 중요한 중요도(0.9)를 부여한다.

## 3.3 내진성능평가 등급 판정

### 3.3.1 1단계 내진안전성 부재평가

각 부재에 작용하는 지진하중강도 축력, 전단력,

휨모멘트의 상호 유기적 관계를 고려하기 위하여 각 힘에 부여된 중요도를 고려하여 2.1.2의 λ-퍼지 척도를 구하고, 식 (2.3)과 같이 퍼지적분하여 산정한다. <Table 2>, <Table 4>에 따른 해당 층의 내진안전성 평가결과는 아래와 같다.

〈Table 10〉 Evaluation result of safety for seismic

| Story | Member | Force | Grade | Evaluation grade |
|---|---|---|---|---|
| 3F | Column (0.9) | Axial(0.9) | 1 | 1.00 |
| | | Shear(0.9) | 1 | |
| | | Moment(0.7) | 1 | |
| | Girder (0.7) | Shear(0.9) | 1 | 1.00 |
| | | Moment(0.7) | 1 | |
| | 3F evaluation grade of safety for seismic | | | 1.00 |
| 2F | Column (0.9) | Axial(0.9) | 3 | 2.94 |
| | | Shear(0.9) | 3 | |
| | | Moment(0.7) | 1 | |
| | Girder (0.7) | Shear(0.9) | 1 | 3.80 |
| | | Moment(0.7) | 5 | |
| | 2F evaluation grade of safety for seismic | | | 3.71 |
| 1F | Column (0.9) | Axial(0.9) | 5 | 4.89 |
| | | Shear(0.9) | 1 | |
| | | Moment(0.7) | 5 | |
| | Girder (0.7) | Shear(0.9) | 1 | 3.80 |
| | | Moment(0.7) | 5 | |
| | 1F evaluation grade of safety for seismic | | | 4.78 |

- 1층 기둥부재 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1\times1+(5-1)\times0.972+(5-5)\times0.9 = 4.89$$

- 1층 보부재 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1\times1+(5-1)\times0.7 = 3.80$$

- 1층 내진안전성 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 3.80\times1+(4.89-3.80)\times0.9 = 4.78$$

2층, 3층의 기둥, 보부재의 평가결과는 위와 같은 방법으로 실시한다.

### 3.3.2 2단계 층별평가

2단계 층별평가는 <Table 5>의 층간변위 평가결과 값과 <Table 6>의 노후도 상태 평가결과 값, <Table 10>의 층별 내진안전성 평가결과 값의 상호 유기적 관계를 고려하여 아래와 같이 퍼지적분하여 산정한다.

〈Table 11〉 Final result of building for seismic

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3F | Safety for seismic (0.9) | Story displacement (0.7) | Deterioration (0.7) |
| | Grade 1.00 | Grade 1.00 | Grade 1.00 |
| | 3F evaluation grade of story | | **1.00** |
| | Demand performance for seismic | | C.P. |
| | Final result level | | **"Adequateness"** |
| 2F | Safety for seismic (0.9) | Story displacement (0.7) | Deterioration (0.7) |
| | Grade 3.71 | Grade 1.00 | Grade 1.00 |
| | 2F evaluation grade of story | | **3.44** |
| | Demand performance for seismic | | C.P. |
| | Final result level | | **"Danger"** |
| 1F | Safety for seismic (0.9) | Story displacement (0.7) | Deterioration (0.7) |
| | Grade 4.78 | Grade 1.00 | Grade 1.00 |
| | 1F evaluation grade of story | | **4.40** |
| | Demand performance for seismic | | C.P. |
| | Final result level | | **"Serious danger"** |
| Building evaluation grade for seismic | | | **4.25** |
| Demand performance for seismic | | | C.P. |
| Total final result level | | | **"Serious danger"** |

- 3층 내진성능 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1.00\times1+(1.00-1.00)\times0.915 +(1.00-1.00)\times0.7 = 1.00$$

- 2층 내진성능 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1.00\times1+(1.00-1.00)\times0.915 +(3.71-1.00)\times0.9 = 3.44$$

- 1층 내진성능 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1.00\times1+(1.00-1.00)\times0.915 +(4.78-1.00)\times0.9 = 4.40$$

### 3.3.3 3단계 종합내진성능 평가

대상건축물에 대한 종합내진성능 평가는 건축물을 구성하고 있는 층의 평가결과를 퍼지적분하여 평가한다. 최종결과는 <Table 11>과 같다.

- 종합 내진성능 평가점수

$$\int_a h(a) \circ g(\cdot) = 1.00\times1+(3.44-1.00)\times0.977 +(4.40-3.44)\times0.9 = 4.25$$

<Table 11>에서 나타난 바와 같이 붕괴방지(Collapse Prevention, C.P.) 성능수준에서 3층은 적합한 상태로 도출되었으며, 2층은 위험한 상태, 1층은 심각한 상태에 있는 것으로 나타났다.

각 층의 중요도를 고려하여 퍼지적분한 결과 종합내진성능평가지수가 4.25로서 <Table 1>, <Table 11>과 비교할 때 지진발생 시 목표요구성능인 붕괴방지성능수준을 확보하고 있지 못하는 심각한 상태로 판단할 수 있다.

# 4. 결론 및 향후 연구방향

## 4.1 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 건축물의 내진성능 확보측면에서 객관적이고 내진성능평가가 가능하도록 퍼지이론을 적용한 내진성능평가기법을 개발하였다.

첫째, 본 내진성능평가기법은 평가항목별, 하중강도 종류별, 부재종류별, 층별 상호 유기적 관계를 고려하기 위한 평가절차와 기준을 설정하였으며, 최종적으로 내진성능수준에서의 등급과 종합내진성능지수를 도출할 수 있도록 하는 내진성능평가체계를 구축하였다. 본 내진성능평가기법은 현재 국토교통부와 국민안전처에서 서로 상이한 내진성능평가기법을 제안하고 있는 바, 이를 통합할 수 있는 기틀이 될 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 내진성능평가에 포함되는 평가항목별, 하중강도별, 부재종류별, 층별 중요도를 퍼지이론에 따라 설정하고, 해당 평가항목의 평가지수를 결정하여 제안하였으므로, 내진성능보강 시 보강이 필요한 부위를 쉽게 확인하고 성능을 재검토할 수 있는 시스템으로 적용이 가능하다.

셋째, 내진성능평가 결과를 계량화하고 객관화하기 위해 평가요소별 중요도, 퍼지척도, 퍼지적분을 적용하여 종합내진성능지수를 산정하는 평가기법으로서 평가의 용이성을 제고한 것으로 판단된다.

## 4.2 향후 연구방향

본 연구에서 개발된 '퍼지이론을 적용한 기존 중저층 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가기법'의 기능을 확대하고, 범용성과 실용성을 제고하기 위해 철근콘크리트조외에 철골조, 조적조, 목조, 석조 등 각 구조형식에 맞는 퍼지기법을 이용한 내진성능평가기법 연구가 필요하다. 퍼지이론을 적용한 내진성능평가 시스템 개발 시 현재 안전점검 및 정밀안전진단 시 이용하고 있는 종합평가 프로그램과 호환되어야 하며, 내진성능평가기법이 반영될 수 있도록 관련 기준개정을 위한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문을 위한 2017년도 선문대학교의 지원에 감사 드립니다.

## References

1. MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport), Information Center, Building statistics, http://www.eais.go.kr/
2. Kim Dong Hee, "A Study of Structural Safety Performance Evaluation in RC Building Structures", Seoul National University of Science and Technology, pp.99, 2006
3. MOLIT, KISTEC(Korea Infrastructure Safety Technology Corporation),"the Guide of Seismic Resistance Evaluation Method for Buildings", KISTEC, pp. 123, 2013
4. MOLIT, KISTEC "the Guide of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Buildings" pp.176, 2011
5. Kim Dong Hee, Kim Chi Kyoung "the Study of Revision in Evaluation Program for In-depth Safety Inspection", KISTEC, pp76, 2007

6. Federal Emergency Management Agency, "FEMA-310·Handbook for Seismic Evaluation of Buildings-A Prestandard", Washington. D.C, pp.268, 1988
7. MPSS(Ministry of Public Safety and Security), "the Guide-line Seismic Resistance Evaluation for Building" MPSS pp.156, 2013
8. KBC2016, "Building code requirements for structural concrete and commentary", Architectural Institute of Korea, 2016

■ Received : April 03, 2017
■ Revised : April 19, 2017
■ Accepted : April 19, 2017