

국내 기존 조적조 건축물의 내진성능에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Seismic Capacity for Existing Masonry Building in Korea

허 재 상*

Heo, Jae-Sang

이 상 호**

Lee, Sang-Ho

Abstract

In this study, FEM analysis has been performed based on the results from domestic experimental researches regarding to material and member characteristics of masonry. After validation of reliability for the used FEM analysis method, this study is progressed the evaluation of seismic capacity for existing prototype masonry building in Korea. According to the evaluation for the prototype masonry building, the horizontal shear force and the average shear stress are similar to those of previous studies.

요 지

본 연구에서는 국내에서 수행되었던 조적조의 재료특성과 부재특성에 대한 실험연구 결과를 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 본 연구에서 이용한 유한요소 해석 방법에 대한 신뢰성을 확보한 다음, Prototype 조적조 건축물에 적용하여 얻은 내진성능을 분석하여 국내 비보강 조적조 건축물의 지진에 대한 안전성을 평가하고자 하였으며, Prototype 건축물의 해석결과, 수평전단력과 평균 전단응력은 기존의 실험연구와 비슷한 값을 나타냈다.

Keywords : unreinforced masonry, finite element method, push-over analysis, seismic capacity, failure mode

핵심 용어 : 비보강 조적조, 유한요소해석, Push-over 해석, 내진성능, 파괴모드

* 정회원, 부산대학교 건축공학과 대학원 석사

** 정회원, 부산대학교 공과대학 건축학부 교수

E-mail : sangho@pusan.ac.kr 051-510-2359

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라 주거 건물의 많은 부분을 차지하는 기존의 조적조 건축물은 저층으로 명확한 내진설계 지침이 마련되기 전에 대부분 건립되었다. 조적조 건축물의 경우, 구조특성상 수평하중에 대한 저항능력이 매우 약하고 재난관리 시설물 중에서도 지진에 대한 붕괴위험이 높을 것으로 예상된다. 또한 국내의 경우에도 큰 지진의 발생 가능성이 높아짐에 따라 기존 조적조 건축물에 대한 내진성능의 파악 및 이에 대한 대책 마련이 절실히 필요하다.

한편, 국내에서 수행된 비보강 조적조의 내진성능에 대한 실험적 연구는 재료와 부재 요소에 대해서는 일부 수행되었으나, 조적조 건축물에 대해서는 전무한 실정이고, 해석적 연구는 재료 및 부재 요소, 건축물에 대한 연구가 일부 수행되었으나, 재료 및 부재 요소에 대한 타당성 검증이 미비하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 조적조에 대한 기존의 재료 및 부재 요소에 대한 실험연구 결과(이원호 등 2004; 2005)를 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과를 바탕으로 유한요소의 해석방법, 재료 및 부재특성에 대한 해석의 신뢰성을 확보한 다음, Prototype 조적조에 대한 유한요소 해석을 수행하여 국내 비보강 조적조 건축물에 대한 내진성능을 파악하고자 한다.

1.2 기존 연구의 동향

1.2.1 프리즘(Prism) 연구

조적개체와 관련하여 2005년도에 개정된 구조설계기준(대한건축학회, 2005)의 경우에는 대부분 외국기준을 따르고 있는 실정이며, 이는 외국과는 다른 사용재료의 특성으로 인한 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 또한, 구조설계기준 및 시방서에서 요구하는 모르타르(Mortar) 배합비에 대하여 실제 현장에서의 적용성 여부 등의 문제점이 있다. 국내

에서 수행한 프리즘 연구로는 2001년 김희철 등의 지진하중을 고려한 비보강 조적조의 재료특성 평가에 관한 실험연구, 2004년 이원호 등의 조적개체 재료특성에 관한 실험적 연구 등의 재료실험 연구가 있으며, 2001년 이후 조적재료에 대하여 국내 실정에 적합한 기초자료 및 국내 기준의 타당성을 평가하기 위한 연구가 수행되었다.

1.2.2 요소(Element) 연구

비보강 조적조 건축물은 벽돌(Brick)이나 블록(Block), 돌 또는 모르타르 등과 같이 취성적인 재료들로 구성되어 있으므로 비탄성 구간까지 고려해야 하는 등 내진성능 평가에 어려움이 있다. 이에 국내의 경우, 1998년 정병주 등의 조적조 구조물 손상의 지배적 요인인 수평 전단균열을 전제로 하여 벽체의 균열 패턴(Crack pattern)에 관한 실험적 연구, 2002년 노현섭 등의 2층 비보강 조적조 건축물의 지진응답에 대한 실험연구, 2004년 김남희 등의 내진설계가 이루어지지 않은 조적조 건축물의 내진 거동 실험연구, 2005년 이원호 등의 국내 조적벽체의 전단내력식과 평균 전단응력도를 산정하기 위해 비보강 조적벽체의 전단거동 실험연구 등이 있다. 국내에서는 1990년 후반부터 국내 조적조의 요소 특성에 관한 실험적 연구를 수행하여 비보강 조적조의 구조적 요소에 대한 기초적 자료를 제시하고 있다.

1.2.3 조적조의 유한요소 해석연구

국내에서 수행한 조적조에 대한 유한요소 해석 연구로는 1998년 김희철 등의 2층 조적조 건축물의 지진하중에 의한 거동해석 및 균열평가 연구, 2000년 정상훈 등의 저층의 비보강 조적조 건축물의 등가 정적 해석에 관한 연구, 2002년 김장훈 등의 비보강 조적벽체의 면내방향의 내진성능을 조사하기 위하여 면내거동에 관한 연구 등이 있다. 국내에서는 1990년 후반부터 지진에 대한 비보강 조적조 건축물의 거동특성과 안정성을 평가하기 위한 방법으로 유한요소 해석 연구가 수행되었으나, 조적조의

재료특성과 부재특성을 고려하여 실험 연구와의 타당성을 분석하여 신뢰성을 확보한 연구는 전무한 실정이다.

이에, 유한요소 해석을 통하여 국내 비보강 조적조에 대한 기초적 자료를 제시하는 것이 본 연구의 동기라 할 수 있다.

1.3 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 먼저 국내에서 수행된 조적개체와 모르타르의 압축강도, 조적조 프리즘의 압축강도와 탄성계수, 사인장 전단강도 등 조적조의 재료특성과 부재특성에 대한 기존의 실험연구 결과를 조사한다. 이를 바탕으로 유한요소 프로그램인 ANSYS 11.0 (ANSYS, 2007)을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 해석결과와 기존 연구자들이 수행한 실험결과와의 비교·분석을 통하여 본 연구에서 이용한 유한요소 해석방법과 재료 및 부재특성에 대한 신뢰성을 확보한다. 그 다음으로, 국내 비보강 조적조 건축물의 Prototype을 선정하여 대상 건축물에 대한 유한요소 해석적용을 통한 조적조의 내진성능 평가 결과를 분석하여 국내 비보강 조적조 건축물의 내진성능에 대한 기초적 자료를 얻고자 한다.

2. 기존의 재료 및 부재 요소의 내진성능 고찰

2.1 재료 요소에서의 내진성능

조적조는 벽돌과 벽돌들을 서로 연결시켜주는 줄눈재료인 모르타르에 의하여 구성된다. 기본적으로 조적조는 고정하중과 활하중 같은 수직하중을 받으며, 이것은 조적조가 저항하는 기본적인 하중조건이 1축 압축임을 의미한다.

Fig. 1은 조적조 프리즘에 작용하는 응력을 나타낸다.(김희철 등, 2001) Fig. 1(b)는 수평의 응력상태만을 고려하여 벽돌은 인장(+), 모르타르는 압축(-)을 나타내며, 콘크리트 벽돌과 모르타르 줄눈에 3축 응력상태가 발생한다는 것이 알려져 있고 (Dialer, 1999), Fig. 1(c)는 콘크리트 벽돌과 모르

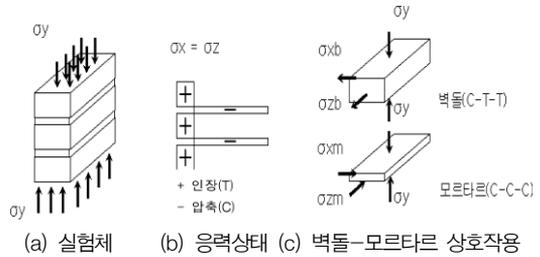


Fig. 1 조적조 프리즘에 작용하는 응력⁽⁴⁾

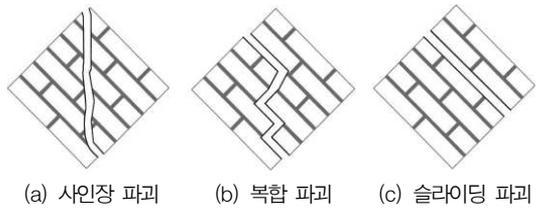


Fig. 2 조적조 사인장 전단강도에 따른 파괴형태 분류⁽⁴⁾

타르에 작용하는 응력은 수직으로 압축력이 작용하고 수평의 2축으로 인장력이 작용하게 되며 (C-C-T), 반면에 모르타르는 콘크리트 벽돌의 작용에서 강도에 따른 변형률, 즉 포아송비의 차이로 인해 3축 압축이 작용하게 된다(C-C-C).

사인장 조적조의 최종 파괴형태는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 사인장 파괴, 복합 파괴, 슬라이딩 파괴 등으로 나누어진다.(김희철 등, 2001)

2.2 부재 요소에서의 파괴모드 및 전단강도식

2.2.1 파괴모드

일반적으로 조적벽체의 파괴형태는 조적개체의 재료적 성질만이 아니라, 단부 구속조건, 벽체의 형상비, 작용하중의 크기 및 형태 등에 따라 달라지며, FEMA 273(FEMA 273, 1997)과 FEMA 306(FEMA 306, 1999)등은 주요 파괴모드를 Fig. 3과 같이 4가지로 구분한다.

1) 강체회전 파괴모드

강체회전(Rocking) 파괴모드는 재료의 전단강도가 높고 벽체가 세장하며 벽체 윗부분의 압축강도가 낮을 경우 발생하기 쉽고, Fig. 3(a)와 같이 힘으로

인한 균열이 벽체끝단 모서리에서 발생이 된 후 벽체는 벽체 끝단에 대해 회전 강체와 같이 거동하는 균열형태이다.

2) 수평줄눈의 미끄러짐 파괴모드

수평줄눈의 미끄러짐(Sliding) 파괴모드는 Fig. 3(b)와 같이 수평줄눈의 모르타르 접합부 파괴로 인한 벽체의 균열형태이다. 횡하중에 대한 저항능력은 수평줄눈의 모르타르 접합부 부분의 접착능력과 수직하중의 크기에 따라 결정되며, 모르타르 접합부의 파괴 이후에는 수직하중에 의한 마찰력만이 횡하중 저항성능을 가진다.

3) 사인장 파괴모드

사인장(Diagonal tension) 파괴모드는 Fig. 3(c)와 같이 수직벽체가 수평하중과 수직하중을 받을 경우 대각선 방향의 균열이 발생하는 형태이며, 균열은 모르타르 줄눈의 접합부 또는 조적개체에서 발생할 수 있다.

4) 단부 압축 파괴모드

단부 압축(Toe crushing) 파괴모드는 Fig. 3(d)와 같이 인장을 받는 조적벽체의 끝단 모서리에서 휨균열이 발생하고, 횡하중이 증가하면서 압축을 받는 조적벽체 끝단에서 압축파괴가 발생하는 균열형태이다.

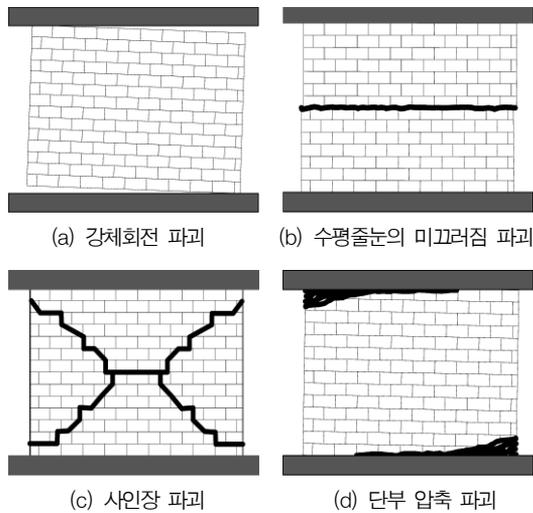


Fig. 3 조적벽체의 파괴 모드⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

2.2.2 전단강도식

FEMA 273과 FEMA 306에서는 전술한 4가지 파괴모드에 대하여 다음과 같은 전단강도식들을 제안하고 있으며, 이중 가장 작은 값을 적용한다.

$$\text{강체회전 파괴} : V_r = 0.9aP\left(\frac{l}{h}\right) \quad (1)$$

$$\text{수평줄눈의 미끄러짐 파괴} : V_s = v_{me}A_n \quad (2)$$

$$\text{사인장 파괴} : V_{dt} = f_{dt}A_n\left(\frac{l}{h}\right)\sqrt{1+\frac{f_a}{f_{dt}}} \quad (3)$$

$$\text{단부 압축 파괴} : V_{tc} = aP\left(\frac{l}{h}\right)\left(1-\frac{f_a}{0.7f'_m}\right) \quad (4)$$

여기서, P : 축하중, l : 벽체길이, h : 벽체높이.

f'_m : 조적조 압축강도, f_a : 축응력,

f_{dt} : 대각인장응력($0.05f'_m$), a : 경계조건,

v_{me} : 수평줄눈의 미끄러짐 전단강도,

A_n : 순단면적

3. 조적개체에 대한 유한요소 해석의 적용성

3.1 조적개체의 유한요소 해석 개요

기존 비보강 조적조 건축물의 유한요소 해석을 수행하는데 중요한 요소를 차지하는 것이 해석에 사용되는 적절한 모델기법과 재료특성을 결정하는 것이다. 재료시험을 수행하여 결정된 재료특성은 약산법을 통한 건축물의 평가와 각 부재의 성능을 결정짓는데 필수적인 요소가 되기 때문에 가능한 정확한 특성값이 요구된다.

여기에서는 조사된 기존의 실험연구 결과를 바탕으로 조적조의 재료특성을 고려하여 부재특성에 대한 신뢰성을 검토하는데 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS 11.0을 이용하며, 신뢰성의 검토 방법은 분리균열 모델(Discrete crack model) 기법으로 재료

특성에 대한 해석을 수행한 결과와 기존의 실험연구 결과와 비교하여 해석방법에 대한 타당성을 확보한다. 한편, 분리균열 모델기법은 복잡한 조적조 구조물에 적용하기에는 시간적으로나 해석을 수행하기에 많은 절점과 요소가 필요해 효율적이지 못하므로, 이에 대한 대안의 한 방법으로 분포균열 모델(Smeared crack model) 기법으로 해석을 수행한 결과를 분리균열 모델기법과의 해석결과를 비교·분석하여 분포균열 모델의 재료특성의 선정과 모델기법에 대한 신뢰성을 검토한다.

3.2 해석대상 시험체의 개요

3.2.1 조적조 프리즘

조적조 프리즘은 Hendry(Hendry, 1981; 1987)의 제안에 준하는 시험체로 압축방향은 실제로 하중을 받는 방향으로 전체면에 고르게 가하며, 해석모델의 형상은 Fig. 4 (a)와 같다.

3.2.2 사인장 조적조

사인장 조적조는 ASTM E 519-81(Standard Test Method for Diagonal Tension Shear in Masonry Assemblages)(ASTM, 1996)에 명시되어 있는 내용을 참조하여 시험체 상하에 V형 구좌를 설치하여 고정시킨 시험체를 계획하며, 가력방법은 시험체 중앙부를 가력하여 완전히 파괴시까지 하중을 가한다. 해석모델의 형상은 Fig. 4(b)와 같다.

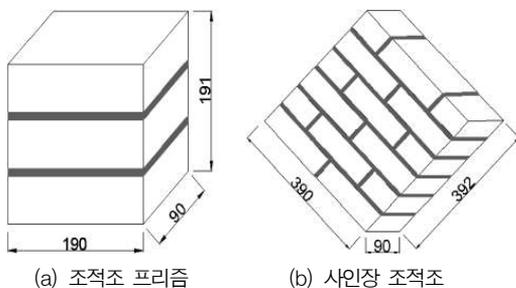


Fig. 4 해석모델의 형상(단위:mm)⁽⁴⁾

3.3 분리균열 모델기법에 의한 유한요소 해석

3.3.1 해석 개요

분리균열 모델기법은 접촉면 요소(Interface element 또는 Gap element)를 사용하여 접촉면에서의 응력이 재료의 인장강도를 초과하게 되면 접촉면을 중심으로 한 요소들이 접촉면으로부터 서로 미끄러지거나 분리되는 해석 방법이다.

조적조 프리즘의 해석모델은 재료의 비선형을 고려하기 위하여 Solid 65 요소를 사용하고, Fig. 4(a)와 같이 3개의 벽돌과 2개의 벽돌 층 사이의 10mm 두께의 모르타르로 구성된다. 하중재하 방법은 실제 하중을 받는 중력방향으로 전체면에 고르게 작용되는 형태로 하며, 해석모델의 하단부는 UX, UY, UZ 3방향의 자유도를 모두 구속하여 모델링한다. 사인장 조적조는 Fig. 4(b)와 같이 6개 층의 벽돌과 5개 층의 모르타르로 390mm×90mm×392mm의 마름모 형태로 구성되며, 하중재하 방법은 시험체 중앙부를 가력하여 해석모델이 완전 파괴시까지 하중을 가하는 형태로 하며, 해석모델의 하단부는 UX, UY, UZ 3방향의 자유도를 모두 구속하여 모델링한다.

분리균열 모델에 의해 사용되는 재료의 물성치는 Table 1에 나타낸다. 압축강도와 탄성계수는 주어진 여건에 따라 넓은 범위에 걸쳐 그 값이 분포될 수 있으므로 기존의 실험연구(이원호 등, 2004)에 근거하여 설정하고, 포아송비는 기존의 연구(김장훈, 2002)를 참조하여 0.15, 부착강도는 기존 실험연구 결과(이원호 등, 2004)를 참조하여 0.6MPa, 조적조의 인장강도는 기존의 실험결과(Tomazevic, 1999)를 참고하여 $f_t' \approx 0.03f_m'$ 로 가정한다.

Table 1 분리균열 모델의 재료특성

	벽돌	모르타르
탄성계수(MPa)	1,844	1,771
포아송비	0.15	0.15
압축강도(MPa)	15.4	9.6
인장강도(MPa)	0.46	0.29
부착강도(MPa)	0.6	0.6

조적조 프리즘과 사인장에 대한 하중 재하방법은 하중증분에 따른 오차를 해결하기 위하여 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하며, 해석 모델이 압축 및 전단파괴에 도달하도록 점진적으로 가하는 하중제어 방법을 이용하여 해석을 수행한다.

3.3.2 실험결과와 분리균열 모델기법의 해석결과 비교

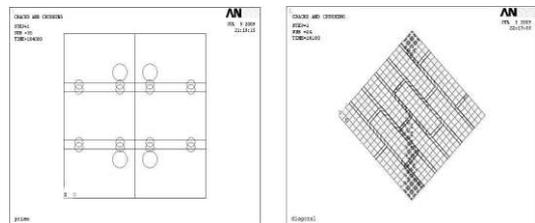
조적조 프리즘과 사인장 조적조의 기존 실험결과 (1)(벽돌 15.4MPa, 모르타르 9.6MPa)와 분리균열 모델기법의 해석결과를 비교하여 Table 2와 Table 3에 나타낸다. 조적조 프리즘의 분리균열 모델에 의한 해석의 최대하중이 184kN, 압축강도가 10.76MPa로 나타났으며, 기존의 실험값과 분리균열 모델의 비는 각각 0.98로 나타났다. 사인장 조적조는 분리균열 모델에 의한 최대하중의 해석값이 18.10kN, 전단응력이 0.64MPa로 나타났으며, 기존의 실험값과 분리균열 모델의 비는 각각 0.99로

Table 2 조적조 프리즘의 실험 및 분리균열 모델 해석결과

	실험값	분리균열 모델 해석값	실험값/해석값
최대하중(kN)	180.92	184.00	0.98
압축강도(MPa)	10.58	10.76	0.98

Table 3 사인장 조적조의 실험 및 분리균열 모델 해석결과

	실험값	분리균열 모델 해석값	실험값/해석값
최대하중(kN)	17.86	18.10	0.99
전단응력(MPa)	0.63	0.64	0.99



(a) 조적조 프리즘 (b) 사인장 조적조

Fig. 5 분리균열 모델에 의한 파괴형상

나타났다.

Fig. 5는 분리균열 모델의 해석방법으로 유한요소 해석을 수행한 결과의 파괴형상을 나타낸다. 조적조 프리즘의 파괴형상을 살펴보면, 벽돌과 모르타르의 접합부 및 모르타르에서 파괴가 발생하였고, 사인장 조적조의 파괴형상은 하중을 가하는 중력방향으로 사인장 균열 형태의 파괴가 발생하였다.

조적조 프리즘과 사인장 조적조에 대하여 실험결과와 분리균열 모델의 해석방법으로 산출한 해석값의 오차는 2% 이내이고 파괴형상도 유사하여, 실험에 대한 유한요소 해석에서 분리균열 모델방법의 적용성이 어느 정도 확보되었다고 판단된다.

3.4 분포균열 모델기법에 의한 유한요소 해석

3.4.1 해석 개요

분포균열 모델기법은 요소내의 응력이 재료의 인장강도를 초과하게 되면 주인장응력에 따라 균열이 발전하는 것으로 간주하며, 이 때 균열성분은 요소 내에 고르게 분포된 것으로 균열의 벌어짐과 닫힘에 의한 비선형 효과를 요소에 포함시킨 모델의 해석 방법이다.

조적조 프리즘의 해석모델은 분리균열 모델과 같이 재료의 비선형을 고려하기 위하여 Solid 65 요소를 사용하며, 벽돌과 모르타르는 각각 모델링하지 않고 하나의 개체로 가정하여 190mm×90mm×191mm의 직사각형 형태로, 사인장 조적조는 390mm×90mm×392mm의 마름모 형태로 모델링하며, 하중재하 방법과 하중제어 방법은 분리균열 모델과 같은 방법으로 한다.

분포균열 모델에 사용된 재료특성은 벽돌과 모르타르로 구성된 조적조가 거동함에 있어 벽돌과 모르타르의 영향을 동시에 받지만, 특히 모르타르의 영향이 더 우세하다고 판단하여 재료특성을 설정한다. 분포균열 모델에 사용된 재료특성은 주로 모르타르의 재료특성을 설정하며, 조적조의 줄눈 파괴시 모르타르보다는 벽돌과 모르타르의 접합부에서 대부분의 파괴가 발생하므로 모르타르의 인장강도를 변

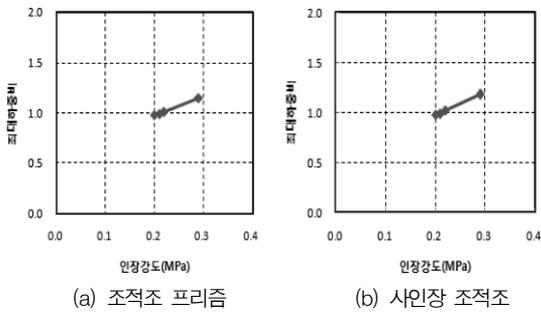


Fig. 6 인장강도를 변수로 한 분포균열 모델의 해석결과

Table 4 조적조 프리즘의 분리균열 모델 및 분포균열 모델의 해석결과

	분리균열 모델	분포균열 모델	분포균열 모델 해석값/ 분리균열 모델 해석값
최대하중(kN)	184.00	183.00	0.99
압축강도(MPa)	10.76	10.70	0.99

Table 5 사인장 조적조의 분리균열 모델 및 분포균열 모델의 해석결과

	분리균열 모델	분포균열 모델	분포균열 모델 해석값/ 분리균열 모델 해석값
최대하중(kN)	18.10	17.90	0.99
전단응력(MPa)	0.64	0.63	0.99

수로 하여 해석을 수행한다.

조적조 프리즘과 사인장 조적조에 대한 재료특성 중 모르타르의 인장강도를 변수로 하여 분포균열 모델과 분리균열 모델의 최대하중비를 비교하여 Fig. 6과 같이 나타내며, 분포균열 모델의 재료특성에 적절한 인장강도는 모르타르 인장강도의 약 72%(0.21 MPa) 정도가 적당하다고 판단된다.

3.4.2 분리균열 모델과 분포균열 모델기법의 해석결과 비교

조적조 프리즘과 사인장 조적조의 분리균열 모델과 분포균열 모델기법의 해석결과를 비교하여 Table 4와 Table 5에 나타낸다. 조적조 프리즘의 분포균열 모델에 의한 최대하중의 해석값이 183 kN , 압축강도가 10.7 MPa 로, 사인장 조적조의 분포균열 모

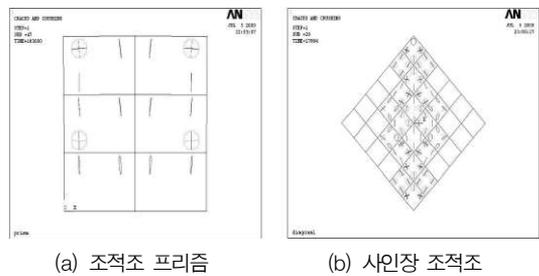


Fig. 7 분포균열 모델에 의한 파괴형상

델에 의한 해석의 최대하중이 17.9 kN , 전단응력이 0.63 MPa 로, 분리균열 모델의 해석값과 분포균열 모델의 해석값의 비는 각각 0.99로 나타났다.

Fig. 7은 분포균열 모델의 해석방법으로 유한요소 해석을 수행한 결과의 파괴형상을 나타낸다. 조적조 프리즘의 파괴형상은 분리균열 모델의 해석결과와 달리 벽돌과 모르타르의 일체화된 파괴형상이 발생하였으며, 사인장 조적조의 파괴형상은 균열이 사인장 형태로 넓게 분포되는 경향이 있으나, 분리균열과 비슷한 유형의 파괴형상인 사인장 균열이 발생하였다.

조적조 프리즘과 사인장에 대하여 분리균열 모델과 분포균열 모델의 해석방법으로 산출한 해석값의 오차가 1% 이내로, 해석결과에 따라 분리균열 모델에 대한 분포균열 모델의 모델방법 및 재료특성에 대하여 어느정도 신뢰성을 확인되었다고 판단된다.

본 연구에서 진행하는 조적조의 유한요소 해석에 관한 연구방법으로 벽돌을 등방성 탄성요소로, 모르타르 줄눈은 접촉면 요소로 하며, 모든 벽돌과 모르타르를 각각 모델링해야 하는 실용적이지 못한 분리균열 모델의 방법보다는 하나의 재료특성으로 균열의 벌어짐과 닫힘에 의한 비선형 효과를 요소에 포함시킨 분포균열 모델 방법을 이용하며, 이때 적절한 재료특성을 사용하면 효율적인 해석이 가능하다고 판단된다.

4. 분포균열 모델을 이용한 조적벽체의 유한요소 해석

4.1 해석대상 모델의 개요

Table 6 시험체 일람표(이원호 등, 2005)

시험체명	크기 (m)	형상비 (h/l)	축응력 (MPa)	예상전단응력(MPa)			
				τ_r	τ_{lc}	τ_s	τ_{dt}
W-1.2-L2-a	1.2×2.7	2.25	0.254	0.058	0.060	0.179	0.292
W-1.8-L2-a	1.8×2.7	1.50	0.254	0.075	0.079	0.179	0.283
W-2.7-L2-a	2.7×2.7	1.00	0.254	0.115	0.120	0.179	0.424
W-3.6-L2-a	3.6×2.7	0.75	0.254	0.146	0.153	0.179	0.419

W - 2.7 - L2 - a

시험체길이(h/l) 축응력 쌓기방법
 3.6m (0.75) L2 : 0.254(MPa) a : 1.0B 쌓기
 2.7m (1.0)
 1.8m (1.5)
 1.2m (2.25)

지진에 대하여 실제의 조적조 건축물은 개구부와 함께 조적벽체의 크기와 형상에 따라 구조물의 거동에 상당한 차이가 발생하기 때문에, 본 장에서는 조적벽체의 유한요소 해석에 대한 타당성의 검토를 위하여 해석대상 모델은 조적벽체의 형상비를 변수로 한 기존의 실험연구(이원호 등, 2005)를 선정하며, 기존의 각 시험체별 예상 전단응력 및 파괴모드는 Table 6에 나타낸다. 기존 실험에서의 재료특성은 벽돌이 15.4MPa, 모르타르가 8.2MPa이었다. 여기에서는 조적벽체의 가력에 대한 기존의 실험결과와 본 연구에서 수행한 해석결과를 비교하여 부재 요소에 대한 유한요소 해석의 신뢰성을 확보하고자 한다.

4.2 비보강 조적벽체의 해석

비보강 조적벽체의 유한요소 해석 적용을 위하여 2.7m의 높이로 1.0B(두께 190mm) 형식으로 모델링한다. 조적벽체의 위·아래는 가력실험과 같이 강판으로 구성하며, 하부 강판은 조적벽체의 수평 및 수직 변위에 대하여 구속하고 상부 강판은 중력 방향의 하중과 수평력을 전달하도록 한다. 해석에 사용된 변수는 개구부가 없는 조적벽체의 형상비로, W-2.7-L2-a 시험체를 기준으로 조적벽체의 높이를 2.7m로 일정하게 유지하면서 길이를 변화시킨다.

사용된 유한요소 프로그램은 ANSYS 11.0이며,

Table 7 분포균열 모델의 재료특성

탄성계수 (MPa)	포아송비	인장강도 (MPa)	압축강도 (MPa)
1,771	0.15	0.18	8.2

Table 8 강판(Shell 143)의 재료특성

종류 (SWPC7B)	탄성계수 (MPa)	항복강도 (MPa)	포아송비	변형률 경화계수
SS400	2.0×10^5	235	0.3	2.0×10^3

재료의 비선형을 고려하기 위하여 조적개체는 Solid 65 요소를 사용하고 조적벽체의 뒤틀림을 막기 위해 조적벽체의 상·하부에 설치한 강판은 Shell 143요소를 사용한다. 조적개체에 적용한 재료특성은 3장에서 조적조 프리즘과 사인장 조적조의 유한요소 해석에 의해 신뢰성을 확보한 방법으로 인장강도를 변수로 한 해석결과를 사용하고(Table 7 참조), 강판은 Table 8의 재료특성을 사용한다. 사용한 메쉬(Mesh)의 크기는 200mm×200mm이며, 조적벽체 모델의 격자는 조적벽체의 실제 줄눈의 형상에 따라 나누지 않고 통줄눈의 형태로 나눈다.

조적벽체에 대한 수평하중의 재하방법은 변위제어법으로, 먼저 중력방향으로 하중(축응력 0.254MPa)을 가하여 정적해석을 마친 상태에서 시험체 바닥면에서 가력점까지의 높이가 2.7m의 0.025%를 기준으로 횡방향으로 변위를 증가시키면서 해석을 수행한다.

4.3 기존 실험결과와 해석결과의 비교·분석

기존 비보강 조적벽체의 각 시험체별 실험결과에 따른 파괴형상은 W-1.2-L2-a 시험체의 경우는 강제회전 거동을, W-1.8-L2-a과 W-2.7-L2-a 시험체는 강제회전 및 단부 압축 거동을, W-3.6-L2-a 시험체는 강제회전, 단부 압축 및 수평줄눈의 미끄러짐 거동이 복합적으로 발생하였다⁽²⁾. 해석결과에 따른 파괴형상은 W-1.2-L2-a, W-1.8-L2-a, W-2.7-L2-a, W-3.6-L2-a 시험체 모두 강제회전과 사인장 균열에 따른 단부 압축의 복합적인

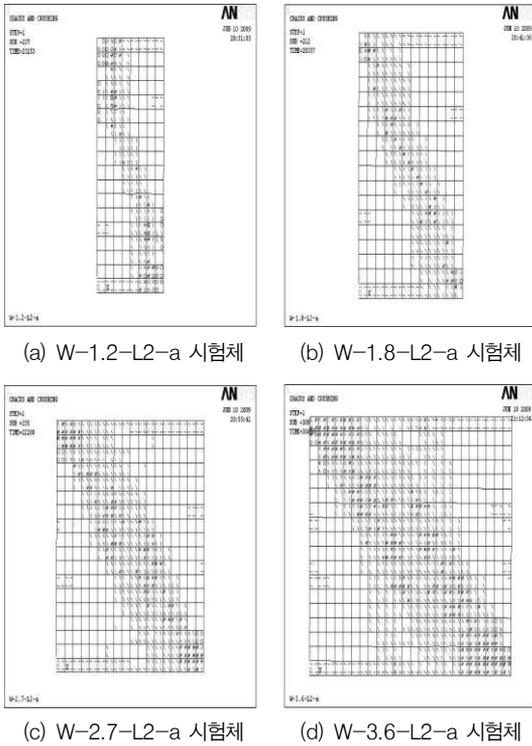


Fig. 8 조적벽체의 Crack mode

거동이 발생하였고, 해석결과에 따른 최종 Crack mode를 Fig. 8에 나타낸다.

4.3.1 하중-변위 관계

비보강 조적벽체의 형상비를 변수로 한 유한요소 해석결과의 하중-변위 관계를 비교하여 Fig. 9에 나타낸다. 형상비가 1.0보다 상대적으로 큰 W-1.2-L2-a 시험체는 강제회전 거동에 따른 벽체의 회전으로 작용하는 횡하중에 비하여 변위가 크게 발생하였다. 형상비가 상대적으로 작은 W-3.6-L2-a 시험체의 경우에는 강제회전과 사인장 균열로 인한 단부 압축의 복합적인 파괴형상이 발생하였으며, 다른 시험체에 비해 강도와 강성이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 형상비가 높을수록 조적벽체가 세장하게 되어 휨 강성 및 전단 강성이 감소되어 낮은 강도와 큰 변위가 발생하는 것으로 판단된다. 그리

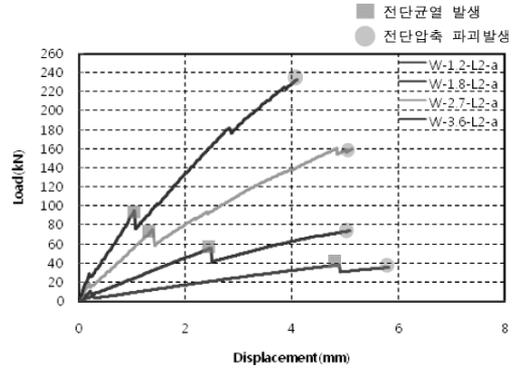


Fig. 9 조적벽체의 시험체별 하중-변위 관계

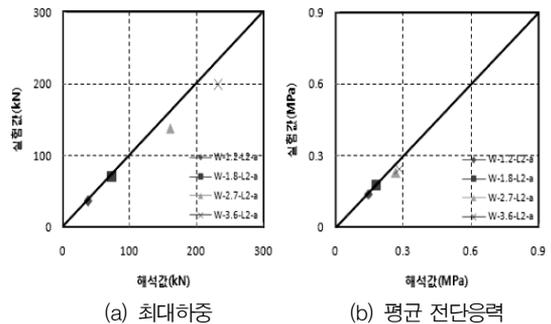


Fig. 10 조적벽체의 최대하중과 평균 전단응력의 결과 비교

고 4가지 시험체 모두, 조적벽체 상·하부와의 초기 균열 발생과 좌측상부에서 우측하단 방향으로 사인장 균열이 발생하는 시점에서 변위의 증가에 비해 작용하는 하중이 급격히 감소하였다가 다시 증가하는 현상이 발생하였다.

4.3.2 조적벽체의 최대하중과 평균 전단응력

해석모델에 대한 각 조적벽체 시험체의 최대하중과 평균 전단응력을 기존 실험값과 해석값을 비교하여 Table 9에 나타내고, Fig. 10은 최대하중과 평균 전단응력의 실험값/해석값을 비교한 것이다. 최대하중의 실험값/해석값은 0.85~0.96으로, 평균 전단응력의 실험값/해석값은 0.86~0.96으로 나타나 조적벽체의 형상비에 따라 약간의 오차는 있으나, 오차범위 최대 15% 이내로 실험값과 대체적으로 비슷하게 나타났다.

조적조 건축물은 수많은 벽돌과 모르타르가 복합적으로 구성되어 있어 실제 건축물의 모형으로 모델링을 할 경우, 많은 요소와 절점이 소요될 뿐만 아니라 장시간의 해석시간이 요구되므로 보다 효율적인 해석을 위하여 3장의 조적조 프리즘과 사인장, 4장의 비보강 조적벽체의 유한요소 해석에서 모델 기법과 재료특성에 대한 연구를 수행하여 신뢰성을 확보한 분포균열의 모델기법과 Table 7의 재료특성을 사용하여 해석을 수행한다.

ANSYS 11.0의 유한요소 프로그램을 사용하여 해석을 수행하며 재료의 비선형을 고려하기 위하여 조적개체는 Solid 65 요소를 사용하고, 슬라브는 철근과 콘크리트를 대신해서 슬라브를 하나의 강체로 설정하여 Shell 143 요소를 사용한다. 지반과의 경계조건은 UX, UY, UZ의 3방향의 자유도를 모두 구속하고 외벽은 1.0B로, 내벽은 0.5B 또는 1.0B를 사용한다. 인방보는 없는 것으로 하며, 사용한 메쉬의 크기는 비보강 조적벽체의 해석모델과 같이 200mm×200mm로 격자는 통출눈의 형태로 모델링한다.

Prototype 조적조의 해석방법은 비보강 조적벽체의 해석방법과 같이 중력방향으로 하중을 가하여 정적해석을 마친 상태에서 대상 건축물의 바닥면에서 가력점까지의 높이 7.5m의 0.1%를 기준으로 변위 제어 방식으로 비선형 정적해석을 X(장변방향)-Y(단변방향) 방향으로 각각 수행하여 X-Y 방향에 대한 하중-변위 관계 곡선을 구하고 내진성능을 평가한다.

5.3 Prototype 조적조의 해석결과

Prototype 조적조에 대한 유한요소 해석결과로 얻은 X-Y 방향의 하중-변위 관계를 건축구조설계기준⁽³⁾에서 제시한 값과 비교하여 Fig. 13에 나타낸다.

해석결과에 따른 전단균열은 X 방향이 361.8kN, Y 방향이 455.9kN에서 발생하였고, 최대하중은 X 방향이 894.9kN, Y 방향이 1,210.5kN으로 나타났

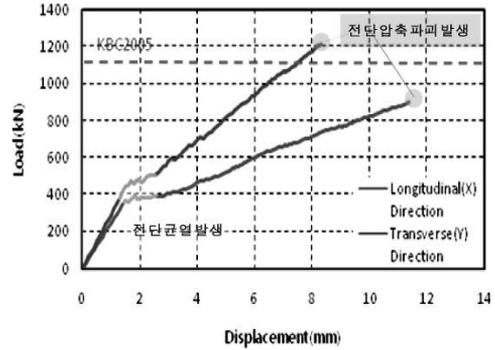


Fig. 13 Prototype 조적조의 하중-변위 곡선

다. 건축구조설계기준에서 제시한 식(5)와 식(6)의 방법으로 Prototype 조적조의 최대 수평전단력을 계산한 결과 1,129.2kN 값으로 나타났으며, 해석결과와 비교하면 X 방향에 대해서는 제시한 값보다 내진성능이 부족한 것으로 나타나지만 Y 방향에 대해서는 내진성능을 만족시키는 것으로 나타났다.

X 방향에 대한 평균 전단응력은 0.17N/mm², Y 방향에 대한 평균 전단응력은 0.18N/mm²으로 나타나 기존의 연구(강대원 등, 2007)에서 제시한 무개구부 조적벽체의 평균 전단응력인 0.2N/mm²과 비슷하게 나타났으며, X 방향은 층간변위각 $R = 1/658 \text{ rad}$ Y 방향은 $R = 1/902 \text{ rad}$ 정도에서 전단파괴가 발생되었다.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (5)$$

여기서, F_i : i 층 바닥에 작용하는 지진력

$$F_x = \frac{w_x h^{k_x}}{\sum_{i=1}^n w_i h^{k_i}} V \quad (6)$$

여기서, k : 건축물 주기에 따른 분포계수

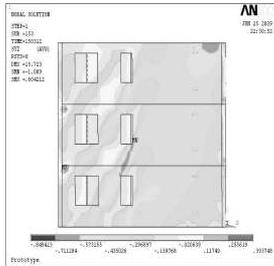
$k = 1$: 0.5초 이하의 주기를 가진 건축물

$k = 2$: 2.5초 이상의 주기를 가진 건축물

단, 0.5초와 2.5초 사이의 주기를 가진 건축물에서는 k 는 1과 2 사이의 값을 직선보간하여 구한다.

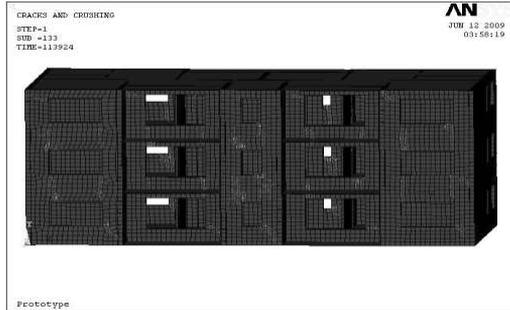


(a) X-Direction

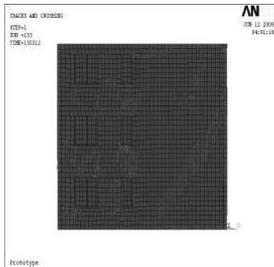


(b) Y-Direction

Fig. 14 Prototype 조적조의 전단응력 분포



(a) X-Direction



(b) Y-Direction

Fig. 15 Prototype 조적조의 파괴형상

h_i, h_x : 밑면으로부터 i 또는 x 층까지의 높이

V : 밑면 전단력

w_i, w_x : i 또는 x 층 바닥에서의 중량

n : 층수

Fig. 14는 X-Y 방향에 대한 전단응력의 Contour를 보여주고 있으며, 전단응력의 분포는 X 방향이 $-0.35 \sim 0.81 N/mm^2$, Y 방향이 $-0.85 \sim 0.39 N/mm^2$ 에서 발생하였으며, 주로 개구부 주위에서 변위를 가하는 대각선 방향으로 최대 전단응력이, 바닥판에서 최소의 전단응력이 발생하였다.

Fig. 15는 X-Y 방향에 대한 파괴모드의 균열양상에 대해 나타내며, 각 층의 상·하부에서 수평 균열이 발생한 후 변위가 증가함에 따라 개구부 주위에서 전단균열이 집중되어 발생하였다.

6. 결론

본 연구에서는 국내 주거건축물의 많은 부분을 차지하고 있는 조적조 건축물에 대한 내진성능을 해석적으로 파악하고자 조적조 프리즘과 사인장 조적조에 유한요소 해석을 통한 모델방법 및 재료특성에 대한 적용성을 검토하고, 이를 비보강 조적벽체에 적용시켜 부재요소에 대한 해석방법의 신뢰성을 확보한 다음, 선정된 대상 조적조 건축물에 적용하여 유한요소 해석을 수행하고 해석결과를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 조적조 프리즘과 사인장 조적조에 대해 분리균열 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과, 기존 실험연구와 1% 이내의 범위에서 오차가 발생하여 유한요소 해석에 대한 적용성을 확인하였다.

2) 조적조 프리즘과 사인장 조적조에 대해 분포균열 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과, 분리균열 모델의 해석결과와 2% 이내에서 오차가 발생하여 분포균열 모델의 재료특성 및 해석방법에 대한 유한요소 해석의 신뢰성을 확보하였다.

3) 비보강 조적벽체의 유한요소 해석결과, 시험체 대부분이 기존의 실험연구 결과와 비슷한 유형의 파괴형상이 발생하였으며, 형상비별 초기강성비는 0.85

~0.91로, 최대하중 및 평균 전단응력의 실험값/해석값은 0.85~0.96으로 나타나 기존의 실험연구와 비슷한 결과값을 나타내었다.

4) Prototype 조적조의 유한요소 해석결과, 개구부 주위에서 최대 전단응력이 작용하였고 전단균열이 집중되어 발생하였으며, 평균 전단응력은 X 방향이 $0.17N/mm^2$, Y 방향이 $0.18N/mm^2$ 으로 각각 나타나, 기존의 연구에서 제시한 무개구부 조적벽체의 평균 전단응력인 $0.2N/mm^2$ 과 비슷하게 나타났다.

5) Prototype 조적조의 유한요소 해석결과, 최대하중은 X 방향이 $894.9kN$, Y 방향이 $1,210.5kN$ 으로 각각 나타났으며, 구조설계기준에서 제시한 최대 수평전단력은 $1,129.2kN$ 으로, 해석결과와 비교하면 X 방향에 대해서는 제시한 값보다 내진성능이 부족한 것으로, Y 방향에 대해서는 내진성능을 만족시키는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구 되었음

참고문헌

1. 강대언, 이원호, 송동엽, “국내 조적조 건물의 내진성능 평가 방법”, 콘크리트학회지 19권 5호, 2007. 9.
2. 권기혁 외, “조적조 건축물에 대한 내진 보강 방안”, 서울특별시, 2001. 6.
3. 김남희, 김재관, “비보강 조적조의 동적거동”, 한국지진공학회 논문집 8권 5호(통권 39호), pp. 1-14, 2004. 10.
4. 김장훈, 권기혁, “비보강 조적벽체의 면내거동 해석”, 한국지진공학회 논문집, 6권 3호(통권 25호), pp. 1-10, 2002. 6.
5. 김희철, 김관중, 박진호, 홍원기, “지진하중을 고려한 비보강 조적조의 재료특성 평가에 관한 실험연구”, 한국지진공학회 논문집 5권 2호(통권 18호), pp. 93-101, 2001. 4.
6. 김희철, 이경훈, “2층 조적조의 지진하중에 의한 거동 해석 및 균열평가”, 한국지진공학회 논문집, 2권 4호

- (통권 8호), pp. 179-190, 1998. 12.
7. 노현섭, 최성모, 권기혁, “2층 비보강 조적조 건축물의 지진응답에 대한 실험연구”, 대한건축학회 논문집, 구조계, 18권 4호(통권 162호), pp. 59-66, 2002. 4.
8. 대한건축학회, “건축구조설계기준”, 2005.
9. 이원호, 이정환, 강대언, 양원직, “조적개체 재료특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 구조계, 20권 12호(통권 194호), pp. 45-52, 2004. 12.
10. 이원호, 이정환, 오상훈, 양원직, 강대언, “비보강 조적벽체 전단내력 평가에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 구조계, 21권 10호(통권 204호), pp. 3-10, 2005. 10.
11. 정상훈, 김관중, 김희철, “비보강 조적조 건물의 등가정적 해석에 관한 연구”, 한국지진공학회 논문집 4권 3호(통권 15호), pp. 1-10, 2000. 9.
12. 정병주, 김윤일, “조적벽의 전단내력과 보수효과에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집 14권 1호(통권 111호), pp. 307-318, 1998. 1.
13. American Society for Testing and Materials, Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards, Philadelphia, ASTM, Vol. 4-5, 1996.
14. ANSYS, Inc., ANSYS manual, Release 11.0, 2007.
15. Dialer, C. P., “Basic behaviour of masonry: case studied, alternative approaches and modelling hints”, Technology, Law and Insurance, Vol. 4, pp. 131-136, 1999.
16. FEMA 273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C., October 1997.
17. FEMA 306, “Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings”, Washington, D.C., May 1999.
18. Hendry, A. W., Structural Brickwork, John Wiley & Sons, pp. 12-61, 1981.
19. Hendry, A. W., “Testing methods in masonry engineering”, Fourth North American Masonry Conference, Vol. 2, pp. 49, 1987.
20. Tomazevic, M., Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Series on Innovation in Structures and Construction, Vol. 1, Imperial College Press, pp. 268, 1999.

(접수일자 : 2009년 4월 15일)
 (1차수정일자 : 2009년 7월 28일)
 (심사완료일자 : 2009년 9월 2일)