

# 축소모델 휨부재의 재료거동에 관한 연구

배성용  
(주)미산건설

## A Study on Behavior of Materials for Flexural Member of Reduced-Scale Models

SUNG-YEONG BAE

Civil Department, Construction of Mi-San 332-9 Dae-Myeong Nam-Gu, Taegu 705-039, Korea

**KEY WORDS:** Reduced-scale model 축소모델, Similitude requirement 상사성 요구, Bond behaviour 부착거동, Simple beam test 단순 보실험, Prototype 원형

**ABSTRACT:** The main objectives of this study are to compare the obtained mechanical characteristics of reduced-scale model materials with those of the prototype and to provide the information on the best selection of materials. Manufacturing techniques on the micro-concrete and reduced reinforcement are introduced. The test results of these materials are shown to be satisfactory with regard to the similitude requirement. The simple beam tests were performed to verify similitude in the bond behavior between micro-concrete and reduced reinforcement. Those results also prove that these manufacturing and experimental techniques are useful and reliable for reduced-scale model tests.

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경 및 목적

철근콘크리트 구조물의 외부하중의 영향을 받을 때 전체적 거동은 대부분 비탄성영역에 도달하여 손상이나 붕괴됨으로 반드시 신뢰성있는 방법에 의하여 그 안전성확보에 매우 중요하고 필수적으로 검토되어야 한다. 그러나, 근래에 구조물에 대한 컴퓨터해석기법이 큰 발전을 이루고 있는 가운데서도 아직도 여전히 비선형적인 철근콘크리트 부재로 이루어진 3차원 구조물의 붕괴모드와 파괴하중을 해석적으로 예측한다는 것은 어려운 일이다. 이로 인하여 구조물의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 구조요소의 구조성능 뿐만 아니라, 전체구조물에 이르기까지의 거동실험을 통하여 검토 비교할 필요성이 있다. 구조물에 대한 축소모델 실험의 중요한 사항은 상사성 확보이다. 상사성 평가에 대한 기준은 실물크기의 실험을 수행하여야 하며, 축소모델실험의 결과와 실물실험에 따른 상사성오차를 얼마만큼 정확하게 측정할수 있는가 하는 문제점이 따르기 때문에 가장 적합한 축적계수(scale factors)를 선택하여 크기효과(size effect)를 최소화시켜야 한다(Alami, 1963; Harris, 1970). 축소모델의 재료실험 연구는 구조물에 사용되는 콘크리트 및 철근 등이 축소모델의 경우에도 그 재료특성을 그대로 유지하도록 하기 위해 축소모델 재료제작 기법을 연구하며, 모델콘크리트와 모델이형철근의 부착거동을 확인한다. 축소모델은 실물크기의 1/5 축소 시험체를 사용하여 같은 실험방법에 의하여 실험결과를 얻은 후 분석을 통하여 축소모델의 상사성 여부를 비교한다.

#### 1.2 재료의 상사법칙

실물크기와 모델에서 콘크리트와 철근의 응력-변형률곡선의 일치를 가정으로 하여 진모델(true model)의 상사법칙(similitude-law)은  $(p=$ 실물크기,  $m=$ 모델,  $S=1/$ 축소율) (하중) $_p = ($ 하중) $_m \times S^2$ , (변위) $_p = ($ 변위) $_m \times S$ , (변형률) $_p = ($ 변형률) $_m$ 로 나타낼 수 있으며, 이것을 모델의 거동에 적용하여 실물크기의 값으로 나타낼 수 있다(Bertero, 1983).

##### 1.2.1 콘크리트의 상사성

원형콘크리트(prototype concrete)와 모델콘크리트(model concrete)의 특성을 동일하게 상사하기에는 매우 어려운 과제를 지니고 있다. 콘크리트는 골재의 크기 시멘트의 입자, 콘크리트의 공극율까지 상사를 시켜야 한다. 특히 모델 콘크리트배합은 잔골재율(S/a)조절로 일부는 만족시킬 수 있지만, 시멘트와 모델콘크리트의 공극의 크기 등을 상사시킨다는 것은 현실적으로 어려운 일이므로 모델실험의 결과와 원형실험의 결과에 생기는 상사성오차를 얼마만큼 정확하게 하는 것이 중요하다. 이러한 문제점에서 크기효과를 포함한 여러 문제점을 최소화시켜야 한다. 원형과 모델콘크리트는 다음과 같은 성질들이 상사되어야 한다(Bertero, 1983; ACI committee 444, 1988).

- 1) 압축강도 ( $f_{ck}$ )
- 2) 탄성계수 ( $E_c$ )
- 3) 극한 압축변형률 ( $\epsilon_{cu}$ )
- 4) 극한 인장강도 ( $f_t$ )

##### 1.2.2 철근의 상사성

대부분의 실제 철근콘크리트 구조물은 철근의 항복을 유도하는 과소설계(under-reinforced design)의 요구를 충족시키기 위

해 명확한 항복점과 충분한 연성(ductility)을 보유한 철근을 사용하고 있다. 따라서 아래와 같은 실제 철근의 특성들이 축소 모델용 제작시 고려되어야 성질은 다음과 같다.

- 1) 인장항복강도( $f_y$ ) 및 극한강도( $f_u$ )
- 2) 하중-변형률곡선의 형상
- 3) 연성(ductility)
- 4) 철근-콘크리트표면의 부착특성

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 콘크리트실험

골재는 강자갈, 강모래를 사용하였으며, 절대 건조상태의 모래비중은 2.58, 자갈은 2.60이다. 원형콘크리트재료는 보통포틀랜드시멘트의 비중은 3.15, 분말도는  $3200\text{cm}^2/\text{g}$ 이고 굵은 골재의 최대치수는 25mm인 일반골재를 사용하였다. 모델콘크리트에 사용된 초조강시멘트의 비중은 3.12, 분말도는  $6200\text{cm}^2/\text{g}$ 인 것을 사용하고 골재는 입도 분포를 조절하기 위하여 No.8을 통과하는 모래를 모델모래로 하며 Sm으로 표시하고 No.4에 통과하고 No.8에 남은 모래를 모델자갈로 하며 Gm으로 표시하였다.

모델콘크리트에는 초조강시멘트를 사용한 이유는 상사성을 고려한 보통포틀랜드보다 훨씬 입자가 미세하고 분말도가 높아 입자사이의 공극을 최소화 할 수 있을 것이다. 각각의 콘크리트에 대해서는 원형콘크리트의 공시체( $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ )와 모델콘크리트의 공시체( $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ )를 제작하였으며, 압축강도의 공시체 7개, 인장강도의 공시체 7개를 Table 1과 같은 원형 및 모델콘크리트의 배합비로 하여 각각 배합을 하였다. 그리고 공시체를 24시간이 지난 후 공시체의 물드를 제거한 후, 28일 동안 수중양생을 하였다. 공시체의 압축강도는 100t용량의 유

Table 1 Mix ratios of concrete

Mixs	W/C	S (Sm+Gm)	A	F.M	Admixture
Proto-concrete	0.45	2.06	3	7.1	-
Micro-concrete I	0.65	3(2.4+0.6)	0	3.3	-
Micro-concrete II	0.65	6(3+3)	0	4.9	0.7%
Micro-concrete III	0.65	6(2+4)	0	5.1	0.7%

Note:

W/C : Water/Cement Ratio

S, A : Sand , Aggregate

F.M : Fineness Modulus

Sm : Model sand defined by particle size smaller than #8 sieve

Gm : Model gravel defined by particle size larger than #8 sieve and small than #4 sieve

Admixture : Super-Plasticizer

압식 만능시험기(U.T.M)로 사용하였다. 공시체의 응력-변형률은 로드셀과 compressor meter에 transducer displacement를 양쪽에 설치하여 정적변형변환기와 컴퓨터에 의해 데이터를 취득하여 응력-변형률관계를 측정하였다.

### 2.2 철근실험

원형철근에 사용된 이형철근은 SD 30인 제품화된 D10, D13, D22로 선택했다. 그러나, 모델철근은 제품화하지 않았기 때문에 직접 주문제작이 필요하였다. 모델철근으로는 경강선  $\phi 2\text{mm}$ ,  $\phi 3.5\text{mm}$ 를 구입하여, 직접 주문제작한 이형화기구(deformer)로 이형화를 시킨 D1.84mm, D3.25mm를 냉간 압연가공하여 제작하였다. 축소모델재료는 원형철근을 기하학적 상사성으로 축소시킨 모델철근의 직경은 각각 D2mm, D2.54mm, D3.82mm를 요구하고 있다. 그러나 원형철근의 정확한 기하학적 상사성을 만족시키기에는 어려운 일이었다. 다른 상사조건을 만족하고 있는지 알아보기 위해서 D1.84mm, D3.25mm의 2종류 모델철근에 대한 역학적 특성을 실험하였다. 모델철근들을 제작할때는 냉간 압연가공후 열처리과정을 통하여 요구되는 항복강도, 극한강도 그리고 연성을 갖는 원형철근과 유사한 모델철근을 얻을 수 있을 것이다.

모델철근의 항복강도특성은 모델철근의 열처리(annealing) 및 이형화(deformation)기법에 따라 크게 달라질수 있다. 열처리기법에서 중요한 조절인자는 열처리온도와 시간이며 열처리 시간이 길수록 항복강도가 대체로 낮아지며 적절한 온도는 540°C에서 820°C정도로 알려져 있으나, 이들 시간 및 온도에 대한 결정은 선택재료에 따라 다르며 실험을 통해서 쉽게 이루어질수 있다. 철근에 대한 이형화 작업은 Fig. 1과 같이 제작하였으며, 원하는 크기의 이형화는 원하는 이형형태에 맞는 톱니 모양을 가진 두 개의 톱니바퀴 간격을 조절하여 철선이 통과하게 함으로써 이루어질수 있다(Kim, 1988; Marayama, 1983).

열처리(annealing process)는 냉간 압연후, 원형철근을 축소한 하중-변형률곡선과 가장 적합한 모델철근의 하중-변형률곡선을 얻기 위해서 이형화시킨 철근을 진공관에 넣어 전기로에서 열처리하였다. 열처리는 요구되는 수준까지 온도가 도달하면 최고온도에서 10분 정도 등온상태로 유지 시킨 후, 전기로를 끄



Fig. 1 Deformation of model bar

고 온도가 실내 온도와 같을 때까지 전기로 안에 계속 유지시키며 노냉(furnace cooling)을 한다.

열처리과정의 변수는 첫째는 전기로의 온도상승시간, 둘째는 열처리 온도, 셋째는 열처리 시간, 넷째는 재료의 냉각 시간, 다섯째는 전기로 내부의 온도 분포등이다. 이 모든 변수들은 원래 재료의 특성을 변화시킨다. 모델 철근제작의 주요변수는 전기로의 상승온도를 선택하였다. 열처리 온도는 다른 특성뿐만 아니라, 특히 항복강도에 영향이 있으며, 열처리 시간과 연속적인 냉각 시간은 항복고원(yield plateau)과 변형률경화(stain hardening)에 영향을 미친다(Sabins, 1993).

2.3 휨부재실험

축소모델의 부착거동을 관찰하기 위해 휨실험(flexural test)을 수행하였다. 원형보(prototype beam) 시험체의 단면크기는 20×30cm로 하고 부재길이는 260cm이며, 전단지간비(a/d)는 3.2로 하였다. 철근의 항복강도가 3000kg/cm<sup>2</sup> 인 기성제품인 이형철근을 사용하였으며, 인장철근은 2D22, 압축철근은 2D13 및 스테럽은 D10인 시험체 2개를 제작하였다. 모델보(model beam) 시험체의 크기는 원형보 시험체를 1/5 축소하였으며, 인장철근은 3D3.25mm와 압축철근은 2D1.84mm인 시험체 4개를 제작하였다. Table 2는 시험체의 제원을 나타내고 있으며, Fig. 2는 시험체의 상세를 나타내고 있었으며, 시험체의 하중가력방법은 휨거동을 관찰하기위해 2점가력방법을 선택하였다.

Table 2 Dimensions of specimens (unit:mm)

Scale	a	L	L'	s	s'	b	d	c	h
P-Beams	800	2400	2600	100	150	200	250	50	300
M-Beams	160	480	520	20	30	40	50	10	60

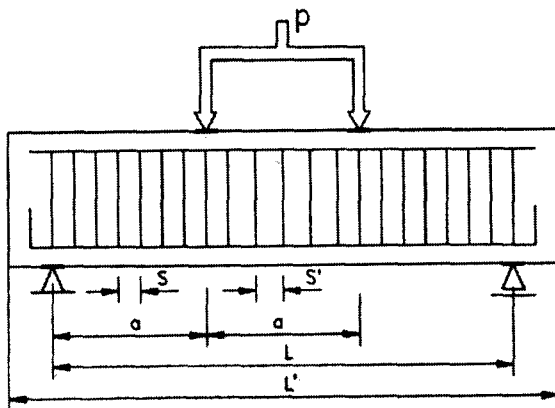


Fig. 2 Details of specimen for flexure test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 실험결과

3.1.1 원형 콘크리트

Fig. 3은 원형콘크리트의 응력-변형률곡선을 나타내고 있다. 5개의 압축 공시체의 평균 압축강도는 321.8kg/cm<sup>2</sup>이며, 최대 강도에서의 평균변형률은 0.00212으로 나타났으며, 평균 인장 강도는 29.17kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었다. 인장강도와 압축강도의 비는 0.0907로 측정되었다. 이들 값들은 실제로 사용되고 있는 전형적인 보통 원형콘크리트로서 고려하고 모델 콘크리트와 비교할 대상의 근거로 하였다.

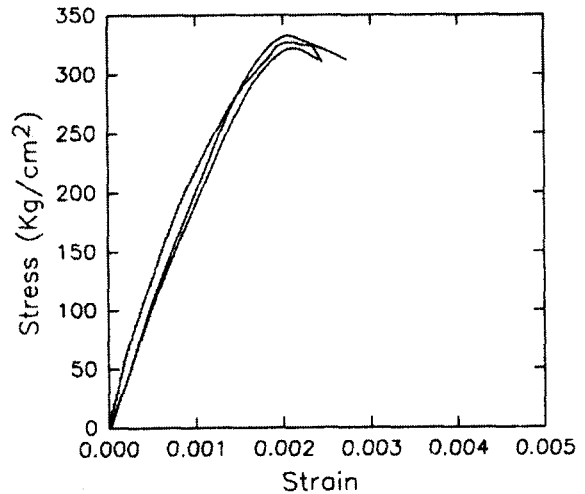


Fig. 3 Stress-strain curves of prototype concrete (W/C=0.45)

3.1.2 모델 콘크리트 II

Fig. 4는 모델콘크리트의 응력-변형률곡선을 나타내고 있다.

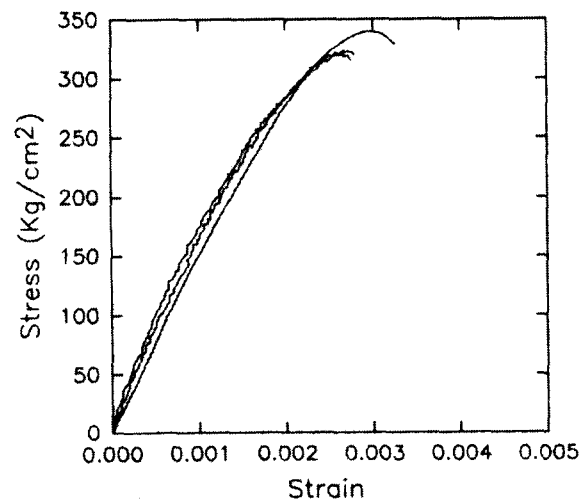


Fig. 4 Stress-strain curves of micro concrete II (W/C=0.65)

각각의 공시체의 평균 압축강도는  $327.32\text{kg/cm}^2$ 이며, 평균인장강도는  $28.23\text{kg/cm}^2$ 이며 최대 강도에서의 평균 변형률은 0.00268으로 측정되어 원형콘크리트보다 약 26% 정도가 높게 측정되었다. 인장강도와 압축강도비에서 원형콘크리트보다 약 3.4%정도 측정되었으며, 가장 비슷하게 결과를 얻었다.

3.1.3 실험고찰

철근콘크리트 축소모델에 가장 적합한 모델콘크리트를 얻기 위해서 여러 가지 배합비로 하였다. 원형콘크리트와 가장 유사한 성질을 얻기 위한 변수로는 골재 시멘트비(A/C)를 선택하였다. 골재는 시멘트보다 훨씬 큰 강성을 가지고 있기 때문에 골재 시멘트비(A/C)를 증가시켜서 콘크리트 강성을 증가시킬수 있었다. 원형콘크리트와 가장 유사하게 나타내고 있는 것은 모델콘크리트 II (W/C=0.65)이므로 모델용 콘크리트배합비로 선택하였다. Table 2는 원형 및 모델콘크리트특성의 평균값을 나타내고 있다.

Table 3 Mean mechanical characteristics of concrete models

Mix (W:C:S:A)	$f_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Sigma_u$	$f_{ck} / f_t$
Proto-concrete (0.45:1:2.06:3)	321.8	29.17	0.00212	0.0907
Micro-concrete I (0.65:1:3:0)	316.2	32.14	0.00360	0.1016
Micro-concrete II (0.65:1:6:0)	327.3	28.66	0.00268	0.0876
Micro-concrete III (0.65:1:6:0)	322.1	23.22	0.00290	0.0721

3.2 철근의 실험결과

모델철근에 요구되는 항복강도를 가지게 하고 연성의 개선과 명확한 항복점을 얻기 위해서 열처리를 수행하였다. 몇번의 시행착오방법으로 원형철근과 유사한 성질을 얻기 위하여 모델철근에 대한 가장 적합한 열처리 온도와 시간을 결정하였으며, 원형 철근의 항복강도가  $3000\text{kg/cm}^2$ 인 기성제품인 이형철근 D22를 1/5로 모델화하면, 축소된 모형철근의 항복강도는  $465\text{kg/cm}^2$ 정도 계산되므로 이와 유사한 하중을 나타내는 3.25mm의 모델철근에 적합한 온도를 Fig. 5에 나타낸바와 같이 전기로의 온도를  $750^\circ\text{C}$ 로 하여 14hr정도 열처리를 수행하였다. D10과 D13의 철근을 축소시킨 D1.84mm 모델철근을 선택하였으며, Fig. 6에 나타낸바와 같이 전기로이 온도는  $800^\circ\text{C}$ 로 선택하였다. D10과 D13를 축소시킨 D1.84mm의 모형철근은 다소 항복강도오차가 발생하였으나, 휨부재의 거동은 주철근 D22를 축소시킨 D3.25mm의 모형철근이 영향을 미치므로 항복강도를 유사하게 근접시켰다. 본 연구에서는 강도 상사성에 중점을 두었으며, Fig. 5와 Fig. 6은 열처리온도에 따른 모델철근의 하중-변형률곡선을 나타내고 있다.

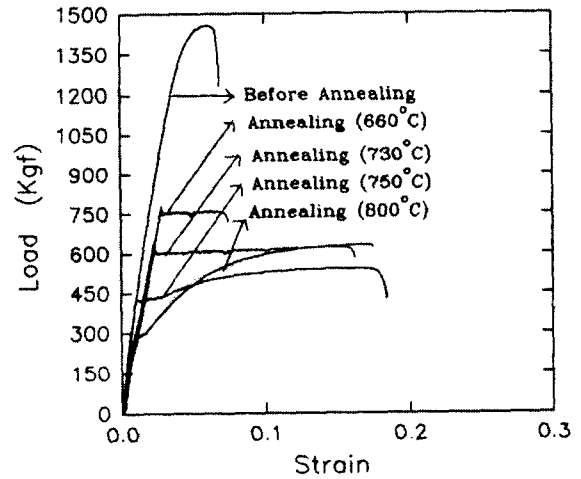


Fig. 5 Load-strain curves of annealing temperature (D3.25mm)

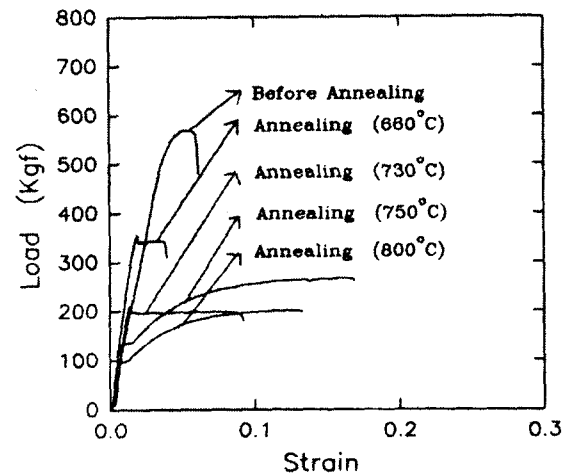


Fig. 6 Load-strain curves of annealing temperature (D1.84mm)

3.3 휨부재의 실험결과

휨부재의 실험은 철근콘크리트의 휨 역학(flexural mechanics)과 관련한 시험체거동의 실험결과를 Table 4에 비교하였다. 원형 및 모델보의 시험체 하중-처짐곡선을 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 축소 모델보의 시험체가 원형보의 시험체보다 휨강성(flexural stiffness)이 더 크게 나타나았으며, 모델콘크리트의 재료는 예상했던 원형콘크리트 재료의 입자크기를 축소하지 못했기 때문에 다소 균열수가 적게 발생하는 것이 관찰되었다. 초기균열은 모델보가 원형보보다 늦게 발생하였으며, 휨균열수가 적게 발생되어 균열폭이 크게 발생하는 것이 육안으로 관찰되었다. 실제 모델보를 제작할때는 모델콘크리트재료의 입자크기를 고려해야하며, 모델철근은 항복강도, 극한강도 및 연신율등을 정확히 상사성을 만족하면, 휨부재의 상사성오차를 최

소화할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7에 나타난 실험결과를 비교분석하면, 축소모델실험을 통하여 유사한 실제 구조물의 거동을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4 Test results of specimens

Type	Compression strains( $\epsilon_c$ )	Midspan deflection(mm)	Ultimate load(kgf)
M-Beam I	2093	7.8	684.3
M-Beam II	1755	9.9	844.7
M-Beam III	3613	7.4	814.2
M-Beam IV	3975	11.6	869.7
P-Beam I	3295	8.2 # (41.0)	860.5 #
P-Beam II	3353	8.0 # (39.8)	868.9 #

Note:

# : Adjusted deflection =  $1/S_l \times$  measured deflection

Adjusted loads =  $1/S_l^2 \times$  measured loads

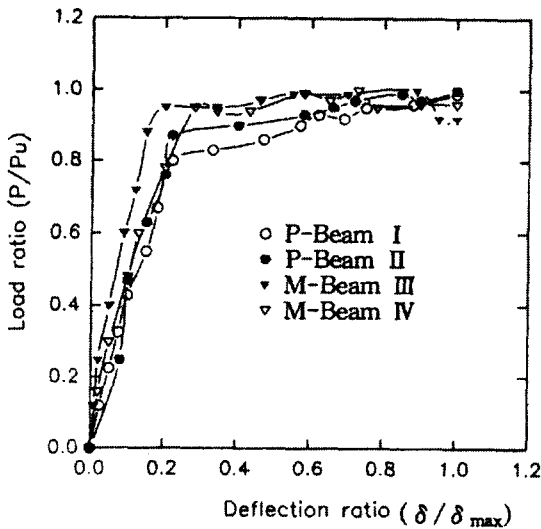


Fig. 7 Load-deflection curves of beams

#### 4. 결 론

축소한 모델실험을 통한 재료의 역학적 특성을 수행한 결론은 다음과 같다.

(1) 모델 콘크리트의 응력-변형률곡선은 골재의 선택과 물/시멘트비의 적절한 선택을 통하여 원형콘크리트의 응력-변형률곡선과 유사하게 근접시킬 수 있다.

(2) 모델철근은 적절한 온도를 선택하여 열처리함으로써 원형철근과 유사한 힘-변위관계와 연성을 가질수 있다.

(3) 모델콘크리트의 혼합체들을 정확히 상사시킬수 없기 때문에 모델보시험체는 원형보시험체보다 균열수가 적게 관찰되었다.

(4) 원형과 모델철근의 항복강도와 극한강도의 상사성은 응력-변형을보다 힘-변위관계로 나타냄으로써 사용할 수 있다.

(5) 실험과정에서 발생하는 상사성오차와 크기효과의 영향을 줄이기 위해서는 가장 적합한 축적계수(scale factors)를 선택함이 중요하다.

#### 참 고 문 헌

윤한상(1993). "금속 조직학", 형설 출판사.  
 김 우, 김대중, 강성후(1991). "철근콘크리트 구조연구를 위한 소축적 구조실험기법", 한국콘크리트학회논문집, 제3권 제4호.  
 이한선(1993). "1/3 축소 3층 습식접합부 프리캐스트 콘크리트 대형판 입체모델의 진동대 실험", 한국콘크리트학회지, 제5권 제1호.  
 ACI Committee 444(1998). "State-of-the-Art Report ; Models of Reinforced Concrete Member", American Concrete Institute, Detroit, Michigan.  
 Alami, Z. Y. and Ferguson, P. M.(1963). "Accuracy of Models Used in Reserch on Reinforced Concrete", ACI JOURNAL, Proceedings, V. 60, No. 11, pp 1643~1661.  
 Bertero, V. V., Aktan, A. E., Harris, H. G. and Chowdhury, A. A.(1983). "Mechanical Characteristics of Materials Used in a 1/5 Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure", University of California, Berkery, EERC - 83 /21, October.  
 Harris, H. G, Sabns, G. M. and White, R. N.((1970). "Reinforcement for Small Scale Direct Models of Concrete Structures", Symposium on Structural Models, SP-24, American Concrete Institute, Detroit.  
 Kim, N., Ei-affar, A. and White, R. N.(1988). "Small-Scale Modeling Technique for Reinforced Concrete Structures Subjected to seismic Loads", School of Civil and Environment Engineering, Conell University, November.  
 Marayama, Y. and Node, S.(1983). "Study on Small Scale Model Tests for Reinforced Concrete Structures-Small Scale Model Tests by Using 3mm Diameter Deformed Rebars", Report No. 40, Kajima institute of Construction Technology, Tokoy.  
 Sabins, G. M., Harris, H. G.(1983). "Structural Modeling and Experimental Techniques", Prentice-Hall Inc., nelgwood cliff, New Jersey.

2000년 1월 21일 원고 접수

2000년 5월 10일 수정본 채택