

# 철근콘크리트구조 연구를 위한 소축척 구조모형실험기법

## Experimental Techniques of Small-Scale Models for Reinforced Concrete Structural Researches

김 우\* 김 대 중\*\* 강 성 후\*\*\*  
Kim, Woo Kim, Dae Joong Kang, Sung Hoo

---

### 요 약

원형(prototype) 철근콘크리트 구조물의 거동을 축소모형실험을 이용하여 연구하기 위해서는 모든 구성재료의 물리적 성질들이 특정상사(similitude) 관계 또는 1:1로 복제된 모형재료를 사용하여야 한다. 원형과 모형의 물리적 특성에 관한 상사성에 대해 사전 연구가 되어져야만 축소모형실험결과 해석에 적용할 수 있다. 본 연구는 철근콘크리트 구조물을 축소모형화하는데 따른 구성재료의 물리적 성질과 기본 거동에 관한 문제점들을 파악하고, 개선된 방법을 찾기 위한 것이다. 모형콘크리트에서 발견되는 큰 인장강도를 최소화하기 위해 배합비를 변화시켜서 원형콘크리트에 가장 가까운 모형콘크리트의 제작기법과 모형철근의 표면형태에 따른 거동의 차이를 단순보를 이용하여 연구하였다.

### Abstract

When the behavior of a prototype concrete structure is studied through small-scale model experiments, it is necessary to reproduce all significant physical characteristics on either an one-to-one basis or a specific similitude relationship. Any distortion of similitude must be understood and its effect must be predictable. This paper focuses on improved physical modeling techniques for small-scale reinforced concrete structures. Particular emphasis is placed on the development of a model concrete mix to accurately model the important properties of full-scale prototype concrete. Four types of model reinforcement with different bond characteristics are also studied by testing twenty simple beams. The information obtained will be of immediate use to engineers contemplating small-scale modeling of reinforced concrete structures.

---

\* 전남대학교 공과대학 토목공학과 조교수  
\*\* 전남대학교 대학원 박사과정  
\*\*\* 동신대학 토목공학과 조교수

"이 논문은 1990년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 지방대  
육성 학술연구조성비에 의하여 연구되었음."

## 1. 서론

최근들어 대형특수구조물, 즉 원자력구조물, 대형해양 및 지하구조물 등의 설계에 기존의 이론을 적용하는데는 많은 문제점들이 발견되고 있다. 이와 같은 대형특수구조물의 거동을 연구하는데 소축적 구조모형(small-scale structural model) 실험은 좋은 연구 방법중의 하나이다. 모형에서 생기는 현상은 간단히 측정할 수 있을 뿐만 아니라 눈으로 상세히 관찰할 수 있는 장점이 있다. 모형 실험에서 측정된 결과를 가지고 실물(원형 prototype)에 생기는 현상을 얼마나 정확하게 추정할 수 있는지의 문제에 대해서 아직 확실한 대답을 하기 힘든 상태이다.<sup>1)</sup> 지난 30년 사이에 여러나라에서 -이탈리아의 Instituto Sperimantale Modelli E Structure, 영국의 Coment and Concrete Association, 포르투갈의 Laboratorio Nacional De Engenharia Civil 등등- 특수구조물 연구를 위한 소축적 구조모형실험을 강도있게 수행하여 성공적인 결과를 얻어냈을 뿐만 아니라, 최근에는 핵발전소 구조물, 미사일 격납고, 해양구조물 및 고층 건물 연구를 위하여 많은 소축적 구조모형실험이 수행되고 있다.<sup>1)</sup> 위와 비교할 때 지금까지 국내에서는 구조모형실험에 대한 연구는 전무한 편이라고 할 수 있다. 실물실험을 통한 연구는 실험장비 및 공간을 준비하는데 큰 규모의 재정이 뒷받침되어야 한다. 그러나 소축적 구조모형실험은 재정과 공간을 최소화하면서 많은 실험을 통한 연구를 가능하게 할 수 있을 것이다. 우리나라의 현실적 여건을 고려한다면, 앞으로 많이 연구 및 정리되어야 할 분야라고 할 수 있다.

실물(prototype) 철근콘크리트구조 System의 거동(behavior)을 모형(model)화 시키기 위해서는, 원형재료들의 물리적 특성들은 모형재료의 그것과는 유사성(similitude)이 성립되어야 한다. Scale Effect는 가능한 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 여러 형태의 실물 R/C 구조물을 모형실험을 통해 연구하기 위한 가장 기본적인 연구로서, 구성재료(콘크리트 및 철근)의 각 물리적 성질과 구조의 기본거동을 소축적 모형화에 따른 문제점을 파악하고, 국내에서 조달가능한 재료로, 그 기본적 자료를 소규모 실험을 통해 조사하려고 한 것이다.

## 2. 모형 콘크리트

### 2.1 일 반

소축적 모형화에 있어서 가장 어려운 단계중의 하나가 모형콘크리트의 선택이다. 콘크리트와 같은 비균등질(heterogenous)인 재료는 굳은 콘크리트의 성질에 영향을 주는 요소의 복잡성때문에 상사시키는 것이 쉽지 않다. 이론적으로 콘크리트의 성질을 축적화한다는 것은 골재의 규격 뿐만 아니라 시멘트 입자의 크기, 굳은 콘크리트 내부의 공극 및 pore 크기까지 축적화되어야 한다. 소축적 모형 콘크리트에서 위 사항들은 골재 크기를 조절한다든지 하여 부분적으로 만족시킬 수 있다. 그러나 시멘트 입자의 크기, 굳은 모형 콘크리트내의 공극의 크기등을 상사시킨다는 것은 현실적으로 불가능하다고 할 수 있다. 현재까지 Model Concrete로서 Micro-concrete(여기서는 시멘트와 모래와 물만 혼합된 concrete를 말함)와 Gypsum을 주로 사용하였다.<sup>2,3)</sup> 그러나 여러 문헌에 의하면 Micro-concrete는 일반적으로 강성(stiffness)이 적고, 모형의 축적이 적어질수록 인장강도 대 압축강도의 비( $f_t/f_c$ )가 커져서, 균열에 의해 거동이 크게 지배되는 콘크리트구조를 모형화를 하는데는 문제가 있었다.<sup>4)</sup> 일반적으로 단기하중 재하시 모형 콘크리트는 실제 콘크리트의 다음과 같은 성질들은 1:1로 복제하여야 한다.

1. A specific ultimate compressive strength( $f_c$ )
2. A specific elastic modulus(E)
3. A specific ultimate compressive strain( $\epsilon_u$ )
4. A specific ultimate tensile strength( $f_t$ )

본 연구에서는 현실적으로 쉽게, 원형콘크리트(prototype concrete)의 위 4가지 성질을 1:1로 복제된 모형콘크리트를 만들기 위하여 시멘트와 골재의 혼합비(A/C)와 사용골재의 입도분포를 변화시켜서 가장 적합한 Model concrete 재료를 찾고자 한 것이다.

### 2.2 실험

#### 2.2.1 재료 및 배합

실물(원형) 콘크리트용 Cement는 Type I cement를 사용하였다. 이 시멘트의 성분은 Tricalcium Silicate( $C_3S$ )가 55.2%, Tricalcium Aluminate( $C_3A$ )가 8.2%로 구성되어 있다. 모형콘크리트용 Cement는 Type III

조강시멘트를 사용하였다. Type III Cement를 사용한 이유는 다음과 같다.

(i) Type III Cement는 Type I보다 더 작은 입자로 되어있어서 상사조건에 더 부합된다.

(ii) Type III Cement로 된 콘크리트가 Type I Cement로 된 공시체 시험결과보다 더 일괄성(consistency) 있는 결과를 얻을 수 있다.<sup>9)</sup>

Table 1 Mix Ratios of Microconcrete Test Specimens

Mix	Water	Cement	Sand (S <sub>m</sub> +G <sub>m</sub> )*	Coarse Aggregate
Prototype Concrete	0.65	1	3(2.4+0.6)	3
Microconcrete I	0.70	1	3(2.4+0.6)	0
Microconcrete II	0.70	1	3(2.4+0.6)**	0
Microconcrete III	0.70	1	6(3.0+3.0)	0
Microconcrete IV	0.70	1	6(2.0+4.0)	0

Note: \* S<sub>m</sub>: Model sand defined by particle size smaller than #8 sieve

G<sub>m</sub>: model gravel defined by particle size larger than #8 sieve and smaller than #4 sieve.

\*\* G<sub>m</sub> was coated by a chemical material.

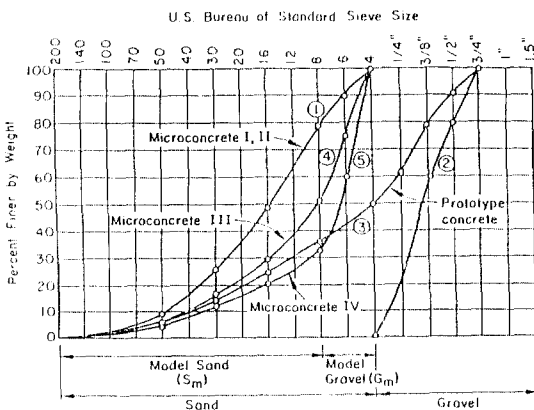


Fig. 1 Grading Curves of Aggregate Used

표 1에 나타낸 것처럼 5종류의 배합을 하여 공시체를 제작하였다. 원형(prototype) 콘크리트에는 일반적으로 사용되는 최대 입경이 19mm인 채석골재를 사용하였다. 반면에 모형콘크리트에는 굵은골재를 사용하지 않고 모래만 사용하였다. 모형콘크리트에 사용된 모래의 입도분포

를 조절하기 위하여 처음 구입된 모래(그림 1에서 입도곡선①)를 편의상 2종류로 나눠서 재조합을 통하여 그림 1과 같은 여러가지의 입도분포를 갖는 모래를 만들었다. 즉 8번체를 통과한 모래를 본 연구에서는 모형 모래(model sand)라 하여 S<sub>m</sub>으로 표시하였고, 4번체를 통과하고 8번체에 남은 크기의 모래를 모형 자갈(model gravel)이라고 하여 G<sub>m</sub>으로 표시하였다. 이 S<sub>m</sub>과 G<sub>m</sub>의 배합비를 표 1과 같이 하여 그림 1과 같은 입도분포를 갖는 여러 종류의 모형콘크리트용 골재를 만들었다. 모형콘크리트 II에서는 모형자갈에 해당하는 모래중의 굵은 입자를 Polystyrene으로 피복(coating)을 하였다. 이것은 모형콘크리트가 갖는 단점중의 하나인 인장강도가 비교적 높은 것을 방지하기 위하여 골재와 시멘트풀과의 부착력을 감소시킴으로써 저인장강도를 유도하기 위한 것이었다. 피복하는 방법은 참고문헌 9에서와 동일하게 하였다.

### 2.2 실험방법

각 콘크리트 배합마다 14개의 공시체를 제작하였다 (압축시험용 7개와 활열인장시험용 7개). 원형 콘크리트는 15cm×30cm인 원통형 공시체로 하고, 모형 콘크리트는 5cm×10cm의 소축적 원통형 공시체로 제작하였다. 재하장비로는 10 ton용량의 Instron 재료시험기를 이용하였다. 공시체의 변형은 Gage Length가 5cm인 Extensometer를 사용하였다. 압축시험은 응력-변형률 곡선을 구해, 각각 응력축에 대해 Normalization시켜서 평균에 해당하는 응력-변형률 곡선을 구하였다. 인장시험은 활열인장시험법을 사용하였다. 각 배합마다 7개의 인장시험결과를 평균하여 인장강도를 구하고, 압축강도도 7개의 결과를 평균하여 결정하였다.

### 2.3 실험결과 및 분석

실험에서 얻어진 결과들을 표 2와 그림 2에 정리하였다. 이 그림과 표에 나타나 있듯이, 모든 모형콘크리트는 원형 콘크리트에 비해 낮은 강성(stiffness)과 큰 변형율을 보이고 있으나, 모형콘크리트의 배합을 달리 함으로써 그 차이를 줄일 수 있음을 보이고 있다.

모형콘크리트 I은 종래 주로 사용되는 모형콘크리트 배합으로, 원형콘크리트에 비해 인장강도 대 압축강도의 비가 18%이며, f<sub>c</sub>에서의 변형율은 50%가 크다. 모형콘크

Table 2 Summary of Microconcrete Test Results

Mix (W:C:S:A)	Compression Cylinder Tests				Split Tensile Tests		
	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ (cm/cm)	$E_{m1}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{m1}f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_t/f_c$	$f_t/\sqrt{f_c}$
Prototype Concrete (0.65:1:3:3)	342	.00229	259000	216900	32	0.095	1.73
Microconcrete I (0.7:1:3:0)	324	.00345	135000	124000	36	0.112	2.00
Microconcrete II (0.7:1:3:0)	299	.00424	125000	108300	27	0.090	1.56
Microconcrete III (0.7:1:6:0)	329	.00301	210700	168900	32	0.096	1.76
Microconcrete IV (0.7:1:6:0)	377	.00293	220800	175000	27	0.071	1.39

Note : 1. For Prototype Concrete, 15cm×30cm standard cylinders were tested.  
 2. For all Microconcrete, 5cm×10cm model cylinders were tested.

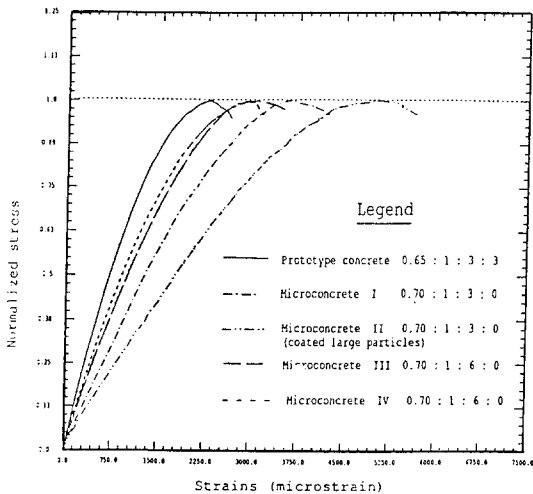


Fig. 2 Summary of Mean Normalized Stress-strain Relationships of Concrete tested

리트 II에서는 굵은 골재와 시멘트풀과의 부착저항을 감소시킴으로서 저인장강도를 유도하기 위한 것이었다. 결과는 의도대로 저인장강도의 모형콘크리트를 얻을 수 있었으나, 너무 적은 탄성계수를 갖는 콘크리트가 되었다. 모형콘크리트 III에서는 시멘트대 골재의 비(A/C)를 증가시킴으로서 큰 탄성계수를 유도하기 위한 것이었다. 이것은 골재의 탄성계수가 시멘트풀의 탄성계수보다 크기 때문에 골재의 비율을 증가시키면 전체 콘크리트의 탄성계수가 증가하리라는 예측에서였다. 결과는 기대대로 모형콘크리트 II에 비해 큰 탄성계수를 갖는 콘크리트였으나 원형콘크리트에 비해 여전히 낮은 탄성계수를 나타

내고 있다. 인장강도 대 압축강도의 비는 원형콘크리트와 거의 동일한 결과를 나타냈다. 모형콘크리트 IV에서는 모형콘크리트 III과 같은 A/C를 사용하되, 사용된 골재의 굵은 입자 함유 비율을 증가시켰다. 그 결과 탄성계수는 원형콘크리트의 값에 근접시킬 수 있었으나 인장강도가 크게 저하되었다. 이것은 입도분포가 좋지 않은 골재의 사용에 따른 과도한 하니콤(honeycomb)에 기인한 것과 불량한 workability에 따른 다짐상태가 좋지 않기 때문으로 사료된다.

결과적으로, 현실적으로 쉽게 모형콘크리트를 제작하기 위해서 주요변수로 A/C를 선택하게 되었는데, 실험결과는 A/C가 커질수록 강성은 증가하고, 인장강도는 감소하는 경향이 그림 3처럼 나타나고 있다. 본 연구에서 실시한 제한된 실험결과 모형콘크리트 III이 가장 적절한 모형콘크리트라고 할 수 있을 것이다.

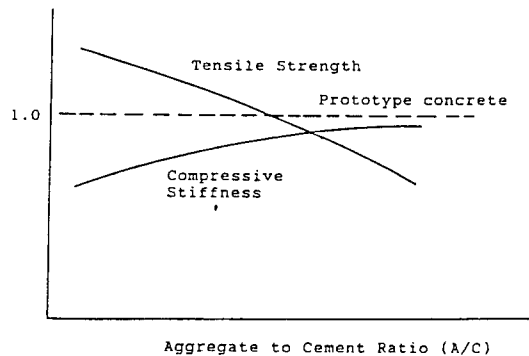


Fig. 3 Schematic Variation of Stiffness and Tensile Strength of Microconcrete as Function of A/C Ratio

### 3. 모형 철근

#### 3.1 일반

일반적으로 철근콘크리트 구조물의 모형연구에서는 직경이 1mm에서 6mm인 강봉(rod)이나 강선(wire)이 사용된다. 철근의 소축적 모형화에 따른 주요문제는 부착(bond)과 연관된 표면형태와 항복강도이다. 본 연구에서는 궁극적으로 모형철근의 표면상태에 따른 부착(bond) 기능의 차이에서 기인한 구조적 거동의 변화를 조사하기 위한 것이므로, 현실적으로 쉽게 구입할 수 있는 강선, 나선봉과 실험실에서 압연가공한 강선에 대하여 인장시험을 실시하여 모형철근으로써 타당한가를 조사하였다.

#### 3.2 재료

실물(원형 prototype) 철근으로 D19를 선정하였고, 이 철근의 1/3 및 1/6축척에 정확히 맞는 제품을 구하기가 불가능하여 필요한 직경에 가장 가까운 제품으로 표 3에 나타난 재료를 선택하였다.

표면상태에 따라 원형(round)모형철근, 이형(deformed) 모형철근 및 나선(thread)모형철근등 3종류를 선택하였다. 1/3 Scale 모형철근으로서 열연가공된 상용 D6 이형철근과 나선강봉을 선택하였으며, 1/6 Scale 경우는 원형(round)강봉을 원래대로 사용하였고, D3 이형(deformed) 모형철근은 특수하게 제작된 모형철근 압연장치를 이용하여 냉각압연가공하여 제작하였다.<sup>8)</sup> D3 모형철근은 KS D 3051의 규격에 만족되도록 마디와 리브형태를 표 4와 같이 하였다.

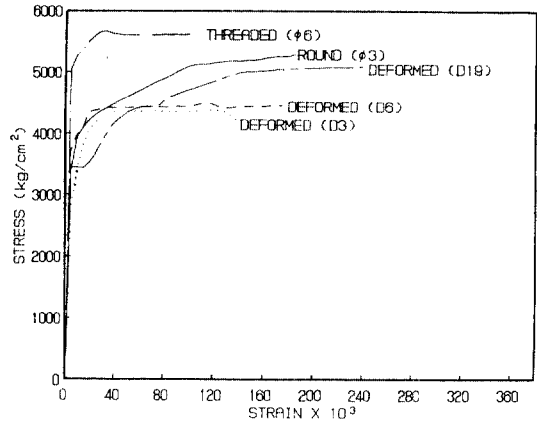
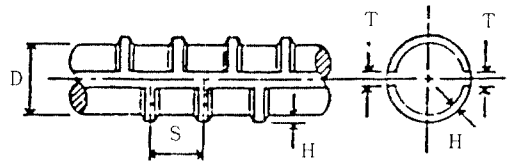


Fig. 4 Summary of Stress-strain Curves of Reinforcement

Table 4 Dimension of Deformation of Deformed Bars

BAR	Diameter (mm)	S (mm)	H (mm)	T (mm)	Remarks
D19	19.1	13.4	1.0-2.0	3.6	열연가공, 상용
D6	6.35	4.4	0.3-0.6	1.2	열연가공, 상용
D3	3.15	2.2	0.15-0.3	0.6	냉각압연, 특수제작



#### 3.3 결과

원형(round)강봉이 아닌 D3 이형철근과  $\phi 6$  나선강봉의 단면적을 결정하는데는 KS D 3051(열연압연 봉강 및

Table 3 Reinforcing Materials for Test

Scale	Type of bar/wire	Physical Diameter (mm)	Nominal Diameter (mm)	Cross Sectional Area (cm²)	Yield Strength (kg/cm²)	Ultimate strength (kg/cm²)
1/1 Scale	Deformed Bar (D19)		19.1	2.8652	3455	5096
1/3 Scale	Deformed Bar (D6)		6.35	0.3167	3790	4484
	Thread Bar ( $\phi 6$ )	O.D=5.6 I.D=5.1	5.4	0.2290	4650	5676
1/6 Scale	Round Bar ( $\phi 3$ )	3.4	3.4	0.0908	4100	5320
	Deformed Bar (D3)		3.15	0.0779	3950	4360

코일 봉강의 모양, 치수 및 무게와 그 허용차)의 공칭단면적 개념을 이용하였다.

$$\text{공칭단면적} = \text{중량} / (\text{단위중량} \times \text{길이})$$

이것은 단위길이당의 무게가 동일한 원형(round)철근의 단면적으로 환산하는 방법이다. 각 철근의 실험치를 위의 공칭단면적에 의해 산정된 항복강도 및 극한강도를 표 3과 그림 4에 정리하였다.

냉각압연 가공하여 모형철근을 제작할 때, 열처리가 수반되어야만 요구되는 항복강도와 연성(ductility) 및 명확한 항복점(sharp yield point)을 갖는 모형철근을 얻을 수 있을 것이다. 앞으로 냉각압연 가공한 모형철근의 annealing 온도 및 시간등과 같은 열처리문제에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.<sup>8,12)</sup>

## 4. 모형보

### 4.1 일반

모형과 원형사이의 상사성(similitude)을 확보하기 위해서는, 구성재료인 콘크리트와 철근의 각각의 특성 뿐만 아니라 다른 변수들도 충분히 검토되어야 한다. 철근콘크리트 구조물의 거동에 영향을 미치는 중요한 인자중의 하나는 철근과 콘크리트 사이의 부착이다. 이 부착은 철근콘크리트 구조물의 균열상태를 지배할 뿐만 아니라, 특히 항복강도 이후에는 slip에 의해 전체적 구조의 강성(stiffness)의 감소, Energy 축적정도의 차이에서 오는 구조 손상도(damageability), 또는 붕괴한도(collapse limit) 상태등이 부착정도에 따라 큰 차이를 나타냄으로서, 모형과 원형의 상사성을 잃게 된다. 뿐만 아니라 소축적 모형화함으로서, 부재 단면에 작용하는 변형률 구배(strain gradient)가 축적에 따라 변화하기 때문에 파괴기동이 달라진다.

본 연구에서는 위의 현상을 조사하기 위해, 가장 간단하게 구조적 거동을 파악할 수 있는 직사각형 단순보의 전단거동에 대한 원형과 모형의 차이를 조사하였다. 원형보와 1/3 및 1/6 모형보에 단기 단순증가하중을 가하여 전단거동(균열형상, 처짐량과 파괴강도)를 측정하여, 상사 법칙(similitude law)에 의하여, 모형보의 결과로부터 원형의 거동을 추정할 값과 원형의 측정값을 비교하여 모형실험의 신뢰성에 대해 검토하였다. 본 논문에서는 특히

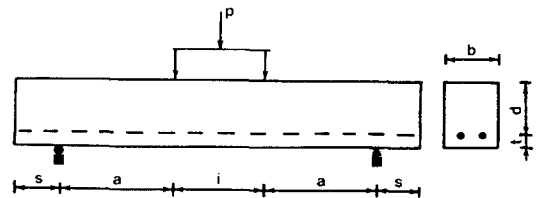
강도 모형(strength model)에 중점을 두었다. 본 연구에서 단순보의 전단거동에 국한시키고 휨거동을 포함시키지 않은 이유는, 보의 휨거동은 철근의 인장강도에 크게 지배되기 때문에 모형철근과 원형철근의 강도가 정확하게 상사성이 확보되든지(완전상사모델) 또는 동일(충분 또는 1차 상사모델)하든지 하여야 되는데, 현실적으로 이러한 모형철근은 불가능하기 때문이다.

### 4.2 실험

실험체는 표 5에 정리한 바와 같이 총 20개로서, 1/1 원형보 4개, 1/3 모형보 8개와 1/6 모형보 8개를 실험하였다. 각 보의 기하적 치수는 그림 5에 나타냈다. 원형보는 앞 절에서 기술한 D19 이형철근을 주인장철근으로 사용했으며, 1/3 모형보는 D6 이형철근과  $\phi 6$  나선봉 두종류를 사용했고, 1/6 모형보에서는 실험실에서 제작한 D3 이형철근과  $\phi 3$  원형(round) 철사를 주인장철근으로 사용했다. 원형보에는 2절에서 기술한 원형콘크리트(prototype) 를, 1/3과 1/6 모형보에는 모형콘크리트 III(microconcrete III)을 사용하였다. 단지 필요한 Workability를 얻기 위하여 물-시멘트 비를 높게 하여 사용하였

Table 5 Beam Test Specimens

Scale	a/d	Rebar Type			
		2	3	4	5
1/1					
Proto-type	Deformed	P-2-D	P-3-D	P-4-D	P-5-D
1/3					
Model	Deformed	1/3M-2-D	1/3M-3-D	1/3M-4-D	1/3M-5-D
	Thread	1/3M-2-T	1/3M-3-T	1/3M-4-T	1/3M-5-T
1/6					
Model	Deformed	1/6M-2-D	1/6M-3-D	1/6M-4-D	1/6M-5-D
	Round	1/6M-2-R	1/6M-3-R	1/6M-4-R	1/6M-5-R



Scale	b	d	t	i	s
Prototype Beams	13.0	21.0	4.0	30.0	15.0
1/3 Model Beams	4.3	7.0	1.3	10.0	5.0
1/6 Model Beams	2.2	3.5	0.7	5.0	2.5

Fig. 5 Dimension of Specimens

다. 각 축척의 주인장철근의 형태마다 4종류의 전단지간 ( $a/d=2, 3, 4, 5$ )을 갖도록 하였다. 이것은 전단지간에 따라 보의 거동, 특히 강도(strength)가 변화하는 현상이 소축척 모형보에서 동일하게 복제되는가를 조사하려는 데 목적이 있었기 때문이다.

하중재하는 30ton과 5ton 용량의 유압잭을 원형과 모형 실험에 각각 이용하였으며, 보의 중앙처짐과 하중, 균열형 상등을 기록하였다.

### 4.3 결과 및 분석

단기하중에서의 철근콘크리트 부재의 거동은 크게, 강도(strength), 순간처짐 및 균열과 파괴형상으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 축척과 철근표면형상에 따른 강도에 대한 상사정도를 집중적으로 분석하여 보았다.

각 실험체에서 직접 측정된 전단균열강도 및 극한강도(파괴강도)를 표 6에 정리하였다. 표 6에 나타낸 자료 자체로는 모형과 원형보의 강도에 대한 상사성이 어느 정도 나타나는지 분간할 수 없다. 특히 본 연구에서 실행한 모형보는 왜곡모형(distorted model)으로 모형보에

사용된 콘크리트강도  $f_c$ , 철근비  $p$  및 규격이 원형보의 것과 일정한 관계가 성립되어져 있지 않기 때문에 상사법칙(similitude law)을 적용하는데도 큰 한계점을 갖고 있다. 위와 같은 이유로 본 연구에서는 철근콘크리트보의 전단거동에 크게 영향을 주는 몇개의 주변수에 대해서 상사법칙을 적용하여 모형과 원형의 상사 정도를 검토하여 보았다.

철근콘크리트보의 전단거동에 영향을 미치는 변수는 일반적으로 다음과 같이 알려져 있다.

$$F(V_{cr}, f_c, A_s, b, d, a)=0 \quad (1)$$

여기서  $V_{cr}$ 은 전단균열강도를 의미하며, 보통 일반적 길이를 갖는 보( $a/d \geq 2.5$ )에서는 전단균열강도는 극한전단 강도와 동일한 값이다. 전단균열강도  $V_{cr}$ 에 직접적 영향을 미치는 것은 콘크리트의 압축강도  $f_c$ 보다는 인장강도  $f_t$ 이다. 그럼에도 불구하고 모든 시방서 식에  $f_t$  대신  $f_c$ 가 사용되어진 것은  $f_t$ 는  $f_c$ 에 의해 결정할 수 있다는 가정때 문이다. 즉,

$$f_t = k_1 (f_c)^x \quad (2)$$

여기서  $k_1$ 과  $x$ 는 실험상수이다. 보통 콘크리트 재료시

Table 6 Test Results

Scale	Series	b (cm)	d (cm)	a (cm)	p (%)	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_{cr}$ (kg)	$P_u$ (kg)	$V_{cr}$ (kg)	$V_u$ (kg)
1/1 Prototype	P-2-D	13.0	21.0	42.0	1.05	247	9700	13800	4850	6900
	P-3-D	13.0	21.0	63.0	1.05	247	8100	8100	4050	4050
	P-4-D	13.0	21.0	84.0	1.05	247	7700	7700	3850	3850
	P-5-D	13.0	21.0	105.0	1.05	247	7400	7400	3700	3700
1/3 Model	1/3M-2-D	4.3	7.0	14.0	1.05	290	1300	2300	650	1150
	1/3M-3-D	4.3	7.0	21.0	1.05	217	1050	1050	525	525
	1/3M-4-D	4.3	7.0	28.0	1.05	290	1010	1010	505	505
	1/3M-5-D	4.3	7.0	35.0	1.05	217	890	890	445	445
	1/3M-2-T	4.3	7.0	14.0	0.76	217	1100	1730	550	865
	1/3M-3-T	4.3	7.0	21.0	0.76	217	980	980	490	490
	1/3M-4-T	4.3	7.0	28.0	0.76	217	920	928	460	460
	1/3M-5-T	4.3	7.0	35.0	0.76	217	880	880	440	440
1/6 Model	1/6M-2-D	2.2	3.5	7.0	1.01	180	350	330	175	265
	1/6M-3-D	2.2	3.5	10.5	1.01	180	270	270	135	135
	1/6M-4-D	2.2	3.5	14.0	1.01	180	250	250	125	125
	1/6M-5-D	2.2	3.5	17.5	1.01	180	216	216	108	108
	1/6M-2-R	2.2	3.5	7.0	1.18	180	280	340	140	170
	1/6M-3-R	2.2	3.5	10.5	1.18	180	260	260	130	130
	1/6M-4-R	2.2	3.5	14.0	1.18	180	230	230	115	115
	1/6M-5-R	2.2	3.5	17.5	1.18	180	226	226	113	113

험을 통해 상수  $k_1$ 과  $x$ 가 결정되어 사용되어지고 있다. 그러나 콘크리트보에서 전단거동과 관련된 식(2)의 상수  $k_1$ 과  $x$ 는 현재까지 많은 의견들이 일치로 보지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는  $f_t$ 와  $f_{cm}$ 의 관계를 단순한 콘크리트 재료적 관점에서 취급하지 않고 식(1)에 주어진 모든 변수와 함께 총괄적으로 다루었다.

식(1)에 나타난 6개의 변수에 대해 Buckingham Pi 정리를 적용하여 무차원 항(nondimensional term)  $\pi_i$ 를 만들면 다음과 같다.<sup>3,13)</sup>

$$\pi_1 = \frac{V_{cr}}{bdf_t} \quad \pi_2 = \frac{As}{bd} (=p) \quad \pi_3 = \frac{d}{a} \quad \pi_4 = \frac{b}{d} \quad (3)$$

위 항중  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ 와  $\pi_3$ 는 전단거동에 직접적 영향을 주는 주변수임을 알 수 있다. 그러나  $\pi_4$ 항의  $b$ ,  $d$ 의 영향은  $\pi_1$ 과  $\pi_2$ 에 이미 포함되어져 있다고 할 수 있다. 따라서  $\pi_4$ 를 무시하고 무차원 식을 만들면,

$$\frac{V_{cr}}{bdf_t} = k_2(p)^x (d/a)^y \quad (4)$$

식(2)를 위 식에 대입하면, 현재 사용되는 전단강도식의 형태가 나온다.

$$\frac{V_{cr}}{bd} = k(f_j)^x (p)^y (d/a)^z \quad (5)$$

여기서  $k$ ,  $x$ ,  $y$ 와  $z$ 는 상수로서, 많은 실험자료를 통해 통계적 방법인 다중회귀분석(multiple regression analysis)으로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 직접분석을 실행하지 않고, 대신에 377개의 많은 자료를 이용하여 분석한 Zsutty의 자료를 그대로 사용하였다.<sup>13)</sup> Zsutty의 자료에 의하면,

$$x=0.31, y=0.37, z=0.27 \quad (6)$$

식(6)의 값을 식(5)에 대입하여 무차원항을 만든 후, 모형과 원형의 상사조건(similitude requirement:  $[\pi]_{model} = [\pi]_{prototype}$ )을 적용하면:

$$\left[ \frac{V_{cr}}{k b d (f_j)^{0.31} (p)^{0.37} (d/a)^{0.27}} \right]_{model} = \left[ \frac{V_{cr}}{k b d (f_j)^{0.31} (p)^{0.37} (d/a)^{0.27}} \right]_{prototype} \quad (7)$$

모형실험 결과로부터 원형 결과의 추정은 위 식을 이용

하여 다음과 같이 할 수 있다. 즉, 모형에서 측정된 강도  $(V_{cr})_m$ 로부터 추정된 원형강도  $(V_{cr})_p$ 는

$$(V_{cr})_p = \left( \frac{k_p}{k_m} \right) \left( \frac{b_p}{b_m} \right) \left( \frac{d_p}{d_m} \right) \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm}} \right)^{0.31} \left( \frac{p_p}{p_m} \right)^{0.37} \left( \frac{(d/a)_p}{(d/a)_m} \right)^{0.27} (V_{cr})_m$$

$$(V_{cr})_m = S_k S_b S_d (S_{f_c})^{0.31} (S_p)^{0.37} (S_{a/d})^{0.27} (V_{cr})_m \quad (8)$$

여기서  $S_k$ =상수  $k$ 의 축척,  $S_b$ =보의 폭  $b$ 의 축척,  $S_d$ = 유효높이  $d$ 의 축척,  $S_{f_c}$ =콘크리트 압축강도의 축척,  $S_p$ =철근비  $p$ 의 축척,  $S_{a/d}$ = $a/d$ 의 축척비이다. 본 연구에서의 모형보는 왜곡모형(distorted model)으로,  $S_k=S_{a/d}=1$ 이고,  $S_b=S_d=3$  또는 6이며,  $S_{f_c}$ ,  $S_p$ 는 각 보마다 다르다. 따라서 모형실험강도  $(V_{cr})_m$ 로부터 원형강도 추정값  $(V_{cr})_p$ 는

$$(V_{cr})_p = S_b S_d (S_{f_c})^{0.31} (S_p)^{0.37} (V_{cr})_m \quad (9)$$

식(9)에 의해 모형실험결과로부터 추정된 원형전단강도  $(V_{cr})_p$ 를 표 7에 정리하였다. 대체적으로 축소 모형보의  $a/d$ 에 따른 전단강도의 변화 경향과 파괴양상은 원형(prototype)보의 것과 거의 일치하고 있음을 나타내고 있어서, 소축척화에 따른 보의 전단거동은 그대로 복제시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 6에 나타냈듯이, 이형철근을 쓴 보에서의 원형추정전단강도  $(V_{cr})_p$ 는 축척이 작아질수록 증가함을 알 수 있다. 이것이 바로 크기효과(size effect) 현상을 잘 나타내주고 있으며, 원형보의 실험값에 비해 1/3 축척에서는 평균 15%, 1/6 축척에서는 30% 정도 큰  $(V_{cr})_p$ 가 산출되었다. 그러나 그림 6에서 알 수 있듯이, 전단길이에 따른 크기효과의 변화가 상당히 컸다. 즉, 지간이 긴 보일수록  $(V_{cr})_p$ 가  $(V_{cr})_{est}$ 에 가까운 값을 나타내고 있어서, 긴 보일수록 크기효과가 작아지는 것을 알 수 있다.

강도 관점에서만 살펴보면, 원형(round)철근이 가장 좋은 결과를 나타내고 있으며, 나선(thread)철근은 이형철근보다 큰  $(V_{cr})_p$ 를 나타내고 있다. 이것은 전체적인 균열양상(crack pattern)을 살펴보면, 나선철근을 사용한 보의 휨균열양상이 원형(prototype)보의 것과 가장 근접하였고, 원형(round)철근을 사용한 보에서의 적은 수의 휨균열이 큰 간격으로 발생한대에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 즉 적은 수의 휨균열은 전단균열 정점의 응력을 상대적으로 크게 하기 때문에 파괴강도가 적게 될 수밖에 없을 것이다. 반면에 나선철근을 사용한 보에서는



Table 7 Similitude of Prototype and Model

a/d	Beam	모형실험 전단강도 (V <sub>c</sub> ) <sub>m</sub> (kg)	Scale Factor				원형추정 전단강도 (V <sub>c</sub> ) <sub>p</sub> (kg)	원형실험 전단강도 (V <sub>c</sub> ) <sub>test</sub> (kg)	(V <sub>c</sub> ) <sub>p</sub> (V <sub>c</sub> ) <sub>test</sub>
			S <sub>b</sub>	S <sub>d</sub>	S <sub>c</sub>	S <sub>v</sub>			
2	1/3M-2-D	650	3	3	0.8517	1.0000	4850	4850	1.15
	1/3M-2-T	550	3	3	1.1382	1.3816			1.20
	1/6M-2-D	175	6	6	1.3722	1.0396			1.45
	1/6M-2-R	140	6	6	1.3722	0.8898			1.10
3	1/3M-3-D	525	3	3	1.1382	1.0000	4050	4050	1.21
	1/3M-3-T	490	3	3	1.1382	1.3816			1.28
	1/6M-3-D	135	6	6	1.3722	1.0396			1.34
	1/6M-3-R	130	6	6	1.3722	0.8898			1.22
4	1/3M-4-D	505	3	3	0.8517	1.0000	3850	3850	1.12
	1/3M-4-T	460	3	3	1.1382	1.3816			1.26
	1/6M-4-D	125	6	6	1.3722	1.0396			1.31
	1/6M-4-R	115	6	6	1.3722	0.8898			1.14
5	1/3M-5-D	445	3	3	1.1382	1.0000	3700	3700	1.13
	1/3M-5-T	440	3	3	1.1382	1.3816			1.26
	1/6M-5-D	108	6	6	1.3722	1.0396			1.18
	1/6M-5-R	113	6	6	1.3722	0.8898			1.16

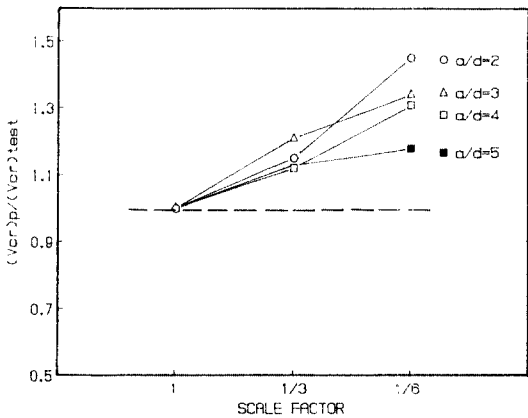


Fig. 6 Ratio of (V<sub>c</sub>)<sub>p</sub>/(V<sub>c</sub>)<sub>test</sub> with Variation of Scale Factor in Beam using Deformed Bar

많은 수의 휨균열이 고르게 분포되어 발생됨으로써 전단 균열에 상대적인 응력집중현상이 작기 때문에 전단강도가 크게 산출된 것으로 판단된다. 위와 같은 관점에서 살펴 본다면, 축소모형에서의 모형철근의 형태는 연구목적에 따라 원형(round) 또는 나선철근을 사용하는 것이 더 좋은 결과를 산출할 수 있을 것이다. 즉, 전단에 의한 파괴처럼 한 균열이 파괴를 지배하는 형태의 구조물을 모형실험을 하는데는 원형(round) 철근이 유리하다고 할 수 있고, 지진하중 또는 충격하중을 받는 복잡한 구조

물에서와 같이 에너지축적정도가 구조물의 거동을 지배하는 구조물 실험에는 균열형상에 대한 상사성이 좋은 나선 모형철근이 더 좋은 결과를 산출할 수 있을 것으로 생각 된다.<sup>12)</sup>

### 5. 결론

본 연구에서는 규모가 크고 거동이 복잡한 철근콘크리트구조를 실험으로 연구함에 있어서 소축척 구조모형실험을 이용할 수 있도록 모형재료와 그 기법을 개발하고자 하였으며, 이들의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 원형(prototype) 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 골재입도 및 골재 대 시멘트 비를 적절하게 선택함으로써 비교적 정확하게 모형화시킬 수 있다.

(2) 축척의 크기에 따른 단축보의 전단강도는 실험보의 결과보다 1/3 축척에서 평균 15%, 1/6 축척에서 30%정도 크게 크기효과(size effect)가 나타났다. 그러나 보의 전단길이에 따른 크기효과의 변화가 상당히 크며, 특히 전단길이가 클수록 크기효과는 감소하여, a/d가 5인 1/6 축척의 모형보에서 15% 정도의 크기효과를 나타내고 있다. 이것은 a/d가 큰 보일수록 휨거동의 영향이 연관되기 때문으로 생각된다.

(3) 강도상사 측면에서 원형(round)철근이 좋은 결과를 나타냈으나, 균열형상상사 측면에서는 좋지 않았으며, 반면에 나선철근은 강도상사 측면에서는 크기효과(size effect)가 현저하나, 균열형상상사에서 좋은 모형철근으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단 1990년도 지방대 육성 학술연구구성비의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사한다.

#### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 444, "State-of-the-Art Report : Models of Reinforced Concrete Members," American Concrete Institute, Detroit, Michigan 1977.
2. ACI Ad Hoc Committee on Structural Models, "Models for Concrete Structures," ACI Special Publication No.24, Detroit, Michigan, 1970.
3. Sabnis, G.M., Harris, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., "Structural Modeling and Experimental Techniques," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1983.
4. White, R.N., "Modeling Techniques for Reinforced Concrete Structure," Report No.326, Dept. of Structural Engineering, Cornell University, 1976.
5. Harris, H.G., Editor, "Dynamic Modeling of Concrete Structure," Publication SP-73, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1982.
6. Bertero, V.V., Aktan, A.E., Harris, H.G., and Chowdhury, A.A., "Mechanical Characteristics of Materials Used in a 1/5 Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure," Report No. UCB/EERC-83/21 College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 1983.
7. Bedell, R.J., and Abrams, D.P., "Scale Relationships of Concrete Columns," Structural-Research Series No.8302, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1983.
8. Marayama, Y., and Noda, S., "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, Tokyo, Japan, 1983.
9. Darwin, D., "The Effect of Paste—Aggregate Bond Strength Upon the Behavior of Portland Cement Concrete Under Short-Term Load." M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, 1968.
10. Noor, F.A., Wijayasri, S., "Modeling the Stress-Strain Relationship of Structural Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol.34, No.116, March, 1983.
11. Harris, H.G., Sabnis, G.M., and White, R.M., "Small Scale Direct Models of Reinforced and Prestressed Concrete Structures," Report No.376, Cornell University, September 1966.
12. Kim, W., A. El-Attar, and White, R.N., "Small-Scale Modeling Techniques for Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loads," Technical Report NCEER-88-0041, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, November 22, 1988.
13. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data," ACI Journal, November, 1968, pp.943~951.

(접수일자: 1991. 11. 5)