

# 철근콘크리트 구조물의 축소모형 부재 제작 및 역학적 특성

박 훈<sup>1)</sup> · 유지완<sup>1)</sup> · 이희광<sup>1)</sup> · 김승곤<sup>1)</sup>

## 1. 서 론

축소모형을 이용한 철근콘크리트 구조물 발파해체시 구조물의 거동을 분석하기 위해서는 축소모형 부재에 대한 적절한 축소를 산정과 축소모형 부재를 구성하는 재료의 역학적 특성이 원형(prototype) 철근콘크리트 재료와 상사(similitude)되어야 한다.

본 연구에서는 축소모형 부재의 축소를 산정하고, 축소모형 콘크리트와 축소모형 철근을 선정하여 콘크리트의 배합 및 압축과 인장에 대한 철근의 배근을 콘크리트 표준시방서와 콘크리트 구조설계 기준에 의해 기술하였으며 재료의 역학적 특성인 축소모형 콘크리트의 압축강도와 인장강도, 축소모형 철근의 인장강도를 실험하여 원형(prototype) 철근콘크리트 부재를 구성하는 재료와의 상사관계를 검토하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 축소모형 부재의 축소율 산정

본 연구에서 축소모형 부재의 재료선정은 구성재료의 밀도를 기준으로 하여 축소모형 콘크리트는 굵은골재 최대치수 10mm인 콘크리트를 선정하였고, 축소모형 철근의 주철근은 SWM-A, 4.00을 선정하였고, 띠철근 및 배력철근은 SWM-A, 3.20을 선정하였다. 축소모형 부재의 축소는 축소모형 콘크리트 배합시 굵은골재의 최대치수를 고려하여 기둥은 압축부재 단면의 길이, 보는 폭과 높이, 슬래브는 두께에 대해 축소를 1/5로 결정하였다. 축소모형 철근은 원형(prototype) 철근인 이형봉강의 공칭지름에 대해 축소를 1/5로 결정하였다. 다음 표 1은 축소모형 부재의 규격 및 축소를 나타낸 것이며, 표 2는 축소모형 철근의 규격 및 축소를 나타낸 것이다.

표 1. 콘크리트 부재의 축소율

부재	원형 부재 규격(mm)		축소모형 부재 규격(mm)		축소율
	단면 길이	폭	단면 길이	폭	
주기둥	400	600	80	120	1/5
보조기둥	400	400	80	80	1/5
보	400	600	80	120	1/5
슬래브		150		30	1/5

1) 전북대학교

표 2. 철근의 축소율

종류	원형 이형철근		축소모형 철근		축소율
	규격	공칭지름(mm)	규격	실측지름(mm)	
주철근	SD300, D19	19.1	SWM-A, 4.00	3.81	1/5
띠철근, 배력철근	SD300, D16	15.9	SWM-A, 3.20	3.18	1/5

## 2.2 축소모형 부재의 콘크리트 배합 및 철근의 배근 콘크리트 배합

굵은골재의 최대치수는 부재 최소치수의 1/5을 초과하지 않고, 철근피복 및 철근의 최소 순간격의 3/4을 초과하지 않아야 하며 거푸집 양 측면 사이의 최소거리의 1/5, 슬래브 두께의 1/3, 개별철근, 다발철근, 프리스트레싱 긴장재(prestressing tendon) 또는 덕트 사이 최소 순간격의 3/4를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있다(한국콘크리트학회, 2004). 따라서 본 실험에서는 10mm의 굵은골재를 사용하여 축소모형 콘크리트를 배합하였다.

콘크리트 설계기준강도( $f_{ck}$ )는 대한주택공사 전문시방서에서 제시된 상부구조, 기초구조를 포함한 건축공사 설계기준강도인 24MPa을 축소모형 부재의 설계기준강도로 적용하였다(대한주택공사, 2006).

콘크리트 배합강도( $f_{cr}$ )는 다음 식 (1)에 의해 계산된 표준편차를 이용하여 식(2), 식(3)에 의해 계산된 값 중에서 큰 값보다 커야하며, 콘크리트 압축강도의 시험횟수가 29회 이하이고 15회 이상인 경우는 다음 표 3의 보정계수를 곱한 값을 표준편차로 사용할 수 있다(한국콘크리트학회, 2004).

$$s = \left[ \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $s$ 는 표준편차,  $X_i$ 는 개개의 강도 시험값,  $\bar{X}$ 는  $n$ 개의 강도 시험 결과 평균값,  $n$ 은 연속 강도 시험 횟수이다.

$$f_{cr} \geq f_{ck} + 1.34s \quad (2)$$

$$f_{cr} \geq (f_{ck} - 3.5) + 2.33s \quad (3)$$

표 3. 시험 횟수가 15회 이상이고 29회 이하일 때 표준편차의 보정 계수

시험 횟수	표준편차의 보정계수
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 이상	1.00

축소모형 콘크리트 배합에서는 혼화제를 쓰지 않고 시험배합설계 없이 배합설계를 하고자 기존 배합표에 의한 간이배합설계를 기준으로 시멘트-물비  $C/W$ 와 재령 28일 압축강도 ( $f_{28}$ )과의 관계식(김성수, 1998)을 단위 환산한 식 (4)를 이용하였다.

$$f_{28} = -20.59 + 21.08 \times \frac{C}{W} \quad (4)$$

여기서  $f_{28}$ 은 재령 28일에서 콘크리트의 압축강도,  $C$ 는 단위시멘트량,  $W$ 는 단위수량이다. 다음 표 4는 각각의 단위량을 산출한 축소모형 콘크리트의 시방배합표이다.

표 4. 축소모형 콘크리트의 시방배합표

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트비 $W/C$ (%)	잔골재율 $S/a$ (%)	단위량 ( $kg/m^3$ )				
					물 $W$	시멘트 $C$	잔골재 $S$	굵은골재 $G$	혼화제 ( $g/m^3$ )
10	10	3	47.2	54	228	483	827	718	—

#### 철근의 배근

원형(prototype) 이형철근의 경우 KS D 3504에서 SD300의 항복강도는  $300N/mm^2$  이상, 인장강도는  $440N/mm^2$  이상으로 규정하고 있으며, 축소모형 철근의 경우 KS D 3552에서 SWM-A의 인장강도는  $260\sim 590N/mm^2$ 으로 규정하고 있다. 축소모형 철근의 축소율 1/5을 고려하여 주철근인 SD300, D19는 SWM-A, 4.00으로, 띠철근 및 배력철근인 SD300, D16은 SWM-A, 3.20으로 배근하였다.

#### 1) 기둥의 배근

옥외 또는 흙에 접하지 않는 경우 기둥의 최소 피복두께는 40mm이다. 또한 굵은골재 최대치수의 4/3배 이상이어야 한다. 따라서 기둥의 최소피복두께는 1/5인 8mm 이상, 굵은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 축소모형 기둥의 피복두께는 15mm로 하였다.

압축부재인 기둥배근은 종방향 철근의 순간격 40mm의 1/5인 8mm 이상, 철근 공칭 지름 4mm의 1.5배인 6mm 이상, 굵은 골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 축소모형 기둥의 종방향 철근 간격은 주기둥의 경우 30mm, 보조기둥의 경우 25mm로 하였다.

축방향 주철근수는 직사각형 띠철근 내부 최소 개수는 4이고, 축방향 주철근 단면적은 전체 단면적( $A_g$ )의 0.01배 이상, 0.08배 이하이므로, 축소모형 주기둥에는 8개를 배근하였고, 축소모형 보조기둥에는 6개를 배근하였다. 이때 압축 철근비( $\rho'$ )는 주기둥의 경우 0.011, 보

조기등의 경우 0.012이다.

띠철근의 수직간격은 종방향 철근지름의 16배 이하인 64mm 이하, 띠철근이나 철선지름의 48배 이하인 153.6mm 이하, 기둥 단면의 최소 치수인 80mm 이하로 배근해야 하므로, 62mm 간격으로 배근하였다.

횡지지된 종방향 철근의 양쪽으로 순간격이 150mm 이상 떨어지지 않아야 하므로 150mm의 1/5인 30mm 이상 떨어지지 않아야 한다. 축소모형 주기등의 순간격은 26mm이고, 보조기둥의 순간격은 21mm이므로 두 기둥 모두 30mm 이하이다. 따라서 두 기둥 모두 횡지지된 띠철근은 배근하지 않았다.

## 2) 보의 배근

옥외 또는 흠에 접하지 않는 경우 보의 최소 피복두께는 기둥과 동일한 40mm이고 굽은골재 최대치수의 4/3배 이상이다. 따라서 보의 최소피복두께는 1/5인 8mm 이상, 굽은골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 축소모형 보의 피복두께는 20mm로 하였다.

인장철근 보강이 요구되는 보의 모든 단면에 대해 최소 양의 인장철근 보강이 필요하며 인장철근의 단면적( $A_s$ )는 다음 식 (5), 식 (6)에 의해 계산된 값 중에서 큰 값 이상으로 하여야 한다.

$$A_{s,\min} = \frac{0.25 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} bd \quad (5)$$

$$A_{s,\min} = \frac{1.4}{f_y} bd \quad (6)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 설계기준강도,  $f_y$ 는 철근의 설계기준 항복강도,  $b$ 는 부재의 압축면의 폭,  $d$ 는 압축연단으로부터 인장철근 중심까지의 거리를 나타낸다.

식 (5)에서 인장철근의 최소단면적( $A_{s,\min}$ )은  $32.65\text{mm}^2$ , 식 (6)에서 인장철근의 최소단면적( $A_{s,\min}$ )은  $37.33\text{mm}^2$ 이다. 따라서 단면적  $12.56\text{mm}^2$ 인 SWM-A, 4.00을 3개 배근하였으며, 인장 철근비( $\rho$ )는 0.0047이다.

동일 평면에서 평행하는 철근 사이의 수평 순간격은 25mm 이상, 철근의 공칭 지름 이상으로 하여야 하며, 굽은골재의 최대치수 조건을 만족해야 한다. 따라서 철근 간격은 수평 순간격 25mm의 1/5인 5mm 이상, 철근 공칭지름 4mm 이상, 굽은 골재 최대치수의 4/3배인 13.3mm 이상이어야 하므로, 보의 철근 간격은 25mm로 하였다. 철근이 상단과 하단에 2단 이상으로 배치된 경우 상하철근은 동일한 연직면 내에 배치되어야 하고, 이때 상하철근의 순간격은 25mm 이상이어야 하므로, 순간격은 25mm의 1/5인 5mm 이상이고, 단근 보의 하단에 배치된 철근과 동일하게 복근 보의 상단에 철근을 배치하였다.

## 3) 슬래브의 배근

축소모형 슬래브는 장변과 단변이 동일하고 4변이 모두 지지되는 2방향 슬래브를 기준으

로 배근하였다. 2방향 슬래브의 각 방향 철근 단면적은 최소 철근비 0.0014 이상이어야 한다.

옥외 또는 흙에 접하지 않는 경우 D35 이하 슬래브의 최소 피복두께는 20mm이다. 또한 설계기준 항복강도( $f_y$ )가 300MPa 일 때 2방향 슬래브 시스템의 최소 두께는 식 (7)과 같으나 지판이 없는 슬래브의 경우 최소 두께는 120mm 이상으로 해야 한다.

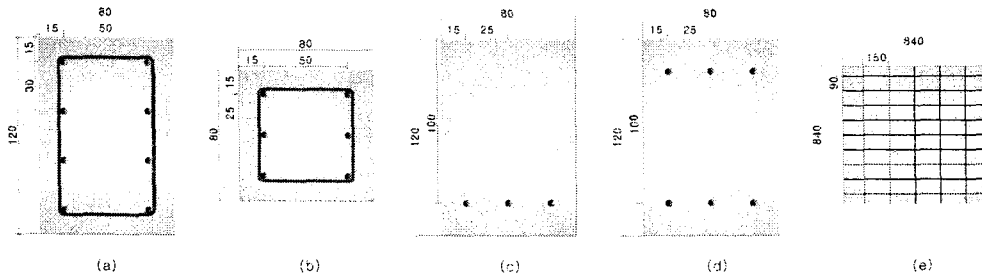
$$h_{min} = l_n / 35 \quad (7)$$

여기서,  $h_{min}$ 은 2방향 슬래브 최소 두께,  $l_n$ 은 모멘트가 결정되는 방향으로 측정된 받침부 사이의 순경간이다.

따라서 축소모형 슬래브 철근의 최소 피복두께는 4mm 이상, 슬래브의 최소 두께는 24mm 이상이어야 한다. 또한 굵은 골재의 최대치수가 슬래브 두께의 1/3 이하이므로 슬래브의 두께를 30mm로 하였다.

슬래브에서 휨 주철근의 간격은 슬래브 두께의 3배 이하이므로 SWM-A, 4.00을 90mm 간격으로 배근하였으며, 주철근에 수직하게 배력철근을 슬래브 두께의 5배 이하로 SWM-A, 3.20을 150mm 간격으로 배근하였다. 이때 주철근 방향의 철근비는 0.0045이고, 배력철근 방향의 철근비는 0.0015이다.

그림 1은 축소모형 부재의 단면 및 철근의 배근상태를 나타낸 것이다.



(a)주기둥, (b)보조기둥, (c)단근보, (d)복근보, (e)슬래브.

그림 1. 축소모형 부재의 단면 및 배근(unit : mm)

### 2.3 축소모형 재료의 역학적 특성

#### 콘크리트 공시체 제작

본 실험에서는 콘크리트의 압축강도 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법), 인장강도 KS F 2423(콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법) 시험용으로 표준공시체  $\phi 150 \times 300mm$ 를 제작하였다. 표준공시체의 콘크리트 설계기준강도( $f_{ck}$ )는 24MPa이고, 제작에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트, 잔골재는  $\phi 5mm$  체를 통과한 모래를 사용하였으며 굵은 골재는  $\phi 5mm$  체에는 남고  $\phi 10mm$  체를 통과한 부순돌을 사용하였다.

**철근 시험편 제작**

실험에 사용된 철근 시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편) 시험용으로 인장 시험편 규격은 표 5와 같으며, SWM-A, 4.00, SWM-A, 3.20를 각각 10개씩 9A호로 제작하였다.

표 5. 인장 시험편 규격

시험편 종류	표점거리 $L(mm)$	물린간격( $mm$ )
9A호	100	150 이상
9B호	200	250 이상

**실험결과**

1) 표준공시체 압축강도시험 결과

콘크리트 설계기준강도( $f_{ck}$ )는  $24MPa$ , 표준편차( $s$ )는 식 (1)에 계산된  $1.93MPa$ 에 압축강도의 시험횟수가 15회이므로 표 3에서 제시된 보정계수 1.16을 곱한  $2.24MPa$ 이다. 따라서 식 (2)와 (3)에 의한 값 중 큰 값인  $27MPa$ 을 콘크리트 배합강도( $f_{cr}$ )로 정하였다.

표준공시체 압축강도시험 결과, 압축강도는  $29.54\sim 35.98MPa$ 이며, 평균압축강도는  $31.70MPa$ 이고, 압축강도가 콘크리트 배합강도보다 큰 원인은 굵은골재를 부순들로 사용한 경우에는 골재와 시멘트풀과의 부착이 좋기 때문이며, 일반적으로 강자갈을 사용한 원형(prototype) 콘크리트의 압축강도보다 1.20~1.35의 강도비를 갖는다(김성수, 1998). 다음 표 6은 표준공시체 압축강도시험 결과이다.

표 6. 표준공시체 압축강도시험 결과

시료 번호	지름( $mm$ )	높이( $mm$ )	수직하중( $KN$ )	압축강도( $MPa$ )
C-1	150.29	289.68	534.17	30.13
C-2	151.69	294.63	585.36	32.41
C-3	149.29	292.03	612.62	35.02
C-4	151.00	293.99	535.54	29.92
C-5	150.27	296.65	533.88	30.12
C-6	151.87	293.38	538.29	29.73
C-7	150.45	294.86	561.73	31.61
C-8	151.42	295.75	647.54	35.98
C-9	150.08	293.85	566.93	32.06
C-10	150.84	297.10	587.62	32.90
C-11	151.61	296.17	554.86	30.75
C-12	149.92	294.88	567.51	32.17
C-13	150.25	296.73	523.48	29.54
C-14	151.38	294.60	590.36	32.82
C-15	150.69	294.94	539.95	30.29
평균	150.74	294.62	565.32	31.70

2) 표준공시체 인장강도시험 결과

표준공시체 인장강도시험 결과, 인장강도는 2.67~3.75 MPa이며, 평균인장강도는 3.13 MPa이다. 본 실험에서 평균인장강도와 평균압축강도의 비는 0.0987이고, 다음 표 7은 표준공시체의 인장강도시험 결과를 나타낸 것이다.

표 7. 표준공시체 인장강도시험 결과

시료 번호	지름(mm)	높이(mm)	수직하중(KN)	인장강도(MPa)
T-1	148.53	297.04	214.47	3.10
T-2	151.21	297.19	224.28	3.18
T-3	150.28	295.12	247.62	3.56
T-4	150.45	293.35	225.65	3.26
T-5	150.78	295.64	262.23	3.75
T-6	151.44	294.14	187.41	2.68
T-7	152.19	283.05	180.54	2.67
T-8	150.51	294.47	198.68	2.86
T-9	150.65	294.23	237.71	3.42
T-10	150.26	297.65	198.10	2.82
평균	150.63	294.19	217.67	3.13

3) 철근 인장강도시험 결과

본 실험에서 사용된 철근의 인장강도시험 결과는 다음 표 8, 표 9와 같다. SWM-A, 3.20의 항복강도는 253.68~417.82 N/mm<sup>2</sup>, 인장강도는 402.59~475.79 N/mm<sup>2</sup>이고, SWM-A, 4.00의 항복강도는 272.16~358.01 N/mm<sup>2</sup>, 인장강도는 390.39~413.82 N/mm<sup>2</sup>이다.

SD300의 항복강도는 300 N/mm<sup>2</sup> 이상으로 규정하고 있으며, 본 실험에 사용된 SWM-A, 3.20의 평균항복강도는 301.88 N/mm<sup>2</sup>이며, SWM-A, 4.00의 평균항복강도는 313.08 N/mm<sup>2</sup>이다. SD300의 인장강도는 440 N/mm<sup>2</sup> 이상으로 규정하고 있으며, SWM-A, 3.20의 평균인장강도는 420.89 N/mm<sup>2</sup>이고, SWM-A, 4.00의 평균인장강도는 409.13 N/mm<sup>2</sup>이다.

그러므로 본 실험에 사용된 축소모형 철근은 원형(prototype) 철근인 이형봉강의 항복강도 조건에 적합하고, 인장강도는 원형(prototype) 철근인 이형봉강의 93.0~95.7%의 범위에 있다. 그림 2는 SWM-A, 3.20의 인장강도와 변위와의 관계를 나타내고 있으며, 그림 3은 SWM-A, 4.00의 인장강도와 변위와의 관계를 나타내고 있다.

표 8. SWM-A, 3.20 인장강도시험 결과

시료번호	철근지름(mm)	항복강도(N/mm <sup>2</sup> )	인장강도(N/mm <sup>2</sup> )
A-3.2-1	3.18	268.36	402.59
A-3.2-2	3.18	315.38	402.59
A-3.2-3	3.18	391.05	439.19
A-3.2-4	3.18	417.82	475.79
A-3.2-5	3.18	264.75	402.59
A-3.2-6	3.18	306.83	439.19
A-3.2-7	3.18	287.92	439.19
A-3.2-8	3.18	256.17	402.59
A-3.2-9	3.18	253.68	402.59
A-3.2-10	3.18	256.79	402.59
평균	3.18	301.88	420.89

표 9. SWM-A, 4.00 인장강도시험 결과

시료번호	철근지름(mm)	항복강도(N/mm <sup>2</sup> )	인장강도(N/mm <sup>2</sup> )
A-4.0-1	3.81	350.92	413.82
A-4.0-2	3.81	297.90	413.82
A-4.0-3	3.81	322.10	413.82
A-4.0-4	3.81	322.10	413.82
A-4.0-5	3.81	358.01	413.82
A-4.0-6	3.81	299.86	390.39
A-4.0-7	3.81	272.16	390.39
A-4.0-8	3.81	295.51	413.82
A-4.0-9	3.81	335.40	413.82
A-4.0-10	3.81	276.80	413.82
평균	3.81	313.08	409.13



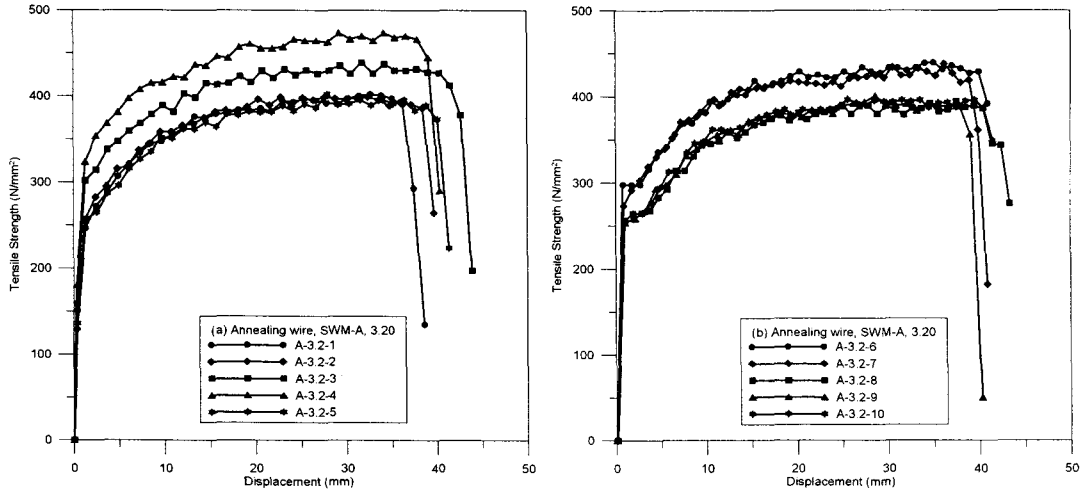


그림 2. SWM-A, 3.20의 인장강도와 변위와의 관계

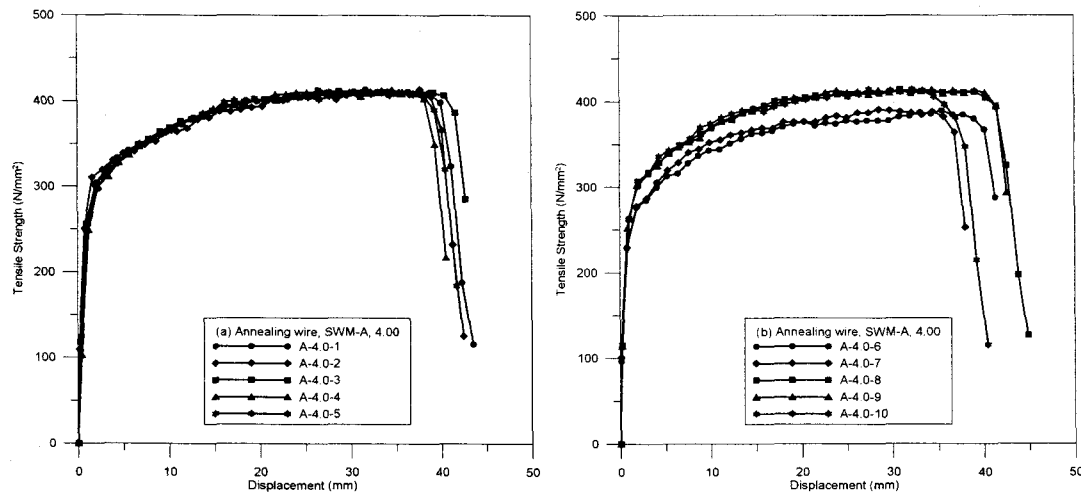


그림 3. SWM-A, 4.00의 인장강도와 변위와의 관계

### 3. 결론

본 연구에서 구성재료의 밀도를 기준으로 축소모형 콘크리트는 굵은골재 최대치수 10 mm인 콘크리트를 선정하였다. 또한 축소모형 철근의 주철근은 SWM-A, 4.00을 선정하였고, 띠철근 및 배력철근은 SWM-A, 3.20을 선정하였다. 축소모형 부재의 축소율은 축소모형 콘크리트 배합시 굵은골재 최대치수를 고려하여 부재 단면의 길이에 대해 1/5로 결정하였으며, 축소모형 철근은 공칭지름에 대해 1/5로 결정하였다.

박 훈, 유지완, 이희광, 김승곤

축소모형 콘크리트의 압축강도는 콘크리트 설계기준강도보다 1.32의 강도비를 가지며, 이것은 굵은골재를 부순들로 사용하여 굵은골재와 시멘트풀과의 부착이 좋아졌기 때문이다. 또한 평균인장강도와 평균압축강도의 비는 0.0987이었다.

축소모형 철근은 원형(prototype) 철근인 이형봉강의 항복강도 조건에 적합하였고, 인장강도는 원형(prototype) 철근인 이형봉강의 93.0~95.7%의 범위에 있었다.

따라서 축소모형 콘크리트와 축소모형 철근으로 구성된 축소모형 부재의 역학적 특성은 원형(prototype) 철근콘크리트 부재를 구성하는 재료와 상사되는 것을 알 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터 지원에 의해 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 대한주택공사, 2006, 대한주택공사전문시방서, KNHC/2006, 20210 콘크리트, pp. 163.
2. 한국콘크리트학회, 2004, 콘크리트표준시방서 해설, 기문당, 서울, pp. 95-121.
3. 한국콘크리트학회, 2004, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 서울, pp. 33-283.
4. 김성수, 1998, 최신토목재료학, 구미서관, 서울, pp. 95-153.