

# 모르터 충전 강관 슬리브를 이용한 철근 이음의 해석 모델

## The Analytical Model for the Reinforcement Bar Connection in Grout-Filled Steel Pipe Sleeve

황재호\*    이용재\*\*    이원호\*\*\*    이리형\*\*\*\*  
Hwang, Jae-Ho    Lee, Yong-Jae    Yi, Waon-Ho    Lee, Li-Hyung

---

### Abstract

The purpose of this study is to develop the analytical model for the reinforcement bar connection in grout-filled steel pipe sleeve, which consists of beam elements for the reinforcement bar and shell elements for the sleeve and the mortar and spring elements for the bond stress-slip relationship.

In the reinforcement bar connection using grout-filled steel pipe sleeve, the major variables are the bond stiffness between reinforcement bar and mortar( $K_1$ ) and between sleeve and mortar( $K_2$ ). It is nearly difficult to predict the exact bond stiffness with the experimental results. Therefore, The linearly elastic analyses using ABAQUS, FEM package show the validity of the mathematical equations for the bond stiffness and the choice of material elements in this paper.

To predict the behaviour between yield and ultimate tensile strength, the nonlinear analyses must be performed henceforth.

---

### 1 서론

국내 건설업계는 건설생산성 향상을 위해 공법 개발에는 주력을 하고 있으나, 구조물의 거동에 영향을 미칠 뿐만 아니라 건축물의 시공법 등과 밀접한 관계가 있는 철근의 이음법에 대해서는 그 연구

---

\* 한양대 대학원 석사과정  
\*\* 한양대 대학원 박사과정  
\*\*\* 광운대 건축공학과 교수, 공박  
\*\*\*\* 한양대 건축공학부 교수, 공박

가 거의 없는 실정이다. 또한 건축물의 대형화, 고층화 추세에 따라 직경이 굵은 철근의 사용이 필요 하리라 판단된다. 실제 국내 규준에서 D35를 초과하는 철근은 겹침 이음을 하지 못하도록 규정되어 있기 때문에 직경이 굵은 철근의 이음에는 기계식 철근 이음법이 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에 서는 시공성이 우수한 고강도 모르터 충전 강관 슬리브를 이용한 철근 이음법을 채택하여 직경이 굵 은 철근이음에 대한 기초적 연구로서 D22, D25철근을 대상으로 한 해석 모델을 개발하고, 기존의 실험 결과<sup>1)</sup>와 비교 분석하여 해석 모델의 타당성을 검증한 후, 철근과 모르터, 모르터와 강관 슬리브 사 이에서 발생하는 부착 강성 변화에 따른 변위 관계를 유도하여, 모르터 충전 강관 슬리브 시스템의 선 형 유한 요소 해석 모델을 개발하고자 한다.

## 2 해석 모델 개발

### 2.1 재료 요소 선정

유한 요소 해석을 통한 해석 모델 개발을 위해 ABAQUS 패키지를 이용하여 해석을 실시하였다. 철근 요소 선정을 위해 3차원 요소 중에서 solid 요소(C3D8)와 보 요소(B33)를 채택하였으며, 해석은 D22(SD40)철근을 대상으로 철근 재료 실험방법과 동일한 경계 조건으로 해석을 실시하였다. 해석 결 과는 표 1.과 같다. 표 1.에서 재료 실험 결과와 가장 근접된 보 요소를 철근의 해석 모델 요소로 선정 하였다.

표 1. 철근 요소별 비교 결과

	최대 하중 (ton)	최대 변형도 ( $\times 10^{-6}$ )	해석 소요 시간 (sec)
solid 요소	14.32	61.532	2549.3
보 요소	15.10	60.288	10.5
재료 실험	15.10	63.664	-

모르터와 강관 슬리브를 모델링하기 위해 사용 가능한 3차원 요소는 쉘 요소와 solid 요소가 있으 나, 본 연구에서는 철근의 보 요소와 연결이 용이하고 간략한 모델링과 해석 시간의 절약을 위해서 쉘 요소를 선택하였다. ABAQUS에서 쉘 요소는 두께와 길이의 비에 따라 두꺼운 쉘 요소와 얇은 쉘 요 소로 구분하고 있으며, 이들 값에 대한 경계값은 ABAQUS에서 1/15로 제안하고 있다. 따라서, 1개의 요소가 4개의 절점으로 이루어져 있고, 각 절점은 6개의 자유도를 가지고 있는 쉘 요소 중에서 고강도 모르터는 두꺼운 쉘 요소(S4R)를 사용하였으며, 강관 슬리브는 얇은 쉘 요소(S4R5)를 사용하였다.

### 2.2 부착-슬립 요소 선정

본 연구에서 채택한 모르터 충전 강관 슬리브 시스템은 부착 응력에 관한 역학적 거동의 규명이 매 우 중요하다. 철근 콘크리트 구조물에서 부착 응력은 균열이 발생한 후에 콘크리트와 철근의 응력 재 분배에 따른 변형도 변화에 기인하고, 두 재료의 부착면을 따라 작용하는 전단 응력으로 표현되며, 인 장 균열 면에서 이러한 응력의 변화로 인하여 슬립이 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 그러나 부착- 슬립 효과는 부착면에서의 응력 분포가 매우 불규칙하고 복잡하므로, 이론적으로 그 관계를 규명하기 가 어렵다. 특히 본 연구에서 대상으로 한 모르터 충전 강관 슬리브 시스템은 강관 슬리브 구속 효과 로 부착 응력에 대한 이론적 규명이 더욱 어려운 실정이다. 그러므로, 부착-슬립 관계의 규명은 실험 값에 대한 수치 해석을 통해 경험적으로 모델화하는 것이 일반적인 방법이다<sup>2)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 부착-슬립 관계를 다음과 같이 가정하여 모델링 하였다.

1. 항복 하중에 도달하기 전까지는 부착-슬립 관계는 선형적이다.
2. 모르터에 부착된 철근 표면에는 동일한 부착 응력이 작용한다.

모르터와 철근 사이, 모르터와 강관 슬리브 사이의 부착-슬립 관계를 모델링하기 위해, 본 해석 모델에서 사용한 스프링 요소의 기본 개념을 그림 1.에 표시하였다. 그림 1.(a)는 철근과 모르터 사이에 작용하는 부착력을 수직 성분과 수평 성분으로 나누어 표시한 것이고, 그림 1.(b)는 부착 응력을 모델링하기 위한 스프링 요소를 나타낸 것이다. 그림 1.(a)에서 부착 응력( $f_b$ )과 부착 응력에 의한 수직 성분( $f_b \tan \alpha$ )은 그림 1.(b)에서의 스프링 A와 스프링 C에 해당되며, 그림 1.(a)에서의 두 성분의 합력은 그림 1.(b)에서 스프링 B에 해당한다. 두 성분의 합력과 부착 응력( $f_b$ ) 또는 스프링 B와 A가 이루는 각도  $\alpha$ 는 Tepfers의 실험 결과에 의해  $45^\circ$ 로 모델링하였다.<sup>3)</sup>

각각의 기능을 가지고 있는 스프링 A, B, C에 대해 Ngo와 Scordelis는 철근과 콘크리트의 부착-슬립 모델에서 수직 스프링의 강성을 구하기는 어렵지만 수직 변위가 매우 작기 때문에 철근과 콘크리트의 절점은 일치시킬 수 있다고 하였으며, 수평 스프링이 부착-슬립의 관계를 지배하고 있는 것으로 보고하였다.<sup>4)</sup>

그러나, 본 연구에서의 부착 특성이 강관 슬리브에 의해 구속되므로 강관 슬리브와 철근사이에 있는 모르터는 대각선 방향으로 지압 응력이 발생하게 된다. 그러므로 본 해석 모델에서는 철근과 모르터를 연결하고 있는 스프링 C와 부착-슬립에 관계된 스프링 A의 역할을 모두 할 수 있는 대각선 스프링 B만 설치하고 스프링 A와 C는 제거한 스프링 요소를 해석 모델에서 사용하였다. 또한, 철근과 모르터 절점에 각각 연결되어 있는 대각선 스프링 B의 양단 끝 부분의 자유도를 철근 길이 방향(의력이 작용하는 방향)으로만 풀어 주고, 그 이외의 방향은 고정시켜 부착 응력이 철근 길이 방향으로만 작용할 수 있게 하여, 실제적인 부착 스프링 요소 모델과 동일한 거동을 하도록 하였다. 그림 2.에 대각선 스프링 요소와 철근 요소, 모르터 요소, 그리고 강관 슬리브 요소로 구성된 전체 해석 모델을 나타내었다

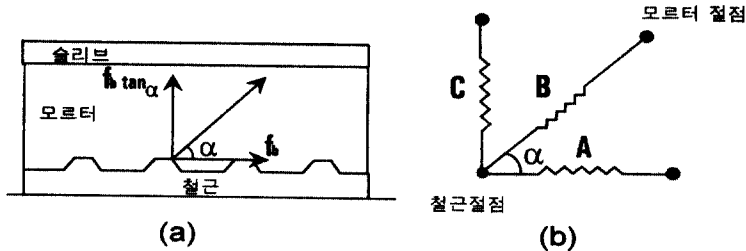


그림 1. 부착-슬립에 대한 스프링 요소 기본 개념

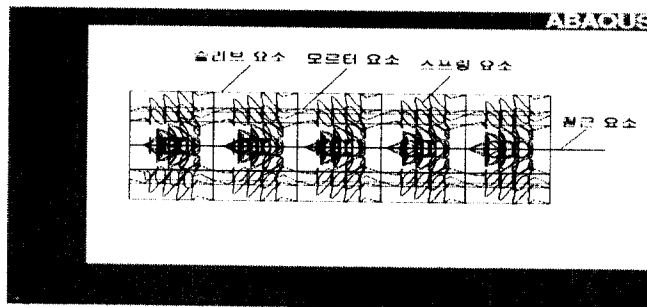


그림 2. 스프링 요소를 사용한 전체 해석 모델

### 2.3 스프링 요소의 강성 계수

철근과 모르터, 모르터와 강관 슬리브 사이에 설치된 스프링의 강성 계수를 결정하기 위해서, 철근과 모르터의 부착 강성( $K_1$ )이 발생하는 경우와 모르터와 강관 슬리브의 부착 강성( $K_2$ )이 발생하는 경우로 구분하여 각각의 경우에서 구한 부착 강성 값을 본 해석 모델의 스프링 요소 강성 계수로 사용하였다.

#### 2.3.1 철근과 모르터의 부착 강성( $K_1$ )

철근과 모르터 사이의 부착 강성( $K_1$ )을 구하기 위해 철근과 모르터 사이에서만 변형이 발생하고 나머지 구간인 모르터와 강관 슬리브는 일체로 거동한다고 가정하면 강관 슬리브에 발생하는 변위과 모르터에 발생하는 변위는 동일한 값을 가지게 된다. 그러므로, 철근과 모르터 사이에서 발생하는 순수한 변위( $S_{01}$ )는 그림 3.과 같이, 철근과 강관 슬리브의 총 변위( $S_{A1}$ ), 철근의 변형도( $\epsilon_r$ ), 강관 슬리브 변형도( $\epsilon_s$ )에 의한 관계로부터 식(1)과 같이 표시할 수 있다

$$S_{01} = S_{A1} - \int_a^c \epsilon_r dx + \int_0^b \epsilon_s dx \quad (1)$$

식(1)에서 모르터와 강관 슬리브가 일체로 거동한다고 가정하였으므로 철근과 모르터 사이의 부착 강성( $K_1$ )을 구하기 위해서 고강도 모르터의 변형은 무시하였다. 철근의 변형도  $\epsilon_r$ 은 실험시 강관 슬리브 단부 철근에 부착한 게이지(이하 W.G.S로 약칭)에 의해 구한 변형도를 말하며,  $\epsilon_s$ 는 강관 슬리브에 부착한 W.S.G에 의해 측정된 변형도를 말한다. 또한,  $S_{A1}$ 은 실험시 가력점 c점에 부착한 다이얼 게이지에 의해 측정된 변위 값을 사용하였다.

식(1)에서 구한  $S_{01}$ 과 실험시 작용한 항복 하중으로부터 고강도 모르터와 철근 사이의 부착 강성  $K_1$ 을 구하였다. 단 이때 하중과 변위 상태는 완전 탄성체로 가정하였다.

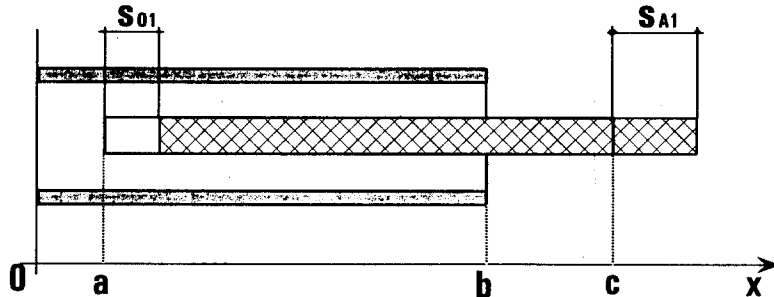


그림 3. 철근과 모르터에 슬립이 발생하는 경우

그림 3.에서 c점은 실험시 가력점이 되고, a점은 강관 슬리브 시공시 시공오차 흡수를 위해 강관 슬리브 중앙부에서 양단으로 각각 10mm씩 이격하여 시공한 것을 표시하고 있으며, b점은 철근의 정착 길이를 표시하였다.

#### 2.3.2 모르터와 강관 슬리브의 부착 강성( $K_2$ )

모르터와 강관 슬리브의 부착강성( $K_2$ )은 강관 슬리브와 모르터와의 순수한 부착 슬립에 의한 강성을 말한다. 그러므로, 부착강성( $K_2$ )을 구하기 위해서는 철근과 모르터 사이에서의 부착 강성( $K_1$ )을 구하는 경우와 반대로, 철근과 모르터 사이에서는 부착에 의한 슬립이 발생하지 않고 철근과 모르터가

일체로 거동한다고 가정하여야 한다.

따라서 그림 4.의 모르터에 배근된 철근의 구간인 0~b사이에서의 철근의 변형은 무시하고, b~c 구간에서의 철근 변형만을 고려하면, 모르터와 강관 슬리브에서 발생한 변위( $S_{02}$ )는 전체 변위( $S_{A2}$ ), 철근의 변형도( $\epsilon_r$ )에 의한 변형, 모르터의 변형도( $\epsilon_m$ )에 의한 변형, 그리고 강관 슬리브의 변형도( $\epsilon_s$ )에 의한 변형을 고려하여 식(2)와 같이 표시된다.

$$S_{02} = S_{A2} - \int_b^c \epsilon_r dx - \int_0^b \epsilon_m dx + \int_0^b \epsilon_s dx \quad (2)$$

그러나, 탄성구간에서 모르터의 변형은 거의 발생하지 않고, 또한 강관 슬리브로 인해 모르터의 변형도를 측정하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 모르터에 의한 변형량은 무시하였다. 식(2)에서 구한 총 변위량  $S_{A2}$ 를 이용하여  $K_1$ 과 동일한 방법으로 모르터와 강관 슬리브 사이의 부착강성  $K_2$ 를 구하였다.

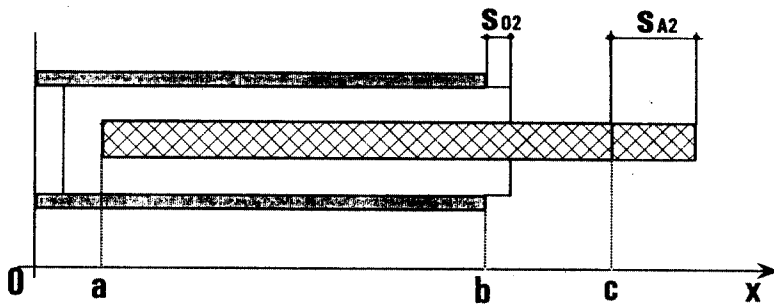


그림 4. 모르터와 강관 슬리브 사이에 슬립이 발생한 경우

#### 2.4 요소 수렴성 검토

모르터 충전 강관 슬리브 시스템에 대한 3차원 해석 모델 개발을 위한 합리적인 메쉬 형태를 결정하기 위해 3STN25(철근 직경 25mm이고 강관 슬리브의 직경 60.5mm, 두께 5.5mm, 길이 300mm) 실험체를 대상으로 모델링 하였으며, 이때 메쉬 형태는 5개, 10개, 20개로 구분하여 그림 5.와 표 2.에 표시하였다. 각각의 메쉬 형태에 대해 선형 탄성 해석을 실시하였으며, 작용 하중은 실험체의 최대 하중까지 3톤씩 증가시키면서 철근 끝단의 변위를 측정하여 실험 결과와 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서와 같이 각각의 요소에 대한 항복 하중시 변위는 메쉬 1은 17.5mm, 메쉬 2는 17.5mm, 메쉬 3은 16.93mm으로 나타나 거의 동일하게 평가되었으며 실험 결과와도 9%정도의 오차를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 모델링이 간편한 메쉬 1을 선택하여 대상 실험체 해석 모델링에 사용하였다.

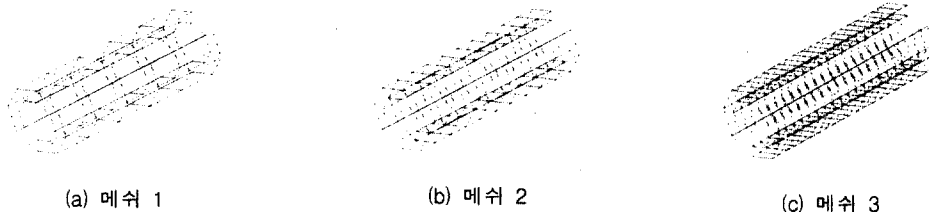


그림 5. 메쉬 형태

표 2. 각각의 메쉬 형태 비교

	강관 슬리브, 모르터 메쉬 (w×l)	철근 메쉬 (lr)	스프링 개수 (개)
메쉬 1	8×5	5	40
메쉬 2	8×10	10	40
메쉬 3	8×20	20	40

l : 셸 길이 방향의 요소 개수, w : 셸 단면의 요소 개수, lr : 철근 보 요소의 길이 방향 요소 개수

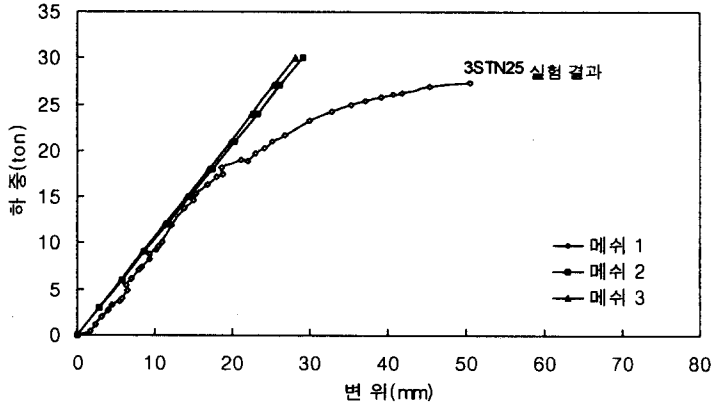


그림 6. 유한 요소 모델의 수렴성 검토

### 3 모르터 충전 강관 슬리브 시스템의 선형 탄성 해석

본 연구에서 제시한 강관 슬리브 시스템의 해석 모델 선정시 가장 문제가 되는 부분은 식(1)과 식(2)에서 제안한 부착 강성  $K_1$ 과  $K_2$ 의 타당성에 있다. 그러나, 본 연구에서 제안한 부착강성  $K_1$ 과  $K_2$ 는 각각의 경우가 독립된 상태로 거동하는 것으로 가정하여 산정하였으나, 실제 거동에 있어서는  $K_1$ 과  $K_2$ 는 서로 독립된 상태에서 거동하지 않고, 서로 동시에 거동을 하기 때문에  $K_1$ 의 성분과  $K_2$ 의 성분이 서로 중복되어 거동하게 되므로, 서로 중복된 부위의 강성을 제거해 주어야 한다.

그러나, 본 연구에서 대상으로 한 대부분의 실험체 파괴 형태가 철근 항복에 의한 철근 인발과 철근 인장 파괴로 나타났고, 이러한 원인은 결국  $K_2$ 가  $K_1$ 에 비해서 상대적으로 큰 강성을 유지하고 있음을 의미하게 된다. 따라서 본 연구에서는 강관 슬리브와 모르터 사이에서의 부착강성  $K_2$ 를 보정하였다. 보정 방법은 식(1)과 식(2)에서 계산된 강성 값을 이용하여 선형 탄성해석을 실시하였고, 해석결과를 실험결과와 비교하여 실험결과와의 오차를 수정하는 방법으로  $K_2$ 값을 보정하였다. 보정한 결과  $K_2$ 의 값이 D22 철근은 약 24배, D25철근의 경우에는 약 28배의 오차가 발생한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 탄성구간에서 강관 슬리브의 변형이 거의 발생하지 않고 철근의 변형만이 발생하기 때문에 고강도 모르터와 강관 슬리브의 강성은 무한대에 가까운 값을 가지게 되는 것을 의미한다. 그러나, 만일 탄성구간을 벗어난 비탄성구간에서의 변형은 강관 슬리브의 변형도 예상되기 때문에 보다 정확한  $K_2$ 의 값에 대한 유추가 필요하리라 판단된다.

식(1)에 의해 산정한  $K_1$ 의 값은 D22철근의 경우에는 1.55로, D25철근은 1.69로 나타났으며, 식(2)에 의해 산정후 보정한  $K_2$ 는 D22철근의 경우에는 24.1로 D25철근은 28.0으로 나타났다. 위와 같이 구한

$K_1$ 과  $K_2$  그리고 표 4.와 표 5.에 나타난 바와 같은 슬리브와 철근, 모르터의 재료 실험 결과를 가지고 선형 탄성 해석을 실시하여 표 6에 나타내었다.

표 6에서와 같이 항복 하중시 실험에서 구한 최대 변위와 해석에서 구한 최대 변위의 오차는 D22 철근의 경우에는 8.38%, D25철근의 경우에는 4.05%의 근소한 차이를 보이고 있어 제안된 재료 요소 모델과 강성 계산식이 비교적 정확하게 모델링 된 것으로 판단된다.

표 3. 모르터 압축 실험 결과

단면적 (cm <sup>2</sup> )	최대하중 (kg)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )
25	18,540	741.6	$3.1 \times 10^9$

표 4. 재료 인장 실험 결과

실험체	항복강도, $\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	항복 변형도 ( $\times 10^{-6}$ )	인장강도, $\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	탄성 계수 (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y / \sigma_u$
D22	4.00	2416.9	5.74	1655.0	0.697
D25	3.51	2014.1	5.34	1742.8	0.657
슬리브	2.97	1064.7	3.30	2791.3	0.900

표 5. 실험체 별 탄성 해석 결과 비교

실험체	이음 철근 (SD40)	강관 슬리브 (mm)			항복 하중 (ton)	강관 슬리브 변형도 ( $\times 10^{-6}$ )	철근 변형도 ( $\times 10^{-6}$ )	부착 강성 (K1) (t/mm)	부착 강성 (K2) (t/mm)	실험 결과 (mm)	해석 결과 (mm)	실험/해석 (%)
		길이	직경	두께								
F2LM	D22	300	60.5	3.9	14.5	470	5000	1.55	24.1	18.6	20.4	91.2
2STN25	D22	300	60.5	5.5	14.3	430	1200	1.55	24.1	20.7	20.14	102.8
3STN25	D25	300	60.5	5.5	18.6	500	8000	1.69	28.0	21.2	23.84	88.93
2STN55	D22	300	60.5	5.5	14.5	380	5300	1.55	24.1	20.0	20.4	98.04
3STN55	D25	300	60.5	5.5	18.6	540	7500	1.69	28.0	24.3	23.84	101.9
2STN67	D22	300	60.5	5.5	14.5	360	5100	1.55	24.1	24.5	20.4	120.1
3STN67	D25	300	60.5	5.5	18.8	490	7600	1.69	28.0	24.7	24.1	102.5
2STN69	D22	300	60.5	5.5	14.5	280	6600	1.55	24.1	18.7	20.4	91.7
3STN69	D25	300	60.5	5.5	19.2	260	2100	1.69	28.0	24.4	24.6	99.2

#### 4 결론

모르터 충전 강관 슬리브 시스템의 탄성 해석 모델 개발을 위한 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 모르터 충전 강관 슬리브 시스템의 해석 모델 개발을 위해서는, 실험 결과와 잘 일치하는 셀 요소와 보 요소 그리고 스프링 요소로 구성된 3-D 유한 요소 모델이 적당한 것으로 판단된다.
2. 모르터 압축 강도가  $700\text{kg/cm}^2$  이고 슬리브의 직경이 60.5mm, 길이 300mm일 경우에, D22철근의  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값은 1.55 t/mm와 24.1 t/mm가 적당하며 D25철근의  $K_1$ 과  $K_2$ 의 값은 1.69 t/mm와 28.0 t/mm가 적당한 것으로 판단된다.
3. 철근과 모르터 사이 부착 강성  $K_1$ 은 본 연구에서 제안한 값이 비교적 잘 일치하고 있으나 강관 슬리브와 모르터 사이 부착 강성  $K_2$ 는 강관 슬리브의 강성을 고려한 설계식의 개발이 필요하리라 판단된다.

4. 본 연구에서 개발한 유한 요소 해석 모델은 선형 탄성 해석에 의한 것이므로 모르터 충전 강관 슬리브 시스템의 항복 이후의 거동과 극한 하중시 거동에 대한 평가를 위해서는 재료적 비선형 조건과 비선형 해석 기법 연구를 통한 비선형 유한 요소 해석 모델의 개발이 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. 이리형, 이원호, 김병균, 이용재, 이동우, 강관 슬리브를 이용한 철근이음에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 13권, 3호, pp.241-250, 1997
2. Nilson. Arthur. H., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method," ACI Journal, September. 1968, pp. 757-766
3. Tepfers, Ralejs., "Lapped Tensile Reinforcement Splices," ASCE, V.108, No.ST1, January. 1982, pp. 283-301
4. Ngo, D., and Scordelis, A. C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams," ACI Journal, Proceedings V.64, No.3, Mar. 1967, pp.152-163
5. Amin Einea, Takashi Yamane, Maher K. Tadros, "Grout-Filled Pipe Splices for Precast Concrete Construction," PCI Journal, January-February. 1995, pp. 82-93
6. 松奇育弘 外, モルタル充填式鉄筋継手をを用いたプレキャスト部材構造性能評価に関する研究“(その4)應力傳達機構に関する基礎研究. 1996. 9.日本建築學會大會學術講演概要集, pp.755-756