

시간의존적 거동을 고려한 철근콘크리트 골조의 효율적인 지지시스템 결정

Determination of Efficient Shoring System in RC Frame Structures Considering Time-Dependent Behavior of Concrete

곽 효 경[†] 김 진 국* 홍 수 미**

Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Jin-Kook Hong, Su-Mi

(논문접수일 : 2003년 9월 15일 : 심사종료일 : 2004년 8월 23일)

요 지

이 논문에서는 철근콘크리트 골조 구조물의 시공 시 작용하는 사하중, 활하중, 시공하중 등의 하중에 대한 지지 및 안전한 시공을 위해 설치되는 지지시스템에 대하여 보다 체계적인 분석이 이루어졌다. 지지시스템의 종류, 비계의 강성과 간격 등의 변화에 따른 구조물의 거동특성을 비교, 분석하였고, 기존의 설계규준 및 해석방법과의 비교를 위해 크리프 등의 시간의존적 거동을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 해석이 수행되었으며, 나무 비계를 사용한 경우와 강재 비계를 사용한 경우에 대한 비교 검토가 이루어졌다. 또한, 대표적인 3-경간 구조물에 대한 해석을 수행하여 내측 기둥과 외측 기둥의 부등축소에 따른 영향을 반영한 검토가 이루어졌다. 나아가 다양한 설계인자의 변화에 따른 거동분석을 통해 2S1R 지지시스템이 가장 효율적임을 제시하였다.

핵심용어 : 시공단계, 지지시스템, 비계 강성, 비계 간격

Abstract

In this paper, systematic analyses for the shoring systems installed to support applied loads during construction are performed on the basis of the numerical approach introduced in the previous study.²⁾ Structural behaviors require changes in design variables such as types of shoring systems, shore stiffness and shore spacing. In this paper, the design variable are analyzed and discussed. The time dependent deformations of concrete and construction sequences of frame structures are also taken into account to minimize structural instability and to improve design of shoring system, because those effects may increase axial forces delivered to shores. From many parametric studies, it can be recommended that the most effective shoring system is 2S1R(two shores and one reshore).

keywords : construction sequence, shoring system, shore stiffness, shore spacing

1. 서 론

근자에 들어 공간의 효율적인 활용과 편리한 주거공간의 구축에 대한 필요성 증대로 다양한 형태와 용도의 고층건물이 활발히 건설되고 있으며, 경제성과 유지 관리상 많은 이점이 있는 철근콘크리트 골조의 고층건물에 대한 수

요 또한 증가하는 추세에 있다. 그러나 사용재료인 콘크리트는 시간에 따라 거동이 변화하는 재령재료로, 초기 재령 시 하중 작용에 따른 변형과 변형 후 시간의 경과에 따라 나타나는 크리프 및 건조수축 등의 시간의존적 거동에 크게 영향을 받는 등 복잡한 구조거동을 나타낸다. 따라서 시공단계를 고려한 철근콘크리트 골조 구조물의 거동특성

[†] 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수
전화 : 042-869-3621 : Fax : 042-869-3610
E-mail: khg@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사

• 이 논문에 대한 토론을 2004년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 콘크리트의 초기재령 거동에 대한 특성과 크리프, 건조수축 등 장기변형에 대한 영향 및 시공단계를 고려한 해석이 요구된다.

구조물의 시공은 상부의 새로 타설되는 콘크리트 슬래브 자중을 지지하도록 하는 지지시스템을 설치한 후 슬래브 콘크리트를 타설하고 일정시간이 경과하면, 지지시스템을 제거하는 반복과정을 거치게 된다. 따라서, 철근콘크리트 골조 구조물의 시공 중 거동에 영향을 줄 수 있는 요소로는 지지시스템(shoring system)의 종류, 시공 속도, 콘크리트 강도, 타설의 숙련도, 건물의 층수 등을 들 수 있는데, 이 가운데 지지시스템의 종류, 시공 속도가 설계과정에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되고 있다.¹⁾ 특히, 지지시스템은 시공 중 새로 타설되는 콘크리트 하중을 하부의 슬래브와 기둥으로 분산시켜주는 역할을 하므로, 지지시스템에 따라 시공 중 구조물의 거동이 다르게 나타날 수 있다.

시공 중 거푸집(formwork)과 비계(shore)는 타설된 콘크리트가 시공 하중을 저항할 수 있도록 충분히 강도가 발현된 후에 제거되어야 한다. 그러나, 안전한 시공을 위해 거푸집과 비계의 존치기간을 증가시킬 경우 공사기간 및 비용의 증가가 뒤따르게 되므로 경제성과 시공의 안전성을 확보하기 위해서는 효율적인 지지시스템의 결정이 요구된다. 관련 설계기준인 Australian Formwork Code AS 3610²⁾에서는 시공 시 요구되는 비계의 층수와 존치기간에 관한 사항을 언급하고 있으며, ACI Committee 347³⁾에서도 거푸집, 비계의 존치 기간 및 지지시스템의 결정에 관한 개략적인 내용을 제시하는 등 지지시스템에 대한 일반적인 내용을 명시하고 있다. 그러나 대부분 경험을 토대로 제안된 규정들로서 합리적인 설계와는 다소 거리가 있는 것 또한 사실이다.

이러한 배경에서 보다 정확한 구조거동을 토대로 철근콘크리트 골조 구조물의 효율적인 시공방법의 제안을 위해 지지시스템을 고려한 구조물의 시공단계별 거동에 관한 연구가 폭넓게 이루어지고 있으며, 그 가운데 대표적인 방법으로는 Grundy⁸⁾ 등이 몇몇 가정들을 토대로 제안한 간략화된 해석방법인 단순해석법(simplified method), 단순해석법의 가정 사항들을 보다 실제거동에 부합하도록 보완하고 수치 해석적인 방법으로 접근한 Liu와 Chen 등⁴⁾에 의해 제안된 개량해석법(refined method)과 El Shahhat과 Chen⁵⁾에 의해 제안된 개선된 해석법(improved method)등을 들 수 있다. 이러한 해석법들은 이전 방법과 비교하여 보다 개선된 결과를 주지만 여러 한정된 가정사항들을 토대로 하고 있으며, 구조물의 비선형 거동을 효과적으로 고려하지 못하고 있어 골조 구조물의 거동을 정확히 모사하

는데 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 참고문헌 6에서 철근콘크리트 프레임 구조물의 시공단계별 거동을 모사할 수 있는 해석법이 제안된 바 있으며, 나아가 참고문헌 7에서는 지지시스템의 영향을 고려하여 구조물을 보다 실 구조물에 가깝게 모델링하여 시공단계별 구조해석을 수행할 수 있는 해석법이 제안된 바 있다. 이 논문에서는 참고문헌 7에서 제안된 해석법을 토대로 지지시스템의 종류, 비계의 강성과 간격 등의 변화에 따른 구조물의 거동특성을 비교, 분석하였다. 특히, 기존의 설계기준과의 비교를 위해 크리프 등의 시간의존적 거동을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 해석이 수행되었으며, 나무 비계를 사용한 경우와 강재 비계를 사용한 경우에 대한 비교 검토가 이루어졌다. 나아가, 대표적인 3-경간(3-Bay)구조물에 대한 해석을 수행하여 내측 기둥과 외측 기둥의 부등축소에 따른 영향을 반영한 검토가 이루어졌으며, 콘크리트 재령과 시간의존적 거동특성인 크리프와 건조수축의 영향을 반영한 부재력 평가를 통해 상대적으로 안전하고 효율적인 지지시스템이 2개 층의 비계와 1개 층의 재설치 비계 시스템(2S1R)임을 입증하였다.

2. 지지시스템의 구성³⁾

ACI Committee 347³⁾은 Grundy 등⁸⁾에 의해 제안된 단순해석법을 토대로 지지시스템 설계를 위한 관련 정보를 제공하고 있는데, 시공 중 새로 타설되는 콘크리트 하중을 지지하는 지지시스템의 종류 및 층수, 시공 중 하중 분포 등에 대한 포괄적인 내용을 포함하고 있다(표 1 참조). 설계기준에서는 가장 낮은 층의 비계는 비계가 제거되기 전까지 타설된 상부 층의 하중을 모두 지지해야 하며, 2개 층 이상의 비계에 대해서는 빠른 시공을 위해 각 층의 사하중인 콘크리트 자중과 시공할하중의 1.5배 이상의 활하중을 지지할 수 있게 비계를 설계하도록 권장하고 있다.³⁾ 또한, 상부 하중을 지지하는 지지시스템의 층수를 결정하는데 있어서 콘크리트의 자중 및 시공하중, 콘크리트의 설계강도, 시공속도 등을 고려하도록 하고 있다.

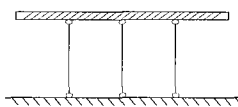
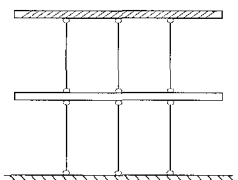
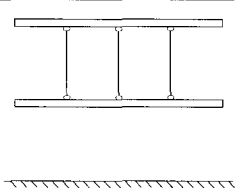
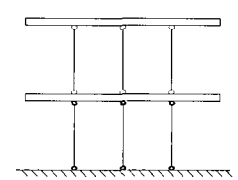
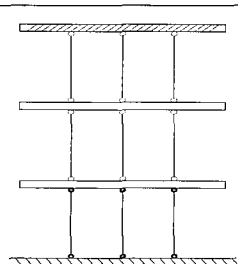
그러나 콘크리트 골조 구조물의 거동이 위에서 언급한 각각의 영향인자의 변화에 따라 다르게 나타나는 관계로 현재에 이르기까지 정형화된 기준을 제시하지 못하고 있으며, 여러 요소들을 단순화한 가정⁹⁾과 정의된 사하중 및 활하중을 토대로 구조계의 시공단계별 해석을 수행하여 구조물에 맞는 지지시스템을 설치하도록 권장하고 있다. 해석 시 일반적으로 사용되는 가정들로는 비계 및 재설치 비계(reshore)의 강성이 무한하고, 모든 층의 슬래브가 같은

강성을 가지며, 기초가 강체이고 시간의존적 거동이 고려되지 않는 등 단순해석법⁸⁾에서 도입하고 있는 가정사항들과 크게 다르지 않은 것이 일반적이다.

표 1은 지지시스템에 대한 시공단계별 하중 해석의 한 예로 두 개 층의 비계와 한 개 층의 재설치 비계(two shores one reshore, 2S1R)로 시공되는 경우에 대한 전반적인 내용을 언급하고 있다. 표 1의 예에서는 시공활하중(0.5D) 및 거푸집, 비계하중(0.15D)의 영향을 고려하지 않고, 콘크리트 슬래브 자중(D)만을 고려하고 있으며, 2S1R의 지지시스템이 설치될 경우 다음의 세 단계가 반복적으로 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. (1) 비계와 거푸집을 설치하고 콘크리트를 타설, (2) 설치된 지지시스템의 가장 낮은 층의 재설치 비계 제거 및 그 다음 층의 거푸집 및 비계 제거, (3) 비계가 제거된 층에 재설치 비계의 설치. 여기서, 재설치 비계는 설치된 후 상부의 추가 하중이 작용하기 전까지는 하중을 지지하지 않는다.

표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 최대 슬래브 하중은 1.95D로 단계 10일 때 2층에서 발생한다. 한편, 표 1의 예와 달리 콘크리트 슬래브 자중(D)이외에 시공 활하중(0.5D), 거푸집 및 비계(0.1D), 재설치 비계(0.05D)를 모두 고려할 경우 최대 슬래브 하중은 1.95D(표 1참조)에서 2.11D로 증가하게 되며 발생시점 또한 단계 10에서 단계 9로 변화하게 되는데, 이와 관련한 내용은 참고문헌 9에서 살펴볼 수 있다. 즉, 슬래브에 작용하게 되는 최대 부재력은 콘크리트의 자중만 고려한 경우(D)와 비교해 볼 때, 추가적으로 고려되는 하중인 시공활하중, 거푸집 및 비계와 재설치 비계의 무게(0.65D)에 비해 상대적으로 작은 차이가 나타남을 알 수 있다. 그러나 이러한 현상은, 시공활하중 등을 모두 고려할 경우, 하중 가운데 0.65D에 해당하는 하중이 일시적으로 작용되는 하중으로 거푸집과 비계 등이 제거되면서 모두 사라지게 되기 때문인 것으로 판단된다.

표 1 2S1R 지지시스템의 시공 중 슬래브 하중 및 비계하중(단순해석법)⁹⁾

Step	Operation	Status of structure	Slab Load(in Multiples of D)	Shore Load
1	Place level 1		0	1.0 D
2	Place level 2		0 0	1.0 D 2.0 D
3	Remove shores (level 1)		1.0 D 1.0 D	0
4	Place reshores (level 1)		1.0 D 1.0 D	0 0
5	Place level 3		0 1.0 D 1.0 D	0 1.0 D 1.0 D

Step	Operation	Status of structure	Slab Load	Shore Load
6	Remove reshores (level 1)		0.33 D	0.67 D
			1.34 D	
			1.33 D	0.33 D
7	Remove shores (level 2)		0.5 D	0.5 D
			1.5 D	
			1.0 D	
8	Place reshore (level 2)		0.5 D	0.5 D
			1.5 D	
			1.0 D	
9	Place level 4		0	1.0 D
			0.83 D	1.17 D
			1.83 D	0.34 D
			1.34 D	
10	Remove reshores (level 2)		0.11 D	0.89 D
			0.94 D	0.95 D
			1.95 D	

최대 슬래브 하중이 1, 2층의 비계 및 재설치 비계가 제거되는 시점에서 발생하는 것과 달리 최대 비계하중은 표 1의 단계 2에서 볼 수 있는 바와 같이 지지시스템이 설치되고 1층의 비계가 제거되기 전, 즉 구조계가 하중을 지지하기 전 1층 비계에서 발생하며, 최대 비계하중은 두 개 층의 슬래브 자중인 2D로 나타난다. 한편, 시공하중을 고려할 경우 최대 비계하중은 두 개 층의 슬래브 자중(2D)과 시공 활하중(0.5D), 두 개 층의 거푸집 및 비계 자중(0.2D)의 합인 2.7D로 나타나는데⁹⁾, 슬래브 자중만을 고려할 경우와 비교하여 30%이상의 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 설계규준에서는 설계 비계하중을 각 층의 자중 및 거푸집, 시공 활하중의 합(1.6D) 또는 자중 및 시공하중의 합인 1.5배(1.5×1.6D=2.4D)보다 크게 하도록 권장하고 있으며, 권장사항(2.4D)과 해석결과의 비교를 통해 안전한 쪽으로 설계가 이루어지도록 하고 있다.

이와 같이 각 시공단계에 따라 슬래브와 지지시스템에 전달되는 최대 작용하중의 크기와 작용단계가 각각 다르게 나타나게 된다. 따라서 철근콘크리트 골조의 정확한 해석과 안전하고 경제적인 시공을 위해서는 콘크리트의 시간의존적 거동특성과 구조물의 시공과정을 고려하여 결정된 부재력을 토대로 지지시스템을 결정할 필요가 있다.

3. 수치해석

앞 절에서 언급한 바와 같이 콘크리트 골조 구조물을 시공함에 있어 슬래브 하중 및 비계하중을 구하는 방법에는 ACI 347³⁾에서 제안하는 단순해석법³⁾을 포함한 다양한 방법이 있다. 그러나 이전에 제안된 방법들은 여러 한정된

가정사항들을 토대로 구성된 것으로 크리프, 건조수축 등 시간에 따른 콘크리트의 장기변형인 구조물의 비선형 거동을 고려하는데 한계가 있어, 보다 실제적으로 구조물의 시공단계별 거동을 모사할 수 있는 해석법이 참고문헌 7에서 제안된 바 있다. 따라서 이 논문에서는 참고문헌 7에서 제안된 해석법을 토대로 다양한 해석이 수행되었으며, 해석결과를 슬래브 하중과 비계하중으로 나타내어 여러 영향인자들에 따른 구조물의 시공단계별 거동 변화를 고찰하였다.

먼저 비계 강성의 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 일반적으로 사용되는 나무 비계($A_w=10\text{cm}\times 10\text{cm}$, $E_w=7.74\times 10^4\text{kg/cm}^2$), 강관 비계($A_s=8.58\text{cm}^2$, $E_s=2.1\times 10^6\text{kg/cm}^2$)에 대한 해석을 수행하였으며, 설계규준의 단순해석법과의 비교를 위해 축방향으로 무한강성($EA=\infty$)을 갖는 비계의 경우에도 해석을 수행하였다. 또한, 단순해석법에서 비계의 간격을 고려하지 않고 무수히 많은 비계가 등분포 되어 있다는 가정과 달리 실제의 슬래브 구조물 시공 시에는 비계가 일정한 간격으로 설치되게 된다. 따라서 비계의 설치에 따른 구조물의 거동특성을 살펴보기 위해 비계의 간격 변화(60cm, 100cm)에 따른 해석을 수행하였다. 나아가, 콘크리트의 시간의존적 거동을 고려하지 않은 단순해석법과의 비교를 위해 크리프($C_u=2.5$), 건조수축($\epsilon_{sh}=300\times 10^{-6}$) 및 콘크리트의 재령 효과를 고려하여 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라 2-경간 이상의 골조 구조물에서 나타나는 내측 기둥과 외측 기둥의 부등축소에 따른 영향을 살펴보기 위해 그림 1(b)의 3-경간 골조 구조물에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과는 표 7에서 볼 수 있다.

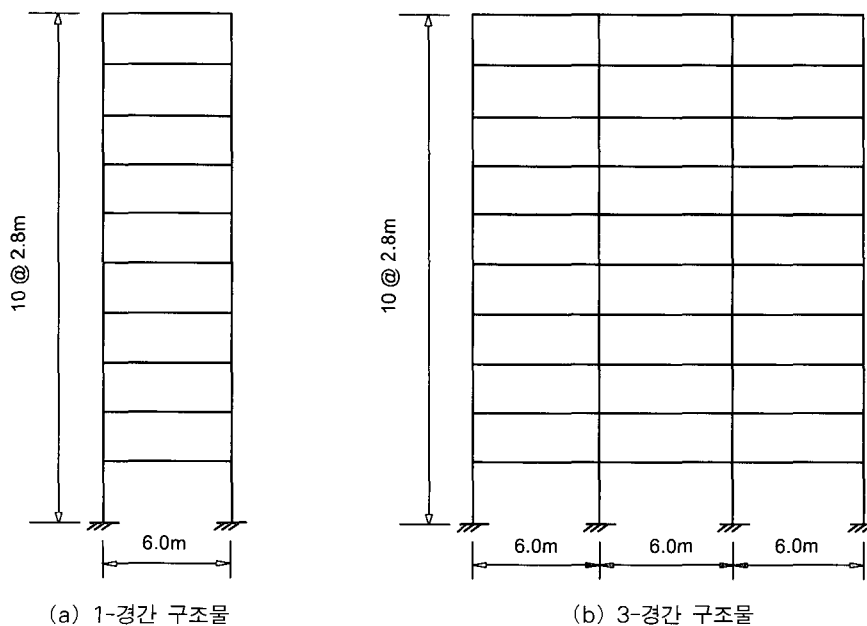


그림 1 평면 철근 콘크리트 프레임 구조

이 논문에서는 구조물을 2차원 프레임으로 모델링하여 슬래브를 등가의 보($B \times H = 90\text{cm} \times 18\text{cm}$)로 환산하여 고려하였으며, 표 2~7의 해석에 사용된 구조모델은 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 두 개의 기둥과 한 개의 보로 한 층이 구성되는 1-경간 프레임 구조물이다. 해석에 사용된 보와 기둥의 단면은 참고문헌 6의 표 1에 명시한 단면과 동일한 단면을 사용하였다. 사하중은 철근콘크리트의 단위 중량을 $2.5\text{t}/\text{m}^3$ 으로 가정하여 계산하였으며 해석 시 콘크리트의 압축강도는 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 기본으로 가정하였다. 또한 보의 상부에 설치되는 슬래브의 효과는 분포하중으로 작용시킴으로써 고려하게 된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 기둥간격이 길이와 폭 방향에서 모두 6.0m 로 구성된 정방형 구조계로써 슬래브 두께를 18cm 로 각각 가정하였으므로 슬래브 하중은 $w_{\text{slab}} = 27.0\text{kg}/\text{cm} (= 2.5\text{t}/\text{m}^3 \times 6.0\text{m} \times 0.18\text{m})$ 로 결정된다.

3.1 슬래브 하중 (Slab Load)

표 1에 나타난 바와 같이 한 층의 슬래브 자중을 D 라고 할 때, 하중의 일부를 비계와 슬래브가 분담하게 되는데, 표 1의 3번째 단계에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브 콘크리트가 타설되고 일정시간 경과 후 슬래브가 탄성체로 거동하게 될 때 탄성체인 슬래브에 의해 분담되는 사하중 무게를 슬래브 하중이라 한다. 그러나 표 1의 이상화된 구조계와 달리 실 구조물에서는 기둥이 슬래브의 양단을 구속하고 있어 슬래브의 중앙부(양 모멘트)와 단부(부 모멘트)에서의 거동이 다르게 나타나게 된다. 따라서 표 1에서 언급한 슬래브 하중의 대표값은 중앙부와 단부의 두 값으로 표현할 필요가 있다. 이를 위해 이 논문에서는 개량해석법(refined method)⁴⁾과 개선된 해석법(improved method)⁵⁾에서 사용한, 외력 w_D 가 작용할 때 유발되는 슬래브

모멘트의 개념을 도입하였는데, 이는 부재에서 발생하는 모멘트가 작용하는 외력과 비례관계를 유지하는 관계로 슬래브 하중과 동일한 의미로 사용이 가능하기 때문이다.

개량해석법과 개선된 해석법에서는 슬래브의 양단을 고정지지 또는 단순지지로 가정하여, 슬래브 모멘트를 양의 모멘트만 발생하는 단순지지의 경우와 양(+), 부(-)모멘트 모두가 발생하는 고정단지지의 경우에 대해 각각 고려하였다.(그림 2 참조) 따라서, 개량해석법 및 개선된 해석법에서는 슬래브에 작용되는 등분포 하중을 w_{slab} 라 하고, 슬래브의 길이를 L 이라 할 때, 단순지지의 경우 슬래브자중 w_{slab} 에 의해 중앙부에서 발생하는 최대 모멘트인 $w_{\text{slab}}L^2/8$ 에 대한 시공 중 발생하는 최대 모멘트의 비율로 정의하고, 고정단지지의 경우 슬래브자중 w_{slab} 에 의해 중앙부에서 발생하는 최대 양의 모멘트인 $w_{\text{slab}}L^2/24$ 에 대한 시공 중 발생하는 최대 양(+)모멘트의 비율을 최대 양의 슬래브 하중으로, 단부에서 발생하는 최대 부의 모멘트인 $w_{\text{slab}}L^2/12$ 에 대한 시공 중 발생하는 최대 부(-)모멘트의 비율을 최대 부의 슬래브 하중으로 각각 정의하여 슬래브가 지지하는 하중의 비율을 나타내었다.(그림 2와 표 2 참조)

한편, 이 논문에서 사용된 해석법은 구조물을 2차원 프레임으로 모델링한 후 시간의존적 거동해석을 수행하는 관계로 앞서와 같이 구속조건을 단순화시킬 필요가 없으며 기둥과 슬래브의 상대적인 휨 강성 차에 의해 슬래브의 구속 정도가 결정된다. 따라서 이 논문에서는 중앙부에서 발생하는 최대 양의 슬래브 하중은 시공 완료 후 최대 양(+)의 모멘트(M_0^+)에 대한 동일 위치에서의 시공 중 발생하는 최대 양(+)의 모멘트(M_{max}^+)비율로, 단부에서 발생하는 최대 부의 슬래브 하중은 시공 완료 후 최대 부(-)의 모멘트(M_0^-)에 대한 시공 중 최대 부(-)모멘트 (M_{max}^-)의 비율로 각각 나타내었다. 따라서 이 논문에서 슬래브 하중은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

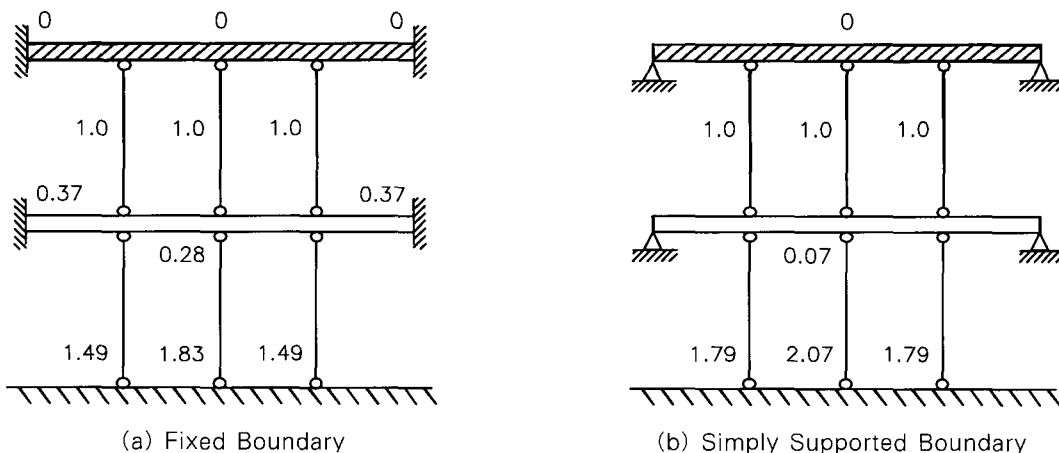


그림 2 2S1R 지지시스템의 시공 중 (단계 2) 슬래브 하중 및 비계하중 (개선된 해석법)⁵⁾

$$slab\ load = \frac{M_{max} (M_{max}^+ \text{ or } M_{max}^-)}{M_0 (M_0^+ \text{ or } M_0^-)} \quad (1)$$

이와 같이 이 논문에서 제안된 방법과 개량해석법 및 개선된 해석법에서 슬래브 하중의 정의에 있어서 차이를 보이고 있다. 나아가 기존의 단순화된 방법에서 채택하고 있는 가정된 경계조건과 실 구조물의 경계조건 차이에 따라 계산된 슬래브 하중 값 또한 차이를 나타나게 된다. 이 논문에서는 이전 방법들과의 비교를 위해 그림 1의 구조물에 대한 시공단계별 구조해석을 수행하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 해석 구조물은 2S1R 지지시스템을 토대로 하여 60cm간격으로 비계가 설치되었으며, 구조 부재의 단면 및 하중조건은 앞에서 언급한 바와 같다.

개량해석법 및 개선된 해석법에 의해 산정된 슬래브 하중과 마찬가지로 지지시스템이 설치되어 있는 층 가운데, 높은 층에서 낮은 층으로 갈수록 슬래브 하중이 증가하는

것을 표 2의 결과로부터 알 수 있다. 예를 들어, 10번째 단계는 2층에서 4층에 걸쳐 비계가 설치되어 있으며(표 1의 그림 참조) 이때, 2층 슬래브에서 슬래브 하중이 가장 크게 작용하게 되는 것을 알 수 있다. 그러나 이전 방법들에 의해 슬래브 하중이 산정될 경우 최대 슬래브 하중은 2층의 재설치 비계가 제거될 때(표 2의 단계 10 참조) 2층에서 발생하는 반면, 이 논문에서 제안된 방법에 의하면 4층의 슬래브가 타설될 때(표 2의 단계 9 참조) 2층에서 발생함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 표 2의 (3), (4)에서 볼 수 있는 바와 같이 콘크리트의 시간의존적 거동의 고려 유무에 관계없이 나타나며, 시간의존적 거동이 고려될 경우 고려되지 않은 경우보다 오히려 작은 슬래브 하중이 발생함을 볼 수 있다.

또한, 이 논문에서 제안된 방법(표 2의 (3), (4) 참조)에 의해 슬래브 하중이 산정될 경우 슬래브의 경계가 유한한 강성을 갖는 기둥과 연결되어 있다는 가정을 토대로 하

표 2 산정 방법에 따른 슬래브 하중 비교

*Step	Level	(1)	Fixed Boundary				Simply Supported Boundary		(4)		(5)	
			(2)		(3)		(2)	(3)	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M
			(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M
1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	0.00	0.37	0.28	0.37	0.28	0.07	0.07	0.15	0.24	0.14	0.25
3,4	1	1.00	1.41	1.33	1.39	1.39	1.12	1.12	1.10	1.14	1.01	1.15
	2	1.00	0.67	0.59	0.61	0.61	0.88	0.88	0.92	0.85	0.98	0.86
5	1	1.00	1.60	1.54	1.59	1.60	1.20	1.21	1.16	1.23	1.07	1.25
	2	1.00	1.09	1.09	1.08	1.07	1.03	1.02	0.99	1.02	1.05	1.03
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1	1.33	1.78	1.75	1.73	1.83	1.52	1.54	1.44	1.43	1.21	1.30
	2	1.34	1.19	1.16	1.29	1.19	1.27	1.32	1.25	1.17	1.14	1.12
	3	0.33	0.06	0.05	0.12	0.08	0.20	0.14	0.34	0.39	0.61	0.60
7,8	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.96	1.03
	2	1.50	1.67	1.63	1.78	1.65	1.55	1.60	1.48	1.43	1.29	1.28
	3	0.50	0.37	0.33	0.35	0.22	0.45	0.40	0.53	0.57	0.74	0.71
9	1	1.34	1.21	1.18	1.21	1.18	1.31	1.31	1.33	1.29	1.41	1.52
	2	1.83	1.95	1.94	1.93	2.09	1.88	1.93	1.82	1.76	1.64	1.60
	3	0.83	0.87	0.85	0.89	0.70	0.80	0.75	0.87	0.95	1.07	1.09
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.97	1.02
	2	1.95	2.06	2.05	2.24	2.01	2.12	2.12	1.79	1.69	1.59	1.54
	3	0.94	0.92	0.91	0.92	0.90	0.86	0.86	0.85	0.88	1.01	1.00
	4	0.11	0.03	0.03	0.14	0.07	0.02	0.02	0.37	0.43	0.42	0.45

Note : *Step - construction step mentioned in Table 1; Level - floor slab;
 (1) simplified method [7]; (2) refined method [9]; (3) improved method [3];
 (4) this study (considering concrete age only and using wood studs);
 (5) this study (considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs);
 (+)M - positive moment; (-)M - negative moment; 하중=자중(D)

표 3 해석조건에 따른 최대 슬래브 하중(작용하중이 D인 경우)

비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M
비계 간격 (100cm)	1S1R	1.53	1.60	1.54	1.55	1.58	1.59	1.74	1.68	1.74	1.71
	2S	2.04	2.08	2.03	1.98	2.00	1.92	2.03	1.92	2.06	1.97
	2S1R	1.88	1.88	1.86	1.81	1.82	1.76	1.69	1.64	1.72	1.69
	3S	2.24	2.27	2.21	2.08	2.11	1.96	1.99	1.92	2.05	2.02

Note : (1) considering concrete age only and using rigid studs;
 (2) considering concrete age only and using steel studs;
 (3) considering concrete age only and using wood studs;
 (4) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs;
 (5) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using steel studs;
 (+)M - positive moment; (-)M - negative moment; 하중=자중(D)

표 4 해석조건에 따른 최대 슬래브 하중(작용하중이 1.5D인 경우)

비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M	(+)M	(-)M
비계 간격 (100cm)	1S1R	1.78	1.89	1.78	1.82	1.86	1.89	2.04	1.96	2.05	2.00
	2S	2.30	2.36	2.30	2.24	2.26	2.16	2.32	2.20	2.33	2.25
	2S1R	2.02	2.06	2.02	1.98	1.98	1.92	1.84	1.80	1.88	1.86
	3S	2.42	2.46	2.39	2.23	2.26	2.09	2.19	2.09	2.21	2.20

Note : (1) considering concrete age only and using rigid studs;
 (2) considering concrete age only and using steel studs;
 (3) considering concrete age only and using wood studs;
 (4) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs;
 (5) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using steel studs;
 (+)M - positive moment; (-)M - negative moment; 하중=자중(D)+시공활하중(0.5D)

고 있기 때문에 해석 결과가 고정단지지와 단순지지경우의 결과들(표 2의 (1),(2) 참조) 사이에 존재할 것으로 예상할 수 있으나 구조계의 거동은 그러한 경향을 보이지 않음을 표 2의 결과들로부터 볼 수 있다. 구조계가 단순지거나 고정단지기로 고려될 경우 상부층이나 하부층으로의 하중 전달이 비계에만 의존하게 되는 것에 반해 (그림 2 참조), 실 구조물에서는 비계와 기둥 모두를 통해서 전달되게 된

다. 따라서 상부 또는 하부 구조계의 하중 전달은 비계와 기둥의 강성차이 및 비계의 간격 변화에 따라 달라지게 된다.(표 3~4 참조) 한편, 시간의존적 거동이 고려될 경우 최대 슬래브 하중이 상대적으로 작게 나타나는 것은 크립 등의 시간의존적 거동에 의해 작용하중이 구조물의 상하부로 지속적으로 전달되어 구조물 전체적으로 하중을 골고루 분담하게 되기 때문이라 판단된다.

표 3~4는 비계의 강성 변화와 간격 및 시간의존적 거동의 고려 유무에 따른 각 지지시스템에서의 최대 슬래브 하중 변화를 나타내고 있다. 비계간격이 60cm인 경우를 먼저 살펴보면, 구조물을 구성하고 있는 콘크리트의 시간의존적 거동이 고려되지 않을 경우(표 3~4에서 (1)~(3)), 전반적으로 지지시스템의 강성 변화에 따른 최대 슬래브 하중의 변화는 크지 않으나, 2S, 2S1R, 3S의 경우 지지시스템의 강성이 작을수록 상대적으로 작은 모멘트가 유발되며, 해석조건의 변화에 따라 양의 모멘트에 대해 최대 7%, 음의 모멘트에 대해 최대 15%정도 차이가 발생함을 볼 수 있다. 한편, 재설치 비계를 설치하는 경우 최대 슬래브 하중의 변화가 상대적으로 작게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 비계의 제거 및 재설치 과정을 통해 하중의 적절한 분배를 유발시키기 때문이라 판단된다. 또한, 양의 모멘트보다 부의 모멘트 변화가 상대적으로 크게 발생함을 볼 수 있는데, 이는 부모멘트가 발생하는 단부가 연결되어 있는 기둥이 시간에 따라 강성이 변하기 때문이라 판단된다.

나아가, 시간의존적 거동이 고려될 경우(표 3~4에서 (4)~(5))크리프 및 건조수축에 의해 변형이 증가하게 되는데, 비계의 지지 층 수가 상대적으로 많은 2S1R과 3S의 경우 비계가 시간의존적 거동에 의한 추가적인 변형을 지지하게 되기 때문에 최대 슬래브 하중의 감소가 초래된다. 반면, 1S1R과 2S의 경우, 지지 층 수가 상대적으로 적고 시공속도가 빨라 추가적으로 발생하는 변형을 충분히 지지하지 못해 최대 슬래브 하중의 증가가 초래된다.

비계의 간격이 100cm인 경우 또한 간격이 60cm인 경우와 유사한 최대 슬래브 하중 결과를 나타내고 있음을 표 3~4로부터 알 수 있다. 따라서, 비계에 작용하는 슬래브 자중 및 시공활하중을 비계가 충분히 지지하면서 시공 시 과도한 처짐에 의한 불안정성이 발생하지 않도록 관리될 수 있다면 간격을 넓혀 적은 수의 비계를 설치해도 무방할 것이라 판단된다. 크리프 등의 시간의존적 거동을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 시간의존적 거동을 고려한 경우 역시 양의 슬래브 하중에 대해서는 비계의 강성 변화에 따른 영향이 작게 나타나며, 부의 슬래브 하중에 대해서 상대적으로 큰 영향이 나타남을 표 3~4으로부터 볼 수 있다. 이는 최대 부의 모멘트가 발생하는 슬래브와 기둥의 접합부 부근의 모멘트 분포가 기둥의 강성과 기둥과 근접한 비계의 강성차이에 따라 틀러지게 되기 때문이라 판단된다. 또한, 표 3~4의 결과로부터 시간의존적 거동이 고려되지 않을 뿐만 아니라 앞에서 언급한 바와 같이 여러 가정들을 토대로 한 설계기준과 비교하여 보다 실 구조물에 가까운 구조 해석이 수행될 때, 2S1R 지지시스템을 사용할 경우 가장 작은 슬래브 하중이 발생함을 알 수 있다.

즉, 2S1R 지지시스템이 시공 중 슬래브에서 발생하는 휨 모멘트를 최소화시키는 상대적으로 효과적인 지지시스템임을 나타내고 있다.

지지시스템의 설계 시 거푸집 및 비계(0.1D)와 재설치 비계(0.05D)의 하중(0.15D)이 슬래브 자중과 비교하여 상대적으로 작아 일반적으로 슬래브 자중(D)과 시공활하중(0.5D)만을 고려해도 결과에 큰 차이는 없을 것으로 판단된다. 표 3~4는 각각 시공활하중을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 결과를 보여주고 있는데, 시공활하중을 고려한 경우 총 작용하중은 1.5D로 슬래브 자중만 고려한 경우인 D과 비교하여 50%의 차이가 있는 반면, 최대 슬래브 하중은 약 9~15%의 차이가 발생함을 볼 수 있다. 예를 들어, 지지간격 60cm에서 시공활하중을 고려하지 않은 경우인 작용하중이 D인 경우 표 3에서 보는 바와 같이 발생하는 최대 슬래브 하중의 최소값은 구조물 콘크리트의 장기 변형을 고려하면서 목재비계를 사용해서 2S1R 지지시스템을 채택한 경우 발생하게 된다. 즉, M^+ 에 대해 1.69, M^- 에 대해 1.64로써 $M_{\max}^+ = 1.69M_0^+$, $M_{\max}^- = 1.64M_0^-$ 로 계산된다. 반면, 시공활하중을 고려할 경우인 표 4의 작용하중이 1.5D인 경우 발생하는 모멘트 값은 $M_{\max}^+ = 1.84M_0^+$, $M_{\max}^- = 1.80M_0^-$ 로써 슬래브에 추가적으로 작용하는 활하중에 비해 모멘트 증가가 비교적 작게 나타난다. 여기서 M_0^+ 와 M_0^- 는 각각 D와 1.5D의 하중이 작용할 때 시공 완료 후 발생하는 최대 모멘트를 나타낸다. 이는 시공활하중이 새로 타설되는 층에 일시적으로 작용하는 하중으로 한 층의 타설이 끝나면 제거되기 때문이다. 따라서 시공활하중과 마찬가지로 일시적으로 작용하는 거푸집 및 비계, 재설치 비계의 하중(0.15D)은 시공활하중(0.5D)의 1/3에 불과하기 때문에 최대 슬래브 하중에 있어서 그 영향이 5% 이하로 극히 작을 것으로 판단된다.

3.2 비계하중 (Shore Load)

설계기준에서 사용하고 있는 단순해석법에서는 비계를 슬래브와 슬래브 사이에 있는 부재로 균일하게 무수히 많이 분포되어 있다고 가정하고 있으며, 기둥의 강성과 변형을 고려하지 않아 한 층에 발생하는 비계하중을 동일한 크기의 하나의 값으로 정의하고 있다. 그러나 실 구조물에서는 비계가 일정한 간격으로 균일하게 분포하고 있긴 하지만 비계설치 작업에 필요한 충분한 간격을 유지하게 된다. 즉, 작지 않은 일정한 간격으로 비계가 설치되는 관계로 내측과 외측에 설치되는 비계는 물론 내측의 각 비계마다 다른 크기의 하중을 지지하게 된다. 따라서 이 논문에서는 실 구조물과 같이 비계가 일정 간격을 갖도록 모델링하여

해석하였으며, 해석결과 중 최대 비계하중이 발생하는 층에서의 최대 비계하중과 평균 비계하중은 표 5~6에 나타난 바와 같다. 또한, 이 논문에서는 설계기준 [4]에서 가정하고 있는 바와 같이 비계하중을 하나의 비계가 지지하게 되는 하중인 평균비계하중에 대한 일정한 간격을 유지하는 실 구조계의 비계에 발생한 내력의 비로 정의하였다. 여기서, 평균비계하중은 한 층의 슬래브가 3개의 비계로 지지된다면 단부 비계의 경우 슬래브 자중 $\times 1.5/4$ 로, 중앙부 비계의 경우 슬래브 자중 $\times 1/4$ 로 각각 결정된다(그림 3 참조).

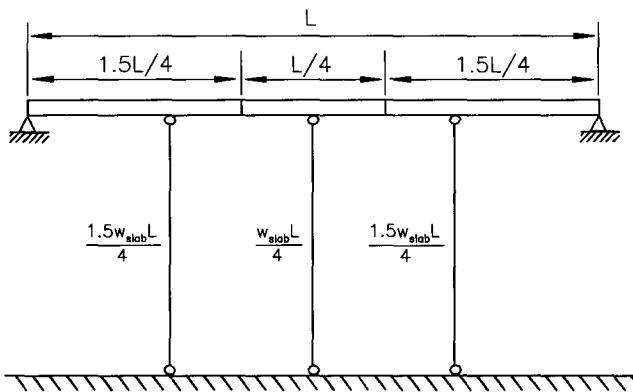


그림 3 각 비계가 지지하게 되는 평균비계하중

표 1에서 언급한 단순해석법을 토대로 슬래브 자중만 작용하는 경우(하중=1.0D)와 슬래브 자중과 시공활하중이 모두 작용하는 경우(하중=1.5D)에 대한 해석에서, 1S1R에 대해서는 최대 비계하중이 각각 D와 1.5D, 2S 및 2S1R에 대해서는 각각 2D와 2.5D, 3S에 대해서는 각각 3D와 3.5D로 계산되는데, 이는 표 5~6에서 비계의 강성이 무한히 큰 경우인 (1)의 결과와 유사한 결과이다. 여기서, 표의 결과와의 차이는 단순해석법과는 달리 표의 결과는 일정한 간격의 비계와, 비계 및 구조물의 기둥의 강성을 고려하여 얻어진 결과이기 때문이다.

최대 슬래브 하중이 일반적으로 1층 또는 2층의 비계가 제거되는 시점의 2층 또는 3층에서 발생하는 것과는 달리, 최대 비계하중은 보통 각 지지시스템에 대해 모든 층의 비계가 설치된 시점의 1층에서 발생하며, 크리프 등에 의한 추가적인 변형이 발생할 경우 추가적인 변형을 비계가 지지하게 되어 비계하중의 증가가 초래된다. 표 5~6의 (4)와 (5)의 결과를 보면, 1S1R의 경우 최대 35%정도의 비계하중 증가가 발생하는 반면, 2S, 2S1R의 경우 약 20%, 3S의 경우 약 15%로 설치되는 비계의 층수가 커질수록 비계하중 증가가 감소됨을 볼 수 있다. 이는 2S, 2S1R 및 3S 지지시스템이 한 층의 비계만 설치되는 1S1R과 비

교하여 설치되는 비계의 총 수가 많고, 모든 층의 비계가 설치될 때까지의 시간이 상대적으로 길어 슬래브 및 기둥이 하중의 많은 부분을 분담하게 되기 때문이다.

표 5~6로부터 최대 비계하중이 발생하는 층의 슬래브 중앙부에서 발생하는 비계하중의 최대값은 최대 슬래브 하중(최대 양의 슬래브 하중)과 마찬가지로 비계의 강성변화에 따른 영향이 비교적 작게 나타나는데 반해, 비계하중의 평균값은 비계의 강성변화에 따른 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 비계의 강성이 변해도 중앙부에서 지지하게 되는 비계 하중은 크게 변하지 않는 반면 기둥과 슬래브가 만나는 슬래브의 단부 부근에서는 비계의 내력이 크게 변하는데, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 기둥과 비계의 상대적인 강성 차이에 따라 하중 분배가 달라지기 때문이라 판단된다. 또한, 표 5~6의 (4), (5) 열인 콘크리트의 시간의존적 거동 특성을 고려한 해석에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 실 구조물에서의 최대 비계하중은 설계기준에 의해 산정되는 최대 비계하중보다 크게 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 지지시스템의 설계 시 설계기준만을 따를 경우 자칫 지지시스템에 작용하는 하중의 저 평가로 인해 슬래브 시공 시 안전 사고가 초래될 수 있어, 보다 정밀한 해석 및 검토를 통한 설계가 이루어져야 할 필요가 있다.

3.3 기둥의 부등축소에 따른 영향

그림 1(b)에 나타난 바와 같이 경간이 2개 이상인 프레임 구조물은 기둥이 분담하게 되는 사하중을 포함한 하중의 상대적인 차이로 인해 내 외측에 위치하는 기둥에서 서로 다른 축방향 탄성변형과 이에 따른 장기 변형량을 동반하게 된다. 나아가 골조 구조물에서 내, 외측 기둥간의 부등축소는 기둥과 연결된 보 및 슬래브, 벽체 등에도 부등변위를 발생시키고, 부재간의 2차 응력으로 인한 부재력의 재분배를 유발한다. 뿐만 아니라 부재의 부등 변형량 증가는 지지시스템 설계 시 슬래브 하중 및 비계하중을 계산하기 위해 사용됐던 단순화된 구조물과는 다른 거동 특성을 보일 것으로 예상된다.

이러한 배경에서 기둥의 부등축소량이 지지시스템의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 1(b)에 나타난 3-경간 10층 구조물의 해석이 수행되었다. 해석에 사용된 모든 재료상수와 구조계를 구성하는 각 부재의 치수 등 제반 상수는 앞의 예제에서 정의된 값과 동일한 값을 사용하였다. 3-경간 구조물의 해석결과(표 7 참조)를 1-경간 구조물의 결과(표 3과 5 참조)와 비교해보면, 슬래브 하중에 대하여 부등축소에 따른 영향이 전반적으로 크지 않은 반면, 1S1R 및 2S1R의 경우 시간의존적 거동이 고려될 때

표 5 해석조건에 따른 최대 비계하중(작용하중이 D인 경우)

비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max
	1S1R	0.91	1.00	0.77	1.05	0.71	1.09	1.10	1.60	1.17	1.53
	2S	1.82	2.00	1.54	2.11	1.43	2.17	1.51	2.15	1.61	2.05
	2S1R	1.82	2.00	1.54	2.11	1.43	2.17	1.51	2.15	1.61	2.05
	3S	2.72	3.00	2.13	3.24	1.88	3.13	2.43	3.13	2.85	2.94

비계 간격 (100cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max
	1S1R	0.85	1.01	0.75	1.09	0.67	1.08	1.04	1.62	1.11	1.57
	2S	1.69	2.01	1.45	2.16	1.33	2.15	1.42	2.19	1.52	2.16
	2S1R	1.69	2.01	1.45	2.16	1.33	2.15	1.42	2.19	1.52	2.16
	3S	2.53	3.01	1.97	3.21	1.68	2.91	2.12	3.13	2.43	3.16

Note : (1) considering concrete age only and using rigid studs:
 (2) considering concrete age only and using steel studs:
 (3) considering concrete age only and using wood studs:
 (4) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs:
 (5) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using steel studs:
 (+)M - positive moment: (-)M - negative moment: 하중=자중(D)

표 6 해석조건에 따른 최대 비계하중(작용하중이 1.5D인 경우)

비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max
	1S1R	1.36	1.50	1.16	1.58	1.07	1.63	1.48	2.06	1.57	2.06
	2S	2.27	2.63	1.93	2.64	1.78	2.71	1.88	2.71	2.01	2.63
	2S1R	2.27	2.63	1.93	2.64	1.78	2.71	1.88	2.71	2.01	2.63
	3S	3.18	3.50	2.47	3.78	2.18	3.64	2.76	3.67	3.22	3.70

비계 간격 (100cm)	지지 시스템	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max	Aver.	Max
	1S1R	1.27	1.51	1.09	1.62	1.00	1.61	1.39	2.16	1.49	2.10
	2S	2.11	2.51	1.82	2.70	1.66	2.69	1.77	2.72	1.90	2.70
	2S1R	2.11	2.51	1.82	2.70	1.66	2.69	1.77	2.72	1.90	2.70
	3S	2.95	3.51	2.28	3.73	1.94	3.37	2.42	3.65	2.78	3.68

Note : (1) considering concrete age only and using rigid studs:
 (2) considering concrete age only and using steel studs:
 (3) considering concrete age only and using wood studs:
 (4) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs:
 (5) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using steel studs:
 (+)M - positive moment: (-)M - negative moment: 하중=자중(D)+시공활하중(0.5D)

부 모멘트에 한하여 약 10%정도의 슬래브 하중 차이가 발생함을 볼 수 있다. 즉, 재설치 비계가 고려되는 경우 다소간의 부재력 차이를 보이고 있는데, 이는 비계가 제거 되고 재설치 비계가 설치되는 과정에서 구조계 내부에 하중 재분배를 유발시키고 나아가 콘크리트 크리프 등의 시간의존적 거동에 의한 기둥간 부등축소량의 증가와 함께

내측 기둥에서의 하중 재분배가 발생하기 때문이라 판단된다. 한편, 비계하중은 모든 경우에 대하여 유사한 결과를 보이고 있는데, 최대 비계하중은 한 단위의 지지시스템이 처음으로 설치될 때 1층에서 발생하기 때문에 부등축소의 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단된다.

표 7 해석조건에 따른 최대 슬래브 및 비계하중

Slab Loads											
비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		비계 간격 (100cm)	지지 시스템	(1)		(2)	
		(+)M	(-)M	(+)M	(-)M			(+)M	(-)M	(+)M	(-)M
	1S1R	1.58	1.66	1.73	1.50		1S1R	1.62	1.72	1.74	1.81
	2S	2.00	1.90	2.01	1.91		2S	1.99	1.84	2.02	1.87
	2S1R	1.81	1.73	1.67	1.48		2S1R	1.80	1.68	1.65	1.58
	3S	2.10	1.97	1.97	2.00		3S	2.03	1.87	1.97	1.91
Shore Loads											
비계 간격 (60cm)	지지 시스템	(1)		(2)		비계 간격 (100cm)	지지 시스템	(1)		(2)	
		Aver.	Max	Aver.	Max			Aver.	Max	Aver.	Max
	1S1R	0.70	1.08	1.09	1.60		1S1R	0.65	1.07	1.02	1.62
	2S	1.40	2.17	1.49	2.15		2S	1.30	2.14	1.40	2.18
	2S1R	1.40	2.17	1.49	2.15		2S1R	1.30	2.14	1.40	2.18
	3S	1.86	3.10	2.42	3.12		3S	1.65	2.87	2.10	3.11
Note : (1) considering concrete age only and using wood studs; (2) considering aging, creep and shrinkage of concrete and using wood studs; (+)M - positive moment; (-)M - negative moment; 하중=자중(D)											

3.4 콘크리트 재령을 고려한 슬래브 하중 비(α)

앞에서 언급한 바와 같이 슬래브 하중은 시공 완료 후 슬래브에 발생하는 최대 모멘트 (M_0)에 대한 시공 중 발생하는 최대 모멘트 (M_{max})의 비율로 정의되고 있으며, 슬래브 하중을 토대로 구조물의 시공 중 안전성을 평가하여 전체 구조물의 설계에 반영하게 된다. 정의에 따라 완성된 구조계를 토대로 구조해석을 수행하여 얻어진 결과에 앞의 표 2~7에서 정의된 슬래브 하중을 곱하면 시공 중 발생하는 최대 모멘트를 계산할 수 있다. 또한 결정된 최대 모멘트에 저항하도록 하기 위해 재령의 영향을 고려한 콘크리트 강도를 이용하여 슬래브의 단면 설계가 이루어지게 된다. 특히 슬래브의 경우 작용하는 휨모멘트에 대해 단위 폭당 보로 설계되는 것이 일반적이고 폭이 b 이고, 높이가 d 인 단면의 휨모멘트에 대한 저항력은 $f'_c \cdot bd^2$ 에 비례하므로, 각 부재에서 발생하는 휨모멘트에 대한 $f'_c \cdot bd^2$ 의 비율은 해당부재의 상대적인 부재력 크기를 나타내는 지수로 설정할 수 있다.

그러나 시공 중에는 일정한 간격을 유지하면서 지지시스템이 설치되는 관계로 시공 중 유발되는 슬래브 모멘트는 상대적으로 작은 값을 나타내게 된다. 따라서 정량적으로 평가되는 휨모멘트/ $f'_c \cdot bd^2$ 은 극히 작은 값을 나타내게 된다. 콘크리트의 강도 또한 시간의 경과에 따라 변화하게 되므로 정의된 비율의 상대적인 크기를 평가하기 위해 식 (2)에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 28일 설계강도에 대한 완성된 모멘트의 비율로 상대적인 비율을 정량화 함

으로써 그 크기를 정의하고자 하였다. 따라서, 이 논문에서는 콘크리트 재령을 고려한 슬래브 하중 비 α 를 도입하였으며, 표 3~4와 표 7의 해석 결과 중 시간의존적 거동을 고려하고 나무비계를 사용한 경우에(표 3~4중 (4)와 표 7중 (2)) 대한 α 값과 그에 상응하는 콘크리트 재령을 고려하지 않은 슬래브 하중을 그림 4에 나타내어 두 방법에 따른 결과를 비교하였다.

$$\alpha = \frac{\frac{M_{max}(t)}{f'_c(t) \cdot bd^2}}{\frac{M_0}{f'_c(28) \cdot bd^2}} = \frac{M_{max}(t)}{M_0} \cdot \frac{f'_c(28)}{f'_c(t)} \quad (\text{slab load}) \cdot \frac{f'_c(28)}{f'_c(t)} \quad (2)$$

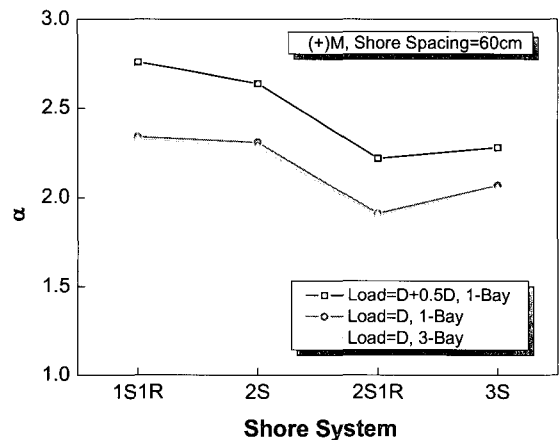
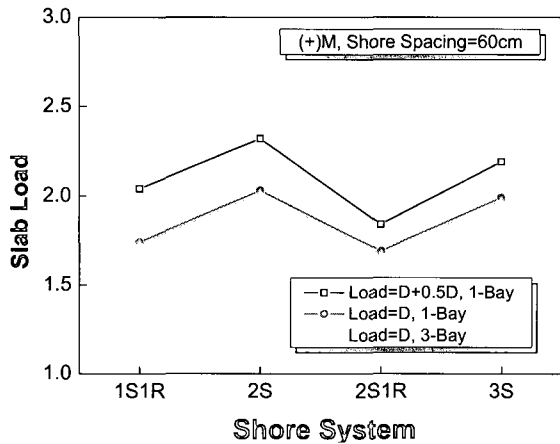
여기서, $M_{max}(t)$, M_0 는 각각 시공 중과 시공 완료후의 최대 모멘트를 각각 나타내며, $f'_c(t)$ 은 재령 t 에서의 콘크리트 압축강도를, b , d 는 슬래브 단면의 폭과 두께를 각각 나타낸다.

그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 시공 중 발생하는 모멘트를 나타내는 방법에 따라 지지시스템 변화에 따른 경향이 크게 달라지게 되는 것을 알 수 있다. 표 3~4와 표 7에서 이미 살펴본 바와 같이 콘크리트 재령을 고려하지 않은 슬래브 하중은 양의 모멘트에 대하여 약 1.6에서 2.4의 값을 나타내고, 음의 모멘트에 대하여 약 1.5에서 2.2의 값을 나타내고 있으며, 결과에 있어서 일정한 경향을 찾아보기 힘든 반면 1S1R 및 2S1R 시스템 등 재설치 비계가 설치되는 지지시스템에 대하여 전반적으로 슬래브 하중이 작게 나타나는 것을 그림 4로부터 볼 수 있다. 이는

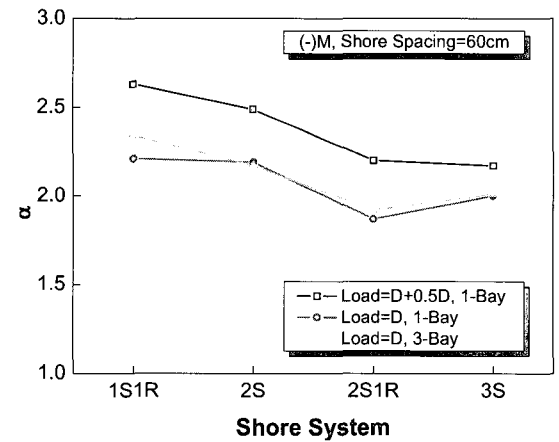
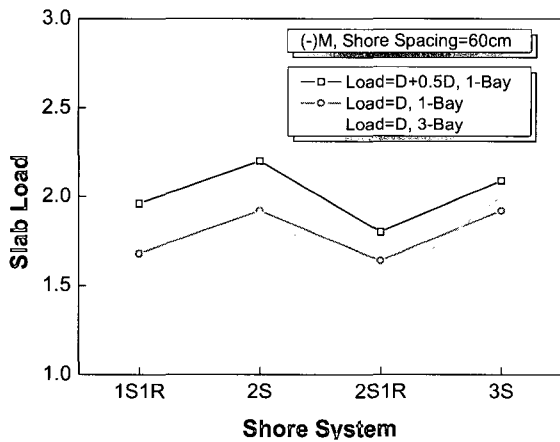
앞에서 언급한 바와 같이 재설치 비계를 설치하는 지지시스템의 경우 비계가 제거되고 재설치 비계가 설치되는 과정에서 시공된 구조계를 통한 적절한 하중 재분배를 유발하기 때문이라 판단된다.

콘크리트의 재령을 고려한 슬래브 하중 비인 α 값은 설치되는 지지시스템의 층 수에 크게 영향을 받음을 그림 4로부터 볼 수 있다. 2개 층에 걸쳐 비계 또는 재설치 비계

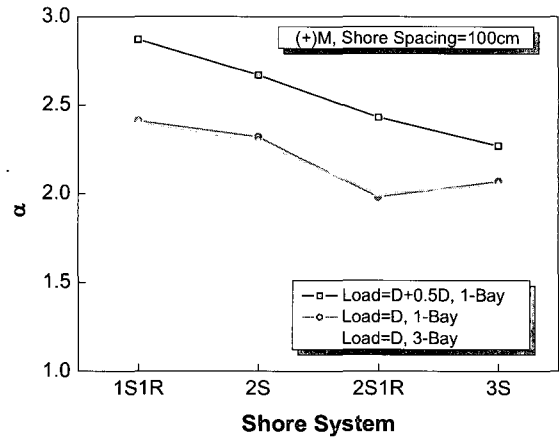
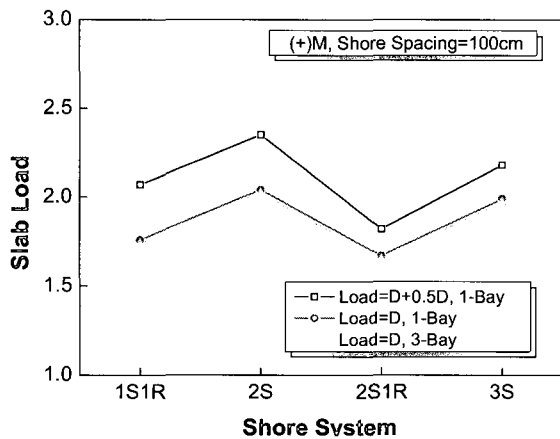
가 설치되는 1S1R 및 2S 지지시스템과 3개 층에 걸쳐 비계 또는 재설치 비계가 설치되는 2S1R 및 3S 지지시스템의 경우 각각 유사한 결과를 보여주고 있으며, 특히 비계의 제거 및 상부 슬래브의 타설 시점이 보다 빠른 1S1R과 2S의 경우 더 큰 α 값을 나타내고 있다. 이는 비계의 제거 및 상부 슬래브 타설 시점에서의 콘크리트 강도가 작아 단면의 저항력에 대한 부재력이 상대적으로 크게 나타



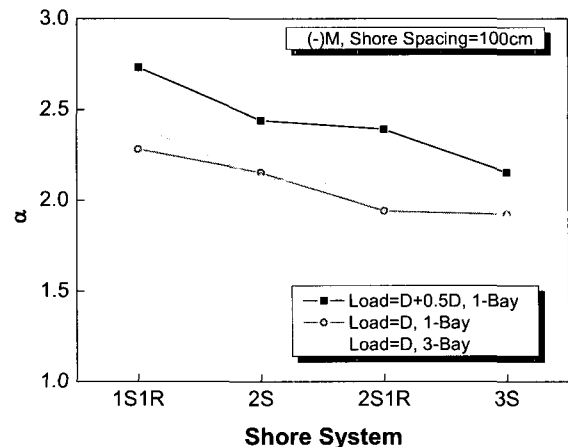
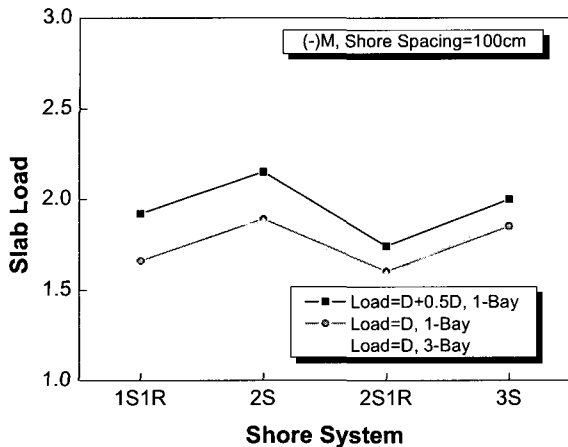
(a) 비계 간격 60cm인 경우



(b) 비계 간격 60cm인 경우



(c) 비계 간격 100cm인 경우



(d) 비계 간격 100cm인 경우

그림 4 슬래브 하중과 α 값의 비교

났기 때문에 판단된다. 1-경간 구조물의 경우 재령을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 2S1R의 경우 α 값이 가장 작게 나타났으며 그 이유 역시 재령을 고려하지 않은 경우와 같을 것으로 판단된다. 한편 3-경간 구조물의 경우 비계간격이 상대적으로 큰 경우 3S-지지시스템에 대하여 가장 작은 α 값을 나타냄을 볼 수 있는데, 이는 비계간격이 넓어짐에 따라 한 층에 설치되는 비계의 개수가 감소하게 되고 그로 인하여 비계보다는 기둥, 특히 내측 기둥을 통하여 하중이 전달되어 재설치 비계에 의한 하중 재분배 영향이 비교적 작게 나타났기 때문에 판단된다. 그러나 실 구조물에서는 일반적으로 비계가 100cm보다 좁은 간격으로 설치되기 때문에 2S1R 지지시스템을 선택하는 것이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 효율적인 지지시스템의 설계를 위해 지지시스템의 종류, 비계의 강성 및 간격, 구조물의 형태 등을 변화시켜가며 다양한 수치해석이 수행되었다. 해석결과로부터, 슬래브 하중 및 비계하중은 비계의 강성 및 간격의 변화에 따른 영향이 비교적 크지 않기 때문에, 비계에 작용하는 하중을 충분히 지지하는 동시에 처짐 등 사용성을 만족하는 범위에서 비계의 설치 간격을 증가시켜도 무방할 것으로 판단된다. 또한, 지지시스템의 구성부재 설계 시에는 설계 부재력의 크기에 영향을 미치게 되는 시공활하중과 거푸집 및 비계의 자중에 의한 영향을 고려하여야 하나 2S1R 또는 1S1R 등 대상 구조계에 가장 적합한 효율적인 지지시스템은 거푸집 및 비계의 자중을 추가적으로 고려하지 않고 슬래브에 작용하는 자중만으로 결정이 가능할 것으로 판단된다. 나아가 시간의존적 거동을 고려하지 않

는 설계기준에 의한 설계는 슬래브 하중에 대해 다소 과다 설계를 유도하는 반면, 비계하중에 대해서는 과소설계를 유도하였다. 따라서 보다 안전하고 경제적인 지지시스템의 설계를 위해서는 설계기준에서 제시하는 것 외의 비계하중에 대한 검토가 필요하며, 시공되는 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동특성, 구조제로써의 거동, 비계의 강성 및 간격, 구조물의 형태 등, 시공 중 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 설계인자의 변화에 대한 영향분석을 고려할 때, 두 개의 비계와 한 개의 재설치 비계(2 shores-1 reshore)를 사용하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 SMART사회기반시설 연구센터(SISTEC)의 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 이 지원에 대하여 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. D.C. Epaarachchi, M.G. Stewart, D.V. Rosowsky, "Structural Reliability of Multistory Buildings during Construction", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 2, 2002, pp. 205~213
2. Australian Standard (AS) "Formwork for concrete" AS3610-95, Sydney
3. *American Concrete Institute (ACI) committee 347, Guide to Formwork for Concrete*, 2002
4. Liu, X.L., Chen, W.F., Bowman, M.D "Construction Loads on supporting Floors", *Concrete*

- International*, Dec., 1985, pp. 21~26
5. A.M. El shahhat and W.F. Chen, "Improved Analysis of Shore Slab Interaction," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 5, 1992, pp. 528~537
 6. 곽효경, 서영재, "시공단계를 고려한 콘크리트 프레임 구조물의 해석," *전산구조공학회*, Vol. 12, No.2, 1999, pp. 201~214
 7. 곽효경, 김진국, 홍수미, "지지시스템을 고려한 철근콘크리트 골조 구조물의 시공단계별 해석," *대한토목학회*, 23권, 4A호, 2003, pp. 765~775
 8. Grundy, P. and Kabaila, A., "Construction Loads on Slabs with shored Formwork in Multistory Buildings", *ACI Journal*, Vol. 60, No. 12, 1963, pp. 1729~1738
 9. Hurd, M.K., *Formwork for Concrete prepared under direction of ACI Committee 347*, SP. No. 4, Forth Edition, *American Concrete Institute*, Detroit, 1984