건식 바닥 난방시스템의 적용 시 구조적 거동 및 경제성 분석

An Affect Evaluation for Dry Floor Heating System that can Increase Efficiency in Building Structures

이 상 주*
Lee, Sang-Ju

이 동 우**
Lee, Dong-Woo

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 필요성

이 연구는 건식 바닥 난방시스템을 적용함으로서 결과적으로 건축구조물의 고정하중(바닥하중)을 감소시킬 수 있다는 점에 착안하여 구조물의 규모 및 구조시스템에 따른 구조적 거동을 평가하고 경제성을 분석하는데 목적이 있다.

건식 바닥 난방시스템을 적용함으로서 일반 습식 바닥 난방시스템과 비교해 전체 바닥 마감두께와 하중을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 지진하중, 풍하중의 감소, 층고감소에 따른 마감재 절감, 건식공법에 의한 공기단축 및 유지관리의 효율성 등을 추측할 수 있다. 하지만 건식 바닥 난방시스템을 적용할 경우 일반 습식 바닥 난방시스템에 비하여 자재비가 고가이므로 적용성이 우수하다고 단정 할 수 없다.

따라서 이 연구에서는 건식 바닥 난방시스템 적용에 따른 구조적 특징 및 구조적 거동을 구조물의 규모와 구조시스템에 따라 비교·분석하고, 구조물의 골조물량 및 경제성을 객관적으로 평가할 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.[1)]

1.2 연구의 방법

이 연구에서는 실제 수행되고 있는 프로젝트에 바닥 난방시스템으로서 습식과 건식 바닥 난방시스템을 각각 적용하여 구조물의 안정성 검토 및 구조물의 골조물량을 비교함으로서 보다 객관적인 적용성 평가를 하고자 한다.

연구 대상 구조물은 규모, 구조시스템이 서로 상이한 3개이며, 각각 기준층이 철근콘크리트 내력벽식 구조이고 하부 구조체가 철근콘크리트 모멘트골조인 지상18층/지하2층 구조물, 기준층이 철근콘크리트 모멘트골조인 지상20층/지하3층 구조물, 기준층이 철근콘크리트 플랫슬래브인 지상43층/지하4층 구조물이다.

건식시스템의 적용에 따른 구조물 고정하중(바닥마감하중)의 감소는 지진하중의 감소로 이어지고 풍하중의 사용성 평가와도 관련이 있다[2)]. 따라서

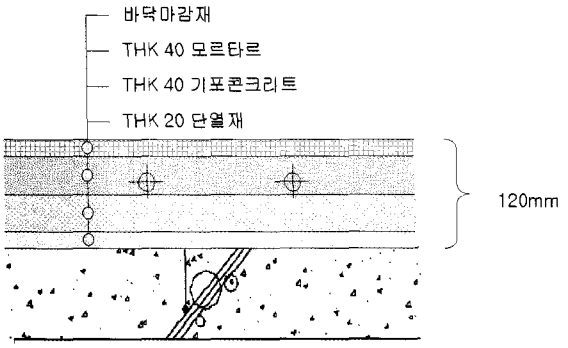
* (주)플러스구조기술사사무소 선임연구원, 공학박사
** 정회원, (주)플러스구조기술사사무소 대표이사, 구조기술사, 공학박사

유치해석, 지진 및 풍하중을 고려한 응답스펙트럼 해석을 수행하여, 결과로 얻어지는 횡변위, 층간변위 등에 기초하여 바닥마감하중의 감소가 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토한다. 특히 지상43층 구조물의 경우 초고층이며 지역이 부산이므로 풍하중이 크기 때문에 바닥마감하중의 감소로 구조물량이 절감된 상태에서 구조적 안정성 확보가 가능한지에 대하여 검토를 수행한다.

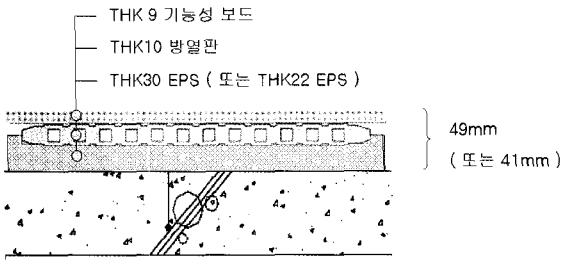
2. 건식 바닥 난방시스템[3)]

구조물의 바닥 마감두께 감소에 따른 바닥하중의 감소를 목적으로 바닥 난방시스템에 적용하고자 하는 건식시스템의 성능 및 특성은 (1) 경량화 및 슬림화, (2) 고효율 난방시스템, (3) 간편한 시공, (4) 환경 친화적 자재 등이다. <그림 1>

또한 기존의 습식시스템 대신 건식시스템을 적용하는 경우 바닥마감두께가 얇아짐에 따른 층고 감소효과로 외장재 시공비용 및 사업계획 시 건물높이제한 해결에 유리하다. 또한 바닥마감하중의 감소로 구조물량을 줄일 수 있으며 시공이 간편하여 공



(a) 기존 습식 바닥 난방시스템



(b) 고효율 면발열 바닥 난방시스템

〈그림 1〉 바닥 난방시스템 비교

〈표 1〉 대상 구조물

항목 \ 대상	구조물1	구조물2	구조물3
지 역	경기도 평택시	서울시 구로구	부산시 해운대구
용 도	공동주택 /근린생활	업무/근린생활	업무/ 근린생활
규 모	지상18층 /지하2층	지상20층 /지하3층	지상43층 /지하4층
연면적	13,900 m^2	26,000m^2	121,000 m^2

기단축도 가능하다. 또한 건식시스템은 차음성능이 습식온돌에 비하여 우수하여 경량충격음을 약 7dB 감소시킬 수 있다. 이 수치는 건교부에서 제시한 바닥충격음 기준 58dB를 충족시키므로 차음을 위한 마감재의 추가비용이 필요 없다고 판단된다.

하지만 바닥 난방시스템의 자재비를 비교해 볼 때 건식시스템이 40%정도 고가이므로 위에서 나열한 비용절감 요소들의 효과가 얼마나 큰지는 파악하기 힘들다. 즉 건식시스템을 적용할 경우 설계하중이 줄어서 부재력이 감소하므로 구조물량이 감소되는 경제적인효과가 얻어질 것으로 예상할 수 있으나, 자재비 증가로 인한 경제적 손실을 고려할 필요가 있으며, 부재 설계 시 지배하중이 풍하중인 경우 구조물량 절감효과가 구조물 거동의 안정성에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 충분한 검토가 필요하다.

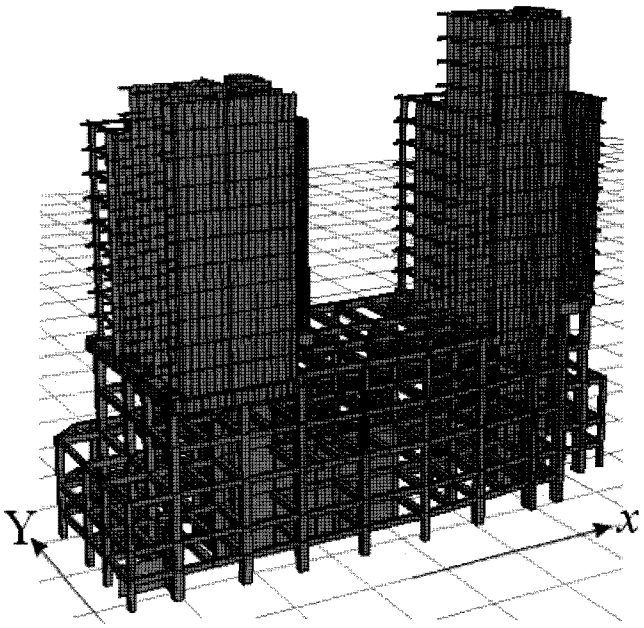
3. 구조시스템에 따른 구조안정성

3.1 대상구조물

본 연구에서는 일정 규모 이상의 내력벽식 구조물과 모멘트골조 구조물을 대상으로 바닥하중의 감소에 따른 구조물량을 비교하고, 구조물의 거동에 미치는 영향을 해석적으로 파악하여 경제성을 평가한다. 표1에 대상구조물 1, 2, 3에 대한 개요를 나타낸다. 해석에 있어서는 범용 프로그램인 MIDAS를 이용하여 고유치해석, 지진해석 및 풍해석을 수행한다.

3.1.1 대상구조물1

대상구조물1을 그림 2에 나타내고, 적용하중을 표2에 나타낸다. 여기에서는 바닥하중의 변경에 따



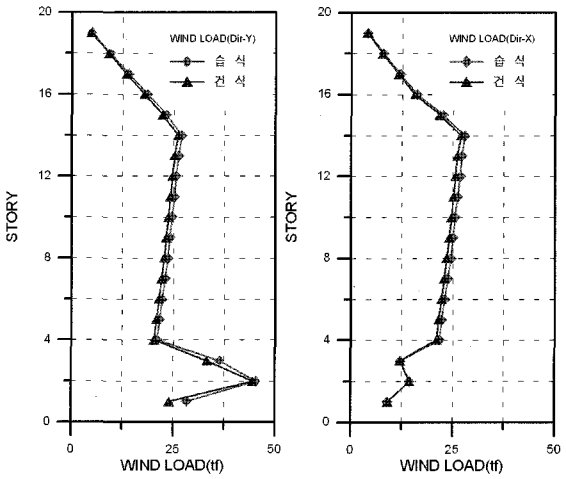
〈그림 2〉 대상구조물1

〈표 2〉 대상구조물1의 적용하중(단위 : N)

항 목		습 식	건 식	비 고
단위 면적당 고정하중	온돌	1,800	200	감소
	슬래브	3,600	3,600	
	천정	150	150	
단위면적당 적재하중		2,000	2,000	
기준층의 고정하중		9,870×103	7,980×103	감소
지진하중		지역계수 A=0.11 지반계수 S=1.2 중요도계수 I=1.5 반응수정계수 R=3.0 고유주기 T=0.0488(hn)3/4 동적계수 C=S/(1.2T1/2) 밑면전단력 V=(AIC/R)×W		감소
풍하중		기본풍속 =30m/s 노풍도 B 중요도계수 1.1		고려하지않음

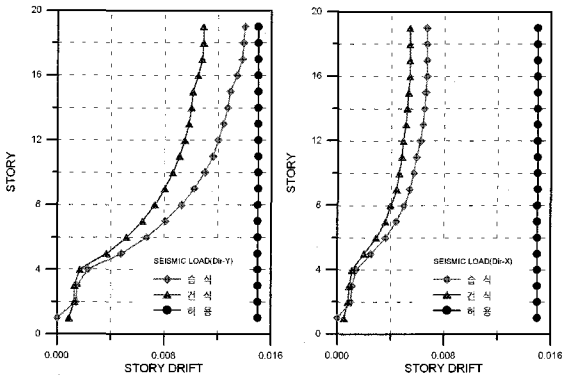
주) 습식과 건식시스템을 적용한 경우의 구조물량 산정 시 해석방법과 설계조건을 동일하게 하며, 가능한 부재의 단면도 동일하게 설계하고 철근량만 조절한다.

른 물량 비교 시 조건을 가능한 동일하게 하여, 물량 비교의 편이를 위해 부재의 단면은 동일한 것으로 가정하고 철근배근만 변경하여 설계 및 해석을 수행한다. 지진하중, 즉 밑면전단력을 구하는 식에 사용되는 계수에는 중량 W가 포함되어 있으며, 구조물전체의 질량에 따라 크기가 변한다. 단, 풍하중



(a) x방향 (b) y방향

〈그림 3〉 층별 풍하중 분포도



(a) x방향 층간변위각 (b) y방향 층간변위각

〈그림 4〉 지진하중에 의한 층간변위각 비교

의 경우 마감하중과 연관성이 없으나 건식시스템 사용 시 층고가 각 층당 71mm씩 감소하므로 풍하중을 받는 면적과 설계풍속이 줄어들게 되어 층당 풍하중도 줄어들게 된다. 하지만 풍하중 비교 결과 노풍도가 B이고 지역이 평택이어서 기본풍속이 크지 않으므로, 층별 풍하중 분포의 차이는 그림 3과 같이 미소한 것으로 나타났다. 따라서 대상구조물1에서는 구조물에 미치는 풍하중의 영향을 무시한다.

바닥 난방시스템의 변경에 따른 고정하중의 감소를 고려하여 고유치해석을 행한 결과, 구조물의 주기는 습식시스템 보다 0.216초 정도 짧은 값을 얻었다. 이는 구조물고유주기의 10%가 감소한 것인데 구조물의 질량이 동일할 경우 구조물 강성이 20%정도 큰 것과 같은 효과라 할 수 있다. 그리고 지진하중의 경우 동일한 위치, 중요도라도 구조물전체의

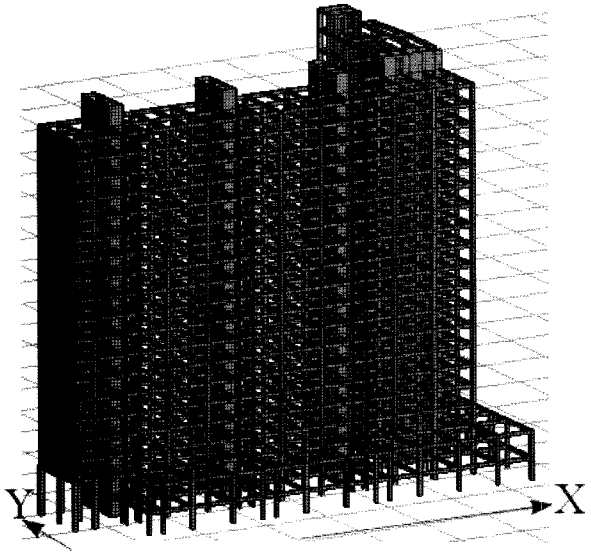
중량에 따라 그 결과가 다르게 나타나므로 본 연구에서는 지진하중의 층전단력, 층간변위각에 따른 시스템별 비교를 수행하였다. 지진하중에 의한 구조물의 동적 해석을 통하여 얻어진 층간변위각을 그림 4에 나타낸다. 해석결과 건식시스템에 따른 층간변위각은 습식시스템에 비해 감소되었으며 이는 고정하중의 감소로 구조물의 고유주기가 짧아지고 지진하중이 작게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

건식시스템은 습식시스템에 비하여 고정하중이 감소하기 때문에 지진하중도 작아지며 구조물의 주기가 짧아지므로 횡방향 층간변위각도 감소하게 된다. 즉 건식시스템의 적용은 지진하중에 대하여 구조안정성을 더 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2. 대상구조물2

대상구조물1에 비해 규모가 크고 구조시스템이 다른 대상구조물2를 대상으로 하여 바닥 난방시스템의 대체에 따른 구조물의 거동 및 영향을 평가한다. 대상구조물2를 그림 5에 나타내고, 적용하중을 표3에 나타낸다. 특히 대상구조물2에는 1.0B의 세대간벽이 있으며 이 조적하중을 4,400N/m^2로 고려하고, 풍하중에 대해서는 대상구조물1과 같이 그 차이가 미소하므로 고려하지 않는다.

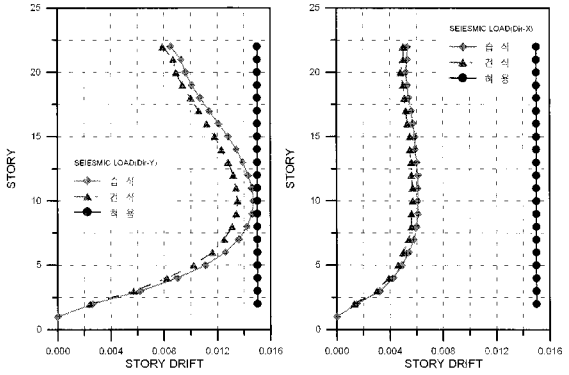
구조물의 주기를 비교한 결과 건식시스템의 고유주기가 습식시스템에 비하여 0.140초 짧은 값을 얻었다. 이는 습식시스템을 적용한 경우 고정하중



〈그림 5〉 대상구조물2

〈표 3〉 대상구조물2의 적용하중(단위 : N)

항 목		습 식	건 식	비 고
단위면적당 고정하중	온돌	1,800	200	감소
	슬래브	3,240	3,240	
	천정	300	300	
	조적벽	4,400	4,400	
단위면적당 적재하중		2,000	2,000	
기준층의 고정하중		1,810×103	1,650×103	감소
지진하중		지역계수 A=0.11 지반계수 S=1.2 중요도계수 I=1.5 반응수정계수 R=4.0 고유주기 T=0.0488(hn)3/4 동적계수 C=S/(1.2T1/2) 밑면전단력 V=(AIC/R)×W		감소
풍하중		기본풍속 =30m/s 노풍도 B 중요도계수 1.1		고려하지 않음



(a) x방향 층간변위각 (b) y방향 층간변위각

〈그림 6〉 지진 동적 해석에 의한 층간변위각 비교

이 커서 건식시스템을 사용하였을 때 보다 구조물의 강성이 저하하고 이에 따라 지진하중에 대하여 횡변위가 증가하게 된다는 것을 의미한다.

지진하중에 의한 구조물의 동적 해석을 통한 거동 특성으로서 층간변위각을 그림 6에 나타낸다. 대상구조물2에서도 대상구조물1과 같이 층간변위각은 감소되었으며 이는 고정하중의 감소로 구조물의 고유주기가 짧아지고 지진하중이 작게 작용하기 때문인 것으로 판단되므로 습식시스템을 적용한 때보다 구조안정성을 더 확보할 수 있다고 판단된다.

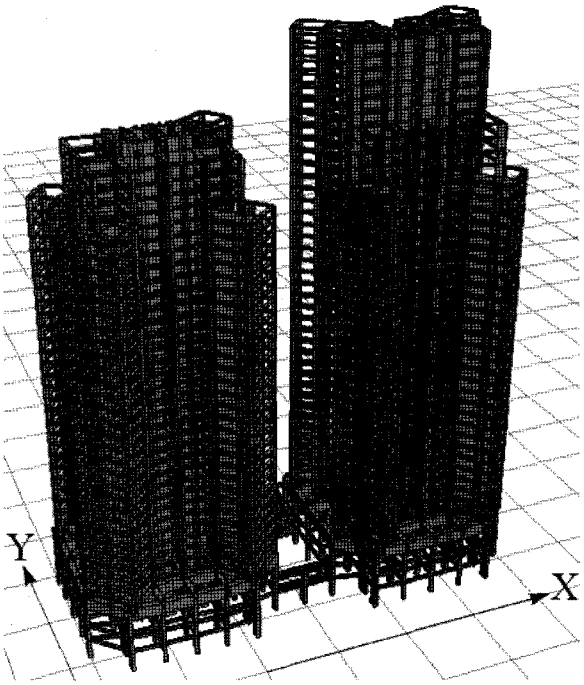
3.1.3. 대상구조물3

대상구조물1, 2와 규모 및 시스템이 다른 구조물에 대하여 난방시스템의 적용에 따른 바닥 난방시스템의 대체에 따른 구조물의 거동 및 영향을 평가한다. 대상구조물3을 그림 7에, 적용하중을 표4에 나타낸다.

두 난방시스템에 따른 고유주기와 고유모드를 그림 8에 나타낸다. 구조물의 주기를 비교한 결과 건식시스템이 습식시스템에 비하여 1차 고유주기가 0.380초 짧은 것을 알 수 있다. 이는 대상구조물 1, 2와 같이 고정하중의 감소효과로 평가할 수 있다. 또한 두 난방시스템에 따른 3차 모드를 비교해 보면 질량과 강성의 관계가 달라짐에 따라 구조물의 거동도 달라진 것을 알 수 있다.

풍하중의 경우 위치, 용도, 구조물의 형상에 따라 그 값이 변동하는 것이므로 마감하중에 따라 그 값이 변하지 않지만 건식시스템을 사용할 경우 층당 71~79mm정도 감소하여 전체층고가 3.12m감소하므로 구조물의 풍하중이 감소하는 효과도 얻을 수 있다.

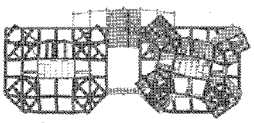
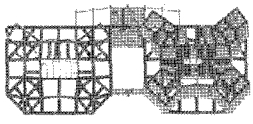
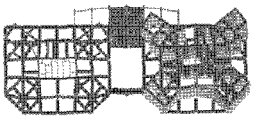
풍하중에 의한 해석을 수행한 결과 얻어진 횡변위를 그림 9에 나타낸다. 건식시스템의 경우 Y방향의 최대 횡변위가 H/500이하이나, 습식시스템의 경우 H/500을 넘는 것으로 나타났다. 일반적으로 구조물의 횡변위는 H/500이하로 제한하고 있으므로 습식 시스템의 경우 풍동실험을 통한 재해석이나 횡변위 제어를 위한 구조요소가 요구된다. 또한 지진하중에 의한 구조물의 동적 해석을 통한 거동



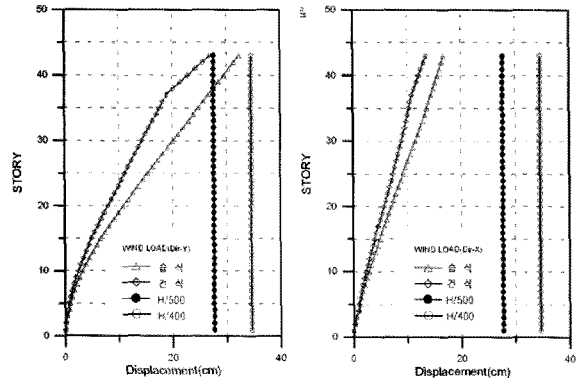
〈그림 7〉 대상구조물3

〈표 4〉 대상구조물3의 적용하중(단위 : N)

항목		습식	건식	비고
단위면적당 고정하중	온돌	1,800	200	감소
	슬래브	6,000	6,000	
	경량칸막이	1,000	1,000	
	천정	150	150	
단위면적당 적재하중		2,500	2,500	
기준층의 고정하중		$38,300\times10^3$	$34,800\times10^3$	감소
지진하중		지역계수 A=0.11 지반계수 S=1.5 중요도계수 I=1.5 반응수정계수 R=4.0 고유주기 $T=0.0731(h_n)^{3/4}$ 동적계수 $C=S/(1.2T^{1/2})$ 밑면전단력 V=(AIC/R)×W		감소
풍하중		기본풍속 =40m/s 노풍도 D 중요도계수 1.1		고려함

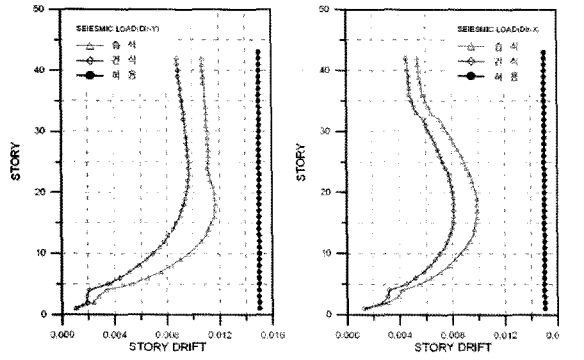
습식시스템	건식시스템
 1차모드 (RZ), 3.763 sec	1차모드 (RZ), 3.380 sec
 2차모드 (DY), 3.657 sec	 2차모드 (DY), 3.271 sec
3차모드 (RZ), 3.268 sec	3차모드 (DX), 2.825 sec

〈그림 8〉 풍하중에 의한 고유모드



(a) x방향 층간변위 (b) y방향 층간변위

〈그림 9〉 풍하중에 의한 횡변위 비교



(a) x방향 층간변위각 (b) y방향 층간변위각

〈그림 10〉 지진하중에 의한 층간변위각 비교

특성으로서 층간변위각을 그림 10에 나타낸다. 대상구조물1, 2와 같이 작용하중의 감소에 따라 건식 시스템이 습식 시스템에 비하여 층간변위각이 작게 나타난다.

본 대상구조물의 경우 횡하중에 대하여 별도의 요소를 추가하여 비교하지는 않았으나 고층 또는 초고층의 경우 횡하중에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 Outrigger, Wall Truss등을 추가하여야 할 수도 있다. 이 경우 분양세대 감소, 시공성 저하 등 물량이 추가되는 사항 이외에도 경제적으로 많이 불리하게 된다. 따라서 건식시스템을 사용할 경우 고정하중이 감소하여 횡하중에 대하여 습식시스템을 적용하였을 때 보다 안정성을 더 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 구조시스템에 따른 적용성 평가

각 대상구조물에 대해서 건식시스템의 적용에 따른 구조물의 물량에 대하여 비교·검토하여 적용성을 평가한다. 습식시스템에 대한 비율을 항목별로 표 5에 나타낸다.

〈표 5〉 습식시스템에 대한 비교

구 분	대상구조물1	대상구조물2	대상구조물3
고정하중	89%	94%	92%
밑면전단력	89%	92%	93%
기준층 철근량	88%	91%	83%
저층부 철근량	85%	79%	83%
총 철근량	86%	90%	83%
총 공사비	89%	93%	88%

주1) 철근의 경우 이음 및 정착을 고려하여 슬래브, 벽체는 13%, 그 외 부재는 26%할증을 고려함.
주2) 총공사비에는 콘크리트물량이 포함됨.

4.1. 기준층 및 저층부 철근물량 비교

기준층 물량의 경우 구조물의 구조형식이 다를 뿐 규모가 비슷한 대상구조물1과 2는 절감되는 철근의 물량이 유사한 것으로 나타났으며, 다른 구조물에 비하여 규모가 큰 대상구조물3의 경우는 부산지역이어서 풍하중의 영향이 커서 다른 대상구조물에 비하여 2배정도 물량이 절감되었다는 것을 알 수 있다.

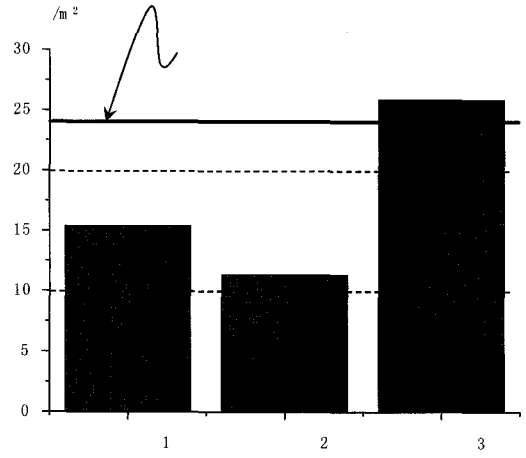
저층부의 경우 수평재의 물량은 하중이 동일하므로 그 차이가 발생하지 않고 상부층에서 누적된 하중의 차이로 수직재에만 물량절감이 발생하게 된다. 대상구조물1과 대상구조물3의 경우 전이층이 있어서 대상구조물2에 비하여 기본적으로 물량이 많이 요구되어서 인지 줄어드는 물량이 많은 것에 비하여 그 비율은 다소 작게 나타났다. 그리고 저층부의 경우 건축 공간 등의 이유로 수직재의 경우 단면을 최적화하여 설계를 수행하게 되므로 기준층에 비해서 철근비가 증가하게 되며 하중이 감소하여 줄어드는 철근량 역시 기준층보다 증가하게 되므로 철근물량의 감소비가 기준층에 비하여 크게 나타난다.

4.2. 총 철근물량 및 총공사비 비교[4)]

총 철근물량의 경우 기준층과 저층부의 비, 수직재 물량과 수평재 물량의 비에 따라 감소물량비가 좌우

므로 기준층, 저층부 철근물량을 비교한 것과 차이가 있는 것으로 판단된다. 하지만 총 철근물량 역시 대상구조물3의 절감비율이 가장 큰 것으로 나타났다.

총공사비 비교 결과 대상구조물3이 가장 크며, 이는 초고층에서 건식시스템을 사용하는 것이 중·저층 구조물에서보다 경제적으로 유리하다는 것을 의미한다.



〈그림 11〉 난방면적당 공사비 절감액 비교

그림 11에 나타낸 것과 같이 난방면적당 공사비 절감액은 대상구조물 모두 감소하지만 , 건식시스템의 경우 자재비가 60천원/m^2이므로 습식시스템의 경우 36천원/m^2인데 비해 40%정도 고가이다.[3] 이를 고려한다면 대상구조물3만 경제적이라고 할 수 있다. 단, 대상구조물1, 2에 대해서도 건축마감재, 공사기간, 추후 발생되는 2차비용 감소 등을 추가하여 비교할 경우 경제성을 확보가능하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 그 규모와 구조시스템이 다른 3개의 구조물을 대상으로 건식 바닥 난방시스템으로 변경이 구조물의 안정성에 미치는 영향을 검토하고 적용성을 평가하였다.

연구수행결과 대상구조물은 모두 바닥하중감소에 따라 고유주기가 짧아지고, 지진하중에 대한 층간변위각도 감소하였다. 특히 대상구조물3에서는 풍하중에 대하여 습식시스템을 적용한 경우 횡변위 제한치를 충족시키지 못하고 있으므로 안정성을 확보하기 위하여 횡변위 제어를 위한 추가적인 구조요소를 필요로 하지만, 건식시스템을 적용하는 경우 제한치를 만족하며 구조적 안정성도 확보 가능함을 알 수 있었다.

그리고 건식시스템을 적용하는 경우 습식시스템에 비하여 자재비가 고가이므로 이를 고려하여 비교 분석해 본 결과, 난방면적당 공사비는 대상구조물 모두 감소하고 구조물이 고층일수록 경제적 효과가 큰 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준, 건설교통부고시 제2004-71호.
2. 대한건축학회(2000). 건축물 하중기준 및 해설.
3. LG화학(2003). LG히트릭스, 기술자료집.
4. 종합적산정보(2004). 사단법인 한국물가정보.