

# 시공단계를 고려한 플로팅 폰툰의 상부구조물 해석기법

† 이영욱 · \*채지용

† 군산대학교 건축공학과 교수, \* 군산대학교 건축공학과 박사과정

## Analysis method of the Superstructure on Floating Pontoon Considering the Construction Sequences

† Young-Wook Lee · Ji-Yong chae\*

† Department of Architecture and Building Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 수상위에 진수된 콘크리트 플로팅 폰툰에 상부골조를 단계별로 시공함에 따라 발생하는 추가 처짐이 상부골조에 발생하므로 추가변형에 의한 상부골조의 추가 모멘트량을 산정하는 해석절차를 제시하였으며 제시된 절차에 따라 3층 예제 철골 건물을 해석하고 분석하였다. 제시된 시공단계를 고려한 해석 방법과 비교하여, 폰툰의 변형을 고려하지 않는 해석 방법은 수직하중에 의한 변형을 무시하여 설계하중을 과소평가 하며, 플로팅 구조물을 전 층을 모델링하고 하중을 동시에 작용시키는 모델은 과대 처짐의 영향으로 설계하중을 과대평가함을 알게 되었다.

**핵심용어** : 콘크리트 폰툰, 상부구조물, 시공단계, 수직 처짐

**Abstract** : In this research , the influence of additional vertical deformation of floating pontoon when dead load of each story is loaded during construction was investigated. The analysis procedure is presented for considering the influence of the additional deformation to calculate the additional moment of super-frame. Following the procedure, an example building with 3 storied steel frame was analyzed. Analysis method that taking no account for deformation of pontoon to the modeling was underestimated by ignoring design load following deformation of vertical load. By operating the load at the same time, design load under the influence of large deflection of model which whole modeling of floating structure was overestimated. So analysis method of floating structure considering the construction sequences demonstrated the suitable method.

**Key words** : Concrete Pontoon, Superstructure, Construction Sequences, Vertical Deflection

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

플로팅 구조물은 지구온난화에 따른 해수면의 상승에 따른 자연스러운 해결방법으로 받아들여지고 있으며, 경제력의 향상으로 사람들의 욕구가 다양해지면서 수변공간을 이용한 레포츠 등 공간을 형성하는 효율적인 대안 중 하나로 부상하고 있다.

플로팅 구조물은 폰툰식과 반잠수식이 널리 사용되고 있으며, 정온 수역에서는 반잠수식 보다 폰툰식 폰툰이 경제성이 있다(C. M. Wang, 2008; 해양수산부, 2008).

일본의 경우 폰툰형 폰툰을 이용한 초대형폰툰 프로젝트(Mega-Float Project)가 1995년에서 1997년까지 수행되었으며, 폰툰설계기술, 해상시공기술, 장기내용(耐用)기술, 상재시설기능 보증기술, 환경영향평가기술의 이론 및 실증실험에 대한 연구를 중점적으로 진행하였다. 1998년부터 2000년 사이에 해상공

항을 목표로 한 제 2기 실증실험을 추진하여 본격적인 해양 부유 구조물 기술을 축적하고 있다(해양수산부, 2008).

국내에서는 초대형 부유식 해상구조물 기술개발을 1999년부터 2007년까지 해양수산부의 지원을 받아 한국해양연구원 및 관련 연구기관이 공동으로 초대형 부유식 구조물 설계와 해석 평가 기법 개발 및 시스템 개념설계 연구(해양수산부, 2008)를 수행하였다.

이러한 제반 연구에서 핵심은 폰툰형 플로팅 폰툰과 계류의 거동에 대한 해석과 검증실험이었다. 특히 초대형 플로팅 폰툰의 경우 길이에 비하여 폰툰의 두께가 얇으므로 유탄성 해석을 수행하여 폰툰의 두께를 최적화한다. 기존의 선박 해석은 6자유도를 갖는 강체거동의 모델을 사용하는데 반하여 플로팅 폰툰은 수면위에 탄성거동을 하는 구조물로 해석을 한다.

따라서 이러한 탄성거동을 하는 폰툰 위에 건물과 같은 구조물을 상부에 시공함에 따라 폰툰에 불균등 수직 처짐이 발생하

† 교신저자 : 연희원, leeyu@kunsau.ac.kr 063)469-4784

\* 연희원, luckyc007@hanmail.net 063)469-1956

며, 이러한 처짐은 상부 구조물의 반력하중을 증가시키는 요인으로 작용한다.

이러한 수직 처짐은 초고층 건물에서 발생하는 부등변위와는 역학적으로 다르지만 동등한 효과를 나타낸다. 초고층 건물에서는 기둥의 축강성과 수직하중의 차이에 의하여 부등변위가 발생하여 구조물에 추가적인 하중(김한수, 2003; 문주혁, 2007)이 작용된다. 그러나 폰툰위에 시공되는 구조물의 방법은 폰툰의 처짐에 의하여 수직변위가 주로 발생한다는 점에서 초고층 건물의 부등변위와 차이가 있다.

일반적으로 콘크리트 폰툰위에 상부골조를 시공하는 방법은 다음과 같이 두 가지 경우(ACI 357, 2010)로 생각할 수 있다.

경우 A: 도크(dock)내에 플로팅폰툰과 상부골조를 시공한 후에 이를 진수하는 방법

경우 B:는 플로팅 폰툰을 제작하여 수상에 진수한 후에 상부골조를 시공하는 방법

경우 B와 같이 수상에서 플로팅 폰툰 위에 건설되는 상부골조의 두 가지 시공법에 대하여 다음과 같은 세 가지 해석방법이 가능하다.

방법 1: 폰툰의 변형을 고려하지 않는 하부가 고정된(Fig. 1 참조) 일반적인 해석방법이다. 이 방법은 간편하게 계산을 수행할 수 있으나 지속되는 폰툰의 수직하중에 의한 변형을 무시하게 되므로 예상되는 설계하중을 과소평가할 수 있다.

방법 2: 폰툰의 변형을 고려하고 전 층을 모델링하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 상부 구조물의 하중에 의한 변형을 일시적으로 고려하므로 상부골조에 지나치게 큰 반력 하중이 발생하므로 설계하중을 과대평가할 수 있다.

방법 3: 폰툰의 변형을 고려한 시공단계별 해석방법이다.

일반적으로 폰툰이 대형인 경우 폰툰의 제작기간과 진수에 따른 어려움 때문에 하부의 폰툰을 세그먼트(ACI 357, 2010)로 제작하고 해상에서 세그먼트를 접합 시공한다. 이후에 상부골조의 조립을 수행하게 된다. 이러한 방법은 앞에서 언급한 방법 3의 방법에 따라 순차적인 처짐을 고려한 해석을 수행하여야 한다.

그러나 앞에서 언급한 국내외에서 수행한 대다수의 연구는 유동학 또는 유탄성 해석에 근거한 동적거동에 대한 연구가 주요 초점이었으며, 시공절차에 따른 상부구조물에 대한 영향에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 폰툰위에 상부구조물의 시공 단계에 따른 수직하중의 영향을 고려하는 해석절차를 제안하고자 한다. 즉, 폰툰위에 상부구조물의 시공단계별로 인한 해석방법론을 제안하고, 예제 해석을 통하여 기존의 해석방법과 반력의 차이를 확인하는 것을 연구의 목적으로 한다.

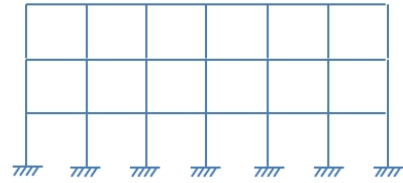


Fig 1. Base Supported Model

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 플로팅 폰툰의 재료가 콘크리트이고 상부골조가 철골조인 경우를 대상으로 하였다. 이 경우 각층별 시공단계별로 고정하중(마감하중 포함)이 작용하고, 전체 층이 완성된 후에 커튼월의 하중이 작용하며, 그 이후에 활하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 플로팅 폰툰의 경우 육상과는 달리 지진하중의 영향을 받지 않으며, 파랑하중의 영향을 받으나 본 연구에서는 파랑에 의한 콘크리트 폰툰의 영향을 고려하지 않는다.

또한 플로팅 폰툰위에 건조되는 골조는 저층형으로 가정하여, 수직하중에 의한 기둥의 부등 축소량은 무시한다. 즉, 수직 처짐은 주로 폰툰의 휨 변형에 의하여 발생하는 것으로 가정하였다.

폰툰과 상부골조의 변형은 탄성해석에 의하여 산정한다. 즉, 상부하중에 의한 장기 적재 영향은 무시한다. 일반적으로 폰툰의 상부골조는 저층이므로 시공기간이 짧아 시공기간동안 크리프에 의한 변형이 미미하여 장기 처짐을 고려하지 않아도 된다. 따라서 상부하중이 증가함에 따른 구조체의 변형량을 탄성해석에 의하여 계산한다.

본 연구에서는 폰툰의 변형을 고려하고 시공단계를 고려하는 해석방법에 따라 발생하는 골조의 모멘트 및 축력의 변화량을 확인하고, 기존의 해석방법과 차이점을 분석한다.

## 2. 시공단계별 해석 방법

폰툰위에 골조가 있는 경우의 해석 방법이 일반적인 건물과 동일하다고 가정하면 해석 모델은 Fig. 1과 같이 지반위에 고정되어 있는 모습과 같다. 그러나 이러한 해석은 방법3과 같이 진수된 폰툰위에 건물을 시공할 때와 하중 작용 상황이 다르기 때문에 해석 결과에 차이가 발생한다.

먼저 폰툰이 수상에 진수되면 콘크리트 폰툰의 자중에 의하여 Fig. 2와 같은  $\delta_0$ 의 처짐이 발생되게 된다. 이 처짐이 발생한 후에 1층이 시공되므로 1층의 부재 반력은  $\delta_0$ 의 영향을 받지 않는다.

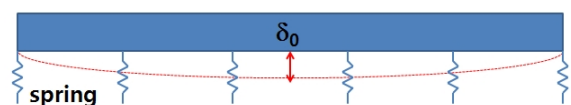


Fig 2. Deflection of pontoon by self-weight

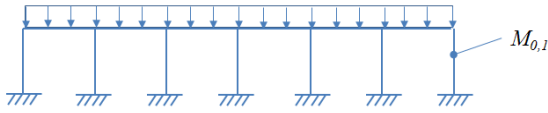


Fig. 3. Reaction Moment after 1st floor construction

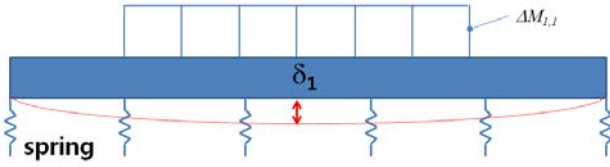


Fig. 4. Additional deflection after 1st floor construction

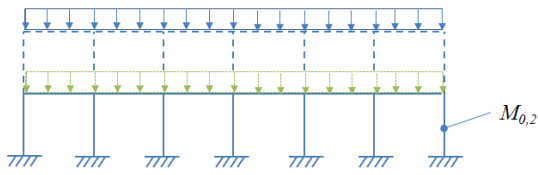


Fig. 5. Reaction Moment after 2nd floor construction

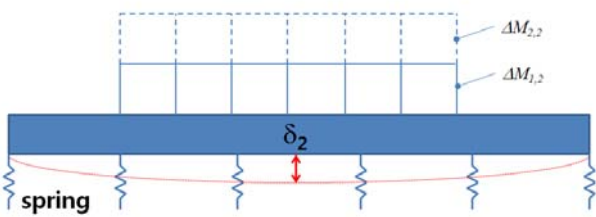


Fig. 6. Additional deflection after 2nd floor construction

1층이 시공되면 자중에 의한 추가 처짐  $\delta_1$ 이 발생한다. 이 처짐을 1층이 시공된 폰툰에 강제 처짐 하중으로 입력하게 되면 1층 자중에 따른 영향을 확인 할 수 있다. 이 때 1층 골조의 모멘트를  $M_{1,1}$ 라 하고, 처짐이 발생하기전의 1층의 골조 모멘트  $M_{0,1}$ (Fig. 3참조)라 하면 다음과 관계식이 성립된다. 단,  $\Delta M_{1,1}$ 은 1층 시공에 따른 추가변위  $\delta_1$ 에 의한 추가 모멘트이다.

$$M_{1,1} = M_{0,1} + \Delta M_{1,1} \quad (1)$$

2층 시공시 1층 골조의 모멘트  $M_{1,2}$ 는 다음의 식(2)와 (3)에 의하여 표현될 수 있다. 단,  $\Delta M_{1,2}$ (Fig. 6참조)는 2층 시공에 따른 추가변위  $\delta_2$ 에 의한 1층의 모멘트 증가량이고,  $\delta M_{0,2}$ 은 추가된 2층 골조에 의한 모멘트의 변화량이다.

$$M_{1,2} = M_{1,1} + \delta M_{0,2} + \Delta M_{1,2} \quad (2)$$

$$\delta M_{0,2} = M_{0,2} - M_{0,1} \quad (3)$$

여기서  $M_{0,2}$ 는 2층 골조에 자중이 작용할 때 반력 모멘트(Fig. 5 참조)이다.

2층 시공에 의한 2층의 모멘트  $M_{2,2}$ 를 수식으로 표시하면 다

음과 같다. 단,  $\Delta M_{2,2}$ (Fig. 6참조)는 2층 시공에 따른 추가변위  $\delta_2$ 에 의한 2층의 모멘트 증가량이다.

$$M_{2,2} = M_{0,2} + \Delta M_{2,2} \quad (4)$$

마찬가지로, 3층이 시공된 후의 1층에서의 모멘트  $M_{1,3}$ 는 다음과 같다.

$$M_{1,3} = M_{1,2} + \delta M_{0,3} + \Delta M_{1,3} \quad (5.a)$$

$$= (M_{0,1} + \delta M_{0,2} + \delta M_{0,3}) + (\Delta M_{1,1} + \Delta M_{1,2} + \Delta M_{1,3}) \quad (5.b)$$

$$\delta M_{0,3} = M_{0,3} - M_{0,2} \quad (5.c)$$

식(5.b)의 첫째 괄호안의 값에 식(3)과 (5.c)를 대입하여 정리하면 식(6)과 같다.

$$M_{1,3} = M_{0,3} + \Delta M_{1,1} + \Delta M_{1,2} + \Delta M_{1,3} \quad (6)$$

임의의  $j$ 층을 시공함으로 자중이 추가하여  $i$ 층에 추가되는 모멘트를  $\Delta M_{i,j}$ 라 하고, 이때의  $i$ 층의 모멘트를  $M_{i,j}$ 라 하면 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$M_{i,j} = M_{0,j} + \sum_{k=i}^j \Delta M_{i,k} \quad (7)$$

단,  $M_{0,j}$ 는  $j$ 층까지 지반이 지지된 조건에서 구조 모델링하여 얻은 부재의 모멘트이다. 예를 들어 3층까지 시공될 때의 2층의 모멘트  $M_{2,3}$ 는 다음과 같다.

$$M_{2,3} = M_{0,3} + \sum_{k=2}^3 \Delta M_{2,k} \quad (8)$$

$$= M_{0,3} + \Delta M_{2,2} + \Delta M_{2,3}$$

만약 동일한 면적의 건물이라고 가정하면 자중은 동일하므로 추가 처짐  $\delta_i$ 은 층수에 관계없이 일정할 것이다. 따라서  $i$ 층을 시공하였을 때의 폰툰의 총 처짐  $\delta$ 는 식(9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\delta = \delta_0 + i \times \delta_i \quad (9)$$

또한  $\delta_i$ 가 동일하다면 추가하중에 의하여 발생하는 모멘트의 변화량  $\Delta M_{i,j}$ 도 크게 다르지 않을 것으로 예측된다. 따라서 매 층마다 구조해석을 반복할 필요 없이 다음과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$M_{i,j} = M_{0,j} + (j - i + 1) \times \Delta M_{1,j} \quad (10)$$

여기서,  $\Delta M_{1,j}$ 는  $\Delta M_{1,1}$ ,  $\Delta M_{1,2}$ ,  $\Delta M_{1,3}$ 의 3개중 하나를 임의로 선택함을 말한다.

따라서  $n$ 층의 건물을 수상의 폰툰위에 시공하였을 때 발생하는 총 처짐량  $\delta_t$ 와 1층의 휨모멘트  $M_{1,n}$ 는 식(11)과 (12)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_i = \delta_0 + n \times \delta_i \quad (11)$$

$$M_{1,n} = M_{0,n} + n \times \Delta M_{1,i} \quad (12)$$

단,  $i$ 는 1에서  $n$ 까지 어떤 값을 선택하여도 큰 차이가 없다.

### 3. 예제 해석

#### 3.1 해석모델 개요

본 연구에서는 플로팅 구조물의 시공단계별 해석을 위하여 Fig. 7과 같은 대상모델을 선정하였다. 대상모델은 길이 96m, 폭 48m, 높이 2.5m인 콘크리트 구조물이며, 8m×8m의 모듈 72개로 구성했다. 콘크리트 폰툰의 외부 두께는 0.2m이며 내부의 격벽 또한 0.2m로 모델링 되었다. 상부구조물은 철골모멘트연성골조로 재질은 SS400이며 기둥은 H-310×305×15×20, 보는 H-482×300×11×15로 되어 있다. 상부구조물 또한 8m의 스패너로 장변방향으로 48m, 단변방향으로 32m이다. Y방향으로 사이보가 들어가 있으며, 층고는 3.5m이다.

시공단계를 고려하기 위하여 1층에서 3층까지 시공시 하중은 고정하중으로 3.8kN/m<sup>2</sup>을 적용하였고, 시공후 외벽 마감 재료로 0.5kN/m<sup>2</sup>, 활하중으로 3kN/m<sup>2</sup>을 적용하였다.

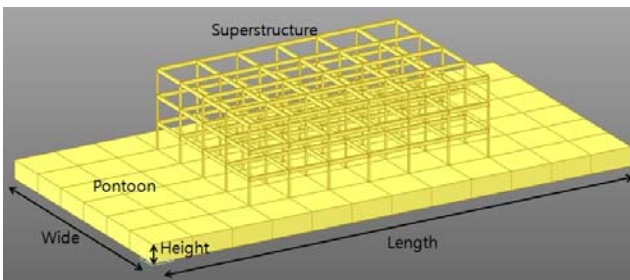


Fig 7. Example model for analysis

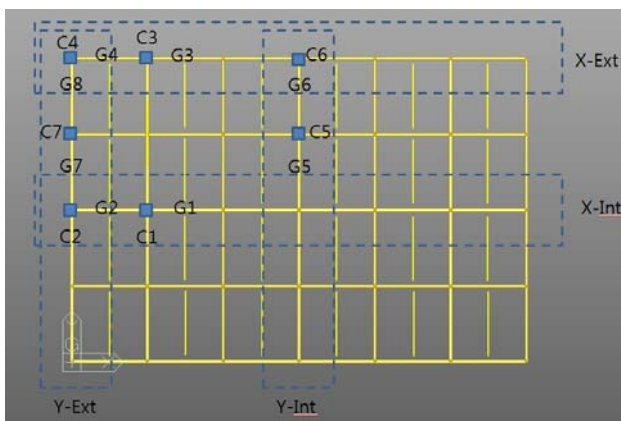


Fig 8. Frames for analysis and element ID

#### 3.2 해석 방법

시공단계에 따른 상부구조물의 휨모멘트의 비교를 위해 고정하중이 작용하는 모델의 해석을 먼저 수행하였다. 그 이후에

커튼월 자중과 활하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

Table 1은 고정하중에 대한 모멘트를 지반위에 상부골조를 모델링한 방법1에 따른 모멘트를 구하여 각층의 시공에 따른 추가변위의 해석을 수행하여 각 부재의 모멘트를 더하였다. 이러한 시공단계에 따른 해석방법에 따라 방법3을 구하고 동시작용에 따른 방법2와 비교하였다.

Table 2의 방법3은 고정하중에 대한 모멘트를 해석 후 커튼월에 대한 외부마감하중 및 활하중에 대하여 해석을 수행하였다. 커튼월에 대한 외부마감하중의 경우 이미 시공된 고정하중이나 활하중에 비해 변형이 미미하며 방법2와 방법3의 최종 값만 이용하여 시공단계의 모멘트 변화량만 확인하였다.

활하중에 의한 수직 처짐을 계산함에 있어서 활하중이 건축 전체 면적에 동시작용이 되지 않는다고 판단하여 건축구조기준에서 정하는 활하중 저감계수를 사용하였다(대한건축학회, 2009).

$$C = 0.3 + \frac{4.2}{\sqrt{A}} \quad (13)$$

여기서, C : 활하중 저감계수

A : 영향면적 (단, A ≥ 36m<sup>2</sup>)

식 (13)에 따라 슬래브의 1면만 영향을 받는 네 모퉁이의 기둥(C4)은 저감계수 0.6을 사용하였으며, 2면의 영향을 받는 외측 기둥(C2)은 0.51, 4면의 영향을 받는 내측 기둥(C1)은 0.45를 사용하여 활하중에 대한 영향을 저감시켰다. 활하중의 입력은 밑면 고정단에서 반력을 추출하여 각 기둥에 대한 활하중 저감계수를 곱한 값을 다시 각 노드마다 절점하중으로 입력하여 처짐을 계산하였다.

건축물에 사용성을 위한 하중조합으로 1.2D+1.6L을 사용하였다. 일반적으로 플로팅 구조물은 항시 외기에 노출되어 있어 파랑 및 풍하중에 의한 하중조합이 사용되지만 본 연구에서는 수직하중의 조합만을 고려하였다.

플로팅 구조물은 상부구조설계를 할 때 지상설계보다 처짐에 대한 영향에 유의해야하며, 각 용도에 따라 변형허용치를 만족해야한다. 하부 폰툰의 방법 건축구조기준에서 정하는 활하중에 의한 최대 허용처짐인  $l/360$ (대한건축학회, 2009), 상부구조물은 철골부재의 허용기준을 사용하여  $l/300$ (대한건축학회, 2009)에 대하여 사용성 검토를 하였다. 처짐은 양끝단부와 최대 처짐이 생기는 중앙부의 상대 처짐으로 계산하였다. 폰툰의 중앙부에서는 0.15m의 처짐이 발생하고, 상부구조물은 0.026m의 처짐이 발생하였으며, 각 허용기준을 초과하지 않았다.

Table 3의 a)는 Table 1과 같이 폰툰위에 각층이 시공됨에 따라 발생하는 기둥의 축력 및 모멘트를 나타낸 것이다. b)는 Table 2와 같이 커튼월 시공 후 하중조합에 의해 발생하는 축력 및 모멘트를 나타냈으며, 또한 a)의 방법1은 반복이며 축력 및 모멘트의 변화량도 다르기에 방법2, 방법3의 최종 값을 나타내었다.

Table 1 Analysis data with dead load (without curtain-wall load)

(a) X-INT Frame (kN-m)

Member Method	X-INT Frame (kN-m)															
	Interior beam								Exterior beam							
	1G1 End.	2G1 End.	3G1 End.	mean	1G1 Cen.	2G1 Cen.	3G1 Cen.	mean	1G2 Ext.	2G2 Ext.	3G2 Ext.	mean	1G2 Int.	2G2 Int.	3G2 Int.	mean
(1) CASE 1	-187	-183	-190	-187	144	146	143	145	-134	-146	-104	-129	-198	-194	-206	-200
(2) CASE 2	-303.3	-273.7	-226.8	-268	156.2	159	162.3	159	-414.3	-357.1	-236.8	-336	47.4	3.3	-81.2	-10
(3) CASE 3	-262.6	-218.1	-199.6	-227	148.2	154.3	148	150	-334.6	-235	-137.3	-236	-25.5	-111.8	-174.8	-104
(1)/(3), (%)	71	84	95	83	97	94	96	96	40	62	75	59	770	174	117	354
(2)/(3), (%)	115	125	113	118	105	103	109	106	128	151	172	150	185	2	46	78
$\Delta M_{1,i}$	-29.7	-23.4	-9.3		3	3.2	4.8		-72.4	-53	-33.3		63.5	49	31.4	

(b) X-EXT and Y directional Frame (kN-m)

Member Method	X-EXT Frame (kN-m)				Y-INT Frame (kN-m)				Y-EXT Frame (kN-m)			
	1G3 End.	1G3 Cen.	1G4 Ext.	1G4 Int.	1G5 End.	1G5 Cen.	1G6 Ext.	1G6 Int.	1G7 End.	1G7 Cen.	1G8 Ext.	1G8 Int.
(1) CASE 1	-96.9	73.8	-69.6	-102.3	-108.5	52.6	-52.4	-115	-57.5	27.7	-27.6	-61
(2) CASE 2	-209.4	85	-340.4	135.4	-85.9	58	-87.4	-82.1	-42.2	32.2	-37.9	-52.6
(3) CASE 3	-169.2	84.2	-260.7	62.8	-108.4	56.5	-70.3	-98.2	-57.2	30.5	-40.5	-49
(1)/(3), (%)	57	87	26	162	100	93	74	117	100	90	68	124
(2)/(3), (%)	123	100	130	215	79	102	124	83	73	105	93	107
$\Delta M_{1,i}$	-28.8	2.9	-69.3	60.8	-0.3	1.2	-6.5	6	-0.1	0.9	-4.9	4.4

Table 2 Analysis data with load combination(with curtain-wall load)

Member Method	X-INT Frame (kN-m)											
	1G1 End.	1G1 Cen.	1G2 Ext.	1G2 Int.	2G1 End.	2G1 Cen.	2G2 Ext.	2G2 Int.	3G1 End.	3G1 Cen.	3G2 Ext.	3G2 Int.
(a) CASE 2	-404.2	191.2	-593.2	140.9	-360.9	195.2	-501.3	72.4	-285.2	201.4	-329.8	-54.4
(b) CASE 3	-326.1	154.4	-487.6	108.7	-269.1	161.2	-350.4	-3.1	-219.7	146	-209.8	-106.2
(a)/(b), (%)	123	123	121	129	134	121	143	4	129	137	157	51
Member Method	X-EXT Frame (kN-m)				Y-INT Frame (kN-m)				Y-EXT Frame (kN-m)			
	1G3 End.	1G3 Cen.	1G4 Ext.	1G4 Int.	1G5 End.	1G5 Cen.	1G6 Ext.	1G6 Int.	1G7 End.	1G7 Cen.	1G8 Ext.	1G8 Int.
(a) CASE 2	-302.3	111.6	-511	233.1	-131.5	71	-105.9	-98.1	-81.8	45.1	-74.6	-53.1
(b) CASE 3	-231.1	90.4	-409.3	193.2	-109	59	-83.9	-85.7	-57.4	32.5	-51.4	-39
(a)/(b), (%)	130	123	124	120	120	120	126	114	142	138	145	136

### 3.3 분석

#### 3.3.1 시공단계에 의한 보의 모멘트

외부마감이 시공전인 고정하중에 의한 시공단계 해석 후 주요부재에 발생하는 모멘트를 Table 1에 정리 하였다. 각 해석 방법에 따른 모멘트이며, 해석방법에 따른 명확한 차이를 보여 주기 위해 장변방향의 내부골조를 내-외부로 나누어 데이터를 정리 하였다. 이에 따라 내측보인 G1부재의 경우 시공단계를

고려한 방법3에 비하여 방법1은 83%로 감소하였고, 방법2의 경우 118%로 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 외측보 G2의 내부단부는 증가하였는데, G2는 처짐을 고려하지 않는 해석에서 부모멘트가 발생하나 합체의 부등 처짐에 의해 발생하는 정모멘트로 인해 결과 값의 차이가 나게 된다.

식(12)에 대한 유효성을 확인하고자  $\Delta M_{1,i}$ 를 표기 하였다. 1G2 외부의 경우 밀면이 고정된 상태에서의 모멘트는 -139.4kN-m이다.  $\Delta M_{1,i}$ 는 -72.4kN-m이며 이 모멘트를 3번

Table 3 Analysis data in the column

a) Axial load and moment according to dead load sequence

Member Method	1C1		1C2		1C3		1C4		2C1		2C2		3C1		3C2	
	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M
(1) CASE 1	-1047	-3	-503	59	-695	-3	-330	69	-343	-3.2	-158	104	-343	-16	-159	105
(2) CASE 2	-964	212	-645	262	-648	151	-409	178	-328	151	-198	236	-328	145	-198	236
(3) CASE 3	-1004	170	-504	221	-678	80	-358	132	-338	81	-166	137	-338	24	-166	137
(1)/(3), (%)	104	2	100	27	103	4	92	52	101	4	95	76	101	67	96	77
(2)/(3), (%)	96	125	128	119	96	189	114	135	97	187	119	172	97	604	119	172
Δ	14	56	-24	53	11	39	-20	27	4	40	-7	33	5	41	-8	33

b) Axial load and moment according to load combination

Member Method	1C1		1C2		1C3		1C4		2C1		2C2		3C1		3C2	
	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M
(a) CASE 2	-1129	330	-874	386	-590	320	-594	344	-767	235	-557	251	-393	230	-260	329
(b) CASE 3	-959	288	-583	333	-454	279	-413	293	-653	165	-402	191	-327	113	-183	210
(a)/(b), (%)	118	115	150	116	130	115	144	117	117	142	139	131	120	204	142	157

\* Unit of P = kN, Unit of CASE1/3 and CASE2/3 = %

곱하여 더하게 되면 -356.6kN-m가 된다. 방법3의 경우 -334.6kN-m와 비교해보면 약간 값의 차이가 발생하게 되나 상부 층이 적층하게 되면서 1층에 발생하는 모멘트가 분배되어 작아진다는 것을 감안하면 유사한 결과임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 Table 1의 데이터를 시공단계를 고려한 해석한 방법과 비교하기 위하여 방법1/방법3, 방법2/방법3과의 백분율로 표현한 것이다. 외부보인 2G2는 백분율의 차이가 크기 때문에 그래프를 명확히 확인하고자 제외하였으며, 외부보가 내부보에 비하여 모멘트 비율의 변화가 크다는 것을 알 수가 있다.

Fig. 9에서 폰툰의 장변방향 내부보에서, 방법1/방법3은 1보다 작은 값을 나타내고 있으며, 방법2/방법3은 1보다 큰 값을 나타내고 있다. 즉, 폰툰 장변방향으로 방법1의 해석은 보의 모멘트를 과소평가하고 방법2의 해석은 과대평가함을 의미한다.

Fig. 9에서 폰툰의 장변방향 외부보에서, 방법1/방법3은 1보다 작은 값을 나타내고 있지만 1G2의 내단부는 매우 큰 값을 보여주었다. 방법1의 1G2 내단부 모멘트는 -198kN-m이고, 방

법3의 경우는 -25.5kN-m이므로 모멘트의 절대값이 큰 것은 아니다.

Fig. 10은 장변방향 외부골조의 1층에서 모멘트를 나타낸 것으로 Fig. 9와 비슷한 양상을 보인다. 즉, 내부 보보다는 외부 보에서 모멘트의 증가량이 확연히 크다.

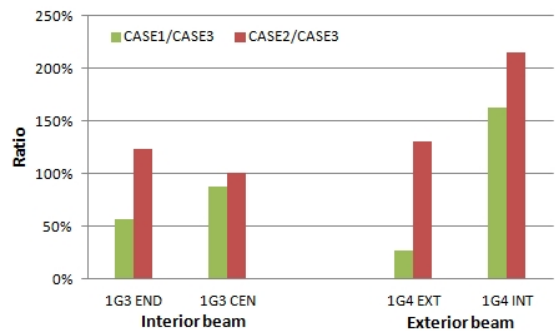


Fig 10. Moment of X-ext. frame(Dead load sequence)

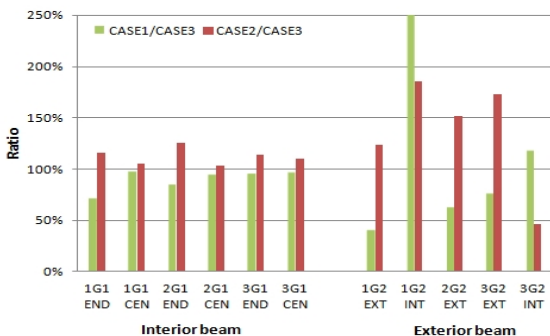


Fig 9. Moment of X-int. frame(Dead load sequence)

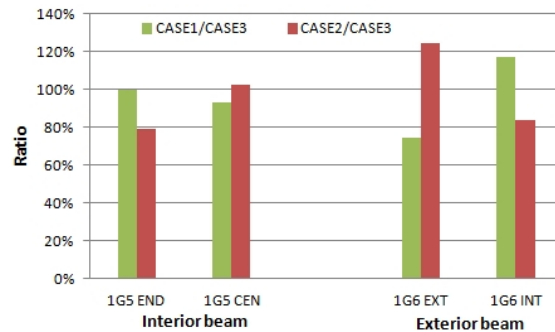


Fig 11. Moment of Y-int. frame(Dead load sequence)

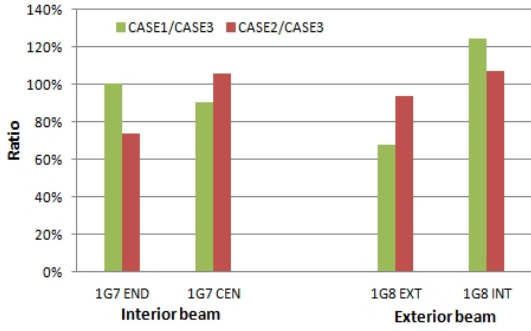


Fig 12. Moment of Y-ext. frame(Dead load sequence)

Fig. 11, 12는 폰툰 단변방향 내-외부골조의 경우로 장변방향에 비하여 모멘트의 차이가 크게 없었다. 이는 장변방향에 비하여 단변방향으로 처짐이 상대적으로 작기 때문이다.

보에서는 방법3에 비하여 방법1의 경우는 전반적으로 모멘트가 작게 발생하였다. 그러나 외부보의 내단부에서는 처짐의 영향으로 모멘트가 증가하였다. 방법2의 해석방법과 비교하여 보면 방법3보다 전체적으로 증가하는 양상을 보인다. 따라서 시공단계를 고려한 해석방법이 필요하다는 것을 나타낸다.

3.3.2 하중조합에 따른 보의 모멘트

시공단계에 따라 작용된 고정하중과 활하중 저감계수에 의해 저감된 활하중을 통하여 하중조합을 하였다. 하중조합을 통한 처짐을 시공단계에 발생하는 모멘트와 똑같은 방법을 통하여 구하였으며, Table 2에 정리 하였다.

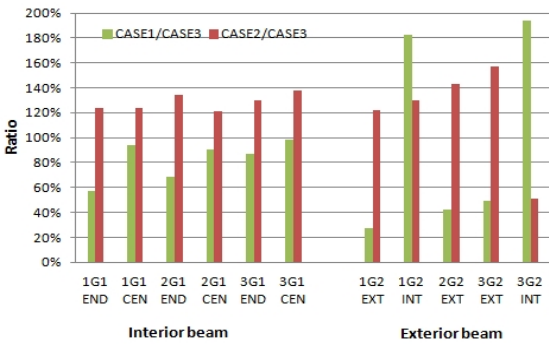


Fig 13. Moment of X-int. frame(Load combination)

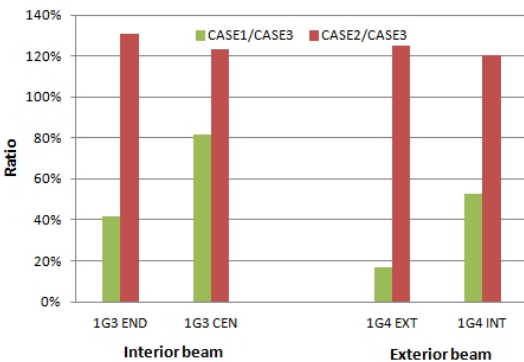


Fig 14. Moment of X-ext. frame(Load combination)

Table 2의 값을 Fig. 13과 14에서 그래프로 나타냈으며, 폰툰의 장변(X)방향에서 내-외부모멘트의 비율은 방법 3에 비하여 방법1은 감소하였으며, 방법2의 방법 120% 이상이 증가하는 것을 볼 수 있다. 전체적인 양상은 Fig. 9와 비슷하게 나타난다.

3.3.3 기둥의 축력 및 모멘트

Fig. 15는 기둥에 작용하는 축력 및 모멘트를 방법3에 비하여 방법2가 얼마나 증가하였는지를 나타낸 것이다. 전반적으로 모멘트는 크게 증가하지 않았다. 2C1의 경우 모멘트의 증가량이 크게 나왔는데, 방법2에서 151kN-m, 방법3에서 81kN-m로 다른 기둥에 비하여 모멘트의 값이 큰 것이 아니다. 3C1또한 비율의 차이가 크게 발생하여 그래프에는 넣지 않았지만 Table 3에서 보면 다른 기둥에 비하여 모멘트가 작은 것을 확인 할 수 있다. 축력은 각 프레임의 외부기둥에서 20% 이상 증가하는 양상을 보이거나 내부의 기둥과 비교해 보면 작은 값이다. 따라서 축력에 대한 영향은 미미한 것으로 판단된다.

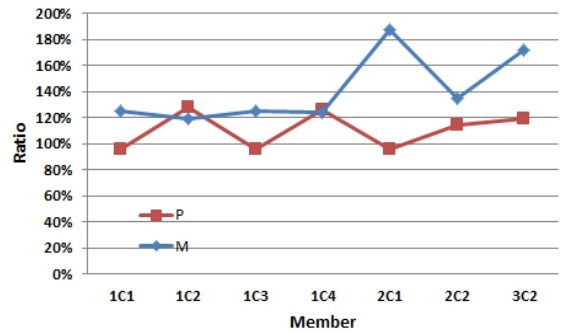


Fig 15. Moment ratio of CASE2/CASE3 of Columns (Dead load)

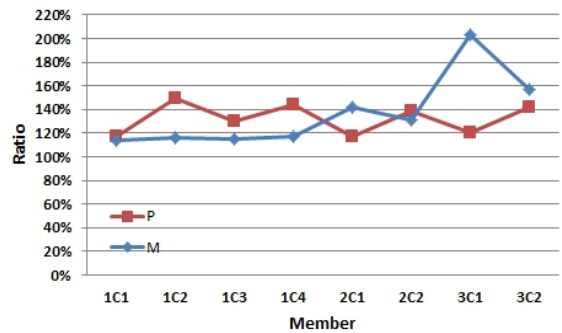


Fig 16. Moment ratio of CASE2/CASE3 of Columns (Load combination)

Fig. 16은 하중조합에 의하여 생기는 각 기둥의 축력 및 모멘트에 대한 방법2/방법3의 비율이며 이 또한 고정하중의 시공단계에 따른 양상과 비슷하게 나타난다.

3.3.4 단순 계산식의 정확도 검증

동일한 면적으로 각 층이 시공이 된다면 처짐의 양도 동일하기에 매번 해석을 수행하지 않고도 식(12)에 따라 간단하게 시

Table 4 Comparing with case 3 and case  $1+3\times\Delta M_{1,i}$  in superstructure(Dead load sequence)

Member Method	1G1	1G1	1G2	1G2	1G3	1G3	1G4	1G4	1C1		1C2	
	End.	Cent.	Ext.	Int.	End.	Cent.	Ext.	Int.	P	M	P	M
CASE 3	-262.6	148.2	-334.6	-25.5	-169.2	84.2	-260.7	62.8	-1004	170	-504	221
CASE1+ $3\times\Delta M_{1,i}$	-276.8	153.7	-352.1	-7.5	-183.3	82.5	-277.5	80.1	-1005	165	-575	218
Ratio* (%)	94.9	96.4	95	340	92.3	102.1	93.9	78.4	99.9	103	87.7	101.4

\* Ratio of CASE 3/CASE  $1+3\times\Delta M_{1,i}$ , Unit of P = kN

공단계의 모멘트를 구할 수 있다. Table 4는 1층의 주요 보 및 기둥에 대하여 시공단계에 따른 모멘트 및 축력을 구한 것과 약산식에 의하여 구한 모멘트 값을 비교하였다. Fig. 17을 통하여 약산식으로도 시공단계에 따른 상부골조의 모멘트를 정확하게 예측할 수 있음을 볼 수 있다.

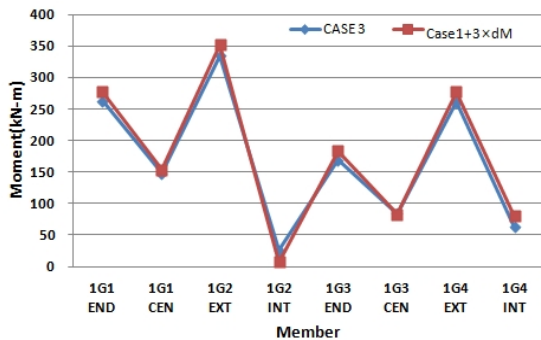


Fig 17. Comparing with CASE 3 and CASE  $1+3\times\Delta M_{1,i}$  (Dead load sequence)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수상에서 콘크리트 폰툰위에 건립되는 상부 구조물의 시공단계에 따른 해석방법론을 제안하였으며, 예제 모델의 해석을 통하여 기존의 해석방법과 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

폰툰의 변형을 고려하지 않는 해석방법의 경우는 시공단계를 고려한 해석보다 보의 모멘트를 과소평가하였으며, 폰툰의 변형을 고려하고 전 층을 모델링 하여 해석하는 방법은 시공단계를 고려한 해석방법에 비하여 보의 모멘트를 과대평가하는 것으로 나타나, 플로팅 함체위에 상부구조물의 있는 경우 시공단계 해석을 통하여 부재의 내력을 산정하여야 한다. 예제의 경우 시공단계를 고려한 해석 방법은 다른 해석 방법과 비교하여 보의 외부 모멘트에 많은 변화가 발생하였으나, 기둥의 모멘트와 축력은 다른 해석방법과 차이가 크게 나타나지 않았다.

시공 단계에서 매 층마다 해석을 수행해야 하는 번거로움을 피하기 위하여, 본 연구에서 제안한 단순 계산식(식 11, 12, 13)을 사용함으로써 시공단계별 해석을 정확하고 빠르게 할 수 있음을 예제 해석을 통하여 증명하였다.

#### 후 기

본 논문은 2010년 국토해양부 기술연구개발의 지역기술 혁신 사업 (과제번호 : 10 지역기술혁신 B01)의 일환으로 수행된 연구를 밝히며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김한수의 2인(2003), “초고층건물 RC코어와 SRC 기둥의 기둥축소량 해석 및 현장계측”, 대한건축학회논문집 구조계 제19권 11호, pp. 49-56
- [2] 대한건축학회(2009), 건축구조기준 및 해설
- [3] 문주혁외 3인(2007), “골조효과를 고려한 철근콘크리트 기둥의 축소량 해석”, 한국콘크리트학회 2007년 가을 학술발표대회 논문집, pp. 409-412
- [4] 해양수산부(2008), 초대형 부유식 해상구조물 기술개발 최종연구보고서, UCPM0139A-37-2
- [5] ACI Committee 357(2010), Report on Floating and Float-In Concrete Structures, ACI 352.2R-10
- [6] C. M. Wang, E. Watanabe, T. Utsunomiya(2008), Very Large Floating Structures, Talyor and Francis

원고접수일 : 2012년 3월 8일  
 심사완료일 : 2012년 4월 20일  
 원고채택일 : 2012년 4월 24일