

3D 프린터로 제작된 비정형 거푸집의 최대 측압에 대한 유한요소해석

Evaluation of Maximum Lateral Pressure on the 3D Printed Irregular-Shaped Formwork by Finite Element Analysis

이 정 호*
Lee, Jeong-Ho

주 영 규**
Ju, Young K.

김 학 범***
Kim, Hak-Beom

Abstract

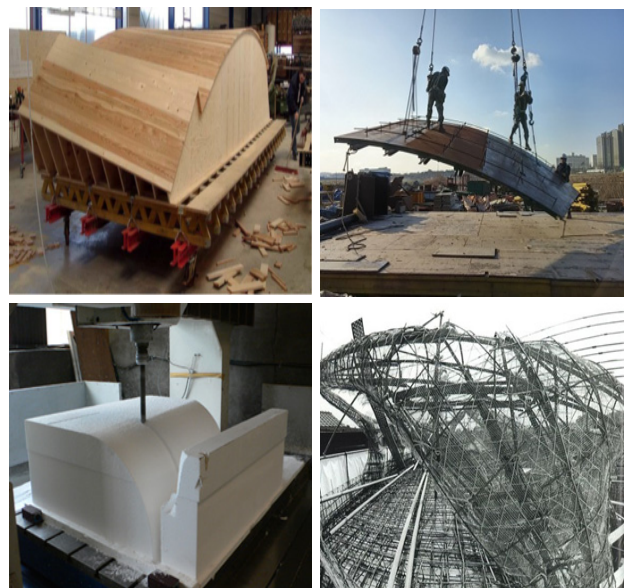
The F3D(Free-Form Formwork 3D Printer) technology that manufactures EPS(Expanded Polystyrene) formworks for irregular-shaped concrete structures by 3D printers was developed to reduce the cost and time. Because of weak strength and low elastic modulus of the EPS, structural performance including lateral pressure by fresh concrete of the formwork that consisted of EPS should be investigated. In order to calculate lateral pressures acting on formwork, several variables including sizes, shapes of formwork, tangential force(friction) between fresh concrete and formwork, and material properties of fresh concrete should be considered. However, current regulations have not considered the properties of concrete, only focused on vertical formwork. Galleo introduced 3-dimensional finite element analysis models to calculate lateral pressure on formwork. Thus, proposed finite element analysis model based on previous studies were verified for vertical formwork and irregular-shaped formwork. The test results were compared with those by FEM analysis. As a result, the test agrees well with the analysis.

keywords : 3D printer, Irregular-shaped structure, Formwork, Fresh concrete, Lateral pressure

1. 서론

설계·시공 기술의 발달로 인하여 세계적으로 비정형 구조물에 대한 수요가 증가하고 있다. 비정형 구조물의 시공에 있어 콘크리트는 높은 성형성, 경제성을 지니고 있기 때문에 다른 재료들에 비해 선호되는 추세이다. 콘크리트는 배합 직후 액체와 같이 거동하기 때문에 경화하여 강도를 발현하기 전까지는 적절하게 설계된 거푸집에 의해 지지되어야 하며 거푸집은 콘크리트 구조물의 시공 시 전체 비용의 40~60%를 차지하는 중요한 요소이다¹⁾²⁾. 국내 비정형 건축물

의 시공 사례는 삼성동 하나은행 빌딩, 인천 Tri bowl 등이 있으며, 거푸집으로는 EPS(Expanded Polystyrene), FRP(Fiber Reinforced Plastics), 목재, 철근 트러스 등이 주로 사용되었다. 그러나 FRP, 목재,



〈Fig. 1〉 Case of irregular shaped formwork

* 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 석박통합과정
School of Civil, Environmental, Architectural Engineering,
Korea University

** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사
School of Civil, Environmental, Architectural Engineering,
Korea University

*** 교신저자, 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 석사과정
School of Civil, Environmental, Architectural Engineering,
Korea University

Tel: 02-3290-3833 Fax: 02-3290-5999
E-mail: khb900@naver.com

철근 트러스로 제작된 거푸집은 거푸집 자체를 비정형으로 제작하기 때문에 정밀도가 낮고 가공이 어려우며 제작 비용이 높다. 한편, EPS 거푸집은 목표 형상에 맞게 CNC(Computer Numerical Control) milling 공법으로 가공된 EPS 폼 라이너를 거푸집에 고정시켜 사용하는 방식으로, 기계를 사용하여 EPS를 가공하기 때문에 가공이 비교적 쉬우나 가공 속도가 느리다는 단점이 있다.

높은 정밀도를 유지하면서 가공 속도를 향상시키기 위해 F3D(Free-Form Formwork 3D Printer) 기술이 도입되었다. F3D 기술은 3D 프린팅 기술의 일종으로 스티로폼을 열선으로 절삭한 후 적층하여 목표 형상의 폼 라이너를 제작하는 방식이다. F3D 기술로 제작된 EPS 폼 라이너는 정밀도가 높고 제작 속도가 빠르지만 스티로폼 자체의 낮은 강도와 탄성계수로 인하여 거푸집의 설계 시 작용하는 하중에 대한 검토가 필요하다.

작용 하중에 비해 거푸집이 과도하게 설계될 경우, 전체적인 시공 비용이 증가한다. 반대로 거푸집이 작용하는 하중에 비해 약하게 설계될 경우, 거푸집의 변형에 의해 부재가 목표하는 형상과 다르게 제작되어 경제적, 시간적 손실이 발생할 수 있으며 경우에 따라서는 파괴가 발생하여 심각한 사고를 야기할 수도 있다²⁾.

거푸집의 설계 시 주요 고려 대상은 경화 전의 콘크리트(Fresh concrete)에 의해 거푸집에 작용하는 압력으로, 일반적인 설계 목적으로는 경화 전 콘크리트가 유체역학적으로 비점성유체와 같이 거동한다고 가정된 후 거푸집과 경화 전 콘크리트 사이의 마찰로 인해 발생하는 접선 방향의 응력을 무시하고 측압을 계산한다³⁾.

이와 같은 계산 방법은 일반적으로 높은 안전율을 가지고 있으나, 거푸집이 지면에 대해 경사를 가지고 있는 경우 실제 측압보다 더 낮은 결과를 나타낼 수 있으며, 거푸집의 높이가 높아질수록 보수적인 계산 결과를 나타낸다⁴⁾. ACI 347r-14에서는 콘크리트에 의해 거푸집에 작용하는 최대 측압을 타설 시 콘크리트의 온도, 콘크리트 중량, 콘크리트의 첨가물 등을 고려하여 계산하고 있다⁵⁾. 국내의 KDS

21 50 00(거푸집 및 동바리 설계기준) 또한 콘크리트의 중량, 타설되는 콘크리트의 온도, 콘크리트의 첨가물, 타설 속도 등을 고려하여 측압을 계산하도록 하고 있다⁶⁾.

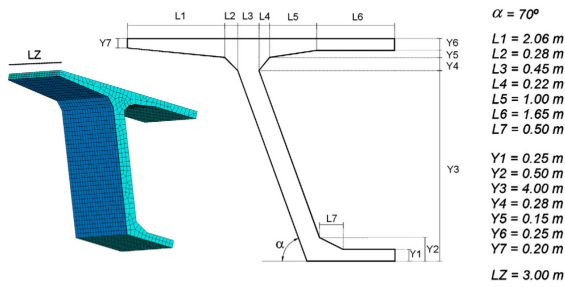
그러나 위에 제시된 측압 기준에서는 간단한 형상의 수직 거푸집만을 고려하고 있다⁴⁾. 거푸집에 작용하는 콘크리트의 압력은 더 많은 요소들(거푸집의 크기와 형상, 콘크리트 배합, 타설 속도, 다짐 등)에 의해 영향을 받기 때문에 현재 기준은 실제 콘크리트에 의해 거푸집에 작용하는 압력을 효과적으로 모사하지 못한다. Galleo(2010,2011)³⁾⁴⁾는 복잡한 변수들을 고려하기 위하여 경화 전 콘크리트의 역학적 거동, 거푸집 면과의 마찰을 중점적으로 고려하여 유한요소해석을 수행하였으며 지면에 대해 경사가 있는 거푸집의 경우 수직 형상의 거푸집에 비해 더 큰 측압이 발생함을 시사하였다⁴⁾.

본 연구에서는 Galleo(2011)⁴⁾의 연구를 바탕으로 유한요소해석을 수행하였고, 경화 전 콘크리트에 의해 거푸집에 작용하는 최대 측압을 산정한 후 이를 비정형 부재에 적용하기에 앞서 일반적인 형상의 부재를 대상으로 해석 결과와 선행 연구의 실험 결과를 비교하여 해석 모델의 타당성을 확인한다. 또한 특정 비정형 부재를 대상으로 측압 측정 실험과 해석을 수행하고 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 본 연구에서 수립된 유한요소해석 모델이 비정형 부재를 대상으로도 적용이 가능한지를 검토하고자 한다.

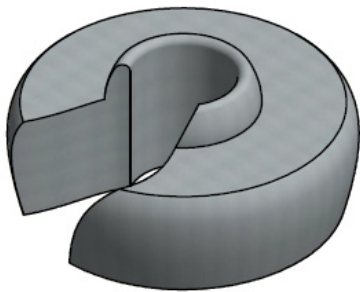
2. 해석 모델 개요

본 연구에서는 Abaqus/Explicit 2017을 사용하여 거푸집에 작용하는 경화 전 콘크리트의 압력에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 거푸집의 크기, 타설 속도, 그리고 콘크리트의 배합을 고려하여 경화 전 콘크리트를 모델링하였고, 접촉 조건을 사용하여 거푸집과 경화 전 콘크리트의 마찰을 고려하였다.

빠른 타설 속도와 낮은 높이의 거푸집을 가정하여 콘크리트는 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid)와 같이 거동하도록 설정하였으며, 콘크리트와 EPS 폼 라이너 사이의 마찰은 접선 방향의 마찰력이 법



<Fig. 2> Shape of formwork by Galleo



<Fig. 3> Shape of formwork

선 방향의 힘과 비례하도록 모델링하였다. 해석에 사용된 비정형 부재는 <Fig. 3>과 같으며 420mm 높이까지 모델링하였다. 경화 전 콘크리트와 EPS 폼 라이너는 변형 가능한 고체로 설정하였으며 거푸집은 폼 라이너 경계의 면으로 설정하였다.

2.1 경화 전 콘크리트(Fresh concrete)의 거동

경화 전 콘크리트의 거동 특성은 타설 이후 시간 경과에 따라 3가지 단계로 분류가 가능하다. 타설 직후에는 비뉴턴 유체와 같이 거동하여 점성과 항복강도를 통해 모델링할 수 있으며⁷⁾, 중간 단계에서는 토질역학에 기초하여 탄소성 거동을 통해 모델링이 가능하다⁸⁾. 경화한 후에는 강도를 발휘하기 때문에 거푸집에 압력을 거의 가하지 않는다. 거푸집에 작용하는 콘크리트의 압력이 최대가 되는 시점에서 경화 전 콘크리트의 거동은 타설 속도와 거푸집의 전체 높이에 따라 달라진다. 일반적으로 높이가 2m 이하이고 타설 속도가 10m/h를 넘는 경우 거푸집에 작용하는 최대 측압은 타설 초기 단계에서 발생하게 된다⁹⁾. 본 연구에서는 소형 비정형 부

재를 대상으로 하였기 때문에 경화 전 콘크리트를 비뉴턴 유체로 고려하였다. 비뉴턴 유체는 전단변형 속도(γ)에 따라 점성 혹은 항복강도가 달라지는 유체로 Ferris(1998)¹⁰⁾가 제시한 Hershel-bulkely 모델을 사용하여 해석을 진행하였다. 해당 모델에서 경화 전 콘크리트의 점성은 전단항복강도(τ_0), Flow consistency(k), Flow behavior index(n)를 통해 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (1)$$

경화 전 콘크리트의 거동 모델링에 필요한 변수들의 값은 Rheometer와 Viscometer를 통해 실험적으로 얻을 수 있다. Murata(1992)¹¹⁾는 Viscometer를 사용하여 η_0 와 τ_0 를 측정하였으며, 콘크리트 배합에 사용된 굵은 골재의 고품분과 체적농도를 통해 두 값을 계산할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 Ferris(1998)¹⁰⁾는 Rheometer를 사용하여 다양한 배합과 혼화제의 유무에 따른 콘크리트의 유동학적 특성을 측정하였다. 본 연구에서는 Ferris(1998)¹⁰⁾가 측정된 콘크리트의 배합에 따른 물성치를 참고하여 해석 모델에 사용하였다. 해석에 사용된 변수들의 값은 <Table 1>에 제시되어 있다.

<Table 1> Material properties

Mechanical variable	Value
Unit weight of concrete(kg/m^3)	2,300
Shear yield strength(MPa)	1.14e-3
Flow consistency(Pa·s)	26.0
Flow behavior index(Non-dimension)	1.55
Friction coefficient(Non-dimension)	0.05
Unit weight of EPS(kg/m^3)	30
Elastic Modulus of EPS(MPa)	686.5
Possion's ratio of EPS	0.3

2.2 거푸집과 경화 전 콘크리트의 마찰 모델링

Aslan¹²⁾ 등은 거푸집에 사용되는 재료의 거칠기와 비부착 물질의 사용 여부를 변수로 하여 일반 내부진동다짐 콘크리트에 의해 거푸집에 작용하는 최대 측압을 계측하였으며, 비부착 물질의 사용 유

무가 경화 전 콘크리트에 의해 거꾸집에 발생하는 측압에 영향을 주지 않음을 확인하였다. 본 연구에서 폼 라이너와 경화 전 콘크리트 사이의 마찰을 Coulomb 모델을 사용하여 설정하였다(식 (2)). 해당 모델에서 접선 방향의 마찰력은 법선 방향의 압력에 비례하여 증가한다. 비부착 물질의 사용을 고려하여 접촉력(k)은 0으로 설정하였고 마찰계수(μ)는 참고문헌¹²⁾의 값을 인용하여 0.05로 설정하였다.

$$\tau = k + \mu p \tag{2}$$

2.3 EPS 폼 라이너 및 거꾸집 모델링

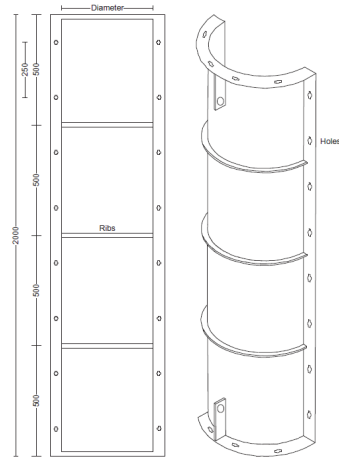
EPS 폼 라이너는 소성변형이 발생하지 않는다고 가정하여 탄성계수와 푸아송비, 단위중량을 설정하여 모델링하였다. 단위중량은 일반적인 비드법 1호 단열재의 기준인 30kg/m^3 으로 설정하였으며, 탄성계수는 참고문헌¹³⁾의 값을 사용하여 686.5MPa로 설정하였다. 푸아송 비의 값으로는 0.3이 적용되었다.

거꾸집은 Galleo(2010,2011)^{3),4)}의 연구를 참고하여 가설재로 충분히 지지되었다고 가정하였다. 따라서 폼 라이너 바깥의 면을 모두 고정 지점으로 설정하였다.

2.4 해석의 타당성 확인

앞서 설명한 유한요소해석 모델을 비정형 부재에 적용하기에 앞서 일반적인 형상을 갖는 부재를 대상으로 하여 본 해석 모델의 타당성을 확인하였으며 Santilli(2011)¹⁴⁾의 실험 결과를 대상으로 하였다. 해당 실험에서는 원형 기둥, 정사각형 기둥을 대상으로 굽은 골재의 비율, 단면의 크기 등을 변수로 하여 콘크리트의 타설 시 발생하는 최대 측압을 바닥으로부터 100mm, 360mm, 650mm, 1,120mm 높이에서 측정하였다. 실험체 중 직경 0.93m, 높이 3m의 원형 기둥을 대상으로 유한요소해석을 진행하였다. Santilli(2011)¹⁴⁾의 실험 데이터를 사용한 것은 12m/h의 빠른 타설 속도로 실험이 수행되었으며, 배치플랜트 근처에서 타설을 진행하여 경화 전 콘크리트가 비뉴턴 유체로 거동하는 시점에서 최대 측압이 발생한다고 보는 것이 타당한 것으로 평가

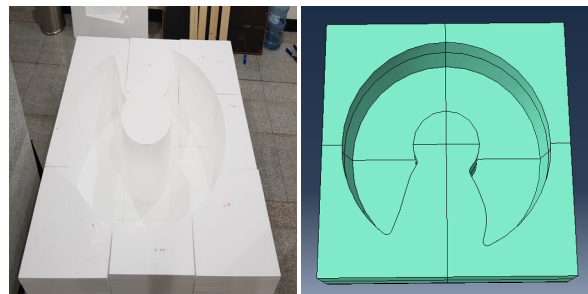
되었기 때문이다.



〈Fig. 4〉 Shape of vertical formwork by Santilli

3. 비정형 거꾸집 측압 측정 실험

본 연구에서 제시된 해석 모델의 타당성 확인을 위해 측압 계측 실험을 수행하였다. 해석 수행 시 가정했던 조건(낮은 높이의 거꾸집, 빠른 타설 속도, 경화 시작 전의 콘크리트)과 부합하도록 실험 조건들을 설정하였고 해석 모델과 동일한 모델로 실험을 진행하였다.



(a) Experiment (b) Analysis
〈Fig. 5〉 Shape of form liner

3.1 거꾸집 설치

본 연구에서는 1,500×1,500mm 크기의 목재 유로 폼 4개를 사용하여 거꾸집을 제작하였다. 〈Fig 5〉와 같이 500×500mm 사이즈에 두께 20mm를 갖는 EPS를 목표 형상에 맞게 절삭 후 적층하는 F3D 방식으로 폼 라이너를 제작하였으며, 아홉 부분으로

제작하여 접착제로 연결하였다. 폼 라이너 바닥 부분의 높이는 20mm로 하부에 유로폼을 설치하여 지지하였다. 또한 <Fig. 6>과 같이 거푸집 외부의 4면 모두를 강관과 클램프로 구속하였다.



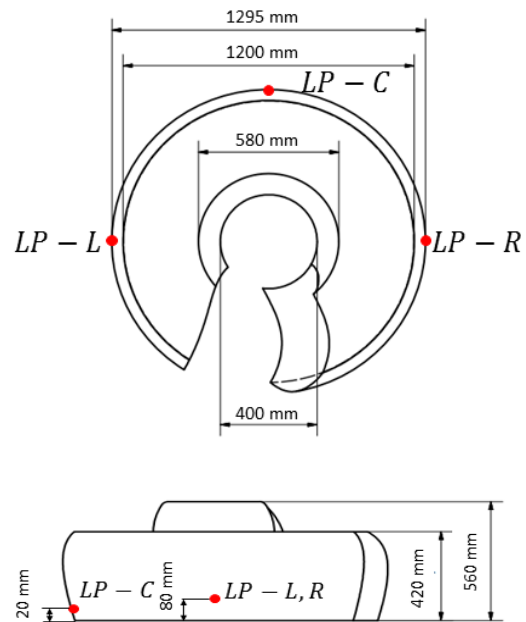
<Fig. 6> Formwork

3.2 계측 계획

콘크리트 타설 시 거푸집에 작용하는 최대 측압을 계측하기 위하여 <Fig. 7>의 토압계를 사용하여 압력을 계측하였다. Khayat(2008)¹⁵⁾의 연구 결과에 의하면 압력 측정 도중 굽은 골재에 의해 발생하는 불필요한 간섭을 피하기 위해서는 콘크리트 굽은 골재의 최대 치수보다 더 큰 압력계를 사용하는 것이 바람직하기 때문에 직경이 50mm인 원형 토압계를 사용하였다. 또한 사용된 토압계의 압력 측정 범위는 300kPa 이내로 약 13m 높이의 콘크리트 기둥에 작용하는 압력까지 측정이 가능하므로 본 실험에 적절하고 판단하였다. 토압계는 총 3개를 사용하여 거푸집의 좌측, 중앙부, 우측에 1개씩 설치하여 순서대로 LP-L(Lateral Pressure - Left), LP-C(Lateral Pressure - Center), LP-R(Lateral Pressure - Right)로 명명하였다. 좌·우측에 설치된 토압계는 바닥으로부터 80mm, 중앙부에 설치된 토압계는 바닥으로부터 20mm 높이에 설치하였다. 폼 라이너인 EPS에 토압계의 직경과 동일하게 구멍을 뚫은 후 삽입하는 방식으로 설치하였으며, 설치 위치 상세는 <Fig. 8>과 같다.



<Fig. 7> Soil pressure meter



<Fig. 8> Location of sensor

3.3 콘크리트 타설

실험에 사용된 콘크리트의 배합은 <Table 2>와 같으며, 혼화제를 첨가하지 않은 일반 콘크리트를 배합하였다. 단위용적당 시멘트의 질량은 298 kg/m³이며 물-시멘트 비(w/c)는 53.8%, 잔골재율(s/a)은 49.7%인 콘크리트를 사용하였다.

유한요소해석 수행 시 콘크리트가 배합 직후 타설되어 경화 시작 전의 비뉴턴 유체로 거동한다고 가정하였던 것과 일치하도록 배치플랜트 근처에서 타설을 진행하였다. 콘크리트는 총 3회에 나누어 타설되었으며, 상단부의 불룩한 부분은 하단부 타설 시작 1시간 후 분리 타설을 진행하여 계측 결과에

<Table 2> Mix proportions

W/C(%)	S/a(%)	Water(kg/m ³)	Cement(kg/m ³)	Sand(kg/m ³)	Gravel(kg/m ³)
53.8	49.7	162	298	915	925

서 제외하였다. 또한 매회 타설 직후에는 내부진동 다짐을 실시하였다. 타설이 시작된 후, 400mm 높이 까지 타설하는데 걸린 시간은 5분으로 평균 타설 속도는 비교적 빠른 4.8m/h였다.

4. 결과 분석

4.1 일반 부재 유한요소해석 결과

원형 기둥을 대상으로 콘크리트 타설 시 발생하는 최대 측압을 측정된 Santilli(2011)¹⁴⁾의 실험 결과와 본 연구에서 제시한 유한요소해석 결과를 <Table 3>에 나타내었다. 모든 계측 지점에서 해석 결과는 실험 결과에 비해 낮은 것으로 나타났다. 바닥으로부터 100mm 높이에서 실험 결과와 해석 결과는 각각 62.4kPa, 61.6kPa로 나타났으며, 그 차이는 0.8kPa로 계측 지점들 중 가장 낮았다. 360mm 높이에서 실험과 해석 결과의 차이는 1.3kPa였으며, 650mm 높이에서는 두 결과의 차이가 2.1kPa로 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 1,120mm 높이에서 두 결과의 차이는 2kPa로 높이가 증가할수록 해석 결과와 실험 결과의 차이가 증가하는 경향을 보였다. 실험 결과와 해석 결과 사이의 가장 높은 오차율은 1,120mm 높이에서 4.6%로 비교적 낮았고, 이로써 빠르게 타설된 일반 콘크리트 부재를 대상으로 본 연구에서 제시한 유한요소해석 모델은 유효한 것으로 평가되었다.

4.2 비정형 부재 측압 계측 결과

타설 시작 후 측정된 압력을 <Fig. 9>에 나타내었다. 콘크리트의 타설 시작 직후 LP-C와 LP-R에서 측정된 측압은 각각 3.76kPa, 4.53kPa로 급격하게 상승하였으나, 1.17kPa, 1.31kPa로 급격하게 감소하였다. LP-L에서 측압이 급격하게 상승하는 시점은 LP-C와 LP-R에 비해 늦게 발생하였으며 급격히 상승한 측압 또한 LP-C와 LP-R보다 낮은 1.67kPa로 측정되었다. 급격한 측압의 상승은 타설에 따른 충격의 영향으로 사료된다. 최초 타설 지점이 LP-C와 LP-R의 중간 지점이기 때문에 콘크리트 타설 시 충격에 의한 측압의 상승량은 LP-L에 비해 LP-C와 LP-R에서 더 크게 측정된 것으로 보인다. 세 계측 지점 모두 2차 타설 직후와 3차 타설 직후 초기 타설 시와 마찬가지로 측압이 급격하게 상승하였으나 콘크리트가 토압계에 직접적으로 충격력을 전달하지 않았기 때문에 급격한 측압 증가량은 1차 타설 직후에 비해 작게 나타났으며 3차 타설 시에는 거의 발생하지 않았다.

실험과 유한요소해석 모델에서 각 계측 지점에서 발생한 최대 측압을 <Table 4>에 나타내었다. 실험 결과 LP-L, LP-C, LP-R에서 측정된 최대 측압은 각각 7.12kPa, 7.24kPa, 7.15kPa로 유사한 결과를 보였으며, LP2에서 측정된 최대 측압은 LP-L과 LP-R에 비해 각각 0.12kPa, 0.9kPa 높게 측정되었다. LP-C가 LP-L, LP-R보다 60mm 낮은 곳에 설치되어 더

<Table 3> Lateral pressures in Santilli's experiment and analysis

Height(mm)	Max. lateral pressure - Experiment(kPa)	Max. lateral pressure - Analysis(kPa)
100	62.4	61.6
360	57.6	56.3
650	53.7	51.6
1,120	43.3	41.3

높은 최대 측압이 측정된 것으로 보인다.

4.3 비정형 부재 유한요소해석 결과

거푸집에 작용하는 최대 측압에 대해 유한요소해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과를 <Table 4>에 나타내었다. 일반 부재를 대상으로 실험 결과와 해석 결과를 비교하였을 때와는 반대로 모든 계측 지점에서 실험 결과가 해석 결과보다 더 큰 측압을 나타내었다. 부재 양 측면의 계측 지점인 LP-L, LP-R에서의 해석 결과는 각각 7.02kPa, 7.06kPa로 실험 결과와 같이 서로 유사하였으며, 실험 결과에 비해 각각 0.10kPa, 0.07kPa 작은 것으로 나타나 1.4%, 1.2%의 오차율을 보였다. LP-C에서의 해석 결과는 7.13kPa로 실험 결과보다 0.11kPa 더 작았으며 오차율은 1.5%였다. 이는 타설 시의 충격과 내부진동 다짐의 영향 때문인 것으로 사료된다.

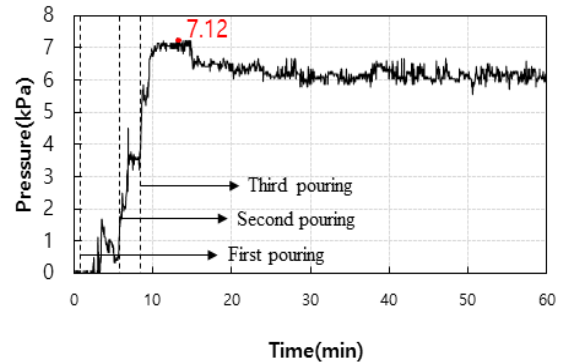
<Table 4> Maximum lateral pressures

Name	Experiment (kPa)	Analysis (kPa)	Error (%)
LP-L	7.12	7.02	1.4
LP-C	7.24	7.13	1.5
LP-R	7.15	7.06	1.2

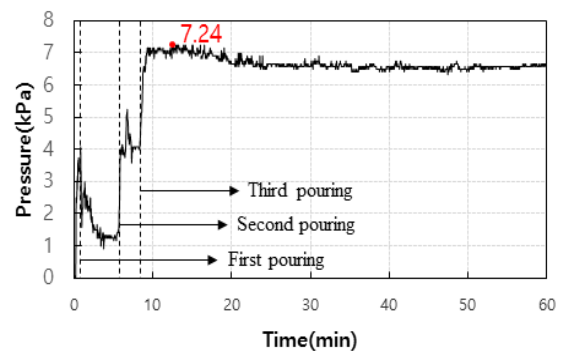
5. 결론

본 연구에서는 기존연구를 바탕으로 거푸집에 발생하는 최대 측압을 계산하는 유한요소해석 모델을 제시하였다. 일반적인 형상과 비정형 형상의 거푸집을 대상으로 해석을 수행하였으며, 실험 결과와의 비교를 통해 해석의 타당성을 확인하였다.

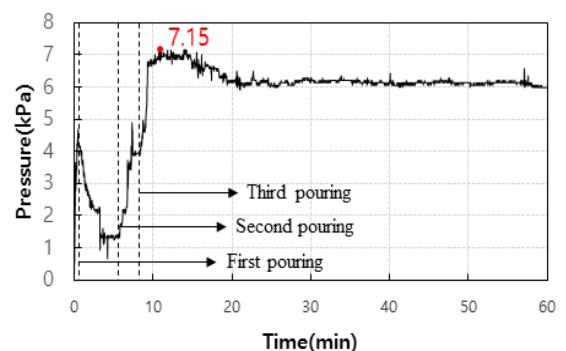
1) 일반 부재를 대상으로 유한요소해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였을 때, 모든 계측 지점에서 해석 결과는 실험 결과에 비해 낮은 것으로 나타났다. 또한 계측 지점이 높아질수록 해석 결과와 실험 결과의 차이가 커지는 경향을 확인하였다. 이는 계측지점이 높을수록 타설 시의 충격과 진동다짐의 영향을 더 많이 받기 때문인 것으로 사료된다. 해석 결



(a) LP-L



(b) LP-C



(c) LP-R

<Fig. 9> Measured lateral pressures

과와 실험 결과의 최대 오차율은 4.6%로 해석 모델이 일반 부재에 대해 타당성이 있음을 확인하였다.

2) 곡면 형상을 갖는 비정형 부재를 대상으로 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 모든 계측 지점에서 해석 결과는 실험 결과보다 작게 계산되었다. 일반 부재와 마찬가지로 이는 실험에서 타설 시의 충격과 내부진동다짐으로 인해 측압이 국부적으로 상승하였기 때문인 것으로 보인다. 거푸집 양

측면에서 측정된 압력은 해석 결과와 각각 0.10kPa, 0.07kPa의 차이를 보였으며, 중앙부의 압력은 해석 결과와 0.11kPa의 차이를 보였다. 최대 오차율은 1.5%로 비정형 부재에 대한 해석 모델의 타당성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 도시건축연구사업(17AUDP-B121595-02)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Hanna, A. S., Senouci, A. B., "Material Cost Minimization of Concrete Wall Forms", *Building and Environment*, Vol.32, No.1, pp.57-67, 1999
 2. Shapira, A., "Contemporary Trends in Formwork Standards - A Case Study," *Journal of Construction Engineering and Management-ASCE*, Vol.125, No.2, pp.69-75, 1999
 3. Gallego, E., Fuentes, J. M., Ramirez, A., Ayuga, F., "Design of Tall Formworks by a Finite-Element Model," *Journal of Construction Engineering and Management-ASCE*, Vol.136, No.7, pp.803-810, 2010
 4. Gallego, E., Fuentes, J. M., Ramirez, A., Ayuga, F., "Computer Simulation of Complex-shaped Formworks Using Three-dimensional Numerical Models," *Automation in Construction*, Vol.20, No.7, pp.830-836, 2011
 5. ACI, "Guide to Formwork for Concrete", ACI 347, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014, p32
 6. 국가건설기준, "거푸집 및 동바리 설계기준", KDS 21 50 00, 국토교통부, 경기도 고양시, 2016, p29
 7. Tattersall, G. H., "The Workability of Concrete", *Cement and Concrete Association*, Slough, U.K, 1976
 8. Gardner, N. J., "Pressure of Concrete on Formwork - a Review," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.82, No.5, pp.744-753, 1985
 9. Gallego, E., Fuentes, J. M., Ramirez, A., Navamuel, B., Ayuga, F., "Cálculo de Encofradosde gran Altura Mediante un Modelo de Elementos Finitos: Estudio Paramétrico", *Informes de la Construcción*, Vol.59, No.505, pp.73-81, 2007
 10. Ferraris, C.F., Larrard, F. de, "Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology", *NISTIR 6094*, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, 1998, p.61
 11. Murata, J., Kukawa, H., "Viscosity Equation for Fresh Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.3, pp.230-237, 1992
 12. Arslan, M., Şimşek, O., Subaşı, S., "Effects of Formwork Surface Materials on Concrete Lateral Pressure," *Construction and Building Materials*, Vol.19, No.4, pp.319-325, 2005
 13. S.H. Yoo, "[Development of Non-metallic (Expanded Polystyrene) Insulating Finishing Material with Function of Formwork]", *Gyeongnam National University of Science and Technology*, Jinju, Gyeongsangnamdo, 2014
 14. Santilli, A., Puente, I., Tanco, M., "A factorial Design Study to Determine the Significant Parameters of Fresh Concrete Lateral Pressure and Initial Rate of Pressure Decay", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.4, pp.1946-1955, 2011
 15. Khayat, K. H., Assaad, J. J., "Measurement Systems for Determining Formwork Pressure of Highly-flowable Concrete," *Materials and Structures*, Vol.41, No.1, pp.37-46, 2008
- Received : November 24, 2017
 - Revised : December 04, 2017
 - Accepted : December 04, 2017