

Research Paper

기성콘크리트 부재의 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트 개발

Development of Risk Evaluation Checklist for In-Situ Production of Precast Concrete Members

임지영¹ · 정희웅² · 김대영^{3*}

Lim, Jeeyoung¹ · Jeong, Hee Woong² · Kim, Dae Young^{3*}

¹Research Scholar, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Geumjung-Gu, Busan, 46241, Korea

²Associate Professor, Department of Architectural Design, Dongseo University, Sasang-Gu, Busan, 47011, Korea

³Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Geumjung-Gu, Busan, 46241, Korea

*Corresponding author

Kim, Dae Young
Tel : 82-51-510-7609
E-mail : dykim2017@pusan.ac.kr

ABSTRACT

In previous studies, it was confirmed that through the in-situ production of precast concrete members, costs could be reduced by 14.5-39.4% compared to in-plant production. In particular, it was confirmed that the factory owner did not make a contract if it did not earn more than 20% of the production cost. If precast concrete members are produced in-situ under the same conditions, the quality equivalent to that of factory production can be secured. As it is advantageous in terms of cost and quality, precast concrete members must be produced in-situ. However, it is difficult to produce all quantities in-situ due to time and various other constraints. This is because in-situ production is avoided due to anticipated risks during the project management process. However, if the risk factors are analyzed before performing in-situ production of precast concrete members, it will increase the opportunity for in-situ production. Therefore, this study develops a checklist for evaluating the risk of in-situ production of precast concrete members. By applying the checklist to one case site, it was verified that risk factors can be evaluated easily and quickly. As a result, it was analyzed that sites with a high building coverage ratio are classified as high-risk sites because it is difficult to secure usable area for production and storage. The developed checklist efficiently evaluates the risk factors of in-site production, and makes it possible for the operator to determine the risk factors, which can change frequently during project execution, and respond according to the situation.

Keywords : in-situ production, precast concrete members, risk checklist development, risk evaluation, case project

Received : September 3, 2021

Revised : September 17, 2021

Accepted : September 24, 2021

1. 서론

1.1 연구의 목적

기성콘크리트 부재를 현장 생산하는 경우 공장생산보다 약 14.5-39.4%의 원가가 절감되는 것으로 이전 연구에서 확인되었다[1-5]. PC(Precast Concrete) 공장 관계자의 인터뷰를 통해, 실제 공장주는 생산원가의 20% 이상의 이윤을 얻지 못하면 공장관리 간접비를 감당하지 못해 계약을 하지 않는 것으로 확인되었다[6]. 그리고 동등한 조건에서 기성콘크리트 부재를 현장에서 생산한다면 공장생산 대비 동등 이상의 품질이 확보된다[6-8]. 이 연구들에 따르면 원가와 품질 측면에 유리하므로 기성콘크리트 부재는 현장에서 생산하여야 한다[9-10]. 그러나 주어진 공기뿐 아니라 현장생산을 위한 여러 가지 제약조



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

건으로 모든 물량을 현장생산하기 어렵다[11-13]. 그 이유는 현장생산은 프로젝트 관리 과정에서 발생할 수 있는 리스크로 인하여 기피하기 때문이다.

그러나 기성콘크리트 부재의 현장생산 수행 전 리스크 요인을 분석하고 그에 대응한다면 현장생산 기회를 높일 수 있다. 즉, 리스크요인을 효율적으로 평가하기 위한 리스크 평가 체크리스트가 필요하다. 이를 실제 현장에서 활용하면 프로젝트 수행 시 수시로 변경되는 리스크요인을 쉽고 빠르게 판단할 수 있을 것이다. 그리고 사업 초기단계에 체크리스트를 활용하여 현장생산 시공계획을 검토할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 기성콘크리트 부재의 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트를 개발하는 것이다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구의 범위는 층고가 약 10m이고 10톤 이상의 기성콘크리트 부재로 구성되는 물류창고시설 및 주차시설을 대상에 적용하는 기성콘크리트 부재의 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트를 개발한 후, 사례분석을 통해 체크리스트의 효용성을 검증하는 것으로 연구 프로세스는 Figure 1과 같이 진행한다. 첫째, 기성콘크리트 부재의 기술적용 및 현장생산, 건설공사 관련 리스크에 대한 기존 문헌을 고찰한다. 둘째, 현장생산 프로세스 분석을 통해 리스크 평가를 위한 체크리스트를 개발한다. 셋째, 사례프로젝트의 현장생산 부재 리스크, 현장여건 리스크, 생산 및 야적 리스크를 분석한다. 넷째, 사례프로젝트에 적용하여 개발된 체크리스트의 효용성을 평가한다.

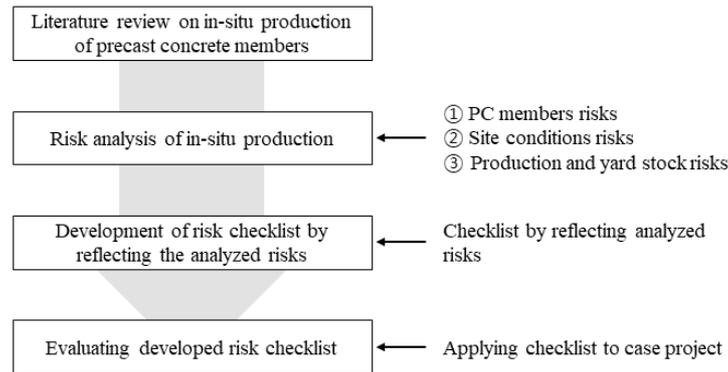


Figure 1. Research methodology

2. 이론적 고찰

2.1 건설현장에서의 기성콘크리트 기술적용 현황

건설 산업은 공장생산을 활용하여 시공단계에서 생산성을 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 그러나 아직 건설분야에서는 공장에서 부재 제작을 위한 자동화 및 로봇화가 보편화되기 어렵다[14-15]. 그 이유는 공장에서의 공간 활용의 한계[15], 복잡한 인터페이스[16], 균일하지 못한 품질[17], 기존 방법에 대한 의존[18], 복잡한 공정[19], 비용[20] 등 여러 어려움이 있기 때문이다[21]. PC공법에 대한 연구는 전세계적으로 신기술의 개발 및 투자로 지속적으로 성장하고 있고[22] 최근 물류창고시설의 대형화 추세로 인해 PC공법의 수요가 증가하고 있다. 공기단축에 의한 인건비, 장비비, 제경비 등과 같은 공사관리비 절감 및 조기운영에 따른 경제적 이익을 취하기 위하여 대형 물류창고시설은 투자비 회수를 위한 조속한 건설이 필요하다[7]. 이러한 특성을 고려할 때 PC 구조는 RC(reinforced concrete) 구조보다 매우 유리한 것으로 인식되고 있다

[23-25]. 또한, 대형 물류창고시설은 약 10m 길이의 기둥과 보의 설치가 필요하므로 공사를 위해서는 상당한 규모의 가설공사가 이루어져야 한다. 따라서 장비비, 재료비는 저하되고 인건비가 상승하는 현 시점에서는 자본집약적인 기성콘크리트 공법이 유리하다[26-28].

2.2 기성콘크리트 현장생산 관련 기존연구 고찰

기성콘크리트 부재의 현장생산은 가공된 철근을 설치, 콘크리트 타설, 양생, 야적의 순서로 진행되는 공장과 동일한 과정이다. 양생된 기성콘크리트 부재가 야적 후 표면에 부분적으로 손상이 있을 경우 품질 확인 및 마감작업이 인력에 의해 이루어지는 공정, 또한 동일하다[7]. 즉, PC 부재는 공장에서 실제로 제작될 때, 생산과정은 자동화 및 로봇화가 적용되기보다 현장생산과 동일한 방법으로 대부분 인력으로 진행된다[21]. 그 이유는 일반적으로 동일한 사이즈의 기성콘크리트 기둥 및 보를 설계하더라도 철근 배치가 동일한 기성콘크리트 부재로 설계되지 않기 때문이다. 따라서 부재가 설계도와 동일하게 제작, 확인 및 설치되기 위해서는 인력에 의한 작업이 필요하다. 따라서 건설현장에서의 작업을 현실적으로 고려했을 때 기성콘크리트의 현장생산이 유리하다.

기성콘크리트 현장생산의 관리 측면에 대한 연구를 살펴보면, Lee[10]는 합성 기성콘크리트부재의 현장생산 관리 모델을 연구하였고, 현장생산 관리요소로는 원가, 품질, 공정, 자원, 안전관리 등을 제시하였다. Won et al.[3]은 증기양생을 통한 기성콘크리트부재 현장생산의 에너지(energy) 효율에 대한 연구를 진행하였고, 필요한 투입 열에너지(thermal energy)에 대한 계산식 및 예측을 도출하여 실무 적용 시 필요 정보를 제시하였다. Hong et al.[1]은 기성콘크리트부재 현장생산에 영향을 미치는 요인을 생산관리와 배치로 구분하여 분석하였고, 공장생산보다 공사비의 약 14.5-21.6%가 절감된다고 주장하였다. 그러나 이들 논문은 현장생산에 영향을 미치는 요인을 분석하였으나, 구체적으로 리스크 체크리스트를 작성한 연구가 아직 이루어지지 않았다.

또한, 실제 사례현장에서 시뮬레이션을 적용한 연구를 살펴보면, Lim[5]은 현장생산을 위한 다양한 리스크요인을 분석하고, 개발된 리스크 관리 모델을 사례 프로젝트에 적용하였다. Son et al.[29]는 FCP 설치를 위한 현장 생산 계획을 수학적 방법으로 분석하는 알고리즘을 제안하였다. Lim et al.[8]은 실험적 연구를 통해 현장생산의 상세한 과정을 소개하고, 물량 비율에 따른 원가절감 비율의 정도를 도출하였다. Lim and Kim[11]은 현장생산의 사례연구를 통해 LCA(Life Cycle Assessment) 기법으로 CO₂ 배출량을 산정하였고, 물량 비율에 따른 CO₂ 배출량 감소비율을 도출하였다. Lim et al.[12]은 현장생산 물량 산정에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 개발된 시뮬레이션 모델을 활용하여 6가지 시나리오에 적용하여 적정한 물량을 도출하였다. Lim and Kim[21]은 현장생산의 다양한 영향요인을 정의하고 목적함수를 도출한 후, 환경부하량 최소화를 위한 최적화 모델을 개발하였다. 그러나 이들 논문은 대부분 시뮬레이션을 통한 적정 물량을 산정하는데 중점을 두고 연구가 이루어졌고, 리스크에 대한 연구가 아직 이루어지지 않았다.

2.3 건설공사 리스크 관련 기존연구 고찰

건설공사 분야에서의 리스크에 대한 연구를 살펴보면, Kang et al.[30]은 건설공사 단계별 리스크인자 분석하여 리스크를 경감하기 위한 방안 모색에 대하여 연구하였다. Chung and Chung[31]는 건설공사 리스크인자 분석 및 경감에 관한 연구를 수행하였고, Shin and Kim[32]는 국내개발사업 사전기획단계에서의 효율적 리스크 관리를 위한 리스크인자 중요도에 관한 연구 등을 수행하였다. Suh et al.[33]은 건설공사의 최적리스크 대응방안 선정을 위한 의사결정 모델을 개발하였고, Kang[34]는 공동주택사업에서 사업비 측면의 리스크 관리 효율화에 관한 연구를 수행하였고, Kim[35]은 부동산 개발사업의 리스크 요인 분석 및 관리방안을 제안하였으며, Lee[36]는 주택사업의 리스크 원인분석 및 대응방안에 관한 연구를 수행하였다. 이들 연구는 리스크 인자를 분석하고 리스크의 중요도를 산정하거나 리스크 대응에 대한 연구를 수행하여 리스크

원인을 분석하여 개별 대응으로 해결하는 방안을 제시하였다. 따라서 건설공사 리스크 연구에 대한 연구가 꾸준히 수행되고 있으나, 기성콘크리트 부재 현장생산의 리스크 분석에 대하여 구체적인 연구가 수행되지 않았고, 리스크 평가방법에 대한 연구도 전무한 실정이다.

3. 현장생산 리스크 요인 도출

3.1 현장생산 프로세스 분석

리스크 평가요인을 도출하고 체크리스트 개발을 하기 위하여 각 항목에 대한 리스크 분석이 필요하다. 리스크 분석을 하기 위하여 Figure 2와 같이 현장생산 프로세스를 살펴보고, 리스크 요인을 도출한다. 기성콘크리트부재 생산, 야적으로 구분되고, 프로세스 분석을 통해 작업의 전후 관계에 대한 파악이 가능하고 리스크 영향요인 분석을 용이하게 해 준다.

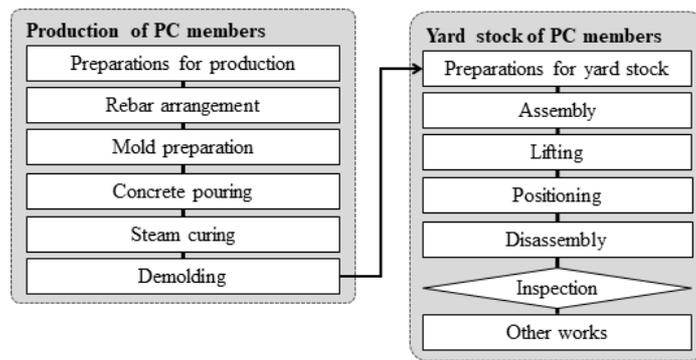


Figure 2. Process of production and yard stock for in-situ production

3.1.1 기성콘크리트 부재의 생산

기성콘크리트 부재의 현장생산은 공장생산과 동일하게 진행된다. 기성콘크리트 부재 생산 공정은 부재생산을 위한 거푸집 공사인 몰드 청소, 박리제 도포, 몰드 조립, 매입 철물 조립, 철근배근 후 검사를 거친다. 이후 콘크리트 타설, 증기양생, 탈형을 거쳐 부재를 생산 완료한다[37]. 이 프로세스에서 철근 설치와 콘크리트 타설은 공장과 동일한 수준으로 수행되었다. 먼저, 몰드 내부를 청소하고, 기성콘크리트 부재와 철제거푸집의 부착력을 감소시키는 박리제를 바른다. 그리고 크레인을 활용하여 조립된 철근을 철제거푸집 내부에 배치한다. 이후 콘크리트를 타설한 후, 보일러를 활용하여 증기 양생한다. 기성콘크리트 부재의 현장생산 방식은, 공장생산과 달리, 자재 야적공간의 확보, 인력과 차량의 통행뿐 아니라 안전 이격거리 등을 고려하여 생산면적을 확보해야 하는 어려움이 있다[1]. 따라서 제한적인 공간에서 기성콘크리트 부재를 생산하려면 운영되는 설비의 효율성이 중요하다[5]. 그리고 공기와 원가를 저감하기 위해서 추가 운반 없이 양중 및 설치할 수 있도록 이동식 크레인의 작업반경을 고려한 몰드 배치가 중요하다. 또한, 현장의 여러 조건들을 검토하고, 설치계획에 맞추어 기성콘크리트 부재의 JIT(just-in-time)으로 공급을 할 수 있는 생산계획을 수립하여야 한다.

3.1.2 기성콘크리트 부재의 야적

기성콘크리트 부재의 생산시간은 설치시간과 비교하여 많은 시간이 소요되므로 생산된 부재는 설치되기 전까지 현장에 야적된다. 야적 공정은 부재 야적을 위한 양중 준비, 양중장비와의 연결, 야적 위치로의 양중한다. 이후 품질검사 후 청소 및 마감하는 것으로 마무리된다. 야적 과정은 단순히 프로세스 측면만을 분석했을 때 간단한 작업이지만, 야적면적은 총 소요

면적의 84% 이상으로[12], 생산면적보다 높은 비율을 차지하므로 중요하다. 현장생산 물량이 많아질수록 소요 야적면적 또한 증가하므로 물량에 대한 야적면적 확보가 중요하다.

3.2 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트 개발

기성콘크리트 부재의 현장생산을 위한 생산 및 야적 프로세스 분석을 통하여 Table 1과 같이 19가지의 리스크 요인을 도출하였다. 이때 기존 연구에서 분석된 영향요인[1,6,7]과 기존 연구에서 수행된 시뮬레이션을 통해 도출된 영향요인[8,11,12,21]을 고려하였다. 현장생산의 전체 과정은 생산과 야적으로 구분할 수 있지만, 실제 현장에 기술을 적용하였을 때는 현장생산 부재 리스크, 현장여건 리스크, 생산 및 야적 리스크로 구분할 수 있다. 현장생산 부재 리스크는 해당 현장의 기성콘크리트 부재에 대한 규모, 규모에 따른 몰드 설계, 규모를 고려한 현장 조닝계획, 몰드 원가에 대한 리스크가 도출되었다. 현장여건 리스크는 인근부지 분석 및 그에 따른 자재 및 장비 반입계획, 현장생산 적용구간 및 가용면적 등에 대한 리스크가 도출되었다. 생산 및 야적 리스크는 공기, 장비, 타공사와의 간섭에 대한 분석과 현장생산을 위한 면적 산적, 시뮬레이션 수행, 품질관리 등이 도출되었다. 그리고 각각의 요인은 공기, 원가, 품질, 안전 측면에서 고려되어야 하는 사항을 표기하였고, 중복되는 항목도 함께 표기하였다.

Table 1. Risk identification for in-situ production of PC members

Risk type	Factors	
PC members risks	■ Calculation of the total quantity of PC members	T, C
	■ In-situ production quantity	T, C
	■ Load of PC members	T, C, S
	■ Mold type according to the size of PC members	T, C, Q
	■ Zoning plan considering the number and arrangement of cranes	T, S
	■ Steel mold material cost fluctuations	C
Site conditions risks	■ Interference with adjacent sites	T, S
	■ Site access road considering crane movement	T, C, S
	■ Transportation of materials and equipment	T, C, S
	■ Application section of PC members	T, C
	■ Secure available area on site for production and yard stock	T
Production and yard stock risks	■ Calculation of production and installation time of PC members	T, C
	■ Crane selection according to member size	T, C, S
	■ Interference with other construction works	T, C, Q, S
	■ Establish detailed process plan for integration with reinforced concrete structures	T, C, Q, S
	■ Area of production module and yard stock module	T, Q, S
	■ Calculation simulation for available area, production area and yard stock area	T, S
	■ Steam curing time management according to irregular climatic conditions such as temperature and humidity	T, C, Q

T: Time, C: Cost, Q: Quality, S: Safety

4. 사례 적용

4.1 사례 현장 개요

본 연구에서 개발된 리스크 관리 시스템의 활용성을 확인하기 위하여 실제 진행된 사업을 추가 사례프로젝트로 선정하

였고, 프로젝트 현장의 개요는 다음 Table 3과 같다. 사례 프로젝트는 국내에 위치한 판매시설 신축공사로, 지상 8층의 규모이다.

4.2 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트 적용

4.2.1 현장생산 부재 리스크

본 연구에서는 설계된 기성콘크리트 부재를 100% 현장생산하는 것을 목표로 하고, 현장생산 물량을 산출하기 전 부재 분석이 필요하다. 면적을 산정하기 전, 구조물의 기성콘크리트 부재를 분석하였다. 설계도면의 부재일람표의 기성콘크리트 기둥을 살펴보면, 가로 0.8~1.7m, 세로 0.8~1.0m, 길이 9.1m, 체적 5.8~15.5m³, 하중 13.9~37.2ton으로 분석되었다. 기성콘크리트 보의 가로 0.5~1.3m, 세로 1.0~2.0m, 길이 8.5~11m, 체적 4.3~28.6m³, 하중 10.3~32.4ton으로 분석되었다. 부재의 크기에 따라 몰드 타입을 기성콘크리트 기둥 2가지, 기성콘크리트 보 2가지로 분류하였다. 100% 설치 물량은 사례 프로젝트의 총 부재 수로, 기둥 타입 1은 250개, 타입 2는 160개, 보 타입 1은 96개, 타입 2는 206개를 적용하였다(Table 2).

Table 2. Contents of selected case site

Item	Contents
Location	Suncheon-si, Jeollanam-do, South Korea
Site area	9,985.00m ²
Total floor area	Main building 15,668.48m ² , Parkig lots 10,347.96m ²
No. of floors	8 stories above the ground level, 1 story of basement

사례 프로젝트의 크레인 배치를 고려한 조닝계획과 분석된 부재에 따라 기성콘크리트 부재의 설치계획이 수립된다. 발주자 요구 공기를 만족하는 현장생산 공기를 도출한 후, 설치계획은 크레인을 활용하여 부재당 설치시간을 산정된 시간을 반영한다. 이때 실제 현장에서는 수시로 변경되는 현장상황을 반영하기 위해 주(week), 일(day), 시간(hour) 단위로 설치계획을 수립할 수 있다. 수립된 설치계획은 기성콘크리트 현장생산을 위한 생산 및 야적계획에 반영된다.

4.2.2 현장여건 리스크

사례 프로젝트는 Figure 3과 같이 서측은 접근 가능한 도로와 접하고 있어, 건물의 주차출입구 설계를 고려하여 서측에 주차출입구를 위치시킬 수 있다. 북측과 남측은 타 부지와 인접하고, 동측은 접근 가능 도로가 있으나 도로가 좁아 현장으로의 진입이 원활하지 않을 수 있어 소규모의 장비, 자재를 반입시킬 수 있는 부출입구를 위치시킨다. 현장 인접부지에 대한 분석은 크레인 이동동선 및 현장의 주/부출입구 설정 시 고려되어야 하므로, 수시로 변경되는 건설현장 여건을 반영하여 계획을 수정할 수 있다.

본 건축물은 지하 1층~8층 중 주차시설과 판매시설 구역의 지상 1~4층 바닥층이 PC 구조로 설계되어 있다. 그리고 코어는 철근콘크리트 구조, 램프 구간은 철골구조 및 철골철근 콘크리트 구조인 다양한 구조로 이루어져 있다. 특히, 층고 8m의 철근콘크리트 구조는 가설공사 및 콘크리트공사가 주공정에 주요 영향을 주는 요인이었다. 따라서 상이한 구조인 PC 구조와 철근콘크리트 구조와의 일체화를 위하여 상세 공정계획이 필요하였다. 구조물 높이는 낮고 부재의 하중은 크기 때문에, 해당 현장 내에 기성콘크리트 부재를 설치하기 위한 대형 이동식 크레인 배치가 필요하다. 발주자 요구 공기를 준수하기 위하여 양중계획에 따라 조닝계획이 수립된다. 기성콘크리트 부재의 생산 및 야적을 위해 수립된 조닝계획에 따라 현장생산 계획이 수립되어야 한다.

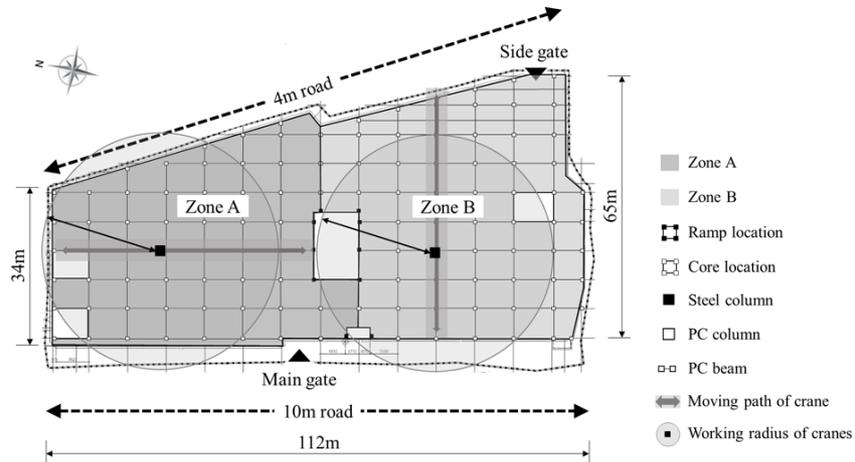


Figure 3. Case project site layout

4.2.3 생산 및 야적 리스크

적은 물량의 부재를 현장생산하는 경우 생산 및 야적면적이 충분하기 때문에 면적에 대하여 고려하지 않아도 된다. 그러나 본 사례프로젝트에서 전체 기성콘크리트 부재의 물량 중 100%를 현장생산하는 것을 고려하여 생산 및 야적면적을 비롯한 전반적인 과정에 대한 리스크 분석이 필요하다. 앞서 분석된 생산 및 야적 과정을 고려하여, 생산을 위한 단위 모듈은 식 (1)과 같이 몰드 면적, 증기양생 면적, 작업면적을 합산하여 산정하고, 야적을 위한 단위 모듈은 식 (2)와 같이 부재 면적, 작업면적을 합산하여 산정할 수 있다.

$$A_{UP} = A_M + A_{SC} + A_W \tag{1}$$

$$A_{UYS} = A_C + A_W \tag{2}$$

A_{UP} : 단위 생산면적(m^2)

A_M : 몰드 면적(m^2)

A_{SC} : 증기양생 면적(m^2)

A_W : 작업공간 면적(m^2)

A_{UYS} : 단위 야적면적(m^2)

A_C : 야적 부재 면적(m^2)

분류된 몰드 타입은 생산 및 야적 면적 산정의 기준이 된다. 먼저, 생산면적의 경우, 현장생산모듈은 증기양생을 위한 보일러 영역, 양생막 영역으로 구성된다. 이때 기성콘크리트 부재의 기동 타입 1에 대한 생산 모듈은 몰드 2개로 구성하고 Figure 4의 (a)와 같이 표현될 수 있고, 기동 타입 1에 대한 야적 모듈은 부재 5개로 구성하고 Figure 4의 (b)와 같이 표현될 수 있다. 이때 생산면적은 몰드 타입별 면적을 합산하여 산정할 수 있고, 야적면적은 야적 물량과 단위 야적면적의 곱을 몰드 타입별로 합산하여 산정한다. 참고로, 모든 부재가 생산완료되면 생산면적은 필요하지 않다.

현장생산된 기성콘크리트 부재는 JIT으로 설치되는 것을 목표로 하지만, 부재 설치시간에 비해 생산시간이 상대적으로 오래걸리므로 이를 고려한 야적공간이 필요하다. 즉, 설치 전, 설치 중 등의 공사 진행상황에 따라 현장생산된 기성콘크리트

부재의 야적계획이 수립되어야 한다. 또한, 현장 내에서 기성콘크리트 부재가 설치된 면적, 장비 이동동선, 작업공간 등을 제외한 모든 면적을 가용면적으로 사용할 수 있고, 크레인의 작업반경 이내의 면적을 산정한다. 기성콘크리트 부재의 설치에 따라 가용면적은 변경되므로 공사진행에 따라 산정이 필요하다. 이때 현장에 야적공간이 협소하여 부재의 야적이 불가능한 경우 일부 부재를 공장생산함으로써 문제를 해결할 수 있다.

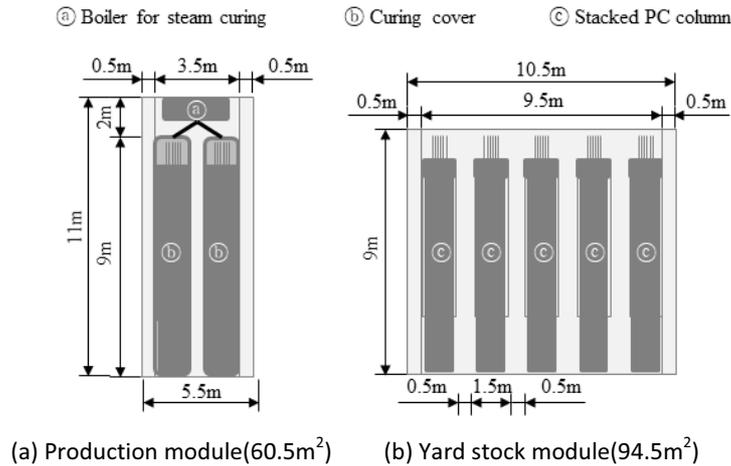


Figure 4. Production and yard stock module

현장에서 진행되는 철근콘크리트 구조 코어를 고려하여 공사가 진행되어야 하고, 코어 시공은 현장타설 콘크리트이므로 접합되는 기성콘크리트 부재와 함께 결합될 수 있도록 콘크리트 타설을 동시에 진행하여야 한다. 따라서 코어는 기성콘크리트 부재의 설치계획에 맞춰서 함께 시공되어야 한다. 또한, 램프 구간의 철골 및 철골철근 콘크리트 공사가 함께 진행되어야 하고, 가용면적 산정 시 이들 공사에 대한 작업공간이 제외되어야 한다. 사례 프로젝트는 Figure 3과 같이 2대의 크레인이 A, B 존(Zone)에 각각 투입되어 현장생산 및 야적 공기가 산정되었다. 각 존의 크레인 이동동선을 따라 부재 생산, 야적 및 설치가 이루어진다. 이때 적용된 증기양생을 통해 몰드에서 생산되는 부재의 소요시간은 3일이고, 현장생산 물량은 기동 410개, 보 302개가 적용되었다. 이를 활용하여 야적면적이 고려된 현장생산 및 야적계획을 수립하였다.

4.3 사례 적용 결과

앞서 도출된 현장생산 리스크 평가 요인의 적정성을 확인하기 위하여 Table 3과 같이 현장생산에 참여한 건설업체 직원, 연구원 등 전문가 5명에게 리스크 요인에 대한 설문조사를 실시하였다. 리커트 5점 척도로 각 항목을 평가하였고, 그 결과 13가지 항목이 4점 이상, 6가지 항목이 3점 이상으로 평가되어 본 연구에서 도출된 리스크 요인이 적절하게 도출되었다고 판단된다.

Table 3. Questionnaire respondents

	Distribution	Person
Period	05.01.2021~06.15.2021	5(100%)
Profession	Professional field engineer	3(60%)
	Researcher	2(40%)
Careers	5 years~10 years	2(60%)
	More than 10 years	3(40%)

또한, Table 4와 같이 리스크 평가 체크리스트를 사례 현장에 적용하였다. 이때 추후 비전문가도 현장생산 리스크 평가를 용이하게 수행할 수 있도록 본 연구에서 개발한 체크리스트의 평가구분은 3가지로 양호, 미흡, 해당사항 없음의 3단계로 구성하였다. 현장생산 리스크 평가 체크리스트를 적용한 결과, ‘현장생산 부재 리스크’의 기성콘크리트 부재 총물량 산정 ‘양호’, 현장생산 물량 규모 ‘미흡’, 기성콘크리트 부재 하중 ‘양호’, 기성콘크리트 부재 사이즈에 따른 몰드 종류 ‘양호’, 크레인 대수 및 배치를 고려한 조닝계획 ‘양호’, 스틸몰드 재료 원가 변동 ‘해당사항 없음’으로 나타났다. ‘현장여건 리스크’의 인접 부지와의 간섭 ‘해당사항 없음’, 크레인 이동동선을 고려한 현장 진출입로 ‘양호’, 자재 및 반입동선 ‘양호’, 기성콘크리트 부재 적용 구간 ‘양호’ 생산 및 야적을 위한 현장 내 가용면적 확보 ‘미흡’, ‘생산 및 야적 리스크’의 기성콘크리트 부재 생산 및 설치 시간 산정 ‘양호’, 부재 사이즈에 따른 크레인 선정 ‘양호’, 타공사와의 간섭 검토 ‘양호’, 철근콘크리트 구조와의 일체화를 위한 상세 공정계획 수립 ‘양호’, 가용면적, 생산 및 야적 면적 산정 시뮬레이션 ‘미흡’, 생산모듈 및 야적모듈 면적 ‘양호’, 현장생산 기성콘크리트 품질 관리 ‘양호’, 기온, 습도 등 불규칙적인 기후조건에 따른 양생시간 관리 ‘양호’로 나타났다.

Table 4. Risk evaluation for in-situ production of PC members

Phase	Risk factors	Evaluation		
		Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
PC members risks	▪ Calculation of the total quantity of PC members	○		
	▪ In-situ production quantity		○	
	▪ Load of PC members	○		
	▪ Mold type according to the size of PC members	○		
	▪ Zoning plan considering the number and arrangement of cranes	○		
	▪ Steel mold material cost fluctuations			○
Site conditions risks	▪ Interference with adjacent sites	○		
	▪ Site access road considering crane movement	○		
	▪ Transportation of materials and equipment	○		
	▪ Application section of PC members	○		
	▪ Secure available area on site for production and yard stock			○
Production and yard stock risks	▪ Calculation of production and installation time of PC members	○		
	▪ Crane selection according to member size	○		
	▪ Interference with other construction works	○		
	▪ Establish detailed process plan for integration with reinforced concrete structures	○		
	▪ Area of production module and yard stock module			○
	▪ Calculation simulation for available area, production area and yard stock area	○		
	▪ Steam curing time management according to irregular climatic conditions such as temperature and humidity	○		

Ⓐ: Good, Ⓑ: Insufficient, Ⓒ: Not applicable

4.4 결과 분석

기성콘크리트 부재 현장생산을 위한 리스크 평가 체크리스트에 현장사례를 적용 분석한 결과, ‘현장생산 부재 리스크’의 총 6항목 중 4건의 ‘양호’와 1건의 ‘미흡’, 1건의 ‘해당사항 없음’으로 분석되었다. ‘현장여건 리스크’의 총 5항목 중 4건의 ‘양호’와 1건의 ‘미흡’으로 분석되었다. 또한, ‘생산 및 야적 리스크’의 총 8항목 중 8건의 ‘양호’와 1건의 ‘미흡’으로 분석되었다.

현장생산을 위한 리스크 평가 체크리스트의 평가 결과를 분석해보면, ‘현장생산 부재 리스크’의 현장생산 물량 규모 항

목, ‘현장여건 리스크’의 생산 및 야적을 위한 현장 내 가용면적 확보 항목, ‘생산 및 야적 리스크’의 가용면적, 생산 및 야적 면적 산정 시뮬레이션 항목에서 ‘미흡’으로 평가되었다. 이것은 본 사례현장이 높은 건폐율로 인하여 야적면적을 확보하기 어려웠기 때문인 것으로 판단되며, 이들 항목에 대한 리스크 관리가 필요하다는 것으로 분석되었다. 미흡한 것으로 평가된 항목은 물량 규모 축소, 가용면적 확보, 반복적인 시뮬레이션을 통해 리스크를 최소화할 수 있다. 또한, 스틸 몰드 재료 원가 변동은 전체 공사를 고려하면 공사비에 직접적인 영향을 미치지 않지만, 원가 변동에 따른 공장생산된 기성콘크리트 부재도 동일한 비율로 단가가 올라가기 때문에 리스크 요인으로 해당사항이 없다고 인식한 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서 제안한 현장생산을 위한 리스크 평가 체크리스트에 1개 현장사례만을 적용하여 검증하기는 하였지만, 현장생산 리스크 평가에 효과가 있을 것으로 판단된다. 향후 본 연구에서 개발된 현장생산을 위한 리스크 평가 체크리스트를 건설현장에서 활용하여 적용한다면, 프로젝트 관리 시 리스크 저감을 통해 효율적인 공사 수행에 기여할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 기성콘크리트 부재 현장생산을 위한 원가, 품질, 공기, 안전 측면에서의 리스크 평가 체크리스트를 개발하고 효용성을 검토하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 현장생산을 위한 리스크 평가 체크리스트를 활용하여 리스크 요인을 쉽고 빠르게 평가하였다. 이를 통하여 1개의 사례현장에 적용하여 현장생산 리스크 평가가 가능하다는 것을 검증하였고, 다른 사례현장에서도 적용 가능할 것이다.

둘째, 건폐율이 높은 현장의 경우 생산 및 야적을 위한 가용면적을 확보하기 어려워 리스크가 큰 현장으로 분류되는 것으로 분석되었다. 이 리스크 항목은 물량 규모 축소, 반복적인 시뮬레이션을 통해 가용면적에 대한 리스크를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 체크리스트의 리스크 요인 중 ‘스틸 몰드 재료 원가 변동’ 항목이 현장생산에 대한 리스크에 포함되지 않는 것으로 분석되었다. 이것은 철재 단가의 변동이 공장생산에도 영향을 미치므로 현장생산의 공사비 리스크가 되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발된 리스크 평가 체크리스트는 현장생산의 리스크요인을 효율적으로 평가하며, 프로젝트 수행 시 수시로 변경되는 리스크요인을 쉽고 빠르게 판단하여 상황에 따라 대처가 가능하다. 그리고 사업 초기단계에 체크리스트를 활용하여 현장생산 시공계획을 검토할 수 있다. 향후 변경되는 현장여건에 따라 리스크 체크리스트 검토가 수행될 경우 이를 반영하여 리스크요인을 재정의할 수 있다. 그리고 본 연구는 공장생산 기성콘크리트 부재에 대한 간접 및 공장생산 부재의 공급에 따라 변동되는 사항들은 검토되지 않았으므로, 추후 이에 대한 전반적인 검토가 진행되어야 한다. 현장생산은 공장생산보다 야적을 위한 별도의 공간이 추가적으로 필요하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 현재 대형물류센터에 대한 수요가 증가하고 있는 시점에서, 현장생산에 대한 다양한 장점에 대한 추가적인 연구를 통해 경제적, 시간적, 기술적 기여도를 높일 수 있다.

요약

기성콘크리트 부재를 현장 생산하는 경우 공장생산보다 약 14.5-39.4%의 원가가 절감되는 것으로 이전 연구에서 확인되었다. 특히, PC공장 관계자의 인터뷰를 통해, 실제 공장주는 생산원가의 20% 이상의 이윤을 얻지 못하면 공장관리 간접비를 cover하지 못해 계약을 하지 않는 것으로 확인되었다. 그리고 동등한 조건에서 기성콘크리트 부재를 현장에서 생산한다면 공장생산 대비 동등 이상의 품질이 확보된다. 이 연구들에 따르면 원가와 품질 측면에 유리하므로 기성콘크리트 부재는

현장에서 생산하여야 한다. 그러나 주어진 공기뿐 아니라 현장생산을 위한 여러 가지 제약조건으로 모든 물량을 현장생산하기 어렵다. 그 이유는 현장생산은 프로젝트 관리 과정에서 발생할 수 있는 리스크로 인하여 기피하기 때문이다. 그러나 기성콘크리트 부재의 현장생산 수행 전 리스크 요인을 분석하고 그에 대응한다면 현장생산 기회를 높일 수 있다. 따라서 본 연구는 기성콘크리트 부재의 현장생산 리스크 평가를 위한 체크리스트를 개발한다. 체크리스트를 1개의 사례현장에 적용하여 리스크 요인을 쉽고 빠르게 평가할 수 있다는 것을 검증하였다. 그 결과 견뎌움이 높은 현장의 경우 생산 및 야적을 위한 가용면적을 확보하기 어려워 리스크가 큰 현장으로 분류되는 것으로 분석되었다. 개발된 리스크 평가 체크리스트는 현장생산의 리스크요인을 효율적으로 평가하며, 프로젝트 수행 시 수시로 변경되는 리스크요인을 쉽고 빠르게 판단하여 상황에 따라 대처가 가능하다.

키워드 : 현장생산, 기성콘크리트 부재, 리스크 체크리스트 개발, 리스크 평가, 사례현장

Funding

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

ORCID

Jeeyoung Lim,  <https://orcid.org/0000-0002-2606-7831>

Hee Woong Jeong,  <https://orcid.org/0000-0002-9104-2892>

Dae Young Kim,  <https://orcid.org/0000-0003-3186-826X>

References

1. Hong WK, Lee GJ, Lee S, Kim SH. Algorithms for in-situ production layout of composite precast concrete members. *Automation in Construction*. 2014 May;41:50-9. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.005>
2. Park SH, Lim CY, Lee WJ, Kim DS, Jung, YS. The experimental study on concrete manufacturing technologies for ultra high strength concrete pile. *Proceeding of the 2013 Spring Annual Conference of the Korea Concrete Institute*; 2013 May 8-10; Seoul, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2013. p. 67-8.
3. Won IW, Na YJ, Kim JT, Kim SK. Energy-efficient algorithms of the steam curing for the in situ production of precast concrete members. *Energy and Building*. 2013 Sep;64:275-84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.019>
4. Kim SK, Hong WK, Kim JH, Kim JT. The development of modularized construction of enhanced precast composite structural systems (Smart Green frame) and its embedded energy efficiency. *Energy and Building*. 2013 Nov;66:16-21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.023>
5. Lim J. A risk management model for in-situ production of precast concrete members focused on time and cost using system dynamics [Ph.D. Thesis]. [Seoul (Korea)]: Kyung Hee University; 2018. 54 p.
6. Lim C. Construction planning model for in-situ production and installation of composite precast concrete frame [Ph.D. Thesis]. [Seoul (Korea)]: Kyung Hee University; 2016. 9 p.
7. Oh OJ. A model for production and erection integration management of large scale PC structures using system dynamics [Ph.D. Thesis]. [Seoul (Korea)]: Kyung Hee University; 2017. 42 p.
8. Lim J, Park K, Son S, Kim S. Cost reduction effects of in-situ PC production for heavily loaded long-span buildings. *Journal of*

- Asian Architecture and Building Engineering. 2020 Mar;19:242-53. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1740095>
9. Jung KO, Chung YK. The pollution and economic growth based on the multi-country comparative analysis. *Journal of Industrial Economics and Business*. 2004 Oct;17(4):1077-98.
 10. Lee GJ. A study of in-situ production management model of composite precast concrete members [Ph.D. Thesis]. [Seoul (Korea)]: Kyung Hee University; 2012. 77 p.
 11. Lim JY, Kim SK. Evaluation of CO₂ emission reduction effect using in-situ production of precast concrete components. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2020 Feb;19(2):176-86. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1726763>
 12. Lim JY, Kim SK, Kim JJ. Dynamic simulation model for estimating in-situ production quantity of PC members. *International Journal of Civil Engineering*. 2020 Apr;18:935-50. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00509-4>
 13. Na YJ, Kim SK. A process for the efficient in-situ production of precast concrete members. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2017 Oct;19(4):153-61.
 14. Pan M, Pan W. Advancing formwork systems for the production of precast concrete building elements: from manual to robotic. *Proceedings of 2016 Modular and Offsite Construction (MOC) Summit*; 2016 Sep 29-Oct 01; Edmonton, Canada. Alberta (Canada): Modular and Offsite Construction Summit; 2016. p. 2-9. <https://doi.org/10.29173/mocs1>
 15. Pan M, Pan W. Determinants of adoption of robotics in precast concrete production for buildings. *Journal of Management in Engineering*. 2019 Sep;35(5):05019007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000706)
 16. Pan W, Gibb AGF, Dainty ARJ. Strategies for integrating the use of off-site production technologies in house building. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2012 Nov;138(11):1331-40. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000544](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000544)
 17. Hwang BG, Shan M, Looi KY. Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction. *Journal of Cleaner Production*. 2018 May;183:183-93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.136>
 18. Mao C, Shen Q, Pan W, Ye K. Major barriers to off-site construction: The developer's perspective in China. *Journal of Management in Engineering*. 2015 May;31(3):04014043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000246)
 19. Arashpour M, Wakefield R, Abbasi B, Lee EWM, Minas J. Off-site construction optimization: Sequencing multiple job classes with time constraints. *Automation in Construction*. 2016 Nov;71:262-70. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.001>
 20. Pan M, Linner T, Pan W, Cheng H, Bock T. A framework of indicators for assessing construction automation and robotics in the sustainability context. *Journal of Cleaner Production*. 2018 May;182:82-95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.053>
 21. Lim J, Kim JJ. Dynamic optimization model for estimating in-situ production quantity of PC members to minimize environmental loads. *Sustainability*. 2020 Oct;12(19):8202. <https://doi.org/10.3390/su12198202>
 22. Kang SM, Kim OJ. Domestic and foreign present situation analysis of a PC method. Seoul (Korea): Daelim Technology Research Institute: Architecture(Spring); 2006. p. 28-37.
 23. Park JH, Kim SJ, Paik MS, Lee SH, Park B K, Jung SJ. An experimental study on strength characteristics of mass concrete cast with high-strength concrete for precast application. *Proceeding of the 2007 Autumn Annual Conference of the Korea Concrete Institute*; 2007 Nov 7-9; Seoul, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2007. p. 585-8.
 24. Park H, Park S, Hong K, Kim S. Development of residential PC prefabricated building structure system. *Construction Engineering and Management*. 2011 Feb;12(1):11-6.
 25. Song KJ, Lee UK, An SH, Kang KI. PC production schedule optimization model using a genetic algorithms and random keys. *Proceeding of the 2005 Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*; 2005 Oct 24-25; Seoul, Korea. Seoul (Korea): the Architectural Institute of Korea; 2005. p. 487-90.
 26. You YC, Choi KD, Kim KH, Lee LH. Mechanical bar anchorage of the PC in beam-column joint. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2001 May;17(5):35-42.
 27. Yoon D, Hong W, Yoon T. Half slab construction for eco-friendly composite frame system. *Proceeding of the 2010 Autumn Annual Conference of the Korea Institute of Building Construction*; 2010 Nov 18-19; Suwon, Korea. Seoul (Korea): the Korea

- Institute of Building Construction; 2010. p. 15-8.
28. Hong WK, Kim SK, Kim SI. Load carrying capacity of structural composite hybrid system (green frame). *The International Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*. 2010 Feb;10(1):25-31.
 29. Son SH, Lim JY, Kim SK. Planning algorithms for in-situ production of free-form concrete panels. *Automation in Construction*. 2018 Jul;91:83-91. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.006>
 30. Kang LS, Kim CH, Kwak JM. Analysis for the importance of risk factors through the project life cycle. *Journal of the Architectural Institute of Korea(Structure & Construction)*. 2001 Aug;17(8):103-10.
 31. Chung BH, Chung YS. Analysis and reduction for risk factors of construction projects. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*. 2001 Aug;2(4):62-8.
 32. Shin KH, Kim JJ. A Study on the importance of risk factors for effective risk management in the pre-project planning phase of the development projects. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*. 2002 Mar;3(2):75-86.
 33. Suh SW, Kim JJ, Kim KR. A decision making model for construction risks using optimized response method. *Journal of The Architectural Institute of Korea(Structure & Construction)*. 2002 Oct;18(8):115-22.
 34. Kang SK. A study on the risk management efficiency in the cost of apartment housing development [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Chung-Ang University; 2004. 86 p.
 35. Kim MH. A study on the method of the risk management in the real estate development project. Seoul (Korea): Construction and Economy Research Institute of Korea; 2005. 97 p.
 36. Lee JK, Lee JH. A study on the method of the risk management in the housing project. *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*. 2008 Apr;8(2):79-86.
 37. Lim J, Son S, Kim JT, Kim S. Experimental study of in-situ production of precast concrete members, *Proceeding of the 7th International Conference on Construction Engineering and Project Management(ICCEPM)*; 2017 Oct 27-30; Chengdu, China. Seoul (Korea): Korea Institute of Construction Engineering and Management; 2017. p. 98.