공동주택 PC 슬래브 및 공장 품질 생산 시스템 개발

Development of Arpartment PC Slab and Plant Quality Production System

권 순 영
까뮤이앤씨
PC 사업부문 부문장
(전무)

1. 머리말

건설현장의 안전문제, 인력문제가 대두됨에 따라 탈현장 건축(Off-Site Construction, 이하 OSC) 공법의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 중에서도 Precast Concrete(이하 PC) 공법은 건축생산성을 극대화한 대표적인 공업화 건축 공법이다. PC 공법은 건축물의 주요 콘크리트 부재(기둥, 보, 슬래브, 벽체 등)를 공장에서 제작하고 현장에서 조립하는 방식으로, 공장생산에 따라 품질이 균일하고 정밀도가 높은 제품 생산이 가능하다.

국내에서는 1970년대 말에 PC 대형판을 이용한 조립식 구조가 아파트에 적용되기 시작하여, 1980년대 후반 전문 기능 노동력의 부족과 인건비의 상승 등으로 인한 주택 건설의 어려움을 완화시키는 대안으로 벽식 구조의 PC 공동주택이 시공되었다. 그러나, 30년전 건설교통부에서 PC 조립식 주택을 15층 이하로 층수를 제한하는 기준(건설부 고시 제 1992-564호)을 고시하였고, 전문적인 지식을 갖춘 엔지니어의 부족과 부실시공에 의한 많은 하자가 발생하며 PC 공법 건설시장 점유율은 급속도로 쇠퇴하였다.

최근까지 PC 공법은 주로 물류센터, 공동주택 지하주차장, 반도체 공장 중심으로 시장이 형성되어 있었다. 그러나, 최근 온라인 물류시스템 변화에 따른 대규모 물류센터와 세계 반도체 시장을 장악한 한국 기업들의 반도체 공장 증축, 대형 복합 쇼핑몰 등의 건설사업 발주 증가로 국내 PC 건축시장의 규모는 지속적으로 증가하고 있다.

그러나 국내 PC 품질관리는 기존 습식공법 및 해외 PC 기준을 준용하고 있어, PC에 맞는 기준이 부재한 상황이다. PC 공동주택의 적용범위를 확대시키기 위한 많은 연구가

수행되고, PC 공법의 문제점을 줄이기 위해 기술개발 및 품질관리가 요구되는 상황이다.

까뮤이앤씨는 2020년에 시작된 "Off-site Construction (이하 OSC) 기반 공동주택 생산시스템 혁신기술개발" 사업에 참여하여 공동주택의 주동에 PC 공법을 적용하기 위한 바닥용 PC 슬래브 기술개발과 PC 부재의 품질향상을 위한 공장인증제도 개발을 수행하고 있다.

본고에서는 공동주택 바닥용 PC 슬래브의 기술개발을 위해 거친면 처리 없이 Topping 콘크리트와의 일체성 유지를 위한 구조실험에 대한 내용과 PC 부재의 품질향상 및 안전성 확보를 위해 해외의 공장인증제도를 분석하여 국내 PC 공장인증제도 도입을 위한 기초 자료 마련에 대한 내용을 서술하고자 한다.

2. 공동주택 바닥용 PC 슬래브 기술개발

PC 공법의 적용 확대에 따라 공동주택에서는 지하주차장 및 옥탑 등에 한정되었던 PC 적용 범위를 주동까지 확대시키려는 노력이 이루어지고 있다. 당사는 "Off-site Construction 기반 공동주택 생산시스템 혁신기술개발" 사업에서 PC 슬래브 기술개발에 참여하고 있다. 슬래브는 PC 구조에서 가장 큰 물량을 차지하며 하중, 내화 및 층간소음 등의 거주성과 연관되므로 그 중요성이 크다.

과거 90년대 중반까지는 주로 벽식 구조를 가진 PC 공동주택이 건설되었다. 벽식 구조 PC 공동주택에는 래티스 슬래브(Lattice slab or half slab)를 사용하였는데 경제성과 품질의 문제로 상용화되지 못하였다. 과거 PC 공동주택의 한계점을 개선하기 위해 당사는 구조성능과 거주성능을 만족시키는 PC 슬래브 적용을 검토하고 있다.

2.1 국내·외 PC 슬래브 공법 비교 및 특성 분석

국내 PC 시장은 물류센터, 지하주차장, 공장 등 비거주 시설을 위주로 형성되어 있고 각각의 건물 유형에 따라 최적화된 PC 슬래브가 적용되고 있는데, 국내에서 주거시설에 적용 가능한 PC 슬래브는 그 개발 및 적용 사례가 적다. PC 공동주택용 슬래브 개발에 앞서 적용 가능한 PC 슬래브의 형상을 정리하였다.

과거 PC 공동주택은 벽식 구조로, 상대적으로 짧은 경간을 가진 래티스 슬래브가 사용되었다. 그러나 최근 PC 공동주택은 벽식 구조와 라멘조 두가지 유형으로 시공되고 있으므로, 두가지 시스템에 모두 적용 가능한 슬래브의 개발이 필요하다.

또한 PC 슬래브는 2방향 슬래브보다 1방향 슬래브가 경제적으로 우수하기 때문에, 장경간에 적용 가능한 1방향 PC 슬래브 개발을 고려하였다.

표 1은 국내·외에서 사용되고 있는 PC 슬래브 유형별 장·단점을 나타낸 것이다.

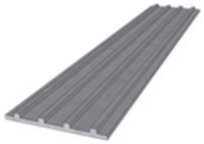
하향 리브형 계열은 상부 플랜지가 압축력을 부담하고 유효춤이 높아 단면 효율성이 높으나 층고가 증가하고 하부 돌출부로 인해 마감이 어렵다는 단점이 있다.

중공형 계열은 대량 생산에 유리하지만, 고가의 생산설비를 투자해야한다.

파이형 계열은 하향 리브형 계열과 마찬가지로 하부 돌출부로 인해 마감이 어렵고 슬래브 간 측면 연결 작업량이 많아, 공기단축이 시급한 공동주택 현장에서는 적용에 어려움이 있다.

상향 리브형 계열은 주로 지하주차장 현장에서 사용되고 있는데 플랜지가 하부에 위치하여 고하중지지가 어렵다는 단점이 있지만, 2.0kN/㎡ 수준의 낮은 활하중을 받는 공동주택 거실에는 적용하는데 어려움이 없을 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 단면 두께가 얇으므로 Topping 콘크리트 제외 시 PC 슬래브 두께를 150㎜ 정도로 최소화 시킬 수 있어 층고 절감이 필요한 공동주택에 적합하다.

표 1. PC 슬래브 유형별 장·단점 비교

구분	장점	단점
상향 리브형 계열 	- 단면 두께 감소 - 단부 연속 접합 구현 유리	- 고하중지지 어려움 - 장스팬·고하중 적용시 전단 보강 필요
하향 리브형 계열	- 단면 효율성 높음 - 장스팬에서 유리	- 단부 연결부 하자 발생 사례 많음
중공형 계열	- 중공 형성으로 자중 감소 - 대량 생산에 유리	- 고가의 생산 설비 투자 필요
파이형 계열	- 콘크리트 재료 투입 최소화 - 합성 효과 우수	- 측면과 마구리의 안전성 확보 필요

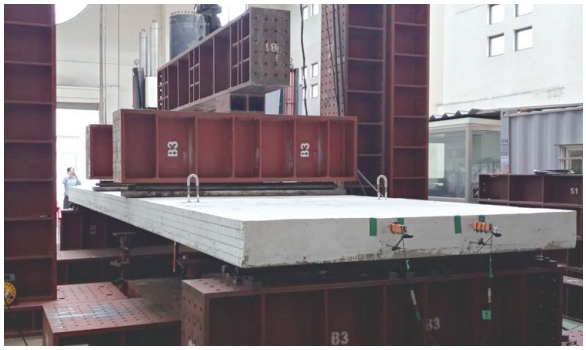
2.2 공동주택 PC 슬래브 구조성능 평가

당사는 PC 슬래브 유형의 장·단점을 비교하여 PC 공동주택에 가장 적합한 형태인 상향 리브형 슬래브 적용 방안을 모색하였다. 그러나, 상향 리브형 슬래브는 Topping 콘크리트와의 일체성을 위해 거친면 처리가 필수적으로 요구된다(표 2). 공장 생산의 시공성을 높이기 위해서는 거친면 처리가 없는 상향 리브형 슬래브 개발이 필요하다.

따라서, 상향 리브형 PC 슬래브를 대상으로 별도의 전단연결재 및 거친면 처리 없이 Topping 콘크리트와의 일체성을 유지하는지 확인하기 위해 수평전단 실험을 수행하였다.

표 2. 국내외 설계기준의 마찰계수 값

기준	조건		f_{ck}		
			25	35	40
콘크리트 구조설계 기준	표면청결, 거친 처리		0.56		
	최소전단연결재, 표면청결, 거친 처리 없음		0.56		
	최소전단연결재, 표면청결, 깊이 6mm의 거친 처리		1.80		
ACI 318-08	표면 청결, 거친 처리		0.55		
	최소전단연결재, 표면청결, 거친 처리 없음		0.55		
PCI 6th	최소전단연결재, 표면청결, 깊이6mm의 거친 처리		1.80		
	의도적인 거친 처리		0.55		
	최소전단연결재만 있음		0.55		
	0.25in의 의도적 거친 처리 최소전단연결재		1.80		
Eurocode2	매우 부드러움 : 강재, 플라스틱 거푸집 사용 표면		0.30	0.33	0.42
	부드러움 : 슬립폼 또는 사출, 진동 처리 표면		0.42	0.47	0.58
	거친 : 골재 노출 또는 40mm 간격으로 3mm 깊이의 갈퀴 처리		0.54	0.60	0.75
	요철 처리 : 기준에 그림으로 제시한 5mm 이상의 요철로 처리		0.60	0.67	0.83
BS 8110	공칭전단 연결재 없음	일반타설, 사출표면	0.4	0.55	0.65
		브러시, 갈퀴, 거친다짐	0.6	0.65	0.75
		레이턴스 세척, retarder로 처리 후 청소	0.7	0.75	0.80
	공칭전단 연결재 있음	일반타설, 사출성형	1.2	1.8	2.0
		브러시, 갈퀴, 거친다짐	1.8	2.0	2.2
		레이턴스 세척, retarder로 처리 후 청소	2.1	2.2	2.5

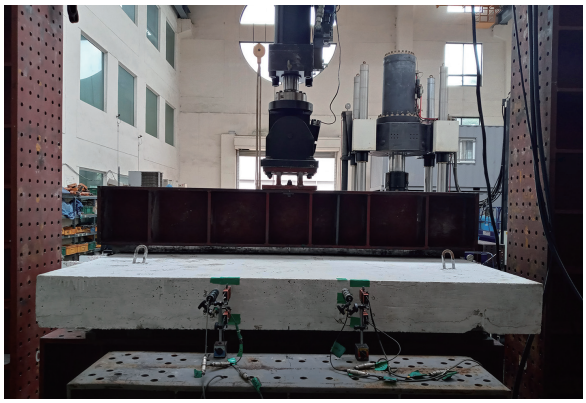


(a) 휨 가력

(b) 전단 가력

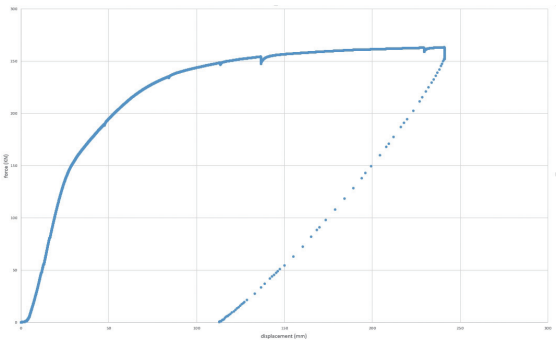
그림 1. PC 슬래브 수평 전단 실험

(a) 휨 가력

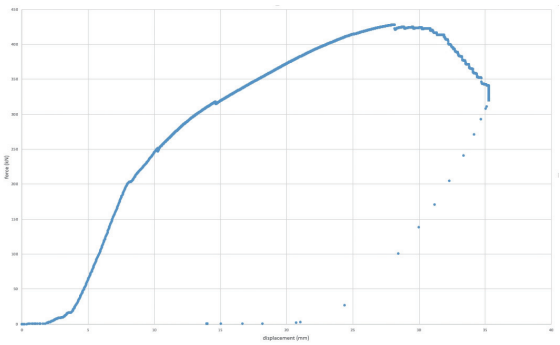


(b) 전단 가력

그림 2. 구조실험체 LVDT 부착



(a) 휨 가력



(b) 전단 가력

그림 3. 구조실험체 실험 결과(변위-하중 그래프)

그림 1과 같이 2개의 실대형 실험체를 제작하였다. 실험은 휨 가력과 전단 가력으로 나누어 구조실험을 수행하였다. PC 슬래브를 파괴 시까지 가력하였고, 그림 2와 같이 LVDT를 부착하여 실험체의 수평 미끄러짐 발생을

확인하였다.

실험은 수평 응력 분포를 고려한 계산 시 수평 전단응력이 수평 전단강도보다 커서 미끄러짐 파괴가 예상되었으나, 실제 실험에서는 수평 미끄러짐이 발생하지 않았다. 따라서 최종 파괴 시 휨 파괴의 균열 양상이 나타났다.

그림 3은 수평 전단 실험에 대한 변위-하중 그래프이다. 실험결과 최종 파괴하중은 이론 공칭강도보다 약 108% 상회하는 내력을 확보하였다.

실험결과, 실제 PC 공동주택의 PC 슬래브 시공 시에도 현재의 구조 기준보다 수평 미끄러짐에 대한 완화된 기준이 적용 가능할 것으로 판단된다.

2.3 공동주택 PC 슬래브 내화성능 평가

공동주택용 PC 슬래브는 건축물의 주요구조부(내력벽, 기둥, 바닥, 보, 지붕틀 및 주계단)에 해당하여 내화구조의 성능기준을 만족시켜야 한다. PC 슬래브의 내화 성능 평가는 수행된 결과가 부족하기 때문에, 당사의 실험은 PC 슬래브에 대한 내화성능 개발에 큰 도움이 될 것이라 판단된다.

추후 내화성능 평가를 위해 다양한 변수를 가진 PC 슬래브 실험체를 제작할 예정이다. 또한, KS F2257-1에 따라 허용변형량, 허용변형률, 차염성 등에 대한 내화성능평가를 수행하고 공동주택 적용 가능성을 확인할 예정이다.

3. PC 공장 품질 인증 시스템 개발

PC 공법의 가장 큰 특징은 공장 생산으로, 현장 시공 간소화에 따라 공사 기간 단축이 가능하고, 실외에서 작업하는 현장 생산과는 달리 날씨의 영향을 받지 않기 때문에 균일한 품질의 콘크리트 부재를 얻을 수 있다(그림 4 PC 공법 프로세스).

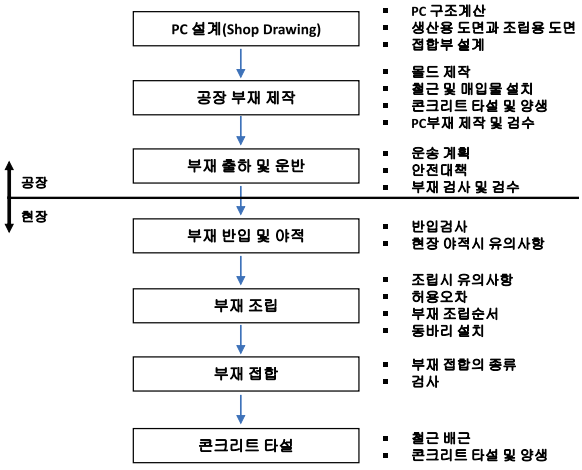


그림 4. PC 공법 프로세스
(스마트 프리캐스트 & 프리스트레스트 콘크리트 설계, 2021)

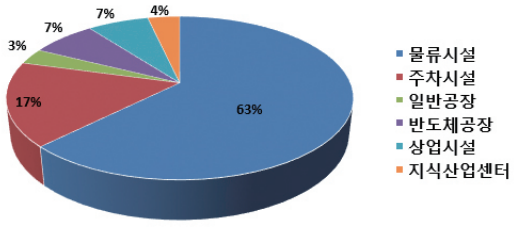


그림 5. 2018년도 국내 PC 건축 점유율

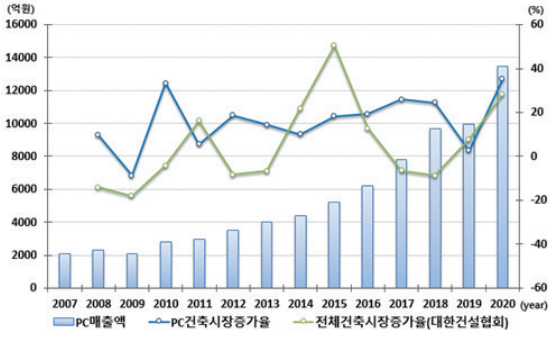


그림 6. 국내 PC 건축 연간 매출 및 증가 추이

PC 공법은 그림 5와 같이 주로 물류센터, 공동주택 지하주차장, 반도체 공장 중심으로 시장이 형성되어 있다. 최근 코로나19 유행에 따라 외국인 근로자가 감소하고,

비대면 쇼핑에 의한 물류센터 공사가 증가하며 PC 공법에 의한 건설 시장이 더욱 확대되고 있다(그림 6).

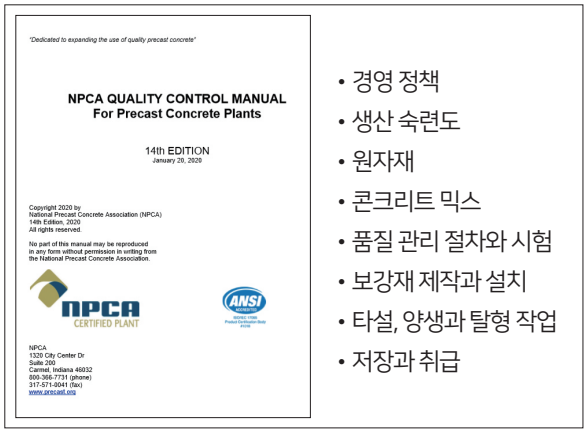
이처럼 PC 시장이 확대되고 있으나, PC 제작공장 및 현장에 PC에 대한 전문적인 지식을 갖춘 엔지니어의 부족으로 품질확보에 어려움을 갖고 있다. 미국에서는 이러한 해결책으로 부재의 제작에 대한 안전성 확보 및 품질 보증을 위해 공장인증제도가 시행되고 있다. 국내에서도 철강을 이용한 강교에 대해서는 공장인증제도가 시행되고 있지만, PC 부재의 공장인증제도는 도입되어 있지 않다. 따라서, PC 부재의 생산에서부터 현장 설치 및 사용에 이르기까지 안전성이 확보되면서도 표준화된 제품의 품질 확보를 위한 제도적 조치가 절실히 요구되고 있다.

당사는 PC 공장에서 생산하고 있는 제품의 품질 확보를 위하여 PC 공장인증제도 운영이 가장 활발한 미국의 NPCA(National Precast Concrete Association)와 PCI(Precast/Prestressed Concrete Institute)의 공장인증제도 대해 분석하였다. 또한, 공장인증 시 품질관리 기준이 되는 각 협회의 품질관리 매뉴얼을 확인하여 향후 국내 건축 PC 시장에 부합되는 품질관리 매뉴얼을 개발하기 위한 척도를 마련하고자 한다.

3.1 PC 공장인증시스템 사례 분석(NPCA)

미국 프리캐스트 콘크리트 협회(National Precast Concrete Association, 이하NPCA)의 공장 인증 프로그램은 프리캐스트 및 프리스트레스 콘크리트 공장 및 산업계의 자발적 인증 프로그램으로서, NPCA 품질 관리 매뉴얼에 명시된 요구 사항을 충족하는 공장은 고품질의 프리캐스트 또는 철근콘크리트 제품을 생산할 수 있다는 것을 보장하나, PC 또는 철근 콘크리트 제품 자체를 인증하지는 않는다.

NPCA 공장인증의 가장 중요한 요소는 PC품질을 감독하고, 준수사항을 보고하는 품질관리 프로그램을 구현하



NPCA QC Manual

그림 7. NPCA Quality Control Manual

는 것으로, 공장의 모든 직원은 NPCA 생산 및 품질관리 과정(Production Quality School)의 교육을 이수하여야 한다.

NPCA Plant Certification Program은 프리캐스트 또는 프리스트레스 콘크리트 제품 생산 시 품질 보증에 필요한 모든 작업의 기준을 다룬 품질 관리 프로그램인 NPCA Quality Control Manual(품질관리매뉴얼)을 마련하고, NPCA 공장 인증을 획득한 공장에 대해 정기적 사후 심사를 통해 품질관리매뉴얼 준수 여부를 지속적으로 확인하는 것이다(그림 7).

3.2 PC 공장인증시스템 사례 분석(PCI)

프리캐스트/프리스트레스트 콘크리트 학회(Precast/Prestressed Concrete Institute, 이하PCI)는 프리캐스트 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물 산업을 위한 기술 학회 및 무역 협회이다. PCI 공장 인증 제도(PCI Plant Certification Program)는 인증 받은 PC 공장이 국가 산업 기준에 기반을 둔 철저한 내부적 품질 관리 시스템을 갖추고 있다는 사실을 보증한다. 단일 인증만 존재하는 NPCA 공장인증 프로그램의 경우와는 달리 PCI 공장인증

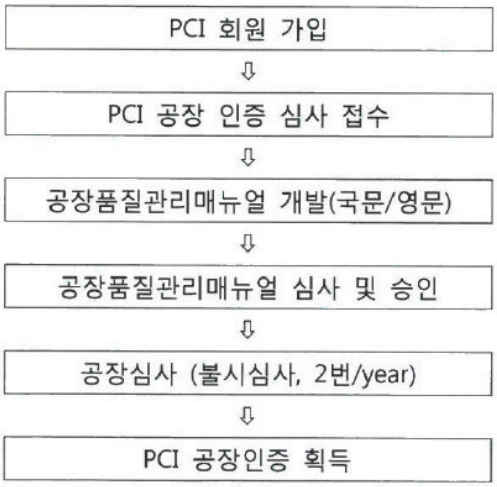


그림 8. PCI 공장 심사 과정(MNL-117, 2013)

프로그램은 공장 외에도 생산 직원, 현장 조립 인원에 대한 인증제도를 실시하고 있다.

그림 8은 PCI 공장 심사 과정을 나타낸 것이다. PCI 공장인증의 주요 평가 대상은 품질시스템, 문서화, 생산절차, 괸리, 엔지니어링, 인력, 장비 및 최종 제품이다. 공장 인증을 받기 위해서는 공장 전용 품질시스템 매뉴얼을 개발하여야 한다. 매뉴얼에는 각 공정이 어떻게 진행되는가에 대해 상세히 서술해야 하고 PCI의 승인을 받아야 한다. 이후 공장은 일년에 두 번의 불시 검사를 받게 되고, 이 때는 제 3의 엔지니어가 3개의 PCI 품질 관리 매뉴얼로 발간된 아래의 기준(MNL-116, MNL-117, MNL-130)을 따라 심사를 실시한다.

3.3 PC 공장인증제도 도입을 위한 기초 자료

국내의 실정에 맞는 PC 공장인증시스템 도입을 위해서는 전문적인 지식을 갖춘 현장 엔지니어와 PC 관련 업체 전문가들의 인식에 대한 조사가 우선적으로 이루어져야 한다.

당사는 2021년 10월 15일 'PC산업 공동발전 포럼'에 참석한 PC제조사, 설계사무소, 학계, 건설사의 종사자 등 37명을 대상으로 PC 공장인증제도의 도입 필요성 및 인증방식에 대한 설문조사를 수행하였다.(이창재 외 2명, 2022) 설문내용은 인문·사회적 항목과 PC공장 인증제도 방향 설정에 대한 항목으로 진행되었다. 일반설문과 SD법 5점 척도를 병행하여 22문항을 조사하였다.

그림 9에 나타낸 것과 같이 설문 대상자들의 직업 분포는 PC제조사(59.5%), 종합건설사(13.5%), 구조사무실(11.8%), PC엔지니어링(5.4%), 공공기관(5.4%), 학계(5.4%)이다.

그림 10에 나타낸 것과 같이 설문 대상자들은 PC공법이 공기단축 면에서 가장 뛰어나고 공사환경정리, 부재품질확보, 공기예측가능성 등의 순으로 우수하다고 인식

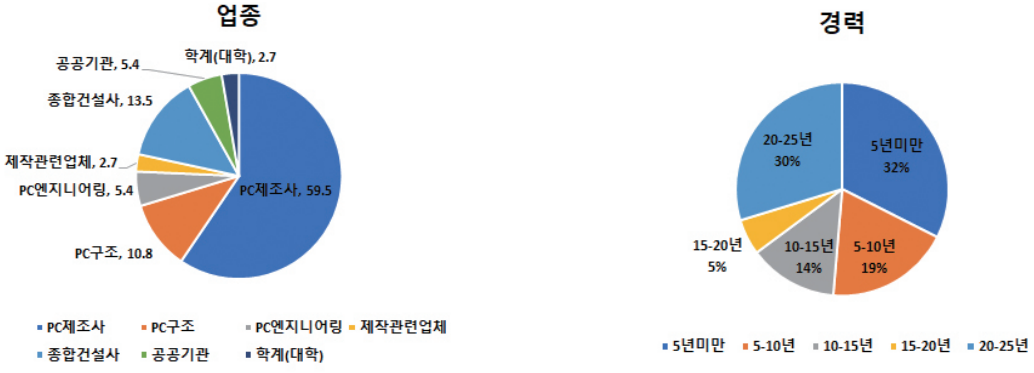


그림 9. PC 공장인증제도 도입 필요성 설문 대상자의 직업 분포 및 경력

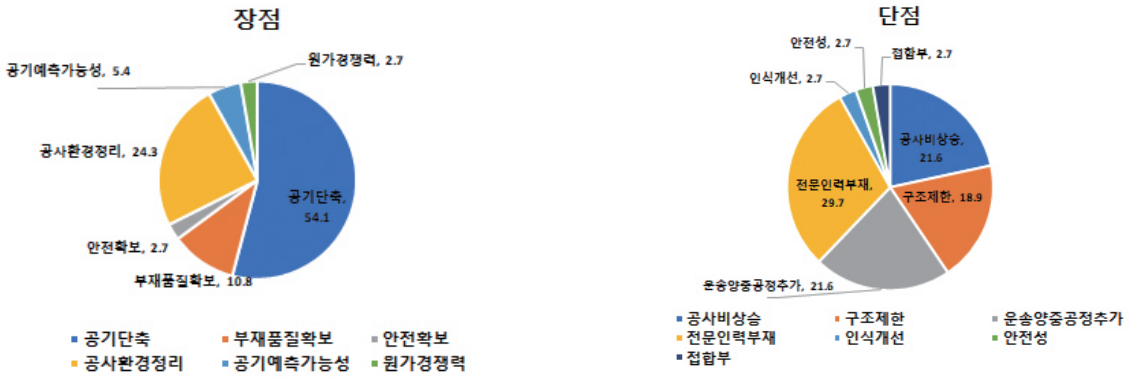


그림 10. PC 공장인증제도 도입 장점 및 단점에 대한 설문 결과

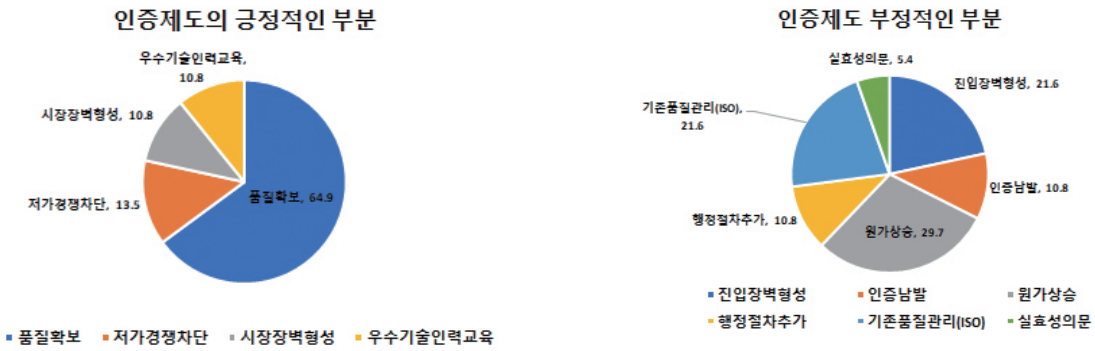


그림 11. 설문 대상자의 PC 공장인증제도 도입 인식

했다. 반대로 전문인력이 부족하고 공사비상승, 운송양중공정추가. 구조제한 등에 제약이 있다고 인식하였다.

설문 대상자들은 PC공장인증제 도입에 따라서 품질이 향상될 것으로 인식하고 있었으나 원가상승, 진입장벽형성, 기존품질관리(ISO), 인증남발 면에서 부정적인 인식을 갖고 있었다(그림 11).

인증방식은 공장인증과 콘크리트제품별 인증병행을 선호하였고 인증의 관리주체는 정부(32.4%), 제조사전문협회(29.7%), PC관련협의체(16.2%) 순으로 나타나 향후 인증관리주체 선정 시 업체의견 수렴이 중요할 것으로 판단되었다. 인증중점항목으로는 품질생산관리, 공장장비/설비, 연간제작실적, 기술이력구성, 자동화설비 순으로 나타나 인증에서 품질에 대한 중요도가 가장 큰 것으로 인식하고 있었다. 재인증 기간은 3~4년이 약 60% 이상으로 가장 높았고 4년 이상이 27%로 나타났다. 향후 인증제도 참여여부에 대해서는 86.4% 정도가 긍정적인 반응을 보였고 대부분의 응답자들은 인증 여부에 따라 부재의 단가에 차등을 둘 수 있다고 판단하였다. 그리고 인증을 획득하면 인센티브를 받을 것으로 기대하였고 인증 유지를 위해서는 생산 및 품질관리 교육강화가 필요하다고 분석되었다.

당사는 설문조사 결과를 통해 PC 공장인증제도 도입을 위한 기초 자료를 마련하였다. 추가적인 설문조사를 통해 PC 관련 업체 전문가들의 의견을 수립하고, 선행으로 조사된 해외의 PC 공장인증제도를 참고하여 국내 PC 산업에 맞는 공장인증 심사 항목과 세부항목을 설정할 예정이다.

4. 맺음말

본고에서는 PC 시장을 더욱 확대하기 위해 공동주택의 주동에 PC 공법을 적용하기 위한 바닥용 PC 슬래브 기술 개발과 PC 부재의 품질향상 및 안전성 확보를 위한 공장 인증제도 개발에 대한 내용을 서술하였다.

상향 리브형 PC 슬래브를 대상으로 별도의 전단연결재 및 거친면 처리 없이 Topping 콘크리트와의 일체성을 유지하는지 확인하기 위해 구조실험을 수행하였다. 실험결과 실제 PC 공동주택의 PC 슬래브 시공 시에도 현재의 구조 기준보다 수평 미끄러짐에 대한 완화된 기준이 적용 가능할 것으로 판단된다.

또한, 공장인증 시 품질관리 기준이 되는 각 협회의 품질관리 매뉴얼을 확인하여 향후 국내 건축 PC 시장에 부합되는 품질관리 매뉴얼을 개발하기 위한 전문가 조사를 실시하였다. 추후 추가적인 조사를 통해 PC 관련 업체 전문가들의 의견을 수립하고, 선행으로 조사된 해외의 PC 공장인증제도를 참고하여 국내 PC 산업에 맞는 공장인증 심사 항목과 세부항목을 설정할 예정이다.

국내 PC 시장의 규모는 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 PC 공법에 맞는 기준 및 정책 마련이 현저히 부족한 상황이다.

까뮤이앤씨는 PC 시장이 더욱 확대될 수 있도록 다양한 연구를 수행하여 공법을 개발하고 있다. 또한 공법이 실현화 될 수 있도록 현장의 의견을 수렴하여 효율적인 방안을 모색하고 있다. 이러한 활동은 국내 PC 시장을 활성화시킬 뿐 아니라, 추후 해외 수출을 통해 전 세계의 PC 산업 발전에도 크게 이바지 할 수 있을 것이라 생각한다.

참고문헌

1. ㈜연우PC엔지니어링, 스마트 프리캐스트&프리스트레스트 콘크리트 설계 입문, 기문당, 2021, 617 pp.
2. 이창재, 김만우, 권순영, 프리캐스트 공장 인증제도의 도입방향에 관한 연구, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2022, pp. 775-776
3. 홍성엽, 이창재, 김만우, 권순영, 국내외 프리캐스트 콘크리트 산업 현황 및 기술수준 조사 연구, , 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2021, pp. 677-678
4. 홍성엽, 이창재, 김만우, 권순영, 국내외 프리캐스트 콘크리트 산업 현황 및 기술수준 조사 연구, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2021, pp. 677-678
5. 홍성엽, 이창재, 프리캐스트 콘크리트의 유형2 슬리브 기계적 이음 성능 평가, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2020, pp. 1-2
6. NPCA, NPCA quality control manual for precast concrete plants, National Precast Concrete Association, 2020, Carmel, 177pp.
7. PCI, Manual for quality control for plants and production of structural precast concrete products, Precast/Prestressed Concrete Institute, MNL-116-99, 1999
8. PCI, Manual for quality control for plants and production of architectural precast concrete products, Precast/Prestressed Concrete Institute, MNL-117-13, 2013
9. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조 학회기준", 한국콘크리트학회, KCI 2017, 2017
10. ACI, "Building Code Requirements for Structural Concrete", American Concrete Institute, ACI 318-14, 2014
11. British Standards, "Eurocode 2: Design of concrete structures", British Strandards, BS EN 1992-1-1:2004, 2004
12. British Standards, "Structural use of concrete", British Strandards, BS 8110-1:1997, 1997

권순영 까뮤이앤씨 PC 사업부문 부문장은 1990년 성균관대학교에서 건축공학을 전공하였고, 1990년부터 ㈜까뮤이앤씨(구 삼환까뮤)에 재직중이다. 2006년에는 까뮤이앤씨 이천 공장의 공장장으로 재직하였고, 현재는 PC 사업부문의 부문장(전무)를 맡고 있다.

e-mail : sykwon@camusenc.com