

## 조립식 (Prefabrication) 및 모듈화 (Modularization) 관련 연구 동향



최진욱 Iowa State University CCEE/Postdoctoral Research Associate

### I. 서론

조립식 (Prefabrication)과 모듈화 (Modularization)는 현장에서 작업될 일 일정량을 조립공장 (shops/factories)이나 야외 (yards)에서 작업을 하는 방법 중 하나로 생산성을 높이고, 원가를 절감하고, 공기를 단축시키고, 품질을 향상시키고, 사고율을 낮춰 안전성을 높일 수 있는 방법이다. 현재 산업부문에 따라 (industrial, civil, & buildings) 모듈화에 관련된 여러 용어들이 쓰이고 있으나 (예를들어, prefabrication, preassembly, off-site fabrication, modularization, prework, PPMOF, accelerated bridge construction, industrialized/modular building systems, 기타등등), 핵심인 현장이 아닌 다른 곳에서 작업을 하여 위에 나열한 혜택을 누리는 것에는 큰 차이가 없다. 최근에는 모듈화를 통해 폐기물을 줄이고 투입되는 재료를 아끼는 등 친환경적인 요소도 장점으로 주목받고 있다. 조립식이나 모듈화 기법이 건설업에 도입된지 수 세기가 지났음에도 건설업계는 위에 나열한 장점들을 극대화 할 수 있는 더 높은 차원의 모듈화 기법의 적용에 어려움을 겪고 있었으나, 최근에 BIM과 IT기술을 발전으로 모듈화 기법은 급속히 발전하고 있으며 (McGraw-Hill 2011) 조선업과 제조업의 product-oriented 방법에 영감을 받아 미국과 유럽에서 다시 모듈화가 건설업의 생산성과 효율성을 높일 방법으로 다시 주목받고 있다. 한 예로 2009년에는 미국 National Research Council이 모듈화 기법을 향후 20년간 미국 건설부문의 생산성과 경쟁력을 크게 향상시킬 방법 다섯 가지 방법 중 하나로 꼽은 바 있다 (NRC 2009). 이에 본 고에서는 북미 지역을 중심으로 최근에 수행된 모듈화 연구와 활동들에 대해 간략히 소개하고자 한다.

### II. 본론

#### 1. 모듈화 기법 연구 동향

##### 1.1 CII Research Team 283: Industrial Modularization

미국 Construction Industry Institute (CII) 에서는 1980대에 서부터 조립식 및 모듈과 기법에 대해 연구를 꾸준히 해오고 있다. 이 기법들에 관련된 CII 연구 보고서들은 아래와 같다.

- 1987. "Constructability improvement using prefabrication, preassembly, and modularization"
- 2002. "Implementing the Prefabrication, Preassembly, Modularization, and Offsite Fabrication Decision Framework: Guide and Tool."
- 2002. "Prefabrication, Preassembly, Modularization, and Offsite Fabrication in Industrial Construction: A Framework for Decision-Making."
- 2004. "Prefabrication, Preassembly, Modularization, and Offsite Fabrication (PPMOF) – Instructor's Guide."
- 2006. "Constructability Implementation Guide."
- 2007. "Examination of the Shipbuilding Industry."
- 2011. "Transforming Modular Construction for the Competitive Advantage through the Adaptation of Shipbuilding Production Processes to Construction."
- 2012. "Industrial Modularization: How to Optimize; How to Maximize."

이들 보고서 중 가장 최근에 Research Team 283 이 진행한 모듈화에 진행된 연구에 대해 본 고에서 소개하고자 한다.

2010년부터 2012까지 The University of Texas at Austin의 Dr. James T. O'Connor 와 Dr. William J. O'Brien 주도하고 본 고의 저자가 연구를 보조한 연구팀이 (RT283: Industrial

Modularization) 공업 프로젝트 (Industrial capital projects) 를 초점을 두고 “더 광범위적이고 효과적인 모듈화 사용을 위한 최적의 환경을 만들기 위해 어떠한 변화나 적응이 전통적인 공정에 필요한가?” 에 대한 질문에 답을 찾기 위해 연구를 진행하였다. 이 연구팀에는 북미에서 자원한 17개의 기업이 참여하여 진행되었으며 2012년과 2013년에 보고서들 (CII 2012; CII 2013; O'Connor et al. 2013)이 나왔다. 연구팀은 이 연구에서 다섯가지 해법 요소들을 제시하였다 (CII 2012):

- 사업성 분석 프로세스 (a business case process)
- 실행계획 차이 (execution plan differences)
- 결정적 성공 요인 (critical success factors)
- 표준화 전략 (a standardization strategy)
- 모듈화 극대화 가능자 (modularization maximization enablers)

각 해법 요소들을 간략하게 소개하면, 첫번째로 ‘사업성 분석 프로세스’ 해법 요소에선 어떻게 하면 모듈화 적용에 따른 이득과 비용들을 평가할지, 얼마나 모듈화 시켜야 할지 (% modularization), 언제 이러한 것들이 평가되어야 하며 어떠한 정보들이 필요한지 등에 대한 해법들을 제시하였다. 핵심 메시지는 프로젝트 팀은 최대한 빨리 ‘사업성 분석 프로세스’를 적용해야 하고, 사업 단계가 지날 수록 더 많은 정보들을 모다 심도 깊은 분석은 해야하며, 무엇보다도 사업팀이 모듈화를 중점적으로 염두에 두고 진행해야한다는 것이다. 두번째 해법인 ‘실행 계획 차이’에서는 프로젝트 실행계획과 실행에 있어 100여가지의 전통적인 건설방법과 모듈화 기법의 차이점을 찾아냈으며 특히 초기 설계 단계에 전통기법에 비해 모듈화를 위해 고려해야 할 것들이 많다는 것을 찾아내었다.

세번째로 다섯 해법 요소중 가장 핵심적인 해법 중 하나인 ‘결정적 성공 요인’에서는 21한가지의 결정적 요인들을 찾아냈으며 이 요소들이 누가 책임지고 고려해야하며 언제 이들이 적용되는지 그리고 현재 얼마나 성취되고 있는지에 대해 연구하였다. 총 21가지의 결정적 성공요인들 중에서 가장 중요한 5가지는 1) 모듈 한계 이해 (module envelope limitations), 2) 프로젝트 팀의 프로젝트 추진요인 지지 (team agreement on project drivers), 3) 발주자의 적절한 계획 자원과 프로세스 (adequate owner-planning resources and processes), 4) 모듈 디자인 확정 (timely freeze of scoping and design), 그리고 5) 모듈화 적용으로 예상되는 공기단축 가능성 인식과 파악 (recognition of possible early completion from modularization) 이다.

그다음으로 ‘표준화 전략’ 해법 요소에서는 어떻게 하면 표준화와 모듈화가 조화가 되어 시너지 효과를 낼 수 있을지에 대해 연구를 진행하였으며 어떠한 장단점이 있는지 어떻게 적용할 수 있을지에 대해 방법들을 케이스 프로젝트와 함께 제시하였다. 마지막으로 ‘모듈화 극대화 가능자’ 해법 요소에서는 현재 모듈화 기법 적용의 장애물들을 찾아내고 건설산업 차원에서 이를 극복하기 위한 열가지 가능자들 제시하였다. 그림1은 이 다섯가지 해법들간의 관계를 깃발 그림형식으로 표현한 것이다.

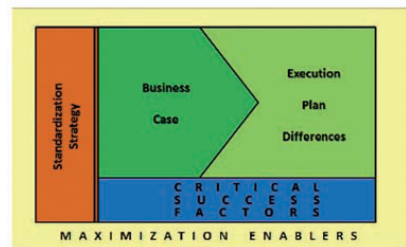


그림 1. 다섯 해법 요소 기 (CII 2012)

간략하게 요소들 간의 관계 (그림 1)를 설명하면, 사업 초기에 ‘사업성 분석 프로세스’가 실행계획단계에는 ‘실행계획 차이’가 중요한 해법들로 이는 서로 딱 맞물려 떨어지는 해법들이다. 이 두 해법들은 ‘결정적 성공요인’를 더욱 주의를 기울임으로 강화 될 수 있다. 그리고 몇몇 사업은 프로젝트가 시작하기 전에 ‘표준화 전략’을 통해 모듈화의 이익을 더 끌어올릴 수 있다. 마지막으로 모듈화 전략을 한단계 더 끌어 올리기 위한 ‘모듈화 극대화 가능자’ 건설산업차원에서 필요하다.

### 1.2 CII Modularization Community or Practice (MCOP)

이 절에서는 CII의 The Knowledge Management Committee의 지원으로 운영되고 있는 CII Communities of Practice이라는 소그룹들 중 모듈화 그룹 (Modularization Community of Practice (COP) 활동에 대해 간략하게 소개하고자 한다. 2014년 기준 30여개의 CII 소속 미국 건설사들이 다양한 모듈화 프로젝트의 계획, 설계, 그리고 시공까지 관련된 지식을 공유하기 하기위해 활동하고 있다. 특히 모듈화에 대한 비전을 가지고 모듈화를 통해 프로젝트의 성과를 향상시키기 위한 방법들을 공유하는데 노력하고 있다 (CII 2012). 현재 The University of Texas at Austin의 Dr. James T. O'Connor와 본 고의 저자가 학계쪽 관리자로 이 그룹을 지원하고 있다. MCOP는 매달 첫번째 주 수요일에 화상회의를 하고 있으며 1년에 한두번씩 휴스턴이나 CII Annual Conference에서 만남을

가지고 있다.

최근 MCOP는 네가지 구현도구 (Implementation Tool) 를 개발하였고 이는 곧 CII 회원사들 사이에 공유가 될 예정이다. 이 네가지 틀은 1) 모듈화 경제성 분석 틀, 2) 모듈화 프로젝트 타이밍 안내서, 3) RT283 연구보고서 요약, 그리고 4) 모듈화 결정적 성공 요인 성취도 확인 틀이다 (그림2 결과 보고서 예시 참고). 이 외에도 MCOP는 모듈화의 장점을 널리 알리고 CII 안에서 모듈화가 Best Practice가 선정될 수 있도록 노력하고 있으며 새로운 모듈에 관한 CII 연구 주제를 제안 하는 Think Tank 역할을 하고 있다.

Summary Table		Modularization CSF Status Tool	
Project Name	Project XXX	2011/2015	2011/2015
Estimated Site-built TIC	\$	200,000,000.00	
% Manufacturing	%	25%	
Common Site Works	%	75%	
Precedent Practices	Y/N		
Relative MH Cost at Site / MH	\$	275 MH	
Relative MH Cost at Assembly Yard / MH	\$	95 MH	
Relative MH Cost at Fab Yard / MH	\$	89 MH	
Site-built Cost - Common Site Work	\$	190,000,000.00	
Prepared Site-built Cost - Module Portion	\$	80,000,000.00	
Module Cost	\$	49,491,250.00	
Installation Cost at Site	\$	41,250.00	
Shipping Cost	\$	400,000.00	
Fabrication Cost at Fab Yard (MH, S, Labor)	\$	13,000,000.00	
Module Assembly Cost at Assembly Yard	\$	26,000,000.00	
Engineering Cost	\$	6,000,000.00	
Yard Management Cost	\$	100,000.00	
Yield	\$	100,000.00	
Import Duties Cost	\$	100,000.00	
Train	\$	100,000.00	
Early Investment Cost (Finances)	\$	100,000.00	
etc.	\$	100,000.00	
Manufacturing Benefits	\$	900,000.00	
Estimate Savings Benefit	\$	400,000.00	
Manufacturing benefits	\$	500,000.00	
Safety Benefit	\$	100,000.00	
Quality Benefit	\$	100,000.00	
Benefits to Local Community	\$	100,000.00	
Contingency Benefit	\$	10,000.00	
Site Impact Benefit	\$	100,000.00	
Risk Benefit	\$	100,000.00	
Other Specified Benefits	\$	100,000.00	
Estimated Site-built TIC	\$	200,000,000.00	
Estimated Modular Project TIC	\$	184,761,250.00	
Estimated Total Cost Saving	\$	6,238,750.00	

21 MCRI CSFs	Stacked Status			Points
	None of Accomplish	Mostly Partially Accomplish	Mostly Fully Accomplish	
1 "Module Envelope Limitations" prior to Solution				N/A
2 "Alignment on Drivers" prior to Solution				3
3 "Owner's Planning Resources & Processes" prior to Solution				1
4 "Design Freeze" prior to EPC				1
5 "Early Capabilities Recognition" prior to Build Outgo				2
6 "Preliminary Module Definition" prior to Build Outgo				0
7 "Owner's Fabricating Lead Equipment Specifications" prior to Build Outgo				0
8 "Cost Savings Recognition" prior to Build Outgo				N/A
9 "Contractor Leadership" prior to Build Outgo				N/A
10 "Contractor Expertise" prior to EPC				2
11 "Module Fabrication Capability" prior to EPC				2
12 "Investment in Studies" prior to Build Outgo				3
13 "Heavy Lifting Transport Capabilities"				0
14 "Yield Improvement" prior to Build Outgo				N/A
15 "O&M Practices"				0
16 "Transport Infrastructure" prior to Build Outgo				2
17 "Owner Delay Avoidance" prior to EPC				Select One
18 "Data For Optimization" prior to Build Outgo				Select One
19 "Continuity Through Project Phases"				Select One
20 "Management of Execution Risks"				Select One
21 "Transport Delay Avoidance"				Select One

그림 2. Tool 1과 4의 결과 보고서의 예

현재 Modularization COP 이외에도 CII에는 Quality Management, Risk Management, Safety, Sustainability 등 다양한 주제로도 COP 모임들이 활발하게 활동하고 있다. 본 고의 저자는 대한민국 건설기업들도 자발적으로 모여 대한민국 건설업의 발전을 위한 모임들이 활발해지면 좋지 않을까 하는 생각에 본 고에서 미국 CII COP의 경험을 공유하였다.

### 1.3 모듈화 결정적 성공요인과 프로젝트 성과의 연관성

이 절에서는 작년 본 고 저자가 쓴 박사 논문을 간략하게 소개하고자 한다. 본 고 저자는 박사 학위 논문에서 모듈화 결정적 성공 요인 (modularization critical success factors)와 프로젝트 성과의 연관성에 대해 공업 프로젝트 중심으로 연구를 진행하여 2014도에 The University of Texas at Austin에서 Dr. James T. O'Connor 교수님의 지도하에 학위를 받았다. 이 연구는 모듈화 기법을 적용한 경/중공업 프로젝트들 (process and manufacturing facilities) 예를들어서 offshore facilities, petro-chemical plants, power plants, 등 25개의 프로젝트에서 모듈화 정보를 20개 미국 메이저 회사들에서 구하였고 이를

바탕으로 연구를 진행하여 1) 모듈화한 공업 프로젝트들의 특성을 찾아 내고, 2) 모듈화 결정적 성공 요인들의 성취도를 측정하고, 그리고 3) 모듈화 결정적 성공 요인들과 프로젝트 성과의 연관성을 찾았다 (Choi 2014). 특히 이 연구는 모듈화 결정적 성공 요인들이 Construction & Startup success, Cost & Schedule 성과에 큰 영향을 미친다는 것을 찾아 내었으며 특히 업계에서 더 노력해야하는 요소들을 찾아 내었다. 향후 본 저자는 건축과 토목 분야로 연구를 확장하여 모듈화 프로젝트들의 결정적 성공 요인들 연구를 진행할 계획이 있다.

### 1.4 토목에서의 모듈화 기법 동향

미국에서 공업부문 이외에 토목부문의 모듈화 연구 동향에 대해 간략하게 소개하자면 미국의 토목 인프라의 노후에 따른 보수나 교체에 대한 관심이 높은 상황에서 모듈화 공법은 빠르고 교통이나 주위를 방해할 덜하는 장점 때문에 최근 주목을 받고 있다. 보의 일부분을 교체하는 방법 등에도 모듈화가 쓰이고 있으나 특히 교량의 모듈화에 대한 관심이 높아지고 있으며 미국에선 이를 Accelerated Bridge Construction (ABC) 라고 부르고 있다. ABC에 대한 연구는 특히 Florida International University 주도로 2011년에 개설된 Accelerated Bridge Construction University Transportation Center이 활발히 활동하고 있다. Iowa State University 와 University of Nevada 가 파트너로 활동하고 있으며 매해 National Accelerated Bridge Construction Conference를 개최하고 있다.

ABC에 관한 가장 최근 연구는 Iowa State University 와 미국 기업들이 참여한 Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Renewal Project R04으로 (HNTB et al. 2014), 모듈화를 통한 교량 전체의 설계와 시공을 표준화된 방법으로 재빨리 복구하기 위한 방법을 연구하였다. 핵심 내용으로 표준화된 디자인으로 시공회사들이 교량 모듈을 가볍고 간단하고 쉽게 시공할 수 있는 방안들이 제시되었다.

## III. 결론

조립화나 모듈화 기술은 향후 건설산업의 생산성과 경쟁력을 향상시킬 효과적인 방법으로 앞으로 기업이나 산업 차원에서 지속적으로 연구하고 발전 시켜나가야 할 분야 중 하나이다. 본 고에서는 이에 미국에서 최근 진행되었던 모듈화에 대한 연구들과 CII MCOP의 활동에 대해 소개하였다. CII RT283 연구팀은 더 광범위적이고 효과적인 모듈화 사용을 위한 최적의 환경을 만들기 위한 해법으로 다섯가지 해법 요소들을 제시하였고

본 고의 저자는 2014 박사학위 논문 연구에서 모듈화 결정적 성공요인과 프로젝트 성과의 연관성을 찾아 이 요인들의 중요성을 강조하였다. 이들 연구들은 한단계 높은 모듈화를 통한 더 높은 프로젝트 성과를 가져오는데 기여할 것으로 기대하고 있다. CII Modularization COP업계 소그룹은 모듈화에 대한 비전을 가지로 기업들을 위한 다양한 툴들을 개발하고, 모듈화의 장점을 홍보하며, 새로운 모듈에 관한 연구 주제들을 제안하는 등 활발하게 활동하고 있다. 토목부문의 모듈화의 경우 미국의 토목 인프라의 노후에 따른 보수나 교체에 대한 수요로 인해 빠르고 교통이나 주위를 방해할 줄이는 ABC공법이 주목을 받고 있으며 연구/개발이 활발히 진행되고 있다. 대한민국은 모듈화 기법으로 세계 1위를 달성한 조선업의 노하우, 기법, 장비들을 보유하고 있다. 건설업이 이를 적극적으로 받아들인다면 대한민국 건설산업이 한단계 발전하여 세계적인 경쟁력을 확보할 것이다. 이를 위해 건설업의 조립식/모듈화 기법에 관련된 분야의 적극적인 연구/개발이 필요하다고 사료된다.

## 참고문헌

Choi, J. (2014). "Links between Modularization Critical Success Factors and Project Performance." Ph.D., The University of Texas at Austin, Austin, TX.

CII (2012). "CII Modularization Community of Practice Charter." The University of Texas at Austin: Construction Industry Institute.

CII (2012). "Industrial Modularization: How to Optimize; How to Maximize." The University of Texas at Austin: Construction Industry Institute, Austin, TX, RS283-1

CII (2013). "Industrial Modularization: Five Solution Elements." The University of Texas at Austin: Construction Industry Institute, Austin, TX, IR283-2

HNTB, Genesis Structures, Structural Engineering Associates, and Iowa State University. (2014). Innovative Bridge Designs for Rapid Renewal, Transportation Research Board of The National Academies, Washington, D.C.

McGraw-Hill (2011). "Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry." SmartMarket Report.

NRC (2009). "Advancing the Competitiveness and Efficiency of the U.S. Construction Industry." National Research Council, Committee on Advancing the

Competitiveness and Productivity of the U.S. Construction Industry, ed., The National Academies, The National Academies Press, Washington, D.C., 122.

O'Connor, J. T., O'Brien, W. J., and Choi, J. (2013). "Industrial Modularization: How to Optimize; How to Maximize." The University of Texas at Austin: Construction Industry Institute, Austin, TX, RR283-11

■ 최진욱 E-mail: jchoi@iastate.edu; choi.jinouk@gmail.com