

식스-시그마를 이용한 군 독신자 숙소용 모듈러 건축 시스템 개발

Development of a Modular Building System for the BOQ Using Six-sigma

조 봉 호*
Cho, Bong-Ho

이 재 승**
Lee, Jae-Sung

차 희 성***
Cha, Hee-Sung

요 약

군 내무생활관, 독신자 숙소 등은 동일한 평면이 반복되면서 대량으로 건설되는 대표적인 공공건축물이다. 이들 건축물들은 향후 군 구조개편시 부대의 이동, 재편에 따라 건축물의 해체 및 재사용 등이 요구되는 경우도 있다. 이러한 이유로 2005년 이래 군 건축물에 대해 철골조 기반의 공업화 건축공법인 모듈러 공법의 도입이 이루어져 왔다. 군 건축물에 모듈러 공법을 적용함에 있어 가장 중요한 요소는 표준화를 통한 공사비 절감, 건축물의 해체 및 재사용의 용이성 등이거나 기존의 모듈러 군시설들은 이러한 요구를 만족시키지 못하였다. 본 연구는 향후 많은 수요가 예측되며 표준화된 모델을 적용하기 용이한 군 독신자 숙소를 대상으로 식스-시그마 방법론을 이용한 모듈러 건축 시스템을 제안한다. 식스-시그마방법론을 적용하면 개발 단계에서 고객 요구사항을 주요 설계요소인 CTQ에 반영할 수 있고 이를 기반으로 설계 컨셉의 도출이 가능하다. 분석 결과 공사비 절감은 면적당 골조 중량, 재사용 용이성은 공장제작 비율의 지표로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 BOQ시스템은 기존의 모듈러 시스템에 비해 공장제작비율은 약 80% 향상되고, 면적당 골조의 중량은 기존 모듈러 시스템에 비해 62% 절감되어 충분한 경쟁력을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

키워드 : 식스-시그마, 모듈러 건축물, QFD, 푸-매트릭스, 군 독신자 숙소

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

모듈러 건축물은 공장에서 제작된 3차원 건축 모듈을 현장에서 운송하여 조립, 완성하는 공업화 건축 시스템으로, 유럽, 일본 등에서는 다양한 분야에 적용되고 있다(Lawson, 2008). 국내에서는 2003년 이후 포항산업과학연구원, 한국건설기술연구원 등에서 개발하여 학교, 군막사, 해외수출용 건축물 등에 적용되고 있다.(조봉호, 2007, 김홍렬, 2009)

군 내무생활관, 독신자 숙소 등은 동일한 평면이 반복되면서 대량으로 건설되는 대표적인 공공건축물이다. 또한 향후 군 구조개편시, 부대의 이동 및 재편 등으로 해체 및 재사용 등이 요

구되기도 한다. 군은 현재 전국적으로 약 10만여 동, 2,520만 m²의 방대한 시설을 보유하고 있으나 이중 20년 이상 경과된 노후시설이 전체의 약 30%를 차지하고 있어 병영시설 개선을 위한 신공법의 도입이 요구되고 있다(박재식, 2006). 이러한 이유로 2005년 이래 군 시설에 대한 모듈러 공법의 도입이 이루어져 왔으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 2005년 소초급 내무생활관을 시작으로, 군 오피스 시설, 대대급 내무생활관, 군독신자



그림 1. 군시설에 대한 모듈러 공법 적용 사례

* 일반회원, 아주대학교 건축공학과 조교수, 공학박사, bhcho@ajou.ac.kr

** 일반회원, 한남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사(교신저자), jaesung@hnu.kr

*** 종신회원, 아주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사, hscha@ajou.ac.kr

숙소 등 다양한 용도로 적용되고 있다.

군 건축물에 모듈러 공법을 적용함에 있어 가장 중요한 요소는 표준화를 통한 공사비 절감, 건축물의 해체 및 재사용 용이성 등이나 기존의 모듈러 군시설들은 이러한 점에서

만족스럽지 못한 것으로 평가되었다(박재식, 2006). 군 독신자 숙소(Bachelor Officer's Quarters ; BOQ)는 표준화가 쉬워 공업화 시스템을 이용한 신공법 적용이 용이한 건축물 유형으로 평가된다. 본 연구에서는 식스-시그마 연구방법론을 이용하여 군 독신자 숙소에 특화된 모듈러 건축 시스템을 개발하였다. 개발 초기 단계에서 고객 요구사항을 주요 설계 지표에 반영하고 이를 기반으로 설계 컨셉을 도출하였다. 분석 결과, 공사비 절감은 면적당 골조 중량, 재사용 용이성은 공장제작 비율의 지표로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 식스-시그마 방법론을 BOQ시스템 제품 개발 전 과정에 적용하였다. 식스-시그마는 1980년대 모토로라사에서 처음 개발되어 사용된다(Pheng, 2004) 1990년대에 GE사의 잭 웰치 등에 의해 전 세계적으로 널리 알려졌고, 1990년대 후반 이후 국내의 다수 제조업 분야의 대기업들이 생산성 향상과 프로세스 개선, 신제품 개발 등에 적용하고 있는 혁신 방법론이다(김세준, 2006).

본 연구에서는 BOQ개발과 관련하여, 고객(군)의 요구도출, 최적의 BOQ설계를 위한 QFD (Quality Function Deployment)방법론 적용 및 CTQ정의, 최적 컨셉안 도출을 위한 Pugh 매트릭스 적용 등 식스-시그마의 대표적인 방법론을 적용하였다.

건설 분야에 있어서 건설정보(권오철, 2010)나 공사관리(Pheng, 2004)등의 분야에서 식스-시그마를 이용한 사례나, 주택의 설계 등에 적용되었거나(Johnson, 2006), 건축자재 개발에 식스-시그마를 적용한 사례(조봉호, 2010)는 있으나, 본 연구와 같이 건축 시스템 전반의 개발에 적용된 경우는 거의 없다. 이는 향후 건설 분야에서 식스-시그마 방법론의 적용 영역을 확대할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

2. 개선기회 확인 및 문제 정의

2.1 개선 기회

대표적인 군 시설인 내무생활관과 군 독신자 숙소에 대한 모듈러 공법 적용 특성은 표 1과 같다. 국내 내무생활관의 경우

3~4개의 모듈을 조합하여 하나의 단위공간을 형성하며 다수의 적용 사례가 있으나 공장 제작율이 떨어지고 재사용 성능이 떨어지는 문제가 지적되었다(박재식, 2006). 반면 BOQ의 경우 해외에서는 대부분의 군시설이 독신숙소 형태로 적용되고 공장제작율이 높아 모듈러 공법 적용시 군에서 요구하는 재사용을 향상 등이 가능할 것으로 분석되었다.

표 1. 내무생활관과 BOQ비교

구분	내무 생활관	BOQ
실 구성 방법	3~4개 모듈을 이용해 단위 내무생활관 구성	1개 모듈이 1개 실 구성
단위 평면		
국내외 모듈러 공법 적용 사례	현황	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 : 적용사례 미미 · 해외 : 대부분 군시설이 독신숙소 위주로 적용됨
	특징	<ul style="list-style-type: none"> · 공장제작율 저하(약 50~60%) · 해체, 재사용을 저하 : 접합부위 다수, 실간 설비배관 관통 등의 이유로 이동 및 재사용 성능 저하

2.2 공사비 분석

모듈러 공법은 표준화된 모듈의 대량 생산을 통해 공사비 절감이 가능하나 기존의 군 공사의 경우 소량 생산으로 인해 RC대비 공사비가 오히려 상승하였고, 전체 공사비 중에서는 골조공사비가 가장 과다하게 소요되는 것으로 분석되었다. 그림 2는 9개의 RC 군시설과 2개의 모듈러 군시설의 공사비를 비교한 그래프로, 유사한 총 공사비 수준에서 모듈러 공법의 골조 공사비가 과다하게 소요됨을 알 수 있다.

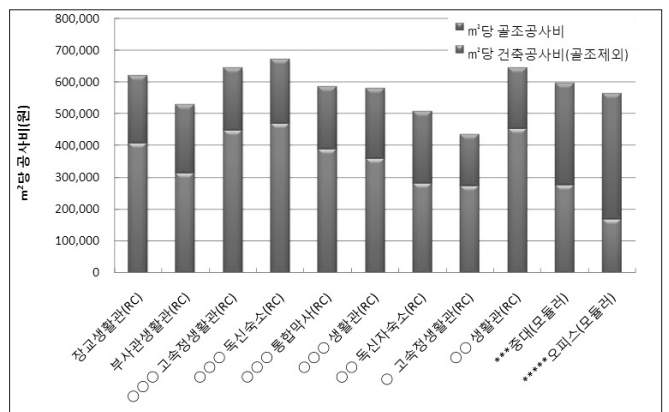


그림 2. RC 및 모듈러 공법 공사비 비교

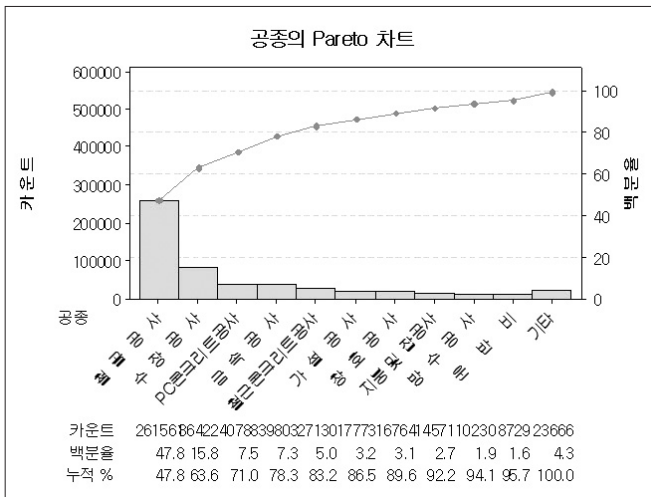


그림 3. **오피스(모듈러 공법)의 공종별 공사비

그림 2의 군시설 중 모듈러 공법을 적용한 4층 규모 오피스 건물인 **오피스 시설의 공종별 공사비를 살펴보면, 그림 3에서 보는 바와 같이 내화페인트를 포함한 철골공사의 공사비 비율이 47.8%에 달함을 알 수 있다.

따라서 가격 경쟁력 향상을 위해서는 골조 공사비 절감이 필수적인 것으로 평가되었다.

그림 4는 본 연구에서 개발하고자 하는 BOQ시스템 개발 프로세스를 공급자(Supplier)와 투입요소(Input), 프로세스, 산출물(Output) 및 고객(Customer)로 구분하여 나타낸 SIPOC 다이어그램을 나타낸다.

3. 군독신자숙소 CTQ도출

모듈러 공법을 이용한 군독신자 숙소의 요구조건을 도출하기 위해 내부고객과 외부고객으로 나누어 고객을 분석하면 내부고

객은 설계사무소, 모듈 제작사, 시공사 등으로 구분되며, 외부 고객은 발주처, 사용자(부사관, 장교)등으로 구분된다.

각 고객들이 군독신자숙소에 대해 요구하는 고객 요구사항은 표 2와 같다. 표 2는 주요 고객들에 대한 면담 조사를 통해 정리한 데이터로, “원시데이터”는 고객들이 직접적으로 원하는 요구사항을 나타내며, “요구품질”은 각 고객들이 주어진 환경에서 요구하는 제품을 품질을 나타낸다.

표 2. 주요 고객별 BOQ요구품질

고객	원시 데이터	Scene			요구 품질
		Who	Where	When	
설계 사무소	획일화된 디자인으로 외관이 수려하지 않다.	설계사가 개발된 BOQ 모듈을 이용하여 BOQ의 외관을 디자인함			미려한 외관의 디자인이 가능하다.
제작사	너무 다양한 자재들을 사용한다. 전방지역에서의 모듈 운송이 어렵다. 모듈 운송에 비용이 많이 든다.	제작사가 공장에서 주요 자재들을 재고로 확보하여 BOQ용 모듈을 제작함			표준화된 자재를 사용한다. 전방지역에서의 모듈 운송이 용이하다.
시공사	운송과 시공 중 모듈에 손상이 발생한다.	시공사가 제작된 BOQ용 모듈을 이용하여 BOQ 시설을 시공함			운송 중 강우 및 손상에 안전하다.
발주처	기존 공법 대비 공사비가 저렴하지 않다.	발주처가 기존 공법과 모듈러 공법의 공사비를 비교하여 BOQ용 공법을 선정함			공사비가 저렴하다.
	해체 후 재사용 가능 부위가 많지 않다.	발주처가 BOQ를 수년~수십년 사용 후 해체하여 이동, 재사용함			해체 및 재사용이 용이하다.
사용자	기존 BOQ 시설의 주거성이 열악하다.	전방지역의 육군 독신 부사관, 장교들이 일과 후 숙소로 BOQ를 사용함			열환경이 우수하다. 빛환경이 우수하다. 음환경이 우수하다.

1차 인터뷰를 통해 도출된 VOC(Voice of Customer)로부터 도출된 요구품질은 그림 5의 QFD의 HOQ(House of Quality)를 통해 설계를 위한 품질특성으로 변환된다.

그림 5의 <1. 요구품질 전개표>는 표 2의 고객요구품질로부터 전개된 항목들로, 이들 요구품질에 대한 2차 고객 설문조사를 통해 중요도 및 만족도를 평가하였다.

그림 6은 BOQ에 대한 고객들의 중요도 및 만족도를 나타낸

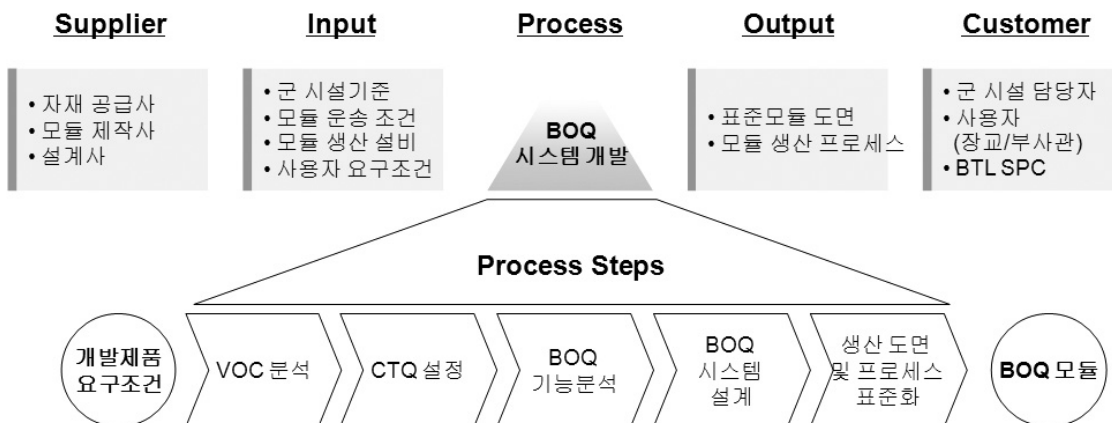


그림 4. BOQ개발 프로세스(SIPOC)

다. 특히 공사기간, 조립해체의 용이성, 모듈간 호환성, 공사비 등의 항목에서 중요도는 높으나, 기존 시스템에 대한 만족도는 떨어지는 것을 알 수 있다.

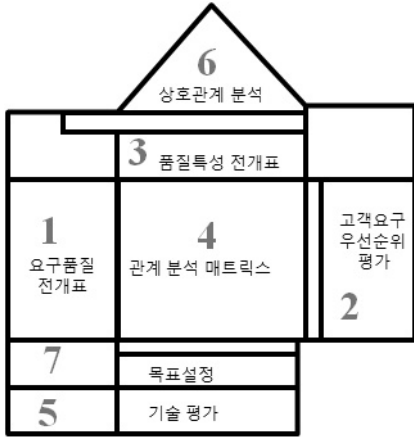


그림 5. QFD를 위한 HOQ 기본 구조

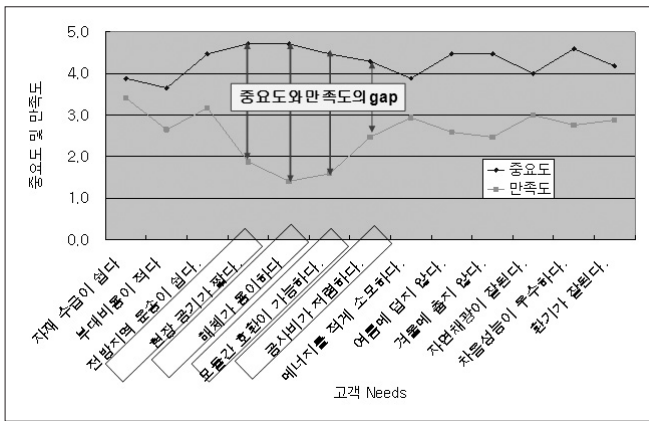


그림 6. 주요 요구품질에 대한 고객 중요도 및 만족도 평가

표 3. 요구품질 우선순위 선정

고객 요구	1) 고객 요구 중요도	2) 기존 제품 만족도	기획			WT		순위
			3) 기획품질점	4) 레벨별점	5) 세일즈포인트	6) 대용량대점	7) 요구품질WT	
자재 수급이 쉽다	3.9	3.4	5	1.5		5.8	5.40%	6
부대비용이 적다	3.7	2.7	3	1.1		4	3.70%	11
전방지역 운송이 쉽다.	4.5	3.2	5	1.6	◎	10.7	9.90%	4
현장 공기가 짧다.	4.7	1.9	5	2.7		12.7	11.80%	3
해체가 용이하다	4.7	1.4	5	3.5	◎	24.7	23.00%	1
모듈간 호환이 가능하다.	4.5	1.6	3	1.9	○	10.2	9.50%	5
공사비가 저렴하다.	4.3	2.5	5	2	◎	12.9	12.00%	2
에너지를 적게 소모하다.	3.9	2.9	2	1		3.9	3.60%	13
여름에 덥지 않다.	4.5	2.6	2	1		4.5	4.20%	9
겨울에 춥지 않다.	4.5	2.5	3	1.2		5.4	5.00%	7
자연채광이 잘된다.	4	3	2	1		4	3.70%	11
차음성능이 우수하다.	4.6	2.8	2	1		4.6	4.30%	8
환기가 잘된다.	4.2	2.9	2	1		4.2	3.90%	10

- 1) 중요도 : 설문조사를 통해 평가한 고객의 중요도(1점~5점)
- 2) 만족도 : 설문조사를 통해 평가한 기존제품(1점~5점)
- 3) 기획품질 : 개발자 측면에서 확보 가능한 품질 수준(1점~5점)
- 4) 레벨점 : 3)/2)
- 5) 세일즈 포인트 : 개발자 측면에서 세일즈 포인트(◎:15, ○:12)
- 6) 절대 중요도 : 1) · 4) · 5)

고객 설문조사 결과를 이용해 그림 5의 HOQ의 고객요구 우선순위 평가를 실시한 결과는 표 3과 같다. 평가 결과 “해체 용이성”, “공사비 절감”, “현장공기 단축” 등이 가장 높은 우선순위를 갖는 것으로 평가되었다.

QFD를 이용한 다음 분석 단계는 개발하고자 하는 제품과 관련된 “품질특성 전개”로, 품질특성은 측정 가능한 정량적 지표로 표현된다. BOQ의 주요 요구품질과 관련된 품질특성은 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

표 4. BOQ의 주요 품질 특성

품질특성(1차 level)	품질특성(2차 level)
골조 물량	면적당 골조 중량
재사용율	모듈 공장제작 비율
	현장 접합부 개수
표준화율	구조재 종류수
	건물당 모듈 종류수
모듈 치수	모듈 높이
	모듈 길이
	모듈 폭
주거 성능	창호 면적
	실간 차음 성능
	외벽 단열 성능

표 4의 품질특성과 표 3의 요구품질간의 상관관계 분석을 통해 품질특성의 우선순위를 구할 수 있다. 표 5는 요구품질-품질특성 상관관계 분석을 통한 품질특성 중요도 평가 결과는 나타낸다.

11가지 품질 특성 중 상위 6개 항목을 잠재적 CTQ 로 선정하여 현 수준을 파악하고, 개발 목표치를 설정하였다. 표 6은 상위 6개 품질특성의 특성 및 현수준(기존 내무생활관용 모듈 기준)을 나타낸다.

표 6. 잠재적 CTQ의 현수준 파악

우선 순위	잠재적 CTQ	특성 구분	Spec(현수준)		비고
			현 모듈러 군막사 (대대급막사, 연면적 : 3,322.35m ² 기준)		
1	모듈 공장제작 비율	망대	42%		순 공사 금액 중 공장제작 부분 금액 (형성 대급막사 기준)
2	현장 접합부 개수	망소	0.15개 / m ²		
3	건물당 모듈 종류 수	망소	5개		
4	구조재 종류 수	망소	6개		
5	모듈 면적당 골조 중량	망소	77.9 kg/m ²		보, 기둥 및 보조철물 포함
6	모듈 길이	망소	6m		

표 5 요구품질-품질특성 상관관계 분석

고객 요구	요구 품질		재사용율		표준화율		모듈 치수			주거 성능			고객 요구 중요도	기존 제품 만족도	기획			WT		순위
	모듈 면적 당 골조량	모듈 공장 제작 비율	현장 접합부 개수	구조재 종류 수	건물당 모듈류 수	모듈 높이	모듈 길이	모듈 폭	창호 면적비	실간 차음 성능	외벽 단열 성능	기획 품질			레벨업율	세일즈 포인트	절대 중요도	요구 품질 WT		
자재 수급이 쉽다				◎	○								3.9	3.4	5	1.5		5.8	5.40%	6
부대비용이 적다	○	○		○	◎								3.7	2.7	3	1.1		4	3.70%	11
전방지역 운송이 쉽다.	○					○	◎	○					4.5	3.2	5	1.6	◎	10.7	9.90%	4
현장 공기가 짙다.		◎	◎		△								4.7	1.9	5	2.7		12.7	11.80%	3
해체가 용이하다		◎	◎		△								4.7	1.4	5	3.5	◎	24.7	23.00%	1
모듈간 호환이 가능하다.					◎								4.5	1.6	3	1.9	○	10.2	9.50%	5
공사비가 저렴하다.	◎			◎		○	○	○					4.3	2.5	5	2	◎	12.9	12.00%	2
에너지를 적게 소모하다.									○		◎		3.9	2.9	2	1		3.9	3.60%	13
여름에 덥지 않다.									○		◎		4.5	2.6	2	1		4.5	4.20%	9
겨울에 춥지 않다.									○		◎		4.5	2.5	3	1.2		5.4	5.00%	7
자연채광이 잘된다.						○			◎				4	3	2	1		4	3.70%	11
처음성능이 우수하다.										◎			4.6	2.8	2	1		4.6	4.30%	8
환기가 잘된다.						○			◎				4.2	2.9	2	1		4.2	3.90%	10
품질특성 중요도	160	349	337	180	183	95	135	71	115	41	124						100%			
품질특성WT	8.90%	19.50%	18.80%	10.10%	10.20%	5.30%	7.50%	4.00%	6.40%	2.30%	6.90%	100%								
순위	5	1	2	4	3	9	6	10	8	11	7									

다음 단계에서는 표 6의 잠재적 CTQ에 대해서 현수준 파악 및 벤치마킹 등의 기술분석을 통해 개발 목표치를 설정한다. 본 연구에서는 영국의 "T"사의 군모듈러 시스템을 벤치마킹하여 목표 수준을 표 7과 같이 설정하였다.

표 7. 잠재적 CTQ의 목표 수준 설정

잠재적 CTQ	모듈 공장 제작 비율	현장 접합부 개수	건물당 모듈 종류 수	구조재 종류 수 *	면적당 골조 중량 *	모듈 길이
CTQ WT (%)	19.5	18.8	10.2	10.1	8.95	7.54
특성구분	망대	망소	망소	망소	망소	망소
Targets	70%	0.17개/m ²	4개	3개	60 kg/m ²	6m

Competitive Benchmark	5
	4
	3
	2
	1

* 영국 Terrapin사 BOQ의 경우, 내력벽형식으로 구조재 종류수, 면적당 골조 중량 등은 직접 비교가 어려움

표 7의 잠재적 CTQ 중 “건물당 모듈 종류수”, “구조재 종류수” 등은 사례별로 차이가 크고 “현장 접합부 개수”는 정량화하기 어렵다. 또한 “모듈 길이”의 경우 개선효과가 크지 않다고 판단되어 최종 CTQ는 “모듈 공장제작 비율”과 “모듈 면적당 골조

중량”의 2가지로 선정하였다. 선정된 CTQ에 대한 운용정의 및 목표 수준은 표 8과 같다.

표 8. CTQ운용정의 및 측정정의

CTQ	특성	운용정의	측정 방법	현수준	목표 수준	목표수준 설정 근거
				기존 모듈러 군막사		
모듈 공장제작 비율	망대	전체 순 공사비 중 공장에서 제작, 시공되는 부분의 재료, 노무, 경비	최종 설계도서 기반 내역서 중 공정제작 부분 측정	42%	80%	영국 선진 기술의 경우 85~90% 수준으로 이에 근접하는 값을 목표수준으로 설정함
면적당 골조 중량	망소	단위 면적당 모듈러 유닛 철골 골조 중량	최종 설계도서 내역서 측정	77.9 kg/m ²	60 kg/m ²	기존 시스템의 약 80% 수준임

4. 군독신자숙소 설계 컨셉 도출

앞에서 도출된 CTQ에 따라 BOQ시스템을 설계하기 위해서 주요 기능을 도출하였다. 주요 핵심기능은 “모듈운송기능”, “모듈조립기능”, “모듈사용기능” 등으로 주요 기능별 요구사항은 그림 7과 같다.

핵심 기능	상세 기능	요구사항(Target)
모듈 운송 기능	운송 중 강우 대응 기능	운송 중 강우 침입 방지
	트레일러 적재 기능	운송 중 모듈 고정
	육교 통과 기능	바닥부터 모듈 상부 4.3m 이하
모듈 조립 기능	모듈 양중 기능	모듈 양중 중 모듈 손상 미발생
	모듈 위치 맞추기 기능	허용오차 2mm 이하
	중복도 포함 모듈 접합 기능	고력볼트 접합 가능
	설비 배관 접합 기능	현장 설비 접합부위 최소화
	전기 배관 접합 기능	현장 전기 접합부위 최소화
모듈 사용 기능	내장재 접합 기능	현장 내장재 접합부위 최소화
	외장재 접합 기능	현장 외장재 접합부위 최소화
	연직하중 저항 기능	바닥, 지붕의 DL, LL 저항
	수평하중 저항 기능	풍하중, 지진하중 저항
	방수 기능	지붕 우수 처리 및 방수
	차음 기능	실내, 실외의 차음 성능 만족
	단열 기능	실내외 단열 성능 만족
방화 기능	충단 방화 가능	
배수 기능	화장실 배수 가능	

그림 7. BOQ주요 기능 및 요구사항

다음 단계에서는 표 5와 동일한 방법으로 품질특성-기능 상관관계를 분석하고, 주요 기능별 설계 컨셉을 도출하였다. 품질특성과 기능의 상관 관계표는 표 9와 같다.

분석 결과 “외장재 접합 기능”, “설비배관 접합 기능”, “운송 및 시공 중 강우 대응 기능”, “중복도 포함 모듈접합 기능”, “트레일러 적재 기능” 등이 높은 우선순위를 갖는 것으로 평가되었다.

주요 설계기능에 대한 솔루션을 도출하고 이들 솔루션을 조합하여 잠재적 설계 컨셉을 도출하였다. 표 10은 주요 기능별 솔루션을 나타낸다. 예를 들어 외장재 접합 기능에 대응하는 솔루션으로 창호의 위치와 모듈간 접합부위의 외장재 설치 방법에 따른 3가지 솔루션을 도출하였다.

표 10의 솔루션을 조합하면, BOQ의 설계 컨셉안을 만들 수 있다. 예를 들어, 솔루션 a, I, i 등 3가지를 조합하면 그림 8과 같은 설계컨셉이 도출된다.

표 10. 기능별 솔루션 도출

상세 기능	Solution		
외장재 접합 기능	Sol. 1 각 실의 정중앙에 창호가 위치함 	Sol. 2 창호가 한쪽으로 치우치게 디자인함 	Sol. 3 광폭 창호로 현장에서의 외장재 접합부위 최소화
설비배관 접합 기능	Sol. A 화장실의 복도쪽에 Pipe shaft를 설치하여 배관 연결 수평배관은 모듈에 설치하여 현장에서 운송하고, 수직배관을 현장에서 설치함 		
운송 중 강우 대응 기능	Sol. a 지붕을 별도 모듈로 제작. 모듈은 천 지붕모듈, 2층모듈, 1층모듈 지붕모듈별도 운송 	Sol. b 2층 모듈에 지붕구조를 포함하여 운송 및 시공중 강우에 대응 방수시트, 방수시트 	
중복도 포함 모듈 접합 기능	Sol. I 복도부분을 바닥패널로 구성 4개 지붕용모듈 + 바닥패널 + 4개 지붕용모듈 	Sol. II 복도부를 캔틸레버로 구성 4개 지붕용모듈 + 바닥패널 + 4개 지붕용모듈 	Sol. III 중복도를 포함한 장스팬 모듈로 구성 4개 지붕용모듈 + 장스팬모듈 + 4개 지붕용모듈
트레일러 적재 기능	Sol. I 동시에 2개 모듈 운송 		Sol. II 기존 방식대로 1개 모듈 운송

이와 같은 방법으로 총 5가지 설계 컨셉안을 도출하였다. 도출된 설계안에 대해서는 Pugh 매트릭스를 이용해 기존 시스템

표 9. 기능 품질특성 관계

품질특성	기능	운송기능			모듈 조립기능						모듈 사용기능							
		운송 중 강우 대응 기능	트레일러 적재 기능	육교 통과 기능	모듈 양중 기능	모듈 위치 맞추기 기능	구조재 접합 기능	설비 배관 접합 기능	전기 배관 접합 기능	내장재 접합 기능	외장재 접합 기능	연직하중 저항 기능	수평하중 저항 기능	방수 기능	차음 기능	단열 기능	방화 기능	배수 기능
모듈 공장제작 비용		◎	○			○	◎	○	○	◎				○				
현장 접합부 개수		○				◎	◎	○		◎		○					○	
건물당 모듈 종류수						○					○							
구조재 종류수					◎													
면적당 골조 종량			◎		◎	○					○	○						
모듈 길이														○	○			
외벽 단열 성능																◎		
창호 면적비										○								
모듈 높이				◎														○
모듈 폭			◎															
실간 차음 성능													◎					
품질특성WT (%)		10.60%	8.00%	2.20%	7.80%	2.60%	10.40%	15.70%	5.20%	2.70%	16.60%	2.60%	3.80%	2.70%	2.00%	3.70%	2.60%	0.70%
순위		3	5	15	6	12	4	2	7	10	1	12	8	10	16	9	14	17

과의 주요 항목별 우열을 평가하였다. 표 11은 Pugh매트릭스를 이용한 최적 설계안 도출 결과를 나타낸다.

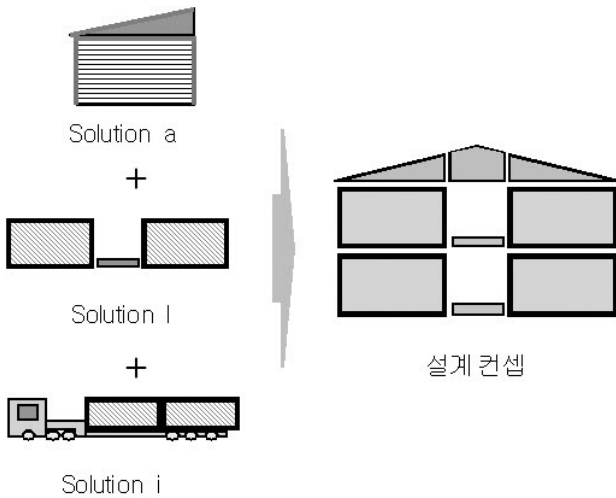


그림 8. 기능별 솔루션 조합을 통한 설계컨셉 도출

분석 결과 Concept 2가 가장 높은 점수를 갖는 것으로 평가되었다.

표 11. Pugh 매트릭스를 이용한 최적 설계안 도출

설계 컨셉안	기준 시스템	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4	Concept 5
Key Criteria	가중치					
골조공사비	5	S	S	+	S	S
운송용이성	3	S	+	+	+	-
재사용성	5	S	S	+	-	+
현장공기	3	S	-	+	-	+
국방시설기준	4	S	S	S	+	+
제작 비용	4	S	+	-	S	-
표준화	4	S	+	-	S	+
지재권	2	S	S	+	+	S
Sum of positives	0	3	5	3	4	3
Sum of negatives	0	1	2	2	2	3
Sum of sames	8	4	1	3	2	2
Weighted sum of positives	0	12	18	10	16	12
Weighted sum of negatives	0	-3	-8	-7	-8	-12

5. 상세설계 및 설계 검증

5.1 상세 설계

다음 단계에서는 앞에서 도출된 설계안에 대한 상세 설계를 수행하였다. 그림 9는 설계를 위해 사용한 기존의 RC BOQ평면도를 나타낸다.

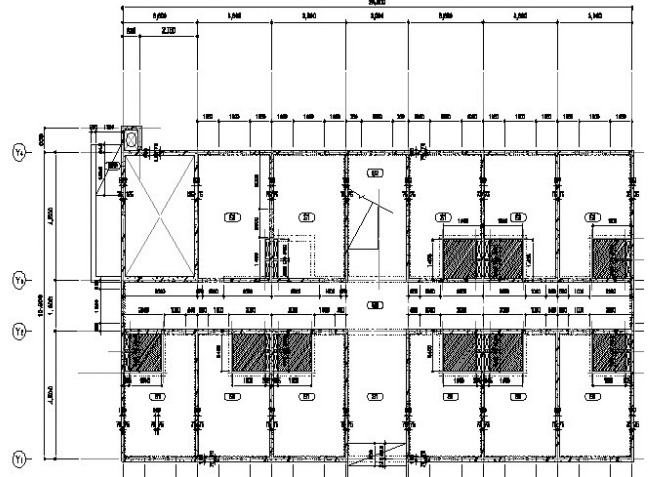


그림 9. 비교대상 RC BOQ(2층, 연면적 530m²)

1인용 BOQ의 단위 실은 공장에서 제작되는 모듈과 동일한 크기로 설계하였다. 단위 실은 폭 3.3m로 설계되며, 공장제작을 극대화를 위한 창호 및 배관 새프트를 갖도록 설계된다. 표 12는 단위실 평면 설계 결과를 나타낸다.

표 12. 단위실 평면 상세 설계

기능 module 명 : 1. 외장재 설계 기능 / 2. 설비배관 접합 기능	상위수준 설계요소	단위 실 평면 설계
정의	1인 사용 BOQ 단위 실 평면 설계	
As is	To be	
-RC 골조에 의한 단위평면 -폭 3.6m * 길이 4.5m (16.2 m²) - 화장실 배관 새프트 측벽쪽에 설치	- 운송을 고려한 폭-길이 적용 (폭 3.3m * 길이 4.9m : 16.17 m²)	
개선 Point	모듈화 고려 단위실 폭, 길이 설계 / 공장제작을 극대화를 위한 창호 및 배관 새프트 설계	
기대 효과	국방시설기준 충족	
산출물	단위 실 평면 도면(단위실 폭, 길이, 화장실 폭, 길이, AD, PD위치, 창호 크기 등)	

단위실 설계 결과 폭을 3.3m로 하고, 공장제작을 극대화하기 위한 창호 및 배관 새프트를 설계하였다.

표 13은 횡단면 상세 설계 결과를 나타낸다. 앞에서 도출된 설계 컨셉과 같이 상부 모듈에 지붕 프레임을 일체화함으로써, 골조 물량을 최소화하면서 공장제작을 높일 수 있도록 하였다.

BOQ 모듈 골조 설계와 관련해서는 총 4 종류의 단위 골조를 조합하도록 설계하였다. 표 14와 같이 중복되는 모듈의 측면에

캔틸레버 형식으로 부착하여 현장 작업을 최소화하면서도, 기둥이 중복되는 부위를 없애서 최적 골조설계가 가능하도록 하였다.

표 13. 횡단면 상세 설계


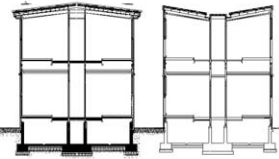
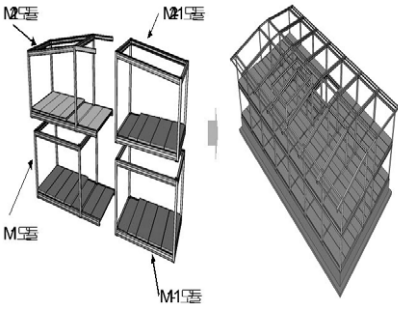
기능 module 명 : 1. 외장재 설계 기능 /2. 설비배관 접합 기능	상위수준 설계요소	BOQ 횡단면 설계
정의	1인 사용 BOQ 단위 실 평면 설계	
As is	To be	
-RC 골조 단면 -천장고 : 2.4 m -지붕 경사도 3/10 확보	- 경사 방향에 따라 2가지 횡단면 안 설계 - 천장고 2.4m확보(2층은 평균 천장고 2.4m확보) : 최대 지붕 경사도 1/10 - 복도부 천장을 통한 황배관 관통 - 수직배관의 기초 피트층 연결 및 기초 피트층에서의 연결	
		
개선 Point	국방시설기준을 만족하면서 모듈 height를 최소화함	
기대 효과	충고저감 효과	
산출물	단위 실 평면 도면(단위실 폭, 길이, 화장실 폭, 길이, AD, PD위치, 창호 크기 등)	

표 14. BOQ 모듈 골조 설계

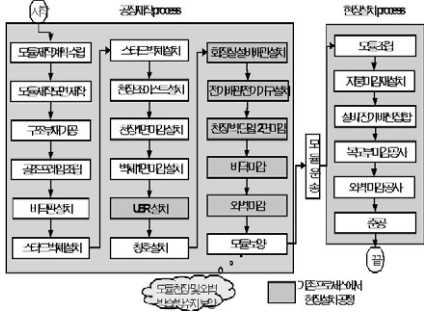
기능 module 명 : 3. 중복지 포함 모듈 접합 기능/4. 트레일러 적재기능	상위수준 설계요소	BOQ 모듈 골조 설계
정의	4개 모듈 타입으로 구성된 모듈 골조 설계	
To be		
		
개선 Point	4개 type골조를 이용해 골조 최적화	
기대 효과	골조 물량 최소화	
산출물	4개 type골조 도면, 자재 list	

다음으로 모듈의 공장제작 및 현장설치 프로세스를 설계하였다. 기존 프로세스의 현장 설치 공정 중 7개를 공장제작이 가능하도록 하여 공장 제작율을 극대화 하였다.

그림 15는 공장제작/현장설치 프로세스 맵을 나타낸다.

상세 설계 결과 최종 BOQ설계안은 그림 10과 같다. 최종 BOQ설계안은 그림 9의 20인실 RC BOQ와 동일한 규모를 가지며, 28개의 모듈러 유닛을 조합하여 시공이 가능하다.

표 15. BOQ 모듈 골조 설계

기능 module 명 : 5. 모듈 운송 및 시공 중 강우 대응 기능	상위수준 설계요소	BOQ 모듈 골조 설계
정의	공장제작 및 현장설치 공정의 상위 프로세스 맵 설계	
To be		
		
개선 Point	공장제작 비율 극대화 및 운송 중 손상방지를 위한 마감 디테일 개선	
기대 효과	재사용율 향상	
산출물	프로세스 맵	

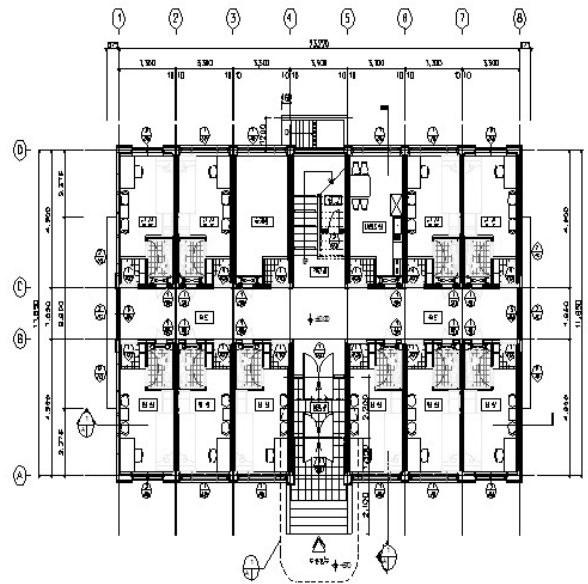


그림 10. BOQ최종 설계안

5.2 설계 검증

최종 설계된 설계안에 대해설계 검증을 실시하였다. 표 8의 CTQ와 추가적으로 공사비를 평가함으로써 개발 시스템의 적합성을 검증하였다. 최종 설계 검증 항목은 및 평가 방법은 표 16와 같다.

첫 번째 항목인 공장 제작율은 최종 설계안에 대한 설계 내역서의 공사비를 기준으로 평가하였다. 비교대상인 기존의 군내무생활관의 공장제작비율이 42%임에 비해, 본 연구 결과 설계된 모듈러 BOQ의 공장제작 비율은 75.19%로 공장제작율이 약

80% 향상(33.19% 포인트 향상)된 것으로 평가되었다. 이는 대부분의 설비배관 및 실내 마감공정이 공장에서 이루어졌기 때문으로, 그림 11은 기존 모듈러 시스템과의 공장제작 및 현장설치 프로세스를 비교하여 나타낸다.

표 16. 설계 평가 항목

평가항목	평가 방법	비교 대상	목표치
모듈 공장제작 비율	건축 순공사비 중, 기초공사비 및 운반비 등을 제외한 순공사비 중 공장제작 비율 측정(공사비 기준)	기존 모듈러 시스템	70%
면적당 골조 중량	면적당 철골 골조 (벽체와 천장구조를 제외한)의 중량비 측정	기존 모듈러 시스템	60 kg/m ²
공사비	설계내역서상의 건축 공사비 평가(건축 + 설비 기준)	기존 모듈러 시스템 / 기존 RC BOQ	96.9 만원/m ² 이하 (기존 RC BOQ의 80% 수준)

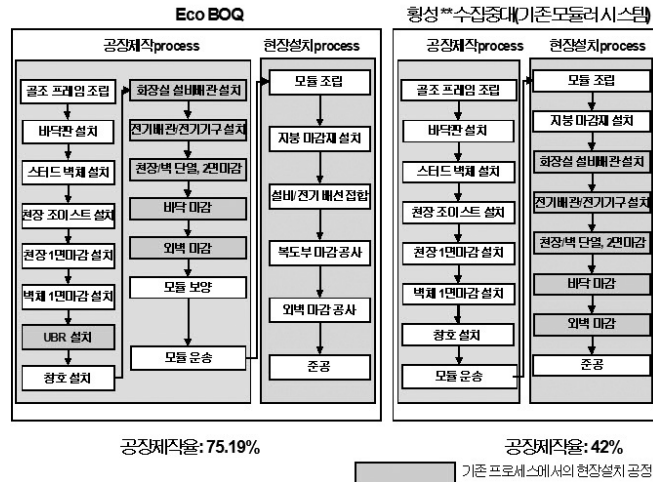


그림 11. 공장제작-현장설치 프로세스 및 공장 제작율

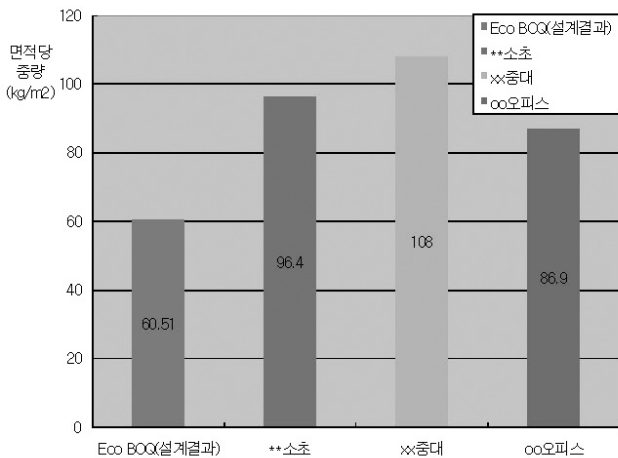


그림 12. 단위 면적당 골조중량 비교(지붕 포함)

두 번째 평가항목인 골조중량은 최종 설계 결과 지붕층을 제외할 경우 기존 모듈러 공법의 약 75% 수준으로 평가되었다. 지붕층을 포함할 경우, 본 설계 결과 지붕층의 골조가 상부모듈에 통합되어 면적당 골조 물량이 60.51kg/m² 수준으로 기존 공법의 62% 수준으로 절감됨을 확인하였다. 그림 12는 지붕층을 포함했을 때 기존의 모듈러 시스템과의 단위면적당 골조 중량을 비교하여 나타낸다.

표 17. 건축 공사비 비교

공사비 구분	RC BOQ공사비(원/m ²)	Eco BOQ공사비(원/m ²)
재료비	298,886	400,445
노무비	366,744	161,793
경비	60,752	78,113
이윤 및 기타	144,271	184,969
건축공사비 합계	870,653	825,320

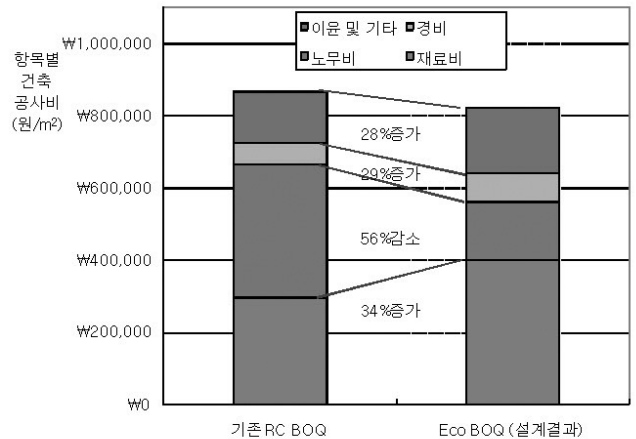


그림 13. 항목별 건축 공사비 증가

세 번째 평가 항목인 공사비 비교에서 그림 9의 기존 RC BOQ와 비교하면, 건축공사비만 비교할 경우 설계안이 약 95% 수준으로 약 5%의 공사비 절감이 가능한 것으로 분석되었다. 표 17 및 그림 13은 RC BOQ와 본 연구의 모듈러 BOQ 설계안의 건축공사비를 항목별로 비교한 결과이다. 재료비는 약 34% 증가하지만, 노무비가 56% 감소하여 전체적인 건축공사비는 약 5%의 절감효과가 있음을 볼 수 있다.

건식 공법으로 전기 난방 등을 적용하면, 건축+전기+통신+소방공사를 포함한 총 공사비는 RC공사의 약 82% 수준으로 설계 목표치에는 약간 미치지 못하지만 상당한 공사비 절감 효과가 있음을 확인하였다. 설비 방식의 차이로 직접적인 비교는 불가능하지만, 이동 및 재사용을 전제로 건식공법을 적용한다는 점에서 본 연구를 통해 개발된 모듈러 BOQ를 적용할 경우, 공사비 절감이 가능할 것으로 평가되었다.

6. 결론

본 연구에서는 식스-시그마 방법론을 이용해 모듈러 공법을 이용한 BOQ건축 시스템을 제안하였다. 군 시설 중 독신자숙소는 표준화된 평면의 적용이 용이하면서 향후 시설개선 요구의 증가가 예상되는 건축물이다. 또한 향후 군 구조개편 등에 따른 해체 및 재사용에 대한 요구 또한 증가하고 있는 건축물 유형이다. 본 연구는 군 독신자 숙소의 직접적인 내부 고객인 설계사, 모듈 제작사, 시공사 및 외부고객인 군시설 담당자, 독신 장교 등을 대상으로 한 VOC에 기반하여 모듈러 BOQ시스템을 개발하였다. 개발 과정에서 QFD, Fugh Matrix등 식스-시그마에서 사용되는 기법들을 이용해 최적의 시스템 설계가 가능하도록 하였다. 특히 CTQ로 선정된 면적당 골조 중량은 기존 모듈러 시스템의 62% 수준으로 절감되고, 공장제작비율은 80% 향상됨을 확인하였다. 결과적으로 기존의 RC BOQ와 비교하여도 충분한 가격경쟁력을 확보하는 것으로 평가되었으며(건축 공사비 기준 약 5% 공사비 절감), 본 연구를 통해 개발된 시스템은 향후 노후된 군 독신자 숙소를 대체할 수 있는 유력한 대안 시스템이 될 수 있을 것으로 평가된다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 조봉호, 김홍진, 고광호, “모듈러 건축 시스템의 기술개발 동향 및 적용사례,” 한국강구조학회지, Vol.19, No.1, pp112~119, 2007
- 권오철, “DMAIC방법론을 활용한 건설기술정보시스템 활용도 제고방안에 관한 연구”, 한국건축시공학회 논문집, Vol.10, No.1, pp 91~99, 2010.
- 김세준, 임변준, 장영훈, 한태식, “DFSS기법을 이용한 차량의 Shock & Jerk 최소화 연구” 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp.2139~2144, 2006
- 박재식, 박태근, “모듈러 공법을 적용한 군시설공사의 개선방안에 관한 연구” 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp.642~647, 2006.11
- 김홍렬, 이재승, 유용호, 조봉호, 김형준, “화재하중을 고려한 병원형 모듈러블럭의 화재거동 및 구조체 변형에 관한 실험적

- 연구”, 대한건축학회 논문집-구조계, Vo. 25, No.12, pp. 21~30, 2009
- Alaa Hassan, Ali Siadat, Jean-Yves Dantan, Patrick Martin, "Conceptual process lanning—an improvement approach using QFD, FMEA and ABC methods" Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.26, No. 4, pp.392~401, 2010.
- Akao, Yoji. "Development History of Quality Function Deployment". The Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment. Minato, Tokyo 107 Japan: Asian Productivity Organization. pp.339-351, 1994
- J.A. Johnson and H. Gitlow, S. Widener, E. Povovich, "Designing New Housing at the University of Miami: A "Six-sigma"DMADV/DFSS Case Study", Quality Engineering, Vol 18, No.3, pp.299-323, 2006
- R.M. Lawson and R.G. Ogden, "Hybrid' light steel panel and modular systems", Thin-Walled Structures, Vol.46, No. 7-9, pp.720-730, 2008
- Low Sui Pheng and Mok Sze Hui, "Implementing and Applying Six-sigma in construction", Journal of construction Engineering and Management, ASCE, pp. 482~489, 2004

논문제출일: 2010.09.30

논문심사일: 2010.10.01

심사완료일: 2010.11.10

Abstract

Military Barracks and Bachelor Officer's Quarters are public buildings representing architectural characteristics with repeating the same room modules. These buildings require easy dismantling and reusing for the next generation' military re-organization. For these reasons, since 2005, the modular construction has been applied to military buildings. The most important factors required for modular military buildings are standardization, low-cost construction and reusable construction method. However, conventional modular building system have not been matched with these requirements. This study suggests a new modular system for Bachelor Officer's Quarters using Six-sigma design tool. To reflect the voices of customers, market study and surveys were carried out. Through the QFD, the voices of customers were converted into quality characteristics of building system for BOQ. The various design concepts meeting customer's requirement were derived by the QFD and Pugh matrix methodology. The proposed modular building system shows 80% increased factory production rate and 62% decreased weight of steel frame as compared with the conventional modular building system.

Keywords : *Six-Sigma, Modular Building, QFD, Pugh-Matrix, BOQ*
