

경량형강을 사용한 모듈러 시스템 개발에 관한 연구

A Study on Development of Modular System using Light-weighted

Structure Members

정 성 립*
Zheng, Sheng-Lin

주 기 수**
Ju, Gi-Su

박 성 무***
Park, Sung-Moo

요 약

본 논문은 유닛 모듈러를 구성하는 주구조체인 각형강관 기둥과 냉간성형 LEB C-형강 보가 볼트 접합된 접합부를 가진 모듈러 건물의 접합부 구조성능 및 시공성을 평가하는 것이 연구의 목적이다. 모듈러 건축의 장점은 공사기간 단축, 경량성, 이동가능성 등으로 볼 수 있다. 반면에 유닛 또는 모듈의 운송비용이 공사비 절감 비용을 반감시킬 수 있고 많은 공장들이 외부 지역에 있으므로 이들을 도심지나 원하는 지역으로 이동하기 위해서는 비용이 추가된다. 그리고 유닛이나 모듈 설치에 크레인 등의 장비 사용으로 인해 시공비용이 증가될 수 있는 단점들이 존재한다. 본 연구에서는 해체조립이 용이한 볼트접합부 구조성능 및 모듈러 건축물의 시공사례를 통하여 공기, 비용 등 측면에서 기존 연구와 비교분석을 진행하고자 한다.

Abstract

The object of this paper is to evaluate on constructability of modular steel frame with the hollow structural steel section to LEB C-shape. A modular building is built with factory-manufacture and site-construction. The advantage of a Modular building presents that enhanced building quality, shortened construction period and easy at an expansion and enlargement for buildings but also has demerits such as size restriction of the modular units according to the Road Traffic Law and Inflexibility of the unit composition. So in this study we use light-weighted structure members with bolted joint for easy Knock-down and traffic, also we evaluated the constructability of this bolted joints type modular buildings.

키워드 : 해체조립, 모듈러 시스템, 각형강관, LEB C형강, 접합부, 시공성

Keywords : Modular System, Hollow Structural Section, LEB C Section, Joint, Constructability

1. 서 론

오늘날의 건축 환경은 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 심각한 사회·환경 문제가 되고 있다. 과학기술과 산업의 발전에도 불구하고 건축은 공급과 생산에 있어 전 근대적인 양상에서 벗어나지 못하며, 그로 인한 공급의 결핍과 자연환경의 파괴, 자원의 낭비, 건축 환경의 질적 악화 등의 심각한 문제를 야기하고 있다.

이에 영국과 독일, 미국, 일본 등 외국에서는 환경친화적인 건축시스템 및 공장 생산기반의 공업화 건축 기술을 기본으로 하는 모듈러 빌딩 시스템을 건축물에 적용하여 지속적으로 개발하고 있다. 모듈러 빌딩 시스템은 학교를 비롯한 군 시설물, 오피스빌딩 등 다양한 유형의 건축물들에 폭넓게 적용하고 있다.

유닛 모듈러 건축은 공장에서 제작된 단위 유닛 형상을 현장에서 조립하여 구조체를 완성해가는 공업화 건축을 의미하며, 일본, 유럽, 미국 및 캐나다 등에서는 다양한 용도의 건축물에 이미 널리 사용되고 있는 조립식 공법이다. 최근 국내에서도 건설현장에서 인건비 상승, 공기단축 및 재사용이 용이한 건축물에 대한 요구, 친환경 건축물에 대한 요구 등으로

* 영남대학교 건축학부 박사수료
Tel: 053-810-2428 Fax:053-815-1566
E-mail : zsl1978cn@yahoo.co.kr

** 종신회원, (주)동성중공업 상무이사, 공학박사

*** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

인하여 유닛 모듈러 건축물의 도입에 대한 요구가 증가하고 있는 상황이다.

따라서 국내 건설산업 및 건설환경전반에 대한 능동적인 발전을 위하여 이동 및 재사용이 가능한 경량철골 모듈러 유닛의 구조 시스템 및 제작, 설치 공법이 개발되고 있다.

본 연구는 모듈러 시스템을 적용한 건축물 접합부에 대한 구조적 거동 및 공기, 비용 등 측면에서 기존 연구와 비교분석을 진행하여 본 연구에서 제안한 모듈러 시스템의 접합부 강성과 시공성을 평가하고자한다.

2. 모듈러 시스템의 현황

모듈러 시스템은 공장에서 제작된 단위 유닛 형상을 현장에서 조립하여 구조체를 완성해가는 공업화 건축을 의미하며, 다양한 용도로 널리 사용되고 있는 조립식 공법이다.

모듈러 시스템을 구성하고 있는 주요 부재는 경량 형강이며, 벽체와 바닥의 내력 및 비내력용 구조재로 사용된다. 각 형 강관 등의 열연강재는 단위 유닛의 양중 포인트와 코너에서 기둥 구조재로 사용되며 다양한 형태의 접합방법으로 모듈러 시스템의 구조체가 제작된다.

해외 모듈러 시스템은 각 나라의 특성에 맞게 개발되어 사용되고 있다. 영국과 독일 등 유럽에서는 대규모 제조사들에 의해 보급되고 있으며, 단독주택 및 6층 이하 규모의 집합주택, 학교 항업시설 기숙사 등 중·저층 건물에 대해 다양한 용도로 사용되고 있으며, 모듈러 시스템에는 대부분 강하고 가벼우며 경제적인 시공이 가능한 경량철골 부재들이 주요 구조부재로 사용되고 있다.

일본은 단독주택 시장이 대규모로 형성되어, 주문에 의해 공장에서 제작하는 제조사들이 자동차 규모의 설비와 기술력을 갖추고 다양한 모듈들을 생산하고 있다. 따라서 유럽이나 미국에 비해서 가장 높은 수준의 기술력을 갖추고 있다.

3. 모듈러 시스템의 접합부

모듈러 시스템은 공장에서 제작된 단위 유닛

형상을 현장에서 조립하여 구조체를 완성해가는 공업화 건축을 의미하며, 다양한 용도로 널리 사용되고 있는 조립식 공법이다.

일반적으로 철골구조에 있어 기둥과 보의 접합 형식은 보의 플랜지, 웨브 모두 기둥 플랜지에 용접하는 방법, 보의 플랜지를 용접, 웨브르 고력볼트접합으로 하는 방법, 보의 플랜지, 웨브 모두를 고력볼트접합으로 기둥 플랜지에 붙이는 3가지 방법이 대표적이다. 하지만 모듈러 시스템의 경우 기둥부재는 H형강을 사용하고 있는 것도 있지만 대부분 각형강관을 사용하고 보부재는 H형강을 많이 사용하였으며 보 단부에 엔드플레이트(END PLATE)를 용접한 것이 대부분이다

4. 접합부 실험

현재 모듈러 시스템의 접합방법은 앞에서 언급했듯이 기둥에는 각형강관을 보에는 H형강을 사용하는 것이 일반적이 추세이며, 일부 각형강관과 냉간성형강을 주구조체로하여 접합하는 경우가 있다. 하지만 접합방법에 있어 강접합을 하여 실험을 수행한 경우는 있으나 볼트를 사용하여 주구조체를 접합부를 형성한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 각형강관 기둥과 냉간성형강 보의 볼트접합부의 실험을 통하여 접합부의 강성 및 내력을 평가하고자한다.

4.1 실험체 계획

볼트접합부를 가지는 각형강관 기둥과 냉간성형 LEBC형강 접합부에 대한 실험체는 바닥보와 기둥 및 천장 보와 기둥과의 접합부를 실험 대상으로 설정하였다. 접합부 사용된 부재 재질은 다음 표 1과 같다.

표 1 주구조체 부재사이즈

구분	부재사이즈	재질
기둥	□-150x150x6.0	SPSR400
보	C-220x65x18x12x3.0	SGH400
고력볼트	M16	F10T

표 2 시험체명

시험체명	브라켓 두께 (mm)	Flange		Web	
		고력볼트 개수 (EA)	지름 (mm)	고력볼트 개수 (EA)	지름 (mm)
CB1	6T	x	x	x	x
LCF2W2	6T	2	16	2	16
LCF3W2	6T	3	16	2	16

CB1, CB2 : 용접접합형 시험체

LC: LEB C형강

F2, W2: F는 플랜지, W는 웹;

수치는 고력볼트 개수 표시

실험은 기둥-LEB C형강 보의 접합부를 볼트로 접합할 경우 구조성능을 평가하기 위해 접합방법과 볼트의 갯 수로 하였다. 실험체 일람은 표 2와 같다. 강재와 C형강을 볼트접합 하였을 경우 플랜지의 볼트 수량이 접합기둥에 미치는 영향을 확인하고자 LEB C형강의 단면크기를 일정하게 제작하였다. 실험체 기둥은 압축력이 가해졌을 경우 휨변형이 발생하지 않도록 하였다. 또한, LEB C형강의 길이는 실험체 설치와 유압식 오일잭의 길이에 영향을 받지 않도록 하였으며, 비대칭 단면보의 국부좌굴과 비틀림을 최대한 방지하기 위한 길이로 제작하였다.

4.2 가력 및 측정방법

접합부의 하중 가력방법은 기둥 양 단부를 고정용 핀 플레이트의 상부 위에 올려놓고 접합된 기둥-보에서 LEB C형강 보에 제작된 가력판 중심부에 20ton 오일잭으로 압축력을 가하는 단조 재하 방법을 이용한다. 가력위치 LEB C형강이 집중하중을 받아 먼저 파괴되는 것을 방지하기 위하여 플레이트로 보강하였다. 하중 가력은 기둥-LEB C형강 보의 접합부에 항복현상이 나타나거나 기둥과 보 부재의 파괴 이후 하중이 계속적으로 증가하여 실험체가 심한 국부변형으로 더 이상 가력하기에 불안정한 상태가 되었을 때 종료하였다.

접합부의 하중 및 변형도 측정은 20ton 오일잭 단부에 로드셀을 설치하여 하중을 측정하였고, LEB C형강 보의 처짐 및 변위를 측정하기 위하여 50mm

변위계(LVDTs)를 가력 보의 상단부에 부착하여 측정하였다.

4.3 실험결과

4.3.1 하중-변위 곡선 및 파괴형태

각 시험체의 하중-변위결과를 표3과 같이 정리하였다. 항복하중은 실험과정에서 비틀림이 발생하는 시점에서 하중을 기록하여 정리하였다.

표 3 접합부 실험체 하중-변위 관계

시험체명	항복하중 (ton)	최대하중 (ton)	최대변위 (mm)
CB1	2.169	3.015	29.2
LCF2W2	2.323	3.168	34.6
LCF3W2	2.071	3.615	34.2

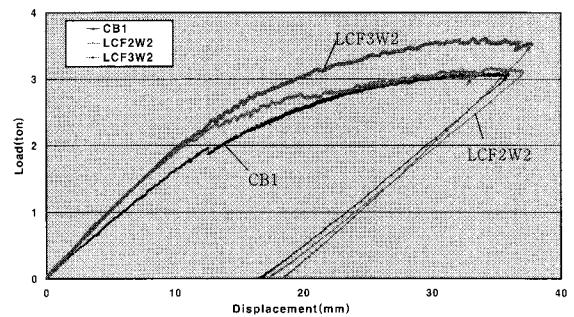


그림 2 브라켓 두께 6T계열 시험체

4.3.2 접합부분류

Eurocode 3 : Design of steel structures Part1.8: Design of Joints의 강성에 의한 접합부 분류 방법은 그림 3과 같다.

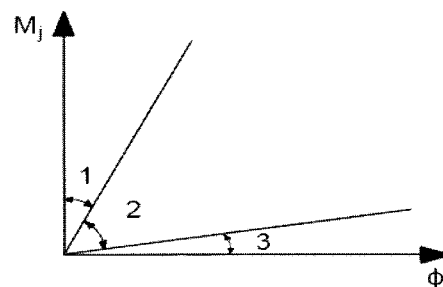


그림 3 강성에 의한 접합부 분류

Zone 1: 강접합, $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$;

$k_b=8$ 브레이스 구조물

$k_b=25$ 기타 frame($K_b/K_c \geq 0.10$)

Zone 2: 반강접 ;

Zone 3: 핀, $S_{j,ini} \leq 0.5 EI_b / L_b$

*) $K_b/K_c < 0.1$ 골조인 경우 접합부는 반강접으로 분류됨.

$K_b = I_b / L_b$; $K_c = I_c / L_c$

I_b : 보의 단면2차모멘트

I_c : 기둥의 단면2차모멘트

L_b : 보의 길이(기둥 중심사이 거리)

L_c : 기둥 높이

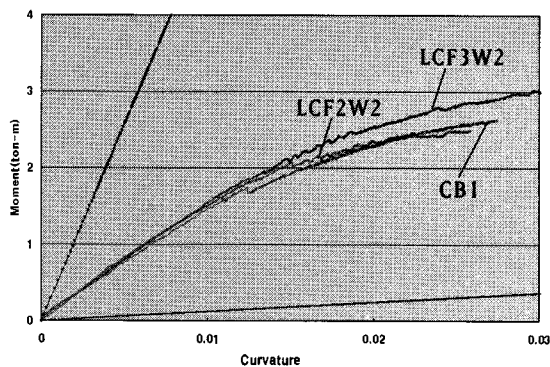


그림 4 접합부 강성평가

그림 4와 같이 각 시험체의 초기 강성은 편접합과 강접합 사이에 있는 70%정도의 강접성질을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 기둥과 LEB C형강을 볼트접합으로 할 경우 반강접성질을 가지며 모듈러 빌딩에 적용 시 이를 고려한 접합부 설계가 되어야 한다.

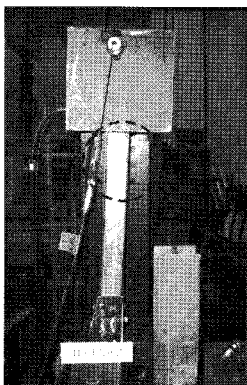


그림 5 좌굴 파괴

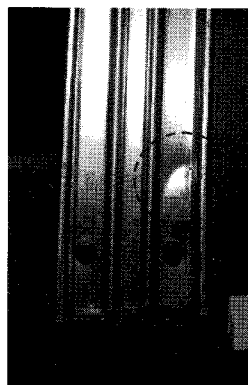


그림 6 국부 좌굴

실험과 같이 LEB C-형강 보의 비틀림좌굴에 의해 강도가 지배되는 것으로 파악되었으며, 그림 5, 6에는 실험 중에 관찰된 기둥-보 접합부의 주요 파괴형태인 비틀림좌굴 변형 형상을 나타내었다.

5. 시공사례

5.1 시공과정

자재를 공장에 반입한 후 공장에서 단변방향과 바닥, 지붕 프레임을 각각 제작한다. 제작된 프레임은 현장에 운반한 후 현장에서는 먼저 바닥프레임과 단변 방향 프레임을 설치하여 골조를 형성한다. 그리고 지붕 프레임을 설치 및 실내의 마감 공사를 진행하였다. 다음은 현장에서 건립된 모듈러 건축물의 시공과정을 정리한 사진이다(표 4~표 6).

표 4 공장제작

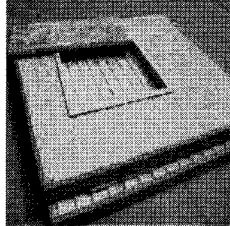
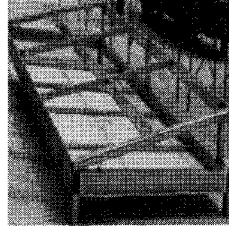
공장제작	
	
외장벽체 제작	트러스 제작

표 5 현장설치

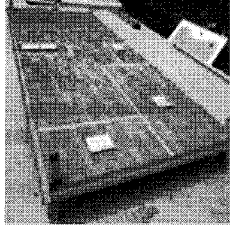
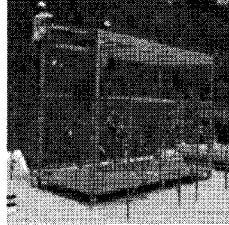
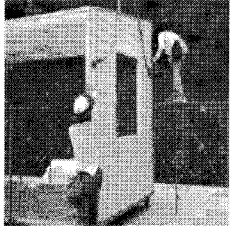
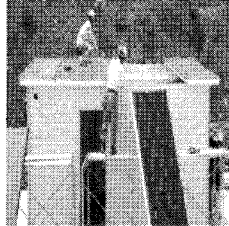
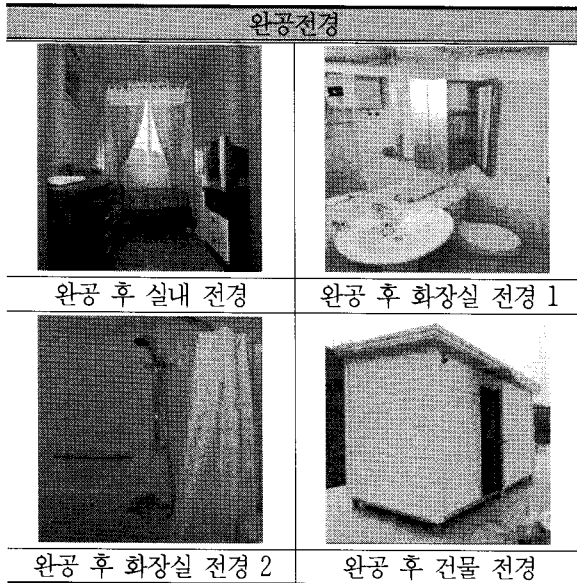
현장설치	
	
바닥프레임 설치	주골조 설치
	
벽체 설치	지붕설치

표 6 완공전경



6. 시공성 평가

시공성은 동일 규모의 유사 성능 시설물을 얼마나 적은 노력과 비용으로 얼마나 빠르게 완성할 수 있는지를 지표로 평가할 수 있다. 공사에 고급 인력이나 많은 인력을 필요로 하는 경우 비용이 올라갈 뿐만 아니라 시공의 난이도에 따라 원하는 품질을 얻지 못할 수 있다. 그리고 동일 인력으로 작업을 하더라도 자재의 취급용이성에 따라 시공성의 정도가 달라진다. 재료가 중량일수록 시공성능이 떨어지며 별도의 장비를 추가로 필요하게 된다.

6.1 작업시간분석

모듈러는 현장에서 최소한의 공기만으로 조립 후 사용이 가능하도록 계획되어 있어 현장공기의 최소화를 이룰 수 있는 장점을 가지며 모듈 신축 및 이동 후 재시공시에도 최소한의 공기만을 필요로 하기 때문에 현장공기 단축의 요소를 가지고 있다.

본 연구에서는 편이 상 1개 모듈을 기준으로 시공사례를 구성하였기에 기존 연구의 결과 중 1개 모듈단위에 소요되는 현장 작업시간과 비교 분석하였다. 기존 연구에서 모듈 1개의 표준 작업시간은 3.3 시간²⁾으로 산출되었으며 본 연구에서 시공

사례분석을 통한 결과 모듈 1개의 설치 작업시간은 3.05시간으로 산출되었다(표 7). 따라서 본 연구의 모듈러가 기존의 모듈러 방식보다 8.2%의 시간 단축효과가 있는 것으로 판단된다. 시공과정에서 판넬마감 설치 등 마감공사 진행 시 현장에서 치수조정 등 수작업이 발생하여 시간이 다소 지연되는 현상이 발생하였는데 이는 타당성을 분석하는 시공사례로서 제작 시 발생한 문제점으로 파악되며 향후 정확한 설계와 공장 제작과정을 거치면 시간 단축효과가 더 클 것으로 판단된다.

표 7 작업시간분석 사례 개요

구분	내용	소요시간	비율
기존연구	폴조+마감 - 폴조조립 - 마감	3.3 시간	108%
본 연구	폴조+마감 - 폴조조립 - 마감	3.05 시간	100%

6.2 비용분석

6.2.1 초기투자비

초기투자비는 건물의 초기에 발생하는 비용 산출을 위한 모델로 건물이 완공되어 사용되기 이전까지의 단계에 소요되는 비용으로 구성된다.

표 8 초기투자비 비교

구분	본 연구(원)	철골조(원)
공사비용	1,557,240,623	1,688,342,312
경비	145,802,712	244,223,933
초기투자비 합계	1,723,043,335	1,887,447,688
m ² 당 순공사비	647,488	708,863
m ² 당 순건축공사비	408,015	461,583
m ² 당 운반비	5,391	2,489

표 8은 공법별 초기투자비를 비교한 것이다. 초기투자비는 본 연구의 모듈러를 기준으로 본 연구 모듈러(100%) < 철골조(110%)으로 산출되어져 본 연구의 모듈러가 10% 경제적인 것으로 분석되었다. 이러한 결과가 도출된 이유는 모듈러가 철골조

2) 유민 외 5인, 모듈러 건축물의 공기 분석에 관한 연구, 2005

에 비하여 주골조 부재의 사용량 및 바닥 콘크리트 사용량이 상대적으로 적기 때문에 판단된다.

공종별 공사비 중 공사현장 여건에 따라 차이가 심한 토목 공사비와 냉난방 방식, 설비체계 구성 등에 따라 편차가 심한 기계/전기설비 공사비를 제외한 건축공사를 중심으로 비교를 진행해 보았다. m²당 공사비는 본 연구를 기준으로 할 때 모듈러(100%) < 철골조(113%)으로 모듈러가 13% 경제적인 것으로 나타났다.

m²당 운반비는 기존의 철골조가 54%정도 경제적인 것으로 나타났다. 하지만 모듈러 건물은 필요 시 이축 가능하므로 실질적으로 가격측면에서 경쟁력이 있는 것으로 판단된다.

6.2.2 운반비 비교

기존의 모듈러 방식은 완성된 단위 모듈을 트레일러를 이용하여 운반하므로 운송비용이 많이 소요되는 것으로 문제점이 나타나고 있다. 본 연구의 해체조립식 모듈러 공법은 일반 화물차량을 이용한 운반비로서 기존의 운송방식에서 오는 비용을 절감시킬 수 있는 공법이라 할 수 있다. 본 연구에서 산출된 운반비를 기준으로 기존 연구³⁾와 비교했을 경우 본 연구의 모듈러(100%) < 기존 연구 1(273%) < 기존 연구 2(163%)으로 나타나 운반에 따른 비용을 절감할 수 있는 방식으로 나타났다.

표 9 운반비 비교

구분	본 연구 모듈러(원)	기존 연구 모듈러1(원)	기존 연구 모듈러2(원)
m ² 당 건축공사 운반비	5,391	14,713	8,770
비율	100%	273%	163%

7. 결론

해체조립이 용이한 모듈러 건축물의 시공사례를 구성하여 공기, 비용 등 측면에서 기존 연구와 비교분석을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 주요 접합형상이 볼트로 접합 되었을 경우 접합부의 파괴 없이 LEB C-형강보의 국부좌굴로 인한 비틀림좌굴에 의해 강도가 지배되는 것으로 파악되었다.

2) Eurocode 3의 강성에 의한 접합부 분류 방법에 의하여 볼트접합으로 70% 정도의 강접 성질을 가지는 것을 알 수 있으며 모듈러 빌딩에 적용 시 이를 고려한 접합부 설계가 되어야 할 것으로 판단된다.

3) 작업시간 분석 결과 기존의 모듈러보다 8.2%의 시간 단축효과가 있었다.

4) 초기투자비 분석결과 본 연구의 모듈러를 기준으로 하였을 경우 철골조보다 10%비용이 적게 투입되는 것으로 분석되었으며 순 건축공사비의 경우 13%정도 적게 나타났다.

5) 기존 철골조와 운반비를 비교할 경우 철골조가 54%정도 싸게 분석되었는데 이는 자재를 일반화물 차량을 사용하여 현장에 운송하기 때문이다. 이동성을 고려할 경우 모듈러가 싼 것으로 판단된다.

6) 기존 연구의 모듈러 시스템과의 운반비 분석 결과 본 연구의 모듈러를 기준으로 하였을 경우 기존 모듈러 시스템보다 63%~173%비용이 적게 투입되는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 냉간성형강 구조설계기준 및 해설, 1999.
2. 이문섭, 모듈러주택의 구성과 생산시스템에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 6권 1호 통권27호, 1990.
3. 유영동, 모듈러 시스템 공법을 이용한 공업화 건축물, RIST연구논문 제 17권 제3호, 2003.
4. SCI., Modular Construction Using Light Steel Framing-Architects' guide, 1994.
5. SCI., Modular Construction Using Light Steel Framing-Design of Residential Buildings, 1999.

3) 박재식 외 1인, 모듈러 공법을 적용한 군시설공사의 초기투자비 분석에 관한 연구, 2006.10