Mega Double Wall 공법을 통한 지하 외벽 설계 및 시공안전 개선 연구

Improvement of Underground Wall Design and Construction Safety Using Mega Double Wall Construction Method

지경환* · 최병정**

Ji, Kyung-Hwan*, and Choi, Byong-Jeong**

Abstract

Underground wall construction that is an under-the-frame construction constituting the skeleton of a building, involves a construction with a high outer wall, poor working environment, and high safety risk. A conventional formwork method exists for such construction. The existing method requires several technicians working in different areas such as scaffolding, rebar construction, formwork construction, and concrete casting construction. In addition, it requires longer construction periods with higher risk of accidents and deterioration in the quality. To overcome such drawbacks, in this work, mega double wall construction method that involves a factory-made precast form, has been used for the initial design stage after discussions between the client, designer, and builder. This method reduces the number of required technicians and construction period, lowers the risk of accidents, and improves the quality, and is a result of introducing the concept of design for safety at the early design stage. In the future, it is necessary to introduce the concept of design for safety not only for underground wall construction, but also for finishing work, thus, allowing for safer overall construction.

Key words : DFS, Mega Double Wall, Structural Analysis, Underground Exterior Wall, Design Stage

요 지

건축물공사의 뼈대에 해당되는 골조공사 중 지하 외벽공사는 외벽 높이도 높고 작업환경도 열악하고 안전위험도 매우 높은 공사이다. 이러한 공사를 수행하는 공법으로는 재래식 형태의 거푸집공법이 있다. 기존 공법은 비계공사, 철근공사, 거푸집공사, 콘크리트 타설공사 등의 기술인 투입이 많고 공사기간도 증가되며 안전사고의 위험성이 높고 품질저하 요인도 발생한다. 이러한 단점을 개선하고자 초기 설계단계에 발주자, 설계자, 시공자간 회의를 거쳐 공장제작 프리캐스트 형태인 대형벽체부재 공법을 개발하여 현장 적용함으로써 기존 공법의 단점인 기술인 투입의 절감, 공기단축, 안전사고 저감, 품질향상 등의 효과가 나타났다. 이는 설계단계에서부터 안전을 고려한 공법을 제안하는 설계안전 개념을 도입하여 시행한 결과이다. 향후 지하 외벽공사뿐만 아니라 마감공사에서도 설계안전 개념을 도입하여 보다 안전한 공사가 되도록 해야 한다.

핵심용어 : 설계안전, 대형벽체부재, 구조해석, 지하외벽공사, 프리캐스트콘크리트

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물공사에서 골조공사 즉 건물의 뼈대를 구성하는

구조체 공사는 지하층과 지상층으로 구분하여 공사를 수행한다. 이중 지하층의 구조체 공사 중 외벽공사의 수행 시 기존 재래식 공법은 비계공사, 거푸집공사, 철근배근공사, 콘크리트 타설공사로 수행되어 진다. 건설현장 특성상 외부

*정회원, 경기대학교 박사과정 수료(E-mail: kyunghwanji@hanmail.net)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architecture Engineering, Kyunggi University

**교신저자, 정회원, 경기대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-31-249-9702, Fax: +82-31-249-9702, E-mail: bjchoi@kgu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architecture Engineering, Kyunggi University

환경적인 요인에 의한 공기지연, 건설현장의 안전사고 증대 등으로 인해 Ji and Choi (2017)는 안전사고 저감을 위해서는 초기설계단계부터 안전을 고려한 안전설계 및 공법이 필요하며 이를 위해서는 발주자 및 설계자의 안전의식의 전환이 없이는 현장의 안전을 담보할 수 없다고 하였다. 현장안전위험요인을 저감시키기 위해서는 현장에서 인력을 투입하여 설치하는 재래식 공법보다는 공장제작하여 현장에서 설치하는 모듈화 된 Precast concrete (이하 PC) 제품을 적용하여 현장작업을 수행할 경우 기술인 감소, 레미콘 회사의

콘크리트 불규칙공급, 공사기간 지연, 구조물 품질 저하, 안전사고 발생 등의 어려움을 개선할 수 있다고 판단되어 PC 벽체 공법을 개발하게 되었다. Lee (1991)는 PC 벽체의 종류를 PC부재 형태 구성에 따라 단일벽, 리브벽, 이중벽, 중공벽으로 구분하였고 PC부재 구조 기능에 따라 내력벽, 비내력벽, 간막이벽, 장막벽으로 구분하였다. 기존 PC벽체 공법은 외부와 내부 벽체를 공장에서 각각 제작하여 현장 반입한 후 현장에서 각각 벽체를 설치 후 하나로 결합하는 공정을 거친 후 현장타설 콘크리트 작업에 의해 일체화된 벽체를 형성하는 방법으로 공사를 수행한다. 이 경우 내, 외부 벽체지지가 미흡할 경우 전도되어 안전사고가 발생한다.

본 연구에서는 PC부재 형태로는 중공벽, 구조 기능분류로는 내력벽에 대하여 적용코져 한다. Oh and Moon (2017)은 기존 내부, 외부 벽체를 각각 생산하던 것을 가운데 연결보(Link beam)를 설치하여 일체화된 벽체를 제작하는 것이고, 이를 Maga Double Wall (이하 MDW)로 명칭하였다. MDW 공법은 공장에서 PC 형태로 제작되므로 현장에서는 기존의 벽체공사를 위한 비계공사, 거푸집공사, 철근배근공사 없이 MDW 설치 후 콘크리트 타설작업만으로 일체화된 벽체를 형성할 수 있는 개선된 합성 PC공법이다. MDW 공법은 지하외벽, 공동구, 저수조 벽체등에 활용된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 지하외벽구조물 공사 수행 시 발생할 수 있는 안전사고 저감을 위해 Design for Safety (이하 DFS)관점에서 안전한 공법을 제시하기 위하여 다음의 과정으로 진행하였다. 첫째로 지하외벽구조물을 형성하는 공법에 따라 MDW, PTW, RC 공법의 장점과 단점을 비교하여 안전, 시공측면에서 유리한 공법은 MDW, PTW, RC공법순서 임을 도출하였다. 둘째로 MDW공법의 구조적 안전은 구조해석 프로그램으로 부재의 최대탄성처짐, 응력상태와 최대응력을 산출하여 안전성을 확인하였다. 셋째로 MDW공법을 실제 현장 적용하여 구조해석에 따른 안전성, 시공성에 문제가 없는지를 확인 하였다.

2. PC벽체공법 고찰

2.1 PC공법도입 배경과 선행연구 고찰

국내 건설환경은 젊은 기술인들이 노동을 기피하는 현상

으로 인해 점차 인력수급이 어렵고 기술인들도 고령화 되어 가고 있으며, 건설현장의 안전사고도 지속적으로 발생하고 있다. Shin (2017)은 건설현장에서 발생할 수 있는 위험요소를 사전에 발굴하여 설계단계에서부터 안전을 고려한 설계를 실시해야한다고 하였다. Hong and Oh (2018)는 노무비상승, 근로시간단축, 레미콘 8.5제 등의 이슈발생으로 현장작업을 최소화 할 수 있는 대안으로 PC공법이 대두 되었다. 국내에서 PC는 기둥 및 수평부재 형태가 일반적으로 생산, 사용되고 있다. PC공법은 콘크리트 품질관리가 용이하고 현장 타설 콘크리트 공법에 비해 노동력 감소, 공기단축 및 안전리스크 저감의 특징을 갖고 있다. Kang (2013)은 PC공법은 건설현장의 노동력을 최소화하고 거푸집, 동바리 생략 등 기계화 시공으로 공기단축이 가능하다는 장점으로 선진국에서 점차 사용이 늘어나는 추세에 있다고 하였다. Kim et al. (2004)는 PC 수평부재는 크게 3가지 종류로 더블티슬래브(double tee slab), 중공슬래브(hollow slab), 하프PC슬래브(half pc slab)를 들 수 있다. 각 PC는 현장 설치 후 덧침 콘크리트(topping concrete)를 타설하여 양생 시 합성부재로 설계된다. 건축현장에서 구조체 벽체를 형성하는 공법으로 Park (2017)은 PC 패널과 패널을 앵커볼트로 체결하는 Double Composite Wall I (이하 DCW)공법이라 명칭하였고, Oh et al. (2017)은 DCW와 기존 현장타설을 비교하여 DCW가 공기단축되는 것을 연구하였다. Oh and Moon (2017)은 기존 재래식 거푸집공법과 내부, 외부 PC 패널을 트러스로 연결하는 공법 일명 Precast concrete Truss Wall (이하 PTW)과 강성이 큰 연결보를 사용하여 내부, 외부 벽체PC 패널을 연결하여 제작하는 강성이 큰 벽체를 MDW라 하였다. Yang et al. (2018)은 지하층 벽체 공사의 경제성과 안전성 확보를 위해 더블 T형상의 PC패널이 마주보는 형태의 이중합성 프리캐스트 벽체 내부의 중공부에 채움콘크리트를 타설하여 제작한 실험체의 휨 및 전단거동 실험을 수행하여 설계이상 강도 결과를 얻었다. 건축분야뿐만 아니라 교량에서도 교각을 중공형태의 프리캐스트 콘크리트로 제작 후 내부를 채움콘크리트로 타설하는 공법을 개발하여 적용하였다. Lee and Choi (2007)는 PC공법의 경우 부재간 단절에 의한 응력불연속 구간이 접합부에 형성되어 일체 타설된 Reinforced concrete (RC)구조와 같은 성능을 발휘하기가 쉽지 않기 때문에 PC와 현장 타설 콘크리트를 합성하여 사용하는 복합화 공법이 증가하고 있다고 하였다. Seo and Yoon (2008)은 중공형 PC부를 공장에서 원심성형으로 제작하고 현장에서 중공부에 채움 콘크리트를 타설하는 중공PC(Hollowed precast concret, “이하 HPC”)기둥이 기존 RC구조와 거의 대등함을 확인하고 내진구조시스템에 HPC기둥을 적용할 수 있음을 제시하였다. Roh and Hashlamon (2016)은 중공프리캐스트 내부에 콘크리트 타설된 교각에 대한 내진성능을 분석하는 연구를 진행하였다.

2.2 공법에 따른 벽체공사의 비교

기존재래식거푸집의 경우 비계가설공사, 철근배근공사, 거푸집공사 등의 작업순서가 많아 작업이 복잡하고 위험요인도 많으며 콘크리트 타설시 긴결하게 체결하지 못할 경우 측압에 의해 거푸집이 터져 품질이 저하 되는 경우가 종종 발생한다. PTW도 콘크리트 타설시 측압에 의한 터짐이 발생하는 경우가 가끔 있어 이를 개선하기 위한 공법으로 MDW 공법을 적용하여 타설 시 콘크리트 측압에 대한 안전성을 향상시킬 수 있고 뒤틀림과 같은 부재의 변형을 줄일 수 있는 장점을 얻게 되었다.

Fig. 1. Comparison of Wall Construction According to Construction Method

상기 Fig. 1은 RC, PTW, MDW공법을 나타낸 것이며, RC공법은 벽체 조성 전 가설공사인 비계공사 및 거푸집설치, 철근배근 등의 현장 기술인들의 투입이 필요하고 공사기간이 많이 소요된다. PTW 공법은 가설공사인 비계공사와 거푸집, 철근공사 등이 필요 없다. 공장에서 PC형태로 제작을 하여 현장에서는 설치만 수행하면 된다. 다만 내부와 외부벽체를 연결시켜 주는 트러스의 매입 생산으로 피복두께 부족 시 측압에 취약할 수 있고 부재와 부재간 보강근이 별도 조립이 필요하다. MDW 공법은 가설공사인 비계공사, 거푸집, 철근

공사가 필요 없고 내부와 외부벽체를 연결시켜 주는 연결보의 강성이 커 자립 시 및 콘크리트 타설 시 측압에 대한 저항력이 크다. 각공법별 특징을 비교한 결과 MDW 공법이 양측면 벽체를 연결하는 연결보 강성으로 인하여 시공 시 발생할 수 있는 횡력에 대해서 기존 PTW 공법보다 우수한 성능을 갖는 것으로 분석되며, MDW 양중에 따른 변형이나 부재력 측면에서도 충분한 내력을 확보하는 것으로 평가된다. Table 1은 공법별 장, 단점을 Fig. 2는 MDW 작업순서를 표시하였다.

Fig. 2. MDW Sequence of the Work

2.3 MDW 공법 및 구조적 안전성

2.3.1 공법 소개 및 적용

Moon and Choi (2016)는 Mega Double Wall (이하 ‘MDW’) 공법은 건물 지하층 외벽, 저수조, 공동구, 폐수처리장벽체 등에 적용하는 제품으로 대형공간 적용을 목적으로 개발하였으며, 또한, MDW는 두께 1 m 이상, 높이 10 m 이상의 대형부재로 내부와 외부 벽체 두께는 120~150 mm로 PC 패널을 일정크기의 콘크리트 링크빔(Link beam)으로 연결하여 PC공장에서 생산 된다고 하였다. 생산된 부재는 공사현장까지 트레일러로 운반하여 부재하역 후 크레인 등의 장비를 이용하여 설치를 한다. 이후 MDW와 MDW간 보강을 위한 와이어메쉬를 설치 후 내부에 형성된 중공부에 현장

Table 1. Advantages and Disadvantages of Construction Methods

Method	Advantages	Disadvantages
RC	<ul style="list-style-type: none"> By conventional method Easy to secure technical personnel High manpower input High Risk Factors 	<ul style="list-style-type: none"> Temporary (Scaffolding / Formwork) Construction Required Construction period increase due to temporary construction High input of manpower Many risk factors
PTW	<ul style="list-style-type: none"> No need for temporary construction work PC wall independence secure Secured quality through factory production Middle manpower input Middle Risk Factors 	<ul style="list-style-type: none"> It is vulnerable to side pressure when the thickness of coating is insufficient Separate assembly of reinforcing bars between members and members
MDW	<ul style="list-style-type: none"> No need for temporary construction work PC wall independence secure Secured quality through factory production Low manpower input Low Risk Factors 	<ul style="list-style-type: none"> Separate assembly of reinforcing bars between members and members

콘크리트 타설을 하여 충전하고 경화시킨다. 이에따라 거푸집을 활용한 기존의 재래식 현장타설 콘크리트 공법과 동등한 수준의 구조성능을 만족함과 동시에 PC 공법의 장점인 기술인 투입의 최소화, 안전위험요인 저감, 공기단축 및 공장생산을 통한 품질확보 등의 장점을 보유하였다. 하지만 실제 현장 적용 사례는 없어 본 연구를 통해 MDW의 시공, 안전성을 확인코져 하였다. MDW 단면 및 단면상세도 Fig. 3과 같고, 제작된 형상은 Fig. 4와 같다.

Fig. 3. MDW Section and Section Detail

Fig. 4. MDW Shape

2.3.2 MDW의 변형상태와 최대 탄성처짐

MDW 공법의 PC 부재는 공장에서 생산 시 1차로 상부 판과 연결빔을 동시타설 후 2차로 하부판을 타설한다. 타설후 야적장으로 이동시 수평줄결이 운반대를 부재 인서트에 걸어 옮기는데 이때 탈형 탄성처짐이 발생한다. 현장으로 운반되는 트레일러를 이용하여 운반을 하게된다. 도로사정에 의한 운반 시 탄성처짐이 발생한다. 부재가 현장에 도착하면 크레인 등으로 수평 줄결이 운반대를 부재 인서트에 걸어 하역한다. 이때도 탄성처짐이 발생한다. 이후 현장에서 부재를 설치하기 위해 크레인 등의 장비로 양중 시와 설치 후 풍하중 및 콘크리트 타설 시에도 탄성처짐이 발생한다. 각각의 최대 탄성처짐에 대하여 구조 해석을 진행하였다.

2.3.2.1 탈형 시 최대 탄성처짐

실제 현장 시공에 적용할 MDW 부재 형상은 높이가 13.5 m, 자중은 14 ton, $F_{ck} = 40 \text{ mpa}$ 공장에서의 탈형시 수평 줄결이 운반대의 양측면에서 인양고리를 걸어 탈형 후 야적장으로 운반하게 된다. 이때 탈형 시 충격으로 인해 크랙이 발생할 수 있으므로 유의하여야 한다.

Fig. 5는 MDW 공장에서 몰드에서 탈형 시 최대 탄성처짐이며 수치는 2.62 mm이다.

Fig. 5. Maximum Elastic Deflection During Demolding

2.3.2.2 운반 시 최대 탄성처짐

MDW 운반은 공장에서 현장까지 트레일러로 운반한다. MDW 부재 형상은 높이가 13.5 m, 자중은 14 ton, $F_{ck} = 40 \text{ mpa}$, 운반시 부재력에 대한 동적계수 적용: 2.0 동적계수 2.0은 정하중에서 갑작스레 작용한 하중으로 정하중에 의한 처짐이 2배가 되는 처짐을 의미한다. Fig. 6은 MDW 공장에서 현장까지의 운반과정에서 발생하는 최대 탄성처짐이며 수치는 1.09 mm이다. 차량운반에 대한 동적계수 2.0이 반영되었으나 그 이상의 충격이 발생시 균열, 깨짐 등이 우려되며 차량운행 시 쏠림 및 중력방향 충격에 유의하여야 한다.

Fig. 6. Maximum Elastic Deflection During Unloading

2.3.2.3 세우기 시 최대 탄성처짐

MDW 세우기는 크레인 후크를 부재 최상단 연결빔 홀에 슬링벨트를 넣어 결속한 후 서서히 인양한다. MDW 부재 형상은 높이가 13.5 m, 자중은 14 ton, $F_{ck} = 40 \text{ mpa}$, MDW

Fig. 7. Maximum Elastic Deflection During Installing

인양 각도: 30도 Fig. 7은 MDW 현장설치에서 발생하는 최대 탄성처짐이며 수치는 3.64 mm이다.

Fig. 8은 세우기 시 하단부 끝단에서 1~1.5 m 높이 위치에 처짐으로 인한 균열 발생우려가 있으므로 컷선재 등을 이용하여 처짐을 분산시켜 크랙을 방지하도록 한다.

Fig. 8. MDW Unloading & Installation

2.3.2.4 풍하중에 대한 최대 탄성처짐

풍하중의 안전성 검토 조건은 MDW 중요도 계수는 0.6, MDW 높이는 13.5 m, 지표면 조도는 C, 기본풍속은 28 m/sec이다. Fig. 9는 MDW 풍하중에서 발생하는 최대 탄성처짐으로 수치는 4.01 mm이다. 건물분류는 가시설로 기준을 정하여 검토하였다.

Fig. 9. Maximum Elastic Deflection for Wind Loads

풍하중은 태풍 등 예상하지 못한 상황이 발생할 수 있으므로 현장 설치 시는 추가적인 안전성 확보를 위해 Fig. 10과 같이 MDW 지지용 서포트를 하부에 2개를 설치하고 하부 양카도 설계상 2개이나 1개를 추가로 설치하여 전도방지에 대응한다.

Fig. 10. MDW Support & Anchor

2.3.2.5 콘크리트 타설 측압에 의한 최대 탄성처짐

MDW 설치후 벽체 내부 중공부에 콘크리트를 현장 타설한다. MDW 부재 높이는 13.5 m이고 자중은 14 ton이다. 콘크리트 강도는 40 MPa이다. 작용하는 인장력 C_c 는 1.2이며 타설시간은 7시간으로 기준한다. 이때 타설측압은 60.4 kN/m^2 이다. 타설속도는 시간당 2.0 m를 기준으로 하고 타설 온도는 춘절기 20도 기준으로 한다. Fig. 11은 상기조건에서 발생하는 측압의 최대탄성 변위로 수치는 5.1 mm이다. 또한, MDW 탈형, 운반, 세우기, 풍하중, 콘크리트 타설 측압에 의한 최대탄성처짐은 Table 2로 정리하였다.

Fig. 11. Maximum Elastic Deflection for Concrete Side Pressure

2.3.3 MDW의 응력상태와 최대응력

2.3.3.1 탈형 시 최대 응력

실제 현장 시공에 적용할 MDW 부재 형상은 높이가 13.5 m, 자중은 14 ton, 콘크리트 강도는 40 MPa이다. Table 3, Fig. 12와 같이 부재의 최대 소요 압축응력은 5.59 MPa로 허용 압축응력(f_c) 16 MPa 보다 적으므로 안전하며, 최대소요 인장응력은 3.75 MPa로 허용 인장응력(f_t) 3.98 MPa 보다 적으므로 안전하다.

Table 2. Deformation State of Member and Maximum Elastic Deflection

Factor	Deformation state of pc member	Maximum elastic deflection
demolding		2.62mm
carrying		1.09mm
installating		3.64mm
wind loads		4.01mm
concrete pouring		5.10mm

Table 3. Maximum Stress at Demolding

Division	Contents	Remarks
Allowable compressive stress(f_c)	$0.4 f_{ck} = 16.0 \text{ MPa}$	
Maximum required compressive stress	$5.59 \text{ MPa} < f_c$	ok
Allowable tensile stress(f_t)	$0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.98 \text{ MPa}$	
Maximum required tensile stress	$3.75 \text{ MPa} < f_t$	ok

Fig. 12. Maximum Stress at Demolding

2.3.3.2 운반 시 최대 응력

MDW 운반은 공장에서 현장까지 거리는 약 60 km이고 트레일러로 운반을 하게 된다. 현장에서 하역 시는 수평줄결이 운반대를 사용하여 하역한다. Table 4, Fig. 13과 같이 최대 소요 압축응력은 6.67 MPa로 허용 압축응력 16.0 MPa 보다 적으므로 안전하다. 최대소요 인장응력 3.95 MPa는 허용인장응력 3.98 MPa 보다 적으므로 안전하다.

Table 4. Maximum Stress During Transport

Division	Contents	Remarks
Allowable compressive stress(f_c)	$0.4 f_{ck} = 16.0 \text{ MPa}$	
Maximum required compressive stress	$6.67 \text{ MPa} < f_c$	ok
Allowable tensile stress(f_t)	$0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.98 \text{ MPa}$	
Maximum required tensile stress	$3.95 \text{ MPa} < f_t$	ok

Fig. 13. Maximum Stress at Carrying

2.3.3.3 양중 시 최대 응력

부재를 크레인으로 양중 시 30도 각도를 기준으로 구조 해석하였다. Table 5, Fig. 14와 같이 최대소요압축응력 5.56 MPa는 허용압축응력 16.0 MPa 보다 적으므로 안전하다. 최대소요인장응력 2.70 MPa는 허용인장응력 3.98 MPa 보다 적으므로 안전하다.

Table 5. Maximum Stress at Full Load

Division	Contents	Remarks
Allowable compressive stress(f_c)	$0.4 f_{ck} = 16.0 \text{ MPa}$	
Maximum required compressive stress	$5.56 \text{ MPa} < f_c$	ok
Allowable tensile stress(f_t)	$0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.98 \text{ MPa}$	
Maximum required tensile stress	$2.70 \text{ MPa} < f_t$	ok

Fig. 14. Maximum Stress at Unloading

2.3.3.4 설치 시 최대 응력

설치 시는 Table 6, Fig. 15와 같이 최대소요압축응력 2.94 MPa는 허용압축응력 16.0 MPa보다 적으므로 안전하다. 최대소요인장응력 2.32 MPa는 허용인장응력 3.98 MPa 보다 적으므로 안전하다.

Table 6. Maximum Stress at Installation

Division	Contents	Remarks
Allowable compressive stress(f_c)	$0.4 f_{ck} = 16.0 \text{ MPa}$	
Maximum required compressive stress	$2.94 \text{ MPa} < f_c$	ok
Allowable tensile stress(f_t)	$0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.98 \text{ MPa}$	
Maximum required tensile stress	$2.32 \text{ MPa} < f_t$	ok

Fig. 15. Maximum Stress at Installing

2.3.3.5 타설 시 최대 응력

타설 시는 Table 7, Fig. 16과 같이 최대소요압축응력 3.0 MPa는 허용압축응력 16.0 MPa보다 적으므로 안전하다. 최대소요인장응력 3.91 MPa는 허용인장응력 3.98 MPa 보다 적으므로 안전하다. 또한, MDW 탈형, 운반, 양중, 설치, 타설에 의한 최대소요인장응력은 Table 8로 정리하였다.

Table 7. Maximum Stress at Pouring

Division	Contents	Remarks
Allowable compressive stress(f_c)	$0.4 f_{ck} = 16.0 \text{ MPa}$	
Maximum required compressive stress	$3.0 \text{ MPa} < f_c$	ok
Allowable tensile stress(f_t)	$0.63 \sqrt{f_{ck}} = 3.98 \text{ MPa}$	
Maximum required tensile stress	$3.91 \text{ MPa} < f_t$	ok

Fig. 16. Maximum Stress at Pouring

Table 8. The Result of Stress Condition and Maximum Stress of pc Member

Factor	Stress state of pc member	Maximum compressive stress(MPa) Maximum tensile stress(MPa)
demolding		5.59 < fc 3.75 < ft
carrying		6.67 < fc 3.95 < ft
unloading		5.56 < fc 2.70 < ft
installation		2.94 < fc 2.32 < ft
concrete pouring		3.00 < fc 3.91 < ft

3. MDW 실적용 사례

3.1 적용 프로젝트 개요

프로젝트 개요는 아래와 같다

- 공사명: M 건축물공사, 공사비: 6천억원
- 공사기간: 2018.01 ~ 2019.8 (20개월)
- 공사종류: 플랜트 건축물공사
- 설계자: 이영범외, 회사명: S사

• 발주자: L사, 시공자: N사, 사업관리: H사

상기 프로젝트를 선정한 사유는 지하층 외벽공사규모가 높이 13.5 m이고 시공길이가 약 400 m에 해당되고 플랜트 건축물 특성상 짧은 기간동안 공사를 완료해야 함으로 이를 완성하기 위해 초기부터 DFS를 통한 설계안전을 시행하고 기술인투입을 최소화 하여 현장작업을 줄이고 공장에서 제작된 제품을 운반, 설치하는 공법으로 대안을 제시하여 시행하였다. 18년 7월~9월간 약 3개월 공사를 수행한 결과 재래식거푸집공법에 비해 기술인인력 저감, 공기단축, 안전성확보의 장점이 있었다. Table 9는 실제 M 건축물공사에 적용한 사례이며 재래식현장은 M 건축물공사 인근 프로젝트이다. 두 개 현장은 규모 및 공사기간이 유사하여 이를 비교한 결과 MDW를 적용한 현장이 인원 투입은 77.3%로 22.7% 저감하였고, 공사기간은 87.6%로 12.4% 공기단축 효과가 있었으며, 위험성평가 시 도출된 위험요인은 58.3%로 41.7% 저감되었다.

Table 9. Comparison of MDW Method and Conventional Method for Workers Input, Construction Period, Risk Factors

Division	Unit	MDW	Conventional	Percentage
Workers	persons	841	1,052	77.3
construction period	day	92	105	87.6
Risk factor	amount	14	24	58.3

3.2 MDW 적용 검토

플랜트건축물 특성상 발주자는 제품 출하를 조기에 하여 매출 및 이익을 창출해야 한다. 이에 발주자는 시공자에서 수행하는 건축물 공사완료를 당초 23개월에서 20개월로 3개월 단축 해달라는 요청사항이 발생하였다. 전체 공기 중 3개월을 단축하더라도 안전사고는 발생하지 않으면서 공사 수행할 것을 요청하였다. 전체 공기 23개월 중 공기단축이 가능한 공종은 구조체공사에서 2개월 단축하고 마감공사에서 1개월을 단축하는 것을 목표로 하였다. 이에 초기설계 단계부터 공기단축, 기술인인력 투입 최소화, 안전시공, 품질확보를 위한공법을 발굴하였다. 초기설계에 반영이 되지 않는 것은 공사수행을 하면서 문제점 도출 및 개선안을 수립하여 진행하였다. 또한, 기존 재리식과 개선안에 대한 위험요소를 도출하고 위험성평가를 거쳐 설계안전 적정대안을 수립 후 안전설계에 반영하였다.

3.2.1 설계단계 위험요인 저감 대책

설계단계에서 설계단계에서는 MDW 공법의 구조적 강성을 확인하기 위해서 공장 제작 시 몰드에서 탈형, 운반, 양중하자, 설치, 풍하중, 콘크리트 타설시 측압 등에 대한 변형

상태와 최대 탄성 처짐 및 부재의 응력상태와 최대응력 검토를 실시하였다. 또한, 안전시공을 위해 설계단계에서 안전저감을 위해 위험요인 제거, 대체, 기술적 제어, 관리적 통제, 개인보호구 중 제거단계를 적용하여 안전설계를 실시한다는 Hierarchy of Controls을 따라 저감대책 개선안을 수립하였다. 저감대책 개선안으로는 기존 재래식거푸집 공법으로 수행시 벽체 높이가 13.5 m의 고소작업으로 인해 추락, 낙하 등의 위험요인이 발생한다. 이를 제거하기 위해 현장에서의 가설공사, 거푸집, 철근 설치 작업을 최소화하는 방향으로 공장제작 공법인 PC 공법인 MDW 공법을 적용하였다. MDW 공법 적용 시 현장에서의 비계설치 해체, 철근가공조립, 거푸집설치 해체, 콘크리트타설, 거푸집해체, 동바리비계해체 등의 6단계를 MDW 설치, MDW와 MDW간 판관 철근보강 시공, 콘크리트 타설 3단계로 저감되어 시공 및 안전에서 크게 향상되었다.

3.2.2 지하외벽공사 MDW적용

공장 제작된 부재는 트레일러 차량을 이용하여 현장에 반입한다. 기존 재래식 외벽공사에 비해 현장에서의 조립, 설치 인력이 대폭 감소되어 성력화 되고 공기단축, 품질향상 및 안전에서는 고소작업이 줄어 추락, 낙하, 비래 등의 안전사고를 획기적으로 줄이는 공법이라 할 수 있다. Fig. 17은 제작과정을 나타내었다.

Fig. 17. MDW Reinforcement and Formwork Installation (Photo by Author, 2018)

부재가 현장에 도착을 하면 타워크레인 또는 하이드로크레인 장비로 하역을 실시한다.

Fig. 18과 같이 하역 시는 부재길이에 해당되는 철골수평대를 MDW에 매립된 인서트에 줄걸이를 균등하게 걸쳐서 수평을 맞춘 후 하역 한다. 부재를 현장 설치 시에는 타워크레인 등의 양중장비를 이용하여 설치를 실시한다. 설치하는 하역된 부재의 최상단 연결빔에 있는 인양구멍에 슬링벨트를 넣어 체결 후 서서히 한쪽부터 인양하여 수직으로 세운

후 설치할 위치로 이동하여 수직으로 설치한다. 이때 지면에 닿은 부재하부의 1 m 지점에서 하중이 집중되어 크랙이 발생할 수 있으므로 집중 하중을 분산시키기 위한 완충재를 고여 서서히 인양한다.

Fig. 18. MDW Unloading and Installation (Photo by Author, 2018)

Fig. 19. MDW Base Anchor, Support and Link Plate Installation After MDW Assembly (Photo by Author, 2018)

Fig. 19와 같이 현장에서 MDW 설치 후 풍하중, 외부충격에 의한 전도 방지를 위해 하부 기초 앵커에 볼트를 체결하고 추가적으로 벽체에 서포트로 지지대를 설치한다.

MDW 콘크리트 타설 전에 Fig. 20과 같이 타설발판을 MDW상부에 타설 작업발판을 제작하여 설치한 후 스카이장비를 이용하여 기술인들이 올라가 타설을 진행한다. 벽체 타설은 측압을 많이 받는 관계로 10 m 높이를 5회 분할하여 타설 진행한다. 구조적으로는 1회 타설시 2 m/h이 가능하나 안전을 확보를 위해서 1회 타설 시 1.5 m/h 이하로 타설을 실시하고 이후 2회 타설부터는 2 m/h 씩 타설을 진행한다. 1회 타설 후 90분 후 순차적으로 타설을 진행한다.

Fig. 20. MDW Concrete Pouring (Photo by Author, 2018)

4. 현장 적용시 문제점 및 개선안

4.1 품질관리 문제점 및 개선안

공장제작하여 현장도착 시 MDW 부재에 대한 품질검사를 시행한 결과 품질에 문제가 발생한다. Fig. 21은 품질관리 수준을 나타낸 것으로 공장으로 다시 회차 되는 경우가 총 부재수 400매 중 64매로 16%에 해당 된다. 초기 7월은 회차율이 20.25%, 8월은 16.67%, 9월은 8.16%로 점차 감소되었다.

Fig. 21. MDW Export Status

회차 된 64개 부재를 원인분석 하여 본 결과 Fig. 22와 같이 나타났다. 부재 크랙으로 회차가 36개, 부재 두께 부족이 16개, 부재의 레이턴스 미제거가 8개, 기타 크기부족 등 4개가 발생하였다.

Fig. 22. MDW Export Detail Status

개선안 도출을 위해 발주자, 감리자, 시공사가 개선대책회의를 매주 1회 실시하였다. 개선대책으로 MDW 생산 공장에 PC 검사 전문기를 상주하여 일일 품질관리를 실시하고 부재 출고전 협력사 및 시공사 직원이 입회하여 품질관리 실시 후 출고하여 점진적으로 회차율을 줄였다.

4.2 시공관리 문제점 및 개선안

부재설치 및 콘크리트 타설 시 단계별 위험성평가를 실시하였으나 크레인으로 인양시 MDW 하부 1 m에 집중하중이 발생하여 크랙이 발생하는 것과 콘크리트 타설 시 연결플레이트 수량 부족으로 콘크리트 측압으로 인한 변위발생이 구조해석보다 크게 발생하는 상황은 평가에 누락이 되어 Table 10과 같이 위험성평가를 재실시하였다. 개선안으로는 기존 MDW 하부 고임목을 높이 100 mm 나무로 사용하였으나 크랙 방지를 위해 완충역할을 하는 높이 1000 mm 컷선재 품으로 고임목을 사용하여 개선하였다. 또한, 콘크리트 타설 시 타설높이가 구조계산서에 의하면 2 m/h 타설 시 부재의 상, 하 수직 구간의 최대변위가 5.1 mm이나 실제 현장에서 상기 기준대로 타설한 결과 MDW 부재가 수평길이 8.4 m 구간에서 변위가 15 mm가 발생하였다. 이는 MDW 상부 부재와 부재를 연결하는 연결플레이트의 응력부족으로 변위가 발생하였다. 개선안으로는 상부 연결플레이트를 당초 1개 시공이었으나 4개로 추가 보강하여 시공하였다. 그 결과 변위가 5 mm 이내로 완화되었다

Table 10. Risk Assessment During MDW Member Lifting and Pouring

Hazardous, risk factors and risk	Grade		
	Frequency	Serious	assessment
MDW crack occurs due to load generation at 1m below member in lifting	3	4	12
MDW is jammed due to lack of connecting plate when concrete is poured	2	4	8

상기 Table 10은 MDW 설치 전 위험성평가를 실시하였으나 실제 현장에서 시공 시 나타난 예측되지 않은 위험성평가를 재실시하였다. 실시결과 인양 시 부재하부에 집중하중으로 인해 크랙이 발생할 경우 위험평가를 12점, 타설 시 부재간 변위 발생으로 벽체 터짐 우려가 있어 위험평가를 8점으로 평가하였다. 이를 저감하기 위해 Fig. 23은 상기 위험성평가를 실시한 후 부재인양 시 부재 하부에 컷선재를 설치하여 크랙을 방지하였고 콘크리트 타설 시 연결플레이트를 수량을 당초 1개에서 4개로 추가하여 변위를 구조기준 이내로 들어오도록 진행하였다.

Fig. 23. Improvement Plan of Construction

4.3 안전관리 문제점 및 개선안

부재를 현장에서 하역 후 크레인으로 인양하여 설치 전 작업단계별로 위험성평가를 실시하였으나 설치 시 슬링벨트를 MDW홀에 넣어 인양 시 홀의 모서리가 날카로워 슬링벨트가 끊어지는 위험요인이 발생하였다. 이에 위험성평가를 재실시하여 Table 11과 같이 도출한 후 개선방안을 수립하였다. 개선안은 공장제작 후 출하 전 인양 홀 주변을 둥글게 보수를 하지 않아 발생하였으므로 공장에서 출하 전 인양홀 주변을 둥글게 보수하고 이를 출하 전 반드시 품질담당자가 검사하여 출하시켜 이후에는 안전하게 작업을 수행하였다.

Table 11. Risk Assessment During MDW Member Installation

Hazardous, risk factors and risk	Grade		
	Frequency	Serious	assessment
With the belt hole in the corner of the sling falling friction	3	4	12
The absence of rotation caused by technology and narrowing the conflict	2	4	8

상기 Table 11은 MDW 인양 전 위험성평가를 실시하였으나 실제 현장에서 예측되지 않은 위험성이 나타나서 위험성평가를 재실시하였다. 실시결과 인양시 슬링벨트가 부재 홀 모서리에 긁혀 손상이 발생하여 위험평가를 12점, 부재와 장비간의 충돌을 8점으로 평가하였고, 이를 저감하기 위해 Fig. 24와 같이 공장에서 부재출하 전에 인양홀을 둥글게 보수하도록 시행하고 출하 전 보수사진을 확인 후 출하하였다. 장비와 부재간 충돌 방지를 위해서는 신호수를 2명 배치하여 신호체계를 정립하여 시행하였다.

Fig. 24. Improvement Plan of Safety

5. 결 론

본 연구 시 지하층 구조체인 외벽공사를 기존 재래식 거푸집공법에서의 문제점인 기술인 인력투입의 과다, 공사기간의 증가, 안전사고의 위험요인 증대, 품질저하 등의 단점을 보완하기 위해서 설계초기단계부터 DFS 개념을 도입하여 설계안전성검토 개념에 입각한 발주자, 설계자, 시공자, 협력사와 여러차례 위험저감 대안 도출을 진행하였다. 대안방법으로 공장제작 제품인 MDW 공법을 개발하여 구조적으로 요구강성에 적합한지를 구조계산 하여 안정성을 확보 하였고 이를 실제 현장에서 적용하여 기존의 단점을 개선하여 기술인 인력 투입을 줄이고, 공기는 단축하고 안전 위험요인은 대폭 저감시키는 결과를 도출하였다. MDW 공법이 개선된 공법이지만 설계단계에서 발굴하지 못하였던 구조, 시공, 안전상의 문제는 일부 현장에 적용 하면서 문제점을 발굴하고 개선하였으나, 향후 추가 시행하는 프로젝트에서는 설계 초기단계에서부터 발굴하지 못한 위험요인을 발굴해야하는 프로세스 개선은 연구과제로 남았다. 또한, 향후 외벽공사뿐만 아니라 타 공종에서도 설계안전성 검토를 반영한 많은 연구가 이루어져야 한다.

References

- Hong, S.Y., and Oh, S.Y. (2018). Survey on precast concrete construction in Korea. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 233-234.
- Ji, K.H., and Choi, B.J. (2017). A study on safety improvement of domestic construction industry subject to design for safety review. *Journal of Korea Safety Management & Science*, Vol. 19 No. 4, pp. 63-76.
- Kang, T.S. (2013). Precast concrete construction of SAMPYO engineering & construction LTD., R&D Institute. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 4, pp. 46-49.
- Kim, J.S., Jung, J.W., Lee, K.H., and Ahn, J.M. (2004). Recent domestic precast concrete slab technologies. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 5, pp. 16-19.

- Lee, J.M., and Choi, I.S. (2007). Present and Future of Precast Concrete Structure. *Review of Architecture and Building Science*, Architectural Institute of Korea, Vol. 51, No. 4, pp. 76-82.
- Lee, S.H. (1991). *A study on the properties of precast concrete construction*. Master's thesis, Konkuk University.
- Moon, J.H., and Choi H.C. (2016). *MDW Structural Performance Test Report*. Hannam University, pp. 1-11.
- Oh, S.Y., Hong, S.Y., and Park, K.M. (2017). A study on the site work of precast concrete double composite wall. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 2, pp. 407-408.
- Oh, Y.H., and Moon, J.H. (2017). *Evaluation Study on the integral of the PC and the RC of the MDW method*. Korea Concrete Institute, pp. 1-36.
- Park, K.M. (2017). *A study on the production and construction of precast concrete walls*. Master's thesis, Kyonggi University.
- Roh, H.S., and Hashlamon, I.H. (2016). Hysteretic model and seismic response of partial precast concrete piers with cast-in-place for base and outside of hollow cross section. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, pp. 123-124.
- Seo, S.Y., Yoon, S.J., and Lee, W.J. (2008). Evaluation of structural performance the hollow PC column joint subjected to cyclic lateral load. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, pp. 335-343.
- Shin, J.Y. (2017). *Advancement of Construction Safety and Health in the Age of the Fourth Industrial Revolution*. Kyunggi University, KOSHA, pp. 59-69.
- Yang, H.M., Han, S.J., Lee, S.H., Choi, S.H., Chung, J.H., and Kim, K.S. (2018). Out of plane behavior of double composite PC walls. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 149-150.

Received	October 4, 2018
Revised	October 10, 2018
Accepted	December 20, 2018