

RC건축물 해체공사의 안전성 평가기법 및 탑재장비 등급 제안

Technique to Evaluate Safety and Loaded Heavy Equipment Grade in RC Building during Demolition Work

박성식¹ · 이범식² · 김효진³ · 손창학⁴

Seong-Sik Park¹, Bum-Sik Lee², Hyo-Jin Kim³ and Chang-Hak Sohn⁴

(Received March 5, 2011 / Revised April 5, 2011 / Accepted April 20, 2011)

요 약

철근콘크리트 건축물에 중장비를 탑재하여 해체작업을 시행할 때, 중장비와 철거잔재의 중량은 건축물을 설계할 당시에 고려하지 못한 하중으로 작용한다. 그러나 우리나라 해체 현장에서는 건축물의 안전성에 대한 구조전문가의 검토 없이, 현장 관리자나 작업자의 경험에 의하여 중장비 탑재와 해체작업이 이루어지고 있어 작업 중에 건축물이 붕괴하거나 중장비가 추락하는 사례도 발생하고 있다. 따라서 해체공사 시행 과정에서 해체 대상 건축물의 구조안전성을 평가할 수 있는 평가기법과 구조부재가 부담할 수 있는 적정 장비중량에 대한 기준 마련이 시급한 실정이다. 이 논문에서는 기계해체 현장에 대한 방문조사와 작업근로자에 대한 설문조사를 통해 해체 대상 건축물의 안전성 평가에 필요한 철거잔재 하중, 하중계수, 강도감소계수, 작업하중 등을 제안하였다. 해체 현황을 고려한 구조물의 해석과 부재(슬래브, 보)의 적절한 안전성 평가방법을 제시하였으며, RC 슬래브와 RC 보의 제원에 따라 양중 가능한 중장비의 중량을 제시하였다. 이 연구에서 제안한 해체구조물의 안전성 평가기법과 중장비 탑재 등급은 해체대상 구조부재의 성능을 합리적으로 평가하고, 적절한 장비운용을 통한 해체작업의 효율성과 안전성을 향상하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어: 기계해체, 구조안전성, 항복선 이론, 비선형해석

ABSTRACT

During mechanical demolition of RC structures, weights of dismantling equipment and demolition waste of building are applied to unexpected load which did not be considered during the design of structural member. Nevertheless, the loading of dismantling equipment and dismantling process are mainly dependent on field managers' field workers' or experiences without considering safety of structural member by a structural engineer. It is urgently required that reflecting actual circumstance of mechanical demolition, safety evaluation method to evaluate the safety and the guideline for appropriate capacity of structural member to support dismantling equipment weight, be provided. Through site investigation and questionnaire on field workers, this paper proposed demolition waste load, load factor, strength reduction factor, and so on. These are essential to safe evaluation of a building, ready to demolition. Considering actual circumstance of mechanical demolition, safety evaluation method of building and design method of slab and beam was suggested to a dilapidated building. An capability to loading of dismantling equipment was proposed, applied to RC slab and RC beam. Therefore, the suggested safety evaluation method and the guideline for an capability to loading of dismantling equipment weight can reasonably evaluate the capacity of structural member in demolition and use effectively as increasing efficiency and improving safety of demolition through proper management of dismantling equipments.

Key words: Mechanical demolition, Structural safety, Yield line theory, Nonlinear analysis

1. 서론

국내·외 해체기술 적용 현황을 고려할 때 구조물 해체방식은 크게 기계해체와 발파해체로 구분할 수 있다. 근래 들어 대규모 고층구조물의 해체공사가 증가함에 따라 발파해체의

적용사례도 점증하고 있으나 아직 우리나라에서는 굴삭기에 브레이커나 압쇄기를 장착한 장비(이하 '중장비'라고 함)로 대상물을 파쇄하는 기계해체공사가 대부분을 차지한다.

일반적으로 단독주택을 포함한 6층 이하 공동주택의 해체공사에서는 중장비가 지상에서 대상물을 직접 파쇄하지만,

본 연구는 건설교통부의 2003년도 건설기반구축사업 수도권지역특성화사업(R&D 03기술기반 C01)의 지원으로 수행됨.

- 1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: spark72@lh.or.kr)
- 2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: bslee417@LH.or.kr)
- 3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원
- 4) 한국토지주택공사 인천지역본부 과장

높이가 7층 이상이 되면 굴삭기의 작업 반경에 한계가 있어 지상에서 작업은 불가하다. 이 경우 해체공사는 중장비를 대상물의 최상층에 인양, 탑재한 후 아래 방향으로 한 층씩 파쇄하여 내려가는 방식으로 수행한다.

그러나 이러한 방식에서는 해체작업 도중 중장비의 추락, 구조적 불안전으로 인한 건축물 붕괴 등 안전사고 위험성을 내재한다. 중장비 자체하중, 작업 중 발생하는 충격 및 진동하중, 작업 층에 적재되는 철거잔재의 하중 등 건축물 설계 당시에는 고려하지 않은 다양한 변수가 존재하기 때문이다.

반면에 우리나라에서 수행되는 대부분 해체공사에서는 구조분야에 지식이 전혀 없는 현장감독자나 장비기사가 탑재할 중장비의 중량등급과 작업 층 보강방법 등을 경험적으로 결정하고 있다. 또한, 해체공사 계획단계에서도 작업 안전성 확보를 위한 구조전문가의 검토가 거의 수행되지 않고 있다. 이 때문에 작업 층의 부재내력을 초과하는 중량의 중장비가 무리하게 탑재됨으로써 건축물이 붕괴하거나 중장비가 추락하는 사례도 발생하고 있다¹⁾.

이러한 배경에서 여러 연구자들이 해체 대상물 고층화에 대비한 고소작업 안전관리지침 및 설계기준 마련 등에 대한 필요성을 지적한 바 있으나(대한주택공사 2000, 건설교통부 2005, 김창학 등 2010), 아직까지 이 분야에 대한 실질적인 진전은 없는 상황이다.

이 논문에서는 철근콘크리트 건축물에 중장비를 탑재하여 해체공사를 수행하는 현장을 대상으로 방문조사와 실무자 면담조사 그리고 관련 문헌분석을 통하여 해체공사를 수행할 때 고려하여야 할 하중과 하중계수 등을 도출하였고, 이를 적용하여 보와 슬래브에 대한 탄성해석과 비선형해석을 수행하였다.

이러한 결과를 분석하여 우리나라의 해체공사 현장여건을 고려하여 적용가능한 구조물의 안전성 평가기법과 보와 슬래브와 탑재가능한 중장비의 중량등급을 제안하였다.

제안 결과는 해체대상 구조부재의 성능을 합리적으로 평가하고 해체공사 작업안전성을 향상시키는 데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 해체공사 현황 조사

2.1 일반 현황

2.1.1 기계해체작업 실태

현재 건축물 해체공사에서 일반적으로 사용하는 중장비는 대차등급²⁾이 0.1~1.0m³급인 압쇄기나 브레이커 장비이다.

이 장비는 무한궤도형 굴삭기의 버킷(bucket) 부분을 제거하고 콘크리트 파쇄기인 압쇄기(crusher)나 브레이커(breaker) 등을 장착한 것이다.

표 1은 우리나라 해체공사 현장에 주로 사용되고 있는 중장비의 대차등급별 중량을 나타낸 것이다.

표 1. 해체 중장비의 중량

대차등급(버킷용량)	0.5m ³ 급	0.8m ³ 급	1.0m ³ 급
중량 (tf)	13.40~13.98	19.30~21.50	27.00~28.80

표 2. 건축물 높이에 따른 해체작업 방법

건축물 높이	해체작업 방법
3층(10m) 이하	건축물의 층고에 맞는 적정 대차등급의 압쇄기나 브레이커 장비로 지상에서 직접 해체
4~6층(10~18m)	건축물 외부에서 중장비에 의한 해체가 가능한 높이로 성토체를 조성한 후 성토체 위에서 해체작업 수행
7층(18m) 이상	건축물 최상층에 압쇄기나 브레이커 장비를 탑재하여 아래 방향으로 한 층씩 해체

건축물이 비교적 저층이고 현장 내 여유 공간이 충분하면 중장비가 지상에서 직접 대상물을 해체할 수 있기 때문에 작업 효율을 높이기 위하여 가능한 대형 중장비가 투입된다. 그러나 도심지에 있는 고층 건축물은 굴삭기 붐(boom) 길이의 한계 때문에 지상 작업이 불가능하므로 최상층 슬래브에 중장비를 탑재하고 아래 방향으로 한 층씩 파쇄작업을 수행한다.

LH의 연구결과에 따르면 공동주택 아파트를 기준으로 할 때, 기계해체작업은 층수 및 높이에 따라 표 2와 같이 수행하는 것으로 보고되어 있다(대한주택공사, 2000).

2.1.2 기계해체작업 순서

여의도 소재 RC 라멘조 오피스 빌딩(지상 12층, 지하 3층) 해체공사 현장을 대상으로 탑재한 중장비의 제원, 해체작업 순서 및 작업안전성 확보방안 등을 조사하였다.

해체작업은 그림 1에서와 같이 건축물의 옥상층 슬래브에 0.8m³급 중장비 1대를 탑재한 후 하부 층으로 이동하면서 슬래브, 벽체, 기둥 등을 파쇄하는 방식으로 진행되었다. 작업의 안전성 확보를 위하여 작업 층으로부터 아래 3개 층까지 보 하부에 잭 서포트(Jack Support)를 설치하여 구조내력을 보강한 것으로 확인되었다(그림 2). 잭 서포트의 배치간격은 4m 정도로 구조계산에 의한 간격이 아닌 현장소장의 시공경

1) 1997~2004년까지 해체 현장 사고사례를 조사한 결과, 3건 정도가 무리한 중장비 탑재에 의한 것으로 확인되었다. 사고사례의 특수성으로 관련업체의 자료 공개가 원활하지 않음을 감안하면 실제 발생 건수는 더 많을 것으로 예상된다.

2) 압쇄기나 브레이커는 작업 능력에 대한 표준화된 등급이 정립되어 있지 않다. 따라서 현장과 실무에서는 압쇄기나 브레이커가 장착되는 굴삭기(백호우)의 버킷 등급으로 대체하여 '대차등급'이라는 표현을 사용하고 있다.

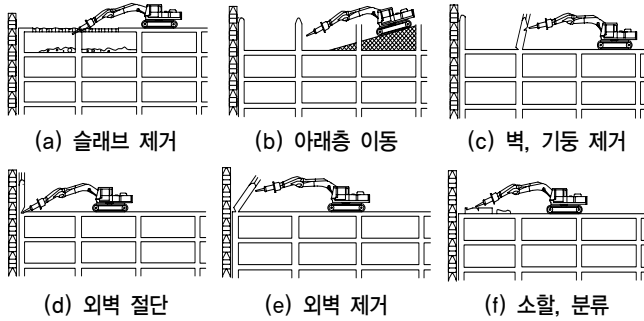


그림 1. 기계해체작업 순서



(a) 슬래브 해체 전경 (b) 작업 층 하부 잭 서포트 보강

그림 2. 기계해체작업 전경

험에 의한 것으로 확인되었다.

그림 1은 기계해체작업 순서를 모식화한 것이고 그림 2는 작업 전경을 나타낸 것이다.

2.2 구조안전성 평가를 위한 현황 조사

2.2.1 중장비 자중

해체공사 현장을 조사한 결과, 고정하중 외에 중장비 때문에 슬래브에 추가로 적재되는 하중은 $1.0 \sim 1.5 \text{ tf/m}^2$ 정도인 것으로 확인되었다. 이는 일반적인 RC 건축물을 신축 설계할 때 고려하는 하중 ($0.25 \sim 0.5 \text{ tf/m}^2$)을 3~4배 정도 초과하는 수치이다. 그러나 작업 층 하부 슬래브와 보의 육안조사에서는 안전성에 영향을 미칠 만한 심각한 균열은 관찰되지 않았다. 작업 층을 포함한 하부 3개 층의 보에 일정한 간격으로 잭 서포트를 설치한 것이 구조내력 보강에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2.2.2 철거잔재 중량

해체 과정에서 슬래브나 보에 적재되는 철거잔재 중량은 중장비 자중과 함께 건축물을 설계할 때 고려하지 못한 하중으로 작용하게 되므로 해체작업의 구조안전성 검토에서 중요한 데이터가 된다.

조사 결과, 콘크리트, 목재 및 이물질 등이 혼합된 상태의 철거잔재 무게는 1.38 tf/m^3 이며, 콘크리트만 분별한 잔재의 무게는 1.43 tf/m^3 으로 확인되었다. 따라서 해체작업의 안전

성을 검토할 때, 철거잔재가 구조물에 작용하는 하중은 1.5 tf/m^3 으로 가정하여 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

2.2.3 실무자 설문 조사

현장 실무자의 다양한 경험을 수집하기 위하여 해체공사 경험이 풍부한 현장소장 및 감독자 등 27명을 대상으로 설문 조사를 하였다. 조사 내용은 작업 과정에서의 관행, 중장비의 운용 및 작업안전성 확보를 위한 조치사항 등이다.

설문 결과, 대부분 현장이 0.8m^3 급 장비를 가장 많이 탑재하고 있는 것으로 나타났으며, 설문자의 84%가 “탑재할 중장비의 대차등급은 구조전문가의 검토 없이 경험적으로 결정하고 있다.”라고 응답하였다. 반면 구조적으로 취약할 것으로 예상하는 보 하부에는 잭 서포트 설치 등 제한적인 안전성 확보조치를 취하는 것으로 조사되었다.

철거잔재 취급과 관련해서는 설문 자의 33%가 “작업 과정에서 발생하는 철거잔재는 작업 층에 0.4m 정도 두께로 포설하면서 작업을 수행한다.”라고 응답하였고, 약 25%는 “발생하는 대로 지상으로 이동시키면서 작업을 수행한다.”라고 응답하였다. 한편, 대부분 응답자가 기계해체 현장의 안전기준 수립을 위한 제도적 장치 마련이 시급하다는데 의견을 같이 하였다.

3. 기계해체공사의 구조안전성 평가

3.1 일반사항

해체작업 과정에서 대상 건축물의 구조안전성을 평가하기 위하여 1차적으로 슬래브, 보에 대한 탄성해석과 구조설계를 수행하여 중장비의 탑재 가능 여부를 검토하였다. 또한 중장비의 탑재가 불가능할 경우 비선형해석을 수행하여 슬래브와 보의 지지능력을 평가하였다.

탄성해석에는 대표적인 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Gen을 사용하였고, 비선형해석에는 RC 구조물의 항복 이후 거동을 예측하는 데 용이한 GT-STRUDL을 사용하였다.

이 장에서는 2.2절의 현황조사 결과와 함께 해체대상 구조물을 해석할 때 고려해야 할 설계용 계수를 정의하고, 이를 적용하여 슬래브와 보에 대한 탄성해석과 비선형해석을 수행하였다. 그림 3은 이 논문에서 수행한 구조해석의 개략적인 흐름도를 보여준다.

3.2 구조해석의 고려 사항

3.2.1 하중계수

건축물 구조설계에 적용하는 하중계수와 강도감소계수는 시공 과정뿐만 아니라 건축물을 장기간에 걸쳐 사용할 때 그 구조적 안전성을 위협하는 예측하기 어려운 외력에 대응하기 위한 안전계수이다.

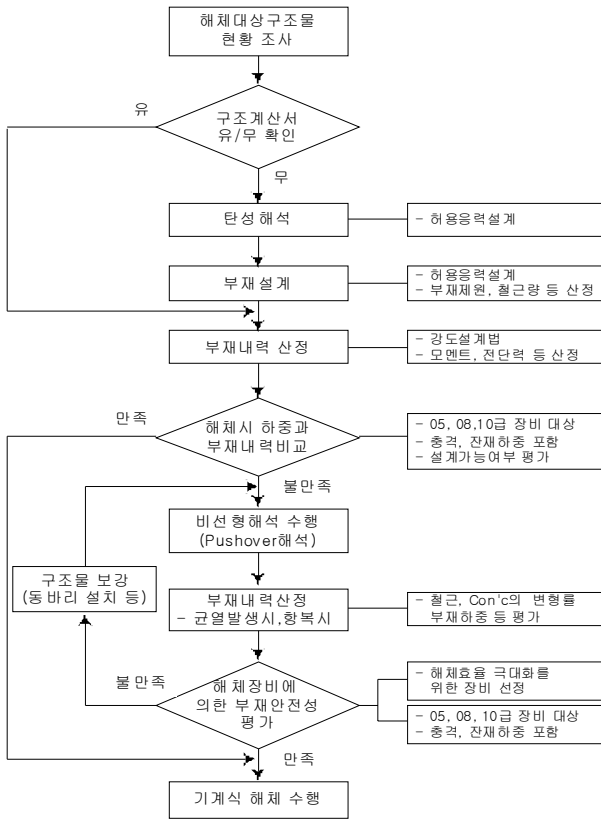


그림 3. 구조안전성 평가를 위한 구조해석 흐름도

그러나 해체대상 건축물의 대부분은 건립 이후 20년 이상 지난 것으로, 설계했을 때의 시공오차 등과 같은 불확실한 요소가 해체시점에서 확인할 수 있으며, 더 이상 사용되지 않으므로 향후 하중의 변동요인이 없다. 또한 해체할 때 작용하는 중장비의 무게와 철거잔재의 무게는 비교적 정확히 예측할 수 있으므로, 이 논문의 구조해석에서는 고정하중에 대한 하중계수는 고려하지 않았다.

3.2.2 충격하중계수

중장비의 충격하중은 바닥의 요철, 차량의 가속과 감속 및 하중의 분포 등에 따라 변화하며, 이를 충격이라 정의하고 충격계수로서 충격의 정도를 나타낸다.

이 논문에서는 중장비를 탑재하였을 때 증가할 수 있는 충격하중을 도로와 상황은 다르지만 해체 현장의 다양한 변수와 해체할 때의 안전을 고려하여 한국도로교통표준시방서에 적용되는 최대충격계수인 0.3을 적용하였다.

3.2.3 강도감소계수

강도감소계수는 재료의 공칭강도와 실제 강도와와의 차이, 부재의 제작과 시공 설계도면과의 차이 그리고 내력의 추정과 해석에 관련된 불확실성을 고려하기 위하여 마련된 안전계수이다.

표 3. 철근의 재료실험결과

SD240			SD400		
인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
51.24	33.05	29.40	65.05	46.19	24.70

자료: 대한주택공사(2002), 「프리패브 활용기술 연구(II)」

표 4. 슬래브 제원 및 재료물성

구조형식	전용면적 (m ²)	재료강도 (MPa)		부재 치수 (mm)	
		콘크리트	철근	슬래브	벽체
벽식구조	73.94, 84.20	21.0	SD240	120	150

자료: 대한주택공사(2002), 「프리패브 활용기술 연구(II)」

건립한 지 20년 이상이 지난 해체대상 건축물의 경우 탄성 해석을 수행할 때 구조부재의 급격한 파괴 등에 대한 최소안전조항으로 강도감소계수 적용이 필요할 것으로 판단되어, 이 논문에서는 현행 기준상의 계수를 적용하였다.

3.2.4 철근의 인장강도

철근의 인장강도는 콘크리트의 압축강도와 함께 RC 건축물의 구조적 거동에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. 실제 철근의 항복 및 인장강도를 광범위하게 측정된 연구결과(대한주택공사, 2002)를 해체대상 구조물에서 설계와 해석에 사용하였다(표 3).

4. 슬래브 구조안전성 평가

4.1 평가개요

1980년도에 건립된 10층 규모 RC아파트의 슬래브를 대상으로 강도설계법을 이용하여 구조안전성을 검토하였다. 검토대상 슬래브의 주요 제원은 표 4와 같다.

구조안전성을 검토할 때 하중상태가 확인된 해체구조물임을 감안하여 하중계수는 적용하지 않았으나, 해체작업을 수행할 때의 중장비 운용에 따른 충격하중은 고려하였다.

슬래브 설계에 사용되는 강도감소계수는 해체할 때의 재료 강도와 시공 정도를 명확히 확인하기 어려운 점 등을 고려하여 현행 설계기준의 계수 값을 적용하였다.

슬래브의 안전성을 평가할 때 대상 구조물에 하중으로 작용하는 해체 중장비와 철거잔재의 무게를 반영하였다. 철거잔재의 무게는 현장조사와 설문조사 결과를 반영하여(2.2절 참조) 0.6 tf/m²의 잔재하중이 슬래브에 등분포로 작용하는 것으로 가정하였다. 해체장비의 중량이 무한궤도를 통하여 등분포하중으로 작용하는 것으로 판단하고 작용 부위에 따라 정모멘트와 부모멘트가 가장 큰 슬래브 중앙부위와 벽체와 슬래브 접합부 등을 대상으로 Type 1~3의 장비하중이 작용

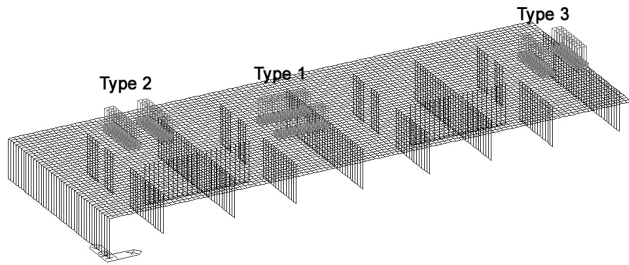


그림 4. 슬래브 해석모델

표 5. 슬래브 제원 및 재료물성

고정하중 (D.L.) (tf/m ²)		중장비 하중 (E.L.) (tf/m ²)
슬래브 및 마감	철거잔재	
슬래브 : 0.288 마감하중 : 0.10	1.5 tf/m ³ × 0.4m = 0.6	05m ³ 급 : 14.0 tf ÷ 3.6m ² = 3.88 08m ³ 급 : 21.5 tf ÷ 3.6m ² = 5.97

하는 것으로 가정하였다 (그림 4).

해석 결과, Type 1이 가장 불리한 것으로 나타나 이 논문에서는 Type 1의 중장비 하중이 작용할 때의 해석결과를 중심으로 기술하였다. 슬래브 해석에 사용한 하중은 표 5와 같고, 하중조합은 아래의 ①에서 ③과 같다.

- ① 순수하중 : 1.0 D.L. + 1.0 E.L.
- ② 충격하중 : 1.0 D.L. + 1.3 E.L.
- ③ 계수하중 : 1.4 D.L. + 1.7 E.L.

슬래브 안전성 평가를 위한 해석에는 그림 4와 같이 단위 층 전체를 대상으로 모델링하여 슬래브를 해체할 때의 슬래브 응력과 변형을 평가하였다.

4.2 탄성해석에 의한 평가

기계해체 공사를 할 때 탄성해석에 의한 슬래브의 안전성을 평가한 결과, 4.1절의 3가지 하중조합 중 슬래브에 작용하는 순수 하중만을 고려한 하중조합 ①의 경우만이 잔재하중 0.2 tf/m²과 0.5 m³급의 중장비를 탑재할 수 있는 것으로 나타났다. 충격계수를 고려하거나 현행 강도설계법의 하중조합을 고려한 하중조합 ②, ③의 경우는 0.5 m³급의 중장비도 적재할 수 없는 것으로 나타났다. 선형해석 결과는 표 6과 같다.

해체대상 아파트의 평형에 따라 슬래브 크기에 다소 차이가 있을 수 있으나, 탄성해석 결과에 의하면 현재 우리나라 해체 현장에서 주로 사용되는 0.5 m³급 중장비도 탑재가 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 실제 해체 현장에서는 0.5 m³급, 0.8 m³급 중장비가 운용되고 있으므로 탄성해석법 이외의 해석방법을 활용하여 해체하중에 대한 슬래브의 보유능력을 보다 정확히 평가해야 할 것으로 판단되었다.

표 6. 슬래브 선형해석 결과 - 하중 Type 1

장비 대치등급	하중 조합	M_u (tf·m)	ϕM_n (tf·m)	$\phi M_n/M_u$ (%)	장비 탑재 여부
0.5m ³ 급	①	1.29	1.36	94.9	탑재 가능
	②	1.55	1.36	114.0	탑재 불가
	③	2.11	1.36	155.1	
0.8m ³ 급	①	1.87	1.36	137.5	탑재 불가
	②	2.35	1.36	172.8	
	③	3.13	1.36	230.1	
0.5m ³ 급*	①	1.61	1.36	118.4	탑재 불가
	②	1.88	1.36	138.2	
	③	2.67	1.36	196.3	

주) *: 철거잔재의 하중 (0.6 tf/m²)이 슬래브에 등분포로 작용하는 것으로 가정

4.3 항복선 이론에 의한 평가

4.3.1 평가 개요

슬래브의 항복선 이론은 재료의 비탄성 거동을 고려하고 파괴 직전의 구조물 상태를 직접 고려하는 해석방법으로 충분히 검증된 이론이다. 따라서 이 논문에서는 항복선 이론을 이용하여 슬래브의 안전성을 평가하였다.

해체대상 슬래브의 극한하중은 실제 배근상태를 활용하여 산출하는 방법(표 7 ①)과 배근상태를 알 수 없을 경우에는 해석상 요구되는 강도로 배근하여 산출하는 방법(표 7의 ②) 등 두 가지 방법을 사용하여 비교, 분석하였다.

일반적으로 구조물의 배근은 배근간격 조정이나 시공성을 고려하여 소요 철근량에 비해 과다하게 배근하고 있으므로 실제 배근된 철근량에 따라 슬래브 내력을 검토하는 것이 실제 슬래브의 거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

항복선에서의 극한휨모멘트는 배근된 철근콘크리트 슬래브 단면의 설계강도로 하며 배근량에 따라 식 (1)을 사용하여 산출하였다.

$$M_u = \phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - 0.59 \frac{A_s f_y}{f_{ck}} \right) \quad (1)$$

해체대상 슬래브의 배근 상태를 정확하게 확인하는 것이 매우 어려우므로 배근의 불량 가능성을 고려하여 강도감소계수는 0.9를 적용하였다.

4.3.2 평가 결과

해체대상 슬래브의 내력평가 결과는 표 7과 같다. 실제 배근상태의 저항모멘트와 소요강도에 해당하는 저항모멘트에 의하여 극한하중을 각각 산출한 결과, 설계했을 때 고려한 하중에 비해 3배와 2.2배의 하중 저항능력을 갖고 있는 것으로

표 7. 항복선 이론에 의한 슬래브 안전성 평가

평가 방법	극한하중/설계하중비	잔재 적재량	적재 가능 하중	적재 가능 중장비
①	3.0	잔재 포함	14 tonf	0.5m ³ 급 이하
		잔재 미포함	22 tonf	0.8m ³ 급 이하
②	2.2	잔재 포함	7 tonf	적재 불가
		잔재 미포함	15 tonf	0.5m ³ 급 이하

나타났다.

실제 배근된 상태로 산출한 내력이 소요강도로 산출한 내력에 비해 36% 정도 증가한 이유는 배근설계를 할 때 해석에 의한 소요강도보다 설계자가 여유롭게 배근한 결과로 판단되며, 해체할 때의 슬래브 중국상태를 평가할 경우는 실제 배근된 소요강도로 검토하는 것이 현실적인 것으로 조사되었다.

철거잔재가 슬래브에 0.4m 두께로 적재된 상태에서 해체 작업을 수행할 경우 실제 배근을 통한 검토(방법①)에서는 0.5 m³급 이하의 장비만이 운용 가능하며, 소요강도로 검토(방법②)했을 때는 장비운용이 불가능한 것으로 나타났다.

지붕층과 같이 슬래브에 파쇄잔재가 적재되지 않고 해체 장비만 탑재되어 작업하는 경우 방법①에 의한 검토 결과, 0.8 m³급 장비도 탑재가 가능하며, 방법②로 검토할 경우는 0.5 m³급의 장비를 적재할 수 있는 것으로 나타났다.

그러나 해체대상 슬래브의 배근도가 정확하지 않을 경우 구조안전성에 문제가 발생할 수도 있으므로 0.8 m³급 장비를 탑재할 때는 정밀한 안전성 검토가 요구된다.

5. 보의 구조안전성 평가

5.1 탄성해석에 의한 평가

5.1.1 평가 개요

평가대상 구조물은 1979년도에 건립된 12층 규모의 철근 콘크리트 라멘조 공동주택 아파트로, 단위세대 평면도와 구조도는 그림 5와 같다.

그림 5의 아파트를 대상으로 주거용 구조물의 고정하중과 활하중을 적용하였으며, 슬래브의 부담면적 폭을 3m로 하여 보에 등분포하중으로 작용하는 것으로 해석하였다.

해체 중장비의 무한궤도는 폭 2m, 길이 3m 이상이고 전체 길이는 7m 이상이므로 2대의 중장비가 근접하여 작업할 수 없다. 이러한 점을 감안하여 1개 보에는 1대의 중장비만 탑재되는 것으로 가정하였다.

그림 5(b)의 단위세대 구조도에서 보의 길이는 3.9m, 크기는 300×500mm, 단부의 스티럽은 D10 철근이 200mm 간격으로 배근되어 있다. 이러한 제원의 보를 대상으로 충격하중과 잔재하중을 고려한 탄성해석을 수행하였다. 또한 동일한

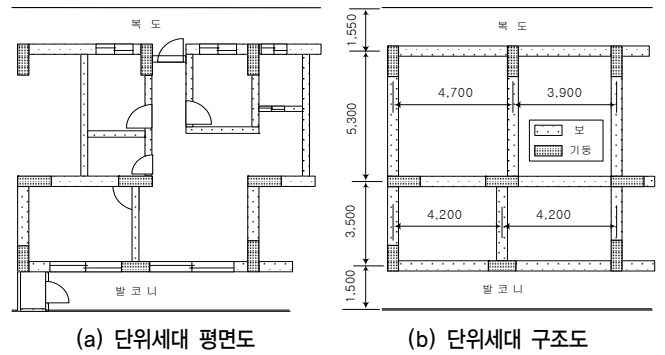


그림 5. 기계해체대상 아파트 현황 (22평형)

표 8. 보의 탄성해석에 사용된 재료 물성

콘크리트			철근		
강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	포외송비	등급 (MPa)	탄성계수 (MPa)	포외송비
21	2.16×10 ⁴	0.167	SD240	2.04×10 ⁵	0.30

표 9. 보 제원 산정을 위한 해석결과 - 중앙부 기준

보 길이	3.9m	5m	6m	7m
b×D (mm)	250×500	250×500	250×500	400×550
상부근	2-D19	2-D19	3-D19	2-D19
하부근	2-D19	3-D19	5-D19	6-D19
스티럽	D10 @300	D10 @300	D10 @250	D10 @250

작업조건에서 보의 길이가 5m, 6m, 7m로 증가할 경우에 보가 부담할 수 있는 하중을 추가적으로 산정하였다.

한편, 이러한 경우 철근량 확인이 불가능하므로 신축할 때의 설계조건으로 재해석을 수행하고 허용응력설계법으로 철근량을 산정, 배근하였다. 구조안전성을 검토할 때 파쇄잔재의 중량은 이 논문에서 조사된 1.5 tf/m³를 적용하였고, 하중조합은 중장비의 충격하중을 고려하여 장비 무게의 1.3배를 고려하는 것으로 하였다.

기계해체를 할 때 철근콘크리트 보의 내력을 산정하고, 보의 길이 변화에 따른 철근량을 산정하는 데 사용된 부재의 제원 및 물성은 표 8, 표 9에 제시한다.

5.1.2 평가 결과

기계해체를 할 때의 고정하중과 충격하중을 고려하여 탄성해석으로 수행된 보의 안전성은 휨성능과 전단성능 평가로 이루어졌으며, 휨과 전단성능이 모두 만족하여야만 안전성이 확보되어 해체 중장비의 탑재 가능한 것으로 평가하였다. 보의 안전성 평가결과는 표 11~14와 같다.

탄성해석 결과, 보의 길이에 관계없이 철거잔재의 중량을 고려하지 않은 경우에는 0.5 m³급 중장비의 탑재가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 철거잔재가 작업 층에 약 0.4m 두

개로 포설되는 것으로 가정하여 해석한 결과는 보의 길이에 관계없이 0.5~1.0 m³급 중장비의 탑재가 불가능한 것으로 나타났다.

이러한 해석결과는 실제 건축물 해체 현장에서 0.8 m³급의 중장비를 사용하여 구조적인 문제 없이 공사가 완료되었음을 감안할 때 타당한 결과는 아니라고 볼 수 있다. 결과적으로 탄성해석은 건축물을 신축할 때 사용되는 설계방법으로 상당한 안전율을 포함하고 있기 때문에 붕괴까지의 하중저항능력을 평가하기에는 적절하지 못한 해석법이라 할 수 있다. 따라서 구조물의 하중저항능력을 더 정확하게 평가하기 위해서는 구조물의 비선형적 거동을 예측할 수 있는 해석기법을 적용하여 안전성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

5.2 비선형해석에 의한 평가

5.2.1 평가 개요

탄성해석 방법으로 기계해체작업을 수행할 때의 보의 안

표 10. 보 탄성해석 시의 적용하중 및 하중조합

구분	해체시 구조안전성 검토를 위한 적용하중	철근량 추정을 위한 재설계시 적용하중
고정하중 (D.L.) ※ 슬래브 두께: 120mm	0.62 tf/m ² ※ 조적하중 제외	0.82 tf/m ² ※ 조적하중 포함
활하중 (L.L.)	사용하중: - 잔재하중: 0.80 tf/m ² (조적 0.2, 잔재 0.6)	0.13 tf/m ²
충격하중 (E.L.)	중장비 하중	-
	0.5m ³ 급: 13 tf	-
	0.8m ³ 급: 21 tf	-
	1.0m ³ 급: 28 tf	-
하중조합	1.0 (D.L.+L.L.)+1.3 E.L.	1.0 D.L. + 1.0 L.L.
설계방법	강도설계법	허용응력설계법

표 11. 보의 탄성해석 결과 - 보 길이 3.9m

구분	사용 중장비	ΦM_n (tf·m)	M_u (tf·m)	$M_u/\Phi M_n$ (%)	ΦV_n (tf)	V_u (tf)	$V_u/\Phi V_n$ (%)	결과
서포트미보강	0.5급 (13tf)	5.32	5.17	97.2	13.47	11.73	86.8	OK
		5.32*	5.82	109.4	13.47	15.04	110.8	NG
	0.8급 (21tf)	5.32	7.69	144.5	13.47	16.50	122.4	NG
	1.0급 (28tf)	5.32	8.64	162.4	13.47	18.30	135.8	NG
	적재 가능 하중 (13tf)	5.32	5.31	99.8	13.47	12.00	89.1	-
서포트보강	0.5급 (13tf)	5.32	4.20	78.9	13.47	10.95	81.0	OK
		5.32*	4.83	90.8	13.47	14.12	104.1	NG
	0.8급 (21tf)	5.32	6.16	115.8	13.47	15.32	113.5	NG
	1.0급 (28tf)	5.32	6.89	129.5	13.47	16.96	125.7	NG
	적재 가능 하중 (18tf)	5.32	5.31	99.8	13.47	13.44	99.8	-

주) * : 철거잔재 포함

표 12. 보의 탄성해석 결과 - 보 길이 5.0m

구분	사용 중장비	ΦM_n (tf·m)	M_u (tf·m)	$M_u/\Phi M_n$ (%)	ΦV_n (tf)	V_u (tf)	$V_u/\Phi V_n$ (%)	결과
서포트미보강	0.5급 (13tf)	7.64	6.63	86.8	13.47	13.02	96.7	OK
		7.64*	7.64	100.0	13.47	17.25	128.1	NG
	0.8급 (21tf)	7.64	9.78	128.0	13.47	17.91	133.0	NG
	1.0급 (28tf)	7.64	10.97	143.6	13.47	19.74	146.5	NG
	적재 가능 하중 (14tf)	7.64	6.82	89.3	13.47	13.32	98.9	-
서포트보강	0.5급 (13tf)	7.64	4.79	62.7	13.47	11.86	88.0	OK
		7.64*	5.76	75.4	13.47	15.83	117.5	NG
	0.8급 (21tf)	7.64	6.83	89.4	13.47	16.09	119.5	NG
	1.0급 (28tf)	7.64	7.59	99.3	13.47	17.68	131.3	NG
	적재 가능 하중 (16tf)	7.64	5.55	72.6	13.47	13.45	99.9	-

주) * : 철거잔재 포함

표 13. 보의 탄성해석 결과 - 보 길이 6.0m

구분	사용 중장비	ΦM_n (tf·m)	M_u (tf·m)	$M_u/\Phi M_n$ (%)	ΦV_n (tf)	V_u (tf)	$V_u/\Phi V_n$ (%)	결과
서포트미보강	0.5급 (13tf)	12.45	8.16	65.5	17.02	14.47	85.0	OK
		12.45*	9.95	79.9	17.02	19.60	115.2	NG
	0.8급 (21tf)	12.45	11.64	93.5	17.02	19.40	114.0	NG
	1.0급 (28tf)	12.45	12.94	103.9	17.02	21.25	124.9	NG
	적재 가능 하중 (17tf)	12.45	9.94	79.8	17.02	16.99	99.8	-
서포트보강	0.5급 (13tf)	12.45	5.60	45.0	17.02	13.02	76.5	OK
		12.45*	7.01	56.3	17.02	17.68	103.9	NG
	0.8급 (21tf)	12.45	7.53	60.5	17.02	17.14	100.7	NG
	1.0급 (28tf)	12.45	8.26	66.3	17.02	18.68	109.8	NG
	적재 가능 하중 (21tf)	12.45	7.46	59.9	17.02	16.98	99.8	-

주) * : 철거잔재 포함

표 14. 보의 탄성해석 결과 - 보 길이 7.0m

구분	사용 중장비	ΦM_n (tf·m)	M_u (tf·m)	$M_u/\Phi M_n$ (%)	ΦV_n (tf)	V_u (tf)	$V_u/\Phi V_n$ (%)	결과
서포트미보강	0.5급 (13tf)	15.03	9.83	65.4	19.87	15.85	79.8	OK
		15.03*	12.11	80.6	19.87	21.79	109.7	NG
	0.8급 (21tf)	15.03	13.82	91.9	19.87	20.75	104.4	NG
	1.0급 (28tf)	15.03	15.31	101.9	19.87	22.59	113.7	NG
	적재 가능 하중 (20tf)	15.03	13.08	87.0	19.87	19.85	99.9	-
서포트보강	0.5급 (13tf)	15.03	6.77	45.0	19.87	14.33	72.1	OK
		15.03*	8.60	57.2	19.87	19.72	99.2	OK
	0.8급 (21tf)	15.03	8.86	58.9	19.87	18.38	92.5	OK
	1.0급 (28tf)	15.03	9.64	64.1	19.87	19.89	100.1	NG
	적재 가능 하중 (24tf)	15.03	9.62	64.0	19.87	19.86	99.9	-

주) * : 철거잔재 포함

전성을 평가한 결과, 해체할 때의 관련 하중에 대하여 보의 안전성을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 해체 현장에서는 탄성해석 결과와는 다르게 해체장비를 활용한 해체 작업이 수행되고 있으므로 비선형해석기법을 도입하여 보 부재의 안전성을 검토하였다.

비선형해석(Push over)에는 GT-STRUDL을 사용하였고 콘크리트 재료모델은 Park 모델, 철근 재료모델은 Balan 등이 제안한 삼선형 모델(Trilinear Model)을 사용하였다. 그림 6은 비선형해석에 사용된 재료모델을 보여준다.(Toader A. Balan, 1998). 보 해석을 위한 제원은 탄성해석과 동일하다. 그리고 구조물을 해체할 때 작업 층 하부의 3개 층까지 잭 서포트를 설치하는 것이 일반적이므로 이를 고려하여 보 중앙의 잭 서포트 설치 유무에 따른 안전성도 검토하였다.

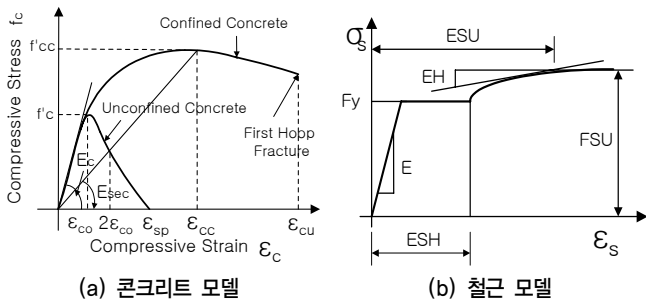


그림 6. 비선형해석을 위한 재료모델

우리나라의 기계해체 현장에서는 일반적으로 최소 0.5m³ 급 장비를 탑재하여 작업을 수행하고 있으므로, 0.5m³급 장비의 하중을 단위하중으로 환산하고 이 하중의 10%를 점진적으로 증가시켜가며 보의 주철근과 콘크리트의 항복 여부를 평가하였다. 비선형해석을 수행할 때 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계를 이용하여 부재에 발생하는 응력이 최대가 될 때 구조물의 붕괴가 이루어진 것으로 평가하였다.

5.2.2 해석모델 선정

해석모델은 최근 주요 해체대상 구조물인 아파트의 3.9m 경간 구조물을 기준으로 하여 기타 용도의 건물까지 고려하기 위하여 5, 6, 7m 경간까지 모델링하여 비교하였다. 일반적으로 해체 현장에서 최대 1.0m³의 해체장비를 탑재하는 것을 고려하여 잭 서포트를 보 중앙에 보강 배치하여 1.0m³의 장비가 적재 가능한 지를 검토하였다. 모델은 비선형해석의 효율성을 위해 2D모델을 이용하였다(그림 7).

5.2.3 하중조건

주거용 건축물의 고정하중과 활하중을 적용하였으며 보에 작용하는 부담 면적의 폭을 3m로 하여 등분포하중으로 작용

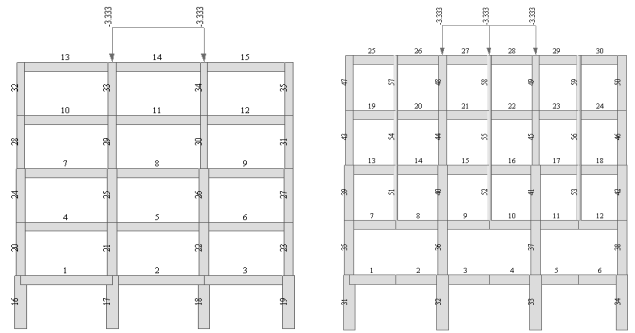


그림 7. 대상구조물 모델링

하는 것으로 하였다. 하중 재하는 가장 취약한 경우일 때를 고려하여 중장비의 전체 하중이 보에 직접 작용하는 것으로 하였으며, 중장비의 크기 등을 고려하여 2개 이상의 중장비가 1개의 보에 탑재되지 않는 것으로 하였다. 이는 중장비 궤도가 폭 2m, 길이 3m 이상이 되고 총 길이는 7m 이상이므로 근접하여 작업할 수 없는 점을 고려한 것이다.

배근 상태를 확인할 수 없어 재해석을 통하여 허용응력설계법으로 배근 상태를 추정하는 경우는 허용응력설계법 상에 적용된 하중기준과 하중조합을 적용하였다. 그리고 해체할 때의 안전성을 검토하는 경우에는 철거잔재의 하중은 2.2절에서 조사한 1.5 tf/m³를 적용하였으며, 하중조합은 중장비의 충격하중을 고려하여 중장비 중량의 1.3배를 고려하였다.

5.2.4 평가 결과

잭 서포트 보강 유무와 보의 길이에 따라 탑재 가능한 중장비 중량을 산정하기 위하여 비선형해석을 수행한 결과, 보의 파괴는 보 길이에 관계없이 철근의 항복에 이어 콘크리트의 항복으로 이어지는 것으로 나타났다. 그리고 철근의 항복을 기준으로 기계해체 현장과 같이 잔재하중을 고려하고 잭 서포트를 사용하였을 경우, 무 서포트 조건보다 48~100%까지 중장비의 탑재중량이 증가하였다. 서포트 유무에 따른 보의 비선형해석 결과는 표 15와 같다.

그림 8~9는 표 15의 결과 중 보의 길이가 7.0m인 경우에 대한 모멘트 다이어그램을 나타낸 것이다.

기계해체할 때 발생하는 고정하중 및 충격하중 등을 고려한 비선형해석 결과를 탄성해석 결과와 비교하였다. 철근의 항복하중을 기준으로 했을 때 잭 서포트 보강을 하지 않은 경우 비선형해석이 탄성해석에 비해 30~60% 정도 내력이 증가하며, 잭 서포트 보강을 한 경우에는 최대 2배 이상 내력이 증가하는 것으로 나타났다.

표 16은 보의 지지하중 증가율을 탄성해석 결과와 비선형 해석결과를 이용하여 나타낸 것이다.

결과에서 알 수 있듯이, 기계해체 공사를 할 때 하부층 보

표 15. 보의 비선형해석 결과 - 보의 중장비탑재 중량

구분	보길이 (m)	기본가력 하중(tf/m)	잔재하중 포함		잔재하중 미포함	
			압축측 Con'c 항복	철근응력 240MPa	압축측 Con'c 항복	철근응력 240MPa
서포트 미보강	3.9	3.33	17.58tf	14.58tf	22.98tf	19.98tf
	5.0	2.60	19.84tf	14.68tf	26.76tf	21.60tf
	6.0	2.17	27.88tf	26.54tf	36.19tf	34.85tf
	7.0	1.86	27.90tf	27.71tf	37.60tf	37.40tf
서포트 보강	3.9	4.55	27.57tf	21.57tf	33.00tf	27.00tf
	5.0	3.20	36.78tf	29.08tf	43.70tf	36.00tf
	6.0	3.45	46.91tf	46.69tf	55.22tf	55.00tf
	7.0	3.42	56.70tf	56.70tf	66.39tf	66.39tf

표 16. 보의 탄성해석 대비 비선형해석 하중증가율

구분	보길이 (m)	압축측 Con'c 항복			철근 응력 240MPa		
		탄성 해석 (A)	비선형 해석 (B)	B / A (%)	탄성 해석 (A)	비선형 해석 (B)	B / A (%)
서포트 미보강	3.9	25.94tf	38.30tf	47.65	25.94tf	34.40tf	32.63
	5	28.35tf	45.60tf	60.85	28.35tf	38.90tf	37.21
	6	35.82tf	60.60tf	69.18	35.82tf	58.86tf	64.32
	7	42.14tf	65.59tf	55.65	42.14tf	65.31tf	54.98
서포트 보강	3.9	31.51tf	51.32tf	62.87	31.51tf	43.52tf	38.11
	5	31.60tf	67.60tf	113.92	31.60tf	57.60tf	82.28
	6	40.44tf	85.32tf	110.98	40.44tf	85.02tf	110.24
	7	47.81tf	103.04tf	115.52	47.81tf	103.04tf	115.52

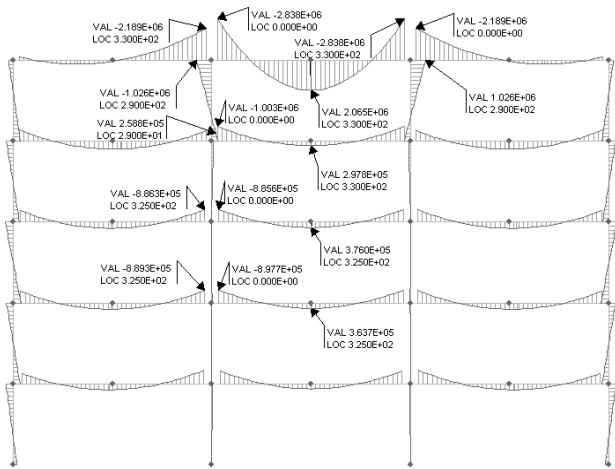


그림 8. 잭 서포트를 보강하지 않은 경우 비선형해석 결과 (B.M.D)

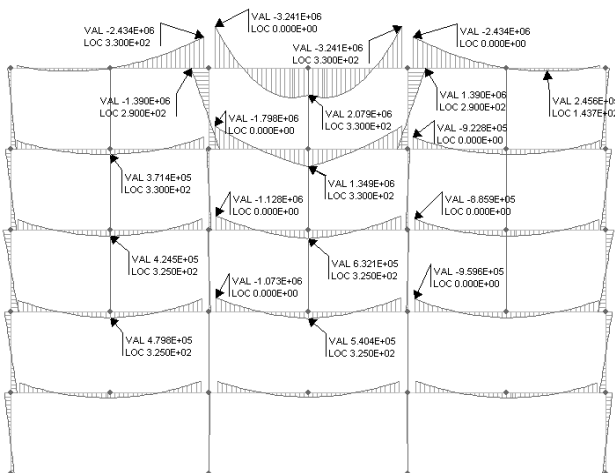


그림 9. 잭 서포트를 보강한 경우 비선형해석 결과 (B.M.D)

적 운용 등을 감안하여 보에 양중 가능한 중장비의 중량을 비선형해석을 수행하여 산정하였다. 보를 비선형해석할 때는 잭 서포트와 철거잔재를 고려하고 철근의 항복을 보의 항복으로 가정하였다.

비선형해석 결과, 3.9~7m 길이의 보에 양중 가능한 해체 중장비의 중량은 21.57~56.70 tf인 것으로 나타났다. 0.8m³ 급 중장비의 중량이 19.3~21.5 tf이므로(표 1), 0.8m³급 이하의 중장비를 탑재할 수 있는 것으로 평가되었다.

6. 결론

이 논문은 철근콘크리트 건축물의 상부에 중장비를 탑재하여 수행하는 해체공사에서 구조물의 안전성을 평가할 수 있는 기법을 제안하고 슬래브와 보에 적재 가능한 해체중장비의 적정 중량등급을 제안하는 것을 목적으로 수행되었다. 연구목적 달성하기 위하여 실제 해체 현장에 대한 방문조사와 현장 실무자를 대상으로 설문조사를 수행하였다. 이러한 조사 결과를 반영하여 구조부재에 대한 탄성 및 비선형 해석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기계해체 현장에 대한 조사 결과, 해체구조물을 구조해석할 때 잔재두께를 0.4m를 기준으로 단위하중은 0.6 tf/m²를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
2. 구조설계를 위한 하중계수 중 해체 중장비는 충격계수를 고려하여 1.3배를 적용하며, 기타 하중은 순하중을 적용함이 적절할 것으로 판단된다.
3. 해체구조물의 안전성 평가를 위하여 구조해석을 실시할 때, 슬래브는 항복선 이론을 통한 해석, 보는 비선형해석이 적절한 해석방법인 것으로 판단된다.
4. 비선형해석을 할 때 철근 항복강도에 대한 인장강도비는 SD240은 1.5, SD400은 1.4를 적용하고, 안전성 평가를

에 잭 서포트 보강만으로도 보의 저항능력이 매우 향상되며 아울러 해체 중장비의 효율성도 증가될 것으로 기대된다. 기계해체 현장의 작업안전성 확보와 해체 중장비의 효율

위한 철근의 변형률 기준은 안전을 고려하여 항복강도의 변형률을 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

5. 해체구조물의 정확한 배근량 산정이 가능한 경우, 철거 잔재를 고려하면 슬래브에 0.8m³급 미만의 해체 증장비 탑재는 가능한 것으로 판단된다.
6. 보 길이 4~7m 범위 내에서 보 중앙에 서포트를 설치한 후 해체작업을 할 경우 0.8m³급 이하의 해체 증장비 탑재도 가능한 것으로 나타났으나, 전단에 대한 별도의 안전성 검토가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한주택공사(2000), 「해체공사의 설계 및 견적기준 정립 연구」.
2. 대한주택공사(2002), 「프리패브철근 활용기술 연구(II)」.
3. 건설교통부·한국건설교통기술평가원(2005), 「도심지 건축물 해체기술 연구기획 보고서」, 대한주택공사.
4. 김창학·김효진·강인석(2010), “지속가능한 발전을 위한 해체산업분석 및 제안”, 「한국건설관리학회 논문집」, 11(3): 64-71.
5. 장경수(1998), “재하시험 자료분석에 의한 도로교 충격계수에 관한 연구”.
6. 건설교통부(2000), 「건축물 하중기준 및 해설」, 대한건축학회
7. 정일영(2001), 「철근콘크리트설계」, 엔지니어즈.
8. 건설교통부(2003), 「콘크리트 구조설계기준」, 한국콘크리트학회
9. 이진호(2003), 「기본소성구조해석론」, 탐구문화사.
10. 「GT-STRU DL V27 매뉴얼」, 2004.
11. Johansen, K. W. (1972), *Yield-line Formulae for Slabs*, Cement and Concrete Association.
12. Balan, T. A. Filippon, F. C. and Popov, E. P. (1998), “Hysteretic Model of Ordinary and High-Strength Reinforcing Steel”, *ASCE Journal*, 3.
13. MacGregor, J. G. (1988), *Reinforced Concrete - Mechanics and Design*, Prentice Hall.
14. Nawy, E. G. (2000), *Reinforced Concrete - A Fundamental Approach*, Prentice Hall.
15. Park, R. and Gamble, W. L. (2000), *Reinforced Concrete Slabs*, John Wiley & Sons.
16. IDARC Version 3.0 (1992), *A Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Technical Report NCEER-92-0022, State University of New York at Buffalo.
17. Kasai, Y. (1988), “Demolition Methods and Practice”, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium in Japan*, Chapman & Hall.
18. 櫻井莊一·毛見虎雄·平賀友晃(1986), 「鐵筋コンクリート造の實用的解体工法」, 理工圖書.
19. 建築物の解体除去技術に關する調査研究委員會(1988), 「建築物の解体除去技術に關する調査研究」, 研究報告書.
20. 進勝愼(1998), “解体工事の積算”, 「月刊 建築と積算」.