아파트 리모델링을 위한 부분해체에서 슬래브의 구조적 거동

Structural Behavior of Slab in the Partial Demolition for the Apartment Remodeling

최 훈¹⁾

Choi, Hoon

주 형 중²⁾

Joo, Hyung Joong

김 효 진³⁾

Kim, Hyo Jin

윤 순 종^{4)*}

Yoon, Soon Jong

Abstract

Due to the fact that the social environment is improved and the urban development is stabilized, the demand of new construction of apartment becomes slowdown. Accordingly, there are many researches to lengthen the service life of the existing apartment through the remodeling and its importance is continuously rising. However, reliable design specifications and guidelines for the design of remodeling with partial demolition are not provided yet in Korea. Specially, in the apartment remodeling, slab collapse accidents take major portion in all accidents that reported by Korean Government. It is very important to prevent initial crack of slab because initial crack could cause severe accident like collapse of all structure in a short period of time. The purpose of this study is to develop structural guidelines that could guarantee the structural safety and serviceability of slab structure and could be adopted in Korean remodeling with partial demolition. There are mainly two components to determine structural behavior of slab structure. One is the shape of slab structure and the other is load which is resisted by the slab structure. In this study, the weight per unit volume of concrete debris and concrete strength are estimated through the analysis of previous researches to recognize the relationship between the shape of slab and load that loaded on the slab. Accordingly, approximately 300 pieces of floor plan are collected and analyzed. The finite element analysis is conducted using these analyzed and estimated results. From the finite element analysis results, the limited stacking height of debris is suggested and the stacking method is also discussed. In addition, to find the relationship between movement of demolition equipment and structural behavior of slab, the static and dynamic loading tests are conducted. From the results of loading tests, the impact factor which will be considered in the remodeling design could be estimated.

Keywords : Remodeling, Slab, Initial Crack, Debris, Limited Stacking Height, Stacking Method, Static Loading Test, Dynamic Loading Test, Impact Factor

1. 서 론

국내에는 해체공사에 대한 표준작업안전지침 및 시방 기준을 마련하기 위해 이미 수행된 연구들이 다수 있으나 일부 내용이 국부적이고 통일되지 않아 해체공사 전반에 운용될 수 있도록 체계적인 정비가 필요하다(국토해양부, 2009). 이 연구는 기존 연구들의 내용을 정비하여 해체 공사를 위해 좀 더 합리적인 기준을 마련하기 위한 노력의 일부이다.

해체공사는 구조물의 성능증진 및 용도변경 등의 목적으로 보수보강 등을 통해 구조물을 지속적으로 사용하기 위해 수행되는 리모델링 등의 부분해체공사와 구조물의

수명이 다하여 재건축을 위한 전면해체 공사 등이 있다(이원식, 2007). 부분해체 공사와 전면해체 공사는 목적, 해석방법 및 기법 등에 따라 구분되어지는 특징적인 면이 있으나 현재 국내의 시방규정에는 이와 관련된 구체적인 언급이 미비한 실정이다.

특히 리모델링 공사의 경우 구조물의 설계도서가 없는 경우가 많고, 무분별한 개보수 및 구조변경 등으로 현재 구조물의 상황과 도면이 불일치하는 경우 등 여러 제약요인들로 인해 구조해석 없이 경험에 의해 시공하는 경우가 많다. 이러한 원인으로 리모델링 도중 구조물에 균열이 발생하는 등의 손상이 발생할 수도 있으며, 이러한 손상이 발전하여 Photo 1에서 보여주고 있는 바와 같이 시공

1) 정회원, 홍익대학교 부설 과학기술연구소 연구원

2) 정회원, (주)아이스시 이엔씨 대표이사

3) 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원

4) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : sjyoon@hongik.ac.kr 02-3141-0774

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Photo 1 Collapse during Demolition(<http://www.yonhapnews.co.kr>)

Table 1 Accidents during Demolition

Type	Number of accidents									Total
	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	
Overturning and collapse of wall	4	3	5	3	1	2	4	3	0	25
Collapse of slab	1	1	0	3	0	2	0	1	2	10
Dropping of worker	0	0	1	0	1	0	0	0	5	7
Etc.	0	3	1	0	0	1	2	1	3	11
Total	5	7	7	6	2	5	6	5	10	53

도중 붕괴사고로 이어질 가능성도 있다.

국내 해체공사의 사고사례를 분석한 결과 Table 1(국토해양부, 2009)에서 보여주고 있는 바와 같이 총 53건의 사고사례가 보고된 바 있으며, 그 중 슬래브(Slab) 붕괴사고의 경우 총 10건의 사고로 벽체전도 및 붕괴에 의한 사고와 비교 빈도수는 작지만 슬래브 붕괴사고의 경우 구조물 전체가 붕괴될 수 있는 대형사고로 이어질 수 있는 위험을 내포하고(국토해양부, 2009) 있다.

슬래브의 경우 리모델링 공사시 해체된 잔해물의 무게 및 해체장비하중에 대해 직접 저항하고, 슬래브에 균열이 발생할 경우 리모델링 기본취지에 어긋나며, 또한 앞에서도 언급한 바와 같이 대형사고의 발단이 될 수 있기 때문에 안전한 리모델링을 위해서는 슬래브의 균열은 1차적으로 방지되어야 한다고 생각한다.

해체공사의 형태 및 작업자의 성향에 따라 재하되는 하중의 형태가 다양할 수 있으며, 공사의 성격에 따라 운용되는 장비의 종류가 달라 질 수가 있다. 이러한 변화는 슬래브의 구조거동을 예측하는데 중요변수로 작용할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 다양한 변수를 고려하여 현장 작업자가 해체작업의 계획을 수립하고 또 이를 수행함에 있어 활용될 수 있는 지침을 마련하기 위한 기초자료로

Fig. 1 Demolition Process of Structure

Fig. 2 Main Category of This Study

활용 가능할 것으로 생각된다.

이 연구에서는 소형해체장비를 이용하여 리모델링 부분해체 공사를 실시하는 경우를 가정하였다. 소형해체장비를 이용하여 구조물을 부분해체할 경우에는 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 소형해체장비를 이용하여 벽체 등의 구조물의 각 부재를 파쇄한다. 파쇄된 콘크리트 잔해물은 슬래브 위에 적재되고 일정량의 잔해물이 적재된 이후 소형해체장비를 이용하여 잔해물을 아파트 하부로 낙하시킨다. 이 때 파쇄된 콘크리트 잔해물과 작업을 위해 운용되는 소형해체장비는 슬래브에 작용되는 중요하중요소이다.

이 연구는 Fig. 2에서 보여주고 있는바와 같이 크게 2부분으로 이루어졌다. 해체잔해물의 적재량 및 적재방법에 따른 슬래브의 거동을 파악하고 적절한 적재제한높이 및 적재방법을 제안하기 위해 해체잔해물의 단위중량을 현장조사 및 문헌자료를 바탕으로 조사하였다. 국내에서 시공 및 분양되고 있는 아파트의 평면도를 입수하여 분석한 후 대표 슬래브의 표본을 결정하였으며, 국내 여러 아파트의 안전진단결과, 현장조사 및 문헌자료를 바탕으로 구조물의 연도경과별 설계강도를 결정하였다. 조사 및 결

정된 해체잔재물의 단위중량, 대표 슬래브 표본, 설계강도를 바탕으로 유한요소해석을 실시하였으며, 해석결과 해체잔재물의 적절한 적재제한높이 및 적재방법을 제안할 수 있었다.

또한, 소형해체장비의 운용에 따른 슬래브의 거동을 파악하기 위해 국내 한 해체현장에서 정적, 동적 재하실험을 실시하였다. 재하실험결과 소형해체장비의 이동에 따른 충격계수를 추정할 수 있었으며, 일반적으로 설계에서 사용되는 충격계수의 적절성에 대해 검토할 수 있었다.

다만, 이 연구는 경계조건, 하중조건, 아파트 평면 형태 등에 대하여 특정한 가정사항을 적용하여 수행하였기 때문에 해체현장에서 논문의 결과를 직접 적용하는 것은 적절치 못하다. 따라서, 해체공사에 대한 설계, 검토 등의 참고자료 및 향후 연구자들을 위한 자료로만 활용되어야 함을 밝혀둔다.

2. 해체잔해물 적재제한높이

2.1 선행연구

국내 해체현장의 경우 해체잔해물을 Photo 2에서 보여주고 있는 바와 같이 슬래브 상부에 적재한 후 하부로 낙하시키는 작업을 반복하여 실시한다(대한주택공사, 1996). 이때, 파쇄작업을 충분히 실시한 후 해체잔해물을 아파트 하부로 낙하시켜야 공사기간을 단축시킬 수 있으며, 또한 해체공사의 효율을 증진시킬 수 있다. 그러나, 현장여건상 해체잔해물을 슬래브 상부에 오랜시간 방치하거나 공사의 효율을 위해 무리하게 많은 양의 해체잔해물을 적재

Photo 2 Debris on the Slab

하여 슬래브 하부에 균열을 초래해 리모델링 공사 본래의 목적에 위배되는 결과를 초래하기도 하고, 심할 경우에는 뜻하지 않은 붕괴사고를 초래할 수도 있다.

따라서, 공사의 효율을 확보하면서 슬래브의 초기균열을 방지할 수 있는 대책이 마련되어야 한다. 이와 관련 다양한 기관에서 연구가 수행되었다. 최훈 등(2010)은 최대재하하중을 $6kPa$ 로, 최대적재제한높이를 $26.1cm$ 로 제안하였다. 그러나, 이 결과는 크기 $4.2m \times 4.2m$ 인 슬래브의 해석결과로 제한되며, 해체잔해물의 적재제한높이를 산정할 때 해체잔해물의 단위부피($1m^3$)당 무게(kN)를 직접 고려하기 보다는 콘크리트의 단위중량($23kN/m^3$)으로 대체하여 산정되었으므로 활용에 제한이 있다. 국토해양부의 연구결과에서는 최대재하하중을 $6kPa$ 로 잔해물의 최대 높이는 $40cm$ 로 제안하였다(국토해양부, 2009). 그러나, 해당 슬래브에 대한 크기, 두께 등의 적용과 관련된 구체적인 자료가 제시되어 있지 않으므로 적용함에 있어 어려움이 있는 실정이다. 또한, 해외의 경우 홍콩에서 2004년에 발간된 Code of Practice for Demolition of Buildings (Building Department, The Government of Hong Kong, 2004)는 상황에 따라 $3kPa$ 에서 $12.5kPa$ 로 다양하게 제시하고 있지만, 이 역시 구체적인 적용에 대한 언급이 모호하므로 해체공사의 환경이 상이한 국내현장에 직접 적용하기란 상당한 어려움이 있을 것으로 생각된다. 따라서 이러한 연구 결과를 참고 및 보완하여 좀 더 구체적이고 현실성 있는 최대재하하중 및 적재제한높이에 대한 제시가 필요하다.

2.2 해체잔해물의 단위부피당 무게

구조해석결과 해당 슬래브에 재하될 수 있는 하중의 크기는 수치적으로 얻을 수는 있다. 그러나, 구조해석과 관련된 전문기술자가 아닌 현장작업자들이 수치적으로 표현된 하중을 인식하기란 현실적으로 어려움이 있다(국토해양부, 2009). 따라서, 하중을 직접 육안으로 확인할 수 있는 장치가 마련되어야 한다. 해체잔해물의 단위부피당 무게가 산정되면, 식 (1)을 통해 해체잔해물의 높이를 계산할 수 있으며, 이를 통해 슬래브 위에 재하된 해체잔해물의 하중을 알 수 있다.

$$h = \frac{W}{\gamma \times A} \quad (1)$$

Table 2 Weight per Unit Volume of Debris

Researches	Weight/Volume kN/m^3 (tf/m^3)
Field worker	12.46~13.35 (1.4~1.5)
Ministry of land, transport and maritime affairs, Choi et al.	13.35 (1.5)
Korea price information, corp.	12.46~14.23 (1.4~1.6)

여기서, h : 잔해물의 높이(m)

W : 해체잔해물 총무게(kN)

γ : 해체잔해물의 단위부피당 무게(kN/m^3)

A : 슬래브 면적(m^2)

해체잔해물의 단위부피당 무게를 산정하기 위해 국내 한 해체현장을 방문하여 현장작업자들을 대상으로 조사를 한 결과 용량 $133.45kN(15tf)$ 의 트럭의 경우 해체 잔해물을 가득 적재할 경우 $10m^3$ 을 적재할 수 있으며, $213.52kN(24tf)$ 의 트럭의 경우 최대 $16m^3 \sim 17m^3$ 을 적재 가능한 것으로 나타났다. 이 경우 해체잔해물의 단위부피당 무게는 $133.45kN/10m^3 = 13.345kN/m^3$, $213.52kN/(16 \sim 17)m^3 = (12.46 \sim 13.35)kN/m^3$ 임을 알 수 있었다. 국토해양부(2009)의 연구결과와 최훈 등(2010)의 연구결과를 분석한 결과 해체잔해물의 단위부피당 무게를 $13.35kN(1.5tf/m^3)$ 로 가정하였음을 알 수 있었다. (사)한국물가정보(<http://www.kpi.or.kr>) 자료로부터 폐콘크리트의 단위중량당 무게는 $12.46kN \sim 14.23kN(1.4tf/m^3 \sim 1.6tf/m^3)$ 임을 알 수 있었고, 이는 현장조사, 국토해양부(2009) 및 최훈 등(2010)의 연구 결과로부터 얻은 해체잔해물의 단위부피당 무게와 유사함을 알 수 있다. 이러한 조사결과를 정리하여 Table 2에 나타냈으며, 연구에서는 해체잔해물의 단위부피당 무게를 $13.35kN/m^3(1.5tf/m^3)$ 로 가정하였다.

2.3 국내 아파트 평면도 분석

연구를 위해 Fig. 3에서 보여주고 있는 바와 같이 현재 국내에 건설 및 분양되고 있는 아파트 구조물의 면적(평수)별 평면도를 입수하여 분석하였다.

Fig. 3의 전용면적 $59.87m^2(18\text{평})$, $114.81m^2(35\text{평})$ 아파트의 경우 계단 및 엘리베이터실을 제외한 나머지 구역은 각각 4, 6종류의 슬래브로 구분될 수 있다.

(a) $59.87m^2$ (18pyoung)

(b) $114.81m^2$ (35pyoung)

Fig. 3 Samples of Floor Plan

Fig. 3에서 중앙의 Slab 1이 가장 큰 슬래브이며, 그 크기는 각각 $3.5m \times 5.7m$, $5.0m \times 6.8m$ 이다. 이와 유사한 방법으로 약 300여개의 평면도를 분석하여 각 면적에 해당하는 슬래브의 최대크기를 결정하였다. 결정된 슬래브의 최대크기를 다시 면적(평수)별로 분류하여 대표 슬래브의 표본으로 결정하였으며, 각각의 크기를 정리하여 Table 3에 나타내었다.

2.4 해체대상 구조물의 콘크리트 강도

해체대상 구조물은 대부분 사용시간이 오래 경과되어 있다. 일반적으로 콘크리트의 강도는 약 50년까지 시간이 경과될수록 증가하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 외부 환경, 시공중 양생이나 타설불량 혹은 뜻하지 않는 외부

Table 3 Maximum Slab Size of Each Type of Floor Plan

Floor plan type		Maximum slab size (a×b)	
Area (m ²)	Area (pyoung)	a (m)	b (m)
39.9	13	3.3	4.1
49.9	16.5	3.5	8.7
59.8	20	3.5	6.4
84.7	28	4.6	6.7
101.8	34	4.5	6.8
114.6	38	5.4	6.2
134.6	44	5.3	7.0
167.5A	55A	5.1	5.7
167.5B	55B	5.5	9.6

Table 4 Concrete Design Strength vs. Measured Strength

No. of samples	Structural type	Concrete strength (MPa)		Ratio (②/①)
		Design, ①	Measured, ②	
1	Apartment	21.0	25.9	1.2
2	Apartment	21.0	25.1	1.2
3	Apartment	21.0	29.4	1.4
4	Apartment	21.0	25.4	1.2
5	Apartment	21.0	22.7	1.1
Average		—	—	1.2

충격에 의해 국부적으로 구조물의 강도가 저하될 수 있으며, 각 경우가 너무나 불규칙하기 때문에 이를 이론적으로 예측하기란 상당히 어렵다. 이에 이미 수행 완료된 사용 중인 구조물의 안전진단보고서를 샘플로 하여 설계강도와 실측된 강도를 비교하여 Table 4와 같이 나타내었다.

조사는 총 5개의 아파트(Apartment)를 대상으로 하였다. 조사결과 Table 4에서 보여주고 있는 바와 같이 조사 강도가 설계강도와 비교 평균적으로 1.2배 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 콘크리트 강도의 변동성을 고려하여 구조물의 설계시 사용하는 설계강도보다 구조물의 실제강도인 배합강도를 크게 하였고, 조사 대상 구조물이 특별한 재해환경에 노출되지 않았기 때문이라고 생각된다(한국콘크리트학회, 2008).

리모델링의 경우 안전진단을 통해 대상 구조물의 구조 안전성을 확인하거나 안전진단 결과 구조적으로 안전하지 못할 경우에는 구조안전성 보강공사를 추가적으로 실시한 후 리모델링공사를 실시해야 한다. 이 연구에서는 리모델링 대상 구조물의 콘크리트의 역학적 성질과 관련된 사항은 이상이 없거나 혹은 보수가 실시되었다는 가정 하에서 이루어졌다.

2.5 유한요소해석 일반사항

해체잔해물의 적정제한높이를 제안하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 유한요소해석은 상용 구조해석 프로그램인 GTSTRUDL Ver. 31을 사용하였다(GTSTRUDL, 2010). 최훈 등(2010)의 연구결과에 의하면 리모델링 공사의 경우 사용성 및 유지관리를 위해 슬래브 하부의 균열을 방지하는 것이 중요하다고 기술하고 있다. 또한, 해석의 방법적 측면에서 콘크리트 슬래브와 보강철근을 각각 솔리드요소(Solid Element)를 사용하여 해석한 결과와 판요소(Plate Element)를 사용하여 콘크리트 만의 균질한 슬래브로 가정하여 해석한 결과가 탄성범위내 낮은 하중상태에서는 서로 유사하다고 기술하고 있다. 따라서 이 연구에서 최훈 등(2010)의 연구결과를 참고하여 해석의 효율을 위해 4절점 판요소인 SBHQ6(Stretching and Bending Hybrid Quadrilateral)를 사용하여 해석하였다. 이러한 이유는 SBHQ6는 Fig. 4에서 보여주고 있는 바와 같이 한 절점당 6개의 자유도(Degree of Freedom)를 가지는 판요소로 평면응력요소(Plane Stress Element)와 판의 휨요소(Plate Bending Element)의 특성을 동시에 가지고 있어 슬래브의 거동을 모사하기에 적절하기 때문이다.

슬래브의 두께는 1988년 이전의 최소슬래브 두께 규정을 참고하여 120mm, 150mm 2가지로 결정하였다(한국리모델링협회, 2008). 해석을 위해 콘크리트 설계기준 압축강도는 21MPa로 가정하였다. Table 4에서 보여주고 있는 바와 같이 조사된 대부분의 실측강도가 설계강도보다 크게 나타났기 때문에(Table 4 참조) 별도의 계수를 적용하지 않는 설계기준압축강도를 해체 당시의 콘크리트 슬래브의 압축강도(f_{ck})로 가정하였고, 콘크리트 슬래브의 인장강도(f_t)는 압축강도의 1/7(한국콘크리트학회, 2004)를 적용하여 3MPa로 가정하였다. 포아송비

Fig. 4 SBHQ6

Fig. 5 Boundary Conditions (BC)

Fig. 6 Load Case

(ν)는 0.18(Park and Paulay, 1975)로 가정하였다. 초기균열상태의 낮은 하중상태만을 연구결과로 활용하기 때문에 최훈 등(2010)의 연구결과를 참고하여 슬래브는 철근이 배근되지 않은 무근콘크리트로 가정하였다.

이 연구에서는 Fig. 5에서 보여주고 있는 바와 같이 슬래브의 경계조건을 슬래브의 4변이 모두 고정(Fixed)되어 있는 경우와 3변(단면 2개, 장변 1개)이 전면 고정되어 있고 1변은 자유단(Free)인 경우 총 2가지 경우를 가정하여 고려하였다. 이 연구에서는 내력벽과 접하는 슬래브의 경계를 고정단(Fixed)으로 가정하였지만, 경우에 따라 단순지지(Simple) 혹은 반강접(Semi-rigid)으로도 볼 수도 있기 때문에 실제 건설현장에 적용할 경우에는 현장조건과 구조물의 상태를 정확히 조사하여 적절한 경계조건에 따른 해석을 실시해야 한다.

하중은 잔해물의 적재형태를 고려해서 Fig. 6에서 보여주고 있는 바와 같은 총 4가지 경우를 고려하였다. Fig. 6에서 보여주고 있는 형태의 하중을 모사하기 위해 슬래브의 구역을 Fig. 7에서 보여주고 있는 바와 같이 5개의 구역(Zone 1 ~ Zone 5)로 구분하여 동일한 크기의 하중을 다양한 형태로 재하하였다. 각 구역별 면적비율 및 재하된 하중의 비율은 Table 5에 표현하여 나타내었다.

Fig. 8은 유한요소해석을 위해 모델링된 유한요소해석 모델 및 해석결과와 한 경우를 보여주고 있는 그림이다.

Fig. 7 Zone in the Slab

Table 5 Load Distribution

Zone		Percentage of load distribution on the slab (%)			
District	Area ratio (%)	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4
Zone 1	36.0	0.0	45.0	18.0	54.0
Zone 2	28.0	0.0	28.0	28.0	31.0
Zone 3	20.0	0.0	16.3	25.0	15.0
Zone 4	12.0	75.0	8.2	21.0	0.0
Zone 5	4.0	25.0	2.5	8.0	0.0
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2.6 하중형태에 따른 슬래브의 거동

114.6m² (38평)의 두께 150mm (Table 3 참조) 슬래브를 대상으로 총 33.5kN의 하중을 Table 5에 따라 Zone 1 ~ Zone 5에 분배하여 재하하여 해석을 진행하였다. 해석결과를 통해 하중형태에 따른 슬래브의 거동의 차이점을 분석할 수 있었다.

Table 6에서 보여주고 있는 바와 같이 슬래브의 4변이 모두 유효할 경우에는 하중이 슬래브 중앙으로 집중됨에 따라 슬래브 하부에 발생하는 인장응력은 증가하는 경향을 나타냈으며, 하중이 지점부근으로 이동됨에 따라 발생하는 인장응력은 감소하는 경향을 나타냈다. 슬래브의 4변 중 3변만이 유효할 경우에도 슬래브의 중앙에 하중이 집중될 경우에 최대응력이 발생하였다. 하지만, BC 1과는 다르게 BC 2에서는 LC 4와 같이 하중이 슬래브 주변으로 집중될 경우에 발생하는 응력이 LC 2, LC 3일 경우와 유사함을 알 수 있다. 슬래브의 리모델링 공사를 위해 경계조건을 변경해야 할 경우에는 반드시 변경된 경계조건에 따른 응력해석을 수행해 그 영향을 시공에 반영해야

Fig. 8 FE Analysis

Table 6 Stress pertaining to Load Case and Boundary Condition

BC	Maximum tensile stress occurred at bottom of slab under each load cases (LC), σ_{max} (MPa)			
	LC 1	LC 2	LC 3	LC 4
BC 1 (①)	3.20	0.61	1.30	0.28
BC 2 (②)	3.55	1.65	1.85	1.55
Ratio (②/①)	1.11	2.70	1.42	5.54

함을 알 수 있다.

2.7 해체잔해물의 적정제한높이

슬래브의 4변이 모두 유효할 경우와 3변만이 유효할 경우 모두다 LC 1에서 인장응력이 최대 발생하는 경향이 있음을 알 수 있다. LC 1의 하중형태로 전체하중의 크기를 증가시켜가며 해석을 반복 수행하였다. 그 결과 Table 7에서 보여주고 있는 바와 같이 각각의 조건하에서 콘크리트 슬래브 하부에서 발생하는 인장응력의 최대 값이 3.0MPa 일 때의 하중 및 가정된 해체잔해물의 단위부피당 무게(13.4kN/m^3)를 식 (1)에 적용하여 해체잔해물의 적정제한높이를 계산할 수 있었다. Table 7에

Table 7 Maximum Stress, Loads, and Limited Stacking Height of Debris

BC	Area of slabs	Thickness of slab					
		120			150		
		σ_{max}	Load	h	σ_{max}	Load	h
1	39.9	3.0	36.0	269.7	3.0	57.0	425.4
	49.9	3.0	20.0	149.8	3.0	31.5	235.1
	59.8	3.0	23.0	172.3	3.0	36.5	272.4
	84.7	3.0	16.0	119.9	3.0	25.0	186.6
	101.8	3.0	16.0	119.9	4.0	25.0	186.6
	114.6	3.0	15.0	112.4	3.0	23.5	175.4
	134.6	3.0	13.0	97.4	3.0	20.5	153.0
	167.5A	3.0	17.5	131.1	3.0	27.0	201.5
	167.5B	3.0	9.7	72.7	3.0	15.0	111.9
	Ave.	3.0	—	129.0	3.0	—	201.5
2	39.9	3.0	36.0	254.7	3.0	57.0	388.1
	49.9	3.0	20.0	138.6	3.0	31.5	216.4
	59.8	3.0	23.0	164.8	3.0	36.5	257.5
	84.7	3.0	16.0	127.3	3.0	25.0	179.1
	101.8	3.0	16.0	116.1	4.0	25.0	179.1
	114.6	3.0	15.0	101.1	3.0	23.5	156.7
	134.6	3.0	13.0	93.6	3.0	20.5	145.5
	167.5A	3.0	17.5	116.1	3.0	27.0	182.8
	167.5B	3.0	9.7	71.2	3.0	15.0	108.2
	Ave.	3.0	—	122.5	3.0	—	188.2

* Area: m^2 , Thickness of slab: mm , σ_{max} : MPa , Load: kN/m^2
h: cm , Limiting stacking height of debris

서 보여주고 있는 바와 같이 슬래브의 두께가 120mm일 때, 잔해물의 적재제한 높이는 평균적으로 BC 1에서 129.0mm, BC 2에서 122.5mm로 나타났다. 또한, 슬래브의 두께가 150mm일 때, 잔해물의 적재제한 높이는 평균적으로 BC 1에서 201.5mm, BC 2에서 188.2mm로 나타났다. 해체 잔해물 적재제한 높이의 평균값은 계산값의 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값을 이용해 계산하였다. 또한, 이 연구에서 제시한 해체잔해물의 적재제한 높이는 현장실험을 제외한 해석적 기법에 의해 제시된 결과 이므로, 일반적으로 슬래브에 발생할 수 있는 건조수축균열 등의 위해요소는 고려하지 않았다. 그러한 이유는 기타 위해요소를 고려할 경우 또 다른 가정사항을 추가적으로 도입을 해야 하기 때문이다. 하지만, 추후 실험적 연구가 실시될 경우 연구의 정확성을 위해 건조수축균열 및 기타 위해요소를 고려하길 바란다.

3. 소형해체장비의 운용에 따른 슬래브의 동적 거동특성

3.1 현장 재하실험

이 연구에서 고려하고 있는 리모델링 부분해체공사는 소형해체장비를 운용하여 실시하는 경우이므로 소형해체장비의 운용에 따른 슬래브의 구조적 거동을 조사하여, 해당해체장비(17.5kN)의 충격계수를 산정하기 위해 현장 재하실험을 실시하였다.

현장재하실험은 정적, 동적 재하실험 2종류를 실시하였다. 그러한 이유는 소형해체장비가 정지시, 이동시 각각 슬래브에 미치는 영향을 고려하여 소형해체장비의 운용과 관련된 해석적 기초자료를 마련하기 위해서다. 이 연구에서는 정적 재하실험을 실시하여 해체장비의 재하위치에 따른 슬래브의 구조적 거동을 조사하였고, 동적 재하실험을 실시하여 장비의 이동에 따른 슬래브의 구조적 거동을 조사하였다. 정적, 동적 재하실험 결과를 비교분석하여 소형해체장비의 충격의 영향을 구조해석에 고려하기 위한 충격계수를 결정하였다.

실험은 Photo 3에서 보여주고 있는 바와 같은 국내 강원도 속초시에 소재한 골조식 콘크리트 구조물의 리모델링 공사현장에서 실시하였다. 정적, 동적 재하실험은 Photo 3(d)에서 보여주는 바와 같은 현장에서 사용중인 17.5 kN의 해체장비인 H사의 ZX17U-2를 사용하였다.

Photo 3 Tests Site and Testing Machine

(a) Location of LVDT's (LD)

(b) Location of Load

Fig. 9 Loading and Measurement

3.2 정적 재하실험

정적 재하실험에는 Fig. 9(a)와 같이 3개의 LVDT를 사용하였으며, 하중재하 위치는 Fig. 9(b)와 같이 슬래브의 중심부분과 슬래브 긴방향 및 짧은방향 각각의 1/4 지점이다. 정적 재하실험의 경우 해당위치에 하중이 재하된

(a) LOC. 1

(b) LOC. 2

(c) LOC. 3

(d) LOC. 4

Fig. 10 Time vs. Displacement Graph of Static Loading Tests

Table 8 Static Loading Test Results

Location	Displacement (mm)			
	LOC. 1	LOC. 2	LOC. 3	LOC. 4
LD 1	0.49	1.18	0.57	0.61
LD 2	0.92	0.72	0.49	0.44
LD 3	0.32	0.75	0.55	0.56

후 약 10분을 유지하였으며, 하중제거 후 5분을 유지하여 구조물이 복원되게 한 후 실험을 연속하여 반복 수행하였다(김재욱 등, 2010).

재하실험 결과 Fig. 10에 보여주고 있는 바와 같은 시간-변위(처짐) 그래프를 얻을 수 있었으며, 실험결과 발생한 최대변위를 정리하여 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 보여주고 있는 바와 같이 장비의 정적 하중에 의해서는 슬래브의 처짐이 최대 1.18mm 발생하였으며, 하

Photo 4 Static Loading Test

중이 제거된 후에 슬래브의 처짐이 0mm로 관찰되어 슬래브는 탄성거동을 하고 있음을 알 수 있었다. Photo 4는 정적 재하실험의 실험장면을 보여주고 있는 사진이다. Fig. 10과 같이 하중재하 전후 변위가 순간적으로 증가하는 경향이 있는데 이러한 이유는 장비를 이동하기 위해 시동을 켜고 끄고 하는 과정에서 발생하는 진동의 영향 때문이라고 생각된다.

3.3 동적 재하실험

현장여건상 작업공간이 협소하여 안전상의 이유로 인해 슬래브 위에 1대의 소형해체 장비만을 운용하고 있었다. 정적 재하실험 결과 슬래브 중앙부에 하중이 집중될 경우가 슬래브의 균열에 가장 취약한 경우임을 알 수 있었으므로, Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 슬래브 중앙을 따라 1대의 소형해체장비(17.5kN)가 이동할 경우에 대해 슬래브의 구조적 거동을 조사하였다(김재욱 등, 2010).

슬래브의 처짐량은 탄성범위 내에서는 하중에 비례하므로 동적 재하실험을 통해 측정된 처짐량과 정적 재하실험을 통해 측정된 처짐량을 비교하여 충격계수를 산정하였다(한국시설안전기술공단, 2006).

동적 재하실험은 슬래브 중앙을 따라 해체장비의 운행속도가 저속(2km/h), 평속(3km/h), 고속(4km/h) (ZAXIS17U Manual) 각각의 경우 왕복 3회씩 총 9회 반복 실시하였다.

동적 재하실험 결과 Fig. 12와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 정적 및 동적 재하실험 결과 슬래브 중앙부에 발생한 처짐(LD1)을 Table 9에 정리하여 나타내었으며, Table 9에서 보여주는 바와 같이 동적 하중이 재하될 경우가 정적 하중이 재하될 경우보다 처짐이 크게 발생하였다. 동

Fig. 11 Schematic View of Dynamic Loading Test

(a) Test 1

(b) Test 2

Photo 5 View of Dynamic Loading Test

적 재하실험에서의 하중속도의 영향을 보면 하중속도가 커질수록 충격하중이 커졌으며, 정적 재하실험결과와 비교 슬래브 중앙부의 처짐량은 최대 약 20%정도 증가함을 알 수 있었다.

현장실험결과 처짐량을 기준으로 하여 산정한 충격계수는 약 0.2로 나타났으며, 이는 현재 사용하고 있는 토목교

Table 9 Static and Dynamic Loading Tests Results

Tests	Static loading test result, ①	Dynamic loading test result, ②		
		Velocity of vehicle		
		Low (2km/h)	Normal (3km/h)	Fast (4km/h)
Max. deflection (mm)	1.18	1.24	1.35	1.40
Impact factor $\left(\frac{②-①}{①}\right)$	—	0.05	0.14	0.19

(a) Low (2km/h)

(b) Normal (3km/h)

(c) Fast (4km/h)

Fig. 12 Time vs. Displacement Graph of Dynamic Test

량분야의 충격계수 최대값인 0.3(대한토목학회, 2008)과 비교해 작은값임을 알 수 있었다.

4. 결 론

이 연구는 해체공사를 위한 좀 더 합리적인 기준을 마련하기 위한 연구의 일부이다. 리모델링 등의 부분해체공사와 관련 해체잔해물 등의 고정하중, 해체장비 등의 이동하중에 의한 슬래브의 구조적 거동을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 해체 잔해물의 적재제한 높이를 결정하기 위한 해체잔해물의 단위부피당 무게를 현장조사, 문헌조사 등을 통해 조사하였으며, 조사결과 적절한 해체잔해물의 단위부피당 무게는 $1.35kN/m^3$ 임을 알 수 있었다.
- (2) 현장 및 문헌조사 결과와 유한요소 해석결과를 종합하여 각 평수별 아파트의 해체잔해물 적정제한 높이를 결정할 수 있었으며, 적정제한높이는 평균적으로 $122.5cm$ 임을 알 수 있었다.
- (3) 장비하중의 이동에 따른 충격계수를 결정하기 위해 정적, 동적 재하실험을 실시하였으며, 실시결과 충격계수는 0.2로 나타났다.
- (4) 기존의 시방서를 참고하여 적용하고 있는 충격계수의 최대값 0.3은 안전측 설계를 위해서 적절한 값을 알 수 있었다.

이 논문에서는 특정한 크기와 경계조건의 슬래브에 대하여 연구를 진행하였다. 그러므로 슬래브가 다른 경계조건을 가지거나, 현장조사 결과 건조수축에 의한 균열이 발생하거나 과거 재해로 인한 위해요소를 포함하는 경우에는 해당 변수를 고려해 해체잔해물의 적정제한높이를 새롭게 구해야 함을 밝혀두는 바이다. 다만, 이 논문을 통해 아파트의 리모델링시 해체잔해물의 적정높이를 구하는 접근방법 및 관련 프로세스, 현장실험 방법 및 분석 프

로세스를 제공하고자 한다. 이러한 노력들이 계속 쌓여 다양한 하중, 경계조건, 해석변수 모두를 포함하는 자료가 확보 될 때 보다 완벽한 자료가 마련될 것이며, 시방기준으로 발전할 수 있을 것이라 생각된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업(과제번호: 10CHUD-B043673-05-000000)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설공사안전관리(해체공사) 업무프로세스의 체계화 및 구체화 연구, 연구보고서, 국토해양부, 2009.
2. 건축구조설계기준 및 해설, 기문당, 대한건축학회, 2006.
3. 교량 재하시험 매뉴얼, 한국시설안전기술공단, 2006.
4. 구조물의 해체 공법에 관한 연구(I), 연구보고서, 대한주택공사, 1996.
5. 김재욱, 최훈, 이영근, 윤순중, “콘크리트 구조물 해체시 장비 이동의 영향”, 한국구조물진단유지관리공학회 춘계학술발표대회 논문집, 2010, pp.7-10.
6. 도로교설계기준 해설, 기문당, 대한토목학회, 2008.
7. 리모델링 총설, 기문당, 한국리모델링협회, 2008.
8. 이원식, 건축 리모델링, 기문당, 2007.
9. 최훈, 주형중, 이승식, 윤순중, “리모델링 공사를 고려한 슬래브 구조물의 거동에 관한 해석적 연구”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제14권 2호, 2010, pp.106-112.
10. 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 한국콘크리트학회, 2008.
11. Code of Practice for Demolition of Buildings, Building Department, The Government of Hong Kong, 2004.
12. GTSTRUDL, User Reference Manual, Version 31, Latest Revision K, May, GTICS Systems Laboratory, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2010.
13. Park, R. and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, 1975.
14. ZAXIS17U manual, HITACHI Construction Machinery.

(접수일자 : 2010년 9월 17일)
(1차 수정일자 : 2011년 1월 11일)
(2차 수정일자 : 2011년 7월 25일)
(심사완료일자 : 2011년 9월 23일)

요 지

사회적 생활 환경이 향상되고 도시개발이 안정화됨에 따라 신규 주택건설공사에 대한 요구는 점진적으로 감소하고 있다. 이에, 신축 보다는 정비를 통해 구조물의 사용수명을 연장시키는 리모델링의 중요성이 강조되고 있으며, 이와 관련된 많은 연구들이 진행중에 있다. 그러나 국내의 경우 리모델링 해체공사를 위한 구조해석 관련 기준이 미흡한 실정이다. 국내 보고된 리모델링 해체 공사도중에 발생한 사고중 슬래브 붕괴사고는 다수를 차지하고 있으며, 대형사고로 발전할 수 있는 위험성을 내포하고 있어 리모델링 해체공사에 적용할 수 있는 구조해석 관련 기준의 개발은 중요하면서도 시급하다. 슬래브의 경우 하중을 직접적으로 저항하기 때문에 균열에 취약해 질수 있고 균열이 발생할 경우 리모델링의 근본취지에 어긋남과 동시에 붕괴사고의 원인이 될 수 있으므로, 초기균열을 억제함은 상당히 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구는 슬래브 구조물의 초기균열을 억제하기 위한 기준을 마련하기 위한 기초자료를 제공하기 위해 수행되었다. 슬래브 구조물의 구조적 거동과 관련된 주요 요소로는 구조물의 형상과 구조물에 작용하는 하중이 있다. 슬래브 구조물의 형상과 작용하중과의 상호관계를 파악하기 위해 국내 아파트 평면도를 분석하였으며, 해체잔해물의 단위중량, 콘크리트 강도 등과 관련된 자료를 분석하였다. 분석결과를 활용하여 유한요소해석을 실시하였으며, 유한요소해석결과 주요 하중요소인 해체잔해물의 적재제한높이 및 적재방법에 대해 검토할 수 있었다. 또한, 소형해체장비의 이동에 따른 슬래브의 구조적 거동을 파악하기 위해 동적, 정적 재하실험을 실시하였으며, 실험결과 이동하중에 따른 충격의 영향을 반영할 수 있는 충격계수를 결정할 수 있었다.

핵심 용어 : 리모델링, 슬래브, 초기균열, 해체잔해물, 적재제한높이, 적재방법, 정적 재하실험, 동적 재하실험, 충격계수