

## 진단사례

### 샌프란시스코지역 기존건축물 내진보강사례 현장조사

Field Survey about Seismic Retrofit of Existing Building in San Francisco



김 은 성<sup>1)\*</sup>

Kim, Eun Seong

#### 1. 서론

1988년 내진설계 관련 기준이 제정된 이후 내진설계 의무화 대상 건축물 범위는 점차 확대되어 왔다. 하지만 지진에 취약한 소규모 건축물(2층 이하, 500m<sup>2</sup> 미만)에 대해서는 자율에 맡기고 있으며 기준 제정 이전에 지어진 건물의 대부분이 내진성능 확보가 되어있지 않은 실정이다. 한반도의 잠재적인 지진 위험성은 높아지고 있지만 내진성능평가, 내진보강 비용 및 일시적인 건물 폐쇄에 따른 경제적 손실 등이 내진보강의 걸림돌이 되고 있다.

2013년 5월, 국토교통과학기술진흥원 주관으로 ‘지진 및 기후변화 대응 소규모·기존 건축물 구조안전성 향상기술 개발’ 과제 연구단이 출범했다. 이 과제는 소규모 또는 기존 건축물 내진보강 시 비용 부담을 줄일 수 있는 기술 개발을

목적으로 하며 ㈜창민우구조건설탄트는 기존 건축물의 구조성능 개선 실무적용을 위한 전산시스템 개발을 진행하고 있다.

그리고 지난 8월 말, 과제의 일환으로 샌프란시스코 지역 기존건축물 내진보강사례에 대한 현장조사가 진행되었다. 샌프란시스코 지역은 Northridge지진 등의 영향으로 내진보강이 의무화된 뒤 체계적으로 기존건축물에 대한 보강을 수행해왔다. 이번 현장조사를 통해 실제적인 내진성능평가 및 보강 프로세스 파악하고 내진보강법 선정의 경향 및 적용근거를 살펴보고자 하였다.

조사는 UC버클리 캠퍼스 내 건물들을 중심으로 이루어졌으며 샌프란시스코 시내, 스탠포드 대학 등을 돌며 실시되었으며 본 기사에는 8개의 주요 사례에 대해 소개하고자한다.

1) ㈜창민우구조건설탄트 기술지원팀 연구원

\* E-mail : eskim21@minwoo21.com

## 2. UC버클리 기존건축물 내진보강 사례

### 2.1 SAFER PROGRAM

캘리포니아주 버클리시에 위치한 UC버클리 캠퍼스는 내진보강공법의 박물관이라는 별칭을 가지고 있을 정도로 다양한 보강공법이 적용된 건축물들이 밀집되어 있다. 이는 캠퍼스 내진보강 프로젝트인 SAFER PROGRAM의 덕분이라 할 수 있다.

1997년부터 계획되어 시행되고 있는 SAFER PROGRAM은 UC버클리 캠퍼스 전체의 건물을 대상으로 하는 내진보강 프로젝트이다. 1989년 Loma Prieta, 1994년 Northridge, 1995년 Kobe 지진 이후 내진코드의 변화와 더불어 캠퍼스 내에 항상 잠재하고 있는 Hayward 단층의 위험성 등을 이유로 캠퍼스 내 건물들의 구조성능평가 및 내진보강에 대한 필요성이 대두되었다. 이전에도 캠퍼스 내 주요 건물에 대한 내진보강이 부분적으로 이루어져 왔지만 본 캠퍼스 내의 건물은 물론 수 마일 떨어져 있는 실험센터 연구동 등 모든 건물들에 대한 평가와 보강이 이루어진 것은 처음이었다.

캘리포니아 지역의 구조설계 사무소 3곳(Degenkolb, Forell/Elsesser, Rutherford and Chekene)이 협력, 캠퍼스 내의 건축물에 대한 사전성능평가를 실시하였고 위험도에 따라 Good, Fair, Poor, Very Poor의 네 가지 등급으로 구분하였다. 그 결과 조사된 건축면적의 27%에 해당되는 건축면적이 Poor 혹은 Very Poor 등급을 받아 내진보강이 필요한 것으로 조사되었다. 그 후, 더욱 정밀한 성능평가가 이루어졌고 지원 예산과 건물 폐쇄 시 수용가능 인원 등을 고려하여 20~30년간 12억 달러의 예산을 들여 캠퍼스 내 건물에 대한 내진보강을 진행해나가는 계획이 수립되었다.



(a) 건물 전경

(b) 전단벽 보강  
(자켓팅 공법)

Fig. 1 Barrows Hall

### 2.2 전단벽 보강 사례

#### 2.2.1 Barrows Hall (1964)

1964년에 완공된 8층 RC건물로 Degenkolb사에서 내진보강을 담당했다. SAFER PROGRAM이 실시되기 이전에도 몇 차례 구조성능평가에서 지진발생시 인명피해가 예상되었으나 예산의 문제로 보류되었다가 1997년 Poor등급을 받아 내진보강이 추진되었다.

건축설계업체인 Hansen/Murakjani/Eshima와 구조설계 업체인 Degenkolb 공동으로 내진보강 방안에 대해 논의하였고 버트레스 설치, 건물 내 전단벽 설치, 그리고 건물 양쪽을 자켓팅하는 방안이 제시되었다. Barrows Hall의 보강이 예정된 2000~2002년에는 캠퍼스 내 많은 보강공사가 예정되어있었기 때문에 Barrows Hall을 완전폐쇄 할 경우 수용인원을 충당할 시설이 부족했다. 자켓팅은 용어 그대로 건물에 옷을 입히듯 전단벽으로 감싸서 보강하는 방식으로 이 방식을 적용할 경우, 공사 부분을 제외한 건물 중앙부의 운용이 가능하다는 점이 보강안 결정하는 데 큰 영향을 주었다. 새로 설치된 전단벽은 약 50cm 두께이며 드래그 스트럿(혹은 다이어프레임 콜렉터)을 이용해 본 건물과 기초에 고정되었다.

#### 2.2.2 Barker Hall(1964)

버클리 캠퍼스 남서쪽에 위치한 7층 콘크리트



(a) 건물 전경 (b) 공사 당시 건물 전경

Fig. 2 Barker Hall

전단벽 건물이다. 당초 기존에 설치된 전단벽이 적절한 횡저항 성능을 보일 것으로 여겨졌으나 1989년 Loma Prieta 지진당시에 중급의 손상을 입었으며 1997년 구조성능평가 당시 Poor 등급을 받았다. 여러 가지 보강방안이 제시되었으나 Barrows Hall과 마찬가지로 건물의 완전 폐쇄가 불가능한 여건 때문에 건물 외부 한 면에 2개씩 총 8개의 전단벽을 추가하는 방안이 채택되었다. 기존의 직접독립기초는 대신 포스트-텐션 콘크리트 보로 이루어진 둘레기초가 설치되었으며 보강에 사용된 모든 콘크리트에는 플라이에쉬가 혼입되었다.

### 2.3 브레이스 보강 사례

#### 2.3.1 Hildebrand Hall(1966)

1966년에 완공된 3층짜리 콘크리트 건물로 건물하부는 Latimer Hall과 지하통로로 연결된다. 당시 엔지니어 중 한명으로 참여한 사람이 프리스트레스트 콘크리트의 아버지라고 불리는 T.Y Lin이다. 당시 프리스트레스트 콘크리트는 기존 RC에 비해 콘크리트 물량을 약 50%, 철근 물량을 약 20% 저감시키는 경제적 이점 때문에 주목 받고 있었다. 많은 잠재력을 가지고 있던 신공법을 적용해 경제성을 확보하고 건물의 심미성을 추구함으로써 Hildebrand Hall은 프리스트레스트 콘크리트가 적용된 대표 사례로 남게 되었지만 현대의 기준으로 보면 충격적일 정도로 전단저항 요소가 설치되어 있지 않았다. 콘크



(a) 건물 전경 (c) 비부착 가새

Fig. 3 Hildebrand Hall

리트 계단실과 엘리베이터 박스만이 유일한 횡저항 성능을 제공했다.

1997년 수행된 접합부의 성능평가 결과, 지진 발생 시 내부기둥이 슬래브를 관통하게 되는 편칭파괴가 전 층에 걸쳐 나타나 건물 전체적인 붕괴로 이어지는 것으로 예측되었다. 당시로서는 최신의 내진보강 방식인 비부착 가새(unbonded barce)의 적용이 논의되었다. 횡하중을 받을 경우 쌍을 이루는 두 부재는 인장력과 압축력을 번갈아가면 받게 되는데 철골과 콘크리트가 함께 적용되기 때문에 인장과 압축에 대해 적절하게 저항할 수 있다는 장점이 있다. 브레이스 외에도 1, 2층에 전단벽이 추가로 설치되었으며 동서 방향의 전단벽은 지붕층까지 확장되었다. 계단 실벽 강화와 함께 편칭파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 기둥-슬래브 접합부가 보강되었다.

### 2.4 면·제진 보강 사례

#### 2.4.1 Hearst Memorial Mining Building (1907)

1989년 Loma Prieta 지진당시에는 경미한 손상만을 입었으나 1990년 진행된 구조성능평가 결과 South Hall과 같은 문제점이 도출되었다. 조적벽체는 전단에 대해 과부하가 걸렸고 많은 슬래브가 벽체와의 연결성이 부족한 것으로 나타났다. 또한 건물 전면은 횡하중을 적절히 받지 못하는 상태였고 굴뚝, 기와장, 타일천장, 석조 장식물들도 붕괴의 위험이 감지되었다.



(a) 건물 전경 (b) 면진장치 설치

Fig. 4 Hearst Memorial Mining Building

이에 엔지니어들은 철골 가새 프레임을 설치해 슬래브와 연결하는 등 몇 가지 보강안을 제시했지만 미적, 역사적 의미가 큰 HMMB의 외관을 손상하지 않는 것이 프로젝트의 가장 중요한 논점이 되었다. 이에 가장 비싼 내진 시스템인 면진장치의 적용이 결정되었고 총 134개소의 적층고무받침을 사용한 면진장치가 설치되었다.

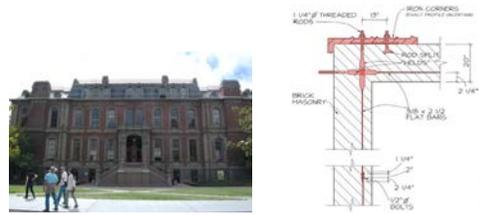
면진장치의 설치하는 기존의 기초로부터 건물을 분리시켜 유압프레스로 고정된 상태에서 면진장치가 설치될 공간을 굴착한 뒤 새로운 기초와 면진장치를 설치하는 단계로 진행되었다. 이 과정에서 기존 지하층보다 훨씬 층고가 높은 새로운 공간이 창출되었고 이 공간은 기계실로 활용되게 되는 부가적인 효과도 발생했다.

## 2.5 기타 보강 사례

### 2.5.1 South Hall(1873)

조적조 건물로 현 버클리 캠퍼스에 최초로 건립된 기념비적인 건축물이다. 당초에는 보다 연성이 우수한 목재를 재료로 써서 내진설계를 하는 방안이 논의되었다. 하지만 목재의 화재에 대한 취약성과 캠퍼스 내 최초 건물로서의 상징성이 떨어진다는 의견 때문에 조적조로 결정되었다.

1980년대에 들어와서 실시된 조사에서 South Hall는 비보강조적조로 분류되었고 평가 결과 몇 가지 문제점이 나타났다. 첫째로 지붕층을 비롯해서 각 층 평면과 외부 벽체와의 연결이 형편 없어서 다이아프레임으로서 효율적으로 작용하



(a) 건물전경 (b) 조적벽 보강 계획

Fig. 5 South Hall

지 못해 보강이 필요했다. 이에 새로운 층 구조물 설치와 접합부 보강이 이루어졌다. 두 번째로 벽체에 창문, 벽난로 등 전단성능을 저하시키는 요소들이 많아 이에 대한 보강이 요구되었다. 기초부터 지붕까지 이어진 조적 벽체에 수직 철근·에폭시 보강이 이루어졌다. 보강공사는 매우 조심스럽게 이루어졌고, 그 결과 건물 내·외부 모두 원형의 모습을 유지할 수 있게 되었다.

### 2.5.2 California Memorial Stadium(1923)

캘리포니아 메모리얼 스타디움은 제 1차 세계 대전 당시 전사한 이들을 추모하기 위한 목적으로 건립되었다. 7만 5천명을 수용하는 대형 경기장으로 수용인원의 변화 등을 이유로 수차례 리노베이션이 이루어졌다. 가장 큰 특징은 Hayward 단층이 스타디움을 관통한다는 사실이다. 이에 내진보강 시에 신축이음(Expansion Joint)을 적용하여 경기장을 여러 파트로 분리시켰다는 점이다. 실제로 외관만 한 바퀴 돌려 봐도 신축이음이 경기장 상단부터 지면까지 적용되어 있는 것을 쉽게 찾아볼 수 있었다.

2012년에 완료된 최신 리뉴얼은 표면 파열(surface rupture)에 관한 영향을 고려하였다. Hayward 단층이 서로 반대방향으로 이동해 표면 파열이 발생할 경우를 가정해 해석을 수행한 결과, 파열에 의한 변위가 가로 방향으로 약 6피트, 세로 방향으로 약 2피트 발생할 것으로 예측되었다. 내진보강을 담당한 Forell/Elsesser은



(a) 스타디움 전경 (b) 표면파열블록 보강계획 (c) 시공이음

Fig. 6 California Memorial Stadium

표면파열이 예상되는 경기장 블록을 표면파열블록(surface rupture block)로 지정, 독립적으로 거동이 발생하게끔 내진 보강 계획을 수립했다. 먼저 표면파열블록을 인접한 블록으로부터 12인치 정도 이격시켰다. 수직 방향의 변위 발생을 완충시켜주기 위해, 기초 슬래브 하부에 3피트 두께의 모래층을 깔았다. 매끄러운 독립적인 이동이 가능하게 하기 위한 2개의 고밀도 폴리에틸렌 층이 모래층 사이에 계획되었고 추가적으로 연약한 지반을 보강하기 위한 석조 기둥이 지하에 설치되었다.

### 3. 기타 주요 내진보강 사례

#### 3.1 John A. Blume Earthquake Engineering Center(1912)

스탠포드 대학에 위치한 지진공학센터 건물이다. 경량철근콘크리트 보와 기둥, 목재 트러스로 채워진 비보강 조적벽 등이 주요 구조시스템으로 적용되었다. 1989년 발생한 진도 7.1의 Loma Prieta지진은 스탠포드 대학에 상당한 피해를 주었고 1912년에 지어진 이 건물 역시 큰 타격을 받았다. 이에 대학 내에서도 역사적인 건축물



(a) 실험실 지붕트러스 보강 (b) 실험 관측실 벽체 보강

Fig. 7 John A. Blume Earthquake Engineering Center

로 인식된 본 건물의 내·외관을 보전하면서 내진성능을 개선하고자 보강이 실시되었다.

보강은 1994년에 시작되었으며 지붕층 다이어프레임과 지붕트러스 사이의 접합부를 보강해 내진성능을 향상 시켰고 실험 관측실 벽체에 하부 다이어프레임으로 전달력을 전달하기 위해 브레이스 프레임이 설치되었다. 기존에 있던 지붕트러스는 철골튜브를 추가함으로써 보강이 이루어졌고 비보강 조적벽은 보강하거나, 제거한 뒤 새로운 콘크리트 전단벽으로 교체했다.

#### 3.2 Caltrans District 4 Headquarter(1991)

Caltrans District 4 Headquarter Building은 오클랜드시에 위치한 지상 15층 규모의 철골모멘트프레임 건물이다. 준공 후 3년 후인 1994년 Northridge지진이 발생, LA에 위치한 비슷한 건물들이 막대한 피해를 입게 되었고 이 지역에 내진보강이 의무화되는 결과를 낳았다. 약 150년 주기로 큰 지진을 발생하고 있는 Hayward 단층이 약 5마일 거리를 관통하고 있고 1868년 이후 큰 지진이 나타나지 않았다는 점도 내진보강에 영향을 주게 되었다.

내진보강은 Degenkolb사에서 수행했다. 모든 프레임 접합부를 보강하는 방법, 제진장치를 설치하고 일부 접합부를 보강하는 방법, BRB 설치, 면진장치 설치 등 크게 네 가지 보강안이 제시되었다. 제진장치 설치와 접합부 보강을 함



(a) 건물 전경 (b)제진장치 보강

Fig. 8 Caltrans District 4 Headquarter

게 실시하는 방법이 최종적으로 채택되어 실용적인 제진장치의 용량과 위치를 찾고 접합부 보강 위치와 제진장치 설치위치를 일치시킴으로써 작업개소를 줄이는 작업이 수행되었다. 총 228개의 제진장치가 설치되었으며 접합부 총 1218개 중 746개에 보강이 실시되었다.

#### 4. 맺음말

UC버클리 캠퍼스 내 건물을 중심으로 샌프란시스코 지역의 기존건축물 내진보강 사례에 대한 현장조사 내용을 소개하였다. 보강 방식은 전단벽 보강, 브레이스 보강, 면진장치·제진장치에 의한 보강, 접합부 보강 등 다양하게 나타났다. 다만 캠퍼스 건물에는 전통적인 보강 방식인

수직부재 보강이 많이 적용된 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 건축설계 담당자와 구조설계 담당자가 협의를 통해 내진보강 프로젝트를 진행하기 때문에 심미적인 부분에 대한 건물주의 의견이 충분히 반영되지만 본 학교 건물은 주정부 소유이기 때문에 예산과 편의성이 보강방법 결정에 더 영향을 주었다. 따라서 미관을 일부 손상시키더라도 외부에 브레이스 보강이나 전단벽 보강을 한 케이스가 비교적 많이 나타난 것으로 이해할 수 있다.

이번 조사를 통해 다양한 사례에 대한 보강 프로세스를 살펴볼 수 있었으며 기존건축물의 특징과 보강 당시의 현장 여건 등에 따라 적합한 보강방법이 결정되는 플로우를 확인할 수 있었다. 이는 우리나라 기존건축물의 보강 프로세스에 대한 전산시스템을 구축하는 데에도 선례로서 좋은 참고자료가 될 수 있을 것으로 보인다.

담당 편집위원: 김태진  
(주)창민우구조컨선타트 사장  
taejin@minwoo21.com