

역사지진의 진도추정을 위한 초가삼간의 내진성 평가실험

1998. 3. 21

서 정 문

원자력연구소

1. 서론

우리 나라의 지진재해도에 관한 연구는 1970년대 초부터 원자력발전소의 내진설계와 관련하여 수행되어 왔다. 최근까지의 지진재해도 평가결과를 분석해 보면 우리 나라가 안정지괴인 유라시아 판에 놓여 있어 지진활동은 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있는데 비해 지진재해도는 비교적 높게 평가되었으며 불확실성 또한 매우 컸다. 이는 우리 나라의 지진 전반에 관한 연구가 그동안 매우 미흡하였던 탓으로 여겨진다.

지진재해도 분석결과에 큰 영향을 미치는 요소는 큰 지진의 발생 빈도 및 감쇄식 등이다. 감쇄식에 관하여는 최근까지 발생된 지진자료를 근거로 상당히 신뢰할 수 있는 연구결과가 발표되었다[1]. 그러나, 역사지진의 진도에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이었다. 역사지진의 진도가 과다하게 평가될 경우에는 큰 지진의 발생빈도가 커져 지진재해도는 전반적으로 증가하게 된다.

진도 평가에 일반적으로 사용되어 온 인간의 지각 또는 가옥의 파괴 및 자연현상 중 중간 크기의 지진부터 큰 지진까지 비교적 신뢰성 있게 역사지진의 진도를 평가할 수 있는 것은 가옥의 거동 및 손상과 관련된 것이라고 할 수 있다. 큰 지진 시 일부 발생하는 산사태, 낙석, 지반파괴, 용수 현상 등은 소수의 지진기록에만 나타나며, 이러한 현상이 발생할 수 있는 조건은 함수비, 입자의 크기 등 많은 변수들에 의해 결정된다. 따라서 역사지진 기록에서 자주 나타나는 가옥의 손상이나 파괴에 관한 지진의 진도를 우선적으로 연구함으로써 불확실성을 저감할 필요가 있다.

가옥의 손상을 기준으로 하여 우리 나라 역사지진의 진도를 결정하는데 있어서도 MM진도 또는 JMA진도와 같은 진도 등급을 직접 적용하기는 어렵다. 왜냐하면 우리 나라의 전통적인 가옥구조는 유럽 또는 일본과는 많은 차이를 보이고 있기 때문이다. 그러나, 일본의 지진 시 목조 건물의 피해 사례로부터 많은 것을 알 수 있다.

현재까지 발견된 우리 나라의 역사지진 기록은 약 1,900여 개에 달한다. 이 중에서 가옥의 붕괴 및 인명 손실과 관련된 지진 기록은 표 1과 같다[2]. 표에서 유사한 지진 피해 및 동일한 지진 피해기록에 대한 진도 평가 결과는 진도 5에서 10까지의 범위를 보인다. 이를 지진 가속도로 환산하면 진도-지진가속도 상관식의 종류에 따라 진도 5는 0.01g-0.04g, 진도 10은 0.52g-2.75g의 큰 편차를 보인다. 이와 같은 차이는 평가자의 지식, 경험, 방법 및 평가시간 등이 상이하기 때문이다. 그리고, 표에서 큰 지진 피해가 경주지역에서 상대적으로 많이 발생되었음을 알 수 있다. 경주지역 및 일부 옛 도읍지는 모래, 자갈 등으로 구성된 충적층 지반이며 기타 대부분의 지역은 암반지반이다. 지진 시 충적층 지반에서의 목조가옥의 피해는 매우 큰 것으로 알려져 있다. 대표적인 예로써 1995년 1월의 일본 코베 지진시 대부분의 피해가 연약지반 상에 건설된 목조가옥에서 발생하였다. 그리고, 흰개미나 곰팡이에 의해 부패된 오래된 목조가옥의 피해가 매우 컸던 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 위에서 기술한 바와 같은 사항을 고려하여 가옥파괴에 관한 역사지진의 진도를 추정하기 위해 먼저 일본 고베 지진 시 목조건물의 피해 분석 결과를 소개하였다. 그리고, 우리 나라의 전형적인 민가 형태의 하나로서 초가삼간을 선정하고, 초가삼간의 내진성을 정량적으로 평가하기 위한 일련의 실험 과정 및 결과를 소개하였다. 실험에는 초가삼간을 구성하는 소나무의 강도실험, 뼈대의 정적 및 유사정적 수평내력 실험, 초가의 1/4 축소 모델에 대한 내진성 실험 등이 포함되었다.

표 1. 가옥붕괴 및 인명사상과 관련된 역사기록

일시 (년/월/일)	발생지역	내용	MM진도
27/	(경기도 광주)	땅이 흔들리고 사람이 사는 집 들이 기울고 넘어졌다	7~9
100/	경주	땅이 흔들려 민가 를 넘어뜨리고 죽은 사람도 있었다	8~10
304/	경주	땅이 흔들려 민가 를 무너뜨리고 죽은 사람이 있었다	8~10
458/	경주	땅이 흔들리고 금성(경주)의 남문이 스스로 부서졌다	6~8
502/	(평남서부)	땅이 흔들리고 민가 가 무너져 땅바닥에 깔리게 되어 죽은 사람이 있었다	8~10
510/	(경주)	땅이 흔들리고 사람들의 집 이 무너져 죽은 사람이 있었다	8~10
779/	경주	땅이 흔들리고 민가 가 무너져 죽은 자가 100여명이나 되었다	8~10
1036/7/23	개성,경주	(중략) 흙담집과 여막집 들이 많이 무너졌으며, 경주는 심해서 3일 만에야 그쳤다	7~8
1260/6/24	개성	땅이 크게 흔들리고 기와집과 담 이 무너지고 부서졌는데 개성에서 더욱 심했다	7~8
1455/1/24	경상도,전라도	(중략) 담과 집 이 무너지고 사람이 많이 깔려 죽었다	8~10
1518/7/2	한반도전역	(중략) 궁궐내의 담들이 부서져 넘어졌으며, 민가 가 무너졌으므로 남녀노소가 모두 밖으로 나와 노숙을 하여 압사를 면했다	8~10
1613/7/16	(지역미상)	새벽에 지진이 일어나 큰 우뢰와 같은 소리가 났으며 담과 집 이 많이 부서졌다	5~8
1757/7/30	덕산	충청도 덕산에 지진이 일어나 죽은 사람이 있었다	8
1760/8/30	경상도,함경도	(중략) 금산, 전산 등의 읍과 함경도 문천군에서는 지진으로 죽은 사람이 무릇 4명이었다	8

*주 : ()안의 지역은 역사문헌명에 따른 추정지역

2. 고베 지진 시 목조 가옥의 피해

鈴木有[3]는 고베 지진 시 목조 건물의 중요한 피해원인을 다음과 같이 4가지로 요약하였다.

- 지진동 특성과 구조물 특성 : 고베 지진의 지진파는 0.8초를 피크로 한 1초 전후의 주기 대에 강한 파워 진동성분을 갖는 수평진동과 동일 위상의 강한 상하진동이 거의 동시에 작용하였다. 이 지역의 재래식 목조건물은 뼈대 및 토벽으로서 노화되어 내진력이 약하며 1초 전후의 고유진동수를 갖기 때문에 지진동과 공진을 발생하였고 강렬한 몇 개의 파가 반복작용을 함으로서 대변형을 일으켜 도괴에 이르렀다.

- 공법의 변화에 의한 내력의 저하 : 재래식 축조법은 큰 나무를 사용하고 벽을 배치하고 대나무 등으로 흠벽을 지지한다. 나무와 나무, 대나무와 흠은 일종의 댐퍼 작용을 하게 된다. 그리고 큰 기둥, 보, 소벽은 일종의 라멘 구조로서 강한 저항력을 갖는다. 코베 지역에서는 오랫동안 큰 지진이 없었기에 경제성 논리에 따라 가는 부재, 연결부의 간략화, 사재의 소량화, 벽의 효용성에 관한 인식부족 등으로 내진성능이 저하되었다. 이 지역은 태풍.한서의 대책으로 기와집이 많고 방화법 제정 이후 몰탈이 일반화되어 외벽심은 몰탈을 사용하였다. 지붕과 벽의 중량은 흠을 사용한 건물과 유사하다. 1층에 지붕 무게에 의한 강한 전단력이 작용하고, 강한 상하 진동의 중력이 가중되어 뼈대의 복원력을 저하시킴으로서 복원력한계를 초과하는 급격한 붕괴가 발생하였다.
- 토지정책, 주택정책의 영향 : 도로에 면한 곳에서 길고 좁은 가옥이 건설되었다. 1층에는 큰 개구부가 1면이 연속되고 외곽 및 내부 벽이 적어지고 편재한다. 이것이 큰 파괴원인의 하나이다. 고속성장기에 연약한 매립지 및 사면에 주택을 조성한 결과 인공지반에는 일반적으로 진동이 증폭되고 액상화 및 붕락, 합몰 및 균열의 발생 등 지반이 변형하였으며 이에 의한 피해도 많았다.
- 기밀화의 진행 및 유지보수의 부재 : 고기밀, 고단열화가 진행됨에 따라 목재의 부패가 빨라졌고 흰개미의 번식을 촉진시켰으나 적절한 유지보수가 이루어지지 않았다. 중요한 접합부가 부패하여 목조의 강도는 상실되어 파괴된 가옥이 많았다.

교토대학의 피해 조사결과[4], 목조건물의 피해가 북쪽 산측에서는 경미하고 남측은 매우 컸다. 이는 남북방향의 지반특성이 다르기 때문이다. 그리고, 전반적으로 건설연대가 오래되고 노후화된 건물이 큰 피해를 받았다. 특히 무거운 기와 건물의 피해가 현저하였다. 間口가 좁은 주택은 연행방향으로는 외벽이 배치되지만 장간방향으로는 벽을 충분히 배치할 수 없다. 특히 도로에 면한 부분에 출입구와 창을 설치하기 위해 벽을 배치할 여유가 없기 때문에 장간방향으로 경사 및 도괴되었다. 점포 병용 주택에는 도로측에 큰 개구부를 두기 때문에 큰 변형이 발생하여 압괴에 의해 도로 전면으로 도괴하였다. 고베시와 인접한 아야시시의 피해도 이와 유사하였다. 특히, 외벽과 기둥, 보의 부패 및 해충에 의한 강도저하에 의해 피해가 많았다. 그리고, 벽율이 15% 미만인 경우 100% 파괴, 20%까지는 50% 파괴되었다. 토벽의 경우 전괴율이 50%에 달하였다. Doi 등[5]의 조사결과 목재의 생물학적 부패가 가옥 붕괴의 주요 원인 중의 하나였다. 진양지에 인접한 코베 시내 1 km x 0.3 km의 탐사 구간에 대한 70-80%는 기와지붕이며, 약 60%는 수명이 30년 이하인 건물이었다. 수명 30년 이하의 가옥이 흰개미의 침해를 받거나 부패한 비율은 약 25% 정도였고, 30년 이상의 가옥에서는 약 60% 정도가 흰개미의 침해를 입었다. 부패된 가옥은 수명에 관계없이 대부분 붕괴되었다.

3. 고대 민가의 구조

표 1의 지진피해 기록에서 기와집의 피해는 명확하게 알 수 있으며, 기와집이 아닌 가옥(민옥, 민가 또는 집)의 피해기록과 뚜렷하게 구분이 되고 있다. 따라서, 대부분의 지진피해는 일반 서민의 민가에서 발생하였을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 판단의 근거는 조선시대 도성에서 감지된 중.소규모의 지진에 대한 피해 기록은 기와집과 관련된 것이 많은 반면 지방에서 감지된 지진의 피해기록은 특별히 유의할만한 것이 없다는 점이다. 그리고, 신라,

백제 등 삼국시대 및 그 이후의 궁궐, 사찰 등 주요 건물은 일반적으로 기와집으로 알려져 있으나 이에 대한 지진피해 기록은 극소수에 불과하다. 이는 기와집의 구조가 민가에 비해 내진성이 큰 구조일 가능성을 보여준다. 구조적인 관점에서 기와집은 초가집에 비해 단위 면적당 중량이 3-4배 크며, 무게중심이 지상에서 높은 위치에 있게 되어 상대적으로 지진에 취약한 구조이다. 따라서 이에 대한 지진피해 기록이 극히 적다는 점은 기둥과 들보로 구성되는 뼈대가 충분한 강도를 갖도록 지어져서 상대적으로 지진에 대해 강한 구조로 되었기 때문에 피해가 적었을 것으로 추정된다. 실제로 현존하는 기와집을 살펴보면 부재의 단면이 매우 크고 뼈대의 구성도 매우 튼튼하게 되어 있음을 알 수 있다. 또한 주요 사찰 등에 대한 화재피해 기록은 상당수 있는 바, 만일 이들 구조물이 지진에 의해 큰 피해를 입었다면 역사 기록에서 화재피해와 마찬가지로 비중있게 다루어 졌을 것으로 추정된다.

19세기말 경남 의령군 상정면에서 수행된 호구조사 결과에 의하면 초가집이 전체의 99%에 달하였고, 호당 약 3칸 정도의 규모였던 것으로 나타났다[6]. 그리고 현재 민속마을로 보존되고 있는 전남의 낙안마을은 15세기에 지어져서 현재까지 원형이 잘 보존되고 있는데 초가집이 전체의 약 90%에 이른다. 따라서 민가의 지진피해에 관한 대다수의 기록은 일반 소농 또는 하층계급의 일반적인 주거형태였던 초가집으로 추정된다. 또한 평민 또는 소농이하의 가옥은 고구려, 신라, 백제, 고려 및 조선시대의 주택정책에 의해 규모, 재료 등 여러면에서 제한을 받았으며 또한 경제적인 이유로 인해 재료 및 시공면에서 상대적으로 취약한 구조였을 것으로 추정된다.

민가의 구조는 계층적 차이 이외에도 시대적 및 지역적으로 차이를 보인다. 그러나, 조선시대 이전의 민가의 구조는 고고학적 실증이 부족하여 유추하기 어렵다. 현존 건물에 대한 조사결과 전국적으로 가장 보편적인 민가의 형태는 표 2에서와 같이 2칸 또는 3칸의 외통집으로 추정되었다[7]. 대표적인 4랑집 초가삼간을 그림 1에 보였다. 재료로서는 소나무가 가장 보편적으로 사용되었다.

표 2. 민가의 평면구성(김홍식, 1992)

모양	평면구성	배치방법		
		외채집	쌍채집 . 二자형 . ㄱ자형	세채집
한일자집	. 외통집 (전국, 소농) . 양통집 (함경.동해안, 소농) . 곁집 (남도, 자영농)	외채집	쌍채집 . 二자형 . ㄱ자형	세채집
좁은자집 . 꺾은집-평안 . 곱배집-충청	. 좁은자집 (중부, 자영농) . ㄷ자집 (경기, 자영농) . ㄹ자집 (전국, 대농)	. 튼ㄷ자집, 튼ㄹ자집 . 튼ㄹ자집 . ㅁ자집 - 사대부집		
사대부집	ㅂ자집, 乙자집, ㄷ자집, 元자집, 日자집, ㅍ자집, 用자집, 田자집			

초가삼간의 평균적인 구조상세는 전국의 민속마을에 대한 답사 및 전문가의 자문을 통하

여 그림 2와 같이 결정하였다[2]. 초가삼간은 그림 2(a)와 같이 방 2개 및 부엌 1개와 전퇴로 구성된다. 초가삼간의 폭은 3.6 m, 길이는 7.2 m이다. 기둥은 모두 15 cm 인 각재가 사용되며, 외진주의 기둥은 길이 2.4 m인 평주이고 내진주의 기둥 2개는 길이 2.94 m인 고주이다. 모서리 기둥은 기둥 윗쪽이 안쪽으로 1/80의 기울기를 갖는다.

외진주의 평주는 기둥 상단에서 도리 및 들보로 연결된다. 가장 일반적인 연결방법은 그림 3과 같은 사개맞춤이다. 그리고, 기둥의 상·하부에는 상인방 및 하인방이 가로로 연결된다. 인방의 연결에는 폭 15 mm, 깊이 30 mm의 장부맞춤이 사용된다. 부엌문과 방문은 인방 사이에 세로로 문설주를 연결한 다음 설치되며, 방 및 부엌의 양쪽에 대칭으로 설치된다(그림 2(b)). 고주는 기둥 상단에서 장방향으로 도리에 의해 연결되며, 고주와 평주를 연결하는 들보의 중앙에는 그림 2(c)와 같이 동자주가 세워진다. 동자주끼리는 도리에 의해 기둥 상단에서 장방향으로 연결되며, 고주와 동자주는 단방향으로 연결된다. 동자주와 고주 상단의 연결에는 사개맞춤이 사용된다. 고주 상부에서 2개의 단방향 들보는 장부맞춤에 의해 연결되고 직경 24 mm의 나무못 4개로 보강된다.

4개의 모서리 기둥과 고주 및 동자주 상단의 도리는 추녀에 의해 연결된다. 그리고, 고주 상단의 장방향 도리는 외진주의 평주와 사개맞춤으로 연결되며, 동자주 상단의 장방향 도리와 외진주 평주의 도리가 연결된다. 고주 및 동자주의 장방향 도리위에는 직경 90 mm의 동연이 300 mm 간격으로 설치된다. 서까래는 직경이 90 mm이며 300 mm 간격으로 설치된다. 서까래, 동연 등의 연결에는 보통 벗집으로 만든 새끼가 이용된다. 지붕은 서까래 위에 산자를 덮고 5~7cm 정도의 보도를 한 다음 최종적으로 30~45 cm 정도의 이엉을 얹어 구성하였다. 지붕의 무게는 약 170 kg/m^2 로서 매우 무거운 편이다.

벽체는 골조 사이에 심벽을 설치하여 만든다. 심벽은 목심과 수수깡, 싸리나무 등으로 짜여 있으며 그 위에 흙을 발랐다. 주추는 일반적으로 다듬지 않은 판석형의 돌이 사용되었다. 기둥 하단은 주추와 기둥의 접촉면이 완전히 밀착될 수 있도록 주추의 요철을 고려하여 기둥을 그랭이질하여 얹혀 놓았다.

3. 목조 프레임의 수평내력 실험

초가삼간을 구성하는 목조 프레임 및 1/4 축소모델의 제작에는 강원도에서 채취한 신선한 소나무를 사용하였다. 초가삼간 축소모델에 대한 내진성 평가실험 결과의 정확한 분석을 위하여 소나무에 대한 여러 가지 강도실험을 수행하였고, 실물 크기의 프레임을 여러 개 제작하여 정적 및 유사정적 수평하중에 대한 거동특성을 분석하였다[2,8].

3.1 소나무의 강도시험

목재의 강도실험은 KS표준에 따라 압축, 인장, 전단 및 휨 강도실험을 수행하였고 실험 후 각 시편의 함수비 및 비중을 측정하였다. 전형적인 휨 강도시험 장면을 그림 4에 보였으며, 소나무의 섬유 방향과 평행한 방향 및 직각인 방향의 압축하중-변위 곡선을 그림 5에 대표적으로 보였다. 그림에서 소나무는 이방성 및 비선형성이 매우 큰 것을 알 수 있다. 소나무의 함수율, 비중 및 파괴강도의 평균값을 표 3에 보였다. 표에서 인장 및 전단 실험 결과는 소나무의 섬유 방향과 평행한 경우에 대한 값이다. 휨 실험의 경우 평균 탄성계수는 $69,890 \text{ kg/m}^2$ 로서 미국 소나무에 비하면 20% 이상 작은 편이다. 섬유 방향과 평행한 방향의 압축강도도 미국 소나무에 비해 약 50%가 작다.

표 3. 모델에 사용된 소나무의 함수율, 비중 및 파괴강도

구분	휨시험	압축시험		전단시험	인장시험
		종	횡		
함수율(%)	15.5	21.0	19.5	14.0	11.5
비중	0.55	0.44	0.46	0.57	0.48
강도(kg/cm^2)	539	206	33	129	772

3.2 목조 프레임의 수평내력 실험

3.2.1 정적 수평내력 실험

초가삼간을 구성하는 목조 프레임의 장방향 및 단방향의 수평내력을 평가하기 위하여 평주 프레임과 고주 프레임에 대한 1:1 모델을 각각 제작하였다. 평주 프레임은 도리가 기둥에 ① 완전히 끼워진 형태; ② 4/5정도 끼워진 형태; ③ 완전히 끼워진 형태에서 심벽이 설치된 서로 다른 3가지 모델을 제작하였다. ①,②는 보통 집과 허술하게 지어진 집의 차이를, ①,③은 보통 집에서 심벽의 영향을 분석하기 위한 것이다. 고주 프레임은 내력의 평균값을 구하기 위해 동일한 형태로 2개를 제작하였으며, 사개맞춤은 완전히 끼워진 형태로 제작하였다.

프레임의 기둥 하단은 바닥에 고정된 철제 프레임과 연결되었고, 상단은 반력벽에 연결된 유압가력기와 수평으로 연결되어 있다. 기둥의 비틀림을 방지하기 위하여 프레임의 좌우에 철제 프레임을 설치하였다. 기둥 하단의 경계조건은 힌지로 가정하였다. 실험은 변위제어 방법을 사용하였다. 데이터의 측정은 유압가력기의 스트로크와 각 기둥에 설치된 변위계의 변위를 측정하였다. 유압가력기의 시험한계인 200 mm까지 실험을 수행한 후에는 파괴 시 변위 및 파괴모드를 분석하기 위하여 와이어로프를 수평으로 연결하여 파괴에 도달할 때까지 변위를 가하였다. 심벽이 설치된 프레임의 실험과정을 그림 6에 보였다.

평주 프레임 및 고주 프레임의 수평하중-변위 곡선을 각각 그림 7 및 8에 나타내었다. 그림에서 프레임의 거동은 매우 큰 비선형성을 보여주며 뚜렷한 항복점이 존재하지 않는다. 완전한 사개맞춤으로 제작된 평주 프레임(S-A1)의 극한 수평내력은 1,184 N, 도리 높이의 4/5가 결합된 사개맞춤에서 프레임(S-A2)의 극한 수평내력은 952 N으로서 S-A1에 비해 S-A2의 극한강도가 약 20% 감소하였다. 심벽이 설치된 프레임(S-A3)의 경우 수평내력은 S-A1에 비해 약간 증가할 것으로 예상되었으나 극한 수평내력은 1,090 N으로서 오히려 약 8%가 감소하였다. 이는 심벽이 목조 프레임의 수평내력에 미치는 영향이 매우 미미하며, 조인트 제작상의 숙련도의 차이로 인한 것으로 추정된다. 고주 프레임의 경우 극한 수평내력은 평균 4,160 N으로서 평주 프레임에 비해 매우 크다. 이것은 평주 프레임의 경우에는 사개맞춤에서 두 개의 화통가지에 의해 하중을 받으나, 고주 프레임의 경우에는 네 개의 화통가지 모두에서 하중을 받기 때문이다.

파괴 시 평주 프레임의 평균 수평변위는 약 400 mm(1/6 rad), 고주 프레임의 경우는 약 250 mm(1/9.6 rad)로 측정되었다. 조인트의 파괴는 평주 프레임의 경우 모두 화통가지의 전

단파괴로 관찰되었으며 대표적인 파괴모드를 그림 9에 보였다. 고주 프레임의 경우는 모두 화통가지의 휨 파괴로 관찰되었으며 대표적인 파괴형상을 그림 10에 보였다.

3.2.2 이력특성 실험

이력특성 실험을 위해서 평주 프레임 2개 및 고주 프레임 1개를 제작하였다. 평주 프레임의 기둥 상부 조인트는 (1)완전한 사개맞춤 (2) 4/5 결합된 사개맞춤의 2가지로 나누어 제작하였다. 이는 조인트의 형태에 따른 이력특성을 분석하기 위한 것이다. 고주 프레임은 평주 상단 부분이 완전한 사개맞춤으로 이루어져 있다.

실험체는 정적 특성실험과 유사하게 설치되었다. 교변하중을 재하시키기 위하여 두께 30 mm의 강판으로 제작된 철구를 유압가력기와 허두 사이에 설치하고, 직경 40 mm의 강봉 2개를 이용하여 철구와 프레임의 허두를 연결하였다. 따라서, 유압가력기를 밀 때는 하중이 직접 프레임에 전달되나 유압가력기를 당길 때에는 강봉과 허두를 통하여 하중이 전달된다. 고주 프레임의 경우에는 강봉을 반대편 평주의 허두까지 연장하여 연결하였다.

이력실험에는 변위제어 방식을 사용하였다. 실험에 사용한 변위량은 그림 11에서와 같이 최소 ± 3 mm에서 최대 ± 96 mm까지 6단계로 구분하고, 각 단계마다 동일한 변위량으로 4회 반복하여 이력실험을 수행하였다. 각 재하 사이클은 분당 1회로 하였다. 이력실험 종료 후에는 파괴 시 변위 및 파괴모드를 분석하였다.

조인트가 4/5 결합된 사개맞춤의 평주 프레임은 실험결과가 부적당하여 분석대상에서 제외하였다. 완전히 결합된 사개맞춤의 평주 프레임에 대한 하중-변위 이력곡선 및 고주 프레임의 이력곡선을 각각 그림 12, 13에 나타내었다. 그림에서 이력곡선은 매우 큰 비선형성을 나타내며, 변위가 증가함에 따라 강성이 저하됨을 알 수 있다. 그리고, 경험변위의 크기가 증가함에 따라 프레임의 강성이 저하되었다. 이는 목조 프레임이 동일한 크기의 지진하중을 받을 경우 경험변위의 크기에 따라 거동이 다름을 의미한다.

이력곡선으로부터 이력당의 일량과 에너지 소비량과의 관계를 이용하여 프레임의 등가 점성감쇠비를 계산한 결과 평주 프레임에서 약 27%, 고주 프레임에서 약 13%로 나타났다. 이는 평주의 조인트에서 도리가 2개의 화통가지에 끼워 맞춘 형태로 되어 있는 반면, 고주의 경우에는 보가 4개의 화통가지에 연결되어 있어 유연성이 크기 때문이다.

프레임의 파괴모드는 정적 특성실험의 경우와 동일한 양상을 보였다.

4. 축소모델의 내진성 평가실험

초가삼간의 지반조건에 따른 내진성을 평가하기 위하여 그림 14와 같은 모델 2개를 제작하여 사용하였다. 재료는 강원도에서 채취한 신선한 소나무를 사용하였고, 진동대의 크기 및 성능을 고려하여 기하학적 상사율은 1/4로 결정하였다. 축소모델의 지붕에는 총 930 kg의 중량을 설치하였다. 실제 구조물의 경계조건과 동일한 경계조건을 구성하기 위하여 주주와 기둥사이의 연결을 힌지로 설계하였다. 지반조건은 암반 및 연약 지반으로 가정하고, 이와 유사한 지반조건을 갖는 외국의 계기지진 자료를 이용하였다. 지진가속도 수준을 단계별로 증가시켜 가옥이 파괴에 도달할 때까지 실험을 수행하여 내진성을 평가하였다[9,10].

4.1 암반지반상의 초가삼간의 내진성 실험

입력운동으로 사용된 Nahanni 지진(규모 6.4, 진앙거리 8 km, 진원심도 18 km, 최대 수평

지진가속도 1.176g)은 1985년 12월 북미 동부에서 발생하였고, 지속시간이 약 20초이며 고진동수 성분이 많다. 3방향 가속도시간이력은 그림 15와 같다. 실험은 최대 지반가속도 수준을 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 및 0.6g의 6단계로 0.1g 씩 증가시키면서 수행하였다. 3방향 지진파를 동시에 입력시켰으며, 연직성분은 수평성분의 2/3로 하였다. 축소모델의 고유진동수 및 감쇠비 측정을 위해 시험 전 및 각 가속도 단계별 시험 후 백색잡음(White Noise)파를 이용한 랜덤 진동시험을 수행하였다.

축소모델의 탄성한계 내에서의 고유진동수는 장방향 및 단방향으로 각각 3.32 Hz 및 4.29 Hz로 나타났다. 이를 원형(prototype) 구조의 진동수로 환산하면 각각 1.66 Hz, 2.15 Hz이다. 축소모델의 탄성한계 내 감쇠비는 양방향 모두 약 7%로 나타났다. 1950년대 이전의 일본 진동 목조가옥[6,7]의 평균 고유진동수 2.5 Hz 및 탄성한계 내 감쇠비 6%~8%와 비교할 때 우리나라의 초가삼간이 매우 유연한 구조이며 감쇠비는 비슷한 수준임을 알 수 있다.

최대 지반가속도 수준별로 기동상부에서 측정된 가속도 및 변위 응답의 최대값을 표 4에 나타내었다. 표에서 수평방향의 가속도 응답이 입력가속도에 비해 감소하며, 입력가속도 수준의 증가에 따른 가속도 응답의 증가에 비해 변위 응답의 증가가 현저하게 나타나고 있다. 0.6g의 입력지진에 대한 기동 상부에서의 가속도응답 시간이력을 그림 16에 대표적으로 나타내었다.

표 4. 가속도 수준별 최대응답 가속도 및 변위

입력가속도 수준	최대가속도응답(g)			최대변위응답(mm)	
	x	y	z	x	y
0.1 g	0.07	0.06	0.09	1.19	1.08
0.2 g	0.10	0.07	0.18	2.85	3.28
0.3 g	0.12	0.08	0.25	3.91	5.89
0.4 g	0.06*	0.06*	0.06*	6.24	4.69
0.5 g	0.18	0.09	0.37	7.83	6.21
0.6 g	0.17	0.16	0.38	9.84	7.40

* 가속도 데이터의 계측이 불완전하여 분석대상에서 제외

입력가속도가 0.6g일 경우의 x방향 가속도 및 변위응답의 최대값은 0.1g에서의 응답의 2.4배 및 8.3배로 각각 나타났다. 또한 가속도 응답이 0.1 g에서는 0.073g로 입력가속도의 약 73 %를 나타내고 있으며, 0.6g에서는 입력가속도의 약 30 %의 응답을 보여주고 있다. 이상의 결과로부터 입력 가속도 수준이 증가함에 따라 변위응답이 급격히 증가하며 변위의 증가에 따라 축소모델의 강성이 감소되어 고유진동수가 저하되고 그에 따라 가속도 응답이 입력 가속도에 비해 매우 작게 나타나게 된다. 0.6g 입력에 대한 모델의 변위응답은 실제 초가삼간에서는 반파 이상의 손상으로 판정할 수 있다[8].

4.1 연약지반상의 초가삼간의 내진성 실험

본 실험은 경주시 인근에서 지진이 발생한 경우 그로 인해 시내에 위치한 초가삼간이 붕괴할 때의 최대 지반가속도를 추정하기 위해 수행되었다. 경주시는 형산강과 북천 및 남천 등의 하천이 범람하여 만든 두께 20 m 내외의 대표적인 충적층 지반이다. 입력지진으로는 1979년 10월 미국 서부에서 발생한 규모 6.5의 Imperial Valley 지진의 Array No.5에서 측정된 지진기록을 사용하였다. 이곳의 지반특성은 경주시와 매우 유사하다. 그림 17에 Imperial Valley 지진의 가속도 시간이력을 나타내었다. 이 지진은 2 Hz 이하의 저진동수 대역에서의 수평방향 응답성분이 매우 크며, 지진의 지속시간은 약 40초이다. 축소모델에 대한 진동대 실험은 최대 지진가속도 수준을 0.05g, 0.08g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 및 0.25g의 6단계로 수행하였다.

탄성한계내 모델의 고유진동수를 측정하여 원형 구조의 진동수로 환산한 결과 장방향 및 단방향으로 각각 1.66 Hz 및 1.76 Hz이었다. 또한 감쇠비는 양 방향에서 약 7%로 나타났다.

입력 지진가속도 수준별로 세 측정점에서의 가속도 및 변위 응답의 최대값을 표 5에 나타내었다. 0.15g 이상의 입력가속도 수준에서는 A3 기둥의 장방향 가속도 및 변위 응답만을 측정하였으나, 최대 변위는 측정한계인 ± 25 mm를 초과하였다. 표에서 축소모델은 지반가속도 0.25g에서 파괴되었다. 0.1g의 입력에 대한 기둥 상부에서의 전형적인 가속도응답 시간이력을 그림 18에 나타내었다. 수평방향 가속도응답 시간이력에서 초기의 약 3초 구간은

표 1. 가속도 수준별 모델의 최대 가속도 및 변위 응답

입력가속도 수준	방향	최대 가속도응답 (g)			최대 변위응답 (mm)		
		A3*	C2*	D1*	A3*	C2*	D1*
0.05 g	x	0.040	0.043	0.052	4.28	4.20	5.13
	y	0.037	0.029	0.037	2.33	1.59	0.80
	z	0.036	0.044	0.039	-	-	-
0.08 g	x	0.056	0.059	0.065	9.74	9.40	10.71
	y	0.046	0.042	0.042	4.13	3.14	2.44
	z	0.069	0.076	0.069	-	-	-
0.10 g	x	0.063	0.060	0.066	14.29	13.29	14.96
	y	0.048	0.052	0.049	4.97	4.29	2.46
	z	0.086	0.088	0.081	-	-	-
0.15 g	x	0.099	-	-	-	-	-
0.20 g	x	0.148	-	-	-	-	-
0.25 g	Collapse						

* A3, C2, D1는 센서의 부착 위치

탄성응답을 나타내기 때문에 입력지진과 유사한 파형을 나타낸다. 3초 이후 큰 변위가 발생하여 강성이 저하된 구간에서는 입력지진과의 고진동수 성분이 매우 감소하였다. 그림 19는 0.25g의 입력에서 축소모델이 완전히 붕괴된 모습을 보여주고 있다.

5. 초가삼간의 내진특성을 고려한 역사지진의 진도

공학적으로는 지반운동의 척도로서 지진가속도가 가장 일반적으로 사용된다. 그러나, 역사지진과 같이 정성적으로 표현된 피해기록으로부터 지진가속도를 추정하기 위해서는 통상 진도가 사용된다. 진도와 지진가속도와의 상관관계는 지진 자료로부터 만들어진 경험식으로 주어지며 Trifunac and Brady (1975), Ambraseys (1974), Hershberger (1956), Gutenberg and Richter (1956), Murphy and O'Brien (1977) 등이 제안한 식들이 사용된다. 그러나, 이들 상관식은 그림 20에서와 같이 매우 큰 편차를 나타낸다.

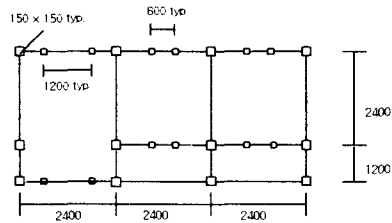
실험결과 암반지반상의 초가삼간은 0.6g에서 반파이상의 피해를 나타냈으며, 연약지반상의 초가삼간은 0.25g에서 완전히 파괴되었다. 이러한 실험결과는 강도의 손상이 전혀 없는 신축 가옥에 대한 것으로서 상한값에 가까운 값으로 추정할 수 있다. 그리고, 역사지진 기록에 나타나는 파괴된 가옥은 50년 또는 100년이 경과한 노후된 가옥이 상당수 있을 것이라는 추정이 가능하며, 이러한 추정은 일본의 대규모 지진시 목조가옥의 피해조사 결과 밝혀졌다. 따라서 지반조건과 무관하게 실험결과를 모두 포괄하는 진도는 MM진도 VIII로 추정된다.

참고문헌

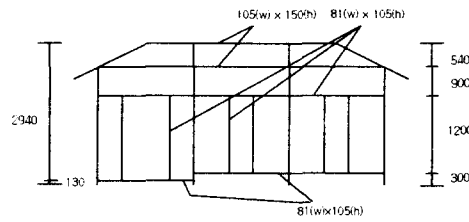
1. 박창엽, 한반도 지진파 에너지 감쇠 연구, 한국원자력연구소 (연구기관; 서울대학교), 1997.10
2. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영, “고대 민가의 구조 및 목조 프레임의 수평내력에 관한 연구”, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제2호, 1997, pp. 31-37.
3. 鈴木有, 木造建物はなぜ大被害お生じたか?, 平成 7年 兵庫縣南部地震の被害調査に基づいた實証的分析による被害の検証, 경도대학 방재연구소, 1996
4. 阪神・淡路大震災 -防災研究への取り組み- 건물의 피해, 도시내진계획, 경도대학 방재연구소, 1996.
5. Doi, T et al., “Damage to Wooden Houses due to the 1995 Great Hanshin -Awaji Earthquake Disaster,” Proc. of 11th WCEE, Paper 856, 1996
6. 신영훈, 한국의 살림집, 열화당, 1995
7. 김홍식, 한국의 민가, 한길사, 1992
8. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, “수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제1권 제3호, 1997, pp. 21-27.
9. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, “전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반조건”, 한국지진공학회 논문집, 제1권 제 4호, 1997.(인쇄중)
10. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, “전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(II) : 연약지반조건”, 한국지진공학회 논문집, 제1권 제 4호, 1997.(인쇄중)



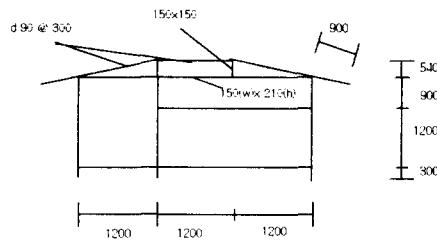
그림 1. 전형적인 4량집 초가삼간



(a) 평면도



(b) 전면도



(c) 측면도

그림 2. 4량집 초가삼간의 상세 구조

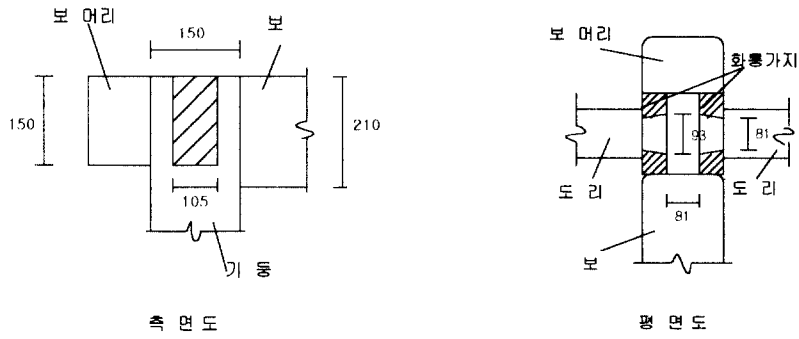


그림 3. 사개맞춤 상세도

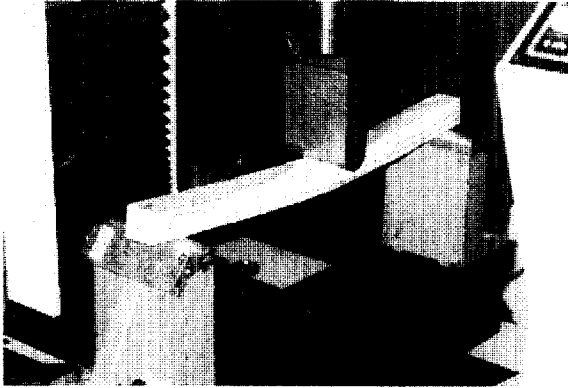
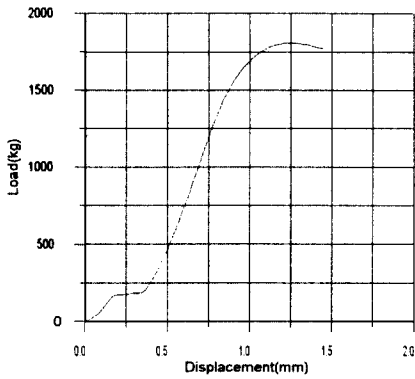
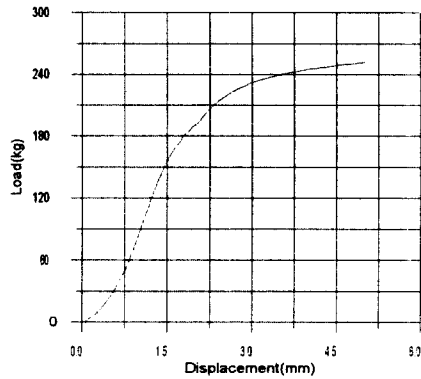


그림 4. 소나무의 휨강도 시험



(a) 섬유 방향



(b) 나이테 방향

그림 5. 소나무의 압축강도 시험 결과

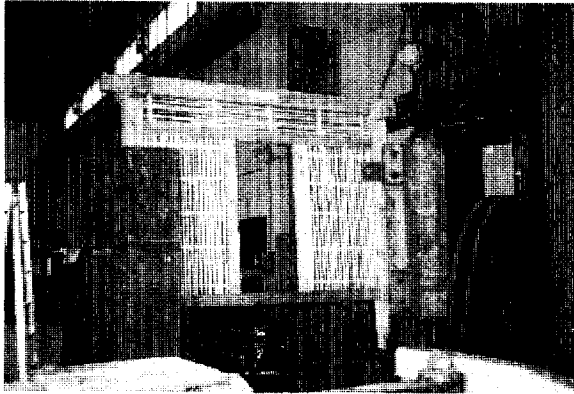


그림 6. 심벽 평주 프레임의 내력실험 전경

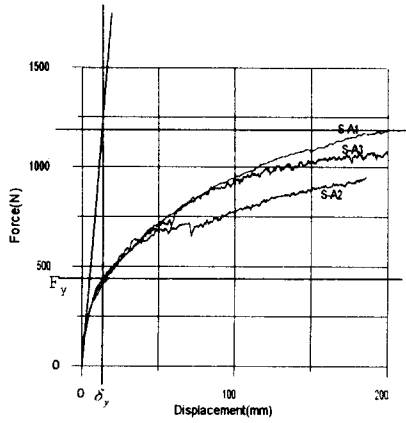


그림 7. 평주 프레임의 수평하중-변위 곡선

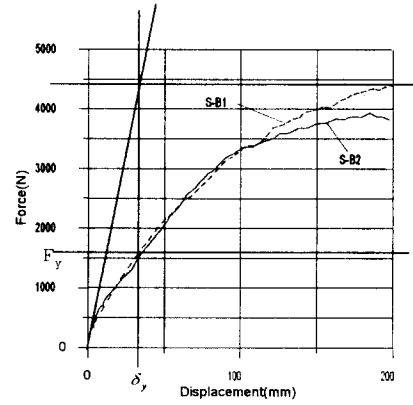


그림 8. 고주 프레임의 수평하중-변위 곡선



그림 9. 평주 프레임 조인트의 파괴모드

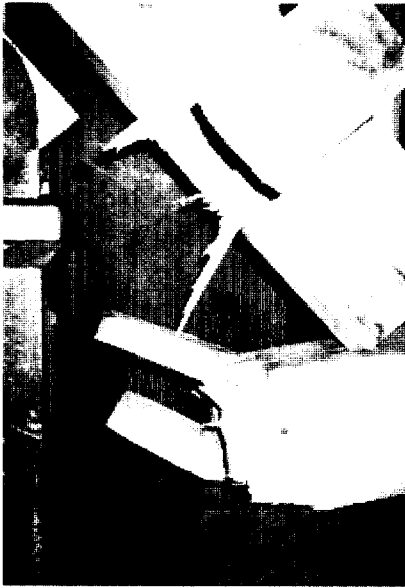


그림 10. 고주 프레임 조인트의 파괴모드

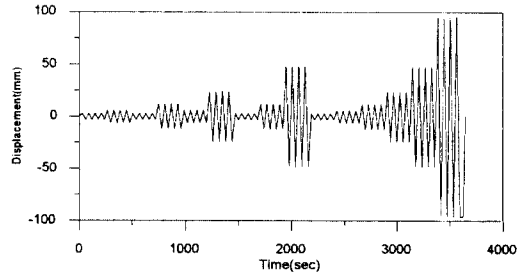


그림 11. 프레임의 이력특성 실험 재하 싸이클

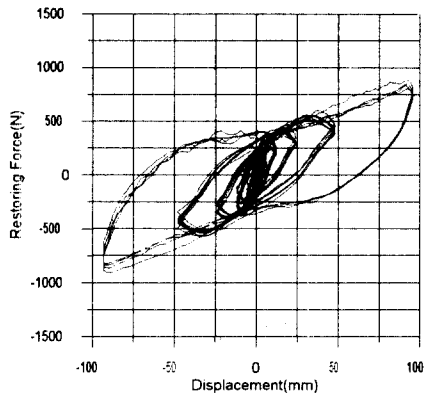


그림 12. 평주 프레임의 하중-변위 이력곡선

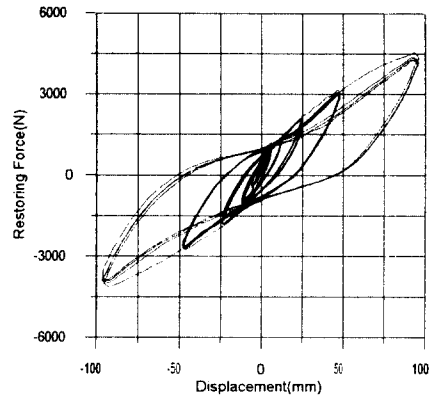


그림 13. 고주 프레임의 하중-변위 이력곡선

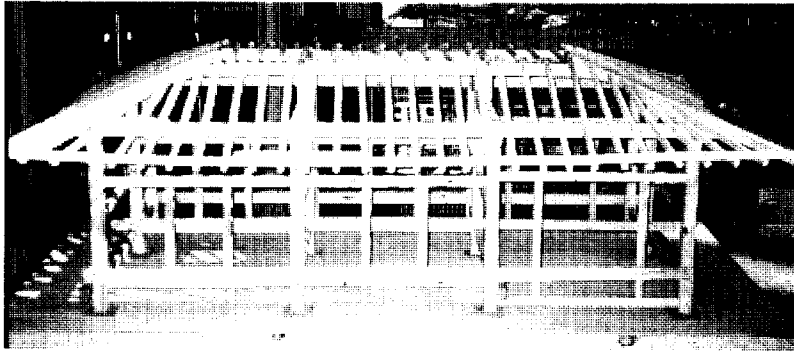
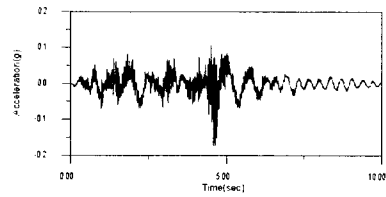
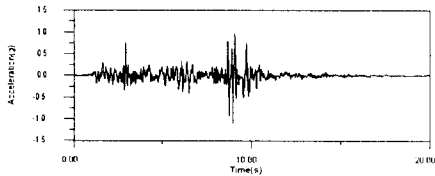
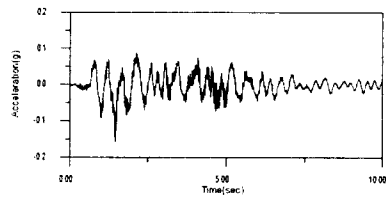
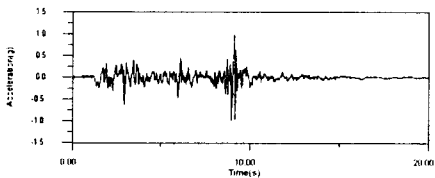


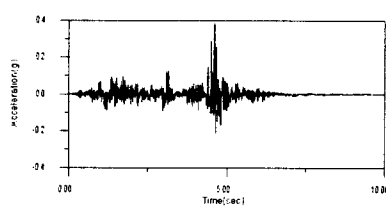
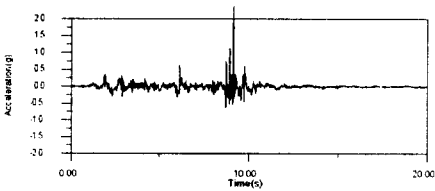
그림 14. 초가삼간의 1/4 축소모델



(a) 장방향



(b) 단방향



(c) 연직방향

그림 15. Nahanni 지진의 3방향
가속도 시간이력

그림 16. 암반지반 조건 실험의 기둥
상부의 가속도응답(PGA = 0.6g)

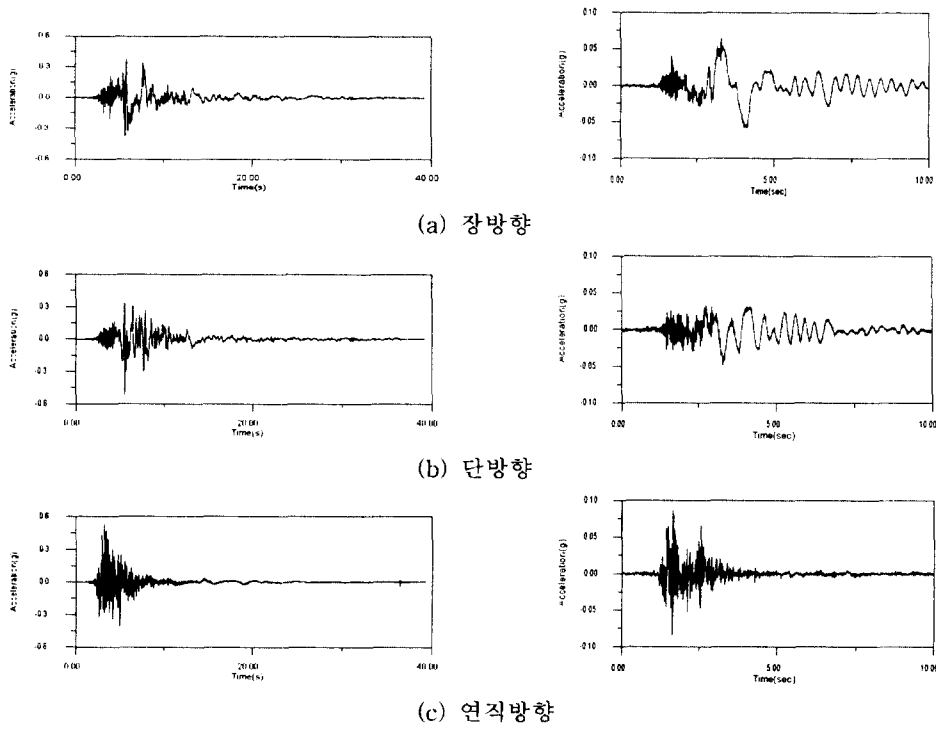


그림 17. Imperial Valley 지진의 3방향 가속도 시간이력

그림 18. 연약지반 조건 실험의 기둥 상부의 가속도 응답(PGA = 0.1g)

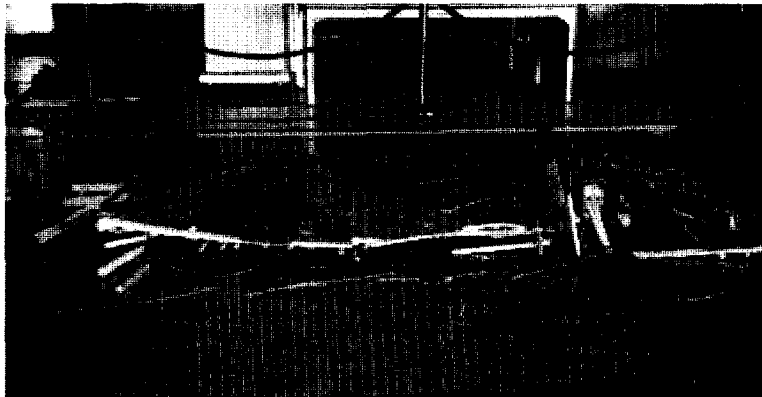


그림 19. 0.25g 입력에 대한 축소모델의 붕괴된 모습

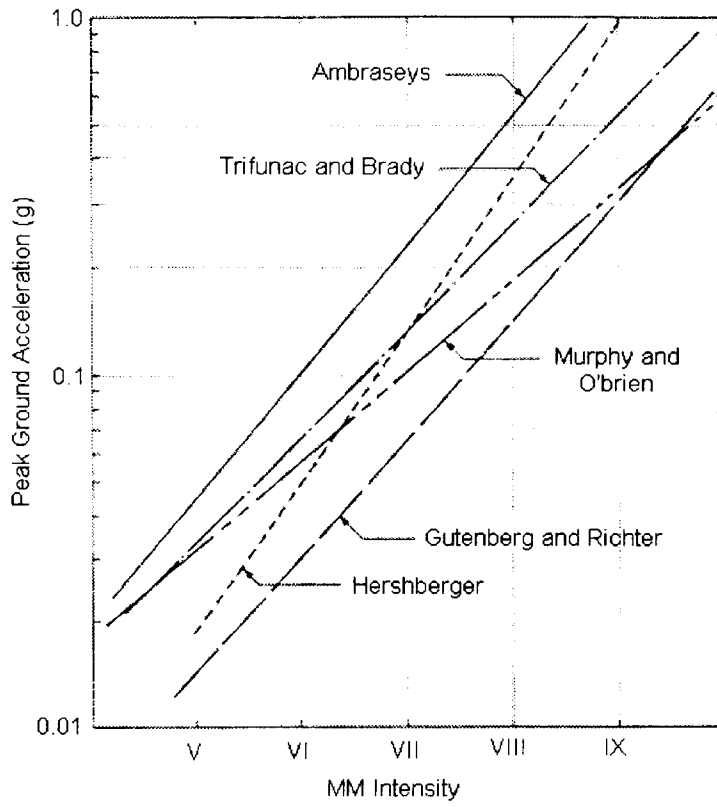


그림 20. 지진가속도-진도의 상관식