

발파진동으로 인한 조적조 가옥 피해의 임계수준 평가

양형식¹⁾ · 김남수²⁾ · 전양수²⁾ · 정지문³⁾ · 김재철³⁾ · 문승백³⁾ · 조상호³⁾ · 진연호³⁾

Estimation of Critical Vibration Level on Structural Damage of Brick House Induced by Blasting

Hyung-Sik Yang, Nam-Soo Kim, Yang-Soo Jeon, Ji-Moon Jung, Jae-Chul Kim, Seung-Baek Moon, Sang-Ho Cho and Yeon-Ho Jin

ABSTRACT New criteria to evaluate blasting damage to structure is proposed considering environmental caused daily deformation of cracks in structures. Results from 3 brick houses in fishing village shows that more than 10 times higher vibration level than design criteria of 0.5 kine is required to cause structural damage.

Key words : blasting, vibration, field measurement

초 록 구조물의 피해판정을 위하여 환경변화를 감안한 새로운 판정방법을 제안하였다. 농어촌 조적조 가옥에 대한 시험결과, 구조물 피해를 유발하는 발파진동 수준은 허용 발파진동설계를 위한 0.5 kine 보다 10배 이상의 높은 진동수준이었다.

핵심어 : 발파, 진동, 현장계측

1. 서 론

우리나라에서 지난 수년간 발생한 건설관련 민원문제 중 절반 가량이 발파 등 진동소음과 관련되어 있다.¹⁾ 현재, 국내에서는 발파진동 허용수준을 독일 기준의 하한치를 이용한 서울 지하철공사 기준을 주로 적용하고 있으며 피해의 산정에는 이 기준보다 더 엄격한 0.3 kine을 적용하고 있는 실정이다. 이는 설계허용기준을 구조물 피해 인정 기준으로 잘못 적용한 것일 뿐만 아니라 기준 자체가 진동주파수의 특성 등을 도외시한 것이기 때문에 문제가 많다. 이에 따라 여러 가지 기준을 제안한 연구들이 있지만²⁾ 실제 구조물의 피해를 관찰하면서 기준치를 제안한 연구는 없다.

본 연구는 2년여에 걸쳐서 국가공단을 건설하는 현장에서 철거대상 농어촌 조적조 가옥을 상대로 상시 기록화면에 따른 균열의 거동과 확장을 조사하고 실제 발파를 실시하면서 균열의 거동과 확장을 관찰하였다. 이러한 연구를 통하여 건물의 피해를 인정하는 하나의 기준을 제안하였으며 이에 따라 농어촌 일반 조적조 가옥

에 대한 구조물 피해 인정 진동수준을 제시하였다.

2. 실험 대상지역 및 시험가옥

대상지역은 여천공단 확장단지 조성공사가 진행중인 전남 여천시 화치동 연성마을로서 기반암은 주로 안산암 및 응회암들로 이루어져 있으며 이들이 풍화작용을 받아 토질화된 풍화층이 기반암 상부에 불규칙하게 피복되어 있고 지역에 따라서는 해성퇴적층 하부에 바로 기반암이 발달, 분포하기도 한다. 풍화대 상부에는 미고결 상태의 해성퇴적층인 실트질 모래, 자갈층과 실트질점토층이 광범위하게 발달, 분포하고 있다.

시험가옥 I, II, III은 70년대 후반에 건축된 단층 블록조로서 외벽은 시멘트모탈 마감 처리되었으며 목조 스러스트에 스테이트 덩게 형식으로 축조된 비교적 취

1) 정희원, 전남대학교 교수

2) 학생회원, 전남대학교 대학원 박사과정

3) 학생회원, 전남대학교 대학원 석사과정

원고 접수일 : 1998년 12월 5일

원고 심사 완료일 : 1999년 2월 27일



Photo. 1. Test house III

약한 전형적인 농촌가옥이고 수직, 수평, 전단균열이 많이 발달되어 있다. Photo 1은 시험가옥의 일례이다.

3. 측정장치 및 배열상황

본 실험에 사용된 발파진동 측정기는 캐나다 Instantel 社의 Blastmate I (DS-477) 1대, Blastmate II (DS-677) 1대 및 Minimate (DS-077) 6대 이다. 진동의 측정범위는 0.13 mm/s에서 253.99 mm/s 이다.

계측기는 근거리 발파에 의한 지반진동 및 구조물의 진동응답을 측정하기 위하여 알루미늄 plate와 bolt를 제작하여 시험가옥 벽체와 바닥에 측정기를 부착하였으며 측정기가 시험가옥의 각 부재와 함께 움직일 수 있도록 완전히 고정시켰다.(Photo 2)

발파진동에 의한 시험가옥 벽체의 표면 균열이나 팽창지점의 이동 변위를 측정하기 위하여 (주)신흥건설턴트에서 제작한 크랙 게이지를 사용하였다. 게이지의 측정범위는 0~40 mm (± 20 mm)이며, 분해능은 0.04

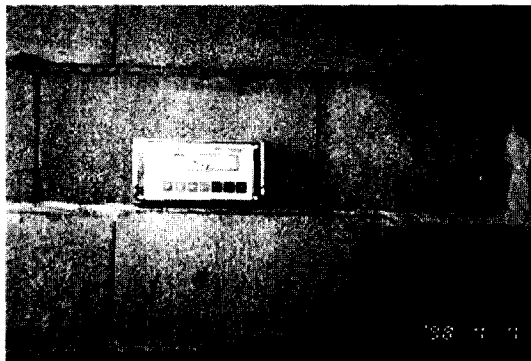


Photo. 2. Vibrometer installed at wall

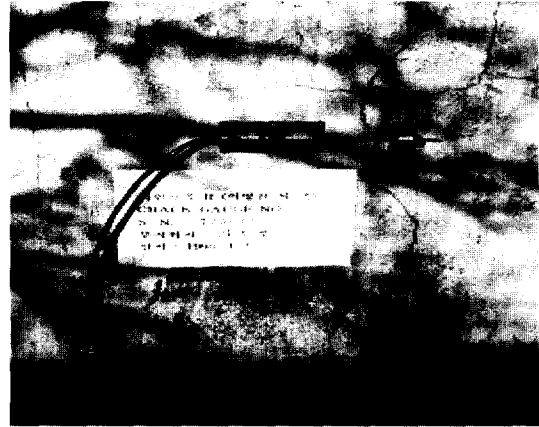


Photo. 3. Installed crack gauge

mm 이다.(Photo 3)

벽체의 물성을 측정하기 위해서 암석용 Schmidt hammer, Pundit 탄성파속도 측정기, ELS 압축시험기 등을 사용하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 온도변화에 따른 균열 변형

구조물의 균열발생 원인은 열팽창 차, 구조물의 과하중, 부재의 화학적 변질, 목재의 수축 및 팽창, 벽 카바의 피로 및 노화, 기초의 차등 침하 등 다양하다.

Table 1은 미광무국 시험가옥에서 측정된 일상환경

Table 1. Comparison of strain levels induced by various activities

Loading phenomena	Site ^a	Induced microstrain(μ)	Corresponding blast level ^b (mm/s)
Daily environmental changes	K1	149	30.0
	K2	385	76.0
Household activities			
Jumping	S2	37.3	7.1
Door slams	S1	48.8	12.7
Pounding nails	S12	88.7	22.4

^a : K1 K2는 두 장의 석고벽 사이의 테이프를 바른 연결부에 위치

^b : 변형률 대 지반진동의 비례도에 기초한 수치임
source : Stagg(1984), reconstructed

의 변화(온도 및 습도)와 일상활동으로 인한 변형률을 비교한 것이다. 활동적인 가족은 일상생활 중에 2.5~12 mm/s의 발과진동으로 발생한 것과 비슷한 정도의 벽 변형률을 일으키고, 온도와 습도의 일상 변화에 의해서도 3 kine 이상의 진동에 해당하는 큰 변형이 발생함을 알 수 있다.

시험가옥의 온도 변화에 따른 균열 변화에 대한 실험을 3월 20일에서 22일까지 3일에 걸쳐 실시하였다. 시험가옥 I, II의 내외부벽체의 여러 균열에 crack gauge를 붙이고 온도의 변화에 따른 기존 균열의 변형량을 측정된 결과는 Table 2와 같다.

시험가옥 I과 II에서 보듯이, 실내에서 측정된 균열의 변형량은 0~0.1 mm 미만으로 아주 작은 변화를 보였다. 반면에 실외에서 측정된 변형량은 0.027 mm에서 최대 0.41 mm 까지 변화를 보였다.

가옥 외부 벽체의 균열 변형량을 비교하면 대체로 햇빛을 직접적으로 받는 벽체의 균열이 가장 큰 변화를 보이고 있다. 시험가옥 I에서는 좌측벽의 균열이 0.41 mm의 변화를 보였고, 시험가옥 II에서는 보일러실 우측벽의 수직균열이 0.244 mm의 변화를 보였다. 이들 벽체가 실외 기온의 영향과 습기의 건조나 흡습을

가장 크게 받는 때문으로 생각된다.

균열의 형태에 따른 균열의 변화는 대체로 수직균열이 가장 큰 변형을 나타내고, 수평균열, 전단균열의 순이다.

시험가옥 I에서 최대 변화를 보이는 좌측벽의 균열의 길이는 0.7 m이고, 시험가옥 II의 보일러실 우측벽 수직균열의 길이는 1.3 m로 대체로 신장이 긴 균열이 많은 변화를 보이나 직접적인 비례관계는 보이지는 않는다.(Fig. 1) 균열의 폭과 균열의 변형량도 뚜렷한 관계가 없음을 알 수 있다.(Fig. 2)

Fig. 3은 시험가옥 I·II의 대표 균열의 온도변화에 따른 변화량을 나타내고 있다.

관찰 결과, 햇빛에 직접 노출되어 건조와 흡습이 자유로운 벽체의 수직균열이 가장 큰 변화를 일으키는 것으로 나타났다. 대표적인 균열은 시험가옥 I의 좌측벽 수직균열로서 온도차 14°C에서 최대 0.41 mm의 변형

Table 2. Comparison of deformation induced by daily temperature changes

Test house	Factors					
	Position	Shape	Length (m)	Width (mm)	δ_{max} (mm)	ΔT_{max} (°C)
I	Room 1	Vert.	0.45	7	0.054	3
	Left wall	Vert.	0.7	0.5	0.41	14
	Right wall	Shear	0.5	0.45	0.027	14
	Front wall	Hor.	0.4	0.1	0.054	14
II	Room 1	Vert.	2.2	5	0.027	8
	Right wall	Vert.	0.6	1	0	8
	Boiler room	Vert.	1.3	4	0.244	9
	Right wall	Hor.	1.1	0.6	0.109	9
	Kitchen	Hor.	1.5	0.4	0	7
	Behind wall					

δ_{max} : Max. deformation
 ΔT_{max} : Max. difference of Temp.

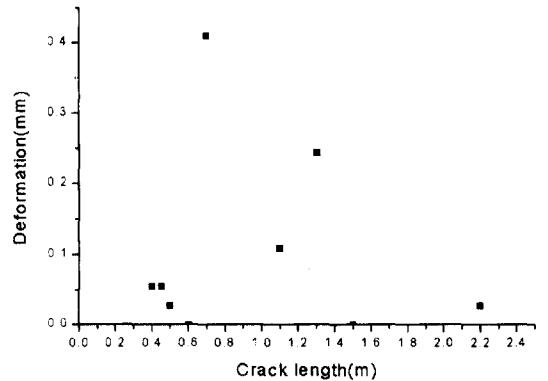


Fig. 1. The relationship between crack length and deformation

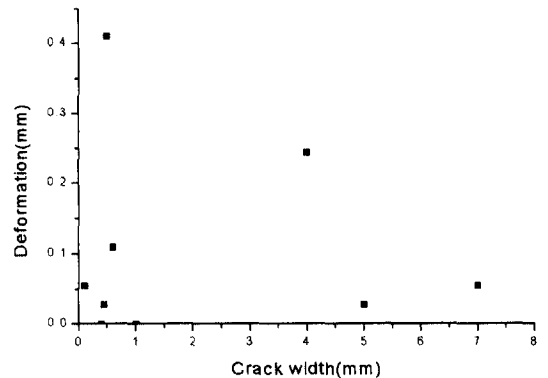


Fig. 2. The relationship between crack width and deformation

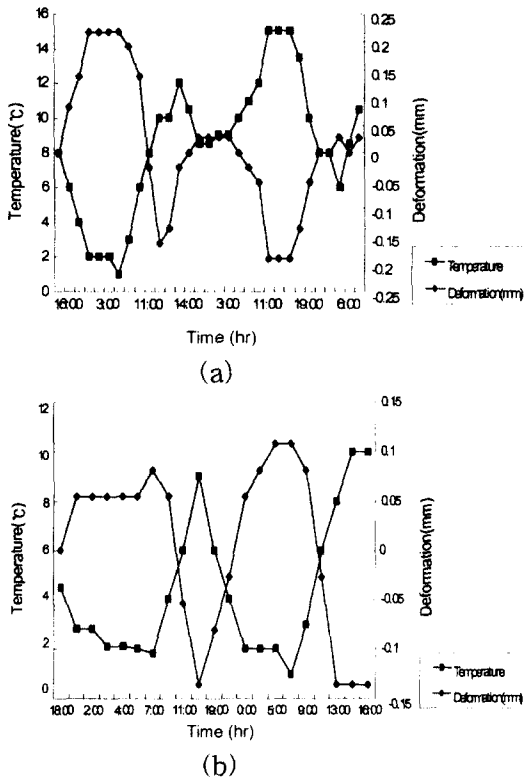


Fig. 3. Deformation induced by daily temperature changes. (a) Test house I (b) Test house II

을 보였으며, 시험가옥 II는 보일러실 우측벽의 수직균열로서 온도차 9°C에서 최대 0.244 mm의 변형을 보였다. 이러한 균열의 변화는 실험 발파시 시험가옥 각각의 피해를 판단하는 기준으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 발파로 인한 균열 변형

시험가옥 주변의 발파지점 상부의 풍화토층을 포크 레인을 사용하여 약 2~3 m 정도 벗겨내었고 유압식 천공기를 이용하여 수직으로 6 m 천공하여 토중 발파를 실시하였다. 폭약은 Φ 50 mm 다이내마이트를 사용하였다.

먼저 시험가옥 I을 대상으로 발파하였다. 진동 측정기는 시험가옥 지반과 대면벽, 좌측벽 및 우측벽에 설치 되었고, 크랙 게이지는 대면벽의 수평·수직균열과 좌측벽 왼쪽 창 밑, 오른쪽 창 밑 수직·수평균열, 우측벽 전단균열에 각각 설치했다.

1회 발파는 시험가옥과의 거리가 37.5 m 지점에서

단당장약량 21 kg, 2회 발파는 22.5 m 지점에서 29 kg으로 실시하였다.

1회 발파에 의해 발생한 진동수준은 시험가옥 지반에서 16.9 mm/s, 대면벽에서 11 mm/s, 좌측벽 8.05 mm/s, 우측벽 10.02 mm/s로 이때 균열은 우측벽에서 0.027 mm의 미세한 움직임을 보였다.

2회 발파에서는 시험가옥 지반에서 91.7 mm/s, 대면벽 52.5 mm/s, 좌측벽 33.1 mm/s, 우측벽 47.1 mm/s의 진동속도가 계속되었고, 균열 이동은 대면벽에서 역시 0.027 mm의 미세한 움직임만이 관측되었다.

시험가옥 II와 III에 대하여는 거리를 20 m 이내로 조정하여 더 큰 진동수준을 유도하였다.

시험가옥 II에 대한 실험은 4회에 걸쳐 실시되었다. 매 발파는 10, 6, 5, 8 m 이격지점에서 단당 24, 40, 56, 40 kg의 장약량으로 발파하여 지반진동속도는 129, 78.5, 270, 282 mm/s가 계속되었고, 이 때 균열의 최대 변형은 대면벽에서 발생하였다.

시험가옥 III에 대한 실험은 6회에 걸쳐 실시되었다. 매 발파는 15, 15, 15, 8, 4, 4 m 이격지점에서 단당 16, 8, 16, 20, 9, 22.5 kg의 장약으로 발파하여 지반진동속도는 90.1, 35.8, 148, 169.9, 186.7, 168.8 mm/s가 계속되었고, 매 발파시 균열의 최대 변형은 대체로 우측벽면에서 발생하였다.

5. 고 찰

발파진동에 대한 각 시험가옥의 거동을 진동수준별로 표시하였다. 피해를 판단하는 기준으로 온도변화에 따른 균열 변형량을 사용하였다. 온도변화에 따른 시험가옥 벽체의 균열 변형량을 살펴보면, 온도의 변화 또는 습도의 함유량에 따른 자연적인 영향으로도 구조물이 상당한 변화를 일으키고 있다. 이것을 발파진동에 의한 인위적인 균열 변형량과 비교하여 볼 때 이 수준 이하의 변형을 일으키는 진동수준은 구조물에 피해를 유발할 수 없는 수준이라고 판단하여 시험가옥 I에 대해서는 온도변화에 따른 최대 변형량 0.41 mm를 피해 기준으로 적용하였고, 시험가옥 II, III에 대해서는 변형량 0.244 mm를 피해의 기준으로 적용하였다.

Fig. 4는 발파진동에 대한 시험가옥 I의 응답을 도시한 것이다. 발생한 진동수준은 미소한 변형을 유발하여 피해기준을 초과하지 못하였다. 피해기준을 초과하지 않은 최대진동수준(비파괴 상한선, Noncracking upper

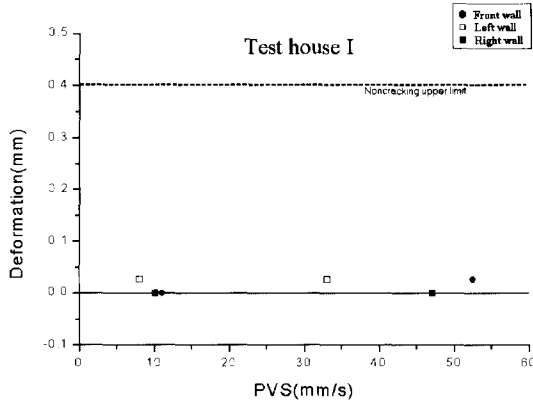


Fig. 4. The responses of test house I

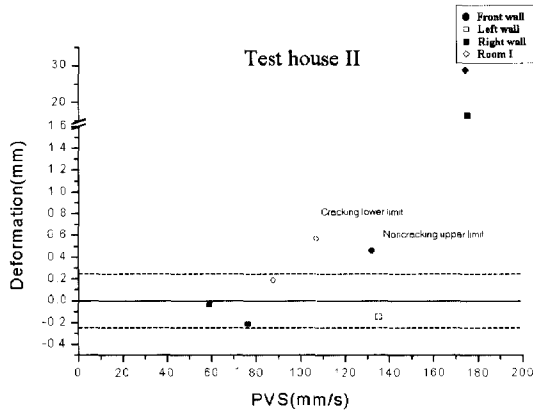


Fig. 5. The responses of test house II

limit)은 52.5 mm/s 였으며, 이 때 발생한 변형량은 0.027 mm 였다.

결과적으로 5 kine 이하의 진동수준에서는 벽체의 거동이 미소하여 한계피해 이상의 거동을 유발하기 위해서는 더 큰 진동수준이 요구됨을 예측할 수 있었다.

Fig. 5는 발파진동에 대한 시험가옥 II의 응답을 도시한 것으로 최초로 변형을 유발한 진동수준은 우측벽에서 계측된 58.9 mm/s로서 이 때 발생한 변형량은 -0.027 mm 였다. 그리고 최고 진동수준은 좌측벽에서 계측된 223.4 mm/s로서 변형량은 9.063 mm 였다.

피해기준인 온도변형량 0.244 mm를 초과하지 않은 비파괴 상한선은 135.2 mm/s로서 변형량은 -0.138 mm 였고, 피해기준을 초과하여 최초로 피해를 유발한 진동수준(파괴 하한선, Cracking lower limit)은 107 mm/s로서 이 때 발생한 변형량은 0.572 mm 였다.

Fig. 6은 발파진동에 대한 시험가옥 III의 응답을 도시

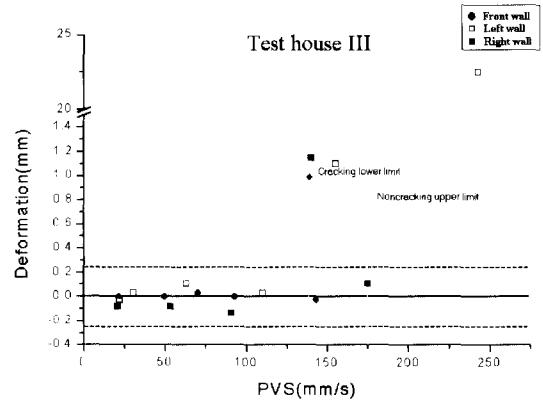


Fig. 6. The responses of test house III

한 것으로 최초로 변형을 유발한 진동수준은 우측벽에서 계측된 53.3 mm/s로서 이 때 발생한 변형량은 -0.081 mm 였다. 그리고 최고 진동수준은 좌측벽에서 계측된 243 mm/s로서 변형량은 22.534 mm 였다.

시험가옥 III에 피해기준인 온도변형량 0.244 mm를 초과하지 않은 최대진동수준은 175.2 mm/s로서 변형량은 0.109 mm 였고, 피해기준을 초과하여 최초로 피해를 유발한 진동수준은 대면벽에서 발생한 138.9 mm/s로서 이 때 발생한 변형량은 0.99 mm 였다.

본 실험에서 구한 피해기준인 온도변화에 따른 최대 변형량인 0.41 mm와 0.244 mm 미만의 가장 큰 변형을 일으킨 진동속도는 시험가옥 I에서는 계측되지 않았고, 시험가옥 II는 107 mm/s, 시험가옥 III는 138.9 mm/s로서 예상진동속도에서 예측한 것과 같은 경향을 나타내었다. 이러한 값들은 경미 피해에 대한 균열발생기준인 114 mm/s 와도 비교가 되는 값들이다.

이들 값은 국내의 허용설계기준인 0.5 kine에 비하면 10배 이상에 달하는 값으로 허용설계기준이 실제 피해가 발생하는 기준이 아닐 뿐만 아니라 과도하게 보수적인 기준임을 알 수 있다. 특히 실험대상 가옥이 연약 지반 위의 조적조 건물임을 감안하면 더욱 그러하다.

6. 결 론

전남 여천시 화치동 연성마을의 농어촌 조적조 가옥을 대상으로 실시한 발파진동 및 균열 계측을 통하여 온도 및 자연적인 영향에 따른 기존 균열의 변화와 근거리 발파로 발생한 발파진동이 주변 구조물의 균열에 미치는 영향을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 발파진동에 대한 주변 구조물의 피해를 판단하는 기준으로 환경적인 영향 즉 외부온도와 습도로 인한 기존균열의 변형량을 새로운 발파진동의 피해 판정기준으로 제시하였다.

2) 이 지역의 경우 대표 균열은 시험가옥 I의 좌측벽과 시험가옥 II의 보일러실 우측벽의 수직균열로서 온도차 14°C와 9°C에서 최대 0.41 mm와 0.244mm의 변형을 보였으며 이를 진동피해발생 기준으로 가정하였다.

3) 제시된 피해기준에 해당하는 변형을 일으킨 진동 속도는 최소한 100 mm/s 이상으로 실제 구조물 피해가 발생하는 진동수준은 국내에서 적용되는 허용설계 진동수준의 10배 이상이다.

감사의 말씀

본 연구는 여천국가공단 확장공사 토취장일원에서

수행되었으며 실험과 계측을 위하여 특히 많은 도움을 주신 제 3 공구 현대건설 박대휴 부장(당시), 강제섭 차장, 김은수 대리 및 태아건설 전 옥 소장 등 관계자 여러분에게 마음 깊은 감사를 드립니다. 또 판정 기준 등에 대해 조언해 주신 류창하 박사에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 양형식, 전양수, 이경운, 1997, 인체에 대한 진동의 허용 기준 및 피해 산정에 관한 연구, 한국암반공학회지, Vol. 7, pp. 310-322.
2. 류창하, 선우춘, 정소걸, 이종립, 주광호, 이대수, 1994, 안전관련 구조물 근접시공시 발파진동 허용기준의 적용성에 관하여, 한국암반공학회지, Vol. 4, pp. 157-165.
3. Dowding, C.H., 1985, Blasting Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp. 126-127.