

## L형 케이슨 안벽 구조물의 내진성 평가를 위한 진동대 시험 Shaking Table Tests for Evaluation of Seismic Performance of L-type Caisson Quay Walls

한진태<sup>1)</sup>                      황재익<sup>2)</sup>                      이용재<sup>3)</sup>                      김명모<sup>4)</sup>  
Han, Jin Tae                  Hwang, Jae Ik                  Lee, Yong Jae                  Kim, Myoung Mo

---

### ABSTRACT

Shaking table tests and pseudo-static analysis were performed, in this study, on newly-designed aseismic L-type caisson quay walls, which were constructed by extending the bottom plate of gravity quay walls into the backfill soil. The L-type quay walls are expected to give economical benefits by reducing the cross-sectional area of the wall while maintaining its aseismic efficiency as much as the classical caisson gravity quay wall. To confirm the effectiveness of the L-type structure, the geometry of L-type quay walls were varied for shaking table tests. And, to verify the influence of backfill soils on the seismic behavior of quay walls, additional shaking table tests were performed on the L-type quay wall after the backfill soils were replaced by gravels and light materials. As a result, it was found that L-type caisson quay walls are good earthquake resistant structures but increasing the length of bottom plate did not proportionally increase the effectiveness of the structure in its aseismic performance. Replacing the backfill soils by the gravels and light materials, contrary to our expectation, was not an effective measure in improving the seismic performance of L-type caisson quay wall.

---

### 1. 서론

1995년 고베 지진에 의하여 항만의 중력식 안벽 구조물에 막대한 피해가 발생한 이후로, 국내에서도 항만구조물에 대한 내진설계기준을 마련하였고, 새로 건설되는 항만구조물들의 내진설계가 의무화되고 있다. 항만구조물의 합리적인 내진 설계를 위해서는 안정성을 증진시키고 경제성이 우

1 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

2 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

3 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

4 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

수한 보강공법을 마련하여야 한다. 일본 등지에서는 중력식 안벽의 내진 성능을 향상시키기 위하여 배면 지반의 토압을 감소시키는 방법, 안벽의 무게를 증가시키는 방법, 신설구조물을 설치하는 방법 등을 제안하고 있다. 본 연구에서는 중력식 안벽의 저면판을 배면으로 확장하여, 저면판 위의 흙의 자중으로 안벽의 무게를 증가시켜 내진 성능을 향상시킬 수 있는 L형 케이슨 안벽에 대해 진동대 실험을 수행하여 내진 성능을 평가하였다. 또한, L형 케이슨 안벽 배면 지반의 자갈·뒤채움과 경량재 치환 공법의 내진 효율성 평가를 위한 진동대 시험도 수행하였다.

## 2. 진동대 시험준비 계획 및 절차

시험에 이용된 진동대는 최대 테이블 가속도 1g, 최대 상재하중 5ton의 진동대로서, 여기에 길이 195cm, 폭 44cm, 높이 60cm이고, 두께 2cm의 투명 아크릴 토조를 설치한 후 시험을 수행하였다. 토조의 진동 방향 양 끝단에는 진동시 파의 반사를 최소화하기 위하여 5cm 두께의 스펀지를 설치하였다.

그림 1은 시험단면을 나타낸 것으로 총 4가지의 시험단면을 보여준다. Case 1은 L형 케이슨 안벽의 내진성능 평가를 위해 비교 대상으로 설치한 무보강 안벽단면이고, 안벽의 폭은 18cm이다. Case 2는 등가정적해석을 수행하여 무보강 안벽과 동일한 미끄러짐 안전율을 갖도록 설계된 L형 케이슨 안벽단면으로서, 폭은 12cm이고 저면판 길이는 10cm이다. 등가정적해석에서는 L형 케이슨 안벽의 저면판 위의 배면 흙이 벽체와 일체 거동한다고 가정하였다. 등가정적해석의 결과는 표 1과 같다. Case 3은 Case 2의 단면에 배면 지반 내진대책공법으로 자갈 뒤채움 및 경량재 치환공법을 적용한 단면이다. 경량재 치환공법은 뒤채움 지반상부의 흙을 단위중량이 매우 낮은 경량재료로 치환함으로써 벽체에 작용하는 배면토압을 감소시켜 안벽의 안정성을 증진시키는 공법으로서, 이전의 실험결과(김성렬 등, 2000)에서 우수한 내진 성능을 보여주었다. Case 4는 Case 2의 실험단면에서 L형 케이슨 안벽의 저면판 길이를 2배로 증가시킨 실험단면이다. 이 단면의 저면판 길이는 20cm로서 저면판 길이가 10cm인 Case 2의 결과와 비교하여, 저면판의 길이 변화에 따른 L형 케이슨 안벽의 내진 성능 향상 효과를 분석하였다.

모형 벽체는 철제 강성벽체를 이용하였으며, 모든 Case에 대해 벽체의 단위 중량을  $2.4 \text{ t/m}^3$ 으로 일정하게 하였다. 안벽의 폭은 42cm로서, 안벽과 토조 벽면간 약 1cm정도의 간격을 유지하여 마찰력 효과를 감소시키고, 이 틈에는 스티로폼을 부착하여 틈새로 과잉간극수압의 소산 및 모래의 유입을 방지하였다. 토력이 가해지는 배면판과 벽체 본체 사이에 3개의 로드셀을 삼각형 형태로 벽체 상부에 1개, 하부에 2개를 설치하여 뒤채움토와 벽체의 동적 상호작용에 의한 토력을 측정하였다. 기초지반과 뒤채움 지반 구성에 이용된 모래는 주문진 표준사로서 평균 유효입경  $D_{50}$ 은 0.32mm, 균등계수는 1.53 그리고 비중은 2.66이다. 그리고 최대 건조밀도( $v_{\max}$ )와 최소 건조밀도( $v_{\min}$ )는 1.66과 1.40이다. Case 3의 경량재 치환공법에 이용된 경량재는 포화단위중량이  $1.25 \text{ t/m}^3$ 이고 입도는 대략 직경 1cm로 균일하며, 지반조성이 완료된 후 뒤채움 지반의 일부를 제거하고 설치하였다.

본 실험은 L형 케이슨 안벽의 내진성능을 분석하는데 목적이 있으므로 결과분석을 용이하게 하기 위해 기초지반 및 뒤채움 지반을 조밀하게 조성하여 뒤채움 지반의 액상화 발생과 기초지반의 변형이 안벽의 내진성능에 미치는 영향을 배제하였다. 모든 Case에 대해 하부층은 가속도 크기

0.4g, 20Hz의 정현파로 약 1분 동안 진동을 가하여 20cm 두께로 매우 조밀하게 조성한 뒤, 모형 안벽 아래 부분에 5cm 두께의 자갈 마운드를 설치하였다. 뒤채움 지반은 모래 위 수위가 5cm로 일정하게 유지되도록 하면서 젖은 모래를 투하하여 조성하였다. 하부 지반의 상대밀도는 약 84% 이고, 뒤채움 지반의 경우 약 71%로 일정함을 확인하였다.

본 실험에서는 지반 내의 과잉간극수압의 발생양상 및 크기를 분석하기 위해 간극수압계 8개, 지반의 액상화 발생 여부 및 지반증폭현상 분석 그리고 안벽의 가속도를 측정하기 위해 가속도계 9개, 지진동시 모형 안벽의 변위를 계측하기 위해 LVDT 3개를 이용하였다.

진동대 입력파는 진동수 5Hz, 지속시간 5초인 정현파로서 동일한 실험체에 대하여 진폭을 0.1g, 0.2g, 그리고 0.3g로 점차 증가시켰다.

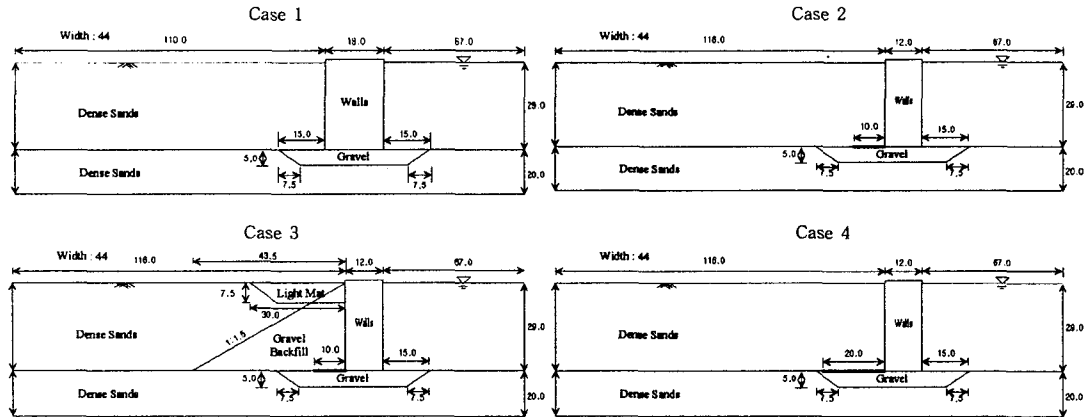


그림 1. 4가지 종류의 시험단면 (Case 1~4)

표 1. 안벽 폭(B)과 저면판 길이(L) 변화에 따른 L형 케이스 안벽의 미끄러짐 안전율

	B(m)	L(m)	FS(sliding)
무보강	0.18	0	1.07
L형 케이스 1	0.18	0.18	1.32
L형 케이스 2	0.18	0.1	1.23
L형 케이스 3	0.1	0.1	0.99
L형 케이스 4	0.1	0.2	1.16
L형 케이스 5	0.12	0.1	1.06

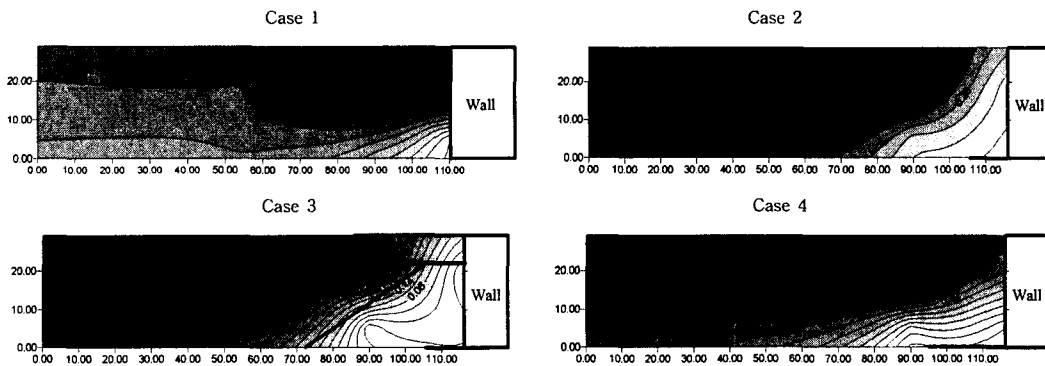
### 3. 진동대 시험 결과 및 분석

결과 분석은 뒤채움 지반의 과잉간극수압 반응과 안벽의 배면 동적작용력, 변위 반응에 대해 이루어졌다. 입력 가속도 크기가 0.1g인 경우에는 모든 단면에서 변위 결과가 계측기 오차 범위 이내로서 변위가 거의 발생하지 않았다. 이 사실은 안벽단면을 횡방향 지진계수 0.1g에서 미끄러짐에 대한 등가정적해석 안전율이 1.0이상 되도록 설계할 경우 안벽의 잔류 변위가 발생하지 않음을 확인시켜 주는 것으로서, 등가정적해석 방법이 내진 설계시 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다.

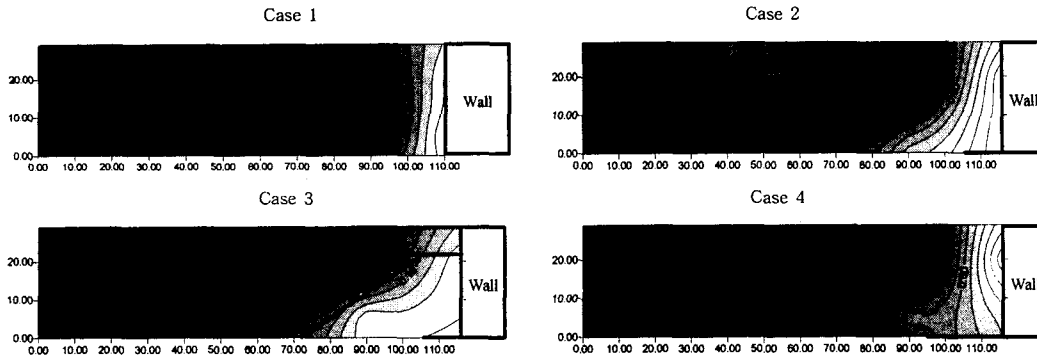
### 3.1 뒤채움 지반에 발생한 과잉간극수압

그림 2는 각 실험단면의 뒤채움 지반내에 발생하는 과잉간극수압비 등고선을 보여준다. 과잉간극수압비는 과잉간극수압값을 그 깊이에 작용하는 수직유효응력으로 나눈 값으로서 뒤채움 지반에 설치된 총 7개의 간극수압계 측정값을 이용하여 구하였다. 이 때, 입력값으로 이용된 과잉간극수압은 지진동 후 각 간극수압계에서 측정된 과잉간극수압 중 최대값이다. 수직유효응력 산정에 이용한 지반의 포화단위중량은  $v_{sat}=1.95 \text{ t/m}^3$ 을 이용하였다. Case 3의 굵은 사선은 자갈 뒤채움재 설치 경계를 그 위에는 경량재가 놓인 부분을 나타낸다.

각 단면에서 과잉간극수압비는 벽체와 가까워질수록 그리고 깊이가 깊어질수록 과잉간극수압비가 감소하는 경향을 보여준다. 과잉간극수압비가 증가하기 위해서는 진동중 지반이 압축되려는 경향이 발생해야 하는데, 벽체에 가까워질수록 과잉간극수압비가 감소하는 것은 진동중 벽체의 소성변위가 발생하면서 벽체와 인접한 뒤채움 지반의 부피가 증가하기 때문이다. 무보강 안벽단면인 Case 1의 경우 입력 가속도 진폭이 0.2g일 때, 안벽 인접 지표면 지반에서의 최대 과잉간극수압비가 0.70에 도달하여 다른 실험단면에 비하여 큰 값이 발생하였다. 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우 최대 과잉간극수압비가 0.45에 도달하는데 0.2g인 경우보다 과잉간극수압비가 작아진 것은 이전의 진동으로 인하여 지반의 밀도가 증가하였기 때문이다. 저면판 길이가 10cm인 L형 케이스 안벽단면인 Case 2의 경우 입력 가속도 진폭이 0.2g일 때, 지표면에서 최대 과잉간극수압비가 0.50에 도달하였으며, 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우 Case 1의 경우와 마찬가지로 과잉간극수압비가 0.2g보다 전체적으로 작은 값을 나타낸다. 자갈 뒤채움 및 경량재 치환 공법을 적용한 Case 3의 경우 입력 가속도 진폭이 0.2g일 때, 벽체에 인접한 자갈 뒤채움재 내에서 발생한 최대 과잉간극수압비는 0.12로서 과잉간극수압 발생이 매우 억제되어 경량재 치환공법이 과잉간극수압 감소효과가 큰 것으로 나타났다. 이것은 뒤채움 지표부분을 경량재로 치환한 경우 경량재의 직경이 자갈과 비슷한 약 1cm이므로 자갈 뒤채움재 내에 발생하는 과잉간극수압의 소산이 원활하게 이루어졌기 때문으로 판단된다. 저면판 길이가 20cm인 L형 케이스 안벽 단면인 Case 4의 경우 입력 가속도 진폭이 0.2g일 때, 지표면에서 발생한 최대 과잉간극수압비는 0.50에 도달하였다. 모든 실험에서 최대 과잉간극수압비가 1.0에 도달하지 않아 액상화가 발생하지 않았는데, 이것은 배면 지반의 액상화가 안벽의 내진 성능에 미치는 영향을 배제하고자 하였기 때문이다.



(a) 가속도 크기 0.2g (Case 1~4)



(b) 가속도 크기 0.3g (Case 1~4)  
그림 2. 뒤채움 지반의 과잉간극수압비 곡선

### 3.2 안벽 배면에 발생한 동적 작용력

그림 3은 가속도 크기 0.20g에서 각 안벽에 발생한 동적 토력, 관성력 시간이력을 나타낸다. 동적 토력은 진동중 벽체와 벽체 배면의 흙과 간극수 사이의 상호작용으로 발생하는 힘으로서 안벽의 배면판에 설치한 3개의 로드셀의 합으로 구하는데 진동 후 벽체 배면에 추가적으로 발생하는 힘을 모두 합하여 측정된 값이다. 이 동적 토력은 실험 전의 측정값을 0으로 초기화시킨 후 측정된 값으로서 정적인 힘은 포함되어 있지 않다. 동적 토력의 (+)부호는 벽체에 작용하는 힘이 초기 정적인 작용력보다 증가함을 의미하고, (-)부호는 동적 토력이 초기 정적인 작용력보다 감소함을 의미한다. 그림 3을 살펴보면 관성력과 동적 토력은 180°의 위상각을 갖고 있다. 즉, 관성력이 증가할 때 동적 토력은 감소하고, 관성력이 감소할 때 동적 토력은 증가한다. 이것은, 관성력과 동적 토력이 동일한 방향으로 작용한다는 설계상의 가정과 상치되는 결과로서 현재의 설계가 보수적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

표 2는 각 단면의 안벽 배면에 작용하는 관성력, 동적 토력, 그리고 관성력과 동적 토력의 합력인 동적 작용력을 정리하였다. 벽체는 관성력과 동적 토력을 합한 동적 작용력이 최대일 때 가장 위험하므로 동적 작용력이 최대일 때의 값들을 정리하였다. 표 2를 보면 동적 작용력이 저면판 길이가 10cm인 L형 케이스 안벽(Case 2)의 경우가 가장 작고, 저면판 길이가 20cm인 L형 케이스 안벽(Case 4)인 경우가 가장 크다. Case 4에서 동적 작용력이 최대인 것은 다른 실험단면들에 비하여 벽체에 인접한 배면지반내의 과잉간극수압이 크게 발생하여 벽체에 작용하는 동적 토력이 크게 발생하였기 때문으로 판단된다.

표 3은 배면 동적 토력의 최대값 및 최대 진폭을 나타낸다. 표 3 및 그림 3에서 알 수 있듯이, 무보강 안벽(Case 1)의 경우 동적 작용력이 최대일 때 동적 토력값이 관성력과 반대방향으로 큰 값을 가지는데 반하여, L형 케이스 안벽(Case 2~Case 4)의 동적 토력 값들은 매우 작은 값들을 보여주고 있다. 이것은 저면판 위의 배면흙이 등가정적해석에서 가정한 바와 같이 안벽과 거의 일체로 거동하기 때문으로 판단된다.

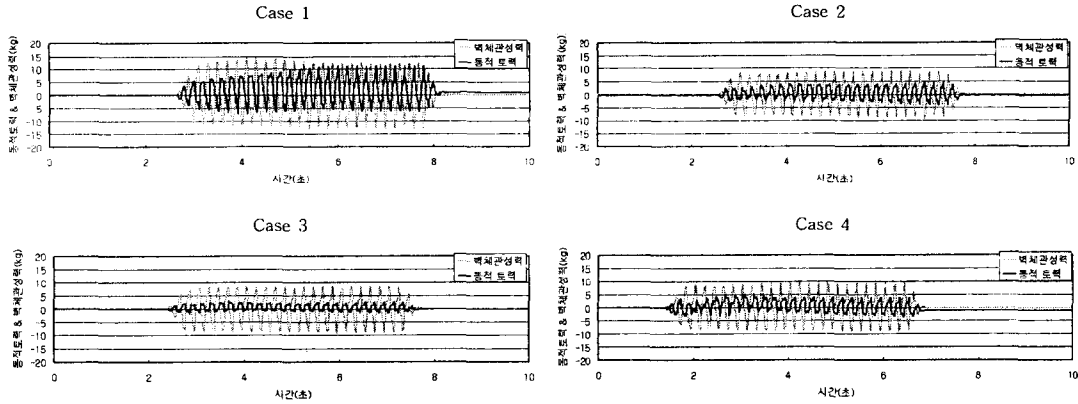


그림 3. 진동시 안벽의 관성력, 동적 토크 시간이력(가속도 크기 0.2g, Case 1~4)

표 2. L형 케이스 안벽 배면에 작용하는 관성력과 동적토크

구분	동적토크(kg):(A)		관성력(kg):(B)		동적작용력(kg):(A)+(B)	
	0.2g	0.3g	0.2g	0.3g	0.2g	0.3g
Case 1 (무보강)	-4.73	-4.29	13.46	19.77	8.73	15.48
Case 2 (L1)	0.95	-3.52	7.42	19.23	8.37	15.71
Case 3 (L1+G+L)	0.14	0.50	8.36	12.50	8.51	13.01
Case 4 (L2)	2.87	1.79	7.99	20.41	10.86	22.21

표 3. L형 케이스 안벽 실험에 대한 배면 동적토크 비교

	입력가속도 진폭 (g)	배면 동적 토크 (kg)		
		주동방향 최대값	수동방향 최대값	최대 진폭
Case 1	0.2	11.4	7.3	17.7
	0.3	15.2	28.2	35.1
Case 2	0.2	5.2	4.2	9.3
	0.3	9.3	6.9	12.7
Case 3	0.2	2.9	1.8	4.6
	0.3	3.3	5.3	8.8
Case 4	0.2	5.2	3.5	7.4
	0.3	14.5	4.2	18.7

### 3.3 안벽에 발생한 잔류 변위

표 4는 각 실험단면에서 발생한 횡변위량, 침하량, 그리고 회전각의 최대값을 나타내었다. 저면판의 길이가 10cm인 L형 케이스 안벽(Case 2)의 횡변위량, 입력 가속도 진폭이 0.2g인 경우 1.82mm, 입력 가속도 진폭 0.3g인 경우 10.98mm로 가장 작게 발생하였다. 표 4를 보면, 침하량 및 회전각의 크기는 횡변위량의 크기에 비해 상대적으로 작다. 안벽의 침하 및 회전은 안벽 단면형상 및 지반보강공법의 영향보다는 기초지반의 영향으로 발생하는데, 기초지반 조건은 모든 실험단면에서 동일하므로 횡변위량을 중심으로 L형 케이스 안벽의 내진 성능을 평가하였다. 그림 4는 안벽 단면형상에 따른 횡변위량을 각 실험단면별로 나타내었다. 초기 단면 설계시 무보강(Case 1) 안벽 단면과 저면판 길이가 10cm인 L형 케이스 안벽 단면(Case 2)이 동일한 미끄러짐 안전을

로 설계되었음에도 불구하고 L형 케이슨 안벽에서 발생한 횡변위량이 무보강 안벽보다 입력가속도 진폭이 0.2g인 경우 약 64%, 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우 약 49% 감소하여 L형 케이슨 보강안벽의 내진 성능이 매우 우수함을 알 수 있다.

표 4. L형 케이슨 단면의 횡변위량, 침하량, 회전각의 최대값

구분	횡변위량 (mm)		침하량 (mm)		회전각(도)	
	0.2g	0.3g	0.2g	0.3g	0.2g	0.3g
Case 1 (무보강)	5.09	21.61	1.70	4.15	0.37	0.63
Case 2 (L1)	1.82	10.98	0.61	3.52	0.15	0.36
Case 3 (L1+G+L)	2.98	14.12	0.80	3.05	0.05	0.41
Case 4 (L2)	2.80	11.94	0.43	2.22	0.07	0.43

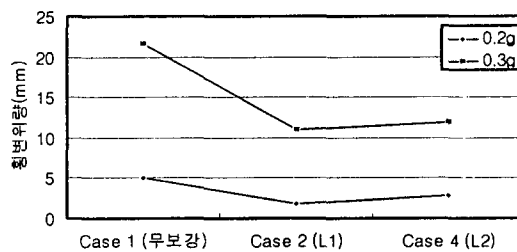


그림 4. 안벽 단면형상에 따른 횡변위량의 비교

다만, 저면판 길이가 20cm인 L형 케이슨 안벽(Case 4)은 Case 2에 비하여 저면판 길이가 2배로 증가하였음에도 불구하고 횡변위량은 오히려 소폭 증가하였다. 이는 저면판의 길이를 증가시키는 것이 반드시 안벽의 내진 성능을 향상시키는 것은 아님을 보여주는 결과이다. 이 원인은 그림 5에 나타낸 저면판의 길이 변화에 따른 미끄러짐 안전율 변화곡선을 보면 알 수 있다. 미끄러짐 안전율은 진동대 실험 단면(안벽폭 12cm, 안벽 단위중량 2.4t/m<sup>3</sup>)에 대하여 저면판의 길이를 증가시키면서 등가정적해석을 실시하여 구하였다. 그림 5를 보면 저면판 길이증가에 따른 안전율의 증가는 입력 가속도 크기가 작을수록 크다. 입력 가속도가 0.2g인 경우에는 저면판 길이가 10cm에서 20cm로 증가할 때 미끄러짐 안전율은 0.60에서 0.67로 증가량이 작기 때문에 안벽의 횡변위량이 큰 차이가 나지 않은 것으로 판단된다. 오히려 횡변위량이 소폭 증가한 것은 등가정적해석이 실제 안벽의 동적 거동을 정확히 모사할 수 없는 한계 때문으로 판단된다. 진동대 실험 결과와 등가정적해석 결과를 종합하여 볼 때 지진 가속도가 작은 경우( $k_h=0.1g$ )에는 L형 케이슨에서 저면판의 길이를 증가시키는 것이 내진 성능 향상에 매우 효과적이지만, 지진 가속도가 큰 경우( $k_h>0.2g$ )에는 저면판 길이증가에 따른 안전율의 증가율이 작으므로 안벽의 내진 안정성을 확보하기 위해서는 저면판 길이 증가와 함께 별도의 내진 보강 공법을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

그림 6은 무보강 안벽(Case 1)과 저면판 길이가 10cm인 L형 케이슨 안벽(Case 2), 그리고 Case 2에 배면 지반 내진 보강 공법인 자갈 뒤채움 및 경량재 치환 공법을 추가적으로 적용한 단면(Case 3)에서 발생한 횡변위량을 비교하였다. 무보강 안벽(Case 1)에 비해서는 Case 2와 Case 3에서 횡변위량이 작게 발생하였으나, L형 케이슨 안벽에 추가적인 내진 보강 공법을 적용하지 않은 Case 2에서 가장 작게 발생하였다. 이는 L형 케이슨 안벽만으로 충분한 내진 성능을 갖고 있

음을 보여주고 있으며, 자갈 뒤채움 및 경량재 치환 공법을 적용한 Case 3의 경우 L형 케이슨 안벽에 있어서 오히려 내진 성능을 저감시키는 결과를 나타내었다. 경량재 치환으로 인한 배면 지반의 토압 감소에 비해 저면판의 마찰 저항력 감소가 더 크기 때문에, Case 2에 비해 Case 3에서 횡변위량이 더 크게 발생한 것으로 판단된다.

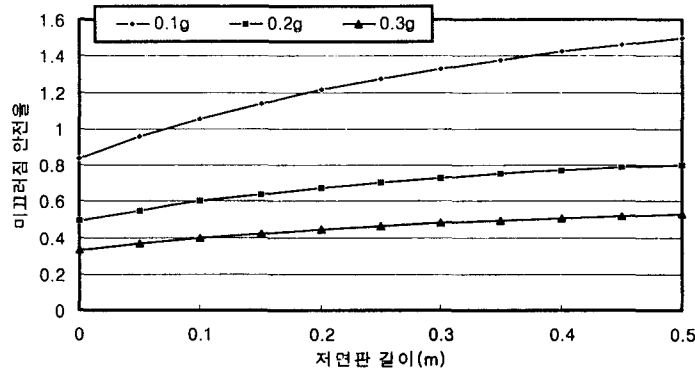


그림 5. 등가정적해석을 통한 저면판의 길이에 따른 미끄러짐 안전율

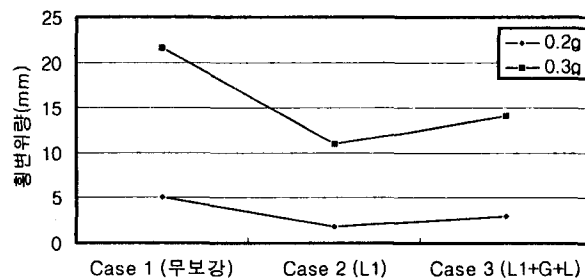


그림 6. 내진 보강 공법에 따른 횡변위량

#### 4. 결론

본 연구에서는 일련의 진동대 시험을 실시하여, 중력식 신형 내진 안벽인 L형 케이슨 안벽에 대해, 저면판의 길이 및 배면 지반의 추가적인 내진 보강 공법의 적용성에 관한 연구를 수행하였다. 진동대 시험 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 배면 지반 과잉간극수압비의 전체적인 발생경향은 벽체와 가까워질수록 그리고 깊이가 깊어질수록 과잉간극수압비가 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 진동중 벽체의 소성변위가 발생하면서 벽체와 인접한 뒤채움 지반의 부피가 증가하기 때문으로 판단된다.
2. 무보강 안벽(Case 1)의 경우 동적 작용력이 최대일 때 동적 토력값이 관성력과 반대반향으로 큰 값을 가지는데 반하여, L형 케이슨 안벽(Case 2~Case 4)의 동적 토력 값들은 매우 작은 값을 보여주고 있다. 이것은 등가정적해석에서의 가정과 같이 L형 케이슨 저면판 위의 배면흙이 안벽과 거의 일체로 거동하기 때문으로 판단된다.
3. 등가정적해석에 의해 무보강 안벽 단면과 저면판 길이가 10cm인 L형 케이슨 안벽 단면이 동일한 미끄러짐 안전율로 설계되었음에도 불구하고 L형 케이슨 안벽에서 발생한 횡변위량이 무보강



안벽보다 입력가속도 진폭이 0.2g인 경우 약 64%, 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우 약 49% 감소하여 L형 케이슨 안벽의 내진성능이 매우 우수함을 보였다.

4. 진동대 실험 결과와 등가정적해석 결과를 종합하여 볼 때 지진 가속도가 작은 경우(kh=0.1g)에는 저면판의 길이를 증가시키는 것이 내진성능 향상에 매우 효과적이지만, 지진 가속도가 큰 경우(kh>0.2g)에는 저면판 길이증가에 따른 안전율의 증가율이 작으므로 안벽의 내진 안정성을 확보하기 위해서는 저면판 길이 증가와 함께 별도의 내진성 향상 공법을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

5. L형 케이슨 안벽에 추가적인 배면 지반 내진 보강 방법으로, 배면 뒤채움을 자갈 및 경량재로 치환하였을 경우 과잉간극수압 발생은 억제되지만, 안벽에 발생한 변위를 비교하였을 경우에는 L형 케이슨 안벽에 있어서 오히려 내진 성능을 저감시키는 결과를 보였다.

#### 감사의 글

이 연구는 해양수산부의 ‘안벽구조물의 실용적 내진보강기법 개발’ 연구용역의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김성렬, 박영호, 권오순, 김명모, “안벽 구조물의 내진성 평가를 위한 진동대 시험”, 한국지반공학회 논문집, Vol. 16, No. 5, 2000, pp.75-81.
2. 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서, 해양수산부, 1999.
3. Kramer, S. L., “Geotechnical earthquake engineering”, Prentice Hall, 1996.
4. Yoshio, S., Takahiro, S., Shunsuke, Y., Tsuyoshi, T. and Koji, S., “Experimental study of the behavior of hybrid(steel-concrete composite) caisson-type quay walls during earthquakes using an underwater shaking table” Proc. 12th World Conference On Earthquake Engineering, New Zealand, 2000.