

바닥진동에 의한 비구속 물체의 거동과악 실험과 수치해석 전산프로그램의 개발

Experimental and Numerical Investigation of Sliding Response of Unconstrained Objects to Base Excitations

이상호

단국대학교 토목환경공학과

Sang Ho Lee (shlee@dankook.ac.kr)

요약

원자력 발전소의 안전관련 설비들은 운영과정에서 일시적으로 비구속 상태에 있게 되며, 이때 지진이 발생할 경우 이러한 설비들은 미끄러짐에 의한 손상이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 바닥 진동으로 인한 비구속 물체의 미끄러짐 거동 과악을 위한 실험과 해석을 수행하였다. 실험에서는 마찰계수를 구하기 위한 정역학적 실험과 동역학적 실험 그리고 해석 결과와 비교하기 위한 진동 테이블 실험을 수행하였으며, 해석 방법으로는 미끄러짐 거동을 표현하는 비선형 미분방정식의 해를 선형축차적분법으로 구하여 이를 이용한 전산프로그램을 작성하였다. 작성된 전산프로그램의 검증을 위하여 바닥의 조화진동과 선형진동에 대한 정해를 구하여 비교하였으며, 진동테이블을 이용한 실험 결과와 비교하였다. 또한 미끄러짐으로 인한 비구속 물체의 충돌 기준을 상대변위 포락도를 이용하여 제시하였다.

■ 중심어 : | 활동 | 비구속계 | 진동 테이블 | 마찰계수 |

Abstract

Safety related devices unconstrained temporally in the process of operation of nuclear power plants could be damaged by the sliding during seismic activity. In this study sliding response of unconstrained objects to the base excitations is studied experimentally and analytically. In experiments static and dynamic tests to determine the coefficient of friction and the shaking table experiments to verify the sliding response of the analytic results were conducted. Numerical solutions by solving the nonlinear differential equations of motion governing sliding were found by the computer program using the step by step acceleration method. The exact solutions of the sliding response to the simple forms of base excitations were found to verify the computer program developed in this study. Relative displacement envelopes were suggested as a colliding criteria of the unconstrained objects.

■ keyword : | Sliding | Unconstrained Sysrem | Shaking Table | Coefficient of Friction |

I. 서론

1. 연구배경

원자력 발전소는 핵연료의 연소에 따라 핵연료 재장

전 작업을 주기적으로 수행하여야 한다. 재장전 작업 시 효율적인 업무 수행을 위해 핵연료 및 제어봉 집합체는 사용후 연료 저장조의 저장대로 옮겨진다. 이때 핵연료 저장대는 저장조의 각 쉘 내에서 지지판 위에

접수일자 : 2013년 09월 12일

수정일자 : 2013년 11월 20일

심사완료일 : 2013년 12월 24일

교신저자 : 이상호, e-mail : shlee@dankook.ac.kr

비구속 상태로 놓여있게 되며 재장전 작업 중 지진이 발생 할 경우 미끄러짐으로 인한 저장대간 또는 저장조 벽과의 충돌로 인한 사고가 발생 할 수 있다[1]. 이러한 미끄러짐 발생으로 인한 사고는 귀중한 조각품이나 공예품이 전시된 박물관[4], 병원과 같은 보건·의료 복지 시설에서 혹은 화물이 적재된 이동 중인 트럭에서도 발생 할 수 있다[5].

안전 관련 설비나 배관 근처에 배치된 비구속 물체의 미끄러짐 거동은 구조물 자체의 안전을 위태롭게 할 수 있고 인명피해까지 야기할 수 있어 원자력 발전소와 같은 동력에너지 관계시설이나 보건·의료와 같은 복지시설 등에서는 비구속 물체의 미끄러짐으로 인한 안전성을 확보하기 위하여 비구속 물체의 응답을 예측하는 것이 중요한 관심사항으로 대두되고 있다[7-11].

2. 연구동향

바닥 진동으로 인한 비구속 물체의 거동은 1965년 Newmark에 의해 거론된 이후, 1975년 Aslam은 콘크리트 블록의 지진응답을 구하기 위한 진동테이블을 이용한 실험을 수행하였으며 1989년 Nigbor은 세 종류의 바닥면을 사용한 실험 결과 마찰계수가 증가할수록 이론결과와 실험결과와의 연관성이 낮아짐을 보였다.

그 이후 Chopra와 Zhang(1991), Shenton과 Jones(1991), Nigbor(1994), Hogan(1994)은 물체의 폭과 높이의 비, 정적마찰계수의 크기를 변수로 사용하여 물체의 거동을 미끄러짐과 흔들림 거동으로 분류하였으며 1994년 Shultz와 Jones는 폭과 높이의 비, 정적마찰계수, 바닥판의 가속도를 고려하여 비구속 물체의 응답형태를 미끄러짐과 흔들림으로 분류하기 위한 실험적 연구를 실시하였다.

미끄러짐과 관련된 컴퓨터 프로그램의 개발은 1998년 Shao에 의해 단일 마찰계수모형을 사용하여 작성되었으며, 그 후 정적·동적 마찰계수를 사용하는 프로그램이 제시되었다.

3. 연구방법

비선형 미분방정식으로 표현되는 비구속 물체의 미끄러짐 거동의 정해를 찾는 것은 쉽지 않다. 이에 본 연

구에서는 바닥 진동 가속도와 마찰계수를 입력하여 비구속 물체의 미끄러짐 거동을 파악할 수 있는 전산프로그램을 개발하고, 개발된 전산프로그램의 해석결과와 실험결과를 비교함으로써 프로그램에 사용된 기존의 마찰모델과 실험장치의 문제점을 파악하고자 한다.

개발된 전산프로그램의 입력 자료로 사용되는 마찰계수와 비구속 물체의 미끄러짐 거동을 파악하기 위한 방법으로 도르래 실험과 경사면 실험 그리고 진동테이블을 이용한 동적 실험을 수행하였다.

개발된 전산프로그램을 검증하기 위하여 바닥의 선형과 조화 진동에 대한 미끄러짐 거동의 정해를 구하여 비교하였으며, 진동테이블을 이용한 실험을 수행하여 그 결과를 작성된 전산프로그램의 해석결과와 비교하였다. 또한 상대변위 포락도를 작성하여 미끄러짐으로 인한 비구속 물체의 충돌여부를 파악 할 수 있는 기준을 제시하였다.

II. 마찰모델과 전산프로그램

바닥의 수평 진동에 의한 비구속 물체의 미끄러짐 거동은 다음과 같이 표현할 수 있다[2][3][6][7].

$$m\ddot{x} = \mu mg \operatorname{sgn}(\dot{s}) ; |\ddot{x}_b| > \mu g \quad (1)$$

여기서, m 은 비구속 물체의 질량이며, g 는 중력가속도, μ 는 마찰계수, \ddot{x} 는 비구속 물체의 가속도, \ddot{x}_b 는 바닥의 가속도이며, \dot{s} 는 바닥에 대한 비구속 물체의 상대속도이다. $\operatorname{sgn}()$ 은 signum 함수로 인수인 상대속도의 부호에 따라 1, 0 또는 -1의 값을 갖는다. 식(1)의 운동방정식은 인수인 상대속도가 0인 경우와 바닥판의 가속도의 절대 값이 μg 보다 작은 경우에는 성립되지 않는다.

정적·동적 마찰계수 모델은 단일마찰계수 모델과 달리 두 개의 마찰계수가 작용하는 모델이다[9][10][12]. 단일마찰계수 모델은 하나의 마찰계수만 작용하나, 정적·동적 마찰계수 모델에서는 두 물체가 일체로 거동하여 상대속도가 0일 때에는 정적마찰계수가 작용하고,

상대속도가 0이 아닌 미끄러짐 거동 시에는 동적마찰 계수가 작용하는 모델이다.

정적·동적 마찰계수모델의 운동방정식은 다음과 같다. 바닥과 일체로 거동할 때에는 비구속 물체의 거동을 아래의 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x} = \ddot{x}_b ; \quad \dot{s} = 0 \text{ and } |\ddot{x}_b| < \mu_s g \quad (2)$$

그리고 미끄러짐 거동은 아래의 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x} = \mu_d g \operatorname{sgn}(\dot{s}) ; \quad |\ddot{x}_b| > \mu_s g \text{ or } \dot{s} \neq 0 \quad (3)$$

여기서 μ_d, μ_s 는 각각 동적마찰계수와 정적마찰계수이다.

바닥진동에 의한 비구속 물체의 거동은 세 가지 상태로 분류할 수 있다. 바닥과 일체로 거동하여 바닥에 대한 상대속도가 0인 일체적 거동과 상대속도가 양인 미끄러짐 거동 그리고 상대속도가 음인 미끄러짐 거동으로 분류할 수 있다.

비구속 물체의 미끄러짐 거동의 정해를 구하는 방법은 미끄러짐의 발생시점과 종료시점 그리고 방향을 모든 구간마다 확인하여야 하는 매우 비효율적인 방법이다. 이에 본 연구에서는 오일러 기법의 축차적분법을 알고리즘으로 사용한 전산프로그램을 MATLAB을 이용하여 개발하였다.

[그림 1]에는 작성된 프로그램의 흐름도가 나타나 있으며 그림에서, \ddot{X}_0 와 \ddot{X} 는 각각 물체와 바닥의 가속도, $rv()$ 는 바닥에 대한 물체의 상대속도, $\operatorname{sgn}()$ 은 *signum* 함수이다. 아래의 흐름도에는 세 개의 조건 ①, ②, ③이 나타나 있으며 조건 ①은 물체의 미끄러짐 여부와 마찰력의 방향을 결정하기 위한 조건이며, 조건 ②와 ③은 바닥판과 물체의 일체적 거동 여부와 그 방향을 결정하기 위한 조건이다.

비구속 물체의 거동상태가 조건 ①, ②, ③을 통하여 결정되면 가속도가 결정되고, 가속도가 결정되면 속도 증분을 이용하여 속도를 구하고, 속도가 결정되면

속도증분을 이용하여 변위를 구하는 축차적분법을 순차적으로 수행하며, 이후 바닥판에 대한 비구속 물체의 상대속도와 상대변위를 구하게 된다.

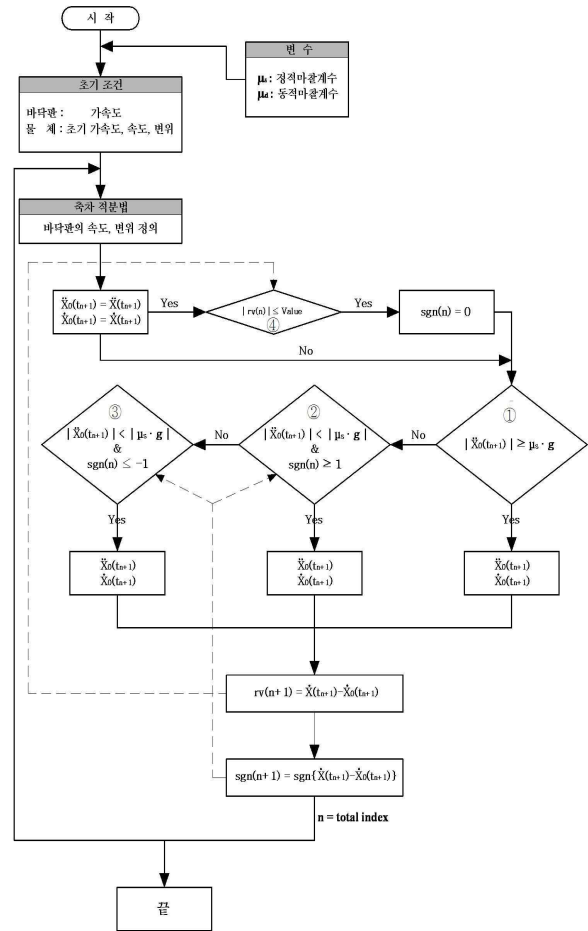


그림 1. 흐름도

작성된 전산프로그램의 검증을 위하여 바닥의 조화진동과 선형진동에 대한 단일마찰계수모델과 정적·동적마찰계수모델의 이론적 정해를 구하였으며 이를 전산프로그램의 해석결과와 비교하였다.

아래 [그림 2]에는 진폭 $9.144m/s^2$, 진동수 5.236 rad/s 인 바닥의 조화진동에 대한 마찰계수 $\mu=0.5$ 인 단일마찰계수모델의 정해와 전산 프로그램 해석 결과가 나타나 있으며 두 결과 모두 동일한 미끄러짐 거동이 방향을 바꾸어 계속 발생하는 것을 볼 수 있다.

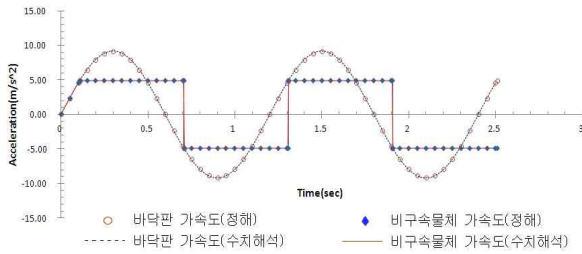


그림 2. 조화진동(단일계수)

아래 [그림 3]에는 바닥의 선형 가속도 진동에 대한 정적마찰계수 $\mu_s=0.6$, 동적마찰계수 $\mu_d=0.45$ 인 정적·동적마찰계수모델의 정해와 전산프로그램의 해석결과가 나타나 있다. 그림을 보면 두 결과 모두에서 일체적 거동과 미끄러짐 거동이 방향을 바꾸어 계속하여 발생하는 것을 볼 수 있으며, 미끄러짐의 발생과 함께 가속도가 급히 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 일체적 거동 시에는 정적마찰계수가 작용하나 미끄러짐의 발생과 동시에 동적마찰계수가 작용하며 이로 인한 마찰력 감소에 따른 감속 현상이다.

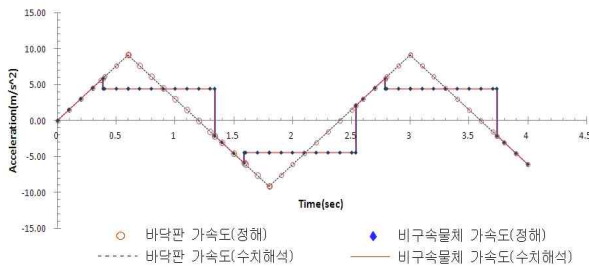


그림 3. 선형가속도(정적·동적계수)

III. 실험 및 분석

정적마찰계수와 동적마찰계수는 아래의 [그림 4]와 같은 도르래 실험을 수행하여 구할 수 있다. 동적 마찰계수는 그림과 같이 추의 무게를 서서히 증가시켜 바닥면을 가볍게 두드리며, 이때 연속적인 미끄러짐이 발생되면 그때의 추와 물체의 무게를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 구할 수 있으며, 정적 마찰계수는 동일한 과정을 두드리지 않고 실행하여 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{W_h}{W} \tag{4}$$

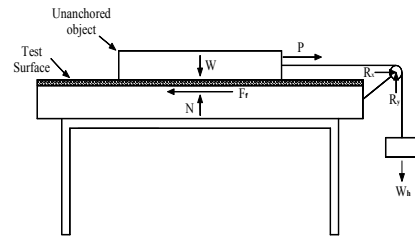


그림 4. 도르래 실험

아래 [그림 5]에 나타난 경사면 실험은 미끄러짐이 발생하는 각도 θ 를 측정하여 식 (5)와 같이 정적마찰계수를 구하는 방법이다.

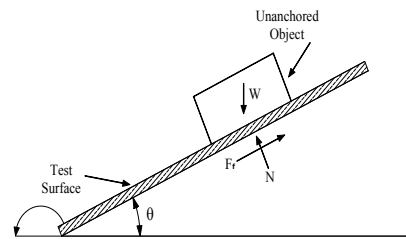


그림 5. 경사면 실험

$$\mu_s = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} = \tan(\theta) \tag{5}$$

아래의 [그림 6]은 정적마찰계수를 구하기 위한 진동 테이블 실험이다. 실험에서 조화진동으로 구동된 진동 테이블의 가속도를 서서히 증가시키면 미끄러짐이 발생되며 이때의 가속도를 중력가속도로 나눈 값이 정적 마찰계수가 된다.

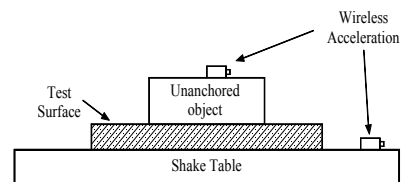


그림 6. 동적 실험

마찰계수를 구하기 위한 도르래, 경사면, 그리고 동적

실험을 수차에 걸쳐 수행하였으며 실험 시 비구속 물체는 소나무 각재를 사용하였다. 아래의 [표 1]에는 소나무 각재와 여러 바닥판 사이에서 측정된 마찰계수의 평균값이 습도별로 나타나 있다.

표 1. 마찰계수

실험종류	구분		습도			
	바닥판		48%	50%	52%	58%
도르래	오련회	동적		0.31	0.38	
		정적		0.35	0.44	
	유리	동적	0.28			0.29
		정적	0.29			0.33
	MDF	동적	0.31			0.31
		정적	0.38			0.39
판재	동적	0.33			0.34	
	정적	0.39			0.41	
경사면	오련회			0.36	0.42	
	유리		0.31			0.35
	MDF		0.40			0.41
	판재		0.38			0.39
동적실험	오련회			0.35		
	유리		0.30			0.35
	MDF		0.38			0.40
	판재		0.37			0.38

[표 1]에 나타난 마찰계수는 수회 시행된 실험결과의 평균값이며 실제 수행된 동일 조건의 실험에서는 마찰계수에 편차가 발생하였다. 이러한 결과는 동일 재질의 바닥에서도 위치에 따라 마찰계수에 변화가 있기 때문으로 판단된다.

바닥 진동에 대한 비구속 물체의 거동을 파악하고 작성된 전산프로그램의 검증은 위하여 조화진동과 지진파를 이용한 진동테이블 실험을 수행하였다.

실험에서는 리니어 모터로 구동되는 스마트제어계의 ST-E-1 진동테이블을 사용하였으며 아래 그림 7.과 같이 바닥판을 진동테이블에 고정 한 후 소나무각재를 바닥판에 놓아 실시하였다.

실험 시 소나무 각재와 바닥면 사이 마찰면의 불균일한 마찰력으로 인하여 소나무 각재의 회전거동이 발생되었으며 이러한 회전거동을 방지하기 위한 줄을 그림과 같이 설치하고 설치된 줄에는 밀랍을 입혀었다.

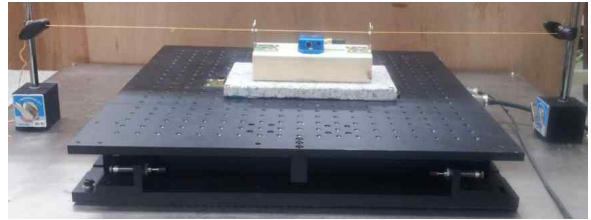


그림 7. 진동테이블 실험

아래의 [그림 8]에는 진동수 5Hz 진폭 0.57g로 구동된 오련회 바닥판과 소나무 각재의 가속도가 나타나 있다. 그림에 나타난 초기의 거동 상태를 보면 마찰력에 의한 소나무 각재의 가속도보다 바닥판의 가속도가 커짐에 따라 일체로 거동하던 소나무 각재에 미끄러짐이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이후 바닥판의 가속도가 감소하면 바닥판과 일체로 거동하는 구간이 다시 나타나며, 역진된 바닥판의 가속도가 반대방향으로 증가함에 따라 또 다른 미끄러짐이 발생하는 현상을 볼 수 있다. 이후 미끄러짐과 일체적 거동이 반복되어 나타나는 것을 그림에서 볼 수 있다.

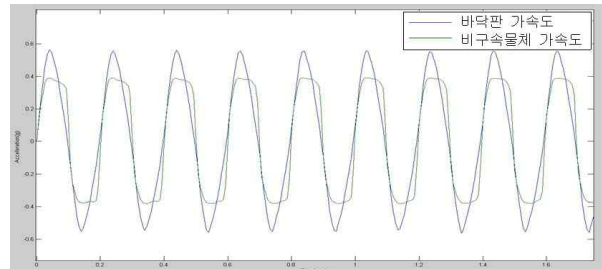


그림 8. 진동테이블 실험

위에 실험에서 사용된 바닥판의 가속도와 진동수 그리고 정적마찰계수를 전산 프로그램에 입력하여 해석한 결과가 아래의 [그림 9]에 나타나 있다.

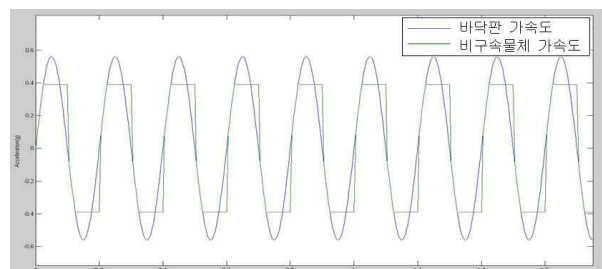


그림 9. 수치해석

아래의 [그림 10]에는 진동수 5Hz 가속도 진폭 0.73g로 구동된 폴리싱타일 바닥판과 소나무 각재의 가속도가 나타나 있다. 그림을 보면 소나무 각재는 최초의 미끄러짐이 발생한 이후 일체적 거동 없이 미끄러짐 거동이 방향을 바꾸어 반복하여 발생하는 것을 볼 수 있다.

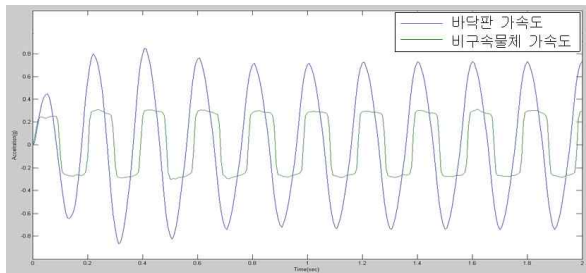


그림 10. 진동테이블 실험

위의 실험에 사용된 바닥판의 가속도와 진동수 그리고 정적마찰계수를 입력하여 구한 해석 결과가 아래의 [그림 11]에 나타나 있다.

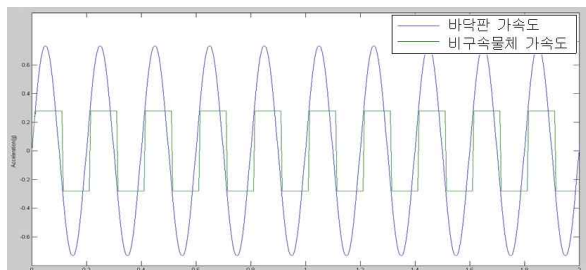


그림 11. 수치해석

[그림 10]의 실험결과와 [그림 11]의 해석 결과를 비교하여 보면, 실험결과에서는 미끄러짐이 지연되며 또한 완만한 경사의 가속도를 갖는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이의 원인은 실험 시 진동테이블이 고정된 지지판의 들림과 눌림 현상이 관찰 되었으며 이로 인한 수직방향 가속도의 영향이 원인으로 판단된다. 또한 불균일한 마찰력에 의해 발생하는 회전거동과 바닥의 위치에 따라 변화하는 마찰계수도 원인의 하나로 판단된다.

아래의 [그림 12]에는 지진파로 구동된 폴리싱타일 바닥판과 소나무 각재의 가속도 그리고 전산프로그램 해석 결과가 함께 나타나 있다.

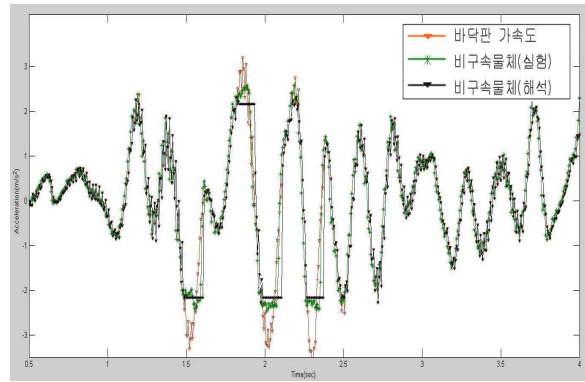


그림 12. 지진파

아래의 [그림 13]에는 바닥에 대한 비구속 물체의 상대변위 포락도가 나타나 있으며, 그림에서 X_r^{max} 은 양의 방향으로 발생한 최대상대변위이다.

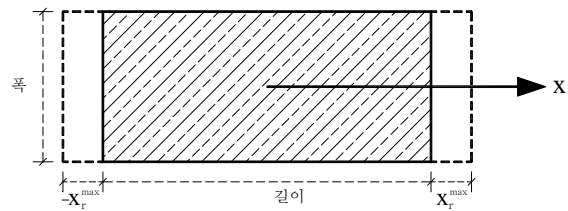


그림 13. 포락도

아래의 [표 2]에는 조화진동과 지진파에 의해 발생한 비구속 물체의 최대 상대변위 값이 나타나 있다.

표 2. 최대상대변위

	진동수-가속도	$-X_r^{max}$ (mm)	X_r^{max} (mm)
오런회	5Hz - 0.43g	0	0
	5Hz - 0.58g	3.9	3.9
	10Hz - 0.25g	0	0
	10Hz - 0.62g	2.9	2.9
폴리싱 타일	5Hz - 0.43g	4.5	4.5
	5Hz - 0.65g	6.4	6.4
	10Hz - 0.58g	6.2	6.2
지진파	-	3.1	3.2

IV. 결론

진동수와 가속도가 미끄러짐 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험 결과 미끄러짐 거동은 진동수보다

는 가속도의 크기에 의해 결정되었다.

마찰계수를 구하기 위한 실험을 바닥판의 재질과 습도를 변화 시키어 수행한 결과 습도가 높아지면 마찰계수의 크기도 증가하였다. 또한 동일한 재질에서도 바닥면의 위치에 따라 마찰계수에 편차를 보이었다.

바닥 진동 가속도와 마찰계수를 입력하여 비구속 물체의 거동을 파악 할 수 있는 수치해석 전산프로그램을 개발하였으며 작성된 전산프로그램의 검증을 위하여 바닥의 선형과 조화 진동에 대한 미끄러짐 거동의 정해를 구하여 비교하였다. 비교한 결과 전산프로그램의 해석 결과는 시간증분이 작아짐에 따라 정해에 수렴하였다.

진동테이블 실험을 수행하였으며 그 결과를 기존의 마찰모델을 사용하여 작성한 전산프로그램 해석결과와 비교하였다. 비교한 결과 동일한 정성적 결과를 확인하였으나 보다 정확한 비교를 위해서는 불균일한 마찰력에 의한 회전거동과 들림과 눌림에 의한 수직방향 가속도가 제거된 정밀한 실험과 함께 바닥면의 위치와 속도가 고려된 마찰모델의 개발이 요구된다.

바닥진동에 대한 비구속 물체의 상대변위 포락도를 작성하여 미끄러짐으로 인한 비구속 물체의 충돌여부를 파악 할 수 있는 기준을 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] 신태명, “사용후 핵연료 습식저장 시설의 중대사고 안전성 검토”, 방사성폐기물학회지, 제9권, 제4호, pp.231-236, 2011.

[2] 황근창, “마찰계수를 이용한 사면에서 물체의 운동 분석”, 한국물리학회, 제46권, 제5호, pp.237-248, 2003.

[3] 김정수, 박재석, “바닥 거칠기 및 미끄럼판 재질에 따른 미끄러짐 특성연구”, 한국안전학회지, 제25권, 제5호, pp.65-69, 2010.

[4] R. L. Nibor, *Analytical and Experimental Evaluation of Seismic Mitigation Measures for Art Objects*, Doctoral Dissertation, USC, 1989.

[5] C. L. Mehta, *Sliding of Loose Objects during*

Earthquakes, Structural Design and Drafting Division, 1974.

[6] M. Aslam, W. G. Godden, and D. T. Scalies, *Sliding Response of Rigid Bodies to Earthquake Motion*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1975.

[7] H. W. Shenton, “Criteria for Initiation of Slide, Rock, and Slide-Rock Modes,” *J. of Engineering Mechanics*, Vol.122, July, 1996.

[8] N. Mostaghel, M. hejazi, and J. Tanbakuchi, “Response of Sliding structures to Harmonic Support Motion,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.11, pp.355-366, 1983.

[9] A. Pompei, A. Scalia, and M. A. Sumbatyan, “Dynamics of Rigid Block due to Horizontal Ground Motion,” *J. of Engineering Mechanics*, Vol.124, No.7, pp.713-717, July, 1998.

[10] S. R. Jensen and O. Gurbuz, “Sliding and Rocking of Unanchored Components and Structures,” *Structures Congress*, pp.2178-2189, 2011.

[11] R. Tinawi and P. Leger, “Seismic Safety of Gravity Dams,” *J. of Structural Engr.*, Vol.125, No.4, pp.518-529, 2000.

[12] Yuan Shao, *Seismic Response of Unanchored Objects*, Doctoral Dissertation, NCSU, 1998.

저 자 소 개

이 상 호(Sang Ho Lee) 정회원



- 1983년 5월 : North Carolina State Univ.(공학석사)
- 1988년 5월 : North Carolina State Univ.(공학박사)
- 1990년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야> : 내진해석, 충돌해석