

유사동적 실험법을 이용한 구조물의 내진 성능 평가

Assessment of the Seismic Capacity of Structure Using Pseudodynamic Test

김 대 곤* 김 대 영** 안 재 현*** 박 칠 림****
Kim, Dae-Kon Kim, Dae Young Ahn, Jae Hyen Park, Chil Lim

국문요약

인류문명에 가장 파괴적인 자연재해 중 하나인 지진에 대한 대비의 필요성이 대두되고 있는 이때에 여러 가지 구조물들의 내진 설계 및 해석적 연구가 요구된다. 구조물의 내진 특성을 알기 위해서는 이론적 연구뿐만 아니라 실험적 연구가 특히 중요하며, 현재 존재하는 여러 가지 실험 방법들 중에서 컴퓨터-가력기 on-line 실험이라고 알려진 유사동적 실험은 진동대를 사용하지 않고 구조물의 내진 성능을 연구할 수 있는 실험 방법이다. 이 논문에서는 간단한 일 자유도 실험체들을 대상으로 유사동적 실험법을 적용하여 구조물의 내진 성능을 평가하였다. 실험에서 얻은 값들을 이론 값들과 비교한 결과 대체로 일치하는 경향을 보였으며, 좀 더 성능이 좋은 계측 및 제어장비들을 사용한다면 더욱 만족할 결과들을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 유사동적 실험, 자유진동 실험, 준정적 실험, 진동감쇠, 제어·계측장비

ABSTRACT

It is necessary to conduct researches about seismic design and analysis to protect various structures from earthquakes which are one of the most destructive natural disaster to human civilization. To assess the seismic capacity of structure, not only analytical but also experimental researches are important. Currently, pseudodynamic test known as computer-actuator on-line test is one of the available test methods to assess seismic capacity of structure without using shaking table. In this paper seismic capacity of simple one-degree of freedom structure was estimated by pseudodynamic test. Good agreement between the experimental and analytical results was obtained. Better results would be obtained when more sophisticated measuring and controlling instruments are available.

Key words : pseudodynamic test, free vibration test, quasistatic test, damping, control·measuring instrument

1. 서 론

현재 세계는 무한 경쟁체제에 있으며 앞으로 국내 건설시장 개방에 따른 해외 내진 기술의 무차별 유입에 대응하고 더 나아가 내진 설계를 요구하는 거의 대부분의 국가에서의 건설 경쟁력을 높이기 위해 내진 설계에 대한 교육의 강화와 내진 연구가 절실히 필요하다. 이에 부응하여 최근 국내에서도 인간생명과 구조물들에 막대한 피해를 입히는 지진

에 대처키 위해 산학연을 중심으로 내진 설계 및 해석에 관한 연구를 시작했다.

지진력은 매우 위력적이어서 지진발생동안 구조물들이 소성 변형을 경험하며 이러한 대 변위에서의 거동들을 이론적으로만 해석하기는 거의 불가능하다. 즉 구조물의 내진 특성을 알기 위해서는 이론적 연구뿐만 아니라 실험적 연구도 반드시 병행되어야 한다. 현재 여러 가지 실험 방법들이 존재하는데 그 중에서 진동대 실험, 준정적 실험 그리고 유사동적 실험이 가장 널리 사용된다.

현실적으로, 가장 이상적으로 지진의 효과를 낼 수 있지만, 설치 비용이 비싸고, 고도의 운용기술을 섭렵한 기술자가 필요한 진동대 실험(shaking table

* 정회원·(주)대우 건설기술연구소 선임연구원
** (주)대우 건설기술연구소 선임연구원
*** (주)대우 건설기술연구소 책임연구원
**** (주)대우 건설기술연구소 소장, 공학박사

test)과 현재까지 가장 많이 사용되어져 오고 있는 실험방법으로 설치 비용 면에서 매력적인 준정적 실험(quasistatic test)의 장점들을 따온 실험 기법인 컴퓨터-가력기 on-line 실험이라고 알려진 유사동적 실험은 구조물의 내진 성능을 연구하는 실험방법으로써 일본 건설성, 미국의 캘리포니아 주립대학교(버클리)와 미시간 주립대학교 등을 중심으로 활발히 진행되어오고 있다.

이 논문에서는 유사동적 실험법에 대하여 간략히 소개하고, 이 실험법을 적용하여 일 자유도 구조물의 내진 성능을 평가하여 이 실험법의 문제점 분석을 통한 실용성과 적용성을 살펴보았다. 또한 유사동적 실험에 필요한 실험체의 감쇠비(damping ratio)를 얻기 위하여 퓨즈감쇠(fuse bar)을 이용한 자유진동 실험(free vibration test)도 실시하였으며, 지진하중에 의한 실험체의 탄-소성 이력 특성을 수치적으로 정확히 모델링 하기 위해 준정적 실험 역시 실시하였다.

2. 유사동적 실험

2.1 실험방법

유사동적 실험법의 기본 접근 방법은 다음과 같다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 대부분의 컴퓨터를 이용한 구조물의 동적 해석에서와 마찬가지로 이 실험법에서 다루는 연속체인 실험체를 몇 개의 자유도로 질량은 집중(lump) 시켜서 유한한 자유도를 갖는 불연속개수 모델(discrete-parameter model)으로써 묘사할 수 있다. 이와 같이 이상화한 다 자유도 모델의 운동방정식은 식 (1)과 같이 잘 알려진 이계 미분 방정식으로 표현된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + R(u) = f \quad (1)$$

여기서 m 과 c 는 각각 실험체의 질량 그리고 점탄성 감쇠 계수(viscous damping coefficient) 행렬들이고 \ddot{u} , \dot{u} , 그리고 u 는 집중된 질량에서의 실험체의 가속도, 속도 그리고 변위 벡터들이며 f 와 $R(u)$ 는 각각 실험체에 가해진 외력 벡터 그리고 이 외력 벡터에 의해 발생된 실험체의 복원력 행렬이다. 흔히 이 복원력 행렬은 ku 로 표현하지만 복원력은 비선형일 수 있으므로

$R(u)$ 로 표현하였다.

유사동적 실험법이 잘 알려진 일반 동적 해석법과 다른 점은 매 시간 간격 Δt 마다 계산된 변위 u 를 유압식 가력기에 의해 실제로 실험체에 준정적으로(quasistatically) 부여하여 이때 실험체에서 발생된 복원력을 변형된 실험체로부터 측정하여 해석적으로 부여된 질량 m 과 점탄성 감쇠계수 c 그리고 수치적으로 표현된 외력 f 와 함께 식 (1)로 부터 다음단계 변위를 수치적분으로 구한다. 위의 작업을 전 수치해석 구간에 걸쳐서 반복 수행하여 실험체는 진짜 지진하중동안 변형하는 경로(동적 효과)를 똑같이 경험한다.

유사동적 실험법의 장점을 요약하면 해석적으로 모델링하기 가장 어려운 대상 실험체의 탄-소성 복원력(탄-소성 이력특성)이 실험을 통해서 매시간 간격 Δt 마다 직접 구해지기 때문에 실험체의 마찰감쇠(Coulomb damping)와 이력감쇠(hysteretic damping)가 자동적으로 고려되어진다. 따라서 상대적으로 작은 양인 점성 감쇠력 항 $c\dot{u}$ 만이 미지수이며 컴퓨터 프로그램이 식 (1)을 수치적분 하면서 실험체의 동적 효과를 직접 고려하기 때문에 이 실험법은 준정적 실험에서 흔히 사용하는 유압식 가력기를 사용하여 천천히 실험을 수행할 수 있다.

그림 1과 그림 2는 지반진동을 받는 구조물의 유사동적 실험법(편의상 점성감쇠는 없는 경우)과 그의 수치해석 흐름도(flow chart)를 보여준다. 그림 1에서 u_t 는 질량이 경험하는 총 변위, u_g 는 지반 변위 그리고 \ddot{u}_g 는 지반 가속도이다.

2.2 수치적분

식 (1)을 각 시간 단계 Δt 마다 푸는 방법에는 explicit 방법과 implicit 방법이 있다.⁽³⁾ Explicit 방법은 각 시간 단계 Δt 에서의 실험체의 변위를 바로 이전 단계에서의 실험체의 거동들로부터 구할 수 있는 방법이고 implicit 방법은 바로 이전 단계의 거동들뿐만 아니라 현 단계의 거동들도 필요한 방법이다.

수치적분법을 선택할 때 가장 중요한 사항은 해석결과와 안정성(stability)과 정확도(accuracy)이다. Explicit 방법은 implicit 방법에 비해 유사동적 실험

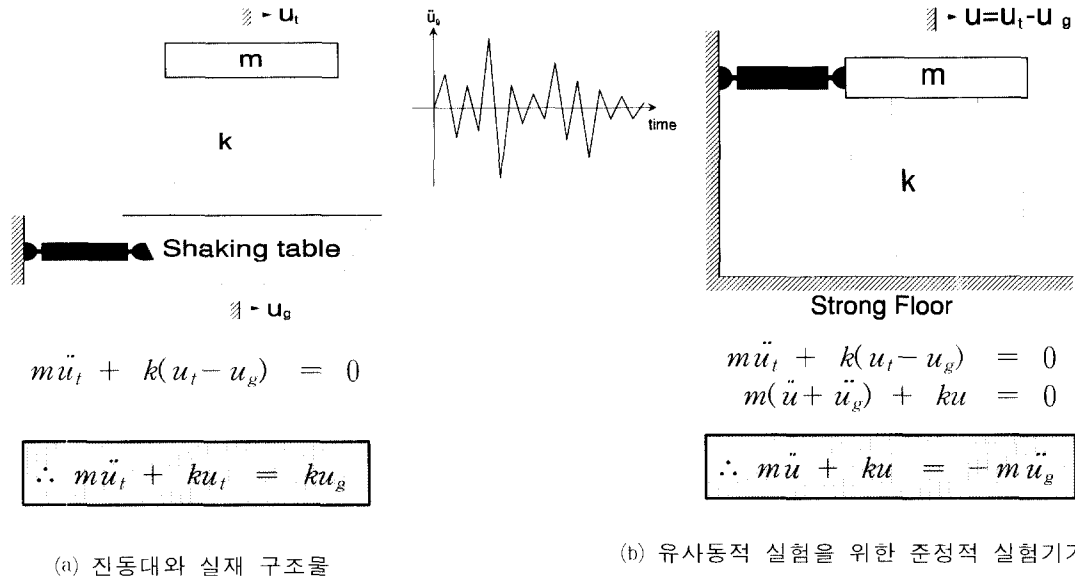


그림 1 유사동적 실험법⁽¹⁾

법이 수치적으로 다루기 쉬운 알고리즘인 반면 해석결과가 안정적이면서도 정확하기 위해서는 수치 해석을 매우 짧은 시간 간격 Δt 마다 수행해야 하기 때문에 다 자유도 구조물의 해석시 특히 해석 시간과 비용이 요구된다.

동역학에서 가장 흔히 쓰이는 수치적분법은 Newmark의 알고리즘이다.⁽⁴⁾ 시간 단계 $\Delta t = i+1$ 일 때:

$$m \ddot{u}_{i+1} + c \dot{u}_{i+1} + k u_{i+1} = f_{i+1} \quad (2)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + (\Delta t)^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_i + \beta \ddot{u}_{i-1} \right] \quad (3)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta t \left[(1 - \gamma) \ddot{u}_i + \gamma \ddot{u}_{i-1} \right] \quad (4)$$

여기서 β 와 γ 는 안정성과 정확도에 관계되는 상수들이다. 예를 들어 β 가 0.25 이고 γ 가 0.5 일 때 이 수치해석 방법은 implicit 방법이고, 만약 β 가 0 이라면 식(3)에서 \ddot{u}_{i+1} 항이 없어

지므로 이 수치해석 방법은 explicit 방법이 된다.

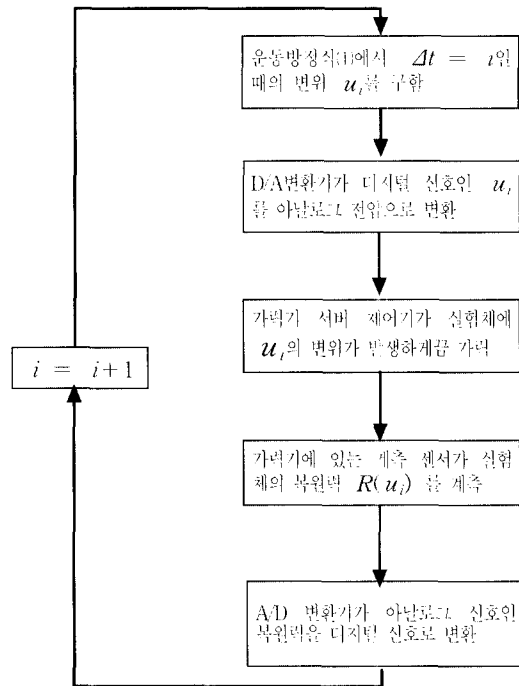


그림 2 유사동적 실험법 수치해석 흐름도

2.3 적용범위

유사동적 실험법을 적용하려면 사용할 가력기의 수를 최소화하기 위해 대상구조물을 몇 개의 자유도로 절량을 집중시킬 수 있어야 하며, 컴퓨터 제어 프로그램이 매 시간 간격 Δt 마다 수치적분을 할 때 수치해석 오차, 부적합한 실험체의 설치, 그리고 부적절한 계측·제어장비 사용 등의 원인으로 발생하는 실험 오차들을 극소화시킬 수 있어야 한다.

매시간 간격 Δt 마다 변위가 수치해석을 통해서 정확하게 구해졌다고 할지라도 이 디지털 신호로 이루어진 변위값이 D/A(디지털-아날로그) 변환기를 통해서 아날로그 전압으로 전환되어 가력기의 서보 제어기(servo controller)에 입력될 때 사용 변환기의 분해능(resolution)이 떨어지면 계산치와 약간 다른 변위값이 가력기의 제어기에 입력된다. 또한 가력기의 서보제어 능력이 불충분하면 제어해야 할 입력 변위량을 정확하게 제어하지 못한다. 가력기에 붙어있는 힘 계측 센스의 정확도가 떨어지면 일정 변위 제어에 필요한 가력기의 힘(실험체의 복원력) 또한 정확히 계측하지 못하며 비교적 정확하게 계측했다 할지라도 아날로그 신호로 이루어진 이 복원력을 A/D(아날로그-디지털) 변환기를 통해서 디지털 신호로 바꾸어서 컴퓨터로 보낼 때 이 변환기의 분해능에 따라 또 한번 오차가 발생될 수 있다. 이상과 같은 오차들을 최소화하지 않으면 매 수치 해석동안 오차가 계속 누적되어 좋지 않은 결과를 초래할 수 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

이 실험법의 단점중의 하나는 가해진 하중이 충격성 하중이고 대상 구조물의 주기가 매우 짧으며(보통 0.1초 이하) 대상 구조물을 이루고 있는 구조체가 가력 속도에 민감하다면 소위 말하는 '변형속도 효과(strain rate effect)'는 고려할 수 없다는 것이다. 그러나 철골조를 포함한 대부분의 구조물에서 이 효과는 미비하며 구조물을 수치적으로 모델링할 때 고려치 못하는 여러 가지 불확실성과 비교할 때 이 변형속도 효과는 무시할 수 있다고 하겠다.⁽⁷⁾ 한편, 가력기의 가력 속도를 실제 시간으로 빨리 하여 변형속도 효과를 실험 결과에 포함하는 노력들도 진행중이다.⁽⁶⁾

3. 실험 및 해석 예

본 연구소에서 본격 실시 예정인 정밀한 계측·

제어 장비들을 필요로 하는 유사동적 실험법의 속도와 실험장비 점검 및 보안을 위해 몇 가지 실험과 이론적 해석을 실시하였다.

3.1 실험 set-up

H 형강(SS41) 350×350×12×9를 이용하여 그림 3과 같은 일 자유도 실험체를 5개 제작하였다. 길이 1700 mm인 H 형강은 #19인 stiffener들로 보강된 base plate (1200×800×250)에 모살 용접(r25)으로 접합되었다. 가력 용량이 50 ton(MTS 모델명:244.41, stroke:250 mm, frequency range:100 Hz)인 동하중 가력기가 base plate와 H 형강과의 용접부위로부터 1500 mm 높이에서 실험체와 두께 2500 mm인 반력벽(strong wall)에 고정되었다. Base plate는 직경이 32 mm인 6개의 DywidagTM 강봉에 의해 두께 1500 mm의 반력상(strong floor)에 고정되었는데 가력시 실험체의 미끄러짐을 방지키 위해 각 강봉은 oil jack으로 30 ton씩 pre-stress 되었다.

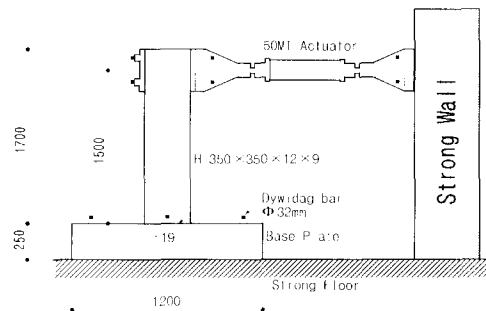


그림 3 유사동적 실험 Set-Up

모든 실험을 위해서 A/D 와 D/A 변환기의 bit 수가 16이고 최대 sampling rate가 4 kHz인 Controller를 사용하였으며 준정적 실험을 위해서는 최대 sampling rate가 50 Hz인 정적 data logger 그리고 자유 진동 실험과 유사동적 실험을 위해서는 응답주파수가 2.5 kHz인 동적 data logger를 각각 사용하였다.

3.2 준정적 실험

실험체의 탄-소성 이력특성을 알아보기 위해 그림 4(a)와 같은 변위 제어로 준정적 실험을 실시하였다. 실험체의 변위는 측정범위가 100 mm이고 분해능력이 0.05 mm인 비접촉식(laser) 변위계를 사

용하여 계측하였으며 그림 4(b)는 실험결과를 보여 준다. 실험에서 얻은 실험체의 탄성 강성은 18500 kgf/cm 인데 이 값은 실험체와 base plate의 모살 용접 부분을 완벽한 고정단이라고 가정했을 때의 이론적 탄성 강성 값의 약 75% 이다.

실험체의 지진하중에 대한 거동을 유사동적 실험 방법을 이용하여 구했을 때 이 실험결과를 해석적 결과와 비교해 보아야 한다. 이때 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 실험체의 탄-소성 이력특성을 최대한 정확히 모델링 하여야 한다. 본 논문에서는 구조물의 동적 소성 거동을 해석하는데 흔히 사용되는 상용 컴퓨터 구조해석 프로그램인 DRAIN-2DX⁽⁷⁾의 부재타입 #1인 bilinear 트리스 부재 3개를 조합(○ 논문에서는 quadri-linear model 이라고 칭함)하여 그림 4(b)의 실험결과를 해석적으로 모델링 하였다. 그림 4(c)는 이 해석모델의 결과를 보여준다.

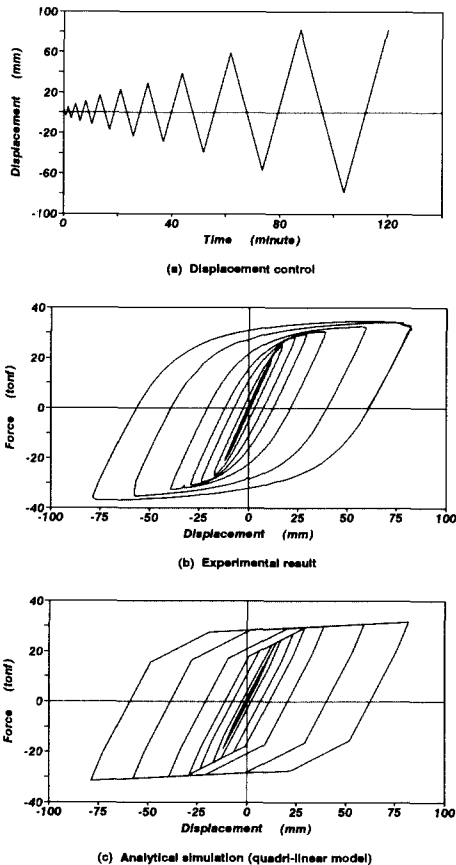


그림 4 준정적 실험 및 해석 모델

3.3 자유진동 실험

유사동적 실험의 수치 해석시 식 (1)에서 복원력 $R(u)$ 는 실험으로 직접 구해지지만 질량 m 와 점탄성 계수 c 는 해석적으로 부여된다. 일반적으로 질량 m 은 자유도(절점)에서의 tributary 질량으로 구해지고 점탄성 계수 c 는 적절한 값으로 가정된다.

본 논문에서는 실험체의 주기와 점탄성 계수를 실험적으로 구하기 위해서 자유진동 실험을 실시하였다. 실험체를 자유진동 시키기 위한 set-up은 그림 5와 같다. Oil jack이 Dywidag^{IM} 강봉을 잡아당겨서 실험체에 약 4 mm의 변위가 발생할 때 퓨즈 강봉이 끊어지게끔 강봉의 두께를 9 mm로 밀링(milling) 하였다.

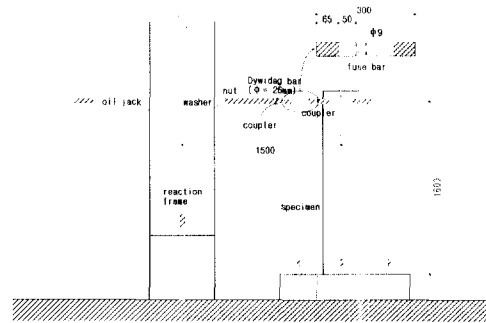


그림 5 자유 진동 실험 Set-Up

초기 변위에 의한 자유진동 실험동안 실험체의 변위와 가속도를 측정하였다. 변위는 준정적 실험에서와 같은 laser 변위계를 사용하였는데 응답 주파수는 약 900 Hz까지 가능하다. 가속도는 최대 2000g 충격성 가속도는 5000g 까지 측정할 수 있는 가속도계를 사용하였다.

총 4번의 자유진동 실험의 변위 응답 시간이력 데이터를 통해서 실험체의 감쇠비가 약 3%임을 알았다. 감쇠비는 잘 알려진 대수 감소법(Logarithmic decrement method)⁽⁴⁾으로 구하였으며 그림 6(a)는 자유진동 변위 응답 시간이력을 보여준다. 실험체의 주기를 구하기 위해 변위 응답 시간이력의 spectral 해석을 실시하여 실험체의 기본 주파수가 약 59 Hz임을 알았으며 그림 6(b)는 해석 결과를 보여준다.

일반적으로 실험체의 고차 모드들의 개입으로 가

속도 응답 시간 이력 데이터들은 별로 좋지 않았다. 그림 6(c)는 이 문제를 해결기 위해 low path filter를 사용하여 100 Hz 이하의 주파수들만 통과시킨 결과이다. 이 가속도 데이터에서 구한 감쇠비도 약 3%이다. 그림 6(d)는 가속도 응답 시간 이력의

의 주기가 약 0.4초에서 0.8초 구간에서 가속도 응답치가 최대임을 알 수 있다.

본 유사동적 실험을 위해서 실험체의 주기가 식 (5)로부터 0.6초가 되게끔 조절하여 두 지진파에 대한 실험체의 거동이 최대가 되게 하였다.

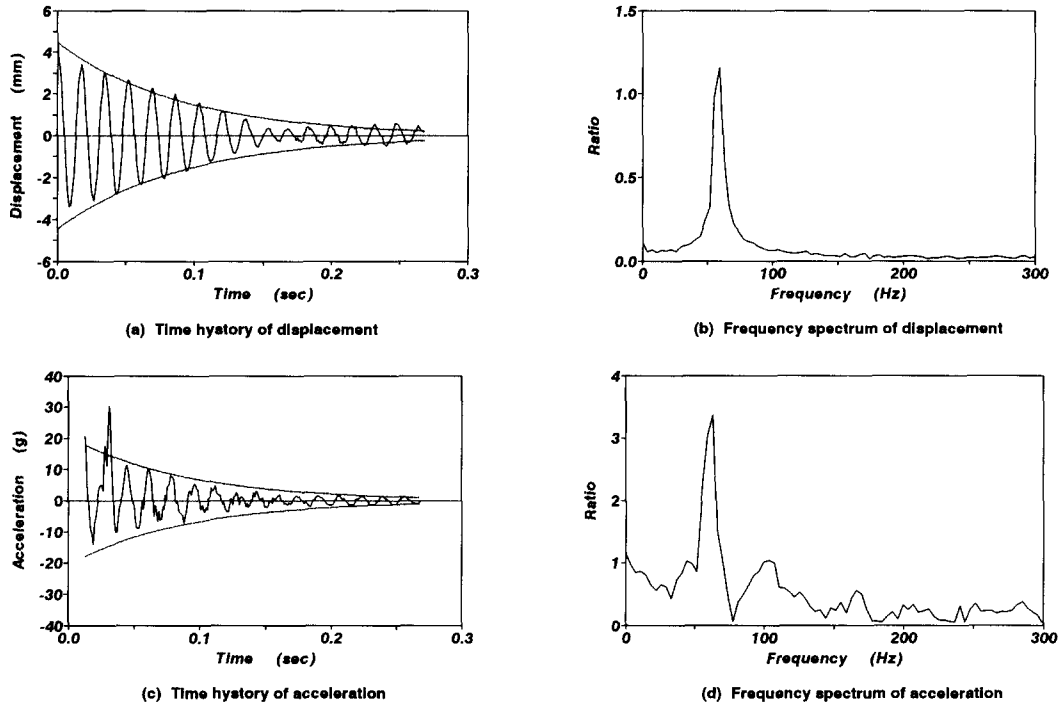


그림 6 퓨즈 강봉을 이용한 자유 진동 실험

spectral 해석 결과이며 실험체의 기본 주파수 약 63 Hz를 얻었다. 일반적으로 low pass filter를 사용하여 고주파들의 통과를 막았다 할지라도 이들의 통과를 완전히 막을 수는 없기 때문에⁽⁸⁾ 약간의 고주파 성분들을 이 그림에서 관찰할 수 있다.

3.4 유사동적 실험

실험체의 지진하중에 대한 비탄성 거동을 유사동적 실험을 통해서 알아보기 위하여 El Centro NS (PGA=0.35g)와 고베(PGA=0.83g) 지진파를 사용하였다. 그림 7은 감쇠비가 3% 일 때의 두 지진파에 대한 가속도 응답 스펙트럼이다. 이 그림에서 구조물

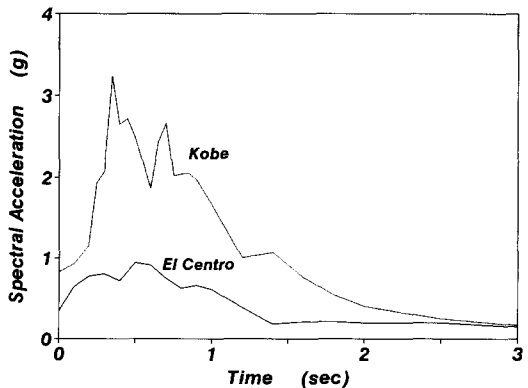


그림 7 가속도 반응 스펙트럼 (감쇠비=3%)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5)$$

여기서 k 는 준정적 실험으로부터 18500 kgf/cm 이고 m 은 $168.7 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$ 를 유사동적 실험 컴퓨터 프로그램에 입력하였다.

본 논문에서 실험을 조절하고 식 (2)를 푸는 컴퓨터 프로그램은 미국 MTS사에서 개발한 유사동적 프로그램⁽⁹⁾을 사용하였다. 이 프로그램에서 식 (2)를 위한 수치해석 알고리즘은 Hilber가 개발한 α -method를 Hughes가 발전시킨 형태를 사용했는데 식 (2)의 변형된 형태를 소개하면 식 (6)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$m \ddot{u}_{i+1} + (1+\alpha)c \dot{u}_{i+1} - \alpha c \dot{u}_i + (1+\alpha)k u_{i+1} - \alpha k u_i = (1+\alpha)f_{i+1} - \alpha f_i \quad (6)$$

여기서 u_{i+1} 과 \dot{u}_{i+1} 은 식 (3)과 식 (4)로 각각 구한다. 이 알고리즘은 implicit 방법인데 수치해석결과와 무조건적 안정성과 적절한 에너지소산을 위해서 $1/3 \leq \alpha \leq 0$, $\beta = (1-\alpha)^2/4$, 그리고 $\gamma = 1/2 - \alpha$ 를 사용한다.

실험체의 마찰감쇠, 이력감쇠, 그리고 점성감쇠 이외에 가력기 자체의 마찰력이 유사동적 실험동안 개입되어 실험 결과에 내포되는 여러 실험 오차들의 한 부분을 차지한다는 사실은 잘 알려져 있다.⁽¹¹⁾ 이 문제를 해결하기 위하여 실험체들의 두 지진파에 대한 거동을 본격적으로 살펴보기 이전에 식 (6)에서 $c=0$ 인 경우의 유사동적 실험법을 이용한 자유진동 실험(초기 변위 4 mm 를 프로그램의 input data로 부여, 즉 이 input에 의해서 가력기는 실험체에 힘을 가하여 4 mm 의 변위가 발생한 상태에서 실험을 시작한다)을 실시하였다. 유사동적 실험에서는 변위계의 분해능력이 좋아야 정확한 실험결과를 기대할 수 있으므로 측정 범위가 $\pm 50 \text{ mm}$ 이고 분해능력이 0.01 mm 인 접촉식 변위계를 사용하였다.

그림 8에서 볼 수 있듯이 $c=0$ 인 경우임에도 불구하고 가력기 자체의 마찰력 때문에 점성 감쇠를 포함한 자유진동 실험의 결과와 유사한 결과를 얻었다(그림 8에서 before correction의 경우). 이 오차를 제거하기 위해서 $c=0$ 인 경우의 실험 데이터로부터 대수 감소법(Logarithmic decrement method)을 이용하여 가상의 약 1%의 감쇠비를 얻었다. 가력기의 마찰력에 의한 오차를 보상하는 방

법으로 가상의 1%의 감쇠비에 음의 부호를 붙여서 (minus damping) 식 (6)에 대입하여(프로그램의 input data) 똑같은 자유진동 실험을 실시하여 보정된 결과를 그림 8에서 after correction의 경우와 같이 얻었다.

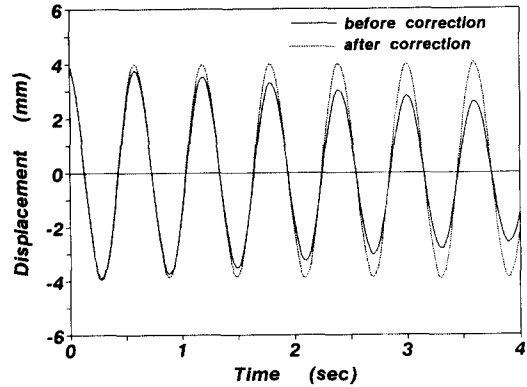


그림 8 유사동적 실험법을 이용한 자유 진동 실험

이상과 같이 가력기의 마찰력에 기인한 오차를 보정한 후 두 지진파에 대한 유사동적 실험을 실시하였다. 실험체의 점성 감쇠비는 본 논문의 3.3절 자유진동 실험에서 구한 3%에 가력기의 마찰력에 의한 오차를 보상하는 방법으로 사용한 -1%의 감쇠비를 합한 값인 2%를 실험체의 점성 감쇠비로 취급하였으며 식 (6)의 수치적분은 매 $\Delta t = 0.02$ 초 시간 간격마다 시행하였다. 사용 변위계의 측정 범위가 $\pm 50 \text{ mm}$ 이므로 El Centro 지진파와 고베 지진파 PGA의 67%와 22%만을 각각 사용하여 유사동적 실험동안 실험체의 변위가 변위계의 최대 측정 범위를 넘지 않게 하였다. 각 지진파는 14초 동안의 줄여진 가속도 데이터를 사용하였으며 가력기의 가력 속도는 0.127 mm/sec 이었으며 총 실험에 소요된 시간은 각 지진파에 대하여 약 1 시간씩 소비되었다.

유사동적 실험결과에 대한 정확한 비교 대상으로는 진동대 실험이 가장 바람직 하지만 본 논문 3.2절 준정적 실험(그림 4(c))을 통해서 실험체의 탄-소성 이력 특성을 해석적으로 최대한 정확히 모델링하였기 때문에 컴퓨터 프로그램 DRAIN-2DX를 이용한 순수한 해석적 결과가 실험체들의 지진파들에 대한 실제 거동이라고 가정할 수 있다.

그림 9와 그림 10은 El Centro와 고베 지진파에 대한 유사동적 실험 결과와 DRAIN-2DX 해석 결과

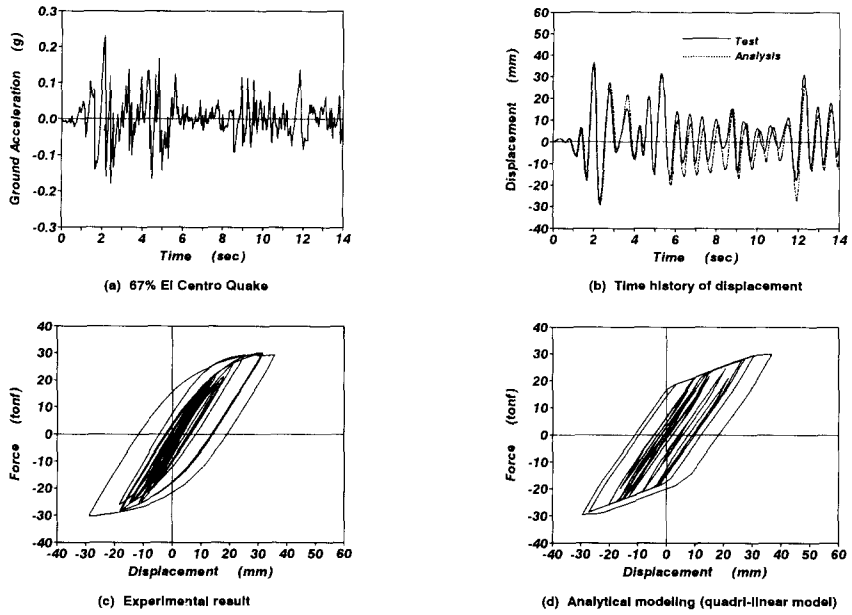


그림 9 67% El Centro 지진파를 이용한 유사동적 실험과 해석결과

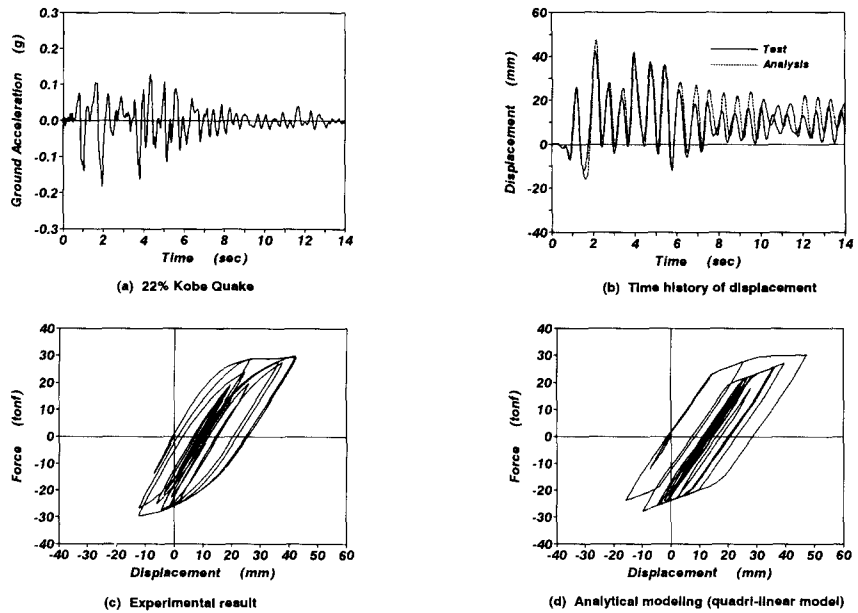


그림 10 22% Kobe 지진파를 이용한 유사동적 실험과 해석 결과

를 각각 보여준다. 실험과 해석 결과는 비교적 일치하나 실험체가 소성 상태로 넘어간 후 다소의 차이가 관찰되었다. 이 문제점은 실험체의 실제 탄-소성 거동과 이것의 DRAIN-2DX 해석 모델링 사이의 피할 수 없는 차이와 가력기의 가력 속도가 다소 느리기 때문에 실험체가 소성 변위 상태로 넘어간 후 각 수치해석 시간단계 Δt 동안 실험체와 가력기 사이에 힘 이완(force relaxation) 현상이 생겼기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

유사동적 실험법은 준정적 실험과 수치적분을 병행하여 실험체의 동적 효과를 얻어내는 기법이다. 따라서 이 실험법의 성공 여부는 수치적분 과정을 통하여 계산된 변위의 정확한 제어와 이에 따라 발생한 실험체의 복원력의 정확한 계측이다. 그 동안 유사동적 실험법에 적합한 수치 적분법은 Newmark의 알고리즘을 근간으로 계속 발전해 오고 있다. 따라서 계측 기기의 입력신호와 출력신호 사이의 관계를 결정하는 calibration, 응답속도, 그리고 가장 중요한 분해능력 등에 기인하는 실험 수행 중의 여러 오차들의 최소화가 유사동적 실험법에서 가장 중요하다. 이 문제에 대한 해결책은 여러 계측, 제어 기기 들에 대한 지식과 경험이 많은 엔지니어의 도움으로 원하는 계측, 제어의 범위에 적합한 실험장비들의 선택이 중요하다.

참 고 문 헌

1. Clark, A., French, C.W., and Leon, R., "Earthquake Testing Methods for Structures-Examples of Current Practice and Future directions," *Proceedings of the International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design*, Berlin, 13-16 June, 1989, pp. 409-418.
2. Aktan, H.M., "Pseudo-dynamic Testing of Structures," *J. of Engrg. Mech.*, ASCE, vol. 112, No. 2, February, 1986, pp. 183-197.
3. Mahin, S.A., and Shing, P.B., "Pseudodynamic Method for Seismic Testing," *ASCE, J. of Structural Engrg.*, Vol.III, No.7, July, 1985, pp. 1482-1503.
4. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995, 729pp.
5. Takanashi, K., and Nakashima, M., "Japanese Activities on On-line Testing," *ASCE, J. of Engrg. Mech.*, Vol.113, No.7, July, 1987, pp. 1014-1032.
6. Mahin, S.A., Shing, P.B., Thewalt, C.R., and Hanson, R.D., "Pseudodynamic Test Method-Current Status and Future Directions," *ASCE, J. of Structural Engrg.*, Vol.115, No.8, August, 1989, pp. 2113-2128.
7. Prakash, V., Powell, G.H., Campbell, S.D., and Filippou, F.C., *Drain-2dx User Guide*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California 1992.
8. Morris, A.S., *The Essence of Measurement*, Prentice Hall, 1996, 221pp.
9. *Flex TestTM IIm 2.0B Program for Pseudodynamic Testing*, MTS System Corporation. 1996.
10. Shing, P.B., Vannan, M.T., and Cater, E., "Implicit Time Integration for Pseudodynamic Tests," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, 1991, pp. 551-576.
11. 김남식, "기초 분리된 액체저장탱크의 지진 거동 분석을 위한 유사동적 실험", 박사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 1994, 125pp.