한국전산구조공학회
1998년도 가을학술발표회 논문집

부분구조 유사동적법에 있어 다자유도 시스템에 대한 수정 시간증분 조정기법

MODIFIED POSTERIOR TIME-STEP ADJUSTMENT TECHNIQUE FOR MDOF SYSTEM IN SUBSTRUCTURING PSEUDODYNAMIC TEST

이 원호* 강 정호**
Yi, Waon-Ho Kang, Joung-Ho

ABSTRACT

The substructuring pseudodynamic test is a hybrid testing method consisting of a numerical simulation of the earthquake response of an analytical model and a loading test of a specimen. The substructuring pseudodynamic testing technique has been applied to various seismic experiments since it has advantages over the shaking table test to study dynamic behaviors of relatively large scale structures. However, experimental errors are inevitable in substructuring pseudodynamic testing. Some of these errors can be monitored during the test, but, due to limitations in control system, they cannot be eliminated. For example, one cannot control exactly the displacements that are actually imposed on the structures at each time step. This paper focuses on a technique to minimize the cumulative effect of such control errors for MDOF system. For this purpose, the modified posterior adjustment of the time increment from a target value Δt_n to an adjusted value is performed to minimize the effect of the control errors for MDOF system.

1. 서론

일반적으로 구조설계시 사용되는 탄성해석 기법은 구조물이 탄성범위 내에서 거동할 경우에만 적용 가능하나, 일반적인 지진발생의 경우에 있어 구조물의 비탄성 거동은 매우 복잡하며 또한, 구조물의 복원력 특성, 동적 응답 그리고, 구조물의 종국하중 및 파괴 현상 예측에는 사용될 수 없다. 이러한 사항들은 반드시 실험을 통해 규명되어야 하며 설계시 실험 결과에 의해 얻어진 대비책이 반영되어야 할 것이다. 특히 구조물의 지진에 대한 검토방법으로서는 진동대(shaking table)를 이용한 지진응답 실험기법이 가장 바람직하고 신뢰성 있는 실험기법이다. 그러나, 고가의 장비 설치비가 필요함에 따라 보편화 되어있지 못하고, 지진응답을 모의 실험하기 위한 구조물의 무게 및 크기 등의 진동대 용량제한에 따른 실험체의 제약조건으로 인해 이를 대체할 수 있는 간편한 내진 실험기법이 요구되고 있다. 구조물의 비탄성 변형에 의한 에너지 소산능력과 비탄성 거동의 파악과 붕괴기구 메커니즘을 평가 비교하는데 있어 Pseudo-Dynamic 실험기법은 가장 경제적이며 간편한 실험기법이다. 이 기법에 있어 실험체에 가해지는 변위이력은 측정된 실험체의 동적 특성치와 특

* 정회원, 광운대학교 건축공학과 교수
** 학생회원, 광운대학교 건축공학과 석사과정

정한 지진기록에 의해 실험과정에서 컴퓨터에 의해 결정되고 있다. 즉, 컴퓨터와 실험장치가 서로 보완적인 역할을 수행한다. 그러나, 유사동적 해석법에 있어 실험오차는 구조물의 거동에 있어 오차의 축적효과를 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에 있어서는 실험에 있어 발생되는 제어오차 즉, 유압가력장치(hydraulic actuator)의 제어부족으로 발생되는 제어 오차를 제거하는 것에 연구의 초점을 맞추었다.

2. 유사동적 실험에 있어 부분구조 기법의 기본개념

유사동적 실험은 구조물의 지진응답을 실험하기 위한 좋은 방법이지만 실제 응용에 있어서는 여러 문제가 있다. 즉, 구조물 전체의 모델화에는 많은 비용과 대규모의 실험장비가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 축소모델 실험을 실시하지만 축소 모형을 사용함에 따라 여러 문제가 발생된다. 이런 문제를 해결하기 위해 부분구조 기법의 사용이 최근 들어 증가되고 있다.

이 기법의 기본 개념으로 그림 1에서와 같이 전체 구조물을 크게 두 부분으로 분리할 수 있다. 즉, 실험체 전 부분을 제작하여 실험하는 것이 아니라 이력 거동(hysteretic behavior)이 복잡한 부분에 대해서 실험체를 제작하여 실험을 적용하는 실험부(test part)와 실험체를 제외한 나머지 부분에 대해서 적절한 모델링을 가정하여 수치해석을 실시하는 계산부(numerical part)로 구분된다. 이러한 부분구조 기법은 기존 유사동적 실험법에 비해 실험체 제작비용을 크게 줄일 수 있으며, 실험실 공간이나 유압 가력기의 용량 등과 같은 실험장비 비용을 크게 줄일 수 있다. 이러한 여러 가지 장점은 대형 구조물의 실험을 가능하게 하여 대규모 실험이 가능하다.

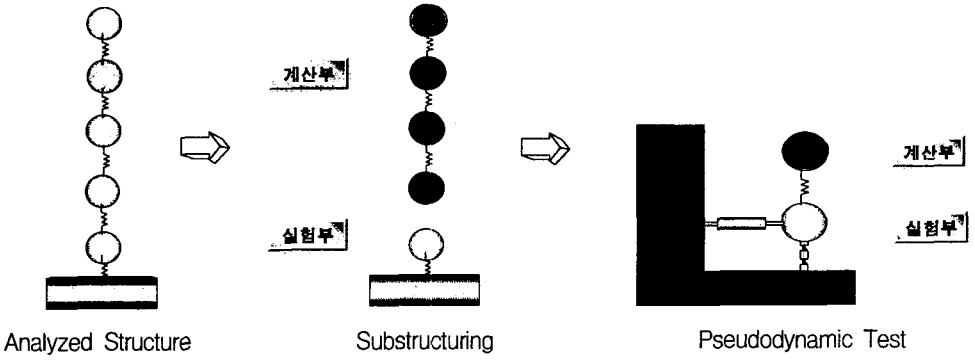

그림 1. 유사동적 실험에 있어 부분구조 기법의 개념

3. 수치적분법

3.1 시간증분 조정기법의 기본 개념

유사동적 실험에 있어 적분법은 Δt의 크기에 의해 각 시간단계에 따라서 진행된다. 각 시간단계의 시작점에서의 변위, 속도, 가속도 및 복원력으로부터 적분 기법을 사용해 시간 단계의 끝점에서 변위를 계산할 수 있다. 각 시간단계에서 계산된 변위는 $\mathbf{d}_{desired}$로서 표현되고 시간증분 Δt에 대한 함수로서 나타내면 아래와 같다. 즉

$$\mathbf{d}_{desired} = \mathbf{d}_{measured}(\Delta t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

예상변위($\mathbf{d}_{desired}$)와 유압가력기 의해 구조물에 가해진 변위를 측정한 측정변위($\mathbf{d}_{measured}$)의 차는 제어오차로 정의되며, 다음 시간단계에서의 계산에 있어서는 측정변위 보다는 예상변위를 사용하는 것이 더욱 유리하게 된다. 즉, 수치적분시 측정변위는 사용되지 않으며, 다만 제어오차 보상기법(error compensation scheme)에서의 사용은 가능하다. 조정된 시간증분에 따른 예상변위가 가능한 한 측정변위에 가깝도록 시간증분이 조정되어야 한다. 즉, 다음의 제어오차가 최소가 되도록 조정된 시간증분 $\Delta t_{adjusted}$가 결정되어야 한다.

$$e(\Delta t_{adjusted}) = \mathbf{d}_{measured} - \mathbf{d}_{desired}\ (\Delta t_{adjusted}) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

3.2 Flow Diagrams의 설명

그림 2는 Newmark의 외연적 시간 적분법에 대한 기본 개념을 나타내고 있다. 그림 2에 있어서 두꺼운 선은 실험동안 계속적으로 흐르는 전기적 신호를 나타내며 반면, 가는 선은 매 시간단계에 있어 한번만 실행되는 것을 나타낸다. 부분구조 유사동적 실험에 있어, 두꺼운 선은 모두 아날로그 신호를 나타낸다. 만약 디지털 제어가 사용된다면 Inner control loop에 있어서 영향을 미치지 않는다. 즉, 유압가력기의 응답에 대한 리프레쉬 시간(refresh period)에서 연속적으로 흐르는 신호는 디지털 신호로 바꾸어지게 된다. 그림 2에 있어 왼쪽 첨자는 신호양의 차를 구별하기 위해 사용되며 만약 실험오차가 발생되지 않는다면, 왼쪽 첨자는 모두 같게 된다.

Actuator와 Structure box에는 Actuator와 Structure 뿐만 아니라 하중계 및 변위계 그리고 아날로그와 디지털의 변환기 등을 포함한다. Inner control loop에 있어 유압가력기의 직접 제어에 사용된 피드백(feedback)은 변위계로부터 측정되며 왼쪽 위 첨자 1로 표현된다. 각각의 변위는 두 개의 분리된 변위계로부터 측정되며, 이 변위는 각각 ${}^1\mathbf{d}_n$과 ${}^2\mathbf{d}_n$로 표현된다. 또한 변위 ${}^2\mathbf{d}_n$과 복원력 ${}^2\mathbf{s}_n$은 A/D변환기에 의해 변환되면서 약간의 오차가 발생되며, 왼쪽 첨자는 2에서 3으로 변환된다.

$t = t_0$에서 초기 속도와 변위는 0이며, 가속도는 운동방정식으로부터 다음과 같이 계산된다.

$${}^i\mathbf{d}_0 = {}^i\mathbf{v}_0 = {}^i\mathbf{s}_0 = 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

$${}^5\mathbf{a}_0 = \mathbf{M}^{-1}\,\mathbf{F}_0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

목표 값의 시간단계인 Δt를 사용해 다음단계 ${}^4\mathbf{d}_{n+1}$의 예상변위 값을 계산하기 위해 n=0을 갖고 Computational box로 들어 가게된다.

다음 단계에서는 제어오차의 보상기법이 사용된다. 이 기법은 명령신호 ${}^6\mathbf{d}_n$과 측정변위 ${}^3\mathbf{d}_n$의 차를 제어오차 보상기법을 통해 제거한다. Computational box로부터의 명령신호는 ${}^6\mathbf{d}_n$으로부터 ${}^6\mathbf{d}_{n+1}$로 점진적으로 증가된다. 그리고 이것은 아날로그인 ${}^7\mathbf{d}$로 변환되며, 유압가력기를 작동하게 한다. 피드백 ${}^1\mathbf{d}$가 아날로그 명령신호 ${}^7\mathbf{d}$와 같아지면 유압가력기의 작동이 멈추게 된다.

제어오차 때문에 측정변위 ${}^3\mathbf{d}_n$ 그전에 계산된 예상변위 ${}^4\mathbf{d}_n$과 같지 않고, 그러므로 조정된 시간 단계 $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$이 측정변위와 조정 시간단계의 최소값에 따른 예상변위의 차로서 구해진다. 최소화 기법으로서 다음과 같은 Norm이 사용되었다.

$$\| (\ ) \| = \sqrt{(\ )^T\,\mathbf{G}\,(\ )} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

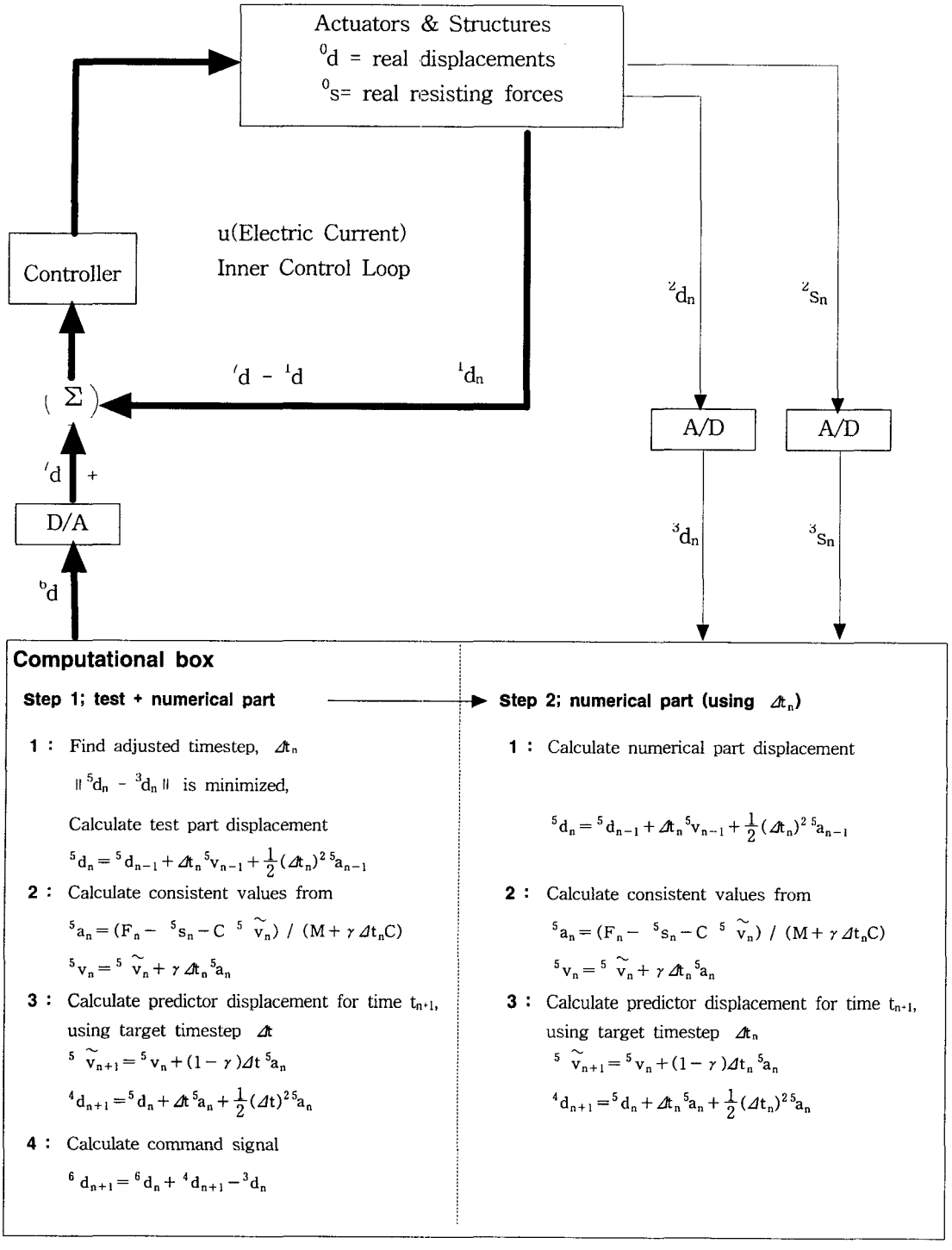

그림 2. Newmark의 외연적 적분법에 기초한 부분구조 유사동적 실험법

여기서, G는 Symmetric positive-definite weighting matrix이고, 본 연구에 있어서는 단위행렬이 사용되었다. 시간단계 Δt_n의 최저값이 음의 값을 갖는 것을 방지하기 위해 최저값의 한계를 다음과 같이 정의하였다. (Δt_{min}, Δt_{max}) = [(1- θ) Δt, (1+ θ) Δt], 여기서 θ는 1/2를 사용하였다.

3.3 실험오차에 대한 수정 시간증분 조정기법

유사동적 실험에 있어 발생되는 실험오차는 여러 가지의 형태가 존재하게 되며, 본 연구에 있어서는 구조물에 큰 영향을 미치는 제어오차에 초점을 두고 있다. 즉, 제어오차는 ${}^1\mathbf{d} - {}^7\mathbf{d}$의 불균형 전압을 완전히 제거하는 제어시스템이 없기 때문에 발생되며 만약 모든 오차가 0이면 ${}^0\mathbf{d}_n = {}^1\mathbf{d}_n = {}^2\mathbf{d}_n = {}^3\mathbf{d}_n$과 ${}^0\mathbf{s}_n = {}^1\mathbf{s}_n = {}^2\mathbf{s}_n = {}^3\mathbf{s}$ 그리고 ${}^6\mathbf{d}_n = {}^7\mathbf{d}_n$이 된다.

부분구조 유사동적 실험에서 사용되는 최소 제어변위 δ_{min}은 유압가력기의 전체 스트로크(λ) 와 D/A 변환보드의 변환능력(2^n)으로부터 다음과 같이 결정된다.

$$\delta_{min} = \frac{\lambda}{2^n} \quad \cdots\cdots(7)$$

변위 증분이 δ_{min}보다 작을 경우, 유압가력기로는 제어할 수 없게 된다. $\mathbf{d}_{desired} - \mathbf{d}_{measured} < \delta_{min}$일 경우 유압가력기는 Undershooting되었다고 하며, 이때의 오차인 Undershooting error를 제어오차로 채택하였다. 유압가력기는 μ에 의해 예상변위 증분이 Undershoot되는 것으로 가정하였다.

$${}^4\mathbf{d}_{n+1} - {}^3\mathbf{d}_n = (1+\mu)({}^6\mathbf{d}_{n+1} - {}^6\mathbf{d}_n) \quad \cdots\cdots(8)$$

여기서, Overshoot에 대해서 μ는 양의 값을 나타내고, Undershoot에 대해서는 음의 값을 나타낸다. 일반적으로 Overshoot는 에너지 소산효과를 일으키는 반면, Undershoot 현상이 발생하면 실제 실험체에 발생한 복원력보다 작은 값이 측정되어 수치적분을 이용한 동적응답에 에너지 부가효과를 가져오며, 또한 축적효과로 인해 커다란 오차를 나타낸다.

이러한 오차는 SDOF 시스템에 있어서 기존의 시간증분 조정기법(posterior timestep adjustment technique; PTA)에 의해 완전히 제거되었으나, MDOF 시스템에서 제어오차의 효과는 완전히 제거되지는 못하였다. 왜냐하면 다자유도에 있어서 제어오차 ${}^5\mathbf{d}_n - {}^3\mathbf{d}_n$은 벡터이고, Δt_n은 스칼라이기 때문이다. 또한, 부분구조 유사동적 실험에 있어서 제어오차는 실험부에서만 발생되고 계산부에서는 발생되지 않는다. 그러나 기존의 시간증분 조정기법에 있어서는 계산부와 실험부에 제어오차 최소기법을 동시에 적용하였다. 즉, 실험부만 있고 계산부가 없는 SDOF 시스템에 대해서는 제어오차를 완전히 제거할 수 있었지만, 실험부가 하나이고 계산부가 여러 개인 다자유도 시스템에서는 계산부에 발생된 제어오차를 어느 정도 줄일 수는 있었지만 완전히 제거할 수는 없었다.

따라서, 아래의 그림 3은 이러한 기존의 시간증분 조정기법의 문제점을 줄이기 위해 실험부에 발생된 제어오차를 제거하기 위하여 시간증분 조정기법을 적용하고, 이때에 결정된 시간증분을 이용하여 계산부의 변위를 계산하는 수정 시간증분 조정기법 (modified posterior timestep adjustment technique; MPTA)이라는 새로운 기법을 도입하였다.

그림 3의 Step 1에서는 Newmark 외연적 적분법을 이용해 예보변위(predictor displacements)를 결정하고, 결정된 변위에 제어오차를 도입하여 유압가력기를 통해 실험체에만 작용시킨다. 실험체에 가해진 변위는 변위계를 통해 측정되고, 측정변위는 시간증분 수정기법을 통해 제어오차를 제거하고 실험부에 대한 최적의 Δt_n이 산출된다. 이렇게 산출된 Δt_n을 이용해 실험부에 대한 변위(${}^5\mathbf{d}_n$)가 결정된다. 이와 같은

방법으로 실험체에 대한 변위가 결정되면 Step 2로 이동되어 시간증분 수정기법을 통해 얻은 Δt_n을 갖고 계산부에 대한 예보변위가 결정된다. 계산부에 있어서는 제어오차가 발생되지 않으므로 시간증분 수정기법을 적용할 필요가 없게 된다. 따라서 Step 2에서는 Step 1의 실험부에서 결정된 조정 시간증분 Δt_n을 이용해 계산부에 대한 변위(^5d_n)를 결정할 수 있다. 이러한 과정을 통해 하나의 시간단계에 대한 해석이 끝나며, 각 시간단계는 점진적으로 증가되면서 Step1, Step2의 각 Cycle을 통해 각각의 시간단계별로 변위를 결정하여 실험을 종료하게 된다.

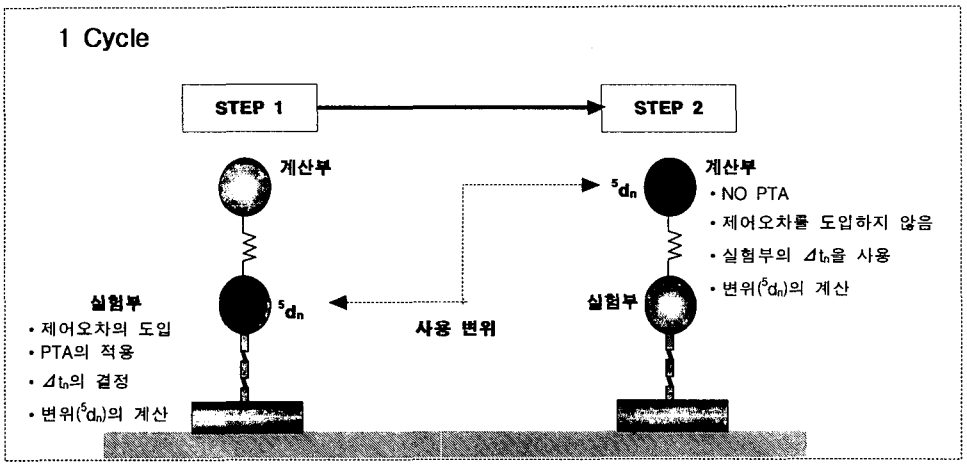

그림 3. 수정 시간증분 조정기법의 기본 개념

4. 수치해석 예제

수정 시간증분 조정기법의 효용성을 검증하기 위해 고유진동수가 19.58 rad/s와 96.85 rad/s인 2DOF 시스템과 6.01 rad/s와 20.00 rad/s 그리고 40.79 rad/s인 3DOF의 다자유도 시스템에 대한 수치적 모의 실험을 아래와 같은 조건하에서 행하였다.

1) 제어오차의 도입, 시간증분 조정기법을 적용한 경우 (PTA)
2) 제어오차의 도입, 수정 시간증분 조정기법을 적용한 경우 (MPTA)
3) 제어오차의 도입, PTA 또는 MPTA를 적용하지 않은 경우 (NO PTA)
4) 제어오차를 도입하지 않은 경우 (ZERO ERROR)

각각의 시스템에 있어 Δt = 0.02s를 사용하였고 제어오차는 Undershoot 10%를 적용하였다. 이것에 대한 해석 결과는 그림 5와 그림 6에 표시하였다. 해석결과를 보면 수정 시간증분 조정기법을 적용하지 않을 경우 커다란 오차를 보인 반면 수정 시간증분 조정기법을 사용했을 경우는 Zero error에 근접해 제어오차가 거의 제거되었음을 나타내고 있다. 그림 7에 있어서는 3DOF 시스템에 있어 기존의 시간증분 조정기법과 수정 시간증분 조정기법에 의한 변위를 비교한 결과, 0sec에서부터 2.5sec까지는 서로 비슷한 결과를 나타내고 있으나 2.5sec 이후에는 기존의 시간증분 조정기법에 의한 변위는 제어오차를 도입하지 않은 해석결과(ZERO ERROR)와 현격한 오차를 나타낸 반면, 수정 시간증분 조정기법에 의한 변위는 제어오차를 도입하지 않은 해석결과에 근접함을 나타내고 있다. 따라서, 다자유도 시스템에 있어 제어오차는 수정 시간증분 조정기법을 사용함으로서 거의 제거되었음을 나타내고 있다.

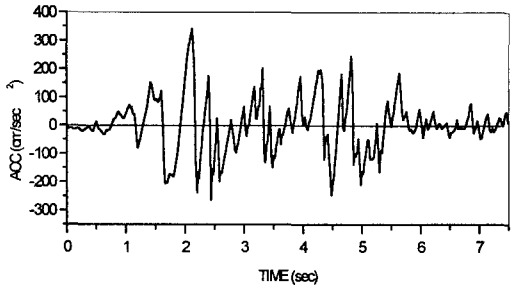

그림 4. 1940년의 El Centro 지반운동
N-S 방향

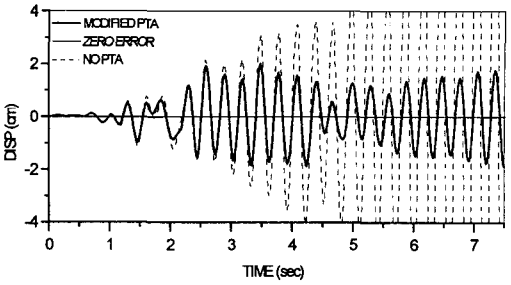

그림 5A. 2DOF시스템에 있어 DOF2에
대한 변위-응답곡선

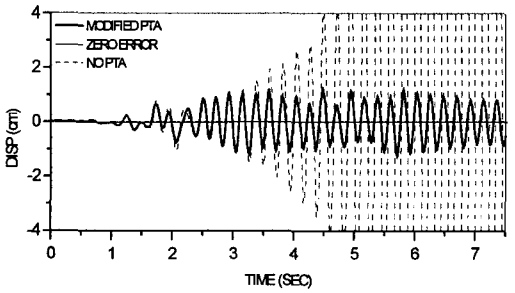

그림 5B. 2DOF시스템에 있어 DOF1에
대한 변위-응답곡선

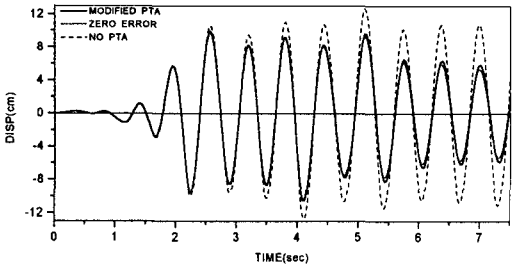

그림 6A. 3DOF시스템에 있어 DOF3에
대한 변위-응답곡선

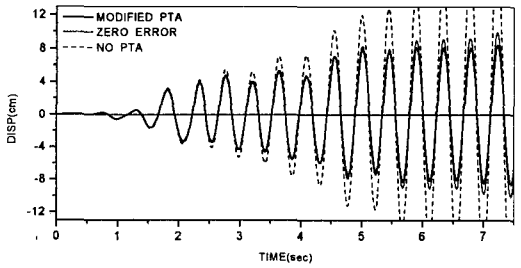

그림 6B. 3DOF시스템에 있어 DOF2에
대한 변위-응답곡선

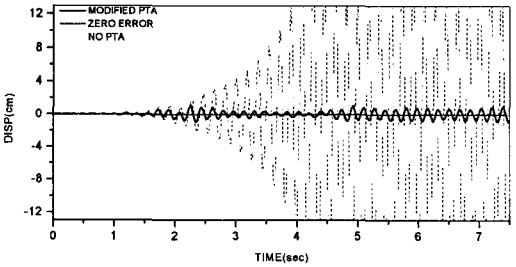

그림 6C. 3DOF시스템에 있어 DOF1에
대한 변위-응답곡선

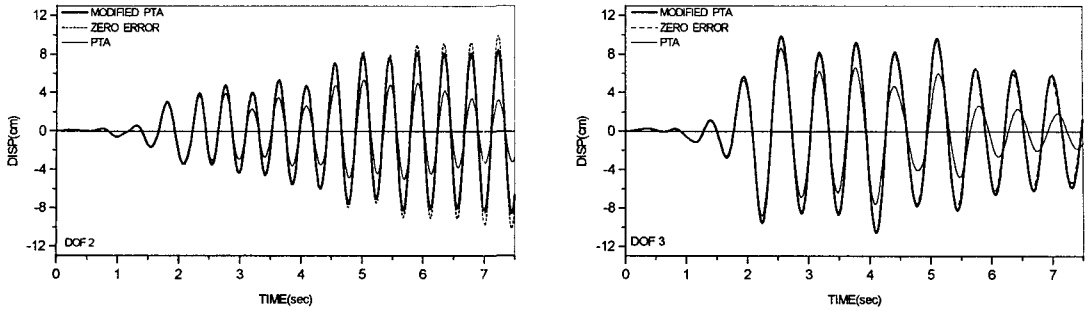

그림 7. 3DOF시스템에 있어 PTA기법과 MPTA기법의 변위-응답곡선

5. 결론

기존의 시간증분 조정기법으로 줄일 수 없었던 제어오차의 효과를 제거하기 위해 수정 시간증분 조정기법을 부분구조 유사동적 실험법에 적용하였다. 기존의 시간증분 조정기법을 수정한 수정 시간증분 조정기법의 효용성을 증명하기 위해 수치적 모의 실험을 행한 결과, 다자유도 시스템에 있어 조직적 오차의 한 부분인 제어오차가 크게 줄어 부분구조 유사동적 실험에 있어서 수정 시간증분 조정기법을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 1997년도 해외방문연구 (도쿄대학 생산기술연구소, 나카노교수)의 일환으로 수행된 연구로서 초대형 구조시스템 연구센터 및 도쿄대학 생산기술연구소에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Peek, R. and Yi, W.H. (1990a), "Error Analysis for the Pseudodynamic Test Method; Part I - Analysis," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 7, pp.1618-1637.
2. Peek, R. and Yi, W.H. (1990b), "Error Analysis for the Pseudodynamic Test Method; Part II - Application," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No. 7, pp.1638-1658.
3. Yi, W.H. (1991), "Towards Reducing the Effects of Control Errors in Pseudodynamic Testing: Formulation, Implementation, and Evaluation," Report No. UMCE 91-2, Department of Civil Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, M.I.
4. Yi, W.H. and Peek, R. (1993), "Posterior Time-Step Adjustment In Pseudodynamic Testing," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, No. 7, pp.1376-1386.
5. Nakashima, M., Ishida, M., and Ando, K. (1990), "Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test (Pseudo Dynamic Test with Substructuring Techniques)," Journal of Structural and Construction Engineering, No.417, November 1990, pp.107-117 (in Japanese).