

PSEUDODYNAMIC TEST METHOD

이 승 준*

1. 서언

지진 하중에 대한 구조물의 거동은 많은 연구가 필요한 분야임은 의심할 여지가 없으며, 실제로 세계의 많은 과학자와 기술자들이 다양한 형태의 구조부재, 구조시스템의 내진거동에 관한 연구에 종사하고 있다. 일반적으로, 지진에 대한 구조물의 거동에 관한 연구는 두가지로 분류될 수 있다. 즉, 해석적인 연구와 실험적인 연구이다. 해석적인 연구는 수학과 역학을 이용한 순수 이론적인 연구로 부터 Digital Computer를 이용한 수치해석에 이른다. 최근에는 전자분야의 급속한 발전으로 수치해석법을 이용한 연구가 많아지고 있다. 실험적인 연구는 오랜 역사를 갖고 있으며 지진공학의 발전에 매우 큰 공헌을 하여왔다. 전자공학과 역학의 발전에 힘입어 실험의 기술은 크게 변화되어 오고 있다. 현재, 하중을 가할 수 있는 Actuator와 Actuator를 제어할 수 있는 전자장치의 발전으로 실물크기의 대형 구조물을 실험할 수 있는 대형 Shaking Table을 세계 여러 곳에서 볼 수 있다. 이렇게 해석적인 방법과 실험적인 방법의 발전으로 지진하중에 대한 구조시스템의 거동에 관한 지식은 확대되었다.

1974년, 구조시스템의 지진에 대한 거동을 연구하기 위한 새로운 기술이 개발되었다.¹⁾ 이 기술은 수치해석법을 이용하여 실험을 하는 방법으

로 Pseudodynamic(PSD) Test Method, Hybrid Experimental Method 또는 Computer On-Line Test Control Method라 불린다. PSD Test Method는 Time Domain에 대하여 구조시스템의 내진거동을 시뮬레이션할 수 있으며 Shaking Table Test보다 여러가지 장점이 있음이 알려져 왔으며, 미국, 일본 그리고 유럽에서 많은 과학자들이 다양한 구조시스템의 지진에 관한 특성을 연구하기 위해 PSD Test Method를 이용하고 있다.^{2), 3)}

2. PSD Test Method의 개념

PSD Test Method는 구조물의 지진에 대한 거동을 시뮬레이션하기 위한 기술로서 기본적인 개념은 구조물의 Motion의 Equation들을 Direct Integration Method를 이용하여 Computer에서

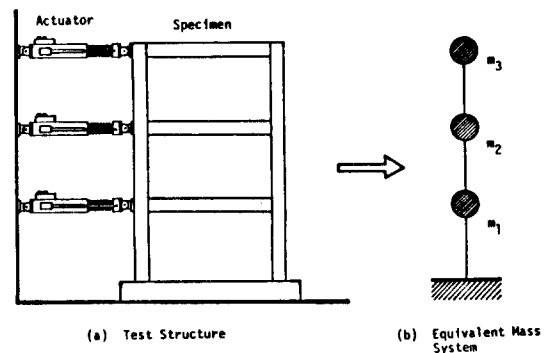


그림 1. Representation of Pseudo-Dynamic Testing

* 정회원, 학술이사, 아주대학교 건축학과 조교수, 공학박사

풀고 이 결과를 실험에 명령하므로써 Time Domain 에 있는 구조물을 실험하는 것이다. 개략적인 과정은 다음과 같다. 대상구조물이 실험실에 설치된 후 그림 1.과 같이 구조물은 Discrete Mass 시스템으로 가정되고 하중을 가할 수 있는 Actuator가 각 Mass의 위치에서 연구하고자 하는 구조물의 내진거동의 방향으로 설치된다.

이 구조물의 지진에 대한 Motion의 Equation 은 Matrix 형태로 쓰면,

$$[m] \{\ddot{X}_i\} + [c] \{\dot{X}_i\} + \{\bar{F}_i\} = -[m] \{1\} \ddot{X}_g \quad (1)$$

이 되고 여기에서 $\{\ddot{X}_i\}$, $\{\dot{X}_i\}$, $\{X_i\}$ 는 각각 i^{th} -step 에서 Discrete 시스템의 가속도, 속도, 변위 벡터를 나타내며 $[m]$, $[c]$ 는 구조물의 Mass와 Viscous Damping Matrix이고, $\{\bar{F}_i\}$ 는 i^{th} -step에서 구조물의 Restoring Force 벡터(Stiffness Values)이다. 이 식(1)은 Viscous Damping을 적절하게 가정 한 후 Direct Integration Method를 이용하여 풀 수 있다. 이 과정에서 Restoring Force는 가정된 것이 아니고 각 Step마다 실험으로 부터 직접 측정된다. PSD Test Method에서는 식(1)을 풀기 위해 Central Difference Method를 이용하는데 i^{th} -step에서의 가속도 벡터 $\{\ddot{X}_i\}$ 와 속도

벡터 $\{\dot{X}_i\}$ 는 $(i-1)^{th}$ -step, i^{th} -step, $(i+1)^{th}$ -step에서의 변위 벡터 $\{X_{i-1}\}$, $\{X_i\}$, $\{X_{i+1}\}$ 로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$\{\dot{X}_i\} = 1 / (2\Delta t) \cdot (\{X_{i+1}\} - \{X_{i-1}\}) \quad (2)$$

$$\{\ddot{X}_i\} = 1 / (\Delta t^2) \cdot (\{X_{i+1}\} - 2\{X_i\} + \{X_{i-1}\}) \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입한 후 $(i+1)^{th}$ -step에서의 변위 벡터 $\{X_{i+1}\}$ 을 구해 보면,

$$\{X_{i+1}\} = ([m] + \Delta t / 2 \cdot [c])^{-1} \cdot \{2[m] \{X_i\} + (\Delta t / 2 \cdot [c] - [m]) \cdot \{X_{i-1}\} - \Delta t^2 \cdot (\{\bar{F}_i\} + [m] \{1\} \ddot{X}_g)\} \quad (4)$$

이 된다. 이 식에서, $(i+1)^{th}$ -step에서의 변위는 i^{th} -step에서 이미 알고 있는 지식을 이용해 구할 수 있음을 알 수 있고, 구조물은 $(i+1)^{th}$ -step의 변위 $\{X_{i+1}\}$ 로 Actuator에 의해 Quasi-statically 하중이 가해진다. 변위 $\{X_{i+1}\}$ 에 도달하면 Restoring Forces $\{F_{i+1}\}$ 이 Actuator Load Cell에 의해 측정된다. 이 방법을 반복하므로써 주어진 지진가속도 \ddot{X}_g 에 따라 실험은 계속된다. 이 Test Method의 Flow Diagram이 그림 2에 보여진다.

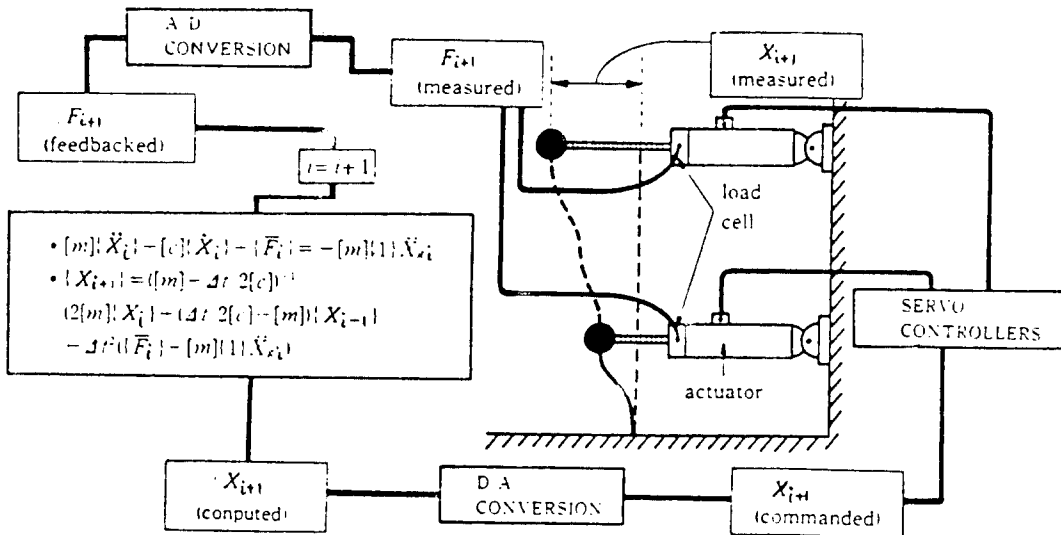


그림2. Basic Algorithm and Procedures of PSD Testing

3. PSD Test의 적용

PSD Test Method는 이 기술의 개발이 시작된 이후 여러 형태의 구조시스템에 적용되어 왔다. 초기에는 일본에서 매우 활발하게 연구되고 이 기술의 적용성을 확대시켰다. 구조물은 간단한 형태에서 최근에는 매우 복잡한 실물 크기의 다층 건축구조물의 지진하중에 대한 실험을 하는데 적용되었다. 초기의 단층 철골 Frame의 실험에 PSD Test Method를 적용한 연구는 Tanakashi¹⁾와 Udagawa⁴⁾ 등에 의해 이루어 졌으며 Tanakashi⁵⁾는 PSD Test Method를 2층 철골 Frame의 실험에 적용하므로써 Multi Degree-Freedom의 실험으로 확장시켰다. 이 PSD Test Method는 Okada, Seki⁶⁾ 등에 의해 철근 콘크리트 Space Frame의 지진에 대한 거동의 실험에 적용되었고, Yamanouchi⁷⁾와 Kaminosono⁸⁾ 등에 의해 다층 구조물의 실험에 적용될 수 있는 가능성이 확인되었다.

이 PSD Test Method는 U.S.-Japan Cooperative Earthquake Research Program Utilizing Large Scale Testing Facilities에서 두 대형 구조물의 실험에 적용되었다. 첫번째 대형 구조물에는 적용은 2 span×3 span의 Shear Wall이 있는 7층 철근 콘크리트 건축 구조물의 실험이었다.⁹⁾ 이 실험에서 구조물은 Single Degree of Freedom으로 가정되고 횡하중은 역삼각형의 형태로 분포되었으며 Roof Floor에서의 Actuator에 의해 Control되었다. 두번째 적용은 실물크기의 2 span×2 span의 6층 철골 건축 구조물이었다.¹⁰⁾

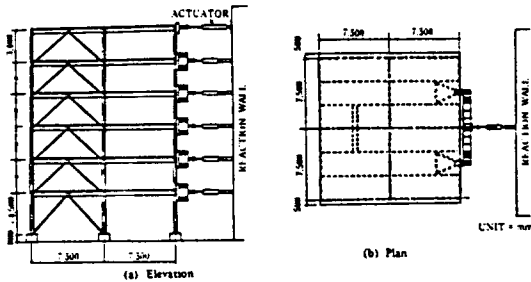


그림3. Full-Scale Six-Story Braced Frame

구조물의 Dimension과 Actuator의 위치가 그림 3에 나타나 있다. 이 구조물은 각층에 Mass가 집중되어 있는 6 Degree of Freedom으로 가정되었고 여러 단계의 실험이 수행되었다. 그림 4는 이 실험으로 부터의 결과와 해석적 연구의 결과를 함께 보여주고 있다.

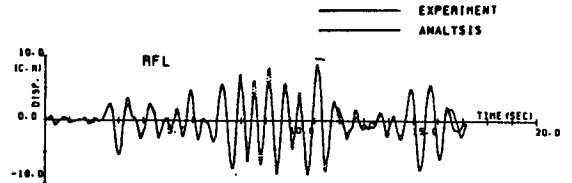


그림4. Time History of Roof Floor Displacement

4. PSD Test와 Reliability

앞에서 보여주듯이 PSD Test는 구조물의 지진에 대한 거동을 직접 시뮬레이션하기 위한 좋은 기술임이 확인되었다. 그러나, 이 Test는 많은 가정과 단순화에 의한 Approximate Method이고 또한 이 Method를 이용한 실험의 성공을 위하여는 정확하게 변위를 Control하고 정확한 Force를 측정해야 한다. 이 방법에 의해 얻어진 결과의 정확도를 평가하기 위해서 일련의 Shaking Table Test와 PSD Test가 수행되었다.

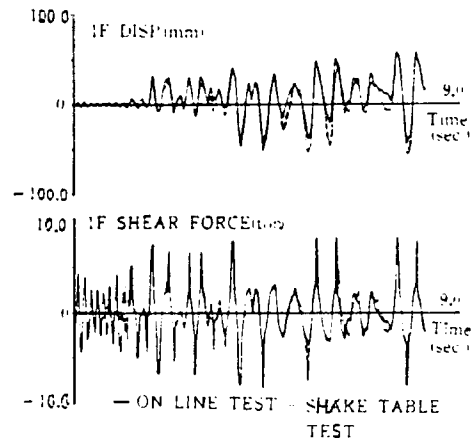


그림5. Comparison of Response Time History

그림5는 Yamazaki¹¹⁾에 의해 2층 철골 Frame 을 이용하여 수행된 Correlation Study의 결과이며 이 그림으로부터 PSD Test는 매우 정확하게 지진하중에 대한 구조물의 반응을 시뮬레이션 함을 볼 수 있다. 그러나 PSD Test로 부터 얻어진 결과를 평가하는데 Error를 수치적으로 제시해야 할 필요가 있다. 일반적으로, Error는 두 Group의 원인에 의한다고 생각된다. 첫째는 Intrinsic Error Sources이며 주요한 것은 다음과 같다.

(i) Continuum인 구조물을 Discrete 시스템으로 가정하는데 생기는 Error이다. (ii) Time Domain에 대하여 Motion의 Equations를 Discretization하고 Difference Equation에 의해 푸는 과정에서 생기는 Error이다. (iii) Damping을 속도에 비례하는 Viscous Damping으로 미리 가정하는데 생기는 Error이다. 그러나 Intrinsic Error는 PSD Test에 만 생기는 Error가 아니고 수치해석에서 나타나는 Error이며 이 Error를 줄이는 연구는 많이 수행되었다. 둘째는 Experimental Error Sources이다. 이 Error는 변위와 하중을 측정하고 다음 단계로의 명령을 수행하는데 완전하지 않은 Experimental Hardwares로 부터 생기는 Error이다. 최근에는 Hardware의 발전으로 이로 인한 Error가 크게 줄어 들었다. Nakashima, Kato, Mahin 등에 의한 연구에서 이에 관한 상세한 결과를 볼 수 있다.^{12, 13, 3}

5. PSD Test Method의 New Dimension - Substructuring Technique

PSD Test Method가 수치해석의 변형된 형태이고 실험에서 대상 구조물의 Restoring Forces를 Computer에서 가정하여 구하는 대신에 직접 측정함을 생각할 때, 대상구조물 전체를 실험체로 제작하지 않고 단지 우리가 Restoring Force Characteristics를 잘 모르는 구조물의 일부를 실험체로 제작하고 나머지 부분은 Computer에서 수치해석법에 의해 다루는 방법이다. 그림 6은 이 기술에 의한 Coupled Shear Wall 시스템의 실험을 보여준다. 전체 구조물을 실험하는 대신에 비선형 변형이 가장 많이 일어나고 따라서

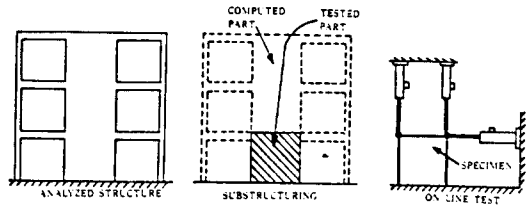


그림6. Concepts of Substructure PSD Test

Modelling 하기가 가장 어려운 부분인 1층 Shear Wall만을 실험하고 나머지 부분은 Computer에서 다루는 실험이 Okada와 Seki에 의해서 수행되었다.¹⁴⁾

Substructure Technique에 의한 SPD Test Method는 지진공학에 있어서 많은 가능성을 제시해 준다. 그러나 이 방법을 성공적으로 이용할려면 아직 해결해야 할 많은 문제점이 있다. Degree of Freedom 이 많아짐에 따라 Integration 과정에서 계속 Stable한 Condition을 유지해야 한다. 또한 실험체가 아닌 부분이 Computer에서 다루어지기 때문에 어느 Degree of Freedom에 따른 Mass가 적절하게 가정되지 않는 등의 문제점이 있다. Dermitzakis와 Mahin¹⁵⁾, Nakashima와 Takai¹⁶⁾ 등에 의해 이에 관한 연구가 수행되었다.

6. 결론

이 글에서 Pseudodynamic(PSD) Test Method의 발전 과정, 여러 구조 시스템에의 적용 예, 이 방법이 갖고 있는 문제점들, 그리고 앞으로 이 방법을 발전시킬 수 있는 분야등을 기술하였다. 이에 근거하여 PSD Test Method가 구조물의 지진에 대한 거동을 시뮬레이션 할 수 있는 Technique임을 알 수 있으며 따라서 앞으로의 발전을 위해 많은 연구가 필요한 분야이다.

참 고 문 헌

1. Takanashi, K., et al: "Seismic Failure Analysis of Structures by Computer-Pulsator On-Line

- System", J. of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol. 26, No.11, Dec. 1974.
2. Hanson, R. D. and McClamrock, N. H. : "Pseudo Dynamic Test Method for Inelastic Building Response" Proc. 8th WCEE, San Francisco, CA, July 1984, Vol. 6.
 3. Mahin, S. A. and Shing, P. B. : "Pseudodynamic Method for Seismic Testing", J. of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, July 1985.
 4. Udagawa, K., Takanashi, K. and Tanaka, H. : "Non-Linear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer Actuator Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer Actuator On-Line System (Part 2 Response Analysis of One Bay-One story Steel Frames with Inelastic Beams)", Transaction of the Architectural Institute of Japan No. 268, June 1978.
 5. Takanashi, K., Udagawa, K. and Tanaka, H. : "Pseudo Dynamic Tests on a 2-Story Steel Frame by a Computer-Load Test Apparatus Hybrid System", Proc., 7th WCEE, Istanbul, Sep. 1980.
 6. Okada, J., Okada, K. and Seki, M. : "Response Test of RC Space Frame Under Biaxial Motion (Part 1 Testing Method)", Proc., Annual Meeting of the AIJ, Sep 1981.
 7. Yamanouch, H., et al. : "Feasibility Study of Pseudo-Dynamic Test Method by a Full-Scale Simple Structure", Proc., 8th WCEE, San Francisco, CA, July 1984.
 8. Kaminosono, T., Nakashima, M. and Isoishi, H. : "Study on Pseudo-Dynamic Test Method of Multi-Degree-Of-Freedom System", Proc., Annual Meeting of the AIJ, Sep. 1983.
 9. Kaminosono, T., et al : "U.S.-Japan Cooperative Research on R/C Full Scale Building Test, Part 1 Single Degree-Of-Freedom Pseudo-Dynamic Test", Proc., 8th WCEE, San Francisco, CA, July 1984, Vol. 6.
 10. Foutch, D. A., et al : "Summary of the Design and Construction of the Full-Sace Specimen and the Results of the Phase I Tests", Structures Congress III, ASCE Annual Convention, San Francisco, CA, Oct. 1984.
 11. Yamazaki, Y., et al : "Earthquake Response Simulation Capacity of Pseudo Dynamic Testing-Experimental Demonstration and Analytic Evaluation-", Proc. of the ASCE Eng. Mechanics Div. Specialty Conf. on Structural Dynamics, LA, CA, Mar. 1986.
 12. Kato, H., et al : "Simulation Accuracy of Computer-Actuator Online Testing", Proc. of the 7th Symposium on the Use of Computers in Building Structures, The AIJ, March 1985.
 13. Nakashima, M., et a : "Simulation of Earthquake Response by Pseudo Dynamic(PSD) Testing Technique (Part 3 Estimation of Response Errors Caused by PSD Test Control Errors)", Prod., Annual Meeting of the AIJ, Oct. 1985.
 14. Okada, J. and Seki, M. : "Nonlinear Earthquake Response of Equipment System Anchored on R/C Building Floor", Proc., 8th WCEE, San Francisco, CA, July 1984, Vol. 5.
 15. Dermitzakis, S. N. and Mahin, S. A. : "Development of Substructuring Techniques for On-Line Computer Controlled Seismic Performance Testing", UCB/EERC-85/04, EERC, U. of Ca., Feb. 1985.
 16. Nakashima, M. and Takai, H. : "Computer-Act Online Testing Using Substructure and Mixed Integration Techniques", Proc., of the 7th Symposium on the Use of Computers in Building Structures, The AIJ, March 1985.