

부분구조법에 의한 건축물의 국부진동해석 Substructuring technique for local vibration of building structures

이 동 근*
Lee, Dong-Guen

안 상 경**
Ahn, Sang-Kyoung

김 진 구***
Kim, Jin-Koo

ABSTRACT

Generally the excessive caused by isolated sources in localized to members closely located to the vibration sources. In this case it may not be economical to model the whole structure to obtain the responses of a specific member. In this study, a substructuring technique has been used for local vibration of a framed structure. The boundary conditions of members selected are determined by condensing the degrees of freedom of the remaining members. Fixed and hinged boundary condition are also assumed for comparison.

According to the results, the substructuring technique is quite efficient in predicting the responses of a structure on which the vibration source in located, but is not very reliable for the members located for away from the source.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 역사의 역할은 단순히 역으로서의 기능에서 탈피하여 상가 및 도시민의 생활공간으로서 복합적인 기능으로 확대되고 있다. 이러한 역사의 기능변화로 역사의 규모가 대형화됨에 따라 구조적 거동이 매우 복잡하게 되었고 대형 구조물의 장기적 안정성 및 사용성의 확보를 위한 유지관리 및 쾌적한 생활 환경에 대한 요구가 날로 증가되고 있다.

본 논문에서는 건축구조물의 국부진동을 효율적으로 해석하기 위하여 부분구조법을 이용하는 방법에 대하여 연구하였다. 역사구조물 내부에서 열차하중에 의해 유발되는 연직진동의 경우에는 역사구조물 전체에 진동이 발생하기보다는 열차의 선로가 설치된 인근부재에 국부진동의 형태로 주로 발생하게 되며, 열차하중의 위치 및 역사구조물의 강성과 질량의 분포에 따라서 구조물 전체로 진동이 확산되기도 한다. 국부진동에 의

* 성균관대학교 건축공학과 교수

** 성균관대학교 건축공학과 박사과정

*** 성균관대학교 건축공학과 전임강사

하여 영향을 받는 일부 부재를 분석하기 위해서 구조물 전체에 대하여 동적해석을 하는 것은 비경제적일 수 있다. 구조물의 국부진동 해석시 구조물의 거동은 인접부재들의 강성과 질량에 의하여 주로 좌우되며, 부분 구조물로 간략화 하여 해석하는 것이 경제적이다. 따라서 본 연구에서는 행렬응축기법에 의해 계산된 경계조건을 고려한 부분구조기법을 제시하였다.

2. 부분구조기법에 의한 국부진동해석

구조물의 국부진동 해석의 경우, 구조물의 거동은 주로 인접부재의 강성과 질량에 의하여 좌우된다. 그러므로 구조물 전체를 해석하는 것은 컴퓨터의 많은 계산시간과 기억용량을 요구하게 된다. 부분구조법은 전체구조물을 부분구조물로 간략화 하여 해석하는 방법이다. 전체구조물을 너무 간략화 시키면 중요모드가 소실되며 이것은 많은 해석오차를 가져오게 된다. 그러므로 최소한의 해석오차를 갖는 부분구조물의 모형화가 필요하다. 본 연구에서는 행렬응축기법에 의하여 계산된 경계조건을 사용하여 부분구조법을 제안하였다.

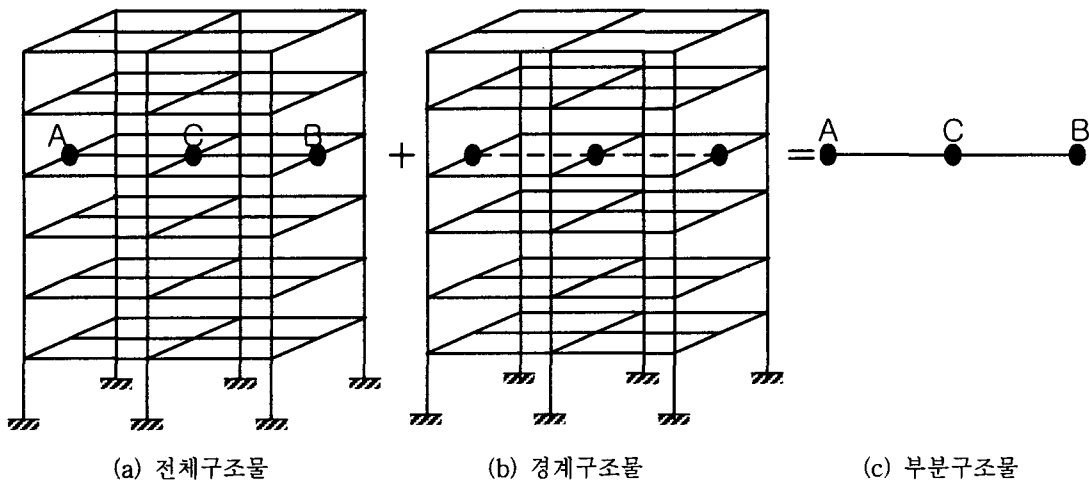


그림 1 경계조건을 고려한 3차원 골조구조물의 연직진동 해석모형

그림 1에 나타난 구조물을 부분구조물로 모형화 하여 동적해석을 수행 할 경우, 구조물의 규모가 커질수록 가장 해석에 많은 시간이 소요된다. 그러나 만약 그림 1(c)처럼 C점에 하중이 가해지고 부재 A-C-B만 해석할 수 있다면 해석이 한결 빨라질 것이다. 하지만 그림 1(c)와 같이 부분구조물로 모형화 하여 해석할 경우 가장 큰 문제점은 경계가 되는 A점, B점 및 C점에서의 경계조건이다. 예를 들면 경계가 되는 점을 고정지지로 모형화 하는 것과 단순지지로 모형화 하는 것이다. 그러나 일반적으로 구조물의 절점의 경우, 특히 다른 부재가 연결되어 있을 경우, 강성값을 정확히 고려할 수가 없다. 본 논문에서 제안한 부분구조기법은 이러한 어려움을 해결하면서, 부분구조물만으로 전체구조물의 특성을 효율적으로 나타낼 수 있는 방법이다.

본 논문에서 제안하고 있는 부분구조기법은 그림 1에서와 같이 국부진동이 발생하는 부재를 구조물로부터 분리하고 행렬응축기법을 부분구조물을 제외한 전체구조물(경계구조물 : boundary structure)에 적용하여 부분구조물과의 연결점 (A, C, B점)의 자유도 성분만을 남긴다. 이 자유도 성분에 대한 축소된 질량과 강성이 국부진동부재의 경계조건으로 사용된다. 동적해석을 위하여 정적 및 동적행렬응축기법을 이용하였다.

이상에서 언급한 방법에 의해 조합된 질량행렬과 강성행렬로부터 국부진동해석을 수행할 수 있다. 이 모형의 경우에는 전체 구조물의 구조요소를 요소 분할하여 해석하는 경우보다 질량 및 강성행렬의 크기가 매우 줄게 되므로 개인용 전산기로서도 실제의 복잡한 구조물을 해석할 수 있다. 전산기를 이용한 해석에서 저항행렬의 크기가 줄게 되며, 이에 따른 계산시간의 단축으로 인하여 경제적이며, 현실적으로 사용하기가 간편하다.

다음장에서 예제해석을 통하여, 본 연구에서 제시한 부분구조기법의 효율성을 검토하였다.

3. 예제 해석

3.1 예제구조물의 개요

본 논문에서 그림 2와 같은 3차원 골조구조물에 대하여 부분구조기법의 효율성을 검토하였다. 예제구조물은 7층의 철근콘크리트조 구조물로서 각 부재의 단면치수는 표 1과 같다. 동적해석에 사용한 질량은 구조물의 자중만을 고려하였다. 구조물의 감쇠비는 콘크리트구조물로 가정하여 5%로 하였다. 하중의 지속시간은 그림 6에 나타냈듯이 8초간 해석을 하였으며, 해석 시간간격은 0.02초로 하였다.

구조물 전체에 대하여 세분화한 모델을 정확해라 가정하고 국부진동모델과 가속도에 대하여 비교하였다. 여기서 경계조건의 중요성을 검토하고자 단순지지와 고정지지의 경계조건을 사용한 모델과 부분구조모델을 비교하였다.

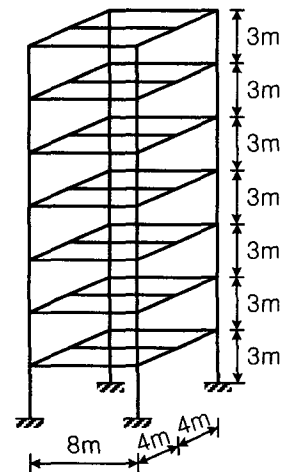


그림 2 예제 구조물

3.2 가진점의 진동해석

구조물 내부의 임의의 특정 보에 연직방향으로 진동하중이 가해져 국부진동이 발생할 경우 가진되는 보만을 가지고 부분구조물로 모형화 할 수 있다.

그림 3에서 S-1모델은 본 논문에서 제안하고 있는 행렬응축기법에 의해 얻어진 경계조건을 사용한 모형이다. H-1모델은 경계조건을 단순지지로, F-1모델은 경계조건을 고정지지로 둔 것으로, 가진되는 보만을 모형화 한 것이다.

그림 4는 가진되는 작은보와 이를 지지하고 있는 큰보까지를 모형화 모델이며, 그림 5는 큰보를 지지하는 기둥까지를 모형화 한 것이다. 그러므로 정확도 면에서는 그림 5에 나타낸 모델이 가장 좋은 결과를 나타내리라 예상된다.

그림 7은 재하점에서의 가속도에 대한 시간이력곡선이다. 구조물 전체를 요소분할하여 모형화한 모델의 동적해석결과를 정확해(그림 7(a))로 가정하여 본 연구에서 제시한 모델을 비교하였다. 또한 양단을 단순지지로 가정한 모델과 양단을 고정지지로 가정한 모델의 동적해석 결과를 가속도에 대한 시간이력곡선으로 나타내었다. 본 연구에서 제시한 S-1모델의 해석결과(그림 7(d))는 비교적 정확한 값을 보이고 있다. 그러나 경계조건을 고정지지로 가정한 F-1모델의 해석결과(그림 7(b))는 전체를 해석한 모델의 결과보다 작은 해석결과를 나타내는데 이것은 큰보의 강성을 과대평가하기 때문이다. 또한 구조물의 고유진동모드를 제대로 표현하지 못하는 이유로 다소 많은 오차가 발생하고 있다. 이것은 작은보가 큰보에 지지되어 있으므로 큰보에 발생하는 비틀림효과를 고려하지 못하기 때문이다. 따라서 단부를 단순지지로 가정한 H-1모델(그림 7(c))은

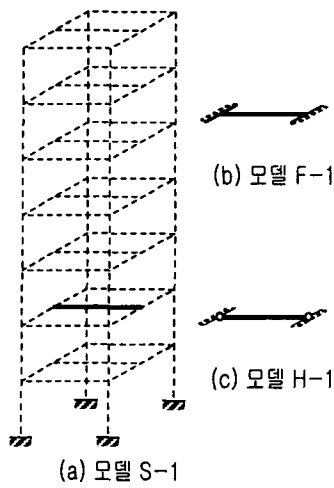


그림 3 부분구조 모델
(S-1, F-1, H-1)

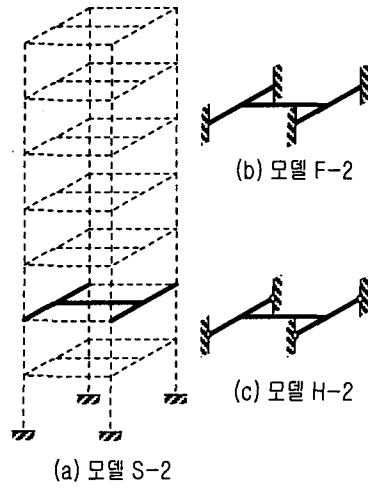


그림 4 부분구조 모델
(S-2, F-2, H-2)

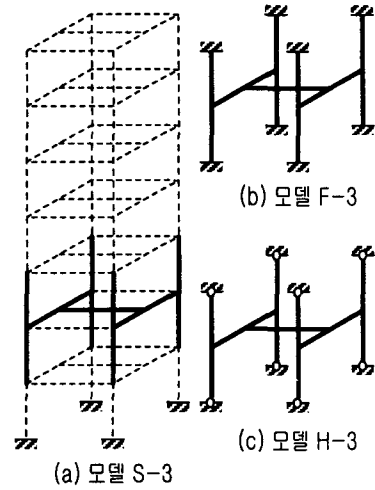


그림 5 부분구조 모델
(S-3, F-3, H-3)

단부를 고정지지로 한 F-1모델(그림 7(b))보다 구조물의 특성을 잘 표현할 수 있어, 해석결과에 있어서 F-1 모델(그림 7(b))보다 H-1모델(그림 7(c))의 결과가 더 정확하게 나타남을 알 수 있다.

전체구조물에 대하여 동적해석을 수행할 경우에는 전체자유도수가 798개가 되지만, 본 연구에서 제시한 부분구조기법의 경우에는 30개의 자유도만이 존재하게 되므로 해석시간과 컴퓨터 기억용량을 상당히 절약할 수 있다. 일반적으로 해석시간의 경우에는 자유도수의 세제곱에 비례하므로 자유도수가 2배 늘어난다면 해석에 소요되는 시간은 8배가 된다. 본 예제구조물의 경우에는 전체구조물에 대하여 해석한 경우 약 26분 36초가 소요되었으나 S-1모델의 해석에 소요된 시간은 약 1분 10초 정도였다. 구조물의 경간(徑間)수와 층수가 많아질수록 자유도의 수는 급격하게 증가하게 될 것이며, 따라서 이러한 부분구조기법의 효과는 더욱 증대되고 경제적인 방법이라 할 수 있다

큰보까지 모형화하여 경계조건을 단순지지로 가정한 H-2모델(그림 7(f))의 경우에는 다소 많은 오차가 발생하고 F-2모델(그림 7(e))은 경계조건을 고정지지로 보았을 때에 H-2(그림 7(f))에 비하여 비교적 정확한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 본 연구에서 제시한 방법에 의한 결과가 가장 정확한 결과를 가진다. 연속된 기둥과 보가 접하는 점에 대하여 H-2모델(그림 7(f))은 기둥과 큰보의 휨강성과 비틀림강성을 과소평가하기 때문에 구조물의 고유진동모드를 제대로 표현하지 못하게 된다. 따라서 다소 많은 오차가 발생하게 된다. 그림 7(h)와 그림 7(i)를 비교하여 보면 결과는 거의 유사하다. 이것은 기둥까지 고려한 모델들이며 단지 경계조건만 단순지지로 한 것과 고정지지로 한 것이 다르다. 이 같은 결과를 보이는 것은 기둥의 휨강성은 이 구조물에서 큰 역할을 하지 않는다는 것은 의미한다. 위의 결과를 종합하여 볼 때 S-3모델(그림 7(j))의 해석결과는 앞의 S-1(그림 7(d)) 및 S-2모델(그림 7(g)) 보다도 더 정확함을 알 수 있으며, 이것은 가진되는 보만을 해석에 고려하는 것보다는 인접부재까지 해석에 고려하는 것이 구조물의 고유진동모드를 좀 더 정확하게 표현할 수 있다는 것을 의미한다.

표 1 부재 단면치수 (단위:cm)

| 층 수 | 기둥 (B×H) | 보 (B×H) |
|-------|----------|---------|
| 5 - 7 | 45 × 45 | 40 × 60 |
| 1 - 4 | 60 × 60 | 40 × 60 |

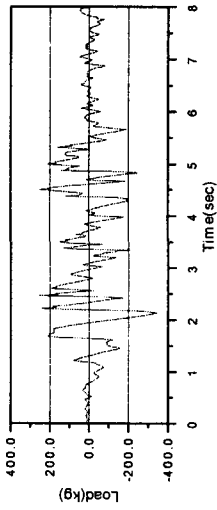
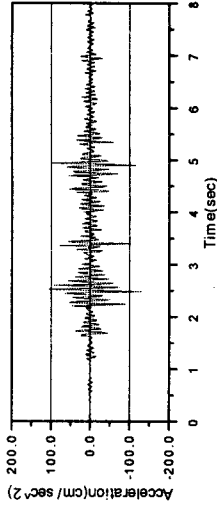
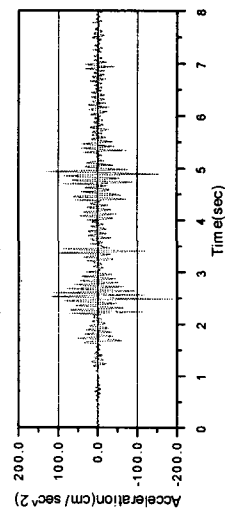


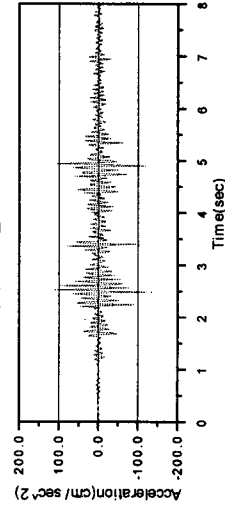
그림 6 임력하중



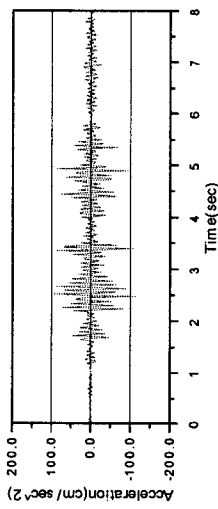
(a) 모델 A



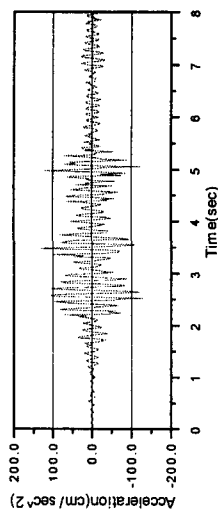
(b) 모델 F-1



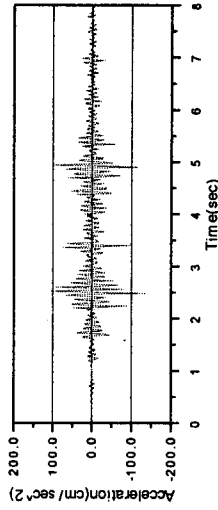
(c) 모델 H-1



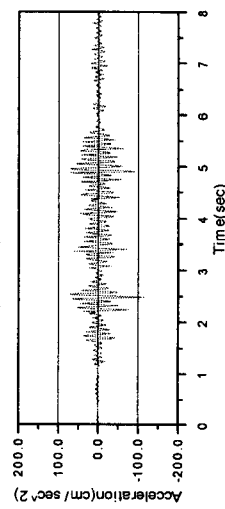
(d) 모델 S-1



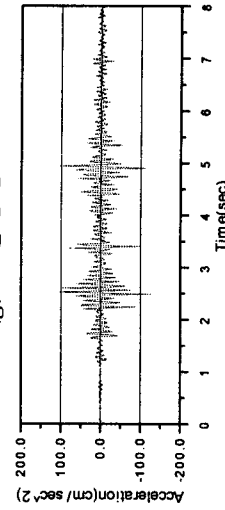
(e) 모델 F-2



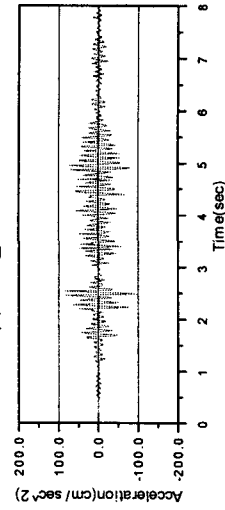
(f) 모델 H-2



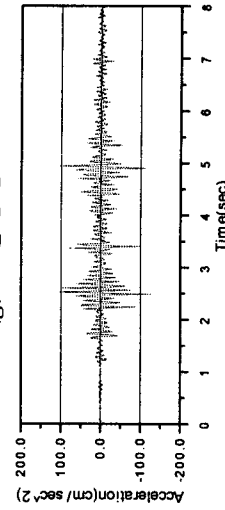
(g) 모델 S-2



(h) 모델 F-3



(i) 모델 H-3

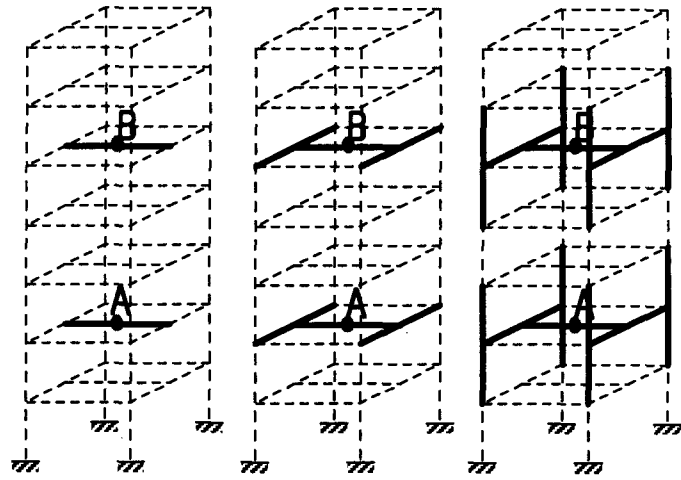


(j) 모델 S-3

그림 7 가진점에서 발생하는 가속도의 시간이력

3.3 비가진점의 진동해석

가진점이 아닌 다른 위치에서의 거동을 예측하고자 하는 경우, 구조물의 규모에 따라 가진점과 거동 예측 점내의 부재들을 연결하여 부분구조물로 모형화하는 것은 한계가 있다. 따라서 그림 8과 같이 두 위치의 인접부재들로 모형화 할 수 있다면 상당히 효과적일 것이며 해석시간 또한 많이 줄어들 것이다. 세가지 모델에 대하여, 하중이 작용하는 작은보와 부재는 작은보가 연결된 큰보부재는 4개의 요소로 분할하였고 작은보와 평행한 큰보 및 기둥은 2개의 요소로 분할한 후 부분구조법을 이용하여 해석하였다. 하중은 3층 바닥의 작은보 중앙(A점)에 연직방향으로 가해지는 것으로 하였으며, 앞절의 예제해석에서 사용한 하중을 사용하였다. 응답을 구한 위치는 6층바닥의 작은보 중앙점(B점)이다.



(a) 모델 S-4 (b) 모델 S-5 (c) 모델 S-6
그림 8 부분구조 모델

그림 9는 6층 바닥보의 중앙지점(B점)에서의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 앞서 살펴본 가진점에 대한 시간이

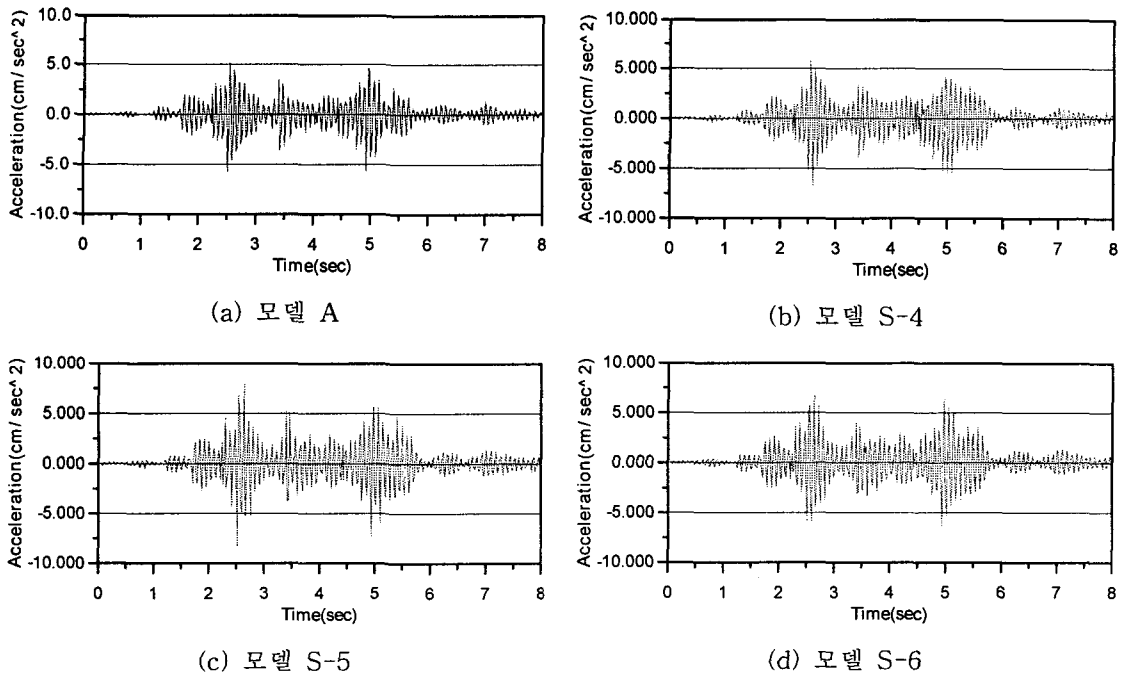


그림 9 비가진점에서 발생하는 가속도의 시간이력

력의 경우와 비교해 보면, 비가진점에서의 시간이력은 S-4모델, S-5모델 및 S-6모델 모두, 전체구조물에 대하여 동적해석을 한 결과와 다소 많은 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 행렬의 응축과정에서 발생하는 수치적 오차 때문일 수도 있지만, 더 큰 이유는 부분구조물과 전체 구조물과의 자유도수 및 이에 따른 고유진동모드수의 차이, 즉 구조물의 진동에 영향을 미치는 진동모드를 제대로 표현하지 못하기 때문이라 생각된다. 따라서 본 연구에서 제시한 부분구조기법을 이용하여 가진되는 보에 대해서는 비교적 정확하게 거동을 예측할 수 있지만, 비가진 보에 대한 거동 예측 시에는 좀 더 여러 가지의 모델에 대하여 비교할 필요가 있으며 자유도 선택에 세심한 주의가 필요하다. 표 2는 본 연구에서 제시한 부분구조기법을 이용하여 국부진동 해석을 수행 할 때에 소요되는 시간을 자유도수에 따라 비교한 것이다. 국부진동의 해석을 위해 사용한 컴퓨터의 사양은 표 3과 같다. 행렬응축과정에 추가되는 시간이 있지만, 행렬응축을 통해 자유도수가 감소하게 되므로 고유치해석과 시간이력해석에 소요되는 시간이 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 2 자유도수에 따른 해석시간의 비교

| 모 델 | 자 유 도 수 | 소 요 시 간 |
|--------|---------|---------|
| 모델 A | 798 | 26분 36초 |
| 모델 S-1 | 30 | 1분 10초 |
| 모델 S-2 | 78 | 1분 22초 |
| 모델 S-3 | 156 | 1분 48초 |

표 3 해석에 사용된 컴퓨터 사양

| 시 스템 | 사 양 |
|--------|----------------|
| C.P.U. | Pentium 133MHz |
| R.A.M. | 64MByte |

4. 결 론

본 논문에서는 건축구조물을 효율적으로 해석하기 위하여 구조물의 일부분만을 모형화하는 부분구조기법에 대하여 연구하였다. 경계조건에 대한 영향을 비교하기 위하여 부분구조모형의 경계조건을 단순지지, 고정지지 및 강성과 질량행렬을 행렬응축기법을 이용하여 응축한 경계조건을 이용한 모델을 비교하였다. 또한 행렬응축기법은 정적 및 동적행렬응축기법을 사용하였으며, 각 모델별 해석결과의 비교, 분석을 위하여 고유진동 모드와 질량 참여률을 비교하였다.

이상으로 본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 행렬응축기법을 이용하여 경계조건을 고려하는 부분구조법의 경우 가진점에 대해서는 가진되는 보와 기둥까지를 모형화 하면 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다.
- 2) 경계조건을 단순지지 및 고정지지로 가정하여 해석할 경우 연직방향의 강성, 질량 및 휨강성을 제대로 고려하기가 어려워 해석결과에서 많은 차이가 난다.
- 3) 비가진점에서의 거동예측에 있어서는 상당한 오차가 발생할 수가 있으며, 모형화 할 때 세심한 주의가 필요하다.

추후 연구과제로서 비가진점에서의 좀더 정확한 거동예측을 할 수 있는 추가적인 모형화기법의 연구가 필수적이며, 행렬응축기법을 사용하지 않고 경계점에 대하여 등가의 강성과 질량을 고려할 수 있는 모형화 기법의 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김희철, 이동근, 민경원, "지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석모델", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993.
- 2) 정길영, 손종걸, 이동근, 김우범, "철골구조물의 연직진동해석시 주자유도의 선택기법", 대학토목학회 학술발표회 논문집 (1), 1994, pp. 259-262
- 3) 문성권, 이동근, "여러 Wing들로 구성된 3차원 구조물의 효율적인 해석모델", 대한토목학회논문집, 제14권 제3호, 1994.5, pp429-438.
- 4) 이동근, 윤정방, 이승래, "진동기계초 해석 및 설계표준화에 관한 연구", 한국중공업주회사, 1994. 12.
- 5) 이동근, 윤정방, 이승래, "진동기초 해석 및 설계 지침서", 한국중공업주식회사, 1994.12.
- 6) 정길영, 송종걸, 이동근, 김우범, "구조물의 효율적인 연직진동해석", 대한토목학회 논문집, 제 15권, 제 4호, 1995.7.
- 7) 박창호, 이동근, "중력하중의 영향을 고려한 철골구조물의 비탄성해석", 대한토목학회 논문집, 제 15권, 제 4호, 1995.7.
- 8) 윤정방, 이동근, 정진상, 김두기, "지하철 운행하중에 대한 인접 구조물의 진동해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제8권 제2집, 1995.10.7.
- 9) 박창호, 이동근, 윤정방, 김진근, "보의 비탄성거동에 미치는 중력하중의 영향", 대한건축학회논문집, 제12권 제3호, 1996.3.
- 10) 이동근, 안상경, 홍성일, "대형복합역사 구조물의 건설 및 열차하중에 관한 지반-역사구조물복합계의 해석기술개발", 한국과학재단, 1996.8.31
- 11) Robert J. Guyan, "Reduction of Stiffness and Mass Matrices", AIAA Journal, Vol. 11, No. 5, 1965, pp. 380
- 12) J. N. Ramsden, J. R. Stoker, "Mass Condensation : Semi-automatic Method for Reducing The Size of Vibration Problems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 1, 1969, pp. 333-349.
- 13) W. Matta, "Selection of Degrees of Freedom for Dynamic Analysis", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol 109, 1987, pp. 65-69.
- 14) N. Shah, M. Raymund, "Analytical Selection of Masters for Reduced Eigenvalue Problem", International for Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, 1982, pp. 89-98.