

대형철골구조물의 효율적인 국부진동해석 Efficient Local Vibration Analysis of Large Steel Frames

이동근* 송종길** 정길영*** 김우범****
Lee, Dong-Geun Song, Jong-Keol Chung, Gil-Young Kim, Woo-Bum

ABSTRACT

In a local vibration analysis of a large steel frame, a large eigenvalue problem results. Due to computer storage and the expense of a complete solution, it is desirable to minimize the size of the resulting matrices.

A new and efficient method of local vibration analysis for large steel frames is presented. It reduces the order of dynamic matrices by dynamic condensation method.

Examples are given for local vibration of a plane frame. Results are compared to the complete solution of the full eigenvalue problem.

1. 서론

많은 산업구조물들은 진동을 유발하는 기계설비들이 구조물내에 설치되어 있으며, 기계설비의 자중을 지지하기 위하여 주로 철골구조물로 이루어져 있다. 예로서 발전소 구조물들은 대형 발전설비를 지지하기 위하여 주로 철골구조물을 이루어져 있다. 발전소의 보일러 건물, 터어빈 건물들은 거의가 철골구조로 건설되고 있다.

바닥판에 진동하는 기계설비가 설치되면 구조물이 국부적으로 진동하게 되는 데, 이러한 국부진동은 대부분 연직방향의 진동성분이므로, 수평방향의 거동을 주로 분석하는 지진해석 모델과는 달리 보를 여러개의 요소로 분할하여 보의 휨변형에 의한 동적거동의 영향을 반영하여야 한다. 보를 여러개의 요소로 분할하면 자유도수의 급격한 증가로 실제의 대형구조물은 개인용 전산기를 이용하여서는 해석이 불가능하고, 해석에 소요되는 시간도 많이 소모되기 때문에 경제적이지 못하다.

구조물의 국부진동은 인접구조요소들의 강성 및 질량에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서 개발한 효율적인 국부진동해석모델은 동적해석할 부재를 제외한 전체구조물을 행렬응축기법을 이용하여 자유도를 줄이고 이로부터 구해진 축소된 자유도의 질량 및 강성을 국부진동부재의 경계조건으로 사용한다. 간단한 2차원 구조물의 예제 해석을 통하여 이 방법의 효율성 및 정확성을 검증하였다.

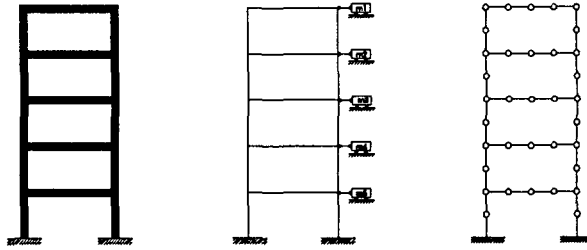
* 한국과학기술원 토목공학과 부교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
**** 한국전력공사 기술연구원 선임연구원

2. 국부진동해석 모델

2.1 지진해석 모델과 국부진동해석 모델의 차이

구조물의 동적거동은 강성과 질량의 영향에 따라 절대적인 영향을 받는다. 예를 들어서 그림 1-(a)와 같은 구조물의 지진에 대한 거동해석시에는 그림 1-(b)과 같은 해석모형으로 모형화하여 해석한다. 구조물의 질량은 각 층에 집중되어 있다고 가정하여 집중질량(lumped mass)을 사용한다. 이와 같은 해석모형을 사용하면 구조물의 수평방향 거동을 분석하는데는 별다른 문제가 없다. 그러나 이 지진해석 모델은 철골구조물이 기계설비의 진동과 같은 연직방향 진동에 의한 구조물의 거동을 분석하기에는 적절하지 못하다. 구조물이 연직방향으로 진동할 때에 지진해석모델은 각 층의 보가 가지는 질량의 영향(관성력)은 양단의 절점으로 집중되어 있으므로 기둥의 축방향 변형에 의한 구조물의 진동은 나타낼 수 있으나 보의 휨변형에 의한 구조물의 진동은 적절하게 고려하지 못한다. 구조물의 연직방향진동은 보의 휨변형에 의한 진동의 영향을 크게 받게 되므로, 지진해석 모델은 구조물의 연직방향 진동해석에는 적합하지 못하다.

보의 연직진동을 고려하기 위해서는 그림 1-(c)에서 나타낸 바와 같이 보의 관성력의 영향을 고려할 수 있는 해석모형을 사용하여야 한다. 그러나 이러한 모형을 사용할 경우에는 해석에 사용되는 자유도의 수가 급격하게 늘어나게 되므로 또 다른 문제가 발생하게 된다. 실제의 대형구조물은 많은 수의 구조요소로 되어 있으며 하나의 구조요소를 보의 관성력의 영향을 고려하기 위하여 여러개의 유한요소로 모형화하는 경우에는 지나치게 많은 절점과 유한요소를 사용하게 되므로 개인용 전산기를 이용하여서는 해석이 불가능하게 되고, 해석 시간도 많이 소요되므로 경제적이지 못하며 현실적으로 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 국부진동의 효율적인 해석기법의 개발이 필요하게 된다.

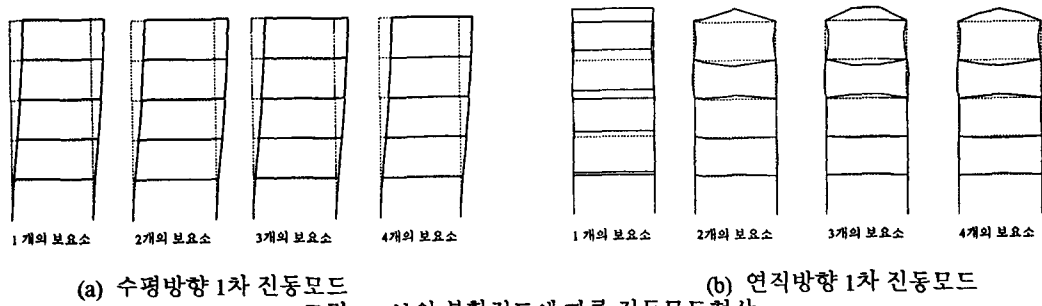


(a) 구조물의 예 (b) 지진해석모형 (c) 국부진동해석모형
그림 1 구조물의 진동해석 모형화

2.2 구조요소의 분할에 따른 진동모드 형상 및 진동수

기계설비에 의한 구조물의 국부진동은 대부분이 연직방향의 진동이며, 이를 정확하게 해석하기 위하여는 보의 분할에 따른 진동해석의 정확도를 알아보아야 한다. 또한 이 결과를 통하여 보를 몇개로 분할하여 해석할 것인지를 결정하여야 한다. 여기서는 간단한 2차원 구조물에 대하여 보의 분할에 따른 진동모드 형상 및 진동수를 구하여, 연직진동 해석시 보의 분할의 필요성 및 보의 분할에 따른 정확해와의 수렴정도를 알아보았다. 그림 2에는 구조요소의 분할정도에 따른 진동모드의 형상을 나타내었다. 이 해석 결과를 통하여 수평방향의 모드형상은 구조요소의 분할에 의한 차이가 없지만 연직방향의 모드형상은 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 보를 분할하지 않은 경우는 보의 휨변형에 의한 영향을 고려할 수 없음을 알 수 있고 기둥의 축방향 변형의 영향만이 반영됨을 알 수 있다.

그림 3에서 구조요소의 분할에 의한 수평방향 및 수직 방향의 진동수의 값을 비교하였다. 보의 분할정도에 따른 첫 연직방향 및 지진해석에서 중요한 역할을 하는 수평방향 모드의 진동수는 구조요소를 분할한 경우와 분할하지 않는 경우나 진동수의 차이가 없다. 즉 구조물의 지진해석시에는 구조요소를 분할할 필요성이 없다. 하지만 연직방향 모드의 진동수는 구조요소를 분할하지 않은 경우가 분할한 경우보다 진동수가 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러므로 철골구조물의 국부진동해석을 위해서는 구조요소의 분할이 필요함을 알 수 있다. 구조요소를 두개이상으로 분할할 경우에는 분할 정도에 관계 없이 진동수가 거의 수렴함을 알 수 있다. 그러므로 연직방향의 진동해석시에는 구조요소를 두개의 요소로 분할하여 해석한다면 별무리가 없다.



(a) 수평방향 1차 진동모드 (b) 연직방향 1차 진동모드
 그림 2 보의 분할정도에 따른 진동모드형상

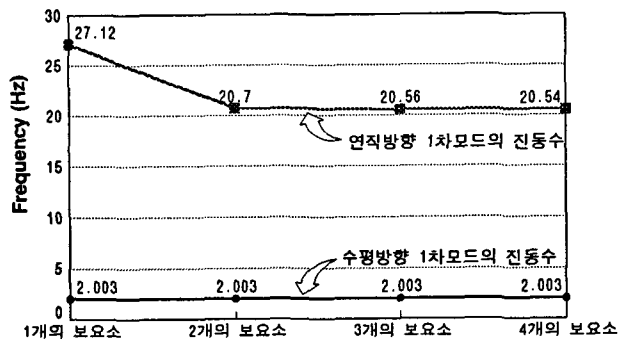
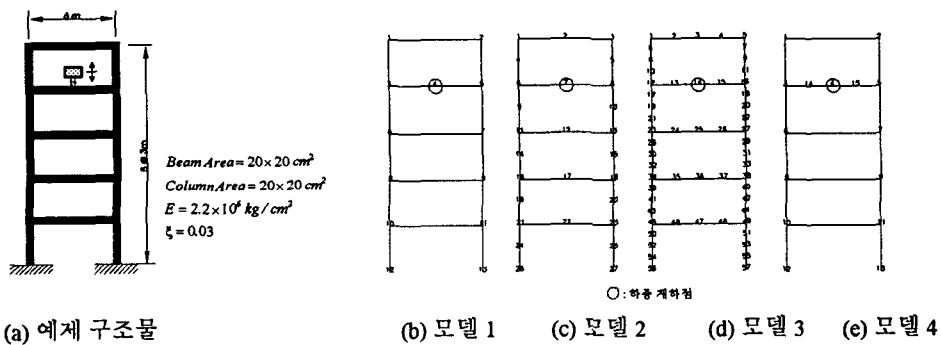


그림 3 보의 분할정도에 따른 진동수

2.3 국부진동해석에 적합한 구조요소의 분할 형태



(a) 예제 구조물 (b) 모델 1 (c) 모델 2 (d) 모델 3 (e) 모델 4

그림 4 예제구조물 해석모델 및 절점 모델링 번호

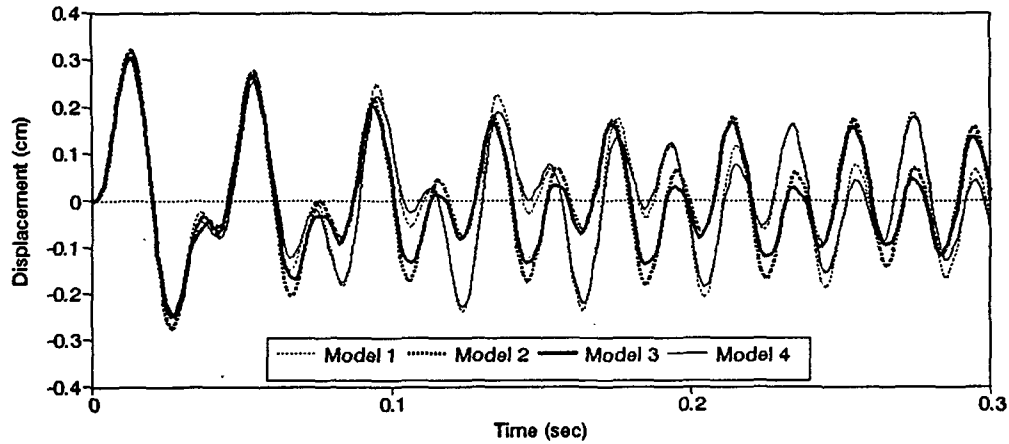
그림 4의 예제구조물을 4가지의 형태로 분할하여 요소분할에 따른 진동해석의 정확도를 비교 분석하였다. 그림 4에 나타나 있듯이 모델 1은 하중을 가하기 위해서 4번 절점 1개를 추가한 것 이외에 모든 요소를 분할하지 않았다. 모델 2의 경우는 모든 보와 기둥을 2개의 요소로 분할한 경우이고 모델 3은 모든 보와 기둥을 4개의 요소로 분할한 경우이다. 모델 4는 하중이 가해지는 보만을 4개의 요소로 분할하고 그외의 다른 요소들은 분할하지 않은 경우이다. 표 1에 각 모델의 연직방향 1차 진동수를 비교하였다.

입력하중은 최대크기는 10,000 kg이고 진동수가 50 hz인 조화하중을 취하여 각 모델의 해석을 수행한 후 이를 비교, 검토하였다. 각 모델에 대한 50 hz의 입력하중에 대한 하중재하점의 연직거동을

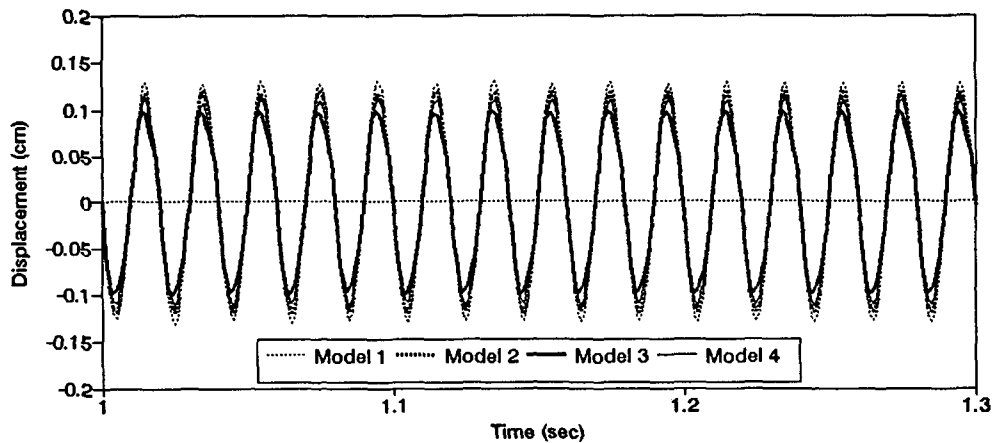
그림 5에 나타내었다. 그림 5-(a)는 초기상태의 거동이고 그림 5-(b)는 안정상태의 거동이다. 초기상태에서는 진동수비가 비슷한 모델 2와 모델 3의 거동이 비슷한 양상을 보이고 모델 1과 모델 4가 비슷한 거동을 보이고 있다. 이러한 다른 양상을 보이고 있는 이유는 하중재하점의 거동이 초기에는 첫 연직진동 모드에 의한 구조물 전체의 연직거동에 많은 영향을 받기 때문이다. 하중재하점의 거동이 시간이 지나면서 차츰 입력하중의 진동수로 바뀌며 안정상태로 접어들게 된다. 초반기(transient state)에서의 양상과는 달리 안정상태에서는 모델 3과 모델 4가 비슷한 거동을 보임을 알 수 있다. 이는 연직하중 재하초기에는 하중재하점의 거동이 전체구조물의 거동에 의해 영향을 받다가 시간이 지나면서 하중재하점 부근의 국부진동으로 바뀌기 때문에, 안정상태에서는 하중재하점 부근의 요소분할수에 따라 해석의 정확성이 달라 있다고 볼 수 있다.

표 1 각 모델의 연직방향 1차 진동수

모델	연직방향 1차 진동수
모델 1	23.12 hz
모델 2	20.70 hz
모델 3	20.54 hz
모델 4	22.93 hz



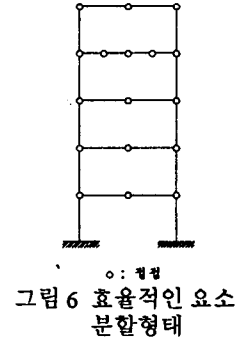
(a) 초기상태의 동적거동



(b) 안정상태의 동적거동

그림 5 50 hz 진동수의 입력하중에 대한 예제구조물의 거동

앞의 예제구조물을 4가지 형태로 요소를 분할하여 가장 많은 요소로 분할한 모델 3이 정확한 해에 가장 가까우리라 가정하고 해석결과를 비교하였다. 앞의 해석결과를 검토해 볼때, 그림 4의 예제구조물은 연직진동에 대해서는 기둥의 거동은 축방향 변형이 주된 거동이기 때문에, 기둥의 휨변형을 무시할 수 있으므로 각 기둥의 요소를 분할할 필요는 없다. 그리고 하중이 가해지지 않는 보는 2개의 보요소로 분할하고 하중이 가해지는 보는 여기에 몇개의 절점을 더 추가하여 해석하면 전체 구조물에 대해 요소의 수를 작게 사용하고자 좋은 해석결과를 얻으리라 예상된다. 이러한 요소의 분할형태를 그림 6에 나타내었다. 이는 안정상태에서는 하중재하점 주위의 국부진동이 구조물의 거동에 주된 영향을 주기 때문에 하중재하된 보에 대한 국부진동 해석시 정확성 및 경제성을 고려한 요소분할 형태이다.



3. 효율적인 국부진동 해석모델

진동을 일으키는 설비에 의한 대형구조물의 국부진동해석시 국부진동에 가장 직접적인 영향을 주는 것은 진동설비에 인접한 구조요소의 강성 및 질량이다. 그러므로 국부진동을 해석할 부재를 제외한 전체 구조요소들을 적절한 기법을 이용하여 축소하여, 이 축소된 자유도를 국부진동해석시에 경계조건으로 이용하여 국부진동부재만을 정밀해석 한다면 효율적인 해석이 될 수 있을 것이다. 이와 같은 목적에 부합되는 국부진동해석 모델을 그림 7에 나타내었다.

그림 7에 나타낸 것처럼 국부진동해석을 할 부재를 제외한 전체구조물을 행렬응축기법(dynamic condensation)을 이용하여 국부진동해석 부재의 양단 절점 자유도만 남기고 나머지 절점의 자유도는 소거한다. 여기에서 구한 국부진동부재 양단의 절점 A,B에 대한 6×6 강성행렬을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

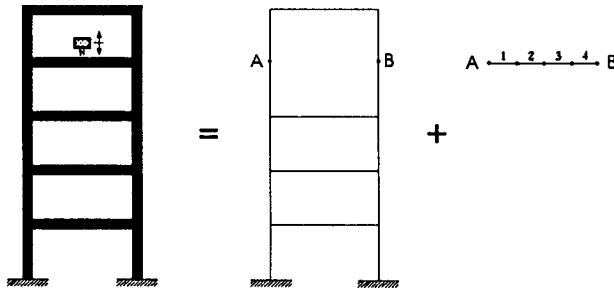


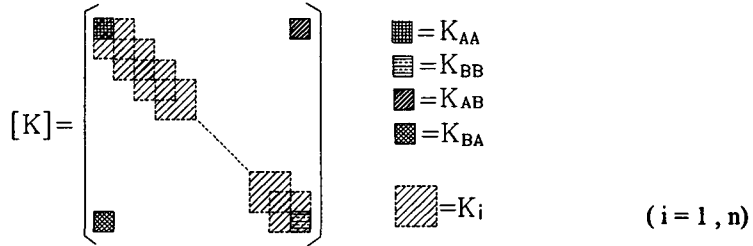
그림 7 효율적인 국부진동해석 모델 (모델 5)

$$[\hat{K}] = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

그리고 국부진동해석을 할 부재의 강성 행렬을 n개의 요소로 분할한 경우의 강성행렬로 나타내면 식(2)와 같다.

$$[\hat{K}] = \begin{bmatrix} \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{matrix} & \\ & \begin{matrix} K_{n-1} \\ K_n \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 K_n 은 n번째 분할보의 6×6 강성행렬이다. 식 (1)의 절점 A,B의 강성행렬을 식 (2)의 강성행렬과 조합하면 국부진동부재의 강성행렬을 구할 수 있으며, 이 강성행렬의 조합형태를 도식적으로 나타내면 다음과 같다.



국부진동해석을 할 부재의 질량행렬도 위와 같은 과정에 의해 구할 수 있다. 구한 질량행렬과 강성행렬로부터 국부진동해석을 수행할 수 있다. 이 경우에는 전체 구조물의 구조요소를 요소분할하여 해석하는 경우보다 질량 및 강성행렬의 크기가 매우 줄게 되므로 개인용 전산기로서도 실제의 복잡한 구조물을 해석할 수 있다. 전산기를 이용한 해석에서 저장행렬의 크기가 줄게되고, 이에 따른 계산시간이 매우 단축되므로 경제적이며 현실적으로 사용하기가 간편하다.

4. 예제 해석

효율적인 국부진동해석 모델(모델 5)의 정확성을 검증하기 위하여 모델 5의 해석결과를 전체 구조물을 그림 8에 나타낸 것처럼 양단고정보와 부분구조물로 축소하여 해석한 경우와 그림 4의 모델 3과 비교하였다.

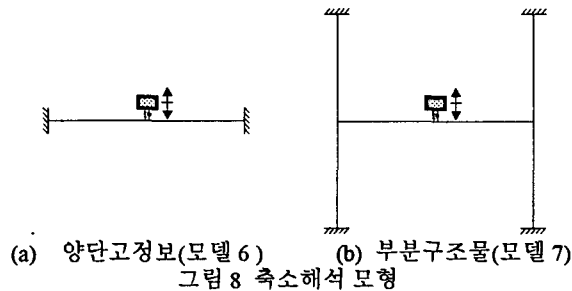


표 2에는 각 모델의 연직방향 1차 진동수를 비교하였다. 모델 5의 진동수가 모델 3의 진동수(실제 구조물의 진동수)에 가장 근접함을 알 수 있다.

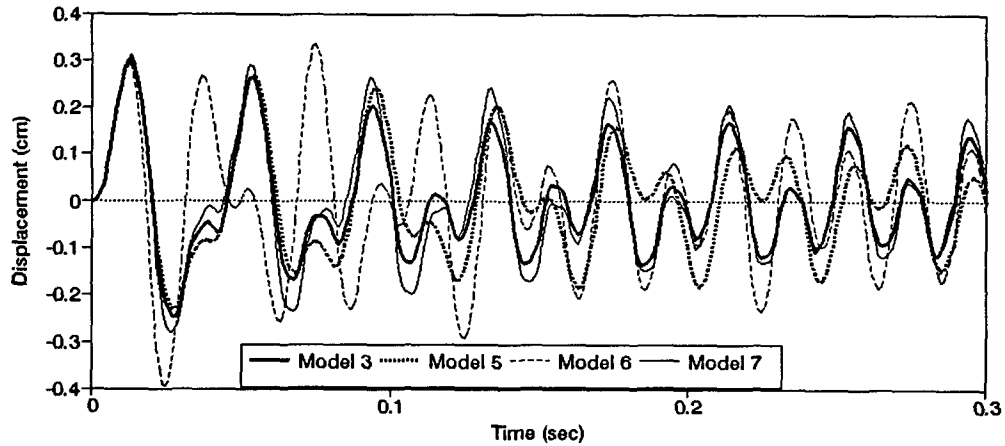
표 2. 각 모델의 연직방향 1차 진동수

모델	연직방향 1차 진동수
모델 3	20.54 hz
모델 5	23.42 hz
모델 6	29.96 hz
모델 7	24.64 hz

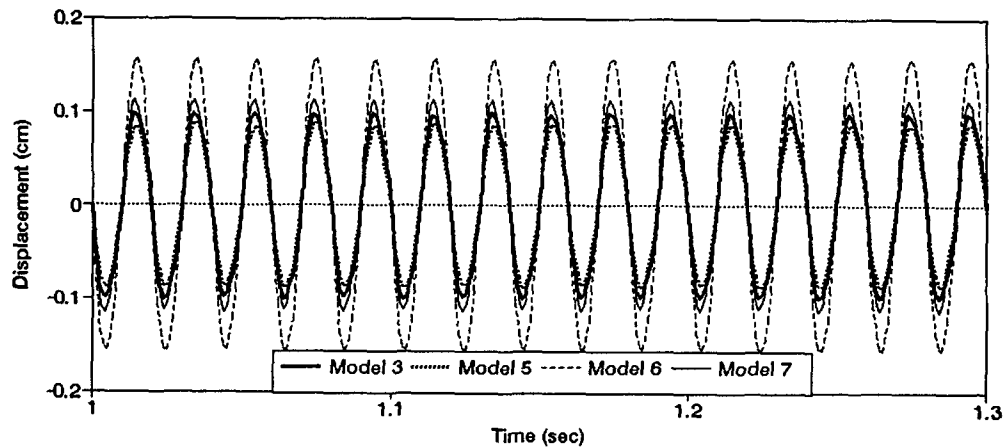
그림 9에는 50 hz의 입력하중에 대하여 각 모델의 동적거동을 비교하였다. 초기상태에서는 모델 5가 모델 3에 대해서 약간의 차이를 보이지만 안정상태에서는 이 차이가 거의 사라지게 된다. 축소모델인 모델 6, 7 보다는 효율적인 국부진동해석모델(모델 5)이 보다 정확한 동적거동을 보임을 알 수 있다.

모델 5는 전체구조물의 질량 및 강성의 영향을 고려하기 위하여 행렬응축기법을 이용하여 국부진동부재의 인접한 절점의 자유도를 제외한 나머지 자유도를 소거하였다. 너무 많은 자유도의

소거로 인해 국부진동부재에 경계조건으로 사용될 자유도의 질량 및 강성의 정확성이 줄었으며, 경계조건이 구조물의 강성을 증가시켰음을 알 수 있다.



(a) 초기상태의 동적거동



(b) 안정상태의 동적거동

그림 9 50 hz의 입력하중에 대한 각 모델의 동적거동 비교

그림 10에는 입력하중의 진동수에 따른 각 모델의 변위 최대값을 나타내었다. 이 결과로부터 모델 6은 구조물의 공진범위를 제대로 반영하지 못함을 알 수 있고, 나머지 모델은 구조물의 공진범위는 잘 나타내지만 모델 7은 구조물의 거동을 과대 평가함을 알 수 있다. 모델 5가 공진 범위의 하중에 대하여 가장 모델 3에 근접함을 알 수 있다. 하지만 모델 5는 공진범위 외의 하중에 대해서는 전이 상태에서 다소 큰 변위를 나타낸다.

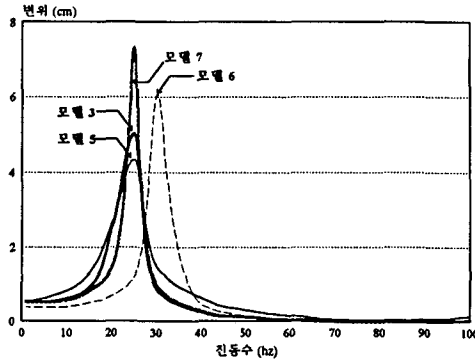


그림 10 입력하중에 진동수에 따른 각 모델의 변위의 최대값

이 결과들을 종합적으로 분석하여 보면, 철골구조물의 국부진동은 인접 구조요소들의 강성 및 질량의 영향이 지배적이지만 전체 구조물을 무리하게 양단고정보나 부분구조물로 축소하면 실제 구조물의 진동현상을 제대로 분석할 수 없다. 양단고정보로 축소하여 해석한 경우보다는 부분구조물로 축소하여 해석한 경우의 해석결과가 보다 정확함을 알 수 있다. 이 연구에서 개발한 국부진동해석 모델에 의한 해석 결과는 구조요소를 분할한 경우의 해석결과와 정확하게 일치하지는 않지만 가장 잘 일치하는 결과를 보여줌으로써, 국부진동해석 모델의 타당성 및 효율성을 검증할 수 있다. 또한 이 연구에서 개발한 국부진동해석 모델은 행렬응축기법에 의한 경계조건에 의해 국부진동부재만을 해석하므로 전체구조물을 여러개의 구조요소로 분할하여 해석하여야 하는 어려움이 없으므로 경제적이고 간편하게 이용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구조물의 국부진동은 동적저동의 초기에는 전체구조물의 질량 및 강성에 크게 영향을 받지만 어느정도 시간이 경과한 안정상태에서는 국부진동부재의 인접 구조요소의 강성 및 질량에 지배적인 영향을 받는다.
2. 구조물의 연직저동해석시에는 전체구조물의 보를 2개정도로 분할하고 국부진동부재는 보다 더 많은 요소로 분할한다면 효율적인 해석이 될 수 있다.
3. 본 연구에서 개발한 효율적인 국부진동해석 모델은 대형구조물의 국부진동해석시 적은 자유도를 사용하더라도 실제의 국부진동거동을 근사하게 예측하므로 개인용 전산기를 이용하여서도 해석이 가능하며, 해석시간도 단축되므로 경제적이며 효율적이다.

6. 참고문헌

1. 김희철, 이동근, 민경원 "지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석 모델", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993
2. V. N. Shah, M. Raymund "Analytical Selection of Masters for Reduced Eigenvalue Problem", Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, 89-98, 1982
3. Mario Paz "Practical Reduction of Structural Eigenproblems", ASCE, Vol. 109, No. 11, 2591-2599, 1983