

철근콘크리트 슬래브의 진동제어

Vibration Control of Reinforced Concrete Slabs

변근주*, 노병철**, 유동우**, 이호범***
 Byun, Keun-Joo, Lho, Byeong-Cheol, You, Dong-Woo, Lee, Ho-Beom

ABSTRACT

As the vibration loads are variable and the design criteria are more strict, in this study, the dynamic characteristics of the slab is analyzed and the vibration is controlled for the special peculiarity of structures. First, the procedure of dynamic analysis is developed by the finite element method and then examined by using the slab model tests. Second, in order to improve the dynamic characteristics, the effects of the number of supports, material properties, position of exciting force, added mass and dynamic balance on the dynamic behavior of reinforced concrete slabs are analyzed. It is concluded that the vibration can be controlled by the change in the natural frequency of system and the use of the high-strength concrete or polymer impregnated concrete(PIC), and the dynamic characteristics can be considerably affected by the arrangement of equipments, added mass, and dynamic balance, etc.

1. 서론

구조물의 해석 및 설계를 위한 고성능 컴퓨터의 사용이 일반화되고, 구조거동의 평가를 위한 고정밀 계측기의 개발에 힘입어 대상구조에 따라서는 설계와 시공에 매우 엄밀한 설계기준의 적용이 요구된다. 특히 반도체, 광학기기 및 고정밀 기기 제조공장의 건물구조, 원자력발전소의 격납구조등에서는 구조물의 사용성을 만족하기 위하여 사용하중하에서 발생하는 처짐, 속도 및 가속도등의 동적응답정도를 대상 구조물의 허용범위 이하로 크게 제한하고 있다⁽¹⁾. 그러나 진동하중은 기초지반의 물성, 지반과 구조물의 상호작용, 내부하원의 성질, 구조의 종류, 구조의 기하형상 및 구성재료의 물리적성질등에 따라서 간섭 또는 중첩되기도 하고, 진동모드나 진동과의 전달이 매우 다양한 경로를 통하여 이루어지므로 구조물의 동적거동을 합리적으로 평가하는 것과 이를 일정수준 이하로 제어하는 것은 용이하지 않다. 일반적으로 콘크리트구조물은 강구조물에 비하여 진동을 흡수하는 진동감쇠능력이 우수한 것으로 알려져 있으나, 이를 이용한 연구는 많지 않은 실정이다.

*정회원 연세 대학교 토목공학과 교수
 **정회원 연세 대학교 토목공학과 박사 과정
 **정회원 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원

따라서 본 연구에서는 대상구조의 진동실험과 수치해석을 통하여 가진력의 위치에 따른 대상구조물의 동적응답과 진동제어에 적합한 구성재료 및 최적경계조건을 구명하며, 부가질량이나 부가질점계동의 동적명령개념을 이용한 진동제어방법을 실험적으로 도출하므로써, 진동영향인자 변화에 따른 철근콘크리트 슬래브의 동특성 개선에 연구의 목적을 두고 있다.

2. 철근콘크리트 슬래브의 동적해석

2.1 모드중첩법에 의한 동적거동해석

모드중첩법에서는 실제 발생하는 임의의 변위를 여러모드의 조합으로 표현할 수 있다고 가정하여 시간에 따른 변위를 식(2.1)과 같이 구한다.

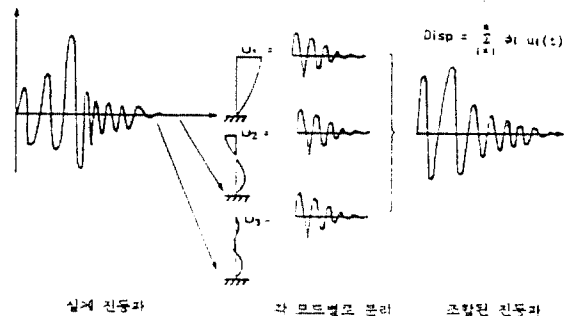


그림 2.1 모드중첩법의 개념도

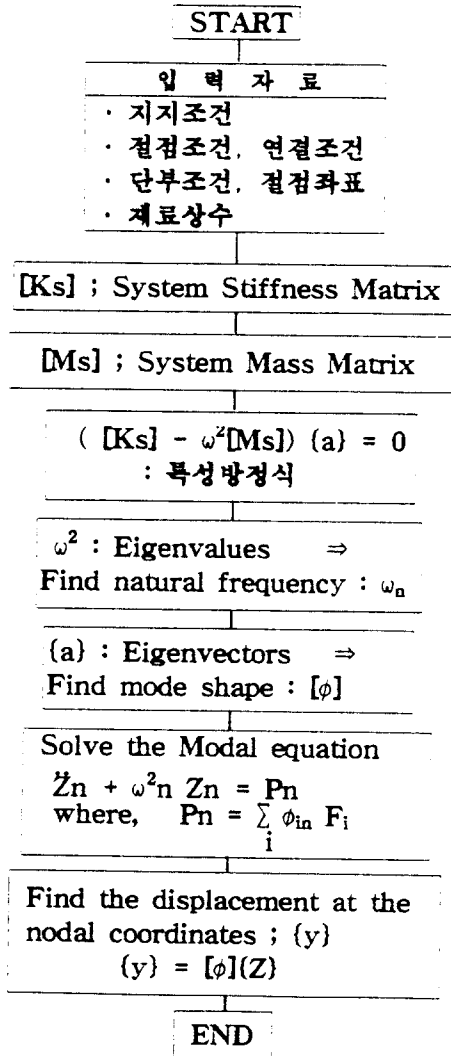
그림 2.1은 모드중첩법을 개념적으로 도시한 것이다.

$$\{u(t)\} = [\{\phi_1\} + \dots + \{\phi_n\}]\{u(t)\} = \{b\} \quad (2.1)$$

여기에서 $\{b\}$ 는 비강쇠자유진동의 운동방정식으로부터 구해지는 고유벡터로서 모드형상이라 한다.

2.2 철근콘크리트 슬래브의 동적해석

철근콘크리트 슬래브의 동적응답을 구하기 위한 해석과정은 그림 2.2와 같다.



3. 진동수 분석

진동계는 넓은 진동수 대역에 걸쳐 측정된 하나의 진동값을 제시하며, 진동수 스펙트럼은 신호에 대한 자세한 정보를 제공해 주며, 진동발생부위 및 진동발생원의 위치를 찾는 데 도움이 된다. 그러나 이러한 정보는 시간상의 신호로부터 얻을 수 없으므로, 각 진동수성분을 알기 위해서는 진동수 분석을 실시하여야 한다.

4. 철근콘크리트 슬래브의 동적실험

4.1 가진력의 선정

구조물의 진동특성을 파악하기 위한 실험적 모드 해석법에서 가진력을 제공하는 한 방법으로, 충격력 측정기가 부착된 해머를 이용한 충격시험 기법이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서 철근콘크리트 슬래브에 대한 관심대상의 진동수가 200Hz 이내이므로 0~200Hz의 진동을 가할 수 있는 충격해머를 이용하고자 한다. 그림 4.1은 모형화가진력 및 이의 진동수분석 결과이며, 입력가진 에너지가 0~200Hz에서 일정한 값을 알 수 있다.

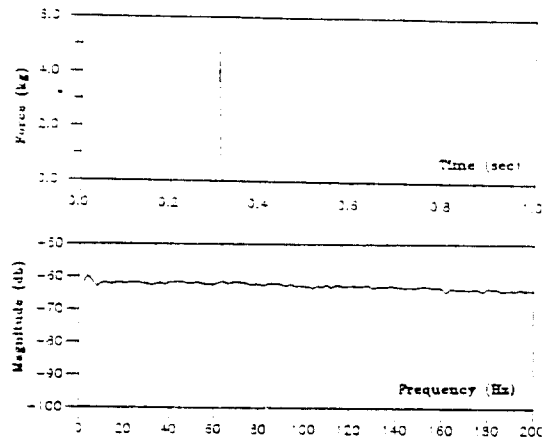


그림 4.1 입력가진력

4.2 대상구조물의 선정 및 동적실험

본 연구에서 선정한 구조물은 그림 4.2에 나타난 바와 같은 제원을 갖는 단면비가 3:1인 철근콘크리트 슬래브이다. 대상구조물의 지지점은 그 상부에 따라 매우 상이한 동특성을 나타내므로, 수치해석조건과 가장 근접한 절점지지 및 철근콘크리트 슬래브의 수평을 정확히 유지하기 위하여 볼트로써 높낮이 조정이 가능하도록 하였다. 동적 실험을 위한 지지점의 개수는 그림 4.2와 같이 6개로 하였으며, 충격해머를 이용하여 가진하였다.

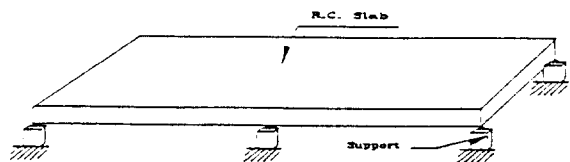
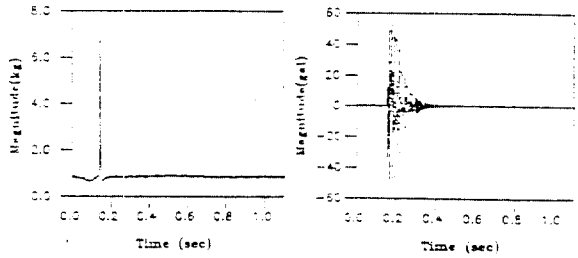


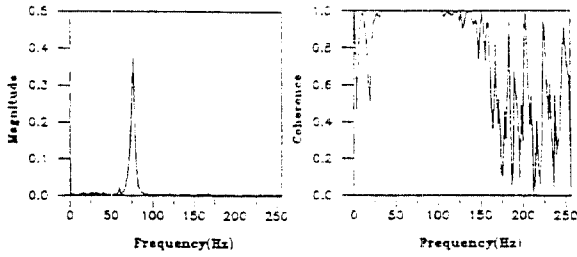
그림 4.2 대상구조물의 제원 및 지지조건

이들의 입력과 출력에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여 coherence를 구하였다. 그림 4.3은 가진력(입력)과 이에 따른 절점#31(그림 5.1)에서의 가속도(출력) 및 이들간의 coherence를 구하여 도시한 것이며, 이로부터 실험에 의한 coherence가 25Hz~150Hz의 진동수범위에서 1에 가까우므로 이 범위에서 자료들을 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.



a) 가진력(입력)

b) 가속도(출력)



c) 진동수 분석

d) Coherence

그림 4.3 실험결과(#31)

5. 수치해석 및 비교분석

5.1 대상구조의 모형화

그림 5.1 은 철근콘크리트 슬래브의 수치해석을 위한 요소분할을 나타낸 것으로 대상구조물을 총 55개의 절점과 40개의 요소로 분할하였으며, 지지조건은 절점#1과 절점#45에 x 및 y방향의 변위와 z방향의 회전을 구속하는 힌지조건으로 하여 강제운동을 억제하였으며, 절점#6, 절점#50, 절점#11 및 절점 #55는 z방향의 회전만을 구속한 로올러 조건으로 하였다.

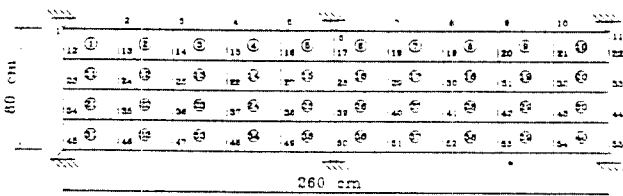
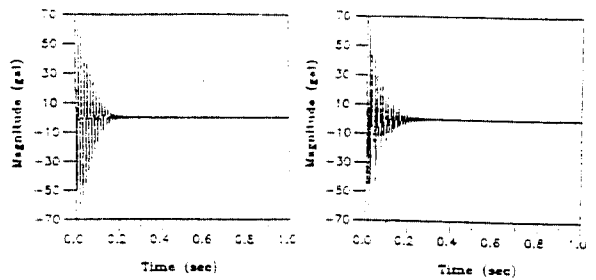


그림 5.1 대상구조의 유한요소 모형화

5.2 수치해석결과의 검증

충격해머로 절점#25에 가진하여 절점#31에서의 실험값과 수치해석값을 비교하였다. 그림 5.2는 각각의 가속도응답을 시간영역에서 도시한 것이다. 그림 5.3은 각각의 진동수분석한 결과를 나타낸 것으로 같은 조건하에서 실시한 실험 및 수치해석의 최대가속도는 실험값이 수치해석값에 비하여 약 9.8% 작고, 최대속도는 실험값이 수치해석값 보다 4.5% 크게 나타났다. 또한 이들의 고유

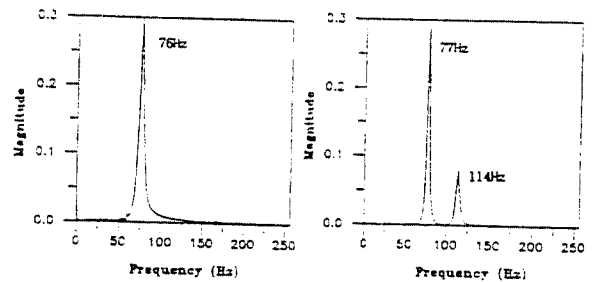
진동수는 실험의 경우 76Hz인 반면 수치해석의 경우 77Hz로 수치해석값과 실험값이 큰 차이가 없으므로, 이 수치해석과정에 대한 신뢰성을 인정하고, 대상구조물에 대한 수치해석을 실시하였다.



a) 실험값

b) 해석값

그림 5.2 가속도응답(시간영역)



a) 실험값

b) 해석값

그림 5.3 진동수 분석 결과

또한 실험에서 가진력과 동적응답에 의한 coherence는 그림 5.4에서 보듯이 25Hz~150Hz에서 1에 가깝고, 진동수를 분석한 결과 철근콘크리트 슬래브의 고유진동수가 이 범위안에 있으므로 실험값에 대한 신뢰도가 큼을 알 수 있다.

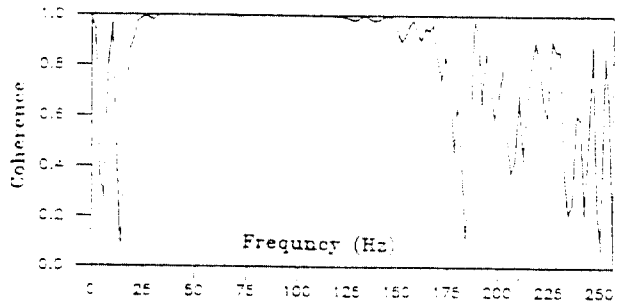
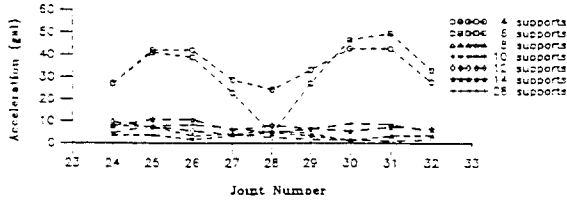


그림 5.4 가진력과 동적응답의 coherence

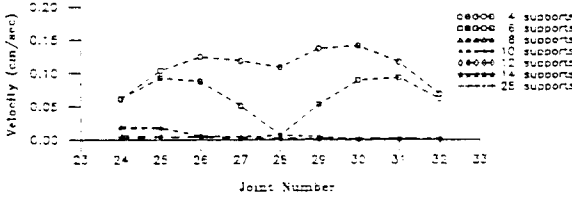
5.3 지지점수의 변화에 따른 동특성

그림 5.5는 강도가 246kg/cm²인 철근콘크리트 슬래브에 지지점의 갯수를 4개, 6개, 8개, 10개, 12개, 14개 및 28개로 변화시킨 경우 중앙부의 길이방향인 절점#24에서 절점#32까지의 최대동적응답을 정리한 것이다. 물론 각 절점에서의 최대값은 동일한 시간에 발생한 것은 아니며, 단지 진동

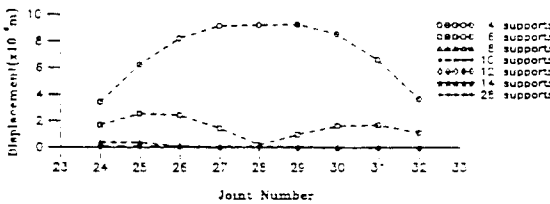
허용값과의 비교를 위하여 최대값을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 지지점이 8개 이상인 경우 동적응답값이 4개의 경우에 비하여 60~80%정도 줄어듦을 알 수 있다. 12개 이상에서는 지지점이 10개일 경우보다 45%~55% 커지는 경향이 나타나지만 4개일 경우의 감소된 동적응답값에 비하면 무시할 수 있다. 따라서 지지점의 갯수를 최적으로 지지하여 철근콘크리트슬래브의 진동을 제어하는 것이 바람직하다고 사료된다.



a) 지지점변화에 따른 각지점의 최대가속도



b) 지지점변화에 따른 각지점의 최대속도



c) 지지점변화에 따른 각지점의 최대변위

그림 5.5 지지점변화에 따른 각지점의 동적응답

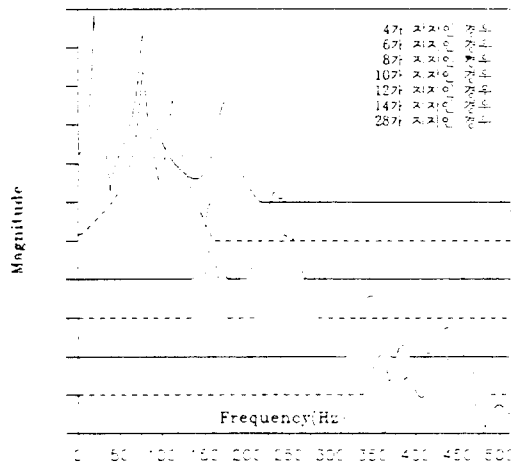
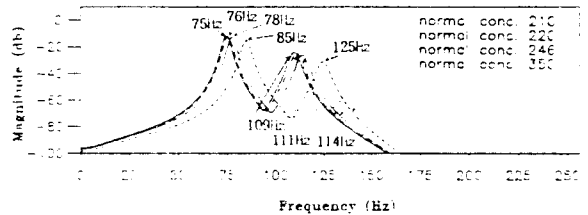


그림 5.6 지지점수에 따른 진동수분석

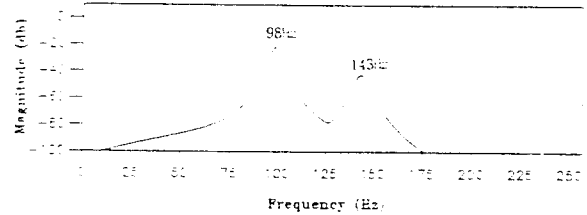
또한 그림 5.6은 수치해석 결과 절점#31의 동적응답에 대한 진동수분석을 나타낸 것이다. 지지점이 12개 이상인 경우, 고유진동수가 300Hz 이상으로 이동하여 공진에 의한 증폭효과 및 철근콘크리트 슬래브의 고유진동특성에 따른 전달효과가 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 이 철근콘크리트 슬래브의 동특성을 개선하기 위하여 최적의 지지점으로 지지하여 동적응답의 크기를 감소시키고 동시에 입력가진원의 진동수보다 구조물의 고유진동수를 크게 조정함으로써 동적거동을 제어하는 것이 바람직하다.

5.4 재료특성에 따른 동특성

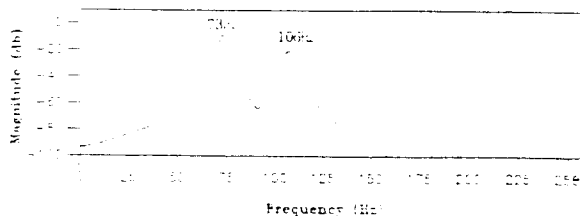
재료특성에 따른 입력자료로 폴리머침투콘크리트는 현재까지 연세대학교 변근주의 실험을 통하여 얻어진 물성을, 고강도 경량골재콘크리트는 국내의 기존자료에 대한 물성을 입력자료로 하여 철근콘크리트슬래브에 대한 수치해석을 실시하였다. 폴리머침투콘크리트를 사용한 경우는 문헌에서와 같이 저진동수 영역에서 진동이 제거되며^[2], 고유진동수가 고진동수로 이동하므로 특정가진에 대한 방진에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.



a) 보통콘크리트



b) 폴리머침투콘크리트



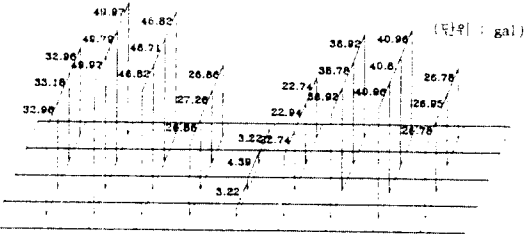
c) 고강도경량골재콘크리트

그림 5.7 재료변화에 따른 동특성 변화

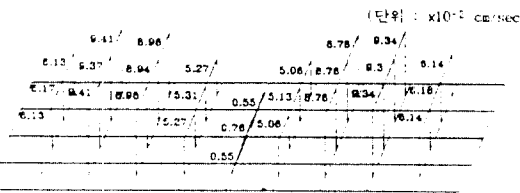
그림 5.7은 지지점이 6개인 철근콘크리트슬래브의 재료물성을 변화시킨 경우에 대한 동적응답결과를 진동수영역으로 나타낸 것이며, 이로부터 동적응답값은 탄성계수가 증가함에 따라 감소되는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 구조체의 고유진동수가 강제진동수와 멀어지기 때문이라고 사료된다.

5.5 가진력의 위치변화에 따른 동특성

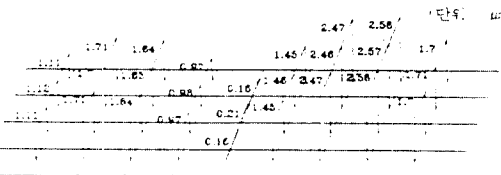
그림 5.8은 가진력의 위치변화에 따른 절점#31의 동적응답값(가속도, 속도, 변위)을 도시한 것이다. 이로부터 대상구조물내의 절점#31에서의 동적응답은 중앙부에 가진력이 가해질 경우 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 진동의 영향을 많이 받는 기계는 위치선정시 동적거동이 작은 곳에 놓일 수 있도록 고려해야 한다.



a) 가진력 위치에 따른 가속도변화



b) 가진력 위치에 따른 속도변화

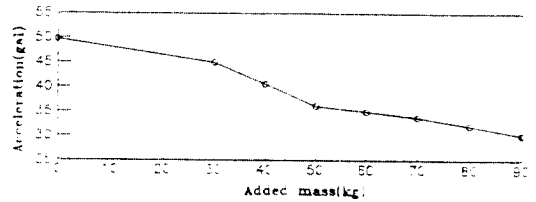


c) 가진력 위치에 따른 변위변화

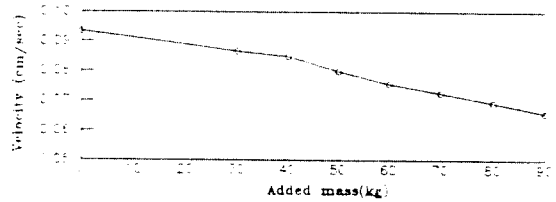
그림 5.8 가진력의 위치에 따른 동적응답

5.5 부가질량에 따른 동특성

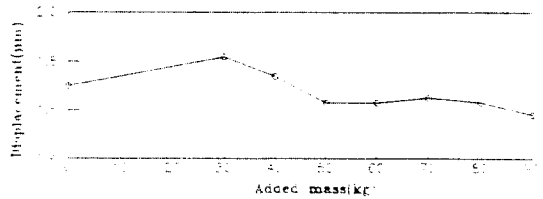
감쇠이론에 의한 철근콘크리트슬래브의 동특성 개선을 위하여, 철근콘크리트슬래브와 거동을 함께 하도록 부가질량을 추가한 형태로 모형화하여 수치해석을 하였다. 관심지역인 절점#31의 동적응답을 줄이기 위해 30~90kg (철근콘크리트 슬래브의 약 1/10~1/3)의 질량을 증가시키면서 절점#31의 동적거동을 예측하였다. 이 결과 철근콘크리트슬래브 질량의 1/3을 추가하였을 경우 가속도는 49.7gal에서 30.1gal로 40%정도 감소하며, 속도는 0.0934 cm/sec에서 0.0658 cm/sec로 30%정도 감소되고, 변위는 1.70mm에서 1.58mm로 7% 감소됨을 알 수 있다. 따라서 동적거동을 줄이기 위한 지점에 부가질량을 추가하여, 철근콘크리트슬래브의 강성을 변화시키지 않고 동특성을 개선할 수 있는 효과적인 방법이라고 사료된다. 그림 5.9는 부가질량을 추가하였을 경우 동적응답(가속도, 속도, 변위)의 변화를 도시한 것이다.



a) 부가질량에 의한 가속도변화



b) 부가질량에 의한 속도변화



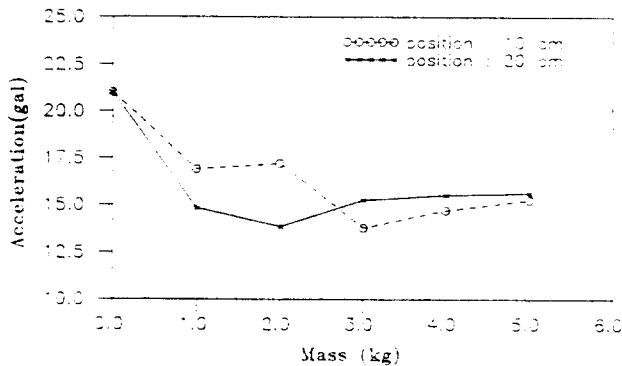
c) 부가질량에 의한 변위변화

그림 5.9 부가질량에 따른 동적응답(#31)

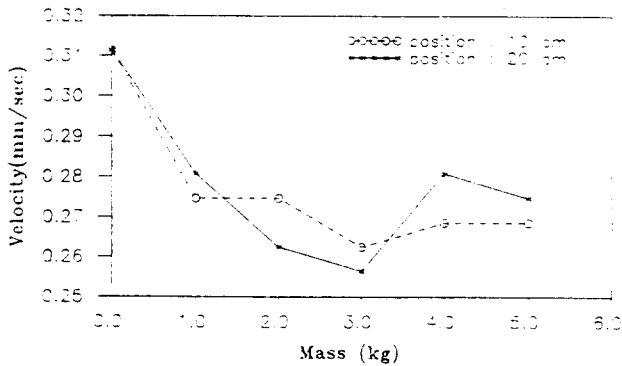
5.6 부가질점계에 의한 동특성

철근콘크리트 슬래브의 절점#31에 부가질점계를 제작하여 장착하고, 절점 #32에 60Hz의 진동

수를 갖는 모터로 가진하여 동적거동을 실험적으로 분석하였다. 제작한 부가질점계는 강철판이 스프링 역할을 하도록 하고, 추를 사용하여 질량을 변화시킬 수 있도록 하였다. 추의 위치를 중앙에서 10cm 및 20cm로 변화시켜 부가질점계의 강성을 변화시켰으며, 실험에 의한 결점#25의 동적응답 결과를 그림 5.10에 나타내었다. 이로부터 가속도는 20.99gal에서 13.79gal로 최대 34%, 속도는 0.311cm/sec에서 0.256cm/sec로 최대 18%정도 감소하였다. 이로부터 부가질점계의 고유진동수를 강성 및 질량을 변화시켜 일정대역의 가진진동수에 가깝게 하므로서 동적응답을 제어할 수 있는 효율적인 방법이라고 사료된다.



a) 부가질점계에 의한 가속도변화



b) 부가질점계에 의한 속도변화

그림 5.10 부가질점계에 따른 동적응답(#25)

6. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 동적해석과정의 타당성을 검증을 통하여 수치해석의 동적응답 및 진동수분석결과가 실측된 동적거동과 잘 일치하고 있으므로, 본 연구의 해석과정은 철근콘크리트슬래브의 영향인자별 동특성 개선을 위한 진동특성을 비교적 정확하게 도출할 수 있다고 판단된다.
- 2) 경계조건인 철근콘크리트슬래브의 지지점을 4~28개로 변화시키면서 수치해석한 결과로부터 지지점을 증가시킬 수록 관심 대상의 동적

응답을 45~50%정도 줄일 수 있었다. 이는 철근콘크리트슬래브의 고유진동수를 외력의 진동수와 격리시키므로서 일정대역에서 공진을 일으키지 않도록 한 것으로 판단된다.

- 3) 구성재료의 변화에 따른 수치해석한 결과 탄성계수를 크게함으로써 동적응답값을 감소시킬 수 있으며, 고유진동수 또한 고진동수로 이동하여 진동을 제어할 수 있다. 특히 폴리머침투 콘크리트는 저진동수 영역에서 진동을 제거할 수 있으므로 특정가진에 대한 방진에 효과적으로 사용될 수 있는 재료라는 사실을 밝혔다.
- 4) 가진원의 위치를 본 대상구조 철근콘크리트슬래브내에 이동시키면서 해석한 경우 동적응답값이 중앙부에서 작음을 알 수 있으며, 이로부터 진동에 크게 영향을 받는 기계는 위치선정시 동적거동이 작은 곳에 놓이도록 하는 것이 유리하다는 사실을 구명하였다.
- 5) 진동을 제어하고자 하는 위치에 부가질량을 30~90kg으로 추가시키면서 수치해석한 결과 부가질량이 증가할 수록 동적응답이 감소되며, 본연구의 모형에서는 부가질량이 90kg(철근콘크리트슬래브 질량의 약 1/3)일 경우에 동적응답값이 30~40% 감소되므로 부가질량은 진동제어에 효과적이라고 판단된다.
- 6) 철근콘크리트 슬래브에 제작한 부가질점계를 장착하여 동적실험한 결과, 동적응답을 18~34%정도 줄일 수 있었다. 따라서 부가질점계의 강성 및 질량을 변화시키므로서 일정대역의 진동을 제어할 수 있음을 밝혔다.

7. 참고문헌

1. Setareh, M. and Hanson, R.D., "Tuned Mass Dampers to Control Floor Vibration from Humans", Jr. of Structural Engineering, ASCE, Vol.118, No.3, 1992, pp 741-762.
2. Schulz, H., "Statical and Dynamical Behavior of Machine Tools Frames made of Polymer Concrete", Polymer In Concrete, 1984, pp121-124.
3. 武田壽一, 構造物の免震, 防震, 制震, 技報堂出版, 1988. pp169-186.
4. 時田保夫, 森村正直, 玉木常博, 精密防振ハンドブック, 日経印刷株式會社, 1987. pp133-138.
5. 島口正三郎, 寺村彰, 中川恭次, 渡邊清治, "ダイナミック・バランスによる振方法の研究", 日本建築學會大會學術講演概集, 1981. pp321-340.