

개폐식 지붕구조의 움직임에 대한 공간구조물의 진동해석

Vibration Analysis of Space Structure with Retractable Roof

김기철* 강주원** 김현수***
Kim, Gee-Cheol Kang, Joo-Won Kim, Hyun-Su

요약

지붕구조의 개폐가 가능한 체육시설 및 복합시설은 대공간구조물의 장점을 잘 나타내고 있으며 대공간구조물의 전천후 사용이 가능하도록 하였다. 개폐식 지붕구조는 구조형식, 마감재료, 개폐방식에 따라서 매우 다양하며 개폐방식에 따라서 중첩방식, 수평이동방식, 주름접기방식 등으로 구분할 수 있다. 특히 중첩방식이나 수평이동방식에 의한 지붕구조의 움직임은 주행하중, 충격하중, 관성력 및 제동력과 같은 동적하중이 구조물에 가해질 수 있으므로 이에 대한 대공간구조물의 진동해석이 필요할 것으로 사료된다. 지붕구조의 움직임에 의한 주행하중은 이동질량 또는 이동하중으로 적용할 수 있으나 비교적 움직임이 느린 개폐식 지붕구조에 의한 동적하중은 이동하중으로 적용하는 것이 타당하다. 따라서 본 논문에서는 지붕구조의 개폐로 야기되는 이동하중에 대한 새로운 적용방법을 제안하고 이를 이용하여 개폐식 지붕의 개폐 속도에 따른 대공간구조물의 진동해석을 수행하였다. 본 논문에서 제안된 등가 이동하중은 지붕구조 개폐에 의한 대공간구조물의 진동해석에 있어서 매우 용이하게 활용할 수 있다.

Abstract

Retractable roof system is one of the special feature in stadium or complex structure. And this retractable roof system makes possible to use spacial structure all-weather. This retractable roof system is able to classified into overlapping, parallel movement and folding system. Moving load, impact load, inertial or braking loads, these dynamic loads induced by movements of retractable roof system. So it is necessary to analysis of spacial structures are subjected to these dynamic loads. Dynamic loads that are induced by the retractable roof movements can be applied to moving mass method or moving force method. But, moving force method is appropriate because the retractable roof movements is slow relatively. In this paper, new application method of moving forces induced by the retractable roof movements is proposed. And vibration analysis of spacial structures are executed by using the proposed method. This proposed equivalent moving force can be easily applied to spacial structure that is subjected to dynamic loads induced by movement of the retractable roof system.

키워드 : 개폐식지붕, 대공간구조물, 이동질량, 등가이동하중

Keywords : Retractable Roof, Large Spacial Structure, Moving Mass, Equivalent Moving Force

1. 서론

경기장, 전시장, 복합시설 및 집회시설과 같은 대공간구조물은 용도에 있어서 매우 다양하며 형태에 있어서도 매우 다양하다. 그리고 대공간구조

물은 일반적인 라멘구조와 다른 구조적 및 형태적 특성을 가지고 있으며 그 중에 하나가 지붕구조의 개폐가 가능하다는 것이다. 지붕구조 개폐 시스템은 대공간구조물에서만 구현될 수 있는 독특한 시스템으로 지붕구조의 개폐로 인하여 대공간구조물의 전천후 사용이 가능하게 되었다. 지붕구조의 개폐는 대공간구조물의 사용성을 증대할 뿐 아니라 지붕이 열리고 닫히는 광경만으로 이벤트적인 효과를 낼 수 있다.

* 서일대학 건축과 부교수, 공학박사

** 교신저자, 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

*** 선문대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

개폐식 지붕구조는 구조형식, 마감재료 및 개폐 방식에 따라서 매우 다양하다. 구조형식에 따라서 케이블구조와 골조구조로 구분할 수 있으며, 재료에 따라서 막재료와 강판재료로 구분할 수 있다. 또한 지붕구조의 개폐는 수평이동, 중첩, 주름접기 등 매우 다양하게 구현할 수 있다.¹⁾

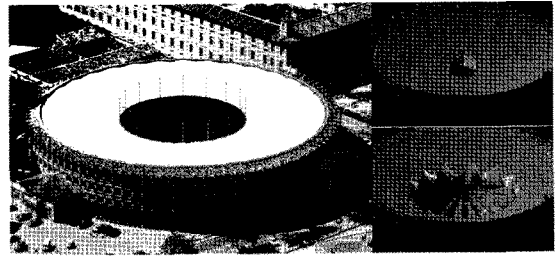
지붕구조 개폐에 대한 그 특징을 간단하게 고찰하면 다음과 같다. 수평이동방식은 <그림 1 (a)>의 오션 돔과 같이 지붕구조가 단순하게 평행하게 움직여 지붕을 개폐하는 것이다. 중첩방식은 몇 개로 구성된 지붕이 완전히 열려진 상태가 될 때 지붕이 2중 또는 그 이상으로 겹쳐지는 지붕구조로 회전이동, 상하이동, 평행이동 등으로 지붕이 움직이며 <그림 1 (b)>는 멜론 아레나로 회전이동 중첩방식을 적용한 것이다. 주름접기방식은 케이블에 막을 매달아 커튼처럼 막을 펴고 접는 방식으로 상하 주름접기, 방사형 주름접기, 수평 주름접기, 부채꼴형 주름접기 등이 있다. <그림 1 (c)>는 스페인 자라고자시에 있는 투우장으로 방사형 주름접기 방식을 적용한 것이다.



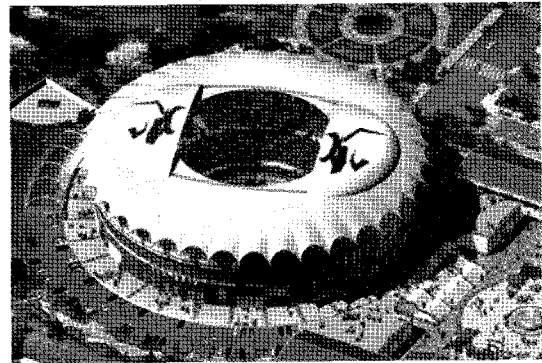
(a) 오션 돔-미야자키, 일본



(b) 멜론 아레나-피츠버그, 미국



(c) 투우장-자라고자, 스페인



(d) 소싸움장-청도, 대한민국

<그림 1> 개폐식 대공간구조물

국내에서 개폐식 지붕구조 시스템을 적용한 사례는 <그림 1 (d)>와 같이 청도 소싸움장이 있으며 지붕구조의 개폐는 슬라이딩 중첩방식을 적용하고 있다. 그러나 국내 대공간구조물의 건설실적은 물론 개폐식 대공간구조물의 실적도 매우 적으며 엔지니어링 설계에 있어서도 초기단계에 있다.

개폐식 지붕구조를 갖는 대공간구조물의 경우에 지붕 개폐에 따른 특별한 동적하중이 대공간구조물에 가해지게 된다. 특히, 수평이동방식이나 중첩방식의 경우에 지붕구조가 레일을 따라서 움직이게 되므로 이에 따른 주행하중, 충격하중, 관성력 및 제동력이 발생하게 된다. 주행하중은 차륜의 축방향으로 가해지며 지붕구조 무게, 차륜간격, 지붕경사도, 주행속도 등에 의하여 결정된다. 충격하중의 경우에 레일의 이음새 또는 주행레일 조도 등에 의하여 발생하게 되며 충격하중은 수평방향 및 상하방향으로 가해지게 된다. 관성력과 제동력은 주행속도나 브레이크 특성 등에 의하여 결정되지만 개폐식 지붕의 경우에 주행속도가 매우 느려서 구조물에 미치는 영향은 매우 미비하다. 따라

서 개폐식 지붕구조를 갖는 대공간구조물의 경우에 지붕개폐에 따른 주행하중과 충격하중을 고려한 진동해석이 수행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 개폐식 지붕구조의 움직임에 따른 동적하중을 고려한 대공간구조물의 진동해석을 수행하기 위하여 지붕 개폐에 따른 주행하중의 적용방법을 제시하고자 한다.

2. 지붕 개폐에 따른 주행하중

지붕 개폐에 따른 동적하중은 지붕 무게, 지붕 개폐속도, 레일 조도 등에 따라 다르게 나타나며 주로 지붕 무게와 지붕 개폐속도에 따라서 동적하중의 크기가 좌우된다.

2.1 이동질량과 이동하중

이동하는 물체에 의한 동적하중은 적용 방법에 따라 이동질량(moving mass) 모델과 이동하중(moving force) 모델로 구분 할 수 있다.

(1) 이동질량 모델

이동질량 모델은 움직이는 물체에 대한 질량의 영향을 고려하는 것으로 동적 평형방정식에서 시간에 따라 질량항이 변하게 된다. 이 방법은 수치 해석과정이 복잡하고 해석시간이 많이 소요된다는 단점이 있으나 움직이는 물체와 구조물과의 상호 동적효과를 고려할 수 있어 정확한 진동해석을 수행할 수 있다.

(2) 이동하중 모델

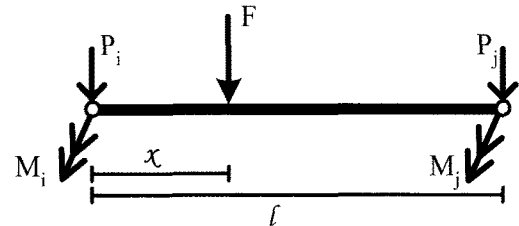
이동하중 모델은 움직이는 물체에 대한 질량의 영향을 무시하기 때문에 동적 평형방정식에서 시간에 따라 질량항은 일정하며 하중항이 변하게 된다. 이 방법은 해석과정이 비교적 간단하나 움직이는 물체와 구조물과의 상호 동적효과를 고려할 수 없다.

움직이는 물체에 동적하중은 이동하중 모델보다는 이동질량 모델이 보다 실제적이나 움직이는 물체의 질량이 구조물의 질량에 비해 매우 작고, 주행 속도가 비교적 느린 경우에 시간에 따른 질량 변화의 영향을 무시할 수 있으므로

이동하중 모델과 이동질량 모델에 의한 진동 응답이 유사하다. 개폐식 지붕 시스템은 개폐 속도가 비교적 느리며 지붕 질량이 구조물의 질량에 비하여 매우 작다. 따라서 본 논문에서는 지붕 개폐에 따른 주행하중을 이동하중 모델로 적용하고자 한다.

2.2 등가 절점하중

절점당 하나의 연직자유도와 하나의 회전자유도를 갖는 보요소 내부의 부재하중(F)을 보요소의 형상함수를 이용하여 식 (1)과 같이 등가 절점하중(P_i, M_i, P_j, M_j)으로 치환할 수 있다.^{2),3),4),5)}



<그림 2> 보요소 등가 절점하중

$$\begin{bmatrix} P_i \\ M_i \\ P_j \\ M_j \end{bmatrix} = F[f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \quad (1)$$

여기서 f_1, f_2, f_3, f_4 은 보요소의 형상함수를 의미한다.⁶⁾

위와 같은 방법으로 레일 위를 주행하는 차량에 의한 이동하중(F_n)을 보요소 형상함수로 표현할 수 있으며 등가 이동하중은 식 (2)~식 (5)와 같이 연직하중과 함께 모멘트하중으로 나타낼 수 있다.

$$P_{ni} = \frac{F_n (l-x)^2(l+2x)}{l^3} \quad (2)$$

$$M_{ni} = -\frac{F_n x(l-x)^2}{l^2} \quad (3)$$

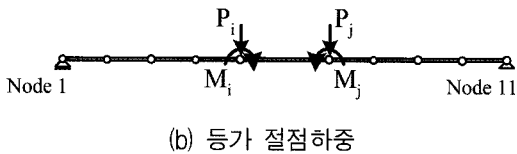
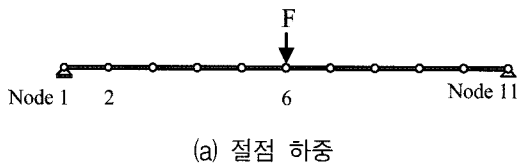
$$P_{nj} = \frac{F_n x^2(3l-2x)}{l^3} \quad (4)$$

$$M_{nj} = -\frac{F_n (l-x)x^2}{l^2} \quad (5)$$

여기서 n 은 차륜 위치에 따른 번호이며 l 은 보요소의 길이이며 x 는 이동하중이 작용하는 위치를 의미한다. P_{ni} 와 P_{nj} 는 i 절점과 j 절점으로 치환된 등가의 연직하중이며 M_{ni} 와 M_{nj} 는 i 절점과 j 절점으로 치환된 등가의 모멘트하중이다.

2.3 등가 절점하중의 적용

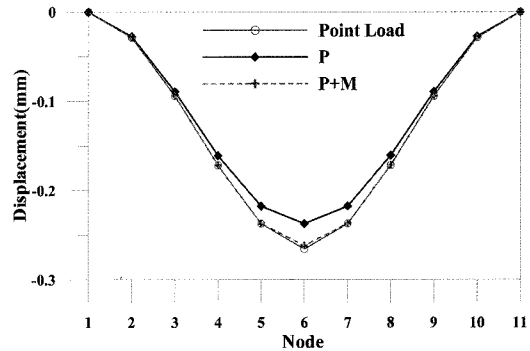
등가 절점하중의 타당성을 검증하기 위하여 다음 <그림 3>과 같이 예제 구조물에 절점하중과 등가 절점하중을 가하여 예제 구조물의 절점별 변위를 비교하였다. 예제 구조물은 경간이 10m인 단순보 구조물이며 보의 중앙점에 10kN의 정적하중을 가하였다.



<그림 3> 등가 절점하중의 적용

<그림 3 (a)>는 절점 6에 10kN의 절점하중을 가한 것이고 <그림 3 (b)>는 절점하중을 등가의 절점하중을 치환한 것으로 5kN의 연직하중과 2.45kN·m의 모멘트하중을 가한 것이다. <그림 4>는 예제 구조물의 절점별 변위를 나타낸 것으로 등가의 절점하중으로 연직하중(P)만 적용한 것보다는 연직하중(P)과 모멘트하중(M)을 적용한 것이 절점하중(Point Load)을 가한 예제 구조물의 변위에 보다 근접한 것을 볼 수 있다. 등가의

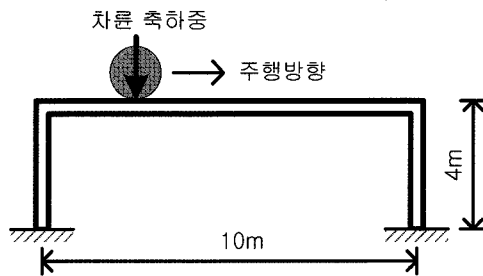
절점하중을 적용하는 간단한 방법으로 연직하중만을 적용할 경우에 약간의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.



<그림 4> 등가 절점하중 적용-변위(정적해석)

2.4 등가 이동하중의 적용

등가 이동하중을 실제 대공간구조물에 적용하기 이전에 단순 골조구조물에 적용하여 타당성을 검증하고자 한다. <그림 5>는 등가 이동하중을 적용하기 위한 단순한 골조구조물로 경간은 10m로 하였다. 이동하는 차륜의 축하중은 10kN이며, 이동속도는 매우 저속으로 0.1m/sec로 하였다.

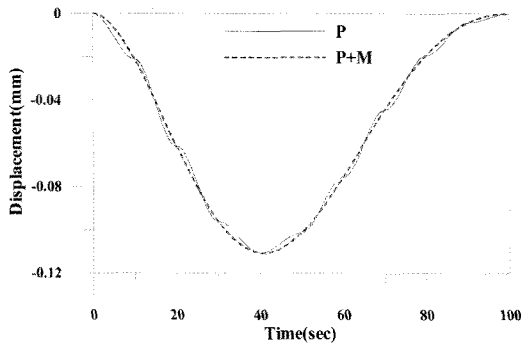


<그림 5> 등가 이동하중의 적용

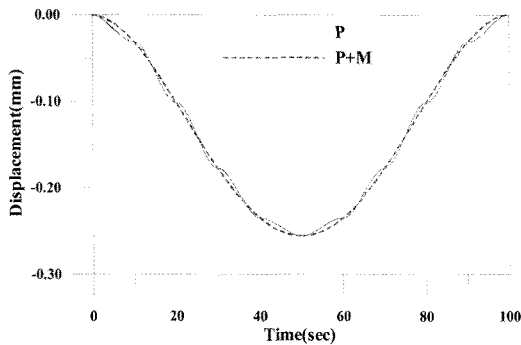
이동하는 물체의 의한 구조물의 진동응답은 이동하는 물체의 속도 및 무게에 의하여 영향을 받으며 또한 이동하는 물체의 관성력과 제동력과 같은 충격하중에 의한 영향을 받게 된다. 관성력은 이동하는 물체가 움직이기 시작할 때 야기되는 것이며 제동력은 물체가 정지할 때 야기되는 것으로 관성력과 제동력은 이동하는 물체

의 무게와 이동속도와 연관이 있다. 그러나 이동속도가 비교적 느리고 무게가 작은 이동하는 물체의 경우에 관성력과 제동력에 의한 진동응답 영향이 매우 작을 것으로 사료된다.

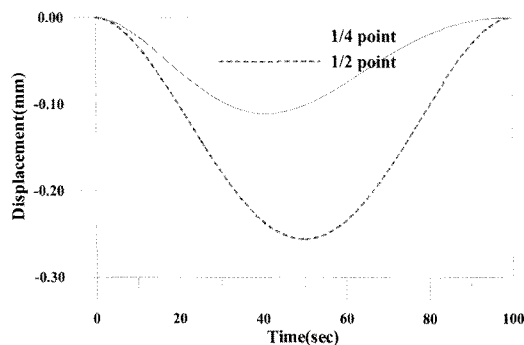
등가 이동하중을 적용방법에는 연직하중만을 적용하는 방법(P)과 연직하중과 모멘트하중을 모두 적용하는 방법(P+M)이 있을 수 있다.



(a) 경간 1/4에서의 변위응답



(b) 경간 1/2에서의 변위응답



(c) 위치별 변위응답-연직과 모멘트하중 적용

<그림 6> 등가 이동하중 적용-변위(동적해석)

등가 이동하중을 적용한 예제 구조물의 변위응답을 <그림 6>에 나타내었다. 연직하중만을 적용한 경우에 전체적인 변위응답 양상이 연직하중과 모멘트하중을 함께 적용한 예제 구조물의 변위응답 양상과 크게 다르지 않으나 약간의 차이가 있음을 볼 수 있다. 또한 등가 이동하중으로 연직하중만을 가한 경우에 변위응답의 양상이 부드럽게 나타나지 않고 있다. 그러나 모멘트하중을 추가하여 적용할 경우에 변위응답 양상이 전체적으로 부드럽게 나타나는 것을 볼 수 있다. <그림 6(c)>에서 알 수 있듯이 중앙점(1/2)에서의 변위응답이 중앙점을 지나가는 시간대 50초 부근에서 가장 크게 나타나고 있다. 그러나 1/4점에서의 변위응답은 40초 부근에서 변위응답이 크게 나타나고 있다. 이는 이동하는 물체가 중앙점 부근을 지나갈 때 모든 위치에서 변위응답이 크게 나타나기 때문이다.

3. 예제 구조물 및 가진 이동하중

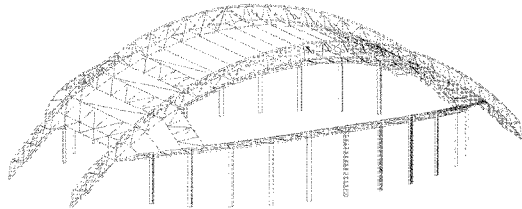
3.1 킬아치 예제 구조물의 동적특성

본 논문에 적용한 수치해석 예제 구조물은 현재 시공 중에 있는 OO기술교육대학교 홍보관으로 킬아치 구조형식을 갖는 대공간구조물이다. 킬아치의 지점간 거리는 49m이며 바닥에서 천정까지의 최고 높이는 24m이다. 킬아치는 트러스 구조로 되어 있으며 지붕을 열고 닫을 수 있는 개폐식 지붕구조로 되어 있다. 지붕의 개폐구간은 20m 정도이다.

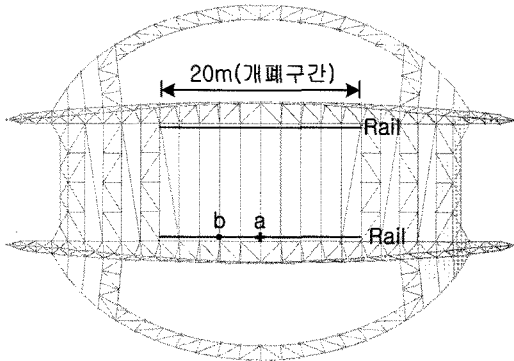
킬아치 예제 구조물의 진동모드 형상은 아치구조물의 진동모드 양상과 유사하게 나타나고 있다. 킬아치 예제 구조물의 주요 진동모드와 고유진동수를 <그림 8>에 나타내었다.

킬아치 예제 구조물의 1차, 2차 및 3차모드는 킬아치 경간의 법선방향 강성이 비교적 작기 때문에 법선방향 모드로 먼저 나타나고 있으나 본 연구는 주로 경간방향과 연직방향의 진동응답에 대하여 분석하고자 한다. 킬아치 예제 구조물의 동적거동에 영향을 미치는 주요모드는 <그림 8>

과 같이 4차, 5차 및 9차 모드에서 나타나고 있다. 모드별 진동수를 살펴보면 트러스로 되어 있는 킬아치의 강성이 비교적 크기 때문에 일반적인 아치 구조물과 비교하여 고유진동수가 크게 나타나고 있다.

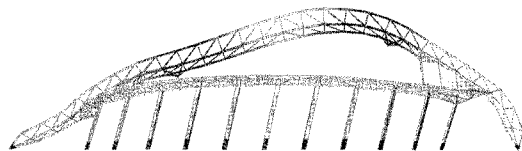


(a) 킬아치 예제 구조물

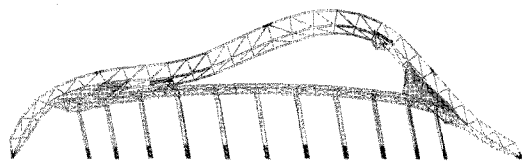


(b) 킬아치 예제 구조물 개폐구간

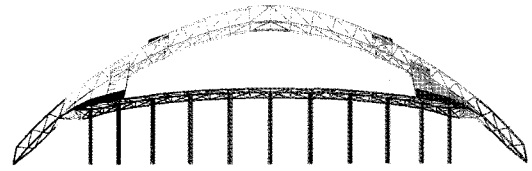
<그림 7> 수치해석 예제 구조물



(a) 4차모드 (8.02Hz)



(b) 5차모드 (12.46Hz)

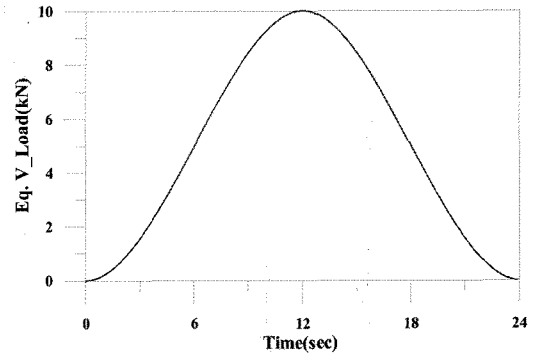


(c) 9차모드 (19.75Hz)

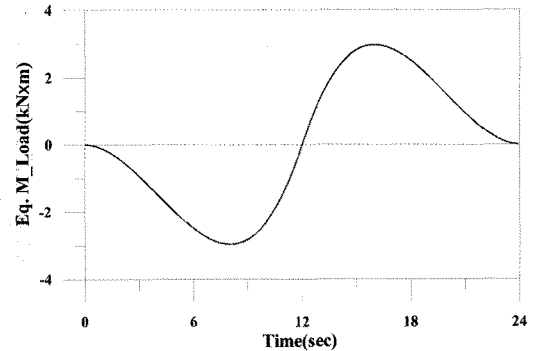
<그림 8> 킬아치 예제 구조물의 동적특성

3.2 킬아치 예제 구조물의 가진 이동하중

킬아치 예제 구조물에 적용하고자하는 등가 이동하중은 연직하중과 모멘트하중을 동시에 가하는 것이 합리적이다. <그림 9>는 킬아치 예제 구조물에 적용하고자하는 등가의 연직하중과 모멘트하중으로 개폐식 지붕구조물의 무게는 약 20kN 정도이며 지붕구조물의 개폐 속도는 10m/min.로 하였다. 따라서 양쪽의 레일에 각각 10kN에 의한 등가 이동하중이 나란하게 적용하게 된다.



(a) 등가 연직하중



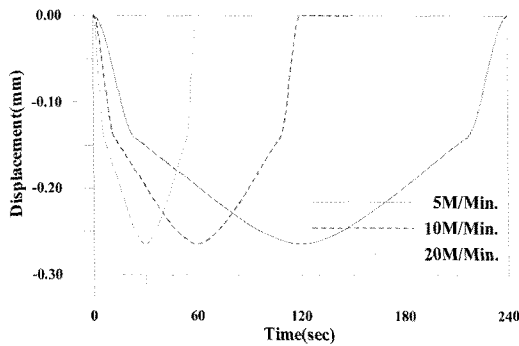
(b) 등가 모멘트하중

<그림 9> 등가 이동하중

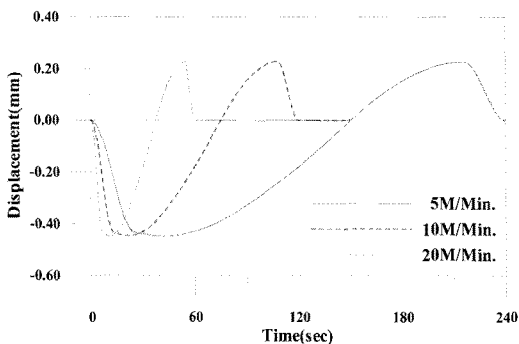
등가 이동하중이 작용하는 레일의 단위 길이는 약 2.0m 이므로 식 (2)~(5)에서 구한 등가 연직하중과 등가 모멘트하중이 질점에 따라서 반복 적용하게 된다.

4. 예제 구조물의 진동응답

지붕구조물의 개폐 속도에 따라서 대공간구조물의 진동응답의 양상이 다르게 나타날 수 있으므로 이에 대한 분석이 필요하다. 따라서 지붕구조물의 개폐 속도를 5m/분, 10m/분 그리고 20m/분으로 하여 이에 따른 킬아치 예제 구조물의 변위응답을 비교 분석하였다.



(a) 개폐 속도에 따른 점 a의 변위응답



(b)개폐 속도에 따른 점 b의 변위응답

<그림 10> 개폐 속도에 따른 변위응답

<그림 10 (a)>은 지붕구조물의 개폐 속도에 따른 점 a에서의 변위응답을 나타낸 것이다. 지붕구

조물의 개폐 속도가 5m/분일 경우에 120초 부근의 영역에서 변위응답이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 레일 길이가 약 20m이므로 지붕구조물이 개폐하기 시작하여 2분이 경과하면 차륜에 의한 이동하중이 레일의 중앙에 다다르게 되기 때문이다. 마찬가지로 개폐 속도가 10m/분일 경우에 약 60초 부근의 영역에서 변위응답이 가장 크게 나타나고 있으며, 개폐 속도가 20m/분일 경우에 약 60초 부근의 영역에서 진동응답이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

<그림 10 (b)>은 지붕구조물의 개폐 속도에 따른 점 b에서의 변위응답을 나타낸 것이다. <그림 10 (a)>는 다른 양상을 보이고 있다. 차륜 하중이 레일의 중앙점을 지나간 후에는 점 b의 변위가 양의 값으로 나타나고 있다. 이는 차륜하중이 중앙점을 지나는 시점부터 점 b가 떠오르기 때문이다. 이러한 현상은 구조설계에 의한 부재 구성에 따라서 다르게 나타날 수도 있다.

<그림 10>에서 볼 수 있듯이 개폐 속도에 따라서 변위응답의 크기가 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 이동물체의 이동하중은 이동속도와 무관하기 때문이다. 그러나 충격하중의 양상을 갖는 관성력 및 제동력은 이동속도에 따라서 매우 다르게 나타나므로 이에 따른 진동응답의 크기도 다르게 나타날 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 대공간구조물 지붕형태의 하나인 개폐식 지붕구조물의 개폐로 야기되는 이동하중의 수치해석 적용방법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 등가 이동하중을 적용하는 방법은 등가 연직하중만을 적용하는 방법과 등가 연직하중과 등가 모멘트 하중을 동시에 적용하는 방법이 있을 수 있다. 전자의 경우에는 이동하중의 적용방법이 간단하나 후자의 경우와 비교하여 진동응답에 오차가 발생한다. 후자의 경우에는 비교적 정확한 진동응답을 얻을 수 있다.

둘째, 본 논문에서 제안한 등가 이동하중의 적

용으로 지붕구조물의 개폐로 야기되는 대공간구조물의 진동응답 분석을 통하여 지붕구조물의 개폐에 따른 사용성 평가가 가능하다.

셋째, 지붕구조물의 개폐로 야기되는 이동하중을 등가의 이동하중으로 치환하여 적용할 경우에 엔지니어들이 손쉽게 이를 적용할 수 있으며 효율적인 진동해석이 가능하다.

본 연구에서는 개폐식 지붕구조물의 개폐에 따른 이동하중만을 고려하여 진동해석을 수행하였으나 지붕구조물의 움직임으로 야기되는 관성력 및 제동력 등에 대한 대공간구조물의 진동해석을 통한 대공간구조물의 사용성 평가가 필요하리라 판단된다.

Finite Elements For Structural Analysis, Prentice Hall, pp. 205~209, 1984

- ▶ 접수일자 : 2010년 11월 16일
- ▶ 심사 완료일자 : 2011년 1월 21일
- ▶ 게재 확정일자 : 2011년 2월 16일

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 (과제번호 # 06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박선우, 최취경, "세계의 대형 개폐식 지붕구조", 한국공간학회 학술발표회, 제5권 제1호, pp.227~231, 2008.
2. 김태호, "교통하중을 받는 구조물의 동적해석", 석사학위논문, 성균관대학교, 1998
3. 김기철, 이동근, "보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, pp.21~29, 2001. 2
4. 김기철, 한덕진, "차량 이동하중을 받는 바닥판 구조물의 효율적인 진동해석", 대한건축학회 논문집, 제21권 제4호, pp.57~64, 1999, 2005. 4
5. Jia-Jang Wu, A.R. Whittaker and M.P. Cartmell, "The use of finite element techniques for calculating the dynamic response of structures to moving loads", Computers & Structures, Vol. 78, pp. 789~799, 2000
6. William Weaver, Jr., and Paul R. Johnston,