

## 탄력망의 동력학적모형화에 대한 연구

박진혁, 김영성

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《체육을 과학화하여야 나라의 체육기술을 빨리 발전시킬수 있으며 경기에서 좋은 성과를 거둘수 있습니다.》

탄력망체조운동은 탄력망우에서 수행하는 체조운동으로서 공중전회의 여러가지 기교 동작들과 탄력망에로의 착지동작들을 엮바꾸어 수행하는 형태로 구성되어있다. 탄력망체조운동의 동력학적모의계산을 진행하는데서 탄력망기재에 대한 모형을 정확히 작성하는 문제는 무엇보다도 중요한 의의를 가진다.

우리는 질량-용수-감쇠요소들을 결합하여 탄력망의 비선형동력학적모형을 작성하기 위한 한가지 방법을 제안하였다.

실제의 탄력망은 탄성이 강한 섬유를 리용하여 조밀하게 짠 그물로서 전체적으로 길이 5.2m, 너비 3.05m의 직4각형형태를 가지고 지면으로부터 1.1m의 높이에 설치된다.

선행연구[1]에서는 탄력망체조운동의 동력학방정식을 작성하기 위하여 탄력망을 비선형용수역세기를 가진 한자유도계로 보고 그것의 동특성 즉 탄력망의 비선형등가역세기와 감쇠특성을 결정하기 위한 실험을 진행하였다. 여기서는 탄력망의 중심위치에 각이한 질량을 가지는 추를 올려놓으면서 해당한 변위를 측정함으로써 탄력망에 작용하는 힘과 변위사이의 비선형관계를 추정하였다.

실험결과에 의하면 탄력망에 작용하는 힘 및 모멘트와 수직 및 수평변위, 회전각사이의 관계식은 다음과 같다.

$$G = 6\,230y^2 + 1\,530y, \quad P = 240x, \quad M = (22y - 0.2)\theta$$

여기서  $G$ 는 수직방향힘,  $y$ 는 수직방향변위,  $P$ 는 수평방향힘,  $x$ 는 수평방향변위,  $M$ 는 회전모멘트,  $\theta$ 는 회전각이다.

그러나 이 모형은 선수가 탄력망에서 오직 수직방향의 운동만을 진행한다는것을 전제로 한것이므로 만일 선수의 운동자리길이 약간 포물선을 그리면서 조금이라도 변하여 착지점이 달라지는 경우 그물의 실제특성 즉 실제의 변형을 그대로 반영하지 못하는 부족점이 있다.

선행연구[2]에서는 탄력망을 단일한 역세기를 가지는 한자유도선형용수로 환산하고 착지과정에 대한 동력학적방정식을 작성하였는데 이 방법은 탄력망을 선형계로 모형화한것으로 하여 그것의 실제적인 비선형특성을 정확히 반영하지 못하였다. 선수의 각이한 기교동작에 대하여 탄력망체조운동의 동력학적모의를 보다 현실감이 있게 진행하려면 동력학모의프로그램인 ADAMS를 리용하는것이 합리적이다. ADAMS를 리용한 탄력망운동모의에서 관건적인 문제는 탄력망기재에 대한 동력학적모형을 어떻게 작성하는가 하는 문제이다. 앞에서도 언급한바와 같이 탄력망의 한자유도계모형은 선수의 운동자리길이 각이하게 변하는 경우 그물의 실제특성을 그대로 반영하지 못하였다.

선행연구[1]에 의하면 탄력망의 최대변위와 회복힘사이에는 비선형관계가 존재한다. 즉 탄력망은 전체적으로 볼 때 비선형다자유도진동계이다. 그러나 탄력망의 매 그물눈을

구성하는 요소섬유들의 길이와 형태는 모두 꼭 같으므로 그것들은 단일한 역세기를 가지는 용수요소들이라고 볼수 있다. 또한 매 요소섬유들의 변형은 전체 그물의 변형에 비하면 대단히 작으며 비교적 선형성을 가진다고 볼수 있다. 이로부터 탄력망의 매 그물눈은 선형질량-용수-감쇠요소들의 결합이며 전체 탄력망은 그러한 요소들이 수평방향에서 서로 수직으로 결합된 다자유도진동계라고 보고 그것의 동력학적모형을 작성할것을 제안하였다. 이를 위하여 각이한 높이에서 락하하는 선수에 대한 실험자료와 ADAMS동적모의결과의 비교연구를 통하여 탄력망을 구성하는 질량-용수-감쇠요소의 파라미터를 확정하기로 한다.

탄력망의 그물눈의 크기는 10mm미만으로서 매우 작은데 이것을 그대로 ADAMS에 반영하려면 대단히 많은 용수-감쇠요소들이 필요하며 결과적으로 기억용량과 계산부하가 엄청나게 커지게 된다. 이로부터 그물눈의 크기를 0.5m로 성글게 하면서도 실제의 탄력망과 등가인 용수-감쇠를 가지는 등가모형을 작성하기로 한다.

론문에서는 이러한 탄력망의 특성을 모의하기 위하여 45개의 질점들(질점들사이의 간격은 0.5m)과 108개의 용수-감쇠기를 리용하였으며 선수의 발과 탄력망의 접촉을 원활하게 보장하기 위하여 1개의 보조판(크기는  $0.5m \times 0.5m \times 0.01m$ , 질량은 무시)을 그물의 중심부분에 설치하였다.(그림) 탄력망모형에서 매개의 용수-감쇠요소들은 질량이 매우 작은 집중질량요소들에 의하여 결합되어있는데 전체 집중질량요소들의 질량의 합은 탄력망의 총질량 8.3kg과 같다. 즉 매 집중질량요소들의 질량은  $8.3/45 \approx 0.18kg$  이다.

그물의 바깥부분에 위치한 28개의 용수요소들은 지면과 질점사이의 연결부분이며 기타 용수요소들은 호상 린접한 질점들을 연결하는데 리용된다.

우선 각이한 락하높이에서 선수가 곧추 선 수직자세로 떨어질 때의 최대착지깊이와 해당한 높이에 대하여 각이한 용수역세기를 설정한 ADAMS 운동모의를 통하여 얻은 최대착지깊이와의 비교를 통하여 탄력망의 모형화에 리용될 용수요소의 역세기를 결정한다. 최대착지깊이에 대한 실험자료와 모의결과를 비교하였다.(표) 표에서 알수 있는바와 같이 최대착지깊이의 실험자료에 대한 운동모의결과의 평균상대오차는  $k=30N/mm$  인 경우에 최소로 6.37%이다. 이로부터 탄력망의 동력학적모형작성에 리용될 용수요소로서 질량이  $m=0.18kg$  이고 역세기가  $k=30N/mm$  인 용수요소를 선택하였다.



그림. 탄력망과 선수에 대한 ADAMS모형

표. 최대착지깊이에 대한 실험자료와 모의결과의 비교

락하높이 /m	최대착지깊이 실험자료/m	역세기 $k$ (N/mm)에 대한 최대착지깊이의 모의결과/m					
		$k=26$	$k=28$	$k=30$	$k=32$	$k=34$	$k=36$
3.1	0.810	0.784	0.771	0.761	0.75	0.736	0.724
2.5	0.750	0.752	0.741	0.73	0.72	0.707	0.695
2.2	0.710	0.735	0.723	0.713	0.703	0.690	0.678
1.5	0.620	0.688	0.676	0.666	0.656	0.643	0.632
1.1	0.550	0.655	0.644	0.634	0.625	0.613	0.602
평균상대오차(%)		7.411	6.794	6.366	6.367	6.575	6.757

여기서 락하높이는 탄력망의 수평면에서 발끝까지의 높이이다.

다음으로 용수요소의 감쇠계수를 구하는 문제이다. 선수가 탄력망에 착지하였다가 다시 반발하여 공중으로 리탈하면 탄력망은 물결처럼 출렁이게 되는데 이것은 일종의 충격진동으로 볼수 있다. 그 지속시간의 길이는 탄력망의 감쇠특성에 의존되는데 감쇠가 작으면 출렁이는 지속시간이 길고 감쇠가 크면 그 지속시간이 짧다. 실제의 촬영자료를 분석하여보면 선수의 락하높이에 따라서 약간씩 다르기는 하지만 탄력망이 출렁이는 지속시간 즉 충격진동의 지속시간은 대체로 1.2 ~ 1.4s 정도이다. 이로부터 용수요소의 감쇠계수를 0.5Ns/mm 로 취하여 탄력망모형의 충격진동지속시간이 실제의 지속시간과 같아지도록 설정하였다.

## 맺 는 말

선형질량-용수-감쇠요소들을 리용하여 탄력망기재의 비선형동력학적모형을 작성하기 위한 한가지 방법을 확립하였다. 탄력망의 매 그물눈에는 비록 선형용수요소들이 리용되었지만 그것들을 수평방향에서 서로 수직되게 련결하여 얻은 탄력망의 최대연직변위와 회복힘사이에는 비선형관계가 존재하며 따라서 탄력망은 전체적으로 비선형다자유도진동계로 모형화된다.

## 참 고 문 헌

- [1] W. Blajer et al.; Journal of Biomechanics, 34, 1619, 2001.
- [2] J. Chen et al.; Human Movement Science, 48, 54, 2016.

주체109(2020)년 12월 5일 원고접수

## Study on a Dynamic Modeling of Trampoline

*Pak Jin Hyok, Kim Yong Song*

In this paper a method for a dynamic modeling of trampoline has been studied by means of ADAMS software. A dynamic model for the trampoline was proposed by using a net composed of spring force elements—the total stiffness was equivalent to that of the real trampoline.

Keywords: trampoline, computer simulation, multibody dynamics