

탄력망체조운동의 동력학적모의방법에 대한 연구

김영성, 황금혁

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

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

체조운동은 달리기와 공중전회, 기재를 리용한 여러가지 기교동작들로 구성되는 복잡하고 거시적인 력학적운동으로서 체조운동의 과학화는 경기승패를 결정하는 중요한 요인으로 된다.

선행연구[1]에서는 선수가 체조운동을 진행할 때 관절각의 시간에 따르는 변화량을 운동모의의 구동조건으로 리용하여 결과적으로 전체 몸무게중심의 운동자리길과 몸통회전각의 변화특성을 얻었으며 선행연구[2]에서는 운동선수의 평면5토막모형을 리용하여 공중전회운동을 모의하였다.

본문에서는 ADAMS프로그램을 리용하여 탄력망체조운동을 동력학적으로 모의하는 방법에 대하여 논의하였다.

1. 탄력망운동모의를 위한 다체계동력학문제의 설정

사람의 신체는 명백히 강체가 아닌 부분토막들로 구성되어있지만 체조운동과 같이 거시적인 운동만을 고찰하는 경우에는 서로 련결된 다강체계로 취급할수 있다.

체조운동선수는 운동과정에 외부물체의 반작용힘과 같은 외력의 영향을 받는다. 실제로 탄력망운동선수는 운동과정에 탄력망의 반작용힘을 리용한 공간비행을 하면서 여러가지 기교동작들을 수행하게 된다. 이때 외력의 작용과 함께 운동과정에 선수가 의도적으로 취하는 몸자세에 의하여 전체 몸무게중심의 운동자리길과 몸통의 회전각은 달라지게 된다. 여기서 외부물체 즉 탄력망은 그 물리적특성량들이 고정적으로 주어지므로 탄력망의 반작용힘은 전적으로 선수의 능동적인 자세에 의해 결정된다. 따라서 운동모의에서 기본은 선수가 체조운동과정에 의도적으로 취하는 능동적인 몸자세에 따라 전체적인 운동상태가 어떻게 변화되는가 하는 문제 즉 몸자세에 따르는 전체 몸통의 무게중심의 병진운동과 몸통의 회전각을 구하는 문제이다.

이 문제를 해결하자면 다체계동력학의 해석수법을 리용하여야 한다. 다체계동력학에서는 시간에 따라 선수가 취하는 능동적인 몸자세를 속박조건으로 하고 외부물체의 반작용힘을 외력으로 하는 운동미분방정식에 기초한 과학적이며 합리적인 풀이방법을 제공한다. 그런데 인체운동에 대한 동력학적모의와 같은 복잡한 문제에서는 수동적으로 운동방정식을 작성하는것이 시간과 품이 많이 들고 오류가 발생할 가능성도 많기때문에 컴퓨터 모의프로그램에 의한 자동해석방법이 널리 리용되고있다.

ADAMS, OpenSim 및 AnyBody 등의 운동모의프로그램들에서는 사용자가 정의한 강체 및 탄성체에 대하여 운동방정식을 자동적으로 작성하고 그 적분풀이를 수치적으로 구하고있다.[1]

여기서는 ADAMS 2017프로그램을 리용하여 탄력망체조운동에 대한 동력학적모의를 진행하는 방법에 대하여 보기로 한다.

2. 탄력망과 선수의 신체 및 호상접촉에 대한 동력학적모형화

먼저 탄력망에 대한 동력학적모형화를 진행한다. 실제의 탄력망은 탄성이 강한 섬유를 리용하여 조밀하게 짠 그물을 길이 5.2m, 너비 3.05m의 직4각형형태의 크기로 1.1m의 높이에 설치한 기재이다.

우리는 ADAMS의 용수힘요소들을 리용하여 탄력망에 대한 동력학적모형화를 진행할것을 제안하였다. 실제의 탄력망그물눈의 크기는 10mm미만으로서 매우 작은데 이것을 그대로 ADAMS에 반영하려면 대단히 많은 용수힘요소들이 필요하며 결과적으로 기억용량과 계산부하가 엄청나게 커지게 된다. 이로부터 그물눈의 크기를 500mm로 성글게 하면서도 실제의 탄력망과 등가인 역세기가 보장되도록 개별적인 용수힘요소들의 역세기를 조절하는 방법으로 등가탄력망모형을 제안하였다.(그림 1)

실제의 탄력망에서 그물의 최대처짐깊이는 1 100mm인데 그림 1에서 보여준 등가역세기를 가지는 탄력망의 최대처짐깊이는 1 060mm로서 2개의 탄력망이 거의 같은 처짐깊이를 가진다고 볼수 있다.

탄력망모형에서 매개의 용수힘요소들은 질량이 매우 작은 집중질량요소들에 의하여 결합되어있는데 집중질량요소들의 전체 무게합은 탄력망의 무게와 같다.



그림 1. 실제의 탄력망과 같은 등가역세기를 가지는 탄력망모형

다음으로 선수의 신체에 대한 동력학적모형화를 진행한다.

먼저 신체측정자료에 기초하여 선수의 기하학적모형을 SolidWorks 2017을 리용하여 작성하고 표에 보여준 성인남자의 신체부위별상대무게비율에 따라 전체 몸무게를 상박과 전박, 대퇴와 하퇴 등의 부분토막별로 분할한다. 다음 매 부분토막들의 무게자료를 ADAMS 2017에 입력하여 토막별무게중심들의 자리표와 축관성모멘트를 자동적으로 계산한다. 그리고 신체에서 서로 상대운동을 하는 12개의 운동토막들과 10개의 관절들에 대하여 상대운동의 기본특성을 반영하도록 운동쌍들을 정의한 다음 매 운동쌍들에 운동분석을 통하여 얻은 관절각변화자료를 속박조건으로 입력한다.

표. 성인남자의 신체부위별상대무게

신체부위	전체 몸	몸통	머리와 목	상박	전박	손	대퇴	하퇴	발
무게비율/%	100	48.3	7.1	3.3	1.9	0.6	10.5	4.5	1.5

끝으로 선수와 탄력망사이의 충돌접촉특성파라메터들을 정의한다. ADAMS에서는 충돌과정에 두 충돌체들사이에 가상적인 비선형용수-감쇠기가 작용한다고 보고 충돌접촉에

대한 모의를 진행한다. 즉 충돌하는 두 물체사이에 설정된 표식자 I 와 J 사이의 거리가 자유길이 x_1 보다 작아지면 비선형충돌접촉이 발생하기 시작한다고 본다.

비선형충돌의 수학적모형은 다음과 같다.

$$F = \begin{cases} \max(0, k(x_1 - x)^e - \text{step}(x, x_1 - d, c_{\max}, x_1, 0) \cdot \dot{x}), & x < x_1 \\ 0, & x \geq x_1 \end{cases}$$

여기서 x 는 두 표식자사이의 거리, x_1 은 x 의 자유길이라고 하는데 x 가 x_1 보다 작아지면 충돌힘이 계산된다. k 는 접촉억제기, e 는 힘변형특성지수로서 굳은 용수특성에 대해서는 $e > 1.0$ 이고 연한 용수특성에 대해서는 $0 < e < 1.0$ 이다. c_{\max} 는 최대감쇠계수, d 는 침투깊이로서 감쇠힘이 최대로 작용하는 침투거리를 의미한다.

우의 충돌모형에서 리용되는 접촉파라미터들의 구체적인 값은 적용되는 대상에 따라 모두 다르다. 또한 많은 연구자들이 우의 모형을 리용하여 충돌모의를 진행하고있지만 모의에서 리용된 구체적인 파라미터값들은 공개하지 않고있는것이 보통이다. 더우기 국내에서는 아직까지 인체와 탄력망사이의 충돌모의에 대한 연구가 진행되지 못한것과 관련하여 우리는 시행착오적인 방법을 반복적용하여 선수의 신체와 탄력망사이의 접촉파라미터들을 결정하였다.

3. 운동분석을 통한 모의구동자료의 준비

탄력망체조운동은 크게 예비조약, 락하, 그물접촉하여 반발조약, 완충정지 등의 단계들로 구성된다. 우의 단계들에서 완충정지를 내놓은 나머지동작들은 흔히 여러차례의 반복동작으로 이루어지는것이 보통이다.

ADAMS를 리용하여 우의 운동과정에 대한 동력학적모의를 진행하려면 운동의 전기간 선수가 취하는 몸자세 즉 신체의 매 관절각들의 시간에 따르는 수값자료가 필요하다. 선수의 몸자세 즉 관절각의 변화특성자료는 ADAMS프로그램에서 신체의 관절들에 대한 비정상기하학적속박조건으로 입력된다. 이 속박조건들과 초기순간의 몸자세와 속도 즉 초기조건이 바로 운동모의의 구동조건으로 된다.

초기조건과 관절각의 변화특성에 대한 이러한 기초자료를 얻자면 선수의 운동과정을 촬영하고 그에 기초한 운동학적분석을 통하여 신체의 매 관절각들에서의 시간변화특성을 얻어야 한다.

우리는 탄력망체조운동의 《몸굽혀 앞으로 세바퀴 허공돌며 180° 방향바꾸기》동작을 수행하는 어느 한 선수에 대하여 운동 전 과정을 촬영하고 운동분석프로그램을 리용하여 초기몸자세와 속도, 관절각들의 시간변화특성을 구하였다. 이때 운동모의를 위한 초기시각은 예비조약을 통하여 최고높이까지 조약한 선수가 다시 아래로 자유락하하기 직전의 순간으로 취하였다.

운동분석프로그램을 리용하여 선수가 능동적으로 취하는 몸자세중의 하나인 왼쪽다리무릎각도의 시간에 따르는 변화곡선을 분석해보면 그림 2와 같다. 그림에서 초기시각에 각도가 0인것은 초기자세에서의 각도를 0으로 보고 그에 대한 상대각을 측정하기때문이다. 이와 같은 각도변화곡선들을 신체의 매 관절들에 대하여 얻음으로써 관절각구동에 기초한 운동모의를 진행할수 있는 준비를 끝낸다.

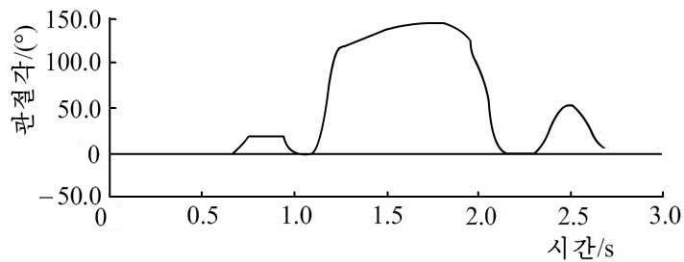


그림 2. 왼쪽다리무릎각도의 시간에 따르는 변화곡선

4. 전용화된 사용자대면부의 작성

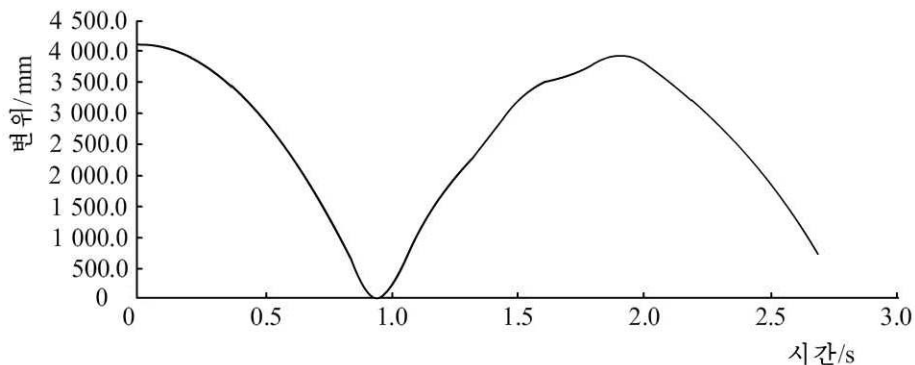
ADAMS 2017프로그램은 전용화된 사용자대면부를 작성할수 있는 2차 개발기능을 제공한다.

우리는 탄력망체조운동과정에 대한 력학적모의에 필요한 입력파라미터로서 매 관절들에서의 시간에 따르는 운동스플라인곡선을 몸자세파라미터로 취하고 이에 따르는 전용화된 사용자대면부를 작성하였다. 그림 3에 모의프로그램에서 리용된 사용자대면부를 보여주었다. 전용화된 사용자대면부를 리용하면 10개의 관절각들의 시간에 따르는 변화값들을 여러가지로 변경시켜보면서 전체 몸무게중심의 운동자리길과 회전각이 어떻게 달라지는가 하는것을 편리하게 모의할수 있다.

모의프로그램의 실행을 통하여 얻게 되는 결과를 요약하여 본다면 전체 몸무게중심의 병진운동법칙과 그 몸무게중심주위로의 전체 몸의 회전운동법칙이다. 이외에도 전체 몸무게중심의 속도 및 가속도, 무게중심주위로의 각속도 및 각가속도, 임의의 신체부위점에 대한 운동학적 및 동력학적특성량(병진 및 회전에 관한 변위, 속도, 가속도와 작용힘, 반력, 회전모멘트 등)들을 얻을수 있다. 선수가 자유락하하여 탄력망에서 한번 반발조약하고 다시 탄력망에 떨어지기 전까지 상체의 무게중심의 시간에 따르는 수직변위와 전체적인 운동자리길을 보여주었다.(그림 4)



그림 3. 사용자대면부



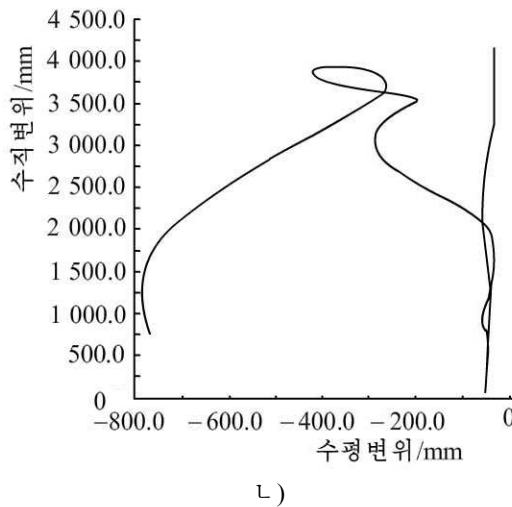


그림 4. 상체의 무게중심의 시간에 따르는 수직변위와 전체적인 운동자리길

맺는 말

논문에서는 ADAMS프로그램을 리용하여 탄력망체조운동을 동력학적으로 모의하는 방법에 대하여 고찰하였다. 또한 모의계산결과의 정확성검증에 대한 논의를 진행하지 않고 다만 이러한 형태의 체조운동모의를 진행하는 방법을 실행순차별로 고찰하였다. 모의 결과의 정확성검증에 대한 논의는 보다 구체적인 연구를 필요로 하는 과제로서 앞으로의 연구에서 더 심화시킬 예정이다.

참고 문헌

- [1] J. P. Carl et al.; Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise, Routledge, 176~200, 2008.
- [2] R. M. Alexander; Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B, 329, 3, 1990.

주체108(2019)년 12월 15일 원고접수

A Method for Dynamic Simulation of the Movements of Trampoline Exercise

Kim Yong Song, Hwang Kum Hyok

In this paper, we study a method for dynamic simulation of the movements of trampoline exercise by means of ADAMS software. A dynamic model for the trampoline is proposed using a net composed of spring force elements of which the total stiffness is equivalent to that of the real trampoline. The joint angle time histories are used as drivers for the simulation.

Keywords: gymnastics, trampoline