 <p style="font-size: 2em; font-weight: bold;">특집</p> <p style="font-weight: bold;">인체 운동 및 진동</p>	<p style="font-size: 1.5em; font-weight: bold;">역·순동역학 방법을 이용한 인체운동과 진동해석</p>
	<p>송창용*</p> <p>(주아띠)</p>

1. 머리말

15세기 레오나르도 다 빈치에 의해 시도된 인체의 생물학적 연구(biology)와 역학(mechanics) 이론의 융합은 최근 생체역학(biomechanics)이라는 독립적인 학문으로 발전하였다. 생체역학은 생물학, 의학, 그리고 다양한 공학적 지식을 바탕으로 정형외과 등의 재활의료 분야부터 스포츠 산업 분야, 자동차·항공·조선과 같은 제조산업 분야, 생체모방 연구(biomimetics) 분야에 이르기까지 광범위한 범위에서 적용되어 오고 있다. 생체역학 연구는 동작운동분석, 골격분석, 근육 분석, 관절분석, 인체측정학, 작업생리학 등의 분야에서 독립적으로 혹은 부분 연계 형태로 진행되고 있으며, 이중에 동작운동분석은 해부학적인 신체의 움직임을 동역학적으로 모사함으로써 인체에서 발생하는 다양한 물리적인 응답을 파악할 수 있는 분야이다.

동작운동분석을 이용하여 스포츠 분야, 제품의 상품성 향상, 재활의학 분야, 국방 분야 및 인체 진동 분야에 대한 다양한 연구들이 활발하게 수행되어 오고 있다. 이 글에서는 역동역학 방법(inverse dynamics method) 및 순동역학 방법(forward dynamics method) 기반의 기구 동역학 이론을 이용하여 인체운동 시뮬레이션을 구현하는 방법론과 인체동역학 모델을 응용한 진동해석

사례 및 기법들을 알아보도록 한다.

2. 인체동역학모델과 운동해석

2.1 인체동역학 모델링

동역학 기반의 인체모델은 기본적으로 신체를 구성하는 머리, 팔, 다리, 몸통 등의 인체분절요소를 조합하여 생성하는데, 이러한 분절요소는 관절 조인트와 근육·힘줄과 같은 생체조직으로 연결되게 된다. 또한, 운동해석을 적절히 수행하기 위해서는 인체모델이 직면한 환경적인 상황이 고려된 기구학적인 접촉요소가 포함되어야 한다.

(1) 인체분절요소

인체분절요소는 일반적으로 신체치수, 질량 및 관성텐서 정보에 대한 인체측정학적 데이터베이스로부터 생성된다. 이러한 인체측정학적 데이터베이스는 시험을 통하여 직접 데이터베이스를 구축할 수도 있고 기존에 상용화된 프로그램을 이용할 수도 있다. 그림 1은 인체동역학 전용해석 프로그램인 LifeMOD를 이용하여 생성되어진 인체운동해석용 인체분절요소 모델이다.

최근 정형외과 수술에서 중요한 부분인 인공관절과 같은 인체에 별도로 삽입되는 비인체분절요소는 추가적인 데이터베이스를 생성하면 해석

* E-mail : cysong@ahtti.com / (031) 777-9131

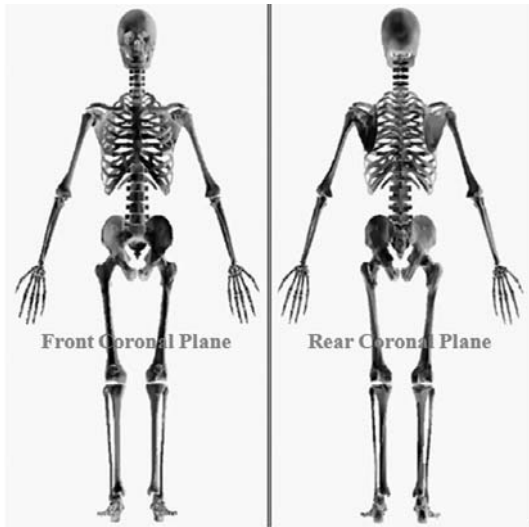


그림 1 인체분절요소의 기구동역학 모델

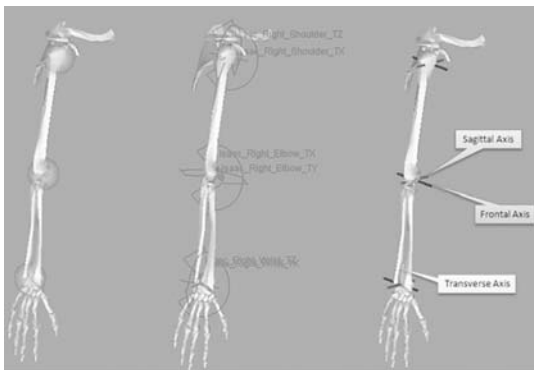


그림 2 관절요소 구성 : 인체관절요소(좌측), 기구학적 관절요소(가운데), 인체측정 좌표(우측)

모델에 고려할 수 있다.

(2) 관절요소

인체분절요소에 대한 정의가 완료된 후에는 각 분절요소 사이의 움직임을 정의하기 위하여 관절요소를 구성해야 한다. 이때 사용되는 관절요소는 기구학적 구속조건(kinematic constraint)이며 역·순동역학(inverse and forward dynamics) 해석에서 인체 움직임의 패턴을 학습하고 재현하는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 관절요소는 해부학적 자유도 상에서 3축 힌지와 수동적인 혹은

능동적인 힘요소로 구성된다. 그림 2에는 인체 팔에 대해서 관절요소를 정의한 사례가 나타나 있다.

관절요소의 특성은 인체 움직임에 따라 크게 6가지 형태로 구분되며, 다음과 같이 정의 된다.

- Fixed joint : 기구학적으로 완전 고정관절
- Free joint : 기구학적 구속이 없는 관절
- Driven joint : 구동 데이터를 기반으로 기구학적인 구동 관절
- Passive joint : 강성, 댐핑, 각도한계 등을 정의할 수 있는 비틀림 스프링 힘관절 요소로써 역동역학 해석 시에 사용된다.
- Driver joint : PD-servo 형태의 제어기 관절 요소
- Hybrid III joint : 강성, 댐핑, 마찰 및 한계 정지 강성 등을 정의하여 Hybrid III 모델을 생성하기 위한 관절요소

(3) 연조직 요소

인대나 근육과 같은 연조직(soft tissue)은 역학적인 비선형 특성이 강하기 때문에 해석적인 데이터로 정의하기가 용이하지 않다. 인체 운동해석에서 이와 같은 연조직은 스프링, 댐핑요소와 인장힘 요소로 이상화하여 골격 모델 사이에 정의한다. 근육요소모델은 학습가능 요소와 능동요소로 구분된다. 학습가능 근육요소는 역동역학해석에서 모션캡처 데이터를 기반으로 인체 동역학 모델이 구동되어질 때 수축과 인장 패턴을 기록하고 학습한다. 능동 근육요소는 순동역학해석에서 액추에이터 역할을 수행하여 역동역학해석의 근육 움직임 패턴을 재현한다. 근육과 같은 연조직의 인장력 추정을 위한 다양한 공식들이 개발되어 오고 있으며, 그림 3은 이러한 공식들을 적용하여 생성된 근육모델 형상들이 나타나 있다.

인체분절요소, 관절요소 및 연조직요소를 이용하여 인체동역학 모델이 완성되면, 인체운동해석을 수행하기 전에 초기 운동자세를 구성한다.

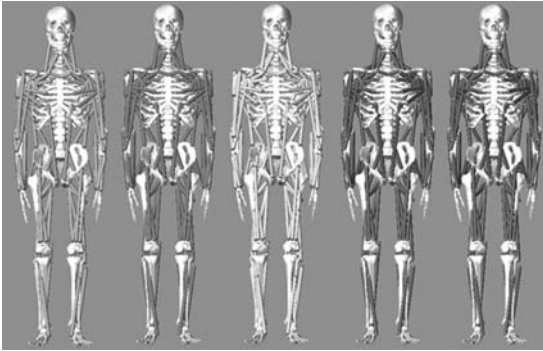


그림 3 인체 근육모델, 좌측부터 우측으로 : 레코딩, 오픈 심플, 오픈 힐, 클로즈드 심플, 클로즈드 힐

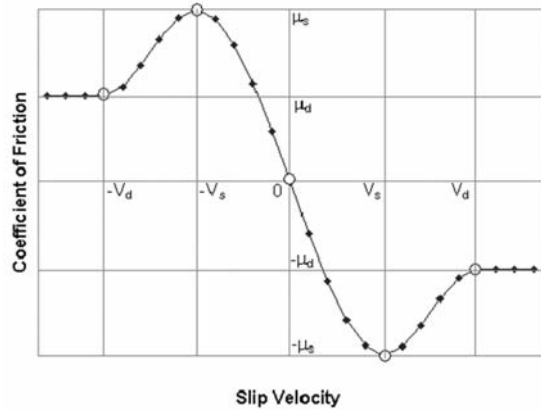


그림 4 마찰계수와 슬립속도 관계 그래프

(4) 접촉요소

인체운동은 인체모델과 운동이 발생하게 되는 주변환경, 즉 보행 시 지면이나 스포츠 운동 시 각종 스포츠 장비, 혹은 운전 시 자동차 내부 등과의 접촉력을 고려해야 한다. 이러한 접촉력은 타원면-평면 접촉요소(ellipsoid-plane contact elements), 타원면-타원면 접촉요소(ellipsoid-ellipsoid contact elements)나 입체-입체 접촉 알고리즘(solid-solid contact algorithm)을 이용하여 생성된다. 일반적인 형태의 접촉력 함수는 다음의 관계식들과 그림 4로부터 마찰계수와 슬립 속도의 관계로 구성된다.



그림 5 타원면-타원면, 타원면-평면 접촉요소

$$\mu(-v_s) = \mu_s \quad (1)$$

$$\mu(v_s) = -\mu_s \quad (2)$$

$$\mu(0) = 0 \quad (3)$$

$$\mu(-v_d) = \mu_d \quad (4)$$

$$\mu(v_d) = -\mu_d \quad (5)$$

$$\mu(v) = -\sin(v) \cdot \mu_d \text{ for } |v| > v_d \quad (6)$$

$$\mu(v) = -\text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s) \cdot \sin(v) \text{ for } v_s \leq |v| \leq v_d \quad (7)$$

$$\mu(v) = \text{step}(v, -v_s, \mu_s, v_s, -\mu_s) \text{ for } -v_s < v < v_s \quad (8)$$

식 (1)부터 (8)에서 v 는 접촉부에서의 슬립속도, v_s 는 정지마찰 천이속도, v_d 는 마찰 천이속도, μ_s 는 정적 마찰계수, μ_d 는 동적 마찰계수를

각각 의미한다. 그림 5에는 복싱 경기에 대한 운동해석 시에 가격 시에 타원면-타원면 접촉력, 그리고 발바닥과 바닥지면에서의 타원면-평면 접촉력 구성 예가 나타나 있다.

2.2 인체동역학해석

인체 운동해석은 크게 수동해석(passive analysis)과 능동해석(active analysis)으로 나누어진다. 수동해석은 인체모델 주위의 동작환경 요인에 반응하는 형태로 해석이 수행되는데, 외력에 대한 신체의 반응을 측정하는 충돌더미(crash dummy) 시험이 대표적인 예이다. 따라서, 수동해석에서는 인체모델이 스스로 운동하기 위해

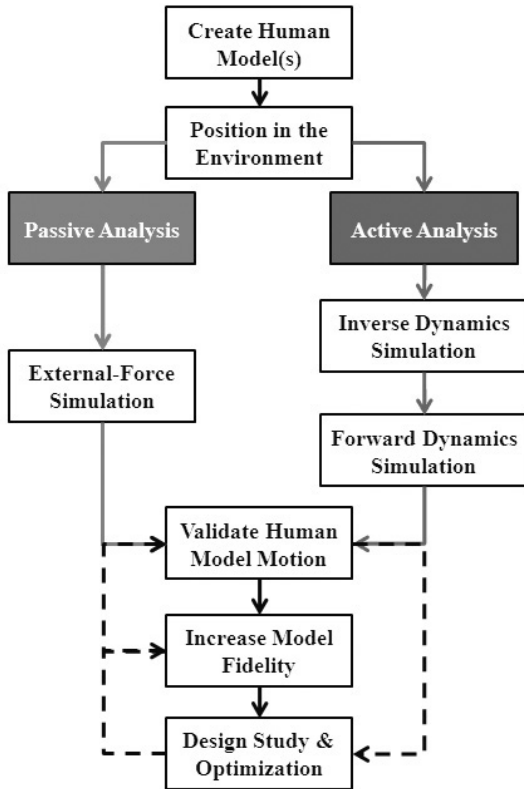


그림 6 인체모델의 동적 운동해석 프로세스

필요한 운동 동인(motion agent)이나 근육함수가 필요하지 않다. 능동해석에서는 인체모델이 주위 동작환경에 반응을 스스로 발생시키게 된다. 능동해석의 정확도를 향상시키기 위해서, 역동역학해석과 순동역학해석을 순차적으로 진행해야 한다. 역동역학해석은 해석 대상이 되는 인체 분절요소에 대해서 관절의 움직임과 근육 수축에 대한 데이터를 기록하는 시뮬레이션을 진행한다. 이때, 운동 동인들이 운동을 발생시키기 위하여 인체모델에 부착되고 움직임의 정보를 관절요소와 연조직에 전달한다. 역동역학해석으로 움직임 정보가 성공적으로 기록되면, 순동역학해석을 이용하여 실제 인체 환경작동과 연계된 각종 운동해석을 수행할 수 있게 된다. 인체동역학해석에 대한 전체적인 프로세스는 그림 6에 나타나 있다.

일반적으로 인체운동해석이라 함은 역·순동

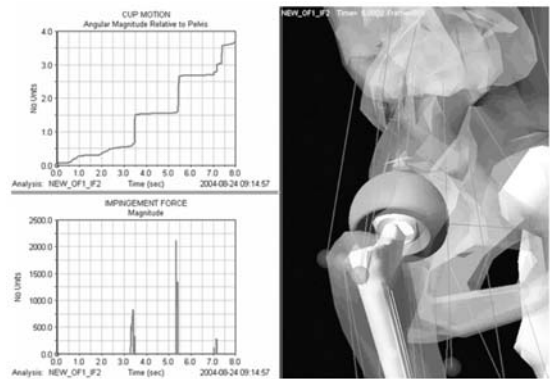


그림 7 대퇴부 인공관절에 대한 보행-착석-보행 시뮬레이션

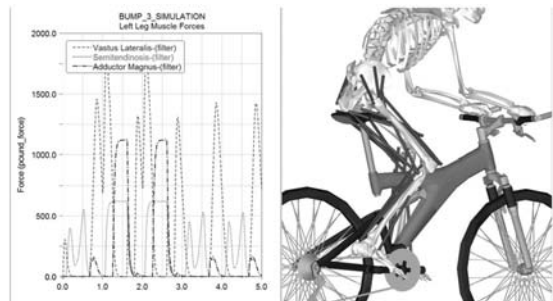


그림 8 자전거 운동 시 하체근육 반력 시뮬레이션

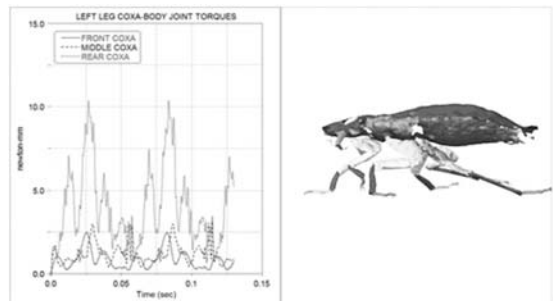


그림 9 곤충운동에 대한 관절 반력 시뮬레이션

역학을 기반으로 한 능동해석이며, 최근 인체 움직임을 측정하는 모션캡처 장비들의 비약적인 발전으로 능동해석의 활용도가 높아지는 추세이다. 능동해석을 이용한 인체운동분석 사례들은 다양한 공학분야연구에서 확인할 수 있으며, 그림 7~9에서의 연구사례는 대표적인 예라고 할 수 있다. 그림 7에는 의공학 분야에 대한 해석사

레로써 대퇴부 인공관절 시술에 대한 인체운동 해석 결과이다.

그림 8에는 스포츠 분야에 대한 해석사례로써 자전거 주행 시 하체근육에 발생하는 반력을 인체운동해석으로부터 시뮬레이션한 결과가 나타나 있다.

그림 9에는 생체모방 분야에 대한 해석사례로써 곤충의 관절에 발생하는 반력을 시뮬레이션한 결과가 나타나 있다. 생체모방 운동해석을 위해서는 관련된 생물체의 분절요소에 대한 별도의 물성정보를 실험적으로 취득해야 하는 어려움이 있으나, 이러한 연구를 통하여 인공조직과 로봇응용 등의 연구로의 융합과 확장이 가능할 수 있다.

이와 같이 능동해석을 기반으로 한 인체운동해석은 다양한 분야에 적용하여 운동에 대한 공학적인 정보를 취득할 수 있으며, 이를 통한 운동 및 반응분석, 운동의 제어 및 관련된 생체의 구조해석을 위한 하중정보로도 유용하게 응용될 수 있다.

3. 인체동역학모델 기반 진동해석

3.1 인체진동 개요

일상 생활 속에서 인체는 자동차 타기, 진동기계 혹은 전동 공구 사용과 같이 일상 활동에서 다양한 형태의 진동에 노출되어 있다. 인체전달되는 진동은 크게 유해한 요인으로 보는 경우와 운동 및 치료에 응용하는 긍정적인 요인으로 구분할 수 있다. 전자는 산업용 전동공구 사용이나 이동수단의 지나친 흔들림으로 야기되는 진동으로서 인체에 전달될 때 불쾌감, 피로감, 시계의 곤란, 기분 활동성, 그리고 작업효율의 저하를 가져올 수 있다. 후자는 스포츠와 재활치료 분야에서 진동을 응용하여 근력, 신경계, 혈액순환, 대사량(metabolism) 및 골밀도(bone density) 향상의 효과를 기대할 수 있다.

인체의 각 부위는 고유한 물성치 및 질량 특성에 따라 각기 고유의 주파수를 가지고 있으며, 인

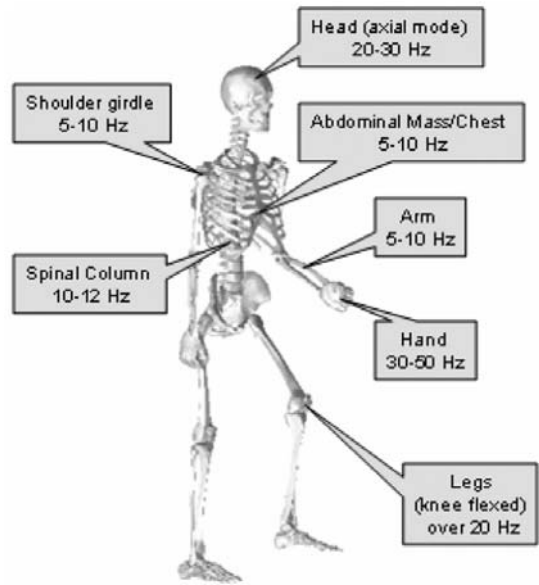


그림 10 단순화된 인체모델과 공진 주파수 범위

체의 진동에 대한 영향은 노출되는 외부가진의 주파수 크기, 특성, 노출량, 방향에 따라 달라진다. 인체의 주요부위와 자세에 대한 진동수를 측정하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 오고 있으나, 인체의 다양성과 인체시험의 한계성으로 인하여 정확한 추정은 어려운 실정이다. 그림 10에는 인체의 각 부위에서 발생하는 공진주파수 대역을 단순하게 표현한 사례가 나타나 있다. 기존의 인체진동을 위해 사용되었던 수학적 인체모델은 낮은 자유도 그리고 실제 인체 특성에 대한 사실적 표현의 어려움 등으로 연구결과에 대한 정확성이 낮은 한계점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 실제 인체의 자유도를 최대한 정확하게 모사할 수 있는 인체동역학 기반의 인체모델을 사용하여 진동해석을 수행하는 연구들이 진행되어 오고 있다.

이러한 인체동역학 기반의 가상인체모델은 특수한 환경과 자세를 고려하여 인체와 주변환경과의 연동 시에 분절요소, 관절과 연조직 등의 자세한 정보와 높은 자유도를 이용함으로써 정도 높은 인체진동해석을 수행하는데 효과적으로 적용될 수 있다.

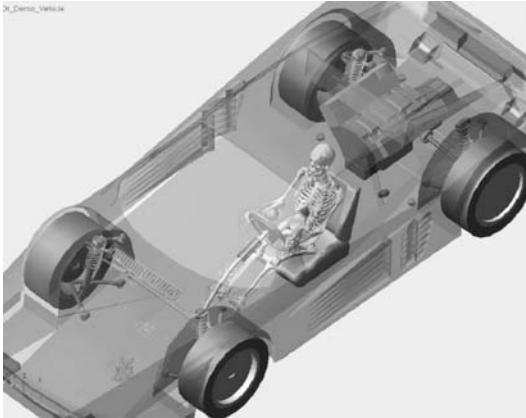


그림 11 인체진동해석을 위한 인체-차량 연성 동역학모델

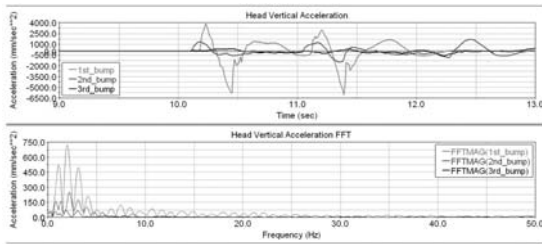


그림 12 범프 통과 시 인체두부 진동응답 결과

3.2 인체진동 해석 사례

인체에 유해한 진동발생에 관한 연구로 차량 운행 시 인체동역학모델을 적용하여 인체의 두부에 발생하는 진동응답 평가를 위해 구성된 인체모델과 차량동역학모델의 구성이 그림 11에 나타나 있다.

차량탑승자의 진동 연구에서는 다양한 형태의 과속방지턱을 10 km/hr의 속도로 통과하는 조건과 30 km/hr의 속도로 벨지안로를 주행 시에서 인체의 움직임 및 두부에 전달되는 진동응답특성을 분석하였다. 그림 12에는 과속방지턱 통과 시의 차량에 탑승한 인체 두부에 전달된 가속도 응답특성과 진동 응답특성을 해석한 결과가 나타나 있다.

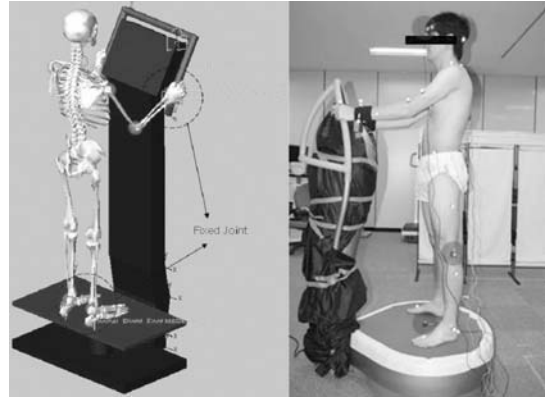


그림 13 가상진동운동기와 인체골격 모델(좌측), 인체계측시험

인체에 긍정적인 진동 응용에 관한 연구로 전신 진동운동기 개발과 관련하여 인체동역학모델을 적용하여 진동응답 평가를 위해 구성된 인체모델과 인체시험구성이 그림 13에 나타나 있다.

상기 연구는 전신 진동운동기의 다양한 가진 조건에 대해서 머리부터 무릎관절에 이르기까지 중요 위치에서의 진동응답을 인체동역학 해석결과와 함께 시험결과와 비교 검증을 통하여 좋은 일치를 나타내었다.

4. 맺음말

인체동역학 기반의 생체역학 분석은 인체의 움직임뿐만 아니라 관련 생체조직의 역학적 연구에 있어서 가장 기초적이고 중요한 부분이라고 할 수 있다. 다른 생체역학 분야와 마찬가지로 인체동역학 분야도 인체조직의 복잡성과 다양성으로 인하여 앞으로도 수행되어야 할 연구가 많이 남아 있다. 인체동역학 분야의 지속적인 연구는 인간의 생활 향상에 결정적으로 기여할 수 있는 의공학, 로봇공학, 생체모방공학 등의 다양한 학문분야의 발전에 크게 기여할 수 있다. **KSNVE**