

전기자극에 의한 골격근의 근육피로를 고려한 근육모델

Muscle Model including Muscle Fatigue Dynamics of Stimulated Skeletal Muscle

林鍾光* · 南文鉉**

(Jong-Kwang Lim · Moon-Hyon Nam)

Abstract - A musculotendon model is proposed to predict muscle force during muscle fatigue due to the continuous functional electrical stimulation(FES). Muscle fatigue dynamics can be modeled as the electrical admittance of muscle fibers and included in activation dynamics based on the Ca^{2+} kinetics. The admittance depends on the fatigue variable that monotonically increase or decrease if electrical pulse exists or not, and on the stimulation parameters and the number of applied pulses. In the response of the change in activation the normalized Hill-type contraction dynamics connected with activation dynamics decline the muscle shortening velocity and thus its force under muscle fatigue. The computer simulation shows that the proposed model can express the muscle fatigue and its recovery without changing any stimulation parameters.

Key Words : Muscle Model(근육모델), Muscle Fatigue(근육피로), Functional Electrical Stimulation(기능적 전기자극), Electrical Admittance(전기적 어드미턴스), Fatigue Variable(피로변수)

1. 서론

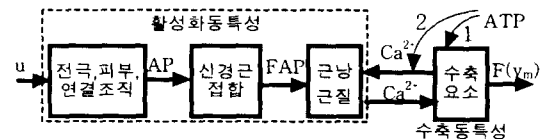
근육의 모델링은 의학과 생체공학에서 많은 연구가 이루어져 왔으며 최근에는 하반신 마비자의 기동성 회복을 위해 적용되고 있는 기능적 전기자극법(functional electrical stimulation, FES)의 실용화 연구에도 널리 활용되고 있다. 이 경우에는 전기자극에 의해 활성화된 근육의 근력을 예측하고 근육피로를 최소화시켜 주는 근육별 전기자극 패턴을 결정하기 위해 필요하다. 근력감소와 근섬유내 pH의 관계를이용한 근육모델은 근력감소를 표현할 수 있으나[1,2] 전기자극 매개변수와와의 관계는 알기 어렵고 자극이 인가되지 않는 구간에 대한 피로회복도 표현할 수 없는 결점이 있다.

본 논문은 이미 발표한 전기자극에 의한 근육의 피로특성을 나타내는 근육모델에 대한 결과[2]를 바탕으로 전기자극시 근력감소 뿐만 아니라 전기자극 중지기간 동안 진행되는 피로회복을 나타낼 수 있는 새로운 근육모델을 제안하고 모델의 적합성을 검증하는데 목적이 있다. 아울러 새로운 모델을 이용하여 슬관절을 일정한 각도로 고정시킨 등장성 조건에서 활성화된 대퇴직근의 근력 예측성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 검증하는데 부수적인 목표를 두었다.

2. 근육피로를 고려한 근육 모델

전기자극에 의해 발생된 근육피로는 신경신호의 전달과정

을 분석하면 그림1과 같이 신경말단, 신경근 접합, 근낭과 근질에서 활동전위의 발생과 전파 및 활성화 실패, 수축요소에서 수축실패에 의해 발생할 수 있으며, 활성화 문턱값이 증가되고 근력과 수축속도는 감소하며 이완이 지연되는 피로현상이 나타난다[3~8].



u : 연속적인 전기자극 AP : 신경말단으로 전파된 활동전위
 FAP : 근낭으로 전파된 근육활동전위 F(vm) : 근력과 수축속도의 관계
 1 : 근육수축시 Ca^{2+} 이 트로포닌과 결합하면 마이오신은 ATP로부터 얻은 에너지를 사용하여 액틴을 끌어당긴다.
 2 : 근육이완시 트로포닌과 분리된 Ca^{2+} 은 ATP를 이용하여 근낭으로 반환된다.

그림 1 근육피로의 발생위치와 요인
 Fig. 1 The locations and causes of muscle fatigue

근육피로에 대한 모델링은 수축속도 감소에 따른 근력감소 곧 $F(v_m)$ 의 특성 변화를 이용하였다. 신뢰성이 높은 전기자극법을 이용하여 활동전위가 근낭까지 정상적으로 전달되도록 하면 근육피로는 근낭과 근질에서 활성화 실패와 수축요소에서 수축실패로 인하여 발생할 수 있다. 활성화 실패는 전기펄스에 비해 Ca^{2+} 이 근낭으로 복귀되는 속도가 저하되어 근질에 Ca^{2+} 이 축적되어 활성화 문턱값을 증가되고 수축요소의 순환속도가 저하되기 때문에 발생된다. ATP이용율과 수축속도 그리고 수축속도는 Ca^{2+} 순환속도와 상관관계가 있으므로 수축요소의 근력-수축속도의 변화는 활성화 값

* 正 會 員 : 國防科學研究所 先賢研究員
 ** 正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 9月 16日
 最終完了 : 1999年 10月 15日

에 따라 변경될 수 있도록 하였고, 활성화 동특성은 Ca^{2+} 순환속도를 이용하여 모델링할 수 있다. 수축요소는 근육피로 상태에서 카페인 투여로 최대 근력을 발생시킬 수 있기 때문에 수축실패의 요인이 될 수 없으며, 에너지 이용율과 근육 내 대사물질이 수축실패의 요인이 될 수 있다. 근육피로시 수축속도의 감소는 ATP 분해효소의 활동저하와 상관관계가 있으며, 이것은 H^+ 농도의 증가 또는 pH 감소와 무기성 인산염 P(inorganic phosphate)의 증가에 의한 것으로 밝혀졌다 [9,10]. 이러한 현상은 크로스브리지(crossbridges)의 순환속도가 감소되어 근강으로 Ca^{2+} 이 느리게 복귀되어 활성화를 지연시키므로써 보다 작은 근력이 발생되도록 근력과 수축속도의 관계가 변화되기 때문이다[9~11]. 근육피로를 반영시킨 근육모델은 그림2와 같다.

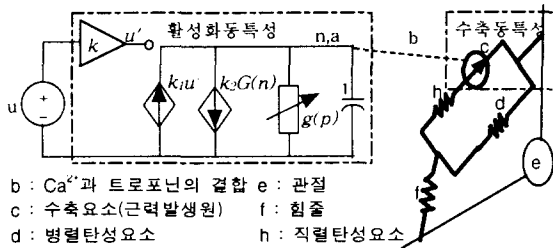


그림 2 전기자극에 의한 근육피로를 반영한 근육모델
Fig. 2 Muscle model including muscle fatigue dynamics of stimulated muscle

근질에서 Ca^{2+} 과 트로포닌(troponin)이 손실없이 결합한다고 가정하면 곧, $n(t)=a(t)$ 이고 Ca^{2+} -트로포닌 결합체의 농도 $n(t)$ 의 변화를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = k_1 u'(t) - k_2 G(n(t)) - g(p)n(t) \quad (1)$$

$$u'(t) = ku(t), \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (2)$$

$$G(n(t)) = \begin{cases} g_1 n(t), & 0 \leq n(t) < 0.8 \\ g_2 + g_3 n(t), & 0.8 \leq n(t) < 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

$$g(p) = \frac{1}{1 + \exp[-(g_1 p - g_5)]} \quad (4)$$

$$p = f(u(t)) + f(u(t-1)) \quad (5)$$

$$f(u(t)) = \begin{cases} u_1, & u(t)=1 \\ d_1, & u(t)=0 \end{cases} \quad (6)$$

k 는 근육 동원(recruitment) 특성곡선에서 선형구간의 기울기, k_1 와 k_2 는 각각 Ca^{2+} 과 트로포닌의 결합과 분리속도계수 [s^{-1}], $G(n(t))$ 은 무피로 상태에서 정규화된 $n(t)$ 와 Ca^{2+} 분리속도의 관계를 나타내며 g_1, g_2, g_3 는 곡선근사 계수이다. $g(p)$ 는 전기적 어드미턴스 [s^{-1}]이며 피로 진행시 증가하고 피로회복시 영으로 접근하며 시그모이드(sigmoid) 함수로 표현되고 근질속의 Ca^{2+} 이동율을 조절하는 역할을 한다. g_4 는 $g(p)$ 의 기울기를 조절하고 g_5 는 근육피로의 시발시점을 조절하는 곡선근사계수이다. $p(0 < p < \infty)$ 는 전기자극시 근력이 감소하고 자극중지 기간동안 피로회복을 표현하기 위하여 도입한 것이며 근육피로를 시간의 함수 대신 인가되는 펄스 폭과 갯수의 함수로 변환하는 변수로 한 주기당 피로이득과 회복이득의 누적총합으로 정의되고 증감카운터로 구현하였다. $f(u)$ 는 펄스가 존재하면 피로이득 u_1 만큼 증가되고 펄스가 존재하지 않는 시간동안 회복이득 d_1 만큼 감소되며 바꿔 말하면 u_1 이 클수록 피로가 빨리 진행된다. 수축 동특성은 활성화

값에 따라 근력과 수축속도의 관계에 의해 근육의 수축속도가 변경되며, 근력은 힘줄을 포함한 근육길이의 변화와 근육 수축속도 사이의 편차와 근육강성의 곱으로 결정되었다[2].

3. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 모델의 적합성 검증

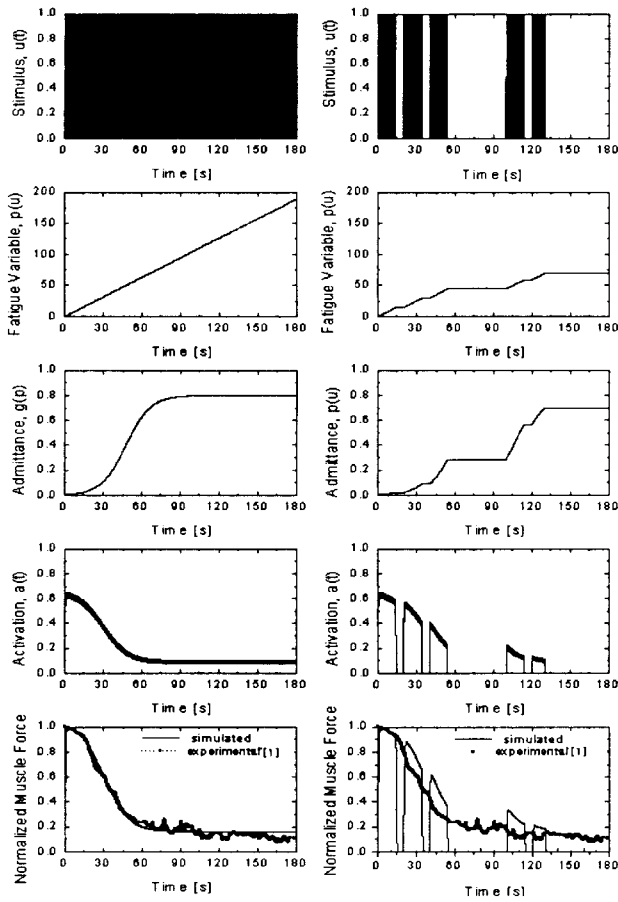
새로 제안한 근육모델은 2가지 전기자극 프로토콜에 대하여 등장성조건에서 발목에 작용하는 반력으로부터 결정된 대퇴직근의 근력[2]과 근육모델로 결정된 값을 비교하여 근력에 추 성능을 평가하였다.

- (A) 지속수축 : 단극성 단위크기의 PWM(20Hz, 6% duty ratio)
- (B) 프로토콜 1 : (A)를 180초 인가
- (C) 프로토콜 2 : (A)를 14초 인가, 6초 자극중지(C-1), (C-1)을 3회 반복, 40초 자극중지, (C-1)을 1회, (A)를 10초 인가, 50초 자극중지

프로토콜 1,2에 대한 근육모델의 근력에측결과는 그림3과 같다. 프로토콜1에 대한 결과는 실험값[1]과 거의 일치하였고 연속자극으로 인해 피로변수는 단순증가하고 어드미턴스는 증가하였다. 프로토콜2에 대한 결과는 자극중지 기간동안 피로회복이 진행되어 피로변수와 어드미턴스가 프로토콜1에 비해 느리게 증가하고 이에 따라 근력감소율이 줄어들었다.

4. 고찰

본 논문에서 제안한 모델에는 근육피로시 근력-수축속도 특성이 변하고 수축요소는 기구적으로 정상 작동한다는 생리학적 연구결과가 반영되어 있고 Ca^{2+} 와 트로포닌의 결합과 분리 개념을 적용한 활성화 동특성 모델을 사용하여 수정된 활성화 값이 근육의 수축 동특성을 변경시켜 근력의 감소를 나타낼 수 있도록 한 것이다. 활성화 값은 전기자극입력과, 근육피로 진행에 따라 Ca^{2+} 순환속도의 저하에 의해 조절되도록 하였다. 근육피로시 Ca^{2+} 순환속도의 감소는 단위시간당 근질에서 근강으로 복귀되는 Ca^{2+} 농도의 감소에 의한 것으로 근질에서 단위시간당 Ca^{2+} 의 축적을 의미하므로 전기적 어드미턴스로 구현하고자 하였다. 근질속의 Ca^{2+} 는 전하와 상사관계가 있고 Ca^{2+} 의 이동속도는 전류이므로 어드미턴스는 근육피로 진행에 따라 전하의 이동 곧 전류를 조절함으로써 근육수축을 조절하는 것으로 판단할 수 있다. 자극시간에 따라 근력감소를 나타내는 대신 근육에 인가되는 단위시간당 전기펄스의 수와 펄스폭에 따라 변화될 수 있도록 근육피로 변수를 도입함으로써 인가펄스의 매개변수에 따라 근육의 피로를 전기적 어드미턴스의 형태로 수식화할 수 있었다. 이와 같은 근육피로에 대한 모델이 이전 논문에서 제시했었던 pH와 근력의 관계식을 무피로 상태의 활성화값에 단순한 곱의 형태로 처리한 모델[2]과 구조적으로 다른 점이다. 프로토콜2와 같이 간헐적인 자극시 자극중지 기간중에는 실제 피로회복이 진행이 되어 근력 발생능력이 일부 회복되어야 하는데 이전 모델에서는 근력이 계속 감소하는 문제가 있어 피로회복을 표현하지 못하였지만, 개선된 모델은 그림3에서 자극중지 기간동안 연속자극의 경우(그림3(a))와 근력을 비교하면 근력이 일부 회복되었음을 확인할 수 있었다. 이와같은 장점은 개선된 모델이 피로변수를 이용하여 피로회복을 나타낼 수 있는 구조를 갖고 있기 때문이며 u_1, d_1 값을 변경시키면 피로진행과 회복속도를 조절할 수 있다.



$k_1=27, k_2=1.08, k=1, g_1=0.137, g_2=0.11, g_3=1.125, g_4=0.1, g_5=50, u_1=10.5, d_1=0.056$

그림 3 근육모델을 이용한 전기자극 근육의 근력
Fig. 3 Stimulated muscle force using muscle model

5. 결 론

본 연구에서는 기존 근육모델이 간헐적으로 근육에 전기자극을 인가할 때 자극중지 기간동안 근육의 근력을 예측하지 못하는 문제점을 해결하고 전기자극 매개변수가 근육피로 현상에 미치는 영향을 반영시킬 수 있는 개선된 근육모델을 제안하였다. 근육의 피로현상은 전기자극 펄스 폭과 갯수에 따라 근육 이완시 근질로 복귀되는 Ca^{2+} 을 이동속도를 조절하는 전기적 어드미턴스 개념을 이용하여 수식화 되었다. 제안한 근육모델의 적합성은 연속적인 근육수축과 간헐적인 수축 프로토콜에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 근육피로시 근력감소와 자극중지기간 동안 근력회복을 표현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 근육모델은 시간에 따른 근력 정보를 확보하면 근력을 예측할 수 있으며 체질

(body-segment)모델과 결합하여 자세유지와 기동시 근육피로를 최소화하고 근육의 동력을 극대화시켜 주는 근육별 최적 자극매개변수를 결정하는데 크게 기여하리라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Giat, J. Mizrahi, and M. Levy, "Musculotendon model of the fatigue profiles of paralyzed quadriceps muscle under FES", IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 40, No.7, pp. 664~674, 1993.
- [2] 임종광, 남문현, "전기자극에 의한 근육의 피로특성을 나타내는 근육모델", 대한전기 학회 논문지, 제48권 8호, pp. 1046 ~ 1053, 1999.
- [3] Erling Asmussen, "Muscle fatigue", Medicine and Science in Sports, Vol. 11, No.4, pp. 313 ~ 321, 1979.
- [4] Krenjvic K., Miledi R., "Presynaptic failure of neuromuscular propagation in rats", J. Physiol., Vol. 140, pp. 1~22, 1959.
- [5] Murali K.D. Pagala, Tatsuji Namba, and David Grob, "Failure of neuromuscular transmission and contractility during muscle fatigue", Muscle & Nerve, 7/8, pp. 454~464, 1984.
- [6] Jones D. A, Bigland - Ritchie B, Edwards R. H. T, "Excitation frequency and muscle fatigue : Mechanical responses during voluntary and stimulated contractions", Exp Neurol., Vol. 64, pp. 401 ~ 413, 1979.
- [7] Bigland-Ritche B, Jones Da, Qoods J, "Excitation frequency and muscle fatigue : Electrical responses during human voluntary and stimulated contractions", Exp Neurol., Vol. 64, pp. 414 ~ 427, 1979.
- [8] Spande J. E, Schotelius B. A., "Chemical basis of fatigue in isolated mouse soleus muscle", Am. J. Physiol. Vol. 219, pp. 1490~1495, 1970.
- [9] J. Lännergren, and H. Westerblad, "Maximum tension and force-velocity properties of fatigued, single Xenopus muscle fibers studied by caffeine and high K^+ ", J. Physiol., Vol. 409, pp. 473~490, 1989.
- [10] R. Cooke, K. Franks, G. B. Luciani, and E. Pate, "The inhibition of rabbit skeletal muscle contraction by hydrogen ions and phosphate", J. Physiol., Vol. 397, pp. 77~97, 1988.
- [11] A. De Hann and D. A. Jones, "Changes in velocity of shortening, power output and relaxation rate during fatigue of rat medial gastronemius muscle", Pflügers Arch., Vol. 413, pp. 422~428, 1989.