

전완의 등척성 수축시 최대근지구력시간을 예측하기 위한 동적근피로모델의 평가

이기영*

Evaluation of dynamic muscle fatigue model to predict maximum endurance time during forearm isometric contraction

Kiyoung Lee*

요 약 최대근지구력시간(MET, maximum endurance time)을 예측하기 위한 근피로모델은 실험적으로 측정된 MET를 이용하여 구축한 실증적 모델과 생리학적 과정을 수학적으로 표현한 이론적 모델로 나뉜다. 본 연구에서는 전완의 등척성 수축시 MET을 예측하기 위한 이론적 모델인 동적 근피로모델의 예측성 평가를 위하여 실증적 모델과 비교 및 평가하고자 한다. 실험에 참여한 피검자는 40명(남성 20, 여성 20)이며 실증적 모델인 지수모델과 거듭제곱모델 및 이론적 모델인 동적 근피로모델을 이용하여 비교하였다. 평가를 위하여 평균절대치편차(MAD, mean absolute deviation), 상관계수 및 급내상관계수를 구한 결과 동적 근피로모델과 실증적 모델들 사이에 MAD는 3.5%p 이하였으며, 상관계수는 0.93, 급내상관계수는 0.87 이상으로 전완의 등척성 수축시 MET을 예측하기 위한 이론적 모델인 동적 근피로모델이 적합함을 확인하였다.

Abstract Muscle fatigue models to predict maximum endurance time (MET) are broadly classified as either 'empirical' or 'theoretical'. Empirical models are based on fitting experimental data and theoretical models on mathematical representations of physiological process. This paper examines the effectiveness of dynamic muscle fatigue model as theoretical model to predict maximum endurance time during forearm isometric contraction. Forty volunteers (20 females, 20 males) are participated in this study. Empirical models (exponential model and power model) and theoretical model (dynamic muscle fatigue model) are used to compare. Mean absolute deviation (MAD), correlation coefficient (r) and intraclass correlation (ICC) are calculated between theoretical model and empirical models. MAD are below 3.5%, r and ICC are above 0.93 and 0.87, respectively. This results demonstrate that dynamic muscle fatigue model as theoretical model is valid to predict MET.

Key Words : MET, MFM, %MVC, ICC,

1. 서론

근피로는 근육 활동과 관련한 근력의 저하로 정의되며[1], 근육의 최대지구력시간(MET, maximum endurance time)에 영향을 준다[2]. 여기서 MET는 근육이 정적인 부하를 유지할 수 있는 최대 시간이며, 등척성 근육운동 또는 정적인 작업의 과정을 효율적

로 설계하는데 유용한 요소이다[3-5]. 또한 주어진 부하 조건에 따라 변화될 근피로에 의해 개인의 능력 정도를 예측하는 모델을 근피로모델 (MFM, muscle fatigue model)이라 하며, 광범위한 응용 가능성이 있다. MFM을 두 가지로 나누면 실증적 모델과 이론적 모델이 있다. 여기서 실증적 모델은 실험적으로 측정

*Corresponding Author : Department of Bio-medical, Catholic Kwandong University (kylee@cku.ac.kr)
 Received November 07, 2022 Revised December 02, 2022 Accepted December 05, 2022

한 데이터를 이용하여 모델을 구축하는 데 대하여 이론적 모델은 생리학적 과정을 수학적으로 표현한 모델이다[2].

MET를 예측하는 대표적인 실증적 모델로는 거듭제곱모델 (power model)과 지수모델 (exponential model)이 있다. 거듭제곱모델은 상대적인 부하강도인 %MVC와 실험적으로 측정된 MET 사이의 관계를 거듭제곱함수형 회귀모델에 적용하여 %MVC에 따른 MET를 예측하는 모델이며[6-9], 회귀모델에 지수함수 (exponential function)를 적용하여 %MVC에 따른 MET를 예측하는 모델이 지수모델이다[5,10]. 또한 MET를 예측하는 대표적인 이론적 모델로는 Ma 등 [11]의 동적 근피로모델 (dynamic muscle fatigue model)이 있다. 이 모델은 힘이 커질수록 근피로가 급속히 증가한다는 가정에 바탕을 둔 모델이다. 이상에서 실증적 모델은 실험적으로 측정된 MET에 대해서는 최적으로 추정하도록 학습된 적합화된 모델로 구축한다. 그러나 근육의 군(muscle group) 또는 실험방법, 즉, 참여한 피검자들의 개인적 성향 및 자세 등은 각 모델에 의한 예측오차를 서로 다르며, 특히 낮은 %MVC에서 예측오차가 커지는 문제점이 있다[12]. 더욱이 이론적 모델은 실험적 데이터와 관계없이 구축되기 때문에 실제로 측정된 데이터와의 오차를 확인하고 상관계수나 급내상관계수(ICC, intraclass correlation) 등의 통계 확률적인 분석으로 실험 데이터나 실험모델과의 관계에 어떠한지 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 이론적 모델인 동적 근피로모델을 이용하여 전완의 등척성 수축시 주어진 부하 조건에 따라 실제로 측정된 데이터와 큰 오차 없이 MET를 예측할 수 있는지 그 유효성을 확인하고자 한다. 실험에서 전완의 등척성 수축 부하는 MVC의 30-80%로 하였으며 40명의 피검자를 대상으로 MET를 측정하였다. 이 실험 데이터를 학습데이터로 하여 실증적 모델인 거듭제곱모델과 지수모델을 구축하여 MET를 예측하였으며, 이론적 모델인 동적 근피로모델을 이용하여 MET를 예측하였다. 이러한 3가지 모델에 의한 실제 MET들을 통계확률적으로 비교 평가하여 그 유효성을 확인하였다.

2. 방법 및 재료

2.1 피검자

본 연구에 근골격계의 질환이 없는 40명 (남성 20, 여성 20)이 자원하여 참여하였다[14, 19, 20]. 피검자들의 인적사항과 인체치수의 평균 및 표준편차와 범위를 표 1에 기술하였다. 이 실험과정은 가톨릭관동대학교 기관생명윤리위원회의 허가로 이루어졌으며, 피검자들에게 사용할 장치들과 실험의 진행과정을 설명하였으며 헬싱키 선언에 따라 수행하였다.

표 1. 피검자의 인적사항 및 인체치수

Table 1. Subject demographics and anthropometrics

Variable	Mean±SD (range)
Age (yr)	22.1±1.8 (19-26)
Height (cm)	169.3±8.8 (150-187)
Weight (kg)	69.4±12.9 (45.9-110.4)
Body mass index (kg/m ²)	24.4±7.5 (11.4-39.1)

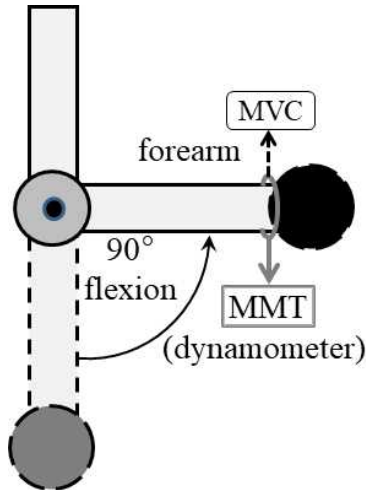


그림 1. MVC 측정과 상완이두근의 등척성 수축운동
Fig. 1. MVC measure and isometric contraction of biceps brachii muscle

2.2 실험 프로토콜

피검자들의 상완이두근의 최대자율수축강도 MVC (maximal voluntary contraction)는 MMT (Manual Muscle Test, Lafayette Instrument, USA)를 이용하여 측정하였다. 그림 1과 같이 피검자는 직립하여 우성의 팔을 시상면에 따라 충분히 폈다가 전완(forearm)을 90° 굽힌 상태에서 최대 수축강도를 3초씩 유지하며 3번씩 MMT로 측정하였다. 측정할 때마다 휴식시간은 2분으로 하였으며, 측정한 강도들 중에서 최대치를 MVC로 하였다[13]. 본 실험의 주요 과정은 상대적인 수축강도 (%MVC)에 따라 상완이두근의 등척성 수축운동을 더 이상 수행할 수 없을 때까지 근지구력시간을 측정하는 것이다. 피검자는 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%MVC의 상대적인 수축강도에 대하여 소진할 때까지 등척성 수축운동을 수행하였다. 그 순서는 피검자마다 불규칙적으로 하였으며, 정해진 %MVC의 등척성 수축운동을 소진할 때까지 수행하였을 때 피검자의 휴식시간은 1일로 하였다. 각 %MVC에 대한 등척성운동의 종료시점인 MET는 피검자가 근피로에 이르러 상완과 전완사이의 각도 90°를 더 이상 유지하지 못할 때까지로 하였다 [8,13,14,19].

2.3 MET 예측모델과 평가방법

%MVC와 MET와의 관계를 이용한 실증적 모델인 거듭제곱모델과 지수모델 및 이론적 모델인 동적 근피로모델은 다음과 같다.

① 실증적 모델:

Power model: $MET = A \times (\%MVC)^B$

Exponential model:

$$MET = A \times e^{B \times (\%MVC)}$$

② 이론적 모델

Dynamic muscle fatigue model:

$$MET = -60 \times \frac{\ln(\%MVC/100)}{(\%MVC/100)}$$

여기서 이상의 MET모델들의 시간단위는 초(sec)이다.

모든 피검자로부터 측정된 MET들을 기준으로 실증적 모델과 이론적 모델을 이용한 각각의 예측치들을 산출하였다. 각 모델별로 예측한 MET들을 평가하기 위하여 측정된 MET와의 오차를 비교하는 방법으로 평균절대편차 (mean absolute deviation; MAD)를 이용하였으며[15-17], 통계확률적 비교방법으로 상관계수와 급내상관계수를 이용하였다. 상관계수는 클수록 모델에 의해 예측된 MET들이 측정된 MET들과 선형적인 관계가 크며, ICC가 클수록 사용한 모델이 다른 모델들과 더욱 유사함을 의미한다[11]. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 이다.

3. 결과

3.1 측정된 최대근지구력시간 및 모델

최대근지구력시간은 외부의 부하가 상대적으로 감소할수록 길어지고 증가할수록 짧아진다[6,18]. 모든 환자로부터 측정된 최대 근지구력시간의 평균은 106.1 s (SD=100.5) 였으며 최대자율수축 (MVC)의 백분율에 따른 평균 근지구력시간은 표 2와 같다. 또한 그림 2는 상대적 부하에 따라 측정된 근지구력 시간과 MET 모델들에 의해 추정된 최대근지구력시간을 보이고 있다. 여기서 MET 모델은 실증적 모델인 지수모델, 거듭제곱모델과 이론적 모델인 동적 근피로모델이다.

최대자율수축 (MVC) 강도의 백분율과 측정된 최대 근지구력시간(MET) 사이의 상관계수는 0.694이며, 실증적으로 학습된 지수모델 및 거듭제곱모델 사이의 상관계수는 각각 0.962 및 0.916이고, 학습하지 않고 이론적으로 구축된 동적 근피로모델 사이의 상관계수는 0.936이었다 ($p < 0.05$).

표 2. MVC의 백분율에 따라 측정된 최대 근지구력시간 (SD: 표준편차)

Table 2. Measured MET according to % of MVC (SD: standard deviation)

MVC	30%	40%	50%	60%	70%	80%	Total
Mean	262.0	138.4	87.0	64.1	51.8	33.2	106.1
SD	133.5	65.7	36.6	29.4	23.5	17.2	100.5

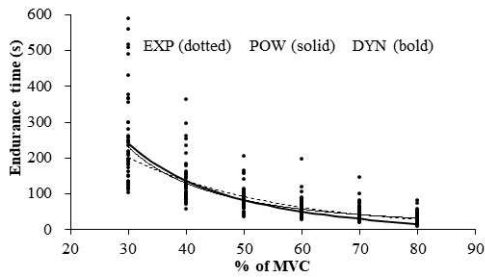


그림 2. %MVC 마다 측정된 근지구력시간과 MET 모델 (EXP: 지수모델, POW: 거듭제곱모델, DYN: 동적근 피로모델)

Fig. 2. The measured endurance time and the MET models according to %MVC (EXP: exponential model, POW: power model, DYN: dynamic muscle fatigue model)

3.2 모델의 MAD

다음 그림 3은 상대적 부하인 %MVC에 따라 측정된 근지구력시간과 MET 모델 사이의 평균절대편차 (MAD)를 보이고 있으며 표3은 %MVC 구간별 MAD를 보이고 있다. 즉, 30-50% MVC에서 동적근피로모델의 MAD는 다른 모델의 것보다 제일 작았으나, 60-80% MVC에서는 오히려 동적근피로모델의 MAD가 다른 모델보다 제일 컸다. 또한 전체 구간인 30-80%MVC에서 동적근피로모델의 MAD는 지수모델보다 약 3.7%p 컸으나 거듭제곱모델보다 약 1.0%p 작았다. 따라서 이론적 모델인 동적근피로모델의 MAD는 실증적 모델과 거의 유사하였다.

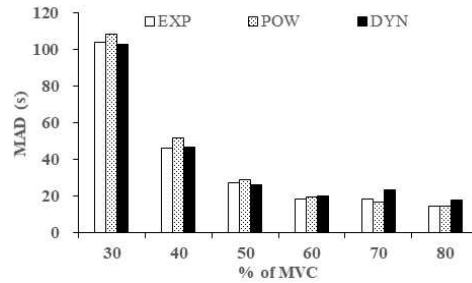


그림 3. 측정된 근지구력시간과 MET 모델 사이의 평균절대편차 (MAD)

Fig. 3. Mean absolute deviation (MAD) between the measured MET and the MET models

표 3. %MVC 구간별 MAD

Table 3. MAD by %MVC sections

Section	EXP	POW	DYN
30-50%	59.2	63.1	58.8
60-80%	17.2	16.8	20.5
30-80%	38.2	40.0	39.6

3.3 상관계수와 급내상관계수

그림 4는 측정된 근지구력시간과 두 가지 실증적 모델 및 한 가지 이론적 모델 사이의 상관계수 및 급내상관계수를 보이고 있다. 여기서, 실증적 모델인 지수 모델 사이의 상관계수는 0.756, 거듭제곱모델과의 상관계수는 0.769이며, 이론적 모델인 동적 근피로모델과의 상관계수는 0.766으로 이론적 모델인 동적 근피로모델과 측정된 최대근지구력시간 사이의 선형적인 관계가 실증적 모델들과 유사함을 확인하였다. 또한 측정된 최대근지구력시간으로 학습된 두 가지 실증적 모델들 사이의 급내상관계수는 0.81 이상으로 높았지만 측정된 데이터로 학습하지 않은 이론적 모델인 동적 근피로모델 사이의 급내상관계수는 0.73 정도로 실증적 모델보다 작았다. 이론적 모델의 급내상관계수가 실증적 모델보다 낮은 것은 실증적 모델은 측정된 최대근지구력시간으로 미리 학습하였으나 이론적 모델은 측정된 최대근지구력시간과 관계없이 이론적으로만 구축되었기 때문인 것으로 사료된다.

그림 5는 이론적 모델인 동적근피로모델과 실증적 모델인 지수함수모델 사이의 상관계수와 급내상관계수를 보이고 있다. 두 모델 사이의 상관계수는 모두 0.93 이상이었으며, 거듭제곱함수모델과의 상관계수가 지수함수모델보다 높았다 ($r = 0.988$). 또한 거듭제곱함수모델과의 급내상관계수도 지수함수모델보다 높았다 ($ICC = 0.871$). 따라서 이론적 모델과 실증적 모델 사이의 상관계수가 0.93 이상으로 높고, 급내상관계수도 0.87 이므로 동적근피로모델의 예측성을 확인할 수 있었다.

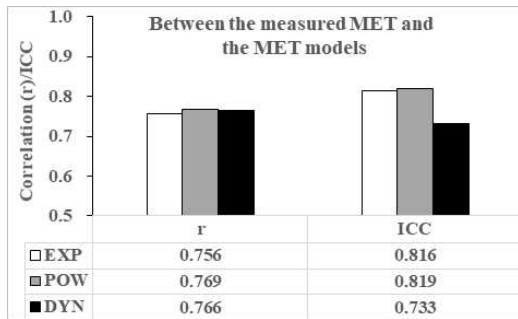


그림 4. 측정된 MET와 MET 모델들 사이의 상관계수와 급내상관계수
 Fig. 4. Correlation coefficients (r) and ICC between the measured MET and the MET models

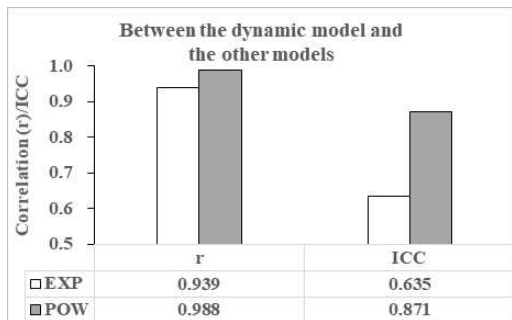


그림 5. 동적 근피로모델과 그 외의 모델들과의 상관계수와 급내상관계수
 Fig. 5. Correlation coefficients (r) and ICC between the dynamic muscle fatigue model and the other models

4. 고찰

본 연구에서는 이론적 모델인 동적근피로모델의 예측성을 판단하기 위해 실증적 모델인 지수모델과 거듭제곱모델과 비교하였다.

첫째 이론적 모델인 동적근피로모델의 MAD를 다른 모델들과 비교한 결과 상대적 부하가 바뀔 때마다 차이가 있었지만 실증적 모델들과 거의 차이가 없었다 (그림 3, 표 3).

둘째 측정된 최대근지구력시간과 세 가지 모델들 사이의 상관계수 및 급내상관계수를 비교한 결과 MFM 모델들 사이의 상관계수는 모두 0.76 정도로 유사하였으며, 급내상관계수는 실증적 모델인 지수함수모델과 거듭제곱함수모델 사이에서 0.81 이상으로 높은 반면, 이론적 모델인 동적근피로모델 사이에서는 0.73 정도로 작았다. 그 이유는 실증적 모델은 피검자로부터 측정된 MET를 대상으로 훈련하여 구축하였기 때문이다 (그림 4).

셋째 이론적 모델인 동적근피로모델과 두 가지 실증적 모델 사이의 상관계수 및 급내상관계수를 비교한 결과 상관계수는 모두 0.93 이상으로 높았으며, 급내상관계수는 거듭제곱함수모델 사이에서 0.87 이었다. 이 결과는 Ma 등이 연구에서 산출한 상관계수 및 급내상관계수와 일치하였다[11].

5. 결론

본 연구에서는 이론적 모델인 동적 근피로모델을 실증적 모델인 지수모델 및 거듭제곱모델과 비교하여 그 예측성을 확인하였다. 40명의 피검자를 대상으로 전완의 등척성 수축운동시 MET를 측정하여 실험한 결과는 다음과 같다.

- (1) 동적근피로모델의 MAD와 실증적 모델의 것들과의 차이가 3.5%p 이하로 작았다.
- (2) 측정된 MET와 MFM 모델들 사이의 상관계수와 급내상관계수는 모두 0.73 이상이었다.
- (3) 동적근피로모델과 실증적 모델들 사이의 상관계수와 급내상관계수는 각각 0.93과 0.87 이상이었다. 이상의 결과로부터 이론적 모델인 동적근피로모델

이 기존의 실증적 모델과 같이 등척성 운동시 MET를 추정하기에 적합함을 확인하였다. 향후, 피검자의 수를 더 많이 확보하는 것과 동적 운동과 보다 많은 근육을 포함한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Bigland-Ritchie, B., Woods, J.J., "Changes in muscle contractile properties and neural control during human muscular fatigue," *Muscle & Nerve*, Vol. 7, Issue 9, pp. 691-699, 1984.
- [2] Rashedi, E., Nussbaum, M.A., "A review of occupationally-relevant models of localised muscle fatigue," *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, Vol. 5, No 1, pp. 61-80, 2015.
- [3] Kahn, J.K., Monod, H., "Fatigue induced by static work," *Ergonomics*, Vol. 32, pp. 839-846, 1989.
- [4] Miedema, M.C., Douwes, M., Dul, J., "Recommended maximum holding times for prevention of discomfort of static standing postures," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 19, pp. 9-18, 1997.
- [5] Mathiassen, S.E., Elizabeth Åhsberg, "Prediction of shoulder flexion endurance from personal factors," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 24, pp. 315-329, 1999.
- [6] Rohmert, W., "Ermittlung von Erholungspausen für Statische Arbeit des Menschen," *Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschliesslich Arbeitsphysiologie*, Vol. 18, pp. 123-164, 1960.
- [7] Hagberg, M., "Muscle endurance and surface electromyogram in isometric and dynamic exercise," *Journal of Applied Physiology*, Vol. 51, No. 1, pp. 1-7, 1981.
- [8] Sato, H., Ohashi, J., Iwanaga, K., Yoshitake, R., Shimada, K., "Endurance time and fatigue in static contractions," *J. Hum. Ergol.*, Vol. 13, pp. 147-154, 1984.
- [9] Rohmert, W., Wangenheim, M., Mainzer, J., Zipp, P., Lesser, W., "A study stressing the need for a static postural force model for work analysis," *Ergonomics*, Vol. 29, No. 10, 1235-1249, 1986.
- [10] Manenica, I., *The ergonomics of working postures: A technique for postural load assessment*, in Corlett, E. N., Wilson, J. and Manenica, I. (Eds), *The ergonomics of working posture*, Taylor & Francis, London, pp. 207-277, 1986.
- [11] Ma, L., Damien Chablat, Fouad Bennis, Wei Zhang, "A new simple dynamic muscle fatigue model and its validation," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 39, pp. 211-220, 2009.
- [12] El ahrache, K., Imbeau, D., Farbos, B., "Percentile values for determining maximum endurance times for static muscular work," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 24, pp. 99-108, 2006.
- [13] Lee, K., Jang J., Won J., Lee, K., Eum, J., Lee, S., "Regression models to estimate endurance time using relative gravitational torques during forearm isometric contractions," *The transactions of the Korean institute of electrical engineers*, Vol. 68, No. 10, pp. 1252-1257, 2019.
- [14] Dimitrova, N. A., Arabadzhiev, T. I., Hogrel, J. Y. and Dimitrov, G. V., "Fatigue Analysis of Interference EMG Signals Obtained from Biceps Brachii during Isometric Voluntary Contraction at Various Force Levels," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol. 19, No. 2, pp. 252-258, 2009.
- [15] Zhang, Z., Kai Way Li, Wei Zhang, Liang Ma, Zhenguang Chen, "Muscular fatigue and maximum endurance time assessment for male and female industrial workers," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, pp. 292-297, 2014.
- [16] Yi, C., Li, K.W., Tang, F., Zuo, H., Ma, L., Hu, H., "Pulling strength, muscle fatigue and prediction of maximum endurance time for simulated pulling tasks," *PLoS ONE*, Vol. 13, No. 11, pp. 1-12, 2018.
- [17] Yi, C., Tang, F., Li, K.-W., Hu, H., Zuo, H., Zhao, C., "Modeling and Validation of

Fatigue and Recovery of Muscles for Manual Demolition Tasks," Int. J. Environ. Res. Public Health, Vol. 19, No. 2, pp. 1-15, 2022.

[18] Lee, K.Y., S.S. Lee, A. R. Choi, C. Choi, J. Mun., "Endurance time prediction of biceps brachii muscle using Dimitrov spectral index of surface electromyogram during isotonic contractions," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 4, pp. 711-717, 2011.

[19] Lee, S.Y., Jo, M.E., "Comparison of maximum voluntary isometric contraction of the biceps on various posture and respiration conditions for normalization of electromyography data," Journal of Physical Therapy Science, Vol. 28, pp. 3007-3010, 2016.

[20] Geun-Yong Lee, Soo-Hwan Kim, Jae-Hyun Cho, Se-Jin Yoon, & Sang-Sik Lee., Establishment of electromyography measurement system for measuring motor nerve evoked response during transcranial magnetic stimulation. Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, 12(4), 413-418, 2019.

저자약력

이 기 영 (Kiyong Lee)

[중신회원]



- 1987~1988년 : 한국전자통신 연구소 연구원
- 1992년 : 명지대학교 박사
- 2003~2004년 : 미주리주립대학교 교환교수
- 2011년 : 성균관대학교 박사
- 1993년~현재 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 교수

<관심분야>

의용전자, 생체 신호처리,
기계 요소학, 디지털 신호처리