Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 25, No. 1 pp.35-41, February 2006

손가락 하중과 신경명령 사이의 다중 관계에 관한 연구*

김윤혁[1] · 김소연[1] · 김경수[2] · 권영하[1]

[1]경희대학교 테크노공학대학 / [2]서울대학교 수리과학부

A Study on Multiple Relationship between Finger Force and Neural Command

Yoon Hyuk Kim[1], So Yeon Kim[1], Kyungsoo Kim[2], Young Ha Kwon[1]

[1]College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Yongin, 446-701
[2]Department of Mathematical Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-747

ABSTRACT

During multi-finger force-production tasks, finger forces can be generated without the involvement of neural commands which called the enslaving effect. In addition, the force produced by a given finger in a multi-finger task is smaller than the force generated by this finger in its single-finger maximal force-production task which called the force deficit effect. The purposes of this study were to represent quantitatively both the enslaving effect and the force deficit effect and propose the relationship between the finger force and the neural command by the experimental results. Seven subjects were instructed to press one, two, three and four fingers on the finger sensors as hard as possible acting in parallel in all possible combinations. The results confirmed that the finger forces were generated without the neural commands up to 20% of their maximal forces as the enslaving effect. In addition, the force deficit effect increased with the number of fingers involved. The mathematical model proposed in this paper could explicitly describe the two effects of finger interaction. The present results could be useful information to understand the basic neuro-muscular mechanism in hand biomechanics and the fundamentals of intelligent hand robots.

Keyword: Finger force production, Enslaving effect, Force deficit effect

1. 서 론

생활수준의 향상으로 높은 수준의 의료복지 서비스와 근로현장 여건 개선에 대한 요구가 날로 증대되고 있다. 따라서 현대 의공학 및 로봇 공학 연구의 한 갈래는 이러한 요구에 맞추어 인체기능 회복기술과 인체 모방에 초점이 맞추어져 있다. 인체기능 회복기술이란 질병이나 노화 또는 사고 등에 의해 그 기능이 일부 혹은 전체를 상실한 인체 기관의 기능을 회복시키는 것으로 수술, 재활 그리고 의수나 의족과 같은 대체물 개발 등이 있다. 인체 모방은 산업체의 로봇이나 병원의 수술 로봇 등 인간의 능력을 대신할 로봇 개발을 위해 인체의 일부를 모방하는 것을 말한다. 인간의 손은 다른 동물이나 다른 신체 부위에 비해 높은 정밀도와 조작 능

*이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업으로 수행된 논문입니다.
교신저자: 김윤혁
주 소: 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1, 전화: 031-201-2028, E-mail: yoonhkim@khu.ac.kr

력을 가지고 있기 때문에 다양하고 복잡한 동작을 하기 위한 장치는 손의 기능을 모방한다. 따라서 손의 기능 회복과 모방을 위해서는 무엇보다 손의 구조와 신경의 명령체계 등에 대한 연구가 선행되어야 한다.

인간 손의 일반적인 구조는 손을 움직이기 위해 필요한 구성요소보다 더 많은 구성요소를 가지고 있다. 따라서 중추신경계에서 요소 선택의 문제를 지니며, 이를 여유 구동기(motor redundancy)라 부른다(Bernstein, 1947, 1967). 본 연구와 같은 다중 손가락 하중 발생에 관한 최근의 연구는 이러한 여유 구동기의 좋은 예이다. 손의 기능은 다섯 개 손가락의 협동을 요구한다. 즉, 각각의 손가락은 서로 상호 연관 관계를 가지고 있다. 일반적으로, 사람 손의 손가락 움직임을 역학적으로 묘사할 수 있는 수는 조직을 일일이 열거하여 나타낼 수 없을 정도로 많다. 따라서 무한한 수의 지관절의 힘과 우력은 실제로 어떠한 조작도 가능하게 한다. 힘을 주거나 물건을 잡을 때, 각각의 지관절에 의해 발생한 힘과 우력은 높은 정확성을 가져야 하므로, 정확성을 가지는 다중 지관절의 움직임을 위해서 Bernstein의 문제를 명명하였다.

Bernstein의 문제 해결방법으로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 여유 구동기에 관한 유일한 해를 찾는 방법으로 일반적으로 시스템에 제한을 주거나, 비용과 값의 최적화 중 선택을 하게 하는 것이 일반적이다(Latash, 1993; Rosenbaum et al., 1995). 두 번째는 Gelfand와 Tsetlin의 방법을 따른다(Gelfand and Tsetlin, 1966). 이것은 중추신경계가 자유도를 제한하지 않고, 오히려 조작을 용이하게 하기 위한 해를 구하기 위하여 이용할 수 있는 모든 자유도를 사용한다. 이것은 최근 UCM 가설(uncontrolled manifold hypothesis)의 형태로 발전되었다(Scholz and Schoner, 1999; Latash et al., 2002).

이러한 여유 구동기의 문제는 다중 손가락 하중 발생시 손가락 사이의 상호 연관 관계를 부여하는 것으로 알려져 있다(Li et al, 1998, 2000). 다중 손가락 하중 발생시 손가락의 상호 연관 관계는 하중의 분배효과(force sharing effect), 신경명령의 누출효과(enslaving effect), 하중의 감소효과(force deficit effect)가 있다(Danion et al., 2003; Kilbreath and Gandevia, 1994; Zatsiorsky et al., 2000; Li. et al., 1998). 첫째, 하중의 분배효과는 손이 부가하는 하중은 각각의 손가락이 똑같은 하중을 가하는 것이 아니라 특정 비율에 의하여 가하는 효과이다. 즉, 손이 10N의 하중을 가할 때, 검지는 2.5N, 중지는 3.0N, 약지는 2.5N, 소지는 2.0N의 하중을 각각 가한다. 둘째, 신경명령의 누출효과는 약지를 움직일 때 소지도 같이 움직이는 것처럼, 한 손가락이 움직일 때 다른 손가락이 함께 움직이는 현상이다. 셋째, 하중의 감소효과는 여러 손가락에 최대한으로 동시에 하중을 가하였을 때, 각 손가락의 하중은 그 손가락에만 최대한으로 하중을 가하였을 때의 하중보다 작게 나타나는 현상이다. 예를 들면, 검지에만 최대한의 하중을 가하였을 때 검지에 가한 하중이 10N이라 할 때, 검지와 중지에 동시에 최대 하중을 부과하면 검지에 부가된 하중은 10N보다 작은 8.5N이 된다. 최근에 신경명령의 누출효과와 하중의 감소효과를 다양한 실험 조건에서 연구한 논문들이 발표되고 있다(Danion et al., 2003; Zatsiorsky et al., 2000; Li. et al., 1998).

본 연구의 목적은 정적 평형 상태에서 다중 손가락 하중 발생시 신경명령의 누출효과와 하중의 감소효과를 측정하여 정량적으로 표현하고, 두 효과에 대한 실험 결과를 이용하여 다중 손가락 하중 발생시 인간 손의 제어를 위한 신경명령과 손가락 하중 사이의 개선된 다중 관계 모델을 제시하는 것이다.

2. 실험 대상 및 방법

2.1 실험 대상

본 연구에서는 다중 손가락 하중 발생시 손가락 사이의 상호작용에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험에 들어가기에 앞서 성별의 차이를 알아보고자 예비 실험을 수행한 결과, 성별에 따른 편차가 크게 나타났다. 따라서 본 실험에서는 남자만 실험 대상자로 선정하였다. 실험 대상자는 신경계통과 팔, 손에 질환이 없는 20대 남자 7명으로 키 1.73±0.05 m, 몸무게 83.0±9.2kg이며, 오른손을 주로 사용한다. 실험 대상자들의 손의 길이(오른 손 가운데 손가락 끝에서 손목까지의 길이)는 0.192±0.020m이다.

다중 손가락 하중 측정 실험은 해부학 및 생체역학적인 측면에서 볼 때, 엄지의 움직임을 주관하는 근육이 다른 네 손가락의 움직임에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되므로, 엄지를 제외한 나머지 네 손가락에 대하여 수행하였다(Buchholz et al., 1992; Moore and Dalley, 1999).

2.2 손가락 하중 측정 실험 장치

동적 압력측정 장치인 I-scan®(Model 5101, Tekscan, Inc)을 이용하여 손가락 끝의 하중을 측정하였다. 압력센서의 크기는 112mm * 112mm이고, 측정범위는 최소 0~5 PSI, 최대 0~25,000 PSI이다. 분해능은 최소 0.02 PSI, 최대 0~25,000 PSI이며, 오차는 ± 10%이다. 실험 전에 1kg과 25kg의 추를 사용하여, 측정 압력 값을 보정(calibration)하였다.

실험 대상자들은 실험이 진행되는 동안에 동일한 자세를 유지해야 하므로 자세를 고정하기 위하여 그림 1과 같은 장치를 고안하였다. 손의 자세를 고정하기 위하여 압력센서 위에 손가락 접촉 위치를 표시하고, 테니스공의 반구를 압력센서에 부착하여 지지대로써 활용하였다. 또한, 실험 대상자들의 체중이 팔에 부과되지 않도록 실험 대상자들의 상체와 하체의 각도를 직각으로 유지하기 위하여, 압력센서와 실험 대상자가 앉는 의자의 위치를 고정시킨 후 상체가 의자 등받이에서 떨어지지 않도록 하였다. 실험이 진행되는 동안 실험 대상자들의 상체와 오른팔의 각도는 변하지 않도록 하였다. 왼팔은 실험에 방해되지 않는 범위에서 실험 대상자들이 가장 자연스러운 자세를 취하도록 하였다.

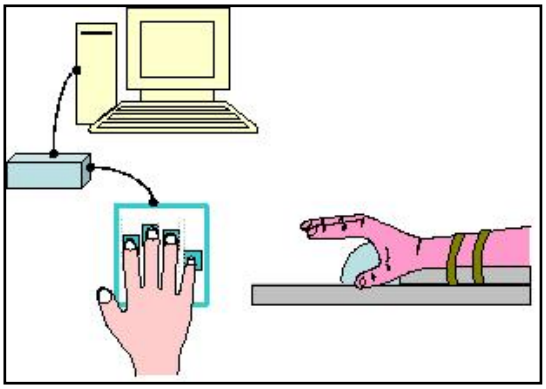


그림 1. 손가락 하중 측정 실험 장치 개략도

2.3 실험방법

실험 대상자가 하중을 가하고자 하는 손가락, 즉 손가락 하중 발생에 대한 신경명령이 전달되는 손가락을 지배지(master finger)라 하고, 그 손가락을 제외한 나머지 손가락을 피지배지(slave finger)라 한다. 각 손가락의 명칭은 검지가 I, 중지가 M, 약지가 R, 소지가 L이다.

각각의 손가락이 지배지가 될 수 있는 경우는 다음과 같이 15가지 지배지 조합이 있다: I, M, R, L, IM, IR, IL, MR, ML, RL, IMR, IML, IRL, MRL, IMRL. 여기서 I는 지배지가 검지인 경우, 즉 검지에만 힘을 가하라는 명령이 전달된 경우를 나타낸다. M은 중지, R은 약지, L은 소지가 지배지인 경우를 나타낸다. 지배지의 조합이 IM인 경우는 검지와 중지가 지배지가 되는 경우를 나타낸다.

실험 대상자는 압력센서 위에 손을 펼쳐 놓고, 지시자가 부르는 지배지 조합에 5초 동안 하중을 부가한다. 이때 지시자는 지배지 조합 순서를 무작위로 불렀다. 예비 실험에서, 지시자가 지배지 조합을 일정한 순서에 의하여 불렀을 때에는 실험 대상자가 손가락을 미리 눌러 오차를 일으키는 원인이 되었기 때문이다. 실험 대상자가 지배지 조합에 하중을 가할 때, 지배지가 2개 이상일 때에는 동시에 하중을 가해야 한다. 예를 들면, 지배지 조합이 IM일 때에는 검지와 중지 손가락에 동시에 힘을 가해야 한다. 또한, 한 번의 실험이 진행되는 동안, 네 손가락의 끝은 압력센서에 항상 밀착되어 있어야 한다. 하중을 5초 동안 부가한 후 최소한 2초의 휴식을 취한 후 지시자가 부르는 지배지 조합에 하중을 부가하였다. 한 번의 실험은 지배지 조합 15가지에 하중을 가하는 것으로 이루어진다. 한 번의 실험이 실행된 후 실험 대상자는 손의 피로를 풀 수 있도록 충분한 휴식을 취하였다. 실험 대상자마다 5회의 실험을 실시하였다. 실험 대상자 한 명이 실험하는데 소요되는 시간은 약 1시간이다.

2.4 실험 결과의 수집 및 해석

손가락 하중 실험 결과는 Tekscan사의 소프트웨어를 통하여 수집되었다. 하중 값은 하나의 지배지 조합에서 네 손가락 각각의 하중과 네 손가락 하중의 총합, 이렇게 5가지로 나타난다. 각 지배지 조합에서 총합이 최고일 때의 I, M, R, L 값과 손가락의 자중(압력센서 위에 힘을 주지 않고, 손을 올려놓은 상태에서의 값)을 기록했고, 기록된 각 조합의 값에서 손가락의 자중을 뺐다. 이 연구에서는 손가락 사이의 상대적인 하중 값이 필요하기 때문에 하중 값을 정규화 하였다. 정규화 방법은 지배지가 한 손가락일 때의 값을 기준으로 다른 지배지 조합의 하중 값들을 백분율로 환산하였다. 예를 들어, 지배지 조합이 I일 때 검지의 하중 값을 기준으로 다른 지배지 조합에서의 검지의 하중 값을 백분율로 환산하였다. 정규화한 값들 사이의 평균 및 표준편차는 Microsoft사의 Excel을 사용하여 계산하였다.

3. 연구 결과

표 1은 손가락 하중 측정 실험 결과를 보여주고 있다. 이 표에서 행은 지배지 조합을 표시하고, 열은 4개의 손가락 하중에 대하여 정규화한 값을 의미한다. 예를 들어 지배지가 검지와 중지일 때(IM), 검지에 주어진 힘은 검지 최대 힘의 85%이고 중지에 주어진 힘은 중지 최대 힘의 78%이다. 지배지가 아닌 약지와 소지에도 각각 최대 힘의 22%, 17%의 힘이 주어졌다.

3.1 신경명령의 누출효과

그림 2는 지배지가 1개, 2개, 3개 또는 4개일 때 각각의

표 1. 남자 7명 실험에 대한 정규화한 손가락 하중의 평균과 표준편차(%)

	Index	Middle	Ring	Little
I	100± 0	22± 4	19± 4	8± 3
M	23±11	100± 0	24± 4	9± 3
R	13± 6	24± 9	100± 0	31± 9
L	10± 5	17± 4	30± 8	100± 0
IM	85±10	78± 9	22± 9	17± 8
IR	77±11	25± 7	79±12	22± 6
IL	80± 9	23± 8	26±11	82± 7
MR	20± 5	83±13	84±12	28± 5
ML	16± 5	77± 9	32±12	79±13
RL	13± 4	21±11	84±12	81±10
IMR	72± 9	74± 8	70±11	32± 7
IML	72± 8	65±10	32±11	65± 5
IRL	70± 3	24± 8	77±14	70±12
MRL	22± 5	65± 7	77±12	68±15
IMRL	65± 7	62± 7	69± 6	63± 8

손가락에서 측정된 하중을 표시한 그래프이다.

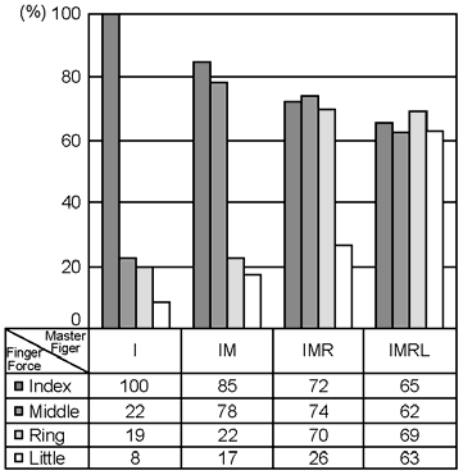
지배지가 검지(I)일 때, 실험 대상자는 검지에는 검지가 낼 수 있는 최대 하중의 100%에 해당하는 하중을 주었지만, 중지에는 중지 최대 하중의 22%, 약지에는 약지 최대 하중의 19%, 그리고 소지에는 소지 최대 하중의 8%의 하중이 나타났다(그림2(a)).

또한 지배지가 중지(M)일 때, 실험 대상자는 중지에는 중지가 낼 수 있는 최대 하중의 100%에 해당하는 하중을 주었지만, 검지에서는 검지 최대 하중의 23%, 약지에는 약지 최대 하중의 24%, 그리고 소지에는 소지 최대 하중의 9%의 하중이 나타났다(그림 2.(b)). 앞에서 예를 들었던, 검지가 지배지(I)일 때 피지배지의 하중은 중지, 약지, 소지 순서로 작아졌다. 이러한 의도되지 않은 피지배지의 하중은 지배지에 가까울수록 지배지의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 지배지에 가까운 피지배지의 하중은 26±4%이며, 지배지에서 먼 피지배지의 하중은 10±4%이다.

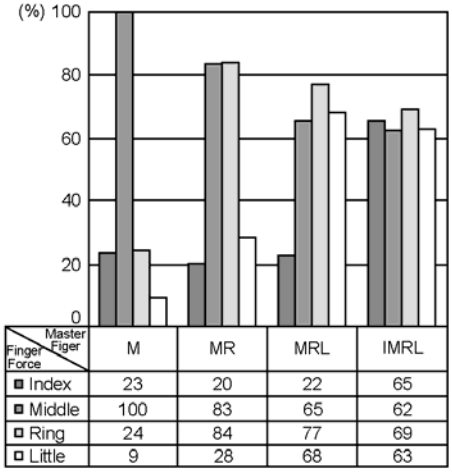
이러한 신경명령 누출효과는 지배지의 수가 2개 이상일 때에도 나타난다. 그림 2에서 지배지가 검지와 중지(IM)일 때, 실험 대상자는 검지와 중지에만 최대 하중을 부과하고자 하였으나, 검지에는 검지 최대 하중의 85%, 중지에는 중지 최대 하중의 78%, 약지에는 약지 최대 하중의 22%, 그리고 소지에는 소지 최대 하중의 17%의 하중이 부과되었다(여기서 검지와 중지의 하중이 최대 하중이 아닌 이유는 3.2절에서 설명하기로 한다). 이와 같은 신경명령의 누출효과는 그림 2에서 나타난 지배지의 조합에서 뿐만 아니라, 다른 모든 조합에서도 나타났다.

3.2 하중의 감소효과

그림 3은 중지가 포함된 지배지 조합들의 손가락 하중을 모두 표시한 그래프이다. 그림 3에서 지배지의 수가 증가할수록 중지의 최대 하중은 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 중지만 지배지(M)일 때 중지의 최대 하중을 100%라 하면, 지배지가 중지와 약지(MR)일 때 중지의 최대 하중의 83%, 지배지가 중지, 약지, 소지일 때(MRL) 중지의 최대 하중은 65%이다. 지배지가 검지, 중지, 약지, 소지(IMRL)



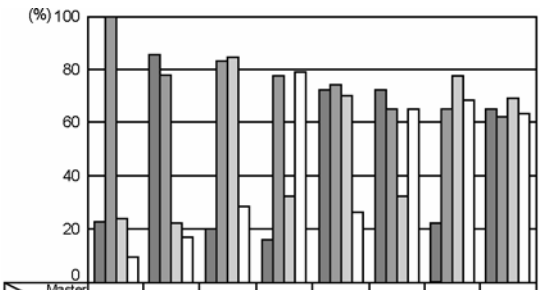
(a) 검지에 나타난 신경명령 누출효과



(b) 중지에 나타난 신경명령 누출효과

그림 2. 검지와 중지에서의 신경명령 누출효과

일 때 중지의 최대 하중은 62%이다. 지배지의 수가 1개에서 4개까지 증가할수록 중지가 부가한 최대 하중은 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 손가락 최대 하중은 지배지의 수에 의존한다고 볼 수 있다. 이와 같이 지배지의 수가 늘어날수록 하중이 감소하는 현상은 중지뿐만 아니라, 네 손가락에서 모두 나타났다. 하중은 지배지의 수가 2개일 때는 20±3%, 3개일 때는 30±4%, 4개일 때는 35±3%의 감소가 나타났다.



Finger Force \ Master Finger	M	IM	MR	ML	IMR	IML	MRL	IMRL
Index	23	85	20	16	72	72	22	65
Middle	100	78	83	77	74	65	65	62
Ring	24	22	84	32	70	32	77	69
Little	9	17	28	79	26	65	68	63

그림 3. 중지에서의 하중 감소효과

4. 고 찰

다중 손가락 하중 발생시 손가락에서 발생하는 하중의 감소효과와 신경명령의 누출효과의 해석적 모델에 대한 연구가 최근에 발표되기 시작하였다. Danion은 신경망 모델을 구성하여, 손가락의 신경명령과 손가락 하중 사이의 관계 모델을 제시하였다(Danion, 2003). 이 모델은 크게 세 단계로 나누어져 있다. 첫 번째 단계는 손가락을 움직이고자 할 때 신경에 명령이 전달되는 단계이고, 두 번째 단계는 신경명령에 의해서 손가락에 힘을 줄 때 나타나는 신경명령의 누출효과와 하중의 감소효과가 일어나는 단계이다. 마지막으로 세 번째 단계는 손가락에 하중이 부가되는 단계이다(Danion et al., 2003).

본 연구에서는 신경명령과 손가락 하중 사이에 선형적인 관계가 있다는 Danion의 모델을 기초로, 해석모델을 확장하였다. 하중의 감소효과를 나타내는 인자인 G가 손가락 하중의 지배지의 수(N)에 의존한다고 가정하면, 신경명령과 손가락 사이의 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$F_{Mode} = G \cdot F \cdot M \qquad (1)$$

이때,

$$F_{Mode} = \begin{pmatrix} F_I^{Mode} \\ F_M^{Mode} \\ F_R^{Mode} \\ F_L^{Mode} \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} G_I(N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_M(N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_R(N) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_L(N) \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} F_I^I & F_I^M & F_I^R & F_I^L \\ F_M^I & F_M^M & F_M^R & F_M^L \\ F_R^I & F_R^M & F_R^R & F_R^L \\ F_L^I & F_L^M & F_L^R & F_L^L \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} M_I \\ M_M \\ M_R \\ M_L \end{pmatrix}$$

$(단, M_I, M_M, M_R, M_L \in \{0,1\})$ 이다.

식1의 좌변의 행렬 $F_{mode}(4\times1)$는 각 손가락에 발생한 하중을 나타낸다. 이 행렬의 원소에서 위 첨자는 지배지 조합, 아래 첨자는 각 손가락을 뜻한다. 예를 들어 F_I^{RL} 은 지배지가 RL일 때, 검지(I)에 부가된 하중이다. 행렬 $G(4\times4)$는 가정에 의하여 지배지의 수 N에 의존하는 함수로 하중의 감소효과를 표현한다. 행렬 $F(4\times4)$는 지배지가 하나일 때 각 손가락에 발생한 하중을 나타낸 것으로 신경명령 누출효과를 표현한다. 이 행렬 원소의 위 첨자는 지배지 조합을 뜻하고, 아래 첨자는 각 손가락을 뜻한다. 예를 들어 F_M^I 은 지배지가 검지(I)일 때, 중지(M)에 부가된 하중이다. 행렬 M은 신경명령을 숫자로 표시한 것으로, 각각의 손가락이 지배지인 경우에는 1, 피지배지인 경우에는 0을 나타낸다. 지배지의 조합이 IR인 경우 행렬 M은 $M_I=1$, $M_M=0$, $M_R=1$, $M_L=0$이 된다.

본 연구에서는 모든 손가락이 동일한 하중의 감소효과를 가지고 있다고 가정한 Danion의 모델을 각각의 손가락 하중에 대하여 감소효과를 표현할 수 있도록 확장하였다. 이럴 경우 각각의 손가락에 대하여 독립적으로 하중의 감소효과를 고려하여 손가락 하중을 예측할 수 있으며, 따라서 특정

손가락에 이상 현상이 발생하는 경우 등을 다루는 것이 가능하다. 또한 Danion의 모델에서는 손가락 하중의 크기를 계산하고 있는데, 이 경우 피실험자 개개인마다 힘(손가락 하중)의 차이에 따라 오차가 클 수 있다. 본 연구에서는 각 손가락 하중 사이의 상호 관계를 보다 정확한 수학적 모델로 표현하기 위하여 각 손가락 하중을 정규화하여 비율로 나타내었다.

실험 결과 식1에서 행렬 G의 각 원소는 지배지의 수가 증가함에 따라 감소한다. 예를 들어, 행렬 G의 원소 G_M은 N=2일 때는 0.62, N=3일 때는 0.46 그리고 N=4일 때는 0.38이다. 이 값들은 그림 4에서처럼 $1/N^a$ 형태의 분수함수로 가정할 수 있으므로, 최소제곱법을 사용하여 지수를 구해 다음과 같은 함수로 표현할 수 있다.

$$G_M(N)=\frac{1}{N^{0.70}} \quad (2)$$

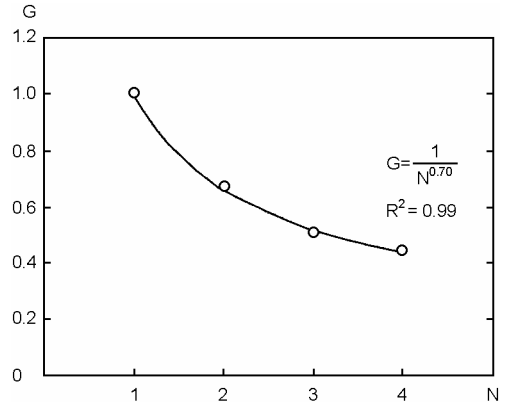


그림 4. 손가락 하중 실험에 의한 G값(°)과 식 2에 의하여 얻은 이론적인 중지의 G값(–) 비교

그림 4는 중지의 손가락 하중 실험에 의한 G값과 식2에 의한 이론적인 G값을 비교한 그래프이다. 손가락 하중 실험에 의한 G값은 점(°)으로 표시했고, 식2에 의한 G값은 실선(—)으로 표시했다. 실험에 의한 중지의 G값과 식2에 의한 G값은 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다(R^2=0.99). G_I, G_R, G_L도 마찬가지 결과를 얻을 수 있다. 이 결과를 식1에 대입하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_I^{Mode} \\ F_M^{Mode} \\ F_R^{Mode} \\ F_L^{Mode} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N^{0.70}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{N^{0.70}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{N^{0.60}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{N^{0.62}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 & 23 & 13 & 11 \\ 22 & 100 & 24 & 17 \\ 19 & 24 & 100 & 30 \\ 8 & 9 & 31 & 100 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_I \\ M_M \\ M_R \\ M_L \end{pmatrix} \quad (3)$$

식3은 표 1에 대한 신경명령과 손가락 하중의 관계식이다. 이제 식3을 통하여 손가락 하중을 예측할 수 있다. 예를 들어, 지배지가 검지와 약지(IR)일 때, M_I=1, M_M=0, M_R=1, M_L=0이고 N=2이다. 이를 식3에 대입하면 F_I=73, F_M=29, F_R=75, F_L=26이다. 표 1에서 지배지가 검지와 약지(IR)일 때 각 손가락의 하중 값은 F_I=77, F_M=25, F_R=79, F_L=22이다. 식4를 통하여 얻은 값과 실험에 의하여 얻은 표1의 값과 비교하였을 때 검지 5%, 중지 16%, 약지 5%, 소지 18%의 오차를 가지며, 이 오차는 표1의 표준편차보다 작아 식이 비교적 정확함을 확인할 수 있다.

계산된 손가락의 하중 값의 오차는 지배지일 때의 오차가 피지배지일 때의 오차보다 작았다. 이는 다른 지배지 조합에서도 마찬가지였다. 피지배지의 오차가 지배지의 오차보다 큰 이유는 지배지의 하중은 실험 대상자가 최대한으로 센서를 누른 힘이지만, 피지배지의 하중은 실험 대상자가 의도하지 않은 힘이기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 지배지는 인간의 의지에 의해서 조절이 된다. 하지만 피지배지의 하중은 비자발적으로 발생하기 때문에 오차가 큰 것으로 생각된다.

본 연구에서 개발한 수학적 모델의 타당성을 보이기 위하여 Danion의 모델과 비교해 보았다(Danion et al., 2003). 먼저 하중의 감소효과를 나타내는 $G(N)=1/N^a$에서 지수 a는 각각 0.70(I), 0.70(M), 0.60(R), 0.62(L)인데 이는 Danion의 모델에서 모든 손가락에 공통적으로 작용하는 하중의 감소효과에 대한 지수인 0.712와 유사하다. 또한 Danion의 결과를 본 연구에서의 모델링 방법을 이용하여 재구성했을 때, 신경명령의 누출효과를 나타내는 행렬은 다음과 같다.

$$F_D=\begin{bmatrix} 100 & 23 & 13 & 11 \\ 22 & 100 & 24 & 17 \\ 19 & 24 & 100 & 30 \\ 8 & 9 & 31 & 100 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 행렬의 각 원소와 식3에서 주어진 F 행렬의 원소를 비교하면 값 자체는 차이가 있지만 전체적인 경향은 유사함을 확인할 수 있다. 예를 들어 본 연구에서 예측한 행렬의 첫 번째 열은 (100 22 19 18)이고, Danion의 모델에서 대응되는 첫 번째 열은 (100 28 18 11)이다. 다른 열과 행도 마찬가지이다. 또한 본 연구에서 계산한 F 행렬의 값이 전반적으로 Danion 모델에서의 값보다 작은데, 이는 실험 대상자들의 인종 또는 민족적 특성인 반영된 것으로 생각되며, 추후 인종, 성별, 직업 등의 영향에 대한 연구가 필요할 것이다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 정적 평형 상태에서 다중 손가락 하중 발생 시 신경명령의 누출효과와 하중의 감소효과를 측정하였다. 다중 손가락 하중 발생시 신경명령의 누출효과는 피지배지가 지배지에 인접할수록 그 영향이 더 커지는 것으로 나타났다. 지배지에 인접한 피지배지의 하중은 25±4%로 측정됐고, 지배지와 떨어져 잇는 피지배지의 하중은 약 10±2%로 측정됐다. 하중의 감소효과는 지배지의 수가 증가할수록 더 커지는 것으로 나타났다. 지배지의 수가 2일 때에는 20±3%, 지배지의 수가 3일 때에는 30±4% 그리고 지배지의 수가 4일 때에는 35±3%의 감소를 보였다. 신경명령 누출효과와 하중 감소효과는 지배지의 수와 연관되며, 신경명령-손가락 하중에 관하여 제시된 다중 관계 모델은 실험을 통하여 확인하였다.

이러한 신경명령 누출효과와 하중 감소효과는 인간의 의지와는 상관없이 일어나는 현상이다. 이러한 효과는 인간이 환경에 적응해오면서, 자신도 모르게 몸을 최적의 상태로 만들어온 결과라 예측된다. 앞으로 이러한 현상의 신경생리학적 원인에 대한 연구가 수행되고 그 원인이 밝혀진다면, 정상적인 사람의 손처럼 쉽고, 정밀하게 움직일 수 있는 인공지능 의수를 제작할 수 있을 것이다. 또한 신경장애로 인한 장애인들이나 노인의 재활훈련에 도움이 될 것이라 기대된다.

참고 문헌

Bernstein, N. A., *On the Construction of Movements*, Medgiz: M, 1947

Bernstein, N. A., *The Coordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press: Oxford, 1967.

Buchholz, B., Armstrong, T. J. and Goldstein, S. A, Anthropometric Data for Describing the Kinematics of the Human Hand. *Ergonomics*, 35(3), 261-273, 1992.

Chao, E. Y. S., An, K. N., *et al*., *Biomechanics of the Hand - A Basic Research Study*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1989.

Danion, F., Schoner, G., Latash, M. L., Li, S., Scholz, J. P. and Zatsiorsky, V. M., A Mode Hypothesis for Finger Interaction during Multi-finger Force-Production Tasks. *Biol. Cybern*., 88, 91-98, 2003.

Gelfand, I. M. and Tsetlin, M. L., *On Mathematical Modeling of the Mechanisms of the Central Nervous System. In: Gelfand, I. M., Gurfinkel, V. S., Fomin, S. V. and Tsetlin, M. L. (Eds.), Models of the Structural-functional Organization of Certain Biological Systems*, Nauka, 1966.

Kilbreath, S. L. and Gandevia, S. C., Limited Independent Flexor of the Thumb and Fingers in Human Subject. *J. Physiol*., 479, 487-497, 1994.

Latash, M. L., *Control of Human Movement*, Human Kinetics, 1993.

Latash, M. L., Scholz, J. P. and Schoner, G., Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability. *Exer. Sport. Sci. Rev*., 30, 26-31, 2002.

Leijnse, J. N., Snijders, C. J., *et al*., The Hand of the Musician: The Kinematics of the Bidigital Finger System with Anatomical Restrictions. *J. Biomech*., 26, 1169-1179, 1993.

Li, Z. M., Latash, M. L., *et al*., V. M., Motor Redundancy during Maximal Voluntary Contraction in Four-Finger Tasks. *Exp. Brain. Res*., 122, 71-78, 1998.

Li, Z. M., Latash, M. L. and Zatsiorsky, V. M., Force Sharing Among Fingers as a Model of the Redundancy Problem. *Exp. Brain. Res*., 119, 276-286, 1998.

Moore, K. L. and Dalley, A. F., Clinically Oriented Anatomy(4th), Lippincott Williams & Wilkins: Baltimore, 1999.

Rosenbaum, D. A., Loukopoulos, L. D., *et al*., Planning Reaches by Evaluating Stored Postures. *Psychol. Rev*., 102, 28-67, 1995.

Scholz, J. P. and Schoner, G., The Uncontrolled Manifold Concept: Identifying Control Variables for a Functional Task. *Exp. Brain. Res*., 126, 289-306, 1999.

Zatsiorsky, V. M., Li, Z. M., and Latash, M. L., Enslaving Effects in Multi-Finger Force Production. *Exp. Brain. Res*., 131, 187-195, 2000.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 김 윤 혁 ❖ yoonhkim@khu.ac.kr
한국과학기술원 학사
한국과학기술원 석사, 박사
현 재: 경희대학교 테크노공학대학 교수
관심분야: 생체역학, 그래픽 시뮬레이션

❖ 김 소 연 ❖ bbogleee@empal.com
경희대학교 학사
현 재: 경희대학교 섬유공학과 석사과정
관심분야: 생체역학

❖ 김 경 수 ❖ azureton@kaist.ac.kr
한국과학기술원 학사
한국과학기술원 석사, 박사
현 재: 서울대학교 수리과학부 박사후 연구원
관심분야: 수치해석, 생체역학

❖ 권 영 하 ❖ yhkwon@khu.ac.kr
경희대학교 학사
University of Illinois at Chicago 석사, 박사
현 재: 경희대학교 테크노공학대학 교수
관심분야: 감성공학, 실험역학, 기계재료

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2005년 08월 25일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2005년 11월 30일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2006년 02월 10일