

TITLE: Evaluation of the contributions of individual finger forces in various submaximal grip force exertion levels

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to evaluate contributions of individual finger forces associate with various levels of submaximal voluntary contraction tasks.

Background: Although many researches for individual finger force have been conducted, most of studies mainly focus on the maximal voluntary contraction. However, Information concerning individual finger forces during submaximal voluntary contraction is also very important for developing biomechanical models and for designing hand tools, work equipment, hand prostheses and robotic hands. Due to these reasons, study of contribution of individual finger force in submaximal grip force exertions should be fully considered.

Method: A total of 60 healthy adults without any musculoskeletal disorders in the upper arms participated in this study. The young group (23.7yrs) consisted of 30 healthy adults (15 males and 15 females), and the elderly group (75.2yrs) was also composed of 30 participants (15 males and 15 females). A multi-Finger Force Measurement (MFFM) System developed by Kong and Kim (2008) was applied to measure total grip strength and individual finger force. The participants were asked to exert a grip force attempting to minimize the difference between the target force and their exerted force for eight different target forces (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, and 75% MVCs). The order of these target forces based on the maximum voluntary contraction which were obtained from each participant was randomly assigned in this study.

Results: The contributions of middle and ring fingers to the total grip force represented an increasing trend as the target force level increased. On the other hands, the contributions of index and little fingers showed a decreasing trend as the target force level increased. In particularly, Index finger exerted the largest contribution to the total grip force followed by middle, ring and little finger in case of the smallest target force level (5% MVC), whereas middle finger showed the largest contribution followed by ring, index and little fingers at the largest target force levels (65 and 75% MVCs).

Conclusion: Each individual finger showed a different contribution pattern to the gripping force exertion. As the target force level increase from 5 to 75% MVC, the contributions of middle and ring fingers showed increasing trends, whereas the contributions of index and little fingers represented a decreasing trend in this study.

Application: The results of this study can be useful information when designing robotic hands, hand tools and work equipment. Such information would be also useful when evaluating abnormal hand functions.

Keywords

Grip Force, Contribution, Individual Finger Force, Submaximal Voluntary Contraction

1. Introduction

사람의 손은 운동활동과 촉각의 주요 매개일 뿐만 아니라 눈과 더불어 외부의 물리적 환경 등과 접촉하는 주요 수단 중의 하나이다. 특히, 글쓰기나 식사하기 등과 같은 대부분의 일상생활활동 (Activities of Daily Living; ADLs)은 손의 원활한 기능에 의존하기 때문에 손은 매우 중요한 인체기관 중 하나라고 할 수 있다. 따라서 손에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 다만, 많은 연구들 중, 각 손가락의 개별적인 기능이나 기여도에 대한 연구는 연구환경이나 실험장비의 한계 등의 이유로 다른 연구들 보다 다소 드문 실정이다.

각 손가락 별 기여도에 대한 연구는 손의 생체역학적 모델을 수립하고, 수공구 및 수작업 활동의 디자인 및 개선을 위해 선행되어야 하는 중요한 연구이다 (Radwin et al, 1992). 특히 인간공학 분야에서 손가락 별 기여도 및 생체역학적인 데이터의 확보는 수공구나 의수 (Crago et al. 1991), 로봇 팔 (Mason and Salisbury, 1985), 작업환경 디자인에 있어서 필수적인 정보일 뿐만 아니라, 손 기능의 이상을 판별하기 위해서도 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다 (An et al. 1985).

이에 따라 손가락 기여도에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔으나, 대부분의 연구들은 최대약력 발휘시의 기여도에 대한 연구들이며 (Ohtsuki, 1981; Talsania and Kozin, 1998; Kong and Lowe, 2005; 김대민과 공용구, 2008; Kong et al, 2008; Lee et al, 2009; Kong et al, 2011) 최대하근력 (Submaximal voluntary contraction) 발휘시의 손가락 기여도에 대한 연구는 많이 부족하다. 이미 언급한 바와 같이, 최대근력 발휘시 손가락 기여도 역시 중요한 연구과제이기도 하나, 실생활에서는 최대약력보다 최대하근력의 발휘가 더욱 빈번하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 정밀하고 어려운 작업은 대부분 최대하근력의 미세한 조정을 통해 이루어지기 때문에 이에 대한 연구는 매우 중요하다.

Radwin et al (1992)의 세 수준의 힘 (10, 20, 30% MVCs) 발휘시에 손가락 별 기여도에 관한 연구결과에 의하면, 10% MVC 에서 30% MVC 로 힘의 크기가 증가할 때, 중지의 기여도는 25%에서 38%로 증가하는 반면, 검지의 경우 35%에서 31%로 감소하는 결과를 보였다. 다만, Radwin et al (1992)의 연구는 30% MVC 미만의 다소 낮은 세 수준의 힘에서의 기여도만을 관찰하였기 때문에 큰 힘을 발휘할 때의 기여도와 비교하는 데에는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하고자 총 8 수준 (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75% MVCs)의 힘을 독립변수로 선정하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 다양한 최대하근력 발휘 과업에서의 손가락 별 기여도를 측정하였으며, 측정된 데이터를 바탕으로 발휘하는 힘에 따른 손가락 별 기여도의 변화 양상을 분석하였다. 또한 고령자와 젊은 연령간의 기여도 변화의 차이를 분석하고자 고령자 30 명과 젊은 연령 30 명을 섭외하여 실험을 수행하였다. 본 연구는 다양한 수준의 %MVCs 에 따라 각 손가락의 기여도 차이가 있을 것이라는 가정하에 실험을 수행하였다.

2. Methods

2.1 Participants

본 연구의 실험 참가자는 과거 및 현재 상지에 근골격계 관련 질환 병력이 없는 건강한 성인

남녀 60명으로 구성되었으며, 연령에 따른 차이를 살펴보기 위하여 고령자 집단과 젊은 연령집단으로 분류하였다. 고령자 집단과 젊은 연령 집단은 각각 30명으로, 남녀 각각 15명으로 구성되었다. 실험 전, 기본적인 신체 정보를 파악하기 위하여 나이, 팔 길이, 손 너비 등의 총 12가지 항목에 대해 측정하였으며, Size Korea에서 권장하는 측정 방법을 사용하였다. 실험 참여자의 자세한 인체치수 정보는 [Table 1]과 같다

Table 1. Anthropometric data of participants

	elderly group		young group	
	mean	S.D	mean	S.D.
age [yr.]	75.2	6.1	23.7	2.1
weight [kg]	58.5	8.9	65.4	13.5
height [cm]	156.2	7.8	170.3	8.9
arm length [cm]	51.4	5.0	55.5	3.3
upper-arm length [cm]	32.5	2.3	34.8	1.9
Lower-arm length [cm]	25.2	1.5	26.0	3.6
upper-arm circumference [cm]	28.9	3.1	29.8	4.2
elbow circumference [cm]	27.3	2.3	26.9	2.8
wrist circumference [cm]	16.3	1.1	15.4	0.9
hand length [cm]	17.3	0.9	17.5	1.0
hand width [cm]	8.0	0.6	7.7	0.6
hand thickness [cm]	2.9	0.3	2.7	0.3

2.2 Measurement System

본 연구에서 총 악력과 손가락 별 힘을 측정하기 위해서 MFFM(Multi-Finger Force Measurement) System 을 사용하였다 (김대민과 공용구, 2008). 4 개의 소형 로드셀 (Miniature Load cell, Honeywell Model 13)을 각 손가락이 파지되는 부분에 삽입하여 손가락 별 힘을 측정하도록 설계하였다 [Figure 1]. 정확한 측정을 위하여 각 로드셀은 1-5kg 무게의 분동을 이용하여 보정 (Calibration)하였으며, 하중과 출력신호 간의 높은 선형관계를 보였다 ($R^2 > 0.99$).

MFFM System 에서 측정된 데이터는 NI DAQ-USB 6008 (National Instrument Ltd.)을 이용하여 디지털 값으로 변환하였으며, 변환된 값은 컴퓨터로 전송되었다. 악력 측정 시 손가락 별 힘과 총 악력을 분석하기 위해서 LabVIEW Program (National Instrument, Austin, Texas)을 사용하여 분석모듈을 구현하였다.

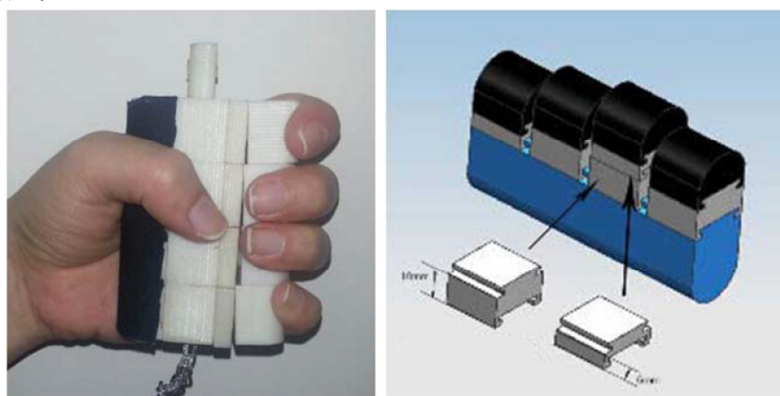


Figure 1. MFFM (Multi-Finger Force Measurement) System

2.3 Experimental Design

Target Force에 따른 손가락 기여도의 차이를 살펴보기 위하여, 일정한 악력 (Target Force)을 10초 동안 유지하는 Tracking Task를 수행하였다 [Figure 2]. Target Force Level은 각 피실험자의 최대악력을 기준으로 각각 선정하였다. 독립변수로는 손가락 (Index, Middle, Ring, Little), Target Force (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75% MVCs), 연령 (고령자, 젊은 연령), 성별 (여성, 남성)을 선정하였으며, 종속변수로는 각 손가락 별 기여도(%)가 선정되었다. 손가락 별 기여도는 <equation 1> 과 같이 계산되었다.

측정된 데이터는 SPSS 18.0 (Lead Technologies, Inc., Chicago, USA)을 사용하여 분석하였다. 종속변수에 미치는 연령, 성별, 손가락 등에 대한 효과를 파악하기 위하여 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 분산분석 (ANOVA)를 수행하였으며, 유의한 효과에 대한 사후검정으로는 Tukey's Studentized Range (HSD)를 수행하였다.

$$\text{Contribution}(\%) = \frac{\text{individual finger force}}{\text{total grip force}} \times 100 \dots\dots\dots < \text{equation 1} >$$

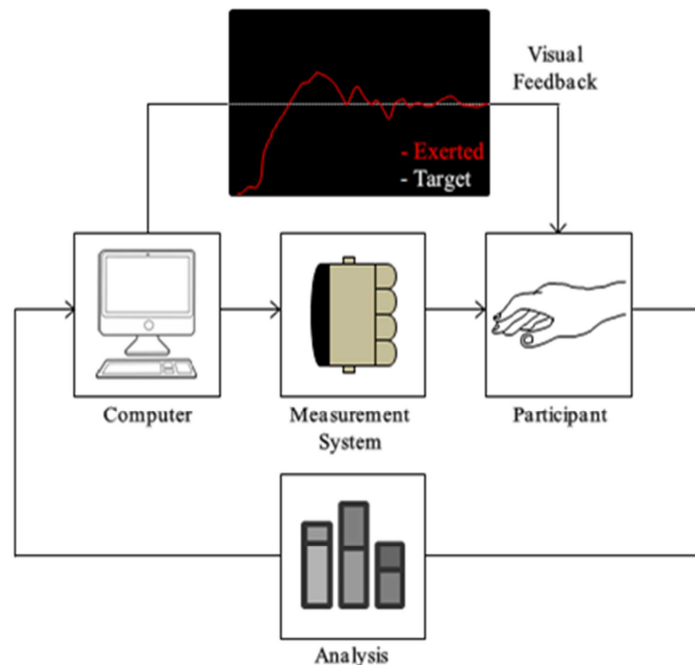


Figure 2. Structure of a tracking task system

2.4 Experimental Procedures

실험 전, 상지의 근골격계 질환과 기타 질환에 대한 응답지를 작성하고 실험 참가자의 신체 정보 및 나이 등의 12 가지 항목을 측정하였다. 각 피실험자 별, Target force level 들의 선정을 위해 5 초간 최대악력을 2 회 측정하여 평균 값을 사용하였다. 파지 방법, 실험 자세, 실험 방법 등의 숙지를 위해 Tracking task 연습을 충분히 수행하였다. 실험 자세는 미국 손 치료사협회(American Society of Hand Therapists, ASHT)의 제안에 따라 의자에 앉은 상태에서 어깨는 자연스럽게 내리고 팔꿈치는 90°로 굴곡, 전완 및 손목은 중립을 유지하도록 하였다 (Fess and Moran, 1981). 피실험자들은 8 가지 Target force level (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75% MVCs)에

대하여 각각 2 회씩 반복측정을 실시하였으며, 학습효과를 배제하기 위하여 임의 순서로 진행하였다. 반복 측정으로 인한 손의 피로를 최소화하기 위하여 trial 간 3 분의 휴식시간을 제공하였다 (Trossman and Li, 1989).

3. Results

Table 2. ANOVA on finger contribution

소스	자유도	제곱합	평균제곱	F	유의확률
Gender	1	18.0	18.0	.16	.688
Finger	3	1378601.3	459533.8	4115.63	.000
Age	1	154.2	154.2	1.38	.240
Target	7	975.3	139.3	1.25	.272
Gender * Finger	3	36880.6	12293.5	110.10	.000
Gender * Age	1	.9	.9	.01	.930
Gender * Target	7	205.4	29.3	.26	.968
Finger * Age	3	7884.8	2628.3	23.54	.000
Finger * Target	21	98111.7	4672.0	41.84	.000
Age * Target	7	99.5	14.2	.13	.996
Gender * Finger * Age	3	4058.7	1352.9	12.12	.000
Gender * Finger * Target	21	5436.9	258.9	2.32	.001
Gender * Age * Target	7	58.1	8.3	.07	.999
Finger * Age * Target	21	11296.7	537.9	4.82	.000
Gender * Finger * Age * Target	21	1745.7	83.1	.75	.790
오차	15031	1678297.3	111.7		
합계	15159	12925780.0			

3.1. Contributions of Individual Finger Forces

각 손가락에서 발생하는 힘의 기여도는 손가락 별로 통계적으로 유의한 차이를 보인 반면, ($p < 0.001$) 성별과 나이는 통계적으로 유의하지 않았다. 결과에 따르면, 성별이나 나이에 관계없이 중지의 기여도가 36.4%^A 로 가장 높았으며 그 다음으로는 검지 (29.0%)^B 의 기여도가 크게 나타났다. 소지 (10.2%)^D 의 기여도는 약지의 (25.2%)^C 기여도보다 통계적으로 유의하게 낮게 나타났다 [Figure 3].

손가락 별 기여도에 대한 성별과 각 손가락의 교호작용 또한 통계적으로 유의하였다 ($p < 0.001$). 여성과 남성의 손가락의 기여도의 크기는 모두 중지-검지-약지-소지 순으로 동일하였으나, 검지와 소지의 기여도에서는 유의미한 차이를 나타냈다. 여성 (31.6%)의 경우, 남성 (26.4%)에 비해 검지의 기여도가 상대적으로 높게 나타났다. 여성의 경우 검지와 중지의 기여도 차이가 3.8%p에 그치지만, 남성의 경우 10.8%p로 차이가 두드러지게 나타났다 [Table 3 & Figure 3]

Table 3. Contributions of individual finger force for gender

	Index	Middle	Ring	Little
Female	31.6%	35.4%	24.7%	8.4%
Male	26.4%	37.2%	25.0%	11.4%

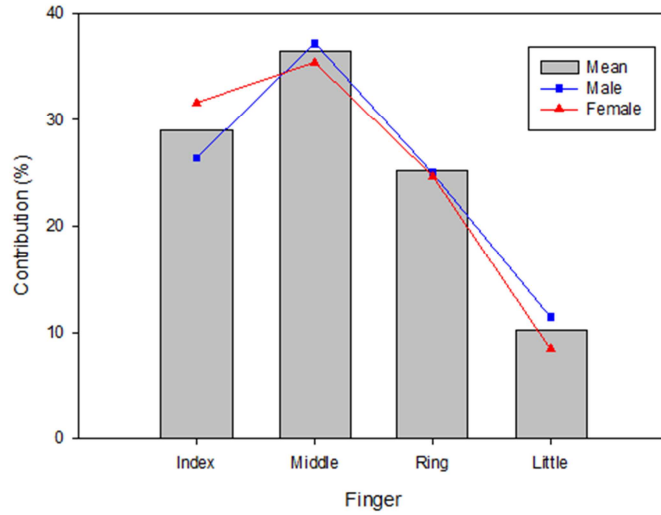


Figure 3. Contributions of individual finger force to the total grip force

3.2. Trends of Individual Finger Force for Various Target Force Levels

손가락 별 기여도에 대한 Target Force Level과 손가락의 교호작용은 통계적으로 유의하였다 ($p < 0.001$). 분석결과에 의하면, 가장 작은 Target Force Level (5% MVC)에서는 검지-중지-약지-소지 순의 기여도를 보인 반면, 15%~55% MVC에서는 중지-검지-약지-소지 순의 기여도를 보였다. 또한, 큰 Target Force Level (65 & 75% MVC)에서는 중지-약지-검지-소지 순의 기여도를 보였다. 그러므로, Target Force Level이 커질수록 중지와 약지의 기여도는 점점 커졌으며, 반대로 검지의 기여도는 감소하였다 [Figure 4].

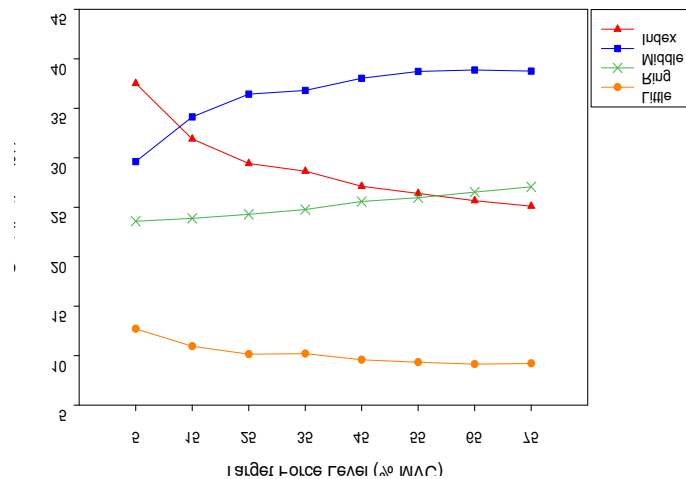


Figure 4. Trends of individual finger force contributions for target force levels

손가락 별 기여도에 대한 Target Force Level과 손가락의 교호작용은 연령에 따라 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.001$). 고령자의 경우, 55% MVC 이상의 Target Force Level에서는 검지보다 약지의 기여도가 더욱 크게 나타났으나 [Figure 5, left], 젊은 연령의 경우, 모든 Target Force Level에서 검지의 기여도가 약지의 기여도보다 큰 경향을 나타냈다 [Figure 5, right].

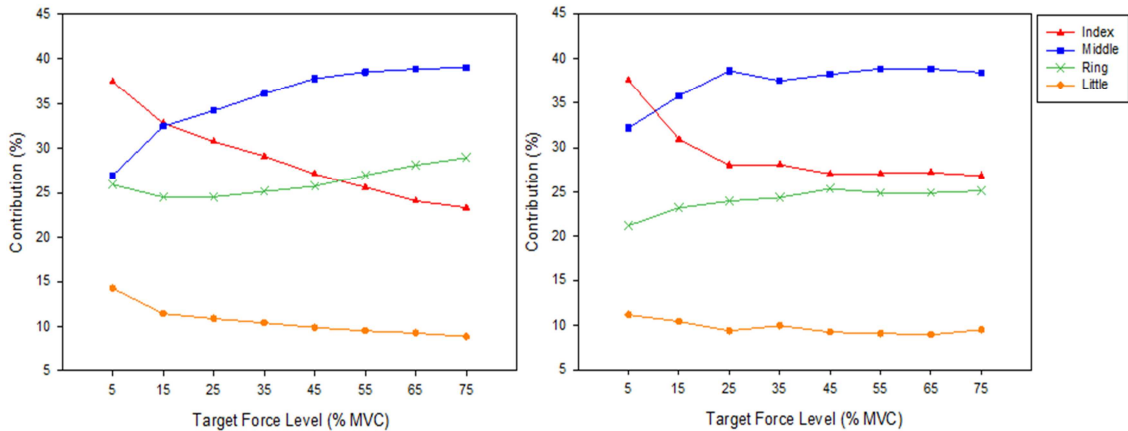


Figure 5. Interaction effects of individual finger and target force level (left: elderly; right: young)

4. Discussion

본 연구에서는 일정한 악력을 발휘하는 과업에서, 발휘하는 악력의 크기에 따라 손가락 기여도의 변화를 알아보기 위해 8 개의 Target Force Level 에 대한 Tracking Task 를 수행하였다. 분석 결과, 손가락 별 기여도는 중지에서 36.4%로 가장 크게 나타났으며 소지의 기여도 (10.2%)는 가장 작게 나타났다. 검지와 약지는 각각 29.9%와 25.2%의 기여도를 보였다.

기여도에 대한 성별과 손가락의 교호작용은 통계적으로 유의하였다. 여성과 남성 모두 중지-검지-약지-소지 순의 동일한 기여도 경향을 보였으나, 여성의 경우 남성에 비해 비교적 검지의 기여도가 큰 것으로 나타났다. 검지와 중지의 기여도 차이를 살펴보면, 여성의 경우 3.8%p 차이가 발생한 반면 남성의 경우 10.8%p 로 여성보다 약 2.8 배 큰 차이를 보인 것으로 나타났다. 이는 여성은 검지와 중지의 사용이 비교적 고른 반면, 남성의 경우에는 중지의 사용 비율이 월등히 높다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 남성이 주로 사용하는 수공구의 경우 중지의 사용을 고려하여 디자인하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

검지와 소지의 기여도는 Target Force Level 이 커질수록 감소하였으며 중지와 약지는 증가하는 서로 상반된 경향을 나타냈다. 정리하자면, 가장 작은 Target Force Level (5% MVC)에서는 검지-중지-약지-소지 순의 기여도를 보인 반면, 15 ~ 55% MVCs 와 같은 중간 힘을 발휘할 때에는 중지의 기여도가 증가하여 중지-검지-약지-소지 순의 경향을 보였다. 즉, 15% MVC 부근의 Target Force Level 에서 검지와 중지의 역할이 교체되었음을 알 수 있는데, 이는 최대하근력 (10, 20, 30% MVCs) 발휘시의 기여도를 연구한 Radwin et al. (1992)의 결과와 유사하였다. Radwin et al (1992)의 연구결과에 의하면 가장 작은 10% MVC 를 발휘할 때에는 본 연구의 결과와 유사하게 검지의 기여도가 중지의 기여도보다 커, 검지-중지-약지-소지 순의 경향을 보였으며, 20% MVC 와 30% MVC 에서는 중지의 기여도가 검지의 기여도를 넘어, 중지-검지-약지-소지 순의 기여도 경향을 보여, 본 연구의 15~55% MVC 에서 보인 기여도 결과와 유사한 경향을 보였다. 상대적으로 큰 Target Force Level (65 와 75% MVC)에서는 약지가 검지의 기여도를 역전하여 중지-약지-검지-소지 순의 기여도를 보였는데, 이는 최대근력 발휘시 손의

기여도를 연구한 기존의 연구 결과들과 유사한 경향이라고 할 수 있다 (김대민과 공용구, 2008; Kong and Lowe, 2005; Kong et al, 2008; Kong et al, 2011; Lee et al, 2009; Ohtsuki, 1981; Talsania and Kozin, 1998). 본 연구 결과에 의해, 큰 힘을 발휘하는 경우에는 중지와 약지가 중요한 역할을 하며, 섬세한 움직임에는 검지가 크게 관여한다는 것을 유추해볼 수 있을 것이다.

손가락과 Target Force Level 교호작용은 연령에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 고령자의 경우 55% MVC 이상의 큰 Target Force Level 에서 검지보다 약지의 기여도가 더 크게 나타났다. 그러나 젊은 연령의 경우 모든 Target Force Level 에서 검지의 기여도가 약지보다 큰 경향을 보였다. 젊은 연령의 경우 Target Force Level 에 따라 기여도의 변화가 크지 않은 반면, 고령자는 Target Force Level 에 따라 기여도 양상이 다르며 특히, 큰 힘을 발휘할 때에 약지가 큰 관여를 한다는 것을 알 수 있다.

Target Force Level 에 따른 손가락의 기여도 변화를 고려한다면, 정밀하고 작은 힘을 발휘해야 하는 경우에는 검지의 효율적인 사용을 위한 수공구 설계가 적절할 것이라고 예상되며, 65% MVC 이상의 비교적 큰 힘을 발휘하는 작업의 경우 중지와 약지의 사용을 중점적으로 고려한 수공구 설계가 이루어져야 할 것이다. 본 연구의 결과가 인간공학적 수공구 설계에 반영되어 수공구로 인한 작업관련성 근골격계 질환의 예방과 작업현장의 효율성에 도움이 되길 기대한다.

Acknowledgements

이 연구는 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ010017032016)의 지원에 의해 수행되었음

References

김대민과 공용구, MFFM System 을 이용한 손가락 별 파지 폭들의 변화에 따른 악력 및 개인 선호도에 대한 연구, 대한인간공학회지, 27(3), 1-6, 2008.

An, K. N., Chao, E. Y., Cooney, W. P., and Linscheid, R. L., Forces in the normal and abnormal hand, *Journal of Orthopaedic Research*, 3(2), 202-211, 1985.

Crago, P. E., Nakai, R. J., and Chizeck, H. J., Feedback regulation of hand grasp opening and contact force during stimulation of paralyzed muscle, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38(1), 17-28, 1991.

Fess, E. E., and Moran, C. A., Clinical Assessment Recommendations, *American Society of Hand Therapist*, University of Minnesota Press, Minneapolis, MN, 1981.

Kong, Y. K., Lee, K. S., Kim, D. M., and Jung, M. C., Individual finger contribution in submaximal voluntary contraction of gripping, *Ergonomics*, 54(11), 1072-1080, 2011.

Kong, Y. K., and Lowe, B. D., Optimal cylindrical handle diameter for grip force tasks, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(6), 495-507, 2005.

Kong, Y. K., Lowe, B. D., Lee, S. J., and Krieg, E. F., Evaluation of handle shapes for screwdriving, *Applied Ergonomics*, 39(2), 191-198, 2008.

Lee, S. J., Kong, Y. K., Lowe, B. D., and Song, S., Handle grip span for optimising finger-specific force capability as a function of hand size, *Ergonomics*, 52(5), 601-608, 2009.

Mason, M. T., and Salisbury Jr, J. K., *Robot hands and the mechanics of manipulation*. MIT Press, 1985.

Ohtsuki, T., Inhibition of individual fingers during grip strength exertion, *Ergonomics*, 24(1), 21-36. 1981.

Radwin, R. G., Oh, S., Jensen, T. R., and Webster, J. G., External finger forces in submaximal five-finger static pinch prehension, *Ergonomics*, 35(3), 275-288, 1992.

Talsania, J. S., and Kozin, S. H., Normal digital contribution to grip strength assessed by a computerized digital dynamometer, *Journal of Hand Surgery (British and European Volume)*, 23(2), 162-166, 1998.

Trossman, B. and Li, P. W., The effect of the duration of intertribal rest periods on isometric grip strength performance in young adults, *The Occupational Therapy Journal of Research*, 9(6), 362-378, 1989.