

A Study of the Relationship between Internal Tendon Force and External Grip Force using Cadaver Hand Experiment

Dae-Min Kim¹, Yong-Ku Kong², Kyeong-Hee Choi²

¹Dongseo University, Division of ICT Convergence Engineering, Busan, 47011

²Sungkyunkwan University, Department of Industrial Engineering, Suwon, 16419

시체 손 실험연구를 이용한 손 내부 건의 힘과 외부 악력과의 관련성 연구

김대민¹, 공용구², 최경희²

¹동서대학교 ICT 융합공학부

²성균관대학교 산업공학과

Corresponding Author

Kyeong-Hee Choi

Sungkyunkwan University, Department of

Industrial Engineering, Suwon, 16419

Email : kyunghe7@naver.com

Received : May 28, 2020

Revised : September 28, 2020

Accepted : October 08, 2020

Objective: The purpose of this study was to investigate the relationship between internal tendon exertion and external total grip strength through the cadaver hands experiment.

Background: Many previous studies have been conducted to accurately measure the strength of the internal muscles of the human body, but there have been many difficulties in research, including the supply and demand of cadaver hands and the establishment of systems for data collection.

Method: The donated four fresh cadaver hands were used, and the Cadaver Finger Force Measurement (CFM) system was developed to control the strength of the hand muscles. Grip span (4 levels: 45, 50, 55, 60mm), total tendon force (3 levels: 70, 105, 140N), and tendon force ratio (1:1, 1:1.5, 1:2, 1:3) were selected as independent variables, and total grip strength and internal tendon force/external force ratio (I/E ratio) were selected as dependent variables.

Results: Grip span 55 and 60mm had a total grip strength of 28.8N and 27.5N, respectively, showing a relatively larger (approximately 15%) than 24.7N and 24.3N of 45mm and 50mm, respectively. The total grip strength for tendon forces showed the lowest total grip strength (19.0N) at 70N and the largest total grip strength (33.7N) when increased to 140N tendon force. The I/E ratio according to grip span was low in 55mm and 60mm grip span, and the ratio was relatively high in 45mm and 50mm grip span. The I/E ratio based on total tendon was the lowest (3.9) at tendon force of 70N and the highest at tendon force of 4.5 at 140N.

Conclusion: It was confirmed that the external force of the hand grows together as the internal force (tendon exertion) increases, and that the rate of increase also depends on the magnitude of the external force.

Application: The findings of this study provide useful insights and information for understanding the relationship between the external force of the hand and the force of the internal muscles that exert various grip or force.

Keywords: Cadaver hand study, Internal tendon force, Flexor Digitorum Profundus (FDP), Flexor Digitorum Superficialis (FDS), I/E ratio (Internal tendon force/external force ratio)

1. Introduction

작업장이나 조립라인 등의 산업현장에서 외부에 작용하는 힘에 대한 신체 내부의 근육이나 건들의 부하에 대한 정확한 분석을 위해 여러 다양한 연구들이 시도되어 왔다. 대부분의 많은 연구자들은 시뮬레이션을 이용하거나, 물리학적 원리를 이용하여 생체역학적 분석을 통해 수학적으로 외부의 힘으로 인해 발생하는 인체 내부의 부하를 예측하는 방법을 사용하였으나, 이는 인체 내부의 힘을 직접 측정하기 힘든 한계라고 할 수 있다.

인체 내부의 힘에 대한 직접 측정의 한계를 극복하고, 보다 정확한 내부의 부하를 측정하기 위해 많은 연구자들은 시체 실험이나 in-vivo 환경에서의 실험을 수행해 왔다. 시체 실험의 경우, 인체와 매우 가까운 환경이기는 하지만, 중추신경 요인이 배제되어 in-vivo 실험보다 상대적으로 수동적인 반응의 결과를 얻을 수 밖에 없는 한계가 있지만, in-vivo 실험보다 실험 재현의 자유로움이라는 장점을 가지고 있어 보다 다양한 연구를 진행하기 위해 많은 연구자들이 시체연구를 진행하였다.

기존의 시체연구에서는, 전신(Dempster and Gaughran, 1967), 상지(An et al., 1983; Brooks et al., 1993; Phillips and Mass, 1996; Marco et al., 1998; Kleiven and Hardy, 2002; Follmar et al., 2008; Nimbarde et al., 2008; Schoffl et al., 2009; Schweizer and Hudek, 2011), 그리고 하지(Day et al., 1975; Puers et al., 2000; Cambier et al., 2001; Janda et al., 2003; Crottet et al., 2005; Luring et al., 2006) 등과 같이 여러 신체 부위에 대해 외부력과 인체 내부의 부하의 상관관계 등과 같은 다양한 연구가 보고되었다. 대부분의 손가락연구를 위한 시체실험연구에서는 실제로 손가락을 굽히는 동작을 위해 관여하는 많은 근육들 중, 손가락 굽힘에 역할이 가장 큰 근육인 FDP (Flexor Digitorum Profundus)와 FDS (Flexor Digitorum Superficialis) 두 근육에 대한 연구(Ketchum et al., 1978; Brand et al., 1981; An et al., 1985; Marco et al., 1998; Park et al., 2000; Valero-Cuevas et al., 1998)를 주로 수행하였다. Table 1와 같이, 손과 관련된 시체연구에서, 손가락에서 발생하는 외력과 내력 사이의 관계를 파악하기 위한 연구를 위해 Brand et al. (1981)과 An et al. (1985)은 손가락을 움직였을 때 발생하는 FDP와 FDS의 질량, 부피 그리고 fiber lengths를 직접 측정된 결과, FDP와 FDS의 tendon force의 비율이 각각 1.5:1와 1.1:1로 나타났다. Marco et al. (1998), Vigouroux et al. (2006), and Park et al. (2009)은 Slope grip, Crimp grip, 그리고 Power grip에서 발생하는 FDP와 FDS tendon의 힘의 비를 구한 결과, 1.5~3.0:1로 FDP의 근육이 FDS의 근육보다 1.5배에서 3배의 큰 힘을 발휘하는 것으로 나타났다. 반면 Ketchum et al. (1978)의 시체 팔(arm)를 이용하여 MCP joint가 굴곡되는 동안, FDP와 FDS의 tendon force ratio를 측정된 결과, FDP가 FDS의 0.9배로 기존 연구들과 다소 다른 결과를 보였다.

Table 1. Tendon force ratios (FDP vs. FDS) in cadaver hand studies

References	Finger configuration	FDP to FDS force ratio
Ketchum et al. (1978)	MCP joint flexion	0.9 to 1
Brand et al. (1981)	-	1.5 to 1
An et al. (1985)	-	1.1 to 1
Marco et al. (1998)	Crimp grip	3.0 to 1
Vigouroux et al. (2006)	Crimp grip Slope grip	1.75 to 1 0.88 to 1
Park et al. (2009)	Power grip	1.5 to 1

반면, In vivo 실험은 실험 조건에 여러 제약이 따르지만, 생체와 똑같은 환경에서 실험할 수 있는 장점이 있어, 많은 연구자들이 연구를 진행해왔다. Bright and Urbaniak (1979)은 tendon force measurement system을 개발하여 연구를 진행하였으며, 그 결과 Power grip과 pinch grip를 isometric finger function으로 수행할 때의 FDP 근육의 tendon force ratio가 FDS 근육에 비하여 1.5~1.8배 크다는 결과를 보고하였다. Schuind et al. (1992) 역시 Force transducer를 개발하여 power grip과 pinch grip를 수행할 때 발생하는 FPL (Flexor Pollicis Longus), FDS 그리고 FDP의 tendon forces를 측정하였으며, 그 결과, FDP와 FDS의 tendon force 비율은 pinch grip에서는 FDP가

1.7배, power grip에서는 4.1배 큰 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. Tendon force ratios (FDP vs. FDS) in In-vivo studies

References	Finger configuration	FDP to FDS force ratio
Bright and Urbaniak (1979)	Tip pinch	1.8 to 1
	Power grip	1.5 to 1
Schuind et al. (1992)	Tip pinch	1.7 to 1
	Power grip	4.1 to 1
Kursa et al. (2006)	MCP joint flexion	1.0 to 1.8

위와 같이 전신에서부터 각 부위까지 시체연구가 다양한 분야에서 진행되고 있지만, 시체 수급부터 근육별 힘의 데이터를 수집할 수 있는 시스템구축까지 연구에 많은 어려움이 있어, 복잡하고 다양한 움직임을 담당하고 있는 손에 대한 연구가 여전히 미진한 상태이며, 특히 한국의 경우는 매우 드문 연구라고 할 수 있다. 또한, 기존의 연구들이 오래전에 수행되어 내력과 외력을 동시에 제어하며 측정하는 것과 외력 측정 방법도 기준이 서로 달라 일반인들의 결과와 비교하는 것에 대한 한계가 발생하였다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 시스템을 구축하여 동시 제어와 계측이 가능하도록 하였고, 악력 발휘 방식에 따른 측정 방법을 선택함으로써 시체 실험의 결과를 일반인들의 악력 측정 실험과 비교 분석할 수 있는 기회를 제공하고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 시체 팔을 이용한 연구를 수행하기 위해, (1) Cadaver Finger force Measurement (CFM) system을 개발하고, (2) 손 내부의 FDP와 FDS tendon의 발휘 힘의 수준, 두 tendon 발휘 힘의 비율(tendon force ratio), 그리고 다양한 grip span이 총 악력(total grip force)과 내력과 외력의 비(I/E ratio)에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. Method

2.1 Specimens

본 연구에서는 근골격계질환이나 해부학적 문제가 없는 기증된 4개의 시체 손을 사용하였으며, 기증자의 평균연령은 46세로 모두 미국 백인이었다. 실험을 위해 냉동실에 보관하고 있던 시체 손은 실험 전날 저녁 상온에 노출 후, 시체 손 해동 후에 실험을 진행하였다. FDP와 FDS tendon은 외과 전문의의 참여하에 정확하게 분류하였다. 시체 손 실험을 위해서 IBC 승인을 받았으며(IBC #41787), Pennsylvania state university 학내에서 시행되고 있는 시체 실험 자격 시험(감염병 및 Bio-hazard 관련)에 모두 응시하였으며, 시험에 통과한 연구원만이 본 실험에 참여하였다.

2.2 Apparatus

2.2.1 Main frame setting of Cadaver Finger force Measurement (CFM) system

본 실험에서 finger force measurement system과 시체 손을 견고하게 고정하기 위해 main frame의 틀을 Figure 1과 같이 20mm T-slotted profile로 제작하였다. Main frame은 실험에 필요한 finger force measurement system (MFFM system), motors, 그리고 camera 등의 장비를 고정시킬 수 있도록 설계하였고, 시체 손이 움직이지 않도록 설계하였다.

시체 손을 고정하기 위해, 6개의 schanz screw를 radius와 ulna에 각각 3개씩 삽입한 후, radius의 팔꿈치 쪽에 삽입한 1개의 schanz screw와 ulna에 삽입한 3개의 schanz screw를 main frame에 단단히 체결하였다. 또한 시체 손의 손목 부분을 추가로 고정하기 위해서 손목부위의 radius에 삽입된 2개의 schanz screw를 wrist jack를 삽입 후에 main frame에 단단히 고정시켰다. 이 2개의 schanz screw에

의해 고정된 wrist jack은 손목각도를 중립으로 유지하기 위해 중수골(metacarpal bone)에 소형 schanz screw를 삽입하여 고정시켰다.



Figure 1. Setting of the Cadaver Finger force Measurement (CFM) system

2.2.2 Tendon and Finger force measurement system

두 종류의 힘을 측정하였는데, 첫 번째로는 소형 로드셀을 사용하여 시체 손의 FDS와 FDP tendon forces를 측정하였으며, 둘째로는 MFFM system (Kim and Kong, 2008)을 사용하여, 두 tendon forces에 의해 발휘되는 시체 손의 악력을 측정하였다.

Tendon force 측정: 모터와 FDP와 FDS 근육과 연결된 와이어 중간 위치에, 각 Tendon에 발생하는 힘을 측정하기 위하여 2개의 로드셀(KTOYO Ltd., Model 247ST)을 사용하였다. Tendon과 로드셀을 연결하기 위하여 freeze clamps를 사용하였으며, 로드셀과 모터를 연결하기 위해서는 알루미늄 제조업체에 주문 제작하여 사용하였다.

Finger force 측정: 시체 손의 각 손가락의 힘을 측정하기 위해 사용된 MFFM system은 4개의 소형 로드셀(Miniature Load Cell, Honeywell Model 13)로 구성되었다. 각 로드셀의 크기는 지름이 9.5mm, 두께가 2.75mm의 소형 로드셀 타입으로 손가락 별 최대 악

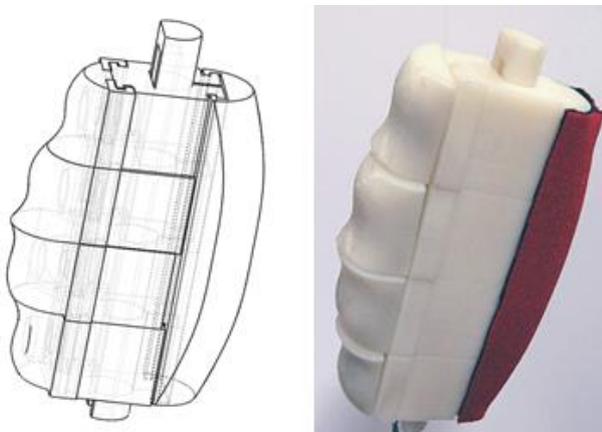


Figure 2. Finger force measurement system (MFFM) in main frame

력을 측정하는데 적합하도록 제작되었다. 본체는 Solidworks를 이용하여 3D 도면을 그린 후, Rapid Prototype Machine (3D Printer-SST 1,200es, Stratasys Inc.)으로 저항력과 내구력이 우수한 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 합성수지 재질로 자체 제작하였다(Figure 2).

2.2.3 Tendon force measurement system

근육의 수축과 이완을 구현하기 위해 National Instrument사의 NI DAQmx-USB 6008 장비를 통해 signal을 제어 계측하였다(Figure 3). NI DAQmx board는 analog signal input 16 channel과 digital signal output 8 channel로 구성되어 있는데, Finger force measurement system (MFFM)으로부터 측정된 각 손가락들의 힘 데이터와 load cell로부터 측정된 각 tendon force 데이터의 수집을 위해서 아날로그 신호를 사용하였으며, AD704 amplifier를 사용하여 이 센서들의 신호를 증폭하였다. 또한, tendon force의 근 수축과 이완의 강도를 실험환경에 맞춰 조절하기 위해서 H-bridge 회로를 구성하여, 디지털 신호를 사용하여 2개의 모터를 조절하였다. Tendon force를 제어하기 위한 모터(Chang Won Ltd., Korea)는 DC 모터로 24V를 사용하며, 당기는 힘이 40kg와 200 stroke까지 가능하였다. 모터의 작동속도는 16m/sec이다.



Figure 3. Tendon force control system in the bottom of the main frame

2.3 Experiment procedure

실험에 앞서, 시체 손의 해동과 screw 삽입 작업이 잘 되었는지 확인한 후, 시체 손을 main frame에 고정시킨다. 고정된 상태에서 FDP와 FDS tendon을 freeze clamps로 잡고, 당기는 힘에 의해 빠지지 않게 하기 위해 nitrogen gas를 이용하여 tendon과 clamp의 결합부위를 급속 냉동시킨다. 냉동이 완료되면, 시체 손의 손가락 부분에 MFFM system을 쥐어 준 후, 본 실험을 실시한다.

시체 손의 손에 임의의 순서로 선정된 4개의 파지폭 중 하나인 MFFM system을 자연스럽게 잡도록 손가락의 위치를 조정한다. FDP와 FDS의 tendon force ratio (1:1, 1:1.5, 1:2, 또는 1:3)를 선택한 후, total tendon force를 70N, 105N, 140N으로 변화시킨다. 각 tendon force ratio에 따른 total tendon force는 약 3~4초 간 평균 악력을 측정하며, 3회씩 반복 측정한다. Tendon force를 70~140N으로 조절하고 시체 손의 손에서 발생하는 악력에 데이터는 본 실험을 위해 LabVIEW program을 개발하여 모든 실험을 통제하였다. 실험이 진행되는 동안, 지속적으로 clamp의 냉동 상태를 파악하여 냉동 상태가 약해지는 경우, nitrogen gas를 통해 다시 얼려 실험을 진행하도록 하였다. 냉동 작업은 실험이 진행되는 동안 매 20분마다 진행되었다.

2.4 Experimental design

본 연구에서 Grip span, total tendon force 그리고 tendon force 3개의 독립변수를 사용하였으며 각각에 대한 종속변수로 total grip

strength와 internal tendon force/external force ratio (I/E ratio)를 측정하여 다변량분석분석(MANOVA)를 실시하였고 각 독립변수 별 사후분석을 위해 Tukey HSD를 실시하였다. Grip span은 4수준(45mm, 50mm, 55mm, 60mm)과, total tendon force는 3수준(70N, 105N, 140N), 그리고 Tendon force ratio는 FDS와 FDP의 비율로 4수준인 1:1, 1:1.5, 1:2 그리고 1:3을 선정하였다. 예를 들어, Total tendon force가 70N이고, tendon force ratio가 1:1일 경우, FDS가 35N, FDP가 35N을 발휘하게 되는 것이며, 1:2일 경우에는 FDS가 23N, FDP가 47N을 발휘하도록 설계되었다.

종속변수 total grip strength는 FDS와 FDP 근육을 지정된 힘으로 당겼을 때, 각 손가락에서 발생하는 악력을 MFFM system을 사용하여 수집하여 총 합을 정의하였다. 종속변수 Internal tendon force/external force ratio (I/E ratio)는 내부의 FDS와 FDP의 tendon force에 대한 외부의 힘(total grip strength)의 비율로 internal tendon force / total grip strength로 정의하였으며, 이는 단위 외부 grip strength를 발휘하는데 필요한 내부 tendon force의 수준을 의미한다.

3. Results

3.1 Total grip strength

Grip span, total tendon force, 그리고 tendon ratio에 따른 total grip strength의 주효과와 교호작용을 분석하였는데, Grip span과 total tendon force의 주효과만 통계적으로 유의한 결과를 보였다(all p -values <0.001). Tendon force ratio의 주효과와 모든 교호작용은 통계적으로 유의하지 않았다.

Grip span에 대한 분석결과에서는, 55mm와 60mm에서 total grip strength가 각각 28.8 (\pm 7.23)N과 27.5 (\pm 8.72)N으로, 45mm와 50mm의 24.7 (\pm 8.39)N과 24.3 (\pm 11.16)N 보다 상대적으로 큰 악력(약 15%)을 발휘하였다(Figure 4, left).

Total tendon force에 따른 total grip strength 역시 통계적으로 유의했으며, 통계적 유의한 차이는 Figure 4 (right)와 같다. 예상한대로, Tendon force가 70N일 때, total grip strength가 19.0 (\pm 4.65)N으로 가장 낮게 나타났으며, 다음으로는 105N tendon force에서 total grip force가 26.3 (\pm 6.97)N으로 다소 높게 나타났다. Tendon force를 140N으로 증가시켰을 때, 가장 큰 total grip strength [33.7 (\pm 8.67)N]을 보였으며, total tendon force가 증가될수록 total grip strength가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

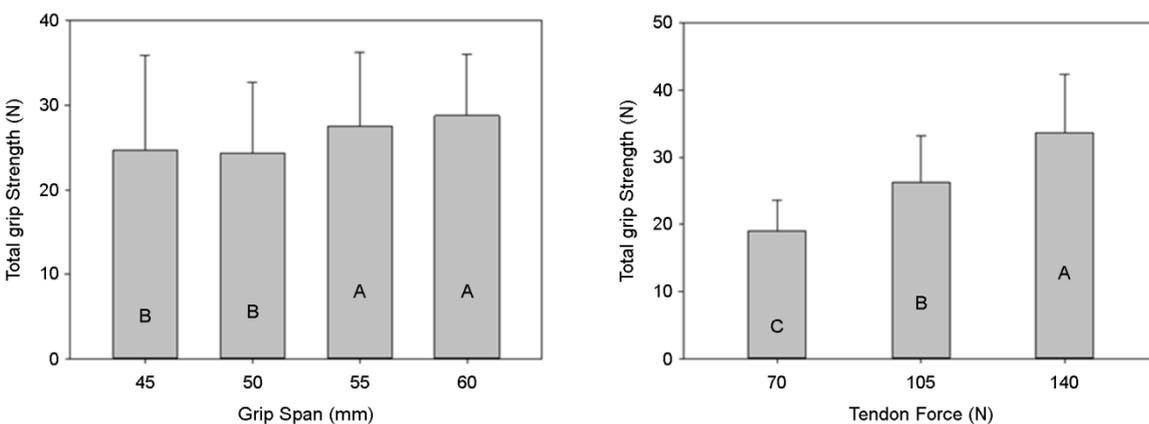


Figure 4. Total grip strength associated with grip spans and tendon force levels

Tendon force ratio는 통계적으로 유의하지는 않았으며, 본 실험에서 실시한 4가지 FDS와 FDP의 ratio에 상관없이 25.6~27.3N의 total grip strength를 보였다(Table 3).

Table 3. Total grip strengths for tendon force ratios

Tendon force ratio (FDS:FDP)	Total grip strength (N)
1:1	27.3 (± 9.83)
1:1.5	25.6 (± 8.66)
1:2	26.1 (± 9.09)
1:3	26.3 (± 9.05)

3.2 Internal tendon force / external force ratio (I/E ratio)

Grip span, total tendon force, 그리고 tendon ratio에 따른 internal tendon force / external force ratio (I/E ratio)의 주효과와 교호작용을 분석한 결과, Grip span과 total tendon force는 통계적으로 유의한 결과를 보인 반면(all p -values < 0.01), Tendon force ratio의 주효과와 다른 교호작용은 통계적으로 유의하지 않았다.

Grip span에 따른 I/E ratio는 55mm와 60mm grip spans에서 각각 3.6과 4.0으로 낮게 나타난 반면, 45mm (4.6)와 50mm (4.9) grip spans에서는 상대적으로 높은 비율을 보였다(Table 4). I/E ratio가 총 악력을 발휘하는데 필요한 내부 tendon force의 수준을 의미하므로, 45 또는 50mm grip span의 경우, 55 또는 60mm grip span의 경우보다 같은 수준의 외부 총 악력을 발휘하기 위해 더 큰 내부 근육/건의 힘 발휘가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Internal tendon force and external force ratio (I/E ratio) for grip spans

Grip span (mm)	I/E ratio
45	4.9 A (± 1.92)
50	4.6 A (± 1.16)
55	4.0 B (± 0.83)
60	3.6 B (± 0.42)

Total tendon force에 따른 I/E ratio의 유의한 차이는 Table 5와 같이 통계적으로 유의하였는데, total tendon force가 70N일 때, I/E ratio가 3.9로 가장 낮고, 다음은 105N에서 4.3 그리고, 140N일 때, 4.5로 가장 큰 비율을 보여, total tendon force가 증가함에 따라, I/E ratio가 증가되는 것을 경향을 보였다. 즉, 낮은 수준의 외부의 힘을 발휘할 때의 내부의 근육이나 tendon들이 발휘하는 힘(3.9배)보다, 높은 수준의 외부의 힘을 발휘할 때, 내부의 근육이나 tendon들이 발휘하는 힘(4.5배)이 더 증가한다는 것으로 해석할 수 있다.

Table 5. Internal and external force ratio for total tendon force

Total tendon force (N)	Internal and external ratio
70	3.9 C (± 1.07)
105	4.3 B (± 1.33)
140	4.5 A (± 1.43)

4. Discussion

Grip span에 따른 총 악력(total grip strength) 분석결과, tendon의 발휘 힘 수준이나 발휘 힘의 비율(tendon force ratio)에 관계없이, 45mm와 50mm grip span에서 낮은 악력(24.3~24.7N)을 발휘한 반면, 55mm와 60mm grip span에서는 상대적으로 큰 악력(27.5~28.8N)을 발휘하였다. 시체 손 실험에서 grip span에 따른 시체 손의 악력 변화에 관한 연구에서, Park et al. (2009)은 30mm에서 최대 악력이 발휘되었고, grip span이 커질수록 낮은 악력이 발휘된 반면, Chang et al. (2014)의 연구에서는 50mm에서 최대 악력이 발휘되었다. 이와 같은 연구결과 간의 차이는 각 연구에 사용된 악력 측정 장비의 grip type 차이로 볼 수 있는데, Park et al. (2009)는 cylindrical grip을 평가한 반면, Chang et al. (2014)은 noncylinder-type grip을 분석하였다. Cylindrical type의 악력기(cylindrical grip dynamometer)를 사용하여 여러 피실험자를 대상으로 실험한 연구결과에서도 많은 연구자들이 30~35mm의 직경의 cylindrical handle에서 가장 큰 악력이 나타났고, 손잡이의 직경이 커질수록 악력이 감소하는 결과가 보였다(Edgren et al., 2004; Kong and Lowe, 2005; Seo and Armstrong, 2008; Park et al., 2009).

반면, 본 연구와 Chang et al. (2014)의 연구결과와 같이 non-cylindrical type의 악력기(palmar grip dynamometer)를 사용한 연구를 살펴보면, 많은 연구결과에서 50~60mm가 최대 악력을 발휘하는 grip span이라는 결과를 발표하여 본 연구결과와 유사한 결과를 보였다(Petrofsky et al., 1980; Oh and Radwin, 1993; Kim and Kong, 2008; Lee et al., 2009; Kong et al., 2014; Kim et al., 2016).

Grip span에 따른 I/E ratio 분석에서도 55~60mm에서 I/E ratio가 3.6~4.0으로 45~50mm의 4.6~4.9보다 상대적으로 낮은 비율을 보였는데(Table 4), 이미 언급한 바와 같이, I/E ratio는 외력인 총 악력을 발휘하기 위한, 내부 근육/건의 힘 발휘 수준을 의미하므로, 이는 동일한 수준의 외부의 힘을 발휘하기 위해서, 55 또는 60mm grip span의 내부 근육/건의 발휘(3.6~4.0배)가 45 또는 50mm grip span의 내부 근육/건의 발휘(4.6~4.9배)보다 더 적은 힘의 발휘만으로 가능하다는 것으로 해석할 수 있다. 그러므로, 본 연구를 통해 55와 60mm grip span의 경우, 상대적으로 45와 50mm의 grip span보다, 낮은 tendon의 힘 발휘와 함께, 높은 총 악력을 발휘할 수 있는 것으로 사료된다.

Total tendon force 수준에 따른 총 악력(total grip strength)의 분석에서는, 높은 tendon force를 발휘함에 따라 총 악력 또한 함께 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있었다. 특히, 내부의 tendon force를 70N에서 105N 그리고 140N으로 각각 1.5배 그리고 2배로 발휘하게 함에 따라, 외부의 악력도 19N에서 26.3N 그리고 33.7N으로 각각 1.4배 그리고 1.77배로 유사한 증가율을 보였다.

서로 다른 수준의 total tendon force에 따른 I/E ratio 분석에서도 유사한 경향을 보였는데, 내부의 tendon force를 70N에서 105N 그리고 140N으로 각각 1.5배 그리고 2배로 발휘하게 함에 따라, I/E ratio는 3.9에서 4.3 그리고 4.5로 각각 1.1배 그리고 1.15배로 증가하였다. 비록, 내부의 tendon force가 커짐에 따라 I/E ratio의 증가세가 다소 둔화되는 경향을 보였으나, 낮은 수준의 외부의 힘을 발휘할 때의 내부의 근육/건의 발휘하는 힘(3.9배)보다, 높은 수준의 외부의 힘을 발휘할 때, 더 증가(4.5배)한다는 것은 매우 주목해 봐야할 것이다. 이는 외력이 커지면 내부에 발생하는 근육이나 건들의 스트레스가 커지는 것으로 볼 수 있다. 손의 외력(악력)은 내력(근육힘)이 증가함에 따라 증가한다. 다만, 손의 외력이 일정비율 증가하는 만큼 내력도 같은 비율로 증가하는 것이 아니라, 그 비율 이상으로 큰 힘이 필요하다고 할 수 있을 것이다.

또한, 기존의 여러 연구진들은 시체 손 실험에서 최적의 ratio를 구현하기 위해 다양한 FDP:FDS tendon force ratio를 시도해 왔었다 [1:1.5 (Park et al., 2009; Bright and Urbaniak, 1979); 1:4 (Schuind et al., 1992)]. 본 연구에서는 두 tendon 사이의 발휘 힘의 비율(tendon force ratio: 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:3)에 따른 총 악력을 분석하였는데, 두 tendon의 발휘 힘의 비율에 관계없이 발휘되는 총 악력은 25.6~27.3N으로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 총 악력을 발휘함에 있어서, 두 근육의 총 발휘 힘이 같다면, 비율에 상관없이 같은 외력(총 악력)을 발휘한다고 할 수 있을 것으로 사료된다.

5. Conclusions

본 연구는 Cadaver Finger-force Measurement (CFM) system을 이용하여 손 내부의 FDP와 FDS tendon들의 발휘 힘의 수준(70, 105, 140N)과 두 tendon 사이의 발휘 힘의 비율(tendon force ratio: 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:3), 그리고 다양한 grip span (45, 50, 55, 60mm)이 총 악

력(외력: total grip force)과 I/E ratio에 미치는 영향을 분석하였다.

55와 60mm의 grip span의 경우, 45와 50mm grip span과 비교하여 상대적으로 낮은 tendon force의 발휘로 높은 총 악력의 결과를 보여, 기존의 palmar type의 손잡이 관련 총 악력에 관한 연구들을 검증할 수 있는 데이터를 제시하였으며, I/E ratio(즉, 내부 근육/건의 발휘 힘과 총 악력의 비율) 분석을 통해, 손의 외력이 내력(근육의 힘)이 커짐에 따라 함께 커진다는 것을 확인할 수 있었으며, 그 증가 비율 또한 외력의 힘의 크기에 따라 달라진다는 것을 확인하였다.

본 연구의 한계점으로는 백인의 시체 손만을 대상하였으며, 상대적으로 적은 수의 시체 손을 실험에 사용했다는 점이다. 그러나 본 연구가 국내에서는 수행되기 힘든 시체 실험인 점을 감안하였을 때, 연구결과는 충분한 의의를 가질 수 있다고 사료된다. 본 연구의 결과가 여러 다양한 악력이나 힘을 발휘하는 손의 외력 및 내부 근육의 힘과의 관계를 이해하는 기초연구가 되었기를 희망한다.

Acknowledgement

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MISIT) (NRF-2019R1F1A1064206).

References

- An, K.N., Chao, E.Y.S., Cooney, W.P.3rd. and Linscheid, R.L., Forces in the normal and abnormal hand, *Journal of Orthopedic Research*, 3, 202-211, 1985.
- An, K.N., Ueba, Y., Chao, E.Y., Cooney, W.P. and Linscheid, R.L., Tendon excursion and moment arm of index finger muscles, *Journal of Biomechanics*, 16(6), 419-425, 1983.
- Brand, P.W., Beach, R.B. and Thompson, D.E., Relative tension and potential excursion of muscles in the forearm and hand. *Journal of Hand Surgery*, 6, 209-218, 1981.
- Bright, D.S. and Urbaniak, J.S., Direct measurements of flexor tendon tension during active and passive digit motion and its application to flexor tendon surgery, *The 22nd Annual Meeting Orthopaedic Research Society*, New Orleans, 240, 1979.
- Brooks, C.H., Revell, W.J. and Heatley, F.W., Vascularity of the humeral head after proximal humeral fractures, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 75B(1), 132-136, 1993.
- Cambier, D., Herde, K., Witvrouw, E., Beck, M., Soenens, S. and Vanderstraeten, G., Therapeutic ultrasound: Temperature increase at different depths by different modes in a human cadaver, *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 33, 212-215, 2001.
- Chang, J., Freivalds, A., Sharkey, N.A., Kong, Y.K., Kim, H.M., Sung, K. and Kim, D.M., Investigation of triggering force by the index finger for optimal trigger design using a cadaver experiment, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 58th International Annual Meeting, Hyatt Regency Chicago, Chicago, Illinois, USA, October 27-31, 2014.
- Crottet, D., Maeder, T., Fritschy, D., Bleuler, H., Nolte, L.P. and Pappas, I.P., Development of a force amplitude- and location-sensing device designed to improve the ligament balancing procedure in TKA, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52, 1609-1611, 2005.
- Day, W.H., Swanson, S.A.V. and Freeman, M.A.R., Contact pressures in the loaded human cadaver hip, *The Journal of Bone and*

Joint Surgery, 57B(3), 302-313, 1975.

Dempster, W.T. and Gaughran, G.R.L., Properties of body segments based on size and weight, *American Journal of Anatomy*, 120, 33-54, 1967.

Edgren, C.S., Radwin, R.G. and Irwin, C.B., Grip force vectors for varying handle diameters and hand sizes, *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(2), 244-251, 2004.

Follmar, K.E., Baccarani, A., Das, R.R., Mukundan, S., Levin, L.S., Erdmann, D. and Marcus, J.R., Osteocutaneous face transplantation, *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 61, 518-524, 2008.

Janda, S., VanderHelm, F.C.T. and DeBlok, S.B., Measuring morphological parameters of the pelvic floor for finite element modelling purposes, *Journal of Biomechanics*, 36, 749-757, 2003.

Ketchum, L.D., Brand, P.W., Thompson, G. and Pocock, G.S., The determination of moments for extension of the wrist generated by muscles of the forearm. *Journal of Hand Surgery*, 3, 205-210, 1978.

Kim, D.M., Choi, K.H., Lee, S.Y. and Kong, Y.K., Study on the grip spans of combination pliers in a maximum gripping task, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 54, 42-47, 2016.

Kim, D.M. and Kong, Y.K., Development of an Adjustable Multi-Finger Force Measurement (MFFM) System for research on hand tool-related musculoskeletal disorders. *Applied Human Factors and Ergonomics 2nd international conference*, Las Vegas, 14-17 July, 2008.

Kleiven, S. and Hardy, W.N., Correlation of an FE model of the human head with local brain motion - consequences for injury prediction, *Stapp Car Crash Journal*, 46, 123-144, 2002.

Kong, Y.K., Seo, M.T. and Kang, H.S., Evaluation of total grip strength and individual finger forces on opposing (A-type) handles among Koreans, *Ergonomics*, 57(1), 108-115, 2014.

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

Kursa, K., Lattanza, L. and Diao, E. and Rempel, D., In vivo flexor tendon forces increase with finger and wrist flexion during active finger flexion and extension, *Journal of Orthopaedic Research*, 24(4), 763-769, 2006.

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

Luring, C., Hufner, T., Kendoff, D., Perlick, L., Bathis, H., Grifka, J. and Krettek, C., Eversion or subluxation of patella in soft tissue balancing of total knee arthroplasty Results of a cadaver experiment, *The Knee*, 13, 15-18, 2006.

Marco, R.A.W., Sharkey, A.S., Smith, T.S. and Zissimos, A.G., Pathomechanics of closed rupture of the flexor tendon pulleys in rock climbers, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 80A(7), 1012-1019, 1998.

- Nimbarte, A.D., Kaz, R. and Li, Z.M., Finger joint motion generated by individual extrinsic muscles: A cadaveric study, *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 3, 27, 2008.
- Oh, S. and Radwin, R.G., Pistol grip power tool handle and trigger size effects on grip exertions and operator preference, *Human Factors*, 35(3), 551-569, 1993.
- Park, S., Freivalds, A., Sharkey, N. and Lowe, B., A new device for measuring flexor tendon forces and grip force: A cadaver model. *The Annual Meeting of the American Society of Journal of Biomechanics*, 7, 123-129, 2009.
- Petrofsky, J.S., Williams, C., Kamen, G. and Lind, A.R., The effect of handgrip span on isometric exercise performance, *Ergonomics*, 23(12), 1129-1135, 1980.
- Phillips, C. and Mass, D., Mechanical analysis of the palmar aponeurosis pulley in human cadavers, *The Journal of Hand Surgery*, 21A(2), 240-244, 1996.
- Puers, R., Catrysse, M., Vandevoorde, G., Collier, R.J., Louridas, E., Burny, F., Donkerwolcke, M. and Moulart, F., A telemetry system for the detection of hip prosthesis loosening by vibration analysis, *Sensors and Actuators*, 85, 42-47, 2000.
- Schoffl, I., Oppelt, K., Schweizer, A., Hugel, A., Jungert, J., Henning, F., Neuhuber, W. and Schoffl, V., A new measuring technique for determining the forces acting on the pulley system of the finger, *Sports Technology*, 2(1-2), 28-32, 2009.
- Schuind, F., Garcia-Elias, M., Cooney, W.P. and An, K.N., Flexor tendon forces: in vivo measurements. *Journal of Hand Surgery*, 17(2), 291-298, 1992.
- Schweizer, A. and Hudek, R., Kinetics of crimp and slope grip in rock climbing, *Journal of Applied Biomechanics*, 27(2), 116-121, 2011.
- Seo, N.J. and Armstrong, T.J., Investigation of grip force, normal force, contact area, hand size, and handle size for cylindrical handles, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 52th International Annual Meeting, New York City, NY, USA, September 22-26, 2008.
- Valero-Cuevas, F.J., Zajac, F.E. and Burgar, C.G., Large index-fingertip forces are produced by subject-independent patterns of muscle excitation, *Journal of Biomechanics*, 31, 693-703, 1998.
- Vigouroux, L., Quaine, F., Labarre-Vila, A. and Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tension and pulley forces during specific sport-climbing grip techniques, *Journal of Biomechanics*, 39, 2583-2592, 2006.

Author listings

Dae-Min Kim: dmkim@gdsu.dongseo.ac.kr

Highest degree: Ph.D, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

Position title: Assistant Professor, Division of ICT Convergence Engineering, Dongseo University

Areas of interest: Physical Ergonomics, WMSDs, Finger/Hand Modeling

Yong-Ku Kong: ykong@skku.edu

Highest degree: Ph.D., Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

Areas of interest: Physical Ergonomics, WMSDs, Finger/Hand Modeling

Kyeong-Hee Choi: kyunghe7@naver.com

Highest degree: M.S., Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

Position title: Ph.D., Candidate, Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University

Areas of interest: Physical Ergonomics, Prosthesis