

등속운동 훈련장치의 개발 및 이의 성능시험에 관한 연구

윤 용 산 · 조 영 돈

Development of Isokinetic Exercise System and Examination of Its Performance

Yong-San Yoon, and Young-Don Cho

- Abstract -

An isokinetic exercise system was designed and manufactured to perform muscular performance test and the training of athletes and the rehabilitation of patients. The system majorly consists of gear box, D. C servo motor and servo controller, data reduction computer.

Preliminary experiments were conducted to find out the performance of the system. The performance of the prototype isokinetic exercise system was turned out to be satisfactory compared with a commercial product called CYBEX system.

1. 서 론

환자의 재활(rehabilitation) 또는 운동선수의 근육 훈련과 근육 성능 실험을 위한 대표적인 훈련 장치(exercise system)로서 두가지가 있다. 첫째는 저항이 일정한 등저항 훈련 장치(isotonic exercise system)가 있고 둘째는 운동속도가 일정한 등속운동 훈련 장치(isokinetic exercise system)가 있다. 먼저 등저항 훈련 장치는 환자가 일정한 저항을 받으며 운동을 하는데 이때의 운동속도는 변하게 되는 장치이다. 반면 등속운동 훈련 장치는 환자가 적당히 변화하는 저항을 받으며 일정한 속도로 운동하도록 해 주는 장치이다. 그리고 이때의 힘과 변위를 측정할

수 있다면 환자의 회복 상태, 근력 특성, 피로도 등을 알 수 있게 된다.

등속운동 훈련 장치는 다음과 같이 세가지로 사용되고 있다. 첫째로 이 장치는 각종 근육 실험에 사용된다. Barnes¹⁾와 Patton 등²⁾은 여러 속도에서의 등속운동 피로 곡선(isokinetic fatigue curves)을 조사하였다. 그리고 Gregor 등³⁾은 여자 운동선수를 대상으로 근육의 섬유 조직(fiber composition)과 토크(torque)-속도(velocity)의 관계를 이 장치를 이용하여 조사하였다. 실제로 근육 성능 실험(muscular performance test)에서 등속운동 측정 방법(isokinetic methods of measurement)은 등저항 측정 방법(isotonic methods of measurement) 보다 우수하다고 인정받고 있다.¹⁾ 둘째로 이 장치는 환자의 재활에 사용된다. Malone 등⁴⁾은 무릎의 재활에, Wilder 등⁵⁾은 환자의 걷는 모양(gait pattern)을 개선하기 위하여 이 장치를 사용하였으며 이 장치가 환자의 재활에 효과적이라고 추천하였다. 셋째로 이 장치는 근력 강화에 사용된다. Coyle 등⁶⁾은 이 장치를 이용하여 여러 속도에서의 근력 강화를 조사하였고 Ro-

〈접수 : 1990년 4월 10일〉

한국과학기술원 기계공학과

Dept. mechanical Eng., KAIST

본 연구는 1986년도 한국과학재단 일반 연구비의 일부에 의해서 이루어진 것을 감사드립니다.

sentswing^{등7)}은 이두근의 근력 강화를 여러가지 방법으로 시험하고 비교하였다. 그 결과 그들은 이 장치가 이두근의 근력 강화에 가장 좋다고 추천하였다.⁷⁾

이와같은 등속운동 훈련 장치로서 현재 시판되고 있는 것이 있는데 이것이 Cybex 시스템이다. 이 시스템은 우수한 성능 때문에 널리 시판되고 있으나 가격이 상당히 고가인 것이 단점이며 그 원리 또한 알려져 있지않다.

따라서 본 연구에서는 가격이 저렴하면서 우수한 성능을 보유한 등속운동 훈련 장치를 새로이 고안하여 설계 및 제작한다. 이러한 장치의 제작과 더불어 이 장치의 작동상에 있어서의 문제점들을 찾아내고, 어느 정도의 성능을 갖고 있는지 입증 하고자 한다.

2. 실험 장치

본 연구에서 설계 및 제작한 등속운동 훈련 장치(isokinetic exercise system)는 인체의 어떤 부위가 반복 등속 회전운동을 하도록 해주며 그때의 토크와 각도를 측정, 분석해주는 장치이다.

전체 실험 장치는 그림 1에 나타나있다.

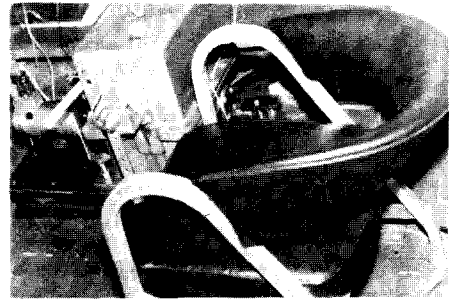
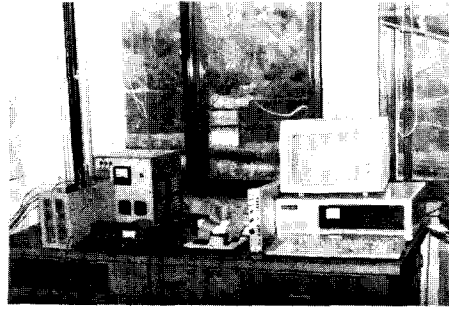


Fig. 1 Perspective View of Experimental System

2.1 전체 장치의 구성

전체 실험 장치의 개략도를 그림2에 나타내었다.

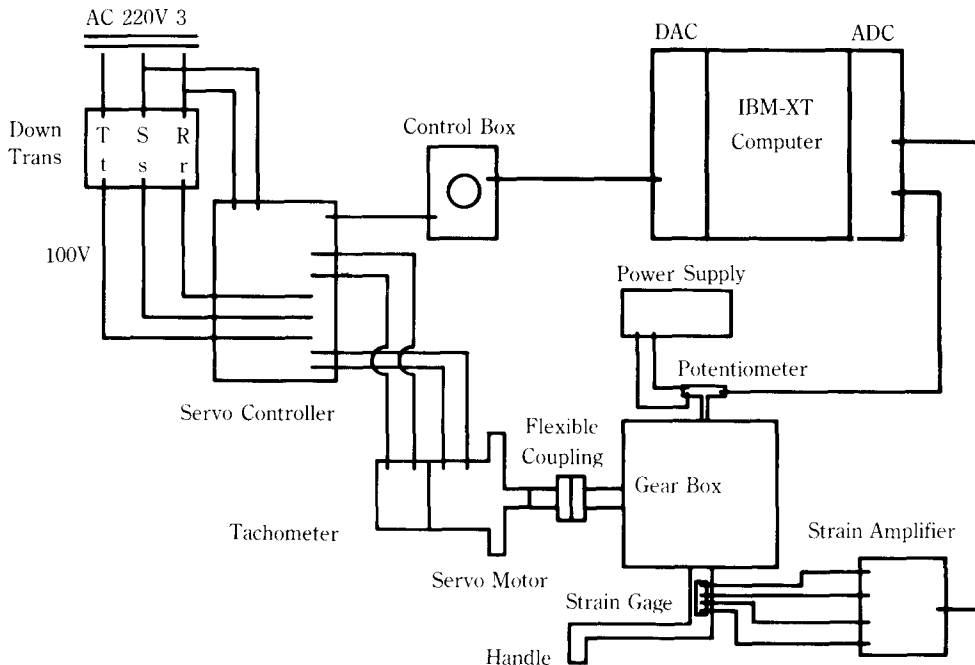


Fig. 2 Sketch of Experimental Set up

먼저 여기에서 사용되는 서어보 콘트롤러(servo controller)는 타코메타(tachometer)와 컴퓨터로부터의 출력 전압에 대응하는 속도로 모터를 돌려주게 된다. 기어 박스(gear box)의 동력은 300W D.C 서어보 모터에 의해서 공급되는데 회전을 원활하게 하기 위하여 모터와 기어 박스 사이에는 플렉시블 커플링(flexible coupling)이 설치되었다. 이와 같은 상태에서 손잡이를 돌리면 손잡이는 모터 회전속도의 1/100의 한계속도를 갖는다.

2.2 기어 박스

기어 박스의 개략도는 그림3에 나타내었다. 이 장치는 다섯개의 스피어 기어(spur gear)와 두개의 워엄 기어(worm gear) 그리고 기어가 연결된 축과 케이스 등으로 구성되어 있다. 모터와 손잡이의 속도비는 약 100대 1이며 두개의 워엄 기어는 스타팅 클러치(starting clutch)를 통하여 축과 연결된다. 여기에서 스타팅 클러치는 한쪽 방향의 상대회전은 허용하나 반대쪽 방향의 상대회전은 막아주는 역할을 한다.

(1) 기어 박스의 작동원리

기어 박스의 개략도에 의거하여 이 장치의 작동원리를 다음과 같이 설명된다. 모터가 화살표 방향으로 회전하면 스피어 기어 C, D, E는 각각 그림과 같은 방향으로 회전한다. 여기에서 워엄 기어 X, Y는 각

각 오른나사, 왼나사로 되어 있으므로 그림과 같은 방향으로 회전한다. 여기에서 워엄 기어 X, Y의 회전 각속도를 각각 W_x , W_y 라고 하면 W_x , W_y 는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$W_x = -W_y \quad (\text{단 } W_y > 0 \text{으로 놓자.})$$

이때에 손잡이를 돌리면 기어 A, B가 회전하여 B에 연결된 축이 회전하게 된다. 여기에서 기어 B의 회전 각속도를 W 라고 하였을때 스타팅 클러치의 작용에 의하여 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$W_x = -W_y \leq W \leq W_y$$

결국 손잡이는 모터 회전 속도의 1/100의 한계 속도를 가지며 시계 방향 또는 반시계 방향으로 회전할 수 있다.

(2) 기어 박스의 설계

이 기어 박스의 설계에서 몇가지 주요한 부분에 대하여 다음과 같이 설명한다. 첫째, 기어 A, B의 잇수비는 2.25이다. 본 장치에 사용된 스타팅 클러치는 27(N.m) 이상의 토오크가 작용할 경우 약 20°의 미끄럼이 생긴다. 이것은 곧 주축에 전달되어 등속운동에 좋지 않은 영향을 끼친다. 따라서 기어 A, B의 잇수비를 2.25로 하여 주축에 전달되는 미끄럼을 10° 이하로 제한하였다. 둘째, 모터의 용량은 기어 잇수비, 기어의 직경, 비틀림 각 등에 따라 결정된다. 셋째, 스트레인 게이지 측정 부분은 측정된 토오크의 신뢰도를 높이기 위하여 주축의 다른 부분보다 가늘게 제작하였다.

2.3 측정부

본 실험 장치에는 두개의 측정부가 있다. 첫째로 주축에 스트레인 게이지를 붙여서 토오크를 측정하는 부분이 있고 둘째로 주축에 전위차계를 연결하여 각도를 측정하는 부분이 있다. 토오크를 측정할때 굽힘에 의한 효과를 배제하기 위하여 지지대를 달아 주었다. 또한 인장, 압축, 굽힘에 의한 효과를 제거하고 비틀림 만에 의한 응력을 측정하기 위하여 full bridge 회로를 구성하여 측정하였다.

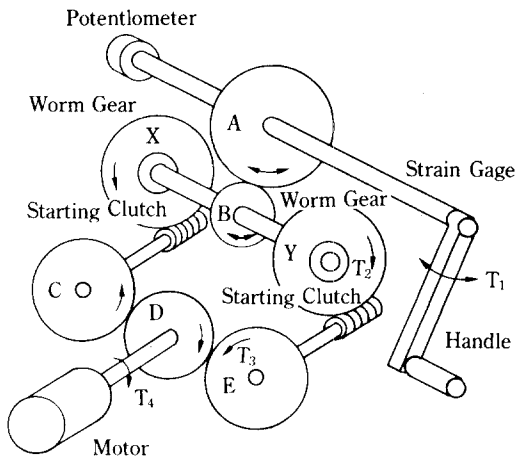


Fig. 3 Configuration of Gear Box

3. 실험 및 고찰

3.1 실험 방법

먼저 모터의 속도를 조절하고 피 실험자와 실험 조건에 대한 자료를 입력한다. 자료를 전부 입력함과 동시에 컴퓨터는 데이터를 받기 시작하므로 자료 입력을 완료하기 직전에 피 실험자는 운동을 시작해야 한다. 그러면 컴퓨터는 지정된 시간동안 일정한 시간 간격에 따라 데이터를 받아 들인다. 그런 다음에 컴퓨터는 받아 들인 데이터를 분석, 정리하여 플로피 디스크에 데이터 파일로 저장한다. 실험자가 실험 결과를 보고 싶을 경우에는 프로그램의 출력 모듈을 통하여 데이터 파일로 저장된 결과를 출력하여 보된다.

3.2 예비 실험 결과

그림4와 5는 피 실험자가 운동 속도 10[rpm]에서 오른발로 실험한 결과이다. 이 결과에서 보듯이 토오크가 아무리 변화할지라도 각 운동 구간에서의 운동 속도는 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 실제로 실험 A에서 전 구간에서의 오차의 rms 값은 5.04 [%] 정도이다.

그림6은 주축에 토오크를 걸어주고 그 때에 스트레인 게이지로부터 나오는 전압을 측정된 것을 도시한 것이다. 이 결과를 보면 토오크와 전압사이에는 선형 관계가 잘 유지됨을 알 수 있다. 표1은 토오크를 일정하게 유지하면서 축에 걸리는 추의 무게를

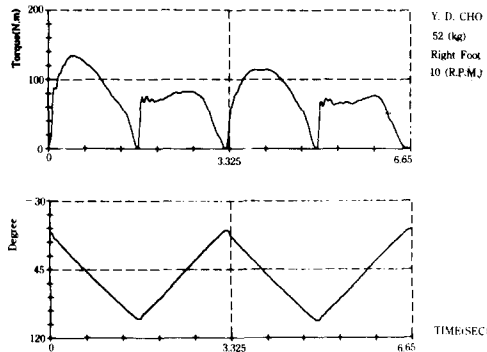


Fig. 4 Experimental Result of Experiment A

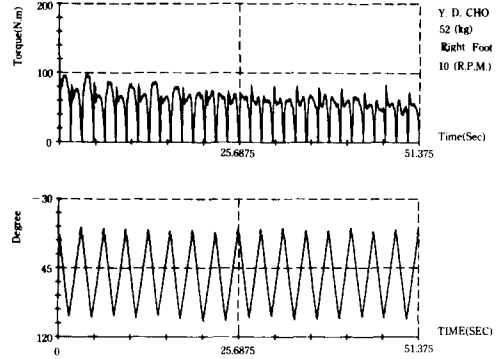


Fig. 5 Experimental Result of Experiment B

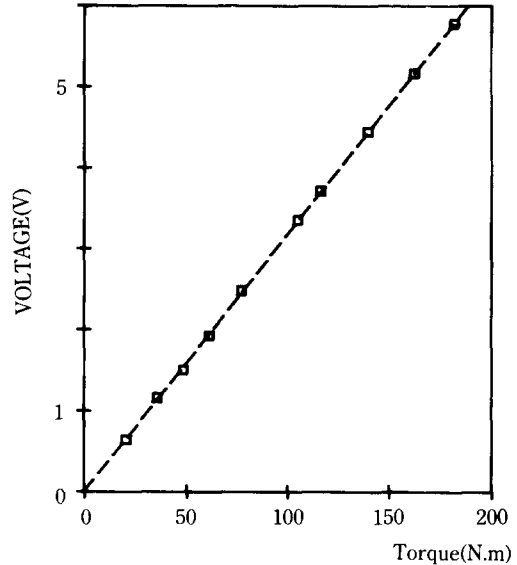


Fig. 6 Relation of Torque and Output Voltage of Strain Gage

달리하여 스트레인 게이지로부터 나오는 전압을 측정된 결과이다. 이 결과를 보면 주축에 걸리는 굽힘 때문에 발생한 오차는 최고 3~4[%] 정도로 굽힘 효과가 잘 제거됨을 알 수 있다.

3.3 실험 결과의 성능 비교

이 절에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 Cybex 시스템과 본 실험 장치의 성능을 비교, 분석함으로써 어느 정도의 성능을 보유하고 있고 어떤 문

Table 1 Removal of Bending Moment Effect

Exerted Torque (N. m)	Weight (kg)	Measurement Value of Torque(N. m)	Error (%)
35	6.28	35.2	0.57
	9.21	35.8	2.29
	14.08	35.5	1.43
	18.63	35.5	1.43
	23.13	36.2	3.43
60	9.51	59.4	-1.00
	14.08	58.2	-3.00
	19.13	60.7	1.17
	23.63	59.4	-1.00

$$\text{Error}(\%) = \frac{\text{M.V.T.} - \text{E.T.}}{\text{E.T.}} \times 100$$

M.V.T. : Measurement Value of Torque, E.T. : Exerted Torque

제점을 갖고 있는지 보여주고자 한다.

그림7과 8은 Cybex 실험 결과를 보여준다. 아래에 두 장치의 성능을 비교한 결과를 설명한다.

(1) 운동 속도

등속운동 훈련 장치에서 가장 중요한 것은 토오르크가 아무리 변화할 지라도 운동 속도는 일정하게 유지되는 것이다. 이에 두 장치의 실험 결과를 비교하여 보면 운동 속도는 두 장치가 다 거의 일정함을 알 수 있다.

(2) 프로그램

Cybex 시스템에서는 본 장치와 마찬가지로 데이

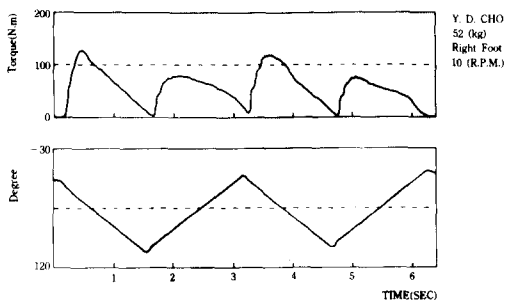


Fig. 7 Experimental Result of CYBEX Experiment A

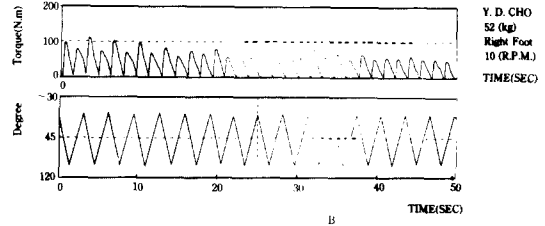


Fig. 8 Experimental Result of CYBEX Experiment

타의 분석과 정리에 자료 정리 컴퓨터를 사용한다. 이 컴퓨터는 본 장치의 프로그램과 꼭 같은 기능을 보유하고 있으며 본 프로그램과 꼭 같은 형태로 정리된 결과를 출력한다. 그런데 본 장치의 프로그램은 BASIC으로 작성되어 있어 얼마든지 수정 및 보완이 가능한 반면 Cybex 시스템에서는 프로그램이 고정되어 있다. 따라서 Cybex 시스템에서는 어떤 기능을 추가한다든지 단지 한 두개의 기능만 이용함으로써 프로그램에 입력시키는 자료를 대폭 줄인다든지 하는 등의 작업은 어렵게 된다.

(3) 신체 고정 장치

본 실험 장치의 결과와 Cybex 시스템의 결과를 비교하여 보자. 각 실험에서 실험 A, B와 Cybex 실험

Table 2 Comparison of Experiments A-B and CYBEX Experiments A-B

	Exp.A	C.Exp.A	Exp.B	C.Exp.B
(Extension)				
Peak Torque(N.m)	135	129	112	
and Angle of Occurrence(0)	32.0	31.0	43.1	30.0
Peak T.A.E. (N.m)	18.0	16.4	13.1	14.5
Total Work Performed	304	219	1580	1090
Average Power(W)	91.3	74.9	61.5	44.1
(Flexion)				
Peak Torque(N.m)	82.5	77.5	86.8	77.5
and Angle of Occurrence(0)	42.3	72.0	92.7	63.0
Peak T.A.E. (N.m)	11.1	10.1	9.17	10.0
Total Work Performed	212	172	1460	868
Average Power (W)	64.0	53.3	56.8	35.0

Exp. : Experiment, C.Exp. : CYBEX Experiment

T.A.E. : Torque Acceleration Energy (Work Performed in the 1/8 Second)

Table 3 Torques at Prescribed Angles in Experiment A and CYBEX Experiment A

Prescribed Angle(°)	Experiment A		CYBEX Experiment A	
	Ext.	Fle.	Ext.	Fle.
9	18.2	12.1	30.1	12.0
18	48.5	29.1	81.3	30.1
27	93.9	37.6	96.4	52.7
36	95.2	44.2	98.8	60.2
45	77.0	48.5	92.2	60.8
54	65.5	53.9	85.8	59.6
63	51.5	59.4	74.1	57.2
72	40.6	60.6	61.7	53.3
81	28.5	58.8	51.2	51.5
90	15.2	42.4	38.3	56.6

$$\text{Value} = \frac{\text{Torque at Prescribed Angle}}{\text{Peak Torque at Extension}} \times 100$$

Ext. : Extension, Fle. : Flexion

험 A, B는 각각 같은 피 실험자, 같은 실험 조건에서 행한 것이다. 표2에서는 실험 A, B와 Cybex 실험 A, B의 실험 결과를 각각 비교하였다.

두 실험 결과에서 가장 큰 차이점은 각 그래프의 모양이 다르다는 것이다. 표3은 실험 A와 Cybex 실험 A에서 토오크의 첫번째 주기의 모양을 9° 마다 비교한 것이다. 이 결과를 보면 두 그래프의 모양은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 차이가 생긴 이유는 두 장치의 신체 고정 장치의 차이 때문인 것으로 추정된다. 본래 본 장치의 제작시에 신체 고정 장치는 크게 고려하지 않았다. 반면 Cybex 시스템에서는 운동시에 몸을 완전히 고정하도록 되어 있다. 따라서 본 장치에서는 Cybex에서와 달리 운동시에 상체등을 움직이면서 힘을 내게 되므로 두 장치의 실험 결과는 다르게 된다.

(4) 운동 속도의 범위

Cybex 시스템은 운동 속도를 0[rpm]에서 50[rpm]까지 조절할 수 있으나 본 실험 장치에서는 0[rpm]에서 30[rpm]까지 조절할 수 있다.

4. 보완점 및 개선 방향

본 장치를 설계 제작 및 실험하여 본 결과 실제로 이 장치를 보급하고 사용할 경우 여러가지 보완해야 할 점이 발견되었다. 이러한 보완해야 할 점들을 열거하고 그 개선 방향을 다음과 같이 제시한다.

4.1 신체 고정 장치

앞에서 설명한 바와 같이 본 장치에서는 신체 고정 장치가 완전하지 않으므로 실험 결과가 Cybex 실험 결과와는 좀 다르다. 따라서 좀 더 크고 단단한 의자에 Cybex 시스템과 같은 고정 장치를 부착하면 신체를 잘 고정할 수 있다.

4.2 운동 속도의 범위

본 장치의 운동 속도 범위는 0[rpm]에서 30[rpm]까지로서 Cybex 시스템보다 범위가 좁다. 이 것은 모터의 최고 허용 회전 속도가 3000[rpm]인데 비하여 모터와 손잡이의 감속비가 100 : 1로 너무 크기 때문이다. 그러므로 최고 허용 회전 속도가 좀 더 높은 모터를 사용할 경우 현재의 기어 박스를 그대로 사용할 수 있다. 그리고 워엄 기어 또는 고속 회전 기어등의 기어 잇수비를 조정함으로써 현재의 모터를 그대로 사용하고 운동 속도 범위를 넓힐 수 있다.

4.3 운동 부위의 제한

본 장치는 팔과 발의 운동에 편리하도록 제작되었으므로 다른 부위의 운동에는 약간 곤란하다. 예를 들어 어깨 근육, 엉덩이 근육등의 운동은 현재로서는 좀 곤란하다. 이러한 점을 보완하기 위하여 기어 박스의 고정부(Base)와 케이스 등을 다시 설계 제작해야 한다.

5. 결 론

1. Cybex 시스템과 비슷한 등속운동 훈련 장치가 새로이 설계되었고 경제적으로 제작되었다. 이 장치는 운동 속도를 조절할 수 있으며 기어 박스, 모터 및 구동 장치, 자료 정리 컴퓨터 및 측정부 등으로 구

성되었다.

2. 본 장치의 실험 결과와 Cybex 시스템의 실험 결과를 비교하고 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 등속운동이 잘 유지되었다. 이 기능은 등속운동 훈련 장치에서 가장 중요한 기능으로서 오차(Error)의 rms값은 약 5-7[%]로 나타났다.

(2) 두 장치에서 토오크의 실험 결과가 다른 것은 신체 고정 장치가 다르기 때문인 것으로 판명되었다.

3. 데이터를 분석하고 정리하는 프로그램을 BASIC으로 작성하였다. 이 프로그램은 Cybex 시스템의 자료 정리 컴퓨터가 수행하는 기능을 다 수행할 수 있으며 수정 및 보완이 용이하도록 여러가지 모듈로 작성하였다.

4. 본 장치를 실제로 보급하고 이용하기 위하여 보완해야할 점을 지적하고 그 개선 방안을 제시하였다. 그 결과 신체 고정 장치, 운동 속도의 범위, 운동 부위의 제한, 소음 등의 보완점들이 검토되었다.

참 고 문 헌

- 1) W. S. Barnes, "Isokinetic Fatigue Curves at Different Contractile Velocities," Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 62, pp. 66-69, Feb. 1981.
- 2) R. W. Patton, M. M. Hinson, B. R. Arnold, and B. Lessard, "Fatigue Curves of Isokinetic Contractions," Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 59, pp. 507-509, November 1978.
- 3) R. J. Gregor, V. R. Edgerton, J. J. Perrine, D. S. Champion, and C. Debus, "Torque-Velocity Relationships and Muscle Fiber Composition in Elite Female Athletes," Journal of Applied Physiology, pp. 388-392, August 1979.
- 4) T. Malone, T. A. Blackburn, and L. A. Wallace, "Knee Rehabilitation," Physical therapy, Vol. 60, No. 9, pp. 1602-1610, Sept. 1980.
- 5) P. A. Wilder and J. Sykes, "Using an Isokinetic Exercise Machine to Improve the Gait Pattern in a Hemiplegic Patient," Physical Therapy, Vol. 62, No. 9, pp. 1291-1295, Sept. 1982.
- 6) E. F. Coyle, D. C. Feiring, T. C. Rotkis, R. W. Cote, F. B. Roby, W. Lee, and J. H. Wilmore, "Specificity of Power Improvements Through Slow and Fast Isokinetic Training," Journal of Applied Physiology, Vol. 51, No. 6, pp. 1437-1442, 1981.
- 7) J. Rosentswieg and M. M. Hinson, "Comparison of Isometric, Isotonic and Isokinetic Exercises by Electromyography," Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 53, pp. 249-252, June 1972.
- 8) J. Falkel, "Plantar Flexor Strength Testing Using the Cybex Isokinetic Dynamometer," Physical Therapy, Vol. 58, No. 7, pp. 847-850, July 1978.
- 9) M. T. Moffroid and R. H. Whipple, "Specificity of Speed of Exercise," Physical Therapy, Vol. 50, No. 12, pp. 1692-1700, Dec. 1970.
- 10) H. Lord, W. S. Gately, and H. A. Evensen, "Noise Control for Engineers," McGraw-Hill Company, 1980.
- 11) S. H. Crandall, N. C. Dahl, and T. J. Lardner, "An Introduction to the Mechanics of Solids," McGraw-Hill Company, 1978.