Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 33, No. 4, pp. 480-486, December 2007.

한국 성인의 정상 보행데이터를 이용한 보행진단 지원 시스템의 개발

김동진[1†] · 유태범[2] · 권세만[3] · 최화순[4] · 정민근[5]

[1]LG전자 MC 사업본부 / [2]한밭대학교 산업경영공학과 / [3]경희대학교 전자정보학부
[4]포항공과대학교 산학협력연구소 / [5]포항공과대학교 산업경영공학과

Development of a Gait Diagnosis Supporting System using Korean Normal Gait Data

Dongjin Kim[1] · Taebeum Ryu[2] · Seman Kwon[3] · Hwa Soon Choi[4] · Min K. Chung[5]

[1]Mobile Communication Company, LG Electronics
[2]Department of Industrial and Management Engineering, Hanbat National University
[3]Department of Electronics and Information, Kyung Hee University
[4]University-Industry Cooperation Institute, POSTECH
[5]Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

A gait diagnosis supporting system is necessary to evaluate the characteristics of abnormal gait of a patient in a systematic and efficient manner. The present study developed a gait diagnosis supporting system which compares abnormal gait of a patient with a reference gait data and presents abnormal gait characteristics in an organized form. Three types of diagnosis modules were developed for the spatio-temporal, kinematic and kinetic gait parameters, and a gait data for Korean normal adults was used for the reference data of the system. The system was applied to evaluate the gait pattern of three arthritis patients and the abnormal gait characteristics of them could be easily identified with a systematic and graphical presentation.

Keywords: Abnormal Gait, Gait Diagnosis Support System, Korean Reference Gait Data

1. 서 론

복잡한 운동인 보행의 정량적 분석은 많은 변수들의 특성치 파악을 필요로 한다. 보행은 골반과 각 하지의 관절 및 근육의 조화로운 움직임으로 일어나는 복잡한 운동이다(Whittle, 2000). 보행의 정량적 분석은 일반적으로 시거리 및 운동형상학적 그리고 운동역학적 특성을 파악하여 이루어지고 각 특성은 10개 이상의 세부 변수들을 포함한다.

보행진단 지원 시스템은 하지 질환자의 비정상적 보행특성을 효율적으로 분석하기 위해 필요하다. 하지 질환자의 비정상적 보행특성 파악은 30개 이상의 보행 변수들의 환자와 정상인 간 비교를 필요로 한다. 따라서 정량적 보행분석에 요구되는 변수들이 많기 때문에 수작업에 의한 비교는 시간적/비용적 측면에서 비효율적이고 또한 분석자의 실수로 인하여 오류를 초래할 수도 있다. 반면 환자의 보행특성 파악을 위한 보행진단 지원 시스템은 환자와 정상인 간의 보행 변수 비교를 자동적으로 하고 분석자의 실수로 인한 오류를 방지할 수 있다.

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원으로 수행되었습니다.
† 연락저자 : 김동진, 153-801 서울특별시 금천구 가산동 327-23, LG전자 MC사업본부, Tel : 02-2033-3381, Fax : 02-2033-3637
E-mail : releasky@naver.com
2006년 02월 접수; 2007년 09월 수정본 접수; 2007년 09월 게재 확정.

기존의 보행분석 프로그램들은 국내 하지 질환자의 비정상적 보행특성 파악에 기능, 판정의 정확성 그리고 비용 측면에서 한계를 갖는다. VICON iQ(Vicon Peak, UK & USA), Qualisys Track Manager(Qualysis Medical AB, Sweden), Orthotrak(Motion Analysis Corporation, USA)의 기존 프로그램들은 자체적으로 보유한 정상 보행 데이터를 기준으로 환자의 데이터를 제시할 뿐, 정상치와의 차이 제시나 이상여부 파악에 한계를 갖는다. 그리고 대부분의 프로그램에 내장된 정상 보행데이터는 외국인을 대상으로 구축되어 있어 국내 하지 질환자 보행의 이상특성 파악에 이용될 경우 이상여부의 판정 결과를 왜곡시킬 수 있다. 또한 이 프로그램들은 보행 측정장비와 함께 보행분석 시스템을 구성하는 전용 프로그램으로 높은 구입 비용 때문에 많은 사용자들이 이용하기 어렵다.

본 연구는 한국 성인의 정상 보행데이터를 기준으로 국내 하지 질환자의 보행특성을 자동적으로 비교하고 보행 이상여부의 진단을 가시적으로 지원하는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 국내 성인의 정상 보행데이터를 보행특성 파악의 기준으로 사용하여 국내 하지 질환자의 비정상적 보행특성을 진단할 수 있다. 또한 본 시스템은 정상인과 환자의 다양한 보행 변수를 자동적으로 비교하고 환자의 보행특성 파악 결과를 이상여부, 그래프를 이용하여 가시적으로 표현할 수 있도록 개발되었다. Microsoft Visual Basic 6.0 기반으로 개발된 본 시스템은 퇴행성 슬관절 환자의 이상 보행특성 파악에 적용되었다.

2. 보행진단 지원 시스템의 개발

2.1 한국인 정상 보행데이터의 수집

본 연구는 국내 하지 질환자의 비정상적 보행특성 파악을 위해서 비교 기준으로 한국인의 정상 보행데이터를 사용하였다. 보행특성은 인체 치수나 인종 등에 영향을 받으므로 국내 하지 질환자의 이상 보행특성 파악을 위해서는 한국인의 정상 보행특성을 나타내는 데이터가 필요하다. 본 연구는 Lim *et al.*(2006)의 한국인의 정상 보행데이터를 본 시스템의 비교 기준으로 이용하였다.

2.2 시스템의 구성

본 보행진단 지원 시스템은 <Figure 1>과 같이 총 다섯 개의 모듈로 구성된다. 데이터 입력 모듈은 하지 질환자의 보행 데이터를 특성 종류별로 입력 받는다. 보행 진단 모듈은 입력된 환자의 보행 데이터와 시스템에 내장된 정상 보행 데이터를 비교하여 보행 이상여부를 파악하고 그 결과를 제시한다. 전체판정결과 모듈은 보행 이상여부를 체계적으로 파악할 수 있도록 모듈 별 진단 결과를 요약하여 제시한다.

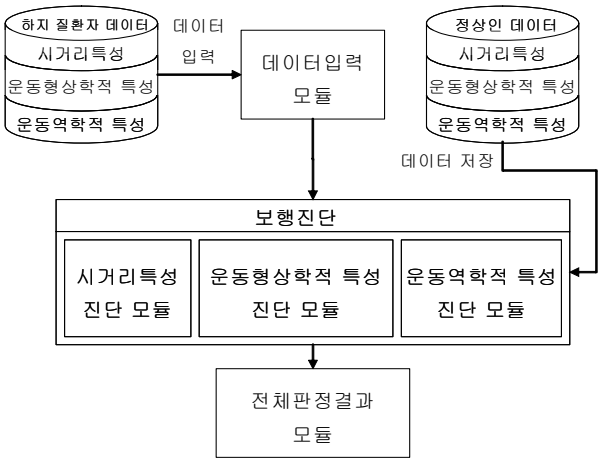

Figure 1. 프로그램 전체 구성도

2.3 모듈 별 개발 방법

2.3.1 데이터 입력 모듈

데이터 입력 모듈은 하지 질환자의 보행 데이터를 입력 받아 그 값을 화면에 표시하도록 개발되었다. 보행 입력 변수로 <Table 1>과 같이 보행분석에 대표적으로 사용되는 세 가지

Table 1. 보행진단 지원 시스템에 사용되는 변수

구 분	변 수
시거리 특성 변수	보행속도
	분속수
	보행간격
	보폭
	활보폭
	디딤시간
	유각시간
운동형상학적 특성 변수	골반기울어짐
	골반경사
	골반회전
	엉덩관절 굽힘/폄
	엉덩관절 모음/벌림
	엉덩관절 내측회전/외측회전
	무릎관절 굽힘/폄
	무릎관절 내반/외반
	무릎관절 내측회전/외측회전
	발목관절 발등굽힘/발바닥굽힘
	발목관절 엎침/뒤침
	발목관절 내측회전/외측회전
운동역학적 특성 변수	발목관절 압축/이완 힘
	발목관절 전/후 힘
	발목관절 내측/외측 힘
	엉덩관절 굽힘/폄 moment
	엉덩관절 모음/벌림 moment
	무릎관절 굽힘/폄 moment
	무릎관절 내반/외반 moment
	발목관절 발등굽힘/발바닥굽힘 moment
	발목관절 안쪽번짐/바깥쪽번짐 moment

Table 2. 시거리 특성 변수

보행 속도 (cm/s)	분속수 (steps/ min)	보행간격 (cm/step)	보폭 (cm/ step)	활보폭 (cm)	디딤시간 (%보행 주기)	유각시간 (%보행 주기)
118.89	103.60	138.88	69.95	15.48	61.87	38.13

Table 3. 운동형상학적 특성 변수

시간 (보행주기: 100)	골반 기울어짐 (degree)	골반경사 (degree)	골반 회전 (degree)	…	발목관절 내측회전/외측 회전(degree)
0	-5.275	-0.628	1.004	…	-31.516
…	…	…	…	…	…
100	-6.543	1.049	4.054	…	-27.576

Table 4. 운동역학적 특성 변수

시간	발목관절 압축/이완 힘(N/BW)	발목관절 전/후 힘 (N/BW)	발목관절 내측/외측 힘(N/BW)	…	발목관절 안쪽 번짐/가쪽번짐 (Nm/BW)
0	0.055	0.003	-0.052	…	0.009
…	…	…	…	…	…
100	-0.017	0.007	-0.035	…	0.001

보행특성의 28개 변수들이 기존의 보행 연구를 참조하여 선정되었다(Auvinet *et al*., 2002; Benedetti *et al*., 1998; Cho *et al*., 2004; Kadaba *et al*., 1990). 시거리 특성은 보행 주기 내 특정 사건 및 단계와 관련된 시간/거리/속도 등을 나타내는 보행변수를, 운동형상학적 특성은 하지 관절의 각운동을 그리고 운동역학적 특성은 관절의 힘과 모멘트를 각각 포함한다. 보행 데이터는 보행특성에 따라 <Table 2>~<Table 4>와 같은 형식의 엑셀 파일로 입력된다. 또한, 본 시스템은 남녀를 구분하여 환자의 보행 데이터를 입력하고, 입력된 데이터 값을 화면상에 나타내어 분석자가 확인할 수 있도록 개발되었다.

2.3.2 시거리 보행특성 진단 모듈

시거리 특성 진단 모듈은 정상 보행데이터의 정상범위를 이용하여 하지 질환자 보행의 시거리 특성 이상여부를 진단하도록 개발되었다. 식 (1)과 같이 시거리 특성을 나타내는 변수 별로 정상 보행의 평균(avg)과 표준편차(σ)를 이용하여 정상범위가 결정되었고 환자 보행의 이상여부를 진단하는 기준으로 사용되었다. 정상범위의 결정을 위해서 기존의 연구에서 사용된 기준이 참조되었다(Duhamel *et al*., 2004). 본 모듈에서 환자의 시거리 특성 측면 이상여부는 정상범위 내 환자 데이터의 포함여부로 판단된다.

$$\text{정상범위} = [\text{avg} - 2\times\sigma,\ \text{avg} + 2\times\sigma] \quad (1)$$

시거리 특성의 진단 결과는 정상 보행데이터와 하지 질환자 보행 데이터의 그래프 및 정량적 차이를 이용하여 체계적으로 제시되도록 하였다. 본 모듈은 <Figure 2>와 같이 정상범위와 환자 데이터를 나타내는 막대 형태의 그래프에 의하여 시각적으로도 쉽게 이상여부를 확인할 수 있게 개발되었다. 또한, 정상범위를 벗어난 환자 데이터를 나타내는 정량적 척도는 정상 보행데이터의 평균값과 환자 데이터 차이의 절대값을 사용하였다.

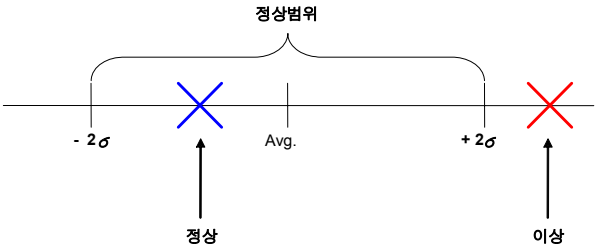

Figure 2. 그래프를 이용한 시거리 특성의 이상여부 판단

2.3.3 운동형상학적 보행특성 진단 모듈

운동형상학적 특성 진단 모듈은 시간에 따른 관절 각도의 정상범위를 이용하여 하지 질환자 관절각도의 이상여부를 진단하도록 개발되었다. 운동형상학적 특성 변수인 관절 각운동은 시간에 따른 연속적인 데이터이므로, 진단에 사용되는 정상범위는 식 (2)와 같이 시간에 따른 정상 보행데이터의 평균($avg_{(t)}$)과 표준편차($\sigma_{(t)}$)를 이용한 신뢰구간(confidence interval)으로 설정되었다. 본 모듈에서 사용된 신뢰구간은 기존의 연구 결과를 참조하여 결정되었다(Duhamel *et al*., 2004). 임의의 시점에서 신뢰구간 내 포함되지 않는 환자 데이터가 존재할 경우, 본 모듈은 해당 환자를 이상으로 진단하도록 개발되었다.

$$\text{신뢰구간}(t) = [\text{avg}(t) - 2\sigma(t),\ \text{avg}(t) + 2\sigma(t)] \quad (2)$$

운동형상학적 특성 측면에서 이상여부의 진단 결과는 신뢰밴드(confidence band)를 나타내는 정상범위와 하지 질환자 관절 각운동 그래프, 그리고 RMS(Root Mean Square)값을 이용하여 제시되도록 하였다. 운동형상학적 측면에서 정상인과 환자의 보행 패턴 및 환자 보행의 이상여부 파악은 <Figure 3>과

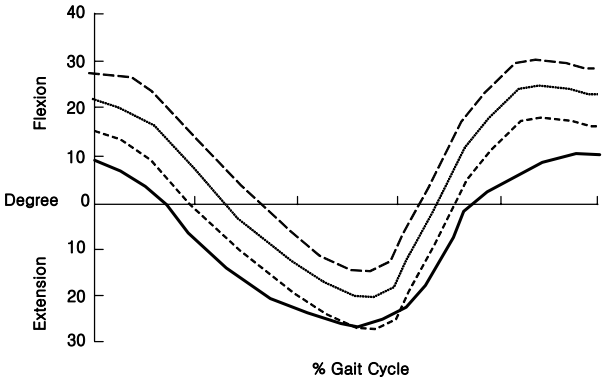

Figure 3. 그래프를 이용한 운동형상학적 특성의 이상여부 판단(점선 : 신뢰밴드, 실선 : 환자 데이터)

같이 각 시점의 신뢰구간을 연결한 신뢰밴드와 시간에 따른 환자의 데이터를 나타낸 그래프를 이용하였다. 신뢰밴드에서 벗어난 환자 데이터를 나타내는 정량적 척도로 식 (3)과 같은 RMS값을 사용하였다. 환자 데이터의 RMS값과 정상치와의 비교 결과 운동형상학적 측면의 이상여부가 진단되었다.

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n}^{i=1}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \qquad (3)$$

(n = 보행주기 내 데이터 수, x_i = 환자의 보행주기 내 i번째 관절 각도, $\overline{x}$ = 정상인의 보행주기 내 i번째 관절 각도의 평균)

2.3.4 운동역학적 보행특성 진단 모듈

운동역학적 특성 진단 모듈은 운동형상학적 특성 진단 모듈과 유사한 방법을 사용하여 하지 질환자의 보행 이상여부를 진단하고 그 결과를 제시하도록 개발되었다. 운동역학적 변수는 운동형상학적 변수와 같이 시간에 따른 연속적인 데이터를 가지므로 신뢰구간의 계산 및 운동역학적 특성의 이상여부 진단이 운동형상학적 특성 진단 모듈과 동일한 방식으로 이루어진다. 본 모듈은 보행진단 결과로 신뢰밴드와 환자의 데이터를 나타내는 그래프를 제시하여 정상인과 환자 보행의 운동역학적 특성 및 환자 보행의 이상여부를 시각적으로 쉽게 알 수 있게 하였다. 또한, 신뢰밴드에서 벗어난 정도를 나타내는 정량적 척도로 RMS값이 사용되었다.

2.3.5 전체판정결과 모듈

전체판정결과 모듈은 보행특성 진단 모듈 별 결과를 요약하여 제시하도록 개발되었다. 본 모듈에서는 시거리 특성의 정상 보행데이터를 이용한 정상범위와 하지 질환자의 보행 데이터를 나타내는 막대 그래프로 시거리 특성의 이상여부가 쉽게 파악되도록 하였다. 또한, 운동형상학적/운동역학적 측면에서 진단된 보행의 이상여부가 '정상' 혹은 '이상'으로 제시되도록 하였다. 운동형상학적 특성의 이상여부는 네 개의 하지 관절 그림과 함께 각 관절 및 시상면/전두면/횡단면 별로 나타나도록 하였다. 운동역학적 특성의 이상여부는 운동형상학적 특성과 유사한 방법을 사용하여 관절의 그림과 함께 각각의 기준면 별로 제시되도록 하였다.

2.4 모듈 별 개발 결과

데이터 입력 모듈은 하지 질환자의 보행특성을 나타내는 데이터를 성별에 따라 입력받고 화면에 나타낸다<Figure 4>. 환자의 데이터는 보행특성 별 이상여부의 진단을 위해 특성을 구분하여 입력된다. 그리고, 진단 기준으로 사용되는 정상범위의 성별 차이로 인하여 남녀를 구분하여 입력된다. 본 모듈은 사용자가 입력된 데이터를 확인할 수 있도록 그 값을 화면에 제시한다.

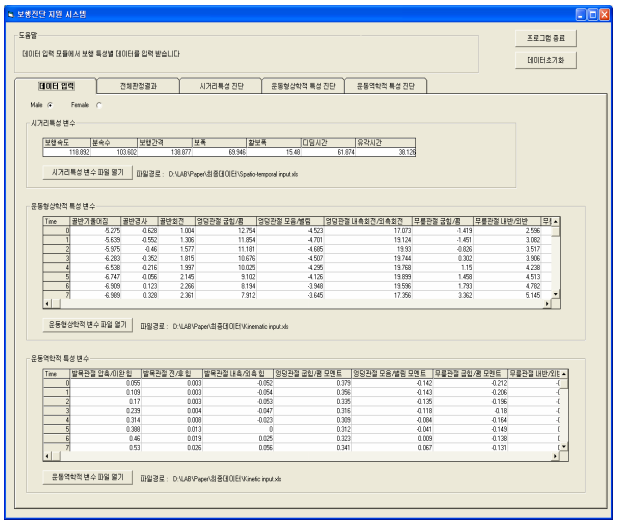

Figure 4. 데이터 입력 모듈

시거리 특성 진단 모듈은 <Figure 5>와 같이 개발되었다. 본 모듈은 정상 보행데이터의 평균/상한/하한과 환자 데이터 그리고 환자데이터와 정상 보행데이터의 평균에 대한 차이를 제시한다. 또한, 정상범위와 환자 데이터를 나타내는 그래프를 제시하여 시거리 특성의 이상여부를 쉽게 확인할 수 있게 한다. 그래프에서 빨간점은 환자 데이터를, 회색선은 정상범위를 나타낸다.

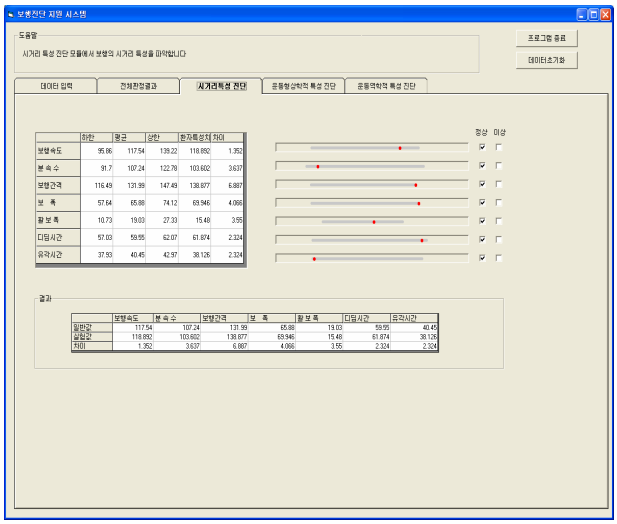

Figure 5. 시거리 특성 진단 모듈

운동형상학적 특성 진단 모듈은 <Figure 6>과 같이 개발되었다. 본 모듈은 정상인과 환자 보행 시 네 개 하지 관절 별 시상면/전두면/횡단면에 대한 관절 각운동 및 신뢰밴드를 나타내는 그래프를 제시하여 운동형상학적 특성의 이상여부를 확인한다. 그래프의 회색 선은 신뢰구간의 상한과 하한을, 연보라 선은 정상 보행데이터의 평균값을, 파란색 선은 환자 데이터를 나타낸다. 또한, 본 모듈은 관절 별로 세 개의 기준면에서

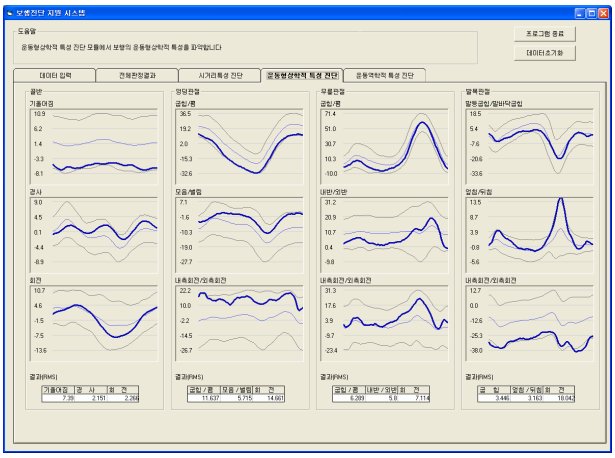

Figure 6. 운동형상학적 특성 진단 모듈

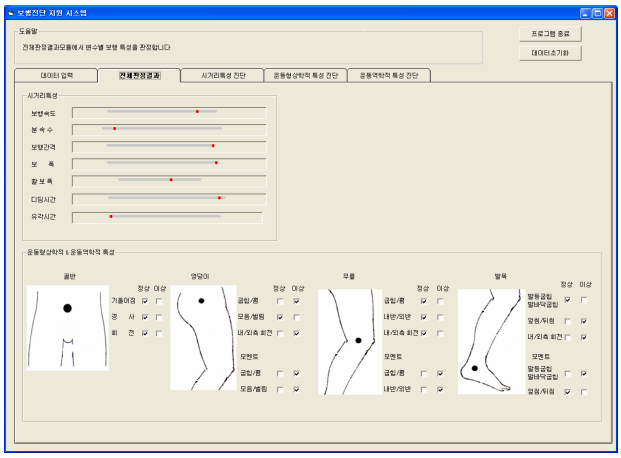

Figure 8. 전체판정결과 모듈

환자 관절 각운동의 정상치에 대한 차이를 RMS값을 이용하여 나타낸다.

운동역학적 특성 진단 모듈은 <Figure 7>과 같이 개발되었다. 환자 보행 시 발목 관절에 세 가지 방향으로 작용하는 힘과 세 개의 하지 관절마다 두 가지 방향으로 작용하는 모멘트가 신뢰밴드와 함께 <Figure 7>과 같은 그래프로 제시된다. 본 모듈은 제시된 그래프를 이용하여 운동역학적 측면에서 환자 보행의 이상여부를 파악하고 정상치에 대한 차이를 나타내는 정량적 척도로 RMS값을 사용하였다.

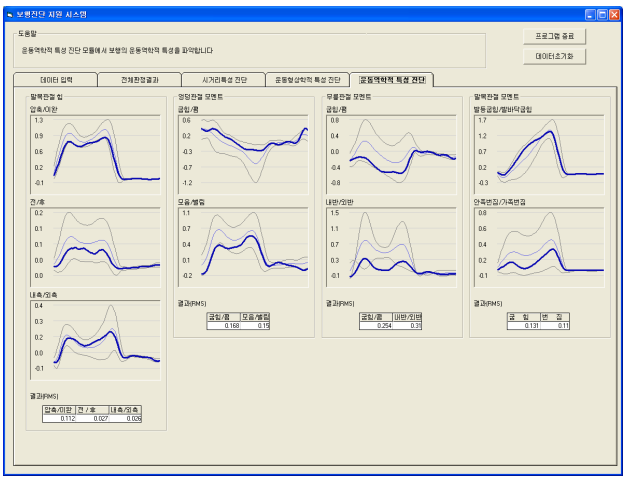

Figure 7. 운동역학적 특성 진단 모듈

전체 판정결과 모듈은 <Figure 8>과 같이 개발되었다. 시거리 특성의 정상범위 및 환자 데이터의 그래프가 제시되어 시거리 측면의 이상여부가 쉽게 파악된다. 운동형상학적 특성의 경우 하지 관절 별 세 개의 기준면에 대한 이상여부가 관절의 그림과 함께 제시된다. 운동역학적 특성의 경우 발목 관절에 작용하는 힘과 세 개의 하지 관절에 작용하는 모멘트의 이상여부가 <Figure 8>과 같이 제시된다.

3. 적용 사례

본 연구는 실제 슬관절 환자의 보행진단에 개발된 시스템을 적용하여 그 효과를 파악하였다. 환자들은 슬관절에 퇴행성 관절염이 있는 세 명의 여성이었으며 평균 나이는 68 ± 7.6세, 신장은 150.7 ± 6.8㎝, 몸무게는 53.7 ± 5.0㎏f 이었다. 보행특성의 측정을 위하여 여섯 대의 Falcon 카메라(MotionAnalysis, 미국)와 0.40 × 0.60m 크기의 힘판(Bertec, 미국) 한 개로 구성된 3차원 보행측정 시스템이 사용되었다. Falcon camera의 샘플링 비율은 60Hz, 힘판의 샘플링 비율은 1000Hz로 설정되었다. 보행 실험에 앞서 피실험자들에게 실험의 목적과 진행 방법에 대해 설명하였다. 실험 단계에서는 피실험자들이 Helen Hayes Marker set(Kadaba *et al.*, 1990)에 따라 다리와 골반에 마커를 부착하고 5분 정도의 간단한 보행 연습 후에 약 4m정도의 보행 구간을 자연스러운 속도로 걷도록 하였다.

3.1 시거리 특성 진단 결과

실험에 참여한 여성 슬관절 환자들의 시거리 특성 진단 결과

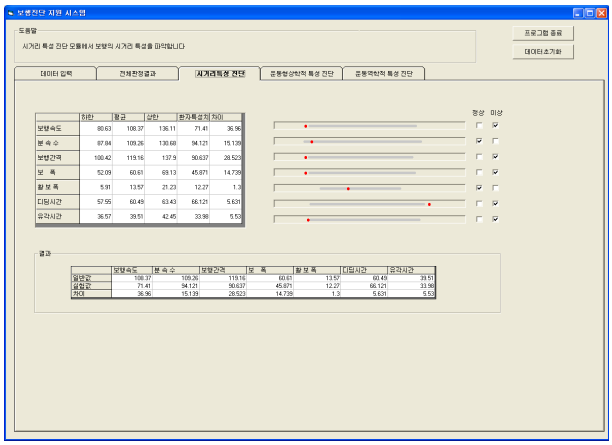

Figure 9. 슬관절 환자(C)의 시거리 특성 진단 결과

환자 별 보행 이상 특성이 쉽게 파악되었다. 환자 A, B의 경우 유각시간을 제외한 모든 변수에서 정상인과 환자 데이터 간 비교적 큰 차이를 보이고 있으나 모든 시거리 특성이 정상으로 진단되었다. 반면 환자 C의 경우 분속수와 활보폭을 제외한 모든 변수에서 시거리 특성이 이상으로 진단되었다 (<Figure 9> 참조).

3.2 운동형상학적 특성 진단 결과

슬관절 환자들의 운동형상학적 특성 진단 결과 이상적 관절 각도 변화가 쉽게 파악되었다. 모든 환자들에서 엉덩관절 내측/외측회전 등과 같은 변수를 제외한 많은 각운동이 이상으로 진단되었다(예: 환자 C의 경우 <Figure 10> 참조). 특히, 엉덩관절 모음/벌림, 무릎관절 내반/외반, 발목관절 엎침/뒤침을 나타내는 운동각이 정상범위에서 크게 벗어났다.

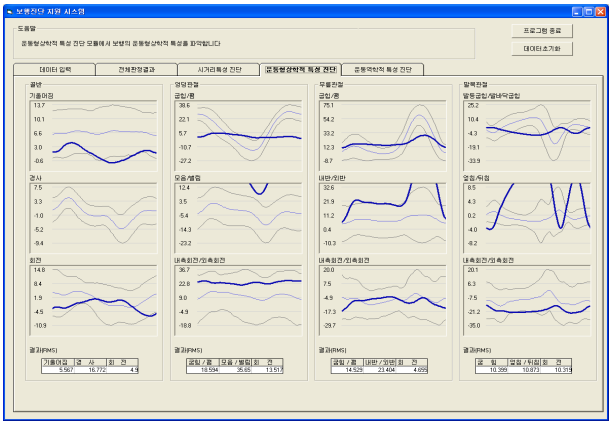

Figure 10. 슬관절 환자(C)의 관절 각운동 진단 결과

3.3 운동역학적 특성 진단 결과

슬관절 환자들의 운동역학적 특성 진단 결과 이상 보행특성이 쉽게 파악되었다. 모든 환자들에서 여섯 개의 관절 별 모멘트가 모두 이상으로 진단되었다. 대표적으로 <Figure 11>은 슬관절 환자 C의 운동역학적 특성 진단 결과를 나타낸다. 특히, 발목 관절 안쪽/가쪽번짐 모멘트는 정상 범위에서 크게 벗어나는 것으로 확인되었다.

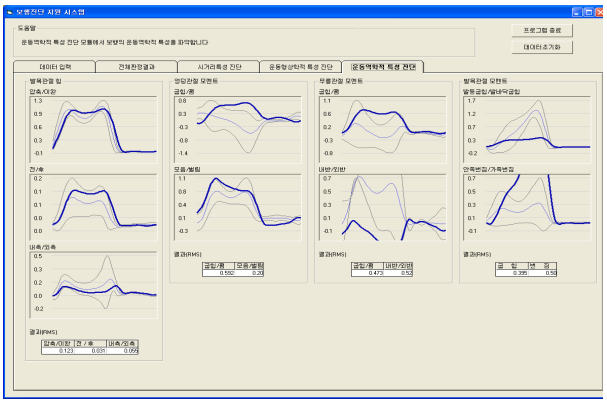

Figure 11. 슬관절 환자(C)의 운동역학적 특성 진단 결과

3.4 전체판정결과

전체 판정결과 보행특성 별로 슬관절 환자들의 이상 부분이 쉽게 파악되었다. 환자 A와 B의 경우, 모든 시거리 특성과 무릎관절 내측/외측회전을 제외한 모든 운동형상학적/운동역학적 특성 변수들이 동일한 진단 결과를 나타내었다. 환자 C의 경우 다섯 개의 시거리 특성 변수들과 엉덩관절 및 발목관절 내측/외측회전을 제외한 모든 운동형상학적/운동역학적 특성을 나타내는 변수들이 이상으로 진단되었다(<Figure 12> 참조).

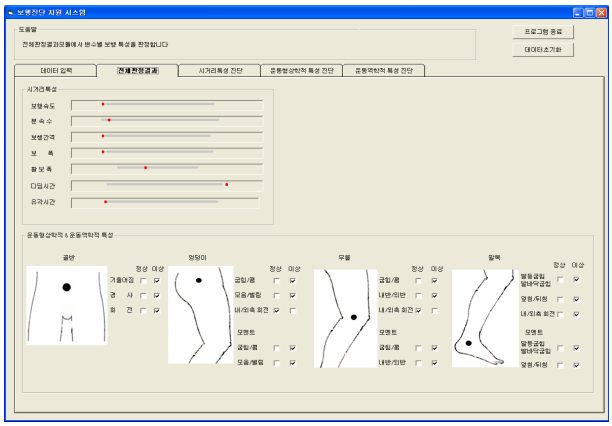

Figure 12. 슬관절 환자(C)의 전체판정결과

4. 토의 및 결론

본 연구는 국내 하지 질환자의 보행 이상특성을 자동적으로 파악하고 진단 결과를 체계적으로 제시하는 보행진단 지원 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 외국의 시스템들과는 달리 국내 성인의 정상 보행데이터를 기준으로 환자의 보행특성을 파악하여 진단의 타당성을 확보하였다. 그리고, 본 시스템은 정상인과 환자 보행 데이터를 그래프로 가시화할 뿐만 아니라 정량적 차이와 이상여부를 함께 나타내어 진단 결과를 체계적으로 제시할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 하지 질환자의 보행 데이터를 이용하여 추가적인 비용 없이 보행 이상특성이 파악될 수 있도록 하였다. 이상여부 파악을 위해 기준으로 사용되는 정상 보행데이터는 기존 연구(Lim *et al.*, 2006) 결과를 참조하여 신체 노화가 진행되기 이전의 20대 성인의 정상적인 데이터를 사용하였다.

개발된 시스템은 실제 국내 슬관절 환자의 보행진단에 적용된 결과 이상 특성을 쉽게 파악할 수 있었다. 시거리 특성, 하지 관절 별 각운동, 관절에 작용하는 힘과 모멘트의 이상 부분이 시거리 특성 진단 결과 및 전체 판정 결과에서 제시된 이상

여부에 의하여 곧바로 확인되었다. 또한 환자 데이터와 정상 범위를 비교할 수 있도록 나타낸 그래프 및 환자 데이터와 정상 보행 데이터간 차이를 나타내는 정량적 척도를 이용하여 이상 보행 특성이 세부적으로 쉽게 파악되었다.

본 시스템은 보행 이상여부 판정이 아닌 진단의 지원을 목적으로 하므로 결과만으로 이상여부를 판정하는 것은 위험하다. 개발된 시스템은 하지 질환자를 대상으로 보행 특성에 따른 이상여부를 구체적으로 확인하고 진단을 지원하는 역할을 한다. 따라서 보행 특성 별 진단 결과는 환자의 보행 진단을 지원하기 위한 객관적 자료로만 이용되어야 할 것이다.

참고문헌

Auvinet, B., Berrut, G., Touzard, C., Moutel, L., Collet, N., Chaleil, D., and Barrey, E. (2002), Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device, *Gait and Posture*, **16**(2), 124-134.

Benedetti, M. G., Catani, F., Leardini, A., Pignotti, E., and Giannini, S. (1998), Data management in gait analysis for clinical applications, *Clinical Biomechanics*, **13**(3), 204-215.

Cho, S. H., Park, J. M., and Kwon, O. Y. (2004), Gender differences in three dimensional gait analysis data from 98 healthy Korean adults, *Clinical Biomechanics*, **19**(2), 145-152.

Duhamel, A., Devos, B. P., Krystkowiak, P., Destee, A., Derambure, P., and Defebvre, L. (2004), Statistical tools for clinical gait analysis, *Gait and Posture*, **20**(2), 204-212.

Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., and Wootten, M. E. (1990), Measurement of lower extremity kinematics during level walking, *Journal of Orthopaedic Research*, **8**(3), 383-392.

Lim, W., Ryu, T., Choi, H. S., and Chung, M. K. (2006), A comparison of gait characteristics between Korean and Western young people, *Journal of the Ergonomic Society of Korea*, **25**(2), 33-41.

Whittle, M. W. (2000), *Gait analysis: an introduction*, Butterworth-Heinemann, Edinburgh, UK.