



<일 반>

낮은 응력하에서 직물테스트를 위한 Robotic Flexible Test System

오 애 경

1. 서 언

Flexible automation 개념은 1980년대 Computer Numerical Controlled(CNC) 기계와 산업에 사용되는 여러 가지 로봇, 그리고 Automated Guide Vehicles(AGV)들이 개발되면서 제조 공업에 성공적으로 도입되었다. 이것은 여러 실험 조건들을 바꾸고자 할 때에 사람의 손을 거치지 않고 소프트웨어의 변화만으로 충분히 바꿀 수 있는 아주 flexible한 시스템들이다. 일반적으로 중앙처리장치의 제어밖에 있다(off-line)고 간주되었던 시험 및 측정영역에서는 유사한 진보가 이루어지지 않고 있으며 특히 직물 시험의 응용면에서는 거의 전무한 실정이다. 그리하여 낮은 응력하에서 직물을 실험하는 방법중 로봇을 포함한 자동화 시스템(automated system)들을 계속 개발하고 있으나 현재까지는 수동식과 반자동식의 시험기기들이 주를 이루고 있다. 이들 시험으로 얻을 수 있는 낮은 응력하에서의 물리적인 성질들은 직물의 품질과 특성을 판단하는 객관적인 기준이 될 수 있다. 전통적으로 업계에서 직물의 태를 인장, 굽힘, 전단, 압축, 그리고 마찰 등 일련의 특성을 시험한 후 '전문가의 판단'에 의해 stiffness, fullness, smoothness와 softness 등 여러가지 용어로 평가하였다. 그러나 이것은 매우 주관적이라고 할 수 있으며 정확한 판단의 기준이 될 수는 없다.

1930년대 Peirce[1]에 의해 캔틸레버 굽힘시험기(cantilever bending tester)가 개발되어진 후 직물의 인장, 굽힘, 전단, 압축 그리고 마찰특성

등 직물의 물리적 특성을 측정하기 위해 크고 작은 시험기기들이 개발되어 업계에서 사용하고 있다. 이들 기기들은 측정할 시료의 준비, 배열에서부터 시료를 고정시키는 일까지 모두 기계를 조작하는 작업자(operator)에 의해 행해지고 있는데 이것은 시간을 소모시키는 동시에, 시험의 결과는 작업자에 의존될 수밖에 없다. 따라서 본고에서는 이 모든 것을 메카트로닉(mechatronic) 개념을 기초로 하여 작업자의 손을 거치지 않고 자동으로 직물을 시험할 수 있는 로봇릭 시스템에 대해 소개하고자 한다.

2. 기존의 직물시험기기

낮은 응력하에서 직물의 물리적 성질을 측정하는 대표적인 시험 기기로 1970년대 Kawabata에 의해 개발된 Kawabata Evaluation System (KES)[2]과 1980년대 CSIRO의 FAST(Fabric Assurance by Simple Testing)[3] 시스템이 있다.

특히 KES는 비교적 높은 응력이 가해지는 강도시험과는 달리 낮은 응력하에서 직물을 테스트하는 기기로 압축, 굽힘, 전단, 인장과 표면시험이 가능한 4개의 반자동 기기들로 이루어져 있다. 시료를 정렬하는 일부터 배열, 각 기기에 걸어 고정시키는 일까지는 작업자의 손을 거쳐야 하며 그 후 자동적으로 연속적인 응력-변형률 사이클이 직물에 가해지고 응력-변형률 곡선은 x-y 플롯터(plotter)에 의해 그려진다. KES를 사용함에 있어 숙련된 작업자들의 반복적인 실험에

Introductory Robotic Flexible Test System for Fabric Testing under Low Stresses / Ae Gyeong Oh
Visiting Researcher, Department of Textiles, UMIST, PO Box 88, Manchester M60 1QD, U.K., Phone: 001-44-161-200-4140, Fax: 001-44-161-485-1218

도 불구하고 측정자들마다 값이 달라질 수 있으며, 각 나라의 실험실끼리 측정된 값을 비교[4]한 결과 시료를 배열한 후 부터 고정시키는 절차에서 측정오류의 주된 원인이 발생한다고 지적했다.

한편, FAST 시스템은 압축, 굽힘, 인장과 전단(바이어스 인장 포함)이 가능한 3개의 기기로 이루어져 있다. 이 기기는 KES보다 작동시키기가 비교적 수월하고 가격면에서도 싼 장점이 있는 반면 일정한 점에서의 측정, 즉 연속적으로 주어지는 하중이 아닌 특정하중하에서의 변형률이 측정된다. 따라서 직물의 정확하고 빠른 측정을 위해서는 자동화된 시험 기기가 필요하며 로봇틱 플렉시블 테스트 시스템(FTS)이 이를 가능하게 한다.

3. 로봇틱 플렉시블 테스트 시스템

3.1. 목 적

로봇릭 시스템의 가장 주된 목적은 낮은 응력하에서 직물의 물리적 특성을 작업자의 개입 없이 측정하고자 하는 것이다. 즉 다음과 같은 중요한 목적이 있다.

- ① 시료의 초기 조작
- ② 측정하고자 하는 기기의 각 방향으로 시료의 정확한 배열
- ③ 척(chucks)에 시료를 고정시키는 일
- ④ 시료에 초기장력을 가하는 일, 기기의 시험 속도, 최대하중의 결정, 시험결과를 x-y 플롯터로 제공하는 일
- ⑤ 시료를 측정하고자 하는 다음 기기로 연결 위와 같은 5가지 모두가 자동으로 처리되며 직물시료의 갯수에 관계없이 적용 가능하고 실험 조건을 여러 가지로 바꾸고자 할 때에도 작업자의 손을 거치지 않고 소프트웨어의 변경만으로도 충분히 가능하다.

3.2. 로 봇

로봇릭 시스템에 사용된 로봇으로 IBM SCARA robot[5]을 Figure 1에 보인다. 로봇의 팔(arm)은 수평면상으로 연결되어 있으며 일반적인 로

봇 팔의 자유도가 6인 것과는 달리 FTS는 기기의 좌우요동(x, y축), 상하요동(z축), 그리고 회전(roll)만으로 충분히 가능하게 설계하여 자유도가 4인 것이 특징이다. 또한, 이 시스템에서는 하중-변형 사이클이 로봇에 직접 가해지며 따라서 직물의 변형은 로봇의 좌표 위치로 부터 계산된다. 그러므로 로봇의 위치, 속도와 하중의 용량이 아주 중요한 요인이 된다. 로봇은 선형, 원형, 그리고 여러가지 연속적인 곡선의 경우도 실행 가능하며, 속도와 가속도는 변형률의 정확한 제어를 위해 프로그램으로 변화시킬 수 있고 또한, 외부 센서와 액추에이터(actuators)가 대화할 수 있는 48개의 입력, 출력 프로그램이 있다. 로봇의 제어를 위해서는 AML/2라는 고급 프로그래밍 언어를 사용하였다.

3.3. 직물 배열과 처리장치

FTS에서는 여러가지 시험을 할 때 시료의 배열방법이 각각 다르게 고안되었다. 굽힘 시험에서는 시험대의 모서리와 평행하게, 인장과 전단 시험은 고정된 클램프(clamp)와 평행하게 정확히 배열되어야 한다. 이를 위해 직물의 모서리는 2개의 적외선 센서에 의해 감지되도록 장치하였다. 직물시료는 x축을 따라 병진운동을 하면서 적외선 센서들에 의해 감지되는데 2개의 센서 중

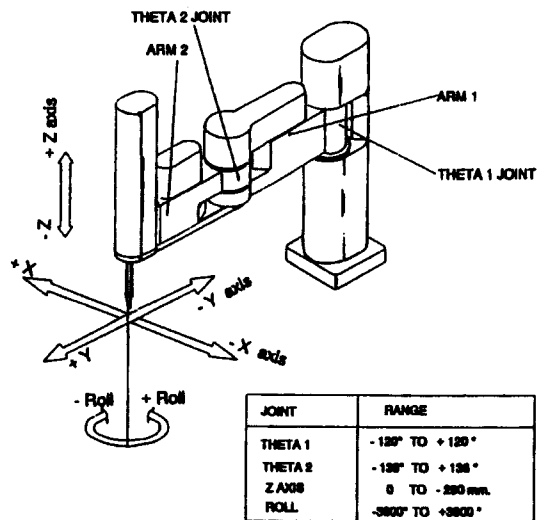


Figure 1. IBM SCARA robot co-ordinate system.

하나라도 센서의 상태가 변하는 순간 그 정보가 즉시 로봇 컨트롤러(robot controller)에 알려지게 된다. 그 때 로봇의 좌표 위치가 소프트웨어에 의해 수치로 정해지면 로봇 컨트롤러는 (1)식에 의해 회전운동을 계산하여 직물시료의 모서리를 정확히 배열하게 된다.

$$dR = \tan^{-1} \left[\frac{x_2 - x_1}{L} \right] \quad (1)$$

여기서 dR : 배열시 요구되어지는 회전축의 수정되는 양

L : 2개의 센서 사이의 거리

x_1 : 센서 1이 변할 때 로봇의 x 좌표의 위치

x_2 : 센서 2가 변할 때 로봇의 x 좌표의 위치

B : 회전 운동(Figure 2(b) 참고)

직물 시료는 계속적인 병진운동과 회전운동을 통해서 시험하고자 하는 시험 기기에 정확하게 배열된다. 이를 Figure 2(a)에 나타내고 그 알고리즘(algorithm)을 (b)에 FTS에서의 배열 작동장치를 (c)에 나타낸다.

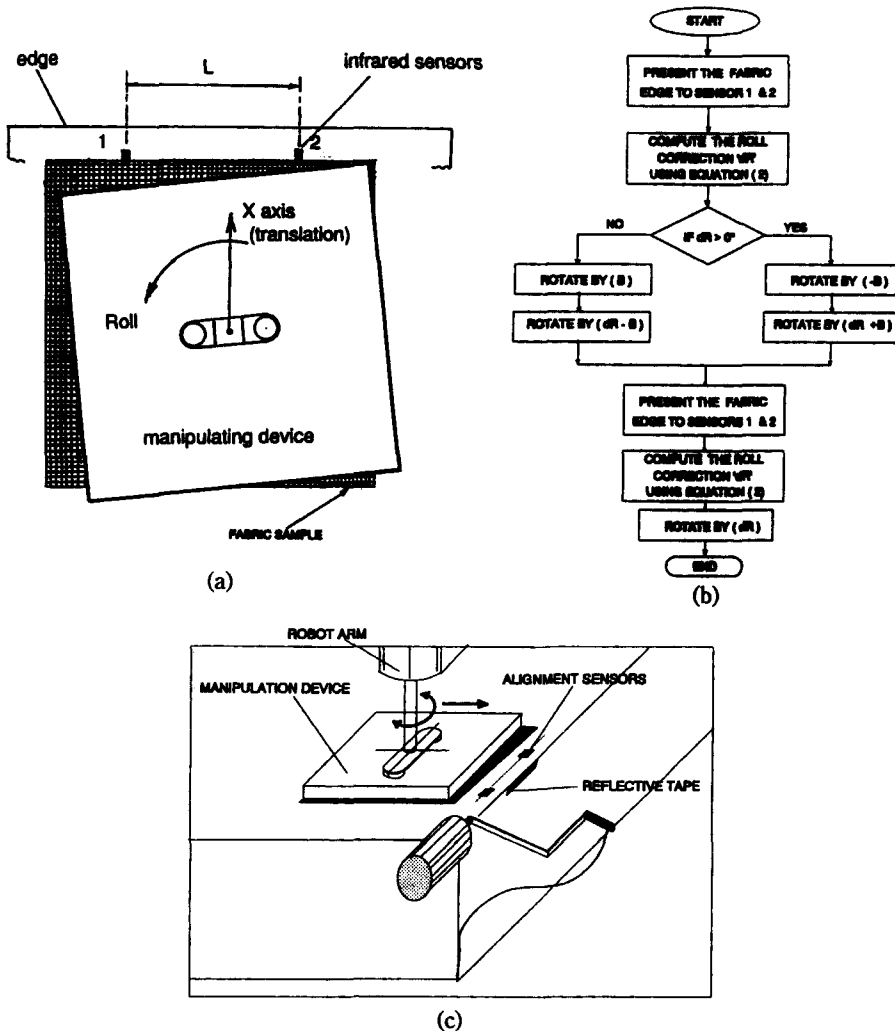


Figure 2. (a) Alignment technique, (b) algorithm, (c) fabric manipulation and alignment.

3.4. 직물 파지 장치(gripping device)

일반적으로 로봇은 시료를 처리하기 위해 여러 종류의 파지 장치를 사용한다. 이들의 메커니즘은 대개 전기 모터(electric motors)나 공기를 이용한 방법(pneumatic actuators)에 의해 이루어지는데 이 때의 파지력(gripping force)은 다루고자 하는 시료의 무게에 비례한다. 직물은 비교적 가벼우므로 요구되는 파지력이 매우 작는데 직물과 조(gripper jaws)사이의 파지력, F_c 는 일반적으로 다음과 같은 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$F_c > \frac{W}{2\mu} \quad (2)$$

여기서 F_c : 파지력

W : 직물의 무게

μ : 직물과 조 사이의 마찰계수

인장과 전단시험은 2개의 클램프 사이에서 직물을 파지하고 있어야 하므로 다른 시험에 비해 많은 힘이 요구된다. 여기서는 고정된 클램프(fixed clamp)와 이 시스템에서의 파지장치인 로봇 팔의 끝에 부착된 클램프 사이에 직물시료가 고정되므로써 테스트가 시작된다. 이를 *Figure 3*에 보인다.

3.5. 시험 기기

압축시험 : 압축시험에서 시료에 직접 가해지는 압력은 시험의 정확성에 큰 영향을 미친다. 따라서 압축시험은 시료들이 실험대에서 다른 시험을 거치기 전에 먼저 하게 된다. 시료는 로봇이 z축으로 움직임에 의해 압축되고 이 z축의 압축 로드 셀(load cell)에는 면적이 2 cm²인 원형 압축 헤드가 부착되어 있다. z축의 위치로부터 계산된 직물의 변형은 압축력과 동시에 기록된다. 최대압축력, $P = 50 \text{ cN/cm}^2$ 가 가해진 후 속도는 0.02 mm/s로 유지되며 이 때 압축 헤드는 같은 속도로 원위치로 되돌아 간다. 로봇 팔에 부착된 압축헤드에 의한 압축시험과 전형적인 압축곡선을 *Figure 4*에 나타낸다.

또한 직물의 두께는 압축 헤드가 실험대 위에 시료 없이 닿았을 때의 위치와 압력이 0.5 cN/

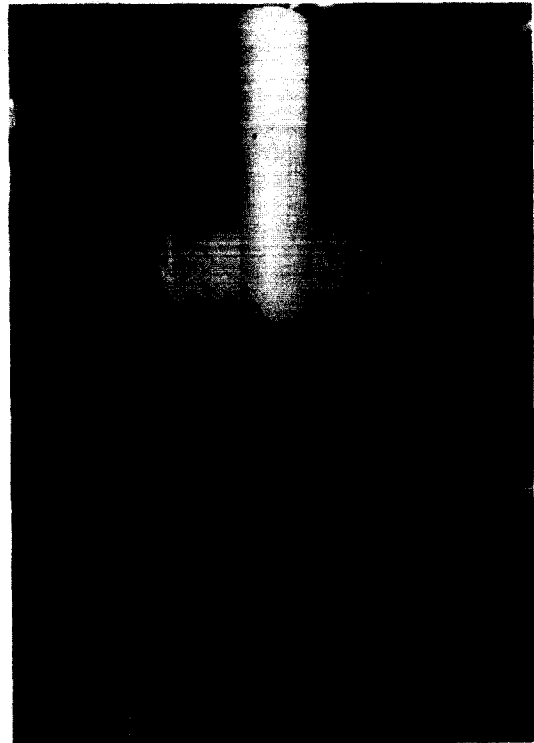


Figure 3. Fabric gripping device.

cm² 하에서 시료와 접촉했을 때 위치의 차이로 결정한다. 즉,

$$T = z_0 - z_{(p=0.5)} \quad (3)$$

여기서 T : 직물의 두께

z_0 : 압축헤드가 시료 없이 실험대와 닿았을 때의 위치

$z_{(p=0.5)}$: $P=0.5 \text{ cN/cm}^2$ 일 때 z축의 위치

압축에너지(WC), 압축회복도(RC)와 선형도(LC)의 압축특성들은 식 (7)~(9)와 유사하게 계산된다.

굽힘 시험 : 굽힘 시험은 캔틸레버 이론을 기초로 하였다. 일반적인 캔틸레버 방법은, FAST 시스템을 포함하여 41.5°의 특정 굽힘 각에서 직물 캔틸레버 길이를 측정하는 반면 로봇릭 시스템에서는 여러 굽힘 각에서 연속적으로 캔틸레버 길이를 측정한다. 직물을 실험대의 모서리에 미끄러지게 함으로써 굽힘각 센서(bending an-

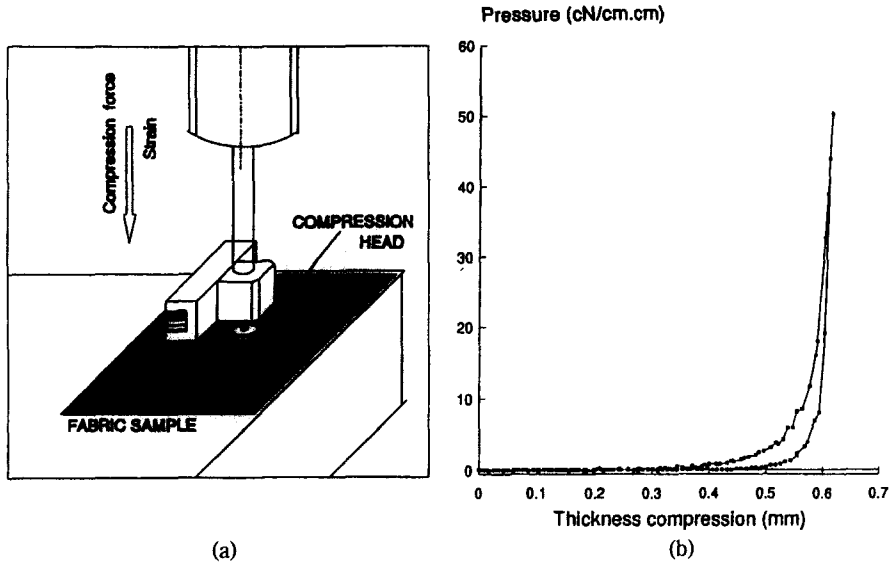


Figure 4. (a) Compression test, (b) compression recovery curve.

gle sensor)에 의해 감지하도록 되어 있으며 굽힘각 센서는 적외선 광이 직물을 감지하는 상태가 변하는 순간 로봇 콘트롤러에 알려져 굽힘 각이를 (4)식과 같이 정확히 계산하게 된다.

$$L_j = x_j - x_0 - \text{offset} \quad (4)$$

- 여기서 x_j : 직물과 광(light beam)이 교차했을 때 로봇의 위치
- x_0 : 직물과 배열 센서(alignment sensor)가 교차했을 때 로봇의 위치
- offset: 실험대의 모서리에서 배열 센서까지의 거리
- j : 굽힘각 센서의 스텝위치(step position)

스텝퍼 모터는 한 스텝에 0.9°씩 회전하며 굽힘각 센서의 각 위치로부터 일련의 캔틸레버 길이를 $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots$ 등으로 구할 수 있다. 또한 P. Potluri[6]에 의해 개발된 유한요소법을 사용하여 굽힘각과 캔틸레버 길이를 모멘트와 곡률의 관계로 바꿀 수 있다. 모멘트-곡률 관계는 초기에는 비선형이지만 초기 내부마찰이 극복된 후 선형부분이 되는데 이 선형부분에서의 기울기가 굽힘 강성(B)으로 계산되며 선형부분의 y

축 외압값이 굽힘 히스테리시스(2HB)이다. 굽힘 시험과 전형적인 모멘트-곡률 곡선을 Figure 5에 보인다.

전단시험 : 전단시험은 고정된 클램프에 평행한 로봇 그립퍼의 움직임에 의해 행해진다. 직물이 배열 센서들에 의해 고정된 클램프의 모서리에 평행하게 배열된 후 고정된 클램프 내의 짧은 캔틸레버에 놓여지면 두 개의 그립퍼 조에 의해 맞물려지고 아래 조가 실험대 높이와 같아질 때까지 그립핑 장치가 z축으로 움직인 후 뉴마틱 시스템(pneumatic system)에 의해 시험이 진행된다. 이 때 로봇은 두 클램프 사이의 거리가 측정하고자 하는 시료 길이와 같아질 때까지 고정된 클램프로 부터 떨어져서 움직인다. 이 단계에서 고정된 클램프는 단혀 있으며 따라서 로봇 그립퍼와 고정된 클램프 사이에 측정하고자 하는 시료 길이만큼 시료가 고정되어 있다. 전단 시험에서는 직물에 초기 장력이 유지되는 동안 로봇 그립퍼가 고정된 클램프에 평행하게 움직이는데 장력의 급격한 증가로 인해 직물이 변형되는 동안에도 그립퍼와 고정된 클램프 사이의 거리는 일정하게 유지된다. 또한 이 시스템에서는 격자모양의 변형에도 가능할 수 있도록 로봇이 원형케도로 움직이게 설계되어 있다. 이를 Figure 6에 나타낸다.

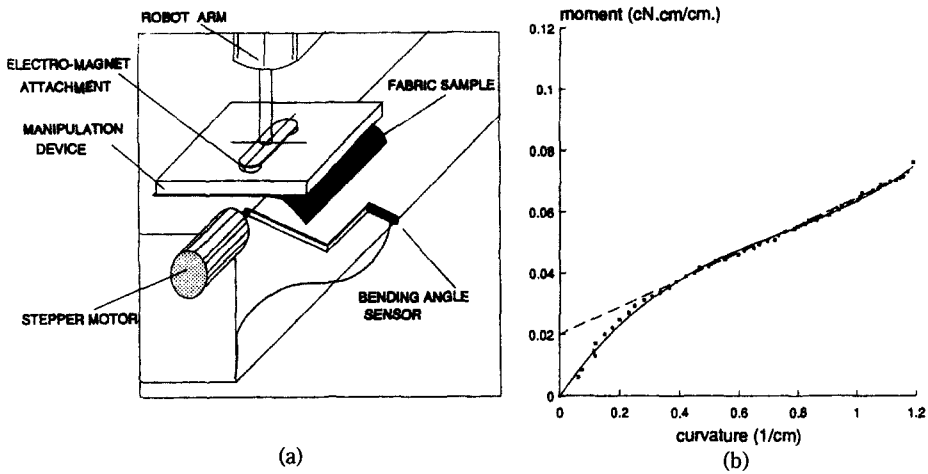


Figure 5. (a) Bending test, (b) moment-curvature relation of a fabric.

전단력은 그립핑 장치에 걸려있는 로드 셀에 의해 측정되고 전단 변형률은 로봇의 y축 위치로부터 식 (5)와 (6)과 같이 계산된다(Figure 6 참조)

$$\phi_j = \sin^{-1} \left[\frac{y_j - y_0}{R} \right] \quad (5)$$

$$R = x_t - x_0 \quad (6)$$

여기서, ϕ_j : 전단 변형률

y_j : j 시료가 전단변형을 받았을 때 y 좌표의 위치

y_0 : 전단 변형 초기에서의 y 좌표

x_t : 특정 초기 장력이 가해진 후 x 좌표

x_0 : 고정클램프에 대한 x 좌표의 위치

R : 원형궤도의 반경

전단특성들은 전단력-변형률 곡선으로부터 0.5°에서의 전단 히스테리시스, 2HG와 5°에서의 전단 히스테리시스, 2HG5 그리고 0.5°와 5° 사이에서 진행되는 곡선의 평균기울기인 전단강성, G를 구할 수 있다. Figure 7에 전단시험과 그 곡선을 보인다.

인장시험 : 직물을 고정시키는 과정은 전단시험과 유사하며 인장변형률은 특정한 속도로 고정된 클램프로 부터 그립핑 장치가 움직임으로써 가해진다(Figure 7(a) 참조). 전단력과 전단

변형률이 로드 셀과 로봇의 y축의 위치로부터 계산되는 것과 유사하게, 인장력은 그립핑 장치에 수직으로 걸려있는 로드 셀에 의해 측정되고 인장변형률은 로봇의 x축 위치로부터 계산된다. 이 때 인장력이 100 N까지 주어지면 인장 변형률은 방향을 바꾼다. 인장시험은 다른 시험에 비해 비교적 큰 힘이 요구되므로 인장변형률이 계산되는 동안 로봇 팔의 편향도를 무시할 수는 없다. 따라서 콤플라이언스(compliance)를 Figure 8(a)와 같이 측정하여 직물의 변형률을 보간법을 사용하여 수정한 후 정확한 값을 얻을 수 있다. 이를 Figure 8(b)에 나타낸다. 인장특성,

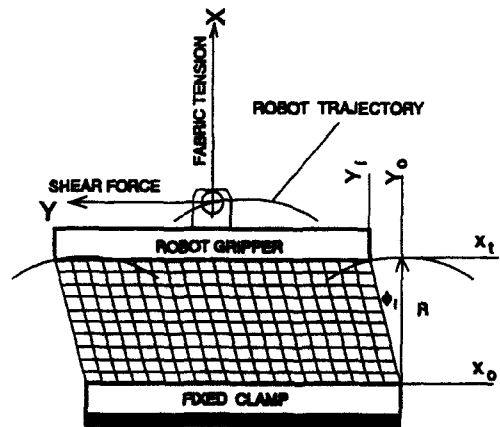


Figure 6. Trellis type shear deformation.

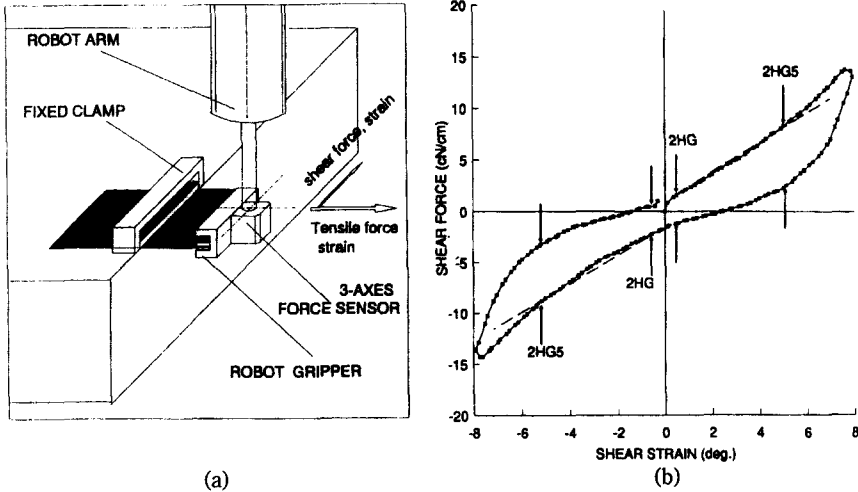


Figure 7. (a) Shear and tensile test, (b) shear force-strain curve.

즉 인장에너지(WT), 인장회복도(RT)와 선형도(RT)는 식 (7)~(9)로 계산된다. 인장시험이 끝난 후 로봇은 모든 작동 장치를 제자리로 돌려놓은 후 시료 역시 원위치에 놓아둔다.

3.6. 마찰실험

마찰시험은 로봇 팔에 부착된 무게를 알고 있는 마찰 접촉자(friction contactor)에 의해 행해지는데 이 센서는 현재 개발중이다. Figure 9에 이를 나타낸다.

3.7. FTS의 하드웨어와 소프트웨어

로보틱 시스템의 하드웨어와 소프트웨어의 조

직을 Figure 10에 보인다. 여기서 중요한 하드웨어는 로봇 팔, 로봇 콘트롤러, AML/2로 쓰여진 프로그램이 실행 가능한 IBM PS/2 컴퓨터와 데이터 포착 하드웨어가 있다. PS/2 컴퓨터와 로봇 콘트롤러는 데이터변환과, 대화를 할 때에는 Figure 10에서 보는 것처럼 병렬 디지털 라인을 따른다. 로봇 콘트롤러는 AML/2 응용 프로그램 하에서 작동하며 DO(digital output) 라인을 통해 솔레노이드의 값들, 스텝퍼 모터와 같은 디지털 장치를 작동시키며 또한 DI(digital input) 라인을 통해서 시료를 배열시키는 일부터 모서리에 정확히 고정시키는 일까지지는 모니터 디지털 센서를 작동시키게 된다. PS/2 컴퓨터는 데이터

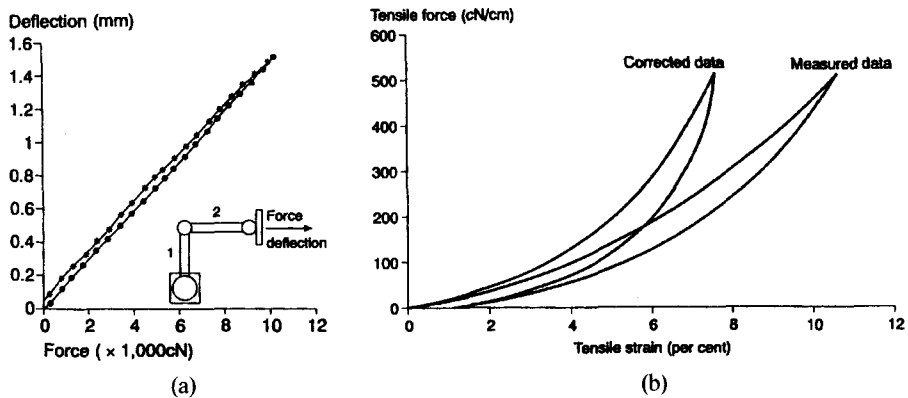


Figure 8. (a) Robot compliance during a tensile test, (b) tensile deformation of a fabric.

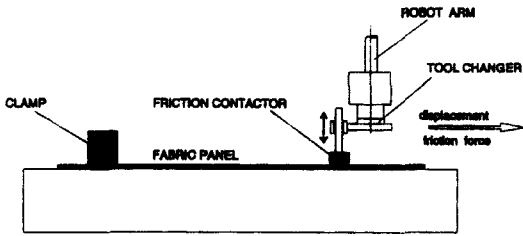


Figure 9. Friction test.

포착 시스템을 제어하는데 이것은 로드셀, 멀티플렉서(multiplexer), 시료 고정장치, A/D 컨버터로 이루어져 있다. 또한 데이터 포착과 분석은 C언어를 이용하였다. 하중과 변형은 PS/2 컴퓨터로 알 수 있으며 직물 변형은 로봇의 좌표 위치로부터 계산된다. FTS에서의 분석 소프트웨어는 데이터 평활화(data smoothing), 곡선 회귀(curve fitting)와 직물의 물리적 특성치를 위해 수치해석 방법으로 개발하였다. 이를 부록 A에 나타낸다.

간단히 인장특성치를 예를 들면 다음과 같이 계산된다.

$$WT = \int_0^{EM} TF d\epsilon \quad (7)$$

$$RT = \frac{WT}{\int_0^{EM} TF' d\epsilon} \times 100 \quad (8)$$

$$LT = \frac{WT}{(TF_m \times EM / 2)} \quad (9)$$

여기서 TF : 인장시의 인장력

EM : 최대 변형률

TF' : 인장 회복시의 인장력

TF_m : 최대 인장력

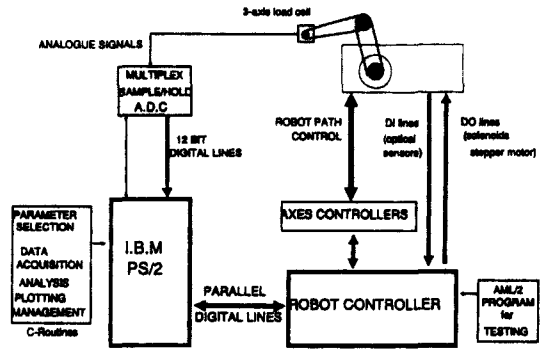


Figure 10. Robot organization.

$d\epsilon$: 변형률의 미소변화

그리고 Table 1에 실험조건들을 정리하여 나타낸다.

4. 현존하는 기기와의 비교

낮은 응력하에서 직물의 물리적인 특성을 측정하는 가장 대표적인 기기인 KES와 FTS를 이용하여 여러 가지 직물의 특성을 비교하였다. 이를 Figure 11에 보이는데 두 시스템은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 직물은 비선형적으로 거동하며 취급하기가 어렵다. 또한 시료의 위치에 따라, 시료의 종류에 따라 물리적 성질들이 달라질 수 있다. 따라서 KES와 FTS가 완전히 동일한 조건하에서의 실험은 불가능하다는 것은 주지의 사실이다.

두 시스템을 비교한 결과 압축과 굽힘 성질들은 인장과 전단특성보다는 상관도가 떨어진다.

Table 1. Test specification

Sample size	Compression test	Bending test	Shear test	Tensile test
Sample size	200×200 mm	200×200 mm	200×200 mm	200×200 mm
Effective size	2 cm ²		50 mm	50 mm
Test speed	0.02, 0.066, 0.2 mm/s	1 mm/s	0.5 °/s	0.1, 0.2 mm/s
Test limit	100 cN		±8°	100 N
Max. deformation	5 mm	100 mm	±8° (14 mm)	25 mm
Accuracy of deformation	±0.2% (±0.01 mm)	±0.25 mm	±0.5% (±0.07 mm)	±0.25% (±0.0625 mm)
Max. force	10 N		50 N	200 N
Accuracy of force measurement	±0.2%		±0.5%	±0.5%

* means full scale

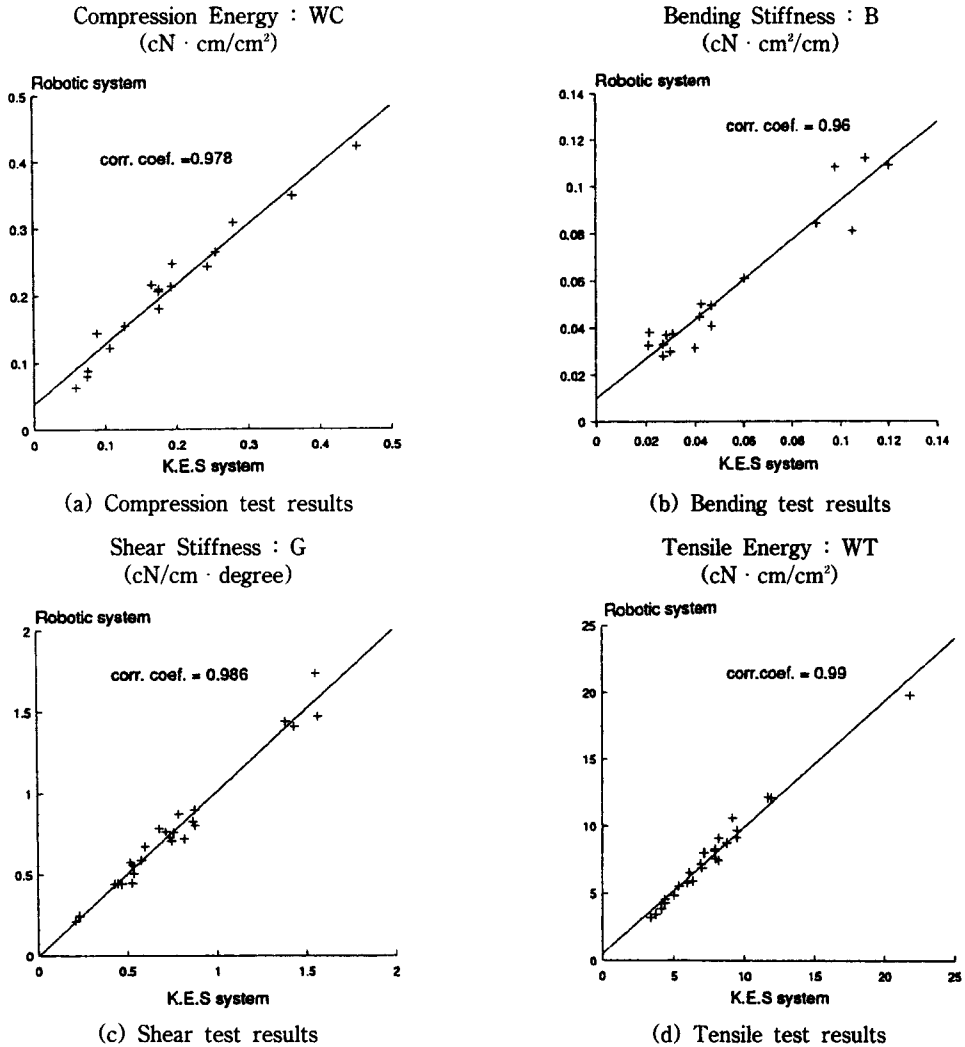


Figure 11. Comparison of fabric properties.

이는 Figure 4(b)에서 알 수 있듯이 매우 작은 압축 스트로크(stroke)가 급격히 압력을 증가시키고 따라서 시험 후반부에 몇몇 포인트들이 기록되기 때문이다. 굽힘 특성의 경우 더 낮은 상관관계를 보이는데 이는 KES 굽힘 테스트는 순수 굽힘 원리(pure bending principle)를 기초로 한 반면 로보틱 시스템은 캔틸레버 방법을 수정한 것을 기초로 하였기 때문이다. 주목할 만한 차이점은 다음과 같다.

(1) 이전의 연구[4,7]에서 지적했듯이 KES 시험에서 작업자와 관련된 오류의 주요인이 시료

의 취급, 배열 그리고 기기에 고정시키는 일인 반면 로보틱 시스템에서는 이 모든 것들이 자동화되어 있다.

(2) 기존의 시스템에서는 유효시료장(effective sample length), 변형률 속도, 초기 장력, 최대 하중 등과 같은 시험조건들을 신속히 바꿀 수 없는 반면 로보틱 시스템에서는 시험상황에 따라 소프트웨어를 이용하여 용이하게 바꿀 수 있다.

(3) KES에서는 직물의 물리적 성질들을 집적 하드웨어(integrating hardware)를 사용하였는데 적분의 부정확한 시작에 기인하는 오류에 대

한 보고[7]가 있었다. 그러나 로봇 시스템에서는 수치해석적인 방법을 사용하여 하중 변형 데이터로부터 직물의 물리적 성질들을 계산한다.

(4) KES 인장 시험기에서 클램프간의 거리가 50 mm이며 시료를 고정시킨 후의 초기신장이 0이 아니다. 특히 뻣뻣한 직물에서 정확히 고정시키려면 몇 번의 시도를 거쳐야 하지만 로봇 시스템에서는 인장력이 매우 작은 초기치라도 그 위치로부터 유효장이 계산되기 때문에 KES와 같은 문제는 발생하지 않는다.

(5) 낮은 응력하에서 직물시험은 원래 태의 측정이 주목적이지만 봉제성, 의복외관성 그리고 옷분을 자동으로 배치할 수 있는 방법[8,9] 등을 예측할 수 있다. 이것은 비선형의 하중-변형 곡선의 진보적인 수치해석 기술이 필요한데 KES에서는 사용하기가 몹시 불편하지만 로봇 시스템에서는 어떤 비선형 분석 패키지도 용이하고 빠르게 사용이 가능하다.

(6) KES는 로봇 시스템에 비해 가격이 거의 2배이며 숙련된 작업자가 필요하고 플로터가 각 시험 기기마다 필요하지만 로봇 시스템에서는 컴퓨터의 프린터를 바로 사용할 수 있다.

(7) 로봇 시스템의 시험 총 소요시간은 6분 인 반면 KES는 2~3배 정도 더 늦다.

5. 결 론

낮은 응력하에서 직물의 물리적 성질을 측정하는 것은 직물 자체가 매우 유연하므로 작업자와 관련된 에러들이 많이 발생한다. 메카트로닉 원리를 기초로 한 로봇 시스템에서는 그림퍼와 3축의 하중 센서 등이 부착된 IBM SCARA

로봇을 이용하여 직물의 배열에서 부터 고정시키는 일 모두가 작업자 없이 가능하다. 직물 변형률은 로봇의 좌표 위치로부터 바로 계산이 되며 모든 방향에서의 하중-변형 관계를 고찰하는데 적용가능하며 최소한의 변경만으로 다른 여러 가지 부가적인 시험을 할 수 있다. FTS에 사용된 하드웨어들의 정확성을 위해 여러 가지 소프트웨어에 기초한 기술들을 메카트로닉 시스템으로 사용하였으며 시료의 정확한 배열, 여러 가지 작동장치를 위한 알고리즘이 있다. 또한 로봇 팔의 하중-변형 특성들은 여러 가지 소프트웨어를 사용하면 정확히 측정되며 특히 전단의 경우 소프트웨어 필터링(software filtering) 기술을 이용하여 관성력(inertia force)을 최소화하였다. 직물의 물리적 특성들은 수치해석적인 방법들을 사용하여 계산된다.

일반적인 시험 시스템들은 여러 개의 기기로 이루어져 있으며 정밀한 장치들을 부착시킴에 의해 가격이 비싼 편이며 KES 역시 이런 이유로 고가이다. FTS는 직물 시험과 정확한 캘리브레이션에 위한 센서들이 로봇 자체에 부착되어 있다. 한편, FAST의 굽힘 시험의 경우 특정굽힘각 41.5°에서 굽힘 특성을 계산하지만 FTS는 특정각이 아닌 여러 각에서 캔틸레버 길이를 측정하여 비선형의 모멘트-곡률 관계를 계산하는데 이것은 메카트로닉 시스템의 큰 장점이다. 또한 여러 센서들에 의해 정확한 캘리브레이션이 가능하다. 이전의 시스템에서는 변형률 속도, 유효 시료장과 최대하중 등 여러 시험조건 등을 쉽게 바꿀 수가 없으며 이것 또한 KES의 중요한 한계중의 하나이다. 그러나 FTS에서는 소프트웨어를 통해 용이하게 변경시킬 수 있다.

APPENDIX A

Fabric Property	Computed from	Notation	Units
1. Compression energy	Compression curve (Fig. 4b)	WC	cN · cm/cm ²
2. Compressional resilience		RC	%
3. Linearity		LC	
4. Bending rigidity	Moment-curvature relation (Fig. 5b)	B	cN · cm ² /cm
5. Hysteresis		2HB	cN · cm/cm

Fabric Property	Computed from	Notation	Units
6. Shear Stiffness	Shear force-strain curve (Fig. 7b)	G	cN/cm · beg
7. Hysteresis at 0.5° shear angle		2HG	cN/cm
8. Hysteresis at 5° shear angle		2HG5	cN/cm
9. Tensile Energy	Tensile force-strain curve (Fig. 8b)	WT	cN · cm/cm ²
10. Tensile resilience		RT	%
11. Extensibility		EM	
12. Linearity		LT	
13. Fabric thickness	Compression curve (Fig. 4b)	T	mm

참고문헌

1. F. T. Peirce, *J. Text. Inst.*, **55**, T377-416(1930).
2. S. Kawabata, "The Standardization and Analysis of Hand Evaluation", HESC, The Text. Mech. Soc. of Japan, 1980.
3. "Fabric Assurance by Simple Testing", CSIRO Division of Wool Technology, Australia, 1988.
4. T. J. Mahar, R. C. Dhingra, and R. Postle, *Text. Res. J.*, **57**, 357(1987).
5. "Reference Manuals for IBM 7576 Manufacturing System", IBM. Corporation, Bocaaton, FL, 1988.
6. V. V. P. Potluli and I. Porat, "29th International MATADOR Conference", Manchester, April, 1992.
7. H. Weustink, *Melliand Textilber*, **90**, 921(1989).
8. G. Stylios(Ed.), "Textile Objective Measurement and Automation in Garment Manufacture", Ellis Horwood, U. K., 1991.
9. P. R. Brown, D. R. Buchanan, and T. G. Clapp, *J. Text. Inst.*, **81**, 1(1990).