

## 당뇨발을 위한 생체역학적 치료방법들에 관한 고찰

고은경, 정도영<sup>1</sup>

마산대학 물리치료과, <sup>1</sup>순천제일대학 의료보장구과

### A Review of Biomechanical Treatments for the Diabetic Foot

Eun-Kyung Koh, PT, M.Sc; Do-Young Jung, PT, M.Sc<sup>1</sup>

Department of Physical Therapy, Masan College; <sup>1</sup>Department of Prosthetics and Orthotics, Suncheon First College

Diabetic foot ulcers result from abnormal mechanical loading of the foot, such as repetitive pressure applied to the plantar aspect of the foot while walking. Diabetic peripheral neuropathy causes changes in foot structure, affecting foot function and subsequently leading to increased plantar foot pressure, which is a predictive risk factor for the development of diabetic foot ulceration. To early identify the insensitive foot makes it possible to prevent diabetic foot ulceration and to protect the foot at risk from abnormal biomechanical loading. Abnormal foot pressures can be reduced using several different approaches, including callus debridement, prescription of special footwear, foot orthosis, injection of liquid silicone, Achilles tendon lengthening, and so forth. Off-loading of the diabetic wound is a key factor to successful wound healing as it is associated with reduced inflammatory and accelerated repair processes. Pressure relief can be achieved using various off-loading modalities including accommodative dressing, walking splints, ankle-foot orthosis, total contact cast, and removable and irremovable cast walkers. (*J Kor Soc Phys Ther* 2007;19(5):51-63)

**Key Words:** Diabetic Foot ulcer, Peripheral Neuropathy, Plantar Pressure, Accommodative Shoe

### 1. 서론

당뇨병(diabetes mellitus)의 가장 심한 합병증은 족저궤양(plantar ulceration)이다. 신경병증 족저궤양은 첫 번째, 두 번째, 혹은 세 번째 중족골두에서 흔히 발생되며, 대부분이 보행 시 발에 적용되는 과도하고 반복된 압력에 의한 것이다 (Ctercteko 등, 1981).

당뇨발 궤양을 일으키는 요인으로는 말초신경병증, 발 외상, 발 기형, 증가된 족저압력, 그리고 굳은살(callus) 등 여러 가지가 있다. 이것은 감각

소실과 같은 내재적 요인과 발에 대한 비정상적인 역학적 하중과 같은 외재적 요인의 공동작용에 의해 발생한다.

족저궤양이 있으면 발바닥의 체성감각에 대한 감수성이 떨어져 위험한 상태에 있으므로 이를 예방하기 위해 다양한 치료방법들이 대두되고 있다. 족저궤양은 재발이 잘 되기 때문에 예방이 매우 중요하다. 또한 족저궤양은 절단(amputation)을 일으킬 수 있으며 사망률과 관련이 있다. 따라서 본 논문은 당뇨병 궤양이 있는 발에 대한 생체역학적 치료접근법에 초점을 맞춘 치료방법들을 소개하고자 한다.

논문접수일: 2007년 7월 28일

수정접수일: 2007년 8월 25일

게재승인일: 2007년 9월 20일

교신저자: 고은경, kohpt@naver.com

## II. 본 론

### 1. 정상적인 발의 기능

발의 기본적인 기능 중 하나는 보행 중 발뒤꿈치 닿기(heel strike)시의 충격흡수와 보행 중 고르지 못한 지면에서의 발의 적응력이다. 이러한 기능에서의 기본적인 역할은 거골하 관절(subtalar joint)에서 이루어진다. 발목관절(ankle joint)은 시상면에서의 움직임을 조절하는 주요한 관절로 직립보행에 필수적이다. 첫 번째에서 다섯 번째 중족지절관절(metatarsophalangeal joint)의 주동작용은 시상면에서의 배측굴곡과 족저굴곡이다.

보행 주기는 두 개의 기본적인 구성요소로 하지가 지면에 접촉하고 있는 입각기(stance phase)와 발이 하지가 추진되는 동안 공중에 있는 유각기(swing phase)가 있다. 입각기는 세 부분으로 나뉜다. 첫 번째가 정상적으로 발 뒤꿈치가 지면에 닿는 접촉기(contact phase)이다. 두 번째가 하중반응/loading response) 시기에서 시작하여 발 뒤꿈치 들기(heel-lift)에서 끝나는 중간입각기(midstance)이다. 세 번째 구간인 추진기(propulsive phase)는 2개의 하부 구성요소(능동적 추진기와 수동적 추진기)로 나뉜다. 능동적 추진기는 지지축의 발뒤꿈치 들기에서 시작하여 반대축의 발뒤꿈치 닿기로 끝난다. 이 단계 동안에는 가장 큰 수평과 수직 힘이 발에 저항하여 전달되며 상대적으로 전족부의 국소 부위에서 무게지지를 하게된다. 그러므로 대개 입각기의 능동적 추진기동안 가장 높은 압력이 발견된다. 수동적 추진기는 반대축 발뒤꿈치 닿기에서 시작하여 지지 축의 발가락 떼기로 끝난다.

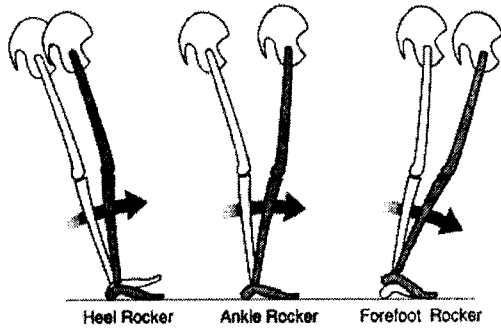
입각기의 각 부분은 발과 발목의 흔들림 동작(rocker action)에 의해 특징지어진다(Figure 1), (Perry, 1992). 접촉기 동안 발뒤꿈치는 지면에 발이 완전히 접촉하도록 부드럽게 족저굴곡 할 수 있는 역할을 한다(발뒤꿈치 흔들림(heel rocker)). 중간입각기 동안에는 발목관절에서 경골(tibia)이 발 위로 전진하도록 한다(발목 흔들림(ankle

rocker). 이것은 압력중심(center of pressure)이 발 뒤꿈치와 중족부로부터 전족부로 이동하게 한다. 능동적, 수동적 추진기동안 첫 번째 중족지절관절은 전족부위에서의 하지가 전진할 수 있도록 발 뒤꿈치 들기를 가속시킨다(forefoot rocker). 그러므로 정상적인 발 관절의 운동성은 하지가 전진되는 데, 즉 보행에 필수적 요소이다.

무게지지 동안의 족저면은 조직에 변형을 일으킬 수 있는 지면반발력(ground reaction force; GRF)에 노출되어있다. 지면반발력과 변형은 스트레스-스트레인 관계(stress-strain relationship)로 표현된다. 이때 스트레스는 정규화된(normalized) 힘으로 단위면적 당 적용되는 힘을 말한다. 기립 시 지면반발력의 크기는 몸무게와 같다. 각각의 발은 족저면에 분포하는 몸무게의 50%의 하중을 받게 되고 그것은 정확하게 수직방향의 힘으로 전달된다. 몇 가지 이유에서 스트레스는 기립 시 보다 보행 시 더 높다(van Deursen, 2004). 첫 번째로는 보행 시 두 발이 동시에 접촉하는 시간이 줄어드는 것이다. 두 번째로는 위에서 언급한 흔들림 동작이 입각기의 다른 여러 구간동안 지면에 맞닿은 발 부위가 다르도록 한다는 것이다. 즉 지면반발력이 발 뒤꿈치에서 엄지발가락으로 나아가는 동안 지면에 접촉하는 족저 부위의 크기와 위치가 다르다. 세 번째로 지면반발력은 보행 시 크기가 다양하다. 지면반발력의 첫 번째 최대 힘은 발뒤꿈치 닿기 시 그리고 두 번째 최대 힘은 전족부에서 발끝 밀기(push off) 시에 일어난다. 그러므로 중족부위보다 발뒤꿈치와 전족부에서 받는 최대압력이 더 높다.

수직 지면반발력 이외에도 발 접촉면에 대해 평행하게 발생하는 힘인 수평 지면반발력이 있다. 그러나 내·외측방향의 힘 크기는 수직방향의 힘보다 훨씬 더 적다. 평균적으로 수직 지면반발력은 몸무게의 120~150%인데 반해 수평 지면반발력은 몸무게의 25%이다.

활동적인 사람은 하루에 최소 일만 걸음(step) 그리고 앉은 자세의 생활하는 사람들은 오천 걸음정도를 걷는다(Tudor-Locke와 Bassett, 2004). 따라서 발은 규칙적으로 보행 시마다 생체역학적 스트레스에 노출되어 있다.



**Figure 1.** Rocker model of the foot and ankle in stance phase during walking.

## 2. 압력 측정 방법

압력은 측정된 힘을 적용된 면적으로 나눈 측정된 값이다. 힘은 직접적으로 측정되거나 압력값은 계산되어 진다. 그러므로 족저면의 좁은 면적에 적용된 힘은 넓은 면적에 분포된 같은 크기의 힘에 비해 해로울 수 있다(Cavanagh와 Ulbrecht, 1993). 압력의 단위는 대개 kilograms per square centimeter 혹은 kilopascals이다( $1\text{kg}/\text{cm}^2 = 98.1\text{ kPa}$ ). 측정된 압력값은 변환기(transducer)의 표면 부위에서 나온 결과값이기 때문에 평균압력으로 표현된다(Cavanagh 등, 1992).

압력측정 장비는 많은 힘 센서(force sensor)들로 구성되어 있다. 이러한 힘 센서들의 크기가 다양하다는 사실이 중요하며 이것은 압력계산시 중요하다. 족저 국소압력은 힘 센서의 크기가 큰 경우에 비해 낮게 측정된다.

또한 족저압력 측정장비들이 회사마다 다양함으로 연구 결과치들을 직접적으로 비교할 수 없다는 것과 계양에 대한 보편적인 임계치(threshold set)가 없다는 문제점이 있다. 이를 위해 정상적인 압력 범위들이 각각의 다양한 시스템 마다 따로 제시되었다. 발 전체의 정상 압력 값은 유일하게 광학 발계측기(optical pedobarograph)와 EMED 플랫폼으로 확인되었다(Veves A 등, 1991; Boulton 등, 1983). EMED 플랫폼을 사용하면 족부계양을 예견하는 임계치로 700 kPa을 제시해왔다(Armstrong 등, 1998). 그러나 그것은 전체 발에

대한 단일화된 압력 임계치를 사용하였는데 옳은 방법은 아니다. 발 부위마다 다양한 압력을 경험하고 다양한 임계치를 갖기 때문에 각 부위의 표준(regional norms)을 구하는데 합당한 접근이 필요하다(Cavanagh와 Ulbrecht, 1991). Kirsch 등(1985)은 전족부와 발가락 부위에 대한 압력값의 경계선을 정의하고자 시도했다. 발 손상을 야기시키는데 단지 하나의 임계치가 존재하는 것인지 혹은 부위별 각각의 임계치들로 인한 것인지 아직까지는 의문사항이다.

거의 모든 압력측정 장비는 수직의 압력만을 측정한다. 많은 연구자들은 족저계양의 발달의 중요한 원인요소로 전단력(shear stress)이라고 믿는다. 상업적으로 유용한 장비는 발과 지면 사이를 측정하는 플랫폼과 발과 신발 사이의 압력을 측정하는 in-shoe 시스템으로 구분된다. 플랫폼 장비는 풋프린트 테크닉(footprint technique)과 계산된 압력측정 테크닉(computerized pressure measurement technique)으로 나뉜다. 발-지면 접촉면의 맨발 측정은 특정한 발 기형의 영향에 대한 상세한 것을 입증하는데 사용된다(Figure 2)(정도영 등, 2002). 그러나 in-shoe 측정은 다양한 신발 종류에 따른 압력과 통증의 경감에 대한 영향을 측정할 수 있다는데 의의가 있다. 그래서 in-shoe 측정을 통해 다양한 종류의 인솔과 신발의 하중경감 효과를 평가할 수 있다. 결론적으로 이러한 측정장비의 중요한 역할은 적절한 신발, 보조기의 처방을 내리는데 있다.

In-shoe 시스템의 중요한 이점은 대상자에 관계없이 플랫폼 접촉을 위해 보행을 바꾸지 않고도 보행에 대해 데이터를 수집할 수 있다는 것이다. In-shoe 테크닉은 압력 측정의 실질적인 접근이 가능하고 발과 신발 사이의 가장 중요한 접촉면을 측정할 수 있다. 또 다른 이점으로는 정상적인 보행 외에도 다른 활동 동안에도 측정할 수 있다는 것이다. Rozema 등(1996)에 의한 연구에서 정상적인 보행만으로는 다른 활동 동안의 족저압력을 항상 예측할 수 없다고 보고하였다. 미래에는 이러한 압력측정 기술의 발달로 장기간 일상 생활동안의 족부압력측정이 가능해 질 것이다.

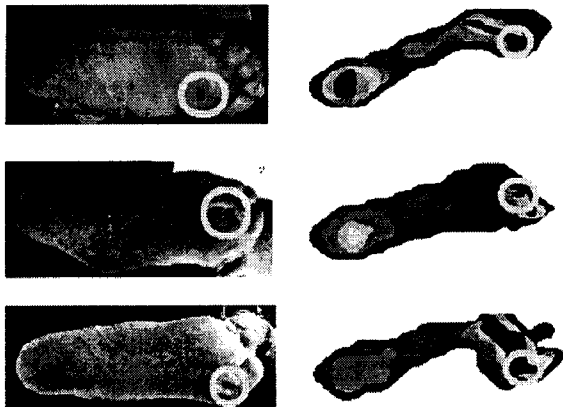


Figure 2. Relationship of ulcer location and plantar pressure using MatScan system.

### 3. 당뇨와 말초신경병증에 의한 발의 변화

말초신경성 당뇨병은 보호감각의 감소 또는 상실뿐만 아니라 발 구조를 변화시키고 피부건조증을 초래하여 과도한 굳은살 형성을 야기시킨다(Mayfield 등, 1998; Reiber 등, 1999). 발 기능에 영향을 주는 발 구조의 변화는 족저압력이 높아져 당뇨발 궤양 발생을 예견하는데 중요한 인자이다(Pham 등, 2000). 또한 족부궤양은 정상적인 압력에서도 발생된다는 것에 주목해야 한다(Cavanagh 등, 1993). 이미 언급했듯이 족부궤양 발생은 압력 역치(pressure threshold)가 정상치 보다 낮은 경우에도 발생된다는 점과 관계가 있다. 대개 발 압력이 높은 부위는 골 돌출부(bone prominence)이다. 골 돌출부를 포함하는 족부기형은 족저압력과 족부궤양의 증가의 위험요인이다(Reiber 등, 1999; Ahroni 등, 1999; Boyko 등, 1999). 게다가 족저조직의 두께는 족저압력과 관련되고 전족부의 압력분포와 쿠션작용 정도 사이에 밀접한 관련이 있다(Young 등, 1995; Abouaesha 등, 2001). Figure 3은 두 번째 중족골두의 조직 두께와 최대 족저압력 사이의 관계를 설명한다(Abouaesha 등, 2001). 유사한 연구에서 족저조직 두께는 당뇨 환자 궤양 발생과 관련성이 높다고 설명되고 있다(Gooding 등, 1986). 당뇨신경병증 환자의 족저 지방 패드(plantar fat pad)의 성질 변화는 중족골두 아래에 비특이성 섬유

과정의 형성으로 관찰되고 있다. 이 섬유조직은 충격 흡수를 하는 족저지방패드의 본질적인 생체역학적 특성과 신경병과 관련된 족저압력의 증가가 사라지는 것에 영향을 준다(Brash 등, 1999).

전형적으로 돌출된 중족골두는 당뇨신경병증 환자의 발가락 기형을 야기시키는 발 내재근의 위축으로 나타난다. 굴곡건(flexor tendon)이 있는 중족골두 아래의 지방완충(fat cushion)은 칼퀴발가락과 망치발가락 원위부로 이동하여 상대적으로 중족골두 부위가 보호받지 못한다고 믿었다. 이러한 근육들의 위축에 대한 증거로써 족부궤양 병력이 있는 당뇨환자의 족저근육에 지방질이 침투되었음이 증명되었다(Suzuki 등, 2000). 그러나 최근의 증거로 당뇨신경병 환자의 발 근육 위축이 있더라도 발가락 기형과 근육 위축은 관계가 없다는 보고와 함께 내재근 약화가 발 기형 발달에 선행하여 나타날 수 있다고 제안하였다(Bus 등, 2002; Andersen 등, 2004). 연이은 연구에서 발가락 기형이 있는 당뇨신경병증 환자는 기형이 없는 환자와 비교하여 중족골두 아래의 지방층이 줄어들었으므로 인해 높은 압력 증가의 가능성과 족부궤양 발달의 위험성이 증가된다고 지적하였다(Bus 등, 2004).

Klaesner 등(2002)은 궤양이 있는 당뇨환자의 족저조직의 양적인 변화가 족저조직의 강직도(stiffness)를 증가시킨다고 보고하였다. 증가된 피부의 경도는 족부궤양이 있는 당뇨환자에게서 나타나며 최대 족저압력과 족부압력분포의 증가와 관련한다(Klaesner 등, 2002; Piaggesi 등, 1999). 발의 제한된 요소의 모델(finite element modeling)에 기초한 스트레스 분석에 의하면 감소된 지방조직의 두께는 발바닥을 딱딱하게 만들어 전단 스트레스가 증가되었다(Piaggesi 등, 1999). 따라서 증가된 강직은 전단력의 높은 증가를 가져오며 주로 당뇨발의 족저 조직에서 보여졌으며 이는 궤양에 약한 조직임을 보여준다(Gefen 등, 2001).

Charcot 관절병은 발 기형의 원인으로 이로 인해 발 기능에 영향을 주고 보행 시 비정상적인 압력을 받게 된다. Charcot 관절병이 있는 환자의 최대 족저압력은 신경병증 궤양 환자와 비교했을

때 보다 더 높다(Armstrong과 Lavery, 1998). 또한 부분적으로 발이 절단된 환자는 비정상적인 발의 기능과 압력부하가 나타나고(Garbalosa 등, 1996) 무지의 절단은 중족골두 아래의 압력이 증가하는 것을 보여준다(Lavery 등, 1995; Quebedeaux 등, 1996).

굳은살 부위는 압력부하에 영향을 주고 족부 궤양의 발생률을 높게 할 수 있다고 보고되어졌다(Murray 등, 1996). 이물질인 굳은살 제거 시 대부분의 경우에 족저압력이 낮아진다(Young 등, 1992; Pitei 등, 1999). 더욱이 신경병증 궤양은 족저 굳은살 아래에 발생하므로 자주 굳은살을 제거하는 것이 당뇨병자에게 강력히 추천되어진다.

발과 발목의 제한된 관절 움직임(limited joint mobility)은 정상 발 기능에 영향을 끼쳐 당뇨병환자의 족저압력을 증가시킨다고 제안되어져 왔다(Veves 등, 1995; Frykberg 등, 1998; Mueller 등, 1989). 비록 당뇨병에서 일어나는 비정적인 콜라겐과 연부조직의 비효소 당화작용(nonenzymatic glycation)이 결국 피부와 건, 인대, 관절낭을 두텁게 하고 따라서 조직의 유연성을 감소시키게 한다는 근거가 있지만 제한된 관절 움직임의 정확한 원인은 아직까지 잘 알려지지 않았다(Vlassara 등, 1986). 당뇨병환자의 경우 궤양이 없는 발보다 반대측의 궤양이 있는 발의 거골하 관절의 움직임이 감소된다고 보고하고 있다(Delbridge 등, 1988). 유사한 연구에서 발목의 배측굴곡과 거골하 관절의 관절범위가 정상인을 비교했을 때 족저궤양의 과거력이 있는 환자가 더 줄어들었다(Mueller 등, 1989). 게다가 엄지발가락의 궤양은 첫 번째 중족지절 관절의 관절가동범위의 감소와 연관이 있다(Birke 등, 1995). 그러나 제한된 관절 움직임과 발 궤양과의 관계가 단지 후향적 연구로 진행되었다는 것에 주목해야 한다. 따라서 이 관계는 제한된 관절범위와 상반되는 관절의 강직으로 인한 당뇨궤양을 해석할 수 있다. 발 궤양은 무게를 줄이기 위한 캐스트를 사용함으로써 치유된다(D'Ambrogio 등, 2003). 또한 환자들에게는 궤양을 치유하는 동안에 신체적 활동 수준을 낮추라고 제안 받는다. 이러한 두 가지 요인들은

관절 움직임에 손상을 주거나 영향을 주는 것으로 사료된다. 그러나 제한된 관절 움직임 이론에 대한 최근 근거는 족저근막의 두께가 정상군보다 당뇨병환자군에게 증가된다는 것이다. 게다가 족저근막의 두께와 중족지절관절의 운동성이 반비례 관계에 있으며 이는 연부조직과의 관련성이 관절 움직임에 영향을 주며 이는 발 하중을 증가시킨다는 것이다.

족저조직의 양과 질, 발 기형 그리고 제한된 관절움직임은 보행 시 비정상적인 역학적 발 하중의 지표이며 결국 이러한 요인들로 인해 높은 족저압력이 발생된다. 높은 압력부하의 경감은 인솔과 신발을 포함한 맞춤형 신발류(accommodative footwear)를 가장 추천할 만 하다. 변화된 발 모양에 적절하게 잘 맞춘 신발류를 이용한다는 것은 중요하다. 많은 환자에게서 일반 굽이 높은 신발(normal street footwear)은 이러한 기준을 충족시키진 못한다.

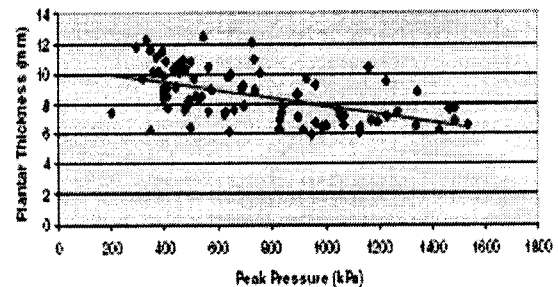


Figure 3. Relationship of plantar peak pressure and plantar tissue thickness at the second metatarsal head (MTH).

#### 4. 족저궤양의 생체역학적 고찰

당뇨발 궤양은 말초혈관병증, 발 기형, 증가된 발 압력 그리고 당뇨병 정도에 따른 다양한 병리생리학적 기전의 결과이다(Shaw와 Boulton, 1997). 신경병증과 혈관질환은 외상으로 인한 조직손상을 일으킨다. 외상은 높은 발 압력으로부터의 반복적인 스트레스 혹은 굳은살과 같은 내재적이거나 신발 내부의 이물질 혹은 잘 맞지 않은 신발

로 인한 피부마찰과 같은 외재적인 요인들 때문이며 이때 주로 발생하는 궤양 부위는 발가락, 전족부, 중족부의 족저부위, 발가락 등, 뒤꿈치 순이다(Reiber 등, 1999).

피부와 피부하 조직은 외부환경에서 전달되는 힘과 내재적인 힘이 상호작용되는 지점으로 역학적 연결고리이다. 궤양은 무감각한 피부표면에 반복적이고 과도한 압력이 가해진 것으로 조직이 손상 받는 상태이다. 만약 감각을 지닌 환자에게 동일한 압력이 일어난다면 통증이 느껴지면 압력을 피할 것이다. 그러나 보호감각의 손실을 지닌 환자는 과도한 압력 혹은 조직손상에 대한 주의가 없으므로 계속적인 국소 압력으로 인해 피부손상 혹은 궤양을 일으키게 된다. 대개 과도한 압력은 발 기형으로 인한다. 게다가 환자가 발상처부위로 오랜 시간 동안 걸게 되어 족저궤양을 치유하는데 방해가 되므로 역학적인 무게를 줄이는 것이 중요한 쟁점이다.

그러므로 과도하고 혹은 반복적인 압력은 피부 손상의 중요한 원인요소가 된다. 이러한 압력발생은 세 가지로 구성되어있다: (1) 압력지속시간의 증가(increased duration of pressures) (2) 압력크기의 증가(increased magnitude of pressure) (3) 압력 받는 횟수의 증가(increased number of pressures)(Mueller, 1992). 첫 번째 압력지속시간의 증가는 상대적으로 오랜 시간 동안 지속된 낮은 압력에 노출된 상태로 허혈을 일으키게 된다. 전통적인 실험으로부터 오랜시간 동안 허혈은 세포 죽음(cell death)과 상처를 발생시킨다(Kosiak, 1959). Figure 4는 시간과 압력의 관계가 반비례관계임을 보여준다. 높은 압력은 상대적으로 짧은 시간에 궤양을 일으키는 반면에 낮은 압력은 상대적으로 오랜 시간이 소요된다. 그러므로 궤양은 매우 낮은 압력으로도 발생할 수 있으나 며칠이 걸린다. 이러한 경우는 잘 맞지 않은 신발, 부적절한 보조기, 혹은 오랜 시간 동안의 침상 혹은 발 안정상태(footrest)에서의 뒤꿈치 눌림으로 인해 궤양이 발생한다. 조직손상의 두 번째 요인은 짧은 시간 동안 큰 압력으로 인한 것이다. 이 손상은 비교적 작은 피부부위에 큰 힘이 적용될

때 일어난다. 예를 들어 못 혹은 유리조각이 발에 박힌 채로 걸게 되면 이러한 현상이 일어난다. 이것은 감각이 없거나 약한 신경병증 당뇨환자에게 빈번히 발생된다. "족하수(foot slap)"도 이러한 기전을 따른다. 배측굴곡근이 약한 족하수는 뒤꿈치 닿기 후 전족부를 감속시키는 기능이 감소되게 된다(Landsman 등, 1995). 그러므로 뒤꿈치 닿기 후 전족부의 강하하는 속도의 조절은 단하지보조기를 사용함으로써 당뇨발 궤양의 예방을 할 수 있다고 제안하였다. 마지막으로 압력 받는 횟수의 증가는 역학적 피로증후군(syndrome of mechanical fatigue)을 발생시키며 이는 반복적인 압력으로부터 기인한다. 역학적 피로는 반복된 하중 때문에 본래성질(integrity)을 유지하려고 하는 최대 하 수준에서 구조 및 생물학적 조직의 실패로 정의된다. 이러한 손상은 신경병증 발의 피부 및 피부하 조직에서 일어나기 쉽다.

우리 몸은 피부가 손상받지 않도록 높은 압력 혹은 작은 외상의 반응으로 굳은살을 형성한다. 그러나 굳은살이 과도하면 오히려 높은 압력을 만들어내는 원인이 됨으로 굳은살이 생기면 반드시 제거해야 한다(Young 등, 1992; Pitei 등, 1999).

비록 전통적으로 높은 수준의 활동이 반복적인 스트레스로 간주되어 왔을 지라도 당뇨발 궤양의 위험요인을 고려해야 한다. 새로운 근거로 비활동적인 환자에게서 발궤양이 많이 발생된다는 것이다(Maluf와 Mueller, 2003; Lemaster 등, 2003). 게다가 이러한 위험요인이 활동수준과 연관되어 있는 것이 아니라 증가된 신체적인 활동의 다양성과 관련된다는 것이다. 이러한 것은 최근 발궤양의 생성과 연관되어 보고되고 있다(Armstrong 등, 2004).

과도한 압력이외에도 비정상적인 발 정렬 또한 족저압력에 영향을 준다. 전족부 혹은 후족부의 비정상적인 정렬을 지닌 발은 정상적인 발과 달리 다른 하중 패턴을 보여준다. 비당뇨 및 당뇨 평발(외번된 후족, 내전된 전족부, 그리고 낮은 족궁)은 비당뇨 정상발(rectus foot: 중립인 후족, 정상 아치 형태)보다 더 높은 족저압력을 보인다. 이것은 활성화된 궤양을 지닌 당뇨 환자군에서

굳은살 및 궤양위치와의 관련성에 관한 연구와 일치한다(Muller 등, 1990). 이 연구결과 비보상적인 전족부 내반(uncompensated rearfoot varus) 혹은 전족부 외반(forefoot valgus) 환자의 88%(17명 중 15명)가 첫 번째 혹은 다섯 번째 중족골두에 위치하였다. 유사한 연구에서 내번된 뒤꿈치를 지닌 군들은 외측 궤양, 반면에 외번된 뒤꿈치는 내측궤양과 관련하였다(Bevans, 1992)

결국 족저압력의 크기 뿐만 아니라 높은 압력의 기간, 압력 증가율 그리고 피부에 적용된 압력 빈도와 같은 여러 다른 요인들이 고려되어야 한다. 비정상적인 압력은 단지 당뇨의 영향 때문이 아니라 정상 발과 다른 특징적인 발 형태를 지닌 당뇨환자가 정상적인 형태의 발을 지닌 당뇨환자보다 높은 족저압력과 궤양을 생성한다는 가설은 합당하다.

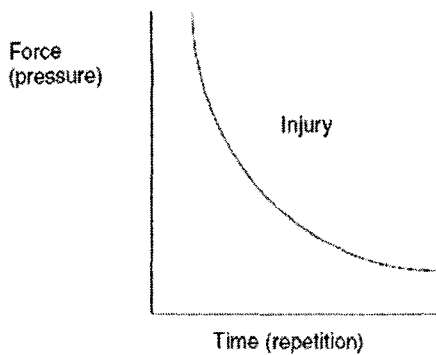


Figure 4. Inverse relationship between force (pressure) and time (or repetition).

### 5. 발 하중을 줄이기 위한 생체역학적인 방법들

족저궤양의 발병률과 족저압력을 줄이기 위한 예방관리는 인솔과 치료용 신발뿐만 아니라 굳은살 제거가 있다. 굳은살의 적절한 관리는 당뇨환자에게 중요하다. 굳은살은 빨리 재발되기 때문에 자주 제거되어질 필요가 있다. 몇몇 환자들은 3, 4주 마다 혹은 더 자주 제거할 필요가 있다. 통상적으로 당뇨발에 굳은살이 과도하게 형성이 되면 제거해야 되나 몇몇 선행 연구에서는 재발

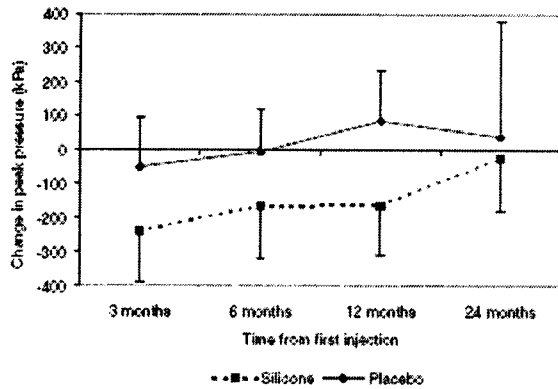
을 최소화하기 위한 방법에 대해 기술하였다(Pitei 등, 1999).

무작위 위약-대조군 임상실험(randomized placebo-controlled trial)에서 전통적인 족부의학 관리와 비교하여 신발 내 보조기를 착용했을 때 환자의 굳은살이 유의하게 적어졌다고 보고하였다(Colagiuri 등, 1995). 유사한 연구에서 당뇨병 환자에게 미세세포성 고무(microcellular rubber) 인솔 신발을 6개월 동안 착용했을 때 족저조직의 강직도와 족저압력 분포가 줄어들었다고 보고하였다(Charanya 등, 2004). 또한 이전 신경병성 궤양이 있었던 당뇨환자에게 굳은살 아래 콜라겐 주입을 8개월 동안 시행한 결과 굳은살 표면적이 줄어들었다(Foster 등, 1988).

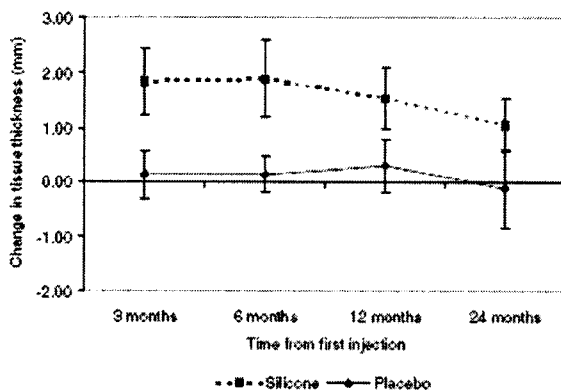
치료목적의 액체 실리콘 주입은 굳은살, 티눈(corn), 그리고 국소 통증부위에 쿠션 기능을 향상시킨다고 제안하였다(Balkin와 Kaplan, 1991). 당뇨병 환자를 대상으로 하는 무작위 위약-대조군 임상실험에서 주입된 액체 실리콘이 최대 족저압력과 굳은살 형성을 줄이고 실리콘 주입 부위에 족저조직의 두께가 증가되었다고 보고하고 있다(van Schie 등, 2000). 이러한 쿠션 기능은 주입 1년 후에도 유의하였으나 2년 후에는 쿠션 성질이 줄어들었다. 그래서 효능 촉진제(booster) 주입을 제한하였다(Figure 5, 6)(van Schie 등, 2002). 실리콘 주입에 대한 부작용은 아직까지 보고된 적이 없었고 이러한 과정에서의 안정성을 제공해주는 사례연구들이 있다(Balkin와 Kaplan, 1991). 그러나 액체 실리콘의 주입이 사실상 족저궤양을 줄일 수 있는지는 더 많은 실험들이 필요하다.

궤양 예방 및 발 압력을 줄이는데 다른 외과수술 방법들이 제안되어 왔다. 중족골두 절제(metatarsal head resection)는 대개 높은 압력에 노출된 중족골두 부위의 궤양이 있는 상처부위에 치료를 가속화시키는 수술방법이다. 비록 수술 6~8주 후에 16명의 환자에게 압력이 감소되었다고 하나 이러한 시행이 오랜 기간 동안 다른 부위에 최대압력이 이동한 결과인지는 잘 알려지지 않고 있다(Patel와 Wieman, 1994). 그러나 두 개의 다른 연구에서 수술 후 6~20개월 그리고 3~25개

월 동안 꺾양이 재발되거나 손상부위가 이동되지 않았다(Patel와 Wieman, 1994; Griffiths와 Wieman, 1990).



**Figure 5.** The mean changes in peak plantar pressure (kPa) from baseline at 3, 6, 12, and 24 months after injection with liquid silicone and saline (placebo).



**Figure 6.** The mean change in plantar tissue thickness from baseline at 3, 6, 12, and 24 months after injection with liquid silicone and saline (placebo).

아킬레스건 연장술(achilles tendon lengthening: ATL)은 당뇨병 전족부 꺾양을 지닌 당뇨병환자의 관절가동범위를 증가시키고 족저압력을 감소시키며 꺾양의 재발을 감소시킨다고 보고하였다(Armstrong 등, 1999; Lin 등, 1996; Mueller 등, 2004). 처음에는 배측굴곡 관절가동범위의 증가가 전족부 압력의 이차적인 감소를 야기시킨다고 하였으나 최근 연구에서는 비록 수술 후 족저 압력

이 줄어들더라도 8개월 후에 배측굴곡 관절가동 범위는 유지되지만 족저압력은 다시 증가된다고 보고하였다(Maluf 등, 2004). 종합적인 보행분석의 결과로부터 전족부 압력 감소는 증가된 관절가동 범위 보다는 보행 시 감소된 족저굴곡 파워(power)에 의한 것이라 결론을 내렸다(Maluf 등, 2004). 비록 8개월 후에 아킬레스건 연장술과 하지의 전면 접촉 캐스트(Total contact cast: TCC) 두 가지를 모두 경험한 환자는 전면 접촉 캐스트만 경험한 환자와 비교 시 더 낮은 신체적 기능을 보였다. 아킬레스건 연장술을 경험한 환자에게는 물리치료가 요구된다. 아킬레스건 연장술의 가장 중요한 합병증은 손상부위가 뒤꿈치로 이동한다는 것이다. 비록 매 수술시행이 위험요인이 되더라도 발목관절에 제한된 배측굴곡 및 재발성 꺾양을 지닌 환자에게 있어 일반적으로 이점이 있다(Mueller 등, 2004).

## 6. 족저 꺾양 치유를 위한 하중을 줄이는 보조기

당뇨성 족부꺾양부위의 하중을 줄이는 것은 성공적인 상처치유에 핵심이다. 많은 연구에서 다양한 보조기들이 하중을 줄이고 상처를 치유하는데 효과적이라고 보고하였다.

유용한 보조기들이 다양하게 있지만, 전면 접촉 캐스트는 일반적으로 당뇨성 상처부위에 무게를 줄이는데 기준이 되는 표준(reference standard)으로 간주되어왔다. 그러나 상처부위에 무게를 줄이는 가장 효과적인 방법이 전면 접촉 캐스트이지만 상처부위를 규칙적으로 확인하기 어렵다는 문제가 있다. 이것은 매번 확인 후 새로운 캐스트를 해야 한다는 것이다. 그러나 최근 연구에서는 매일 상처부위의 관찰 할 수 있도록 족저꺾양 부위에 치료 창(treatment window)이 있는 섬유유리 캐스트(fiberglass cast)의 성공적인 사용을 보고하였다(Caravaggi 등, 2000; Ha Van 등, 2003). 전면 접촉 캐스트의 사용은 급성감염 혹은 허혈성 발에 금기한다. 그럼에도 불구하고 Nabuurs-Franssen 등(2005)은 중증도의 허혈 혹은



감염 시 전면 접촉 캐스트의 사용이 효과적이라고 보고하고 있다. 그러나 말초동맥질환과 감염들 모두 존재하거나 뒤꿈치 궤양이 있는 경우는 전면 접촉 캐스트의 사용으로 예후가 좋지 않으므로 다른 대체 보조기 사용을 요구한다(Nabuurs-Franssen 등, 2005). 착탈식의 보행기(removable walker), Scotchcast 부츠, 절반크기의 신발(half shoes), 상처치유용 신발(healing shoes), 맞춤형 드레싱(accomodative dressing) 등과 같은 다른 보조기들은 전면 접촉 캐스트만큼 효과는 없지만 중요한 이점은 상처부위의 규칙적인 관찰이 가능하다는 점이다. 동시에 환자들이 하중을 줄이는 치료에 참여하지 않기 위해 보조기를 제거할 가능성이 있다는 단점이 있다.

Scotchcast boot는 발목으로부터 잘 패딩이 된 석고부츠가 절단되어 있고 발등 위에서 잘려짐으로써 착탈될 수 있도록 제작되었다. 궤양아래 창이 있고 부츠는 과도한 압력으로부터 궤양을 보호하는 동시에 환자 발의 운동성을 증가시키기 위해 캐스트 샌달로 착용한다(Chantelau 등, 1993).

전면 접촉 캐스트는 발바닥과 하지의 전면을 잘 성형하여 전족부에서 감소된 압력이 대부분이 캐스트 면을 따라 전달되거나 혹은 후쪽으로 이동된다(Figure 7)(Shaw 등, 1997). 다른 무게를 줄이는 방법보다 전면 접촉 캐스트의 이점은 현저한 압력 감소, 조직의 부동화, 그리고 부종 감소 효과가 있다. 그리고 환자의지에 의해 착탈할 수가 없다. 그러나 캐스트는 이차적인 손상을 일으킬 수 있고 제한된 특별한 드레싱 혹은 국소 약품들이 요구된다. 게다가 전문기술을 요하며 다른 치료법보다 많은 적용시간이 필요하다. 그러므로 항상 임상에서 실질적인 선택사항은 아니다. 전면 접촉 캐스트를 만드는 다양한 강도의 섬유유리 재질의 사용은 피부손상을 줄이고 환자의 수용성 만족을 향상시킴으로써 전통적인 전면 접촉 캐스트에서 볼 수 있는 부작용을 줄일 수 있다(Caravaggi 등, 2000). 따라서 전면 접촉 캐스트가 오랜 기간 동안 궤양을 지닌 젊은 환자에서 궤양위치가 증줄골에 위치해 있을 때 더욱 자

주 사용되어진다(Birke 등, 2002).

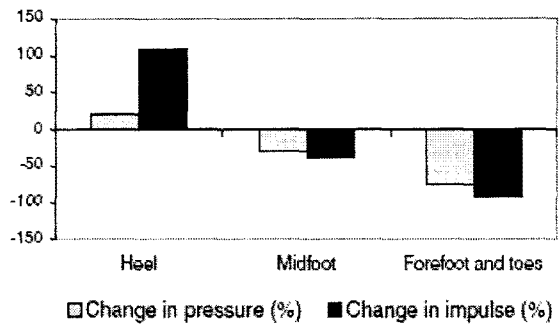


Figure 7. Change in mean peak plantar pressure and impulse (pressure-time integral) in the total contact cast as compared with the shoe condition.

최근에 궤양 치유하는데 있어서 하중 줄임의 중요성을 설명하는데 흥미 있는 결과들이 제시되었다. 전면 접촉 캐스트를 통한 압력경감은 염증 반응을 감소시키고 회복과정을 가속화하는데 신경병증 발 궤양의 과거력과 관계가 있다(Piaggese 등, 2003).

발 궤양을 치유하기 위한 하중을 줄이는 보조기 효능은 항상 무게지지 동안 착용 하나에 따라 달라진다고 제안하였다. 몇몇 연구에서는 착탈이 가능한 캐스트 보행기(cast walker)를 단지 전체 활동 중 28%동안 착용했을 때 치유속도가 거의 없다고 설명하였다(Armstrong 등, 2003). 이러한 결과들은 착탈이 불가능하게 하는 압박붕대 혹은 석고붕대로 둘러싼 착탈이 가능한 보행 캐스트인 즉각적인 전면 접촉 캐스트의 개발을 이끌어내었다. 최근의 예비실험에서는 착탈이 불가능한 전면 접촉 캐스트(irremovable TCC; iTCC)의 효능이 전면 접촉 캐스트와 같은 치유시간을 갖는다고 보고하였다. 반면에 다른 연구에서는 착탈이 불가능한 전면 접촉캐스트가 착탈이 가능한 캐스트 보행기보다 더 빠르게 치유된다고 보고하였다(Katz 등, 2005; Armstrong 등, 2005). 비록 전망있는 기술들이 전면 접촉 캐스트의 많은 단점을 보완하더라도 이러한 보조도구의 형태는 모든 환자에게 맞지는 않다는 사실에는 변화가 없다. 게다가 상처치유는 상처표면절제술, 감염치료 그리고

경우에 따라서 혈관재건술이 필요하다.

족관절-발 보조기(ankle-foot orthosis)는 궤양을 예방하고 상처치유동안 당뇨발의 하중을 줄이는 또 다른 형태이다(Landsman 등, 1997). 족관절-발 보조기는 지면과 발바닥 사이의 높은 속도의 충격을 막아준다. 즉 조직의 역학적 하중의 속도를 조절한다. 사실 대부분의 캐스팅 테크닉은 간접적으로 발목관절을 부동시킴으로써 전족부의 하중 속도를 줄인다. 궤양 치유와 예방에 있어서 족관절-발 보조기의 효능에 대한 단지 제한된 증거가 있다 그러나 예비시험은 궤양부위의 70~92%의 압력감소가 있으며 하중속도가 유의하게 감소된다고 하였다(Landsman 등, 1997).

발 하중을 줄여 궤양 예방 및 재발방지 그리고 상처치유를 증진키는 다양한 방법들이 보고되어 왔다. 비록 하중 줄이는 방법 중 전면 접촉 캐스트가 기준이 되더라도 다른 보조기 또한 궤양치유에 효과적이라고 보고하고 있다. 하중을 줄이는 방법의 선택은 환자와 임상적인 환경에 따라 좌우되므로 하중을 줄이는 다양한 방법들에 관한 더 많은 임상연구가 이루어지면 당뇨성 발 궤양의 예방 및 치료를 위한 임상결정을 향상시키는 데 도움을 줄 것이다.

### III. 결 론

일반적으로 당뇨발 궤양은 보행 시 족저면에 적용되는 반복적인 압력과 같은 비정상적인 역학적 하중의 결과이다. 당뇨병성 말초신경병증은 발 구조를 변화시키고 발 기능에 영향을 미치며 결국 당뇨발 궤양 생성의 위험인자인 족저압력을 증가시킨다. 당뇨발 궤양의 예방은 무감각한 발, 즉 위험한 발로써 인지하고 비정상적인 생체역학적인 하중으로부터 발을 보호함으로써 가능하게 된다. 비정상적인 족저압력은 굳은살 제거, 특별한 신발 및 인솔, 액체 실리콘 주입, 그리고 아킬레스 건 연장술 등 다양한 접근을 함으로써 줄일 수 있다. 당뇨 족저궤양 부위의 비하중은 염증반

응을 감소시키고 치유과정이 가속화시킬 수 있는 성공적인 상처치유의 중요한 요인이다. 족저압력의 경감은 맞춤형 드레싱, 캐스트 보행기, 족관절-발 보조기, 전면 접촉 캐스트, 그리고 착탈 가능하거나 가능하지 않은 캐스트 보행기를 포함한 다양한 비하중 방법들이 있다.

### 참고문헌

정도영, 박경희, 이강성. 한센병 환자의 족저궤양과 최대 족저압력과의 관계. 한국전문물리치료학회지. 2001;9(1):63-8.

Abouaasha F, van Schie CH, Griffiths GD et al. Plantar tissue thickness is related to peak plantar pressure in the high-risk diabetic foot. *Diabetes Care*. 2001;24(7):1270-4.

Ahroni JH, Boyko EJ, Forsberg RC. Clinical correlates of plantar pressure among diabetic veterans. *Diabetes Care*. 1999;22(6):965-72.

Andersen H, Gjerstad MD, Jakobsen J. Atrophy of foot muscles: a measure of diabetic neuropathy. *Diabetes Care*. 2004;27(10):2382-5.

Armstrong DG, Lavery LA. Elevated peak plantar pressures in patients who have Charcot arthropathy. *J Bone Joint Surg Am*. 1998; 80(3):365-9.

Armstrong DG, Lavery LA, Holtz-Neiderer K et al. Variability in activity may precede diabetic foot ulceration. *Diabetes Care*. 2004;27(8):1980-4.

Armstrong DG, Lavery LA, Kimbriel HR et al. VActivity patterns of patients with diabetic foot ulceration: patients with active ulceration may not adhere to a standard pressure off-loading regimen. *Diabetes Care*. 2003;26(9):2595-7.

Armstrong DG, Lavery LA, Wu S et al. Evaluation of removable and irremovable cast walkers in the healing of diabetic foot wounds: a randomized controlled trial. *Diabetes Care*. 2005;28(3):551-4.

Armstrong DG, Peters EJ, Athanasiou KA et al. Is there a critical level of plantar foot pressure to

- identify patients at risk for neuropathic foot ulceration? *J Foot Ankle Surg.* 1998;37(4):303-7.
- Armstrong DG, Stacpoole-Shea S, Nguyen H et al. Lengthening of the Achilles tendon in diabetic patients who are at high risk for ulceration of the foot. *J Bone Joint Surg Am.* 1999;81(4):535-8.
- Balkin S, Kaplan L. Injectable silicone and the diabetic foot: a 25-year report. *The Foot.* 1991;1(2):83-8.
- Bevans J. Biomechanics and plantar ulcers in diabetes. *The Foot.* 1992;2(3):166-72.
- Birke JA, Franks BD, Foto JG. First ray joint limitation, pressure, and ulceration of the first metatarsal head in diabetes mellitus. *Foot Ankle Int.* 1995;16(5):277-84.
- Birke JA, Pavich MA, Patout CA Jr et al. Comparison of forefoot ulcer healing using alternative off-loading methods in patients with diabetes mellitus. *Adv Skin Wound Care.* 2002;15(5):210-5.
- Boulton AJ, Hardisty CA, Betts RP et al. Dynamic foot pressure and other studies as diagnostic and management aids in diabetic neuropathy. *Diabetes Care.* 1983;6(1):26-33.
- Boyko EJ, Ahroni JH, Stensel V et al. A prospective study of risk factors for diabetic foot ulcer. The Seattle Diabetic Foot Study. *Diabetes Care.* 1999;22(7):1036-42.
- Brash PD, Foster J, Vennart W et al. Magnetic resonance imaging techniques demonstrate soft tissue damage in the diabetic foot. *Diabet Med.* 1999;16(1):55-61.
- Bus SA, Maas M, Cavanagh PR et al. Plantar fat-pad displacement in neuropathic diabetic patients with toe deformity: a magnetic resonance imaging study. *Diabetes Care.* 2004;27(10):2376-81.
- Bus SA, Yang QX, Wang JH et al. Intrinsic muscle atrophy and toe deformity in the diabetic neuropathic foot: a magnetic resonance imaging study. *Diabetes Care.* 2002;25(8):1444-50.
- Caravaggi C, Faglia E, De Giglio R et al. Effectiveness and safety of a nonremovable fiberglass off-bearing cast versus a therapeutic shoe in the treatment of neuropathic foot ulcers: a randomized study. *Diabetes Care.* 2000;23(12):1746-51.
- Cavanagh PR, Simoneau GG, Ulbrecht JS. Ulceration, unsteadiness, and uncertainty: the biomechanical consequences of diabetes mellitus. *J Biomech.* 1993;26(Suppl1):23-40.
- Cavanagh P, Ulbrecht J. Biomechanics of the foot in diabetes. 5th ed. St Louis (MO). Mosby. 1993:199-232.
- Chantelau E, Breuer U, Leisch AC et al. Outpatient treatment of unilateral diabetic foot ulcers with 'half shoes'. *Diabet Med.* 1993;10(3):267-70.
- Charanya G, Patil KM, Narayanamurthy VB et al. Effect of foot sole hardness, thickness and footwear on foot pressure distribution parameters in diabetic neuropathy. *Proc Inst Mech Eng [H].* 2004;218(6):431-43.
- Colagiuri S, Marsden LL, Naidu V et al. The use of orthotic devices to correct plantar callus in people with diabetes. *Diabetes Res Clin Pract.* 1995;28(1):29-34.
- Ctercteko GC, Dhanendran M, Hutton WC et al. Vertical forces acting on the feet of diabetic patients with neuropathic ulceration. *Br J Surg.* 1981;68(9):608-14.
- D'Ambrogio E, Giurato L, D'Agostino MA et al. Contribution of plantar fascia to the increased forefoot pressures in diabetic patients. *Diabetes Care.* 2003;26(5):1525-9.
- Delbridge L, Perry P, Marr S et al. Limited joint mobility in the diabetic foot: relationship to neuropathic ulceration. *Diabet Med.* 1988;5(4):333-7.
- Foster A, Eaton C, Dastoor N et al. Prevention of neuropathic foot ulceration: a new approach using subdermal injection of collagen [abstract]. *Diabet Med* 1988;5(Suppl 5):7.
- Frykberg RG, Lavery LA, Pham H et al. Role of neuropathy and high foot pressures in diabetic foot ulceration. *Diabetes Care.* 1998;21(10):1714-9.
- Garbalosa JC, Cavanagh PR, Wu G et al. Foot

- function in diabetic patients after partial amputation. *Foot Ankle Int.* 1996;17(1):43-8.
- Gefen A, Megido-Ravid M, Azariah M et al. Integration of plantar soft tissue stiffness measurements in routine MRI of the diabetic foot. *Clin Biomech.* 2001;16(10):921-5.
- Gooding GA, Stess RM, Graf PM et al. Sonography of the sole of the foot. Evidence for loss of foot pad thickness in diabetes and its relationship to ulceration of the foot. *Invest Radiol.* 1986;21(1):45-8.
- Griffiths GD, Wieman TJ. Metatarsal head resection for diabetic foot ulcers. *Arch Surg.* 1990;125(7):832-5.
- Ha Van G, Siney H, Hartmann-Heurtier A et al. Nonremovable, windowed, fiberglass cast boot in the treatment of diabetic plantar ulcers: efficacy, safety, and compliance. *Diabetes Care.* 2003;26(10):2848-52.
- Katz IA, Harlan A, Miranda-Palma B et al. A randomized trial of two irremovable off-loading devices in the management of plantar neuropathic diabetic foot ulcers. *Diabetes Care.* 2005;28(3):555-9.
- Klaesner JW, Hastings MK, Zou D et al. Plantar tissue stiffness in patients with diabetes mellitus and peripheral neuropathy. *Arch Phys Med Rehabil.* 2002;83(12):1796-801.
- Kosiak M. Etiology and pathology of ischemic ulcers. *Arch Phys Med Rehabil.* 1959;40(2):62-9.
- Landsman AS, Meaney DF, Cargill RS 2nd et al. High strain rate tissue deformation. A theory on the mechanical etiology of diabetic foot ulcerations. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1995; 85(10):519-27.
- Landsman AS, Sage R. Off-loading neuropathic wounds associated with diabetes using an ankle-foot orthosis. *J Am Podiatr Med Assoc.* 1997;87(8): 349-57.
- Lavery LA, Lavery DC, Quebedeaux-Farnham TL. Increased foot pressures after great toe amputation in diabetes. *Diabetes Care.* 1995; 18(11):1460-2.
- Lemaster JW, Reiber GE, Smith DG et al. Daily weight-bearing activity does not increase the risk of diabetic foot ulcers. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(7):1093-9.
- Maluf KS, Mueller MJ. Comparison of physical activity and cumulative plantar tissue stress among subjects with and without diabetes mellitus and a history of recurrent plantar ulcers. *Clin Biomech.* 2003;18(7):567-75.
- Maluf KS, Mueller MJ, Strube MJ et al. Tendon Achilles lengthening for the treatment of neuropathic ulcers causes a temporary reduction in forefoot pressure associated with changes in plantar flexor power rather than ankle motion during gait. *J Biomech.* 2004; 37(6):897-906.
- Mayfield JA, Reiber GE, Sanders LJ et al. Preventive foot care in people with diabetes. *Diabetes Care.* 1998;21(12):2161-77.
- Mueller MJ, Diamond JE, Delitto A et al. Insensitivity, limited joint mobility, and plantar ulcers in patients with diabetes mellitus. *Phys Ther.* 1989;69(6):453-9.
- Mueller MJ, Minor SD, Diamond JE et al. Relationship of foot deformity to ulcer location in patients with diabetes mellitus. *Phys Ther.* 1990;70(6):356-62.
- Mueller MJ. Etiology, evaluation, and treatment of the neuropathic foot. *Crit Rev Phys Rehabil Med* 1992;3:289-309.
- Mueller MJ, Sinacore DR, Hastings MK et al. Impact of achilles tendon lengthening on functional limitations and perceived disability in people with a neuropathic plantar ulcer. *Diabetes Care.* 2004;27(7):1559-64.
- Mueller MJ, Sinacore DR, Hastings MK et al. Effect of Achilles tendon lengthening on neuropathic plantar ulcers. A randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85-A(8):1436-45.
- Murray HJ, Young MJ, Hollis S et al. The association between callus formation, high pressures and

- neuropathy in diabetic foot ulceration. *Diabet Med.* 1996;13(11):979-82.
- Nabuurs-Franssen MH, Slegers R, Huijberts MS et al. Total contact casting of the diabetic foot in daily practice: a prospective follow-up study. *Diabetes Care.* 2005;28(2):243-7.
- Patel VG, Wieman TJ. Effect of metatarsal head resection for diabetic foot ulcers on the dynamic plantar pressure distribution. *Am J Surg.* 1994;167(3):297-301.
- Perry J. *Gait analysis; normal and pathological function.* Thorofare. Slack. 1992.
- Pham H, Armstrong DG, Harvey C et al. Screening techniques to identify people at high risk for diabetic foot ulceration: a prospective multicenter trial. *Diabetes Care.* 2000;23(5): 606-11.
- Piaggese A, Romanelli M, Schipani E et al. Hardness of plantar skin in diabetic neuropathic feet. *J Diabetes Complications.* 1999;13(3):129-34.
- Piaggese A, Viacava P, Rizzo L et al. Semiquantitative analysis of the histopathological features of the neuropathic foot ulcer: effects of pressure relief. *Diabetes Care.* 2003;26(11):3123-8.
- Pitei DL, Foster A, Edmonds M. The effect of regular callus removal on foot pressures. *J Foot Ankle Surg.* 1999;38(4):251-5.
- Quebedeaux TL, Lavery LA, Lavery DC. The development of foot deformities and ulcers after great toe amputation in diabetes. *Diabetes Care.* 1996;19(2):165-7.
- Reiber GE, Vileikyte L, Boyko EJ et al. Causal pathways for incident lower-extremity ulcers in patients with diabetes from two settings. *Diabetes Care.* 1999;22(1):157-62.
- Rozema A, Ulbrecht JS, Pammer SE et al. In-shoe plantar pressures during activities of daily living: implications for therapeutic footwear design. *Foot Ankle Int.* 1996;17(6):352-9.
- Shaw JE, Boulton AJ. The pathogenesis of diabetic foot problems: an overview. *Diabetes.* 1997; 46(Suppl2):58-61.
- Shaw JE, Hsi WL, Ulbrecht JS et al. The mechanism of plantar unloading in total contact casts: implications for design and clinical use. *Foot Ankle Int.* 1997;18(12):809-17.
- Suzuki E, Kashiwagi A, Hidaka H et al. 1H- and 31P-magnetic resonance spectroscopy and imaging as a new diagnostic tool to evaluate neuropathic foot ulcers in Type II diabetic patients. *Diabetologia.* 2000;43(2):165-72.
- Tudor-Locke C, Bassett DR, Jr. How many steps/day are enough? Preliminary pedometer indices for public health. *Sports Med.* 2004;34(1):1-8.
- van Deursen R. Mechanical loading and off-loading of the plantar surface of the diabetic foot. *Clin Infect Dis.* 2004;39(Suppl2):87-91.
- van Schie CH, Whalley A, Armstrong DG et al. The effect of silicone injections in the diabetic foot on peak plantar pressure and plantar tissue thickness: a 2-year follow-up. *Arch Phys Med Rehabil.* 2002;83(7):919-23.
- van Schie CH, Whalley A, Vileikyte L et al. Efficacy of injected liquid silicone in the diabetic foot to reduce risk factors for ulceration: a randomized double-blind placebo-controlled trial. *Diabetes Care.* 2000;23(5):634-8.
- Veves A, Fernando D, Walewski P, Boulton AJM. A study of plantar pressures in a diabetic clinic population. *The Foot.* 1991;1(2):89-92.
- Veves A, Sarnow MR, Giurini JM et al. Differences in joint mobility and foot pressures between black and white diabetic patients. *Diabet Med.* 1995;12(7):585-9.
- Vlassara H, Brownlee M, Cerami A. Nonenzymatic glycosylation: role in the pathogenesis of diabetic complications. *Clin Chem.* 1986;32(10 Suppl):B37-41.
- Young MJ, Cavanagh PR, Thomas G et al. The effect of callus removal on dynamic plantar foot pressures in diabetic patients. *Diabet Med.* 1992;9(1):55-7.
- Young MJ, Coffey J, Taylor PM et al. Weight bearing ultrasound in diabetic and rheumatoid arthritis patients. *The Foot.* 1995;5(2):76-9.