

Intelligente Kompressionsstrümpfe mit Memory-Polymer für chronische Venenerkrankungen

B. Kumar¹, J. Hu², N. Pan¹

¹ Division of Textiles, Biological & Agricultural Engineering, UC Davis, CA, USA

² Institute of Textiles and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong

▲ Die Kompressionstherapie gilt als Grundpfeiler der konservativen Therapie chronischer Venenerkrankungen wie Beinulzera, Ödeme, venöse Stase, venöse Hypertension etc. (1). In der Praxis wird die Kompression über einen Strumpf oder eine Bandage appliziert, um eine bestimmte Druckstärke auf das Gewebe des betroffenen Beines zur Reduktion der venösen Hypertension und zur Verbesserung des Blutflusses auszuüben. Dennoch haben konventionelle Kompressionsstrümpfe einige Defizite:

- a) Unterschiedliche Gründe erschweren es, die gewünschte Druckstärke zu erreichen, wie etwa verschiedene Beinattribute (Form, Größe) der Patienten oder unterschiedliche Eigenschaften (Zeit- und Temperaturabhängigkeit) des Materials (bei Strümpfen und Beinen).
- b) Ein Problem ist ebenso der mögliche Druckverlust aufgrund der Zeitabhängigkeit des Systemverhaltens (2, 3).
- c) Die Kompression findet passiv statt. Das bedeutet, dass ein Strumpf nur einen festgelegten Initialdruck ausübt und nicht in der Lage ist, einen Massageeffekt zu bewirken, der vor allem bei älteren und inaktiven Patienten zur Verbesserung des Blutflusses benötigt wird.

Formgedächtnispolymere

Die oben genannten Unzulänglichkeiten eines konventionellen Strumpfes verdeutlichen einen dringenden Bedarf für ein neuartiges, intelligentes Strumpfsystem zur Kompressionstherapie, das eine Modellierung des Kompressionsdruckes über externe Kontrolle erlaubt, um den Druck - wenn nötig - einfach korrigieren zu können. Die erwähnten Herausforderungen bei Kompressionsprodukten könnten bewältigt werden, wenn es eine Möglichkeit der Belastungskontrolle des Strumpfmateriales gäbe. In letzter Zeit wurden intelligente Materialien, Strukturen und Systeme für den menschlichen Bedarf entwickelt, die auf externe Stimuli reagieren. Unter ihnen haben besonders Formgedächtnispolymere während der letzten zehn Jahre das Forschungsinteresse von Instituten und Industrie angeregt, weil sie die Fähigkeit besitzen, sich nach dem sogenannten Programmierungsprozess jede Formverän-

Report on: Smart medical stocking using memory polymer for chronic venous disorders. *Biomaterials* 2016;75:174-181.

derung, der sie ausgesetzt sind, zu merken, sodass sie als Antwort auf einen externen Stimulus wie Wärme in die Originalform zurückkehren können (4). Abgesehen von der Formkontrolle haben diese Polymeretze das Potenzial, die interne Belastung ihrer Struktur über externes Aufwärmen auszugleichen (5); mit dieser Charakteristik kann eine intelligente Kompressionstherapie erreicht werden, so wie sie nach dem Laplace' Gesetz empfohlen wird (6, 7). In dieser Arbeit präsentieren wir die Fähigkeit intelligenter Strümpfe mit wärmesensitiven Formgedächtnispolymerfasern zur funktionellen Kompressionstherapie, welche Multifunktionalität inklusive selbstkontrollierter Drucknachjustierung an bestimmten Stellen ermöglichen sowie dynamische Kompressionsmassage und ebenso Wärmetherapie.

Herstellung des Materials

Für die Strumpfproduktion werden Formgedächtnispolymerfasern über ein Schmelzspinnverfahren hergestellt. Verwendet werden dafür Polyurethan-Polymer-Chips, die durch Blockpolymerisation mit Polytetramethylenetherglykol ($M_n=650$) als weiches Segment und 4,4'-Methylen-diphenyldiisocyanat und 1,4-Butandiol als hartes Segment hergestellt wurden. Der Übergangsbereich der Formgedächtnispolymer-Aktivierung liegt bei 30 bis 50 °C, nicht weit entfernt von Körpertemperatur, sodass eine einfache Aktivierung möglich ist. Zum Schluss wird mit einer Rundstrickmaschine ein intelligenter, schlauchförmiger Strumpf aus einem verschmolzenen Garn produziert, welches aus Formgedächtnispolymer- (18,6 tex) und Nylonfasern (18,9 tex) besteht. Um die Druckkontrolle durch den Strumpf zu demonstrieren, wurde ein zylindrisches Modell zur Strumpfabplikation verwendet. Die Druckmessung wurde mit einem Kikuhime™-Drucksensor durchgeführt und die Aktivierungstemperatur (T_g) der Strümpfe mit einer thermischen Kammer kontrolliert. Experimentelle Ergebnisse haben gezeigt, dass Memory-Strümpfe die Kontrolle oder das Einstellen des durch den Strumpf ausgeübten Druckes in angezogener Position

erlauben; ein zusätzlicher Druck (bis zu 50 %) konnte einfach durch Erwärmen des Strumpfes generiert werden. Durch Erhöhung der Temperatur und der Beanspruchung des Strumpfes wurde höherer Druck erzeugt (Abb. 1a). Der Strumpf zeigte auch die Fähigkeit, bei mehrfacher Nutzung den Druck zu reproduzieren bzw. wieder herzustellen (Abb. 1b). Es wurde ein Computermodell unter Verwendung der Gummielastizitätstheorie entwickelt und experimentell validiert, um den Druck des Strumpfes vorauszusagen (8). Der Druck kann ausgedrückt werden als Funktion der Belastungserholung (generiert in den Formgedächtnispolymer-Fasern), der strukturellen Parameter des Gewebes, der Größe und Form des umhüllten Bereiches sowie der angewandten Extension und Aktivierungstemperatur. Möglicherweise wird dieses etablierte Modell, wenn es wiederholt wird, den Entwicklungsprozess intelligenter Strümpfe steuern, um die erwünschte Kompression an menschlichen Körperbereichen zu erreichen.

Technische Herausforderungen

Natürlich gilt es in diesem Anfangsstadium einige technische Herausforderungen zu meistern, bevor dieser Strumpf ein sicheres und zuverlässiges Kompressionsprodukt wird. Die Aktivierungsenergie (Tg) der Formgedächtnispolymer-Fasern muss weiter kontrolliert werden, um eine einfache Aktivierung auch bei geringeren Temperaturbereichen zu erlauben. In der Praxis ist das Erwärmen des Strumpfes am Bein bis zu einer bestimmten Temperatur nicht einfach, und es bedarf unkomplizierter und effizienter Erwärmungsanlagen, die eine präzise Druckkontrolle sicherstellen. Die zukünftige Forschung muss all diese Herausforderungen angehen und ebenso die Leistungsfähigkeit des Strumpfes optimieren. Derartige Strümpfe könnten mehrere potenzielle Vorteile bei der medizinischen Kompressionstherapie bieten:

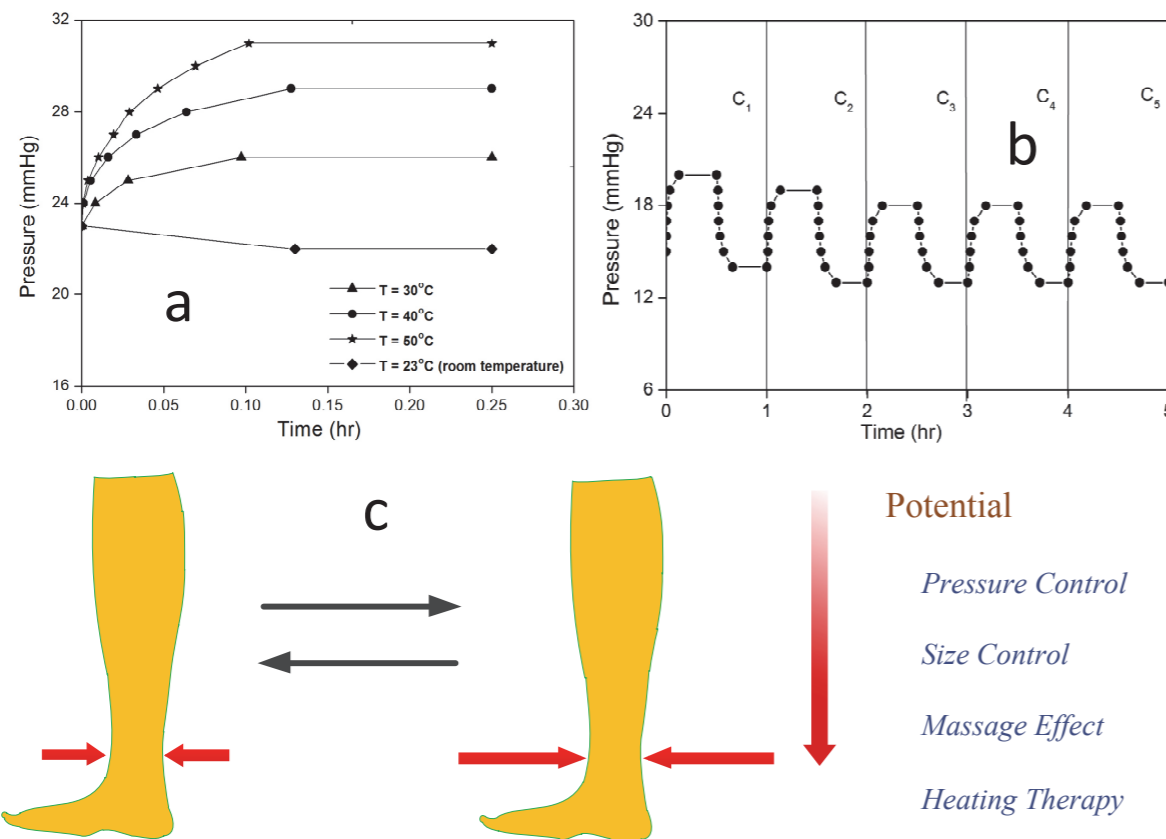


Abb. 1: a) Druckkontrolle der Memory-Strümpfe unter Verwendung kontrollierter Temperaturaktivierung. b) Ergebnisse der dynamischen Kompression über alternierende Wärme- und Kühlzyklen. c) Schema der Leistungsfähigkeit intelligenter Strümpfe: Gezeigt wird die Multifunktionalität inklusive dynamischer Kompression und Druckgradient.

- Der ausgeübte Druck der Formgedächtnispolymer-Strümpfe kann leicht durch Wärmestimulus erhöht werden. Bei Druckverlust des Strumpfes unter ein bestimmtes Ziellevel kann der Druck über Erwärmung wieder justiert werden, ohne die Strümpfe austauschen zu müssen. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Kompression über längere Dauer.
- In der heutigen Praxis benötigt man selbst beim gleichen Patientengut aufgrund von Extremitätengröße oder -form und Kompressionsdruck ein großes Strumpfsortiment. Die Temperatur-Druck-Nachjustierung unserer neuen Strümpfe wird definitiv das Strumpfsortiment reduzieren, das benötigt wird, um den benötigten Druck zu erreichen.
- Ebenso kann die Temperatur-Druck-Empfindlichkeit unserer neuen Strümpfe es dem medizinischen Personal erleichtern, Patienten Kompressionsstrümpfe anzuziehen. Vorteil für das leichtere Anziehen ist hierbei, dass anfangs niedrige Kompressionsklassen (KKL I oder II) und später höhere KKL (III) einfach durch Erwärmen erreicht werden.
- Aufgrund der Verbindung zwischen ausgeübtem Druck und Wärmestimulus des Formgedächtnispolymer-Materials ist es leicht möglich, Strümpfe mit Massageeffekt zu entwickeln, indem eine programmierte Wärmequelle ins System eingefügt wird. Ohne Zweifel wird dies den Ablauf der gegenwärtigen Kompressionspraxis verändern und die Behandlungskomplexität für das medizinische Personal und die Hersteller erleichtern, da die empfohlene Kompressionstherapie für jeden individuellen Patienten ermöglicht wird.

Literatur

- Partsch H. Compression for the management of venous leg ulcers: which material do we have? *Phlebology* 2014;29: 140-145.
- Kumar B, Das A, Alagirusamy R. Effect of material and structure of compression bandage on interface pressure variation over time. *Phlebology* 2013;29(6):376-385.
- Kumar B, Das A, Alagirusamy R. Study of the effect of composition and construction of material on sub-bandage pressure during dynamic loading of a limb in vitro. *Biorheology* 2013;50(1-2):83-94.
- Mather PT, Luo X, Rousseau IA. Shape memory polymer research. *Annual Review of Materials Research* 2009;39:445-471.
- Hu JL, Kumar B, Narayan HK. Stress Memory Polymers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 2015;53(13): 893-898.
- Kumar B, Das A, Alagirusamy R. An Approach to Determine Pressure Profile Generated by Compression Bandage Using Quasi-Linear Viscoelastic Model. *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the Asme* 2012;134(9).
- Kumar B, Das A, Alagirusamy R. Prediction of internal pressure profile of compression bandages using stress relaxation parameters. *Biorheology* 2012;49(1):1-13.
- Kumar B, Hu JL, Pan N. Smart medical stocking using memory polymer for chronic venous disorders. *Biomaterials* 2016;75:174-181.

Korrespondenzadresse

Bipin Kumar
 125 Everson, Division of Textiles
 Biological & Agricultural Engineering
 UC Davis, CA, USA 95616
 E-Mail: bipiniitd18@gmail.com

