

Igor B. Mekjavić¹, Martin Tomšič², Samuel Rodman³

Merjenje toplotne izolacije gorniških čevljev

Determination of Thermal Insulation of Hiking Shoes

IZVLEČEK

KLJUČNE BESEDE: gornišтво, čevlji, toplotna prevodnost

Razvit in izdelan je bil model stopala za določanje toplotne izolacije obuval. Model določa toplotno izolacijo desetih posameznih delov stopala – segmentov. Vsak posamezen segment je oblečen v bakreno pločevino, na katero sta pritrjena električni grelec in temperaturno tipalo. Toplotna izolacija posameznega segmenta je izračunana iz temperaturne razlike med segmentom in medijem, ki obkroža obuvalo, ter moči, porabljene za vzdrževanje konstante, vnaprej določene, tipične temperature segmenta. Primerjane so vrednosti, pridobljene s pomočjo modela stopala, in: a) vrednosti, izračunane iz hkratno merjenih temperaturnih razlik med segmenti modela stopala in okolico ter merjenih toplotnih tokov; b) vrednosti, pridobljene na enak način kot (a), vendar na človeškem stopalu. Vrednosti toplotne izolacije, določene z modelom stopala na oba zgoraj opisana načina, so primerljive. Opažena so bila odstopanja na določenih segmentih med modelom stopala in človeškim stopalom. Razlike so pripisane različni kakovosti stika med čevljem in modelom ter človeškim stopalom.

ABSTRACT

KEYWORDS: mountaineering, shoes, thermal conduction

A thermal foot manikin was developed for the determination of thermal insulation (I , $m^2 \cdot K/W$) of footwear. The thermal foot manikin calculates the thermal insulation of 10 individual segments of the foot. Each copper segment of the manikin contains an electric heater and a temperature sensor. Insulation at each segment is determined by accounting for the difference in temperature between the segment's surface and the surrounding medium, and the electrical power required by the segment's heater to maintain the segment's surface temperature at a pre-determined level under the prevailing conditions. The immersion insulation values obtained using the prototype Thermal Foot Manikin were compared with: a) measurements of thermal insulation based on the temperature difference between the segment's surface and water, and the heat flux, and b) measurements of thermal insulation based on the same principle as in (b), but with a human subject. The obtained values of thermal insulation were similar at all sites when determined with the Thermal Foot Manikin. Some regional differences were observed between the results obtained with a human foot and the manikin. These discrepancies were attributed to differences in the goodness-of-fit of the test boot.

¹ Prof. dr. Igor B. Mekjavić, Inštitut Jožef Stefan, Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Jamova 39, Ljubljana; Institute of Biomedical and Biomolecular Sciences, Department of Sports and Exercise Science, University of Portsmouth, St. Michael's Building, White Swan Road, Portsmouth, Velika Britanija.

² Dr. Martin Tomšič, univ. dipl. inž. el., Inštitut Jožef Stefan, Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Jamova 39, 1000 Ljubljana.

³ Dr. Samuel Rodman, univ. dipl. inž. str., Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana.

UVOD

Glede na to, da so gorniki med odpravami izpostavljeni nizkim temperaturam okolja, je izbor ustrezne zaščitne opreme velikega pomena (1–5). Oprema, ki ne zagotavlja zadovoljive toplotne izolacije, lahko povzroči kriotravme (npr. podhladitev, ozeblina in omrzline), ki so lahko za gornika usodne. Ker za proizvajalce zaščitnih oblek zaenkrat še ni pravnih zahtev, da kupcem posredujejo podatke o biofizikalnih lastnostih zaščitne opreme, gorniki ne morejo presojeti o ustreznosti opreme za določene okoljske razmere, niti ne morejo primerjati značilnosti opreme različnih proizvajalcev. Atestiranje zaščitnih oblek je trenutno formalno pravno urejeno le za industrijsko in vojaško opremo, predvsem za opremo, ki se uporablja pri reševanju.

Ozeblina in zmrzline prstov na nogah so najbolj pogoste posledice nezadostne toplotne zaščite obutve oziroma neprimerne obutve za določene razmere v okolju. Cilj pričujoče raziskave je razviti tako imenovano toplotno stopalo (angl. *thermal foot manikin*), ki bo omogočalo ocenjevanje statičnih in dinamičnih biofizikalnih značilnosti obutve v različnih simuliranih okoljih (6). V pričujočem delu predstavljamo prototip toplotnega stopala za merjenje statične vrednosti toplotne izolacije.

METODOLOGIJA

Struktura toplotnega stopala

Toplotno stopalo (slika 1) je izdelano iz plastične mase (gume). Površina toplotnega stopala je razdeljena na 10 segmentov: notranja stran stopala, zunanja stran stopala, podplat, nart, peta, palec, sprednji del goleni tik nad gležnjem, zadnji del goleni tik nad gležnjem, meča.

Vsak segment je sestavljen iz fleksibilnega grelnika (maksimalna moč 10 W), senzorja temperature (angl. *resistance temperature detector*, RTD – platina, PT 1000) in bakrene površinske plasti (debelina 0,5 mm). Kabelska povezava povezuje vseh deset segmentov na toplotnem stopalu z merilno-regulacijskim sistemom. Vhodno-izhodni sistem FieldPoint (National Instruments, ZDA), napajalnik in računalnik (Compaq) sestavljajo merilno-regulacijski sistem za merjenje temperatur in električnih moči (P, W).

Princip delovanja toplotnega stopala

Pri atestiranju določene obutve postavimo obuto toplotno stopalo v klimatsko sobo, ki simulira mrzlo okolje. Merilno-regulacijski



Slika 1. Toplotno stopalo. Na levi sliki so razvidni ogrevani bakreni segmenti. Za ovrednotenje delovanja toplotne noge smo na šestih segmentih izračunali toplotno izolacijo s pomočjo neodvisne metode, tako da smo merili razliko v temperaturi med površino stopala in vode ter toplotni tok na površini segmenta (dva merilka toplotnega toka sta razvidna; eden na nartu, drugi na notranjem delu stopala). Na desni sliki je prikazano toplotno stopalo obuto v testnem pohodnem čevlju.

sistem vzdržuje temperaturo vsakega segmenta pri željeni (simulirani kožni) temperaturi. Poleg površinske temperature posameznih segmentov (T_s) merimo tudi temperaturo okolja (T_o) in temperaturo podlage. Merilno-regulacijski sistem meri tudi električno moč, ki je potrebna za vzdrževanje stalne temperature segmentov. Iz izmerjenih razlik temperatur in električnih napajalnih moči grelcev posameznih segmentov računalnik sproti izpisuje izračunano toplotno izolacijo (I , $m^2 K/W$) za vsak segment posebej, po naslednji formuli:

$$I = (S \Delta T) / P \quad (\text{enačba 1})$$

I = toplotna izolacija ($m^2 K/W$) segmenta

S = površina segmenta (m^2)

ΔT = $T_s - T_o$ ($^{\circ}C$) pri določenem segmentu

T_s = temperatura segmenta ($^{\circ}C$)

T_o = temperatura okolja ($^{\circ}C$)

P = električna napajalna moč (W) grelca v segmentu

Ovrednotenje toplotnega stopala

Delovanje toplotnega stopala smo ovrednotili z ocenjevanjem toplotne izolacije pohodnega

čevlja (Alpina d. d.) na drug, neodvisen način. Za izračun toplotne izolacije smo merili toplotni tok (Q , $W \cdot m^{-2}$) in temperaturo površine (Heat Flux Transducers, Concept Engineering, ZDA) na šestih segmentih. S temi meritvami smo toplotno izolacijo izračunali z naslednjo formulo:

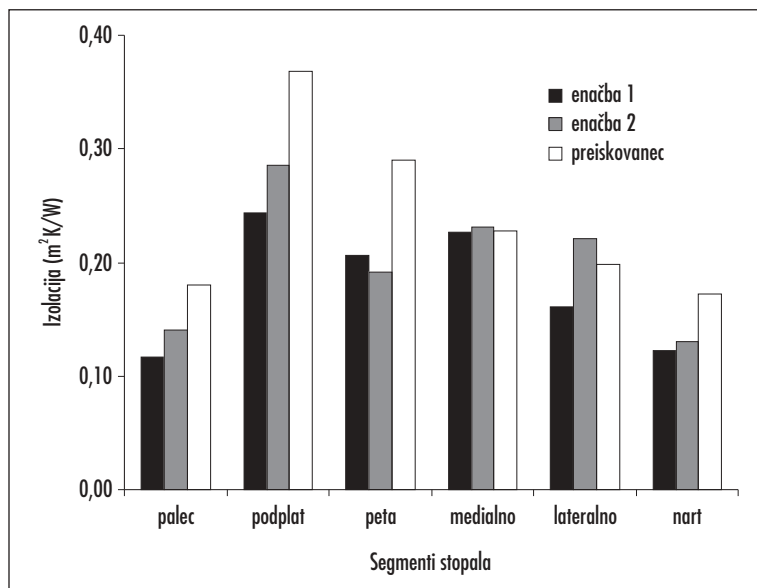
$$I = \Delta T / Q \quad (\text{enačba 2})$$

Q = toplotni tok iz površine segmenta (W/m^2)

Primerjali smo izračun toplotne izolacije na podlagi toplotnega stopala (enačba 1) in na podlagi izmerjenih toplotnih tokov (enačba 2). Toplotno izolacijo, izračunano na podlagi poskusov s toplotnim stopalom, smo primerjali z izračunom toplotne izolacije istega čevlja na prostovoljcu. Merilce toplotnega toka smo na prostovoljčevem stopalu namestili na enaka mesta kot pri toplotnem stopalu.

Postopek določanja toplotne izolacije

Pri določanju toplotne izolacije smo v testni čevlji obuto toplotno stopalo oziroma obuto stopalo prostovoljca zaščitili z zelo tanko



Slika 2. Vrednosti toplotne izolacije na šestih segmentih stopala. Izolacijske vrednosti so bile pridobljene na podlagi: a) razlik v temperaturi med površino segmentov in vodo, ter električne napajalne moči grelcev v segmentih (enačba 1); b) razlik v temperaturi med površino segmentov in vodo, ter toplotnega toka na površini segmentov (enačba 2); c) na enak način kot v (b), vendar s stopalom prostovoljca.

polietilensko vrečo. Tako zaščiteno obuto stopalo oziroma nogo smo potopili v vodo, ki je imela 15°C. Med 20-minutno potopitvijo smo vsako drugo minuto izvajali meritve. Po 15 minutah so temperature površine segmentov na toplotnem stopalu, kot tudi kožne temperature noge, postale stabilne. Toplotno izolacijo čevlja smo računali, ko so bile dosežene stabilne temperature.

REZULTATI

Vrednosti toplotne izolacije, pridobljene s toplotnim stopalom ali izračunane z neodvisno metodo, so si bile podobne (slika 2) za vseh šest segmentov. Vrednosti so se gibale od 0,12 m² K/W na palcu do 0,24 m² K/W na podplatu s toplotnim stopalom oziroma od 0,13 m² K/W do 0,29 m² K/W za neodvisno metodo. Testna obutev ni zajemala goleni in meč.

Kot je razvidno s slike 2, so se vrednosti toplotne izolacije istega čevlja, ki smo jih izračunali med meritvami s stopalom prostovoljca, dokaj ujemale za naslednje segmente: notranja stran stopala, zunanja stran stopala in nart. Znatne razlike med meritvami s toplotnim stopalom in stopalom prostovoljca smo opazili za palec, podplat in peto.

RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK

Izračun statične toplotne izolacije pohodnega čevlja z merilno-regulacijskim sistemom je

bil primerljiv z izračunom na podlagi vzporedne, vendar neodvisne metode, ki temelji na meritvah toplotnega toka. Izračuni toplotne izolacije merilno-regulacijskega sistema so se v treh segmentih ujemali z izračunom na podlagi meritev stopala prostovoljca. Pri treh segmentih je bila izračunana toplotna izolacija znatno večja od vrednosti, pridobljenih z obema metodama s toplotnim stopalom.

Pri testiranju s prostovoljcem so bile izolacijske vrednosti za palec, podplat in peto znatno večje od izolacijske vrednosti na notranji in zunanji strani stopala in na nartu. Opažene razlike pripisujemo razliki v kvaliteti stika med čevljem in toplotnim stopalom ter med čevljem in stopalom prostovoljca.

Preiskava s prostovoljcem je pokazala potencialno velikost odstopanja vrednosti toplotne izolacije zaradi anatomskih razlik stopala med prostovoljci. Zaradi tega mora biti ovrednotenje čevlja s prostovoljci opravljeno na večjem številu prostovoljcev. Toplotno stopalo dovoljuje bolj objektivno ocenjevanje, ki ni vezano na razlike v anatomiji stopala med prostovoljci. Rezultati različnih preiskav z istim toplotnim stopalom so primerljivi.

ZAHVALA

Raziskavo (projekt L2-3377) sofinancirata Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport ter Alpina d. d.

LITERATURA

1. Carlson LD. *Man in Cold Environment. A Study in Physiology*. Fairbanks Alaskan Air Command, Arctic Aeromedical Laboratory, Ladd Air Force Base; 1954.
2. Fourn L, Hollies NR. *Clothing. Comfort and Function*. New York: Marcell Dekker; 1970.
3. Hollies NR, Goldman RF. *Clothing Comfort. Interaction of Thermal, Ventilation, Construction and Assessment Factors*. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers Inc.; 1977.
4. Mekjavic IB, Banister EW, Morrison JB. *Environmental Ergonomics. Sustaining Human Performance in Harsh Environments*. London: Taylor and Francis; 1988.
5. Newburgh LH. *Physiology of Heat Regulation and the Science of Clothing*. New York: Hafner Publishing Co.; 1968.
6. Santee WR, Endrusick TL. Biophysical evaluation of footwear for cold-weather climates. *Aviat Space Environ Med*, 1988; 59: 178-82.