

발포체의 경도가 신발 중창의 압축-반발 특성에 미치는 영향

박 차 철

동서대학교 응용공학부

(2004년 6월 29일 접수, 2004년 8월 9일 수정 및 채택)

The Effects of Hardness on the Compression-Rebounding Properties of Shoe Midsole

Chacheol Park

Department of Footwear Engineering, Dongseo University,
san 69-1, churey-dong, sasang-gu, Pusan, 617-716, Korea

(Received June 12, 2004, Revised and Accepted August 9, 2004)

요약 : 신발중창용으로 사용되는 IP, PH 그리고 PU 발포체의 경도가 발포체의 압축응력, 회복 응력, 압축저장에너지, 압축손실에너지 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 발포체의 종류에 무관하게 경도의 증가에 따라 발포체의 압축력, 압축 회복력, 압축 에너지 손실률, 반발탄성률, 굴곡력은 높은 값을 나타내었다. 압축력, 압축에너지 손실율은 IP 발포체의 경우 가장 높은 값을 나타내었으며, 회복력과 압축에너지 저장율은 PU 발포체가 높게 나타났다.

ABSTRACT : Compression and rebounding properties of IP(injection phylon), PH(phylon) and PU(polyurethane) foams were studied. The compression stress, rebounding stress, loss compression energy and storage compression energy of foams were decreased with increasing hardness of foams. The compression stress, loss compression energy of IP foams were lower than those of PH and PU. Rebounding stress and storage compression energy of PU foams were higher than those of IP and PH. The compression stress and rebounding of PH foam were lower than those of IP and PU.

Keywords : foam, midsole, compression, rebounding

I. 서 론

고분자 재료는 점탄성적 특성과 함께 가소성을 지니고 있기 때문에 고분자 재료에 응력이 가해져서 변형이 일어나게 된 후 응력을 제거하여도 일어난 변형이 100% 회복되지 않고 미소 변형이 영구변형으로 남거나 장시간에 걸쳐 회복되게 된다. 따라서 고분자 발포체를 일반적인 측정 조건하에서 압축-회복력을 측정하는 경우, 발포체의 압축력(E_c)이 회복력(E_R)보다 큰 값으로 나타난다. 발포체

를 압축하는 과정에서 발포체에 가해지는 에너지와 압축된 발포체가 회복하는 과정에서 발포체가 외부에 대하여 내어놓는 에너지인 회복력의 차이가 압축 에너지 손실(ΔE)에 해당된다. 즉 발포체 외부에서 응력을 가하여 압축한 후 외부 응력을 제거하여 회복하는 과정에서 발생하는 압축-회복에 따른 에너지 손실은 항상 $\Delta E > 0$ 으로 나타나게 된다. 따라서 신발의 착용시 일어나는 반복 압축에서 발포체의 압축 및 회복에서 수반되는 에너지 손실에 의한 운동에너지 손실을 최소화하기 위한 재료의 설계도 필요하다.¹⁻⁴

신발을 신고 달리기 등의 동작을 하는 경우 등

† 대표저자(e-mail : ccpark@dongseo.ac.kr)

작에 필요한 전체에너지는 인체에너지와 신발의 반발력 및 지면반발력의 합으로 나타난다. 신발을 신고 동일한 동작을 반복하는 경우 동작에 필요한 전체에너지는 일정하다. 또한 동작을 수행하는 지면이 마루바닥처럼 일정한 조건이면, 동작에 필요한 전체에너지는 일정한 값을 갖게 되며, 동작에 필요한 인체에너지와 신발 및 지면의 반발력은 동작이 일어나는 환경에 따라 변하게 된다. 따라서 동작에 필요한 인체에너지는 신발 및 지면의 반발력의 함수로 의존하게 된다. 동일한 동작을 반복하는 경우 동작을 위하여 동작 피로도를 감소시키기 위하여 인체가 소모해야하는 에너지를 최소로 하기 위하여서는 지면반발력을 크게 하던지 신발의 회복력을 크게 하는 것이 유리하다.^{5~9}

운동역학적인 면에서 고려하면 특정 동작을 수행하는 동안 발이 지면에 닿는 순간 신발의 일부분이 압축되며, 신발이 압축되면서 신발에 E_c 만큼의 에너지가 가해진다. 다음 동작으로 연결되면서 발이 지면으로부터 멀어지면 압축되었던 신발재료가 회복되기 시작하며, 신발재료가 회복되면서 신발이 E_R 만큼의 에너지로 발을 지면으로부터 밀어내게 된다. 따라서 동일한 압축력을 지니는 발포체인 경우 ΔE 가 적을수록 반발력이 큰 것을 의미하며 운동역학적인 면에서 유리한 재료라고 할 수 있다. 즉 압축력이 큰 경우 운동 동작에서 충격흡수 능력이 저하되기 때문에 충격흡수 능력 측면에서는 가능하면 압축력이 작을수록 인체보호 차원에서 유리하다. 따라서 동일한 압축력을 지닌 발포체인 경우 ΔE 가 적을수록 E_R 가 큰 것을 의미하며, ΔE 가 적은 재료일수록 운동역학적으로 우수한 재료라고 할 수 있다.^{10~14}

신발 중창으로 PH, IP 와 PU 발포체가 많이 사용되어지고 있으나 중창의 중요한 기능인 발포체의 압축특성과 회복력에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 보고 되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 신발용 미드솔로 사용되는 발포체의 충격 및 반발특성을 이해하기위하여, 경도가 서로 다른 PU, IP 및 PH 발포체를 제조하여 각 발포체의 경도가 발포체의 압축력, 회복력, 압축에너지손실, 압축에너지 저장율 등에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험

1. 발포체 제조

실험에 사용된 발포체는 신발산업에서 범용으로 사용하는 방법으로 발포체를 제조하였다. 제조된 발포체의 경도는 45, 52, 59, 66으로 조정하였다. PU 발포체는 성형을 위한 몰드내에 첨가제를 부가한 폴리올(국내 동성화학, MR-83320)과 이소시아네이트(국내 동성화학, MP-3200)를 1700 rpm으로 혼합하고, 60 g/sec의 토출속도로 몰드에 투입하여 성형 후 탈형하여 시편으로 사용하였다.

PH 발포체는 비닐아세테이트의 함량이 22 mol%, MI가 2.0인 EVA수지를 사용하여 충전제 및 발포조제 및 기타첨가제를 첨가하여 100℃에서 30 rpm으로 10분간 혼련하고 숙성시킨 후 표면온도가 80℃인 롤 밀에서 가교제, 발포제를 혼합 분산시킨 후 시트상태로 만들고 24시간 상온방치 한다. 안정화된 시트를 150℃로 예열된 몰드내에서 140-150 kg/cm²의 압력으로 50분간 가압한 후 순간적으로 압력을 제거하여 스폰지를 제조한다. 제조된 스폰지의 표면을 스카이빙한 후 크기에 맞게 재단 한 후 온도 145℃, 압력 75-800 kg/cm²의 프레스내에서 8분간 성형하고 냉각프레스로 이동시켜 12분간 냉각한 후 파이론 시편을 제조하였다.

IP 발포체는 비닐아세테이트의 함량이 28 mol%, MI가 3.0인 EVA수지를 사용하여 충전제 및 발포조제 및 기타첨가제를 첨가하여 100℃에서 30 rpm으로 10분간 혼련하고, 표면온도가 80℃인 롤 밀에서 가교제, 발포제를 혼합 분산시킨 후 금형내에 사출하여 시편으로 제조하였다.

2. 특성 측정

경도 45, 52, 59, 66으로 제조한 PU, PH 및 IP 발포체를 23±2℃, 상대습도 50%로 유지되는 항온항습기에 12시간 이상 보관하여 시편을 안정화시킨 후 특성을 측정하였다.

발포체의 압축-회복 특성은 만능인장시험기(Instron사 4466)으로 지름 28.8 mm, 높이 20 mm 원기둥형 시편으로 5 mm/min속도로 50% 압축률로 압축-회복을 반복하여 시편을 압축-회복하여 압축력과 회복

력의 응력-변형률 곡선을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 발포체의 경도가 압축-회복 응력 특성에 미치는 영향

PU 발포체를 50% 압축율로 압축후 회복시키는 경우 압축-회복에 따른 응력 곡선을 Figure 1에 나타내었다. 전반적으로 경도가 증가함에 따라 소재의 압축-회복 응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은, 일반적으로 재료의 가교도가 증가하면 탄성율이 증가하는 현상과 같이, 경도가 높은 발포의 경우 재료내의 높은 가교로 인한 재료의 탄성을 증가에 기인하는 것으로 이해된다. 그리고 PU 발포체의 경도가 증가함에 따라 압축력과 회복력의 차이인 히스테리시스 현상이 더욱 현저하게 나타났다.

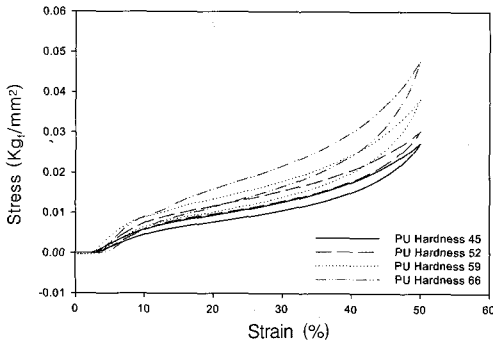


Figure 1. Compression stress-strain curves for PU foams with different hardness.

2. 발포체의 경도가 압축력에 미치는 영향

신발 미드솔용 재료인 PU, IP 및 PH 발포체의 10% 압축율에서의 압축력을 Figure 2(a)에 나타내었다. 전반적으로 경도가 증가함에 따라 소재의 압축력이 증가하는 경향을 나타내었다. 각 소재에 따른 압축력은 PH < PU < IP 순서로 높은 값을 나타내었으며, 경도가 높아짐에 따라 각 소재별 압축력의 차이가 증가하는 경향을 나타내었다. 발포체

의 압축 질감에 해당하는 10% 압축율에서의 압축력이 IP 발포체가 가장 크게 나타난 것으로 보아 IP 발포체의 압축 질감이 가장 딱딱하게 느껴질 것으로 예상할 수 있고, 신발 완제품의 착화실험에서도 IP발포체로 신발 미드솔을 제작한 경우 가장 딱딱한 느낌을 주는 것으로 나타났다. PU 발포체의 경우 10% 압축율에서 압축력이 PH 발포체 보다 높게 나타나고 있어 PU 발포체는 PU 고유의 촉감은 부드러우나 압축 질감은 IP보다 낮은 것으로 나타났다.

4회 반복 압축한 후 측정된 10% 압축율에서의 각 발포체의 압축력을 Figure 2(b)에 나타내었다. 4회 반복 압축 후에도 1회 측정에서와 동일하게 PH

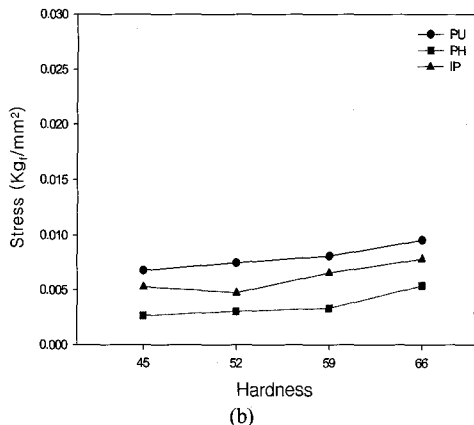
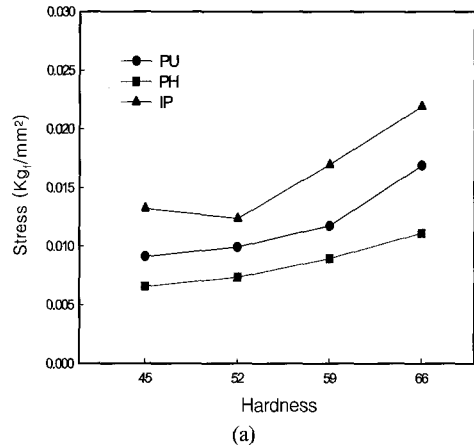


Figure 2. Compression stress at 10% strain of three type of foam with different hardness.; (a) 1st run, (b) 4th run

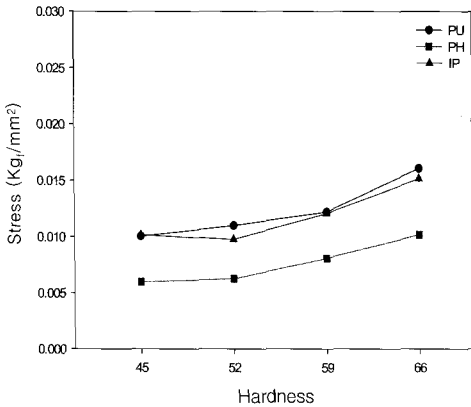


Figure 3. Compression stress at 20% strain of three type of foam with different hardness.

< PU < IP 순서로 높은 압축력을 나타내었으나 각 소재별 압축력의 차이는 1회 측정보다 적게 나타났다.

신발을 착용하여 운동을 하는 경우 미드솔의 평균 압축율에 해당하는 20% 압축율에서 측정된 발포체의 압축력을 Figure 3에 나타내었다. 각 발포체의 압축력은 전반적으로 경도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, PH < PU ≤ IP 순서로 높은 값을 나타내었다. IP와 PU 발포체의 압축력은 큰 차이를 나타내지 않았으나 PU와 PH 발포체의 압축력은 IP와 PU 발포체보다 큰 차이를 나타내었다. IP 및 PU 발포체의 경우 경도가 증가함에 따라 소재의 압축력이 현저하게 증가하는 경향을 나타내었으나 PH 발포체의 경우 경도 증가에 따른 압축력은 완만하게 증가하는 현상을 보였다. 신발을 착용하여 운동을 하는 경우 미드솔의 평균 압축율에 해당하는 20% 압축율에서의 IP와 PU 발포체의 압축력이 크게 나타난 것으로부터 IP 및 PU 발포체로 제작된 신발 솔의 경우가 PH 발포체로 제작된 신발용 미드솔의 경우보다 착용시 압축 반발력이 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

3. 발포체의 경도가 반발특성에 미치는 영향

각 경도별로 제작된 PU, IP 및 PH 발포체의 10% 압축율에서 압축후 회복될 때의 반발력을 Figure 4에 나타내었다. 발포체를 10% 압축율로 압

축한 후 회복시키는 경우 발포체의 반발력은 20% 압축율에서의 압축력과 대조적으로 PU 발포체의 경우가 IP 보다 높은 값을 나타내었다. 즉 10% 압축율에서의 압축력은 IP의 경우가 PU 발포체보다 높은 값을 나타내었으나, 반발력은 IP 발포체의 경우가 PU 발포체의 경우보다 오히려 낮게 나타났다. IP 발포체가 압축저항력은 크지만 압축에 대한 회복력은 PU 발포체보다 낮은 것으로 나타났다. 전체적으로 각 소재별 회복력은 PH < IP < PU 순서로 높은 값을 나타내었으며, IP 발포체의 회복력은 PH 발포체의 회복력 보다 조금 높은 값을 나타내었다. 그러나 PU 발포체의 회복력과 IP 발포체의 회복력의 차이는 IP와 PH 발포체의 경우 보다 큰 차이를 나타내었다. IP 및 PU 발포체의 경우 경도가 증가함에 따라 소재의 회복력이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 PH 발포체의 경우 경도가 증가에 따른 회복력의 증가는 미소하였다. 발포체의 경도가 증가하여도 각 소재별 압축-회복력의 차이는 일정한 경향을 나타내었다. PU 발포체는 세가지 소재 중 가장 높은 압축-회복력을 나타내었다. 이러한 현상은 PU발포체의 경우 발포체의 탄성을 부여하는 분자쇄가 유연성이 높은 지방족 폴리에스테르로 구성되어있으며, 중부가반응시 가교가 동시에 일어나 균일한 가교반응으로 재료의

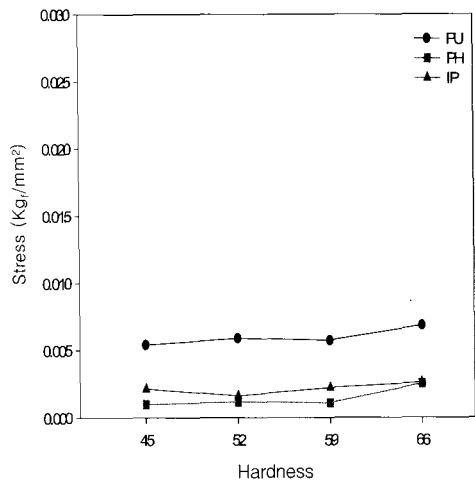


Figure 4. Rebounding stress at 10% strain of three types of foam with different hardness.

변형에 대한 회복특성이 우수한 것에 기인하는 것으로 이해할 수 있다.

각 경도별로 제작된 신발 미드솔용 PU, IP 및 PH 발포체를 압축한 후 회복될 때 20%의 압축율에서의 반발력을 그림 Figure 5에 나타내었다. 50%로 압축 후 회복되는 과정에서 20%의 압축율에서 측정된 각 발포체의 회복력은 전체 경도에서 PH < IP < PU 순서로 높게 나타났으며, 각 소재별 회복력의 차이는 비슷한 경향을 나타내었다. 세 가지 소재에서 발포체의 경우 경도가 증가함에 따라 소재의 회복력이 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다. 발포체의 20% 압축율에서의 압축력이 약 0.01~0.025 kg/mm²으로 나타났으나 회복력은 약 0.004~0.012 kg/mm²으로 압축력에 비하여 매우 낮게 나타났다.

동작에 필요한 전체에너지는 동작에 필요한 인체에너지와 신발의 회복력에 의존하게되며, 신발의 회복력이 큰 값을 갖게 되면 상대적으로 동작에 필요한 인체에너지는 적게 필요로하게 된다. 따라서 동일한 경도에서 소재의 압축회복에 대한 회복력이 클수록 운동역학적으로 우수한 소재라고 할 수 있으며, 연속되는 동작을 수행하는 인간에게 에너지적인 면에서 매우 유리하다고 할 수 있다. 따라서 에너지 적으로 우수한 운동화를 설계하기 위

하여서 소재의 압축 회복력에 대한 정보가 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 신발 착화시 나타나는 압축에 해당하는 20% 압축율에서의 회복력이 PU 발포체가 높게 나타난 것으로부터 운동역학 차원에서 고려하면 신발 미드솔 용 세가지 소재 중 PU 발포체로 제작된 신발솔의 경우가 IP 및 PH 발포체로 제작된 경우 보다 가장 유리한 것으로 볼 수 있다.

4. 발포체의 경도가 압축-회복 에너지 손실에 미치는 영향

압축율 20%에서 발포체의 압축력과 회복력의 차이인 압축에너지 손실을 Figure 6에 나타내었다. 전반적으로 발포체의 압축에너지 손실은 경도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, PH 및 PU 발포체의 경우 경도에 따른 압축에너지 손실은 크게 변화하지 않는 경향을 나타내었다. IP 발포체가 가장 높은 압축에너지 손실을 나타내었다. 20% 압축율에서 상호 유사한 압축력을 나타낸 PU 와 IP 발포체의 경우 압축에너지 손실은 PU 발포체가 IP 발포체보다 현저히 낮은 압축에너지 손실을 나타내고 있어 운동역학적인 면에서 PU 발포체가 IP 발포체보다 우수한 소재라고 할 수 있다.

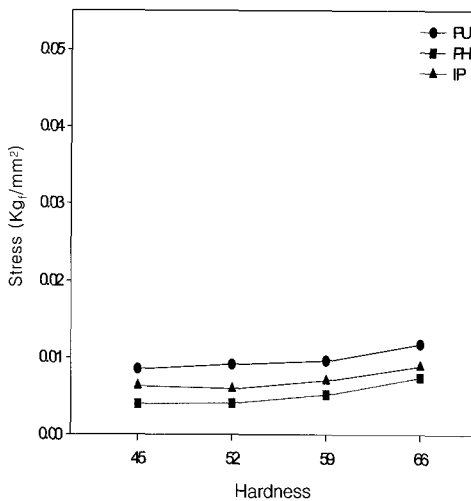


Figure 5. Rebounding stress at 20% strain of three type of foam with different hardness.

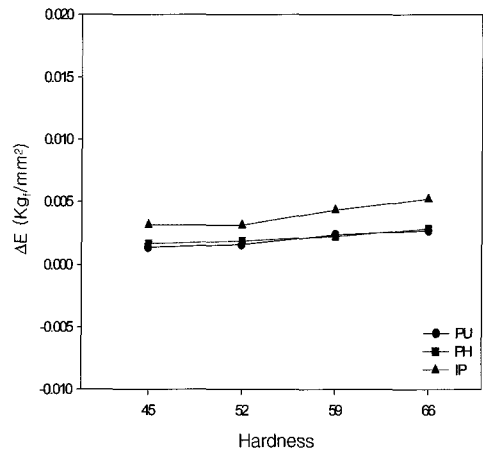


Figure 6. Loss Compression energy at 20% strain of three types of foam with different hardness.

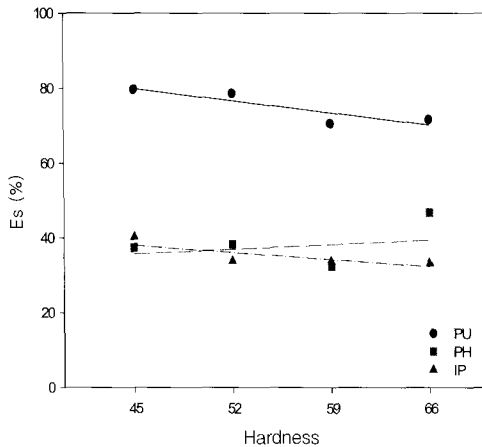


Figure 7. Storage Compression energy at 20% strain of three types of foam.

5. 발포체의 경도가 압축-회복 에너지 저장율에 미치는 영향

발포체의 압축에 사용된 에너지 중 발포체가 회복되면서 외부로 내놓는 에너지의 비를 압축 에너지 저장율(E_s)로 정의할 수 있으며, 압축을 20%로 측정할 경우 발포체의 경도가 압축에너지 저장율에 미치는 영향을 Figure 7에 나타내었다. 압축 에너지 저장율은 PU 발포체의 경우에는 경도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, PH 및 IP 발포체는 경도에 무관하게 일정한 값을 나타내었다. 압축 에너지 저장율은 측정 횟수와 무관하게 $IP \leq PH < PU$ 순으로 증가하는 경향을 나타내었으며, PU 발포체의 경우가 가장 높고 IP 발포체의 경우가 에너지 저장율이 가장 낮게 나타났다.

IV. 결 론

발포체의 종류에 무관하게 경도의 증가에 따라 발포체의 압축력, 압축 회복력, 압축 에너지 손실률, 반발탄성률, 굴곡력은 높은 값을 나타내었다. 압축력, 압축에너지 손실율은 IP 발포체의 경우 가장 높은 값을 나타내었으며, 회복력과 압축에너지 저장율은 PU 발포체가 높게 나타났다. 사람이 보행을 하게 되면 인체가 지면에 닿은 후 다음 동작

으로 연결하기 위해 인체에너지와 신발의 회복력에 의존하게 되며, 따라서 동일 경도에서 소재의 압축에 대한 회복력 및 압축 에너지 저장율이 가장 높은 PU를 중창소재로 사용하는 것이 운동역학적 에너지 측면에서는 가장 효과적인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. N. C. Hilyard, "Mechanics of Cellular Plastics", Macmillan Publishing Co., Chap. 1, New York, (1982).
2. N. C. Hilyard and A. Cunningham, "Low Density Cellular Plastics", Chapman & Hall Co., Chap 1, New York, (1994).
3. N. C. Hilyard. "Mechanics of Cellular Plastics", Macmillan Publishing Co., Chap. 2, New York, (1982).
4. L. J. Gibson, M. F. Ashby, "Cellular Solids", Oxford, New York (1988)
5. 곽창수, "운동화 중창의 경도가 주행시 발바닥의 압력분포와 충격흡수에 미치는 영향", 서울대학교 대학원 박사학위논문, p.25-42, (1993).
6. 김태형, "에어로비스 하이키시 운동화 중창의 경도에 따른 지면반력의 변화 및 발의 안정성에 관한 연구", 서울대학교 대학원 석사학위논문, p.7-17, (1996).
7. 오준석, "운동화의 기능학적 특성에 관한 연구", 연세대학교대학원 석사학위논문, p.9-16, (1984).
8. Abramson, E. "Zur Kenntnis der Merchnik des Mittelfusses." *Arch. Physiol*, **51**, 175 (1927).
9. Andreasson, G., Peterson L. "Effect of shoe and surface characteristics on lower limb injuries in sport s." *Journal of Sports Biomechanics*, **2**(3), 202 (1986).
10. Betts, R.P., Franks, C.J., Duckworth, T., and Burke, "Statics and dynamic foot pressure measurements in clinical orthopedics." *J. Med. and Bio. Eng. and Comput.*, **18**, 574 (1980).
11. Cavanagh ,P.R., "Ground reaction force in distance running." *Journal of Biomechanics*, **13**, 397 (1980).
12. Ebbeling, "The energy cost and the lower xtremity

- in shoes of different heel height." *American Journal of Sports Medicine*, 21, 507 (1994).
13. Hennig, E.M. and Milani, T.L., "In-shoes pressure distribution for running in various types of footwear." *Journal of Applied Biomechanics*, 11, 299 (1995).
 14. Hiroshi, A., Masafumi, M., and Koichi, Y., "A simple method of measuring the footsole pressure of normal subjects using prescale pressure detecting sheets." *Journal of Biomechanics*, 16, 157 (1983).