

일정 응력 반복압축이 발포체의 압축 특성에 미치는 영향

박 차 철

동서대학교 응용생명공학부

(2005년 9월 26일 접수, 2005년 11월 14일 수정 및 채택)

The Effect of Repetitive Compression with Constant Stress on the Compressive Properties of Foams

Chacheol Park

Faculty of Applied Engineering, Dongseo University,
san69-1, churey-dong, sasang-gu, Pusan, 617-716, Korea

(Received September 26, 2005, Revised & Accepted, November 14, 2005)

요약 : 스포츠화 중창용으로 사용되는 PU, IP 및 PH 등 세가지 종류의 발포체를 일정한 응력으로 반복압축한 후, 반복압축에 따른 발포체의 압축력, 영구변형, 회복력 등에 미치는 영향을 고찰하였다. 발포체의 반복압축에 따른 최대압축력은 PU의 경우는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났으나 IP의 경우 최대 압축력은 크게 저하되었다. PU는 반복압축에 따른 발포체의 영구 변형은 미소하였으나 PH의 경우 반복압축횟수가 증가함에 따라 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다. 경도 45인 발포체를 5만회 반복압축 한 경우 발포체의 영구변형은 PU<IP<PH 순서로 증가하는 경향을 나타내었다. PU 발포체의 경우 각 압축률에서의 압축력과 회복력은 반복 압축에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었으나, IP 및 PH의 경우 반복압축에 따라 발포체의 압축력과 회복력이 감소하는 경향을 나타내었다.

ABSTRACT : To study the compressive stress, recovery force and permanent strain of foams for footwear midsole, polyurethane(PU), phylon(PH) and injection phylon(IP) foams were repetitively compressed with constant compressive stress. Maximum compressive stress of PU did not decrease with repetitive compression on the constant compressive stress, but that of IP largely decreased. Engineering strain of foams were formed by repetitively compressing the three types of foam. The engineering strain of PU was smaller than that of IP and PH. Compressive stress and recovery force of IP and PH at certain strain were decreased with repetitive compression, but that of PU was not noticeably changed.

Keywords : foam, compression, strain, midsole, footwear.

I. 서 론

스포츠화를 착용하는 경우 착용감은 안창과 중창에 사용되는 발포체의 압축력에 크게 의존하며, 걷거나 달리기 등의 동작에 필요한 인체에너지는 스포츠화의 반발력 및 지면 반력에 의존하게 된다.

스포츠화에 있어서 반발력과 충격력에 크게 영향을 미치는 스포츠화의 부품은 중창이다. 스포츠화의 중창은 고분자 재료를 발포 및 성형하여 제조하며, 중창의 반발력이나 충격력은 중창용 고분자 발포체의 압축 및 반발특성 등에 의존하게 된다. 스포츠화 중창용으로는 phylon 발포체(PH), injection phylon 발포체(IP) 및 polyurethane 발포체(PU)가 많이 사용되어지고 있다. PH와 IP의 경우 poly

† 대표저자(e-mail : ccpark@dongseo.ac.kr)

(ethylene-co-vinylactate)(EVA)수지를 가교 발포시켜 성형하며, PU는 지방족 폴리올과 이소시아네이트의 중부가 반응으로 중합과 동시에 발포성형하여 중창을 제조한다.¹

고분자 발포체의 특성은 셀을 구성하는 고분자의 종류, 셀의 형태, 밀도, 결정화도, 성형방법 등의 함수로 나타난다.^{2,6} 통상적으로 스포츠화에 사용되는 발포체는 사용온도 범위에서 반발탄성을 나타내어야 소정의 기능을 발휘할 수 있으며, 고분자의 결정화도가 낮으면 발포체가 유연하며 반발탄성이 우수해진다.² 고분자 재료의 유리전이 온도가 사용 환경에 해당하는 온도 보다 높은 경우, 분자쇄의 운동성이 제한되어 고분자 발포체로서의 높은 충격흡수나 반발탄성 등과 같은 고유한 특성을 지닐 수 없게 된다.

고분자 발포체를 일반적인 조건하에서 압축-회복력을 측정하는 경우 발포체의 압축력이 회복력보다 크게 나타나며, 압축력과 회복력의 차이인 에너지 손실은 항상 영보다 크게 된다. 따라서 고분자 발포체에는 에너지 손실에 해당하는 소성변형 즉 영구변형이 잔존하게 되며, 발포체에 반복압축이 가해지는 경우 영구변형이 누적되어 발포체의 압축 특성의 저하를 초래할 수 있다.^{7,10}

박은 스포츠화의 중창으로 사용되는 세가지 발포체의 종류 및 경도가 발포체의 압축 및 반발특성에 미치는 영향과 온도에 따른 충격 및 반발 특성을 보고하였다.^{1,11} 일반적으로 발포체는 반복압축횟수가 증가함에 따라 압축력, 충격흡수력, 반발탄성 등의 특성이 저하되며, 이들 특성이 저하되는 정도는 재료의 종류, 화학구조 등에 의존하게 된다. 특히 스포츠화는 사용 중 다수의 반복 압축을

수반하며 따라서 신발재료로 사용되는 발포체의 반복압축에 대한 내피로 특성이 매우 중요하다.

그러나 반복 압축에 따른 스포츠화 중창용 발포체의 피로특성에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 보고 되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 스포츠화용 중창으로 사용되는 발포체의 종류 및 경도에 따른 내 압축피로 특성을 고찰하기 위하여 발포체에 일정한 응력으로 반복압축을 가한 후 반복압축에 대한 발포체의 압축력, 회복력, 충격력 및 반발탄성 등을 측정하였다.

II. 실험

1. 발포체 제조

PU는 폴리올(국내 동성화학 MR-8320)과 이소시아네이트(국내 동성화학 MP-3200)를 혼합 후 성형하여 발포체를 제조하였다. PH는 비닐아세테이트의 함량이 22 mol%, 용융지수가 2.0인 EVA를 발포제 및 기타조제를 사용하여 1차 발포한 발포체를 가열압착 성형하여 파이론 시편을 제조하였다.¹ IP는 비닐아세테이트의 함량이 28 mol%, 용융지수가 3.0인 EVA수지를 사용하여 충전제 및 발포조제 및 기타첨가제를 첨가하여 사출하여 시편으로 제조하였다. PU, IP 및 PH는 경도 45±2, 52±2, 59±2 및 66±2로 제조하였으며, 제조된 각 발포체의 특성은 Table 1과 같다.

2. 반복압축

반복압축은 표준상태(온도 23±2℃, 상대습도 65±2%)에서 자체 제작한 반복압축기를 사용하여 지름 28.8 mm, 높이 20 mm 원기둥형의 시편을 일정한 압

Table 1. Compression Set and Specific Gravity of PU, IP and PH foams

Hardness	45			52			59			66		
	Cs ¹⁾	Sp ²⁾	Re ³⁾	Cs	Sp	Re	Cs	Sp	Re	Cs	Sp	Re
PU	15	0.36	32	15	0.37	27	16	0.38	27	17	0.38	28
IP	72	0.21	50	72	0.21	46	73	0.22	45	68	0.22	41
PH	70	0.16	36	68	0.17	38	68	0.19	36	67	0.20	33

1) Cs : compression set(%) at 50℃ for 6 hrs, 2) Sp : specific gravity at 25℃, 3) Re : rebound resilience(%) at 25℃.

축응력으로 5만회 반복 압축하였다. 반복압축기의 압축응력은 25 N/cm² 및 40 N/cm²으로 각각 설정하고, 반복 압축속도 50 rpm으로 50000회 까지 반복 압축하였다. 일정횟수 반복압축 후 10분간 상온에서 방치하여 회복시킨 후 만능인장시험기로 압축 특성을 측정하였다.

3. 특성 측정

경도 45, 52, 59, 66으로 제조한 PU, PH 및 IP를 23±2℃, 상대습도 65%에서 특성을 측정하였다. 영구압축줄임율은 시편을 지름 30±0.05 mm, 두께 10 mm인 원기둥을 50%로 압축하여 50℃에서 6시간 압착한 후 시편을 압축 장치에서 꺼내 실온 중에서 방치하여 냉각 후 측정하였다. 영구변형은 반복 압축 후 10분간 방치 후 반복압축 전과 후의 발포체의 높이 차이로 계산하였다. 발포체의 압축-회복 특성은 만능인장시험기(Instron사 4466)로 지름 28.8 mm, 높이 20 mm 원기둥형 시편에 대해 압축-회복을 5 mm/min 속도로 50% 압축률 범위에서 시편의 압

축 응력-변형을 곡선을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 발포체의 형태적 특성

경도 52로 제조된 PU, IP 및 PH의 전자현미경 사진을 Figure 1에 나타내었다. 전반적으로 안정되고 균일한 셀을 지니고 있으며, PU의 경우 PH 및 IP에 비하여 원형의 셀 형태를 지니고 있다. 그리고 PH가 IP 보다 미세하고 균일한 셀로 형성된 것으로 나타났다. Figure 2에 5만회 반복 압축한 PU, IP 및 PH의 전자현미경 사진을 나타내었다. 반복 압축 후에는 전체적으로 셀의 형태가 찌그러져 있는 것으로 나타났다. PU의 경우 셀의 형태가 타원 형태로 변형되어 있는 것을 관찰할 수 있었으며, IP의 경우 셀이 압축되어 크기가 감소한 것을 관찰할 수 있었다. PH는 1차 발포체를 150℃에서 압축성형하여 제조하는 성형과정에서 이미 셀의 변형이 일어나 있기 때문에 차이가 적게 나타났다.

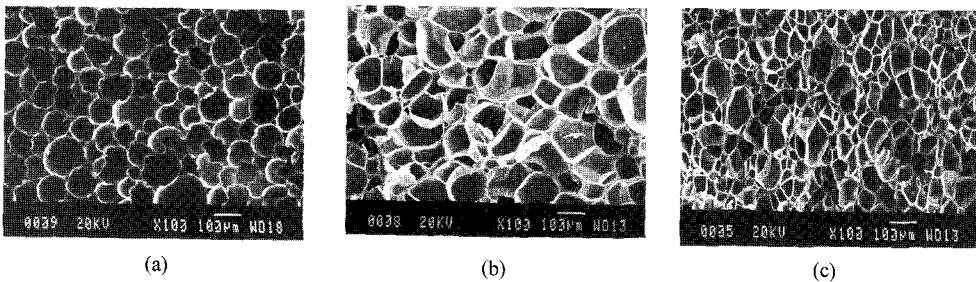


Figure 1. Scanning electron micrographs of PU(a), IP(b) and PH(c) foam with 52 hardness.

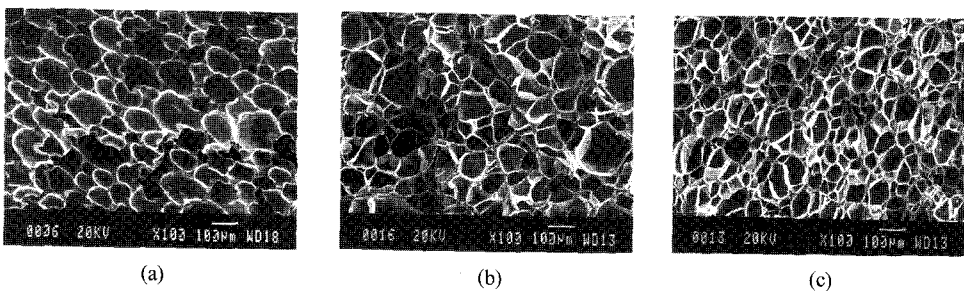


Figure 2. Scanning electron micrographs of PU(a), IP(b) and PH(c) foam(hardness 52) repetitive compressed for 50,000 cycles.

발포체의 반복압축에 따른 셀 크기의 변형으로부터 반복압축에 따른 영구변형이 예상되며, 영구변형의 크기는 PU 보다 IP나 PH가 현저하게 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

2. 반복압축 응력이 발포체의 압축력에 미치는 영향

통상적으로 운동화를 착용하고 달리기 등의 등속운동을 하는 경우 운동화에 일정한 하중으로 압축이 가해지며, 운동화에 가해지는 하중은 운동 속도 및 착용자의 몸무게에 의존하게 된다. 일정한 응력으로 신발에 반복 압축을 하는 경우 반복 압축응력이 발포체의 압축력에 영향을 미치게 된다. 경도 52로 제조된 발포체를 압축응력을 25 N/cm²와 40 N/cm²로 5만회 압축한 경우 반복압축이 압축력(50% 압축률)에 미치는 영향을 Figure 3에 나타내었다. PU(Figure 3(a))의 경우 최대압축력이 약 250 N이었으며, 25 N/cm²로 반복 압축하여도 반복압축 따른 압축력은 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 경도 52로 제조된 IP(Figure 3(b))의 경우 최대 압축력 216 N이었으나 압축응력 25 N/cm²로 5만회 반복압축한 후의 발포체의 최대 압축력은 약 168 N으로 나타났다. 그리고 압축응력 40 N/cm²로 5만회 반복압축한 후의 최대 압축력은 약 147 N으로 압축응력 25 N/cm²에 비하여 압축력의 크게 저하되었다. PH(Figure 3(c))의 경우도 IP 발포체와 유사한 경향을 나타내었다.

3. 반복압축 하중이 발포체의 영구변형에 미치는 영향

일반적인 운동조건하에서 운동화 중창의 경우 10~20% 정도의 압축률로 압축되어지는 것으로 알려져 있다. 경도52로 제조된 세 가지 발포체를 압축응력 25 N/cm²와 40 N/cm²로 5만회 반복압축한 발포체의 영구변형을 Figure 4에 나타내었다. PU(Figure 4(a))의 경우 일정하중으로 5만회 반복 압축하여도 발포체의 영구변형에 큰 변화를 나타내지 않았다. 그러나 IP 및 PH의 경우 반복압축 횟수 1,000까지는 반복압축 횟수가 증가함에 따라 완만하게 증가하였으나, 반복압축 횟수 1,000회 이상에서는 반복압축에 따른 발포체의 영구변형이 현저하게 증가하는 현상을 나타내었다. PU의 경우 5만회 반복압축에 따른 영구변형이 2% 미만이었으나 IP(Figure 4(b))나 PH(Figure 4(c))의 경우 25 N/cm²로 반복압축한 경우 10% 전후의 영구변형을 나타내었으며, 40 N/cm²로 반복압축 한 경우에는 약 20% 정도까지의 영구변형을 나타내었다. PU에 비하여 IP 및 PH의 압축에 대한 영구변형이 크게 나타나는 현상은, PU 발포체의 경우 중합과정에서 균일한 가교결합이 동시에 진행되기 때문에 고분자 사슬의 탄성이 우수하고 따라서 외부 응력에 의한 변형에 대한 회복력이 우수함에 비하여 IP 및 PH의 경우 에틸렌과 비닐아세테이트로 이루어진 열가소성 고분자를 발포성형단계에서 가교하여

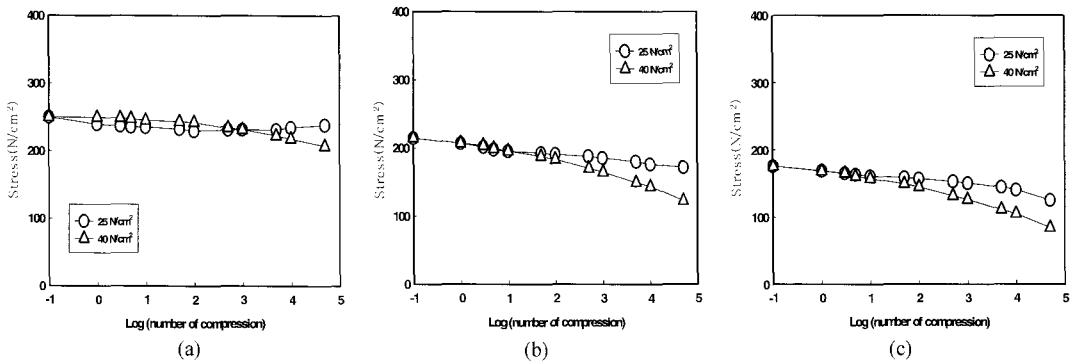


Figure 3. The Effect of repetitive compression on the compressive stress at 50% strain of PU(a), IP(b) and PH(c) foams(hardness 52) compressed with constant stress.

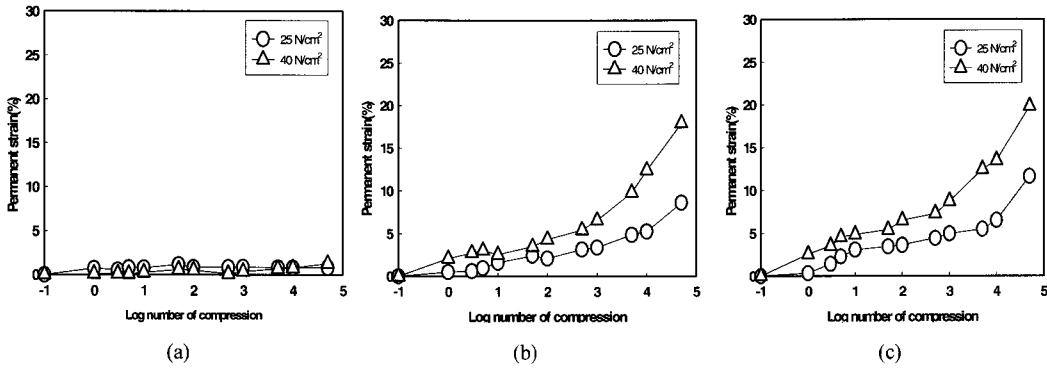


Figure 4. The Effect of repetitive compression on Permanent strain of PU(a), IP(b) and PH(c) foams(hardness 52) compressed with constant compressive stress of 25 N/cm² and 40 N/cm².

탄성을 부여하기 때문에 PU에 비하여 탄성회복 성능이 낮기 때문으로 이해된다. 따라서 반복압축에 따른 발포체의 특성유지에는 IP 및 PH 보다 PU의 경우가 보다 유리할 것으로 예측된다.

4. 발포체의 종류 및 경도가 영구변형에 미치는 영향

발포체를 일정한 압축응력으로 반복압축한 경우 발포체의 수축 특성을 확인하기 위하여, 경도 45, 52, 59 및 66으로 제조된 PU 및 PH를 5만회까지 반복압축에 따른 각 시편의 영구변형의 변화를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5(a)에 나타난 바와 같이 PU의 경우 압축횟수가 증가하여도 반복압축에 따른 영구변형은 크게 증가하지 않았다. 실험 범위 내에서 PU의 영구변형은 약 1%정도에서 평형상태를 나타내었으며, 경도에 따른 차이는 거의 나타나지 않았다. 즉 PU의 경우 반복압축에 5만회 정도의 반복압축을 가하여도 발포체의 수축이 거의 없으며, 발포체의 특성이 대부분 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Figure 2의 발포체의 전자현미경 사진과 Figure 4의 영구변형에서도 유사한 경향을 나타내었다. Figure 5(b)에 나타난바와 같이 PH의 경우 PU와는 달리 반복압축횟수가 증가함에 따라 전반적으로 영구변형이 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 증가의 정도는 PU의 경우 보다 크게 나타났다.

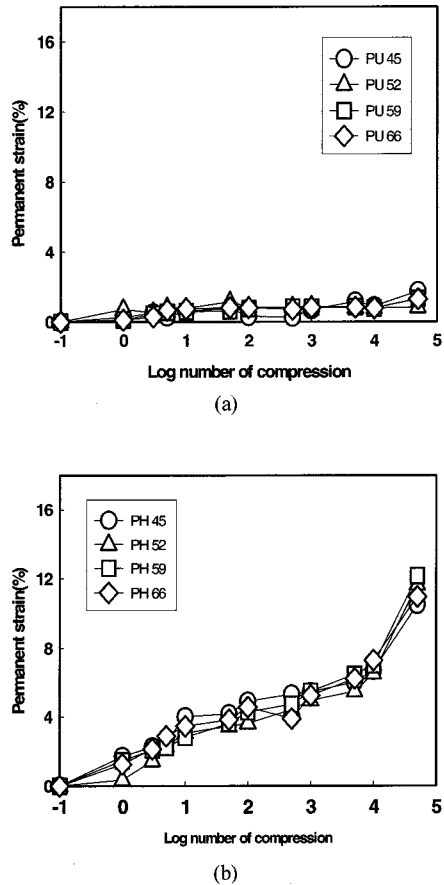


Figure 5. The Effect of repetitive compression on the permanent strain of PU(a) and PH(b) foams compressed with 25 N/cm².

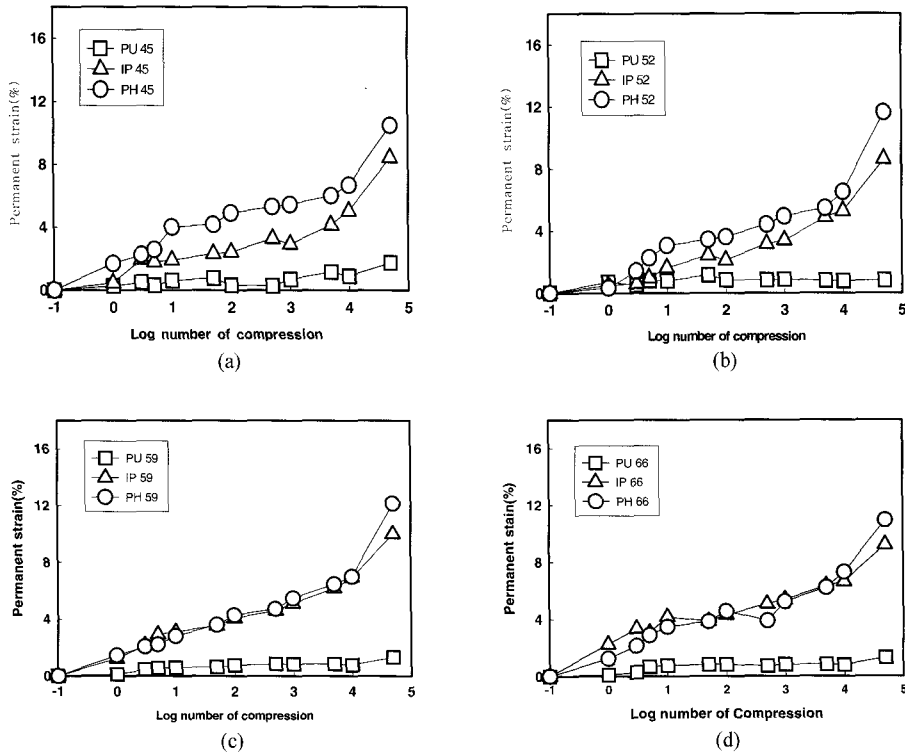


Figure 6. The Effect of repetitive compression on the permanent strain of hardness 45(a), 52(b), 59(c) and 66(d) foams compressed with 25 N/cm².

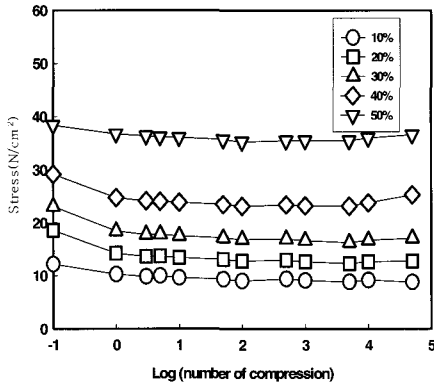
경도 45, 52, 59 및 66으로 제조된 PU 및 PH를 5만회까지 반복압축한 각 시편의 영구변형의 변화를 Figure 6에 나타내었다. Figure 6(a)에 나타난바와 같이 경도 45로 제조된 발포체의 경우 전반적으로 반복압축횟수가 증가함에 따라 영구변형이 증가하는 경향을 나타내었다. PU의 경우 가장 낮은 1% 정도의 영구변형으로 반복압축에 따른 수축이 거의 나타나지 않고 있으나, PH의 경우가 가장 높은 10% 정도의 영구변형을 나타내었다. 5만회 반복압축에 따른 영구변형은 PU<IP<PH 순서로 증가하는 경향을 나타내었다. 경도 52로 제조된 발포체 (Figure 6(b))의 경우 IP와 PH의 영구변형 차이가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 Figure 6(c, d)에 나타나 바와 같이 경도 59 및 66으로 제조된 발포체의 경우 영구변형은 PU의 경우가 IP 및 PH 경우보다 낮은 값을 나타내었으며, IP와 PH는 유사한 값을 나타내었다. 발포체의 경도가 증가함에

따라 반복압축에 따른 영구변형에서 IP와 PH가 유사한 경향을 나타내는 현상은 발포체의 경도가 높아짐에 따라 발포체의 밀도와 가교도가 증가함에 따라 발포체를 제조하는 가공공정상의 차이보다는 재료의 특성이 더 크게 영향을 미치기 때문에 유사한 화학구조를 갖는 IP와 PH의 반복압축에 다른 영구변형 거동 역시 유사한 경향을 나타내는 것으로 이해된다.

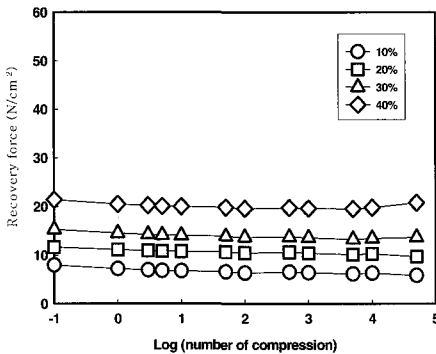
5. 반복압축이 발포체의 압축력 및 회복력에 미치는 영향

경도 52로 제조된 PU를 25 N/cm²의 일정한 압축 응력으로 반복 압축한 발포체의 각 압축률에서의 압축력과 회복력을 Figure 7 나타내었다. 각 압축률에서의 압축력(Figure 7(a))과 회복력(Figure 7(b))은 반복압축에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었다. 그리고 40% 압축률에서 PU의 압축력은 약 27

N/cm^2 이었으나, 회복력은 약 $21 N/cm^2$ 로 현저히 적은 값을 나타내었다. 10% 압축률에서의 압축력과 회복력의 차이는 40% 압축률에서 보다 감소하였다. 이러한 현상은 압축률이 적은 범위에서는 압축변형이 탄성변형의 특성을 많이 지니지만 압축률이 높은 범위에서의 압축변형은 소성변형 특성을 많이 지니기 때문에 큰 압축에너지 손실에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. Figure 8에 IP의 각 압축률에서의 압축력과 회복력을 나타내었다. IP의 경우 반복압축에 따라 압축력과 회복력이 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, PH의 경우도 유사한 경향을 나타내었다.

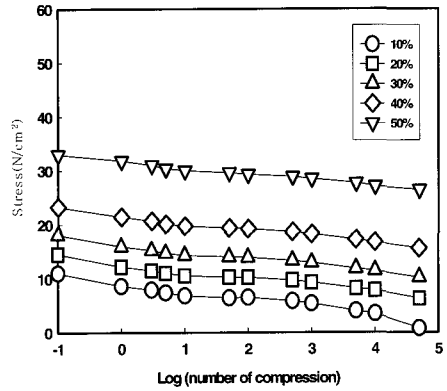


(a)

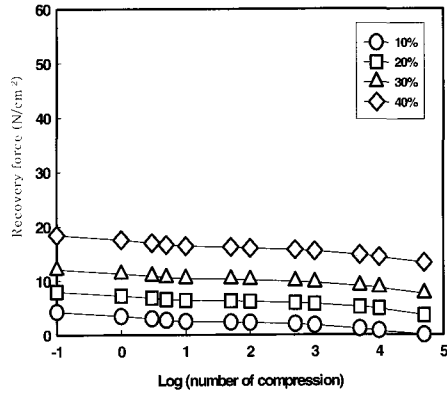


(b)

Figure 7. The Effect of repetitive compression on compressive stress(a) and recovery force(b) at different strain of PU foams(hardness 52) compressed with $25 N/cm^2$.



(a)



(b)

Figure 8. The Effect of repetitive compression on compressive stress(a) and recovery force(b) at different strain of IP foams(hardness 52) compressed with $25 N/cm^2$ loads.

IV. 결 론

PU, IP 및 PH 등 세가지 종류의 발포체를 일정한 응력으로 반복압축한 후 반복압축에 따른 발포체의 압축력, 수축율, 회복력 등에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 5만회 반복압축에 따른 발포체의 최대압축력은 PU의 경우 거의 변화하지 않는 것으로 나타났으나 IP의 경우 최대 압축력은 크게 저하되었다. 반복압축에 따른 발포체의 영구변형은 PU의 경우 약 1%정도에서 평형상태를 나타내었으며, PH의 경우 반복압축횟

수가 증가함에 따라 영구변형이 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다. 경도 45인 발포체를 5만회 반복압축한 경우 발포체의 영구변형은 PU<IP< PH 순서로 증가하는 경향을 나타내었다. PU 발포체의 경우 각 압축률에서의 압축력과 회복력은 반복압축에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었으나, IP 및 PH의 경우 반복압축에 따라 압축력과 회복력이 감소하는 경향을 나타내었다.

감사의 말씀

본 연구는 신발기초기술개발사업과 동서대 연구 과제 결과의 일부입니다.

참고 문헌

1. C. C. Park, "The Effects of Hardness on the Compression-Rebounding Properties of Shoes Midsole", *Elastomer*, **39**, 186 (2004).
2. N. J. Mills, C. Fitzgerald, A. Gilchrist and R. Verdejo, "Polymer Foams for Personal Protection: Cushion, Sshoes and Helmets", *Composites Science and Technology*, **63**, 2389-2400 (2003).
3. R. Dubois, S. Karande, D. P. Write, and F. Martinez, "The Use of Ehtylene/styrene Interpolymers in Cross-linked Foams for the Footwear Industry", *Annual Technical Conference, Society of Plastic Engineer*, 1655-1660 (2001).
4. Y. Zhang, D. Rodrigue and A. Ait-kadi, "Morphology and Mechanical Properties of Foamed Polyethylene Blend", *Polymers*, **22**(4), 211-236 (2003).
5. J. Lee, "Microcellular Cross-linked EVA Foam by Injection Molding Process", *Annual Technical Conference, Society of Plastic Engineer*, 2060-2064 (1997).
6. G. Kotzev, "Studies of Mechanical Properties and Melting Behaviour of Foamed and Crosslinked LDPE/PP Blends", *Cellular Polymers*, **21**, 431-443 (2002).
7. N. C. Hilyard, "Mechnics of Cellular Plastics", Macmillan Publishing Co., Chap. 1, New York (1982).
8. N. C. Hilyard and A. Cunningham, "Low Density Cellular Plastics", Macmillan Publishing Co., Chap. 1, New York (1982).
9. N. C. Hilyard, "Mechnics of Cellular Plastics", Macmillan Publishing Co., Chap. 2, New York (1982).
10. L. J. Gibson and M. F. Ashby, "Cellular Solids", Oxford, New York (1988).
11. C. C. Park, "Impact and Rebounding Properties of Shoes Midsole with Temperature", *Elastomer*, **39**, 274 (2004).