

발포 Al₅Si₄Cu₄Mg 알루미늄 합금이 충전된 304 스테인리스강 원통의 굽힘저항 특성

김엄기[†] · 이효진^{*} · 조성석^{**}
(2003년 1월 9일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

Bending Behaviors of Stainless Steel Tube Filled with Al₅Si₄Cu₄Mg Closed Cell Aluminum Alloy Foam

Amkee Kim, Hyo-Jin Lee and Seong-Seock Cho

Key Words: Aluminum Foam(발포 알루미늄), Thin-walled Cylinder(얇은 벽 원통), Energy Absorption(에너지 흡수), Bending Resistance(굽힘 저항), Filler(충전재)

Abstract

The foam-filled tube beams can be used for the front rail and firewall structures to absorb impact energy during frontal or side collision of vehicles. In the case of side collision where bending is involved in the crushing mechanism, the foam filler would be effective in maintaining progressive crushing of the thin-walled structures so that much impact energy could be absorbed. In this study, bending behaviors of the closed-cell-aluminum-alloy-foam-filled stainless steel tube were investigated. The various foam-filled specimens including piecewise fillers were prepared and tested. The aluminum-alloy-foam filling offered the significant increase of bending resistance. Their suppression of the inward fold formation at the compression flange as well as the multiple propagating folds led to the increase of load carrying capacity of specimens. Moreover, the piecewise foams would provide the easier way to fill the thin-walled shell structures without the drawback of strength.

1. 서 론

얇은 벽 중공형 보는 경량화가 필요한 구조물의 강성(stiffness)을 증가시키기 위하여 자동차,

우주항공 및 조선업에서 널리 이용되고 있다. 따라서 이 구조물이 굽힘하중을 받아 소성붕괴가 발생하는 과정 중에 나타나는 굽힘강도와 에너지 흡수특성의 이해는 구조물 설계의 주요 연구대상이다. 얇은 벽 중공 보의 전형적인 굽힘거동은 작은 굽힘 회전변형 후에 굽힘저항이 최대 값에 도달한 후 급격히 감소하는 것이다. 이 같은 굽힘 하중지지 능력의 감소는 하중점의 판 내부로의 접힘 현상에 기인하는데 이 접힘(fold) 현상이 단면적을 급격히 감소시켜 굽힘저항을 감소시키게 된다.^(1,2)

[†] 책임저자, 회원, 공주대학교 기계공학부
E-mail : amkee@kongju.ac.kr
TEL : (041)850-8616 FAX : (041)854-1449
^{*} 회원, 한밭대학교 건축공학부
^{**} 충남대학교 신소재공학부

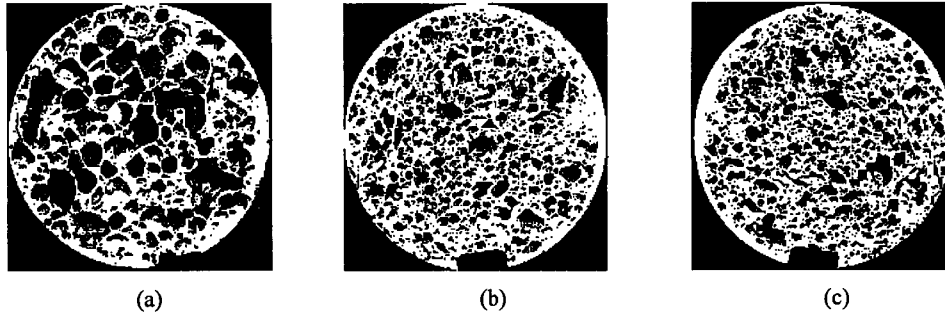


Fig. 1 Closed cellular structures of Al₁₅Si₄Cu₄Mg cylindrical foam filler(diameter=36mm);
 (a) $\rho_f/\rho_s=0.28$, (b) $\rho_f/\rho_s=0.37$, (c) $\rho_f/\rho_s=0.40$

중량을 크게 증가시키지 않고 중공 보의 굽힘 저항을 강화하는 방법으로 보의 중공 부분을 경량재료로 채워 사용하는 방법이 연구되고 있다.⁽³⁾ 충전재(filler)가 굽힘하중 하에서 중공 보의 국부적 접힘을 방지하거나 지연시키는 역할을 함으로써 보의 굽힘저항을 크게 증가시키게 된다.^(4~9) 중공의 충전은 중공 전체를 충전하거나 경제성 및 작업의 수월성을 고려하여 접힘 발생이 예상되는 하중점 근방 일부분만을 충전하는 방법이 있으며, 충전재로서 갖추어야 할 점으로는 경량이면서 높은 강성과 에너지 흡수능 등이 있다. 최근 개발된 고상 발포방식의 다공성 알루미늄(closed cell aluminum foam)은 단위 무게 당 높은 압축저항(crushing resistance)과 내열성, 낮은 생산단가로 인하여 중공형 구조재의 충전재로의 사용이 기대된다.^(3~7)

본 연구에서는 Al-5%Si-4%Cu-4%Mg으로 밀도가 다른 발포 알루미늄 합금 충전재 조각을 분말야금방법(powder metallurgical route)으로 제조하고, 이 조각으로 원통형 스테인리스강 관 내부를 완전히 또는 부분적으로 채워 3점 굽힘 시험을 수행하였다. 충전된 원통 보와 중공 원통 보의 굽힘강도 및 변형 흡수에너지를 비교하였으며, 충전재 밀도와 충전 조각 수 차이에 따른 굽힘강도와 변형거동에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

시험재료는 중공 원통 내에 발포 알루미늄 합금을 충전한 재료이다. 원통은 AISI 304 스테인리스강(18Cr8Ni) 판으로 냉간가공하여 용접한 것이다. 시험편 원통의 치수는 외경 38.4mm, 벽두께 1.2mm이며 길이는 240mm이다. 원통 내부의 충전재로 사용한 발포 알루미늄 합금소재는 분말야금방법을 이용하여 제조하였다. 합금분말(Al₁₅Si₄Cu₄Mg)과 발포제(1wt.% TiH₂)를 혼합하여 40kgf/cm²의 압력에서 압축하고, 430℃에서 20 : 1로 압출하여 제조한 전구체(precursor)를 원통형 금형(mold)에 넣은 후 700℃에서 15분간 발포 열처리시켜 제조하였다. 충전재는 폐쇄 기공(closed pore)이 고체 내에 분포하는 구조로 Fig. 1과 같다. 금형에 넣는 전구체의 양을 달리하면 다양한 밀도의 발포 알루미늄 합금을 얻을 수 있고, 이를 스테인리스강 중공 원통에 접착제 사용 없이 삽입하여 시험편을 제작하였다. 발포 알루미늄 합금 제조에 관한 자세한 내용은 참고문헌^(9,10)에 제시한 바 있다. 시험편은 원통내의 충전 형태에 따라 3가지로 제작하였다. 3조각과 4조각으로 완전히 충전한 것과 1조각으로 부분적으로 충전한 것을 사용하였다. 부분적으로 충전한 시험편의 경우는 길이 120mm인 1조각의 충전재가 Fig. 2(a)과 같이 보의 중앙에 위치하도록 하였고, 완전히 충전한 시험편은 Fig. 2(b, c)와 같이 3조각으로 충전한 것과 4조각으로 충전한 2가지로 제작하였다. 3조각의 경우에는 길이 120mm의 조각을 중앙에

Table 1 Densities of aluminum-alloy-foam fillers

Specimen	1PC-1	1PC-2	1PC-3	3PC-1	3PC-2	3PC-3	4PC-1	4PC-2	4PC-3
Density (ρ_f) (g/cm ³)	0.80	0.95	1.06	0.80	0.90	1.09	0.54	0.90	1.15
Normalized Density (ρ_f/ρ_s)	0.28	0.33	0.37	0.28	0.31	0.38	0.19	0.31	0.40

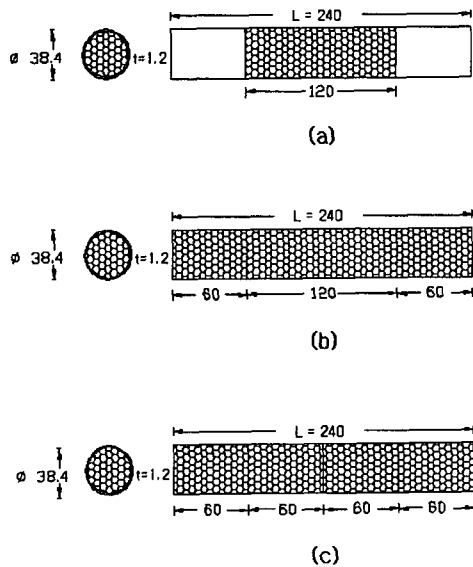


Fig. 2 Insertion of fillers in thin-walled cylindrical tube specimens(unit: mm)

하나 배치하고, 길이 60mm인 2개의 조각을 양 측면에 배치하였다. 4조각으로 충전한 시험편은 4개의 60mm의 발포소재 조각이 시험편 중앙을 대칭으로 좌우에 각 2개씩 위치하도록 제작하였다. 원통에 충전재를 삽입할 때 접착제를 사용하지 않은 관계로 충전재와 스테인리스강 원통사이의 표면은 미끄럼 접촉 상태에 있다. 본 연구에서는 시험편 충전 형태를 구분하기 위하여 속이 빈 중공 시험편과 충전재의 조각 수에 따라 1조각은 1PC, 3조각은 3PC, 4조각은 4PC 시험편으로 표시하여 나타내었다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 시험편의 충전 형태와 충전재의 밀도에 따른 분류표이다. 충전재의 밀도 ρ_f 와 함께 알루미늄 합금 소재 Al5Si4Cu4Mg의 밀도 $\rho_s=2.89g/cm^3$ 로 무차원화

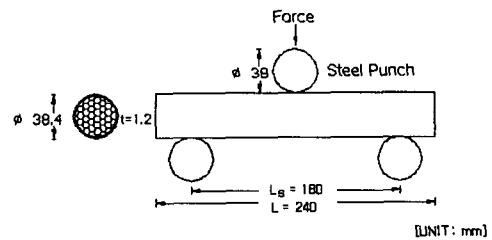


Fig. 3 Configuration of three point bending test

한 상대밀도를 함께 표시하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3과 같이 3점 굽힘 시험을 MTS 만능재료 시험기를 사용하여 수행하였다. 시험편 상부 1점을 누르고 있는 강철편치(steel punch)의 반경은 19mm이며, 시험편 하부 2점을 지지하고 있는 한쌍의 받침대(stopper) 사이의 거리 L_s 는 180mm이다. 편치헤드의 시험속도는 준 정적인 상태가 되도록 낮은 속도인 0.15mm/s를 유지하였다. 시험과정 중에 편치 변위와 하중의 변화는 컴퓨터에 내장된 데이터 수집 장치에 의하여 기록 저장되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 굽힘모멘트와 회전변형각도곡선

Fig. 4, 5, 6은 1PC, 3PC, 4PC 시험편의 3점 굽힘 모멘트 변형각도곡선 거동을 나타낸 것이다. 각 그림 내에 중공 시험편의 굽힘거동을 포함시켜 상호 비교할 수 있게 하였다. 굽힘모멘트 M 과 굽힘에 의한 회전변형각도 θ 는 컴퓨터에 기록된 굽힘하중 P 와 편치의 변위 δ 를 다음 식 (1)과 (2)에

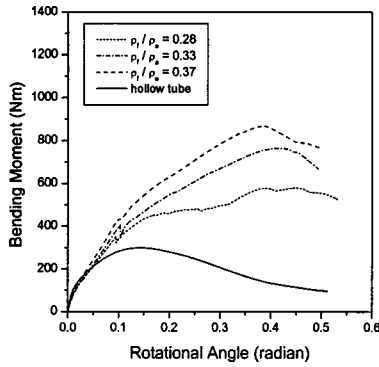


Fig. 4 Three point bending response of IPC

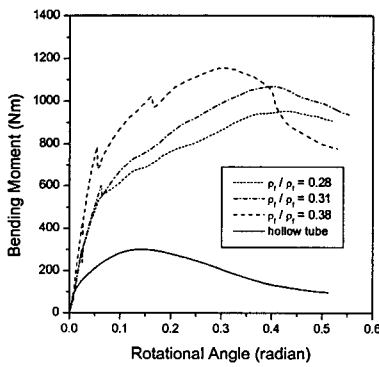


Fig. 5 Three point bending response of 3PC

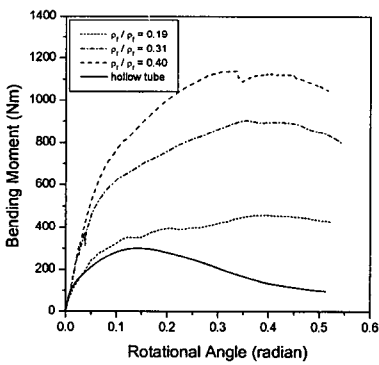


Fig. 6 Three point bending response of 4PC

대입하여 계산하였다.

$$M = \frac{PL_s}{4} \tag{1}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2\delta}{L_s}\right) \tag{2}$$

굽힘모멘트 회전변형각도 곡선은 충전된 시험편에서 변형 중 부분적으로 나타나는 스틱슬립(stick-slip) 현상(굽힘모멘트가 급격히 떨어지는 현상)을 제외하면 회전변형각도의 증가에 따라 굽힘모멘트가 초기에 선형적으로 증가하여 최대저항모멘트 M_f 에 도달한 뒤 점차 감소하는 전형적인 탄·소성 변형거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 스틱슬립 현상은 충전재와 원통 간의 미끄럼 접촉 및 충전재 조각과 조각이 맞닿은 위치에서 갑작스럽게 발생하는 불연속 변형에 기인한다고 생각된다. 이 현상이 중공 시험편에서는 발견되지 않고 조각의 수가 많은 3PC와 4PC에서 많이 발견되는 점이 이 사실을 뒷받침한다. 충전된 시험편이 중공 시험편에 비하여 높은 굽힘모멘트를 나타내고 있으며, 곡선의 밑 면적으로 계산한 굽힘 변형 흡수에너지 역시 충전된 시험편이 월등히 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 같은 형태의 시험편에서도 발포 알루미늄 합금의 밀도의 차이에 따라 굽힘저항 거동에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 충전된 시험편의 굽힘강도(최대굽힘모멘트) M_f 를 중공 시험편의 굽힘강도 $M_o(300 Nm)$ 로 무차원화하여 나타낸 것이다. 동일한 형태의 시험편에서는 충전재의 밀도가 증가할수록 굽힘강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 밀도가 동일한 경우에는 시험편의 형태에 따라 그 크기가 3PC, 4PC, 1PC 순으로 크게 나타나는데 부분적으로 충전한 보에 비하여 전체가 충전된 보의 굽힘저항이 높고 4조각 보다는 3조각이 높게 나타나고 있다. 본 연구에서 시험된 시험편 중 최대강도는 3PC-3($\rho_f/\rho_s=0.38$) 시험편의 강도로서 $M_f=1158Nm$ 이었다. 이 값은 더 높은 밀도의 충전재로 채워진 시험편인 4PC-3

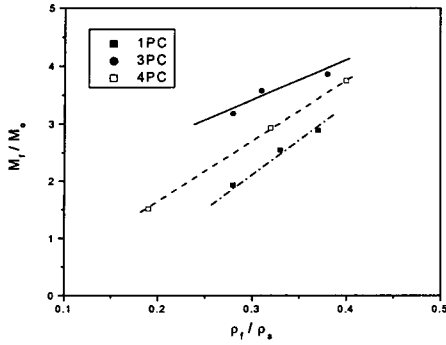


Fig. 7 Variation of the maximum bending moment resistance with the density of foam filler

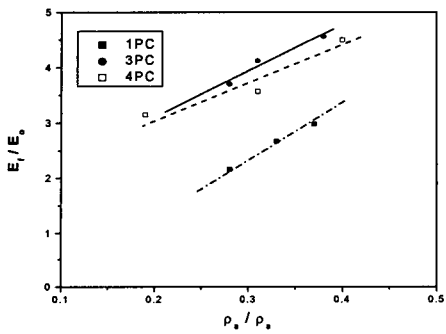


Fig. 8 Variation of the energy absorption with the density of foam filler

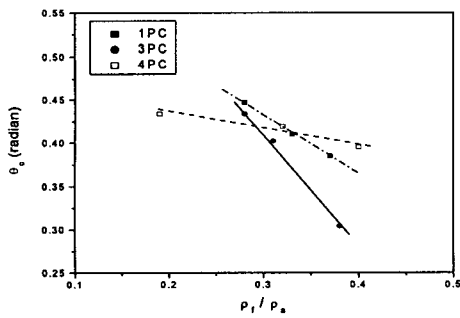
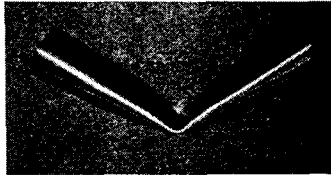


Fig. 9 Variation of the critical rotational angle with the density of foam filler

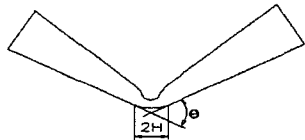
($\rho_f/\rho_s=0.40$)의 강도보다 높은 값이며, 중공 시험편의 굽힘강도에 비하여 3.8배가 증가된 값이다. 4조각 시험편의 경우 시험편의 중앙에 조각의 경계가 위치하므로 편치의 압입이 진행될 때 미끄럼에 의하여 조각간의 간격이 벌어져 충분한 충전효과를 얻을 수 없기 때문에 3조각 시험편에 비하여 상대적으로 낮은 강도를 나타내는 것으로 생각되며, 강도가 가장 낮은 1PC의 경우에는 시험편이 부분 충전되었기 때문에 양 측면의 상대적으로 낮은 비 충전부 굽힘저항이 시험편의 굽힘강도를 크게 저하시키는 것으로 생각된다(Fig. 11(a) 참조).

한편 Fig. 8은 변형회전각도 0.5radian까지 흡수된 각 충전 시험편의 변형 흡수에너지 E_f 를 중공 시험편의 변형 흡수에너지 $E_o(103 J)$ 로 무차원하여 나타낸 것이다. 변형 흡수에너지의 거동은 대체적으로 Fig. 7의 굽힘강도 거동과 유사하게 나타나고 있으나 중공전체를 충전한 3PC와 4PC의 변형 흡수에너지 값 사이의 차이가 크게 좁혀졌음을 알 수 있다. 이 현상은 충전재 조각간의 미끄럼으로 인하여 4PC의 최대굽힘모멘트가 3PC에 비하여 낮게 나타나고 있음에도 불구하고, 4PC의 미끄럼에 의한 조각간의 간격 증가가 시험편의 변형영역을 확대시켜 나타난 현상으로 생각된다. 따라서 추가적 변형으로 발생한 4PC의 변형흡수에너지의 상승이 4PC의 변형흡수 에너지를 3PC의 변형흡수에너지에 근접시키는 것이다. Fig. 6에 나타난 4PC의 굽힘모멘트 변형곡선에서 최대굽힘모멘트 부근의 비교적 큰 플래투(plateau) 형성이 이 사실을 뒷받침한다.

Fig. 9은 최대 굽힘모멘트(굽힘강도)에 도달한 때의 시험편 임계회전변형각도 θ_c 를 나타낸 것이다. 모든 형태의 시험편(1PC, 3PC, 4PC)에서 충전재의 밀도가 증가하면 임계회전변형각도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 충전재의 밀도가 작을수록 기공도가 높아지기 때문에 굽힘하중 하에서 변형될 때 조밀화에 소요되는 변형률이 크게 되기 때문에 발생하는 현상이다. 한편 4PC의 경우 θ_c 가 밀도 변화에 비교적 둔감한 이유는 θ_c 가 충전재의 조밀화와 함께 미끄럼에 의



(a)



(b)

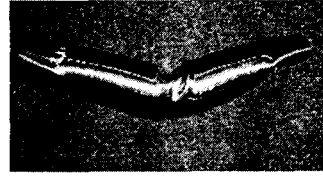
Fig. 10 Folding length, 2H, for a hollow cylindrical tube

한 조각 간격의 변화에도 크게 영향을 받았기 때문이라고 생각된다.

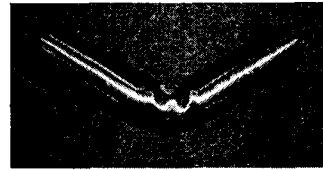
한편 중공 시험편의 임계회전변형각도 $\theta_c = 0.14 \text{radian}$ 은 저밀도의 충전 시험편에 비해서도 매우 작은 값을 나타내고 있다. 이 큰 차이는 중공과 충전 시험편의 굽힘변형 기구의 차이 때문에 발생하는 것으로 충전 시험편이 점진적인 굽힘변형 모드임에 반하여 중공 시험편은 압입부가 함몰되어 급격히 붕괴되는 접힘변형모드를 나타내기 때문인 것으로 생각된다.

3.2 원통 보의 굽힘변형 거동

Fig. 10(a)은 얇은 벽 중공 원통 시험편의 굽힘 변형 형태를 나타낸 것이다. 펀치와 접촉한 부위에서 하나의 접힘선(folding line)이 발생하였으며 펀치에 의하여 벽 안쪽으로 깊숙이 접힌 모습을 하고 있다. 벽이 안쪽으로 들어간 부분이 펀치에 의한 압축영역에 해당되며, 이것이 급격한 단면적 감소를 야기시켜 원통형 보의 변형저항을 감소시키고 있음을 알 수 있다. 펀치에 의하여 형성된 접힘 영역의 크기를 Fig. 10(b)에서 보인 바와 같이 압축영역 반대측 원통벽의 변형구간으로 정의한 접힘길이, 2H로 나타내었을 때 본 연구에서 사용한 중공 원통의 경우 측정값은 $2H=28\text{mm}$



(a)

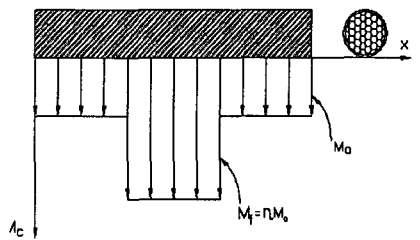
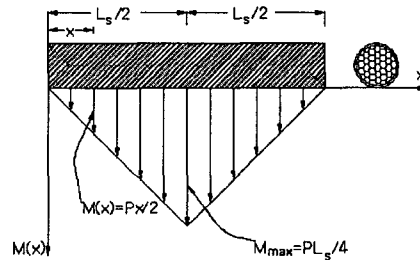


(b)



(c)

Fig. 11 Multiple folds of foam-filled tubes; (a) 1PC-1 (b) 3PC-1, (c) 4PC-1



(b)

Fig. 12 (a) Bending moment distribution of the tube beam; (b) Bending strength of the partially-foam filled tube beam

이었다. 한편 중공 얇은 벽 정사각형 단면보의 접힘길이 $2H$ 는 이론적으로 다음 식 (3)으로 계산할 수 있다.⁽¹⁾

$$2H = 2.55b^{2/3}t^{1/3} \quad (3)$$

여기서 b 는 보의 정사각형 단면의 한 변의 길이이고, t 는 벽의 두께이다. 본 연구에서는 정사각형 단면 보 대신에 원통형 보를 사용하였으므로 원통의 단면을 같은 면적의 정사각형 단면으로 근사하여 계산한 $b=34.0\text{mm}$, $t=1.2\text{mm}$ 을 식 (3)에 대입하여 접힘길이를 계산하였다. 계산된 접힘길이는 $2H=28.4\text{mm}$ 로 실측한 28mm 와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 중공형 원통보의 접힘길이를 예측하는데 있어서도 식 (3)의 사용이 유효한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 얇은 벽 원통형 보의 내부를 충전재로 채운 시험편의 굽힘변형 모습을 나타낸 것이다. Fig. 10의 중공 원통 보의 접힌 모양과는 다르게 편치 압축부 부근에 발생한 굽힘변형 부위가 보의 길이 방향으로 확산되어 분포하고 있고 1개의 접힘선을 대신하여 다수의 주름선이 발생하였다. 또한 다수의 주름선의 발생으로 인하여 중공 원통의 변형저항감소의 주 원인이었던 깊숙한 접힘으로 인한 단면 감소현상이 사라졌다. 따라서 보의 굽힘과정 중에 충전재는 보에 추가적인 변형저항을 제공하는 동시에 원통의 압축부 접힘을 막아 단면형상을 유지시키고, 단면 2차 모멘트의 감소를 막아 보의 굽힘저항을 향상시키는 것이다.

한편 부분적으로 충전된 원통의 경우 충전되지 않은 부분이 빈 공간이므로 이 부분에서의 접힘 변형으로 인한 굽힘강도의 저하를 예상할 수 있다. 빈 공간의 접힘에 의하여 굽힘강도가 저하되지 않기 위한 원통 충전부의 최소길이는 Fig. 12에서 나타낸 보의 굽힘모멘트 분포[Fig. 12(a)]와 굽힘강도 분포[Fig. 12(b)]를 고려하여 이론적으로 계산할 수 있다. Fig. 12(b)에서 중앙 충전부의 굽힘강도는 M_f 이고, 양 측면 비 충전부의 굽힘강도는 M_o 이다. M_f 에 대응하는 편치에서의 굽힘하중을 P 라고 하면, 비 충전부에 접힘이 발생하

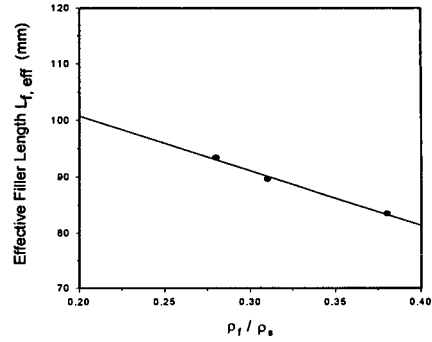


Fig. 13 Variation of the effective filler length with the density of foam filler

지 않기 위한 충전부의 최소길이 $L_{f, \text{min}}$ 은 굽힘하중 P 에 의하여 충전부의 경계 위치 x 에 발생하는 굽힘모멘트 $M(x)$ 와 비 충전 중공부의 강도 M_o 가 일치하는 조건 즉 $M(x) = M_o$ 에 의하여 결정된다. 이 때 강도비를 $\eta = M_f / M_o$ 로 정의하면, 식 (4)와 (5)로부터 최소길이 $L_{f, \text{min}}$ 는 다음 식 (6)과 같이 계산된다.

$$M_f = \frac{PL_s}{4} \quad (4)$$

$$M(x) = \frac{P}{4}(L_s - L_{f, \text{min}}) \quad (5)$$

$$L_{f, \text{min}} = L_s \left(\frac{\eta - 1}{\eta} \right) \quad (6)$$

그러나 실제 충전부와 비 충전부의 경계에서 발생하는 접힘 길이에 의한 추가적 충전 효과때문에 최소길이 $L_{f, \text{min}}$ 는 축소 수정되어야 하는데, 본 연구에서는 충전부 양쪽 경계에서 각각 접힘길이 $2H$ 만큼 수정한 다음 식 (7)을 사용하였다.

$$L_{f, \text{eff}} = L_s \left(\frac{\eta - 1}{\eta} \right) - 4H \quad (7)$$

중공 원통의 굽힘강도 $M_o = 300Nm$ 와 3PC의 M_f 를 이용하여 계산한 $L_{f,eff}$ 는 Fig. 13과 같다. 따라서 밀도의 크기에 관계없이 $L_{f,eff}$ 는 부분 충전된 1PC의 충전길이 $L_f = 120mm$ 에 비하여 작으므로 이론적으로 1PC의 비 충전부에서는 접힘현상이 발생할 수 없게 된다. 실제로 Fig. 11(a)에서 1PC의 중앙 충전부 편치 접촉 부위가 굽힘 변형되었음에도 불구하고 충전부와 접한 양쪽 비 충전부에서는 접힘 변형이 발생하지 않았으며 양 받침대 부위에서 접힘 대신에 압축으로 인한 단면 붕괴가 발견되고 있다. 따라서 1PC의 상대적으로 낮은 굽힘강도는 충전부의 굽힘강도의 저하에 의한 것이 아니라 받침대와 접촉한 비 충전부 원통의 압축에 의한 단면 붕괴에 기인한 것임을 알 수 있다.

4. 결론

두께가 얇은 원통형 보에 발포 알루미늄 합금을 채워 3점 굽힘시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 합금분말(Al₁₅Si₄Cu₄Mg)와 발포제(TiH₂)를 혼합하여 냉간압축 및 열간압출에 의하여 제조한 전구체(precursor)를 원통형 금형에 넣은 후 700℃에서 15분간 발포 열처리시켜 원통 내부를 충전할 수 있었다.

(2) 충전된 원통 보의 굽힘강도가 빈 원통 보에 비하여 최대 3.8배로 향상되었으며, 굽힘변형으로 인한 변형 흡수에너지가 크게 증가하였다. 이는 중공 원통의 굽힘이 한개의 접힘선에서 발생하여 관 내부로 깊숙이 접혀 단면이 급격히 감소하는 변형입에 반하여 충전된 원통은 단면적의 큰 감소 없이 다수의 주름선에 의하여 광범위하게 점진적으로 변형되기 때문이다.

(3) 부분 충전된 1PC에서와 같이 최소 충전 길이 이상으로 충전한 경우에도 비 충전부와 접촉한 압축부(받침대)에서 단면의 붕괴로 인한 굽힘강도의 감소가 발생하였다.

(4) 본 연구의 연구조건 범위 내에서 충전재의 밀도가 증가하면 굽힘강도(최대굽힘모멘트)가 비

례적으로 증가하였다.

(5) 다수의 조각을 이용한 충전방법은 중공형 보의 굽힘저항을 증대시키는데 효과적인 방법임을 확인하였다. 특히 이 방법은 하중점으로부터 조각 간의 경계를 피하여 배치하고, 적절한 충전 길이를 확보하는 경우에 시공 상 1조각으로 충전이 어려운 긴 원통 보의 보강 방법으로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구과제는 한국과학재단 목적기초연구 R01-2002-000-00093-0(2002) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Santos, S. and Wierzbicki, T., 1999, "Effect of an Ultralight Filler on The Bending Collapse Behavior of Thin-walled Prismatic Columns," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, pp. 995~1019.
- (2) Santos, S., Banhart, J. and Wierzbicki, T., 1999, "Bending Crush Behavior of Foam-filled Sections," *Metal Foams And Porous Metal Structures*, Verlag Metall Innovation Technologie MIT, Germany, pp. 337~345.
- (3) Banhart, J., 2001, "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals And Metal Foams," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559~632.
- (4) Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G, 1999, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth, Boston.
- (5) Hanssen, A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O.S., 2000, "Static And Dynamic Crushing of Circular Aluminum Extrusions with Aluminum Foam Filler," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, pp. 475~507.

- (6) Chen, W. and Wierzbicki, T., 2001, "Relative Merits of Single-cell, Multi-cell And Foam-filled Thin-walled Structures in Energy Absorption," *Thin-walled Structures*, Vol. 39, pp. 387~306.
- (7) Santosa, S. and Wierzbicki, T., 1998, "Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb Or Foam," *Computers and Structures*, Vol. 68, pp. 343~367.
- (8) Deshpande, V.S. and Fleck, N.A., 2001, "Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3 Point Bending," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 6275~6305.
- (9) Banhart, J., 2000, "Manufacturing Routes for Metallic Foams," *Journal of Materials*, Vol. 52, No. 12, pp. 22~27.
- (10) Lee, H.J., Eom, S.H., Song, Y.K. and Cho, S.S., 2003, "The Effects of Aluminum Powder Content and Cold Rolling on The Foaming Behaviors of $x\text{Alp}/\text{Al}5\text{Si}4\text{Cu}4\text{Mg}/0.8\text{TiH}_2$ Composites," *Material Science and Technology*, Vol. 19, No. 6, pp. 819~825.