

콘 형상 실린더의 축 방향 압축변형을 이용한 충격흡수장치 설계

김지철[†] · 이학렬 · 김일수 · 심우전 · 박동화*

국방과학연구소, *대우중합기계 특수사업본부

Design of Energy Absorption Device Using the Axial Crushing Behavior of Truncated Cone Type Cylinder

Jichul Kim[†], Hak-Yeol Lee, Il-Soo Kim, Woo Jeon Shim and Dong-Hwa Park*

Agency for Defense Development, *Daewoo Heavy Industries and Machinery Ltd.

Abstract – A brake device for the high-speed impacting object is designed using an axial crushing of thin-walled metal cylinder. Thickness of the cylinder is increased smoothly from the impacting end to the fixed end, resulting in the truncated cone shape. Truncated cone shape minimizes the imperfection-sensitivity of the structure and ensures that plastic hinges are formed sequentially from impacting end. This prevents the undesirable sudden rise in the first peak-crushing load. Several specimens with different conic angles, mean thickness of the wall, and materials were designed and quasi-static compression tests were performed on them. Results indicate that adoption of appropriate conic angle prevents simultaneous wrinkles generation and sudden rise of crushing load and that appropriate conic angle differs in each case, depending on the geometry and material property of the cylinder. Finite element analysis was performed for static compression of the cylinder and its accuracy was checked for the future application.

Key words – energy absorption device, axial crushing, truncated cone type cylinder, plastic deformation.

1. 서 론

실린더형 제동장치는 Fig. 1과 같이 축방향으로 충돌하는 물체의 운동에너지를 금속관의 소성변형 에너지로 변환시켜 소산시키는 장치이다[1]. 단순한 구조 및 높은 중량 당 충격흡수율 등의 장점에 의해 실린더형 제동장치에 대해서 지금까지 많은 실험적 및 해석적인 연구가 이루어졌다[2-4]. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 실린더형 제동장치의 변형은 구조의 형상 오차에 매우 민감(imperfection-sensitive)하고, Fig. 2와 같이 첫 번째 소성 주름(plastic hinge)이 생성되기 전에 실린더 전체에 발생하는 탄소성 좌굴로 인해 초기 제동력이 이후의 제동력에 비해 크게 된다[5,6]. 이 경우 제동의 대상이 되는 물체에 갑작스런 가속도가 작용하게 되어

제동 대상에 손상이 발생될 수 있다.

이러한 실린더형 제동장치의 단점을 보완하기 위해 서 두께가 충격단에서부터 고정단 쪽으로 일정하게 증가하는 형상의 제동장치를 제안하였다[7,8]. 즉, 제동장치의 외형은 단순 실린더가 아니라 Fig. 3과 같이 ‘갈 단이 잘린 콘 형상(truncated cone shape)’이 된다.

본 연구에서는 이러한 콘 형상 실린더의 축 방향 압축현상을 이용하여 고속으로 충돌하는 물체를 제동시킬 수 있는 충격흡수장치를 설계하였다. 콘 각도의 도입이 제동 성능 및 변형 형상에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 다양한 형상 제원 및 재질을 가지는 제동장치를 설계하여 정적압축시험을 수행하였다.

2. 정적압축시험용 제동장치 설계

정적압축시험에 적용될 제동장치의 기본 형상제원은

[†]주저자 · 책임저자 : jichul@add.re.kr

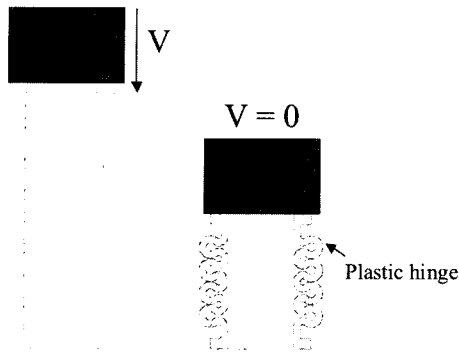


Fig. 1. Cylindrical brake device.

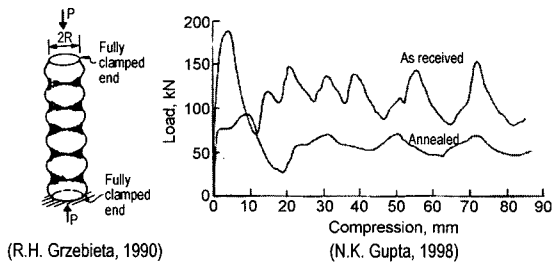


Fig. 2. Buckling of the tube just prior to initial failure (deformation is exaggerated).

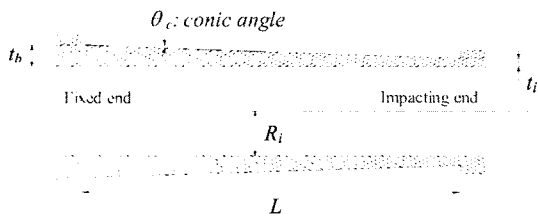


Fig. 3. Truncated cone type cylinder.

다음과 같은 과정을 통해 결정되었다.

제동장치가 압축되면서 충돌체에는 실린더의 소성변형에 의한 제동력이 가해지게 되고, 이 제동력에 의한 일이 충돌체의 초기 운동에너지와 동일해지는 순간 제동이 완료되게 된다. 따라서 실린더의 평균 제동력을 P_m , 제동이 완료될 때 까지 압축된 거리를 l_b , 충돌체의 질량 및 속도를 각각 m 및 v 라고 하면 다음과 같은 에너지 평형식이 성립한다.

$$P_m l_b = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1}$$

본 연구의 대상이 된 충돌체의 질량은 1.0 kg, 충돌 속도는 30.0 m/sec이다. 제동장치가 설치될 공간의 제약조건 및 다른 부분과의 간섭 등을 고려하여 제동장

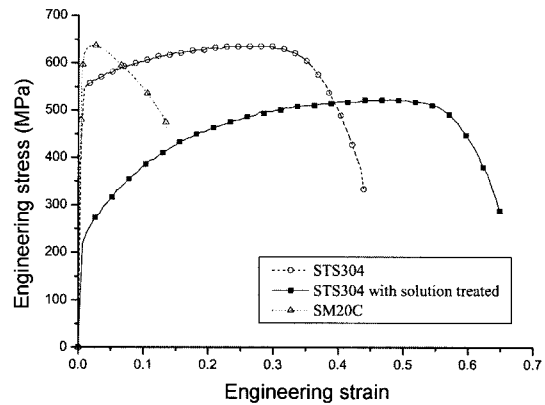


Fig. 4. Stress-strain curves of the materials used.

치 실린더의 전체 길이는 100.0 mm로, 내경은 15.0 mm로 선정하였다. 전체길이 중 30.0 mm가 제동 시 압축된다고 가정하면, 식(1)로부터 제동장치에 요구되는 제동력은 약 1.53 ton이다.

재질이 제동 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 스테인레스 강(STS304) 및 연강(SM20C)을 각각 적용한 시편을 제작하였다. STS304의 경우 고용화 열처리(850°C 1시간 유지→1030°C 2시간 유지→질소 냉각)를 한 경우와 하지 않은 경우를 모두 적용하여 열처리가 재질의 물성 및 제동성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 인장시험을 통해 얻은 각 재질의 응력-변형률 곡선은 Fig. 4와 같다.

실린더의 평균 두께(t_m)는 Jones와 Abramowicz[9]에 의해 제안된 식(2)에 앞에서 주어진 평균 제동력, 재질의 항복응력(σ_0), 실린더의 평균 반경(R) 등을 대입하여 결정하였다.

$$P_m = \frac{\sigma_0 t_m^2 \left[\frac{20.79\sqrt{2R/t_m} + 11.90}{2\sqrt{3} \left[0.86 - 0.568\sqrt{t_m/2R} \right]} \right]}{\tag{2}}$$

Fig. 4로부터 $\sigma_0 = 200 \sim 600$ MPa임을 알 수 있다. 이를 식(2)에 적용하면 항복응력이 200 MPa인 경우 요구되는 평균 두께는 1.5 mm, 600 MPa인 경우는 0.8 mm이다.

큰 형상 실린더의 콘 각도(conical angle, θ_c)는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 실린더 외벽의 기울기로 정의하였다. 콘 각도가 지나치게 클 경우 고정단의 두께(t_b)가 너무 커지거나 충격단의 두께(t_i)가 너무 작아질 수 있다. 특히 두께가 너무 작아지게 되면 제작상에 문제가 될 수 있으므로 콘 각도는 0.2°~1.5° 정도를 적용하였다.

Table 1. Specimen details

Spec. type	Material	t_m (mm)	t_i (mm)	t_b (mm)	θ_c (deg)
SPEC01	STS304 ^a	1.2	0.8	1.6	0.5
SPEC02	STS304 ^a	1.6	1.2	2.0	0.5
SPEC03	STS304 ^a	1.6	0.8	2.4	1.0
SPEC04	STS304 ^b	1.2	0.8	1.6	0.5
SPEC05	SM20C	2.2	1.0	3.4	1.5

a) Solution treated

b) As received

위와 같은 제동장치 형상 제원에 대한 검토 결과를 바탕으로 Table 1과 같이 총 5종의 시편을 설계하였다. 각 설계안 당 3개씩, 총 15개의 제동장치 시편을 제작하여 정적압축시험을 수행하였다.

3. 정적압축시험

Table 1과 같은 사양으로 제작된 각각의 시편에 대해 정적압축시험을 수행하여 각 제동장치의 압축거리에 따른 제동력 변화 및 제동형상을 실험적으로 확인하였다.

3-1. 시험 장비 및 방법

정적압축은 10톤 용량의 만능재료시험기를 이용하여 수행하였다. 제동장치를 만능시험기에 설치하기 위하여 Fig. 5와 같이 마운트 및 압축로드로 구성된 시험치구를 제작하였다. 압축은 15.0 mm/min의 속도로 진행하였다.

3-2. 시험 결과 및 분석

SPEC01 시편 들의 압축거리에 따른 제동력 계측결과는 Fig. 6과 같고, 변형 형상은 Fig. 7과 같다. 시

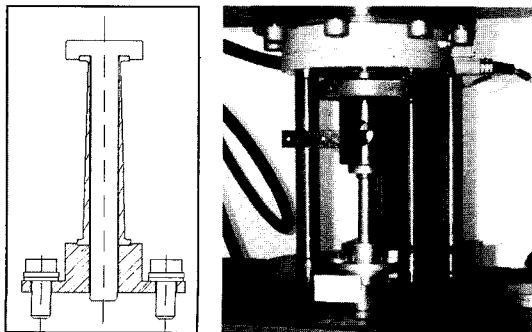


Fig. 5. Experimental setup.

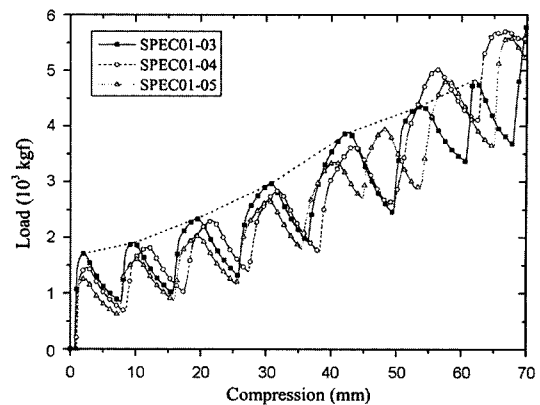


Fig. 6. Crushing loads of SPEC01 specimens.

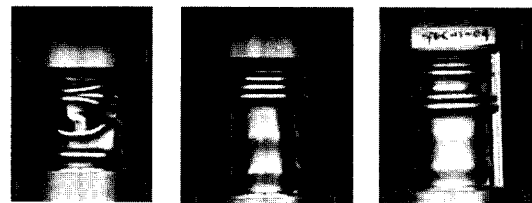


Fig. 7. Deformed shapes of SPEC01 specimens.

편명의 첫번째 숫자는 시편의 제원을 구분하기 위한 것이고(Table 1 참조), 두번째 숫자는 동일 형상의 시편을 구분하기 위한 번호이다.

SPEC01 형상의 경우 최초 두 개의 시편(SPEC01-01, 01-02)에 대해 압축 시험을 수행한 결과 초기 2~3개의 주름이 생성되는 동안에는 축 대칭 변형을 일으키다가 그 후에는 비대칭인 다이아몬드 모드[3]로 변형을 일으키며 이로 인해 압축로드가 제동장치에 끼어버리는 현상이 발생하였다(Fig. 7(a) 참조). 비대칭 변형의 경우 변형 형상의 재현성이 떨어지고 이로 인해 제동력 또한 예측이 어렵게 된다. 따라서 제동장치의 작동의 신뢰성을 높이기 위해서는 제동장치의 변형이 축 대칭으로 발생하는 것이 바람직하다. 이를 위해 압축로드의 직경을 13.0 mm에서 14.8 mm로 증가(실린더 내벽과의 간격 0.1 mm)시켜 압축로드가 실린더의 축 대칭 변형을 유지시켜주는 가이드 역할을 하도록 하였다. 수정된 압축로드를 적용하여 세 개의 시편(SPEC01-03~05)에 대해 압축 시험을 수행한 결과 끝까지 축 대칭 변형이 유지됨을 확인하였다.

Fig. 8에 실린더의 변형형상을 압축거리에 따라 나타내었다. 최초의 소성 주름은 실린더의 두께가 가장 얇은 충격단 쪽에서 생성되며, 압축이 진행됨에 따라

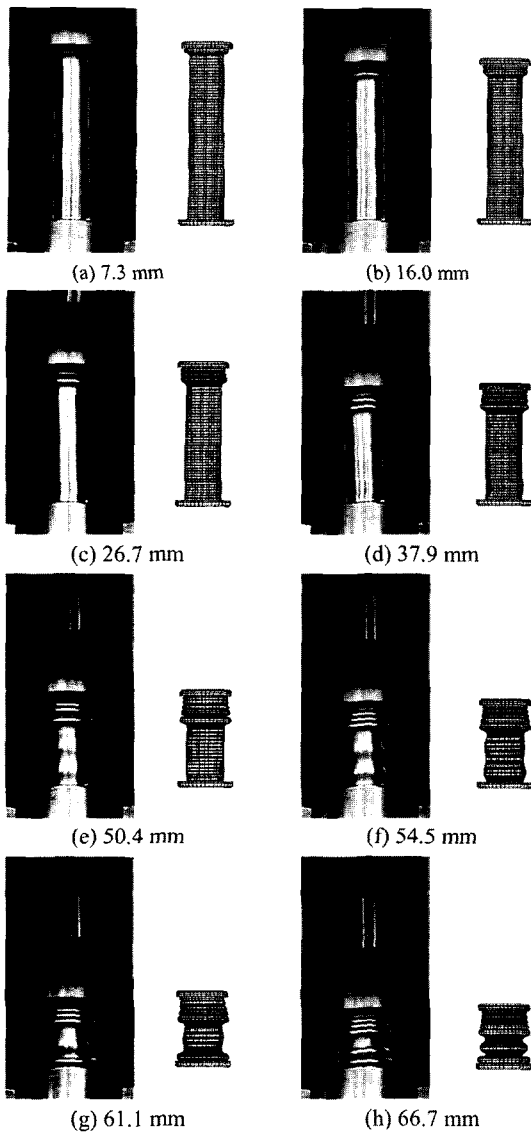


Fig. 8. Crushing process of SPEC01-03 (experiment vs. FEM).

순차적으로 주름이 생성됨을 알 수 있다. 이로 인해 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 큰 형상 제동장치의 제동력은 초기에 가장 작고 압축이 진행됨에 따라 점차적으로 증가하게 된다. 따라서 제동 시 충돌체에 가해지는 초기 충격이 두께가 일정한 실린더를 사용하는 경우에 비해 작으므로 충돌체의 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

5번째의 소성 주름까지는 충격단에서부터 차례로 생성되었으나, 6번째 및 7번째 소성 주름은 동시에 생성

되기 시작하였다(Fig. 8(e), (f) 참조). 이는 상부에 소성 주름이 발생하는 동안 하부에도 소성 변형이 발생하여 실린더 반경 및 두께 변화가 일어났기 때문이다. 즉 소성변형에 의해 두께의 차이가 줄어들어 큰 각도의 효과가 감소하게 되고, 이로 인해 Fig. 8(e)와 같이 동시에 소성 주름이 생성되게 된다. Fig. 7에서 마지막 두 개의 소성 주름이 동시에 생성되는 시점은 압축거리가 40~50 mm 사이인 경우이고, 이는 Fig. 6의 5번째 피크에 해당한다. 동시에 생성되는 주름이 2개 뿐이므로 Fig. 2와 같이 이 때의 피크 값이 다른 피크 값에 비해 현저히 크지는 않으나, Fig. 6의 SPEC01-03 제동력 곡선 피크 값을 연결한 선을 살펴보면 피크 값 증가량이 5번째 피크에 이르러 약간 증가하였음을 알 수 있다.

실린더 두께 및 콘 각도의 영향을 살펴보기 위하여, SPEC01, SPEC02, SPEC03의 제동력 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. SPEC02 및 SPEC03의 변형 형상은 Fig. 10과 같다.

Fig. 9에서 SPEC01의 경우 초기 제동력은 1.5 ton

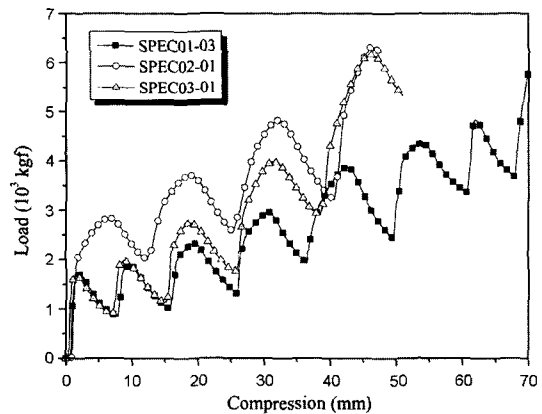


Fig. 9. Crushing loads of SPEC01, SPEC02, and SPEC03 specimens.

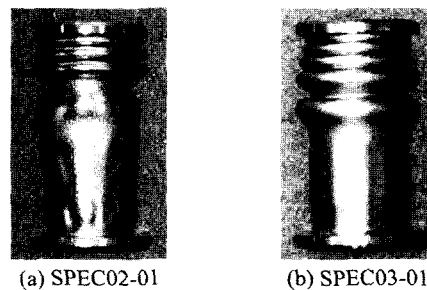


Fig. 10. Deformed shapes of SPEC02 and 03 specimens.

정도이며, 압축이 진행됨에 따라 두께가 두꺼운 부위에서 소성 주름이 생성되게 되므로 제동력이 약 5.0 ton까지 증가하게 된다. SPEC02의 경우는 SPEC01에서 두께만 증가시킨 경우이므로 제동력 곡선도 1.0~1.5 ton 정도 일정량 증가한 양상을 보인다. 단, 두께의 증가에 의해 하나의 소성 주름이 생기기 위해 필요한 압축거리가 증가하였으므로, 이로 인해 전체 소성 주름의 개수는 감소하게 된다. SPEC03의 경우 초기에는 SPEC01과 두께가 유사하므로 유사한 수준의 제동력을 보이나, 큰 각도가 SPEC01보다 크므로 두께의 증가율도 커서 후반부에는 제동력이 SPEC02 수준으로 증가한다.

SPEC02의 변형은 SPEC01과 비슷한 양상을 보였다. 즉, 최초 세 개의 소성 주름까지는 차례로 생성되다가 그 이후에는 실린더 하부 전체가 소성변형을 일으키며 세 개 정도의 소성 주름이 동시에 생성되는 현상이 관찰되었다.

반면 SPEC03의 경우 압축이 끝날 때 까지 주름의 생성 순서가 바뀌거나 두 개의 주름이 동시에 생성되는 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 이는 SPEC03의 큰 각도가 SPEC01 및 SPEC02 보다 두 배(1.0°) 정도 크기 때문에 생기는 결과라고 판단된다. 즉, 압축이 진행됨에 따라 소성변형에 의해 실린더 하부의 반경 및 두께에 변화가 생기고 이로 인해 두께 차이에 의한 효과가 감소하게 되는데, SPEC03의 경우 원래 두께 차이가 크기 때문에 이러한 변형이 전체 두께 차이에 큰 영향을 미치지 않는 것이다.

SPEC01과 동일한 형상에 열처리하지 않은 STS304 재질을 적용한 SPEC04의 경우, Fig. 11과 같이 소성 주름이 7개 생성되는 동안 주름의 생성 순서가 순차적으로 유지되었으며 동시 생성되는 주름도 관찰되지 않았다. 열처리를 하지 않은 경우 항복응력은 550 MPa로, 열처리를 한 경우(200 MPa)의 두 배 수준이다. 이로 인해 Fig. 11과 같이 실린더 상부에서 소성 주름이 발생하는 시점에 하부는 전혀 이에 의한 영향을 받지

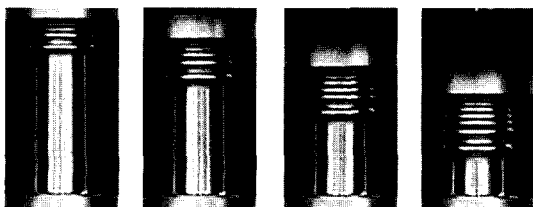


Fig. 11. Crushing process of SPEC04-03.

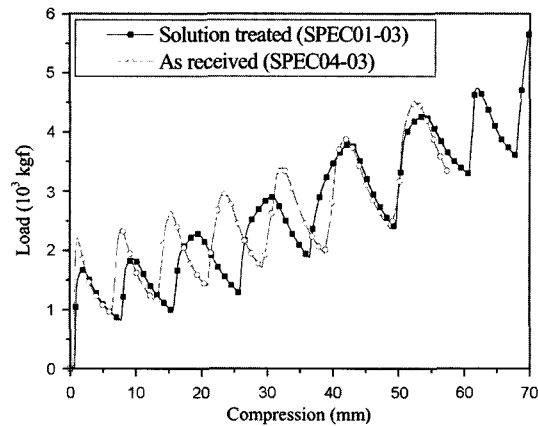


Fig. 12. Crushing loads of SPEC01-03 and SPEC04-03 specimens.

않게 된다. 따라서 초기의 큰 각도에 의한 두께 차이가 압축이 진행되어도 변화가 없으며, 주름 생성 순서가 일정하게 유지된다. 이로부터, 동일한 큰 각도를 가지고 있더라도 재질의 물성에 따라 실린더의 변형 양상이 다르게 됨을 알 수 있다.

SPEC01 및 04 시편의 압축거리에 따른 제동력 곡선을 Fig. 12에 비교하였다. 열처리를 하지 않은 재질의 경우 항복응력이 두 배 이상 크면서 가공경화(strain-hardening)가 거의 없는, 완전 소성과 유사한 경향을 보인다. 이러한 특성이 제동력 곡선에 반영되어, 제동력 곡선의 극대값이 열처리한 경우에 비해 큰 반면, 가공경화가 없기 때문에 제동력이 극대값에 도달하자마자 바로 감소하기 시작한다. 이러한 이유로 제동력 곡선의 형상이 열처리를 한 경우에 비해 봉우리가 높고 폭이 좁은 형상을 띠며, 동일한 압축거리에 대해 생성되는 소성 주름의 개수가 많다. SPEC01-03의 경우 50.0 mm 압축되는 동안 5개의 소성 주름이 생성되었으며, SPEC04-03의 경우는 6 개의 주름이 생성되었다.

SM20C로 제작된 SPEC05 시편 들의 경우 Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 압축도중 시편이 파괴되는 현상이 발생하였다. SPEC05-01의 경우 세 번째 소성

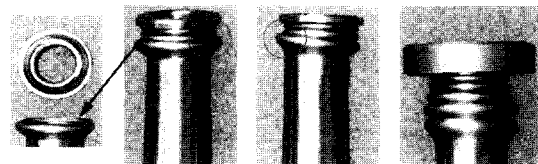


Fig. 13. Fracture locations of SPEC05 specimens.

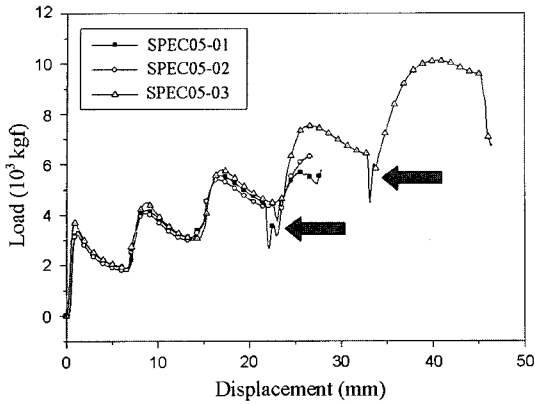


Fig. 14. Crushing loads of SPEC05 specimens.

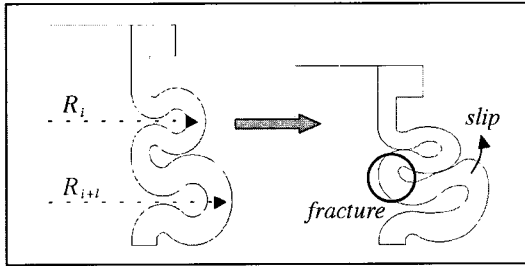


Fig. 15. Fracture mechanism between two adjacent plastic wrinkles.

주름이 두 번째 소성 주름 위로 겹치면서 세 번째 주름의 반경이 연신률 한도를 넘어서 증가하였고, 이로 인해 시험 도중 강한 파열음과 함께 Fig. 13에 표시된 위치에서 파괴가 일어났다. 이러한 실린더의 파괴에 의해 Fig. 14의 제동력 곡선에서 제동력이 갑자기 감소하는 부분이 관찰된다. 이러한 현상의 원인으로서는 첫째, Fig. 4에서 알 수 있듯이 SM20C의 연신률이 15% 정도로 낮기 때문이다. 둘째, 큰 각도 (15°)로 인해 Fig. 15와 같이 인접 소성 주름의 외경 차이가 크게 되기 때문이다 ($R_{i+1} > R_i$). 이로 인해 나중에 생성된 주름이 인접한 주름의 표면위로 미끄러지게 되고, 두 주름 중간 면에서 파괴가 발생하게 된다. 이와 같은 SPEC05에 대한 실험 결과로부터, 무조건 큰 각도를 크게 하는 것 또한 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

실험을 통해 얻은 압축거리에 따른 제동력 곡선(P)을 적분하면, 특정 거리 x 만큼 압축되는 동안 소성변형을 통해 소산되는 에너지의 총량(W_k)을 알 수 있다.

$$W_k(x) = \int_0^x P(\bar{x}) d\bar{x} \quad (3)$$

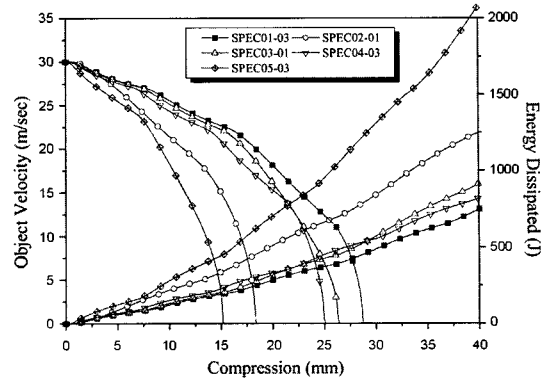


Fig. 16. Kinetic energy dissipation and velocity curves of impacting object for various specimens.

Table 2. Summary of estimated braking distances and mean brake forces

	l_b (mm)		P_m (ton)	
	Exp	FEM	Exp	FEM
SPEC01	28.7	25.5 (-10.9%)	1.60	1.80 (12.2%)
SPEC02	18.4	15.9 (-12.9%)	2.50	2.89 (14.8%)
SPEC03	24.6	21.7 (-12.0%)	1.87	2.12 (13.6%)
SPEC04	25.1	22.4 (-10.3%)	1.83	2.05 (11.5%)
SPEC05	15.2	12.6 (-16.5%)	3.02	3.64 (19.7%)

이 곡선에서 제동 대상이 되는 물체의 초기 운동에너지에 해당하는 지점이 예상 제동거리가 된다. 또한 제동거리에 따른 충돌체의 속도변화는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v(x) = \sqrt{v(0)^2 - 2 \frac{W_k(x)}{m}} \quad (4)$$

식(3)과 (4)를 이용해 얻은 운동 에너지 소산량 곡선과 충돌체의 속도변화 곡선은 Fig. 16과 같다. 이를 통해 예측된 제동거리를 식(1)에 대입하면 각 제동장치치의 평균 제동력을 구할 수 있다. 이러한 방법으로 예측한 각 제동장치치의 성능은 Table 2와 같다. 예상 제동거리 30.0 mm 및 그에 따른 평균 제동력 요구조건 1.53 ton에 가장 근접한 성능을 보이는 시험편은 SPEC01이다.

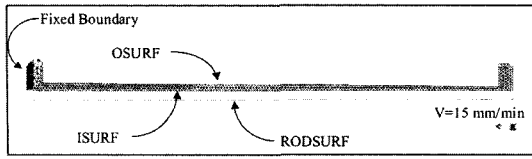


Fig. 17. Finite element model for the axial crushing of cylinder.

4. 유한요소해석

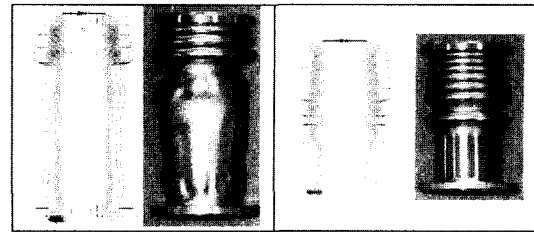
4-1. 유한요소모델

이상과 같은 반복적인 정적압축시험을 수치해석적 기법으로 대체할 수 있는지의 가능성을 살펴보기 위하여 실린더의 정적압축과정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard ver. 6.3-1을 사용하였다. 해석에 사용된 유한요소모델의 형상은 Fig. 17과 같다.

시험결과로부터 실린더의 주된 변형 모드는 축 대칭(Axisymmetric)임을 확인하였으므로 실린더 및 압축로드의 축 대칭면만을 모델링하였다. 실린더는 접촉 문제와 대변형 문제에 적합한 개선된 축대칭 6절점 삼각형 요소(CAX6M)를 이용하여 모델링하였다[10]. 압축로드는 제동장치 실린더에 비해 강성이 크므로 탄성체가 아닌 강체(rigid surface)로 모델링 하였다. 압축과정에서 일어나는 접촉현상을 고려하기 위하여, Fig. 17과 같이 세개의 면을 정의하였고 이들에 대해 실린더 외면 간의 접촉(self-contact, OSURF:OSURF), 내면 간의 접촉(ISURF:ISURF), 그리고 내면과 압축로드 간의 접촉(ISURF:RODSURF)을 고려하였다. 실린더가 고정되는 부분, 즉 고정단에 위치한 절점의 자유도는 모두 구속하였으며, 정적압축상황을 모사하기 위하여 강체로 모델링 된 압축로드가 15 mm/min의 속도로 움직이도록 강체 기준 절점(rigid body reference node)에 속도 경계조건을 적용하였다. 정적해석(static analysis)을 수행하였으므로 압축속도가 해석결과에 미치는 영향은 없고, 단지 상대적인 움직임을 모델링하기 위해 도입된 개념이다. 재료의 모델에는 Fig. 4의 인장시험결과를 바탕으로 항복 및 가공경화 특성을 포함시켰다.

4-2. 해석결과

유한요소해석을 통해 얻은 SPEC01 시편의 압축과정과 실제 정적압축과정을 Fig. 8에 비교하였다. 해석은 축 대칭 모델을 이용하여 수행하였으나, 비교의 편의를 위해 후처리 과정에서 결과를 360도 회전시켜서



(a) SPEC02

(b) SPEC04

Fig. 18. Comparison of the deformed shape obtained from FE analysis and static crushing tests.

그림과 같은 입체 모델을 얻었다. Fig. 8로부터, 유한요소해석을 통해 얻은 소성 주름의 생성 순서 및 개수가 실제 정적압축시험 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. SPEC02와 SPEC04에 대한 해석 결과도 Fig. 18에 비교하였다. SPEC02의 경우 유한요소해석을 통해 3개의 소성 주름이 생성된 후 실린더 하부에 두 개 이상의 소성 주름이 동시에 발생하는 상황이 실험과 동일하게 모사되었음을 알 수 있다. SPEC01과 동일한 모델이나 물성만 다른 SPEC04의 경우에도 7개의 소성 주름이 충격단에서부터 차례대로 생성되는 과정이 유한요소 해석을 통해 동일하게 모사되었다.

유한요소해석을 통해 얻은 SPEC01 및 SPEC04시편의 압축거리에 따른 제동력 곡선은 각각 Fig. 19 및 Fig. 20과 같다. 두 경우 모두 실험결과와 매우 유사한 양상을 보이고 있다. 열처리에 의한 재료의 물성변화가 제동력 변화 양상에 미치는 영향이 유한요소해석 결과에서도 관찰됨을 알 수 있다.

두 결과의 오차를 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소해석을 통해 얻은 제동력 곡선을 식(3) 및 (4)에

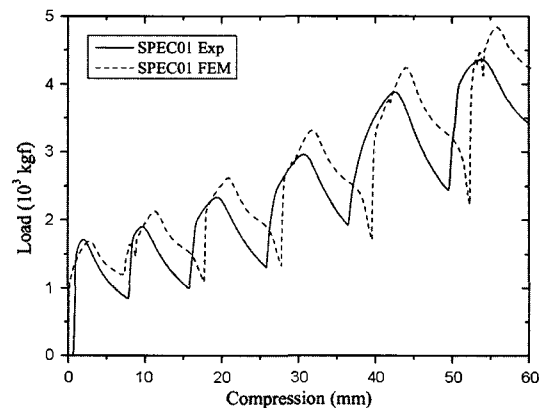


Fig. 19. Comparison of the crushing load obtained from FE analysis and static crushing tests (SPEC01).

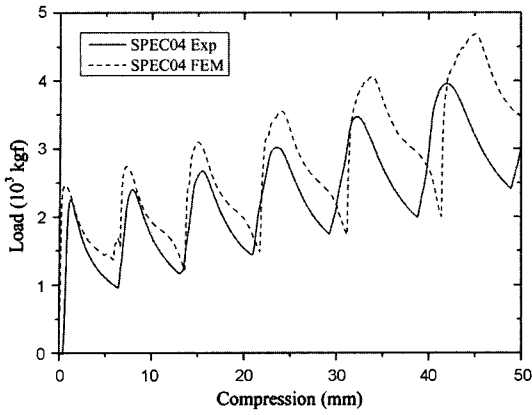


Fig. 20. Comparison of the crushing load obtained from FE analysis and static crushing tests (SPEC04).

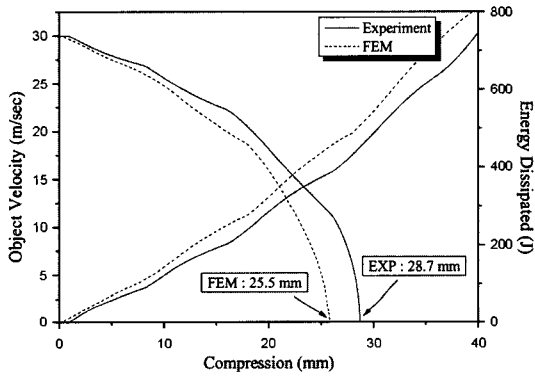


Fig. 21. Kinetic energy dissipation and velocity curves of impacting object for SPEC01 from FEA.

대입하여 제동거리에 따른 운동에너지 소산량 및 충돌체의 속도변화를 계산하였고, 이로부터 예상 제동거리 및 평균 제동력을 구하였다. Fig. 21에 SPEC01에 대해 해석결과로부터 구한 운동에너지 소산량 및 충돌체의 속도변화를 실험결과와 함께 나타내었다. SPEC01의 경우 정적압축시험을 통해 얻은 예상 제동거리는 28.7 mm이고, 유한요소해석을 통해 얻은 값은 25.5 mm로 약간 작음을 알 수 있다. 이상과 같은 방법으로 각각의 시편에 대해 얻은 예상 제동거리와 평균 제동력의 오차를 Table 2에 나타내었다. 제동거리의 경우 유한요소해석을 통해 얻은 결과가 10~17% 정도 작게 예측되었고, 평균 제동력은 12~20% 정도 높게 예측되었다. 여기서 SPEC05의 경우 압축실험 도중 실린더에 파괴가 발생하였으므로, 이를 재질의 파괴가 고려되지 않은 유한요소해석의 결과와 비교하는 것은 적절치 않다. 따라서 SPEC05의 결과를 제외하면 나머지 해석결

과는 실험결과와 약 10~15% 정도의 작은 차이만을 보임을 알 수 있다.

이상과 같은 유한요소해석과 실험 결과의 비교로부터, 실린더의 형상 및 재질 특성이 압축과정에 미치는 영향을 유한요소해석을 이용하여 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 제동장치 성능의 판단 기준이 되는 제동거리 및 평균 제동력도 약 10~15% 정도의 오차로 근사하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

콘 형상 실린더의 축 방향 압축변형에 콘 각도, 두께, 재질 등의 설계 인자가 미치는 영향을 정적압축시험 및 유한요소해석을 통해 확인한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 콘 형상 실린더를 도입함으로써 소성 주름이 여러 군데에서 동시에 생성되는 현상을 방지할 수 있고, 따라서 두께가 일정한 실린더의 경우 발생하는 초기 제동력의 갑작스런 상승을 막을 수 있다.

2) 실린더의 순차적인 압축을 보장하기 위해 요구되는 콘 각도의 범위가 있다. 콘 각도가 너무 작을 경우 의도한 효과를 얻을 수 없으며, 너무 클 경우에는 인접 주름끼리 겹쳐지는 현상으로 인해 파괴가 발생할 수 있다.

3) 콘 각도 요구 범위는 재질의 특성과도 관련이 있다. 항복응력이 작은 재질의 경우 압축이 진행됨에 따라 하부도 변형되어 콘 각도의 영향이 점차 줄어들므로, 보다 큰 콘 각도가 요구된다.

4) 시험 결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 확인하였다.

5종의 시편 중 성능 요구조건에 가장 근접한 SPEC01을 향후 실제 시스템에 적용하여 동적압축상황에서의 제동장치 성능을 확인할 예정이다. 또한 콘 형상 제동장치의 성능에 대한 정성적인 분석결과를 바탕으로, 향후 콘 각도 선정 및 재질 선정 시 기준으로 삼을 수 있는 정량적인 해석기법을 연구할 계획이다. 본 논문을 통해 유한요소해석의 신뢰성을 확인하였으므로, 앞으로 정적압축시험의 많은 부분을 유한요소해석으로 대체할 수 있으리라 판단된다.

참고 문헌

1. Ezra, A. and Fay, R. J., "An Assessment of Energy Absorbing Devices for Prospective Use in Aircraft

- Impact Situations," Dynamic Response of Structures, Pergamon, New York, pp. 225-246, 1972.
2. Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, Chap. 11, pp. 457-519, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1961.
 3. Jones, M., Structural Impact, Chap. 9, pp. 385-431, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
 4. Alexander J. M., "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading," Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 13, pp. 10-15, 1960.
 5. Grzebieta, R. H., "An Alternative Method for Determining the Behavior of Round Stocky Tubes Subjected to an Axial Crush Load," Thin-Walled Structures, Vol. 9, pp. 61-89, 1990.
 6. Gupta, N. K., "Some Aspects of Axial Collapse of Cylindrical Thin-Walled Tubes," Thin-Walled Structures, Vol. 32, pp. 111-126, 1998.
 7. 김지철, 이학렬, 김일수, 심우전, "콘 형상 제동장치의 축방향 압축변형에 대한 실험적 연구," 한국윤활학회 제32회 학술대회 논문집, pp. 169-176, 2002.
 8. Jichul Kim and Woo Jeon Shim, "Design of the Brake Device Using the Axial Crushing of Truncated Cone Type Cylinder," Proceedings of The Second Asia International Conference on Tribology, pp. 387-388, Jeju Island, Korea, 2002.
 9. Jones, N. and Abramowicz W., "Static and Axial Crushing of Circular and Square Tubes," Metal Forming and Impact Mechanics, pp. 225-247, Pergamon Press, Oxford, 1985.
 10. ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2002.