

# 콘 형상 제동장치의 축방향 압축변형에 대한 실험적 연구

김지철 · 이학렬 · 김일수 · 심우전

국방과학연구소

## Experimental Study on the Axial Crushing Behavior of Truncated Cone Type Brake Device

Jichul Kim, Hak-Yeol Lee, Il-Soo Kim, and Woo Jeon Shim

Agency for Defense Development

**Abstract** - Axial crushing behavior of cylindrical shell is utilized in the braking of the high-velocity impacting object. In this paper, truncated cone shape brake device is introduced. That is, thickness of the shell is increased gradually from the impacting end to the other end. A detailed experimental investigation on the quasi-static axial crushing behavior of truncated cone type brake devices has been performed. Specimens of various shape were tested to check the influence of design parameters such as length, radius, mean thickness, and conical angle of cylinder. Influence of the material properties were also investigated by adopting aluminum, low carbon steel, and stainless steel as constructing materials. By analyzing deformation procedures of the specimens, it is seen that conical angle influence the deformation mode and the sequence of the wrinkles generation. Braking distance and mean braking force of each specimen were predicted based on the crushing load measured from the tests.

**Key words** - Impact Energy Absorption, Truncated Cone, Axial Crushing, Quasi-static Compression Test

### 1. 서론

구조물의 내충격성(crashworthiness)을 향상시키기 위하여 다양한 방식의 충격흡수장치가 개발되어왔다. 이 중 재료의 소성변형을 이용한 실린더형 제동장치에 대해서는 지난 세기동안 많은 연구가 이루어졌다.[1-4]

그러나 지금까지 연구에서는 대부분 실린더의 두께가 일정한 경우에 대해서 해석 및 실험이 수행되었다. 두께가 일정한 경우, 처음 소성주름(plastic hinge)이 생기는 부분은 제작 공차에 의한 상대적인 두께 차이에 크게 좌우된다. 또한 미세한 형상 오차(imperfection)에 의해서도 압축 변형

모드가 축대칭 모드에서 비대칭 모드로 전환될 가능성이 있다[5].

이러한 실린더형 제동장치의 단점을 보완하기 위해서 두께가 충격단에서부터 고정단 쪽으로 일정하게 증가하는 형상의 제동장치를 제안하였다[6]. 즉, 이 경우 제동장치의 외형은 단순 실린더가 아니라 '끝단이 잘린 콘 형상(truncated conical shape)'이 되게 된다.

본 연구에서는 이러한 콘 각도의 도입이 제동 성능 및 변형 형상에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다. 이를 위해 다양한 형상 제원의 제동장치를 설계하여 만능재료시험기를 이용한 정적 압축시험을 수행하였다. 또한 몇 가지 재질에 대

해 시편을 제작하여 재질이 제동장치 성능에 미치는 영향도 관찰하였다.

## 2. 정적압축시험용 제동장치 설계

제동장치의 기본 요구조건인 평균 제동력( $P_m$ )은 식 (1)과 같이 제동의 대상이 되는 물체의 무게( $m$ ) 및 충돌 속도( $v$ ), 그리고 예상 제동거리( $l_b$ )에 의해 결정된다.

$$P_m = \frac{mv^2}{2l_b} \quad (1)$$

본 연구에서는 두 가지의 제동 대상에 대해 제동장치를 설계하였으며, 각 경우의 기본 요구조건은 Table 1과 같다.

A형 제동장치는 실린더의 길이를 150.0 mm, 실린더 내경을 36.0 mm로 설정하였고, 전체 길이 중 100.0 mm가 압축되면 제동이 완료되도록 설계하였다. B형 제동장치는 실린더의 길이는 100.0 mm, 실린더 내경은 15.0 mm, 그리고 제동거리는 30.0 mm로 정하였다. 이는 각 제동장치가 실제로 설치될 부위의 여유 공간 및 다른 부분과의 간섭을 고려하여 결정된 값이다.

제동장치의 재질로는 알루미늄(AL6061-T6), 연강(SM20C), 그리고 스테인레스 강(STS304)을 적용하였다. STS304의 경우 고용화 열처리(850℃로 1시간 유지→1030℃로 2시간 유지→냉각)를 한 경우와 하지 않은 경우를 모두 적용하여 열처리가 제동 성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

실린더의 두께( $t$ )는 평균 제동력을 실린더 형상 및 재질의 항복응력( $\sigma_0$ )의 함수로 표현한 식 (2)를 이용하여 결정할 수 있다[7]. 위에서 언급한 재질들의 항복응력 값이 200~300 MPa 정도이므로, 4.78 ton의 제동력이 요구되는 A형 제동장치

의 경우 두께가 2.0~2.5 mm, 1.53 ton이 요구되는 B형의 경우 1.0~1.5 mm 정도의 두께를 갖도록 설계하였다.

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

큰 타입 제동장치의 큰 각도(conical angle)는 Fig. 1의  $\theta_c$ 와 같이 실린더 외벽의 기울기로 정의하였다. 큰 각도가 지나치게 클 경우 고정단의 두께( $t_b$ )가 너무 커지거나 충격단의 두께( $t_i$ )가 너무 작아질 수 있으므로, 제동장치 설계 시 큰 각도는 0.2°~1.5° 정도를 적용하였다.

이상과 같은 제동장치 기본 설계안을 바탕으로 Table 2와 같이 A형 제동장치에 대해 3종, B형 제동장치에 대해 5종의 시편을 설계하였으며, 각 설계안 당 3개씩, 총 8종/24개의 제동장치 시편을 제작하였다. Table 2의 Spec type에서 A 및 B는 각각 Table 1의 설계조건을 의미한다.

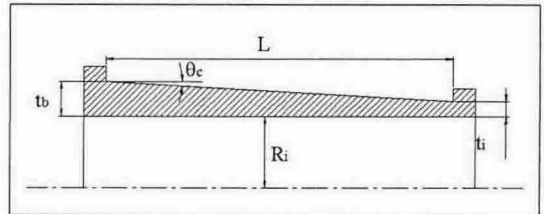


Fig. 1. Shape design parameters of truncated cone type brake device

Table 2. Specimen details

Spec. type	Material	L (mm)	R <sub>i</sub> (mm)	t <sub>i</sub> (mm)	t <sub>b</sub> (mm)	θ <sub>c</sub> (deg)
A01	AL6061-T6	150.0	18.0	2.0	2.4	0.15
A02	AL6061-T6	150.0	18.0	1.8	2.6	0.3
A03	SM20C	150.0	18.0	1.5	2.0	0.2
B01	STS304(a)	100.0	7.5	0.8	1.6	0.5
B02	STS304(a)	100.0	7.5	1.2	2.0	0.5
B03	STS304(a)	100.0	7.5	0.8	2.4	1.0
B04	STS304(b)	100.0	7.5	0.8	1.6	0.5
B05	SM20C	100.0	7.5	1.0	3.4	1.5

STS304(a) : solution treated

STS304(b) : as received

Table 1. Requirements for brake device

Type	Impacting Objects		$l_b$ (mm)	$P_m$ (ton)
	$m$ (kg)	$v$ (m/s)		
A	15.0	25.0	100.0	4.78
B	1.0	30.0	30.0	1.53

### 3. 시 험

#### 3-1. 시험 장비 및 방법

제동장치의 정적압축시험은 10톤 용량의 만능 재료시험기를 이용하여 수행하였다. 제동장치를 만능시험기에 설치하기 위하여, Fig. 2와 같이 마운트 및 압축 로드로 구성된 시험치구를 제작하였다. 압축시험은 15.0 mm/min의 속도로 수행하였다.

#### 3-2. A형 제동장치 시험결과

A01-01 시편은 충격단 쪽에 첫 번째 소성주름이 생기면서 그 부분에서 시편이 찢어지는 현상이 발생하였다. 그러나 압축을 멈추지 않고 계속 수행한 결과 Fig. 3(a)처럼 시편이 완전히 찢어져 버렸다. 따라서 나머지 두 개의 A01 시편에 대해서는 시험을 수행하지 않았다. A02-01의 경우도 A01-01과 마찬가지로 첫 번째 소성주름이 비대칭 모드(diamond mode)로 발생하면서 이로 인해 모서리 접히는 부분에서부터 파괴가 발생하였으며, 그 시점에서 실험을 중단하였다(Fig. 3(b)).

Fig. 3(a)와 같은 변형 모드(fragmentation mode of collapse)는 취성이 강한 재질을 사용하였을 때 주로 나타나는 현상이다[8]. AL6061-T6 재질의 경우 연신율은 12% 정도로, SM20C의 28%에 비하여 연성이 부족하다고 판단된다. 비대칭 모드 변형은 반경이 두께의 40 배가 넘을 경우 주로 발생한다[2]. 따라서 A02의 경우 반경과 두께의 비가 10 이하임에도 불구하고 초기에 비대칭 모드로 변형이 일어난 것은 제동장치 가공 시 발생한 형상오차에 의한 것이라고 판단된다. 또한 A02의 경우 제동장치 내면과 압축 로드 외면 사이의 간격이 2.0 mm로서, 실린더가 비대칭 형상으로 변형할 수 있는 여유가 많았던 것도 원인 중의 하나라고 판단된다.

SM20C 재질로 제작된 A03 시편들의 경우 알루미늄 시편과 달리 파괴현상 없이 압축이 잘 수행되었다. A03 시편들의 최종 변형형상은 Fig. 4와 같고, 압축거리에 따른 제동력 곡선은 Fig. 5와 같다. A03-01의 경우 처음 세 개의 소성 주름까지는 충격단 쪽에서부터 차례로 주름이 생성되었다.

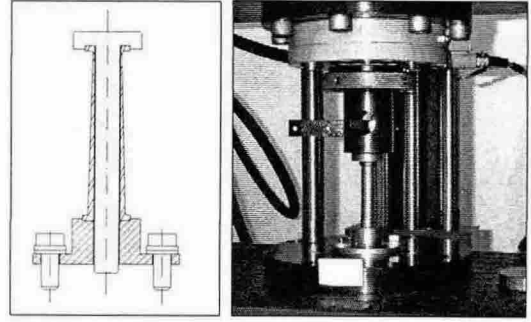


Fig. 2. Experiment setup

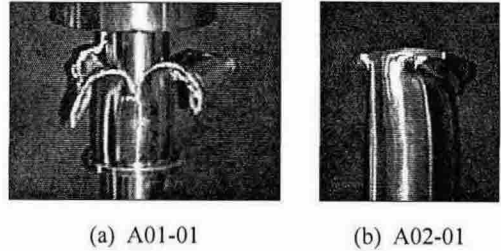


Fig. 3. Fracture of the aluminium specimens

그러나 4번째 소성주름이 생기려고 하는 시점에서 제동력이 Fig. 5와 같이 갑자기 증가하였고, 제동력이 시험기의 한계인 10톤에 근접하게 되어서 안전을 위해 시험을 중단하였다. 원인 분석결과 이는 소성주름의 발생에 의해 제동기 내면이 안쪽으로 휘어 들어가 압축 로드와 밀착되었기 때문이다. 이로 인해 소성변형에 의한 제동력에 마찰력이 더해지게 되었다. 이는 Fig. 5의 두 번째 제동력 피크를 보면 확인할 수 있다. A03-01의 두 번째 피크가 다른 두 개 시편의 두 번째 피크에 비해서 그 값이 급격하게 증가하며, 따라서 A03-01 시편의 경우 두 번째 소성주름 발생 시점부터 압축 로드와의 마찰이 시작됨을 알 수 있다.

이러한 현상을 방지하기 위해서 A03-02 및 A03-03 시편 시험 시에는 압축 로드의 직경을 35 mm에서 26 mm로 감소하여 시험을 수행하였다.

A03-02의 경우 4 번째 소성주름까지는 충격단에서부터 차례로 생성되었으나, 5 번째부터는 거꾸로 고정단에서부터 생성되기 시작했다. 5번째 주름의 생성 시점에서 비대칭 변형모드가 생성되었으며, 시험을 중단하였다.

A03-03은 역시 충격단 쪽에서부터 순차적으로

4개의 소성주름이 생성되었고, 5 번째부터 7 번째까지의 소성주름은 반대로 고정단 쪽에서부터 순차적으로 생성되었다. 따라서 끝까지 소성주름이 순차적으로 생성되도록 하기 위해서는 현재의 콘 각도 값보다 좀더 큰 값을 적용해야 하리라 판단된다.

### 3-3. B형 제동장치 시험결과

B01 시편들의 최종 압축형상은 Fig. 6과 같다. 직경 13.0 mm인 압축로드를 사용한 B01-01 및 B01-02의 경우, 압축 초기에는 축대칭 변형 모드를 보이다가 2~3 개의 소성주름 생성 후에는 비대칭 변형 모드로 전환되는 현상을 보였다. 이는 압축로드와 실린더 내면 사이의 간극이 커서(반경 1.0 mm) 시험 시 하중 조건 또는 변형 형상이 조금만 축대칭에서 벗어나더라도 바로 비대칭 모드로 전환될 여유가 충분하기 때문이라고 판단된다. 따라서 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 B01-03 시험 시에는 직경이 14.8 mm인 압축로드를 사용하였다. 이 경우에는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 70 mm 압축되는 동안 축대칭 변형모드가 끝까지 유지되었다. 즉 압축로드가 실린더의 축대칭 변형을 유지시켜주는 가이드 역할을 하였다. 소성 주름의 생성 순서는 처음 다섯 개까지는 충격단 쪽에서부터 차례로 생성되다가, 6 번째 및 7 번째 주름은 하부에서 동시에 생성되기 시작하였다. 이 중 고정단 쪽의 주름이 먼저 생성 완료되고, 그 위에 위치한 주름이 마지막으로 생성되었

다. B01 세 시편 모두 압축 후 시편이 압축로드에 딱 끼어버려서 후에 분리가 불가능하였다.

Fig. 7에 B02 시편의 최종압축 형상을 나타내었다. 가장 압축이 많이 이루어진 B02-01 시편의 경우 최초 3개의 소성주름까지는 축대칭 형상으로 생성되다가 그 이후에는 제동장치 하부 전체가 소성변형을 일으키며 반경이 증가하는 현상이 관찰되었다. 이로 인해 제동장치가 비대칭 모드로 변형을 일으키기 시작하였으며, 그 시점에서 시험을 중단시켰다. B02-02 및 B02-03 시편의 경우도 마찬가지로 비대칭 변형을 일으키는 시점에서 시험을 중단시켰다.

B03 시편들의 시험결과는 Fig. 8과 같다. 직경 13.0 mm인 압축로드를 사용하였음에도 불구하고 5개의 소성주름이 생성되는 동안 축대칭 변형모드를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 B03의 콘 각도가 B01 및 B02보다 크기 때문에 생기는 결과라고 판단된다. 즉, 압축이 진행됨에 따라 실린더 하부가 소성변형에 의해 반경이 증가하고 이로 인해 두께 차이에 의한 효과가 감소하게 되는데, B03는 원래 두께 차이가 크기 때문에 소성 변형의 효과가 큰 영향을 미치지 않는 것이다.

Fig. 9은 B01, B02, B03 시편에 대한 압축거리에 따른 제동력 계측 결과이다. B01 시편의 경우 초기 제동력은 1.5 ton 정도이며, 압축이 진행됨에 따라 두께가 두꺼운 부위에서 소성주름이 생성되게 되므로 제동력이 5.0 ton 정도까지 증가한다. B01에서 균일하게 두께를 0.4 mm 증가시킨 B02

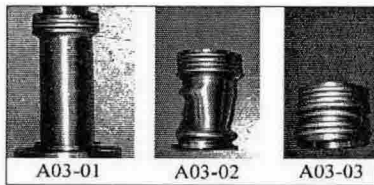


Fig. 4. Deformed shape of A03 specimens

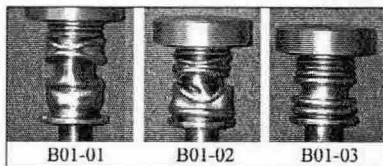


Fig. 6. Deformed shape of B01 specimens

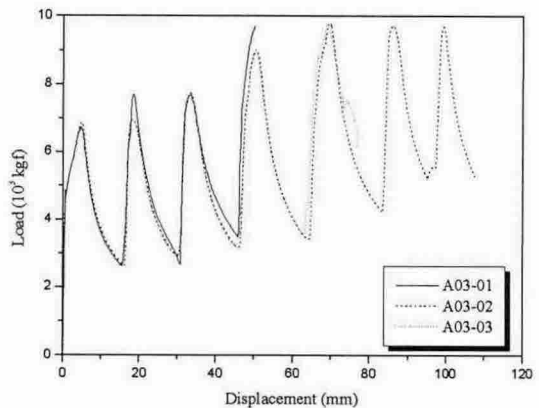


Fig. 5. Load-displacement curve of A03 specimens

의 경우 제동력 곡선도 전체적으로 1.0~1.5 ton 증가한 양상을 보인다. 단, 두께의 증가에 의해 하나의 소성주름이 생기기 위해 필요한 압축거리가 증가하였으며, 이로 인해 전체 소성주름의 개수는 감소하게 된다. B03의 경우는 초기에는 B01과 두께가 동일하므로 동일한 수준의 제동력을 보이나, 콘 각도가 B01보다 크므로 두께의 증가율도 커서 후반부에는 제동력이 B02 수준으로 증가함을 알 수 있다.

B01과 동일한 형상에 열처리하지 않은 STS304 재질을 적용한 B04의 경우, Fig. 10과 같이 소성주름이 최대 7 개 생성되는 동안 축대칭 변형 형상이 유지되었으며, 생성순서도 충격단에서부터 차례로 생성되었다. 열처리를 한 경우와 하지 않은 경우의 응력-변형률 곡선은 Fig. 11과 같다. 열처리를 하지 않은 경우 항복응력은 550 MPa, 열처리를 한 경우에는 그 절반에도 못 미치는 200 MPa 정도 수준이다. 이런 이유로 열처리를 한 재질을 적용한 경우(Fig. 6~8) 상부에 소성주름이 발생함과 동시에 하부에도 소성변형에 의한 반경 증가 현상이 관찰되고, 따라서 주름 생성 순서가 바뀐다거나 변형모드가 축대칭에서 비대칭 모드로 바뀌는 현상이 발생하게 된다. 반면 열처리를 하지 않은 경우에는 항복응력이 높기 때문에 충격단 쪽에서 소성주름이 발생하는 시점에 하부는

전혀 소성변형을 일으키지 않게 된다. 따라서 초기의 콘 각도에 의한 두께 차이가 압축이 진행되어도 변화가 없으며, 주름 생성순서가 일정하게 유지된다.

B01-03 시편과 B04-03 시편의 압축거리에 따른 제동력 곡선을 Fig. 13에 비교하였다. Fig. 11에서 열처리를 하지 않은 재질의 경우 항복응력이 두 배 이상 크면서 가공경화(strain-hardening)가 거의 없는, 완전소성과 유사한 경향을 보인다. 따라서 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. B01-03의 경우 50.0 mm 압축되는 동안 5개의 소성주름이 생겼으며, B04-03의 경우는 6개의 주름이 생성되었다.

SM20C로 제작된 B05 시편들의 경우 Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 압축도중 시편이 파괴되는 현상이 발생하였다. B05-01의 경우 세 번째 소성주름이 두 번째 소성주름 위로 겹쳐지면서 세 번째 주름의 반경이 연신률 한도를 넘어서 증가하였고, 이로 인해 해당 위치에서 파괴가 일어났다. B05-02도 동일한 현상이 발생하여서 파괴가 일어나기 전에 시험을 중단시켰다. 이러한 현상의 원인은 첫째, 제동장치의 콘 각도가 커서 (1.5°) 인접한 소성 주름의 반경 차이가 크기 때문이고, 둘

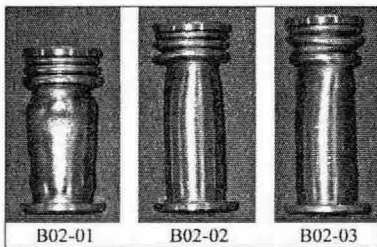


Fig. 7. Deformed shape of B02 specimens

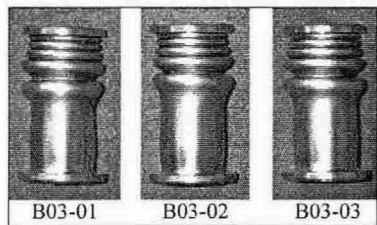


Fig. 8. Deformed shape of B03 specimens

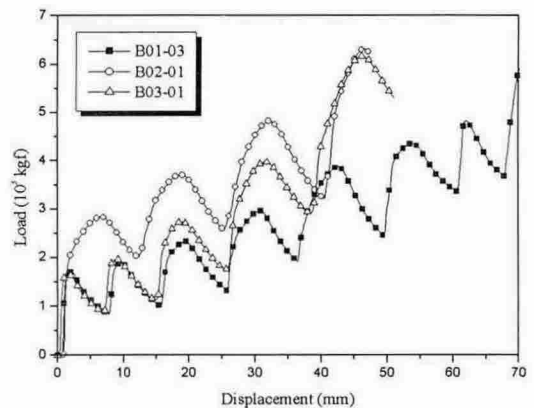


Fig. 9. Load - displacement curves of B01, B02, and B03 specimens

째, B05-01 및 B05-02의 변형 형상에서 알 수 있듯이 제동장치의 중심축이 원래 위치에서 벗어나 변형이 비대칭으로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 B05-03 시편 시험 시에는 직경이 큰 압축로드(14.8 mm)를 적용하여 Fig. 12와 같이 축대칭 변형 모드가 유지되도록 하였다. 이 경우 01 및 02 시편 처럼 확연히 보이지는 않으나 여전히 인접 주름으로 주름이 겹쳐지는 현상이 관찰되었으며, Fig. 13의 압축거리에 따른 제동력 곡선에서 갑자기 제동력이 감소하는 부분(화살표표시)이 보이므로 B05-03 시편도 내부에서 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

### 3-4. 제동장치 성능분석

Fig. 5, 9, 10의 제동거리에 따른 제동력 곡선을 적분하면, 제동거리에 따라 제동장치의 소성변형에 의해 소산되는 운동 에너지량을 알 수 있다. 따라서 이 곡선에서 제동대상이 되는 물체의 초기 운동 에너지에 해당하는 지점이 예상 제동거리가 된다. 제동거리에 따른 운동 에너지 소산량 곡선( $W_k(l_b)$ )으로부터, 제동거리에 따른 충돌물체의 속도변화( $v(l_b)$ )는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v(l_b) = \sqrt{v(0)^2 - 2 \frac{W_k(l_b)}{m}} \quad (3)$$

A형 및 B형 제동장치에 대해 각 시편의 제동력 곡선을 적분해 얻은 운동 에너지 소산량 곡선과 충돌물체의 속도변화 곡선은 각각 Fig. 14 및 Fig. 15와 같다. 이로부터 예측된 제동거리를 식 (1)에 대입하면 평균 제동력을 구할 수 있다. 이렇게 구한 각 제동장치 시편의 성능예측 결과는 Table 3과 같다. A03의 경우 예상 제동거리 100.0 mm에 근접한 제동거리를 보였다. B형 제동장치의 경우 예상 제동거리 30.0 mm에 가장 근접한 성능을 보인 시편은 B01 시편이다.

### 4. 결론

콘 각도, 두께, 반경, 재질 등의 설계인자가 콘형상 제동장치의 성능에 미치는 영향을 실험적으

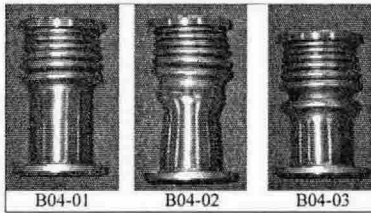


Fig. 10. Deformed shape of B04 specimens

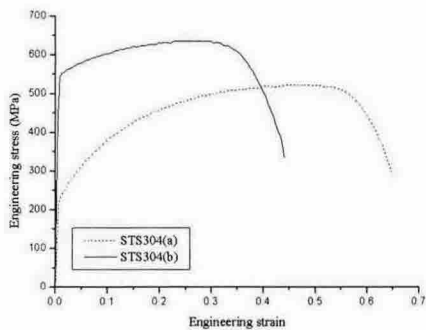


Fig. 11. Stress-strain curve of STS304

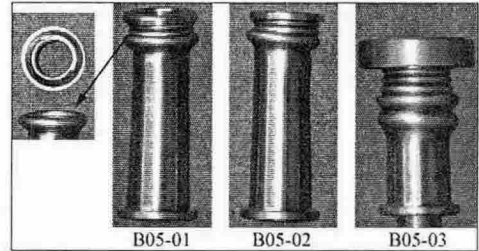


Fig. 12. Deformed shape of B05 specimens

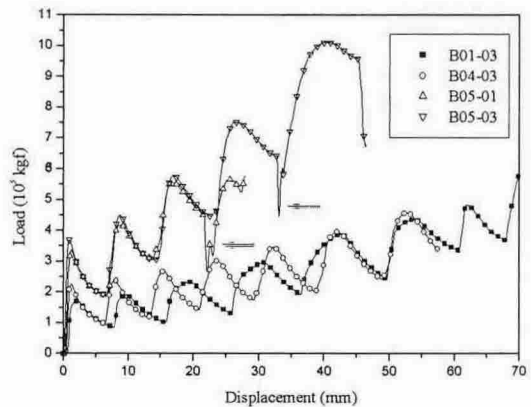


Fig. 13. Load - displacement curves of B01, B04, and B05 specimens

로 확인한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소성주름이 충격단에서부터 차례로 생성되도록 하기 위해서는 콘 각도가 일정 값 이상이어야 한다. 콘 각도가 요구되는 값보다 작을 경우 주름의 생성순서가 압축도중 뒤바뀔 수 있으며 (A03, B01), 또한 변형 모드도 축대칭 모드에서

Table 3. Braking distances and mean braking forces of specimens

type	A03	B01	B02	B03	B04	B05
$l_b$ (mm)	87.2	28.7	18.4	26.4	25.1	15.2
$P_m$ (ton)	5.49	1.11	1.73	1.21	1.27	2.10

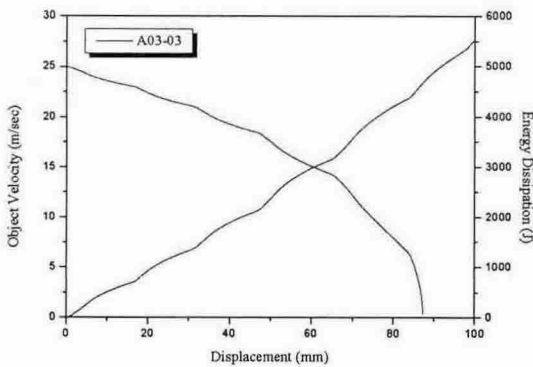


Fig. 14. Kinetic energy dissipation and velocity curves of impacting object (A type brake device)

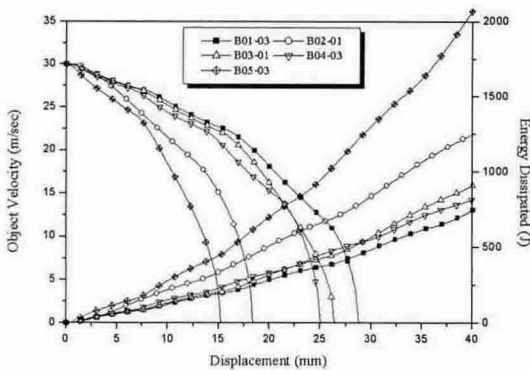


Fig. 15. Kinetic energy dissipation and velocity curves of impacting object (B type brake devices)

비대칭 모드로 전환될 수 있다(B01, B02). 그러나 콘 각도가 너무 크면 인접한 주름끼리 겹쳐지는 현상이 발생하면서 파괴가 일어날 가능성이 높다 (B05).

2) 제동장치와 압축로드 사이의 간격이 너무 크면 제동장치가 비대칭 변형을 일으킬 가능성이 커진다(A02, B01, B05). 따라서 간격을 작게하여 압축로드가 축대칭 변형을 위한 가이드 역할을 하도록 하여야 한다(B01-03, B05-03).

3) 제동장치의 재질로는 연성이 좋은 재질이 적합하며, 콘 각도 선정 시 재질의 항복응력에 대한 고려가 필요하다. 즉 항복응력이 작은 재질의 경우 압축이 진행됨에 따라 실린더 하부에 소성 변형으로 인한 두께의 변화가 발생하게 되고, 이로 인해 콘 각도의 효과가 감소되게 된다(B01, B02). 따라서 항복응력이 큰 경우는 작은 콘 각도로도 원하는 효과를 얻을 수 있으나(B04), 항복응력이 작은 경우 콘 각도를 충분히 적용하여야 한다(B03).

이상과 같은 콘 형상 제동장치의 성능에 대한 정성적인 분석 결과를 바탕으로, 향후 콘 각도 선정 및 재질 선정 시 기준으로 삼을 수 있는 정량적인 해석기법을 개발할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] Ezra, A., and Fay, R. J., "An Assessment of Energy Absorbing Devices for Prospective Use in Aircraft Impact Situations," Dynamic Response of Structures, pp.225-246, Pergamon, New York, 1972
- [2] Jones, M., Structural Impact, Chap. 9, pp.385-431, Cambridge University press, Cambridge, 1989
- [3] Timoshenko, S. P., and Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, Chap. 11, pp.457-519, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1961
- [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] Gupta, N. K., "Some aspects of axial collapse of cylindrical thin-walled tubes," *Thin-Walled Structures*, Vol.32, pp.111-126, 1998
- [6] 김지철, 이학렬, 심우전, "소성변형을 갖는 원통형 제동장치의 동적거동에 관한 유한요소해석," 한국윤활학회 제32회 학술대회 논문집, pp.199-204, 2000
- [7] 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
- [8] Song, H. W., Wan, Z. M., Xie Z. M., Du, X. W., "Axial Impact Behavior and Energy Absorption Efficiency of Composite Wrapped Metal Tubes," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.24, pp.385-401, 2000