

동적 국부좌굴을 고려한 확관튜브의 충돌에너지 흡수성능

안 광 현* · 김 진 성 · 허 훈

한국과학기술원 기계항공시스템학부

The Crash Energy Absorption of the Expansion Tubes considering Dynamic Local Buckling

Kwanghyun Ahn* · Jin Sung Kim · Hoon Huh

School of Mechanical, Aerospace & System Engineering, KAIST, Science town, Daejeon 305-701, Korea

Abstract : Energy absorption mechanism of the expansion tube is mainly expansion of the tube diameter by pushing a conical punch into the tube while a bottom of the tube is fixed. In order to improve crash energy absorption capacity of expansion tubes, local buckling characteristics of an expansion tube must be considered, since crash energy absorption significantly decreases while buckling occurs. This paper deals with the dynamic local buckling characteristics and crash energy absorption of the expansion tubes during tube expanding process. Static local buckling loads can be predicted by modified Plantema equation. In this study, dynamic term is added to modified Plantema equation for considering strain rate effect of buckling. The tube shape that has maximum crash energy absorption capacity can be obtained by comparing between dynamic modified Plantema equation and numerical analysis of expansion tubes.

Key words : Expansion tube(확관튜브), Crash energy absorption(충돌에너지 흡수성능), Dynamic local buckling(동적 국부좌굴), Modified Plantema equation(수정 Plantema 식)

1. 서 론

확관튜브(Expansion tube)는 한쪽 끝단을 고정시킨 원형 튜브에 원뿔 형 펀치를 압입하여 발생하는 튜브 확관과정을 통하여 에너지를 흡수하는 장치이다. 확관튜브는 기존의 압케형 에너지 흡수부재에 비해 튜브의 단위 질량당 에너지 흡수성능은 우수하지 못하지만¹⁾ 확관튜브가 갖는 완만한 하중 증가 특성은 충돌 시 발생하는 가속 충격력을 감소시켜 기타 주요 부재의 가속 충격력에 의한 피

해를 줄일 수 있다. 또한 확관튜브는 그 전체 길이가 확관을 통하여 에너지 흡수에 사용될 수 있다는 공간 효율성으로 인하여 결과적으로 단위 질량당 에너지 흡수성능이 우수하지 못한 단점을 보완하고 압케형 튜브와 비슷한 양의 충돌 에너지를 흡수할 수 있게 된다. 하지만 압케형 튜브가 튜브 자체로만 에너지 흡수부재로 사용될 수 있는 것과는 달리 확관튜브의 경우 압입을 위한 펀치가 필요함으로 인해 그 질량 및 부피가 증가하게 되고 따라서 자동차와 같은 경량화가 필요한 장치에는 사용되기 어렵다. 현재 확관튜브는 열차와 같은 공간적 제약이 크지 않으면서 큰 충돌에너지가 발생하는 곳에 사용되고 있다. 확관튜브가 사용되고 있는 대표적인 예로는 열차의 경충돌 안전장치를 들 수 있다.

* 안광현, E-mail: ankh-1128@kaist.ac.kr

경충돌 안전장치는 열차의 저속 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 흡수하기 위한 장치로서 확관튜브는 경충돌 안전장치의 부품 중 가장 많은 에너지 흡수를 담당하고 있으며 주요부재료의 가속 충격력 전달을 감소시키는 역할을 하게 된다.²⁾

본 연구에서는 확관튜브의 충돌에너지 흡수성능을 저하시킬 수 있는 중요한 특성인 좌굴하중을 예측하여 좌굴이 발생하지 않는 범위 내에서 확관튜브의 충돌에너지 흡수성능을 증가시킬 수 있는 설계 방안을 제안하고자 한다.

2. 해석 조건

확관튜브의 충돌에너지 흡수성능 및 좌굴하중에 미치는 펀치 및 튜브의 형상에 대한 영향을 확인하기 위하여 유한요소해석(Finite element analysis)을 이용한 영향인자 연구를 수행하였다. 유한요소해석에는 내연적/ 외연적 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard와 ABAQUS/Explicit을 사용하였다.

2.1 유한요소 모델 및 경계조건

영향인자 연구를 위한 유한요소 모델 및 경계조건을 Fig. 1에 도시하였다. 해석의 효율성을 위하여 축 대칭 요소를 사용하였으며 튜브의 끝단을 고정하고 펀치에 초기속도 경계조건을 부여하였다. Fig. 1에 도시된 기준 형상은 현재 열차의 경충돌 안전장치에 사용되기 위해 연구중인 확관튜브의 형상 중 한 예이며 본 형상을 기준으로 각 변수를 변화시키며 영향인자 연구를 수행하였다.

2.2.1 마찰 조건

확관튜브의 경우 튜브확관과정 시 펀치와 튜브 사이의 마찰면적이 넓으므로 마찰조건은 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 확관튜브의 해석을 위한 마찰조건을 결정하기 위하여 최원목 등³⁾이 다양한 재료에 대해 수행한 확관튜브의 정적 실험의 결과와 해석조건을 비교하였다. Fig. 2는 두 가지 재료(SCM440, SNCM439)에 대한 실험결과와 다양한 마찰조건으로 수행한 해석결과를 비교한 결과로 마찰계수가 0.05인 경우의 해석결과가 실험결과와 가장 비슷함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 마찰계수를 0.05로 고정하기로 하고 마찰조건의 변화에 따른 영향은 고려하지 않기로 한다.

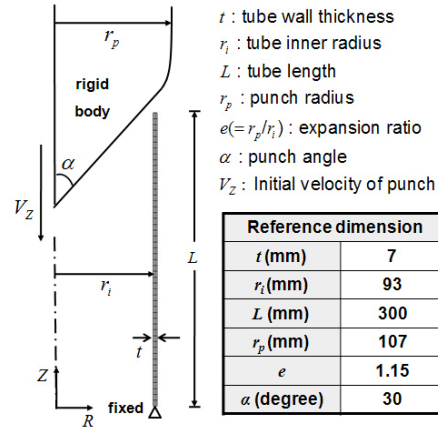


Fig. 1 Finite element model of tube and punch

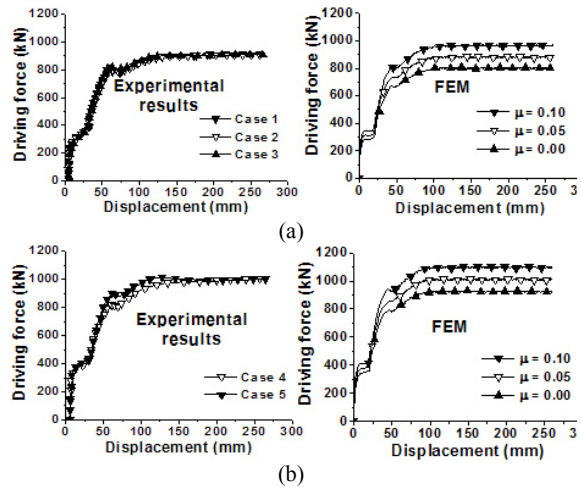


Fig. 2 Driving force of punch from experiment and numerical analysis: (a) SCM440; (b) SNCM439

2.2.2 재료 선정

확관튜브의 경우 에너지 흡수성에 유리한 고 변형률 경화 특성 이외에 튜브 찢어짐을 방지하기에 유리한 고 연신율 특성을 갖는 TWIP 강을 사용하는 것이 유리하나 TWIP 강의 경우 변형률 속도에 대한 영향이 거의 나타나지 않는다. 본 연구에서는 펀치의 속도에 따른 충돌에너지 흡수성능 및 동적 국부 좌굴에 대한 영향을 파악하는 것이 목적이므로 변형률 속도 민감도가 큰 재료인 SPCUD를 사용하여 연구를 수행하였으며 Table 1에 SPCUD의 Johnson-Cook 모델 계수를 나타내었다.

Table 1. Johnson-Cook model coefficients of SPCUD⁴⁾

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
226.61	439.43	0.616	0.131	0.33

3. 환관튜브의 충돌에너지 흡수성능

환관튜브의 에너지 흡수성능에 대한 기존의 연구 결과⁵⁾ 튜브의 두께, 반경, 펀치의 각도 및 환관비 모두 증가할수록 단위 질량당 흡수되는 에너지는 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서는 기존의 연구에 펀치의 속도에 대한 영향을 추가하여 환관튜브의 에너지 흡수성능에 대한 동적 효과를 확인하였다. 동적 해석을 위해 외연적 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit을 사용하였으며 정적 해석에서와 마찬가지로 나머지 변수를 고정하고 한가지 변수를 변화시키며 그 변수에 대한 영향을 확인하였다. 펀치의 질량은 펀치의 속도가 5 m/s일 때 0.2 MJ의 에너지를 가지도록 16,000 kg으로 통일하였다.

3.1 튜브 형상

영향인자연구를 위해 사용된 튜브의 형상과 관련된 변수는 튜브의 두께와 반경으로서 각 변수에 대해 에너지 흡수성능이 변화하는 경향이 펀치의 속도에 의해 받는 영향을 확인하였다.

Fig. 3은 튜브의 두께에 대한 영향을 나타낸 그래프로 튜브의 두께가 증가할수록 단위 펀치진행거리 당 에너지 흡수량이 증가하게 되며 Fig. 3(b)를 통해 그 증가하는 경향은 튜브의 두께에 대해 선형적임을 알 수 있다. 또한 펀치의 초기 속도가 증가할수록 동일한 두께의 튜브가 흡수하는 에너지는 증가하게 되며 이는 변형률 속도 민감도가 양수인 모든 재료에서 같은 경향을 보일 것으로 예상된다. Fig. 3(b)에서 펀치의 속도가 증가할 경우에도 단위 펀치진행거리당 에너지 흡수량이 튜브의 두께에 대해 선형적으로 증가하는 경향은 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그래프의 기호 u 는 펀치 진행거리를 나타낸다.

튜브의 반경 역시 두께의 경우와 마찬가지로 증가할수록 튜브의 에너지 흡수성능이 증가하나 그 증가하는 경향은 점차 감소되는 것을 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 또한 펀치의 속도가 증가할 경우 같은 반경의 튜브가 단위 펀치진행거리 당 흡수하는 에너지량은 증가하게 된다. Fig. 4(b)에서 단위 펀치 진행거리 당 에너지 흡수량이 튜브의 반경에 대해 증가하지만 그 증가량이 점차 감소하는 경향은 속도가 변화할 경우에도 유지되고 있다.

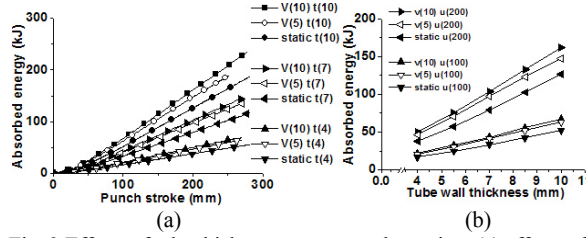


Fig. 3 Effects of tube thickness on energy absorption: (a) effects of punch velocity; (b) energy absorption at the same punch stroke

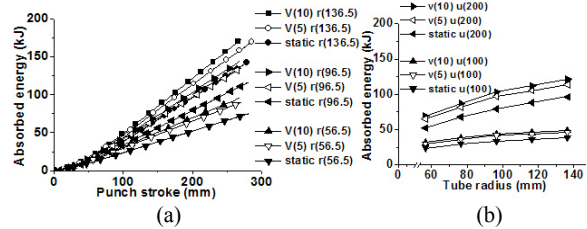


Fig. 4 Effects of tube radius on energy absorption: (a) effects of punch velocity; (b) energy absorption at the same punch stroke

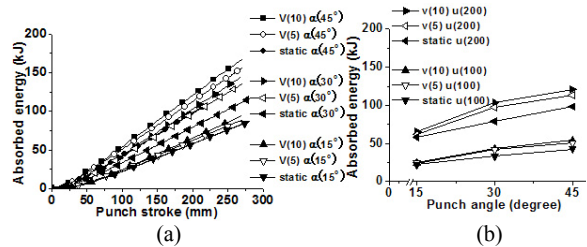


Fig. 5 Effects of punch angle on energy absorption: (a) effects of punch velocity; (b) energy absorption at the same punch stroke

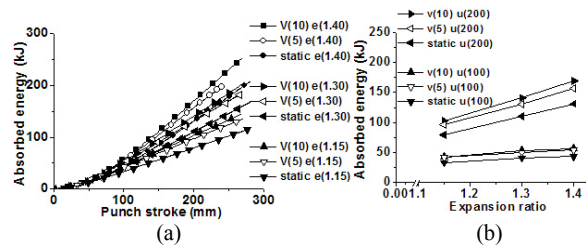


Fig. 6 Effects of expansion ratio on energy absorption: (a) effects of punch velocity; (b) energy absorption at the same punch stroke

3.2 펀치 형상

펀치의 각도와 환관비 모두 정적 해석의 결과와 마찬가지로 증가할수록 에너지 흡수성능이 증가함을 Fig. 5~6을 통해 확인할 수 있다. 펀치의 각도의 경우 증가할수록 에너지 흡수량이 증가하기는 하나 그 증가량은 감소하며 환관비의 경우 환관비에 대해 선형으로 에너지 흡수량이 증가하고 있다. 또한 펀치의 속도가 증가함에 따라 동일한 펀치 각도 및 환관비의 환관튜브가 흡수하는 에너지량은 증가하며 속도가 증가하여도 각 변수가 에너지 흡수량에 미치는 영향은 같은 경향을 보인다.

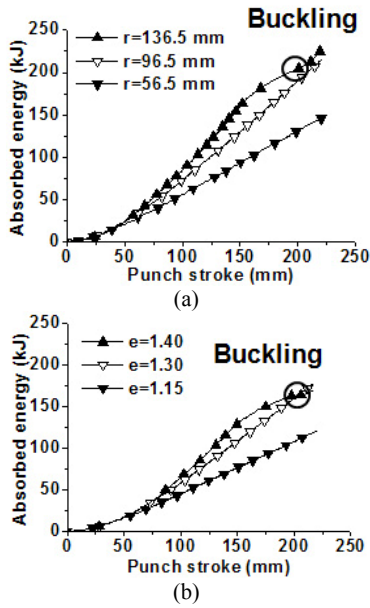


Fig. 7 Effects of buckling: (a) effects of tube radius when $t=5$ mm, $\alpha=45^\circ$, $e=1.3$; (b) effects of expansion ratio when $t=7.5$ mm, $r_i=93$ mm, $\alpha=45^\circ$

4. 확관튜브의 동적 국부좌굴

Fig. 7은 좌굴이 발생한 경우의 에너지 흡수량에 대한 그래프로 좌굴이 발생할 경우 에너지 흡수능이 현저히 감소함은 이전의 연구에서 이미 확인하였다. 이전의 연구에서 확관튜브의 좌굴모드는 비탄성 국부좌굴모드이며 비탄성 국부좌굴하중을 예측하기 위해 보편적으로 사용되는 Plantema 식이 다양한 튜브 형상에서의 좌굴하중을 정확히 예측하지 못함을 확인하였다. 따라서 다양한 형상의 튜브에서의 비탄성 국부좌굴 하중을 예측하기 위해 변형률경화 효과가 포함된 수정 Plantema 식을 제안하였으며 이는 다양한 튜브 형상에서의 정적 국부좌굴 하중을 보다 정확히 예측하였다.⁵⁾ 본 연구에서는 펀치의 속도가 증가하는 경우의 좌굴하중을 예측하기 위하여 기존 연구에서의 수정 Plantema 식에 동적 효과를 추가하였다.

4.1 변형률속도효과를 추가한 수정 Plantema식

식 (1)은 정적 국부좌굴하중을 예측하기 위하여 이전의 연구에서 제안하였던 수정 Plantema 식이다

$$P_{cr} = 2\pi r t \left[A + B \left\{ k \left(\frac{t}{r} \right)^2 \right\}^n \right]_{cr} \quad (1)$$

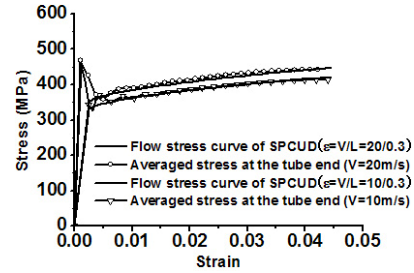


Fig. 8 Comparison between material curve of SPCUD and averaged stress distribution on fixed end at each velocity

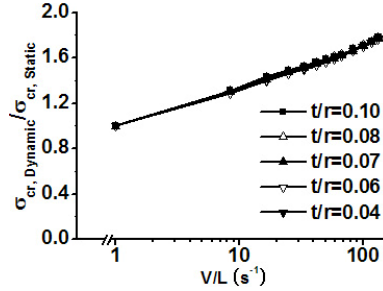


Fig. 9 Ratio of dynamic to static buckling stress of SPCUD w.r.t. the equivalent strain rate

식의 k 는 재료에 따라 결정되는 값으로 각 재료에 대한 k 값은 한번의 유한요소해석을 통하여 구해야 한다. 유한요소해석을 통하여 구해진 k 값은 TWIP 강인 경우 6.8, SPCUD의 경우 4.46으로 나타난다.

튜브의 국부좌굴에 미치는 튜브의 변수는 두께 및 반경 각각의 값이 아닌 반경에 대한 두께의 비, t/r , 임을 기존 연구에서 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 동적 좌굴하중을 예측하기 위한 튜브의 변수로 t/r 을 사용하였다. Fig. 8은 펀치의 속도가 10 m/s, 20 m/s인 두 가지 경우에 대하여 튜브 끝 고정단에서의 두께방향으로의 압축응력 분포의 평균 값을 펀치 진행거리를 튜브 전체 길이로 나눈 값인 단순 변형률에 대해 나타낸 결과이다. 편의를 위해 펀치의 속도를 튜브 전체 길이로 나눈 값을 등가 변형률속도로 정의하면 각 속도에서의 평균 압축응력은 각각의 등가 변형률속도에 해당하는 재료 곡선을 따라가는 것을 확인할 수 있다. 이 때 x축의 변형률은 펀치 진행거리를 튜브 전체 길이로 단순히 나눈 값으로 등가변형률로 정의한다.

Fig. 9는 각 형상에서의 동적 좌굴하중에 대한 결과를 그 형상에 해당하는 정적 좌굴하중으로 나눈 결과로서 그 비는 튜브의 형상과 관계없이 일정하며 다음과 같은 관계가 성립하고 있다.

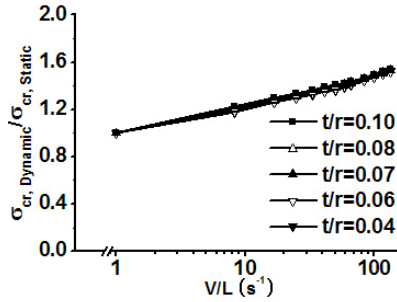


Fig. 10 Ratio of dynamic to static buckling stress of SPRC340R w.r.t. the equivalent strain rate

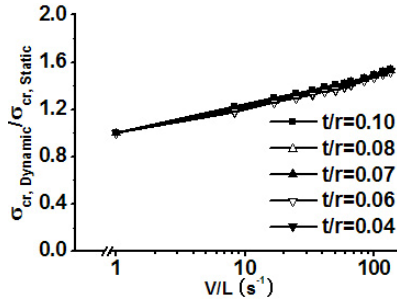


Fig. 11 Ratio of dynamic to static buckling stress of SPCC w.r.t. the equivalent strain rate

$$\frac{\sigma_{cr,dynamic}}{\sigma_{cr,static}} = \left(1 + 0.15 \ln \left(\frac{V/L}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (2)$$

이 때 $\dot{\epsilon}_0$ 은 1/s로 정의된다. 이러한 관계를 다른 재료에 대해 확인해 보기 위하여 SPRC340R과 SPCC의 두 가지 재료에 대하여 등가 변형률 속도에 따른 좌굴하중을 예측하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각 재료에 대한 정적 좌굴하중에 대한 동적 좌굴하중의 비로서 각각:

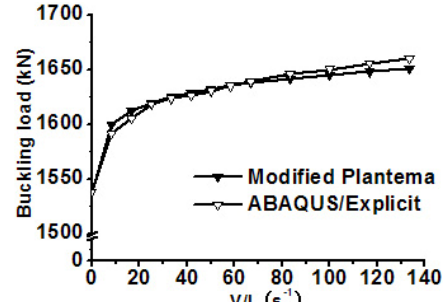
$$\frac{\sigma_{cr,dynamic}}{\sigma_{cr,static}} = \left(1 + 0.105 \ln \left(\frac{V/L}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \text{ for SPRC340R} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{cr,dynamic}}{\sigma_{cr,static}} = \left(1 + 0.075 \ln \left(\frac{V/L}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \text{ for SPCC} \quad (4)$$

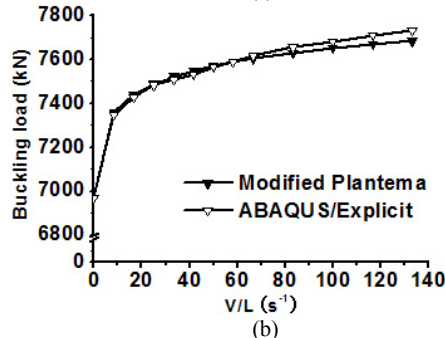
의 관계가 성립하며 식 (2)~(4)를 종합하여 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{\sigma_{cr,dynamic}}{\sigma_{cr,static}} = \left(1 + 1.2C \ln \left(\frac{V/L}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (5)$$

즉, 편치의 속도에 따른 좌굴하중은 식 (1)의 정적 좌굴하중과 식 (5)의 정적 좌굴하중에 대한 동적 좌굴하중의 비를 이용하여 최종적으로 다음과 같



(a)



(b)

Fig. 12 Dynamic buckling load of: (a) Al7039; (b) 4340STEEL

이 예측된다.

$$P_{cr} = 2\pi r t \left[A + B \left\{ k \left(\frac{t}{r} \right)^2 - \frac{\sigma_y}{E} \right\}^n \right] \left[1 + 1.2C \ln \left(\frac{V/L}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (6)$$

Fig. 12는 Al7039와 4340Steel에 대하여 식 (6)의 동적 효과를 고려한 수정Plantema 식을 이용하여 예측한 좌굴하중과 ABAQUS/Explicit을 이용하여 예측한 좌굴하중을 비교한 결과로서 속도가 빨라질수록 오차가 증가하기는 하나 경충돌 안전장치에 해당하는 속도 범위 내에서 다양한 재료 및 형상에 대해 좌굴하중을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 식 (6)의 동적 효과를 고려한 수정 Plantema 식은 Johnson-Cook 모델과 같은 형태를 나타내나 이는 해석을 위한 재료 모델로 Johnson-Cook 모델을 사용하였기 때문이며 기타 다른 재료 모델에 대한 형태도 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

Table 2. Johnson-Cook model coefficients of various materials⁴⁾

Material	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
SPRC340R	251.56	498.26	0.631	0.087	0.41
SPCC	321.03	453.00	0.691	0.063	0.52
Al7039	337	343	0.41	0.01	1
4340STEEL	792	510	0.26	0.014	1.03

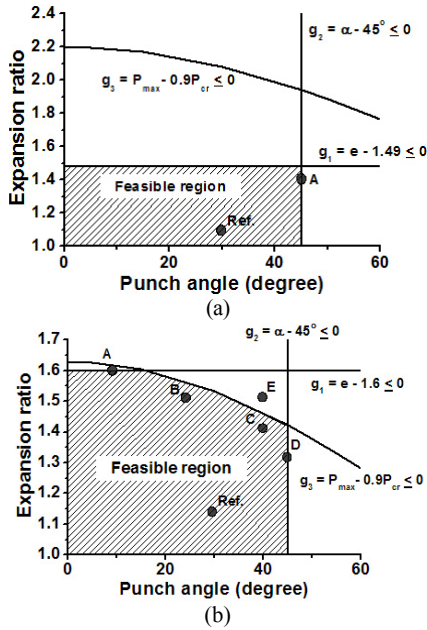


Fig. 13 Stable region of expansion tube: (a) SPCUD; (b) TWIP

5. 적용 방안

Fig. 13은 TWIP강과 SPCUD를 사용한 확관튜브 설계의 예제이다. 각 설계의 두 제한조건 g_1 , g_2 는 각각 에너지흡수성능에 악영향을 미치는 끝단의 찢어짐과 바깥 방향 말림(outward curling)현상을 방지하기 위한 조건으로 Fischer 등⁶⁾과 Kitazawa 등⁷⁾의 연구 결과에 의해 결정하였다. 각 설계의 제한조건 g_3 는 본 연구에서 제안된 수정 Plantema 식을 이용한 좌굴 방지 제한조건으로 TWIP 강 경우 g_1 , g_2 에 의한 영역 내에 좌굴에 대한 경계가 존재하여 좌굴을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다. Table 3과 4는 각 설계에 의하여 개선된 에너지 흡수성능으로 기존의 설계 안에 비해 각각 187 %와 102 % 증가하였음을 알 수 있다.

Table 3. Absorbed energy of the new model (SPCUD)

Case	α	e	Energy	Case	α	e	Energy
Ref.	30°	1.15	100.0 kJ	A	45°	1.4	287.2 kJ

Table 4. Absorbed energy of the new model (TWIP)

Case	α	e	Energy	Case	α	e	Energy
Ref.	30°	1.15	200.0 kJ	C	40°	1.4	404.4 kJ
A	10°	1.6	181.4 kJ	D	45°	1.3	360.1 kJ
B	25°	1.5	343.0 kJ	E	40°	1.5	295.4 kJ

6. 결론

본 연구에서는 확관튜브의 에너지 흡수성능에 악영향을 미치는 국부좌굴을 방지하기 위한 방법을 제시하였다. 정적 국부좌굴을 예측하기 위한 기존의 연구에 이어 펀치의 속도에 따른 국부좌굴을 예측하기 위한 수정 Plantema 식을 제안하였으며 이는 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 이를 토대로 좌굴이 발생하지 않는 범위 내에서 확관튜브의 에너지 흡수성능을 최대로 향상시키기 위한 설계 방안을 제시하였다.

향후 확관튜브에 있어 또 하나의 중요한 인자인 찢어짐 및 마찰에 관한 연구를 수행하고자 한다. 또한 본 연구의 결과는 모두 유한요소해석에 의한 결과이므로 실험을 통해 그 타당성이 검증되어야 할 것이다.

References

- 1) N. Jones, *Structural Impact*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- 2) W.M. Choi, T.S Kwon, S.S Kim, H. Huh and H.S. Jung, "The Study on the Crash Energy Absorbers of the Expansion Tube Type by using the Static Experiment", Proc. KSAE Spring Conference, Vol. 4, pp.1996~2001, 2007.
- 3) W.M Choi, H.S. Jung, W.H. Yu, J.S. Ku and T.S. Kwon, "The Basic Study on the Design of the Light Collision Safety Device", Proc. KSR Fall Conference, pp.26~31, 2006.
- 4) G.R. Johnson and W.H. Cook, "A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperature", Proc. 7th International Symposium on Ballistics, pp.541~547, 1983.
- 5) K.H. Ahn, J.S. Kim and H. Huh, "Study on the Energy Absorption and the Local Buckling of the Expansion Tubes", Proc. KSAE Fall Conference, Vol. 4, pp.2251~2256, 2007.
- 6) F. D. Fischer, F.G. Rammerstorfer and T. Daxner, "Flaring – An Analytical Approach", Int. J. Mech. Sci., Vol. 48, pp. 1246~1255, 2006.
- 7) K. Kitazawa, K. Nakano, M. Tsujide and M. Kobayashi, "Preventing Method of Curling in Tube End Flaring by Conical Dies", J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity, Vol. 31, No. 349, pp. 168~175, 1990.