

# FEM을 이용한 확장형 충돌에너지 흡수부재의 좌굴불안전성에 관한 연구

최원목<sup>†</sup>·정현승<sup>\*</sup>·권태수<sup>\*\*</sup>

## The study on the buckling instability of the expansion tube type crash energy absorber by using the FEM

Won-Mok choi, Hyun-Sung Jung, Tae-Su Kwon

**Key Words:** crash(충돌), instability(불안전성), buckling(좌굴), expansion tube(확관튜브), train(열차)

### Abstract

The crash energy absorbers used in the trains normally are classified into two types. The first is the structure type, which mainly used in not only the primary structure of train but also the crash energy absorbers at the critical accidents. The second is the module type, which just absorbs the crash energy independently and attached onto the structures of the trains.

The expansion tube is widely used as the module type of the crash energy absorbers, especially in the trains that have a heavy mass. Since the crash energy is absorbed by means of expanding the tube in the radial direction, the features of the expansion tube have the uniform load during the compression. As the uniform load remains in sudden impact, the expansion tube is effective to decrease acceleration of passengers when the train accident occur. The buckling instability of the expansion tubes is affected by the boundary conditions, thickness and length of tube. In this study, the effects of the length and thickness of the expansion tubes under the arbitrary load on the buckling are studied using the ABAQUS/standard and ABAQUS/explicit, a commercial finite element analysis program, and then presents the guideline to design the expansion tubes. The analysis processes to compute the buckling load consist of the linear buckling analysis and the nonlinear post-buckling analysis. To analysis the nonlinear post-buckling analysis, the geometry imperfections are introduced by applying the linear buckling modes to nonlinear post-buckling analysis.

### 1. 서 론

철도차량에 쓰이는 충돌에너지흡수부재는 일반 자동차와 달리 부재의 크기와 질량에 따라 적용할 수 있는 범위가 넓기 때문에 다양한 형태의

에너지흡수 부재를 차체에 적용 할 수 있으며, 또한 설계도 용이하다. 열차에 사용되는 충돌에너지 흡수부재는 크게 두 가지로 나뉘어진다. 첫째는 열차의 구조적 강도를 유지해주는 프레임 역할을 하는 동시에 충돌에너지 흡수부재역할을 하는 structure type이고, 두 번째는 단순히 충돌에너지만 흡수하는 module type이다. 연결기, 사이드 버퍼 그리고 경충돌안전장치와 같이 차체에 부착되는 에너지흡수부재는 주로 module type이 사용되고, 열차의 전두부 하부구조 및 객차사이의 에너지흡수구역에 사용되는 에너지흡수 부재는 차체의 강성을 유지하는 구조물 역할을 하면서 충

---

† 회원, 한국과학기술연합대학원대학교

E-mail : wmchoi@krri.re.kr

TEL : (031)460-5274 FAX : (031)460-5279

\* 한국철도기술연구원

\*\* 한국철도기술연구원

---

돌에너지를 흡수해야 하므로, structure type의 에너지 흡수부재가 주로 사용된다.

일반적인 충돌에너지 흡수부재의 에너지흡수 메커니즘은, 충돌사고 발생 시 충돌에너지를 부재의 굽힘 변형에너지로 전환하여 에너지를 흡수하는 방식이다. 하지만 이 방법은 부재의 압괴길이에 비해 변형양이 적으므로 흡수되는 충돌에너지가 작다. Module type의 충돌에너지흡수부재로는 팽창(expansion) 및 역위(inversion) 튜브와 같은 튜브형 부재와 댐퍼가 많이 사용되고 있다. 팽창형 에너지흡수튜브의 에너지흡수 메커니즘은, 충돌사고 발생 시 압입다이가 튜브의 길이방향으로 진행하면서 발생하는 튜브의 원주방향 인장변형 에너지를 이용해 충돌에너지를 흡수한다. 팽창형 에너지흡수튜브는 균일한 압입하중의 장점을 가지고 있지만, 튜브의 길이가 길어지거나 두께가 얇아지면 낮은 압입하중에서 좌굴이 발생할 수 있는 위험성을 가지고 있다. 만약, 충돌사고 발생 시 튜브에 좌굴이 발생하면 치명적인 결과를 가져올 수 있으므로 충돌시 안정적으로 에너지흡수할 수 있도록 튜브를 설계해야 한다.

튜브의 팽창 및 역위는 튜브의 끝단을 가공하는 소성가공공정의 한 과정으로 끝단가공 시 발생하는 튜브의 좌굴에 대한 연구는 Rosa 및 Rodrigues<sup>(1)</sup>에 의해 연구되었으며, 복합재의 국부좌굴(local buckling)에 대한 연구는 Oh 및 Kim<sup>(2)</sup>에 의해 연구되었다.

본 연구는 module type의 충돌에너지 흡수부재 중 하나인 팽창튜브의 주요 설계변수인, 두께가 좌굴에 미치는 영향을 연구하기 위해 상용유한요소 소프트웨어인

ABAQUS/standard와 ABAQUS/explicit를 사용하였으며, 좌굴하중을 예측하기 위해 linear buckling 해석과 nonlinear post-buckling 해석을 수행하였다. 또한, 튜브두께가 국부좌굴(local buckling) 및 전체좌굴(global buckling) 그리고 좌굴하중(critical load)에 미치는 영향을 연구하였다. 튜브의 주요 설계변수로는 길이(L)와 두께가(t)가 있지만, 현재 한국철도기술 연구원에서 개발 중인 경충돌안전장치에 장착될 에너지흡수튜브의 길이는 정해져 있으므로 두께에 대해서만 변수의 범위를 정하였다. 경충돌안전장치에 장착될 에너지흡수튜브의 초기 형상은 압입부가 압입다이형상과 비슷한 쇠기모양을 하고 있기 때문에 압입부의 성형해석을 위해

quasi-static 해석을 수행하였고, 동적하중을 받는 팽창튜브의 좌굴하중을 구하기 위해 linear buckling 해석과 nonlinear post-buckling 해석을 연속하여 수행하였다.

## 2. 충돌에너지 흡수부재

### 2.1 Structure type

Structure type의 충돌에너지 흡수부재는 차체의 강성을 유지하는 구조물 역할과 충돌에너지 흡수부재 역학을 동시에 수행해야 되기 때문에 기본적으로 프레임형상을 하고 있다. 그림 1은 TGV에 사용된 객차 간 충돌에너지 흡수구역의 하부 구조이고, 그림 2는 TGV에 사용된 structure type의 에너지 흡수부재이다. 그림 2와 같이 현재 상용화된 structure type의 에너지 흡수부재는 굽힘 변형에너지를 이용하여 충돌에너지를 흡수하기 때문에 길이에 비해 에너지 흡수량이 작고, 붕괴하중이 균일하지 못 해 열차사고 시 승객이 받는 가속도를 순간적으로 증가시켜 승객 상해치를 높일 수 있다.<sup>(3)</sup>

### 2.2 Module type

Module type의 충돌에너지 흡수부재는 차체의 강성을 유지하는 구조물 역할은 하지 않고, 단순히 차체에 부착되어 에너지를 흡수하는 장치이기

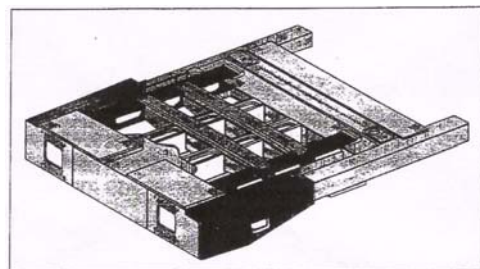


Fig. 1 Under frame of the TGV

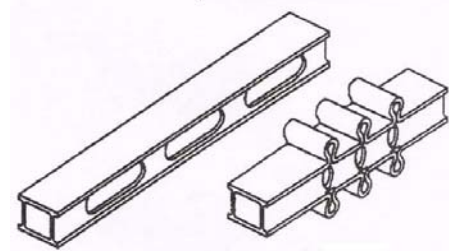


Fig. 2 Crash energy absorber

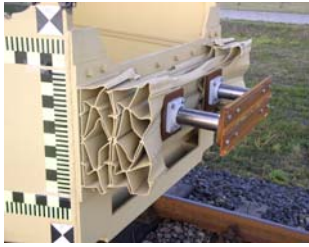


Fig. 3 Honeycomb

때문에 그 형상 및 에너지흡수 방법이 다양하게 적용 될 수 있다. 그림 3은 대표적인 module type의 에너지흡수 부재로 열차 전두부에 장착되는 허니콤이다.<sup>(3)</sup>

### 2.3 경충돌안전장치

경충돌은 차체에 변형을 발생시키지 않으면서, 교환가능한 부품의 손상만이 발생하는 충돌사고이다. 현재 한국철도기술연구원에서 개발 중인 일반열차 전두부에 사용될 경충돌안전장치는 크게 인장형 파단볼트와 팽창튜브로 구성되어 있다. 약 1500kN에서 볼트가 파단 된 후 팽창튜브가 충돌에너지를 흡수하는 구조이고, 약 0.4MJ의 충돌에너지를 흡수한다. 그림 4는 일반열차전두부에 사용될 경충돌안전장치와 팽창튜브이다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 유한요소 모델링

튜브의 초기형상과 양끝단의 경계조건이 좌굴하중에 큰 영향을 미치므로, 정밀한 좌굴해석을 수행하기 위해서는 정확한 초기형상과 경계조건이 필요하다. 경충돌안전장치에 사용될 팽창튜브의 초기 형상은 그림 5와 같이 압입부가 압입다이와 비슷한 쇠기형상이다. 이 형상을 성형하기 위해서 압입다이가 튜브 끝에서 약 35mm

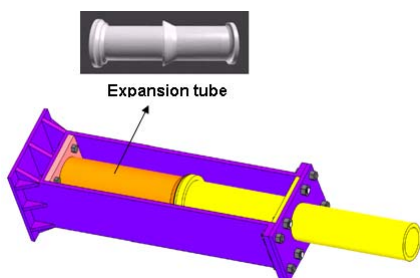


Fig. 4 Light collision safety device

내려와 끝단을 성형한다. 성형이 끝난 직후 다이와 튜브가 접촉하고 있는 절점에 구속조건을 부여하였다. 그림 5는 성형 후 다이와 튜브의 접촉점과 양 끝의 경계조건을 보여준다. 에너지를 흡수하기 위해 튜브가 팽창되는 길이는 약 267mm이지만 압입부 형상, 체결공간 등을 고려해 길이와 지름을 각각 400mm와 200mm로 설계하였다. 좌굴하중에 영향 미치는 설계인자로 튜브의 두께를 선택하였고, 두께 변화에 따른 좌굴하중을 예측하기 위해 2mm, 6mm, 10mm의 두께를 가지는 튜브에 대해 좌굴해석을 각각 수행하였다.

정밀한 좌굴하중을 예측하기 위해 첫째, Quasi-static 해석을 하여 튜브의 초기 형상과 구속조건을 정하였다. 둘째, Linear buckling 해석을 수행하여 30가지의 좌굴모드를 구하였다. 셋째, 둘째 단계에서 구한 좌굴모드를 선형조합한 geometry imperfection 과 재료의 비선형성을 적용한 Nonlinear post-buckling 해석을 수행하였다. 그림 7은 해석절차를 간단하게 나타낸 도표이다. 튜브의 재료는 최근 POSCO에서 개발한 TWIP강으로 항복강도는 약 430MPa이고 인장강도는 약 1,200MPa이다. 표 1은 튜브의 주요치수와 변수의 범위를 나타내고, 그림 7은 TWIP의 응력-변형률 선도를 나타낸다.

### 3.2 Quasi-static Analysis

팽창튜브의 초기형상과 경계조건 적용위치를 결정하기위해 튜브의 예비성형해석이 선행되어야 한다. 정밀한 예비성형해석을 위해 implicit 코드인 ABAQUS/standard를 이용해야 하나, 해석시간을 줄여 전체 해석과정의 효율성을 높이기 위해 예비성형해석은 explicit코드인 ABAQUS/explicit를

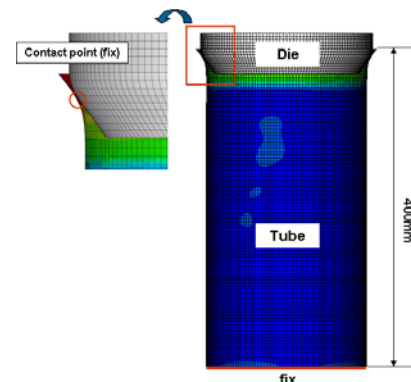


Fig. 5 Boundary conditions

이용한 quasi-static 해석을 이용하였다. 그림 8은 두께가 2mm, 6mm, 10mm인 튜브의 quasi-static 해석 후의 형상이다.

### 3.3 Linear buckling Analysis

Linear buckling 해석은 재료가 선형인 즉 stiff한 구조물의 좌굴모드와 좌굴하중을 구하기 위해 수행된다. 축하중을 받는 튜브의 좌굴모드는 크게 두 가지로 나뉘어진다. 첫째는 global buckling mode이고, 둘째는 local buckling mode이다. global buckling mode는 튜브의 두께에 비해 상대적으로 길이가 매우 긴 경우 발생하고, local buckling mode는 튜브의 두께가 너무 얇거나 길이가 짧을 때 발생한다. 그림 9는 tube의 global buckling mode와 local buckling mode를 나타낸 그림이다.

ABAQUS/standard의 lanczos solver를 이용하여 linear buckling 해석은 수행한 결과 global buckling mode는 발생하지 않았지만 local buckling mode가 발생하였다. 그림 10은 두께가 2mm인 튜브의 linear buckling 해석결과로 30가지 모드 중 대표적인 3가지 local buckling mode이다.

### 3.4 nonlinear post-buckling Analysis

에너지흡수튜브와 같이 재료의 비선형성이 좌굴하중에 큰 영향을 주는 구조물의 경우 linear buckling 해석으로는 정확한 좌굴하중을 구할 수 없다. 그러므로 재료의 비선형성 및 접촉조건을

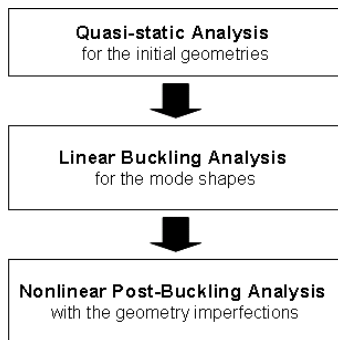


Fig. 6 Flow chart

Table 1 Level of the variables

Variables	Range(mm)
Radius(r)	100
Length(L)	400
Thickness(t)	2, 6, 10

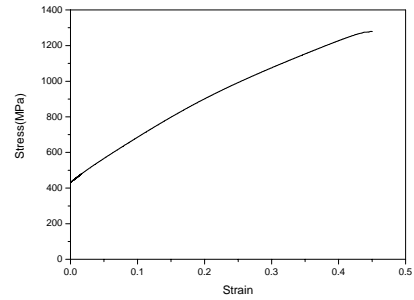


Fig. 7 Stress-strain curve(TWIP)

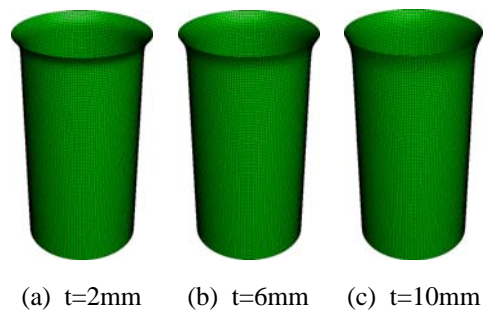


Fig. 8 Initial shapes of the tube

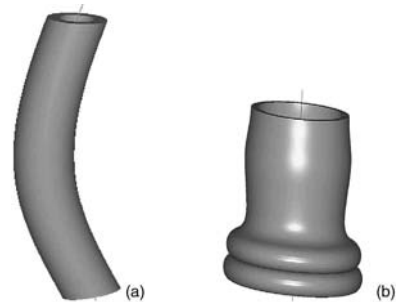


Fig. 9 Buckling modes. (a) global, (b) local

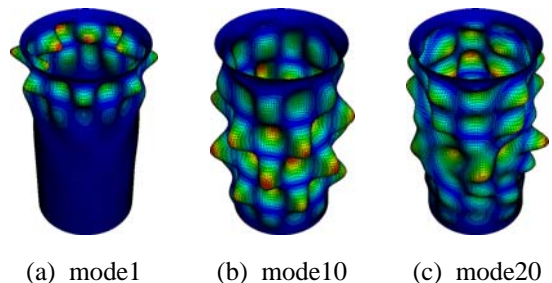


Fig. 10 Representative buckling modes

고려한 nonlinear post-buckling 해석을 수행해야만 좌굴하중을 계산 할 수 있다. 본 연구에 사용된 에너지흡수튜브는 충돌에 의해 발생한 동적축하중을 받으므로 ABAQUS/Explicit를 이용한 nonlinear post-buckling 해석을 수행하였다.

일반적으로 선형재료를 가진 튜브에 발생하는 좌굴하중을 구하기 위해 식 (1)과 (2)가 사용된다. 식 (1)은 Euler의 columns 이론을 Engesser와 Shanley가 수정한 식으로 global buckling의 임계하중을 구할 때 사용된다.<sup>(4)</sup> 식 (1)은 튜브길이( $l$ )와 반지름( $R_0$ )의 함수로, 임계응력( $\sigma_{cr}$ )은 튜브길이의 제곱에 반비례하다는 것을 알 수 있다. 식 (2)는 Timoshenko에 의해 유도된 얇은 두께를 가진 튜브의 임계응력을 나타는 식으로 local buckling이 발생하는 임계응력을 계산 할 때 사용된다. 그리고 식 (2)는 반지름( $r_0$ )과 두께( $t$ )의 함수로 두께가 커질 수록 임계응력( $\sigma_{cr}$ )이 증가함을 알 수 있다.

$$\sigma_{cr} = 0.5 C \pi^2 E_t \left( \frac{r_0}{l} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E_t \frac{t}{r_0} \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 튜브의 양 끝단의 경계조건과 관련된 상수이고(만약, 양 끝단 고정이면  $C=4$ ),  $\nu$ 는 프와송비이다. 그리고  $E_t$ 는 tangent modulus이다. 위의 식은 재료의 비선형성이 고려되지 않았으므로 정확한 좌굴하중을 구하기 위해서는 재료의 비선형성을 고려한 nonlinear post-buckling 해석을 수행해야 되지만 식 (1)과 (2)를 분석하면 주요 설계변수에 따른 좌굴하중의 변화경향을 예측할 수 있다.

튜브는 대표적인 imperfection sensitivity 경향을 가진 구조물로 geometry imperfection을 고려하지 않고는 정확한 좌굴하중을 구할 수 없다. 그러므로 정확한 nonlinear post-buckling 해석을 수행하기 위해 geometry imperfection 조건을 튜브에 적용해야한다. 그러기 위해서는 linear buckling 해석에서 구한 mode shape을 선형조합한 imperfection 조건을 적용하였다. linear buckling 해석결과 각 요소의 buckling mode는 튜브의 지름 방향으로 발생하므로 geometry imperfection의 크기는  $\alpha \times t$ 가 된다. 여기서  $t$ 는 튜브의 두께이고  $\alpha$ 는 scaling factor이다. Silvestre와 Camotim<sup>(5)</sup>의 연구에서는 FEM을 이용한 local buckling 해석을 위해  $\alpha = 15\%$ 로 가정하였으나, 본 연구에서는 1%, 5%,

10%의 scaling factor와 imperfection이 없는 perfect geometry를 가진 튜브에 대해 좌굴하중의 변화를 연구하였다.

그림 11은 nonlinear post-buckling 해석을 수행하기 위한 유한요소모델이다. 튜브의 dynamic 해석을 수행하기 위해 quasi-static 해석에서 확인된 다이와 튜브의 접촉점에 위치한 모든 절점의 자유도를 구속하였으며,  $v=10\text{m/s}$ 의 속도를 다른 한쪽 면에 가하여 nonlinear post-buckling 해석을 수행하였다.

## 4. 해석결과

### 4.1 해석결과

ABAQUS/explicit를 이용하여 nonlinear post-buckling 해석을 수행한 결과 global buckling은 발생하지 않았지만, 모든 두께( $t=2,6,10\text{mm}$ )에서 local buckling이 발생하였다. 그림 12, 13, 14는 scaling factor( $\alpha$ ) 변화에 따른 하중변화 그래프로 1%의 scaling factor와 perfect geometry의 하중변화는 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 두께가 2mm와 6mm의 경우 scaling factor의 변화에 상관없이 좌굴이후 하중이 감소하는 불안정한 특성을 보였지만, 10mm의 경우 좌굴이후 하중이 다소 증가하다가 감소하는 특성을 보였다. 그림 15는 scaling factor의 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 나타낸 그래프로, 두께가 2mm와 6mm인 경우 좌굴하중이 각각 약 500kN과 1,700kN으로 scaling factor의 변화에 거의 영향을 받지 않았지만, 10mm인 경우 scaling factor값이 커질수록 3,000kN에서 2,500kN으로 좌굴하중이 다소 감소하였음을 알 수 있다. 그림 16은 두께 2mm인 튜브의 최종형상을 scaling factor( $\alpha$ )의 변화에 따라 나타낸 그림이다. perfect geometry와 1%의 scaling factor를 적용한 튜브의 최종형상은 거의 같고 최종형상은 원주방향으로 대칭이다. 하지만, 5%와 10%의 scaling factor를 적용한 경우 최종형상이

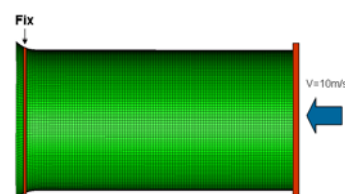


Fig. 13 Boundary conditions



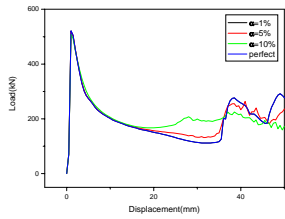


Fig. 14 Axial load (t=2mm)

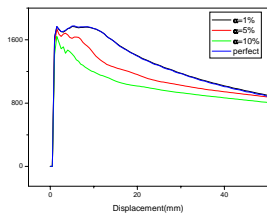


Fig. 15 Axial load (t=6mm)

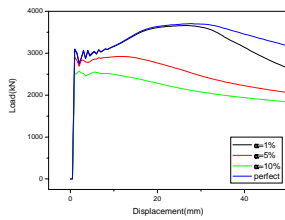


Fig. 16 Axial load (t=10mm)

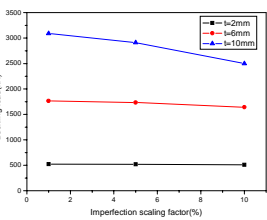
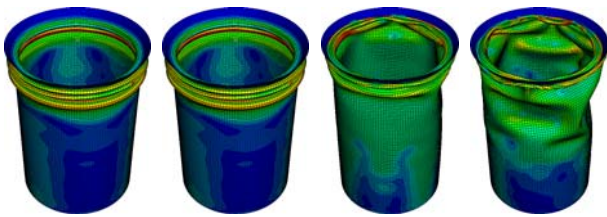


Fig. 17 Buckling load



(a) Perfect (b)  $\alpha=1\%$  (c)  $\alpha=5\%$  (d)  $\alpha=10\%$

Fig. 16 Final deformation (t=2mm)

원주방향으로 대칭이 아닌 다이아몬드 형상으로 변형하였다. , 다이와 접촉하는 부분에서 local buckling

## 5. 결 론

확관형 충돌에너지 흡수튜브를 설계하기 위해서는 우선 충돌에너지 흡수전략에 따른 에너지흡수용량을 정해야한다. 정해진 흡수용량에서 튜브에 좌굴이 발생되지 않아야 성공적으로 충돌에너지를 흡수 할 수 있다.

본 연구는, 현재 한국철도기술연구원에서 개발 중인 경충돌안전장치에 장착될 확관형 에너지흡수튜브를 기초로 튜브의 주요설계변수인 튜브두께와 geometry imperfection의 scaling factor 변화에 따른 좌굴하중을 예측하기 위한 변수연구를 수행하였다. 또한, 확관형 에너지흡수튜브를 설계하기 위한 해석적 접근방법에 대해 기술하였다. 주요

결과를 정리하면 다음과 같다.

① 팽창형(expansion type) 충돌에너지 흡수튜브는 충돌발생 시 압입다이가 튜브를 원주방향으로 확장시켜 충돌에너지를 흡수하는 방법으로 균일한 압입하중을 나타내어 충돌에너지 흡수부재로 매우 적합하다. 하지만, 초기 압입하중에 하에서 튜브에 어떠한 좌굴도 발생되지 않아야 한다.

② 정밀한 nonlinear post-buckling 해석을 위해 quasi-static 해석을 하여 초기 형상과 경계조건을 구하였으며, linear buckling 해석을 이용해 linear buckling deformation mode를 구해 post-buckling 해석의 geometry imperfection으로 사용하였다.

③ 해석결과 global buckling은 발생하지 않았지만 모든 변수 범위에서 local buckling이 발생하였다. 두께가 2mm와 6mm인 경우 scaling factor에 따라 좌굴하중이 거의 변하지 않았지만 10mm인 경우 scaling factor가 증가할 수록 좌굴하중이 감소하였다. 또한, perfect geometry와 1%의 imperfection scaling factor를 가진 튜브는 최종형상이 원주방향으로 대칭이나, 5%와 10%의 imperfection scaling factor를 가진 튜브의 경우 비대칭, 즉 다이아몬드 형상을 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) P. A. R. Rosa., J. M. C. Rodrigues., P. A. F. Martins., 2003, "External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.43, pp.787~796
- (2) Se-Hee. Oh., Kwang-Soo. Kim., Chun-Gon. kim., 2006, "An efficient postbuckling analysis technique for composite stiffened curved panels", *Composite Structures*, Vol.74, pp.361~369
- (3) 2001, "REPORT SAFETRAIN"
- (4) F. R. Shanley., 1947, "Inelastic column theory", *J. Aerosol Sci*, Vol.14, pp.261
- (5) Derrick. C. Y. Yap., Cregory. J. Hancock., 2006, "Interaction Buckling and Postbuckling in the Distortional Mode of Thin-Walled Sections", *Research Report No R870*
- (6) ABAQUS/Explicit THEORETICAL MANUAL