

# 변형률 속도를 고려한 원형 튜브의 동적 좌굴 현상의 상계 해석에 관한 연구

박충희<sup>†</sup> · 고윤기\* · 허 훈\*

## Upper Bound Analysis of Dynamic Buckling Phenomenon of Circular Tubes Considering Strain Rate Effect

Chunghee Park, Younki Ko and Hoon Huh

**Key Words :** Dynamic Buckling(동적 좌굴), Upper Bound Analysis(상계 해석), Circular Tubes(원형 튜브), Strain Rate Effect(변형률 속도 효과)

### Abstract

A circular tube undergoes buckling behavior when it is subjected to axial loading. An upper bound analysis can be an attractive approach to predict the buckling load and energy absorption efficiently. The upper bound analysis obtains the load or energy absorption by means of assumption of the kinematically admissible velocity fields. In order to obtain an accurate solution, kinematically admissible velocity fields should be defined by considering many factors such as geometrical parameters, dynamic effect, etc. In this study, experiments and finite element analyses are carried out for circular tubes with various dimensions and loading conditions. As a result, the kinematically admissible velocity field is newly proposed in order to consider various dimensions and the strain rate effect of material. The upper bound analysis with the suggested velocity field accurately estimates the mean load and energy absorption obtained from results of experiment and finite element analysis.

### 기호설명

$\alpha$	: 최종 변형각
$C, p$	: Cowper-Symonds 유동응력식 계수
$\delta$	: 유효 충돌 거리
$\dot{\epsilon}$	: 변형률 속도
$\sigma_0$	: 항복 응력
$D$	: 튜브의 외경
$t$	: 튜브의 두께
$w$	: 주름의 너비
$h$	: 주름의 높이

### 1. 서론

원형 튜브 구조 요소는 각종 기계 구조물의 구조 요소로써 많이 사용된다. 이 중에서도 특히 자동차에 에너지 흡수용 부재로 사용되는 경우에는 충돌사고에서 인명의 보호를 위하여 적절한 변형을 통하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계되어야 한다. 일반적으로 원형 튜브 구조 요소는 연성이 크고 가공경화가 되는 금속재료로 제작되기 때문에 이들 구조 요소가 축 방향으로 갑작스러운 이상하중이 부과되는 경우 국부적인 소성변형으로 인하여 좌굴 현상이 발생하게 된다. 원형 튜브의 좌굴 거동은 과거부터 널리 연구되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 정적 좌굴 거동에 관하여 다루고 있고, 동적 좌굴에 관하여 다루고 있는 연구들도 동적 좌굴 현상이 일어나면 정적

<sup>†</sup> 회원, KAIST 기계항공시스템학부  
E-mail : chungheepark@kaist.ac.kr  
TEL : (042)350-3262 FAX : (042)350-3210

\* KAIST 기계항공시스템학부

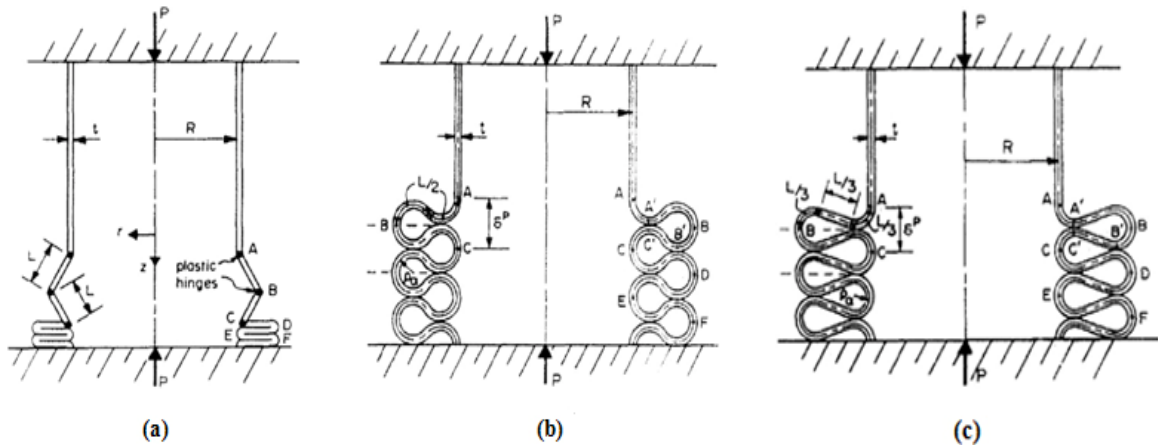


Fig. 1 Cross-sectional profiles used to model the axisymmetric failure mechanism: (a) deformation mode I; (b) deformation mode II; (c) deformation mode III.

좌굴에 비하여 하중이 늘어난다는 결과에 그치고 있으며, 동적 좌굴과 정적 좌굴의 붕괴 거동의 차이나 에너지 흡수 성능 등에는 자세한 연구가 이루어지지 않고 있다.

Alexander<sup>(1)</sup>는 국부 좌굴에 의한 주름 형태의 단순화를 통해 축 방향 압축하중을 받는 원형 튜브의 좌굴 현상에 대한 이론적 수식화를 시도하였다. Wierzbicki 와 Abramowicz<sup>(2)</sup>는 사각관에 대한 기본 붕괴 모드를 설명하고 극한 해석을 통하여 붕괴하중을 계산하였다. Abramowicz 와 Jones<sup>(3)</sup>는 Alexander 의 수식에 변형률 속도에 대한 영향을 추가하여 동적 압축 하에서의 좌굴 현상에 대한 수식화를 수행하고 여러 가지 형상의 원형 튜브에 대한 실험결과와 비교하였다. Abramowicz<sup>(4)</sup>, Abramowicz 와 Jones<sup>(5)</sup>, Jones<sup>(6)</sup>는 유효충돌거리의 도입을 통하여 원형 및 사각 튜브의 동적 좌굴 현상에 대한 실험을 수행하여 비교하였다. Grzebieta<sup>(7)</sup>는 Alexander, Abramowicz 와 Jones 의 모델을 분석하고 직선 구간을 추가한 새로운 모델을 제안하였다.

본 논문에서는 원형 튜브 구조 요소의 정적 좌굴 거동에 대한 상계해석을 기초로 동적 좌굴에 대하여도 상계해석을 수행함으로써 정적 좌굴과 동적 좌굴의 붕괴거동, 붕괴하중 및 에너지 흡수 성능의 차이를 확인하고자 하였다. 또한 실제 동적 좌굴 모드를 보다 정확히 모사할 수 있는 개선된 운동학적 가용속도장을 제안하고 실험과 유한요소 해석을 통하여 이를 검증함으로써 상계해석의 정확도를 향상시키고자 하였다.

## 2. 튜브의 좌굴 현상에 대한 상계 해석

### 2.1 기존의 운동학적 가용속도장 모델

원형 튜브에 축 방향 하중이 부과되었을 때에는 좌굴 현상이 발생하는데, 이러한 원형 튜브의 좌굴 현상을 이론적으로 수식화하기 위하여 기존의 연구자들이 제안한 세 가지 운동학적 가용속도장들을 Fig. 1 에 도시하였다. Fig. 1(a)의 변형 모드 I 은 1960 년 Alexander 가 제안한 모델이다. 그는 제안한 모델에서 좌굴이 발생할 때 소성힌지(plastic hinge)를 중심으로 단순한 축 대칭 변형을 한다고 가정하였다. Fig. 1(b)의 변형 모드 II 는 1984 년 Abramowicz 와 Jones 가 제안한 모델로 좌굴이 발생할 때 주름이 곡선 형태로 발달하며 곡선에서 굽힘과 팽창 변형이 동시에 발생한다고 가정하였다. 그 곡선은 세 개의 호로 이루어져 있으며, 유효충돌거리의 개념을 도입하여 Alexander 의 주름 형상에 대한 단순화를 보완하고 있다. Fig. 1(c)의 변형 모드 III 는 1990 년 Grzebieta 가 제안한 모델로 변형 모드 II 와 같이 주름이 곡선 형태로 발생한다고 가정하였지만, 변형 모드 II 가 호로만 이루어져 있는데 반하여 변형 모드 III 는 호와 호 사이에 평평한 직선 구간이 존재한다고 가정하였다. 곡선 구간에서는 굽힘과 팽창 변형이 동시에 발생하고 직선 구간에서는 팽창 변형만 발생함을 가정하여 시편의 특정 형상 조건에서 실제 변형 형상을 더 정확하게 모사하고자 하였다.

## 2.2 각 운동학적 가용속도장 모델의 상계해석

앞 절에서 언급한 세 가지 운동학적 가용속도장에 대하여 상계해를 구하였다. 각 모델에서 가정한 변형 모드에 의하여 내부 변형에너지를 계산한 후, 이 값이 외력이 해준 일과 같다고 놓아 변형이 일어나는 동안의 평균 하중  $P_m$  을 구할 수 있다. 굽힘에너지와 팽창에너지의 합으로 나타낼 수 있는 튜브의 총 내부 변형에너지는 식 (1)과 같다.

$$W_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 (\pi R + l) + 2\pi \sigma_0 t l^2 \quad (1)$$

계산한 총 변형에너지가 외력이 해준 일인  $P_m \times 2l$  와 같다고 가정하고 평균 하중  $P_m$  을 계산해보면 식 (2)와 같은 결과를 얻는다.

$$P_m = \pi \sigma_0 t \left\{ \frac{t}{\sqrt{3}} \left( \frac{\pi R}{l} + 1 \right) + l \right\} \quad (2)$$

같은 방법을 변형 모드 II 와 III 에도 적용을 하면 식 (3), 식 (4)와 같은 총 내부 변형에너지와 평균 하중을 계산할 수 있다.

$$W_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( 2R + \frac{w}{2} \right) \alpha + 2\pi \sigma_0 t w^2 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

$$P_m = \pi \sigma_0 t \left\{ \frac{t}{\sqrt{3}} \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) \alpha + w \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (4)$$

## 2.3 주름 너비 및 높이

변형 모드 I 에서 주름 너비는 평균 하중이 극값을 가지게 하는 즉,  $\partial P_m / \partial l = 0$  인  $l$  을 계산하여 식 (15)와 같이 얻을 수 있다.

$$l = \left[ \frac{\pi R t}{\sqrt{3}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

이 때, 계산된  $l$  은 튜브의 총 흡수에너지를 최소로 만드는 변형 모드의 주름 너비  $l$  이 된다. 변형 모드 II 와 변형 모드 III 에 대해서도 같은 방법으로  $w$  을 계산해보면 식 (6)과 같다.

$$w = \left[ \frac{2Rt\alpha}{\sqrt{3} \sin(\alpha/2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

계산된  $w$  는 튜브의 총 흡수에너지를 최소로 만드는 변형 모드의 주름 너비  $w$  가 된다.

**Table 1** Constants for Cowper-Symonds model of STK290

$\sigma_0$ (MPa)	C (/sec)	p
260.46	3460	8.66

## 2.4 변형 모드에 따른 에너지 흡수 성능

식 (3)에서 계산한 총 변형에너지는 주름이 한 개 생기는 동안의 총 변형에너지이다. 따라서 전체 길이에 걸쳐 흡수하는 총 변형에너지는 전체 길이에 걸쳐 생기는 주름의 개수를 계산하여 주름한 개의 총 변형에너지를 곱하여 얻을 수 있다. 위의 과정을 통하여 변형 모드 II 와 변형 모드 III 의 총 변형에너지를 식 (7)과 식 (8)에 나타내었다.

$$E = \pi \sigma_0 t \left\{ \frac{t}{\sqrt{3}} \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) \alpha + w \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \frac{L_0 (1 + \cos(\pi - \alpha))}{\alpha} \quad (7)$$

$$E = 2\pi \sigma_0 t \left\{ \frac{t}{\sqrt{3}} \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) \alpha + w \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \times \frac{L_0 \left( 1 + \cos(\pi - \alpha) + \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right)}{3\alpha} \quad (8)$$

## 2.5 변형률 속도 효과

일반적으로 변형률 속도에 따라 재료의 유동응력이 변화하는데, 본 논문에서는 식 (9)와 같은 Cowper-Symonds 유동응력식을 사용하여 재료의 유동응력의 변화를 고려하였다.

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0(\varepsilon) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \quad (9)$$

Cowper-Symonds 유동응력식의 계수는 재료마다 다르기 때문에 실험을 통해 고유의 물성치를 구하여야 한다. 원형 튜브의 좌굴 실험에 사용된 강종 STK290 에 대하여 동적 물성인장시험을 실시하여 물성치를 구하였고, 결과를 Table 1.에 나타내었다.

## 2.6 변형률 속도를 고려한 동적 좌굴 현상의 상계해석

2.2 절에서 계산한 각 변형 모드의 상계해에 변형률 속도를 고려하기 위하여 Cowper-Symonds 유동응력식을 적용하였다. 동적 좌굴이 일어날 때 변형이 진행되는 동안의 주된 변형은 원주 방향으로의 팽창으로 보았기 때문에 변형 모드 I 에 대하여 식 (1)의 팽창에너지 계산식에 식 (9)의 Cowper-Symonds 유동응력식을 대입하면 식 (10), 식 (11)과 같이 총 변형에너지와 평균 하중을 계산할 수 있다.

$$W_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 (\pi R + l) + 2\pi \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] t l^2 \quad (10)$$

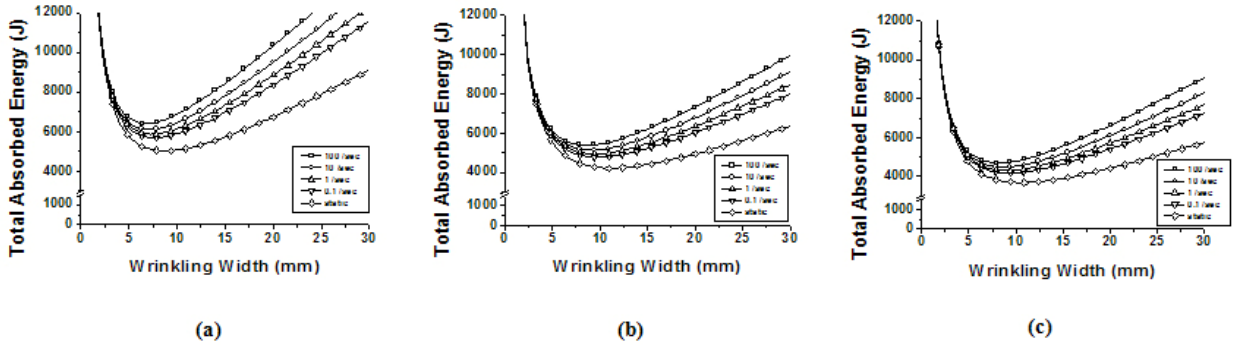


Fig. 2 Total absorbed energy with respect to wrinkling width at the various strain rates: (a) deformation mode I; (b) deformation mode II; (c) deformation mode III.

$$P_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( \frac{\pi R}{l} + 1 \right) + \pi \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] t l \quad (11)$$

변형 모드 II 와 변형 모드 III 에 대해서도 같은 방법으로 식 (12), 식 (13)과 같이 총 변형에너지와 평균 하중을 계산하였다.

$$W_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( 2R + \frac{w}{2} \right) \alpha + 2\pi \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] t w^2 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

$$P_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) \alpha + \pi \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] t w \sin \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

변형 모드 I 에 대하여 계산한 평균 하중이 극값을 가지게 하는 주름 너비  $l$  을 계산해보면 식 (14)와 같은 결과를 얻는다.

$$l = \left[ \frac{\pi R t}{\sqrt{3}} \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

마찬가지로 변형 모드 II 와 변형 모드 III 에 대하여 계산한 평균 하중이 극값을 가지게 하는 주름 너비  $w$  를 계산해보면 식 (15)와 같다.

$$w = \left[ \frac{2R t \alpha}{\sqrt{3} \sin(\alpha/2)} \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

2.4 절에서 사용했던 주름 길이 전체에 걸쳐서 흡수되는 총 변형에너지를 구하는 방법을 동적 좌굴 현상에 대해서도 적용해보면 변형 모드 II 와 III

에 대하여 흡수되는 총 변형에너지는 식 (16), 식 (17)과 같다.

$$E = \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) + \pi \sigma_0 \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right) t w \sin \frac{\alpha}{2} \right] \times \frac{L_0 (1 + \cos(\pi - \alpha))}{\alpha} \quad (16)$$

$$E = \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 t^2 \left( \frac{2R}{w} + \frac{1}{2} \right) + 2\pi \sigma_0 \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right) t w \sin \frac{\alpha}{2} \right] \times \frac{L_0 \left( 1 + \cos(\pi - \alpha) + \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{2} \right) \right)}{3\alpha} \quad (17)$$

각 변형 모드에 대하여 변형률 속도가 변할 때 주름 너비에 대한 총 변형에너지의 변화를 Fig. 2 에 도시하였다.

### 3. 실험 및 유한요소 해석

#### 3.1 정적 및 동적 좌굴 실험

실험에 사용된 원형 튜브는 KS 규격의 일반구조용 탄소강 강관이며, 강종은 STK290 이다. 준정적 좌굴 실험에는 UTM 기를 사용하였다. 시편을 지그에 장착한 뒤 하부 다이의 이송속도를 3mm/min 로 설정하여 축 하중을 부과하였다. 튜브에 부과되는 하중과 이 때 압축된 변위는 각각 로드셀과 LDT 를 통하여 측정하였다. 동적 좌굴 실험에는 충돌시험기를 사용하였다. 시편을 지그에 장착한 뒤 질량 의 대차를 의 속도로 충돌시켜 실험을 수행하였다. 동적 실험에서도 하중은 로드셀을 통하여 컴퓨터로 받아서 처리하였으며, 고속 카메라로 촬영한 영상을 분석하여 변위를 측정하였다.

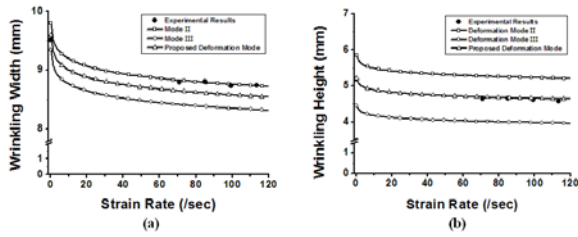


Fig. 3 Length changes with respect to strain rates with experimental results when  $D=48.6\text{mm}$ ,  $t=1.7\text{mm}$ : (a) wrinkling width; (b) wrinkling height.

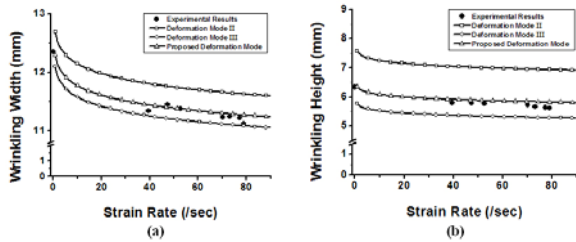


Fig. 4 Length changes with respect to strain rates with experimental results when  $D=76.3\text{mm}$ ,  $t=2.0\text{mm}$ : (a) wrinkling width; (b) wrinkling height.

### 3.2 유한요소 해석

신뢰성 높은 변형모드를 결정하기 위하여 다양한 조건하에서 원형 튜브의 동적 좌굴 현상을 관찰하고 변형 모드를 분석해야 한다. 그러나 본 연구에서는 실험 장치의 한계로 인하여 다양한 조건하에서 원형 튜브의 동적 좌굴 실험을 모두 수행할 수 없었기 때문에 유한요소 해석으로 실험상 부족한 부분을 보충하였다. 유한요소 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Explicit 을 사용하여 수행하였으며 튜브의 외경, 두께 및 충돌 속도 등의 조건을 다양하게 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

### 3.3 실험 및 유한요소 해석 결과의 분석

좌굴 현상의 변형 모드는 변형 단면의 주름 너비와 높이를 통하여 결정할 수 있다고 판단하였다. 정적 및 동적 좌굴 실험 결과물의 단면 사진으로부터 주름 너비와 높이를 측정하여 측정 결과를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 도시하였다. 정적 및 동적 좌굴 실험 결과의 관찰을 통하여 정적과 동적 좌굴 실험 간에 주름 너비 및 높이에 있어서 뚜렷한 변화가 생기는 것을 확인할 수 있다. 정적 변형 형상에 비하여 동적 변형 형상에서의 주름 너비 및 높이가 확연하게 감소하는 경향을 파악할 수 있다. 단면의 형상을 더 자세히 살펴보면 굽힘에 의하여 주름이 곡선 형태로 발생되며 곡선과 곡선 사이에 직선으로 이루어진 부분이 존재함을 볼 수 있다. 외경이 76.3mm 인 튜브의 실험 결과에서 외경이 48.6mm 인 튜브의 실험 결과에서보다 더 긴 직선

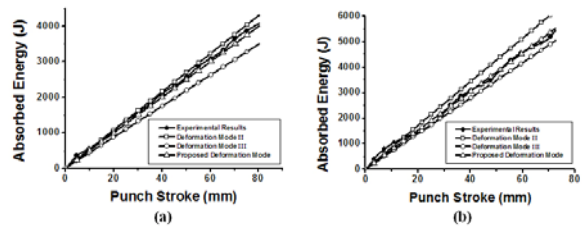


Fig. 5 Absorbed energy with respect to displacement of quasi-static experimental results and each deformation mode: (a)  $D=48.6\text{mm}$ ,  $t=1.7\text{mm}$ ; (b)  $D=76.3\text{mm}$ ,  $t=2.0\text{mm}$ .

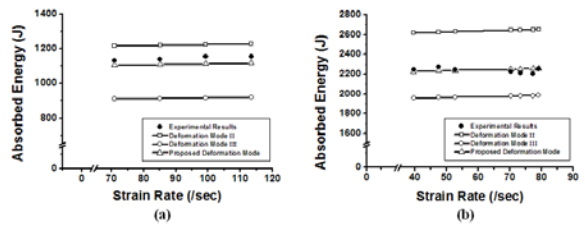


Fig. 6 Absorbed energy during one wrinkling with respect to strain rates of dynamic experimental results and each deformation mode: (a)  $D=48.6\text{mm}$ ,  $t=1.7\text{mm}$ ; (b)  $D=76.3\text{mm}$ ,  $t=2.0\text{mm}$ .

구간이 존재하는 것을 관찰하였다.

### 3.4 상계해석의 타당성 검토

정적 및 동적 좌굴 현상의 실험 및 유한요소 해석으로부터 얻어진 변형 형상에 관한 결과는 변형률 속도가 증가함에 따라 주름 너비 및 높이가 감소하는 경향을 나타내고 있음을 증명하고 있다. 이러한 경향은 2.6 절에서 계산한 변형률 속도를 고려한 동적 좌굴에서의 주름 너비 및 높이에 관한 상계 해석 결과인 식 (14), (15)에서도 나타난다. 이를 확인하기 위하여 외경 48.6mm 와 76.3mm 인 튜브에 대하여 변형률 속도에 대한 주름 너비 및 높이 그래프를 실험 결과와 함께 Fig. 3 과 Fig. 4 에 도시하였다. 상계해석을 통하여 계산한 결과와 실험 결과에서 모두 변형률 속도가 증가하면 길이가 감소하는 경향이 나타나지만 실제 실험 결과는 변형 모드 II 와 변형 모드 III 의 계산 결과 사이에 존재함을 확인할 수 있다. 실험 결과가 변형 모드 II 와 변형 모드 III 의 계산 결과 사이에 존재하는 경향은 정적 좌굴 실험의 흡수에너지-변위 그래프인 Fig. 5 와 동적 좌굴 실험의 주름 한 개를 생성하는데 흡수한 에너지 그래프인 Fig. 6 에서도 확인할 수 있다. 따라서 변형 모드 II 나 변형 모드 III 사이에 존재하는 새로운 변형 모드를 제안한다면 변형 모드 II 나 III 보다 더 정확한 상계해석을 수행할 수 있을 것이다. 다음 절에서 새로운 변형 모드를 제안하고 이를 토대로 상계해석을 수행해 보도록 하겠다.

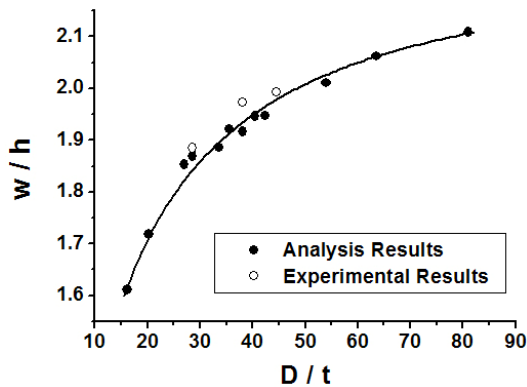


Fig. 7  $w/h$  with respect to  $D/t$  with experimental results.

### 3.5 새로운 운동학적 가용속도장의 제안

앞에서 언급한 변형 모드 중 변형 모드 II는 직선 구간 없이 호로만 이루어져 있다고 가정하였고 변형 모드 III는 호와 호의 길이만큼의 직선 구간으로 이루어져 있다고 가정하고 있다. 그러나 실제 실험 및 유한요소 해석 결과의 단면을 자세히 살펴보면 굽힘이 일어나는 호로 이루어진 구간이 있고 그 사이에 직선 구간이 존재하며 직선 구간의 길이는 조건에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 따라서 기존의 상계해석보다 더 정확한 상계해석을 수행하기 위해서는 실제 변형 모드에 부합하는 변형 모드 II와 변형 모드 III 사이의 새로운 변형 모드를 가정하여야 한다. 실험 및 유한요소 해석 결과에서 측정된 주름 높이에 대한 너비의 비,  $w/h$ 를 관찰함으로써 변형 모드 II와 변형 모드 III 중 어느 변형 모드에 더 가깝게 동적 좌굴이 발생하는지를 판단할 수 있다.  $w/h$ 는 튜브의 외경이 증가할수록, 두께가 감소할수록 커지는 것을 알 수 있다. 튜브의  $D/t$ 에 대하여  $w/h$ 의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 또한 실험 결과에서  $D/t$ 가 일정하면 변형률 속도가 달라져도  $w/h$ 는 일정하다는 결과를 얻을 수 있다. 이를 정리하면, 튜브의  $D/t$ 에 따라  $w/h$ 를 구할 수 있으며,  $w/h$ 에 따라 변형 모드를 결정할 수 있다. 이때  $w/h$ 를 결정하는데 있어서 변형률 속도는 영향을 끼치지 않는다. Fig. 3~6에 새로 제안한 변형 모드를 이용하여 수행한 상계해석의 결과도 같이 도시하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 원형 튜브의 정적 및 동적 좌굴 현상에 대하여 실험 및 유한요소 해석을 수행하여 정적 및 동적 좌굴 현상의 변형 모드를 관찰하였

다. 이 과정을 통하여 튜브의 두께에 대한 외경의 비에 따라 변형 모드가 달라짐을 보였으며 이를 이용하여 기존의 연구들에서 제안된 변형 모드보다 실제의 동적 좌굴 현상을 더 정확히 묘사할 수 있는 변형 모드를 제안하고 이를 검증하였다. 변형률 속도 효과를 고려하기 위하여 Cowper-Symonds 유동응력식을 적용하여 변형률 속도 변화에 따른 평균 하중과 에너지 흡수 성능 및 변형 형상의 변화를 확인하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

동적 좌굴 현상이 발생할 때 변형률 속도가 증가함에 따라 주름 너비 및 높이는 감소하고 평균 하중과 에너지 흡수량은 증가한다. 튜브의 외경 및 두께가 변함에 따라 변형 모드가 달라지는데, 이 때 변형 모드는 좌굴 현상이 발생할 때  $w/h$ 로 결정할 수 있다. 즉, 변형 모드는 튜브의  $D/t$ 에 대하여  $w/h$ 를 이용하여 결정되며,  $D/t$ 가 일정하면 변형률 속도가 달라져도 변형 모드에는 영향이 없다는 것을 확인하였다. 새로운 변형 모드를 제안하여 변형 모드 II와 변형 모드 III 사이의 변형 형상을 묘사하였다.  $D/t$ 와 변형률 속도에 따라 제안된 변형 모드를 적용하여 실험 결과와 상당히 근접한 평균 하중과 에너지 흡수량을 예측하였다.

## 참고문헌

- (1) Alexander, J. M., 1960, "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading", *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 13, pp. 10~15.
- (2) Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., 1983, "On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structure", *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp.727~734.
- (3) Abramowicz, W. and Jones, N., 1984, "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 263~281.
- (4) Abramowicz, W., 1983, "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-walled Metal Columns", *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 1, pp. 309~317.
- (5) Abramowicz, W. and Jones, N., 1986, "Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes", *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 4, No. 4, pp. 243~270.
- (6) Jones, N., 1989, "Structural Impact", *Cambridge University Press, Cambridge*.
- (7) Grzebieta, R. G., 1990, "An Alternative Method for Determining the Behavior of Round Stocky Tubes Subjected to an Axial Crush Load", *Thin-walled Struct.*, Vol. 9, pp. 61~89.