

요소 삭제 방법을 사용한 원형 금속 관의 축방향 파단 해석

이 상 훈[†] · 김 현 규^{*}

(2008년 1월 25일 접수, 2008년 4월 29일 심사완료)

Analysis of Axial Splitting of Circular Metal Tubes by Using Element Deletion Method

Sang-Hoon Lee and Hyun-Gyu Kim

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Element Deletion Method(요소 삭제 방법), Failure Strain(파단 변형률)

Abstract

With the improvement of computer power and technology, fracture modelling by finite element methods has become a topic of extensive studies. However, fracture simulation much limited to an academic study of crack propagation with a fine mesh. Element deletion method is a useful tool for estimating damage due to accidental or extreme loads on structures, provided that an effective and realistic criterion is established for simulating the material failure and subsequent element deletion. In this study, ABAQUS/Explicit is used to simulate the material failure on the basis of experimental results by X. Huang et al.⁽¹⁾ Through numerical experiments, we suggest a formulation to determine the failure strain associated with the size and thickness of removed elements.

1. 서 론

컴퓨터의 능력과 소프트웨어 기술의 발전으로 해석을 기초로 한 파단 예측이 가능하게 되었다. 크랙진전에 의한 파단 예측은 실제특성 뿐만 아니라 응력과 변형률, 격자 크기와 형상, 요소형태의 종류에 따라 다르게 나타난다. 특히, thin-wall 구조물의 파단 해석은 충돌 및 충격의 에너지 흡수에 관한 분석을 위하여 반드시 필요하게 된다. Huang 등⁽¹⁾에서는 에너지 흡수 장치로 사용되는 thin-wall 원형관의 압괴 파손 실험을 실시하고 여러가지 형태에 대한 에너지값을 얻었으며 Huang 등⁽²⁾에서도 유사한 실험방법으로 사각 금속관의

파단실험을 실시하였다. Guillow 등⁽³⁾에서는 thin-wall 원형관을 압축 실험하여 직경 D와 두께 t에 대하여 $F_{AV}/M_p = 72.3(D/t)^{0.32}$ 식으로 도출하였고 (F_{AV} :average crush force, M_p :full plastic bending moment) 원형관의 붕괴형상에 관한 식을 제시하였다. Jiung 등⁽⁴⁾에서는 thin-wall 구조물의 크기효과에 따른 실험연구를 진행하였으며 Reddy 등⁽⁵⁾에서는 원형금속관 에너지 흡수 실험을 하여 축 방향으로 말려 올라가는 형상에 관한 식을 정의하였다. Fan 등⁽⁶⁾과 Yu 등⁽⁷⁾에서는 금속박관의 파손에너지에 대한 에너지 손실문제를 실험으로 나타내었고 두께에 관하여 파단에너지 관계식을 도출하였다.

Thin-wall 구조물은 에너지 흡수 장치로 효과적 이므로 널리 사용되고 있고 에너지 흡수 능력은 충돌이 일어나는 구조물에서 손상을 줄이는 방법으로 중요하게 생각되고 있다. Thin-wall 원형관은 열차의 에너지 흡수식 연결기 장치(Fig. 1)에

[†] 책임저자, 회원, 서울산업대학교 에너지환경대학원

E-mail : hjnnfin@sunt.ac.kr

TEL : (02)949-6310 FAX : (02)949-6310

* 서울산업대학교 기계공학과

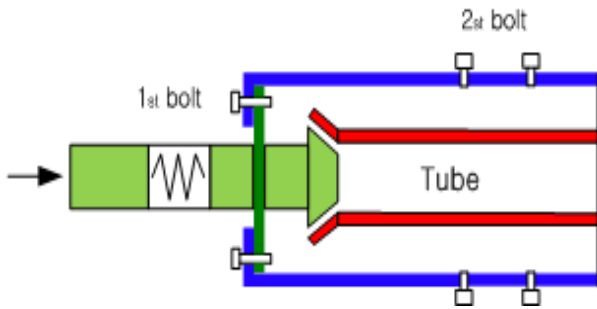


Fig. 1 Energy absorption device

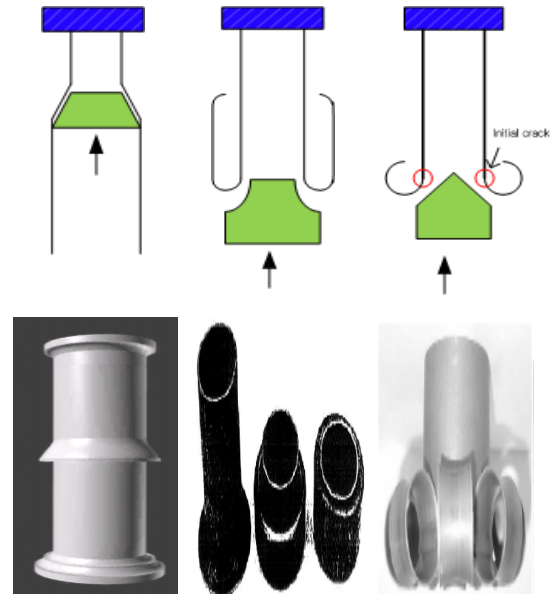
사용되는 것으로 경충돌 사고의 피해로 직접적으로는 차막이 돌파사고, 입환식 격돌사고, 완충기 파손, 간접적으로는 보이지 않는 구조의 영구변형 및 파손, 내구성 저하 등에 의한 안전사고를 줄이기 위한 사항으로 앞서 말한 것들의 보호를 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.

Thin-wall 원형관은 축선상의 대칭적-비대칭적 충돌진행으로 효과적인 에너지 흡수를 할 수 있고 Fig. 2와 같이 (a) expansion tube, (b) inversion tube, (c) tearing tube 의 형태를 가지며 각각의 손상모습의 다양성 때문에 실제와 같은 해석결과를 나타내는데 중점을 두고 있다. 본 논문에서는 초기 크랙을 발생시켜 크랙의 축방향 요소들을 요소삭제방법에 의한 파단형상으로 나타낼 수 있는 tearing tube 형태의 원형관을 사용하였고 이를 해석으로 형상화 하게 된다. 또한 해석모델의 파단 요소 크기에 초점을 맞추어 Huang 등⁽¹⁾의 실험과 같은 방식으로 해석을 하였고 그에 따른 해석결과와 Huang 등⁽¹⁾에서의 실험결과를 비교하였다. 또한 해석결과와 Simonsen 등⁽⁹⁾에서 서술한 요소 크기와 구조물 두께로 도출된 파단변형률 관계식을 참고로 thin-wall 원형관의 요소삭제방법을 사용한 해석에서 요소크기와 구조물 두께에 따른 파단 변형률 선정의 방법을 제시하였다.

2. 이론

2.1 파단 이론

구조물의 파단에 대한 유한요소해석에서 적절한 파단이론을 적용하여 요소 파단모델에 사용하



(a) Expansion tube (b) Inversion tube (c) Tearing tube

Fig. 2 Absorption device types

고 구조물의 상태변수가 임계한도에 도달하게 되면 그 이후의 파단되는 힘 전달은 요소를 삭제하는 요소삭제방법을 사용하여 파단현상을 구현 할 수 있다. 이 논문 해석에 사용된 전단 파단(shear failure) 이론은 사용된 재료의 소성변형률 한도값에 의해 정의된다. 파단은 식 (1)의 손상계수 w 가 1이 넘으면 발생한다.

$$w = \frac{\bar{\epsilon}_0^{pl} + \Sigma \Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ 는 등가소성변형률의 초기값, $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률의 변형증가량이고 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 는 파단변형률값이다. 이 파단이론은 실제 프로그램에서 소성변형률의 한도값을 파단척도로하여 적용하는 방법으로 사용된다.

ABAQUS/Explicit를 사용한 해석에서 'status' 명령어가 사용되는데 이 명령어는 파단 응력 한도에 도달되어 삭제되는 요소의 상태값을 '0'으로 그 외의 요소의 상태값을 '1'로 표시 함으로써 화면상에 '1'상태의 요소만을 나타내어 요소삭제됨을 가시화 할 수 있게 한다.

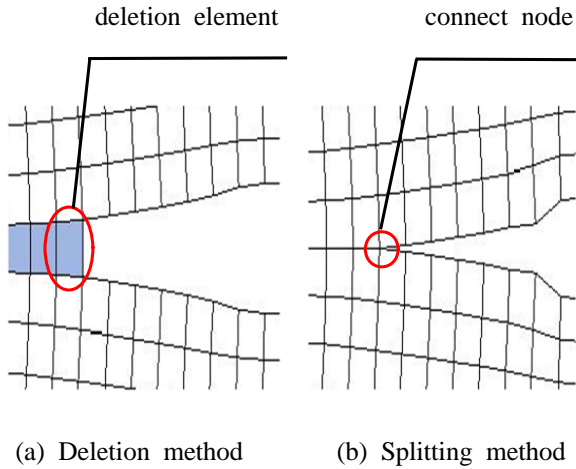


Fig. 3 Difference in deformation and crack propagation

2.2 요소삭제방법과 요소분리방법

파단해석에 가장 널리 사용되는 방법으로 요소 삭제방법과 요소분리방법이 있는데 요소분리방법은 요소삭제 없이 파단이 예상되는 부분의 요소가 임계한도를 넘어설 때 절점이 분리되는 방법으로 절점 분리 방법으로 불린다. 이 두 방법의 차이점은 변형률 값의 가치 판단으로 설명된다. 요소삭제방법(Fig. 3(a))에서의 변형률 가치판단은 요소 적분점에서 찾는다. 그러므로 삭제되는 요소들은 서로 독립적이 되고 삭제될 때 생기는 에너지도 무시 할 수 있게 된다. 이에 비해 요소분리방법(Fig. 3(b))은 변형률 가치 판단을 같은 절점을 공유하는 각각의 요소에서 찾게 된다. 이것은 요소 파단 진행시 요소의 끝 절점이 파단이 진행 될 요소에 붙어 있게 되고 이로 인해 생기는 과도한 에너지가 변형률 값에 적용되므로 요소삭제방법보다 파단 직후 큰 변형률 값을 보이고 이는 손실에너지가 더 크다는 것을 의미한다. 그러므로 요소분리방법은 파단이 진행되는 동안 너무 많은 에너지가 소모되기 때문에 일반적으로 요소삭제방법이 보다 타당한 결과를 주게 된다.⁽⁸⁾

3. 본 론

3.1 원형관 실험

Huang 등⁽¹⁾에서는 원형관의 축방향 분열을 관의 직경과 두께, 원뿔형 다이의 세 가지 각도 형태로 실험한 결과를 나타내었다. Fig. 4는 thin-

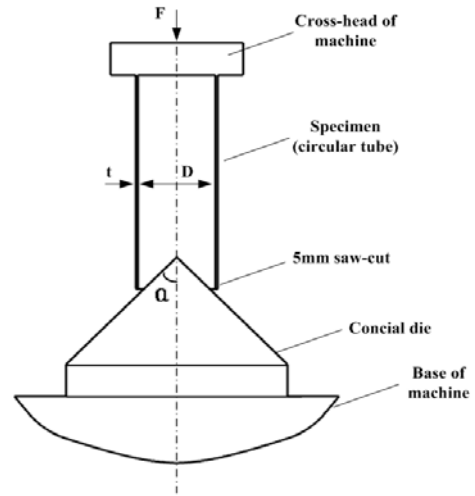


Fig. 4 Experimental set-up, with 8 evenly spaced 5mm initial saw-cuts around lower circumference

wall 원형관 파단실험 모식도를 나타낸다. 그림과 같은 실험조건에서 원형상태로 안쪽으로 찢어져서 말리는 현상을 나타내기 위하여 원형관 밑부분의 8군데에 5 mm의 초기분열을 발생시켰다. 원뿔모양의 다이는 실험기에 고정되어 있다. 파단이 진행될 때 원형관과 실험기는 일직선이 되도록 한다. 원뿔 다이의 각도는 45°, 60°, 75°이며 재료는 mild steel을 사용하였고 원형관의 길이는 200 mm이며 두께 또한 각 직경마다 다르게 실험되었다.

Fig. 5는 실험에 사용된 mild steel의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 실험이 진행되면서 원형관은 변형률한도에 도달하게 되고 이때 초기 크랙에 의하여 축방향의 파단진전이 일어나 실험 후 Fig. 6과 같은 형상으로 말려 올라간다. 이 원형형상은 원뿔 다이의 각도와 원형관의 치수에 영향을 받게 된다. 실험은 원형관이 120 mm 파단 후에 멈추고 파단이 끝난 후 원형형상은 관벽에 접촉하게 된다.

Fig. 7은 원형관이 Fig. 4와 같이 실험함에 있어 다이 각도를 45°, 60°, 75°로 변화시켜 실험 한 후 각 다이 각도에 따라 작용하는 힘-거리 그래프를 나타낸 것이다. 이 그래프는 후에 다이 각도를 달리하여 파단 해석한 해석 결과와 비교할 수 있는 직접적인 비교 그래프가 된다.

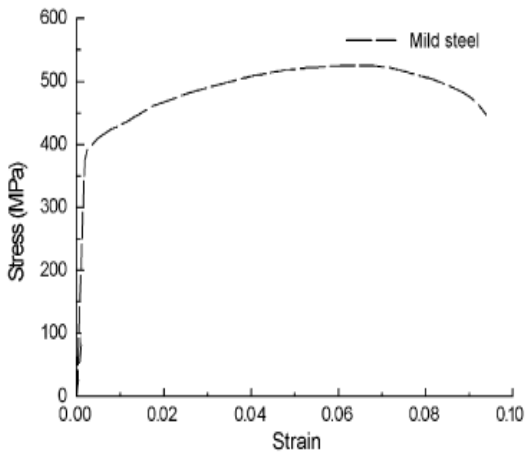


Fig. 5 Stress-strain curve of the mild steel (Huang et al.⁽¹⁾)

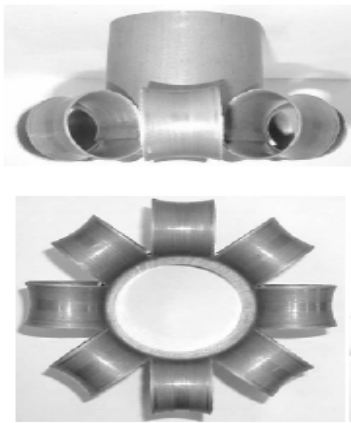


Fig. 6 Typical mild steel specimens after tests (Huang et al.⁽¹⁾)

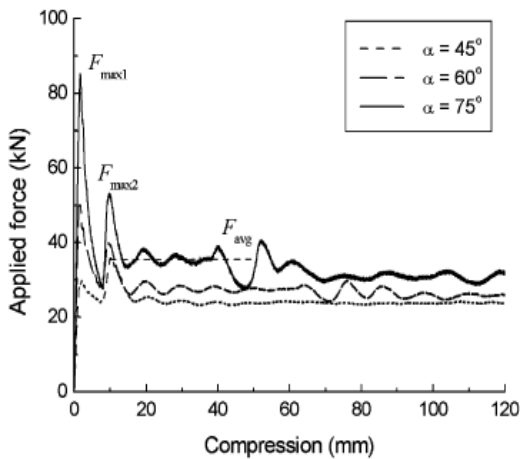


Fig. 7 Typical force-displacement curves for mild steel tubes with $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ (Huang et al.⁽¹⁾)

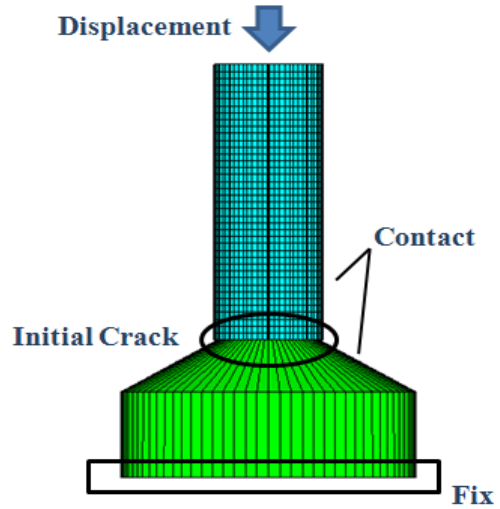


Fig. 8 Boundary conditions of circular metal tube analysis

3.2 원형관 해석

Huang 등⁽¹⁾의 실험결과를 바탕으로 요소의 크기에 초점을 맞추어 요소삭제방법을 이용하여 해석을 하였다. 해석의 경계조건은 실험조건과 마찬가지로 Fig. 8과 같이 주어진다. 원뿔 다이를 고정시키고 원형관의 윗면에 변위를 주어 해석하였고 변위가 적용됨에 따라 원뿔 다이의 겉면과 원형관의 안쪽면이 실제와 같이 면마찰을 하며 해석될 수 있게 접촉 조건을 적용하였다. 신호철⁽¹¹⁾에서 일반적인 steel의 마찰계수는 0.1~0.2의 분포를 보이므로, 논문의 해석조건에서의 마찰력은 0.1로 하였다.

또한 shear failure 파단이론을 이용하여 파단형상을 가시적으로 표현하였고 원뿔 다이는 강제 요소로 원형관은 사절점 쉘 요소(S4R)를 사용하여 해석하였다.

실험에서는 8군데에 5mm의 초기분열을 발생시켜 파단 실험에 적용하였는데 이를 해석에 적용하기 위해 마찬가지로 8군데 5mm의 초기분열을 삭제요소로서 적용하였고 요소의 크기에 따른 해석결과 값을 실험결과 값과 비교하기 위해 0.85, 0.65, 0.43mm로 해석하였다. 요소크기의 조절은 Fig. 9에서와 같이 파단이 진전되는 부분 즉, 초기파단을 준 요소부분의 축방향 요소들의 크기 조절로 나타나게 된다. 또한 파단되어 삭제 표현되는 요소는 두줄로 모델링하였는데 Fig. 6의 실험 결과와 같은 형상의 해석형상을 얻기 위함이다.

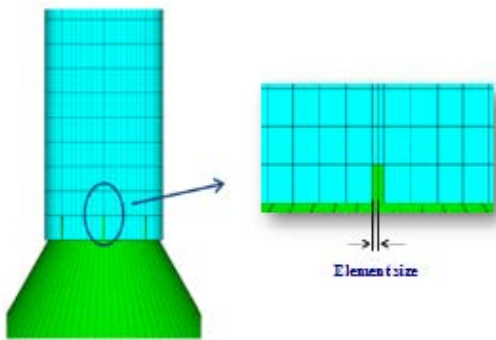


Fig. 9 Element size

한 줄의 요소로 모델링을 하여 해석하는 경우 균열 진전이 나타나는 것 보다 요소가 찢어지는 현상이 발생하였는데 두 줄의 요소를 사용한 모델은 소성변형률의 균열 선단부 집중을 좀 더 잘 나타내게 되어 균열 진전이 타당하게 나타나게 된다.

3.2.1 요소 크기 별 해석 결과

균열 선단부의 요소 크기는 0.85, 0.65, 0.43 mm 로 해석하였으며 이 모델의 원형관의 직경은 74 mm, 두께는 2 mm이다. 원뿔 다이의 각도 α 는 60° 이고 이때 파단 해석에서 사용한 등가소성변형률의 파단변형률 값은 해석시 작용하는 힘의 크기가 Fig. 7에서의 시험 결과와 유사한 값을 보이는 0.3을 사용하였다.

Fig. 10은 해석결과를 나타내는데 Fig. 10(a)는 파단진행이 일어나기 전의 원형관의 모습이다. 강체 요소로 지정된 다이부분은 흰색으로 표현된다. Fig. 10(b)는 파단진행 후 Mises stress 분포를 나타낸 모습이고 Fig. 10(c)는 shear failure 이론에 의한 'status' 명령어 사용으로 요소삭제법이 적용된 모습으로 빨간부분이 status '1'인 부분 파란부분이 파단이 진행되는 즉, 삭제되는 부분인 status '0'인 부분이고 이는 Fig. 10(d)에 나타나듯이 실제 파단 모습(Fig. 6)과 같은 요소삭제모습을 가시화하여 나타낼 수 있다.

이 해석 결과로 작용하는 힘-거리 그래프 Fig. 11를 실험결과 그래프(Fig. 7)와 비교하였다. 해석 결과 그래프의 요소크기 0.65 mm일 때 작용되는 힘의 크기의 평균은 약 2.7 ton으로 실험결과에서 해석조건과 같은 $\alpha = 60^\circ$ 일 때의 힘의 크기

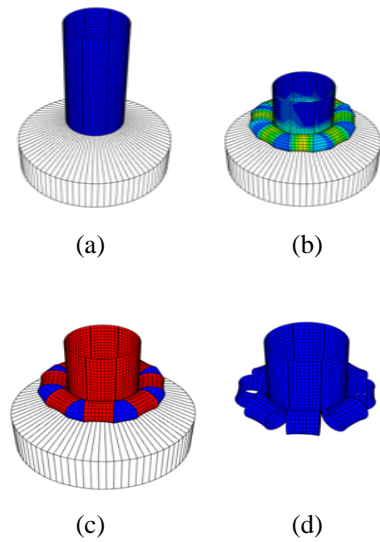


Fig. 10 Analysis Results : (a) initial tube (b) final result(Mises stress) (c) crack propagation and removed element (d) application of 'status' failure keyword

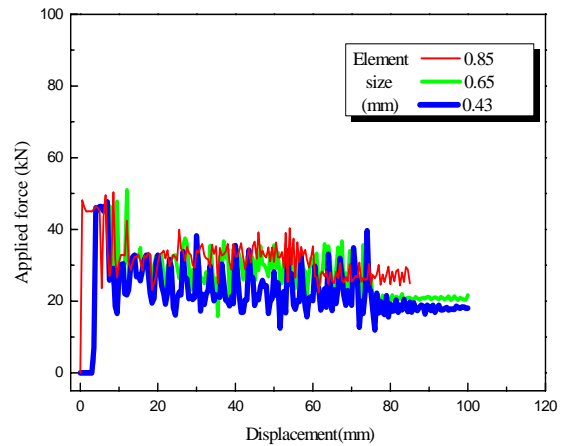


Fig. 11 Force-displacement curve ($\alpha = 60^\circ$)

와 거의 상응하였다. 0.85 mm일 때는 약 3.25 ton, 0.43 mm일 때는 약 2.3 ton의 크기를 보였다. 이 해석 결과들로부터 요소 크기에 따라서 파단 변형률 값을 다르게 변화시켜야 실제 파단 현상을 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것의 추가적인 해석결과로써 직경이 74mm, 두께가 2mm에서 실제 파단 현상을 나타내는 파단변형률은 요소크기 0.85mm 일 때는 0.25, 0.43mm일 때는 0.36을 나타냈다.

Table 1 Comparison of experimental and analysis results

직경 (D,mm)	두께 (t,mm)	다이 각도 (°)	실험결과 (kN)	해석결과 (kN)
74.0	1.8	45	23.3	22.4
74.0	1.8	60	27.0	26.9
74.0	1.8	75	33.8	38.8

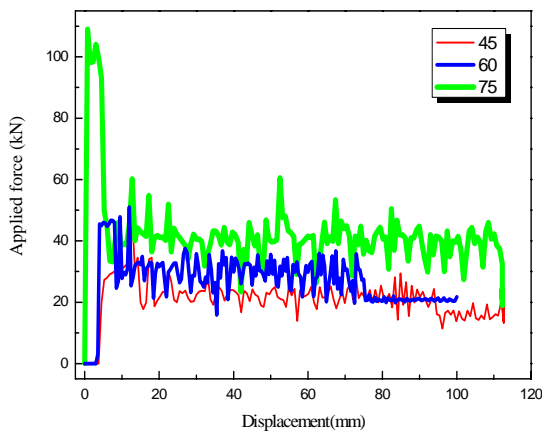


Fig. 12 Force-displacement curve (die angle)

3.2.2 원뿔 다이 각도에 따른 해석 비교

앞 절에서 요소크기에 따라 파단 변형률 값을 다르게 해야 실험결과와 잘 맞는다는 것을 보았다. 요소크기 0.65 mm일 때의 원뿔 다이 각도에 따른 해석결과 또한 실험결과와 맞는지 확인해보았다. 원뿔 다이의 각도는 45°, 60°, 75°형태로 해석을 하였고 원형관의 치수는 앞 절과 같다. Fig. 12는 다이의 각도에 따른 해석결과를 힘-거리 그래프로 나타낸 것이다. 이는 실제 실험결과 그래프(Fig. 7)와 비슷한 경향을 보인다.

Table 1은 다이 각도에 따른 실험결과와 해석 결과의 작용하는 힘의 크기를 나타내었다. 작용하는 힘의 크기의 표현은 평균 값으로 나타내었으며 이는 가장 크게 작용하는 힘과 가장 작게 작용한 힘 일때의 수치를 제외한 나머지 값들의 평균값을 나타낸다. 표에 나타나듯이 평균 작용되는 힘의 값이 거의 상응하는 값으로 나타났다. 이는 실제 실험과 같은 조건을 해석에도 같이 적용되었다는 사실을 확인할 수 있다.

Table 2 Failure strains and normalized element sizes

직경 (D,mm)	두께 (t,mm)	요소 크기 (l_e ,mm)	l_e/t	ϵ_{cr}
47.2	3.3	0.85	0.25757	0.35
		0.65	0.19697	0.4
		0.43	0.13030	0.49
49.4	1.6	0.85	0.53125	0.18
		0.65	0.40625	0.24
		0.43	0.26875	0.31
74.0	2.0	0.85	0.425	0.25
		0.65	0.325	0.3
		0.43	0.215	0.36

3.3 요소크기와 두께에 따른 파단변형률

Simonsen 등⁽⁹⁾에는 요소삭제방법을 통하여 구한 파단변형률 값을 실험결과와 각각 다른 격자 사이즈의 요소크기 모델을 사용하여 시험편의 두께와 요소크기, 변형률에 대한 관계식을 제안하였다. 본 연구에서는 요소삭제방법과 Simonsen 등⁽⁹⁾이 제안한 관계식을 바탕으로 Huang 등⁽¹⁾에서의 실험결과와 본 논문의 해석결과를 비교하여 각 요소크기에서의 파단 변형률 값을 찾아 요소크기/두께의 비율 값으로 나타내게 된다. 실험 조건에 따라 직경에 따른 두께에 대한 각각의 요소크기에서 실험결과 값과 상응하는 파단 변형률 값을 Table 2에 나타냈다. 여기서 요소크기/두께 비율은 다르게 표현하여 정규화된 요소 크기 (normalized element size)라고 정의한다. Table 2를 Fig. 13의 그래프로 나타내었다.

Fig. 13의 그래프에는 두께 $t = 1.6, 2.0, 3.3$ mm 일 때의 적합한 근사 곡선을 도시화 하였다. 이 근사 곡선은 Huang 등⁽¹⁾의 실험모델과 실험결과에 맞는 변형률 식의 모태가 된다. 즉, 요소크기와 두께를 가지고 사용해야 할 파단변형률 값을 예측 할 수 있는 식을 유도할 수 있다. 이 실험 모델의 임계 파단변형률 예측 식은 식 (2)로 나타내진다.

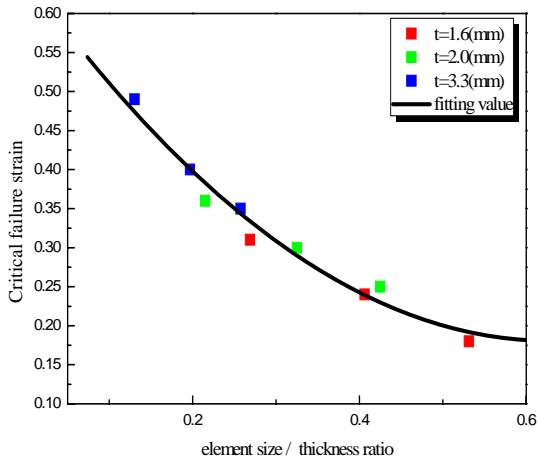


Fig. 13 The critical plastic strain versus normalized element size

$$\varepsilon_{cr} = 0.14 \left(\frac{l_e}{t} \right)^{-0.64} \quad (2)$$

여기서 ε_{cr} 은 임계과단 변형률(critical failure strain)이고 l_e 는 요소크기 그리고 t 는 두께이다. 식 (2)는 Huang 등⁽¹⁾의 실험결과 뿐 아니라 thin-wall 원형관의 변형률 정의를 가능하게 한다. 즉, 실험과 해석시 작용하는 힘과 요소크기 등에 제한을 둘 수 있다. 또한 식 (2)는 해석결과로부터 유추된 것이기 때문에 오차없는 값을 유추하기 위해서 더 많은 실험값과 해석값을 필요로 한다.

4. 결론

본 연구에서는 thin-wall 원형관의 과단예측을 요소삭제방법을 사용하여 해석해 보았다. 크랙진전에 의한 과단 예측은 실제적으로 응력과 변형률, 요소크기와 형태 그리고 물질특성에 따라 다르게 나타난다. 이 논문에서는 과단이론을 이용한 원형관의 과단해석을 통하여 요소크기, 요소형태에 중점을 두어 실험결과와 비교하였다. 해석시 우선 원뿔다이의 각도가 60°일 때 요소크기를 0.85, 0.65, 0.43 mm에 맞추어 실험결과의 작용된 힘의 크기와 요소 크기에 따른 변화를 관찰하였으며 원뿔다이 각도 45°, 60°, 75°로 해석, 그 결과가 실험결과와 거의 상응하는 값을 보이는 것을 확인하였다. 본 논문에서 Simonsen 등⁽⁹⁾에

제시된 요소크기와 두께의 비, 변형률과의 관계 공식을 토대로 실험결과와 해석결과에 맞는 변형률공식을 유도하였다. 이러한 변형률 공식의 제시로 thin-wall 원형관의 흡수에너지해석에서 요소의 크기와 두께에 따라 적절한 과단변형률을 쉽게 결정할 수 있게 된다.

참고문헌

- (1) Huang, X., Lu, G. and Yu, T.X., 2002, "On the Axial Aplitting and Curling of Circular Metal Tubes," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 44, pp. 2369~2391.
- (2) Huang, X., Lu, G. and Yu, T.X., 2002, "Energy Absorption in Splitting Square Metal Tubes," *Thin-walled Structure*, Vol. 40, pp. 153~165.
- (3) Guillow, S.R., Lu, G. and Grzebieta, R.H., 2001, "Quasi-Static Axial Compression of Thin-Walled Circular Aluminium Tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 2103~2123.
- (4) Jiang, P., Wang, W. and Zhang, G.J., 2006, "Size Effects in the Axial Tearing of Circular Tubes During Quasi-Static and Impact Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 2048~2065.
- (5) Reddy, T.Y. and Reid, S.R., 1985, "Axial Splitting of Circular Metal Tubes," *Department of Mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 111~131.
- (6) Fan, H., Wang, B. and Lu, G., 2002, "On the Tearing Energy of a Ductile Thin Plate," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 407~421.
- (7) Yu, T.X., Zhang, D.J., Zhang, Y. and Zhou, Q., 1987, "A Study of the Quasi-Static Tearing of Thin Metal Sheets," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 30, No. 3/4, pp. 193~202.
- (8) Alsos, Hagbart S., 2004, "A Comparative Study on Shell Element Deletion and Element Splitting," *Impact & Crachworthiness Laboratory*, Report No. 127, pp. 24~52.
- (9) Simonsen, B. C. and Törnqvist, R., 2004, "Experimental and Numerical Modelling of Ductile Fracture in Large-scale Shell Structures," *Marine structures*, Vol. 17, pp. 1~27.

(10) Almeida, B.P.P., Alves, M.L. and Rosa, P.A.R., Brito, A.G. and Martins, P.A.F., 2006, "Expansion and Reduction of Thin-Walled Tubes Using a Die : Experimental and Theoretical Investigation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1643~1652.

(11) Sin Hyo Cheol, 1986, "About Friction Coefficient," Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers, Vol. 4, pp. 29~41.

(12) Hibbit, Karsson and Sorensen, 2006, "ABAQUS User's Manual," Hibbit, Karsson and Soren Inc.