

〈論 文〉

사각관의 붕괴해석 및 실험에 관한 연구

강신유* · 한동철**

(1993년 5월 22일 접수)

A Study on the Axial Crush Analysis of a Rectangular Tube with Experimental Comparison

S.Y. Kang and D.C. Han

Key Words : Crush, DYNA3D, Initial imperfection(초기불균일), Elastic buckling mode(탄성좌굴 모드), Quasi-static test(준정적실험)

Abstract

In this paper, the axial crush of the rectangular STS304 tube is analyzed using DYNA3D, and 10 models are tested under quasi-static load. The deformed shapes of analysis and test are present, and the analysis results are compared with the results of quasi-static test. This paper describes that free rotational boundary condition causes a very similar deformed shapes to experimental results, and using the elastic buckling modes as initial imperfection shapes, the deformed shapes are very close to the experimental shapes.

1. 서 론

산업전반에 걸쳐 박판 구조물은 경량화를 요구하는 분야 등에 많이 사용되며, 특히 자동차, 항공기 구조물에 많이 사용되고 있다. 자동차에서의 박판 구조물은 연비 향상을 위한 경량화, 승차감과 조향을 위한 적절한 강성, 진동특성, 구조물의 안정성, 충돌시 충돌 에너지를 적절히 처리하기 위한 파괴 구조 등의 설계조건을 만족해야 하며 그중에서도 충돌시 충돌하중에 대한 구조물의 반응과 충돌에너지를 흡수할 수 있는 능력을 대단히 중요한 설계조건이라 할 수 있다. 그러나, 최소중량을 가지며 우수한 충돌 에너지 흡수특성을 갖게 한다는 것은 서로 상반되는 설계조건이므로 최적의 설계조건을 갖게 하는 연구가 필요하며, 따라서, 최적의 설계변수

들의 조합을 구하기 위한 수치해석기법 등이 필요하다. 충돌하중을 받는 구조물에 관한 수치해석은 1970년대초부터 시작되었으며, 1980년초 Belytschko,⁽¹⁾ Hughes⁽²⁾에 의해 발표된 셀 요소가 일스 프리시트(explicit) 유한요소해석 프로그램으로 개발되면서 활발히 진행되었다. 이어 DYNA3D, PAM-CRASH 등과 같은 상용 프로그램으로 발표되었으며 이를 이용한 연구발표가 있어 왔다.

본 연구에서는 박판구조물이 충돌하중을 받을 때 일어나는 대변형, 접촉문제를 잘 표현하는 사각관을 수치 모델링하여 DYNA3D⁽³⁾를 이용하여 해석하고자 하며 그 해석결과를 실험결과와 비교하고자 한다. 실험은 준정적실험으로 하였으며 이는 동적 실험결과와 비교하여 변형 및 충돌 에너지 흡수특성에 유사성이 있으며, 또한 동적실험에 비하여 반복실험이 용이하고 명확히 결과를 분석할 수 있기 때문이다. 또한 본 연구에서는 수치해석과 실험결과를 분석하여 적절한 수치 모델링 기법과 경계조

* 정희원, 강원대학교 정밀기계공학과

** 정희원, 서울대학교 기계설계학과

건을 설정하는 것에 관하여 논하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 모델

사각관의 실험 모델은 STS304 스테인레스 스틸 용접된 사각봉을 구입하여 사용하였다. 사각관은 단면은 폭 60 mm, 높이 40 mm이며, 두께는 1.1 mm, 길이는 단면 치수의 배수가 되는 240 mm로 하였다. 사각관의 양단은 와이어 절단(wire cutting)하여 수직도를 유지하게끔 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험장치로 Fig. 1과 같이 만능시험기(INSTRON)에 실험 모델을 설치하고 압축실험을 하였다. 실험 모델의 양단은 알루미늄 판을 이용하여 양단 막음으로 사용함으로써 최대한 분포하중이 가해지게끔 하였다. 실험 모델의 하단을 길이방향으로의 고정단으로 하고 시험기상부의 헤드를 이동하여 압축변위를 주었다. 시험기의 압축변위속도는 10 mm/min으로 하였으며 약 100 mm까지의 변위에 대해 로드셀(load cell)을 통하여 반력을 측정하였다.

2.3 준정적 실험

사각관 시험 모델은 총 10개를 가공하여 실험하였다.

실험과정은 Fig. 2와 같으며 (a)는 하중이 가해짐에 따라 판압축(membrane compression)이 일어

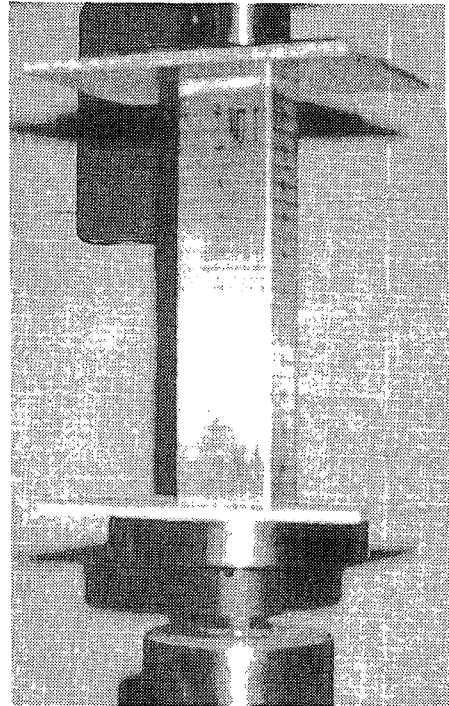


Fig. 1 Quasi-static testing machine

나 반력이 매우 급하게 증가하고 국부좌굴(local buckling)이 일어나기 시작한 모습이다. (b)는 국부좌굴이 일어나 소성힌지(plastic hinge)가 생기고 판압축이 셀굽힘으로 바뀔 때에 따라 이부분의 강성이 약하므로 이곳에 집중적으로 길이방향으로 변위가 생겨 결국 소성힌지가 발생된 부분의 양끝이 맞닿

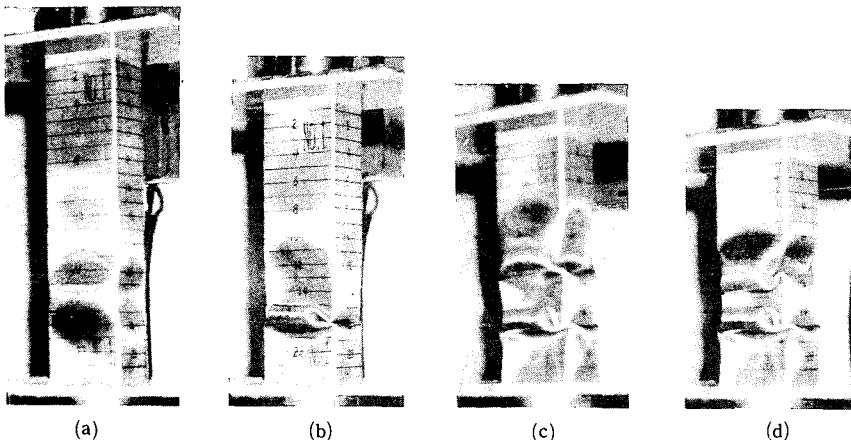
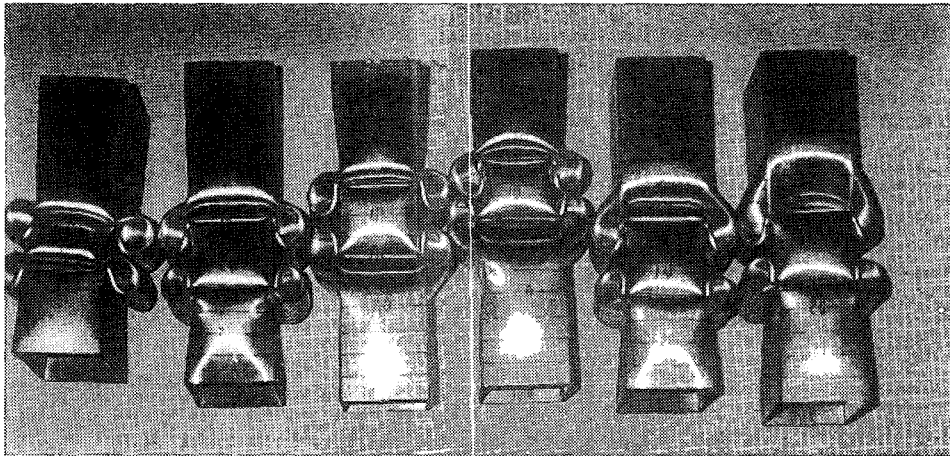
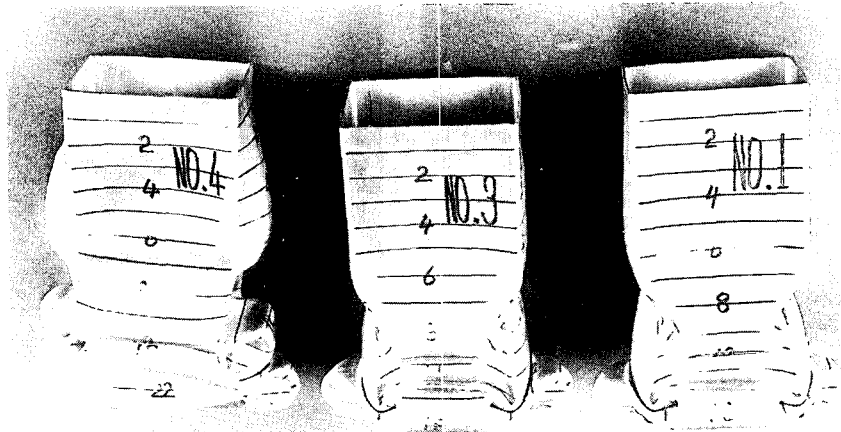


Fig. 2 Deformed shapes of test



(a)



(b)

Fig. 3 Test results

게 된 모습이다. 이 후 구조물의 강성은 다시 커지고 반력도 따라서 증가하며 2차 소성힌지가 발생한다. (c)는 2차 소성힌지가 발생하는 모습이며, (d)는 2차 소성힌지가 진행되는 모습이다.

10개의 모델을 실험한 결과 크게 2가지 형태의 변형이 관찰되었으며 Fig. 3과 같다. (a)는 중앙에 2개의 소성힌지를 만든 모습이며 모두 7개의 모델이 이와같이 변형하였다. (b)는 1차 소성힌지를 만든 후 고정단측 부근에서 2차 소성힌지를 만들고, 이후 1차 소성힌지 다음에 3차 소성힌지를 만든 모습으로 모두 3개의 모델에서 관찰되었다. 10개의 실험 모델에서 1차 소성힌지가 발생하는 부위는 실험모델이 완전히 똑같은 구조물이 아니므로 조금씩

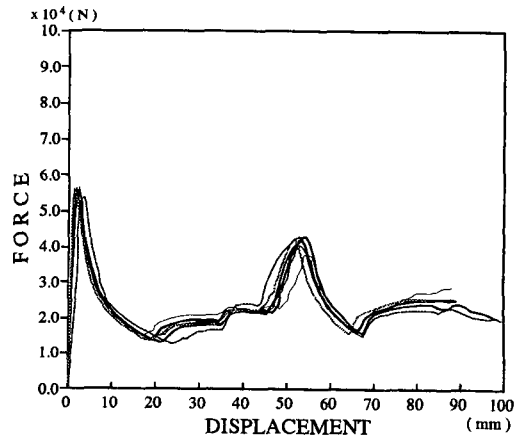


Fig. 4 Displacement-reaction curves of test (case 1)

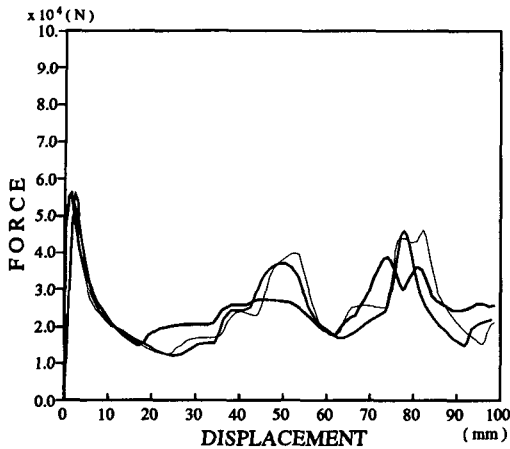


Fig. 5 Displacement-reaction curves of test (case 2)

의 차이는 있었으나 Fig. 3(a)인 경우는 모델 끝에서부터 70-80 mm 떨어진 지점에서 발생하였고, Fig. 3(b)인 경우는 60-65 mm 떨어진 지점에서 생겼다.

실험결과 Fig. 4는 Fig. 3(a)와 같은 변형을 하였을 때 측정된 변위-하중 선도이다. 최대반력평균은 1차 56500 N, 2차 43500 N으로 측정되었다. Fig. 5는 Fig. 3(b)의 경우에 측정된 변위-하중 선도를 나타낸 것으로 Fig. 4에 비하여 결과의 편차는 크나 최대반력평균은 1차 57100 N, 2차 37600 N, 3차 42200 N으로 측정되었다.

3. 수치해석

자동차 충돌해석과 같은 동적붕괴해석에 주로 사용되는 DYNA3D를 이용하여 사각관 붕괴해석을 수행하였다. 초기불완전형태(initial imperfection shape)를 만들기 위해 ABAQUS⁽⁴⁾를 이용하여 좌굴 모드 해석을 하였다. 좌굴 모드 해석 결과의 1차, 2차 모드 형태를 초기불완전형태로 하여 붕괴 해석을 수행하고, 그 결과를 초기불균일(initial imperfection)을 설정하지 않고 해석하였을 때의 결과와 비교하였고 실험결과와도 비교하였다.

3.1 좌굴 모드 해석

사각관 붕괴해석에 대해 DYNA3D를 이용하여 McNay⁽⁵⁾는 완전한 구조물에 초기불균일을 설정하지 않고 해석하고 이를 실험과 비교하였다. 그 결

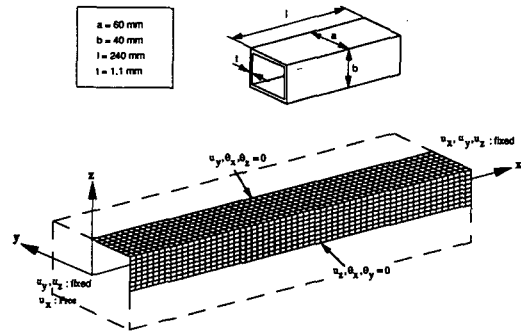


Fig. 6 Numerical model of rectangular tube

과, 그는 실험과의 비교에서 소성흔지 발생위치 및 갯수가 차이가 있다고 발표하였다. DYNA3D에서 초기불균일을 설정하지 않아도 좌굴현상을 계산할 수 있는 것은, 이전 논문⁽⁶⁾에서 지적한 바 있다. 즉, DYNA3D와 같은 익스프리시트 시간적분법을 사용하는 프로그램내에서는 요소좌표계의 변수를 전체좌표계로 변환하는 변환행렬이 시간 t에서 설정되나 변수중 v (속도)는 시간 $t + \Delta t/2$ 에서 산출되므로 시간 t에서 만들어진 변환행렬을 이용하여 좌표계변환을 할 경우 속도성분에 미세한 오차가 생기며 이 오차에 의해 두께방향으로의 속도성분이 생기게 되고 따라서 두께방향으로 힘이 작용하게 된다. 두께방향으로 작용하는 힘은 해석 모델의 단면이 소성역에 이르게 되면 급속히 두께방향으로의 변형을 커지게 하고 좌굴현상과 같은 변형을 발생시키나 붕괴는 임의의 위치에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 ABAQUS를 사용하여 탄성좌굴해석을 수행하고 이결과를 이용하여 초기불균일을 만들고자 하였다. 사각관의 대칭성을 이용하여 Fig. 6과 같이 1/4크기로 모델링하고 탄성좌굴해석을 수행하였다. 양단의 경계조건은 McNay⁽⁵⁾경우와 같이 모델의 한 단은 고정단으로하고 나머지 한 단은 하중단으로 하여 하중단의 하중방향을 제외한 모든 자유도를 고정한 경우와 또 하나는 경계조건중 변위경계조건은 McNay경우와 같이 하고 회전경계조건은 모두 자유롭게 한 경우 2가지에 대하여 계산하여 그 결과를 도시하였다.

탄성좌굴해석을 수행한 결과, Fig. 7은 양단 경계조건에서 회전자유도를 구속한 전자의 경우로서 (a)는 1차 모드이며 (b)는 2차 모드이다. Fig. 8은 양단의 회전을 자유롭게 한 후자의 경우로서 해석

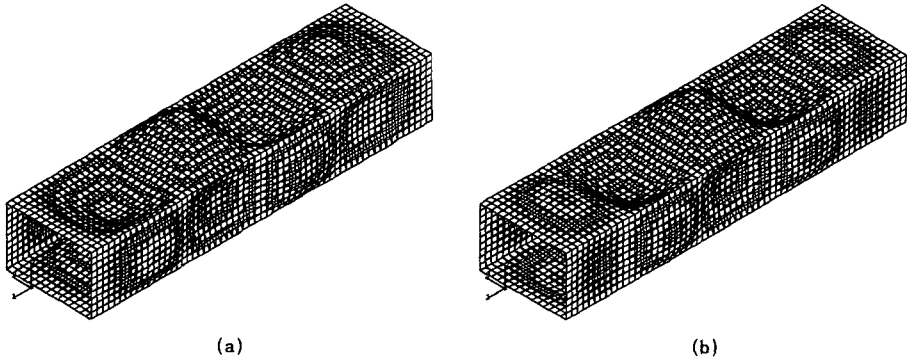


Fig. 7 Elastic buckling mode shapes (a) 1st mode (b) 2nd mode(fixed rotational boundary condition)

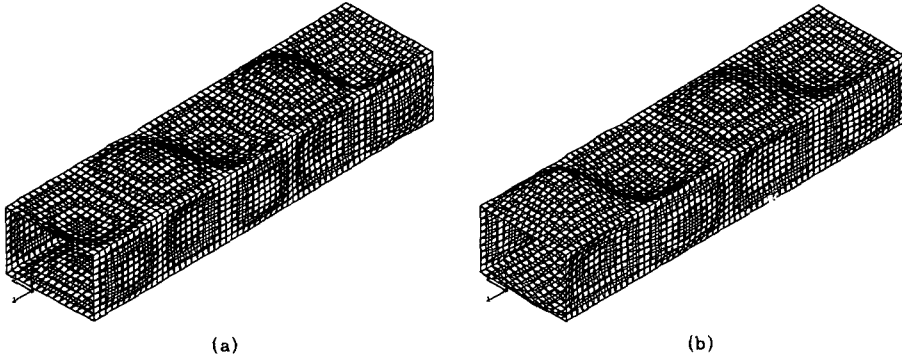


Fig. 8 Elastic buckling mode shapes (a) 1st mode (b) 2nd mode(free rotational boundary condition)

결과 (a)는 1차 모드, (b)는 2차 모드이며, 실험 결과와 비교하였을 때 Fig. 8(a)는 Fig. 3(a)와 같은 좌굴 모습을 보여주며 Fig. 8(b)는 Fig. 3(b)에서 나타난 현상을 잘 재현해 준다. 따라서 실험에서 용접을 하지않고 알루미늄판을 이용하여 양단을 막는 경우에 대하여, 회전자유도를 구속한 McNay의 경계조건보다 회전자유도를 구속하지 않는 경계조건이 더 바람직하다고 판단되었다.

3.2 해석 재료 모델

모델 제작에 사용한 사각관에서 인장시편을 만들어 인장실험을 하였다. 인장실험결과를 재료편람⁽⁷⁾에서 인용한 응력-변형률 선도와 함께 Fig. 9에 나타내었다. 또한 DYNA3D에서 사용한 재료모형은 실험결과와 탄성계수 산출이 부정확하여 재료편람의 탄성계수를 사용하였고 항복강도 및 E_T 는 실험

결과를 사용하여 $E=200000 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_r=350 \text{ N/mm}^2$, $E_T=1800 \text{ N/mm}^2$ 인 탄소성 등방경화(elasto-plastic isotropic hardening) 재료모형을 사용하였다.

사각관에서 추출한 인장시편은 활 모양으로 휘어서 가공상에서 남은 잔류응력이 있음을 나타내었으며 탄성계수를 측정하기에는 정확치 못하였다.

3.3 사각관 붕괴해석

DYNA3D는 동적 해석용 프로그램이므로 하중입력으로서는 초기속도 및 충돌질량이 주어져야 한다. 실험은 준정적실험이므로 가능한 한 초기속도를 줄여 해석하였다. 초기속도는 1.5 m/sec, 충돌질량 8 Ton으로 해석하였다. 해석 모델은 대칭성을 이용한 1/4 모델이므로 대칭면은 경계조건으로 대칭조건을 부여하였고, 양끝의 경계조건으로 변위경계조

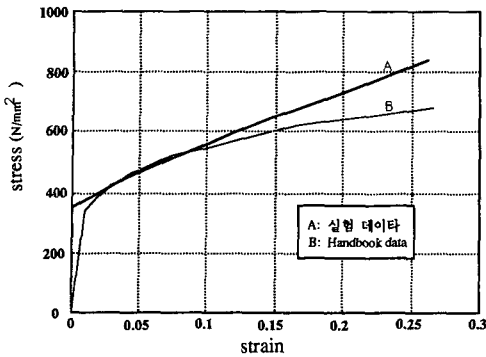
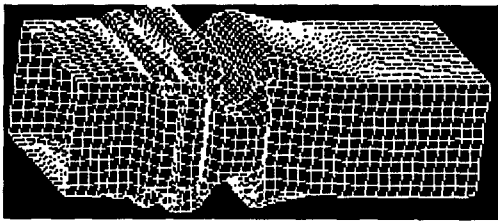
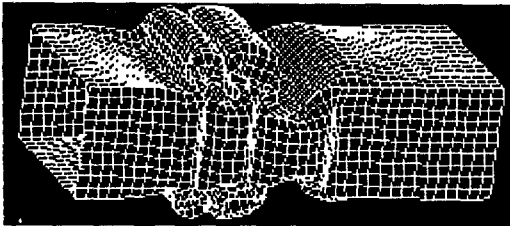


Fig. 9 Stress-strain curves



(a)

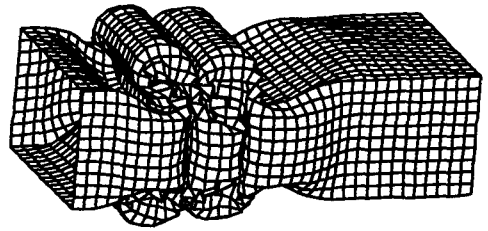


(b)

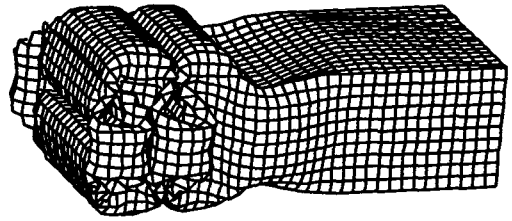
Fig. 10 Deformed shapes(fixed rotational boundary condition)

건은 한쪽끝은 고정시키고, 충돌질량이 있는 곳은 축방향변위가 있게 하였다. 회전경계조건은 탄성좌굴 해석 경우와 같이 고정할 때와 자유롭게 하였을 때의 2가지 경계조건을 주었다. 붕괴해석은 회전조건이 다른 2가지 경우에 대하여 각 경우 1차, 2차 2가지 좌굴 모드를 초기불균일로 하여 해석하였다.

Fig. 7의 결과를 이용하여 초기불완전형상으로 해석한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 Fig. 7(a)의 1차 모드 형상을 이용하여 해석한 결과의 변형 모습이며 Fig. 10(b)는 Fig. 7(b)를 이용하여 해석한 결과이다. Fig. 10(b)는 Fig. 3(a)와 같은 변형 모습을 보여주나 Fig. 10(a)는 Fig. 3(b)와 다



(a)



(b)

Fig. 11 Deformed shapes(free rotational boundary condition)

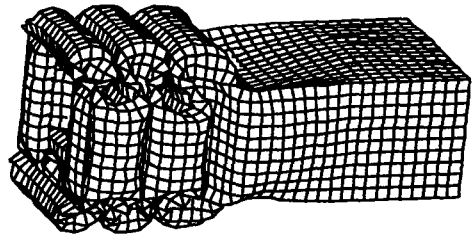


Fig. 12 Deformed shape (without initial imperfection)

른 모습을 보여 준다.

Fig. 11은 회전 경계조건을 자유롭게한 해석결과이다. Fig. 11(a)는 Fig. 8(a)의 1차 모드 형상을 초기불균일로 하여 해석한 결과로써 실험결과인 Fig. 3(a)와 비슷한 모습으로 2개의 소성힌지를 해석모델 길이방향의 중앙부근에 형성한 모습을 보여 주고 있다. Fig. 11(b)는 Fig. 8(b)를 초기불완전형상으로 하여 해석한 것으로 Fig. 3(b)의 실험결과 변형된 모습과 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 초기불균일로 설정하지 않고 해석한 결과로써 소성힌지 발생위치 및 소성힌지 개수가 실험결과와 차이가 있었다.

계산시간은 HP 9000/730 워크스테이션을 이용하여 약 100 mm 범위까지 계산하였을 때 약 800분 소요

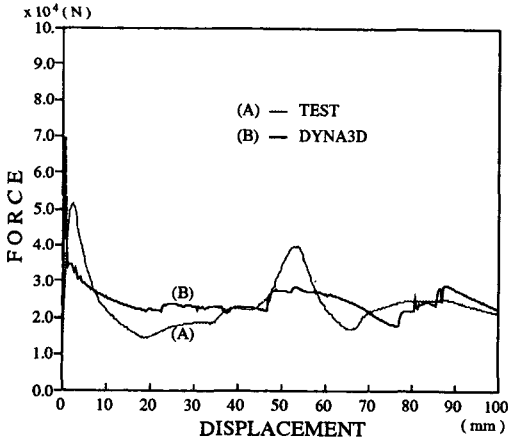


Fig. 13 Displacement-reaction curves(mode 1)

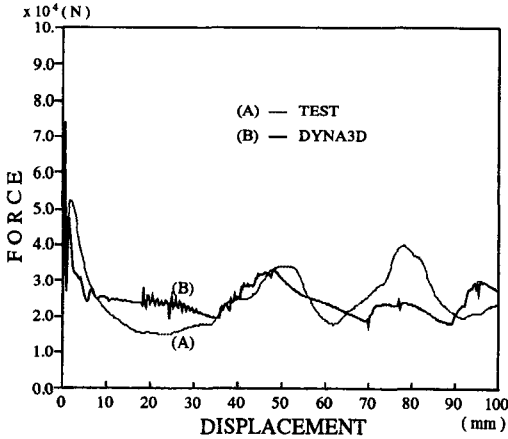


Fig. 14 Displacement-reaction curves(mode 2)

되었다.

4. 결과 및 고찰

해석결과중에서 회전경계조건을 구속하지 않았을 경우 실험결과와 변형된 모습이 잘 일치하여 이 해석결과와 실험결과를 변위-하중 선도에서 비교하였다.

Fig. 3의 실험결과 변형도에서 (a)와 같이 변형한 경우가 Fig. 11(a)와 유사하므로 Fig. 3(a)는 1차 좌굴 모드로 좌굴이후변형을 한 것으로 판단되며 전체 실험모델 10개중에서 7개가이와 같이 변형되어 준정적붕괴실험에서는 1차 좌굴모드가 지배적임을 알 수 있었다. Fig. 13은 1차 좌굴 모드 형태

를 가지고 변형한 경우, 즉 Fig. 3(a)의 실험결과와 Fig. 11(a)의 해석결과를 비교한 것으로 실험결과와 반력은 평균을 구하여 비교하였다. 1차 최대반력은 계산결과 69700 N이며, 실험평균치는 51500 N으로 계산되었다. 실험결과와 평균값은 변위에 대한 반력의 평균을 구한 것으로 각각의 최대반력에 비하여 5000 N정도 낮게 계산되었다. ABAQUS를 이용하여 구한 탄성임계하중은 84900 N으로 산출되어 이들의 값보다 높게 산출되었다. 탄성좌굴해석에서의 임계하중은 탄성계수에 비례하므로 $E=13000 \text{ N/mm}^2$ 일때 임계하중은 55200 N으로 계산되어 실험값과 잘 일치하므로 실험에 사용한 STS304 사각관의 탄성계수가 재료편람에서 인용한 재료상수보다 작거나 또는 사각관 제관과정에서 발생한 잔류응력 영향이라고 판단하였다. 2차 최대반력이 발생하는 변위위치는 거의 일치하였으나 1차 최대반력과 반대로 계산값이 실험값에 비하여 낮게 산출되었다. 실험에서는 Fig. 2(c)와 같이 첫번째 소성힌지가 발생한 다음 일정거리만큼 지난 곳에 두번째 소성힌지사이 에 오목한 형태의 소성힌지가 생겨 강성을 약하게 하기 때문이라고 판단하였다.

Fig. 14는 2차 좌굴형상으로 변형한 경우 실험과 계산에서의 반력을 비교하였다. 계산에서의 최대반력은 74500 N이며, 실험값의 최대반력평균은 52700 N으로 계산되어 Fig. 13의 실험치가 계산치에 비하여 높기 산출되었으며, 2차 3차 최대하중이 발생하는 변위위치는 잘 일치하였다.

사각관단면을 모두 소성역으로 만드는 하중을 구해보면

$$\begin{aligned}
 P_{\text{plastic}} &= (w+h) \times 2 \times t \times \sigma_Y \\
 &= (60+40) \times 2 \times 1.1 \times 350 \\
 &= 77000 \text{ N}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

으로, 계산결과와 잘 일치함을 보여준다.

5. 결 론

사각관 모델을 이용하여 준정적붕괴실험을 하고 그 결과를 DYNA3D를 이용한 해석결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) DYNA3D와 같은 동적거동해석 프로그램은 이용하여 사각관과 같은 완전한 형상의 구조물을 해석하고자 할 때 초기불완전형상을 해석 모델에 부여하여 해석하는 것이 타당함을 보였다.

(2) 사각관 모델의 양단을 용접하지 않고 알루미늄 늪판을 이용하여 막은 경우, 이에 대한 수치해석상 경계조건은 회전자유도를 자유롭게 한 것이 실험과 잘 일치함을 보였다.

(3) 실험결과 사각관의 붕괴는 탄성좌굴 모드의 1차 모드가 지배적이거나, 2차 모드 형태로 붕괴될 수 있음을 나타내었고, 최대하중은 2차 모드 형태로의 붕괴가 다소 높다고 측정되었다.

(4) 해석결과 1차 최대하중이 69700 N으로 산출되었으며 실험치는 약 55000 N으로 측정되어 근접한 결과를 나타내었다.

(5) 단면을 전부 소성역으로 바꾸는 하중인 $P_{prastic}$ 이 77000 N으로 계산되어 해석결과와 잘 일치함을 보였다.

참고문헌

- (1) Belytschko, T., Lin, J.I. and Tsay, C. -S, 1984, "Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng'g*, Vol. 42, pp. 225~251.
- (2) Hughes, T.J.R. and Liu, W.K., 1981, "Non-linear Finite Element Analysis of Shells," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng'g*, Vol. 26, pp. 331~362.
- (3) Hallquist, J.O., 1987, DYNA3D COURSE NOTES, Lawrence Livermore National Lab., UCID-19899.
- (4) ABAQUS Users manual, 1991, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (5) McNay, G.H., 1988, "Numerical Modelling of Tube Crush with Experimental Comparison," *Proc. of 7th Int. Conf. on Vehicle Structural Mechanics*, P-201, SAE, pp. 123~134.
- (6) 강신유, 1992, 충돌하중을 받는 차체 셸 구조물의 동적붕괴해석, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문.
- (7) 金属材料 疲勞強度 テ"-夕集, 1992, Society of Material Science, Japan.

(1) Belytschko, T., Lin, J.I. and Tsay, C. -S, 1984, "Explicit Algorithms for the Nonlinear