

Steel D&I Can 의 안정성 해석

조성재* · 유치상* · 정성욱* · 박현철** · 황운봉** · 한경섭**

Analysis of stability on steel D&I can

S.J. Cho, C.S.You, S.W. Jung, H.C. Park, W. Hwang and K.S. Han

Key Words : D&I can, stability(안정성), FEM simulation(유한요소 해석)

Abstract

The main object of this study is to develop a reliable FEM simulation technique for stability test using ABAQUS software and to clarify the effect of base profile of a steel D&I(drawn and ironed) can on the dome reversal pressure. For the can after body making simulation, two kind of stability test, dome buckle test and axial crush test are performed. The factors studied in the base profile on the dome reversal pressure are the base diameter, the rim radius, the dome shoulder radius, the dome radius and the dome depth. Within the limits before the occurrence of normal snap-through buckling of dome, the dome reversal pressure is improved by decreasing the base diameter, increasing the dome depth or increasing the dome shoulder depth.

기호설명

- D : Base diameter
- R₁: Outer rim radius
- R₂: Inner rim radius
- R₃: Dome shoulder radius
- R₄: Dome radius
- H₁: Dome depth

1. 서론

현재 음료 캔 시장에서는 알루미늄캔과 스틸캔 사이의 경쟁이 심화되고 있다. 스틸 캔은 알루미늄에 비해 강성 및 강도가 크고 탄소와 같은 성분 첨가를 통해 재질의 기계적 특성을 조절하기가 용이하므로 이를 이용한 소재 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 개발의 주요 목표는 소재의 두께를 얇게 하여 캔의 단가를 낮추는 것이며 이러한 일련의 작업을 캔의 경량화라고 한다.

경량화를 위해 소재는 충분한 강도와 가공성이 확보되어야 한다. 소재의 강도의 증가는 일반적으로 성형성을 떨어뜨리므로 소재 개발과 더불어 가

공성의 검증이 이루어져야 하며 동시에 완성 캔에 대한 안정성도 검토되어야 한다.

일반적으로 제조된 캔에 대해서는 축방향 압축 강도와 내압 강도가 요구된다. 축방향 압축 강도는 캔의 운반을 위해서, 내압강도는 음료를 저장하기 위한 필요한 요건이다

Hideki Utsunomiya 는 캔 바닥 형상과 물성치가 내압에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적인 관점에서 연구하였다[1]. 이러한 가공성 및 안정성의 검토는 실험을 통한 연구 결과가 가장 신뢰성이 높으나 개발비용 및 시간의 단축을 위해 FEM 과 같은 이론적 해석을 병행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 ABAQUS 소프트웨어를 사용하여 몸체성형(bodymaking process)해석이 완료된 스틸 캔에 대한 내압 안정성, 축 하중 안정성, 캔 바닥 부분의 형상에 따른 내압특성을 해석하였다. 또한 경량화를 위해 기존에 사용되는 두께 뿐만 아니라 더 얇은 소재에 대해서도 안정성을 평가하였다.

2. 해석 방법

2.1 기하학적 모델링

본 연구에서의 해석 대상인 캔은 206/211 Steel D&I 캔으로 안정성 평가를 위해서는 몸체성형

* 포항공과대학교 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

(bodymaking process) 해석이 선행 되어야 한다. 몸체성형 공정은 드로잉, 리드로잉, 1~3 step 아이어닝, 도밍, 트리밍, 1~8 step 내킹순서로 진행되며 각 해석공정은 Fig.1 에 나타나 있다. 안정성 평가를 위해 소재의 두께는 현재 상용화되고 있는 두께 0.24mm, 0.26mm 와 향후 개발 목표로 하고 있는 두께 0.19mm, 0.21mm, 0.23mm 에 대해서 수행하였다.

캔의 좌굴은 캔의 바닥 부분 즉 돔 부분에서 발행하게 되므로 이 부분의 형상은 강도에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 캔의 바닥 형상에 따른 내압특성을 알아보기 위해 몇가지 돔 형상을 디자인 하여 도밍 공정을 수행하였으며 이에 따른 안정성 평가를 하였다.

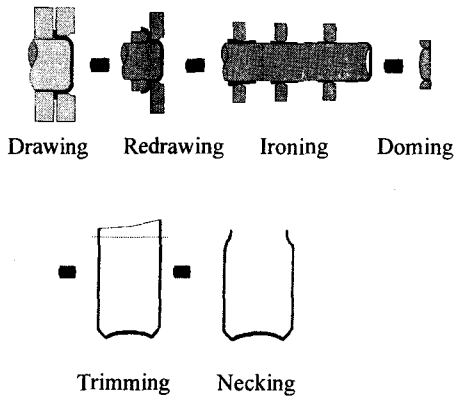


Fig. 1 Process of Can bodymaking

2.1.1 FEM 해석 방법

해석은 2 차원 축대칭 조건에서 수행하였다. 내압 안정성 해석은 실험과 마찬가지로 Fig.2 와 같이 먼저 캔의 상단을 고정 시킨 후 공압을 점차로 가해서 좌굴이 일어나는 압력을 찾는 방법으로 수행되었다.

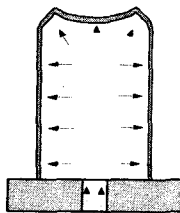


Fig. 2 Process of dome buckle test

실험에서의 축하중 안정성 해석은 Fig.3 과 같이 캔을 세워 놓고 상단부에서 힘을 작용하게 되나

본 연구에서는 캔의 상단부를 고정시키고 다이를 상승시켜 캔의 바닥부로부터 힘을 전달하였다. 이때 변위는 다이의 상승거리, 하중은 다이로부터 전달되는 반발력으로 측정한다.

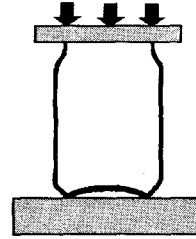


Fig. 3 Process of Axial crush test

3. 내압 안정성

3.1 내압 특성

Fig.4 은 206/211 캔의 바닥 부분의 형상을 나타낸다. 각종 형상에 대한 변수는 Table 1.에 요약되어 있다.

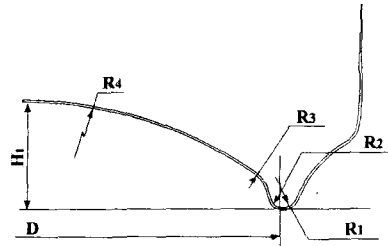


Fig. 4 Geometrical Shape of the bottom profile

Fig.5 는 내압 버클링 해석시 바닥부분에서 발생하는 변형의 진행과정을 단계적으로 보여주며, Fig.6 는 이 때 캔 바닥의 가운데 부분($X=0mm$) 지점에서 측정한 내압과 변위 그래프이다. Fig.5 는 초기의 형상, 버클링이 시작될 때, 버클링이 진행 후 3 가지 모양을 나타내고 있다. 그러나 버클링 진행 형상은 실제 실험 즉 버클링의 바닥부분 곡률이凸에서凹로 바뀌어 진행되는 것과 다른 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 본 FEM 해석의 한계로 버클링 이후의 진행 형상에 대해서는 충분히 모사를 못하기 때문으로 보여진다. 본 연구는 Solution Scheme 이 Implicit 방법을 사용하여 계산하므로 버클링 직전까지는 신뢰성이 높은 결과는 내는 반면 버클링 이후의 급격한 변화를 모사하는데에는 한계가 있기 때문이다. 이러한 해석은

Explicit Solution Scheme 을 사용하면 이후의 형상에 대해서도 어느 정도 실제와 가까운 결과를 찾을 수 있다[2]. 그러나 본 연구의 목표인 최대 내압을 찾기에는 무리가 없다.

D (mm)	R1- R2(mm)	R3 (mm)	R4 (mm)
50	1.5-1	2	35,40,45
		3	35,40,45
	1.5-1.5	2	35,40,45
		3	35,40,45
	2-1	2	35,40,45
		3	35,40,45
51	1.5-1	2	35,40,45
		3	35,40,45
		3	35,40,45

Table 1. Parameter of base profile

Fig.6 의 두 그래프는 드로잉/리드로잉/아이어닝/도밍공정(drawing/redrawing/ironing/doming)에 이은 가공경화효과를 포함한 물성치를 도입한 결과와 가공 경화가 되지 않은 초기 물성치를 사용한 해석 결과이다. 가공경화효과에 의해 바닥부분의 내압강도는 721kPa(105psi)로 초기 물성값을 대입했을 때 나타나는 564kPa(82psi)에 비해 18.6% 증가하였다. 본 연구에서 사용된 캔의 내압 설계기준은 689kPa(100psi)이며 실험들은 대략 760~820kPa(110psi ~120psi)로 나타나 본 해석 값이 실험에서 보다 10% 정도 낮음을 알 수 있다. 이러한 결과

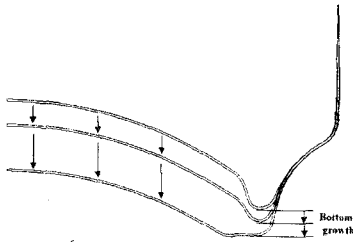


Fig. 5 Deformation shape during dome buckle test

는 본 연구의 해석상의 오차에 의한 것으로 생각된다. 해석의 오차의 요인으로는 몸체성형의 많은 단계로 인한 바닥부분의 가공경화효과, 도밍 공정의 정확성 여부, 내압 해석의 정확성 등이 있으며 이러한 요인들이 누적되어 10%정도의 오차를 발생시키는 것으로 보인다. 따라서 향후 연구는 이에 대한 10%정도의 Safety factor 고려하여 해석할 필요가 있을 것으로 생각된다.

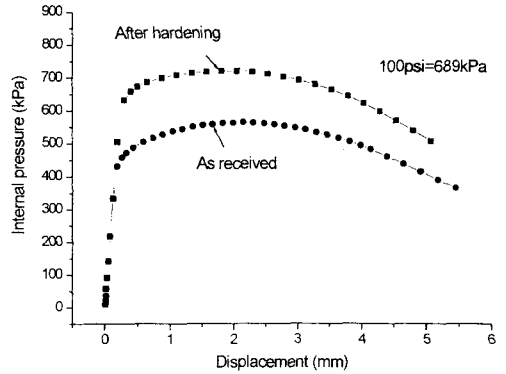


Fig. 6 Internal pressure vs. displacement behavior during dome buckle test

3.2 돔의 형상과 내압과의 관계

기준 206/211 캔의 형상은 Fig.4 의 설명에 나타나 있다. 이 값을 기준으로 각각의 형상 인자들을 변화시켜 각각의 인자가 내압에 미치는 영향을 살펴 보았다. Fig.7~Fig.10 는 돔 깊이 $H_1=9\sim 13$ 범위와 돔반경 $R_4=35,40,45$ 에 대해 공통적으로 수행되었으며, 각각의 형상인자 R_3, R_2, R_1 를 변화시키면서 내압강도를 나타낸 그래프이다. Fig.7~Fig.10 의 대체적인 경향으로는 X 축에 해당하는 돔 깊이(H_1)가 증가할수록, 돔 반경(R_4)가 증가할수록 내압강도는 증가하고 있다. 이러한 현상은 캔 가공시 도밍편치(Dommer)와 다이사이에는 Gap 이 존재하는데, 캔의 안쪽 바닥면(바닥 지지부)이 수직이 아닌 경사진 형태로 되어있기 때문이다. 돔 곡률과 돔 깊이의 증가는 이 부분의 길이를 증가시켜 이 경사의 각도를 수직에 가깝게 만들어주며 바닥 지지부가 수직에 가까울수록, 구조적으로 내압에 더 안정하기 때문이다. 그러나 지나친 돔반경 증가와 돔깊이의 증가는 가공시 돔 솔더 부분에서 응력집중을 발생시켜 이 부분에서 찢어질 위험이 있다.

Fig.7 는 돔 솔더의 반경(R_3)의 영향을 나타낸다. 반경 2mm 직선 그래프와 반경 3mm 점선 그래프는 일반적인 경향이 발견되지 않고, 돔 반경(R_4)에 따라 서로 다른 경향을 나타낸다. H_1 의 증가에 따라 돔 반경 45mm 에서는 직선이 급격히 하강하고, 돔 반경 40mm 에서는 직선과 점선이 교차하며, 돔 반경 35mm 에서는 직선과 점선이 평행하게 나간다. 이는 돔 반경(R_4)와 돔 솔더의 반경(R_3)이 만나는 부분에서 국소 변형이 일어나기 때문이며, 따라서 돔 반경이 증가와, 돔 솔더 반경의 감소가 급격한 바닥 형상 변화로 인해 응력 집중이 발행

할 수 있음을 의미한다.

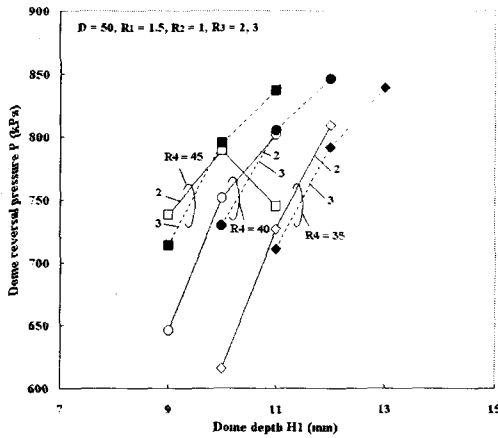


Fig. 7 Relationship between dome reversal pressure P and dome depth H1 for R3

Fig.8 은 캔 바닥 테두리의 안쪽 반경(R_2)의 영향을 나타낸다. 반경 1mm 직선 그래프와 반경 1.5mm 점선 그래프는 H_1 의 증가에 따라 처음에는 점선이 아래부분에 위치하다가 어느 지점에서 교차하여 점선이 윗부분으로 올라오게 된다. 이와 같은 결과는 이 부분의 곡률이 도밍가공시 가장 큰 응력집중을 받아 얇아지기 때문이다. 즉 구조적으로는 R_2 가 작은 것이 유리하나, 돔 깊이가 증가할수록 R_2 가 작은 캔은 이 부분에 응력집중이 일어나 두께가 얇아지고 이러한 현상이 내압강도에 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

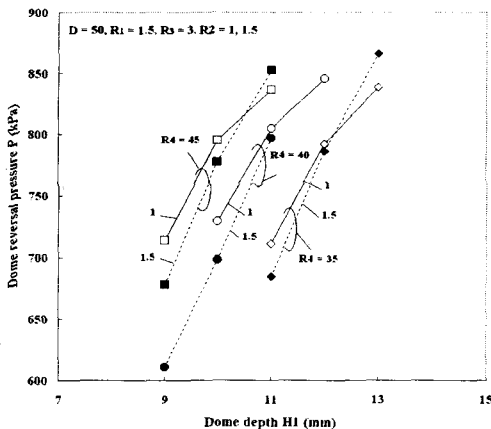


Fig. 8 Relationship between dome reversal pressure P and dome depth H1 for R2

Fig.9 는 캔 바닥 테두리의 바깥쪽 반경(R_1)의 영향을 나타낸다. 반경 1.5mm 직선 그래프와 반경 2mm 점선 그래프는 H_1 의 증가에 따라 서로

평행하게 직선부가 높게 나타난다. 이 부분의 반경 R_1 은 내압 해석에서 버클링이 발생하는 지점이 아니므로 이 부분의 곡률에 따라 내압특성에서 차이가 나는 것은 다소 의외의 결과라고 할 수 있다. 그러나 Fig.4의 버클링 형상으로부터 유추하면, 버클링 발생시 이 부분은 축방향으로 밀려가면서 동시에 중심축에서 멀어지는 방향(+R 방향)으로 변형이 된다. 반경 R_1 이 작을수록 이와 같은 +R 방향으로의 변형을 방해하기 때문으로 생각된다.

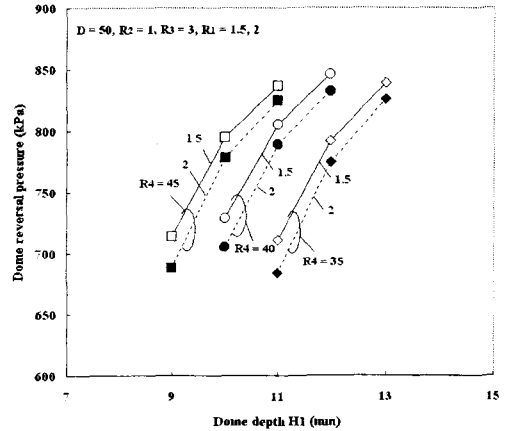


Fig. 9 Relationship between dome reversal pressure P and dome depth H1 for R1

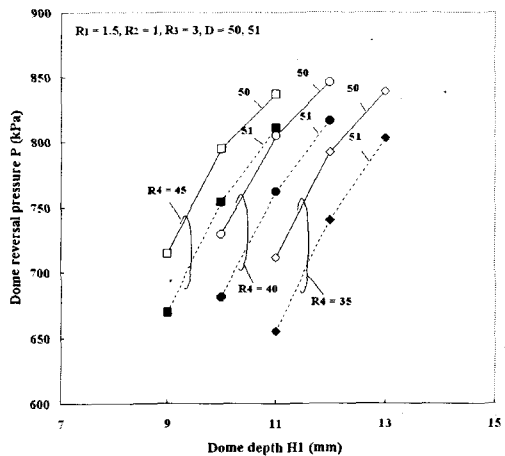


Fig. 10 Relationship between dome reversal pressure P and dome depth H1 for D

Fig.10 는 바닥의 직경(D)의 영향을 나타낸다. 직경 50mm 직선 그래프와 직경 51mm 점선 그래프는 H_1 의 증가에 따라 서로 평행하게 직선부가 높게 나타난다. 이러한 결과는 캔의 바닥부 직경을 가능한 많이 줄이는 것이 내압에 유리함을 의미한

다.

3.3 소재의 두께별 내압력

Fig.11 은 소재의 두께별 내압강도를 나타낸다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 도밍후 두께별 잔류응력분포와 소성변형을 분포가 동일하게 나왔다. 이는 도밍 부분의 물성치가 두께에 관계없이 동일함을 의미한다. 따라서 내압강도는 두께에 비례하게 된다.

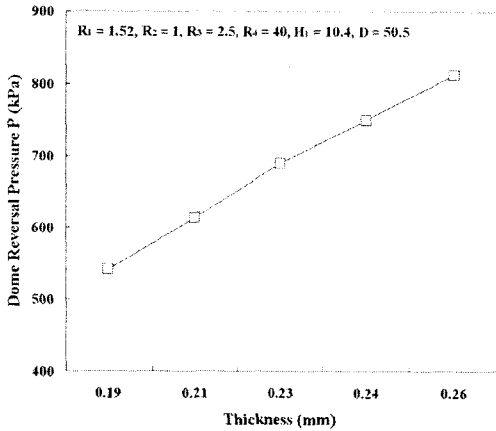


Fig. 11 Relationship between dome reversal pressure P and can thickness

4. 축 하중 안정성

몸체 성형공정에 이어 축하중 해석이 수행되었다. Fig.12 은 2 차원 축강도 해석결과로 나타나는 변형형상을 보여주는 것으로 캔의 바닥부분의 바깥쪽 곡률부에서 굽힘변형이 발생하고 있다. 이러한 결과는 2 차원 축대칭 해석에서는 벽면부를 축대칭의 완벽한 원통으로 가정하게 되므로 벽면부에서 발생하는 3 차원적 버클링을 현상을 묘사하지 못하기 때문이다. 실제의 실험에서는 몸통부분에서 버클링이 발생한다. 그러나, 2 차원 해석은 앞서 수행해온 몸체 성형 각 단계를 통해 누적된 가공경화 효과를 포함할 수 있으므로 캔의 벽면부에서 버클링이 발생하지 않을 경우 바닥부분에 대한 축하중 안정성을 비교적 정확하게 분석할 수 있다. 따라서 2 차원 해석은 결국 캔 바닥부분의 축하중에 대한 안정성 해석이라 할 수 있다.

Fig.13 은 소재 두께별로 축하중 실험시 나타나는 하중-변위 그래프로서 최대축하중값(축강도)이 소재의 두께에 비례하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 앞에서 언급한 바와 같이 도밍 후 바닥부분의 변형률과 잔류응력 상태가 일정하기 때문

이다. 축강도는 0.24mm 소재 캔에서 688lb 로 나타나고 있다. 이 값은 제관사에서 요구되는 캔의 축강도 300lb 의 2.29 배에 해당하는 값이다. 실제 실험에서는 축강도가 500~700lb 로 나타나며 이때 버클링은 캔의 벽면부에서 발생한다. 실험을 통한 벽면부 축강도값과 이론해석을 통해 얻은 바닥부분의 축강도는 서로 비슷한 값을 보이므로 실제 캔에 있어서 바닥부분과 벽면부에서 축강도의 차이는 크지 않게 설계되어있음을 알 수 있다.

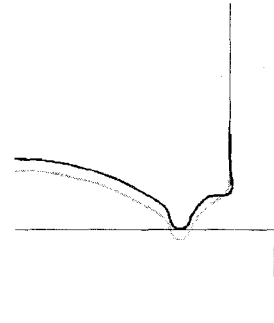


Fig. 12 Deformation during axial crush test

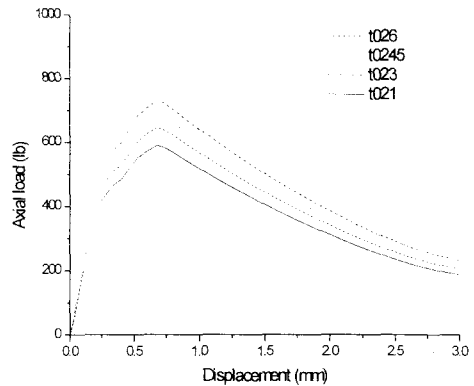


Fig. 13 Axial load vs. displacement during axial crush test

5. 결론

본 연구는 몸체 성형 공정 후 내압 및 축하중 안정성 해석이 수행되었으며 이로부터 유도되는 결론은 다음과 같다.

1. 캔 바닥의 모든 곡률은 내압강도에 영향을 미치는 요소로 작용한다. 일반적으로 바닥의 깊이가 깊어질수록, 돔의 곡률이 클수록, 바닥부분의 직경(base diameter)이 작을수록

내압은 증가 한다.

2. 본 해석에서 사용된 Implicit 해석 코드는 내압 버클링이 발생하기 직전까지의 해석 즉 내압 안정성 해석에는 무리 없이 적용된다.
3. 캔의 축방향 안정성을 해석하는데 있어서 2차원 축대칭 해석은 캔의 벽면부 버클링을 모사하지 못하며 바닥 부분의 축강도를 해석하게 된다. 따라서 캔의 벽면부 버클링은 비축대칭 변위(non axisymmetric deformation)을 동반하는 3차원 해석을 필요로 한다.

후 기

본 연구는 2001년도 두뇌 한국 21 지원 과제비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hideki Utsunoniya, Hisashi Nishimura, "Effect of base profile of a DI beverage can and material properties on the dome reversal pressure" J. Materials Processing Technology, 1998.
- (2) 남재복, 정기조, D&I Can의 아이어닝 공정에서의 reduction 배분에 따른 가공특성 연구, POSCO 연구보고서, 1999
- (3) 한경섭, 정성욱, 남현욱, Steel D&I Can의 Dommig, Necking 공정의 FEM 해석, POSCO 연구보고서, 2000.
- (4) 정기조, 남재복, D&I Can 가공 특성에 미치는 두께 편차 및 가공 조건의 영향, POSCO 연구보고서, 1998.
- (5) 정기조, 남재복, 박강관 가공 기술 매뉴얼, POSCO 기술연구소, 1995
- (6) D.V. Wilson, "Plastic anisotropy in sheet metals", J. Inst. Met., 1966.
- (7) B. Bergeson, M. Reiling, "Two-piece Beverage Canmaking", Sayers publishing group, 1998.
- (8) L. Kollar and E. Dulacska, Buckling of Shells for Engineers, John Willy & Sons, Inc., 1984
- (9) A. C. Ugural, Stresses in plates and shells, McGraw-Hill, Inc., 1981
- (10) L.H. Donnell, "A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bendings", Transactions ASME, 56, 795, 1934