대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 A pp. 459~464 KSME 01F076

Steel D&I Can 몸체성형을 위한 FEM 해석

정성욱* · 정창규* · 남재복** · 진영술** · 한경섭***

Finite Element Analysis for the Body-making Process of Steel D&I Can

S.W. Jung, C.K. Jung, J.B. Nam, Y.S. Jin and K.S. Han

Key Words : Can bodymaking process(캔 성형공정), FEM simulation(유한요소해석)

Abstract

The main object of this study is to develop a reliable FEM simulation technique for the analysis of Steel D&I Can bodymaking process using ABAQUS software. The body making process includes drawing, redrawing, 3 step ironing, doming. The newly developed FEM code in this research is based on the previous research achievement of POSCO for the drawing, redrawing and ironing process. The analysis is performed using two dimensional axisymmetric elements to analyze the punch force, the height of can, the distribution of residual stress and strain. The effect of blank thickness, gap of ironing die is also analyzed.

1. 서 론

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 가공성의 검증이 이루어져 한다. 가공성의 검토는 실험을 통한 연구 결과가 가장 신뢰성이 높으나 개발비용 및 시간의 단축을 위해 FEM 과 같은 이론적 해석을 병행하는 것이 바람직하다.

지난 수년간 포항제철 기술연구소에서는 관련 연구를 수행해오고 있으며 상용 FEM Package 를 사용한 신뢰성 있는 해석코드를 개발하여 많은 성과를 거두고 있다[1-3]. 그러나 이러한 연구들은 공정별로 부분적으로 진행되어 캔 성형공정의 모든 단계를 포함하고 있지 못하고 있다.

이전 연구는 PAM-STAMP 를 사용한 3 차원 해석[3]과 ABAQUS 를 사용한 2 차원 해석[1,2]으로 수행되어 왔다. 3 차원 해석은 가공성 판단에 중요한 요소를 차지하는 드로잉에서의 귀발생, 주름발생 등의 불량을 찾을 수 있으나 요소(shell element)의 특성상 두께방향으로 성형이 진행되는 아이어닝 공정을 포함할 수 없다. 따라서 이를 생략한 드로잉/리드로잉에 이은 도밍공정으로 해석이 수행되었다[3]. 한편, 2 차원 축대칭 요소(axisymmetric element)를 사용한 ABAQUS 해석에서는 드로잉/리드로잉/아이어닝까지의 공정에 대해서 해석이 완료되었다. 2 차원 해석은 3 차원적 불량을 해석할 수는 없으나, 아이어닝 공정을 포함한 몸체성형의 모든 단계를 해석할 수 있다.[5,6]

본 연구에서는 ABAQUS 소프트웨어를 사용하여 기존의 개발된 해석기술을 바탕으로 도밍공정까지의 해석코드를 개발하여 현재 상용화 되고 있는 206/211 D&I Can 가공성에 대한 해석기술을 확보하였다. 개발된 해석코드는 현재 상용되고 있는 두께 0.245mm 의 원판(Blank Sheet)을 기준으로 각종 성형성을 검토하였으며 향후 개발 예정인 두께 0.19mm~0.21mm 의 소재와 기존 0.26mm 원판에 대해서 해석이 수행되었다.

* 포항공과대학교 대학원
** 포항제철 기술연구소
*** 포항공과대학교 기계과

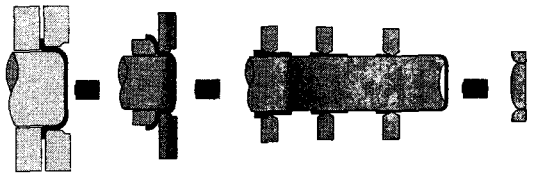

Fig. 1 Process of Can bodymaking

2. 해석방법

2.1 기하학적 모델링

본 연구에서의 해석 대상인 캔은 206/211 Steel D&I 캔으로 몸체성형 공정은 드로잉, 리드로잉, 1~3 step 아이어닝, 도밍으로 진행되며 각 해석공정은 Fig.1 과 같다. 캔 및 금형의 세부 제원은 포항제철 pilot line 에서 시험생산된 D&I 캔의 표준 금형조건에 따른다.

원판소재(blank sheet)의 직경은 134mm 이며 드로잉 펀치의 직경은 88.9mm 로 드로잉비가 1.51 이며 두께 0.245mm 캔을 기준으로 두께에 따른 해석을 진행하였다. 소재의 두께는 향후 개발을 목표로 하고 있는 두께 0.19mm, 0.21mm, 0.23mm 및 현재 상용화되고 있는 두께 0.245mm, 0.26mm 에 대해서 수행하였다.

리드로잉과 아이어닝용 펀치의 반경은 33mm 이며 펀치와 다이 사이의 간격은 0.29mm 로 설정하였다. 리드로 홀더의 코너부 곡률은 드로잉 컵의 곡률과 같은 3mm 이다.

아이어닝 다이는 상업 제관라인에서 적용하고 있는 대표적인 금형 형상을 가진다. 본 연구의 성형해석에서는 3step 아이어닝을 기본 성형법으로 하였으며 각 공정별 아이어닝률은 각각 30%, 22% 44%다.

2.2 요소 선정

해석에 사용된 요소는 Table 1 에 요약되어 있다. 해석은 2 차원 축대칭 요소를 사용하였으며 크게 3 종류로 캔, 금형, 접촉요소로 구성되어 있다. 캔 요소는 4 절점 변형률 소재로써 요소 하나에 5 개의 적분점을 취해서 해석을 수행한다. 소재 특성은 인장실험을 통해서 얻어진 Stress-Strain Curve 와 이방성 계수로 구성된다. 금형은 강체요소를 사용하여 금형의 형상을 2 차원 단면만 취하여 선으로 나타내어지며, 강체 하나당 한 개의 절점을

Table 1. Feature and type of element used in the simulation

	Element feature	Element type	ABAQUS library
Blank Sheet	Deformable body	4 node axisymmetric solid element	CAX4
Tools	Rigid body motion	2 node axisymmetric rigid surface	ISL21A
Contact	Frictional contact	2 node axisymmetric slide line	IRS21A

도입하여 이 지점에서 변위와 경계조건을 적용한다. 금형과 금형 사이에는 2 절점 접촉 요소가 삽입된다. 이러한 접촉 요소는 소재와 소재사이의 침투를 방지하는 역할을 하며 이 부분에서 미끄럼 현상을 결정한다.

2.3 FEM 모델

컵/캔 바닥부의 변형은 크지 않으며 또한 균일하다고 볼 수 있으므로 바닥부에는 한 층(layer)에 5 개의 요소만을 구성하였다. 그러나 벽부에는 공정이 진행될수록 변형량이 커지므로 한 층에 75 개의 요소를 구성하였으며, top 부로 갈수록 촘촘해지도록 구성하였다.

본 해석에서의 소재의 두께는 대단히 얇지만, 공정중의 캔 내,외면에서의 접촉조건이 다르기 때문에 벽두께 단면을 따르는 응력, 변형률은 매우 크다. 따라서 벽 두께 방향으로 2 층 이상의 요소가 설정되어야 변위와 응력의 비선형 분포를 모사할 수 있다. Fig.2 는 드로잉 캔에 대한 요소와 절점의 위치를 나타내며 Table 2 는 공정에 사용된

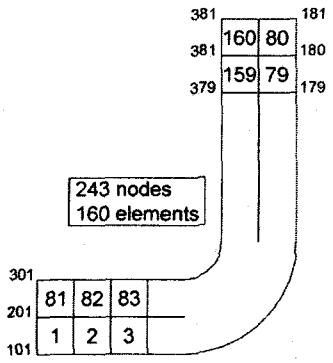

Fig. 2 Node and element generation in can

Table 2. The number of elements used in process

Bodymaking Process	Number of Elements .
Drawing~1st Ironing	160
2nd Ironing	280
3nd Ironing	480
Doming	640
Trimming~Necking	608

캔 요소의 개수를 보여준다. 드로잉~1st 아이어닝 공정에서는 초기의 160 개 요소를 사용하였으며 벽면부 가공량이 증가하는 2nd, 3rd 아이어닝에서는 캔 벽면부에 대해서 요소를 증가시켰다. 도밍 가공에서는 캔의 바닥부분의 요소를 증가시켜 전체 640 개의 요소를 사용하였다.

3. 해석결과

3.1 드로잉/리드로잉 공정

본 연구에서는 소재 두께에 따른 캔의 높이, 판류응력, 공정의 소요하중을 해석하였다.

Fig.3 은 소재의 두께에 따른 드로잉/리드로잉 공정 후의 컵 높이 변화를 나타낸다. 소재 두께는 t=0.245mm 기준으로 0.19mm~0.26mm 에 대해 해석하였다. 해석결과 소재의 두께 증가는 컵의 높이를 조금씩 증가시키는 것으로 나타난다. 드로잉 공정에서는 변형량이 적기 때문에 두께의 영향이 크지 않으나, 리드로잉 공정을 후에는 소재에 따라 1~2mm 정도의 높이 차이를 가져온다. 기준 0.245mm 에서 소재 두께를 0.19mm 로 감소시킬 경우 높이는 1mm 정도 낮아지는 것으로 나타나고 있다. 이는 컵의 높이의 약 2%에 해당하며, 이는

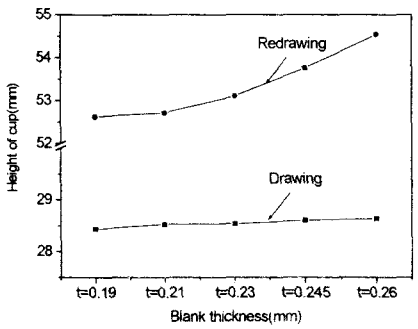

Fig. 3 Cup height after drawing and redrawing

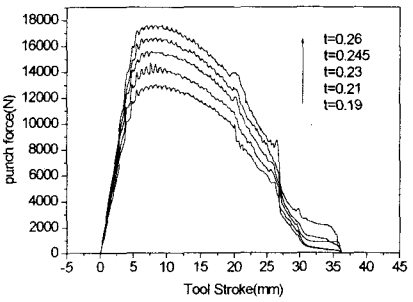

Fig. 4 Punch force during drawing

소재의 두께가 22% 감소한 데 비해서 매우 작은 값이다. 이는 드로잉/리드로잉 공정에서는 소재의 두께의 변화는 전체 성형량에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다[3].

소재 두께에 따른 드로잉/리드로잉의 가공력은 Fig.4 와 Fig.5 에 나타내었다. 그래프에서 Y 축은 드로잉/리드로잉 공정시 펀치가 받는 반력을, X 축은 펀치의 이동거리를 나타낸다. 그림은 가공력이 소재의 두께에 비례하고 있음을 보여준다. Fig.4 에서 두께 0.19mm 캔의 펀치의 최대 가공력은 12.8kN 으로 0.245mm 캔의 16.5kN 에 비해 22%정도 낮은 값으로 두께 감소율 22%과 거의 유사한 결과를 나타내고 있어 이를 입증한다.

Fig.5 에서 리드로잉 펀치의 이동거리 180mm~200mm 지점에서 펀치의 가공력이 갑자기 증가하는 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 리드로잉 공정시 컵은 Thickening 현상에 의해 컵의 상단부가 두꺼워져 리드로잉 마지막 단계에서 아이어닝 가공을 받기 때문이다. 두께 별로는 0.26mm 컵에서 이러한 현상이 가장 먼저 나타나고 점차로 소재 두께가 얇아질수록 아이어닝에 의한 효과가 X 축의 왼쪽에서 나타나며, 0.19mm 캔과 0.21mm 캔에서는 나타나지 않고 있다.

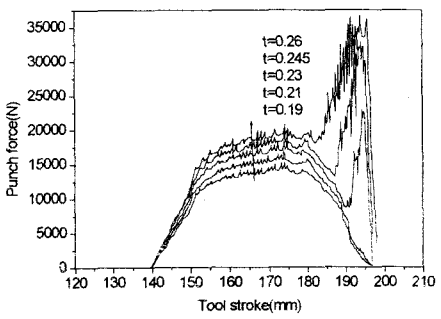

Fig. 5 Punch force during redrawing

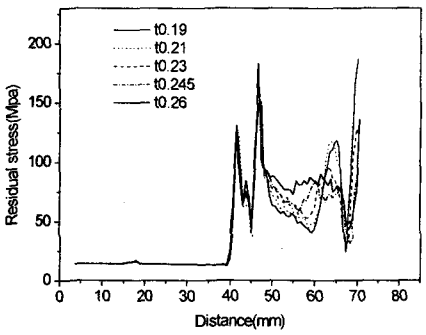

Fig. 6 Residual stress after drawing

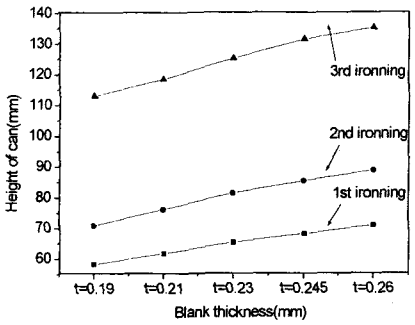

Fig. 8 Can height for 1,2,3 step ironing

소재 두께에 따른 잔류응력은 Fig.6 와 Fig.7 에 나타나 있다. Fig.6 에서 X 축은 캔의 중심부로부터의 거리이며 Y 축은 3 층으로 구성된 Fig.2 의 절점 중 가운데 층에서 측정한 잔류응력(von-mises stress)을 나타낸다. Fig.6 에서 드로잉 공정시 컵의 바닥부분인 0mm~38mm 지점에서는 가공시 변형을 거의 받지 않으므로 약 20Mpa 로 낮은 응력이 존재하다가, 컵에서 곡률진 부분 40mm~50mm 지점에서 잔류응력의 최대가 된다. Wall Thickening 현상이 나타나는 50mm~70mm 지점의 잔류응력은 대체로 일정하게 나타나다가 캔 가장자리에 해당하는 70mm 근처에서 다시 잔류응력이 커지고 있다. 컵 가장자리에서 잔류응력이 커지는 현상은 컵이 펀치와 홀더에서 빠져나가는 마지막 순간에 홀더에 의한 응력 집중을 받기 때문이다.

Fig.7 에서 소재 두께별 잔류응력은 캔의 바닥부분에 해당하는 0mm~40mm 지점까지는 모두 일정하나 40mm~80mm 부근에서의 분포가 달라진다. 이 부분에서 소재두께 0.19mm~0.23mm 컵의 응력은 대체로 일정하나 두께 0.245mm 와 0.26mm 컵은 상단부로 갈수록 잔류응력이 증가하고 있다. 이러한 결과는 리드로잉에 의한 컵 벽면부 Thick-ening 현상에 의해 발생한 잔류응력이 리드 로잉이 끝날 무렵 발생하는 아이어닝 현상에 의해 재조정되었기 때문이다.

3.2 아이어닝 공정

D&I 캔 몸체 성형의 핵심공정인 아이어닝 공정에서의 캔 소재의 두께별 해석을 실시하였으며 두께별 높이 차이를 최소화 하기 위해 다이와 펀치의 간격의 간격을 조절 하였다. 이에 따른 캔의 높이 변화, 잔류응력변화, 캔의 두께분포, 가공력 등이 연구되었다.

3.2.1 소재의 두께의 영향

Fig.8 은 소재두께 0.245mm 에 대한 아이어닝 금형을 사용해서 가공한 캔의 각 아이어닝 단계별 높 이를 보여준다. 아이어닝은 3 단계로 진행되었다. 드로잉/리드로잉 공정과는 달리, 캔의 벽면부의 높이를 100%이상 증가시키는 아이어닝 공정에서는 소재 두께의 차이는 캔의 높이를 20mm 정도로 크게 변화시킨다. 3 단계 아이어닝 후의 캔의 높이변화는 두께에 따라 기준 0.245mm 소재 캔에서 나타나는 131.23mm 를 기준으로 소재 두께가

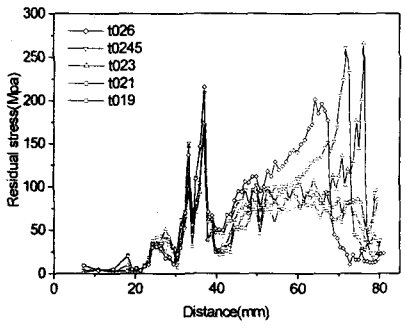

Fig. 7 Residual stress after redrawing

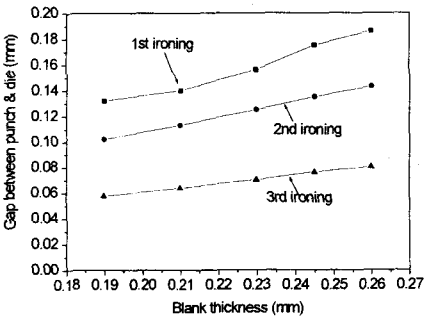

Fig. 9 Gap which make equivalent the height of can after ironing

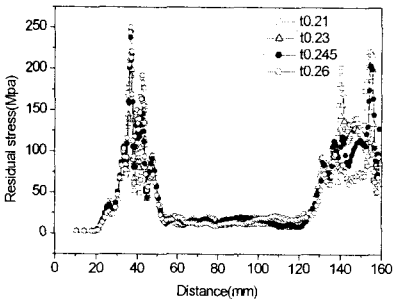

Fig. 10 Residual stress after ironing

얇은 캔은 낮게 소재 두께가 두꺼운 캔은 더 높게 가공이 된다. 아이어닝 공정후 캔은 높이가 일정하게 유지되어야 하므로 두께가 얇은 소재를 적용하기 위해서는 아이어닝 다이와 펀치 사이의 간격 조정이 필요하다.

Fig.9 는 소재두께별 캔의 높이를 기준 0.245mm 캔에서와 같아지게 하는 아이어닝 다이의 간격을 나타낸다. 다이의 간격은 캔의 벽면부분의 두께와 동일하며, 3 차 아이어닝 가공후 0.19mm 캔의 벽면부 두께는 0.0575mm, 0.21mm 에 대해 0.0635mm, 0.245mm 에 대해 0.076mm 로 나타난다. 이로부터 캔의 원판소재의 두께와 캔 높이의 증감률을 비교하면 0.245mm 소재를 기준으로 0.19mm 소재는 소재두께 22% 감소에 따라 벽면부 두께가 24% 감소하였으며, 0.21mm 소재는 두께 14% 감소에 따라 벽면부의 두께 16%의 감소를 나타내고 있다. 이 결과는 캔의 높이가 일정 하게 유지하기 위해서는 소재의 두께에 정비례하여 다이의 간격을 조정해야 함을 의미한다.

Fig.10 과 Fig.11 은 다이의 재배치후 가공된 높이가 일정한 캔에 대해서 잔류응력과 두께분포를 나타낸 그림이다. Fig.10 의 해석결과에서 두께에 따른 잔류응력의 변화는 매우 작다. 캔의 가장 두께가 얇은 벽면부에 해당하는 50mm ~ 120mm 지

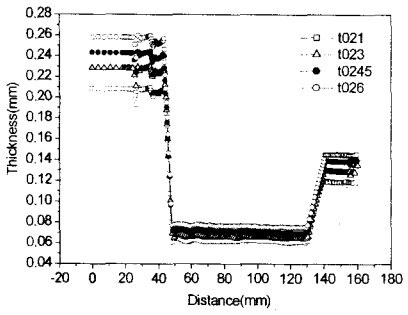

Fig. 11 Wall thickness after ironing

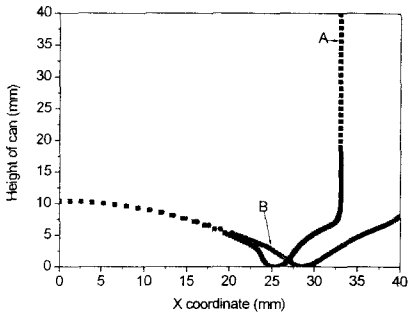

Fig. 12 Can coordinate

점에서의 잔류응력은 25Mpa 정도로 리드로잉 캔의 70MPa~150Mpa 보다 크게 낮은 값을 보이고 있다. 리드로잉 공정에서는 벽면부의 두께가 두꺼워져 있으나 아이어닝에 의해 두께가 얇아지며 두께 분포가 균일해 지므로 잔류응력이 해소된 것으로 생각된다. Fig.11 은 아이어닝 공정후의 캔의 두께 분포를 보여준다.

3.3 도밍 공정

도밍 공정에서의 소재 두께에 따른 캔의 높이, 잔류응력, 공정의 소요하중을 해석하였다.

Fig.12 는 캔의 바닥부분의 좌표를 나타낸다. 그래프 A 는 캔의 형상을, 그래프 B 는 캔의 중심부로부터의 거리(Distance)를 X 축으로, 캔의 높이를 Y 축으로 표현한 그림이다. 이어지는 잔류응력, 변형률분포 등은 B 그래프에 의해 나타내었다.

Fig.13 은 소재의 두께에 따른 잔류응력 분포를 보여준다. 앞서 드로잉~아이어닝 공정에서와 마찬가지로 소재의 두께는 잔류응력의 분포 및 크기에 별다른 영향을 미치지 못함을 보여주고 있다. 이러한 결과는 잔류응력이 소재의 가공량에 의한 것이라기 보다는 경계조건에 더 많은 영향을 받고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 아이어닝후 캔의

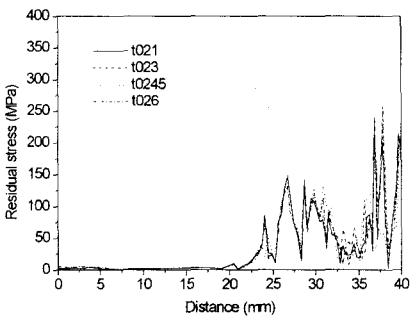

Fig. 13 Residual stress after doming

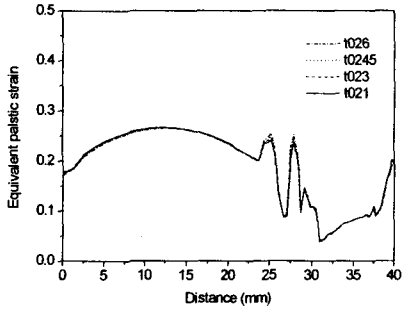

Fig. 14 Equivalent plastic strain after doming

벽면부에서 잔류응력이 적은 것과 같은 같은 이유, 즉 도밍 공정후 바닥부분에서 곡률의 급격한 변화가 없고 변형율이 균일하기 때문인 것으로 보인다. 25mm~30mm 지점은 잔류응력이 집중되고 있는데 이러한 이유는 가공시 응력집중이 발생하기 때문이다.

Fig.14 는 바닥부분의 등가소성변형률을 도시하고 있다. 잔류응력과 마찬가지로 캔의 바닥부분의 소성변형률 분포는 소재의 두께에 상관없이 일정하다. 이러한 결과는 캔의 바닥부분의 두께가 정확히 소재의 두께에 비례함을 의미한다.

Fig.15 는 도밍 가공시 도밍펀치(Dommer)가 받는 힘(가공력)을 보여주고 있다. 가공력은 돔의 깊이(Tool stroke)가 0mm~8mm 지점까지는 완만한 직선형태로 증가하다가 8mm~10mm 부근에서 급격히 증가하며 10mm 이후에는 다시 완만히 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 드로잉이나 리드로잉 공정에서와는 달리 도밍 가공 중에 캔이 다이 내부로 유입되지 않고 고정된 상태에서 바닥만 가공되기 때문이다. 따라서 펀치의 변위가 많아질수록 바닥부분의 가공부위가 넓어져 가공이 증가한다. 가공력이 10mm 이후에 완만히 증가하는 것은 캔의 바닥의 대부분의 부분이 소성변형을 시작하 기 때문이다.

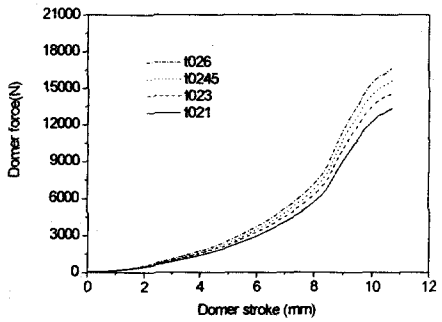

Fig. 15 Punch force

4. 결 론

본 해석은 드로잉에서 도밍공정까지 몸체성형 공정의 성형방법 및 특성해석이 수행되었으며 이로부터 유도되는 결론은 다음과 같다.

1.캔의 드로잉/리드로잉 공정에서 소재의 두께는 캔의 높이, 잔류응력 및 소성변형률 분포에 큰 영향을 미치지 않는다.

2.드로잉/리드로잉 공정에서 드로잉률의 배분은 리드로잉 컵의 높이 및 두께 분포에는 별다른 영향을 미치지 못하나 잔류응력의 분포를 변화시킨다.

3.잔류응력은 캔의 바닥부와 상단 넥 부분의 두께가 두껍고 곡률진 부분에 집중한다.

4.아이어닝 캔의 높이는 다이와 아이어닝 사이의 펀치간격과 소재의 두께에 비례한다. 소재의 두께가 얇아질수록 다이의 간격을 줄임으로써 캔의 높이의 증가시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 2001 년도 두뇌한국 21 산학협동 사업 관련 포항제철의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 정기조, 남재복, D&I Can 가공특성에 미치는 두께편차 및 가공조건의 영향, POSCO 연구보고서, 1998

(2) 남재복, 정기조, D&I Can 의 아이어닝 공정에서의 reduction 배분에 따른 가공특성 연구, POSCO 연구보고서, 1999

(3) 한경섭, 정성욱, 남현욱, Steel D&I Can 의 Doming, Necking 공정의 FEM 해석, POSCO 연구보고서, 2000

(4) 정기조, 남재복, 박강판 가공 기술 매뉴얼, POSCO 기술연구소, 1995

(5) A.M. Zaky, A.B. Nassr, M.G. El-Sebaie, "Optimum blank shape of cylindrical cups in deep drawing of anisotropic sheet metals", J. Materials Processing Technology, 1997

(6) D.V. Wilson, Plastic anisotropy in sheet metals, J. Inst. Met, 1966