

충돌안전성에 미치는 블랭크형상의 영향

심현보[#] · 박종규¹

Effect of Blank Shapes on the Impact Safety of Stamped Parts

H. B. Shim, J. K. Park

(Received January 17, 2008)

Abstract

The effects of blank shape on the safety of stamped parts are studied through the comparison of an optimal blank and the corresponding reference blank shape to show further advantage of the optimal blank. In order to carry out this study, stamping process has been analyzed and the forming history, e.g. accumulated effective strain and thickness has been incorporated in the crash analysis. The reference blank has been determined following to the actual industry guideline, and excessive material to the desired shape has been trimmed off before crash analysis for the objective comparison. Through the study, appreciable increase of impact safety has not been observed and the effective of blank shape is verified not to be significant.

Key Words : Crash Analysis, Optimal Blank, Impact Safety

1. 서론

최근 세계 각국에서는 환경오염에 대한 대책으로 자동차 배기가스 및 연비에 대한 규제를 강화하고 있으며 교통사고로 인한 운전자의 상해를 줄이기 위하여 차량의 충돌 성능에 관한 법규를 제정하고 있다. 이에 따라 자동차 제조업체들은 저공해 연료 차량이나 연비 감소를 위해 차량 경량화에 노력하고 있으며 경량 차체의 경우 교통사고에 대한 충돌 안전성도 충분히 확보할 수 있게끔 설계하고 있다. 더욱이 충돌 안전성에 대한 평가의 결과가 자동차 판매량에 큰 영향을 미치는 만큼 이들 업체들은 차량의 충돌 성능을 높이기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

특히 충돌특성과 관계가 있는 스탬핑 부품은 차체부품이나 샤프트부품 등과 같은 용도 구분과 무관하게 엄밀한 안전성 검토를 바탕으로 경량화를 추구할 필요가 있다.

차체의 경량화는 단순한 소재절감의 차원에서 벗어나 엄밀한 해석을 통해 정적 강도뿐만 아니라 충돌안전성의 확보가 담보되어야 한다. 일반적으로 스탬핑 부품은 가공공정을 거치면서 두께나 변형률이 처음의 상태와 달라지게 된다. 또한 충돌해석결과는 부품의 두께나 변형률의 크기에 영향을 받기 때문에 보다 정확한 충돌해석을 통한 엄밀한 충돌안전성을 확보하기 위해서는 성형해석 결과를 고려한, 즉 성형이력을 고려한 충돌해석을 바탕으로 되어야 한다. 그런데 이러한 성형이력은 소재의 물성이나, 블랭크의 형상, 금형의 설계, 성형조건 등에 따라 크게 달라질 수 있다.

충돌해석에 관한 종래의 연구는 당초 성형이력을 고려하지 않고, 단순히 제품의 형상정보만으로 충돌해석만을 실시하던 단계에서, 이제 상용해석 S/W의 개발 및 컴퓨터의 성능과 같은 해석능력의 향상에 따라 성형이력을 고려한 충돌해석이 이루어지고 있다[1~5]. 성형이력을 고려한 충

1. (주) 화신 기술연구소
교신저자: 영남대학교 기계공학부, E-mail:hbshim@yu.ac.kr

돌해석에서는 성형해석의 결과를 이용하기 때문에 보다 정확한 성형해석결과와 더불어 충돌시의 동적물성치의 정확도가 동시에 요구되는데, 최근에는 충돌시의 동적물성치에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다[6].

최적 블랭크는 주어진 금형으로 성형할 때 원하는 형상으로 성형이 되는 초기 블랭크의 모양을 의미한다. 일반적으로 최적블랭크는 소재의 이용을 증가 및 성형성의 향상 뿐만 아니라 제품전체에 걸쳐 변형률 집중을 줄여주는 효과가 있다[7]. 특히 충돌시 제품의 압괴현상은 취약한 부분부터 시작되기 때문에 충돌 안전성을 높이기 위해서는 취약한 부분을 줄여주는 것이 좋다. 따라서 최적블랭크가 충돌안전성을 증가시킬 수 있다는 가정하에 본 연구를 수행하게 되었다.

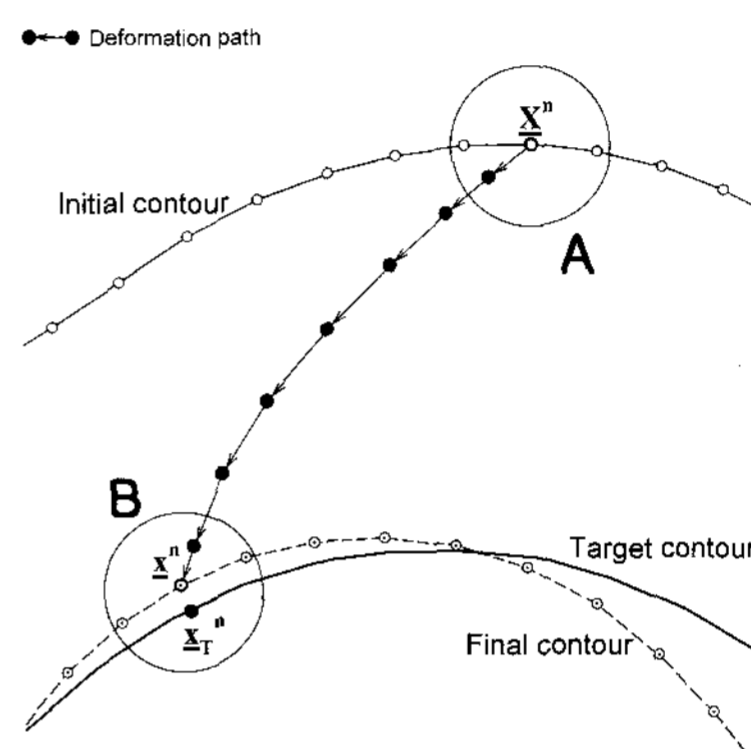
본 논문은 블랭크 형상이 충돌안전성에 미치는 영향을 조사하고, 블랭크의 형상의 개선을 통한 변형률분포의 균일화를 이루고, 이를 충돌안전성의 개선효과를 확인하는 것이 주목적이다. 이를 위해 최적블랭크를 사용하여 성형해석을 한 결과와 일반적인 설계기법으로 결정된 블랭크로 성형해석을 수행하고, 이 결과를 다시 트리밍 처리한 후, 충돌해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 최적블랭크의 설계를 위하여 반경벡터법(radius vector method)을 사용하였다[8]. 예제로는 오일팬 형상과 S-Rail 형상을 채택하였다.

2. 이론해석

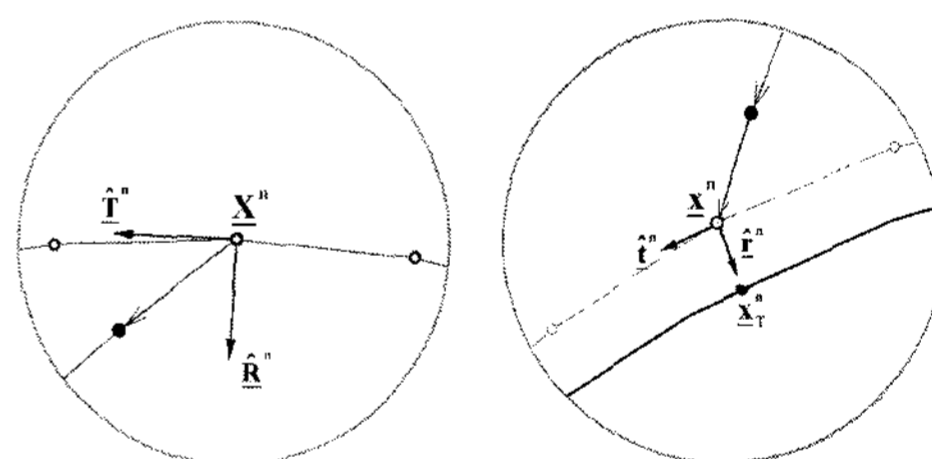
2.1 반경 벡터법

반경벡터법은 성형 후 제품의 윤곽선과 목표의 윤곽선의 차이를 보정하기 위하여, 위치의 수정이 필요한 절점에 대하여 그 절점과 인접하는 절점들에 의해 결정되는 원의 반경방향 벡터를 이용하여 그 절점의 위치를 수정하는 방법이다. 즉, 성형 후의 제품 외곽선이 목표 외곽선과 일치하지 않을 경우, 제품의 외곽선이 목표 외곽선과 일치하도록 성형 전 블랭크 모양을 수정해 주는데 블랭크의 수정은 외곽선상에 위치한 절점의 성형 전의 위치를 이동함으로써 이루어지는데 이때 절점의 이동은 윤곽선 상에서 인접하는 3 점으로 정의되는 원의 반경방향을 사용하고, 이동거리는 제품의 성형 후 윤곽선과 목표윤곽선의 거리를 이용하는 방법이다. 이렇게 새롭게 정의된 윤곽선으로 유한요소 격자를 다시 생성한 뒤 형상오차가 목표값 이내로 들 때까지 반복적으로 적용하여 최적블랭크 형상을 결정한다.

반경벡터법은 먼저 블랭크 형상을 가정하고, 이 블랭크 형상으로 주어진 금형에서 성형해석을 수행한 뒤 성형해석을 통해 윤곽선에 위치한 절점의 위치를 얻고, 절점의 위치와 목표윤곽선까지의 거리를 블랭크의 형상을 수정해 주는데, 성형 후 윤곽선이 목표윤곽선과 일치할 때까지 반복적으로 적용하기 때문에 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 수렴성과 사용이 편리하다는 장점이 있다.



(a) movement of boundary node



(b) detail A, initial state (c) detail B, final state

Fig. 1 Basic concept of error correction in the radius vector method

Fig. 1(a)는 블랭크 외곽선상에 있는 임의의 한 절점이 변형되는 경로를 나타낸 것으로서 성형 전 블랭크 외곽선상의 n 번째 절점의 위치를 X^n 으로, 성형 후 절점의 위치를 \hat{x}^n 으로 표기하였다. Fig. 1(b)는 성형 전 절점 n 의 위치벡터 X^n 에서 그 절점과 인접하는 두 절점에 의해 결정되는 원의 반경방향 단위벡터 \hat{R}^n 과 접선방향 단위벡터 \hat{t}^n 을 나타낸 것이고, Fig. 1(c)는 성형 후 절점 n 의 위치벡터 \hat{x}^n 에서 반경방향 단위벡터 \hat{r}^n 과 접선방향 단위벡터 \hat{t}^n 을 나타낸 것이다.

즉 성형후 윤곽선과 목표윤곽선의 차이는 성형후 윤곽선상의 절점에서 목표윤곽선까지의 최단거리로 정의되며, 이 값은 각 윤곽선상의 모든 절점에 대하여 정의된다. 최단거리를 측정하기 위해 즉 정의되는 형상오차는 성형후 윤곽선상의 한 절점에서 Fig. 1(c)과 같이 인접하는 윤곽선상의 3 점으로 정의되는 원의 반경방향으로 측정한 목표윤곽선까지의 거리로 정의되며, 마찬가지로 블랭크 형상의 수정을 위한 절점의 이동은 해당 절점의 위치를 적절한 방향으로 이동시켜 주는데 이때 접선방향, 즉 \hat{t}^n 방향으로의 이동은 그 절점을 외곽선 방향으로 이동시켜 주는 것이기 때문에 블랭크 형상의 수정과는 관계가 없는 반면 반경방향으로의 이동은 블랭크 형상의 변화와 관계가 있다. 따라서 블랭크 형상의 수정은 반경방향, 즉 \hat{R}^n 으로 절점을 이동시켜 주면 된다.

성형 후 형상과 목표형상과의 차이, 즉 형상오차도 마찬가지로 방법으로 구할 수 있다. 다시 말하자면 절점 n 에서의 형상오차 ε^n 은 성형 후 위치 벡터 \underline{x}^n 에서 변형후의 그 절점의 반경벡터 \hat{r}^n 방향으로 측정한 목표외곽선까지의 거리로 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\underline{x}^n + \varepsilon^n \hat{r}^n = \underline{x}_T^n \quad (1)$$

블랭크 형상의 수정은 식 (1)을 통해 구한 그 절점에서의 형상오차값과 그 절점에서의 반경벡터를 이용하여 식 (2)와 같이 절점위치를 이동한다.

$$\underline{X}_{(i)}^n = \underline{X}_{(i-1)}^n + \beta \cdot \varepsilon^n \cdot \hat{R}^n \quad (2)$$

여기서 β 는 감속계수로 문제의 특성에 따라 적절한 값을 사용하면 된다. 대체로 $\beta = 0.7$ 로 설정하였을 때 대부분의 경우에 무난하게 수렴이 잘 되고 있다.

최적 블랭크는 각 절점별로 정의되는 형상오차 ε^n 이 모든 절점에서 허용오차 이하가 될 때까지 해석 및 블랭크 수정을 수차례 반복하여 구한다.

2.2 충돌해석을 위한 물성 모델

본 연구에서는 LS-Dyna를 사용하여 성형 해석 및 충돌 해석을 수행하였다. 충돌 해석의 정확도를 향상시키기 위해서는 충격이 가해짐에 따라

발생하는 변형률 경화 (strain rate hardening), 열에 의한 연화, 파단 등의 효과를 고려할 수 있는 동적물성치를 사용할 필요가 있다.

충돌해석에 주로 사용되는 물성모델은 충돌시의 복잡한 변형 및 파단 양상을 고려할 수 있어야 하는데, Cowper-Symonds 물성 모델[9,10]과 Johnson-Cook 물성 모델[11]이 널리 사용하고 있으며, 최근 동적 인장시험결과를 바탕으로 Kang-Huh 모델[6]이 새롭게 개발되었다.

본 연구에서는 Cowper-Symonds 모델을 사용하였으며 이 모델은 변형률 경화항과 변형률 속도 경화항의 곱으로 재료의 유동응력식을 표현하고 있다.

$$\sigma_y(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_y^s(\varepsilon) \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right\} \quad (3)$$

여기서 $\sigma_y^s(\varepsilon)$ 은 정적물성치이고, C 와 p 는 재료 상수이며 $\dot{\varepsilon}$ 은 변형률 속도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

자동차의 충돌안전성의 판정에는 충돌시 차체의 운동 에너지의 흡수능력, 충격력, 그리고 충격에 의한 압괴거리 등을 주로 이용하고 있다. 본 연구에서는 블랭크 형상이 충돌안전성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 최적블랭크와 그렇지 않은 블랭크를 대상으로 성형해석과 충돌해석을 실시하여 그 결과를 비교하고자 한다.

3.1 오일팬 (Oil-pan)

오일팬 형상의 제품에 대하여 스탬핑에 사용된 블랭크의 형상이 충돌안전성에 미치는 영향을 조사하였다. 제품의 형상은 Fig 2 와 같은 금형에서 펀치행정 20mm 에서 1.75mm 의 균일한 플랜지 트리밍 여유폭을 가지는 것으로 설정하였다. 일반적으로 굽힘이 지배적인 포밍공정에 비하여 드로잉공정은 블랭크의 형상에 따라 두께변형률이나 두께분포 등과 같은 성형이력에 미치는 영향이 비교적 크게 작용한다. 따라서 본 연구의 취지가 블랭크형상과 충돌안전성의 관계를 조사하기 위한 것이기 때문에 실제 자동차 충돌에서 충돌과 거리가 먼 부품임에도 불구하고 드로잉공정에 의해 성형이 이루어지는 오일팬을 예제로 채택하였다.

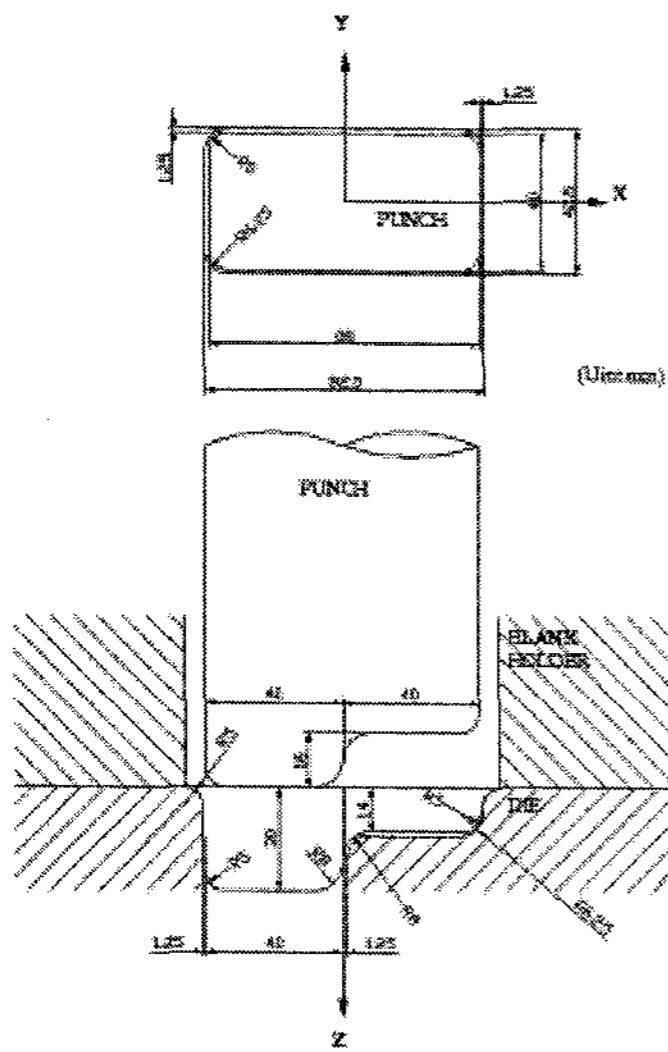


Fig. 2 Die geometry for oil-pan drawing

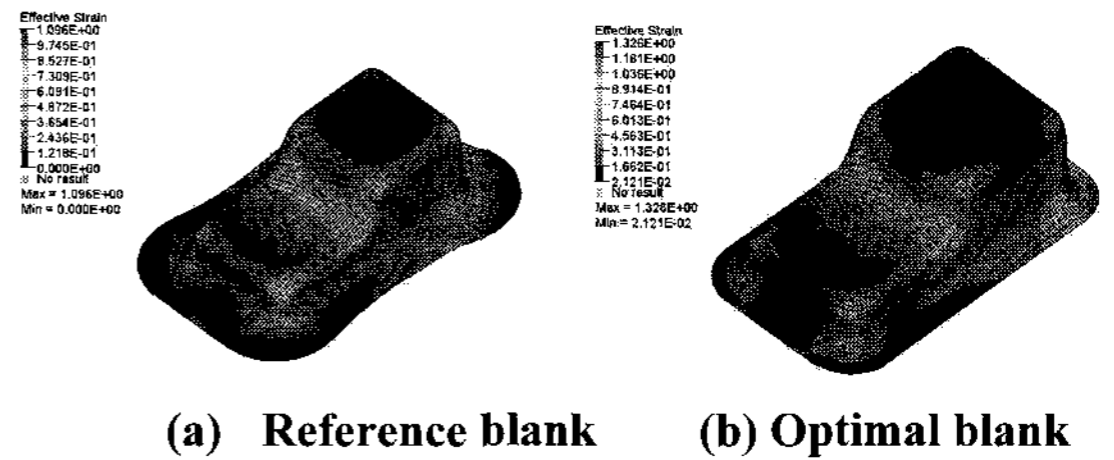


Fig. 3 Effective strain distribution(Oil-pan)

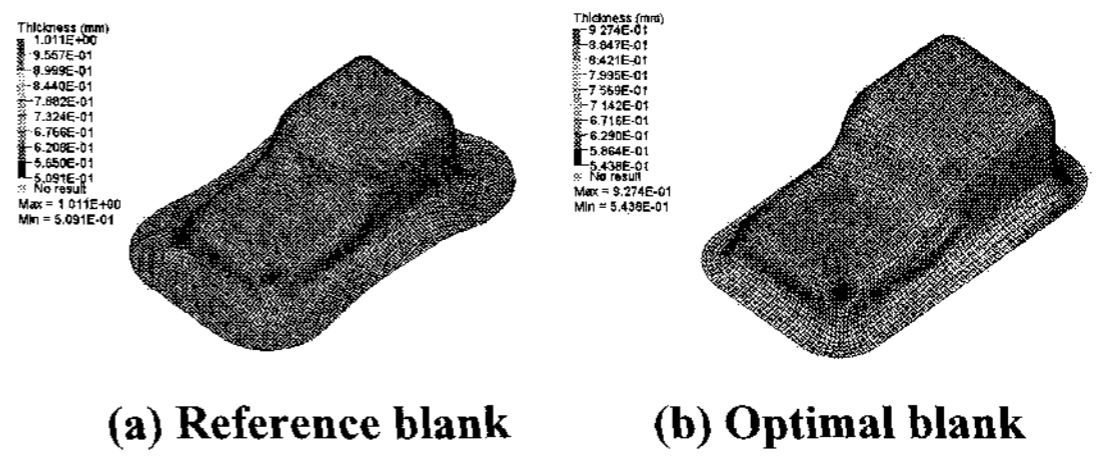


Fig. 4 Thickness Distribution(Oil-pan)

Table 1 Material properties for Stamping

| | |
|----------------------|--|
| Young's modulus, | $E = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$ |
| Poisson's ratio | $\nu = 0.3$ |
| Sheet thickness, | $t_0 = 0.76 \text{ mm}$ |
| Lankford value | $R = 1.377$ |
| Stress-strain curve | $\bar{\sigma} = 514(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.24} \text{ N/mm}^2$ |
| friction coefficient | $\mu = 0.24 \text{ (punch / sheet)}$ $\mu = 0.12 \text{ (die \& holder / sheet)}$ |

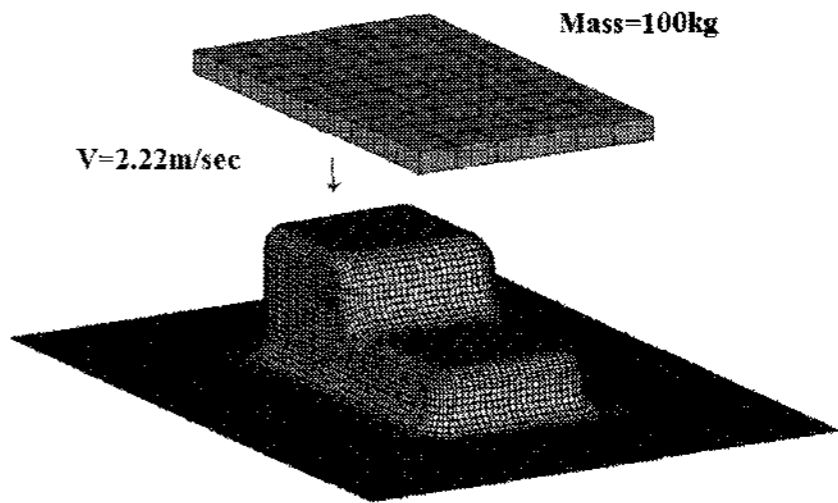


Fig. 5 Concept of crash analysis model(circular cup)

블랭크 형상은 현장에서 사용하는 방법 그대로 제품 형상 정보로부터 일단계해석법을 이용하는 Dynaform 의 BSE 기능을 이용하여 블랭크 형상을 도출하였고 여기에 블랭크형상예측의 불확실성을 감안 5mm 의 트리밍 여유를 부가한 것을 비교블랭크로 두었다. 또한 최적블랭크는 비교블랭크를 초기가정으로 이용하여 반경벡터법을 적용하여 구하였다.

해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 1 과 같다. 충돌해석을 위하여 Cowper-Symonds 모델을 사용하였으며, 이때 정적물성치는 Table 1 의 응력변형을 관계식을 그대로 사용하였고, 변형률 속도의 영향을 고려하기 위하여 C는 40, p는 5로 설정하였다. Fig. 3 은 가공경화의 척도가 되는 유효변형률 분포를 나타낸 것인데, 최적블랭크의 경우 최대 1.217, 최소 0.021, 비교블랭크의 경우 최대 1.096, 최소 0.0 으로 나타났다. Fig. 4 는 두께분포를 나타낸 것인데 최적블랭크의 경우 최대 0.926mm,

최소 0.549mm, 비교블랭크의 경우 최대 1.000mm, 최소 0.540mm 로 나타났다. 따라서 최적블랭크가 비교블랭크에 비해 두드러지는 않지만 변형률을 고르게 분포시켜주고 있음이 확인되고 있다.

성형해석결과를 이용하여 충돌해석을 실시하는데 이때, 비교블랭크로 성형한 것은 성형후 형상 정보로부터 목표 형상이 되도록 트리밍을 실시하였고 이때 스탬핑후의 두께분포와 유효변형률분포가 정보가 충돌해석에 사용될 수 있도록 주의하여 충돌해석을 실시하였고, 최적블랭크로 성형한 것은 성형후 목표형상이 되기 때문에 그대로 사용하여 충돌해석을 실시하였다.

충돌해석조건은 Fig. 5 와 같이 바닥면 위에 놓인 오일팬형상이 질량이 100kg 인 강체벽이 2.222m/sec, 즉 5mph 의 속도로 충돌하는 경우를 설정하였으며 충돌이 발생한 뒤 10msec 후까지의 거동을 조사하였다. 실제 자동차에서는 오일팬이 엔진블록에 체결되어 있지만, 본 연구에서는 단품의 충돌안전성을 조사하였기 때문에 오일팬 만을 대상으

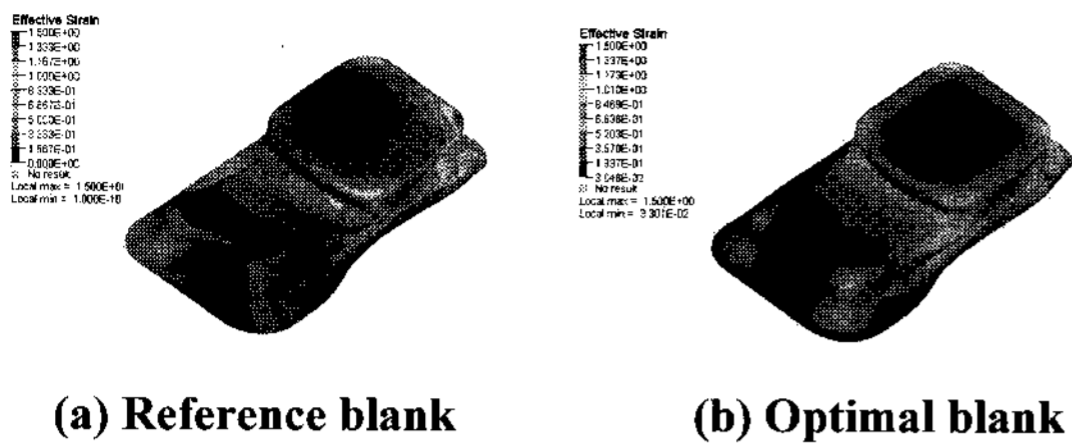


Fig. 6 Deformed shape after crash(Oil-pan)

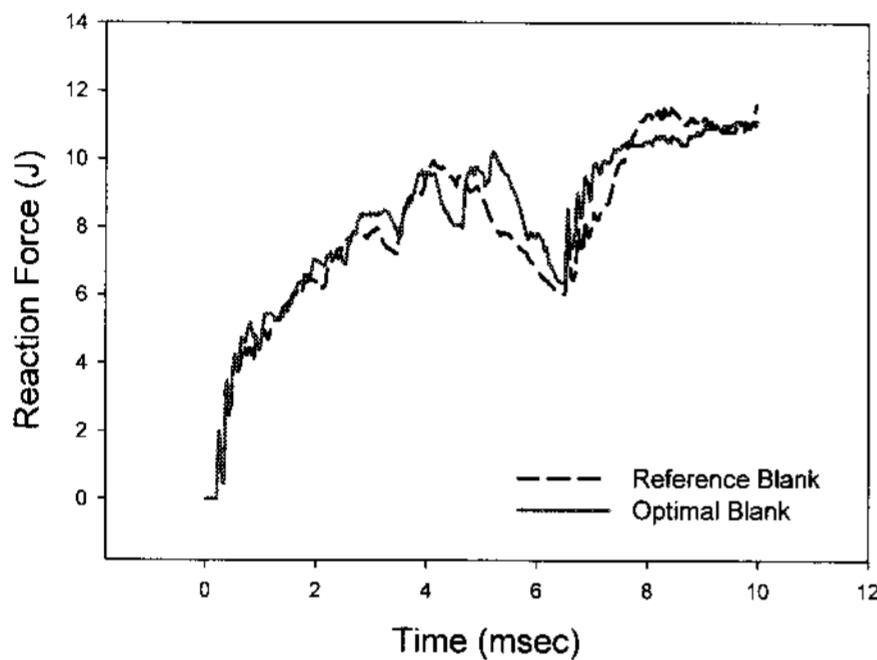


Fig. 7 Change of reaction force during crash(Oil-pan)

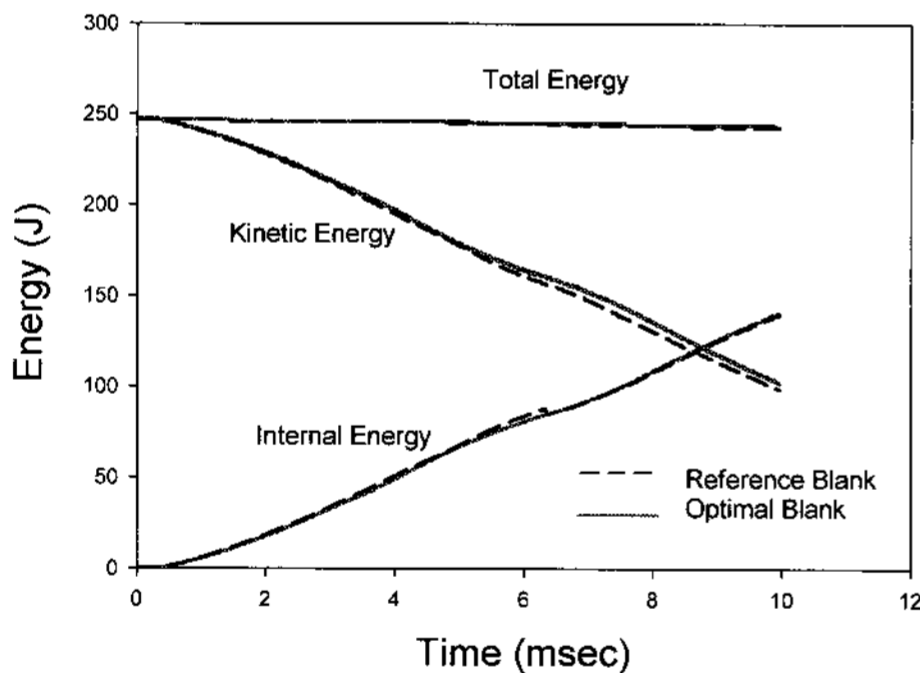


Fig. 8 Change of energy during crash (Oil-pan)

로 하였고, 구속조건을 부여하지 않았다.

Fig. 6 은 각 경우의 제품에 대하여 충돌후 6msec에서의 변형된 형상을 유효변형률과 함께 나타낸 것이고, Fig. 7 과 Fig. 8 은 충돌이 진행되는 동안 각각의 경우에 대한 충돌시의 반력 및 제품의 에너지 흡수량을 비교한 것이다. 충돌시의 반력은 최적블랭크가 압괴도중에는 비교블랭크에 비해 약간 높게 나타나다가 마지막 단계에서는 낮게 나타나고 있다. 미미하지만 블랭크의 모양에 따라 충격에너지 흡수 패턴도 달라짐을 확인할 수 있다. 내부에너지와 운동 에너지의 합으로 표현되는 총에너지는 시간에 관계없이 일정해야 하는데, 비

교블랭크의 운동 에너지가 압괴 마지막 단계에서 최적블랭크에 비해 약간 높게 나타났는데 이는 비교블랭크에서 아워글래스 에너지로 소산되는 양이 많아 실제 총에너지가 최적블랭크에 비해 많이 감소했기 때문에 나타나는 현상이며, 실제로 내부에너지 흡수량은 최적블랭크가 비교블랭크에 비해 약 1%정도 높게 나타났다.

Table 2 는 충돌 동안의 압괴량을 비교한 것인데, 최적블랭크로 성형한 것이 비교블랭크로 성형한 것에 비하여 압괴거리가 약간 작게 나타나고 있어 해석의 오차범위 이내로 미미하지만 안전성이 개선되고 있음을 보여준다.

Table 2 Comparison of crushing distance(Oil-pan)

| | 2ms | 4ms | 6ms | 8ms | 10ms |
|------------|------|------|-------|-------|-------|
| Ref. Blank | 4.44 | 8.71 | 12.55 | 16.02 | 19.08 |
| Opt. Blank | 4.49 | 8.69 | 12.49 | 15.94 | 18.98 |

블랭크의 모양을 달리하면서 충돌해석을 실시한 결과 충돌후의 모양, 충돌시의 반력, 에너지 흡수량, 압괴거리 등에서 두드러진 차이는 보여주지 않고 있다. 이는 비교블랭크의 성형해석결과와 최적블랭크의 성형해석결과가 서로 큰 차이를 보여주지 않기 때문으로 판단된다. 즉 현장에서 채택하는 블랭크 설계기법에 의한 블랭크 형상이 최적블랭크 형상과 큰 차이가 없어, 이미 최적화에 가까운 형상을 사용하기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 그렇지만 충돌시의 승객안전을 고려한다면 약간의 개선이라도 무시할 수 없을 것으로 판단된다.

3.2 S-rail

S-rail 은 범퍼나 사이드 멤버 등의 자동차 부재에 자주 사용되는 형상으로 성형해석이나 충돌해석 예제로 널리 사용되고 있다. Fig. 9 는 S-rail 급형의 형상이며, 해석에 사용된 블랭크의 형상은 Fig. 10 에 나타내었다. 즉 비교블랭크는 Fig. 10(a)와 같이 평행사변형의 모양을 채택하였으며, 최적블랭크는 비교블랭크를 이용, 반경벡터법을 3 회 적용하여 구한 것이다. 해석에 사용한 물성치는 3.1 의 오일팬 예제와 동일한 것으로 가정하였다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 각각의 블랭크로 성형 해석 후 형상으로 유효변형률 및 두께분포를 나타낸 것이다. 두께분포의 경우 최적블랭크를 사용한 경우 최대 1.033mm, 최소 0.913mm, 비교블랭크를

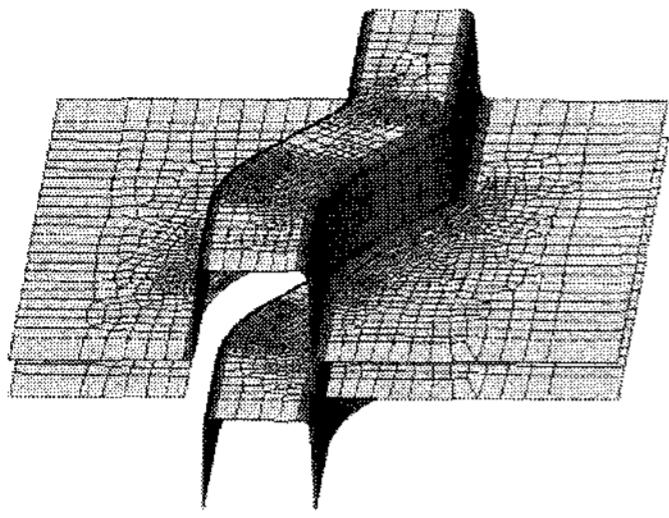
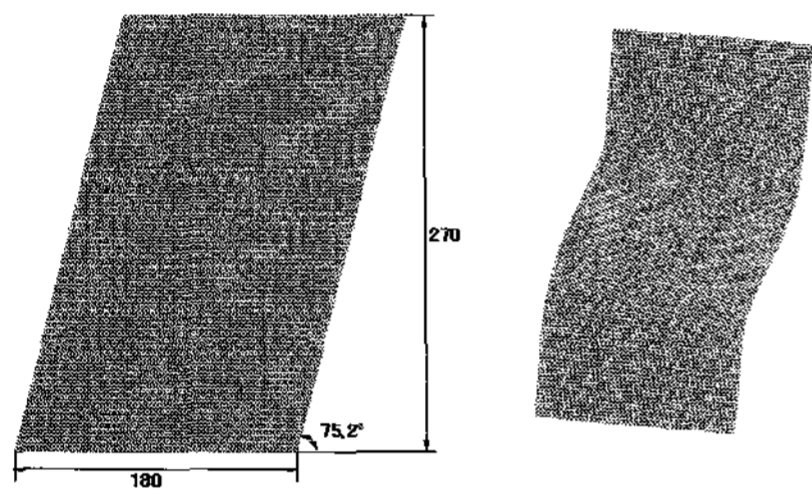
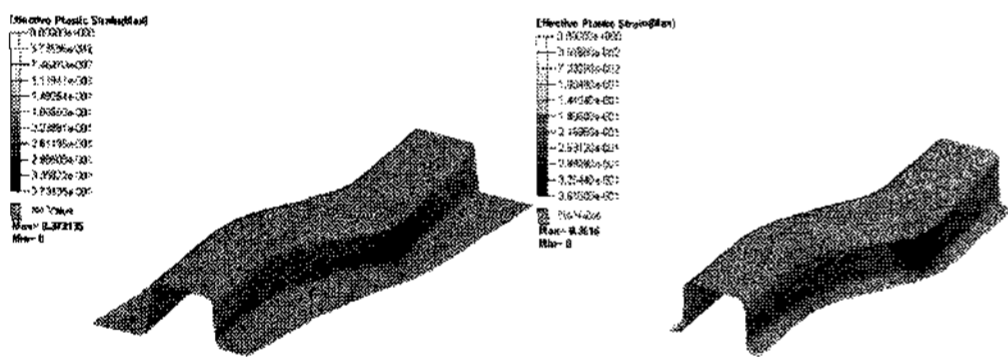


Fig. 9 Die geometry for S-rail drawing



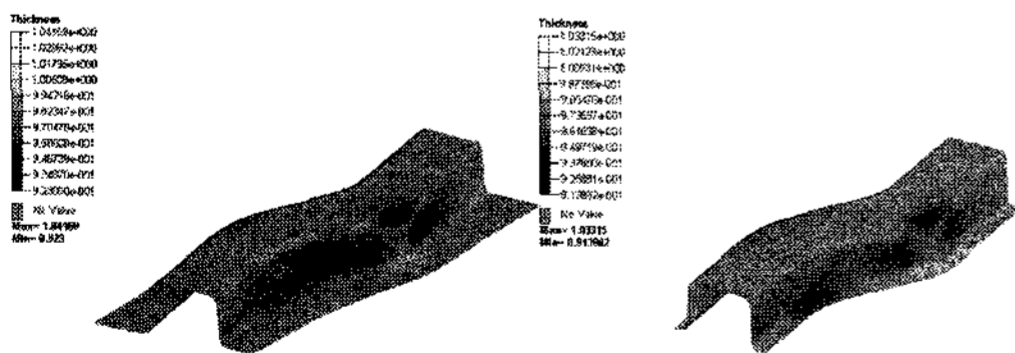
(a) Initial blank (b) Optimal blank

Fig.10 Comparison of blank shape (S-rail)



(a) Reference blank (b) Optimal blank

Fig.11 Distribution of effective strain (S-rail)



(a) Reference blank (b) Optimal blank

Fig.12 Distribution of thickness (S-rail)

사용한 경우 최대 1.042mm, 최소 0.923mm 로 나타났고, 또 가공경화의 척도가 되는 유효변형률의 최대값은 최적블랭크의 경우 0.361 비교블랭크는 0.373 으로 나타나, 최적블랭크와 비교블랭크의 차이가 두드러지지 않고 있다.

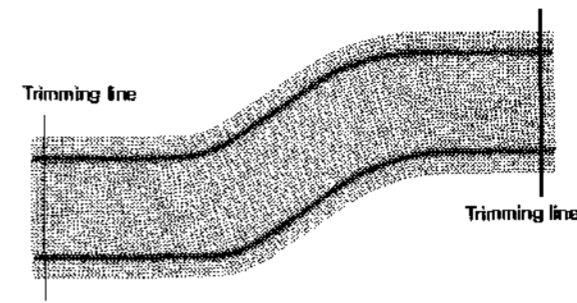


Fig.13 Trimming to enhance crash analysis accuracy

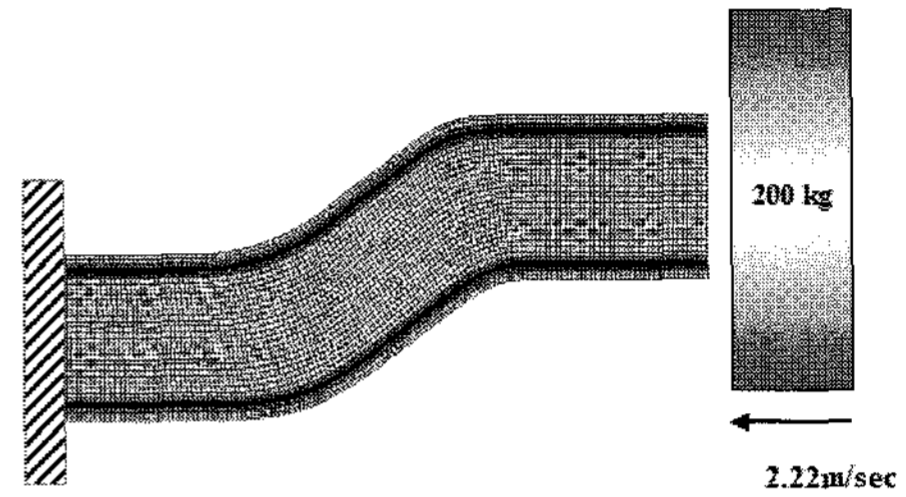
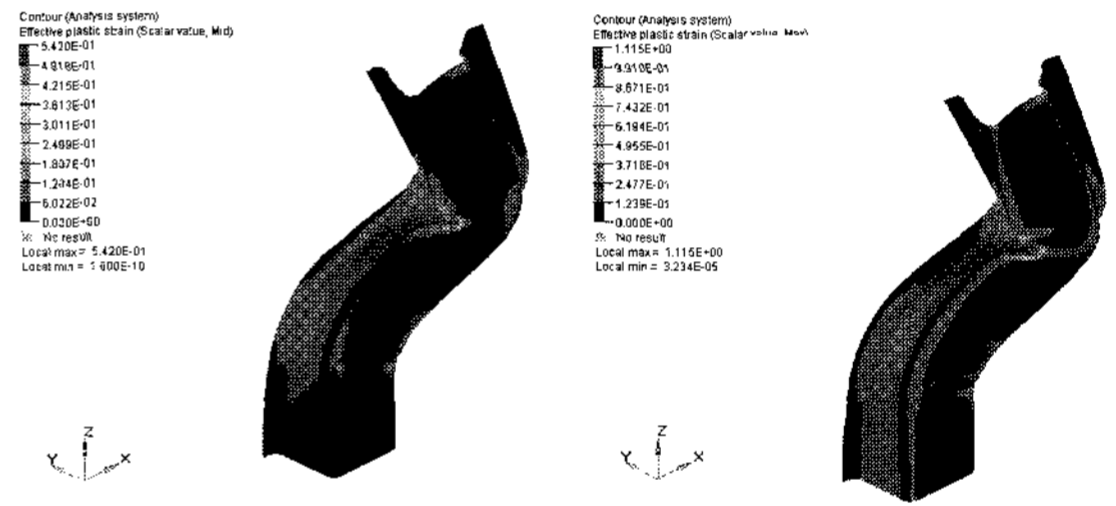


Fig.14 Condition of the crash analysis(S-rail)



(a) Reference blank (b) Optimal blank

Fig.15 Deformed shape after crash(S-rail)

끝 단면이 균일하지 못할 경우 강체벽으로부터 힘이 고루 전달되지 않기 때문에 충돌해석의 신뢰도를 높이기 위해 비교블랭크 뿐만 아니라 최적블랭크로 성형한 것 모두 Fig. 13 과 같이 트리밍을 실시한 후 충돌해석에 사용하였다.

Fig. 14 는 충돌 해석 조건을 나타낸 것으로, S-rail 의 한쪽 끝단을 고정시킨 후 다른 끝단에 200kg 의 강체벽이 초기 속도 2.22m/sec 의 속도로 충돌하는 상황을 설정한 것이다. 해석시간은 총 60msec 로 설정하였다.

Fig. 15 는 각 경우에 대하여 충돌후 16.0 msec 에서의 변형된 형상을 유효변형률과 함께 나타낸 것인데 변형모양이 비슷하게 나타나고 있다. 이 이유는 Fig. 11 과 Fig. 12 에서 나타낸 바와 같이 성형후 유효변형률과 두께분포가 비슷했기 때문으로 판단된다.

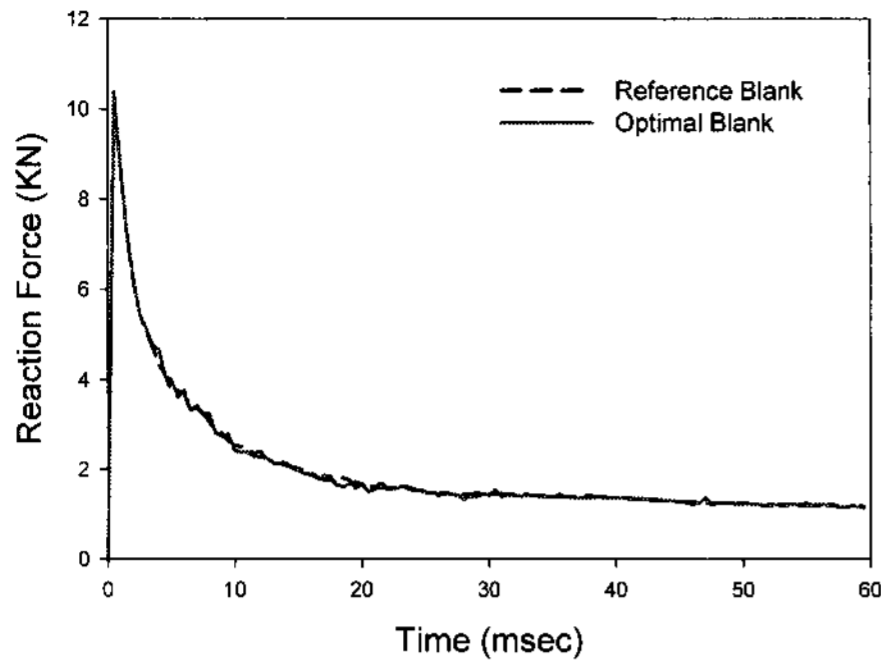


Fig.16 Reaction force during the crash(S-rail)

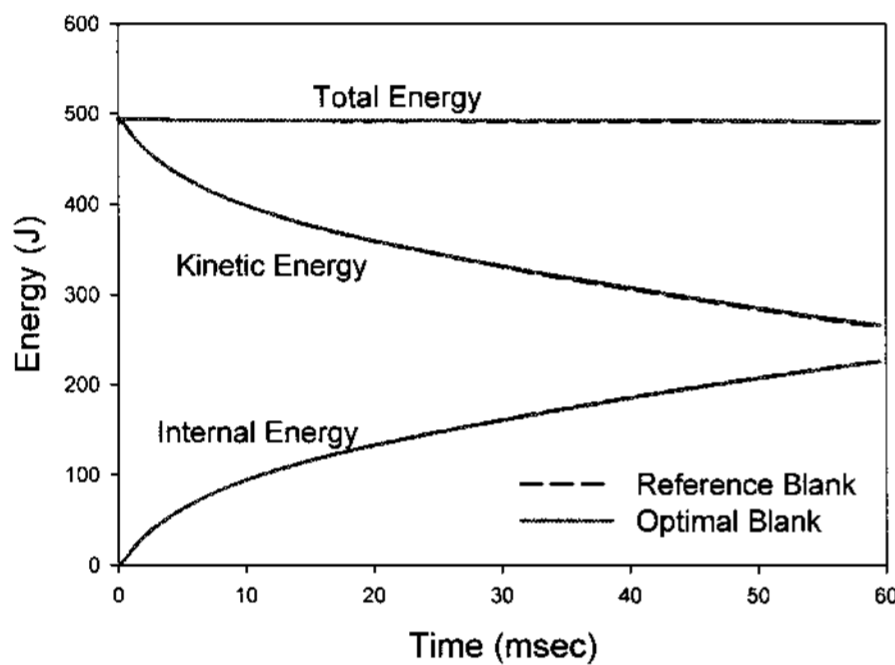


Fig.17 Energy absorption during the crash(S-rail)

Table 3 Comparison of crushing distance (S-rail)

| | 10ms | 20ms | 30ms | 40ms | 50ms |
|------------|------|------|------|------|-------|
| Ref. Blank | 23.0 | 47.1 | 70.6 | 91.4 | 110.5 |
| Opt. Blank | 23.1 | 47.3 | 70.9 | 91.3 | 110.4 |

Fig. 16 과 Fig 17 은 충돌이 진행되는 동안 각각의 경우에 대한 충돌하중 및 에너지변화를 비교한 것인데 앞서 오일팬 예제와 마찬가지로 최적블랭크와 비교블랭크의 충돌해석 결과차이는 두드러지지 않은 것으로 나타났다.

Table 3 은 충돌 동안의 압괴량을 비교한 것인데, 최적블랭크로 성형한 것과 비교블랭크로 성형한 것의 압괴거리의 차이가 거의 나타나지 않고 있어 블랭크 형상의 영향은 나타나지 않고 있다. 이 이유는 앞에서 검토한 바와 같이 성형 후 유효변형률과 두께변형률의 차이가 크지 않았기 때문으로 생각된다.

최적블랭크는 소재질감이나 성형성 향상이라는 분명한 장점은 있으나, 실제 제품은 트리밍을 실시한 후 사용하고 있고, 또 현장에서 채택하고 있는 블랭크설계법이 성공적으로 스탬핑이 될 수

있는 블랭크의 형상이라는 제약조건 때문에 성형 후 결과가 비슷할 수 밖에 없었기 때문으로 판단된다.

4. 결론

최적블랭크는 소재의 이용율 증가 및 성형성 향상이라는 분명한 장점이 있다. 본 연구는 블랭크의 형상이 충돌안전성에 미치는 영향을 조사하는 목적으로 실시되었다. 충돌안전성에 미치는 블랭크 형상의 영향을 비교하기 위하여 최적블랭크와 현장에서 사용하는 방식으로 결정된 블랭크를 대상으로 성형해석을 실시하였고, 해석결과를 이용하여 충돌해석을 실시하였다. 충돌해석을 위해 실제사용조건과 동일하게 성형후 트리밍을 실시하고, 성형이력을 반영하여 충돌해석을 실시한 결과 예상과는 달리 최적블랭크를 사용한 것과 비교블랭크를 사용한 것의 결과차이가 크게 나타나지 않았다. 그 이유는 금형의 형상이 주어지면, 그 금형에 적합한 블랭크의 형상은 제한되기 때문에 블랭크의 형상의 결정에 여유가 비교적 작기 때문으로 판단된다. 결론적으로, 성공적으로 성형이 되는 블랭크의 형상을 사용할 경우, 충돌 특성에 미치는 블랭크의 형상은 거의 없는 것으로 확인되었다.

참고 문헌

- [1] Amit Shukla, 1997, Simulation of quasi-static tension test for roadside hardware material using LS-DYNA3D, Project Report Nonlinear Finite Element Analysis.
- [2] H. Kurtaran, M. Buyuk, A. Eskandarian, 2003, Ballistic impact simulation of GT model vehicle door using finite element method, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 40, pp. 113~121.
- [3] H. Mikami, H. Suzuki, M. Ishizawa, Y. Matsuoka, 1999, Crash simulation considered influence of stamping, Proc. of HANPAM'99, pp. 187~200.
- [4] A. Kellicut, B. Cowell, K. Kavikondala, T. Dutton, S. Iregbu, R. sturt, 1999, Application of the results of Forming Simulation in crash models, Proc. of NUMISHEET'99, pp. 509~514.
- [5] S. H. Kim, H. Huh, 2002, Inverse Finite Element Anaysis of Autobody Structures with a Direct Mesh

- Mapping Method for Crash Analysis Considering Forming Effects, *Trans. Materials Processing* Vol. 11, No. 5, pp. 457~464.
- [6] H. Huh, S. B. Kim, 2007, Testing Equipments for the Evaluation of Dynamic Tensile Characteristics and the Crashworthiness of Auto-body Members, *KSTP Autumn Conference*, pp. 21~24.
- [7] K. C. Son, H. B. Shim, H. T. Hwang, Verification of Sensitivity Method for the Design of Optimal Blanks of General Shaped Parts, *Trans. Materials Processing*, Vol. 10, No. 1, pp. 15~22.
- [8] H. B. Shim, J. K. Park, 2003, Development of Stamping Optimization through the Integration of Blank Design and Nesting, *Trans. Materials Processing*, Vol. 12, No. 7, pp. 615~622.
- [9] E. Markiewicz, P. Ducrocq, P. Drazetic, 1998, An inverse approach to determine the constitutive model parameters from axial crushing of thin-walled square tubes, *Int. J. Impact Engineering*, Vol.21, No. 6, pp. 433~449.
- [10] P. Cunat, 2000, Stainless steel properties for structural automotive applications, *The European Stainless Steel Development Association, Metal Bulletin International Automotive Materials Conference*, 21st to 23rd.
- [11] H. Huh, J. H. Lim, 2002, High strain-rate test of Sinter-forged Cu-Cr with split Hopkinson pressure bar, *Plasticity 2002*, pp. 645~647.