

최적블랭크 설계를 위한 초기형상 생성에 관한 연구

심현보* · 장상득** · 박종규**

(2003년 10월 24일 접수)

A Study on the Generation of Initial Shape for the Initiation of Optimal Blank Design Sequence

H. B. Shim, S. D. Jang and J.K. Park

Abstract

An inverse mosaic method has been proposed to generate an initial blank shape from the final product shape. Differently from the geometric mapping method, the method can handle triangular patches. However, the generated blank shape is strongly dependent on the order of determination of nodes. In order to compensate the dependency error smoothing technique has been also developed. Although the accuracy has been improved greatly compared with the geometrical mapping method, the method has limitation, due to the no incorporation of plasticity theory. Even though the accuracy of the radius vector method is already proved, the method requires initial guess to start the method. In order to compromise the limitation of the present method and the radius vector method, the method has been connected to the radius vector method. The efficiency of the present optimal blank design method has been verified with some chosen examples.

Key Words : Inverse Mosaic Method, Optimal Blank Design, Triangular Patch, Radius Vector Method

1. 서론

스탬핑으로 불리우는 박판성형 제품은 대체로 다음과 같은 특성들, 즉 첫째 적당한 수준의 공차를 허용하는 복잡한 형상을 지닌다는 점, 둘째, 최종제품을 얻기까지 여러 단계의 공정이 필요하다는 점, 셋째, 최종 제품보다는 부품으로 사용된다는 점, 넷째, 업체간의 경쟁이 치열하다는 점을 지니고 있다.

먼저 복잡한 형상의 제품을 생산하기 위해서는 3차원 CAD/CAM에 의한 자유곡면모델링의 생성

및 가공이 필요해지며, 하나의 주어진 최종제품에 대하여 다양한 공정순서의 채택이 가능하기 때문에 공정개발 단계에서 현장기술자의 경험 의존도가 높은 편이다. 또한 부품산업의 특성과 더불어 업체간의 경쟁이 치열하기 때문에 제품가격 결정이 원청업체 주도로 이루어지는 특성이 있어 결국은 소재비용이 제품의 원가에 큰 비중을 차지하게 된다. 여기에 제품개발 기간 단축요구도 스탬핑 업체의 어려움을 가중시키고 있어 원가절감 및 개발기간 단축이 경쟁력유지를 위한 필수적인 사안이 되고 있다.

* 영남대학교 기계공학부

** 영남대학교 대학원 기계공학과

소재원가 절감을 위한 노력으로는 최적블랭크의 설계 및 블랭크 최적배치를 들 수 있으며, 개발기간의 단축을 위한 노력으로는 CAD/CAM의 도입 및 금형수정작업의 최소화를 위한 CAE의 활용이 그것이다.

이중 최적 블랭크는 성형후 제거하는 스크랩(scrap)의 발생을 최소화하여 소재원가의 절감을 기할 수 있도록 할 뿐만 아니라 플랜지부위에서의 소재유동을 개선시켜 주기 때문에 주름이나 터짐을 방지해 준다. 따라서 궁극적으로 트라이아웃에 소요되는 시간을 단축시켜 주기 때문에 최적블랭크 설계는 스탬핑 공정의 개발단계에서 가장 핵심적인 기술이 되고 있다. 그렇지만 이러한 최적블랭크는 일반적으로 금형의 가공이 완료된 후 시행착오과정을 통해 금형의 수정작업과 함께 블랭크 모양이 결정되기 때문에 작업자의 숙련도에 크게 의존하고 있어 최적 형상의 결정에 한계가 있을 뿐 아니라 오히려 제품개발에서 가장 중요한 형상결정단계, 즉 CAD/CAM 단계에 비해 일반적으로 소요기간이 긴 편이다.

현재까지 개발된 최적블랭크 설계법은 주어진 최종형상을 목적형상으로 두고 이로부터 최초형상을 결정하는 방법과 임의로 가정된 최초형상형상으로부터 성형해석을 수행한 후 얻어진 최종형상과 목적형상과의 오차를 구하고, 이를 이용하여 형상오차값이 만족하는 범위에 들 때까지 최초형상을 수정하는 방법과 같은 두가지 범주로 구분된다.

첫번째 범주의 최적블랭크 설계법으로 미끄럼선장법⁽¹⁾, 기하학적 사상법⁽²⁾, 면적가감법⁽³⁾, 유한요소 역해석법⁽⁴⁾, 최소일의 원리에 입각한 이상성형이론을 이용하는 방법⁽⁵⁾, 유한요소 역추적법⁽⁶⁾, 롤백법(roll back)⁽⁷⁾, 직접사상법⁽⁸⁾등을 들 수가 있다. 이들 중 역해석법은 상용성형해석 S/W⁽⁹⁾에서 최초블랭크 형상을 결정하는 모듈에 접목되어 사용되고 있다. 그런데 이 방법에서는 얻어진 최초형상을 이용하여 성형하였을 때 얻어진 최종형상이 목적형상과의 차이, 즉 형상오차가 발생하더라도 이를 보정하는 수단이 없기 때문에 최적블랭크 예측의 정확도가 높지 못한 문제가 있다.

두번째 범주의 방법은 저자에 의해 개발된 민감도법⁽¹⁰⁾, 초기속도법⁽¹¹⁾, 반경벡터법⁽¹²⁾을 들 수 있는데 이 방법에서는 성형해석을 통해 얻은 최종형상에서의 형상오차를 측정 한 후, 이 값이 일정한도 이내에 들도록 축차과정을 거쳐 블랭크

형상을 수정해 주기 때문에 예측의 정확도와 수렴성 모두 매우 높아 간단한 형상의 드로잉뿐만 아니라 실제 자동차부품과 같은 복잡한 형상의 성형에도 성공적으로 적용되고 되고 있다. 특히 반경벡터법은 상용 S/W 인 LS-Dyna 와 Pam-Stamp 해석결과와 연계한 최적블랭크 설계프로그램이 개발되어 있다⁽¹²⁾

그런데 이 방법의 수렴성, 즉 축차 과정에서의 수정횟수는 블랭크 형상의 초기가정의 정확도 여부에 영향을 받는데 일반적으로는 설계자의 경험에 의존하여 임의로 결정하거나 전계장법⁽¹³⁾을 이용하여 초기가정을 생성하여 사용하고 있다. 그런데 이 방법은 제품의 형상이 복잡하여 변형기구가 복합적일 경우 초기가정의 정확도에 한계가 있기 때문에 블랭크 형상 수정횟수가 많이 드는 문제점이 있다. 이 방법들 이외에 실제 자동차부품과 같이 복잡한 형상은 상용 S/W의 역해석 모듈에서 결정된 최초 블랭크의 모양을 이용하는 방법도 사용될 수 있다.

본 연구에서는 반경벡터법에 의한 최적블랭크 설계를 위해 합리적인 블랭크 초기형상의 생성방법을 다룰 예정이다. 본 연구에서 제안하는 역모자이크법(inverse mosaic method)은 소성이론이 배제된 기하학적인 방법으로 초기블랭크 설계법으로 개발된 기존의 기하학적 사상법의 문제점을 개선하여 최종형상이 사각형 격자계로만 구성된 경우에만 국한되던 것을 삼각형 및 사각형 격자가 혼용된 일반적인 경우에 사용될 수 있도록 확장시키고, 또 기하학적사상법의 문제점인 오차의 누적문제, 즉 비변형영역으로부터 이미 결정된 절점의 위치 정보를 이용하여 방사상으로 절점의 위치를 결정함에 따라 원점에서 멀리 떨어져 나중에 결정되는 절점의 정확도가 떨어지는 문제점을 개선한 새로운 방법이다.

즉 본 연구에서는 역모자이크법에 의해 결정된 블랭크의 초기형상을 반경벡터법의 초기가정으로 사용함으로써 반경벡터법에서의 초기형상 결정문제를 해결하였다. 다시 말하면 이미 확인된 반경벡터법의 정확성을 유지하면서, 블랭크 형상의 초기형상결정 문제를 해결함으로써 최적블랭크 설계과정을 체계화, 자동화 할 수 있도록 하였다.

본 방법의 타당성과 효율성은 사각형 컵, L형컵, 오일팬, 휠하우징 등의 예제를 통하여 검증할 예정이다.

2. 기하학적 사상법과 삼각격자 역모자이크 법의 비교

2.1 기하학적 사상법

기하학적 사상법은 소성이론의 적용없이 성형전과 성형후 그리드 면적의 불변조건으로부터 변형된 형상에서 평면으로 면적을 일정하게 유지시키며 투영하는 방법으로 다음의 순서로 이루어진다.

- (1) 변형후의 목적형상에 서로 직교하는 두개의 대칭축을 설정
- (2) 목적형상을 사각형격자로 분할
- (3) 대칭축상의 절점의 사상후 좌표 결정. 이때 목적형상에서의 인근 절점간의 거리를 이용
- (4) 세 절점이 결정된 요소를 찾고 그 요소의 나머지 절점의 위치를 면적불변을 이용해서 결정. 이때 그 절점의 위치결정으로 동시에 여러 개의 요소가 결정될 경우 각 요소의 면적오차의 합이 최소가 되는 위치로 설정
- (5) 모든 절점의 위치가 결정될 때까지 순서 4 반복

Fig. 1은 변형전후의 면적불변을 이용해서 3절점의 위치가 결정된 요소의 나머지 절점의 위치를 구하는 방법을 설명하고 있다. 예컨대 Fig. 1(a)에서 □ABCD에서 절점 A, B, D는 사상후의 위치가 이미 결정되어 있는 절점일 때 절점 C의 사상후의 위치를 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 □ABCD를 삼각형으로 분할한다. 이때 분할후 삼각형은 분할방법에 따라 △ABC, △ACD, △ABD, △BCD의 4가지를 고려할 수 있다. 이 삼각형들 중에서 절점 C를 포함하는 삼각형은 △ABC, △ACD, △BCD의 3가지를 택하여 사상전후의 면적이 불변하도록 절점 C의 사상후의 위치를 결정하면 된다.

Fig. 1(b)는 △ABC로부터 높이 h_1 을 결정하는 방법을 설명하고 있다. 절점 A와 절점B의 사상후의 위치, 즉 절점 a와 절점 b의 위치는 이미 결정되어 있기 때문에 사상후의 변 ab의 길이는 이미 결정되어 있어 사상전후의 면적불변으로부터 △abc의 높이 h_1 을 쉽게 구할 수 있다. 즉 △abc는 변 ab와 변 ab에서 h_1 만큼 떨어진 위치에서 평행한 직선상에 절점 c가 위치하게 된다. 마찬가지로 방법으로 △ACD, △BCD에 대하여 각각 수행하면 높이 h_2 와 h_3 를 각각 구할 수 있다. 그런데 이렇게 구한 3개의 직선은 단순곱힘이 아닌

경우, 즉 면변형을 수반하는 경우 한 점에서 만나지 않게 되는데 이 때 3개의 직선으로 구성된 삼각형의 도심의 위치로 절점 C의 사상후의 위치 c를 결정하게 된다. 이 과정을 3개의 절점의 사상후의 위치가 결정된 요소에 대하여 반복하면 전체 영역에 대하여 사상후의 위치를 결정할 수 있다.

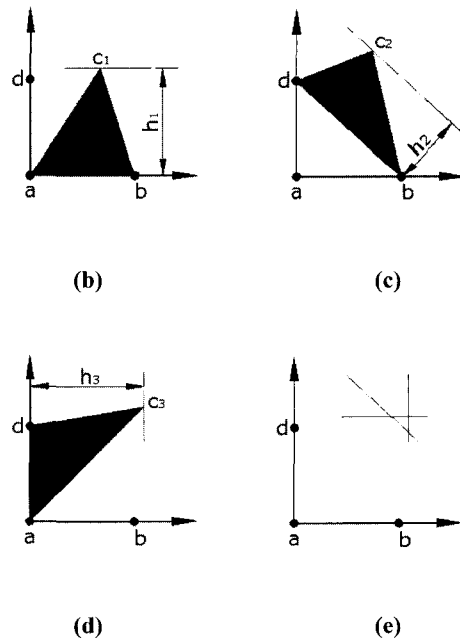
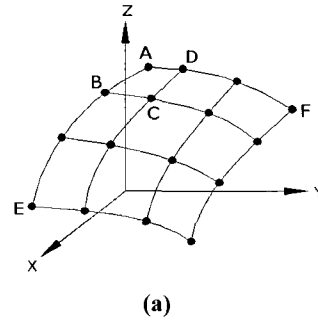


Fig. 1 Schematics of geometric mapping method

이러한 기하학적 사상법은 계산시간이 빠르다는 장점이 있으나 다음과 같은 문제점을 지니고 있어 실제문제에 적용하는데 한계가 있다. 첫째, 대칭축의 설정방법에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에 목적형상이 복잡할 경우 정확한 초기형상을 얻기 위한 대칭축의 설정에 어려움이 있

다. 둘째, 절점의 결정순서가 원점을 중심으로 방사상으로 이루어지기 때문에 원점과 가까운 요소는 비교적 정확한 위치를 제공해 주나 원점에서 먼 요소일수록 오차가 누적됨에 따라 정확성이 많이 떨어진다. 셋째, 사각형격자에만 제한되기 때문에 자동차부품 등과 같이 삼각형 및 사각형 격자가 혼용되는 경우 적용이 불가능하다. 따라서 기하학적 사상법은 실험실 차원의 단순한 형상으로, 사각형 격자로만 구성될 수 있고, 대칭축의 설정에 어려움이 없는 경우에만 적용이 가능하며, 이 경우에도 절점의 결정순서에 따라 초기형상이 달라질 수 있기 때문에 이 방법으로 결정되는 사상후의 형상은 원하는 목적형상으로 성형이 되는 최적 블랭크와는 비교적 거리가 먼 편으로 반경 벡터법과 같은 초기가정(initial guess)이 필요한 최적블랭크 설계법의 초기가정 생성용으로는 유용하게 사용될 수 있다.

2.2 삼각격자 역모자이크법

기하학적 사상법은 정확도에 한계가 있는 것은 사실이지만 최적블랭크 설계를 위한 초기가정의 생성용도로 사용할 경우 비교적 좋은 결과를 제공할 수 있다. 다시 말하면 최적블랭크 설계를 위해서는 초기형상의 가정이 필요한데 주로 전개장법이나 경험에 의존하는 방식 등의 수작업에 의존해 왔는데, 이때 기하학적 사상법을 이용하면 제품형상의 CAD 데이터로부터 자동적으로 초기가정을 생성할 수 있다.

그렇지만 기하학적 사상법이 설계자의 판단에 의한 대칭축의 설정, 예측 결과의 절점 결정순서의 의존성, 그리고 사각격자로만 제한된다는 때문에 사각형과 삼각형격자가 혼용되어 사용되는 일반적인 경우에 적용하는 데에는 여전히 한계가 있다.

본 연구에서 제안하는 삼각격자 역모자이크법은 기하학적 사상법이 지닌 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 방법으로 사각형의 경우 두 개의 삼각형으로 분할하면 되기 때문에 사각형과 삼각형이 혼용된 경우에도 적용이 가능하다.

모자이크 작업은 적절한 크기로 자른 평면 조각들을 곡면 또는 평면으로 구성된 목표형상에 하나씩 붙여주는데 평면의 모자이크 작업은 평면 조각의 겹침이나 변형이 없이 완전하게 접착이 가능하나 곡면 부위에서는 평면 모자이크와 달리 평면조각들을 왜곡이나 겹침이 없이 곡면에 완전

히 접착시킬 수가 없다. 따라서 곡면의 모자이크 작업에서는 조각들을 접착한 후 문질러 줌으로써 조각에 적절한 량의 변형을 가함으로써 매끄럽게 처리해 준다.

이러한 원리를 최적블랭크 설계에 적용한 것이 역모자이크법(inverse mosaic method)이다. 즉 역모자이크 법은 모자이크작업을 역으로 수행하는 것으로 곡면으로 구성된 최종형상으로부터 평면상의 최초형상을 결정하는 방법으로 모자이크 작업처럼 최종형상을 구성하고 있는 삼각형 격자를 하나씩 떼어 평면에 붙여준 뒤 이중곡률부위와 같은 면변형이 발생하는 부분의 격자의 왜곡을 펴주는 과정, 즉 왜곡을 유연화시켜 주는 과정으로 이루어진다.

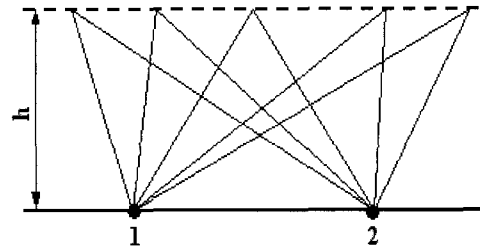


Fig. 2 Equi-area triangles with same base length

이 방법에서는 전체 영역을 변형영역과 비변형영역으로 사전에 구분한 후 비변형영역에 속한 요소들의 절점의 위치는 이동이 되지 않도록 구속한다. 변형영역의 요소를 대상으로 2절점의 위치가 결정된 요소를 찾고 이 요소에 면적불변을 적용한다면 삼각형의 높이를 결정할 수 있다. 일반적으로 비변형영역에 인접하는 변형영역의 요소부터 시작하게 된다. 그렇지만 Fig. 2에서와 같이 밑변이 같은 삼각형에서 같은 면적을 지니도록 하는 삼각형은 무한히 많기 때문에 같은 면적을 지니는 삼각형의 나머지 한 절점의 위치를 결정하는데 어려움이 있다.

그런데 기하학적 사상법에서 서로 직교하는 두 개의 대칭축을 먼저 설정하는 이유는 기본적으로 기하학적 사상법이 세 절점이 결정된 요소에 대하여 나머지 하나의 절점 위치를 결정하는 것이기 때문에 세개의 절점의 위치를 미리 결정해 주기 위한 수단으로 사용되고 있고 이로 말미암아 나머지 한 절점의 위치는 일의적으로 결정되게 되기 때문에 역모자이크법과 같은 문제점이 나타

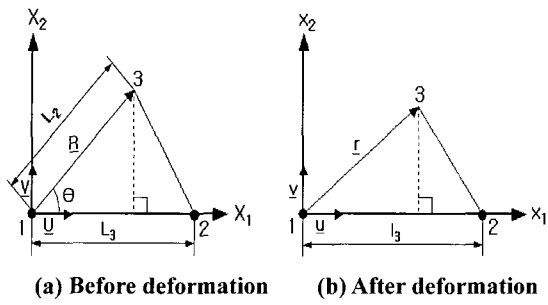


Fig. 3 Concept of similar triangle from the different based equi-area triangle

나지 않는다. 따라서 역모자이크법에서 원래 삼각형과 같은 면적을 지니는 삼각형을 일의적으로 결정하기 위해서는 적절한 기준이 필요해진다.

Fig. 3은 같은 면적으로 밑변의 길이가 서로 다르더라도 형상 특징이 비슷한 두 삼각형, 즉 유사 삼각형을 비교하고 있다. 변형후의 삼각형의 밑변에 대응하는 꼭지점, 즉 절점 3은 밑변의 길이로부터 결정되는 삼각형의 높이이다 그 절점에서 밑변에 내린 수선이 밑변을 변형전의 삼각형과 같은 비율로 내분하는 점의 위치로 결정된다. 즉 변형후의 삼각형에서 두 절점의 위치가 결정되어 있을 때 나머지 절점의 위치를 이 방법으로 결정하면 된다.

변형전의 상태에서 절점 1을 기준으로 한 절점 3의 위치벡터 \underline{R} 은 식 (1)으로 표현된다.

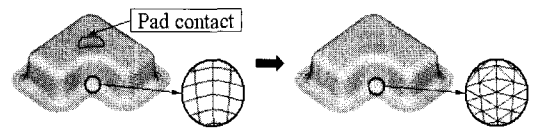
$$\underline{R} = L_2 \cos\theta \underline{U} + L_2 \sin\theta \underline{V} \quad (1)$$

여기서 변형전의 상태는 이미 알고 있기 때문에 변의 길이 L_1, L_2, L_3 각도 θ , 그리고 서로 직교하는 두 단위벡터 즉 \underline{U} 와 \underline{V} 는 알고 있다.

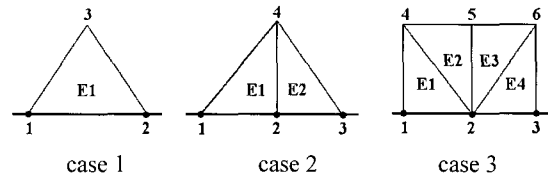
유사삼각형으로부터 변형후 절점 1을 기준한 절점 3의 위치벡터 \underline{r} 은 식 (2)로 표현된다.

$$\underline{r} = L_2 \cos\theta \frac{L_3}{L_3} \underline{u} + L_2 \sin\theta \frac{L_3}{L_3} \underline{v} \quad (2)$$

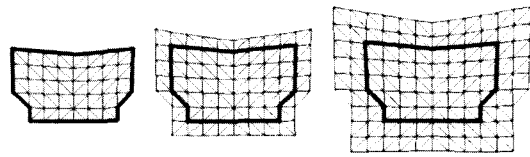
여기서 절점 1과 절점 2는 이미 전단계에서 위치가 결정된 절점으로 변 L_3 과 이 방향의 단위벡터 \underline{u} 는 이미 결정되어 있고, 또 \underline{v} 는 \underline{u} 에 직각방향으로 결정된다.



(a) Divide 4 node element into triangular element



(b) Element selection



(c) Determination of developed shape by the successive application of inverse mosaic method

Fig. 4 Process of triangle patch mosaic method

Fig. 4는 역모자이크법으로 최종형상으로부터 평면에 펼친 형상을 결정하는 과정을 도식적으로 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 최종형상을 보여주고 있는데 이때 사각형 격자는 두개의 삼각형 격자로 나눌수 있기 때문에 최종형상을 구성하는 격자는 삼각형, 사각형, 또는 혼용이 된 경우라고 삼각형 격자 수식의 적용이 가능하다. 또한 비변형영역과 변형영역의 구분을 위해 본 연구에서는 패드와의 접촉여부로 판별하였는데 패드와 접촉하는 부분을 비변형영역으로 지정하여 최종형상의 절점의 좌표를 최종형상을 결정하는 평면상의 좌표로 그대로 사용한다.

Fig. 4(b)는 변형영역에 위치하는 요소들 중에서 두 절점의 위치가 이미 결정된 요소에 대하여 이번 단계에서 새롭게 절점의 위치를 결정시켜주는 절점과 요소를 찾는 방법을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 크게 3가지 경우로 나눌 수 있는데 case1과 같이 절점 1, 2의 위치가 이미 결정된 경우에 대하여 절점 3과 요소 E1이 결정되는 경우, case2와 같이 절점 1,2,3의 위치가 결정된 경우에 대하여 새롭게 결정되는 절점 4에 의해 두 개 이상의 요소가 결정되는 경우, 그리고 case3과 같이 절점 1,2,3의 위치가 결정되어 있는 경우 절점 4

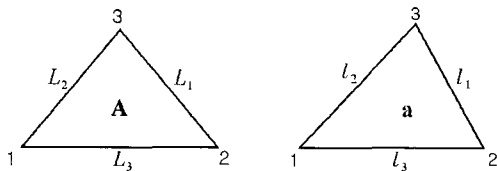
의 위치를 결정함으로써 요소 E1이 결정되고, 절점 6에 의해 요소 E4가 결정되고 또 절점 4, 6이 결정됨에 따라 절점 5의 위치가 결정됨으로써 요소 E2, E3가 동시에 결정되는 경우로 나눌 수 있다.

Fig. 4(c)는 비변형영역에 접하는 변형영역의 요소들로 단계별로 평면에 펼치는 과정을 보여주고 있는데 각 단계별로 한층씩 역모자이크법을 적용한다. 이런 방법으로 단계별로 하나의 층에 대하여 모자이크법을 적용하는데 모든 요소들이 결정될 때까지 반복 수행한다. 이때 한 층씩 요소를 결정한 후 다음에 설명할 격자유연화를 통해 오차를 최소화 하도록 한다.

역모자이크법은 삼각형과 사각형이 혼재된 경우라도 적용이 가능하기 때문에 기하학적 사상법에 비하여 적용범위가 넓고 또 대칭축 설정이 필요 없어 대칭축의 설정방법에 따른 결과의 차이가 없다는 장점이 있다.

3. 격자 유연화 과정

역모자이크법의 문제점인 결정순서가 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위한 목적으로 유연화를 실시하도록 한다. 역모자이크법에서는 소성이론의 적용없이 먼저 위치가 결정된 절점의 위치를 바탕으로 다음 순서의 절점의 위치가 결정되기 때문에 앞 단계에서 발생한 오차가 다음 단계의 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 나중에 결정되는 절점의 경우 전 단계의 누적 오차의 영향을 받는 문제점이 있어 정확도를 향상시키기 위해서는 각 단계에서 발생한 오차를 최소화 시키는 작업이 필요하다. 이는 마치 모자이크작업에서 조각을 붙인 후 왜곡이 발생된 부분에 문지르는 작업을 이를 펴주는 과정과 유사한 개념을 지니고 있다.



(a) Before deformation (b) After deformation
 Fig. 5 Change of edge length during the inverse mosaic method

격자 유연화를 위해 식 (3)과 같은 최소자승법에 의한 목적함수를 정의하였고 이 목적함수를 최소화하도록 역모자이크법으로 결정된 절점의 위치를 조절한다. 즉 식 (3)으로 표현된 오차함수는 각각의 삼각형의 세변의 길이의 변화율의 제곱을 합한 것으로 전체 영역에 대하여 최소가 되도록 함으로써 오차를 분산시키도록 한다. 이때 목적함수의 최소화를 위해 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson)을 이용하였다.

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{l_1^2 - L_1^2}{L_1^2} \right)^2 + \left(\frac{l_2^2 - L_2^2}{L_2^2} \right)^2 + \left(\frac{l_3^2 - L_3^2}{L_3^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

식 (3)에서 L_1, L_2, L_3 는 변형전의 길이를 l_1, l_2, l_3 는 변형후의 길이를 나타내고 있다.

Fig. 6은 사각형 컵을 예로 하여 블랭크 형상을 결정하기 위해 역모자이크법에 의한 결과와 이 결과를 유연화처리한 모양을 비교한 것이다. 즉 역모자이크법의 결과인 Fig. 6(d)와 이를 유연화한 Fig. 6(e)의 격자를 비교하면 유연화 과정을 통해 변의 길이변화가 고르게 이루어지고 있음을 보여 준다.

Fig. 7은 역모자이크법과 격자유연화 과정으로 블랭크의 초기형상을 결정하는 순서도를 나타내고 있다.

역모자이크법을 이용하여 변형후의 형상으로부터 결정된 펼친 형상, 즉 블랭크 형상은 소성이론의 적용이 없기 때문에 정확도에는 한계가 있으며, 이 결과를 다시 격자유연화 과정을 거치더라도 오차의 가능성은 여전히 상존하기 때문에 정확도에는 한계가 있다. 따라서 이 방법에 의해 결정된 블랭크의 형상을 그대로 최적블랭크로 사용하기 보다는 최적블랭크 설계를 위한 블랭크 형상의 초기가정으로 사용한다면 기존의 전개장법이나 경험에 의존하던 초기 형상 결정문제를 해결할 수 있다.

4. 역모자이크법과 연계한 최적블랭크 설계

반경벡터법은 성형후의 형상과 목표형상의 형상오차를 측정하여 이 값을 허용오차 이내에 들도록 축차과정을 거쳐 블랭크의 형상을 수정함으로써 해의 정확도와 수렴성이 매우 높아 간단한 형상의 드로잉 및 복잡한 실제 형상의 성형에서도 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 그러나 반경 벡터법의 수정횟수는 초기 형상의 정확도에 관계하기 하기 때문에 초기 형상 결정은 중요하다. 기존의 경험에 의한 임의의 결정이나 전개장법으로는 제품의 형상이 복잡해 질수록 적용이 곤란할 뿐만 아니라, 수작업이 개입되기 때문에 제품형상의 컴퓨터 형상 데이터로부터 자동적으로 초기형상을 결정하기가 어려운 문제점이 있다. 따라서 역모자이크법으로 결정된 형상을 반경 벡터법의 초기가정으로 사용한다면 초기형상의 도출의 문제점이 해결된 최적블랭크 설계의 자동화가 가능해진다.

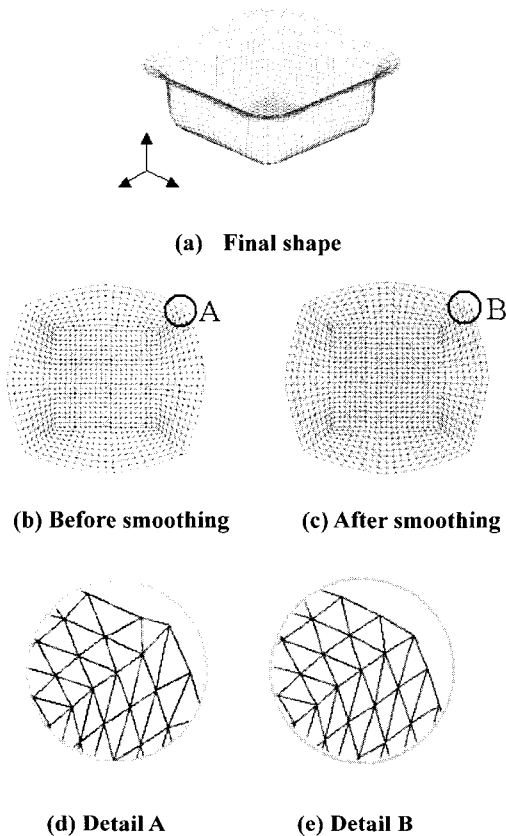


Fig. 6 Effect of smoothing (square cup)

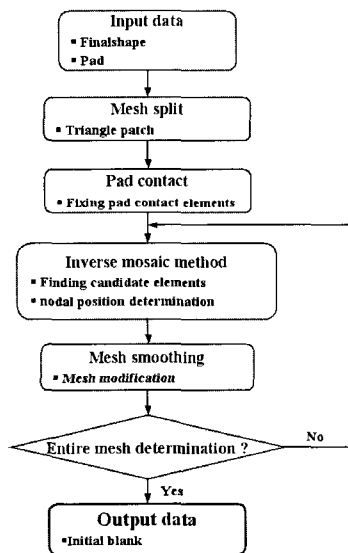


Fig. 7 Flow diagram for the initial guess by the inverse mosaic method

4.1 반경벡터법

Fig. 8(a)는 블랭크 외곽선상에 있는 임의의 한 절점이 변형되는 경로를 나타낸 것으로 성형 전 블랭크 외곽선상의 n 번째 절점의 위치를 \underline{X}^n 으로, 성형 후 절점의 위치를 \underline{x}^n 으로 표기하였다. Fig. 8(b)는 성형 전 절점 n 의 위치벡터 \underline{X}^n 에서 그 절점과 인접하는 두 절점에 의해 결정되는 원의 반경방향 단위벡터 $\underline{\hat{R}}^n$ 과 접선방향 단위벡터 $\underline{\hat{t}}^n$ 을 나타낸 것이고, Fig.8(c)는 성형후 절점 n 의 위치벡터 \underline{x}^n 에서 반경방향 단위벡터 $\underline{\hat{r}}^n$ 과 접선방향 단위벡터 $\underline{\hat{i}}^n$ 을 나타낸 것이다.

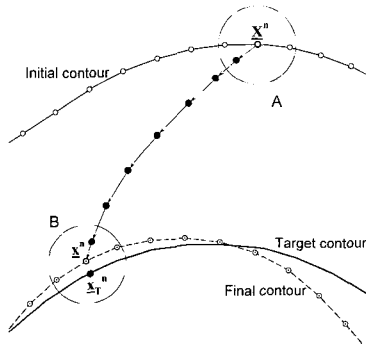
블랭크 형상의 수정은 해당 절점의 위치를 적절한 방향으로 이동시켜 주면 되는데 이때 접선방향, 즉 $\underline{\hat{t}}^n$ 방향으로의 이동은 그 절점을 외곽선에 평행한 방향으로 이동시켜 주는 것이기 때문에 블랭크 형상의 수정과는 관계가 없는 반면 반경방향으로의 이동은 블랭크 형상의 변화와 관계가 있다. 따라서 블랭크 형상의 수정은 반경방향, 즉 $\underline{\hat{R}}^n$ 으로 절점을 이동시켜주면 된다.

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

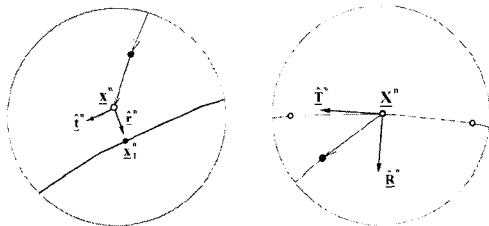
$$\underline{X}^n + \varepsilon^n \hat{\underline{r}}^n = \underline{X}_T^n \quad (4)$$

따라서 절점 n에서의 형상오차 ε^n 는

$$\underline{\varepsilon}^n = (\underline{X}_T^n - \underline{X}^n) \cdot \hat{\underline{r}}^n \quad (5)$$



(a) Movement of boundary node



(b) Detail A, initial state (c) Detail B, final state
Fig. 8 Concept of error correction in the radius vector method

블랭크 형상의 수정은 식 (5)를 통해 구한 그 절점에서의 형상오차값과 그 절점에서의 반경벡터를 이용하여 식 (6)과 같이 절점 위치를 이동한다.

$$\underline{X}_{(i)}^n = \underline{X}_{(i-1)}^n + \beta \cdot \varepsilon^n \cdot \hat{\underline{R}}^n \quad (6)$$

최적 블랭크는 형상오차 ε^n 이 모든 절점에서 허용오차 이하가 될 때까지 해석 및 블랭크 수정을 수 차례 반복하여 구한다.

5. 적용 사례

역모자이크법에 의해 결정된 블랭크의 형상과

전개장법에 의해 결정된 블랭크 형상을 각각 최적블랭크 설계를 위한 초기가정으로 사용하여 최적블랭크를 설계한 후 결과를 비교함으로써 역모자이크법과 연계한 최적블랭크 설계법의 효율성을 확인하도록 한다.

제안된 역모자이크 수식을 Fig. 7의 순서도에 따라 제품의 형상데이터로부터 직접 초기블랭크 형상을 도출하는 프로그램을 작성하였으며, 이 프로그램과 기존의 반경벡터법에 의한 최적블랭크 설계프로그램인 Optiblank⁽¹²⁾과 연계하여 최적블랭크 형상을 설계하여 기존에 사용하던 전개장법에 의해 도출된 초기블랭크 형상을 사용하였을 경우에 대하여 수정 횟수와 최대오차를 비교하였다. 성형 해석은 상용 프로그램인 Ls-Dyna⁽¹⁴⁾를 이용하였다.

5.1 정사각형컵

본 방법에 의한 최적블랭크 설계의 타당성 검증을 위해 일반적으로 사용되는 정사각형컵 드로잉의 최적블랭크 설계를 하였다.

목표형상은 성형깊이 20mm에서 2.0mm의 균일한 플랜지 트리밍 여유폭을 가지는 형상으로 설정하였고, 허용오차를 성형 후 플랜지의 외곽선상의 절점으로부터 목표 형상과의 오차가 0.5mm 이내로 설정하였다.

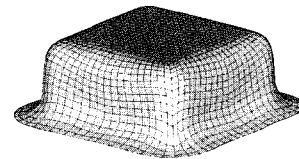


Fig. 9 Final shape (square cup)

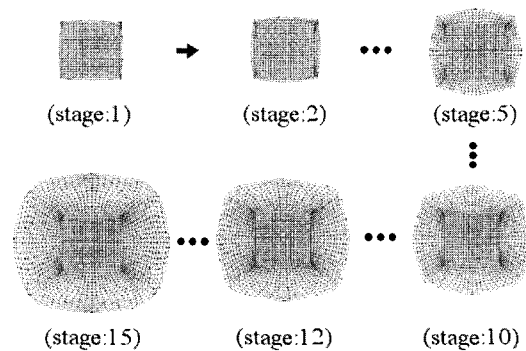
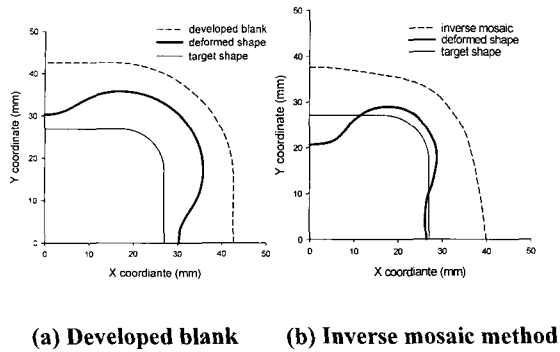
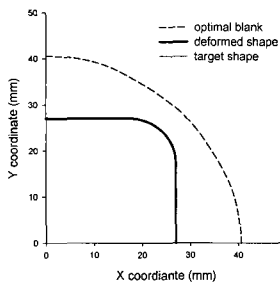


Fig. 10 Determination of initial guess by the inverse mosaic method (square cup)



(a) Developed blank (b) Inverse mosaic method



(c) Optimal blank

Fig. 11 Comparison of blank shape and deformed shape (square cup)

Fig. 9 는 사각형컵의 최종제품 형상을 나타내었으며 Fig. 10 은 역모자이크법으로 각각의 층이 결정되는 과정을 나타낸 그림이다.

Fig. 11(a), (b) 는 각각 전개장법과 모자이크법으로 설계한 블랭크 형상의 초기가정, 그리고 Fig. 11(c)는 반경벡터법을 적용하여 도출한 최적 블랭크의 형상을 성형후 형상과 목적형상을 비교한 그림으로 역모자이크법이 전개장법에 비해 보다 목적형상에 근접하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 12는 전개장법과 모자이크법으로 설계한 초기형상으로부터 반경벡터법을 적용하여 최적블랭크를 설계할 때 목표형상과 비교해서 설계단계별 최대형상오차를 나타낸 그래프이다. 본 예제에서는 전개장법과 역모자이크법에 의해 도출된 블랭크 형상으로부터 최적블랭크 형상으로 수렴할 때까지 두 경우 모두 3회의 수정을 거쳤지만 역모자이크법에 의한 초기가정이 전개장법보다 형상오차가 작게 나타나고 있다.

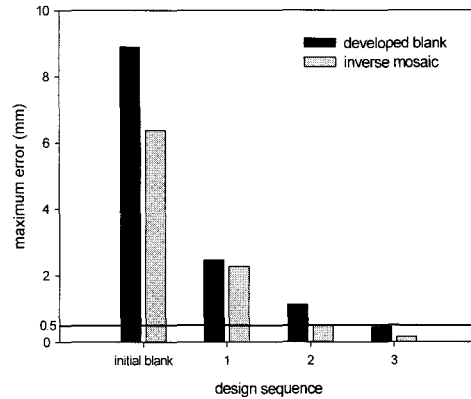


Fig. 12 Change of maximum shape error during optimal blank design process (square cup)

5.2 L 형컵

L형 컵은 Fig. 13의 최종형상에서 보듯이 90도 까지 급격히 꺾이는 오목한 부위를 가져 플랜지 부위에서 인장과 압축이 동시에 급격히 일어나는 복잡한 변형역학을 가진 대표적인 형상이다. 목표형상은 Fig. 14와 같이 펀치 행정이 25mm일때 2.0mm의 균일한 트리밍 여유폭을 가지는 형상으로 설정하였고, 목표형상과의 허용오차는 0.5mm로 두었다.

Fig. 14(a), (b) 는 각각 전개장법과 모자이크법으로 설계한 블랭크 형상의 초기가정, 그리고 Fig. 14(c)는 반경벡터법을 적용하여 도출한 최적 블랭크의 형상을 성형후 형상과 목적형상을 비교한 그림으로 정사각형컵 예제와 마찬가지로 역모자이크법이 전개장법에 비해 보다 목적형상에 근접하고 있다.

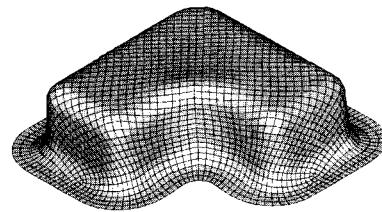
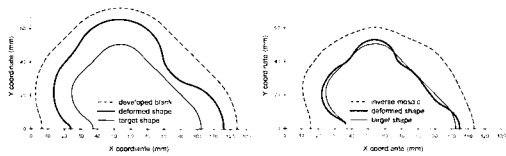
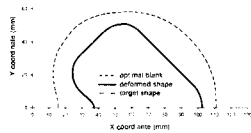


Fig. 13 Final shape (L-shaped cup)



(a) Developed blank (b) Inverse mosaic method



(c) Optimal blank

Fig. 14 Comparison of blank shape and deformed shape (L-shaped cup)

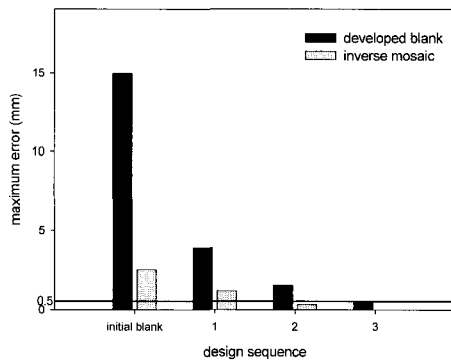


Fig. 15 Change of maximum shape error during optimal blank design process (L-shaped cup)

Fig. 15는 전개장법과 모자이크법으로 설계한 초기형상으로부터 반경벡터법을 적용하여 최적블랭크를 설계할 때 목표형상과 비교해서 설계단계별 최대 형상오차를 나타낸 그래프이다. 본 예제에서는 전개장법에 의해 도출된 블랭크 형상으로부터는 3회의 수정만에, 그리고 역모자이크법에 의한 블랭크 형상에서는 2회의 수정만에 최적블랭크형상이 도출되었고 전개장법에 비해 역모자이크법에 의한 블랭크 형상이 형상오차가 훨씬 작게 나타나 정확도가 양호함을 보여주고 있다.

5.3 오일팬

오일팬은 깊이가 2단으로 되어 있기 때문에 깊이가 얇은 쪽과 깊은 쪽과의 드로잉 속도의 차이

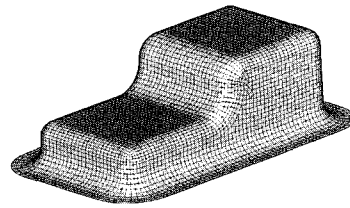
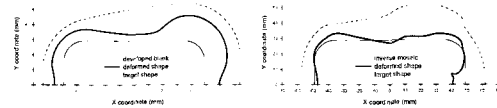
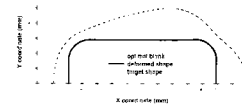


Fig. 16 Final shape (oil pan)



(a) Developed blank (b) Inverse mosaic method



(d) Optimal blank

Fig. 17 Comparison of blank shape and deformed shape (oil pan)

에 의한 펀치와 소재 사이에서의 접촉이 점진적으로 발생하는 특징을 가진다. 목표 형상은 Fig. 16과 같이 금형의 상형과 하형의 체결이 완료된 시점에서 2.75mm의 균일한 플랜지 트리밍 여유폭을 가지는 형상으로 설정하였으며 허용오차는 0.5mm이내로 설정하였다.

Fig. 17(a), (b)는 각각 전개장법과 모자이크법으로 설계한 블랭크 형상의 초기가정, 그리고 Fig. 17(c)는 반경벡터법을 적용하여 도출한 최적 블랭크의 형상을 성형후 형상과 목표형상을 비교한 그림으로 앞의 예제와 마찬가지로 역모자이크법에 의한 블랭크가 전개장법보다 형상오차가 작게 나타나 목표형상에 보다 근접하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 18은 전개장법과 모자이크법으로 설계한 초기형상으로부터 반경벡터법을 적용하여 최적블랭크를 설계할 때 목표형상과 비교해서 설계단계별 최대 형상오차를 나타낸 그래프이다. 본 예제에서는 두 방법 모두 3회의 수정만에 최적블랭크에 수렴하였지만 전개장법에 비해 역모자이크법에 의한 블랭크 형상이 형상오차가 작게 나타나 역모자이크법의 정확도가 양호함을 보여주고 있다.

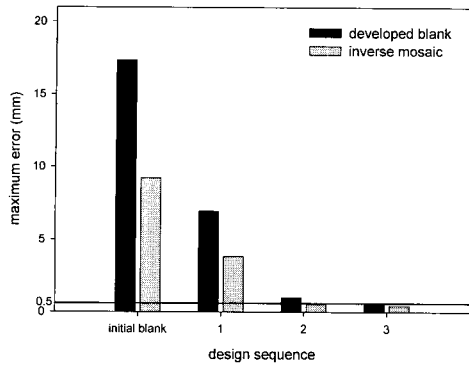


Fig. 18 Change of maximum shape error during optimal blank design process (oil pan)

5.4 휠 하우스징

Fig. 19에 표현된 휠 하우스징은 일반적인 드로잉과는 달리 강제회전 운동이 발생하는 부분이 있어 성형이 진행됨에 따라 플랜지 부분이 블랭크 홀더를 빠져 나오면서 비지지 영역이 발생되어 성형후의 형상이 블랭크의 형상에 매우 민감하게 영향을 받는 특성이 있다.

최적블랭크 설계시 제품의 치수를 감안하여 목표 형상에 대한 허용오차는 6.5mm로 설정하였다.

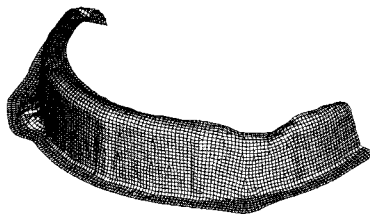
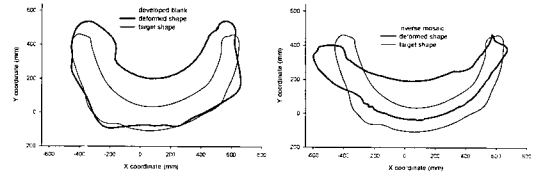
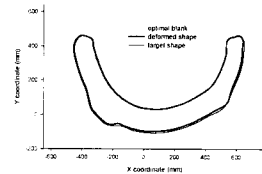


Fig. 19 Final shape (wheel housing)

Fig. 21은 전개장법과 모자이크법으로 설계한 초기형상으로부터 반경벡터법을 적용하여 최적블랭크를 설계할 때 목표형상과 비교해서 설계단계별 최대 형상오차를 나타낸 그래프이다. 모자이크법에서는 4회의 수정만에 최적블랭크형상에 수렴하였지만 전개장법에서는 최적블랭크 설계단계가 더 필요할 것으로 판단된다. 따라서 전개장법에 비해 역모자이크법에 의한 블랭크 형상이 형상오차가 작게 나타나 역모자이크법의 정확도가 양호함을 보여주고 있다.



(a) Developed blank (b) Inverse mosaic method



(c) Optimal blank

Fig. 20 Comparison of blank shape and deformed shape (wheel housing)

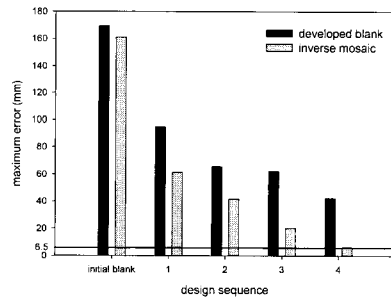


Fig. 21 Change of maximum shape error during optimal blank design process (wheel housing)

6. 결론

본 연구에서는 기존의 사각형 격자에 대한 기하학적 사상법을 삼각형 격자에도 적용이 가능한 역모자이크법을 제안하였다. 이 방법은 소성이론이 적용되지 않기 때문에 절점의 결정순서에 따라 결과가 달라지지만 격자유연화 기법을 도입하여 절점결정순서 의존성을 배제하였다. 역모자이크법에서는 유사삼각형의 개념을 도입하여 기하학적 사상법에서 요구되던 대칭축의 설정이 필요 없게 하여 설계자의 편의성을 향상시켰다. 제안한 방법에 따라 제품의 형상데이터로부터 직접 초기 평면형상으로 펼치는 프로그램을 작성하여 초기

형상 결정단계를 자동화하였고 사각형 격자는 자동적으로 삼각형으로 분할하도록 함으로써 사각형과 삼각형이 혼용되는 일반적인 경우에도 적용이 가능하도록 하였다.

역모자이크법과 격자유연화과정을 거쳐 절점결정순서 의존성과 오차의 누적효과를 최소로 하는 노력에도 불구하고 소성이론이 적용되지 않는 문제점 때문에 정확도에는 한계가 있다. 이를 기존의 반경벡터법에 의한 최적블랭크 설계와 연계함으로써 반경벡터법에서의 문제점인 초기형상 결정을 본 연구에서 제안하는 방법을 사용함으로써 초기형상 결정문제를 해결하여 정확도와 사용자의 편의성을 대폭 향상시켰다.

본 방법에 의한 초기형상 결정방법의 타당성과 효율성을 비교하기 위해 몇가지 예제에 대하여 전개방법으로 초기형상을 결정하였을 경우와 본 방법으로 초기형상을 결정하였을 경우를 비교한 결과 본 방법에 의한 결과가 정확도 및 수렴성이 우수함이 밝혀졌고, 제품의 형상데이터로부터 직접 초기형상을 결정할 수 있도록 함에 따라 최적블랭크 설계과정을 자동화 할 수 있도록 하였다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

(1) H. Gloeckl and K. Lange, 1993, Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components, Proc. 11th NAMRC, pp. 243~253.
 (2) G. N. Blount and B. V. Fischer, 1995, Computerized blank shape prediction for sheet metal components having doubly-curved surfaces, Int. J. Prod. Res. Vol.33, no.4, pp. 993~1005.

(3) Y. Q. Guo, J. L. Batoz, J. M. Detraux and P. Duroux, 1990, Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.30, pp. 1385~1401.
 (4) H. Iseki and R. Sowerby, 1995, Determination of the optimal blank shape when deep drawing nonaxisymmetric cups using a finite element method, JSME international, A, Vol.38, no.4, pp. 473~479.
 (5) F. Barlat, K. Chung and O. Richmond, 1994, Anisotropic plastic potentials for polycrystals and application to the design of optimum blank shapes in sheet forming, Metal and Mater. Trans. A, Vol.25A, pp. 1209~1216.
 (6) S. D. Kim, M. H. Park S. J. Kim and D. G. Seo, 1998, Blank design and formability for non-circular deep drawing processes by the finite element method, J. Mater. Proc. Tech., 75, pp. 94~99.
 (7) 김종엽, 김낙수, 허만성, 1998, 우물정자형 sub-frame의 블랭크 설계, 한국소성가공학회지 제7권, 제3호, pp. 185~195.
 (8) 김승호, 허훈, 2002, 직접격자 사상법을 이용한 차체 구조물의 유한요소 역해석 및 성형효과를 고려한 충돌해석, 한국소성가공학회지 제11권, 제6호, pp. 457~464.
 (9) HyperForm user's manual, 2002, Altair Engineering.
 (10) H. B. Shim, K. C. Son and K. H. Kim, 2000, Optimal blank shape design by sensitivity method, J. Mater. Proc. Tech., Vol.104, pp. 191~199.
 (11) 심현보, 이상현, 손기찬, 2002, 초기 속도법을 이용한 최적블랭크 설계 프로그램의 개발, 한국소성가공학회지 제11권, 제6호, pp. 487~494.
 (12) 심현보, 이상현, 박종규, 김홍엽, 2003, 스탬핑 공정 최적화 시스템의 개발 : 최적블랭크 설계와 최적배치의 일체화, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 283~287.
 (13) 전기찬, 1993, 박판금속의 성형, 반도출판사.
 (14) LS-Dyna user's manual, 2001, LSTC.