

## 금속 판재 성형 기술의 진보

박종우

(한국과학기술연구원 재료연구부)

## Progress in Sheet Metal Forming Technology

Jong Woo Park

### Abstract

Matched die forming technology has been used widely as a sheet metal forming method for a long time. This conventional method, however, needs a high cost and long delivery time to prepare a set of matched dies or, in many cases, several sets of dies. For more than ten years, some alternative methods using single die or non-matched dies have been developed and applied practically in various fields of industry. Elasto-forming, fluid forming, hydro-forming, and blow forming are some examples of these new methods. Recently, a dieless sheet forming technology using a reconfigurable matrix of punch elements has been developed, and started to be used in some industries such as aircraft and railroads. A new concept of dieless forming technology has also been proposed to overcome the drawback of the conventional dieless forming technology.

**Key Words** : Matched Die, Elasto-Forming, Fluid Forming, Hydro-Forming, Blow Forming, Dieless Forming, Multi-Point Forming, Flexible Die, Reconfigurable Discrete Die

### 1. 서론

보통 단순한 2차원 곡면을 제외한 대부분의 금속판재 성형은 한 쌍의 matched die를 사용하여 이루어진다. 이러한 전통적인 방법은 생산성과 정밀도가 높은 장점이 있기 때문에 특히 양산성과 정밀도가 동시에 요구되는 자동차, 전기전자, 통신제품, 생활용품 분야에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 matched die 성형에서는 금형 돌출부와 접촉하는 소재에 응력이 집중되어 변형이 불균일하게 진행되기 때문에 성형한계가 낮아 제품 디자인에 많은 제약이 따른다. 따라서 일체형 부품의 제작이 곤란하여 부품수가 증가하게 되며, 이로 인해 성형공정이 늘어나고 부품 조립에도 많은 시간이 걸려 비용이 증가하며,

피로균열의 주요 기점인 접합부의 증가로 제품의 내구성이 저하된다. 또한 금형의 설계와 제작에 오랜 시간이 걸리고, 금형 제작비가 고가인 단점이 있기 때문에 대량 생산이 아니거나 금형이 대형인 경우에는 생산단가가 크게 올라가며, 신제품의 개발기간이 길어지는 문제도 있다. 그 대표적인 예는 우주항공, 스포츠카, 고급차종, 특수차량, 철도차량, 조선 산업 등이며, 고급 또는 특수 차종은 아직도 일부 panel을 금형 대신 손과 간단한 도구로 직접 성형하기도 한다. 또한 조선에서는 불꽃 가열과 냉각으로 선체 외피용 후판의 3차원 곡면을 성형하는 line heating 법이 사용되고 있다. 이러한 수작업적인 방법은 대부분 생산성과 정밀도가 낮고, 특히 line heating 법은 소재의 특성이 저하되는 문제점도 있다. 따라서 최

근에는 가급적 금형을 적게 사용하거나 전혀 사용하지 않고도 대량으로 정밀하게 성형할 수 있는 기술이 개발되어 점차 활용범위가 넓어지고 있다.

본 기술해설에서는 Elasto-forming을 위시하여 금속판재의 새로운 성형기술로 주목받고 있는 Elasto-forming, Fluid forming, Hydro-forming, Blow forming 등 single die 성형기술과 함께 새로운 기술인 무금형 성형법 (Die-less forming method)을 소개하고, 각 기술의 원리, 특징과 장단점 및 응용분야를 다루고자 한다.

## 2. Single die forming

### 2.1 Elasto-forming<sup>(1)</sup>

Elasto-forming은 Fig. 1과 같이 matched die 중 보통 오목부에 해당하는 금형을 elastomer(고분자 탄성체)로 대체하여 금속판재를 성형하는 기술이다. 때로는 볼록부에 해당하는 금형이 elastomer로 대체될 수도 있다. 이와 같이 한 쪽 금형만을 사용하므로 금형비가 반감되어 경제적이고, 금형 설치가 용이하여 설치 시간이 절약되며, matched die에서 까다로운 과정인 금형 lining-up이 불필요하다. 또한 두께와 재질이 다른 판재도 같은 금형으로 성형할 수 있는 이점이 있다.

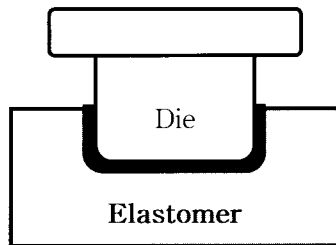


Fig. 1 Elasto-forming

Elastomer는 신축성과 회복력이 뛰어난 고무판이나 diaphragm이 사용되며, 특히 전자의 경우는 Rubber-pad forming이라고도 한다. Elastomer는 유체처럼 판재의 모든 표면과 거의 동시에 접촉하여 균일한 정수압을 가하므로 판재의 변형이 처음부터 상당히 균일하게 진행되어 성형품의 두께분포가 균일해진다. 따라서 Matched die로 성형할 때보다 성형한계가 개선되고, 성형품의 표면품질이 우수하며, 내구성도 향상된다. 또한 균일한 정수압 상태에서 성형되기 때문에 금형 파손과 마모가 적으며, 철강 외에도 기계가공이 용이한 나무, 플라스틱, 알루미늄, 주철 등 다양한 재료로 금형을 만들 수 있는

이점도 있다.

단점으로는 Elastomer의 수명이 성형압력과 변형량의 크기에 크게 의존하여 제한적이며, 성형압력이 낮기 때문에 성형품의 모서리 반경을 작게 하기 어렵고, 주름이 발생하기 쉽다. 그러므로 Elasto-forming은 보통 형상이 단순하고, 깊이가 얇은 부품의 제조에 적합하다. 생산주기는 평균 1분 이하로서 생산성이 보통 Matched die forming법의 1/10 정도이지만 소형 성형품은 다수의 금형으로 동시에 여러 개를 성형할 수 있으므로 대량생산도 가능하다.

Fig. 2는 Elasto-forming 중 가장 초기의 Rubber-pad forming 방식인 Guerin process로서 구조가 간단하고, 취급이 용이하여 단순한 형상의 다품종 소량생산에 적합하다. Rubber pad는 경도가 Durometer A60~75인 연성 소재를 한 덩어리로 또는 여러 장을 겹쳐서 사용한다. 총 두께는 통상 150~300mm이며, 성형품의 3배 깊이가 적당하다. Form block은 platen 위에 느슨하게 놓이고, platen은 rubber pad가 밖으로 밀려나오지 않도록 누르는 역할을 하며, blank는 platen에 연결된 핀으로 고정된다. 성형압력은 보통 7~48MPa 이지만, 작은 platen을 사용하면 140MPa까지 가능하다. Guerin process는 주름이 발생하기 쉽고, deep drawing이 어렵지만 오목 금형과 적절한 clamping을 사용하면 깊이가 얇은 drawing은 가능하다. 또한 이 기술은 성형 외에도 구멍을 뚫거나 일정한 면적을 따내는 용도로도 사용할 수 있다.

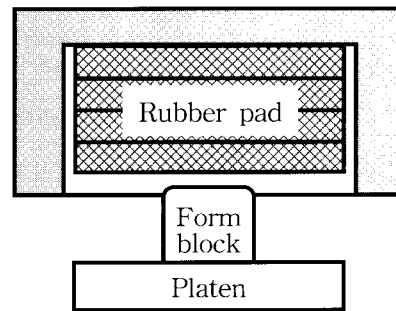


Fig. 2 Rubber-pad forming of Guerin process

Marform process는 blank-holder와 die cushion을 사용하여 주름이 생기지 않고 deep drawing이 가능하도록 Guerin process를 개량한 것이다. Deep drawing 최대 깊이는 적절한 조건에서 성형품의 지름과 거의 같지만 여러 단계의 공정을 거치면 지름의 3배 깊이까지도 가능하며, 0.1mm 이하의 박판도 두꺼운 판 사이에 끼워 성형할 수 있다. Rubber pad의 두께는 보통 성형 깊이의

1.5~2배이고, 보호판을 덮어 굽힘 자국이 생기는 것을 방지하기도 한다. 성형압력은 보통 35~70MPa이며, 높은 압력에 견디도록 press 구조물은 미리 인장력을 가한 강선을 둘러 감기도 한다.

### 2.2 Fluid forming<sup>(1)</sup>

Fluid forming은 단순히 rubber pad만을 사용하는 Guerin process나 Marform process보다 높은 압력으로 성형하기 위하여 수압이나 유압을 rubber pad에 가하는 진보된 기술이다. 이 기술은 두꺼운 rubber pad 뒷면에 놓인 고무 주머니에 유체를 주입하여 높은 압력을 가하는 방식과 얇은 천연고무 격막 후면에 유체를 공급하여 압력을 가하는 방식이 있다 (Fig. 3 참조). 전자는 비교적 얇은 성형품, 후자는 보다 깊고 복잡한 형상의 성형품 제조에 사용되며, 최대 성형 깊이는 약 425 mm이다.

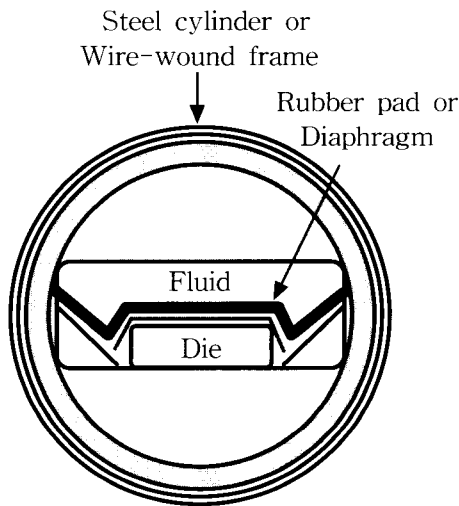


Fig. 3 principle of fluid forming

전자의 경우 금형의 빈공간에 보조 rubber pad를 덧대면 rubber pad의 변형량을 줄이고, 압력을 더욱 고르게 가할 수 있다. Rubber pad는 경도가 Durometer A35인 연성이고, 내마모성 pad 뒷개로 보호되며, 유체 주머니는 padneoprene이나 polyurethane으로 만든다. 또한 용기 모양의 blank 내부에 유압 주머니와 결합된 rubber pad를 넣고 압력을 가하면 원통형이나 원뿔형도 제조할 수 있다.

전후자 모두 필요에 따라 약 300℃에서 온간 성형도 할 수 있으며, 이 경우 rubber pad나 격막 위에 내열 보호 덮개가 사용된다. 최대 성형압력은 유체주머니를 이

용한 전자의 방식이 140MPa, 격막을 이용한 후자의 방식은 200MPa이다. 이동 출력이 가능한 작업대의 면적은 보통 전자가 500×1,270~1,270×4,170mm이고, 후자는 700×2,000~2,000×5,000mm이며, 다수의 제품을 동시에 성형할 수도 있다. 성형주기는 단순 rubber-pad forming보다 약간 길어서 전자가 1~2 분, 후자가 1~3 분이다. 금형은 Elasto-forming과 마찬가지로 전후자 모두 균일한 정수압이 가해지기 때문에 저렴하고 가공이 쉬운 경질의 나무나 고분자소재, 금속 등을 사용할 수 있다. 그러나 이러한 Fluid forming도 Elasto-forming처럼 주름이 발생하기 쉬워 주름을 펴주는 후처리가 필요한 경우가 많다.

상기의 기술을 더욱 개량하여 유체의 압력을 성형 공정에 맞추어 제어하고, 경우에 따라서는 금형을 상하로 이동하면서 압력을 적절히 변화시키는 다단계 가압 성형 기술이 근래에 개발되어 이용되고 있다. 이 때 유압은 유체를 punch로 누르거나 금형을 유체 쪽으로 이동시켜 발생시킨다. 두 단계로 나누어 성형할 때 Fig. 4처럼 punch로 금형을 누르는 1단계의 예비성형은 70MPa 이하의 저압을 가하고, 금형을 유체 속으로 이동시켜 정수압을 가하는 2단계의 본성형은 약 100MPa의 고압을 가한다. 그러면 금형 측면도 충분한 압력을 받아 성형이 균일하게 이루어지므로 복잡한 형상이나 폭에 대한 깊이의 비가 큰 형상도 성형이 가능하다. 성형 주기는 최대 50초인 경우도 있지만 대부분 15~20초이며, 빠른 경우에는 8초로서 Matched die forming에 근접하여 대량생산도 가능하다.

이처럼 fluid forming 기술은 지금까지 많은 발전을 거듭하여 현재 우주항공 뿐만 아니라 자동차 분야에서도 다양한 형상의 판재 성형이나 deep drawing에 활용되고 있다.

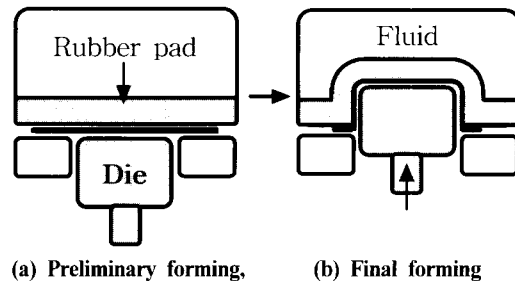


Fig. 4 Two-stage fluid forming process

### 2.3 Hydro-forming<sup>(1-2)</sup>

Hydro-forming은 보통 고무 pad를 사용하지 않고 유

체만으로 압력을 가하여 성형하는 기술로서 Hydromechanical forming이라고도 한다. Hydromechanical forming 기술이 나오기 전에는 Fluid forming이 Hydro-forming으로 불리기도 했다. 고무 pad나 격막 등을 사용하지 않기 때문에 유체는 Fluid forming과는 달리 보통 물이 사용된다. 수압은 최근의 Fluid forming처럼 2~3 단계로 나누어 예비 성형 단계에서는 저압을 가하고, 최종 성형 단계에서는 고압을 가하여 성형장치에 무리가 가지 않으면서 성형이 균일하게 이루어지도록 한다.

Fig. 5는 2단계로 판재를 성형하는 능동형의 Hydro-forming공정과 금형 배열 구조를 보여준다.<sup>(2)</sup> 여기서 유체는 matched die를 대신하여 성형용 판재에 압력을 가해 부풀어오르게 하고, 마지막으로 금형이 이동하여 판재가 금형에 완전히 밀착되게 가압함으로써 성형이 완료된다. 이 때 판재의 변형은 matched die성형에서보다 균일하게 진행되어 성형성이 개선되고, 가공 후 제품의 두께가 균일하며, springback이 적어 정밀도가 높다.

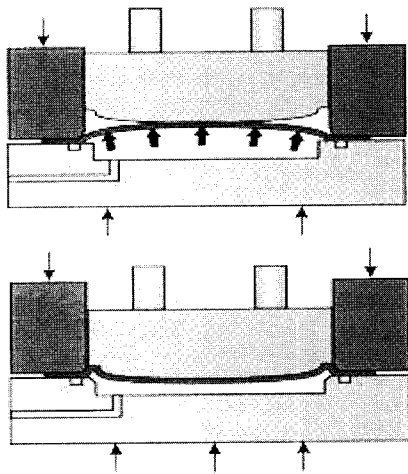


Fig. 5 Active hydro-forming process<sup>(2)</sup>

한편, 판재를 두 개 겹쳐 양 옆을 용접한 다음 그 사이로 수압을 가하여 부풀어오르게 함으로써 판 모양의 복잡한 형상을 성형하는 기술도 있다. 이 경우에도 보통 판재를 부풀리는 단계와 부풀어 오른 판재를 금형으로 눌러 높은 압력을 가하는 2~3 단계의 과정을 거쳐 성형한다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 부풀어 오른 판재를 금형으로 가압할 때 판재 측면은 구속을 하지 않고 상하 양 방향만 구속하는 방식과 (Fig. 6-a), 측면도 금형으로 구속하는 방식이 있으며 (Fig. 6-b), 처음부터 상하 금형을 닫은 상태에서 판재를 부풀리는 방식 (Fig.

6-c)이 있다. Hydro-forming기술은 최근 자동차의 sub frame, side rail, dash panel, exhaust manifold 등의 제조에 이용하고 있으며, 특히 subframe과 같은 자동차 구조물을 일체형으로 제조하는 데 유용하다.

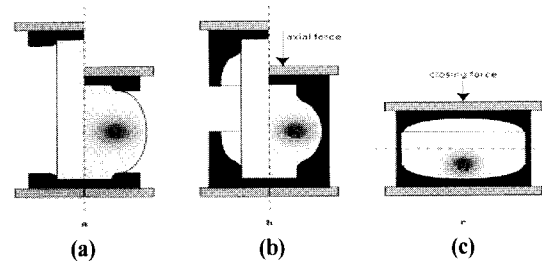


Fig. 6 Process variant of hydro-forming  
(a) free forming (b) tool-dependent transverse die  
(c) tool-dependent longitudinal die<sup>(2)</sup>

2.4 Blow forming<sup>(3)</sup>

Blow forming은 Fig. 7과 같이 가열된 금속 판재에 기체로 압력을 가하여 성형하는 기술로서 초소성 성형 (SPF: Superplastic forming) 기술 중 단조방식의 bulk재 SPF에 대응한 sheet SPF 방식 중 하나다. 성형용 금속 판재는 보통  $0.7 \sim 0.9T_m$ (녹는점)의 고온에서 300~3,000%의 뛰어난 연신율을 나타내는 초소성 재료가 사용된다. 따라서 성형한계가 매우 높아 상당히 복잡한 형상이라도 단공정으로 일체형 성형이 가능하며, 제품 디자인이 자유롭다. 특히 기존의 다른 성형법으로는 성형한계가 매우 낮은 plane strain 이나 biaxial stretching 상태에서 성형성이 매우 우수하다. 초소성 재료는 상온에서는 강도가 일반소재와 거의 동일하지만 성형온도에서는 변형응력이 일반 소재의 50% 이하이기 때문에 보통 5~30MPa의 기체압력으로도 판재 성형이 가능하다. 가압 기체는 산화방지를 위해 불활성 기체인 질소가 주로 사용되며, 성형압력은 시간에 따라 적절히 제어되어야 한다.

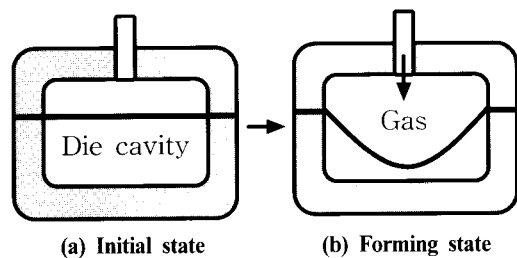


Fig. 7 Cavity type blow forming process

성형 방식은 Fig. 7과 같은 오목성형과 Fig. 8과 같은 볼록성형이 있다. 전자는 깊이가 얇은 panel형 성형품 제조에, 후자는 폭에 비해 깊이가 큰 용기형 성형품 제조에 주로 사용된다. 자유 팽창된 판재의 두께는 늦게까지 변형되는 부분이 가장 얇고, 성형 초기단계에서 금형 벽과 접촉하는 부분은 두껍다. 따라서 오목성형에서는 성형품의 바닥 모서리가 가장 얇고 볼록성형에서는 성형품의 입구 부분이 가장 얇다. 두께를 균일하게 만들기 위해서는 미리 두께 분포를 조절한 판재를 사용하거나 처음에는 금형 반대 방향으로 부풀린 다음 다시 금형 방향으로 부풀리는 2단 성형법을 사용한다. 특히 볼록성형에서는 1단계 성형하여 판재 팽창으로 생긴 빈 공간으로 금형을 이동시킨 다음 2단계에는 1단계와는 반대 방향으로 기체를 주입하여 최종 성형을 하면 상당히 균일한 두께 분포를 얻을 수 있으며, 이로 인해 성형한계가 오목성형의 경우보다 개선된다.

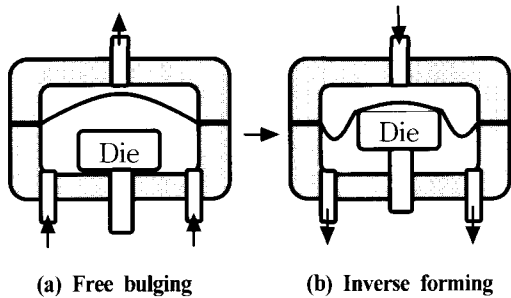


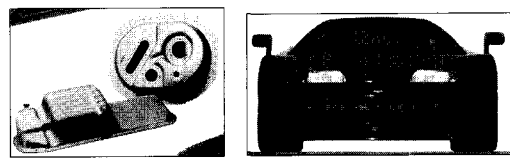
Fig. 8 Bubble type blow forming process

초소성은 과거 구 소련에서 본격적인 연구가 시작되었으나 성형기술의 상용화는 1970년대 초에 영국의 Superform Aluminium사가 처음으로 성공하였고, 이후 미국의 Superform USA사, Rockwell International사, Pratt and Whitney Aircraft사, 일본의 SKY Aluminum사, NAS-Murdock사, 프랑스의 Alstom사, 중국의 항공공예연구소 등이 Fig. 9~12와 같이 우주항공, 자동차, 전기전자, 의료기기, 건축, 철도차량 등 광범위한 분야에 활용하고 있다. 특히 근래 초소성 재료의 우수한 확산접합(Diffusion bonding) 특성을 이용하여 복잡한 구조물을 일체형으로 접합 성형하는 SPF/DB 기술의 발달로 Fig. 13과 같이 다층 구조물을 저렴하게 제조할 수 있게 되었다. 이러한 일체형 성형은 제조단가 뿐만 아니라 제품의 무게도 최대 40% 까지 줄이며, 접합부의 감소로 외관이 미려하고, 피로특성 등 내구성이 개선되는 효과도 있다. 따라서 이 기술은 미국 등 선진국이 전투기와 폭격기 등 방위산업의 필수기술로 채택하고 있다.



(a) Air intake skin (b) Access door

Fig. 9 SPF products for aircraft<sup>(4)</sup>



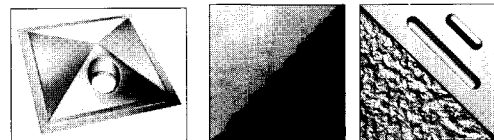
(a) Oil pan & cover (b) Bugatti EB110

Fig. 10 SPF products for automobile<sup>(4)</sup>



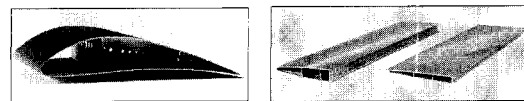
(a) Electronic (b) Electric (c) Medical

Fig. 11 SPF for electronic & medical application<sup>(4)</sup>



(a) Tile (b) Panel

Fig. 12 SPF products for architecture<sup>(4)</sup>



(a) Wing (b) Multi-layer

Fig. 13 SPF/DB products for aircraft

초소성 재료는 결정립을 10 $\mu$ m 이하로 미세하게 만든 철강, 스테인레스강, Al 합금, Mg 합금, Ti 합금 등 수십 종이 있으며, 그 외에 드물게는 세라믹과 금속간화합물도 있다. 금속계 초소성 재료 중에서는 특히 Al 합금과 Ti 합금이 각각 민수용과 군수용으로 많이 사용되고 있다. 또한 slip system이 3개뿐이어서 상온 연신율이 대부

분 10% 이하일 정도로 상온연성이 나쁜 Mg 합금도 초소성 재료로 유망하다. 더구나 Al과 Mg은 영률이 각각 steel의 약 1/3과 1/5에 불과하기 때문에 통상적인 성형으로는 성형 후 steel의 3~5배에 달하는 탄성회복(spring back) 현상으로 인해 성형품의 형상이 뒤틀리고 치수 정밀도가 떨어지는 문제점이 있으나 Blow forming에서는 이러한 springback이 전혀 없기 때문에 성형품의 치수 정밀도가 매우 높다. 다만 Al 합금 등 일부 재료는 성형 중 재료 내부에서 기공이 발생하여 성형품의 특성이 저하될 가능성이 있는데, 이 문제는 재료 뒷면에 약간의 압력을 가하여 성형하면 개선된다.

성형속도는 보통  $10^{-3} \sim 10^{-1}$ /초로서 재료의 결정립이 미세할수록 빠르며, 현재 분말야금, 비정질, 나노기술을 이용한 고속 성형소재가 개발되고 있다. 그러나 성형속도가 지나치게 빠르면 성형압력 제어가 어렵게 된다. 성형시간은 재료에 따라 큰 차이를 나타내어 5초~15분이 걸리며, 가열시간까지 포함하면 보통 5분~30분이다. 그러므로 이 기술은 중소량 생산에 적합하지만 크기가 작은 제품은 동시에 여러 개를 성형할 수 있으므로 대량생산도 가능하다. 성형 온도는 Mg 합금이 250~450°C, Al 합금이 400~550°C, Ti 합금이 750~950°C 스텐레스강은 850~1100°C이다. 성형 압력이 낮고 금형에 정수압이 가해지기 때문에 금형은 고온강도가 성형재료보다 높으면 된다. 따라서 금형재료는 Ti 합금이나 스텐레스강처럼 성형온도가 높은 경우에는 고강도 스텐레스강이나 세라믹 등이 사용되지만 성형온도가 낮은 Al 합금과 Mg 합금 등을 성형하는 경우에는 가공이 쉽고 값싼 주철, 보통강, Al 합금 등이 사용되어 금형비가 일반 금형의 1/10 이하이다. 그러므로 Al 합금과 Mg 합금의 Blow forming은 금형비가 원가에서 차지하는 비중이 큰 다품종 소량생산에 특히 유리하다. Blow forming 기술이 우주항공, 스포츠카, 고급차, 특수차량, 전기차, 철도차량, 건축내외장재, 특수전기전자제품, 의료장비, 방위산업, 스포츠용품 등에 특히 많이 쓰이는 것은 바로 이러한 이유에 기인한다.

상용 초소성 Al 소재는 고온신율이 약 300%인 A5083 합금과 1000% 이상인 2000계 합금 (예: Alcan사의 Supral) 및 8000계 Al-Li 합금 등이 있고, 상용 Mg 합금도 나오고 있다. 또한 성형 시스템은 프랑스의 Alstom사와 미국의 Superform사가 주문제작하고 있으며, 성형 프레스의 용량은 미국 등 선진국에서 1970년대 300톤, 1980년대 600톤 등 꾸준히 대형화되고 있다. 새로운 성형기술로서 최근 난가공성 재료를 초소성 재료로 눌러서 균일하게 성형하는 diaphragm forming 기술도 개발되었다.

우리 나라는 Fig. 14와 같이 2001년 KIST가 현대티타늄과 함께 인공위성용 Ti 연료탱크 제조에 처음으로 Blow forming 기술을 실용화하였다.

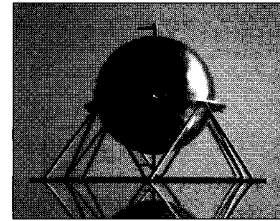


Fig. 14 Satellite fuel tank made by blow forming

### 3. Dieless forming

#### 3.1 Multi-point forming

무금형 성형(Dieless forming)은 금형을 전혀 사용하지 않고 성형하는 기술로서 오래 전부터 조선과 항공산업을 중심으로 일본과 미국 등이 개발을 염원해 온 기술이다. 이 기술의 초기 모델인 Fig. 15의 제1세대형은 수많은 강선이나 강봉을 상하 양면에서 미리 원하는 형상으로 마주보게 배열하여 금형 대용으로 사용하였다.<sup>(5)</sup> 이 방식은 Multi-Point forming (MPF), Flexible die forming, Reconfigurable die forming, Discrete die forming 등 다양한 이름을 가지고 있다.

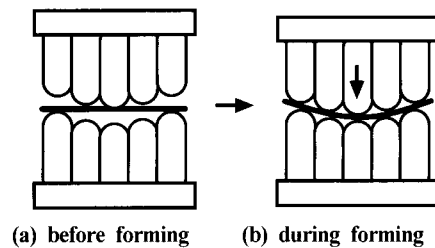


Fig. 15 Principle of multi-point forming

이 방식은 1960~1980년대 일본에서 조선사를 중심으로 선박용 후판 성형의 자동화를 위해 많이 연구되었으며, 불완전하지만 실용화도 추진되었다.<sup>(6)</sup> 미국은 1980년에 Boeing사가 Fig. 16과 같이 모터로 punch의 위치를 제어하는 성형장치의 특허를 얻고<sup>(7)</sup>, 1980년대 중반 이후 MIT가 집중적으로 연구해오고 있으며<sup>(8)</sup>, 최근 Northrop Grumman 사 등이 항공기용 박판 성형의 실용화를 추진하고 있다.<sup>(6,9)</sup> 한편, 중국은 최근 철도차량 분야에 실용화하였고, 자동차 분야에도 실용화를 시도하고 있다.<sup>(6)</sup>

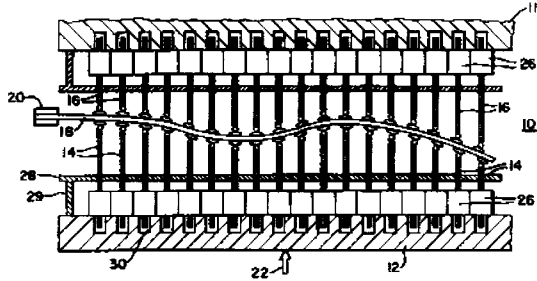


Fig. 16 Multi-point forming apparatus of Boeing Company (US patent 4212188)<sup>(7)</sup>

이러한 방식은 성형하려는 제품의 형상에 맞추어 붓을 재배열하면 얼마든지 재사용이 가능하므로 일단 장비를 갖추면 더 이상 금형비가 들지 않는 이점이 있다. 따라서 우주항공이나 특수차량, 건축내외장재처럼 금형을 자주 바꾸거나 조선택처럼 수작업으로 성형하는 다품종 소량생산 분야뿐만 아니라 일반 승용차처럼 대량생산을 요하는 분야에도 활용할 수 있다.

그러나 높은 정밀도를 요하는 분야에서는 수많은 선재나 붓재를 사용해야 하므로 이를 일일이 재배열하는데 상당한 시간이 걸린다. 재배열 시간을 줄이기 위해서는 pin 수를 줄여야 하지만 그 숫자가 줄수록 성형정밀도가 떨어질 뿐만 아니라 matched die와 마찬가지로 성형 초기에 성형판재와 먼저 접촉하는 곡면 돌출부에서 국부적으로 큰 힘과 변형이 집중되기 때문에 접촉부에 자국이 생기거나 그 주위에 주름이 발생하기 쉽다. (Fig. 15 참조) 따라서 때로는 pin과 소재 사이에 탄성이 있는 고무판이나 강판을 끼워 성형소재의 표면결함을 방지하기도 한다.<sup>(5,10)</sup>

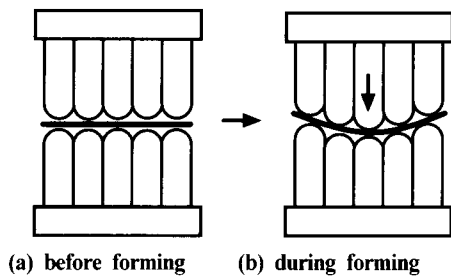


Fig. 17 Active multi-point forming

이러한 문제점을 극복하고자 일본의 Hitachi 제작소는 Fig. 17과 같이 성형하기 전에 모든 강봉이 소재와 접촉하도록 나란히 배열시키고, 성형이 시작되면 각각의 붓을 움직여 최종 형상을 만들어 가는 새로운 기술을 고안

하여 1990년대 중반에 후관강의 3차원 곡면 성형용으로 실용화하였다.<sup>(6)</sup> 이 방식은 1980년대까지 연구된 제1세대 형보다 훨씬 진보된 기술로서 각각의 붓에 위치제어 장치가 부착되어 독립적으로 움직이므로 다양한 곡면을 신속하게 성형할 수 있을 뿐만 아니라 성형결함이 적고, 성형한계가 높은 장점이 있다.

그러나 제2세대형은 Fig. 18에서 보는 바와 같이 성형 전 판재가 평탄한 상태에서는 모든 상하 붓의 간격이 동일하고, 상하 접촉점이 수직선상에서 서로 일치하지만 판재가 성형되기 시작하면 수평면을 제외한 모든 경사면에서 상하 붓과 판재의 접촉점이 동일 수직선상으로부터 벗어나 서로 어긋나게 되고, 더욱이 그 위치와 간격이 판재가 성형되는 동안 3차원 공간에서 계속 변한다. 따라서 성형 중 연속적으로 변하는 상하 붓의 위치와 간격을 정확하게 제어하기 위해 고도의 기술이 필요하다. 그러나 성형 중 판재의 두께변화가 있고, 또 이러한 두께변화가 위치에 따라 다르다면 이를 미리 정확하게 예측하여 상하 붓의 간격을 정밀하게 제어하는 것은 어렵다.

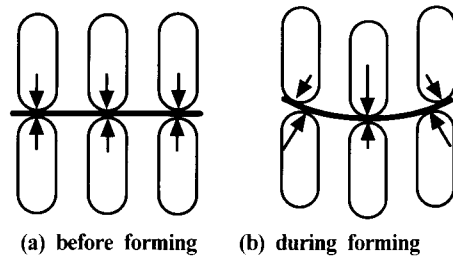


Fig. 18 Change in contact point during MPF

### 3.2 Fluid dieless forming

기존 MPF 장치의 문제점을 극복할 수 있는 새로운 무금형 판재성형 시스템이 최근에 KIST에서 고안되었으며,<sup>(11)</sup> Fig. 19는 그 기본 개념도이다. 새로운 시스템의 가장 큰 특징은 상하 양쪽에 붓을 배열한 기존 시스템과는 달리 한 쪽 붓은 그대로 두고, 다른 쪽은 고분자 탄성체나 유체로 대체한 것이다. 고분자 탄성체나 유체는 형상변화가 자유롭기 때문에 한쪽 붓의 움직임에 따라 위치가 자유로이 변하면서 소재에 압력을 가할 수 있다. 특히 유체는 Pascal의 원리에 의해 압력을 사방에 골고루 전달하여 소재 전면에 균일한 압력을 가할 수 있고, 외부에서 압력을 마음대로 조절할 수 있는 이점도 있다. 강도가 높거나 두꺼운 판재를 성형하는 경우에는 고분자 탄성체나 유체의 일부를 금속 등 강도가 높은 물질로 대체한 보조대를 이용할 수도 있다.

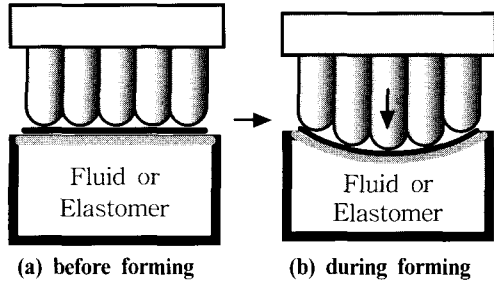


Fig. 19 Fluid dieless forming technology (KIST: US patent 6151938)<sup>(11)</sup>

신 시스템의 또 다른 이점은 기존 방식에 비해 붓의 수가 절반밖에 되지 않기 때문에 기존 설비의 가장 큰 문제점 중의 하나인 시스템 가격이 크게 절감되는 것이다. 뿐만 아니라 붓의 측면에 정수압이 가해지도록 하여 성형 중 경사면에서 전단력에 의해 붓이 휘어지는 문제를 방지할 수도 있다. 또한 고분자 탄성체나 유체로 대체된 면은 소재와 면접촉을 하므로 변형에 필요한 힘이 소재 전면에서 골고루 분산되어 성형 자국이나 주름과 같은 결함이 잘 생기지 않는다. 더구나 소재 양면의 붓을 시간과 위치에 따라 변화시켜야 하는 기존의 MPF 장치와는 달리, 새로운 시스템은 고분자 탄성체나 유체가 항상 소재의 변형에 따라 함께 움직이므로 한쪽 면의 붓의 위치만 제어하면 되기 때문에, 위치 제어가 단순, 용이하고, 높은 성형 정밀도가 얻어질 수 있다.

한편 새로운 장치는 금형을 사용한 성형에도 효과적으로 이용될 수 있다. 이 때 금형은 matched die가 아니라 single die이므로 비용이 절감되고, 제작기간이 단축되는 효과가 있다. 이것은 기존의 Elasto-forming이나 Fluid forming 및 Hydro-forming 방식과 유사하지만 신 시스템에서는 다수의 금형을 동시에 부착하여 개별적으로 작동시킬 수 있으므로 대형의 복잡한 형상도 한번에 성형하거나 한꺼번에 많은 수의 제품을 생산할 수 있다. 그 밖에 새로운 시스템은 deep drawing도 가능하므로 기존의 MPF로는 불가능한 고풍상비(깊이/폭)도 얻을 수 있어 다기능, 다목적으로 활용할 수 있다. 또한 본 개발 장치는 다수의 붓을 blankholder로 사용하여 이방성 판재의 주름발생을 방지하기 위해 위치에 따라 blank 지지압력을 적절히 변화시키기도 용이하다.

#### 4. 결론

금속판재 성형기술은 종래의 matched die법과 수작업법을 탈피하여 점차 금형을 줄이거나 전혀 사용하지 않

고도 정밀하고 신속하게 성형하는 방향으로 진보하고 있다. 그 결과 1980년대 이후에는 single die와 유체를 이용한 성형기술이 상용화되었고, 최근에는 무금형 성형기술이 실용화되기 시작하였다. Matched die 성형에 비해 유체를 이용한 single die 성형은 생산성이 과거에는 1/10 이하였으나 점차 기술이 진보하여 지금은 거의 대등한 수준까지 근접하였다. 따라서 이 기술은 항공 등 다품종 소량생산 분야 외에도 자동차 등의 대량생산 분야로 활용분야가 확대되고 있다. 다수의 강봉을 이용하는 무금형 성형기술은 초기의 고정 배열 방식에서 시작하여 능동제어형 방식으로 발전해 오고 있으며, 앞으로는 유체 성형과 결합된 새로운 무금형 성형기술의 개발이 기대된다. 무금형 성형기술의 실용화는 조선, 항공, 철도차량 분야에서 시작되었으나 머지 않아 자동차 분야에도 가능하리라고 예상된다.

#### 참고 문헌

- (1) Semiatin, S., 1988, "Metals Handbook 9th ed., vol.14, Forming and Forging", ASM, pp. 605~615.
- (2) Schuler, "Metal forming handbook", 1998, Springer, Berlin, Germany, pp. 188~193, 405~432.
- (3) Hamilton, C. H., Ghosh, A., 1988, "Metals Handbook" 9th ed., Vol.14, ASM, pp. 852~873.
- (4) "Brochure of Superform", 2000, UK, USA.
- (5) Li, M., Liu, Y. Su, S., Li, G., 1999, "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 87, pp. 277~280.
- (6) Li, M., 1996~2002, Jilin University, China, Private communication.
- (7) Pinson, G., 1980, "Apparatus for forming sheet metals, US Patent 4212188.
- (8) Walczyk, D., Hardt D., 1998, "Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming" J. Manufacturing Systems, Vol.17, p. 436.
- (9) Walczyk, D., Im, Y., 2000, "A hydraulically-actuated reconfigurable tool for flexible fabrication: Implementation and control" Trans. AIME, Vol. 122, pp 562~568.
- (10) Eigen, G. F., 1992, "Smoothing method for discrete die forming", MIT Master thesis.
- (11) Park, J., Hong, Y., Lim, S., 2000, "Dieless forming apparatus", US Patent 6151938.