

다양한 점진성형의 성형방법과 메커니즘에 관한 고찰

박진기¹ · 김진재² · 박춘달³ · 김봉준⁴ · 김영석^{#5}

1. (주)테라테크노스
2. 경북대학교 기계공학과 대학원
3. 대구기계부품연구원
4. (주)경창산업
5. 경북대학교 기계공학부

A Review of Various Incremental Forming Processes and Mechanisms

J. G. Park, J. J. Kim, C. D. Par, B. J. Kim, S. H. Kim, Y. S. Kim

1. TERA Technos Co.,Ltd.
2. Graduate School, Kyungpook National University
3. Daegu Mechatronics & Materials Institute
4. Kyung Chang Industrial Co.,Ltd.
5. School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

1. 서 론

점진성형(incremental forming)의 대표적인 성형기술인 스피닝(spinning)은 기계가공에서와 같은 절삭 칩(machined chip) 발생이 없는 가장 오래된 금속 판재 성형 기술이다[1].

점진성형은 작은 성형하중, 간단한 성형공구를 이용한 성형공정의 유연성, 비교적 복잡한 형상의 성형, 국부적 변형을 통한 성형성(formability) 향상 등의 장점이 있다. 이 점진성형 기술은 최근 들어 알루미늄, 마그네슘과 같은 경량 난성형재의 성형과 자동차 프로토타입 성형에 많이 적용되고 있다. 이에 따라 스피닝, 플로우 포밍(flow forming), 점진적 판재 성형(incremental sheet forming, ISF)등과 같은 대표적인 점진성형 가공공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

스피닝은 Fig. 1[2]에 나타낸 것과 같이 제품의 형상을 가지는 멘드렐(mandrel)과 성형 소재인 디스크

(disk)를 회전 축에 고정시킨 후 고속 회전을 시킨 후에 멘드렐과 같이 회전하는 디스크에 성형 롤러(roller)가 멘드렐 표면을 따라 이동하면 디스크가 변형하며 멘드렐과 같은 형상으로 성형된다. 이때 멘드렐은 항상 축대칭 형상이어야 한다. 공구가 툴패스(tool pass)를 따라 이동할 때 소재는 국부적으로 변형을 하며 성형된다. 이 점이 딥 드로잉과 같은 일반적인 프레스 성형과 비교하여 가장 큰 차이점이며 스피닝의 장점이다. 국부적 접촉과 변형으로 인해 성형하중이 줄어들 뿐만 아니라 소재의 성형성도 향상시킬 수 있어 프레스 성형에서 성형하기 어려운 복잡한 형상도 성형할 수 있는 특징이 있다. 더욱이 스피닝은 높은 기계적 물성과 우수한 표면 품질을 확보할 수 있는 성형공법으로 알려져 있다.

스피닝의 기원은 고대 이집트 시대의 수동으로 물레를 굴러 도자기를 제작하던 때로 거슬러 올라간다. 이 기술은 10세기 즈음에 중국으로 건너갔다가 에드워드 3세 때에 영국으로 전해지게 된다[1].

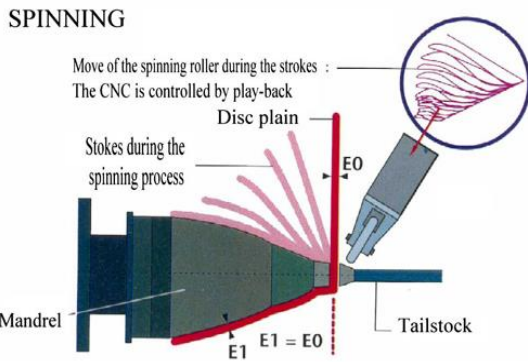


Fig. 1 Spinning process controlled by CNC [2]

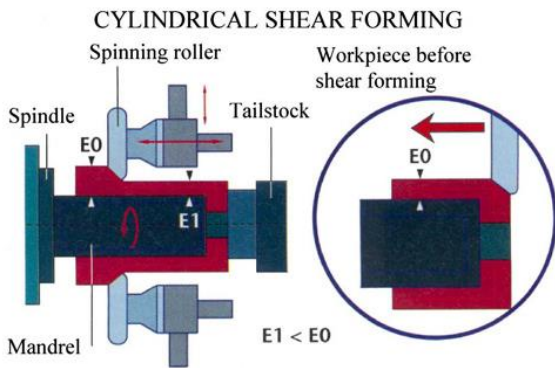


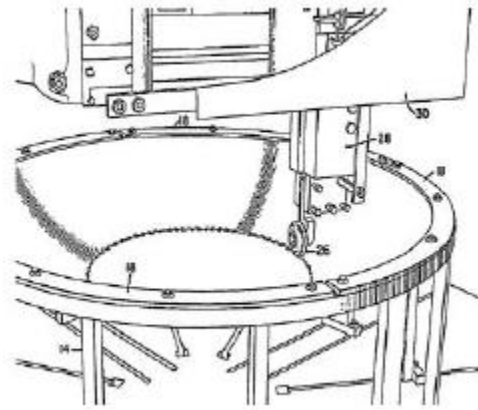
Fig. 2 Flow forming process of a cylindrical shape [2]

이후 스피닝은 찻잔이나 그릇 등을 제작하는 기술로 발전하고[3] 20세기 들어서는 공학 분야 보다는 금속공예 분야에 널리 적용되고 있어 공예기술로 여겨지고 있다.

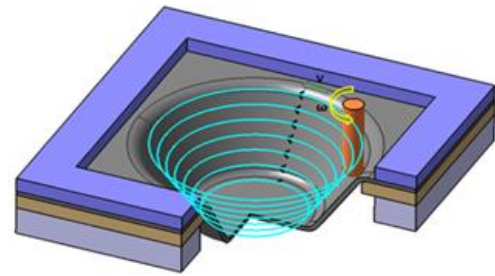
이와 같이 스피닝 기술은 수치화되거나 체계화되지 않고 작업자의 기술수준에 따라 제품의 품질이 달라지기 때문에 치수정밀도도 중요하지 않은 생필품이나 공예품 제작에 주로 활용되었다.

그러나 20세기 후반, 선반 등 공작기기가 대형화, 자동화되면서 제품의 치수 정밀도 확보가 가능해졌고, 두께가 비교적 두꺼운 제품을 성형할 수 있게 되면서 우주 항공분야 등에 적극적으로 도입되었다 [3]. 특히 가스 터빈 엔진과 로켓의 선단, 접시 안테나 성형에 주로 적용되었다. 또한, 기계화 및 자동화된 스피닝 기술은 새로운 수요자들의 요구에 발맞추어 ‘플로우 포밍(flow forming)’ 이라는 기술로 진화한다.

플로우 포밍은 Fig. 2와 같이 디스크 금속 블랭크(blank)(a)와 중공형 또는 튜브 형태의 금속 소재를



(a)



(b)

Fig. 3 Incremental sheet forming processes, (a) US patent No.3316745 [6] and (b) tool path

(b) 멘드렐에 끼우고 멘드렐을 회전시키며 소재의 외경에 1개 이상의 롤러가 접촉하여 소재 표면을 가공하는 기술이다[2]. 스피닝과 가장 큰 차이점은 소재의 두께가 변한다는 것이다. 성형기계의 대형화, 자동화로 인해 소재의 두께를 변화시키기에 충분한 성형하중과 롤러의 자유도를 확보하면서 다양한 소재의 플로우 포밍이 가능하게 되었다. 이 기술로 인해 두께 변화 및 복잡한 형상의 성형이 가능해짐에 따라 점진성형이 딥드로잉과 단조(forging)의 대안으로 자리잡고 있다.

스피닝과 플로우 포밍은 간단한 공구를 사용하여 복잡한 경로로 재료를 이동시켜 성형하기 때문에 프레스 성형과 같은 다단성형이 필요 없을 뿐만 아니라 생산 단가를 절감할 수 있다. 또한 소량 다품종 및 특수 부품 제작에 충분한 잠재적 경쟁력을 가진다.

20세기 후반에 비대칭 형태의 제품을 성형하기 위한 점진성형으로 점진적 판재성형이 개발되었다[4,

5]. 스피닝과 플로우 포밍은 공구의 이동이 2차원 평면에서만 이루어지는 반면 점진적 판재성형의 공구는 3차원 공간에서 이동하며 주로 3축 제어 가능한 CNC 머신이나 로봇 팔을 활용하여 성형이 이루어진다. 그래서 점진적 판재성형은 축대칭 형상의 제품뿐만 아니라 축대칭이 아닌 복잡한 형상의 제품도 성형이 가능하다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 점진적 판재성형은 별도의 멘드렐이나 금형없이 블랭크를 고정하고 공구의 이동으로 제품을 성형하는 방식이다[6]. 그래서 일부 연구자들은 금형이 없다고 해서 다이레스(die-less) 성형이라고도 하였다. 정밀 성형을 위해 최근에는 하부에 금형을 놓고 공구가 금형의 등고선을 따라 이동하며 성형을 하는 방식이 주를 이루고 있다. 점진적 판재성형 기술은 앞서 열거한 스피닝과 플로우 포밍의 장점에 제품 형상에 제약을 받지 않는다는 장점을 가지기 때문에 자동차 산업 외에도 의료, 건축 산업 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

본 논문에서는 스피닝, 플로우 포밍, 점진적 판재성형 등의 여러 가지 점진성형에 대해 소개 및 분류하고, 최근 수행되고 있는 연구에 대한 검토를 하여 향후 관련 분야 연구자들에게 좋은 지침이 되고자 한다.

2. 점진성형 머신의 변천

2.1 스피닝 머신

오래 전부터 물레의 회전력을 이용하여 제품을 성형하는 방법에는 도자기 성형과 Fig. 4에서 보는 것과 같이 인력으로 플라이 휠(fly-wheel)을 돌려서 선반에 나무를 장착하고 작대기 공구를 이용해서 절삭하는 기술이 있다[3].

최초의 스피닝 머신은 2차 산업혁명 이후 전기 동력을 이용하여 개발되었다[1]. 이 장비는 선반과 같은 회전하는 구동부에 성형 대상물을 장착하고 금속 막대를 이용하여 제품을 성형하였다. 즉, Fig. 5와 같이 블랭크를 척(chuck)에 장착하여 회전시키고 포밍바(forming bar)를 T-rest의 구멍에 끼운 후 지렛대 원리를 이용하여 블랭크를 가압성형하며 성형이 진행됨에 따라 구멍의 위치를 변경해 가며 최종 성형을 마무리한다. 그 후 더 크고 두꺼운 제품을 성형하기 위해 포밍바의 끝 단에 롤러를 부착하고(Fig. 6) 더 큰 성형하중을 부여하기 위해 복합 레버가



Fig. 4 Wooden spinning lathe with a manually operated flywheel to spin the workpiece [3]

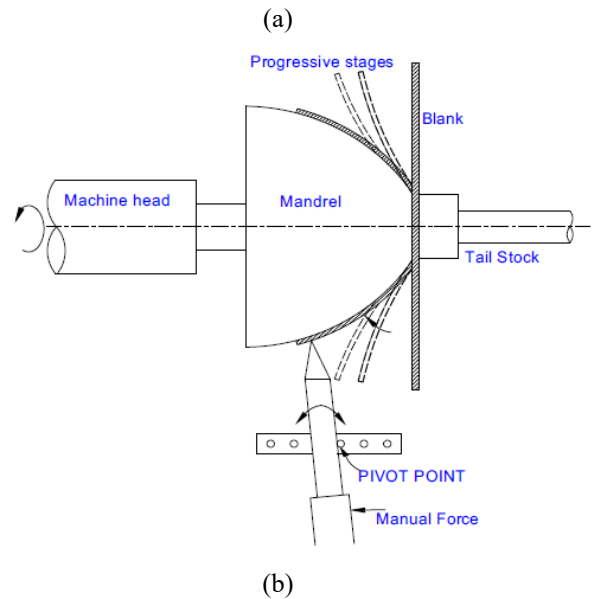
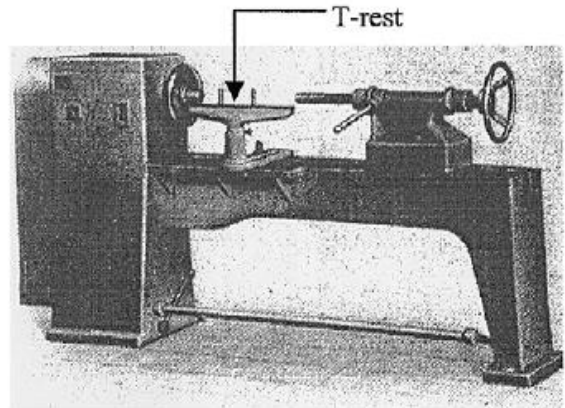


Fig. 5 Traditional type spinning lathe with (a) T-rest and (b) conventional manual spinning process [7]

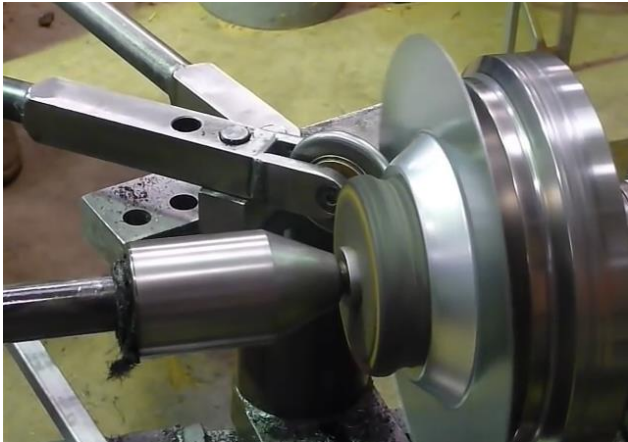


Fig. 6 Spinning demonstration with roller type forming lever and compound lever [7]

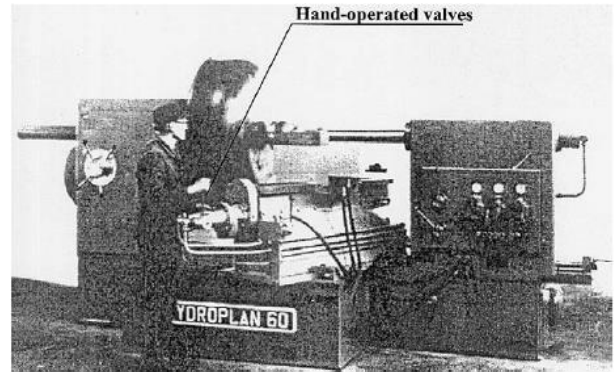
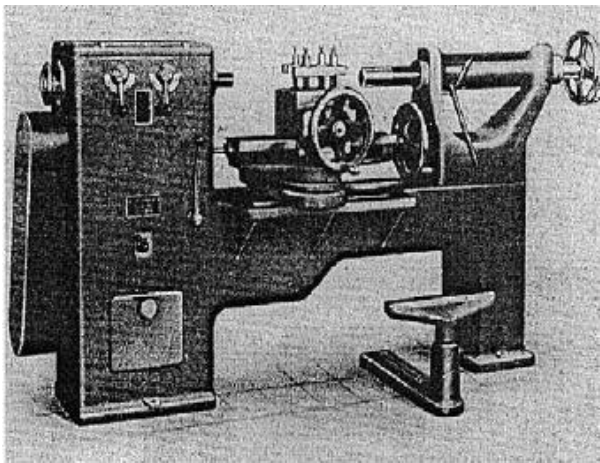
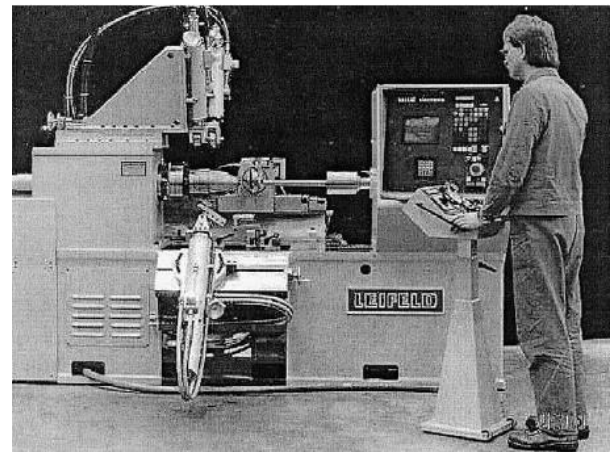


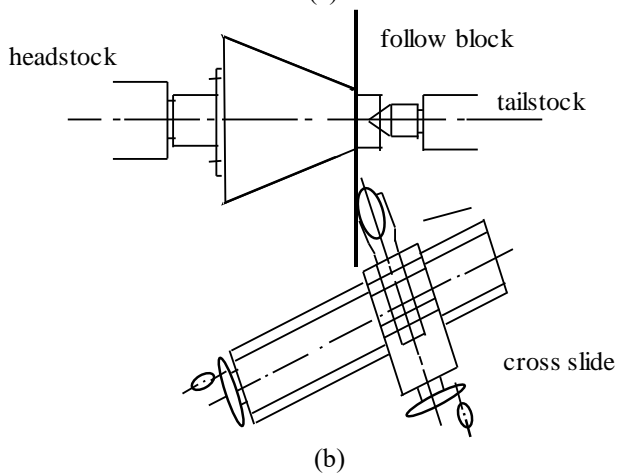
Fig. 8 Hydraulic spinning lathe [7]



(a)



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Spinning lathes with (b) roller tool slide [7]

개발되었다[7]. 이후 더 블랭크의 크기가 커지고 두꺼운 블랭크 성형에 대한 수요가 많아짐에 따라



(b)

Fig. 9 (a) CNC spinning machine and (b) products from spinning [7]

기술자의 인력으로 조작하던 포밍바가 기계적 장치로 발전하였다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 휠을 조작하여 비교적 손쉽고 정밀하게 성형을 할 수 있게 되었다. 이로 인해 압력용기의 끝 단 부 같이 더 두껍고 큰 제품을 성형할 수 있게 되었다.

고강도, 후물(bulk material) 제품 성형의 요구에 따라 1945년에는 처음으로 유압 스피닝 선반이 등장

했다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 운전자는 간단하게 유압 벨브를 조작함에 따라 제품 성형이 가능해졌다. 그러나 큰 작동 하중에 의해 작업의 위험성도 커지면서 수동에 의한 작업에서 자동에 의한 제품 성형 기술이 요구되기 시작했다.

이후 3차 산업혁명으로 컴퓨터 기술이 발달하면서 CNC 스피닝 머신이(Fig. 9(a)) 개발되었다[8]. 이 방식은 성형 공구의 이동에 있어서 큰 유연성을 가져왔으며 기존에 구현하기 어려웠던 복잡한 형상의 성형도 가능하게 되었다. 하지만 가격이 비교적 비싸고 공구의 이동을 프로그래밍 할 수 있는 능력이 추가적으로 요구되었다. 오늘날 대부분의 스피닝 머신은 NC로 제어되고 제품의 형상 및 성형 과정에 따라 공구교환도 가능하다. 또한, 특수 제품에 따라 전용 성형기계도 개발 운용되고 있다. Fig. 9(b) 에 스피닝 머신으로 제작된 제품을 나타내었다.

2.2 플로우포밍 머신

미국의 “DENN” 이라는 회사는 다양한 형태의 스피닝, 플로우포밍 전용 머신을 개발해왔다. 특히, 가장 대중적인 플로우 포밍 제품인 알루미늄 휠(wheel) 성형머신을 출시하였다. Fig. 10에 DENN 사의 머신을 나타내었다.

동 기업은 스피닝과 같은 회전 성형 기술을 단조 성형에 확대 적용하여 Fig. 11 (a)와 같이 회전단조(rotary forge press) 또는 스핀 단조(spin forge) 머신을 개발하였다[9]. 회전단조는 휠 성형의 예비 성형품을 가공하는 전처리 공정으로 활용할 수 있다. Fig. 11(b)는 빌렛(billet)을 회전단조를 이용하여 휠의 예비 성형품을 1차 성형하고 플로우 포밍을 통해 최종 완제품인 휠이 제작되는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 11(c)는 휠 제작 시에 스핀 단조 공정의 자세한 과정을 나타낸 것이다.

국내에서도 플로우 포밍 기술을 이용하여 Fig. 12과 같이 내부에 기어가 형성된 자동차용 변속기 부품을 생산하고 있다. 한편 저압중력 주조된 A357 (Al-Si-Mg) 알루미늄 합금으로부터 자동차 휠을 생산할 때는 주조재와 맨드렐을 150C 정도 가열하여 플로우 포밍이 이루어진다. 이 플로우 포밍에 의해 주조품 내부의 기포 불량을 제거하고 큰 소성변형을 통해 재료의 강도를 향상시키는 부수적인 효과도 있다.



Fig. 10 Flow forming machine [9]

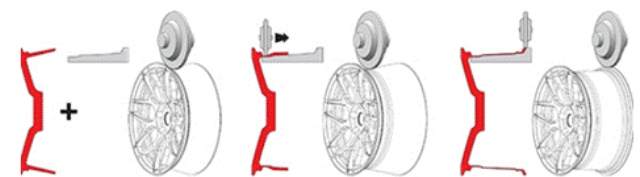
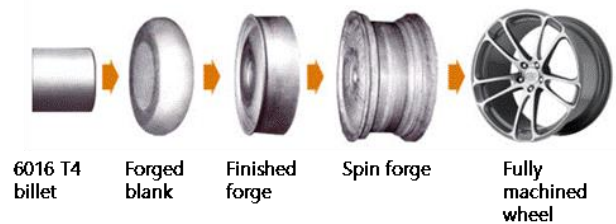
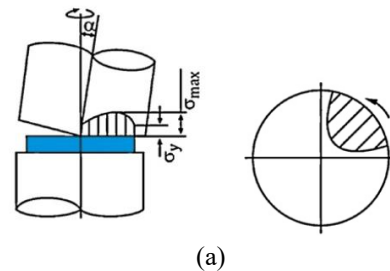
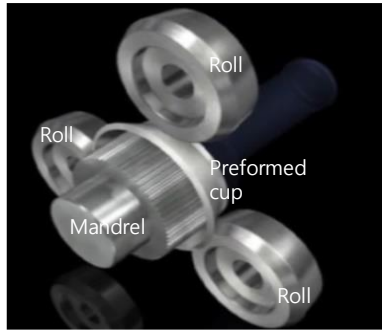


Fig. 11 (a) Rotary forge press concept [9], (b) aluminum wheel of its application and (c) the spin forge process [10]

2.3 점진적 판재 성형 머신

플로우 포밍 머신은 앞서 서술한 플로우 포밍의 정의에서 알 수 있듯이 스피닝 기술에서 파생되어 발전해 왔다. 그러나 점진적 판재 성형은 CNC 머신



(a)



(b)

Fig. 12 (a) The animation for making internal geared clutch parts using flow forming and (b) the real parts

이 개발되고 성형 공구의 이동을 3차원적으로 제어 가능 하면서 발전하게 된다. Fig. 13에서 보는 것과 같이 점진적 판재성형은 스피닝과 달리 제품형상이 반드시 축대칭 형태를 갖지 않아도 성형이 가능하다는 것이다.

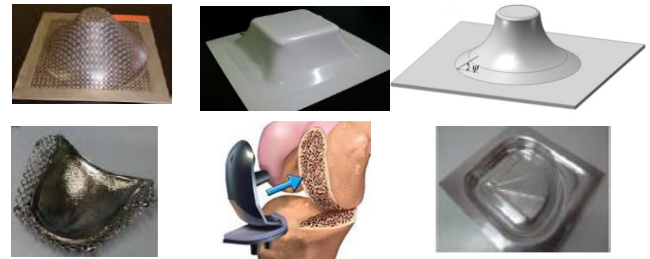
점진적 판재 성형에 대한 Iseki[5] 등의 선구자적 연구 이후 다양한 점진적 판재 성형에 대한 연구들이 수행되었다. 3축 제어 기능이 발달하면서 CNC 뿐만 아니라 산업용 로봇 팔을 이용한 점진적 성형 기술이 보고되었고, 판재를 변형시키기 위한 도구로 금속 공구 대신에 워터젯(water jet)을 이용한 성형방법도(Fig. 14) 연구되고 있다[12~15].

점진적 판재성형이 다양한 분야로 적용이 확대되고 있으며 일본의 Amino에서는 Fig. 15와 같은 점진적 판재 성형 전용 머신을 출시하였으며, 성형기의 크기도 대형화하여 다양한 제품 성형에 대응하고 있다[16].

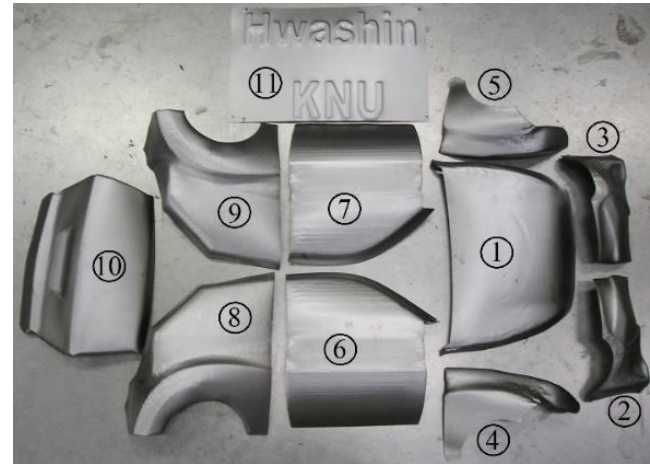
3. 성형메커니즘

3.1 스피닝

일반적으로 전통적인 스피닝은 Fig. 1과 같이 회전하는 블랭크를 변형시켜서 제품을 성형하는데, 변형 구간에 두께 변화가 거의 없는 특징이 있다. 또한,

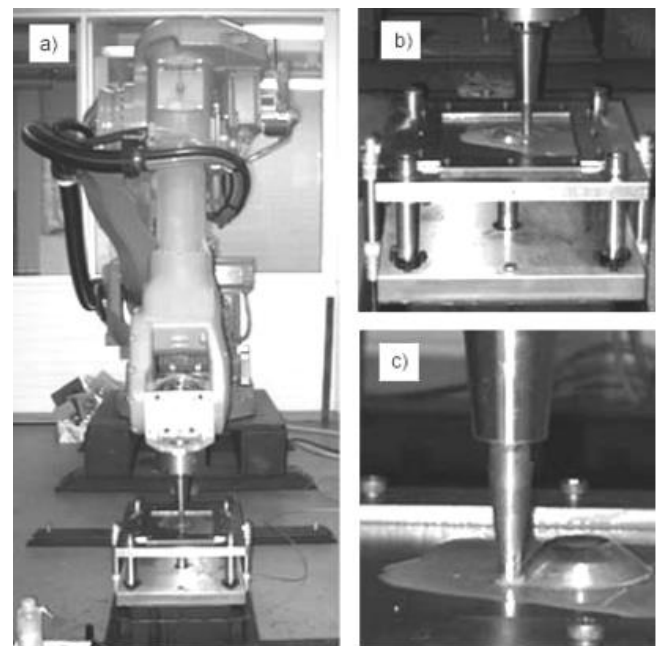


(a)



(b)

Fig. 13 (a) Various applications of ISF – prototype, car part, bio implant etc. and (b) automotive parts [11]



(a)

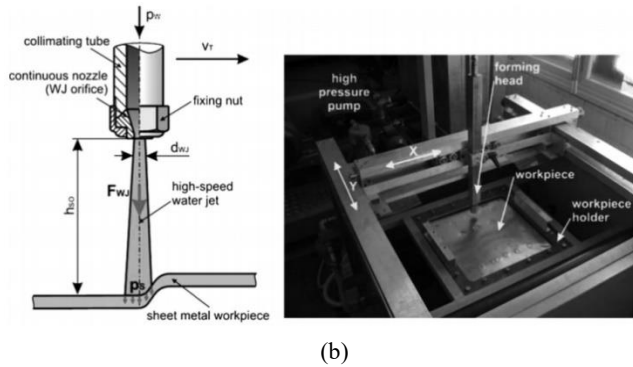


Fig. 14 (a) Incremental sheet forming machines: industrial robot and (b) water jet



(a)



(b)

Fig. 15 Specialized ISF machines built by Amino: (a) one of the smallest machines beginning a positive die and (b) the largest machine with a range of 2.5×6.5m

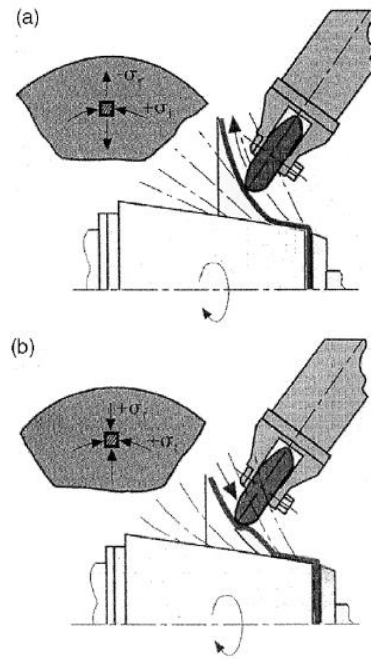


Fig. 16 Development of work zone and material stress during spinning [8]

전통적인 스피닝은 블랭크를 변형시키는 공구가 한 개로 구성되었으나, 최근 블랭크의 두께가 두꺼워지고 강도가 높아 짐에 따라 축대칭 위치에 공구를 추가하여 변형 하중 불균형을 해결하고 블랭크의 두께와 강도 상승에 대응하고 있다.

스피닝 공정에서는 성형공구와 접촉하는 부분에서 국부적 소성변형이 발생한다. 이러한 국부적 소성변형으로 인해 전통적인 프레스 성형보다 매우 작은 하중으로 제품을 성형할 수 있으며 또한 성형 기기들도 소규모로 운용이 가능하다. Fig. 16[8]의 (a), (b)는 성형공구의 두 가지 이동방향에 따라서 발생하는 응력 발생 기구를 나타내었다. 성형공구가 블랭크의 회전 중심축에서 끝 단 방향으로 이동할 때는 반경 방향으로 인장응력, 원주방향으로는 압축응력이 발생한다.

3.1.1 응력과 변형 모드

반경 방향으로 발생하는 인장응력은 블랭크의 두께를 얇게 만들고 원주방향의 압축응력은 블랭크의 두께를 두껍게 만든다. 그러나 성형공구가 블랭크의 끝 단 부에서 중심축으로 이동할 때는 반경 및 원주 방향 모두 압축응력이 발생한다. 이로 인해 성형공구의 진행방향 앞 부분에서 좌굴이 발생하여 Fig.

16의 (b)와 같이 주름이 발생하는 경우도 있다.

Quigley 와 Monaghan[17]는 스피닝 가공 시 발생하는 변형을 측정하여 이론적 계산 값과 비교하였고, 블랭크의 표면에 2.5mm 크기의 그리드 에칭(grid etching)을 하여 가공 후의 변형률을 측정하였다. 또한, 단 패스(single pass) 가공과 다 패스(multi pass) 가공의 변형 거동을 측정하여 이론적 계산 값과 비교하였다. 이 연구에서 회전 중심부에서부터 반경 방향으로 거리가 증가함에 따라 전단 성형(Fig. 2 (a))에 의한 두께방향 변형률과 반경방향 변형률을 계산하였고, 두께를 일정하게 성형하는 스피닝 성형(Fig. 1)에 의한 반경방향 변형률과 원주방향 변형률을 계산하였다.

Fig. 17에 각각 계산된 변형률과 측정 변형률을 비교하여 나타내었다. 단 패스 가공에 대한 측정 결과를(Fig. 17 (a)) 보면 반경방향 변형률이 전단성형의 이론적 결과와 유사하게 진행되다가 성형반경이 증가하면 차이를 보이게 된다. 반면, 다 패스 가공에 대한 측정 결과는(Fig. 17 (b)) 반경방향과 원주방향의 변형률 측정 값이 두께 변화가 없는 성형(스피닝) 예측과 유사함을 보이고 있다. 이 결과를 종합해보면, 스피닝 공정에서 두께 변화는 성형 방법에 따라 필연적으로 발생할 수 있다고 볼 수 있다.

3.1.2 스피닝의 결함들

Fig. 18 [8] 에는 스피닝 공정에서 발생하는 결함들을 나타내었다. 가장 자주 접하게 되는 결함은 좌굴이다. 좌굴없이 블랭크의 직경을 멘들렐 크기로 줄이기 위해서는 원주방향 압축응력과 직경방향 인장응력의 적절한 조합이 필요하다. 한번의 공정으로 이 조합을 달성하기는 어렵고 여러 번의 반복 공정을 통해 달성할 수 있다. 원주 방향과 직경방향의 어느 쪽으로든 과한 응력은 주름 또는 원주 방향의 크랙의 원인이 된다. 또한, 주름이 존재하는 상황에 스피닝을 지속적으로 진행하면 반경 방향으로 크랙이 발생하기도 한다. 이것은 대개 블랭크에 발생된 주름이 퍼지고 생성됨을 반복할 때 발생한다.

3.1.3 공정변수

Fig. 1과 2에서 나타낸 것과 같이 플로우 포밍과 달리 전통적인 스피닝은 변형특성에서는 차이점을 보이지만, 유사한 공정변수들을 가지고 있다. 몇 가지 대표적인 공정변수(process parameter)와 공구

변수(tool parameter)들이 성형 성과와 성형 제품의 품질에 미치는 영향을 미친다.

이송속도(feed ratio)는 스피너들의 회전속도와 성형공구의 이동량의 비로 정의된다. 높은 이송속도에 의해 성형제품의 파단이나 큰 성형하중이 발생할 수 있기 때문에 적절한 이송속도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 반대로 이송속도가 너무 낮으면, 반경 방향으로 과도한 재료흐름이 발생하여 불필요하게 작업능률이 감소하고 소재 두께를 과도하게 얇게 만든다[8].

Wang[18] 등은 스피너들 속도의 증가가 두 가지 효과로 이어진다고 설명하였다. 하나는 높은 변형률 속도로 인한 회전력 상승이며, 다른 하나는 이송 속도가 스피너들 속도에 반비례하므로 1회전당 필요한 변형 에너지가 감소할 수 있다는 것이다.

공구경로는 제품의 형상을 결정하는 중요한 변수이다. 특히 공구의 경로가 급격히 변하는 오탁부,

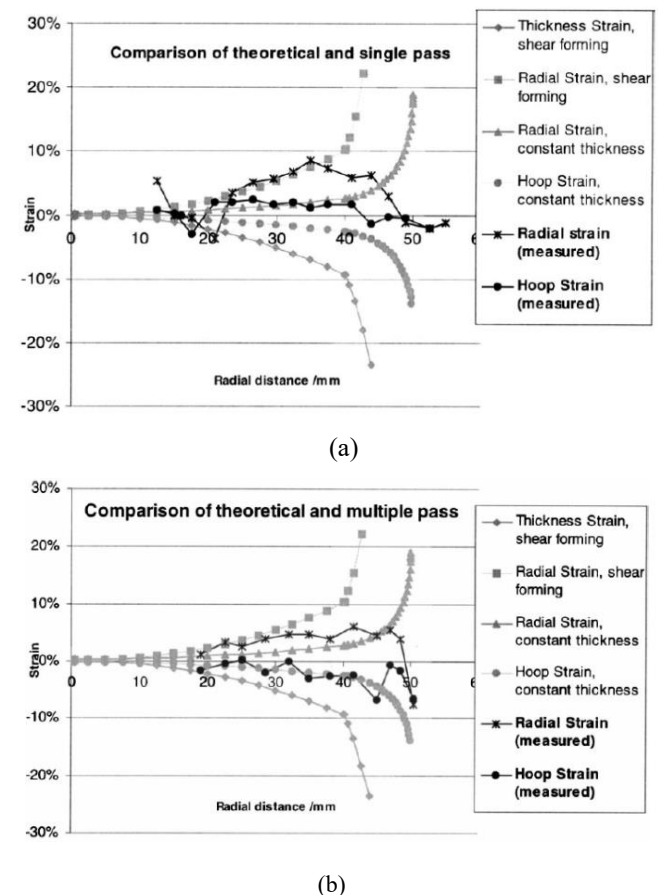


Fig. 17 Graph of strains arising from: (a) a single pass and (b) a multi-pass of spinning operation [17]

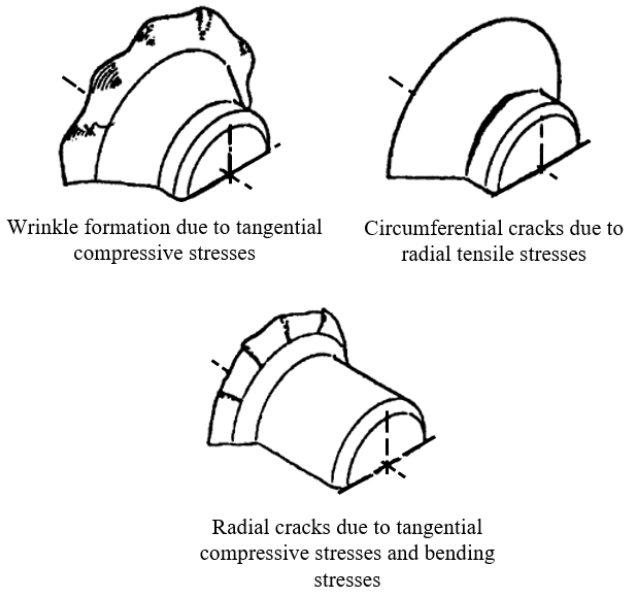


Fig. 18 Typical failure modes in spin components [8]

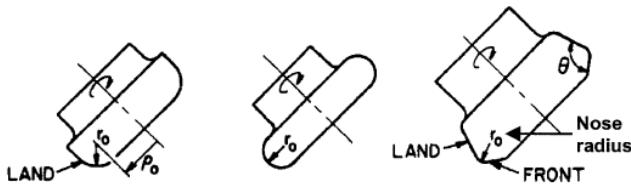


Fig. 19 Different shapes of roller for spinning [21]

볼록부 또는 나선형과 같은 공구의 경로는 블랭크의 변형에 큰 영향을 미친다. 올바른 공구경로를 도입해야만 좌굴이나 균열, 주름 등이 없는 성형이 가능하다. 오목한 제품을 성형하는 공구경로는 전통적인 스피닝에서 가장 많이 쓰이는 방법이다. 첫 번째 공구경로에서 발생하는 두께 감소율은 최종 제품의 두께에 결정적인 역할을 하기 때문에 적절하게 검토되어야 한다[19].

Liu[20] 등은 선형, 이차형, 나선형, 등 여러 다른 공구경로를 갖는 스피닝 공정의 첫 번째 패스에서의 응력 및 변형률 분포를 분석하여 블랭크의 모양을 맨드릴 형상으로 변환하는 탄소성 FEM 모델을 확립하였다. 그들은 나선형 공구경로의 경우에서 반경방향과 접선방향의 응력 및 변형률이 모두 가장 작게 나타났다고 보고 했으며, 세가지 각각의 다른 경로에서 응력과 변형률 분포를 비교하여 기존의 스피닝에 적합한 공구 경로를 선택하는 이론적 근거를 제공할 수 있다고 하였다.

공구의 형상은 최종 제품의 두께나 형상 및 치수

정밀도 등에 영향을 미치기 때문에 아주 세심하게 검토되어야 한다. 공구의 직경은 최종 제품 품질에 거의 영향을 주지 않지만 롤러 노즈(roller nose) 반경이 너무 작으면 응력이 높아져 궁극적으로 두께 균일성이 나빠진다. Fig. 19에 여러 가지 형상의 공구를 나타내었다 [21].

스피닝 비(spinning ratio)는 맨드릴 직경에 대한 블랭크 지름의 비율로 정의된다. 이 스피닝 비는 딥드로잉(deep drawing)에서 LDR(Limit Drawing Ratio)와 유사한 개념으로 볼 수 있다. 스피닝 비가 높을수록 스피닝 공정은 더 어려워진다. 스피닝 비가 너무 크면 성형이 진행됨에 따라 성형되지 않은 재료에 인장응력을 전달할 수 없게 된다. 이는 스피닝 비에 최대 값이 있음을 의미하며 이 스피닝 비를 넘어서 스피닝 후 공정을 진행하면 주름 등이 발생할 수 있다.

3.2 플로우 포밍

플로우 포밍은 튜브(tube)를 성형하는 공정이 많기 때문에 “튜브 스피닝(tube spinning)”으로도 많이 알려져 있다. Fig. 2와 같이 소재는 맨드릴을 따라 회전축에 장착되고 소재의 내경은 변화가 없으며 공구가 소재 외부를 이동하며 소재 유동을 유도하여 제품을 성형한다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 튜브 또는 원통형 제품을 성형하는데 주로 이용된다 [22]. 대부분의 플로우 포밍 머신은 2~3개의 롤러를 사용하며, 스피닝과 전단성형에 비해 설비가 복잡하다. 초기 블랭크는 슬리브 또는 컵 형태 일 수 있으며 치수 정확성을 향상시키기 위해서는 스피닝 딥 드로잉 또는 단조 등을 통해 예비 성형을 거치기도 한다. 냉간가공을 통한 소재강도 증가, 깨끗한 표면 상태 및 간단한 공구 형태와 비교적 낮은 공정비용 등의 플로우 포밍의 장점은 복잡한 형상이나 두께가 변하는 중공형 제품성형에 이점이 있다.

3.2.1 성형공정

플로우 포밍은 Fig. 20과 같이 블랭크를 회전하는 맨드릴에 끼우고 롤러가 블랭크에 축방향으로 접근하여 접촉점 아래에서 국소적으로 금속을 소성변형시킨다. 이러한 방식으로 소재가 축방향으로 유동하며 공작물의 길이가 증가하여 소재의 두께는 감소

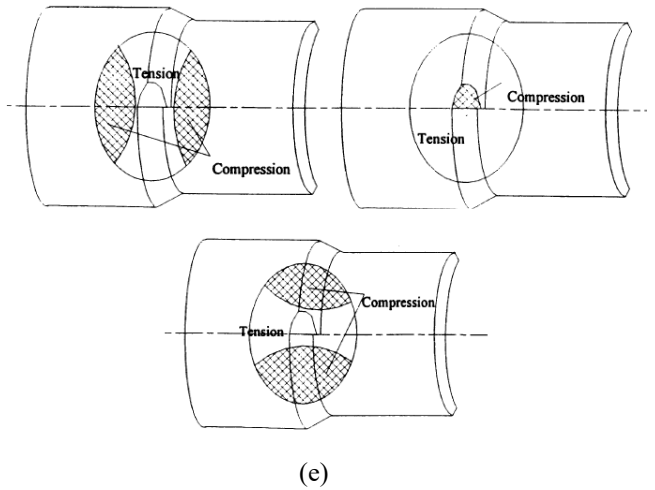
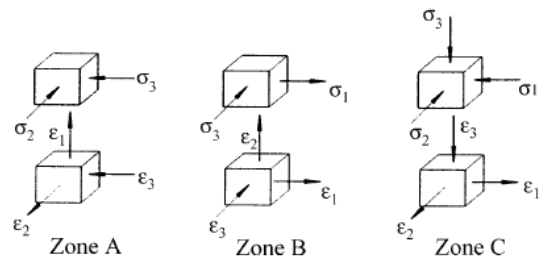
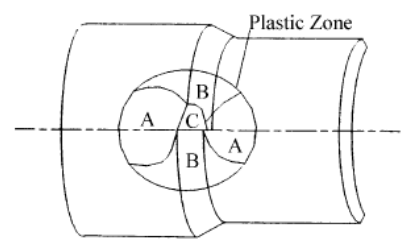
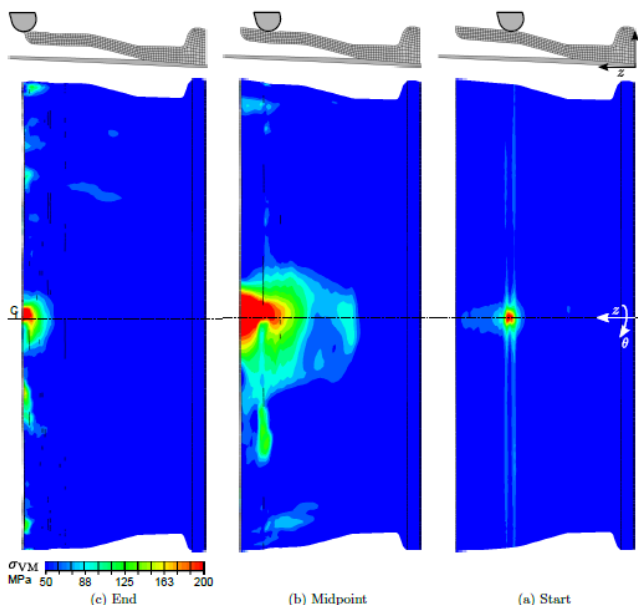
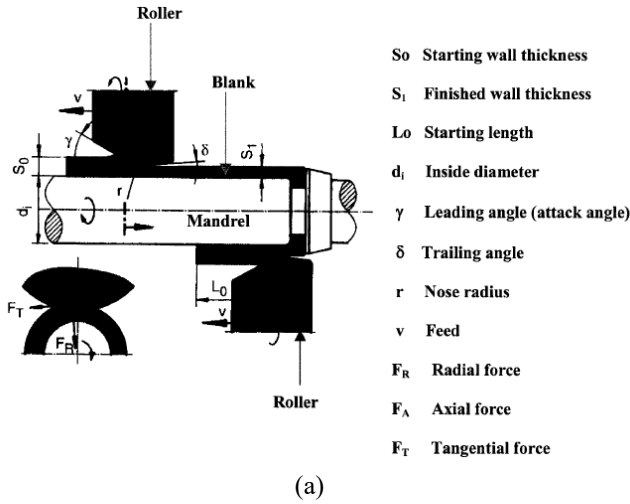
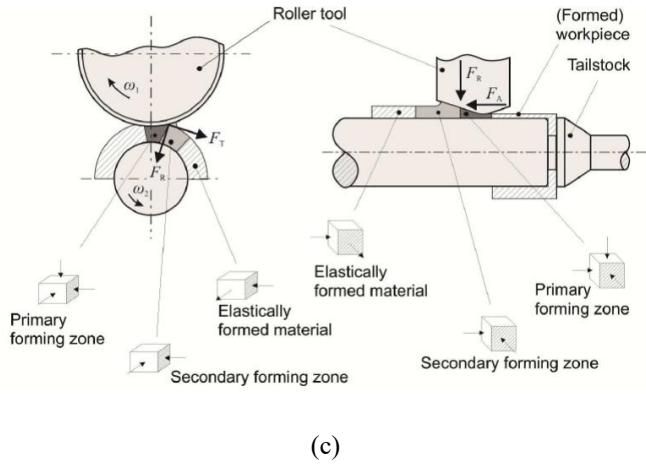


Fig. 20 (a) Principle of flow forming [8], (b) FE predicted equivalent stress during flow forming of aluminum A357 wheel [21], (c) stress state of material between roller and mandrel, (d) schematic diagram of the stress and strain in various regions and (e) distribution of deformation in various directions



하게 된다[22]. 그림 20(c)에 롤러와 멘드렐 사이의 재료의 응력상태를 상세히 나타내었다. 롤러 바로 밑에서는 재료가 3축방향으로 압축 소성변형을 받고 있어서 재료의 파단 없이 큰 소성변형이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 20(d)에는 원주 방향에 걸쳐 재료의 위치별 응력과 변형률 상태를 나타내었고 그림 20(e)에 방향별의 변형분포를 개념적

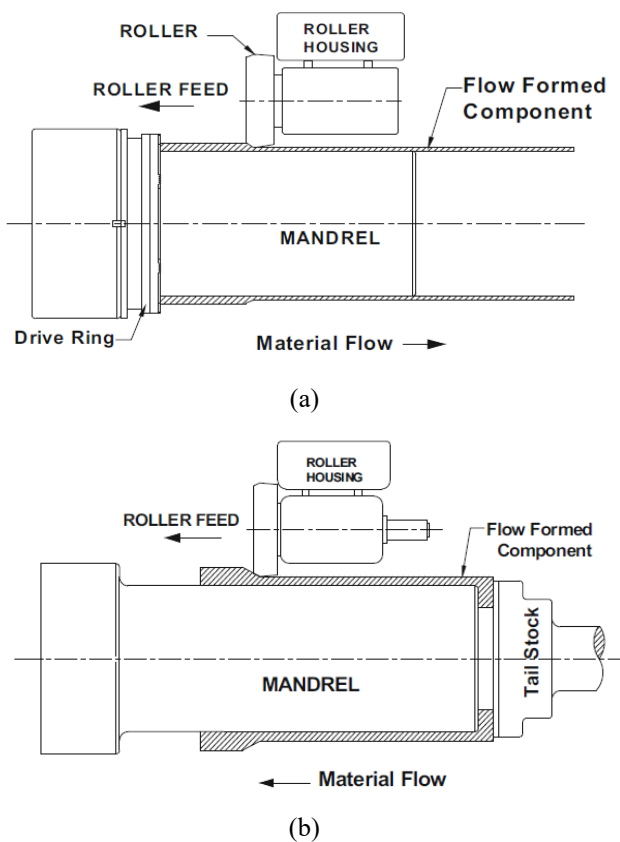


Fig. 21 (a) Forward flow forming and (b) backward flow forming [22]

으로 나타내었다. 그림 20의 해석에서 롤러와 접촉하는 소재의 흐름은 축 방향과 원주 방향의 두 개의 요소로 이루어져 있다. 소재의 흐름은 롤러의 형상으로 제어할 수 있는데, 롤러와 소재의 접촉 길이에서 원주방향의 접촉 길이가 축 방향보다 길다면 소재의 유동은 축 방향이 지배적으로 되어 두께 감소는 평면변형 압출과 유사하게 되어 양호한 제품을 생산할 수 있다[23]. 반대의 경우는 반경방향으로 돌출부가 발생하여 결함을 유발한다.

공작물의 체적이 일정하기 때문에 접선방향으로 유동이 무시할 정도로 작으면 최종 구성 요소 길이는 아래 식 (1)과 같이 계산할 수 있다[8].

$$L_1 = L_0 \frac{S_0(d_1 + S_0)}{S_1(d_1 + S_1)} \quad (1)$$

여기서 L_1 은 공작물 길이, L_0 는 블랭크 길이 S_0 는 초기 소재 두께, S_1 은 최종 제품 두께, d_1 는 내부 직경이다.

튜브의 플로우 포밍에서 사용하는 성형 방식은 전방 성형(forward forming)과 후방 성형(backward forming)이 있다. 이는 Fig. 21과 같이 공정 중에 공구의 이동에 따른 소재의 흐름 방향과 관계가 있다. 전방 성형의 경우 소재(블랭크)는 이송 롤러와 같은 방향으로 성형되어 소재가 연신된다. 블랭크는 맨드릴과 심압대(tail stock) 사이에 끼워져 있으며, 심압대가 심지와 클램프를 고정할 수 있도록 베이스 또는 내부 플랜지가 있는 블랭크가 필요하다. 이 방법은 일반적으로 로켓 모터 케이스, 유압 실린더, 고압 용기 및 발사 튜브와 같은 고정밀 얇은 두께의 실린더를 만드는데 적합하다. 베이스 또는 내부 플랜지가 없는 블랭크의 경우는 후방 성형 방법을 적용할 수 있다. 이 경우, 헤드스톡(Headstock)이 소재를 밀게 되며 맨드릴과 롤러 사이로 소재가 성형되어 공작물이 제작된다. 이와 같은 후방성형은 블랭크 연성이 낮아 주조품, 용접 제품과 같이 인장응력을 수용할 수 없는 경우에 적합하다.

일반적으로 후방성형은 성형소재가 맨드릴의 표면을 따라 흐른다. 따라서 성형량이 많아 질수록 소재와 맨드릴의 접촉이동거리가 많아지게 되어 맨드릴과 접촉하지 않는 자유단부가 발생하게 된다. 이에 따라, 소재흐름의 직진성을 잃고 형상이 불균일해 질 수 있어 일반적으로 후방성형에서는 제품 길이에 걸쳐 치수가 불균일 해지기 쉽다[24, 25].

Fig. 20과 21에서 보는 것과 같이 1개의 롤러는 성형하중의 편심을 형성하는 구조적 한계가 있다. 그래서 많은 경우 1개 이상의 롤러를 사용한다. 최신의 플로우 포밍 성형기들은 3개의 롤러로 구성되어 정밀 부품 성형에서 하중 균형을 향상시킨다. 일반적으로 3개의 롤러는 120° 간격으로 원주 방향으로 이격 되어 있어 맨드릴이 중심축에서 벗어나는 것을 방지하기 위해 하중을 균일하게 분포한다. 또한, 치수 정밀도와 표면 조도를 향상시키기 위해 축 방향 및 반경 방향으로 특정 거리에서 롤러를 오프셋 또는 엇갈리게 배치할 수 있다[26, 27].

3.2.2 성형하중과 공정변수

지난 수십 년 동안 여러 연구자들이 튜브 플로우 포밍의 성형하중에 대한 이론적 분석을 수행하였다. Mohan[28] 등은 소성 유동 메커니즘에 대해서 그리드 라인(grid-line) 기법을 사용하여 이론적 연구를 수행했다. 그들은 소성일의 원리를 적용하여 유효

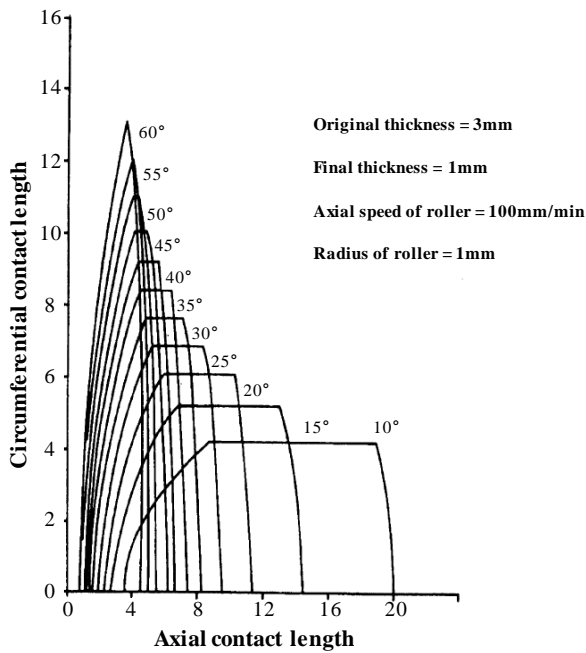


Fig. 22 Effect of the attack angle of the length of contact area [23]

변형률과 롤러 하중을 계산하였으며, 이때 성형 중의 변형 경로는 선형이며 3개의 주 방향의 변형률 성분은 성형후의 변위로부터 계산할 수 있다고 가정하였다.

Hayama[29] 등은 에너지 법을 사용하여 성형 하중과 직경의 정확도를 평가하기 위한 분석을 하였다. 그들은 롤러의 각도와 이송 속도(feed rate)의 다양한 변화에서도 계산값이 실험값을 잘 예측함을 보였다.

Singhal[24] 등은 성형 중에 재료의 축적 및 결핍이 없다고 가정하여 플로우 포밍에서 요구되는 성형 하중에 대한 일반화된 수식을 제안하여 전방 및 후방 성형에 모두 적용하였다.

앞서 논의된 바와 같이, 롤러와 소재의 접촉 부위에서 원주 방향과 축 방향 접촉의 비율은 성형된 블랭크의 외부 표면에서의 물결 모양이나 팽창과 같은 소성 유동 불안정성에 영향을 미친다[23]. Fig. 22에서 알 수 있는 것과 같이 Fig. 20에 표시된 받음각(attack angle)을 증가시킴으로써 이 비율이 증가하고, 계면 마찰로 인해 이 비율이 높을수록, 소재가 축 방향으로 이동하는 경향이 더 높아진다[30].

반면에 원주 대 축 방향의 접촉 비가 매우 크면 금속이 받음각 보다 작은 각도로 흐르게 되어 표면

이 과도처럼 보이고 두께가 달라진다. 유사하게, 너무 큰 받음각은 필요한 파워를 증가시키고 성형 공정의 효율을 감소시킨다 따라서 적절한 균형이 중요하다[22].

일반적으로 플로우 포밍에서 원활한 소재 유동과 적절한 표면상태를 확보하기 위해서는 이송속도, 블랭크 두께 및 롤러 프로파일 간에 절충안을 설정해야 한다[29]. 특정 블랭크 두께에서 너무 낮은 이송속도를 사용하면 소재가 반경방향으로 흐르므로 블랭크의 내부 직경이 증가한다. 반면에 높은 이송속도가 사용될 때, 불균일한 두께, 거친 표면뿐만 아니라 직경 감소와 같은 결함이 발생한다[31].

이송 속도가 일정한 한계를 초과하면 공작물 표면에 톱니 모양의 요철이 생길 수 있다[21, 30]. 이는 매우 큰 이송 속도로 인해 재료가 롤러 축 방향 운동과 반대 방향으로 롤러 아래로 흐르는 경향이 있기 때문이다.

Yao[32] 등은 알루미늄 튜브의 플로우 포밍에서 두께 변형률, 반경방향 하중, 직경 정확도 및 표면 조도에 대한 이송속도의 영향을 실험적으로 조사했다. 그들은 이송 속도의 증가가 성형하중, 두께 변형률 및 표면 거칠기를 증가시킬 것이라고 결론지었다. 또한 직경의 정확도도 이송속도의 증가에 따라 감소함을 확인하였다.

3.3 점진적 판재성형

점진적 판재성형은 성형방법에 따라 음각 성형(negative forming) 및 양각 성형(positive forming)으로 구분할 수 있고 성형공구의 적용 방법에 따라 단일 공구, 이중 공구 점진성형으로 나눌 수 있다. 점진적 판재성형에 대한 연구가 많이 수행되면서 최근에는 점진적 판재성형이 고속열차의 선두의 코 형상과 같은 대형 부품의 프로토타입, 가전제품의 케이스 및 의료 제품과 같은 소형 부품에 이르기까지 널리 적용되고 있다(Fig. 13). 이 기술의 주목할 만한 특징은 값 비싼 금형 다이를 사용하지 않고 비대칭 형상을 성형할 수 있다는 것이다.

3.3.1 성형공정

점진적 판재성형기술은 앞서 기술한 바와 같이 이중 공구와 단일 공구 점진성형의 두 그룹으로 나눌 수 있으며 각각 양각, 음각 성형으로 접근 가능하다. (Fig.23) Fig. 24[33]에 단일 공구와 이중 공구를

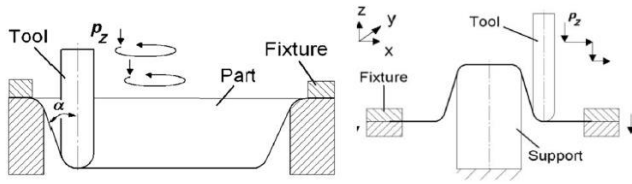


Fig. 23 Positive and negative incremental sheet forming

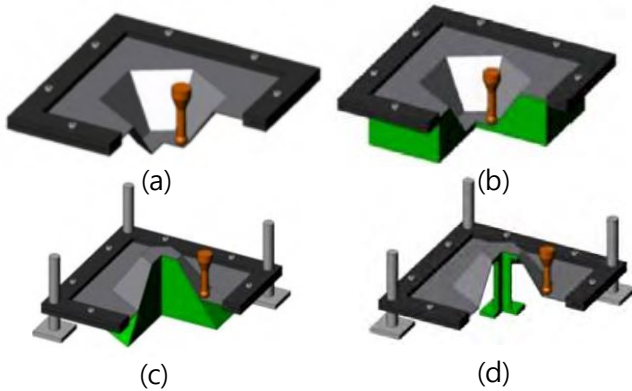


Fig. 24 Incremental forming process: (a) single point incremental forming, (b) two-point incremental forming with negative full die, (c) two point incremental forming with positive full die and (d) two point incremental forming with a positive partial die [32]

이용한 점진적 판재성형의 여러 가지 예를 나타내었다. 단일 공구 점진적 판재성형은 공구와 판재 사이의 고유한 접촉점을 가지는 것이 특징이며 공구가 판재의 한쪽 면에서만 작동하며 Fig. 24(a)와 같이 판재의 양 끝 단부는 고정되어 있다. 반면 이중 공구 점진적 판재성형에서는 공구와 판재의 접촉점과 판재와 블랭크 홀더의 접촉점의 두 지점에서 동시에 변형이 이루어진다. 판재는 수직 방향으로 공구와 동기화되어 움직이는 블랭크 홀더에 의해 고정되고 성형 공구는 하부다이(die)의 불룩한 표면상의 궤적을 따라 형상의 상부에서 하부로 이동한다(Fig. 24 (b)). Fig. 24(c)는 Fig. 24(b)의 하부 다이를 일부만 차용한 성형방법이다.

그림에서 알 수 있듯이 Fig. 24(a)는 하부다이가 없는 성형 방법으로 공구의 이동 궤적에 따라 다양한 형태의 공작물을 성형할 수 있는데 반해 Fig. 24(b), (c)는 하부의 다이형상에 따라 공작물의 형태가 결정된다. 하지만 형상의 동결성이나 공작물의 완성도는 Fig. 24(b), (c)의 방법이 우수하다. Fig. 24(d)는

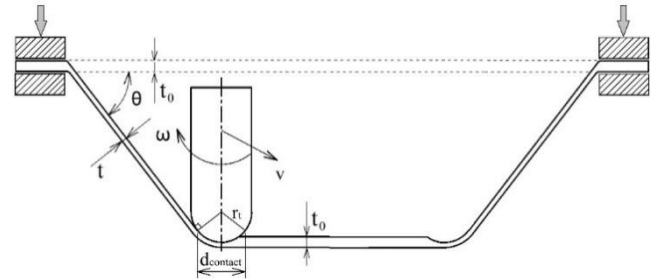


Fig. 25 Tool geometry and tool-sheet contact scheme

Fig. 24(a)의 형상 동결성을 보완하기 위해 제안된 이중 공구에 의한 성형 방법으로 하부의 공구가 상부의 공구 이동경로와 동기화 되어 움직이며 판재의 변형을 용이하게 만든다.

3.3.2 공정변수와 성형성

점진적 판재 성형공정에서 성형성과 성형된 제품의 품질을 결정하는 주요 성형 변수로는 성형각도(θ), 공구 직경(d_t), 수직 스텝 크기(p_z), 수평 스텝 크기(p_x), 공구 회전속도(ω), 공구 이송속도(v), 판재 두께(t) 및 온도(T) 등이 있다[34]. 성형 변수의 조절을 통해 최종 제품의 형상이 결정된다. 성형 각도는 부품의 정밀도에 크게 영향을 미치며 성형 스텝의 크기는 부품 표면 품질을 결정하고 공구 속도와 회전속도는 열 발생과 관련이 있다. 마찰로 인한 열 발생을 줄이려면 마찰 계수를 최소화하기 위해 공구와 판재와의 접촉 미끄럼 대신 공구의 회전 자유도를 부여하며, 성형 각에 대한 접촉 영역은 공구의 하단 점에서 성형 판재가 공구 반경(r_t)에 수직인 지점까지로 정의된다(Fig. 25).

Park[35] 등은 공구의 회전 마찰열을 이용하여 마그네슘과 같은 난 성형 재료의 국부적 온간 성형을 가능케 함으로써 성형성을 향상시키기도 하였다.

성형 후의 두께(t)와 초기 판재의 두께(t_0) 성형각도(θ)는 삼각함수에 의해 식 (2)와 같이 표현된다.

$$t = t_0 * \cos\theta \tag{2}$$

또한 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}$ 는 전단변형률 γ 를 이용하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \gamma &= 1/\tan\theta \\ \bar{\epsilon} &= \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3} \tan\theta} \end{aligned} \tag{3}$$

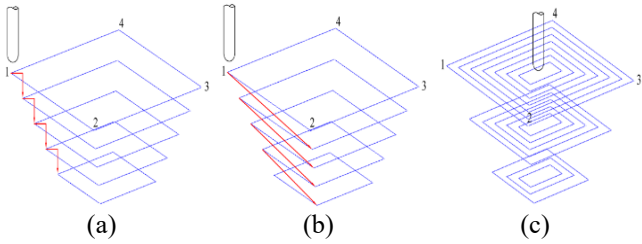


Fig. 26 (a) Inward toolpath, (b) spiral toolpath and (c) outward toolpath [33]

공구의 경로는 성형성, 제품 프로파일, 표면조도, 성형시간 및 두께 변화에 큰 영향을 미치기 때문에 구 경로 생성은 점진적 판재성형에서 매우 중요하다. 공구의 이동 전략에 따라 Fig. 26과 같이 세가지 종류의 공구 경로가 자주 사용된다[12].

인워드(inward) 경로에서(Fig. 26(a)) 공구는 시작점에 도달할 때까지 한면에서 외부 주변을 따라 이동한다. 그 후 코너에서 지정된 단계 깊이만큼 수직 아래쪽으로 다음 평면으로 이동한다. 그 다음 공구는 이전 평면과 동일한 방향으로 계속 이동한다. 이 프로세스는 전체 형상이 형성될 때까지 계속된다. 스파이럴(spiral) 경로에서는(Fig. 26(b)) 내부 공구 경로와 동일하게 동일 평면상에서는 이동한다. 그러나 다음 성형 깊이로 이동할 때 공구가 기울어진 경로로 점차 이동한다. 아웃워드(outward) 경로(Fig.26(c))에서 공구는 지정된 수평 스텝 크기만큼 한 평면의 중심에서 현재 성형 평면의 외주에 도달할 때까지 바깥쪽으로 이동한다. 그런 다음 공구가 다시 중심점으로 이동하여 지정된 수직 스텝 크기만큼 하향 이동하여 다음 평면에 도달한다. 거기에서 원하는 형상을 완성될 때까지 이전 성형 평면에서와 같은 방식으로 이동한다.

점진성형의 재료 거동과 최대 성형성은 최대 성형각도(θ_{max})에 따라 결정될 수 있다[35]. θ 가 증가하면 파단이 발생하기 전에 두께가 최소값에 도달한다.

Fig.27과 같은 다양한 각도의 원추성형시험(varying wall angle conical frustum, VWACF)이 성형성을 평가하기 위해 자주 사용된다. 이 테스트는 최대 성형 각도를 결정하는데 필요한 시도 횟수를 줄여준다. 이 테스트에서는 원추의 벽 각도(θ)를 깊이에 따라 연속적으로 증가시켜 벽 두께 감소를 비례적으로 증가시킴으로써, 판재의 파단을 유도하며 성형한계를 확인할 수 있다. 파괴점에 해당하는 벽변각은 θ_{max}

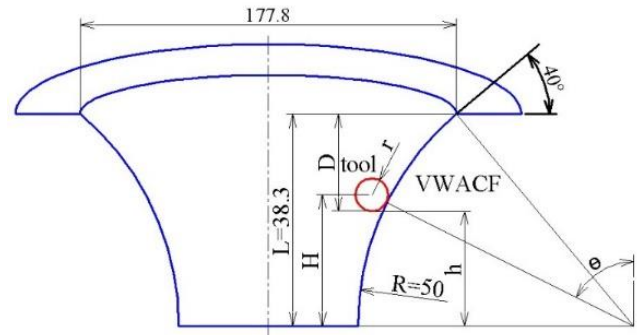


Fig. 27 Geometry of VWACF to determine the formability in incremental sheet forming

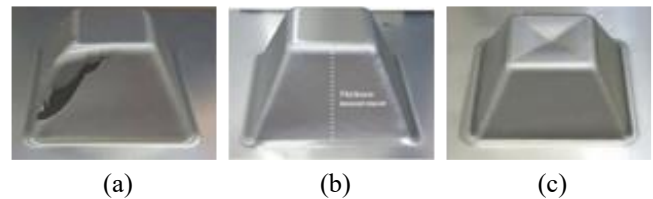


Fig. 28 (a) Fracture occurs in 63-deg pyramid with inward toolpath, (b) safe forming for 64-deg pyramid with spiral toolpath and (c) safe forming for 66-deg pyramid with outward toolpath

로 간주된다.

공정변수는 성형성에 크게 영향을 미친다. 선행 연구자의 결과에서 보면, 성형 공구는 반구형 보다 구형이 성형성에서 더 효과적이고 공구와 판재 사이의 어느 정도의 마찰은 성형성을 향상시키는데 도움이 된다. 성형성은 이송 속도가 감소함에 따라 증가하며 평면 이방성으로 인해 성형성은 공구 이동 방향에 따라 달라짐을 확인하였다[36]. 또한, 스파이럴 경로 성형은 인워드 경로 성형과 비교하여 높은 성형성을 가지며 인워드 경로 성형의 경우 재료의 파손은 공구가 현재 성형 깊이에서 다음 성형 깊이로 하향 이동할 때 더 쉽게 발생한다. 스파이럴 경로의 경우 다음 평면으로 이동할 때 인워드 보다 더 작은 기울기를 가지기 때문에 장출 변형(ϵ_{11})이 감소하고 전단 변형(γ_{23})이 증가한다. 이 때문에 성형성이 증가하며 공구 경로의 영향에 대해 평가한 결과를 Fig. 28에 나타내었다. 실험은 두께 0.8mm의 Al5052-O 판재를 직경 10mm, 수직 스텝 변위 0.4mm, 이송 속도 1000mm/min, 회전 속도 60rpm으로 수행하였다. Fig. 28과 Table 1에 나타낸 것과 같이

인워드 공구경로는 최대 62°의 성형각도를 갖지만, 스파이럴 공구경로는 2° 더 높다. Fig. 28(a)의 파단은 공구가 곧바로 하향 이동하고 이 영역의 재료가 파단 될 때 한 모서리에서만 발생한다. 그러나 다른 영역에서는 스트레칭 변형 보다는 전단변형이 많이 발생하기 때문에 파단이 발생하지 않는다. 이는 주 변형이 스트레칭인 종래의 스탬핑 성형한계보다 전단변형이 많은 점진적 판재성형의 성형한계가 높은 이유를 잘 설명해준다.

아웃워드 공구 경로 성형에서 성형성은 가장 높지만 성형 시간이 현저하게 길어지는 단점이 있다. 이 3가지 경우 파단 주위에서 두께를 측정한 결과 0.22mm의 동일한 값을 얻었다. 이것은 파단 한계가 변형 경로에 의존하지 않고 이전의 결과와 마찬가지로 재료에 의존한다는 것을 의미한다[38 ~ 40].

Fig. 29(a)에 나타난 것과 같이 성형공정에서 벽면의 재료는 'T'에 의한 스트레칭을 받는다 [40, 41]. 한편 바닥면에 가해진 동일한 장력 'T'는 바닥면을 인장시킨다. 동일하게 장력 'T'는 블랭크의 어깨부도 인장시킨다. 그러나 어깨부와 바닥은 고정되어 있는 구속력에 의해 항복강도가 벽면보다 높기 때문에 초기 두께를 유지하며 벽면부만 변형된다. 벽면부의 두께는 식 (2)의 코사인룰에 의해 성형각이 증가함에 따라 감소한다. Fig. 29(b)에 상온에서 성형이 어렵다고 알려진 Al7075-T4 판재를 대상으로 성형 온도에 따른 공구에서의 z 방향 하중을 나타내었다. 성형 온도가 높아짐에 따라 공구에서 받는 하중이 줄어들고 성형 깊이가 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig.30에 85°의 기울기를 갖는 길이와 폭이 각각 50mm 사각컵의 성형공정에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 스피닝이나 플로우 포밍과 마찬가지로 점진적 판재성형 공정에서 소재는 소성변형률 1.0 이상까지 달한다. 따라서 가공공정에서 재료의 소성거동에 대한 해석 그리고 공정 최적화 설계에 유한요소해석을 적용하기 위해서는 대변형에서의 소성변형거동을 잘 묘사해주는 경화법칙을 선정해주는 것이 중요하다. Fig.30의 해석에는 ABAQUS explicit SW와 Hill의 이방성 항복조건식 그리고 경화법칙으로 Kim-Tuan 식[42]으로 이용하였다. 점진적 판재성형에 대한 유한요소해석 결과는 실험결과를 잘 재현하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Performance of different toolpaths with same forming parameters

Tool path	Forming angle (°, θ_{max})	Fracture angle (°, θ_f)	Forming time
Inward	62	63	15 min.
Spiral	64	65	14 min.
Outward	66	67	200 min

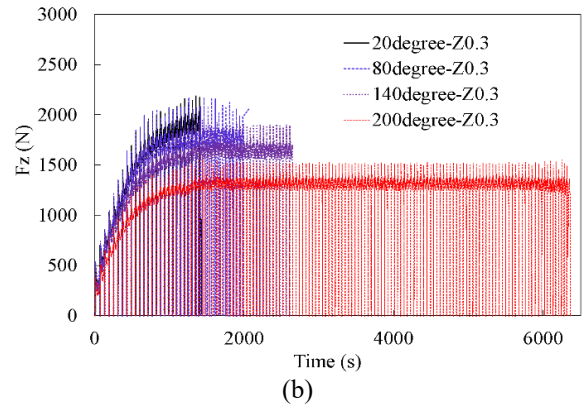
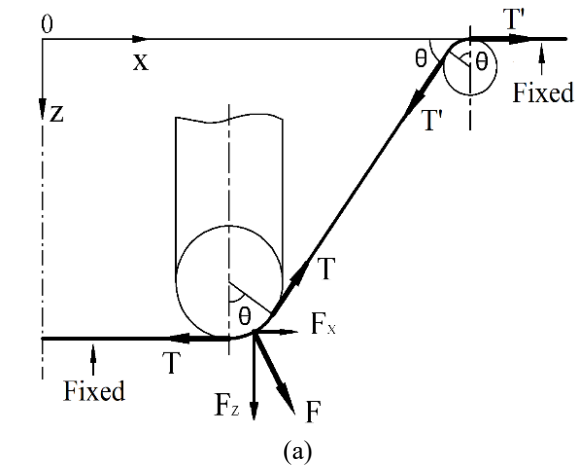


Fig. 29 (a) Schematic of forming force in incremental sheet forming and (b) forming force in the Z-directions for the VWACF with vertical step depth of 0.3 mm at different temperatures [37]

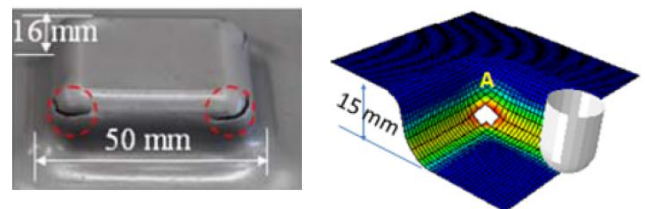


Fig. 30 FE simulation to predict crack occurrence

4. 결 론

본 논문에서는 스피닝, 플로우 포밍, 점진적 판재 성형의 개발 동향 및 메커니즘에 대해 검토하였다. 해당 성형 기술은 프레스 성형에 비해 변형 특성의 관점에서 매우 복잡한 공정이 될 수 있지만, 복잡한 형상의 제조 및 개발 측면에서는 큰 잠재력이 있음을 알 수 있었다.

최근 다양한 고객의 요구 조건을 만족시키고 글로벌 제조산업에서 경쟁력을 갖추기 위해서 유연한 소량 다품종 생산/제조 기술이 요구되고 있다. 본 논문에서 검토한 여러 가지 성형기술들이 이러한 변화에 훌륭한 대안 기술로 자리 잡을 수 있을 것이라 판단된다.

끝으로, 본 논문이 향후 스피닝, 플로우 포밍, 점진적 판재성형 등의 점진성형기술을 연구하는 연구자들의 길잡이가 되길 기대한다.

후 기

이 논문은 2019 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C1011224).

REFERENCES

- [1] E. Lloyd, 1986, An Introduction to Some Metal Forming, Theory, Principles and Practice, Portcullis Press Ltd.
- [2] www.genthial.com/en/spinning-and-flow-forming/glossary.php.
- [3] Spinning and Flowing Forming, Leico GmbH, April, 1997.
- [4] Special Issue on the movement of intelligent incremental forming, 1994, J. Jpn. Soc. Technol. Plast. Vol. 35, pp. 1251~1353.
- [5] H. Iseki, K. Kato, S. Sakamoto, 1992, Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging Using a Path-Controlled Spherical Roller, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series C, Vol. 58, pp. 3147~3155.
- [6] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, 2004, Forming Strategies and Process Modeling for CNC Incremental Sheet Forming, Vol. 53, pp. 203~206.
- [7] W.C. Emmens, G. Sebastiani, A.H. van den Boogaard, 2010, The technology of Incremental sheet forming-A Brief review, J. Materials Process. Technol. Vol. 210, pp. 981~997.
- [8] A Practical Look at Spinning and Flow Turning, 1975, Sheet Metal Industries, 52. pp. 7~11
- [9] M. Runge, 1994, Spinning and Flow forming, Leifeld GmbH, Werkzeugmaschinenbau/Verlag Moderne Industrie AG, D-86895, Landsberg/Lech.
- [10] www.globalmetalspinning.com/machinery_wheel_for_ming_rotary_forging.htm
- [11] www.imagenesmi.com
- [12] D. Nguyen and Y. Kim. 2013, A Numerical Study on Establishing the Forming Limit Curve and Indicating the Formability of Complex Shape in Incremental Sheet Forming Process, Int. J. Prec. Engng. Manuf., Vol. 14, pp. 2087~2093
- [13] L. Lamminen, 2005, Incremental sheet forming with an Industrial Robot-Forming Limits and Their Effect on Component Design, Adv. Mat. Res., Vol. 6-8, pp. 457~464.
- [14] B. LU, M. Bazeer, J. Cao, S. Ai, J. Chen, H. Ou, H. Long, 2017, A Study of Incremental Sheet Forming by Using Water Jet, Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol. 91, pp. 2291~2301.
- [15] B. Juriservic, K. Kurzman, M. Junkar, 2006, Water Jetting Technology: An Alternative in Incremental Sheet Metal Forming, Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol. 31, pp. 18~23.
- [16] H. Amino, Y. Lu, T. Maki, S. Osawa, K. Fukuda, 2002, Dieless NC Forming, Prototype of Automotive Service Parts; Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Rapid Prototyping and Manuf.
- [17] E. Quigley and J. Monaghan, 2000, Metal Forming: An Analysis of Spinning Processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 103, pp. 114~119.
- [18] Q. Wang, T. Wang, Z. Wang, 1989, A Study of The Working Force in Conventional Spinning, Process. 4th Int. Conf. Rotary Forming, pp. 103~108.
- [19] D. Kang, X. Gao, X. Meng, Z. Wang, 1999, Study on The Deformation Mode of Conventional Spinning of Plates, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 91, pp. 226~230.
- [20] J.H. Liu, H. Yang, Y.Q. Li, 2002, A study of stress and strain distributions of first-pass conventional spinning

- under different roller traces, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 129, pp. 326~329.
- [21] M.J. Roy and D.M. Maijer, 2015, Analysis and modelling of a rotary forming process for cast aluminum alloy A356, Vol. 226, pp. 188~204.
- [22] D. Marini, D. Cunningham, P. Xirouchakis, J. R. Corney, 2016, Flow forming: A review of research methodologies, prediction models and their applications, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, Vol.7(1), pp.285~315.
- [23] M. Gur and J. Tirosh, 1982, Plastic flow instability under compressive loading during shear spinning process, *Trans. of the ASME, J. Eng. Industry*, Vol.104, pp. 17~22.
- [24] P.R. Singhal, P.K. Saxena, R. Prakash, 1990, Estimation of power in the shear spinning of long tubes in hard to work materials *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 23, pp. 29~40.
- [25] K. Xue, Z. Wang, Y. Lu, K. Li, 1997, Elasto plastic FEM analysis and experimental study of diametral growth in tube spinning, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 69, pp. 172~175.
- [26] K. Xue, Y. Lu, X. Zhao, 1997, A study of matching relationships amongst technical parameters in stagger spinning, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 69, pp. 167~171.
- [27] K. Xue, Y. Lu, X. Zhao, 1997, The disposal of key problems in the FEM analysis of tube stagger spinning, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 69, pp. 176~179.
- [28] T.R. Mohan and R. Misra, 1970, Studies on power spinning of tubes, *Int. J. of Production Research*, Vol. 10, pp. 351~64.
- [29] M. Hayama and H. Kudo, 1979, Analysis of diametrical growth and working forces in tube spinning, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 22, pp. 776~784.
- [30] M. Jahazi and G. Ebrahimi, 2000, The influence of flow-forming parameters and microstructure on the quality of a D6ac steel, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 103, pp. 362~366.
- [31] P. Rajnish and R.P. Singhal, 1995, Shear spinning of technology for the manufacture of long thin wall tubes of small bore, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 54, pp. 186~192.
- [32] J. Yao and M. Murata, 2002, An experimental study on paraxial spinning of one tube end, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 128, pp. 324~329.
- [33] T. Trzepiecinski, B. Krasowski, A. Kubit, D. Wydrzynski, 2018, Possibilities of application of incremental sheet-forming technique in aircraft industry, *Mechanika, Rutmech*, pp. 87~100.
- [34] J.J. Park and Y.H. Kim, 2003, Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, pp.447~453.
- [35] J. Park, J. Kim, N. Park, Y. Kim., 2010, Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of magnesium alloy sheet, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 41A, pp. 97~105.
- [36] L. Filice, L. Fantini, F. Micari, 2002, Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *Ann. CIRP*, Vol. 51, pp. 199~202.
- [37] X.Xiao, C.I.Kim, X.D.Lv, T.S.Hwang, Y.Kim, 2019, Formability and forming force in incremental sheet forming of aa7075-T6 at different temperature, *J. Mech. Sci. Technol.* Vo.33, be in print.
- [38] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood, 2005, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals-Manuf. Technol.*, Vol. 54, pp. 88~114.
- [39] H. ISEKI, 2001, An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 111, pp. 150~154.
- [40] R. AERENS, P. EYCKENS, A. VAN BAEL, J.R. DUFLOU, 2009, Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 46, pp. 969~982.
- [41] D. Young and J. Jeswiet, 2005, Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminum Sheet, *J. Engng. Manuf.*, Vol. 219, pp. 1~6.
- [42] Q.T. Pham, B.H. Lee, K.C. Park, Y. Kim, 2018, Influence of the post-necking prediction of hardening law on the theoretical forming limit curve of aluminum sheets, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.140, pp.521~536.