



고효율 점진성형기술과 수치해석

이영선, 권용남, 김상우 | 재료연구소
천세환 | 트리니티 엔지니어링

[요약문]

점진성형(Incremental Forming)기술은 고대 대장간에서 대장장이들이 소재를 두드려 조금씩 변형시켜 원하는 농기구나 검을 만드는 것부터 라고 할 수 있으며, 판재를 원하는 형상으로 조금씩 두드려 환기통 등을 제조하는 것들로부터 쉽게 찾아볼 수 있는 일반적인 성형기술이다. 다른 성형기술과 마찬가지로 점진성형 기술 또한 균일한 품질의 제품을 대량으로 생산하기 위해 고속생산이 필요하게 되면서부터 고효율 성형기술이 개발·활용되고 있으며 소재와 장비 등 기반기술과 에너지·환경 보호를 위한 제조공정의 최적화를 위해 점점 발전하면서 점진성형 기술 또한 지속적으로 발전하고 있다. 그러나, 현재 개발의 중심에 있는 고효율 점진성형기술 대부분은 소재를 회전시킴과 동시에 영구변형을 유도하기 때문에 다른 성형기술에 비해 공정변수가 많으며 그 영향이 매우 크다. 따라서, 경험적 지식(노하우)에만 의존하는 것은 신소재·신공정 개발에 어려움이 많으므로 이론적 해석기술의 필요성은 더욱 높다. 반면, 소재의 변형과 회전이 함께 이루어지므로 이론적 해석 난이도가 높아 공정분석과 변수선정을 위한 수치해석기술 또한 상대적으로 뒤쳐져 있다. 본고에서는 점차 증가되고 있는 고효율 점진성형기술의 종류를 알아보고 실제적 기술향상을 위해 개발되고 있는 수치해석 기술에 대해 정리하고자 한다.

1. 서 론(기술의 개요)

18세기말부터 산업혁명을 거치면서 비약적으로 발전해왔던 제조업은 20세기 들어 최고조에 달해 정밀성형(Near Net Shaping)기술을 통해 전 제조공정(Total Manufacturing Process)의 최적화를 실현함으로써 생산성 향상을 통한 원가절감을 달성하고 경쟁력을 확보함으로써 시장을 지배하고자 하였다. 전세계적으로 가속화되었던 자가용 시대에 부응하기 위해 동일한 품질의 저가 제품을 최대한 빠르게 제조할 수 있도록 제조공정 최적화 기술의 개발이 전분야에 걸쳐 진행되었다. 한마디로 제조기술의 고도화가 최대목표이었던 것이다. 생산과 소비의 과속현상은 지구환경의 오염을 초래하여 급기야 1997년 12월 11일 교토의정서(기후변화에 대한 국제연합규약)가 채택되고 2008년부터 2012년까지 선진국 전체의 온실가스 배출량을 1990년 수준보다 적어도 5.2% 이하로 감축할 것을 약속하였다. 결국, 고도성장에서 효율적 생산·소비 시대로 전환하고자 하는 의식전환(Paradigm Shift)이 이루어진 것이다. 다시 말하면 제조원가가 동일하다면 에너지 소비와 환경보전 차원에서 보다 효율적인 기술을 개발·이용하는 것이며 제조에서 소비에 이르는 전에너지(Total Energy) 차원으로 계산하면 더 효율적인 것이라는 개념을 말한다. 성형기술로 국한하여 정리한다면 결국 보다 적은 에너지소비와 재료이용을 향상이 핵심이므로 성형후 절삭가공량을 최소화하며 불량률을 최소화하는 것이 최고의 기술인 것이다. 이러한 고효율 제조기술의 개발은 20세기에 그



개발과 응용이 최고조에 달했던 수치해석(Numerical Analysis)기술의 발달과 함께 진행되었다. 오랫동안 이론적 배경으로 머물러 있던 수치해석기법은 컴퓨터 성능향상과 함께 제조기술의 개발과 활용에 현실적 이용이 가능해지면서 제조공정 최적화에 큰 부분을 담당하게 되었다. 성형기술 가운데는 단조기술과 주조기술과 같은 주요공정에서 그 빛을 발하였으며 현재는 설계단계에서 필수적으로 거쳐야 하는 항목을 차지하고 있을 정도다. 그러나, 본 고에서 기술하고자 하는 점진성형기술은 소재와 공구가 회전운동을 동반하는 경우가 대부분으로 현재까지도 단조, 주조 공정에 비해 상대적으로 현실적 해석기술을 제공하지 못하고 있는 실정이다.

그림 1은 대표적 점진성형기술의 종류 및 용도를 나타내고 있다.

성형공정	세부기술	소재/부품	비고
압 연	열·냉간 압연	판재(박판, 후판 등)	Sheet
	형상 압연	형재(L I-type 등)	Bulk
	링 압연/단조	링재(단순, 형상)	Bulk
단 조	레디알 포징(radial forging)	봉재	Bulk
	로타리 스웨이징(Rotary Swaging)	이형단면 봉, 튜브	Bulk
스피닝	스피닝(spinning)	용기	Sheet
	롤다이 포밍(roll die forming)	이형 단면	Sheet
	플로우 포밍(flow forming)	이형단면 튜브	Tube
특수성형	롤 포밍(roll forming)	이형단면부재	Sheet
	다이리스 포밍(dieless forming)	형상제품	Sheet
	필거링(pilgering)	형상제품	Tube

그림 1. 점진성형기술 종류 및 용도

2. 점진성형공정 특징과 계산효율 증대법

2.1 점진성형공정 특징

점진성형공정에서 소성변형영역은 탄성체 구간들내에 하나로 존재한다. 실제적인 소성변형영역은 전 영역에 비해 상대적으로 미소하다. 게다가, 소재와 공구가 실제 접촉하는 구간 또한 소재크기에 비해 매우 작다. 또한 여러번의 반복작업이 가해지게 된다. 모델링 관점에서 이들 특징들은 다음과 같은 결과를 초래하게 된다^[1].

- 접촉영역은 전체 소재 치수에 비해 미소하다. 일반적인 성형공정과 달리 상대적 접촉영역이 약 2차수 정도 적다.
- 접촉영역은 소재를 따라 연속적으로 이동한다. 따라서, 미소 요소이산화가 소재전체에 걸쳐 요구된다.
- 전체 소성영역이 작은 증분(Step)에서 얻어지기 때문에 많은 변형 증분들이 필요하다.

이러한 특징들 때문에 유한요소해석을 위한 모델은 매우 많은 요소와 시간 증분들을 필요로 하게 된다^[2]. 게다가, 이웃하는 탄성구간은 탄소성재료 거동으로 해석해야 한다.

추가적인 특징은 변형이 주로 정적상태가 아니라는 것이다. 따라서, 평면압연과 같은 정적상태로의 가정 또한 적용하기 곤란하다. 더욱이 이차원으로서의 단순화가 일반적으로 불가능하며 대칭면 또한 존재하지 않는 경우가 대부분이다.

소재와 함께 공구 또한 그 움직임이 복잡하며 소재와의 접촉이 순간 순간 이탈될 수 있다. 결국, 점진성형공정들은 하나 이상의 하중-제하가 주기적으로 나타나며 결국 변형을 경로가 변화하는 영역이 발생되어 단순한 구성방정식을 이용하기 어렵게된다.

이러한 이유들로 인해 계산시간은 빠른 컴퓨터를 이용해도 수개월이 소요되며 데이터도 수백 GB(Giga Bytes)가 필요하게 되기 때문에 특별한 모델링방법들이 효율적인 계산을 위해 개발되었다.

2.2 계산효율 증대법

계산 효율을 증대시키기 위해 문헌상 제안된 모델들은 크게 2가지 영역으로 구분될 수 있다. 하나는 모든 점진성형공정에 적용될 수 있는 일반모델과 다른 하나는 개별공정에만 적용되는 특수모델이다.

2.2.1 일반모델

대표적인 최근의 계산모델들은 표 1과 같다.

표 1. Summary of general models

Method	Processes analysed	References
Dynamic Explicit	Ring-rolling and Pilgering	[3-10]
Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)	Ring-rolling	[11-16]
Hybrid Mesh	Ring-rolling and multipass forging	[17-24]
Multigrid Methods	Ring-rolling and incremental forging	[25]
Super-Elements	Orbital forging	[26]
Self-Similarity	Ring-rolling, flow-forming and rotary swaging	[27, 28]

동적외연적방법(Dynamic Explicit Method)은 계산시간이 매우 빠르기 때문에 링 롤링, 필저링(Pilgering)공정에 널리 이용되고 있다. 동적외연적방법은 정적내연적방법에 비해 최대 22배까지 계산속도가 빠르다는 보고도 있다^[4]. 그러나, 동적외연적방법은 중량비조절(Mass Scaling)이 필요하기 때문에 잔류응력을 정확히 예측할 수 없는 단점이 있고 실제 25%까지 하중예측에 차이가 발생됨을 확인한 바 있다^[6].

ALE법은 변형영역이 전체 소재치수에 비해 작을 때 증분공정을 다루기 적절한 방법으로 재료와 계산영역을 분리할 수 있도록 함으로써 변형영역에서는 미세한 요소(Fine mesh)가 다른 곳은 큰 요소(Coarse mesh)가 사용될 수 있도록 해주며, 링 롤링 공정에 적합한 방법이다^[10-15]. 최근에는 계산요소를 재료요소에 사상하는 방법을 개선함으로써 소재 체적을 일정하게 유지할 수 있도록 정밀도를 개선하는 다양한 방법이 연구되었다^[16].

하이브리드 요소(Hybrid Mesh)법은 ALE와 달리 2개의 다른 요소가 형성되어 재료용과 계산용으로 구선된다. AMS(Actually Rotating Mesh System)와 SMS(Spatially Fixed Mesh System)는 그림 2와 같은 모양을 하고 있는



데, AMS는 속도, 유효변형을 등 공정 데이터를 모두 갖고 있는 미세한 요소망을 나타내며, 반면에 SMS는 속도장을 계산하기 위해 사용되는 큰 요소망을 나타낸다^[17]. SMS와 AMS는 변형영역에서는 동일하게 구성되고 내삽법은 다른 영역에서 실행함으로써 에러를 대폭 감소시켰다^[20]. 하이브리드 메쉬법은 링 롤링과 다단계 단조에 적용되었으며^[21-24] AMS는 기하학적 메쉬를 SMS는 해석용 메쉬를 지칭한다.

이때 하이브리드 메쉬는 종래방법 보다 72% 까지 더 빠른 해석이 가능했다. 그러나, AMS 메쉬에서는 어떠한 요소재구성(Remeshing)이 이루어지지 않고 변형영역 이외에서는 온도등과 같은 변수들의 값이 많이 변화되지 않기 때문에 하이브리드 요소의 정밀도는 감소됨이 보고되었다^[23].

멀티그리드(Multi-grid)법(그림 3)은 반복 해석기법으로 효과적인 에러 감소를 얻기 위해 일련의 계통적 그리드에 대해 시스템 방정식을 푸는 것이 기본 원리라 할 수 있다. 멀티 그리드법을 대수학적으로 설명하면 그림 4와 같이 표현할 수 있다^[25].

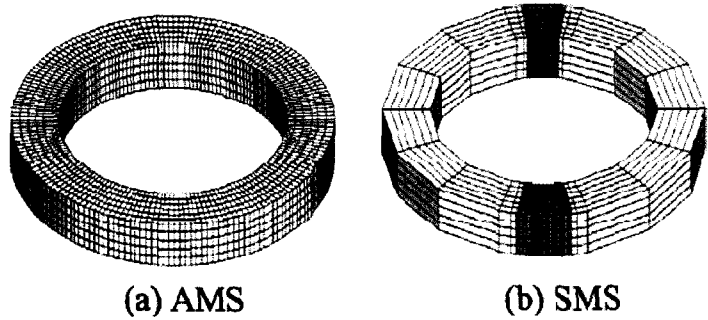


그림 2. Hybrid mesh approach: (a) Actually Rotating Mesh System, (b) Spatially Fixed Mesh System

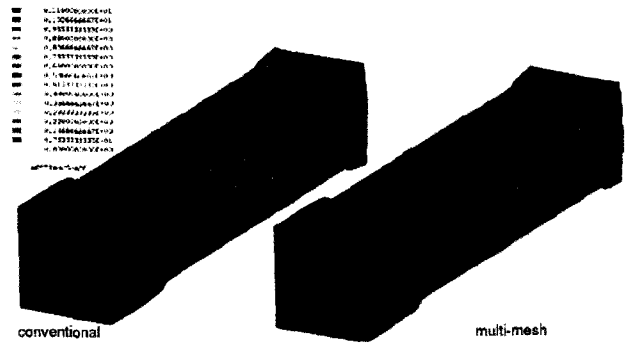


그림 3. Basic idea of multi-grid technique.

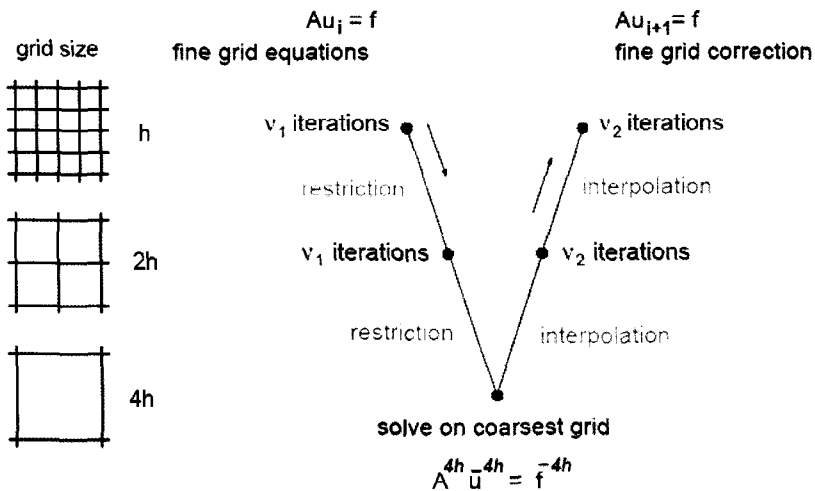


그림 4. Basic idea of multi-grid technique^[25]

2.2.2 특수모델

특정 성형공정에 대해 효과적인 모델을 구축한 것들이 특수모델들로서 표 6에 나타나있다.

표 2. Summary of special models

Method	Processes analyzed	References
Pseudo Plane Strain	Ring-rolling	[29-35]
Steady State Partial Models	Ring-rolling	[36-39]
Transient Partial Models	Ring-rolling	[40, 41]
Automatic Expansion of Domain Method	Radial Forging	[42]
Linearization Method	Orbital Forging	[43]

첫 번째 잘 알려진 특별한 점진성형에 대한 효과적인 모델은 평면 링 롤링에 적용된 준평면변형을 모델이다. 핵심 아이디어는 원주방향 변형을 속도들이 반복적으로 결정되는 2차원적 유한요소모델을 갖는 링의 반경방향 단면의 모델링이다. 추가적인 반복과 다수 반경방향 단면 계산들에도 불구하고, 이 방식은 단지 2차원 계산이 이루어지는 만큼 첫 번째 효과적인 계산 전략에 해당한다.^[29-35]

또 다른 분석법은 링 롤링시 성형영역 부근 소재 일부분이 부분적으로 정적 상태에 있다는 모델을 이용하는 것이다.^[37, 38] 평면변형을 조각 모델에서 3차원 부분이 축대칭 모델로 이용되게 된다.^[39, 40]

최근 2가지 비정상상태의 부분 모델이 링 롤링용으로 소개되었다.^[40, 41] 2가지 경우에 변형영역 부근의 링 영역은 실제 상황처럼 진동이 일어날 수 있다는 것으로 그림 5는 강제인 끝 표면을 진동시키는 부분적 링 모델을 제시하고 있다. 변형이 진행됨에 따라 링은 강제 경계 가장자리로부터 그 지름이 팽창한다.^[40] 이 모델은 단면들의 와핑(Warping)을 풀어주는 것이 개선사항에 해당된다.(그림 6) 여기서, 탄성 경계층들이 롤들의 축을 따라 평면밖 변형이 가능하도록 하는 모델에 추가된다.^[41] 동일한 모델에 대해 계산시간은 범용 PC에서 전체 링 모델에 비해 20배까지 속도가 증가되었다.

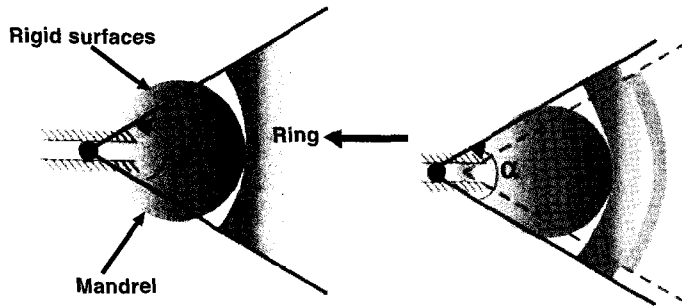


그림 5. Partial ring method with oscillating rigid boundary surfaces

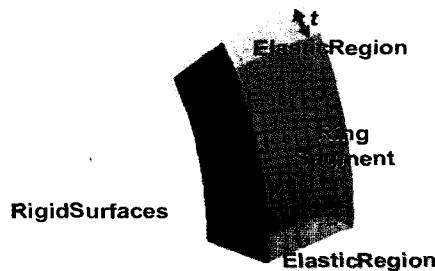


그림 6. Partial ring method with oscillating elastic boundary surfaces



반경단조(Radial Forging)는 작은 소성변형으로 수십번에서 수백번에 이르는 단조과정을 필요로 하는 만큼 공정 시간이 방대하다. 계산시간을 줄이기 위한 획기적인 방법으로 최근 자동 해석영역 증가법(Automatic Domain Expansion Method)이 있다^[42]. 그림 7에서처럼 단조 관심영역(Domain)이 단조과정 과정 동안 팽창된다. 강소성 구성식에 대해 팽창된 도메인에 경계조건들은 고정된 강체에 또는 이동하는 강체에 대응하게 된다. 이러한 과정으로 계산시간을 3~4배까지 감소시킬 수 있다.

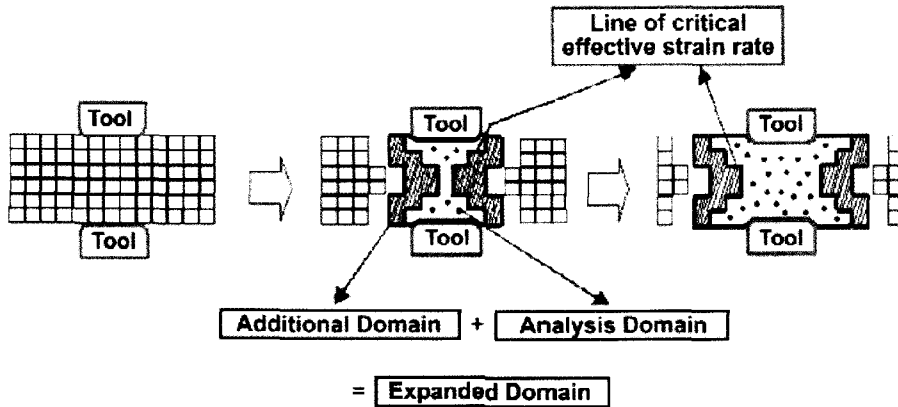


그림 7. Automatic domain expansion method for radial forging process

2.3. 향후 연구방향

점진성형공정 해석에는 여전히 여러 가지 어려운 문제점들이 있다. 가장 기본적인 어려움은 적합한 재료 구성방정식의 모델링이다. 많은 경우 재료 요소는 한쪽에서는 반복적 부하상태로 다른 한편에서는 제한상태로 노출된다. 반면 변형을 경로는 한 주기에서 다른 주기로 변화하고 있다. 이것이 가장 재료거동을 모사하는데 어려움을 야기시킨다.

또 다른 문제점은 계산효율을 증대시키기 위해 단순화된 수치모델 때문에 정밀도가 저하되는 것이다. 강소성 변형체 모델을 이용함으로써 잔류응력과 탄성회복을 예측하지 못하고 있다.

결국, 스마트한 계산 모델을 고안하여 계산속도를 증가시킴으로써 효율적인 해석을 수행할 수 있도록 하는 것이 우선적인 해결방안 가운데 하나로 볼 수 있으며 현재까지도 상기 문제점들에 대한 연구가 지속되고 있으며 다음의 연구사례들로부터 그 예를 살펴보기로 하자.

3. 점진성형 공정과 수치해석

3.1 압연공정과 수치해석

압연공정은 소성가공 공정가운데 가장 대표적인 공정이며 그 역사 또한 대표적이라 할 수 있다. 압연공정 가운데 판 압연은 박판에서부터 후판에 이르기까지 현재 생활의 이기들 대부분의 근간을 이루며 그 만큼 연구의 역사 또한 이론해석의 주 대상임과 동시에 조직제어기술의 연구대상 핵심에 위치하고 있다. 따라서, 본 고에서는 너무나 방대한 압연공정에 대한 부분은 포함하지 않고 최근들어 큰 관심이 집중되고 있는 링 롤링 공정에 대해 국한하여 압연공정을 기술하고자 한다.

○ 형상 링 압연(Profile Ring Rolling)

링 제품은 귀금속류에서부터 구조부품에 이르기까지 매우 다양하며, 소재 또한 철계합금은 물론 Al, Cu와 난성형

재인 Ti 및 Ni합금계까지 매우 다양하다. 링 제품들의 산업별 부품들을 정리하면 표 3과 같다. 이 가운데 대형 링 제품들 또한 그림 8에 나타나 있는 바와 같이 단순한 단면 형상에서부터 복잡한 형상의 제품까지 다양한 제품들이 있다. 구조용 부품들 가운데 대표적인 제품들 가운데는 풍력발전용 Flange(Bottom, Middle, Top)류, 터빈발전용 Diaphragm(Inner web, Outer ring), Gear Rim류와 Lock Plate등이 있으며 화학플랜트용 Pressure Vessel, 원자력 발전 반응기용 압력용기 등과 같이 초대형 링들이 있다.

표 3. 링 롤링 공정에 의해 제조되는 부품들

자동차 관련부품 Automobile Relations	Driving Gear, Bevel Gear, Transmission parts, Ball Bearing Race Taper Bearing, Race Roller, Bearing Race, Spherical Bearing Race
풍력 발전관련 부품 Wind energy	Tower flange for wind energy Inner ring & Outer ring for pitch bearing
산업기계류 Industrial Machinery	Gear, Coupling
플랜트, 토목, 건설 기계류 Engineering & Plant Construction Machinery	Bulldozer Planetary Wheel, Slow Bearing Ring, Wheel Tire, Driving Wheel, Tower Flange
선로관련 부품 Railroad Relations	Railroad Wheel, Wheel Bearing
선박 및 배관관련부품 Ship(Marne)& Piping Relations	Neak Flange, Shaft, Piston Rod, Oil Well Pipe Coupling
석유화학관련부품 Petrochemical Relations	Large Flange, Nozzle Flange, Tower Flange
항공기 관련부품 Aircraft Relations	Case Turbine, Case Compressor, Fan Case

■ FLANGE(BOTTOM/MIDDLE/TOP)

- 용 도 : 풍력발전
- Size : Max 6000 ϕ , Max 15Ton



■ DIAPHRAGM (INNERWEB, OUTERING)

- 용 도 : 터빈발전
- Size : Max 6000 ϕ , Max 15Ton



■ GEAR RIM



■ Lock Plate

- 용 도 : 풍력발전
- Size : Max 6000 ϕ , Max 15Ton

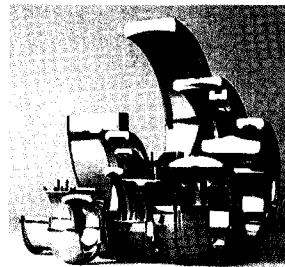


그림 8. 대형 링 제품 사진



구조용 부품으로 이용되는 대형 링은 사용 환경에서의 신뢰성 유지를 위해 용접 링은 사용을 하지 않는 것이 일반적이며 대부분 무용접(Seamless) 링(Ring)을 사용한다. 따라서 무용접 링은 제조비용이 용접 링에 비해 상대적으로 높다하더라도 높은 신뢰성이 필요한 구조용 부품에 널리 이용되고 있으며, 대부분 소성가공 공정을 이용해 제조된다. 링을 제조하는 방법으로는 여러 가지 소성가공 기술(압출, 분말야금, 단조)이 이용될 수 있으나, 지름이 2,000 mm를 상회하는 대형 링의 경우는 링 롤링(Ring Rolling)이나 링 단조(Ring Forging)가 적합한 공정 중 하나이다. 이 가운데 링 롤링 공정은 상대적으로 링의 높이가 낮은 제품을 성형하는데 적합하며 링 단조 공정은 링 높이가 높은 제품에 적합한 특징이 있다. 본 고에서는 링 압연기술, 특히 형상 링 압연기술에 대하여 정리하였다.

링 롤링 공정은 이름에 없는 링 모양의 제품을 만드는 공정으로, 링 롤링공정에 대한 개념도는 아래 그림 9와 같으며 소재는 이축압축응력상태에서 연속적인 변형이 일어난다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 링 롤링 장비는 구동롤(Main roll), 압력롤(Mandrel, Idler Roll), 축롤(Rounding, Roll, Axial Roll)로 구성되어 있으며, 구동롤이 회전하면서 압력롤과 소재(Workpiece)를 회전시키는 역할을 한다. 또한 압력롤과 축롤은 각각 링의 두께와 높이를 감소시켜 단면형상을 이루고 이때 소재의 지름은 증가하게 된다.

링 롤링 공정에 대한 아이디어는 1980년대 일본 히다치(Hitachi)사에서 철도차륜을 다양한 제품에 대응하기 위해 고안되었다^[44]. 아헨 공대는 이 아이디어를 이용하여 반경방향 점진 링압연(Radial Incremental Ring Rolling)기술을 개발하였으며^[45, 46], 축롤과 반경방향을 모두 제어하는 성형기술 또한 개발하였다^[47]. 그림 10(a)는 멘드렐을 이용 반경방향을 제어함으로써 단면에 형상을 부여하는 방식을 그림 10(b)는 축롤을 이용하여 높이 방향의 형상을 제어하는 방식을 나타내고 있다.

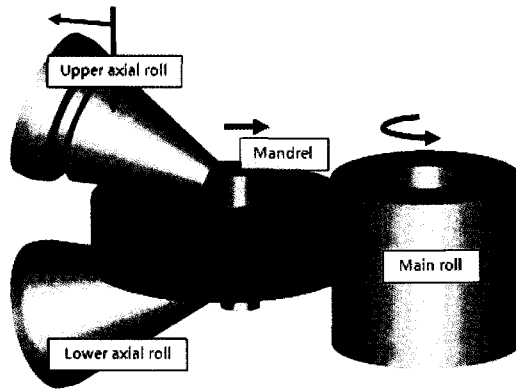
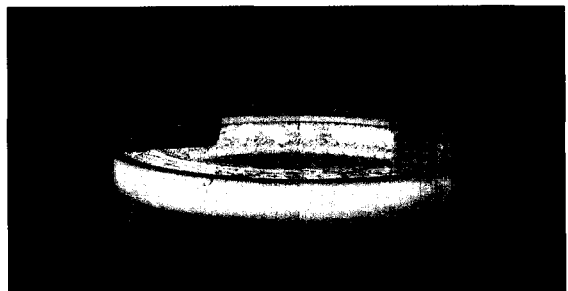


그림 9. 링 롤링(Ring Rolling) 공정 개념도



(a) 멘드렐 제어 반경방향 제어 방식



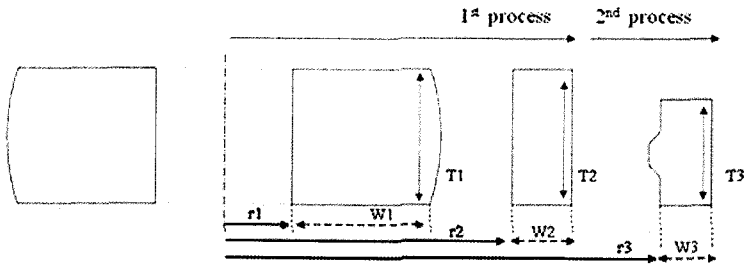
(b) 축롤 제어 높이방향 제어 방식

그림 10.형상 링 롤링(Ring Rolling) 공정의 대표 방식

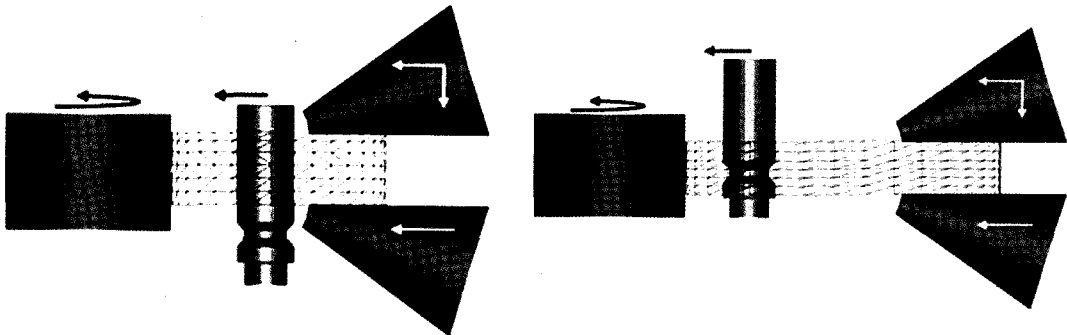
결국, 최종 단면 형상으로 제조할 수 있는 형상 링 롤링(Profile ring rolling) 공정 개발은 재료 이용율을 10% 이상 향상시킬 수 있는 장점으로 제조원가를 감소시키고 그 만큼의 환경오염 방지 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 형상 링 롤링 공정을 이용할 경우는 잉곳을 이용하지 않고 슬라브(Slab)를 이용하여 제조되는 제품의 경우도 동일한 효과를 얻을 수 있다. 그러나 선형 링 롤링공정과 달리 형상 링 롤링공정은 기술적 난이도 매우 높기 때문에 소재의 최적 블랭크 크기와 금형-Mandrel, 메인 롤(Main Roll) 등- 설계에 대한 CAD/CAM 기술이 필요하다.

또한, 형상 링 압연 공정을 수행할 경우 간단한 링 형상을 구현할 경우에 비해 표면결함 및 불균일 변형 등의 각종 성형결함을 초래할 가능성이 높기 때문에 성형결함을 사전에 예측할 수 있는 기술이 요구되며 형상 링 롤링공정의 핵심 기술 분야인 초기 빌렛(Billet), 블랭크(Blank), 링 압연품의 형상설계와 함께 FEM해석을 통한 최적 금형 및 공정설계기술을 축적함으로써 세계적인 경쟁력을 갖추는 것 또한 절실히 요구되고 있다.

형상 링 롤링 방식 가운데 우선 개발되었으며 상대적으로 단순한 개념인 맨드릴 제어방식에 대한 개념도 및 각 공정에서의 작동원리 및 성형품의 양부에 따른 단면 형상은 그림 11에 나타나 있다. 축를 제어방식에 비해 형상이 대칭 형상일 경우가 대부분이며 제어 난이도 또한 상대적으로 낮은 방식이다.

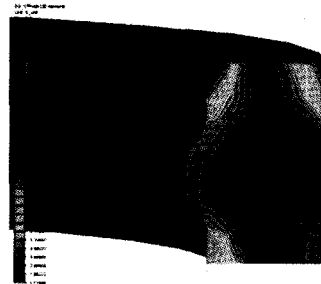
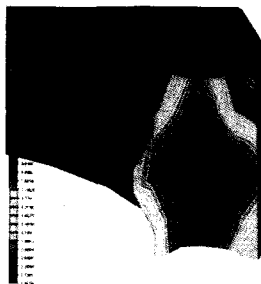


(a) 맨드릴 제어방식의 형상링 공정 개념도



(b) 1차 링 반경 확대 공정

(c) 2차 링 반경 확대 공정



(d) 형상링 단면; 불량 제품(왼쪽), 건전 제품(오른쪽)

그림 11. 맨드릴 제어방식 형상 링 롤링



축률 제어방식을 이용한 비대칭 형상 링 롤링의 개략도는 그림 12와 같다.

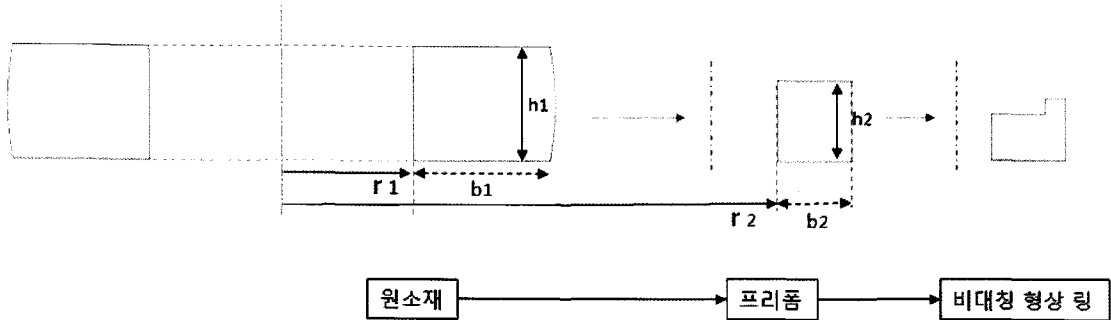


그림 12. 축률 제어방식 비대칭 형상 링 롤링의 개략도

링 롤링 성형공정에 대한 수치해석은 내연적방법(Implicit Method)을 이용하며 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법을 이용하여 해석하는 것이 일반적이다. 회전체에 대한 변형해석은 많은 시간이 소요되는 만큼 계산 시간 단축을 위한 수치적 방법에 대해서는 여전히 미진한 상태이다. 그러나, 접촉처리 문제를 효율적으로 다루는 것이 현재까지는 최선의 방법이다.

형상 링 롤링 성형공정은 업셋팅(Upsetting) 후 펀칭(Punching)한 소재(Blank)를 형상을 만들기 전 단계까지 1차 링 압연(1st Ring rolling)하고 1차로 링 압연한 소재를 예비적 성형품(Preform)이라 한다.

예비 성형체에서 구체적인 형상을 만드는 2차 링 롤링공정(2nd Ring rolling)을 실시하여 대칭형상 링을 제조하게 된다. 따라서 FEM 해석시에도 동일한 단계로 모델링 한 후 실 공정과 동일 조건으로 비정상 상태 해석을 수행하였다. 그림 13은 형상 링 롤링의 각부 명칭과 공구들의 구동을 그림으로 나타내었다.

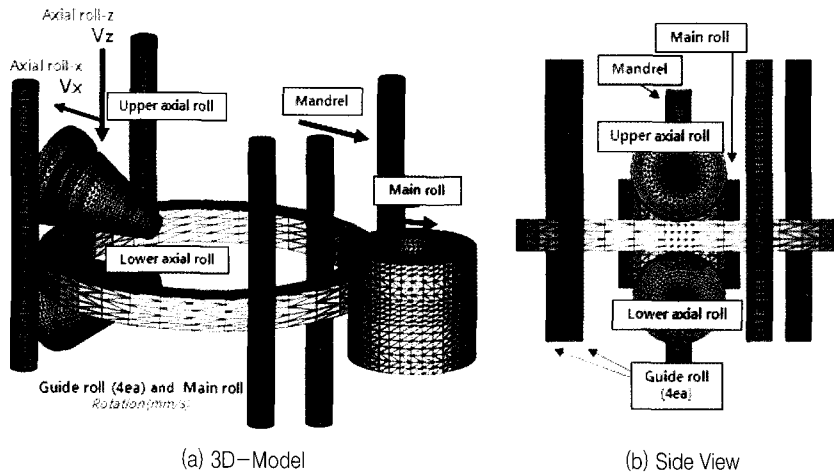


그림 13. 형상 링 롤링의 각부 명칭과 공정변수

링의 두께방향의(Z Axis)의 변화량은 상부 축 롤(Upper Axial Roll)의 링 두께방향 이동거리를 제어하고 링의 폭 방향(X Axis) 변화량은 맨드렐의 이동거리와 상부 축 롤(Upper Axial Roll)의 폭 방향 이동거리를 제어한다. 그림 14는 비대칭 형상 링 롤링에서 형상을 성형하는 동안의 링 내부 압력분포를 공정순으로 나타내고 있다.

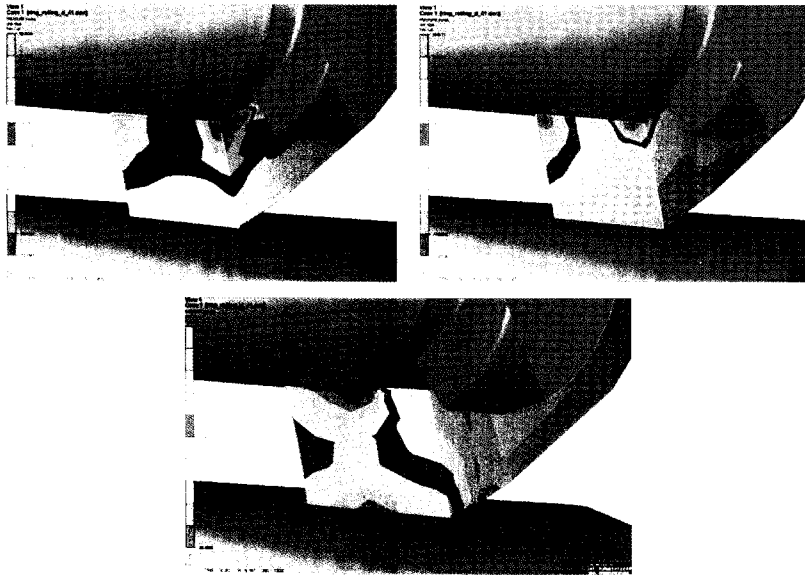


그림 14. 비대칭 형상 링 롤링에서 형상을 성형하는 동안의 링 내부 압력분포

그림 15에서는 링 내부의 시간에 따른 부위별 온도변화를 그래프로, 그림 16은 공정시간에 따른 형상 링 단면의 유효변형율의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 그림 17은 형상 링 롤링 공정에서 형상 링 단면의 속도분포를 나타내고 있는 것으로 각 단면의 불균일성 때문에 발생하는 속도편차에 의해 링 형상이 외곡됨을 잘 나타내고 있다.

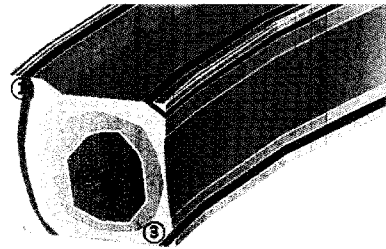
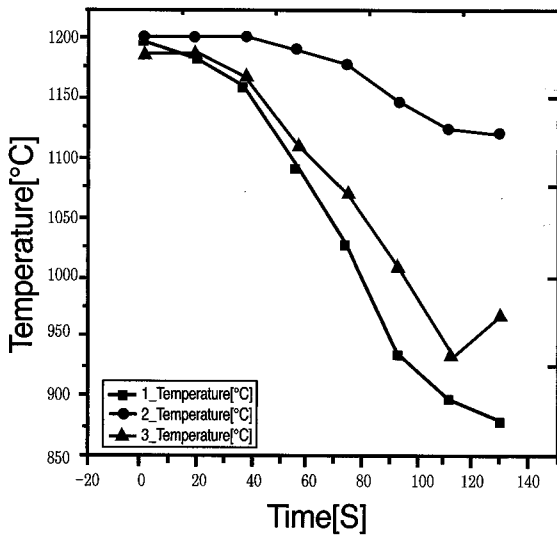


그림 15. 시간에 따른 부위별 온도변화

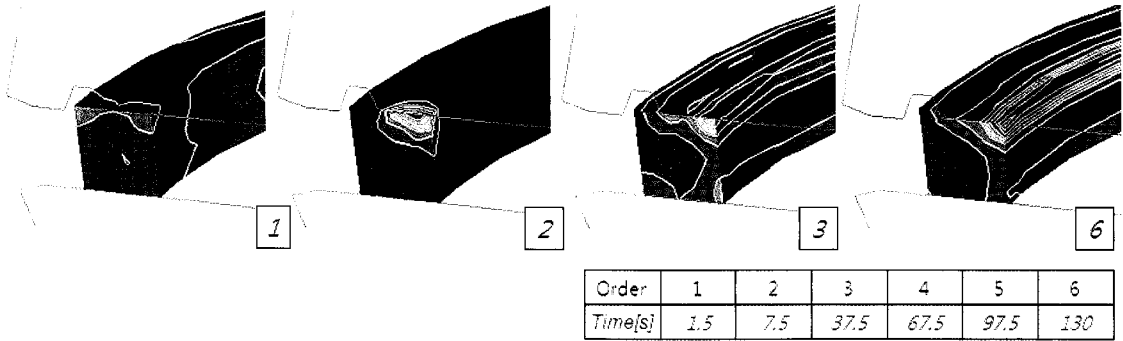


그림 16. 공정시간에 따른 형상 링 단면의 유효변형율의 변화

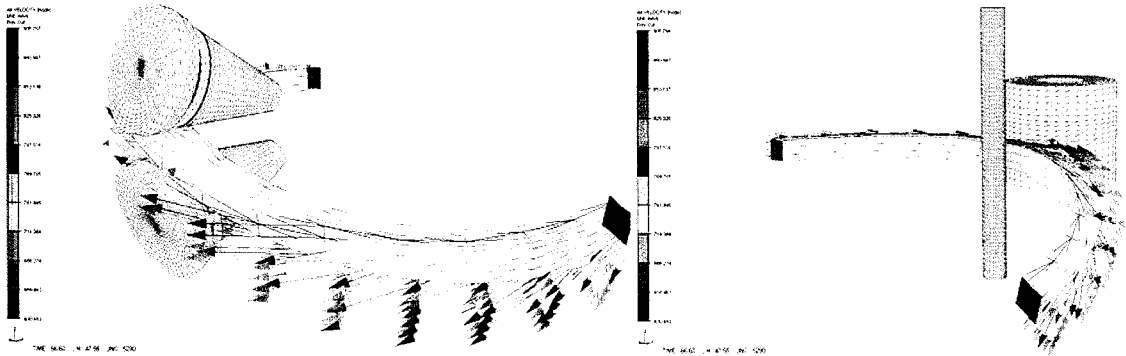


그림 17. 형상 링 롤링 공정에서 형상 링 단면의 속도 분포

형상 링 압연 공정 설계 시 예비 성형체의 크기 설계의 기호 설정에 있어 내부 유효 변형율의 분포가 기준으로 작용할 수 있음을 그림 18에 나타나있다. 단면에서 변형율의 분포가 대칭을 이루며 내부와 링의 상부를 제외한 링 각각의 부위의 변형율의 분포 상태가 링 롤링공정에서 중요한 부분임을 알 수 있었다. 그림 19는 형상 링 롤링 공정으로 만든 제품의 사진이다.

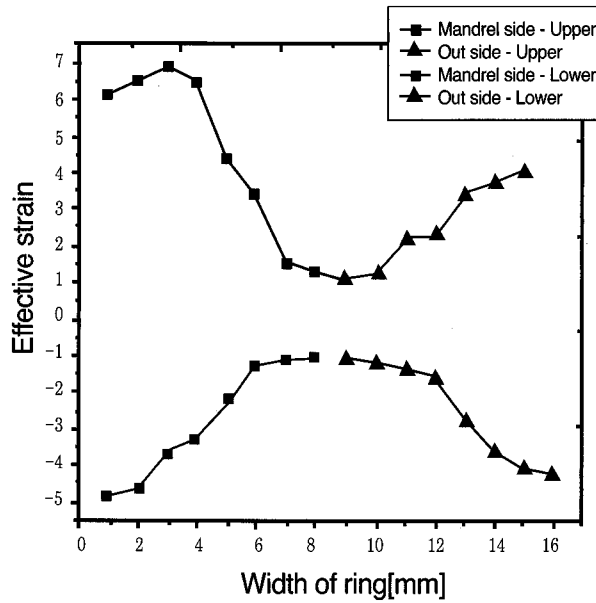
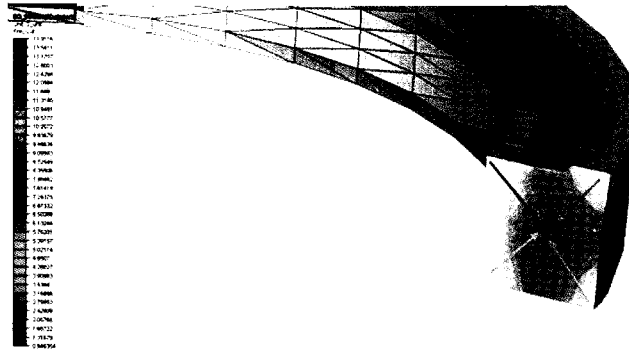
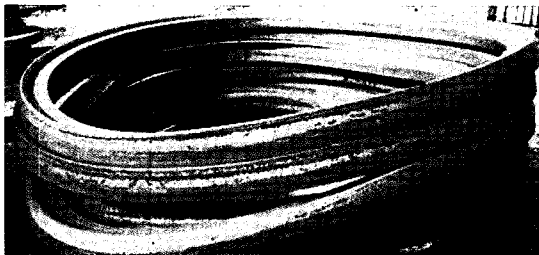
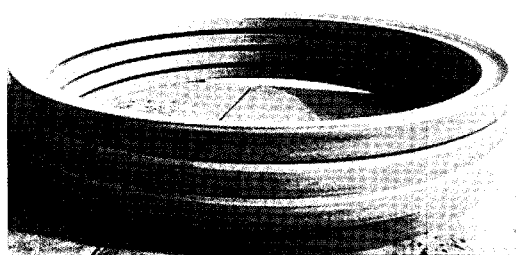


그림 18. 형상 링 롤링 공정에서 형상 링 단면의 유효변형을 분포



(a) 찌그러진 L형 형상 링 제품



(b) 이상적인 L형 형상 링 제품

그림 19. 형상 링 롤링 제품

3.2 단조공정과 수치해석

3.2.1 레디알 포징(Radial Forging)

레디알 포징은 일반단조시 사용되는 가압장치인 상하운동의 프레스(Press)와는 달리 소재를 반경방향으로 4방향에서 가압을 하는 원리를 이용한 가압장치를 이용하는 것이 특징으로서 그 가압원리로는 로타리 스웨이징

(Rotary Swaging)과 유사한 공정이다. 그림 20은 레디알 포징의 개념도를 나타내는 그림으로서 소재의 회전과 펀치의 가압이 거의 동시에 연속적으로 이루어지는 만큼 소재의 변형률속도의 제어와 온도제어에 유리한 장점을 갖고 있다. 따라서, 온도와 변형률 속도에 의존적인 소재의 소성변형에 적합한 공정으로써 국내에는 아직 기반이 부족한 상태라 할 수 있다.

Radial Forging 공정에서 공정변수가 성형에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 공정변수분석에 관한 Case별 해석을 수행하였고, 이를 비교 분석 하였다. Radial Forging 공정 성형에 영향을 미치는 변수로는 크게 소재의 이송거리, 회전각도, 금형의 성형깊이를 고려해 볼 수 있다. 그림 21은 봉재의 지름을 감소시키면서 조직을 균일·미세화하고자 할 경우를 위해 수행한 FEM해석 모델로서 펀치의 가압과 소재의 회전을 실제 상황과 동일한 수준으로 고려할 수 있도록 하였다.

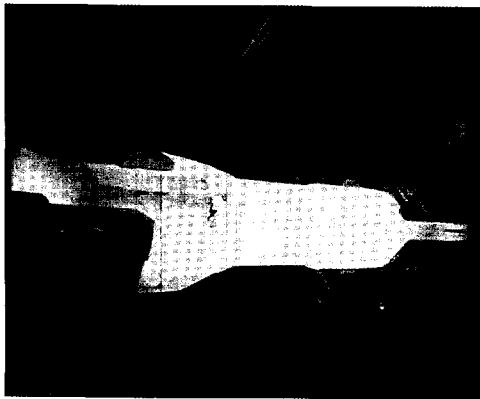


그림 20. 레디알 포징 설비 사진

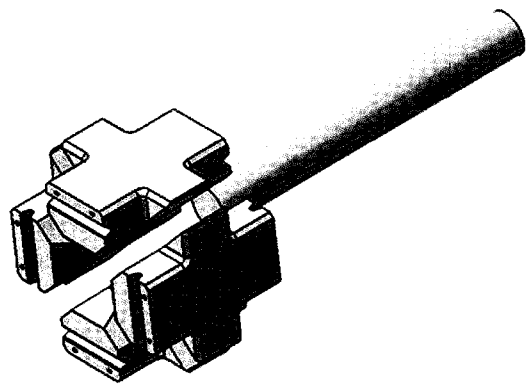


그림 21. 레디알 포징 FEM 해석모델

초기 소재의 크기는 150(d) × 1800(l)mm 이고 최종 소재의 지름은 70mm를 목표로 하고 있다. 금형의 크기는 65(w) × 235(l)mm 이며, 40mm/s로 성형할 수 있다. 소재의 초기온도는 950℃이며, 금형은 350℃로 선정하여 해석하였다. 매니플레이터(Manipulator)는 소재의 양쪽 끝단을 지지하고 있으며, 소재를 회전시키는 역할 또한 담당한다. 해석에서는 매니플레이터를 따로 모델링 하지 않고, 경계조건으로 지정해 주었다. 공정변수의 영향을 비교하기 위하여 다음의 표 4와 같이 각 조건별로 해석을 수행하였다. 여기서 T는 소재의 이송거리, R은 소재의 회전각도, D는 금형의 성형 깊이를 각각 의미한다.

표 4. 공정변수 영향 분석을 위한 공정 조건 설계

CASE	T	R	D
1	50	30	10(5)
2	100	30	10(5)
3	150	30	10(5)
4	200	30	10(5)
5	50	10	10(5)
6	50	20	10(5)
7	50	30	5(2.5)
8	50	30	15(7.5)

표 4에 설계된 조건으로 해석을 수행한 다음 비교를 위하여 그림 22에서부터 그림 24에 해석결과를 나타내었다.

그림 22에는 소재의 이송길이에 따른 빌렛의 단면 형상을 비교하였고, 그림 23은 소재의 회전각도에 따른 빌렛 단면의 형상을 비교하였으며, 그림 24는 금형의 성형 깊이에 따른 빌렛의 단면 및 길이방향의 형상을 각각 비교하여 최적의 공정조건설계에 근접하고자 하였다. 각각의 경우를 종합해 보면, 회전 각도가 30°이고, 소재 이송 길이가 150mm 이며, 성형 깊이가 5mm일 때 빌렛의 형상이 가장 우수함을 알 수 있다.

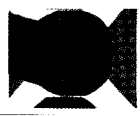

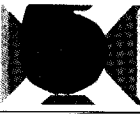
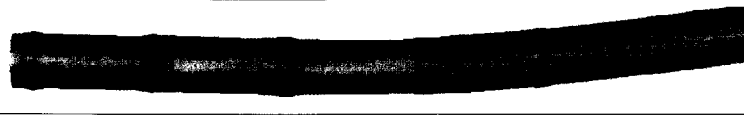




CASE	단면형상	길이방향 형상
1		
2		
3		
4		

그림 22. 소재의 이송길이에 따른 빌렛 단면 형상 비교


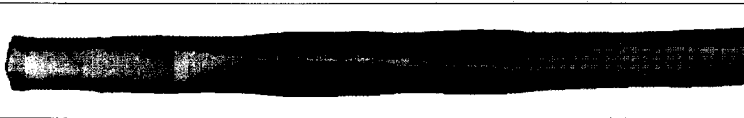

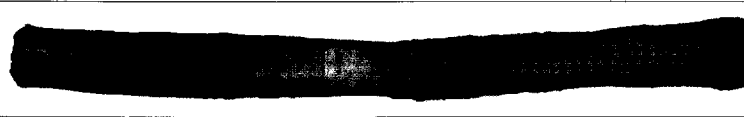

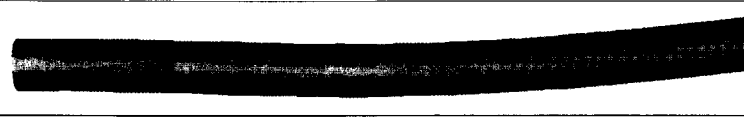
CASE	단면형상	길이방향 형상
5		
6		
1		

그림 23. 소재의 회전각도에 따른 빌렛 단면 형상 비교

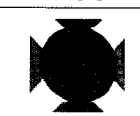
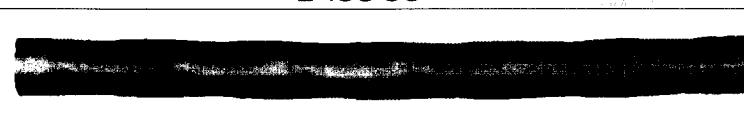

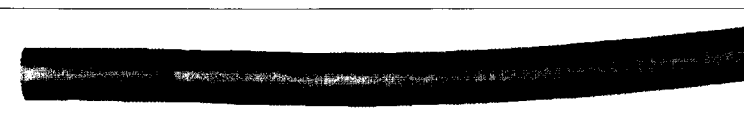

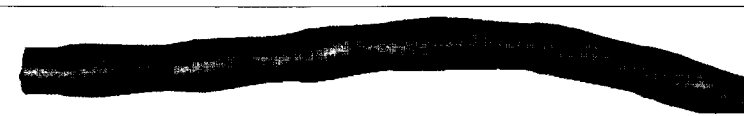
CASE	단면형상	길이방향 형상
7		
1		
8		

그림 24. 성형 깊이에 따른 빌렛 단면 형상 비교

3.2.2 로타리 스웨이징(Rotary Swaging)

로타리 스웨이징은 봉재나 튜브재의 단면을 변화시키는 공정으로 2축 유효응력 상태에 의해 특징지워진다. 적용 대상품의 대부분은 지름을 축소시키는 것과 경사면을 형성하는 것으로 구분된다. 특정한 제품(Drive Shaft)들은 원형단면과 사각 또는 육각단면이 경사면 없이 바로 연결되는 제품들이 있으며 이미, 절삭가공 공정을 대체하고 있다. 또한 기어 샤프트와 같은 자동차 파워트레인 부품들이 절삭가공에서 이 공법으로 전환되고 있다. 또한, 기존의 공정에서는 구현하기 곤란했던 국부적 외경 증가부분의 성형을 구현할 수 있는 새로운 공정이 개발되고 있다. 독일 Darmstadt공대의 IFMI(Institute for Production Engineering and Forming Machines)에서는 Axia-Radial-Forming으로 불리는 로타리 스웨이징과 압출공정을 혼합한 기술을 개발하여 Shaft collar를 성형하는데 성공하였으며 국부 가열이 이용되었다^[48-51].

3.3 스피닝 공정과 수치해석

3.3.1 스피닝(Spinning)

스피닝 공정은 디스크나 튜브와 같이 축대칭 형상의 판재를 고속으로 회전시키면서 공구를 이용해 점진적으로 성형하는 기술이다. 스피닝은 일반적인 프레스 공정에 비해 낮은 성형력을 사용하기 때문에 서양에서는 중세시대 이전부터 축대칭 형상의 금속제품을 성형하는데 사용해 오고 있다.^[52, 53] 우리나라에서도 낫그릇, 징 등이 스피닝 공정에 의해 제조되었다. 현대에도 공예가들이 금속공예품, 건축장식재 등을 만드는데 활용되고 있으며 공업적으로는 로켓 노즈 콘(Rocket Nose Cone)으로부터 주방용기, 고압가스통 등의 고정밀도 축대칭 부품을 제조하는데 적용되고 있다(그림 25).

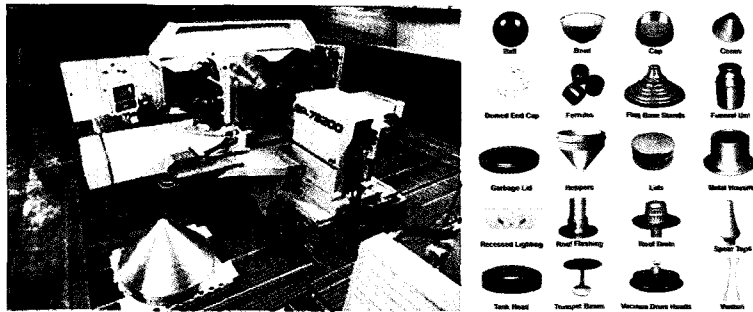


그림 25. 스피닝 제품의 예

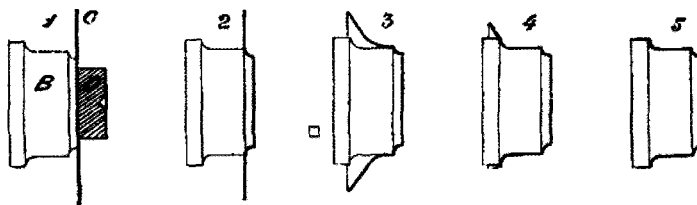


그림 26. 스피닝 공정의 예

스피닝 공정은 그림 26에 나타난 것과 같이 특정한 크기로 재단된 판재를 선반의 구동축에 설치된 맨드릴에 일정한 압력을 가하여 장착한 후 고속으로 회전시키면서 공구를 이용하여 국부적으로 소재를 변형시키는 비교적 단순한 공정으로 이루어져 있다. 맨드릴과 공구 형상 및 투입 경로에 따라 스피닝 제품의 복잡도가 결정된다. 스피닝에서 제품의 직경은 투입소재의 직경에 비해 항상 작아야하기 때문에 소재는 연신되거나 두께가 두꺼워지지 않으면 원주방

향으로 주름이 발생한다. 하지만, 맨드렐을 사용하지 않고 오목한 형상을 가지는 제품의 성형도 가능하다.

스피닝 공정에는 알루미늄, 스테인레스강을 포함해 기본적으로 일정 수준 이상의 연신율을 가지는 소재는 모두 적용이 가능하다. 스피닝 제품은 장비의 크기에만 의존할 뿐 장비의 하중 능력과는 무관하다. 소재의 상온 성형성이 낮은 경우에는 소재와 공구를 가열하는 열간 스피닝 공정이 이용되기도 한다.

전통적인 스피닝에서는 스푼(Spoon)이라고 불리는 공구가 적용되었으나 성형시 발생하는 마찰을 줄이고 공구수명을 증대할 뿐만 아니라 표면거칠기도 향상시키기 위해 회전하는 공구가 일반적으로 적용되고 있다. 또한, 정밀한 치수관리를 위해 공구의 경로도 수치제어형 선반을 이용되고 있다.

스피닝 공정의 장점은 공구경로를 변화시킴으로써 다양한 형상의 제품을 손쉽게 구현할 수 있는데 있다. 다른 금속 성형공정은 기본적으로 제품의 형상에 따른 금형이 필요하기 때문에 공정의 최적화에 도달하는데 스피닝에 비해 비용이 높다. 따라서 스피닝은 비교적 얇은 판재를 적용하여 축대칭 제품을 제작할 경우, 소량의 시제품부터 대량 생산에 이르기까지 경쟁력이 높은 공정이다.

3.3.2 롤다이 성형(Roll Die Forming)

금형내에 운동하는 롤을 삽입하여 치차를 형성하는 기술로 판재 치형류 부품의 생산성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술로 독일 Beier에 의해 개발된 공정이다. 금형구조는 일반 판재 성형 금형이 상형과 하형으로 구성된 것에 대비하여 Mandrel, Die, Roller로 구성되어 있다. 기존 판재 성형 프레스 성형과 동일한 설비를 이용할 수 있는 장점이 있으나 금형의 설계 및 제작이 매우 어려운 공정기술이다. 기존에 단조공법+기계가공을 이용하여 제작되는 부품을 판재성형 프레스 공정으로 제조함에 따라 단조용 전처리(소둔, 고상 윤회처리)가 필요 없어 친환경적이며 제조비용 절감에 유리하며 단조를 적용한 기존 공정에 대비하여 치차 형성을 포함한 기계가공 공수를 크게 낮추어 생산성을 크게 향상시킬 수 있다^[64].

하지만, Roll Die Forming의 경우 판재의 성형성을 고려해 다단에 걸친 성형량 배분, 롤-맨드렐 간격에 따른 치수 정밀도 제어, 롤 수명 향상 등의 여러 가지 기술적인 난점이 존재하여 아직까지 양산제품을 생산할 수 있는 상용화 기술이 국내에서는 개발되지 않고 있는 실정이며 독일 금형사들이 전 세계에서 유일하게 Roll Die Forming 성형의 양산기술을 확보하였으며 일본 금형사들이 기술개발에 나서고 있다.

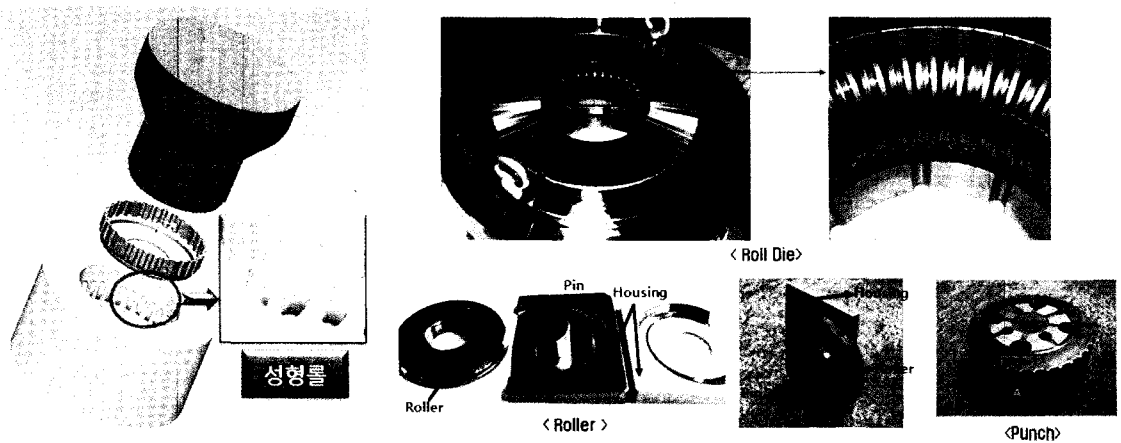


그림 27. Roll die forming 개념 및 금형 구조

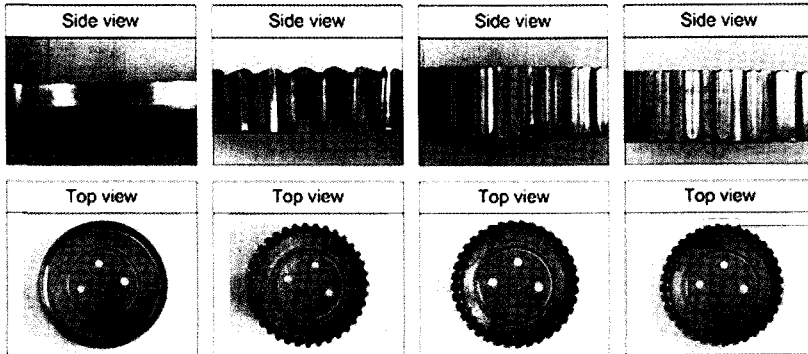


그림 28. Roll die forming 적용 제품

3.3.3 플로우 포밍(Flow Forming)

플로우 포밍은 생산되는 제품의 외형상으로 스피닝과 유사한 공정이다. 하지만, 플로우 포밍은 성형시 한 개 이상의 롤러에 높은 성형하중을 가하여 보다 적극적으로 소성가공을 유도한다는 측면에서 스피닝과 차이가 있다. 회전하는 성형 롤러의 운동 제어를 이용하여 판재소재를 점진적으로 성형하는 기술이다. 플로우 포밍은 복잡한 형상을 완제품 치수에 최대한 가깝게 구현할 수 있으며 그 과정에 형성된 소재결 제어 및 가공 경화를 이용하여 기계적 특성(정적강도, 피로강도, 표면경화) 향상을 달성할 수 있는 장점을 가진다. 높은 성형하중을 가하는 롤러를 통해 소재를 늘리거나 두께를 감소시키는 성형이 가능하기 때문에 스피닝에 비해 보다 복잡한 형상 및 고강도 소재의 적용이 가능한 장점을 가진다. 이러한 이유로 플로우 포밍은 전단 스피닝(Shear Spinning)으로 불리기도 한다. 하지만, 통상적으로 성형시 판재의 두께를 일정하게 유지함으로써 성형전 판재의 면적과 성형품의 면적의 차이가 없는 경우를 전단 스피닝으로 분류한다.

그림 29는 플로우 포밍 공정의 예를 보여주는 그림으로 판재에서 시작하여 점진적으로 3차원적인 형상이 구현되어가는 전형적인 점진 성형공정이다. 성형 하중의 크기 및 롤러의 이송경로는 성형품의 공정설계에 가장 중요한 인자이다. 또한, 스피닝에 비해 큰 하중이 가해지기 때문에 미찰열을 식히기 위해 통상적으로 냉각매체가 사용된다(그림 30).

플로우 포밍은 장비 제작기술이 핵심적인 요소이다. LEIFELD(독일), WF(독일), Autospin(미국) 등이 대표적인 플로우 포밍 장비를 제작할 수 있는 기업이며 국내에서도 중소기업이 해외 수출용으로 최근 개발에 성공한 사례가 있다. 플로우 포밍으로 제작할 수 있는 부품으로는 미사일, 위성발사체, 유도무기 등의 실린더, 자동변속기 축대칭 치형 부품 등이 가장 대표적이다^[55, 56].



그림 29. 플로우 포밍 과정

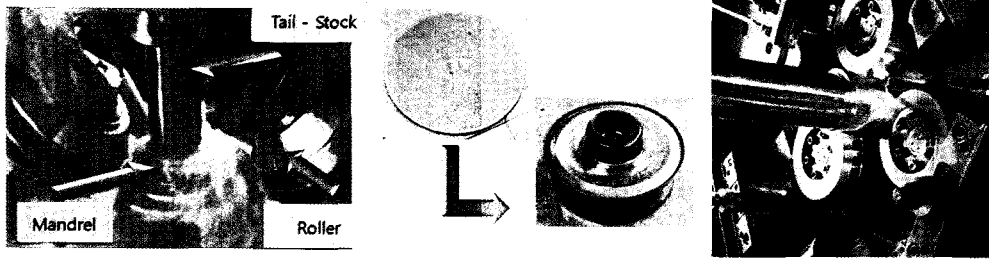


그림 30. 전형적인 플로우 포밍 공정

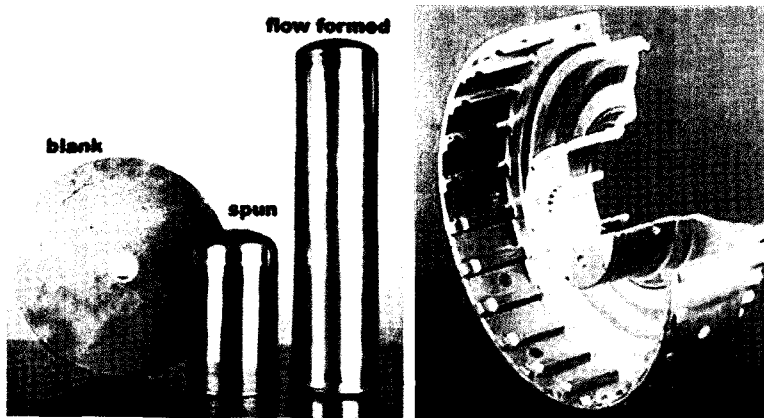


그림 31. 플로우 포밍 제품

3.4 특수성형과 수치해석

3.4.1 롤 포밍(Roll Forming)

나란히 연속된 몇 셋의 성형 롤러에 연속적으로 금속띠판(Coil)을 통과시켜 순차적으로 성형 가공하여 평판에서 목적의 단면 형상으로 접어 나가는 소성 가공법이며, 순차적으로 행하기 때문에 제품의 외관 및 정도가 좋으며 대량 생산이 가능하므로 경제성이 뛰어난 가공방법이다. 롤 성형, 냉간 롤포밍, 냉간압연가공 등으로도 불려지고 있다. 금속을 가공하는 경우, 일반적으로 프레스가공, 판금이라고 하는 방법들이 사용되지만, 롤포밍의 경우 전부 자동

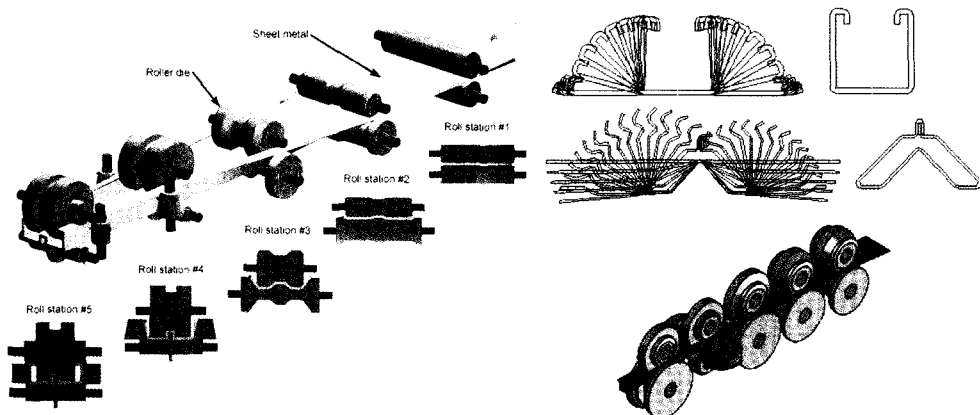


그림 32. Roll forming 성형 단계도 및 단면 디자인

(Automation)화 되어, 금속 시트(Sheet)가 롤포밍 성형기에 자동적으로 빨려 들어가서 가공된 성형품이 빠져나오게 된다. 당연히 판금, 프레스가공에 비해서 가공스피드가 압도적으로 빠르게 된다.

냉간 롤 포밍 제품은 건축, 자동차, 조선, 전자, 기계 등의 광범위한 산업분야에서 중요하게 사용되는 품목입니다. 그 용도는 가이드 레일, 윈도우 및 도어 프레임 등의 구조재료부터 보다 다양한 형상의 이형체에 이르기까지 매우 다양하다. 냉간 롤 성형법의 주된 장점은 실제적으로 무한하게 다양한 단면의 형상이 제조 가능하다는 점, 공정의 고생산성, 공정상에서 재료강화 효과는 얻을 수 있다. 반면에 잔류응력과 새로운 제품을 생산하기 위한 장비 변경비용이 고가라는 부정적인 측면도 있다.

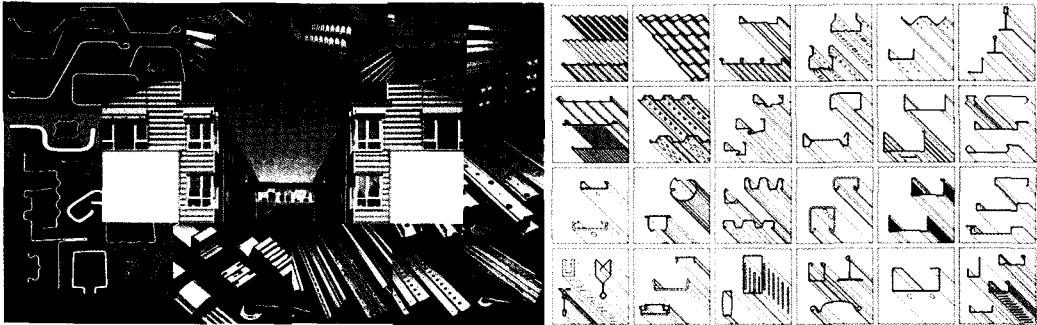


그림 33. 일반적인 Roll forming 제품 및 단면 Profile

롤포밍의 장점을 위에서 언급하였듯이 정리를 하자면,

- 무한한 적용분야; 자동차, 항공, 건축, 외 Roll, Drawings, Part Lists (DATA Manager), CNC programs etc.
- Deformation Technology Module ; calculates, speedily, all major parameter (Material Properties, Material Thickness, Roll Diameter)

- Program produces feedback about possible critical zones. & design check.

;제품개발단계에서 설계, 최종양산까지 모든 과정의 흐름을 DB화.

- 전체 제품 개발 프로세스의 상호관계성.
- 해석 후 3D 결과의 영향을 고려한 디자인.
- 가이드 레일, 윈도우 및 도어 프레임 등 단면의 형상이 제조 가능하다는 장점, 공정의 고생산성, 공정에서의 재료강화 효과.

이러한 롤포밍 공정을 실제 제품에 적용하기 위해서는 단면 Profile 설계 디자인과 롤금형 설계, 해석적인 검토 단계를 거쳐서 롤의 CNC 가공을 하게 된다. 롤금형의 가공이 끝난 후에 롤을 롤포밍기에 셋업하고 최종적인 시험생산을 하면서 롤포밍기와 롤금형, 소재의 진행상태를 확인하게 된다.

아래의 그림 34는 최종 제품으로부터 가져온 단면 프로파일의 Bending Sequences를 나타낸 것이며, 보통 이 프로파일 단면을 기준으로 플라워 디자인(Flow Design)을 검토하게 된다. 이 단면의 플라워 디자인 작업은 롤포밍 단계에서 가장 먼저 진행되고 상당히 중요한 프로세스에 해당된다. 플라워 디자인 작업에서 각각의 앞-뒤 롤셋의 연결성이 제대로 반영되어야 한다. 이것은 연속된 작업으로 이루어져 있는 롤포밍 공정의 특성상 소재가 롤금형에 들어가는 입구측과 제품이 취출되는 출구, 그리고 다음 롤금형의 소재유입이 원활하게 연결되어야 하는 특징을 가지고 있다. 아래의 그림 35는 자동차 범퍼빔(Bump Beam)에 들어가는 형태로 롤포밍 공정을 이용하기 전에는 각 단면 별로 프레스 가공하여 조립 후 용접하여 사용하였다.

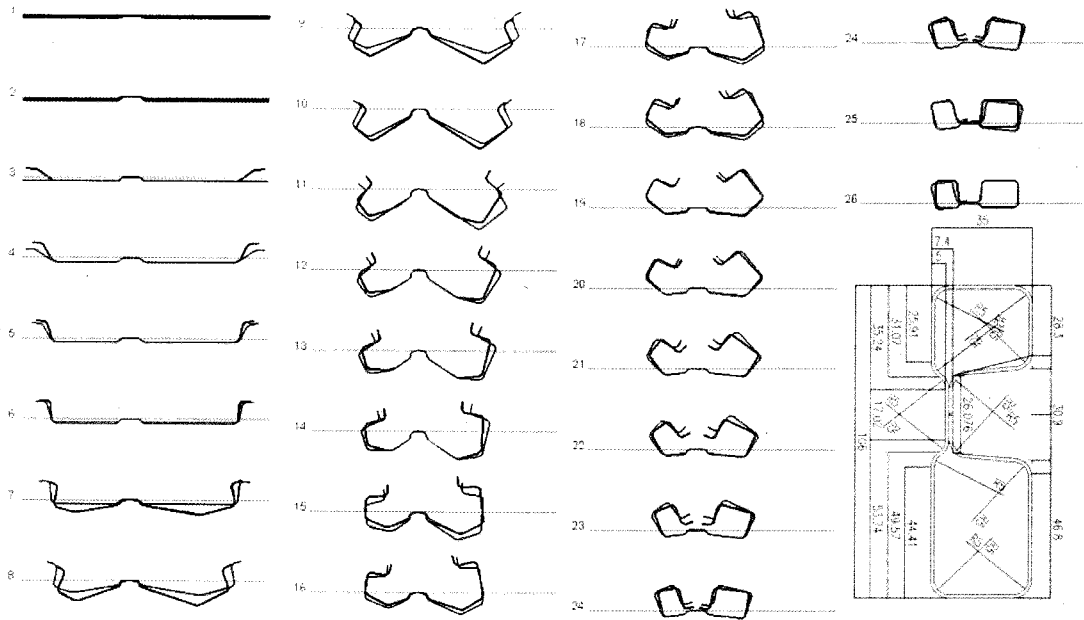


그림 34. 최종제품의 단면과 Flow design process

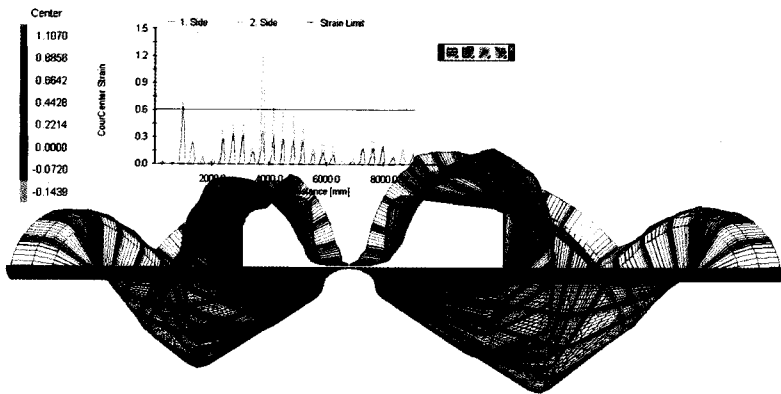


그림 35. 박판 이론과 정적 솔루션을 이용한 시뮬레이션의 예

제품 단면의 플라워 디자인을 각 패스별로 펼치거나 연계하였을 때 각 패스에 발생하는 변형률을 시뮬레이션하여 설계된 Flow Design을 검증해 볼 수 있다. 이 방법은 박판 이론과 정적 솔루션을 포함한 설계 개념으로 일반단면 형태, 튜브, 일정한 패턴의 형태, 와이어(Tube, Trapezoidal, Shaped Tube, Wire) 형태까지 공정상에서 발생하는 길이 방향 변형률을 빠르고 정확하게 계산 할 수 있다. 이 정적해석에 필요한 주요 인자는 재료성질, 판재두께, 롤의 직경, 롤의 형태가 주요 변수가 된다^[57-64].

계산되어 나오는 형상함수로부터 만들어지는 형상은 설계자가 롤 설계를 최적화 할 수 있도록 하여야 하며, 설계 타당성과 설계 취약점에 대한 정보를 파악 할 수 있어야 한다. 이러한 시뮬레이션에 의해 실제 제품을 양산하기 전에 공정을 분석하고 파악할 수 있다. 또한 공정상에서 발생 할 수 있는 스프링백을 고려하거나 롤 머신 설계에서 필요한 다운힐 포밍(Down-Hill Forming) 기술, 각 공정별 변형률(Strain) 값, 모든 진행 과정의 장비와 소재를 입력하고 결과물을 미리 도출해 낼 수 있다.



오픈된 단면 외 폐단면의 경우에는 주로 계관 설계나 빔 설계에 이용되는 설계 방법으로 첫 번째는 롤변수 설계를 하게 되는데, 설계자는 제공되는 성형 방법을 활용하거나 자신의 고유의 필요성에 따라서 성형 순서를 입력 및 계산할 수 있다. 중앙선 기준법, 이중 반경법, W-굽힘법, 선형성형법, 케이지 성형법들 중에서 선택하거나 혹은 설계자 고유의 정의를 생성할 수도 있다. 이러한 변수 설계 방식의 의해서 모든 기술적 변수값을 처리하여 설계자를 지원하게 된다.

박판 이론과 정적 솔루션을 이용한 시뮬레이션의 방법으로 검증된 플라워 디자인이 완성되었다면 다음으로는 설계된 각 패스별로 롤금형을 디자인 하는 작업이 필요하다. 프로파일에 롤형상의 디자인을 자동적으로 만들어주고, 롤의 수정 및 롤 설계에 대한 여러 작업을 하게 된다. 각각의 공정별 롤의 형상을 규격별 도면화 및 최종 가공물의 무게까지 계산되어진다. 아래 그림 36-37은 일정한 패턴 형태를 가지는 반복패턴 단면 (Trapezoidal Section)의 하나로 벨로우즈 단면을 롤 설계 예로 나타낸 것이다.

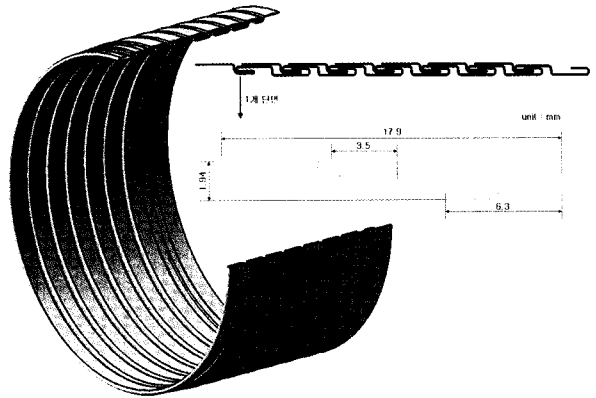


그림 36. 벨로우즈 단면설계 형상 및 치수

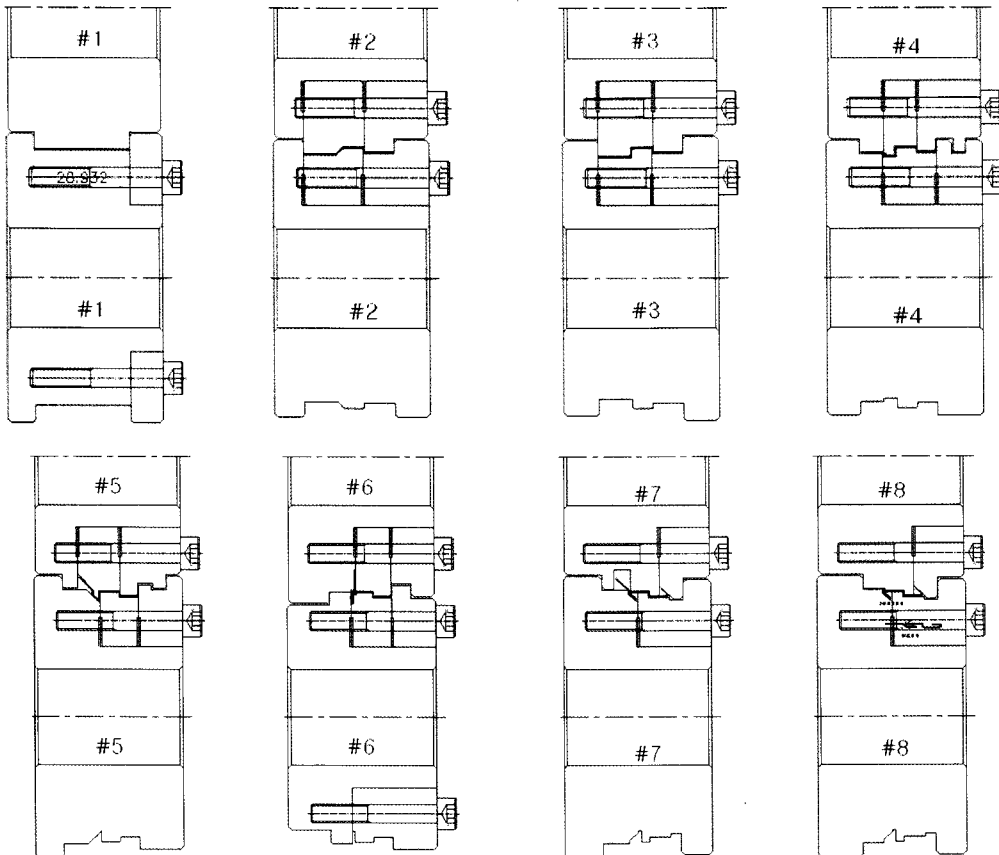


그림 37. 벨로우즈 단면의 롤 설계 예

플라워 디자인 - 정적 해석 검토 - 롤금형 설계 작업이 끝났다면, 다음으로는 설계되어진 금형정보를 바탕으로 비선형 유한요소 해석을 통해 공정상에서 발생하는 힘, 토크, 응력과 최종 생산품의 변형 형상에 대한 3차원의 시각적 형상을 계산해 낼 수 있다. 실제로 그림 38-39에 나타낸 이 방법은 “가상 롤포밍공정”이라고 볼 수 있으며, 실제 하드웨어 제작(롤금형 제작) 이전에 사용자는 필요한 모든 사항을 사전에 검증할 수 있게 된다. 현장 롤포밍 설계자의 요구를 수용하고 패키지를 이용하여 모든 작업을 PC에서 작업 할 수 있는 것이다. 시간이 많이 요구되는 전처리 작업이나 처리하기 난해한 후처리 작업이 필요하지 않고 쉽게 가상 롤포밍 공정을 미리 확인해 볼 수 있다. 설계 모델에서 생성된 플라워 및 롤디자인을 이용하여 단면의 프로파일 및 롤의 설계 후 프로젝트 매니저(Project Manager)에서 생성한 캐드(CAD) 모델을 바로 비선형 유한요소 툴로 전환이 가능하다. 생성된 모델은 비선형유한요소 툴에서 위치 별 데이터를 얻을 수 있게 구성이 되어 있다.

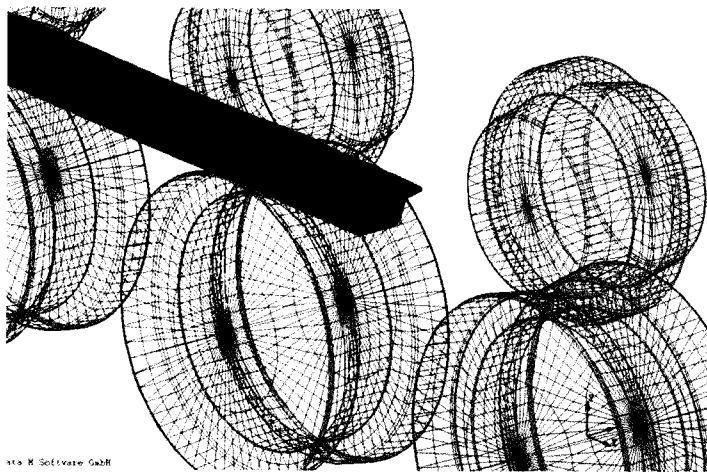


그림 38. 비선형 유한요소 해석 솔루션을 이용한 롤포밍 공정 설계

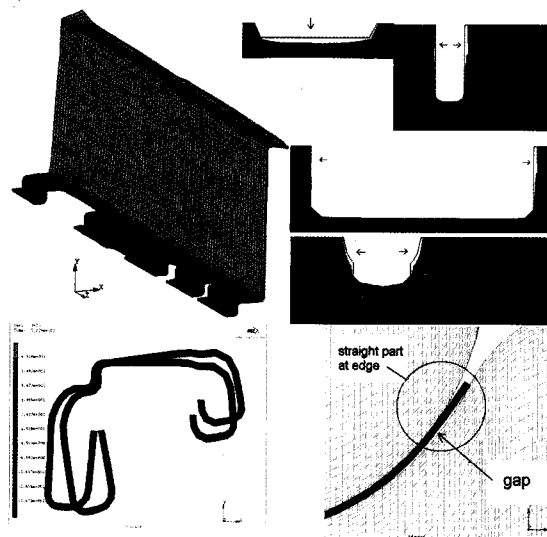


그림 39. 비선형 유한요소 해석 솔루션을 이용한 소재결함 예측



최근에는 상용화된 롤설계 패키지를 이용하여 상당히 빠른 시간내에 단면의 프로파일을 정의할 수 있다. 롤설계 패키지를 활용함으로써 간단한 설계는 물론, 아주 복잡한 형상의 이형재와 형관을 전문적으로 설계할 수 있다. 기획, 설계, 엔지니어링의 비용을 절감해 주며 공정의 모든 단계 즉, 급힘 과정의 플라워 형상 정의, 롤 공구 설계, 기술 계산으로부터 시뮬레이션, 보유 저장된 롤 데이터 관리, CNC 가공과 품질 관리에 이르기까지 모든 공정에서의 설계자를 지원하고 있다. 또한 성형과정의 소재에 걸리는 응력과 변형률을 해석함으로써 설계자는 실제 롤 제작 이전에 공정의 타당성을 검증할 수 있다.

최근에는 단면 형상이 비대칭이거나 일정하지 않은 제품의 성형에도 많은 기술개발이 이루어지고 있다. 보통 롤 포밍 된 단면이나 튜브는 일정한 길이방향 횡단면을 가지게 되는데 자동차산업과 같은 넓은 분야에서의 적용은 다양한 단면들의 프로파일을 요구되어지고 있다. 아래 그림 40은 다양한 단면의 가변롤 성형제품을 나타내고 있다. 아직까지 롤포밍에 사용하는 모든 단면들이 산업에 적용되고 있지는 않지만 점차적으로 확대해 나갈 것으로 판단된다.

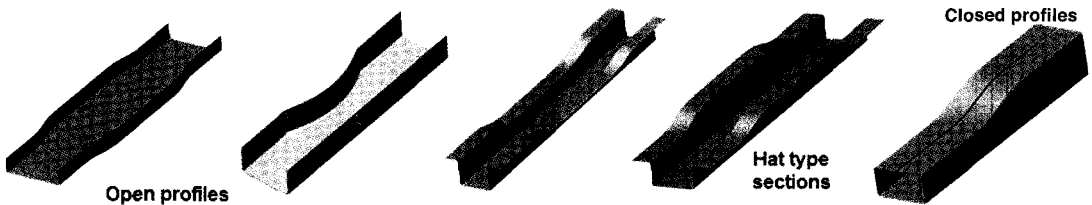


그림 40. Flexible Roll Forming 제품들(플렉서블 롤포밍)

길이방향으로 변화하는 프로파일들은 이동할 수 있는 모터 구동의 롤 도구들로 유연하게 만들어 내고 플렉서블 롤포밍 단계를 제작 할 수 있다. 플렉서블 포밍 단계의 완벽한 제어 장치(소프트웨어와 전동부들)와 롤설계가 함께 병행하여 개발되어 저야 하는 중요한 신기술중의 하나이다(그림 41).

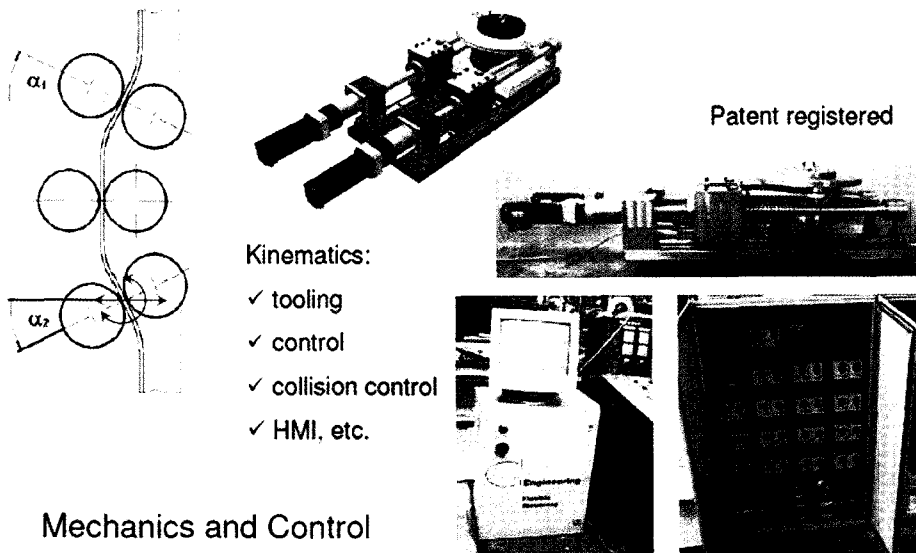


그림 41. Flexible Roll Forming 개념도

3.4.2 다이리스 포밍(Dieless Forming)

항공기, 자동차를 비롯한 각종 수송기기류 또는 전자제품 등 다양한 산업제품의 외관 및 구성품의 제조에 있어 드로잉(Drawing), 스탬핑(Stamping), 블로우포밍(Blow Forming), 하이드로포밍(Hydroforming) 등 판재성형기술을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 종래의 판재성형품을 제조하기 위해서는 제품의 형상을 표현할 수 있는 한 쌍의 금형을 이용하여 성형하는 방법이 주로 이용되어 왔다. 이러한 방법은 금형제작 및 변경 등 초기의 비용부담이 있으나, 일단 공정이 확립되면 단기간내에 많은 제품을 양산할 수 있으므로, 소품종 대량생산 제품군에 적용되어 왔다. 그러나 최근 항공기, 자동차의 프로토타입 제작, 의료기기 등 맞춤형 혹은 다품종 소량생산 제품에 대한 수요가 급격히 늘어감에 따라 기존의 금형을 이용한 성형방법은 고가의 초기개발비용 및 설계에서 금형제작, 제품제조까지 전 공정 동안의 생산속도 저하 등의 문제점이 있어 제품특성에 맞는 새로운 공정이 요구되었다.^[68-78]

다이리스 포밍은 그림 42와 같이 상하부 한 쌍의 금형을 사용하는 일반적인 판재 성형 방법^[68-79]과는 달리 금형을 이용하지 않고, 끝이 둥근 원기둥, 혹은 볼을 삽입한 형태의 공구를 이용하여, 3차원 등고선 궤적을 따라 이동함으로써 점진적으로 판재의 형상을 부여하는 성형 기술이다. 종래의 판재성형기술과는 달리 금형을 필요로 하지 않기 때문에 개발 초기 단계의 금형제작 및 시행착오에 의한 수정이 용이하여 다양한 설계변경요구를 수용할 수 있는 장점이 있어 신제품 개발시간 및 비용을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 또한, 제품의 CAD모델만 보유하고 있을 경우 프로그래밍에 의해 즉시 제작될 수 있으므로 A/S를 위한 재고부품을 보유할 필요가 없음에 따라 그림 43과 같이 다양한 형상의 프로토타입 제작 및 맞춤형 제품 제작에 시도되고 있다.

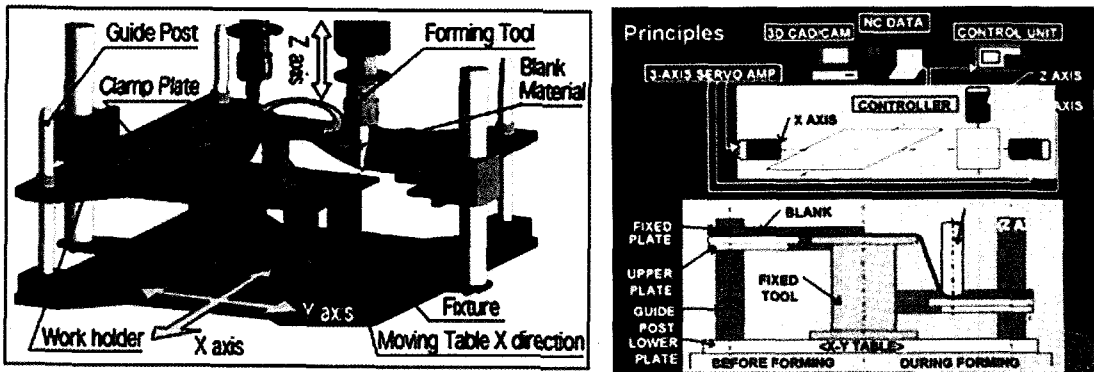


그림 42. 다이리스 포밍 성형 원리(출처: Amino Corp.)

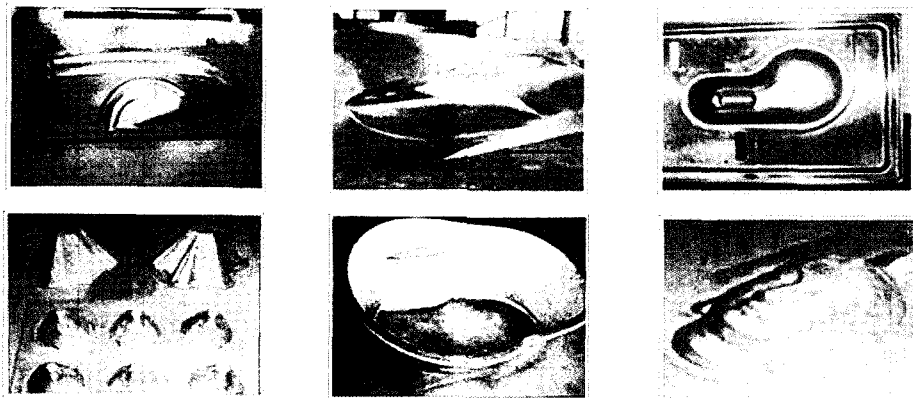


그림 43. 다양한 형상의 다이리스 포밍 제품

다이리스 포밍은 성형방법에 따라 그림 44와 같이 크게 3가지로 요약될 수 있다. 우선, 공구가 판재의 중심에서 외부로, 하(下)방향으로 이동하면서 형상을 부여하는 방법을 Positive 성형이라하며, 반대로 판재의 외부에서 중심으로, 상(上)방향으로 이동하면서 형상을 부여하는 방법을 Negative 성형이라 한다. 일반적으로 Negative 성형의 경우 소재는 클램프에 의해서만 지지되므로 제품의 정밀도가 떨어지는 반면 Positive 성형의 경우 최종 제품 형상 혹은 기본 형상의 지지대를 이용하여 성형함으로써 성형정밀도가 우수한 특징이 있다.

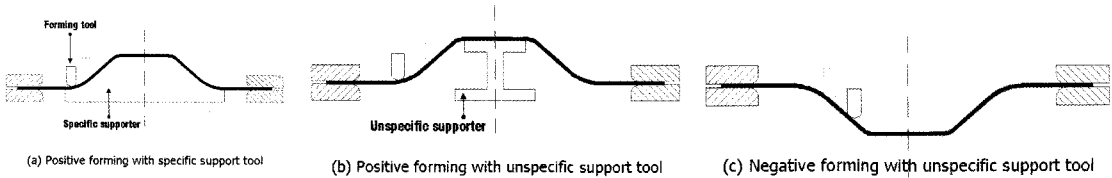


그림 44. 다이리스 포밍 방법

일반적인 상하형 금형을 이용한 드로잉 성형의 경우, 상부금형의 하강에 의해 중심부의 변형영역내로 외곽의 소재가 유입되면서 두께의 감소를 최소화할 수 있는 반면 다이리스 포밍은 그림 45에서와 같이 점진 성형 공정중 변형영역내의 소재유입이 제한적이다. 따라서, 변형영역의 각도가 클수록 과도한 인장변형에 의한 파단발생 가능성이 커지게 됨에 따라, 설계제품의 형상 중 각도가 가장 크게 설계된 부분의 성형 가능 여부가 매우 중요하다. 이밖에도 소재의 성형성, 공구의 형상이나 크기, 등고선 분할시 1회 성형 깊이, 공구의 이송속도, 클램프 하중, 공구와 소재의 접촉면에서의 마찰 등이 주요한 공정변수로 작용한다.

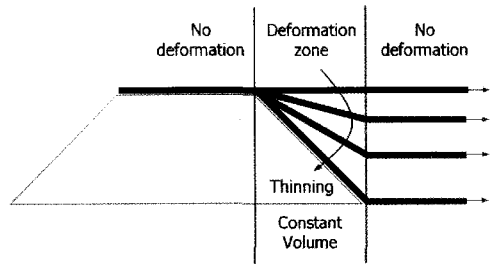


그림 45. 다이리스 포밍의 성형영역

○ 온간 다이리스 포밍

기존의 다이리스 포밍은 대부분 상온에서 수행되어져 옴에 따라 상온 성형성이 우수한 철강, 알루미늄 합금 등의 소재에만 국한되어 사용되어 왔다. 그러나, 지구의 환경문제와 관련하여 자동차를 비롯한 수송기기류의 경량화에 대한 요구에 따라 마그네슘 합금 등의 고비강도 경량소재의 적용이 늘어남에 따라 고온환경에서의 다이리스 포밍에 대한 연구가 시작되고 있으며, 이에 본 고에서는 마그네슘 합금 판재의 적용을 위해 재료연구소에서 시도되었던 할로겐램프를 이용한 온간 다이리스 포밍을 소개하고자 한다. 다이리스 포밍의 경우, 공구가 CAD 데이터에 의해 3차원으로 이동함으로써 공구의 이동경로에 간섭하지 않으면서 효과적으로 가열할 수 있는 방안이 요구된다. 따라서, 이를 극복하기 위한 방안으로 재료연구소에서는 그림 46과 같이 공구에 직접 장착하여 상대운동이 없는 할로겐램프 가열 방식의 가열장치를 고안하였으며 주요구성 및 기능을 정리하면 아래와 같다.

1. 가열수단 : 가열속도의 향상을 위해 6개의 'U' 자형 할로겐 램프 6개를 장착
2. 방열천 : 할로겐램프에 의해 가열된 내부공기가 외부로의 유출되는 것을 방지
3. 온도측정 : 공구하부 및 공구상부에 2개의 열전대를 장착하여 실시간으로 온도를 측정함으로써 판재 및 성형장치 온도 유지.
4. 제어반 : 3의 열전대로부터 측정된 온도데이터로부터 PID 제어를 통해 소재의 가열온도를 일정하게 유지하고 성형장치로의 열전달을 감시하여 일정이상의 온도에 도달할 경우 전원이 차단되어 장치를 보호할 수 있도록 설계

5. 냉각장치 : 할로겐 램프로 인해 가열된 공구에 의해 성형장치로의 열전달을 차단

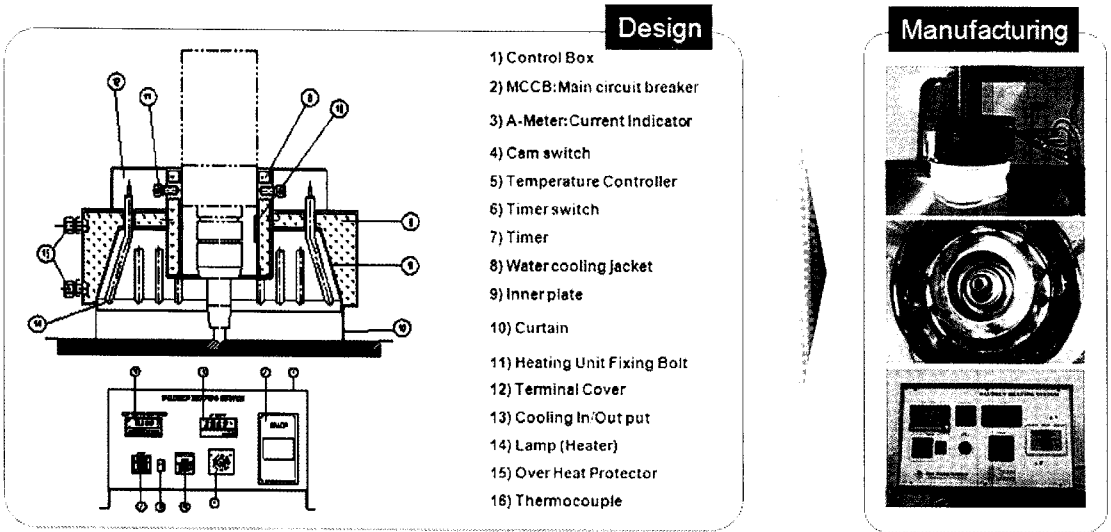
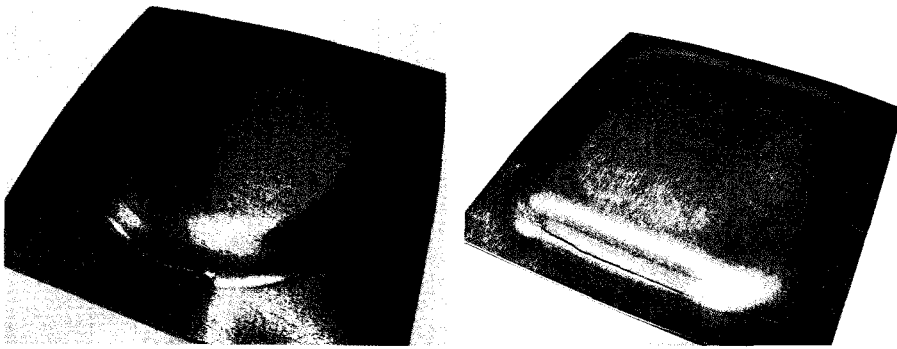


그림 46. 다이리스 포밍용 가열장치

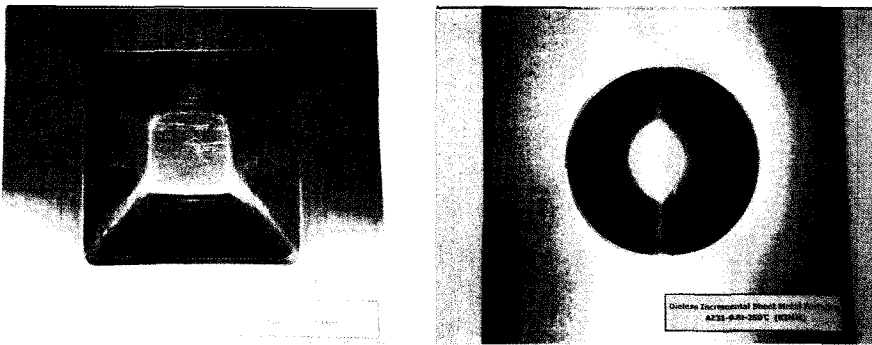
상기의 가열장치의 적용가능여부를 검토하기 위해 다이리스 포밍 장치에 설치하여 실험하였다. 실험시 1회 성형 깊이는 0.2mm, 할로겐 램프로 인해 가열된 소재는 설정온도에 도달한 뒤 약 5분간의 안정화시간을 두었으며, 성형 속도는 1~5회 동안에는 균일한 가열이 되기 위해 10mm/sec으로 유지하고 이후 1000mm/sec으로 고정하였다. 두 실험 모두 250℃에서 진행되었으며, 그 결과 기울임각이 45°인 경우는 성형 초기에 파단이 발생하였으며, 기울임각이 30°인 경우는 50mm높이까지 성형 가능하였다. 그림 47은 상기의 가열장치를 이용하여 AZ31(0.8t) 마그네슘 합금 판재를 이용하여 성형한 샘플을 보여주고 있다.

○ 다이리스 포밍 해석

유한요소법은 시간적분법에 따라 내연적 방법(Implicit Method)와 외연적 방법(Explicit Method)로 나뉘어지는데 내연적 방법의 유한요소해석은 정확성과 신뢰성이 우수하나 복잡한 형상의 금형과의 접촉면에서의 수렴이 어려우며 시간 증분량도 제한을 받게되어 많은 계산시간을 요구한다. 반면 외연적 방법의 경우 강성행렬을 구성할 필요가 없으므로 수렴의 문제가 생기지 않으나 해의 신뢰 및 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 다이리스 포밍의 경우 변형영역이 매우 국부적이고 공구의 이동경로가 복잡함에 따라 내연적 유한요소해석을 통한 해의 수렴이 어렵고 계산시간이 많이 요구됨에 따라 외연적 유한요소해석을 수행함으로써 효율적인 해석이 요구된다. 준정적인 성형공정에 외연적 유한요소법을 사용함에 있어 동적현상에 의한 해의 부정확성을 최소한으로 줄이고 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 Time/Mass Scaling을 통해 최적의 해석환경을 결정해야할 필요가 있다. 그러나, 온간 성형의 경우 유동응력이 온도 및 변형률 속도에 의존적이므로, Time Scale은 실제 공정시간과 계산상 공정시간이 동일하도록 설정하고, 계산속도를 향상시키기 위한 방안으로 Mass Scale만을 조정하여 실제와 유사한 경향이 나타나면서 최소한의 계산시간을 요구하는 최적의 Mass Scale을 결정하는 방법이 사용된다. 그림 48은 1회 공구경로에 대한 Mass Scale에 따른 수직방향 변위분포의 차이를 보여주고 있는데 이 경우, 변형양상의 경우 Mass Scale 1을 기준으로 하였을 때 Mass Scale 100까지는 높이 방향의 변위가 유사한 양상을 보이고 있는 반면 Mass Scale 1000, 10000에서는 지나치게 변형량이 증가함으로써 해의 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타나고 있으며, 계산시간을 분석한 결과 Mass Scale이 클수록 계산시간이 작아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 이 경우 최소의 계산시간을 요구하면서 안정된 해를 얻



(a) 파단 발생(온도: 250°C, 기울임각 45°)



(b) 파단 미발생(온도: 250°C, 기울임각 45°)

그림 47. 마그네슘 합금 판재의 다이리스 포밍 성형품

을 수 있는 Mass Scale은 100정도가 적합한 것으로 판단된다.

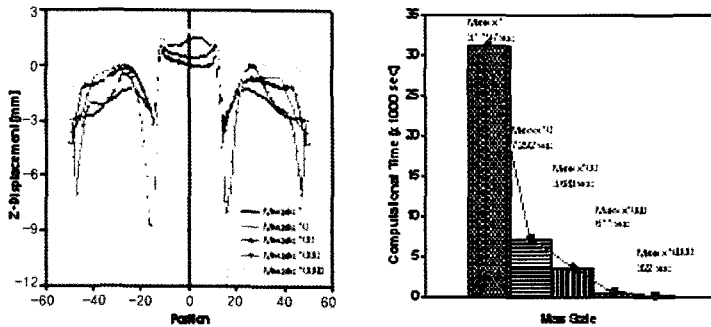


그림 48. Mass scale에 따른 1회 성형시 수직방향 변위 분포 및 계산시간

다이리스 포밍은 등고선 형상의 공구경로를 따라 수십회 반복을 통해 점진적으로 성형해 나가는 공정이므로 공정 해석을 위해서는 공구의 경로를 해석 입력 데이터에 맞게 설정해 주어야 한다. 이 경우, 하나의 공구를 강체로 모델링 한 후, 3차원 이동경로로 강제운동을 하도록 하는 방법과 곡선에서 직선, 혹은 직선에서 곡선으로 운동이 전환되는 지점마다 새로운 공구를 모델링하여 각 단계별로 하나의 공구만 운동할 수 있도록함으로써 마치 하나의 공구가 연속적으로 이동하는 것처럼 묘사할 수 있는 방법이 있다. 본 고에서 소개하고자 하는 해석사례에서는 원뿔형 모델의 경우 전자를 사각기둥의 경우 후자의 방법을 이용하였다. 앞서 소개한 할로겐 램프에 의한 온간 다이리스 성형의

경우, 가열영역내에 일정한 온도가 유지된다는 가정하에 등온공정으로 해석을 수행하였다. 그림 49는 온도 250℃에서 기울임각 45°인 경우에 두 가지에 대해 파단 높이까지의 해석 결과를 보여주고 있으며, 파단이 발생한 부위에서 최대 인장 변형률이 나타나고 있다. 그림 50은 온도 250℃에서 기울임각 30°인 경우에 Model A, B에 대해 50mm 높이까지의 해석 결과를 보여주고 있다.

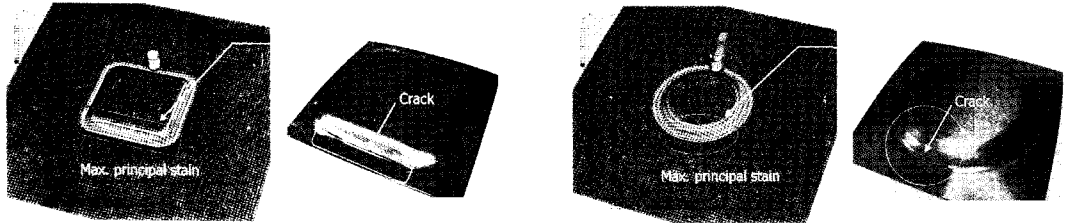


그림 49. 최대인장 변형을 분포(온도: 250℃, 기울임각 45°)

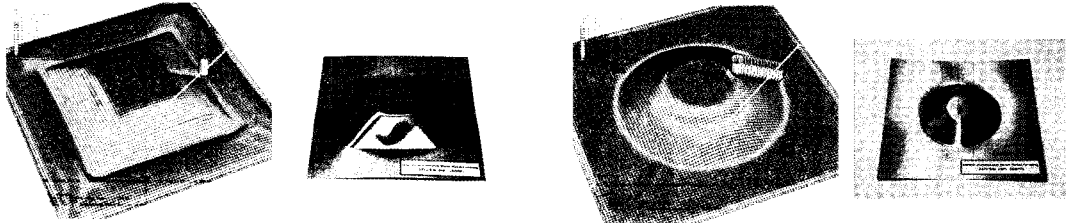


그림 50. 최대인장 변형을 분포(온도: 250℃, 기울임각 30°)

다이리스 성형방법은 제품의 개발비용 및 기간을 최소화할 수 있는 신성형기술로 기존 판재성형방법에 비해 다양한 이점이 있으나, 성형성이 부족하고 형상정밀도가 우수하지 못한 단점으로 인해 일부 소재 및 제품에만 국한적으로 적용되고 있다. 현재 국내외의 많은 연구자들이 이를 극복할 수 있는 지속적인 연구개발을 진행 중에 있으며, 향후, 다양한 소재에 적용하여 우수한 품질을 갖는 제품을 생산할 수 있는 기술로 발전되어 각종 산업군에 적용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

점진성형기술은 균일한 품질의 제품을 대량으로 생산하기 위해 고속생산이 필요하게 되면서부터 고효율 성형기술이 개발·활용되고 있으며 소재와 장비 등 기반기술과 에너지·환경 보호를 위한 제조공정의 최적화를 위해 더욱 더 발전하고 있다. 그러나, 현재 개발의 중심에 있는 고효율 점진성형기술 대부분은 소재를 회전시킴과 동시에 영구 변형을 유도하기 때문에 다른 성형기술에 비해 공정변수가 많으며 그 영향이 매우 크다. 따라서, 경험적 지식(노하우)에만 의존하는 것은 신소재·신공정 개발에 어려움이 많으므로 이론적 해석기술의 필요성은 더욱 높다. 반면, 소재의 변형과 회전이 동시에 이루어지므로 이론적 해석 난이도가 높아 공정분석과 변수선정을 위한 수치해석기술 또한 상대적으로 뒤쳐져 있다. 본고에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구이력과 현재 상태를 점검함으로써 향후 개발방향 설정에 도움을 주고자 하였다.

❖ 참고 문헌

- [1] P. Groche, D. Fritsche, E.A. Tekkaya, J.M. Allwood, G. Hirt, R. Neugebauer., Incremental Bulk Metal Forming, *Annals of the CIRP* Vol.56 2 635 (2007).
- [2] Hofer, F., Seeber, A., Wieser, R., 2000, CNC controlled radial swaging machines and applications, *Proc. of the Global Powertrain Congress*.
- [3] Xie, C., et al., 2000, Rigid-Viscoplastic Dynamic Explicit FEA of the Ring Rolling Process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40/1, 81-93.
- [4] Dop, G.-J., 2001, Simulation of 3D Metal Forming Processes of Axi-Symmetric Products, *FENET Meeting*, Wiesbaden, Germany.
- [5] Sawamiphakdi, K., Pauskar, P. M., Jin, D. Q., Lahoti, G. D., 2002, Ring Rolling Process Modelling Using Explicit Finite Element Analysis, 7th ICTP, Yokohama, Japan, 859-864.
- [6] Pauskar, P., 2006, Finite Element Modelling of Incremental Forming Processes at The Timken Company, *Workshop on Modelling of Incremental Bulk Forming Processes*, Darmstadt, Germany
- [7] Pauskr, P. M., Sawamiphakdi, K., Jin, D. Q., 2004, Static Implicit vs. Dynamic Explicit Finite Element Analysis for Ring Rolling Process Modelling, *NUMIFORM 2004*, Columbus, Ohio, 412-417.
- [8] Sawamiphakdi, K., Pauskr, P. M., Lahoti, G. D., 2004, Applications of Finite Element Modelling in Industrial Forming Processes at the Timken Company, *NUMIFORM 2004*, Columbus, Ohio.
- [9] Guo, L., Yang, H., Zhan, M., 2005, Research on plastic deformation behavior in cold ring rolling by FEM numerical simulation, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 13, 1029-1046.
- [10] Marx, V., Schoß, V., 2002, Numerical Simulation of Pilgering Process, *ICFG 2nd Workshop on Numerical Simulation in Metal forming Industry*, Padua, Italy.
- [11] Hu, Y. K., Liu, W. K., 1992, ALE Finite Element Formulation for Ring Rolling Analysis, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, 33/1217-1237.
- [12] Davey, K., Ward M. J., 2000, An efficient solution method for finite element ring-rolling simulation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47/12, 1997-2018.
- [13] Davey, K., Ward M. J., 2003, ALE approach for finite element ring-rolling simulation of profiled rings, *Journal of Materials Processing Technology*, 139/1-3, 559-566.
- [14] Traore, K., et al., 2001, Three dimensional finite element simulation of ring rolling, *NUMIFORM*, Toyohashi, Japan.
- [15] Davey, K., Ward M. J., 2002, A Practical Method for Finite Element Ring Rolling Simulation using ALE Flow Forming, *Int. J. Mechanical Sciences*, 44, 165-190.
- [16] Davey, K., Ward M. J., 2002, The practicalities of ring rolling simulation for profiled rings, *Journal of Materials Processing Technology*, 125, 619-625.
- [17] Kim, N., Machida, S., Kobayashi, S., 1990, Ring Rolling Process Simulation by the Three Dimensional Finite Element Method, *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 30/4, 569-577.
- [18] Hu, Z. M. Pillinger, I., Hartley, P., McKienze, S., Spence, P. J., 1994, Three-Dimensional Finite Element Modelling of Ring-Rolling, *J. Materials Process. Technol.*, 45, 143-148.
- [19] Lim, T., Pillnger, I., Hartley, 1998, A Finite Element Simulation of Profile Ring Rolling Using a Hybrid Mesh Model, *J. Materials Process. Technol.*, 80-81, 199-205.
- [20] Yea, Y., Ko, Y., Kima, N., Lee, J., 2003, Prediction of spread, pressure distribution and roll force in ring

- rolling process using rigid-plastic finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 478-486.
- [21] Hellmann, M., Hülshorst, T., Kopp, R., 2000, Simulation of Ring Rolling 14th International Forgemasters Meeting, Wiesbaden, 454-460.
- [22] Hellmann, M., 2002, Numerische Simulation des Ringwalzprozesses mit Hilfe der Methode der finite Elemente Dissertation, RWTH Aachen.
- [23] Barton, G., Franzke, M., Hirt, G., 2006, Finite Element Modelling of Multi-Pass Forging accelerated by a Multi-mesh Method, Workshop on Modelling of Incremental Bulk Forming Processes, Darmstadt, Germany.
- [24] Hirt, G., Tiedemann, I., Michl, D., 2005, Komplexe Ringquerschnitte flexibel gewalzt: Modellversuche und Modellierung, 3. Fachtagung Inkementelle Umformtechnik, PtU Darmstadt.
- [25] Schmid, F., Schäfer, M., 2005, Performance of Algebraic Multigrid Method for simulation of Incremental Forming Processes, 8th European Multigrid Conference, Delft.
- [26] Munshi, M., Shah, K., Cho, H., Altan, T., 2005, Finite element analysis of orbital forming used in spindle/inner ring assembly, 8th ICTP, Verona, Italy.
- [27] Groche, P., Fritsche, D., 2005, Efficient Algorithms for the Simulation of Incremental Bulk Metal Forming, 8th ICTP, Verona, Italy.
- [28] Fritsche, D., Groche, P., 2006, Efficient Simulation of Cyclic Processes Using Similarity Methods, Workshop on Modelling of Incremental Bulk Forming Processes, Darmstadt, Germany.
- [29] Tszeng, T. C., Altan, T., 1991, Investigation of ring rolling by pseudo plane strain FEM analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 27, 151-161.
- [30] Kiuchi, M., Yanagimoto, J., 1990, Computer aided simulation of universal rolling processes, *ISIJ International*, 30, 142-149.
- [31] Yanagimoto, J., Kiuchi, M., 1989, Composite numerical method for ring rolling analysis, (in Japanese), Proc. 40th Japanese Joint Conf. for Technol. Plast., 377-380.
- [32] Kim, H., Sweeney, K., Altan, T., 1993, Application of Computer Aided Simulation to Investigate Metal Flow in Selected forging Operations, *J. Materials Processing Technology*, 46/1-2, 127-154.
- [33] Ward, M. J., Miller, B. C., Davey, K., 1998, Simulation of a multi-stage railway wheel and tyre forming process, *Journal of material Processing Technology*, 80-81, 206-212.
- [34] Joun, M. S., Chung, J. H., Shivpuri, R., 1998, An axisymmetric forging approach to perform design in ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38/10-11, 1183-1191.
- [35] Mori, K., Hiramatsu, N., Shibata, M., 2001, Simplified Three-Dimensional FEM Simulation of Ring Rolling with Grooved Rolls, NUMIFORM, Toyohashi, Japan, 607-612.
- [36] Allwood, J. M., Tekkaya, A. E., Stanistreet, T. F., 2005, The development of ring rolling technology Part 2 : Investigation of process behavior and production equipment, *Steel Research International*, 76/7, 491-507.
- [37] Yang, D. Y., Kim, K.H., 1988, Rigid-plastic finite element analysis of plane strain ring rolling, *Int. J. Mech. Sci.*, 30/8, 571-580.
- [38] Xu, S. G., Liam, J. C., Hawkyard, J. B., 1991, Simulation of ring rolling using a rigid-plastic finite element model, *Int. J. Mech. Sci.*, 33/5, 393-401.



- [39] Stainstreet, T. F., Allwood, J. M., 2005, Two simple models form exploring a novel flexible ring rolling process, 8thESAFORM,ConferenceOnMaterialForming,Cluj–Napoca/Romania,1042–1045.
- [40] Music, O., Güley, V., Öztop, M. S., Savas, T., Özhan, F., Tekkaya, A. E., 2005, Analysis of Cold Ring Rolling Process, 8thICTP, Verona, Italy.
- [41] Öztop, M. S., Music, O., Tekkaya, A. E., 2006, Two Novel Elastic–Plastic Models For Incremental Ring Rolling Process, Workshop on Modelling of Incremental Bulk Forming Processes, Darmstadt, Germany.
- [42] Lee, K. H., Lee, S. R., Yang, D. Y., 2004, Rigid–Plastic Finite Element Analysis of Incremental Radial Forging Process Using Automatic Expansion Domain Scheme, Engineering Computations, 21/5, 470–487.
- [43] Moon, H. K., Lee, M. C., Chung, J. H., Joun, M. S., 2005, Finite Element Analysis of a Rotary Forging Process For Bearing Assembly, 8thICTP,Verona,Italy.
- [44] Omori, S. et al., 1984, Experiment on the Roll Forming for Disk–Shaped Blanks, Proceedings of the 3rd International Conference on Rotary Metal Working Processes, Kyoto, Japan, 311 (194)
- [45] Bohmer, C., Tong, W., Kopp, R., 2003, Stahl und Eisen, 123, 4/63 (2003)
- [46] Allwood, J. et al., The Technical and Commercial Potential of an Incremental Ring Rolling Process, Annals of CIRP, 54/1, 233 (2005)
- [47] Stanistreet, T.F., Allwood, J. M., Willoughby, A.M., The Design of a Flexible Model Ring Rolling Machine, J. of Material Processing Technology, 177/1–3, 630, (2006)
- [48] Mueller, F., Potentiale des Axial–Radial–Umformens, 20 Jahre Umformtechnik in Darmstadt, Festschrift, 199–204 (1996)
- [49] Heislitz, F., Optimierung des Axial–Radial–Umformens–eine Verfahrenserweiterung des Rundknetens, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen (2001)
- [50] Groche, P., Rathmann, T., Future Trends of Rotary Swaging, J. of the Japan Society for Technology of Plasticity (JSTP), Tokyo, Japan (2003)
- [51] Rathmann, T., Groche, P., Development of a Technological Processor for 3D–FEA of Rotary Swaging Processes, 4th ICFG Workshop, Shanghai, China (2004)
- [52] en.wikipedia.org
- [53] www.admetalspinning–hx–ltd.co.uk
- [54] Metal handbook, vol 14B, Metalworking: sheet forming, AMS International
- [55] www.leifeldspinning.com
- [56] Metal handbook, vol 14B, Metalworking: sheet forming, AMS International
- [57] Forge 2011 Documentation – Datafile Forge2v44, Datafile Forge3v74, Fichiers MPFX, User_Routines, General Documentation – Heat_Treatment,, General Documentation – Recrystallization
- [58] Yvan Chastel1, Aliou Diop1, Silvio Fanini2, Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack, P.O. Bouchard1, Katia Mocellin1, 1 Centre de Mise en Forme des Matériaux, CEMEF (ENSMP) – rue Claude Daunesse, 06904 Sophia–Antipolis, France
- [59] URL: <http://www–cemef.cma.fr> e–mail: yvan.chastel@ensmp.fr, 2DIMEG, University of Padova, Via Venezia 1 – 35131 Padova, Italy
- [60] Elisabetta Ceretti, Claudio Gardini, Ferdinando Brisotto, Analytical prediction of the central rupture of billets during piercing in a cross–roll piercer due to the Mannesmann effect, Università degli Studi di Brescia – Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Innovations in metal forming – an international

Conference, September 23–24, 2004 – Brescia, Italy

- [61] COPRA® RF 2011 Open Sections & Closed Sections Trapezoidal Sections
- [62] COPRA® RF 2011 Roll Design & Roller Technology DBMS (Roll Database)
- [63] COPRA® RF 2011 Deformation Technology (Simulation) Flower Technology
- [64] COPRA® Finite Element Analysis
- [65] Abee, A., Berner, S., Sedlmaier, A., 2008. Accuracy improvement of roll formed profiles with variable cross sections, ICTP 2008 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea.
- [66] Zettler, A.: Grundlagen und Auslegungsmethoden fuer flexible Walzprofilierprozesse, Dissertation TU Darmstadt 2007.
- [67] Sedlmaier Albert*, Abee Z, On the Quality Improvement of Roll Formed Profiles with Variable Cross Sections, *data M Software GmbH, Frenchman's Reef and Morning Star Marriott Beach Resort, January 3–8, 2009
- [68] H. Iseki, T. Naganawa, Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers, *J. Mater. Process. Technol.* 130–131 (2002) 675–679.
- [69] G. Amrogio, I. Costantino, L. De Napoli, L. Filice, L. Fratini, M. Muzzupappa, Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental investigation, *J. Mater. Process. Technol.* 153–154 (2004) 501–507.
- [70] H. Iseki, An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller, *J. Mater. Process. Technol.* 111 (2001) 150–154.
- [71] M. S. Shim, J. J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *J. Mater. Process. Technol.* 113 (2001) 654–658.
- [72] J. Kopac, Z. Kampus, Incremental sheet metal forming on CNC milling machine–tool, *J. Mater. Process. Technol.* 162–163 (2005) 622–628.
- [73] Y. H. Kim, J. J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *J. Mater. Process. Technol.* 130–131 (2002) 42–46.
- [74] E. Ceretti, C. Giardini, Aldo Attanasio, Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, *J. Mater. Process. Technol.* 152 (2004) 176–184.
- [75] J. J. Park, Y. H. Kim, Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *J. Mater. Process. Technol.* 140 (2003) 447–453.
- [76] T. J. Kim, D. Y. Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *Int. J. Mech. Sci.* 42 (2000) 127–1286.
- [77] K. Dai, Z. R. Wang, Y. Fang, CNC incremental sheet forming of an axially symmetric specimen and the locus of optimization, *J. Mater. Process. Technol.* 102 (2000) 164–167.
- [78] G. Ambrogio, L. De Napoli, L. Filice, F. Gagliardi, M. Muzzupappa, Application of incremental forming process for high customised medical product manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.* 162–163 (2005) 156–162.
- [79] Ji Y.H., Park J.J., Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature, *J. Mater. Process. Technol.*, 201 (2008) 354–358.
- [80] Ambrogio G., Filice L., Manco G.L., Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 57 (2008) 257–260.
- [81] Kim S.W., Lee Y.S., Kwon Y.N., Lee J.H., Study on warm incremental formability of AZ31 alloy sheet,



Steel Res. Int., 79 (2008) 691-698.



이 영 선

- 재료연구소 융합공정연구본부 책임연구원
- 관심분야 : 고효율 성형기술, 성형공정 수치해석
하이브리드 소재 개발 및 응용
- E-mail : lys1668@kims.re.kr



권 용 남

- 재료연구소 융합공정연구본부 책임연구원
- 관심분야 : 금속재료 성형기구 및 성형기술
- E-mail : kyn1740@kims.re.kr



김 상 우

- 재료연구소 융합공정연구본부 선임연구원
- 관심분야 : 주기적 다공질 금속 설계/해석/제조
- E-mail : kimsww@kims.re.kr



천 세 환

- 트리니티 엔지니어링 / Manufacturing CAE
솔루션담당 과장
- 관심분야 : 주-단조, 가변률 성형, 점진성형,
구조-충돌 해석
- E-mail : shchun@trinity-eng.co.kr