

최근의 단조 기술 동향

이정환

(한국기계연구원)

Recent Trends in Forging Technology

Jung Hwan Lee

1. 서론

국가 산업의 근간을 이루는 단조 기술은 그 나라 제조업 경쟁력의 척도로 인식될 만큼 중요한 원천 핵심 기술 중의 하나이다. 최근 정보 산업을 중심으로 한 6T(IT, BT, ET, NT, ST, CT)에 관한 관심이 증대되고 있지만 단조 기술은 철·비철등 소재 산업과 자동차·기계·전자 산업등 거의 모든 조립산업의 중간자적 위치에 있고 주요 전방 산업 발전의 기본이 되는 기술로써 그 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 국내의 단조 관련 업계는 자동차 산업의 비약적인 발전과 함께 양적으로나 기술적으로 많은 발전을 이룩했지만 아직도 업체의 규모, 기술 개발에 대한 인식, 기술 축적 정도 측면에서는 부족한 점이 있어 품질 수준이 선진국에 비해 뒤떨어져 있는 실정이다. 그러므로 국내의 소성 가공기술 발전을 위한 산업 정책적인 측면에서는 소성 업계의 연대 강화와 기술 교류, 노후화된 생산 설비의 교체와 검사 설비의 확보 및 가공 공정 자동화를 위한 정부 차원에서의 지원, 대량 생산을 위한 물량 확보와 기술의 전문화, 경영자의 재투자 의욕 고취 및 기술자의 선진 기술의 이해와 습득을 유도하는 것이 필요한 것으로 생각된다. 또한 연구개발 측면에서는 단조 분야의 지속적인 연구 개발, 고급 연구 인력의 확보, 고부가 가치의 아이템 창출 및 신기술 개발과 관련된 기술의 축적 및 기술자의 재교육 실시 등이 바람직한 방안이라고 생각된다. 따라서 본고에서는 단조용 신소재, 신단조 공정기술, 환경 친화적 공정기술에 관한 전반적인 단조기술의 동향에 관하여 간략히 기술하고자 하였다.

1.1 국내 단조공업의 현황

우리나라 단조업계는 주로 중소기업체들로 전국에 약190여개 정도가 있는 것으로 알려져 있지만 철합금 부품제조가 주종을 이루고 있다. 특히 철합금은 가단성이 좋기 때문에 상대적으로 기술집약도가 낮고 동종의 소재단조 분야에서의 기업간 경쟁 등으로 인해 수익률이 저하하는 등의 경영상의 애로를 단조업체 모두 느끼고 있는 실정이다. 1998년도 상반기동안 20여개 업체가 부도 등 경영악화로 인한 어려움을 겪고 있으며, 단조업계 자체의 구조조정이 이루어지고 있다. 특히 수출비율이 높은 단조회사는 생존에 큰 문제가 없지만, 전적으로 국내 자동차 산업 등 내수비율이 높은 회사는 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 향후 국내의 단조업계는 심각한 공해문제에 대한 환경관련 법령 및 기준의 강화, 외국과의 경쟁, 자동차산업의 근본적인 변화, 단조품의 응용분야 축소화, 단조품의 경쟁재료 증가 등으로 많은 투자부담이 가중될 것이다.

Fig. 1과 2에 각각 단조 기술의 공정별 발전추이와 단조공업의 개발과정을 나타내었다.

1.2 해외 단조공업의 현황

일본의 경우 장기화 되고 있는 불황과 일본자동차 산업의 위축에 의해 단조 생산량이 감소하였다. 이에 반해 전례 없이 지속되고 있는 미국의 호황에 힘입어 북미 단조생산량이 다시 일본을 앞지르게 되었다. 독일의 경우도 80년대 중반 이후 단조생산량이 꾸준히 증가하여 98년 최대 단조품 생산량을 기록하고 있다.

구분	1945	1955	1975	1985	1995	2000
	전후의 설립기	해외기술도입기	양산체제확립기	국제경쟁체제확립기	정밀단조확립기	
재료절단	→ 슬라이스절단(Circular Saw) → 발렛 절단 → 용융절단		→ 고속자동띠톱(Band Saw) → 정밀절단		→ 열간절단 + 자동화 → 방음대책+내진대책	
재료가열	→ 분탄·코크스 → 발생가스로 → 중유배치로	→ 회전로	→ 도시/LP가스배치로 → Pusher로 → 전기저항로 → 유도전기로 → 튜브로			→ 중유/자동회전로 → 복합로
단조	→ 다단가열단조	→ 일단가열단조 → 열간코이닝 → 냉간단조	→ 성형롤 → 냉간자동화	→ 온간단조 → 분류단조 → 폐쇄단조 → 냉간코이닝 → 우이음 알루미늄 단조 → Single단취	→ 정밀단조(열간 net shape) → 소결단조 → 복합단조 → 요동단조 → 치형단조 → AI 용탕단조 → JIT 생산	
설비	→ 자유낙하해머	→ 공기 낙하 해머 → F 프레스 → 스크류프레스 → 업셋팅	→ 원축기초 → 트랜스퍼자동프레스 → 너클조인프레스 → 열간포머	→ 고속해머 → 크로스 롤 → 대형냉간단조기(압축, 추출)	→ 프로폰해머(컴퓨터이용) → 16000t대형프레스 → TPM → 단조로봇(프레스에이용)	→ 해머로봇 → 버어 타발볼스터
재료	→ 조괴법 감쇠	→ 진공용해			→ 연속주조강괴 → 보론강 → 비조질강	
형운활재	→ 목분, 중유	→ 코로이드흑연			→ 백색계이형제	

Fig 1 Trends of forging technology

특히 80년대 후반 중국의 출현으로 단조생산량만을 놓고 볼 때 세계 2위를 차지하는 것으로 나타났다.

단조품의 대부분은 탄소강 및 일반합금강을 소재로 하고 있으나 경량화 요구의 증대로 알루미늄과 같은 비철 단조품 생산이 크게 증가하고 있다. 특히 미국의 경우는 부가가치가 높은 항공, 우주산업에서 비철단조품 적용비율을 높이고 있으며 일본, 독일 등도 미래형 부가가치가 높은 산업에서의 단조기술 발전이 이루어질 것으로 보고 있다. 즉 선진 단조기술 보유국은 고부가가치화와 함께 생산성의 증대를 통해 중진공업국과의 격차를 벌릴 것으로 예상되며, 인도, 대만, 말레이시아 등 후발 단조기술 보유국가는 저임금과 노동력을 발판으로 하여 생산량을 증대시키고 있다.

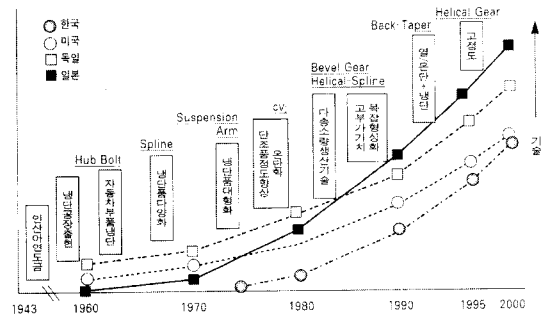


Fig. 3 Comparison of forging technology state among several industrialized countries

최근의 단조 기술 동향

구분	1945	1955	1975	1985	1995	2000
	전후의 설립기	해외기술도입기	양산체제획립기	국제경쟁체제획립기	정밀단조확립기	
금형설계	→ 보통배기구배(행머 7도)	→ 복식형설계 → 치수공차의 표준화(형단조품) → 보통배기구배(프레스 5도)	→ 인서트형설계	→ CAD(도입)	→ 보급 → 정밀배기구배(행머3도) → 정밀배기구배(프레스1도)	
금형가공	→ 선반, 그라인더+샌드페이퍼 → 모방 → 밀링 → 캐서, 판게이지	→ 자동모방 → 전해가공 → 방전가공	→ 자동프로그램 이용(tape) → 제관계 디지털화 → 상차원측정기	→ CAM(도입) → NC모방가공 → 와이어 커팅 가공	→ 보급 → Machining center → 고속직조 → 전해사상 → 방전사상 → 형자동참고	
표면처리	→ 화염소입	→ 경질 Cr 도금		→ 질화(연질화, 이온)		
형재료	→ 탄소공구강 → 구조용합금강	→ 금형공구강	→ 고합금강형재			

Fig. 2 Trends of forging tool

2. 최근 단조 기술

2.1 단조 해석 기술

단조공정은 한번의 성형공정으로는 생산할 수 없는 경우가 많다. 특히 냉간단조 공정은 몇번의 예비성형공정을 거치는 다단계 성형공정이 필요하다. 따라서 냉간단조 공정설계의 가장 중요한 사항은 예비성형 횟수 및 예비성형체 설계 등이며, 이를 실제 현장에서는 대부분 경험적 지식, 설계자의 직관 및 실험에 의한 시행 착오를 통하여 수행하고 있으므로, 시간의 소비가 많고 제품의 가격인상을 초래한다. 그러므로 새로운 부품의 생산을 위한 성형공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여, 실제의 금형 및 공구의 제작 이전에 소재 유동 및 금형내부 채움 정도와 성형하중 등의 상세한 정보를 제공할 수 있는 기법들이 필요하다.

따라서 최근에는 컴퓨터와 수치해석기법의 발전으로 컴퓨터를 이용한 여러 가지 기법들이 성형공정설계 및 금형설계에 활발히 이용되고 있다. 경험적 지식과 문헌 등에 바탕을 둔 설계규칙을 이용한 성형공정 및 금형설계 시스템은 소재의 유동, 응력 및 변형률분포 등을 예측할 수가 없는 반면에 유한요소법을 이용한 시뮬레이션으로는 이와 같은 정보들을 충분히 예측할 수 있다. 또한 유한요소법의 가장 실제적인 적용중의 하나가 다단계

성형공정에 있어서의 공정설계이다. 그러므로 유한요소법을 활용한 단조공정설계는 실제현장에서 필요한 정보들을 미리 얻을 수 있으며, 이러한 정보들을 토대로 실제공정을 설계할 수 있다.

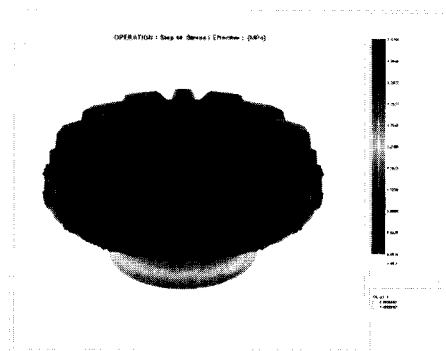
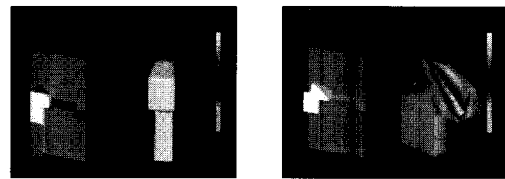


Fig. 4 Example of FE(Finite element) simulation

2.2 단조용 신소재

2.2.1 열처리 생략형 단조소재

최근 세계적으로 자동차산업 분야에서 안정성의 확보, 엔진성능 및 연비의 향상, 공정의 생략 또는 단축을 통한 에너지 절감, 환경문제 해결등의 다양한 요구에 맞추어 기존의 철강부품들을 고강도·고인성 비조질강으로 대체하는 추세에 있다.

일반적으로 비조질강은 중·저탄소강에 소량의 V, Ti 또는 Nb를 함유하는 것을 기본조성으로 하고 있는데, 첨가된 합금원소들은 탄소나 질소와 결합하여 페라이트 결정립내에 미세한 탄화물이나 질화물을 석출시킴으로써 강을 강화시킨다. 이러한 이유로 비조질강은 열간선재압연 또는 열간단조상태에서 조질 처리한 탄소강과 유사한 기계적 특성을 가지게 되어 열처리 공정의 생략이 가능한 것이다. 비조질강은 가공 방법이나 용도에 따라 열간 단조용, 직접절삭용, 냉간가공용 등으로 분류되는데, 열간단조용과 직접절삭용은 주로 봉강형태로 그리고 냉간 압조용은 선재형태로 제조되어 2차 가공공정에서 사용된다. 이 중에서도 열간단조용 비조질강이 압도적으로 많이 사용되고 있으며 냉간압조용은 최근 들어 응용되기 시작하고 있다. Table 1은 세 가지 비조질강의 보다 자세한 분류와 제조공정을 간략히 정리한 것이다.

Table 1 Classification of non-heat treated steels depending on manufacturing processes

강종	종류	제조공정	
열간 단조용	기본형	기존공정	봉재-열간단조-Q/T-가공
	고인성형	신공정	봉재-열간단조-가공
	고강도형	기존공정	봉재-열간단조-Q/T-가공
	고강도/고인성형	신공정	봉재-열간단조(부분급냉)-가공
냉간 가공용	냉간 단조용	기존공정	봉재-구상화처리-냉간단조-Q/T-가공-(유도가열)
		신공정	봉재-냉간단조-가공-(유도가열)
	냉간압조용	기존공정	선재-구상화처리-인발-냉간압조-Q/T-Plating-Baking
		신공정	선재-인발-냉간압조-Plating-Baking
직접 절삭용		기존공정	봉재-Q/T-가공-(유도가열)
		신공정	봉재-가공-(유도가열)

2.2.2 Al계 금속기지 복합재료단조

현재 자동차산업 뿐만 아니라 항공산업 분야에서도 기존 사용되어오던 고비중의 금속재료를 대체할 수 있는 경량 고성능 신소재의 개발분야로 금속기지 복합재료(Matrix Composites)에 초점을 맞추고 있다. 이러한 금속기지 복합재료는 기존의 구조재료 사용되어지고 있는 합금재료가 제공해주던 높은 비강성과 비강도를 가지고 있으며, 우수한 열적거동 및 마모특성을 가지고 있다. 따라서 자동차 산업분야에서는 제품의 생산성과 재료의 가격측면에서도 알루미늄 기지에 Al₂O₃나 SiC같은 세라믹 입자로 강화된 알루미늄계 금속기지 복합재료에 큰 관심을 기울이고 있으며, 저렴한 가격의 합금개발도 꾸준히 진행중에 있다. Fig. 5는 알루미늄 기지에 SiC입자 강화시킨 금속기지 복합재료의 자동차 부품 적용사례로서 자동차 피스톤을 나타낸 그림이다.

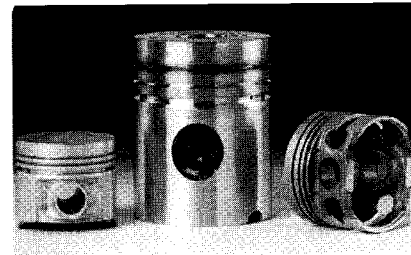


Fig. 5 Piston crown in Al-base

2.2.3 초내열 합금단조

초내열 합금은 고온에서도 높은 강도를 유지할 수 있는 초고온 내열 합금으로, 우수한 내식성과 내산화성을 지니며 Creep 및 Rupture에 대한 저항성도 우수하다. 이러한 초내열 합금은 니켈기지(Ni-base), 철-니켈기지(Fe-Ni-base) 및 코발트기지(Co base)로 분류할 수 있는데 가장 널리 사용되는 것은 니켈기지 초내열 합금(Ni-base Superalloy)이다.

니켈기지 초내열 합금은 고온에서 기계화학적 특성이 우수하기 때문에 내열성을 요하는 부위에 주로 사용되고, 특히 제트엔진용 가스터빈에는 총중량의 60% 정도가 이용된다. 이러한 니켈기지 초내열 합금을 이용하여 부품을 제조할 경우 원자재 값이 비싸고 부품성형이 힘들기 때문에 기계적 성질이 우수한 제품을 경제적으로 얻기 위해서 제조공정에 대한 세심한 검토를 필요로 한다. 이러한 초내열합금은 단조용과 주조용으로 대별할 수 있으며, 동일 합금계에 대해 전자는 후자에 비해 우수한 특성을 나타낸다. 즉 용탕/주형간 반응에 의한 개

재물 혼입이 없고, 진공아크 재 용해, 슬래그 재용해 등 방법으로 정련하기 때문에 원소재의 청정도가 상대적으로 높다. 소성가공에 의해 잉곳 결함을 파쇄, 분산시킴으로써 우수한 기계적 특성을 발현할 수 있다. 또한 균일한 미세결정립을 얻을 수 있으며, 결정흐름을 조절함으로써 고강도를 얻을 수 있고, 형상 및 치수의 제한은 비교적 적다. 이상의 장점 때문에 가스터빈엔진의 압축기 및 터빈부위의 상당부분이 단조품으로 이용되고 있다. Fig. 6은 가스터빈 엔진의 모형을 나타낸 그림이다.

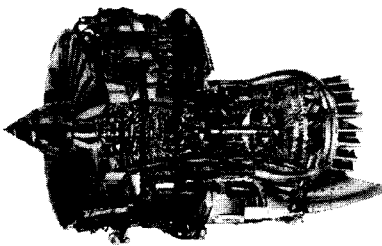


Fig. 6 A typical gas turbine engine

2.2.4 티타늄 합금단조

티타늄 합금은 구조재로서 이상적인 성질인 비강도, 고온강도 및 피로강도 등 기계적 성질이 우수하고 내식성이 좋기 때문에, 항공우주산업을 필두로 잠수정 및 석유시추용 구조재, 원자력·화력·수력 발전소용 부품, 의료기기, 스포츠 용구에 이르기까지 그 응용분야는 매우 넓다. 그러나 티타늄은 가격면에서 스테인레스강, 또는 내열강 소재와 같은 수준으로 일반적으로 생각하는 만큼 고가는 아니지만, 티타늄 고유의 물리적·화학적 성질에 의해 용해, 주조, 단조, 절삭, 연삭, 표면처리, 열처리 등 공정에 많은 비용이 들고 부품으로 제작될 경우 가격이 급격히 상승하므로 고가라는 생각이 들게 된다. 결국 일정형상의 제품을 제조하기 위한 티타늄 원소재 양을 줄이고 후가공 공정을 간소화할 필요성이 대두되며, 정밀 성형이 주요 관심사로 떠오르고 있으며, 정밀성형법에 의해 복잡형상 부품을 직접 제조할 경우, 재료비·가공비 등의 제조원가가 낮아지고, 공정 조건 관리가 용이하기 때문에 조직 및 기계적 성질이 우수한 제품을 제조할 수 있다.

티타늄 합금은 단조온도의 범위가 좁고 변형저항이 높기 때문에 단조가공이 어렵고 기계가공도 곤란하여 가공비가 대단히 높아지는 결점이 있으므로, 재료의 이용율을 높이고 가공비를 절감시키기 위해 가능한 한 최종제품에 가까운 형상으로 가공하는 Near net shape가공법이 검토되어져 왔다.

Table 2 Forging temperature for Ti alloys

합금	단조온도 (°C)		비고
	최고	최저	
순 티타늄	925	*	첫 번째 가열시 ** 2회이상 가열시 ***
	900	*	
α - β 합금			
Ti-6Al-4V	980	*	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	955	*	
Ti-7Al-4Mo	955	*	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	925	*	
Ti-6Al-6V-2Sn	925	*	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	900	*	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955	*	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	955	*	
α 합금			
Ti-5Al-2.5Sn	1035	845	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	1025	815	
Ti-5Al-2.5Sn***	1010	930	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	980	930	
Ti-8Al-1Mo-1V	1010	930	첫 번째 가열시 2회이상 가열시
	980	930	

* 소재의 흐름이 양호한 경우는 단조를 계속해도 좋음

** 소재의 두께가 150mm 이상의 경우

*** 소재의 두께가 1500mm이하의 제 1 또는 2회 이상 가열의 경우

2.3 신소성 공정 기술

2.3.1 정밀 온간단조

최근 냉간단조와 열간단조의 장점을 취하고 단점은 배제한 온간단조에 대한 관심이 증대되고 있다. 온간단조는 냉간과 열간의 중간온도(300~800°C)에서 가공되는 방식으로 냉간단조와 같이 용도에는 제한이 있지만, 냉간과 비교해서 보다 광범위하게 이용할 수 있는 특징이 있다.

냉간단조와 비교하여 하중과 에너지의 경감, 인산염 피막처리가 불필요하며, 온간단조 영역에서는 소재의 변형저항이 내려갈 뿐 아니라 변형능이 향상되어 복잡한 형상의 제품과 고탄소강 등과 같은 가공이 어려운 강종도 성형 가능한 것 등이 온간단조의 장점이다. 열간단조와 비교해서는 우수한 치수정도를 얻을 수 있으며, 기계가공량을 줄일 수 있고 Knock out시 큰 하중을 받으면서도 성형품의 변형강도가 커서 변형이 발생하지 않으므로 0°의 빼기구배가 가능한 것 등이 공업적으로 우위에 있다. 또한 열간단조에서는 스크랩이 투입재료의 20~30%나 발생하지만 온간단조에서는 현저하게 줄어들어

재료회수율이 열간단조품에 비해 향상된다. Fig. 7에서는 베어링 레이스의 단조공법별 원가 비교를 나타낸 그림으로써 온간단조가 가장 원가가 낮음을 알 수가 있다.

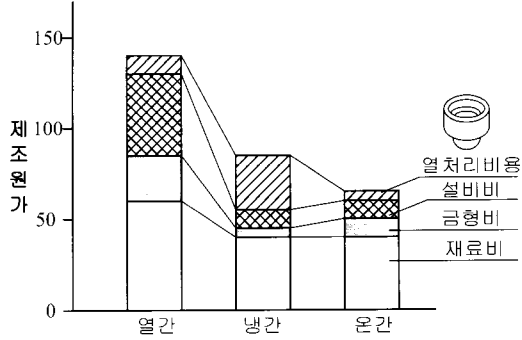


Fig. 7 Comparison of bearing race cost according to forging methods

온간단조의 장점을 구현하기 위한 최대의 조건은 가공품이나 공구의 온도 균일화를 위한 공정의 자동화이다. 온간단조품의 정밀도는 종래의 열간단조품과는 비교가 되지 않을 정도로 개선되어 냉간 단조품과 거의 같은 정밀도를 확보할 수 있다. 또 산화막의 발생이 적고, 금형의 마모도 열간단조에 비해 적고, 표면조도도 10~60 μ m 정도로 양호하고 이 때문에 제품 단조시의 후퍼면 상태로 절삭 없이 사용하는 예도 많다. 온간단조에서는 가공 온도의 편차는 치수정도에 직접적으로 영향을 미친다.

따라서 가공시 피가공재의 온도 균일화는 온간단조가 공의 자동화와 횡형 다단 트랜스퍼 프레스등의 보급으로 온도의 균일화가 달성되었다. Fig. 8은 온간 트랜스퍼 단조금형을 나타낸 그림이다.

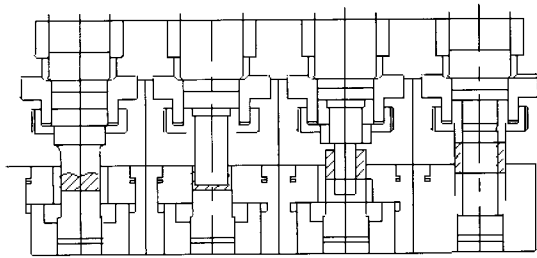
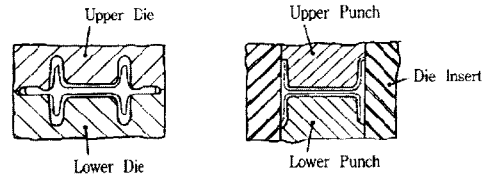


Fig. 8 A schematic diagram of warm transfer forging dies

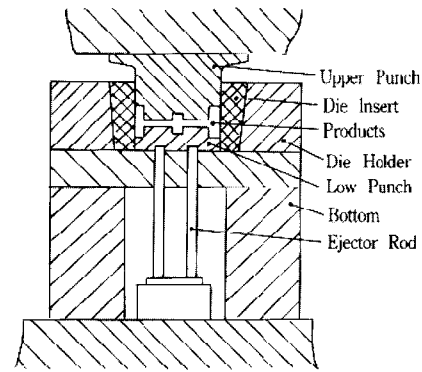
2.3.2 고강도 Si합금 단조

알루미늄 합금은 경량화뿐만 아니라 열전도도, 전기전도도, 내식성이 우수하고 비자성, 무독성이며 시효경화형 합금의 경우 비강도가 높은 특성을 배경으로 단조재료로

많이 쓰인다. 특히 항공기 구조용 부품으로 사용되는 Al 단조품의 요구특성을 얻기 위해서는 단조품 내부 및 표면에 결함이 없어야 하는 것 외에도 가능한 균일하고 미세한 조직을 얻는 것이 중요하다. 그러나 실제 단조품에서는 단조성형의 특성상 Grain flow density의 차이 즉, 부위별로 가공도에 차이가 있게 되는 것을 피할 수가 없다.



(a) Conventional forging die system (b) Precision forging die system



(c) Precision forging die system

Fig. 9 Basic die system of precision forging

형단조법은 금형을 이용하여 특정형상으로 단조하는 방법으로 최종제품의 형상에 대한 가공여유의 정도, 형상의 충실도에 따라 거친형 단조(Blocker type forging), 보통급 단조(Conventional type forging), 정밀단조(Precision type forging)로 분류한다. 여기서 정밀단조품의 제조공정은 보통급 단조품과 같은 공정이지만 우수한 정밀 단조품을 생산하기 위해서는 최적재료의 선정 및 개발, 고도의 금형설계 및 제작기술, 단조설비의 고정도화, 윤활기술, 성형기술, 열처리 기술의 개선과 같은 관련기술의 종합적인 진보와 조화있는 개발이 이루어져야 한다. 정밀단조는 단조품의 일체화 및 복잡형상화를 피하여 절삭 및 연삭 가공을 줄일 수 있으며, 경량으로 고강도를 얻기 위해서 Metal flow가 기계가공에 의해 재료 표면에서 끊어지는 보통급 단조품에 비해 분할선을 적절

히 설계함으로써 유동선을 제품의 형상에 따라 만들어 주면 제품의 기계적 성질, 피로강도, 내응력 부식균열을 개선할 수 있다. 또한, 마무리 가공을 하지 않고 단조품 그대로 사용하기 때문에 표면의 상태가 양호하여야 하며 자동화를 위해서 작업조건을 일정하게 함으로써 고정도를 유지할 수 있다. Fig. 9는 대표적인 정밀단조품과 보통급 단조품의 형상비교를 보여 주고 있다. 정밀단조는 기계가공비의 절감, 제조공정의 생략, 제조일정의 단축, 작업인원의 감소, 재료비의 절감 등과 같은 장점이 있으며, 이러한 장점을 살리기 위해서는 정밀단조 설계 시에 급형 제작비, 제조수량, 최종 사용 상태에서의 형상, 공차에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

2.3.3 분말 단조

최근 재료 개발 동향 중 많은 발전을 이룬 초전도 재료, 비정질 합금, 기계적 합금(Mechanical alloying), Nano-composite 재료등 우수한 물리적 특성과 기능성이 요구되는 재료의 대부분이 분말을 이용하고 있다. 분말 야금의 최대의 매력은 직접 최종제품 형상으로 성형이 가능한 것이고, 재료 특성, 조성, 열처리 및 미세 조직에 있어서 자유도를 가지는 것과 용제법에서는 얻을 수 없는 특성을 나타내는 것과 더불어 경제적으로 양산이 가능한 장점도 있다. 이와 같은 특징을 보유한 분말 야금법에 의해 기어와 베어링 커넥팅 로드(자동차용)등의 각종 기계구조 부품을 시작으로 하여 초경합금, 급형 등의 절삭·내마모 공구재료, W·Mo 등의 고용점 금속재료, 필터와 생체용 Implant 등의 다공질 재료, 전기회로 개폐기와 Pantograph판 등의 전기 접점, 집전재료, 자성코어, 센서 링 등의 자성 재료가 생산되고 있다. Fig. 10은 분말성형법에 의한 자동차용 부품 적용예를 나타낸 그림이다.

분말단조(Powder Forging)란 일반적인 분말 소결법으로 예비 성형체를 만든 후 그것을 단조 소재로 밀폐된 급형에서 정밀 열간단조를 통하여 최종 제품을 만드는 부품가공기술이다. 일반적인 분말야금법에 의해 제조된 제품에는 10~20%의 기공이 존재한다.

이러한 기공은 다공성 베어링과 Filter의 제조시에는 매우 유용하게 작용하지만, 기계구조용 부품에 있어서 기계적 특성을 고려할 시에는 Fig. 11의 예에서 알 수 있듯이 심각한 악영향을 미치게 된다.

즉 소재 내부에 존재하는 상당한 잔류기공으로 인하여 단조나 가공품에 비해 낮은 충격에너지, 피로특성 및 연성을 갖기 때문에 고강도를 요구하는 동작용 부품의 제조에는 그 개발범위가 제한되어 왔다.

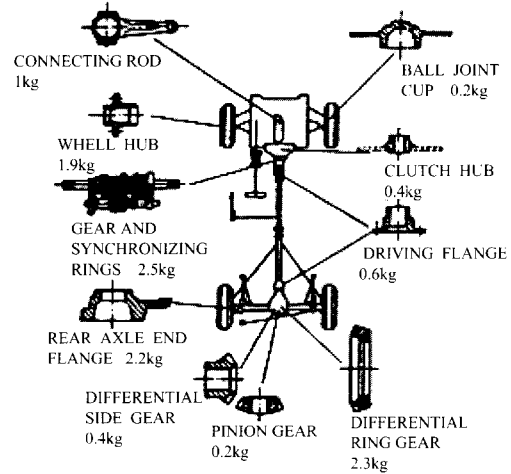


Fig. 10 Forged parts of car using powder forging process

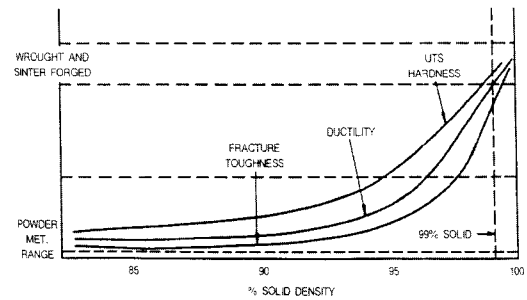


Fig. 11 Relationship between mechanical properties and forged part density

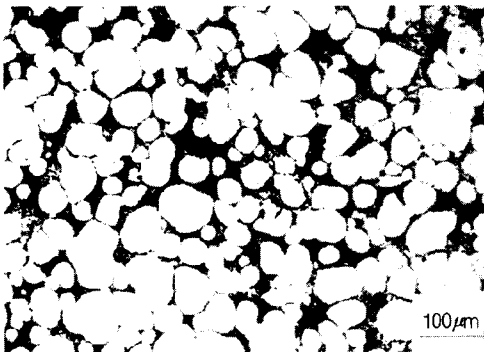
이에 반해 분말단조부품의 경우는 최종 정밀단조를 통하여 진밀도(Full density)를 얻음으로써 소결부품에서의 기계적 특성의 한계성을 극복할 수 있고, 또한 기계가공에 비교하여 분말야금의 장점인 합금 조성 및 특성의 균일화와 후 가공비의 절감 등을 얻을 수 있다.

2.3.4 반응고 단조

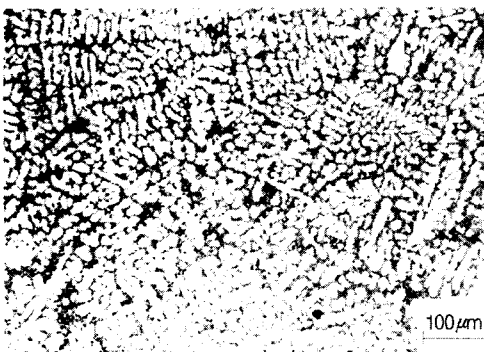
일반적으로 합금을 성형하는 방법으로는 크게 액상에서 성형하는 주조(Casting)와 고상에서 성형하는 단조(Forging) 등, 두가지가 있다.

그런데 주조재는 성형성은 좋으나 기공과 같은 많은 주조결함을 갖고 있어 고품질의 부품으로 활용하기에는 한계가 있다. 반면 단조재는 냉간 혹은 열간가공을 통해 기계적 성질과 같은 특성은 크게 향상시킬 수 있으나 복잡한 형상의 부품 제조에는 한계가 있다.

이러한 기존의 양대 합금성형기술에 대비하여 새로운 제3의 기술로 등장한 것이 '반응고(半凝固) 합금공정', 혹은 'Semi-solid 성형법'이다. 즉 반응고 합금공정은 기존의 주조나 단조공정이 가지는 단점을 최소화하면서 양공정의 장점을 극대화함을 목표로 하고 있는 첨단 제품성형기술이라 할 수 있다.



Semi-Solid Metal Forming



Conventional Casting

Fig. 12 Difference between semi-solid metal forming and conventional casting of microstructure

반응고합금 제조기술의 기본원리는 1970년대 MIT의 M. C. Flemings 그룹에서 주석(Sn)합금의 'Hot tearing' 현상을 연구하던 중 우연히 발견하게 된 것이 그 시초이다.

이들은 Pb-Sn합금의 응고 도중 성장하는 Dendrite조직이 변형, 파괴되는 데 요구되는 전단강도(Shear strength)를 알아보기 위해 원뿔형 고온 Viscometer를 제작하여 실험을 하였는데, 실험중 특이한 현상에 직면하게 되었던 것이다. 즉 한개의 원뿔과 그 바깥쪽에 위치한 보다 큰 원뿔형 용기 사이에 형성된 환형(環形)공간에

Pb-Sn합금을 용해하여 붓고 외측 원뿔용기를 회전시키어 회전력으로 응고중인 반응고(半凝固)합금의 점도를 측정하던 중, 예상과는 달리 반응고 합금의 점도가 액상일 때에 비해 크게 높아지지 않음을 알게 되었다. 더구나 응고중의 온도가 고상 분율 0.5 이상으로 상당히 낮은 경우도 점도가 매우 낮았다.

이와 같은 반응고 합금의 점도 저하는 원뿔용기의 회전에 기인하는 것으로, 회전에 의해 반응고합금에 전단 응력이 가해져 Dendrite조직의 성장이 억제되고, 대신 구형화된 고상입자가 형성되었기 때문이다. 즉 액상 사이에서 구형의 고상입자들이 미끄러짐으로 인해 점도가 낮아지게 된 것이다.

Fig. 12에 대표적인 반응고 합금의 미세조직을 나타내었다.

2.4 환경 친화적 공정기술

2.4.1 환경 친화적 냉간단조 기술

냉간단조를 중심으로 한 금속가공 공정은 성형 부품의 중량과 관련하여 에너지 소비율이 낮고 재료 이용율은 높은 특징을 갖고 있다. 이런 특징들은 경제성뿐만 아니라 환경적으로도 이점을 가지고 있지만 아직 환경적 측면에서의 고려는 많이 부족한 실정이다. 일반적으로 완제품이나 반제품을 생산하기 위해서는 에너지, 재료 및 부가되는 여러 첨가물들이 투입된다. 재료의 전처리 공정, 성형공정과 후처리공정의 생산 단계를 거쳐 제품이 생산되고 그 부산물로서 유해한 찌꺼기와 윤활제 등을 발생시킨다. 그러므로 금속성형공정의 환경적 적합성을 더욱 높이기 위해서는 이러한 모든 측면들을 고려해야 한다. 미래의 환경친화적 금속성형을 위해서 Fig. 13에서 언급된 모든 요소들에 대한 연구의 추진이 필요하며 여기에는 다음의 3가지 과제가 있다.

첫 번째로 환경 친화적 기술로써 잔유물을 처리하는 방법을 연구하는 것이다. 오늘날 일반적으로 행해지는 침전방법으로 유해한 물질들을 제거할 수 있지만, 다소 비환경적이다. 반면에 가장 환경적인 방법은 아직은 현실적이기보다는 미래지향적인 개념으로 보인다. 하지만 환경성과 경제성의 두가지 측면에서 이러한 방법을 가능하게 하는 적절한 방안들이 검토되고 있으며 몇 가지 예들이 보고되고 있다.

두 번째는 에너지, 재료, 첨가물들의 사용량을 감소시키는 것이다. 이것에 대한 해결책은 생산공정과 화학적·물리적 반응, 트라이 블로지 효과와 같은 공정 요소들에 대한 철저한 검토가 선행되어야 한다.

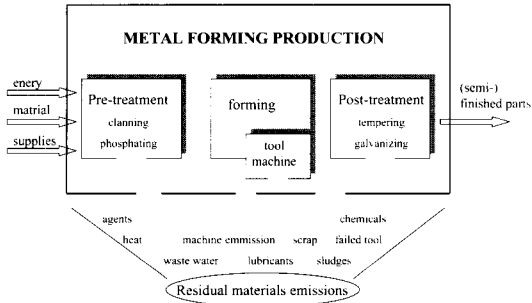


Fig. 13 Environment factors appeared in manufacturing process

2.4.2 미세 단조 기술

냉간단조를 중심으로 한 금속가공 공정은 성형 부품의 최근 산업의 극박단소화에 부응하여 전자 및 전기 부품을 필두로 소형화 추세가 증가하고 있다. 또한, 기계 및 전자 제어기술의 발전으로 인체에 사용되는 인공장기 등 생체기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 이에 따라 최근 독일의 Erlangen-nuremberg 대학을 중심으로 미소한 제품의 부품을 성형하는 미세성형 기술의 개발이 시도되고 있으며, 현재 본 기술을 일부 적용한 전기·전자 부품이 출시되었다.

적용제품의 대표적인 예로서는 IC-packaging용으로 IC-carriers와 Leadframes 및 Fig. 14의 LED(Light Emitting Diode) Support 등으로 지금까지는 기계가공이나 화학적 방법으로 제조되고 있었다.

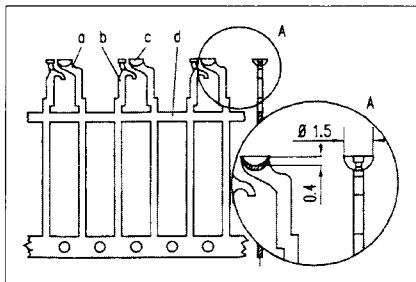


Fig. 14 LED (Light Emittted Diode) support

금속 성형공정이 기존 공정에서 미세 성형으로 바뀔 때 빌렛의 미세조직, 빌렛과 공구간의 표면 성상, 공구와 가공물의 경계 윤활 상태는 변화가 없다. 금속 가공 공정 자체가 상사성을 가지고 미세 치수로 변화한다고 볼 수도 있다. 단,

- 전체 빌렛 채적에 대한 단결정 분포율과 결정립의 이방성 때문에 연속체로 간주할 수 없기 때문에 빌렛의 미세조직은 바로 공정해석에 적용될 수 없다.
- 빌렛과 공구의 표면 성상이 재료의 흐름 거동을 결정하고 마찰 거동에 의해 공작물 표면의 형상을 변화시킨다.
- 빌렛 크기와 윤활 층간의 변화 비율에 기인한 미세 치수의 변화로 윤활 효과가 직접적으로 공정에 전달되지 않는다.

이러한 제약 조건이 미세 성형 기구에 기존의 성형 해석 기구를 적용하기 어려운 요인이며 소위 Size effect라고 불리는 상사이론을 고려할 수밖에 없는 것이다. 치수에 의존되는 금속 가공 거동과 실험 데이터로부터 구한 지배적인 거동 기구의 이해를 위해서는 빌렛 치수와 재료의 관계 및 성형 공정 동안의 마찰 거동을 파악하는 것이 필요하다. Size effect는 시편 조건이 일정할 때와 기존의 치수에서 미세 치수로 기하학적 상사성을 가지면서 점차로 감소할 때로 나누어서 고려할 수 있다.

미세 성형에 관한 Size effect를 조사하기 위한 적절한 재료와 금속성형 실험은 대표적으로 3가지로 나눌 수 있다.

- 마찰을 무시한 초기 유동 응력에 대한 Size effect를 결정하기 위한 인장 실험
- 가공물의 유동 응력 곡선에 대한 Size effect의 평가를 위한 원통형 시편의 압세팅 실험
- 공구와 가공물간의 마찰에 대한 시편 크기의 영향을 결정하기 위한 링 압축 실험

이와 같은 실험을 통하여 금속 소성 가공시 치수에 의존하는 유동응력 곡선과 마찰 거동을 이해할 수 있을 뿐 아니라 미세 소성 가공에 대한 유한 요소 해석을 위한 기초 자료로 응용될 수 있다.

3. 결 론

치열한 국제 경쟁 속에서 우리나라의 단조산업이 발전하기 위해서는 세계 단조산업과 기술의 동향에 대한 정보분석과 더불어, 급속한 변화에 앞서나가야 할 것이다. 환경친화적 생산기술과 고도의 지능화를 지향하는 미래에 대비하기 위해서는 다음과 같은 준비가 필요하다.

- 단조업계의 전문화 노력
- 고기술의 존중과 정보교환의 활성화에 따른 Global한 생산시스템 개발
- 노동시간의 단축과 노동력의 부족에 대응하기 위한 무인화 운전이 어느 정도 가능한 생산성이 높은 생산

Line의 구축 (CIM, IMS등)

- 전시스템의 설계를 효율적으로 가능하도록 CAE의 실용화 및 신속화 제품설계와 가공설계의 통합
 - 유행적인 Net shape제품을 전문 집중 생산하여 다품종 소량생산에 대응이 가능한 기술의 축적(점진 성형 기술 등)
 - 저가의 재료를 이용해서 요구특성을 만족시키는 품질 수준의 단조공법 개발
 - 경량 고강도재료의 가공기술 확립
 - 고강도, 내피로, 내마모 특성을 갖춘 신금형 재료개발
 - 저소음에서 안전하고 깨끗한 작업환경으로의 변혁
 - 인체에 무해하고 깨끗한 윤활제의 사용기술 확립
 - 환경과 조화된 생산시스템 개발
- 이와 같은 단조시스템을 갖추므로써만 단조 산업의 지속적인 발전이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 이정환, 2001, "철강연감"의 단조편, 한국철강신문간.
- (2) 한국소성가공학회, 산자부, 한국단조공업협동조합, 2001. 1, "한국 단조공업 총람".
- (3) Gotoh, M., 1977, "鍛造技術の 變遷과 鍛造에 대한 主要國의 動向", 河部壽雄 鍛造技報.
- (4) 前島敬 · 외, 1993, "鍛造技報", Vol.53, p. 4.
- (5) W. He, Y.F. Zhang, K.S. Lee, L. Lu, S.S. Xie, and Q.J. Jin, 1996, "Microstructure and mechanical properties of an Al/SiCp composite cold die forged gear" Materials Design, Vol. 17, No. 2, pp. 97~102.
- (6) F. Schbert, 1984, "Superalloy Source Book", ASM, 71.
- (7) Titanium and Titanium Alloys Source Book, ASM, ed. M. J. Donachie, Jr., ASM, Metals Park, OH 44073.
- (8) D. Eylon and F. H. Froes, 1984, "Titanium Net Shape Technologies", eds. F. H. Froes and D. Eylon, Met. Soc. AIME, Pa 15086, USA, pp.155.
- (9) "단조 기술 연구소 보고서", 溫間 そく 鍛造の 研究, 1985.
- (10) Geiger, M., 1952, "Towards clean forming techniques", Annals of CIRP 44 ,2. pp. 581~588.
- (11) De Winter, A., Kals, J. A. G., 1994, "A methodic approach to the environmental effects of manufacturing", Proceedings of the 2nd Int. Sem. on life Cycle Engineering RECY'94, Oct 10-11, 1994, Erlangen, Germany. Bamberg: Meisenbach (1994) pp. 287~299.
- (12) De Winter, A., Kals, J. A. G., 1995, "Production and Environment I.C.E.M. Workshop", Aachen, Germany, 12-14. June.
- (13) U. Engel, A. Messner and M. Geiger, "Advanced concept for the FE-simulation of metal forming processes for the production of microparts", Proceedings of the 5th International Conference on Technology of Plasticity - Volume 2.
- (14) M. Geiger, U. Engel, F. Vollertsen, R. Kals and A. Messner, 1994, "Metal Foming of Micro Parts for Electronics(1994).
- (15) Park, J. J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "A new approach to preform design in metal forming with the Finite Element Method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 71~79.
- (16) Hwang, S. M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231~243.