

최근의 알루미늄 단조 동향

櫻井 久之¹

Recent Tendency of Al Forging in Japan

H. Sakurai

1. 서론

일본에 있어서 알루미늄 단조는 자동차의 '안전과 환경의 조화' 문제로부터 차량 증량의 경량화 필요성으로 인한 철에서 알루미늄으로 경량화에 대한 교체 요구가 증가함에 따라 최근에 대폭적인 생산량의 증대가 이루어지고 있다[1](그림 1).

2000 년 이후 자동차용 알루미늄 단조품의 수요가 급격하게 증가하여, 2007 년에 알루미늄 단조품은 1999 년의 2 배 이상 약 33,000 톤으로 되었다. 자동차 각 메이커들이 2000 년에 고급 승용차에 알루미늄 단조 서스펜션 부품의 사용이 증가한 결과이다. 현재 자동차 경량화에서 알루미늄 재료의 적용이 엔진 부품에서 차체부품에 확대되고 있다.

도요다의 최신 제조 기법인 '재료 크라운'에서는 하이마운트 너클이나 서스펜션 멤버 등 대물 부품이 알루미늄화 되고 있다. 2004 년도 모델인 혼다 레전드의 알루미늄 사용량은 대당 총 차체 부품 200kg 가운데 단조품은 46kg(23%)에 이르고 있다.

알루미늄 단조 서스펜션 부품의 사용이 증가한 원인은 가와시다 산업에서 자동차업계의 니즈인 단조품의 고강도화나 코스트 절감에 대한 알루미늄 단조 서스펜션 부품의 최적 설계를 목표로 함으로서 재료 개발과 단조공법개발 및 코스트 삭감을 위한 재료 성능의 향상, 단조 공정의 축소 등의 기술 개발에 의한 것으로 여겨진

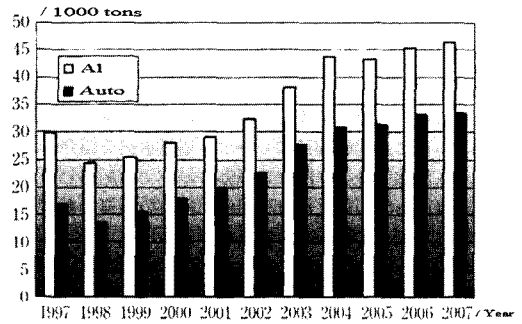


Fig. 1 Annual production amount of forged Al alloys in Japan

다. 이들의 개발은 가와가미 산업의 재료 메이커인 가와가미 산업과 단조 메이커와 자동차 메이커가 강력한 제휴를 통한 공동 연구로 인하여 달성되었다(그림 2).

본 원고에서는 알루미늄 단조 기술혁신으로 대폭적인 수요 증가를 실현한 사례로서, 2000 년도의 서스펜션 부품의 저 코스트화 기술개발인 고강도 합금 개발과 이형 연주체에 의한 고품질 재료, 공정 및 공법의 실현, 필링레스 연주체에 의한 재료 코스트 삭감, 넷트 웨이프(Net Shape)와 같이 극한을 추구한 단조 피스톤, 연속 주조에서 단조까지의 일괄생산에 의한 비약적인 생산성 향상 기술 등과 알루미늄 단조 기술회사가 하고 있는 기술강화에 보고된 기술개발 보고 등에 관하여 소개하고 일본의 알루미늄 단조 동향을 알아 보기로 한다.

1. (社)日本鍛造協會 (郵)103-0023 東京都中央区日本橋本町 4-9-2, Japan
 - 技術解説: 塑性の加工(日本 塑性加工 學會誌) 第49卷 第 568 号 pp. 378-383 (2008.5)
 - 번역자: 박정서(자유번역가), 김인수(금오공과대학교 신소재 시스템공학부, 교수)

2. 알루미늄 단조 서스펜션 압용 고강도 합금의 개발[2]

2.1 알루미늄 단조품의 특성

알루미늄 단조품은 비강도가 높을 뿐만 아니라, 내부품질이 균일하고 안정되어 있는 것이 특징이며 자동차, 철도차량, 항공기 등의 넓은 분야에서 주로 구조 부재로 쓰여지고 있다. 단조용 합금에는 고강도 합금의 2000 계 및 7000 계, 내식합금의 6000 계 및 5000 계, 내마모성 합금인 4000 계 등 많은 합금계가 있지만 자동차 서스펜션 알루미늄 단조 부품에는 그 사용 환경에서 증강도 및 고내식성을 갖는 6000 계(Al-Mg-Si 계) 합금이 쓰여지고 있다.

자동차 서스펜션 알루미늄 단조 부품에 쓰여지고 있는 6000 계 합금 가운데 일반적인 6061 및 개발재인 KS651 의 기계적 성질의 대표 값을 주물용 합금 A356 와 비교하여 표 1 에 나타내었다. 6061 의 항복응력이 260MPa 에 대하여 KS651 의 항복응력은 340MPa 이므로, KS651 는 6061 보다 30% 정도 고강도이기 때문에 KS651 를 사용하는 것이 보다 큰 경량화 효과가 얻어지는 설계를 할 수 있다.

2.2 알루미늄 단조품화에 의한 경량화 효과
종래부터 서스펜션 부재는 일반적으로 주철이 많이 쓰여지고 있으나, 이 주철을 경량화하기 위하여 알루미늄으로 바꾸는 것이 매우 효과적이며 실용적이다. 알루미늄으로 교체하기 위한 구체적인 제조법으로서 알루미늄 단조, 알루미늄 주조, 주조/단조 등이 있다. 이들을 제조법 별로 그 경량화 효과를 계산한 결과를 표 3 에 나타냈다. 경량화 효과는 알루미늄 단조품이 35~40%, 알루미늄 주조 및 주조/단조가 25%정도로서 알루미늄 단조품이 가장 경량화 효과가 큰 제조법이라 말할 수 있다.

알루미늄 단조품이 큰 경량화 효과를 얻어지는 것은 그림 2 와 그림 3 에 보이는 바와 같이 주조품 등과 비교하여 뛰어난 기계적 특성을 보이기 때문이며 단조품 가운데서도 개발재인 KS651 는 6061 에 비교하여 고강도이라는 것에서 가장 큰 경량화 효과가 얻어진다.

2.3 알루미늄 단조품의 신뢰성

알루미늄 단조품은 알루미늄 주조품과 비교하

Table 1 Mechanical properties of Al alloys

Alloy	Tensile strength / MPa	Yield strength / MPa	Elongation / %
KS651-T6	360	340	15
6061-T6	290	260	15
A356-T6	280	240	8

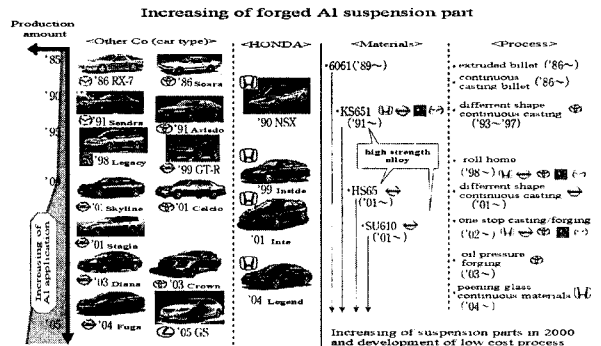


Fig. 2 Tendency of Al forging technology

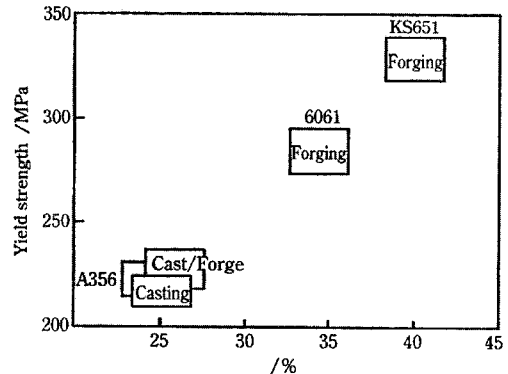


Fig. 3 Effect of light weight of Al with cast iron

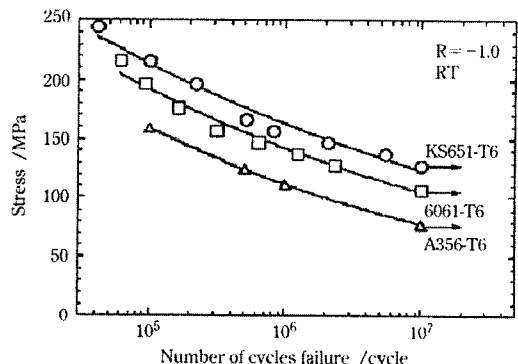


Fig. 4 Fatigue properties of Al alloy

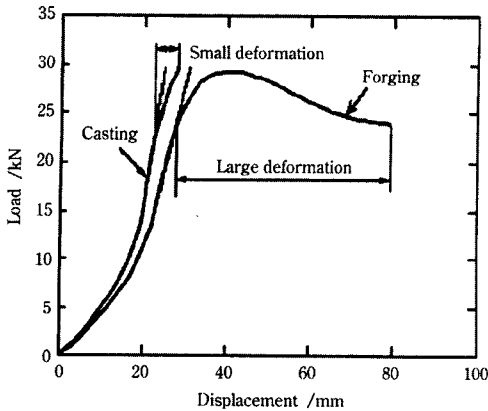


Fig. 5 High load-displacement of forged Al alloy

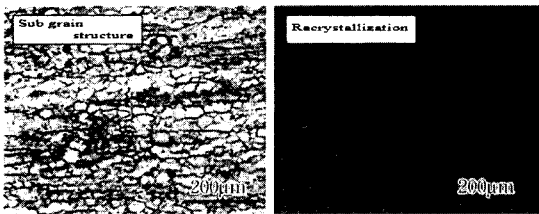


Fig. 6 Sub-grain microstructure of hot forged Al alloy

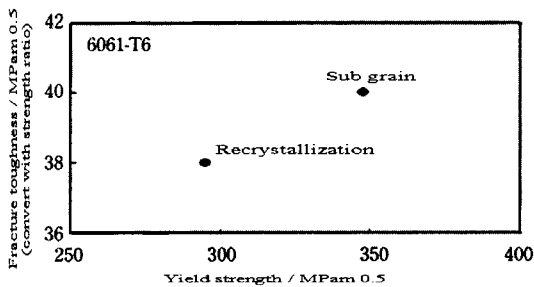


Fig. 7 High strength and toughness of Al alloy having the sub-grain microstructure

여 고강도이며, 고연성, 고인성이라는 것 외에 단조에 의한 소성 변형이 주어지게 되므로 내부 품질이 안정되어 있으며 높은 신뢰성이 얻어진다. 단조용 소재의 연속 주조 빌렛은 용해 뒤에 정련 및 탈 가스 공정을 거쳐 둥근 막대기 형상의 주형으로 외부 원주에서 균일하게 냉각 되어 지면서 일정 속도로 연속적으로 주조된다. 따라서 일반적인 저압 주조품이나 고압 주조품과 비교하여 냉각 속도가 빨라 주조 조건이 안정되는 것으로 아주 미세한 조직으로 건전성에 뛰어난 높은 내부 품질이 얻어진다. 그리고 이 연속주조

빌렛은 단조에 의해 소성 변형이 가해지면 주조 조직이 파괴되어 전신 조직이 되어 다시금 열처리를 거치면, 고강도 고인성의 안정된 내부 품질의 서스펜션 부품이 제조된다. 이 결과 그림 5에 보이는 것과 같이 알루미늄 단조품의 서스펜션 부품의 파괴모드는 변형 시작으로부터 대변형을 거쳐 파단에 이르는 것으로 되어 작은 변형에서 파단에 이르는 주조품과 비교하여 보다 높은 안정성이 얻어지게 된다.

2.4 강도와 신뢰성 향상의 일례

보통 6061 알루미늄 합금을 사용하여 제조공정의 최적화에 의한 강도와 더불어 신뢰성의 향상을 검토했다. 일례로 고온 저변형 속도에서 열간 단조에 의한 마이크로 조직의 아결정립화를 볼 수 있다. 아결정립 및 저결정립의 마이크로조직을 각각 그림 6에 또 강도와 더불어 인성을 그림 7에 보였다. 고온 저변형 속도로 열간 단조에 적용하여 수 µm 크기의 미세한 아결정립 조직이 된다. 또 강도가 높게 됨과 함께 입계 파괴가 생기기 어렵게 되기 때문에 인성도 높아진다. 이상 언급한 바와 같이 단조 프로세스를 최적화 하여 마이크로 조직을 미세한 아결정립 조직으로 하는 것에 의해 6061 알루미늄 합금의 강도와 신뢰성을 향상시키는 것이 가능하다.

3. 알루미늄 단조 서스펜션 암용 필링레스 주조 빌렛의 개발[3]

3.1 알루미늄 단조 부품의 코스트 구성

그림 8에 알루미늄 단조부품의 코스트 구성을 보여주고 있다. 단조 코스트에 차지하는 재료비의 비율은 59%나 높고 그 안의 16%를 단조용 빌렛의 필링비가 차지하고 있다. 보통 빌렛을 주조할 때 냉각 과정에서 생기는 표면층의 매크로 편석이나 응고 수축에 의한 표면의 요철을 없애기 위해 필링을 하고 있다. 또 단조용 소재로서 필링 공정을 필요로 하지 않는 사출재의 적용도 생각할 수 있지만 필링비 이상으로 압축비는 높고, 큰 코스트 증가를 초래한다.

3.2 종래 기술의 과제

대표적인 연속 주조법인 Direct Chill Casting (DC 주조)을 그림 9에 보였다. 이것은 주형내의 알루미늄 용량이 수랭 조형의 냉각(1차 냉각)에

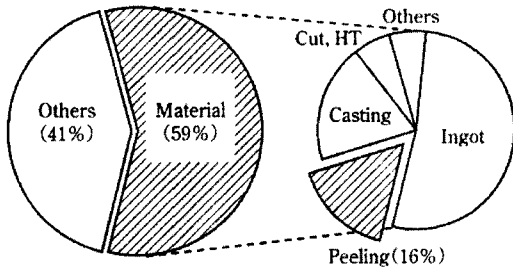


Fig. 8 Cost ratios of forged Al alloy parts

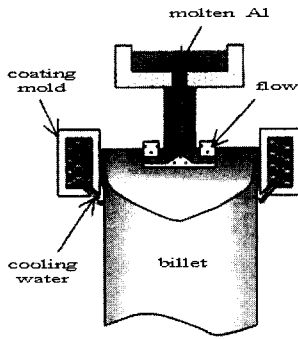


Fig. 9 Conventional DC casting process

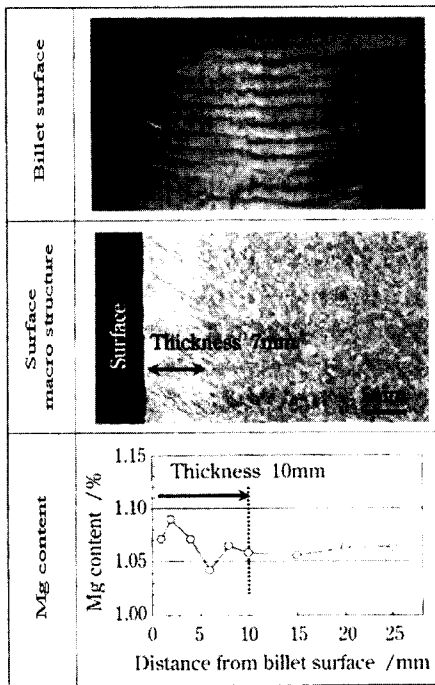


Fig.10 Surface quality of DC continuous casted Al alloy

의해 응고강을 형성하고 형하단에서의 직접 수랭 (2 차 냉각)에 의해 남은 대부분이 응고 하는 2 단 냉각 구조로 되어 있다. 이 구조법에서는 그림 10 에 보이는 바와 같이 2 단 냉각을 되풀이 하기 위해 발생하는 응고 수축에 의해 빌렛 표면에 요철이 생기고 또, 표면층의 매크로 편석이 생기기 쉬울 뿐만 아니라 이들은 부품 단조시의 표면 결함의 발생, 강도 및 내식성 저하의 원인으로 되기 때문에 필링 공정에서 빌렛 표면을 제거하고 있다.

3.3 필링레스 주조 기술

(1)주형 재질과 냉각 방법

종래 기술에 있어서의 2 단 냉각을 억제하기 위해 주형에 냉각 기능을 갖지 않게 하여 직접수랭만으로 하는 단열 주형구조를 채용했다. 그림 11 에 보이는 바와 같이 단열 성능을 갖는 내화물을 주형 홀더에 사용하면서 동시에 용탕의 내부와 표면의 온도 구배를 작게 하기 위해 주형재에는 열전도성에 뛰어난 그라파이트를 채용했다. 또 그라파이트는 자기 윤활 성능을 갖기 때문에 알루미늄 용탕이 주형벽 내로 쉽게 통과된다는 이점도 있고 빌렛 표면의 평활성 향상에 기여하고 있다.

(2)재료성분

그림 10 에 보이는 바와 같은 표면 돌기물의 발생을 응고 껍질의 강도 및 연성을 높이는 것으로 억제를 피하였다. 구체적으로 응고시에 빌렛 표면에 산화 피막을 우선적으로 생성 시키는 Be 을 비롯하여 알루미늄 용탕의 표면장력을 크게 하는 Sc, Ca, Sr 에 주목하고 기본 합금인 6061 합금에 이들의 원소로 첨가하여 개발한 구조법에 의한 빌렛의 표면 품질 향상에 대하는 유효성을 확인했다.

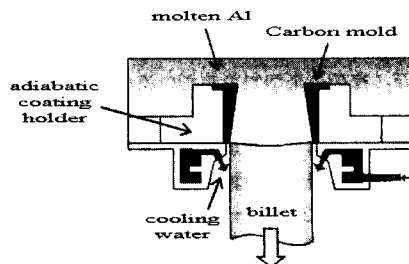


Fig.11 System development of adiabatic casting mold

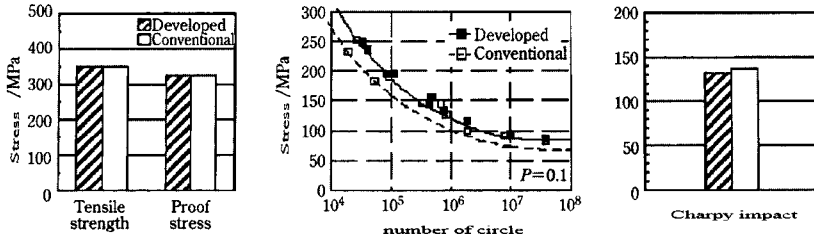


Fig.12 Mechanical properties of forged samples

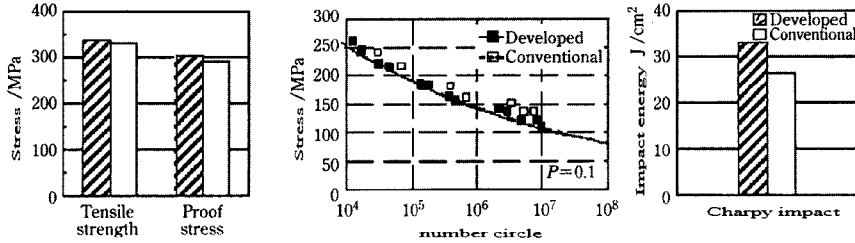


Fig.13 Mechanical properties of inner samples of developed and conventional forging parts

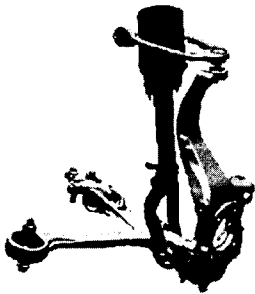


Fig. 14 Front door suspension of Legend model



Fig. 15 Front door arm

3.4 기계적 성질과 부품 특성

(1)잔존 칠(Chill)층의 영향

그림 12 에 평편하게 만든 단조품에서 잘라낸 시험편에 의한 기계적 성질을 보인 것이다. 강도·샤르피 충격값은 칠층의 유무에 관계 없이 동등한 값을 보였지만 피로강도는 종래 기술과 비교하여 약 20% 향상되는 결과를 나타냈다. 이것은 개발한 주조법의 급랭 작용에 의해 조직이 미세하게 되어 있는 것과 표층 칠층이 존재한다는 것에 의한 강화의 효과로 볼 수 있다. 그림 13 에 개발재와 종래재의 단조 압 내부에서 잘라낸 시험편에 의한 기계적 성질을 보인 것이다.

(2)실용 예

본 개발 기술에 의해 종래 필요했던 필링 공정을 폐지하는 것이 가능하게 되고 또 필링 공정

폐기에 의한 주조봉의 교정 폐지, 설비 상각비 등의 삭감에 의해 종래 기술에 비해 약 20%의 재료비 절감을 가능하게 되었다. 그리고 2005 년 모델 Legend 의 후론트 도어 암에 양산 적용하여 주철 암에 비해 약 43%의 경량화를 달성했다. 그림 14 에 Legend 의 후론트 서스펜션 및 그림 15 에 후론트 도어 암을 보인 것이다.

4. 이형 연속 주조 빌렛의 반 밀폐 분쇄 단조 공법 알루미늄 단조 서스펜션 암의 고재료 멈춤 단조법[4]

이형 연주재(슬라이스 재)의 특성을 살린 단조 재료 멈춤 향상과 단조 공정의 절감을 달성하기 위해서 이형 연속 주조 소재 표면의 역편석층을 붕으로 하여 형 외에 배출시키는 반 밀폐 분쇄 단조공법을 개발했다(그림 16, 그림 17). 단조공정

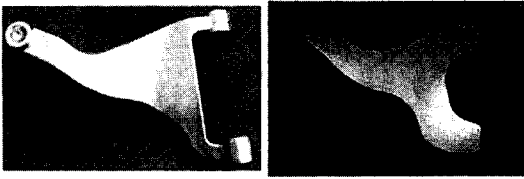


Fig.16 Parts with two different shape in continuous casting

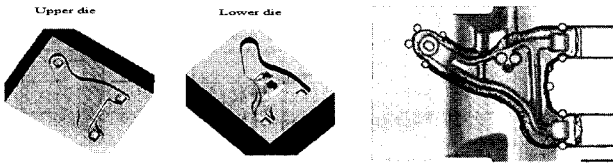


Fig.17 Exhaust of segregation by by mold simulation

으로서는 가열, 조형 3 공정이 있다.

제 1 공정의 멈춤을 올리기 위한 볼륨 나누기와 역편석층을 봉으로서 확실하게 배출하는 형상 설계를 시뮬레이션과 실험에 의해 하고 재료멈춤이 높고 단조 공정을 줄이는 새로운 공정을 개발 했다.

종래의 단조 방안에서는 환봉을 굽혀 누르는 공정으로 볼륨 나누기 하는 방법이 일반적이지만 이 단조 방안에서는 조형 4 공정이 되고 쳐올리는 온도도 저하하고 말며 재결합에 따르는 강도저하를 유발할 가능성이 있다. 고강도재의 특성을 살리지 못할 뿐만 아니라, 공정수의 증가에 의해 비용 상승으로 되고 만다.

대책으로서 소재 메이커로부터 제안한 이형 연주 슬라이스 재를 사용하여 누르는 공정으로 역편석층을 본으로 하여 배출 가능한 이형 연주재의 형상과 분쇄형의 인사이드 형상의 개발에 맞추어 보았다.

전주를 인사이드 형상으로 막고 크리어런스를 작게 하여 중앙에서 서서히 누르는 형 형상에 의해 역편석층을 인사이드 형상에 퍼 붙인 다음 공정으로 배출하는 것에 의해 이형 연주재(슬라이스재)의 단조가 가능하게 되어 고재료 멈춤과 단조 공정의 간소화를 실현하였다.

5. 넷트 셰이프(Net Shape)의 극한을 통한 단조 피스톤의 개발[5]

5.1 단조 피스톤의 과제

2 륜차에서 단조 피스톤 채용을 검토 할 때 코스트의 증가가 큰 과제였다.

주조가 잉곳을 용해하여 그대로 금형에 흘려보내어 형상을 만든 것에 비하여 단조는 그림 16 에 보인 바와 같이 재료를 절단 가공하여 단조 빌렛을 작성할 필요가 있으며 공정수를 생각하여도 주조에 대해 코스트가 높게 되는 것을 알 수 있다.

또 성형 후 기계 가공에 있어서도 주조 피스톤에 대해 기계 가공 공정 수 증가에 따라서 코스트 증가뿐만 아니라 주조 재료는 질삭성이 나쁨으로 인한 부조화 발생 등에 의하여 기계 가공라인의 효율 저하로 코스트 증가 등이 과제이다.

5.2 넷트 셰이프(Net Shape)단조 기술의 개발

단조 공정에서의 알루미늄의 흐름을 조절하는 유동 해석 기술과 금형기술을 확립하여 정밀도가 좋은 고품질인 단조 소재가 얻어지며 가공비삭감으로 인한 코스트의 절감이나 기계적으로 최적인 형상에 의한 경량화를 달성함으로써 주조 피스톤에 대하여 높은 경쟁력을 갖는 경량 피스톤을 개발 하였다.

피스톤의 단조는 1 히트 1 프레스(1HIP)의 유압 또는 메가프레스로 성형되는 경우가 많다. 1HIP

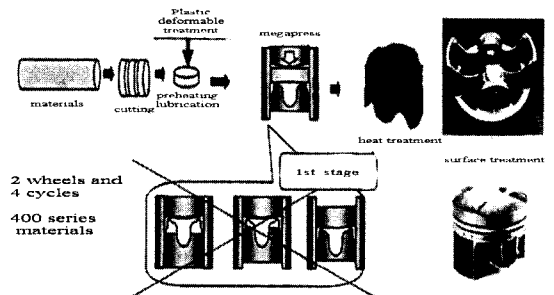


Fig. 18 Forging process of piston

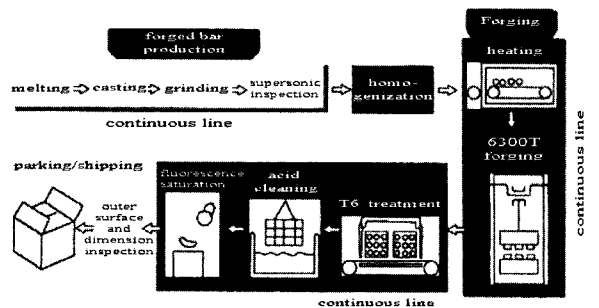


Fig.19 Schematic diagram of one stop melting and casting process in Kobe steel company

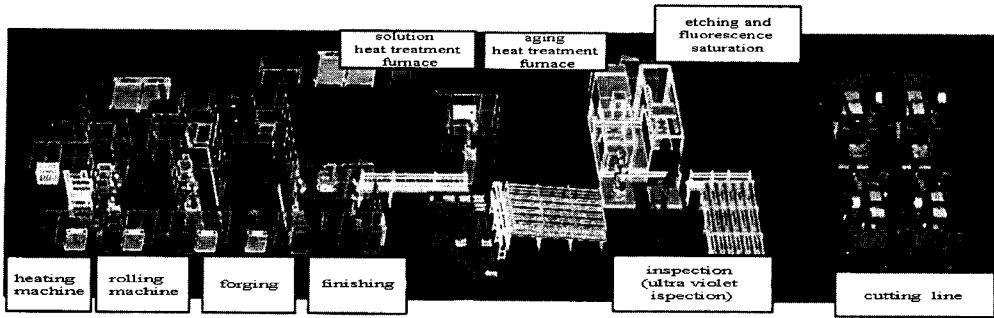


Fig. 20 Schematic drawing of one stop materials processing line of Toyota automobile company

는 다단 프레스에 비해 코스트가 우위에 있으며 치수 정밀도도 얻어지기 쉬운 반면 복수의 금형에서 알루미늄 흐름을 제어 하는 것이 되지 않으며 또, 중간 공정에서 결함을 보완할 수 없기 때문에 단조 결함에 충분히 배려할 필요가 있다. 개발한 소재를 사용하여 피스톤의 정밀단조의 검토를 해 보았다. 복합형상의 피스톤 단조는 2H3P(2히트 3 프레스)또는 1H2P의 다단 공정으로 실시되는 경우가 많다. 여기서는 코스트, 정밀 도면을 고려하여 1HIP의 1 공정에서 실시하였다. 1 공정 단조는 다단 공정에 비해 코스트가 우위에 있으며 치수 정밀도도 얻어지기 쉬운 반면 복수의 공정에서와 같이 알루미늄의 흐름을 제어하는 것이 잘 되지 않으며 또 중간 공정에서의 결함이 보수되지 않기 때문에 단조 결함이 발생하기 쉽다.

그래서 본 개발에서는 결함을 사전 예측하여 재료의 유동을 제어하는 단조를 실시했다. 여기에 덧붙여 특수 윤활처리와 금형 국부의 온도 제어를 실시하는 것으로 복잡 형상품의 고정밀도 단조를 가능하게 하였다. 이를테면 $\Phi 80$ 의 피스톤으로 면평탄도 0.03, 지름공차 ± 0.03 이 달성되었다. 본 개발의 제조공정을 그림 18에 보였다.

6. 결론

알루미늄 단조품의 경쟁력을 향상시키는 기술 개발을 소개하였다. 유럽에서의 알루미늄 단조의 상황은 통계 자료가 충분치 않으나 미국 단조 협회(FIA)에 의한 2005년의 연간 단조품의 생산량은 2004년에 20.9%증가하여 31.0천 ton이며, 일본(32.3천 ton)과 동등하다고 볼 수 있다. 항공기용 단조품이 21.8%(판매가 기준)를 차지하는 미국 단조업계를 고려하면 일본의 자동차 부품용 알루미늄 단조품의 생산량은 세계에서 가장 많다. 앞으

로 자동차의 알루미늄화 확대에 대해서 일본의 고도화된 알루미늄 단조 기술은 강한 국제 경쟁을 갖고 있다.

지면의 형편상 상세히 소개되지 않았지만 (주)미세철소, 오오야스 공장에 설치된 단조 소재의 연속주조에서 단조, 열처리, 검사까지의 일관생산라인(그림 19)을 적용하면 단조시에 발생하는 후처리 등의 효율적인 리사이클, 주조용 소재의 운입의 절감이 가능하게 되어 코스트 절감과 생산 소요 시간의 최소화가 큰 장점으로 되어 갈 것이다[6]. 본 설비는 이미 미국에서 현지 생산에도 적용되고 있다. 또 도요다 자동차는 『제로 크라운』의 연비와 조업 안정성의 향상을 위하여 적극적으로 알루미늄 합금을 채용한 서스펜션을 탑재하고 있으나, 알루미늄 단조재 하이 마운트 너클의 제조할 뿐만 아니라 해외 생산 등의 소량 생산공장에 적용되는 콤팩트한 단조품에서부터 기계가공까지의 일관 라인을 구축하였다(그림 20). 이것은 강단조에 비해 알루미늄 단조의 단조온도, 성형 하중 등의 유리함을 살렸는데 설비의 소형화에 의한 제조 원가 절감의 달성에 의한 것이라고 보고되고 있다[7].

알루미늄 단조는 가와가미·가와나카·가와시다 산업의 강한 제휴에 의한 기술혁신으로 지구 환경 보호에 대응하고 글로벌한 생산 방법의 채택으로 장점이 현실화 되어 가고 있다. 앞으로 단조용 알루미늄 재료의 리사이클의 확대로 인하여 보다 더 효율성이 확대되는 것이 바람직하고 판단된다.

끝으로 본 원고에 협력해 주신 알루미늄 단조 기술회 및 인용에 도움을 주신 논문 집필진 모두에게 감사를 올립니다.

본 논문은 한국소성가공학회와 일본소성가공학

회의 번역 게재 협정에 의하여 저자의 허락을 생략하고 번역하여 게재합니다.

참 고 문 헌

- [1] 牛尾英明 ; ホンダニューレジェンドででの軽量化と鍛造素材技術, アルミニウム鍛造技術會 第 43 回技術講座, (2006).
- [2] 天木友士, 秋山浩, 當間清孝 : Honda R&D Technical Review, 16-2, (2004).
- [3] 中井學 : 6000 系合金足廻り鍛造品の強度ならびに信頼性の向上, アルミニウム鍛造技術會 第 37 回技術講座, (2004).
- [4] 國井正志, 土田孝之 : アルミニウム鍛造新技術への取り組み, アルミニウム 鍛造技術會 第 37 回技術講座, (2004).
- [5] 関口常久ほか : ネットシェープの極限を追求した鍛造ピストンの開発, アルミニウム, 37-12 (2007).
- [6] 中田守 : 溶解, 鍛造一貫ラインをしたアルミニウム 鍛造, アルミニウム 鍛造技術會 20 周年記念出版, 鍛造技術, 鍛造賞記念論文集, (2006).
- [7] 森下弘一 : アルミニウム製ハイマウントナックルの 鍛造技術, アルミニウム 鍛造技術會 20 周年記念出版, 鍛造技術, 鍛造賞記念論文集, (2006).