

최근 자동차부품의 반응고성형 적용동향

고영진, 임태원, 조원석

현대자동차 차량선행개발실 금속재료연구팀

1. 서론

점차 강화되어가고 있는 연비규제에 대응하기 위한 미래의 환경친화적인 자동차를 개발하기 위해 소요되는 천문학적인 연구개발비를 투자하여야만 한다는 것이 업계에서 정설로 알려져 있으며 이를 위해 500만대 이상 차량생산 가능한 자동차회사만이 시장에서 살아남을 것으로 관련전문가들은 예측하고 있다¹. 이와 아울러 최근 자동차산업계에서 재편되고 있는 포드-마쓰다-볼보, 다임러-크라이슬러 그리고 르노-닛산과 같은 기업합병은 이러한 위기의식에 따른 자연적인 현상으로 생각되어진다.

따라서 구미유럽의 선진자동차메이커들은 저마다 다른 정책수립을 통해 초저연비 자동차 개발을 추진하고 있는 상황이다. 미국을 예로 들면 슈퍼카프로젝트(super car project)라는 사업명으로 정부의 지원하에 PNGV 및 USCAR를 조직하여 2004년에 80MPG를 목표로 두고 있으며, 유럽에서는 3리터카 즉, 3리터로 100km를 주행 가능한 초저연비자동차 개발을 각 사별로 진행하고 있으며 폴크스바겐사는 이미 '98년 제네바모터쇼에서 루포(Lupo)를 세계최초로 소개하였으며 경량재료의 대폭적인 적용으로 기존 차량무게를 25%(약 200kg) 경량화하였다². 또한, 일본의 경우도 역시 각 회사별로 제품개발을 추진하고 있는 상태이며 도요다가 야리스(Yaris)를 '99년 4월에 이미 시장에 투입하였으며, 혼다는 하이브리드방식(HEV)을 채택한 인사이트(Insight)를 개발하여 오는 11월에 판매할 것으로 알려지고 있다³.

이와 같은 초저연비차량을 개발하기 위해서 다음과 같은 연비향상방안에 대한 개선요소들이 우선적으로 고려될 수 있을 것이다.

- 설계최적화, 경량재료의 확대적용 및 전륜구동방식에 의한 경량화
- 가속저항, 구름저항 그리고 공기저항 저감대책
- 열효율향상, 냉각손실개선 그리고 마찰손실감소와 같은 엔진효율향상
- 배기에너지회수, 보기효율향상 그리고 전달효율개선 등의 구동계효율향상

이와 같은 종합적인 연비향상방안을 추진하기 위한 초저연비차량개발은 아무리 시스템적인 개선목표를 달성한다고 해도 현실적으로는 현재의 차량중량을 약 40~50% 경량화 하지 않고는 실현 불가능하며 이에 대한 실례로써 현재 개발된 차량의 경우에도 알루미늄 및 마그네슘과 같은 경량재료를 대폭 적용한 바 있다⁴.

따라서 본고에서는 자동차부품에 확대 적용되어지고 있는 반응고성형공정(semi solid forming process)에 대한 장단점, 적용예, 최근업계개발동향을 정리하였으며 자동차부품으로

추후 확대적용을 위한 개발방향을 제안하고자 한다.

2. 반응고공정의 특징

2-1. 금형 수명

기존 용해주조법과 비교하여 반응고 성형법의 첫 번째 장점은 재료의 가열에 필요한 에너지를 줄일 수 있다는 것이다. 예를 들어 빌렛을 반응고 성형온도로 가열하는데 필요한 에너지는 주조시 용해에 필요한 에너지의 약 65% 정도에 해당된다고 알려져 있다. 또한 반응고 성형시의 가열온도는 주조시 용해온도보다 약 100~150℃ 정도 낮기 때문에 성형시 금형의 열충격을 감소시켜 금형수명을 연장시킬 수 있다⁵.

2-2. 생산성

반응고 성형법의 또 다른 장점은 제품성형시의 사이클 타임이 짧다는 것인데, 다이캐스팅법과 비교할 때 제품의 생산성을 20~25% 증가시킬 수 있다고 보고되어 있다⁶. 이것은 재료가 이미 반응고된 상태로 금형에 충전되기 때문에 완전한 응고에 필요한 시간을 단축할 수 있기 때문에 생긴 자명한 결과이다. 현재 이탈리아의 Stampal에서는 Ford Zeta 엔진에 사용되는 fuel rail을 시간당 160개의 생산속도로 제조하고 있다⁷. 참고적으로 표 1은 기존의 성형공법과 반응고성형법에 사용되는 주입온도 및 응고를 완료시키는데 필요한 열방출량을 보여준다.

3-3. 실형상 제어능 및 기계적 성질

주조시 형상제어에 영향을 미치는 주된 변수는 응고수축으로서, 그 요인은 두 가지로 대별된다. 첫 번째는 액상에서 고상으로 변태할 때 일어나는 수축이며, 두 번째는 주조온도에서 상온에 도달하기까지 일어나는 수축이다. 반응고 성형공정은 재료의 응고가 이미 부분적으로 진행된 상태에서 성형하기 때문에 응고에 의한 수축을 최소화시킬 수 있으며, 이러한 특성을 이용하여 기존의 주조공법보다 더욱 정밀한 제품에 대해서도 치수정밀도를 유지할 수 있다. 따라서 반응고 성형을 통하여 실형상에 가까운 부품을 제조할 수 있으며, 이 사실은 기존의 공법보다 기계가공을 대폭 감소시킬 수 있음을 시사한다. 그림 1은 반응고 성형법으로 제조한 자동차용 알루미늄 마스터실린더를 기존의 금형주조법으로 제조한 것과 비교함으로써, 반응고 성형법에 의하여 실형상(near net shape)에 가까운 제품을 얻을 수 있음을 보여준다. 또한 반응고 성형된 제품은 조직적으로 균일하고 응고 수축에 의한 미세기공이 적기 때문에 재료의 기계적 성질을 향상시킬 수 있다.

예를 들어 반응고성형된 A356 합금의 강도 및 연신률은 기존의 주조방식으로 제조한 재료의 기계적 성질보다 우수하며, 특히 단조한 제품의 물성값에 근접함을 알 수 있다.(표 2 참조)

3. 경량화

유류파동과 환경보존 등의 세계적 추세는 자동차의 연비향상의 법제화로 발전되었으며, 미국에서는 현재 미국시장의 중형차의 평균연비인 27mpg (miles per gallon)를 향후 5년 이내에 50mpg로 높이기 위하여 많은 연구 투자를 하고있다. 비록 전자분야와 제어분야의 발전이 자동차의 연비향상에 지대한 공헌을 해왔지만, 현실적으로 자동차를 경량화하지 않고서는 이러한 목표를 달성하기 어렵다. 반응고 성형법은 두께가 얇은 박육제품들을 성형할 수도 있으며, 박육과 후육이 공존하는 경우에도 가능하다. 또한, 기존 철강 구조용 부품을 알루미늄합금으로 대체할 수 있는 신 공정기술로서 미국, 일본, 유럽 등의 국가에서는 이미 자동차용 내압부품 및 구조부품을 반응고 성형공정을 이용하여 생산하고 있다. 예를 들어 그림 2의 경우 자동차의 현가장치 부품들을 반응고성형법에 의한 알루미늄합금으로 대체했을 때 평균 49%의 경량화를 이룰 수 있으며, 그림 3에서 보여주고 있는 조향장치인 스티어링 너클의 경우에는 기존 스틸(C35)단조재를 포르쉐엔지니어링에서 응력해석(FEM analysis)을 통해 재설계하고 독일의 Krupp-Gerlach사의 요청에 따라 EFU에서 개발된 부품으로써 기존 부품중량을 약50% 경량화시켰다⁸. 각 부품별 경량화 내용을 표 3에 나타내었다. 표4는 지금까지 기술한 반응고 성형이 가지고 있는 장점들을 요약하였다.

4. 제조원가

우선 어떠한 부품이 반응고성형에 적합한지를 검토하여야 하며 또한, 관심있는 사람들과 논의할 경우 우리는 항상 반응고부품의 제조원가가 다이캐스팅공법과 비교된다는 사실을 알고 있다. 그렇지만 이것은 처음 시작부터가 잘못 비교된 것으로써, 우선 반응고성형공정은 일반 다이캐스팅공정과 달리 높은 소재원가와 재가열을 위한 유도가열장치에 대한 많은 초기 투자비용부담이 발생되기 때문이다.

철강품이나 알루미늄 단조품으로 만들어지고 있는 부품들은 장치 반응고공법으로의 적용 요구가 높아지게 된다. 현가장치의 일부분에 속하는 서스펜션 암(1.5kg)과 같은 그다지 크게 어렵지 않은 형상을 지닌 서스펜션부품들을 기준으로 하여 단조, 스퀴즈캐스팅, 반응고성형(thixofforming) 그리고 자체적인 리사이클 가능한 반응고성형등 4가지의 서로 다른 제조공법에 대한 원가구성요소별 비교가 그림 4에 나타나 있으며 부품은 그림 3과 같은 형상에 대한 스티어링 너클의 전체제조비용은 반응고공정이 단조 및 스퀴즈에 비해 경제적인 성형방법이라는 것을 보여주고 있다⁹.

5. 국내외 연구동향¹⁰

반응고성형기술은 반응고 상태의 금속재료도 고분자재료와 같이 텍소트로픽 특성을 가진다는 사실이 1970년대 초 MIT의 Flemings 교수 팀에 의해 세계 최초로 알려진 후, 이 특성

을 이용한 새로운 공정기술과 신합금개발이 추진되어 외국의 경우도 그 개발과 실용화가 아직 초기단계로서 역사가 매우 짧다. 미국의 경우 반응고 금속의 의가소성 및 텍소트로픽 특성의 중요성을 인식하여 80년대 들어와서 반응용/반응고기술의 연구와 제품생산을 목적으로 미국의 MIT에서 America Rheotech Co.라는 벤처회사를 설립하였다. 일본의 경우에도 정부 및 민간 합동의 차세대고속제조기술 개발프로그램으로 확정하고 1988년 3월에 Kawasaki Steel Corp., Kobe Steel Ltd., Nippon Steel Corp. 등 18개 업체가 공동으로 30억엔(240억원)을 투자하여 Japan Rheotech Ltd.를 설립하여 반응용/반응고성형기술 개발연구를 실시하였다. 이 결과 반응고 성형에 필요한 많은 기초기술데이터들을 확보하였고, 지금은 알루미늄 합금뿐만 아니라 철강, 스테인레스강 등 고용점고속에서도 이 기술의 상업화가 가능하다는 결론을 얻었으며, 본격적인 산업생산연구에 들어갈 예정으로 있다. 표 5는 Japan Rheotech Ltd.에서 그 동안 연구 검토하였던 내용과 결과를 요약한 것으로서 금속의 리오로지와 텍소트로픽 특성연구를 알루미늄, 동합금에서뿐 아니라 주철(2.5%C), 중탄소강(0.6%C), 스테인레스강에서도 검토하였다. 반응고연속주조를 위해서 pilot 설비규모의 기계적 교반, 전자기적 교반 및 shearing/cooling roller장치를 설계제작하고 생산연구를 수행하였으며 비공개의 생산적 노우하우기술을 확보하게 되었다. 또한 실제 제품생산개발을 위해서 thixo diecasting, rheo-diecasting, forging, extrusion, stripcasting, ingot making 등 다방면으로 반응고 성형 기술의 가능성을 확인하였다.

최근에 미국 Alুমax에서는 1997년에 연산 50,000,000개의 자동차부품이 생산가능한 공장을 건설 하였고, 일본 Speed Star Wheel사에서는 세계 최소중량의 Al wheel을 제조하는 등 현재 Al 또는 Mg 경량합금 부품에서 일부 실용화 단계에 있다. 참고로 외국에서 수행하고 원소재 제조 및 제품생산에 관련된 활동 내용을 표 6과 7에 요약하였다.

우리의 경우 1990년대에 들어와서 이 기술에 대한 잠재력을 확인하고 대학 및 연구기관에서 산발적으로 저용점 경량합금재료에 대한 반응고 성형의 기초연구를 진행하였다. 주요 연구내용은 기계적 교반시 반응고 알루미늄합금에서의 교반속도와 고상율에 따른 조직관찰로서 아직 초보적인 수준에 머물러 있으며, 상업용 합금계에 대한 연구는 최근 들어 반응고 교반소재(rheocast materials) 또는 특수(noble)소재(예; spray formed material, MMCs 등)들에 대해 고·액 공존영역의 온도로 재가열하여 복잡형상의 제품을 양산 제조하는 소재개발 연구가 활발해 지고 있다. 아직 국내에서는 반응고 성형기술에 의한 제품은 생산하고 있지 않지만 국내 자동차 및 전자부품업계에서는 WTO시대에서 생존할 수 있는 국제경쟁력을 확보하기 위해 주요부품의 공정자동화를 통한 생산성제고, 품질향상을 통한 불량률 최소화, 에너지절감을 통한 원가절감 등을 도모하기 위하여 반응고가공기술에 관심을 표명하고 있다.

오늘날 반응고성형법은 가공시 필요한 미세한 등축정조직을 가지는 원재료의 상업적인 공급에 크게 의존하고 있다⁷. 현재 알루미늄합금에 대해서는 전자기교반장치를 이용한 수직 또는 수평식 연속주조장치에서 봉 형태로 제조되고 있다. 주조몰드 내에서 직접 야기되는

교반력은 columnar dendrite의 성장을 억제시키고 강력한 결정립미세화제 역할을 한다. 현재 Alusuisse-Lonza 및 Buhler(Switzerland), Stampal(Italy), Efu GmbH (Germany), Aluminium Pechiney(French), SAG(Austria), Ormet(USA), Alumax(USA), Northwest Aluminium(USA) 등에서 반응고 알루미늄소재를 생산하고 있으나 대부분 자체에서 반응고가 공품을 제조하는데 사용하고 있으며, 생산판매는 Aluminium Pechiney와 SAG사가 유럽에서, Ormet와 Northwest Aluminium가 미주지역에 상업적으로 공급하고 있는 실정이다. 아시아에서는 Aluminium Pechiney사의 자회사인 일본 Pechiney사가 모기업에서 제조된 빌렛을 판매하고 있다.

마그네슘합금의 경우 Thixomat Inc.가 몇 년동안 사출성형장치에서 사용될 수 있는 독특한 마그네슘칩(chip)과 펠렛(pellet)을 공급하고 있으며, 최근에 혼다의 리터카인 인사이트(Insight)의 엔진 오일 팬에 세계최초로 텍소몰딩공법을 적용하여 알루미늄 대비 1.1kg의 경량화를 실현하였다. 한편, Norsk Hydro는 최근 연속주조법에 의한 반응고가공용 빌렛을 개발하였으나, 아직 상업적인 판매는 하고 있지 않지만 반응고가공에 적절한 것으로 판단되고 있다⁷.

반응고(또는 반응용) 금속이라 함은 금속재료를 고상과 액상이 공존하는 반응고(또는 반응용)영역의 온도로 유지시킬 경우 금속내부의 결정립계가 부분적으로 용해되고, 미용융(또는 응고)상태의 결정립이 고상성분으로 잔류하고 있는 슬러리상태를 정의한다.

6. 최근 차동차관련 부품의 적용 및 개발현황

미국의 경우 Alumax는 세계적인 반응고성형 메이커로서 표 8과 같이 과거에는 로커암 샤프트지지대, 타이 밉벨트 텐서너, 에어컨 컴프레서하우징, 퓨얼레일, 서스펜션 및 엔진/변속기 마운트 브라켓 그리고 브레이크 매스터실린더등을 생산하여 미국의 빅3에 공급하였으나 '99년에는 브레이크 매스터실린더, 엔진/변속기 마운트 브라켓 그리고 퓨얼레일(fuel rail) 등이 현재의 주요 제조부품들로 되어있다.

한편, 유럽에서는 표 9에서와 같이 서브프레임, 서스펜션암, 스티어링 너클, 브라켓, 케이스트 노우드, 그리고 퓨얼레일등이 양산 및 개발중에 있다.

일본의 경우 혼다가 3 리터카로 개발완료하여 '99. 11월에 발매예정인 하이브리드(HEV) 방식의 인사이트(Insight- 알루미늄 162kg사용/800kg차량)에 세계최초로 자동차 바디구조재에 속하는 리어아웃 트리거에 알루미늄 반응고부품을 적용하였으며 엔진 오일팬에 마그네슘 텍소몰딩부품을 적용하였다¹¹. 케이힌사로 부터 에어컨 컴프레서 스크롤을 319(86S)합금으로 T6열처리하여 조만간 적용할 예정에 있다.

도요다의 경우 수프라(supra)에 아사히테크로부터 하이드로릭 서스펜션 실린더를 공급받고 있다.

또한 최근 닛산은 2~3리터급인 세드릭/글로리아(Cedric/Gloria)의 어퍼암(upper arm)과

서스펜션암(suspension arm)에 반응고부품을 적용했으며 기존 단조재와 비교하여 각각 6kg, 4.3kg의 경량화를 달성했으며 원가 절감도 이루었다. 따라서 향후에는 배기량 4리터 이상인 시마/프레지던트(cima/president)의 차기모델로도 확대적용기로 결정하였다. 또한, 단조재에 비해 원가절감이 가능하여 중급차량에도 장착을 검토중인 것으로 알려져 있다¹².

7. 결론

현재 산업계에서 상용화되고 있는 반응고성형공정의 경우 구상화된 빌렛을 재가열하여 일정한 부품을 성형 하는 텍소포밍(thixoforming)공법을 이용하고 있으며 구상화된 반응고 슬러리를 원하는 일정한양만을 직접 슬 리브에 투입한 후 사출성형하는 리오포밍(rheoforming)공정은 현재 연구단계에 있다.

자동차부품에 적용 및 개발되고있는 부품들로 내압특성이 요구되는 퓨엘레일(fuel rail), 브레이크 마스터 실 린더(brake master cylinder) 그리고 에어컨 컴프레서 하우징(air-con compressor housing)을 고려할 수 있으며, 내피로강도가 요구되는 서스펜션(suspension)과 엔진/변속기 마운트 브라켓에 대한 적용이 점점 확대일로 에 있는 추세다. 한편, 원가에 대한 공정별 평가는 기존 알루미늄 단조와 스퀴즈공법에 비해 다소 유리한 것으로 알려져 있으며 이러한 사실은 최근에 닛산 자동차회사에서 발표한 내용으로도 이미 확인되었다.

국내에서도 산학연에서 반응고 소재국산화와 공정제어를 위한 기초연구들이 진행되고 있으며 현재는 반응 고시작품을 이용한 부품 특성 평가단계에 접어들고 있다.

그러나 향후 자동차산업에서 반응고부품의 광범위한 적용을 유도하기 위해서는 리오포밍과 같은 단순 성형 공정을 이용하여 제조원가를 절감하는 방안이 하나의 대안으로 제시될 수 있을 것이다. 이를 위해서 일본의 레오텍과 같은 산학연이 함께 공동 참여하는 범국가적인 프로젝트를 통해 체계적이고 효율적인 연구를 진행 해 나가는 일이 중요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) Business Week 99. 7. 5, Honda; Can the Company Go it Alone
- 2) WARD'S Engine and Vehicle Technology Update. Oct 15, 1998 p7.
- 3) 日刊工業新聞, 日刊自動車新聞, '99年9月6日号
- 4) 권순용, 임태원, 조원석, 대한금속학회, 제4회 철강기술심포지움, “자동차 경량화 재료동향” p93
- 5) P. Anderson, J.C, Summerill and A. McLelland : Preceeding of 4th Int, conf, on the Semi-solid processing of Alloy and Composites(1996) p208
- 6) Personal conversation with Alumax Inc.
- 7) A.I. Nussbaum : Light Metal Age, June (1996) p6-22

- 8) G. Hirt, R. Cremer, T Witulski, K. Sommer, NADCA T97-125 Advances in Thixoforming Plant Technology, Component Manufacturing and Simulation
- 9) R. Fink, Frech Info, Practical Examples
- 10) 한국과학기술연구원, 보고서 UCE1467-6085-1 “실형상 금속성형 공정기술개발“ 과학기술처. (1998) p12-68
- 11) 輕金屬, タイジエクト 1999年(平成11年)7月26日, p3
- 12) 日刊工業新聞, 1999年 7月 26日

Table 1. Process temperature and amount of heat to be removed used in various forming processes.

	Gravity	Press-cast	Thixoforming
Process temperature	740 °C	700 °C	580 °C
Thermal energy to be removed	637 Joule/g	595 Joule/g	288 Joule/g

Table 2. Mechanical properties of A356 Al alloy fabricated using various processing methods

Alloy	Process	Heat treatment	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
A356 (Al7Si0.3Mg)	SSM	T6	240	320	12	105
	PM		186	262	5	80
	CDF		280	340	9	-

Note : SSM - Semi-solid metal processing

PM - Permanent mold casting

CDF - Closed die forging

Table 3. Weight reduction of suspension system when replacing conventional steel parts with aluminum alloy.

Front suspension system part name	Weight in grams			
	Steel	Aluminum	Reductions	
Upper control arm, front	750	250	500	76%
Upper control arm, back	800	300	500	62%
Suspension arm	1850	700	1150	55%
Steering control arm	2100	1100	1000	48%
Support	190	120	70	37%
Suspension arm bearing	300	140	160	53%
Shock absorb bearing	185	130	55	30%
Bearing for steering control arm	370	280	90	25%
Knuckle	6950	3900	3050	44%
Total per side	13495	6920	6575	49%
Total per vehicle	26990	13840	13150	

Table 4. Advantages of thixoforming over conventional processes.

Advantage	Description	Remark
Environmental cost	No liquid metal handling is required.	
Nearness to net shape	Due to minimization of solidification shrinkage	Up to 1mm wall thickness
Mechanical properties	Consistency and soundness	
Design complexity	Ability to make complex shape	
Weight reduction	Via alloy substitution & tighter dimensional tolerance	Approx. 40%down
Production rate	Shorter cycle time	
Die life	Extended as a result of process conditions	About 30% up
Cost down	Due to increased cycle time & reduced machining	

Table 5. R&D activities conducted by Japan Rheotech Ltd

Contents of R&D	Materials	Outline of Results
<p>* Physical Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> -viscosity -primary grain growth -solidification rate -deformation resistance 	<ul style="list-style-type: none"> - Al & Cu alloys, 2.5%C cast iron - Al & Cu alloys, 2.5%C cast iron - Sn-Pb, Al & Cu alloys, STS - Al & Cu alloys, 0.6%C steel 	<ul style="list-style-type: none"> - predicted as a function of metal composition, cooling rate and stirring intensity - grain growth prediction for primary crystal particles - prediction for growth rate of solidified shell of semi solid metals - a constant 0.3kg/mm² deformation resistance at fraction solid less than 0.6
<p>* Continuous casting</p> <ul style="list-style-type: none"> -mechanical stirring -electromagnetic stirring -shearing/cooling roll 	<ul style="list-style-type: none"> - Al & Cu alloys, 2.5%C cast iron - Cu alloys, 2.5%C cast iron, various steel (0.1%, 1.0%, STS) - Al & Cu alloys, 2.5% C cast iron 	<ul style="list-style-type: none"> - fraction solid upto 0.5 can be produced continuously - if fraction solid less than 0.25, even 0.1%C steel can be continuously produced - fraction solid upto 0.5 can be produced continuously
<p>* Forming</p> <ul style="list-style-type: none"> -thixo-diecasting -rheo-diecasting -forging -extrusion -strip casting -ingot making 	<ul style="list-style-type: none"> - Al & Cu alloys, 2.5%C cast iron, STSI - Al alloys, gray cast iron - Al & Cu alloys - Al matrix SiCp composites - Sn Pb, Cu alloys, STS - Al & Cu alloys, STS, 1.0%C steel 	<ul style="list-style-type: none"> - enhancement of internal quality - superior in internal quality - appropriate processing speed / preventing macro segregation of solid and liquid - the extrusion pressure for semi-solid phase must be 60% of that for solid - reduction of cracks on cast strip and high speed casting - reduction of segregation and upgraded hot workability

Table 6. Raw material producers and suppliers.

Company	Productions	Remarks
Alumax (USA)	Produce SSM feedstock of 16000 ton per year in Ferdale, Washington, USA	Owns patents for both MHD castings and SIMA. They only produce feedstock for their own in house semi solid forming
Dow Chemical (USA)	Produce Thixomag [®] Mg alloy for Thixomolding [®] process	Thixomat reports that this feedstock material is supplied in quantities of 450kg.
Ormet (USA)	Produces 3 and 4 inch billets, and will produce 5 and 6 inch billets.	Currently building a \$15 million plant in the USA to produce A356 and A357 alloys under the licence of French Pechiney
Pechiney (France)	Supplies 3 alloys, A356, A357, and Al-Si7Cu3Mg, in both 3 and 6 inch dia. billets	All feedstock is shipped to the USA
Alustisse (Swiss)	Produces 3 and 4 inch dia. billets in Chippis, Swiss	Also produce SSM components for automotive applications.
Stampal (Italy)	Recently installed a production line for casting vertical billets with 3 and 4 inch dia.	
Althix (Japan)	Produce SSM Al alloy billets under the license of Pechiney	

Table 7. Companies producing semi-solid castings

Company	Location	Business area	Remarks
Alumax	ST. Louis & Jackson, USA	Produces parts weighing from 10 grams up to 10 Kg, and as large as 500mm in diameter. Production capacity of 50 million per year	Produces air conditioner housing, rocker arm pedestal mount, etc for Big 3
CMI International	Detroit, MI USA	The highest volume manufacturer of squeeze castings in USA, now plans to compare the SSM process with squeeze casting and other casting processes.	
Formcast	Denver, USA	Produces small parts, weighing less than 450 grams	Developed powder-metallurgy based SSM process to produce near-net shape 20~50%Be-Al alloys
Hot Metal Working (HMW)	Arkadelphia USA	Produces 5000 SSM parts a day for GM using Buhler SC machine	
Johnson Controls	Plymouth, MI, USA	Installed a Thixomolding [®] machine to produce SSM Mg alloy parts	
Madison-Kipp	Madison, WI, USA	Under investigation of SSM process	
Stampal	Caselle, Italy	Produce automotive & aerospace parts	Produce fuel rail for Ford, rear axle component for Fiat (Fig.9)
Thixomat	Ann Arbor, MI, USA	Installed a Thixomolding [®] machine to produce SSM Mg alloy parts	
General Motors	Saginaw, MI, USA	Classified	

Table 8. Automotive components producing from Alুমax

car maker	discription(Year)	part name	volume(unit : milion)
CHRYSLER	3.5L('92)	rocker arm pedestal	1.5~2.0
↑	↑	timing belt bracket	0.2
FORD	FS10('94)	air-con comp housing(FR)	0.5
↑	↑	air-con comp housing(RR)	0.5
↑	SIGMA('95)	fuel rail	0.5
↑	ZETEC('95)	↑	0.5
CHRYSLER	PROWLER('97.5)	suspension arms	0.2
↑	Cad STS('97.5)	engine. transmission bracket	
GM	S & T('98)	brake master cyclinder	0.8
↑	GMT800('99), 34mm	↑	1.6
↑	GMT800('99), 37mm	↑	
↑	GM H car	↑	
↑	GMX 160('99)	engine/transmission bracket	1.0
↑	GMX 220('99)	↑	
↑	GMX 310('99)	↑	
FORD	SIGMA('99)	fuel rail	0.4

Table 9. SSM automotive components under productions and developments in Europe

car maker	car name	part name	producer	alloy type	status
ALFA ROMEO	SPIDER	rear multilink subframe	stampal	357-T5	P
↑	156	front suspension triangle	allusingen	A356-T4/T6	↑
BENZ	S-CLASS	suspension triangle & arm	↑	A356-T6	↑
3 German company		front suspension parts		A356/A357	D
3 major company		steering knuckle		A356-T6 A357-T5	↑
PEUGEOT	206	bracket	florence peillon	357-T5	P
FIAT	PUNTO	↑	stampal	↑	↑
FRANCE		6 car nodes	↑	↑	↑
FIAT		fuel rail	magneti marelli	A356-F	↑

P: under pttoduction, D: under development



Fig. 1. Thixoformed master cylinders (fabricated by thixoforming (left) and permanent mold casting (right)) show better near net shape.

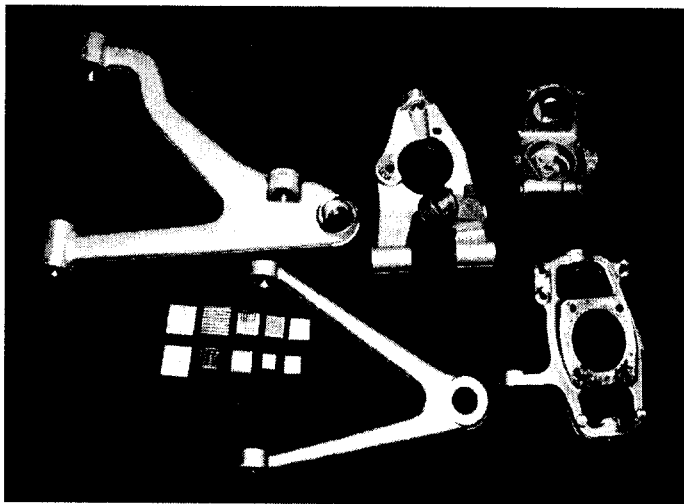


Fig. 2. Various suspension components fabricated by thixoforming process by Alumax.

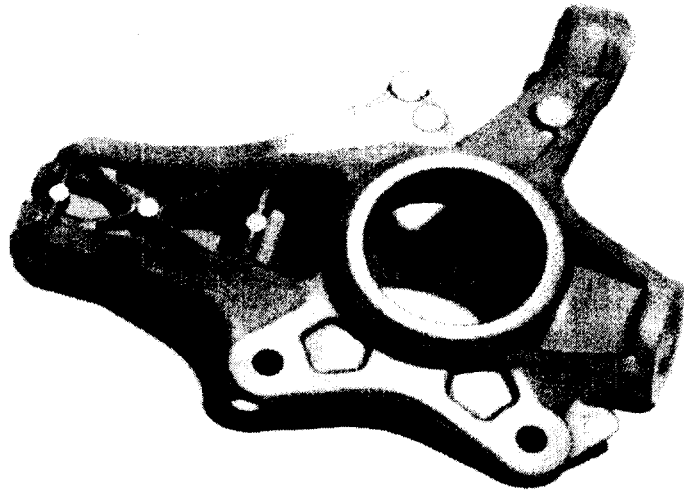


Fig. 3. Picture showing the thixoformed steering knuckle(heat treated A356)

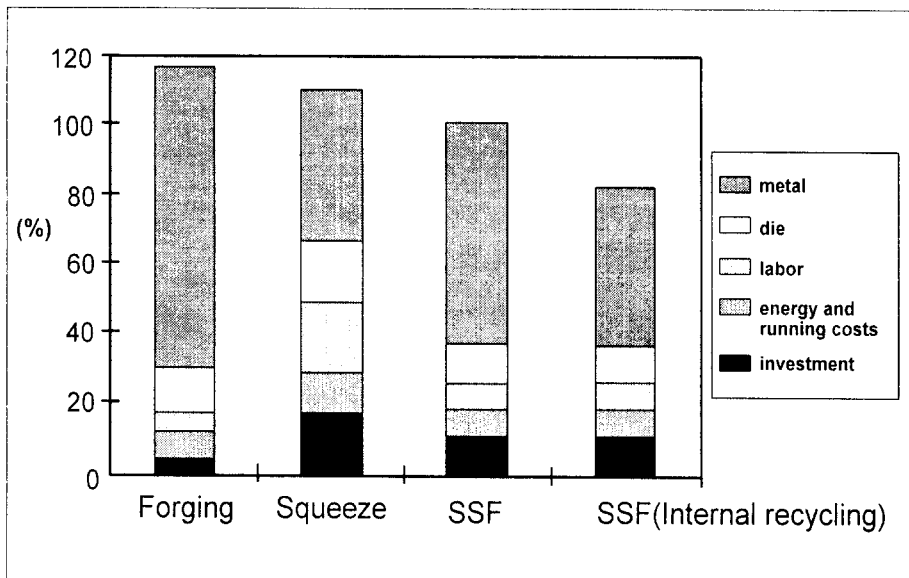


Fig. 4. Comparison of costs for forging, squeeze casting, thixoforming and thixoforming with internal production⁹

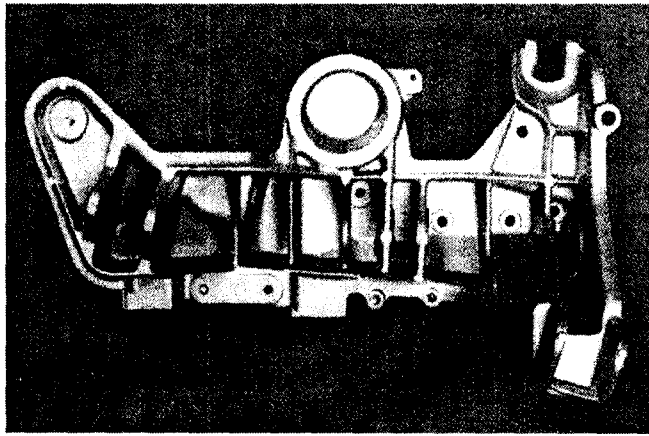


Fig. 5. A picture showing a rear multilink subframe, the world's largest thixoformed part which weighs 15 pounds (made by Stampal)