

주조/단조 기술을 이용한 대형 알루미늄 플랜지 개발에 관한 연구

왕신일* · 서명규* · 조종래** · 배원병†
(2001년 2월 7일 접수, 2001년 6월 26일 심사완료)

A Study on the Development of Large Aluminum Flange Using Casting/Forging Process

Shin Il Wang, Myong Gue Seo, Jong Rae Cho and Won Byong Bae

Key Words : Casting/Forging(주조/단조), Aluminum Flange(알루미늄 플랜지), Preform Design(예비 성형체 설계)

Abstract

The significance of the casting/forging process for reducing the production cost of large components is being noted in these days. This casting/forging process is a method of forging a workpiece preformed by casting into the final shape. In this study, the casting/forging process has been applied in manufacturing a large aluminum flange in order to reduce press capacity and material cost. Firstly, a hot compression test was performed with cast cylindrical billets in order to determine the optimum forging condition of the aluminum flange. The optimum range of forging temperature of Al 5083 was from 420°C to 450°C. The suitable strain rate was 1.5 sec⁻¹. The deformation amount of a preform in a forging process is a key role in the mechanical properties of casting/forging products. In order to find the change of mechanical properties according to effective stain of cast aluminum billets, a hot upsetting test were performed with rectangular blocks and then a uniaxial tensile test was performed with specimens cut from the upsetted billets. The tensile strength and the elongation of cast/upsetted aluminum billets were increased largely until the effective strain was 0.7. FE analysis was performed to determine the configurations of cast preform and die for an aluminum flange. In the FE analysis, the forging load-limit was fixed 1500ton for low equipment cost. The cast preform was designed so that the effective stain around the neck of a flange exceeded 0.7. From the result of FE analysis, optimal configurations of the cast preform and the die were designed for a large flange. The filling and solidification analysis for a sound cast-preform was carried out with MAGMA soft. In the forging experiment for an aluminum flange, it was confirmed that the optimal configuration of the cast preform predicted by FE analysis was very useful. The cast/forged products using designed preform were made perfectly without any defects.

1. 서론

최근 산업용으로 알루미늄 플랜지가 많이 사용되고 있다. 대형 플랜지를 생산하는 데는 알루미

늄 빌렛(billet)을 이용하여 단조하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 너무 큰 성형하중이 요구되고, 단조 후에 기계 가공량이 많기 때문에 프레스의 설비비와 재료비를 줄이기 위해서는 공정의 개선이 매우 시급한 형편이다.

본 연구에서는 주조된 예비성형체를 이용함으로써 단조하중을 낮추고, 스크랩을 재활용할 수 있는 주조/단조공정을 통하여 대형 알루미늄 플랜지를 값싸게 제조할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 우선 주조된 Al 5083 예비성형체의 적절

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 회원, 한국해양대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학과

E-mail : wonbbae@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2313 FAX : (051)514-7640

한 단조조건을 파악하기 위해 원통시편을 사용하여 고온압축실험을 행하였다. 또한 4 각 블록의 고온압축실험과 표준인장시험을 실시하여 유효 변형률에 따른 기계적 성질의 변화를 확인하고, 이를 예비성형체의 설계에 적용하였다. 또한 주물의 응고해석을 통해 적절한 주조방안도 제안하였다. 그리고 주조/단조공정을 이용하여 대형 플랜지를 생산하기 위한 최소의 가공하중과 플랜지의 넥(neck)부위의 주조조직이 파괴될 정도로 충분한 변형을 일으킬 수 있는 예비성형체 및 단조공정을 유한요소해석을 통하여 제안하였다. 제안된 예비성형체 및 단조공정을 이용하여 실제제품의 30%로 축소된 제품을 제조하여 실제제품의 생산 가능성을 타진하였다.

2. 기초실험

2.1 실험소재

실험소재는 Al-Mg 계 단조용 합금인 Al 5083 인데, 이 소재는 용접성, 저온인성, 내식성 등이 우수하며, 강도가 비교적 높기 때문에 LNG, LPG 등의 압력용기로 많이 사용되고 있다.

2.2 원통의 고온압축실험

알루미늄 플랜지 단조에 적합한 조건을 파악하기 위해서 380℃~500℃ 범위에서 1.5/s, 10/s, 17/s의 변형률 속도로 33%, 50%, 67%의 단조비로 압축실험을 하였다. 압축시편은 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편을 급형주조로 제작하였다.

2.3 블록의 고온압축실험 및 표준인장시험

주조/단조에 관련하여 Shinichio 등,⁽²⁾ 櫻天久之 등⁽³⁾은 단조율에 따른 기계적 성질의 변화를 관찰하였다. 그러나 이들의 연구는 단순압축에 의한 단조율에 따라 중심부위의 인장강도와 연신율의 변화에만 초점을 두었으며, 이를 유한요소해석에 접목하는 것은 부적절하다. 따라서 주조/단조 공정으로 생산된 제품의 신뢰도를 높이기 위해서는 유한요소해석을 통해서 충분한 변형을 받는 예비성형체를 설계하여야 한다. 이를 위해서는 유효 변형률과 기계적 성질과의 관계를 파악하는 것이 필요하다.

유효 변형률에 따른 기계적 성질의 변화를 파악하기 위하여 4 각 블록의 고온압축실험을 수행하고, 각 압축 단계마다 인장시편을 채취하여 1축인장실험을 수행하였다. 4 각 블록의 치수는 45 × 120 × 40mm 이고, 높이방향(40mm)으로 압축하였다. 각 단계의 유효 변형률의 크기와 분포는 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM-3D를 이용한 해석

결과에서 알 수 있었다.

3. 단조공정설계

3.1 설계방향

대형 알루미늄 플랜지를 단조공정으로 제조시에는 설비용량의 대형화로 인한 막대한 시설투자가 필요하다. 이에 주조/단조 공정을 적용함으로써 단조공정의 성형하중을 1500ton 이하로 하고, 플랜지 넥부위의 변형을 충분히 부여하여 주조조직을 없애는 데 설계의 목적을 두었다.

4. 주조방안 설계

4.1 주조방안

기존의 주조에서는 대부분 경험에 의존하여 형을 설계하고 주조조건을 결정해 왔다. 이와 비교하여 주조해석은 주조현상을 가시화하여 용탕의 열유동 및 응고현상에 대한 이해를 높이고 문제점 규명 및 해결을 용이하게 한다.

본 연구에서는 주조해석을 통해서 적절한 주조방안을 제시하여 잘못 설계된 주조방안으로 인해 현장에서 발생할 수 있는 시간과 비용의 낭비를 줄이고자 하였다.

4.1.1 탕구방안

축대칭 링 형상의 대형주물은 휠게이트(wheel gate)를 사용하는 것이 일반적이다. 주입구의 위치는 가공부나 두꺼운 부분을 피하고 제일 아랫쪽의 얇은 부분에 두는 것이 보통이다. 설계된 주조방안은 Fig. 1 과 같으며, 2 개의 탕구와 4 개의 주입구를 설치하여 용융금속의 유동이 원활하도록 하였으며, 탕구비는 1:2:2로 하였다.

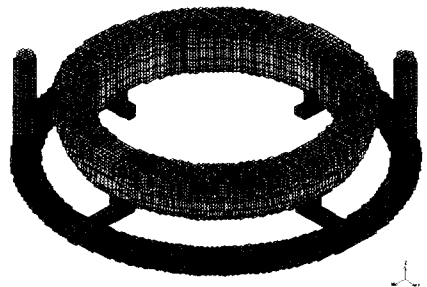


Fig. 1 Mesh shape of a cast plan without risers for a flange perform

4.1.2 압탕방안

압탕은 주입된 주형내의 정압을 부여하여 주형내의 가스를 제거하는 동시에 용탕의 냉각 및 응고에 따라 생기는 체적수축에 대하여 용탕을 보급해 주는 것이 목적이다. 이 목적을 달성하기 위하여 압탕 내에서 용탕은 실제의 주조품이 응고될 때까지 오래도록 용융상태를 유지하여야 한다. 그러므로 열의 중심이 주조품에서 압탕으로 옮겨져서 방향성 응고가 완료되는 종지점이 압탕이 될 수 있도록 하여야 한다. 압탕에는 여러가지가 있으나 가장 일반적인 것은 위쪽을 개방한 원주형 압탕으로 그 높이는 1.0~1.8 배 가량으로 하는 것이 보통이며, 높이를 높게 하는 것보다 직경을 크게 하는 것이 좋다.

본 해석에서 압탕 방안은 최초 주물 체적의 약 30%에서 접근을 시도하였으며 응고해석 결과에 근거해서 수정을 하여 최종결과를 얻었다.

4.2 해석모델 및 조건

주조공정의 충진 및 응고해석은 상용 FVM 프로그램인 MAGMAsoft 를 이용하였다. 금형과 소재의 물성치는 MAGMAsoft 에 저장된 소재의 물성을 사용하였다. 응고해석에 중점을 두었기 때문에 소재는 액상선과 고상선 온도가 Al 5083 과 가장 가까운 알루미늄 소재를 선택하였다. 초기조건으로 주입온도는 700℃로 하였고, 금형의 온도가 300℃로 하였으며, 응고시 중요한 인자인 금형과 소재와의 열전달 계수는 변종문 등⁽¹⁾이 금형주조해석에서 사용한 0.02 cal/cm²·sec·℃로 가정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 원통의 고온압축실험

5.1.1 단조조건에의 결정

주조한 Al 5083 의 67%의 압축변형시 변형률 속도가 비교적 높은 10 /s 와 17 /s 에서는 모든 온도에서 표면에 크랙이 발생하였으며, 변형율 속도가 1.5 /s 일 때는 420℃~450℃ 온도구간에서 양호한 표면을 얻었다. 이러한 결과는 비교적 많은 양의 변형이 필요한 주조/단조의 공정을 주조된 Al 5083 에 적용하기 위해서는 해머 같은 단조공정보다는 비교적 느린 변형률속도의 유압프레스가 적당함을 알 수 있었다.

또한 일반적으로 알루미늄 단조공정의 금형온도는 150℃~315℃이지만 비교적 제품의 크기가 대형이고 낮은 성형속도에 따른 금형의 열전달을 감안하여 본 공정에서는 금형의 온도를 430℃로

유지하는 것이 적절하다고 결정하였다.

5.1.2 조직관찰

변형률에 따른 조직을 관찰하기 위해서 430℃에서 변형률속도 1.5/s, 단조율 33%, 50%, 67%로 압축하였다. 유효 변형률에 따른 조직의 변화를 보기 위해서 DEFORM-2D 를 이용하여 시뮬레이션하여 결과를 비교하였다. Fig. 2 는 시뮬레이션으로 얻은 유효변형률의 값과 압축한 Al 5083 주조시편에서 조직을 촬영한 부위를 보여준다. 같은 방법으로 다른 유효변형률에 대해서도 조직사진을 촬영하였다.

Fig. 3 은 주조/단조한 Al 5083 시편에서 각 유효 변형률에 따른 조직사진이다. 유효변형률이 0.4 에서는 Al 5083 의 주조조직이 압착이 진행되어 수직상 조직이 분산되기 시작하였다. 유효변형률이 0.7 에서는 분산된 조직이 많이 압착되어 압축변형조직이 나타났다. 유효변형률이 1.2 에서는 완전히 파괴된 주조조직을 볼 수 있었다. 하지만 이러한 미세조직의 관찰만으로는 주물의 기계적 성질이 어떻게 변하는가에 대한 정확한 결론을 내릴 수가 없으며 최소한 유효변형률이 0.7 이상이 되어야 한다는 잠정적인 결론에만 도달하였다.

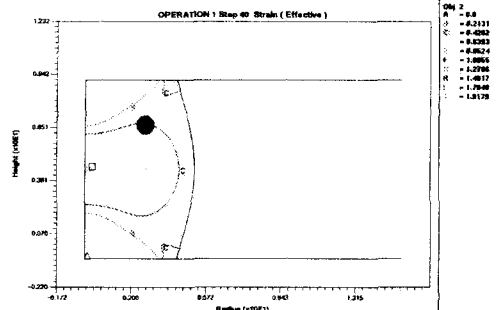


Fig. 2 Effective strain distribution and a selected part to observe the change of a microstructure of cast/forged Al 5083

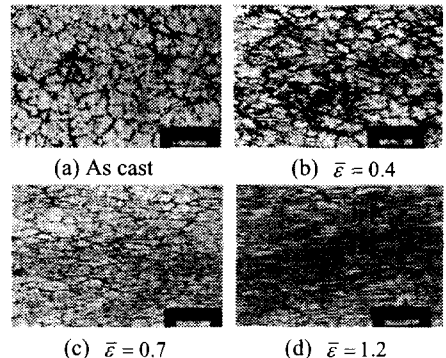


Fig. 3 Microstructures of cast/forged Al 5083 according to effective strain

5.2 블록의 고온압축실험 및 표준인장실험

직육면체의 알루미늄시편을 고온에서 압축하고, 유한요소해석에 근거하여 압축한 시편에서 적절한 유형변형률을 가지는 인장시편을 채취하였다. Fig. 4 는 유한요소해석에서 얻은 압축한 시편의 유효 변형률 분포와 인장시편을 채취한 위치를 나타낸다. 같은 방법으로 각 압축단계마다 인장시편을 채취하였다.

Fig. 5 는 인장실험에서 유도한 유효변형률과 기계적 성질과의 관계를 나타내었다. 인장강도와 연신율 모두 유효 변형률이 증가하면서 향상되는 것을 알 수 있다. 이것은 주조조직이 변형을 받으면서 조직이 치밀해지고, 미세기공 등의 주조 결함이 제거되는 결과로 판단된다. 주물에 비하여 유효 변형률 0.7 에서 인장강도는 180.6MPa 에서 279.3 Mpa 로, 연신율은 6.31%에서 16.21%로 증가하여 ASTM B209 의 규격을 만족함을 알 수 있었다. 또한 유효 변형율이 0.7 이상에서는 인장강도가 크게 증가하지 않음을 관찰할 수 있었다. 이전의 연구결과들은 30%정도의 변형률이 주물에 가해지면 주물의 기계적 성질이 크게 나아진다고 하였다.⁽³⁻⁵⁾ 그러나 본 연구의 결과에서는 주조/단조 공정의 예비성형체를 설계함에 있어서, 주조조직이 파괴되고 단조품과 대등한 기계적성질을 가지기 위해서 유효변형율이 최소 0.7 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

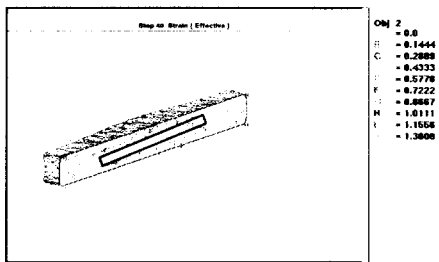


Fig. 4 Effective strain distribution and location of cutting part for a tensile test of an upsetted rectangular block

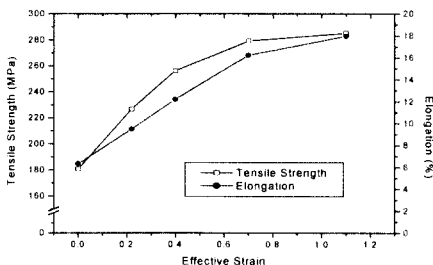


Fig. 5 Tensile strength and elongation according to effective strain of cast/forged Al 5083

5.3 단조공정설계

성형하중을 줄이기 위해 r 방향으로 개방된 Fig. 6 과 같은 단조금형을 제안하였다. 제안된 단조금형에 적합한 예비성형체의 형상 중에서 넥 주위의 변형이 가장 많이 발생할 수 있는 형상은 Fig. 8 과 같았으며, 5 개의 형상변수를 변화시켜서 해석을 수행하였다.

Fig. 6 과 같은 형태로 성형하였을 때, 성형하중은 약 1100 톤으로 적절했으며, 변형률 분포도 넥 주위에서 0.7 이상의 유효 변형률을 얻을 수 있었다. 하지만 이러한 형상의 단조 금형은 단조시 불균일한 마찰, 예비성형체의 치수오차 등과 같은 단조환경의 변화가 있을 경우에 플랜지 바깥부위의 치수가 부족한 부위가 발생하여 불량률이 발생할 가능성을 가지고 있다고 판단하였다. 따라서, 플랜지의 r 방향으로 가공여유를 부여하고, 성형하중이 다소 증가하더라도 상부금형의 외곽에 안내벽을 설치하는 것이 플랜지의 치수정밀도에 유리하다고 생각하였다. 안내벽의 높이와 곡률 반경을 변경하여 해석을 수행하였다.

Fig. 8 에 최종 예비성형체와 금형의 형상을 나타내었다. 상부금형의 속도는 5mm/s 으로 하였다. 성형하중은 1434 톤으로 적절하였으며, Fig. 9 에 최종 해석결과를 나타내었다. 넥 주위의 변형률은 양호한 결과를 얻었으며, z 방향의 플래시는 5mm, r 방향의 플래시는 최소 2mm, 최대 5mm 로 예상되었다. Fig. 9 에서 소재에 표시한 굵은 선은 단조 후 후가공 공정이 이루어진 후 플랜지의 최종형상이다.

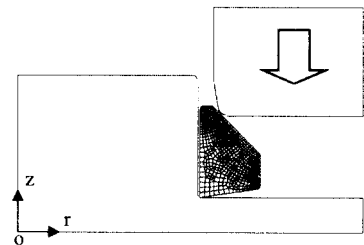


Fig. 6 Open die-forging process for a profile flange

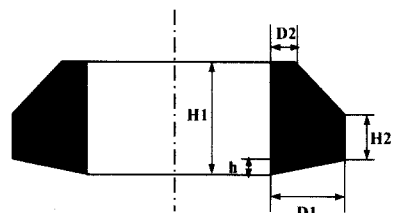


Fig. 7 Configuration and Design Parameters of perform for a profile flange

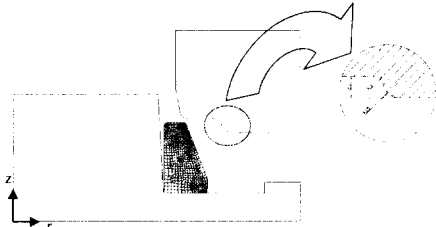


Fig. 8 Scheme of preform for open die-forging with a guide wall

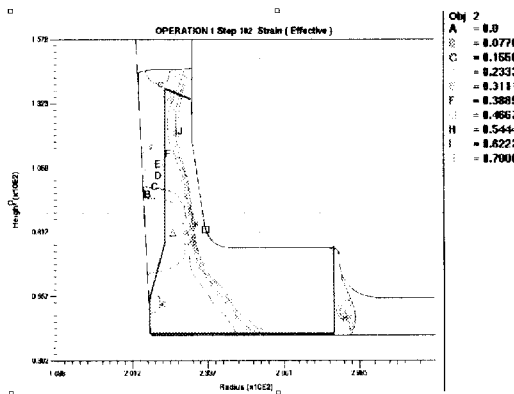


Fig. 9 FE analysis result of the final preform for open die-forging with a guide wall

5.4 주조방안설계

주물에 압탕을 설치하지 않았을 때 응고가 지연되는 부분에 압탕을 설치한 후 응고해석을 실행하는 방법으로 해석을 수행하였다. 압탕을 세우지 않은 해석결과는 Fig. 10 과 같다. 주입구가 있는 부위에서 응고가 지연되어 주물내부에서 온도분포가 폐루프(closed loop)를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이러한 온도분포의 폐루프는 내부가 응고되기 전에 외부가 먼저 응고되기 때문에 압탕으로부터 급탕을 받지 못함으로 수축결함이 발생할 가능성이 높다.⁽⁶⁾ 또한 부위별 응고시간을 고찰하여 주물의 내부에 최종적으로 응고되는 부분이 있을 경우에 이 부위에 수축결함을 예측할 수 있다.^(7,8)

수축결함을 방지하기 위하여 주물의 네 곳에 압탕을 각각 설치하였다. 압탕의 크기를 Fig. 11(a)와 같게 하여 주조해석을 수행한 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 살펴보면 압탕을 설치하였지만 응고가 지연되는 부위가 주물의 내부에 존재함을 알 수 있다. 이를 보완하기 위해서 압탕의 높이보다는 압탕과 주물의 접촉부분인 압탕의 단면적을 크게 증가시킨 Fig. 11(b)와 같은 압탕을 설치하여 응고해석을 다시 수행하였다. 그 결과 Fig.

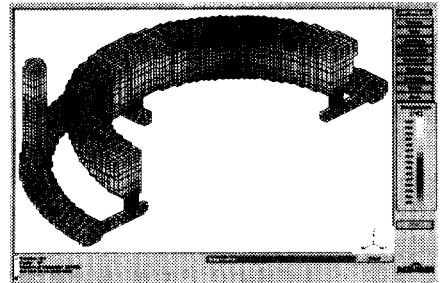


Fig. 10 Analysis result of the cast plan without risers

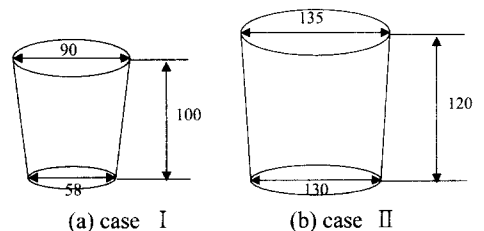


Fig. 11 Scheme of risers for a cast preform

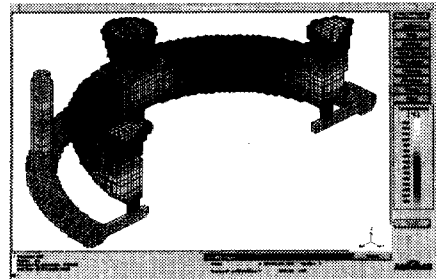


Fig. 12 Analysis result of cast plan in case I

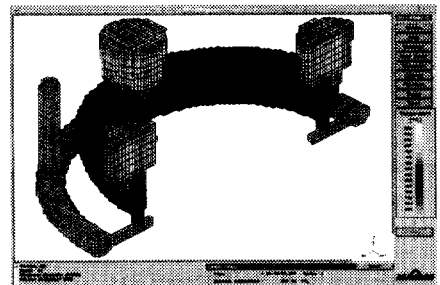


Fig. 13 Analysis result of cast plan in case II

13 과 같이 압탕효과가 개선된 주조방안을 얻을 수 있었다.

5.5 제품제조

Fig. 14는 30%로 축소 제조한 알루미늄 플랜지의 예비성형체와 단조품의 형상이다. 금형과 소재의 온도는 430℃로 하였다. 유한요소해석을 통한

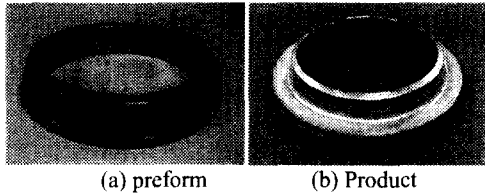


Fig. 14 Configurations of a cast preform and a cast/forged product of the aluminum flange

하중 예측 결과는 150 톤이었고, 실제 성형하중은 160 톤이었다. 10%미만의 하중차이는 실제 크기의 플랜지 생산에 있어서도 크게 문제가 없을 것으로 판단된다. Fig 14(b)와 같이 성형된 플랜지의 플래시부위에 균열이 전혀 없었고, 치수도 유한요소해석에서 예측한 치수를 얻을 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 대형 알루미늄(AI 5083) 플랜지를 주조/단조공정을 통해서 제조할 수 있도록 2 차원 유한요소해석으로 효과적인 주조방안 및 예비성형체를 제안하고, 주조 및 단조시험을 수행하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주조된 알루미늄 예비성형체의 적정 단조 온도는 420℃~450℃ 이고, 적절한 변형률 속도는 1.5/s 이다.
- (2) 알루미늄 플랜지의 예비성형체에서 신뢰성이 요구되는 넥부위의 유효변형률은 0.7 이상이어야 한다.
- (3) 2 차원 유한요소해석을 통하여 제안한 대형 플랜지의 공정조건 및 예비성형체는 실용성이 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 변종문, 예병준, 박종우, 2000, 밀폐 성형장치를 이용한 자동차 부품(arm 류) 정밀 단조 기술 개발, 산업자원부 연구보고서, A00-961-1105-08-3-3.
- (2) Fujikawa S., Kitamura Y., and Shimamura S., 1991, "Application of Numerical Methods for the Aluminum Casting/Forging process," J. Mat. Proc. Tech., Vol. 27, pp. 93~110.
- (3) 櫻天久之, 1994, "コンフォミック스의 以後の展開," 第 19 回 アルミニウム鍛造委員會, pp. 1~33.
- (4) 이우식, 박종우, 김희수, 예병준, 1999, "주조된 Al-Si-Mg 계 합금의 고온압축거동," 주조, 제 19 권, 제 3 호, pp. 269~276.
- (5) 西村 徹三, 1997, "鑄造鍛造法," 輕金屬, 第 47 卷 第 11 號, pp. 587~590.
- (6) 최정길, 1990, "컴퓨터를 이용한 주조방안의 설계," 주조, 제 10 권, 제 6 호, pp. 477~484.
- (7) Kallien L. H., Sturm J. C., 1995, "Simulation Aided Die Design for a 4-Cylinder Engine Block," Indianapolis T95-022, North America Die Casting Association.
- (8) 신회택, 김석준, 최민호, 홍기원, 1998, "자동차부품의 주조해석," 주조, 제 18 권, 제 1 호, pp. 23~30.