

Al 합금 컨트롤 암의 제조 공정 비교 연구

권용남¹·이영선¹·이정환[#]

Processing Comparison for Fabrication of Al Control Arm

Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee

Abstract

The application of Al parts in passenger car has been increasing for the last decade, which gives many advantages such as better fuel efficiency, driving performance and safety. Control arm is one of the most preferably substituted parts from steel into Al alloys among numerous automotive parts. Currently, both wrought and cast Al alloys can find the application for control arm in passenger car. The balance between performance and cost determines a material as well as a fabrication process for a particular part model. In the present study, comparison among various processing techniques has been carried out to build up a data base for Al control arm fabrication.

Key Words : Al Control Arm, Hot Forging, Cast-Forging, Semi-Solid Forming

1. 서 론

현가부품의 중량을 20% 감소시킬 경우 일반 승용차 기준으로 차체 중량 대비 약 10%의 경량화 효과를 얻을 수 있다. 자동차 부품의 경량화는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 연비 절감 뿐만 아니라 운전 성능의 향상, 제동 거리의 단축 등 자동차의 품질을 효과적으로 향상시킬 수 있는 기술이다. 전세계 자동차사들은 다양한 부품의 경량화 기술을 개발하고 있는데 그 중 가장 효과적인 방안은 알루미늄과 같은 경량소재를 이용하는 방법이다. 미국의 경우 1990년대 초반 PNGV(Partnership for a New Generation of Vehicles) 프로그램으로부터 최근 freedom car 프로그램 등에서 알루미늄 부품의 검토가 활발하게 이루어졌으며 현재는 대부분의 자동차사들이 양산에 적용하고 있다. 이러한 추세에 대항하여 철강업계는 ULSAB(UltraLight Steel AutoBody), ULSAS(UltraLight Steel Suspension) 등과 같은 공동 컨소시엄을 구성하여 자동차용 철강소

재의 사용량의 감소를 막고자 자동차용 고강도 강을 개발하고자 하는 노력이 경주되고 있다. 하지만 조향·현가 부품의 경우 철강업계의 노력에도 불구하고 알루미늄 합금은 경량화에 절대적인 우위를 가지는 것으로 평가 받고 있다. 외국의 개발 사례를 살펴보면 철강재로 제조된 컨트롤 암의 최저 중량은 약 5kg인데 반해 알루미늄 컨트롤 암의 경우 3kg 이하에서 같은 성능을 얻을 수 있다. 알루미늄 합금을 통해 조향·현가 부품을 제조할 경우 기존에 steel의 경우 다수의 부품을 용접을 통해 접합을 통해 제조하던 공정을 단일 공정으로 바꿈으로써 부품의 모듈화가 더욱 용이하게 이루어질 수 있는 장점이 있다. 또한, steel 부품을 알루미늄 부품으로 교체하는 경량화에 따라 승용차가 운전자의 명령에 신속히 반응하며 승차감도 크게 향상된다는 결과가 보고되고 있다. 현재 미국, 일본, 유럽 자동차사들은 많은 모델에서 컨트롤 암을 알루미늄 합금으로 제조하는 기술을 확보 양산에 적용하고 있다.

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터
교신저자: 한국기계연구원 소재성형연구센터
E-mail:ljh1239@kmail.kimm.re.kr

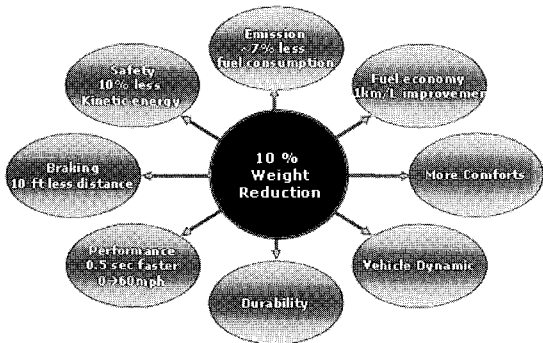


Fig. 1 Various advantages of weight reduction for automotive components

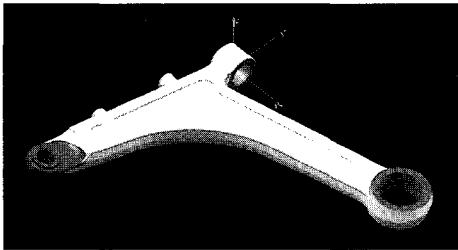


Fig. 2 Optimized design for Al control arm

본 연구에서는 자동차용 컨트롤 암(control arm)의 경량화 및 고강도화를 위해 열간 단조, 주단조, 반응고 성형 공정에 대한 비교 연구를 수행하였다. 이를 통하여 자동차사들의 가격 및 물성 요구에 대응할 수 있는 데이터 베이스를 구축하여 컨트롤 암 생산 업체에 제공할 수 있었다. 각 공정 기술의 보유는 공정에 적합한 모듈 설계에 기초 자료로 사용될 수 있어 자동차 부품 설계자가 부품 설계시 형상의 자유도를 높게 발휘할 수 있는 장점을 부가적으로 얻을 수 있다.

2. 컨트롤 암 성형 공정

알루미늄을 적용한 컨트롤 암의 성형 공정 연구에 앞서 경량화 및 안정성을 고려하여 컨트롤 암의 최적 설계를 실시하였다. Fig. 2는 3000cc 이상의 대형 세단 차종에 적용될 수 있는 컨트롤 암의 형상을 보여주는 그림이다. 열간 단조, 주단조, 반응고 성형에서는 자동차 주행시 요구되는 다양한 성능을 고려하여 최적 설계된 Fig. 2의 형상을 기준으로 설계된 시제품을 제조하였다.

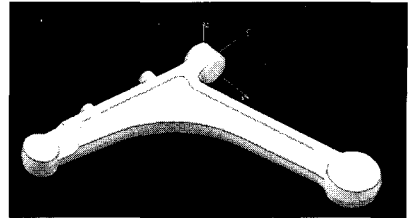


Fig. 3 Optimized design for Al control arm

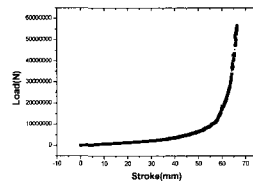
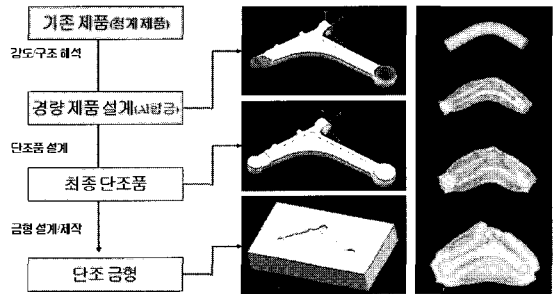


Fig. 4 Strain distribution of hot forged control arm and load versus stroke

2.1 열간 단조

열간단조를 위해 설계된 열간단조품의 형상은 Fig. 3에 나타내었다. Control Arm의 Hard Point에 해당되는 3개의 Hole은 단조로 제조하기에 여러 가지 면에서 곤란한 부분이기 때문에 가공부분으로 설계하였다. 본 단조품의 경우는 측면 방향의 중심이 동일한 평면 내에 존재하지 않기 때문에 금형 분할선(Parting Line)의 설정은 단조결합 발생 방지를 위해 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 결합 발생 방지와 요구 소재 형상 및 크기와 함께 공정 설계를 위해 FEM해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 단조품과 단조 금형을 설계하였다. 단조 공정은 초기 원통형 빌렛을 v자 형상으로 굽힌 후 금형 단조를 실시하는 공정에 대한 유한요소해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타내었듯이 단조 결합 발생 없이 원활한 유동이 이루어지고 있으며 변형량의 분포도 비교적 균일하게 배분되었음을 알 수 있다. 단조에 소요되는 하중은 5,500톤 정도로 예측되었다.

본 연구에서는 소재 형태에 따른 영향을 파악하기 위하여 연주재와 압출재를 각각 사용하였으며 또한 단조온도를 변화시키며 열간 단조를 실시하였다. Fig. 5는 열간 단조를 통해 제조한 시제품의 형상을 보여주고 있다.

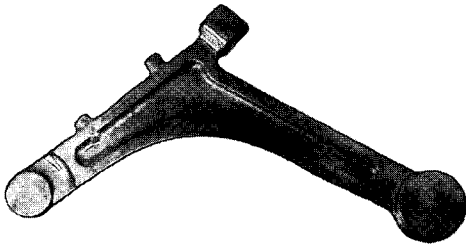


Fig. 5 Control arm fabricated with hot forging

2.2 주단조

자동차용 알루미늄 부품을 생산하는 방법은 주조 및 단조법이 있으며 현재 주조품이 약 80 %정도를 차지하고 있다. 주조법은 최종 형상에 매우 근접한 정형제조에 매우 유리한 공정이지만 제품이 가지는 주조조직은 여타 기계가공품이나 단조품에 비해 열등한 기계적 물성을 나타낸다. 이에 반해 단조품은 우수한 기계적 물성을 가지고 있지만 제조 원가 측면에서 주조법에 비해 경쟁력을 가지고 있지 못하다. 따라서, 단조의 우수한 기계적 물성과 주조의 경제성을 동시에 만족시킬 수 있는 공정으로 주단조법이 최근 자동차 부품업계에서 큰 관심을 모으고 있다.

주단조법은 우선 최종 제품의 형상에 가까운 주조 preform 을 제조한 다음 단조공정을 통해 취약한 기계적 성질을 가져오는 주조조직을 파괴하여 건전하고 우수한 물성을 가지는 부품을 제조하는 기술이다. 현재, 프랑스에 소재한 saint-jean industries 사에서 경사주조와 단조공정을 일체화시킨 COBAPRESS 공정이 대표적인 주단조 상용화 기술이다. 주단조법은 주조법이 가지는 정형제조의 장점과 단조공정이 가지는 치밀한 조직을 제조할 수 있는 장점을 동시에 가질수 있을 뿐만 아니라 경제적으로도 매우 유리한 공정으로 대표적인 특징은 다음과 같다.

1. 사용하는 소재가 전신재가 아닌 주조재를 사용하기 때문에 재료비가 저렴하다.
2. 복잡한 형상을 가지는 부품일수록 주조공정에서 정형에 가까운 형상의 preform 을 제작할 수

있기 때문에 재료의 회수율을 높힐 수 있다.

3. 단조에서는 업세팅, 다단의 예비성형, 마무리 단조공정이 요구되지만 주조에서 최종 형상에 가까운 preform 을 만들었기 때문에 단조공정수를 최소화시킬 수 있다.

이상의 이유로 단조품에 비하여 약 30% 이상의 제조비의 절감을 얻을 수 있을 것으로 예측하고 있다.

주단조 공정은 최종제품의 형상과 유사한 예비성형체(preform)를 주조로 만들고 이것을 단 한 번의 마무리 단조(finish forging)로서 성형하는 제조 공정이다. 본 연구에서는 기존 주조 제품이 가지는 기계적 성질을 더욱 향상시키고 동시에 단조 스크랩의 발생을 억제하여 원소재 이용율을 획기적으로 높힐 수 있는 주단조 공정을 개발하고자 하였다. 주조 preform은 저압 주조법으로 제조하였으며 단조 압하율의 변화에 따라 제품의 특성을 조사, 분석하였다. 본 연구에 사용한 주조 preform의 형상은 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 단조형상과 동일한 단조금형을 사용하였으나 소재는 주조용 합금인 A356을 사용하여 시제품을 제조하였다. 또한, 단조품의 부위별 변형율이 임계 변형율인 30% 이상이 되도록 preform형상을 설계하였으며 preform이 단조 금형내에 안착이 용이하도록 하여 재료회수율을 극대화 시킬 수 있도록 하였다.

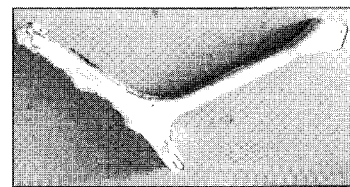


Fig. 6 Cast perform for cast-forging process

단조 제품의 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 예비성형체의 주조조직을 제거하여야 한다. 이를 위해서는 예비성형체가 균일하면서도 충분한 변형을 받도록 설계하여야 한다. 그리고 강도요구가 큰 제품영역은 추가적인 형상설계를 통해 큰 변형률을 얻도록 하였다. 이를 위해 유한요소해석을 이용하여 예비성형체를 제안하였다. Fig. 7은 제품 영역에 대한 높은 변형률을 얻고 또한 목표 플래쉬량을 유도하고자 최적화된 공정의 해석결과를 보여주고 있다.

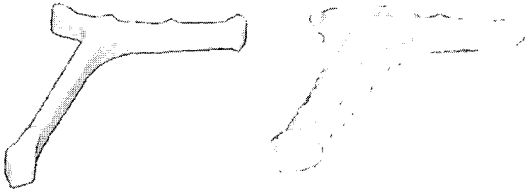


Fig. 7 Cast perform for cast-forging process

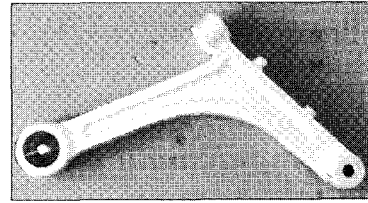


Fig. 8 AI control arm fabricated using rheo-casting

2.3 반응고

반응고 상태의 금속은 전단변형속도에 따라 점도가 변화하는 특징을 가진다. 이러한 특성을 적절하게 제어할 경우 낮은 응력으로도 금속을 성형할 수 있는 가능성을 가지며 특히, 주조재의 물성을 저하시키는 대표적인 요인인 편석 및 수지상 조직을 효과적으로 제어할 수 있는 특징을 가진다. 반응고 소재가 디소트로픽(thixotropy) 특성으로 인해 자동화가 가능하기 때문에 기존의 주조결함을 대폭적으로 저감시킨 컨트롤 암의 생산에 적용할 수 있다. 반응고 성형은 반응고 합금봉을 제조할 수 있게 된 1981년에 상업적인 생산이 시작되었다. 1992년에 반응고 소재에 대한 특허권 시효말소로 소재의 생산공급이 이루어짐으로써 상업화가 급속하게 진행되고 있으며 유럽에서는 몇 개 차종에 대해 컨트롤 암의 제조에 적용된 사례가 있다. 정밀하고 복잡한 부품의 성형, 절삭 등 후가공의 생략 혹은 극소화와 이에 따른 원자재 절약, 높은 생산성 및 자동화 용이, 저압 성형으로 인한 금형 수면 연장 및 에너지 절약, 기계적 특성향상 등의 많은 장점을 갖추고 있기 때문에 기존의 주조 및 단조 공정을 대체할 수 있는 성형기술로서 유망하다. 이를 위하여 더욱 정밀한 소재 가열 및 온도 제어, 더욱 빠른 생산 속도를 얻을 수 있는 장비의 개선 및 금형 관련 기술, 윤활 등이 보다 최적화될 필요가 있다.

반응고 성형은 형상 및 치수면에서 정형 제조에 유리한 만큼 Control Arm 시제품은 Fig. 1의 최적 설계된 형상을 최대한 수용하여 반응고 제품을 설계하였다. Fig. 8은 반응고 성형용으로 설계된 Control Arm 제품의 3차원 형상을 나타내고 있다. 설계된 최적 반응고 성형품을 기준으로 금형을 설계/제조하여 성형품을 제조하였다. 성형에 사용되는 소재는 A356 소재로서 주/단조용 소재와 동일한 조성을 갖는 소재이므로 공정간 특성 비교가 용이할 것으로 판단된다.

3. 특성 분석

3.1 미세조직

Fig. 9는 3가지 공정을 통해 제조한 AI 컨트롤 암 시제품의 대표적인 미세조직을 나타낸 그림이다. 열간단조 공정의 경우 전신재 합금인 Al6061을 사용하였으며 시제품 제조시에 원소재의 종류를 압출재와 연속주조재로 분리하였다. 그림에서 알 수 있듯이 특이한 조직은 관찰되지 않는 전형적인 열간 가공조직을 보여주고 있다. 하지만, 공정조건에 따라 재결정에 따른 결정립성장이 발생하여 조대한 결정립을 얻는 경우도 발생한다. 자동차사가 요구하는 조건을 만족하기 위해서는 이에 대한 공정 변수 제어가 요구되었다.

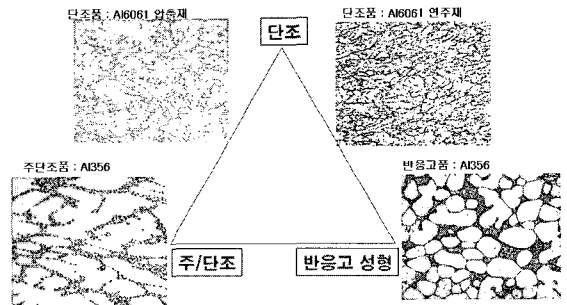


Fig. 9 Microstructure of AI control arms of three different processes.

주단조와 반응고 공정의 경우 주조재 합금인 A356을 사용하여 시제품이 제조되었다. 그림에서 알 수 있듯이 초정상이 주단조와 반응고 시제품에서 관찰된다. 하지만, 초정상의 형상은 일반적인 주조품의 수지상 조직을 가지고 있지는 않다. 주단조품의 경우 초정상이 단조방향에 수직방향으로 길게 연신되는 모습을 보여준다. 주단조품의 경우 초기 preform 내에 존재하는 주조결함인 공공

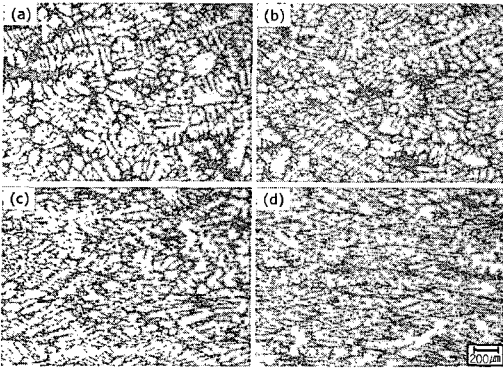


Fig.10 Microstructural evolution of cast-forged A356-T6 alloy, (a) 10, (b) 20, (c) 40 and (d) 60%

이 단조중에 달혀 보다 건전한 조직을 가지게 된다. 반응고 시제품의 경우 초정상이 등축정에 가까운 형상을 가지게 된다. 또한, 낮은 용탕 주입 온도등으로 인해 일반적인 주조 결함들이 제거된 우수한 미세조직을 얻을 수 있었다.

Fig. 10은 주단조공정의 특징을 보여주는 대표적인 그림으로 압축변형량을 변화시킴에 따라 초정상 및 공정상의 변화가 발생함과 동시에 주조시 발생된 공공을 제거됨을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 압축변형량을 20%까지 가할 경우 초기 주조조직이 비교적 잘 유지되고 있으나 변형량이 증가할수록 초정상의 형상이 길게 연신되는 경향을 관찰할 수 있다. 변형량이 증가함에 따라 수직상 조직이 압착되며 60%의 변형량을 받은 조직의 경우 초기 주조 조직을 판별하기 어려운 정도로 큰 조직의 변화가 발생하였다.

3.2 기계적 성질

Fig. 11은 3가지 공정으로 제조된 시제품을 이용하여 인장시험을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 소재의 차이로 직접적인 비교는 무의미하지만 단조품의 경우 가장 높은 강도 및 연신율을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 열간 단조의 경우 Al 6061합금 빌렛의 제조방법에 따라 압출재와 연주재 이종의 소재를 사용하였다. 압출재는 연주 후 압출이라는 소성가공을 거침으로써 소성가공 조직을 가지고 있는 반면에 연주재는 주조조직을 그대로 가지고 있는 차이점이 있다. 연주재는 압출재에 비해 제조공정이 작기 때문에 제조단가가 낮은 장점을 가지고 있다. 또한, 최근에 이르러 연주 기술이 급격하게 발전한 결과 연주빌렛의 경우에도 표면과 중심부간의 물성차이가 크지 않

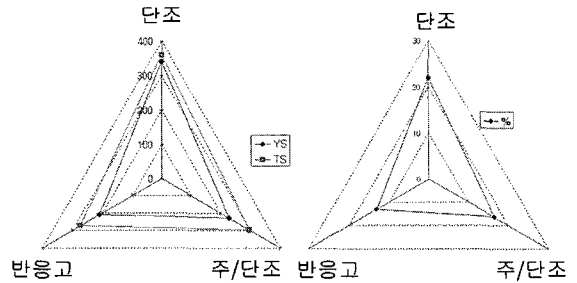


Fig.11 Tensile properties of Al control arms of three different processes

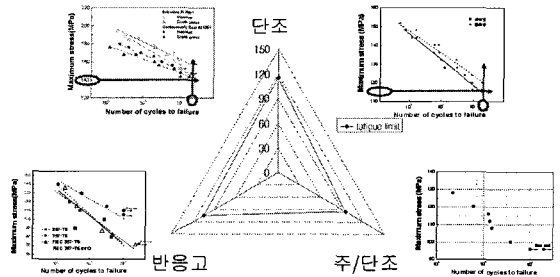


Fig.12 Fatigue strength of Al control arms of three different processes

다고 알려져 있다. Al 6061합금을 사용한 열간단조품의 경우 자동차 설계시 중요한 변수인 항복강도가 A356소재에 비해 높은 수준을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. A356소재를 적용한 반응고와 주단조 공정에서도 기존 주조품에 비해 향상된 강도 특성을 관찰할 수 있었다. 특히 연신율이 기존 주조품에 비해 2배 이상 향상되는 특징을 확인할 수 있었으며 연신율의 표준편차도 두 공정 모두 1.5%이내로 기존 주조품에 비해 매우 낮은 수준으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 자동차의 조향과 관련된 부품에서 안정적인 연신율의 확보는 필수적인 사항으로 높은 연신율은 부품 설계시 안전율을 상승시켜 보다 높은 경량화를 달성할 수 있다.

Fig. 12는 3공정 시제품의 피로특성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 공정에 관계없이 10^7 주기에서 약 100MPa정도의 피로강도를 나타내고 있다. 일반적으로 피로강도는 항복강도에 영향으로 많이 받으나 반응고 및 주단조품의 경우 상대적으로 낮은 항복강도를 가짐에도 Al6061합금과 유사한 피로수명을 가질 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 공정별로 적합한 형상의 컨트롤 암 및 모델 시제품을 제안하여 시제품을 제작 및 평가하였다. 또한, 시제품 제작에 필요한 공정 변수를 연구하기 위하여 컴퓨터 해석을 실시하여 최적화를 실시하였다. 시제품 제작 및 평가를 통해 컨트롤 암의 경량화를 위한 전신재 및 주조재 합금의 미세조직 및 물성에 관한 데이터 베이스를 구축할 수 있었다.

이상의 공정 및 물성 데이터 베이스는 많은 비용과 시간과 노력이 필요한 만큼 지속적인 투자가 이루어져야 하며, 이를 통해 얻은 결과들은 국내 AI 합금 성형 기술의 기반을 구축하는데 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 또한 이로부터 얻은 기술들을 이용하여 Control Arm 시제품을 제조하여 그 특성을 분석하고 있으며 향후 시장 경쟁력을 갖출 수 있는 국내 기반을 조성하였다.

후 기

본 연구는 경남기계기술개발사업 “Mecha-know 21”의 연구비 지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. McQueen, O. C. Celleiers, 1997, Application of hot workability studies to extrusion processing, *Canadian Metall. Quart.*, Vol. 36, No. 2., pp. 73~86.
- [2] F. J. Humphreys, M. Matherly, 1995, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Pergamon, Oxford, U. K.
- [3] C. S. C. Lei, W. E. Frazier, E. W. Lee, 1997, *JOM*, Vol. 49, p. 38.
- [4] Q. G. Wang, C. H. Caceres, 1998, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A241, p. 72.
- [5] A. A. Benzerga, et. Al, 2001, *Acta Mater.* Vol. 49, p. 3071.
- [6] Y. N. Kwon, S. S. Kim, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2005, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 43, p. 834