

Effect of vacuum annealing and characterization of diecast ADC12 aluminum alloys

Jihoon Jo, Daseul Ham, Seongchan Oh, Su Yeon Cha and Hyon Chol Kang[†]

Department of Materials Science and Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

(Received November 26, 2020)

(Revised December 9, 2020)

(Accepted December 17, 2020)

Abstract We report structural, mechanical, and thermal properties of diecast ADC12 aluminum alloys characterized using synchrotron X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray (EDX) analysis, thermal conductivity (λ), Vickers hardness (Hv), and stress-strain measurements. We also studied the effect of post-annealing performed in a vacuum atmosphere on the mechanical properties of diecast ADC12 alloys. EDX and XRD results revealed that Al_2Cu and AlCu_3 grains are formed, well dispersed in Al base and highly crystalline. Ultimate tensile strength (UTS) of 307.9 ± 9.1 MPa and elongation of 2.98 ± 0.62 % were estimated. λ was 129.3 ± 0.27 W/m · K and Hv was approximately 130. Both values were significantly higher than the reported values. At annealing temperatures ranging from 25 to 200°C, UTS and Hv values remained constant, while as the annealing temperature increased to 500°C, these values gradually decreased. This is because stabilization of the microstructure improves toughness and ductility.

Key words Diecasting, ADC12, Tensile strength, Hardness, Thermal conductivity, Annealing

다이캐스팅 공정으로 제조한 ADC12 알루미늄 합금의 물성 향상 및 진공 열처리 효과

조지훈, 함다슬, 오성찬, 차수연, 강현철[†]

조선대학교 재료공학과, 광주, 61452

(2020년 11월 26일 접수)

(2020년 12월 9일 심사완료)

(2020년 12월 17일 게재확정)

요약 최적의 조건에서 ADC12 알루미늄 합금을 다이캐스팅 기법으로 제조하여 구조적, 기계적, 열적 성질을 연구하였다. 또한 진공에서 후속 열처리한 ADC12 알루미늄 합금의 기계적 물성 변화를 규명하였다. 방사광 X-선 회절 및 energy dispersive X-선 화학조성 분석법을 통하여 ADC12 합금은 알루미늄 기지에 알루미늄과 구리의 화합물인 Al_2Cu 및 AlCu_3 상이 결정질 형태로 분포하고 있음을 규명하였다. 대표적인 기계적 물성값인 인장강도와 연신율은 각각 307.9 ± 9.1 MPa와 2.98 ± 0.62 %이다. 기존 보고보다 우수한 열전도도(129.3 ± 0.27 W/m · K)와 비이커스 경도값(Hv=130)을 나타낸다. 후속 열처리 결과, 200°C까지는 기계적 물성치가 일정하게 유지되었으나, 이후 500°C까지 열처리 온도를 증가시킬 경우에는 인장강도와 비이커스 경도가 점진적으로 감소하였다. 이는 열처리 도중 미세조직이 안정화되면서 인성과 연성이 향상되었기 때문이다.

1. 서론

최근 자동차 경량화 및 높은 치수 정밀도가 요구되는 기능성 부품 제조에 활용할 수 있는 Al-Si 계 합금 중 ADC 1종, ADC 3종, ADC10종 및 ADC 12종에 대한 연구 결과가 다수 발표되고 있다[1-7]. ADC 합금은 우

수한 금형충진성을 기반으로 600°C 이상의 온도에서 우수한 유동성을 갖기 때문에 고전적인 알루미늄 합금 주조법보다는 고품질, 대량생산에 적합한 다이캐스팅법 소재로 알려져 있다. 특히 Al-Si-Cu 계 합금은 강도 및 열전도성 등 기계적인 물성의 향상과 더불어 우수한 내식성으로 인하여 미션케이스, 크랭크케이스, EGR 밸브와 같은 경량 고강도 자동차 부품의 제조 등 활용도가 증가하고 있다[1,2,7]. ADC12종 합금의 기본적인 첨가원소는 9.6~12% Si, 1.5~3.5% Cu이다. 표준조성은 Al-11%Si-

[†]Corresponding author

E-mail: kanghc@chosun.ac.kr

2.5%Cu이다. 특히 기공형성과 관련된 열간균열이 억제되는 특징이 있어 고강도 다이캐스팅 소재로 널리 알려져 있다[5,8]. Si는 기계적 물성과 주조성 향상에 도움을 준다. Cu는 강도 및 가공성이 향상되지만 이차상 및 산화물 형성에 따른 내식성의 저하를 동반한다[9]. 또한 용착 억제 목적으로 0.6~1%Fe을 첨가한다. 추가로 0.3%Mg을 첨가하는데, 내식성을 향상하기 위함이다[10]. 1%Zn를 첨가하여 도금성이 향상된다. 이외에도 Mn, Ni, Sn, Pb, Ti이 미소량 첨가되어 있다.

다이캐스팅 공정은 금형에 고속, 고압으로 용탕을 주입하고 급속 냉각에 의해 성형품을 제조한다. 따라서 첨가원소가 알루미늄과 합금을 형성하는 대신 고유의 원재료 형상을 유지하기 때문에 첨가원소에 따라 소재의 특성이 달라진다[1,5,8-10]. 또한 급속 냉각 도중 조직의 치밀화가 발생하여 기계적 물성이 개선된다[11-13]. 기공 및 균열을 억제하기 위하여 금형온도를 최적화해야 한다[8,12,14]. 다이캐스팅 공정 중 형성된 기공은 후속 열처리 과정에서 팽창하고 내부응력 및 균열의 원인이 되기 때문에 통상적으로 다이캐스팅법으로 제조된 ADC12 합금은 후속 열처리가 제한적이다[8,14,15]. 최근 다이캐스팅 후 열처리 공정을 통하여 기계적 물성을 향상시키기 위하여, 고품질 다이캐스팅 알루미늄 합금의 T6 열처리 공정과 이에 따른 미세조직의 변화 및 기계적 성능과의 연관성이 보고되고 있다[15,16]. T6 열처리 공정(용체화처리 + 수냉처리 + 인공시효)에 따라 미세조직이 안정화되어 강도 특성이 개선된다고 알려져 있다.

본 연구에서는 기공형성이 최적화되어 양산이 이루어지고 있는 다이캐스팅 공정조건에서 제조한 ADC12 합금의 기계적 물성이 원재료인 ADC12 ingot 시편 대비 매우 개선됨을 고찰하였다. 또한 상용 다이캐스팅 ADC12 소재의 물성과 비교 분석하였다. 고분해능 X선 회절법을 통하여 첨가원소 및 Al-Cu 금속간 화합물 형성을 규명하였다. 또한 다이캐스팅 공정 후 수행한 진공 열처리 과정이 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 과정

2.1. 다이캐스팅 시편 준비

350톤급 고압 다이캐스팅 장치(Toshiba, DC350CL)를 이용하여 KS B0801 규격의 인장시험편을 제조하였다. 참고로 두께는 3 mm이다. 시편의 외관상 표면결함, 탕주름, 미성형, 소착 등의 결함이 발생하지 않도록 Table 1과 같이 다이캐스팅 공정의 변수를 최적화하였다. 특히 수축 기공과 가스 기공의 생성이 최소화된 다이캐스팅 공정을 위해서 용탕온도는 670°C로 설정하였고, 금형온도는

Table 1
Parameters of diecasting process for ADC12 alloy

Parameters	Value
Diameter of sleeve (mm)	60
Low injection speed (m/s)	0.2
High injection speed (m/s)	4.5
Interval (mm)	150
Molten metal temperature (°C)	670
Mold temperature (°C)	250
Stroke (shot)	10
Cooling time (sec)	10
Mold release jet time (sec)	4

250°C를 유지하였다. 냉각시간은 약 10초이다. 기공 형성을 최소화할 수 있도록 저속 및 고속 사출속도, 절변구간을 조절하여 최적의 다이캐스팅 공정 조건을 설정하였다.

2.2. 진공 열처리

다이캐스팅한 인장시험편은 3-zone 알루미늄 진공 튜브를 이용하여 진공 열처리하였다. 인장시험편은 육면체 알루미늄 보트 위에 올려 놓고 튜브로 중앙부에 위치하였다. 로터리 진공 펌프를 이용하여 진공 열처리 도중 진공도는 5×10^{-3} torr를 유지하였다. 승온 속도는 5°C/min이고 열처리 공정온도에 도달한 후 1시간 유지하였다. 냉각과정은 공정온도에서 25°C에 도달하도록 노냉하였다. 이때 진공은 유지하였다. 공정온도는 100, 200, 300, 400, 500°C이다. 참고로 600°C의 경우에는 시편의 녹음 현상이 관찰되었다.

2.3. X선 회절 시험

시편의 구조적 물성을 분석하기 위하여 방사광 X선 회절 실험을 수행하였다. 방사광 X선 회절 시설은 실험실 X선 회절장치보다 고분해능 측정이 가능하다. 또한 고휘도의 X선이 제공되기 때문에 미량의 금속간 화합물의 형성 여부를 분석하기에 유리하다. 포항방사광가속기 5D 빔라인을 이용했으며, X선의 에너지는 10 keV ($\lambda = 1.24 \text{ \AA}$)를 선택하였다. 일반적인 θ -2 θ powder scan을 하였고, 결정립의 mosaic 분포를 알아보기 위하여 θ -rocking 곡선을 측정하였다[17].

2.4. SEM 및 EDX 시험

시편의 표면 형상을 고찰하기 위하여 SEM(Hitachi S-4800) 측정을 하였다. 또한 첨가원소의 함량 및 분포를 이해하기 위하여 SEM 측정 도중 EDX 분석을 수행하였다. Spectrum과 mapping 측정을 병행하였으며 전자빔 에너지는 15 keV를 선택하였다. EDX 분석의 peak

resolution은 100 eV 이상이며, 원소 함량의 정량적 정확도는 통상적으로 5% 이하이다. 본 연구에 사용한 시편의 경우 금속 소재이고 electron charging 현상에서 자유롭기 때문에 정량적 정확도는 3% 이하로 추정하고 있다.

2.5. 인장강도 시험

다이캐스팅 시편의 기계적 물성 평가를 위해서 universal test(Hounsfield, England)를 진행하였다. 인장 시편은 KS B0802 규격에 따라 제조하였다. Load(kgf) - displacement(mm)를 측정 후 강도(MPa)와 연신율(%)로 환산하였다. 5개의 다이캐스팅 시편을 제작하여 인장강도 시험 후 평균치를 획득하였다. 열처리 공정을 거친 다이캐스팅 시편은 각 온도별로 2개의 시편을 제작하여 인장강도 시험을 수행하고 평균치를 획득하였다.

2.6. 열전도도 시험

다이캐스팅 시편은 ASTM E1461 규격에 맞게 제작한 후 열전도도(Netzsch, LFA 447 nanoflash) 실험을 수행하였다. Laser flash : Thru-plane 법을 이용하였다. 25, 100, 200, 300°C에서 열전도도를 측정하였다. 비열(C_p), 밀도(ρ), 열확산율(α)을 측정하여 열전도도(λ)로 환산하였다. 밀도는 electronic densimeter(Alfa Mirage, MD-300S)를 이용하여 ASTM D792에 준하여 비중을 측정하고 밀도로 환산하였다. 비열은 KS M ISO 11357-4 규격에 맞게 differential scanning calorimetry(DSC) 기법으로 측정하였다(TA, DSC25). DSC 측정 도중 질소 가스를 주입하였다. 측정된 밀도는 2.726 g/cm³으로 각 온도구간에서 상수로 사용하였다. 참고로 원재료인 ADC12 ingot의 밀도는 2.68 g/cm³이다. 다이캐스팅 시편이 상대적으로 치밀조직임을 나타낸다.

2.7. 경도시험

시편의 경도는 마이크로 Vickers 경도(Hv)계(Matsuzawa, MXT- α 1)를 이용하여 측정하였다. 인가 하중은 200 gf 및 500 gf에서 수행하였고, 본 논문에서 제시한 데이터는 500 gf에서 측정된 결과를 비교하였다. 시험하중 유지 시간은 10초이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. XRD 구조 분석

Figure 1은 다이캐스팅한 ADC12 시편의 방사광 XRD

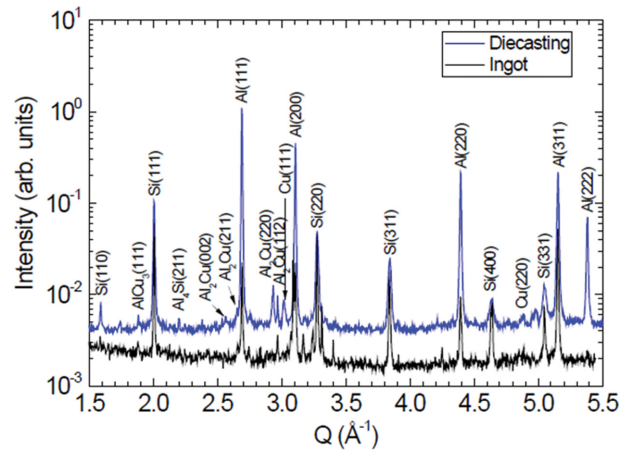


Fig. 1. XRD profile of the ADC12 alloy sample produced by the diecasting process. Bragg diffractions of Al and Si polycrystals are observed. Note that the Bragg diffractions of Au₂Si and AuCu₃ alloys are detected. The XRD profile of the ADC12 ingot sample was also displayed for comparison.

결과를 보여준다. 비교를 위하여 원재료인 ADC12 ingot 시편의 방사광 XRD 결과도 같이 나타내었다. X 축은 Q unit으로 표시하였다. Q는 X-선의 momentum transfer와 관련된 역격자공간의 단위 unit(Å⁻¹)이다. $Q = 2\pi/d$ 로 계산되며, 여기에서 d는 결정의 결정면간 거리이다. 약한 Bragg peak가 잘 보이도록 Y 축은 log scale로 나타내

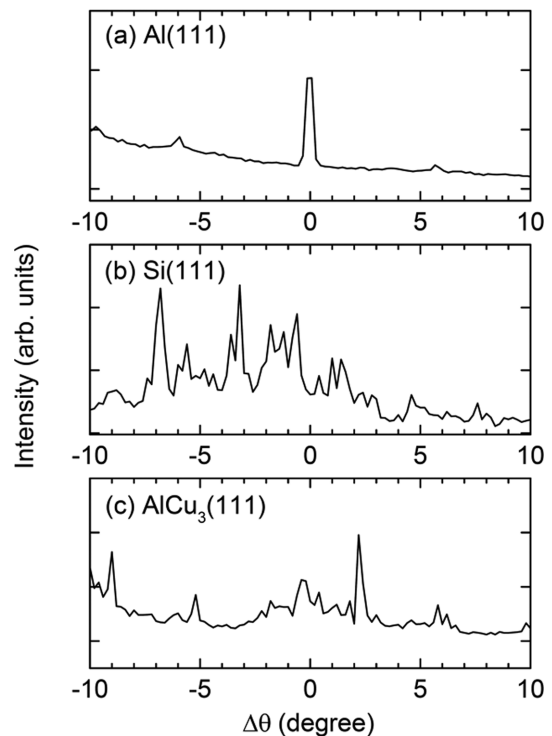


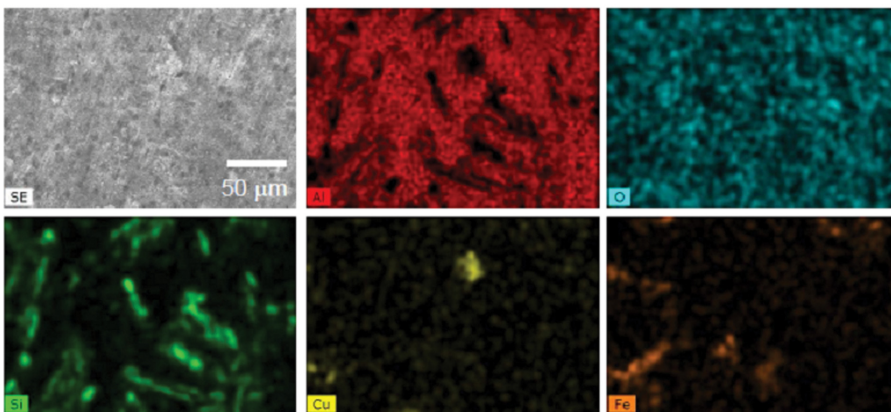
Fig. 2. θ -rocking curve of the (a) Al(111), (b) Si(111), and (c) AlCu₃(111) Bragg peaks. The Al domain showed a preferred orientation, while the Si and AlCu₃ domains showed a mosaic distribution.

었다. 산란강도가 큰 다수의 peak는 Al과 Si의 결정면에 해당하는 Bragg peak이다. 모든 Bragg peak에서 ADC12 ingot 시편보다 다이캐스팅한 ADC12 시편의 산란강도가 증가하였다. 이는 다이캐스팅 과정에서 결정성이 향상되었기 때문이다. Al과 Si의 화합물 형성에 관해서는 보고된 바가 없지만, 매우 약하지만 $Al_4Si(211)$ 에 해당하는 Bragg peak가 관찰되었다. 대부분의 Si 첨가물은 Al과 화합물을 형성하는 대신 용융되지 않고 원재료 상태로 존재하지만 미량의 Al_4Si 화합물을 형성할 수 있다는 것을 의미한다. $Si(111)$ 과 $Al(111)$ Bragg peak의 반치폭(full width half maximum)은 각각 0.01119 \AA^{-1} 와 0.00665 \AA^{-1} 이다. Sherrer 공식을 이용하여 결정립의 크기를 구하면 560 \AA 와 945 \AA 이다[17]. 한가지 주목할 만한 XRD 결과는 Al-Cu 금속간 화합물에 해당하는 $AlCu_3(111)$, $Al_2Cu(002)$, $Al_2Cu(220)$, $Al_2Cu(112)$ Bragg peak가 산란강도는 약하지만 관찰되었다. 순수한 Cu에 해당하는 $Cu(111)$ 과 $Cu(220)$ Bragg peak도 관찰되었다. 이는 첨가원소 Cu 중 일부는 용융되어 Al과 화합물을 형성하는 것을 의미한다. 다이캐스팅 ADC 소재에서

Al_2Cu 화합물 형성이 보고되었고, 강도 증가의 원인으로 해석되었다[1,5,9,15]. 본 연구에서는 추가적으로 $AlCu_3$ 화합물 생성을 확인하였다. Al-Cu 금속간 화합물은 $AlCu$, Al_2Cu , $AlCu_2$, $AlCu_3$ 등이 형성될 수 있지만[18], 미량의 금속간 화합물은 일반적인 XRD 분석에서는 관찰되지 않는다. 본 연구에서는 고휘도 방사광 XRD를 통하여 Al_4Si 과 $AlCu_3$ 화합물의 형성을 규명할 수 있었다. 특히 ADC12 ingot 시편 결과와 비교하여 화합물 형성이 두드러짐을 확인하였다.

XRD 분석 결과 다이캐스팅 ADC12 시편은 Al, Si, Cu 결정립이 혼합된 다결정 형태임을 알 수 있다. 추가적으로 개별 결정립의 mosaic 분포를 조사하기 위하여 θ -rocking 곡선을 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 각각 $Al(111)$, $Si(111)$, $AlCu_3(111)$ Bragg peak에서 측정하였다. 특징적으로 모든 성분에서 잘 정렬된 결정립이 관찰된다는 점이다. Al, Si, $AlCu_3$ 의 θ -rocking 곡선에서 가장 두드러진 peak의 반치폭은 각각 0.3° , 0.18° , 0.11° 정도이다. Al 결정립의 θ -rocking 곡선은 $\Delta\theta = 0^\circ$ 에서 가장 두드러진 피크가 검출된다. 이는 Al 결정립이 우선성

Ingot sample



Diecasting sample

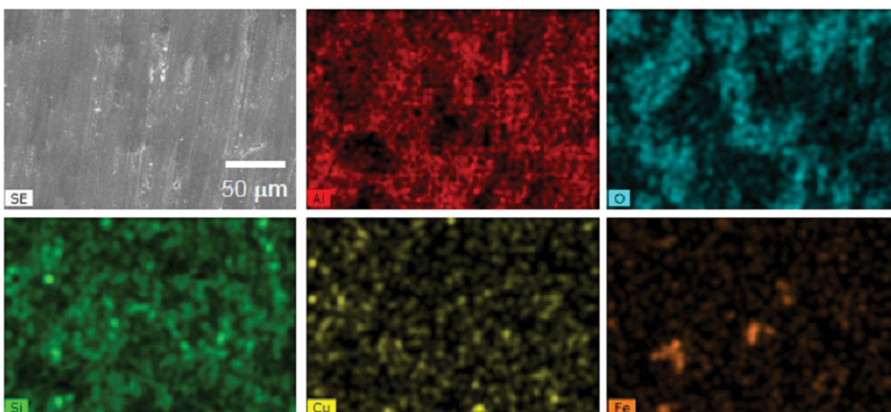


Fig. 3. Comparison of SEM image and EDX mapping results obtained from ADC12 ingot and diecast samples. Dispersion of Si, Cu, and Fe atoms can be clearly distinguished. Note that the dispersion of O atoms implies localized passivation of diecast ADC12 sample. The length of the scale bar is $50 \mu\text{m}$.

장 방향을 갖는 것으로 판단된다. 시편의 미세조직 측면에서 설명하면, 다이캐스팅 후 냉각과정에서 Al 결정립이 주상정(columnar) 성장하는 것과 관련이 있다. 또한 Fig. 2(b)와 2(c)에 나타난 것과 같이 첨가원소인 Si와 Cu의 결정립은 무질서하게 분포한다. 참고로 단결정 Si의 θ -rocking curve 반치폭은 0.003°이다.

3.2. 표면 형상 및 조성 분석

ADC12 ingot 시편과 다이캐스팅 시편의 SEM 사진 및 EDX mapping 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 균일한 표면 형상을 측정하기 위하여 시편은 사포 #2000까지 기계적 연마 후 측정하였다. SEM 사진에서 보면 ingot 시편은 표면에 pore가 다수 발견되었다. 반면 다이캐스팅 시편의 표면은 질긴 조직으로 매끈한 표면이 관찰된다. 즉 최적화된 다이캐스팅 공정으로 수축기공과 가스 기공의 형성이 크게 개선된 것을 알 수 있다. EDX mapping 결과에서 두 시편사이의 두드러진 특징은 첨가원소의 분포이다. Ingot 시편의 경우에는 길쭉한 Si 결정립 모양이 관찰되는데 반하여 다이캐스팅 시편의 경우에는 Si 결정립이 분산되어 있고 뾰족한 형상이 아닌 다수의 구형 결정립이 관찰된다. 이는 다이캐스팅 도중 국부적으로 결정립의 구형화가 일어난 것으로 판단된다. 마찬가지로 Cu 결정립은 ingot 시편에서 날카로운 결정립이 관찰되고, 다이캐스팅 시편에서는 분산된 구형의 결정립 분포를 나타낸다. 추가적인 사항으로는 산소 원자의 분포이다. Ingot 시편에서는 고른 원자 분포를 나타낸다. 다이캐스팅 시편의 경우에는 국부적인 산소 분포를 나타내는데, 다이캐스팅 후 급속 냉각 과정에서 형성된 부동태 피막과 연관성이 있을 수 있다. ADC12 다이캐스팅 소재의 내 부식성을 보여주는 결과이다. 보다 구체적인 내식성에 관한 분석이 필요하다.

3.3. 인장강도 분석

Figure 4는 ingot 시편과 다이캐스팅 시편의 인장강도 시험 결과를 보여준다. 원재료인 ingot 시편의 인장강도는 154 ± 3.08 MPa이고 연신율은 0.81 ± 0.2 %로 측정되었다. 반면에 다이캐스팅 시편의 인장강도는 307.9 ± 9.1 MPa이고 연신율은 2.98 ± 0.62 %로 측정되었다. 인장강도는 2배 정도 증가하였고, 연신율은 3배 이상 증가함을 알 수 있다. 다이캐스팅 시편의 인장강도 결과는 다섯개의 시편을 측정하여 평균한 것이다. 상용 다이캐스팅 ADC12소재의 인장강도는 250 MPa 정도이고 연신율은 2.2 % 정도로 보고되었다. 본 연구결과는 Kim *et al.*이 발표한 Mg 첨가에 따른 개선된 ADC12 소재의 인장강도와 비슷한 수준이고, 연신율은 보고된 2.7%보다 더

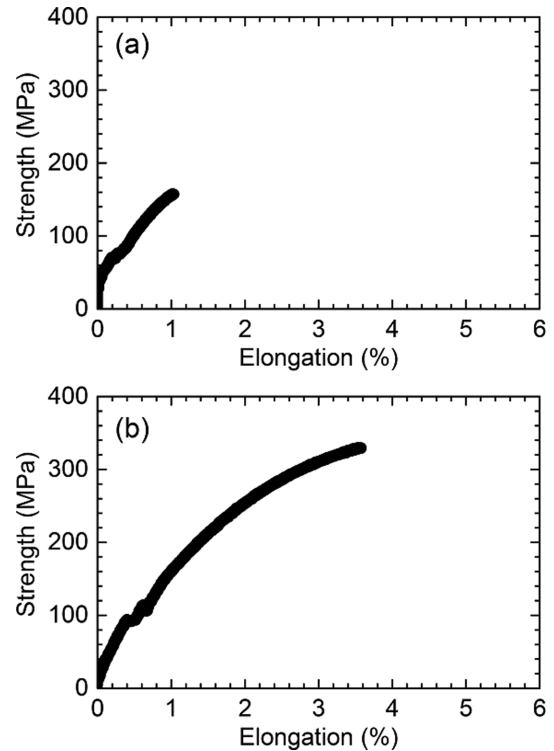


Fig. 4. Strength-elongation curve of (a) ADC12 ingot and (b) diecast samples.

개선되었다[5]. 즉, 기공형성이 최소화된 다이캐스팅 최적화 공정이 기계적 강도 개선에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 기계적 물성의 개선은 미세 조직의 영향, 즉 Si 및 Cu 원소의 석출 및 화합물 형성과 관련된 것으로 해석된다.

3.4. 열전도도 분석

25, 100, 200, 300°C에서 측정된 열전도도 결과는 Fig. 5(a)~5(d)에 나타내었다. 시간(< 150 msec)에 따른 신호를 측정 후 이를 model fitting하여 열확산계수와 열전도도를 획득하였다. 25, 100, 200, 300°C에서 측정된 비열은 0.837, 0.880, 0.915, 1.004 J/gK로 점진적으로 증가하였다. 열확산율은 25°C에서 $56.645 \text{ mm}^2/\text{s}$ 이고, 300°C에서는 $53.516 \text{ mm}^2/\text{s}$ 로 감소하였다. 측정된 ρ , C_p , α 값을 이용하여 열전도도(λ)는 $\lambda(T) = \alpha(T) \times C_p(T) \times \rho(T)$ 로 계산할 수 있다. Figure 6은 다이캐스팅 ADC12 시편의 온도 변화에 따른 열전도도 변화를 나타낸다. 25~300°C 온도구간에서 열전도도는 129.3 ± 0.27 부터 $146.443 \pm 0.38 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 약 13.2% 증가하였다. 상용 다이캐스팅 ADC12의 경우 상온에서 열전도도가 $96 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 알려져 있다[19]. 참고로 Kim *et al.*의 논문에 보고한 ADC12 소재의 열전도도는 $108.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이다 (금형온도 = 100°C)[1]. 본 연구에서 적용한 다이캐스팅

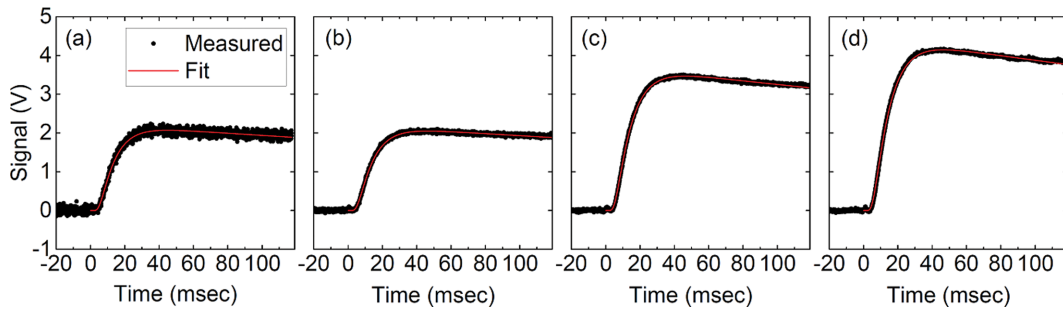


Fig. 5. Thermal conductivity results of diecast samples measured at (a) 25, (b) 100, (c) 200, and (d) 300°C.

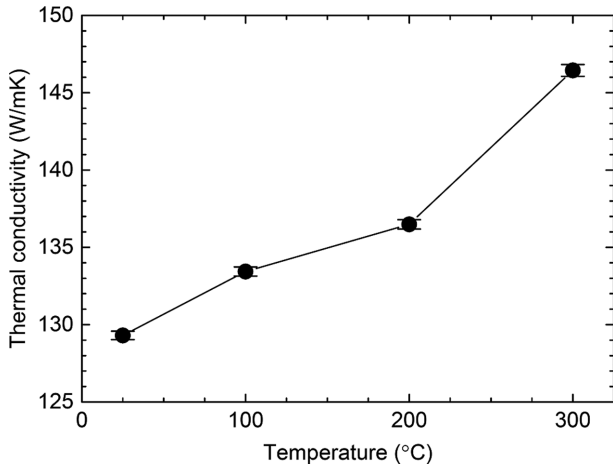


Fig. 6. Change in thermal conductivity of diecast samples as a function of temperature.

공정으로 제조한 시편의 열전도도가 약 19.3% 정도 개선된 것을 의미한다. 상대적으로 높은 금형온도와 관련된 된 치밀조직의 형성 또한 열전도도 개선의 요인이다.

3.5. 진공 열처리 공정 후 기계적 물성 변화

열처리 후 외관상 광학현미경에서 관측되는 내부 기공의 팽창이나 균열은 관찰되지 않았다. 진공 열처리한 다이캐스팅 시편의 기계적 물성 변화는 인장강도, 연신율, 경도를 측정하여 분석하였다. Figure 7(a)와 7(b)에 400°C와 500°C에서 열처리한 시편의 인장강도 결과를 나타내었다. 인장강도의 감소와 더불어 연신율의 증가가 관찰된다. 각 온도별 인장강도와 연신율의 변화를 Fig. 7(c)에 정리하였다. 300°C까지 열처리한 시편은 다이캐스팅 시편과 거의 비슷한 인장강도와 연신율 값을 나타낸다. 이후 400°C와 500°C에서는 인장강도 값이 227.2 MPa까지 감소한다. 반대로 연신율은 5.68%까지 급격하게 증가한다. 즉 급냉에 의해 형성된 치밀 조직이 진공 열처리 과정에서 조직의 안정화와 잔류응력의 제거 등이 복합적으로 작용하여 연성과 인성이 증가한 것이다. 300°C(변태점)까지는 원자의 유동성이 불충분하여 인장강도와

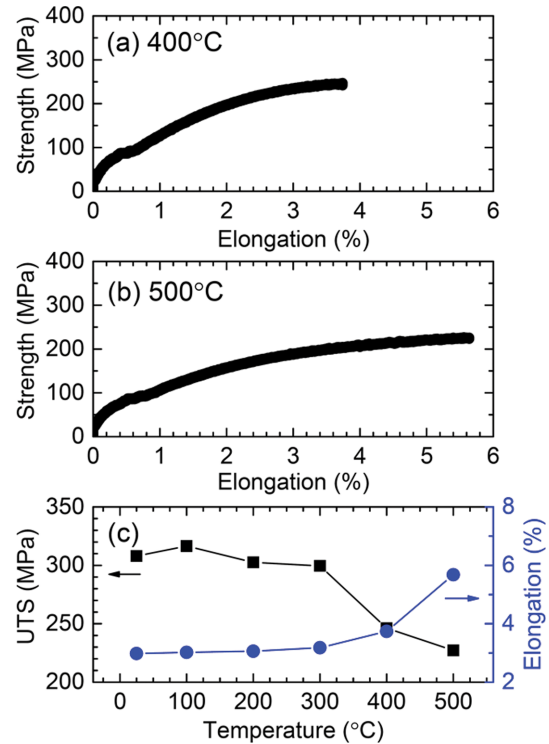


Fig. 7. Strength-elongation curves of diecast samples annealed at (a) 400°C and (b) 500°C. (c) A plot of changes in ultimate tensile strength and elongation as a function of annealing temperature.

연신율의 변화가 매우 작다.

Figure 8은 진공 열처리 온도에 따른 Hv 경도 변화를 나타낸다. 인가하중은 500 gf이다. 다이캐스팅 시편의 Hv 경도치는 130 정도이다. 참고로 원재료로 사용된 ADC12 ingot 시편의 Hv 경도치는 75 정도이다. 다이캐스팅 ADC12 시편의 경우 통상 110 정도의 Hv 경도치가 보고되었다[16]. 본 논문에서는 기본적인 다이캐스팅을 통하여 경도치가 크게 개선되었다. 200°C까지는 경도치의 변화가 없다. 300°C 시편부터 경도치가 점진적으로 감소하기 시작하여 500°C 시편의 경도치는 74.3으로 43% 정도 감소하였다. 인장강도 결과와 마찬가지로 고온 열처리 동안 조직의 안정화로 인하여 Hv 경도치가 감소하였다. 진공 열처리 온도에서 상온까지 노냉하는

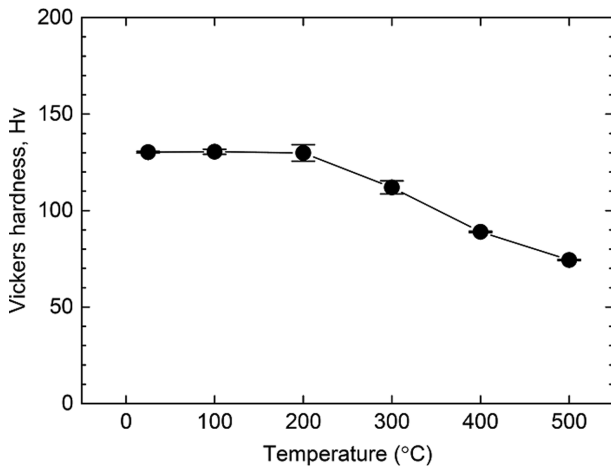


Fig. 8. Vickers hardness of diecast samples as a function of annealing temperature.

동안 안정화 과정이 진행되었을 것으로 추정된다. 참고로 Kang *et al.* 논문은 T6 열처리를 통하여 다이캐스팅 시편의 경도치가 135 정도로 개선됨을 보고하였다[16].

4. 결 론

기공 형성이 최소화된 최적 공정 조건, 특히 금형 온도 250°C에서 ADC12 알루미늄 합금을 다이캐스팅법으로 제조하여 기초적인 물성 분석을 수행하였다. 원재료인 ADC12 ingot와 비교하여 다이캐스팅 시편에서는 첨가 원소인 Si과 Cu의 고른 분포 형상이 관찰되었다. Si은 미소량의 Al_4Si 금속간 화합물을, Cu는 두드러지게 Al_2Cu 와 $AlCu_3$ 금속간 화합물을 형성하였다. 통상의 다이캐스팅 합금에 비하여 열전도도, 인장강도, Hv 경도치가 크게 개선되었다. 200°C 이상의 진공 열처리 조건에서의 물성 변화는 거의 없고, 300°C 이상의 진공 열처리 조건에서는 경도, 인장강도는 감소하였고, 연신율은 증가하였다. 이는 진공 열처리에 따른 조직의 안정화로 인한 연성 및 인성의 개선으로 설명할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다(2018년).

References

[1] C.-W. Kim, Y.-C. Kim, J.-H. Kim, J.-I. Cho and M.-S.

Oh, "Effect of alloying elements on the thermal conductivity and casting characteristics of aluminum alloys in high pressure die casting", *Korean J. Met. Mater.* 56 (2018) 1.

[2] S. Das, A.R. Siddiqui and V. Bartaria, "Evaluation of aluminum alloy brake drum for automobile application", *Int. J. Sci. Technol. Res.* 2 (2013) 96.

[3] M. Okayasu, Y. Ohkura, S. Takeuchi, S. Takasu, H. Ohfuji and T. Shiraishi, "A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes", *Mater. Sci. Eng. A* 543 (2012) 185.

[4] R.N. Lumley, D. Viano, J.R. Griffiths and C.J. Davidson, "The effect of heat treatment on tensile, fatigue and fracture resistance of ADC3, ADC10, and ADC12 alloys", *Proc. 12th International Conference on Aluminum Alloys* (2010) 345.

[5] Y.K. Kim, M.J. Kim, S.K. Kim, Y.O. Yoon and K.A. Lee, "Microstructure, tensile strength, and high cycle fatigue properties of Mg+Al₂Ca added ADC12 (Al-Si-Cu) alloy", *Trans. Mater. Process.* 26 (2017) 306.

[6] A.Z. Syahrial, L.P. Puspita, D. Dhaneswara and B.W. Utomo, "Effect of Sr addition on the microstructure and mechanical properties of ADC12/nano Al₂O₃ composites produced by stir casting method", *AIP Conf. Proc.* 1964 (2018) 020015.

[7] J.-H. Son, S.-K. Oh, D.-B. Kim and C.-W. Han, "Properties evaluation on aluminum for die-casting (ADC 12) to packing case of composite sensor", *J. Kor. Soc. Ind. Appl.* 9 (2006) 141.

[8] S. Dong, Y. Iwata, Y. Sugiyama and H. Iwahori, "Cold crack criterion for ADC12 aluminum alloy die casting", *Mater. Trans.* 51 (2010) 371.

[9] J.-C. Jang and K.S. Shin, "Effects of Ni and Cu addition on tensile properties and thermal conductivity of high pressure die-cast Al-6Si alloys", *Korean J. Met. Mater.* 58 (2020) 217.

[10] G.-Y. Yeom, H.K. Lim, S.K. Kim, S.-K. Hyun and Y.-O. Yoon, "Effects of Mg enhancement and heat treatment on microstructures and tensile properties of Al₂Ca-added ADC12 die casting alloys", *J. Mater. Sci. Technol.* 32 (2016) 1043.

[11] M. Okayasu, S. Takeuchi, M. Yamamoto, H. Ohfuji and T. Ochi, "Precise analysis of microstructural effects on mechanical properties of cast ADC12 aluminum alloy", *Mater. Trans. A* 46A (2015) 1597.

[12] Y.-S. Lee, Y. Makino, J. Nitta and E. Lee, "Influence of continuous casting speeds on cast microstructure and mechanical properties of an ADC14 alloy", *Metals* 10 (2020) 625.

[13] M. Okayasu, Y. Miyamoto and K. Morinaka, "Material properties of various cast aluminum alloys made using a heated mold continuous casting technique with and without ultrasonic vibration", *Metals* 5 (2015) 1440.

[14] M. Okayasu, S. Yoshifuji, M. Mizuno, M. Hitomi and H. Yamazaki, "Comparison of mechanical properties of die cast aluminum alloys: cold v. hot chamber die casting and high v. low speed filling die casting", *Int. J. Cast Metal Res.* 22 (2009) 374.

[15] R.N. Lumley, N. Deeva and M. Gershenzon, "The optimization of strength and ductility in heat treated ADC12

- alloys”, Proc. 12th International Conference on Aluminium Alloys (2010) 2197.
- [16] S.-W. Kang, K.-S. Park, E.-H. Oh, J.-I. Shim and H.-S. Kim, “Change of mechanical properties during heat treatment of diecast ADC12 alloy”, J. Kor. Foundry Soc. 36 (2016) 88.
- [17] H.C. Kang, S.H. Seo and D.Y. Noh, “X-ray scattering study on the structural evolution of AlN/sapphire (0001) films during radiofrequency sputter growth”, J. Mater. Res. 16 (2001) 1814.
- [18] R. Marstatt, M. Krutzlinger, J. Luderschmid, M.F. Zaeh and F. Haider, “Formation of a diffusion-based intermetallic interface layer in friction stir welded dissimilar Al-Cu lap joints”, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 181 (2017) 012002.
- [19] J.-S. Shin, K.-T. Kim, S.-H. Ko, D.-J. An and M.-H. Kim, “Design and evaluation of aluminum casting alloys for thermal managing application”, J. Kor. Foundry Soc. 33 (2013) 22.