

Fe가 첨가된 과공정 Al-Si-Fe합금 압출재의 기계적특성 및 미세조직에 관한 연구

이세동¹ · 김덕현¹ · 백아름¹ · 임수근^{1,#}

Effect of Fe Addition on Mechanical Properties and Microstructure of As-Extruded Hypereutectic Al-Si-Fe Alloy

S. D. Lee, D. H. Kim, A. R. Beck, S. G. Lim

(Received January 8, 2019 / Revised March 18, 2019 / Accepted March 22, 2019)

Abstract

Hypereutectic Al-Si alloys have been widely utilized for wear-resistant components in the automotive industry. In order to expand the application of Hypereutectic Al-Si alloys, the addition of alloying elements forming a stable precipitate at high temperature is required. Thermally stable inter metallic compounds can be formed through the addition of transition elements such as Fe, Ni to Al alloys. However, the amount of transition element to be added to Al alloys is limited due to their low solid solubility. Also, hypereutectic Al-Si-Fe alloys form coarse primary Si phases and needle-shaped intermetallic compounds during solidification in the general casting processes. In this study, the effects of the destruction of Intermetallic compound and Si phase are investigated via hot extrusion. Both the microstructure and mechanical properties are discussed under different extrusion conditions.

Key Words : Al-Si alloy, Heat extrusion, Hot deformation, Microstructure

1. 서 론

과공정 Al-Si 합금은 고온에서의 치수 안정성과, 비강도가 우수한 합금으로 널리 알려져 있다. 또한 알루미늄 합금 중 높은 내 마모성과 낮은 밀도, 내부식성 및 열전도도 또한 비교적 우수하여 차량용 피스톤 블록(piston block) 또는 파워 트레인의 부품에 사용된다[1,2].

Al-Si 합금은 12.4-12.6wt% Si의 범위에서 공정점을 가지는 합금으로써, 본 연구에 사용된 합금은 초정Si 상과 공정Si 상이 기지 내에 공존하는 미세조직을 보인다. 그러나 초정Si의 경우 용탕이

응고하는 동안 조대하게 성장하며, 이는 소재의 물성을 저하시키는 요인으로써 널리 알려져 있다. 또한, 알루미늄 소재의 강도 및 내식성을 향상시키기 위해 미량으로 첨가되는 Mg와 Cu의 경우 Mg₂Si, Al₂Cu 등의 석출강화상의 영향으로 상온에서의 강도 향상에는 기여할 수 있으나, 고온환경에서는 이러한 상들이 성장하거나, 기지 내로 재용해 되어 고온 강도 향상에 미치는 영향은 미미하다. 그러나, 최근에 천이원소인 Fe를 첨가하여 열적으로 안정한 β(Al₃FeSi) 상을 정출시켜 고온에서의 물성을 향상시키고자 하는 노력이 계속되고 있다. 하지만 β(Al₃FeSi)상 또한 주조 시에 약 50-80 μm 크기로 조대하게 성장함으로써 소재의 인성을 저하시키는 요인으로 작용한다[2,3,4].

1. Gyengsang National Univ.

Corresponding Author : Research Center for Aircraft Parts Technology

E-mail : suglim@gnu.ac.kr, ORCID ID : 0000-0002-8132-8416

열적으로 안정한 β (Al_5FeSi)상을 미세화하기 위하여 여러 연구들이 진행된 바 있다. 대표적으로 Sr 및 Be 등의 개량화제를 첨가하는 방법과 반응고주조법, 급속 응고법(rapidly solidification casting), 소성 가공(plastic deformation) 등이 제시되었다. 본 연구에서는 압출비(extrusion ratio)와 압출다이(extrusion die)의 경사각을 달리함으로써 급속간화합물인 β (Al_5FeSi)상에 대한 파쇄효과 및 미세조직학적 특성을 알아보고 이에 대한 물성 및 고온에서의 치수 안정성에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험방법

2.1 합금분석 및 빌렛제조

본 연구에 사용된 합금의 조성은 유도결합 플라즈마 분광광도계인 ICP(inductively coupled plasma spectrometer) 장비를 이용하여 분석하였으며 그 결과를 Table. 1에 나타내었다. 열간압출을 위해 제조된 압출용 빌렛은 99.9% 순도의 Al과 Al-10Fe, Al-25Si의 모합금을 이용하여 전기저항로를 사용하여 800℃ 에서 용해 후, 지름 60mm, 높이 150mm의 SUS type몰드에 중력주조 방식으로 주입하여 제조하였으며, 주입 15-20분 전 탈가스 하였다. 압출용 빌렛에 대한 최적 조건을 설정하기 위하여, 냉각 조건을 달리하여 3회 주조를 실시하였으며, 빌렛을 제조하기 위한 주조 조건은 Table. 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Al-17Si-3Fe alloy(wt.%)

Elements	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Bal.
	72.8	17.5	2.68	25	1.37	>0.57

Table 2 Experimental Condition of permanent mold cast for Al-17Si-3Fe alloys

	As cast1	As cast2	As cast3
Melting Temp.	800 ℃	800 ℃	800 ℃
Pouring Temp.	700 ℃	700 ℃	700 ℃
Mold Temp.	300 ℃	R.T(25 ℃)	R.T(25 ℃)
Cooling condition	Water Quenching	Air Cooling	Water Quenching

2.2 열간압출 및 미세조직

압출은 각 조건을 달리하여 3회 실시하였으며, 경사각과 컨테이너의 온도, 그리고 압출비를 달리하여 진행하였다. 압출 장비는 300ton 급의 수직형 직접 압출기를 사용하였으며 램 속도(ram speed)는 1mm/s 하에서 진행하였으며 그 조건을 Table. 3에 나타내었다.

압출재의 미세조직은 각 길이방향의 단면(longitudinal cross-section)과 횡방향의 단면(transverse cross-section)을 OM과 SEM(EDAX)장비를 사용하여 분석하였으며, 시편은 sand paper를 이용해 #80-#2000까지 연마 후, diamond suspension (1 μ m, 3 μ m)를 이용하여 미세 연마(fine polishing)하였다. 연마된 시편은 Modified Keller reagent(175ml of distilled water, 3ml HCl, 2ml HF, 20ml HNO₃)를 이용하여 식각(etching)하였다.

2.3 물성 및 열특성평가

압출재의 기계적 특성을 평가 비교하기 위하여 상온 인장시험을 진행하였다. 인장시험편은 ASTM E8M 규격의 dog born형상의 시편으로 제작하였으며, 변형률 속도 10⁻³s⁻¹로 인장시험을 진행하였다. 또한 고온에서의 치수안정성을 판단하기 위하여 TMA (thermal mechanical Analyzer)를 이용하였으며, 챔버 온도를 10℃ 에서 5분 유지후 10℃/min 의 속도로 약 400℃까지 승온 시키면서 시편의 체적변화를 측정하였다. 시험편은 1cm x 1cm x 1cm의 큐빅 형태로 제작하였으며, 압출 방향으로의 길이 변화를 측정하였다.

Table 3 Experimental Condition for hot extrusion about each billet of Al-17Si-3Fe alloys

	Sample1	Sample2	Sample3
Extrusion ratio	27:1(\emptyset 10)	18:1(\emptyset 12)	27:1(\emptyset 10)
Die angle	90°	20°	20°
Extrusion speed	1mm/s	1mm/s	1mm/s
Container Temp.	480℃	450℃	450℃

3. 결과 및 고찰

3.1 압출용 빌렛 제조

Fig. 1 은 Fe 첨가량에 따른 Al-17si-XFe의 미세조직을 관찰한 것이다. Fe의 첨가량이 약1wt%을 가

질 때 금속간화합물인 β (Al_5FeSi)상이 침상(needle like type)으로 얇고 길게 정출된 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 Fe의 첨가량이 1, 3, 5wt%로 증가함에 따라 β (Al_5FeSi)은 두께 방향으로 성장하여 직사각형의 형태(rectangular shape)의 형상을 띄는 것을 확인할 수 있다. 또한, Image analyzer (IMT-200)을 사용하여 Fe의 첨가량에 따른 초정Si의 분율을 측정 한 결과, Fe의 첨가량과 초정Si의 분율은 반비례하는 관계를 나타내었으며, 이는 Fe의 첨가량이 증가함에 따라 정출되는 β (Al_5FeSi)이 초정Si 정출물 보다 우선적으로 정출 됨으로써 Si의 분율 감소를 야기한 것으로 판단된다[7,8].

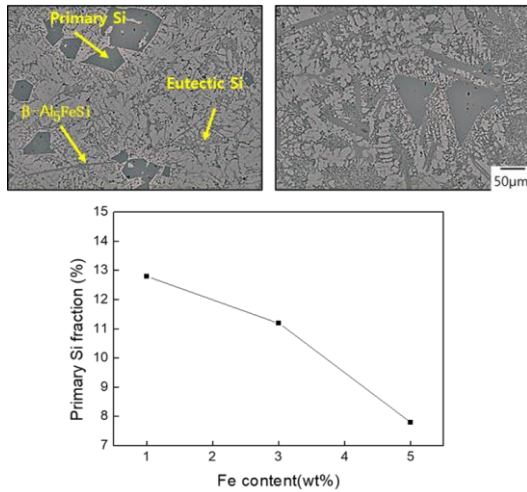


Fig. 1 Microstructure of As-casted Al-17Si-1Fe and Al-17Si-5Fe alloys and Variation of Primary Si fraction with different Fe contents in Al-17Si-xFe

본 실험에서는 3wt%의 Fe을 첨가하여 압출용 빌렛을 각 다른 조건하에 냉각시킴으로써 내부 결함의 크기와 수를 판별하고, 압출에 적합한 빌렛을 판정하였으며, 각 압출용 빌렛의 제작 조건은 Table 2에 나타내었다. Fig.2는 압출용 빌렛의 미세조직을 보여 준다. As cast3번 시료의 경우 내부의 기공의 크기가 비교적 조대하고, 다수가 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 냉각속도가 가장 빨랐던 조건하에서 용탕 내의 가스가 빠져나가기 위한 충분한 여유를 받지 못해, 잔류한 가스가 내부에 남아 형성한 기공(pore)로 판단된다. 또한 공냉시킨 As cast2번의 경우 내부의 기공(pore)의 수는 크게 감소하였으나, 냉각속도가 늦어 원자들의 확산에 의한 여유가 충분해 상의 크기가 비교적 매우 조대하게 정출되었다.

그러나 As cast1번의 빌렛의 경우, 예열된 몰드를 사용하여 용탕 내의 가스의 유동을 도움으로써 가스가 충분히 빠지게 하고, 이후 수냉하여 정출상의 크기를 억제하여, 보다 압출을 위해 건진한 압출용 빌렛을 제작할 수 있었다. 이후 As cast1번의 조건하에 추가적으로 빌렛을 제조해 압출을 진행하였다[9].

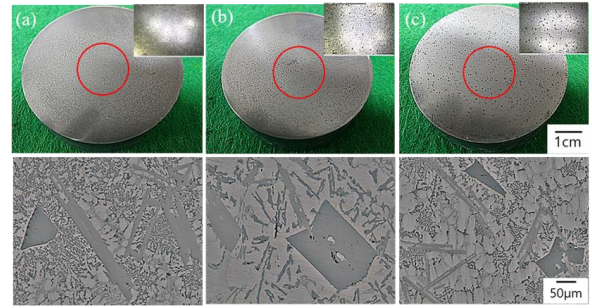


Fig. 2 Micro- and Macrostructure of Al-17Si-3Fe by permanent mold casting (a) 300 °C pre-heated mold and water quenching (b) 25 °C mold and air cooling (c) 25 °C mold and water quenching

압출을 위해 제조된 빌렛에 대한 XRD 분석 결과를 Fig.3 에 나타내었다. 기본적으로 석출강화상으로 작용되는 Al_2Cu 상과 Mg_2Si 의 peak가 나타났으며, 또한 Fe가 첨가됨으로써 형성되는 β (Al_5FeSi)이 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

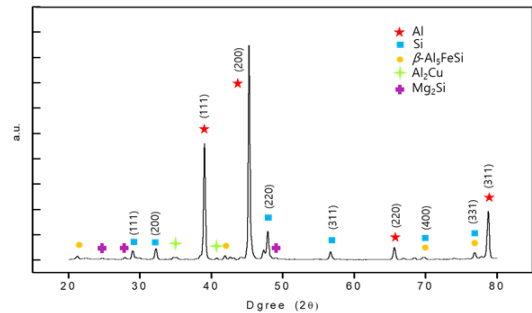


Fig. 3 XRD pattern of as-casted Al-17Si-3Fe alloys

3.2 열간압출 및 미세조직

압출은 압출비를 달리하여 3회 실시하였으며 압출 조건은 Table3.에 나타내었다, 압출 시 발생했던 압출압력과 압출재의 표면 상태에 대한 그래프는 Fig.4에 나타내었다. 압출 빌렛이 컨테이너 내부에서 setup 시간은 모두 50s 이내에서 완료되었다. 최대압출압력(maximum extrusion pressure)이후 압출압력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 간접압

출(indirect extrusion)과 달리 직접압출(direct extrusion)은 압출 과정에서 빌렛의 길이가 짧아짐으로써 컨테이너 내벽과의 마찰력이 감소하여 최대압출압력 이후 압력이 감소하는 것으로 알려져 있다 [10].

압출용 빌렛에 부하된 압출압력이 가장 크게 발생했던 Sample1(extrusion ratio 27:1, die angle 90°)의 압출재의 표면은 표면이 전나무 껍질 형태의 Fir-tree결함이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 압출 결함은 주로 압출 속도(extrusion rate), 압출다이의 디자인(extrusion die design), 압출비(extrusion ratio)에 크게 의존하게 된다. 이는 컨테이너의 온도가 높거나, 압출시 압출압력이 높아 마찰열이 크게 상승하게 됨으로써 표면이 일부 용융되며, 컨테이너에 소착되면서 발생하는 결함으로 알려져 있다. 따라서 이러한 결함을 억제하기 위해 압출압력을 감소시키는 방안으로 압출다이의 직경을 Ø12로 변경하고, 압출다이의 경사각을 20°을 부여함으로써 압출압력을 낮춰서 압출을 진행하였다. 압출압력은 약20%가량 크게 하락하였으며, 압출재의 표면은 결함 없이 건전하게 압출되었으나, 이후 미세조직 분석결과에서 β (Al₃FeSi)상과 초정Si이 파쇄되지 않고, 조대하게 남아있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Sample3의 압출조건인 extrusion ratio 27: 1, die angle 20°으로 압출을 진행하였으며 그 결과, 보다 미세한 미세조직과 건전한 표면을 가지는 압출재를 얻을 수 있었다[11].

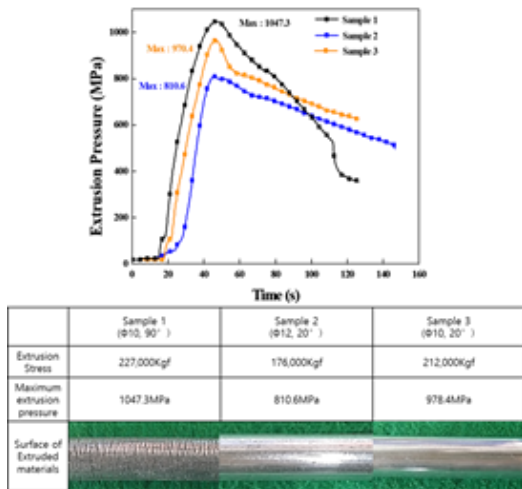


Fig. 4. Loaded pressure graph in heat extrusion process and Maximum pressure and Optical surface images of extrusion about As cast 1

각 조건하에 압출된 압출재를 종단면(longitudinal cross-section)과 횡단면(transverse cross-section)으로 절단하여 미세조직을 관찰하였으며 그 결과를 Fig.5에 나타내었다. 압출압력이 가장 작게 부하되었던 Sample2의 압출재 미세조직에서는 다른 두 조건의 압출재보다 비교적 조대한 상들이 존재하였으며, 모든 압출재의 미세조직은 압출방향을 따라 재배열 된 것을 확인 할 수 있었다.

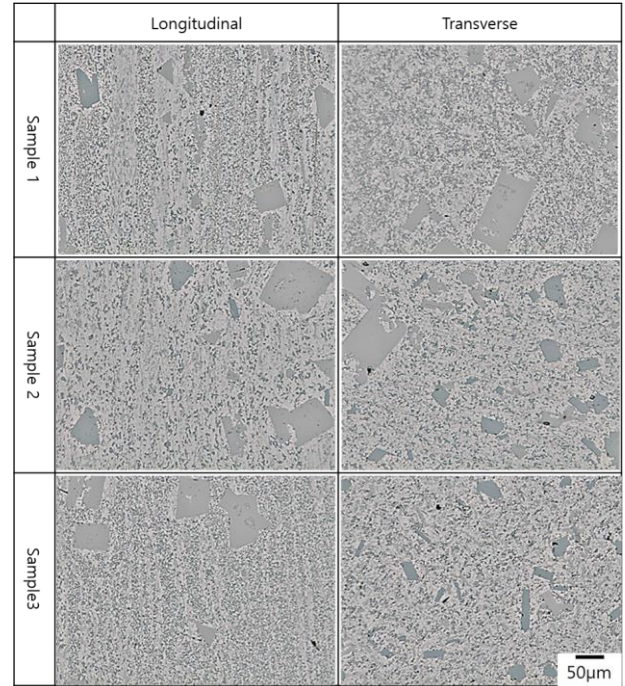


Fig. 5. Microstructure of extruded materials about longitudinal and cross section (a) Ø10, 90° (b) Ø12, 20° (c) Ø10, 20° (die diameter, die angle)

Fig.6과 Table.4는 각 시편의 종단면(longitudinal cross-section)과 횡단면(transverse cross-section)의 로크웰 경도값(HRB scale)과 각 정출상들의 크기를 나타낸 그래프와 표이다. 초정Si의 크기는 As-cast된 주조재에 비하여 평균적으로 약 30µm이상 크게 감소하였으며, 그 크기는 각 압출재에 부하된 압출압력과 반비례하였다. 또한, 미세하게 파쇄된 정출물들로 인하여 경도값은 각각 압출압력과 반비례 관계를 나타내며 Sample1에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 Hall-patch equation과 부합하는 결과를 보여줬다. 압출재의 횡단면과 종단면의 경도값에서는 종단면의 경도값이 높게 측정되

었으며, 이는 압출과정에서 압출다이의 홀(die hall)로 소재가 빠져나오는 도중 종단면의 경우 횡 방향의 압축응력이 크게 작용함으로써, 소재 내부에 보다 큰 응력장(strain filed)이 작용된 것으로 판단 된다[10].

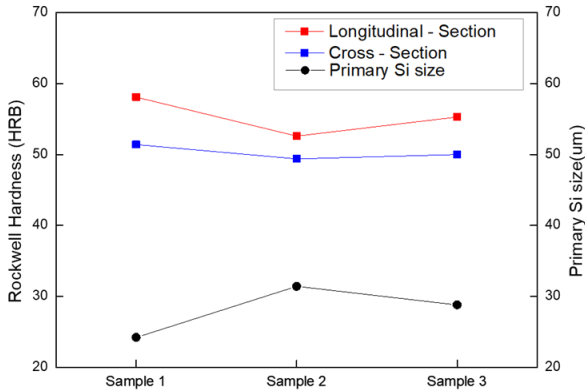


Fig. 6 Graph of Rockwell hardness and primary Si size about hot extruded Al-17Si-3Fe alloys in each condition.(27:1, 90° / 18:1, 20° / 27:1, 20°)

Table 4 Rockwell hardness (HRB) and primary Si size of extruded specimen for Al-17Si-3Fe alloy

	Primary Si size(um)	HRB (Longitudinal)	HRB (Cross)
Sample1	24.2	58.1	51.4
Sample2	31.4	52.6	49.4
Sample3	28.8	55.3	50.0
Average	28.1	55.3	50.1
As cast	38.0	58.7	

3.3 기계적 특성 및 고온 치수안정성

Fig.7은 각 압출재에 대한 인장시험결과를 나타낸다. 인장시험 결과 인장강도의 경우 압출압력이 가장 크게 부하되었던 Sample1에서 가장 높게 나타났으나 압출재 표면에 결함이 발생하였으며, 또한 연신율은 4% 미만으로 매우 취약적인 소재임을 알 수 있었다. Sample2번과 Sample3번의 경우 인장강도값은 크게 차이가 없었으나 항복강도에서 Sample3이 Sample2보다 우세하였으며 연신율은 Sample2에서 가장 높게 나타났다. β (Al₅FeSi)의 경우 Monoclinic crystal structure 를 가지며 2/m 공

간균에 속하는 금속간 화합물로서 일반적으로 기지 조직인 Al 이 가지는 FCC 구조보다 복잡한 공간구조를 가진다. 따라서 결정구조가 복잡해지면서 뚜렷한 최조밀면(close-packed plane)과 최조밀방향(close-packed direction)을 가지지 못하기 때문에 Peierls-Nabarro force 가 증가하게 되어 단위 전위를 움직이는데 필요한 응력이 비교적 높아지게 된다[13].

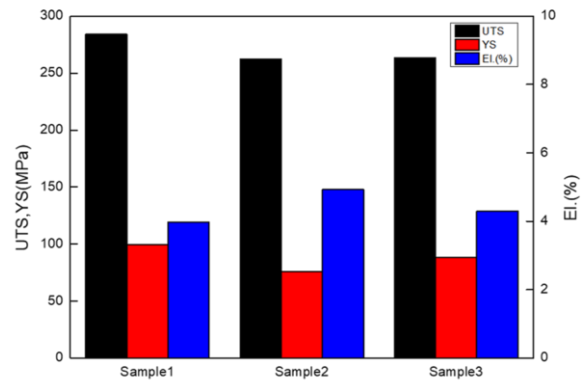


Fig. 7. Variation of Tensile properties (UTS, YS, El.) for hot extruded Al-17Si-3Fe alloys

Fig.8는 인장시험 후 파단된 시험편의 횡 방향과 종 방향의 판단면을 OM 과 SEM 장비를 이용하여 분석한 결과이다. 횡단면의 조직분석결과에서 취성이 강한 초정 Si 는 반듯하게 절단된 모습을 보였으나 그 주위의 기지 부위는 Dimple 이 존재함으로써 전형적인 연성파괴의 모습을 확인할 수 있었다. 또한 딴플 내부에 미세한 금속간화합물이 발견됨으로써 파쇄된 금속간 화합물인 β (Al₅FeSi)이 딴플 내부에서 딴플을 생성하는데 기여한 것으로 판단된다. 또한 파단된 시험편의 종단면을 관찰한 결과 균열의 전파는 조대한 초정 Si 상 및 파쇄되지 않은 금속간 화합물 β (Al₅FeSi)을 절단하며 균열이 진전된 것을 확인할 수 있었고 그에 대한 모식도를 Fig.8 (b)에 나타내었다. Inclusion Theory 에 따르면 탄성에너지의 밀도는 상의 크기와 반비례하는 관계를 가진다. 따라서 충격이 가해지거나 크랙이 전파되는 경우 진행 방향은 조대한 상을 통과하며 진행하게 된다. Fig.8 의 종단면 사진을 확인 한 결과, 크랙이 진행하던 도중 조대한 초정 Si 상으로 급격하게 방향을 우회하여 Si 초정상을 절단 후 계속해서 진행한 것을 확인할 수 있다[2].

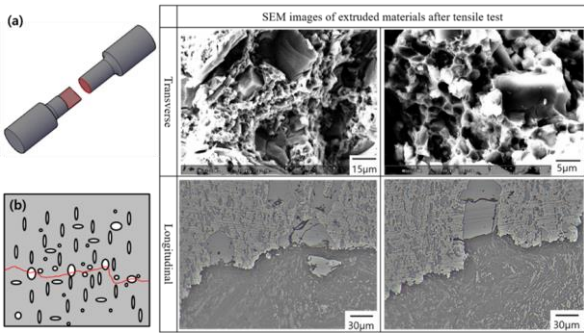


Fig. 8. Schematic of (a) observed surface after tensile test and (b) path of crack propagation and SEM and OM fracture surface of tensile tested specimens for Al-17Si-3Fe alloys

Fig.9은 TMA(thermal mechanical analyzer)를 이용하여 CTE(coefficient thermal expansion)을 측정 한 결과이다. 과공정 Al-Si합금은 주로 고온에서 사용되며, 고온에서의 치수 안정성이 요구되는 소재이다. 따라서 본 연구에서는 기존 Setting Temperature를 10° C로 유지 후 10° C/min의 승온 속도를 유지하여 400° C까지 승온 하였다. 체적변화에 대한 그래프를 Fig.9에 나타내었으며 그 결과, CTE 값은 소재가 가지는 파쇄된 정출물의 크기에 반비례하는 결과를 가졌다. 가장 미세한 조직을 가지던 Sample1소재에서는 체적변화가 가장 적었으며, 비교적 조대했던 Sample2에서 가장 높은 체적변화율이 나타났다. 이는 보다 미세하게 파쇄된 조직들의 경우, 같은 분율 조건 하에서 기지와 표면적이 늘어나게 되고, 고온에서의 기지조직과 미세입자간의 결합력(Bonding Energy)가 증가하게되어 전체적으로 체적의 변화는 조직이 미세할수록 그 변화량이 적은 것으로 판단된다.

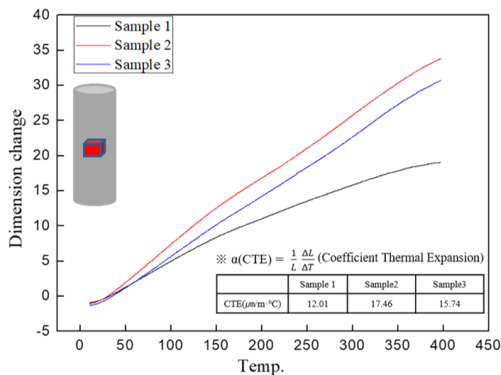


Fig. 9. TMA result of CTE variation about hot extruded Al-17Si-3Fe alloy in each condition (27:1, 90° / 18:1, 20° / 27:1, 20°)

4.결론

본 연구에서는 3wt% Fe가 첨가된 과공정 Al-Si합금 압출재에 대한 미세조직 및 인장특성, 그리고 CTE분석결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압출재의 압출압력이 증가함에 따라 정출된 β (Al_5FeSi)은 더욱 미세하게 파쇄된 것을 확인 할 수 있었으며, Sample1의 압출조건인 extrusion ratio 27: 1, die angle 90° 에서 진행된 압출에서는 압출재 표면에서 Fir-tree defect가 관찰되었으며, 이는 압출시 빌렛에 부하되는 높은 압력에 의해 컨테이너와의 마찰력으로 인한 표면용융이 영향을 끼친 것으로 판단된다.

(2) 압출재의 미세조직은 압출방향으로 재배열된 것을 확인 할 수 있었으며, 각 압출재의 횡단면과 종단면의 경도값은 종단면이 횡단면보다 높은 경도값을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 압출시 횡방향으로의 압축응력으로 인해 발생하는 응력장이 영향을 준것으로 판단된다.

(3) 인장시험 결과 인장강도 및 항복강도는 압출재 내의 미세조직의 크기와 반비례하는 관계를 가졌으며 이는 Hall-patch이론에 부합하는 것을 보여 준다. 또한 인장시험 후 파단면의 SEM조직 사진에서 Dimple이 발견되어 전체적으로 연성파괴가 일어난 것을 확인 할 수 있었으며, 종단면의 OM분석결과에서는 균열이 전파는 경로는 주로 조대한 초정 Si 및 파쇄되지 못한 β (Al_5FeSi)을 절단하며 진행하는 것을 확인 할 수 있었다.

(4) TMA장비를 통한 열분석실험에서 400° C까지 승온 하며 CTE값을 분석한 결과 조직이 미세했던 Sample1의 압출재에서 가장 낮은 부피 변화를 보였으며, Sample2에서 가장 큰 부피 변화를 보였다. 이는 미세하게 파쇄된 정출물들은 기지조직과의 표면적이 보다 넓어지고 이로인한 기지-정출물 간의 bonding energy가 증가하여 체적변화에 영향을 준것으로 판단된다.

(5) 실험 결과, Sample2(extrusion ratio 27:1, die angle 90°)에서 β (Al_5FeSi)및 초정Si가 적절하게 파쇄 되었으며 또한, 표면결합이 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Sample2에서의 조건이 가장 적절하다 판단하였다.

REFERENCES

- [1] Jien-Wei Yeh, Shi-Ying Yuan, Chao-Hung Peng, 1998, A reciprocating extrusion process for producing hypereutectic Al-20wt.% Si wrought alloys, Mater. Sci. Eng., A252, No. 2, pp.212~221.
- [2] Li Runxia, Yu Fuxiao, Zuo Liang, 2011, Effect of hot extrusion process on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys, WFC, vol.8, No.1, pp. 145~149.
- [3] Jun young-Han, 2017, Master's thesis, Kongju National Univ., Kongju-si, South Korea, pp.11~23.
- [4] Jung-Moo Lee, Suk-Bong Kang, 1998, A study on the phases formed during solidification and heat treatment in A390 alloy, J. Kor. Inst. Met. Mater., Vol.36, No.2, pp.159~164.
- [5] Jaesung-Park, 2006, Master's thesis, In-ha Univ., Incheon-si, South Korea, pp.14~25.
- [6] Kesheng Zuo, Haitao Zhang, Ke Qin, Xing Han, Bo Shao, Jianzhong Cui, 2015, Effects of heat treatment and extrusion on microstructure and properties of A390 alloy hollow billet fabricated via DC casting, The Jap. Inst. Metals. Mater., Vol. 56, No.9, pp. 1591~1598.
- [7] Cheolhyeon-Kim, 2004, Master's thesis, In-ha Univ., Incheon-si, South Korea, pp.4~21.
- [8] Jeong keun-Lee, Chong sung-Park, Myung ho-Kim, 1998, Beryllium effects on the morphology of iron intermetallics in the A356 aluminium casting alloy, Vol.18, No.4, pp.357~362.
- [9] J. Gilbert Kaufman, Elwin L. Rooy, 2004, ALUMINUM ALLOY CASTING, ASM & AFM, United States of America, Ch.5, pp.47-53.
- [10] Prof. T. SHEPPARD, 1999, EXTRUSION OF ALUMINIUM ALLOYS, KLUWER academic publishers, Dordrecht & Boston & London, Ch.1, pp. 6~8.
- [11] A. F. M Arif, A. K. Sheikh, S. Z. Qamar, M. K. Raza, K. M. Al-Fuhaid, 2002, Product defects in aluminum extrusion and their impact on operational cost, KFUPM, vol.5, pp.137~154.
- [12] Sang won Lee, Sang-Hoon Kim, Sung Hyuk Park, 2018, Tensile properties at room and evaluated temperatures and high-cycle fatigue properties of extruded AZ80 andTAZ711 alloys, Kor. J.Met. Mater., Vol56, No. 10, pp.1~9.