

논문

분사주조한 과공정 Al-Si-Fe 합금의 기계적 및 열적 특성에 관한 고찰

박재성 · 류민[†] · 윤의박 * · 윤우영 ** · 김권희 *** · 김명호

인하대학교 신소재공학부, *한양대학교 신소재공학부

고려대학교 재료금속공학부, *고려대학교 기계공학부

A Study on the Mechanical and Thermal Properties of Spray-cast Hypereutectic Al-Si-Fe Alloys

Jae-Sung Park, Min Ryou[†], Eui-Pak Yoon*, Woo-Young Yoon**, Kwon-Hee Kim*** and Myung-Ho Kim

Division of Metallurgical Engineering, Inha University

*Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University

**Division of Materials Science and Engineering, Korea University

***Department Mechanical Engineering, Korea University

Abstract

Mechanical and thermal properties of spray-cast hypereutectic Al-20wt.%Si-xwt.%Fe alloys ($x=0, 1, 3, 5$) were investigated. After the spray-casting, hot extrusion was performed at 400°C. Intermetallic compound (β -Al₅FeSi) and primary Si are observed in the spray-cast aluminum alloys. The size of primary Si and intermetallic compound of the spray-aluminum alloys became finer and more uniformly distributed than that of the permanent mold cast ones. Ultimate tensile strength of the spray-cast aluminum alloys increased by increasing Fe contents, but that of the permanent mold cast aluminum alloys decreased by increasing Fe contents possibly due to increased amount of coarse intermetallic compound. The coefficient of thermal expansion (CTEs) of the aluminum alloys became lower with finer primary Si and intermetallic compound, and this is attributed to the increased amount of interfacial area between the aluminum matrix and the phases of finer Si and intermetallic compound.

Key words : Spray-cast, Hypereutectic Aluminum alloys, Primary Si, β -Al₅FeSi, CTEs.

(Received May 10, 2006 ; Accepted June 18, 2006)

1. 서 론

Al-Si합금계 중 과공정 Al-Si합금은 내마모성, 내열특성이 매우 좋은 것으로 널리 알려져 있으며, 또한 밀도 및 열팽창계수가 작고 주조성이 우수할 뿐만 아니라 제조비도 저렴하기 때문에 재료 물성 측면과 경제적 측면에서 종래의 주철이나 강을 대체할 수 있는 가능성이 매우 큰 소재이다. 따라서 내마모성, 내열성 및 고비강도를 필요로 하는 각종 장치산업용 및 수송기계용 핵심 부품재료에의 적용가능성에 있어 일순위 재료로서 최근 그 수요도 급격히 증가되고 있다.[1-3] 그러나 현재 상용화되고 있는 과공정 Al-Si합금은 상기의 장점 및 많은 응용성을 보유한 합금특성에도 불구하고 응고과정 중 조대한 초정 및 공정 Si의 정출과 편석의 발생으로 인해 기계적 성질(충격인성, 인장강도, 연신율), 가공성(workability), 성형성(formability), 기계가공성(절삭성)등을 저하시킬 뿐만 아니라 Si 미세화를 위해 자연적으로 첨가되는 Cu 및 강도향상을 위한 Mg, Cu 원소는 내식성을 저하시키는 특성을 나타내고 있다. 또한, 내소착성 또는 내열 특성을 높이기 위해 첨가하는

Fe 원소는 Al, Si, Mg 등과 결합하여 침상의 금속간화합물을 생성시킴으로서 기계적성질, 가공성, 성형성, 기계가공성을 저하시킨다.

따라서 본 연구에서는 초정 Si 및 금속간화합물을 미세하게 정출시킬 수 있는 금속 응고법 중의 하나인 분사주조법을 이용하여 과공정 Al-20wt.%Si-xwt.%Fe ($Fe=0, 1, 3, 5$) 합금을 제작하여 재료의 특성 향상과 관련한 연구를 수행하였다. 특히, 일반 금형주조법과 분사주조법으로 제조된 Al-20Si-xFe 합금의 정출상들을 분석, 비교함으로서 정출상의 형상과 크기 등이 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향에 관해 고찰해 보았으며, Fe 첨가량의 증가에 따른 금속간화합물의 부피분율 증가가 재료의 특성에 미치는 영향에 관해서도 알아보았다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 분사주조 시험편은 미리 준비된 Al-25wt.%Si, Al-50wt.%Fe, Pure Al을 전기저항로에서 목표중량 20 kg, 목표화학조성 Al-20wt.%Si-Xwt.%Fe가 되도록 용해한

[†]E-mail : mr4207@inhaian.net

후 분사주조 장치를 사용하여 예비성형체를 만들었다. 이때의 분사주조 조건은 6기압의 N₂ 가스를 사용하였으며, 분사온도는 760~780°C에서 실시하였다. 또한 금형주조재와 비교하기 위하여 금형주조 시험편은 분사주조 시험편과 동일한 방법으로 용해한 후 200°C로 미리 예열된 직경 50 mm의 금형에 주입하여 Al-20wt.%Si-xwt.%Fe 합금을 주조하였다. 이렇게 제조된 금형주조재와 분사주조 예비성형체를 400°C로 예열한 후 25:1의 압출비로 열간압출을 실시하였다.

제조된 시험편은 미세조직 관찰을 위해 1 μm의 다이아몬드 페이스트(Diamond Paste)로 연마 후 광학현미경, 주사전자현미경, 영상분석기(Image-Analyzer)를 이용하여 미세조직을 관찰, 분석하였으며 생성되는 정출상의 분석을 위하여 SEM (Jeol5600), EDX, XRD를 이용하여 금속간화합물 정출상에 대해 상분석을 실시하였다.

인장 특성 평가를 위하여 ASTM subsize 규격의 봉상 인장시편으로 가공한 후 Instron 4481 인장시험기를 사용하여 인장 속도 1.8 mm/min으로 상온에서 인장시험을 실시하였으며, 팽창 계수 측정은 50~400°C 구간에서 온도 상승에 따른 열팽창계수를 3회 반복 측정하여 열팽창 특성을 평가하였다.

본 실험에 사용된 Al-20Si-xFe 합금의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 시험편의 제조조건 및 열간압출 조건은 Table 2와 3에 정리하였다.

Table 1. Chemical composition of Al-20Si-xFe alloys. (wt.%)

	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti	P	Al
Al-20Si	20.8	0.07	0.054	0.0009	0.05	0.023	<0.0004	bal.
Al-20Si-1Fe	21.07	0.96	0.067	0.0007	0.041	0.0181	<0.0004	bal.
Al-20Si-3Fe	22.62	2.79	0.009	0.0012	0.046	0.0165	<0.0004	bal.
Al-20Si-5Fe	22.34	4.88	0.219	0.0015	0.0789	0.091	<0.0004	bal.

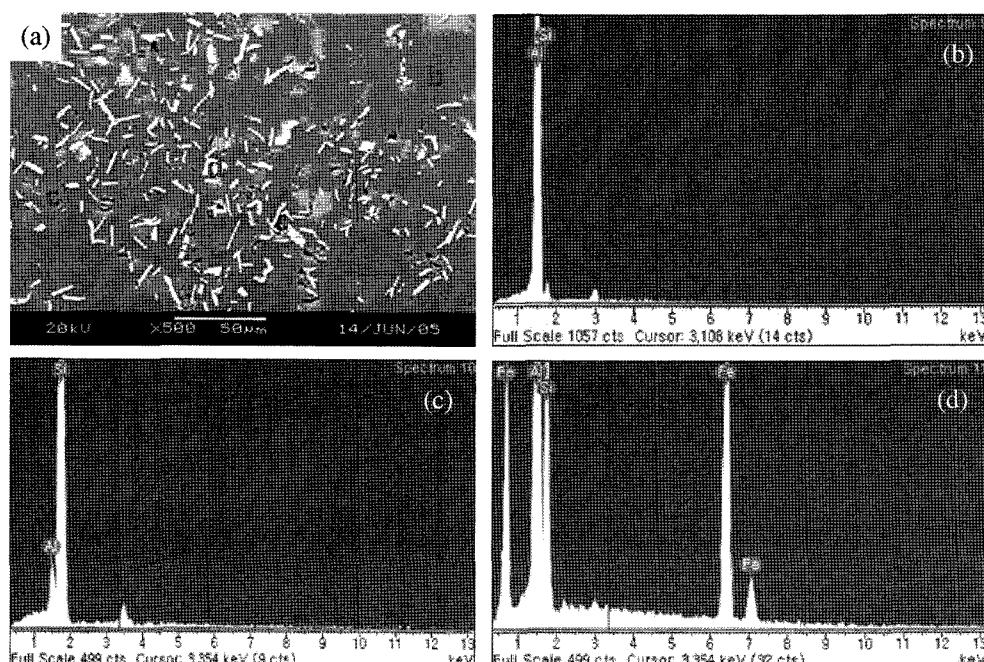


Fig. 1. SEM and EDX analysis of spray cast Al-20Si-5Fe alloy; (a) SEM image and EDX analysis of (b) matrix and (c) Primary Si and (d) AlSiFe Intermetallic compound.

Table 2. Experimental conditions for permanent mold casting and spray casting.

	Permanent mold casting	Spray casting
Melt temperature	800°C	800°C
Pouring temperature	750°C	800°C
Mold temperature	200°C	
Molten metal temperature	760~790°C	
Atomizing gas		N ₂
Gas pressure		6 atm
Flight distance of droplet		440~460 mm
Rotative velocity of the substrate		50 r.p.m

Table 3. Experimental conditions for the hot extrusion.

Diameter of extrusion die	50 mmΦ
Die angle	180°
Ram speed	2.2 mm/sec
Extrusion ratio	25:1
Die temperature	400 °C

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 분사주조한 Al-20Si-5Fe 합금 예비성형체를 주사전

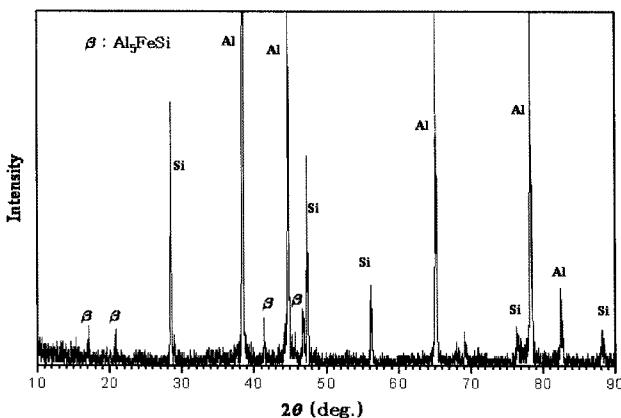


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of spray cast Al-20Si-5Fe alloy.

자현미경으로 관찰한 것으로 미세조직 사진 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 3가지의 정출상들이 형성됨을 알 수 있었으며, (b), (c), (d)는 정출되어 있는 정출상들에 대한 EDX로 분석한 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 1의 (c)에서 보는 바와 같이 blocky type의 정출상은 초정 Si이었으며, Fig. 1의 (d)에서 침상의 정출상은 Al, Si, Fe의 3원계 금속간화합물이 분석되었다. 이로부터 분사주조시 3원계의 금속간화화물이 형성됨을 알 수 있었다. Fig. 2는 분사주조한 Al-20Si-5Fe 합금 예비성형체를 XRD를 이용하여 상분석한 결과이며 분석 결과 Al, Si 및 Fe로 이루어진 3원계 금속간화합물은 β 상(Al_5FeSi)임을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 분사주조한 Al-20Si-xFe 합금 예비성형체의 미세조직사진이다. 급속증고의 영향으로 초정 Si는 대략 6~10 μm , 금속간화합물은 4~7 μm 의 크기로 미세하게 존재하였다. Fe

첨가량이 1, 3, 5wt.% 증가할수록 금속간화합물의 체적 분율은 1.75, 6.02, 9.11%로 증가하였으며 또한 초정 Si의 크기와 체적분율이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이상의 결과는 Al-Si 2원계 합금에 Fe를 첨가함으로써 초정 Si와 더불어 $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ 상의 금속간화합물이 새롭게 정출하게 되고 또한, 금속간화합물이 초정 Si보다 먼저 정출함으로써 Fe 첨가량이 증가함에 따라 금속간화합물의 체적분율은 증가하게 되고 초정 Si의 크기와 체적분율은 감소하는 것으로 여겨진다.

Fig. 4에는 분사주조한 Al-20Si-xFe 합금 압출제의 미세조직 사진을 나타내었다. Table 4의 압출전후의 영상분석결과에서 알 수 있듯이 열간압출 공정에 의해 초정 Si 및 금속간화합물이 물리적 파쇄에 의하여 미세하게 파쇄 되는 것을 확인할 수 있었으며 초정 Si 보다는 금속간화합물의 파쇄효과가 크고 고르게 분포하는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5는 금형주조한 Al-20Si-xFe 합금의 미세조직사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 분사주조보다는 상대적으로 느린 냉각 속도에 의해 약 200 μm 정도의 조대한 초정 Si 및 금속간화합물이 정출하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 열간압출한 금형주조 Al-20Si-xFe 합금의 미세조직 사진으로 열간압출 공정에 의해 조대한 정출상들이 파쇄되어 기계적 특성에 악 영향을 미치리라는 것을 예상할 수 있다.

Table 5에는 금형주조제의 영상분석 결과를 분사주조제와 비교하여 나타내었다. 초정 Si 및 금속간화합물 모두 분사주조를 통하여 그 크기가 아주 미세화 된 것을 확인할 수 있으며 초정 Si의 형상은 분사주조와 금형주조 모두에서 blocky type으로 정출하는 것을 알 수 있다. 또한 분사주조에 의하여 정출되는 Fe계 금속간화합물의 형상은 Fe첨가량의 증가에도 형상의 변화가 작은 반면 금형주조에 의해 정출되는 금속간화합물

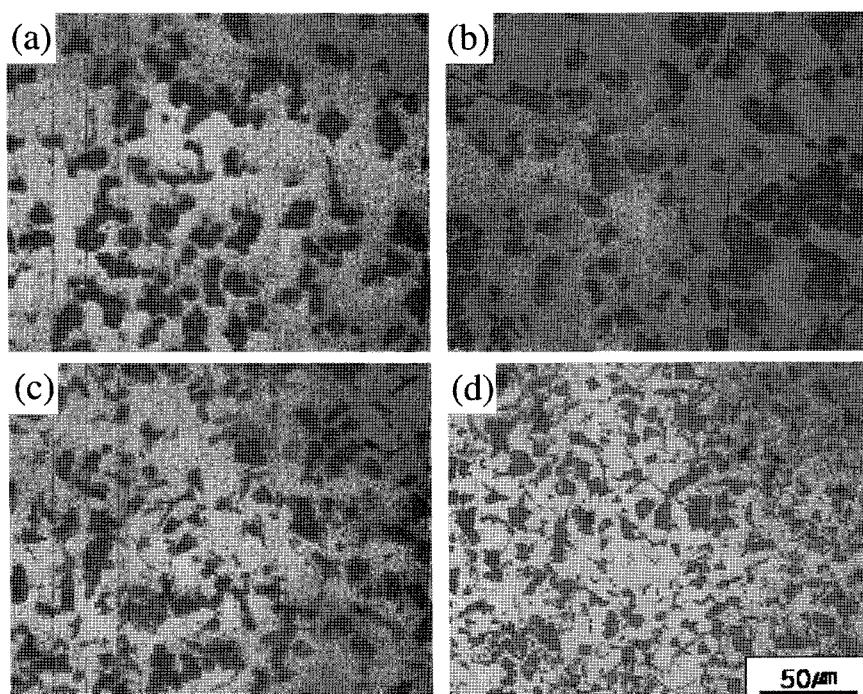


Fig. 3. Optical micrographs of as-spray-cast Al-20Si-xFe alloys; (a) Al-20Si alloy, (b) Al-20Si-1Fe alloy, (c) Al-20Si-3Fe alloy and (d) Al-20Si-5Fe alloy.

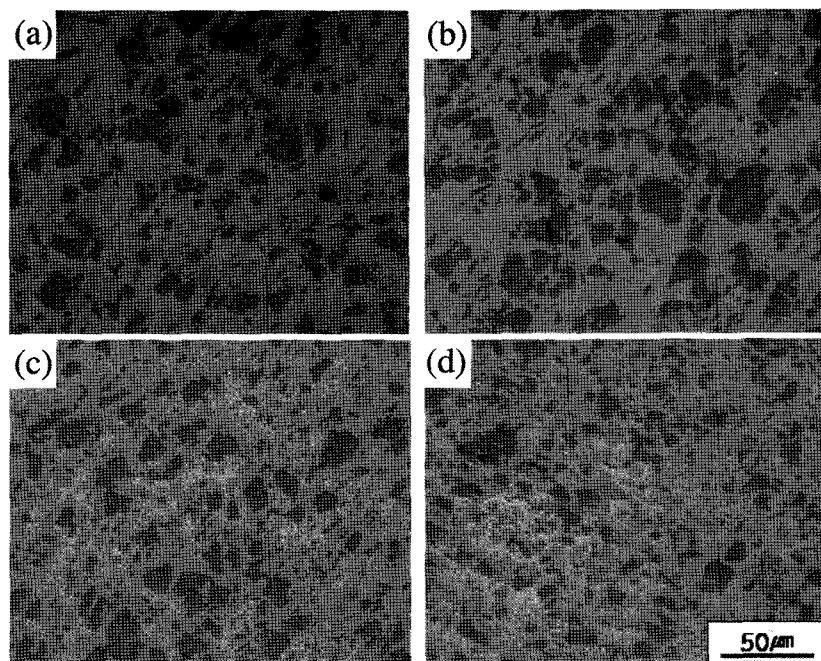


Fig. 4. Optical micrographs of extruded bars of spray cast Al-20Si-xFe alloys; (a) Al-20Si alloy, (b) Al-20Si-1Fe alloy, (c) Al-20Si-3Fe alloy and (d) Al-20Si-5Fe alloy.

Table 4. Image analysis of spray cast Al-20Si-xFe alloys.

(Unit: μm)	As spray cast			Hot extruded		
	Al-20Si-1Fe	Al-20Si-3Fe	Al-20Si-5Fe	Al-20Si-1Fe	Al-20Si-3Fe	Al-20Si-5Fe
Average primary Si size	9.63	6.93	6.03	3.28	2.77	2.72
Aspect ratio of average primary Si	1.85	1.77	1.91	2.24	2.14	2.09
Average intermetallic compounds	6.49	4.19	4.31	2.71	2.99	2.86
Aspect ratio of average intermetallic compounds	3.82	5.03	5.23	2.6	2.39	2.22
Volume fraction of intermetallic compounds (%)	1.75	6.02	9.11	-	-	-

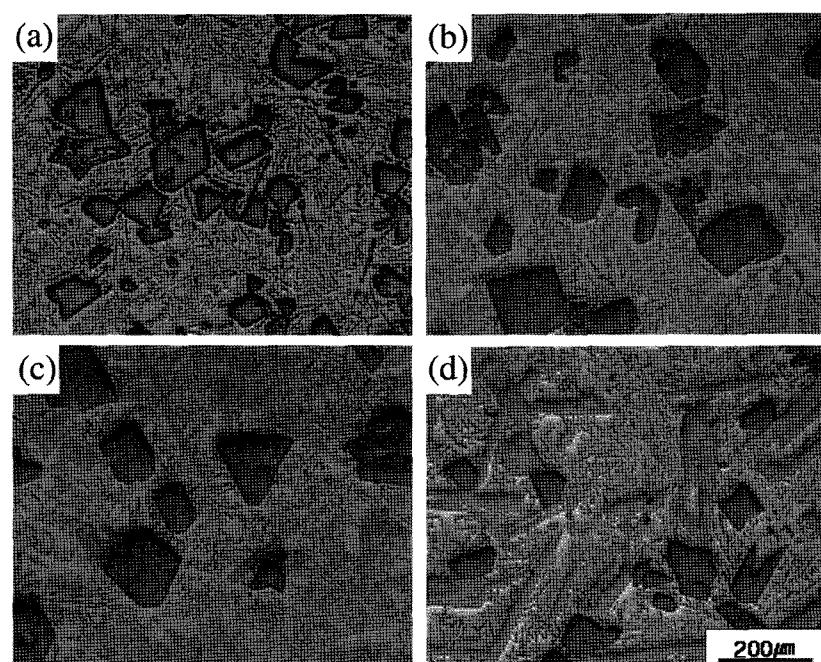


Fig. 5. Optical micrographs of permanent mold cast Al-20Si-xFe alloys ; (a) Al-20Si alloy, (b) Al-20Si-1Fe alloy, (c) Al-20Si-3Fe alloy and (d) Al-20Si-5Fe alloy.

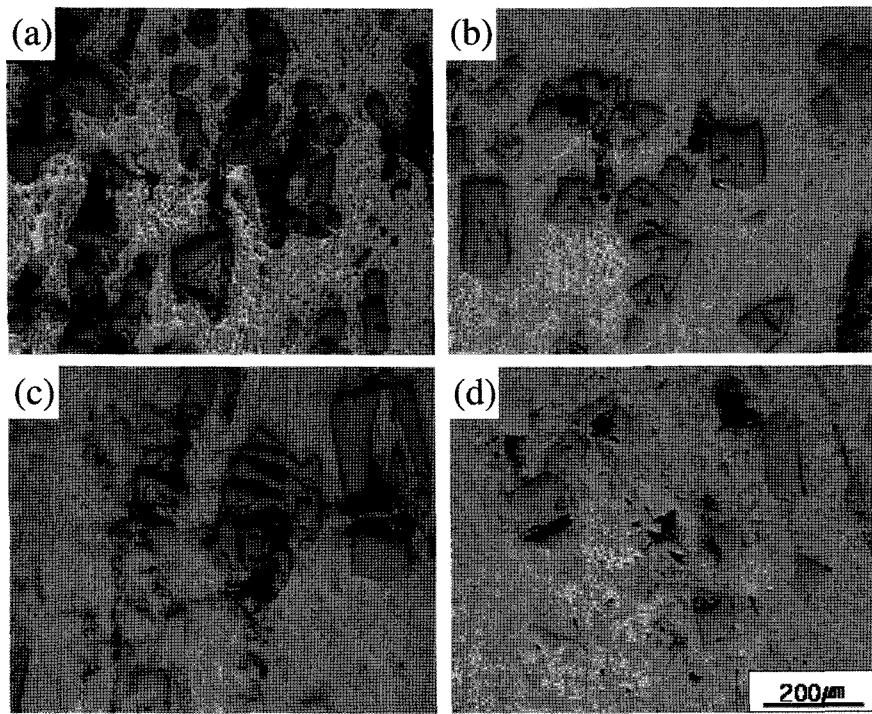


Fig. 6. Optical micrographs of extruded bars of permanent mold cast Al-20Si-xFe alloys; (a) Al-20Si alloy, (b) Al-20Si-1Fe alloy, (c) Al-20Si-3Fe alloy and (d) Al-20Si-5Fe alloy.

Table 5. Image analysis of permanent mold cast and spray cast Al-20Si-xFe alloys.

(Unit: μm)	As spray cast			Permanent mold cast		
	Al-20Si-1Fe	Al-20Si-3Fe	Al-20Si-5Fe	Al-20Si-1Fe	Al-20Si-3Fe	Al-20Si-5Fe
Average primary Si size	9.63	6.93	6.03	78.78	75.44	67.16
Aspect ratio of average primary Si	1.85	1.77	1.91	1.74	1.79	1.82
Average intermetallic compounds	6.49	4.19	4.31	50.39	60.91	81.40
Aspect ratio of average intermetallic compounds	3.82	5.03	5.23	37.14	6.06	5.76

의 형상은 Fe 첨가량이 증가하면서 needle like type에서 rectangular type으로의 형상 변화가 관찰되었다.

Fig. 7은 분사주조 압출재와 금형주조 압출재의 인장특성을 그래프로 나타내었다. 분사주조 압출재가 금형주조 압출재보다 우수한 인장특성을 나타내었으며 분사주조 압출재의 인장강도는 Fe 첨가량이 증가함에 따라 증가하였으며 특히, Al-20Si-5Fe 합금의 경우 Al-20Si 2원계 합금보다 인장강도가 100 MPa 정도 큰 값을 나타내었다. 반면 금형주조 압출재의 인장강도는 Fe 첨가량이 증가하면서 오히려 감소하는 것을 알 수 있었다.

일반적인 제조방법에서는 Fe를 첨가하면 인장강도 등 기계적 성질이 저하되는 것이 다수 보고되고 있다.[4] 그러나 본 연구에서 Fe를 첨가함에도 불구하고 인장강도가 증가하는 이유는 Fe의 첨가에 따라 형성되는 금속간화합물뿐만 아니라 초정 Si 이 미세하게 기지조직에 전반에 걸쳐 고르게 분포하고 있기 때문에 이들 정출상에 집중되는 응력을 분산시키는 분산강화기구와 관계된 것으로 여겨진다.

Fig. 8은 분사주조 압출재와 금형주조 압출재의 열팽창계수 (CTEs: Coefficient of thermal expansion)를 측정한 그래프이다. 분사주조 압출재의 CTEs가 전 온도구간에서 금형주조 압

출재보다 더 낮은 CTEs를 나타냈으며, 또한 Fe 첨가량이 증가할수록 CTEs가 더 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 CTEs가 초정 Si 및 금속간화합물의 형상 및 크기, 체적분율, 분포에 따라 영향을 받는 것으로 초정 Si과 금속간화합물의 크기가 작고, 금속간화합물의 체적분율이 증가할수록 더 낮은 CTEs를 나타내 우수한 열적 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 초정 Si과 금속간화합물 등의 정출상이 미세화되고 금속간화합물의 체적분율이 증가 할수록 AI 기지 조직과 정출상의 계면면적이 증가함에 기인하는 것으로 여겨진다.

이러한 현상은 P. J. Whithers 등이 제안한 Cutting and Welding 모델에서 설명하고 있는 Al-Si 합금의 CTEs 특성과 일치하고 있다.[5]

따라서 재료의 열팽창현상은 온도가 상승할 때 원자 진동에 의한 위치에너지 증가로 인하여 원자간 거리가 증가하는 현상으로, 전위의 존재는 이러한 재료의 열팽창 현상을 완화시킬 수 있는 일종의 완충재 역할을 할 수 있을 것으로 기대되며, 재료 전반에 걸쳐 전위 밀도가 높을수록 더 낮은 CTEs를 가질 것으로 예상된다. 즉, 정출상이 미세하게 정출할수록 정출상과 기지와의 계면에 전위 밀도가 높은 탄/소성영역이 증가함으

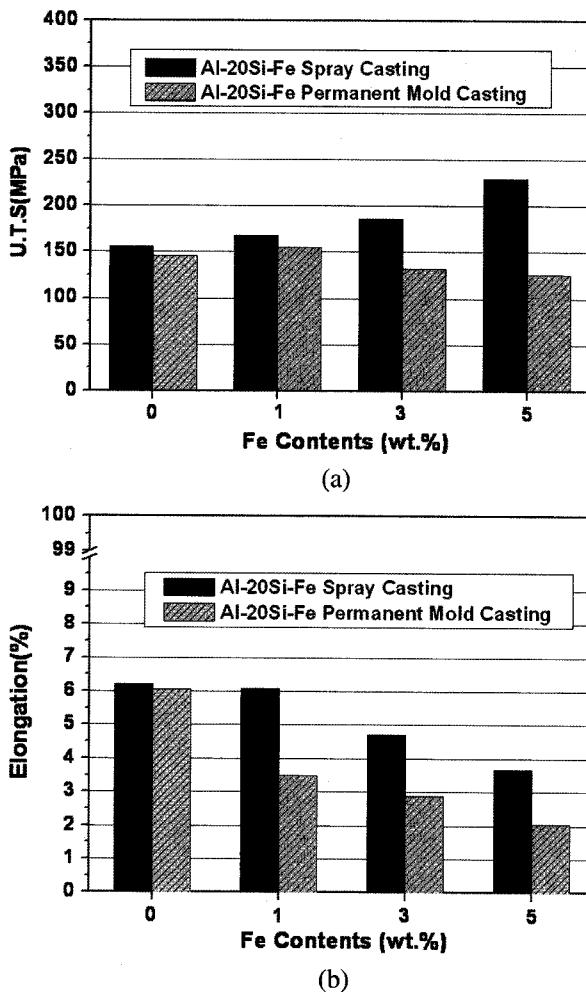


Fig. 7. Variation of tensile properties of spray cast and permanent mold cast Al-20Si-xFe alloys with Fe contents; (a) Ultimate tensile strength and (b) Elongation.

로써 CTEs는 낮아지는 것으로 여겨진다.

4. 결 론

분사주조한 과공정 Al-20Si-xFe 합금의 기계적 및 열적 특성에 미치는 정출상의 영향에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al-20Si-xFe 합금은 초정 Si 뿐만 아니라 침상의 Fe계 금속간화합물 β 상(Al_3FeSi)이 함께 정출하였다.

(2) 분사주조를 이용할 경우 금형주조에 비하여 미세한 초정 Si과 금속간화합물이 정출하였으며 분포 또한 고른 것을 알 수 있었다. 또한 모든 시험편에서 열간압출 공정 중 초정 Si과 금속간화합물의 물리적 파쇄에 의한 미세화 효과를 확인 할 수 있었다.

(3) 초정 Si과 금속간화합물이 미세하여 점에 따라 조대한 초정 Si과 금속간화합물에 집중되는 응력이 고르게 분산됨으로써 인장강도와 연신율이 향상되는 것을 알 수 있었다.

(4) 분사주조 압출재가 금형주조 압출재보다 더 낮은 열팽창 계수를 나타냈으며, 초정 Si과 금속간화합물 정출상이 미세하게

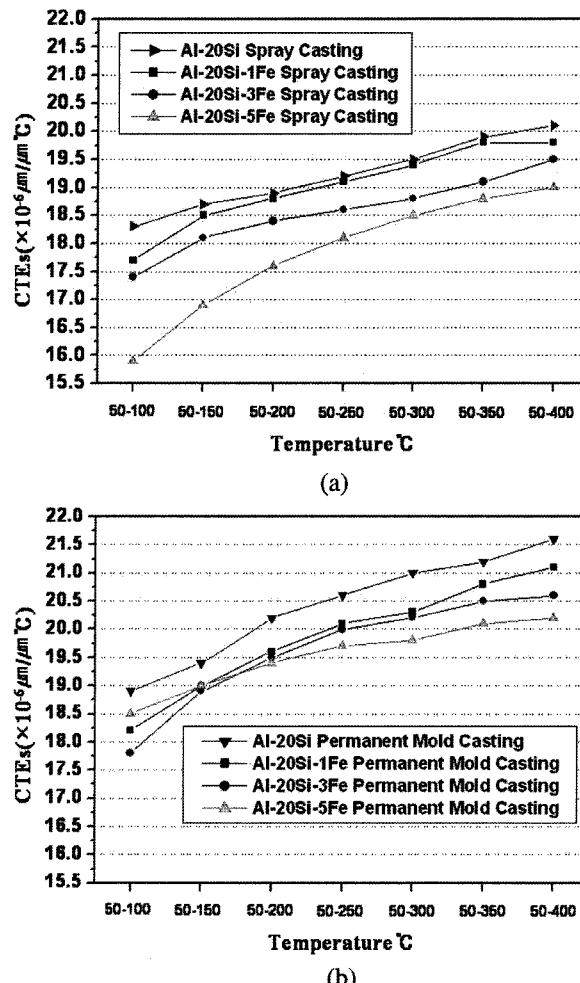


Fig. 8. Variation of CTEs with temperature for (a) Spray casting and (b) Permanent mold casting.

정출할수록 정출상과 AI 기지와의 계면 면적이 증가하게 됨으로써 열팽창계수는 낮아지는 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. K. Young and T. W. Clyne: J. Mat. Sci., "Add to marked items Journal Article a powder-based approach to semisolid processing of metals for fabrication of die-castings and composites" 21 (1986) 1057-1069.
- [2] J. E. Gruzleski and B. M. Closset: The American Foundrymen's Society Inc., "The treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys" 107-126.
- [3] H. S. Kim: Mater. Sci. Eng. A, "Yield and compaction behavior of rapidly solidified Al?Si alloy powders" 251 (1998) 100-105.
- [4] William F. Smith: "Structured and properties of Engineering alloys" (1981).
- [5] C.-H. Kim, D.-H. Joo, and M.-H. Kim: Journal of the Korea Foundrymen's society "Effect of Si Particle Size on the Thermal Properties of Hyper-eutectic Al-Si alloys" 23(4) (2003) 195-203.