

|||||||  
**論 文**  
 |||||

## 과공정 Al-Si합금의 열팽창거동과 기계적 성질에 미치는 미세조직의 영향

박종성 · 이정근 · 김명호

### Effects of Microstructure on the Thermal Expansion Behavior and Mechanical Properties of the Hypereutectic Al-Si Alloy

Chong-Sung Park, Jeong-Keun Lee and Myung-Ho Kim

#### Abstract

The effects of changes in microstructure of Si phase on the thermal expansion coefficients(CTEs) and tensile properties of the hypereutectic Al-Si foundry alloy(A390) were investigated experimentally. Specimens were prepared by various fabrication processes, such as a permanent mold casting, a squeeze casting and a spray casting process, and subsequently hot-extruded. CTEs of the spray-cast specimen were found to be about 10% lower than those of the permanent mold-cast specimen, and the CTEs of the hypereutectic Al-Si alloy(A390) were changed proportionally with the size of Si phase. Ultimate tensile strength of the spray-cast and hot-extruded specimen was dramatically improved about 100% with improved elongation, compared to that of permanent mold-cast specimen. These improvements are mainly attributed to the reduction in size and aspect ratio of the brittle Si phase, and the elimination of the microvoids/porosities formed during casting. (Received February 28, 1997)

#### 1. 서 론

주물의 열적, 기계적 성질은 응고동안 화학조성과 냉각속도의 상호영향에 의해서 주로 결정된다[1]. 따라서 이러한 성질들은 주물의 제조시 형성되는 미세조직적인 양상에 의해 주로 의존될 수 있다. 특히 과공정 Al-Si합금의 경우 미세조직상에 나타나는 초정 과공정 Si의 형상, 크기 및 분포는 주물의 응고시 냉각속도, 불순물의 존재 및 개량처리제와 같은 다양한 조건들에 의하여 크게 변화될 수 있다. 이러한 미세조직적인 차이는 결국 주물의 기계적성질에 결정적인 영향을 미칠 수 있다[2, 3].

한편 복합재료의 열팽창계수는 유효탄성률(effective moduli)에 의해서 영향을 받는다고 알려져 있다[4, 5]. 유효탄성률은 구조적인 형상(structural morphology)에 주로 영향을 받으며, 열팽창계수는 이러한 구조적인 형상(structural morphology)의 효과에 의해 민감한 변화를 보이게 된다.

현재까지 합금과 복합재료의 열팽창특성에 대한 많

은 연구결과들이 발표되었지만 이들의 대다수는 특정 합금성분의 첨가정도에 따른 변화거동과 제2상 체적분율의 변화에 따른 거동에 관한 것들이다[6-8]. 그러나 일정한 체적분율하에서 제2상입자의 형상과 크기와 같은 미세구조적인 변화의 효과가 열팽창 거동에 미치는 영향에 대하여는 거의 알려져 있지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 과공정 Al-Si주물용 합금(A390)에 있어서 Si상의 형상, 크기 및 분포가 인장강도, 연신율 및 열팽창계수(CTE)에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 금형주조법, 용탕단조법, 분사주조법과 같은 각 주조공정들의 특징을 이용하여 다양한 미세조직을 얻었으며, 또한 CTE는 기지내에 존재하는 미소기공에 의해서 영향을 받을 수 있기 때문에[9], 주조동안 도입될 수 있는 미소기공들을 최소화하기 위해서 열간압출도 도입하였다.

#### 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 재료는 초정Si의 개량처리제인

Table 1. Chemical composition of the premodified Al-Si alloy(A390) used(wt.%).

| Si    | Cu   | Fe   | Mg   | Ni   | Ti   | P    | Al       |
|-------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 17.34 | 4.85 | 0.17 | 0.65 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | balanced |

P가 0.004wt.%첨가된 주물용 A390알루미늄합금[10]이었으며, 발광분광분석법으로 측정된 시험편의 성분 분석 결과는 Table 1과 같이 나타났다.

### 2.1 시편제조

각 주조공정의 경우 Al-Si합금(A390) 5 kg씩을 흑연도가니에 장입한 후 전기로에서 용해하였다. 모든 용탕은 주입전에 약 5분동안 질소가스를 이용하여 탈가스시켰다. 금형주조시와 용탕단조시 금속주형의 온도는 200°C로 유지시켰으며, 가압조건은 금형주조의 경우는 중력하에서, 용탕단조시에는 1000 kgf/cm<sup>2</sup>의 가압력을 유지시켜 각각 100 mm × 50 mmφ의 주물품을 얻을 수 있었다.

또한 제2상인 Si상이 기지(matrix)를 차지하고 있는 면적률이 85~95%정도[11]인 A390합금의 경우 Si상의 형상 및 균일한 미세화를 유도하기 위해서 이에 적절한 분사주조법을 도입하였다. 분사주조시 용탕의 온도는 850°C, 주입온도는 800°C로 상기의 주조공정들과 동일하게 유지시켰으며 20 kgf/cm<sup>2</sup>의 고압 질소가스를 이용하여 분무하였다. 이때 비산되는 액적들을 효율적으로 적층시키기 위해서 분무화지점에서 350 mm 떨어진 위치에 세라믹기판을 설치하였다. 여기서 150 mmφ × 60 mmH의 성형체를 얻을 수 있었다. 각 주조공정들에 대한 실험조건은 Table 2와 같다.

### 2.2 열간압출

주조된 시편의 기지내에 존재하는 미소기공들을 최

소화하기 위한 방법으로 열간압출공정을 도입하였다. 각 시편들은 표면산화물을 제거하기 위해서 표면가공을 하였으며, 압출다이의 마찰감소 및 압출유동성을 향상시키기 위해서 알루미늄 파이프에 canning 후 470 °C에서 압출비 25:1로 압출하였다. 최종적으로 얻어진 압출재의 직경은 10 mmφ였으며, 열간압출시 실험조건은 Table 3과 같다.

### 2.3 열처리

압출재는 모두 495 °C에서 4시간동안 용체화처리 하였으며, 20 °C의 물에 퀘칭 후 175 °C에서 6시간동안 인공시효처리를 행하였다.

### 2.4 미세조직관찰

최종적으로 열처리된 압출재는 1 μm의 diamond paste로 연마한 후 modified Keller's solution으로 20 °C에서 약15초 동안 에칭하여 광학현미경(Model HFX-IIA, Nikon, JAPAN)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다.

초정 Si 및 공정 Si의 형상비(aspect ratio), 크기 및

Table 3. Experimental conditions for the hot extrusion

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Diameter extrusion die | 50 mmφ      |
| Die angle              | 180 °       |
| Ram speed              | 2.2 mm/sec. |
| Extrusion ratio        | 25:1        |
| Die temperature        | 400 °C      |
| Billet temperature     | 470 °C      |
| Extrusion pressure     | 670 MPa     |

Table 2. Experimental conditions for each of the casting processes.

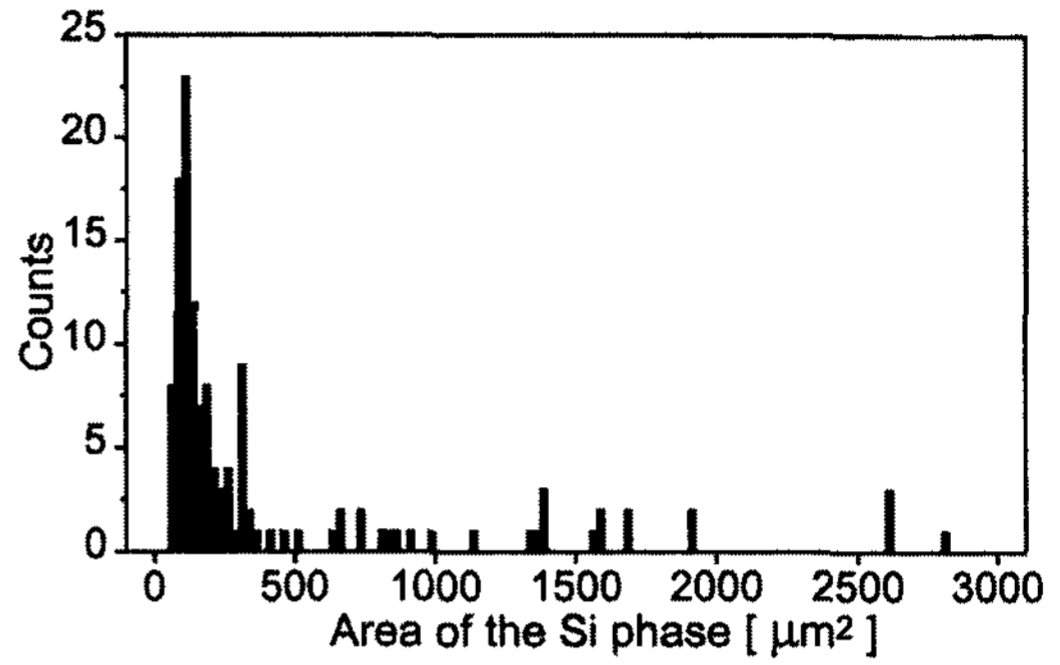
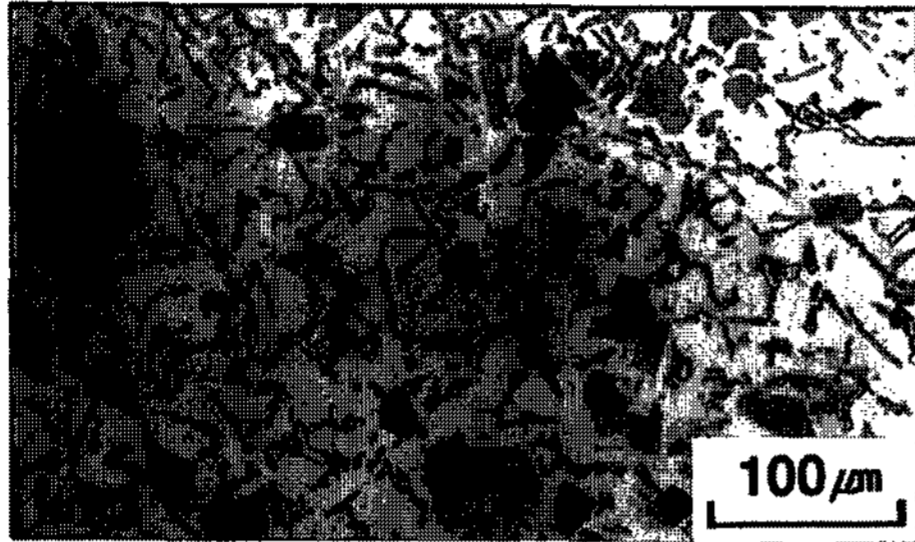
|                            | Permanent Mold Casting | Squeeze casting           | Spray Casting          |
|----------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| Melt Temperature           | 850 °C                 | 850 °C                    | 850 °C                 |
| Pouring Temperature        | 800 °C                 | 800 °C                    | 800 °C                 |
| Mold Temperature           | 200 °C                 | 200 °C                    | -                      |
| Applied Pressure           | -                      | 1,000 kgf/cm <sup>2</sup> | -                      |
| Pressure Loading Time      | -                      | 40 sec.                   | -                      |
| Atomization Gas            | -                      | -                         | Nitrogen               |
| Atomization Pressure       | -                      | -                         | 20 kgf/cm <sup>2</sup> |
| GMR                        | -                      | -                         | 1.6                    |
| Flight Distance of Droplet | -                      | -                         | 350 mm                 |
| R.P.M. of the Substrate    | -                      | -                         | 50 r.p.m.              |

분포와 같은 미세조직에 대한 정량화 작업은 영상분석기를 이용하여 수행하였으며, Si상의 형상이 불규칙하므로 그 크기를 대비하는데 있어서 포착된 상의 면적을 측정하여 이용하였다.

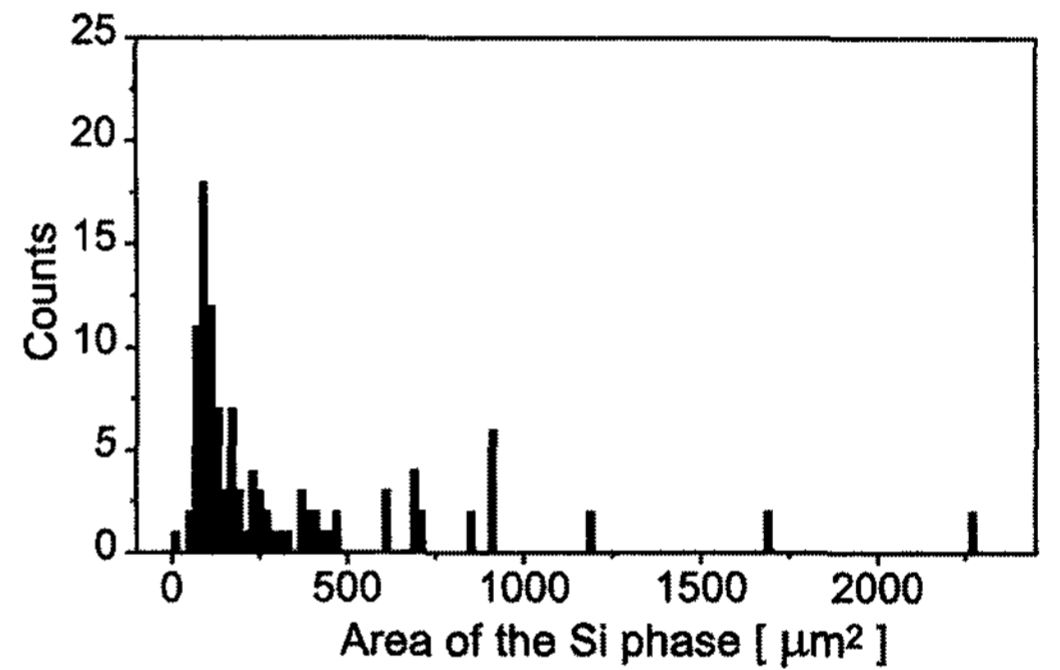
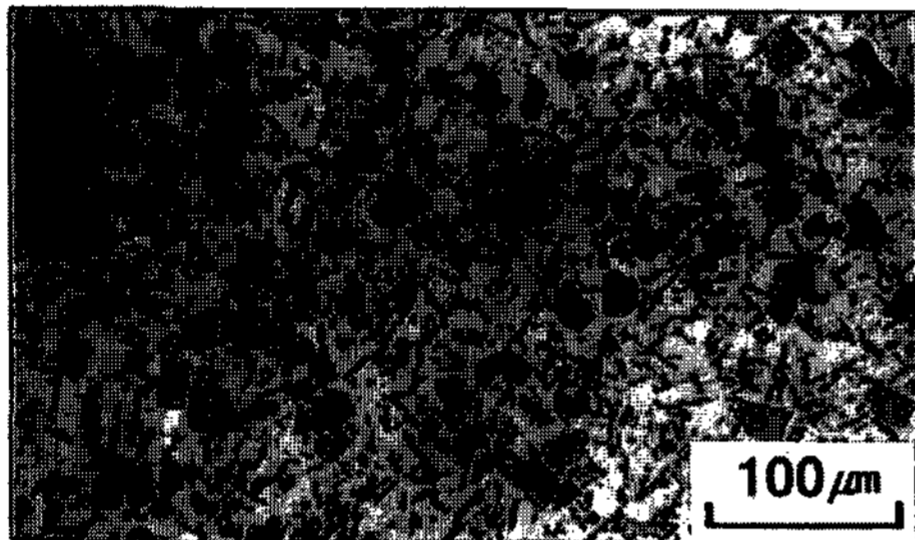
### 2.5 Thermal Mechanical Analysis

TMA 측정용 시험편은 20 mm × 5 mmφ의 크기로 가공하여 표면은 1 μm의 diamond paste로 연마하였다. 특히 선열팽창계수의 측정오차를 줄이기 위해서 시료

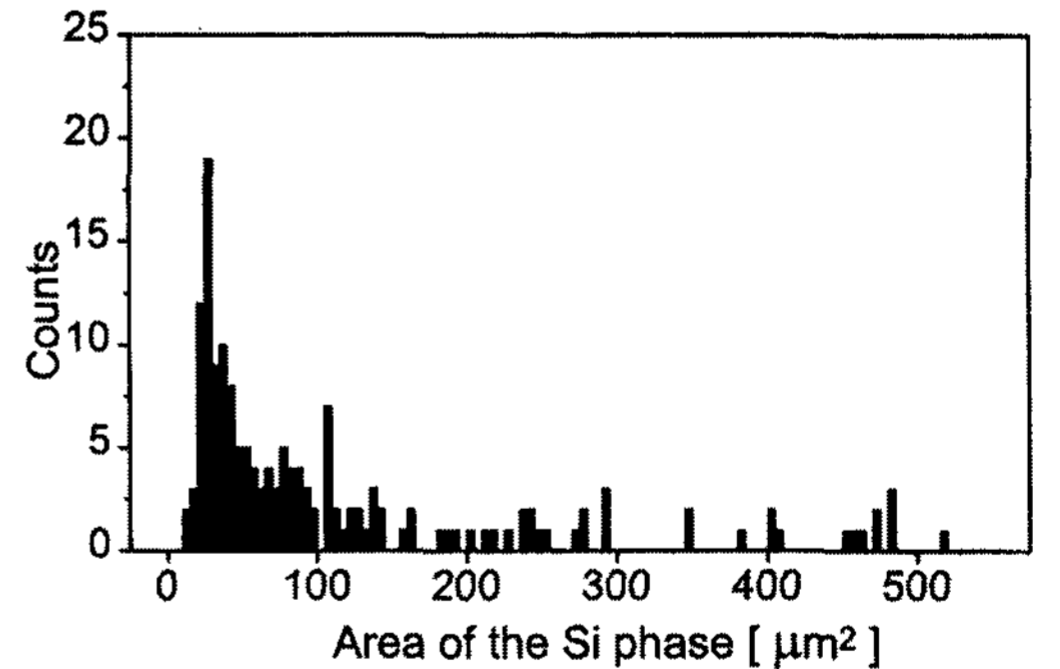
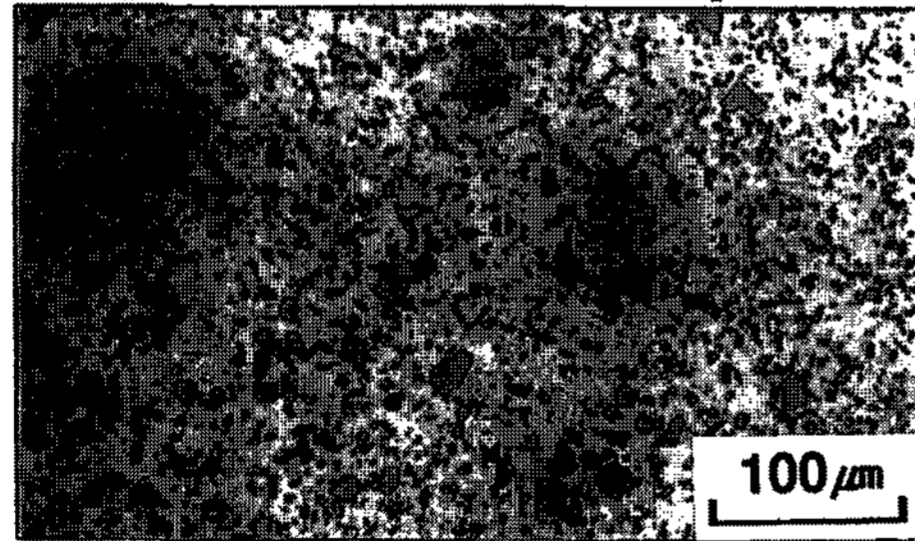
(a) Permanent mold-cast specimen



(b) Squeeze-cast specimen



(c) Squeeze-cast & hot-extruded specimen



(d) Spray-cast & hot-extruded specimen

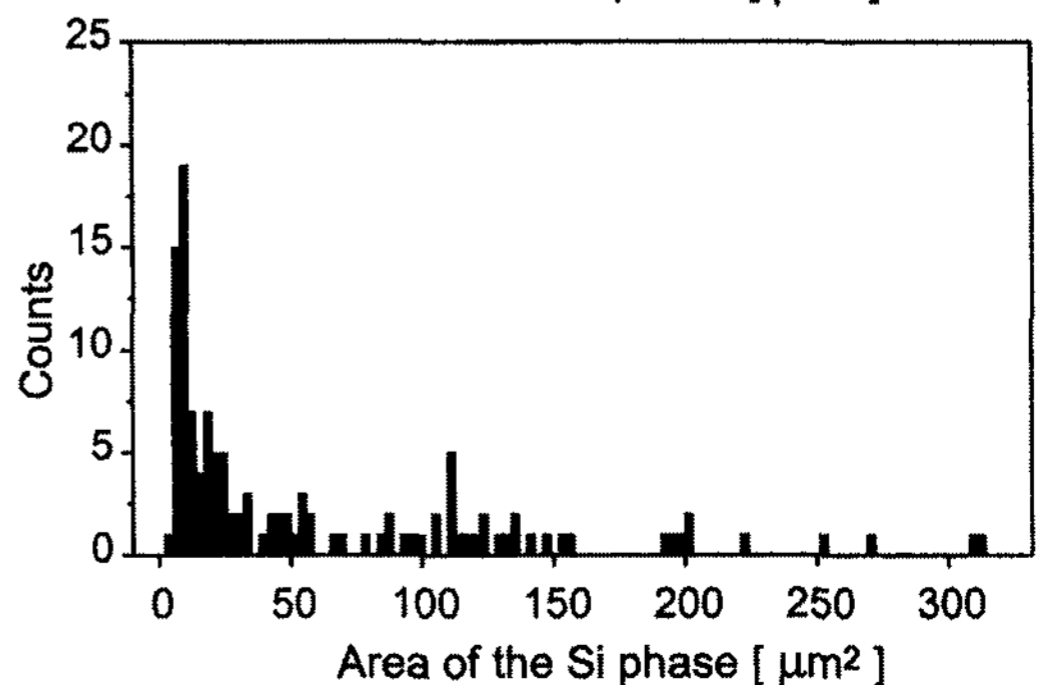
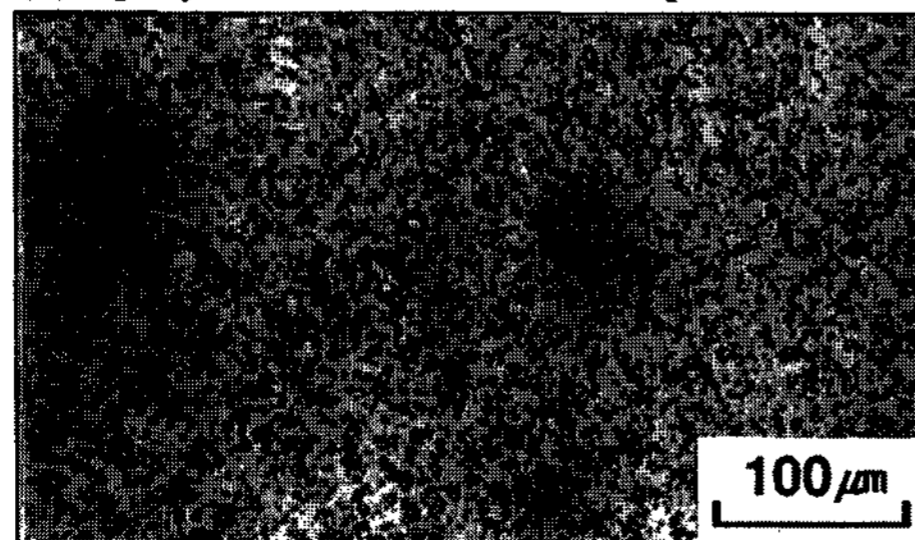


Fig. 1. Typical images and size distributions of the Si phase measured by Image Analyzer.

들이 수평을 유지할 수 있도록 시료의 양끝단에 대한 정밀연마를 행하였다. 선열팽창계수는 Thermal Mechanical Analyzer(Model TMA-50, Shimadzu, JAPAN)를 이용하여 상온에서 300 °C까지 측정을 시도하였다. 열팽창계수의 측정시 로(furnace)는 대기중에서 3 °C/min.의 승온속도를 유지하도록 설정하였다. 시간과 온도의 변화에 따른 길이변화는 표준 팽창 탐침기에 부착된 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)에 의해서 측정되었으며, 20~300 °C까지의 열팽창계수(CTE)를 분석하기 위해서 TMA standard data analysis software를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

매우 큰 체적분율의 공정상을 포함하는 Al-Si합금의 각종 열적, 기계적성질들은 결정립의 크기에 큰 영향을 받지 않으며, 이들의 성질을 주로 결정하는 것은 취약한 공정상이다[12]. 따라서 본 연구에서는 Si상의 형상, 크기 및 분포를 관찰하였다.

Fig. 1(a)~(d)는 각 주조공정에 따른 전형적인 광학 현미경 조직과 영상분석에 의해 측정된 Si상의 크기 분포를 보여준다. 이에 의하면 중력금형주조한 시험편은 미세조직상에서 조대한 초정Si과 공정Si상이 관찰되었으며, 이에 반하여 분사주조한 시험편의 경우는 알루미늄기지에 미세하고 globular-type을 갖는 Si상들이 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 주로 합금의 응고동안 더 빠른 냉각속도에 기인되며, 또한 큰 운동량을 갖는 액적들이 연속적으로 기관상에 충돌되어 고상과 액상의 재배열이 발생하기 때문으로 생각할 수 있다[13]. 또한 열간압출동안 조대하고 길쭉한 Si상들의 기계적인 파쇄와 모서리(edge)들의 소멸에 의해서 Si상들은 더욱 미세화될 수 있다[14]. 중력금형주조 및 용탕단조한 시험편의 경우 Si상의 크기분포는 비교적 광범위하게 나타났다. 그러나 열간압출동안 용탕단조시 응고동안 형성된 망상의 공정Si상이 파쇄되면서 훨씬 더 미세하고 크기분포가 현저히 축소됨을 알 수 있다. 영상분석을 통하여 면적률로 측정된 Si상의 최빈크기는 중력금형주조한 시험편의 경우 113  $\mu\text{m}^2$ 으로 나타났으며, 용탕단조한 시험편의 경우는 90  $\mu\text{m}^2$ , 용탕단조 후 열간압출한 시험편에서는 28  $\mu\text{m}^2$ , 분사주조 후 열간압출한 시험편은 10

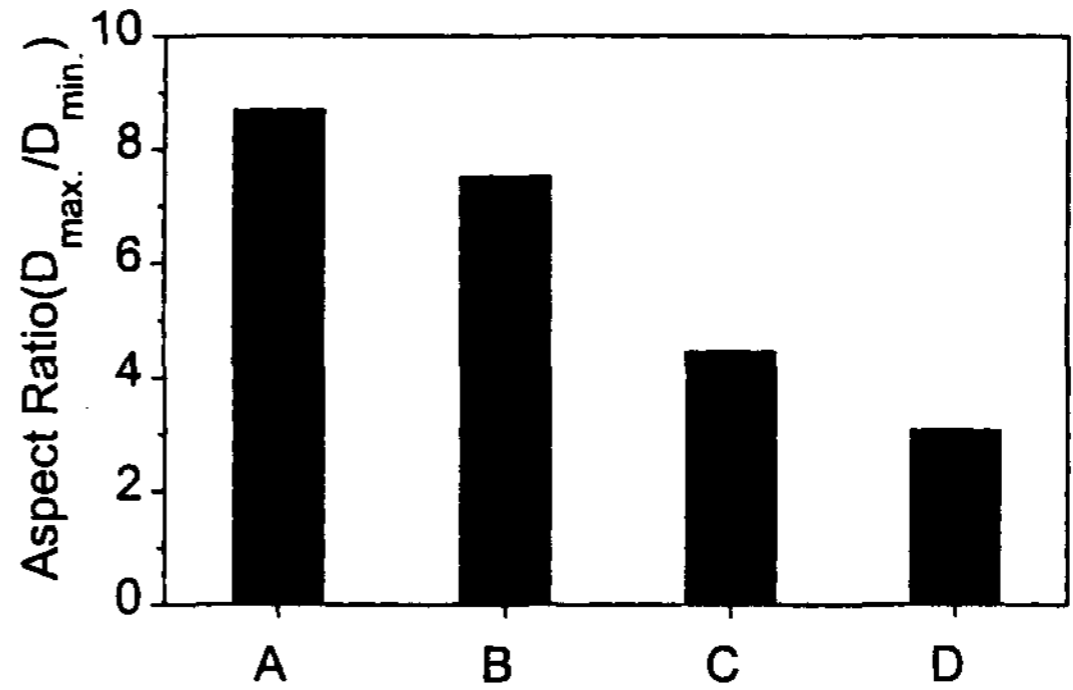


Fig. 2. Average aspect ratio of the Si phase. A: Permanent mold-cast specimen, B: Squeeze-cast specimen, C: Permanent mold-cast & hot-extruded specimen, D: Squeeze-cast & hot-extruded specimen, E: Spray-cast & hot-extruded specimen

$\mu\text{m}^2$ 로 나타났다.

Fig. 2는 각 시험편에서 영상분석된 Si상의 평균형상비(average aspect ratio)를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 분사주조 후 열간압출한 시험편이 다른 시험편들에 비하여 구형화에 가까운 형상비를 나타냈다. 또한 Si상의 형상비는 Si상의 크기가 감소함에 따라서 작아짐을 알 수 있다. 즉, Si상의 형상은 불규칙한 rod형상에서 blocky형상 그리고 globular형상으로 변화됨을 알 수 있다. 이러한 미세조직적인 변화는 주조동안 빠른 냉각속도와 열간압출동안 기계적인 파쇄의 상호복합된 효과에 의해서 나타난 것으로 생각된다.

#### 3.2 기계적 성질

각 주조공정에 의해서 제조된 시험편들의 미세조직적인 차이는 결국 각 시험편들의 기계적인 성질의 차이로 나타나게 된다. Fig. 3은 상온에서 인장시험한 결과로서, 각 시험편에 대한 최대인장강도(UTS)와 연신율을 나타내었다. 기대했던 것처럼, 미세하고 균일한 분포를 갖는 분사주조 후 열간압출한 시험편이 다른 시험편에 비하여 더 향상된 특성을 나타내었다. 중력금형주조한 시험편의 경우 최대 인장강도가 210 MPa로 낮은 값을 나타낸 반면, 분사주조 후 열간압출한 시험편의 경우 430 MPa로 약 100%이상 향상되었다. 이는 취약한 Si상이 미세화될 뿐만 아니라 globular형상으로 더욱 균일하게 분포됨으로서 인장시 Si상에 의한 응력집중 및 균열의 핵생성 효과가 최소한으로 억제되었기 때문으로 사료된다.

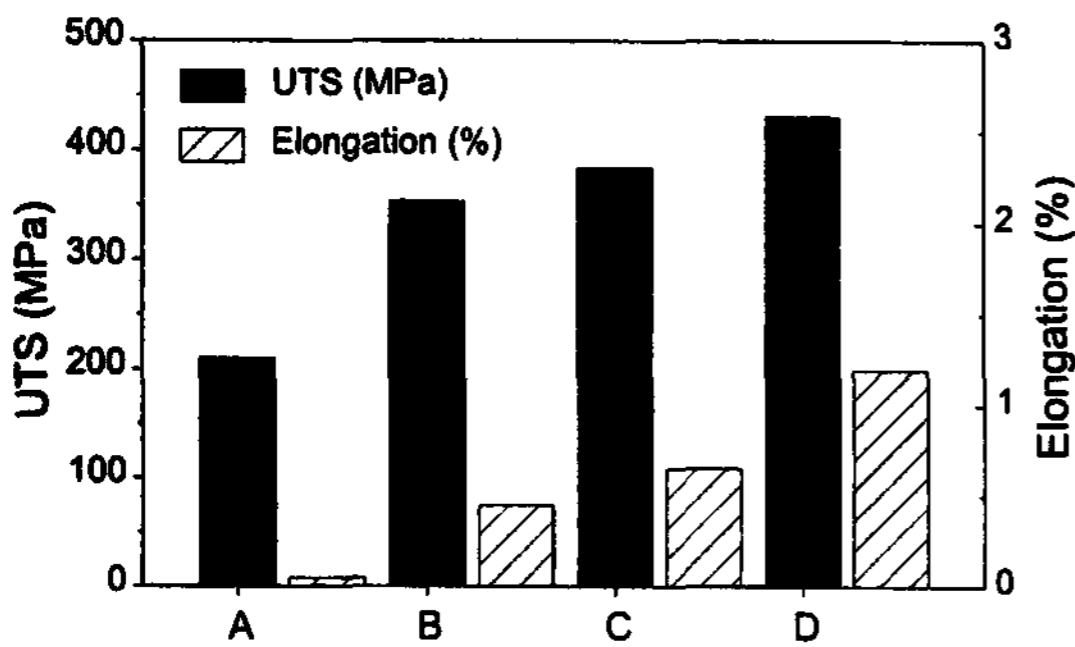


Fig. 3. Ultimate tensile strength and elongation of the specimens. A: Permanent mold-cast specimen, B: Squeeze-cast specimen, C: Squeeze-cast & hot-extruded specimen, D: Spray-cast & hot-extruded specimen

과공정 Al-Si합금(A390)의 연신율은 조대하고 취약한 Si상의 존재로 인하여 매우 낮다. 그러나 취약한 Si상의 미세화를 통하여 연신율이 향상될 수 있다. Fig. 3은 또한 cross head speed를 1 mm/min.으로 고정하고, 40 mm gage length에 부착된 extensometer에 의해 측정된 연신율을 나타낸 것이며, 중력금형주조한 시험편의 경우 파괴연신율이 0.05%에서 용탕단조한 시험편의 경우는 0.45%, 그리고 분사주조 후 열간압출한 시험편의 경우는 1.2%로 측정되었다. 연신율의 향상도 역시 취약한 Si상의 형상비와 크기의 감소에 영향을 받으며, 또한 주조동안 형성된 미소기공이 열간압출동안 제거됨으로써 향상된 것이라 사료된다.

인장성질에 대한 Si상의 크기 영향을 고찰하기 위해, Si상의 크기에 따른 최대인장강도 및 파괴연신율의 변화를 도시하여 본 결과 Fig. 4와 같이 나타났다. 최대인장강도와 파괴연신율은 Si상의 크기가 감소됨

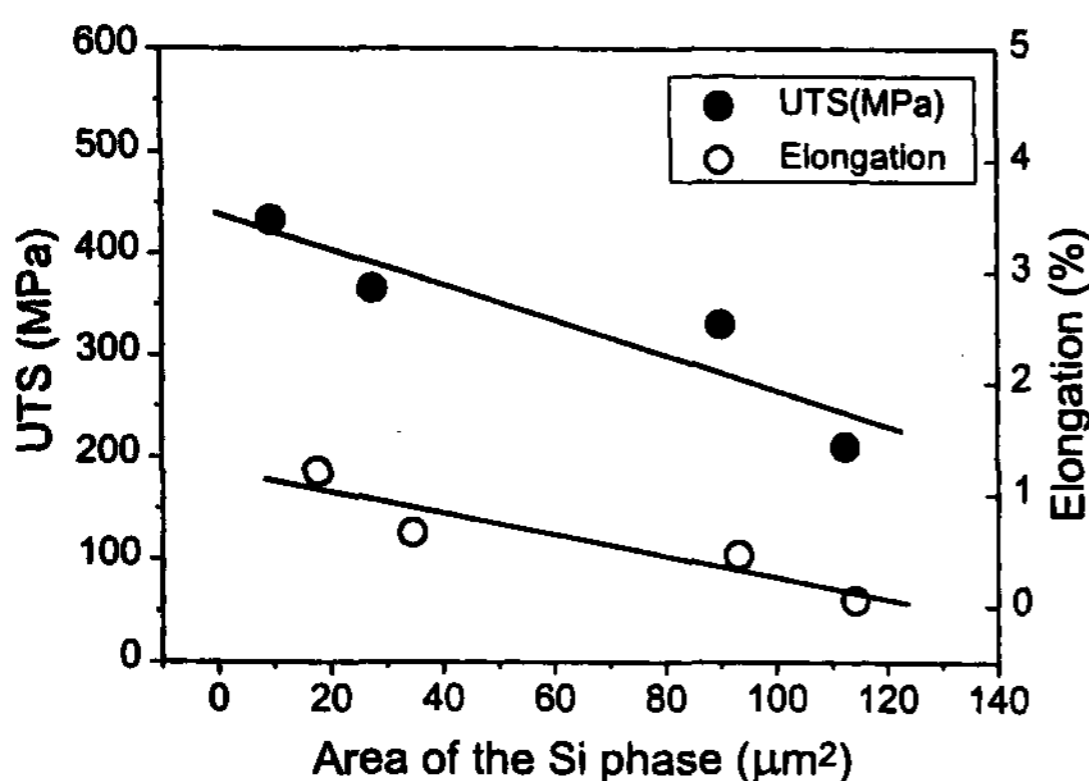


Fig. 4. Variation of UTS and elongation with the size of Si phase.

에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 이는 첨가되는 강화입자가 항복응력을 크게 증가시키는 복합재료의 경우와 유사하게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 즉, 복합재료는 낮은 변형률에서 훨씬 더 높은 가공경화속도를 가지며, 이는 주로 첨가되는 입자에 의해 강화될 수 있다. 낮은 변형속도하에서 가공경화속도는 입자크기에 의존되며, 더 미세한 입자가 첨가될수록 항복응력은 더욱 높아지게 된다[4].

### 3.3 열팽창 거동

각 주조공정에 의해서 제조된 시험편들에 대하여 측정된 선열팽창계수를 Fig. 5에 나타내었다. 분사주조 후 열간압출한 시험편의 열팽창계수는 금형주조한 시험편에 비하여 약 10%정도 낮게 나타났으며, 또한 용탕단조한 시험편의 경우는 측정된 전 온도범위에 대하여 금형주조한 시험편 보다도 더 낮게 나타남을 알 수 있다.

최근 보고된 바에 의하면, 합금재료와 복합재료의 열팽창계수는 제2상의 체적분율과 형상에 의해서 주로 변화된다고 알려져 있다. 그래서 Si상의 형상과 크기와 같은 미세조직적인 특성이 열팽창 거동과 관련될 것이라고 사료되었다. 따라서 이를 실험적으로 고찰하기 위해서 Si상의 크기에 따른 20~300 °C 온도구간에 대한 열팽창계수의 변화를 도시하여 보았다(Fig. 6). 그 결과 과공정 Al-Si합금(A390)의 열팽창계수는 Si상의 크기에 따라 비례적으로 변화됨을 알 수 있었다. 분사주조 후 열간압출한 시험편이 낮은 열팽창특성을 나타내는 것은 응고동안 빠른 냉각속도에 기인

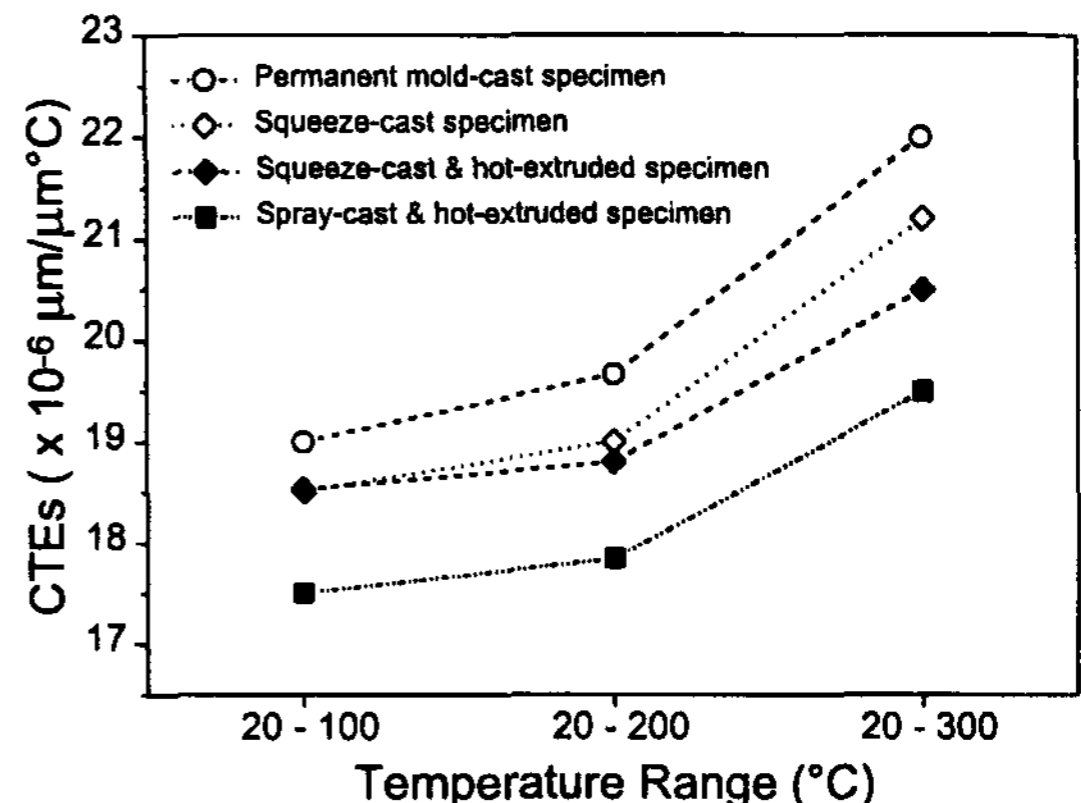


Fig. 5. Thermal expansion coefficients of the hypereutectic Al-Si alloy(A390).



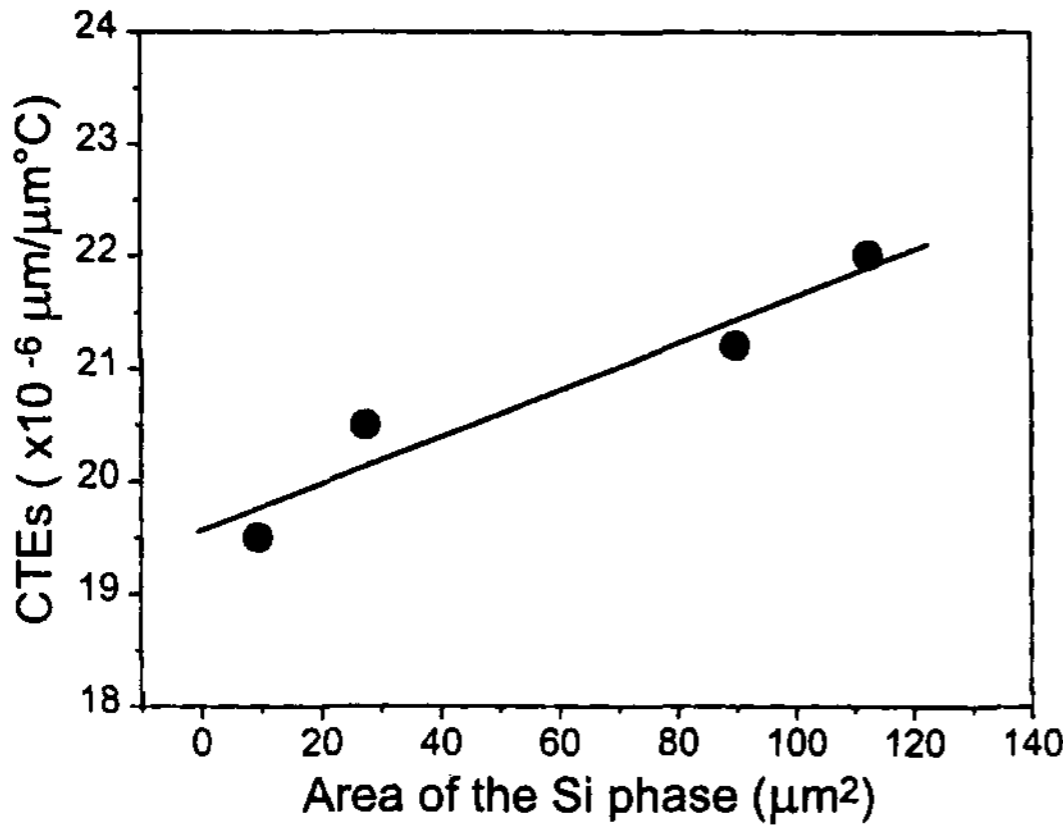


Fig. 6. Changes of CTEs with the size of Si phase.

한 입상(granular morphology)의 Si상이 미세하고 균일한 분포로 존재하기 때문으로 사료된다. 또한 열간압출된 시험편의 경우 열팽창계수의 값은 열간압출동안 기계적인 파쇄에 의한 Si상의 미세화와 균일분포에 기인되어 더욱 감소된 것으로 여겨진다.

#### 4. 결 론

과공정 Al-Si주물용 합금(A390)에 있어서 Si상의 형상, 크기 및 분포가 인장강도, 연신율 및 CTE에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 그결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 분사주조 후 열간압출한 시험편의 Si상의 크기는 다른 주조공정을 통하여 제조된 시험편들에 비하여 더 미세하고 더욱 균일하게 분포되었으며, Si상의 형상비는 Si상의 크기가 감소됨에 따라 작게 나타나는 경향을 보였다. 미세조직상의 이러한 변화는 주조동안 빠른 냉각속도와 열간압출동안 Si상의 기계적인 파쇄의 복합된 효과에 의한 것으로 고찰되었다.

2. 분사주조 후 열간압출한 시험편의 최대인장강도는 중력금형주조한 시험편에 비하여 100%이상 향상되었으며, 파괴연신율은 0.05%에서 1.2%로 향상되었다. 이는 취약한 Si상의 크기와 형상비의 감소에 주로 기인되며, 또한 주조동안 형성된 미소기공의 제거에

의해서 인장특성이 향상되었다.

3. 분사주조 후 열간압출한 시험편의 열팽창계수는 중력금형주조한 시험편에 비하여 약 10%정도 낮게 측정되었으며, 과공정 Al-Si합금(A390)의 열팽창계수는 Si상의 크기에 따라 비례적으로 변화되었다.

#### 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. J. Srolovitz and S. M. Yalisove, etc., *Met. Trans. A*, 26 (1995), 1805
- [2] R. Elliott, *CAST METALS*, 1 (1988), 29
- [3] B. E. Carlson and R. D. Pehlke, *AFS Trans.*, 97 (1989) 903
- [4] S. Elomari, R. Boukhili and D. J. Lloyd, *Acta metall.*, 44 (1996), 1873
- [5] R. R. Tummala and A. L. Friedberg, *J. of Appl. Phys.*, 41, (1970), 5104
- [6] S. J. Feltham, B. Yates, and R. J. Martin, *J. of Mater. Sci.*, 17 (1982), 2309
- [7] A. A. Fahmy and A. N. Ragai, *J. of Appl. Physics*, 41 (1970), 5108
- [8] N. Laws, *J. of Composite Materials*, 22 (1988), 396
- [9] T. Takei and H. Hatta, etc., *Mater. Sci. Eng. A*, 161 (1993), 213
- [10] D. H. Joo and M. H. Kim, *Proc. of 3rd Asian Foundry Congress*, ed. by Z. H. Lee, C. P. Hong and M. H. Kim, The Korean Foundrymen's Society, Korea, (Nov. 1995), 116
- [11] Y. B. Sun and C. R. Loper, *Proc. of 2nd Inter. Conf. on Molten Aluminum Processing*, AFS, Florida, (Nov.1989), 117-1
- [12] G. K. Sigworth, *AFS Trans.*, 91 (1983), 7
- [13] Y. Wu, W. A. Cassada, and E. J. Lavernia, *Metall. Trans. A*, 26 (1995), 1235
- [14] K. B. Muller and A. A. Grigoriev, *The 4th Inter. Conf. on Aluminum Alloys*, Vol.1, Ed. by T.H. Sanders and E. A. Starke, The Georgia Inst. of Tech., (1994), 134