한국기계가공학회지, 제17권, 제3호, pp.102～108(2018.06) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp.102~108(2018.06) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.3.102

# 자동차 경량소재 AlSiCu 합금의 기계적 특성을 개선하기 위한 최적의 이중 열처리공정

박상규*, 김정석**,#
*조선대학교 첨단소재공학과, **조선대학교 재료공학과

# Optimal Double Heat Treatment Process to Improve the Mechanical Properties of Lightweight AlSiCu Alloy

Sang-Gyu Park*, Chung-Seok Kim**,#
*Department of Advanced Material and Engineering, Chosun University,
**Department of Materials Science and Engineering, Chosun University
(Received 18 April 2018; received in revised form 21 April 2018; accepted 1 May 2018)

## ABSTRACT

The objective of this study is to develop the mechanical properties of an AlSiCu aluminum alloy using the two-step solution heat treatment. The microstructure of the gravity casting specimen represents a typical dendrite structure with a secondary dendrite arm spacing (SDAS) of 40 um. In addition to the Al matrix, a large amount of coarsen eutectic Si phase, $Al_2Cu$ intermetallic phase, and Fe-rich phases is generated. The eutectic Si phases are fragmented and globularized with the solution heat treatment. The $Al_2Cu$ intermetallic phase is also resolutionized into the Al matrix. The $2^{nd}$ solution temperature at 525°C may be an optimal condition to enhance the mechanical properties of the AlSiCu aluminum alloy.

**Key Words :** Two-step solution(이단계 고용화), AlSiCu, Dendrite(수지상정), Intermetallic(금속간화합물)

## 1. 서 론

세계 자동차 시장의 개발 방향은 친환경과 에너지 절약에 그 관심이 집중되고 있다. 따라서 자동차의 유해가스 배출량을 감소시키고 연비를 향상시킬 수 있는 자동차 경량화에 대한 연구가 절실하다. 오랫동안 Al 합금은 자동차 경량화 재료로 연구되어 왔으며 이미 상당부분 대체재료로 적용되고 있다[1-3].

# Corresponding Author : chs2865@chosun.ac.kr
Tel: 010-4876-3613, Fax: 062-230-7197

Al-Si계 합금은 주조용 합금으로 널리 사용되고 있으며 Cu의 첨가로 유동성과 주조성이 우수하여 엔진 블럭, 실린더헤드, 피스톤 등에 사용된다[4-10, 11-16]. Si를 첨가하는 것은 내마모성을 증가시키는 영향이 있으며 열적 팽창은 낮추고 열전달 계수를 높게 하는 영향이 있다[10,13]. 특히, Al-Si 합금에서의 Cu 첨가는 열처리에 의한 2차상의 석출이 일어난다고 알려져 왔으며 이로인해 기계적 성질이 현저히 향상되는 것으로 알려져 있다[17-20]. 지금까지 이러한 열처리와 시효 처리 동안 석출물의 거동과 미세구조 변화에 따른 기계적 특성에 대한 많은 연구가 진행되었다. 하지만 아직까지도 자동

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

차용 부품 소재를 경량화하기 위해서 다양한 연구를 통한 적용부품에 요구되는 강도와 연성 등의 물리적 특성 향상 연구가 미진한 상태이다.

열처리는 고용화 열처리와 시효 처리의 최적화를 통해 Al-Si 모재 합금의 기계적 성질을 높이기 위한 가장 중요한 공정요소이다[17,21-23]. AlSiCu 합금계에서 Si 상의 모양, 크기, 그리고 2차 상간 거리는 제품의 기계적, 열적 성질을 변화시키는 큰 원인이 된다. 기계적 성질을 향상시키는 방법은 Si 상의 크기나 모양을 조절하는 것이다. 기계적 성질에 대한 개선으로 열처리 공정을 통해 $Al_2Cu$와 같은 금속간 화합물 상의 분해, 구상화, 조대화, 분해에 의한 공정 Si 상의 형태 등의 영향을 폭넓게 연구하였다[24,25].

경량화 자동차를 위해 요구되어진 강도, 연성, 등에 관한 물리적 성질 개선의 연구는 완전히 만족스럽지 않다. 그러므로 본 연구에서는 경량화 AlSiCu 합금을 주조하고 고용화 열처리를 통하여 인장강도뿐만 아니라 연신율을 향상시킬 수 있는 최적의 이중 열처리 공정을 연구하고자 하였다.

## 2. 실험방법

실험에 사용된 Al 합금은 열처리 전과 후의 미세조직과 기계적 특성을 평가하기 위하여 잉곳으로 중력주조 되었으며 합금의 조성은 유도결합 플라즈마 질량 분석기를 사용하여 분석하였고 결과는 Table 1에 중량비로 나타내었다.

주조된 Al 합금에 적용된 1차 및 2차 용체화 조건은 Table 2에 상세히 나타내었다. 본 연구에서의 용체화 온도는 $Al_2Cu$상의 초기 용융을 피하기 위해 주의 깊게 설정하였다. 1차 용체화 온도는 $Al_2Cu$상의 용융온도 이하인 485±1℃ 와 495±1℃로 선정하고 2차 용체화 온도는 $Al_2Cu$ 상의 용융온도 이상인 515±1℃ 와 525±1℃로 열처리를 수행하였다. 용체화처리 온도는 기존연구와 참고문헌을 참고하여 결정하였다.

미세조직 분석과 기계적 성질의 평가를 위한 시편은 잉곳에서 기계절단 하였으며 시편을 콜드 마운팅 한 후 Keller's 용액을 사용하여 에칭 후 광학현미경으로 관찰하였으며, 석출상은 주사전계방출형 전자현미경, 에너지 분산 분광법, 전자 탐침 미량 분석기을 이용하여 파장분산분광법을 통하여 구성 원소들의 정성 및 정량 분석하였다. 결정구조 분석을 위해 X-선 회절분석을 수행하였다.

**Table 1 Chemical composition of AlSiCu alloy (wt%)**

| Alloy | Si | Cu | Fe | Mn | Mg | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AlSiCu | 6.01 | 2.09 | 1.03 | 0.19 | 0.12 | Bal. |

**Table 2 Schedule of solution heat treatment**

| Specimen | 1st solution | - | 2nd solution | - | Quenching |
|---|---|---|---|---|---|
| AC | as-cast | - | - | - | Water |
| T4A | 485℃ | 4 h | - | - | Water |
| T4A2 | 485℃ | 4 h | 515℃ | 8 h | Water |
| T4A3 | 485℃ | 4 h | 525℃ | 8 h | Water |
| T4B | 495℃ | 4 h | - | - | Water |
| T4B2 | 495℃ | 4 h | 515℃ | 8 h | Water |
| T4B3 | 495℃ | 4 h | 525℃ | 8 h | Water |

이론적인 열역학 계산을 통하여 AlSiCu 합금의 평형상태도를 평가하였다. 이론적 계산을 위한 상용프로그램은 Thermo-calc를 사용하였다.

기계적 성질의 평가를 위한 경도 시험은 미소경도시험기를 사용하였으며 1 kg의 하중으로 유지시간 5 s씩 각 시험편 당 20회 측정하였다. 인장 시험용 시험편은 KS인장규격 14B호를 기초로 하여 평행부거리 16.5 mm인 판 형태로 제작하였으며, 인장시험기를 이용하여 상온에서 1 mm/min의 변형속도 조건에서 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 Al 합금의 표면 미세구조를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 주조직후 AlSiCu 시험편의 미세조직은 40 μm의 이차 수지상 간격을 가진 전형적인 수지상정 구조를 나타내었다. AlSiCu 합금에는 두 개의 주요한 Fe-Si 금속간 화합물이 존재하고 이들은 $\beta$-Fe 상으로 알려진 $Al_5FeSi$ 상과 $\alpha$

-Fe 상으로 알려진 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$이다. 전자는 형태학적으로 판상으로 미세조직상 바늘모양으로 나타난다. $\beta$-Fe 상은 취성이 강해서 주조재의 기계적 특성을 저하시키는 요인이 된다. 후자는 치밀한 형태를 보이며 주조공정에서 균열생성을 야기하지 않는다. 하지만 $\beta$-Fe 와 다르게 $\alpha$-Fe 상은 고용화 조건에 따라서 조성과 형태가 변화하기도 한다. 이러한 다양한 상들의 정성 분석을 위해 에너지 분산분광분석을 수행한 것을 Fig. 2에서 보여준다. 에너지 분광분석 결과 $\alpha$-Al 기지와 중국활자 형상의 $\alpha$-$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, 침상의 $\beta$-$Al_5FeSi$, 판상의 $\theta$-$Al_2Cu$ 그리고 조대한 공정 Si 들이 관찰되었다. Fig. 2(b)에서는 고용화 열처리 전 밝은 회색의 조대한 $\theta$-$Al_2Cu$ 상을 관찰 할 수 있다.

Fig. 2(c)에는 485℃와 515℃에서 이중 고용화 열처리한 시편의 표면조직 모습으로 침상의 $\beta$-$Al_5FeSi$와 공정 Si 그리고 $\theta$-$Al_2Cu$ 상을 모두 관찰할 수 있다. 하지만 고용화 전과 다르게 공정 Si가 분절되고 구형이되며 $\theta$-$Al_2Cu$역시 분절 및 재용해의 흔적을 볼 수 있다. 따라서 이 부분을 확대하여 관찰하였다. 무엇보다도 Fig. 2(d)는 확대된 모습으로 밝은 흰색의 조대한 $\theta$-$Al_2Cu$ 상이 분절되며 Al 기지내로 일부 용해 되어가는 것으로 판단된다.

Table 3은 Al 합금의 기지에 존재하는 다양한 상들의 EDS 분석 결과와 각각의 화학적 조성을 나타내었다. Fig. 3은 주조직후 시험편의 각각의

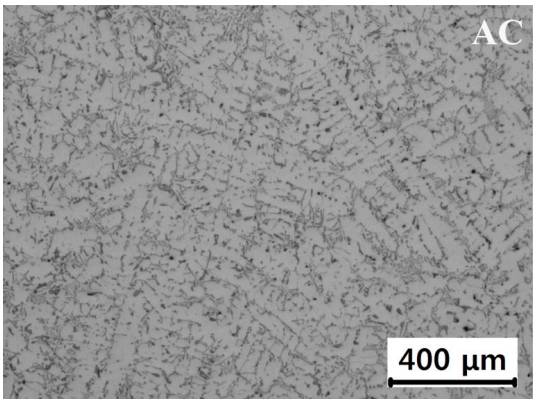


**Fig. 1 Optical micrograph of AC AlSiCu alloy showing typical dendrite microstructure**

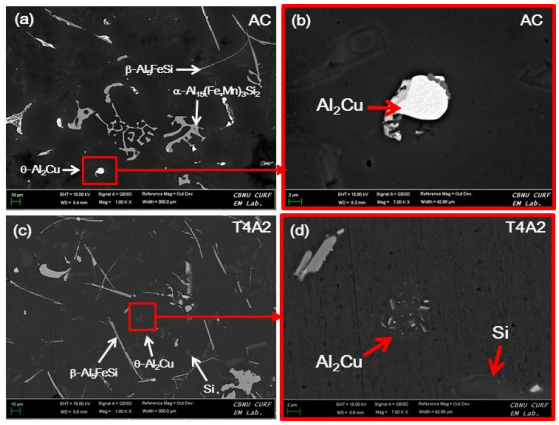


**Fig. 2 Microstructure of AlSiCu alloy; (a) BSE image showing various phases of AC, (b) BSE image of $Al_2Cu$ of AC, (c) BSE image showing various phases of T4A2 and (d) BSE image of $Al_2Cu$ redissolution**

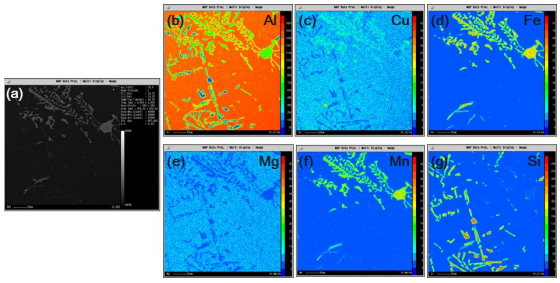


**Fig. 3 The EPMA element distribution of AC AlSiCu sample**

**Table 3 Chemical composition of the main intermetallic phases in AC AlSiCu alloy(wt%)**

| Alloy | Si | Cu | Fe | Mn | Al | phase |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ | 10.7 | - | 22.0 | 8.6 | 56.6 | α |
| $Al_5FeSi$ | 17.5 | - | 23.1 | 2.6 | 56.6 | β |
| $Al_2Cu$ | - | 51.3 | - | - | 48.6 | Θ |

상을 EPMA를 통해 분석한 결과이다. 중국활자형상의 $\alpha$-$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, 침상의 $\beta$-$Al_5FeSi$, 판상의 $\theta$-$Al_2Cu$, Si 상 그리고 기지내에 각각의 원소(Al, Cu, Fe, Mg, Mn, Si) 분포를 나타낸다. 중국활자모

양의 $\alpha$-Fe 상에는 Fe와 Mn이 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 막대모양의 공정 Si상에는 Si만이 분석되었고 바늘모양의 $\beta$-Fe 상에는 Fe와 Si가 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 1차 열처리와 2차 열처리 AlSiCu 합금의 표면 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과를 보여준다. 일반적으로 열처리 온도와 시간이 증가 하면서 Si 입자의 평균 면적은 감소하고 형상비는 증가한다. 고용화 열처리 후 공정 Si 입자들이 Al 기지내로 재용해 될 때 Si 입자들은 구상화 되어진다. Table 4는 고용화 열처리 후 실리콘 상에 대한 정량적인 평가 결과를 나타내었다. 공정 Si 입자들의 형상비는 주조직후와 비교하면 1차 고용화 열처리후 T4A와 T4B에서 대략 130% 증가하였다. 고용화처리의 경우 1차 고용화 온도가 515℃인 경우 단일 고용화보다 약 60% 증가하고 525℃의 경우는 100% 이상 증가하였다. 또한 알루미늄 합금에서 취성의 Si 입자의 모양이 구상화 되면서 구조재료의 피로 특성과 연성에서 연신율과 인성을 향상 시킬 것으로 생각된다. 고용화 열처리와 상의 변화는 X-선 회절 분석을 이용하였다. Fig. 5는 $\alpha$-$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$와 $\beta$-$Al_5FeSi$, Al의 부피율이 너무 적게 발견되었기 때문에 Si와 $Al_2Cu$의 피크만이 발견되어진 것을 보여준다. 결과적으로 $2\theta$=41.94 와 $2\theta$=46.81 에서 $\theta$-$Al_2Cu$회절 피크는 발견되어졌지만 피크의 높이가 비슷하지만 고용에 따른 부피분율의 감소가 약간있어 보인다. 회절 피크의 경우 주조상태에서 나타나는 회절피크는 고용화가 진행되면서 피크가 관찰되지 않아 기지로 재고용되고 있음을 알 수 있다. 하지만 이에대한 추가적인 면밀한 분석이 필요하다. $Al_2Cu$상은 보통 고용화 열처리 동안 Al 기지내로 용해되어진다. 기지안에 $Al_2Cu$상의 용해는 Al 격자내로 Cu원자의 과포화를 유도한다. 결과적으로 격자가 변형되므로 고강도 AlSiCu 알루미늄 합금의 기지부의 기계적 강도가 증가할 것이라고 판단된다.

Fig. 6은 열처리된 Al 합금의 마이크로 비이커스 경도 시험 결과를 나타내었다. 열처리 후의 합금 경도는 AC와 비교할 때 약 30%가 증가하였다. 이는 잉곳 내에 석출된 조대한 $\theta$-$Al_2Cu$ 입자들이

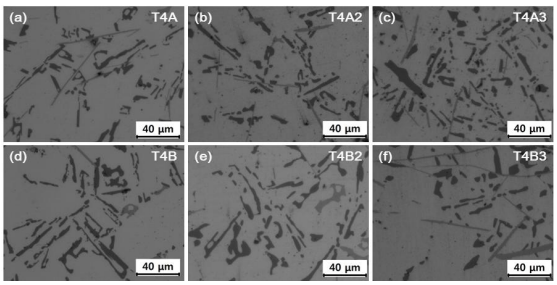


**Fig. 4 Microstructure of AlSiCu alloys after different solution heat treatment ; (a) T4A, (b) T4A2, (c) T4A3, (d) T4B, (e) T4B2, (f) T4B3**

**Table 4 Silicon particle characteristics of the alloy after solution heat treatment**

| Measurement | AC | T4A | T4A2 | T4A3 | T4B | T4B2 | T4B3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mean area($um^2$) | 47.1 | 31.4 | 29.6 | 26.1 | 31.7 | 25.8 | 20.6 |
| Aspect ratio | 0.16 | 0.37 | 0.59 | 0.77 | 0.37 | 0.62 | 0.83 |

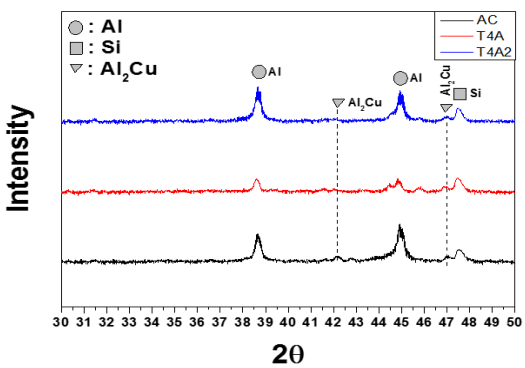


**Fig. 5 XRD profiles of AlSiCu alloy showing diffraction peaks of typical solution heat treatment**

석출 강화에 기여하지 못하고 용체화 처리 후에 Cu 원자들이 기지 내에 고용됨에 따라 고용 강화 효과에 기여하여 경도 값이 증가된 것으로 판단된다. Fig. 6 (a)에서 금속간 화합물, 공정 Si상 그리고 Al 기지의 모든 부분을 한꺼번에 측정한 결과

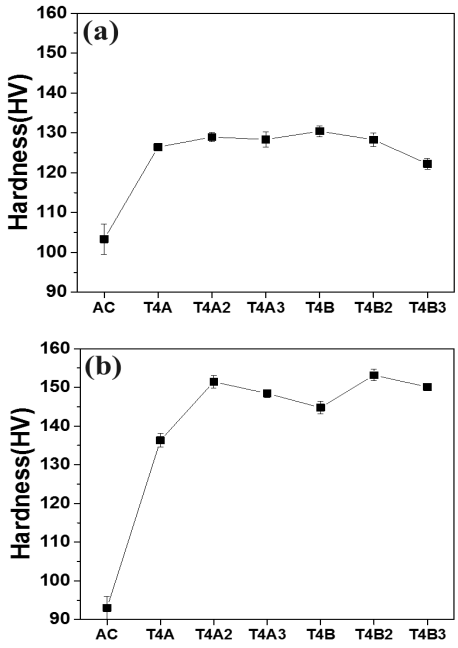


**Fig. 6 Vickers hardness of AlSiCu alloy with solution treatment ; (a) 2kg load, (b) Hv of Al matrix (25g)**

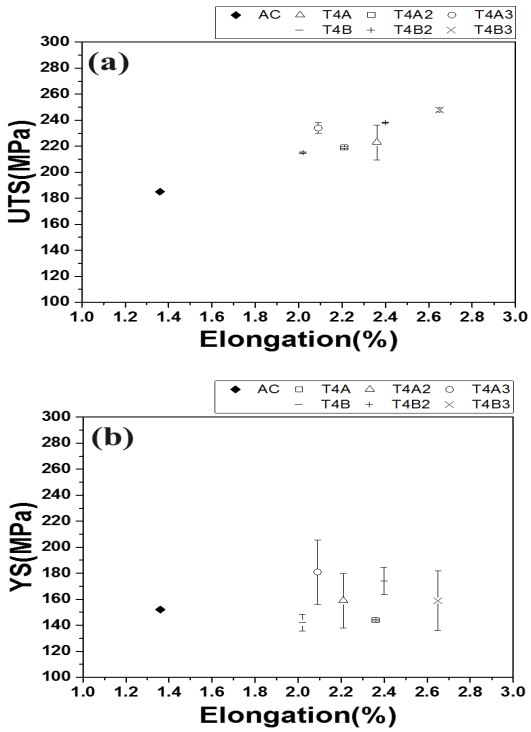


**Fig. 7 Mechanical properties of AlSiCu aluminum alloys.(a) UTS vs. Elongation, (b) YS vs. Elongation**

단일 단계 열처리 시험편과 이중 열처리한 시험편의 경도값은 AC보다는 증가하였고 이중 고용화 열처리 후 시간이 증가 할수록 공정 Si의 구상화로 인해 경도값이 감소한다고 판단된다. Fig. 6 (b)에서는 Al 기지내 경도값을 측정한 결과인데 단일 단계 열처리한 시험편과 이단계 열처리한 시험편의 경도값이 월등히 차이나는 것을 보여준다. Fig. 7은 최대인장강도와 항복강도를 연신률과 관련하여 각 고용화 열처리 조건에 따라서 나타내었다. 경량화소재는 강도의 향상뿐만 아니라 연성 역시 증가시켜 진동, 피로 등의 기계적 손상 저항성을 향상시키는 것이 매우 바람직하다. 최대인장강도와 연신율은 전체적으로 비례적인 관계를 보이며 최적의 고용화 조건은 495에서 1차 고용화하고 525에서 2차 고용화 처리한 T4B3의 조건에 매우 우수한 기계적 특성을 나타내었다.

최대인장가도와 연신율의 경우 최종 이중고용화 처리를 525에서 2차 고용화 처리한 조건에서 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 최대인장강도와 달리 항복강도는 연신율과 관련하여 고용화 열처리에 따라서 큰 변화를 보이지 않았다. 하지만 연신율은 크게 향상되었다. Fig. 7(b)에서와 같이 T4B3의 조건에서 연신율이 크게 증가하였다. 이러한 연신율의 증가는 고용화처리에 따른 공정 Si 입자의 분절과 구상화와 매우 밀접한 관련이 있다. 이와 같이 연신율과 인장강도의 관계에서 T4B3의 조건에서 기계적 특성이 크게 향상되었다.

## 4. 결 론

자동차 경량소재 AlSiCu 합금의 기계적 물성을 향상시키기 위한 최적의 이중 열처리 공정을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주조 AlSiCu 합금의 미세구조는 전형적인 수지

상정으로 40 μm의 이차 수지상 간격을 나타내었다.

2. 주조 후 기지부는 국부적으로 존재하는 중국활자 형상의 $\alpha$-$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, 긴 침상의 $\beta$-$Al_5FeSi$, 판상의 $\theta$-$Al_2Cu$ 와 조대한 기지에 전체적으로 분포하는 공정 Si 상으로 구성되었다.
3. 고용화 열처리 후에 Si 입자는 분절되어 미세해지고 구상화 되어졌다. 더욱이 고용화 열처리 동안 $Al_2Cu$ 상은 Al 기지내로 재고용되어졌다. 이로 인해 인장강도와 항복강도가 증가하였다.
4. 단일 단계 열처리 보다는 이중 열처리한 시험편의 기계적 강도가 높았고 이중 열처리 시간이 길어질수록 공정 Si 입자들은 구상화 되어 연신율이 향상되었다. 특히, 최대인장가도-연신율의 관계에서 T4B3의 조건에서 기계적 특성이 크게 향상되었다.

## REFERENCES


1. Ryu, M. R., Lee, D. H., Lee, S. B., Park, J. H., Shim, J. J., “Study on Performance Experiment and Analysis of Aluminum Disc Brake,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp.60-68, 2013.
2. Lee, S. K. and Ryu, C. W., “Characteristics of Surface Roughness in the Wire-Cut Electric Discharge Cutting Conditions of Aluminium Alloy 2024,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 1, pp. 39-45, 2012.
3. Kim, H. J. and Lee, U. R., “Characteristic Evaluation of Aluminium Filler Tube of Automotive,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9 No. 5, pp. 34-39, 2010.
4. Ammar, H. R., Moreau, C., Samuel, A. M., Samuel, F. H. and Doty, H. W., “Influences of alloying elements, solution treatment time and quenching media on quality indices of 413-type Al-Si casting alloys,” Materials Science and Engineering: A, Vol. 489, No. 1-2, pp. 426-438, 2008.
5. Dobrzański, L. A., Maniara, R. and Sokolowski, J. H., “The effect of cast Al-Si-Cu alloy solidification rate on alloy thermal characteristic,” Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 17, No. 1-2, pp. 217-220, 2006.
6. Caceres, C. H., Svensson, I. L. and Taylor, J. A., “Strength-ductility behaviour of Al-Si-Cu-Mg casting alloys in T6 temper,” Cast Metals Research, Vol. 15, No. 5, pp. 531-543, 2003.
7. Haque, M. M. and Sharif, A., “Study on wear properties of aluminium–silicon piston alloy,” Materials Processing Technology, Vol. 118, No. 1-3, pp. 69-73, 2001.
8. Belov, N. A., Eskin, D. G. and Avxentieva, N. N., “Constituent phase diagrams of the Al–Cu–Fe–Mg–Ni–Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys,” Acta Materialia, Vol. 53, No. 17, pp. 4709-4722, 2005.
9. Liu, X., Qiao, J., Wu, Y., Liu, X. and Bian, X., “EPMA analysis of calcium-rich compounds in near eutectic Al–Si alloys,” Journal of alloys and compounds, Vol. 388, No. 1, pp. 83-90, 2005.
10. Tomida, S., Nakata, K., Shibata, S., Zenkouji, I. and Saji, S., “Improvement in wear resistance of hyper-eutectic Al-Si cast alloy by laser surface remelting,” Surface and Coatings Technology, Vol. 169, pp. 468-471, 2003.
11. Ashtari, P., Tezuka, H. and Sato, T., “Influence of Li addition on intermetallic compound morphologies in Al–Si–Cu–Fe cast alloys,” Scripta Materialia, Vol. 51, No. 1, pp. 43-46, 2004.
12. Liao, H., Sun, Y. and Sun, G., “Correlation between mechanical properties and amount of dendritic α-Al phase in as-cast near-eutectic Al–11.6% Si alloys modified with strontium,” Materials Science and Engineering: A, Vol. 335, No. 1-2, pp. 62-66, 2002.
13. Lasa, L. and Rodriguez-Ibabe, J. M., “Wear

behaviour of eutectic and hypereutectic Al–Si–Cu–Mg casting alloys tested against a composite brake pad," Materials Science and Engineering: A, Vol. 363, No. 1-2, pp. 193-202, 2003.

14. Reif, W., Dutkiewicz, J., Ciach, R., Yu, S. and Krol, J., "Effect of ageing on the evolution of precipitates in AlSiCuMg alloys," Materials Science and Engineering: A, Vol. 234, pp. 165-168, 1997.
15. Saheb, N., Laoui, T., Daud, A. R., Harun, M., Radiman, S. and Yahaya, R., "Influence of Ti addition on wear properties of Al–Si eutectic alloys," Wear, Vol. 249, No. 8, pp. 656-662, 2001.
16. Wang, G., Bian, X., Wang, W. and Zhang, J., "Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al–Si–Cu–Mg cast alloys," Materials Letters, Vol. 57, No. 24-25, pp. 4083-4087, 2003.
17. Dunn, R. and Dickert, W., "Magnesium effect on the strength of A380. 0 and 383.0 aluminum die casting alloys," Die Casting Engineer, Vol. 19, No. 2, pp. 12-20, 1975.
18. Tsao, L. C., Tsai, T. C., Wu, C. S. and Chuang, T. H., "Brazeability of the 6061-T6 aluminum alloy with Al-Si-20Cu-based filler metals," Materials engineering and performance, Vol. 10, No. 6, pp. 705-709, 2001.
19. Ouellet, P. and Samuel, F. H., "Effect of Mg on the ageing behaviour of Al-Si-Cu 319 type aluminium casting alloys," Materials Science, Vol. 34, No. 19, pp. 4671-4697, 1999.
20. Wang, G., Bian, X., Liu, X. and Zhang, J., "Effect of Mg on age hardening and precipitation behavior of an AlSiCuMg cast alloy," Materials science, Vol. 39, No. 7, pp. 2535-2537, 2004.
21. Gauthier, J., Louchez, P. R. and Samuel, F. H., "Heat treatment of 319.2 aluminium automotive alloy Part 1, Solution heat treatment," Cast Metals, Vol. 8, No. 2, pp. 91-106, 1995.
22. Sablonnière, H. D. L. and Samuel, F. H., "Solution heat treatment of 319 aluminium alloy containing~ 0.5 wt% Mg. Part 1-solidification and tensile properties," Cast Metals Research, Vol. 9, No. 4, pp. 195-211, 1996.
23. De la Sablonnière, H. and Samuel, F. H., "Solution heat treatment of 319 aluminium alloy containing~ 0.5 wt% Mg. Part 2—microstructure and fractography," Cast Metals Research, Vol. 9, No. 4, pp. 213-225, 1996.
24. Ringer, S. P. and Hono, K., "Microstructural evolution and age hardening in aluminium alloys: atom probe field-ion microscopy and transmission electron microscopy studies," Materials characterization, Vol. 44, No. 1-2, pp. 101-131, 2000.
25. Totten, G. E., Mackenzie, D. S. and Dekker, M., Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes, CRC Press, pp. 272–84, 2003.