



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

알루미늄청동의 미세조직과 기계적 성질에
미치는 Fe 및 Si 첨가의 영향



2015년 8월

부경대학교 대학원

신소재시스템공학과

김 지 환

공학석사 학위논문

알루미늄청동의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 Fe 및 Si 첨가의 영향

지도교수 김 성 규

이 논문을 석사학위논문으로 제출함



2015년 8월

부경대학교 대학원

신소재시스템공학과

김 지 환

김지환의 공학석사 학위논문을 인준함

2015년 8월 21일



주 심 공학박사 김 성 규 (인)

위 원 공학박사 서 원 찬 (인)

위 원 공학박사 이 길 근 (인)

The Effects of Iron and Silicon Addition on the Microstructures and Mechanical Properties of Aluminium Bronze

Jee Hwan Kim

Department of Advanced Material Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The effects of iron and silicon additions on the microstructures and mechanical properties of aluminium bronze were investigated in this study. When 0.2wt.% Fe was added to the Cu-7.85wt.%Al mold cast round-bar specimens, its α phase had coarse dendrite structures and when 2.99wt.% Si was added to the Cu-7.85wt.%Al round-bar specimens as mold casting, its α phase had non-uniformly distributed needle structures. However, α phase had uniformly distributed needle structures in the Cu-6.93%Al-0.117%Fe-2.3%Si(wt.%) alloy. SEM-EDS point analysis distinguished Cu, Al, Fe and Si for the Cu-7%Al-0.8%Fe-2.5%Si(wt.%) centrifuged specimens, FeSi hard particles were distributed uniformly in the alloy's matrix which had Al and Si as solid solution. The Vickers hardness of mold cast round-bar specimens was that : Cu-7.85%Al(wt.%) alloy was Hv 135.4 Cu-7.41%Al-0.2%Fe(wt.%) alloy Hv 103.2, Cu-7.78%Al-2.99%Si (wt.%) alloy Hv 345.0 and Cu-6.93%Al-0.117%Fe-2.3%Si(wt.%) alloy Hv 268.1. the Vickers hardness of centrifuged cylinder-shape specimens (Cu-7%Al-0.8%Fe-2.5%Si(wt.%) alloy) was Hv 236.5, tensile strength 727.3 N/mm², yield strength 593.9 N/mm², and elongation 8.6%. From the comparison of tensile strength of normalizing heat treated cylinder-shape specimens in

the centrifugal cast Cu-7%Al-0.8%Fe-2.5%Si(wt.%), when the Al content was as high as 7.82wt.%, tensile strength was 781 N/mm² and when the Al content was as low as 7.31wt.%, tensile strength was 681.5 N/mm². A few Al content difference was verified to have huge impact on the tensile strength of aluminium bronze.



목 차

Abstract

제1장 서 론	1
제2장 실험방법	4
2.1 봉상시편 제작	4
2.1.1 합금설계 및 봉상시편 제조	4
2.1.2 봉상시편의 열처리	5
2.1.3 시험내용	10
2.2 원심주조 시편 제작	12
2.2.1 원심주조 시편 제조	12
2.2.2 시험내용	17
제3장 실험결과 및 고찰	19
3.1 Fe 및 Si 첨가 봉상시편의 열처리에 따른 미세조직의 변화	19
3.2 A, AF, AS 및 AFS 봉상시편의 경도 측정	20
3.3 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 인장시험과 경도시험	25
3.4 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 Al함량에 따른 인장강도의 변화	30

3.5 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 미세조직과 인장파단면 관찰.....	33
3.6 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 미세조직의 SEM관찰.....	36
제4장 결론.....	40
제5장 참고 문헌.....	41



제1장 서론

알루미늄 청동은 Al을 주요 원소로 하는 동합금이며, 청동, 황동 등을 대신하여 우수한 성질과 상대적으로 저렴한 Al을 주요 원소로 함으로써 생산원가를 낮출 수 있는 장점으로 용도가 점차 확대되어왔다. 알루미늄 청동은 강도가 높고 내식성 및 내마모성이 우수하여 선박용 재료, 부싱, 밸브, 베어링 등 공업재료로써 사용되고 있다. 특히 선박의 오일 청정기에 사용되는 spiral gear는 불순물이 섞인 오일과 모터의 회전수를 6,000 rpm에서 10,000 rpm으로 증속시키는 가혹한 환경에 사용되어야 하므로 내식성, 기계적 강도 및 내마모성이 요구된다.

Spiral gear와 같이 내식성과 기계적 강도 및 내마모성 등이 요구되는 알루미늄청동 합금은 국내의 개발이 미미하고 공학적인 정보가 부족한 실정이다.

본 연구는 알루미늄 청동의 합금원소로 쓰이는 Fe와 Si의 첨가가 미세조직 및 물성에 미치는 영향을 연구하였다.

현재 사용되어지는 알루미늄 청동의 일본, 미국, 독일 등의 화학조성 규격을 보면 Al의 함량을 8% ~ 11.5%로 취하고 있다. 이는 그림 1과 같이 565 °C, 11.7 wt.%Al에서 일어나는 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$ 의 공석변태반응을 응용, 열처리에 의한 복합상의 미세조직을 만들기 위함이다.[1,3] 또한 Fe, Ni, Mn 등 추가 합금 원소를 첨가함으로써 용도에 맞게 알루미늄 청동의 물성을 조절하고 있다. 하지만 저러한 합금조성의 알루미늄 청동은 서냉할 시 생기는 γ_2 상에 의해 기계적 성질과 내식성이 취약하게 되는 문제를 가지고 있어 열처리 공정이 권장되어진다. 본 연구는 알루미늄 청동합금에 대한 첨가원소의 영향을 보다 세밀하게 알아보기 위하여 이러한 복합상의 미세조직의 구간 아래인 7 wt.%Al을 사

용하였고 이 알루미늄청동의 특징은 fcc격자를 이루는 α 상으로만 구성된 고용체이다.[6]

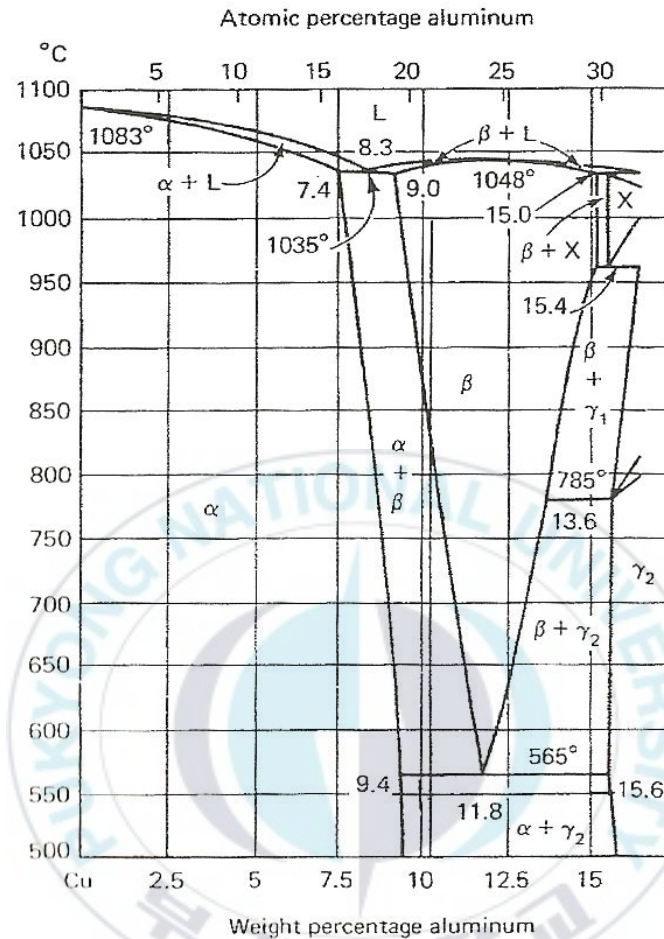


Fig. 1. Cu-Al binary phase diagram of alloy.

본 연구의 알루미늄 청동의 합금원소로 사용된 Fe와 Si 중 Fe는 결정을 치밀하게 만들어 인장강도와 연신율을 증대하는 효과로 알려져 있고, Si는 내식성 증대와 미세조직 미세화 효과가 있으며 강도도 증가하는 것으로 알려져 있다.[4] 또한, 1.5 % ~ 2.0 % Si 가 첨가되었을 때 응고수축이 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구는 'Cu-7 wt.%Al α 단상 합금의 미세조직과

기계적 성질에 미치는 Fe 와 Si 첨가의 영향' 이라 할 수 있다.

이를 위하여 시편은 합금설계에 맞추어 고주파 유도 용해로에서 제조하였고 제조한 합금설계별 봉상시편 재료의 건전부를 채취해 미세조직 특성 및 경도 값을 보다 객관적으로 획득하였다. 또한 Cu-Al-Fe-Si 합금을 공업용 재료로써의 물성치를 알아보기 위하여 원심주조공정을 통해 원심주조하고 열처리를 시행한 원심주조 시편을 제조한 다음 각 시편의 미세조직과 인장강도, 경도 등을 고찰하였다.



제2장 실험방법

실험은 크게 두 가지로 나누어서 실행하였다. 첨가원소의 영향을 정밀하게 알아보기 위하여 봉상금형으로 봉상시편을 제작하여 미세조직 및 경도시험을 하였고, 후에 공업적인 특성의 연구 및 적용을 위해 부상형태의 원심주조 시편을 제작하여 미세조직 및 기계적 특성을 시험하였다.

2.1 봉상시편 제작

2.1.1 합금설계 및 봉상시편 제조

그림 2는 알루미늄 청동의 응고조직 및 열처리 특성에 미치는 Al, Fe 및 Si의 첨가 영향을 고찰하기 위하여 수행한 합금설계 계통도이다. Cu-Al 모합금(A 합금), Cu-Al 모합금에 Fe (AF 합금) 또는 Si(AS 합금)을 각각 첨가한 합금, Cu-Al 모합금에 Fe 및 Si를 복합 첨가한 합금(AFS)을 고주파 유도용해로에서 용해하여 봉상의 금형주조시편을 제조하였다. 이 때 장입 원재료는 Cu 주괴(99.9%Cu 이상), Al 주괴(99.5%Al 이상), 메탈실리콘(99.5%Si 이상), 전해철(99.9%Fe 이상), Al-15%Fe 합금철을 사용하였으며, 제조된 각각의 합금을 분광분석한 조성은 Table 1과 같다.

그림 3은 금형 주조한 봉상시편의 제조과정과 형상, 그리고 원통상의 금형치수를 나타낸다. 연강으로 가공한 원통상 금형을 열처리로에 넣고 200 °C로 예열하였으며, 직경 40mm x 길이 100mm의 봉상 시편을 주조하였다. 이 때 주입온도는 1250-1300 °C로 하였다.

2.1.2 봉상시편의 열처리

그림 4는 열처리 조건을 보여 준다. 시편의 Al함량은 7 ~8 wt.% 이며 Cu-Al 평형 상태도에서 α 단상구간 열처리이므로 열처리의 목적은 노말라이징(Normalizing)과 템퍼링(Tempering)이다. 그림 4의 (b)와 같이 850 °C에서 1 시간 항온 후 수냉하고 다시 500 °C에서 1 시간 항온 후 공랭하였다. 이를 통하여 봉상시편의 균질화를 이루었다.[5]



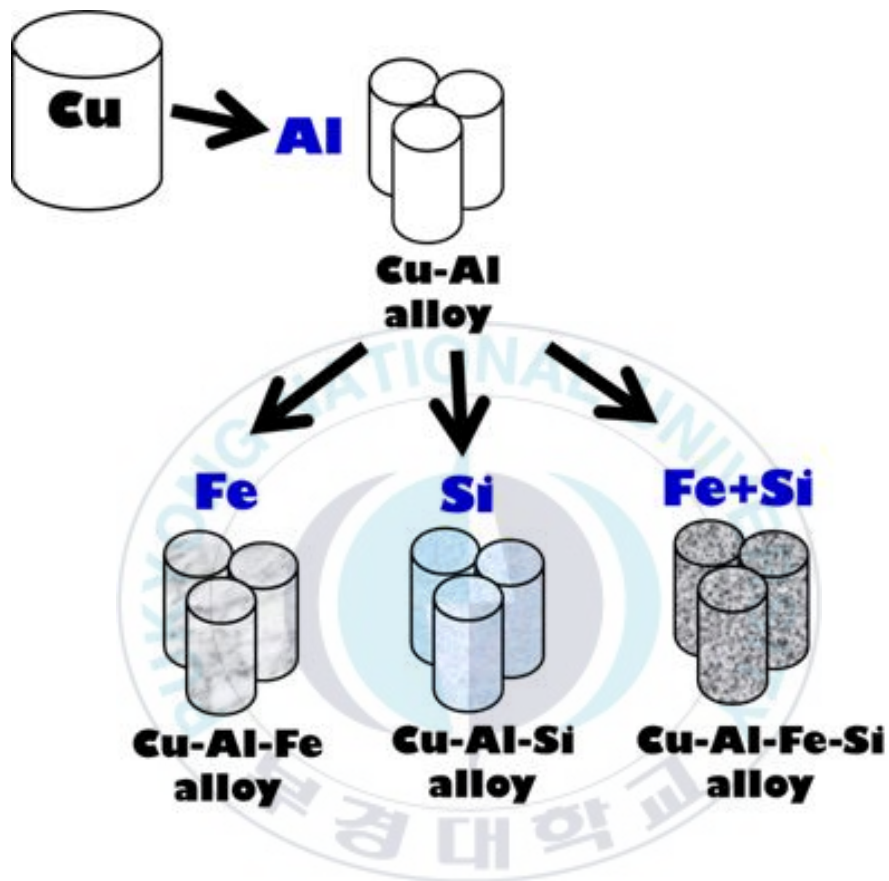


Fig. 2. Schematic diagram of alloy design of aluminium bronze.

Table 1. Chemical compositions of as-cast round-bar type specimens.
(wt.%)

Alloy	Cu	Al	Fe	Si
A	Bal.	7.85	0.017	0.05
AF	Bal.	7.41	0.206	0.05
AS	Bal.	7.78	0.007	2.99
AFS	Bal.	6.93	0.117	2.30

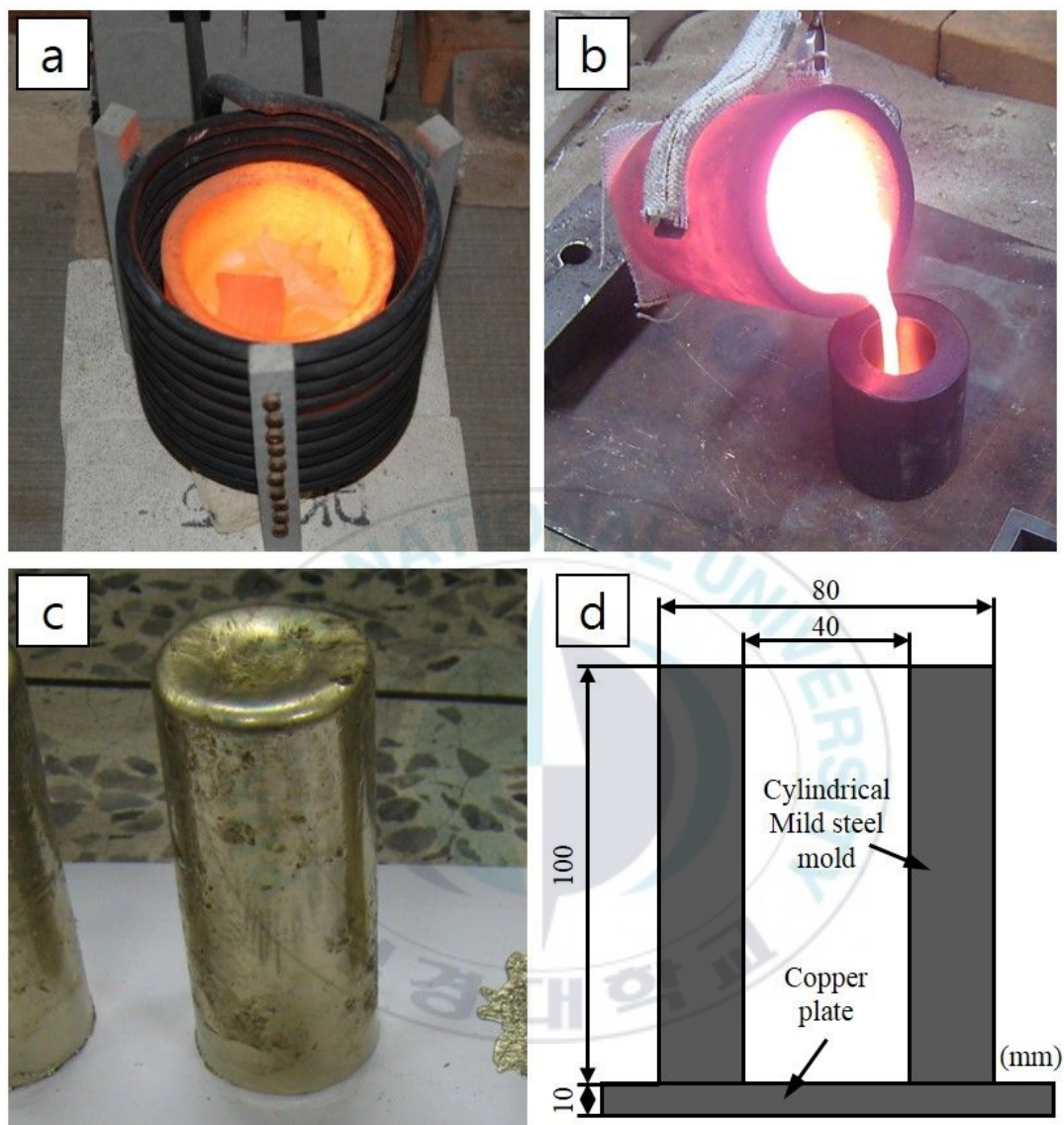


Fig. 3. (a) High frequency induction melting, (b) pouring of round-bar type specimens, (c) as-cast round-bar specimens, (d) shape and dimensions of steel mold.

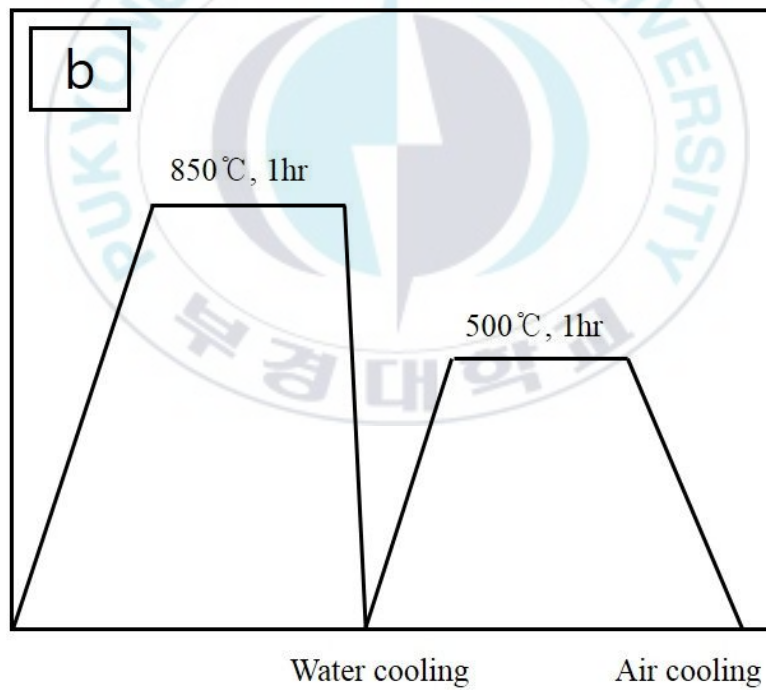
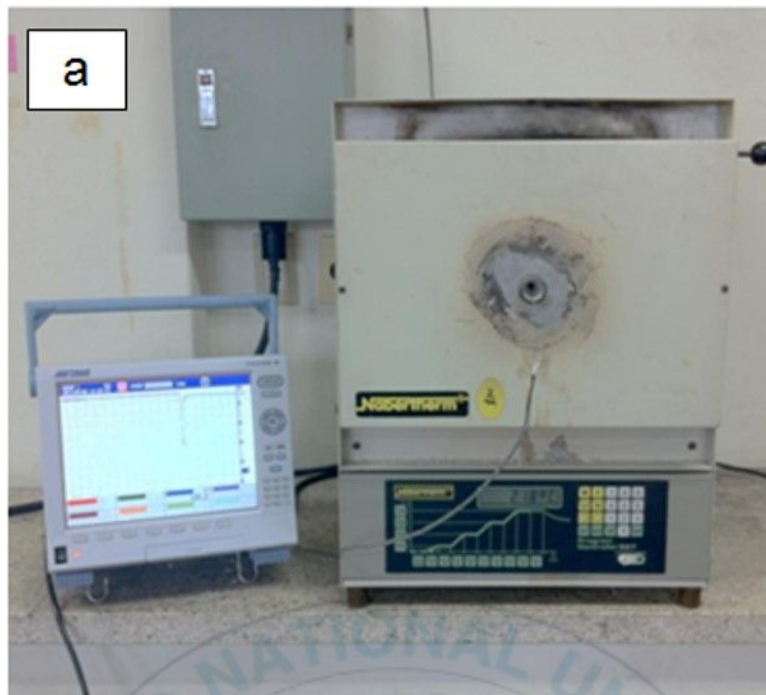


Fig. 4. (a) Heat treatment furnace and (b) condition of heat treatment cycle.

2.1.3 시험내용

그림 5와 같이 봉상시편 상단부의 수축부분을 피하고 하단부의 20 mm 위로 중앙부분을 절단하여 높이 10 mm 의 원통조각을 가공하여 그 원통의 중심을 기준으로 가로 10 mm, 세로 10 mm 의 정사각형 시편을 채취하였다. 이 시편으로 Fe 및 Si의 첨가유무에 따른 광학현미경 미세조직을 관찰하였다. 이들 각각의 시편은 열간성형하고 사포와 다이아몬드 페이스트를 사용하여 연마하였으며, $4g\ FeCl_3 + 30\ ml\ HCl + 120\ ml\ H_2O$ 용액으로 부식하였다.

또한 봉상시편의 Fe 및 Si 첨가유무에 따른 미소경도 값을 측정하였다. 미소경도 값은 각 시편의 미세조직 관찰용 시편에서 오토 비커스 (Mitutoyo Hardness Testing Machine, 1 kg, 20 sec)를 이용하여 경도를 측정하였다. 시편은 각각의 합금 A, AF, AS, AFS의 주조상태, 노말라이징 상태 및 템퍼링 상태의 시편을 측정하였다.

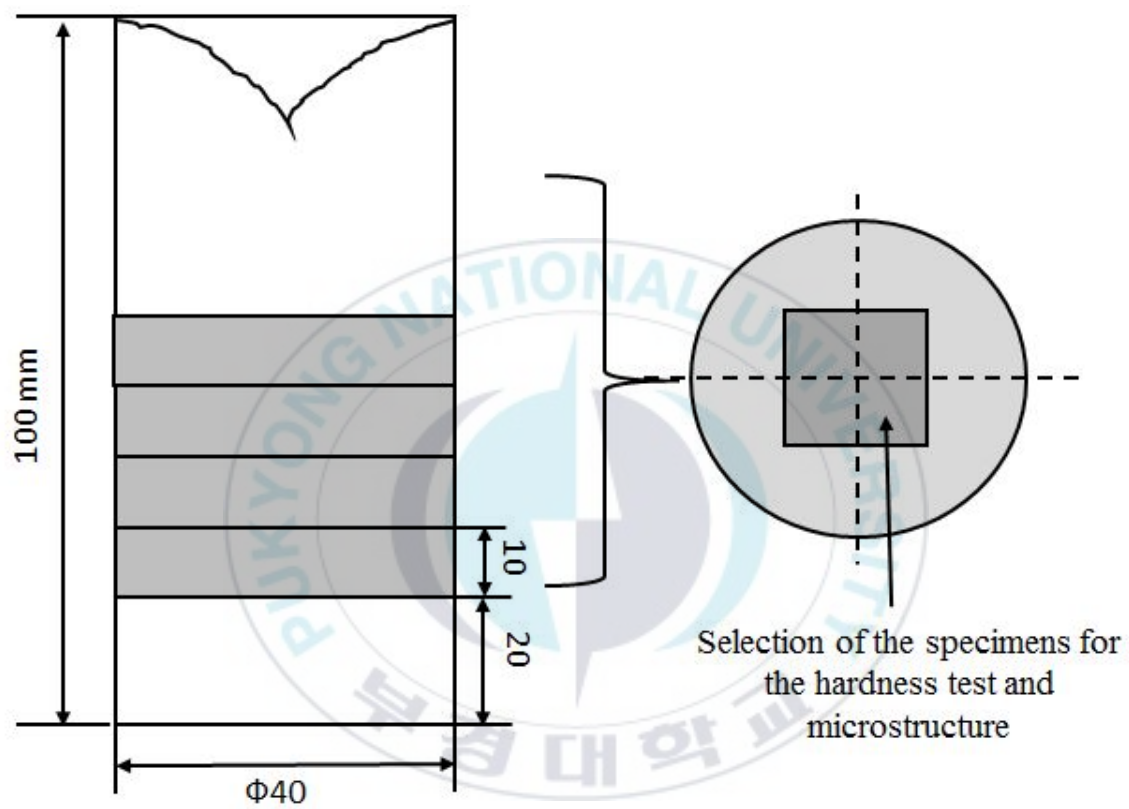


Fig. 5. Cutting of microstructure and hardness test specimens.

2.2 원심주조 시편 제작

2.2.1 원심주조 시편 제조

그림 6 과 같이 원심주조기에 직경 450 mm x 두께 30 mm 의 커버를 세 개의 나사로 조립하여 주입용탕이 넘쳐 나오는 것을 방지한 외경 450 mm x 내경 285 mm x 길이 500 mm 의 원통상 금형을 장착하고 버너를 사용하여 금형내부를 균일하게 예열하였다. 금형의 예열이 끝나면 알콜계 도형제를 도포하여 금형과 주입용탕과의 반응으로 일어나는 금형용손 및 소착을 방지하였다. 이어서 금형 양쪽에 커버를 조립하고 예비실험을 통하여 최적화한 목표 회전수인 중력배수(G)가 60 ~ 65 범위가 되는 600 rpm 으로 고속 회전시키고 용탕을 주입하였다. Cu에 대한 Al, Fe 및 Si의 영향을 검증한 합금설계 연구결과를 바탕으로 구리와 알루미늄 주괴, 메탈실리콘, 전해철, Al-15%Fe 합금철을 목표조성이 되도록 평량하여 장입하고 원심주조를 위한 용탕을 용해하였다. 이때 목표조성은 7 ~8 wt.%Al 과 2.5 ~ 3 wt.%Si, 그리고 Fe의 함량은 알루미늄청동 공업재료에 쓰이는 조성인 0.8 wt.%Fe를 채택하였다.[10]

합금의 용해 시 용량 500 kg의 정치식 흑연 도가니로를 사용하였으며, 환원성 분위기에서 용해하였다. 장입재료가 완전하게 용해되어 출탕온도에 도달하면 분광분석용 시편을 채취하여 목표화학조성을 확인하고 추가 합금하였으며, 용탕을 진정시키고 200 kg 주입 레들에 용탕을 옮겨 원심주조 시편을 5번 제조하였다. 제조된 각각의 합금조성은 Table 2과 같다.

열처리 시 소재의 변형을 방지하기 위하여 외경 290 x 내경 150 x 길이 450 mm, 중량 150 kg으로 원심주조 된 시편을 외경 275 x 내경 185 x 두께 30

mm의 치수로 가공했으며 체적을 고려하여 봉상시편과는 다르게 850 ℃ 에서 2 시간 유지한 후 유냉하여 노말라이징 열처리 하였으며, 템퍼링은 500 ℃ 에 2 시간 유지한 후 공랭 하였다. 그림 7의 (a)는 이에 따른 열처리 조건을 도식화한 것이고 (b)는 열처리된 원심주조 시편의 모습이다.



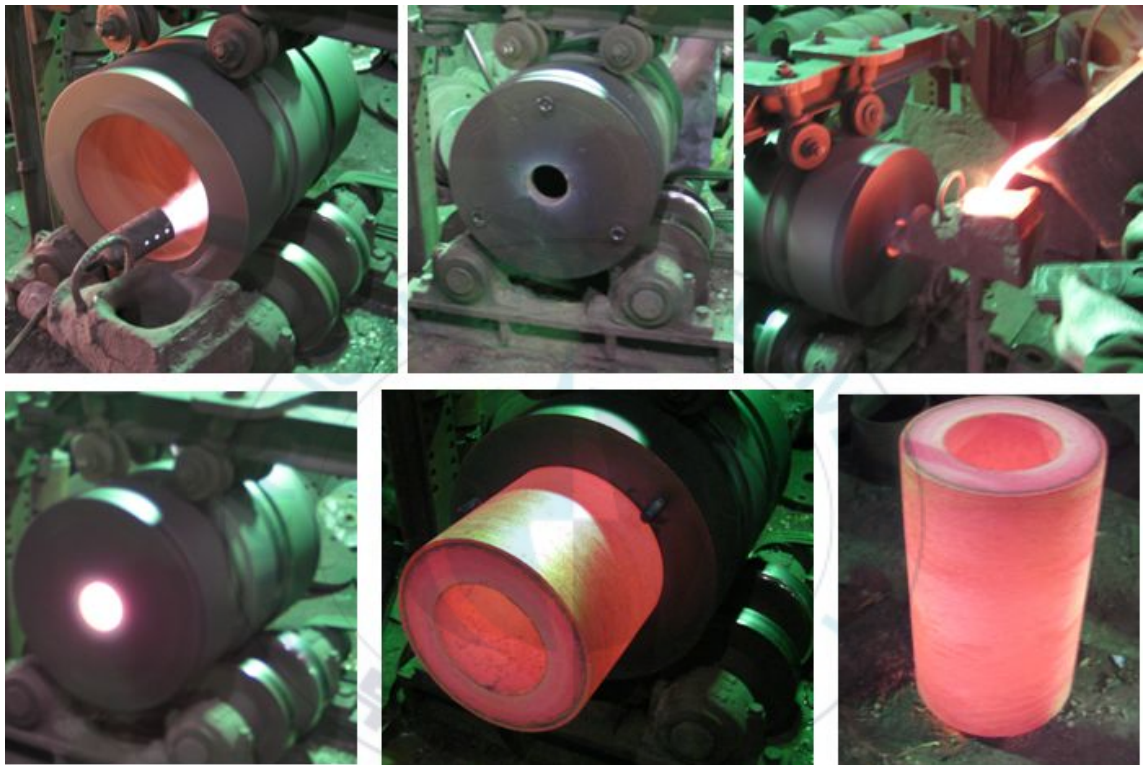


Fig. 6. Centrifugal casting process of specimens.

Table 2. Chemical compositions of centrifuged specimens. (wt.%)

Alloy	Cu	Al	Fe	Si
a	Bal.	7.31	0.74	2.66
b	Bal.	7.23	0.56	2.52
c	Bal.	7.82	0.72	2.83
d	Bal.	7.5	0.82	2.58
e	Bal.	7.23	0.83	2.59

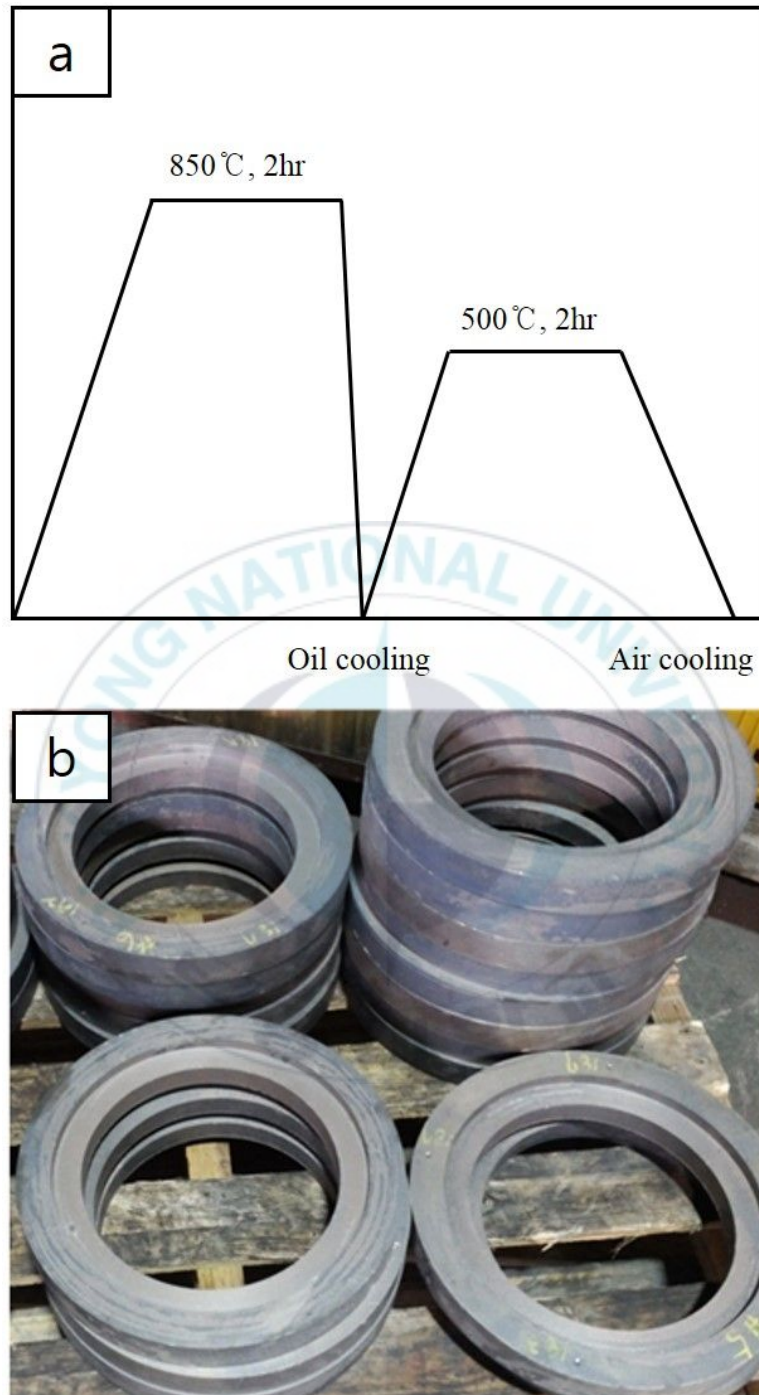


Fig. 7. (a) Condition of heat treatment cycle and (b) heat treated specimens.

2.2.2 시험내용

그림 8의 (a)와 같이 열처리된 원심주조 합금에서 인장시험편(KS B 0802 :2003 14A호 시험편)을 가공하였다. 가공된 인장시험편(KS B 0802 : 2003 14A호 시험편)으로 인장시험(DTU - 900HCS -1MIN)을 실행하였고 시험이 끝난 인장시험편의 중앙 파단면 밑으로 10 mm 떨어진 지점을 절단 후 SEM(GATAN[U.K] MONO CL3+)을 이용한 파단면 관찰을 하였다.

미세조직 관찰은 인장시험편의 가장자리를 10 mm 절단하여 열간성형하고 사포와 다이아몬드 페이스트를 사용하여 연마하였으며, 4g FeCl₃ + 30ml HCl + 120ml H₂O 용액으로 부식하였다.

각 시험편의 비커스 미소경도 값은 각 시험편의 미세조직 관찰용 시험편에서 오토 비커스 (Mitutoyo Hardness Testing Machine, 1kg, 20sec)를 이용하여 경도를 측정하였다. 시험편은 a, b, c, d, e 합금의 열처리 된 상태의 시험편을 측정하였고 각 해당 시험편에 5회 경도 측정을 시행하였다. 5회의 경도 측정시 측정부위 임의의 위치에서 측정하였다.

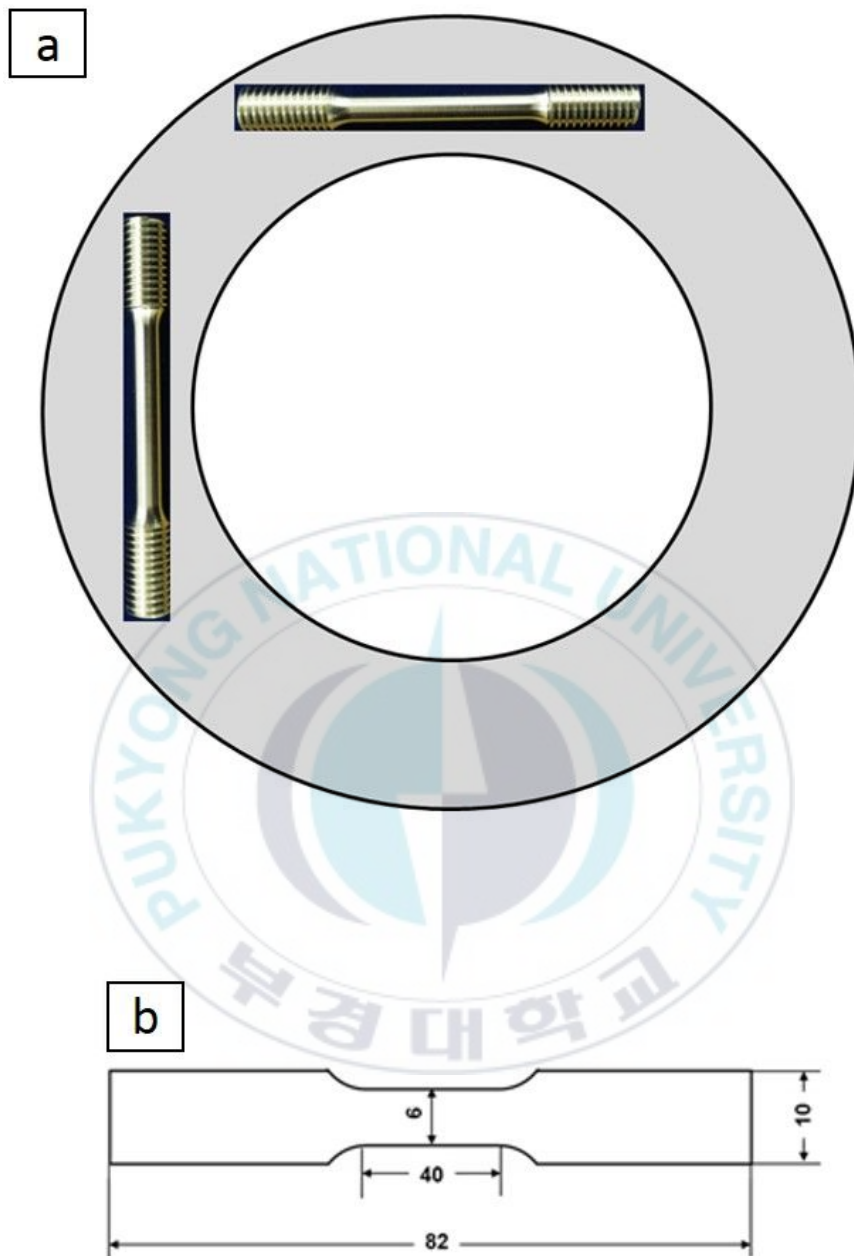


Fig. 8. (a) Cutting of test specimens and
(b) shape and dimension of tensile test specimens.

제3장 실험결과 및 고찰

3.1 Fe 및 Si 첨가 봉상시편의 열처리에 따른 미세조직의 변화

그림 9는 A, AF, AS 및 AFS 합금(표 1참조)의 주조상태 미세조직을 나타낸다. Al이 단독 첨가된 Cu-7.85%Al 합금(A 합금)은 그림 1의 복합상 구간이 아니므로 전형적인 α 상 단상의 알루미늄 청동의 미세조직을 보였다. Cu-Al 합금에 Fe가 첨가된 Cu-7.41%Al-0.20%Fe 합금(AF 합금)은 α 상이 덴드라이트 상으로 관찰되었으며, Si가 첨가된 Cu-7.78%Al-2.99%Si 합금(AS 합금)은 α 상이 미세 침상으로 관찰 되었으며 부분적으로 상의 미세함이 달랐다. Fe와 Si가 복합 첨가된 합금(AFS 합금) Cu-6.93%Al-0.11%Fe-2.3%Si의 경우 α 상의 조직은 Al이 단독 첨가된 A합금보다 균일하게 미세하였다. 이상의 미세조직 관찰로부터 Cu-Al계의 알루미늄 청동합금에 첨가되는 Si 또는 Fe의 응고조직 미세화 효과가 확인되었다.

그림 10은 Cu-7.85%Al 합금(합금 A)의 주조상태와 노말라이징 및 템퍼링 열처리 된 상태의 미세조직을 나타낸다. 이 합금은 열처리에 의하여 미세조직 변화가 관찰되지 않았다. Cu-Al 2원계 평형상태도와 같이 Al 함량이 9% 이하일 경우 α 상의 상변태가 일어나기 않기 때문이며, 냉각속도에 의한 고용도 변화요인이 영향을 미치지 않는 것이 검증되었다.

3.2 A, AF, AS 및 AFS 봉상시편의 경도 측정

Table 3에 A, AF, AS 및 AFS 합금의 주조상태, 850℃에서 1 시간 유지하고 수냉한 노말라이징(균질화) 상태, 그리고 500℃에서 1시간 유지한 후 공냉한 템퍼링 상태의 비커스 경도 값(Hv)을 나타내었고 그림 11은 각 합금별 열처리 전 후의 비커스 경도 값(Hv)을 비교한 것이다. 주조상태 경도 값은 각각 Hv 110.1, 121.2, 241.9 및 204.2 였으며, 템퍼링 상태의 경도 값은 각각 Hv 135.4, 103.1, 345.0 및 268.1 이었다. A 합금의 경우 템퍼링에 의하여 Hv 10 정도 증가하였으나, 0.3%Si가 단독 첨가된 AS 합금의 경우 템퍼링으로 무려 Hv 100 정도 급증하였다. 그리고 미량의 Fe와 Si가 동시에 첨가된 ASF 합금의 경우는 템퍼링으로 Hv 60 정도 증가하였다.

이상의 Cu-Al 청동합금의 경도 값에 미치는 Al, Si 및 Fe의 첨가 영향을 종합하면, Al이 8%이하로 단독 첨가되면 경도 값에 미치는 열처리 효과는 거의 없었다. 그러나 Si이 단독 첨가되거나 또는 Si 및 Fe가 복합 첨가되면 열처리에 의한 경도 값 상승효과가 매우 강하게 나타났다.

균질화 열처리를 수행한 A, AF, AS 및 AFS 합금중 AS와 AFS합금의 열처리 후의 경도 값이 AS합금의 경우 Hv 100, AFS합금의 경우 Hv 60 의 증가값을 나타내는 것을 보아 Fe 및 Si를 첨가할 시에 나타나는 응고조직의 미세화 효과가 균질화 처리 후에 더욱 강하게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

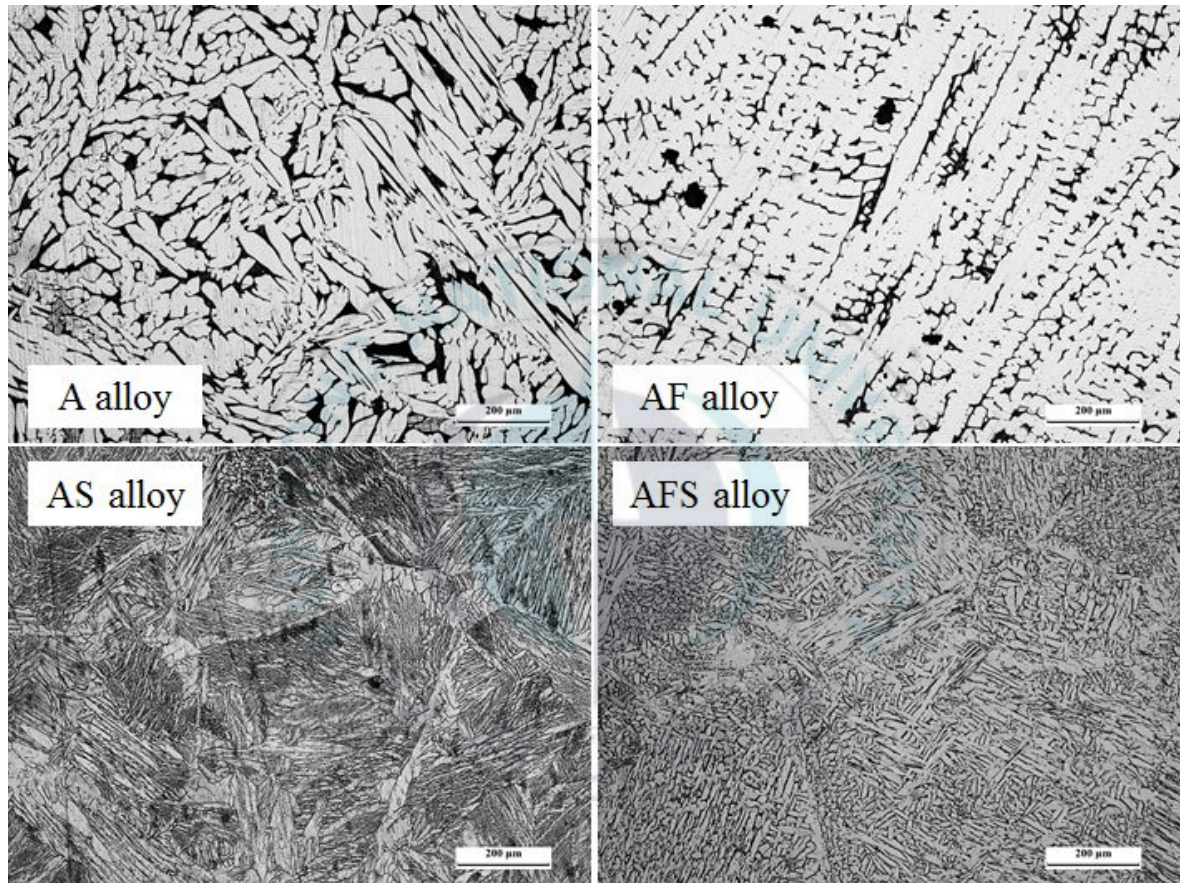


Fig. 9. As-cast microstructures of alloys. (A, AF, AS and AFS)

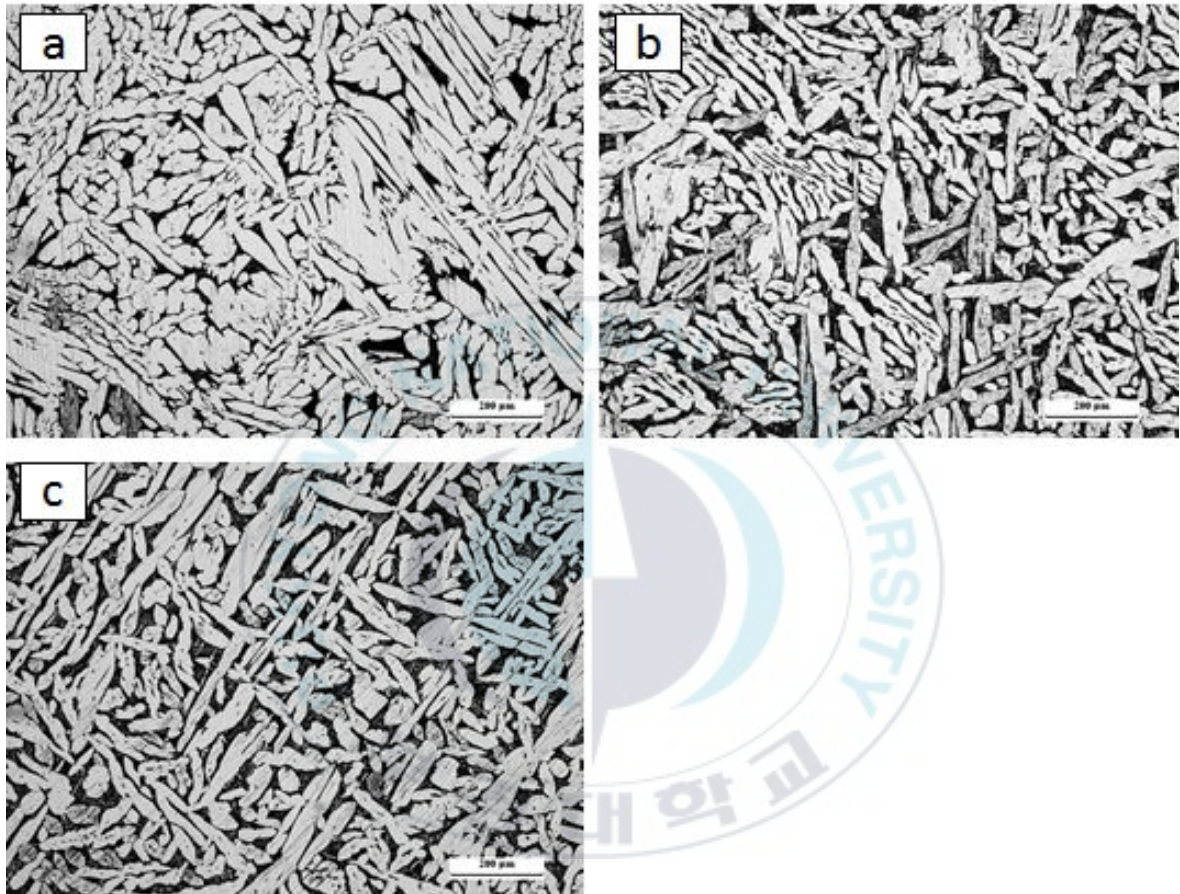


Fig. 10. Microstructures of Cu-7.85%Al alloy (a) as-cast, (b) normalizing and (c) tempering.

Table 3. Vickers hardness of round-bar specimens.

	Specimen groups	1	2	3	4	5	Mean
A	As-cast	110.8	110.5	109.2	109.8	110.4	110.1
	Normalizing(850 °C)	137.0	135.4	137.9	133.7	131.6	135.1
	Tempering(500 °C)	133.4	135.8	137.5	138.5	131.9	135.4
AS	As-cast	245.8	248.2	255.0	231.5	229.4	242.0
	Normalizing(850 °C)	331.9	330.0	327.3	329.5	326.1	329.0
	Tempering(500 °C)	342.7	345.9	350.1	343.8	342.6	345.0
AF	As-cast	121.9	120.1	120.4	121.5	122.8	121.3
	Normalizing(850 °C)	105.4	109.7	111.3	105.1	103.3	107.0
	Tempering(500 °C)	105.2	104.3	101.2	103.7	101.5	103.2
AFS	As-cast	219.7	205.3	202.6	198.7	195.0	204.3
	Normalizing(850 °C)	263.0	269.8	272.4	271.5	270.6	269.5
	Tempering(500 °C)	273.3	272.2	261.4	265.7	268.1	268.1

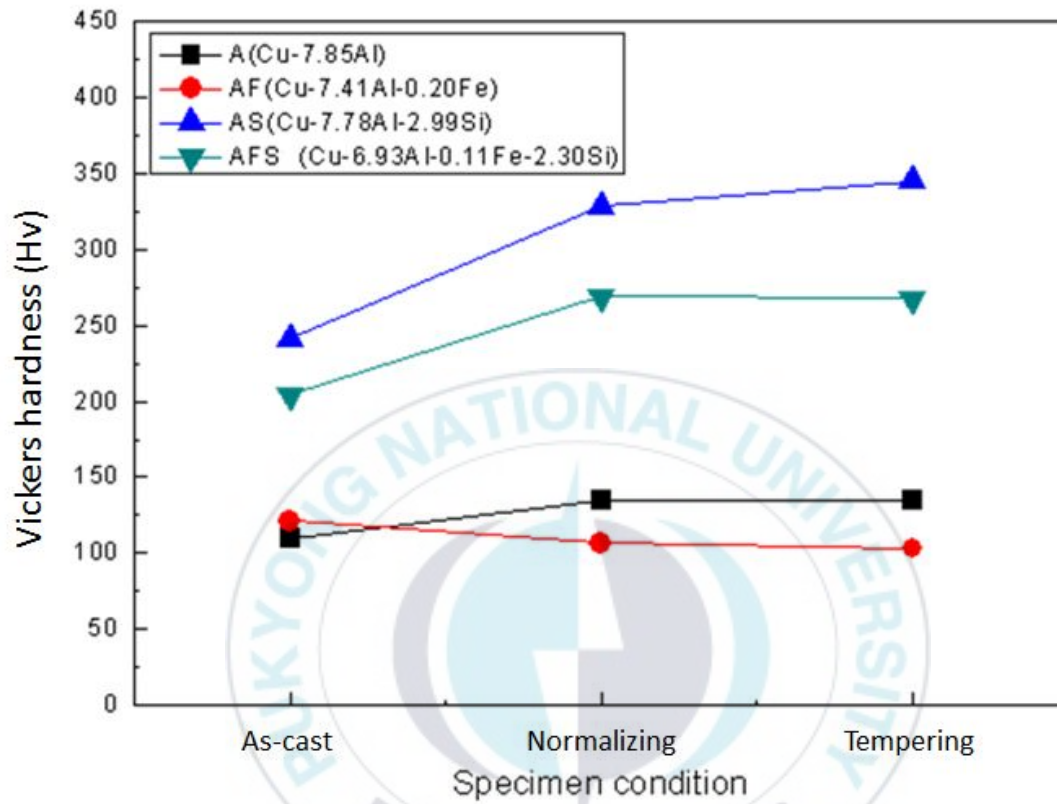


Fig. 11. Effect of alloying elements and heat treatment on the Vickers hardness of round-bar specimens. (A, AF, AS and AFS alloy)

3.3 원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 인장시험과 경도시험

원심주조 소재의 화학조성범위에서 시편의 인장강도는 681 N/mm²에서 781 N/mm², 항복강도는 519 N/mm²에서 690 N/mm², 연신율은 6.6 %에서 11.7 % 범위의 기계적인 성질을 나타내었다.

Table 4 는 원심주조 된 합금시편의 경도 값이다. 5회의 경도 측정값과 그에 따른 평균 경도 값을 Table 4의 오른쪽에 나타내었다. 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 경도는 Hv 219.8에서 Hv 252.1에 달하는 범위의 기계적인 성질을 나타내었다.

인장시험 측정값과 경도시험의 측정값 평균을 Table 5에 나타내었다. 원심주조 된 합금시편의 인장시험결과와 경도 값을 비교하기 위함이고 인장강도와 연신율, 그리고 경도의 관계를 그림 10과 그림 11에 가시적으로 나타내었다. 그림 10 은 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동 시편의 인장강도와 경도와의 관계를 나타내며 보이는 그래프와 같이 경도가 증가하면 인장강도가 증가하였다. 그림 11는 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동 시편의 연신율과 경도와의 관계를 나타내며, 경도가 증가하면 연신율은 감소하였다. 이상의 경도와 인장강도 및 연신율의 관계는 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동 합금시편이 4원계 합금의 복잡성에도 불구하고 경도와 인장강도가 비례하고 경도와 연신율이 반비례하는 교과서적인 물성치 예측이 가능한 결과를 보여주는 것을 확인하였다.

Table 4. Vickers hardness of heat-treated specimens.

	1	2	3	4	5	Mean
a	214.2	228.9	210.6	217.9	227.5	219.82
b	254.2	259.4	256.2	252.2	238.5	252.1
c	255.8	252.7	245.4	244.7	247.8	249.28
d	235.9	236.4	248	237.6	235.7	238.72
e	216.3	223.9	228.2	218.2	226.4	222.6

Table 5. Tensile strength and Vickers hardness of specimens

Alloy	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Vickers Hardness (Hv)
a	681.5	577	10	219.8
b	712	607.7	6.6	252.1
c	781	690.2	6.6	249.2
d	759	575.4	8.3	238.7
e	703	519	11.7	222.6

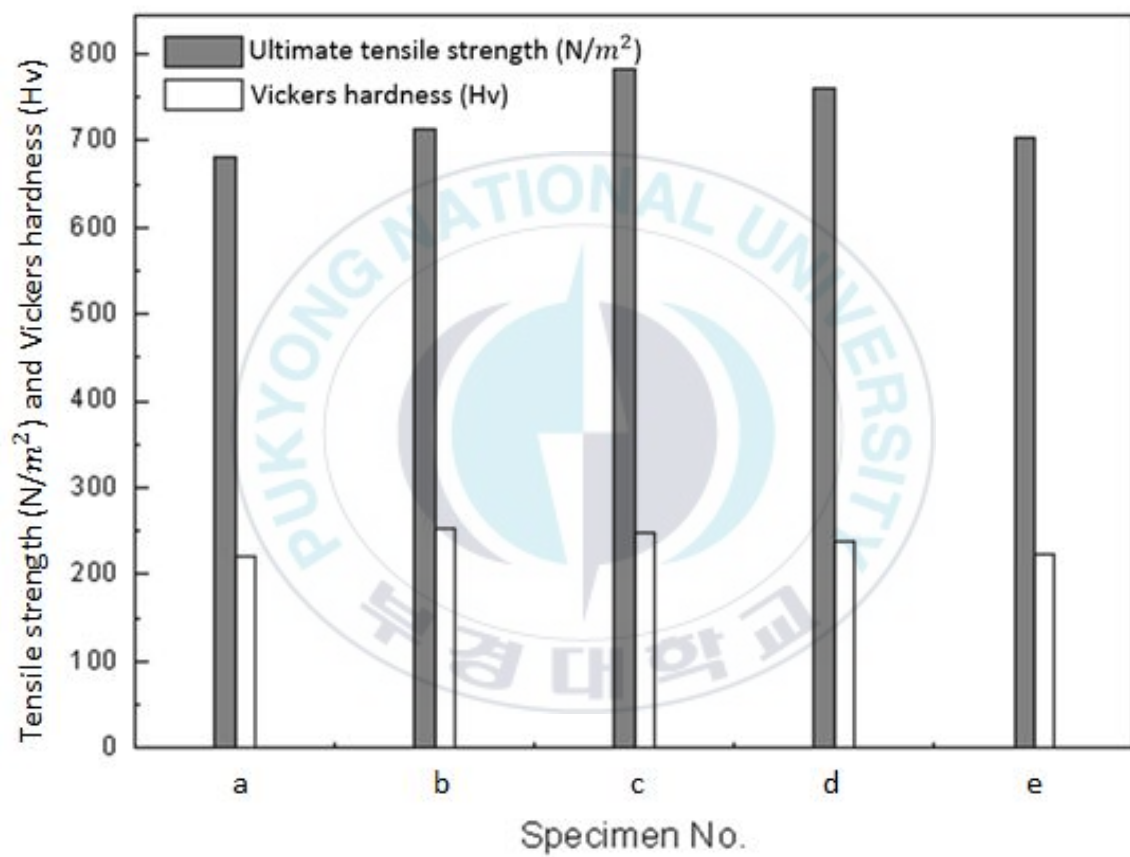


Fig. 12. Tensile strength and Vickers hardness of centrifuged specimens

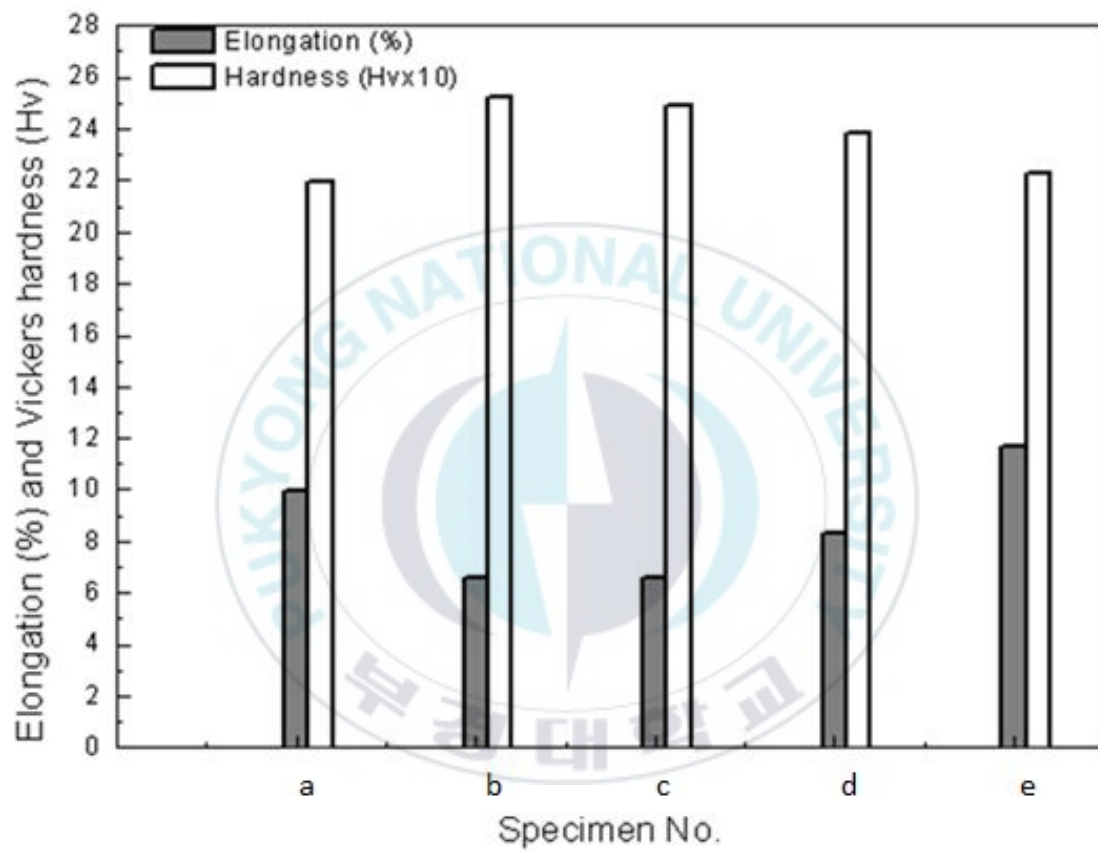


Fig. 13. Elongation and Vickers hardness of centrifuged specimens

3.4 원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 Al함량에 따른 인장강도의 변화

Table 6에 원심주조 시편의 화학조성과 인장강도를 같이 나타내었다. 같은 화학조성을 목표로 원심주조 시편을 총 5회(a, b, c, d 및 e 합금) 제작하였을 때, 약간의 조성차이를 보였는데 이로 인하여 인장시험의 결과 값이 달라지는 것을 눈으로 확인할 수 있었다. 따라서 화학조성과 인장강도와의 관계를 보면 Al함량에 비례하여 인장강도가 달라지는 것을 확인 할 수 있다. Al은 알루미늄청동 합금에 주요 원소이며 첨가 시 α 상 강화효과가 있다.

그림 16은 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 인장강도와 Al 함량의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프와 같이 알루미늄의 함량이 증가할수록 인장강도가 비례하여 증가하는데, 7.2%Al에서 인장강도는 750 N/mm^2 , 7.8%Al에서 인장강도는 850 N/mm^2 으로 Al 함량이 0.6% 증가하면 인장강도는 무려 약 100 N/mm^2 증가하였다.

이 결과는 Al의 함량의 변화가 미소하여도 인장특성에는 큰 영향을 미치는 것을 보여 주며, Al 은 원심주조 된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 강력한 강화 원소이며, Al 함량은 합금설계 및 용해과정에서 엄격하게 관리되어야 하는 핵심원소임이 확인되었다.

Table 6. Chemical compositions and tensile strength of centrifuged specimens

Alloy	Cu	Al	Fe	Si	Tensile strength (N/mm ²)
a	Bal.	7.31	0.74	2.66	681.5
b	Bal.	7.23	0.56	2.52	712
c	Bal.	7.82	0.72	2.83	781
d	Bal.	7.5	0.82	2.58	759
e	Bal.	7.23	0.83	2.59	703

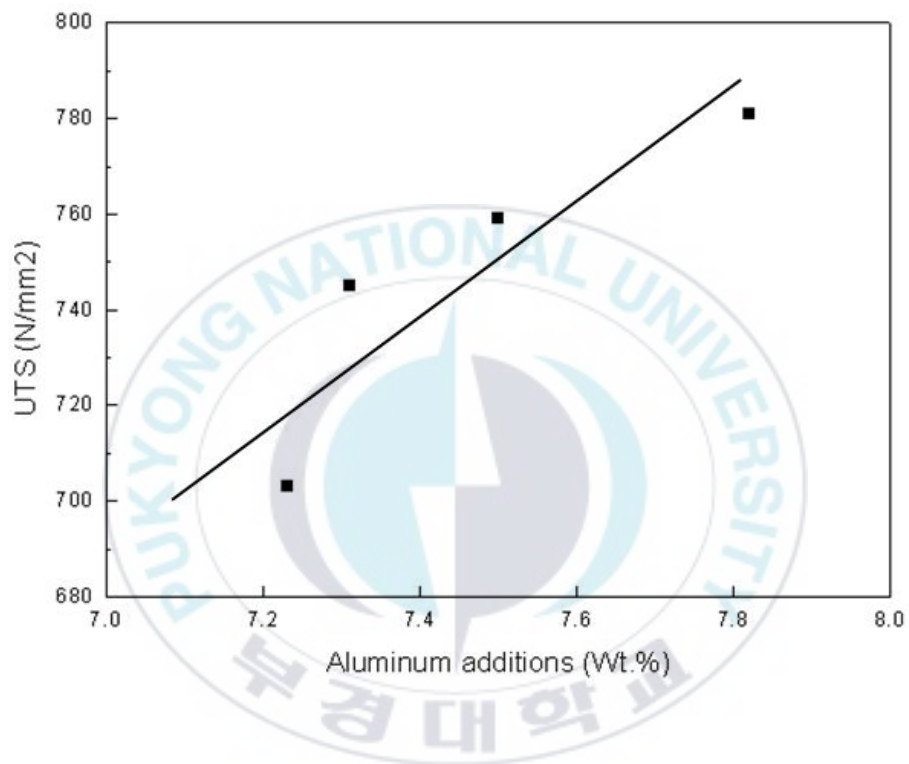


Fig. 14. The effect of aluminium content on the tensile strength of centrifuged specimens

3.5 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 미세조직과 인장 파단면 관찰

원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄 청동의 인장파단면과 미세조직을 그림 15에 나타내었다. 각 시편 a, b, c, d 및 e의 인장파단면 SEM관측사진(1000배) 옆에 같은 배율의 광학현미경 사진을 배치하였다. 파단형태를 보면 크기 10 μm 이하의 미세한 덩플이 균일하게 분포되어 있고, 전형적인 연성파단형태를 보였다. 이러한 미세조직의 파단형태는 연신율 약 9%를 나타낸 기계적 성질을 잘 나타내고 있다. 이 덩플의 생성메커니즘은 보통 소재에 내재하는 산화물, 탄화물, 질화물 등과 같은 1 μm 이하 크기의 개재물에 의해 유발되는 것으로 알려져 있는데, 입자는 기지만큼 쉽게 변형될 수 없기 때문에 입자주위에 인장시험과 같은 심한 소성변형이 발생하면 기지와 입자의 정합은 잃게 된다.

이로 인해 작은 공동이 생기고 이것이 슬립에 의해 성장한다. 따라서 미세조직에 보이는 검은색의 작은 입자는 덩플의 시발점이 되고 기지조직을 따라 덩플이 형성되어 원편의 파단면이 생성된 것으로, 이러한 파단면과 미세조직 광학현미경 사진의 표면을 더 이해하고자 미세조직관찰용 시편으로 주사전자현미경(SEM) 관찰을 시행하였다.

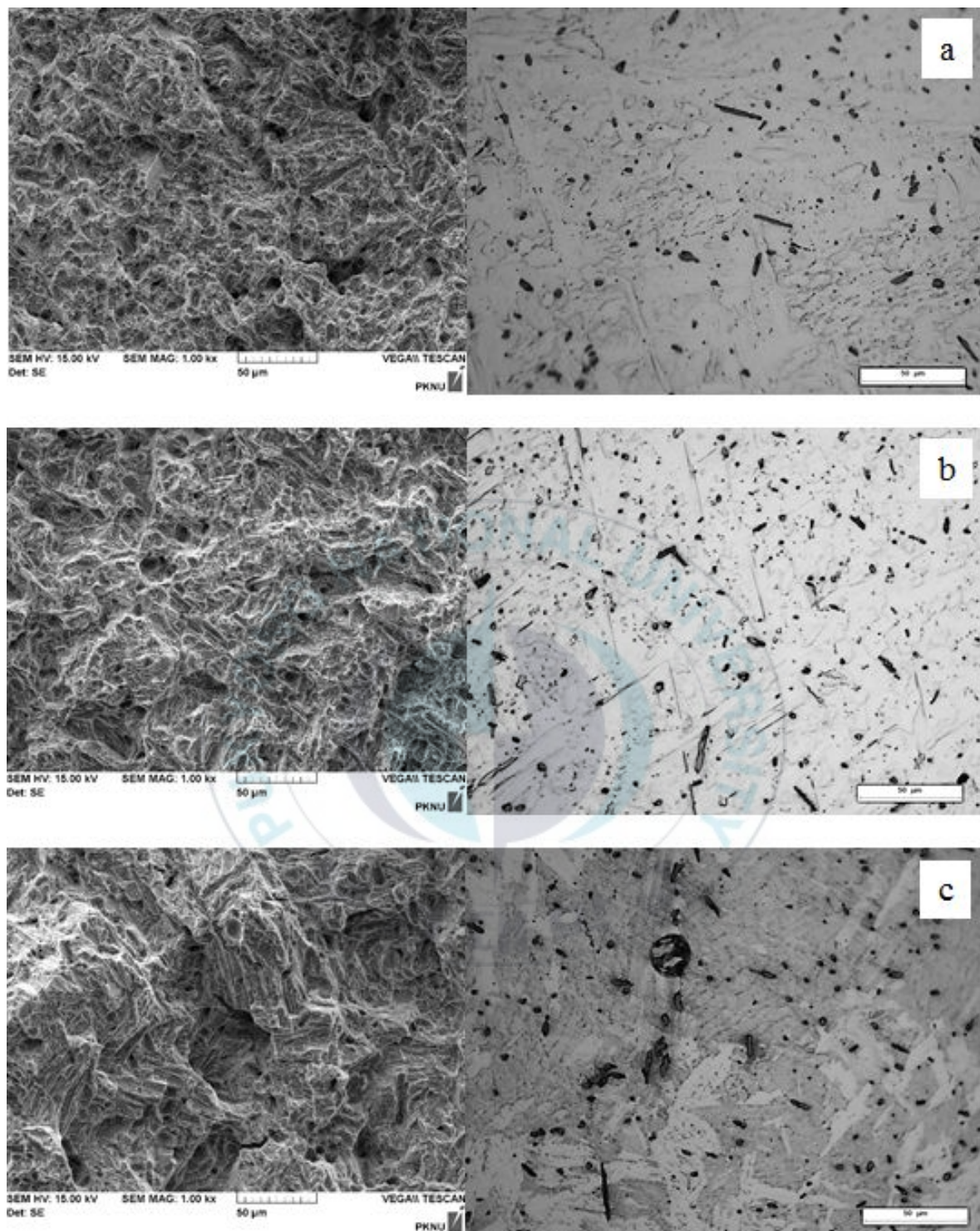


Fig. 15. Tensile fracture surface and optical microstructures of centrifuged specimens

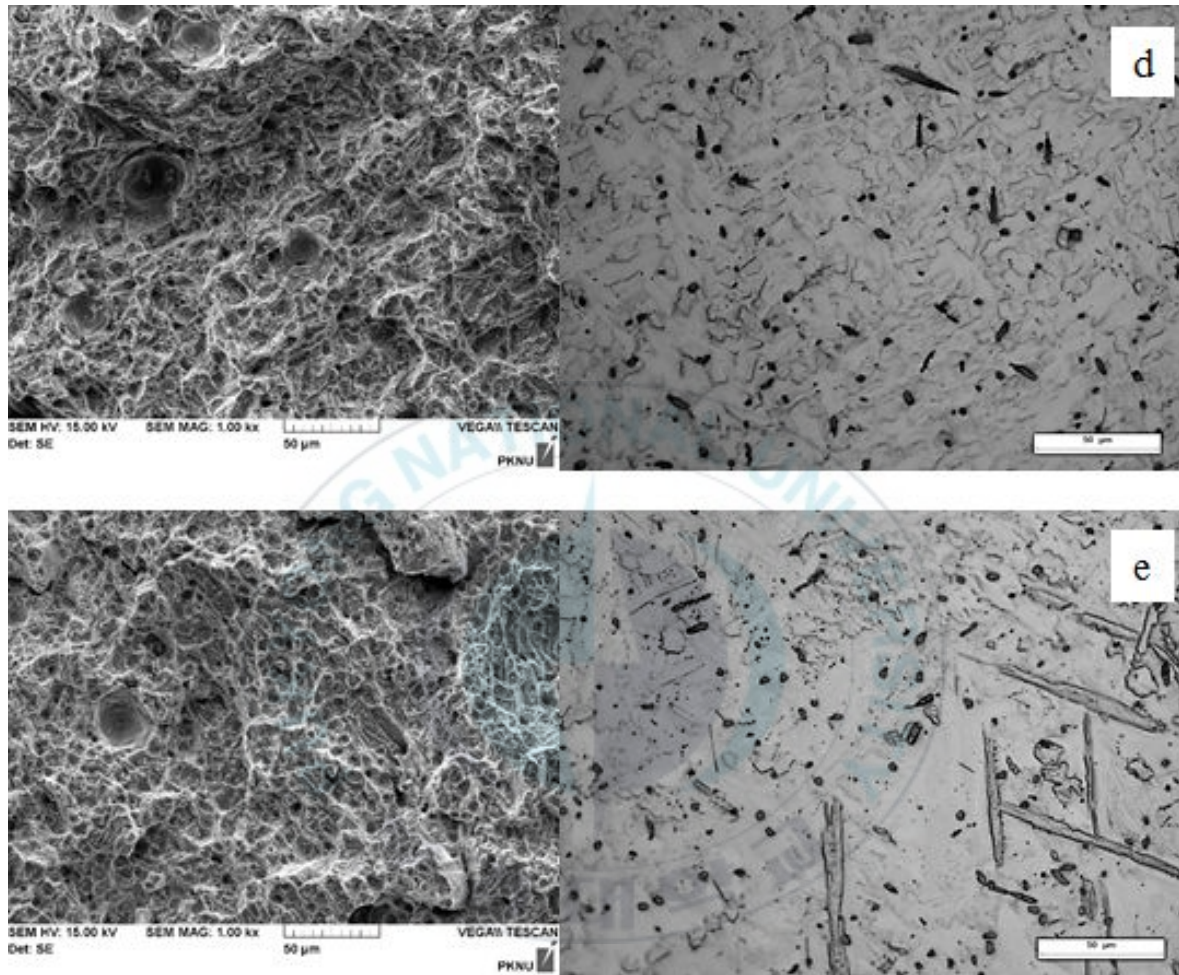


Fig. 15. Tensile fracture surface and optical microstructures of centrifuged specimens

3.6 원심주조된 Fe, Si첨가 알루미늄청동의 미세조직의 SEM관찰

그림 16은 원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄청동의 미세조직 SEM관찰사진을 나타낸다. 300배와 3000배의 SEM 조직사진을 보면 Cu에 Al 고용된 고강도 α 상 기지 속에 흰색의 미세한 경질입자가 균일하게 분산되어 있다. 이 미세입자는 후술하는 SEM-EDS 분석 결과,(그림 17, 그림 18) Fe와 Si의 화합물로 밝혀졌다. 이와 같이 α 상 기지 속에 미세한 경질입자가 균일 분산되어 있는 미세조직의 특성은 고강도, 고인성을 뒷받침 하는 인자로 확인되었다. 그림 17은 원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄 청동의 열처리된 미세조직 시편의 기지와 기지 속에 관찰되는 화합물 입자의 SEM-EDS 점분석 결과이다. 기지의 원자분율 조성은 Cu-15.16Al-2.5Si(at.%)로 분석되어 첨가된 Al의 대부분은 Cu의 기지에 고용되고, 아주 미량의 Si가 기지에 고용되었다. 한편 화합물의 원자분율 조성은 Cu-1.406Al-43.28Fe-50.96Si(at.%)으로 분석되었으며, Fe와 Si의 화합물로 확인되었다. 그림 18은 동일한 시료의 SEM-EDS 면분석 결과를 보여 주며, Al은 기지에 균일 분포되어 있고, Fe와 Si는 입상의 화합물에서 확인되었다. 이로부터 원심주조된 Fe, Si 첨가 알루미늄 청동 시편에 첨가되는 중요 합금원소인 Al, Fe 및 Si의 역할을 요약하면, Al은 기지강화원소로 작용하고 Fe 및 Si는 화합물 생성에 관여함이 확인되었다.

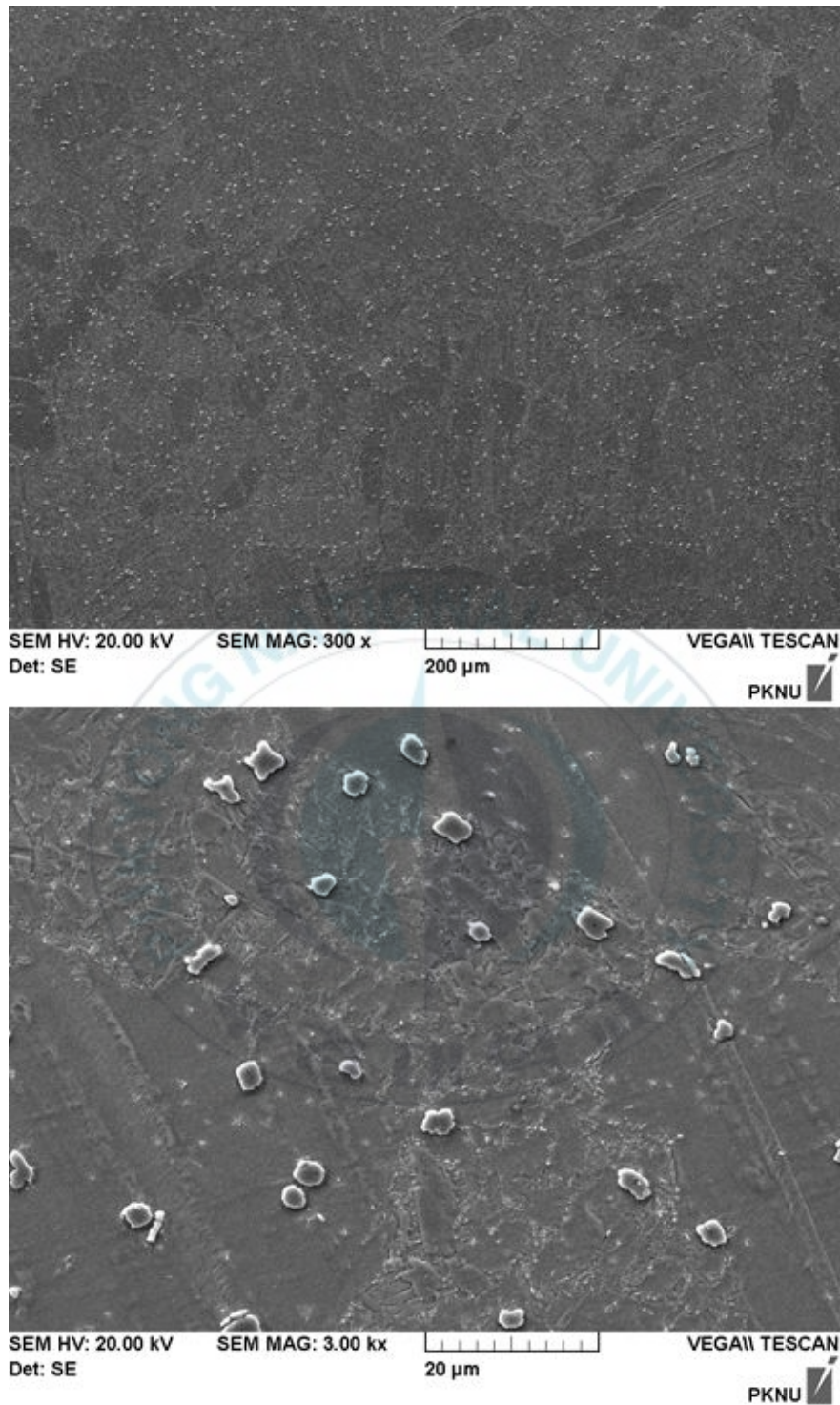


Fig. 16. Scanning electron micrographs of centrifuged specimens

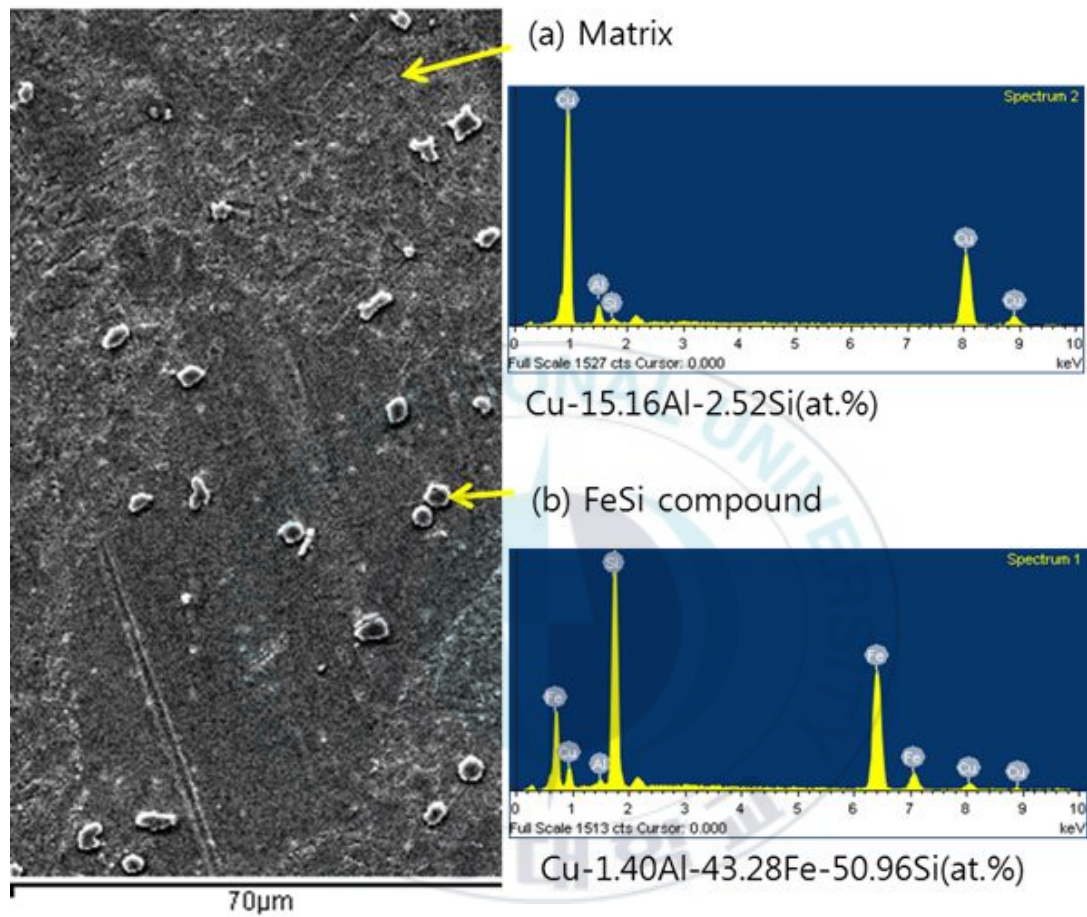


Fig. 17. SEM-EDS point analysis on the elements of Cu, Al, Fe and Si for the centrifuged specimens

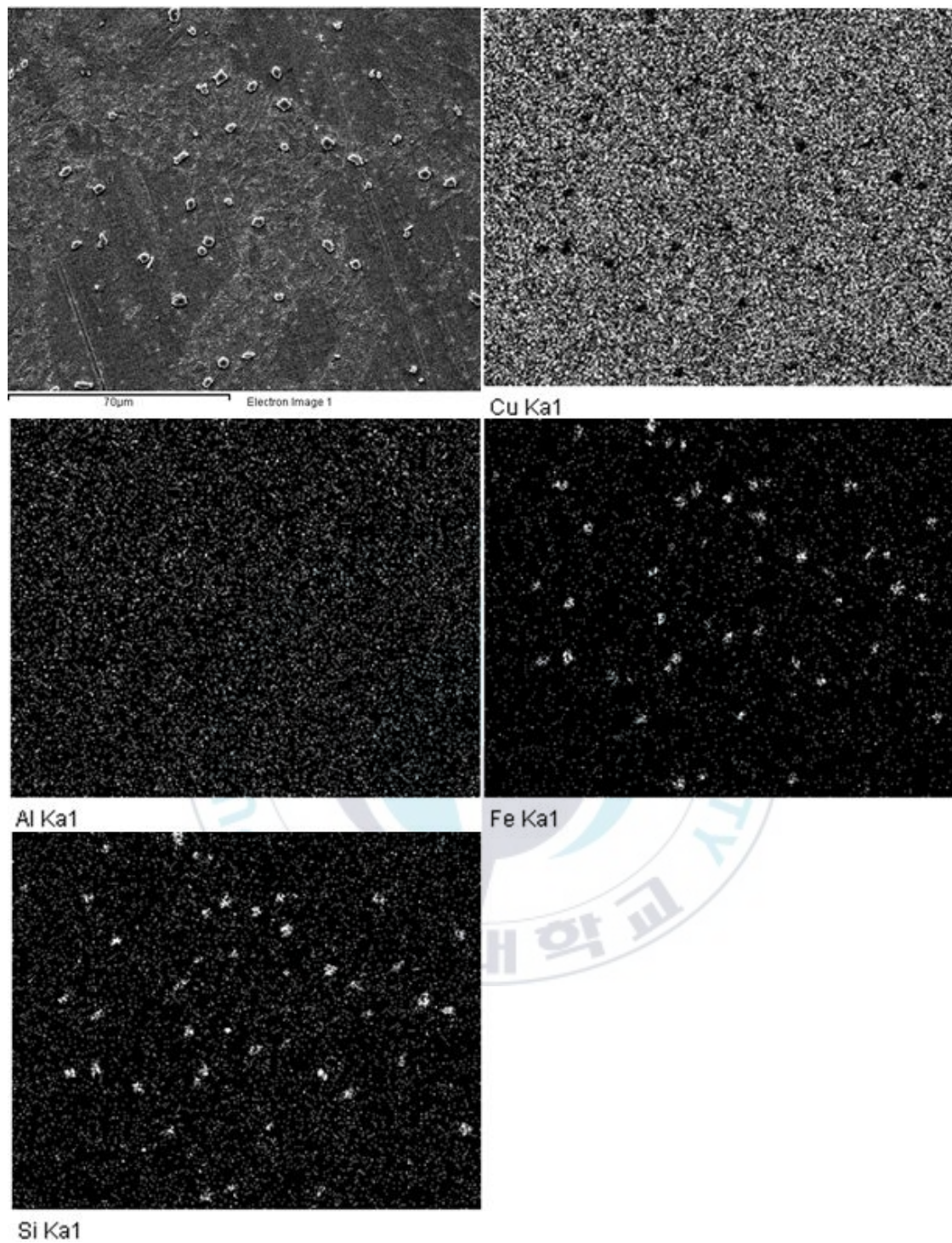


Fig. 18. SEM-EDS mapping on the elements of Cu, Al, Fe and Si for the centrifuged specimens

제4장 결 론

알루미늄 청동의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 Fe 및 Si 첨가의 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 금형주조된 봉상의 Cu-7.85wt.%Al 청동합금에서 Fe가 0.2wt.% 단독 첨가 될 경우 α 상은 조대한 덴드라이트로 관찰되었고 Si 2.99wt.% 단독첨가 될 경우 미세침상의 α 상이 불균일하게 관찰되었으며 Fe와 Si이 복합첨가 된 Cu-6.93%Al-0.117%Fe-2.3%Si(wt.%) 청동에서 미세한 α 상이 균일하게 관찰되었다.

(2) 원심주조된 Cu-7%Al-0.8%Fe-2.5%Si(wt.%) 합금의 미세조직을 SEM-EDS 분석결과, Al과 Si이 고용된 Cu 기지속에 경질의 FeSi 입상 화합물이 균일하게 분산되어 있는 것이 확인되었다.

(3) 금형주조된 봉상합금의 경도 시험결과 A 합금의 경도값은 Hv 135.4, AF 합금의 경도값은 Hv 103.2, AS 합금의 경도값은 Hv 345.0, AFS 합금의 경도값은 Hv 268.1 을 보였다. 원심주조된 원통상 합금의 경도값은 Hv 236.5를 보였으며, 인장강도는 727.3 N/mm², 항복강도는 593.9 N/mm², 연신율은 8.6 %를 보였다.

(4) 원심주조된 원통상 Cu-7%Al-0.8%Fe-2.5%Si(wt.%) 합금을 균질화 열처리한 인장강도 값을 비교한 결과, Al 함량이 7.82wt.% 로 높을 경우 인장강도는 781 N/mm² 이었고, Al함량이 7.31wt.%로 낮을 경우 인장강도는 681.5 N/mm²로 나타났다. 미량의 Al함량변화가 Cu-Al-Fe-Si계 청동합금의 인장강도에 큰 영향을 미치는 것이 관찰 되었다.

제5장 참고 문헌

- [1] X.J. Liu, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida, Journal of Alloys and Compounds 264 (1998) pp 201-208 “Phase equilibria in the Cu-rich portion of the Cu - Al binary system”
- [2] KS D 6024. “Copper and copper alloy castings”, (2009)
- [3] ASM Metals Handbook, Vol 03, Alloy Phase Diagrams (1992), 77p
- [4] O. Y. Kwun and C. S. Kang “Effect of Si on Microstructures and Mechanical Properties of cu-al alloys”, Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 16, No. 3 (1978) pp 179-189
- [5] ASM Metals Handbook Vol 04, Heat Treating (1991), 1960p
- [6] Archives of foundry engineering(AFE) volume 13 15/3 72p~79p “Model of Cu-Al-Fe-Ni Bronze Crystallization”
- [7] Mustafa Yassar, Yahya Altunpak, Materials & Design, Vol. 30, Issue 3, (2009) pp 878 - 884 “The effect of aging heat treatment on the sliding wear behaviour of Cu - Al - Fe alloys”
- [8] S.K. Lee and D.L. Lee : A Study on the Anneal Hardening of Al Bronze, Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, Vol 20, No. 5, pp 448-454
- [9] Davis, J.R. and Davis associates. (2001). “Copper and Copper alloys”, ASM International, pp 46-53
- [10] ASTM B148. “Standard Specification for Aluminum-Bronze Sand Castings” (2009)