

논문

3.60wt%C-2.50wt%Si-0.80wt%Cu 조성 오스텨퍼드 구상흑연주철의 프로세싱 윈도우에 미치는 열처리 조건의 영향

박정재 · 서갑성 \* · 권해욱 \*\*†

영남대학교 대학원 금속공학과, \*대한특수금속(주), \*\*영남대학교 신소재공학부

Effect of Heat Treatment Condition on the Processing Window of 3.60wt%C-2.50wt%Si-0.80wt%Cu Austempered Ductile Cast Iron

Jung-Jee Park, Gap-Sung Seo\*, and Hae-Wook Kwon\*\*†

Dept. of Met. Eng., Graduated School, Yeungnam Univ., Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-749, Korea

\*Daehan Special Metal Co. Ltd., Goryeong, Gyeongbuk, 717-870, Korea

\*\*School of Mat. Sci & Eng., Yeungnam univ., Gyeongsan Gyeongbuk, 712-749, Korea

Abstract

The effect of austenitizing temperature and time on the processing window of 3.60wt%C - 2.50wt%Si - 0.80wt%Cu ductile cast iron and that of the amount of copper added were investigated. The second stage reaction at 400°C was retarded with increased austenitizing temperature. The widest processing window was obtained at the lower austempering temperature with the increased time at the same austenitizing temperature. The width of the widest processing window was decreased with the increase of time at the same austenitizing temperature. The width of processing window was increased with the increased amount of copper added.

Key words : Cast iron, Ductile cast iron, Austempered ductile cast iron, Heat-treatment, Austempering.

(Received April 6, 2009 ; Accepted April 20, 2009)

1. 서 론

오스텨퍼드 구상흑연주철(Austempered Ductile Cast Iron : ADI)은 용해 시 합금 원소를 첨가하고 주조한 후 열처리한 구상흑연주철이다. 열처리한 오스텨퍼드 구상흑연주철은, 펄라이트와 페라이트보다 우수한 특성을 가지는, 오스페라이트라고 하는 페라이트와 안정한 고탄소 오스테나이트가 혼합된 독특한 기지 조직을 가진다. 이와 같은 조직으로 인하여 오스텨퍼드 구상흑연주철은 뛰어난 금속공학적인 특성을 가지고 있다[1~4].

오스텨퍼드 구상흑연주철은 구상흑연주철에 비해 두 배 이상으로 인장 강도가 높고 연신률도 매우 크다. 강도가 높아 경량화할 수 있는 특성과 더불어, 오스텨퍼드 구상흑연주철은 내마모성, 진동 흡수능, 및 열전도도가 크며 다양한 제품 또는 부품을 여러 가지 방법으로 제조할 수 있다. 그리고 낮은 용해 및 주조 온도로 인하여 오스텨퍼드 구상흑연주철 부품의 제조 원가는 주강에 비하여 약 40% 정도 더 낮다.

오스텨퍼링 반응 단계는 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 온도가 높을 경우 전체적인 반응이 비교적 빨리 끝나고 이와 반대로 낮을 경우는 전체적으로 반응이 지연되는 경향이 있다. 이런 차이는 오스텨퍼링 온도에 따른 변태의 구동력 및 탄소

확산 속도 차이에 기인한다.

오스테나이트 상태에서 퀴칭되어 오스텨퍼링이 시작되면 오스테나이트가 불안정 오스테나이트 및 상온에서도 안정한 고탄소 오스테나이트로 변태하게 되는데 이러한 반응을 1 단계 반응(Stage 1)이라고 한다. 안정한 고탄소 오스테나이트를 잔류 오스테나이트라 하며 상온으로 냉각시 불안정 오스테나이트가 변태한 페라이트와 잔류 오스테나이트가 혼재되어 있는 조직을 오스페라이트라고 한다. 이 1 단계 반응에서는 경도와 불안정 오스테나이트의 분률이 감소하고 안정 오스테나이트의 분률과 오스테나이트 탄소 함량이 증가한다. 2 단계 반응(Stage 2)은 고탄소 오스테나이트가 열역학적으로 더욱 안정한 페라이트와 탄화물로 분해하는 과정이다. 고탄소 오스테나이트 부피 분률은 1 단계 반응에 의하여 오스텨퍼링 시간이 증가함에 따라 증가하여 최대값에 도달하게 되고 2 단계 반응이 시작되는 시점 t2에서 감소하기 시작한다. 프로세싱 윈도우를 얻는 방법은 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 1단계 반응이 끝나는 시간, t1, 은 Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같이 오스텨퍼링 시간에 따른 경도의 변화로부터 얻을 수 있으며 이 시간과 최대 잔류 오스테나이트 부피 분률의 90%가 얻어지는 시간, Fig. 1(b)의 tmin 및 tmax, 중 긴 시간인 tmax사이의 시간 간격을 프로세싱 윈도우라

†E-mail : hwkwon@yu.ac.kr

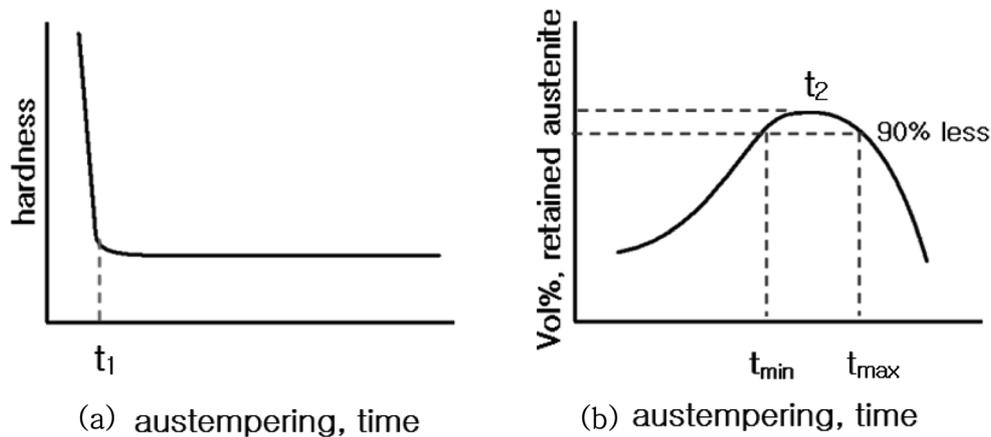


Fig. 1. Determination of  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_{min}$  and  $t_{max}$  [5,6].

Table 1. Chemical analyses of charging materials, nodulariser, inoculants and additives for alloying element.

materials	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ba	Cu	remark
pig iron	4.35	0.78	0.09	0.045	0.008	-	-	-	
steel scrap	0.03	0.016	0.22	0.015	0.009	-	-	-	
Fe-75Si	0.033	75.31	-	0.020	0.003	-	-	-	
Mg-Fe-Si	-	46.44	-	-	-	5.12	2.14	1.91	
Ba-Fe-Si	-	72.44	-	-	-	-	-	-	
Fe-Mn	6.72	0.50	75.55	0.005	0.35	-	-	-	
metallic Cu	-	-	-	-	-	-	-	99.90	

한다[5,6]. 이 구간에서는 페라이트와 고탄소 오스테나이트의 형상과 조성의 변화가 거의 없으며 기계적 특성 또한 최적으로 나타나고 거의 일정하다. 프로세싱 윈도우의 크기는 화학 조성, 오스테나이트화 처리 온도 및 시간 그리고 오스템퍼링 처리 온도 등의 영향을 받는다. 그리고 프로세싱 윈도우를 열린 윈도우와 닫힌 윈도우로 구분하며 닫힌 윈도우는 1 단계 반응이 종료되기 전 2 단계 반응이 시작되며 이 경우에는 최적의 기계적 특성을 얻을 수 없다[7].

주어진 오스템퍼링 처리 온도에서, 오스템퍼드 구상흑연주철을 얻는 최적의 열처리 시간이 프로세싱 윈도우이며 최적의 기계적 성질, 특히 인장 강도 및 연신률을 얻기 위하여 제안되었다. 앞의 연구에서 기지에서 탄소 확산을 억제하여 주방 상태에서 펄라이트 기지 조직을 얻을 수 있는 0.80wt%의 구리를 첨가한 경우에 오스템퍼링 처리하여 최대의 강도를 얻었다[8]. 따라서 본 연구에서는 3.60wt%C-2.50wt%Si-0.80wt%Cu 조성 구상흑연주철의 오스템퍼링 시 프로세싱 윈도우에 미치는 오스테나이트화 처리 온도와 시간 그리고 구리 첨가의 영향을 각각 조사·연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편의 제조

#### 2.1.1 용해 및 주조

75 kW 용량의 고주파 유도 용해로를 이용하여 선철과 강고

철을 로에 장입하여 용해하였다. 2.50wt%의 최종 주조품의 규소 함량을 얻기 위하여 구상화처리 후 용탕의 목표 규소 함량을 2.10wt%로 하였다. 따라서 1.32wt%의 기본 용탕의 규소 함량을 얻기 위하여 규소 함량이 약 75wt%인 페로실리콘을 노 중 용탕에 첨가하였다. R-형태의 열전대를 부착시킨 침전식 온도계를 이용하여 용탕의 온도를 측정하였으며 온도가 약 1,450°C에 도달하였을 때 시험 주조품 중 0.04wt%의 잔류 마그네슘 함량을 얻기 위하여 노 중 용탕에 5.0wt%Mg-Fe-Si 합금을 풀린징하는 방법으로 구상화 처리하였다. 구상화 처리를 한 후 0.80wt%의 구리 함량을 얻기 위하여 금속 구리를 첨가한 후 용탕을 레이드에 출탕하였다. 이 때 용탕의 규소 함량은 약 2.10wt%이며 2.50wt%의 최종 목표 함량을 얻기 위하여 규소 함량을 0.4wt% 증가시키는 방법으로 후접종 처리하였다. 접종제로는 직경이 약 1.0~3.0 mm 크기의 입자형 1.0wt%Ba-Fe-Si 합금을 사용하였다. 용해 시 사용한 장입물, 용탕 처리제 및 구리의 화학 조성은 Table 1에서 각각 보이는 바와 같다.

용탕의 온도를 측정한 후 주형에 주입하였으며 주입 온도는 1,370~1,380°C의 범위에서 거의 일정하였다. 주형으로는 생형을 사용하였으며 지름과 길이가 각각 30 및 300 mm인 봉재 시편을 주형 당 3 개를 얻었다. 주입 후 주형의 주입구와 압탕에 발열제를 뿌렸다. 또한 구리 판 위에 놓여 있는 금형에 소형 레이드를 이용하여 용탕을 주입하여 화학 조성 분석용 시편을 얻었다. 이렇게 얻은 시편을 에미션 스펙트로미터를 이용하여 화학 조성을 분석하였다. 주입된 용탕이 완전히 응고되

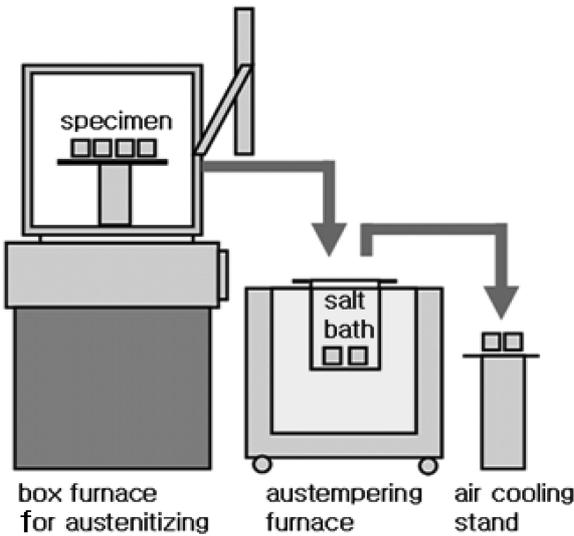


Fig. 2. Austempering heat treatment apparatus.

고 상온으로 냉각한 후 탈사하여 시험 주조품을 얻었다. 시험 주조품을 밴드 쏘우를 이용하여 절단하여 3 개의 봉재 시편을 얻고 시편 절단기를 이용하여 높이가 약 20 mm 크기로 절단하였다.

2.1.2 열처리 조건

오스테퍼링 실험 장치는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 3.1 kW 용량의 박스로를 이용하여 오스테나이트화 처리하고 7.8 kW 용량의 염욕로를 이용하여 오스테퍼링 처리하였다. 염욕은 NaNO<sub>3</sub>와 KNO<sub>3</sub>의 중량비가 45 : 55인 저온용 조성을 택하여 혼합하였다. 오스테나이트화 처리 온도를 850~950°C 범위에서 50°C 간격으로 변화시켰으며 시편을 장입하기 전 로의 온도를 50°C 이상 승온하여 시편을 장입한 후 오스테나이트화 처리 온도의 감소를 보정하였다. 가로 및 세로가 각각 20 및 100 mm인 철판에 6 개의 시편을 올려놓고 오스테나이트화 처리 로에 장입하였다.

오스테나이트화 처리 시간은 30, 60 및 120 분으로 하였다. 각각의 온도 및 시간에 따라 오스테나이트화 처리한 후 염욕로에 6 개의 시편을 동시에 열간 퀴칭하고 오스테퍼링하였다. 오스테퍼링 온도는 300~400°C 범위에서 50°C 범위로 변화시켰으며 시간은 5, 10, 20, 40, 80 및 160 분으로 변화시켰다. 오스테퍼링이 끝난 후 시편을 방출시켜 공냉하였다.

2.1.3 구리 첨가의 영향 시험

프로세싱 윈도우에 미치는 구리 첨가의 영향을 시험하기 위하여 3.60%C-2.50%Si-0.25%Mn 조성의 구상흑연주철 용탕 내에 구리를 0.00~1.20wt% 범위에서 0.40wt% 간격으로 변화시켜 첨가하였다. 그리고 950°C에서 1 시간동안 오스테나이트화 처리하고 각각 450, 400, 350, 및 300°C의 온도에서 5, 10, 20, 40, 80, 160 및 360 분동안 오스테퍼링 처리하였다.

2.2 t<sub>2</sub>와 프로세싱 윈도우의 결정

t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>min</sub> 및 t<sub>max</sub>를 구하는 방법은 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 오스페라이트가 형성된 후 불안정 오스테나이트가 3%

미만으로 거의 일정해지기 때문에 경도 또한 일정해지므로 경도를 측정하여 t<sub>1</sub>을 얻었다. t<sub>2</sub>는 X - 선 회절 분석을 통하여 얻은 오스테퍼링 처리 시간에 따른 잔류 오스테나이트 부피 분율의 변화 곡선, Fig. 1(b), 에서 최대값의 90%에 해당하는 시간인 t<sub>max</sub>와 t<sub>min</sub>을 얻어 아래의 식 (1)로부터 계산하여 얻었다. 그리고 1 단계 반응의 종료 시점인 t<sub>1</sub>과 t<sub>max</sub> 사이의 시간 간격인 프로세싱 윈도우를 얻었다.

log t<sub>2</sub> = (log t<sub>max</sub> + log t<sub>min</sub>) / 2 (1)

2.2.1 경도 시험

오스테퍼링 1 단계 반응의 종료 시간, t<sub>1</sub>, 을 결정하기 위하여 경도 시험을 하였다. 잔류 오스테나이트 양을 측정할 시편을 사용하여 로크웰 경도 시험기를 이용하여 C 스케일로 측정하였다. 각 조건 별로 6 회 시험하여 최대값과 최소값을 제외한 4 개의 값의 평균값을 얻었다.

2.2.2 잔류 오스테나이트 부피 분율의 측정

잔류 오스테나이트 부피 분율은 X - 선 회절 장치를 이용하여 고니오 방식으로 시험하고 적분 강도를 계산하여 측정하였다. 타겟로는 구리를 사용하였다. 이 때 가속 전압과 전류는 각각 40 kV와 100 mA로 하고 스캐닝 속도는 5°/min로 하였으며 2θ는 62 에서 92°까지 변화시켰다. 페라이트는 (200)면의 피크를 택하고, 잔류 오스테나이트는 (220)면의 피크를 선택하여 상대적인 적분 강도를 측정하여 잔류 오스테나이트 부피 분율을 계산하였다.

2.3 광학 현미경 조직 관찰

시편의 가운데 부분을 절단하여 조직 관찰용 시편을 얻었다. 얻은 시편을 조연마하고 1 μm 다이몬드 페이스트를 사용하여 세연마한 후 3% 나이탈을 사용하여 부식시켜 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화학 조성 분석 결과

각 용해 시 조건별로 화학 조성을 분석하기 위한 철 시편을 얻어 분석하였으며 그 결과는 Table 2에서 보이는 바와 같다. 목표 함량이 3.60wt%인 탄소는 3.58~3.65wt% 범위 내에 있었다. 목표 함량이 2.50wt%인 규소 함량은 2.46~2.55wt% 범위 내에 있었다. 목표 함량이 0.04wt%인 잔류 마그네슘 함량은 0.034~0.040wt% 범위인 것으로 나타났다.

망간의 목표 함량은 0.25wt%였으며 0.22~0.27wt% 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 목표 함량이 0.80wt%인 구리 함량은 0.79~0.83wt% 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 그리고 모든 구리를 첨가하지 않은 경우 구리 함량은 0.04wt%로 나타났다. 0.40 및 1.20wt%를 첨가한 경우 각각 0.45 및 1.24wt%인 것으로 나타났다. 모든 시편의 화학 조성은 실험 오차 범위 내에 있었으며 3.60wt%C-2.50wt%Si-0.80wt%Cu 조성의 구상흑연주철의 오스테퍼링 시 프로세싱 윈도우에 미치는 오스테나이트화 처리 온도와 시간 그리고 구리 첨가의 영

Table 2. Chemical analyses of specimens.

specimen No.	elements									remark
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Mo	Ni	
1	3.60	2.46	0.209	0.05	0.01	0.036	0.78	0.002	0.003	
2	3.62	2.50	0.251	0.063	0.01	0.037	0.83	0.002	0.009	
3	3.61	2.55	0.25	0.60	0.01	0.036	0.79	0.002	0.007	
4	3.65	2.56	0.262	0.062	0.01	0.035	0.81	0.002	0.008	
5	3.59	2.46	0.260	0.073	0.01	0.038	0.83	0.002	0.007	
6	3.63	2.47	0.289	0.061	0.01	0.040	0.79	0.002	0.006	
7	3.62	2.51	0.250	0.062	0.01	0.038	0.81	0.002	0.007	
8	3.61	2.49	0.247	0.063	0.01	0.039	0.80	0.002	0.006	
9	3.58	2.53	0.263	0.073	0.01	0.035	0.79	0.002	0.006	
0.00wt%Cu	3.59	2.46	0.254	0.062	0.01	0.039	0.04	0.002	0.007	
0.40wt%Cu	3.62	2.47	0.255	0.063	0.01	0.036	0.45	0.002	0.045	
1.20wt%Cu	3.61	2.48	0.318	0.068	0.01	0.034	1.24	0.002	0.164	

\*The aim contents of C and Si were 3.60 and 2.50wt%, respectively.

\*The aim contents of Mn and Cu were 0.25 and 0.80wt%, respectively.

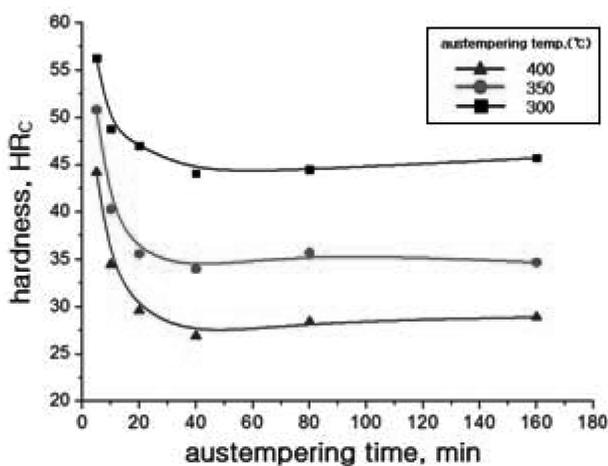


Fig. 3. Variations of the hardness of the ADI specimen austenitized at 950°C for 2 hours with austempering condition.

항 시험 결과를 분석하는 데에는 대체로 문제가 없는 것으로 판단되었다.

### 3.2 경도에 미치는 오스템퍼링 온도와 시간의 영향

오스템퍼링 온도와 시간에 따른 경도의 변화를 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에서 초기 10 분 이내에서 가장 높은 경도 값을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 오스템퍼링 시간이 짧으면 1 단계 반응이 종료될 시간적 여유가 없어서, 즉 페라이트와 상온에서도 안정한 고탄소 오스테나이트가 생기지 못하게 되고 불안정 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하게 되어 경도가 높아지는 것으로 생각된다. 초기의 짧은 시간에서 잔류 오스테나이트의 부피 분률이 작고 시간이 지남에 따라 증가하며 따라서 마르텐사이트 부피 분률이 감소하여 경도가 감소한 것으로 생각된다.

같은 오스테나이트화 온도 및 시간에서 오스템퍼링 온도가 낮을수록 경도 값이 상대적으로 높음을 알 수 있다. 오스템퍼링 온도가 낮을수록 페라이트로부터 탄소의 확산 속도가 페라이트 계면의 성장 속도 보다 느려진다. 페라이트 내에 과포화된 탄소는 페라이트 내에서 탄화물로 석출하게 된다. 따라서 오스테나이트 안정화 원소인 탄소의 감소로 오스테나이트는 감소하고 페라이트의 형상이 침상 페라이트가 아닌 깃털 상의 페라이트로 되면서 경도가 증가하는 것으로 생각된다. 오스템퍼링 온도가 증가할수록 오스페라이트 상이 조대해지며 온도가 낮을수록 미세한 오스페라이트 조직이 형성하였기 때문이다.

### 3.3 잔류 오스테나이트 부피 분률에 미치는 오스템퍼링 온도와 시간의 영향

오스템퍼링 온도와 시간에 따른 잔류 오스테나이트 부피 분률의 변화는 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에서 초기에 오스테나이트 부피 분률이 가장 낮으며 오스템퍼링 시간이 지남에 따라 증가하여 최대값에 도달한 후 감소하였다. 그리고 같은 오스테나이트화 온도에서 오스템퍼링 온도가 높을수록 잔류 오스테나이트 부피 분률이 많았다. 오스템퍼링 온도가 높으면 탄소의 확산 속도가 높아 탄소 함량이 조기 균질화되고 안정 오스테나이트 부피 분률이 증가한 것으로 생각된다.

또한 같은 오스테나이트화 온도 및 시간에서 오스템퍼링 온도가 높을수록 잔류 오스테나이트 부피 분률이 급격히 감소한다. 이것은 높은 오스템퍼링 온도에서는 탄소의 확산 속도가 빨라져 1 단계 반응과 2 단계 반응의 교차가 일어나서 1 단계 반응이 끝나기 전에 많은 부분에서 2 단계 반응이 진행되어 반응이 짧아진 것으로 생각된다. 반대로 오스템퍼링 온도가 낮아지면 탄소의 확산 속도가 느려지면서 고탄소 오스테나이트가 베이나이트로 변하는데 시간이 많이 걸리기 때문에 오스테나이트 감소율이 상대적으로 급격하게 변하지는 않는 것으로 생각된다.

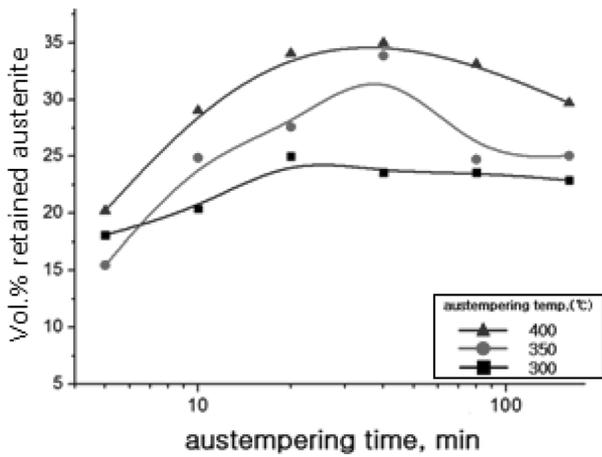


Fig. 4. Variations of the amount of retained austenite of the ADI specimen austenitized at 950°C for 2 hours with austempering condition.

3.4 경도에 미치는 오스테나이트화 온도와 시간의 영향

오스테나이트화 온도와 시간에 따른 경도의 변화는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 대부분의 경우에 있어서 경도의 변화는 처음에는 높은 값이었다가 급격히 감소하였다.

오스테나이트화 온도가 950°C이고 오스테퍼링 온도가 350°C 일 때는 오스테퍼링 시간이 40 분일 때 경도가 일정해졌고 오스테나이트화 온도가 900°C이고 오스테퍼링 온도가 350°C일

때는 오스테퍼링 시간이 20 분일 때 경도가 일정해졌다. 이것은 오스테나이트화 온도가 높을수록 탄소의 확산 속도가 빨라지고 더 많은 탄소가 오스테나이트에 고용되고 안정화되어 1 단계 반응이 지연된 것으로 생각된다.

950°C에서 오스테나이트화 처리하고 350°C에서 오스테퍼링할 때 오스테나이트화 시간에 따른 경도의 변화는 Fig. 5, (a)에서 보이는 바와 같다. 오스테나이트화 처리 시간이 1 시간일 때 경도가 최대를 나타내고 2 시간으로 증가하면 오히려 감소했다. 이것은 오스테나이트화 처리 시간이 길어지면서 오스테나이트화 온도에서 오스테나이트 결정립 성장이 일어났기 때문인 것으로 생각된다.

900°C에서 오스테나이트화 처리하고 350°C에서 오스테퍼링할 때 오스테나이트화 시간에 따른 경도의 변화는 Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같다. 한 시간 동안 오스테나이트화 처리한 경우에 경도가 가장 낮았으며 나머지 두 경우는 큰 차이가 없었다. 850°C에서 오스테나이트화 처리한 경우는 경도의 변화가 불규칙하였으며 특히 0.5 시간동안 오스테나이트화 처리한 경우는 기지 내에 탄소등 합금 원소가 놓아 들어갈 시간이 충분하지 않아 오스테퍼링한 후 경도가 크게 낮아진 것으로 생각된다.

3.5 잔류 오스테나이트 부피 분률에 미치는 오스테나이트화 처리 온도와 시간의 영향

오스테나이트화 처리 온도와 시간에 따른 잔류 오스테나이트 부피 분률의 변화는 Fig. 6 및 7에서 보이는 바와 같다. 오스

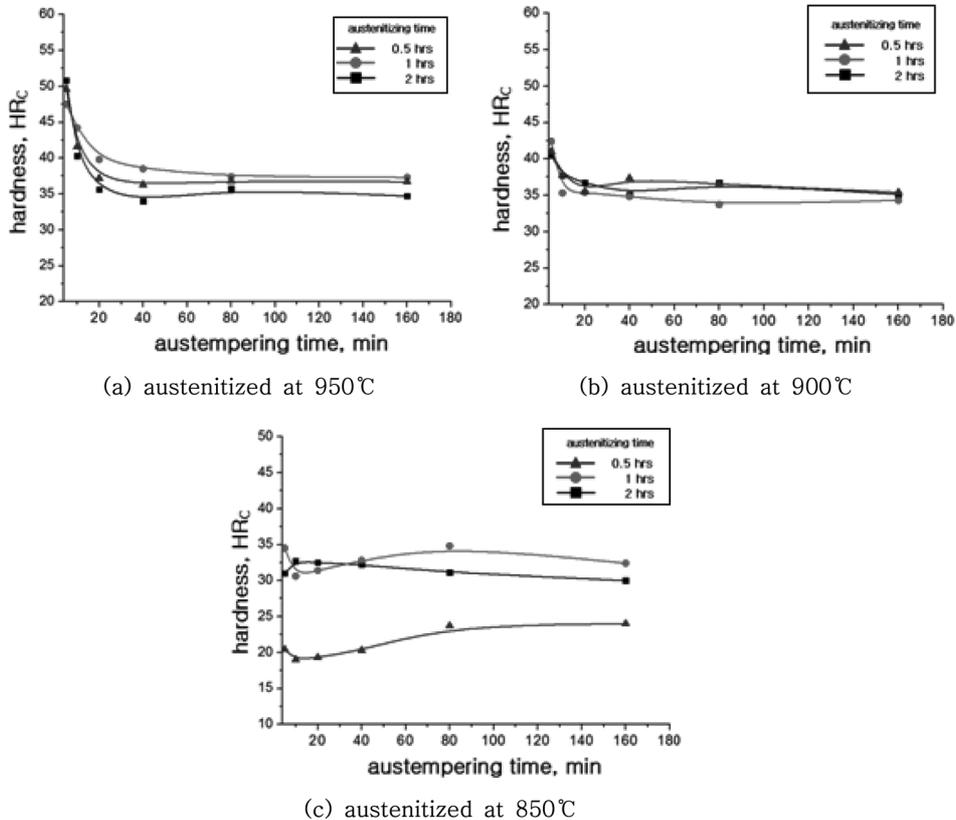


Fig. 5. Variations of hardness as functions of austenitizing temperature and time and austempering time. The austempering was carried out at 350°C.

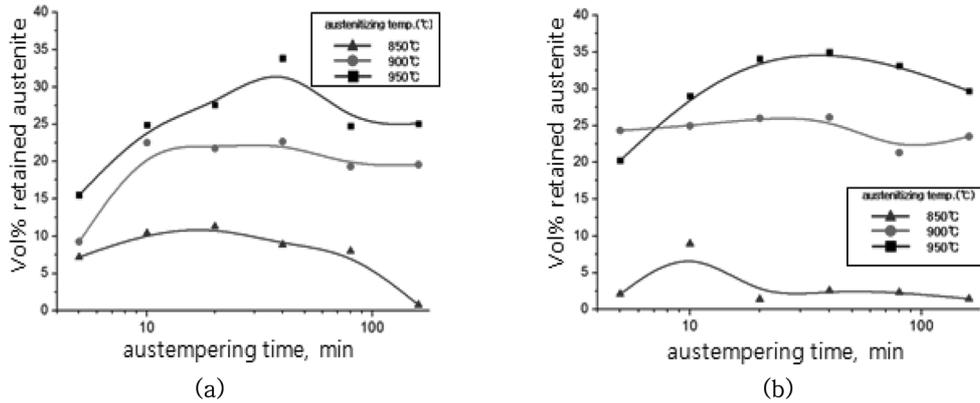


Fig. 6. Variations of the amount of retained austenite with austenizing temperature for 2 hours. The austemperings were carried out at 350, (a), and 400°C, (b).

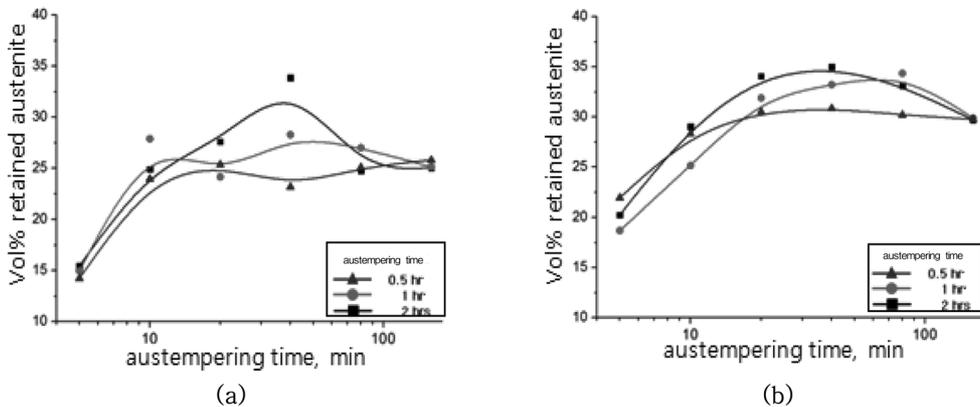


Fig. 7. Variations of the amount of retained austenite with austenizing time at 950°C. The austemperings were carried out at 350, (a), and 400°C, (b).

테나이트화 처리 시간이 2 시간으로 일정할 때 850~950°C의 온도 범위에서 오스테나이트화 처리한 후 오스템퍼링할 때 잔류 오스테나이트 부피 분율의 변화는 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 오스테나이트화 처리 온도가 높을수록 잔류 오스테나이트 부피 분율이 높았다. 이것은 오스테나이트화 처리하는 동안 온도가 높을수록 더 많은 탄소와 합금 원소가 기지 중에 녹아 들어가 안정 오스테나이트 부피 분율이 증가한 것으로 생각된다. 오스테나이트화 처리 온도가 850°C로 낮은 경우 잔류 오스테나이트 부피 분율은 10%이하로 낮았다. 이것은 오스테나이트화 처리 온도가 낮아 오스테나이트 기지로 탄소 및 합금 원소가 충분히 녹아 들어가지 못하였기 때문으로 생각된다.

동일한 오스테나이트화 처리 온도에서 오스템퍼링 처리 시간, 0.5~2 시간, 및 온도, 300~400°C, 를 변화시켜 가며 오스템퍼링 처리하는 동안의 잔류 오스테나이트 부피 분율 변화는 Fig. 7에서 보이는 바와 같다. 오스템퍼링 처리 온도가 400°C로 높을 경우에는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 오스테나이트화 처리 시간이 2 시간으로 가장 길 때 잔류 오스테나이트 부피 분율이 가장 많았다.

### 3.6 오스테나이트화 처리 온도에 따른 프로세싱 윈도우의 영향

900 및 950°C의 온도에서 1 및 2 시간동안 각각 오스테나이트화 처리하였을 때 프로세싱 윈도우는 각각 Fig. 8 및 9에서 보이는 바와 같다. 오스테나이트화 처리 온도가 850°C로 낮은 경우 시간에 상관없이  $t_1$  및  $t_{max}$ 를 구할 수 없었다. 또한 다른 오스테나이트화 처리 온도에서도 오스테나이트화 처리 시간이 짧은 경우에도 마찬가지로  $t_1$  및  $t_{max}$ 를 구할 수 없어 프로세싱 윈도우를 얻을 수 없었다.

같은 오스템퍼링 온도 및 시간에서 전체 프로세싱 윈도우의 구간은 오스테나이트화 온도가 900°C로 낮은 경우인 Fig. 8과 오스테나이트화 온도가 950°C로 높은 경우인 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 같은 오스테나이트화 온도에서 두 프로세싱 윈도우의 형상은 비슷하다. 다른 오스테나이트화 온도에서 그 차이는 오스템퍼링 온도가 400°C인 경우에 오스테나이트화 처리 온도가 900°C일 때가 950°C일 때보다  $t_{max}$  시간이 짧은 것으로 보인다. 이것은 탄소의 고용도의 차이에 의한 것으로 생각된다. 오스테나이트화 온도가 높은 경우 그렇지 않은 경우에

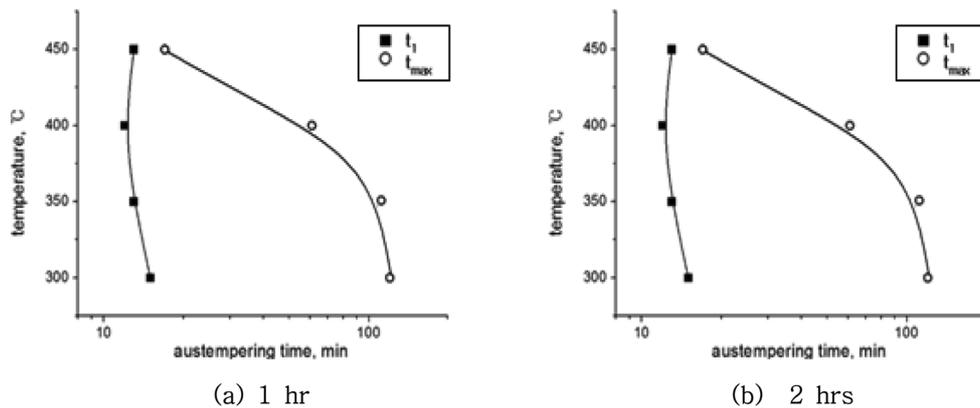


Fig. 8. Processing window of the specimen austenitized at 900°C for different time.

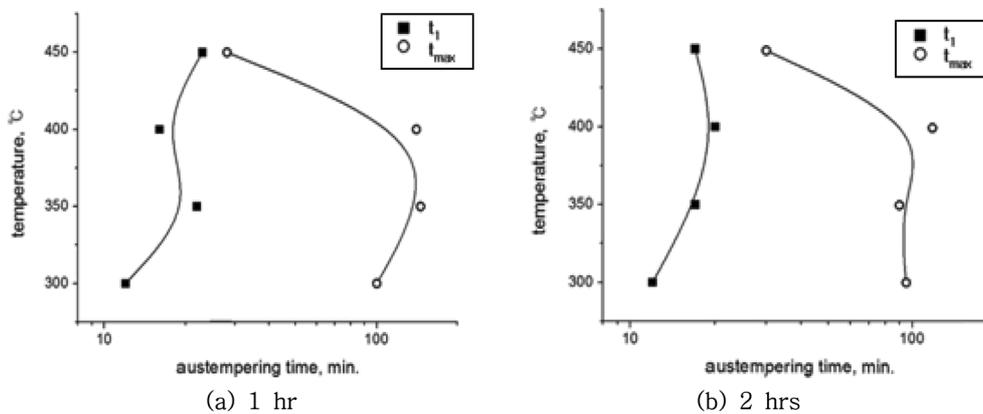


Fig. 9. Processing window of the specimen austenitized at 950°C for different time.

비하여 오스테나이트 중 탄소 및 합금 원소의 고용도가 증가하고 더 고르게 분포하여 프로세싱 윈도우 구간이 넓어진 것으로 생각된다.

오스테퍼링 온도가 400°C 부근에서 프로세싱 윈도우 구간이 더 넓은 것으로 나타났다. 이것은 오스테퍼링 온도가 400°C 부근일 경우 탄소의 확산 속도가 불안정 오스테나이트의 성장 속도 보다 빠르게 되어 고탄소 안정 오스테나이트가 증가하게 되고  $t_{max}$  시간이 길어지게 된다. 350°C 부근에서는 탄소의 확산 속도와 불안정 오스테나이트의 성장 속도가 균형을 이루는 것으로 생각되며 그 구간의 오스테나이트화 온도의 변화에 따른 변화는 그렇게 크지 않은 것으로 생각된다. 300°C와 그 아래의 온도에서는 탄소의 확산 속도가 낮기 때문에 오스테나이트화 온도 및 시간에 따른 프로세싱 윈도우의 변화가 작을 것으로 생각된다.

최대 프로세싱 윈도우가 얻어지는 오스테퍼링 온도는 Table 3에서 보이는 바와 같이 오스테퍼링 시간이 같을 때 오스테나이트화 처리 온도가 950°C로 높은 경우, 900°C의 경우에는 300°C의 낮은 온도인데 비하여, 400°C로 높은 오스테퍼링 온도에서 얻어졌다. 그리고 동일한 오스테나이트화 온도에서 최대 프로세싱 윈도우는 오스테나이트화 처리 시간이 길수록 낮은 오스테퍼링 온도에서 얻어졌다. 950°C의 경우에는 그렇지 않으나, 900°C의 온도에서 한 시간동안 오스테나이트화 처리한 경

우 최대 프로세싱 윈도우는 350°C의 오스테퍼링 온도에서 얻어졌으나 두 시간으로 오스테나이트화 처리 시간이 증가하면 300°C의 낮은 오스테퍼링 온도에서 얻어졌다.

최대 프로세싱 윈도우의 크기는 동일한 오스테나이트화 처리 온도에서 시간이 증가할수록 감소하였다. 950°C의 온도에서 1 시간동안 오스테나이트화 처리한 경우 400°C에서 오스테퍼링한 경우 프로세싱 윈도우는 124 분이었으나 오스테나이트화 처리 시간이 2 시간으로 증가한 경우 900°C의 오스테퍼링 온도에서 프로세싱 윈도우가 98 분으로 감소하였다. 900°C의 온도에서 1 시간동안 오스테나이트화 처리한 경우 350°C의 오스테퍼링 온도에서 120 분이었으나 2 시간 동안 오스테나이트화 처리한 경우 300°C의 온도에서 105 분으로 감소하였다. 이것은 같은 온도에서 오스테나이트화 처리한 경우 시간이 증가함에 따라 오스테나이트 중 탄소와 합금 원소의 고용도가 증가하여 더 낮은 온도에서 오스테퍼링한 경우 탄화물 형성에 대한 구동력인 부피 자유에너지가 상대적으로 커졌기 때문으로 생각된다.

### 3.7 프로세싱 윈도우에 미치는 구리 첨가의 영향

구리 첨가의 프로세싱 윈도우에 미치는 영향을 시험하기 위하여 3.60wt% C-2.50wt% Si 조성의 구상흑연주철을 용해한 후 용탕 내에 구리를 0.00~1.20wt% 범위에서 0.40wt% 간격으로 변화시켜 첨가하였다. 3.60wt% C-2.50wt% Si 조성의 구상흑연

주철의 프로세싱 윈도우에 미치는 구리 첨가의 영향 실험 결과는 Fig. 10에서 보이는 바와 같다.

구리는 주철에 합금 원소로 첨가되면 경화능을 증가시키는

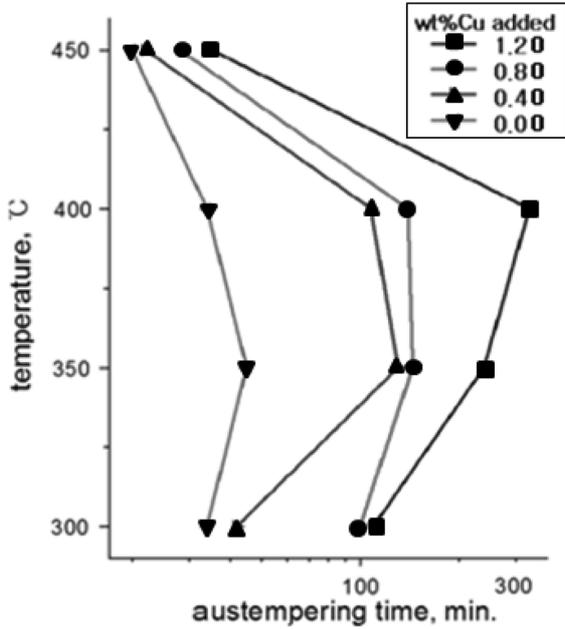


Fig. 10. Variation of  $t_{max}$  curve with the amount of Cu added.

원소로 알려져있다. 이러한 구리의 경화능 증가로 인해 구리의 첨가량이 증가할수록 전체 프로세싱 윈도우 구간에 큰 영향을 미치지만 1 단계 반응은 약간만 지연시킨다. 구리 합금은 오스테나이트를 안정화시키므로 2 단계 반응 즉 안정한 고탄소 오스테나이트가 더욱 안정한 페라이트와 탄화물로 변태하는 것을 상당히 지연시킨다. 따라서 탄소의 확산을 억제하여, Fig. 11에서 보이는 바와 같이,  $t_{max}$  곡선이 오른쪽으로 이동하여 구리 첨가량이 증가할수록 프로세싱 윈도우는 넓어졌다.

#### 4. 결 론

3.60wt%C-2.50wt%Si-0.80wt%Cu 조성의 구상흑연주철의 오스템퍼링 시 프로세싱 윈도우에 미치는 오스테나이트화 처리 온도와 시간 그리고 구리 첨가의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 오스테나이트화 처리 온도가 높을수록 400°C의 오스템퍼링 온도에서 2 단계 반응이 지연되었다.
- 2) 최대 프로세싱 윈도우는 오스테나이트화 처리 시간이 증가하면 더 낮은 오스템퍼링 온도에서 얻어졌다.
- 3) 최대 프로세싱 윈도우 폭은 동일한 오스테나이트화 처리 온도에서 처리 시간이 증가할수록 감소하였다
- 4) 0.00~1.20wt% 범위에서 구리 첨가량이 증가함에 따라 프로세싱 윈도우 폭이 증가하였다.

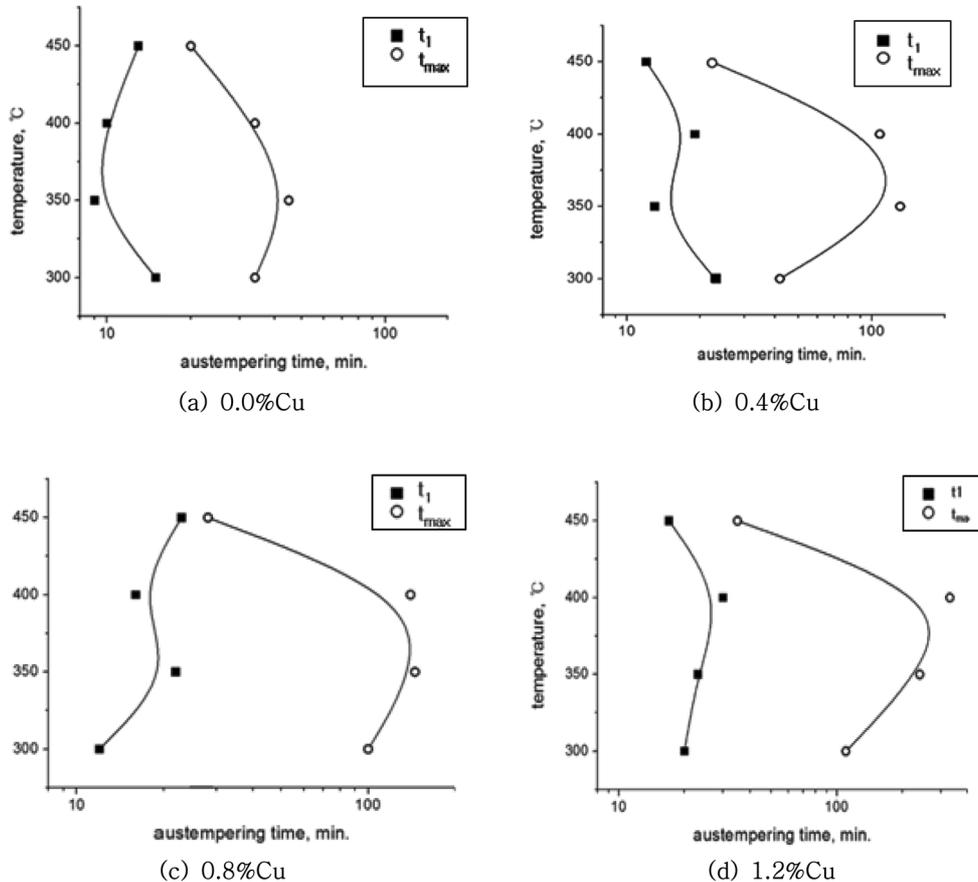


Fig. 11. Variations of processing window of the specimen with the amount of Cu added.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과이며 이에 감사드린다.

### 참고문헌

[1] A. Alagarsamy et. al. : "Ductile Iron Handbook", AFS, (1992) 323-378.

[2] A. Nazarboland and R. Elliott : Mat. Sci. & Tech., 13 (1997) 223-232.

[3] D. C. Wen and T. S. Lei : Mat. Trans., 40(9) (1999) 980-991.

[4] N. Darwish and R. Elliott : Mat. Sci. & Tech., 9 (1993) 572-602.

[5] A. S. Hamid Ali and R. Elliott : Mat. Sci. & Tech., 12 (1996) 1021-1031.

[6] Chan Tung Chen and Tien Shou Lei : Mat. Trans., 40(1) (1999) 82-85.

[7] R. Elliot : "Heat treatment of Metals", (1997) 55-59.

[8] J.-J. Park, G.-S. Seo and H.-W. Kwon : J. of KFS., 28(6) (2008) 273-281.