
금형강의 자유단조 및 열처리 특성

기아특수강(주)
금속기술연구소

이정환, 박상덕, 이용희,
장병록, 권철호, 이영국

금형강의 자유단조 및 열처리 특성

李正煥, 朴相德, 李龍熙, 張炳祿, 權哲好*, 李永國**

기아특수강(주) 금속기술연구소, 일반단조과*, 2차가공과**

1. 서론

차량, 선박, 건축, 석유산업 및 기계 등의 구조물 부재로서 사용되는 강을 일반적으로 구조용강이라 칭하며, 각종 공구, 다이스 형틀, 압출공구, 프레스형틀 등에 사용되는 강을 공구강이라 칭한다. 이 구조용강 및 공구강은 압연 또는 단조후 열처리에 의해서 그 특성이 크게 변한다. 즉, 강재의 특성을 최대화 시켜 사용하기 위해 또는 원하는 요구특성에 맞게 사용하기 위해 열처리라는 후 공정을 이용한다.

특히 0.3~0.5% carbon의 탄소강에 Ni, Cr, Mo, V 등의 합금원소를 적당량 첨가하여 경화능을 향상시키고, 기계적성질을 개선시킨 플라스틱 금형강 및 다이스, 프레스, 엔빌 금형강은 열처리에 의해 강종특성이 크게 변한다.

따라서 이러한 강재는 압연 또는 단조 상태 그대로 사용하기보다는 열처리라는 후공정을 사용하여 강재의 특성을 충분히 극대화시킨 후 사용하고 있다. 더욱이 강재의 크기가 커서 mass effect가 존재할 경우 소입 및 소려 조건은 강재의 경도 및 강도와 인성을 좌우하며, 강재 위치별로도 그 특성이 변한다. 그림 1은 소입조건 즉, 냉매의 온도변화, 교반정도, 냉매의 농도변화에 따른 강재의 냉각속도 변화를 나타낸 것이다.

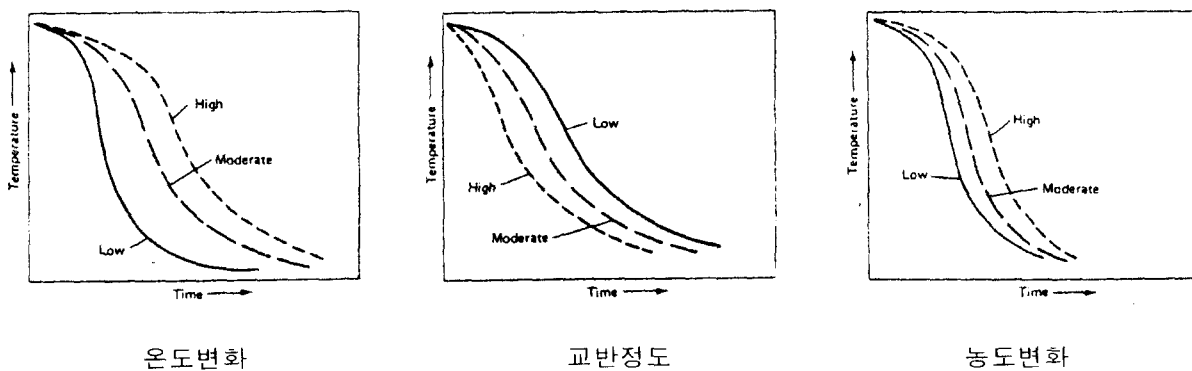


Fig. 1. Effect of temperature, agitation and concentration on cooling rate⁽¹⁾

또한 열처리 중 열처리 변형 및 크랙 등에 의해 제품에 중대한 결함을 유발할 수 있기 때문에 적정 열처리란 매우 중요하다. 수요자들 또한 제품의 종류 및 size에 따라 요구특성이 매우 까다로워지는 추세이다.

본 연구는 당사에서 자유단조로 생산하고 있는 플라스틱 금형강 및 열간 금형강의 소입특성을 예측·

평가하기 위해, 첫째 연속냉각변태 시험을 통해 CCT curve를 작성 냉각속도 변화에 따른 강의 특성(미세조직 및 경도)을 파악하고, 둘째 소입 조건(가열온도, 침적시간, 냉각조건 등)에 따라 강재의 내·외부의 온도변화를 모의시험하여, 강재의 크기 변화에 따라 강재 위치별 특성을 예측한 후, 셋째, 실제 자유단조품에 적용 내·외부 미세조직 및 물성을 비교 분석하였다.

자유단조재의 기초특성(화학성분, size, 형상, 냉각특성 등)과 열처리 모의시험 결과는 금형강의 소입·소려 적정 조건 도출이 가능할 뿐만 아니라 생산성 향상 및 품질 향상이 기대된다.

2. 실험방법

소재 제조

본 연구에 사용된 소재의 화학성분을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of tested steels.(wt%)

강 종	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	비고
Steel A	0.35	0.25	1.00	-	1.75	Add.	0.010	0.030	SCM440 Modify
Steel B	0.40	0.25	1.05	-	1.05	Add.	0.010	0.035	
Steel C	0.54	0.26	0.90	1.72	0.89	0.44	add.	0.025	STF4 계열

소재의 화학성분은 KS D 3753 규격의 STF4 강종 계열인 steel C와 SCM440을 modify한 A 및 B steel을 사용하였다. steel A와 B는 SCM440 기본 base로 하여 Mn 및 Cr, Mo를 미량 더 첨가하였으며, 용도는 플라스틱 금형 소재로 사용되며, steel C는 엔빌 및 압출공구, 다이 블록등에 사용된다.

소재의 제조는 60Ton 전기로에서 용해하여 ingot making후 500×400 ~ 350×350 각재로 자유단조 후 공시재로 사용하였다. 또한 소입 모의시험도 Steel A, B, C에 대해서 여러 가지 조건으로 각각 수 차례 반복해서 실시하였다. 소입 모의시험 및 소입·소려에 사용된 size 및 시험조건을 표 2에 나타내었다.

Table 2. size(mm) and test condition.

강 종	소입 모의시험	Q/T재 분석	CCT Curve 분석 (연속냉각변태 시험)
Steel A	□500×400	□500×400	0.1~20°C/s
Steel B	□500×400	□500×400	0.1~20°C/s
Steel C	□400×350	□400×350	0.1~20°C/s

연속냉각 변태 시험

소입 및 풀림, 불림 등의 열처리는 여러 가지 냉각과정에 있어서 변태를 이용한 것이다. 변태에는 크게 정적 변태인 등온변태와 동적 변태인 연속냉각변태로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 소입 모의시험

및 실제 공시재의 소입·소려 시험에 앞서 강재의 기초적인 특성 즉, 냉각속도 변화에 따른 소입성 및 미세조직, 기계적성질과 연속냉각에 의해 생기는 변태과정을 알아보기 위해 연속냉각변태 시험을 행하였다. 연속냉각 변태 시험을 통해 얻은 결과들은 강재의 냉각속도에 따른 기초적 특성 값으로, 소입 모의시험 및 실제 공시재의 소입·소려 열처리에 앞서 선행되어야 한다. 또한 연속냉각 변태 시험 후 일정온도에서 소려를 실시하여 경도변화를 알아보았다. 연속냉각변태 시험은 열간가공성 재현 시험기인 당사 Gleeble 1500을 이용해 행하였다. 그림 2는 시험에 사용된 시험편 형상 및 시험 조건을 나타내었다.

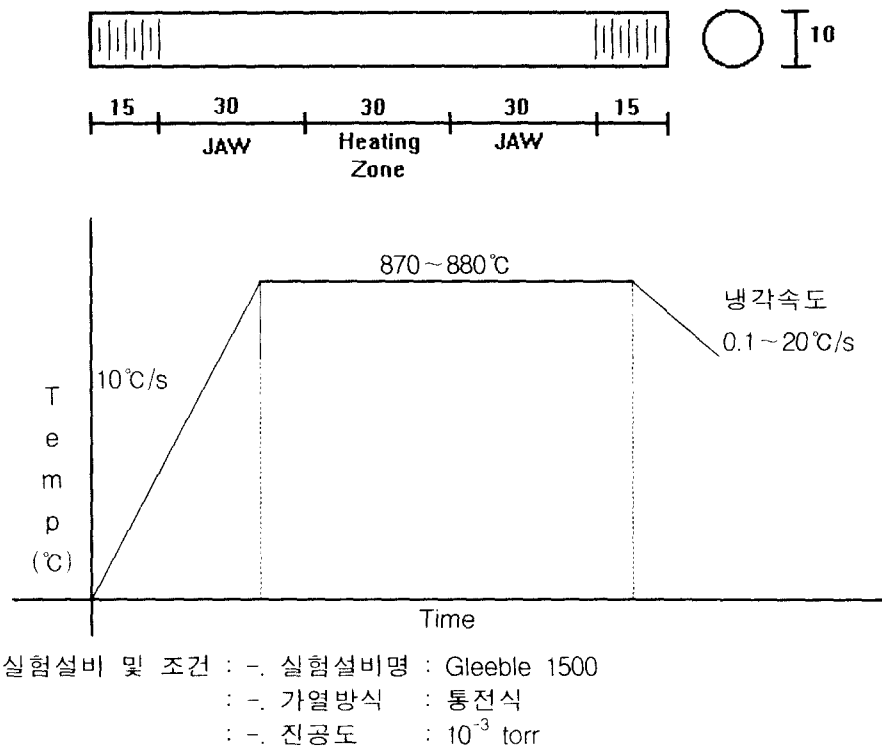


Fig. 2. Experimental condition of continuous cooling transformation test.

소입 모의시험

제품의 종류 및 size에 따라 소입 특성을 예측하기 위해 상용 program인 ANSYS program을 이용 연속냉각변태 조건 및 실제 조업조건을 경계조건으로 수 차례 반복하여 모의시험 하였다. 일정 크기의 강재를 오스테나이트화 온도로 가열한 후 냉각시킬 때 강재의 위치별로 냉각속도는 각기 다른 값을 갖으며, 따라서 강재의 위치별로 냉각속도를 예측하는 것은 소입 후 미세조직 및 경도의 예측이 가능한 것이다.

소입·소려 시험(양산조업 시험)

연속냉각변태 시험 및 소입 모의시험을 통해 얻은 data를 실제 양산품 소입·소려에 적용하여 소입 모의시험결과와 비교 분석하였다. 본 연구에 사용된 강재의 소입 및 소려 조건을 그림 3과 표 3에 나타내었다. 또한 각 강종의 물성 check는 소입·소려후에 하였으며, 물성 check는 경도를 기준으로 하였다. 미세조직은 광학현미경 및 SEM을 이용하여 강종별, 제품의 위치별로 구분하였다.

▶ 소입 & 소려 양산 조업 조건

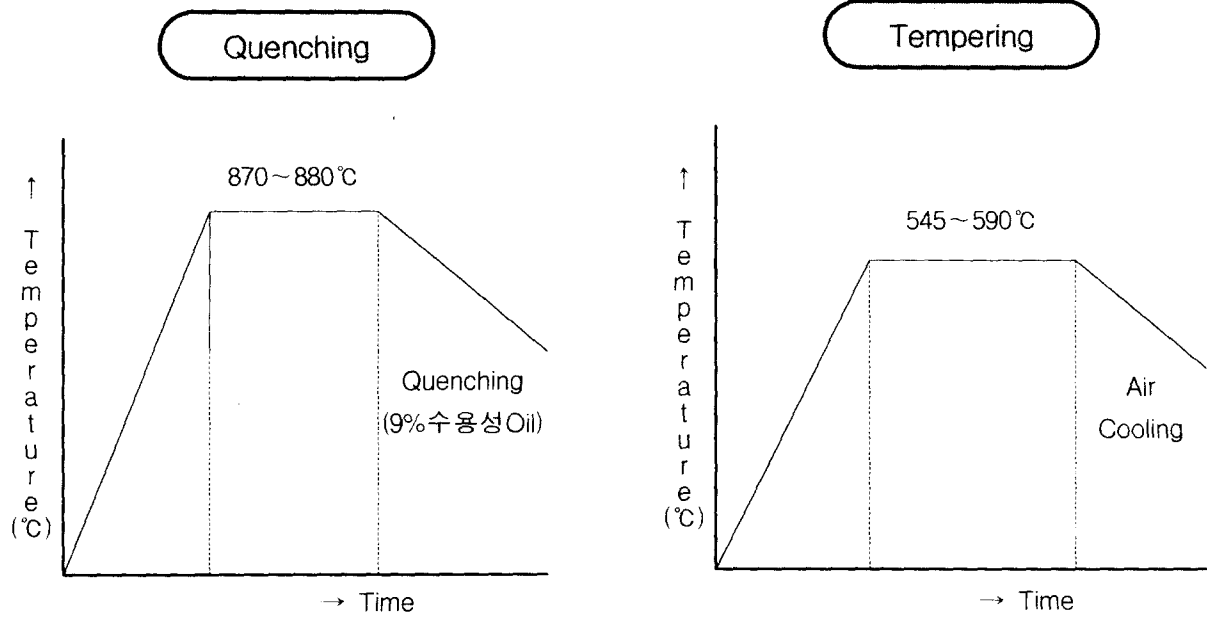


Fig. 3. Quenching and tempering condition

Table 3. cooling condition

소입 tank	교반 능력	냉각 매질	교반조건 (m/sec)	액 온 (°C)	비 고
<ul style="list-style-type: none"> • Size : W3200 × H3500 × L8575 • 용량 : 약 70ton 	<ul style="list-style-type: none"> • 유량: 1.5~7.5m³/min • 냉각수량: 100m³/h 	9% 수용성 오일 (Ucon-A)	0.30~0.45	25°C ~ 45°C	양산조건

3. 실험결과 및 고찰

연속냉각변태 시험

Steel A, B 강종의 냉각속도 변화에 따른 변태온도, 미세조직 및 물성등의 기초적인 특성을 알아보기 위해 연속냉각변태 시험을 행하였다. 그림 4에 Steel A, B의 냉각속도 변화에 따른 미세조직 변화 및 경도 변화를 나타내었다.

Steel A의 경우 약 1.0°C/s의 냉각속도에서 bainite 변태가 시작되었으며, 약 0.3°C/s의 냉각속도에서는 ferrite가 석출하여 미량의 ferrite+pearlite와 bainite가 혼합된 조직을 형성하고 있음을 알 수 있다. 0.1°C/s의 냉각속도에서는 ferrite+pearlite 조직을 구성하고 있다. 또한 연속냉각 변태 공시재를 580°C로 소려 열처리를 행하여 소려후 경도변화를 알아보았다. 그림 5에 소려후 경도값 변화를 나타내었다.

상기 연속냉각변태 시험의 결과를, steel A의 500×400 각재에 적용하여, 500×400 각재의 중심부까지 저온변태 조직인 bainite조직과 HRC 26~28수준의 경도를 얻기 위해서는 적어도 0.3°C/s이상의 냉각속도가 요구되는 것이다. 또한, 이러한 기초 data를 기준으로 소입 모의시험에서는 500×400 각재 중심부까지 0.3°C/s이상의 연속냉각속도를 얻기 위해, 표 3의 변수들을 다양하게 변화시켜 반복 모의시험을 행하

므로 써 0.3°C/s이상의 연속냉각속도를 얻을 수 있는 냉각조건(침적시간, 교반조건, 냉매조건, 냉매온도 등)을 찾는 것이다. Steel B의 경우도 소재의 중심부까지 저온변태 조직을 얻기 위해서는 0.3°C/s이상의 냉각속도가 필요함을 알 수 있다.

이와 같이 연속냉각 변태 시험으로부터 얻은 기초적인 data를 소입 모의시험에 활용하므로써 소입시 적정 냉각조건을 도출해내고, 적정 냉각조건을 실제 조업인 소입·소려 열처리에 적용하므로써 얻고자 하는 요구특성치를 얻는 것이다.

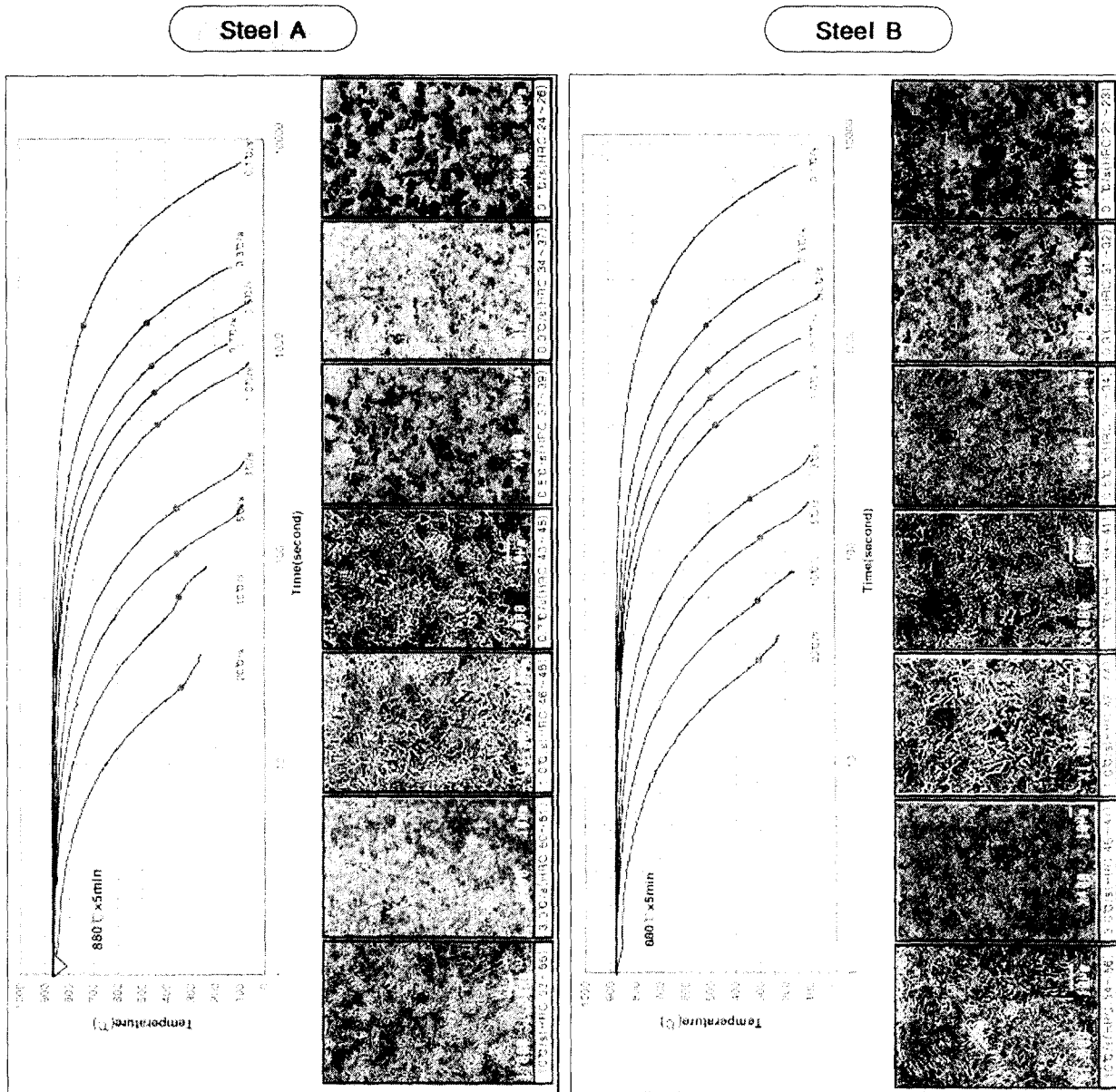


Fig. 4. Continuous cooling transformation diagram and SEM photographics of Steel A and B

소입 모의시험 결과

소입 모의시험은 침적시간 및 교반조건 등을 변수로 하여 A부터 D까지 4가지 조건으로 행하였다. 그림 6과 7은 Steel A와 B의 500×400 각재에 대한 소입 모의시험 결과를 나타낸 것이다. 그림 6은 침적시간 변화에 따른 소재의 온도분포 변화를 나타낸 것이며, 그림 7은 조건 D에 대한 소재의 위치별 냉각속도를 나타낸 것이다. Steel A와 B의 경우 합금성분 및 size가 유사하여 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 7의 소입 모의시험 결과와 연속냉각변태 시험을 연관지어 분석해보면, 표면부 및 표면직하부의 냉각속도는 7~10°C/s로 martensite 조직을 예측할 수 있으며, R/2부의 경우 0.6~0.7°C/s의 냉각속도로 bainite+martensite의 조직을 예측할 수 있으나, 중심부의 경우 0.15~0.20°C/s로 bainite조직에 미량의 ferrite+pearlite가 존재하는 혼합조직을 예측할 수 있다. 이와 같이 소입 모의시험으로부터 냉각속도와 미세조직을 예측하여 실제 조업에 적용하므로써 수요자가 요구하는 강재의 특성치(인장, 경도, 충격치 등)를 시행착오 없이 만족시키는 것이 가능하다.

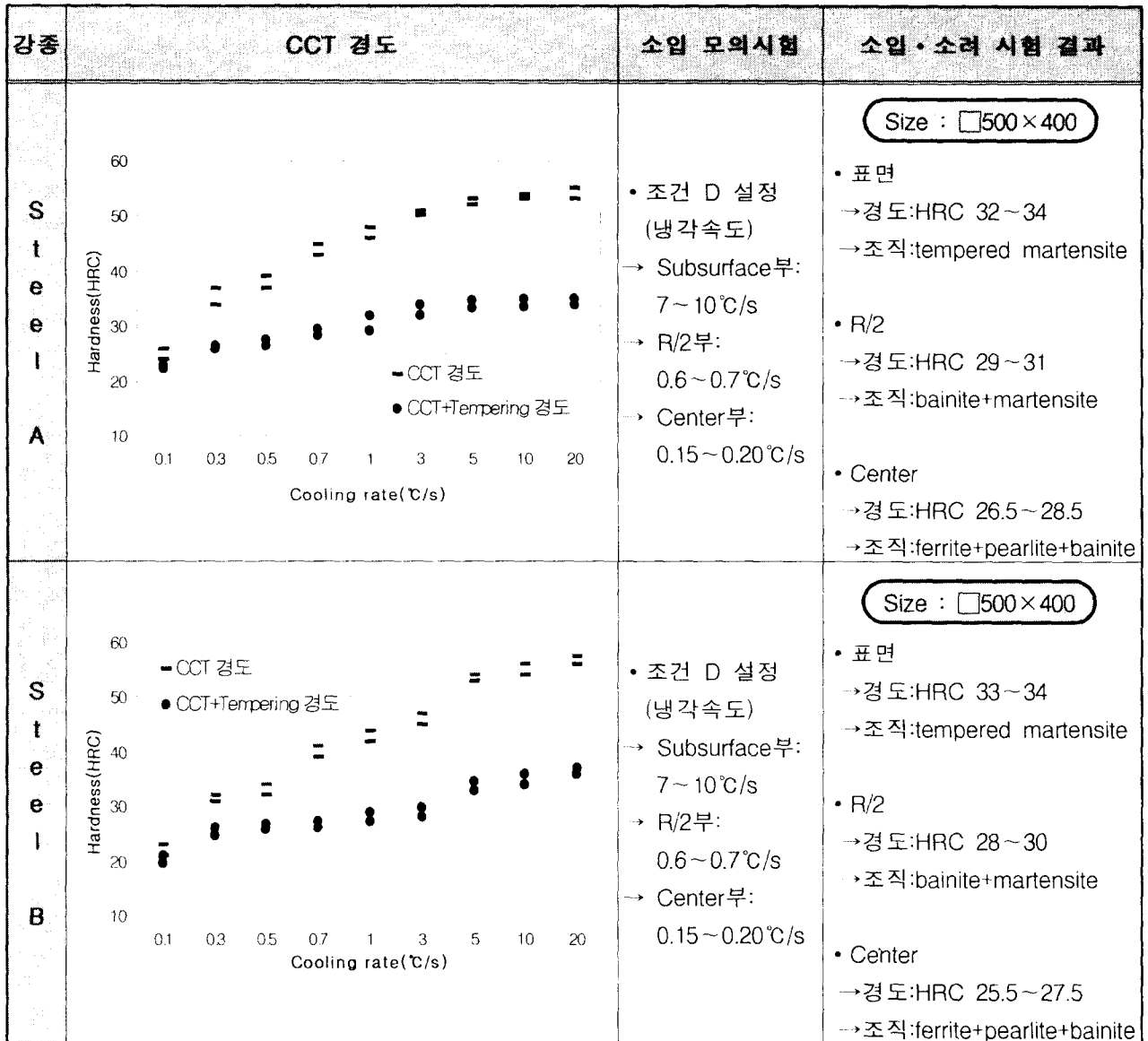


Fig. 5. The comparison of CCT hardness, quenching simulation and Q/T production

▷ Steel A & B (□500×400)

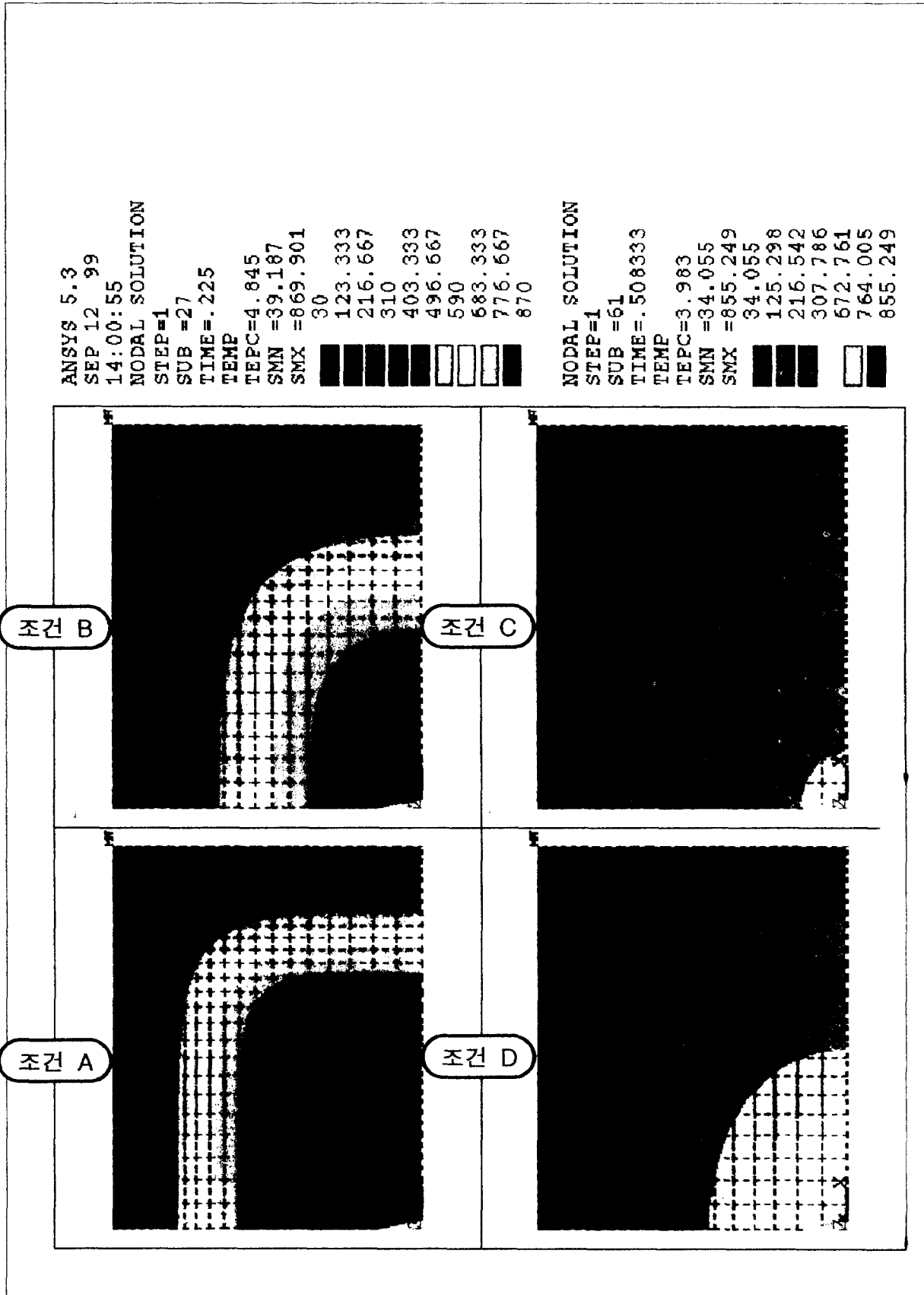
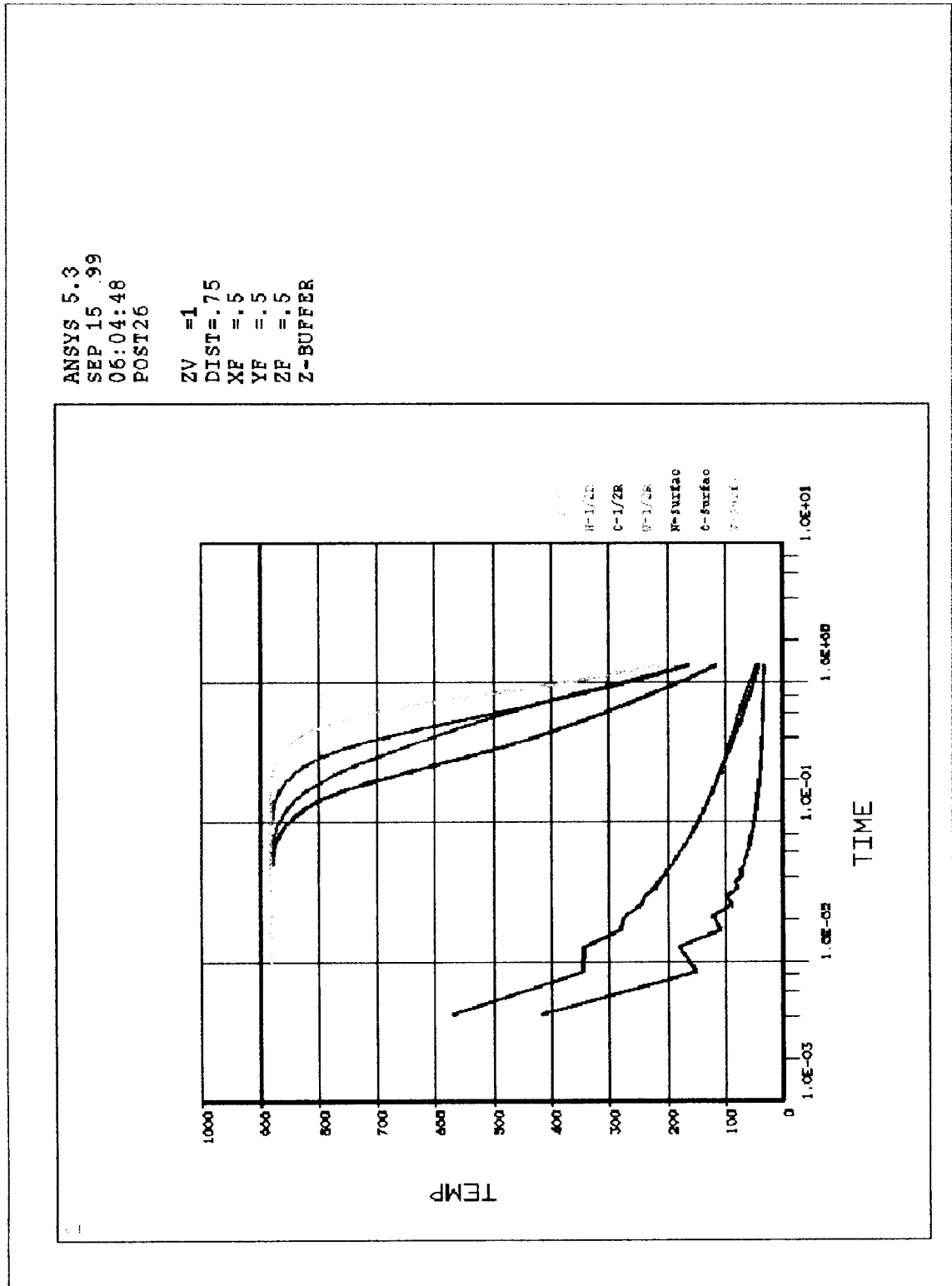


Fig. 6. Quenching simulation of Steel A and B

▷ Cooling Curve of Steel A & B(□500×400)



- ▷ Sub surface부 냉각속도(800~200℃) : 7~10℃/s
- ▷ R/2부 냉각속도 (800~400℃) : 0.6~0.7℃/s
- ▷ Center부 냉각속도 (800~400℃) : 0.15~0.20℃/s

Fig. 7. Cooling curve of Steel A and B, quenching condition D

소입 • 소려(실조업 결과)

소입 모의시험으로부터 얻은 data중 조건 D를 실제 양산조업에 적용한 후 그 결과를 비교 분석하였다. 그림 8은 steel A와 B의 실제 양산조업 결과를 나타낸 것이다. 소입 모의시험에서 예측한 대로 표면에서 200mm 지점 즉, R/2부에서는 bainite에 미량의 martensite가 함유된 혼합조직이 생성되었으며, 중심부의 경우 미량의 ferrite+pearlite와 bainite조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한, 0.7°C/s 연속냉각 변태 시험후 570~580°C 소려 처리한 공시재 및 소입 모의시험 조건 D와 양산 소입 • 소려재의 R/2부와 의 냉각속도에 따른 경도값을 비교하면 HRC 28~31로 일치하는 경향을 나타내고 있다(Fig. 5). 즉, 모의시험 결과와 실제 양산조업 결과는 양호하게 일치하고 있음을 알 수 있다.

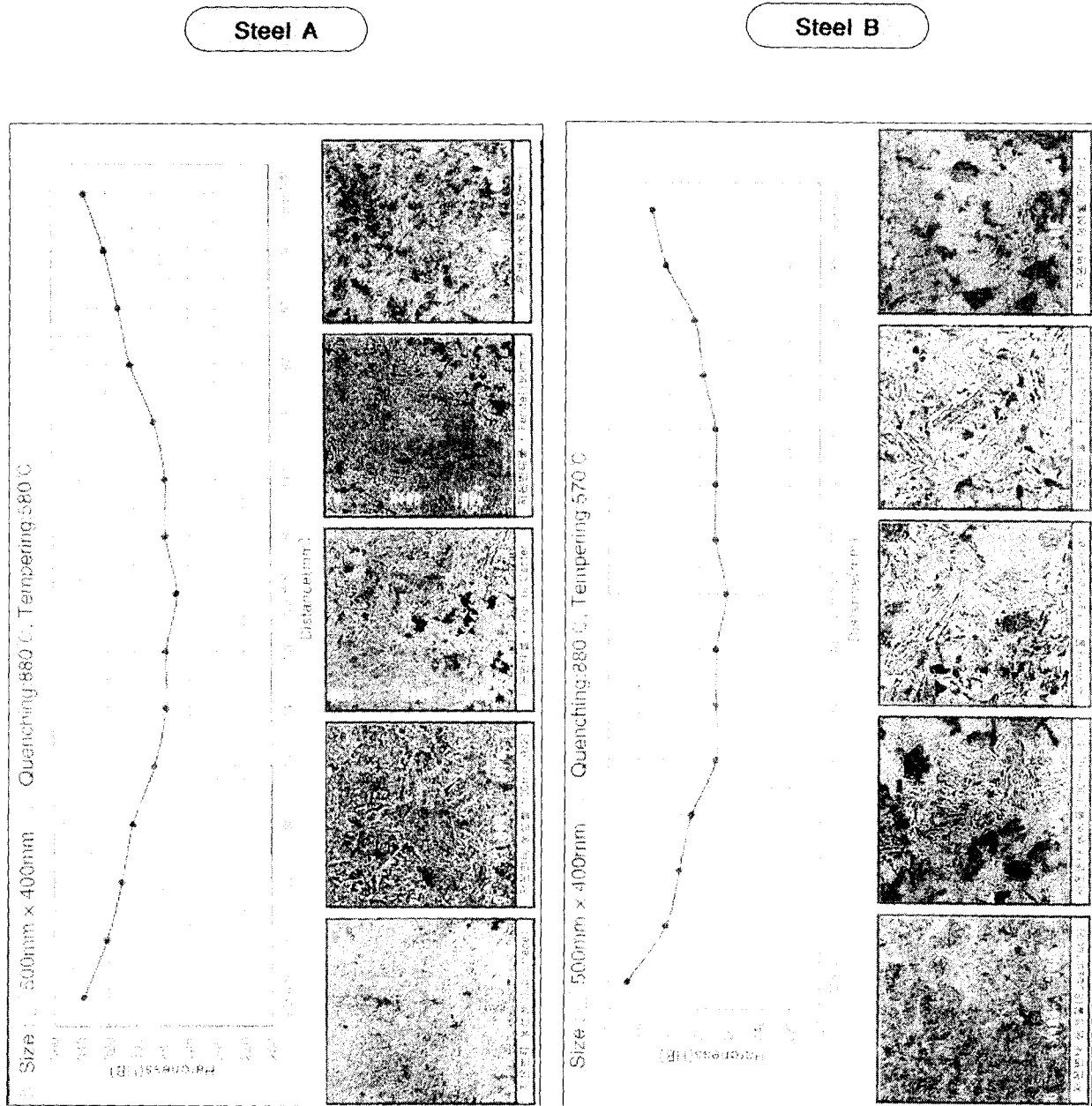
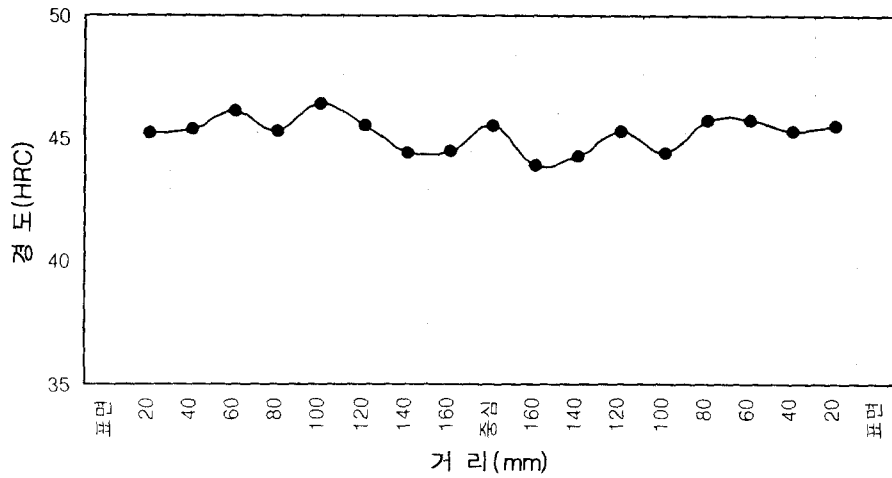


Fig. 8. Hardness and SEM photographics after quenching and tempering of Steel A and B

Steel C의 경우도 연속냉각변태 시험 및 소입 모의시험을 통해 수요자의 요구경도를 만족시킬 수 있는 소입 조건 D를 얻을 수 있었고 조건 D를 양산조업에 적용하여 그림 9의 결과를 얻을 수 있었다.



▶ 수요자 요구 경도 : HRC 42 ~ 48

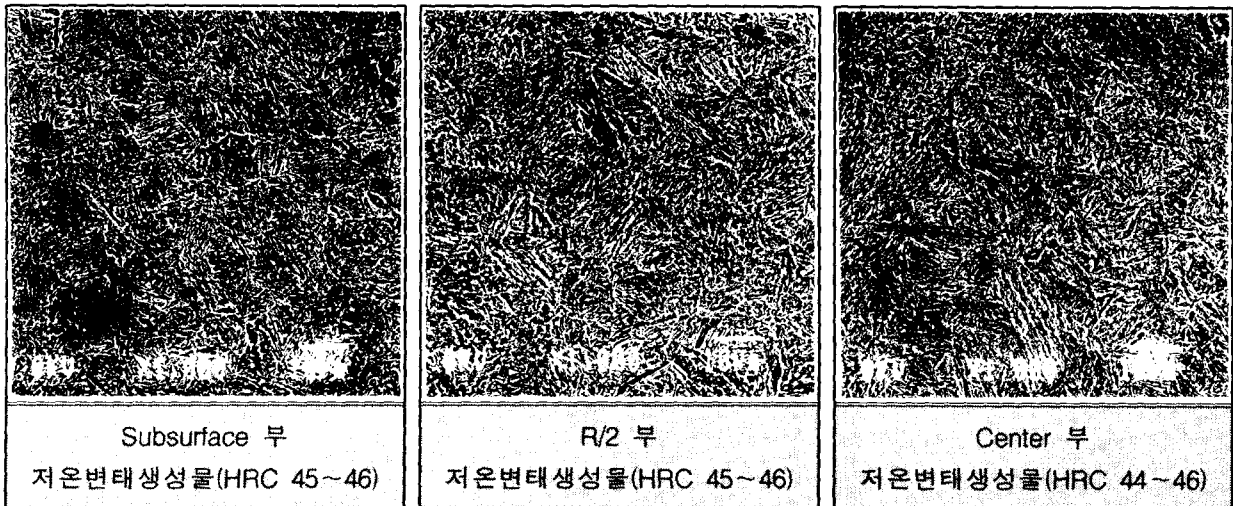
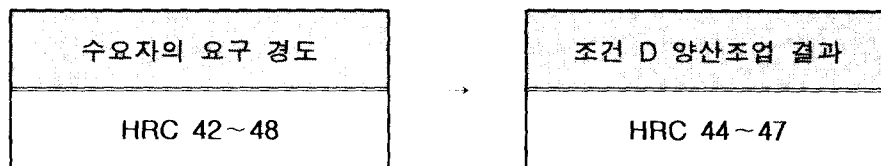


Fig. 9. Hardness and SEM photographs after quenching and tempering of Steel C



이와 같이 연속냉각변태 시험 data를 기초로 하여 연속냉각 변태 조건과 실제 조업조건을 경계로 하여 소입 모의시험을 반복하여 조건 D를 얻을 수 있었으며, 조건 D를 실제 조업에 적용 소입 모의시험에서 예측한 조직과 경도값을 얻을 수 있었다. 따라서 소입·소려 열처리전 소입 모의시험을 행하므로써, 수요자가 요구하는 요구특성치를 만족하는 소입·소려 열처리 조업이 시행착오 없이 가능하다.

4. 결 론

자유단조로 생산된 금형강의 연속냉각 변태 시험, 소입 모의시험 및 실제 소입·소려 조업과의 연관성 분석을 통해 다음과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

- 1) 연속냉각 변태 시험을 통해 강재의 기초 특성, 즉 냉각속도 변화에 따른 미세조직 및 경도변화를 알 수 있었다. steel A의 경우 1.0°C/s의 냉각속도에서 bainite가 생성되기 시작하였으며, 0.3°C/s의 냉각속도에서는 ferrite가 석출하기 시작하여 bainite에 미량의 ferrite+pearlite 조직으로 구성되어 있다.
- 2) 소입 모의시험은 수요자의 요구특성치를 만족할 수 있는 조건을 얻기 위해 연속냉각 조건 및 실제 조업조건을 경계조건으로 수 차례 반복 실시하여 소입 모의시험을 행하였다. 소입 모의시험에서 얻어진 소입조건 D를 Steel A와 B에 적용할 경우 R/2부에서 냉각속도는 0.60~0.70°C/s으로 미량의 martensite와 bainite의 혼합조직을 예상할 수 있다.
- 3) 소입 모의시험으로부터 얻은 조건 D를 실제 조업에 적용한 결과 소입 모의시험 결과와 미세조직 및 경도특성이 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. Steel A 및 B의 경우 연속냉각 변태 시험 및 소입 모의 시험으로부터 얻은 조건 D를 실제 조업에 적용하여 R/2부의 경우 저온변태물을 중심부의 경우 미량 ferrite+pearlite에 bainite의 혼합조직을 얻을 수 있었으며, 경도값은 R/2부의 경우 HRC 28~31, 중심부의 경우 HRC 25.5~28.5로 예측값과 일치하는 경향을 나타내었다.
- 4) Steel C의 경우도 소입 모의시험으로부터 얻은 소입조건 D를 적용하여 수요자의 요구 경도값(HRC 42~48)을 만족하는 HRC 44~47를 얻을 수 있었다.
- 5) 소입·소려 열처리전 소입 모의시험을 행하므로써 수요자가 요구하는 요구특성치를 시행착오 없이 만족시키는 것이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Metals Handbook, 9th edition, p.43