

論文

## 강의 화학조성이 경화능에 미치는 영향

신 승 호 · 최 재 호

인하대학교 공과대학 금속공학과

### The Effect of Chemical Composition on a Hardenability of Steel

Seung Ho Shin and Jae Ho Chae

Dept. of Metallurgical Engineering, College of Engineering, Inha University

#### ABSTRACT

The hardenability of steel is related to its chemical composition. About this relationship, multiple regression analysis of hardenability data was proposed to explain the effect of chemical composition on a hardenability of steel. To establish the formula for calculation hardenability, given hardenability curve(U.S. S. Atlas) were quantitatively analyzed by multiple regression analysis program of computer.

The established hardenability model was applied to predict the hardenability of commercial steel fair well. The effect of chemical composition was also expressed quantitatively.

#### 1. 서 론

강재의 기계적 성질에 영향을 미치는 요소에는 화학 조성, 제조방법, 응고 과정, 냉·열간 가공과 열처리 방법등이 있다. 이중 열처리는 최종 과정으로써 강재를 가공하는 업체에서는 매우 중요한 공정이며, 소재의 선택과 열처리 방법에 따라 부품의 사용 목적에 미치는 바가 크며, 또한 경제적으로 갖는 의미도 크다. 경화능은 열처리강의 중요한 기계적 성질중의 하나로 이상임계직경(Ideal Critical Diameter)인  $D_1$ 와 Jominy 경화능 곡선(Jominy Hardenability Curve)으로 표현되며, 강의 탄소함량, 합금원소의 함량 및 종류와 절대적인 관계가 있다는 것은 잘 알려진 사실이다<sup>1,2)</sup>.

강의 화학조성과 경화능 곡선과의 상관관계로부터 경화능을 예측할 수 있는 수학적인 모델의 개발은 강의 용해 조업에 있어서 화학조성의 조절을 용이하게 하며, 부품의 설계시 강재의 경제적인 선택뿐만 아니라 사용

목적에 최종적으로 부합되는 기계적 성질을 예측할 수 있다는데 중요한 의미를 갖고 있다.  $D_1$ 에 의한 경화능의 규정방법은 경제적인 강의 설계와 최적의 강재를 선택하여야 하는 열처리 산업에 폭 넓게 이용되어 왔다. 그러나 상이한 탄소 함량의 강들이 동일한  $D_1$ 값을 나타내면서 상이한 경도를 갖는 경우가 많기 때문에 실제, 열처리 작업에 이용하기 어려운 단점이 있다. 그럼에도 불구하고  $D_1$ 에 영향을 미치는 인자를 압으로써 강의 화학조성으로부터  $D_1$ 를 간단히 계산할 수 있다는 이유때문에  $D_1$ 값은 아직 강의 열처리에 사용되고 있으며, 또한 개선·연구되어지고 있다.

경화능 곡선의 정량적 분석을 통하여 강의 화학 조성으로부터 경화된 강의 특정 위치에서의 경도 산출이 가능하다. 이러한 강의 화학조성이 경화능 곡선에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석은 수학적인 통계방법으로 가능하다. 근간에 발전된 Computer에 의한 자료 처리 방법을 통하여 강의 화학조성과 경화능과의 관계를 정

량적으로 조사하여 이에 대한 수학적인 모델을 얻고자 하는데 이 연구의 목적이 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험재료

본 실험에서는 일차적으로 Isothermal Transaction -Diagrams of U.S.Steel에 수록된 58 가지의 강종에 대한 화학 조성과 경화능 곡선을 회귀 분석하였다. 이때 이용된 자료의 통계처리용 Computer Program은 SPSS/PC+이다. 이차적으로는 Tabel.1에 제시된 화학 조성을 갖는 강종들의 경화능 시험결과를 회귀 분석에서 얻은 경화능 모델에 적용하여 비교·검토하였다. 본 실험에서 사용된 재료들은 우선 Normalizing(925°C/40 min/air)된 후 KS D 0206에 따라 Jominy시편으로 가공되었다<sup>3)</sup>.

### 2.2. 실험장치와 실험방법

본 실험에 사용된 Jominy Tester는 ASTM표준 규격에 따라 직접 제작하였으며, Fig.1은 실험장치를 나타낸 것이다. 이와 같이 제작된 Jominy Tester는 KS D 0206에 규정된 바에 일치하였다. 냉각된 시편의 양 측면을 평행이 되도록 0.5mm 깊이로 수냉하면서 Grinding 하였다. 평평하게 Grinding된 양 측면을 수냉 단면으로부터 거리가 1.5, 3, 5, 7, 9mm...인 지정된 위치에서 Rockwell C Scale로 경도를 측정하였다.

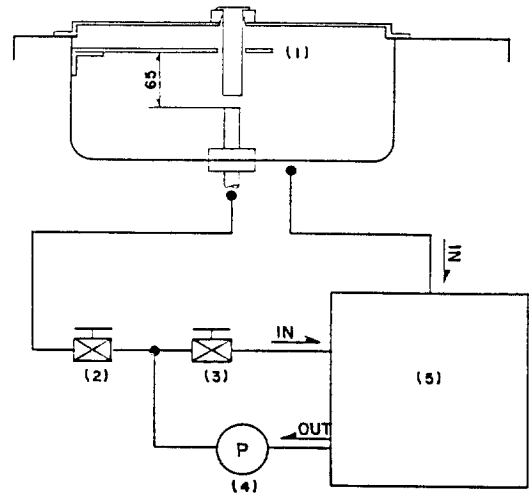
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 중회귀 분석

Isothermal Transaction-Diagrams of U.S.Steel<sup>4)</sup>에

Table 1. Chemical Composition of test specimen

unit : wt. %						
No.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
1	0.19	0.28	0.78	0.09	1.00	0.16
2	0.22	0.25	0.78	0.10	1.10	0.16
3	0.34	0.28	0.83	0.05	1.03	0.17
4	0.40	0.27	0.74	0.03	0.98	0.16
5	0.23	0.29	0.76	0.09	0.98	0.38
6	0.21	0.24	0.87	0.61	0.52	0.19
7	0.23	0.27	0.59	1.66	0.43	0.16



- (1) Water Level
- (2) Level Adjust Valve
- (3) Flow Control Valve
- (4) Pump
- (5) Water Tank

Fig.1. Experimental instrument for Jominy testing

수록된 58 가지의 강종에 대한 화학 조성과 경화능 곡선과의 정량적인 관계를 회귀 분석하여 얻어진 선형 경화능 모델은 다음과 같다.

		Se
$J_{1.5} = 47 \cdot (\%C) + 1.7 \cdot (\%Cr) + 2.6 \cdot (\%Mo) + 2 \cdot (\%Mn) + 33 \text{ HRC}$	(1)	2.03
$J_3 = 54 \cdot (\%C) + 5 \cdot (\%Cr) + 7.7 \cdot (\%Mo) + 6.5 \cdot (\%Mn) + 2.4 \cdot (\%Si) + 1.2 \cdot (\%Ni) + 22 \text{ HRC}$	(2)	3.20
$J_5 = 60 \cdot (\%C) + 11 \cdot (\%Cr) + 16 \cdot (\%Mo) + 13 \cdot (\%Mn) + 5.7 \cdot (\%Si) + 3.2 \cdot (\%Ni) + 4 \text{ HRC}$	(3)	6.19
$J_7 = 64 \cdot (\%C) + 15 \cdot (\%Cr) + 21 \cdot (\%Mo) + 8.4 \cdot (\%Si) - 13 \cdot (\%Mn) + 3.7 \cdot (\%Ni) - 6 \text{ HRC}$	(4)	7.07
$J_9 = 63 \cdot (\%C) + 17 \cdot (\%Cr) + 22 \cdot (\%Mo) + 9 \cdot (\%Si) + 13 \cdot (\%Mn) + 3.4 \cdot (\%Ni) - 9 \text{ HRC}$	(5)	7.08
$J_{15} = 65 \cdot (\%C) + 18 \cdot (\%Cr) + 20 \cdot (\%Mo) + 8.8 \cdot (\%Si) + 13 \cdot (\%Mn) + 3.3 \cdot (\%Ni) - 16 \text{ HRC}$	(6)	5.90
$J_{35} = 50 \cdot (\%C) + 14 \cdot (\%Cr) + 16 \cdot (\%Mo) + 4.7 \cdot (\%Si) + 2.5 \cdot (\%Ni) + 8.6 \cdot (\%Mn) - 11 \text{ HRC}$	(7)	5.05
$J_{55} = 40 \cdot (\%C) + 12 \cdot (\%Cr) + 15 \cdot (\%Mo) + 6 \cdot (\%Si) + 7.2 \cdot (\%Mn) + 2 \cdot (\%Ni) - 9 \text{ HRC}$	(8)	4.45

주) Se : Standard Error

위 공식은 t-검정값이 그 이상인 유의성(95% 이상의 신뢰성)을 지닌 원소들로 구성된 것으로 원소의 나열 순서는 검정값의 크기와 일치하며, t-검정값이 그 이하인 원소들은 점차 제거하였다. 그리고 경화능 곡선들을 수냉단면으로부터의 거리 0(Zero)에 외삽시켜 중회귀 분석을 하면 다음과 같이 최대 경도가 탄소함량에만 의존되는 경도산출모델을 얻게 된다.

$$J_0 = H_{max} = 43 \cdot (\%C) + 38 \text{ HRC} \dots\dots\dots (9)$$

즉, 어떤 위치에서의 경도 산출값이 식(9)에 의한 값보다 높으면 이 값으로 낮추어야 한다<sup>5,9)</sup>. 경화능의 선형 모델이 비선형의 단항식을 통하여 실제 측정치에 더욱 근사할 수 있는지를 관찰하기 위하여 경화능의 비선형 모델을 유도하였다. 비선형 모델로는 합금 원소의 함량이 증가함에 따라 한 원소의 특정한 영향은 감소한다는 경험에 의하여 제공근이 고려되었고, 원소의 제공근들의 유의성 검정 결과 탄소의 제공근만이 모든 수냉단면으로부터의 거리에 대하여 유효한 것으로 나타났다. 이런 사실은 E. Just<sup>9)</sup>가 발표한 것과 일치하며, 경화능 자료의 중회귀 분석 결과 탄소 대신 탄소의 제공근으로 변형된 단항식을 포함하는 경화능의 비선형 모델을 다음과 같이 얻었다.

		Se
$J_{1.5} = 56 \cdot (\sqrt{\%C}) + 1.5 \cdot (\%Cr) + 2 \cdot (\%Mn) + 2.2 \cdot (\%Mo) + 0.8 \cdot (\%Si) + 17 \text{ HRC}$	(10)	1.64
$J_3 = 65 \cdot (\sqrt{\%C}) + 4.8 \cdot (\%Cr) + 7.2 \cdot (\%Mo) + 2.6 \cdot (\%Si) + 1.4 \cdot (\%Ni) + 3 \text{ HRC}$	(11)	2.86
$J_5 = 74 \cdot (\sqrt{\%C}) + 11 \cdot (\%Cr) + 15 \cdot (\%Mo) + 13 \cdot (\%Mn) + 6 \cdot (\%Si) + 3.4 \cdot (\%Ni) - 17 \text{ HRC}$	(12)	5.94
$J_7 = 78 \cdot (\sqrt{\%C}) + 15 \cdot (\%Cr) + 20 \cdot (\%Mo) + 8.7 \cdot (\%Si) + 13 \cdot (\%Mn) + 4 \cdot (\%Ni) - 29 \text{ HRC}$	(13)	6.64
$J_9 = 78 \cdot (\sqrt{\%C}) + 17 \cdot (\%Cr) + 21 \cdot (\%Mo) + 9.5 \cdot (\%Si) + 13 \cdot (\%Mn) + 3.7 \cdot (\%Ni) - 32 \text{ HRC}$	(14)	6.73
$J_{15} = 77 \cdot (\sqrt{\%C}) + 18 \cdot (\%Cr) + 19 \cdot (\%Mo) + 9.1 \cdot (\%Si) + 13 \cdot (\%Mn) + 3.4 \cdot (\%Ni) - 38 \text{ HRC}$	(15)	5.87
$J_{35} = 60 \cdot (\sqrt{\%C}) + 14 \cdot (\%Cr) + 16 \cdot (\%Mo) + 5 \cdot (\%Si) + 26 \cdot (\%Ni) + 8.5 \cdot (\%Mn) - 28 \text{ HRC}$	(16)	4.93
$J_{55} = 45 \cdot (\sqrt{\%C}) + 12 \cdot (\%Cr) + 14 \cdot (\%Mo) + 5.2 \cdot (\%Si) + 7.1 \cdot (\%Mn) + 2.1 \cdot (\%Ni) - 22 \text{ HRC}$	(17)	4.46

최대 경도를 산출하는 비선형 모델은 경화능 자료들 수냉단면으로 외삽하여 중회귀 분석을 통하여 얻었으며 다음과 같다.

$$J_0 = 52 \cdot (\%C) + 23 \text{ HRC} \dots\dots\dots (18)$$

상기 선형, 비선형 경화능 모델의 유효 한계는 다음과 같다.

0.11-0.68%C, 0.03-1.67%Si, 0.25-1.88%Mn,  
0.02-3.90%Ni, 0.01-1.97%Cr, 0.01-1.96%Mo,  
0.02-0.07%Cu, 0.02-0.16%V, 3.5-12 ASTM  
Grain Size Number.

Fig.2는 새로운 선형, 비선형 경화능 모델의 원소들에 대한 배수상관관계계수 (Multiple Correlation Coefficient)의 변화를 거리에 따라 나타낸 것이다. 이러한 상관관계계수들은 원소의 wt.%당 증가하는 경도이며, 수냉단면으로부터 거리에 따른 원소들의 정량적인 영향을 설명하여 준다.

가장 빠른 냉각 속도를 갖는 수냉단면 근처에서는 탄소만이 영향을 미치며, 합금 원소의 영향은 거리가 멀

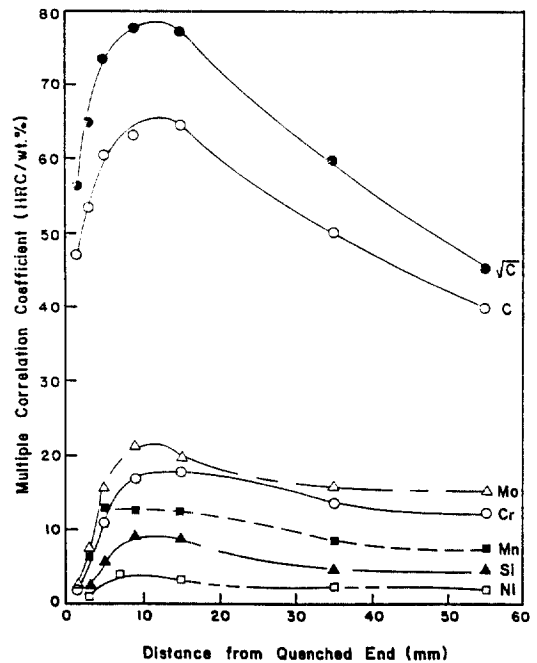


Fig. 2. Change of correlation coefficient for alloying elements

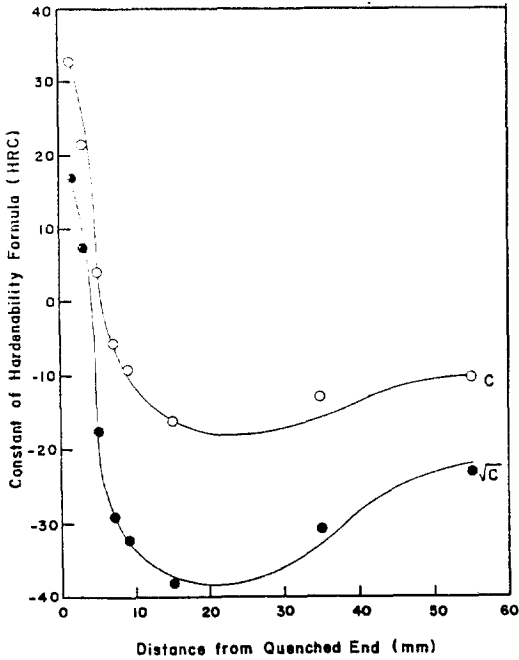


Fig. 3. Constant of hardenability formula vs. distance from quenched end

어지면서 점차 증가하다가 7~9mm를 지나면서 거리에 관계없이 일정하였음을 알 수 있다. 또한, 두 경화능 모델의 비교에서 합금 원소는 계수의 변화가 거의 없었으며, 탄소의 경우는 비선형의 모델이 선형의 모델보다 더 큰 계수를 갖고 있으므로 비선형의 모델이 Jominy 경화능 곡선을 더욱 잘 설명할 수 있다고 판단된다.

Fig.3은 두 모델의 상수의 변화를 거리에 따라 나타낸 것으로 전체적으로 선형 모델이 비선형 모델보다 큰 상수를 갖고 있음을 보이며, 결과적으로 비선형 모델의 탄소 제곱근의 변수항에 대한 배수상관관계계수의 증가는 상수의 감소로 서로 상쇄된다고 생각할 수 있다. 또한, 순철의 기본 경도로서 식(9)와 (18)에서의 상수를 생각할 수 있으며, 식(18)의 상수가 식(9)의 상수보다 더 작은 값을 나타내므로 비선형 모델의 경우가 실제 순철의 경도에 더 근접한다. Fig.2와 Fig.3은 각 원소가 경화능에 미치는 영향을 제시하고 있으며, 이것은 E. Just의 결과를 입증하는 것이 된다. Fig.2로부터 실험 시편의 수냉단면으로부터 7mm 이상의 거리에서 합금 원소의 영향이 일정하다는 사실을 근거로 다음과 같은 거리에 대한 변수 E를 포함하는 하나의 종합적인

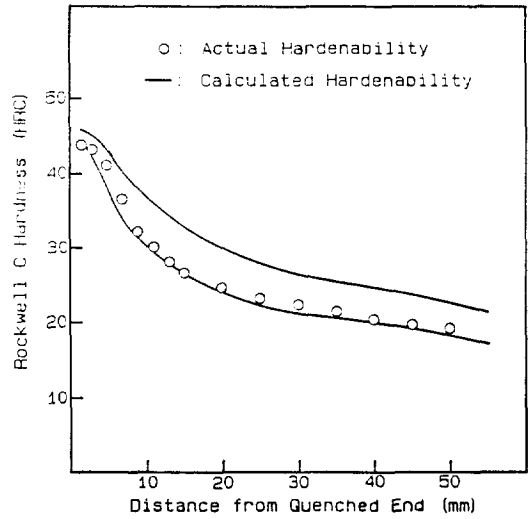


Fig. 4. Comparison of actual hardenability with calculated hardenability band by standard error for No.1 steel.

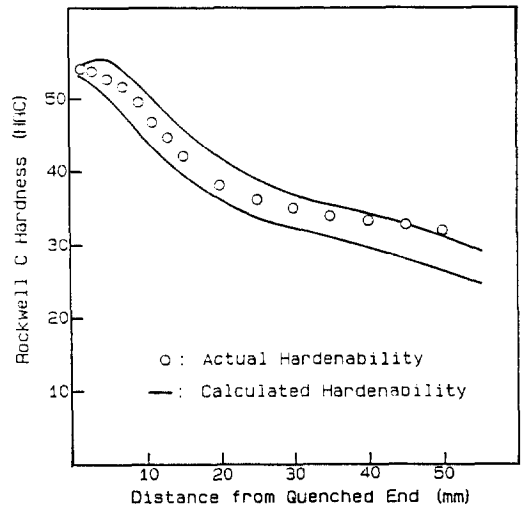


Fig. 5. Comparison of actual hardenability with calculated hardenability band by standard error for NO.3 steel.

경화능 모델을 중회귀 분석에 의하여 얻었다.

$$J_{6-60} = 76 \cdot (\sqrt{\%C}) - 0.009 \cdot (E^2 \cdot \sqrt{\%C}) + 15 \cdot (\%Cr) + 17 \cdot (\%Mo) + 3 \cdot (\%Ni) + 11 \cdot (\%Mn) + 7 \cdot (\%Si) + 15 \cdot (\%V) - 17 \cdot (\sqrt{E}) - 2 \cdot (E) - 0.6 \cdot (K_{ASTM}) + 15 \text{ HRC} \dots (19)$$

여기에서 거리 E의 단위는 mm이고,  $K_{ASTM}$ 은 입도를 ASTM No.로 표시한 것이다.

3.2. 경화능 모델의 검토

본 연구에서 얻어진 경화능 모델의 신빙성을 검토하기 위하여 실제 사용되고 있는 강종의 경화능과 비교하

였다. 또한, E.Just가 제시한 경화능 모델에 대해서도 비교·검토하였다.

Fig. 4, 5, 6은 많이 상용되는 경화능 보증강재(H-Steel)인 3가지 강종에 대한 화학 조성을 이 연구에서 얻은 경화능 모델의 식(10)에서 (17)에 대입하여 산출된 경화능에 표준편차(Standard Error)를 적용한 헛폭

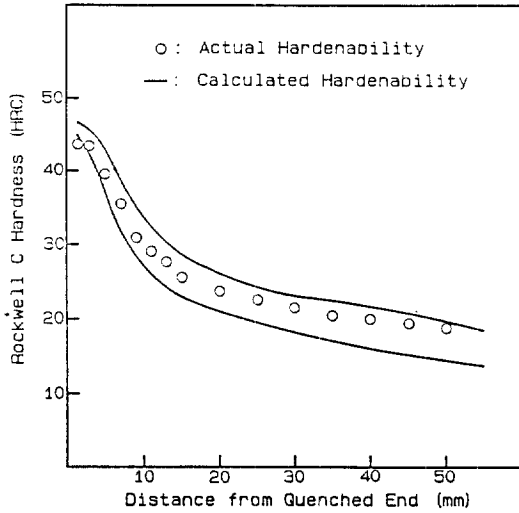


Fig. 6. Comparison of actual hardenability with calculated hardenability band by standard error for NO.6 steel.

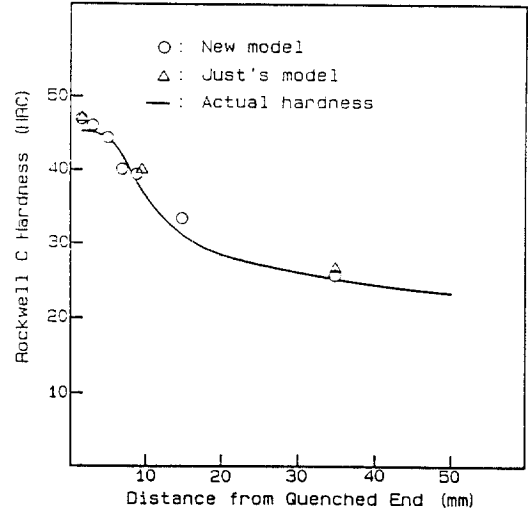


Fig. 7. Comparison of new hardenability model with just's hardenability model for NO.2 steel.

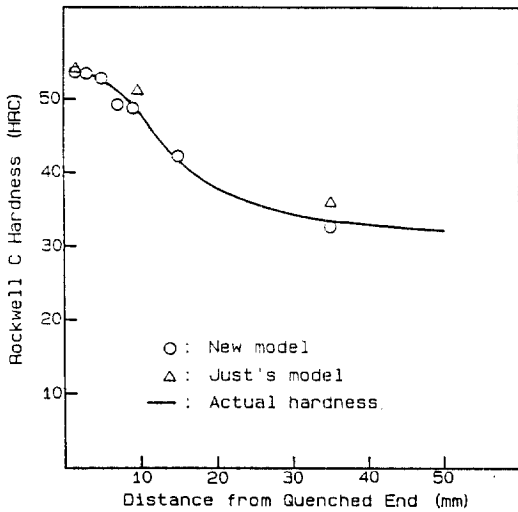


Fig. 8. Comparison of new hardenability model with just's hardenability model for NO.3 steel.

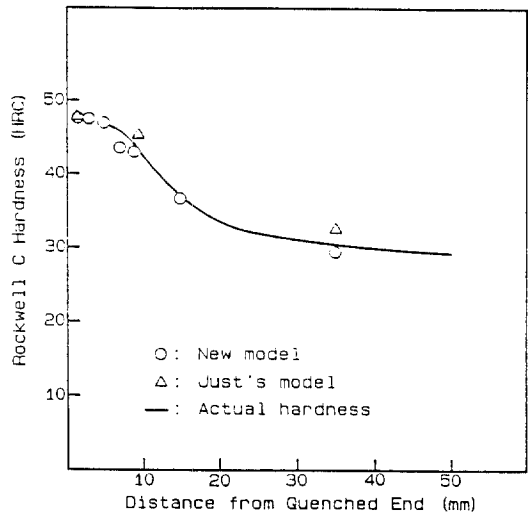


Fig. 9. Comparison of new hardenability model with just's hardenability model for NO.5 steel.

의 경화능 밴드를 제시하고 있다. 상기 강종에 대하여 실제로 측정된 수냉단면으로부터 거리에 따른 경도는 작은 원으로 표시되었다.

Fig.4에서 보아 알 수 있듯이 실제 측정된 경화능은 이 연구에서 얻어진 경화능 모델이 제시한 허용오차 범위 내에 있다.

Fig.5에 있어서는 수냉단면으로부터 거리 35 mm 이상에서 실제 측정된 경화능이 이 연구에서 얻어진 결과에 의한 경화능보다 다소 높게 나타나는 경향을 보이거나 수냉단면으로부터 거리 50 mm를 제외한 대부분의 실제 측정된 경도값들이 여기에서 얻어진 경화능 모델의 허용오차 범위내에 있음을 보여주고 있다.

Fig.6에 있어서는 실제 측정된 경도가 수냉단면으로부터 거리 1.5 mm의 경우를 제외하고는 이 연구에서 얻어진 경화능 모델의 허용오차 범위 내의 중앙에 있음을 볼 수 있다. 수냉단면으로부터의 거리 1.5 mm에서의 경도는 이 위치에서의 경도 측정상의 까다로움 때문에 비교적 낮게 측정된 것으로 사려되며, 이 연구에서 얻어진 결과가 실제 측정된 경화능과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7에서 10은 경화능 보증강재 4 가지 강종에 대하여 E.Just의 경화능 모델의 식과 이 연구에서 얻어진 경화능 모델인 식(10)에서 (17)에 대입하여 얻은 경도

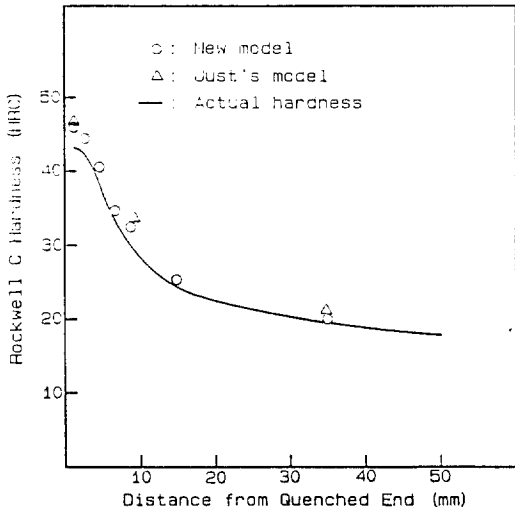


Fig.10. Comparison of new hardenability model with just's hardenability model for NO.7 steel.

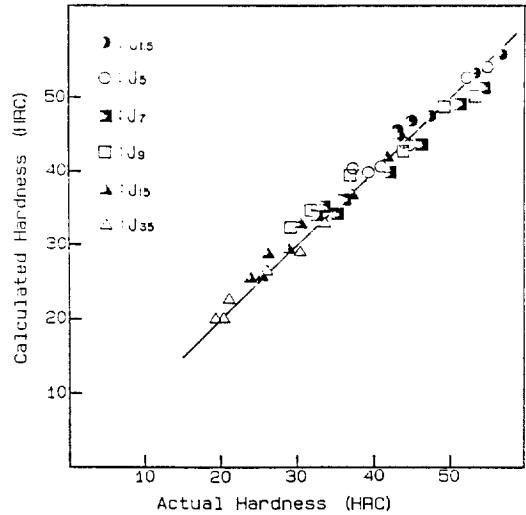


Fig. 11. Actual hardness vs. calculated hardness.

값과 실제 측정된 경화능 곡선을 비교한 것이다.

Fig.7, 8, 9, 10에서는 E.Just의 경화능 모델에 의한 결과와 이 연구에서 얻어진 경화능 모델의 결과가 실제 측정된 경화능 곡선에 대해서 대체로 좁은 오차 한계내에 있음을 보여주며, 아울러 E.Just의 결과와 이 연구에서 얻어진 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig.11은 수냉단면으로부터 상이한 위치에서 얻어진 실제 측정된 경도를 이 연구에서 얻어진 경화능 모델의 식(10)에서 (17)에 의하여 계산된 결과와 비교한 것이다. 이로부터 실측치와 계산치의 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

U.S.S. Atlas의 자료를 Computer를 이용하여 중회귀 분석시킨 결과 선형, 비선형의 경화능 모델과 종합적인 경화능 모델이 산출되었다. 이 연구에서 얻어진 경화능 모델은 상용 경화능 보증강재(H-Steel)들의 경화능과 잘 일치하였으며, 강의 경화능 예측에 잘 활용될 수 있다.

중회귀 분석을 통한 강의 경화능 검토에서 탄소는 수냉단면에서 경화능에 영향을 미치는 바가 크며 Mo, Cr, Mn, Si, Ni은 수냉단면에서부터 떨어진 거리에서의 경화능을 상승시키는 효과가 있다.

5. 참고문헌

1. P. Deb, M.C. Chaturvedi & A.K. Jeva : Metal Technology, Vol.9 (1982), Feb., pp. 76-80.
2. M.A. Grossmann : Transaction of AIME, Vol. 150 (1942), pp. 227-255.
3. ASTM Standard A 255.
4. Isothermal Transaction Diagrams, U.S.S. 1966.
5. E. Just : Härtereitechn. Mitt., 23 (1968), pp. 85-100.
6. E. Just : Metal Progress, Vol. 96 (1969), pp. 87-88.