

論文

경도 기준편의 경도 균일성 향상을 위한 열처리

한 준 회 · 황 능 문 · 김 증 집* · 문 한 규*

한국표준연구원 재료물성연구실

*한국표준연구원 재료응용연구실

Heat Treatment for Improvement of Hardness Uniformity of Standard Hardness Blocks

J. H. Hahn, N. M. Hwang, J. J. Kim* and H. G. Moon*

Materials Properties Lab., Korea Standards Research Inst.

*Materials Application Lab., Korea Standards Research Inst.

ABSTRACT

In order to improve hardness uniformity of standard-hardness blocks, experimental procedure was designed using Taguchi Method. For this purpose the following factors were studied: austenitizing temperature, tempering condition, grinding condition, subzero treatment, lapping time, 15 μ m polishing time, final polishing time. These factors were processed and then ten hardness values were measured on each specimen. SN (signal to noise) ratio for each condition was calculated with standard variations of these values. Finally, from the calculated value of ANOVA on SN ratios, the lapping time was found to be the main factor. Better uniformity with longer lapping time implies that residual stress that was formed after quenching is a dominant parameter that affects on the uniformity of hardness. Therefore, step-quenching method was adapted to minimize the residual stress. By this modification of quenching procedure, the hardness uniformity was improved remarkably and the yield ratio was increased from 55% to 88%.

1. 서 론

경도기준편의 생명은 표면경도의 균일성이다. 따라서 본 연구소에서는 경도기준편용으로 제작한 재료의 최종 표면경도를 각각 열 군데 측정하여, HRC스케일의 경우 그 흐트러짐이 0.3미만인 것만을 경도기준편으로 보급하고 있으며, 0.3 이상인 재료는 불량처리하고 있다. 그러나 이 중에서 HRC 60 이상의 고 경도 범위의 경도 기준편의 불량률이 약 45%로 매우 높아 최근 몇년간 문제가 되어 왔다. 경도균일성에 영향을 미치는 요인은

성분불균일, 잔류오스테나이트, 잔류응력, 표면조도 등을 들 수 있는데, 이중 가장 큰 영향을 미치는 요인을 찾아내어 경도균일성을 향상시킬 수 있는 공정조건을 찾아내기 위해서는 100 회 이상의 많은 실험이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 변수설계에 있어서 적은 횟수의 실험으로도 많은 횟수의 실험을 한 효과를 낼 수 있는 다구찌방법을 적용하여 경도기준편의 경도편차에 큰 영향을 미치는 인자를 찾아내고, 경도편차를 최소화 하는 조건을 설정하고자 하였다. 다구찌방법은¹⁻⁴⁾ 계측의 경도향상 및 연구개발의 변수설계등에 있어서 매우

유용한 방법이며, 특히 특정치의 편차를 줄이는데 있어서 현재까지 알려진 유일한 통계수법이다.

2. 실험방법

경도 기준편의 재료는 일반 탄소 공구강 중 공석강인 SK 5 판재이며 그 제작 공정은 다음과 같다. 판재를 원판모양으로 가공하여 austenitizing, 염수냉 후 액체질소 혹은 드라이아이스 온도에서 심냉처리하고 범위에 따라 뜨임을 한다. 열처리가 끝난 재료는 그 표면을 grinding, lapping 그리고 polishing한다.

이 공정 중 경도편차에 영향을 줄 수 있는 성분불균일, 잔류오스테나이트, 잔류응력, 표면조도 등의 요인을 고려하여 실험을 위해 선택한 인자와 수준은 Table 1과 같다. 광호안의 E는 Existing 즉, 높은 불량률로 경도기준편을 생산할 당시의 공정수준이고 N은 New 즉, 새로 택한 수준이다. 여기서 austenitizing의 새 조건을 810°C, 60 min으로 한 것은 austenitizing온도의 영향을 보기 위한 것이고 뜨임조건은 저온에서 장시간 유지하는 경우의 효과를 보기 위한 것이다. Grinding조건은 처음부터 0.5/100 mm로 표면가공하는 것과 절반은 2/100 mm로 가공하고 나머지 절반은 0.5/100 mm로 가공하여 각 경우의 차이가 있는가를 보기 위한 것이다.

Table 1. Factors and levels.

	Factor	Level
A	Austenitizing	825°C, 60 min (E) 810°C, 60 min (N)
B	Tempering	230°C, 2 h (E) 210°C, 4 h (N)
C	Grinding	0.5/100 mm (E) 2/100 mm (N)
D	Subzero	X (E) O (N)
E	Lapping	180 min (N) 110 min (E)
F	Polishing 15 μm	120 min (E) 150 min (N)
G	Final Polishing	80 min (N) 40 min (E)

Grinding후 심냉처리를 첨가한 이유는 grinding후 새 표면이 나타나는데 이 부분의 잔류오스테나이트를 다시 마르텐사이트로 변환시킬 때의 효과를 보기 위한 것이다. 또한 lapping시간 및 polishing시간의 효과를 보기 위하여 각 조건의 시간을 달리 하였다. 이러한 실험조건은 직교배열표 L8에 배치하면 Table 2와 같다. 여기서 오차의 열을 남기지 않고 모든 열에 할당을 하였는데 다구찌방법에서 흔히 행하는 방법으로 나중에 오

Table 2. L8 Orthogonal array with the selected factor levels.

	A Austenitizing	B Tempering	C Grinding	D Subzero	E Lapping	F Polishing 15 μm	G Final Polishing
1	825°C 60 min	230°C 2 h	0.5/100	X	180 min	120 min	80 min
2	825°C 60 min	230°C 2 h	0.5/100	O	110 min	150 min	40 min
3	825°C 60 min	210°C 4 h	2/100	X	180 min	150 min	40 min
4	825°C 60 min	210°C 4 h	2/100	O	110 min	120 min	80 min
5	810°C 60 min	230°C 2 h	2/100	X	110 min	120 min	40 min
6	810°C 60 min	230°C 2 h	2/100	O	180 min	150 min	80 min
7	810°C 60 min	210°C 4 h	0.5/100	X	110 min	150 min	80 min
8	810°C 60 min	210°C 4 h	0.5/100	O	180 min	120 min	40 min

차의 자유도가 전체의 자유도의 절반정도가 되도록 요
인효과가 작은 인자를 오차항에 합동(pulling)하도록 다
구찌는 추천하고 있다.¹⁻⁴⁾

3. 실험결과 및 고찰

각 행에 주어진 8 개의 공정조건에 대하여 각각 기준
편을 5 개씩 취하여 오차인자로 하였다. 각 기준편에 대
하여 10 회의 경도측정을 하여 첫번째 데이터를 버리고
9 개의 데이터를 취하였다. 이 데이터는 Table 3 과 같
다. 이 데이터의 표준편차로부터 망소특성(특성치가 작
을수록 좋은 특성, smaller is better)의 SN비를 구하
였다.⁵⁾ 이때 실체는 경도기준편의 편차가 0.3 이상인
경우 불량처리되고 0.3 이하일 경우 양호로 처리되므로
데이터를 계수치로 보고 해석할 수 있으나 계수치보다
계량치로 분석하는것이 유리하므로 이와같이 경도의 표
준편차에 대한 SN비를 구한 것이다. 망소특성의 SN비
는 다음의 식으로 주어진다.

$$SN = -10 \log \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right)$$

SN비 결과는 Table 4 에 나타내었다. 이 결과를 분산
분석하여 오차의 자유도가 전체 자유도의 절반 이상이
되도록 효과가 작은 인자를 오차항에 합동(pulling)한
최종 분산분석 결과는 Table 5 와 같다. F-test⁵⁾를 하면
E인자만이 95%의 확률로 의미가 있는 것을 알 수 있
다. 즉 lapping효과만이 경도 균일성에 영향을 미친다.
열처리 온도나 심냉처리, polishing의 효과등은 거의 중
요하지 않다. 또 grinding방법에도 큰 차이가 없고
lapping시간이 길수록 경도편차가 작아진다. 이러한 사
실들은 잔류응력이 경도편차의 중요한 요인임을 암시한
다. 왜냐하면 시편의 길이에 따른 차이는 잔류응력 외
에는 다른 요인이 없기 때문이다. 즉 급냉중에 열응력

Table 3. Hardness data for 8 combination.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	62.1	62.3	62.3	62.1	62.1	62.1	62.1	62.0	62.0
	2	62.0	62.0	62.0	61.7	61.5	61.8	61.8	61.7	61.7
	3	60.7	61.1	61.0	61.0	61.3	61.0	61.0	60.9	60.8
	4	61.3	61.4	61.5	61.1	61.1	61.5	61.3	61.2	61.3
	5	61.4	61.5	61.4	61.3	61.2	61.4	61.4	61.2	61.2
2	1	60.8	61.0	61.0	60.6	60.5	60.8	61.0	60.6	60.7
	2	60.8	60.8	60.8	60.6	60.6	61.3	60.8	60.7	60.8
	3	60.8	60.9	60.9	60.7	60.7	60.9	60.9	60.7	60.8
	4	61.0	61.2	61.0	60.8	60.6	61.0	61.0	60.0	60.9
	5	60.8	61.0	60.9	60.6	60.6	60.8	60.8	60.6	60.6
3	1	61.8	62.0	61.8	61.6	61.5	61.8	61.8	61.6	61.6
	2	62.3	62.4	62.3	62.0	61.9	62.2	62.3	62.0	61.9
	3	61.7	61.8	61.6	61.5	61.5	61.6	61.6	61.5	61.6
	4	61.6	61.6	61.6	61.4	61.2	61.4	61.6	61.3	61.5
	5	62.7	62.9	62.7	62.4	62.4	62.8	62.8	62.4	62.6
4	1	61.3	61.5	61.4	61.2	61.0	61.4	61.3	61.3	61.3
	2	61.3	61.6	61.5	61.2	61.2	61.4	61.3	61.0	61.2
	3	61.6	61.6	61.6	61.3	61.3	61.6	61.6	61.4	61.4
	4	61.5	61.5	61.1	61.1	61.3	61.3	61.4	61.1	61.3
	5	61.4	61.5	61.5	61.2	61.1	61.5	61.4	61.2	61.3
5	1	61.4	61.4	61.4	60.9	60.9	61.4	61.3	60.9	61.2
	2	60.9	61.2	61.2	60.9	60.6	61.2	61.2	60.7	61.0
	3	62.0	62.1	62.1	61.6	61.6	61.9	62.1	61.6	62.0
	4	61.6	61.6	61.5	61.3	61.3	61.6	61.6	61.3	61.5
	5	60.8	61.0	61.0	60.6	60.5	61.0	60.8	60.6	60.6
6	1	60.6	60.7	60.7	60.5	60.3	60.6	60.6	60.3	60.5
	2	60.6	60.7	60.6	60.3	60.3	60.3	60.6	60.4	60.4
	3	60.6	60.8	60.7	60.6	60.3	60.6	60.5	60.4	60.3
	4	60.7	60.8	60.8	60.4	60.4	60.8	60.8	60.6	60.6
	5	60.9	60.9	60.9	60.6	60.5	60.8	60.9	60.5	60.7
7	1	61.1	61.4	61.3	61.2	61.0	61.3	61.3	61.1	61.1
	2	61.7	61.8	61.8	61.5	61.5	61.8	61.8	61.4	61.5
	3	62.3	62.6	62.5	62.0	62.0	62.5	62.7	62.3	62.1
	4	62.0	62.0	62.0	61.6	61.6	61.8	61.9	61.6	61.6
	5	61.3	61.5	61.3	61.2	61.0	61.5	61.5	61.2	61.3
8	1	61.5	61.6	61.4	61.3	61.3	61.5	61.4	61.2	61.4
	2	61.1	61.4	61.3	61.2	61.0	61.1	61.2	61.0	61.0
	3	61.1	61.3	61.2	61.0	61.0	61.1	61.3	61.1	61.1
	4	61.1	61.4	61.2	61.0	61.0	61.4	61.2	61.0	61.3
	5	61.3	61.4	61.4	61.1	61.0	61.3	61.3	61.2	61.0

Table 4. Standard deviation of the data SN ratio.

	Standard Deviation X 100,000					SN(db)
	1	2	3	4	5	
1	10929	17321	17159	15000	11180	16.7208
2	19221	20616	10000	17159	15092	15.4770
3	15635	19437	10000	15000	19365	15.7766
4	18028	18333	13642	16159	15092	15.7313
5	23452	23154	22608	13944	20000	13.5820
6	15000	15000	17321	16667	17401	15.7492
7	13229	16667	25981	19003	16915	14.4976
8	12247	14240	11180	16415	15635	17.0261

Table 5. ANOVA of the SN ratio.

인자	f	s	v	Fo
D	1	1.45	1.45	2.36
E	1	4.48	4.48	7.28*
e	4	2.46	0.615	
T	6	8.39		

* : 95%로 유의

과 상변태응력에 의한 잔류응력이 HRC 60 이상의 기준편의 최종 경도 불균일에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 예상이 된다. 따라서 잔류응력을 줄일 수 있는 공정을 택함으로써 기준편의 경도 균일성을 향상시킬 수 있으리라 생각하였다. 잔류응력을 줄이기 위하여 냉각방법을 바꾸었는데 시편을 종전과 같이 염수로 급냉하여 거의 상온까지 냉각될 때까지 방치하는 것이 아니고 염수중에 몇 초간 유지한 후 시편이 Ms온도 정도로 냉각이 되었을 때 꺼내어 공냉을 하거나 온수중에 넣어 서냉을 하는 것이다. 예상되는 냉각곡선은 Fig.1과 같다. 최종적인 잔류응력의 분포는 열응력과 상변태응력이 복합되어 일어나 매우 복잡한 양상을 띠므로 예측과 조절이 매우 어렵다. 그러나 시간소입을 하는 경우는 열응력의 크기도 어느 정도 감소시키고 특히 상변태응력을 현저히 줄일 수 있으므로 잔류응력의 크기는 현저히 감소되리라 생각된다. 본 실험에서는 염수에 유지하는 시간으로 15초를 잠정적인 최적 조건으로 선택하여 시

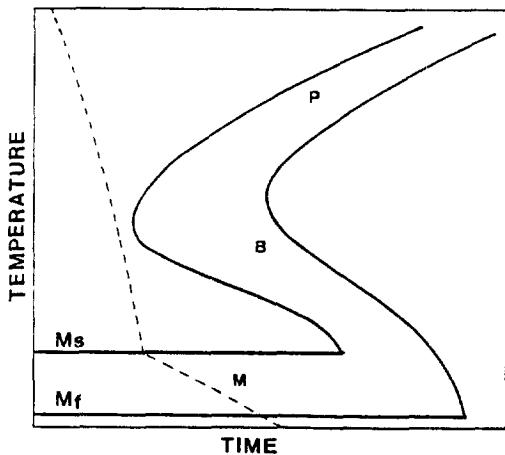


Fig. 1. Cooling curve on TTT diagram.

간소입을 하였다. 이러한 조건으로 냉각한 후 경도기준편의 경도값의 양상을 종래의 방법으로 냉각한 경우와 비교하여 Fig.2에 나타내었다. 급냉 후 시편의 경도편차가 종래의 방법을 사용한 경우 HRC 4.5 정도이지만 새로 택한 2단 냉각방법으로는 편차가 1.4 정도로 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 경도편차의 감소는 2단냉각에 의한 잔류응력의 감소때문이라고 생각되며 최종적으로 기준편의 경도 균일성을 대단히 향상시킬 것을 암시한다. Fig.2의 결과로부터 주목할 만한 또 다른 사실은 종래의 냉각방법에 비하여 새로운 냉각방법으로 열처리하면 경도가 HRC 3.5 정도 증가한다는 것이다. 이러한 결과는 처음에는 전혀 예상하지 못했던 것으로 앞으로 이에 대한 보다 자세한 연구가 요구된다. 현재로서는 이러한 결과를 다음과 같이 해석하고 있다. 시편이 급냉될 때 먼저 재료에 열응력이 발생하는데 표면부의 열응력은 냉각 초기에는 인장이 되지만 냉각이 계속 진행됨에 따라 압축으로 바뀐다. 이 재료의 Ms온도가 210°C 정도인 것을 고려하면 상변태는 표면부의 열응력의 부호가 인장에서 압축으로 바뀐 후 일어난 것이다. 이때 압축응력이 크면 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 것을 억제할 것이다. 그 이유는 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태가 비용적의 증가를 수반하기 때문인데 대략 Clasius-Clapeyron equation⁹⁾을 적용하면 알 수 있다. 한편 2단냉각을 하는 경우 열응력이 작아지므로 표면의 압축응력의 크기가 작아져 압축응력에 의한 마르텐사이트 변태억제 경향이 작아져서 결국 마르텐사이트 양이 증가하기 때문에 경도가 증가한다고 생각된다.

이와같이 2단냉각을 하고 lapping시간을 증가시킨 16

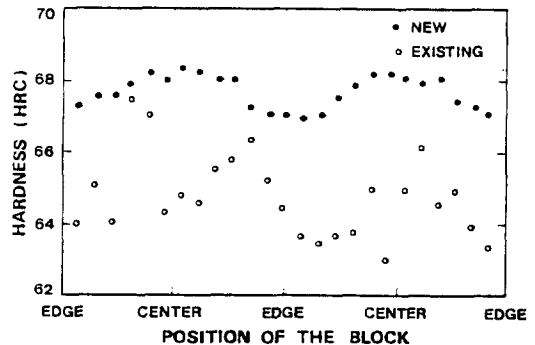


Fig. 2. As quenched hardness along the position of the block.

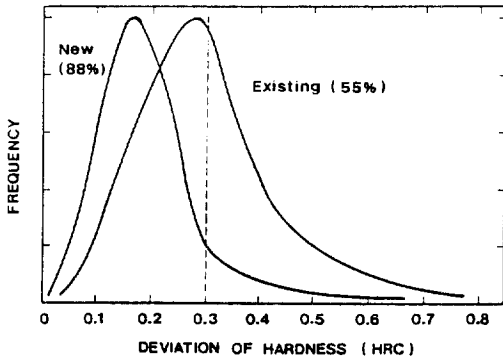


Fig. 3. Distribution of the hardness frequency over the deviation of hardness.

개의 기준편의 최종 경도편차를 조사한 결과 합격률이 종전의 55%에서 88%로 증가하였다. 또한 합격된 기준편 중에서도 이전에는 55%가 0.3, 30%가 0.2, 15%가 0.1의 편차를 보인 반면 새로 택한 방법으로는 7%가 0.3, 57%가 0.2, 36%가 0.1의 편차를 보여 합격률 뿐만 아니라 질 또한 월등히 우수함을 알 수 있다. Fig. 3에 종래의 방법으로 처리한 시편과 새로 택한 방법으로 처리한 시편의 경도편차 분포를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 다구찌의 SN비 방법을 경도기준편의 경도균일성을 향상시키기 위해 적용하였다. 그 결과 경

도기준편의 경도 불균일성이 잔류응력때문이라는 것을 알았고 이러한 잔류응력을 감소시키기 위하여 오스테나이트화 시편을 15초간 염수냉후 꺼내어 공냉하는 2단 냉각방법을 택한 결과 경도균일성을 종전보다 현저히 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

1. G. Taguchi, "System of Experimental Design (2 volumes)", UNIPUB/Kraus International Publications, New York, 1987.
2. G. Taguchi, "Introduction to Quality Engineering", Asian Productivity Organization, 1986.
3. G. Taguchi, "Off-Line Quality Control", Central Japan Quality Control Association, Nagoya, 1980.
4. G. Taguchi and Y. Wu, "Introduction to Off-Line Quality Control", Central Japan Quality Control Association, 1980.
5. Y. Hiroshi, "계측관리의 실제", 공업조사회, 1986.
6. L.P. Sullivan, Quality Progress, June, 76, 1987.
7. G. Parrish, "The Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburized Components", American Society for Metals, 1980.
8. D.R. Gaskell, "Introduction to Metallurgical Thermodynamics", McGraw Hill, 1973.