

## 평등시험설계방법을 리용하여 중탄소저합금초고강도강의 인성을 개선하기 위한 합리적인 소경조건의 최량화방법

최금성, 주영삼

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《현대야금공업의 발전추세에 맞게 선진기술에 의거하여 철강재생산의 기술경제적지표를 개선하며 합금강과 규격강재의 품종을 늘여야 합니다.》

선행연구[1]에서는 중합금초고강도강의 기계적성질에 미치는 팽각속도의 영향을 모의하였으며 선행연구[2]에서는 저탄소Mn강의 현미경조직과 기계적성질에 미치는 소경조건의 영향에 대하여 서술하였다.

일반적으로 소경온도, 팽각속도, 소경제, 소경시간을 비롯한 소경조건은 합금강의 기계적성질과 현미경조직에 큰 영향을 미친다. 그러므로 세기와 인성의 좋은 결합을 얻기 위하여서는 미량합금원소를 첨가하는것과 함께 소경조건을 잘 조절하여야 한다.

한편 중탄소저합금초고강도강(42Cr2NiMoWVSi)의 합리적인 합금조성을 확정하고 일반적인 열처리방법으로 고온변형열처리를 진행한 다음 물속에서 소경하고 저온소려하여 2250MPa의 높은 당김세기를 얻었지만 충격값이  $36\text{J}/\text{cm}^2$ 로서 인성이 매우 낮았다.

이로부터 우리는 평등시험설계방법을 리용하여 중탄소저합금초고강도강의 인성을 개선할수 있는 합리적인 소경조건을 최량화하였다.

우리가 리용한 중탄소저합금초고강도강(42Cr2NiMoWVSi)의 조성은 현장연구자료에 기초하여 품질공학적수법으로 확정하였다.

발광스펙트르분석으로 측정한 중탄소저합금초고강도강(42Cr2NiMoWVSi)의 화학조성은 표 1과 같다.

표 1. 중탄소저합금초고강도강(42Cr2NiMoWVSi)의 화학 조성

합금원소	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti
함량/%	0.42	0.72	0.76	0.018	0.013	1.54	0.52	0.23	0.21	0.12	0.02

한편 합금조성을 알면 다음과 같은 경험식을 리용하여 림계온도( $A_{c3}$ )를 계산할수 있고 소경온도를 대략적으로 결정할수 있다.[1] 즉

$$A_{c3} = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15.2\%Ni + 44.7\%Si + 104\%V + 31.5\%Mo + 13.1\%W \quad (1)$$

식 (1)을 리용하여  $A_{c3}$ 의 최대값을 구하면  $825^\circ\text{C}$ 이다.

일반적으로 소경온도는  $A_{c3}$ 보다  $30\sim 50^\circ\text{C}$  정도 높게 정하기때문에 소경온도구간을 경험식에 포함되지 않은 인자들까지 고려하여  $850\sim 1000^\circ\text{C}$ 로 정하고 소경유지시간은 현장연구자료에 기초하여  $5\sim 35\text{min}$ 으로 정하였다.

또한 소경제로서는 일반적인 소경제들인 물, 기름, 공기로 정하고 평등시험설계방법을 리용하여 저합금초고강도강의 인성을 개선하기 위한 합리적인 소경조건을 결정하였다.

평등시험설계방법은 직교설계법(품질공학적수법)에 비하여 인자들의 수준수가 많은 경우에도 인자수준수만 한 적은 실험을 진행하여 최량화를 진행할수 있는 효과적인 시험

설계방법이다.

열처리한 시편들에 대한 당김 및 충격시험을 진행하였다. 당김시험은 20t급 당김시험기로 진행하였다. 파괴에 대한 충격시험은 샤르피충격시험기로 측정하였다.

인자들의 변동범위를 고려하여 혼합형평등설계표  $U_{12}(4^2 \times 3)$ 을 리용하였다.

평등설계표에 인자들을 배치한 다음 매 경우의 충격값을 각각 2회 측정하여 평균값을 계산하였다. 그 결과에 대한 인자배치 및 충격값은 표 2와 같다.

표 2. 인자배치 및 충격값

No	인자			소경 온도/℃	유지 시간 /min	소경제	측정값		평균값 /(J·cm <sup>-2</sup> )
	1	2	3				/(J·cm <sup>-2</sup> )		
1	3	1	3	950	5	공기	58	58	58
2	2	2	3	900	15	공기	63	63	63
3	2	1	2	900	5	기름	50	52	51
4	1	3	3	850	25	공기	48	48	48
5	3	3	1	950	25	물	50	48	49
6	4	4	3	1 000	35	공기	42	42	42
7	1	2	2	850	15	기름	43	45	44
8	2	4	1	900	35	물	37	39	38
9	4	3	2	1 000	25	기름	46	44	45
10	4	2	1	1 000	15	물	40	40	40
11	3	4	2	950	35	기름	45	47	46
12	1	1	1	850	5	물	32	30	31

충격값 ( $a_k$ )을  $y$ , 소경온도를  $x_1$ , 유지시간을  $x_2$ 로 놓고 선형회귀모형을 작성하면 다음과 같다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + r_1z_{31} + r_2z_{32} + \varepsilon \quad (2)$$

여기서  $z_{31}$ ,  $z_{32}$ 는 고찰하는 인자들중에 정성적인자가 있는것으로 하여 회귀모형에 포함시킨 소경제의 거짓변수이다. 식 (2)에 따르는 회귀방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 58 \\ 63 \\ 51 \\ 48 \\ 49 \\ 42 \\ 44 \\ 38 \\ 45 \\ 40 \\ 46 \\ 31 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 950 & 5 & 0 & 0 \\ 1 & 900 & 15 & 0 & 0 \\ 1 & 900 & 5 & 0 & 1 \\ 1 & 850 & 25 & 0 & 0 \\ 1 & 950 & 25 & 1 & 0 \\ 1 & 1000 & 35 & 0 & 0 \\ 1 & 850 & 15 & 0 & 1 \\ 1 & 900 & 35 & 1 & 0 \\ 1 & 1000 & 25 & 0 & 1 \\ 1 & 1000 & 15 & 1 & 0 \\ 1 & 950 & 35 & 0 & 1 \\ 1 & 850 & 5 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \\ \varepsilon_9 \\ \varepsilon_{10} \\ \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

파라메터들의 추정값은  $\hat{b}_0 = 36.712$ ,  $\hat{b}_1 = 0.0215$ ,  $\hat{b}_2 = -0.1925$ ,  $\hat{r}_1 = -13.25$ ,  $\hat{r}_2 = -6.25$ ,

$R^2 = 0.4946$ ,  $F = 1.71$ 로서 유의하지 않으므로 주효과외에  $x_1^2$ ,  $x_2^2$  항을 더 고찰하자. 이때 회귀방정식은 다음과 같다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + r_1z_{31} + r_2z_{32} + \varepsilon \quad (4)$$

최소두제곱추정을 리용하면 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\hat{y} = -1977.3 + 4.369x_1 - 0.00235x_1^2 + 1.3575x_2 - 0.03875x_2^2 - 13.25z_{31} - 6.25z_{32} \quad (5)$$

이때  $R^2 = 0.9997$ 로서 2차항까지 고려한 식 (5)가 매우 유의하다는것을 알수 있다.

MATLAB의 최량화함수인 fmincon함수를 리용하여 식 (5)의 최량조건을 구하면 소경온도는 930°C, 유지시간은 18min, 소경제로는 공기일 때 충격값이 65.2라는 결론을 얻을수 있다.

평등시험설계방법을 리용하여 얻은 최량조건에 대한 확증실험을 진행하였다. 이때 확증실험에서 얻은 기계적성질에 대한 측정값은 표 3과 같다.

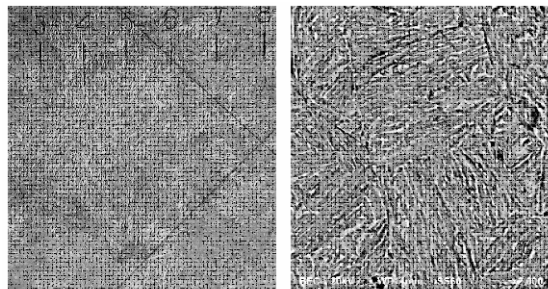
표 3. 확증실험에서 얻은 기계적성질에 대한 측정값

당김세기 /MPa	류동한계 /MPa	충격값 /(J·cm <sup>-2</sup> )	연신률 /%	단면수축률 /%
2040	1780	64.5	9	42

표 3에서 보는바와 같이 평등시험설계방법을 리용하여 얻은 최량조건이 비교적 정확하며 최량화된 소경조건에서 소경하였을 때 중탄소저합금초고강도강(42Cr2NiMoWVSi)의 당김세기는 2040MPa로 감소하였지만 충격값은 64.5J/cm<sup>2</sup>로 증가하여 인성이 현저히 개선되었다는것을 알수 있다.

한편 합금강의 현미경조직에 미치는 소경조건인 영향을 분석하기 위하여 최량화된 소경조건에서 열처리한 시편의 현미경조직을 관측하였다. 현미경조직분석은 광마에 이르기까지 연마를 진행하고 5% 질산알콜로 부식시킨 다음 얻어진 시편을 금속현미경(《MicroXAM-100》)과 전자현미경으로 관측하였다.

중탄소저합금초고강도강의 금속현미경조직과 SEM사진은 그림과 같다.



㉠)

㉡)

그림. 중탄소저합금초고강도강의 금속현미경조직(㉠)과 SEM사진(㉡)

일반적으로 열처리한 시편들의 현미경조직을 보면 펑각속도에 따라 베를리트, 웨리트, 침상베이니트, 마르텐시트로 이루어진다. 그림에서 보면 공기냉각한 시편의 현미경조직은 적은 량의 웨리트와 침상베이니트, 마르텐시트로 이루어져있다.

## 맺 는 말

1) 평등시험설계방법을 리용하여 중탄소저합금초고강도강의 인성을 개선할수 있는 합리적인 소경조건은 소경온도 930°C, 유지시간 18min, 소경제로는 공기라는것을 알수 있으며 이때 충격값은 64.5J/m<sup>2</sup>로서 인성이 현저히 개선되었다.

2) 공기랭각한 시편에서 얻어지는 침상베이니트와 마르텐시트의 혼합조직이 완전마르텐시트조직에 비해 인성개선에 좋은 영향을 미친다.

## 참 고 문 헌

[1] M. Ali et al.; J. Iron Steel Res. Int., 26, 10, 1052, 2019.

[2] E. Raphael et al.; J. Mater. Sci., 54, 12, 875, 2019.

주체109(2020)년 9월 5일 원고접수

## Optimization Method of Suitable Quenching Conditions to Improve the Toughness of Medium Carbon Low Alloy Ultrahigh Strength Steel Using Uniform Design Method

*Choe Kum Song, Ju Yong Sam*

In this paper, we have investigated the suitable quenching conditions to improve the toughness of medium carbon low alloy ultrahigh strength steel(42Cr2NiMoWVSi) by uniform design method. We have found that the best quenching condition is to hold for 18 minutes at the temperature of 930°C and to air-cool.

Keywords: ultrahigh strength steel, tempering temperature, uniform design