



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건 하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2011년 8월

석사학위논문

**18%Ni 마르에 이징 강의
시효처리 최적화에 관한 연구**

조선대학교 대학원

산업기술공학과

김석현

18%Ni 마르에이징 강의 시효처리 최적화에 관한 연구

A Study on Aging Treatment Optimization
of 18%Ni Maraging Steel

2011 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원

산업기술공학과

김석현

18%Ni 마르에이징강의 시효처리 최적화에 관한 연구

지도교수 차 용 훈

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2011년 4월

조선대학교 대학원

산업기술공학과

김석현

김석현의 석사학위 논문을 인준함

위원장 : 조선대학교 교수 박창선



위원 : 조선대학교 교수 성백섭



위원 : 조선대학교 교수 차용훈



2011년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법 및 내용	4
제 2 장 이론적 배경	6
2.1 실험계획법	6
2.2 반응표면법	10
2.3 마르에이징강	14
제 3 장 시험편 및 실험방법	23
3.1 시험편	23
3.2 실험 방법	28
제 4 장 결과 및 고찰	32
4.1 주요인자의 상관관계	32
4.2 회귀분석 및 반응표면분석	45
4.3 반응 최적화	57
제 5 장 결론	60
참 고 문 헌	61

표 목 차

Table 2.1	Chemical compositions of standard maraging steel	15
Table 2.2	Typical mechanical properties of 18%Ni maraging steel by age hardening	20
Table 3.1	Chemical compositions of manufactured maraging steels	25
Table 3.2	Hot rolling mill engineering data	25
Table 3.3	Mechanical properties of base metals	25
Table 3.4	Heat treatment conditions	26
Table 3.5	Specification of the used reagent for aging	30
Table 3.6	The used testers for the experiment	31
Table 4.1	Estimated Effects and Coefficients of Hardness	34
Table 4.2	Analysis of Variance of Hardness	34
Table 4.3	Estimated Effects and Coefficients of Tensile Strength	37
Table 4.4	Analysis of Variance of Tensile Strength	37
Table 4.5	Estimated Effects and Coefficients of Elongation	40
Table 4.6	Analysis of Variance of Elongation	40
Table 4.7	Estimated Effects and Coefficients of Fatigue life	43
Table 4.8	Analysis of Variance of Fatigue life	43
Table 4.9	Estimated regression coefficients for Hardness(Coded)	46
Table 4.10	Analysis of variance for Hardness	46
Table 4.11	Estimated Regression Coefficients for tensile strength(Coded)	49
Table 4.12	Analysis of Variance for tensile strength	49
Table 4.13	Estimated regression coefficients for Elongation(Coded)	52
Table 4.14	Analysis of variance for Elongation	52

Table 4.15	Estimated regression coefficients for Fatigue life(Coded)	55
Table 4.16	Analysis of variance for Fatigue life	55
Table 4.17	Response optimizer	58
Table 4.18	Setting of the response values for optimizer	58

도 목 차

Fig. 2.1	The Process of DOE	9
Fig. 2.2	The Process of RSM	13
Fig. 2.3	Fe-Ni system	16
Fig. 2.4	Effect of solution annealing temperature on the mechanical properties of 250 grade 18%Ni maraging steel	18
Fig. 2.5	Relation between aging time and mechanical properties of 250 grade 18%Ni maraging steel after solution annealing at 815°C for 1hr	21
Fig. 2.6	Tensile strength of the 250 grade 18%Ni maraging steel (Solution annealing ; 815°C 1hr, age hardening ; 6hr, air cooling)	22
Fig. 3.1	Rectangular tensile test specimen, sub-size	26
Fig. 3.2	Standard compact-tension (CT) specimen for fatigue crack growth rate testing	27
Fig. 3.3	Heat treatment diagram	29
Fig. 3.4	Fatigue testing machine set-up	30
Fig. 4.1	Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Hardness	35
Fig. 4.2	Main Effect Plot of the Standardized Effects of Hardness	35
Fig. 4.3	Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Tensile Strength	38
Fig. 4.4	Main Effect Plot of the Standardized Effects of Tensile Strength	38
Fig. 4.5	Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Elongation	41
Fig. 4.6	Main Effect Plot of the Standardized Effects of Elongation	41
Fig. 4.7	Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Fatigue life	44
Fig. 4.8	Main Effect Plot of the Standardized Effects of Fatigue life	44

Fig. 4.9	Contour plot of Hardness between Temp and Time	47
Fig. 4.10	Contour plot of Tensile Strength between Temp and Time	50
Fig. 4.11	Contour plot of Elongation between Temp and Time	53
Fig. 4.12	Contour plot of Fatigue life between Temp and Time	56
Fig. 4.13	Results of the response optimization	59

ABSTRACT

A Study on Aging Treatment Optimization of 18%Ni Maraging Steel

Kim, Suk-Hyun

Advisor : Prof. Cha, Young-Hoon, Ph. D.

Dept. of Industrial Technology Engineering,
Graduate School of Chosun University

This study aims to optimize the aging condition process in order to improve mechanical characteristics of ultra high strength 18%Ni maraging steel which is being highlighted in the fields of the aerospace, nuclear energy and vehicles. The results of this study are as follows.

1. The solution-treated specimen's hardness was reduced by about 3 percent more than the basic material, but the 1-hour aging-treated specimen's hardness increased by nearly 60 percent and then, showed almost similar values after that.
2. It showed the highest tensile strength value of around 1,800MPa for five to eight hours which was about two times bigger than the basic material's. On the other hand, it showed the highest elongation at a low temperature and for less time, and it was similar to the basic material's.
3. The more the aging temperature and aging time increased, the more its fatigue life increased. On the other hand, when applying the aging treatment

for eight hours at a temperature of 510°C, the specimen's fatigue life was most favorable.

4. When applying the aging treatment for eight hours at a temperature of 482°C, the specimen which satisfied 250 grade, was created, and it showed the most excellent mechanical characteristics.
5. When analyzing the effects of the aging temperature and aging time on response values, and evaluating the significance, significant factors were derived from each response values. Then, the main effects and interaction's impact were analyzed.
6. When analyzing a correlation between factors, the possibility of its application was verified, by extracting a proper regression equation through regression analysis and response surface analysis regarding reaction variables of the aging temperature and aging time and then, a regression equation and the optimum reaction were achieved, by establishing a correlation between factors.

When applying the optimum reaction, it was found that it is the most appropriate condition to apply the aging treatment for 6.5 hours at a temperature of 482°C.

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 항공, 우주산업의 발달로 고강도-고인성을 갖는 신뢰성 높은 소재의 수요는 꾸준히 증가하고 있다¹⁾. 마르에이징강이란 명칭은 마르텐사이트를 시효하여 고강도가 얻어진다는 의미에서 붙여진 이름으로서 이 강의 특징은 고강도임에도 불구하고 고인성을 갖는 회백색 금속으로서 성형성, 가공성, 내식성, 고온강도 및 용접성 등이 우수하며, 열처리가 간편하고 열처리 후 치수변화가 거의 없는 등의 장점을 들 수 있다^{2~4)}. 이 강은 미국이 로켓의 모터 케이스에 최초로 적용한 이래 항공·우주분야에서는 제트엔진과 헬리콥터 구동축, 랜딩기어 등에, 자동차분야에서는 각종 구동축, 커넥팅로드 및 엔진밸브 등에, 공구분야에서는 압출 램, Al 및 Zn 케스팅 다이 및 압연기 등 해양, 원자력 분야 및 산업기계의 특수부품 등 그 용도가 급격히 신장하고 있다⁵⁾.

초고장력강인 마르에이징강은 저탄소($C \leq 0.03\%$)의 Fe-Ni 마르텐사이트 기지에 석출경화성 합금원소인 Co, Mo, Ti 등을 고용하고 있기 때문에 시효에 의하여 쉽게 금속간화합물이 석출됨으로서 강화된다⁶⁾. 이 강은 1958년경 미국의 INCO社에서 개발, 공업화되었는데, 초기에는 20%Ni, 25%Ni 강이라 불리는 두 강종에 대하여 개발되었으나, 고강도에서의 취성문제로 인하여 통상적인 표준 열처리 외에 심냉처리나 중간소둔처리 등의 후속 열처리가 더 필요하였다. 그러나 고 Ni합금에서 Co나 Mo 등의 합금원소의 상호작용에 의하여 석출경화 시 인성증가에 기여할 수 있다는데 착안하여 Ti 및 Al 함량을 다소 줄이는 대신에 Co와 Mo을 다량 첨가하고 Ni 함량을 18% 수준으로 낮춤으로서 인성저하 및 응력부식 등의 문제를 개선하였다. 그 결과 1960년대 초에 18%Ni-Co-Mo-Ti계 마르에이징강이 상품화되기에 이르렀다.

마르에이징강은 화학성분 및 강도수준에 따라 여러 종류가 있다. 우선 화학성분에 따라 코발트에 의해 강화된 C-type과 타이타늄에 의해 강화된 T-type이 있으며, 1980년대 초에는 Co를 함유하지 않은 Co-free 마르에이징강도 상품화 되었다. 그리고 각 화학성분에 따른 타입에서 강도수준에 따라 각각 200, 250, 300 및 350 grade로 다시 분류되어 C-200 또는 T-200과 같이 명명되고 있다.

마르에이징강에 대한 최근의 국내·외 연구동향을 살펴보면, 18%Ni이 함유된 마르에이징강의 용접 및 시효처리에 대한 연구^{7~12)}, Mo 및 Co 등의 원소를 첨가하여 제조한 마르에이징강의 연구^{13~16)}, 마르에이징강의 기계적 성질에 관한 연구^{17, 18)} 등이 있다. 또한 1970년대 Co공급의 불안정과 자원편중으로 인해 Co 가격이 급등함에 따라 Co를 보다 저렴한 합금원소로 대체하면서 기존의 Co함유 마르에이징강과 동등한 기계적 특성을 유지하는 합금개발 연구 등이 이루어져 Ti이 다량 함유된 T300강 등에 대한 연구 등^{19~22)}이 수행되었다.

국내에서 마르에이징강에 대한 연구를 비롯하여 제조 및 적용분야는 대단히 부족하다고 할 수 있다. 이 강의 제조는 (주)포스코특수강에서 생산이 이루어지고 있으며, 그것도 200 grade C-type 한 종류에 국한되어 군사용으로 주문 생산되고 있다. 따라서 그 외의 grade 및 타입은 전량 수입에 의존하여 기계가공만을 통한 부품이나 구조물을 제작하거나 일부는 연구용으로 사용되고 있는 실정이다. 실제로 마르에이징강에 대한 국내 연구의 대부분은 수입된 소재를 사용하거나 실험실에서 소규모로 제조하여 Mo 또는 Co의 영향 및 가공조건에 대한 강도평가 등의 연구에 그치고 있다. 그러나 수년전에 (주)포스코특수강에서 250 grade에 대하여 연구를 수행한 적은 있으나 양산에 도달하지는 못했으며 이 강이 주문 생산된다는 점 등을 감안하면 지금까지의 국내연구가 실질적으로 기업에 적용될 가능성은 매우 미약했다고 판단된다. 또한, 첨단부품·소재 기술개발의 가장 기본은 높은 비강도를 갖는 재료의 연구 및 개발이라 사료되며, 고강도/고인성 재료의 용도가 확대되고 있는 추세이므로 초고장력강이면서 가공성과 용접성이 우수한 마르에이징강의 고강도화 기술 및 데이터의 확보는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

중요한 데이터의 확보를 위해 실험계획법을 활용하고 그 결과를 반응표면법을 이용하여 분석 및 최적화 작업을 실시하는데 여기에서 실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 가를 계획하는 것이고 또한, 반응표면법(Response Surface Methodology : RSM)은 통계적인 근사 기법으로써 여러 설계변수가 복합적인 작용을 하여 어떤 시스템의 응답을 생성할 때 이들의 관계를 근사 다항식의 형태로 만든 뒤 이를 이용하여 최적화를 수행하는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 실험계획법을 활용하여 18%Ni 마르에이징강을 대상으로 시효처리조건을 요인으로 적용하여 200 grade 조성에 가깝지만 250 grade에 가까

운 강도 및 신율 등의 기계적 성질을 얻을 수 있는 방법에 대하여 고찰하고자 한다. 또한 시효조건에 따른 강도평가 등을 수행하여 반응표면법을 이용해 최적의 시효처리 온도 및 시간을 고찰하고자 한다. 따라서 특별한 설비투자나 공정변화 등이 필요 없는 기존의 제조방식에 적용 가능한 실질적인 연구를 수행하고자 한다.

1.2 연구방법 및 내용

고강도화에서 연성 및 인성을 동시에 개선시키기 위하여 결정립을 미세화 시키는 방법으로서 준안정 오스테나이트의 가공 방법, 시효 전 마르텐사이트의 가공방법 및 예비시효 후 마르텐사이트를 가공하는 방법 등 가공공정 방법 및 조건에 의해 달성할 수 있다고 보고되고 있다²³⁾. 다른 방법으로는 일반적인 주조조직의 미세화가 있다. 이를 위하여 적당한 결정립 미세화제를 첨가하는 경우로서 Al합금에 Ti나 B의 첨가, Mg합금에 Zr첨가, 주철에 Si첨가에 의한 조직 개선 등²⁴⁾을 들 수 있다. 그러나 마르에이징강에 있어서 결정립 미세화에 대한 연구는 주로 저온압연, 대압하압연, 급냉 및 단조조건 등의 가공공정에 대한 연구가 대부분이며, 첨가원소에 대한 연구는 Co, Mo 및 Ti 등 마르에이징강의 주성분의 함량변화가 강도 등에 미치는 영향이 대부분이었다.

본 연구에서는 실험계획법을 토대로 시효처리 공정변수를 적용하여 진공유도용해로(VIM)에서 잉곳을 제조하였다. 둘째로 제조된 잉곳을 열간압연 후 용체화처리 및 시효처리 조건을 적용하였는데 이 때 용체화처리는 815°C에서 1시간 실시하였으며, 시효처리는 48% KNO₃+52%NaNO₃ 염욕을 이용하여 455°C, 482°C 및 510°C에서 각각 1시간, 2시간, 4시간 및 8시간 실시하였다. 또한 시효처리 조건에 따라 마르에이징강의 강도 등에 미치는 영향을 고찰하기위한 방법으로 경도측정, 인장시험, 피로시험 등의 기계적 시험을 수행하였다.

제 1 장은 연구배경 및 목적과 연구방법으로서 마르에이징강의 용도 및 종류, 국내·외 현황 및 강도향상을 위한 목적과 방법에 대하여 기술하였다.

제 2 장은 실험계획법과 반응표면법 및 마르에이징강의 간단한 학술적 자료를 기술하였다.

제 3 장에서는 시험편 및 실험방법으로서 강의 제조, 열간압연 및 열처리 등의 방법 및 시험평가를 위한 방법 등에 관하여 기술하였다.

제 4 장은 본 연구의 결과 및 고찰로서 시효처리 조건이 기계적성질에 미치는 영

향을 고찰하기 위하여 경도시험, 인장시험 및 피로시험 등을 실시한 후 반응표면법을 이용해 종합적인 분석을 하였다.

제 5 장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 실험계획법

2.1.1 실험계획법의 정의

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 반응치(특성치)에 대하여 이에 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 무수히 많은데다가 원료, 실험장치, 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있고, 환경 조건의 변동, 표본오차(Sampling Error) 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 따라서 우리가 실험을 통하여 달성하고자 하는 목적은 실험에 과학적으로 영향을 미친다고 생각할 수 있는 무수히 많은 원인에 대하여 다음과 같은 것들을 알아내고자 하는 데 있다.

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(Factor)라고 부르며 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준(Level)이라고 한다. 또한, 이 수준으로 취한 값의 수를 인자의 수준수라고 한다. 실험을 실시하기 이전에 실험에 대한 충분한 계획이 없이는 원하는 실험의 목적을 달성하기 어렵다, 실험계획법²⁵⁾이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 짰다고 하는 것을 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법을 택하여 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적 분석방법을 선택하였다는 의미이다.

2.1.2 실험계획법의 순서

실험 계획법에 있어서 실험의 목적과 연구할 인자 및 실험 설계, 데이터 분석 등에 대한 사전 지식을 이해하는 것은 필수적이고 이에 따른 결과를 해석하고 조치

를 내리는 과정은 중요하다. 일반적으로 실험계획법의 순서는 Fig. 2.1과 같이 진행 된다.

가. 실험목적의 결정

실험을 통하여 얻고자 하는 목적을 달성하기 위하여 이와 직결된 실험의 반응치를 특성치로 택해야만 한다. 실험의 목적이 명백히 제시되지 않은 실험은 최적의 실험방법과 분석방법이 무엇인지 찾아내기 어렵다

나. 특성치의 선택

실험의 목적이 정해지면 그 목적을 달성하기 위하여 이와 직결된 실험의 반응치를 특성치로 택해야만 한다. 실험의 목적에 따라서 특성치를 두 개 이상 택해 주어야 할 경우도 있다. 만약 실험자가 택한 하나의 특성치가 좋게 되었더라도 다른 특성이 나쁘게 되어 전체적으로 실험의 목적을 달성할 수 없는 가능성이 있는 경우에는, 실험의 목적과 관련된 모든 반응치를 특성치로 하여 주어야 한다.

다. 인자와 인자수준 선택

실험의 목적을 달성 할 수 있는 인자는 모두 선택하는 것이 원칙이지만 과도한 인자의 수는 실험의 정확도를 떨어뜨리는 경우도 있고 실험비용도 너무 크기 때문에 실험 환경에 제약을 받을 수 있다. 인자는 기술적(경험적)으로 수준이 지정될 수 있는 인자와 기술적으로 지정되지 않아도 되는 시간과 날짜와 같이 다른 인자의 효과에 충분한 영향을 줄 가능성이 있는 인자를 선택할 수 있다. 인자의 수준의 선택은 현재 사용되고 있는 인자의 수준과 최적이라고 예상되는 수준도 포함시키는 것이 좋으며 수준 수는 대량 2~5 수준이 적절하다고 알려져 있다. 인자가 계량 인자(온도, 습도, 압력)의 경우는 수준의 최대값과 최소값을 흥미영역(실험자가 관심을 가지고 있는 인자수준이 변화할 수 있는 범위)의 최대값과 최소값으로 취급해

주는 것이 좋고 중간 수준은 흥미영역을 등간격으로 나누어 취급하는 것이 좋다고 한다. 인자가 계수값을 가지는 경우에는 인자의 종류 수만큼을 수준수로 정해주는 것이 좋다고 알려져 있다.

라. 실험의 배치

인자의 수준이 정해지면 다음 단계로 실험을 어떻게 실시할 것인가에 대한 구체적인 계획을 세워야 한다. 어떻게 인자의 수준을 조합시켜 실험할 것이며, 블록(Block)의 구성은 어떻게 하고, 실험순서를 위한 랜덤화(Randomization)는 어떻게 할 것인가를 정해 주어야 한다. 블록이라는 것은 실험을 시간적 혹은 공간적으로 분할하여 그 내부에서 실험의 환경이 균일하도록 만들어 놓은 것이다.

마. 실험의 실시

실험의 실시는 계획대로 이루어지도록 처음부터 끝까지 충분히 관리하여 주어야 한다. 또한 실험을 실시하여 갈 때, 미리 정한 특성치 이외에도 실험과 관련된 중요한 데이터는 모두 보조 특성치로 두는 것이 좋은데, 이는 실험의 관리상태의 검토, 실험의 반복 등에 유용하게 사용할 수 있기 때문이다.

바. 실험 결과 분석

실험의 실시로 얻어지는 데이터에 대하여 어떠한 통계적 방법을 사용하여 분석할 것인가를 정하여야 한다. 데이터 분석은 가능하면 그래프화 하여 시작하는 것이 좋다. 데이터를 그래프에 그려봄으로 인하여 특성치의 변동 상황을 한 눈에 알아볼 수 있으며, 최적조건의 위치도 짐작할 수 있는 경우가 많다.

사. 분석 결과 해석

분산분석표에서 검정의 결과로부터 결론을 끄집어 낼 때에는 실험의 목적, 가정, 귀무가설 등을 고려하여 결론이 가지고 있는 기술적 의미를 생각해야 한다. 실험결

과의 해석은 실험에서 주어진 조건 내에서만 결론을 지어야 한다.

목적 특성의 변화에 미친 여러 가지 인자들의 영향 정도를 정량적으로 평가하는 실험데이터의 해석방법에는 분산분석(ANOVA : Analysis of Variance), 상관분석(Correlation Analysis), 회귀분석(Regression Analysis), 요인배치 분석(Factional Design Analysis), 반응표면분석(Regression Analysis) 및 혼합물 분석(Mixture Analysis)등이 있다. 이들 분석 기법을 통하여 요인효과의 추정과 최적 조합의 공정 조건을 설정하고 설계방식을 표준화 한다.

실험결과의 해석이 끝나면 반드시 적절한 조치를 취해야 할 것이다. 예를 들면, 다음 단계의 실험을 계획한다거나, 작업표준을 개정한다거나 하여야 한다.

근사화 하고자 하는 원래 함수가 위쪽 그림과 같을 때 실험계획법을 통해 설계영역 안에서 적절한 설계점들을 선택한다. 다음 각 설계점들에 대하여 해석을 수행하여 함수값을 계산하고, 이렇게 나온 설계점과 함수값을 이용하여 반응표면 근사함수를 생성하는 방법이다. 본 연구에서는 반응표면법을 이용한 최적설계를 효율적으로 수행하기 위한 다양한 실험계획법과 근사 함수 생성 알고리즘을 개발하고 있으며, 개발된 알고리즘을 다양한 최적 설계 문제에 적용하고 있다.

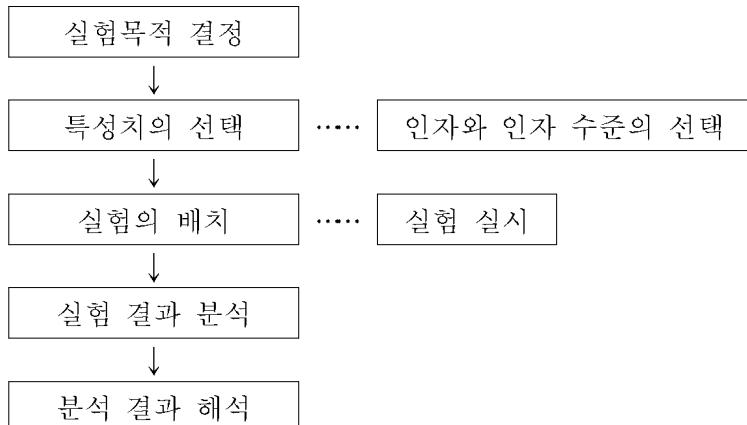


Fig. 2.1 The Process of DOE

2.2 반응표면법

최근 설계 문제가 점점 복잡해지고 이에 따라 해석시간이 기하수적으로 증가함에 따라 근사 최적설계 방법이 주목을 받기 시작하였다. 근사 최적설계는 원래 문제를 근사함수 문제로 치환하고 이 변환된 근사함수 문제를 이용하여 최적설계를 수행하는 방법으로, 이를 통해 해석에 드는 비용을 감소시킬 수 있다. 근사함수의 생성은 크게 국소근사화(Local Approximation)와, 전역근사화(Global Approximation)로 나눠진다. 국소근사화는 민감도 정보를 이용하여 현재 설계점 근처에서 근사함수가 매우 정확하지만 현재 설계점에서 떨어질수록 그 정확도가 급속히 떨어지는 단점이 있다. 그러나 국소근사화를 적절히 이용하더라도 근사 함수를 사용하지 않은 최적설계에 비해 해석계산 횟수를 상당히 감소킬 수 있어 그동안 많은 연구에서 사용되었고, 지금도 활발히 연구되고 있다. 이에 반해 전역근사화는 어느 설계 영역에 대하여 근사 함수를 생성하는 것으로 어느 한 설계점에 대해서는 그 정확도가 부정확할 수도 있지만, 설계 영역 전체에 대하여 근사화하고자 하는 해석치의 일반적인 경향을 보여 줄 수 있는 장점이 있어, 최근에 활발히 연구되기 시작하였다. 일반적으로 반응표면법의 순서는 Fig. 2.2와 같이 진행된다.

2.2.1 반응 표면법의 정의

반응표면분석(Response Surface Analysis)은 여러 개의 설정 변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다.

2.2.2 반응표면 모형의 설정

독립변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 와 종속변수 η 간의 미지의 함수를 f 로 나타내면

$$\eta = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k) \quad (2-1)$$

가 된다. 반응함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면 모형은 k 개의 독립변수에 대한 중회귀모형(Multiple Regression Model)이다. 이 가정은 독립변수들의 모든 값에서 만족할 필요는 없으며, 단지 실험자가 흥미를 가지고 있는 독립변수들의 어떤 영역에서만 만족하면 된다.

독립변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 를

$$x_i = \frac{\zeta_i - \zeta_{0i}}{c_i} \quad (2-2)$$

와 같이 선형변환 시켜서 새로운 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 를 정의하고, 중심

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0) \quad (2-3)$$

이 실험자가 생각하는 흥미영역의 한 가운데 위치한다고 하자. ζ_{0i} 는 보통 ζ_i 의 측정된 값들의 평균치로 취하고, c_i 는 x_i 의 값을 간단하게 해주기 위한 상수이다. 대체로 x_i 의 값이 -1 에서 $+1$ 사이에서 위치하도록 c_i 를 잡아준다.

함수의 반응표면이 곡면으로 표현될 것이라고 믿어진다면, 2차 회귀모형을 사용하는 것이 바람직하고, 그 표현은

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2-4)$$

로 쓰여진다. 3차 회귀모형도 고려될 수 있으나, 실제적으로 거의 쓰여지지 않고 있다.

2.2.3 최적반응조건의 결정

η 를 최적화 시키는 독립변수들의 값을 최적반응조건(Optimal Response Condition)이라고 한다. 본 절에서는 반응표면이 회귀분석방법에 의하여 추정되었을 때 이 추정된 반응표면으로부터 독립 변수들의 최적반응 조건을 결정하는 방법에 대하여 알아보고자 한다.

실험자가 흥미영역 R에서 2차 회귀모형이 적절할 것이라고 생각하여 η 의 측정치를 y 로 놓으면, 그 모형은

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-5)$$

으로 가정되면, 최소 제곱법에 의하여 적합된 반응표면은

$$\eta = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (2-6)$$

로 표현된다. 만약 독립변수의 수가 2로서 $k=2$ 이면

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 \quad (2-7)$$

가 된다.

중회귀를 구하는 방법을 사용하게 되면,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$$B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{13}/2 & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ \hat{\beta}_{21} & \hat{\beta}_{22}/2 & \hat{\beta}_{23}/2 & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ \hat{\beta}_{31} & \hat{\beta}_{32} & \hat{\beta}_{33}/2 & \hat{\beta}_{3k}/2 \\ & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

이 고,

$$\hat{y} = x'b + x'Bx \quad (2-10)$$

로 표현된다. 따라서 x 로 미분한 $b + 2Bx_0 = 0$ 을 만족시킨 x_0 을 정상점(Stationary Point)이라고 부른다.

$$x_0 = -B^{-1}b/2 \quad (2-11)$$

가 구해지며 이 정상점은 적합된 2차 반응 표면에서 다음의 세가지 중 하나가 된다

- (1) \hat{y} 이 최대가 되는 x 의 점
- (2) \hat{y} 이 최소가 되는 x 의 점
- (3) \hat{y} 이 최대도 아니고 최소도 아닌 x 의 안부점(Saddle Point)

또한, \hat{y} 에 대한 등고선표를 그려보아서 각각의 최대, 최소, 안부점을 살펴보고 흥미영역에서 적절한 값을 도출해 낼 수 있다.

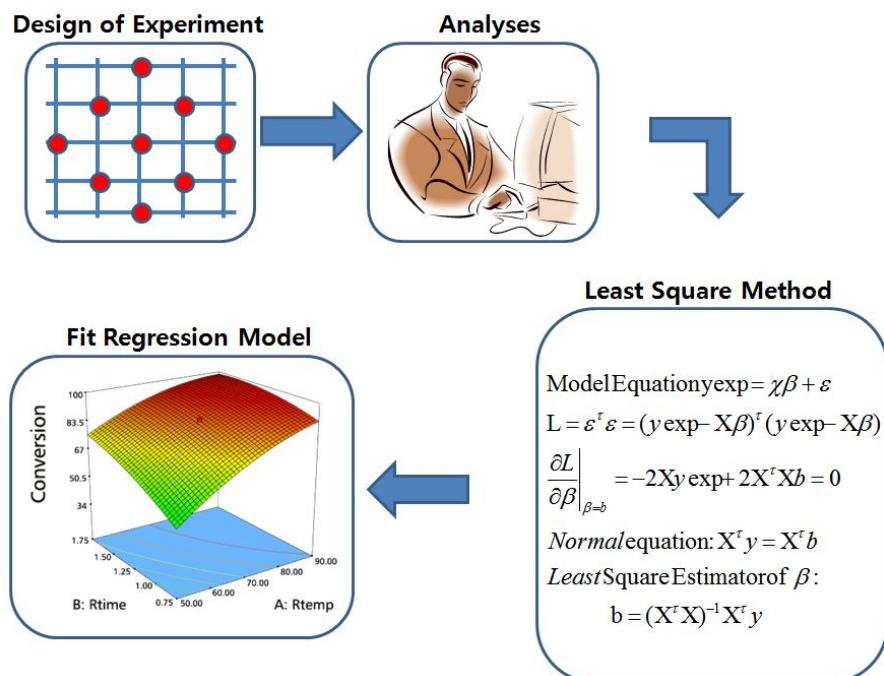


Fig. 2.2 The Process of RSM

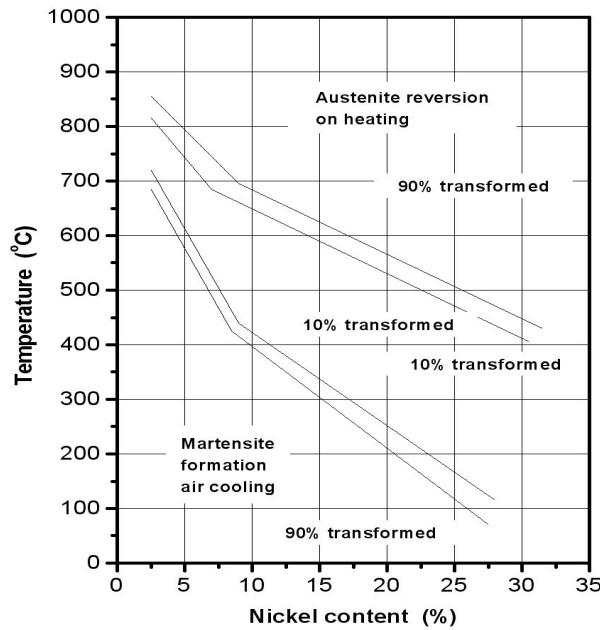
2.3 마르에이징강

마르에이징강은 고합금, 저탄소 Fe-Ni 래스 마르텐사이트로 볼 수 있으며, 소량이지만 중요한 Ti 원소를 함유하고 있다. 각 등급에 따른 전형적인 조성은 Table 2.1과 같으며, 이를 강의 상변태는 Fig. 2.3에 나타낸 2개의 상태도로 설명될 수 있다. Fig. 2.3의 (a)는 가열시 마르滕사이트에서 오스테나이트로 역변태되고, 냉각시는 오스테나이트에서 마르滕사이트로 변태되는 준안정 상태도이다. 그리고 (b)는 Ni함량이 높을 때 저온에서의 평형상은 오스테나이트와 페라이트임을 나타내는 평형상태도이다. 준안정 상태도는 오스테나이트화 온도 혹은 용체화 온도에서 냉각될 때의 전형적인 거동을 보여주는데, 마르滕사이트가 오스테나이트로부터 변태하기 시작하는 온도인 Ms 온도까지는 상변태가 일어나지 않아 두꺼운 단면에서도 냉각 속도가 낮아도 완전한 마르滕사이트 조직이 되기 때문에 경화능은 부족하지 않게 된다²⁹⁾.

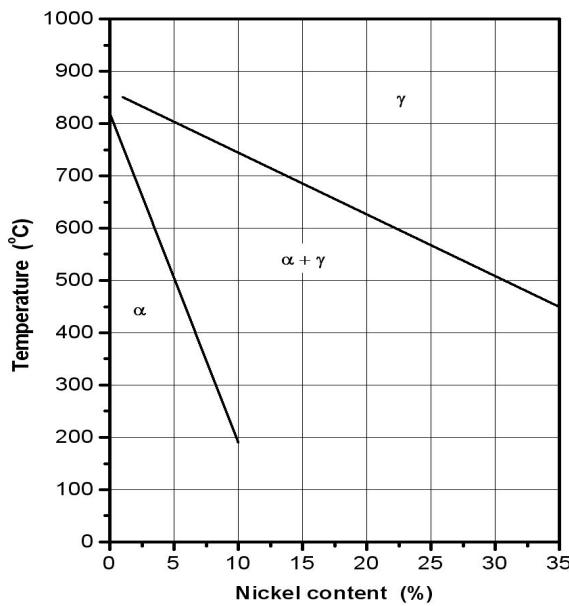
마르에이징강에 함유된 합금원소들은 Ms 온도를 크게 변화시키지만 변태가 냉각속도에 무관하다는 특성은 바뀌지 않는다. Ni 이외에 존재하는 다른 합금원소들은 일반적으로 마르滕사이트의 변태 온도를 낮추는데, Co는 예외적으로 그 반대이다. 즉, Co의 역할 중 하나는 Ms 온도를 높이는 것인데, 이러한 이유 때문에 실온에 냉각되기 전에 마르滕사이트로 완전한 변태가 일어나는 범위 내에서 Ti나 Mo 등 Ms 온도를 낮추는 다른 합금원소들을 많이 첨가시킬 수 있다³⁰⁾. 대부분 등급의 마르에이징강의 Ms 온도는 200~300°C이며, 실온에서는 거의 마르滕사이트이다³¹⁾. 따라서 잔류 오스테나이트는 일반적으로 문제가 되지 않아 시효 전에 냉각처리는 필요치 않다.

Table 2.1 Chemical compositions of standard maraging steel

Grade	Compositions (wt.%)					
	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Nb
18Ni(200)	18	3.3	8.5	0.2	0.1	-
18Ni(250)	18	5.0	8.5	0.4	0.1	-
18Ni(300)	18	5.0	9.0	0.7	0.1	-
18Ni(350)	18	4.2	12.5	1.6	0.1	-
18Ni(cast)	17	4.6	10.0	0.3	0.1	-
Co-free 18Ni(200)	18.5	3.0	-	0.7	0.1	-
Co-free 18Ni(250)	18.5	3.0	-	1.4	0.1	-
Co-free 18Ni(300)	18.5	4.0	-	1.85	0.1	-
Low-Cobalt 18Ni(250)	18.5	2.6	2.0	1.2	0.1	0.1



(a) Semi-stable equilibrium



(b) stable equilibrium

Fig. 2.3 Fe–Ni system

마르에이징강의 마르텐사이트 기지는 용체화처리 후에 시효경화 시킨다. 용체화 처리는 오스테나이트 완료 온도인 A_f 온도 이상에서 고용체내의 합금원소들을 고용시키기 위해 충분한 시간인 약 25mm 단면 크기 당 1시간 정도 유지 후 실온으로 냉각시키는 것이다. 가장 보편적인 경우로 18%Ni 마르에이징강의 200, 250 및 300 grade의 합금은 815°C에서 1시간 유지하고 공냉시키는 것이다. 기계가공을 위해 보통 용체화 처리된 상태로 구입되어 사용되고 있는데, 만일 용체화 처리 후 기계가공이 필요하다면 진공, 분위기제어, 중성염욕 등을 사용하여 표면손상을 최소화시킬 수 있다. 그리고 진공로에서 용체화처리 시는 불활성 가스의 압력을 약간 상승시키고, 저진공에서 합금원소의 손실을 가능한 최소가 되도록 해야 한다³²⁾.

용체화 처리 온도는 시효된 재료의 강도에 큰 영향을 미치지 못한다. 이것은 Fig. 2.4의 250 grade에 대한 예에서와 같이 800~815°C에서 최고치를 나타내며 이보다 더 낮거나 높은 온도에서는 시효 후의 강도가 약 20ksi정도 오히려 감소한다. 또한 Table 2.2에서와 같이 높은 강도는 815°C의 동일온도에서 더 짧은 시간의 열처리로 얻어질 수 있고 또한, 이보다 낮은 온도에서 용체화 처리하면 경화 원소의 불완전 고용 때문에 강도와 연성이 더 낮아짐을 나타내고 있다.

용체화 처리 후의 냉각속도는 미세조직이나 기계적성질의 변화에 영향을 거의 미치지 못하나, 시효경화 전에 실온까지 냉각되어야 하는 것은 필요하다. 만일 시효경화 전에 실온으로 완전히 냉각되지 않으면 미변태 되거나 잔류 오스테나이트가 조직 내에 잔존하므로 예측되는 경도나 강도보다 조금 낮아지는 결과를 가져온다³³⁾.

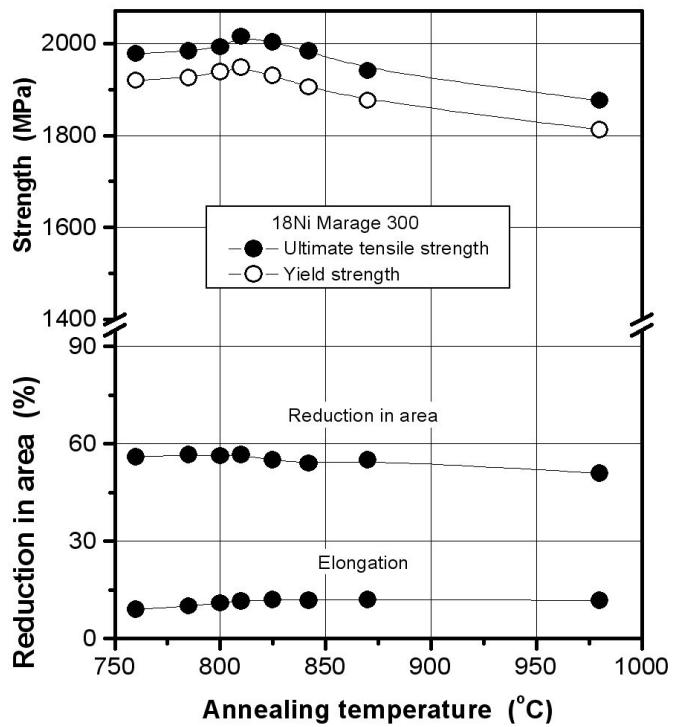


Fig. 2.4 Effect of solution annealing temperature on the mechanical properties of 250 grade 18%Ni maraging steel

용체화처리 후의 전형적인 시효경화 처리는 통상 455°C~510°C의 온도범위에서 3~12시간 유지하고 실온에 공냉시킨다. 즉, 18%Ni 마르에이징강의 200, 250 및 300 grade의 표준 시효처리는 480°C에서 3~8시간 유지 후 공냉시킨다. 그러나 350 grade의 18%Ni 마르에이징강은 480°C에서 통상 6~12시간 유지하거나 495~510°C에서 3~6시간 유지시킨다³⁴⁾.

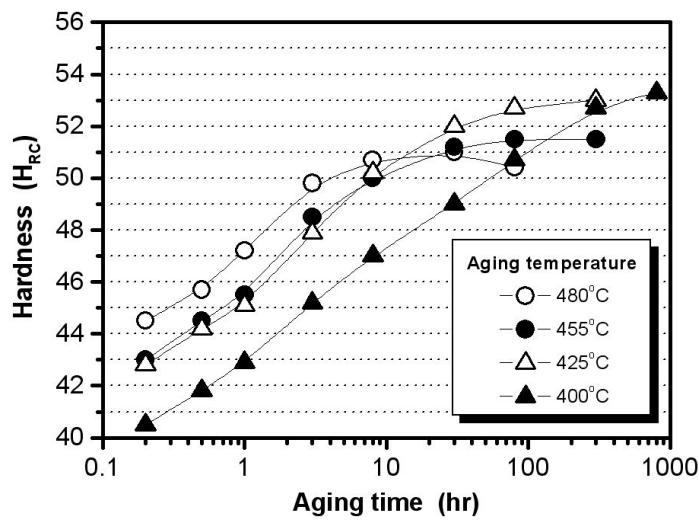
다이캐스팅용 공구로 사용되는 마르에이징강은 약 530°C의 시효온도에서 실시되는데, 이는 열적으로 더 안정화된 과시효 조직을 얻기 위해서이다. 일반적으로 시효 후 표준 18%Ni 강의 전형적인 기계적성질에서 수축률은 200 grade에서 0.04%, 250 grade에서 0.06%, 그리고 300과 350 grade에서 0.08%이다. 시효시 이러한 작은 치수 변화는 용체화 처리 후의 마무리 기계가공을 용이하게 한다. 그러나 정밀한 치수가 요구될 때에는 수축에 대한 허용치가 있어야 하며, 마무리 가공도 시효 후에 실시되어야 한다.

Fig. 2.5의 (a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이 시효온도와 시간은 시효경화 시 마르에이징강의 기계적성질에 큰 영향을 미친다. 경화는 시효온도에서 단지 수분 후에 발생하여 인장강도와 경도가 크게 증가하므로 시효초기의 경화는 매우 급격하다³³⁾. 시효시간이 증가함에 따라 결국 역변태 오스테나이트의 형성과 석출물의 조대화로 인하여 경도와 강도가 감소되는 지점에 도달하게 된다. 이와 같이 과시효가 일어나기 시작하는 시간은 온도의 함수이고, 일반적으로 시간/온도의 속도론적인 관계에 따른다. 또한 (a)에 나타난 바와 같이 시효 후의 높은 경도값은 표준시효온도로 많이 사용하는 480°C보다 낮은 온도에서 더 장시간 시효하면 얻어진다는 것이다. 그러나 400~425°C의 시효온도에 관계된 시간이 100~300시간 정도로 매우 길어 상업적인 기능성을 매우 적다고 볼 수 있다.

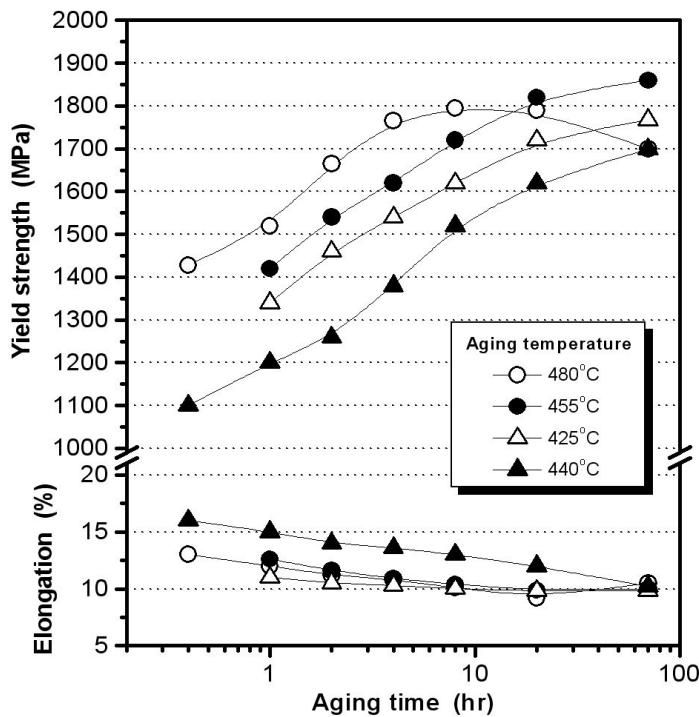
Table 2.2 Typical mechanical properties of 18%Ni maraging steel by age hardening

Grade	Heat treatment	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation in 50mm (%)	Reduction in area (%)
18Ni(200)	A	1400	1500	10	60
18Ni(250)	A	1700	1810	8	55
18Ni(300)	A	2000	2050	7	40
18Ni(350)	B	2400	2450	6	25

(A : 815°C for 1hr → 480°C for 3hr, B : 815°C for 1hr → 480°C for 12hr)



(a) Hardness



(b) Yield strength and elongation

Fig. 2.5 Relation between aging time and mechanical properties of 250 grade 18%Ni maraging steel after solution annealing at 815°C for 1hr

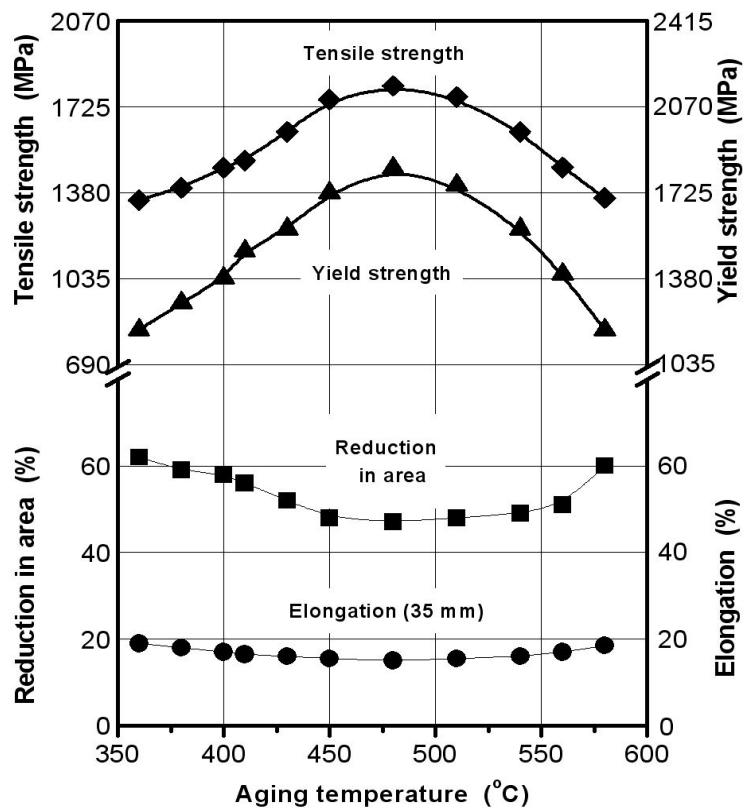


Fig. 2.6 Tensile strength of the 250 grade 18%Ni maraging steel (Solution annealing ; 815°C 1hr, age hardening ; 6hr, air cooling)

제 3 장 시험편 및 실험방법

3.1 시험편

본 연구에 사용한 시험재료는 국내에서 유일하게 (주)포스코특수강에서만 생산되고 있는 18%Ni 마르에이징강으로서 시효처리 조건이 강도에 미치는 영향 등을 분석하고자 진공유도용해로(VIM)에서 잉곳을 제조하였다. 사용된 진공유도용해로는 30kg의 용량에 최고 가열온도는 1650°C이며, 진공도는 10^{-3} Torr, 용해시간은 45 min/charge이었다.

Table 3.1은 습식분석장치(Maker : METROHM)를 이용하여 제조된 잉곳의 화학적 성분분석 결과를 나타내고 있으며, 얻고자 한 합금성분과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 C/S동시분석기(Maker : LECO)를 이용하여 탄소 및 황을 분석한 결과 C는 0.0022wt%, S는 0.0007wt%로 분석되었는데 이러한 성분들은 의도적인 첨가는 아니지만 잔류되어 있던 공기 등으로부터 유입된 결과로 판단되나, 극소량 이므로 탄소가 강도 등에 미치는 영향은 없었다고 판단된다.

제조된 3가지의 잉곳을 모두 동일하게 7단 자동 열간압연을 Table 3-2와 같이 실시하여 최종 압연두께 12mm를 얻었다. 이때 압연을 위하여 노에서 잉곳을 추출시 온도는 1,225°C이었으며, 7단 압연에 걸린 시간은 약 1분 정도 소요되었다.

Table 3.3은 제조된 판재의 기계적 성질을 나타내고 있다.

일반적으로 마르에이징강의 마르텐사이트 기지는 용체화처리 후에 시효경화 시킨다. 200 grade 18%Ni 마르에이징강의 적절한 시효처리의 온도 및 시간을 찾기 위하여 우선 보편적인 815°C에서 1시간 용체화 처리를 먼저 실시하였다. 이 때 사용된 진공로의 진공도는 질소를 이용하여 10^{-3} Torr로 유지되었으며, 온도편차는 $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되었으며, 열처리 후 시료를 공냉으로 실온까지 냉각시켰다.

용체화처리 후의 전형적인 시효경화 처리는 통상 60%KNO₃와 40%NaNO₃ 또는 48%KNO₃와 52%NaNO₃ 염욕을 사용하여 455°C~510°C의 온도범위에서 3~12시간 유지하고 실온에 공냉시키거나 grade에 따라서 시간과 온도는 달라지는데 18%Ni 마르에이징강의 200, 250 및 300 grade의 표준 시효처리는 480°C에서 3~8시간 유지 후 공냉시키는 것으로 알려져 있다.

실험의 요인은 시효시 온도와 시간 두가지로 설정을 하였고, 시효 온도의 레벨

설정은 가장 일반적인 온도인 482°C를 기준으로 약 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 씩 하여 455°C, 482°C 및 510°C 3가지로 하였으며, 각 온도에서 유지시간 레벨은 1시간, 2시간, 4시간 및 8시간으로 늘려가며 4가지로 변화시켜 시효처리 시간이 마르에이징강의 강도 등에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 열처리 시 각 시험편의 장입은 설정온도에 도달되었을 때 실시하였으며, 열처리 중 발생된 온도편차는 약 $\pm 2.9^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되었다. 냉각은 용체화처리와 동일한 방법으로 실온까지 공냉하였다. Table 3.4는 용체화처리 및 시효처리 조건을 나타내고 있다.

본 연구에서는 잉곳 후 열간압연한 판재로부터 실험에 필요한 소요량의 시험편을 최종 마무리 연삭을 제외한 모든 가공을 완료하여 시험편 자체를 열처리하였는데 이는 열처리 후 경화 등으로 인한 기계가공의 난이성 등을 피하기 위함이었다. 그러나 열처리 시 발생될 우려가 있는 수축여유나 소량의 굽힘 등이 발생될 수 있었으므로 연삭여유를 약 0.5~0.8mm 정도 여유를 두었으나 실제 열처리 후 변형 및 치수변화를 살펴본 결과 이러한 현상은 거의 없었다고 판단된다. 열처리 후 밀링 및 연삭기를 이용하여 해당하는 시험편의 규격에 맞게 최종가공을 실시하였다. 압연된 판재로부터의 모든 시험편 가공을 위한 시료채취는 판재의 중앙으로부터 인장시험편은 하중방향이 압연방향과 동일하도록 채취하였다.

시험편의 제작과정은 다음과 같다. 먼저 압연된 두께 12mm, 길이 1600mm판재를 가공이 용이하도록 약 160(W)×500(l)로 절단하여 양면을 약 2.75mm씩 밀링가공하여 6.5mm 두께로 만든 다음 1차 연삭을 실시하였다. 1차 연삭 후 와이어 방전가공기(와이어 직경 0.2mm)를 사용하여 인장시험편 및 피로시험편을 가공하였다. Fig. 3.1은 ASTM E-8³⁵⁾의 subsize로 제작한 인장시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 사용한 시험기는 UH-F50(Shimadzu, 50ton)이다.

피로시험편 가공을 위한 시료 채취 역시 가공여유를 충분히 두고 입계가 피로균열 전파를 저지시키는 역할을 하도록 균열 진행방향이 압연방향과 직각인 L-T방향(Long Transverse direction)이 되도록 채취하였으며^{36, 37)}, 상·하면을 절삭 및 1차 연삭하여 10.2~10.4mm 정도의 두께로 만들었다. 이렇게 만든 이유는 용체화처리 및 시효처리 시 단면 수축의 영향을 고려하기 위함이었으며 열처리후 10mm 두께가 되도록 연삭을 실시하였다. 또한 ASTM E647-83³⁸⁾의 규격에 따라 와이어 방전가공기(와이어 직경 0.2mm)를 사용하여 가공하였다. 예비 노치는 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 3mm 깊이로 해당 위치에 가공하여 완성하였다. Fig. 3.2는 피로시험을 위한 CT 시험편의 형상 및 치수이다.

Table 3.1 Chemical compositions of manufactured maraging steels
 (wt. %)

Materials	Ni	Co	Mo	Al	Ti
Standard	18.00	8.50	5.00	0.12	0.40
Testing material	18.03	8.42	4.99	0.10	0.41

Table 3.2 Hot rolling mill engineering data

Pass No	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Rolling Force (ton)
1	110.0	122	247	72
2	96.0	125	275	108
3	75.0	132	335	138
4	55.0	139	432	177
5	34.0	150	648	265
6	20.0	160	1,035	322
7	12.0	167	1,651	341

Table 3.3 Mechanical properties of base metals

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (MPa)
892.16	980.13	21.16	8362.97

Table 3.4 Heat treatment conditions

Solution annealing		Age hardening					
		condition 1		condition 2		condition 3	
Temp. (°C)	Time (min)	Temp. (°C)	Time (hr)	Temp. (°C)	Time (hr)	Temp. (°C)	Time (hr)
815	60	455	1	482	1	510	1
			2		2		2
			4		4		4
			8		8		8

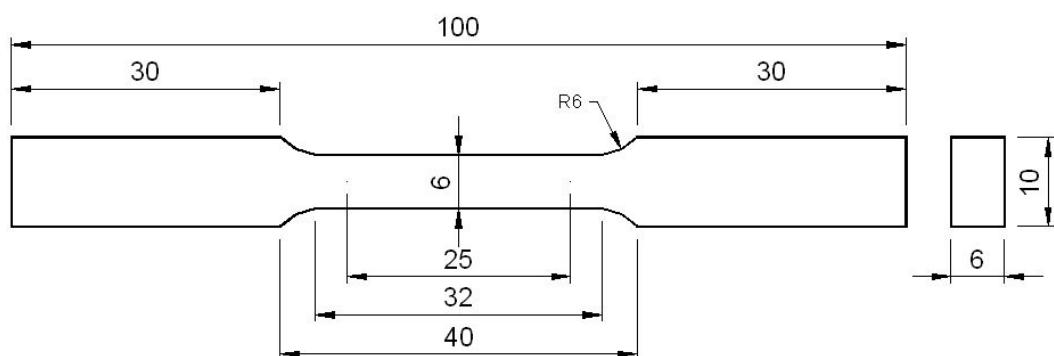


Fig. 3.1 Rectangular tensile test specimen, sub-size

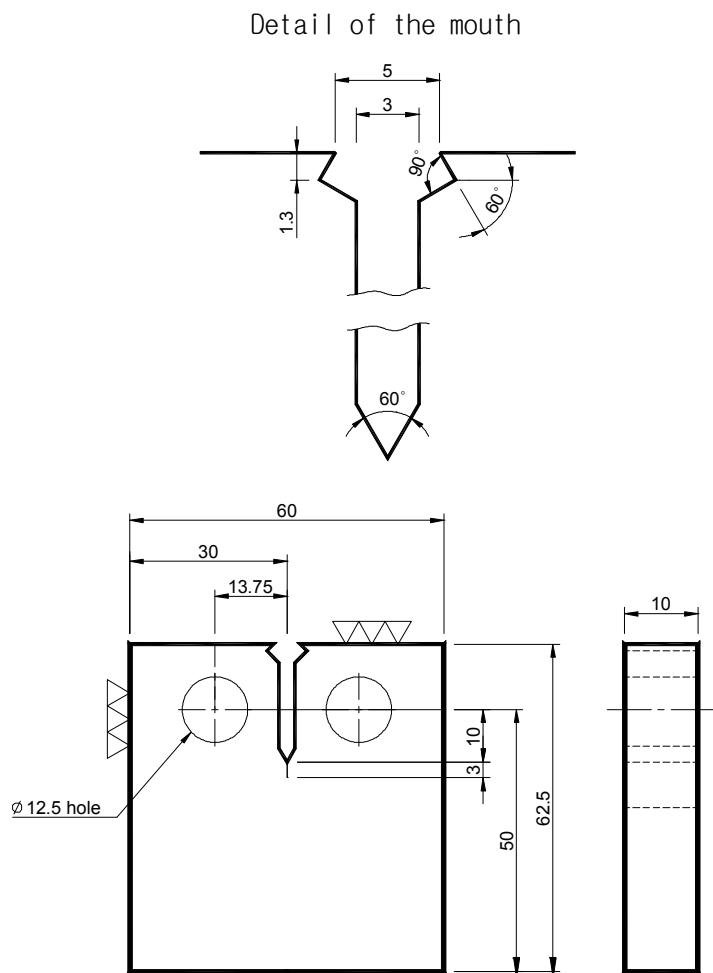


Fig. 3.2 Standard compact-tension (CT) specimen for fatigue crack growth rate testing

3.2 실험 방법

Table 3.5는 시효처리에 사용된 48%KNO₃와 52%NaNO₃ 염욕에 대한 성적서를 나타내고 있으며, Fig. 3.3은 열처리를 종합적으로 정리한 열처리 선도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 3.4는 본 연구에서 200 grade 18%Ni 마르에이징강의 강도에 영향을 미치는 변수들을 고찰하기 위하여 적용한 파라미터 및 이를 평가하기 위하여 필요한 실험 등을 나타내고 있다.

인장시험은 하중 10톤, crosshead speed 3.5mm/min로 상온에서 각각 3개씩 수행 후 평균하였으며 피로수명 및 응력확대계수를 구하여 실험으로부터 얻은 결과값과 비교하였다.

피로시험 조건으로서 주파수는 10Hz, 응력비는 0.1, 파형은 정현파 sine곡선으로 모두 동일하게 상온에서 수행하였다.

Photo. 3.1은 피로시험에 사용한 기기로서 최대용량 10ton의 전기유압식 서보 피로시험기(SHIMADZU, SURVOPULSER)로서 A/D, D/A 변환기를 내재한 컴퓨터에 의해 하중을 설정 및 제어하도록 되어있으며, 제어방식은 close-loop식 제어기구를 이용하여 설정하중 및 수시로 검출되는 로드셀의 신호를 컨트롤러 안에 장착된 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력하여 오차를 계속적으로 보정하므로 고정도의 실험이 가능한 기기이며, 피로균열 전파시험은 ASTM standard E647-88의 규정³⁹⁾에 준하여 실시하였다.

크랙 측정은 시험편 전면에 크립게이지를 장착하여 크랙 개구변위를 측정하였으며, 이 변위와 하중신호로부터 캠플라이언스를 구하여 환산하는 방법을 이용하였다. 크랙길이 측정의 정밀도는 컨트롤러 안에 내재된 12bit A/D변환기의 분해능을 고려하면 크랙 개구변위의 측정정밀도가 약 0.0001mm 정도이며, 이를 크랙길이로 환산하면 0.01mm 정도가 된다. 따라서 시험편 탈착을 제외한 하중제어, 크랙길이 측정 및 데이터 처리 등이 모두 프로그램화 되어있어 자동으로 수행되었기 때문에 신뢰도가 높다고 사료된다.

식 (3-1)은 프로그램에서 피로크랙길이를 구하는 식을 나타내고 있다.

$$a = W \times \{ C_0 + (C_1 \times U^1) + (C_2 \times U^2) \\ + (C_3 \times U^3) + (C_4 \times U^4) + (C_5 \times U^5) \} \quad (3-1)$$

여기서, $U = 1/(1 + \sqrt{B_{\text{eff}}} \times E \times \lambda)$ 이고 유효시료두께 $B_{\text{eff}} = B - (B - B_{\text{net}})^2/B$ 이며 $C_1 \sim C_5$ 는 재료상수를 나타낸다.

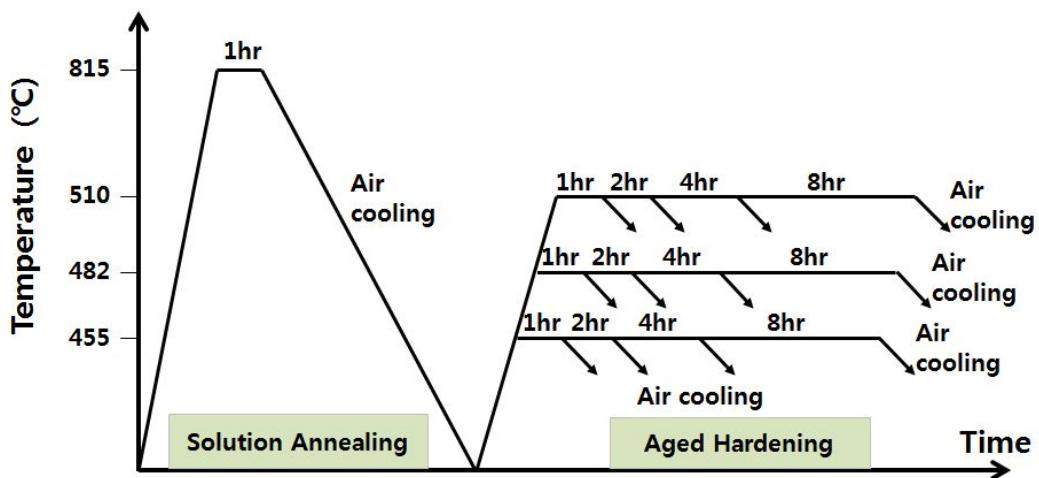


Fig. 3.3 Heat treatment diagram



Fig. 3.4 Fatigue testing machine set-up

Table 3.5 Specification of the used reagent for aging

Item	Basic specification	Applied specification	Remark
Composition	60%KNO ₃ +40%NaNO ₃	48%KNO ₃ +52NaNO ₃	Potassium Nitrate + Sodium Nitrate
Melting point	160±2°C	162°C	-
Specific gravity	1.9±0.5 / at 200°C 1.9±0.5 / at 300°C	1.91/200°C	-
Specific heat (cal/g°C)	0.28±0.02	0.28±0.02	-
Calorie (cal/g)	74	74	-
Water content (%)	under 0.3	0.28	-

본 연구에 사용한 시험기기의 전반적인 제원은 다음과 같다.

Table 3.6 The used testers for the experiment

Tester	Model	Standard	Maker
Fatigue testing M/C	EHF-ED10-40L	±10Ton	Shimadzu, Japan
Universal testing M/C	UH-F50A	50Ton	Shimadzu, Japan
Vacuum furnace	500×400×1000 (w×h×l)	Max. 1200°C, 10^{-3} Torr	Duckyoung, Korea
Age hardening furnace	1900×1200×1350 (w×h×l)	Max. 550°C	Kongdan precision
VIM	VIM30	30kg	ULVAC, Japan
ICP	Dosimat	-	METROHM
Rockwell hardness tester	HR-521	No. 810-2020	Akashi, Japan
C/S Analyzer	C/S Determinator	-	LECO
Vacuum furnace	W500×H400×L1000	10^{-3} Torr Max. 1200°C	DY Co. Ltd. Korea
Salt bath furnace	W1900×H1200×L1350	SiC heater Max. 550°C	GD precision, Korea

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 주요인자의 상관관계

4.1.1 경도에 미치는 영향

일반적으로 인자의 개별 또는 교호작용이 반응값에 미치는 영향의 정도 및 어느 인자가 반응값에 미치는 영향이 낮으므로 스크리닝을 할 수 있는지 여부를 판별할 수 있는 방법에는 크게 3가지가 있다⁴⁰⁾.

첫째, 우선 검정통계에 의하여 구해지는 계수에 대한 검정통계량 T 값과 검정통계량에 대한 확률인 P 값에 의한 방법이다. 따라서 T 값은 상대적 크기가 클수록 유의한 인자로 판단할 수 있으며, P 값은 0에 근접할수록 유의한 인자로 판단할 수 있다. 이 때 통계적 가설 검정에서 유의확률 또는 p 값은 귀무가설이 맞다고 가정할 때 얻은 결과보다 극단적인 결과가 실제로 판측될 확률이며, 실험의 p 값은 실험의 표본 공간에서 정의되는 난수로서 0~1 사이의 값을 가진다. 또한, 의미수준은 통계적인 가설검정에서 사용되는 기준값으로서 일반적으로 유의수준은 α 로 표시하고 90%의 신뢰도를 기준으로 한다면 0.1(1-0.9)값이 의미수준 값이 된다. 가설검정의 절차에서 의미수준 값과 의미확률 값을 비교하여 통계적인 영향의 정도를 검정하게 된다.

둘째, 정규 확률도 및 파레토 채트를 통하여 효과의 상대적 크기를 비교하고, 통계적인 분석을 통하여 반응값에 미치는 영향의 정도를 평가할 수 있다.

셋째, 요인들의 그림을 통한 방법으로서 주 효과도 및 상호 효과도을 통하여 반응값들이 하나 또는 그 이상의 인자와 관련되는지를 시각화를 통하여 영향의 정도를 평가할 수 있다.

본 연구에서는 반응값에 미치는 인자들의 영향의 정도 및 주요인자의 상관관계 평가를 통하여 검정통계량에 대한 확률인 P 값과 정규 확률도를 이용하여 평가하고, 주 효과 및 교호작용 효과를 함께 살펴보았다.

Table 4.1은 반응값 즉, 경도에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 총 12가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일 인자의 영향 2가지, 2개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교

호작용 1가지로서 총 3가지의 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 인자라고 판별하였다.

Table 4.2는 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 경도에 영향을 미치는 정도를 살펴보면, 단일 인자의 Seq SS는 33.846으로서 전체 63.467의 약 53.3%의 값을 갖는다. 이와 같은 의미는 총 3가지 단일 또는 혼합인자들 중 단일인자에 의하여 반응값이 지배받는 정도를 나타내므로 단일 인자들은 매우 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2 가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 2.5%임을 알 수 있다. 따라서 단일인자는 매우 중요한 인자이며, 2인자 교호작용은 중요하지 않거나 영향이 없는 인자라 할 수 있다.

Fig. 4.1은 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 유의한 인자라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 비교적 중요하지 않은 인자들은 값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 시간은 중요한 단일인자이며 나머지 항은 비교적 중요하지 않은 단일인자 또는 교호작용이라 판단할 수 있다.

Fig. 4-2는 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 온도를 증가시키면 경도는 증가하는 양(+)의 효과를 나타내다가 어느 시점 이후로 감소하는 음(-)의 효과를 보이고 있으며 시간을 증가시키면 경도는 증가하는 양(+)의 효과를 나타내며 2~4시간의 영역이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 시간이 온도에 비하여 기울기가 크므로 보다 큰 영향을 미치는 즉, 단일인자들 중에서도 주 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다. 이러한 원인은 일반적으로 마르에이징강의 열처리에서 시효온도가 높을수록 시효시간은 줄어들며, 너무 높은 온도에서 장시간 시효 할 경우 과시효 효과가 나타나 역변태 마르텐사이트 조직이 나타나기 때문으로 분석된다⁴¹⁾.

결과적으로 경도에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 3가지 인자들은 시간 > 시간×온도 > 온도 순으로 인자들의 중요도가 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 53.3%의 영향도를 보이며 경도에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 시간의 영향이라 할 수 있다. 그 밖의 온도와 시간×온도는 중

요도가 적다고 분석되었다.

Table 4.1 Estimated Effects and Coefficients of Hardness

Term	Coded Result				
	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-	48.7332	0.5614	86.8	0
Temp	0.3002	0.1501	0.6876	0.22	0.833
Time	4.3391	2.1696	0.7059	3.07	0.015
Temp×Time	-1.1521	-0.5761	0.8644	-0.67	0.524

Table 4.2 Analysis of Variance of Hardness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	33.846	33.297	16.648	4.75	0.044
2-Way Interactions	1	1.558	1.558	1.558	0.44	0.524
Residual Error	8	28.063	28.063	3.508	-	-
Total	11	63.467	-	-	-	-

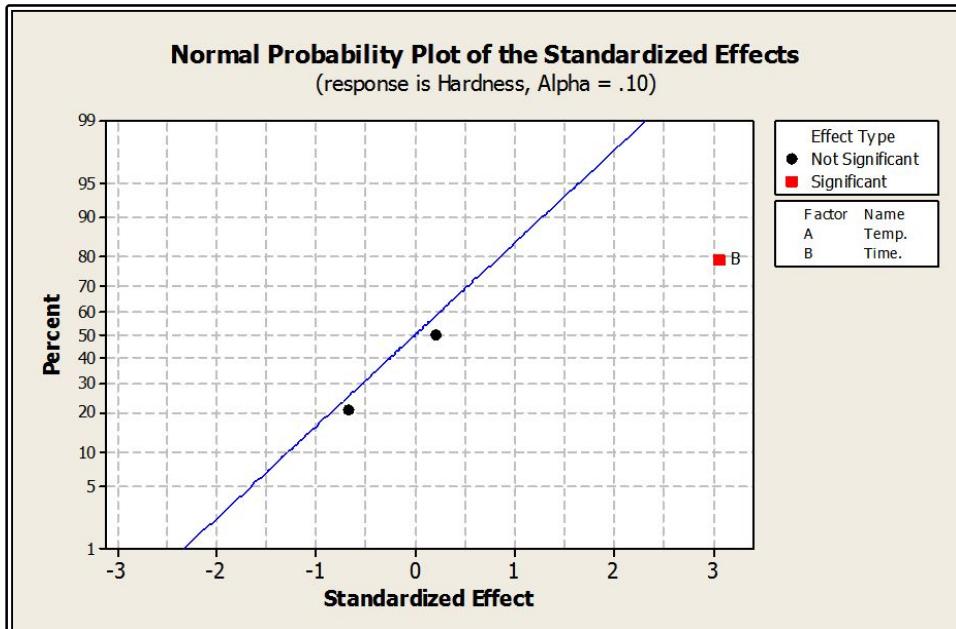


Fig. 4.1 Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Hardness

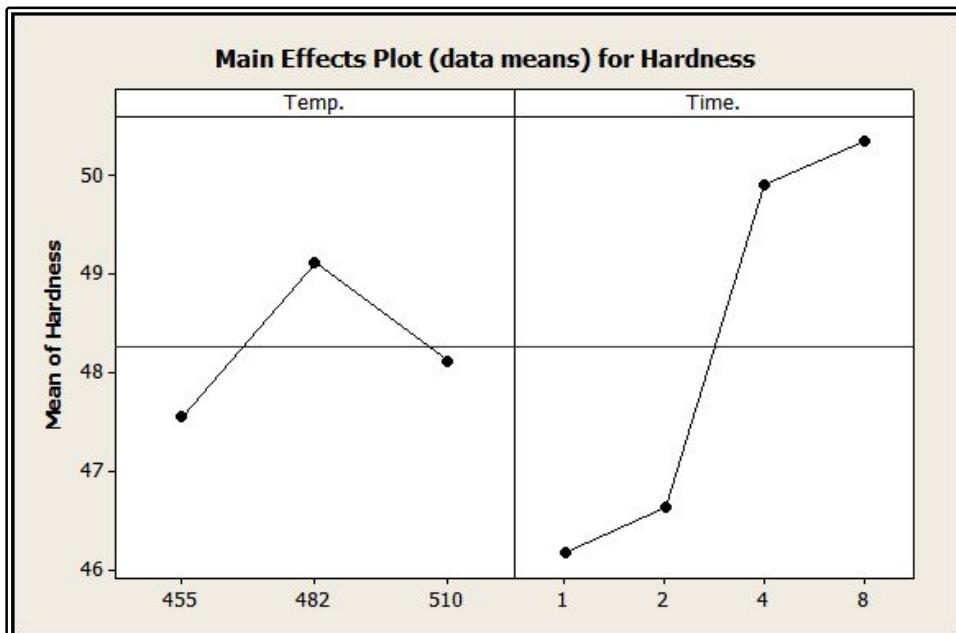


Fig. 4.2 Main Effect Plot of the Standardized Effects of Hardness

4.1.2 인장강도에 미치는 영향

Table 4.3은 반응값 즉, 인장강도에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 총 12가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일 인자의 영향 2가지, 인자들 중 2개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 1가지로서 총 3가지의 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 인자라고 판별하였다.

Table 4.4는 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 인장강도에 영향을 미치는 정도를 살펴보면, 단일 인자의 Seq SS는 100188으로서 전체 126657의 약 79.1%의 값을 갖는다. 이와 같은 의미는 총 3가지 인자들 중 단일인자에 의하여 반응값이 지배받는 정도를 나타내므로 단일 인자들은 매우 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 11.2%임을 알 수 있다. 따라서 단일인자는 매우 중요한 인자이며, 2인자 교호작용 또한 어느정도 영향을 주는 인자라 할 수 있다.

Fig. 4.3은 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 유의한 인자라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 비교적 중요하지 않은 인자들은 값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 시간, 온도 및 시간×온도 모두 중요한 인자라 판단할 수 있다.

Fig. 4.4는 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 온도를 증가시키면 인장강도는 증가하는 양(+)의 효과를 나타내고 있으며 시간을 증가시키면 인장강도는 증가하는 양(+)의 효과를 나타내며 전영역이 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 시간이 온도에 비하여 기울기가 크므로 보다 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

결과적으로 인장강도에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 3가지 인자들은 시간 > 시간×온도 > 온도 순으로 인자들의 중요도가 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 79.1%의 영향도를 보이며 인장강도에 가

장 큰 영향을 미치며, 이는 시간과 온도의 영향이라 할 수 있다. 그 밖의 교호작용은 인장강도에 영향을 미치는 인자로 분석되었다. 따라서 시간, 온도 및 시간×온도 모두 중요하다고 분석하였다.

Table 4.3 Estimated Effects and Coefficients of Tensile Strength

Term	Coded Result				
	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-	1744.25	11.74	148.63	0
Temp	74.97	37.48	14.37	2.61	0.031
Time	213.54	106.77	14.75	7.24	0
Temp×Time	-110.03	-55.02	18.07	-3.04	0.016

Table 4.4 Analysis of Variance of Tensile Strength

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	100188	90567	45283	29.55	0
2-Way Interactions	1	14209	14209	14209	9.27	0.016
Residual Error	8	12261	12261	1533	-	-
Total	11	126657	-	-	-	-

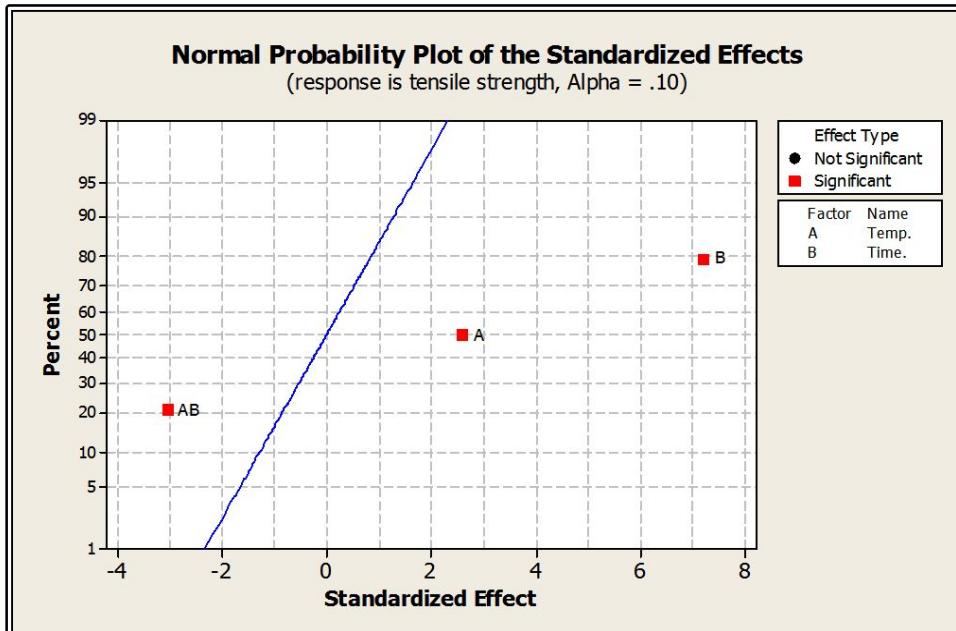


Fig. 4.3 Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Tensile Strength

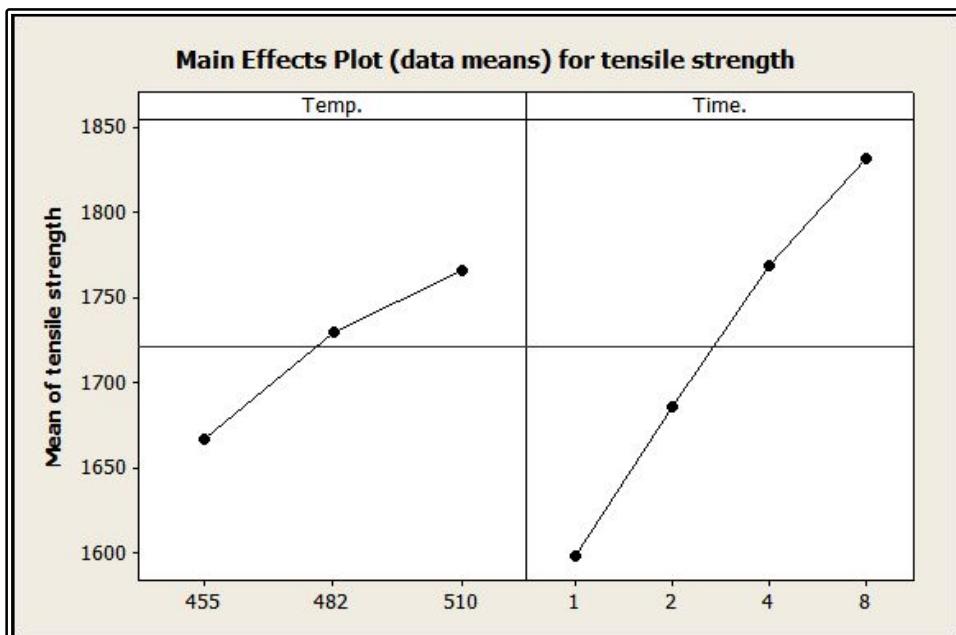


Fig. 4.4 Main Effect Plot of the Standardized Effects of Tensile Strength

4.1.3 연신율에 미치는 영향

Table 4.5는 반응값 즉, 경도에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 총 12가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일 인자의 영향 2가지, 2개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 1가지로서 총 3가지의 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 인자라고 판별하였다.

Table 4.6은 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 연신율에 영향을 미치는 정도를 살펴보면, 단일 인자의 Seq SS는 18.304으로서 전체 26.363의 약 69.4%의 값을 갖는다. 이와 같은 의미는 총 3가지 인자들 중 단일인자에 의하여 반응값이 지배받는 정도를 나타내므로 단일 인자들은 매우 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 5.0%임을 알 수 있다. 따라서 단일인자는 매우 중요한 인자이며, 2인자 교호작용은 중요하지 않거나 영향이 없는 인자라 할 수 있다.

Fig. 4.5는 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 유의한 인자라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 비교적 중요하지 않은 인자들은 값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 시간은 유의한 단일인자이며 나머지 항은 비교적 중요하지 않은 단일인자 또는 교호작용이라 판단할 수 있다.

Fig. 4.6은 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 온도를 증가시키면 연신율은 감소하는 음(-)의 효과를 나타내고 있으며 시간을 증가시키면 연신율은 감소하는 음(-)의 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 시간이 온도에 비하여 기울기가 크므로 보다 큰 영향을 미치는 즉, 단일인자들 중에서도 보다 큰 주 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다.

결과적으로 연신율에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 3 가지 인자들은 시간 > 온도 > 시간×온도 순으로 인자들의 중요도가 분석되었다. 이를 자세히 살펴보면, 단일인자는 전체의 69.4%의 영향도를 보이며 연신율에 가장 큰 영향을 미치며, 이는 시간과 온도의 영향이라 할 수 있다. 그 밖의 온도와 시간

×온도는 중요도가 적다고 분석되었다.

Table 4.5 Estimated Effects and Coefficients of Elongation

Term	Coded Result				
	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-	16.233	0.2752	58.98	0
Temp	-1.323	-0.662	0.3371	-1.96	0.085
Time	-2.763	-1.381	0.346	-3.99	0.004
Temp×Time	1.058	0.529	0.4238	1.25	0.247

Table 4.6 Analysis of Variance of Elongation

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	18.304	16.657	8.3284	9.88	0.007
2-Way Interactions	1	1.314	1.314	1.3143	1.56	0.247
Residual Error	8	6.744	6.744	0.843	-	-
Total	11	26.363	-	-	-	-

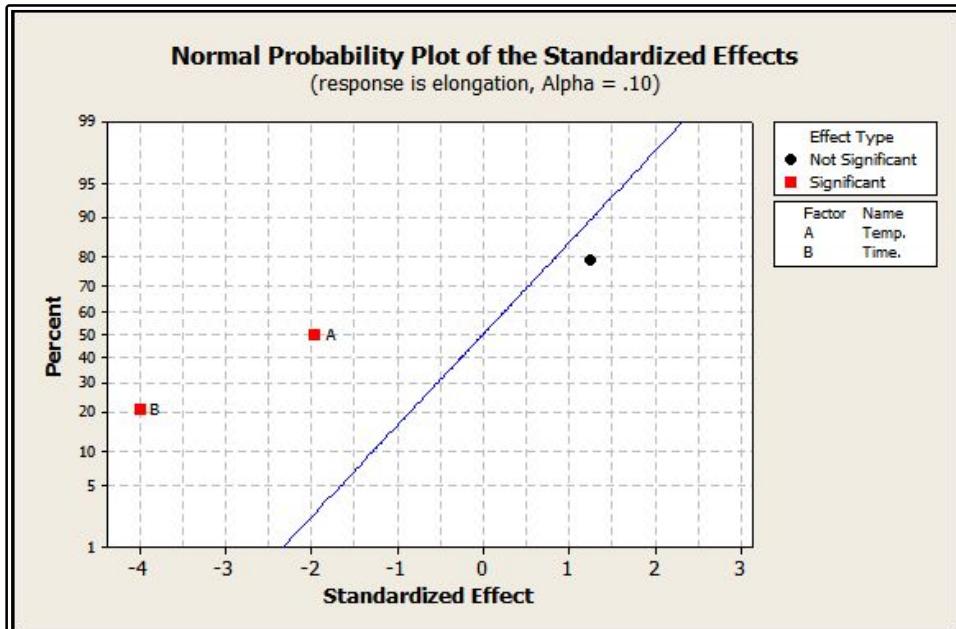


Fig. 4.5 Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Elongation

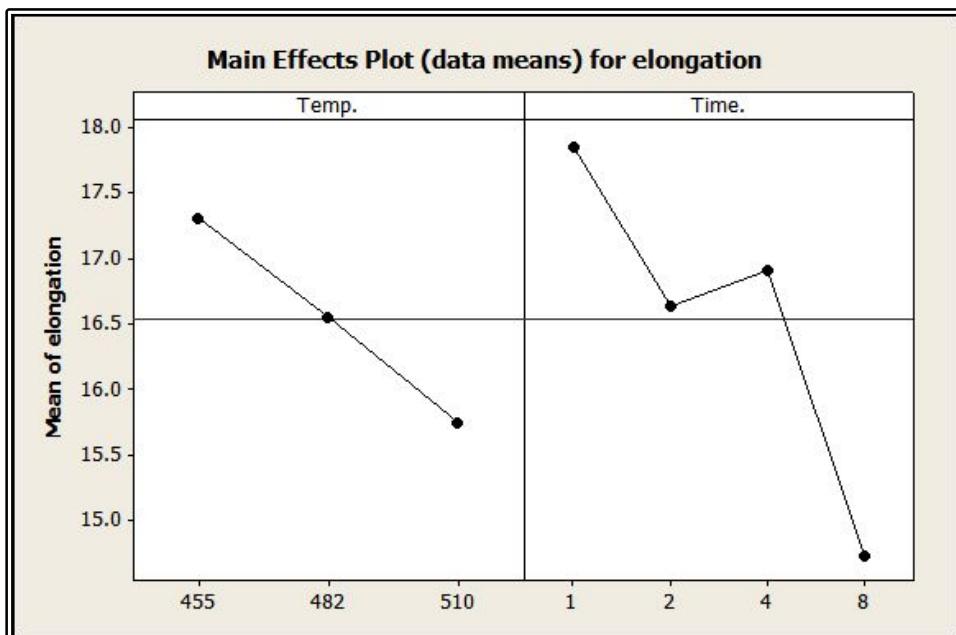


Fig. 4.6 Main Effect Plot of the Standardized Effects of Elongation

4.1.4 피로수명에 미치는 영향

Table 4.7은 반응값 즉, 피로수명에 영향을 미치는 주 인자 및 교호작용을 알아보기 위하여 총 12가지 실험계획에 의하여 수행한 검정통계량 분석의 결과를 모두 나타내고 있다. 즉, 단일 인자의 영향 2가지, 2개의 인자가 결합되어 영향을 미치는 교호작용 1가지로서 총 3가지의 결과를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 해당되는 인자가 결과에 미치는 영향의 정도로서 P값을 기준으로 0.1 이하이면 영향의 정도가 높은 인자, 0.1 보다 크면 영향의 정도가 낮은 인자라고 판별하였다.

Table 4.8은 각각의 인자들에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 비중을 각각 나타내고 있다. 피로수명에 영향을 미치는 정도를 살펴보면, 단일 인자의 Seq SS는 약 14.1%의 값을 갖는다. 이와 같은 의미는 총 3가지 인자들 중 단일인자에 의하여 반응값이 지배받는 정도를 나타내므로 단일 인자들은 중요한 인자들이라 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 살펴보면, 2가지 요인끼리의 결합은 전체의 약 0.9%임을 알 수 있다. 따라서 단일인자는 중요한 인자이며, 2인자 교호작용은 중요하지 않거나 영향이 없는 인자라 할 수 있다.

Fig. 4.7은 각각의 인자들의 영향의 정도를 나타내는 정규 확률도로서 선 근처에 있지 않은 점들은 유의한 인자라는 의미이며 효과들은 적합된 선으로부터 그렇지 않은 효과들보다 떨어져 있고 큰 절대값을 가진다. 반면에 비교적 중요하지 않은 인자들은 값이 작고, 모든 효과들의 평균이 0 근처에 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 그림에 나타난 바와 같이 전체적으로 모든 인자들의 중요도가 조금 적다고 판단할 수 있다.

Fig. 4.8은 단일 인자들 중 주 효과를 알아보기 위한 그림으로서 인자의 수준을 변경했을 경우 평균값이 변하는 정도를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 온도를 증가시키면 피로수명은 증가하는 양(+)의 효과를 나타내며 $455^{\circ}\text{C} \sim 482^{\circ}\text{C}$ 구간에서 급격하게 증가하는 효과를 나타내고 있으며 시간을 증가시키면 피로수명은 급격히 감소하는 음(-)의 효과를 나타내다 2시간 이후부터 다시 증가하는 효과를 나타내고 있다. 또한 시간이 온도에 비하여 기울기가 크므로 보다 큰 영향을 미치는 즉, 단일인자들 중에서도 주 효과를 나타내는 인자임을 알 수 있다.

결과적으로 피로수명에 미치는 인자들의 영향 및 상관관계를 분석한 결과 전체 3가지 인자들은 온도 $>$ 시간 $>$ 시간 \times 온도 순으로 인자들의 중요도가 분석되었다.

Table 4.7 Estimated Effects and Coefficients of Fatigue life

Term	Coded Result				
	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-	108276	5986	18.09	0
Temp	14083	7041	7331	0.96	0.365
Time	6097	3049	7526	0.41	0.696
Temp×Time	-5362	-2681	9217	-0.29	0.779

Table 4.8 Analysis of Variance of Fatigue life

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	530209846	432721843	216360921	0.54	0.601
2-Way Interactions	1	33742412	33742412	33742412	0.08	0.779
Residual Error	8	3190390241	3190390241	398798780	-	-
Total	11	3754342500	-	-	-	-

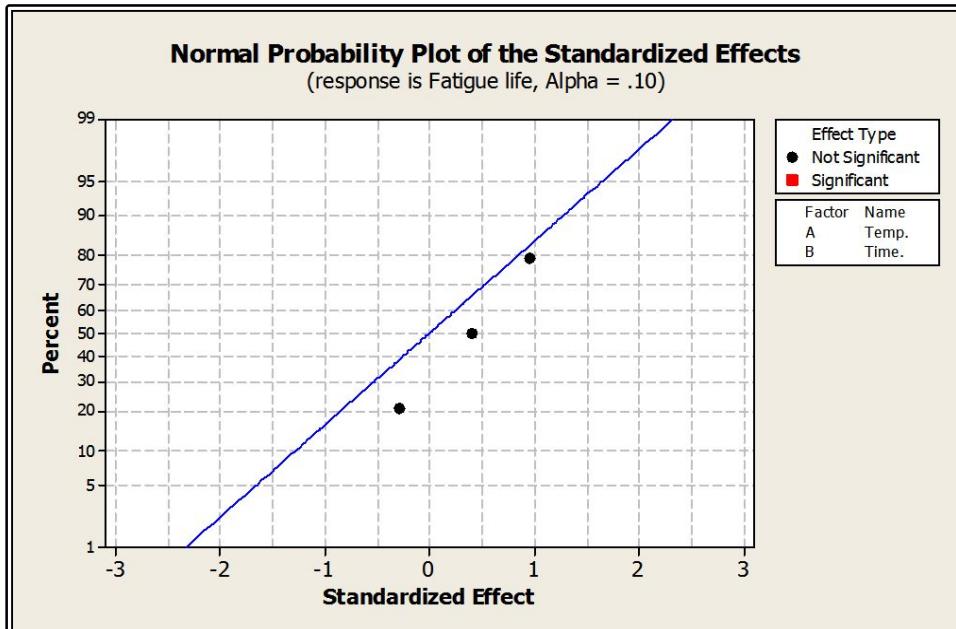


Fig. 4.7 Normal Probability Plot of the Standardized Effects of Fatigue life

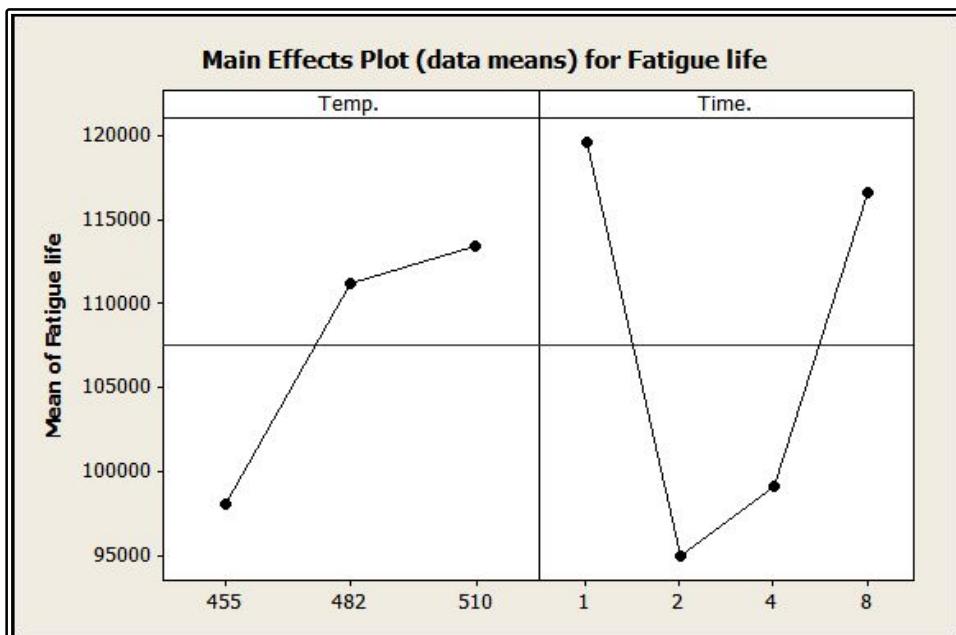


Fig. 4.8 Main Effect Plot of the Standardized Effects of Fatigue life

4.2 회귀분석 및 반응표면분석

4.2.1 경도 분석

Table 4.9는 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4.10은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 우선 선형적인 측면 즉, 단일항을 살펴보면 Seq SS 합 63.4667 중 선형항이 33.8462을 차지하여 약 53.3%의 영향도를 나타낸다고 판단된다. 또한, 제곱항들은 Seq SS 합 중 10.7875을 차지하여 약 17%를 나타내고 있다. 그러나 교호작용의 P값들은 전체 Seq SS 중 1.5578을 차지하여 약 2.5%를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4.9에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 4-1과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_H = 50.766 + 0.1578 \times \text{Temp} + 2.3056 \times \text{Time} - 1.2743 \times \text{Temp}^2 - 1.8249 \times \text{Time}^2 \\ - 0.5761 \times \text{Temp} \times \text{Time} \quad (\text{Coded}) \quad (4-1)$$

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 경도의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 시효온도 482°C, 시효시간 8hr이라 할 때 이 조건을 코드화로 바꾸어 표현하면, 시효온도는 -0.01818, 시효시간은 +1로 표현될 수 있다. 따라서 코드화된 조건은 식 4-1에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 경도는 코드화된 식 4-1을 이용한 결과 51.25448(HR_C)가 산출되며, 실제 실험후의 데이터값은 51.25(HR_C)가 산출되어 약 0.00874% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 경도에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.9는 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 경도가 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이며, 시효온도와 시효시간의 변화에 따른 경도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 시효시간과 시효온도가 높을수록 경도는 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4.9 Estimated regression coefficients for Hardness(Coded)

Term	Coefficient	P
Constant	50.7666	0
Temp.	0.1578	0.808
Time.	2.3056	0.012
Temp.*Temp.	-1.2743	0.266
Time.*Time.	-1.8249	0.185
Temp.*Time.	-0.5761	0.49

Table 4.10 Analysis of variance for Hardness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	46.1916	46.1916	9.23832	3.21	0.094
Linear	2	33.8462	8.5299	4.26496	1.48	0.3
Square	2	10.7875	10.7875	5.39377	1.87	0.233
Interaction	1	1.5578	1.5578	1.55785	0.54	0.49
Residual Error	6	17.2751	17.2751	2.87918	-	-
Total	11	63.4667	-	-	-	-

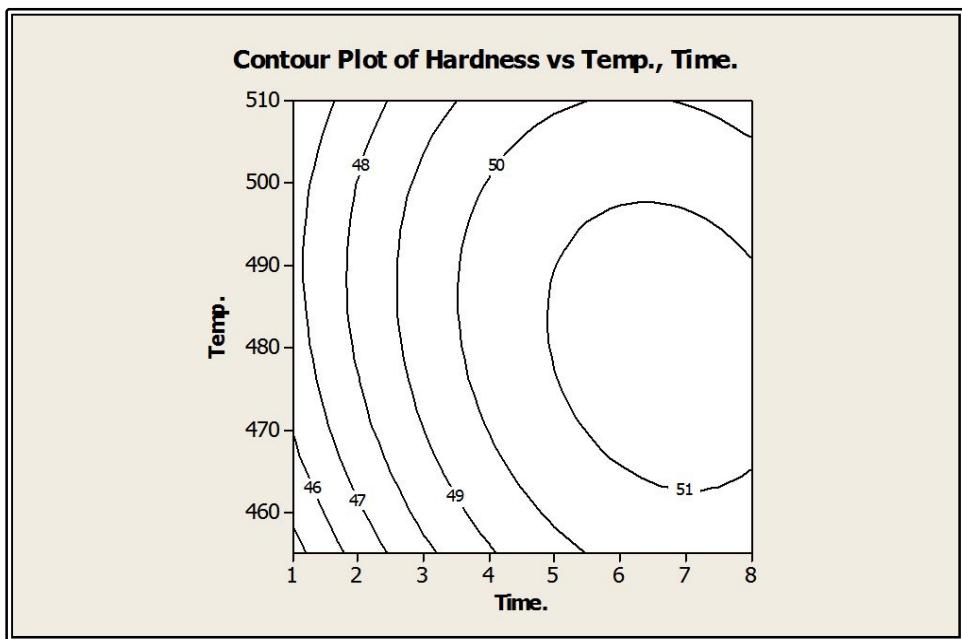


Fig. 4.9 Contour plot of Hardness between Temp and Time

4.2.2 인장강도 분석

Table 4.11은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4.12는 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 인장강도의 선형적인 측면을 살펴보면 Seq SS 합 126,657 중 선형항이 100,188을 차지하여 약 79.1%의 영향도를 나타낸다고 판단된다. 또한, 제곱항들은 Seq SS 합 중 11,302을 차지하여 약 8.9%를 나타내고 있다. 그러나 교호작용의 P값들은 전체 Seq SS 중 14,209을 차지하여 약 11.2%를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4.11에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 4-2와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_T = 1801.83 + 37.57 \times \text{Temp} + 112.33 \times \text{Time} - 13.71 \times \text{Temp}^2 - 74.68 \times \text{Time}^2 - 55.02 \times \text{Temp} \times \text{Time} \text{(Coded)} \quad (4-2)$$

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 인장강도의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 시효온도 510°C, 시효시간 8hr이라 할 때 이 조건을 코드화로 바꾸어 표현하면, 시효온도는 +1, 시효시간은 +1로 표현될 수 있다. 따라서 코드화된 조건은 식 4-2에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 인장강도는 코드화된 식 4-2를 이용한 결과가 1808.32MPa이 산출되어며, 실제 실험후의 데이터값은 1810.37MPa이 산출되어 약 0.1133% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 경도에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.10은 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 인장강도가 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이다. 시효온도와 시효시간의 변화에 따른 강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 시효시간과 시효온도가 높을수록 인장강도는 증가하는 관계가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4.11 Estimated Regression Coefficients for tensile strength(Coded)

Term	Coefficient	P
Constant	1801.83	0
Temp.	37.57	0
Time.	112.33	0
Temp.*Temp.	-13.71	0.124
Time.*Time.	-74.68	0
Temp.*Time.	-55.02	0

Table 4.12 Analysis of Variance for tensile strength

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	125717	125717	25143.4	160.43	0
Linear	2	100188	23843.3	11921.6	76.07	0
Square	2	11320	11320.4	5660.2	36.11	0
Interaction	1	14209	14208.9	14208.9	90.66	0
Residual Error	6	940	940.4	156.7		
Total	11	126657				

Contour Plot of tensile strength vs Temp., Time.

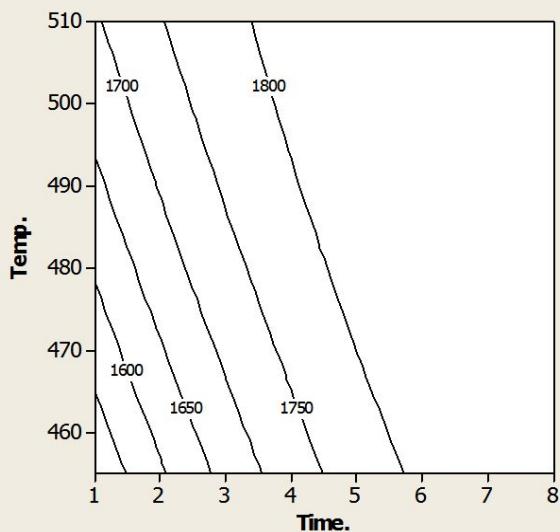


Fig. 4.10 Contour plot of Tensile Strength between Temp and Time

4.2.3 연신율 분석

Table 4.13은 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4.14는 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 우선 선형적인 측면 즉, 단일항을 살펴보면 Seq SS 합 26.3627 중 선형항이 18.304을 차지하여 약 69.4%의 영향도를 나타낸다고 판단된다. 그러나 제곱항들은 Seq SS 합 중 0.1436을 차지하여 약 0.5%를 나타내고 있다. 또한, 교호작용의 P값들은 전체 Seq SS 중 1.3143을 차지하여 약 5.0%를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4.13에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 4-4와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_E = 16.4162 - 0.6616 \times Temp - 1.3611 \times Time - 0.0109 \times Temp^2 - 0.2718 \times Time^2 + 0.5291 \times Temp \times Time (\text{Coded}) \quad (4-4)$$

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 연신율의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 시효온도 510°C, 시효시간 2hr이라 할 때 이 조건을 코드화로 바꾸어 표현하면, 시효온도는 -1, 시효시간은 -0.71429로 표현될 수 있다. 따라서 코드화된 조건은 식 4-4에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 연신율은 코드화된 식 4-4를 이용한 결과 16.1993%가 산출되며, 실제 실험후의 데이터값은 16.44%가 산출되어 약 1.4858% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 연신율에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.11은 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 연신율이 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이다. 시효온도와 시효시간의 변화에 따른 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 시효시간과 시효온도가 높을수록 연신율은 감소하는 관계가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4.13 Estimated regression coefficients for Elongation(Coded)

Term	Coefficient	P
Constant	16.4162	0
Temp.	-0.6616	0.137
Time.	-1.3611	0.014
Temp.*Temp.	-0.0109	0.987
Time.*Time.	-0.2718	0.731
Temp.*Time.	0.5291	0.316

Table 4.14 Analysis of variance for Elongation

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	19.7619	19.76191	3.95238	3.59	0.076
Linear	2	18.304	1.4281	0.71405	0.65	0.556
Square	2	0.1436	0.14362	0.07181	0.07	0.937
Interaction	1	1.3143	1.31426	1.31426	1.19	0.316
Residual Error	6	6.6008	6.60076	1.10013	-	-
Total	11	26.3627	-	-	-	-

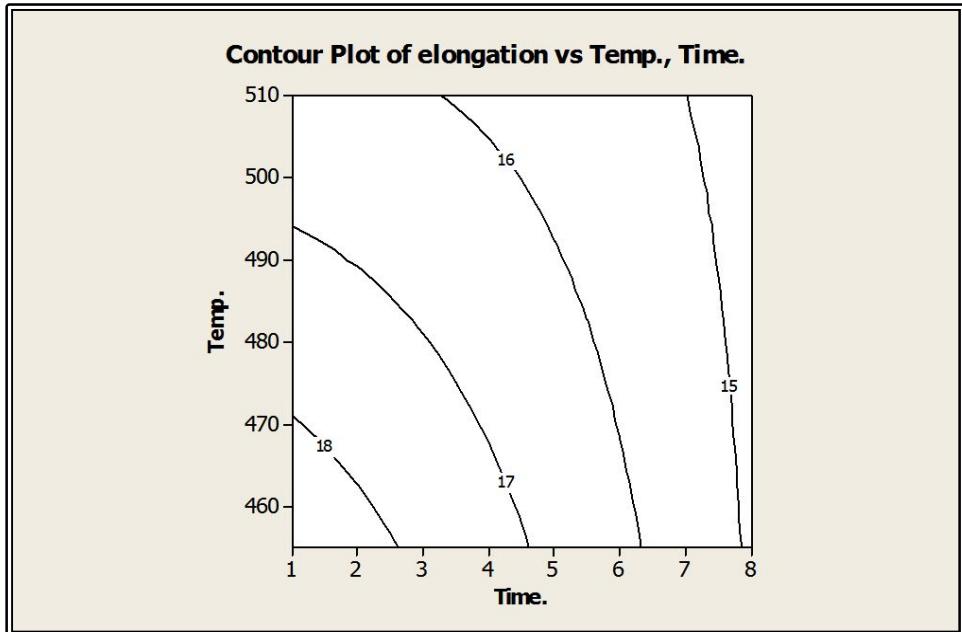


Fig. 4.11 Contour plot of Elongation between Temp and Time

4.2.4 피로수명 분석

Table 4.15는 회귀분석한 결과를 나타낸 표로서 2차방정식이라 가정한 후 각각의 계수 값을 나타내고 있으며, Table 4.16은 선형항, 제곱항 및 교호작용의 영향을 전체적으로 나타내고 있다. 우선 선형적인 측면 즉, 단일항을 살펴보면 Seq SS 합 3,754,342,500 중 선형항이 530,209,846을 차지하여 약 14.1%의 영향도를 나타낸다고 판단된다. 또한, 제곱항들은 Seq SS 합 중 983,586,912을 차지하여 약 26.2%를 나타내고 있다. 그러나 교호작용의 P값들은 전체 Seq SS 중 33,742,412을 차지하여 약 0.9%를 나타내고 있다. 따라서 코드화된 전체적인 회귀식은 Table 4.15에서 도출된 코드화된 계수를 이용하여 식 4-6과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_F = 98054 + 7075 \times \text{Temp} + 1444 \times \text{Time} - 5616 \times \text{Temp}^2 + 21533 \times \text{Time}^2 - 2681 \times \text{Temp} \times \text{Time} (\text{Coded}) \quad (4-6)$$

이와 같이 도출된 회귀식의 이용은 실험을 수행하지 않은 조건에 대한 피로수명의 결과값을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 비코드화된 조건으로서 시효온도 482°C, 시효시간 4hr이라 할 때 이 조건을 코드화로 바꾸어 표현하면, 시효온도는 -0.0182, 시효시간은 -0.14286로 표현될 수 있다. 따라서 코드화된 조건은 식 4-6에 대입하여 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산한 결과 반응값인 피로수명은 코드화된 식 4-6을 이용한 결과 98,149.7사이클이 산출되며, 실제 실험후의 데이터값은 99,602사이클이 산출되어 약 1.4796% 정도의 오차만을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 피로수명에 대하여 도출된 회귀식의 적정함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.12는 유의한 교호작용의 요인들의 값의 변화에 따라 피로수명이 변화되는 내용을 파악하기 위하여 반응표면분석법 중 등고선 선도를 이용하여 나타낸 것이다. 시효온도와 시효시간의 변화에 따른 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 시효시간은 피로수명에 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있고 시효시간과 시효온도가 높을수록 피로수명은 증가하다가 감소하는 관계가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4.15 Estimated regression coefficients for Fatigue life(Coded)

Term	Coefficient	P
Constant	98054	0
Temp.	7075	0.354
Time.	1444	0.85
Temp.*Temp.	-5616	0.65
Time.*Time.	21533	0.169
Temp.*Time.	-2681	0.772

Table 4.16 Analysis of variance for Fatigue life

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	1547539170	1547539170	309507834	0.84	0.566
Linear	2	530209846	94235193	47117596	0.13	0.882
Square	2	983586912	983586912	491793456	1.34	0.331
Interaction	1	33742412	33742412	33742412	0.09	0.772
Residual Error	6	2206803330	2206803330	367800555	-	-
Total	11	3754342500	-	-	-	-

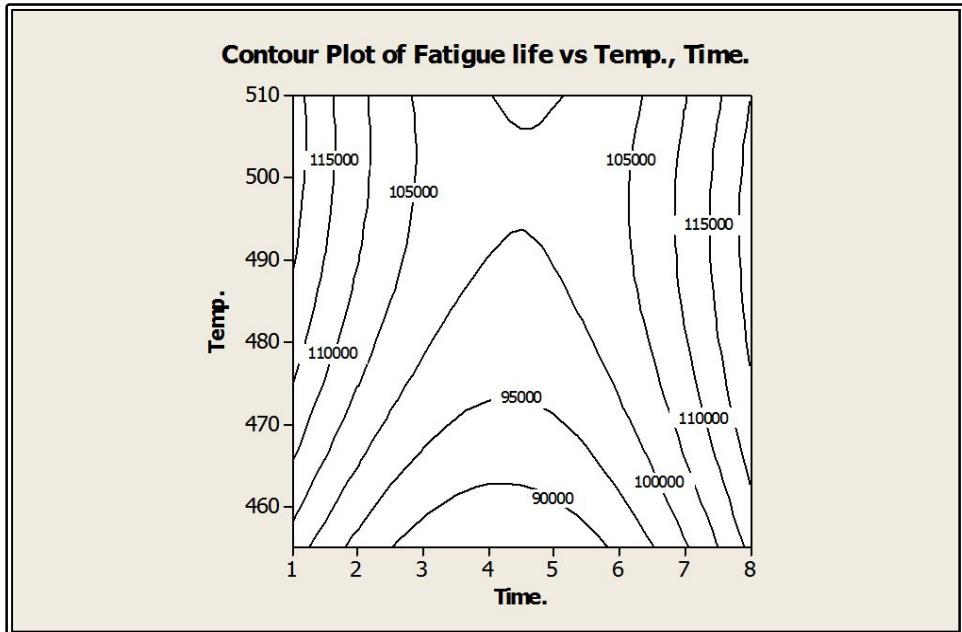


Fig. 4.12 Contour plot of Fatigue life between Temp and Time

4.3 반응 최적화

반응 변수가 하나 또는 여러 개일 때 이들 반응 변수의 목표 값을 만족시키는 인자의 최적조합을 찾아보기 위하여 반응 최적화를 실시하였다.

생성된 실험 설계로 시뮬레이션을 통하여 실험을 실시하여 데이터를 수집하였으며, 수집한 데이터를 워크시트에 입력한 후 분석을 실시하였다. Table 4.17은 반응 최적화를 위한 실험계획 및 수집된 데이터를 나타내고 있다.

반응 최적화는 실험계획에 의하여 설계된 순서에 따라 데이터가 집계되었으므로 앞서 살펴보았던 회귀식 도출 및 반응표면분석이 추가로 가능하나 경향은 큰 차이가 없으므로 생략하고 모든 요인 및 반응값이 포함된 반응 최적화를 곧바로 도출 였다. 이 때 입력한 반응은 시효온도와 시효시간 2가지이며, 분석은 반응값에 따라 직선 및 곡선의 결과가 함께 포함되어 있으므로 반응표면으로 적합시킬 모형 항은 선형, 제곱 및 2차 교호작용을 포함하고 있는 완전 2차형으로 선정하였다.

이어서 반응 최적화에서 목표로 설정하고자 하는 반응변수값 및 범위 등을 Table 4.18과 같이 설정하였다. 여기서 목표는 목표값, 최대값, 최소값 중 선택할 수 있으며, 이 때 반응 변수의 값이 목표 및 상한값과 하한값이 있으면 목표값을, 적으면 적을수록 바람직할 경우 최소값을, 반대로 크면 클수록 바람직할 경우 최대값을 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 경도, 연신율 및 피로수명은 목표값을 설정하였으며, 인장강도는 최대값을 선택한 후 각각에 해당하는 값을 입력하였다.

Fig. 4.13은 반응 최적화 결과를 나타낸 그림이다. Table 4.18에서 설정한 목표값을 나타내기 위하여 설정해야 할 각 인자들의 값을 최적화한 결과 X축에서 보여주는 시효온도는 482°C, 시효시간은 6.5hr로 분석되었다. 이 때 Y축은 원하던 목표값을 모두 정확히 만족시킬 수는 없으나 최대한으로 근접한 값을 보여주게 되며 경도는 51.4909(HR_C), 인장강도는 1841.5244MPa, 연신율은 15.5562%, 피로수명은 105,800사이클이 됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과로서 Table 4.26의 목표값을 얻기 위한 각 인자들에게 필요한 설정값을 최적화하여 얻을 수 있었다. 또한 최적화 결과에 나타난 그림을 이용하여 사용자가 원하는 요인의 값을 입력하여 반응값들을 확인할 수 있는 방법으로는 굵은 실선을 마우스로 움직여 인자들의 값을 변경할 수도 있고 직접 원하는 인자들의 값을 입력하여 반응값들을 확인할 수도 있다. 이

와 같이 인자들의 목표 값이 변경되면 자동적으로 반응값들이 바뀌게 되므로 실험이 수행된 범위 내 모든 인자값의 조합에 따른 반응값을 알 수 있으므로 활용성이 매우 높으리라 사료된다.

Table 4.17 responses for response optimizer

Order	Factors				Responses			
	Coded		Uncoded		Hardness	Tensile strength	Elongation	Fatigue life
	A	B	A	B				
1	-1	-1	455	1	43.25	1496.7	19.96	84902
2	-1	-0.71429	455	2	47.4	1604.77	17.24	100202
3	-1	-0.14286	455	4	49.55	1729.71	16.64	91202
4	-1	1	455	8	50.05	1838.62	15.36	116102
5	-0.01818	-1	482	1	47.2	1609.68	17.96	145502
6	-0.01818	-0.71429	482	2	47.95	1690.95	16.24	94502
7	-0.01818	-0.14286	482	4	50.05	1772.92	17.44	99602
8	-0.01818	1	482	8	51.25	1844.91	14.56	105302
9	1	-1	510	1	48.1	1688.65	15.64	128402
10	1	-0.71429	510	2	44.55	1761.5	16.44	90302
11	1	-0.14286	510	4	50.1	1804.12	16.64	106502
12	1	1	510	8	49.75	1810.37	14.28	128402

Table 4.18 Setting of the response values for optimizer

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Hardness	Target	40	52	55	1	1
Tensile strength	Maximum	1400	1850	1900	1	1
Elongation	Target	14	16	20	1	1
Young modulus	Target	12000	13000	15000	1	1
Fatigue life	Target	80000	100000	150000	1	1

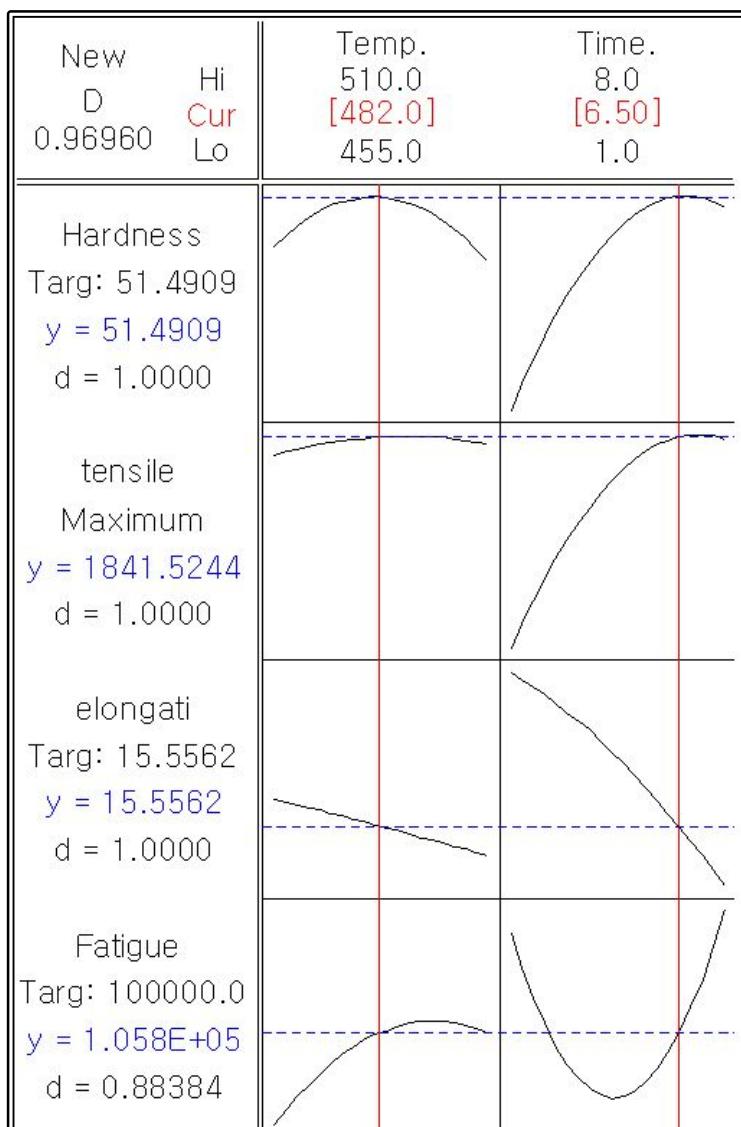


Fig. 4.13 Results of the response optimization

제 5 장 결론

본 연구에서는 항공·우주분야, 원자력 및 자동차분야 등의 용도로 주목받고 있는 초고장력 18%Ni 마르에이징강의 기계적 성질의 향상을 도모하고자 시효조건 공정 최적화에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경도값은 모재보다 용체화 처리된 시험편이 약 3% 감소하였으나 1시간 시효 처리한 시험편은 약 60% 정도 크게 증가하였으며 그 이후의 시간에서는 거의 비슷한 값을 나타내었다.
2. 항복응력은 5~8시간에서 약 1,800MPa로 가장 높게 나타났으며 이는 모재보다 약 2배 이상 증가하였다. 한편 연신율은 낮은 온도와 적은 시간에서 가장 높게 나타났으며 이는 모재와 비슷함을 알 수 있다.
3. 피로수명은 시효온도가 높아질수록 그리고 시효시간이 증가할수록 증가하였다. 한편 가장 양호한 피로수명을 나타낸 시험편은 510°C에서 8시간 시효 시 가장 높게 나왔다.
4. 250 grade를 만족하는 시험편은 482°C에서 8시간 시효한 시험편으로 가장 우수한 기계적 성질을 나타냈다.
5. 시효온도와 시효시간이 반응변수에 미치는 영향을 분석하고 유의성을 평가한 결과 각각의 반응변수에 유의한 인자들이 도출되었으며, 주효과 및 교호작용의 영향을 분석하였다.
6. 인자들의 상호관계를 분석한 결과 시효온도와 시효시간의 반응변수에 대한 회귀분석 및 반응표면분석으로 적정한 회귀식이 도출되어 적용 가능성을 검증하였으며, 각 요인들의 상관관계를 정립하여 회귀식을 완성 및 반응 최적화를 달성하였다. 반응최적화 적용결과 최적의 시효조건은 482°C에서 6.5시간 시효 시 가장 적정한 조건으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- 1) Kim, W. Y., Hisao Tanaka, Kim, M. S., and shuji Hanada, "High Temperature Strength and Room Temperature Fracture Toughness of Nb-Mo-W Refractory Alloys with and without Carbide Dispersoids" , Material Science and Engineering A346, pp. 65~74, 2003
- 2) 姜石峯, 李禎茂, 金成俊, “냉간압연한 C300 및 T300마르에이징강에서 전자빔용접과 열처리에 따른 상변태 거동”, 대한금속학회지, 제 31권, 제 5호, pp. 650~657, 1993
- 3) Decker, R. F. and Floreen, S., “Maraging Steels” , Recent Developments and Applications, R. K. Wilson(Ed.), TMS, p.1, 1988
- 4) 강석봉, 최재영, 김대업, “C250 및 T250 마르에이징강에서 냉간압연과 전자빔 용접이 조직과 기계적 성질에 미치는 영향” , 대한금속학회지, 제 29권, 제 11호, pp. 1090~1096, 1991
- 5) Shiang, L. T. and Wayman, C. M., “Maraging Behavior in an Fe-19.5Ni-5Mn Alloy I ” , Published in METALLOGRAPHY 21, Vol. 399, No. 423, pp. 529~553, 1998
- 6) 김학모, 김인배, 박세윤, “18Ni 마르에이징 강의 기계적 성질에 미치는 Mo 첨가량의 영향” , Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 4, No. 3, pp. 7~12, 1991
- 7) 崔鍾述, 鈴木朝夫, “Ni-Co合金의 加工組織에 관한 研究” , 대한금속학회지, 제 21권, 제 9호, pp. 796~801, 1983
- 8) Zhang, J. S., Liu, X. J., Cui, H., Duan, X. J., Sun, Z. Q., and G. L. Chen, “Ageing Behaviour of Spray-deposited 18Ni(250) Maraging Steel+10vol.% Al₂O₃” , Material Science and Engineering A, Vol. 225, Nos. 1-2, pp. 96~104, 1997
- 9) Moriyama, M. and Takaki, S., “Influence of Reversion Austenite on Fatigue Property of 18% Ni Maraging Steel” , International Journal of Fatigue, Vol. 19, No. 3, pp. 266~267, 1997
- 10) Tsay, L. W., Lee, W. C., Luu, W. C., and Wu, J. K., “Effect of Hydrogen Environment of the Notched Tensile Properties of T-250 Maraging Steel Annealed by Laser Treatment” , Corrosion Science, Vol. 44, No. 6, pp.

1311~1327, 2002

- 11) Hussain, K., Tauqir, A., and Khan, A. Q., "Influence of Gas Nitriding on Fatigue Resistance of Maraging Steel", International Journal of Fatigue, Vol. 21, No. 2, pp. 163~168, 1999
- 12) Shamantha, C. R., Narayanan, R., Iyer, K. J. L., Radhakrishnan, V. M., Seshadri, S. K., Sundararajan, S., and Sundaresan, S., "Microstructural Changes During Welding and Subsequent Heat Treatment of 18Ni (250-grade) Maraging Steel", Material Science and Engineering A, Vol. 287, No. 12, pp. 43~51, 2000
- 13) 석진익, 홍순형, 남수우, "Fe-10Cr-10Ni-2W 마르에이징강에서 인접 래스 사이의 결정학적 방향관계", 대한금속학회지, 제 30권, 제 11호, pp. 1354~1362, 1992
- 14) Krystyna Stiller, Frederic Danoix and Mats Hattestrand, "Mo Precipitation in a 12Cr-9Ni-4Mo-2Cu Maraging Steel", Material Science and Engineering A, Vol. 225, No. 1, pp. 22~26, 1998
- 15) Stiller, K., Hattestrand, M., and Danoix, F., "Precipitation in a 9Ni-12Cr-2Cu Maraging Steels", Acta Materialia, Vol. 46, No. 17, pp. 6063~6073, 1998
- 16) Tewari, R., Mazumder, S., Batra, I. S., Dey, G. K., and Banerjee, S., "Precipitation in 18 wt% Ni Maraging Steel of Grade 350", Acta Materialia, Vol. 48, No. 5, pp. 1187~1200, 2000
- 17) Kim, S. J. and Wayman, C. M., "Strengthening behaviour and Embrittlement Phenomena in Fe-Ni-Mn-(Ti) Maraging alloys", Materials Science and Engineering A207, pp. 22~29, 1996
- 18) Nagayama, K., Terasaki, T., Tanaka, K., Fischer, F. D., Antretter, T., Cailletaud, G., and Azzouz, F., "Mechanical Properties of a Cr-Ni-Mo-Al-Ti Maraging Steel in the Process of Martensitic Transformation", Material Science and Engineering A, Vol. 308, Nos. 1-2, pp. 25~37, 2001
- 19) 최호현, 최종술, 양문영, "코발트를 含有하지 않은 18%NI Maraging 鋼의析出硬化挙動에 미치는 加工度의 影響", 대한금속학회지, 제 22권, 제 5호, pp. 468~474, 1984
- 20) Decker, R. F. and Floreen, S., "Maraging Steels", Recent Developments

- and Applications, R. K. Wilson(Ed.), TMS, p. 1, 1988
- 21) Floreen, S., "Metals handbook", 9th ed., B. P. Bardes(Ed.), ASM, 1, p. 445, 1987
- 22) 최병기, 장경천, "SB41용접재의 페로크래 진전거동에 관한 연구", 한국공작기계학회논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 43~49, 2002
- 23) 윤지현, 설은철, 박승민, 이광학, "Al-Si 합금의 개량처리와 주단조에 의한 조직변화에 관한 연구", 한국주조공학회지, 제 22권, 제 1호, pp. 17~25, 2002
- 24) 朴淵瑞, "Si, Mn, V이 첨가된 비조질강의 기계적 성질 및 미세조직에 미치는 냉각속도의 영향", 경북대학교 공학석사학위논문, pp. 14~15, 2000
- 25) 박성현, "현대실험계획법", 민영사, pp. 547~554, 1995
- 26) R. Myers. AND d. c. Montgomery, "Response Surface Methodology - Process an Product Optimization Using Designed Experiments." John Wiley & Sons. Inc. Canada, 1995
- 27) 윤진환, "반응표면법에 의한 구조 최적설계", 한국항공대학교 공학석사 학위논문, pp. 2~17, 2002
- 28) 전용성, "다양한 회귀함수에 의한 구조 최적설계", 한국항공대학교 공학석사학위논문, pp. 3~25, 2004
- 29) 석진익, 홍순형, 남수우, "Fe-10Cr-10Ni-2W 마르에이징강에서 reverted 오스테나이트의 형태와 결정학적 특징", 대한금속학회지, 제 30권, 제 3호, pp. 340~346, 1992
- 30) Pound, B. G., "The Effect of Aging on Hydrogen Trapping in Precipitation-hardened Alloys", Corrosion Science 42, pp. 1941~1956, 2000
- 31) 한봉희, "금속재료", 희중당, pp. 157~189, 1993
- 32) 김인배, "초내열합금의 열처리", 한국열처리공학회, 제 3권, 제 3호, pp. 3 7~42, 1990
- 33) 정병호, 김한군, "마르에이징강의 열처리", 한국열처리공학회, 제 14권, 제 5호, pp. 297~303, 2001
- 34) Wu, C. P., Tsay, L., and Chen, C., "Notched Tensile Testing of T-200 MaragingSteel and its Laser Welds in Hydrogen", Materials Science and Engineering A346, pp. 302~309, 2003
- 35) Annual Book of ASTM Standards, "Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures", E 8M-96, Standard Test Methods for Tension of

Metallic Materials, pp. 76~96, 1996

- 36) Annual Book of ASTM Standards, “Standard Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”, E399-90, pp. 407~437, 1996
- 37) 한국과학기술원, “용접용 고강도 알루미늄 소재 개발 (II)”, 과학기술처, p 27, 1993
- 38) Annual Book of ASTM Standards, “Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures”, E 647-95a, Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth rates, pp. 565~601, 1996
- 39) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10~8mm/Cycle, ASTM E647-83, pp. 765~783, 1985
- 40) 이상복, “새 Minitab 실무완성”, 이래테크, pp. 575~605, 2005
- 41) 김학모, 김인배, 박세윤, “18Ni 마르에이징 강의 기계적 성질에 미치는 시효처리의 영향”, Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 4 No. 1, pp. 30~36, 1991

감사의 글

지금의 학위 논문이 나오기까지 여러 방면으로 많은 도움을 주신 분들에게 감사의 마음을 전하고자 합니다. 대학원 2년여 시간동안 많은 지도를 받으며 배움을 느낀 시간이었습니다.

언제나 부족한 저에게 세심한 지도를 해주신 지도교수이신 차용훈 교수님께 감사합니다. 또한 광탄성실험실의 베풀목이 되어 성백섭 교수님과 많은 조언을 해주신 박창선 교수님께도 고마움을 금할 길이 없습니다. 그리고 언제나 학교생활에 조언을 해주던 미애누나, 승원이형, 지현이형, 재희형 그리고 다른 선배님들에게도 감사의 말을 전합니다.

또한 학연산 과정으로서 생산기술연구원에 근무했던 것을 자랑스럽게 생각하며 제2의 지도교수로서 회사내에서 언제나 배려해주고 지도해주셨던 이동길 박사님, 그리고 큰아버지같이 가족같은 느낌을 주셨던 장경천 박사님과 저에게 많은 지도를 해주신 김명호 연구원께서 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 또 많은 격려와 조언으로써 언제나 신경써주시는 이기용 박사님과 박순섭 박사님 그리고 작은 것 하나까지도 언제나 알려주시려 하시던 김기풍 박사님께 감사의 말씀을 전합니다. 직장내 선배로서 언제나 걱정해주고 도움을 준 광용이형과 현우형 그리고 앞으로 학생연구원으로 지낼 현준이에게도 많은 격려와 감사의 말을 전합니다.

그리고 언제나 믿어주시며 지원해주시고 항상 가슴 깊은 사랑을 느끼게 해주신 저희 부모님과 형에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또 언제나 가족같이 힘들때나 기쁠때 주위를 지켜준 친구들인 세리, 명기, 용훈, 하나, 현선, 하린, 민욱이 뿐만아니라 많은 지인들에게도 깊은 감사를 드립니다.

진심으로 감사합니다.