

반응표면법을 이용한 대형 L-type 자동화용접장치의 구조최적화 연구

장준호*, 정원지⁺, 이동선⁺, 정장식⁺⁺, 정성호⁺⁺

(Manuscript received: Jul, 26, 2012 / Revised: Nov, 12, 2012 / Accepted: Nov, 26, 2012)

The structure Optimization Research of the Automation Welding Equipment of the Large L-type Using the Response Surface Method

Junho Jang*, Dongsun Lee⁺, Wonjee Jung⁺, sung ho Jung⁺⁺, Jangsik Jung⁺⁺

Abstract

The automation technology for overlay welding is needed due to the occurrence of severe corrosion and abrasion on the surface of internal contact in different shape of fittings. In Korea, different shapes of fittings have been manufactured by using the imported equipment of overlay welding automation at some companies. Thus the research on the development of overlay welding automation system (in short, OWAS) for a large L-type tube is urgently needed⁽⁹⁾. In this paper, the investigation is focused on the optimal design of a supporting base for the (currently developing) OWAS of large L-type tube. Specifically we assume that the base which supports the equipment during the process of overlay welding is loaded as self-weight in the direction of gravity through static analysis especially when it is rotated 180 degree on the OWAS. For optimal design of a supporting base for OWAS of large L-type tube, Solidworks® (for 3-dimensional modelling) and ANSYS Workbench® (for structural analysis) are incorporated so as to proceed an optimization routines based on Response Surface Method (RSM) and Design of Experiment (DOE). In more specific, DOE finds out major factors (or dimensions) of the supporting base by using MINITAB®. Then the regression equations between design variables (the major factors of supporting base) and response variables (deformation, stress and safety factor for the supporting base), which will be resulted in by RSM, verify the major factors of DOE. In the next step, Central Composite Design (CCD) plans 20 simulations of ANSYS Workbench® and then figures out the optimal values of design variables which will be reflected on the manufacturing of supporting base. Finally welding experiment is conducted to figure out the influence of overlay welding quality in applying the optimized design values of supporting base to the actual OWAS.

Key Words : Overlay welding automation system(OWAS), Design of experiment(DOE, 실험계획법), Response surface method(RSM, 반응표면법), Central composite method(CCM, 중심합성법)

* 창원대학교 기계설계공학과
주소: 641-773 경남 창원시 의창구 사림동 9번지
+ 창원대학교 기계설계공학과
++ 에스피하이테크(주)

✉ Corresponding Author E-mail: raita110@naver.com

1. 서론

오일 및 가스를 운송하는 해양 플랜트 조선 플랜트 등에는 많은 제한이 따른다. 내부 표면에 부식 및 마모가 발생하기 때문에 오버레이 용접 자동화 기술이 필요하다⁽¹⁾. 선진국에서는 오버레이 용접자동화 기술을 이미 사용하고 있는데 비해 한국은 그 기술이 아직 부족한 실정이다.

이외에도, 난형상이나, 곡선부분 등을 용접할수 있는 첨단 장비인 오버레이 용접장비 또한 외국 기업들이 독점하고 있다.

한국의 경우 오버레이 용접 자동화 장비를 수입하여 다양한 형태의 피팅을 제조해왔다. 수입 장비는 너무 비쌌뿐만 아니라, 대형-L관에 대한 오버레이 용접 기술에 적합하지도 않다. 따라서 대형-L관 오버레이 용접자동화 시스템(OWAS)의 개발 연구가 시급히 요구되는 상황이다.

기존의 대형-L관 용접용 OWAS 구조는 설계 구조 특성, 외부의 자연 환경, 그리고 전통적인 용접자동화 장비의 구조 설계에 대한 설계자의 경험을 토대로 한 설계자의 주관에 따라 안전 요인들을 준수하면서 진행된다. 이는 신뢰할 만한 증거 자료의 부족으로 인해 오버레이 용접 구조의 안정성에 개선 요소가 많이 있음을 의미한다.

본 논문에서는 현재개발중인 대형-L관의 OWAS 기기의 최적설계를 집중적으로 연구를 실시하였다. 오버레이 용접 중에 장비를 지원하는 기기에, 장비가 180도로 회전할 때 중력방향으로 자중이 부하된다고 가정을 하여 정적해석을 기반으로 실시하였다. 이외에도 OWAS 장치에 최적화 값을 적용한후에, 용접품질에 관련하여 좋은 영향을 미치는지 연구를 진행하였다.

Fig. 1에 나와있듯이, OWAS의 최적화 설계를 위해서 Solidworks[®] (3차원 모델링) 및 ANSYS Workbench[®](구조분석)을 이용하여 반응표면법(RSM)⁽²⁾과 실험계획법(DOE)⁽³⁾을 기반으로 하여 구조 최적화를 진행하였다. DOE의 경우 MINITAB[®]을 이용하여 구조최적화에 있어서 주요 요인들을 선택하였다. 그후 중심합성법(CCD)을 통해 ANSYS Workbench[®]를 통해 20번의 해석을 실행한후, 해석된 결과값을 통하여서 중심합성법을

실시하여 최적화하기에 좋은 설계변수값들을 산출하였다. 마지막으로 최적화된 것을 기반으로하여 대형-L관 OWAS에 접목하여 용접품질의 향상에 대해 연구를 실시하였다.

2. 육성용접 자동화 장치(OWAS)

일반적으로 저탄소강은 발전소, 해양 플랜트, 석유화학 플랜트에서 주로 많이 사용된다. 특히 탄소강 위에 추가 용접되는 Inconel 625를 사용하여, Fig. 2에 나와있는 것처럼, 내식성 및 고강도 관 내부에 일정한 두께로 사용된다. 이런 종류의 용접을 오버레이 용접이라고 부르며, 이는 화학적으로 취약한 환경에 노출된 물리적 속성들을 가진 어떤 금속의 표면을 코팅함으로써 내식성, 내구성, 내마모성 그리고 강도를 개선하는데 목적을 두고 있다^(7,8).

아래의 Fig. 3은 현재 연구하고자하는 장비의 특성 및 모습을 나타내주고 있다. 현재 개발된 장치로서 OWAS는 이형관이 삽입되어 수용되도록 하는 중공관 형상을 가지며 구동력에 의해 회전하는 회전부, 회전부에 결합되어 상기 회전부에 삽입되는 이형관의 표면을 다점 지지하면서 고정하고, 엘보관의 중심선을 연장한 곡선을 따라 이형관이 전후로 이동되게 하는 지그부, 3축 이동이 가능하고 이형관 내에 삽입되어 엘보관 내면에 용접을 수행하는 용접부, 회전부에 의해 이형관이 회전하는 동시에 상기 지그부에 의해 엘보관이 전진 또는 후진하여 이형관 내면에 용접비드가 나선을 형성하면서 연속적으로 육성용접이 수행되도록 제어 하는 제어부로 구성이 되어진다. 따라서 이러

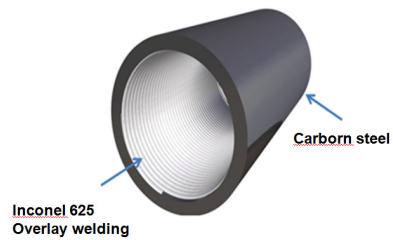


Fig. 2 Overlay Welding(육성용접)

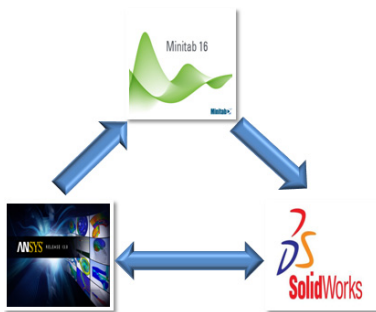


Fig. 1 Incorporation of Solidworks[®], ANSYS Workbench[®], MINITAB[®]



Fig. 3 Prototype of OWAS

한 장비를 현재 OWAS라 부르며, 이는 취약한 환경이나, 노출된 물리적 속성들의 표면들을 코팅함으로써 내식성, 내구성, 내마모성 그리고 강도를 개선하려는 목적을 가지고 있다.

본 연구에서는 OWAS가 180도로 회전을 할 때, 중력 방향으로 자중이 부하된다는 가정하에서, 최적설계를 집중적으로 연구를 하였다. 특히 변형률, 발생응력, 안전율을 최적화함으로써 용접품질 개선 정도에 관련하여 연구를 실시하였으며, 변형률과, 발생응력의 경우는 최소화하고, 안전율의 경우는 상향시키는 최적화 연구를 실시하였다.

3. OWAS for DOE(Design of Experiment)

아래의 Fig. 4는 현재 OWAS 장치의 3차원 모델링의 형상을 나타내고 있다. 아래의 모델의 경우 (a)의 그림의 경우는 Solidworks를 이용하여 최적화를 하고자하는 형상의 Supporting base의 형상을 나타내었다. 이부분의 경우 전체 용접장치의 무게를 지지하는 형상이므로 최적화의 연구주제로 선정을 하였다. Fig. 4(b)의 경우는 OWAS의 Supporting base가 180도 회전을 한 형상이다. 현재 연구의 목적은 180도 회전을하여 중력방향으로 자중의 영향을 받는 가정하에 연구를 진행하는 것이다. 현재 그림에서 보이는 부분(붉은색 원형)부분을 최적화를 진행하고자 한다. 빨간색 부분이 Fig. 5에서 보면 알겠지만, 현재 저 부분에서 변화량, 발생응력 이 가장 높게 나타나며, 또한 안전율의 경우 3이하로 나타나게 되었다.

따라서 앞서 언급하였듯이, 변화량, 발생응력을 최소화하고, 안전율의 경우는 상향을 하기위해서 먼저 기존의 초기값을 ANSYS Workbench(구조 해석 Software)을 이용하여 유한요소해석을 실시하였으며, 또한 여기에 사용되는 이 OWAS 장치의 의 물성치(SM490)를 사용하였다.

앞서 언급하였듯이, 기존 산업장비들의 안전율은 3이상의 값을 확보해야한다. 그러나 ANSYS Workbench를 이용하여 구조분석을 한 결과 안전요인이 2.868의 결과값을 나타내었다. 따라서 이부분의 최적화를 실시를 하기위해 실험계획법(Design of Experiment)를 실시하였다.

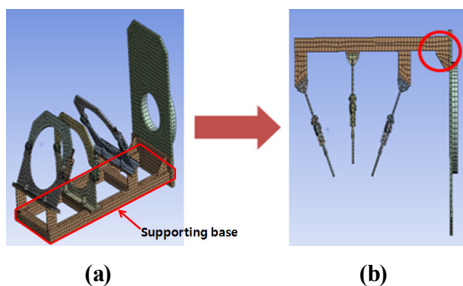


Fig. 4 (a) 3-D model of Solidworks for OWAS
(b) FE model for OWAS

아래의 그림 Fig. 6에서 보는바와 같이 4개의 설계 변수들 (X1, X2, X3, 그리고 X4 값들을) 변수로 설정을 하였다.

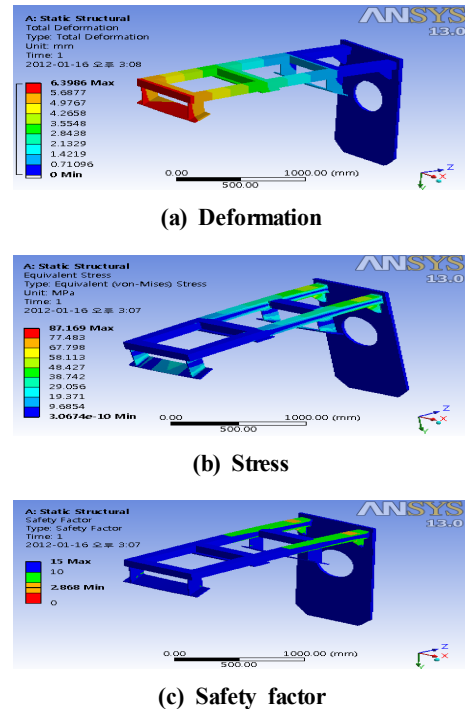


Fig. 5 Preliminary FE analysis of supporting base

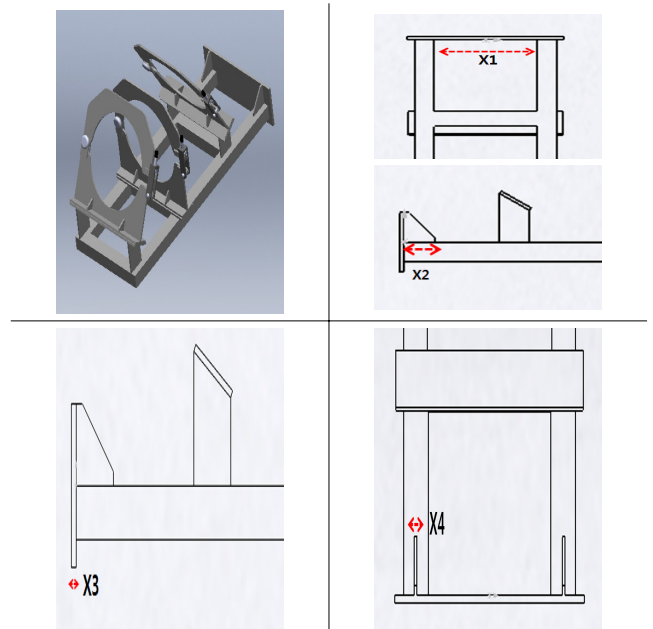


Fig. 6 Design parameters for DOE

Table 1 Initial Analysis Result

Deformation[mm]	Stress[Mpa]	Safety Factor
6.399	87.169	2.868

Table 2 Range of each design parameter

Design Parameters	Range[mm]	
	Lower	Upper
X1	502	542
X2	130	170
X3	10	50
X4	10	50

Table 3 Orthogonal Array(L₁₆(2⁴)) with analysis result

	X1	X2	X3	X4	Stress [Mpa]	Deformation [mm]	Safety factor
1	502	130	10	10	122.68	5.2461	5.2461
2	502	130	10	50	50.001	4.9374	4.9374
3	502	130	50	10	63.185	5.5254	5.5254
4	502	130	50	50	48.985	5.1856	5.1856
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	542	170	10	10	52.137	4.1946	4.1946
14	542	170	10	50	43.878	3.8226	3.8226
15	542	170	50	10	58.170	4.4837	4.4837
16	542	170	50	50	62.850	5.3828	5.3828

물론 Bad 부분과 접촉부분 사이의 관계를 두껍게 하면 할수록 그 강도는 향상이 될 수가 있다. 변화량이나 안전율등에는 좋은 평가를 받을수 있겠지만, 이는 결코 좋은 설계라고는 할수는 없다. 따라서 실험계획법을 통하여 최적화를 진행하였다. 설계 인자를 Fig. 6을 기준으로하여 Table 2에 상향값과 하향값을 기준으로 선정을 하였다.

3.1 설계변수를 고려한 직교배열표 결정

실험을 실시하기 이전에 실험에 대한 충분한 계획 없이는 소기의 목적을 달성하기가 어렵다. 실험계획법이란 실험에 대한 계획을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 하고, 데이터를 어떻게 취소하며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻을수 있는가를 계획하는 것이라 정의할 수 있다. 그리고 실험에 있어서 목적함수값에 영향을 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접적인 영향을 주는 원인을 인자(factor)이라 하며 실험을 하기위한 인자의 조건을 인자의 수준이라 한다. 따라서 본 연구에서는 설계변수의 개수를 고려하여 설계변수를 4개 인자로 하여 5수준의 레벨을 설정하여 L₁₆(2⁴)로 직교배열표로 결정을 하였다.

위의 Table 3의 형상은 미니탐을 이용하여 변화량, 발생응력, 안전율에 대해서 가장 영향을 많이 받는 인자를 찾기위한 선정 방법이며, 16번의 실험을 거쳐 주요 인자를 찾는 과정이다.

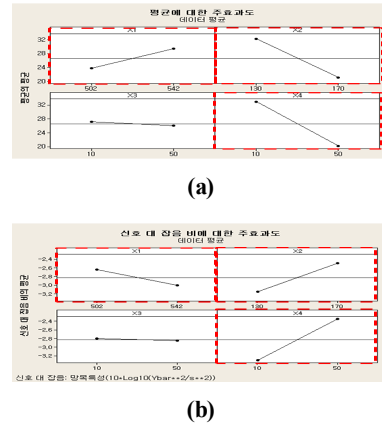


Fig. 7 (a) Main effect about the mean (b) Signal to noise ratio

Fig. 7을 보면 알수있듯이, X1, X2, X4가 가장 많이 영향을 주는 것으로 알수가 있다. 아래의 Fig. 7에서 기울기가 클수록 영향이 많이 간다는 것을 알수가 있다.

위의 Fig. 7의 분석으로 나온 결과값 X1, X2, X4를 기준으로 하여 다시 상향값과 하향값을 결정하여 반응표면법을 이용한 중심합성설계로 하여 최적화 진행을 진행할 것이다.

4. 반응표면법 및 중심합성법

반응표면법(Response Surface Method)는 설계변수(Design variables)와 반응변수(Response variables)의 실험적 관계를 수학적식으로 표현하기 위해서 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 치수들로부터 근사적 반응표면모델을 만들어내는 통계적 기법들을 의미한다.

많은 공학문제에서 설계변수와 반응변수간의 수학적 함수 관계를 찾아낸다는 것은 매우 어려우며 비록 반응함수가 부분적으로 알려져 있다 하더라도 복잡한 형태를 취하는 경우가 대부분이어서 실용성이 낮다. 따라서 반응표면분석법은 함수관계가 밝혀져 있지 않거나 복잡한 형태를 갖는 최적화 문제를 해결할 경우 매우 유용한 최적화 방법이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 설계변수에 대응하는 출력값은 유한요소해석을 통해 구한다.

아래의 그림의 경우는 반응표면법을 이용하여 다시한번 차트를 작성하여 20번의 실험횟수를 거친 그래프이다.

이것의 경우 실험계획법을 통하여 얻은 3가지의 인자를 가지고 한번더 실시를 한뒤, 이 인자들이 정확한지 한번더 확인을 하기위해 잔차분석, 정규분포를 통해 검증을 실시하기 위한 준비단계이다. 따라서 아래의 그림과같이 결과값들이 표와같이 나열되어 있다.

Fig. 8은 Table 4의 결과값을 기준으로 하여 반응표면모형은 각 항에 대한 P값을 확인하고 가장 P값이 큰 것부터 한번에

하나씩 풀링시켜 모형을 적합시켰다. 모형 적합 후, R-sp와 Lack-of-fit 값을 확인하여 R-sq 값이 95% 이상의 적합도를 만족시킬 때 가지 반복을 하였다.

여기서 P의 값은 오차대비 효과의 크기를 나타내며, R-sq의 값은 %클수록 Pure-error가 매우 작을 확률이라는 뜻이다. 그 결과, R-sq의 값을 95.2%로 구하였다. 반응표면 모형에 대한 적합성을 평가하기 위하여 잔차분석과 분산분석 결정 계수를 이용하였다. 아래의 그림은 반응표면법 분석을 이용해서 각각의 변화량, 발생응력, 안전율에 관하여 표준화 잔차를 보여주는 그림이다.

위의 변화량, 발생응력, 안전율 등의 반응표면법을 이용하여 회귀식을 도출하였다. 이의 경우는 R-sp의 값을 95%이상 만족을 하였을시에⁽⁶⁾, 적용이 되는 식으로 아래와 같이 3가지(변화

량, 발생응력, 안전율)에 관한 식이 나타나있다.

이상의 결과를 바탕으로 2차 다항식을 최소제곱법을 이용하여 구하면 아래의 식과 같다.

$$D = 4.9841 + 0.8981(X1) + 0.9480(X2) + 0.8894(X4) - 0.3642(X2^2) - 0.5887(X4^2) + 0.3875(X1 * X2) \quad (1)$$

$$D = 49.065 - 7.015(X1) - 4.998(X2) - 8.702(X4) + 4.412(X1^2) + 10.966(X2^2) + 7.437(X4^2) \quad (2)$$

$$D = 49.065 - 7.015(X1) - 4.998(X2) - 8.702(X4) + 4.412(X1^2) + 10.966(X2^2) + 7.437(X4^2) \quad (3)$$

(1) 변화량, (2) 발생응력, (3) 안전율에 관한 식이다.

위에서 보는 바와 같이 실험계획법을 통하여 도출한 인자 3개(X1, X2, X4)를 기준으로하여 정당한지 반응표면법을 이용하여 검증을 하여 회귀식을 도출하여서 검증을 하였다⁽¹¹⁾.

따라서 이번에는 그 주요 인자들을 기준으로 하여 중심합성법을 실시하였다. 이것의 경우 실험의 반복횟수는 1번으로 하고, 요인수는 3으로 선정을 하여 실시하였다.

마지막으로 Table 4의 결과값을 기준으로 하여 중심합성법을 실시하였다. 중심합성법을 실시한 결과 아래의 Fig. 9와 같이 나타내었다.

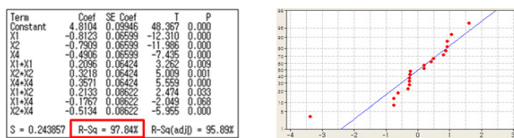
중심합성법을 실시한결과 반응변수의 최적의 값의 경우 X1의 경우 540.6662, X2의 경우 157.7202, X3의 경우 62.66로 선정이 되었다.

따라서 초기값의 분석결과와 중심합성법을 이용한 분석결과를 아래의 Table 5와 같이 비교분석을 하였다.

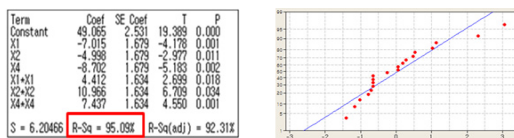
Table 5에 나온 최적화값 (X1, X2, X3, X4)의 결과값을 가

Table 4 Simulation Result

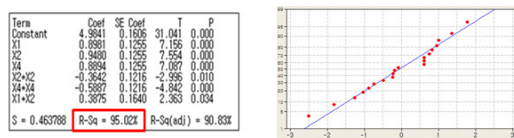
	X1	X2	X3	Stress [Mpa]	Deformation [mm]	Safety factor
1	502	130	10	136.960	5.4264	1.8285
2	542	130	10	168.510	5.9878	1.4836
3	502	130	50	56.985	5.0634	4.3871
4	502	170	50	48.796	4.7894	5.1234
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	522	150	30	60.836	5.2669	4.1094
18	489.34	150	30	62.241	4.9276	4.0166
19	554.66	150	30	71.660	5.7378	3.4887
20	522.00	150	-2.66	56.258	6.0502	4.4438



(a) 변화량(Deformation)



(b) 발생응력(Stress)



(c) 안전율(Safety factor)

Fig. 8 (a) Deformation
(b) Stress
(c) Safety factor

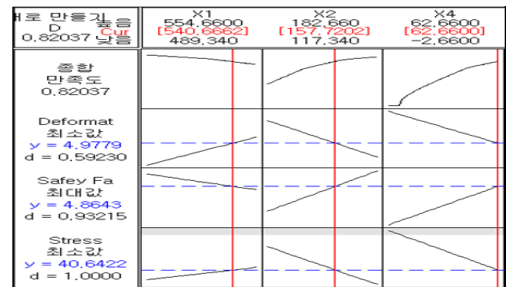


Fig. 9 Optimal conditions results from MINITAB

Table 5 Comparison of the optimal value and the initial value

	X1	X2	X3	X4
Initial value	522	130	30	30
Optimize value	540.6662	156.7202	30	62.66

지고 다시 변화량, 발생응력, 안전율에 관련하여 분석을 실시하였다.

아래의 Table 6에 나타난 바와 같이 변화량, 안전율은 하향이 되었으며, 안전율의 경우는 상향이 되었던 것을 확인할 수가 있다.

위의 Table 6을 보면 확인할수 있듯이, 변화량의 경우 26%, 발생응력의 경우 28.8% 하향되었으며, 안전율의 경우는 40.4%가 상향되었다는 것을 확인 할 수가 있었다.

마지막으로 지금까지 최적화 과정을 진행하여 중심합성법을 통하여 측정된 결과값을 기준으로하여 용접장치에 실제 적용을 한 후에, 또한 용접 방법WPS를 적용을 한 값을 실시하였다. WPS의 경우 아래의 Table 7에 표시되어 있다.

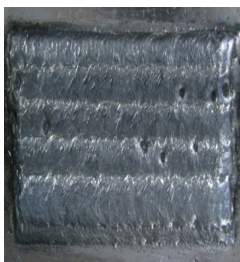
아래의 Fig. 10 경우는 최적값과, 용접조건을 적용하여 실질적으로 용접을 진행을 하였다.

Table 6 Comparison of initial design with optimal design

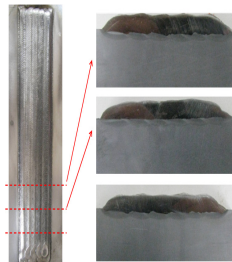
	Value		Improvement Rate
	Before Optimization	After Optimization	
Deformation	6.3986	4.7036	26% (decrease)
Stress	87.169	62.087	28.8% (decrease)
Safety Factor	2.868	4.0266	40.4% (increase)

Table 7 Welding condition

Power	LINCOLN POWER WAVE 455M
WFS	660cpm
Frequency	140Hz
CTWD	22mm
Welding Speed	35cpm
Oscillation Freq.	2.5Hz
Shielded gas	70%Ar-26%He-4%CO ₂ 25l/min
Interpass temp	150℃



Before Optimization



After Optimization

Fig. 10 Welding quality

5. 결론

본 연구는 Overlay육성 자동화 용접장치 시스템에서의 변화량, 주응력, 안전율 등을 향상시키기 위한 조건등을 최적화시키기 위한 연구이다.

- (1) MINITAB을 이용하여 주요인자를 파악한 후에, 반응표면법을 실시하여 변화에 대한 회귀식과 잔차를 분석하여 최적의 변수조건을 찾아내었다.
- (2) 실제시스템에 적용을 한 결과, 변화량 26%, 주응력 28.8%, 안전율 40.4% 향상된 결과값을 얻을수 있었다.
- (3) 최적값을 용접시스템 실시결과 향상된 용접품질을 얻을수 있었다.
- (4) 안전율이 3이상인 것을 만족하였다.

후 기

이 연구에 참여한 연구자의 일부는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

이 논문은 지역산업 기술개발 사업 “Overlay 용접기술을 이용한 해양플랜트용 난형상 이형관 개발에 관한 기술/제품 개발”과제 수행연구에 의한 것입니다.

References

- (1) Ha, H. J., Kim, N. G., Jo, S. M., and Jung, J. S., 2011, *Overlay Welding by Pulse MIG Welding with Inconel 625 for Marine Crube Oil Extration Pipe Inside*, Bukyong National University, Republic of Korea.
- (2) Kim, J. M., 2008, *CUP(Customer Usage Profiling)-based Stochastic Design Technique using DOE(Design of Experiment)*, Changwon National University, Republic of Korea.
- (3) Lee, D. H., 2010, *Process Optimization Approached by Design of Experiment Method for Ga-doped ZnO Thin Films*, Mokwon University, Republic of Korea.
- (4) Lee, S. B., 2010, *The Development of Taguchi and Response Surface Method Combined Model*, SuKyeong University, Republic of Korea.
- (5) Kim, J. M., 2010, *Application of Response Surface Method for Optimal Transfer Conditions of MLCC Alignment System*, Chanwon Navtional University, Republic of Korea.
- (6) Lee, D. H., 2010, *Process Optimization Approached by Design of Experiment Method for Ga-doped ZnO Thin*

- Films*, Mokwon University, Republic of Korea.
- (7) Budinski. K. G., 1988, *Surface Engineering for Wear Resistance*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ Inc.
- (8) Choi, S. D., Jung. S. H., and Kim. K. M., 2007, "A Study on the Mechanical Properties and Wear Properties of Overlay Welding Material," *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, pp. 228~233.
- (9) Bak, Y. L., Jung, J. Y., and Ahan, S. H., 1997, "Trend of the Weld Surfacing Technology," *Journal of KWS*, Vol. 15. No.5, pp. 11~20.
- (10) Kim, Y. S., 2012, "A Study of Optimal Design for Mg Armrest Frame by using Response Surface Method," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 21, No.5, pp. 797~804.