

PT를 이용한 파이프내면 육성용접부 표면결함 진단시스템 개발에 관한 연구

노태정
동명대학교 메카트로닉스공학부

A Study on the Development of Diagnosing System of Defects on Surface of Inner Overlay Welding of Long Pipes using Liquid Penetrant Test

Tae-Jung Lho

School of Mechatronics Engineering, Tongmyong University

요 약 액체침투탐상법(PT)을 이용한 직경 1 m, 길이 6 m의 초장대형 파이프내면 육성용접부의 표면결함 진단시스템을 개발하였다. 우선 CATIA를 사용하여 주요 유닛 및 PT machine 전체를 3D 모델링하였으며, 이를 구조강도 및 변형 해석에 사용하였고 또한 각 유닛의 동작 간섭현상을 체크하여 2차원 제작도면 생성으로 제작에도 사용하였다. ANSYS를 사용하여 구조강도 해석 및 변형 해석한 결과, 최대 등가응력은 44.901 MPa 발생하였고, 이는 PT machine의 재질인 SS400의 항복인장강도 200 MPa 보다 작으므로 안전하다고 판단되며, 또한 최대 변형은 0.15 mm 발생하였고, 이는 하중이 제거되면 원래대로 돌아간다고 판단된다. 개발된 장비의 성능을 검증하기 위하여 공작물의 최대이동속도 7.2 m/min., 최대회전속도 9 rpm, 반복 위치정밀도 1.2 mm, 검사속도 1.65 m²/min. 등을 확인하였으며, 이 모든 검사 항목은 개발 목표치를 만족하였다. ASME SEC. V&VIII의 방법에 따라 육성용접층의 균열, 기공, 인더컷 등의 표면결함 유무를 확인하기 위하여 개발한 PT 자동검사시스템을 사용하여 PT검사를 실시한 결과, 표면층의 결함은 관찰되지 않았다. 부가적으로 육성용접부를 평가하기 위하여 ASTM G48-11의 방법으로 Ferric Chloride pitting test에 따라 육성용접층의 부식시험을 실시한 결과 weight loss는 0.3 g/m²로 만족하였으며, 또한 ASTM A751-14의 방법에 따라 육성용접층의 화학성분을 분석 결과 모든 성분이 규격을 만족하였다.

Abstract A system for diagnosing surface defects of long and large pipe inner overlay welds, 1m in diameter and 6m in length, was developed using a Liquid Penetrant Test (PT). First, CATIA was used to model all major units and PT machines in 3-dimensions. They were used for structural strength analysis and strain analysis, and to check the motion interference phenomenon of each unit to produce two-dimensional production drawings. Structural strength analysis and deformation analysis using the ANSYS results in a maximum equivalent stress of 44.901 MPa, which is less than the yield tensile strength of SS400 (200 MPa), a material of the PT Machine. An examination of the performance of the developed equipment revealed a maximum travel speed of 7.2 m/min., maximum rotational speed of 9 rpm, repeatable position accuracy of 1.2 mm, and inspection speed of 1.65 m²/min. The results of the automatic PT-inspection system developed to check for surface defects, such as cracks, porosity, and undercut, were in accordance with the method of ASME SEC. V&VIII. In addition, the results of corrosion testing of the overlay weld layer in accordance with the ferric chloride fitting test by the method of ASME G48-11 indicated that the weight loss was 0.3 g/m², and met the specifications. Furthermore, the chemical composition of the overlay welds was analyzed according to the method described in ASTM A375-14, and all components met the specifications.

Keywords : Automatic PT inspection system, Deformation analysis, Diagnosing surface defects, Liquid Penetrant Test(PT), Overlay welding, Structural strength analysis, 3D modeling

이 논문은 2018학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.(2018F034)

*Corresponding Author : Tae-Jung Lho(Tongmyong Univ.)

Tel: +82-51-629-1533 email: tjlho@tu.ac.kr

Received July 11, 2018

Revised (1st August 20, 2018, 2nd September 10, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

각종 육.해상 플랜트용 파이프나 압력용기 등은 효율성 향상을 위하여 점차 대형화되고 있으며, 고온 및 고압, 부식 등의 가혹한 조건에서 사용되고 있다. 최근 들어 새로운 용접금속의 개발과 용접기술의 발달로 건전성과 경제성을 동시에 만족시킬 수 있도록 우수한 기계적 특성을 갖는 탄소강 및 저합금강 내부에 요구되는 특성에 맞는 용접재료를 육성 용접하여 내열 및 내압, 내식성을 증대시키는 방법이 사용되고 있다.

용접금속 및 모재에서의 균열은 국부응력이 재료의 극한강도를 초과할 때 발생되고 균열은 일반적으로 용접부 및 불연속 부근, 용접 설계와 관련한 단면 크기나 형상이 급격히 변하는 노치 부근에서의 응력 확대와 관련되어 있다. 이와 같은 원인에서 발생하는 균열의 종류에는 대부분의 금속이 용융 후 응고 시에 2~5%의 체적 수축이 일어나고, 또한 용접부가 국부적으로 가열 냉각되기 때문에 인장력으로 인한 고화균열(solidification cracking), 경화성 페라이트계 강을 용접할 때 발생하는 균열로써 용접 중에 발생하는 것이 아니라 용접 후 상당 시간 후 발생하는 수소균열(hydrogen cracking) 또는 지연균열(delayed cracking), 층상터짐(lamellar tearing), 후열처리 균열(reheating cracking) 등이 있다.

제품 속에 균열 및 기공 등의 결함이 있을 경우, 파괴해서 검사하면 그 유무를 확인할 수 있으나, 이러한 파괴 검사는 낭비가 많아 모든 제품을 검사하는 곳에는 적합하지 않다. 제품을 파괴하여 발생하는 낭비를 줄이기 위하여 금속/비금속 재료, 부품, 설비, 구조물을 손상 없이 평가하는 비파괴 기술은 소재나 제품의 생산공정 중 또는 최종 제품의 결함 유무를 판단하기 위하여 널리 사용되고 있으며, 액체침투탐상(liquid Penetrant Testing: PT), 방사선투과(RT), 초음파탐상(UT), 자분탐상(MT), 와전류(ECT) 비파괴 검사 등이 주로 이용되고 있다.

특히, PT는 금속표면의 결함 유무를 비파괴 검사하는 방법으로 제품 표면의 균열, 핀홀 등으로 표면이 열려있는 결함이 있는 제품의 표면에 침투액을 도포하면, 침투액은 모세관현상에 의하여 결함 속으로 침투하고 침투액이 침투할 수 있는 충분한 시간이 경과되면 표면의 침투액을 제거한 후 현상액을 도포함으로써 수 μm 의 미세한 결함도 육안으로 확인할 수가 있다. 이 방법은 다른 비파괴검사 방법에 비해 검사 속도가 빠르고 경제적이며, 모

양과 크기, 재질에 관계없이 거의 모든 재질의 제품에 적용이 가능하다. 복잡한 형상의 제품이라도 한 번의 조작으로 전체의 탐상이 가능하고, 결함의 방향에 관계없이 어떤 방향의 결함이라도 탐상이 가능한 검사 방법으로 공정 중이나 최종 제품의 검사에 가장 널리 사용되고 있다.

맞대기 용접부에 대한 비파괴 검사는 주로 RT를 실시하고 있으나, 육성용접 파이프의 경우 미국석유협회 API(American Petroleum Institute) 및 세계 최대 석유생산회사 ARAMCO(Arabian-American Oil Co.), ADCO(Abu Dhabi Company for Onshore Oil Operations), Petrofac 등의 제품 검사 규격에서는 육성용접부의 표면에 대한 신뢰성을 확보하기 PT를 실시하도록 규정하고 있다.

이에 대하여 W. J. Chung은 초장대형 파이프의 내면 육성용접 자동화 장치 개발에 관한 연구를 했으며[1], T. J. Lho는 볼밸브용 볼의 로봇 육성용접 자동화시스템을 개발하였으며[2,3], 또한 전자내시경을 활용한 공압실린더 튜브 내면의 자동 결함검사시스템을 개발하였다[4]. 그리고 C. Y. Kang은 마찰교반접합에서 PT를 사용하여 접합표면의 결함유무를 판독하는 연구를 진행하였으며[5], 또한 B. W. Lee는 ERW 강관의 홈 부식에 대하여 PT를 사용하여 결함유무를 판독하는 연구를 진행하였다[6].

본 연구에서는 육성용접부의 품질 확보를 위한 PT 자동검사시스템은 기존의 검사 방법의 정확도와 신뢰도를 향상시키는 측면과 검사 시간을 단축시키는 측면을 고려하여 실시간으로 검사자가 결함 위치, 크기 등을 확인할 수 있도록 한다.

2. PT 자동검사시스템 개발

2.1 PT Machine의 3D 모델링

전체 PT machine 개발시스템의 주요사양은 Table 1과 같으며, 크게 베이스부, 이송부(carriage), 회전부, 상하강부로 구성된다. 이송부는 공작물인 파이프를 최대 7 m/min. 속도로 이송하며, 회전부는 파이프를 최대 7 rpm으로 회전하며, 상하강부는 최대 150 mm의 스트로크를 가진다. 공작물인 파이프는 외경이 200~1,000 mm이며, 길이는 1,300~6,000 mm이며, 하중은 최대 10,000 kg이다.

PT machine 제작을 위하여 우선 CATIA를 사용하여

각종 주요 유닛 및 전체 시스템에 대한 3D 모델링을 실시하여 구조강도 해석 및 변형 해석에 사용하였고, 또한 2차원 제작 도면 생성으로 각종 동작 간섭현상을 체크하여 제작에도 사용하였다.

Table 1. Main specifications of PT machine to be developed

item	Specification
pipe workpiece	D: 8~42“(200A~1,000A) L: 1,300~6,000 mm Weight: Max. 10,000 kgf
turning unit	Max. 7 rpm
carriage moving unit	Max. 7 m/min.
up-down unit	Max. 150 mm(stroke)

베이스부는 바닥과 고정되어 바퀴부가 움직일 수 있게 해주는 레일이 장착되어 있고, Fig. 1과 같이 모델링하였다.

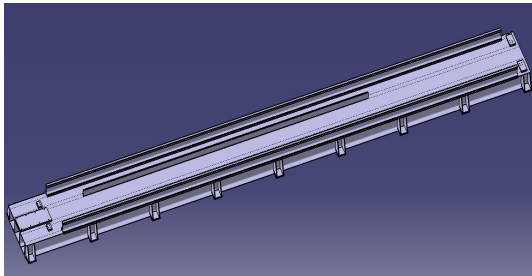


Fig. 1. 3D modeling of the base unit

카메라부는 베이스부에 연결되며 카메라를 파이프 내부에 넣기 위해 긴 봉으로 이루어져 있다. 카메라부는 베이스부와 나사로 결합되기 때문에 나사 간격에 주의하며 설계하였다.

이송부는 레일 위에서 움직일 수 있게 하는 바퀴와 모터 등을 올려놓는 판, 그리고 머리 롤러부와 연결되는 축이 있는 부분으로서, Fig. 2와 같이 모델링을 진행하였다.

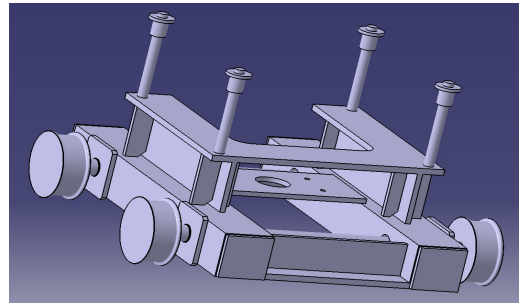


Fig. 2. 3D modeling of the carriage unit

머리 롤러부는 파이프를 받쳐주는 롤러부와 롤러를 움직이게 할 수 있는 받침대로 구성되어 있다. 롤러 부분은 축에 장착되어 좌우로 움직일 수 있게 설계되어 있으며, Fig. 3와 같이 3D 모델링하였다.

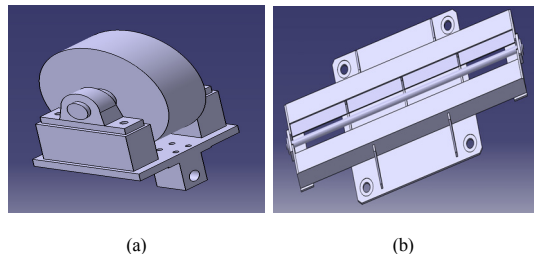


Fig. 3. 3D modeling of the roller(a) and its support(b)

Fig. 4와 같이 각각의 파트별로 조립하여 기계부 전체를 모델링 하였다. 3D 모델링 과정 중 2D 도면에 대한 문제점을 발견되지 않았고, 각 부품별의 간섭도 발견되지 않았다.

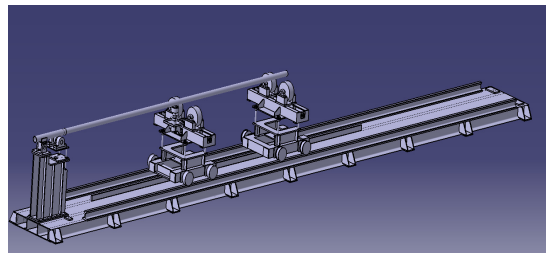


Fig. 4. 3D modeling of the PT machine

2.2 PT Machine의 구조강도 및 변형 해석

파이프 무게는 머리 롤러부에 있는 4개의 롤러에 작용한다. 3D 모델링을 기본으로 ANSYS를 사용하여 이송

부, 베이스부를 포함한 모든 PT장치에서 발생하는 응력 및 변형을 알아보았다.

하중은 10,000 kg_f로 가정하여 해석을 진행하였다. PT 기계부의 재질은 탄소 함량이 0.2~0.3%이며 일반구조용강인 SS400이며, 그 주요 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2. Physical properties of SS400

Density(kg/m ³)	7,860
Young's Modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.23
Tensile Yield Strength(MPa)	200
Tensile Ultimate Strength(MPa)	470

우선 Fig. 5와 같이 머리 롤러부 및 바퀴부인 이송부에 대한 메시를 생성하였으며, nodes의 수는 132,930개이고 elements의 수는 75,442개이다.

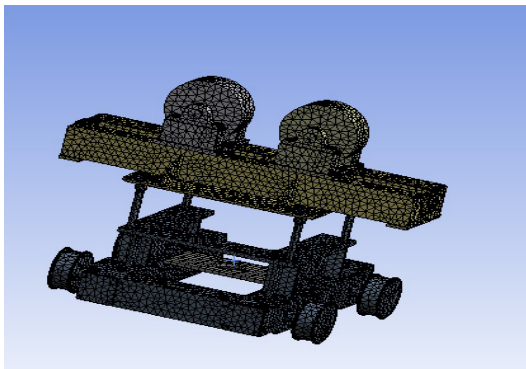


Fig. 5. Mesh generation of the carriage unit

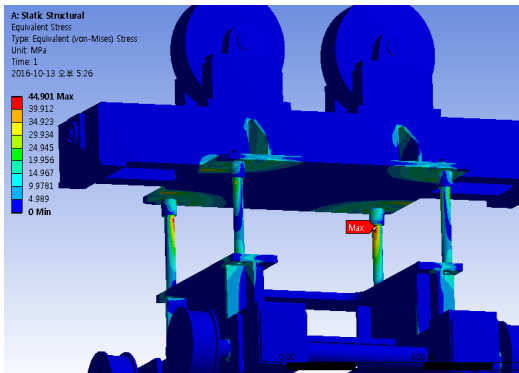


Fig. 6. Equivalent stress analysis on carriage unit under 10,000 kg_f

해석한 결과, Fig. 6과 같이 최대 등가응력은 바퀴부의 축 및 지지대 부근에서 44.901 MPa 발생하였고, 이는 PT 기계의 재질인 SS400의 항복인장강도(tensile yield strength) 200 MPa보다 작은 수치이므로 안전하다고 판단된다.

Fig. 7과 같이 최대 변형은 롤러를 받치고 있는 판에서 0.15 mm 발생하였고, 이는 응력 해석상 탄성변형이 발생하므로 하중이 제거되면 원래대로 복귀한다고 판단된다.

베이스부는 공작물인 파이프와 파이프를 이송하고 회전하는 캐리지를 지탱하는 것으로서, Fig. 8과 같이 PT 기계부 전체에 대하여 메시를 생성하였으며, 그 nodes 수는 839,257개, elements 수는 449,600개이다.

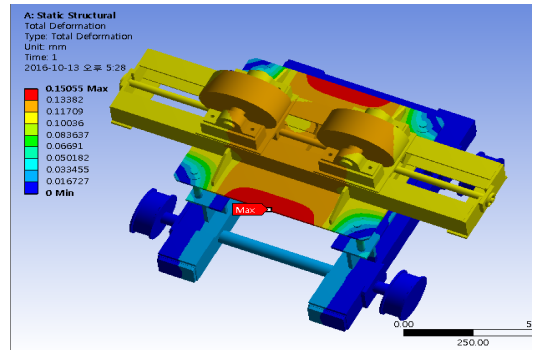


Fig. 7. Deformation analysis of carriage unit under 10,000 kg_f

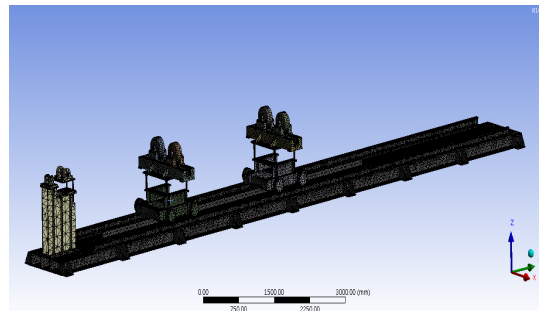


Fig. 8. Mesh generation of the PT machine

해석한 결과로서 Fig. 9와 같이 레일부의 최대 등가응력은 긴 축 부위에서 41.505 MPa이 발생하였고, 이는 PT 장치의 재질인 SS400의 항복인장강도 보다 작으므로 안전하다고 판단된다.

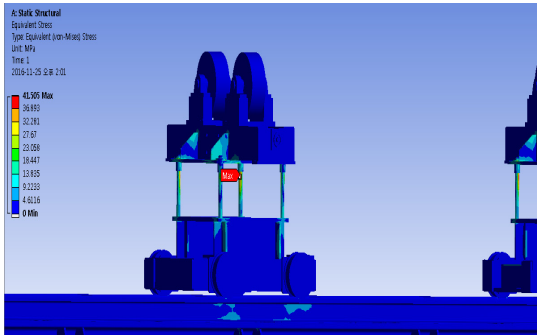


Fig. 9. Equivalent stress analysis on PT machine under 10,000 kgf

Fig. 10과 같이 최대변형은 머리 롤러부 받침에서 0.15 mm 발생하였고, 이는 탄성변형이므로 10,000 kgf 하중조건에서는 안전성이 있다고 판단된다.

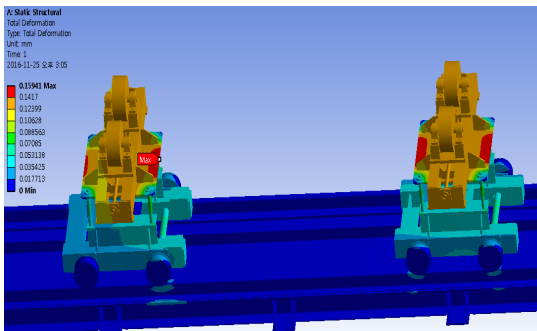


Fig. 10. Deformation analysis of PT machine under 10,000 kgf

2.3 PT 자동검사시스템 개발

Fig. 11과 같이 Weld-i 1000모델의 CCD 카메라를 사용하여 PT 모니터링시스템을 구성하였으며, CCD 카메라의 크기는 1인치 직경과 3.3인치 길이를 가지며, 렌즈는 18 mm, 초점거리는 90~200 mm로서 초점 조절이 가능하고, 열 보호필터를 장착하였다.



Fig. 11. Appearance of the CCD camera used

Fig. 12와 같이, 공작물인 파이프의 외경이 200~1,000 mm이며, 길이는 1,300~6,000 mm인 초장대형 파이프 내면의 육성용접부의 표면을 1.65 m²/min의 검사속도로 PT 결함검사를 할 수 있는 PT 자동검사시스템을 개발 완료하였다.



Fig. 12. Appearance of the developed PT inspection system

3. PT 자동검사시스템 성능시험 및 PT 결함검사

개발 완료된 장비의 성능을 검증하기 위하여 한국조선해양기자재연구원에서 입회하였으며, 검사항목은 수평이동속도, 회전속도, 반복정밀도, 검사속도 등을 확인하였다. 그 시험 결과는 Table 3에서와 같으며, 모든 검사 항목은 개발 목표치를 만족하였다.

Table 3. Results of performance test for the developed PT machine

items	unit	targets	results
moving speed	m/min	7±0.5	7.2
rotating speed	rpm	7±0.5	max. 9
repeatability accuracy	mm	±1	1.2
inspection speed	m ² /min	1.5	1.65

ASME SEC.V&VIII의 방법[7]에 따라 육성용접층의 균열, 기공, 인더컷 등의 표면결함 유무를 확인하기 위하여 Fig. 13과 같이 개발한 PT 표면결함 검사시스템을 사용하여 PT 결함검사를 실시하였다. 검사 결과 표면층의 결함은 관찰되지 않았다.

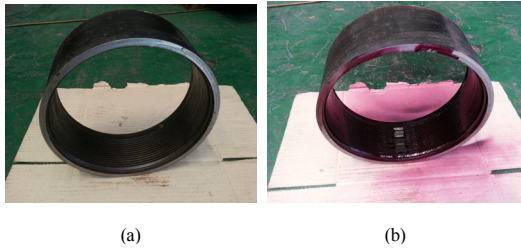


Fig. 13. Specimen of before(a) and after(b) PT inspection

개발한 PT 검사시스템을 사용하여 상세한 PT검사 보고서는 Photo. 1과 같다.

부가적으로 육성용접부를 평가하기 위하여 ASTM G48-11(Method A)의 방법[8]으로 Ferric Chloride pitting test에 따라 weight loss 및 pitting 존재 유무에 대하여 육성용접층의 부식시험을 실시하였다. 시험환경은 시험온도 15±1℃, 시간은 24시간으로 하였다. Fig. 14와 같이 부식시험 결과 weight loss는 0.3 g/m²로 개발목표인 1 g/m² 보다 적게 나타났으며, 육안으로 pitting은 관찰되지 않아 만족스러운 결과를 얻었다.

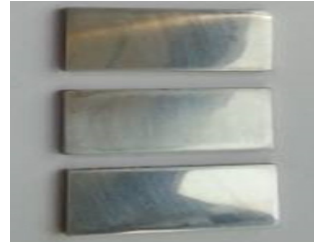


Fig. 14. Result of the pitting test

ASTM A751-14의 방법[8]에 따라 육성용접층의 화학성분을 분석하였다. 분석 결과 모든 성분이 규격을 만족하였으며, Table 4에 분석결과를 자세히 나타내었다.

Table 4. Chemical Properties of STS316L

Prop.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
spec.	0.03	0.30 ~ 0.65	1.0 ~ 2.5	0.03	0.03	11.0 ~ 14.0	18.0 ~ 20.0	2.0 ~ 3.0	0.75
#1	0.018	0.37	2.00	0.024	0.003	12.26	18.53	2.25	0.12
#2	0.019	0.38	1.99	0.023	0.003	12.11	18.64	2.30	0.12

액체침투탐상검사보고서
LIQUID PENETRANT INSPECTION REPORT

KOREA N.P.T.	高麗檢査株式會社 KOREA INSPECTION CO., LTD. 평안남도시 사당구역 갈매동길14-1 T:091313-0395-6, F:091313-0367		외위자 Requester SP HI-TECH CO., LTD.	필수자 Customer N / A
	12" PIPE		재료/두께 Material/Thick. Carbonsteel + 316L / 3mm	도면번호 Dep. No. N / A
표면상태 Surface Condition	As Welded	검사온도 Test Temp.	Ambient (18℃)	조명장치 Illumination equipment INCANDESCENT BULB
원무탐상검사공정 Process of PT	Color Solvent Removal (VC-S)	감도 Sensitivity	□ Heavy ■ Normal □ Light coat	조명도 / 광도 Illumination / Intensity 104SLUX
블랙라이트 Black Light	□ with ■ without	제작자(Maker)	형식(Model)	일련번호(Sr. No.)
침투제 Penetrant	상표 Brand NANO	종류 Type NPP-2	제조번호 Batch No. 15NPP16	적용 Apply
유화제 Emulsifier	상표 Brand N/A	종류 Type N/A	제조번호 Batch No. 15NPP16	적용 Apply
세척제 Remover	상표 Brand NANO	종류 Type NPP-1-3	제조번호 Batch No. 15NPP16	적용 Apply
현상제 Developer	상표 Brand NANO	종류 Type NPD-4	제조번호 Batch No. 15NPD16	적용 Apply
적용규격 (표치서/판정기준) Code/Standard/Procedure	ASME SEC. V 81W OIV.1 APP.8 2015Ed.			
확인 번호 Identification No.	합격 Accept	불합격 Reject	판정 Interpretation	비고 Remarks
12" x 6,000L, Sch.40	V		NO RECORDABLE INDICATIONS.	Q'TY : 4EA
BLANK				
*PT PHASE : AFTER COMPLETION OF THE WELD				
SKETCH ON LINE IF NECESSARY OR □ ATTACHED. 필요시 실선안에 스케치하거나 또는 첨부할 것.				
Inspector by 김사자	일자 Date	2016. 10. 28	보고서번호 Report No.	PT:SRPT-12/P-1610-01
Approved by 김사자	일자 Date	2016. 10. 28	□ Witnessed by	
Form No. PTH-Q (A4 210X297mm) Page 1 of 1 KOREA INSPECTION CO., LTD				

Photo. 1. The PT inspection report for the developed PT system

4. 결론

PT를 이용한 초장대형 파이프내면 육성용접부의 표면결함 진단시스템 개발에 관한 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) CATIA를 사용하여 주요 유닛 및 PT machine 전체를 3D 모델링하였으며, 이를 구조강도 해석 및 변형 해석에 사용하였고 또한 각 유닛의 동작 간섭현상을 체크하여 2차원 제작도면 생성으로 제작에도 사용하였다.
- (2) ANSYS를 사용하여 공작물인 파이프 10,000 kgf의 하중이 작용할 경우, 최대 등가응력은 44.901 MPa 발생하였고, 이는 PT machine의 재질인 SS400의 항복인장강도 200 MPa 보다 작으므로 안전하다고 판단되며, 또한 최대 변형은 0.15 mm 발생하였고, 이는 탄성변형으로 하중이 제거되면 원래대로 복귀한다고 판단된다.
- (3) 개발된 장비의 성능을 검증하기 위하여 공작물의 최대이동속도 7.2 m/min., 최대회전속도 9 rpm, 반복위치정밀도 1.2 mm, 검사속도 1.65 m²/min.

등을 확인하였으며, 이 모든 검사 항목은 개발 목 표치를 만족하였다.

- (4) ASME SEC.V&VIII의 방법에 따라 육성용접층의 균열, 기공, 인더컷 등의 표면결함 유무를 확인하 기 위하여 개발한 PT 자동검사시스템을 사용하여 PT검사를 실시한 결과, 표면층의 결함은 관찰되 지 않았다.
- (5) 부가적으로 육성용접부를 평가하기 위하여 ASTM G48-11의 방법으로 육성용접층의 부식시험을 실 시한 결과 weight loss는 0.3 g/m²으로 만족하였으 며, 또한 ASTM A751-14의 방법에 따라 육성용 접층의 화학성분을 분석 결과 모든 성분이 규격을 만족하였다.

[7] ASME Standards. From: <https://www.asme.org/products/codes-standards/>

[8] ASTM Standards. From: <https://www.astm.org>

노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 정밀기계공 학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성 중공업 기전연구소(수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, 기계 제어 · 자동화

References

- [1] S. W. Jeong, W. J. Chung, J. S. Jung, J. H. Jang, J. H. Bea, "Automated equipment for welding pipe can also nurture inner super-large", *Proc. of The Korean Society Mechanical Engineers Spring Conference*, pp.733-734, 2013.
- [2] J. H. Lee, T. J. Lho, "A study on design and structural strength analysis of positioner in robot overlay welding system of ball for ball-valve", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.3 pp.1639-1644, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.1639>
- [3] J. S. Jang, S. H. Hwang, T. J. Lho, "A Study on Implementation of Robot Overlay Welding System Based on OLP for Ball of Ball Valves", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.12 pp.446-452, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.446>
- [4] T. J. Lho, B. J. Koo, "Development of automatic inspection system of defects on inner surface of pneumatic cylinder-tubes by electronic endoscope", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.6, pp.3376-3382, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.6.3376>
- [5] T. J. Yoon, M. C. Kang, B. H. Jung, C. Y. Kang, "Effect of Welding Condition and Tool Shape on Defect Formation of Extruded AA6005 with Non-uniform Thickness using Load-Controlled Friction Stir Welding Technique", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.12, No.6, pp.45-51, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2013.12.6.045>
- [6] B. W. Lee, J. S. Lee, H. S. Park, "The Effect of Heat Input on Grooving Corrosion Behavior in the Welds of Electric Resistance Welding Steel Pipe", *J. of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol.11, No.3, pp.41-46, 2007.