

주름판 용접 자동화를 위한 토치 회전기구의 개발에 관한 연구

A Study on Development of Torch Rotating Mechanism for Automation of Welding of Corrugated Membranes

배강열^{1,✉}
Kang Yul Bae^{1,✉}

¹ 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)
✉ Corresponding author: kybae@gntech.ac.kr, Tel: +82-55-751-3384

Manuscript received: 2014.9.4 / Revised: 2015.2.3 / Accepted: 2015.2.7

In order to develop an automatic system for welding thin steel plates with curvature such as the corrugated membranes of an LNG storage tank, a rotating mechanism should be firstly designed for the torch to easily follow the weld seam with a constant distance and angle. In this study, a torch rotating mechanism consisting of three circular links, two square-type links and a torch link was proposed for automation of the welding process. A weld-seam tracking system with two axis slides and the proposed rotating mechanism was successfully simulated with a dynamic simulation software. A prototype tracking system was manufactured and a tracking test with the system was then carried out. The test results with tracking system showed that the rotating mechanism could be implemented and it was feasible to be used in automatic tracking of weld seam with curvature.

Key Words: Corrugated membrane (주름판), Weld seam (용접선), Automatic tracking (자동추적), Rotating mechanism (회전기구), Speed control (속력 제어)

1. 서론

LNG (Liquefied Natural Gas) 저장탱크는 탱크 내벽을 스테인리스강 소재의 주름판 (corrugated membrane)으로써 제작하여, 동작 중에 발생하는 큰 열팽창과 수축에 대응하게 된다.¹ 성형된 주름판은 단면이 직선부와 곡선부가 일정한 간격으로 반복되는 형상을 가지며, 이와 같은 주름 구조는 질량관성모멘트를 증가시켜 박판의 굽힘 강성을 확보하게 된다. 탱크의 내벽은 주름판 소재의 측면을 연속적으로 결합하여 제작하게 되며, 결합에

는 용접공정이 적용된다. 주름판과 주름판을 용접이음으로 결합하기 위해서는 작업부재와 용접토치 간의 간격 유지, 토치 각도의 조절 등 용접기술의 정밀성이 요구되는 바, 주로 숙련된 작업자가 TIG (Tungsten Inert Gas) 용접을 이용하여 수작업으로 수행되고 있다. 한편, 이와 같은 공정은 제작의 생산성이 낮고 제품의 품질이 균일하지 못한 문제점을 가지고 있어, 품질과 생산성 향상을 위해서는 해당 공정을 자동화할 수 있는 자동용접장치의 개발과 적용을 필요로 하고 있다.

주름판을 결합하는 용접공정에서는 용접선의

굴곡으로 용접 위치와 방향의 변화가 급격하게 나타난다. 따라서 용접토치의 상하이동과 회전이동이 적합하게 수행되어, 용접위치의 변화에도 불구하고 용접토치의 끝은 해당 위치에 놓여야 하고, 또 용접 토치의 방향이 용접선에 일정한 각도가 유지되도록 회전되어야 한다. 이와 같이 용접선을 자동으로 추적할 수 있는 자동용접장치의 개발을 위해서는 토치의 위치와 방향 조절이 용이하고 적합하게 구현되는 기구의 제안이 선행하여야 한다. 토치 위치 및 방향 조절을 위해서는 특히 중앙 한 점을 특정 위치에 고정된 채로 토치를 회전시킬 수 있는 기구의 개발이 필요로 하나, 기존의 크랭크피스톤 기구나 4 절 기구를 응용해서는 토치 끝이 중심이 되어 토치가 회전하는 기구를 설계하기가 어렵다.^{2,3} 그럼에도 토치의 회전기구를 특별히 제안하여 연구한 사례가 보고되어 있다. 하나의 사례에서는, 중앙에 직선형 링크로 결합된 두 개의 삼각형 링크와 그 좌우 두 개의 직선형 링크로 구성되어, 좌측 직선 링크의 고정피봇에서 모터가 회전 입력을 하여, 중앙 직선 링크에 부착되는 토치를 회전하게 하는 회전 기구를 제안하고 있다.⁴ 그러나 주름판의 경사도에 따라 토치가 수평의 위치까지 회전해야 하는 필요가 있음에도, 링크 간의 간섭 등으로 제안된 기구의 회전각도에는 한계가 존재하는 제약이 있다. 다른 사례에서는, 주행 축과 수직 축 테이블로 구성되고 수직 축 끝단부에 회전 축이 부착된 기구를 제안하고 있다.⁵ 제안된 내용으로는 회전 축의 회전기구에 대한 명확한 파악이 되지 않으나, 용접 위치가 고정된 상태로 토치를 회전하는 기구가 아니라, 토치 상부를 회전시키는 방식으로, 토치 끝이 용접선에 유지되기 위해서는 전체 축을 동시에 동작해야 하는 일반적인 다관절 기구로 판단할 수 있다.⁶ 한편, 제안된 사례들에서는 공히, 주름판 소재는 박판의 레이저 가공면 등 절단면의 정도가 높아, 즉 용접선의 진직도가 매우 높아, 용접 진행 방향으로의 용접선 좌우 오차는 무시할 수 있다고 가정하고 있다.

본 연구에서는 주름판 구조물에서와 같이 높낮이 방향 위치변화와 각도의 변화가 급격한 용접공정에서, 토치의 회전시 토치의 끝단이 변화하지 않아 용접 토치와 용접선과의 거리를 일정하게 유지하고 용접 각도를 일정하게 유지하는 새로운 토치 회전기구를 제안하였다. 제안된 기구에서 동력

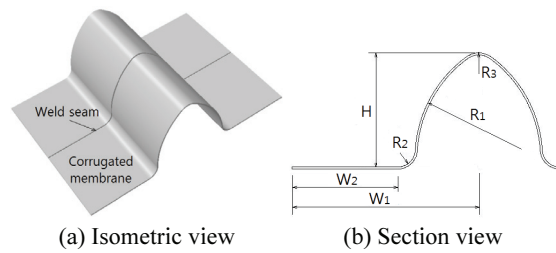


Fig. 1 Typical shape of corrugated membrane

원으로부터 전달된 운동에 의한 중속 링크의 동작 특성을 복소벡터 해석으로써 규명하고자 하였다. 나아가 용접진행 방향에 직각인 좌우로의 용접위치 오차는 없다고 가정하여, 제안된 토치 회전기구를 탑재한 2축의 2차원 용접선 자동추적장치를 제안하고, 이를 동적 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 모델화하고 추적 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 실물의 프로토타입 추적장치를 제작하고 추적시험을 실시하여 제안된 회전기구의 적용성을 검증하고자 하였다.

2. 토치 회전기구의 제안

본 연구에서 고려한 주름판의 전형적 형태를 Fig. 1에서 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 두 주름판 사이의 결합 위치와 용접선을 보여 주고 있고, Fig. 1(b)는 주름판 단면의 특징적 치수를 표시하고 있다.

이와 같은 주름판 용접의 효율적인 자동화를 위해서는, 굴곡진 주름판 위의 다음 용접점과 법선방향이 센서시스템에 의해 측정되면, 그 위치로 토치를 이동하는 이송기구와 이동과 동시에 법선 방향으로 토치가 놓이게 하는 회전기구가 필요하다. 특히, 토치 끝점을 중심으로 토치가 회전하는 기구가 우선적으로 필요하며, 토치 끝점에는 아크가 위치하게 되므로, 토치를 회전하는 운동은 원격으로 전달되어야 한다. 일반적인 3축 또는 4축 기구로는 급격히 변화하는 용접위치와 방향에 대처하기 위하여 각 축이 동시에 대응해야 하므로 정밀한 보간기능이 필요하게 된다.⁶ 이와 같은 대응 기능에 수반되는 제반 문제점을 방지하고 토치와 용접선과의 상대 위치를 일정하게 유지하기 위해서는 토치 끝의 아크를 중심으로 토치가 회전할 수 있는 기구의 적용이 필요하다. Fig. 2는 본 연구에서 제안한 토치 회전기구를 보여 주고 있다.

제안된 회전기구는 고정 링크 1, 디스크 형태

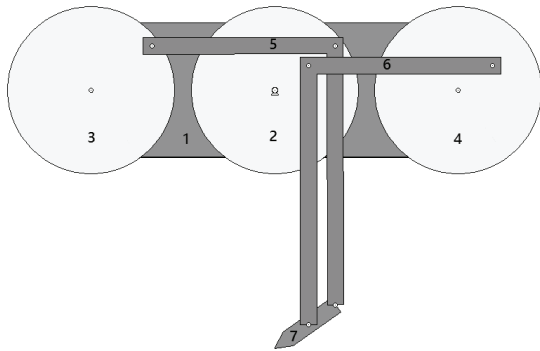


Fig. 2 Torch rotating mechanism

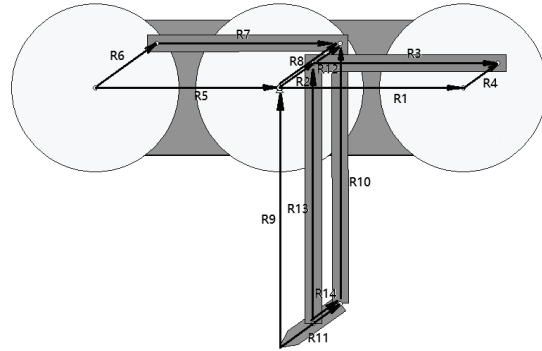


Fig. 3 Complex vector representation of torch rotating mechanism

의 링크 2, 3과 4, 직각자 형태의 링크 5와 6, 그리고 링크 7로 구성되며, 중앙에 회전 동력원을 갖는 링크 2가 입력 링크가 된다. 링크 2, 3과 4는 각각 링크 1에 회전대우로 결합되고, 링크 5는 링크 2와 3에 회전대우로, 링크 6은 링크 2와 4에 회전대우로 결합되며, 링크 7은 링크 5와 6의 하단부에 회전대우로 결합된다. 링크 5의 회전대우는 디스크의 원주 부분에 놓이고, 링크 6의 대우는 동일 반경 방향으로 디스크의 내부에 위치하게 된다. 이 때의 반경방향 길이 비는 45:25로 정하였고, 이 길이 비는 링크 5와 링크 6의 하부 끝이 링크 7내에서 결합되는 위치 비(링크 7의 하부 끝점으로부터의 위치 비)와 동일하다.

링크 2가 반시계 방향으로 회전하게 되면, 링크 5와 6을 동작하게 하여, 링크 7을 동일한 각도만큼 움직이게 된다. 즉, 다른 위치에 놓인 하나의 동력원의 회전으로써, 토치를 토치의 끝을 중심으로 동력원과 동일한 각변위로 회전할 수 있게 하는 기구가 된다. 이때 링크 3과 4는 링크 2와 동일한 각도로 회전하면서 각각 링크 5와 6을 수평상태로 지지하는 역할을 하게 된다. 이로써 링크 7은 하부 끝점이 고정된 위치에서 입력링크와 동일한 각변위를 하게 되는 출력링크가 된다. 용접 토치는 링크 7과 일체로 움직이도록 부착된다. 링크 5와 6의 세로 길이는 입력링크 2의 중심과 용접 위치 사이의 높이 설정에 따라 변화가 가능하며, 이 변화에 따라서는 출력링크의 회전형태가 변화되지 않는다. 링크 5와 6의 가로 길이는, 링크 1의 길이에 따라 다르며, 최소한 링크 7 길이의 2 배 이상이 필요하다. 링크 길이는 아크 형성 지점이 실제의 회전 중심이 되어야 함을 감안하고, 또한 토치 노즐로부터의 후퇴거리도 고려하여 결정

하게 된다. 현재의 7번 링크의 길이는 하부 끝점에 아크가 형성된 것으로 설정한 길이이다.

제안된 기구의 동작이 정상적으로 수행되는지는 운동원에서 전달된 운동에 의해 동일한 운동이 토치에서 수행되는 것으로 증명할 수 있다. 즉, 고정된 위치의 토치 끝을 중심으로 운동원과 동일한 회전운동을 하게 됨을 보이면 가능하게 된다.

제안된 기구의 각 링크에 대응하여, Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 복소벡터(complex vector)로 표현할 수 있다.⁷ 각 복소벡터(R_i)는 크기(r_i)와 편각(θ_i)을 갖는다. 크기는 벡터의 길이이고, 편각은 각변위로, 수평에서 반시계 방향을 양으로 가정한다. 강제로 가정된 모든 링크 길이와 형상은 동작 중 일정하다. 이 기구의 자유도는 1이고, 독립변수(입력변수)는 중앙부 디스크의 회전을 나타내는 θ_8 이고, 이 기구를 표현하기 위해서는 4개의 벡터 루프(loop)가 필요하므로, 각 루프당 2개의 종속변수를 가지게 되어, 총 8개의 종속변수(출력변수)가 존재하게 된다.

복소벡터 해석을 통해, 입력변수 θ_8 의 한 주기 동안의 변화에 따라, 즉 수평 각 0°에서 반시계 방향으로 180°까지 회전하는 동안, 최종 출력변수인 토치 회전각이 입력변수에 동일하게 변화하고, 또 토치 끝이 일정한 위치에 고정되게 됨을 증명하고자 한다. 이로써 토치 끝을 중심으로 하는 회전기구가 될 수 있음을 보일 수 있다. 즉, R_9 가 항상 일정하고, θ_{11} 이 항상 θ_8 과 같음을 보이고자 한다.

루프폐쇄식(loop closure equation)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{루프 1: } R_2 + R_3 - R_1 - R_4 = 0 \tag{1}$$

$$\text{루프 2 : } R_6 + R_7 - R_5 - R_8 = 0 \quad (2)$$

$$\text{루프 3 : } R_8 - R_{10} - R_{11} + R_9 = 0 \quad (3)$$

$$\text{루프 4 : } R_{12} - R_{10} - R_{14} + R_{13} = 0 \quad (4)$$

루프 1에서, θ_2 는 독립변수 θ_8 과 동일한 각변위 이므로, 독립변수라 할 수 있다. r_1, r_2, r_3, r_4 는 각각 일정한 크기이고, $r_1 = r_3, r_2 = r_4$ 이며, θ_1 은 항상 0이다. 따라서 종속변수는 θ_3 과 θ_4 이다. 방정식 (1)을 실수와 허수 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$r_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) + r_3(\cos\theta_3 + i\sin\theta_3) - r_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1) - r_4(\cos\theta_4 + i\sin\theta_4) = 0 \quad (5)$$

기구의 기하학적 조건을 방정식 (5)에 대입하면, 실수 부분은 다음과 같이 구분할 수 있다.

$$r_2 \cos\theta_2 + r_3 \cos\theta_3 - r_1 - r_4 \cos\theta_4 = 0 \quad (6)$$

이를 정리하면,

$$r_3 \cos\theta_3 = r_1 + r_4 \cos\theta_4 - r_2 \cos\theta_2 \quad (7)$$

방정식 (5)에서 허수 부분은 다음과 같이 구분할 수 있다.

$$r_2 \sin\theta_2 + r_3 \sin\theta_3 - r_4 \sin\theta_4 = 0 \quad (8)$$

이를 정리하면,

$$r_3 \sin\theta_3 = r_4 \sin\theta_4 - r_2 \sin\theta_2 \quad (9)$$

방정식 (7)과 (9)의 좌변과 우변의 각각을 제곱한 후, 두 방정식을 더하면, 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\cos(\theta_4 - \theta_2) = 1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)(\cos\theta_4 - \cos\theta_2) \quad (10)$$

여기서 $\theta_4 > \theta_2$ 이거나 $\theta_4 < \theta_2$ 인 경우라면, 두 결과의 좌변의 값은 동일하나, 두 결과의 우변의 크기가 같지 않게 되는 모순이 발생한다. 따라서 $\theta_4 = \theta_2$ 인 결과가 얻어지고, 이를 (3)식에 대입하면, $\theta_3 = 0$ 이 된다. 이는 기구의 동작 주기 내에서 종속변수 θ_4 는 항상 θ_2 와 크기가 같고, 종속변수 θ_3 은 항상 0이 된다는 것을 나타낸다.

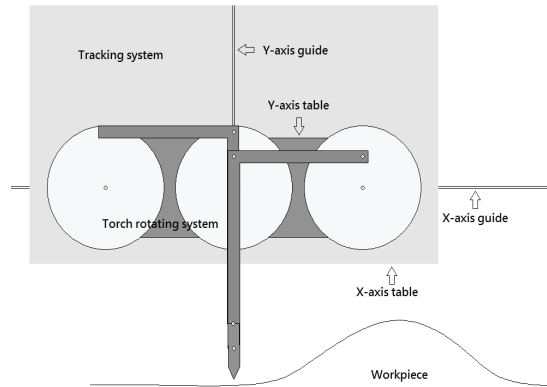


Fig. 4 Simulation model of weld-seam tracking system

동일한 방법을 루프 2에 적용하면, 두 종속변수 θ_6 과 θ_7 은 각각 입력변수 θ_8 과 0의 크기와 동일하게 된다. 루프 4에서, 링크 5와 6은 각각 직각자 모양을 가지고 있고, 루프 1과 2에서 동작 주기 내에서 θ_3 과 θ_7 이 0의 크기를 가지므로, θ_{10} 과 θ_{13} 은 항상 90° 를 유지하게 된다. 따라서 θ_4 는 항상 입력변수 θ_2 의 크기를 갖게 된다. 따라서, 루프 3에서, R_8 과 R_{11} 은 동일한 벡터가 되므로, 방정식 (3)으로부터, R_9 는 R_{10} 가 동일한 벡터가 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 기구의 동작 주기 내에서 r_9 의 크기가 일정하고, θ_9 은 항상 90° 가 유지된다. 이로써 기구의 동작 주기 내에서, 링크 7은 입력변수 θ_2 와 동일한 각도로 회전하게 되고, 링크 하부 끝점은 항상 일정한 위치에 놓이게 된다는 것을 알 수 있다.

3. 용접선 추적시스템 시뮬레이션

제안된 토치 회전기구의 동작특성을 검증하기 위하여, 회전기구를 탑재한 용접선 추적시스템의 동작을 동적 시뮬레이션이 가능한 Working Model 2D프로그램⁸을 이용하여 시뮬레이션(simulation)하였다. 시뮬레이션에서는, Fig. 1에서 보인 바와 같은 형상을 가지며, 치수가 W_1 은 88.5 mm, W_2 는 38.5 mm, H는 54.5 mm, R_1 은 65.4 mm인 주름판⁹을 적용 대상으로 고려하였다.

Fig. 4는 동적 프로그램의 환경에서 구현한 추적시스템의 모델을 보이고 있다. 모델화된 용접선 추적시스템은 x 축 가이드를 따라 병진이동하는 x 축 테이블, x 축 테이블 상에 위치한 y 축 가이드를 따라 병진이동하는 y 축 테이블로 구성되고, y

축 상에는 제안된 토치 회전기구가 위치하게 된다. 작업물은 추적시스템 아래에 위치하고 있고, 임의의 곡선 슬롯으로 표현하였다. 추적시스템의 동작을 시뮬레이션하기 위한 링크의 주요 제원은 다음과 같다. 링크 2, 3, 4의 반경은 50 mm, 링크 2의 중심에서 링크 5와의 회전대우까지는 45 mm, 링크 2의 중심에서 링크 6과의 회전대우까지는 25 mm, 링크 2, 3, 4의 중심간 거리는 110 mm, 링크 5, 6, 7의 폭은 10 mm, 링크 5와 6의 가로 길이는 120 mm, 세로 길이는 195 mm이었고, 링크 7의 길이는 50 mm이었다. 시뮬레이션은 2차원 프로그램을 이용한 바, 각 링크의 두께는 단위 길이인 1 mm로 설정되었다.

작업물을 검지하기 위한 센서는 토치보다 5 mm 앞선 위치에서 작업물의 표면(곡선 슬롯)을 5 mm/sec인 용접속력과 동일한 속력으로 제어되면서 이동하는 블럭으로 모델화하고, 이의 중앙 위치를 측정하였다. 또한, 토치 끝의 위치를 동시에 측정하여, 작업물과 토치 사이의 변위를 계산하였다. 추적시스템의 x 축과 y 축은, 회전기구 중점의 위치 변화와 곡선 궤적 등으로 인한 부하의 변화에도, 일정한 설정 속력을 유지하도록 제어시스템에 의해 각각 축의 추력이 제어되었다.

추적시스템은 x 축을 따라 이동하며, 센서에서 측정되는 용접위치에 따라 x 축과 y 축이 보간된 속력으로 이동한다. 이와 동시에 변위 측정 결과로 계산된 각도에 따라, 토치회전기구가 위치를 제어하여, 용접선에 일정한 각도로 토치가 놓이게 한다. 이와 같은 동적 시뮬레이션은 0.01 sec의 간격으로 수행하도록 하였다. 사용된 디지털 제어시스템은 Matlab에 구현된 바, DDE (Dynamic Data Exchange) 링크를 통해 Working Model과 제어값 등 데이터를 주고 받게 된다. 따라서, Matlab으로 구현된 제어가 제어시스템이 되고, Working Model로 구현된 추적시스템이 모델 플랜트가 된다. 또한 Working Model에서 추적시스템의 출력을 검지하는 모니터링 요소를 구현하였다.

용접위치의 변화를 검지하기 위하여 위치 측정 센서를 활용하였고, 보간 프로그램을 이용하여 구간 내에 위치한 용접부재의 회전각도를 계산하고, 이를 활용하여 진행방향과 높낮이 방향의 보간속도를 결정하였다.

현재 토치의 끝 점(Torch-end position)과 센서가 측정한 작업물 상의 추적점(Sensing position) 사이의 간격이 매우 작다고 가정하면, Fig. 5에 나타낸

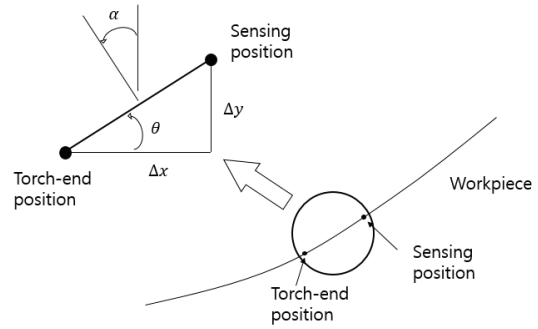


Fig. 5 Linear interpolation between torch-end position and sensing position

바와 같이 두 점 사이를 직선으로 가정할 수 있다. 두 점 사이의 x 방향 거리를 Δx , y 방향 거리를 Δy 라고 두면, 작업물의 기울기는 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)$ 로 계산되고, 작업물과 토치 사이의 각도가 항상 직각으로 유지되어야 한다면, 토치는 용접 경사면에 법선방향으로 위치해야 하는 바, 토치의 위치각 α 는 용접면 경사각 θ 와 동일한 크기가 된다.

따라서, 용접 전에 적정 용접속도 V 가 정해지면, 용접 도중에 센서 및 보간 프로그램에서 결정된 θ 에 따라 x 방향과 y 방향 속력은 다음의 식으로 결정된다.

$$V_x = V \cos \theta \tag{11}$$

$$V_y = V \sin \theta \tag{12}$$

각 축에 설정된 속력을 일정하게 유지하기 위한, 시간영역에서의 비례적분미분(PID)제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{13}$$

디지털 PID제어를 구현하기 위해, 방정식 (13)을 차분방정식의 형태로 근사화하되, T 를 샘플링 시간이라고 하면, n번째 단계에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(nT) = k_p e(nT) + k_i [u[(n-1)T] + \frac{T}{2}(e(nT) + e[(n-1)T])] + \frac{k_d}{T}(e(nT) - e[(n-1)T]) \tag{14}$$

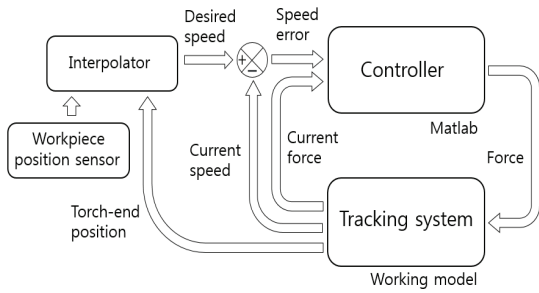


Fig. 6 Flow diagram of control system for the model of weld-seam tracking system

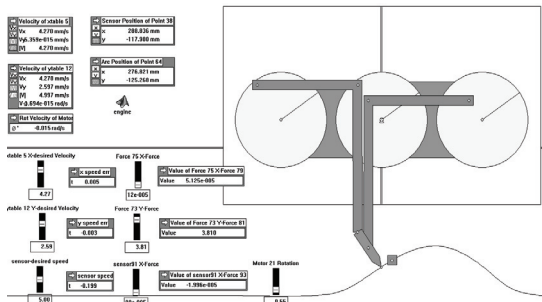
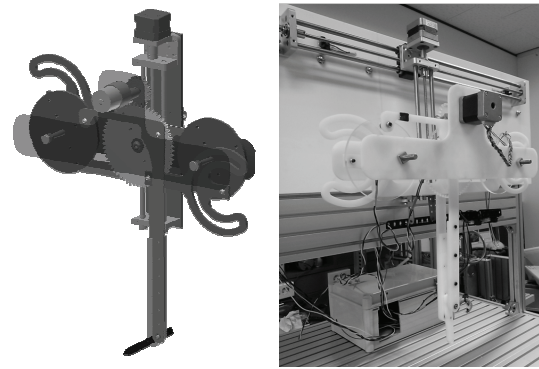


Fig. 7 Tracking simulation of the model of weld-seam tracking system

방정식 (14)의 디지털 제어기는 Matlab 프로그램으로 구현하였고, 시뮬레이션에서 사용된 T 는 0.01 sec, k_p , k_d , k_i 값은 각각, 10, 0.1, 0.8이었다.

시뮬레이션에서 구현한 추적시스템의 동작과 속력을 제어하는 흐름도를 Fig. 6에서 보여 주고 있다. 추적시스템의 동작을 나타내는 Working Model 2D에서는 위치 센서로부터 작업물의 다음 단계 위치와 현재 토치 끝의 위치를 동시에 측정하여, Matlab프로그램으로 구현된 보간기로 입력하고, 현재 각 축의 속도 측정값과 보간기에서 계산된 각 축의 설정 속력과의 차이(error) 그리고 추적시스템의 해당 테이블에 현재 인가되고 있는 추력의 측정값을 각각 Matlab에 구현된 디지털 제어기에 입력한다. 이를 기반으로 하여, 제어기에서는 각 테이블에 다음 단계의 추력을 계산하여 Working Model의 추력 제어값에 인가하게 된다. 회전기구의 회전각도는 보간기에서 계산된 추적각도에 의해 계산되고, 이를 Working Model의 회전각 제어값에 입력하여, 회전위치를 제어하게 하였다.

Fig. 7은 제안된 회전기구를 탑재한 추적시스템이 시뮬레이션 과정에서 동작을 수행하는 형태와



(a) Torch rotating system (b) Tracking system

Fig. 8 Prototype of weld-seam tracking system

이와 관련한 제어 및 모니터링 요소를 나타낸 동적 시뮬레이션 환경을 보이고 있다.

4. 프로토타입 추적시스템 제작 및 추적 시험

제안된 회전기구의 구현 가능성과 동작의 적합성을 실제로 검증하기 위하여 프로토타입의 추적시스템을 제작하였다. Fig. 8에서는 실제 제작된 장치의 도면과 실물을 보여 주고 있다. Fig. 8(a)는 제안된 회전기구와 y 축 테이블을 실제로 구현하기 위한 삼차원 모식도를 보이고 있다. 회전기구에는 모터와 모터축의 기어, 중앙의 기어 링크, 좌우의 디스크 그리고 토치와 토치에 운동을 전달하는 두 개의 직각자형 링크로 구성된다. 특히, 디스크가 90° 회전에 근접하게 되는 경우, 즉 사점 주위에서 직각자형 링크에 운동전달을 용이하게 하기 위하여, 좌우 디스크와 결합부를 곡형 슬롯의 랙으로 설계하였다. 회전기구의 모터에서 발생된 회전운동으로 모터 축 기어가 회전하고, 이에 맞물린 기어 링크에 운동이 전달되어, 직각자형 링크 부, 그리고 토치 링크의 회전 운동이 얻어지게 된다. Fig. 8(b)는 제안된 회전기구와 x 축 및 y 축 테이블로 구성되고, 이를 구동하고 제어하는 장치를 갖춘 프로토타입 추적시스템을 보여 주고 있다. 각 축은 원점을 설정할 수 있도록, 한계스위치를 시작부와 종료부에 설치하였다. x 축의 행정거리는 500 mm, y 축의 행정거리는 250 mm이었다. y 축의 하단부에는 작업물의 높낮이를 측정하는 적외선 센서를 설치하였다. 회전기구의 제작에서는 2번 링크의 동력원인 모터를 상부에 두고, 모터 축에 소형의 기어로써 회전을 전달하게 하였다. 이 때 맞

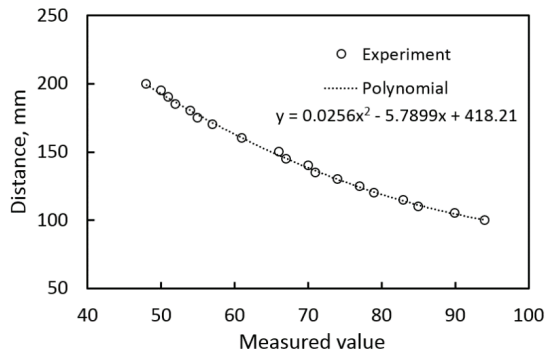


Fig. 9 Distance measured using infra-red sensor between the sensor and workpiece

물리는 링크 2의 원주에는 기어를 형성하였고, 기어 간의 잇수 비는 1대 3으로, 3대 1의 감속비를 갖게 하였다.

병진 이동을 위한 테이블에 적용한 리드스크류의 리드는 2 mm이었고, 각 축의 회전은 스텝각 1.8°인 유니폴라형 스텝모터를 활용하였다. 이 때 병진이동 축의 1 BLU(Basic Length Unit)는 0.01 mm이었다. 각 축의 제어 및 센싱 등 추적시스템의 동작을 위해 원칩 마이컴을 이용하였다. 작업 부재까지의 거리 측정을 위해 적외선센서를 활용하였고, 이는 100~800 mm의 측정이 가능하고, 0~5 V의 아날로그 출력을 낸다. 측정값은 원칩 마이컴의 아날로그디지털 변환 (ADC) 기능을 활용하여 디지털값으로 변환하였다.

적외선 센서를 이용한 높낮이 측정 결과를 Fig. 9에서 보여 주고 있다. 가로축은 센서의 아날로그 출력값을 ADC를 통해 획득한 8비트의 디지털 값이고, 세로축은 디지털 값에 대응하는 센서로부터 작업물까지의 수직거리를 나타낸다. 디지털 값과 실제 높이는 다항식의 관계로 나타내었고, 이를 활용하여, 센서 측정 후, 작업물의 위치를 계산하였다. 작업물의 위치를 감지하기 위한 적외선 거리 측정센서는 x 축 테이블의 하단에 토치 끝보다 일정 길이 앞선 위치에 고정하였다.

주름판의 용접선을 추적하도록 추적장치를 제어하기 위한 흐름도를 Fig. 10에서 보여 주고 있다. 추적이 시작되면, x 축 테이블의 위치정보와 토치에 선행하는 센서로부터 부재의 위치 정보를 얻어, 작업물의 끝을 판단한다. 작업이 끝나지 않았다면, 이를 현재의 토치 위치와 비교하고, 세 축 각각의 위치와 속도보간 값을 계산하게 된다. 용접위치의

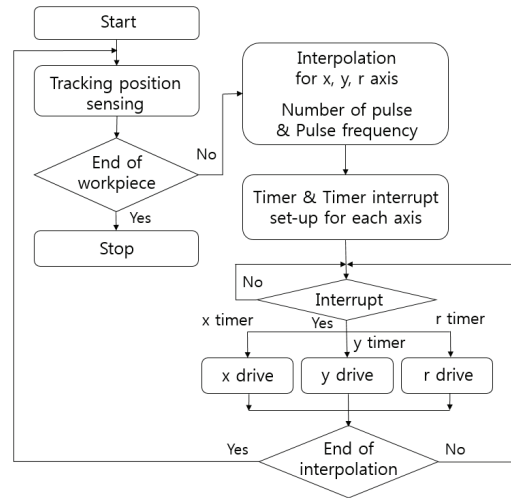


Fig. 10 Flow chart for position and speed controls of weld-seam tracking system

변화를 감지하기 위하여는 적외선 거리측정센서를 활용하였고, 측정된 결과를 활용하여 구간 내에 위치한 용접부재의 회전각도를 계산하고, 진행방향과 높낮이 방향의 보간 속도를 방정식 (11)과 (12)와 같이 결정하였다. 이를 각 모터에 인가할 펄스 수와 펄스 주파수로 환산한다.

각 축에 설정된 속도를 구현하고 세 축의 동시 속도 보간을 위해 타이머와 터미터 인터럽트 기능을 활용하였다. 이를 위해 세 축의 각각에 타이머와 타이머 인터럽트를 할당하고, 각 축에 해당하는 펄스 수에 도달하면 타이머가 인터럽트 신호를 내도록 동작을 설정하였고, 각 인터럽트 서비스루틴에서는 설정된 서비스 회수만큼 해당 축을 구동하게 하였다. 각 축의 인터럽트 서비스가 끝나 보간동작이 완료되면, 다시 위치 센서의 측정값을 읽어 다음 위치로의 추적을 수행하게 된다.

이와 같이 제작된 프로토타입 시스템을 활용하여 추적시험을 실시하였다. 추적시험은, 직경 100 mm의 파이프를 반으로 나누어 최대 높이 50 mm가 되게 하고 이를 평판에 부착하여 제작한 시편을 대상으로 실시하였다. 센서와 토치 사이의 거리를 10 mm, 작업 부재와 센서 간의 최대 거리 200 mm로 두고 추적을 실시하였다. x 방향 추적 거리는 500 mm, y 방향의 안전 거리는 200 mm로 두고, x 축과 y 축의 원점에서 출발하여, 부재 위치로 y 방향 이동을 수행하고, x 방향을 따라 최종 추적위치까지 용접선을 추적하고, 추적 후 y 방향

원점으로 이동 후, 다시 원점으로 회귀하는 작업 사이클을 수행하였다.

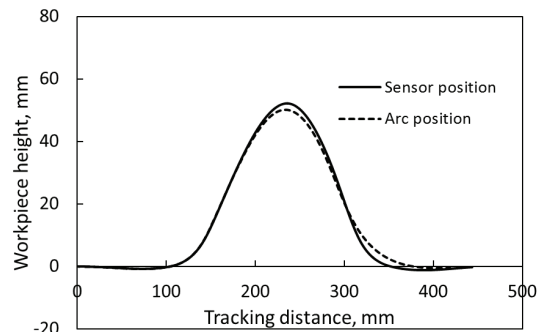
5. 결과 및 고찰

제안된 토치회전기구를 탑재한 용접선 추적시스템의 모델을 이용한 동적시뮬레이션 결과를 Fig. 11에서 보여 주고 있다. Fig. 11(a)에서는 추적시스템이 용접 진행방향으로 이동할 때, 토치의 끝에 놓이는 아크의 위치와 이에 5 mm 간격으로 앞선 센서의 위치 변화를 각각 나타내고 있다. 모델에서 센서는 정확한 작업물의 위치를 나타낸다고 할 수 있으므로, 센서 위치 측정 결과로부터 작업물의 형상과 높이를 파악할 수 있다. 용접선의 추적이 대략 450 mm 정도 수행되는 과정에서, 작업물의 곡선부가 약 250 mm에 해당하고, 최고 높이는 약 50 mm임을 보여 주고 있다. 토치의 끝에 위치한 아크는 최고 높이 근처와 곡선부가 종료되는 부분에서는 다소 추적 정도가 낮게 나타나나, 전반적으로 작업물의 형태를 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 이는 각 축의 속도 보간과 토치의 회전이 작업물의 형태에 따라 적합하게 수행된 결과로 판단할 수 있다.

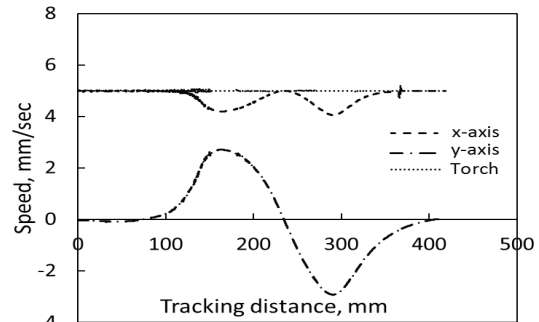
Fig. 11(b)는 추적시스템의 시뮬레이션에서, 토치가 5 mm/sec의 용접선 추적속도를 얻기 위해 x와 y의 각 축에 설정되는 보간 속력을 보여 주고 있다. 보간 속력은 용접 작업물의 경사도를 계산하여 얻어지므로, 작업물의 경사가 급한 구간에서 y 방향 속력이 크게 증가되고 있으며, x 방향 속력은 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 경사의 기울기가 반대가 되면, y 방향 속력은 음의 값으로 나타나게 되며, 이는 토치가 아래 방향으로 이동하고 있음을 의미한다.

Fig. 11(c)는 용접선 추적 시뮬레이션에서 나타나는 토치의 회전각 변화 결과를 보여 주고 있다. 주어진 작업물 표면에 대하여 토치는 시계 방향으로 최대 약 30° 정도 기울여 짐을 알 수 있고, 반대편 경사면에서는 반시계 방향으로 회전이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

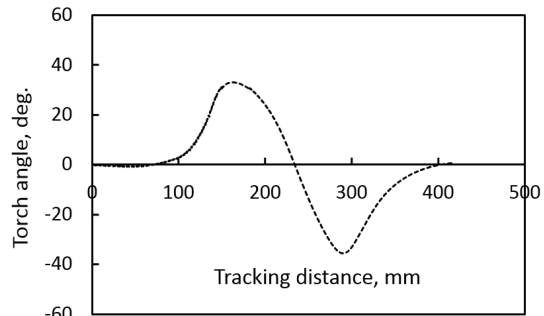
프로토타입으로 제작된 추적시스템을 이용한 추적시험은 반경이 50 mm인 반원의 부재를 대상으로 실시하였다. 추적 시험 결과, 시뮬레이션에서 나타난 결과와 유사하게, 토치의 끝이 반원의 윤곽에 수직을 유지하며, 용접선을 잘 추적하는 것을 확인하였다.



(a) Measured and tracked positions



(b) Interpolated and absolute speeds



(c) Tracked torch angles

Fig. 11 Controlled positions and speeds of the tracking system along tracking distance

6. 결론

주름판과 같이 곡률을 가지고 있는 작업물의 용접을 용이하게 자동화하기 위하여 토치의 회전기구를 제안하고, 해석적 방법으로 기구의 동작을 검증하고, 모델과 프로토타입의 용접선 추적장치에 탑재하여 적용성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 복소벡터해석을 적용하여 토치 회전기구를 검증한 바, 원격에 놓인 동력원으로써, 토치가 고

정된 위치에 놓인 끝점을 중심으로 회전하게 되는 운동을 실현하는 것이 가능하였다.

(2) 토치 회전기구를 탑재한 용접선추적시스템 모델의 동적 시뮬레이션에서, 위치센서의 형상 파악과 속도보간의 적용으로, 추적시스템은 토치 끝을 용접선에 일정한 간격으로 유지하였다.

(3) 토치 회전기구를 활용하여, 토치가 용접선에 항상 직각을 향하면서, 용접선을 일정 속력으로 추적할 수 있었다.

(4) 프로토타입의 용접선추적시스템을 제작하고 이를 적용한 용접선 추적시험에서, 토치회전기구의 실질적 구현이 가능하였고, 토치회전기구의 동작이 용접선 추적에 적합하게 수행되었다.

후 기

이 논문은 2014년도 경남과학기술대학교 기성회연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kim, S. W., Lee, S. W., and Lee, J. N., "Finite Element Analysis of the Corrugated Membrane of LNG Storage Tank for its Geometric Design," Proc. of the KSPE Autumn Conference, pp. 620-624, 1997.
2. Wilson, C. E. and Sadler, J. P., "Kinematics and Dynamics of Machinery," Prentice Hall, 3rd Ed., pp. 27-82, 2003.
3. Erdman, A. G., Sandor, G. N., and Kota, S., "Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Vol. 1," Prentice Hall, pp. 588-632, 2002.
4. Yu, J. Y., You, W. S., Na, S. J., Kang, G. H., and Han, Y. S., "A Study on Development of Automatic Welding System for Corrugated Membranes of the LNG tank," J. of Korean Welding Soc., Vol. 14, No. 1, pp. 99-106, 1996.
5. Kim, J. J. and Kim, H. S., "Automatic System for Plasma Welding of Corrugated Membranes," KOR Patent, No. 20-0300236, 2002.
6. Asfahl, C. R., "Robots and Manufacturing Automation," John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed., pp. 133-144, 1992.
7. Cleghorn, W. L., "Mechanics of Machines," Oxford University Press, pp. 149-173, 2005.
8. Knowledge Revolution, "Working Model[®] 2D, Ver.

4.0," 1996.

9. Yu, J.-Y., "A Study on the Vision Sensor for Automatic Welding of Height-Varying Weldments," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1998.