

研究論文

모서리 부위 연속 용접을 위한 아크 용접 로봇 시스템의 궤적 개발

장 교 근* · 유 범 상**

Trajectory Development of Robotic Arc Welding System for Continuous Weldline of Corner Area

K. G. Chang* and B. S. Ryuh**

Abstract

When a workpiece is to be arc welded around the outside corner, continuous welding without welding seam in the neighborhood of corner still remains a very difficult technique. Skilled welders weld corners by delicate "hand-eye coordination" while turning the workpiece manually. However, there is not a very clear solution to this problem in robotized arc welding process. In order to solve this problem, the coordination of a robot and a positioner with one or two axes is necessary. This paper presents a method of continuous welding around the corner of workpiece using the coordinated motion of a robot and a positioner. The positioner is either revolute jointed or prismatic jointed. In this paper, a clothoid curve is chosen for welding trajectory. The clothoid curve is excellent in connecting straight and curved weld-lines with good continuity and accommodates various welding conditions. By using this welding trajectory, the deceleration, which leads to widening of the melt and the heat affected zone, at corner area is reduced with strategic rotation of robot torch in coordination with a positioner providing smooth transition of welding torch orientation. Two types of special clothoid curves are developed for different weld slope conditions. These clothoid curves are applied to the case of linear and rotary positioners at arc welding robot work-cell.

* 비회원, 전북대학교 정밀기계공학과

** 정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

본 논문은 1996년도 교육부 학술연구조성비 (기계공학:ME96-E-27) 의 일부에 의하여 연구되었습.

1. 서 론

아크 용접 자동화는 자동화의 상당 부분을 차지하고 있으며 자동차 산업의 성장과 함께 더욱 확산되고 있다. 아크 용접의 자동화는 용접 환경으로부터 노동자의 보호, 균일한 품질과 보다 고품질의 제품 생산 등을 이룰 수 있으므로 계속적으로 보급될 것이다. 그러나 아직 아크 용접 자동화가 완전하게 이루어지지 못한 부분의 하나인 모서리 부위 용접에서는 두 용접선이 일정한 각도로 만나게 되어 있어서 용접 진행 방향의 변환과 용접 토치의 방위 변환 등으로 인한 용접 속도의 감소를 가져오게 된다. 여기에서 용접 토치 변환에 의한 감속만을 고려하여 토치 방위 변환량을 줄이면 용접선의 경사각에 의한 불완전한 용접 상태를 가져온다. 따라서 용접 토치는 짧은 용접 거리에서 효율적으로 방위 변환을 실시하여 되도록 많은 용접 부위에서 좋은 용접 자세를 보장하여야 하고 동시에 용접 진행 방향 변환량을 적게 하여야 한다.

이러한 난해한 문제를 해결하기 위해 몇몇 연구가 이루어졌는데 크게 나누어 컨트롤러에 의한 방안, 용접 궤적에 추가점을 주는 방안, 여유 자유도(redundancy)를 갖는 작업 환경에서 로봇과 포지셔너(positioner)를 이용하여 용접물이 동시에 이동하며 용접을 실행하는 방안 등이 있다.

컨트롤러에 의한 방안은 사전 정보를 사용하는 것과 0 위상 오차 추적 컨트롤러에 의한 방안 등이 있는데 Tomizuka¹⁾, Yoshimoto와 Sugiuchi²⁾ 등에 의해 제안된 사전 정보 방안은 고추적(5cm/s이상) 속도에서 몇몇 난점이 보고되고 있으며, Tomizuka³⁾에 의해 제안된 0 위상 오차 추적 방안은 계획된 결과와 실제 결과 사이의 주파수 응답(frequency response)이 모든 주파수에서 0 위상 이상을 보이도록 하는 방안이다. 그러나 주파수가 증가하면 오차도 증가하는 단점을 가지고 있다.

Tomizuka¹⁾에 의해 제안된 추가점을 주는 방안은 모서리 부위 전후에 추가점을 삽입하는 것으로 계획된 고추적 속도의 25%의 모서리 속도에서 좋은 결과가 보고되고 있지만 추가점에 의한 용접 속도 감소의 문제점은 여전히 안고 있다.

여유 자유도를 갖는 작업 환경에서 로봇과 용접물이 동시적으로 이동하여 이동간 용접을 실행하

는 방안은 Jouaneh 등에 의해 제안된 방안^{4,5)}으로써 수직 다관절 6축 로봇과 2축 직선형 포지셔너의 작업 환경에서 로봇은 토치를 계속적으로 이동시키고 포지셔너는 토치의 변위에 알맞도록 용접물을 이동시키도록 하며 양 용접선의 모서리 부근에서 토치의 속도를 증가하고 토치 진행 방향의 변환각을 감소시켜 감속 요인을 줄일 수 있었다. 이 방안은 바람직한 방향으로 사료되나 용접 궤적의 생성이 난해하고 실제 현장에 많이 사용되는 회전형 포지셔너에 대한 연구는 이루어지지 못하였다.

또한 모서리 부위 용접에서 좋은 용접 품질을 위해 고려되어야 할 사항⁶⁾은 첫째, 중력 효과가 용입을 돕도록 로봇 토치가 용접물에 대하여 하향 용접 자세를 유지해야 한다. 이를 위해서는 보통은 로봇 6축 이외의 다른 다수의 축을 가진 포지셔너가 요구된다. 하향 용접은 용접점의 법선 벡터가 중력 반대 방향을 향하고 있어서 중력에 의해 용입 효율이 우수하다. 그러나 모서리 부위 용접에서는 두 용접선이 일정한 각도(모서리 각, corner angle)를 이루고 있는 부위를 연속적으로 용접하여야 하므로 불안정한 경사각을 가지면서 용접하는 것이 불가피하다. 따라서 모서리 부위 용접은 하향 용접에 최대한 가깝게 하여야 하며 이 불안정한 용접 부위를 빠르게 탈피해야 하는 노력이 요구된다. 둘째, 일정한 용접 속도를 유지하여 균일한 품질을 얻어야 한다. 모서리 부위 용접에서는 단순히 로봇 6축만으로는 용접 토치의 진행 방향 변환 때문에 일정한 속도를 유지할 수 없으므로 포지셔너가 필수적이다. 셋째, 열변형, 치수 변경, 장비와 고정 오차 등에서 기인된 용접물 오차에 정확하게 용접부를 추적하여야 한다. 즉 닫힌 회로에 의한 컨트롤러의 구비가 필수적이다.

본 연구는 수직 다관절 6축 로봇과 직선형 포지셔너 또는 회전형 포지셔너 등의 여유 자유도를 갖는 작업 환경에서 모서리 부위를 아크 용접 로봇이 토치의 방위 변환도 연속적이면서 가속을 가지도록 하여 급격한 토치 방위 변환에 의한 감속을 방지하였다. 이를 위한 용접 궤적은 용접 길이와 용접 속도를 변수로 하여 클로소이드 곡선을 선택하고 다시 이 곡선을 이용하여 직선형 포지셔너의 이동 변위를 구한다. 구해진 직선형 이동 변위를 직선형 포지셔너에서는 그대로 이동 변위로 이용하고 회전형 포지셔너에서는 일정한 반경에 의해 그

러지는 호의 길이로 하여 클로소이드 곡선을 변형한다. 이때 사용되는 클로소이드 곡선의 형태를 두 가지로 구분하였다.

2장은 모서리 부위 용접에서 용접물을 고정된 작업 환경에서의 문제점을 보이며 3장은 모서리 부위 용접의 문제점을 실제 용접을 통하여 고찰하고 해결할 수 있는 로봇 시스템을 모색하고 이에 알맞은 용접 궤적을 4장에서 개발하고 직선형과 회전형 포지셔너에 적용한다. 5장은 결론을 맺으며 향후 연구 과제를 논한다.

2. 모서리 부위 아크 용접의 문제점

Fig. 1과 같이 두 용접선이 일정한 각도로 마주치는 부위의 아크 용접은 상당히 난해한 기술이다. 특히 용접 제품이 기밀을 요하는 경우, 현재로서는 자동화 장비로 직선 부분만 용접을 하고 수용접에 의하여 각진 부분 근처를 보충 용접을 하는 경우가 많다.

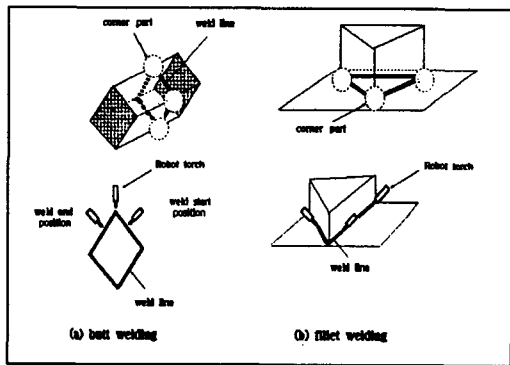


Fig. 1 Workpieces of Cornered Welding

로봇에 의한 자동화를 할 때, 두 용접선이 서로 마주치는 부위를 경유하는 명령은 로봇의 제조사에 따라 다소 차이는 있으나 본 연구에 사용된 Sweden ABB사의 IRB 2000 로봇 컨트롤러는 Path, Fine, Corner 등을 사용한다.⁷⁾ Path로는 로봇의 설정 속도에 알맞게 컨트롤러에서 자체 계산에 의해 구해지는 것으로 설정 속도에 비례한다. 프로그램된 위치에서 로봇 TCP (Tool Center Point)가 직선

경로를 이탈하는 지점까지의 거리인 이탈 영역 (Zone)이 1000mm/s에서 25mm이므로 5~10 mm/s일 경우 이탈 영역은 0.123~0.25mm를 갖는다. Fine는 가장 경유점에 근사하여 통과하도록 하는 명령으로써 경유점의 근사 위치에서 일시 정지하므로 용접에서는 사용하지 않는 것이 좋으며 용접 시작점과 종료점에서만 사용한다. Corner 명령은 Corner I과 Corner II로 나누어지며 전자는 속도에 무관하게 이탈 영역 값이 5mm이므로 저속일 때는 오히려 Path보다 크기 때문에 이탈 길이가 상대적으로 크게 된다. Corner II는 설정 속도에 비례하여 1000mm/s에서 100mm의 이탈 영역을 갖는다. 따라서 모서리 부위 아크 용접을 위해서는 Path 명령이 적절할 것이다. 이 Path 명령에서 두 용접선이 이루는 모서리 각 (corner angle)에 따라 로봇의 속도는 감속이 일어나게 되는데 이 제한 속도는 Table 1과 같다.

Table 1. 모서리 각에 대한 최고 속도의 제한

모서리 각	입력 속도에 대한 최소 속도의 퍼센트
180°	100%
135°	90%
90°	70%
45°	40%
0°	0%

Table 1에서 두 용접선이 이루는 모서리 각이 작으면 작을수록 로봇 토치의 진행 방향 변환량은 크게 되며 감속의 정도는 더욱 크게 된다. 따라서 로봇과 포지셔너의 작업 환경에서 용접물의 모서리 각은 변하지 않지만 포지셔너가 용접물을 이동시키고 로봇 토치가 타원형의 곡선을 따라가게 하여 연속적이면서 진행 방향 변환량을 적게 하여 감속 요인을 줄일 수 있다.

용접에서 용접 부위와 용접 토치까지의 거리는 전압과 전류를 일정하게 유지하기 위해서 동일 거리를 유지하여야 한다. Table 2는 프로그램된 위치에서 로봇 TCP가 직선 경로를 이탈하는 지점까지의 영역인 이탈 영역의 크기에 따른 이탈 영역 크기 (zone size)를 나타내고 있다.

Table 2. 모서리 각에 따른 이탈 거리

이탈영역 크기 (mm)	모서리 각				
	180°	135°	90°	45°	0°
1	0	0.2	0.4	0.5	0.5
2	0	0.4	0.7	0.9	1
5	0	1	1.8	2.3	2.5
15	0	2	5.5	7	7.5
25	0	5	9	11.5	12.5
50	0	10	18	23	25
100	0	19	36	46	50

Table 2에서 저속(5~10mm/s)으로 움직이는 아크 용접에서는 Path명령의 경우 이탈 영역 크기가 0.123~0.25mm으로 매우 작으므로 이탈 거리가 작은 수치임을 알 수 있으며 따라서 이탈 거리는 무시될 수 있다.

로봇 토치의 방위 변환은 용접 경로의 전체에 TCP 속도와 상호 영향을 줄 수 있도록 동기 되어 있다. 다시 말해 로봇 토치의 방위 변환이 클 때 프로그램된 정확한 위치에서 프로그램된 방위가 실현되도록 TCP의 속도는 저하된다. 또 저속에서 토치 방위 변환은 토치 이동 속도에 비례한다. 따라서 모서리 부위의 아크 용접을 위해서는 토치 이동 속도를 증가하여 토치 방위 변환을 빠르게 하여야 한다.

또 하나의 모서리 부위 전체에 가장 제약되는 인자로는 중력에 수직인 방향과 용접선이 이루는 경사각을 고려하여야 한다. 경사각이 크면 클수록 용접 상태는 좋지 못하므로 경사각을 줄이도록 용접 궤적을 선정하여야 하며, 굳이 경사각을 유지한다면 최소한 로봇 토치의 방위 변환에 의해 발생하는 불완전한 용접 자세(다음 용접선에 알맞은 용접 자세로 변환하기까지의 용접 자세)를 빠르게 탈피하여야 한다. 다시 말해 불완전한 용접 자세를 줄이는 방안이 모색되어야 할 것이다. 또한 경사진 용접선에서 용접 자세는 전진 용접이 되도록 하며 두 용접선의 경유점에서 용접 자세는 하향이면서 모서리 각도에 알맞도록 전진 용접을 하여야 한다.

이상의 토치의 방위 변환과 용접 토치의 진행 방향 변환각에 의한 감속을 고려하고 용접선 경사각

이 용접 품질의 악화를 피하도록 용접 궤적을 선정해야 한다. 구해진 용접 궤적 중에서 용접물과 포지셔너의 너무 과도한 움직임은 용접의 불완전한 요소가 될 수 있으므로 용접물의 움직임이 적은 값을 선정해야 한다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 클로소이드 곡선을 용접 궤적으로 하여 알맞은 형태를 정의하고 최적의 변수 선정을 위한 방안을 제시한다.

3. 6축 수직 다관절 로봇의 고정 용접물 용접

모서리 부위 아크 용접은 Fig. 2에서 보듯이 후진 입향 상진 용접 자세와 전진 입향 하진 용접 자세가 각각 형성된다. 그런데 경사각이 크면 클수록 토치 방위 변환량이 증가하므로 토치가 변화하면서 형성되는 과도한 경사의 후진 용접과 전진 용접 자세 부위가 커진다. 이러한 부위의 용접 자세는 상당히 좋지 않은 용접 자세로 모서리 부위에서 토치 변환을 위한 감속이 발생하여 용입 과다가 일어난다.

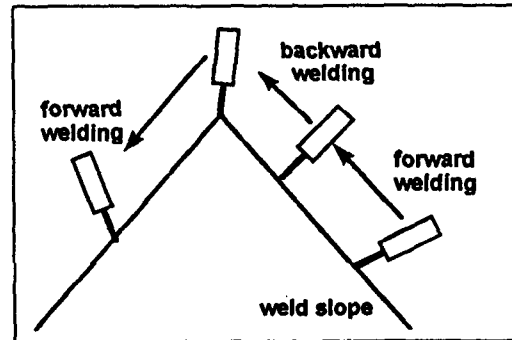
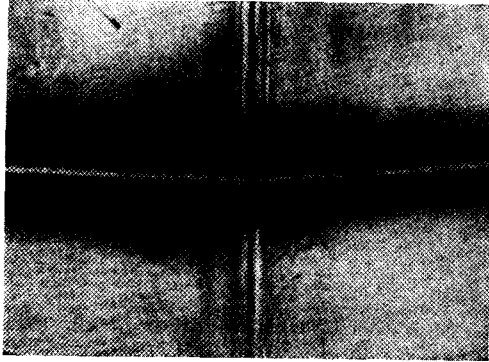
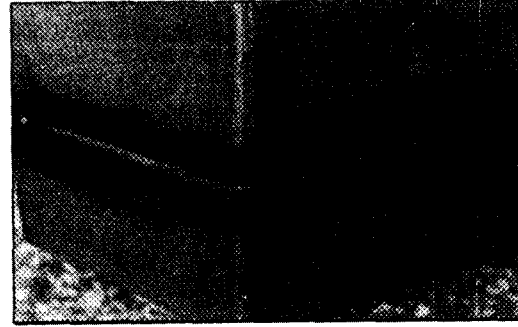


Fig. 2 Welding Postures on Cornered Workpiece

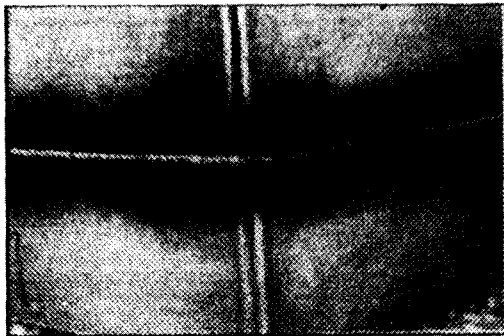
Fig. 3은 모서리 각을 달리하면서 용접 속도를 5mm/s로 하였으며, 팁과 모재 사이의 길이를 23mm, 그리고 재질은 스테인레스 강으로서 두께가 3.2mm인 두 강판으로 맞대기 용접을 아크 용접 로봇으로 실행하였다. Fig. 3 (a)에서는 비교적 좌우의 용접 상태가 비슷하나 (b) 이후로는 상당한 차이가 존재한다. 다시 말해 모서리 각이 105°



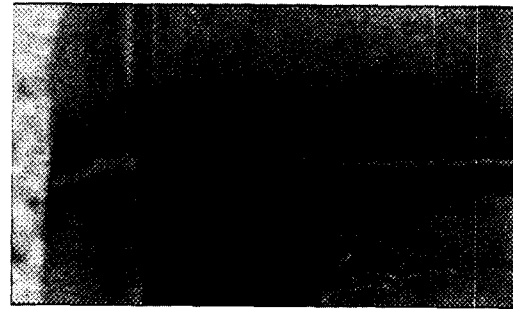
(a) 모서리각 120°
(토치 진행 방향의 변환각 60°)



(c) 모서리각 90°
(토치 진행 방향의 변환 요구각 90°)



(b) 모서리각 105°
(토치 진행 방향의 변환각 75°)



(d) 모서리각 75°
(토치 진행 방향의 변환 요구각 105°)

Fig. 3 Robot Arc Welding for Cornered Workpieces (Stainless Steel, 3.2mm)

(경사각이 32.5 이하인 경우에는 모서리 부위를 위한 새로운 용접 방안이 필요하다. Fig. 3(b), (c), (d)에서 초기의 용접 상태는 경유점 왼쪽 부위는 후진 용접 자세이면서 입향 상진 용접 자세를 취한다. 그런데 이 부위에서는 용접 폭이 두껍고 모재의 용융 상태가 좋지 못하다. 특히 경유점에서 용접 속도 저하로 인한 움푹 패인 형상이 확인되며 그 정도는 경사각이 크면 클수록 심하다. 또 방위가 많이 변화하는 부위에서 용접 폭이 심하게 변화하여 용접이 일정하게 실행되지 않았다. 그러나 Fig. 3 (d)에서 보듯이 반대편의 전진 하향 하진 용접 자세 부분은 용접 상태가 상대적으로 좋으나 경유점 부근의 초기 용접 폭이 약간의 변화를 보이

고 있다.

Fig. 4는 보다 얇은 재료로서 두께 2mm인 SS41 재질에서 용접 속도를 7mm/s로 하였으며, 팁과 모재 사이의 길이를 20mm, 모서리각이 90°에서 용접을 실행하였다. 용접 토치의 진행 방향 변환 또는 용접 토치 방위 변환에 따른 용접 속도의 저하로 용접물이 심하게 손상되어 있으며 좌우의 용접 상태도 현저하게 차이를 보이고 있다. 여기서 확인될 수 있는 사실은 얇은 재료일수록 용접 속도 저하에 의한 용접물의 상태는 더욱 악화되므로 모서리 부위의 용접 계획을 보다 낮은 용접 토치의 진행 변환각과 빠르면서 연속적인 용접 토치의 방위 변환쪽으로 세워야만 한다.

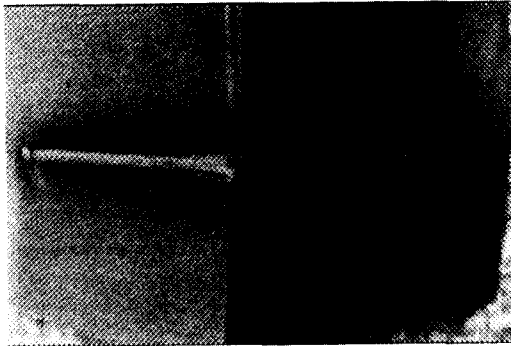


Fig. 4 Robot Arc Welding for The Cornered Workpiece (SS41, 2mm)

아크 용접 로봇 시스템은 로봇, 아크 발생 장치, 포지셔너, 로봇 컨트롤러, 기타 각종 센서로 구성되어 있는데 모서리 부위 용접을 위하여 로봇과 포지셔너의 동시 제어 (coordinated control)가 가능하며 좁은 공간을 차지해야 하므로 단일 컨트롤러에 의한 제어, 곧 로봇 컨트롤러에 의한 동시 제어 방식이 바람직하다. 로봇은 좁은 공간에서 능숙능란한 (dexterous) 수직 다관절형이 필수적이며 정밀한 반복 정밀도를 요구한다. 그러면서도 로봇 작업 공간 (work space)이 상대적으로 커야 한다. 포지셔너는 로봇의 작업 영역을 확장시킬 수 있고 로봇 토치가 좋은 용접 자세로 용접하도록 용접물을 위치시킨다. 모서리 부위 용접을 위한 단순한 1축 회전형 포지셔너일 때는 용접물을 단순히 회전만 하면 되므로 별 문제는 없으나 2축의 경우 각축의 포지셔너 1축 회전각을 적게 하여 용접 토치의 방위 변환 정도를 줄이고 회전 반경이 커서 로봇의 속도가 일정한 방향으로 빠른 이동이 가능하게 하며 여러 형태의 용접물에 용접이 가능하여야 한다. 컨트롤러는 공간을 적게 차지하여야 하며 통신과 언어 오류를 줄일 수 있도록 단일 컨트롤러가 유리하며 동기 제어가 이루어지도록 7축 이상의 축을 동시에 제어해야 한다.⁸⁾

4. 용접 궤적의 개발

모서리 부위 용접을 위한 용접 궤적이 구비할 조

건은 첫째, 용접 토치의 진행 방향 변환각이 작도록 하여야 하므로 타원과 같은 연속적인 곡선이어야 한다. 둘째, 용접 토치의 연속적인 자세 변화를 위해서 곡선 부위 이전 또는 이후의 직선 부위와 연속적인 연결이 가능하여야 한다. 셋째, 곡선의 길이 제어가 편리하여 일정한 용접 속도를 이루면서 좋은 용접 상태를 얻을 수 있도록 쉽게 곡선 선택이 가능하여야 한다. 넷째, 경사각이 다른 두 직선의 용접에 있어서 다른 길이의 곡선이 형성된다. 따라서 두 곡선이 만나는 경유점에서 연속적으로 연결되어야 한다. 다섯째, 용접 토치 방위 변환에 의한 감속을 줄이기 위해 방위 변환 속도가 가속과 감속을 하면서 빠르게 변화하여야 한다. 이러한 조건에서 사인 곡선, 원호, 타원, 클로소이드 곡선 등이 고려될 수 있으나 본 연구에서는 직선과의 연속성이 우수하며 로봇과 용접물 등의 용접 환경에 따라 곡선 선택이 양호한 클로소이드 곡선 (clothoid curve)을 채택하였다.

4.1 클로소이드 곡선 (clothoid curve, Cornu curve, Euler curve) 이론

본 논문에서는 모서리 부위 아크 용접의 난해한 문제를 해결하기 위해 용접 궤적으로 클로소이드 곡선을 기본으로 하였다. 클로소이드 곡선은 곡률이 선형적으로 변화하는 비선형 평면 곡선으로서 곡률 반경을 무한대로 하면 직선 형상이 구해지고 호의 길이를 제어하여 용접 시작점과 끝점을 변화

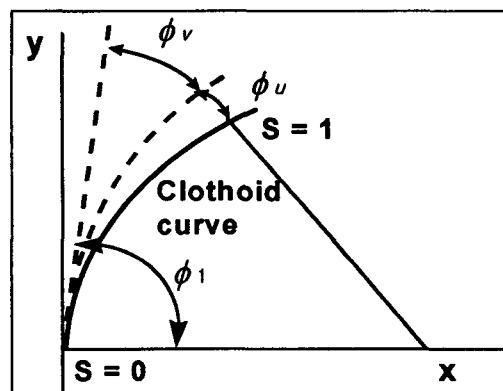


Fig. 5 Clothoid Curve Segment

할 수 있으며 용접 토치의 방위 제어가 편리하고 두 용접선이 접하는 모서리 전후의 토치 진행 방향 변환각이 작아서 감속을 방지할 수 있다.

Fig. 5은 클로소이드 곡선의 기본식을 유도하기 위한 그림을 보여주고 있다.

다음은 클로소이드 곡선의 기본식을 보이고 있다.^{9,10)}

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + h \int_0^S e^{i\phi} dS^*, \quad (0 \leq S \leq 1)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_v S^* + \phi_u S^2 \quad (1)$$

$$\text{곡률 } (C_U) = \frac{\phi_u + 2\phi_u S^*}{h}$$

h는 클로소이드 곡선의 호의 길이이며 S는 무차원 변수이다. ϕ_1 는 초기 경사각이며 ϕ_u 는 순수한 원 회전각으로 (-) 값이다. 그런데 순수한 원 회전각은 S가 0일때 직선 형상이 되어야 하므로 곡률이 0이고 당연히 ϕ_u 는 0이 되며 ϕ_u 는 (-) 값으로써 곡률 변화각이다. 그러므로 (1)식은 다음으로 다시 쓸 수 있다.

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + h \int_0^S e^{i\phi} dS^*, \quad (0 \leq S \leq 1)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_v * S \quad (2)$$

S가 1일 때가 도착점이 되며 이를 (2)식에 대입하고 ϕ_u 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\phi_u = \phi_2 - \phi_1 \quad (3)$$

모서리 부위 용접에서는 초기 클로소이드 곡선 부분이 용접 직선과 일치하였다가 최종 위치에서 다시 직선 형상을 이루어야 한다. 따라서 두 개의 곡선이 서로 연결되어야만 한다. Makino는 한 쌍(double)의 클로소이드 곡선을 사용하여 빠른 이동 속도를 유지하면서 코너 회전 문제를 해결하는 방법을 제시하였으며 Jouaneh 등은 한 쌍의 클로소이드 곡선을 이용하여 모서리 부위의 용접 경로 계획을 제시하였다. Fig. 6은 한 쌍의 클로소이드 곡선을 보이고 있다.

Fig. 6에서 1~2, 2~3 구간의 임의의 좌표는

$$\vec{P}_{1-2} = \vec{P}_1 + h_{1-2} \int_0^S e^{i\phi_{1-2}} dS^*, \quad (0 \leq S \leq 1) \quad (4)$$

$$\vec{P}_{2-3} = \vec{P}_2 + h_{2-3} \int_0^S e^{i\phi_{2-3}} dS^*, \quad (0 \leq S \leq 1) \quad (4)$$

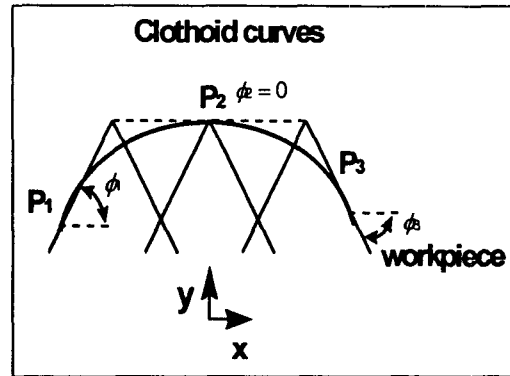


Fig. 6 Double Clothoid Curves

여기에서 ϕ_{1-2} 과 ϕ_{2-3} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_{1-2} = \phi_1 + \phi_{u1-2} S^2$$

$$\phi_{2-3} = \phi_3 + \phi_{u2-3} (1-S^*)^2$$

그런데 $\phi_{u1-2}, \phi_{u2-3}, h_{2-3}$ 은 각각 다음과 같다.¹¹⁾

$$\phi_{u1-2} = \phi_2 - \phi_{u2-3} = \phi_3 - \phi_2, \quad h_{2-3} = \frac{\phi_{u2-3}}{\phi_{u1-2}} h_{1-2}$$

ϕ_{2-3} 에서 S대신 (1-S)를 대입한 것은 \vec{P}_2 점에서 양쪽의 ϕ 의 변화가 동일한 거동을 보이도록 하기 위한 것이다. Fig. 7과 같이 로봇 토치는 클로소이

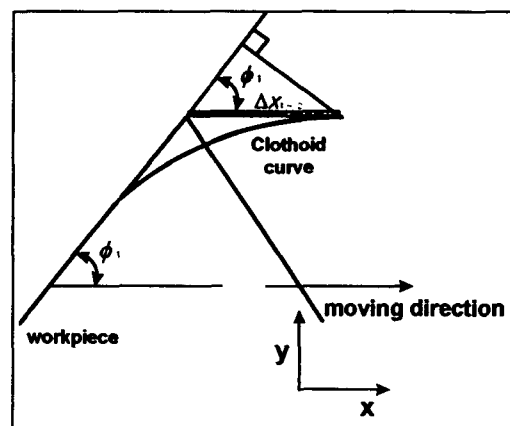


Fig. 7 Translation of Prismatic Positioner

드 곡선을 따라가지만 직선형 포지셔너의 이동은 다음과 같이 직선 변위 (ΔX) 만큼 변위 한다.

$$\Delta X_{1\sim 2} = \frac{h_{1\sim 2} \int_0^1 \sin(-\phi_{u1\sim 2} S^{*2}) dS^*}{\sin \phi_1} \quad (5)$$

$$\Delta X_{2\sim 3} = \frac{h_{2\sim 3}}{\sin(\pi - |\phi_3|)} \int_0^1 \sin(\phi_{u2\sim 3} (1-S^*)^2) dS^*$$

직선형 포지셔너를 갖춘 아크 용접 로봇 시스템의 경우 로봇은 용접 궤적(클로소이드 곡선)을 따라 이동하고 포지셔너는 직선 변위 (ΔX) 만큼 이동하며 모서리 부위의 연속적인 용접을 수행할 수 있다.

4.2 등속 용접을 위한 계획

용접에 있어 용접 속도는 매우 중요한 인자로서 용접 속도가 작으면 생산 능률이 저하되고 용입량이 과다하거나 구멍이 발생하는 요인이 되어 용접 품질을 나쁘게 하며, 용접 속도가 빠르면 자동화 효율을 증가시킬 수도 있으나 용입량이 적어져 모재가 용융되지도 않게 되거나 용접 자체가 실행되지 않게 된다. 그러므로 적당한 용접 속도에서 등속을 유지하는 것은 매우 중요하다. (2)식에서 등속으로 유지하기 위해 x축은 포지셔너와의 상대 속도가 등간격으로 증분하지만 y축 방향으로 일정한 간격으로 증분하면 된다. 따라서 y축 방향을 등간격으로 나누기 위해서는 알맞는 S의 크기를 구해야 한다.

(4) 식으로부터

$$y_{1\sim 2} = y_1 + h_{1\sim 2} \int_0^1 \sin(\phi_1 + \phi_{u1\sim 2} S^{*2}) dS^* \quad (6)$$

이며, S가 1일 때 $y_{1\sim 2}$ 는 y_2 이므로 1~2구간의 호의 길이는 다음과 같다.

$$h_{1\sim 2} = \frac{y_2 - y_1}{\int_0^1 \sin(\phi_1 + \phi_{u1\sim 2} S^{*2}) dS^*} \quad (7)$$

그리고 Fig. 4에서 등속도를 유지하기 위해서 모서리 용접을 위해 필요한 용접 길이를 d라 하고 단위 시간에 대한 용접 속도를 V라 하면, 이때 d를 V로 나누면 총 소요 시간이 나오게 된다. 따라서 소요 시간 (t_w)에 속도를 곱하며 경사각 ϕ_1 을 가지는 방향의 용접 길이가 되므로 y의 변위 Δy 는

$$\Delta y = y_{1\sim 2} - y_1 = v \times t_w \times \sin \phi_1$$

임을 알 수 있다.

(6) 식에서 y의 임의의 위치 ($y_{1\sim 2}$)에서 y_1 을 제하면 Δy 이므로

$$\int_0^1 \sin(\phi_1 + \phi_{u1\sim 2} S^{*2}) dS^* = \frac{\Delta y}{h_{1\sim 2}} = \frac{V \times t_w \times \sin \phi_1}{h_{1\sim 2}} \quad (8)$$

나타낼 수 있다. 따라서 (5) 식의 직선 변위값을 구하기 위해 이분법(Bisection Method), 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson Method) 등의 보간법에 의해서 무차원 변수 S의 값을 구할 수 있다.

4.3 클로소이드 곡선 형태

본 논문에서는 용도에 따라 두 가지 형태의 클로소이드 곡선을 사용하기로 한다. 두 가지 형태는 각각 Fig. 8의 A type과 Fig. 9의 B type으로 구분된다. A type은 포지셔너에 장착된 용접물의 이동 방향과 용접물 상의 용접 방향이 동일하다. 따라서 클로소이드 곡선은 곡률의 변화가 비교적 완만하고 곡률 변화각(ϕ_u)의 변화도 급하지 않다. B type은 주로 A type을 사용할 수 없는 경우에 사용

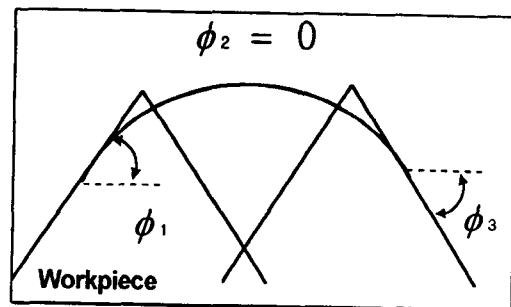


Fig. 8 A type Clothoid Curves

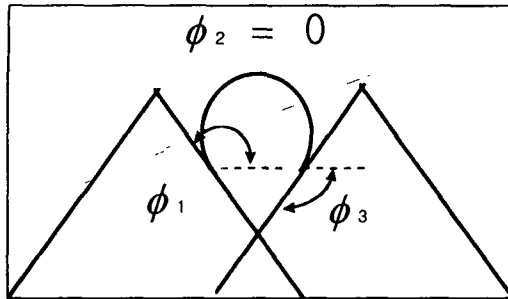


Fig. 9 B type Clothoid Curves

하게 되는데 용접물의 이동 방향과 용접물위의 용접선의 방향이 서로 반대이어서 비교적 어려운 개념으로, 곡률의 변화가 급하며 곡률 변화각도 큰 변화폭을 갖는다.

만약 용접 토치의 자세를 용접 궤적에 수직 방향으로 한다면 A type의 용접 토치 자세는 ϕ 의 거동과 일치하며 $\phi + \frac{\pi}{2}$ 축이 수직 벡터(normal vector)의 방위가 된다. 용접 토치는 수직 벡터에서 전진 용접 자세에 알맞도록 이송 각도(travel angle)를 변화시키면 된다. B type은 용접 토치가 ϕ 의 거동과 일치하지 않는다. 그러나 $2\pi - (\phi_1 - \phi_3)$ 만큼 용접 토치가 변화해야 한다는 것을 로봇 토치가 용접 궤적을 따라감으로써 추정할 수 있다. 그러므로 용접 토치의 자세 ϕ_{torch} 를 (3)식과 유사하게 표현하면

$$\phi_{torch 1-2} = (\phi_1 - \frac{\pi}{2}) + (\pi - \phi_1) S^{*2}$$

$$\phi_{torch 2-3} = (\phi_3 - \frac{\pi}{2}) - (\pi + \phi_3) (1 - S^*)^2$$

임을 알 수 있다.

Table 3.과 Table 4.는 A type과 B type에서 Newton-Raphson 보간법으로 용접 길이를 40mm로 놓고 용접 속도를 8mm/sec로 하여 구해진 값들을 보이고 있다. 여기서 S는 무차원 변수이며 ΔX 는 직선형 포지셔너의 경우 직선 변위를 나타내고 있다.

Table 3.과 4.를 살펴보면 A type과 B type모두 S의 거동이 1~2구간에서 증가, 2~3구간에서 감소를 보이지만 그 증가분이나 감소분에 있어서 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이것은 1~2구간을 위한 (8)식에서 A type의 경우 ϕ 의 거동이

Table 3. 보간법을 이용한 A Type의 데이터

$$(\phi_1 = \frac{\pi}{4}, \phi_2 = 0, \phi_3 = -\frac{\pi}{4})$$

	용접길이 (mm)	S	ΔX (mm)
h_{1-2} =58.0077	8	0.138685	0.057264
	16	0.281778	0.474718
	24	0.436498	1.785348
	32	0.618906	5.052843
	40	0.999926	20.471658
h_{2-3} =58.0077	8	0.381094	15.418815
	16	0.563502	18.686310
	24	0.718223	19.989300
	32	0.861294	20.328994
	40	0.999978	20.472102

Table 4. 보간법을 이용한 B Type의 데이터

$$(\phi_1 = \frac{3\pi}{4}, \phi_2 = 0, \phi_3 = -\frac{3\pi}{4})$$

	용접길이 (mm)	S	ΔX (mm)
h_{1-2} =36.5461	8	0.211683	0.379240
	16	0.395211	2.471496
	24	0.555738	6.671304
	32	0.714197	13.35014
	40	0.999913	27.030634
h_{2-3} =36.5461	8	0.285850	13.694367
	16	0.444410	20.385457
	24	0.604850	24.595717
	32	0.788380	26.696760
	40	1.000015	27.079586

45° 에서 0° 로 변하므로 이것의 사인값은 계속적으로 감소된다. 그런데 용접 속도를 일정하게 유지하기 위해 우변의 증분 값이 일정하게 증가하여야 한다. 따라서 무차원 변수 S의 값의 증분이 커지게 된다. B type의 경우 1~2구간에서 ϕ 의 거동이 135° 에서 0° 로의 변화는 사인값의 증분 값이 증가, 감소를 보이고 있으므로 무차원 변수 S값의 증분은 감소, 증가를 보이게 된다.

따라서 A type은 가속과 감속이 단 한차례씩 일어나기 때문에 제어가 간단하고 구동 장치에 무리

를 주지않게 되므로 B type보다는 직선형 포지셔너와 단순 회전형 1축 포지셔너의 환경에서는 필렛 용접에 적합하며 B type은 2차레씩 가감속이 반복되나 회전형 1축 포지셔너의 환경에서 맞대기 용접을 실행할 경우 A type 보다는 용접선의 경사각을 줄일 수 있으므로 하향 용접 자세에 가까운 용접을 실행할 수 있다.

4.4 회전형 포지셔너의 계획

직선형 포지셔너를 구비한 작업 환경에서 로봇이 클로소이드 곡선을 따라갈 때 직선형 포지셔너는 (5)식의 직선 변위 (ΔX)를 따라 이동하면 된다. 클로소이드 곡선의 장점을 이용하면서 회전형 포지셔너에 적절히 적용하기 위해서 본 논문에서는 직선형 포지셔너에서 직선 변위를 회전형 포지셔너의 회전 중심에서 양 용접선이 마주치는 경유점까지의 거리를 반경으로 하여 원 회전에 의해 형성되는 호의 길이 변위로 대체하였다. 이렇게 하여 두 용접선이 마주치는 경유점에서 토치 진행 변환 각도를 작게 할 수 있고 용접 토치의 변환 속도를 가속과 감속을 시키는 효과와 용접 시작점과 종료점에서 곡률이 직선 형상을 이룰 수 있는 장점 등을 그대로 이용할 수 있다.

예로서 회전형 1축 포지셔너를 구비한 작업 환경에서 아크 용접을 위한 좌표축의 설정은 Fig. 10과 같이 설정될 수 있으며 (9)식에서와 같이 좌표 변환식을 구할 수 있다. 그런데 (9)식의 우변에서 용접 토치를 용접선에 따라 일정한 방위를 유지한다면 변화되는 변환값은 오직 포지셔너1축 용접선만이다. 따라서 포지셔너1축 용접선만을 구하며 (9)식의 좌변을 역기구학을 이용하여 구할 수 있게 된다.

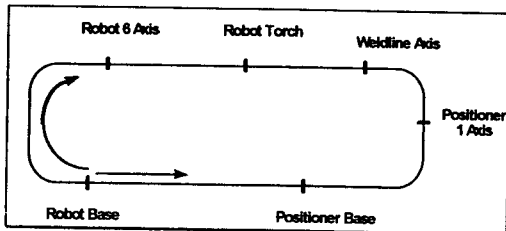


Fig. 10 Welding Workcell Transform Graph

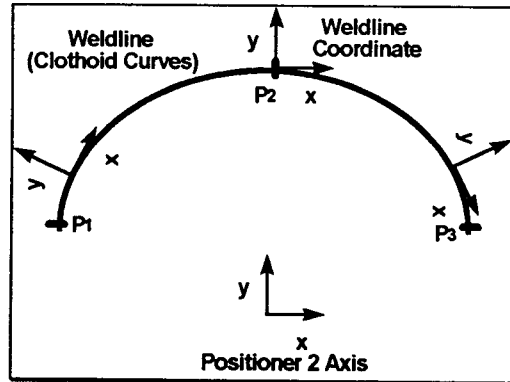


Fig. 11 Weldline Coordinates For A Type

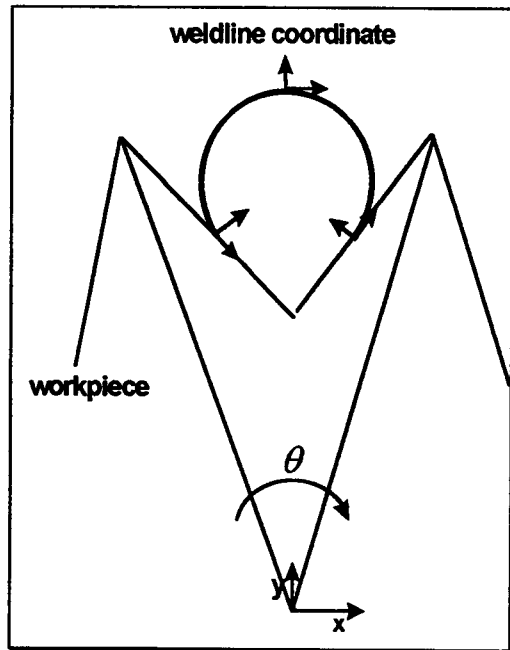


Fig. 12 Weldline Coordinates For B type

$$\begin{matrix}
 \text{로봇기저} \\
 \text{용접토치}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \text{로봇기저} \\
 \text{포지셔너기저}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \text{포지셔너기저} \\
 \text{포지셔너1축} \\
 \text{용접선}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \text{포지셔너1축} \\
 \text{용접선} \\
 \text{용접토치}
 \end{matrix}
 \quad (9)$$

Fig. 11과 같이 용접선의 좌표축을 설정하면 1축 포지셔너의 회전 중심에서 두 용접선이 마주치는 지점까지의 거리(L)를 반경으로 회전되는 포지셔너의 회전 변환각(θ)은 다음과 같다.

$$\theta_{1\sim 2} = \frac{h_{1\sim 2}}{\sin\phi_1 \cdot L} \left\{ \int_1^0 \sin(-\phi_{U1\sim 2} S^{*2}) dS^{*2} - \int_S^0 \sin(-\phi_{U1\sim 2} S^{*2}) dS^{*2} \right.$$

$$\theta_{2\sim 3} = \frac{h_{2\sim 3}}{\sin(\pi - |\phi_3|) \cdot L} \int_S^0 \sin(\phi_{u2\sim 3} (1-S^*)^2) dS^{*2} \quad (10)$$

$$P_y = \Delta X \sin\theta_{1\sim 2} - \Delta Y \cos\theta_{1\sim 2}$$

$$P_z = 0$$

(11) 식으로부터 포지셔너¹축 용접선 Γ 의 값을 구하였으므로 역기구학을 이용하여 로봇의 방위와 위치를 구할 수 있다.

그리고 직선형 Λ type일 때의 용접선(클로소이드 곡선) 상의 좌표 변환각(ϕ)은

$$\phi_{1\sim 2} = \phi_1 + \phi_{u1\sim 2} S^{*2}$$

$$\phi_{12\sim 3} = \phi_3 + \phi_{u2\sim 3} (1-S)^{*2}$$

이며 직선형 B type의 경우는 다음과 같다.

$$\phi_{1\sim 2} = (\phi_1 - \pi) + (\pi - \phi_1) S^{*2}$$

$$\phi_{12\sim 3} = (\phi_3 + \pi) - (\pi + \phi_3) (1-S)^{*2}$$

따라서 회전형 포지셔너가 1축일 때의 방위 변환은 θ 와 ϕ 의 합으로 구하여지며 이를 식으로 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \cos(\phi + \theta) - \sin(\phi + \theta) 0 P_x \\ \sin(\phi + \theta) - \cos(\phi + \theta) 0 P_y \\ 0 & 0 & 1 P_z \\ 0 & 0 & 1 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기에서 (11) 식에서 변위값(P_x, P_y, P_z)을 구하기 위해서 1~2 구간에서 용접물 상의 용접점($\Delta X, \Delta Y$)은 용접 속도와 소요 시간의 곱에 경사각의 코사인 값과 사인 값을 각각 곱함으로 구할 수 있다.

$$\Delta X = V \times t_w \times \cos\phi_1$$

$$\Delta Y = V \times t_w \times \sin\phi_1$$

여기서 1축 포지셔너의 회전에 의한 회전 변환된 변위값(P_x, P_y, P_z)은 다음과 같다.

$$P_x = \Delta X \cos\theta_{1\sim 2} - \Delta Y \sin\theta_{1\sim 2}$$

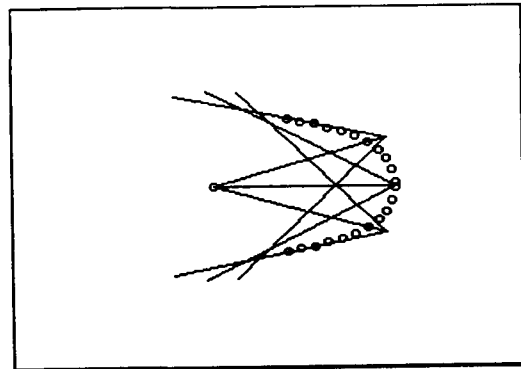


Fig. 13 Λ Type Simulation

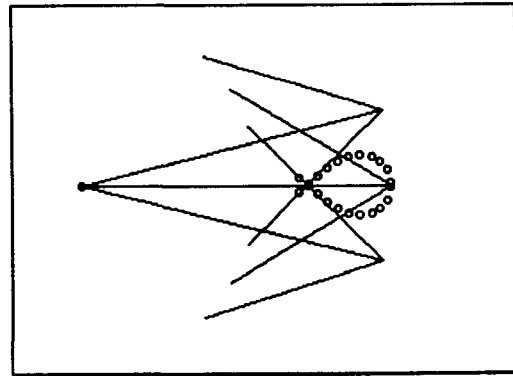


Fig. 14 B Type Simulation

Fig. 13은 Λ type으로 하여 회전형으로 시뮬레이션 한 것이고 Fig. 14은 B type으로 하여 시뮬레이션을 한 것이다.

Fig. 13과 14에서 확인되듯이 변환된 클로소이드 곡선이 연속적인 곡선 변위를 보이기 때문에 용접 토치 진행 방향의 변환각은 작게 되며 용접 토치의 방위는 연속적으로 변환하게 된다.

5. 결 론

두 용접선이 일정한 각도로 접하고 있는 모서리 부위 아크 용접은 작은 모서리 각에 의한 로봇 용접 토치 진행 방향의 변환각이나 토치의 방위 변환에 기인하여 용접 속도가 감소하게 되어 좋지 못한 용접 품질을 얻게 된다. 따라서 토치 진행 방향의 변환 요구각을 작게 하여 감속의 원인을 제거하고 또 토치 진행 방향의 방위 변환을 계속적이면서 가속적으로 실행되어야 한다. 이를 위해서는 로봇 토치가 일정한 곡선을 그리면서 이동하도록 하여 토치 방위 변환을 가감속적으로 실행하도록 하며 토치 진행 방향의 변환각을 작게 할 수 있다. 따라서 로봇은 곡선을 따라가도록 하면서 토치의 순간 위치에 포지셔너가 용접물의 용접 위치를 일치시키도록 하여야 하는 동시에 제어가 가능한 아크 용접 로봇 시스템이 구축되어야 한다.

본 논문에서는 수직 다관절 6축 로봇과 직선형 및 회전형 포지셔너의 여유 자유도를 갖는 작업 환경에서 연속 동작을 이루면서 모서리 부위 아크 용접에 관한 연구를 하였다. 그리고 용접 궤적으로 방위 변환과 직선과의 연결이 우수한 클로소이드 곡선을 이용하여 직선형 포지셔너에서는 이동 변위만큼 용접물을 이동시켜 이동 중 용접이 실행하도록 하였으며 회전형 포지셔너에서는 직선형 포지셔너에서 구한 이동 변위를 포지셔너의 회전 중심에서 두 용접선이 마주치는 용접물 상의 경유점까지의 거리를 반경으로 하여 회전에 의해 형성되는 호의 길이로 대체하였다. 예로서 1축 회전형 포지셔너를 구비한 작업 환경에서의 좌표 변환을 구하였다. 앞으로 회전형의 적용 방안을 2축에 활용하여 맞대기 용접과 필렛 용접 등의 용접 이음에 알맞은 용접 궤적을 구할 것이며 이에 적당한 포지셔너를 개발하며 주어진 용접 궤적을 로봇과 포지셔너가 가장 정확하게 이동하도록 로봇 컨트롤러가 인식할 수 있는 오프-라인(off-line) 프로그래밍을 개발하고 실제 용접을 실시하여 현장에 도움이 될 수 있는 정보를 얻어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Tomizuka, M., Dornfeld, D., Bian, X., and Cai, H., "Experimental evaluation of the preview control scheme for a two-axis position system", *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 106, No. 1, pp. 1~5, Mar. 1984.
2. Yoshimoto, K., and Sugiuchi, H., "Trajectory control of robot manipulator based on the preview tracking control algorithm", *Robotics Research: The Second International Symposium*, (Hanafusa, H., and Inoue, H., Eds.). Cambridge, MA: MIT Press, 1985, pp. 171~178.
3. Tomizuka, M., "Zero phase error tracking algorithm for digital control", *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, vol. 109, no. 1, pp. 65~68, Mar. 1987.
4. Jouaneh, M. K., Zhixiano Wang and Dornfeld, D. A., "Trajectory Planning for Coordinated Motion of a Robot and a Positioning Table : Part 1 - Pathe Specification", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 6, pp. 735~745, 1990.
5. Jouaneh, M. K., Dornfeld, D. A., and Tomizuka, M., "Trajectory Planning for Coordinated Motion of a Robot and a Positioning Table : Part 2 - Optimal Trajectory Specification", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 6, pp. 746~759, 1990.
6. Fernandez, K., and Cook, G. E., "A Generalized Method for Automatic Downhand and Wirefeed Control of a Welding Robot and Positioner," *NASA Tech. Paper 2807*, Feb. 1988.
7. IRB 2000 Robot Programming Manual
8. Pierce, M. F., "A Guide to Robotic Arc Welding Positioners," *Welding Journal*, November, pp. 28~30, 1985.
9. Makino, H., "Clothoid Interpolation - A New Tool for High-Speed Continuous Path

- Control", annals of the CIRP Vol. 37/1, pp 25~28, 1988.
10. Makino, H., "Clothoid Interpolation of Freely Given Point Series Using Tangent Method", JSPE, Vol. 60, No. 1, 1994.
 11. 장교근, 유범상, "모서리 부위 연속 용접을 위한 아크 용접 로봇과 포지셔너의 협업", 1996년도 용접 학회 춘계 논문 발표회, pp. 96~98