

LNG 알루미늄 판재 가공용 자동 궤적 추적 알고리즘 개발 및 인공지능을 이용한 공정조건 선정에 관한 연구

문형순*, 권봉재*, 정문영*, 신상룡*

A Study on Development of Automatic Path Tracking Algorithm for LNG Aluminium Plate and Selection of Process Parameters by Using Artificial Intelligence

H. S. Moon*, B. J. Kweon*, M. Y. Chung* and S. R. Shin*

ABSTRACT

Aluminum alloys have low density, relatively high strength and yield strength, good plasticity, good machinability, and high corrosion and acid resistance. Therefore, they are suitable for large containers for the food, chemical and other industries. Large containers are often bodies of revolution consisting of shell courses, stiffening rings, heads and other elements joined by annular welds. Larger containers have longer welds and require greater leak-tightness and higher weld mechanical properties.

The LNG tank consists of aluminum plates with various sizes, so its construction should be divided by several sections. Moreover, each section has its own sub-section consisted of several aluminum plates. To guarantee the quality of huge LNG tank, therefore, the precise control of plate dimension should be urgently needed in conjunction with the appropriate selection of process parameters such as cutting speed, depth of cut, rotational speed and so on.

In this paper, a manufacturing system was developed to implement automatic circular tracking in height direction and automatic circular interpolation in depth of cut direction. Also, the neural network based on the backpropagation algorithm was used to predict the cutting quality and motor load related with the life time of the developed system. It was revealed that the manufacturing system and the neural network could be effectively applied to the bevelling process and to predict the quality of machined area and the motor load.

Key Words : Numerical Controller(수치제어기), Air Balance Tactile Sensor(공압용 접촉센서),
Circular Interpolation(원호보간), Neural Network(신경회로망)

* 현대중공업 산업기술연구소 자동화연구실

1. 서론

Moss형 LNG운반선은 구형의 대형 알루미늄 탱크 4 - 5개가 탑재되는 액화천연가스 운반 전용선으로, Moss Rosenberg사가 개발한 선형이다. 탱크는 직경이 약 40m 내외이고, 내·외부에 별도의 지지구조가 없는 독립형이며, 28mm부터 166mm 두께까지의 후판 알루미늄 합금으로 이루어져 있다. 탱크의 중앙 상단으로부터 하단까지 파이프타워(pipe tower)라 불리는 직경 3m의 긴 원통이 설치되며, 그 내부에 화물을 싣고 내리는 시스템이 내장되어 있다. 화물인 액화천연가스(이하 LNG로 표기)는 -163°C 의 극저온 상태이므로 탱크의 재질은 저온에서도 취약하지 않은 것을 사용해야 하며, 그 중에서도 중량에 비해 강도가 높고 가격도 비교적 저렴한 알루미늄 합금 5083을 사용한다. 이 선형은 고부가가치 선으로서, 1960년대 미국에서 본격적으로 건조를 시작한 이래 70년대에는 노르웨이, 독일 등 유럽이, 80년대 들어서는 일본 등 소위 선진국이 시장을 점유하고 있다. LNG 탱크를 건조하기 위하여 노르웨이 커페너사와 일본의 유명조선소에서 사용하고 있는 장비는 소재 가공을 위한 마킹라인 없이 3차원 곡판재를 가공할 수 있어 높은 생산력을 갖추고 있다. 즉 공간상의 임의의 3차원 위치를 제어하고 가공하기 위하여 직선 좌표계 3축과 회전 좌표계 3축을 갖는 6축으로 구성되어 있다. 하지만 이러한 최신 장비는 경제적인 측면에서 고가라는 단점을 가지고 있으며, 따라서 경제성 측면을 고려한 기술개발이 필수적으로 요구되고 있다.

일반적으로 알루미늄은 저밀도(low density), 상대적으로 높은 강도(high strength)와 항복강도(yield strength)를 가지고 있으며, 소성변형이 용이하여 가공하기가 쉬운 특성이 있다. 이러한 이유 때문에 알루미늄은 식료품 및 화학약품 등을 운반할 목적으로 사용되는 대형 컨테이너(container)제조에 아주 적합한 재료이다. 대형 컨테이너 제작시 필수적으로 요구되는 항목은 컨테이너 내부에 적재된 가스나 화학약품 등의 누수(leak)가 없어야 하며, 또한 용접된 부위의 기계적 특성이 우수해야만 한다는 것이다. 누수 및 용접부의 기계적 특성을 향상시키기 위해서는 용접기법 뿐만 아니라 용접하고자 하는 부위가 적절히 용입(penetration)될 수 있도록 항상 일정한 그루브(groove)를 형성해야만 한다.⁽¹⁾

LNG 탱크는 그 크기가 매우 비대하므로 7개의 구획으로 나누어져 조립되며, 이는 또한 164조각의 곡판재가

연결되어 하나의 탱크로 완성된다. 각 곡판재는 용접을 위하여 테두리를 따라 그루브를 형성해야하며, 다수의 곡판재가 연결되어 하나의 탱크로 완성되므로 곡판재 길이에 대한 가공오차도 최소화되어야만 한다. 또한 그루브 형상 및 표면의 거칠기를 원하는 목적에 맞게 형성시키기 위하여 절삭공구를 적절히 선택해야 하며, 가공부재의 두께에 따라 가공깊이, 절삭속도 그리고 스핀들(spindle) 회전 속도에 따른 모터의 부하율도 고려해야만 한다. 즉 부적절한 가공조건은 모터에 과부하를 유발시키며 결국에는 장비의 수명 및 가공표면의 조도에 악영향을 초래하게 된다.^(2,3,4,5,6) 본 연구에서는 곡판재의 가공깊이 오차를 최소화하고, 정밀한 용접 그루브를 형성할 수 있는 시스템을 구성하였으며, 부재의 두께, 가공깊이, 절삭속도 및 스핀들 회전 속도에 따른 가공면의 조도 및 모터 부하율 예측을 위한 신경회로망(neural network)을 구성하였다.

2. 곡판재 가공 시스템

하나의 탱크는 164조각의 곡판재를 각각 용접하여 완성된다. 탱크의 진원도에 대한 정밀도가 엄격히 요구되므로, 각각 날개의 곡판의 가공정밀도 관리가 필수적으로 대두된다. 탱크에서 각 곡판재가 어느 위치에 존재하느냐에 따라 곡판재의 두께 및 길이가 다양하게 변하게 된다.

2.1 LNG 탱크 형상

탱크는 위도방향으로 두께가 다른 8개의 구획으로 구성되며, 남극부에서 시작하여 북극방향으로 각기 번호를 할당하게 된다. 구형탱크의 각부 명칭을 Fig.1에 나타내었다.

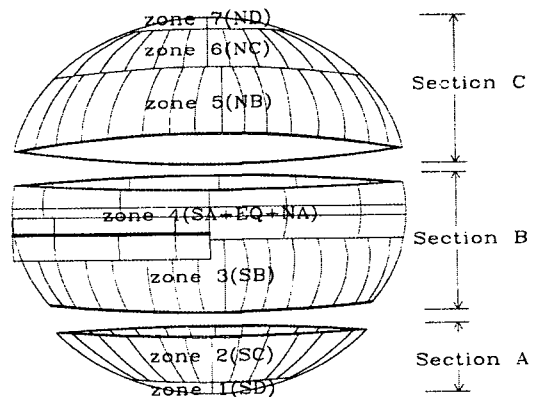


Fig. 1 Definitions of sections and zones in the LNG aluminum tank

남, 북극부를 제외한 각 구획은 반지 형상을 하고 있으며, 조립방법은 정도관리의 용의성을 감안하여 3개의 영역으로 분할하였다. 또한 영역 분할의 편의성을 위해 원형탱크의 적도면을 기준으로 아랫면은 남쪽을 나타내는 S, 윗면은 북쪽을 나타내는 N으로 정의하였으며, 적도면을 기준으로 아랫방향으로의 SA, SB, SC, SD, 윗 방향으로 NA, NB, NC, ND로 정의하였다. 본 연구에서는 B, C영역의 2번, 3번과 5번, 6번 구획에 대한 곡판가공용 시스템을 개발하였다.

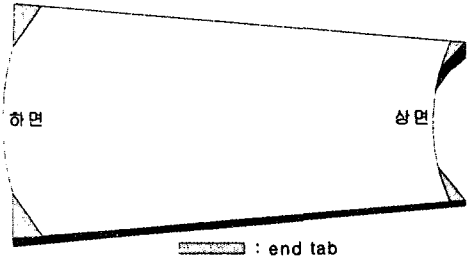


Fig. 3 Location of the end tap for preventing weld defects

2.2 가공부재의 형상

본 장비에서 가공하고자 하는 LNG 탱크의 반경은 20,230mm를 갖는 원형탱크이다. 즉 부재의 내면(inside)은 원형탱크의 중심점을 기준으로 20,230mm의 반경을 갖게된다. 부재의 두께는 약 31mm ~ 46mm를 가지므로 외벽(outside)의 반경은 20,230+(31~46)mm를 형성하게 된다. 본 장비에서 가공하고자 하는 부재의 가공부는 Fig.2에 나타난 바와 같이 부재의 측면이 아니라 상, 하면이며, 이 상, 하면은 일정한 곡률을 갖는 원형태를 가진다.

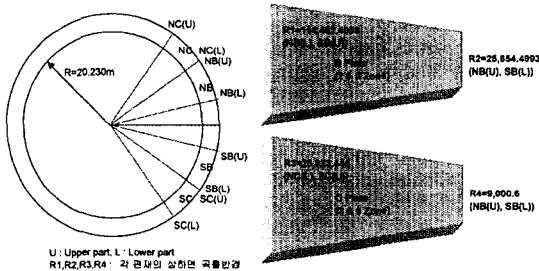


Fig. 2 Definition of radius of B and C plates

가공하고자 하는 부재의 가공면은 일정한 곡률을 형성하고 있으며, 내면을 기준으로 반경 20,230mm의 곡률을 가지고 있다. 각 곡판재들이 여러 개가 모여서 하나의 링(ring)을 형성하게 되고, 이러한 링들이 조립되어 하나의 탱크를 완성하게 된다. 하나의 링을 구성하기 위해서는 여러 개의 곡판재를 용접해야 하며, 용접시 용접결함을 방지하기 위하여 단탭(run of weld tap or end tab)을 사용하게 된다. 따라서 이러한 단탭에 대한 가공여유를 부재가공면에 부여해야 하는데 이를 Fig. 3에 나타내었다. 단탭은 각각의 곡판재가 연결되는 곡부의 끝단 부

위에 위치하며, 곡판재의 가공부중 짧은 면을 상면, 긴 면을 하면이라 정의하였다.

2.3 곡판의 곡면가공

곡판을 가공하고자 할 때 우선적으로 고려해야할 사항은 부재의 실장길이(actual length)와 단탭이 있는 원호 가공면이다. 원소재의 길이에서 실부재의 실장길이를 빼면 실제 가공해야할 부재의 길이가 구해지게 되며, 이를 구현하기 위하여 각각의 부재 곡면 중앙부 상, 하면에 레이저 변위센서를 설치하였다. 가공전에 레이저 센서와 원소재 상, 하면 사이의 거리를 측정함으로써 가공중 실제 절삭깊이를 예측할 수 있으며, 원하는 절삭깊이에 따른 가공기의 절삭방향 이송량을 결정할 수 있다. 또한 소재가 높이방향(Y축)과 절삭방향(Z축)으로 곡률을 형성하기 때문에 이를 자동 추적할 수 있는 센서 및 알고리즘이 필수적으로 요구된다. 높이방향 곡면추적을 위해서 공압용 접촉센서(air balance tactile sensor)를 이용하였으며 이를 Fig.4에 나타내었다. 공압용 접촉센서는 가공헤드(head)부에 부착되어 있으며, 가공헤드의 중력에 의한 처짐을 상쇄시켜 주는 역할을 한다. 즉 가공헤드와 부재 표면간에 높이차가 발생하면 헤드는 자동적으로 중력에 의해 낙하하려는 성질을 가지며, 이때 과도한 부하가 부재표면에 작용하게 된다. 이로 인해 부재는 변형이 발생하고 결국에는 가공정밀도를 감소시키는 요인으로 작용하게 된다. 공압용 접촉센서는 기계적으로 가공헤드를 부재면에 접촉시켜주며, 이때 작용하는 부하가 최소가 되도록 공압으로 반력을 형성시키는 역할을 한다. 절삭방향의 곡을 가공하기 위하여 수치제어기(Numerical Controller, NC)를 개발하였으며, 공압용 접촉센서와 수치제어기의 특성을 조합하여 3차원 곡률가공 시스템을 구성하였다. 가공축이 움직이는 궤적과 가공하고자 하는 원호의 상호 기하학적 관계를 Fig.5에 나타내었다.

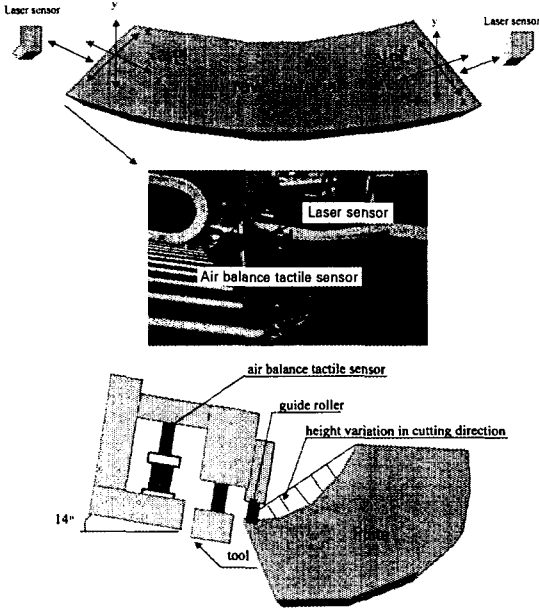


Fig. 4 A Schematic diagram of an experimental apparatus

Fig.5의 (b)에 도시된 H 및 H1, H2는 원호관계식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = R - \sqrt{R^2 - (L/2)^2} \quad (1)$$

$$H1 = H2 = Y1 = \sqrt{R^2 - (L/2 - L1)^2} - (R - H) \quad (2)$$

$$Y2 = (\sqrt{R^2 - (L/2 - L1)^2} - (R - H)) / 2 \quad (3)$$

$$Y3 = \sqrt{R^2 - (L/2 - L1/2)^2} - (R - H) - Y2 \\ = \sqrt{R^2 - (L - L1)^2 / 4} - \sqrt{R^2 - (L/2 - L1)^2} / 2 - (R - H) / 2 \quad (4)$$

- 여기서, L : 전체 가공 주행거리(주행축의 이송거리)
 L1 : 단턱 가공용 전체 주행거리
 R : 가공부재의 원호반경
 H : 원호가공을 위한 절삭 깊이방향 이송양
 H1, H2, Y1 : 단턱 가공용 절삭 이송양
 Y2 : 단턱 가공용 전체 절삭 이송양의 보조점
 Y3 : 단턱 가공을 위한 마진(margin)
 X : 가공기 주행방향
 Z : 가공기 절삭깊이 방향

원호보간을 구현하기 위해서는 시점과 보조점 그리고

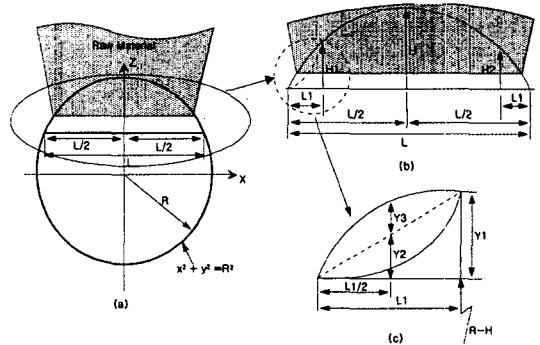


Fig. 5 Geometrical relationships of the traveling machine and circular interpolation

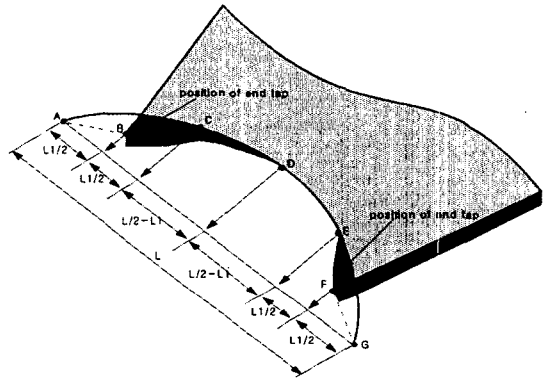
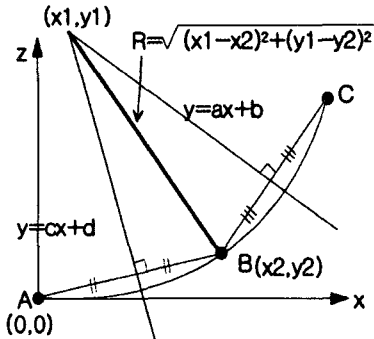


Fig. 6 A Schematic diagram of position data to implement circular interpolation

중점이 필요하며, Fig.3에 도시된 상면을 가공하는 절차는 다음과 같다. 우선 주행 시작점으로부터 단턱을 형성할 수 있는 원호를 구성한 다음, 부재의 원호가공을 위한 원호 프로그램을 작성한다. 끝으로 가공부 끝단에서 다시 단턱을 형성할 수 있는 원호를 구성해야 한다. 이를 Fig.6에 나타내었다.

단턱을 형성할 수 있는 원호를 구현하는 방법은 다음과 같다. 우선 단턱을 형성하기 위한 원호를 A-B-C와 같이 지정한다. 여기서 A는 시점, B는 Y3를 이용한 원호 보조점 그리고 C는 종점데이터이다. 단턱이 없는 실 원호보간을 구현하기 위해서는 C를 시점, D를 원호 보조점 그리고 E를 종점으로 두면 된다. 끝으로 원호 끝단에서의 단턱은 E를 시점, F를 원호 보조점 그리고 G를 종점으로 두면 된다. 모든 시점은 항상 원점데이터, 즉 (0,0)의 정보를 가진다. 마찬가지로 가공부재의 하면의 경우도 위와



시점 : A, 보조점 : B, 종점 : C
 ▷기준축 이송 어드레스(address) : L1
 ▷보조축 이송 어드레스 : L1/2
 ▷기준축 원호 어드레스 : C점의 Y축 이송거리(Y1)
 ▷보조축 원호 어드레스 : B점의 Y축 이송거리(Y2+Y3)

Fig. 7 A Schematic diagram for calculating radius

같은 방법으로 원호를 구현할 수 있다. 원호를 구현하기 위한 시스템으로 주행축 이송, 절삭방향의 이송 기능이 있는 2축 모터를 사용하였다. 여기서 주행축은 기준축이며, 절삭방향은 보조축으로 선정하였다. 단턱을 구현하기 위한 원호데이터 및 NC 제어기에서 원호반경을 구하는 알고리즘을 Fig. 7에 나타내었다. 임의의 점 A,B,C 사이의 수직이등분선이 만나는 점과 B점과의 거리를 구하면 A,B,C가 이루는 원호반경을 구할 수 있다.

임의의 점 A,B,C사이의 수직이등분선이 만나는 점과 B점과의 거리를 구하면 A,B,C가 이루는 원호반경을 구할 수 있다.

가공하고자 하는 부재의 기하학적 조건과 원호보간 정보가 결정된 후 초기 절삭가공을 위해서는 툴과 레이저 센서간의 거리, 레이저 센서와 가공부재사이의 거리 및 절삭원점에서 원호 상단면까지의 거리가 정확히 결정되어야 한다. 본 연구에서는 툴과 레이저 센서간의 거리를 3차원 측정이 가능한 EDM(Electric Distance Measurement)장비를 이용하여 측정하였다. 레이저 센서와 부재사이의 거리는 레이저 센서의 특성에 의해 구해지며, 절삭원점과 원호 상단까지의 거리는 원호보간 데이터에 의해 결정된다. 이를 Fig. 8에 나타내었다.

LNG 탱크의 곡판재 가공시 최종 용접작업에 필요한 개선형상을 형성하기 위하여 3가지 형태의 절삭공구를 사용한다. 본 가공 장비에 사용된 세 가지 절삭공구의 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 작업절차는 평 컷터(plane

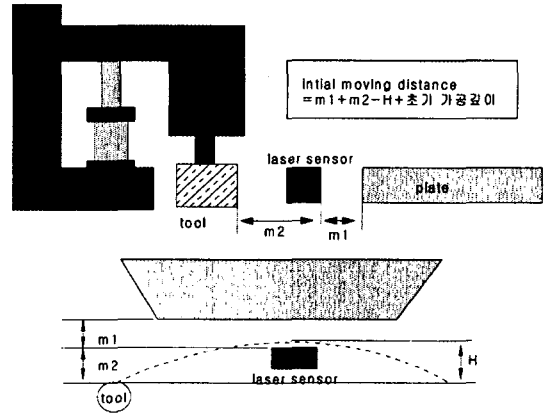


Fig. 8 A Schematic diagram for determination of initial depth of cut

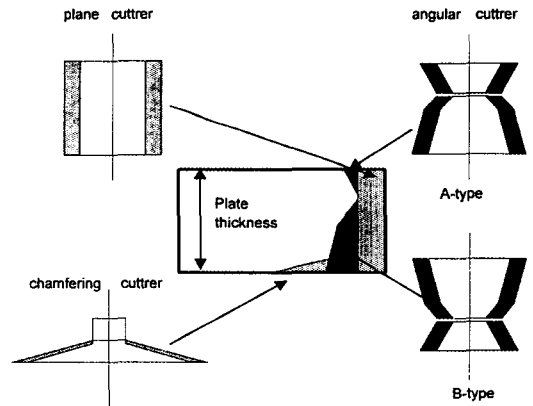


Fig. 9 Shapes of cutters used in the edge bevelling machine

cutter)로 개선 하고자 하는 위치까지 절삭한 후 개선 컷터(angular cutter)로 원하는 개선형상을 얻게된다. 용접하고자 하는 판재의 두께가 상이할 경우 개선 작업 후 챔프링 컷터(chamfering cutter)를 사용하게 된다.

3. 가공 조건 선정

부재의 가공 정밀도 못지 않게 중요한 변수는 가공면의 거칠기 및 가공부의 개선형상이다. 가공부의 거칠기 및 개선형상은 소재의 두께, 주축 회전수, 가공기의 가공깊이 그리고 가공속도와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 곧 생산속도와 같은 개념으로 정의할 수 있다. 소재의 두께에 따라 주축 회전수, 가공속도 및 가공깊이가 적절

한 범위를 넘어서면 가공면이 거칠 뿐 아니라 주축 회전 모터에 과도한 부하를 주기 때문에 장비의 수명에 지대한 영향을 미치게 된다. 또한 이러한 변수들이 적절한 범위 이하의 값으로 선정되면 모터의 부하 및 가공면의 거칠기에는 별 영향을 주지 않지만 생산속도가 느려짐으로서 시간과 비용면에서 문제점이 발생하게 된다. 따라서 소재의 두께, 주축 회전수, 가공깊이 그리고 가공속도에 따른 모터의 부하 및 가공면의 거칠기를 예측할 수 있는 시스템 및 원하는 표면조도, 소재의 두께, 가공속도 그리고 모터의 부하를 선정하면, 자동적으로 가공기의 절삭깊이 및 주축 회전수가 결정되는 시스템이 필수적으로 요구되게 되었으며, 본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위하여 신경회로망기법을 이용하였다.

3.1 신경회로망의 이론적 배경

신경회로망의 특성으로는, 우선 기본 처리단위가 간단하다는 특성을 들 수 있다. 즉 아주 간단한 기능을 가진 프로세서들이 모여서 고도로 복잡한 문제를 해결할 수 있다. 분산표현으로써 데이터는 전체망 구조에 연결되어 있는 각 연결강도의 값들에 의해 기억된다. 또한 몇 개의 처리단위가 망가져도 전체망의 정확도는 크게 떨어지지 않는다. 신경망은 새로운 패턴을 학습하기 위해 스스로 연결강도를 조정할 수 있고, 프로그래밍이 어려우나 구조와 메커니즘이 익숙한 경우에 적합하다.^(7,8,9)

3.2 가공면의 거칠기 및 모터 부하를 예측을 위한 신경회로망 구성

신경회로망은 입, 출력 그리고 은닉층으로 구성되어 있으며, 원하는 출력결과와 학습에 의해 나타나는 실제 출력사이의 오차를 최소화하면서 각 연결강도들을 최적화시키는 과정이 학습의 원리이다. 에너지 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = (1/2) \sum_p \sum_k (d_k - a_k)^2 \quad (5)$$

여기서,

d_k : 실제 실험에 의한 가공면의 거칠기 및 모터 부하
 a_k : 신경회로망을 통해 결정되는 가공면의 거칠기 및 모터 부하

사용된 시그모이드 함수는 다음과 같다.

$$S(x) = 1.0 / (1.0 + \exp(-x - \theta)) \quad (6)$$

여기서, θ : 내부 오프셋치(internal offset value)

$S(x)$: 시그모이드 함수(Sigmoid function)

입출력 값은 시그모이드 함수의 특성에 의해 값들이 0 혹은 1로 수렴하는 것이 어려우므로, 0.1 - 0.9 사이의 값으로 평준화(normalizing) 하였다.

이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{normalized value} = 0.8 * (\text{value} - \text{value}_{\min}) / (\text{value}_{\max} - \text{value}_{\min}) + 0.1 \quad (7)$$

여기서 value_{\max} 은 소재의 두께, 측정된 주축회전수, 가공깊이, 가공속도, 표면거칠기 및 모터 부하의 최대치 혹은 그 이상의 값을 의미하며, value_{\min} 은 소재의 두께, 측정된 주축회전수, 가공깊이, 가공속도, 표면거칠기 및 모터 부하의 최소치 혹은 그 이하의 값을 의미한다. 또한 value는 실제 사용된 앞 변수들의 실제 값을 의미한다. 단 가공면의 거칠기는 수치적으로 표현하기가 매우 힘들기 때문에, 본 연구에서는 표면의 면조도가 광택이 있는 경우를 0.9로 가정하였으며 표면조도가 열악할수록 그 수치를 낮게 지정하였다. 소재의 두께, 주축 회전수, 가공속도 그리고 가공깊이에 따른 가공면의 거칠기 및 주축 모터 부하를 예측하기 위한 신경회로망 구조를 Fig.10에

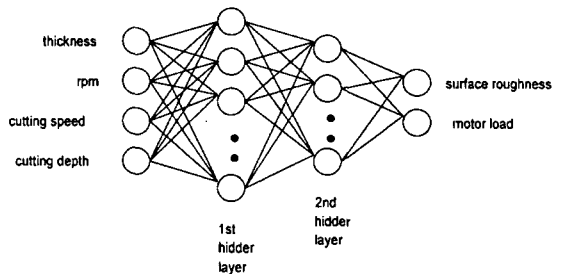


Fig. 10 A Schematic diagram of the neural network to predict motor load and surface roughness

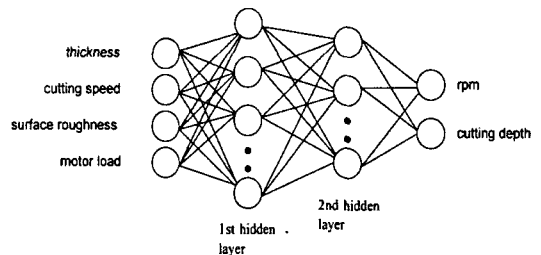


Fig. 11 A Schematic diagram of the neural network to predict rpm and cutting depth

나타내었으며 가공후 표면조도, 소재의 두께, 가공속도 그리고 모터의 부하에 따른 가공기의 절삭깊이 및 주축 회전수를 예측하기 위한 신경회로망 구조를 Fig. 11에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

곡판을 가공하기 위해서는 가공전 작업인 곡판 위치조정(fit-up)이 선행되어야 하며, 위치조정 후 실제 가공해야 할 가공깊이를 정밀하게 측정해야 한다. 곡판의 가공정밀도는 상, 하면간의 실장거리가 0.5mm 이내의 오차를 가져야만 한다. 본 장비에서는 절삭방향의 가공정밀도를 향상시키기 위하여 2축 원호 보간이 가능한 NC 장비를 개발하였으며, 부재의 상, 하면에 해상도가 0.1mm인 레이저 센서를 조사하여 가공깊이 정밀도를 향상시켰다. 또한 높이방향 자동추적을 위하여 공압용 접촉센서를 이용하였으며, 이를 통해 원하는 위치에서의 정밀한 개선면을 얻을 수 있었다. 개발된 시스템을 Fig. 12에 나타내었다. 본 장비를 사용하여 길이가 약 10m 정도 되는 알루미늄 곡판재를 가공한 결과 원하는 가공오차에서 약 0.5mm 이하의 가공정밀도를 얻을 수 있었다. 본 개발 장비는 2차원 곡면을 자동으로 추적하는 NC 장비 및 이를 구현하기 위한 알고리즘, 그리고 높이 방향의 위치를 자동적으로 추적할 수 있는 센서를 도입함으로써 임의의 3차원 곡면 가공이 가능할 수 있었다. 이러한 시스템을 바탕으로 유사한 가공특성을 갖는 시스템 및 구동특성이 비슷한 분야에 효율적으로 적용될 수 있으리라 사료된다.

공정변수들이 가공면에 미치는 영향을 조사하기 위하여 다양한 각도에서 실험을 행하였다. 다양한 실험데이터중 일부는 신경회로망의 학습데이터로 이용하였으며, Fig.10과 Fig11 구조의 신경회로망을 학습시키는데 필요한 대표적인 실험데이터를 Table. 1에 표기하였다. 실험에 의하면 주축회전수가 높을수록 가공면이 깨끗하였으며, 모터의 부하는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 또한 가공하고자 하는 부재의 두께, 절삭깊이 그리고 가공속도가 클수록 주축 모터에 작용하는 부하는 증가하였으며 가공면 조도도 떨어지는 경향이 나타났다. 신경회로망은 은닉층(hidden layer)의 구조에 따라 학습신뢰도가 달라지며, 또한 은닉층의 구조가 학습 신뢰도에 미치는 영향이 수학적으로 명확히 정립된 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 은닉층의 처리단위를 다양하게 변화시켜, 그 중에서 가장 예측 신뢰도가 높은 구조를 사용하였다. Fig 10에 나타난 신경회로망을 구현하기 위해서는 입력이 4개, 첫 번째 은닉층의 처리단위가 10개, 두 번째 은닉층의 처리단위가 6개, 그리고 출력이 2개인 구조가 예측 신뢰도가 높았으며, 그 학습과정을 Fig.13에 나타내었다. Fig.11와 같은 구조에 대해서는 첫 번째 은닉층의 처리단위가 12개, 두 번째 은닉층의 처리단위가 8개인 구조가 예측 신뢰도가 높았다. Fig. 10에 제안된 신경회로망의 신뢰도를 검사하기 위하여 실제 실험치와 신경회로망을 통해 예측된 값들의 에러율을 Fig. 14에 나타내었으며, Fig.11에 대한 신뢰도는 Fig. 15에 나타내었다. 이 결과에 의하면 실제 실험치와 예측된 값들의 차이는 대부분 -5% 와 +5% 사이의 에러율을 나타내었다.



Fig. 12 Photograph of LNG edge bevelling machine

Table 1. Representative data used to train a neural network for plane cutters

No.	Specification	thickness (mm)	rpm (rpm)	cutting depth (mm)	cutting speed (mm/sec)	surface roughness	motor load (A)
1		42	3300	15.5	260	GOOD	20
2		42	3300	15.7	350	GOOD	30
3		42	3300	15.4	400	GOOD	35
4		42	3300	15.4	450	GOOD	36
5		42	3300	16.0	500	GOOD	37.5
6		42	3300	15.6	650	BAD	48.5
7		42	3300	12.1	750	GOOD	37.5
8		42	3300	12.5	800	BAD	40.1
9		42	2700	10	400	GOOD	26.7
10		42	2700	12	400	GOOD	37
11		46	3300	16	500	BAD	44
12		50	3600	20	265	GOOD	29

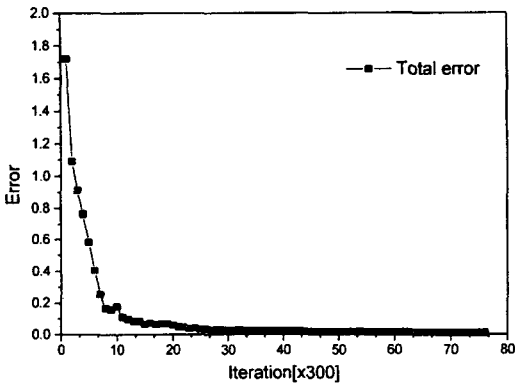


Fig. 13 Variatoin of learning errors, network structure : 4-10-6-2

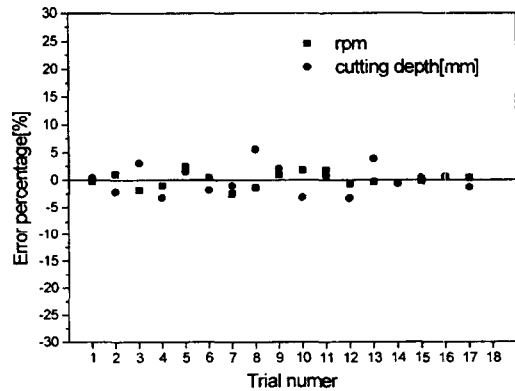


Fig. 15 Result of error percentage experimental data and data estimated using the neural network

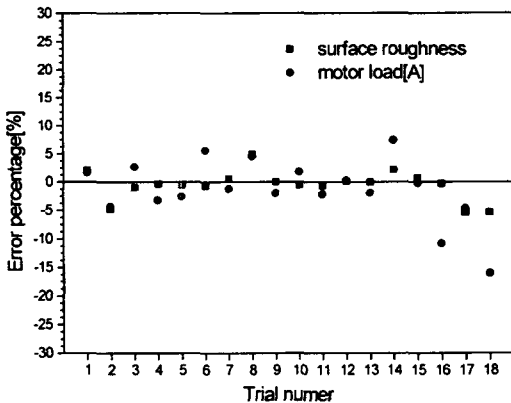


Fig. 14 Result of error percentage experimental data and data estimated using the neural network

5. 결 론

LNG 운반선에 장착되는 알루미늄 탱크는 그 크기가 매우 비대하므로 일반적으로 여러 개의 구획으로 나누어 조립하게 된다. 다양한 두께 및 크기가 다른 곡판재를 수십 장에서 많게는 백여 개의 곡판재로 조립하므로, 각 곡판재에 대한 가공 정밀도가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 알루미늄 곡판재의 높이 방향을 자동적으로 추적할 수 있는 센서 및 절삭깊이 방향으로의 정밀가공을 위하여 3차원 NC 가공장비를 개발하였다. 또한 가공단 각각에 레이저 센서를 부착함으로써 가공정밀도를 향상시켰다. 가공 정밀도 못지 않게 중요한 변수는 가공부의 표면조도이며, 이는 곡판 연결시 연결부위의 용접품질을

결정하는 인자로 작용할 수 있다. 가공부의 표면조도는 선정된 공정변수에 의해서 결정되며, 따라서 공정변수와 표면조도 간의 관계를 예측할 수 있는 알고리즘이 필수적이다. 사용되는 공정변수로는 소재의 두께, 절삭깊이, 가공속도, 주축회전수 등이 있으며 결과적으로 나타나는 변수로는 표면조도 및 주축 모터의 부하를 들 수 있다. 본 연구에서는 인공지능을 이용하여 이러한 변수들 사이의 비선형적 관계를 예측할 수 있었으며, 신뢰할 수 있는 예측 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Aritoshi, K. Okita, K. Yasuda, N. Arai, I. Takai and S. Funai, "A Study on Cutting of Thin Aluminum Alloy Plates by CO₂ Laser," *일본기계학회지*, Vol. 54, No. 507, pp. 2794-2801, 1987.
2. H. J. Fu, R. E. Devor and S. G. Kapoor, "A Mechanistic Model for the Prediction of the System in Face Milling Operation," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 81-88, 1984.
3. S. C. Lin and R. J. Yang, "Force-Based Model for Tool Wear Monitoring in Face Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 9, pp. 1201-1211, 1995.
4. M. Sato, T. Yamazaki and M. Kubo, "The Cutting Mechanism of an Aluminum Single Crystal Based on the Crystal Slip Theory," *Transactions of Japan Institute of Metals*, Vol. 26, No. 4, pp. 251-258, 1985.
5. G. Yucesan, Q. Xie and A. Bayoumi, "Determination of Process Parameters Through a Mechanistic Force Model of Milling Operations," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 4, pp. 627-641, 1993.
6. A. Saigal and G. G. Leisk, "Milling Alumina-Reinforced Aluminum 6061 Metal Matrix Composites," *Proceedings of the ASME Materials Division*, MD-Vol. 69-1, pp. 653-660, 1995.
7. W. Ameling, J. Borowka, U. Dilthey, L. Kreft, M. Raus and W. Scheller, "Adaptive Arc Sensor for Varying Joint Geometry - the Use of Artificial Neuronal Networks," *Welding and Cutting*, Vol. 9, pp. E24-E25, 1992.
8. R. Reilly, X. Xu and J. E. Jones, "Neural Network Application to Acoustic Emission Signal Processing," *International Conference on Computerization of Welding Information IV*, Orland, Florida, November 3-6, pp. 146-160, 1992.
9. Y. Ichikawa and t. Sawa, "Neural Network Application for Direct Feedback Controllers," *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 3, No. 2, pp. 224-231, 1992.