

용접철근매트를 이용한 철근선조립공법의 생산성 향상을 위한 면가공 설비개발

김현기*, 김정우
다스코(주) 기술연구소

Development of Bending Equipment to Improve Productivity of Rebar Pre-assembly Method Using Welded Bar Reinforcement Mat

Hyun-Gi Kim*, Jung-Woo Kim
R&D Center, DASCO Co., Ltd.

요약 건설산업의 생산성향상을 위해 Modular, OSC 등과 관련된 공법들이 각광받고 있으며, 노동력에 의존하는 철근 조립 공종의 개선을 위한 선조립공법이 다양하게 적용되고 있다. 본 연구는 용접철근매트를 이용한 철근 선조립공법의 확산에 필수적인 휨가공(이하 면가공) 설비개발을 수행하였다. 설비는 기능별로 4개 부분으로 나누고 상세유닛(unit)들을 구성하여 체계적으로 설계하였다. D25, 60개 철근을 최대용량으로 설정하고 평형방정식을 기초로 저항모멘트와 가력모멘트를 계산하여 유압실린더의 제원을 결정하였다. 철근의 굽힘축과 가력봉의 회전축이 다르므로 최소제곱법으로 관계함수를 결정하고 실측을 통해 재설정하였다. 3차원 조립 시뮬레이션을 통해 부품의 오류를 사전에 검토하였고 가닥 철근 실험과 용접철근매트 실물 실험을 수행하여 시작품의 성능을 검증하였다. 수동모드로 이루어진 테스트 결과는 목표한 휨가공을 수행하는데 충분한 것으로 나타났으며, 오차 보정은 설비 작동 후 발생한 오차를 다음 작동 시 당초의 값에 각도를 더하는 시행착오 방법으로 합리적인 각도를 찾을 수 있었다. 향후, 본 연구의 결과를 활용하여 설비 고유의 특성과 스프링백 유발 요인들을 분석하는 실험적 연구와 자동제어를 위한 보정방안 및 제어로직에 관한 연구가 수행되면 추가적인 생산성 향상이 가능 할 것으로 사료된다.

Abstract Construction methods such as modular and OSC methods are attracting attention to improve productivity in the construction industry. Pre-assembly methods are also being applied in various ways to improve the rebar assembly process, which relies on labor. We developed mat-type bending equipment for market expansion of a rebar pre-assembly method using welded bar reinforcement mats. D25 and 60 rebar was set to the maximum capacity, and the resistance moment and acting moment were calculated based on an equilibrium equation to determine the specifications of a hydraulic cylinder. Since the bending axis of the rebar and the rotation axis of the forcing device are different, the relationship function was calculated using the least squares method and updated through measurement data. In addition, errors in parts were reviewed through 3D assembly simulation, and the performance of a prototype was verified by performing mat experiments. A test conducted in manual mode showed that it was sufficient to perform target bending. Correction of the error was done through trial and error by adding the angle in the next operation to the error that occurred in the previous operation, and a reasonable angle was found.

Keywords : Reinforcement-Prefab, Rebar Bender, Hydraulic Cylinder, Bending Test, Spring-Back

본 논문은 국토교통부 스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 RS-2020-KA156007)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(DASCO Co., Ltd.)

email: khk2696@nate.com

Received October 5, 2023

Accepted November 3, 2023

Revised November 1, 2023

Published November 30, 2023

1. 서론

건설시공 분야의 철근콘크리트 공종에서 노동생산성이 낮은 철근조립 공정은 노령화 및 숙련공의 부족현상이 인건비 상승을 더 가속화 하고 있어 개선이 절실하다 [1,2]. 유럽이나 미국에서 일반화된 용접철근매트 공법을 이용할 경우 조립시간 또는 작업자를 감소시켜 공기단축이나 사업비의 절감을 도모할 수 있다. 정확한 배근간격과 결속을 통해 균열이나 처짐을 방지하여 콘크리트 품질도 향상시킬 수 있다[3,4]. Fig. 1과 같이 굽힘 먼가공을 통해 선조립 적용범위는 더 확대 될 수 있다.

'Mesh Bender'로 불리는 기존의 먼가공 설비는 용접철망(Wire Mesh)을 구조재로 사용하고 있는 유럽제품이 대부분이며, 직경 14 mm 이하의 설비가 주종을 이룬다[5]. 그러나 건축물의 기초나 토목구조물은 직경 16 mm(이하 D16)이상의 철근이 주로 사용되므로 휨가공 위한 적정설비가 요구되며, 격자매트 형태의 가공을 위해서는 벤딩핀(Bending Pin) 간격조절이 용이해야 한다.



Fig. 1. Welded bar reinforcement mat and bending products

대부분의 설비는 수작업으로 나사를 풀어 간격조절을 할 수 있어 소품종 다량생산에 부적합하다. 본 연구는 입체가공된 선조립철근 공법의 생산성을 향상을 도모하고자 직경 25 mm(이하 D25)를 최대직경으로 설정하고 벤딩핀 교체나 간격조절이 용이한 범용 굽힘가공 설비개발을 목표로, 기능별 부품 설계와 제작, 시제품 조립을 수행하고 실물실험을 통해 성능을 검증하였다.

2. 용접철근매트 및 철근선조립

2.1 용접철근매트 개요

철근조립 공정의 생산성 향상을 위해 공장에서 제작되는 구조용 용접철근매트는 전기저항 용접방식으로 자동화설비를 통해 생산되며 국가건설기준과 KS규정의 용접

철망 규정을 만족시킨다[6,7]. 공종별 투입비용 중 인건비 비중이 높은 유럽이나 미국과 같은 국가에서는 일반화되어 있는 공법이나 국내의 경우 기계식 가공기술 개발수준에 머물고 있어 철근선조립 공법에 대한 기술개발이 요구된다.

용접철근매트는 배근불량으로 나타나는 시공상의 원인을 제거하여 균열방지나 품질을 향상시키는 장점이 있다. 용접점으로 인한 부착력과 정착력의 증가는 물론 정확한 단면적과 간격의 구현이 가능하고 콘크리트 타설중 이동없이 정확한 철근위치 확보가 가능하다. 균일한 배근이 응력을 고르게 분포시켜 균열방지에 효과적이고 횡방향 구속철근은 슬래브의 강성을 증가시키고 균열과 처짐의 크기를 줄여 사용성을 향상시킨다[8,9]. Fig. 2는 운송 및 중량을 고려한 표준크기와 입열량을 최소화한 용접점 단면을 나타낸다.

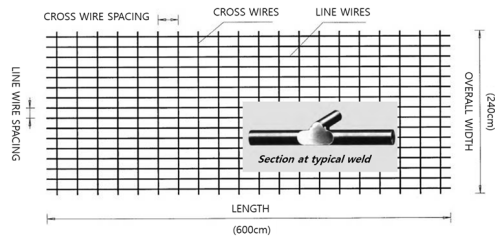


Fig. 2. Standard dimensions(6.00 m × 2.40 m) for Welded bar reinforcement mat

2.2 철근선조립 공법

철근을 공장에서 선(線)가공하고 선(先)조립하여 운송 후 현장에서 거치시키며 최종적으로 조립이 마무리되는 일반적인 선조립 방법 외에도 용접된 케이지나 용접철근매트와 같이 사전조립 없이 곧바로 적용되거나 추가적인 굽힘가공으로 선조립 되는 경우도 있다. 부분적인 유닛 단위의 제품을 조합하는 방법과 연결장치(Coupler)에 주목한 방법, 운송편의를 위해 고안된 방법, 철근상세를 구조해석과 실험을 통해 바꾸는 선조립공법 등 철근 선조립공법은 다양하게 발전되고 있다[10-12].

철근선조립 공법은 철근콘크리트의 품질 및 생산성 향상을 목적으로 가공철근을 공장에서 사전에 조립하거나, 조립장치나 철근상세를 구조적으로 변경하는 방법 등으로 현장에서의 조립시간 또는 작업인원을 최소화 하고, 안전사고 예방 및 사업비 절감을 도모하는 공법으로 정의할 수 있다[13,14]. 본 연구는 Fig. 3과 같이 구조용 용접철근매트와 먼가공제품의 조합으로 형성되는 R-Prefab 공법을 기반으로 설비를 개발하였다.

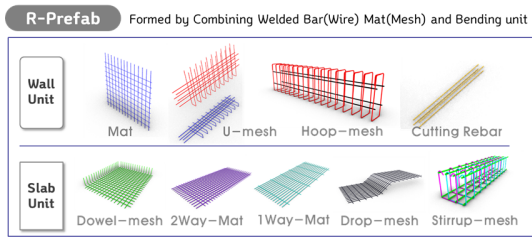


Fig. 3. Concept of reinforcement pre-assembly method using the welded bar reinforcement mat

용접철근매트를 이용한 철근선조립 공법은 Table 1에 정리된 바와 같이 설계기술, 시공기술, 매트의 면가공 기술을 핵심기술로 볼 수 있고, 높은 완성도를 위해 면가공 설비의 개발과 운용이 중요하다. 용접철근매트의 적용과 관련된 모든 공정은 BIM 데이터로 관리되며, 다양한 설계상세, 생산데이터, 공사비, 시공 결과 등의 축적된 데이터는 생산성 향상과 기술개발의 기초자료로 활용할 수 있다[15]. 최근 철근 BIM이 별도로 발주되고 있고, 용접철근매트를 적용하는 선조립공법과 같이 BIM이 적용되면 낭비요소를 줄일 수 있다. 면가공 기술의 다양한 활용과 발전을 위해서는 사전계획과 물류를 포함하는 시스템 구축이 필요하다.

Table 1. Core technology of R-Prefab method

| Division | Description |
|--------------|---|
| Design | Optimal design, planning capabilities, and various rebar detail technologies considering structural standards, manufacturing limitations, transportation conditions, assembly sequence, etc. |
| Construction | Development of construction technology and equipment for welded bar mats, including assembly equipment, lifting and transportation JIG, assembler training, construction materials, and spacers. |
| 3D Bending | Technologies that contribute to the expansion of the application of welded bar mats, such as 3D bending equipment that is differentiated from linear cut and bent, discovery of 3D members, and 2D member pre-assembly technology |

3. 면가공 설비개발

3.1 개발 범위 및 방향

벽식 건축물에 흔히 사용되는 직경 10~13 mm의 철근과 구조용으로 이용되는 8 mm이상의 철선의 경우 겹

침이음의 길이가 비교적 짧아 정착길이를 고려하더라도 철근 수량의 변화는 크지 않으나, Table 2의 이음길이 예시와 같이 건축물의 기초나 토목구조물에 사용하는 대 직경 철근들은 ‘ㄱ’, ‘ㄷ’, ‘Z’ 등 간단한 형태로 가공되더라도 겹침이음에 따른 물량저감이 가능하다. 용접철망은 일반적으로 14 mm이하의 철선이 이용되며, 유럽의 경우 16 mm, 미국은 19 mm가 최대직경으로 사용된다.

Table 2. Tensile splice length for deformed bar (fy=400MPa)

| Splice Length (mm) | fck | | |
|--------------------|--------|--------|--------|
| | 21 MPa | 24 MPa | 27 MPa |
| Rebar type | | | |
| D16 | 880 | 810 | 770 |
| D19 | 1,040 | 960 | 920 |
| D22 | 1,500 | 1,410 | 1,330 |
| D25 | 1,710 | 1,600 | 1,510 |

철선 직경이나 연성을 고려하면 굽힘반경이 작아 비교적 용이한 가공성으로 다양한 용도의 제품생산이 가능하다. Fig. 4와 같이 유럽, 중국, 일본을 중심으로 다양한 면가공 설비가 개발되어 판매 중이고, 국내에서도 활용되고 있다.



Fig. 4. Example of mesh bending M/C from Google search

그러나 대부분의 면가공 설비는 철근의 직경과 간격이 바뀔 때 마다 벤딩핀을 교체하거나 간격을 재설정 할 수는 있지만, 촘촘한 격자의 형태나 벤딩핀의 숫자를 고려하면 매트의 타입이 바뀔 때 마다 세팅에 소요되는 시간이 크게 늘어나는 단점이 있다. 물리적인 힘을 가하여 구조기준이 허용하는 각도와 형태를 모재의 구조적 손상 없이 굽히는 면가공설비는 보조치구를 활용하거나 벤딩핀을 다양하게 구비하여 생산범위를 확장할 수 있다.

본 연구에서는 설비개발을 위해 몇 가지 제한적인 범위를 설정하였다. 먼저, 현재 국내에서 생산하는 용접철

근매트의 직경이 최대 25 mm이므로, 동일수준을 가공할 수 있도록 범위 설정하였다. 다음으로, 구조설계기준에 따른 표준갈고리의 최대 굽힘각도 135도를 범위로 설정하고, 재료나 직경별 특성치를 반영하여 정밀도를 확보할 수 있도록 미세조정 장치를 고안하였다. 그 다음으로는, 표준갈고리 내면반지름 크기를 고려하여 형태와 크기를 설정하고, 벤딩핀을 쉽고 빠르게 교체 혹은 이동시키도록 유압클램프를 적용하는 고정방식을 도입하였다. 추가적으로, 벤딩핀 교체를 위해 철근 직경별로 각각 달리 제작하고, 내면반지름 길이가 달라질 경우 벤딩핀의 지지원판 교체가 가능하도록 계획하였다. 마지막으로, 가로 6.0 m, 세로 1.5 m, 높이 1.5 m, 6톤 이하 중량으로 설정하였고, 수평 선반(Table)을 설치하여 작업자의 사용편의와 안전사고 예방이 가능하도록 계획 하였다.

3.2 기능별 설계

설정한 개발방향에 따라 기본설계를 수행한 후 각 부품별 3차원 모델링을 통해 반복 검토하고 미흡한 부분을 최종설계에 반영하였다. 기본설계는 Fig. 5와 같이 설비의 기능별 장치와 제어시스템으로 구분하여 진행하였고 3차원 조립 시뮬레이션을 수행하여 각 부품과 운용의 적정성을 평가하였다. 제작된 각 부품의 치수 검증 후 설비를 조립하고 제어시스템과 연계하여 기본적인 작동과 점검을 수행하였다.

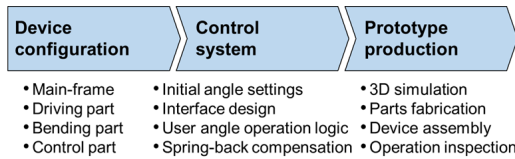


Fig. 5. Summary of design and prototype production process

Table 3. Device configuration by function

| Division | Unit | Function |
|--------------|---|---|
| Main frame | Steel plate | Loading support |
| Driving part | Hydraulic pump, Valves, Pipes, Hydraulic cylinder | Hydraulic pressure generation, transmission and control |
| Bending part | Pressurizing, Bending | Direct involvement in bending |
| Control part | Encoder, PLC | Angle calculation and operation |

용접철근매트를 반복적으로 편리하게 휨 가공하기 위해 4개 부분으로 구분하여 설계하였다. 매트 중량과 가력에 대한 지지역할을 수행하는 골격부, 유압을 발생시켜 전달하고 제어하는 구동부, 휨가공에 직접적으로 관여하는 절곡부, 사용자가 원하는 각도를 산출하고 조작하는 조절부 등으로 구성되고 각 부분의 유닛과 기능은 Table 3에 나타내었다.

3.2.1 골격부 제원

골격부는 용접철근매트 표준길이(6.0m)를 가공 할수 있는 폭과 1.1m 높이에서 작업이 가능하도록 하였다. 전체 중량을 지지하는 하부플레이트 두께는 25 mm, 벤딩핀과 레일 및 유압클램프를 비롯하여 작업하중을 지지하는 상부플레이트는 35 mm, 나머지 프레임들은 기본 두께 20 mm를 Fig. 6과 같이 적용하였다. 유압실린더의 작동방향에 맞춰 측면을 사다리꼴 형태로 정하고, 후면은 폐쇄형이지만 전면이 개방되는 8개의 실린더실로 계획하였다.

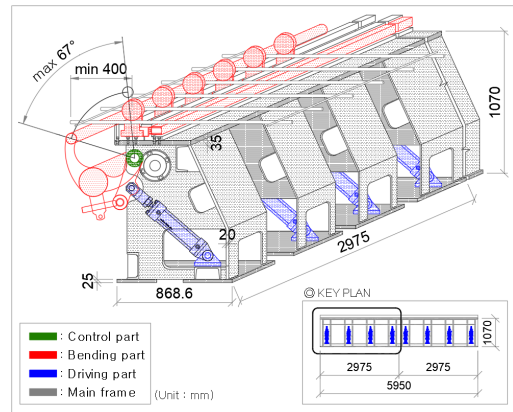


Fig. 6. Device configuration and dimensions

3.2.2 구동부 설계

철근의 휨변형을 가하는 힘 또는 회전력을 발생시키는 구동부는 유압펌프, 밸브 및 배관, 유압실린더 등으로 구성된다. Fig. 7은 가력 모멘트와 저항 모멘트에 대한 개념도를 나타내며, 철근의 굽힘가공을 실행할 실린더 소요력은 Eq. (1)의 평형방정식을 통해 산출할 수 있다.

$$\sum M_O = 0 ; \quad M_L = M_R \quad (1)$$

Where, M_L denotes acting force moment M_R denotes rebar resistance moment

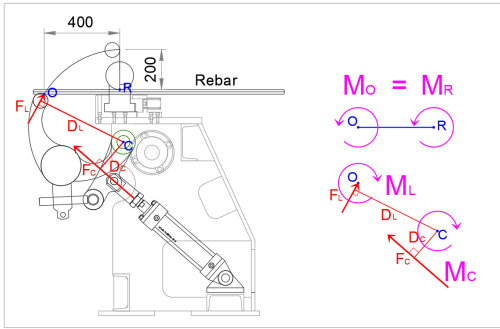


Fig. 7. Equilibrium conceptual diagram for moment of driving part

철근의 회전 저항력을 구하여 작용점의 거리에 따른 힘을 역산하고, 그 힘에 해당하는 회전가력을 거리에 따른 실린더 회전축으로 전환하면 소요력을 산출 할 수 있다. 실린더의 최종 용량은 안전율을 고려하여 결정하였다.

Table 4는 실린더 설계를 위해 소요되는 힘을 산정한 결과를 나타낸다. 철근재원을 SD600, UHD25, 간격 100 mm로 가정하면 폭 6.0m일 때 철근의 최대용량은 총 60가닥이 되고 가력에 저항하는 모멘트(M_R)는 Eq. (2)로부터 구할 수 있다.

Table 4. Calculation of required force for deformed bar (SD600, D25)

| Division | Moment (tmm) | Distance (mm) | Force (ton) | Note |
|------------------|--------------|---------------|---|-------|
| Rebar Resistance | 98.46 | 200 (min.) | 0.49 (1Rebar) 29.54 (60Rebar) | M_R |
| Acting Force | 14.769 | 500 | 29.54 | M_L |
| | | 192 | 76.92 (8cylinder) 9.62 (1cylinder) | M_C |

$$M_R = S_R \times Z_R \quad (2)$$

Where, S_R denotes yield strength of rebar, Z_R denotes section modulus

이때, 회전중심은 벤딩핀의 사분점 하단으로 보고 절곡봉의 작용위치가 400 mm 거리에서 철근의 휨이 시작되나 90도에 도달하면 작용거리가 200 mm로 짧아 더 큰 힘이 소요되며, 평형상태에서 초기 굽힘이 시작되는

값을 최대 가력으로 적용하였고, 가력 속도의 영향은 고려하지 않았다.

가력 모멘트(M_L)는 Eq. (3)로부터 구할 수 있고 동일한 크기의 실린더 회전축 모멘트(M_C)로부터 실린더 소요력(F_C)이 계산된다.

$$M_L = F_L \times D_L \quad (3)$$

Where, F_L denotes acting force D_L denotes distance

Table 4에서 산출된 최대 소요력 76.92 tonf은 8개의 실린더를 배치할 경우 실린더 당 9.62 tonf을 커버할 수 있고 15%의 안전율을 적용하면 약 11.0 tonf을 가력할 수 있어야 하므로, 실린더는 압력 14.3 MPa(140 kgf/cm²)의 KP140H(케이시시정공) 표준형 제품으로 선정하였다. 처짐을 방지하고 내구성을 높이기 위해 실린더 2개를 중앙에 배치하였고 가력오차로 인한 비틀림 방지를 위해 기어방식의 동조장치를 도입하였다.

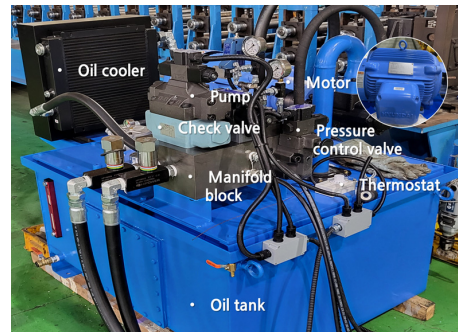


Fig. 8. Configuration and arrangement of hydraulic pump

Fig. 8은 유압펌프 구성도를 나타낸다. 유압장치 전체를 지지하는 유압탱크는 메인 실린더 8개와 클램핑 실린더 30개를 고려하여 400리터 규모로 계획하고, 전기모터는 저압유도 전동기로 전격출력 15마력으로 결정하였다. 유압펌프는 두 종류의 실린더를 컨트롤 하기 위해 토출구가 2개인 더블펌프를 채택하고, 과열방지를 위한 오일쿨러를 도입하였다. 유압제어밸브는 압력과 방향을 제어하는 두가지 밸브로 구성하고, 오일 주입 배관과 방출 배관을 각 2가닥씩, 총 4가닥의 유압배관을 설계하였다.

3.2.3 절곡부 구성

절곡부는 유압실린더의 상하 피스톤운동으로 가압하는 절곡유닛과 사용자가 요구하는 절곡반경을 형성하기 위해 철근을 고정하는 유닛으로 구성된다. 가압절곡 유닛은 스윙암, 회동암, 링크암, 틸딩가이드바, 가압절곡봉으로 구성되고, 스윙암에서 발생한 요동으로 회동암이 승강하면서 철근을 휘게 되며, 틸딩가이드바와 스윙암은 링크암으로 연결되어 있다. 링크암에는 철근의 휨각도를 정밀하게 미세조정 할 수 있는 고정위치 조절 장치를 배치하였고 가압절곡 유닛의 장치들은 분해조립이 가능하도록 볼트이음을 적용하였다.

절곡고정 유닛은 철근의 굽힘 형상을 만들고 지지해주는 벤딩핀과 간격에 따라 배열되는 벤딩핀을 지지해주는 레일, 벤딩핀을 자동으로 고정하고 해체하는 유압클램프로 구성된다. Fig. 9에 각 유닛의 명칭을 나타내었다.

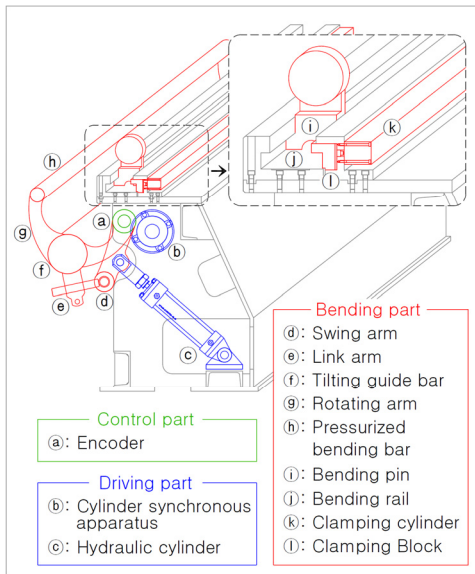


Fig. 9. Unit configuration and designation for bending part

용접철근매트의 직경이나 간격이 달라질 경우 기존 설비는 벤딩핀 고정 볼트를 모두 풀고 재배열하는데 많은 시간이 소요되어 생산성이 저하되었으나, 본 연구에서는 유압클램프를 도입하여 벤딩핀의 고정 및 해제를 간단한 버튼 조작으로 가능하게 하였다. 벤딩핀은 Fig. 10과 같이 프레임, 원판, 이격블록으로 구성되고, 프레임은 교체하지 않지만 범용성을 고려하여 원판과 이격블록은 D16~D25 철근까지 구조설계기준[16]의 구부림 내면반지름에 따라 교체가 가능하도록 계획하였다. 프레임 하

부는 철근 피막이나 이물질 제거가 용이하도록 직경 25 mm 반원 홈을 만들고, 마찰 최소화를 위해 원판이 회전할 수 있도록 후면부 홈에 탈착이 가능한 링핀으로 고정하였다.

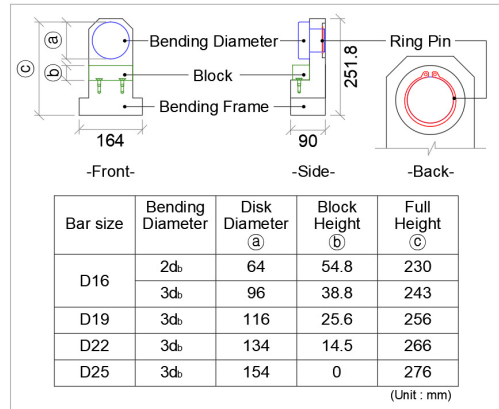


Fig. 10. Detailed specifications of bending pins

3.2.4 조절부 설계

조절부는 가압절곡봉의 회전각을 측정하는 엔코더와 제어하는 컨트롤러로 구성된다. 가압절곡봉의 회전축에 설치되어 축 회전에 따른 상대위치를 계속할 엔코더는 인크리멘털(incremental)형의 분해능(회전당 펄스) 5,000인 DBS60E(SICK)모델을 선정하였다.

컨트롤러는 외부 프레임과 조작장치, PLC(programmable logic controller)로 구성된다. 전원과 유압펌프를 작동 및 정지하는 버튼을 비롯하여 벤딩 상승 및 하강, 고정클램프의 전진 및 후진, 비상정지를 위한 버튼을 Fig. 11과 같이 각각 배치하였다. LCD모니터는 사용자의 각도 입력과 데이터 설정편의를 위해 터치형으로 적용하였다.

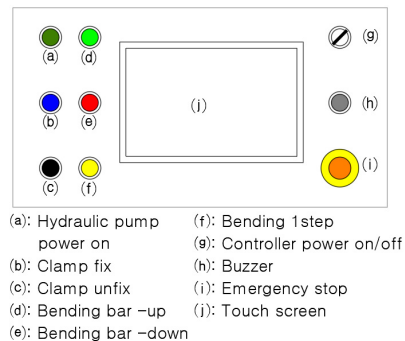


Fig. 11. Control device with input display on touch screen

PLC(programmable logic controller) 시스템은 비교적 간단한 설비 특성과 규모를 고려하여 일체형 모델인 XBC-DR30SU(LS산전)로 선정하였다. 다양한 유형의 산업설비와 자동화 시스템을 제어할 수 있는 LD(ladder diagram)의 동작을 모방하는 컴퓨터기반의 솔리드스테이트(solid state)의 단일 처리(single processor)시스템을 가지며, PLC의 기본구성은 Fig. 12와 같다. 최근 시스템제어 장치의 대부분이 PLC로 대체되었다[17-19].

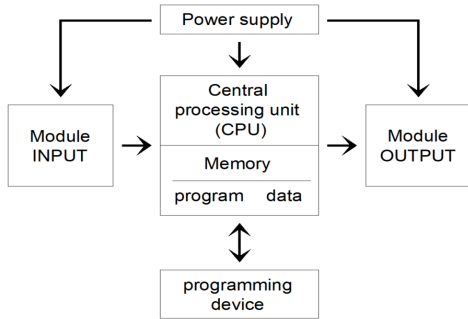


Fig. 12. Basic configuration diagram for PLC

3.3 시작품 제작

설비에 대한 기본설계 후 각 부품과 구동 시스템의 적정성을 2차원 도면기준으로 검토하고 Fig. 13과 같이 3차원 모델링을 수행하였다. 구성품 간 간섭 여부, 가압회전 장치의 방향과 동조장치의 적절성, 내민길이 최소화 방안, 벤딩핀의 높이 조정을 비롯하여 부품조립 과정을 시뮬레이션 하였다.

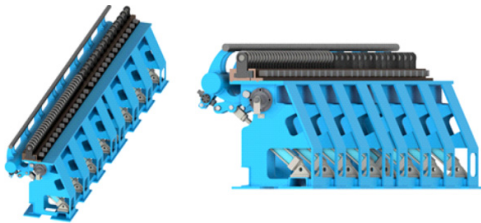


Fig. 13. 3D modeling and simulation of equipment

모델링과 시뮬레이션 결과를 최종설계에 반영하여 수정하고, 각 구성별 소요부품과 메인프레임을 제작하고 치수 검측 후 시작품을 조립하였다. Fig. 14는 부품제작과 조립과정, 유압설비 및 컨트롤러 등 상세 구성품을 나타내며, 작업편의와 안전을 위한 받침대를 추가로 제작하였다.

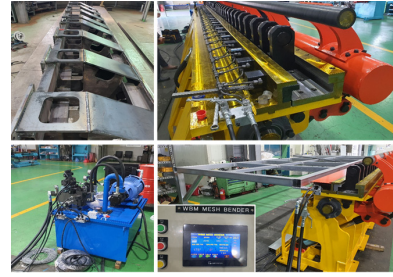


Fig. 14. Prototype production and component details

4. 기본성능 검토

4.1 가동점검

설비 시작품 조립 후 컨트롤러를 통해 기본적인 작동과 점검을 수행하였다. 각 파트별 기본적인 작동을 점검하기 위해 Table 5와 같이 장치구성별 대분류 점검리스트를 작성하고, 육안검사와 함께 가동을 위한 체계적인 작동점검을 진행하였으며, 유지관리와 안전장치에 대한 점검을 추가로 수행하였다.

가동점검의 결과로 나타난 보완사항은 첫째, 길이방향으로 배치된 30개의 유압클램프와 배관이 노출되어 복잡하게 얽혀 보일 뿐만 아니라 손상우려가 있어 2.0 mm 두께의 강판(cover plate)으로 보강하였다. 둘째, 클램프 장치와 유압장치간의 연결파이프들이 적절하게 고정되지 않아 반복 작업 시 떨림에 의한 피로파괴 가능성이 있으므로 진동흡수 패드를 이용하여 고정하였다.

Table 5. Check list for operational inspection

| Division | Check List | Results |
|--------------|------------------------------|---------|
| Main frame | Dimensional accuracy | ☑ |
| | Horizontal stability | ☑ |
| | Connection fixity | ☑ |
| | Harmony between members | ☑ |
| | Resistance to vibration | ☑ |
| Driving part | Pump pressure adjustability | ☑ |
| | Vibration of hydraulic pipes | ☒ |
| | Fluid flow controllability | ☑ |
| | Cylinder operability | ☑ |
| | Noise control | ☑ |
| Bending part | Bending range and angle | ☑ |
| | Clamper operability | ☒ |
| | Pin fixing and replacement | ☑ |
| | Distance from bending point | ☒ |
| Control part | Angular accuracy | ☑ |
| | Controller operability | ☑ |
| | Response rate and speed | ☑ |
| | Degree of overheating | ☑ |

셋째, 철근의 내민길이(가력점과 벤딩핑의 굽힘 중심점 간 거리)가 D25 기준의 400 mm로 설계되어 D16 철근의 최소 내민길이 260 mm의 단부를 가공할 경우의 대안이 필요한 것으로 나타났다. 보조 가압봉을 추가로 설치할 경우 회전력과 반경이 줄어들 수 있어, 스틸파이프를 캡으로 제작하여 내민길이를 연장할 수 있도록 고안하였다.

4.2 성능실험

용접철근매트 실물 가공테스트 수행 전, 가닥철근을 이용하여 사용자 각도를 구현하는데 필요한 기계의 각도를 측정하고 관계함수를 업데이트 하였다. 엔코더를 통해 측정된 회전반경의 범위에 따라 설비의 작동각도는 최소 0도~ 최대 67도로 설정되었다.

$$\begin{aligned}
 D25 : \quad & f(x) = 1.57E-05x^3 - 5.53E-03x^2 + 0.824x + 6.2 \\
 D22 : \quad & f(x) = 1.43E-05x^3 - 5.26E-03x^2 + 0.819x + 7.8 \\
 D19 : \quad & f(x) = 1.63E-05x^3 - 5.41E-03x^2 + 0.801x + 10 \\
 D16(3D) : & f(x) = 1.63E-05x^3 - 5.28E-03x^2 + 0.783x + 12.2 \\
 D16(2D) : & f(x) = 1.92E-05x^3 - 5.83E-03x^2 + 0.817x + 12.5
 \end{aligned}$$

(4)

실린더에 작용하는 힘은 동조장치와 회전축을 거쳐 가압봉이 직접적으로 철근을 가력 하지만, 사용자가 원하는 각도와 설비의 작동 각도는 상이하므로 상호 관계설정이 필요하다. 즉, 특정각도의 가공작업을 위해 설비를 작동시킬 기계각도로 변환하여 입력되어야 하므로, Fig. 15와 같은 테스트를 통해 얻은 실측 데이터와 최소제곱법을 이용하여 Eq. (4)와 같이 상호 관계함수를 구할 수 있다.

추가적으로, 가닥철근을 이용한 수동제어 성능검토를 수행하였다. Fig. 15는 각 직경별로 3가지의 사용자 각도를 정해 수동절곡을 점검한 사례를 나타낸다. 관계함수로 계산된 기계각도를 입력하여 1회 작동 시키고 오차를 최소화 시키는 시행착오를 통해 목표각도를 구현하였다. 또한, 폭6.0m에 대한 힘의 분산과 유지를 위한 동조장치 성능평가를 위해 중앙, 좌·우측 3지점의 실험결과 오차는 거의 없는 것으로 나타났다.

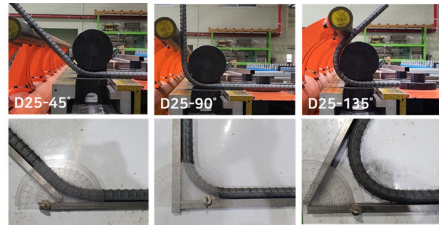


Fig. 15. Basic test case for equipment using a single rebar

Fig. 16은 용접철근매트 실험체의 단면을 나타내며, 각 매트마다 굽힘각을 비롯하여 다양한 체크사항을 실험체 설계에 반영하였다. 철근은 D16~D25, 가로선(용접)이 없는 자유단일 경우 면외 비틀림을 점검할 수 있도록 가로선 유무의 두 가지 경우로 크게 구분하고, 굽힘각 45도, 90도, 135도를 고려하였다. 설비개발 방향에 맞추어 굽힘으로 인한 모재 손상정도, 굽힘각의 정밀도, 내·외경의 적정성, 벤딩핀 교체시간 등을 점검항목으로 설정하였다.

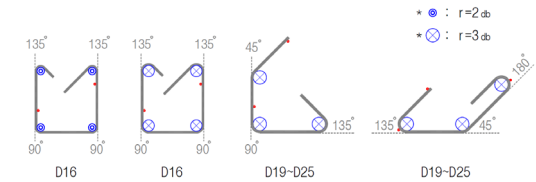


Fig. 16. Cross section of bending test specimens according to standard hook

Fig. 17은 D16~D25 철근에 대한 테스트 과정과 가공품을 나타낸다. 가닥철근과 마찬가지로 몇차례 시행착오를 거쳐 수동모드로 가공되었다. Table 6에 1회 작동 시 발생한 가공 오차를 각도별로 계측한 결과를 나타내었다.

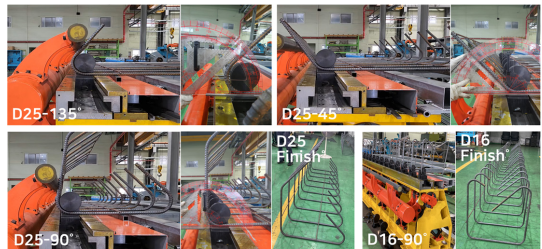


Fig. 17. Bending performance test of equipment using welded bar reinforcement mat

Table 6. Bending results of welded bar reinforcement mat for prototype performance test

| Bar Size | Bending Angle & Error (°) | | |
|----------|-----------------------------|--------|----------|
| | 45° | 90° | 135° |
| D16(2D) | - | 88(-2) | 129(-3) |
| D16(3D) | - | 90(-2) | 130(-5) |
| D19 | 45(0) | 90(0) | 135(0) |
| D22 | 45(0) | 85(-5) | 126(-9) |
| D25 | 42(-3) | 83(-7) | 122(-13) |

D19의 경우 오차가 거의 없었으나 철근 직경과 굽힘 각도가 커질수록 오차가 커지는 경향을 보였다. 수동모드로 목표한 각도의 가공을 위해 각 오차들은 1회차 각도에 더해 2회차 작동 값으로 이용하였고 3회 이상의 추가보정을 통해 완료되었다. 결과적으로 Fig. 17에 나타난 최종 제품을 생산하는데 요구되는 성능은 충분히 검증되었으며, 반복생산을 위한 사용자의 초기치 설정작업이 중요할 것으로 판단된다.

실험체별 편차와 강종, 마찰계수, 굽힘반경 등 오차 유발요인은 다양하므로 자동절곡을 구현하기 위해서는 모든 요인을 커버하는 설비 자동제어 로직 개발이 요구된다. 철근을 비롯하여 강판이나 강관의 굽힘가공을 위한 스프링백에 대한 연구는 설비 고유의 특성치가 반영되는 다양한 방식으로 스프링백을 커버하고 있으므로, 개발된 설비 특성을 고려하여 1회 작동으로 사용자가 원하는 각도를 구현할 수 있는 스프링백 보정 연구가 이루어진다면 생산성이 획기적으로 향상될 것으로 예상된다.

5. 결론

용접철근매트를 이용한 철근선조립공법의 적용확대를 위해 굽힘가공은 필수적으로 요구된다. 본 연구는 철근량을 절감시키고 시공성을 향상시킬 수 있는 면가공설비 개발을 목표로 요구성능에 적합한 설계와 부품제작, 시제품 조립 등 개발방법과 절차를 제시하였고, 실물 실험을 통한 성능검증을 수행하여 아래와 같은 결론을 함께 얻었다.

첫째, 기존 설비의 문제점을 개선하기 위한 방안으로 유압클램프를 이용한 벤딩핀 교체장치와 표준갈고리를 비롯한 다양한 직경의 철근을 적용하기 위해 원형지지판 교체도 가능하도록 고안하였다.

둘째, 설비는 골격부, 구동부, 벤딩부, 제어부로 총 4

개 파트를 기능별로 구분하고, 각 부분은 세부 유닛으로 구성하여 설계가 진행되었을 뿐 아니라, 제작 과 성능검토가 체계적으로 이루어져, 면가공 설비개발에 필요한 구성과 절차적 방안을 제시하였다.

셋째, 가력을 위한 유압장치 설계에 모멘트 평형방정식을 이용하였다. D25철근 60개를 최대용량으로 하는 저항모멘트를 가력점의 하중으로 변환한 뒤 모멘트를 구하고, 실린더 회전축으로 전환하여 각 실린더가 부담할 힘을(약 11톤) 도출하였고, 이 결과에 기초하여 유압기를 구성하는 제원을 확정하였다.

넷째, 범용설비의 개발에 시행착오를 줄이기 위해 벤딩핀의 크기, 가압봉의 회전각 등 벤딩부 유닛의 상호관계 설정이 중요하며, 굽힘가공의 범위를 결정짓는 중요한 사안임을 확인하였다. 3차원 모델링을 통한 설비가동 범위와 간섭여부 체크, 실험방법과 실험체 설계안을 제시하였다.

다섯째, 설비의 성능검증을 위해 용접철근매트를 이용한 실험결과 1회 작동 각도에 오차를 더하여 2회 작동하는 방식으로 3회 이상 수행되어 최종 제품을 제작했으며, 철근 프리팹(R-Prefab) 제작에 충분한 성능을 보였다. 또한, 반복적으로 수행되는 가공작업에서 사용자의 초기치 각도 설정에 필요한 시행착오는 횡수별 오차를 누적하는 방식으로 최소화할 수 있는 것으로 판단된다.

향후, 생산성 향상을 위해 1회에 스프링백을 커버할 수 있는 실험데이터 확보와 자동절곡 로직에 대한 연구가 요구된다. 다양한 스프링백 발생요인과 개발된 설비의 특성치를 반영하는 제어장치와 소프트웨어 로직에 대한 추가연구가 수행되어 보완된다면 개발된 면가공 설비는 현업에 적용되어 용접철근매트를 이용한 철근선조립공법의 확산에 크게 기여 할 것으로 사료된다.

References

[1] S. B. Bae, H. S. Cha, "Development of 3D Visualization Tool of Construction Management Information for OSC-based Precast Concrete Buildings", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.39, No.3, pp.249-258, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5659/JAIK.2023.39.3.249>

[2] H. G. Kim, J. H. Jung, "Preliminary Investigation of Planning Technology for Application of Welded Wire/Bar Mat", *KCI 2022 Fall Academic Conference*, Korea Concrete Institute, Jeju, Korea, Vol.34, No.2, pp.741-742, Nov. 2022.

- [3] L. E. Bernold, P. Chang, "Potential gains through welded-wire fabric reinforcement", *Journal of construction engineering and management*, Vol.118, No.2, pp.244-257, 1992.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1992\)118:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:2(244))
- [4] Wire Reinforcement Institute, The Benefits of WWR [Internet]. Wire Reinforcement Institute, c2023 [cited 2023 July 15], Available From: <https://wirereinforcementinstitute.org/welded-wire-reinforcement/welded-wire-101> (accessed Sept. 20, 2023)
- [5] OSCAM S.r.l, Mesh Bending Machines[Internet]. OSCAM, c2023 [cited 2023 July 15], Available From: <http://www.oscam.com/EN/Mesh-bending-machines/default.aspx> (accessed Sept. 20, 2023)
- [6] Ministry of Trade, Industry and Energy, Welded wire mesh and bar fabrics(KS D 7017:2023), Korean Agency for Technology and Standards, pp.1-24.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Generals of Structural Concrete Design Standard (Strength Design Method) (KDS 14 20 01: 2022), Korea Construction Standard Center, pp.1-48.
- [8] G. S. Hur, Y. H. Yoon, J. S. Yang, S. J. Kim, H. S. Chung, "An experimental study on flexural behavior of one-way concrete slabs", *Journal of preceeding-structural division of the Architectural Institute of Korea*, Vol.13, No.2, pp.555-1109, Oct. 1993.
- [9] B. M. Ayyub, N. Al-Mutairi, P. Chang, "Structural strength of bridge decks reinforced with welded wire fabric", *Journal of Structural Engineering*, Vol.122, No.92, pp.989-997, 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:9\(989\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:9(989))
- [10] S. H. Hwang, K. H. Yang, J. I. Sim, Y. S. Choi, "Evaluation on the Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Supplementary Prefabricated V-ties", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.32, No.3, pp.225-232, Jun. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.3.225>
- [11] H. D. Kim, S. H. Lee, J. H. Cho, S. H. Kim, S. M. Kang, "Moment-Curvature Relationship of RC Structural Walls with Confined Boundary Elements Using Pre-Fabricated Rectangular Continuous Hoops", *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, Vol.35, No.1, pp.45-55, Feb. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2022.35.1.45>
- [12] Y. C. Jung, B. Y. Lee, G. H. Kim, "Application Possibility of Folding Pre-fabricated Rebar Cage in Domestic Construction Fields", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.10, No.2, pp.125-132, Apr. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5345/JKIC.2010.10.2.125>
- [13] H. G. Kim, J. H. Jung, D. H. Kim, "Data Exchange System between Digital Model and Design Information for Welded Wire/Bar Mat", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.33, No.3, pp.43-49, May. 2021.
- [14] J. H. Jung, H. G. Kim, "Development of Welded Wire/Bar Mat Design and Application for Prefab Bridge Deck", *KCI 2021 Fall Academic Conference*, Korea Concrete Institute, Gyeongju, Korea, Vol.33, No.2, pp.713-714, Nov. 2021.
- [15] J. H. Jung, D. H. Kim, H. G. Kim, "BIM based Data Exchange System of Welded Wire/bar Mat for Pre-fab RC Members", *Journal of Korean Institute of Building Information Modeling*, Vol.11, No.1, pp.21-30, Mar. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.13161/kibim.2021.11.1.021>
- [16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Structural Concrete Design Standard for Reinforcement Details (KDS 14 20 50 : 2022), Korea Construction Standard Center, pp.1-13.
- [17] E. R. Alphonsus, M. O. Abdullah, "A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs).", *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol.60, pp.1185-1205, Jul. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- [18] R. Agustin, "Programmable logic controllers versus personal computers for process control.", *Computers & Industrial Engineering*, Vol.33, No.1, pp.421-424, Oct. 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00127-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00127-7)
- [19] J. Swider, G. Wszolek, W. Carvalho, "Programmable controller designed for electro-pneumatic systems.", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.164-165, pp.1459-1465, May. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2005.02.200>
- [20] C. H. Choi, L. Kulinsky, J. H. Kim, "A numerical study of the spring-back phenomenon in bending with a rebar bending machine", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.6, Jan. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/959207>

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : (주)동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 : 가톨릭대학교 에너지플랜트공학과 교수

• 2019년 9월 ~ 현재 : 다스쿠(주)기술연구소 상무

<관심분야>

구조공학, BIM, 해상풍력발전

김 정 우(Jung-Woo Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 경상국립대학교
에너지공학과 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 서울시립대
대학원 첨단녹색도시개발 학과
- 2020년 4월 ~ 2021년 12월 :
세라코(주) 기업부설연구소 사원
- 2022년 1월 ~ 현재 : 다스코(주)
기술연구소 대리

〈관심분야〉

철근선조립공법, BIM, 스마트시티