

이단 압착식 동관 피팅기의 구조설계에 관한 기초연구 A Basic Study on Structural Design of Two-Stage Compression Fitting Device for Copper Pipe

박환철* · 정지현***
Hwan-Cheol Park* and Ji-Hyun Jeong***

(Received 02 March 2022, Revised 18 April 2022, Accepted 18 April 2022)

Abstract : In general, copper tubes with high corrosion resistance, high thermal conductivity and high mechanical properties for the transfer of pressurized fluids are used in industry. In the field of using a refrigerant having a flammability problem, the joint method of the copper pipe by oxygen welding still remains a problem to be solved. This study proposes a compression fitting method that can solve the flammability problem by breaking away from the conventional oxygen welding method of the copper pipe used for refrigerant transfer in the air conditioner. The compression fitting device is implemented as 3D modeling and the joint characteristics of the copper pipe are verified through simulation. This study analyzes the contact length of internal and external copper pipes according to the shape of a roller that generates pressing force when pressing the copper pipe.

Key Words : Flammability problem, Copper tube, Compression fitting, Pressing force

1. 서 론

구리를 이용한 동관(copper pipe)은 수분과 공기 그리고 토양에 대해 뛰어난 내식성뿐만 아니라 높은 열전도성 및 제작의 용이성 때문에 각종 배관 및 건물에 널리 사용되고 있다. 또한 신축성이 좋고 열변형률이 낮으며 진동에 강해서 가압공기나 윤활유 및 냉동기의 냉매를 이송하기 위한 매개체로 광범위하게 활용되고 있다.^{1,2)}

국내에 사용되는 냉매는 HCFC(수소화염화플루오린화탄소), HFC(수소불화탄소) 계열 냉매가 전

체 냉매사용량의 95% 이상을 차지하고 있다. 하지만 세계적인 냉매 규제(몬트리올 의정서의 키칼리 개정안)가 본격화되면서 자연냉매(물, 공기, 탄화수소, CO₂ 등)나 HFO(하이드로플루오르올레핀) 계열의 냉매가 부각되고 있다. 자연냉매의 경우, 낮은 임계온도, 윤활유에 대한 낮은 용해성 및 성적계수 그리고 높은 비체적 등의 이유로 HFO 계열의 냉매가 대체제로 확대되고 있다.^{3,4)} 그러나 HFO 계열의 냉매도 인화성 및 안정성에 대한 우려가 있으며, 환경문제에도 완전히 자유롭지 못하지만 친환경적이며 효율 높은 대체제가 나올 때

*** 정지현(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1585-2295)
: 교수, 제주대학교 기계공학전공
E-mail : badaro@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3627
*박환철(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5670-7246)
: 1등 기관사, 부경대학교 실습선

*** Ji-Hyun Jeong(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1585-2295)
: Professor, Major of Mechanical Engineering, Jeju National University. E-mail : badaro@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3627
*Hwan-Chul Park(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-5670-7246)
: 1st Engineer, Training Ship, Pukyong National University.

까지는 혼합물 형태로 사용될 수밖에 없다.

공조냉동기의 냉매 이송용으로 사용되는 동관은 곡관(elbow)이 필요하거나 한 개의 관을 2개의 관(two-way pipe)으로 나눌 필요가 있을 때, 그리고 관의 직경이 달라질 때(reducer) 등의 경우에 주로 이음매의 강도 및 누설에 강한 산소용접 방법에 의해 상호 연결하여 필요한 공간에 설치되고 있는 실정이다. 동관의 이음매 문제에 대한 연구는 대부분 응력(stress) 문제와 크랙(crack) 분석 등에 국한된다. 따라서 인화성에 문제가 있는 냉매를 사용하는 현장에서 산소용접에 의한 방법은 여전히 해결되어야 할 문제로 남아 있다.

본 연구에서는 공조냉동기의 냉매 이송용으로 사용되는 동관의 이음방법을 기존의 산소용접에 의한 방법을 탈피하여 인화성 문제를 해결할 수 있는 압착식 이음방법을 제안한다. 압착식 이음장치를 3D 모델링으로 구현하고 시뮬레이션을 통해 동관의 이음특성을 검증한다. 시뮬레이션은 벤딩 전용 해석프로그램인 Deform 3D를 사용하고 동관 압착시 압착력을 발생시키는 롤러(roller)의 형상에 따른 동관과 슬리브(sleeve)의 접촉 길이와 접촉부 형상을 분석한다.⁵⁻⁷⁾

2. 장치 모델링 및 설계조건

2.1 피팅시스템 설계

본 연구에서는 냉매이송용 동관의 무용접 이음을 위한 기초연구로 Fig. 1과 같이 롤러의 형상을 다양하게 적용가능하고 롤러의 교체가 가능하도록 조립식으로 압착식 동관 피팅기를 설계하였다. 설계한 압착식 동관 피팅기는 압착부(press part), 회전부(rotating part) 그리고 고정부(fixing part)로 구성되어 있다. 먼저 압착부는 Fig. 2와 같이 이음이 필요한 동관과 동관의 상부에 삽입된 슬리브를 압착하기 위해 사용된다. 동관 및 슬리브를 압착하기 위해 롤러와 연결된 롤러 지지부 상단에 삽입된 육각볼트를 조정하여 두 개의 롤러가 수평을 유지하며 직선운동을 할 수 있도록 설계하였다. 롤러는 변형, 파손 시 또는 다른 형상이 필요할 때 등 교체가 쉽게 이루어질 수 있도록 롤러

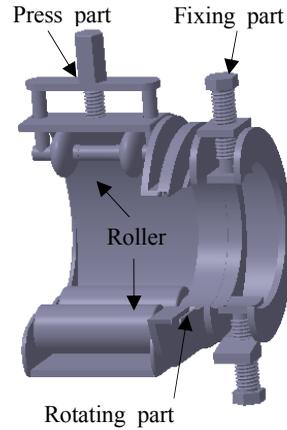


Fig. 1 Schematic diagram of compression fitting device

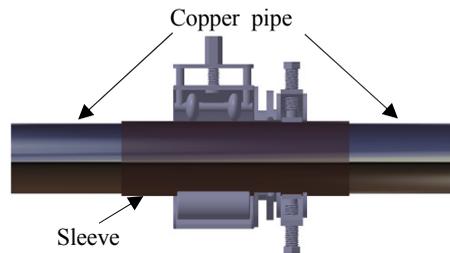


Fig. 2 Fitting system with sleeve and pipe

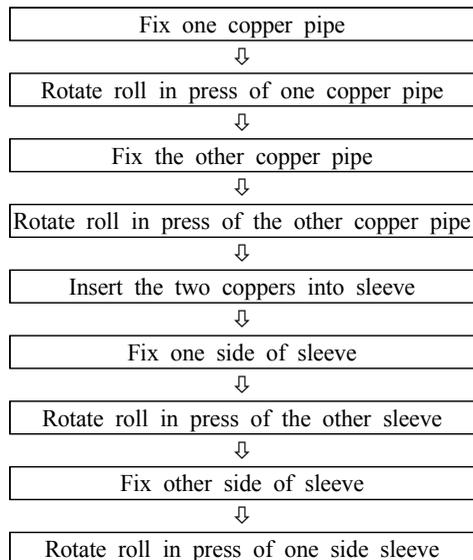


Fig. 3 Step of fitting system

봉에 탈부착식으로 설계하였다. 또한 롤러는 동관 압착시에 마찰력이 최소화되도록 베어링을 삽입하여 회전이 원활하게 하였다.

회전부는 압착부와 고정부 사이에 위치하며 동관 압착시 롤러가 동관의 회전중심을 기준으로 360° 회전이 가능하도록 하는 역할을 한다. 이때 고정부를 기준으로 압착부를 회전시키기 위해 압착부와 같이 회전되도록 설계하였다. 원활한 회전을 위해서 회전부는 압착부와 연결된 회전원판이 고정부와 연결된 회전외판으로 구성되며, 회전원판은 회전외판의 내측에서 회전운동을 하도록 설계하였다.

고정부는 슬리브 또는 동관이 압착과정에서 흔들림 없이 고정될 수 있도록 고정부 상단 및 하단의 양단에 고정판을 만들었다. 양단 고정판은 슬리브 및 동관의 표면이 손상 또는 변형되지 않도록 쿠션이 있는 아치형(arch form)으로 육각볼트를 이용하여 고정판의 압착력을 선택적으로 조절할 수 있도록 설계하였다.

본 연구에서 제안하는 압착식 동관 피팅시스템은 Fig. 3과 같은 공정으로 나누어 회전 압착을 실행시킨다. 먼저 연결하고자 하는 두 개의 동관을 각각 피팅기의 롤러로 회전 압착시키면 두 개의 원형 홈이 각 동관에 남게 된다. 압착공정에 의해 원형 홈을 가지게 된 두 개의 동관을 슬리브 내부로 삽입 및 접촉시킨 후 동관의 원형 홈이 있는 위치에 맞춰 슬리브 외관을 피팅기의 롤러로 회전 압착시킨다. 이러한 다단 공정을 거치면 동관의 원형홈 상부에 슬리브를 압착시켜 동관의 외부 원형 홈과 슬리브의 내부 원형홈이 가압 접촉되어 접촉력부의 접촉력과 접촉면적을 상승시킬 수 있게 된다.

2.2 재료의 물성 및 실험조건

본 연구에서 사용하는 인탈산동은 고순도의 원 재료를 용해한 뒤 용융 동 중의 산소를 산소 친화력이 강한 인(P)으로 탈산 및 산소함유량을 100 ppm 이하로 관리함으로써 전연성, 내식성, 열전도성, 용접성 그리고 가공성 등이 뛰어난 제품이다.

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of material

Mechanical properties		Chemical composition				
Tensile strength (N/mm ²)	Hardness (HR30T)	Cu	Pb	Fe	P	Si
315	50.1	99.95	0	0	0.023	0

Table 2 Experimental conditions

	Copper Pipe	Sleeve
Material	Cu pipe	Cu pipe
Diameter (mm)	∅ 15.88	∅ 17.40
Thickness (mm)	0.7	0.7
Deform depth (mm)	1.0	1.0

이러한 특성을 가지고 있는 인탈산동은 냉공조기, 열교환기, 라디에이터 그리고 유압이나 공기압 장치들의 컨트롤 라인(control line) 등에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 이음매 없는 인탈산동관으로 KS소재규격인 외경 15.88 mm, 두께 0.7 mm를 사용하였고 슬리브는 외경 17.40, 두께 0.7 mm를 사용하였다. 재료의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1에, 시뮬레이션 조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3 벤딩장치의 유한요소 모델

본 연구에서 설계한 압착식 동관 피팅기에 대한 유한요소모델은 Fig. 4와 같다. 동관의 기하모델은 직선 원통형이지만 모델에 대한 해석시간 단축을 위해 대칭되는 모델의 절반만 설계하였다. 설계한 동관 및 슬리브는 yz면을 기준으로 좌-우 대칭성을 가지기 때문에 대칭면(symmetry plane)을 설정하고 동일하게 한쪽(요소 수 : 300,000개, 메쉬타입 : tetrahedral mesh)만 유한요소모델을 만들어 해석하였다. 유한요소해석을 위해 사용한 소프트웨어는 Deform 3D를 이용하여 FEM(Finite Element Method)을 수행하였다.

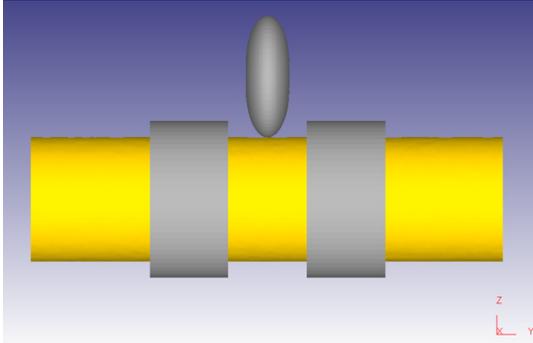


Fig. 4 Modeling of Fitting unit

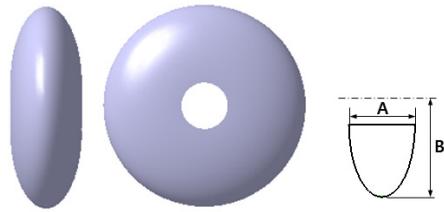


Fig. 5 Diagram to express roller shape

여기서 A는 롤러의 3D형상을 만들기 위한 부분 타원단면의 가로길이이고, B는 회전중심에서 부분 타원단면 꼭지점까지의 길이이다.

먼저 제안하는 압착 피팅시스템의 공정순서에 따라 동관을 10가지 롤러형상으로 압착시키는 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 동관의 압착부 외부형상과 압착될 슬리브부 내부형상의 접촉면적과 압착력이 가장 크게 작용할 것으로 예상되는 변형된 동관의 형상(롤러 B:12 mm)을 선정하였다. 그 이유는 롤러타원 단면의 길이 B가 작을수록 동관 외부 홈이 넓게 변형됨을 확인할 수 있어서, 슬리브를 동관 외부에 삽입 후 슬리브를 압착시키면 압착 초기에 슬리브의 내부와 동관 외부와의 접촉이 거의 발생되지 않아 동관과 슬리브의 접촉력이 작아질 수 있기 때문이다.

Table 3 Material properties of model

Material	C1220
Young's modulus	264[MPa]
Poisson's ratio	0.38
Thermal expansion coefficient	1.3E-4

동관 및 슬리브가 롤러에 의해 압착되는 공정 기간에 동관의 변형을 최소화시키기 위해 고정부를 동관의 좌·우에 두고 동관 및 슬리브를 고정시켰다. 롤러는 동관 및 슬리브의 외곽 형상을 따라 압착공정 동안 회전하면서 z축을 따라 이동되도록 설정하였다. 압착공정 시 변형되지 않는 고정부의 요소들은 강체(rigid body)로 설정하였고, 유한요소해석에 사용된 동관의 물성치는 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 동관은 물리적 특성상 급격한 외력에 의한 변형 시 설계한 형상과 다르게 나타날 수 있기 때문에 동관이 서서히 변형될 수 있도록 변형단계를 총 10단계로 나누어 시뮬레이션하였다. Fig. 5와 같이 A(5.5 mm)는 고정치수로 하고 B를 3.0~12.0 mm까지 롤러의 형상을 10가지로 변화시키면서 시뮬레이션하였다.

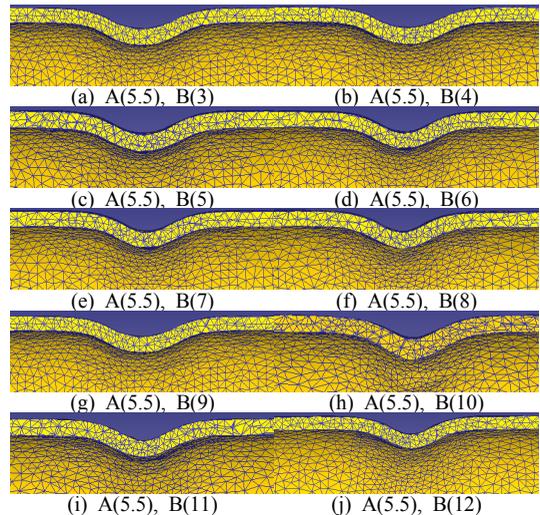


Fig. 6 Shear plane on deformed copper pipe by roller (unit : mm)

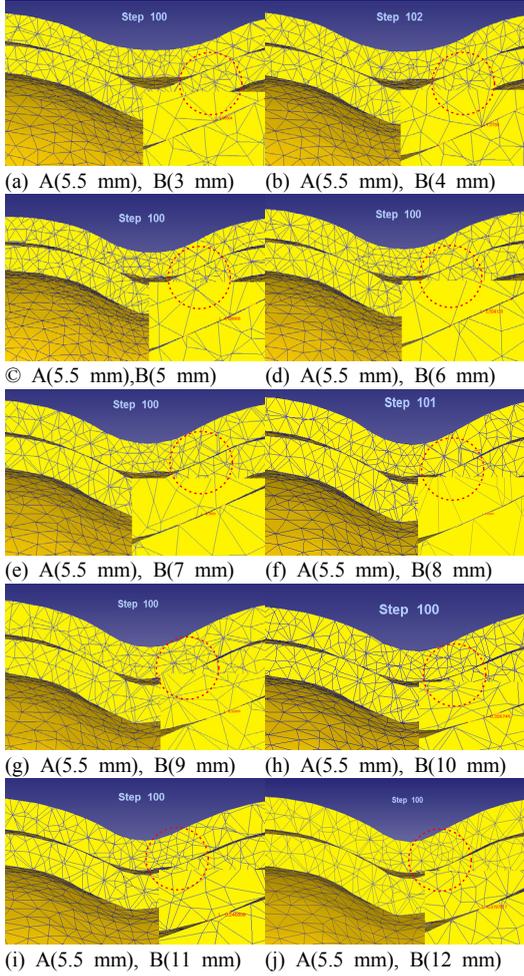


Fig. 7 Shear plane on deformed sleeve by roller

Fig. 7은 롤러(A:5.5 mm, B:12 mm)로 압착한 동관을 슬리브에 삽입 후 롤러의 타원단면 A(5.5 mm)는 고정치수로 하고, B를 3.0~12.0 mm까지 10가지로 변화시켜 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 압착한 동관의 홈 중앙부 외부형상은 롤러의 형상을 띄지만 내부형상은 동관의 두께 영향으로 롤러의 외곽형상보다 완만한 곡선형을 나타내었다. 슬리브의 내부로 삽입한 동관과 슬리브는 동관의 외부와 슬리브의 내부가 압착에 의해 접촉하게 된다. 롤러의 타원단면 B의 치수가 커질수록 롤러의 형상이 커지며 A가 고정치수이기 때문에 롤러 끝단의 곡률은 작아진다. 롤러 끝단의 곡률이

Table 4 Contact length of copper pipe and sleeve

Length of B (mm)	Contact length (mm)
3	1.083640
4	1.079900
5	0.788908
6	0.504129
7	0.359300
8	0.338824
9	0.328440
10	0.326745
11	0.246886
12	0.079782

작아질수록 압착된 동관과 슬리브의 접촉 길이가 작아짐을 알 수 있었다. 접촉 길이의 측정은 압착 완료된 형상을 yz평면으로 자른 후 Deform 3D의 측정 툴을 사용하여 yz평면에 나타난 접촉 부위 중 대칭되는 오른쪽 면을 기준으로 측정하였다. 또한 슬리브의 압착에 의해 동관의 형상도 슬리브 내부와 압착접촉에 의해 같이 변형되면서 접촉 길이가 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 롤러의 타원단면의 치수 B(10단계)에 대한 동관과 슬리브의 접촉 길이를 Table 4에 나타내었다. 동관과 슬리브의 접촉 길이만으로 압착에 의한 이음효과가 보장된다고 할 수는 없지만 슬리브에 의해 동관의 형상이 변형됨으로 상호 압착력이 작용함을 추측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 동관의 이음에서 발생하는 인화성 문제를 해결할 수 있는 압착식 이음방법을 제안하였다. 압착식 이음장치를 3D 모델링으로 구현하고 동관과 슬리브의 압착을 시뮬레이션하였다. 롤러(roller)의 형상에 따라 동관과 슬리브의 접촉부 형상과 접촉 길이를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 롤러의 곡률 형상과 유사하게 동관 및 슬리브의 변형형상이 나타났으며, 고정단의 영향으로 압착부 근처까지만 변형이 나타남을 확인할 수 있었다.

2) 롤러 끝단의 곡률이 작아질수록 압착된 동관과 슬리브의 접촉 길이가 작아짐을 알 수 있었다.

3) 슬리브의 압착에 의해 동관의 형상도 슬리브 내부와의 압착접촉에 의해 슬리브와 함께 변형되면서 접촉 길이가 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

4) 향후 연구에서는 접촉 길이와 접촉면적에 따른 압착력을 분석하여 압착에 의한 무용접 이음 시스템의 효율성을 확인할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2021학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. H. Jeong; Writing-review & editing. H. C. Park; Writing-original draft.

References

1. R. Shotri, L. Faes and A. De, 2020, "Magnetic pulse welding of copper to steel tubes-Experimental investigation and process modelling", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 58, pp. 249-258. (<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.061>)
2. A. Tavassolimanesh and A. A. Nia, 2018, "Investigating the properties of bimetallic aluminum-clad copper tubes produced by friction stir welding", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 751, pp. 299-306. (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.117>)
3. S. Kannan, S. S. Kumaran and L. A. Kumaraswamidhas, 2016, "An investigation on mechanical property of commercial copper tube to aluminium 2025 tube plate by FWTPET process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 672, pp. 674-688. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.205>)
4. S. H. Suh, Y. J. Suh, H. G. Yoon, J. H. Oh, Y. J. Kim, K. M. Jung and H. S. Kwon, 2016, "Analysis of pitting corrosion failure of copper tubes in an apartment fire sprinkler system", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 64, pp. 111-125. (<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.009>)
5. D. W. Jung, J. H. Jeong, J. R. Cho, 2013, "A study on forming analysis for the soft pipe bending process of thickness guarantee", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 66-71. (<http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.1.66>)
6. H. C. Park, B. S. Kim and J. H. Jeong, 2018, "A study on Forming Analysis for Copper Pipe Bending Process Improvement", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 60-65. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2018.22.3.060>)
7. H. C. Park, B. S. Kim and J. H. Jeong, 2019, "A study on Characteristics of Bending Deformation for the Copper Pipe", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 51-56. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.3.051>)