

동 파이프 성형 시 치수 변화 및 배관 시스템의 기계적 특성 변화

Changes in Dimension and Mechanical Characteristics of Copper Pipe System during Pipe Processing

최제민¹, 김수민¹, 채수원²✉
Je Min Choi¹, Soo Min Kim¹, and Soo-Won Chae²✉

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ. Graduate School)

² 고려대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

✉ Corresponding author: swchae@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3367

Manuscript received: 2013.12.10 / Revised: 2014.5.6 / Accepted: 2014.5.8

Copper pipes have been widely used as components of System Air-Conditioner due to high thermal conductivity. This system consists of 150 pipes, which are approximately 10m long in total. Dimensional changes occur during pipe processing such as expansion, reduction and bending. This processing induces changes in length of pipes and makes dimensional differences from original pipes. The summation of the differences of pipes components leads to make huge cumulative dimensional differences. The cumulative differences can cause serious problems such as crack, refrigerant leakage. However the differences have not been considered so far. To satisfy target quality of the system, it is essential to predict and calibrate the differences. In this paper, the changes in dimension were predicted using FEM and it was found that cumulative differences could cause undesirable stress during assembly process. As a result, dimensional differences or undesirable stress could be reduced using the proposed method.

Key Words: Copper (동), Pipe (파이프), Dimension (치수), Pipe Processing (파이프 성형), Deformation (변형)

1. 서론

빌딩용 공기조화시스템으로 많이 사용되고 있는 시스템 에어컨의 실외기는 냉매의 통로로 동 파이프를 사용하고 있다. 동 원소재의 압출이나 인발 과정을 거쳐 직관 형태의 동 파이프로 제작되고, Fig. 1과 같이 정해진 부피 내에 인체의 혈관 처럼 에어컨의 각 중요 부품들을 서로 연결하기 위해 환관, 축관 및 굽힘 성형을 거쳐서 제품에 적용되고 있다.

가정용에어컨과 달리 시스템에어컨은 빌딩과 같이 넓은 면적에 냉방 혹은 난방을 공급하는 역

할을 하게 되는데, 큰 냉방 및 난방 부하에 대응하기 위해서 실외기 부피가 가정용 에어컨에 비해 크다. 또한 다양한 환경에서의 신뢰성 확보를 위하여 내부는 복잡한 파이프 구조를 가지게 된다.

20마력의 실외기에는 약 10미터의 동 파이프가 사용되는데, 이 동 파이프 어셈블리(assembly)는 수많은 단위파이프들로 구성된다. 각각의 단위 파이프들은 정해진 부피 내에서 서로 연결되기 위해 개당 2~3개소의 성형이 가해진다. 이 성형 과정에서 치수 오차가 발생하면, 단위파이프의 치수 오차는 크지 않을 수 있지만 동 파이프 어셈블리의 전체 누적 치수오차는 매우 커지게 된다. 고압의

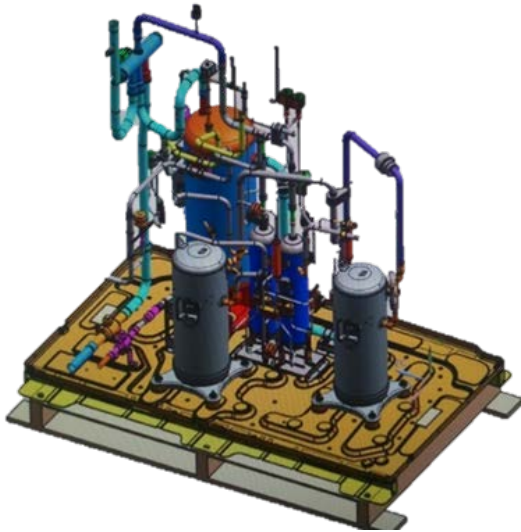


Fig. 1 Cu pipe assembly of the system A/C outdoor

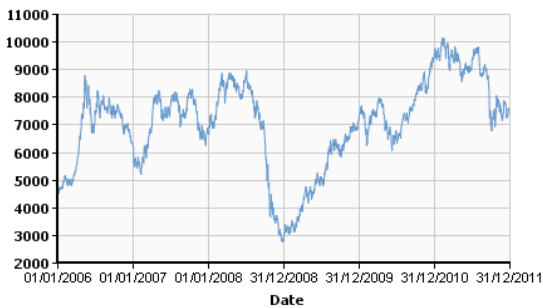


Fig. 2 Material cost of copper (2006 ~ 2011)¹

냉매가 흐르는 통로이며, 압축기에서 발생하는 진동이 전달되는 동 파이프 어셈블리에 시스템에어컨 운전 중에 큰 응력이 가해지게 되고 이로 인해 동 파이프 파손으로 인한 냉매 누설로 시스템 오작동을 일으키게 된다. 이에 제조업체에서는 개발 단계에서 제품이 운전 중에 발생하는 응력이나 진동에 의해 문제를 일으키지 않는 설계 요구 수준으로 제품을 해야 한다. 하지만, 제조 과정에서 발생할 수 있는 동 파이프 성형에 의한 치수 오차는 동 파이프 어셈블리 연결 과정에서 추가적인 변형을 야기시키게 되고 이는 곧 동 파이프에 유해한 응력을 발생시키는 결과를 초래하게 된다.

따라서, 동 파이프 성형 시 치수 오차 예측을 통해 어셈블리 누적 치수 오차를 최소화하여 제품의 내 응력성이나 내 진동성이 설계 요구 수준으로 제품화되어 원하는 제품 품질을 얻을 수 있다.

Table 1 Typical forming dimensions of pipe (mm)

Outer Diameter	Pipe Thickness	Expansion / Reduction			L-Bending	
		Forming Depth	Expansion Inner Diameter	Reduction Outer Diameter	Bending Radius	Clamp Length
Φ6.35	0.7	8	6.5	4.85	R15	15
Φ9.52	0.7	8	9.7	7.95	R25	15
Φ12.7	0.8	10	12.9	10.9	R30	15
Φ15.88	0.8	10	16.1	14.05	R30	20
Φ19.05	1	10	19.25	16.85	R35	25
Φ22.225	1	15	22.45	20	R40	30
Φ25.4	1.2	15	25.65	22.8	R50	40
Φ28.58	1.2	20	28.7	25.9	R50	50

또한, 최근 원자재의 가격이 급격하게 변하고 있어 (Fig. 2) 제조업체에서는 원자재 의존도가 높은 제품들에 대한 원자재 소요량의 정확한 산출을 통해 원자재 가격 변동에 따른 재료비 변화를 정확하게 관리해야 한다.

원자재 사용 의존도가 높은 제품 중의 하나인 에어컨 실외기에 사용되는 냉매 유동용 동 파이프 소요량의 정확한 산출을 위해 동 성형에 의해 발생하는 소요량의 변화를 정확히 관리하기 위한 기준으로 제시하고자 한다. 많은 수의 동 파이프 성형 시 발생하는 치수 변화량의 누적이 매우 크기 때문에 많은 양을 사용할 경우 원자재 사용 중량에 큰 영향을 준다. 이에 설계 도면에 표현된 동 파이프 길이와 성형 전 직관 동 파이프 길이 차이에 대한 정확한 치수 분석을 통해 정확한 소요량 파악이 가능하다.

2. 연구 대상 선정 및 배경 자료

2.1 연구 대상 선정

본 연구에서 대상이 되는 동 파이프는 에어컨에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 인발 공정으로 제작된 인탈산 동관(C1220T-O, KS D 5301규격²)으로 선정하였으며, 두께는 각 외경 별로 상용되고 있는 치수로 선정하였다. 각 파이프 별로 상용 성형 기준 치수를 Table 1과 같이 선정하였다.

동 파이프 가공 방식은 여러 가지가 있으나, 본 연구의 대상이 되는 가공방식은 Fig. 3과 같이 동 파이프를 연결시키기 위한 확관 및 축관, 흐름 방향을 바꿀 수 있는 L-굽힘의 세 가지 가공방식을 선정하였다.

탄소성 해석을 수행하기 위해서 KS D 5301규격²의 동 파이프 물성을 참조하였으며 탄성계수는 117,679MPa (12,000 kgf/mm²), 포아송비는0.33으로

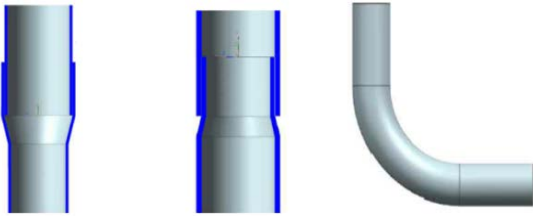


Fig. 3 Shape of copper pipe

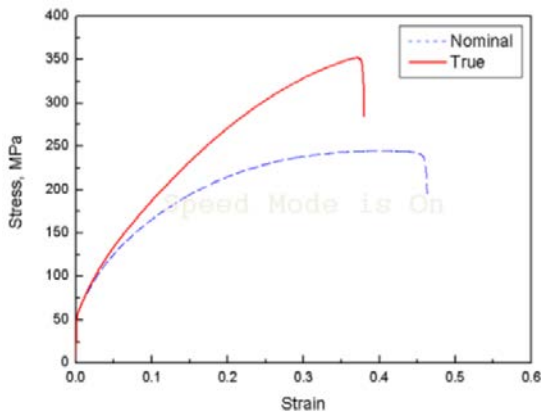


Fig. 4 True stress-strain curve for FEM analysis

하였다. 소성영역 물성치는 Fig. 4와 같이 관련 논문에서 수행된 인장시험을 통한 진응력-진변형을 선도를 참조하여 적용하였다.³

3. 동 파이프 성형 해석

3.1 확관 성형 시의 치수 변화 고찰

3.1.1 확관 성형 해석 계획 수립

동 파이프 확관 성형에서 확관 깊이가 변화되면서 그에 따라 발생하는 치수 변화값도 달라지게 된다. 기준 확관 깊이에서의 파이프 치수 변화를 계산할 수 있도록, 확관 공구가 35mm 이동하는 경우와 30mm 이동하는 두 가지 케이스를 선정하여 변형에 의한 치수변화를 살펴보았다. 상기 두가지 케이스에서 챔퍼부에 의해 발생하는 치수 변화는 동일하므로 확관 깊이에 따른 치수 변화를 독립적으로 계산하는 것이 가능하다.

3.1.2 확관기 3차원 모델링

유한요소 해석을 위해 UG NX Tool을 이용하여 동 파이프 확관기의 3차원 모델을 Fig. 5와 같이 간략화하여 설계하였다.

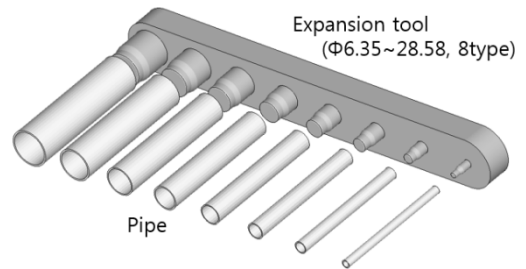


Fig. 5 3D modeling of expansion tool

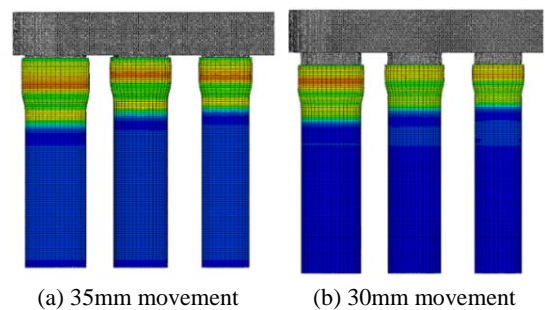


Fig. 6 Finite element analysis of expansion

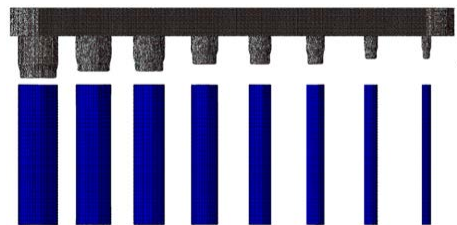


Fig. 7 Analysis result of expansion

3.1.3 확관기 요소망 생성 및 해석

설계된 3차원 모델을 Hypermesh 9.0을 이용하여 Fig. 6과 같이 요소망을 생성하였다. 파이프는 육면체 요소, 확관 공구는 사면체 요소를 사용하였다. 확관공구는 강체로 가정하였고, 파이프와 공구 간에는 접촉 조건을 부여하고, 파이프는 고정시키고 확관 공구를 이동시켜 확관해석을 진행하였다.

생성된 요소망을 바탕으로 ABAQUS 6.10을 이용하여 확관틀이 Fig. 7과 같이 30mm 및 35mm 이동하는 두 가지 케이스에 대해서 유한요소 해석을 수행하였다.

3.1.4 확관성형 해석 결과 분석 및 검증

확관공구 30mm와 35mm 이동 해석 결과를 기준으로 파이프 경 별 확관성형에 의해 발생하는

Table 2 Change of dimension by expansion (mm)

Outer Diameter	A	B	C	D	E	F	X
Φ6.35	6.77	1.23	2.4	0.6	1.15	0.25	1.41
Φ9.52	7.03	0.97	2.51	0.49	0.85	0.22	1.07
Φ12.7	8.93	1.07	4.36	0.64	0.94	0.23	1.17
Φ15.88	9.09	0.91	4.45	0.55	0.78	0.2	0.98
Φ19.05	9.05	0.95	4.42	0.58	0.8	0.23	1.03
Φ22.225	13.79	1.21	9.14	0.86	1.13	0.17	1.3
Φ25.4	13.71	1.29	9.07	0.93	1.16	0.23	1.39
Φ28.58	18.52	1.48	13.84	1.16	1.37	0.21	1.58

변형에 의한 감소길이를 도출하였다. 두 가지 케이스의 해석결과를 바탕으로 아래 세 가지 비례식을 통해 Table 2와 같이 확관 성형 시에 각 파이프 외경별로 감소하는 길이를 도출하였다.

$$(A-C) : (B-D) = (L) : (E) \tag{1}$$

→ 기준 확관 깊이에서 변형에 의한 감소길이(E)

$$(A) : (B-F) = (L) : (E) \tag{2}$$

→ 챔퍼 성형에 의한 변형 감소량(F) 계산

$$(X) = (E+F) \tag{3}$$

→ 확관 성형에 의해 감소되는 길이(X) 도출

L : 기준확관깊이

A : 35mm이동 확관깊이

B : 35mm이동 감소길이

C : 30mm이동 확관깊이

D : 30mm이동 감소길이

E : 기준확관깊이 성형감소길이

F : 챔퍼부성형 감소길이

X : 확관성형 감소길이

3.2 축관 성형 시의 치수 변화 고찰

3.2.1 축관 성형 해석 계획 수립

동 파이프 축관성형에서 축관깊이가 변화되면 그에따라 발생하는 치수변화값도 달라지게 된다. 기준 축관깊이에서의 파이프 치수변화를 계산할 수 있도록, 확관 고찰방식과 동일한 방식으로 진행하였다. 축관 공구가 35mm이동하는 경우와 30mm 이동하는 두 가지 케이스에서 챔퍼부에 의해 발생하는 치수변화는 동일하므로 축관깊이에 따른 치수변화를 독립적으로 계산하는 것이 가능해진다.

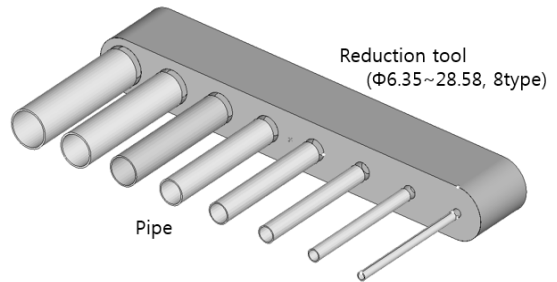


Fig. 8 3D model of reduction tool

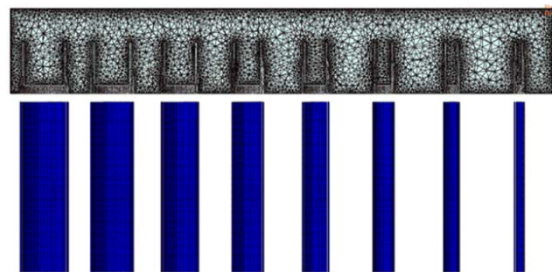


Fig. 9 Finite element analysis of reduction

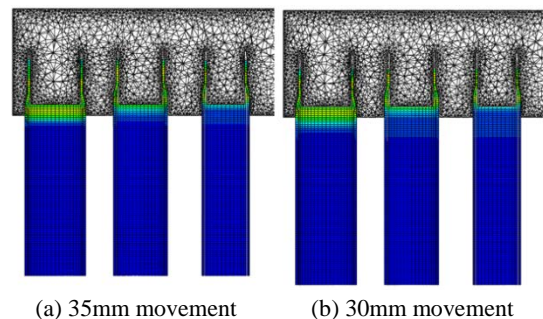


Fig. 10 Analysis result of reduction

3.2.2 축관기 3차원 모델링

유한 요소 해석을 위해 UG NX 7.5를 이용하여 동 파이프 축관기의 3차원 모델을 Fig. 8과 같이 간략화하여 설계하였다.

3.2.3 축관기 요소망 생성 및 해석

설계된 3차원 모델을 Hypermesh 9.0을 이용하여 Fig. 9와 같이 요소망을 생성하였다. 파이프는 육면체 요소, 축관 공구는 사면체 요소로 적용하였다. 경계 조건은 축관 공구는 강체, 파이프와 공구 간에는 접촉조건을 부여하고, 파이프는 고정시키고 축관 공구를 이동시켜 축관 해석을 진행하였다.

생성된 요소망을 바탕으로 ABAQUS 프로그램

Table 3 Changes of dimension by reduction (unit:mm)

Outer Diameter	A	B	C	D	E	F	X
Φ6.35	9.94	1.94	3.89	0.89	1.38	0.22	1.6
Φ9.52	9.08	1.08	3.42	0.42	0.93	0.03	0.95
Φ12.7	11.1	1.13	5.56	0.56	1.02	0	1.01
Φ15.88	10.9	0.94	5.46	0.46	0.88	-0.02	0.86
Φ19.05	11	0.95	5.47	0.47	0.87	0	0.87
Φ22.225	16.2	1.23	10.8	0.81	1.16	-0.03	1.13
Φ25.4	16.5	1.51	11	0.98	1.43	-0.06	1.36
Φ28.58	21.6	1.61	16.2	1.16	1.66	-0.18	1.48

을 이용하여 축관틀이 30mm 및 35mm이동하는 두 가지 경우에 대해서 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 10은 해석 수행 후 파이프의 변형된 모습을 나타낸다.

3.2.4 축관 성형 해석 결과 분석 및 검증

축관 공구 30mm와 35mm 이동 해석 결과를 기준으로 파이프 경 별 축관 성형에 의해 발생하는 변형에 의한 감소 길이를 도출하였다. 두 가지 경우의 해석 결과를 바탕으로 아래 비례식을 통해 축관 성형 시에 각 파이프 외경 별로 증가하는 길이를 Table 3과 같이 도출하였다.

$$(A-C) : (B-D) = (L) : (E) \tag{4}$$

→ 기준 축관 깊이에서 변형에 의한 증가길이(E)

$$(A) : (B-F) = (L) : (E) \tag{5}$$

→ 챔퍼부 성형에 의한 변형 증가량(F) 계산

$$(X) = (E+F) \tag{6}$$

→ 축관 성형에 의해 증가되는 길이(X) 도출

- L: 기준 축관 깊이
- A: 35mm 이동 축관 깊이
- B: 35mm이동 증가 길이
- C: 30mm이동 축관 깊이
- D: 30mm 이동 증가 길이
- E: 기준 축관 깊이 성형 증가 길이
- F: 챔퍼부 성형 증가 길이
- X: 축관 성형 증가 길이

3.3 L-굽힘 성형 시의 치수 변화 고찰

3.3.1 굽힘기 구조 및 단순화 설계

L-굽힘 가공은 상용 굽힘 머신 모델을 단순화 하여 굽힘 가공 시 단면 찌그러짐을 방지하기 위

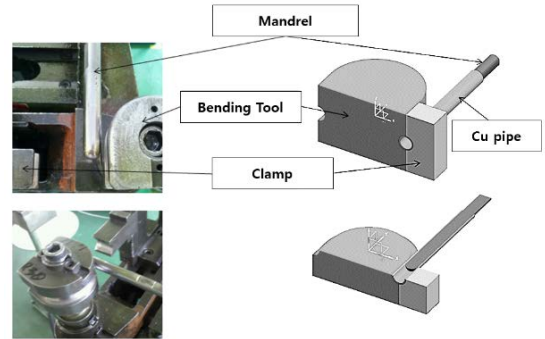


Fig. 11 L-Bending machine & its simplified model

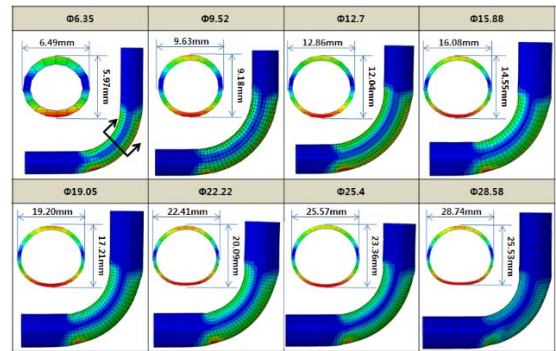


Fig. 12 Analysis result of L-Bending

한 맨드릴(mandrel), 원하는 곡률 반경을 가진 파이프 굽힘 형상을 만들어주는 굽힘 도구, 벤딩 작업 시 파이프가 이탈하지 않도록 단단히 파이프를 잡아주는 클램프(clamp)로 구성하여 모델링하였다. Fig. 11은 L-굽힘 공구와 이것을 단순화한 모델을 보여준다.

3.3.2 L-굽힘기 해석

설계된 3차원 모델을 Hypermesh 9.0을 이용하여 요소망을 생성하였다. 맨드릴, 굽힘 도구, 클램프는 강체로 하였고 파이프와 맨드릴, 굽힘 도구 및 클램프 간에는 접촉 조건을 부여하였다. 생성된 요소망을 바탕으로 ABAQUS를 이용하여, 맨드릴은 고정하고 굽힘 도구가 90도 회전하는 조건으로 해석을 수행하였다. 스프링백을 고려하기 위해 간단한 모델을 통한 스프링백의 정도를 살펴보았으나 전체 치수에 미치는 영향이 0.3% 이내로 미미하여 스프링백은 고려하지 않았다. Fig. 12는 파이프의 외경에 따른 해석결과 및 파이프 단면을 나타낸다.

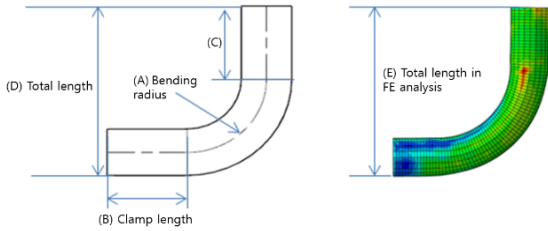


Fig. 13 L-Bending dimension

Table 4 Changes of dimension by L-Bending

Outer Diameter	L	A	B	C	D	E	X
Φ6.35	55	15	15	16.5	34.6	35.45	0.83
Φ9.52	65	25	15	10.8	40.5	41.42	0.91
Φ12.7	80	30	15	17.9	54.3	55.87	1.62
Φ15.88	90	30	20	22.9	60.8	63.36	2.52
Φ19.05	110	35	25	30.1	74.6	77.46	2.89
Φ22.225	120	40	30	27.2	78.3	81.59	3.28
Φ25.4	150	50	40	31.5	94.2	97.79	3.59
Φ28.58	180	50	50	51.5	116	120.3	4.54

3.3.3 L-굽힘 성형 해석 결과 분석

L-굽힘 해석 결과를 토대로 L-굽힘 성형에 의 해 발생하는 치수 증가 길이를 도출하였다. 설계 도면 굽힘 후 길이와의 차이는 L-굽힘 시 파이프의 변형에 의한 것으로 계산식은 아래 세 가지를 적용하였다. Fig. 13은 L-굽힘에서의 파이프 주요치수들을 나타낸다.

직선부 길이:

$$C = L - (B + 2\pi A/4) \tag{7}$$

설계 도면 굽힘 후 길이:

$$D = (\text{파이프외경}/2) + A + C \tag{8}$$

L 굽힘 성형에 의한 증가 길이:

$$X = E - D \tag{9}$$

L: 굽힘 전 직관 길이

A: 굽힘 R

B: 굽힘 클램프 길이

C: 직선부 길이

D: 설계 도면 굽힘 후 길이

E: 해석 굽힘 후 길이

X: L-굽힘 성형 증가 길이

위 계산식으로부터 나온 외경에 따른 파이프의 굽힘 성형 후 주요 치수들의 결과 값은 Table 4와 같다.

Table 5 Sample and analysis dimension - expansion

Diameter	FE analysis (mm)	Experiment (mm)	Difference (mm)
Φ6.35	1.41	1.33	-0.08
Φ9.52	1.07	1.2	0.13
Φ12.7	1.17	1.07	-0.1
Φ15.88	0.98	0.9	-0.08
Φ19.05	1.03	1	-0.03
Φ22.225	1.3	1.37	0.07
Φ25.4	1.39	1.27	-0.12
Φ28.58	1.58	1.43	-0.15

Table 6 Sample and analysis dimension - reduction

Diameter	FE analysis (mm)	Experiment (mm)	Difference (mm)
Φ6.35	1.6	1.77	0.17
Φ9.52	0.95	0.97	0.02
Φ12.7	1.01	0.96	0.05
Φ15.88	0.86	1	0.14
Φ19.05	0.87	0.73	-0.14
Φ22.225	1.13	1	-0.13
Φ25.4	1.36	1.34	-0.02
Φ28.58	1.48	1.5	0.02

4. 실제 성형 등 파이프 치수 검토

동 파이프 성형해석으로 도출된 치수변화 값에 대해 실제 동 파이프 성형 시의 치수변화값과 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 실제 샘플의 치수 측정은 2~3가지 샘플의 평균값으로 하였다.

해석과 실측 결과간에 발생하는 치수 변화에 대한 오차의 원인을 검토해보면 동 파이프 직관 재단 시 발생하는 거스러미(Burr)에 의한 측정오차가 발생하였다. 치수를 측정할 때, 끝단에 발생하는 거스러미로 인해 정확한 치수측정이 난이하였고, 거스러미를 제거하여 측정을 하게 되면 제거하는 과정에서 추가적인 치수 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 동 파이프 가공에서 발생하는 변형에 의한 정확한 치수 변화 값을 도출하는데 있어 실측을 통해서만 정확한 값을 얻을 수 없었으며, 실측과 해석결과의 비교에서 오차값이 미세하며 8가지 배관경마다 유사한 경향성을 가지므로 해석 결과는 타당하다고 볼 수 있다. Table 5, 6, 7은 각각 환관, 축관 및 L-Bending 에서 유한요소해석의 결과와 실제 실험에서의 결과값 및 차이를 나타낸다.

Table 7 Sample and analysis dimension - L-bending

Diameter	FE analysis (mm)	Experiment (mm)	Difference (mm)
Φ6.35	0.83	1.01	0.15
Φ9.52	0.91	1.02	0.11
Φ12.7	1.62	1.55	-0.07
Φ15.88	2.52	2.06	-0.46
Φ19.05	2.89	3.13	0.24
Φ22.225	3.28	3.56	0.28
Φ25.4	3.59	3.33	-0.26
Φ28.58	4.54	4.34	-0.2

5. 치수 오차가 응력분포에 미치는 영향 검토

동 파이프 확관/축관/L-굽힘 성형에 의해 치수 오차가 최대 발생하는 경우에 어셈블리의 응력 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 5 개의 파이프와 역류를 방지하는 체크 밸브 1개 및 이물질 거름용 필터로 구성된 임의의 동 파이프 어셈블리를 구성하였다. 해석 결과를 기반으로 동 파이프에서 최대 오차가 발생한다고 가정 한 경우의 오차값을 도출하였다. 이어진 동 파이프 어셈블리로 제품화되는데 있어 최대 오차값이 발생하면 설계된 사양으로 동 파이프 어셈블리 연결이 불가능하다. 이에 작업자는 어셈블리 끝단을 정위치에 연결하기 위해 힘을 가하게 된다. 이 과정에서 나타나는 응력분포를 보기 위해서 끝단이 설계된 위치로 가기 위한 오차보정값(x방향 -2.53mm, y방향 -3.24mm, z방향 -2.47mm)을 설정하고, 경계조건으로 용접부는 묶음으로 구현하고, 시작점은 고정된 상태로 끝점에 지정된 변위를 가하도록 해석을 수행하였다. Fig. 14는 어셈블리 모델의 끝점이 이동 한 후 모델에 걸리는 응력분포를 나타낸다.

누적된 치수 오차를 인위적으로 바로 잡는 경우에 발생한 최대응력값은 Fig. 14에서 보는 바와 같이 100 MPa 이다. 이 최대 응력값이 동 파이프에 미치는 영향을 확인하기 위해, Table 8의 동 파이프 인장강도 시험결과 4를 참고하였다. 항복응력의 평균값은 57 MPa로서 치수 오차에 의해 발생한 100 MPa의 응력은 항복응력을 넘어서는 수치로서 배관 어셈블리에 소성변형을 일으키게 된다. 이는 배관 어셈블리에 영구적인 변형이 발생하는 것으로 설계된 사양과 일치하지 않는 배관 어셈블리가 되어 적용된 제품의 품질 저하 요인이 될 수 있다.

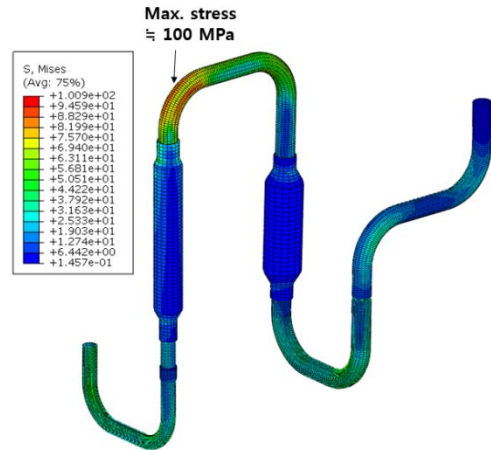


Fig. 14 Stress distribution by displacement

Table 8 Result of tensile stress⁴

Specimen No.	Yield Strength(MPa)
1	55
2	58
3	59
Average	57

6. 결론

본 연구에서는 동 파이프 성형(확관/축관/L-굽힘)시에 발생하는 치수오차 예측을 통해 정확한 치수를 가진 동 파이프 결과물을 제작할 수 있도록 유한요소 해석을 진행하였다. 정확한 치수 오차예측을 통해 동 파이프 어셈블리의 누적 오차를 최소화할 수 있고, 치수 오차에 의해 발생하는 추가적인 응력 발생을 최소화할 수 있으며, 이로 인한 소성 변형 발생 가능성을 방지하여 배관 시스템이 설계된 사양으로 구현될 수 있다. 또한, 본 연구에서 다루지 않은 다양한 동 파이프 성형 방식에 대해서도 유한요소 해석을 통해 치수 오차를 예측할 수 있는 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 치수 오차가 응력분포에 미치는 영향을 검토하기 위해 임의의 모델을 시뮬레이션 하였으므로 어셈블리된 상태 이후의 성형 오차값에 대한 조립 시 추가변형만을 고려하였다. 따라서 파이프의 확관, 축관 및 L-Bending에 따른 잔류 응력 부분은 고려되지 않았다. 임의의 모델이 아닌 실제 특정 제품의 경우 정확한 분석을 위해 기존의 소성변형 과정도 고려하면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이라 예상된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2007-0056094)

REFERENCES

1. London Metal Exchange, "LME Official Price," <http://www.lme.com/pricing-and-data/pricing/official-price> (Accessed 12 May 2014)
2. Korean Industrial Standards, "Copper and Copper Alloy Seamless Pipes and Tubes," http://www.standard.go.kr/code02/user/0B/03/SerKs_View.asp?ks_no=KSD5301 (Accessed 12 May 2014)
3. Kim, S. Y., Koo, J. M., Seok, C. S., and Mo, J. Y., "Evaluation of Residual Stress Effect about Fatigue Characteristic of U-shaped Structure," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 4, pp. 79-86, 2010.
4. Kim, S. Y., Seok, C. S., Kim, H. I., Choi, C. H., Mo, J. Y., et al., "Evaluation of Fatigue Characteristic for U-shaped Copper Pipe," Proc. of the KSME Spring/Autumn Conference on Materials and Fracture, pp. 117-122, 2006.