



APDL Customizing 기반한 신축관으로 연결된 파이프 시스템의 유한요소 해석

손병직¹ · 장봉춘² · 이상열³

건양대학교 해외건설플랜트학과 부교수¹ · 안동대학교 기계공학과 교수² · 안동대학교 토목공학과 부교수³

Finite Element Analysis of Pipe Systems Connected by Bellows Based on APDL Customizing

Son, Byoung-Jik¹ · Jang, Bongchoon² · Lee, Sang-Youl³

¹Associate Professor, Department of International Civil and Plant Engineering, Konyang University, Nonsan, Korea

²Professor, Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

Abstract: This study performed a finite element stress analysis of pipe system connected by bellows based on APDL(ANSYS Parametric Design Language) customizing. The effects of different shapes of developed pipes for various parameters are studied using the finite element commercial package for this study. The structural behavior of complex pipe structures with bellows was also investigated to study the interactions between bellows and other parts. Based on the ANSYS APDL, the effect of initial axial and lateral displacements, and internal temperature and pressure on the Von Mises stress distribution is also analyzed.

Key Words: bellows, ANSYS APDL, pipe system, finite element analysis

1. 서론

신축관 (Bellows)은 각종 배관 시스템에 장착되어 급격한 온도변화에 따른 배관의 팽창, 수축 및 진동을 잡아 시스템 안정화에 도움을 주는 기능을 하는 연결부재를 의미한다. 벨로우즈는 크게 자동차용과 플랜트용으로 구분된다. 자동차용은 자동차 엔진의 소음, 진동, 운행 중 노면의 진동을 흡수해 운전자 승차감을 향상시키는 기능을 하며 플랜트용은 건설, LNG 등 산업 시스템 운전 시 발생하는 열 변위 및 진동에 의한 피로파괴 해결에 사용되는 배관이음쇠 용도로 널리 적용되고 있다 (Jang and Kim, 2015; Faraji et al., 2008).

이러한 신축관은 주로 중소기업에서 생산하고 있으며, 상세구조해석 보다는 단순 설계 위주로 제품을 생산하고 있는 실정이다. 파이프 시스템이 다변화하면서 산업 전반에 걸쳐서 신축관의 적용이 크게 증가하고 있는 반면, 신축관으로 연결된 파이프 시스템의 상세구조해석은 필수적이다. 그러나, 실무자 입장에서 유한요소 상용프로그램을 사용하여 복잡한 연결부를 모델링하고 해석하는 것은 난해할 수 있다. 따라서 실무자들이 용이하게 구조해석을 수행하고 최적 설계에 반영할 수 있도록 하는 Customizing 기반의 시스템 구축이 필요하다. 본 연구에서는 고등 유한요소 상용 프로그램 패키지 ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language)를 적용하여 신축관 전문업체인 동신 EF에서 개발한 신축관으로 연결된 파이프 시스템에

주요어: 신축관, ANSYS APDL, 파이프 시스템, 유한요소해석

Corresponding author: Lee, Sang-Youl

Department of Civil Engineering, Andong National University, 388 Songchon-dong, Andong, Kyongsangbuk-do 760-749, South Korea

Tel: +82-54-820-5847, E-mail: lsy@anu.ac.kr

Received December 6, 2015 / Revised December 12, 2015 / Accepted December 14, 2015

대하여 상세 유한요소 응력해석을 수행하였다 (ANSYS, 2014). 또한, 범용 프로그램인 Excel을 이용하여 버튼 클릭 한번으로 해석을 진행하고 결과까지 확인할 수 있도록 엑셀 VBA(Visual Basic for Application)를 이용하여 설계변수를 변경하고, 한번의 버튼 클릭으로 ANSYS에서 해석을 진행하고 ANSYS에서 결과를 Excel로 넘겨받아 결과를 확인할 수 있게 인터페이스 기술을 개발하였다. 이는 ANSYS의 APDL이 Excel VBA를 이용한 Customizing을 가능하게 한다. 본 연구는 사용자 편의의 ANSYS의 APDL 구동기법을 제시하고 이를 적용한 신축관으로 연결된 복잡한 파이프 시스템의 자동화된 유한요소 구조해석을 수행하여 거동을 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. APDL 기반 Customizing 모델

전술한 바와 같이 본 연구에서는 ANSYS APDL을 적용하여 신축관을 갖는 파이프 구조의 모델링 및 해석을 수행하였다. ANSYS-ADPL 기반 구조해석 모델링 및 해석은 Coding 기반의 모델링으로 좌표와 mesh 생성 등을 정확하게 입력하여 해석 시간 단축 효과를 가져올 수 있다 (Son and Lee, 2015; Qu et al., 2014). 본 연구에서는 해석모델은 APDL로 구현하였으며, 사용자 편의를 위하여 Excel VBA 기반의 해석 프로세스를 개발하였다. ADPL의 설계변수는 Excel VBA의 코딩에서 같은 변수로 사용된다. 전처리 단계의 코딩은 해석 모델링과 메쉬 작업을 수행하며, 해석 단계는 경계조건 및 하중조건을 설정하고, 해석을 수행한다. 또한, 후처리 단계는 해당 결과를 출력하는 단계이다. Excel 연동된 자동화 해석은 모델링 및 해석을 위한 변수 입력, ANSYS에서 생성된 모델 형상 체크, ANSYS 결과 추출, 보고서 자동 생성 양식으로 구성하였다.

<Given information>

<Geometry>			
Pipe	DI	742.9	Length 2652
	Do	762.0	Thickness 9.95

작업폴더 D:\Work_Ansys\Excel
 진행상태 모델링 완료
 작업시간 25 sec

Modeling

<Materials>				Location : Start Center			Bellows			Elbow
	x	y	z	Length	Diameter	Thickness	Span	Height	Number	Radius
1 A182-304H	Flange	0	0	50	742.9	72.05				
2 A358-304H	Start Pipe	0	0	370	250	762.0	1.2	50	50	5
3 Incoloy800	Bellows	0	0	620	250	742.9	9.95			
4 A358-304H	Middle Pipe	0	0	1370	250	742.9	1.2	50	50	5
5 Incoloy800	Bellows	0	0	1620	270	742.9	9.95			
6 A358-304H	End Pipe	0	0	1890	742.9	9.95				
7 A403-304H	Elbow	452	430	105	2630	30.0				
8 A193-87	Tie Rod									

Location : Start Coordinates				Ear Plate		
	x	y	z	Lz1	Lz2	Radius
1 A240-304	Stay Plate 1	0	0	205	1120	1030
2 A403-304H	Stay Plate 2	0	0	2652	1120	1030
3 A240-304	Ear Plate	371.45	0	2152	1030	12
4 A240-304	Holder	452	-430	99.5	100	287.6
				46.5	87	93

하부 위치에서 반시계방향 각도
Holder Angle (°)

Fig. 1 Modeling interface

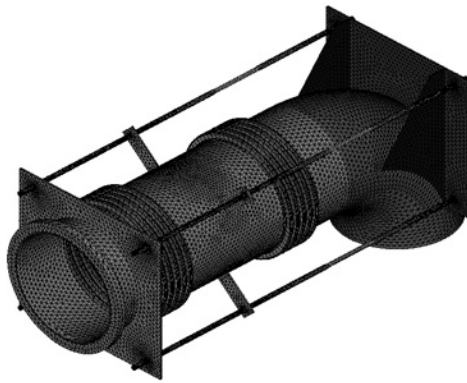
Fig.1은 모델링 인터페이스를 보여준다. 여기서, 노란색 배경 셀은 수정이 가능하며, 녹색 배경은 자동으로 계산되고, 나머지는 고정된 값이다. 노란색 배경은 설계 변수로서 APDL 설계 변수와 같은 변수를 사용하여, 혼동을 피하도록 하였다. Excel에서 변수명은 셀 주소(G12 등)로 표현되지만, 변수명을 대입하여 사용할 수 있다. 예를 들면, 변수명 “flange_1”은 플랜지의 길이를 나타내며, ADPL에서의 설계 변수명과 동일하게 사용하였다. 녹색 배경 셀은 자동으로 계산되며, ADPL에서 계산된 변수와 동일한 변수명을 사용하였다. 설계변수를 모두 입력하고, “Modeling” 도형을 클릭하면, ANSYS APDL을 이용하여 모델링을 수행하고, Modeling 시트로 자동 이동되며 벨로우즈의 기하 형상 및 mesh 형상을 도식하게 된다. 개발한 인터페이스에서는 전체 모델에 대한 형상 및 각 부품의 형상을 나타내어 모델링의 타당성을 검토하기 용이하도록 구성하였다. “Mesh Step”을 3단계로 두어 해석의 편의를 제공하도록 하였다. 즉, 1단계는 mesh 수가 적은(Coarse) 단계로 시간을 절약하여 모델링의 타당성을 검증할 수 있게 하였고, 실제 해석을 위해서는 2, 3단계를 사용하도록 하였다. 다음으로 설계 변수를 모두 입력하고, “Solve” 도형을 클릭하면, ANSYS APDL을 이용하여 해석을 수행하고, Output 시트로 자동 이동되며 변위 형상을 도식한다. 변위형상은 전체 모델 및 각 부품의 결과를 나타냈으며 해석 결과는 총 변위(Total Displacement)와 등가 응력(Von Mises Stress)으로 설정하였다.

3. 유한요소 해석 모델

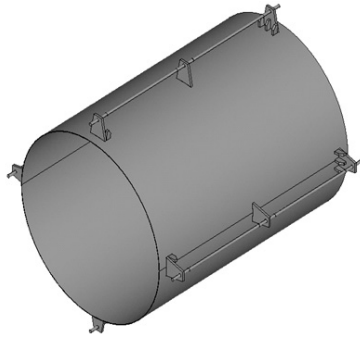
Fig. 2는 두 가지 타입의 유한요소 모델을 보여준다. 그림에서 Type I은 굽힌 파이프 연결구조 모델이며, Type II는 타이로드로 연결된 원통형의 모델이다. 그림에서 보는 바와 같이 신축 연결관을 포함한 전체 모델은 여러개의 부품으로 이루어져 있다. 이러한 부품들을 한번에 모델링하는 것은 난해하므로, 본 연구에서는 각 부품별로 나누어 각각 모델링하여 결합하는 방법을 적용하였다. 신축 연결관을 포함한 파이프 구조는 반복적인 구조해석을 통하여 최적의 구조를 도출하게 되는데, 본 연구에서 제안한 ADPL 기반 인터페이스 방법은 이러한 과정을 용이하도록 한다. Type I은 235,630개의 Node 및 131,907개의 Element를 사용하였으며, Type II는 727,616개의 Node와 393,994개의 Element를 사용하였다. Table 1은 ADPL 기반의 유한요소 해석을 위한 변수 설정 과정의 일부를 보여준다.

Table 1. Geometrical properties for type I

Parts	Location : Start Center						Bellows			Elbow
	x	y	z	Length	Diameter	Thickness	Span	Height	Number	Radius
Flange	0	0	0	50	742.9	72.05	-	-	-	-
Start Pipe	0	0	50	320	742.9	9.55	-	-	-	-
Bellows	0	0	370	250	762.0	1.2	50	50	5	-
Middle Pipe	0	0	620	750	742.9	9.55	-	-	-	-
Bellows	0	0	1,370	250	762.0	1.2	50	50	5	-
End Pipe	0	0	1,620	270	742.9	9.55	-	-	-	-
Elbow	0	0	1,890	-	742.9	9.55	-	-	-	762
Tie Rod	452	430	105	2,647	30.0	-	-	-	-	-



(a) Type I



(a) Type II



Fig. 2 Finite element model

Type I은 파이프 내경 742.9mm, 외경 762.0mm, 전체 길이는 2,652mm, 두께는 9.55mm이다. 각 부품에 대한 기하학적 물성은 Table 1과 같다. 전체 파이프 재료 물성은 탄성계수 200GPa, 프아송비 0.3이며, 나머지 부품들은 탄성계수 193GPa, 프아송비 0.29이다. Type II는 파이프 내경 1,712mm, 외경 1,720mm, 전체 길이는 2,350mm, 두께는 4.00mm이다. 파이프 재료물성은 탄성계수 200GPa, 프아송비 0.3이다. Table 2는 ADPL 기반 설계 변수 설정에 대한 개발 코드의 일부를 보여주며 Fig.3은 각 부품에 대한 유한요소 모델링을 나타낸다.

Table 2. Parameters finite element analysis based on ADPL

```

pipe_di = 742.9 $ pipe_do = 762 $ elbow_r = 762
flange_l = 50 $ flange_t = 72.05
start_l = 270+50 $ middle_l = 750 $ end_l = 270
b_t = 1.2 $ b_s = 50 $ b_h = 50 $ b_n = 5

stay_z1 = 205 $ stay_lx = 1120 $ stay_ly = 1030 $ stay_t = 12
ear_lz1 = 500 $ ear_lz2 = 110 $ ear_t = 12

tie_x = 452 $ tie_y = 430 $ tie_z = 105 $ tie_d = 30

holder_lx = 100 $ holder_ly = 287.6 $ holder_t = 12
h_angle1 = 46.5 $ h_angle2 = 43.5+2 $ h_angle3 = 46.5+2 $ h_angle4 = 43.5+2

temperature = 0 $ pressure = 0 $ trust = 49323
mesh_opt = 1 !(Coarse)1 ~3(Fine)

pipe_t = (pipe_do - pipe_di)/2 $ start_z = flange_l
b_z1 = start_z + start_l $ b_l = b_s+b_n $ b_d = pipe_do
middle_z = b_z1 + b_l $ b_z2 = middle_z + middle_l

end_z = b_z2 + b_l $ elbow_z = end_z + end_l
pipe_l = elbow_z + elbow_r $ stay_z2 = pipe_l
tie_l = (stay_z2 - stay_z1) + 2*(stay_z1 - tie_z)
holder_z = middle_z + middle_l/2

ear_x = pipe_di/2 $ ear_ly = stay_ly $ ear_z = pipe_l-ear_lz1
    
```



(a) Flange & Pipe

(b) Bellows

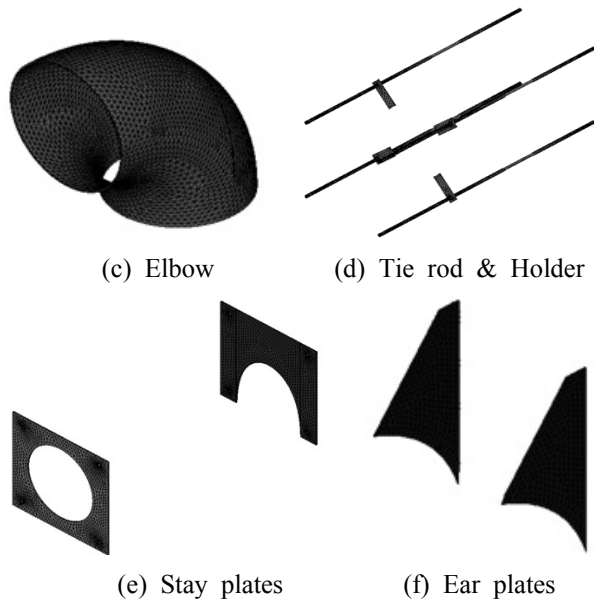


Fig. 3 Finite element model for parts (Type I)

4. 해석 결과 및 분석

전술한 유한요소 모델에 대하여 구조해석을 수행하였다. Type I 및 II에 대하여 작용하는 총 추력(Trust)은 49,323N이며, 이는 Fig. 2에서 타이 로드 4군테를 $49,323N/4$ 로 당기는 하중을 의미한다. 해석모델에 대한 경계조건은 한 변은 고정이고 한 변은 자유단이다. Fig. 4는 Type I에 대한 구조해석 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 전체 구조에 대한 변위 형상 및 각 부위별 변위 값 분포를 나타낸다. Fig. 4(b)는 전체 구조의 등가 응력분포를 보여준다. 전체적인 변위 및 응력은 신축관과 파이프를 연결하도록 고정해주는 고정단 부근의 타이로드에 최대 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 해석 결과 최대 변위는 2.58mm이며, 최대 등가응력은 106.31MPa로 계산되었다.

Fig. 5는 Type II에 대한 구조해석 결과를 보여준다. Fig. 5(a)는 전체 구조에 대한 변위 형상 및 각 부위별 변위 값 분포를 나타낸다. Fig. 5(b)는 전체 구조의 등가 응력분포를 보여준다. 전체적인 변위 및 응력은 타이로드를 파이프에 고정하는 부위에서 국부적으로 최대 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 해석 결과 최대 변위는 0.32mm이며, 최대 등가응력은 31.69MPa로 계산되었다. Fig. 6~7은 Type I에 대하여 각 부품별 변위 및 등가 응력 분포를 보여준다. 신축관을 갖는 파이프 구조는 여러 부품의 조합으로 구성되므로 각 부품별 상세 거동을 해석하는 것이 필요하며, 해석 결과 신축연결관 및 전체를 연결하는 타이 로드 부위에서 높은 응력이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 자

동화 구조해석 결과를 설계에 반영하여 최적화된 신축관을 포함하는 파이프 시스템을 구축할 수 있다.

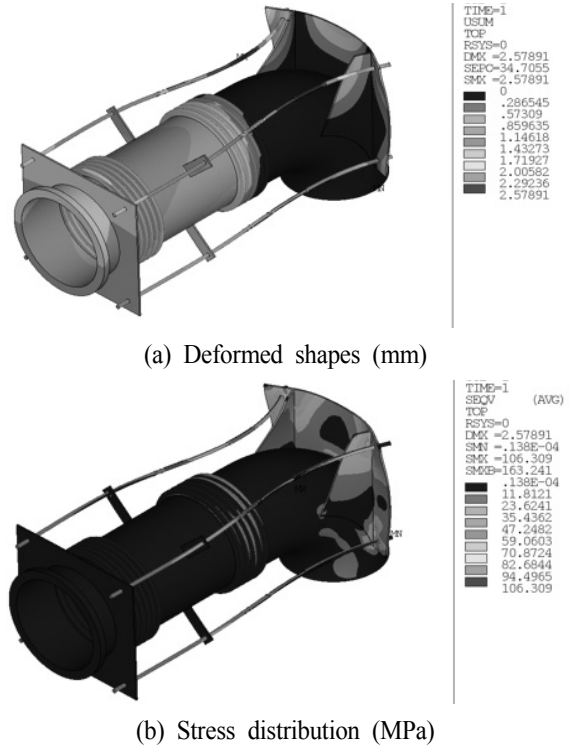


Fig. 4 Deformed shapes and stress distribution (Type I)

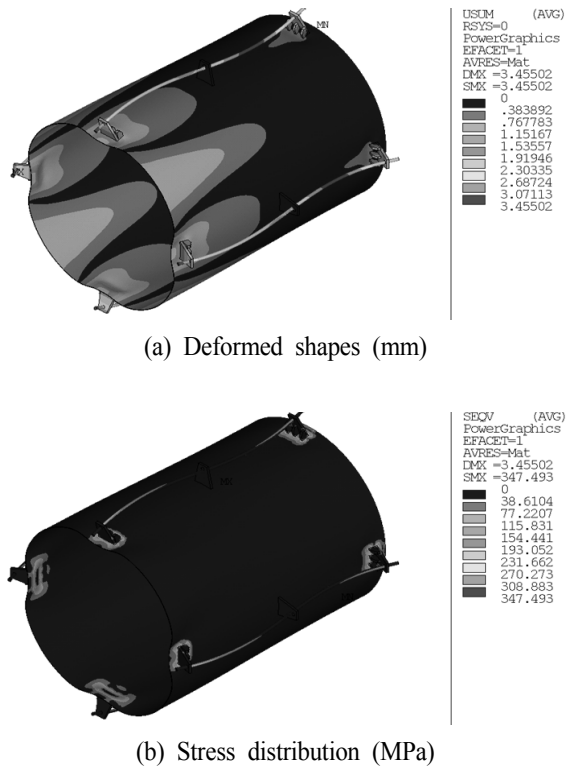


Fig. 5 Deformed shapes and stress distribution (Type II)

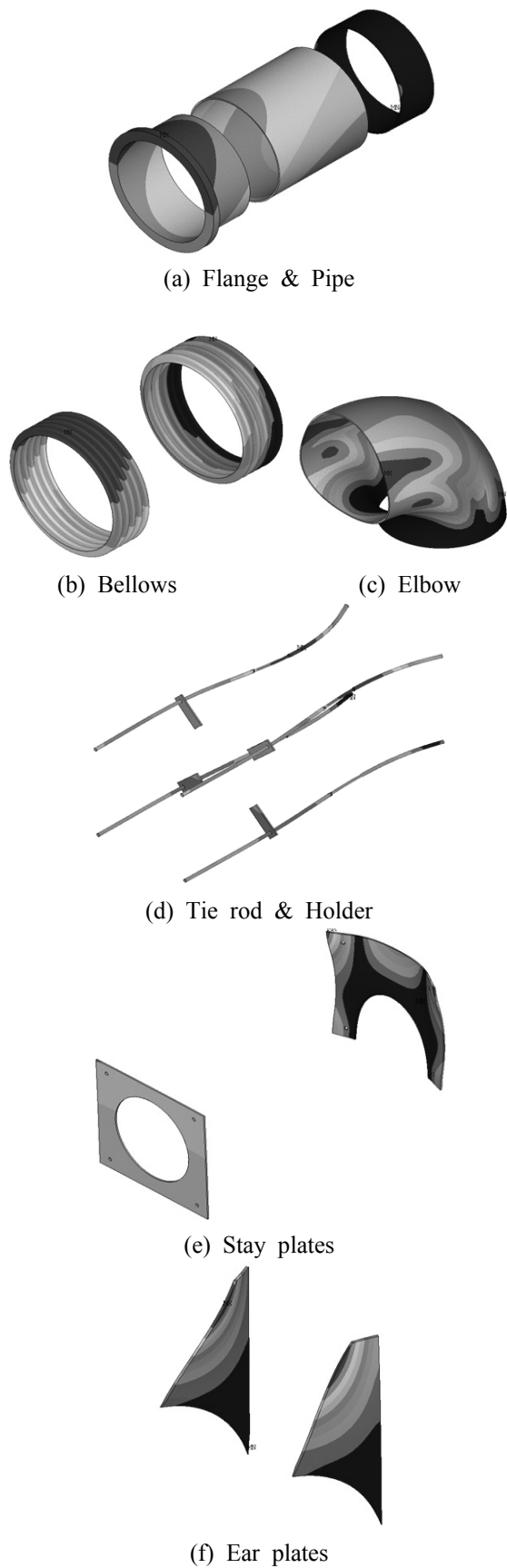


Fig. 6 Deformed shapes for parts (Type I)

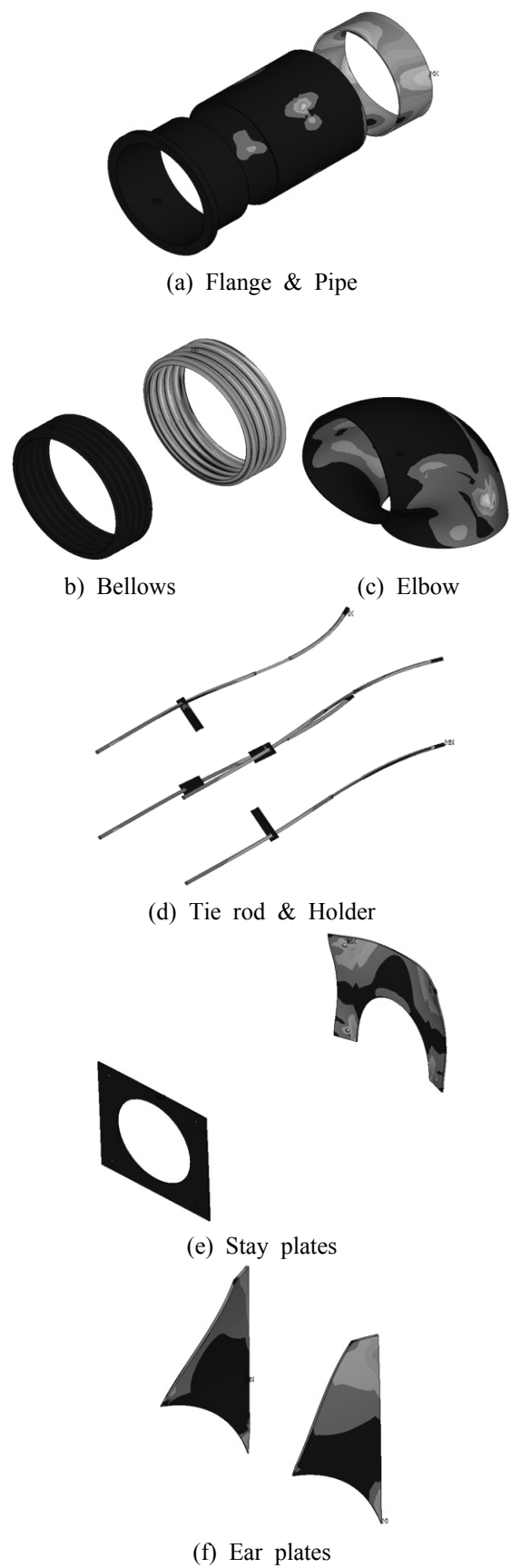
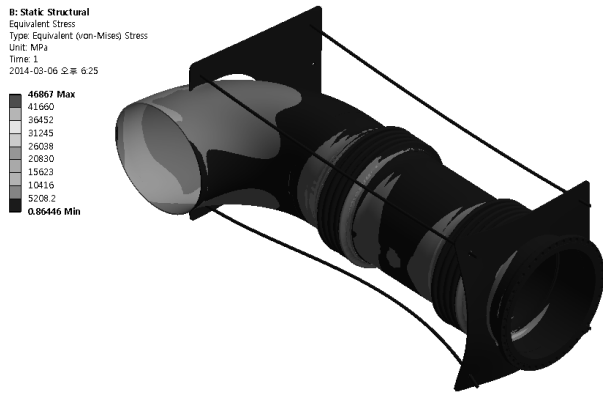
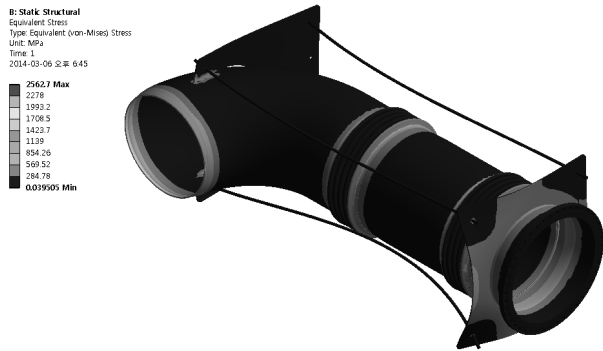


Fig. 7 Stress distributions for parts (Type I)



(a) Initial displacements
(Axial 180(5+175)mm, Lateral 5mm)



(b) Internal temperature: 532°C, Pressure: 0.07MPa

Fig. 8 Initial displacements and heat stress distributions (Type I)

Fig. 8(a)는 축방향으로 180mm, 측방향으로 5mm 변위를 하중으로 재하하였을 경우에 대한 등가 응력분포이며 Fig. 8(b)는 내부온도 532도, 내압 0.07MPa인 경우에 대한 열응력 해석 결과를 보여준다. 해석 결과 개발된 신축 연결관을 포함하는 파이프 시스템은 초기 변위 및 온도에 대하여 전체적으로 안정적인 응력분포를 보임을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 신축관 및 타이로드로 연결된 파이프 시스템에 대하여 구조해석을 수행하였다. 본 연구의 특징은 파이프 전체 및 상세 부품별 거동을 분석하였으며, 사용자 편의 기반의 자동화된 구조해석 및 설계 환경을 개선하기 위해서 Excel VBA를 이용한 ANSYS 구조해석의 Customizing 기술을 개발한 것이다. 본 연구에서 개발한 프로그램으로 ANSYS 프로그램 문외한이더라도 설계 변수를 자유롭게 변경하면서 해석을 수행할 수 있으며, 해석된 결과로 설계의 타

당성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 수치 예제는 설계 변수를 하나씩 변경해서 결과를 확인할 수 있으나 동시에 여러 경우의 해석을 수행하는 파라미터 해석 문제도 충분히 가능할 것으로 기대된다.

제한한 자동화 구조해석 프로그램에 의하여 파이프 시스템의 변위 및 응력해석을 수행한 결과, 개발된 파이프 구조는 설계기준에 부합하는 안정적인 거동을 보이는 것으로 나타났다. 특히 신축관 및 타이로드로 각 파이프를 견고하여 연결하여 초기변위 또는 고온, 고압에도 안정적으로 거동함을 알 수 있었으며, 각 부품별 거동을 상세 분석한 결과는 향후 파이프 시스템의 최적화된 설계 및 제작에 가이드라인을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- ANSYS 15.0, "Mechanical APDL", 2014.
- Faraji, G., Besharati, M. K., Mosavi, M., Kashanizadeh, H. (2008), "Experimental and finite element analysis of parameters in manufacturing of metal bellows", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 7, pp 641-648.
- Jang, B. C. and Kim, S. C. (2015), "Development of U-shaped metal bellows design software based on MATLAB", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 4 pp. 2379-2384.
- Qu, C. H., Han, W., and Wang, Y. M. (2014), "Analysis of fatigue for metal bellows based on ANSYS", *Advanced Materials Research*, Vols. 1044-1045, pp. 910-913.
- Son, B. J. and Lee, S. Y. (2015), "Finite element stress analysis of large sized rectangular water tank structures made of stainless steel materials", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.* Vol. 6, No. 2, pp. 85-90.