

고속 Tube Expander의 동적 모델링 및 해석

김재량*, 정원지+, 김수태**, 최욱환***

(논문접수일, 심사완료일)

Analysis and Dynamic Modeling of a High-speed Tube Expander

Jae-Lyang Kim*, Won-Jee Chung+, Su-Tae Kim**, Chul-Moon Han***

Abstract

Tube expanding process is for combining a heat-sink plate with hair-pins (Cu-tube) through plastic deformation. The two parts, *i. e.*, heat-sink plate and hair-pins are they components of a heat-exchanger for an air conditioner. This paper presents the analysis and dynamic modeling of a high-speed tube expander which integrates transfer of parts, fixing of parts, and tube expanding into one process. The 3-dimensional modeling of all the parts for the tube-expander was constructed using CATIA[®]. then the CATIA[®] models are transferred into visualNastran[®] to execute the 3-dimensional animation for checking prescribed cycle-time. The technique presented in this paper has been shown to be effective as a priori tool for verifying the design of a high-speed tube expander.

Key Words : 확관기(Tube Expander), 열교환기, 헤어핀(Hair-pin), 방열핀, 맨드렐(Mandrel), 동적 모델링(Dynamic Modeling), 시뮬레이션(Simulation)

1. 서론

우리가 일상 생활에서 흔히 접하는 에어컨(Air conditioner)에서 열교환기는 응축된 냉매가 계속적으로 순환하고 있어서 강제로 유입된 외부 공기를 차갑게 식혀주는 핵심적인 역할을 한다. 이러한 열교환기는 냉매가 흐르는 동관(헤어핀 ; Hair-pin)과 공기와 직접 접촉하여 열교환이 일어나는 방열핀으로 구성되어 있는데, 확관기(Tube

Expander)는 헤어핀 속으로 확관 맨드렐(Mandrel)을 삽입하여 관의 지름을 확장시킴으로써 해서 방열핀과 헤어핀을 서로 밀착시키게 되고 이를 통해 헤어핀에서 순환하는 냉매와 공기와 직접 접촉하고 있는 방열핀사이에 열교환이 원활하게 이루어짐과 동시에 헤어핀과 방열핀을 하나로 묶어주는 조립기능을 수행하게 된다. 기존의 확관기는 작업자가 직접 수작업으로 조립되기 전 상태(헤어핀과 방열핀이 서로 밀착되지 않은 상태)의 열교환기를 삽입하여 확관

* 주저자, 창원대학교 대학원 기계설계공학과 (rainkk445@hotmail.com)

주소: 경남 창원시 사림동 9번지

+ 창원대학교 기계설계공학과

++ 창원대학교 기계공학과

+++ 특일기공 대표

작업을 수행해 왔으나 최근 에어컨 수요의 증가와 인건비 상승 등의 요인에 의해서 자동화 된 고속의 확관기가 필요하게 되었다. 하지만 정밀도가 높은 확관작업을 자동화 된 상태에서 고속으로 수행하기 위해서는 매우 많은 공정을 확관기라는 하나의 장치에 모두 첨가해야 한다는 어려움이 있다. 따라서 이러한 확관기를 직접 제작하기 전 설계단계에서의 모델링이 반드시 필요하게 되고⁽¹⁻⁴⁾ 많은 작업을 동시에 고속으로 수행하기 위해서 설계 작업의 오류를 미리 파악할 수 있는 해석 작업을 병행해서 수행해야 한다.

본 연구는 고속 확관기의 설계단계에서의 모델링과 해석을 통해 확관기에 있어서 장치들의 모의실험을 수행하여 복잡한 동작의 오류를 미리 파악⁽⁵⁾하고 설계의 효율을 보다 더 극대화시키는데 목적이 있다.

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

확관기는 Fig. 1에서처럼 매우 복잡한 시스템으로 구성된 고가의 장치이다.

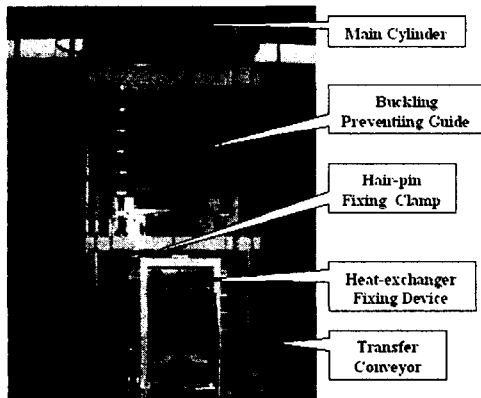


Fig. 2 System of Tube Expander

메인 실린더(Main cylinder)는 유압으로 구동되며 확관 맨드렐이 부착되어 있어 상승·하강 행정을 통해 헤어핀을 확관하는 작업을 수행하게 하는 원동력을 제공해 주며 특히 정밀도가 높은 소성변형에 관여하기 때문에 정밀한 조정이 가능하도록 설계되어야 한다. 다음으로 버클링 방지 가이드(Buckling preventing guide)는 맨드렐이 부착되어 있는 길이가 매우 긴 확관툴(Tool)에 메인 실린더의 구동에 의해 확관 작업 수행시 맨드렐이 받는 소성변형에 의한 수직방향의 저항력으로 인해 버클링이 발생하는 것을 방지한다. 그리고

헤어핀 고정 클램프(Hair-pin fixing clamp)는 확관시에 헤어핀이 아래로 흘러내리는 것을 방지함과 동시에 확관기 하단부의 고정장치와 연계하여 헤어핀의 반지름방향 확관에 의한 길이방향의 수축을 방지하는 작용을 하며, 열교환기 고정장치(Heat-exchanger fixing device)는 자동화 장치에 의해 확관기에 삽입된 열교환기를 확관기 전면부에서 서보모터와 공압장치를 이용해 고정해준다. 끝으로 이송 콘베이어(Transfer conveyor)는 열교환기를 확관기 까지 이송해 주는 역할을 하며 열교환기를 이송 중에 고정해 줄 수 있는 장치와 연계되어 있어야 한다.

2.2 시스템의 모델링 방법

시스템을 모델링 하는 방법은 여러 가지가 있지만 컴퓨터 상에서 수행되는 연산속도와 효율을 높이기 위해서는 기본적으로 대상 시스템을 단순화시키는 것이 가장 기본적인 시뮬레이션을 위한 모델링 방법이다. 하지만 고속 확관기의 경우 시스템 구성이 복잡하고 동작구성의 오류를 확인해야 하므로 시스템을 단순화한다는 것은 큰 의미가 없다. 즉, 연산속도의 효율성을 어느 정도 포기하고 확관작업 동작구성에 필요한 장치들은 반드시 시뮬레이션 환경 속에 삽입되어야만 하며 주요 동력장치(메인 실린더 등)들도 생략하여서는 좋은 결과를 기대하기 어렵다. 따라서 많은 노력과 시간이 소요되더라도 Fig. 2에서처럼 2차원 도면을 3차원 도면으로, 그리고 다시 3차원 도면을 시뮬레이션 환경으로 끌어오는 작업이 순차적으로 수행되어야 한다. 대신 이러한 일련의 과정을 수행함으로써 실제 제작에 사용되는 2차원 도면을 3차원 도면으로 검토해 볼 수 있어 설계상의 오류를 찾아 낼 수 있다는 부가적인 효과도 볼 수 있다.

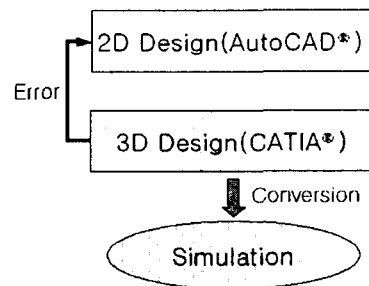


Fig. 3 Method of system modeling

2.2.1 3차원 도면 설계

확관기의 동적 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 전술했듯이 2차원 도면을 3차원으로 설계하는 작업이 필요하게 된

다. 이러한 과정을 통해 실물제작에 사용되는 2차원 도면의 오류를 확인하는 작업을 병행 할 수 있으므로 시물레이션에서 소요되는 시간의 손실 부분에 대한 보상을 받을 수 있다. 또한 이 과정에서 시물레이션 환경의 기본 틀을 구성하게 되므로 시물레이션에서 중점적으로 고려해야 할 부분 등에 대한 선별 작업도 수행하게 된다. 즉, 2차원 도면의 정보를 모두 3차원으로 옮길 수 없으므로 예를 들어 외관을 아름답게 하기 위한 장치라든지 또는 시스템의 동작에 전혀 상관 없는 결합부 등은 3차원으로 도면을 재구성할 필요가 없다. 이와 반대로 주요 구동부와 그 주변 장치 등은 꼭 시물레이션을 구성할 수 있도록 3차원 설계가 필요하다. Fig. 3은 2차원 도면을 3차원으로 설계한 것을 나타낸 것이다.

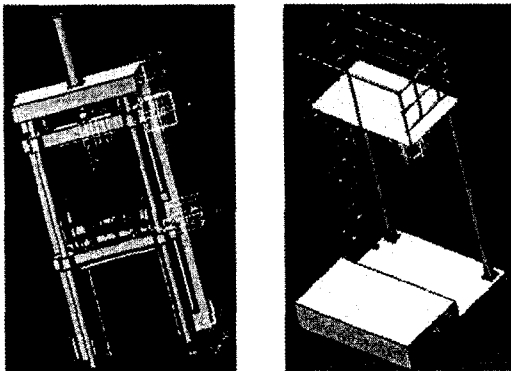


Fig. 4 3-D modeling of Tube Expander

2.2.2 3차원 도면의 변환

2차원 도면을 3차원 도면으로 구성하는 작업을 통해 시물레이션의 예비단계가 이루어졌다면 3차원 도면을 다시 동적 해석 프로그램으로 변환하는 과정은 동적 시물레이션에 있어서 가장 기본적인 단계이다. 3차원 도면이 단순히 솔리드(Solid)형태의 형태를 구성한다면, 이 과정에서는 각 작동 부위에 구속조건을 부여하고 구동장치들을 장착함으로써 실제 동적 시물레이션을 수행 할 수 있도록 해준다. 또한 복잡한 형태의 확관과정을 다양한 형태로 검토할 수 있도록 여러 가지 시험치를 부여하는 작업도 병행하게 된다.

3. 동적 해석

3.1 시물레이션 환경

고속 확관기 시스템의 시물레이션 환경은 Fig. 4와 같이 구성하였다. 열교환기 이송장치(Heat-exchanger transfer

device)는 열교환기를 세운 상태로 확관공정에 진입시켜 공정의 효율성을 높이고 장치를 간소화하기 위한 고정·이송 장치이다. 그리고 메인 실린더, 이송 컨베이어, 열교환기 고정 장치, 헤어핀 고정 클램프 등은 모두 전동 또는 유·공압에 의해 구동되는 장치들로 각각의 시물레이션 셋팅(Setting)값은 Table 1과 같다.

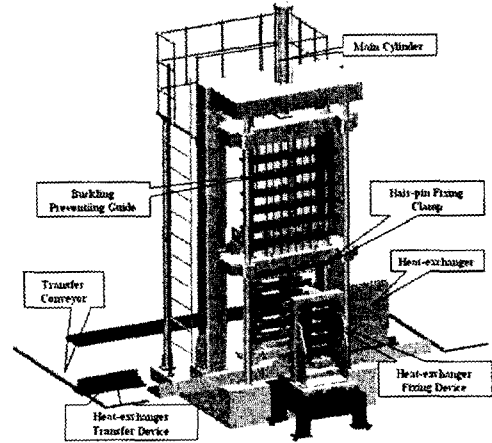


Fig. 5 Environment of Simulation

Table 1 Simulation Setting

Body	MC	HFC	HFD	TC
Setting	MC	HFC	HFD	TC
Power source	Oil pressure	Oil pressure	Air pressure	Motor
Velocity [mm/sec]	150	47	160	170
Friction coeff.	-	0	-	0
Sampling time	1/100 [sec]			
Integration	Kutta-Merson(5th-order Runge-Kutta)			

- MC : Main cylinder
- HFC : Hair-pin fixing clamp
- HFD : Heat-exchanger fixing device
- TC : Transfer conveyor

시물레이션에서 설정된 장치들의 셋팅 값들은 매우 중요한 요소를 차지하고 있으므로 실물에서 얻은 실측값을 바탕으로 시물레이션 상에서 반복실험을 통해 설정되어 최대한 실물에 가깝도록 하였다. 또한 Sampling time은 정확도 향상을 위해 1/100초로 설정하였다. 그리고 데이터를 획득을 위한 Integrator 즉, Numerical Method는 5차 Runge-Kutta Method를

사용하였다. 이 Method는 $y'(t) = f(y, t)$, $y(0) = y_0$ 로 문제가 정의된다면, 상미분 방정식의 적분법을 적용하여 구현할 수 있다. 그리고 여기서 y_{n+1} 과 y_n 의 관계식은 다음과 같다.

$$y_{n+1} = y_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(y, t) dt, \quad t_{n+1} = t_n + h \quad (1)$$

이러한 식이 성립될 수 있는 것은

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(y, t) dt = y(t_{n+1}) - y(t_n) \quad (2)$$

이 성립하기 때문이다. 그러므로

$$(y_n)_1 = y_n + \frac{1}{3} hf(y_n, t_n)$$

$$(y_n)_2 = y_n + \frac{1}{6} hf(y_n, t_n) + \frac{1}{6} hf((y_n)_1, t_n + \frac{1}{3} h)$$

$$(y_n)_3 = y_n + \frac{1}{8} hf(y_n, t_n) + \frac{3}{8} hf((y_n)_2, t_n + \frac{1}{3} h)$$

$$(y_n)_4 = y_n + \frac{1}{6} hf(y_n, t_n) - \frac{3}{2} hf((y_n)_2, t_n + \frac{1}{3} h) + 2 hf((y_n)_3, t_n + \frac{1}{2} h)$$

$$(y_n)_5 = y_n + \frac{1}{6} hf(y_n, t_n) + \frac{2}{3} hf((y_n)_3, t_n + \frac{1}{2} h) + \frac{1}{6} hf((y_n)_4, t_n + h)$$

$$y_{n+1} = (y_n)_5 \quad (3)$$

5차 Runge-Kutta Method는 계산식이 복잡해서 다른 Method에 비해 시간이 많이 소요되는 단점이 있지만 정확도가 높아서 연속적인 충돌조건에 의한 결과 값의 발산을 방지할 수 있다.

4. 동적 해석 결과

복잡한 공정을 가지는 고속 확관기의 동적 해석 결과 우리는 주요 구동부의 사이클 타임(Cycle time)을 도출할 수

있었다. 확관공정에서 수행되는 실제 공정의 총 개수는 43가지이며 그 중에 센서에 의한 센싱(Sensing)작업을 제외한 30가지 공정을 동적 시뮬레이션하였다. 확관기 시스템에서 한 사이클에 소요되는 사이클 시간은 약15초였으며 이것은 실제 제작된 확관기에서의 사이클 시간 24초에 약 9초 정도 빠른 시간이며 이러한 차이는 생략된 공정(센싱 등)의 반영으로 볼 수 있다.

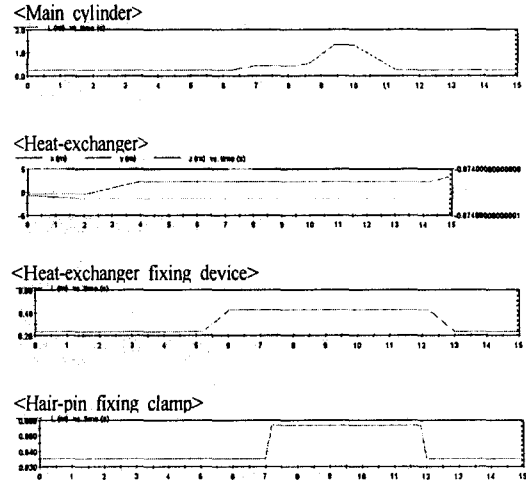


Fig. 5 Timing chart of tube expanding process

4. 결론

복잡한 형태의 고속 확관기의 공정을 효과적으로 설계하고 이에 대한 다양한 해석과 공정의 효율성을 최대한 끌어올리기 위해 우리는 2차원으로 설계된 제작 도면을 이용하여 3차원 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 그 결과, 각 주요 공정에 대한 사이클 타임의 이론 값을 얻을 수 있었으며 실제 확관기와 비교한 결과 9초 정도의 차이를 나타내었다. 이것은 부수적 공정이 생략됨으로 해서 나타난 현상으로 추측할 수 있다. 그리고 사이클 타임을 확인함으로써 복잡 한 시스템의 동작을 한눈에 확인할 수 있어 확관공정에 적용시 동작 수정 등에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

후기

이 논문은 독일기공의 지원 및 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터(RRC)의

지원에 의한 것입니다.

또한 본 논문은 산업자원부 출연금 등으로 수행한 지역전략산업 석박사 연구인력 양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- (1) Chung, W. J., Kim, J. L., Choi, S. J., and Kim, I. S., 2003, "Dynamic Analysis and Modeling of Guide Track for A Braiding Machine of Maypole", KSMTE, Vol.12, No.4, pp.70~77.
- (2) Sciavico, L. and Siciliano, B., 2000, Modeling and Control of Robot Manipulators, Springer, pp.14~16.
- (3) Cho, S. R., Lee, C. M. and Chung, W. J., 2001, "A Study on the modeling of roller gear cam", KSMTE, Vol.10, No.3, pp.31~37.
- (4) Ko, T. J., Baek, D. K., and Kim, H. S., 2002, "Digital Manufacturing and Virtual Machine Tool", KSPE, Vol.19, No.6, pp.15~22.
- (5) Robert L. Norton, 1999, Design of Machinery, McGraw-Hill, New York, pp.345~431.