

진동특성을 고려한 에어컨 실외기 배관의 최적설계

김준형[†] · 박창배^{*} · 최수용^{*} · 민제홍^{*}

Optimal Design of the Pipe Configuration of an Air Conditioner Outdoor Unit Considering Vibration Characteristics

Junhyung Kim, Changbae Park, Sooyong Choi, and Je-Hong Min

Key Words : Pipe(파이프), Optimization(최적화), Air Conditioner(에어컨), Compressor Vibration(압축기 진동), iSIGHT(상용 최적설계 소프트웨어), I-DEAS(상용 3 차원 캐드)

Abstract

The pipes in the outdoor unit of an air conditioner are designed to reduce the vibration effect of the compressor. Three-dimensional structure of the pipe could provide various design choices and the resultant vibration characteristics of the outdoor units. A design program has been developed for an eligible parametric study of pipe design and automatic vibration analysis using commercial software, I-DEAS, and its macro. Optimal design of pipe configuration has been performed using the commercial software, iSIGHT. The optimized design shows 70 percents improvement in the vibration characteristics of the outdoor unit of an air conditioner.

1. 서 론

에어컨 실외기는 냉매 압축 및 방열을 위해 설치되는 에어컨의 일부분으로서 일반적으로 실외에 장치되고, 동 파이프를 통하여 실내기와 연결되는 구조이다.

실외기 안에는 냉매의 유로를 확보하기 위하여 관이 필요하다. 실외기 관은 현재 생산성, 조립성, 단가 등의 이유로 인하여 주로 동관을 사용하고 있으며, 압축기와 케이스 벨브에 용접하여 연결되어 있다.

에어컨 실외기의 배관부분은 압축기 진동에 의한 파손, 진동의 실내기 전달 등의 문제가 전체 성능에 큰 부분을 차지하며 에어컨의 진동 레벨이 출하조건에 명시되어 있는 상태이다. 진동 문제를 고려하지 않고 냉매의 유로만 고려하여 배관을 설계하는 경우, 100% 전부 진동문제로 인하여 설계 변경이 필요하다고 현장에서 보고되고 있다.

그러나 아직까지 개발기간 및 인력부족 등의 문제로 이 문제를 해석적으로 예측하여 회피하는 설계가 아니고 실제 제작 및 실험을 통해 시행착오를 통해 해결하고 있다. 그 결과 시행착오법으로 에어컨 모델마다 배관설계가 바뀌어 오면서, 그동안 에어컨 실외기의 시방부품의 수가 크게 증가하여 부품 표준화의 측면에서 최악의 상황이라고 평가할 수 있다. 이에 따라 부품 표준화 업무를 시작하고 있는 단계에 있는데, 표준화된 부품을 설계에 반영하는 도구의 하나로써 설계 프로그램이나 최적화 해석기술의 적용이 필요하다.

2. 에어컨 실외기 파이프

실외기 파이프 형상

파이프 형상은 기본적으로 설치공간 내에 3 차원적으로 구현되기 때문에 가능한 배열이 무수히 많이 존재한다. 경험적으로 에어컨 실외기의 파이프의 경우 파이프 입출력 부분을 짧게 바로 연결하면 압축기의 진동이 바로 외부로 전달되어서 문제가 크다고 알려져 있다. 그러므로 설계자가 파이프 형상을 경험적으로 결정하거나 시행착오를 통하여 각 부분의 길이 및 형태를 결정하는 것이 널

[†] 삼성전자

E-mail : riak.kim@samsung.com

TEL : (031)200-3462 FAX : (031)200-4692

^{*} 삼성전자

리 사용되는 설계 방법이다. 또한 몇 번의 시행착오를 통해서도 심한 진동에 의하여 문제가 될 때에는 파이프에 질량 및 댐핑 추가의 목적으로 고무블록 등을 추가로 문제를 해결하고 있다. 이와 같은 방안은 진동절연 효과는 크지만, 비용절감 측면에서는 매우 불리하다.

그림 1 은 가장 단순한 종류의 에어컨 실외기의 배관을 나타낸다. 난방기능은 없고 냉방기능만 있는 제품에 사용되는 에어컨 실외기의 경우 크게 압축기로 냉매 기체를 넣어주는 흡입(Suction) 파이프와 압축된 냉매를 열교환기로 보내는 토출(Discharge) 파이프로 구성된다.

에어컨 진동 저감에 대한 기존의 연구들을 보면 많은 연구자들⁽¹⁻³⁾이 진동절연을 위한 마운트 관련 기술이나, 제품의 진동특성 분석에 대하여 연구하였다. 또한 류봉조⁽⁴⁾ 등과 같이 파이프 내를 흐르는 유체유동에 의한 진동문제에 대한 연구도 수행되었으나 본 연구에서는 이 문제는 고려하지 않았다. 장한기⁽⁵⁾는 에어컨 압축기의 진동문제를 고려한 파이프 배열기술에 대하여 연구하였는데, 본 연구는 같은 문제를 주제로 하고 있으며 파이프 설계방식에서 차이점을 두고 있다. 다시 말해서, 본 연구에서는 파이프를 통한 진동전달을 최소화하는 최적형상을 설계하는데 목적을 두었으며, 설계변수의 선택에 있어 파이프의 굽힘점의 좌표를 선택하여 설계의 자유도를 높이도록 하였다. 최적설계를 하기 위하여 상용 소프트웨어 I-DEAS 를 사용하여 파이프 굽힘점 좌표값 정보로부터 형상을 생성하는 프로그램과 이를 자동으로 해석하는 프로그램을 개발하였다. 설계 간단화를 위해 개발된 프로그램을 상용 최적화 소프트웨어 iSIGHT 에 연결하여 최적화를 수행하는 과정을 수립하였다.

3. 파이프 형상생성 및 해석 시스템

기존의 에어컨 실외기 배관설계의 방법을 블록모형으로 그리면 그림 2 와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 현재 배관설계 방법은 전형적인 시행착오법을 사용하고 있다. 여기서 배관수정 한번에 걸리는 시간은, 배관제작이 수동으로 힘든 경우가 많기 때문에 가공업체에 소량 가공 의뢰하여 제작하는데 평균 1 주~2 주 정도 걸린다. 그러므로 2~3 회 수정하면 1 달 이상 개발기간 지연이 일어난다. 그러므로 그림 3 과 같이 실외기 배관설계를 위한 프로그램을 개발하면 다양한 실외기 개발에서 개발비용 및 시간의 단축효과를 얻을 수 있다. 그림 3 의 과정을 설명하면 다음과 같다.

먼저 파이프 형상 GUI 프로그램으로 기본적인 형상을 GUI 환경에서 설계자가 그린다. 그 결과로

부터 해석 및 최적화에 필요한 꼭지점의 좌표, 즉 형상좌표 정보를 추출한다. 파이프 형상 출력 프로그램은 형상좌표를 이용하여 형상을 만들어낸다. 파이프 형상으로부터 자동 유한요소 프로그램이 유한요소망을 생성하고 미리 입력된 조건들을 이용하여 경계조건을 생성하고 해석까지 상용 소프트웨어 I-DEAS 를 이용하여 수행한다.

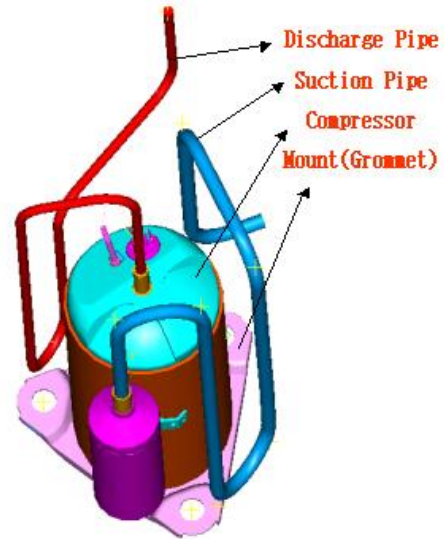


Fig. 1 Compressor and Pipes in the outdoor unit of an air conditioner

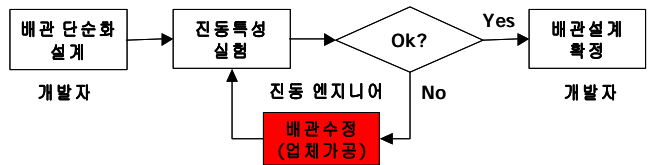


Fig. 2 Current Design Procedure

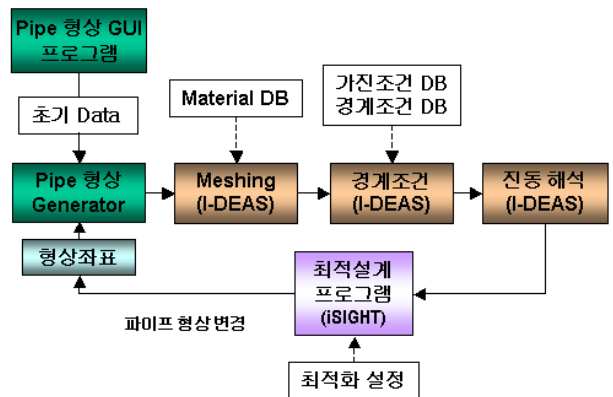


Fig. 3 Auto Design Procedure of the Pipe Shape

상기 프로그램은 자체적으로 하나의 자동해석 프로그램이 되며, 이 자동해석 프로그램은 형상좌표 입력에 의해 최종 파이프 구조의 진동특성 값

을 출력해 준다. 그러므로 이 자동해석 프로그램을 상용 최적화 소프트웨어 iSIGHT 에 연결하여 최적화 조건을 설정해 주면 최적화를 수행할 수 있다.

3.1 파이프 형상생성 프로그램

I-DEAS 와 같은 CAD 소프트웨어에서 3 차원 파이프를 그리는 방법으로는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째는, 처음 파이프가 시작하는 위치로부터 돌출기능(Extrude)을 통하여 계속 원하는 모양을 덧 붙여 나가는 방식이다. 장한기⁶⁾는 이 방법을 기초로 최적화 문제의 설계변수를 설정하였다. 이 방법은 일반적으로 3D 모델을 그릴 때 사용하는 방법의 연장으로 볼 수 있어서 설계자에게는 대체로 익숙한 방법이라고 볼 수 있다. 그러나 3 차원 파이프의 경우 구조적 특성에 의하여 처음 시작부분에서 잘못 설계하여 수정이 가해지면 나머지 부분의 설계값들이 모두 영향을 받아서 다시 그려야 한다는 불편함이 있다.

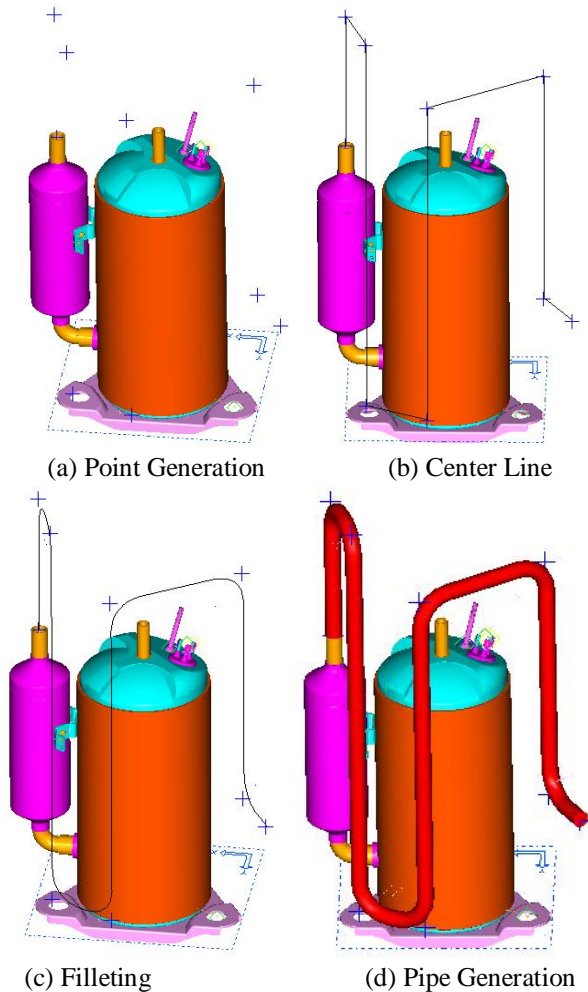


Fig. 4 Development of the pipe shape using the coordinates of the Bending Point

둘째는, 그림 4 와 같이 파이프가 꺾어지는 꼭지점의 좌표를 미리 결정하고 이 꼭지점을 연결하여 파이프 중심선을 그린 다음 곡률을 주어서 파이프를 생성하는 방식이다. 이 방법은 파이프의 형상변경이 필요할 때 부분위치만 바꾸기 편리하고, 중심선을 이용하여 그리기 때문에 FE 모델링을 할 때도 편리하다는 장점이 있다. 다만, 아주 이상한 모양이 나올 수도 있기 때문에 제작환경에 따른 제한조건을 꼭지점 좌표들에 대한 함수로 잘 정의해 주어야 한다는 불편함이 있다. 본 연구에서는 최적화를 수행하기 위해서는 쉽게 형상변경 및 자동 FE 모델생성에 유리한 꼭지점을 이용한 형상생성 방식을 사용하였다.

3.2 파이프 해석 프로그램 및 검증

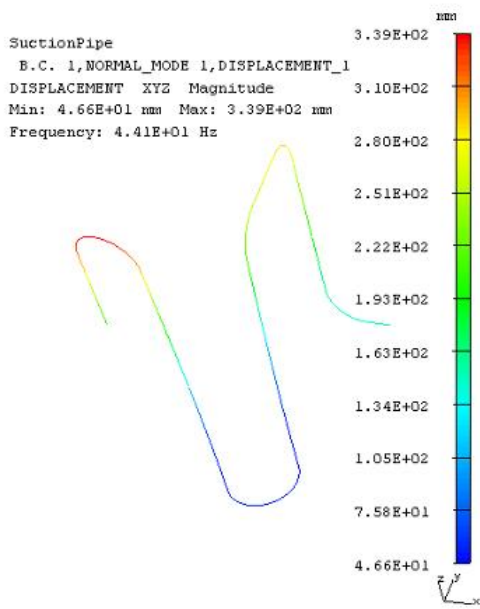
실외기 파이프를 유한요소 모델링하기 위해서는 형상의 특성상 크게 Shell 과 Beam 요소로 모델링 할 수 있다.

표 1 은 동일한 조건에서 Mesh 요소를 그림 5 와 같이 Shell 과 Beam 으로 나누어 해석하여 비교한 결과이다. Shell 요소를 사용하는 경우 같은 단위길이로 요소를 나누었을 때 Beam 요소에 비하여 요소수가 약 10 배정도 크다. 또한 단위길이를 크게 하여 요소 개수를 줄이면 단면의 근사오차에 의하여 파이프의 총 질량에 5% 정도의 오차가 발생하며 이로 인하여 파이프 공진주파수의 값도 5% 정도 변화하게 된다. 이에 반하여 Beam 요소의 경우 요소수가 상대적으로 적게 필요하며 요소수에 따른 전체 질량이나 해석된 파이프 공진주파수에 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다. Shell 과 Beam 요소의 공진주파수는 Shell 요소를 써서 해석한 경우 항상 약 10% 오차 내에서 Beam 요소로 해석한 결과보다 더 작은 값을 나타내고 있다.

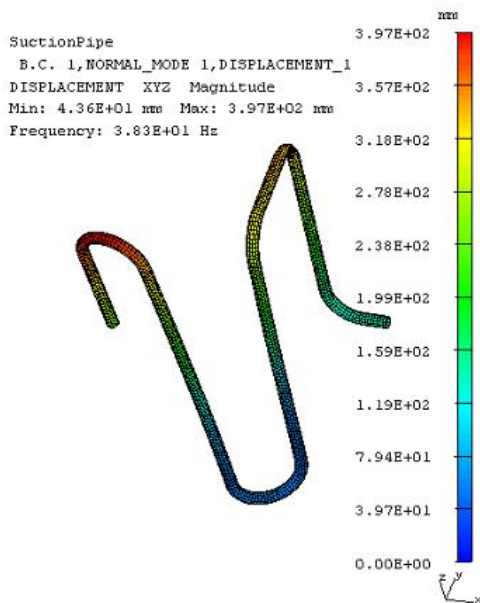
표 2 는 그림 5 의 기존 배관의 파이프 일부분을 실제 모드 실험하여 얻은 공진주파수와 해석결과로 얻은 공진주파수를 비교한 표이다. 결과를 보면 Beam 요소를 사용한 경우가 실험결과에 더 근접하다는 사실을 알 수 있다.

Table 1 Analysis results of beam and shell elements

요소크기		$\Delta L = 1 \text{ mm}$	$\Delta L = 3 \text{ mm}$	$\Delta L = 8 \text{ mm}$
Shell	요소수	48766	5280	825
	전체질량	0.3232 kg	0.3198 kg	0.3021 kg
	F	38.5 Hz	38.3 Hz	36.0 Hz
Beam	요소수	1384	460	174
	전체질량	0.3237 kg	0.3237 kg	0.3235 kg
	F	44.1 Hz	44.1 Hz	44.1 Hz



(a) Beam elements



(b) Shell elements

Fig. 5 I-DEAS Analysis Result

그림 6 은 위의 결과를 바탕으로 파이프 해석요소로 Beam 요소를 채택하여 해석 프로그램에 적용한 결과로써 해석하기 직전의 모습을 나타낸 그림이다.

파이프의 외부연결위치는 고정시켰으며, 압축기는 무게중심의 위치에 집중질량으로 가정하였다. 그로밋(Grommet)이라고 불리는 압축기를 지지하는 3 곳의 고무 마운트는 3 축 스프링으로 모델링 하였다. 그로밋과 파이프는 강체요소(Rigid element)로 압축기 집중질량과 연결하였다.

가진력은 압축기 집중질량에 회전질량으로 인

한 원심력으로 넣어주었다.

Table 2 Comparison of analysis and experiment

Mode	Type	Beam	Shell		Test
			Quad.	Tetr.	
1st		29.6	25.8	26.1	28.2
2nd		37.7	34.8	35.0	39.6
3rd		53.3	46.7	47.0	55.0
4th		88.8	82.9	83.4	92.4
5th		127.5	118.4	119.6	133.0
6th		155.6	136.7	141.1	152.0
7th		172.2	152.9	154.9	177.0
8th		208.3	197.9	199.6	212.0
9th		233.6	213.8	217.3	222.0
10th		275.3	257.9	260.3	291.0

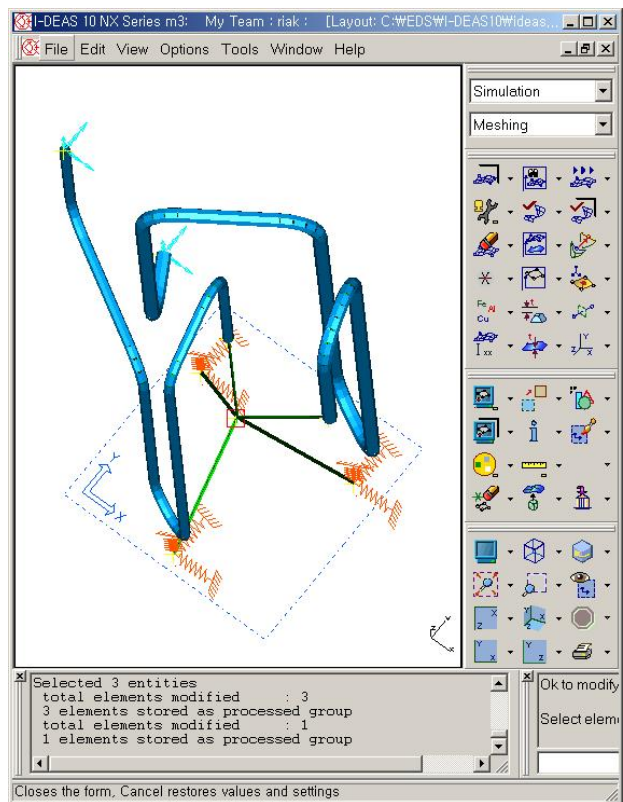


Fig. 6 Auto-analysis macro program using I-DEAS

4. 파이프 형상 최적화

본 연구에서는 CAE 해석결과를 이용하여 최적화하는 도구로써 상용 최적화 소프트웨어 iSIGHT 를 사용하였다. 그림 7 은 iSIGHT 를 이용하여 입력, 해석프로그램, 출력을 설정한 그림이다. PipeInput.dat 파일은 설계변수가 저장된 문서파일이며, test.bat 파일은 윈도우 환경에서 I-DEAS 를 불러와 입력된 설계변수에 대하여 해석을 수행하는 명령어 파일이다. RESULT.dat 파일은 해석결과가 저장되는 파일이며 iSIGHT 는 RESULT.dat 파일

의 결과를 최적화하도록 PipeInput.dat 파일을 업데이트하며 반복 연산하게 된다.

4.1 설계변수

파이프 형상을 최적화 하기 위해서는 설계변수의 변화에 따라 설계자의 작업이 없이 자동 형상 생성 및 해석이 용이하고 결과를 얻을 수 있어야 한다. 본 연구에서는 그림 4 에서 설명한 파이프의 굽힘점의 좌표(x,y,z)값 중 두 파이프의 U 자 형태 관 부분의 높이로 삼았다. 즉, 흡입파이프의 U 형태 관에서 상단 꼭지점은 고정하고 하단 꼭지점의 Z 좌표값을 설계변수 H_S 로 두고, 마찬가지로 토출 파이프의 U 형태 관의 하단 꼭지점의 Z 좌표값을 설계변수 H_D 로 두었다.

그러므로 설계변수 벡터 X 는 다음과 같다.

$$X = \{H_S H_D\}^T \tag{1}$$

4.2 목적함수

파이프 최적화의 목표는 압축기의 진동전달을 최소화하고 파이프의 최대응력을 낮추어 피로파손을 방지하는 것이다.

먼저 파이프 최대응력 σ_{max} 는 진동해석을 통해 얻을 수 있는 요소의 Von Mises 응력값 중 최대값을 선택하였다.

둘째로 진동전달력 $F_{Reaction}$ 는 압축기를 지지하는 3 개의 그로밋과 파이프가 외부에 고정되는 2 개의 끝단에서 발생하는 반력들의 크기를 모두 더한 값이다.

그러므로 목적함수 $f(X)$ 는 다음과 같다.

$$f(X) = - (\sigma_{max}/\sigma_{INI} + F_{Reaction}/F_{INI}) \tag{2}$$

이때 σ_{INI} 와 F_{INI} 는 초기 설계시의 값이며 두 성능지수의 가중치는 1:1 로 동일하게 주었다.

4.3 제한조건

설계 제한조건으로는 설계변수가 파이프의 형상이므로 실외기내의 부품들에 의한 공간적 제약이 제한조건이 된다. 본 연구에서는 다음과 같이 설계변수의 최대값과 최소값을 제한하였다.

$$10 \text{ mm} \leq H_S \leq 40 \text{ mm} \tag{3}$$

$$60 \text{ mm} \leq H_D \leq 120 \text{ mm} \tag{4}$$

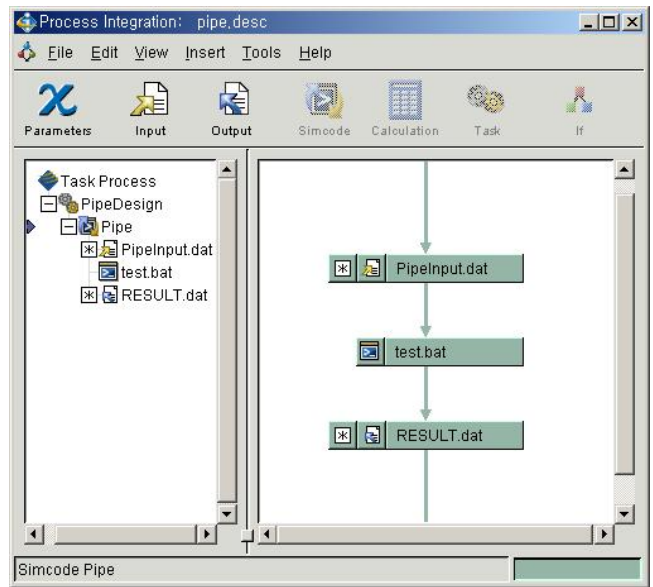


Fig. 7 Optimization program using iSIGHT

5. 최적화 결과

그림 8 은 수립된 파이프 최적화 문제를 최적화 반복계산하는 과정을 보여주는 모니터 그림이다.

최적화 알고리즘으로는 목적함수의 연속성이 보장될 때 좋은 효율을 보이는 MMFD(Modified Method of Feasible Direction)법을 사용하였다.

26 회의 반복계산 후 목적함수 값은 2.02 에서 0.52 로 74% 줄어들었으며, H_S 는 23.4 에서 10 으로 H_D 는 92.2 에서 60 으로 바뀌었다. 이 결과는 파이프의 U 관의 길이가 길어지면 진동특성은 좋아진다는 사실을 보여준다.

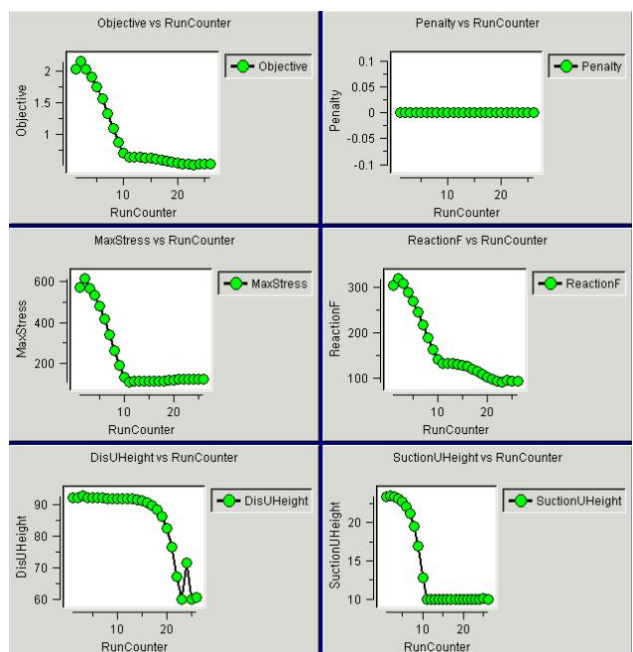


Fig. 8 Iteration monitor result using iSIGHT

Table 3 Optimization Results

		초기값	최적값	변수범위
설계 변수	H_S [mm]	23.4	10	10 ~ 40
	H_D [mm]	92.2	60	60 ~ 120
목적 함수	σ_{max} [kN/m ²]	305.2	91.7	
	$F_{Reaction}$ [mN]	574.1	121.4	

표 3 은 설계변수와 목적함수의 최적화 전후의 값을 비교한 것이다. 설계변수의 값을 2~3 cm 바꾸어 줌으로써 기존제품에 비하여 최대응력은 약 70% 줄어들었고, 진동에 의한 반력의 합은 80% 정도 줄어들었다.

6. 결 론

3 차원 공간에서 다양한 설계가능성을 가지고 있는 에어컨 실외기의 압축기에 연결되는 배관은 진동특성이 주요 설계목적의 하나이다. 진동특성은 실제 실험을 통하거나 컴퓨터 해석을 통해서만 구할 수 있으므로 제품 개발자들에게는 시행착오법으로 설계하기에 어려운 점이 많다.

본 연구에서는 최적설계 기법과 자동 진동해석 프로그램의 구축을 통하여 손쉽게 진동특성을 고려한 배관설계 시스템을 구축하였다.

개발된 설계시스템을 사용하여 기존의 제품을 최적화 해 본 결과, 배관형상을 2~3cm 변경하는 것만으로도 파이프의 최대응력 및 진동반력량이 70~80% 줄어든다는 것을 보여준다.

제안된 설계시스템을 사용함으로써 진동 저감을 위해 사용되던 고무블록이나 댐퍼 등의 부품 비용을 절약할 수 있고, 실험제작회수를 줄여서 개발기간을 크게 단축시키는 효과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) Yamamoto, H. and et al., 1995, "A Vibration Analysis System for Pipe Design," ASME, Current topics in computational mechanics, Vol. 305, pp. 327~338.
- (2) Sawanobori, T. and et al., 1995, "A Vibration Analysis of Compressor-Piping Coupled System in Air Conditioning Units," ASME, Current topics in computational mechanics, Vol. 305, pp. 305~310.
- (3) Seoggwan Kim and et al., 1993, "Vibration Analysis of a Refrigerator Using Component Synthesis Method," Journal of KSNVE, Vol. 3, No. 3, pp. 253~257.
- (4) Bong-Jo Ryu, and et al., 2000, "Effects of Attached Masses on the Instability and Vibration Suppression of a Flexible Pipe Conveying Fluid," Journal of KSNVE, Vol. 10, No. 2, pp. 280~290.
- (5) Han-Kee Jang, and et al., 1999, "Development of Pipe Configuration of Air Conditioner Compressor for Vibration Isolation," Journal of KSNVE, Vol. 9, No. 4, pp. 795~805.