Transactions of the KSNVE, 22(10) : 925~931, 2012.
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.10.925 ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

철도차량용 냉방기 배관계의 진동저감 연구

Vibration Reduction of Pipe Line in Air-conditioner for Railway Vehicle

유 원 희†·정 용 호*·구 정 서**
Wonhee You, Yongho Jung and Jeongseo Koo

(Received January 9, 2012 ; Accepted September 3, 2012)

Key Words : Railway Vehicle(철도차량), Air-conditioner(냉방기), Pipe Line(배관계), Vibration Durability(진동내구성), Vibration Reduction(진동저감)

ABSTRACT

The air-conditioner for railway vehicle should have vibration durability in order to operate normally in vehicle running situation. KS R 9144(vibration test methods for railway vehicle parts) is used to verify the vibration durability. The specifications of compressor, condenser and evaporator for air-conditioner in railway vehicle are standardized, but the shape and structure of pipe lines are not specified. Because the air-conditioner handler produces the pipe line arbitrarily, sometimes the pipe line is broken during the vibration durability test. In this research the cause identification and solution of pipe line breaking problem in during the vibration durability test were studied for air-conditioner of railway vehicle(diesel multiple unit). It was found that the natural frequency of pipe line is related to the pipe line breaking by experiment. A new pipe line shape was introduced by using FEA in order to avoid the resonance. The prototype new pipe line was applied to air-conditioner and the natural frequency was measured by experiment in order to verify the resonance avoidance. The vibration reduction of air-conditioner with new pipe line was reviewed by comparing to the air-conditioner with original one.

1. 서 론

철도차량에서 사용되는 냉방기는 철도차량이라는 특수 환경에서 항상 정상적으로 작동할 수 있도록 내구성을 확보해야 한다. 이를 위하여 KS R 9144 (철도차량 부품의 진동시험 방법)에 의한 진동시험을 거치도록 되어 있으며, 이를 통하여 취급 환경성, 수송 및 운용 시에 예상되는 동적 진동에 견딜 수 있도록 제작되었는지의 여부를 확인하고 있다.

철도차량에 사용되는 냉방기에 있어서 압축기, 응축기, 증발기 등에 대해서는 구조와 사양 등이 정의되어 있으나, 연결 배관의 구조 및 형상에 대해서는 정형화되어 있지 않다. 이에 따라 냉방기 취급자가 임의로 배관의 형상을 제작하여 연결하고 있기 때문에, 진동내구성 시험 시 배관에 균열이 발생하거나 혹은 완전히 절단되기도 한다.

배관계의 진동내구성 문제는 대부분 배관계의 공진과 관련되어 있다. 가전제품이나 플랜트 등 여러 시스템에서는 이러한 문제에 대해 오래전부터 연구

† Corresponding Author ; Member, Korea Railroad Research Institute
E-mail : whyou@krri.re.kr
Tel : +82-31-460-5670, Fax : +82-31-460-5299
* KORAIL Research Institute
** Seoul National University of Science and Technology

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

를 수행하여 설계단계에서 시스템의 작동주파수와 배관계의 고유진동수를 회피하도록 하고 있으며, 추가적으로 배관계에 질량 혹은 댐핑을 부가하는 방법을 적용하고 있다. 장한기[1] 등은 냉방전용 에어컨 실외기 제품의 배관 시스템에 대해서 3가지 설계 요구사항 즉, 압축기 회전주파수에 대한 공진회피와 배관의 강도확보 및 배관의 질량 최소화를 달성할 수 있는 배관 형상을 최적설계 기법을 통해 도출하였다. 이를 위해서 설계 요구사항들을 정량적으로 평가할 수 있는 기준을 도입하였고, 배관의 특정 형상에 대한 매개화된 형상변수를 최적설계를 위한 설계변수로 고려하였다. 또한 특정 형상을 갖는 배관 시스템에 대해서 3가지 설계 요구사항을 자동으로 평가할 수 있는 해석 시스템을 구축하였다. 민준홍[2] 등은 파이프를 통한 진동전달을 최소화 하는 측면에서 파이프의 형상설계 과정을 최소화하고자 하였다. 우선, 제한적이기는 하지만 파이프의 배열의 초기형상을 결정하는 방안을 제안하였다. 이어서 선정된 초기형상에 대하여 필요한 요구조건이나 제약조건을 만족하면서 주위로 전달되는 진동과 소요비용이 동시에 최소화되는 방향으로 파이프의 최종치수를 결정하는 과정을 제안하였다. 전체적으로 비용이 다소 증가하지만 초기상태에 비하여 진동저감비가 약 50 % 임을 보여주었다. 한편, Ryu[3] 등은 압축기의 가진력을 고려하여 배관계의 과도진동을 예측하고 이를 저감하기 위한 방법에 대해 연구를 하였으며, Jeon[4] 및 Ryu[5] 등은 압축기를 지지하는 지지스프링 또는 마운트의 강성을 줄임으로써 압축기의 진동수준을 저감하는 연구를 수행하였다. 압축기의 진동수준이 저감하면 배관계로 전달되는 진동이 약하게 되어 배관계는 그만큼 진동환경에 안정하게 될 것이다.

이와 같이 냉방기의 배관계에 대해 여러 가지 설계방법이 연구/제시되어 왔다. 이러한 방법들을 참고로 하여 이 연구에서는 영업운전 투입이 촉박한 철도차량에 탑재하기 위한 냉방기가 진동내구성시험을 통과하지 못하고 배관계가 절단된 문제에 대하여 시간의 제약에도 불구하고 체계적으로 접근하여 해결하고자 하였다. 압축기와 응축기 사이에 연결된 배관계의 고유진동수를 측정하여 절단원인을 파악하고, 공진을 회피하기 위하여 유한요소법에 의해 새로운 배관계 모델을 제안하였다. 유한요소법에 의해 새롭게 제안된 배관모델을 실제작하여 냉방기에 연결하고 이에 대한 고유진동수 측정을 통해 실험적으로 검증하였다. 검증된 배관계가 적용된 냉방기를 정상 작동시켜 원래의 배관계를 가진 냉방기의 진동수준을 비교함으로써 진동저감효과를 파악하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 냉방기 배관계 절단 현상

철도차량은 주행 중 항상 진동을 유발하며, 이에 따라 철도차량에 사용되는 냉방기는 진동환경에 견딜 수 있도록 내구성을 확보해야 한다. 냉방기와 같이 철도차량에 탑재되는 부품이 진동내구성을 확보하고 있는가를 검증하기 위해서는 KS R 9144[6](철도차량 부품의 진동시험 방법)에 의한 진동시험을 필수적으로 거치도록 되어 있다. 그러나 냉방기에 사용되는 배관계는 특정한 사양이나 형상이 정해져 있지 않고 취급자가 임의로 형상화하여 연결하기 때문에 때때로 진동내구성시험 시 절단이 나기도 한다. 이 연구에서는 Fig. 1과 같이 내구성시험 중 절단이 발생한 도시통근형동차(diesel multiple unit)용 냉방기의 배관계에 대해 충격해머와 가속도계를 이용하여 고유진동수를 찾아냄으로써 절단의 원인을 파악하고자 하였다.

참고로, KS R 9144에 의한 진동내구성시험은 Table 1과 같이 수행한다. 10 Hz 이하에서 고유진동수가 나타나면 그 고유진동수에서 내구성시험을 수행하고 이어서 고유진동수가 아닌 10 Hz에서 내구성시험을 수행한다. 이 연구의 대상이 된 배관계는

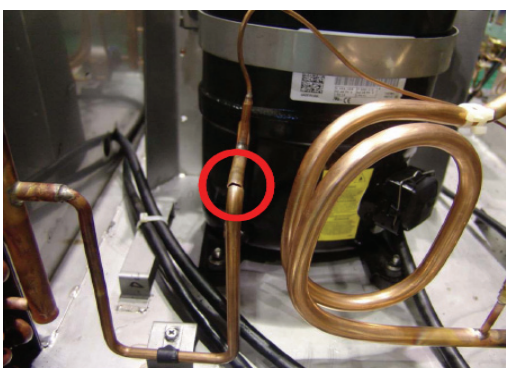


Fig. 1 Broken part of pipe line

Table 1 Vibration durability test

Direction	Exciting acceleration	Exciting frequency	Test time(sec)	Remark
Longitudinal	13.7 m/s^2	Longitudinal natural freq.	1,800	Resonance
		10 Hz	5,400	Non-resonance
Lateral	13.7 m/s^2	Lateral natural freq.	1,800	Resonance
		10 Hz	5,400	Non-resonance
Vertical	13.7 m/s^2	Vertical natural freq.	3,600	Resonance
		10 Hz	10,800	Non-resonance

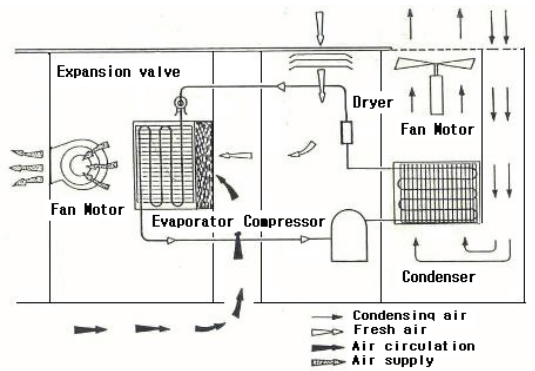


Fig. 2 Layout of air-conditioner

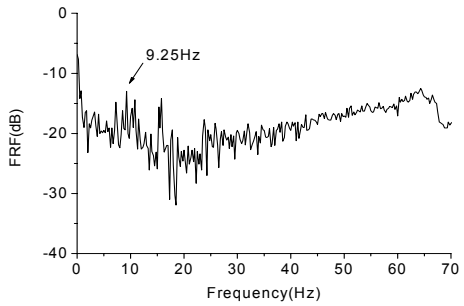
9.75 Hz 횡방향 고유진동수에서의 내구성시험 후에 절단이 되었음이 확인되었다.

Fig. 2는 이 연구의 대상이 되는 냉방기의 내부배치도를 보여주고 있다.

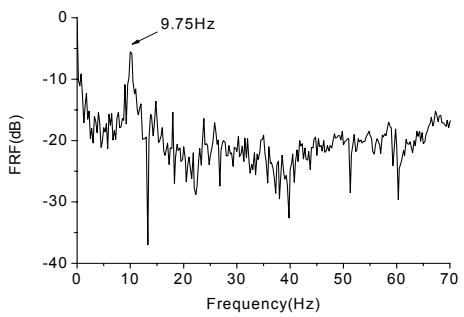
2.2 냉방기 배관계 고유진동수

이 연구의 대상이 된 철도차량용 냉방기의 배관계는 횡방향 진동내구성시험 과정에서 파손되어 차량에 탑재하는 것이 불가능하게 되었다. 차량에 탑재하기 위해서는 진동에 의한 파손문제를 해결하여야 한다. 이러한 파손문제를 해결하기 위하여 기존배관계의 고유진동수를 측정하고, 그로부터 기존배관계의 고유진동수를 변경시키는 방법을 고려하였다.

Fig. 1과 같이 문제가 된 배관계를 에서 냉방기에 연결한 상태에서 충격해머와 가속도계를 이용하여 종방향, 횡방향 및 수직방향으로의 전달함수를 구하고 그로부터 각 방향의 고유진동수를 구하였다. KS R 9144에 의거한 10 Hz 미만의 고유진동수에서의 진동내구성 시험 시 배관계에 균열이 나타났기 때문에 이 주파수대역의 고유진동수에 대해 고려하였다. 실제로 철도차량의 공통적인 특징 중의 하나는 차체의 굽힘



(a) Vertical direction



(b) Lateral direction

Fig. 3 Frequency response function

고유진동수가 8~10 Hz 근방에서 나타난다는 것이다. 이에 따라 KS R 9144 역시 Table 1에서 보는 바와 같이 10 Hz 이하에서의 진동내구성시험에 대해 정의하고 있다. 즉, 철도차량 차체에 탑재되는 냉방기의 경우 Table 1에 기술된 진동내구성시험을 통과하지 못하면 철도차량 주행 중 언제라도 배관계가 절단되어 냉방기가 제 성능을 발휘하지 못하게 될 것임을 나타내고 있다.

Fig. 3은 고유진동수 시험결과 얻어진 횡방향 및 수직방향 주파수응답함수를 보여주고 있다. 이들로부터 횡방향으로는 9.75 Hz, 종방향으로는 9.75 Hz 그리고 수직방향으로는 9.25 Hz의 고유진동수를

얻어내었다.

2.3 냉방기 배관계의 형상 변경

앞에서 언급한 바와 같이 이 연구의 목적은 냉방기 배관계의 고유진동수를 변경하여 KS R 9144에 의한 진동내구성시험을 통과할 수 있도록 하는 것이다. 따라서 이 절에서는 유한요소 해석을 통해 기존 배관계와는 차별된 새로운 배관계를 설계하여 고유진동수를 변경하고자 하였다.

(1) 배관의 모델링

설계단계에서부터 냉방기에 적절한 배관계를 디자인하는 것이 가장 합리적인 방법이나 이 연구에서는 여러 가지 제한된 여건(공간적인 문제 및 현장에서의 작업성 등)에 의하여 수정이 비교적 용이한 3가지 형상을 제안하여 검토하였다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 기존배관의 응축기(condenser)쪽의 높이를 165 mm에서 120 mm, 80 mm로 짧게 디자인 하였으며, Fig. 4(d)는 배관의 중앙부를 2회 감아 디자인 하였다.

(2) 기존 배관계의 고유진동수 해석

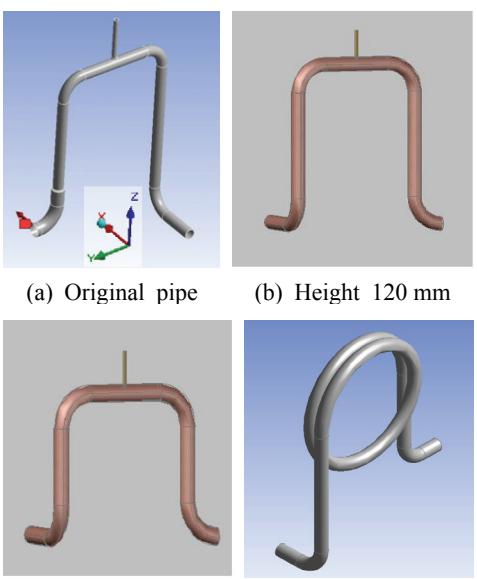
배관계의 고유진동수는 배관을 연결하는 연결방법 또는 경계조건에 따라 약간씩 변하게 된다. 이 연구에서는 경계조건을 탄성지지로 연결된 것으로 가정하여 유한요소 해석을 통해 기존 배관계의 고유진동수를 파악하고자 하였으며 Fig. 3에서 보여주고 있는 고유진동수에 맞는 경계조건(탄성지지 상수)을 찾고자 하였다.

Table 2와 같은 배관의 물성치를 적용하여 기존 배관의 경계조건을 탄성지지 값(k)을 16 N/mm^{3}부터 2 N/mm^{3}씩 순차적으로 조절하여 26 N/mm^{3}까지 변화를 주면서 고유진동수 9.75 Hz에 맞는 k값을 찾고자 하였다. 그 결과 k값 22 N/mm^{3}에서 기존배관의 고유진동수에 해당하는 9.75 Hz가 나타남을 확인하였다(Fig. 5 참조).

(3) 새로운 배관계의 진동해석

기존 배관계의 고유진동수 9.75 Hz에 맞는 k값 22 N/mm^{3}을 고려하여 Fig. 4의 새로운 배관계들의 주파수응답함수와 고유진동수를 유한요소법을 이용하여 계산해내었다. 유한요소법에 의해 계산된 기존의 배관계와 새로운 형상의 주파수응답함수는 Fig. 6과 같으며 고유진동수는 Table 3과 같다.

배관계의 진동특성을 고려할 때 중요한 사항은 압축기의 진동이 배관계를 통해 냉방기 프레임 및 차체에 영향을 주는 것을 최소화해야 하는 것이다.



(a) Original pipe (b) Height 120 mm

(c) Height 80 mm (d) Circle type

Fig. 4 Modeling of original and modified pipe

Table 2 Physical properties of the pipe

Density	8940 kg/m^3
Young's modulus	110 GPa
Poisson's ratio	0.33
Tensile yield strength	0.251 GPa

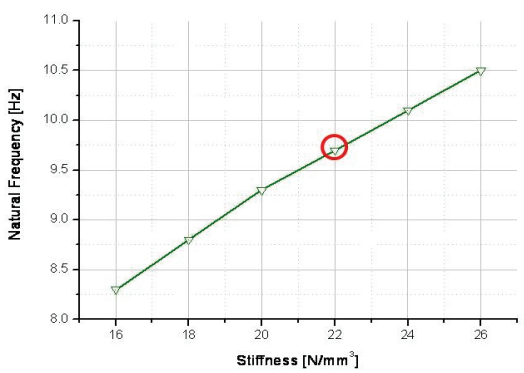


Fig. 5 Relationship between stiffness and natural frequency

따라서 배관계는 너무 큰 강성을 가지기 보다는 어느 정도 유연한 성질을 갖고 있어서 압축기의 진동이 냉방기 프레임으로 전달되지 않도록 해야 한다. 반면에 철도차량의 진동에 견딜 수 있는 내구성을 가지고 있어야 한다. 즉, 유연성과 진동차단성능 및 진동환경에서의 내구성 등을 종합적으로 판단하여 새로운 배관계를 선택해야 한다. 이러한 관점으로 Fig. 4에 보여주고 있는 네 종류의 배관계에 대해 고유진동수 및 전달함수를 살펴보았다. Fig. 6 및 Table 3에 기술된 modified (a)는 높이가 120 mm인 배관계이며, modified (b)는 높이가 80 mm인 배관계이고, modified (c)는 원형의 배관계를 나타낸다 (Fig. 4 참조). Fig. 6을 보면 세 종류의 새로운 형상의 배관계 중 Fig. 4(d) 모델의 고유진동수가 기존 배관계의 고유진동수(약 9.75 Hz)를 회피하고 있으면서 저주파수의 고유진동수(약 7.1 Hz)를 가지기 때문에 더욱 유연한 특성을 가지고 있으며, 고유진동수에서의 가속도응답의 크기도 가장 작게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 4(d)의 배관계 모델이 이 연구의 목적에 가장 적합할 것으로 기대된다.

2.4 실험에 의한 신규 배관계 진동응답특성

앞 절에서 선정된 배관계를 대상으로 기존 배관계와 비교하여 고유진동수와 주파수 응답함수가 어떻게 바뀌었는지 충격해머와 가속도계 및 신호분석기를 이용하여 검토하였다. 즉, 수직방향 및 좌우방향의 주파수응답함수를 이용하여 기존의 배관과 새로운 배관 사이의 진동전달의 차이를 분석하고자 하였다. Fig. 7은 기존의 배관과 새로운 배관에 대해 동일한 지점에서의 주파수응답함수를 나타내고 있다. 이 그림들로부터 1~30 Hz 주파수 범위에서 새로운 배관현상의 효과가 잘 나타나는 부분은 약 7 Hz~12 Hz에 해당되는 부분임을 알 수 있다.

한편, 이 그림들로부터 기존의 배관계의 주파수응답함수와 새로운 배관계의 주파수응답함수를 비교해 보면 약 7 Hz~12 Hz에 해당되는 주파수에서 새로운 배관계의 주파수응답함수의 크기가 기존의 배관계에 비하여 상당히 작음을 알 수 있다.

2.5 신규 배관계를 적용한 냉방기의 진동내구성시험 및 정상작동 시의 진동특성

새로운 배관계를 적용한 냉방기를 KS R 9144에 근거하여 시험을 실시한 결과 아무런 문제없이 진동

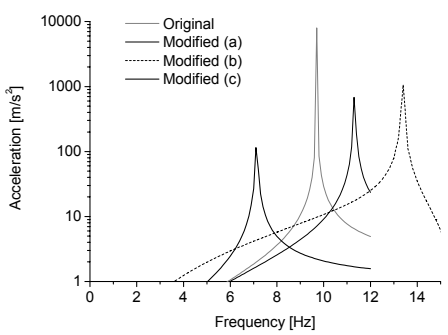
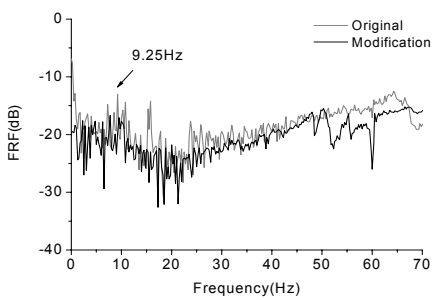


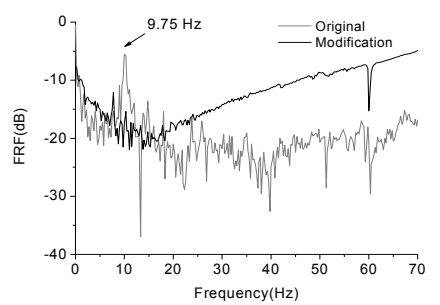
Fig. 6 Comparison of FRF

Table 3 Natural frequencies of pipes(Hz)

Direc.	Original pipe	Modified pipes		
		(a)	(b)	(c)
Lateral(x)	9.7	11.3	13.4	7.1
Longitudinal(y)	9.7	11.3	20.2	7.1, 9.5
Veritcal(z)	9.7	11.3	13.4, 20.2	7.1, 9.5

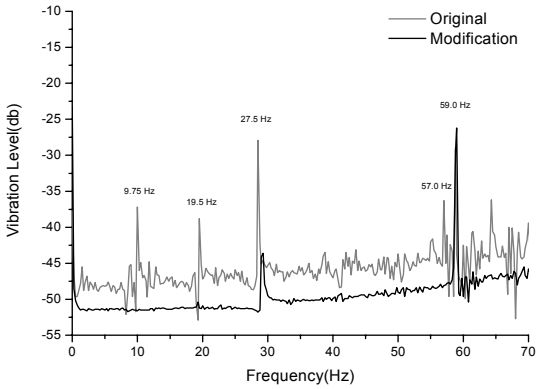


(a) Vertical direction

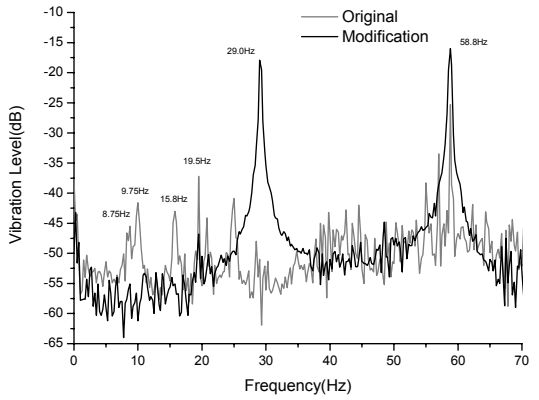


(b) Lateral direction

Fig. 7 Comparison of experimental FRFs



(a) Lateral vibration



(b) Vertical vibration

Fig. 8 Comparison of vibration level

내구성시험을 통과하였다.

그러나 기존 배관계를 적용한 냉방기와 새로운 배관계를 적용한 냉방기의 정상작동 시 진동수준을 비교하는 것이 배관계의 변경 이후의 진동저감효과 측면에서 매우 중요하다. 앞에서 살펴본 바와 같이 새로운 배관계는 기존의 배관계에 비해 주파수응답함수의 크기가 7 Hz~12 Hz 근방에서 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 압축기를 정상 작동한 상태에서 기존의 배관계로 이루어진 냉방기와 새로운 배관계로 이루어진 냉방기의 배관계 횡진동 및 수직진동을 비교하였다. 그 결과는 Fig. 8과 같으며, 25 Hz 이하의 저주파수에서 진동수준이 현저히 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 횡방향의 59 Hz 성분 및 수직방향의 29 Hz 및 58.8 Hz 성분은 오히려 증가되었다. 이는 추가적인 댐핑처리 없이 향상변경만으로 저주파수에서 나타나는 공진에 의한 배관계의 파손을 해결하고자 함에 따른 결과로 판단된다. 그러나 이 연구의 목적인 10 Hz 이하 또는 그 근방 저주파수에서의 진동수준은 확실히 개선되어 목적이 달성되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

이 연구는 철도차량에 탑재되는 냉방기의 부품진동 시험 시 배관계의 진동에 의한 절단현상을 해결하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험에 의해 구해낸 배관계의 고유진동수로부터 부품진동시험 시 나타나는 배관계의 절단원인을 파악하였다.

(2) 새롭게 제안된 3가지 배관계에 대하여 유한요소법을 이용하여 목적으로 하는 주파수 영역에서 진동저감에 가장 적합한 배관계를 선정하였으며, 선정된 새로운 배관계에 대하여 실험적으로 진동저감 효과를 검증하였다.

(3) 기존 배관계를 적용한 냉방기와 새로운 배관계를 적용한 냉방기의 정상작동 시의 진동수준을 비교하여 목적으로 하는 주파수 영역에서 새로운 배관계의 진동저감성능을 확인하였다.

이 연구에서 수행된 고유진동수 측정방법 및 유한요소에 의한 이론적 검증방법은 철도차량 부품의 진동문제를 해결하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

(1) Jang, H.-K., Gu, C.-W., et. al., 1999, Deve- lop-ment of Pipe Configuration of Air Cpnditioner Com-pressor for Vibration Isolation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 795~806.

(2) Min, J. H., Choi, D.-H., et. al., 2009, Shape Optimization of an Air Conditioner Piping System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 1151~1157.

(3) Ryu, S. M., Jeong, W. B. and Han, H. S., 2011, Prediction and Reduction of Transient Vibration of Piping System for a Rotary Compressor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 8, pp. 733~740.

(4) Jeon, S. H., Jeong, W. B., Won, S. G. and Lee, H. J., 2007, Design of Connecting Part of Linear Compressor to Reduce the Vibration Level of 60 Hz, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1360~1365.

(5) Ryu, S. M., Jeong, W. B., Han, H. S. and Ahn, J. W., 2010, Optimal Design of Mount for Vibration Reduction of an Rotary Compressor, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 142~143.

(6) KS R 9144 : 2004, Test Methods for Vibration of Parts of Railway Rolling Stock.

Wonhee You,
1996.12 ~ Present: Korea Railroad Research Institute.
1993.12 ~ 1996.11: Samsung Electronics Research Institute.
1982.11 ~ 1989.2: Agency for Defence Development

JeongSeo Koo,
2005.3 ~ Present: Professor in Seoul National University of Science and Technology.
2002.12 ~ 2005. 2: Korea Railway Research Institute.
1991. 3 ~ 2002. 12: Korea Institute of Machinery and Materials.
1987. 3 ~ 1991. 2: Korea Institute of Science and Technology.

YongHo Jung,
1983.5 ~ Present: KORAIL Research Institute, Quality Certification Center.
2009.3 ~ 2011.8 Seoul National University of Science and Technology, Graduate School of Railroad, Master of Engineering.