

왕복동 수소 압축기의 진동 분석 및 평가

조성원[†]·이정환*·김효중*·최병근**

Vibration Analysis of Reciprocating Hydrogen Compressor

SungWon Cho, JungHwan Lee, HyoJung Kim, Byeong Keun Choi

Key Words: Reciprocating Hydrogen Compressor (왕복동 수소 압축기), Pulsation (맥동), Mechanical Characteristic (기계적 특성), Numerical Analysis (수치해석),

Abstract

The reciprocating type hydrogen compressor is for high pressure and volume. However this type compressor makes pulsation caused by mechanical characteristic. This type compressor also makes noise and vibration that cause negative effect to machine and working condition. Therefore, diagnosis and countermeasure are needed to decrease vibration for safety on hydrogen compressor. therefore in this paper, the numerical analysis and vibration measurement is conducted in order to investigate vibration characteristic and to evaluation vibration condition, Respectively

1. 서 론

미래의 에너지라고 불리는 수소 에너지에 대한 기대가 커짐에 따라 수소의 사용량이 증가하고 있다. 따라서 대용량, 고압으로 압축할 수 있는 수소압축기가 필수적이다. 로터리식 압축기로는 고압의 수소를 얻기는 힘들었다. 이로 인해 고압의 수소를 얻을 수 있는 방안으로 왕복동식 압축기의 사용이 증가되었다. 그러나 왕복동식 압축기의 경우 기계적인 특성상 맥동이 발생하게 되는데 이 맥동은 많은 소음과 기계 진동을 발생시켜 기계에 마멸과 파손을 일으킨다. 그러

므로 수소 압축기의 안전성 측면에서 진동 저감이 필수적으로 요구 된다. 이러한 진동 저감 방안을 위해서는 진동 특성 파악이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 수치 해석적 진동 특성을 파악하기 위해 현재 개발된 수소 압축기를 수치 해석 기법을 통해 분석해 보았고, 이 압축기의 진동 및 소음 측정을 통해 현 상태를 파악하여 이후 개발될 수소 압축기의 수치 해석적 진동 특성 파악의 기초 데이터를 확립 하였다.

2. 수소 압축기의 진동 해석

2.1 해석수행과정

† 조성원, 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr
TEL : (055)640-3186 FAX : (055)640-3188

* 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

** 경상대학교 기계항공공학부



Fig. 1 Analysis Process of Hydrogen Compressor

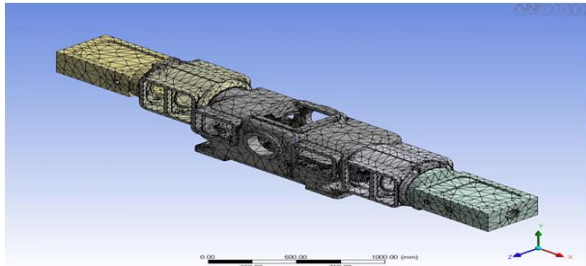


Fig. 2 Finite Element Modeling

왕복동식 수소 압축기의 구조상 발생하는 맥동에 의한 진동과의 공진여부를 확인하기 위하여 Crank Case, Distance Piece, Cylinder Block을 Assembly 하여 자유진동해석(고유치 및 고유 모드)을 수행 하였다. Fig. 1은 수소 압축기 해석 과정을 보여 주고 있다. 모델링은 상용 3D CAD 프로그램인 solidworks를 이용하여 모델링 하였다. 이 모델링 파일을 partran에 Import 후 자유진동해석을 위해서 Fig. 2와 같이 mesh 및 properties 작업을 통하여 유한 요소 모델 구축 이후 Nastran과 Workbench를 solver로 하여 해석을 수행 하였다

2.2 자유진동해석

Table. 1 Mode Natural Frequency

Mode	Non Pipe 상태의 고유 진동수(Hz)	Mode	Add Pipe 상태의 고유 진동수(Hz)
1	52.89	1	63.67
2	58.20	2	74.52
3	60.28	3	210.72
4	60.60	4	233.75
5	210.33	5	249.82
6	233.41	6	259.74
7	261.33	7	295.74
8	300.08	8	312.83
9	318.08	9	324.41
10	330.66	10	347.20

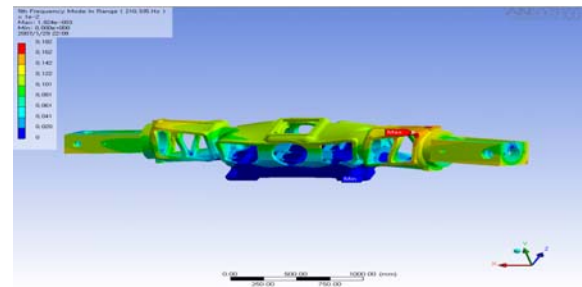


Fig. 3 5th Frequency Mode of Hydrogen Compressor Without Pipe (210.33Hz)

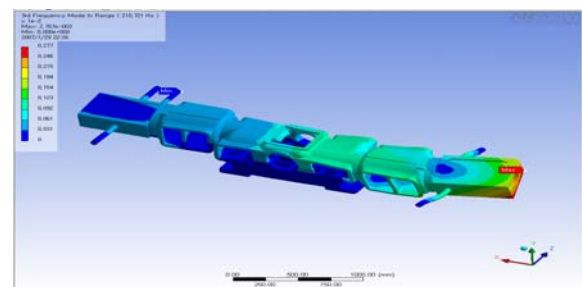


Fig. 4 3rd Frequency Mode of Hydrogen Compressor With Pipe (210.72Hz)

Table. 1은 Workbench를 이용 하여 모드별 고유 진동수를 나타낸 것이다. 수행 방법은 Fig. 3에서 Crank Case 바닥 부분을 Fix후 Cylinder Block에 pipe를 연결하지 않은 Non Pipe 상태와 pipe를 연결한 상태 두 가지 경우에 대하여 고유진동수를 계산하였다. 그리고 조화가진력과의 공진여부를 확인하기 위하여 각각의 경우 10개의 고유진동수를 구하였다. Non Pipe 상태에서 Crank Case 바닥 부분을 All Fix 하여 고유 진동수를 분석 하였다. Non Pipe 상태에서는 1~4차 모드까지는 굽힘 모드가 나타났고 5차 모드에서 비틀림이 나타났으며 5차 모드에서 고유진동수가 200Hz대로 나타났다. 그리고 8차 모드에선 300Hz대로 나타났으며, 10차 모드에선 330.66Hz까지 나타났다.

Fig. 4는 Pipe의 영향을 보기 위하여 Pipe를 장착한 상태에서의 고유 진동수를 나타낸 것이다. Fix는 바닥 부분과 Pipe 각 끝 부분을 All Fix 하였다. Pipe의 결합으로 인해 강성이 증가하여 Non Pipe상태의 고유진동수보다 전체 고유진동수가 증가 하였다. Pipe 장착 상태에서는 1~2차 모드 까지는 굽힘 모드가 나타났다. 3차 모드에서 비틀림이 나타났으며 200Hz대로 나타났다. 8

차 모드에서 300Hz대, 최종 10차 모드에서 347.2Hz로 나타났다.

2.3 수소 압축기의 강제 진동응답

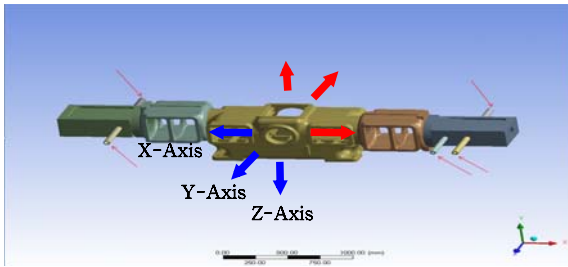


Fig. 5 Fixing Position at Modeling

수소 압축기의 고유 진동수를 알아보기 위하여 Cylinder Block에 Pipe가 장착된 상태에서 강제 진동을 시킨 후 수소 압축기를 강제 진동 영향을 분석 하였다. Fig. 5를 살펴보면 실선 화살표와 같이 Pipe 각 끝단과 Crank Case 바닥 부분을 Fix 하였다. X, Y, Z축 3부분으로 나누어 1N의 힘으로 0~400Hz까지 0.5Hz 간격으로 가진하여 강제진동해석을 실시하였다.

각각의 축에 대하여 Fig. 5의 붉은 화살표처럼 각각의 축에 좌우방향으로 힘을 주었고 한 방향당 1N으로 힘을 가하였으며 Phase Angle 을 0°와 180°로 주었다. 예를 들어 Fig. 6 와 같이 X축에 대한 고유 진동수를 알아 볼 경우 X축 좌우 방향으로만 힘을 주었고 Phase Angle 을 0°와 180°를 주어 해석 하였다. 이와 같이 Y 축이나 Z축에 대한 고유 진동수를 구할 경우에도 각축 좌우 측면에 힘과 Phase Angle을 주어 구하였다.

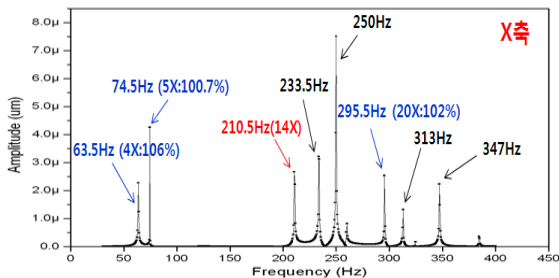


Fig. 6 Forced Vibration Response for X-Axis

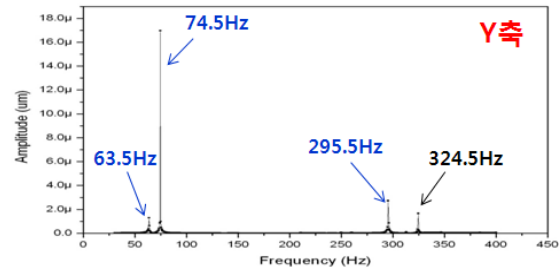


Fig. 7 Forced Vibration Response for Y-Axis

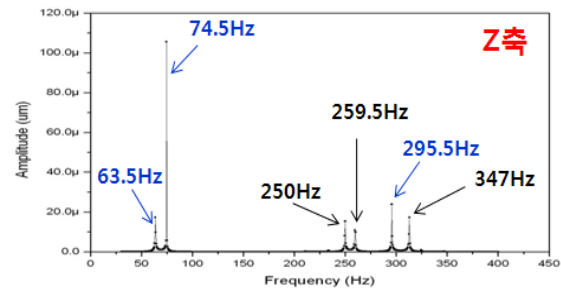


Fig. 8 Forced Vibration Response for Z-Axis

Fig. 6, 7, 8은 각 축 방향에 대한 강제진동응답을 나타낸 것이다. Y축과 Z축에 비해 X축에서 다양한 주파수에서 진폭이 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 수소 압축기 피스톤이 X축 방향으로 왕복 압축운동을 하도록 설계되었기 때문에 X축 방향으로 진동이 발생하기 쉽다고 사료 된다. 따라서 X축은 피스톤의 왕복 운동의 영향 적게 받는 Y축이나 Z축 보다 다양한 주파수대에서 진폭이 크게 발생된 것이다. 그리고 63.5Hz, 74.5Hz, 295.5Hz는 X축뿐만 아니라 Y축과 Z축에도 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로 이후 이 영역 대에 대한 고려가 필요 하다.

3. 진동 측정 및 평가

3.1 측정 대상

Table. 2는 현재 개발 중인 수소 압축기의 재원이다. 하지만 아직 개발 단계이므로 진동과 소음을 측정 할 수 없었다. 따라서 이번 개발 대상과 같은 형태인 왕복동식 수소 압축기에 대하여 진동 및 소음을 측정 해보았다. 토출 압력은 36 MPa.G, 압축용량은 800Nm³/hr, 소요 동력은 110 Kw인 강지지 type의 왕복동식 수소 압축기이다.

Table. 2 Specification of Reciprocating Compressor

CAPACITY	800 Nm ³ /hr
SUCTION PRESS.	2.452 MPa G.
DISCHARGE PRESS.	19.614 MPa G.
POWER	110 KW

3.2 규격

왕복동 압축기의 규격으로는 일반적으로 ISO 10816/6을 적용한다. 하지만 ISO 10816/6의 경우 왕복동 압축기의 진동을 12단계로 나누어 놓았지만, 사용영역에 대한 명확한 구분이 되어있지 않으므로 현재 독일에서 ISO 10816/6을 보완하기 위해 제정된 VDI 3838을 적용 하였다. 그리고 소음의 경우 국내 규격인 KS B 6351을 적용 하였다.

Table. 3 Vibration Permission of Reciprocation Piston Compressor (100kW over, VDI 3838)

Foundation	speed (rpm)	Vibration displacement s (µm)	Vibration velocity v (mm/s)	Vibration acceleration a (m/s ²)
High-tuned	120 to 3000	≤280	≤18	≤28
Low-tuned	300 to 3000	≤450	≤28	≤44

3.3 측정 방법

진동 및 소음측정에 사용된 장비로는 Pulse 3560(B&K SV), VIBROTEST 60(B&K Vibro), 가속도계와 마이크로폰이며, 각각의 제원은 Table 2와 같다.

Table. 4 Factor of Pulse and Sensor

계측장비	Pulse 3560(B&K SV), VIBROTEST 60(B&K Vibro)	
	Type	Sensitivity
Charge Accelerometer	4371 (11718)	0.988 pC/ms ⁻¹ (9.69 pC/g)
	4371 (11719)	1.003 pC/ms ⁻¹ (9.84 pC/g)
	4382 (11037)	3.117 pC/ms ⁻¹ (30.56 pC/g)
Microphone	4189-L-001 (2477633)	25.8dB re 1V/Pa
	4189-L-001 (2377640)	27.3dB re 1V/Pa

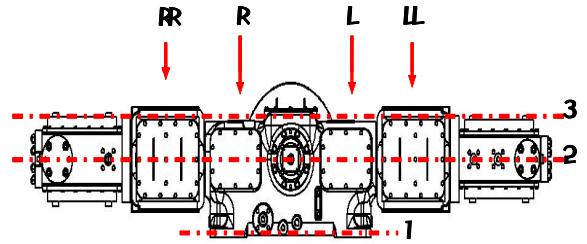


Fig. 9 Vibration Measurement Point (The Front Side)

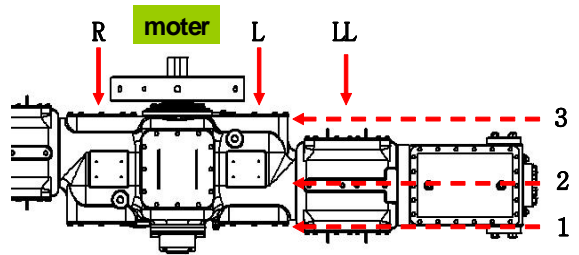


Fig. 10 Vibration Measurement Point (The Upper Side)



Fig. 11 Vibration measurement direction

VDI(ISO와 동일)규격에 따라 Fig. 9~11과 같이 측정 위치를 정하였다. 모터를 기준으로 좌·우 각 세 개, 바닥으로부터 상부까지 각 세 개의 기준, 그리고 진동의 방향성을 알아보기 위해 각 포인트에 X, Y, Z 세 방향으로 총 18 포인트로 진동을 측정하였다. Fig. 12와 Fig. 13 소음 측정은 KS B 6351의한 측정 위치를 나타낸 그림이다. 측정은 Crank shaft와 좌우 실린더에서 수평거리 1m 와 바닥에서 높이 1m의 위치에서 각각 측정을 수행하였다.

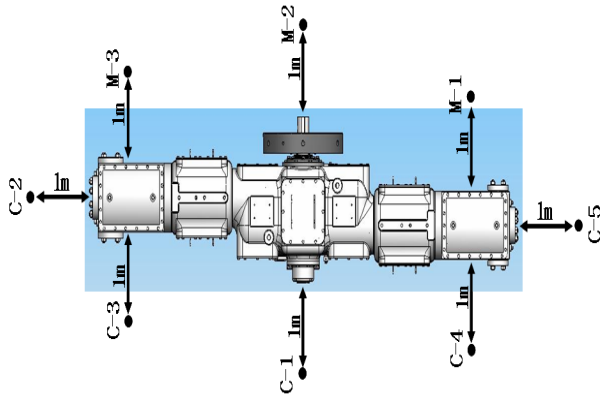


Fig. 12 Noise Measurement Point



Fig. 13 Noise Measurement

3.3 측정 결과

Table 5은 수소압축기의 진동 측정결과이다. 측정 결과 최고치 값이 나타나는 위치는 변위의 경우 X-축 R,3,1 위치에서 $7.05\mu\text{m}$, 속도는 Z-축 L3,3에서 2.07mm/s , 그리고 가속도는 Z-축 R,2,2에서 2.1m/s^2 정도로 전반 적으로 VDI 3838 보다 낮게 나타났다.

Table 6는 소음측정결과이다. 대부분의 측정 위치에서는 KS 규격에서 허용하는 80 dB 정도로 허용 범위 안에 있었다. M3의 경우 다른 위치 보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 M3의 경우 맥동에 의한 진동외의 외부의 다른 조건의 영향에 의한 것으로 사료된다.

따라서 현재 수소 압축기는 진동과 소음 측면에서는 양호한 상태라는 것을 알 수 있었다.

Table. 5 Vibration Measurement Result

Measu ring point	X			Y			Z		
	s (μm)	v (mm/s)	a (m/s^2)	s (μm)	v (mm/s)	a (m/s^2)	s (μm)	v (mm/s)	a (m/s^2)
R,3,3	6.55	1.47	1.24	2.92	0.87	1.29	5.27	1.31	1.11
R,2,3	5.21	1.16	1.09	2.85	0.72	1.30			
R,1,3	2.73	0.45	0.50	1.30	0.33	0.67	4.71	1.21	0.9
R,3,2	3.50	1.27	1.56	4.19	0.95	1.44	4.09	1.62	1.69
R,2,2	5.32	1.64	1.84	4.06	1.04	1.97	6.91	2.05	2.1
R,1,3	3.23	0.83	0.95	3.05	0.74	0.99			
R,3,1	7.05	2.02	1.89	7.76	1.56	1.66	3.66	1.70	1.52
R,2,1	6.19	1.52	1.39						
R,1,1	2.88	0.55	0.56	2.11	0.5	0.71	4.18	1.78	1.18
L,3,3	6.53	1.95	1.64	5.67	1.71	1.92	5.73	2.07	1.41
L,2,3	5.48	1.59	1.38						
L,1,3	1.67	0.47	0.63	1.50	0.48	0.75	4.51	1.65	1.43
L,3,2	5.65	1.90	1.71	3.47	1.45	1.63	4.08	1.64	1.63
L,2,2	4.52	1.33	1.37	2.27	1.38	1.63	3.20	1.37	1.59
L,1,3	2.28	0.70	0.82	1.26	0.65	0.87			
L,3,1	5.90	1.87	1.54	3.18	1.34	1.67	3.98	1.48	1.35
L,2,1	4.68	1.46	1.34	2.90	1.17	1.56			
L,1,1	1.67	0.48	0.60	1.60	0.40	0.73	3.14	1.08	0.98

Table. 6 Noise Measurement Result

Point	Data (dB(A)/20 μ Pa)
C1	82.5
C2	83.7
C3	81.5
C4	81.8
C5	79.4
M1	81.3
M2	78.0
M3	86.1

4. 결 론

수소 압축기의 소음 및 진동의 저감 대책을 마련하기 위해 진동 특성을 살펴보았다.

현재 개발 된 수소 압축기의 자유진동해석을 통해 고유치 및 고유모드를 살펴보았고, 강제진동해석을 통해 주파수 응답을 살펴보았다. 이결과 수소 압축기의 고유치가 압축기 모터의 구동 주파수 성분의 공진 영역대 있으므로 이후 이 영역에 대한 고려가 필요 하다고 사료 된다.

그리고 왕복동 수소 압축기의 소음 및 진동의 측정 결과 KS B 6351 와 VDI 3838의 허용 범위 내에 있는 것으로 보아 현상태가 양호 함을 알 수 있었다. 그러나 이후 장시간 운전 에 따른 소모에 의해 진동 및 소음의 증가되면 방진 패드나 동흡진기의 사용이 효과적이라고 사료된다.

이 결과를 토대로 새로 개발 될 왕복동식 수소 압축기의 수치 해석적 진동 특성 파악의 기초 데이터로 사용할 수 있다고 사료 된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업, NURI(첨단기계산업기술혁신인력양성사업단) 및 2단계 BK21의 지원으로 진행 되었다.

참고문헌

- 1) Hyojung Kim, Dongsik Gu, Haneol Jung, Byeong keun Choi 2006. Vibration analysis of reciprocation type hydrogen compressor
- 2) ISO Standard. 1996. Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. ISO/IS 10816.
3. G, D. 1985. Vibration permission of Rotary machine, Reciprocation machine. Vibration engineering handbook. 775. Japan.
- 4) KS Standard. 1986. Test and examination method of Positive displacement compressor. KS B 6351. Korea
- 5) B, S, Yang. 1994. Actuality of equipment diagnosis by vibration's law. Ilo. P, 240-241. Korea
- 6) MSC.Software Corporation. 2004. MSC.Nastran Quick Reference Guide. MSC.Software Corporation .
- 7) Rathbone, T. C. : "Vibration Tolerance," Power Plant Engineer, Vol.43, pp.721, 1939.
- 8) Verlin Deutscher Ingenieure 1964.: "Beurteilung der Einwirkung Mechanischer Schwingungen auf den Menschen," VDI Standard 2056,