

# 항만용 크레인 구동 모터 고진동 사례 연구

김영춘\* · 박희주\*

## A Case Study of the Higher Vibration on the Driving Motors of Port Crane

Yeong-Chun Kim, Heui-Joo Park

**Key Words :** RTGC(컨테이너 야적 크레인), 3-axis accelerometer(3 축 가속도계), Frequency analyzer(주파수 분석기), Impact test(충격시험), Frequency response function (주파수 응답함수), Order tracking plot(차수추적선도)

### Abstract

It was firstly issued that frequently broken of Encoder installed at travelling motor during RTGC operation. Estimated as broken due to excessive vibration of traveling and motor manufacturer claimed it as resonance of motor base. The principal vibration of Encoder was caused by the rotating vibration component of motor and by traveling wheel. The component transmitted from the wheel didn't have great vibration by the resonance with motor and other parts. Therefore, the plans was tried to add the support point to prevent the Encoder shaft vibrated greatly and inhibit the vibration. These showed good results.

### 1. 서론

컨테이너 항만에서 운용되는 크레인의 종류에는 여러 가지가 있으나, 본 연구의 대상이된 크레인 은 본선으로부터 하역된 컨테이너를 야적장에 적재하는데 사용되는 RTGC(Rubber Tired Gantry Crane)로 Fig. 1 과 같다.

RTGC의 가장 큰 특징은 여타 크레인이 대부분 철로 위를 주행하는 것에 비해 합성고무로 제작된 바퀴를 장착하고 있으며, 4행정 디젤엔진을 탑재하고 자가 발전된 전력을 이용하여 모터로 구동하는 시스템을 가진다. 따라서 철로를 사용하는 크레인에 비해 작업 공간으로의 이동이 자유로우며, 지면의 형성 조건이나 타이어의 상태 특히 공기압에 의해 기기 전체가 진동의 영향을 많이 받을 수 있는 구조로 되어있다.

RTGC에서의 최초 문제 발생은 주행 중 구동모터 상부에 설치된 엔코더의 잦은 파손이었다. RTGC에서 엔코더는 대각방향으로 2기 또는 4기의 모터 구동부에 각각 1대씩 설치가 되며, 각 구동부의 속도를 검출하여 크레인의 운전을 자동으로 조절할 수 있게 한다.

모터 제작사인 G사에서의 모터 구동부 각 부위에 대한 진동을 측정하였으며, 그 결과 모터 상부의 엔코더 부위에서 모터의 회전주파수 이하에서 발생하는 고진동 성분을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 RTGC에서 발생하고 있는 고진동 현상의 정밀한 측정과 정확한 원인 규명을 목적으로 하였다. 원인규명을 위하여 여러 가지 측정방법이 적용되었으며, 주름개수가 다른 타이어를 갖는 크레인의 진동현상을 측정하여 비교하였다.

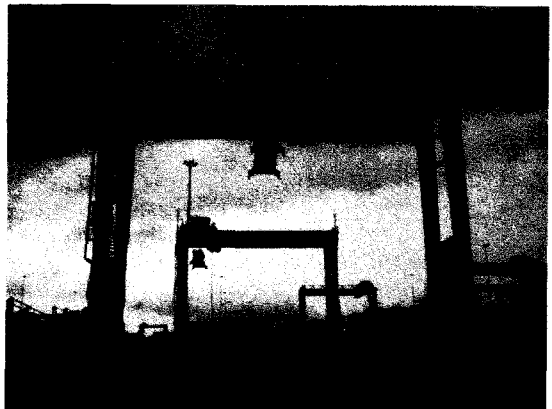


Fig. 1 A photograph of RTG crane in PTP Malaysia

\* 두산중공업㈜ 기술연구원

또한 규명된 가진원 및 고진동 현상에 대한 대책 수립하고 이를 실제 운전 중인 RTGC에 적용하여 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 진동 측정 및 방법

RTGC에 적용된 모터 구동부는 Fig. 2의 실물 사진에서와 같이 수직형으로 설치되어 있으며, 개략적인 사양은 Table 1과 같다. 진동의 측정은 3축 가속도계(KISTLER) 4개와 1축 가속도계(PCB 336M28) 8개를 사용하여 진동신호를 검출하고 이를 주파수 분석기(HP35670A)를 이용하여 분석하였다. Fig. 2에 가속도계 설치 위치 및 측정방향을 나타내었다.

Table 1. Specifications of motor driving parts

Part name	Specification	
Motor	Maker	G.E.
	Speed (rpm)	1785.0
	Output (HP)	75
	Type	AC Motor
	Weight (kg)	485.4
	Phase	3
	Voltage (V)	460
Encoder	Maker	AVTRON
	PPR	1024 ea
Reduction Gear	Weight (kg)	6.2
	Rating (kW)	55.9
	Ratio	1 / 20.4
	Weight (kg)	404.9

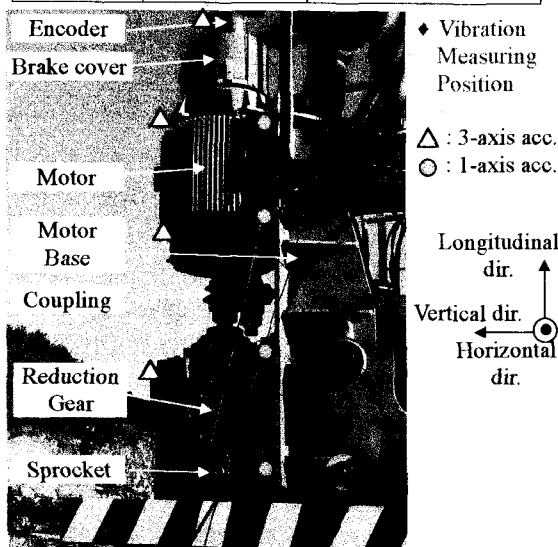


Fig. 2 A photograph of motor driving part of RTGC.

고진동의 원인을 규명하기 위해 크레인의 운전 중 또는 정지간에서 여러가지 방법으로 측정을 행하였으며 다음에서 열거하는 것과 같다.

- 1) 크레인 주행 중 진동 측정
- 2) 타이어의 공기압 변화에 따른 진동 측정 : 9.2kg/cm<sup>2</sup>, 8.5kg/cm<sup>2</sup>
- 3) 크레인 Jack-up 후 진동 측정
  - 운전 중 진동 측정
  - 구동체인 분해 후 운전 중 진동 측정
- 4) 모터 기초부 공진확인을 위한 Impact test
- 5) 모터 단독운전 시험(shop-test 실시)
  - 엔코더 제거 전후 진동 시험
- 6) 방진지그 적용 후의 운전 중 진동 측정

또한 진동현상의 비교 차원에서 주름개수가 다른 RTGC를 선정하여 동일한 측정 위치에서 진동 측정을 실시하였다.

## 3. 분석 전 확인사항

### 3.1 진동 평가 기준

RTGC 운전 중 고진동 발생이 문제로 되고 있는 주행부(모터, 감속기, 베이스, 엔코더 등)에서의 진동 허용치에 대한 기준치 설정 문제에 있어 일반 회전기계에 적용하는 ISO2372를 적용하기에는 무리가 많다고 본다. ISO2372는 구동부의 마운팅이 견고하게 또는 약하게 기초에 고정되어 있는 경우에 대한 규정이며, RTGC의 경우와 같이 고정된 기초 자체가 주행함에 따라 상당한 진동을 유발하고 있어 기초(foundation)로부터 진동이 구동부로 전달되는 크기에 따라 구동부에서 측정되는 진동치가 달라지게 되기 때문이다.

최근에 제정된 회전기계 진동 허용치 규정인 ISO10816-1도 근본적으로 ISO2372와 내용이 동일하고, 오히려 ISO7919-3 규정을 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 이는 진동 허용치를 베어링과 축의 상대진동치(peak to peak shaft vibration displacement, relative to bearing)만으로 규정하여 나타내므로 기초로부터 전달되는 진동을 배제할 수 있겠으나, 베어링의 지지강성에 따라서 변화가 생길 수 있다는 한계가 있다.

따라서, 현실적인 대안으로 기 설치되어 잘 운전되고 있는 RTGC에 대하여 선별적으로 진동을 측정하여 그 평균값으로 정의하는 것도 고려해볼 만하다.

### 3.2 발생 가능한 진동의 종류

RTGC의 모터 구동부에서 발생할 수 있는 진동의 종류를 살펴보면 다음과 같다.

- 감속기 기어에 의한 진동  
진동주파수 = 감속기회전수 × 기어 잇수
- 베어링 파손에 의한 진동(SKF, FAG & NTN)  
진동주파수 1 = 회전주파수 × 0.38  
진동주파수 2 = 0.4 × 회전주파수 × 볼수  
진동주파수 3 = 0.6 × 회전주파수 × 볼수
- 축정렬 불량에 의한 진동  
진동주파수 = 회전주파수 × 1, 2, 3
- 운전중 타이어에 의한 진동  
진동주파수 = 바퀴회전주파수 × 주름(tread)수

## 4. 측정결과 및 분석

RTGC의 정지 및 주행 중 각종 진동 시험을 행하였으며, 결과의 확인을 위해 주름개수가 다른 RTGC를 선정하고 동일한 측정위치에 대해 주행 중 진동을 측정하였다. 각각의 시험 방법에 대한 측정 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

### 1) 운전 중 진동

RTGC를 100%운전 시의 진동은 Table 2에서와 같이 모든 측정 부위에서 주파수 범위 12~12.5 Hz 부근의 진동응답이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 최대 진동치가 발생하는 곳은 엔코더 부위로 30~56mm/s,rms의 크기를 보인다. 엔코더 부위에서의 진동은 12~12.5Hz 진동성분과 모터의 회전주파수인 30Hz 진동성분이 주진동이 수직방향의 진동이 여타 방향에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

측정 당시의 RTGC 운전 조건에 따라 진동치의 변화가 크게 나타나고 있으며, 이는 조향장치의 작동에 따른 구동부의 회전수 변화 및 부하의 변동에 기인한 것으로 판단된다.

### 2) 타이어 공기압 변화에 따른 진동 측정

Table 3에 타이어의 공기압을 최초 9.2kg/cm<sup>2</sup>에서 8.5kg/cm<sup>2</sup>으로 감압시킨 후 100% 운전 시 진동을 측정한 결과를 보인다. 12~12.5Hz 부근의 진동치는 최초 운전 시에 비해 20~40% 감소함을 확인하였다.

### 3) 크레인 Jack-up 후 진동 측정

12.5Hz 부근의 가진성분을 확인하기 위해 크레인을 Jack-up 한 상태에서 구동체인 분해 전후 운전 조건에 대해 진동을 측정하였다.

Fig. 3~Fig. 6는 체인 분해 전후에 대한 측정결과로 측정 부위 중 상대적으로 높은 진동치를 보이는 엔코더와 모터 상부의 수직방향에 대한

cascade plot을 나타낸다. Fig. 3은 구동륜이 회전하고 있는 상태로 12.5Hz 부근의 진동성분은 존재하지 않는 것을 알 수 있으며, 이는 타이어로부터 발생됨을 알 수 있다. 18.5Hz 부근의 공진점은 Fig. 3, Fig. 4에서 공통적으로 발생하고 있음을 알 수 있으며, 여타 측정결과와 비교하여 엔코더 자체의 문제인 것으로 판단된다.

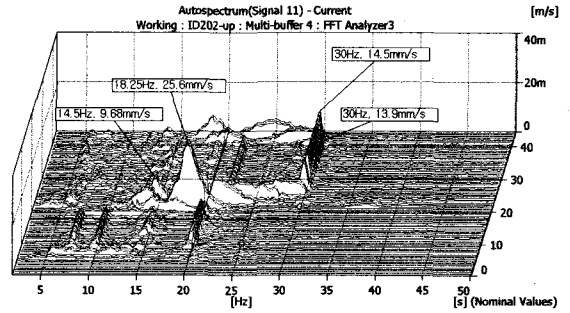


Fig. 3 Cascade plot for vertical direction of encoder . (chained and crane jacked-up)

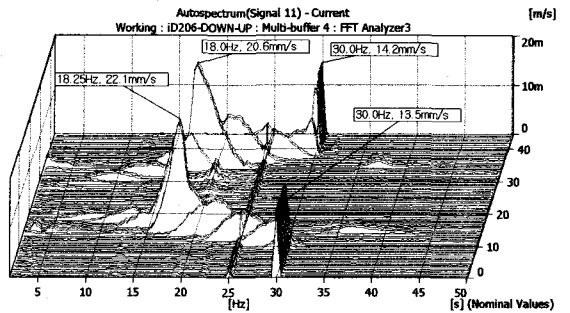


Fig. 4 Cascade plot for vertical direction of encoder . (unchained and crane jacked-up)

Fig. 5에서 14.5Hz 부근의 진동은 Fig. 6 및 여타 측정 결과와 비교하여 jack-up 된 상태에서 구동체인과 연관된 진동수로 추정된다.

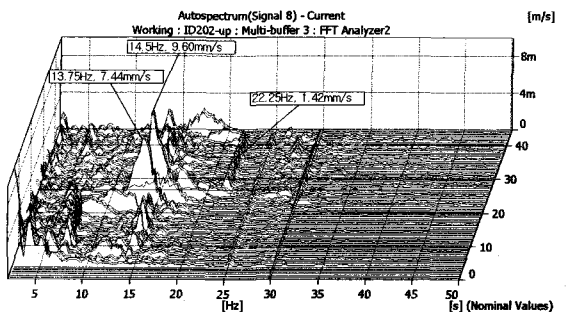


Fig. 5 Cascade plot for vertical direction of motor upper. (chained and crane jacked-up)

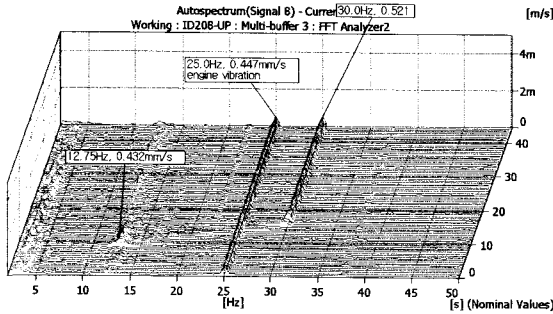


Fig. 6 Cascade plot for vertical direction of motor upper. (unchained and crane jacked-up)

4) 모터 기초부 및 구조물 Impact test

강제 진동응답에서 나타난 공진점에 대한 기초 부와의 연관성을 조사하기 위해 impact test 를 실시하였으며, 측정결과 중에서 대표적인 엔코더와 기초 상부의 주파수 응답함수를 Fig. 7, Fig. 8 에 보인다.

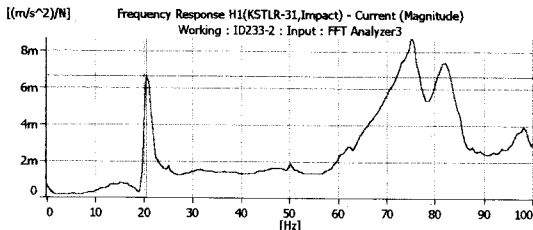


Fig. 7 Frequency response function (encoder / base)

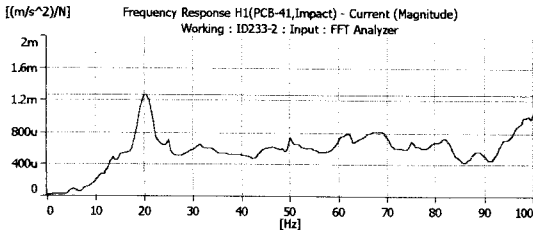


Fig. 8 Frequency response function (base / base)

측정결과에서와 같이 기초부의 고유진동수는 21Hz 부근에 존재하며, 이는 강제 진동응답에서 나타난 주파수와 무관함을 알 수 있다.

5) 모터 단독 운전시의 진동 측정

진동측정은 모터만을 분리하여 단독운전 중 실시하였다. Table 4 는 엔코더 부착전후의 모터 운전 중 측정 위치별 진동 최대치를 비교한 것이다. 이 결과를 살펴보면 엔코더 부착 후에 베어링하우징 위치 및 엔코더 부위에서의 진동치가 상승하는 것과, 엔코더에서 발생하는 진동이 상대적으로 높음을 알 수 있다.

Table 4. Comparisons of vibration measurement data with or without encoder

Measuring position	Vibration, mm/s rms	
	With encoder	Without encoder
MTR upper	4.9	1.8
MTR lower	0.8	5.4
Encoder		19.6

Fig. 9 는 모터를 1750rpm 에서 감속하면서 측정 한 차수전도(order plot)와 차수추적선도(order tracking plot)를 나타낸다. 진동 최대치는 100% 회전수 부근이 아닌 920rpm 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

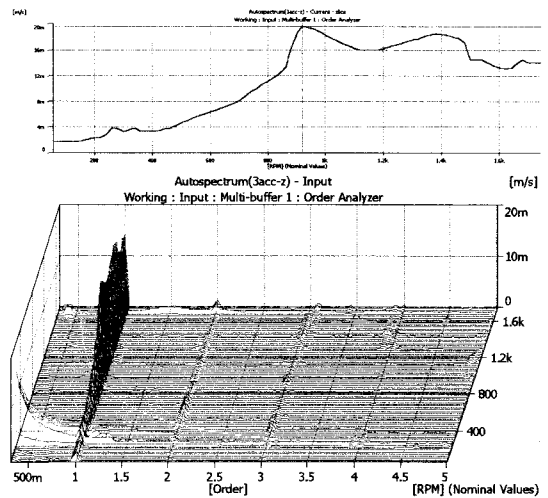


Fig. 9 Order tracking plot and slice plot for vertical direction of encoder (1750-0rpm)

6) 방진지그 설치 후 진동 측정결과

방진지그 설치 전에 문제로 되었던 12.5Hz, 18.5Hz, 30Hz 부근에서 발생하는 고진동을 줄이기 위해 방진지그를 제작, 적용하였으며 Fig.10 에서와 같이 개선됨을 확인할 수 있었다.

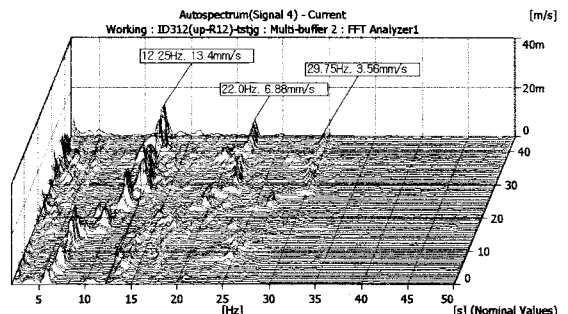


Fig. 10 Cascade plot for vertical direction of encoder (after installed bearing cover)

## 5. 요약 및 결론

### 7) 다른 종류의 RTGC 와 진동 측정결과 비교

타이어로부터 발생하는 진동성분의 확인 및 3년간 운전 중인 크레인의 진동상태를 비교 확인하기 위해 국내 항만에서 운전 중인 크레인을 대상으로 진동을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 11에 보인다.

대상 크레인은 당사에서 제작 납품한 것으로 문체의 RTGC와 유사하게 설계 제작되었다. 진동측면에서의 큰 차이점은 30개의 주름이 있는 타이어를 장착하고 있다는 것으로 앞서 언급한 식으로 계산한 결과와 측정결과가 14.5Hz로 일치함을 알 수 있다. 따라서 주름진 타이어가 가진원인을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12의 측정결과와 비교하면 진동의 크기 또한 비슷함을 알 수 있다. 따라서 엔코더를 제외한 나머지 구조물에서 발생하는 진동은 RTGC에서 일반적으로 발생할 수 있는 주파수와 크기의 진동임을 알 수 있다.

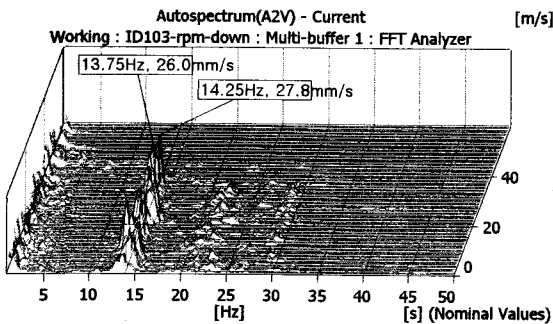


Fig. 11 A photograph of motor driving part of RTGC. (Type A)

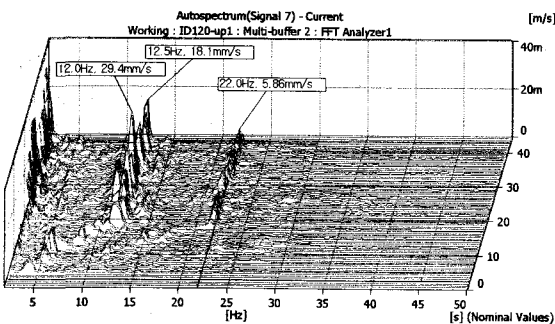


Fig. 12 A photograph of motor driving part of RTGC. (Type B)

RTG 크레인의 모터 구동부에서 발생하는 진동을 측정 및 분석하였으며, 원인 규명을 통하여 고진동 방지대책으로 방진지그를 제작 설치하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 크레인을 Jack-up 한 상태에서의 진동측정 결과 엔코더와 모터 구동부의 각 부위에서 발생하는 12.5Hz 부근의 진동은 타이어로부터 발생됨을 확인하였다.
- 2) 주행 중 타이어의 공기압과 진동과의 관계를 조사하기 위하여 공기압을 변화하였으며, 진동 및 크레인의 운전에 적합한 타이어의 공기압은 8.5kg/cm<sup>2</sup>임을 확인하였다.
- 3) Impact test 결과 15, 18, 21Hz 부근의 주파수 성분이 검출되었으나, 이는 모터 구동부 기초와는 무관하며, 엔코더 자체 시스템에서 기인함을 확인하였다.
- 4) 엔코더 부위에서 발생하는 고진동의 대책으로 방진지그를 제작 설치하고 엔코더 부착 위치를 조절한 결과 고진동을 10mm/s,rms 이하로 줄일 수 있었다.
- 5) 정상 주행 중 발생하는 진동은 합성고무재질의 주름 타이어를 장착한 크레인에서 발생할 수 있는 공통적인 현상이다.
- 6) 다른 종류의 크레인에서 발생하는 진동 측정치 비교 검토 결과 엔코더 부분을 제외한 모터 몸체나 기초부에서의 진동은 유사하나, 엔코더 부위의 진동이 크게 나타나므로 이는 엔코더 적용 상의 문제로 추정된다.

## 참고문헌

- (1) D.J. Inman, 1994, Engineering Vibration, Prentice Hall.
- (2) S.S. Rao, 1990, Mechanical Vibration, Addison-Wesley.
- (3) Victor Wovk, 1991, Machinery Vibration Measurement and Analysis, McGraw-hill.
- (4) J.S. Rao, 1983, Rotor Dynamics, John Wiley & Sons.
- (5) M. Lalanne, G Ferrais, 1990, Rotor Dynamics Prediction in Engineering, John Wiley & Sons.
- (6) R.B. Randall, 1987, Frequency Analysis, Bruel & Kjaer.
- (7) Vibration Consultants Inc., 1990, The Vibration Analysis Hand book, Vibration Consultants Inc.
- (8) J.E. Berry, 1993, Predictive Maintenance and vibration Signature Analysis 1, IRD Mechanalysis.
- (9) B.S. Yang, 1998, Practical Application to the

Diagnosis of Machinery, Hyosung Press.

- (10) ISO, 1974, "Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200rev/s", ISO-2372.  
 (11) ISO, 1996, "Mechanical Vibration of Non-Reciprocating Machines – Measurements on rotating Shafts and Evaluation Criteri – Part 3 : Coupled industrial machine", ISO-7919-3.

- (12) ISO, 1998, Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, ISO-10816-1.  
 (13) SKF, 1993, Large bearings, Bearings for heavy engineering applications, SKF.

Table 2. Measurement data for normal operation

a) 1<sup>st</sup> measurement

Freq. (Hz)	Encoder			Motor upper			Motor lower			Reducer upper		
	H	L	V	H	L	V	H	L	V	H	L	V
12.25	4.23	22.1	47.3	3.91	27.0	32.6	2.97	23.7	16.0	4.43	24.1	3.49
22.0			3.89			2.76						
30.	16.1		14.5									

b) 2<sup>nd</sup> measurement

12.25	6.5	14.0	34.7	5.4	20.8	23.8	3.7	13.4	9.9	2.5	12.2	1.3
22.0	1.2	1.4	7.5	1.3	3.6	4.2	1.3	2.4	2.5	0.4	1.8	0.7
30.	17.4	0.7	16.6									

c) 3<sup>rd</sup> measurement

12.25	11.1	16.9	33.3	6.22	20.6	22.6	2.30	16.0	11.4	4.76	16.2	2.57
22.0			7.17		3.31	4.71		2.54	2.01		2.12	
30.0	16.7		16.0									

Table 3. Comparisons of vibration measurement data according to air pressure of tire

a) tire air pressure : 9.2 kg/cm<sup>2</sup>

	Encoder			Motor upper			Motor lower			Reducer upper		
	H	L	V	H	L	V	H	L	V	H	L	V
12.25	27.6	17.6	34.0		21.4	29.4	1.6	19.6	12.2	3.7	1.1	5.0
18.5			43.2									
22.0			14.6		2.8	5.8		2.7	2.8	2.2		2.7
30.	9.5		8.4									

b) tire air pressure : 8.5 kg/cm<sup>2</sup>

12.25	3.2	9.9	22.7	2.3	12.4	19.6	1.1	11.2	7.8	1.0	1.0	4.6
18.5	22.9		36.2									
22.0	2.7	1.7	11.9		2.6	4.6		2.4	1.8			1.9
28.0	10.4	2.0	11.1									