

# 발파진동으로 인한 공작기계 가공정도의 영향 평가

이진갑\*

<sup>1</sup>경기과학기술대학교

## Evaluation of the Influence of Blast Vibration on Machine Tool Accuracy

JinKab Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Automation, Gyeonggi College of Science and Technology

**요약** 공작기계는 기계산업의 생산 및 시제품가공 등에 널리 적용되고 있다. 폭발시 발생하는 지반진동은 인근 구조물의 손상이나 시설에 많은 영향을 미친다. 본 논문은 발파진동이 공작기계의 가공정밀도에 미치는 영향을 고찰하였다. 발파진동과 발파시 공작기계의 진동을 측정하였고, 진동허용치를 기준으로 평가하였다. 공작기계의 진동허용치를 기준으로 할 경우 본 연구에 사용된 공작기계의 발파시 진동허용치는 SLIGHTLY ROUGH~ROUGH에 해당된다. 발파진동이 반복될 경우 정밀도가 저하될 가능성이 많다.

**Abstract** The machine tool is used widely to manufacture and trial manufactured goods in many machinery industries. Blast-induced ground vibration may have an environmental impact, such as damage to the adjacent structures and facilities. This study examined the influence of blast vibration on the accuracy of machine tools. The blast vibration and vibration of machine tools was measured to evaluate the influence of blast vibration on machine tools. Based on the evaluation of the vibration limit of machine tools, the vibration criteria for machine tools in this study were SLIGHTLY ROUGH~ROUGH. By repeated blast vibration, machine tools are more likely show reduced accuracy.

**Key Words** : Blast vibration, Machine tool, Vibration, Noise, Evaluation

### 1. 서론

최근 기간시설의 확충에 따라 도로, 철도 등의 건설이 증가하고 있다. 이런 공사를 수행하기 위해 암반절취를 포함한 지반굴착으로 인한 지반진동, 소음 등에 의한 환경피해 역시 지속적으로 발생하고 있다. 발파로 인한 지반진동은 대표적인 환경피해 요인으로 그 유형은 인체에 대한 정신적 피해와 구조물에 대한 물적 피해로 구분될 수 있다. 발파진동에 의한 피해는 대상물에 따라 미치는 영향이 전혀 다르게 발생하므로 각각의 특성에 맞는 기술적인 검증을 통해 규제 기준이 마련되어야 한다. 발파가 이루어지는 곳에 위치한 인근 업체에서 발파진동으로

인해 공작기계의 가공정밀도 저하로 품질불량 발생의 사례가 발생되고 있으나, 발파진동으로 인한 공작기계의 가공불량에 대한 정량적인 평가가 되지 않아 어려움을 겪고 있다. 발파진동의 구조물에 미치는 영향과 평가 [1-3] 및 공작기계의 진동평가[4-6]에 대해 다수의 연구가 소개되어 있으나 대부분 건축 구조물에 대한 것이다. 발파진동이 공작기계와 같은 정밀기계에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구는 발파진동이 공작기계의 정밀도에 미치는 영향을 진동측정을 통해 정량적으로 평가하였다. 발파되는 위치에서 일정거리 떨어진 지점에 위치한 공작기계를 대상으로 발파순간의 진동을 측정하여 그 결과를 진동

\*Corresponding Author : JinKab Lee(Gyeonggi College of Science and Technology)

Tel: +82-31-496-4729 email: [ljk@gtec.ac.kr](mailto:ljk@gtec.ac.kr)

Received July 11, 2014

Revised August 6, 2014

Accepted August 7, 2014

평가기준에 의해 발파진동이 공작기계의 정밀도에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 발파진동과 진동 평가기준

### 2.1 발파진동

발파를 통한 채광작업에서는 화약의 폭발시 발생하는 충격압에 의해 암반 중에 탄성파의 형태로 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동이라 한다.

발파진동에 의한 구조물의 피해는 진동속도의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있다. 발파진동은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 측정경험을 기준으로 예측식이 제시되어 있으며, 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 아래의 발파진동식이다[1].

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n$$

여기서,  $V$  는 발파 진동속도,  $D$  는 폭원으로 부터의 이격거리,  $W$  는 지발당 최대장약량,  $K$  는 자유면의 상태나 화약의 종류, 암질 등에 따른 상수,  $n, b$  는 감쇄지수와 장약지수이다.

위 식에서 거리와 지발당 장약량의 비인  $D/W^b$ 를 환산거리라고 하며,  $b = 1/2$ 이면 제곱근 환산거리,  $b = 1/3$ 이면 세제곱근 환산거리라 한다. 이와 같은 이론을 근거로 시험발파를 통해 얻은 계측자료를 통해 발파 진동속도를 예측할 수 있다.

### 2.2 진동 평가기준

#### 2.2.1 발파진동 평가

발파진동에 대해서 각 나라마다 진동 규제치가 있으나, 대부분 건물을 기준으로 하고 있다. 구조물에 대한 발파진동의 허용기준은 Table 1에 주어져 있다[2].

[Table 1] Blast vibration acceptance criteria

Division	Computer facilities	House	Concrete steel building	Factory, Plant
Vibration(cm/s)	0.2	0.3~0.5	1.0	1.0~5.0

#### 2.2.2 공작기계 진동 평가

발파진동이 구조물에 미치는 영향에 대한 연구는 다

수 발표되어 있으나 건축물이나 대형 구조물을 대상으로 한 것이 대부분으로 공작기계와 같은 정밀기계에 대한 연구나 평가기준은 제한되어 있다.

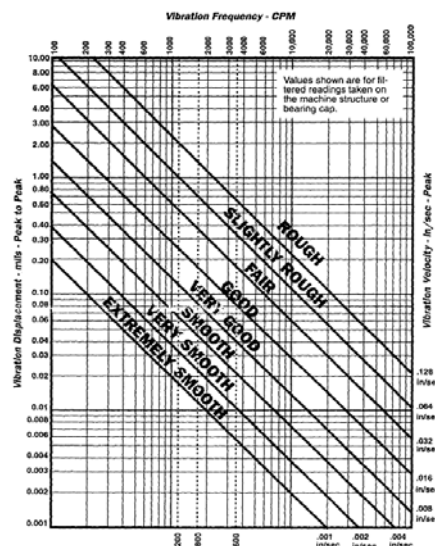
문헌[2]에 API(American Petroleum Institute)에 의해 수립된 발파 허용진동은 축진동을 기준으로 160Hz(9,600RPM)에서 12mm/s이며, 진동에 예민한 구조물의 경우 3mm/s, 전자장비의 진동 허용치는 2mm/s로 제시되어 있다. Fig. 1은 ISO 2372 BS 4675에 제시된 각 용량별 회전기계의 진동허용기준이다.

IRD Mechanalysis Chart[4]에 공구 및 공작기계의 진동허용치가 제시되어 있으며 Fig. 2에 주어져 있다.

Fig. 3은 공작기계를 포함한 일반기계의 진동평가기준이다. 이 기준은 완성제품의 성능에 영향을 미칠 수 있는 진동허용치인 경험치이며, 제품의 크기와 요구되는 허용공차에 따라 다를 수 있다.



[Fig. 1] Vibration criterion chart(10~1000Hz)



[Fig. 2] Vibration limit of machine tool

1. Assuming Machine Speed - 600 to 80,000 RPM.
2. Assuming Measurements by Accelerometer or Velocity Pickup as Close as Possible to Bearing Housing.
3. Assuming Machine Not Mounted on Vibration Isolators (for Isolated Machinery - Set Alarm 30% - 50% Higher).
4. Set Motor Alarm Same as that for the Particular Machine Type unless Otherwise Noted.
5. Set Alarm on Individual External Gearbox 25% Higher Than that for a Particular Machine Type.

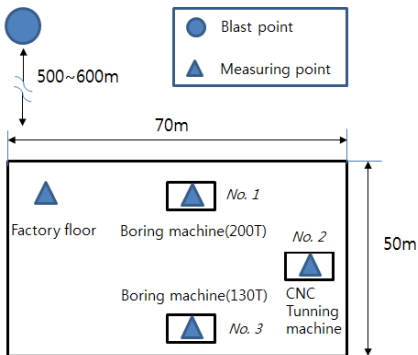
MACHINE TYPE	GOOD	FAIR	ALARM 1	ALARM 2
<b>COOLING TOWER DRIVES</b>				
Long Hollow Drive Shaft	0 - .375	.375 - 600	600	900
Close Coupled Belt Drive	0 - .275	.275 - 425	425	650
Close Coupled Direct Drive	0 - .200	.200 - 300	300	450
<b>COMPRESSORS</b>				
Reciprocating	0 - .325	.325 - 500	500	750
Rotary Screw	0 - .275	.275 - 425	425	650
Centrifugal With or W/O External Gearbox	0 - .300	.300 - 300	300	450
Centrifugal - Integral Gear (Axial Meas.)	0 - .200	.200 - 300	300	450
Centrifugal - Integral Gear (Radial Meas.)	0 - .150	.150 - 250	250	375
<b>BLOWERS (FANS)</b>				
Lobe-Type Rotary	0 - .300	.300 - 450	450	675
Belt-Driven Blowers	0 - .275	.275 - 425	425	650
General Direct Drive Fans (with Coupling)	0 - .250	.250 - 375	375	550
Primary Air Fans	0 - .250	.250 - 375	375	550
Large Forced Draft Fans	0 - .200	.200 - 300	300	450
Large Induced Draft Fans	0 - .175	.175 - 275	275	400
Shaft-Mounted Integral Fan (Extended Motor Shaft)	0 - .175	.175 - 275	275	400
Vane-Axial Fans	0 - .150	.150 - 250	250	375
<b>MOTOR/GENERATOR SETS</b>				
Belt-Driven	0 - .275	.275 - 425	425	675
Direct Coupled	0 - .200	.200 - 300	300	450
<b>CHILLERS</b>				
Reciprocating	0 - .250	.250 - 400	400	600
Centrifugal (Open-Air) - Motor & Comp. Separate	0 - .200	.200 - 300	300	450
Centrifugal (Hermetic) - Motor & Impellers Inside	0 - .150	.150 - 225	225	350
<b>LARGE TURBINE/GENERATORS</b>				
3600 RPM Turbine/Generators	0 - .175	.175 - 275	275	400
1800 RPM Turbine/Generators	0 - .150	.150 - 225	225	350
<b>CENTRIFUGAL PUMPS</b>				
Vertical Pumps (12" - 20" Height)	0 - .375	.375 - 600	600	900
Vertical Pumps (8" - 12" Height)	0 - .325	.325 - 500	500	750
Vertical Pumps (12" x 6" Height)	0 - .250	.250 - 400	400	600
Vertical Pumps (8" x 6" Height)	0 - .200	.200 - 300	300	450
General Purpose Horizontal Pump Direct Coupled	0 - .200	.200 - 300	300	450
Boiler Feed Pumps	0 - .200	.200 - 300	300	450
Hydraulic Pumps	0 - .125	.125 - 200	200	300
<b>MACHINE TOOLS</b>				
Motor	0 - .100	.100 - 175	175	250
Gearbox Input	0 - .150	.150 - 225	225	350
Gearbox Output	0 - .100	.100 - 175	175	250
Spindles: a. Roughing Operations	0 - .075	.075 - 125	125	175
b. Machine Finishing	0 - .050	.050 - 075	075	115
c. Critical Finishing	0 - .030	.030 - 050	050	075

[Fig. 3] Vibration evaluation standard of general machinery (peak, in/sec)

### 3. 측정 대상 및 측정 방법

#### 3.1 측정 대상

발파현장은 공작기계가 위치한 공장에서 약 500~600m 떨어진 거리에 위치하고 있다. 공장내부의 발파진동과 공작기계의 측정위치는 Fig. 4, 측정하려는 공작기계의 종류와 측정위치는 Table 2에 표시하였다. 공작기계 본체의 측정위치는 공작기계가 위치한 지면과 공작기계의 주축대 및 스피indle이다.



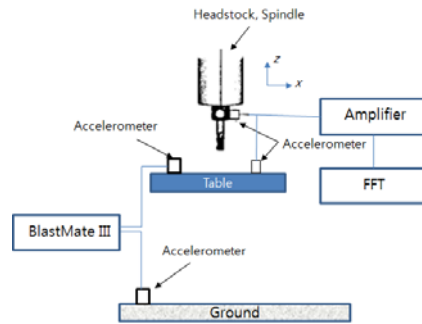
[Fig. 4] Vibration measuring position

[Table 2] Measuring machine tool

No.	Machine tool	Measuring point
1	Boring machine(200T)	Ground, Headstock, Spindle
2	CNC Turning machine	
3	Boring machine(130T)	

#### 3.2 측정장치 및 방법

Fig. 5는 공작기계가 위치한 지면의 발파진동과 공작기계 주축대의 진동을 평가하기 위한 측정장치도이다.



[Fig. 5] Experimental Set-up

Table 3에 측정에 사용된 장비를 나타내었다. 발파진동으로 인한 지반 및 공작기계 테이블의 진동측정에는 BlastMate III를 사용하였으며, 공작기계 주축대 및 스피indle의 진동측정에는 가속도센서(B&K 3560)과 주파수 분석기(B&K Pulse Lite)를 사용하였다.

[Table 3] Measuring instrument

Division	Instrument
Blast Vibration	BlastMate III
Vibration of Machine tool	FFT: B&K Pulse Lite Sensor: B&K 3560

발파진동은 발파진동 측정지침[3]을 참조하였다. 공장의 지면에 계측기(BlastMate III)를 설치하여 수직선분(Z축), 진행성분(X축) 및 이 두성분의 방향과 직각을 이루는 접선성분(Y축)을 측정하여 벡터합(PVS)을 구하였다. 공작기계의 진동은 KS B 4009:2002를 참조하여 측정하였다. 발파시 발파강도가 모두 달라 여러차례 측정하였다. 공작기계의 평가는 발파시 3대를 동시에 측정을 할 수 없고, 발파강도와 측정위치가 달라 상대평가를 할 수 없어 절대평가를 하였다.

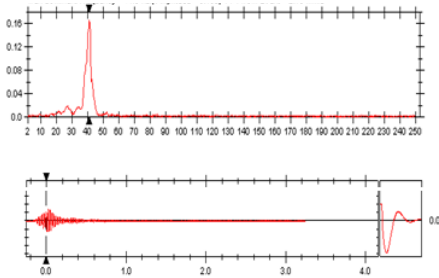
### 4. 측정결과

#### 4.1 공장내부 지면의 진동

공장은 발파지점으로부터 500~600m 떨어져 있고, 공장내부 지면의 발파진동 측정지점은 공작기계에서 약 25m 떨어진 지점으로 Fig. 4서 표시되어 있다. 9회에 걸쳐 발파시 측정된 진동의 PVS값을 Table 4에 정리하였고, Fig. 6에 No. 2의 발파속도의 진행방향 성분을 나타내었다. 공장내부 지면에서 측정된 발파진동 속도의 평균값은 5.87mm/s(0.58kine), 변위의 평균값은 15 $\mu$ m이다.

[Table 4] Results of blast vibration on factory floor

Meas. Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Avg.
mm/s	3.92	2.68	5.55	3.97	8.99	6.81	8.14	6.22	6.55	<b>5.87</b>
$\mu$ m/s	-	-	-	-	16	12	20	10	16	<b>15</b>



[Fig. 6] Results of blast vibration response of No. 2

#### 4.2 공작기계 지면과 테이블의 진동

발파시 공작기계가 설치된 지면과 공작기계의 가공물이 올려진 테이블의 진동을 측정하여 그 결과를 Table 5에 정리하였다.

[Table 5] Results of vibration on machine tool floor and machine tool table

	m/s <sup>2</sup>			mm/s			PVS	
	T	L	V	T	L	V		
Machine tool (floor)	0.78	0.46	0.56	3.06	1.52	2.24	<b>3.69</b>	
Machine tool (table)	No.1	0.93	0.93	0.53	3.17	3.17	1.78	<b>4.11</b>
	No.2	0.40	0.66	0.40	0.89	2.41	1.44	<b>2.46</b>
	No.3	0.40	0.53	0.27	1.27	2.02	0.89	<b>2.05</b>

공작기계가 설치된 지면의 발파시 진동은 2회 측정 결과의 평균값으로 3.69mm/s이다. 이 지면의 진동은 공작

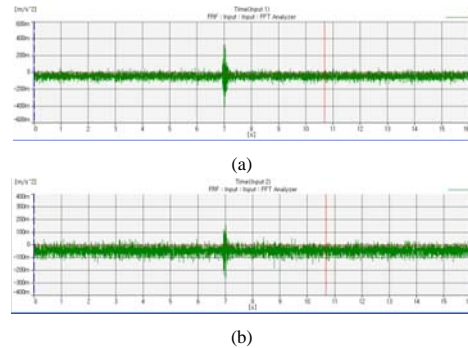
기계의 테이블, 주축대로 전달된다. 공작기계 테이블에서의 진동은 공작기계 자체의 무게와 감쇄의 영향을 받아 지면의 진동치와 차이를 보인다. Table 5에서 3종류의 공작기계 중에서 발파진동에 상대적으로 큰 영향을 받는 공작기계는 No. 1(200T boring machine)으로 진동 속도는 4.11mm/s이며, 진동변위는 18 $\mu$ m이다.

#### 4.3 공작기계의 스피들의 진동

발파시 공작기계의 스피들에서 측정된 진동가속도 및 진동속도는 Table 6에 정리하였다. 주축대에서의 진동은 테이블에 비해 상대적으로 작다. Fig. 7은 공작기계 No. 1의 주축대에서 측정된 진동가속도의 결과이다.

[Table 6] Results of vibration on machine tool

Machine tool (Spindle)	mm/s <sup>2</sup>		mm/s
	z	x	z
No.1	322	146	1.80
No.2	212	189	1.08
No.3	187	107	0.92



[Fig. 7] Results of vibration response of No.1  
(a) z-axis (b) x-axis

### 5. 고찰

본 연구의 발파시 진동은 공장내부의 지면, 공작기계가 설치된 바닥과 지면, 주축대를 대상으로 측정을 하였으며, 그 결과를 Table 4, Table 5 및 Table 6에 표시하였다. 발파진동으로 인한 공작기계의 진동은 발파의 강도에 따라 가진력이 달라지므로, 몇 회 측정으로 그 경향을 판단하는 것은 한계가 있다. 또한, 공작기계는 종류가 매우 다양하여 진동을 측정하였다 하더라도 진동절대치

에 대한 규제치가 없어 유관규격 및 메이커에서 제시한 데이터에 부분적으로 의존하고 있다. 본 연구에서는 유관규격을 참조하여 평가하였다.

### 5.1 발파진동의 크기를 기준한 평가

공장의 내부지면에서 측정된 발파진동의 평균값은 Table 4에서 5.87mm/s 이며, Table 1에 제시된 철근구조물에 대한 허용기준 10mm/s 이하에 있으므로 공장의 구조물에 영향을 주지는 않는다.

발파진동 허용기준[2](건설교통부, 1999)에 따르면 진동에 예민한 구조물의 경우의 규제치는 2~3mm/s, 2.2.2 절에 언급한 API의 진동에 예민한 구조물의 규제치는 3mm/s이다. 또한, Fig. 2, 3의 평가기준에 따르면 공작기계의 진동허용치는 3.2mm/s(0.128 inch/s)로 이 이상이 되면 ROUGH(ALARM)에 해당된다.

공작기계의 진동허용치(Fig. 2, 3)를 기준으로 할 경우 Table 5에 표시된 공작기계 테이블의 측정치는 No. 1인 경우 4.11mm/s로 ROUGH(ALARM), No. 2, 3의 경우 각각 2.46mm/s, 2.05mm/s로 SLIGHTLY ROUGH에 해당된다.

### 5.2 공작기계의 정밀도의 영향

공작기계 본체의 경우 메이커에서 제시한 초기 설치시 바닥면의 설치공차는 3 $\mu$ m~15 $\mu$ m으로 설정되어 있다. 발파시 공작기계가 설치된 베이스 바닥에서 측정된 복진폭(p-p)의 평균값은 30 $\mu$ m(Table 4)로 초기 설치공차를 초과한다. 발파진동이 수차례 반복됨에 따라 공작기계 본체 및 가공물이 올려져 있는 테이블의 틀어짐이 점차로 발생하여 정밀도에 영향을 주게 된다.

또한, 공작기계 본체는 바닥에 볼트로 고정되어 테이블과 바이트가 물려있는 주축대의 강성이 큰데 비해서, 대형가공물은 테이블 위의 지그로 올려져있어 가공물을 고정하는 3축이 모두 지지되지 않아 강성이 상대적으로 약하다. 따라서, 발파진동이 반복될 경우 공작기계 본체보다 테이블에 올려진 가공물이 진동에 취약해 가공정밀도에 영향을 미칠 가능성이 많다.

## 6. 결론

본 연구에서는 발파진동으로 인한 공작기계의 정밀도

에 미치는 영향을 고찰하기 위해 발파진동을 측정하고, 그 결과를 관련규격과 비교하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 발파진동과 공작기계의 진동은 측정규격에 의해 측정하였고, 평가는 공작기계 진동기준과 발파진동 구조물의 허용기준을 참조하였다.
- (2) 공작기계가 설치된 공장 지면에서의 발파진동 측정치는 5.87mm/s 로 철근구조물에 대한 허용기준 10mm/s 이하에 있으므로 공장의 구조물에 영향을 주지는 않는다.
- (3) 발파시 공작기계가 설치된 지면의 진동은 30 $\mu$ m 로 공작기계 메이커에서 제시한 설치공차 기준인 3 $\mu$ m~15 $\mu$ m를 초과한다.
- (4) 공작기계의 진동허용치<sup>4)</sup>를 기준으로 하면 공작기계 중 No. 1은 ROUGH(ALARM), No. 2와 No. 3의 경우 SLIGHTLY ROUGH에 해당된다.
- (5) 공작기계 가공물의 지지대가 본체와 이격되어 테이블 위에 올려져 있는 경우 가공물을 지지하는 강성이 약해 발파진동이 반복될 경우 정밀도가 저하될 가능성이 많다.

## References

- [1] Ah-Ram Won, et. al., "A Study on the Relationship between Blast Vibration velocity and Vibration Level", Explosive and Blasting, Vol. 30, no.1, pp. 60~70, 2012
- [2] Joon-Kee Doo, Chang-Ha Ryu, "A Review on the Problems of korean Blast Damage Criterion", Explosive and Blasting, Vol. 22, No. 3, pp. 85~95, 2004
- [3] Choon Sunwoo, Chang-Ha Ryu, "Suggestions for Blast Vibration monitoring", Explosive and Blasting Vol. 18, No. 4, pp. 7~17, 2000
- [4] IRD Mechanalysis, INC, "General Machinery Vibration Severity Chart", International Research and Development Corporation, 2009
- [5] Ik-Soo Kang et. al., "Evaluation of Vibration Characteristics and machinability of High Speed machining Center", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers., Spring Conference, pp.

424~429, 2004

- [6] Kumaraswamy, et. al., "Standardization of Absolute Vibration Level and Damage Factors for Machinery Health Monitoring", Proceedings of VETOMAC-2, pp. 16-18, December, 2002
- 

이진갑(JinKab Lee)

[정회원]



- 1993년 2월 : Ph.D. degree in mechanical engineering from Ruhr-University in Bochum, Germany in 1993 (기계공학 박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 경기과학기술대학교 기계자동화과 교수

<관심분야>

진동 소음, 동역학, 기계 설비진단