

진동특성에 따른 수직보정 진동레벨의 변환 특성 연구

Characteristics of Transformed Vibration Level According to Vibration Characteristics

양 형식, 박 경준

Hyung-Sik Yang, Kyung-Jun Park

전남대학교 건설지구환경공학부

초 록

발파진동은 보통 지반진동속도로 계측되며, 발파설계나 구조물의 피해 산정에 사용된다. 그러나 인체의 반응이나 가축의 피해 산정 문제에서는 현행 소음진동규제법과 관련하여 인체의 감각적 감응척도에 따른 진동레벨을 주로 사용하므로 변환이 필요하다. 본 연구에서는 디지털 필터에 의한 진동레벨 변환 프로그램을 이용하여 진동의 특성이 따른 진동레벨 변환의 특성을 고찰하고 문제점을 제시하였다.

핵심어 : 발파진동, 진동속도, 진동레벨

1. 서 론

주민들의 의식 수준 향상에 따라 각종 건설현장에서 발파로 인해 발생하는 소음과 진동에 더욱 더 민감하게 반응하고 있다. 그래서 시공자는 각종 민원을 조기에 예방하고 피해 보상을 줄이기 위해서 시공중에 소음진동 계측을 실시하고 있다.

발파진동의 계측 단위는 구조물에 미치는 영향 척도인 진동속도(mm/s)와, 인체에 대한 환경목적 척도인 진동레벨 dB(V)로 구분할 수 있다.

그러나 실제 건설 발파현장에서는 거의 진동속도를 측정하는 기기를 사용하고 있다. 따라서 발파설계나 구조물의 피해 산정에 적절하게 사용되거나 인체의 반응이나 가축의 피해 산정의 문제는 현행소음진동규제법과 관련하여, 인체의 감각적 감응척도에 충실한 진동레벨을 주로 사용하므로, 진동속도에서

진동레벨 dB(V)로 변환할 필요가 있다.

본 연구에서는 수치적으로 조화진동, 감쇠진동과 충격진동의 파형을 생성하여 이를 김 등(2001)이 개발한 디지털필터로 진동레벨 변환시키고 진동의 특징에 따라 진동레벨의 크기에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 발파진동의 측정과 규제

2.1 발파진동의 측정

발파진동의 크기를 표현하는 방법에는 변위(cm), 속도(cm/s), 가속도(cm/s^2 , gal) 등이 쓰이는데 그 중에 구조물에 미치는 피해는 진동속도에 가장 잘 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 실제 건설 발파현장에서의 발파진동은 속도를 계측한다. 파동은 파의 전달방향 성분(longitudinal)과 수직(vertical)성분 및 접선(transverse) 성분을

계측하며, 세 방향 성분의 시차별 벡터 합이 최대가 되는 값 PVS(peak vector sum)로 구조물 피해 기준에 적용한다. 구조물에 대해서는 이러한 척도가 잘 적용될 수 있으나 인체의 감각은 Weber·Fechner의 법칙에 따라 대수적으로 대응하므로 레벨로 표현한 진동레벨 dB(V)을 사용한다.

진동레벨은 진동가속도 레벨(Vibration Acceleration Level)에 수직 방향 진동에 대한 인체의 상대응답으로 보정한 진동레벨(Vibration Level)로 나타낸다. 이들의 정의는 다음과 같다.

가속도레벨

$$VAL = 20 \log \frac{A}{A_0} \text{ (dB)} \quad (1)$$

A : 측정치의 가속도 실효치(m/s^2)

A_0 : 기준치($10^{-5} m/s^2$)

진동레벨

$$VL = VAL - W_n \text{ dB(V)} \quad (2)$$

W_n : 수직 방향 진동에 대한 주파수 보정치

2.2 발파진동레벨 변환식의 고찰

현실적으로 발파현장에서는 대부분 사용하는 계측기기가 진동속도를 계측하므로 민원 발생시에는 진동속도를 진동레벨로 변환시켜 피해를 입증하는 사례가 많다. 주로 사용하는 변환식은 진동수 8Hz 이상의 단순조화진동일 때 진동속도의 peak치와 진동레벨의 이론적인 관계로부터 얻어지는 식이다.

$$\text{dB(V)} = 20 \log v + 71 \quad (3)$$

여기서 v 는 최대 진동속도치(mm/s), dB(V)는 수직 보정한 진동레벨이다. 이 식은

평균예상식이 아니고 sine파에 근사하는 연속진동에 잘 맞으나 감쇠진동과 충격진동에는 잘 맞지 않으며 감쇠진동과 충격진동의 경우 진동레벨이 과대평가 되는 경향이 있다. (김과 양, 1998)

3. 시험방법 및 결과

3.1 디지털필터

(1) 진동레벨변환 알고리즘

진동변환의 알고리즘은 진동레벨계측기의 동작원리와 같다. 계측된 전기신호는 증폭기에서 증폭되어 전기식 필터를 통과한 후, 다시 증폭기를 거쳐 정류회로에 입력된다. 정류회로는 교류신호를 직류신호로 변환하는 역할을 하여 정류회로에 입력된 교류신호는 실효값으로 변환하는 것이다. 이렇게 얻은 신호는 Log변환장치를 거쳐 레벨로 표시된다.

진동레벨변환 프로그램의 알고리즘은 이러한 계측기의 변환과정을 수행하는 것이다. 프로그램의 대략적인 연산과정은 그림 1에 나타났다.

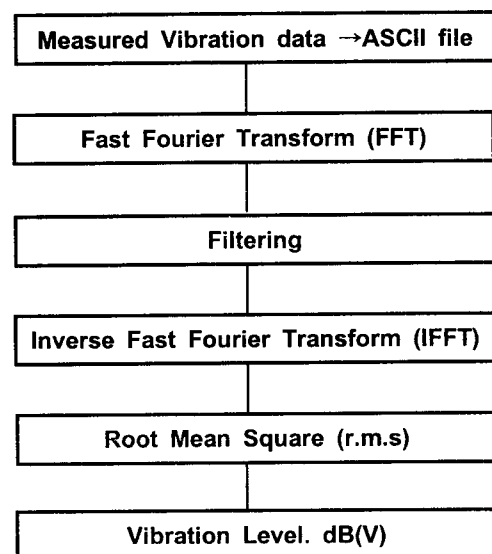


그림 1. 디지털필터의 알고리즘

발파진동 계측자료를 가속도로 바꾸고 FFT를 수행하여 주파수별로 가속도에 보정치를 곱한다, 식(2)에서의 보정치는 Log함수 내에서 곱으로 계산하는데, 이 과정을 필터링이라 한다. 보정된 주파수별 가속도는 역푸리에 변환을 통하여 다시 시간에 대한 가속도로 나타나게 된다. 이렇게 하여 얻어진 가속도의 실효치를 계산하여 식(1)에 대입하면 진동레벨이 계산된다.

(2) 발파진동의 계측 및 결과비교

김 등(2001)은 진동속도 측정을 Blast mateII(DS-477), 진동레벨 측정은 Rion사의 VM-52로 진동속도와 진동레벨을 동시에 계측하였다. 그리고 연구 개발한 디지털 필터에 의한 진동레벨변환의 방법에 대해서 비교 검토하였다. 그림 2는 디지털 필터로 처리한 진동레벨과 실측된 진동레벨과의 관계를 나타낸 그림이다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 상관관계가 0.98, 표준편차가 1.0dB(V)로 상관성이 매우 높게 나타났다.

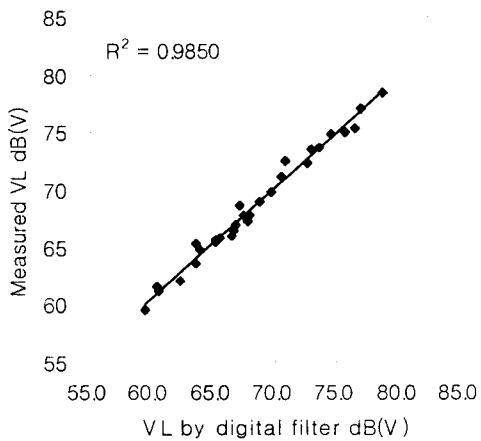
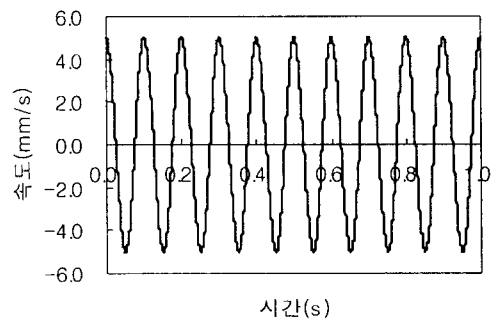
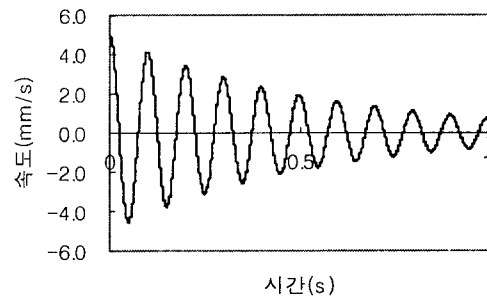


그림 2. 실측된 dB(V)와 디지털필터에 의한 dB(V)의 비교

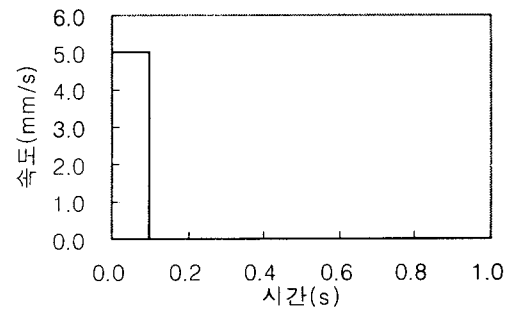
본 연구에서는 수치적으로 조화진동파형, 감쇠진동파형, 충격진동을 생성하여 김 등(2001)에 의해 개발 검증된 디지털필터를 이용한 진동레벨변환 프로그램으로 변환시킨 진동레벨과 현행 변환식으로 변환시킨 진동레벨을 비교하여 그 적합성을 검토하였다. 그림 3은 수치적으로 생성한 파형들의 예이다.



(a) 조화진동



(b) 감쇠진동



(c) Pulse

그림 3. 수치적으로 생성한 진동파형의 예

3.2 조화진동

수치적으로 단순화한 조화진동 파형을 생성하여 디지털 필터를 이용한 변환 프로그램의 결과와 진동속도가 8Hz 이상의 조화진동일 때 이론적인 진동속도의 peak치와 진동레벨의 관계로부터 얻어진 진동레벨 변환식의 결과를 상호 비교하였다.

$$v = v_0 \cos(2\pi ft + \psi) \quad (4)$$

$$a = -2\pi f v_0 \sin(2\pi ft + \psi) \quad (5)$$

ψ : 초기 위상각(rad)

그림 4와 표 1은 속도변화에 따른 dB(V)의 관계를 나타낸 그림이다. 디지털 필터를 이용한 결과와 기존 변환식으로부터 얻어진 진동레벨의 결과가 거의 정확하게 일치함을 알 수 있다.

표 1. 단순조화진동파에서 속도 변화에 따른 dB(V)의 변화

속도 (mm/s)	디지털 dB(V)	변환식 dB(V)	오차 dB(V)
1	71.34	71.00	0.34
1.5	74.86	74.52	0.34
2	77.36	77.02	0.34
2.5	79.30	78.96	0.34
3	80.88	80.54	0.34
4	83.38	83.04	0.34
5	85.32	84.98	0.34
6	86.90	86.56	0.34
7	88.24	87.90	0.34
8	89.40	89.06	0.34
9	90.42	90.08	0.34
10	91.34	91.00	0.34

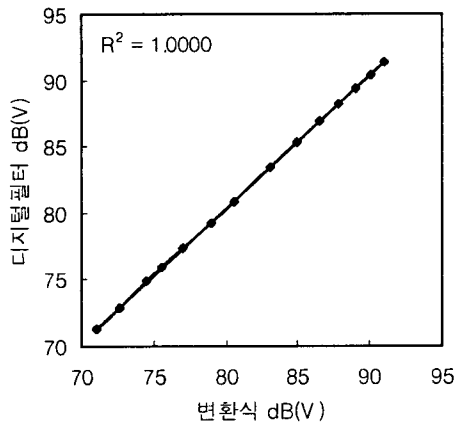


그림 4. 조화진동파형에서의 dB(V)비교

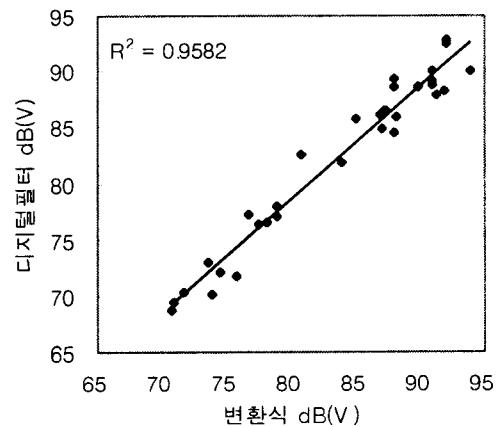


그림 5. 중첩된 진동파형에서의 dB(V)비교

그림 5는 둘 이상의 조화진동을 주파수와 위상차를 달리하면서 중첩하여 얻은 진동파형을 디지털 필터를 이용한 변환 프로그램의 결과와 이론적인 진동속도의 peak치와 진동레벨의 관계로부터 얻어진

진동레벨 변환식의 결과를 비교한 그림이다. 결과가 단순조화진동파형일 때와는 다르게 중첩된 조화진동파형에서는 오차가 최대 4dB(V)이상 발생할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 감쇠진동

수치적으로 감쇠진동 파형을 생성하여 디지털필터를 이용한 결과와 기존 변환식의 결과를 상호 비교하였다.

감쇠율은 다음식과 같다.

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \left(-\ln \frac{u_{n+1}}{u_n} \right) \quad (6)$$

u_n , u_{n+1} 은 연속된 진폭이다(Thompson, 1965).

그림 6과 표 2는 감쇠율(β)이 3%이고 주파수가 10Hz인 감쇠진동 파형의 속도변화에 따른 dB(V)의 관계를 나타낸 그림이다. 디지털 필터를 이용한 결과와 기존 변환식의 결과가 속도의 변화에 따라 4.83 dB(V)의 일정한 차이를 보임을 알 수 있다.

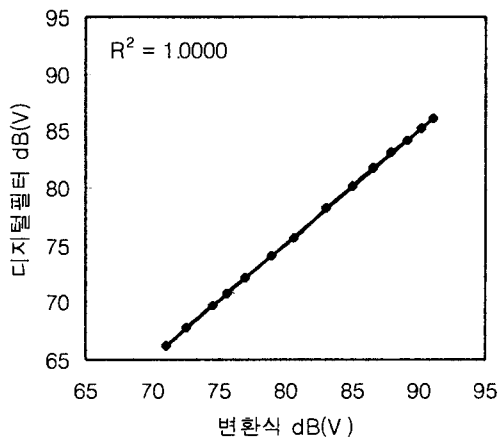


그림 6. 감쇠진동파형에서의 dB(V)비교

표 2. 감쇠진동파에서 속도의 변화에 따른 dB(V)의 변화

속도 (mm/s)	디지털 dB(V)	변환식 dB(V)	오차 dB(V)
1	66.17	71.00	4.83
1.5	69.69	74.52	4.83
2	72.19	77.02	4.83
2.5	74.13	78.96	4.83
3	75.71	80.54	4.83
4	78.21	83.04	4.83
5	80.15	84.98	4.83
6	81.73	86.56	4.83
7	83.08	87.90	4.82
8	84.23	89.06	4.83
9	85.25	90.08	4.83
10	86.17	91.00	4.83

그림 7은 주파수가 10Hz일 때 감쇠율에 따른 dB(V)를 비교한 그림으로 디지털필터에 의해 변환된 dB(V)의 결과가 감쇠율이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 이는 디지털필터에 의해 변환된 dB(V)가 감쇠율에 따른 영향을 반영해 주고 있으나 변환식에 의한 dB(V)는 그렇지 못하고 일정한 값을 보임을 알 수 있다.

그림 8은 속도와 감쇠율(3%)이 일정할 때의 주파수변화에 따른 dB(V)를 나타낸 그림이다.

디지털필터에 의한 dB(V)는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 현상을 보인다. 반면 변환식에 의한 dB(V)는 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 이는 디지털필터에 의한 dB(V)가 주파수에 의한 영향을 반영하고 있음 알 수 있다. 주파수가 90Hz일 때 두 dB(V)는 7.19 dB(V)의 차이를 보였다.

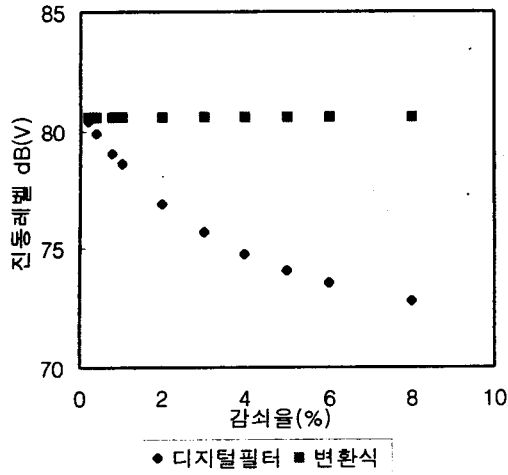


그림 7. 감쇠율에 따른 dB(V)의 변화

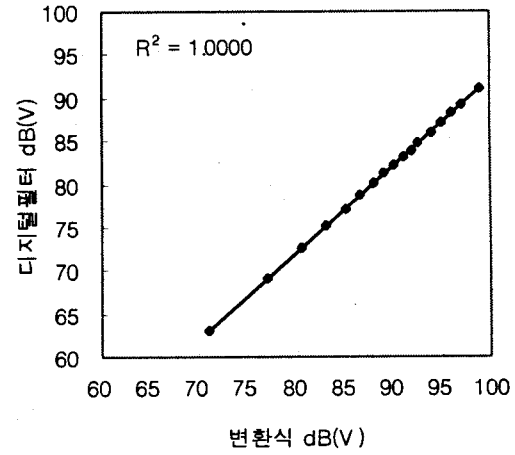


그림 9. 충격진동파형에서의 dB(V)비교

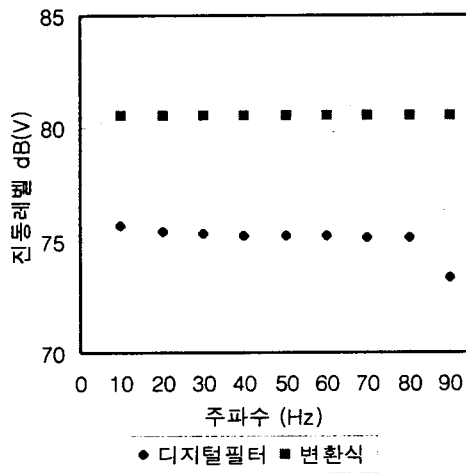


그림 8. 주파수변화에 따른 dB(V)의 변화

표 3. 충격진동파에서 Pulse의 속도진폭의 크기에 따른 dB(V)의 변화

속도 (mm/s)	디지털 dB(V)	변환식 dB(V)	오차 dB(V)
1.00	63.12	71.00	7.88
2.00	69.14	77.03	7.89
3.00	72.66	80.54	7.88
4.00	75.16	83.04	7.88
5.00	77.10	84.98	7.88
6.00	78.68	86.56	7.88
7.00	80.02	87.90	7.88
8.00	81.18	89.06	7.88
9.00	82.20	90.08	7.88
10.00	83.12	91.00	7.88
11.00	83.95	91.83	7.88
12.00	84.70	92.58	7.88
14.00	86.04	93.92	7.88

3.4 충격진동

수치적으로 충격진동 파형을 생성하여 디지털 필터를 이용한 결과와 기존 변환식의 결과를 상호 비교하였다.

그림 9과 표 3은 Pulse의 속도진폭 변화에 따른 dB(V)관계를 나타낸 그림이다.

그림에서 나타낸 바와 같이 디지털 필터를 이용한 변환프로그램의 결과와 이론적인 진동속도의 peak치와 진동레벨의 관계로부터

얻어진 진동레벨 변환식의 결과가 7.88 dB(V)의 오차가 있음을 알 수 있다.

그림 10은 Pulse의 크기를 일정하게 했을 때 지속시간의 변화와 dB(V)의 관계를 나타낸 그림이다.

지속시간이 증가할수록 디지털필터에 의한 dB(V)가 증가하다가 어느 구간부터는 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

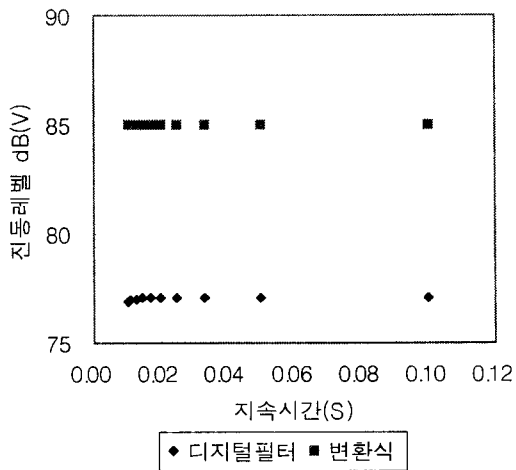


그림 10. 지속시간변화에 따른 dB(V)변화

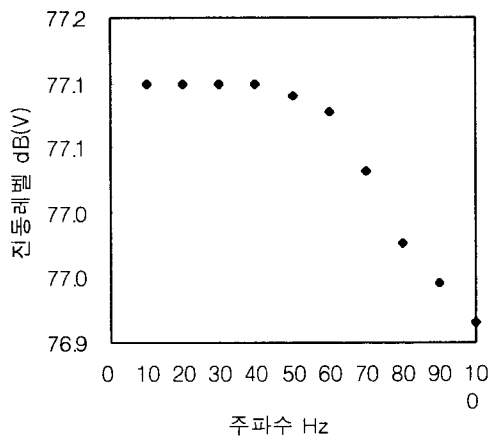


그림 11. 주파수 변화에 따른 dB(V)의 변화

그림 11은 지속시간을 주파수로 변환하여 주파수의 변화에 따른 dB(V)의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타나는 바와 같이 40Hz까지 일정한 dB(V)를 유지하다가 주파수가 증가할수록 dB(V)가 감소함을 알 수 있다.

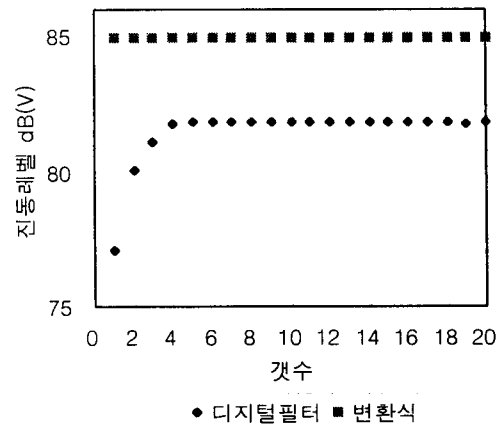


그림 12. Pulse의 수의 변화에 따른 dB(V)의 변화

그림 12는 Pulse의 지속시간이 0.025s이고 속도진폭이 5mm/s인 Pulse의 수의 변화에 따른 dB(V)의 변화관계를 나타낸 그림이다. Pulse의 수가 증가할수록 dB(V)가 증가하다 Pulse의 수가 4이상부터는 일정한 값이 됨을 알 수 있다.

4. 고찰

디지털 필터를 이용한 변환프로그램의 결과와 이론적인 진동속도의 peak치와 진동레벨의 관계로부터 얻어진 진동레벨 변환식의 결과를 비교하였다.

- 1) 단순조화진동과형에서는 각각에 의해서 구해진 dB(V)가 거의 정확히 일치하였으나 중첩된 조화진동과형에서는 4 dB(V) 이상의 오차가 생김을 알 수 있다. 이는

파형이 복잡해져서 조화진동이 아닌 상태로 전환됨에 따라 진동레벨은 작게 나타남을 알 수 있다.

2) 감쇠진동파형의 실험에서 주파수가 10 Hz이고 감쇠율이 3%일 때 속도의 변화에 대한 두 변환 값의 오차가 4.83 dB(V)이 발생하였는데 그림 7과 그림 8에서 보여주는 것처럼 주파수와 감쇠율이 변화하면 차이를 보일 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 그림 8에서 주파수가 90Hz일 때 7.19 dB(V)의 차이를 보였는데 이를 현행 변환식에 근거하였을 때 실제 진동속도보다 2.3배 과대 평가된 것이다. 감쇠진동파형에서 dB(V)는 실제 감쇠율, 주파수의 영향을 받음을 알 수 있다.

3) 충격진동파형의 실험에서는 속도의 변화에 대한 두 변환 값의 오차가 7.88 dB(V)이 발생하였는데, 이를 현행 변환식에 의한 진동수준이 실제보다 2.5배 과대평가 된 것이다. Pulse의 지속시간의 변화를 주파수의 변화로 생각할 수 있다. 따라서 주파수가 증가할 때 어느 구간까지 일정한 값을 보이다가 감소됨을 알 수 있다. 충격진동파형에서의 dB(V)가 실제 주파수와 Pulse의 수에 영향을 받음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수치적으로 진동을 생성시켜 디지털필터로 처리하여 변환한 진동레벨을 고찰한 결과 진동 파형의 특성에 따라 진동레벨의 특성이 달리 나타남을 보였다.

현재 사용되고 있는 변환식은 단순조화진동 파형에 대해서는 오차가 거의 없이 정확하였으나,

복잡한 진동파형이나 감쇠진동파형, 충격진동 파형 등에 대해서는 많은 오차가 발생하여 맞지 않음을 알 수 있다. 또한 기존 변환식에 의한 dB(V)가 감쇠진동파형과 충격진동 파형에서 높은 dB(V)를 나타내고 있음도 알 수 있다.

발파진동은 단순조화진동이라기보다는 감쇠진동이나 충격진동이라 할 수 있다. 따라서 변환식을 이용할 경우 진동레벨은 과대평가 됨을 알 수 있다. 이 때문에 그동안 민원 문제가 불공정하게 처리되었을 가능성이 있음을 알 수 있다.

현재 사용되고 있는 변환식의 적용은 지양되어야 하며 진동레벨을 직접 측정하거나 측정된 진동 파형을 이용하여 진동레벨을 구하는 방법이 더 타당하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김용국, 2001, 디지털필터를 이용한 소음·진동의 변환 연구, 전남대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 김남수, 양형식, 1998, 발파소음·진동 수준의 변환 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.377~390
3. 양형식, 김남수, 1998, 소음·진동 규제법의 문제점, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제8권 제3호, pp.178~183