화약 · 발파(대한화약발파공학회지)
제33권 제1호, 2015년 3월, pp. 21~26

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 33, No. 1, 2015, pp. 21-26
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

발파 진동속도의 진동레벨 환산과 적용 오류 사례

양형식[1)*]

Conversion Formula from Peak Particle Velocity to Vibration Level and Some Inappropriate Cases

Hyung-Sik Yang

Abstract Several conversion formulas to convert peak particle velocity to vibration label were studied for their validity and applied to environmental dispute cases. Special cases like structural damage by blast vibration was accepted while mental damage was not accepted were discussed. Results show that inadequate formula was used or construction damage caused by subsidence or disturbance of ground were misidentified as vibration damage for some cases.

Key words Vibration level, Peak particle velocity, Conversion formula, Mental damage, Structural damage

초 록 진동속도를 진동레벨로 환산하는 몇 가지 식을 검토하고 환경분쟁 사례에 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 또 구조물에 대한 진동피해가 인정되었지만 정신적 피해가 인정되지 않은 사례에 대해 검토하고 그 원인을 고찰하여 그 원인이 잘못된 환산식을 적용하였거나, 침하 등 건설상의 피해를 진동피해로 잘못 인정된 경우임을 보였다.

핵심어 진동레벨, 진동속도, 환산식, 정신적 피해, 구조물피해

1. 서 론

대개 발파진동속도를 진동레벨로 환산하는 것은 편차가 크고 결정계수가 높지 않아 적절하지 않다. 그러나 환경 피해의 경우 민원발생 이전에 계측을 하지 않은 경우가 많고 또 민원에 대한 피해 판정 시점에서는 피해 발생원 자체가 소멸되고 없는 경우도 허다하다. 따라서 피해산정을 위해 부득이 시공 중 계측자료인 진동속도나 작업일지에 기록된 장비들이나 발파제원을 이용하여 추정하는 것이 현실이다.

그런데 최근 구조물의 피해가 인정되는 정도의 진동수준에서도 정신적 피해가 인정되지 않는 경우가 발생하고 있어서 그 타당성에 대한 의문이 제기되었다.

본고에서는 현재 적용되고 있는 몇 가지 진동레벨 환산식을 설명하고 이를 적용하였을 때의 진동레벨과 진동수준을 비교하여 피해판정의 타당성을 검토하고자 한다. 또 낮은 진동수준에 대해서도 피해가 인정된 사례들을 검토하여 그 원인과 타당성을 검토하려고 한다.

2. 진동레벨 환산식

2.1 진동레벨 환산의 문제점

진동레벨의 환산은 마치 키로 부터 체중을 환산하려는 시도와 마찬가지이다. 키 큰 사람이 체중이 많이 나갈 확률이 높은 것은 사실이나 보편적인 것은 아니다. 진동속도가 크면 진동레벨이 클 확률은 분명히 높지만 진동주파수와 그에 따른 보정계수 때문에 그렇지 않을 경우도 많다. 특히 발파의 경우는 계측방법도 상

1) 전남대학교 에너지자원공학과
* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr
접수일 : 2015년 3월 17일
심사 완료일 : 2015년 3월 23일
게재 승인일 : 2015년 3월 26일

이하여 진동레벨 추정이 대단히 어렵고 분산이 많다. 따라서 피해의 판정이나 규제를 위해서는 실계측치가 가장 우선시 되어야 한다. 그러나 적절한 계측이 이루어지지 않은 상태의 분쟁사건에서는 부득이 환산식을 적용해야 할 경우가 있는데 이 식들의 가정이나 전제조건에 대한 충분한 이해가 없으면 큰 오류를 범할 수 있다.

2.2 진동레벨 관계식과 환산식

1) Ejima

진동수 8Hz 이상의 조화진동에 대해서는 이론적으로 다음 식이 성립한다.

$$dB(V) = 20\ \log v + 71 \qquad (1)$$

v: 진동속도 (mm/s)

이 식은 실험적으로도 유사한 결과를 얻을 수 있다(그림 1).

그런데 발파를 포함한 건설진동은 대부분 충격성

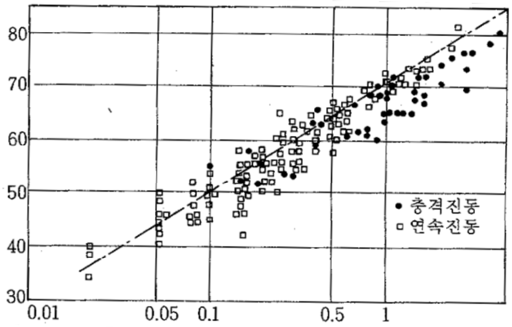

그림 1. Ejima 변환.

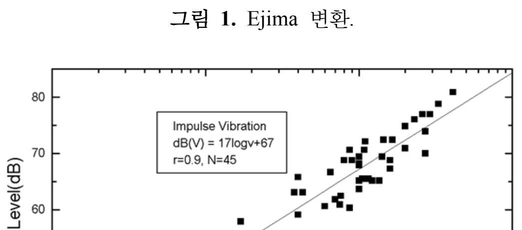

그림 2. 충격진동으로 재구성한 변환식.

진동이고 빠른 속도로 감쇠되며 지속시간도 짧다. 간헐적 반복 진동이라고 하더라도 조화진동으로 간주하기에는 무리가 따른다. 실제로 그림 1에서 충격진동 자료만으로 재구성한 변환식은 원래의 식과 다르다. 즉 평균예상식은 다음과 같다(그림 2).

$$dB(V) = 17\log v + 67 \quad (r{=}0.9) \qquad (2)$$

그림에서 기울기를 고정하고 자료의 95%가 그래프의 아래에 위치하도록 하여 구한 95% 상한식은

$$dB(V) = 17\log v + 71 \qquad (3)$$

과 같이 쓸 수 있다.

그림 1과 2에서 지극히 이상적인 실험실 환경에서 실험한 결과임에도 어떤 특정한 위치에서는 평균치보다 5dB 이상 차이가 날 수 있는 것은 물론이고 10dB 이상 벗어난 데이터도 있음을 확인할 수 있다.

발파진동속도는 설계를 위하여 3방향 성분 벡터합(pvs)으로 구하는 경우가 있으며 성분최대치(ppv)로 하더라도 진행방향이나 횡방향 성분이 최대인 경우도 있어서 수직성분에 대한 신체응답특성을 고려한 dB(V)로의 변환은 무리가 있다. 더구나 1방향 단순조화진동 변환식을 적용하면 여러 가지 오류가 동시에 발생하여 신뢰성이 없다.

더구나 dB(V)로 된 환경기준으로부터 Ejima 식으로 역변환하여 계산한 진동속도를 피해판정 기준으로 적용하는 것은 대단히 불합리하다.

2) Vanmarcke

최대진폭과 진동지속 시간을 감안한 환산식으로서 Vanmarcke의 식은 충격진동의 변환식으로 사용되었다.

$$V_L = 20\log v_V + 10\log(1 - e^{-T_d/0.63}) + 85 \quad dB(V) \qquad (4)$$

v_V: 수직방향 최대 진동값 (cm/s)

T_d: 진동지속시간 s

0.63: 진동레벨의 동특성을 규정하는 시정수(그림 참조)

이 식은 Ejima 식보다는 더 적합도가 높은 것으로

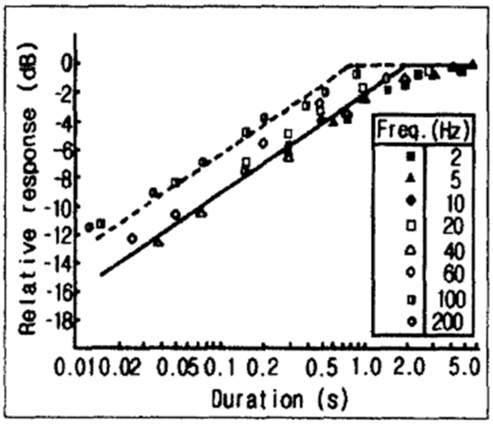

그림 3. 정현진동의 계속시간과 레벨의 관계.

알려져 있다. 그러나 진동지속시간으로서 T_d를 구하여야 하는데 이를 단순히 한 개 발파 파형의 연속시간으로 볼 것인지 혹은 연속되는 피크의 빈도와 지속시간으로 볼 것인지에 따라서 변환의 값이 큰 차이를 보일 수 있다. 그림 3에서 정현진동의 주파수와 지속시간에 따라 진동레벨이 12~13dB 차이가 날 수 있음을 보여주고 있다. 전기뇌관에 의한 터널 발파의 경우 단발로는 0.1s 이내이지만 전체 발파는 5초 이상이 될 수 있으므로 선택에 따라서는 7~10dB의 차이를 초래할 수도 있다. 그림 3은 또 같은 지속시간에 대해서도 2dB 이상의 오차가 있을 수 있음을 보여주고 있다. 충격진동의 경우에는 더 큰 차이가 가능할 것으로 보인다.

3) 실 계측치를 이용한 환산식

김과 양(2001)은 실측한 진동속도와 진동레벨 데이터를 이용하여 분석한 결과 상관계수가 높지 않고 큰 오차가 있어 변환에 의한 피해판정에는 무리가 있다고 적시하였다. 다만 안전율이 높고 최고수준을 예측할 수 있다는 점에서 제시된 식은 다음과 같다.

$$V_L = 16\log v + 66 \text{ (95\% 상한치)} \quad (5)$$

v: 최대 수직방향 성분값 즉 ppv (mm/s)

환경정책연구원(2007)은 발파 현장에서 실측한 진동속도와 진동레벨 데이터를 이용하여 예측식을 제안하였다.

$$VL = 13.54\log V_{peak} + 72.33 \quad (6)$$

VL: 진동레벨 dB(V)

V_{peak}: 최대 발파진동속도 (cm/s)

이 식에서 최대발파진동속도로 표시된 V_{peak}는 실벡터합인 V_{pvs}로 보이는데 이는 최대성분치인 V_{ppv} 보다 큰 값이다. 따라서 과대평가될 가능성이 있다.

그래프로 보아 대략 80여 개의 자료로부터 구한 식으로서 자료의 수가 적을 뿐만 아니라 ±5dB 이상으로 분산도 크고 평균 회귀식을 적용한다는 점에서 한계가 있다. 실벡터 값을 사용하여 유도한 식임에도 불구하고 대체적으로 진동레벨이 과소평가되는 경향이 있지만, 상당 기간 동안 이 식이 진동레벨 환산식으로 적용되었다.

원앤비 기술사사무소(2012)는 789쌍의 데이터를 획득하고 이를 이용하여 다음의 식을 얻었다.

$$\begin{aligned} V_L &= 20\log(V_v) + 80 \text{ (전체)} \\ V_L &= 20\log(V_V)^{1.0625} + 90.49 + W_n \quad (10 < f \leq 30) \\ &= 21.25\log(V_V) + 90.49 + W_n \\ V_L &= 20.78\log(V_V) + 95.22 + W_n \quad (30 < f \leq 60) \\ V_L &= 19.85\log(V_V) + 98.20 + W_n \quad (60 < f \leq 90) \end{aligned} \quad (7)$$

V_L: 진동레벨 [dB(V)]

V_V: 연직방향 진동속도(cm/s)

W_n: 인체 감각 보정치 $= 20\log(f/8)$ (dB)

이 식들은 비교적 많은 계측결과로부터 도출되었고 상관관계도 높으나 오차가 ±5dB 이상에 달하는 등 마찬 가지의 문제를 노정하고 있다. 또 이 식들도 평균 예상식이어서 최대치가 수인한계를 넘으면 피해를 인정하는 중앙환경분쟁조정위원회의 일반적 관행과 차이가 있어서 단순 적용이 곤란하다.

2.3 진동레벨 환산식의 비교

그림 4는 Ejima, Vanmarcke의 식들과 실계측치들로부터 유도한 환산식들인 김과 양, 환경정책연구원 그리고 원앤비의 추정식을 이용하여 진동속도로부터 추정한 환산치들을 나타낸 것이다. 그림에서 Ejima의

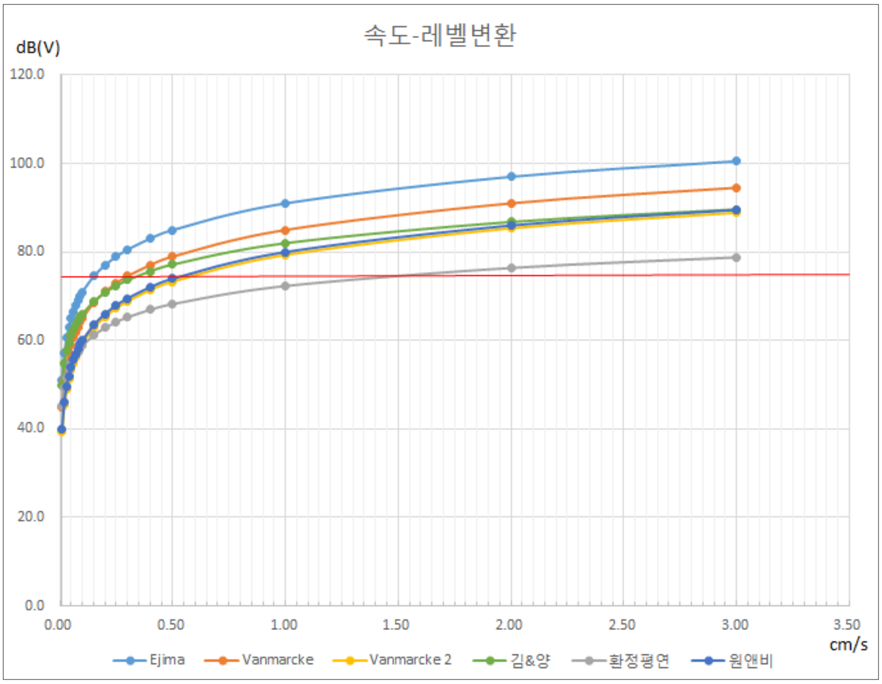

그림 4. 속도레벨 변환관계.

식은 자유진동 결과를 나타낸 것으로 다른 식들에 비해 최소 5dB 이상 일관되게 과대평가되고 있다. Vanmarcke의 식은 진동지속시간의 선택에 따라 현저하게 다른 값을 보인다. 터널에 대한 전기식 발파를 전체 진동지속시간으로 간주하여 구한 $T_d = 5s$와 10단 발파로 간주하여 $T_d = 0.2s$로 추정한 두 그래프는 현저한 차이를 보인다.

계측결과로부터 유도한 김과 양, 원앤비 식의 그래프는 $T_d = 0.2s$인 Vanmarcke의 식 그래프와 크게 다르지 않다. 그러나 환경정책연구소의 결과는 언급된 모든 진동 추정식들보다 낮으며 결과적으로 이 식을 이용하여 추정한 경우 대체적으로 10dB 이상 과소평가될 수 있음을 보인다.

건물피해 수인한도로 사용되고 있는 0.5, 0.3 cm/s에 대한 김과 양 식의 변환값은 원앤비의 값보다 다소 높게 나타난다. 이는 김과 양의 식 데이터가 환경피해 영역 부근에서 계측된 사례가 많고 95%를 기준으로 한데 반하여 원앤비는 평균치 예측을 하였기 때문으로 보인다.

전술한 바와 같이 환산식을 사용하는 것은 전혀 타당하지 않지만, 김과 양, 원앤비 그리고 $T_d = 0.2s$인 Vanmarcke의 식들은 유사한 결과를 유도해내므로 다른 어떠한 자료도 없는 경우 이 식들을 원용할 수 있고 특히 환경피해 판정의 경우에는 수인한도 부근에서 95% 상한값을 예측하는 김과 양의 식을 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 특히 이렇게 추정된 값이 피해인정기준을 넘지 않을 때는 면책사유로 인정될 수 있고 반면 기준을 현저하게 초과할 경우에는 피해를 인정할 수 있을 것으로 본다.

3. 적용사례

환경분쟁 조정사례 중에서 발파진동으로 인한 구조물 피해는 인정하였으나 정신적 피해는 인정하지 않은 사례를 중심으로 진동레벨이 잘못 적용된 사례와 전문가의 오류로 침하 등 건설상의 피해를 발파진동피해로 인정한 사례들을 검토하였다.

3.1 진동레벨 환산 오류

전남 OO군 도로건설공사장의 소음·진동으로 인한

건물 및 정신적 피해 배상 요구 사건에서 발파공사 기간(09~10) 중 발파 소음도 및 진동도는 최대 76dB(A)와 72.8dB(V)로서 '10년도 피해인정기준인 78dB(A), 75dB(V)를 초과하지 아니하므로 피해의 개연성이 인정되지 않았다. 발파진동으로 인한 건물 피해는 신청인 주택과 OO터널과의 이격거리가 비교적 근접한 거리(63.5m)라는 점, 발파로 인한 진동 추정 속도가 1.1cm/s로 피해인정 기준(0.3cm/s)을 초과한다는 점, 신청인의 주택이 진동에 예민한 건축물이라는 점, 발파로 인한 건물피해에 대한 전문가의 의견 등을 종합적으로 고려하여 발파진동으로 인한 건물피해의 개연성을 인정하였다.

이 사례에서 발파진동에 의한 정신적 피해가 인정되지 않았으면서도 구조물 피해가 인정된 점은 진동에 대한 인체의 반응이 구조물보다 훨씬 더 민감하다는 그간의 연구결과와는 상치된다. 진동속도 1.1cm/s를 (4)~(7)식에 대입하여 구한 진동레벨은 각각 80.2~85.8, 82.7, 72.9, 80.8 dB(V)로서 환경정책연구원의 추정식을 이용했음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 환경정책연구원의 식은 계측 수도 적고 평균치를 택한 것이어서 진동레벨이 과소평가되기 때문에 이러한 모순적인 판정이 내려진 것으로 보인다. 비록 추정치이기는 하지만 여타의 식들이 모두 당시의 정신적 피해 인정기준인 75dB(V)를 초과했던 점에서 진동으로 인한 정신적 피해를 인정하는 것이 합리적이었을 것으로 보인다.

3.2 진동피해 판정 오류

전남 OO군 O터널 공사장 소음진동으로 인한 피해 분쟁사건에서 발파진동이나 소음으로 인한 정신적 피해가 인정되지 아니한 상태에서 구조물 피해가 있는 것으로 판정한 사례이다.

이 사건에서 발파 지점은 신청인의 축사로부터 북쪽으로 115m 이격하여 있고, 신청인들의 주택으로부터 북쪽으로 최소 325m, 최대 793m 이격하여 있다. 신청인 축사에서의 소음도는 최대 72dB(A), 진동도는 최대 62dB(V)로, 신청인들 건물들이 위치한 OO마을에서의 소음도는 최대 62dB(A), 진동도는 최대 53dB(V)로 평가되었다.

판정 결과는 다음과 같다.

발파로 인한 소음도가 최대 62dB(A), 진동도가 최대 53dB(V)로써 피해 인정기준인 소음 75dB(A), 진동 75dB(V)을 초과하지 않아서 신청인이 사회통념상 수인의 한계를 넘는 정신적 피해를 입었을 개연성을 인정하지 않았다. 터널 발파에 따른 진동속도 추정 결과, 신청인 축사에서는 최대 0.136cm/s, OO마을에서는 최대 0.047cm/s로 나타남에 따라 신청인 건물의 대부분이 진동 등의 횡력에 구조적으로 취약한 시멘트블럭으로 지어진 점 등을 고려하여 적용한 피해 인정기준(0.21cm/s)에 크게 못 미치고 따라서 진동으로 인한 건물 피해의 직접적인 개연성은 거의 없으나, 대상 건물의 노후도 등에 따라 일부 건물에 단순 보수 수준 이내의 미미한 손상이 있을 수 있다는 전문가 의견을 고려하여, 신청인들이 발파 진동으로 인하여 건물 피해를 입었을 개연성을 인정하였다.

결국 정신적 피해가 인정되지 않을 정도의 미미한 진동레벨과 진동수준에도 불구하고 구조물에 대한 진동피해를 인정한 것은 다른 구조물 피해의 원인을 규명하지 못한 전문가의 자신감 결여로 인한 것으로 생각할 수 있다. 정신적 피해의 인정 수준이 구조물 피해의 수준보다 훨씬 더 낮다는 사실에 대한 이해가 있었다면 다른 판정이 가능했을 것이다.

3.3 진동 실측 자료 대신 추정치를 적용한 경우

충남 OO시 산업단지 개발사업 조성공사 토취장 발파공사장에서 발생하는 진동으로 인한 건물피해 배상사건으로 피신청인의 상시계측자료에 따르면 민원인 건물에서 최고 0.22cm/s의 진동속도가 계측되었다. 전문가는 170m 이상 이격된 민원인 건물에 대한 판정에서 조적조 균열과 사인장 균열이 발견되나 외부마감에 사용된 드라이비트의 경우 재료의 특성상 진동에 의해 들뜨거나 탈락되는 현상이 쉽게 발생되지 않기 때문에 일부 시공과정에서의 문제도 현재 건물의 상태에 영향을 준 것으로 사료된다고 하였다. 그럼에도 불구하고 최대진동속도를 0.60cm/s로 추정하고 이에 따라 조적조 형식의 주거용 건축물 기준진동속도인 0.5cm/s를 초과하여 피해를 인정하였다.

전수 조사한 실측자료 대신 추정치를 사용한 것은 명백히 잘못된 것이다. 추정에 사용되는 식들은 대부분 현장이 조성되기 전에 실시한 시험발파 진동예상식들이다. 이 식들은 설계에 사용될 뿐 시공중에는 현저

히 다른 값을 보이는 경우가 많으므로 시공중 계측결과로부터 구한 추정식이 아닌 초기 시험발파 추정식을 피해판정식으로 사용하는 것은 부적절하다. 이 사례에서는 건축물 조사에서 이미 진동으로 인한 피해가 잘 발생되지 않는다고 하여 사실상 진동으로 인한 구조물 피해가 아님을 판정하고도 참고자료에 그쳐야 할 추정수치 앞에서 전문가적인 판단을 번복한 것이다.

최근 많은 시공자들이 전수 실측 하는 방식으로 발파피해가 예상되는 지점들에 대해 관리하고 있다는 점에서 피해 판정에는 이러한 실측자료를 가장 우선시 인용해야 한다고 본다.

4. 결 론

진동레벨 환산식은 그 자체로 큰 오차가 있으므로 피해인정기준으로 사용하는 것은 적절하지 않고 초기 시험발파의 결과를 이용하여 구한 추정치로 판정하는 것도 옳지 않다.

환경분쟁이 예측되는 현장에서는 전수 계측을 원칙으로 하고, 피해판정에는 계측치를 우선적으로 판정에 적용하고 계측치가 없는 경우에는 부득이 시공중 진동 예상식이나 환산식을 적용하되 Ejima 식과 환경정책연구원의 식을 제외한 나머지 식에 의한 추정치를 참조하는 것이 바람직하겠다.

또 침하, 지하수에 의한 토사 유실, 지반변형 등 다른 피해원인을 함께 검토하여 진동으로 인한 피해가 아닌 경우 환경분쟁 판정에서 제외하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김남수, 양형식, 1998, 발파 소음·진동 수준의 변환 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 377-380.
2. 대한주택공사 주택연구소, 1999, 건설현장의 소음·진동·분진 평가 및 저감대책에 관한 연구: 발파공사를 중심으로, pp. 186.
3. 원앤비 기술사사무소, 2010, 진동레벨과 진동속도의 상관성 분석 등에 관한 연구, 중앙환경분쟁조정위원회, pp. 92.
4. 중앙환경분쟁조정위원회, 분쟁조정사례, http://edc.me.go.kr/
5. 한국환경정책평가연구원, 2007, 공사장 환경분쟁사건 소음 진동도 산출방법 개선 연구, 중앙환경분쟁조정위원회, pp. 71.

양 형 식
전남대학교
에너지자원공학과 교수

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr