

〈논 문〉

측정수가 발파계수와 허용환산거리의 산정에 미치는 영향

Influence of Sample Number on the Estimation of Blasting Coefficients and Limit Scaled Distance

양 형 식* · 전 양 수** · 정 지 문***

Hyung-Sik Yang, Yang-Su Jeon and Jimoon Jung

(1998년 3월 26일 접수 ; 1998년 8월 31일 심사완료)

Key Words : Limit Scaled Distance(허용 환산 거리), Log Normal Distribution(로그 정규 분포), *t* Distribution (*t* 분포), Site Constants(입지 상수), Correlation Coefficient(상관 계수), Blasting Vibration(발파 진동)

ABSTRACT

Vibration data from two blasting sites were analyzed to determine the sufficient sample number for blasting vibration estimation. Most important result is that much more than 30 sample data and succeeding measurement are necessary to estimate confident blasting vibration level and to determine limit scaled distance.

1. 서 론

발파진동의 예측은 흔히 환산거리식으로 이루어진다.⁽³⁾ Dowding은 입지상수의 산정에 필요한 최소한의 측정수로서 통계처리와 계측의 편의성을 고려하여 20개 이상을 추천하였다.⁽⁴⁾ 우리나라의 경우 그간 현장에서 이루어진 시험발파는 상당수가 이에 미치지 못한 실정이며 그 이후 계측을 생략하는 경우가 많았다. 일정한 환산거리 영역에 있어서 진동 속도는 그 범위가 크게 나타나 로그 정규분포를 보이므로 실제로 필요한 측정수는 표준정규분포의 경우보다 더 많아야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 로그 정규분포 방식인 발파진동수

준의 특성을 고려하여 발파진동의 안정적 예측에 필요한 측정수를 결정하고자 하였다.

또 여러 가지 상수들과 함께 허용환산거리에 미치는 측정수의 영향을 고찰하여 초기 발파진동의 예측이 후기의 발파에 미치는 영향을 찾고자 하였다.

2. 발파진동수준의 로그 정규분포

평균 μ 와 분산 σ^2 을 갖는 정규확률변수 X 의 확률분포는,

$$n(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(1/2)(x-\mu)/\sigma^2}, \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

와 같다. 이를 정규분포(normal distribution)라 한다.

이 때 평균 μ 가 0이고 분산 σ^2 이 1인 정규확률변수의 분포를 표준정규분포(standard normal distribution)라 한다.

* 정희원, 전남대학교 공과대학 자원공학과

** 정희원, 전남대학교 대학원 자원공학과

*** 전남대학교 대학원 자원공학과

중심극한정리에 의하면 평균이 μ 이고 표본의 분산이 S^2 인 모집단으로부터 크기가 n 인 표본을 추출했을 때, 표본의 평균 \bar{X} 에 대해서 $(\bar{X}-\mu)/(S/\sqrt{n})$ 는 n 이 상당히 클 때 표준정규분포 $n(z; 0, 1)$ 에 접근한다. 여기서 n 이 상당히 크다는 것은 일반적으로 30 이상일 때를 의미한다.

그러나 표본의 크기(n)가 30 보다 작은 경우

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (2)$$

는 서로 독립적인 표준정규확률변수 Z 와 자유도 ν 인 카이제곱확률변수 V 의 항으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T = \frac{Z}{\sqrt{V/\nu}} \quad (3)$$

이때 T 의 확률분포는

$$h(t) = \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\Gamma(\nu/2)\sqrt{\pi\nu}} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2}, \quad -\infty < t < \infty \quad (4)$$

가 된다. 즉 $h(t)$ 는 자유도 ν 인 t 분포의 확률분포이다.

t 분포의 형태는 표준정규분포와 같이 원점을 중심으로 대칭을 이루며 자유도가 커질수록 표준정규분포에 접근한다.(Fig 1)

정규분포의 해석을 위해서는 표본수가 30개 이상이어야 한다. 그러나 그 이하의 경우에는 t 분포로 해석해야 하는데 이는 표준편차의 범위가 더욱 커져서 설계의 어려움이 많다. 따라서 해석을 위한 충분한 계측수의 확보가 필요하다.

Dowding(1985)은 미국 일리노이 주에서 이루어진 발파진동 계측결과로부터 일정한 환산거리 영역에서 계측된 진동 계측치가 로그 정규분포임을 보였다.⁽⁴⁾

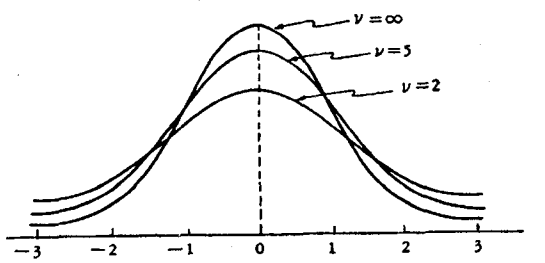


Fig. 1 t distribution

로그 정규분포는 특정 수준에 대해 그 분산이 일반 정규분포보다 현저히 크므로 진동 계측치의 범위가 평균의 수 배에 달할 수 있음을 의미한다. 따라서 발파진동을 평균적인 수준에 대하여 안전을 $\sqrt{3}$ 정도로 하여 설계하는 방법은 대단히 안전하지 못한 방법이 된다. Dowding은 95 %의 신뢰수준을 갖는 예상식을 이용할 것을 권고하고 있다.

우리 나라의 경우에는 허용진동수준 자체가 구미의 1/10인 0.3~0.5 kine에 불과한 실정이므로 이러한 낮은 영역으로 제한한 진동계측 결과는 상대적으로 높은 수준의 진동계측이 적은 왜곡된 형태가 될 것으로 보이지만 일반적으로는 자승근 환산거리와 진동속도를 양대수로 회귀분석한 진동예상식의 상관계수가 0.7을 상회한 자료가 대부분이어서⁽¹⁾ 로그정규분포의 적용이 타당한 것으로 판단된다. 그러나 허용진동수준이 지나치게 낮아서 95 % 신뢰수준의 설계가 단당 사용장약량을 크게 제한하게 되어 기술적인 어려움이 많다. 따라서 설계의 주 인자인 장약량이 다른 인자들에 비해 비중이 작아져서 시공의 안전도가 낮아지고 발파현장의 자유면 상황이나 지형적인 잦은 변화로 인한 변동요인이 커진다. 따라서 진동수준의 상시적인 계측이 더욱 필요할 것으로 생각된다.

3. 연구의 방법

3.1 환산거리식

환산거리에 의한 진동예측식은

$$v = K (SD)^{-n} \quad (5)$$

이며 여기서 v 는 진동속도, K 는 입지상수, n 은 감쇠정수이며 SD 는 환산거리로서 발파원과 수신점의 거리 L 과 장약량 W 의 식으로 표시된다.

$$SD = \frac{L}{\sqrt[n]{W}} \quad (6)$$

여기서 b 가 2이면 자승근, 3이면 삼승근 환산거리라고 하며 원거리에서는 대개 자승근 환산거리를 적용한다.

K 와 n 은 장약량과 거리를 제외한 모든 인자를 반영한다. 따라서 통칭하여 입지상수 (site constants)라고도 한다.^(2,3) 식에서 진동속도는 환산거리에 반비례하며 거리에 대해서는 반비례, 장약량에 대해서는 비례하는 것을 알 수 있다.

환산거리식의 두 변수를 분리하고 지수계수를 달

리하면 적합도가 더 높은 일반식

$$v = KW^{\alpha}L^{\beta} \quad (7)$$

의 식이 얻어진다. α 와 β 는 각각 지수계수와 감쇠 계수이다. 일반식은 높은 적합도에도 불구하고 설계의 어려움 때문에 많이 적용되지 않고 있다.

식 (5)나 식 (7)로 구해지는 진동수준은 평균진동 수준이므로 발파설계에 직접 이용할 수 없다. 따라서 앞장에서 본 바와 같이 로그 정규분포의 특성을 이용하여 신뢰수준 95 %의 발파예상식을 구하고 현장여건에 맞는 허용 진동수준으로부터 허용 환산 거리를 산출하게 된다.

3.2 적용현장

본 연구에서 진동의 계측은 여천국가공단 확장공사 제 2공구 및 제 3공구의 토석채취장에서 이루어진 약 3개월간의 발파 공사중에 이루어졌다.

발파 대상지의 지질은 표토층이 두껍게 발달하고 그 하부에 풍화암 및 연암이 위치하며 전체적으로 층간 교호가 많은 화산성 퇴적암과 절리가 발달한 화산암 들로 되어 있다.

제 2공구 토석채취장(C10) 주변은 해발 71.5 m의 야산으로 발파구역 주변에 민가와 진동에 민감한 공정을 포함하고 있는 주요 공장이 있다. 발파는 산정에서 시작하여 민가를 등지고 있는 사면에 벤치를 형성하는 방향으로 이루어지고 있다. 제 3공구 토석채취장(C7)은 해발 60 m 이하의 낮은 구릉이 해변까지 연결되어 있으며 발파는 해변의 꼭대기로부터 산

정으로 확장하며 벤치를 만들고 있으나 충분한 작업 공간을 확보하지 못하여 산발적으로 발파장이 옮겨다니는 형태를 취하고 있다.(Fig. 2)

3.3 계측 및 자료 처리

계측에 사용된 기기는 Blastmate DS677을 비롯하여 DS477, DS077 등이었다. 1회의 발파에는 최대 8대의 진동 계측기가 사용되었고 시험발파 시에는 임의점에서 계측하였으며 시공중에는 고정 계측점을 두고 필요시에 이동 계측점을 설정하였다.

계측된 자료는 계측 순서별로 나열하였으며 같은 발파의 경우는 근거리 자료를 원거리 자료보다 앞에 두었다. 최소자승법에 의해 자승근 환산거리에 의한 진동예상식의 입지상수 K, n, α, β 등을 구하였다. 또 허용환산거리는 국내의 사정을 감안하여 0.5 kine을 확보할 수 있는 95 % 신뢰범위의 최대 허용 환산거리로 구하였다.

데이터는 (1) 최초 데이터부터 임의 시점까지의 누적 데이터로 계산, (2) 그 시점에서 최신타 데이터 50 개만으로 계산하는 두 가지 방법으로 계수의 변동추세를 구하였다.

4. 계측 결과

4.1 누적 데이터에 의한 분석

Fig. 3은 C10 지역에서 계측된 110여 개의 자료로부터 자승근 환산거리에 의한 진동예상식으로 구한 발파계수의 변동을 나타낸 것이다.

그림에서 측정수가 누적될수록 입지상수 K 는 줄어드는 추세이며 감쇠지수 n 은 늘어나는 추세이나 50개 정도의 데이터가 누적된 이후로는 거의 변동이 없다. 이러한 결과는 자료의 누적에 의해 정규분포의 해석결과가 안정된 결과이며 계측 기간중 발파지역의 지형이나 지질이 극단적으로 변하는 일이 없이 지속적으로 발파가 이루어진데도 기인한다. 실제로 K 값의 변동은 로그 축척으로 그려져 있으므로 수치로서의 변동폭은 훨씬 크다.

또 50개 미만의 자료는 이후의 자료들을 포함한 자료에 비해서 현저하게 불안정한 값을 보이고 있는데 이는 초기의 발파가 시험발파로서 이후의 시공발파에 비해 자유면의 형성이 완전하지 못했던 점에도 기인하지만 자료의 절대수가 부족한 것도 큰 요인으로 생각된다. K 와 n 이 안정된 수치로 되는데는 적어도 50개에 가까운 데이터가 있어야 할 것으로

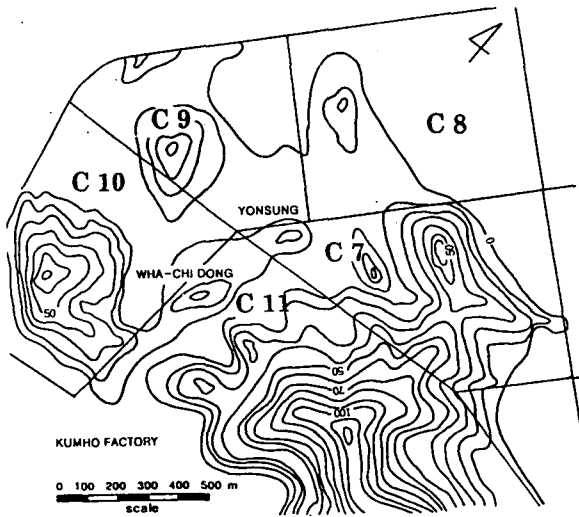


Fig. 2 Blasting map

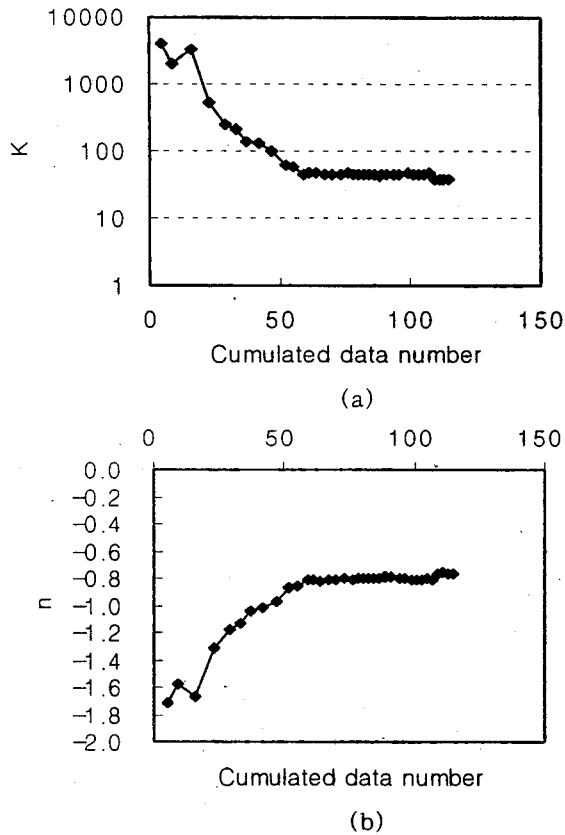


Fig. 3 Trend of site constants for C10 site calculated from scaled distance.

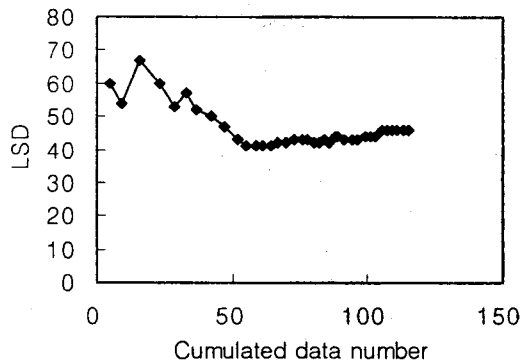


Fig. 4 Trend of limit scaled distance for C10 site calculated from scaled distance.

판단된다.

Fig. 4는 K 값의 큰 변동으로 인하여 예상식의 산정이 어려운 점을 감안하여 각 과정에서 95%의 신뢰수준을 가지는 허용환산거리를 계산하고 그 추이를 보인 것이다.

그림에서 K 나 n 과 마찬가지로 50개 미만의 자

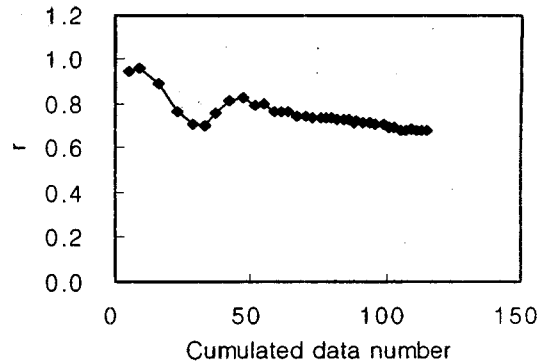


Fig. 5 Trend of correlation coefficient for C10 site calculated from scaled distance.

료에서는 변화폭이 크지만 그 이후에는 점점 안정된 값을 갖는다. 즉 K 와 n 값의 격렬한 변동에도 불구하고 허용 환산거리의 변동은 비교적 적어서 예상식에 의한 허용 환산거리의 산정과 적용이 타당함을 보인다.

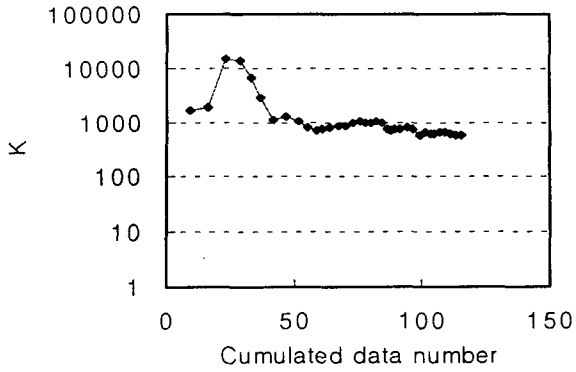
Fig. 5는 이러한 계산이 이루어지는 동안의 상관계수 변동으로서 상관계수는 양대수 선형회귀분석의 선형적합도의 근이다.

그림에서 상관계수는 최초의 1에 가까운 값에서 30여 개의 데이터가 누적될 동안 0.7 정도로까지 떨어졌다가 극부적인 반동을 보인 후 점점 감소하고 있다. 발파진동의 계측이 계속될수록 지형의 변화나 발파환경의 변화가 수반하여 상관계수는 점점 감소하는 것으로 생각된다. 데이터 수가 50여 개에 달하면 대체적으로 충분한 변동 요인이 예측에 반영된 것으로 판단된다.

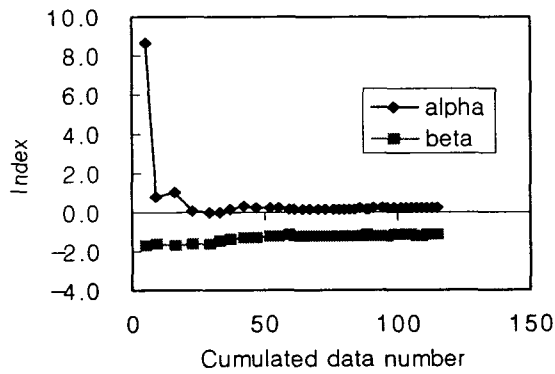
Fig. 6에서 입지상수는 물론이고 장약량에 따른 비례지수인 α 도 초기의 변동이 극심하다. 특히 일반식에서는 장약량과 거리의 관계가 일정하지 않으므로 환산거리 형태로 단순화할 수 없고 자료도 이차원적인 도해가 불가능하므로 설계의 어려움이 많다. 그러나 상관계수 자체는 환산거리식보다 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 또 50 개 정도의 누적자료에서 계수들의 수렴이 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

C10 지역과는 달리 발파중 지형의 상황이 자주 바뀌고 발파방식이나 화약류를 달리 적용했던 C7 구간에 대해서도 누적자료에 대해 분석하고 같이 표시하였다.(Fig. 7)

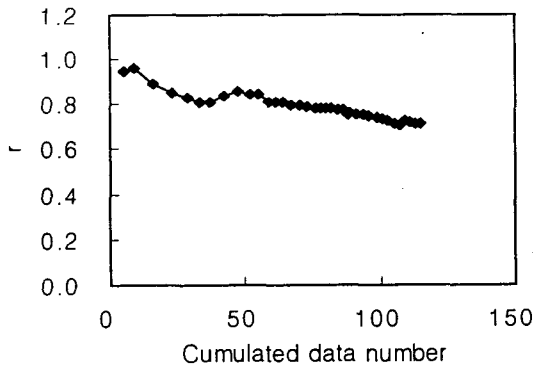
그림에서 발파계수들은 극단적으로 변동하지만 허용 환산거리는 비교적 완만하게 변동함을 알 수 있다. 허용 환산거리는 180여 개의 자료 가운데서 50



(a)



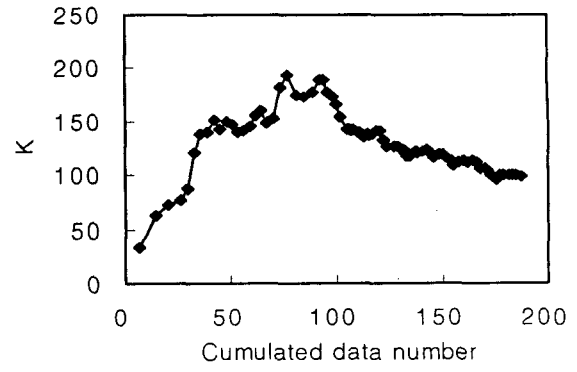
(b)



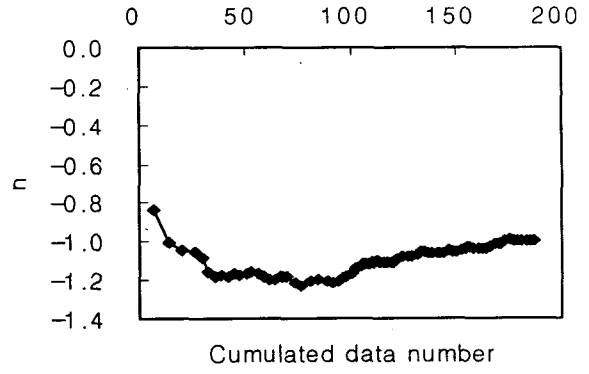
(c)

Fig. 6 Trend of blasting coefficients and correlation coefficient for C10 site calculated from general equation

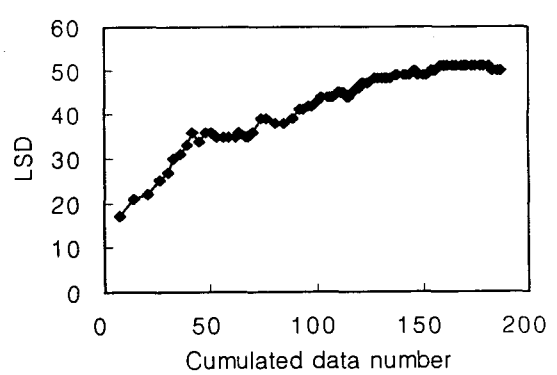
여 개의 자료가 누적되었을 때 안정된 값을 보였으며 이후 현장 지형이나 발파지점 및 화약류의 변화에 따라 계측값의 변동이 일어났다고 판단된다. 특히 허용 환산거리의 지속적인 증가는 C10 지역에 대한 설명 외에도 이 지역에서는 특히 암맥의 발달이 두드러진 방향으로의 진동전달이 우세한 경향이 있으며 시공중 이 방향의 진동전달이 문제가 되어



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Trend of site constants and limit scaled distance for C7 site calculated from attenuation equation

계측수가 대폭 늘어난 것에도 기인한다. 이러한 진동전달 우세방향은 계측 중에 발견된 것으로 시험발파에서는 예상하지 못했던 것이다. 따라서 시험발파만으로 설계하는 일은 상당한 위험부담이 따름을 알 수 있다.

Fig. 8은 두 지역의 허용 환산거리 변동추세를 같이 보인 것이다. 두 경우 모두 데이터의 누적에 따

라 허용 환산거리가 안정되어 가지만 초기의 시험발파시 허용 환산거리가 시공시의 환산거리와는 크게 다를 수 있다. 특히 50개 미만의 적은 수로 데이터를 처리하였을 때의 결과는 C10과 같이 대단히 과안정적이거나 C7과 같이 진동수준을 과소평가하

는 위험이 있음을 알 수 있다.

4.2 연속 데이터 50 개에 의한 분석

이상의 고찰로부터 로그 정규분포의 분석을 위한 측정점수를 일반 정규분포를 위한 30개보다 많은 50개로 정하고 C10 지역의 측정자료에 대해 다시 분석하였다.

Fig. 9는 C10 지역의 발파진동 계측결과로부터 자승근 환산거리 방식으로 구한 입지상수들과 허용 환산거리 및 상관계수의 변동추세이다.

Fig. 9(a), (b)에서 초기의 입지상수들은 대단히 급격하게 변하다가 안정이 된다. 이는 시험발파의 결과가 영향을 미친 것으로 시험발파에서 자유면이 충분히 확보되지 않은 등 실제 시공 발파와 다른 점들이 반영된 것으로 여겨진다. 이에 따라 허용 환산거리는 초기의 40여 $m/kg^{1/2}$ 에서 증가와 감소를 반복하다가 자료순번 45 정도에서 30 $m/kg^{1/2}$ 까지 낮아졌다가 다시 증가하게 된다.

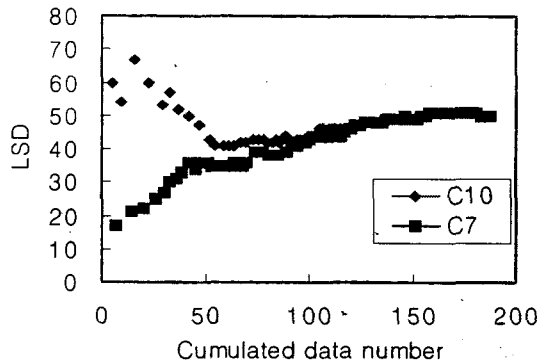
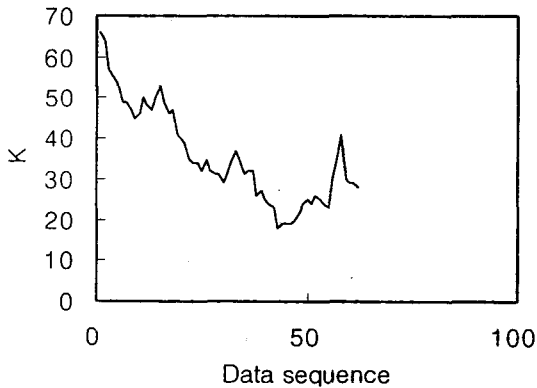
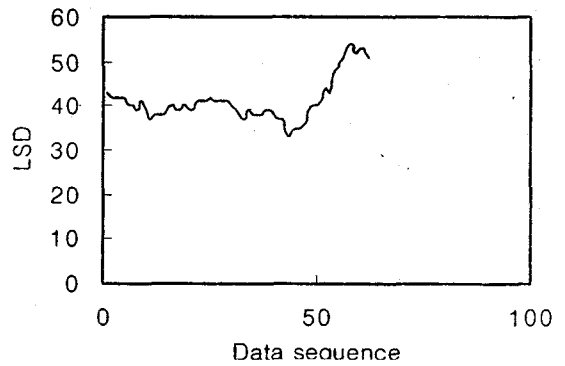


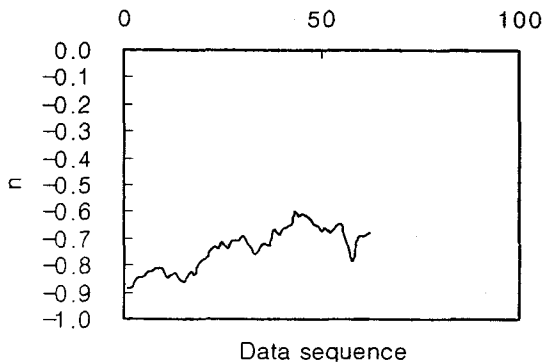
Fig. 8 Trend of limit scaled distance for C10 and C7 sites



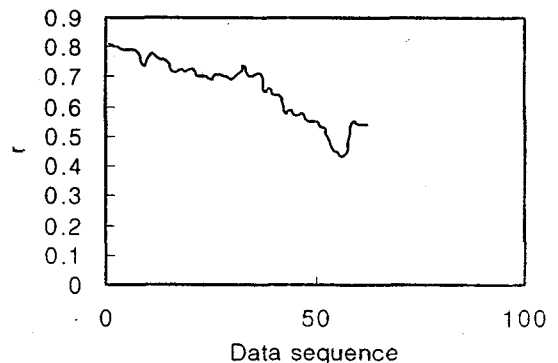
(a)



(c)



(b)



(b)

Fig. 9 Trend of blasting coefficients, limit scaled distance and correlation coefficient for C10 site from 50 sequent data.

Fig. 9(c)에서 자료순번 30까지는 시험발파의 영향권이며 자료순번 50 주변에서는 지발당 장약량의 증가가 이루어졌다. 또 자료순번 60 주변에서 지발당 장약량을 20 kg 이내로 제한하여 발파가 이루어졌으며 그 이후 다시 장약량의 증가가 이루어졌다. 이러한 발파방식이나 끊임없는 자유면의 변화 양태가 허용환산거리를 $30 \sim 60 \text{ m/kg}^{1/2}$ 의 넓은 범위로 변동시키고 있으므로 한 지역에서 계속되는 발파라고 하더라도 계속 진동수준의 계측과 관리가 필수적임을 알 수 있다.

5. 결 론

여천국가공단 확장단지 제2, 3공구의 발파지역에서 계측된 지반의 진동속도와 장약량들을 이용하여 입지상수와 환산거리 등을 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 발파진동의 예측식에서 입지상수 K 와 감쇠지수 n 은 변화가 많았고 이 값들이 안정된 수준을 확보하게 되기 위해서는 로그정규분포의 분석을 위해 적어도 50개에 가까운 데이터가 있어야 할 것으로 판단되었다.
- (2) 충분한 수의 계측수로 환산거리를 구하여도 발파가 계속됨에 따라 지형의 변화가 이루어지고 발파방식도 변화하는데 따라 진동 예측식의 변화가 일

어났다. 따라서 적절한 진동수준의 관리를 위해서는 초기 시험발파 이후 지속적인 진동 계측으로 예상식이 보완되어야 함을 규명하였다.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 현대건설 박대휴 부장님, 강재갑 차장님, 대우건설 염현천 소장님, 은회법 과장님의 여러 관계자에게 심심한 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간, 한국암반역학회지, Vol. 2.2, pp. 199~211.
- (2) Bollinger, G.A. 1980, Blast Vibration Analysis, S. Illinois Univ. Press, Carbondale, p. 95.
- (3) Devine, J.F. et al., 1966, Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting, USBM RI 6774, p. 37.
- (4) Dowding C.H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood cliffs, p. 288.