터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 11, No. 4, 2001, pp. 344~351

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 11, No. 4, 2001, pp. 344-351
J. of Korean Society for Rock Mech.

수치모형에 의한 터널발파 시뮬레이션에 관한 연구

박정주[1] · 박의섭[2]

Numerical Simulation of Tunnel Blasting

Jung-Joo Park and Eui-Seob Park

Abstract. In the tunnelling by blasting, the calculations of charge weight and the estimations of blasting effect have been simply carried out by empirical formulas. Also, it has been rare to consider the impact energy of blasting in numerical analyses. Thus in this study a numerical modeling technique of blasting load is developed and used with the 2 dimensional distinct element method(DEM) to consider the nonlinear behaviour of discontinuous underground structures. To examine and verify its applicability of the numerical model to actual problems, a blasting of tunnel under an embankment is numerically analyzed with DEM. It is examined that the behavior of circumference structures, the displacements of above- and under-ground structures, and the propagation of particle velocities can be known by this numerical analysis. As a result, the blasting load model, proposed by this study, can be applied to actual problems. This model applied with DEM can be used in the examination of structural stability.

Key words : tunnel, blasting, numerical model, DEM, underground structures

초 록. 발파를 이용한 터널굴착에 있어서, 장약량 산정이나 터널 주변 암반 및 구조물에 대한 영향 평가 등은 주로 간단한 경험식에 의해 이루어져 왔다. 또한 지금까지 발파의 충격에너지를 고려한 지하구조물의 동해석 연구는 매우 빈약한 실정이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 발파하중을 받는 불연속체 지하구조물의 비선형 거동을 평가하기 위하여 2차원 개별요소법의 수치모델기법을 개발하였고, 실제문제에의 적용성을 검토하기 위하여 제방하부에 위치한 터널발파의 수치해석을 통하여 시간별 지하 및 지상 구조물의 변위 및 입자속도의 전파과정을 살펴보았다. 해석결과 본 연구에서 제안한 발파하중의 모형이 실제 문제에 적용될 수 있었고, 이를 개별요소해석에 적용함으로써 발파지역 주변의 구조물의 안정성을 검토할 수 있었다.

핵심어 : 터널, 발파, 수치모델, 개별요소법, 지하구조물

1. 서 론

최근 전 세계적으로 도시의 급격한 성장으로 인하여 공간문제해결의 한 방안으로서 지하공간에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 우리나라에서도 서울 등 대도시를 중심으로 본격적인 지하구조물 건설이 활발히 진행되어 구조물의 심층화 및 복잡화를 가속시키고 있다. 특히 지하도로, 지하철, 하수관 및 통신관 등의 각종 관로, 지하 유류비축기지 및 지하 핵폐기물 처분시설 등의 요구가 급격히 증가하고 있는 실정이다.

이러한 지하구조물의 건설방법에는 여러 가지가 있지만, 화약의 폭발력을 이용한 발파에 의한 터널 굴착이 가장 일반적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 터널굴착에 필요한 장약량 산정이나 발파에 의한 주변영향평가 등은 지금까지도 주로 경험식에 의존한 간단한 계산으로 이루어졌다. 지금까지 지하구조물의 동역학적 해석의 경우 고려하중이 주로 지진하중인 경우는 많았지만 발파시의 충격에너지를 고려한 해석은 그리 많지 않다. 그리고 지반구조나 제방과 같은 불연속적인 재료를 그 해석대상으로 할 경우에는 연속체를 그 대상재료로 하는 유한요소법보다는 각 요소를 독립된 요소로 간주하는 개별요소법(Distinct Element Method)이 더욱 적당한 방법이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 터널 발파시의 충격하중을 동역학적으로 모형화하고 구조물재료의 비선형거동, 상호작용 및 발파시 발생되는 응력변화에 따른 지반 및 구조물에 발생하는 절리 및 활강을 고려할 수 있는 2차원 개별요소해석 프로그램인 UDEC[1]을 사용하여 터널

[1]정회원, (주)다산컨설턴트 부회장 및 울산대학교 겸임교수
[2]정회원, 서울대 지구환경시스템공학부 특별연구원
접수일 : 2001년 11월 27일
심사 완료일 : 2001년 12월 14일

발파과정을 수치모형화하는 해석기법을 개발하고, 개발된 수치모형 해석기법을 현장적용을 통하여 검증하고자 한다.

2. 발파하중의 모형화

2.1 장약량에 따른 발파압력의 계산

2.1.1 폭발압력

폭약 1 kg의 부피를 $v_0(l)$라 하고, 폭발압력을 p_1(atm)이라 하면, 비에너지 f는 식 (1)과 같다.

$$f = p_1 v_0 \tag{1}$$

그러므로, 폭발압력 p_1은 식 (2)가 된다.

$$p_1 = \frac{f}{v_0} = f \cdot \rho \tag{2}$$

이 값은 폭발생성가스를 이상기체로 가정한 것이므로 장약밀도에 대하여 보정하면 식 (3)과 같다.

$$p_1 = \rho_0 \cdot \frac{f}{(1-\alpha \cdot \rho_0)} \tag{3}$$

여기서 α는 코볼륨(covolume)이라는 보정값이며, 이 값을 결정하는 인자는 여러 가지가 있으나 장약밀도의 함수로 표시한 실험식은 Fig. 1과 같다.[2]

이 장약압력이 천공부에 작용하는 최대 압력의 크기는 식 (4)와 같다.[3]

$$p_{max} = p_1 \times D^{-0.95} \tag{4}$$

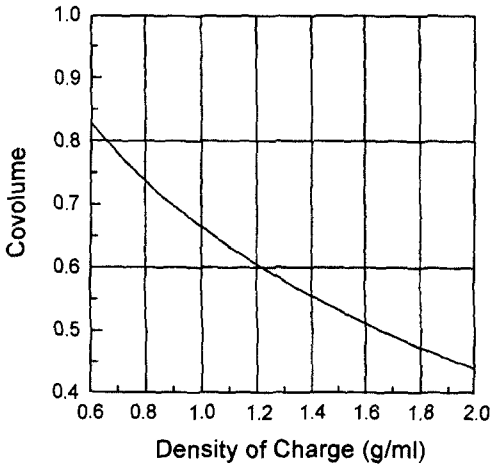

Fig. 1. Relationship between density of charge and covolume.

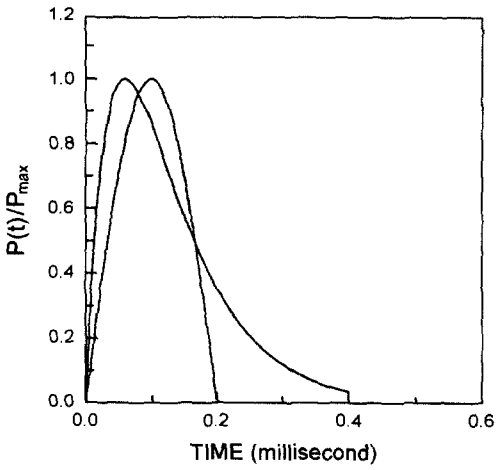

Fig. 2. Shape of blast pressure acting to rockmass.

여기서, D는 완충비로서 천공부의 공간부피를 장약의 부피로 나눈 값이다.

2.1.2 폭발압력의 시간에 따른 변화

충격파의 작용시간은 약 10^{-6}초에서 10^{-4}초 정도로 위의 관계를 고려하면 시간에 따른 발파압력의 변화는 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.[4]

$$P(t) = 4P_{max}\left[\exp\left(\frac{-16338t}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2} \cdot 16338t)\right] \tag{5}$$

여기서 t는 시간으로, 단위는 초이다.

Fig. 2에서는 식 (5)와 함께 주기가 0.0004초인 사인(Sine)파의 반파장을 비교해 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 충격파의 형태가 0.0002초까지는 사인함수의 경우와 지수함수의 경우가 유사함을 알 수 있다. 충격하중이 구조물에 작용할 경우에 그 초기 형태에 따른 영향이 크고 후반부의 형태는 그 영향이 적으므로 발파하중을 모형화하는데 있어서 사인함수를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 발파하중을 모형화하는데 사인함수를 사용하였다.

2.2 암반에 작용하는 충격압력

터널의 발파시에 발파압력의 대부분이 암반의 파쇄에 사용되고 그 일부만이 지반에 진동을 일으키는데 사용된다. 여러 연구자에 의해 폭발에너지 중 탄성파의 전달에 사용되는 폭발에너지는 진동을 전달하는 암종 및 사용된 화약의 종류에 따라 다르지만 대체적으로 5~50%의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구

에서는 발파압력의 30%가 지반에 진동을 발생시키는 것으로 가정하고 이 발파압력이 각 발파단계의 예상 파쇄면에 등분포 압력으로 환산되어 작용하는 것으로 보았다.

2.3 발파진동에 의한 구조물의 안정성 기준

발파진동에 대한 주변 구조물의 피해는 지반진동과 폭풍압(Air Blast)에 의한 피해로 나눌 수 있고, 여러 연구자들에 의해 진동속도가 구조물의 피해정도와 가장 깊은 상관관계를 갖는 것으로 밝혀졌다. 그러나 자연지진과는 달리 발파진동은 진동주파수가 훨씬 크므로 가속도를 기준으로 주변 구조물의 피해 정도를 표시하는 것은 부적절하다. 즉 같은 가속도 값에서도 진동주파수에 따라 피해의 정도가 달라지기 때문이다.[2]

Crandall은 발파에 의한 구조물의 안전기준으로서 식 (6) ER(Energy Ratio)을 제안하였다.

$$ER = a^2/f^2 = 16\pi^4 f^2 A^2 \quad (6)$$

여기서, ER = Energy Ratio
a = 가속도 (feet/sec^2)
f = 주파수 (cycle/sec)
A = 지반의 변위 혹은 충격파의 진폭 (feet)

ER이 3 이하일 경우에 구조물은 안전하며, 6 이상일 경우에 구조물이 위험하게 된다고 한다. 그러나 Messachusetts 와 New Jersey 에서는 주파수가 10 cycles/sec 인 경우에 ER의 안전한계를 1 이하로 정하고 있다. 이러한 한계들을 Fig. 3에 나타내었다.[5]

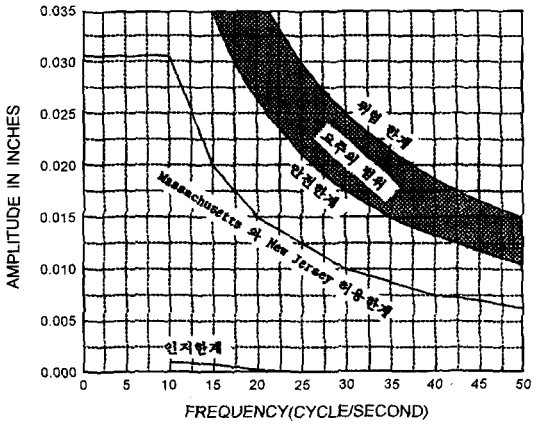

Fig. 3. Relationship between frequency and amplitude.

3. 수치해석

3.1 현장조건

해석대상지역 부근의 지질은 선캠브리아기의 서산층군과 경기 편마암 복합체가 분포하고 있다. 경기 일원 및 서해안 당진, 홍성 지역에 분포하고 있는 변성암체는 선캠브리아기에 퇴적된 우리나라 최고기의 암석층의 하나로 수 차례에 걸친 구조운동과 광역변성작용을 받은 것으로 알려져 있다.

대상현장 부근에는 남양만 방조제가 위치하며, 방조제 내수면의 수심은 약 10 m 정도이며 지반은 점토로 이루어진 얕은 표토층과 해수면 아래 약 30 m 부근에서부터 발달한 기반암으로 구성되어 있다. 기반암은 주로 편마암과 편암으로 구성되어 있으며 해수면 아래 약 130 m 부근을 중심으로 그 상부에는 편암, 하부에는 편마암이 분포한다. 방조제의 중심부와 발파지역 사이의 거리가 약 200 m 정도로 상당히 근접하므로 발파에 따른 충격 에너지가 방조제에 상당한 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 2차원 발파 동해석을 위하여 Fig. 4의 A-A 단면을 선택하였으며, 제방은 A-A 단면에 수직으로 위치하는 것으로 가정하였다. Fig. 5는 저장기지의 터널 단면을 나타낸다.

이 터널의 발파는 갤러리 부분, 벤치-I, 그리고 벤치-II의 3 단계로 이루어지는데, 본 연구에서는 자유면이 가장 적고 지표면으로의 진동전파가 가장 크게 발생할 것으로 사료되는 갤러리 발파의 경우에 대하여 수치모형해석을 실시하였다.

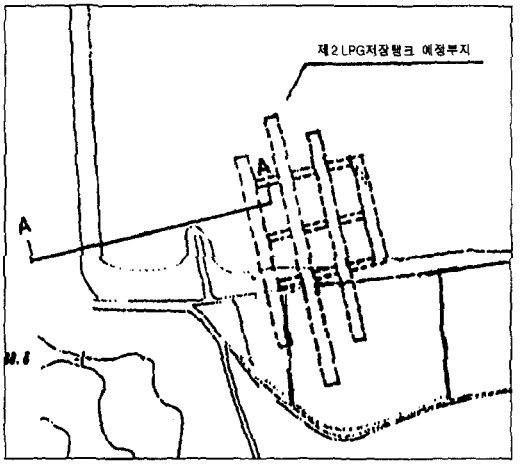

Fig. 4. Layout and analysis section of test site.

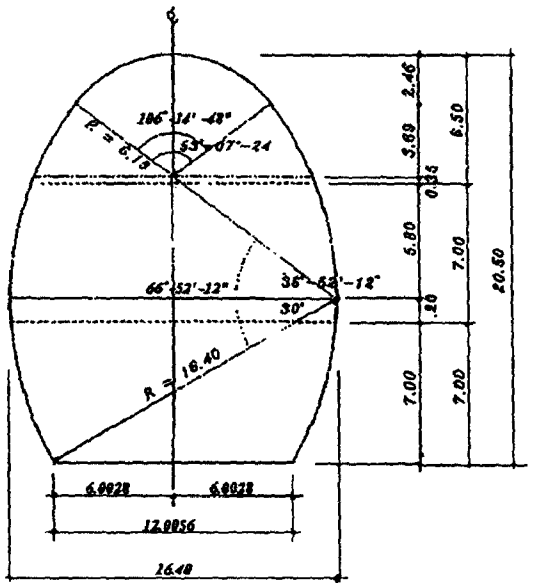

Fig. 5. Typical section of storage cavern.

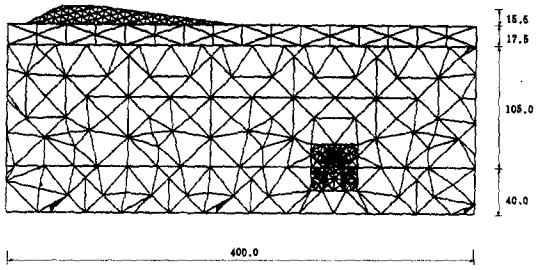

Fig. 6. DEM mesh for dynamic analysis.

3.2 해석조건

3.2.1 해석모델

본 해석에서는 2차원 평면변형률조건을 만족하고, 저장시설을 모두 포함하는 합리적 단면을 선택하기 위하여 Fig. 4의 A-A 단면을 해석단면으로 하였다. 해석대상의 개별요소망이 Fig. 6에 나타나 있다. 본래 지하 저장공동은 3열로 설계되었으나 이번 해석에서는 방조제에 가장 가까운 저장공동 1개만을 모형화하였다. 좌표축은 요소망에서 좌-우방향을 X축으로, 상-하방향을 Y축으로 정하였으며, 좌표의 원점은 터널 연직상부 119.5 m 지점이 된다. 지표면의 Y좌표는 -7.5이며, 이 요소망의 범위는 좌우 400 m, 상하 178 m 이다.

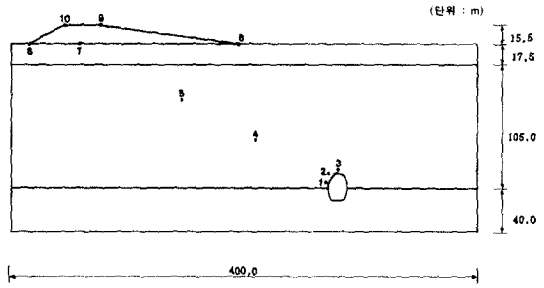

Fig. 7. Location of measuring points.

해석대상 구조체 내에서 발파에 의한 에너지의 전파와 이에 따른 변위, 응력 및 입자속도 등을 계산하기 위하여 구조체 내에 계측점을 설정하였다. 즉 터널 주변부의 역학적 거동을 밝히기 위하여 측점 1~3번을 45° 각도로 배치하였으며, 발파하중의 전파상태를 확인하기 위하여 측점 4, 5번을 배치하였다. 또한 발파하중에 따라 그 거동이 중요하다고 판단되는 방조제의 거동을 규명하기 위하여 측점 6~10번을 배치하였다. 각 측점의 위치는 Fig. 7에 나타내었다. 발파지점으로부터 각 측점까지의 거리는 암반 내에 위치한 4, 5번은 각각 77 m, 154 m이고, 방조제에 위치한 측점 중 가장 가까운 6번은 138 m, 나머지 7, 8, 9, 10번은 각각 250, 286, 240, 265 m 정도 떨어져 있다.

3.2.2 해석지반의 물성

본 연구에 사용된 각 지층의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of rockmass.

Items	Gravel	Clay	Gneiss	Schist
Density, ρ (kg/m^3)	2,040	2,160	2,670	2,700
Elastic modulus, E (MPa)	15,000	1,400	58,400	58,400
Poisson's ratio, υ	0.3	0.12	0.11	0.11
Bulk modulus, K (MPa)	12,500	600	25,000	25,000
Shear modulus, G (MPa)	5,800	630	26,300	26,300
Cohesion, c (MPa)	0	0.196	0	0
Friction angle, ϕ	38°	3.4°	34°	34°
Normal stiffness, Kn (MPa/m)	1,100	1,250	14,600	14,000
Shear stiffness, Ks (MPa/m)	1,100	1,250	14,600	14,000

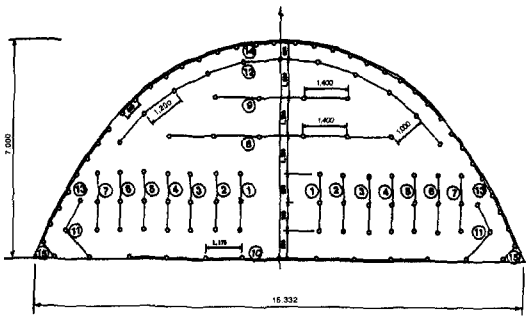

Fig. 8. Blast pattern for gallery excavation.

각 지반 물성들과 지층의 구성은 대상 지역에서 실시된 시추조사 및 실내시험 결과를 참조하여 결정하였다. 한편 동적해석시 사용된 기반암의 Damping 계수는 경암에 일반적으로 적용되는 2%를 사용하였다.

3.3 발파하중

터널의 발파시에 발파압력의 대부분이 암반의 파쇄에 사용되고 그 일부만이 지반에 진동을 일으키는데 사용된다. 본 연구에서는 발파압력의 30%가 각 발파단계의 예상파쇄면에 등분포 압력으로 환산되어 작용하는 것으로 보았다.

Fig. 8은 저장공동의 갤러리부의 발파 패턴도를 보여준다.

Table 2. Properties of explosives used.

Item	KOVEX-100 (dia. 32 mm)	FINEX-I (dia. 17 mm)
Specific gravity (kg/*l*)	1.06~1.08	1.2~1.3
Detonation velocity (m/sec)	4,300	4,000
Specific energy (l · kg/cm^2)	7,600	4,400
Blasting pressure P_l (MPa)	823.2	550.0
Covolume α	0.67	0.58
Revised pressure P_{det} (MPa)	2,820	1,960

이 발파는 총 15단계의 발파로 이루어지며, 이때 사용되는 폭약은 KOVEX-100와 FINEX-I의 2 종류이며, 각각의 폭약의 특성은 Table 2에 나타내었다.

1단계의 발파에서 15단계의 발파까지의 총 소요시간은 3.1초이다. 그러나 각 단계의 발파 진동이 제방에 전달되는 시간이 매우 짧으므로 계산 시간의 단축을 위하여 해석시에는 6단계부터 15단계까지의 단차를 0.15초로 고정시켜 총 발파시간을 1.75초로 줄였다.

Fig. 8과 Table 2로부터 단위 길이당 장약량을 구하고 그 때의 장약부피와 천공부피의 비로부터 완충비를 구하여 P_{hole}을 구하고 P_{hole}의 30%를 천공부의 둘레 길이와 예상 파쇄면의 길이의 비에 따라서 환산 압력을 구하였다. Table 3에서는 위의 과정에 따라 구한 완충비

Table 3. Revised pressure of each blasthole.

Step	Weight of charge per unit length (kg)		Volume of charge per unit length (l)		Decoupling ratio	Blasthole Pressure (MPa)	Circumference length of blasthole (m)	Length of excavation face (m)	Revised Pressure (MPa)
	Kovex-100	Finex-I	Kovex-100	Finex-I					
1	1.1100	-	1.0280	-	1.53	1,878	0.85	6.44	74
2	1.1258	-	1.1363	-	1.40	2,047	0.85	6.44	81
3	0.9889	-	0.9242	-	1.72	1,683	0.85	6.44	67
4	1.0171	-	0.9506	-	1.67	1,728	0.85	6.44	68
5	1.0471	-	0.9786	-	1.63	1,776	0.85	6.44	70
6	1.0788	-	1.0082	-	1.58	1,828	0.85	6.44	72
7	1.0788	-	1.0082	-	1.58	1,828	0.85	6.44	72
8	1.1842	-	1.1067	-	1.44	1,997	0.85	9.50	54
9	1.1842	-	1.1067	-	1.44	1,997	0.57	7.20	47
10	1.5250	-	1.4252	-	1.12	2,539	1.27	11.30	86
11_{GL}	0.7416	-	0.6931	-	2.29	1,280	0.57	4.10	53
11_{FL}	1.5250	-	1.4252	-	1.12	2,539	0.28	5.50	39
12	0.7416	-	0.6931	-	2.29	1,280	1.56	12.15	49
13_{GL}	0.0568	0.2200	0.0531	0.1600	-	322	2.26	7.94	28
13_{FL}	1.5250	-	1.4252	-	1.12	2,539	0.28	4.24	50
14	0.0568	0.2200	0.0531	0.1600	-	322	2.83	11.40	24
15	1.5250	-	1.4252	-	1.12	2,539	0.28	2.57	83

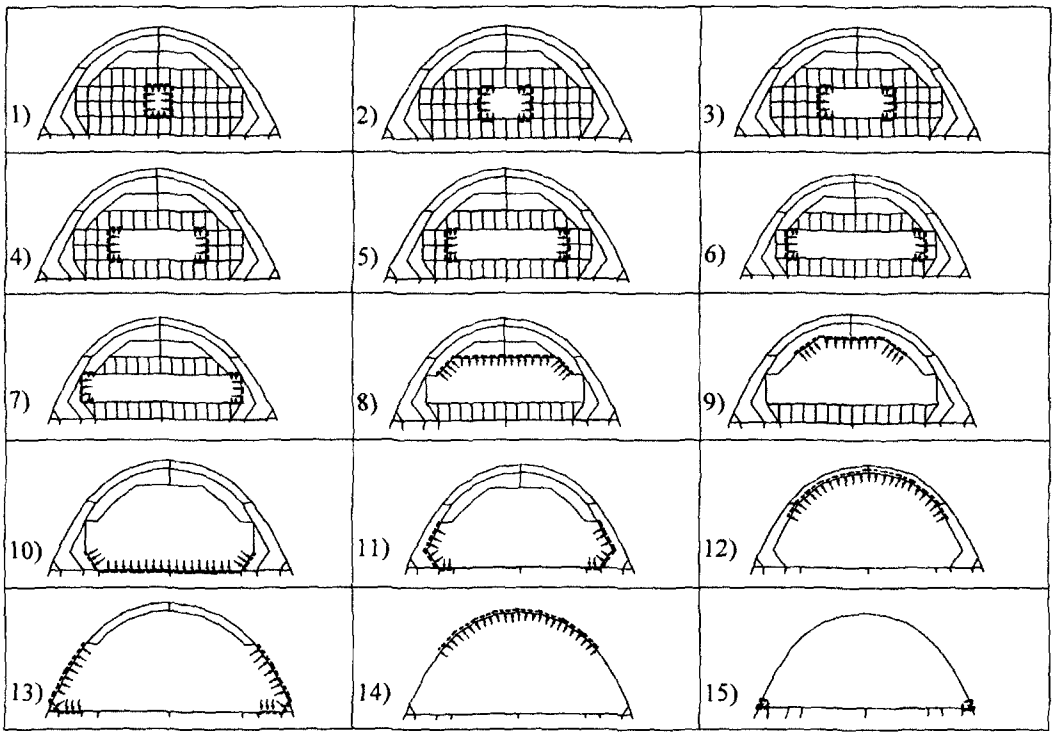

Fig. 9. Simulation of each blasting step.

와 암반에 작용하는 환산압력을 나타내었으며, Fig. 9는 각 발파단계별 예상 파쇄면과 하중의 작용방향을 나타내었다.

3.4 결과분석

앞 절에서 언급한 해석대상 구조체의 수치모형화와 하중의 모형화를 통하여 터널발파 시뮬레이션을 실시하였다.

총 15단계의 발파가 끝나는, 최초 발파로부터 발파 종료후 0.5초 경과(2.25초)될 때까지 발파에 따른 각 측정지점별 입자속도(2차원 해석에서의 벡터합 성분)의 변화는 Fig. 10~13에 나타나 있으며, 발파지점에 인접한 주변암반(측점 1, 2, 3)의 입자속도는 *200~400* mm/sec의 높은 값을 보여주고 있으나, 거리가 점점 멀어질수록, 입자속도가 급격히 감소하여 기반암 내의 측점인 4, 5에서는 거의 3~5 mm/sec의 작은 값을 보여주고 있다. 특히, 주요 구조물인 제방 내의 입자속도를 살펴보면, 6번 측점의 경우 1.57초(step 13이후)에서 약 2.8 mm/sec

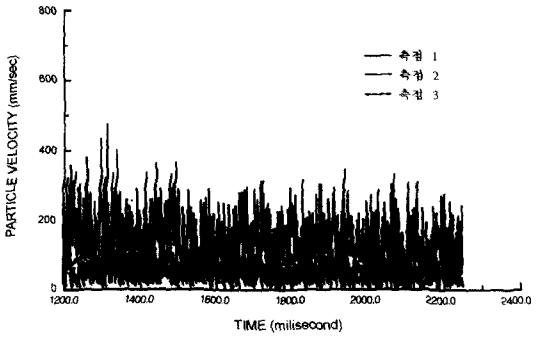

Fig. 10. Particle velocity with elapse of time (point 1, 2 & 3).

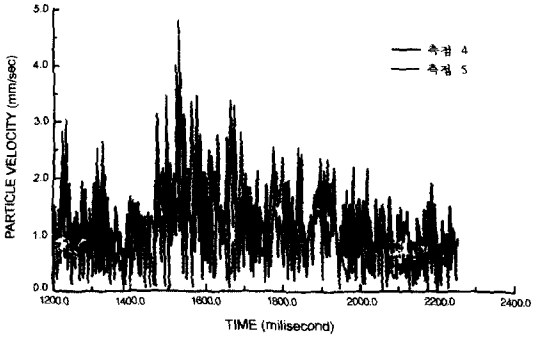

Fig. 11. Particle velocity with elapse of time (point 4 & 5)

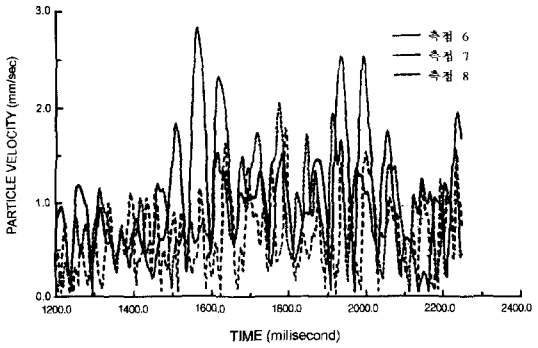

Fig. 12. Particle velocity with elapse of time (point 6, 7 & 8).

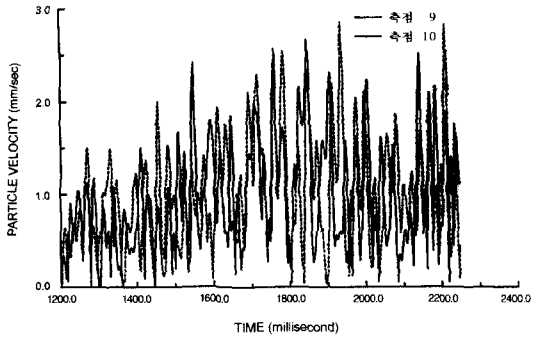

Fig. 13. Particle velocity with elapse of time (point 9 & 10).

로 최대값을 보이며, 7번 측점에서는 1.78초(step 15이후)에서 약 2.1 mm/sec, 8번 측점의 경우 1.8초(step 15 이후)에서 1.8 mm/sec 정도의 값을 가진다(Table 4).

발파하중의 시간에 따른 방조제 저면부의 각 측점에서의 최대 변위는 다음 Table 5에 나타나있다.

제 6번 측점에서는 발파가 종료된 이후인 초기발파로부터 약 1.98초 경과후 0.08 mm 정도의 변위가 X 방향으로 발생되며, 제 7번 측점에서는 1.75초에서 0.05 mm 를 최대값으로 하는 X 방향의 변위가 발생한다. 또한 제 8번 측점에서는 0.03 mm 가량의 X 방향 최대변위가 1.75초에서 발생함을 알 수 있다. 또한 이에 따른 Y 방향의 변위는 제 6번 측점의 경우 0.08 mm, 제 7번 측점의 경우 0.04 mm, 제 8번에서는 0.03 mm 정도가 각각 1.97초, 1.95초, 1.97초에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한 시간에 따른 방조제 상부의 X 방향의 변위는 제 9번 측점에서 0.04 mm, 제 10번 측점의 경우 0.06 mm의 변위가 모두 1.75초에서 발생됨을 알 수 있고, Y 방향의 변위는 제 9번 측점에서는 1.9초, 제 10번에서는 1.96초에서 모두 0.04 mm 정도의 변위를 가지고 있으나 방조제 상부의 양단은 그 거동이 상당히 유사함을 알 수 있다.

시간에 따른 변위의 변화는 방조제의 안정성에 큰 영향을 미치게 되므로 각 측점에서 시간에 따라 발생하는 최대변위의 값은 중요한 의미를 가진다고 하겠다.

발파진동에 따른 방조제의 안정성을 평가하기 위해 Fig. 3을 사용하면, 본 연구의 해석대상 구조는 주파수(Frequency)가 7.55 cycle/sec 정도의 값을 가지며 모든 측점에서의 X 방향 최대변위는 0.08 mm이고 Y 방향 역시 0.08 mm의 값을 가진다. 따라서, 이 해석결과는 구조물의 허용한계에 못 미치는 낮은 값을 가지므로, 터널발파가 방조제에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단되어 방조제는 상당한 안정성을 가짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구를 수행함에 있어 이 해석대상 지역내의 발파하중의 크기와 폭발물의 크기가 달라지더라도 동일한 방법으로부터 대상지역 내의 구조물의 안정성을

Table 4. Peak particle velocity at bottom of embankment.

Point	Location	Peak particle velocity	Time	Blast step	Remarks
6	Backside	2.8 mm/sec	1.57 sec	After 13	
7	Middle	2.1 mm/sec	1.78 sec	After 15	within 2.25 sec
8	Front	1.8 mm/sec	1.8 sec	After 15	

Table 5. Displacement at each measuring point of embankment.

Point	Location	X-displacement (mm)	Time (sec)	Y-displacement (mm)	Time (sec)	Remarks
6	Backside	0.08	1.98	0.08	1.97	
7	Middle	0.05	1.75	0.04	1.95	
8	Front	0.03	1.75	0.03	1.97	within 2.25sec
9	Top(Backside)	0.04	1.75	0.04	1.9	
10	Top(Front)	0.06	1.75	0.04	1.96	

평가할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 발파시의 충격하중을 동역학적으로 모형화하고, 발파에 따른 지하구조체에 발생되는 구조거동을 개별요소에 의하여 수치해석하였다. 이를 위하여 남양만 하부에 위치한 지하저장시설의 건설을 위한 발파 시뮬레이션을 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 발파에 따른 충격하중을 폭약의 비에너지, 장약밀도, 천공의 완충비와 장약량에 따라 정량화하는 방법을 제안함과 동시에, 발파에 따른 동적인 구조거동을 개별요소해석을 통하여 모형화할 수 있음을 보였고, 그 결과를 매체 내의 입자속도 및 변위로 표시함으로써 구조체의 안정성을 검토할 수 있음을 보였다.

2) 개별요소해석을 이용한 동적 해석결과, 해석 대상지역에서의 발파작업시 터널로부터 약 140 m 떨어진 방조제의 가장 가까운 지점에서 해석된 진동의 최대변위와 최대 입자속도는 각각 0.08 mm와 2.8 mm/sec로 나타났고, 이 방조제의 고유진동수는 7.55 cycle/sec로 해석되었다.

3) 남양만 매립지역에 위치한 지하저장시설의 건설을 위한 발파작업시 발생되는 발파하중에 대해 방조제는 주어진 하중에 대해서는 상당한 안정성을 가지고 있음을 알 수 있다.

4) 본 연구결과 다양한 발파조건에 따라 입자속도의 시간 이력, 응력의 이력, 구조물의 안정성 등을 해석하고 평가하는데 있어서 개별요소해석을 이용한 동적해석이 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. User's Manual, 1992, Universal Distinct Element Code(UDEC) Version 1.82, Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group.
2. 김재극, 1986, 산업화약과 발파공학, 서울대학교출판부, 서울, 408p.
3. Bergmann, O.R., Riggle J.W., and Wu F.C., 1973, Model Rock Blasting - Effect of Explosives Properties and Other Variables on Blasting Results, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 10., 585-612.
4. Histake, M., Sakurai, S., Ito, T., and Kobayashi, Y., 1983, Analytical Contribution to Tunnel Behaviour Caused by Blasting, Proceedings of 5th. International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, E191-E194.
5. 양형식, 1992, 발파진동학, 구미서관, 서울.
6. Cundall, P.A. and Hart, R.D., 1985, Development of Generalized 2-D and 3-D Distinct Element Program for Jointed Rock, Itasca Consulting Group.
7. Cundall, P.A., 1971, A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock System, Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Vol. 1, paper No. II-8, France.

박 정 주

1965년 부산대학교 공과대학 토목공학과, 공학사
1993년 연세대학교 산업대학원 토목공학과, 공학석사
2001년 울산대학교 공과대학원 지구환경시스템공학부 박사과정 수료
Tel: 02-2222-4030
E-mail: jjpark2000@hanmail.net
현재 다산 이엔씨 부회장 및 울산대학교 지구환경시스템공학부 겸임교수

박 의 섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부, 공학박사
Tel: 02-880-8701(518)
E-mail: espark@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공학연구소 특별연구원