

불연속암반의 공학적 특성에 따른 원형수직구 편하중에 관한 연구

신영완^{1*}, 문경선², 주경원³

A study on asymmetric load on circular shaft due to engineering characteristics of discontinuous rock masses

Young-Wan Shin, Kyoung-Sun Moon, Kyoung-Won Joo

Abstract In the case of a circular shaft, it is expected that asymmetric loads should apply on the surface rather than symmetric loads due to geographical factors and the non-homogeneity of the jointed rock masses. In this study, discontinuous numerical analysis was carried in order to analyze the characteristics of asymmetric load distribution on the wall of the circular shaft due to anisotropy caused by heterogeneity of rock masses affected by the discontinuities like as a joint. And it was also analyzed that the effect of the mechanical properties varied with the rock mass rating and horizontal stress with depth had influence in the asymmetric load on the wall of the shaft. In the case of considering the effect of the joint as variable, asymmetric load ratio (R_p), which was defined as the ratio of the load subtracted minimum from maximum to minimum, was below 25% in the hard rock. As regarding the variation of the rock mass rating with depth as variable, the value of R_p was below than 25% in the hard rock, and the value between 30% and 40% in the soft rock. On the other hand, the R_p of fractures rock was between 45~50% which value was much higher than that in better rock mass rating.

Keywords: Circular shaft, jointed rock mass, heterogeneity, anisotropy, asymmetric load

요 지 원형수직구의 경우 지형적인 요인과 지반의 불균질성으로 인하여 등분포의 대칭하중이 작용하는 경우보다는 비대칭의 편하중이 작용하는 경우가 많을 것으로 예상된다. 지금까지 지반조건에 따른 원형수직구 벽체에 작용하는 편하중 산정을 위한 정량적인 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 불연속암반의 불균질성을 고려한 불연속체 해석을 통하여 이방성 거동에 따른 원형수직구 벽체에 작용하는 편하중 분포특성을 분석하였다. 또한, 깊이에 따른 암반등급 및 초기응력이 편하중에 미치는 영향을 분석하였다. 검토 결과 절리특성에 따라 양호한 경암반에서는 25%이하의 편하중이 발생하는 것으로 분석되었으며, 수직구 깊이에 따른 암반등급의 영향을 검토한 결과 경암의 편하중비는 25%이하, 연암에서는 30%~40%로 나타났다. 또한, 풍화가 진행된 파쇄연암의 편하중비는 40%~50%로 나타났다. 깊이 100 m의 경암반에 대하여 초기응력을 나타내는 측압계수(K_0)를 변수로 한 불연속체 해석을 수행하였다. 해석 결과 측압계수가 2.0보다 작은 경우의 편하중비는 약 25%의 값을 나타내나 측압계수가 2.0보다 큰 경우에는 편하중비가 점차 증가하는 경향을 나타냈다.

주요어: 원형수직구, 불연속암반, 불균질성, 이방성, 편하중

1. 서 론

하저 또는 해저에 장대터널 건설시 환기용 또는 공사용 수직구의 건설이 필수적이다. 또한, 도심지에 터널을 시공하기 위해 수평의 본 터널에 접근하기 위한 수직구, 지하 양수발전소나 유류비축기지의 수직구, 또는 도로나 철도 등 교통터널의 환기용 수직구 등 수직구 건설은 필수적이라 할 수 있다. 이러한 수직구는 공간이용의 비효율성에도 불구하고 직사각형 모양보다는 원형단면으

로 설계 및 시공되고 있다. 이는 원형단면에서 발생하는 아칭효과로 인하여 지중응력의 대부분을 지반자체가 지지하고 벽체에 작용하는 하중은 훨씬 감소하는 장점이 있기 때문이다(Szechy, 1966).

원형수직구의 경우 지형적인 요인과 지반의 불균질성으로 인하여 등분포의 대칭하중이 작용하는 경우보다는 비대칭의 편하중이 작용하는 경우가 많을 것으로 예상된다. 일본의 경우 발주처마다 상이하지만 토사지반에서 주동토압이나 정지토압의 5~20%의 편하중을 고려하도록 규정하고 있다(岩波基, 2003). 한국터널공학회에서 2007년 개정된 국내의 터널설계기준에서도 “지질구조의 급격한 변화나 지형 및 지반 특성상 현저하게 비대칭인 경우 편하중이 작용하는 것으로 설계하여야

¹정회원, (주)하경엔지니어링 터널지반부 상무

²정회원, (주)하경엔지니어링 터널지반부 차장

³정회원, (주)하경엔지니어링 터널지반부 대리

*교신저자: 신영완 (ywshin@hakyong.net)

한다.”라고 규정하고 있다.

Y.S. Oh 등(2004)은 암반내 불연속면의 방향성을 매개변수로 한 실내실험과 측압계수를 매개변수로 한 불연속체 해석을 통하여 원형공동의 비대칭 변형특성에 대하여 연구하였다. Maghous S 등(2008)은 불연속면의 강도특성과 방향성을 고려한 3차원 구성방정식을 개발하여 터널의 변형특성에 대하여 분석하였다. E. Pan 등(2001), F. Tonon 등(2003)은 불연속면의 특성으로 인한 터널의 응력-변형거동에 대하여 수치해석적 방법을 이용하여 분석하였으며, M. Yasar Kaltakci(1996)는 이론적인 방법을 이용하여 불연속면의 방향성이 원형공동의 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 신영완 등(2008)은 현장계측을 통하여 원형수직구에 편측변위 및 편하중이 작용함을 확인하였다. 이 밖에도 많은 연구자들에 의해 암반 불연속면의 영향에 의한 이방성 거동에 관한 연구가 수행되었다. 그러나, 중력방향과 수직방향인 원형수직구 단면설계를 위한 암반의 불연속면의 공학적 특성의 영향으로 인한 비대칭하중의 정량적인 산정방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 실제 현장에서 조사된 절리특성을 고려하여 원형수직구에 대한 불연속체 해석을 수행하였으며, 절리의 영향을 받는 암반지반에서 절리특성에 따른 수직구에 작용하는 편하중에 대한 정량적인 연구를 수행하였다. 추가적으로 깊이에 따른 암반등급과 초기응력이 편하중에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연구대상 절리조건 선정

일반적으로 지중에 설치되는 수직구는 상대적으로 깊이가 얇은 상부 토사 또는 풍화암층을 제외하면, 설치심도의 상당부분이 암반구간에 분포한다. 따라서, 암반의 강도 및 변형특성에 지배적인 영향요소로 작용하는 절리특성을 반영한 수직구 벽체에 작용하는 하중의 분포 특성 분석을 위하여 암반의 강도 및 변형특성 외에 초기응력 및 깊이 등의 대표적인 영향요소를 변수로 하여 불연속체 해석을 수행하였다.

절리의 특성 중 편하중에 영향을 미치는 공학적 특성은 구조적 특성과 역학적 특성 등 매우 다양하지만, 구조적 특성 중 절리의 주향 및 경사 등의 방향성과 절리의 간격의 영향이 가장 클 것이다. 따라서, 본 연구에서

는 다양한 조건의 암반등급, 절리의 주향 및 간격, 절리의 역학적 특성을 고려한 2차원 불연속체 해석을 수행하였다. 이차원 해석의 특성상 절리의 경사는 고려가 곤란하여 검토에서 제외하였으며 상대적으로 그 영향은 크지 않을 것으로 예상된다.

한편, 실제 존재할 수 있는 절리의 조건은 매우 다양하다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1 및 표 1과 같이 실제 현장에서 지반조사를 통하여 얻어진 다섯 가지의 절리특성에 대하여 수치해석을 수행하였다. 절리특성은 지표지질조사, 시추조사, 시추공내 영상촬영, 절리면 전단시험 등을 통하여 조사되었다.

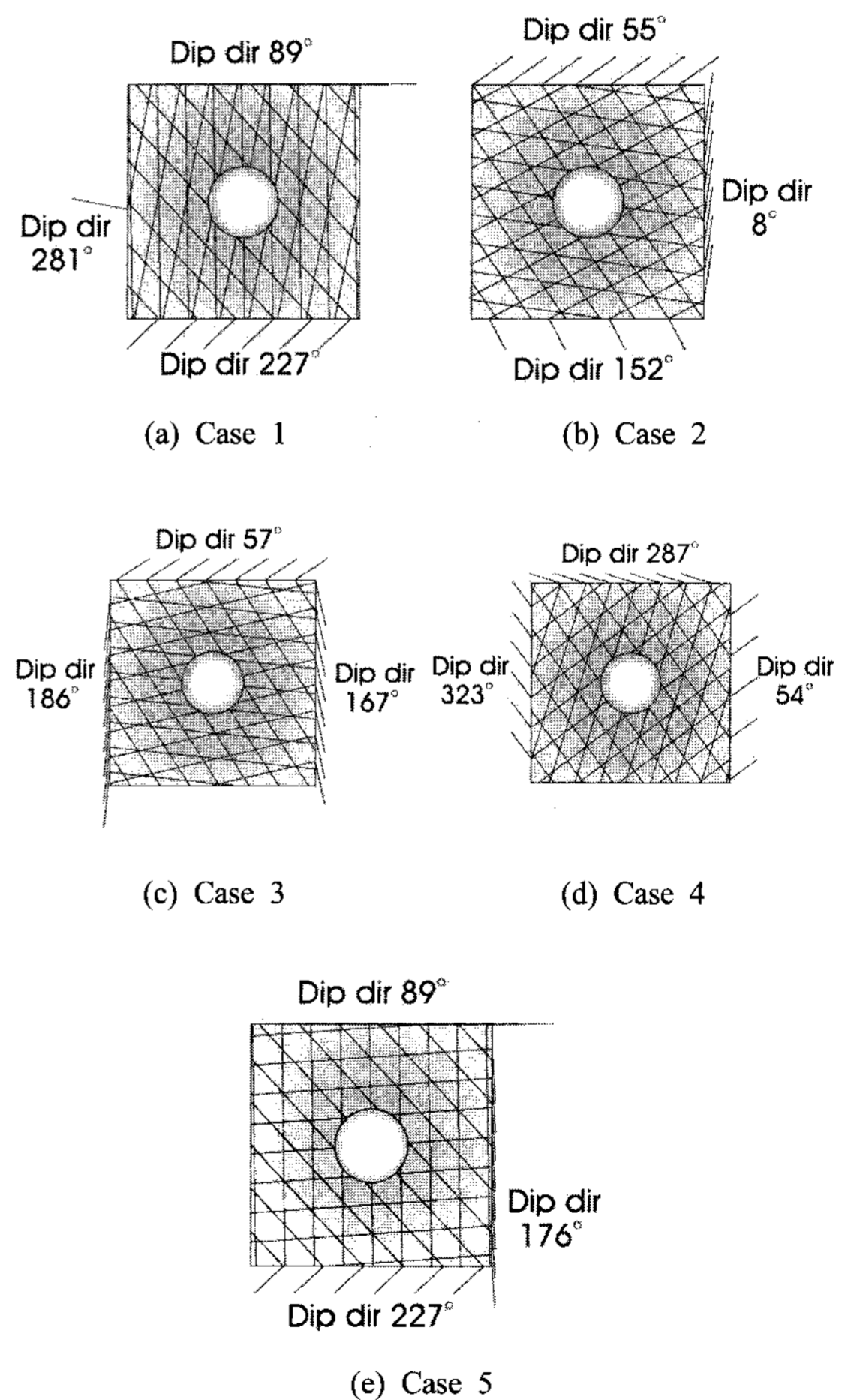


그림 1. 연구대상 절리 조건

표 1. 절리면 특성값

구 분	Set	Dip/ Dip dir.	JRC	JCS (MPa)	σ_c (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각(°)		Ks (MPa/mm)	Kn (MPa/mm)
							최대	잔류		
CASE 1	set 1	48/089	7.00	38.90	126.0	0.021	34.5	32.1	5.27	20.23
	set 2	55/281	6.00	41.20					5.06	19.54
	set 3	35/227	7.00	39.50					5.65	30.22
CASE 2	set 1	90/152	7.50	43.78	81.9	0.013	33.3	31.0	0.44	10.66
	set 2	87/055	7.60	52.60					0.45	12.61
	set 3	77/108	12.00	33.12					0.56	15.65
CASE 3	set 1	12/186	3.00	13.70	132.0	31.000	31.2	29.0	0.44	39.27
	set 2	11/057	3.00	13.20	207.0				0.42	48.36
	set 3	60/167	4.00	13.30	219.0				0.45	31.19
CASE 4	set 1	80/287	11.65	17.50	104.3	0.027	34.4	32.0	0.66	13.2
	set 2	87/54								
	set 3	85/323								
CASE 5	set 1	74/089	9.69	86.28	99.9	0.047	32.0	29.8	1.73	38.65
	set 2	67/227	8.34	80.40					1.58	35.06
	set 3	28/176	8.40	65.36					1.54	26.24

3. 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 불연속 암반의 이방성 거동에 주로 영향을 미치는 절리특성 외에 초기응력 및 깊이에 따른 암반등급의 영향을 분석하고자 하였다. 절리특성은 앞에서 기술한 바와 같이 국내에서 수행된 지반조사 결과 중 절리의 방향성 및 역학적 특성 값의 신뢰도가 높은 자료를 선정하여 해석에 적용하였다. 이 중에서 해석결과의 대표성을 갖는 CASE를 대상으로 초기응력 및 깊이에 따른 암반등급별 영향검토를 수행하였다.

3.1 절리 특성의 영향 검토 조건

절리면의 분포특성 및 역학적 특성값은 각각의 조사 및 시험을 통하여 획득된 결과를 적용하였으며, 암반 특성값은 각 과업의 암반등급별 특성값을 적용하였다. 연구 대상으로 하는 수직구는 깊이 100 m의 응력조건에서 축압계수는 1.0이고 암반등급은 I등급인 조건을 대상으로 하였다. 수직구 3차원 거동의 2차원해석을 위한 하중분담률은 시공순서에 따라 굴착-연한숏크리트 및 록볼트-굳은숏크리트의 단계로 나뉘어 60%-20%-20%를 적용하였다.

표 2. 수직구 깊이에 따른 암반등급의 영향 검토 조건

구 분	심도(m)	암반등급
CASE 6	20	암반등급 IV(파쇄연암)
CASE 7	40	암반등급 III(연암)
CASE 8	60	
CASE 9	80	암반등급 II(경암)
CASE 10	100	암반등급 I(경암)
CASE 11	150	

3.2 수직구 깊이에 따른 암반등급의 영향 검토 조건

일반적으로 지표로부터 깊어질수록 암반의 역학적 특성은 양호해진다. 절리면의 역학적 특성이 동일하더라도 주변 암석의 역학적 특성 및 초기지중응력조건에 따라 다른 거동을 보일 수 있으므로 이에 대한 영향을 검토하고자 하였다. 초기응력을 고려하기 위한 축압계수는 1.0을, 암반등급 I 및 II등급의 하중분담률은 60%-20%-20%를 적용하였다. 암반등급 III등급의 하중분담률은 50%-20%-30%를, 암반등급 IV등급의 하중분담률은 40%-30%-30%를 적용하였다.

3.3 초기응력의 영향 검토 조건

동일한 절리의 방향성 및 절리면의 역학적 특성을 갖는 암반이더라도 초기응력의 대소에 따라 그 거동이 다를 것이다. 따라서, 이러한 초기응력의 영향 검토를 위해 수직구 깊이 100 m, 암반등급은 I등급인 조건에 대하여 하중분담률은 60%-20%-20%를 적용하였다. 초기응력 조건을 고려하기 위한 측압계수는 지금까지 국내에서 수행된 지반조사결과에 의한 심도별 측압계수 값을 적용하였다(표 3).

3.4 수치해석 모델

본 연구에서 대상으로 한 수직구 단면은 그림 2와 같이 일반적으로 지하구조물 건설시 설계 및 시공되는 수직구 단면을 적용하였다. 터널 직경은 10 m, 슝크리트 두께는 160 mm, 록볼트 길이는 4.0 m, 록볼트 간격은 종방향 2.0 m와 횡방향 1.2 m로 고려하였다.

암반내 절리특성이 수직구의 변형 및 응력변화에 반영되도록 절리 간격, 연장성 및 충전상태 등은 심도에

표 3. 초기응력(K₀)의 영향 검토 조건

구 분	측압계수
CASE 12	1.0
CASE 13	1.5
CASE 14	2.0
CASE 15	2.5
CASE 16	3.0

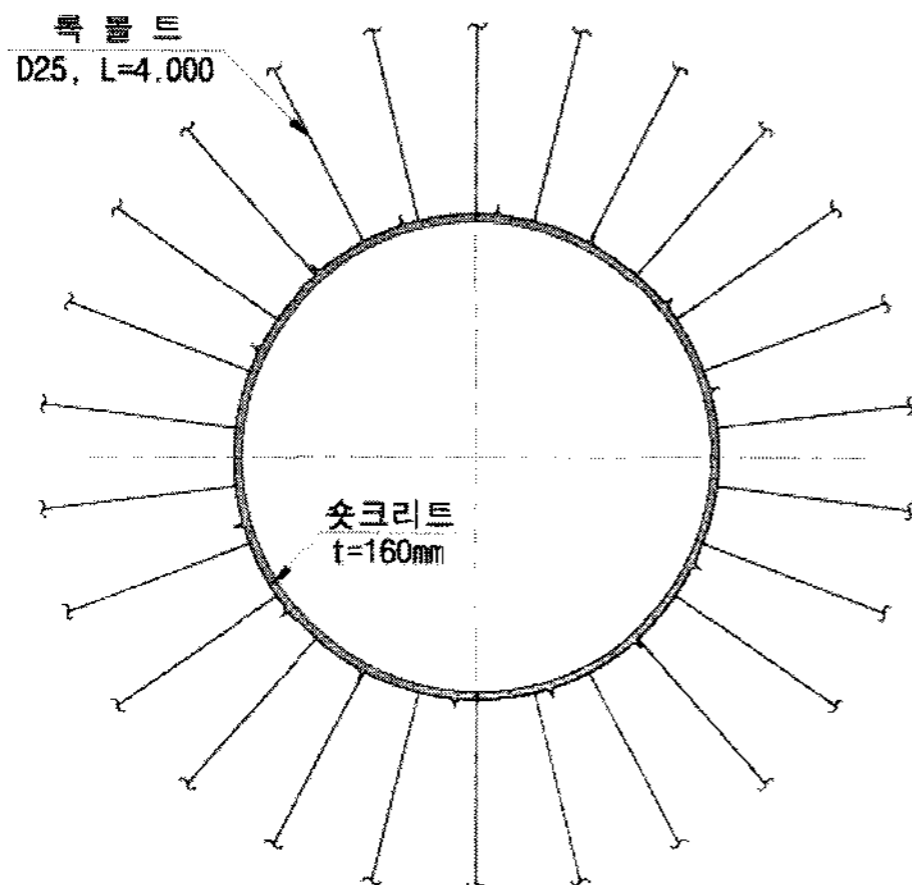


그림 2. 대상 수직구 및 지보패턴

따라 균일한 것으로 가정하였으며, 수직구의 반경방향으로 작용하는 암반의 측압은 해석외부 경계에 균등하중으로 작용하여 측압조건을 모사하였다.

또한, 암석블록의 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고 절리의 구성모델은 Barton-Bandis 모델을 적용하여 각 조건별 불연속체 해석을 수행하여 수직구 라이닝의 각 측점에 작용하는 하중을 산정하였다. 불연속체해석 프로그램은 UDEC(Ver. 4.0)을 사용하였다.

그림 3과 같이 터널 깊이 및 측압계수를 고려하여 초기응력조건을 모사하였고, 그림 4와 같이 수치해석의 경계조건에 의한 구속효과를 배제하기 위하여 터널 좌·우 측 및 상·하부 해석영역은 4D이상 모델링하여 적용하였다. 그림 5는 지반조사에 의해 얻어진 절리특성을 고려한 해석모델을 나타내고 있다.

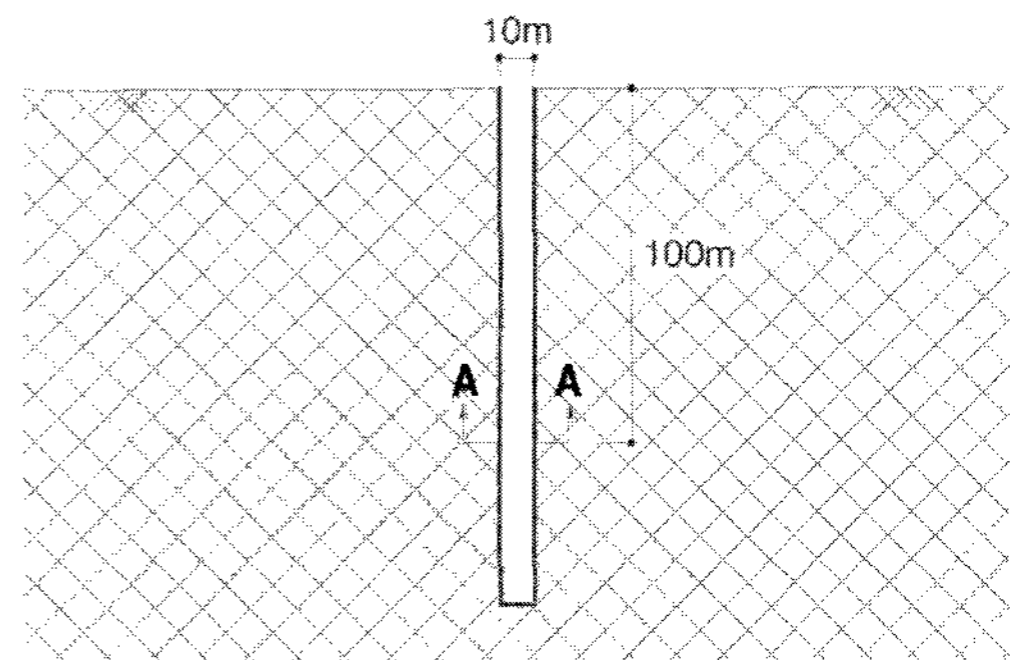


그림 3. 수치해석 깊이 조건

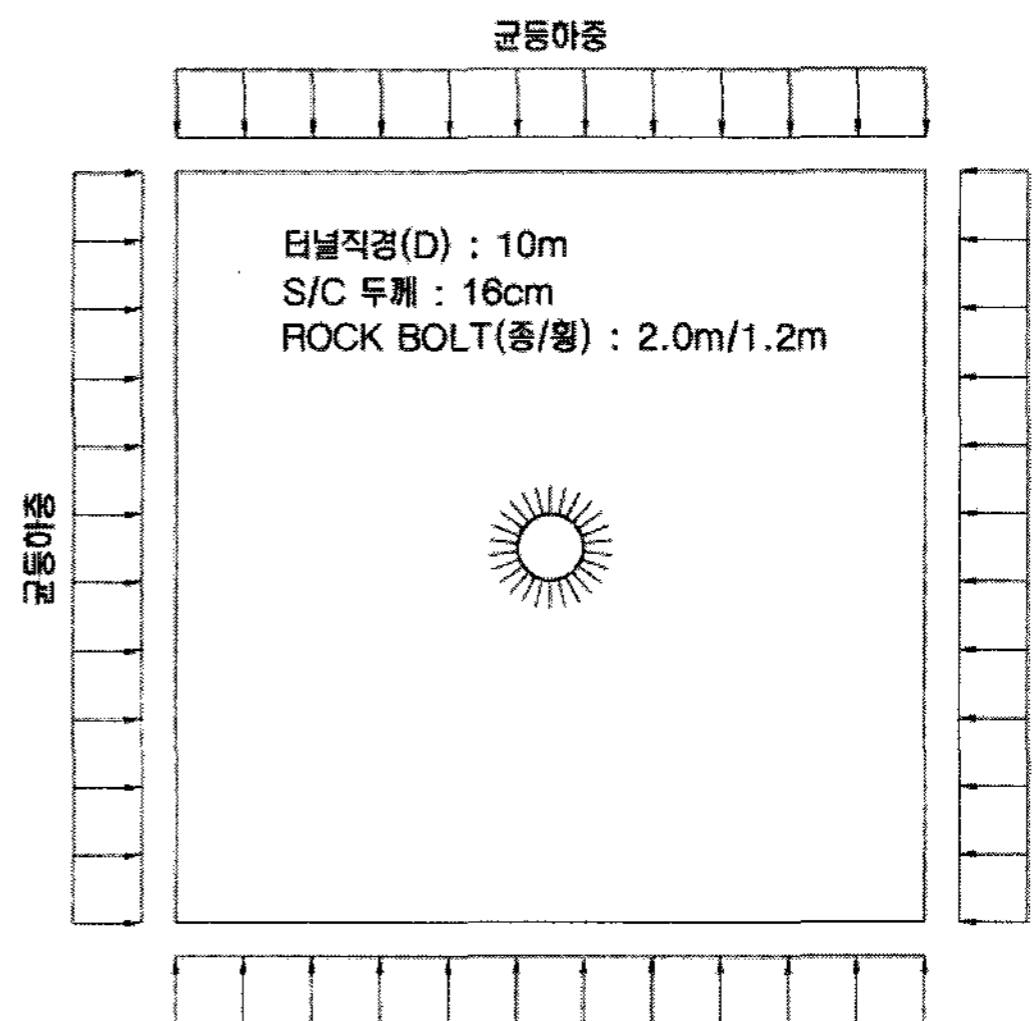
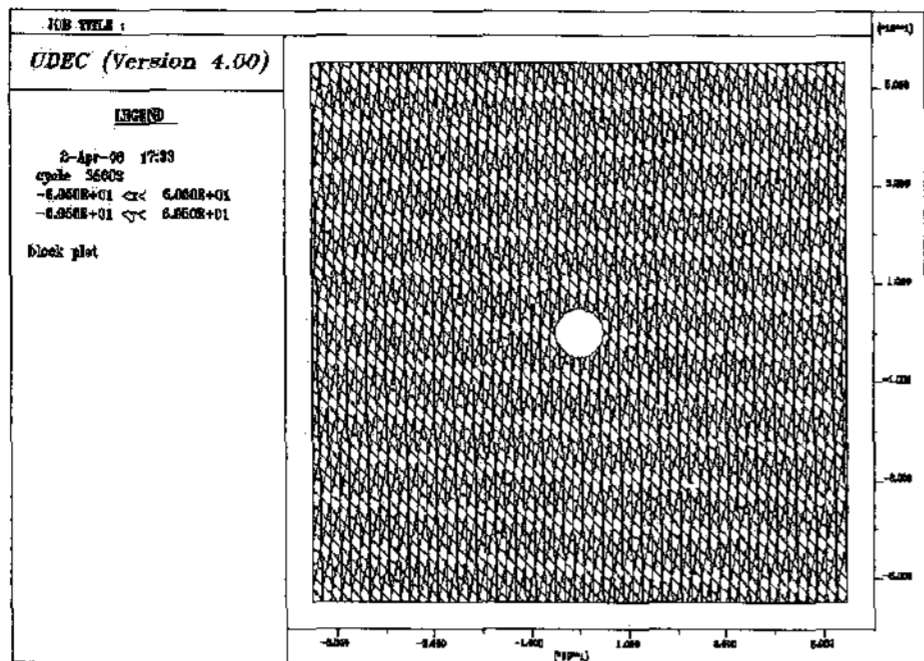
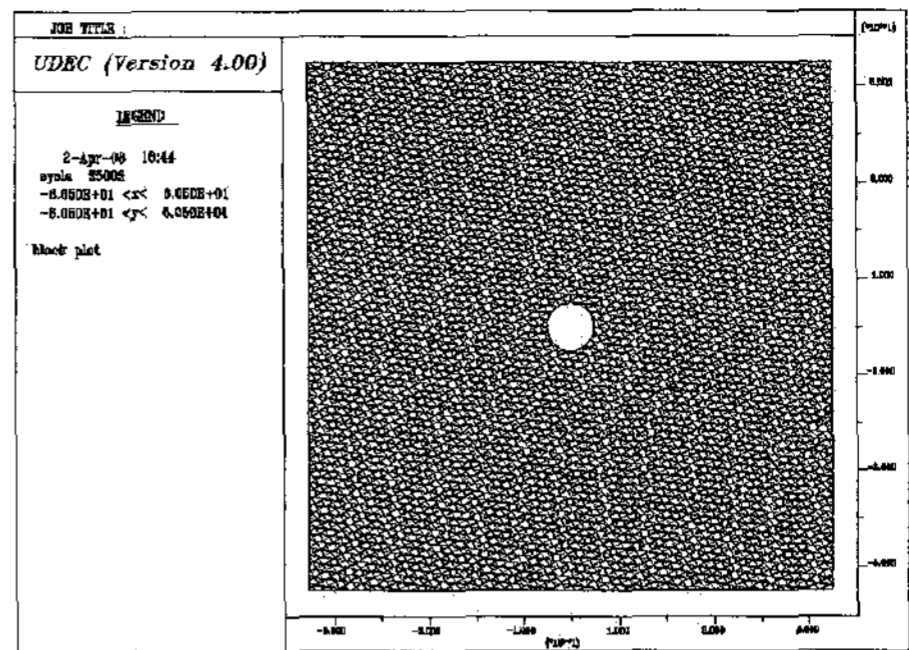


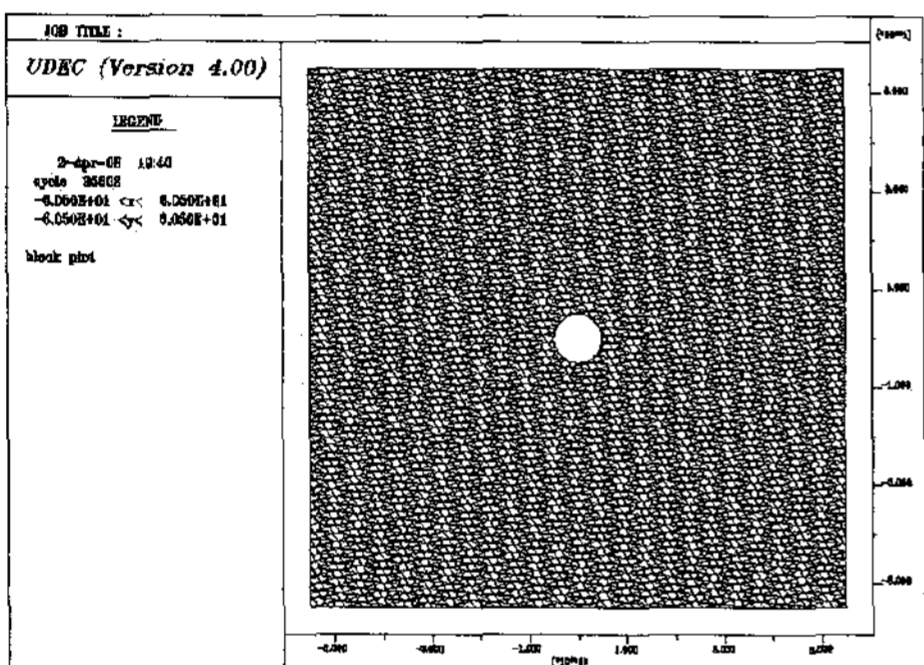
그림 4. 수치해석 하중조건(단면 A-A)



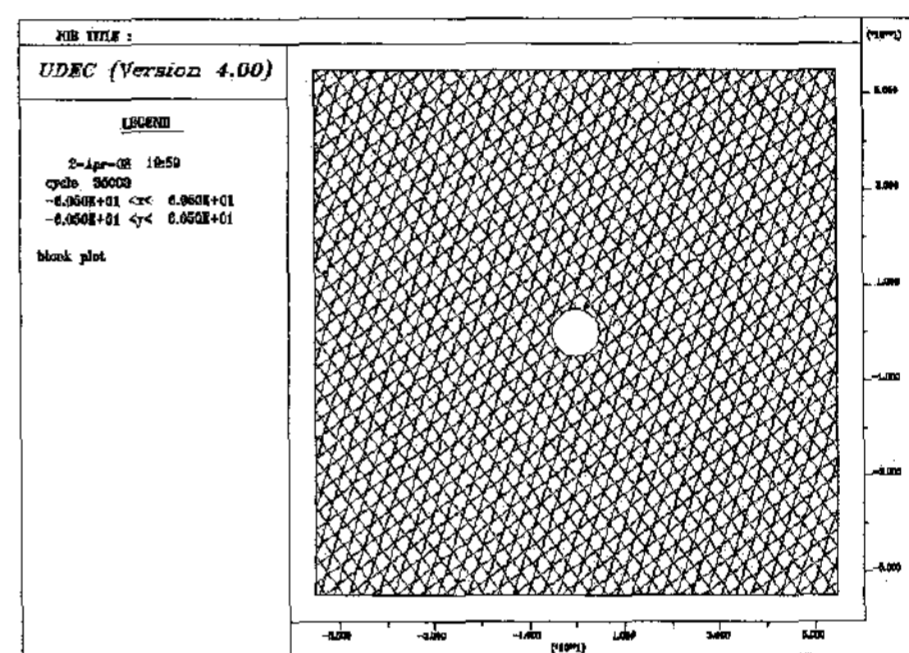
(a) Case 1(절리연장 20 m, 절리간격 2 m)



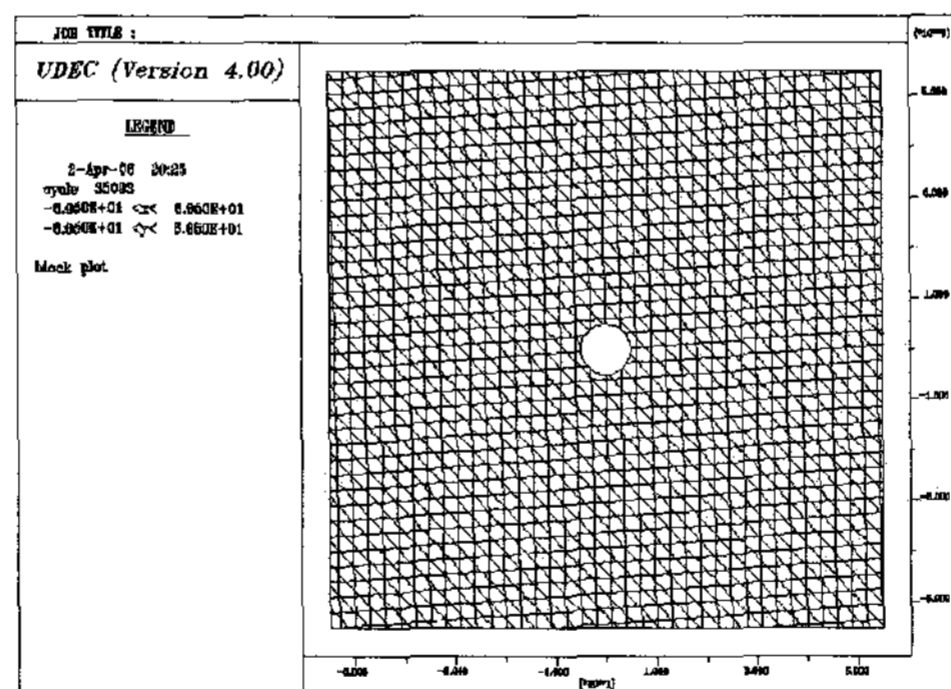
(b) Case 2(절리연장 20 m, 절리간격 1.5 m)



(c) Case 3(절리연장 20 m, 절리간격 1.5 m)



(d) Case 4(절리연장 20 m, 절리간격 3.0 m)



(e) Case 5(절리연장 20 m, 절리간격 3.0 m)

그림 5. 절리특성별 해석모델

3.5 암반 및 지보재 특성값

수치해석을 위한 절리의 특성값 입력시 암반과 지보재의 특성값은 일반적인 값을 적용하였으며 표 4 및 표 5와 같다.

4. 해석 결과 및 분석

4.1 절리특성의 영향 분석

절리특성을 변수로 한 불연속체 해석을 수행하여 수직구 벽체에 작용하는 하중의 분포특성을 분석한 결과,

표 4. 암반 특성값

구 분	변형계수 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아송비 (v)
암반등급 I(경암)	24,000	27	4.0	45	0.20
암반등급 II(경암)	14,000	26	2.2	41	0.22
암반등급 III(연암)	5,500	25	0.9	38	0.26
암반등급 IV(파쇄연암)	1,200	23	0.3	33	0.27

표 5. 지보재 특성값

구 분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MPa)	포아송비	
숏크리트	연성	20.0	5,000	0.20
	강성	20.0	15,000	
록 볼트	78.5	210,000	-	

그림 6 및 표 6과 같이 편하중이 작용하는 것으로 검토되었다. 편하중에 영향을 미치는 공학적 특성은 절리의 방향성, 강도, 및 강성 등으로 다양하나 수치해석을 통한 검토 결과 절리의 방향성이 주 영향 인자인 것으로 판단된다. 즉, 그림 1과 그림 6을 비교하여 보면 두 개의 절리군이 만나는 방향으로 편하중이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

수직구 벽체에 작용하는 하중은 수직구 주변에 분포하는 암반내 절리의 방향성 및 변형특성에 의하여 편하중이 발생하는 것으로 판단된다. 절리특성의 영향분석을 위하여 편하중비의 개념을 도입하였다. 편하중비는 최소하중에 대한 최대하중과 최소하중의 차의 비율로 정의하였다. 각 검토조건별로 다른 절리특성에 따라 13.3%~33.4%(평균 19.9%)의 편하중이 발생한 것으로 분석되었다. 따라서, 수직구 벽체 설계시 수직구 주변 암반의 공학적인 강도특성이 양호한 경암반의 경우에는 25%이하의 편하중비 적용이 적정할 것으로 판단된다.

4.2 깊이에 따른 암반등급의 영향 분석

절리특성의 영향 검토결과 편하중비가 약 25%인 CASE 5의 절리조건에 대하여 깊이에 따른 암반등급 및 초기응력의 영향검토를 위한 수치해석을 수행하였다.

수직구 깊이에 따른 암반등급을 변수로 한 불연속체 해석을 수행하여 수직구 벽체에 작용하는 하중의 분포 특성을 분석한 결과 그림 7, 그림 8 및 표 7과 같은 경향

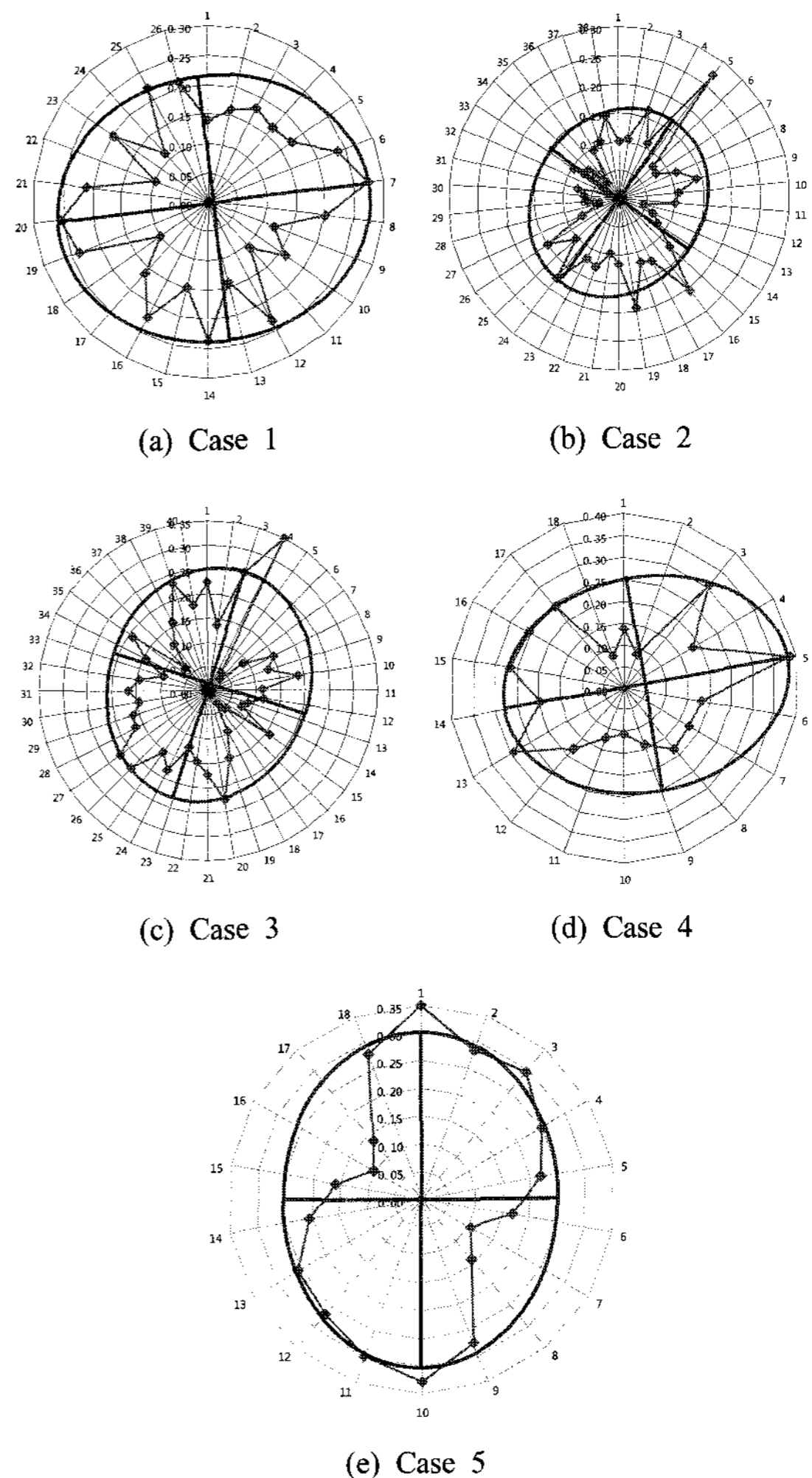


그림 6. 절리특성에 따른 수직구 작용하중 분포(MPa)

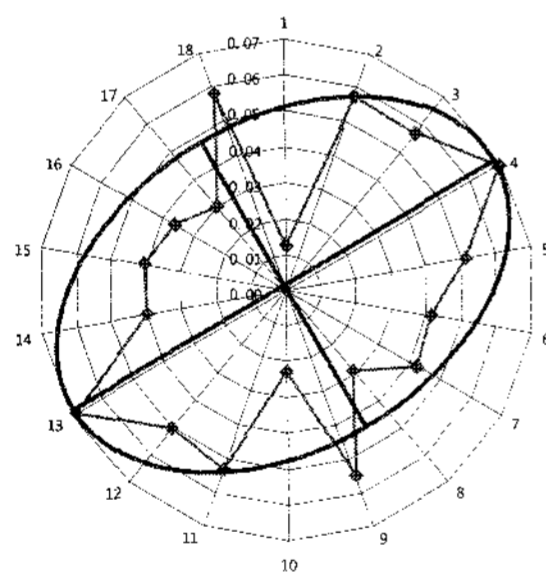
을 나타냈다. 수직구 깊이에 따른 암반등급별 편하중비 분석결과 경암에서는 25%이하, 연암에서는 30%~40%로 나타났으며, 풍화가 진행된 파쇄연암에서는 40%~

표 6. 절리특성에 의한 편하중비

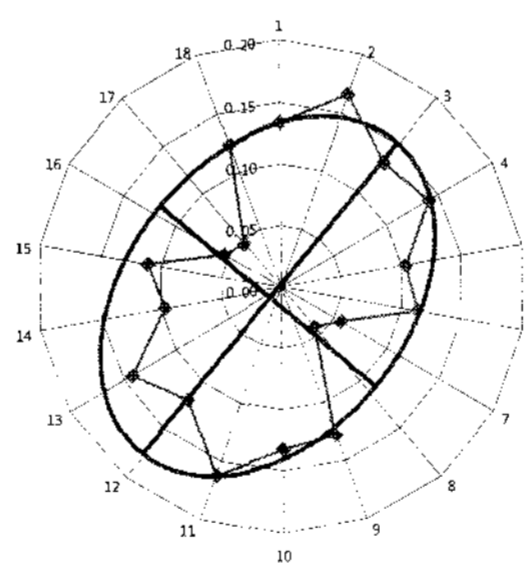
구분	깊이 (m)	편하중 $P_{max}-P_{min}$ (MPa)	측압계수 K_o	균등하중 P_{min} (MPa)	편하중비 $R_p = \left(\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{min}} \right)$ (%)
CASE 1	100	0.037	1.0	0.228	≈ 25
CASE 2		0.020		0.150	
CASE 3		0.032		0.210	
CASE 4		0.084		0.290	
CASE 5		0.053		0.250	

표 7. 깊이에 따른 암반등급별 편하중비

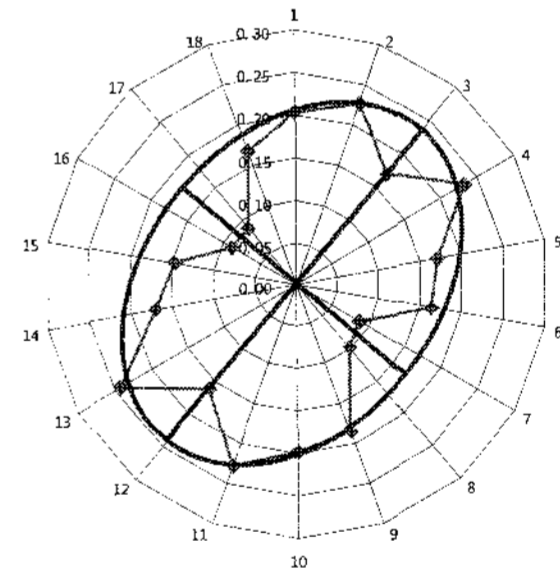
구분	깊이 (m)	암반 등급	편하중 $P_{max}-P_{min}$ (MPa)	측압계수 K_o	균등하중 P_{min} (MPa)	편하중비 $R_p = \left(\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{min}} \right)$ (%)
CASE 6	20	파쇄연암	0.022	1.0	0.047	46.8
CASE 7	40	연암	0.047		0.117	40.2
CASE 8	60		0.060		0.178	33.7
CASE 9	80	경암	0.055		0.190	28.9
CASE 10	100		0.053		0.250	21.2
CASE 11	150		0.082		0.393	20.9



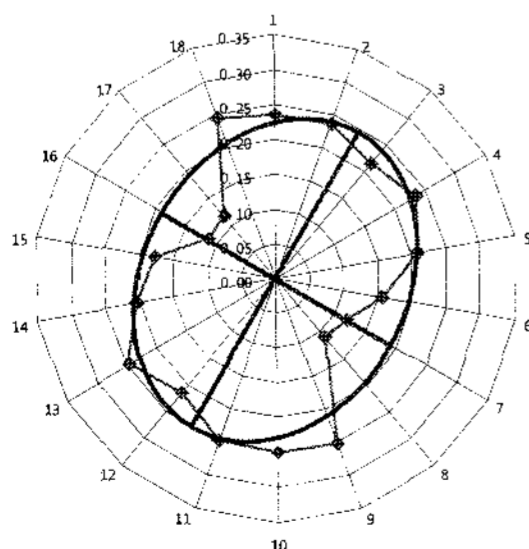
(a) Case 6



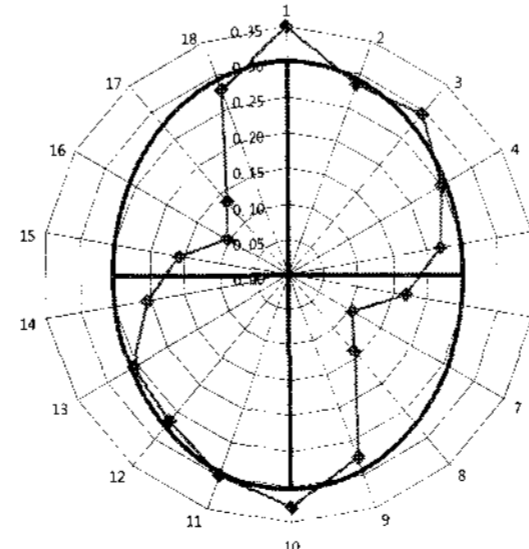
(b) Case 7



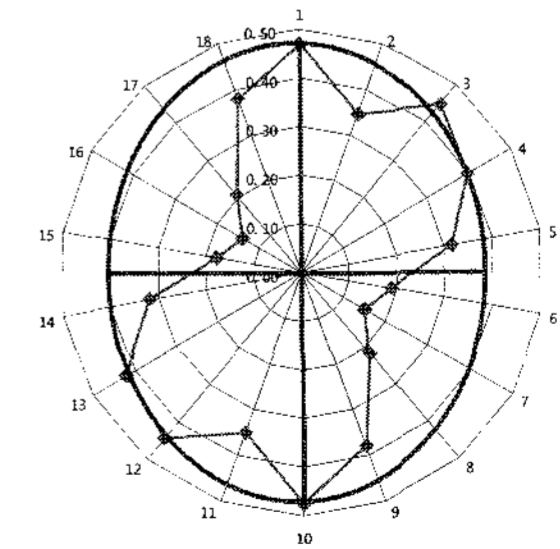
(c) Case 8



(d) Case 9



(e) Case 10



(f) Case 11

그림 7. 깊이에 따른 암반등급별 작용하중(MPa)

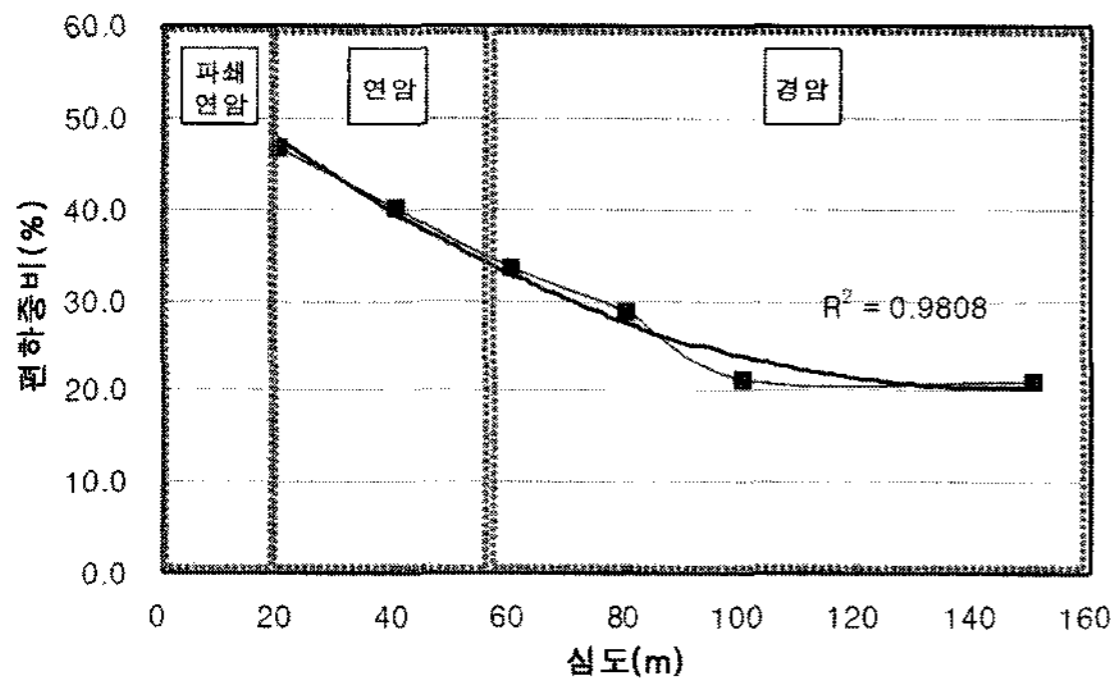


그림 8. 깊이에 따른 암반등급별 편하중비

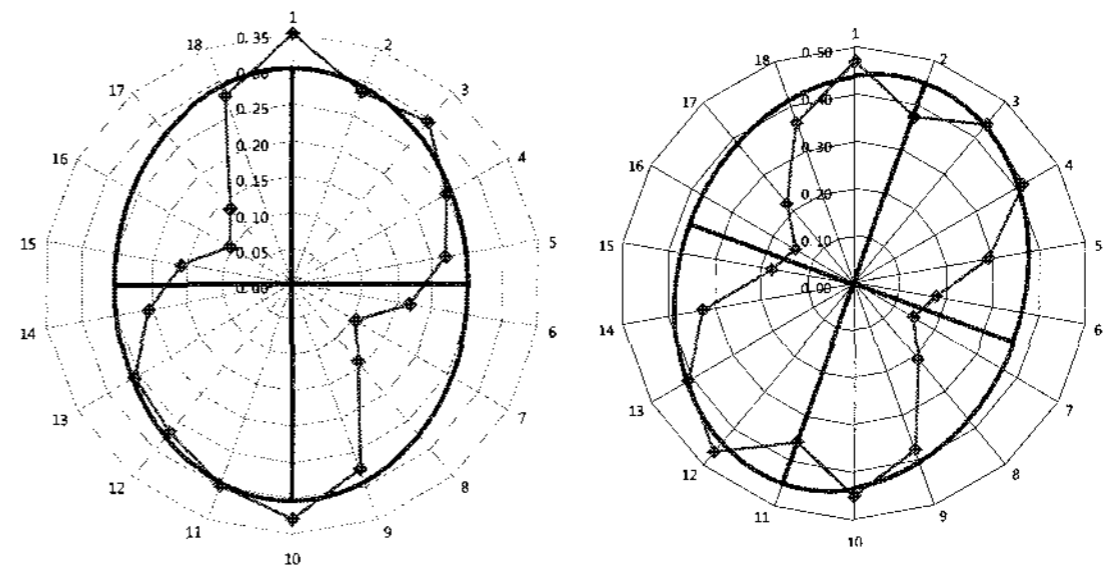
50%의 비교적 큰 편하중비가 나타났다.

이러한 결과는 동일한 절리 특성 및 초기응력 조건에 대한 해석결과로서 암반자체의 역학적 특성에 따라 변형성이 크고 강도특성이 작을수록 편하중의 영향이 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다.

4.3 초기응력의 영향 분석

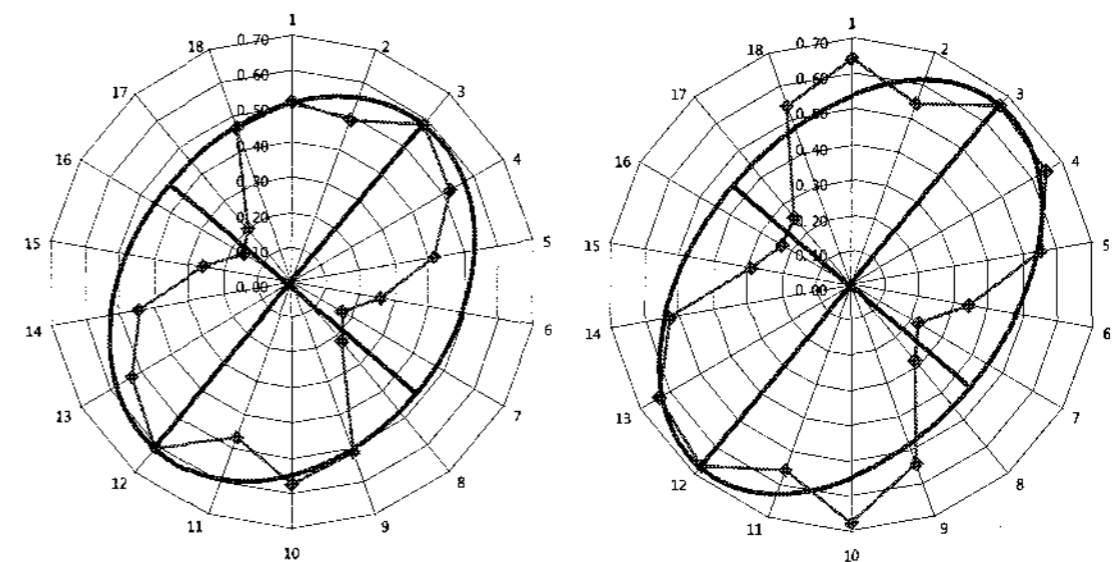
본 절에서는 3.3절과 같이 깊이 100 m의 경암반에 대하여 초기응력을 나타내는 측압계수를 변수로 한 불연속체 해석을 수행한 결과를 나타냈다. 수직구 벽체에 작용하는 하중을 분석한 결과, 그림 9, 그림 10, 그림 11 및 표 8과 같은 경향을 나타냈다.

수직구 주변 암반의 측압계수 변화에 따른 편하중비를 검토한 결과, 그림 10과 같이 측압계수가 2.0보다 작은 경우에는 편하중비는 약 25% 이하의 값을 나타내나 측압계수가 2.0보다 큰 경우에는 편하중비가 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 측압계수가 큰 경우 지중응



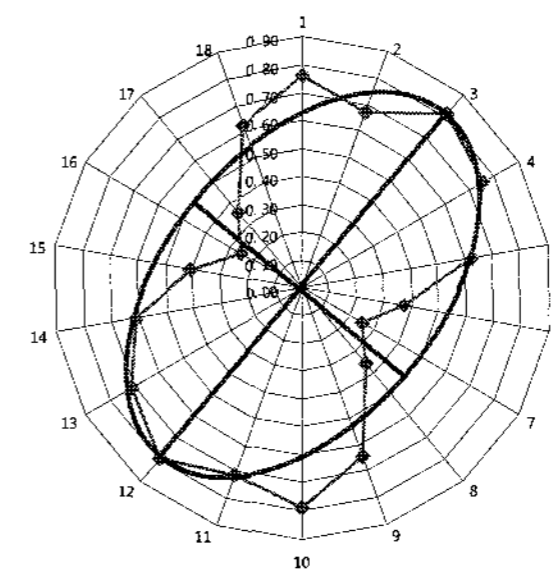
(a) Case 12

(b) Case 13



(c) Case 14

(d) Case 15



(e) Case 16

그림 9. 초기응력에 따른 수직구 편하중 분포(MPa)

표 8. 측압계수에 따른 편하중비

구 분	깊이 (m)	편하중 $P_{max}-P_{min}$ (MPa)	측압계수 K_0	균등하중 P_{min} (MPa)	편하중비 $R_p = \left(\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{min}} \right)$ (%)
CASE 12	100	0.053	1.0	0.250	21.2
CASE 13		0.083	1.5	0.368	22.6
CASE 14		0.109	2.0	0.485	22.5
CASE 15		0.215	2.5	0.450	47.8
CASE 16		0.302	3.0	0.500	60.4

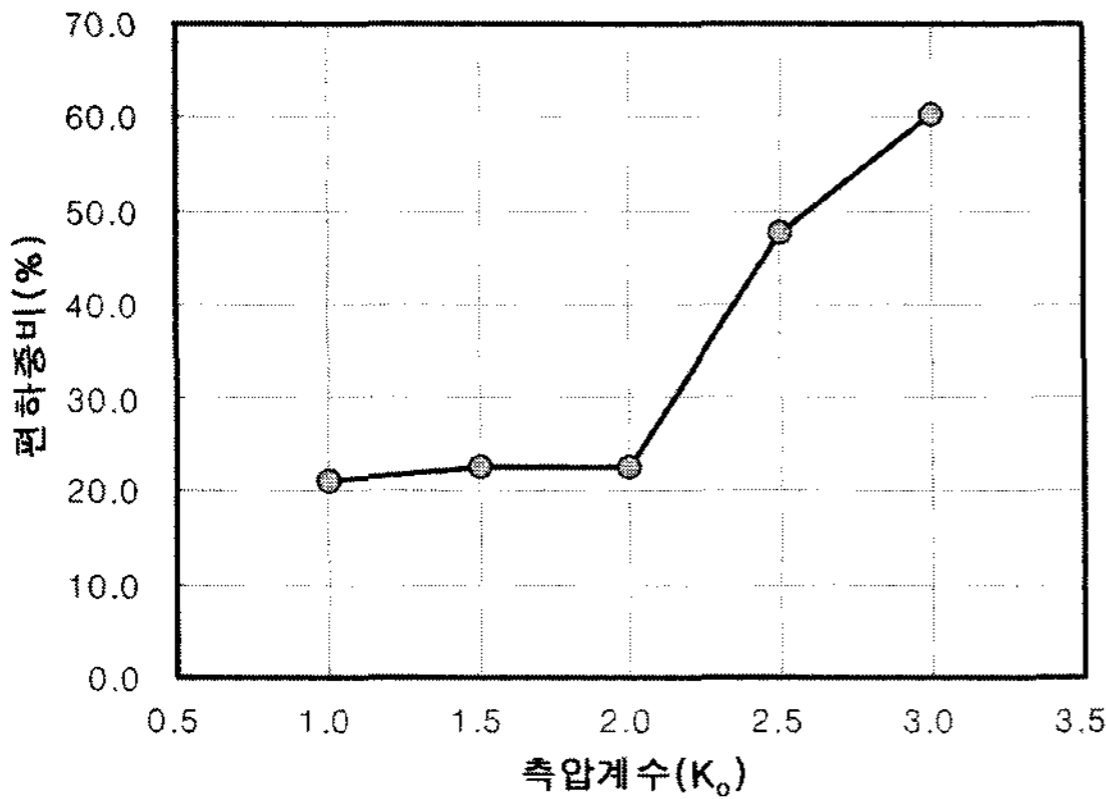


그림 10. 측압계수와 편하중비

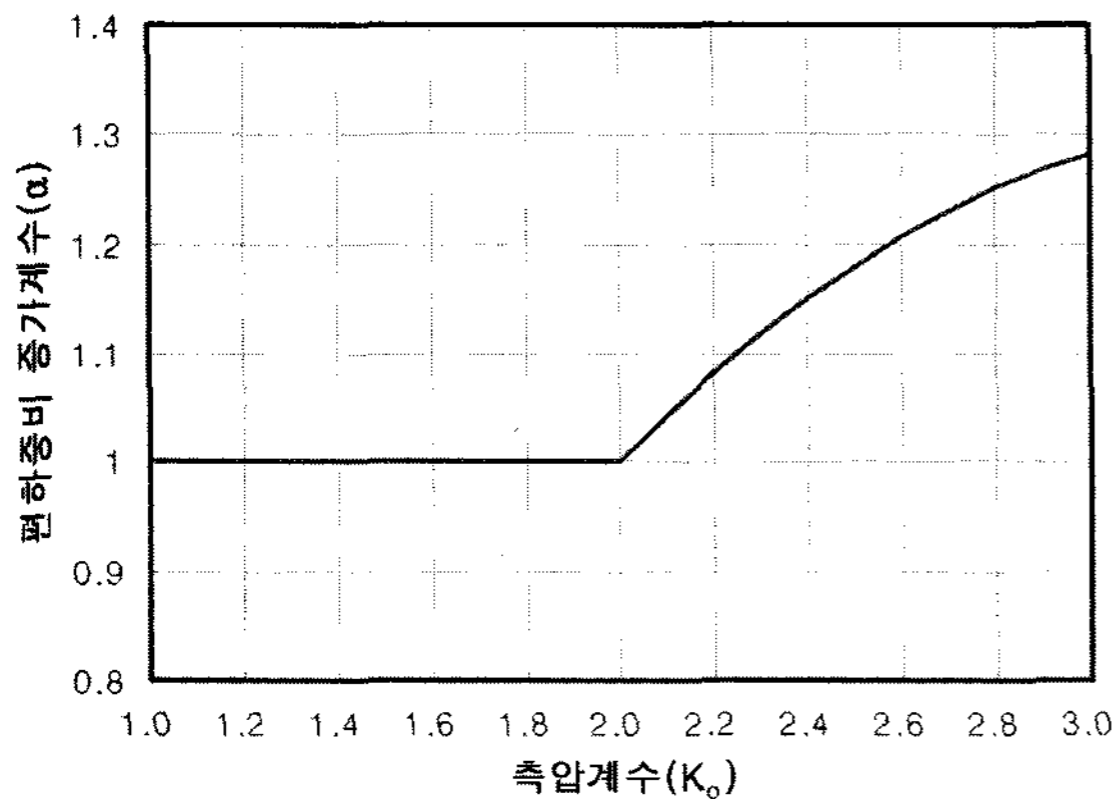


그림 11. 측압계수와 편하중비 할증계수

력이 증가하고 불연속면의 전단강도를 초과하는 응력이 작용하게 되면 불연속면에 전단변형이 증가하기 때문으로 판단된다. 따라서, 이러한 경향으로부터 편하중비 증가계수 α 를 도입하여 측압계수가 2.0보다 클 경우에는 편하중비 증가계수는 1.0 이상의 값을 나타내는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 불연속체 해석을 통하여 불연속 암반의 불균질성, 깊이에 따른 암반등급 및 측압계수가 불연속 암반내에 위치하는 원형수직구의 벽체에 작용하는 편하중에 미치는 영향을 분석하였다.

이상의 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 불연속암반의 질리특성을 매개변수로 한 불연속체 해석을 수행하여 수직구 벽체에 작용하는 하중의 분포특성을 분석한 결과, 각 검토조건별로 다른 질리특성에 따라 13.3%~33.4%(평균 19.9%)의 편하중이 발생하는 것으로 분석되었다.
2. 수직구 깊이에 따른 암반등급을 변수로 한 불연속체 해석을 수행하여 수직구 벽체에 작용하는 하중의 분포특성을 분석한 결과, 암반자체의 역학적 특성에 따라 변형성은 크고 강도특성은 작을수록 편하중의 영향은 증가하는 것으로 나타났다.
3. 측압계수가 2.0보다 클 경우에는 암반등급에 따른 편하중비 외에 추가적으로 측압계수의 크기에 따라 1.0 이상의 편하중비 증가계수를 적용하여야 할 것으로 판단된다.
4. 불연속 암반의 다양한 공학적 특성에 의하여 원형수직구 배면의 반경방향응력은 다양한 크기의 비대칭 분포를 보이는 것은 명백한 것으로 판단된다. 따라서, 불연속면의 공학적 특성을 고려한 불연속체 해석을 통하여 원형수직구 벽체에 작용하는 깊이에 따른 편하중의 크기를 산정 후 벽체 구조계산에 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

본 연구는 제한된 조건에 대한 수치해석 결과로서 연구결과의 적용성 확보를 위해서는 현장계측을 통한 비교·분석 등의 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 신영완, 문경선, 강휴택, 이승호 (2008), "현장계측을 통한 원형수직구 작용하중 분석", 한국지반환경공학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 63-76.
2. 한국터널공학회 (2007), 터널설계기준, p. 94.
3. 岩波 基 (2003), "Study on retaining wall design for

circular deep shaft undergoing lateral pressure during construction”, 博士學位論文, 早田大學.

4. Maghous, S., D. Bernaud, J. Freard and D. Garnier (2008), “Elastoplastic behavior of jointed rock masses homogenized media and finite element analysis”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pp. 1-14.

5. Oh, Y.S., T.W. Ha, Y.W. Park and J.S. Lee (2004), 1st International UDEC/3DEC Symposium, Balkema, pp. 24-34.

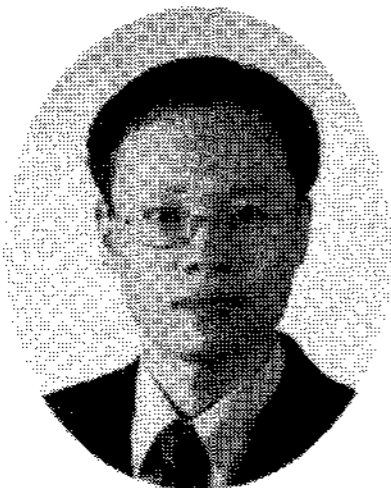
6. Pan, E., B. Yang, G. Cai and F.G. Yuan (2001), “Stress analyses around holes in composite laminates using boundary element method”, Engineering analysis with

Boundary Elements, Vol. 25, pp. 31-40.

7. Szechy, K. (1966), “The art of tunnelling”, Akademiai kiado, Budapest, pp. 909-924.

8. Tonon, F. and B. Amadei (2003), “Stresses in anisotropic rock masses : an engineering perspective building on geological knowledge”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, pp. 1099-1120.

9. Yasar Kaltakci, M. (1996), “Stress concentrations and failure criteria in anisotropic plates with circular holes subjected to tension or compression”, Computers and Structures, Vol. 61, No. 1, pp. 67-78.



신 영 완

(주)하경엔지니어링
터널지반부
상무

E-mail: ywshin@hakyong.net



문 경 선

(주)하경엔지니어링
터널지반부
차장

E-mail: mksgood@hanmail.net



주 경 원

(주)하경엔지니어링
터널지반부
대리

E-mail: sky00j@empal.com
