



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2009년 2월

석사학위논문

스파이럴 볼트와 록 볼트의
지보 메커니즘

조선대학교 대학원

자 원 공 학 과

김 동 조

스파이럴 볼트와 록 볼트의
지보 메커니즘

- Support mechanism of spiral and rock bolts -

2009년 2월 25일

조선대학교 대학원

자 원 공 학 과

김 동 조

스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보 메커니즘

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2008년 10월

조선대학교 대학원

자원공학과

김 동 조

김동조의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석 ㉠

위원 조선대학교 교수 박천영 ㉠

위원 조선대학교 교수 강추원 ㉠

2008년 11월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

List of tables	i
List of figures	ii
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 연구배경	4
3. 록 볼트 및 스파이럴 볼트	10
3.1 록 볼트(Rock Bolt)	10
3.2 스파이럴 볼트(Spiral Bolt)	11
3.3 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 특성	14
4. 연구방법	15
4.1 시멘트-모르타르 압축강도시험	15
4.2 실내 인발시험	17
4.3 구속압, 내부압, 전단응력	20
5. 연구결과	26
5.1 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 항복 하중	27
5.2 양생기간 7일	27
5.2 양생기간 28일	42
6. 토의	58
7. 결론	61

List of tables

Table 2-1. Geotechnical data	5
Table 3-1. Mechanical properties of rock bolt and spiral bolt by pull-out test	14
Table 4-1. Component ratio of cement-mortar	15
Table 4-2. Result of uniaxial compression tests	16
Table 5-1. Result of pull-out load and pull-out strength by pull-out test in laboratory : 7days	29
Table 5-2. Result of external pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 7days	30
Table 5-3. Result of Inner pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 7days	34
Table 5-4. Result of pull-out load, pull-out strength by pull-out test in laboratory : 28days	42
Table 5-5. Result of external pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 28days	44
Table 5-6. Result of Inner pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 28days	49

List of figures

Figure 2-1. The load-deformation curves for the rock mass and support system	6
Figure 2-2. Suspension effect	8
Figure 2-3. Keying effect	8
Figure 2-4. Arch effect	9
Figure 2-5. Friction effect	9
Figure 3-1. Appearance of rock bolt	11
Figure 3-2. Appearance of spiral bolt	12
Figure 3-3. Shape and cross-section of spiral bolt	12
Figure 3-4. Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground	13
Figure 4-1. Curing of cylindrical specimens for uniaxial compression test	16
Figure 4-2. Uniaxial compression test : before and after uniaxial compression test	12
Figure 4-3. Accessory for pull-out test in laboratory	17
Figure 4-4. Schematic sketch of rock and spiral bolts	17
Figure 4-5. Installation of rock and spiral bolts and location of strain rosette gauge for pull-out test in laboratory	18
Figure 4-6. Photography for pull-out test of rock bolt and spiral bolt	19
Figure 4-7. Data logger and digital displacement indicator for pull-out test	19
Figure 4-8. Relationship between axial and lateral strains and pull-out load	20
Figure 4-9. Circular cylinder subject to external pressure and Inner pressure	21
Figure 5-1. Pull-out test of rock bolt and spiral bolt in laboratory	26
Figure 5-2. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days	28
Figure 5-3. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days	28

Figure 5-4. Relationship between external pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days 31

Figure 5-5. Relationship between external pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 7 days 31

Figure 5-6. Relationship between external pressure and displacement of rock bolt with 7 days 32

Figure 5-7. Relationship between external pressure and displacement of spiral bolt with 7 days 32

Figure 5-8. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days 33

Figure 5-9. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days 33

Figure 5-10. Relationship between inner pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days 36

Figure 5-11. Relationship between inner pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 7 days 36

Figure 5-12. Relationship between inner pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 7 days 37

Figure 5-13. Relationship between inner pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 7 days 37

Figure 5-14. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days 38

Figure 5-15. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days 38

Figure 5-16. Relationship between inner pressure and shear stress of rock bolt with grouted specimen of 7 days 39

Figure 5-17. Relationship between inner pressure and shear stress of spiral bolt with grouted specimen of 7 days 39

Figure 5-18. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days by calculation 40

Figure 5-19. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days by calculation 40

Figure 5-20. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days calculated by theory 41

Figure 5-21. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days calculated by theory 41

Figure 5-22. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days 43

Figure 5-23. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 43

Figure 5-24. Relationship between external pressure and pul-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days 46

Figure 5-25. Relationship between external pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 46

Figure 5-26. Relationship between external pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 28 days 47

Figure 5-27. Relationship between external pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 47

Figure 5-28. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days 48

Figure 5-29. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days 48

Figure 5-30. Relationship between inner pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days 51

Figure 5-31. Relationship between inner pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 51

Figure 5-32. Relationship between inner pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 28 days 52

Figure 5-33. Relationship between inner pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 52

Figure 5-34. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days 53

Figure 5-35. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days 53

Figure 5-36. Relationship between inner pressure and shear stress of rock bolt with grouted specimen of 28 days 54

Figure 5-37. Relationship between inner pressure and shear stress of spiral bolt with grouted specimen of 28 days 54

Figure 5-38. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days by calculation 55

Figure 5-39. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days by calculation 55

Figure 5-40. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days calculated by theory 56

Figure 5-41. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days calculated by theory 56

Figure 6-1. Variation of ultimate bond strength with Young's modulus of rock and grout, strength of grout and borehole diameter 60

Abstract

- Support mechanism of spiral and rock bolts -

By Kim, Dong Jo

Adv. Prof. : Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

Artificial structures like slopes, tunnels or underground storages may give rise to a serious problem, namely subsidence, collapse, failure, and so on. In the present day, the various support members such as ground anchor, cable or rock bolts with spiral bolt are developed and also commonly being used in order to solve these problems. A main aim of these support members is to be maintained a stability of ground foundation or rock mass structures.

The purpose of this study is to clarify an effect of support between spiral bolt of a new support type and rock bolt of a widely used support type. We used the bolts of two types, that is, rock bolt with 25 mm in a diameter and 550 mm in a length and spiral bolt with 32 mm in a width, 9 mm thickness and 550 mm in a length. In addition, the grout-mortar curing period is 7 and 28 days and a ratio of water/cement is 0.50. Rosette gauges are also adhered on the surface of cylindrical circular steel specimen to measure strain and to evaluate inner and external pressures. Uniaxial strength, Young's modulus and poisson's ratio of grout-mortar specimen are 34.23 MPa, 9.9 GPa and 0.24 in case of 7 days and 39.15 MPa, 15 GPa and 0.17 in case of 28 days.

Firstly, pull-out test was performed in laboratory, then measured load, displacement and strain. Secondly, Inner and external pressures and shear stress were calculated from the result obtained from pull-out test. Finally, an effect of support between spiral and rock bolts was compared.

In the case of curing period 7 days, displacement in spiral bolt was occurred at higher 50 kN, on the other hand, one in rock bolt at lower 50 kN. Also, in

case of 28 days, displacement in spiral bolt was occurred at higher load than rock bolt. Inner and external pressures of spiral bolt at the same load step in case of 7 days showed higher than rock bolt, but almost same in the case of 28 days. Furthermore, inner and external pressures increased with increasing position of rosette gauges, and inner and external pressures according to position of rosette gauges of 28 days was higher than 7 days.

Shear stress in rock bolt was bigger than that in spiral bolt.

In the case of rock bolt, shear stress in samples of curing period 28 days more increased than that in samples of 7 days did.

On the other hand, in the case of spiral bolt shear stress in samples of 28 days more decreased than that in samples of 7 days.

According to this study, bigger inner and external pressures and the lowest shear stress more likely occur in the end of support members than in wall so that it will collapse first in tunnel or slope in which support members are installed.

Besides, unlike rock bolt, pull-out load increased again in spiral bolt because of the second effect by spiral bolt after it had decreased because of collapse between spiral bolt and grout-mortar.

1. 서론

과거의 토목공사에서는 주로 자연사면을 이용하여 구조물을 축조하였다. 그러나 오늘날에는 국토를 효율적으로 이용하기 위하여 인공사면, 터널, 지하저장시설 등과 같은 다양한 지하공간 구조물의 활용에 관심이 고조되고 있으며, 해마다 개발빈도가 증가하고 있다. 인공사면은 자연지반과 자연사면에 절취 및 성토 과정을 통해 인위적으로 만들어진 사면으로 사면의 기울기가 크고 성토층에 대한 다짐이 불확실한 관계로 붕괴의 위험성이 더욱 크다. 공동이나 터널에서도 이완된 암반의 사하중이나 굴착 공동 주변에 발생하는 암반 내 응력장의 변화에 따라 야기되는 변형 등에 의한 위험성이 커서 손상대 내에서 붕괴, 또는 파괴가 나타나는 등의 문제점을 야기한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 불안정한 지반응력상태를 안정화시키는 작업이 무엇보다 중요하다. 이에 개발된 것이 그라운드 앵커(ground anchor), 록 볼트(rock bolt) 및 케이블 볼트(cable bolt)와 같은 지보재이다.

그라운드 앵커는 인장재의 한 쪽 끝을 지반에 정착 시킨 후 다른 끝을 구조물 등에 고정시키고, 그 중간부분의 인장재는 자유롭게 하여 인장재에 외부로부터 선응력을 부여함으로써 구조물에 가설적 및 영구적으로 발생하는 외력에 의한 응력, 변형 등을 억제시키기 위해 지반에 설치되는 구조체이다. 이 그라운드 앵커 공법은 사면붕괴 방지, 구조물의 부상이나 전도방지 등에 이용되고 있는 지반공법 중의 하나로써 주로 토사와 같은 연약지반에 사용되어 지반의 안정을 꾀할 수 있다(김낙경, 2000, 2001; 김래현 외, 2002; 전상현 외, 2006). 반면, 록 볼트나 케이블 볼트 공법은 주로 터널을 굴착한 후에 사용되는 지보재로서 시멘트 그라우트의 마찰력이나 부착력을 이용하여 지반과 볼트를 고정시켜 지반의 안정성을 확보하는 공법이다(Hudson, 1989; Indraratna & Kaiser, 1990; Bawden et al., 1992; Kaiser et al., 1992, Yazici & Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992, 1995; Tannant, 1995; Oreste & Peila, 1996; Jeng & Huang, 1999; Ito et al., 2001). 그라운드 앵커가 인장력을 유도하는데 반해 록 볼트나 케이블 볼트는 마찰력이나 부착력을 이용한다. 하지만, 양쪽 모두 기하학적 형상으로 지반의 움직임을 일차원적인 저항 작용을 이용하여 지반이나 구조물의 안정성을 확보한다는 측면에서는 유사하다.

위의 지보재 이외에 최근 개발되고 있는 새로운 형태의 지보재인 스파이럴 볼트는 판상의 동판에 비틀림을 가하여 만든 나선형 형태의 지보재이다(Hirata et al.,

2003, 2005). 그라운드 앵커, 록 볼트 및 케이블 볼트와 같은 지보재는 연약지반의 경우 지보재를 설치하기 위해서 천공작업이 반드시 필요하지만 스파이럴 볼트의 경우 천공작업 없이 지보재의 회전만으로 지반 내에 설치할 수 있다. 또한 견고한 지반의 경우 천공작업을 통하여 적용이 가능하다. 즉, 스파이럴 볼트와 지반사이를 그라우트로 고정시키면 다른 지보재와 마찬가지로 지보기능을 충분히 발휘할 수 있다.

지보재의 거동에 영향을 미치는 요인으로는 지보재의 형태, 지보재의 부착 길이, 지보재의 크기, 지보재의 경사, 정착제의 강도, 암반과 지보재와의 부착력, 천공경, 공벽의 상태, 암반의 성질 및 지질구조적 상태 등 여러 가지가 있다(대한광업진흥공사, 1986). 위 요인들이 그라운드 앵커나 록 볼트 및 케이블 볼트의 지보특성에 미치는 영향이나 지보재들의 지보 메커니즘에 관한 연구는 국내외적으로 많이 행해지고 있다.

국외의 경우 Farmer(1975)는 전면 접촉형 록 볼트의 응력분포에 대한 이론식을 구하고 전단응력은 굴착 벽면에서 최대이고 볼트 거리를 따라 지수함수적으로 감소한다고 제시하였다. Yazici & Kaiser(1992)는 그라우트 된 케이블 볼트와 그라우트 경계면 사이에서의 정착강도 발달을 설명하기 위해 Bond strength model을 제시하고 실내 인발시험을 통한 그라우트의 거동을 설명하였다. 그리고 그라우트 된 케이블 볼트는 연암보다 경암에서 부착강도가 더 발달한다 하였다. Hyett et al.(1992)은 그라우트 된 케이블 볼트의 부착력에 영향을 미치는 주요 요인을 알아보기 위하여 시멘트와 물의 배합비나 정착길이, 암반상태 등을 달리하여 실내, 실외의 시험을 수행하였다.

국내의 경우 김호영과 이희근(1991)은 전면접촉형 록 볼트의 응력분포를 알아보기 위한 이론식을 구하고 록 볼트의 지보거동을 고려한 전산해석법을 개발하였다. 정해성 등(1999)은 록 볼트의 역학적 거동의 파악을 위하여 지반조건, 록볼트의 설치조건, 설치길이 등을 변화시켜 가며 전산해석을 수행하였으며 암질이 나뉠수록 록 볼트의 보강 효과가 높게 나왔다. 임경필 등(1999)은 불연속면이 지보재의 전단응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 절리면을 갖고 있는 모형 암반을 이용하여 인발시험을 수행하고 변형률을 측정하여 전단응력을 계산하였다. 측정에 의해 계산된 전단응력과 이론식을 비교하여 측정값과 이론식이 많은 차이를 나타냄을 보였다. 박병수 등(2006)은 앵커의 정착길이, 천공경, 지보재의 직경 등을 변화시켜 인발시험과 수치해석을 수행하여 비교하였고 정착길이나 지보재의 직경에 따라 한계

하중이 증가하고 수치해석과 비례하는 결과를 얻었다. 유성원 등(2006)은 부착식 앵커의 인발·전단특성을 알아보기 위하여 부착길이, 앵커직경 등의 조건으로 인발·전단시험을 수행하여 길이나 직경이 길어지고, 직경이 커질수록 부착력이 증가한다는 결과를 나타냈다. 이 외에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 이에 비해 스파이럴볼트의 지보재로서의 특성이나 효과, 그리고 지보 매커니즘은 구체적으로 규명되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 이용되고 있는 지보재인 록 볼트와 새롭게 개발되고 있는 스파이럴 볼트를 대상으로 그라우트의 양생조건을 달리하여 실내 인발시험을 수행하여 다음과 같은 지보재의 특성을 규명하고자 한다. 첫째, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보특성의 차이점을 살펴보고, 둘째, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보재로서의 효과를 비교하고자 한다. 마지막으로, 스파이럴 볼트와 록 볼트가 지반사이에 작용하는 연성거동 매커니즘을 규명하고자 한다.

그리고 볼트-그라우트-암반 복합체는 볼트-그라우트와 그라우트-암반의 두 가지 접촉면이 존재하며 이에 따라 인발시험으로부터 여러 가지 파괴양상을 보인다. 첫째는 볼트의 직접적 파괴이고, 둘째는 볼트-그라우트의 접촉면의 파괴로 볼트만 인발하는 경우, 그리고 셋째는 그라우트-암반 접촉면의 파괴로 볼트와 그라우트가 하나로 암반에서 인발되는 경우, 마지막으로 볼트 주변의 암반이 파괴되어 볼트-그라우트-암반이 전체로 인발되는 파괴양상이다. 일반적으로 볼트-그라우트 접촉면 파괴로 볼트만 인발되는 파괴가 많이 일어나고 그에 대한 집중적 연구가 필요하겠기에 본 연구에서는 볼트만 인발하는 경우에 맞춰 연구를 수행하였다.

2. 연구배경

화산활동, 지진활동, 대륙간의 판 이동 및 빙하기와 같은 지질작용으로 인하여 암반 내에 단층, 절리와 같은 불연속면이 형성되고 혹은 발파작업으로 인해 암반에는 잠재적인 불안정성이 항상 존재한다. 이러한 불안정한 조건하에서 사면이나 터널 또는 지하공동시설과 같은 구조물을 건설할 경우 암반의 안정성을 확보하는 일은 매우 중요하다.

균열로 인해 암괴가 굴착면내에 떨어져 들어가는 경우 암반이 보다 연속체와 같은 거동을 하도록 암반을 보강하는 것이 지보재이다. 지보재는 굴착에 따라 불안정하게 되는 터널 주변 암반 및 지반을 시공 전 과정에 걸쳐 안전하게 유지하고 터널이용의 안전성을 확보하는 것이 그 목적이다. 지보재는 개개의 블록과 느슨해진 블록들을 분리되지 않게 연결하여 불연속면을 따라 전단저항이 증가한 암반을 보강하게 된다. 불연속면은 굴착 후 팽창하려는 경향이 있는데 빨리 지보하지 않으면 암반이 불안정해지게 된다. 지보에 의해 응력의 재분배와 안정성을 유지하고, 굴착면 주변에 존재하는 불연속면의 팽창을 최소화 시켜 충분한 강성을 갖게 한다. 지보재로는 다우웰, 록 볼트, 메쉬(mesh), 슛크리트, 케이블 볼트 및 앵커 등이 사용된다. 지보재는 종류에 따라 각각의 특징을 가지고 있으며, 주변 암반이나 지반 조건에 따라 적용되는 지보재가 다르고, 지보가 하는 역할도 다르다.

지보재를 설계하는데 필요한 요소와 그것들을 구하는 방법을 Table 2-1에 나타내었다.

Table 2-1. Geotechnical data (Douglas and Arthur, 1983)

Geotechnical data	Source
Preliminary information	<ul style="list-style-type: none"> • Published and unpublished geological maps, reports, memoirs, etc. • Records, logs of excavations, boreholes etc. in close proximity to proposed project • Published and unpublished reports on projects in similar ground
Geological description	<ul style="list-style-type: none"> • Surface mapping, core logging, etc.
Rock material strength and deformation characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratory testing(uniaxial and triaxial)
Rock mass index properties	<ul style="list-style-type: none"> • Assessment of rock quality(e.g. rock quality designation(RQD)) • Point load testing, etc.
Discontinuity Data: description orientation spacing continuity	<ul style="list-style-type: none"> • Surface mapping • Structural logging of drillholes • Core orientation • Mapping of surface outcrops and completed excavations
Discontinuity shear strength characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • In situ shear testing • Shear box tests
Rock mass deformation moduli	<ul style="list-style-type: none"> • Geophysical methods • Drillhole modulus gauges • Plate bearing tests • Monitored excavations
In situ stress measurement	<ul style="list-style-type: none"> • Drillhole stress meters • Deformation gauges • Strain cells
Unit weight	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratory testing
Groundwater conditions	<ul style="list-style-type: none"> • Piezometric measurements • Packer tests • Visual inspection of excavation
Seismic data	<ul style="list-style-type: none"> • Published seismic records • Vibrograph measurements

터널 혹은 지하공동에서의 지보 설계의 가장 중요한 목적은 암반의 지지력을 돕는 것이다. 한 예로 Figure 2-1은 암반과 지보에 대한 하중-변형 곡선이다 (Daemen, 1975). 터널 굴착으로 인한 지반의 변형은 항복점을 지나 완전 소성거동을 하게 되며 일정 변위로 수렴할 수도 있고 그렇지 않고 과다 변위가 발생할 수도 있으므로 적절한 시기에 지보 설치가 중요하다. 점 D에서처럼 터널의 변형이 생기지 않을 때 지보는 하중을 부담하지 않는다. 그러다가 터널의 측벽과 아치부에 곡선 CEG, BFH와 같은 반경방향의 변화가 일어나게 되면 강제 지보에 발생하는 내부 지보압 P_i 는 곡선 DEF처럼 반경방향 변형과 함께 증가한다. 만약 지보를 삽입 하지 않았다면 곡선 EG나 FH처럼 변형이 증가하게 될 것이다. 측벽의 경우 점 G에서 변형이 멈춰 안정 되겠지만 아치의 경우 변형을 제어하는데 필요한 지보압력이 약화 되었다가 다시 증가하여 아치는 붕괴할 것이다. 강제지보의 반력 곡선은 터널 측벽과 아치의 변형곡선과 점 E 및 점 F에서 교차한다. 이런 점에서 측벽과 아치의 변형을 더 진행시키지 않게 하기 위한 지보압력과 지보에서 발생한 지보반력이 정확하게 평형을 이루어 터널과 지보가 평형상태를 이룬다. 이를 통해 지보설계에는 암반과 지보의 상호작용을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다(Hoek, 1980).

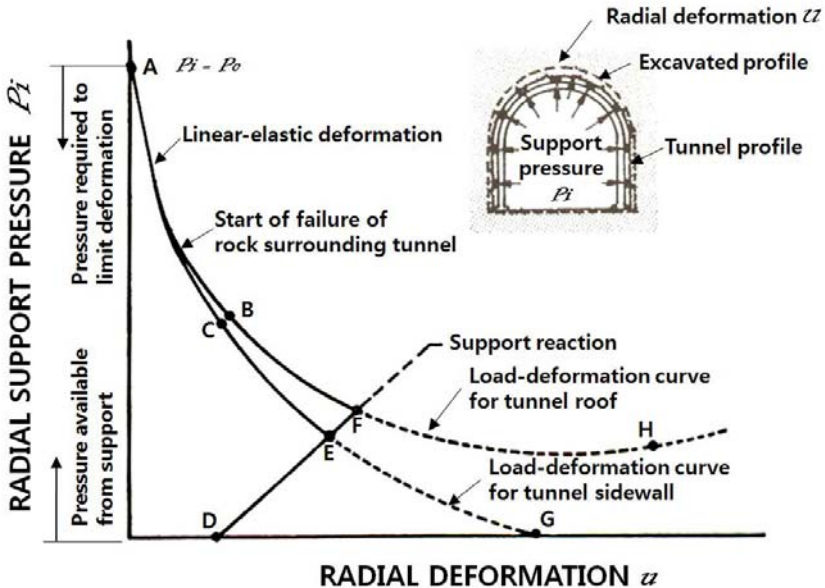


Figure 2-1. The load-deformation curves for the rock mass and support system(Hoek, 1980).

터널 혹은 지하공동에서 지보재를 사용함으로써 다음의 네 가지 효과를 기대할 수 있다. 첫 번째로 매달림 효과(Suspension effect)는 가장 단순한 효과로서 발과 등으로 인해 느슨해진 암괴를 자체 지지력을 가진 상부의 천반에 지지하게 함으로써 낙하를 방지하는 효과이다(Figure 2-2). 균열, 절리가 발달된 원지반에 슛크리트와 동시에 시공하면 비교적 작은 틈에 대해서도 효과적이다. 두 번째로 엇물림 효과(Keying effect)는 취약면을 따라 일어나는 변위를 줄여 취약면에 의해 형성된 암괴를 고정시킴으로써 천반부를 안정시키는 효과이다(Figure 2-3). 세 번째로 아치효과(Arch effect)는 시스템 록 볼트에 의한 내압 효과 때문에 일체화 해서 내하능력이 높아진 터널 주변 암반이 내공측에 일정하게 변위가 발생하는 것에 의해 ground arch를 형성하는 것이다(Figure 2-4). 마지막으로 마찰효과(Friction effect)는 록 볼트의 인장력에 해당하는 힘으로써 자체 지지력이 없는 층상 천반의 얇은 층들이 볼트의 설치에 의해 함께 묶여지면 층리면에 마찰력이 유발되어 볼트가 설치되어 있지 않을 때 천반이 분리, 함몰되면서 층리면을 따라 일어나는 암괴의 수평, 수직운동을 억제하거나 감소시켜 지지력을 발휘해 주변암반의 강도 또는 내하능력의 저하를 방지하는 작용을 한다(Figure 2-5). 이러한 마찰효과는 지보재의 인장력과 지보재가 관통하는 층 수에 비례하고 지보재의 설치간격과 천반폭의 크기에 반비례한다(대한광업진흥공사, 1986).

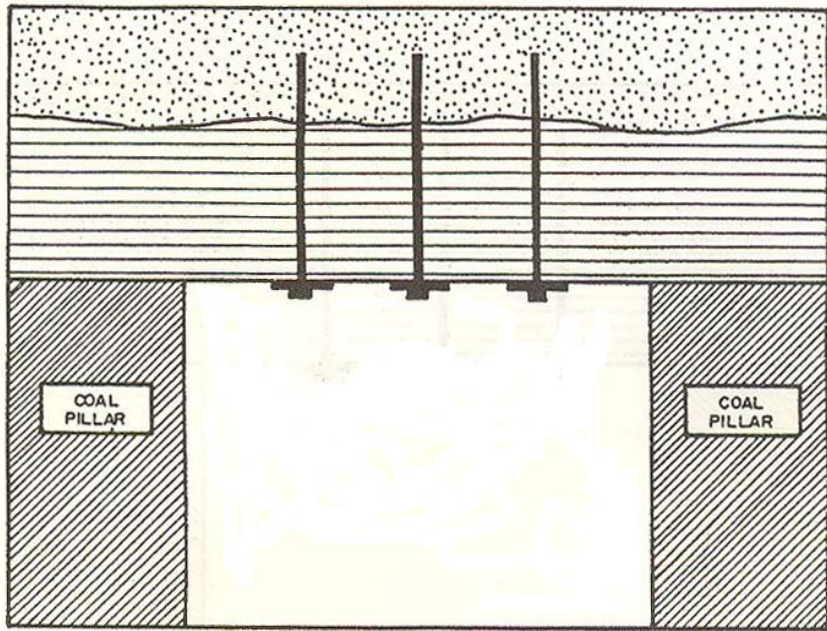


Figure 2-2. Suspension effect (Korea Resources Corporation, 1986).

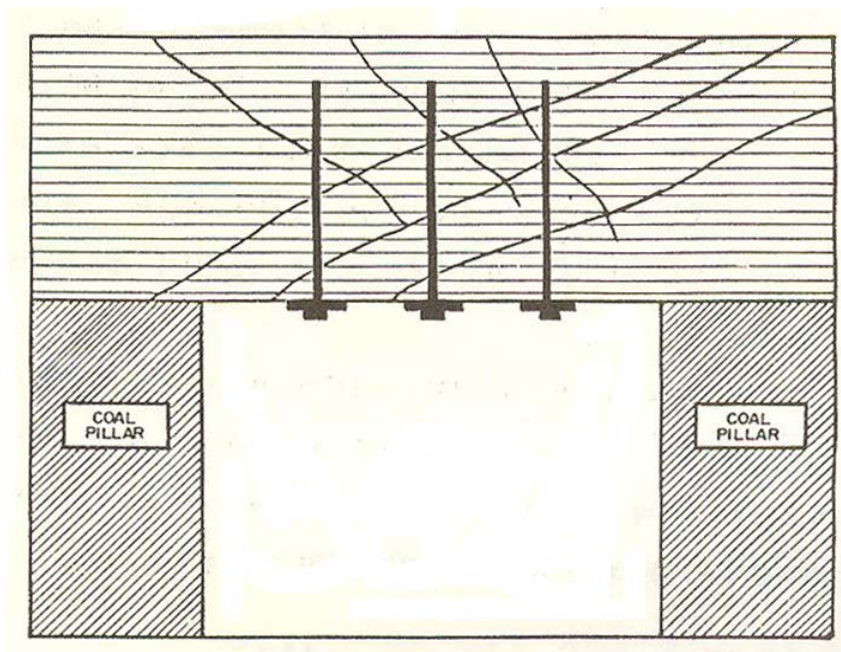


Figure 2-3. Keying effect (Korea Resources Corporation, 1986)

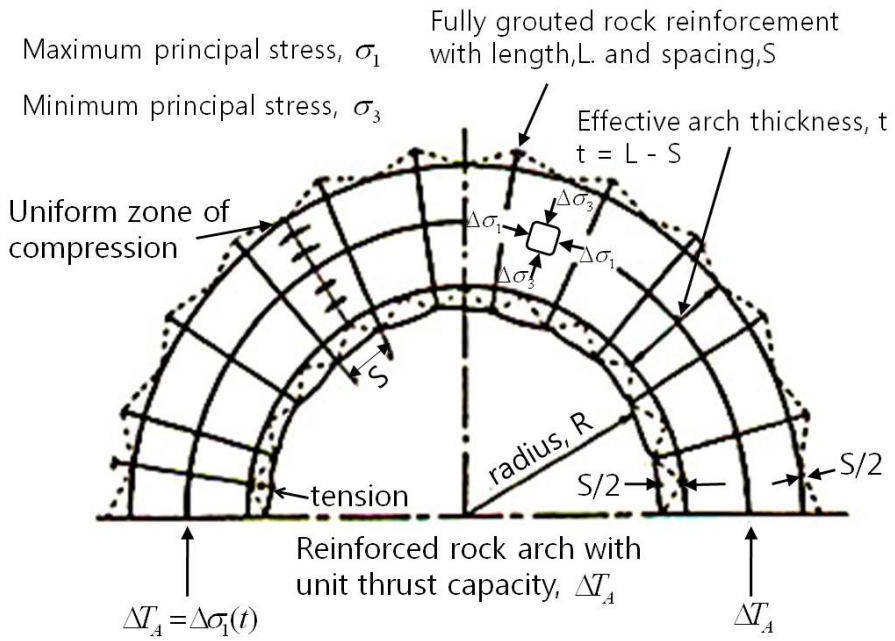


Figure 2-4. Arch effect (Korea Resources Corporation, 1986)

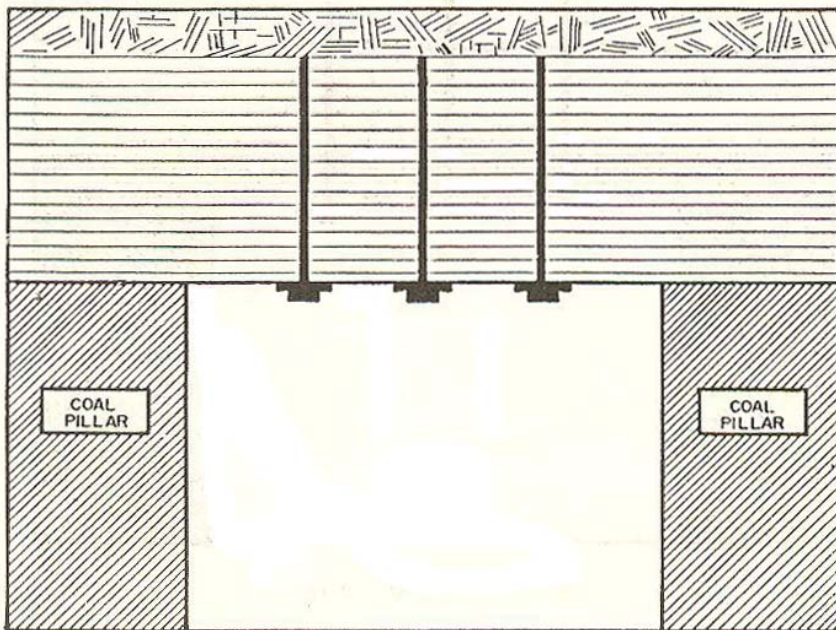


Figure 2-5. Friction effect (Korea Resources Corporation, 1986)

3. 록 볼트 및 스파이럴 볼트

3.1 록 볼트(Rock Bolt)

초기의 록 볼트는 지반 중에 고정점을 가지는 지보로서 암반중에 철재로 만들어진 로드, 튜브, 케이블로 충분한 깊이에 삽입하고 적당한 방법으로 끝에 고정하거나 전체길이를 따라 부착하게 하는 것이었다(Stephan, 1913). 록 볼트는 굴착단면의 형상에 제한을 받지 않고, 설치가 용이하여 타 공법에 비하여 저비용이며 전체 공정이 기계화 시공이 가능하므로 토목현장의 지하굴착공사에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 터널현장에서 발파 및 기계굴착시 발생하는 주변 원지반의 소성영역 확대를 억제하고 원지반의 안정성을 증가시키며 굴착부분이 일시적으로 개방됨에 따른 취약점을 보완하여 2차 변형 발생을 억제하는 주 지보재 역할을 한다.

록 볼트는 볼트의 형상과 설치방법에 따라 크게 mechanically anchored rock bolts, grouted rock bolts 그리고 friction anchored rock bolts 등으로 구분할 수 있다(대한광업진흥공사, 1986).

Mechanically anchored rock bolts 중에서 가장 보편적으로 사용되는 지보재인 expansion shell anchored rock bolt는 볼트가 회전하면서 공내로 들어감에 따라 볼트에 부착된 썸기가 원추형의 expansion shell 안으로 당겨져서 이 때 발생하는 힘에 의해 썸이 팽창하면서 공벽 안으로 밀착되어 암반을 고정시켜 지지해주는 지보재이다. 따라서 썸이 암반을 밀착시켜 암반을 고정시키는 밀착력이 중요한데 이것은 공경의 크기, 암반의 종류와 상태에 따라 좌우된다. 일반적으로 mechanically anchored rock bolts는 주로 경암에 사용된다. 장점으로는 비교적 가격이 저렴하고, 설치한 직후부터 지보재의 역할을 할 수 있으며, 충진을 하면 거의 영구적으로 사용할 수 있다는 점들을 들 수 있다. 반면에 사용범위가 경암으로 제한적이며 발파 진동이나 높은 지압으로 공 주위 암석이 붕락됨으로서 지지력을 잃게 될 수 있다는 단점을 가지고 있다.

Grouted rock bolts는 공과 지보재 사이를 시멘트나 레진(resin)과 같은 충전재료를 주입하여 암반을 지지하는 설치과정이 비교적 간단한 지보재로서 완전충진 rebar bolt와 강철제 thread bar bolt 지보재가 가장 많이 사용된다. 완전 충전

rebar bolt는 설치 직후부터 암반과 지보재 사이에 지지력이 발휘된다는 장점이 있지만, 사용 방법이 어렵고 지지수명에 한계가 있다는 단점을 가지고 있다. 강철제 thread bar bolt는 설치 후 강하고 지속적인 지지력을 가지며, 특히 취약한 환경에 대한 영향을 적게 받음으로서 영구적인 지지를 목적으로 하는 곳에 사용된다. 하지만 가격이 비싸고, 충전 후 볼트의 지지력이 충분히 발휘되기 위해서는 어느 정도의 경화기간이 요구된다.

Friction anchored rock bolts는 split set rock bolt 와 swellex rock bolt의 두 가지 형태가 있다. Split set rock bolt는 볼트보다 약간 작은 크기의 공경에 이 지보재를 강제로 투입하여 지지력을 얻는 방법으로 공경의 크기가 지보재의 지지력에 중요한 영향을 미친다. 즉, 공경이 볼트의 직경에 비해 너무 작으면 볼트를 설치하기 어려우며 반대로 공경이 너무 크면 지지력이 감소한다. 하지만, 지보재가 정상적으로 잘 설치되었다면 설치 후 바로 지지력을 발휘할 수 있고 균열이 많이 존재하는 암반을 제외한 다양한 암반에 대해 적용이 가능하다는 장점이 있다. Swellex rock bolt는 볼트를 공간에 투입한 후 높은 수압펌프를 사용하여 볼트를 팽창시킴으로서 지보재를 공벽에 밀착시켜 지지력을 발휘하는 방법이다. 따라서 공벽의 상태가 매끄럽지 않고 울퉁불퉁할지라도 충분한 마찰저항을 얻을 수 있다. 이 지보재는 split set rock bolt와는 다르게 공경의 크기에 영향을 별로 받지 않으며 볼트 설치 직후부터 암반을 지지할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

Friction anchored rock bolts는 암반이 젖어있는 상태에서도 설치가 가능하지만 볼트의 설치시 암반과 발생하는 마모문제 때문에 영구적인 지지에 대해서는 고려해야 한다. Figure 3-1은 록 볼트의 대표적인 형상을 보여준다.



Figure 3-1. Appearance of Rock bolt.

3.2 스파이럴 볼트(Spiral Bolt)

스파이럴 볼트는 최근에 개발된 새로운 형태의 지보재로서 얇고 긴 강판의 양단면을 고정시킨 후 축회전을 시켜 만든 나선형 형태의 지보재이다(Figure 3-2). 금

속재료인 연강을 사용하여 쉽게 가공할 수 있고 길이(l), 폭(d), 두께(t) 등에 따라 여러 크기로 가공할 수 있다. 스파이럴 볼트의 가공 특성상 강판의 축방향에 압축력이 작용하므로 축중심 부근의 두께가 두꺼워지는 반면, 축중심에서 가장 멀리 떨어진 양쪽 가장자리 부분에서는 인장력의 작용으로 인하여 두께가 얇아지는 경향이 있다. 그러므로 동일한 단면 내에 함께 작용하는 압축력과 인장력을 완화시키기 위하여 축방향에 일정한 인장력을 가하면서 비틀림 가공을 수행해야 한다. Figure 3-3은 스파이럴 볼트의 일부분과 이를 확대시켜 나타낸 것으로써, 축방향과 양쪽 가장자리 부분의 각은 약 45° 의 관계를 이룬다(Hirata et al., 2003, 2005).



Figure 3-2. Appearance of Spiral bolt.

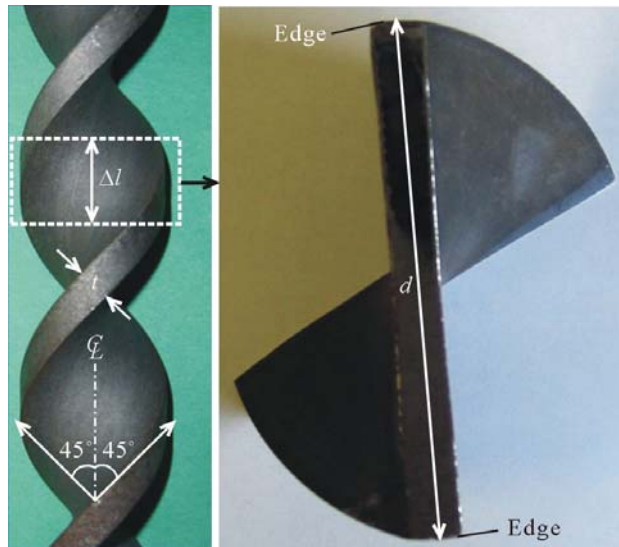


Figure 3-3. Shape and cross-section of spiral bolt (강성승 외, 2005).

스파이럴 볼트는 단면적 차이가 부착력이나 마찰력에 크게 영향을 미치지 않지만, 회전할 때 발생하는 축방향 저항력에 영향을 미치는 것이 특징이다. 연약지반의 경우 천공작업을 하지 않고 스파이럴 볼트를 직접 회전시키면서 지반 내에

바로 설치할 수 있기 때문에 지반을 교란시키지 않고 지반과 일체화 시킬 수 있다. 암반과 같은 견고한 지반의 경우 천공작업을 한 후에 스파이럴 볼트를 그라우트와 함께 설치하는데, 고화된 그라우트가 주위 지반과 어느 정도 비슷한 강도를 갖는다면 회전시켜 설치하는 상태와 같은 결과를 기대할 수 있다. Figure 3-4는 스파이럴 볼트에 축력이 작용했을 때 스파이럴 볼트와 지반 사이에 형성되는 전단파괴 과정을 나타낸다.

스파이럴 볼트에 축력이 가해지면 스파이럴 볼트 양쪽 가장자리와 지반의 경계부에 전단파괴대가 발생한다. 축하중이 계속 가해지면 동시에 전단파괴대도 함께 성장하다가 마지막 단계에서는 스파이럴 볼트와 지반의 경계부 사이에 원형의 전단파괴 영역이 형성된다. 스파이럴 볼트 주위에 완전한 전단파괴 영역이 형성되면 축 방향 저항력은 잔류 응력상태가 되므로, 스파이럴 볼트의 크기와 지반의 전단강도를 알면 축 방향 저항력을 계산할 수 있다(강성승 외, 2005).

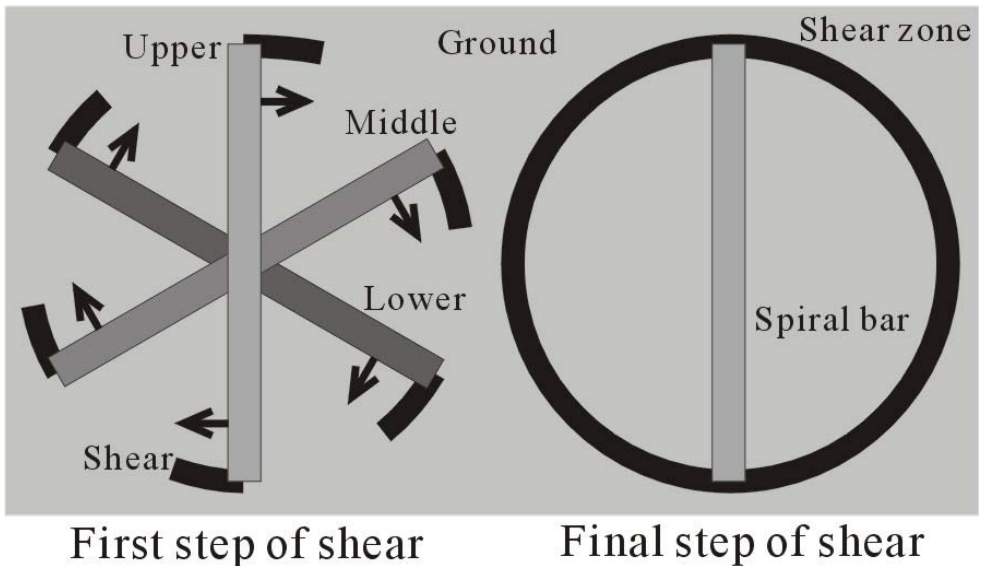


Figure 3-4. Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground (강성승 외, 2005).

3.3 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 특성

본 연구에서는 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보 특성을 알아보기 위해 인발시험을 수행하였다. 실험에 사용된 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 제원은 Table 3-1과 같다.

Table 3-1. Mechanical properties of rock bolt and spiral bolt by pull-out test.

Type	Size	Material	St_{yield}	St_{max}
Rock bolt	$\phi = 25$ $A = 506.7$	SD400	354	505
Spiral bolt	$d = 32$ $t = 9$ $A = 288$	SS400	459	464

ϕ : diameter of rock bolt(mm), A : area of rock and spiral bolts(mm^2), d : width of spiral bolt(mm), t : thickness of spiral bolt(mm), St_{yield} : yield tensile strength(N/mm^2), St_{max} : maximum tensile strength(N/mm^2).

Table 3-1에서 알 수 있듯이 Rock bolt가 Spiral bolt에 비해 단면적이 약 1.8배 정도 크다. 항복인장강도(yield tensile strength)와 최대인장강도(maximum tensile strength)의 차이는 록 볼트의 경우 $151 N/mm^2$ 의 차이를 보이는 반면 스파이럴 볼트의 경우 미미한 차이를 보인다.

4. 연구방법

4.1 시멘트-모르타르 압축강도시험

각 지보재의 인발시험을 수행하기 전에 1차 시험으로 그라우트 재료로 사용된 시멘트-모르타르의 일축압축강도 시험을 하여 그라우트 재료의 강도와 탄성계수, 포아송비 등을 구하였다.

시험편 제작에 사용된 시멘트-모르타르는 국내 R사에서 제작한 건식 모르타르를 사용하였고, 재료로 인한 미세한 차이를 없애기 위해 단일 제조업체의 모르타르만을 사용하였다. 재료의 제원은 Table 4-1과 같다.

Table 4-1. Component ratio of cement-mortar.

Type	Standard	component ratio
cement	portland cement	59.5%
sand	0.3 <i>m/m</i> max	39.5%
compound	fluid compound, etc.	1.0%

시험편 제작 시 물/모르타르(w/m)비는 0.25:1로 고정시키고 직경 54 mm, 높이 120 mm의 공시체 몰드에 봉상의 진동 다짐기를 사용하였다. 양생은 지보재의 실내 인발시험 시험체와 동일한 조건으로 양생을 하기 위해 수중양생을 하지 않고 기중양생을 실시하였다. 양생기간은 본 연구의 목적에 따라 7일과 28일의 경우로 하였다(Figure 4-1).

재하장치로 사용한 장비는 100 ton용량의 유압식 만능재료시험기(Model No. KPUT-100)를 사용하였고, 재하속도는 ASTM C39-86(1986)규정에 맞게 1.3 mm/min의 속도로 재하 하였다.

시험은 양생기간 7일과 28일의 경우로 각 3회씩 수행하였고 그 평균값을 계산하여 재료특성을 정하였다. 양생조건에 따라 일축압축시험으로 구한 재료특성 결과를 Table 4-2에 나타내었다. 일축압축강도는 양생기간 7일의 경우 34.23 MPa, 28일의

경우 39.15 MPa로 양생기간에 따라 각각 다르게 나타남을 알 수 있다.

Table 4-2. Result of uniaxial compression tests

Curing	W:M	Uniaxial compressive strength S_c (MPa)	Young's modulus E (GPa)	poisson's ratio ν
7 days	0.25 : 1	34.23	9.9	0.24
28 days	0.25 : 1	39.15	15	0.17



Figure 4-1. Curing of cylindrical specimens for uniaxial compression test.

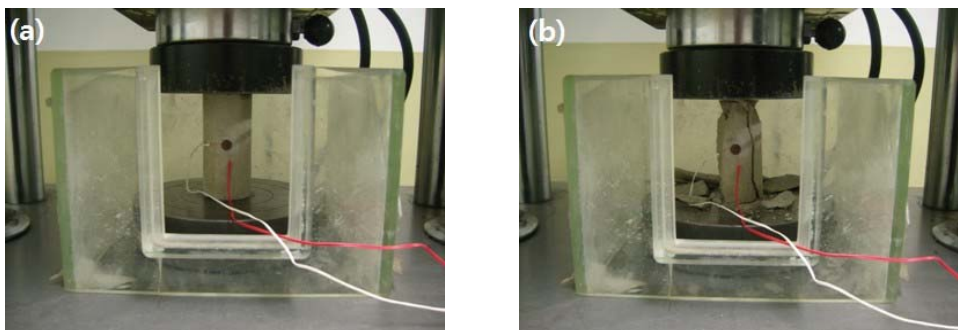


Figure 4-2. Uniaxial compression test
: (a)before and (b)after uniaxial compression test.

4.2 실내 인발시험

실내 인발시험을 수행하기 위한 공시체는 Figure 4-3과 Figure 4-4와 같이 인공암반으로서 연강 원통관을 사용하여 제작하였다. 연강 원통관의 크기는 외경 76.3 mm, 내경 69.1 mm, 길이 450 mm, 영률(E)은 206 GPa 그리고 포아송비(ν)는 0.3이다. 록 볼트와 스파이럴 볼트의 길이는 550 mm로 제작하였다.

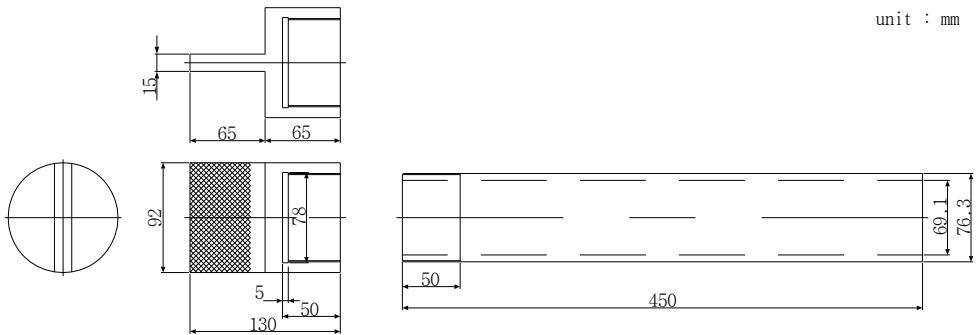


Figure 4-3. Accessory for pull-out test in laboratory.

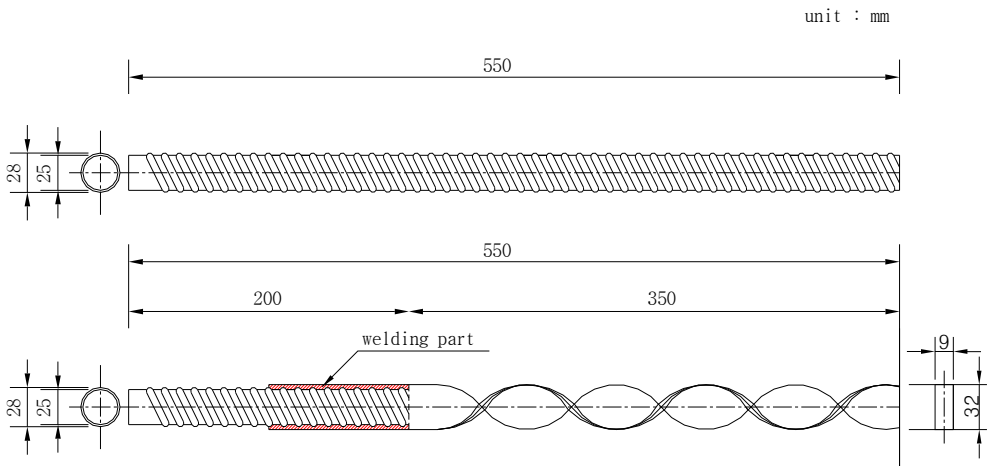


Figure 4-4. Schematic sketch of (a)rock and (b)spiral bolts.

인공암반과 지보재 사이의 그라우트는 시멘트-모르타르를 사용하였다. 공시체 제작은 록 볼트 혹은 스파이럴 볼트를 연강 원통관의 중앙에 위치시킨 후 시멘트-모르타르를 주입 후 고정시켰다. 공시체 하부에는 만능재료 시험기의 지그에 고정시키기 위해 특별히 제작한 굴곡형 기구를 연결하였다. 그리고 연강 원통관 공시체의 표면에는 연강 원통관에 발생하는 응력변화를 측정하기 위해 4개의 로제트 게이지 (rosette gauge)를 100, 190, 280, 370 mm 위치에 부착하였다(Figure 4-5).

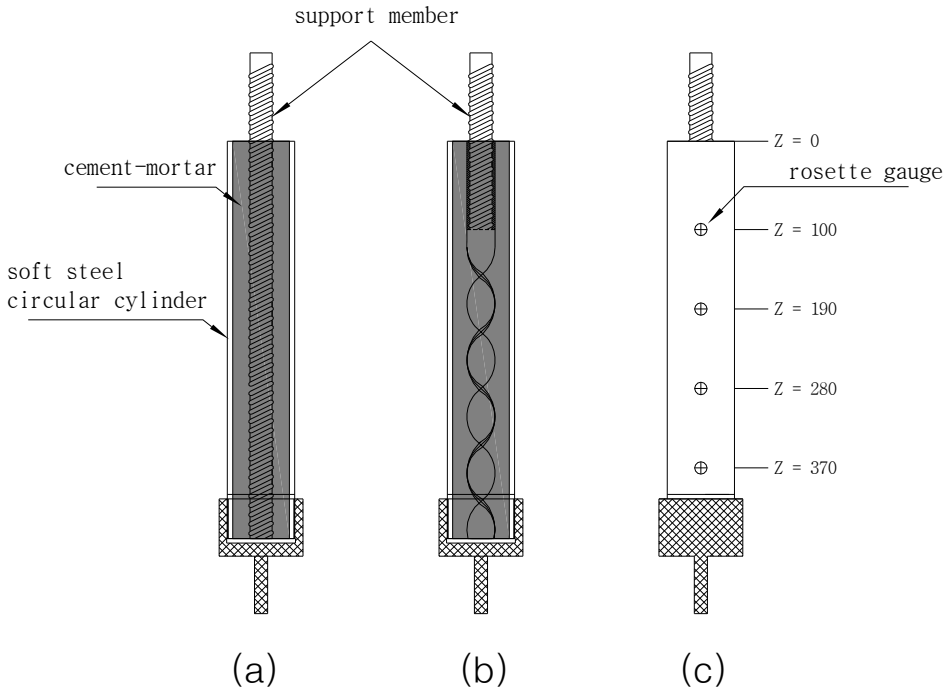


Figure 4-5. Installation of (a)rock and (b)spiral bolts and (c)location of strain rosette gauge for pull-out test in laboratory.

실내인발시험에 사용되는 시험기는 Figure 4-6과 같다. 시험 과정은 우선 공시체의 축을 시험기의 축과 일직선상에 오도록 일치 시킨 후, 0.5 kN정도의 초기하중을 가하여 공시체가 움직이지 않도록 고정시킨다. 이 때 공시체는 시험기의 위아래에 있는 고정용 지그를 이용하여 고정시켰다. 고정된 공시체를 0.5 kN/sec의 하중속도로 인장하중을 가하면서 시험을 실시한다. 재하 장치는 영점 조정과 하중 속도의 조절이 가능한 만능 재료시험기(Model No. KPUT-100)를 사용하였다. 또한 로제트

게이지로부터 얻은 데이터는 디지털 변형률 측정기(Model No. DC3100)를 이용하여 측정 하였으며, 변위는 디지털 변위계(Model No. 543-464B)를 이용하여 측정하였다(Figure 3-7).

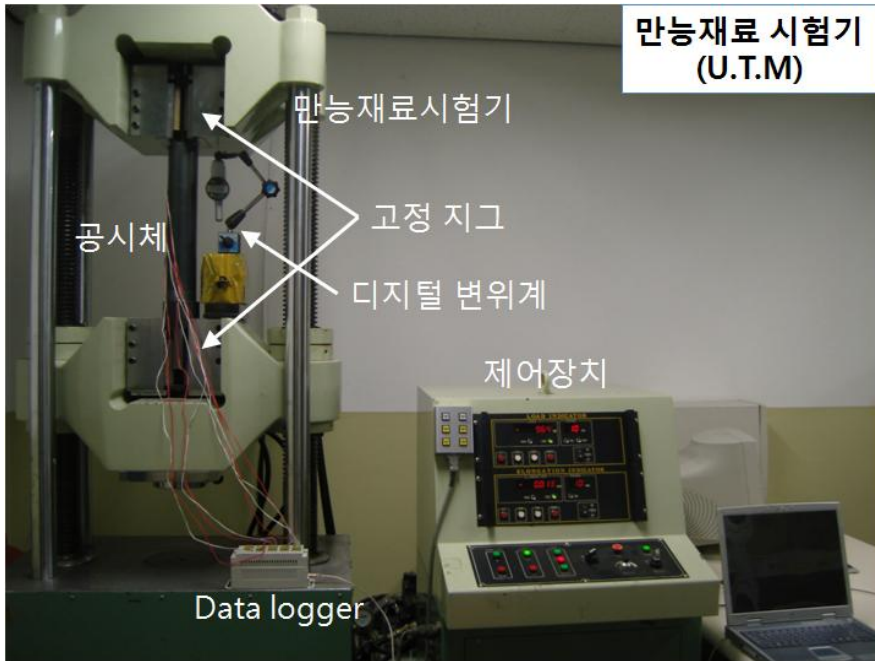


Figure 4-6. Photography for pull-out test of rock bolt and spiral bolt.

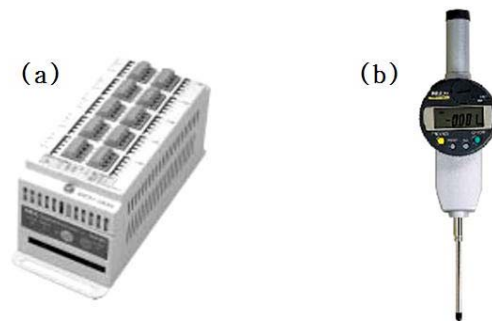


Figure 4-7. (a)Data logger and (b)digital displacement indicator for pull-out test.

4.3 구속압, 내부압, 전단응력

실내인발시험을 수행할 때 연강 원통관의 표면에 로제트 게이지를 부착하여 측정한 결과에 의해 공시체에 발생하는 구속압, 내부압 및 전단응력 등을 계산하여 얻었다.

연강 원통관의 표면에 부착한 로제트 게이지로부터 얻어진 인발하중과 변형률의 변화를 한 예로 나타내면 Figure 4-8과 같다. 인발하중이 작용할 때 하중이 낮을 때는 선형적이며 탄성적인 거동을 보이지만 하중이 증가하면서 비선형적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 거동을 보이는 이유는 연강 원통관의 소성화에 기인하지 않고 지보재가 인발됨으로서 지보재와 그라우트 사이에 부착파괴가 발생하여 공시체 내부에서 팽창압이 발생하여 나타난 현상으로 판단할 수 있다.

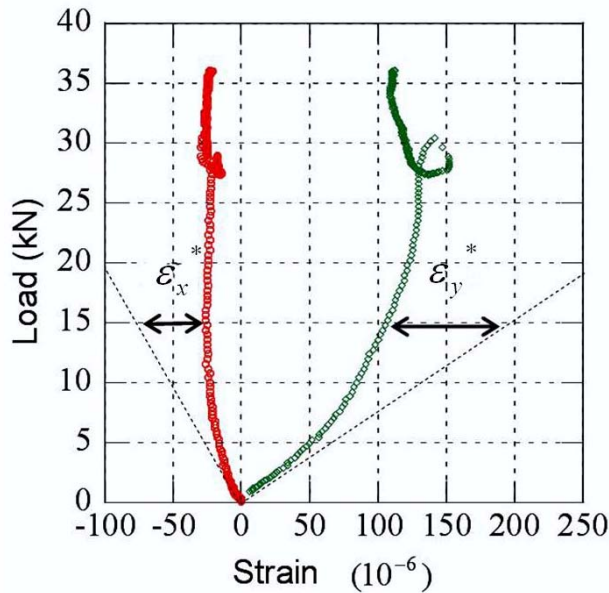


Figure 4-8. Relationship between axial and lateral strains and pull-out load.

선형영역에서는 전단변형률은 거의 0이 되므로 x 와 y 방향의 변형률이 주변형률이 되는 반면, 비선형영역에서는 공시체 내부로 변화가 일어나지 않은 경우 Figure 4-8의 실선으로 나타난 부분의 거동, 즉 실선에서 떨어진 변형률은 연강 원통관 내부의 변화에 의한 것으로 가정할 수 있다. 이 가정으로부터 x 와 y 방향에서 측정된

변형률로부터 탄성거동과 비탄성거동을 보이는 변형률의 차를 각각 ε_x^* , ε_y^* 라 하면 x 방향의 진변형률(true strain) ε_x 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^* + \nu\varepsilon_y^* \quad (4.1)$$

구속압은 연강 원통관의 내압으로 얇은 원통관이론(Ferdinand and Johnston, 1992)을 이용하여 구하였다. 구속압은 다음 식 4.2에 의해 구할 수 있다.

$$P_{ex} = E\frac{t}{r}(\varepsilon_x^* + \nu\varepsilon_y^*) = E\frac{t}{r}\varepsilon_x = \frac{t}{r}\sigma_x \quad (4.2)$$

여기서, P_{ex} 는 구속압, t 는 원통관의 두께, r 은 원통관 내부 반경, E 는 원통관의 영률, ν 는 원통관의 포아송비 그리고 σ_x 는 x 방향의 응력이다.

Figure 4-9는 인발시험을 수행할 때 발생하는 구속압과 내부압을 도시한 것이다.

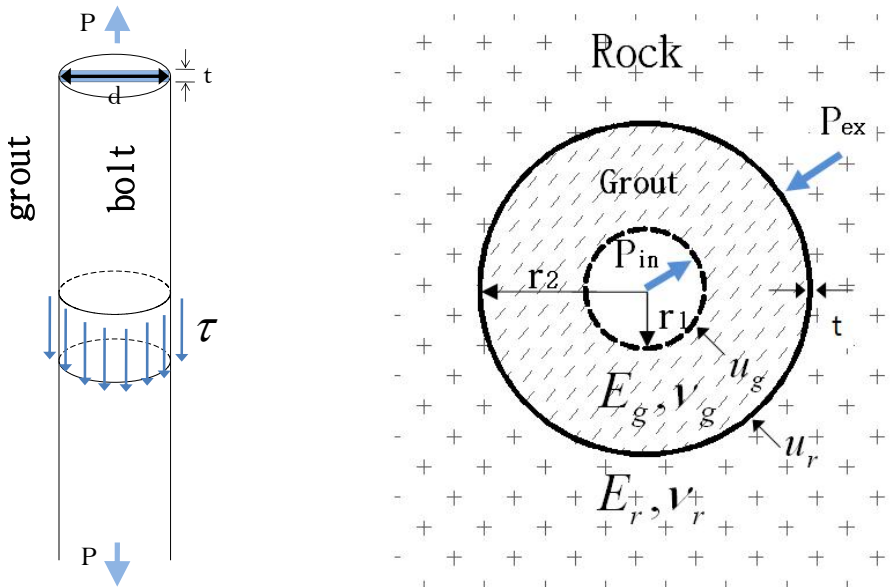


Figure 4-9. Circular cylinder subject to external pressure and Inner pressure.

내부압은 인발시험에서 원통관 내 지보재와 그라우트 사이에 전단응력의 발생으로 인해 원통관 내 팽창이 발생함으로써 생기는 압력으로 내부압과 구속압은 다음 식 4.3과 같은 관계를 갖는다(Yazici and Kaiser, 1992).

$$P_{in} = \beta P_{ex} \quad (4.3)$$

여기서, β 는 다음과 같다.

Figure 4-9의 오른쪽에서 그림에서 볼트와 그라우트 경계면의 변위(u_g)와 암석과 그라우트 경계면의 변위(u_r)는 식 4.4, 식 4.5에 의해 구할 수 있다.

$$u_g = \frac{(1 + \nu_g)(1 - 2\nu_g)}{E_g} \frac{P_{in}r_1^2 - P_{ex}r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r_2 + \frac{(1 + \nu_g)}{E_g} \frac{(P_{in} - P_{ex})r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r_2} \quad (4.4)$$

$$u_r = \frac{P_{ex}r_2}{E_r} (1 + \nu_r) \quad (4.5)$$

그라우트와 암석 경계면의 변위는 동등함이 필요하므로 식 4.6으로 나타낼 수 있다.

$$u_r = u_g \quad (4.6)$$

식 4.6에 의해 식 4.7로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_{ex}r_2}{E_r} (1 + \nu_r) \\ &= \frac{(1 + \nu_g)(1 - 2\nu_g)}{E_g} \frac{P_{in}r_1^2 - P_{ex}r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} r_2 + \frac{(1 + \nu_g)}{E_g} \frac{(P_{in} - P_{ex})r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r_2} \end{aligned} \quad (4.7)$$

P_{in} 을 P_{ex} 에 대해 정리하게 되면,

$$\frac{r_2(1+\nu_r)}{E_r}P_{ex} \quad (4.8)$$

$$= \frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)r_1^2r_2^2}{E_g(r_2^2-r_1^2)}P_{in} - \frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)r_2^3}{E_g(r_2^2-r_1^2)}P_{ex}$$

$$+ \frac{(1+\nu_g)r_1^2r_2^2}{E_g(r_2^2-r_1^2)}P_{in} - \frac{(1+\nu_g)r_1^2r_2^2}{E_g(r_2^2-r_1^2)}P_{ex}$$

$$\left[\frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)r_1^2r_2}{E_g(r_2^2-r_1^2)} + \frac{(1+\nu_g)r_1^2r_2}{E_g(r_2^2-r_1^2)} \right] P_{in} \quad (4.9)$$

$$= \left[\frac{r_2(1+\nu_r)}{E_r} + \frac{(1+\nu_g)(1-2\nu_g)r_2^3}{E_g(r_2^2-r_1^2)} + \frac{(1+\nu_g)r_1^2r_2}{E_g(r_2^2-r_1^2)} \right] P_{ex}$$

$$\frac{1+\nu_g}{E_g(r_2^2-r_1^2)} [(1-2\nu_g)r_1^2r_2 + r_1^2r_2] P_{in} \quad (4.10)$$

$$= \left[\frac{r_2(1+\nu_r)}{E_r} + \frac{(1+\nu_g)}{E_g(r_2^2-r_1^2)} \{(1-2\nu_g)r_2^3 + r_1^2r_2\} \right] P_{ex}$$

양변에 $\frac{1}{r_2}$ 을 곱해 준다.

$$\frac{1+\nu_g}{E_g(r_2^2-r_1^2)} [(1-2\nu_g)r_1^2 + r_1^2] P_{in} \quad (4.11)$$

$$= \left[\frac{(1+\nu_r)}{E_r} + \frac{(1+\nu_g)}{E_g(r_2^2-r_1^2)} \{(1-2\nu_g)r_2^2 + r_1^2\} \right] P_{ex}$$

$$\therefore P_{in} = \frac{\frac{1+v_r}{E_r} + \frac{1+v_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2v_g)r_2^2 + r_1^2]}{\frac{1+v_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2v)r_1^2 + r_1^2]} P_{ex} \quad (4.12)$$

따라서, P_{in} 는 P_{ex} 항에 의해 식 4.3처럼 표현될 수 있다.

$$\beta = \frac{\frac{1+v_r}{E_r} + \frac{1+v_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2v_g)r_2^2 + r_1^2]}{\frac{1+v_g}{E_g(r_2^2 - r_1^2)} [(1-2v)r_1^2 + r_1^2]} \quad (4.13)$$

여기서 E_r , ν_r 은 암반의 영률과 포아송비, E_g , ν_g 는 그라우트의 영률과 포아송비, u_r , ν_g 는 볼트-그라우트 경계면에서의 변위와 그라우트-암석사이의 변위이다. 본 연구에서는 연강 원통관을 인공암반이라 가정하였으므로 암반의 영률과 포아송비 대신에 연강 원통관의 영률과 포아송비를 이용하였다.

연강 원통관의 표면에 부착한 로제트 게이지로부터 변형률을 측정하여 볼트와 그라우트 경계면의 전단응력을 다음 식 4.14와 같이 계산하였다.

$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \quad (4.14)$$

여기서, τ 는 전단응력, P 는 인발하중, d 는 볼트의 직경, l 은 정착길이이다.

다음은 이론식에 의한 전단응력이다(Farmer, 1975).

$$\tau_{th} = \frac{1}{2} r \alpha \sigma \exp(-\alpha x) \quad (4.15)$$

여기서, τ_{th} 는 이론식에 의한 전단응력, r 은 볼트의 반경, σ 는 볼트 선단에 가해

진 인발력, x 는 정착길이, α 는 축력 및 전단응력에 대한 상수로 식 4.16과 식 4.17에 의해 구할 수 있다.

그라우트 직경이 얇은 경우($R-r > r$)

$$\alpha^2 = \frac{K}{r(R-r)} \quad (4.16)$$

그라우트 직경이 두꺼운 경우($R-r < r$)

$$\alpha^2 = \frac{K}{r^2 \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (4.17)$$

여기서, R 은 천공경의 반경, r 은 볼트의 반경, K 는 그라우트의 탄성계수(E_g)와 볼트의 탄성계수(E_b)의 비이다.

5. 연구결과

록 볼트와 스파이럴 볼트에 대해 실내 인발시험을 수행하였고, 각각의 양생기간과 지보재에 따른 하중-변위, 하중-구속압, 변위-구속압, 하중-내부압, 변위-내부압, 내부압-전단응력 및 구속압 분포의 관계를 Figure 5-2 ~ 5-41 에 도시하였다.

Figure 5-1은 실내 인발시험을 수행하기 전과 수행 후의 록 볼트, 스파이럴 볼트의 모습을 나타낸 것이다.



before pull-out test



after pull-out test
of rock bolt



after pull-out test
of spiral bolt

Figure 5-1. Pull-out test of rock bolt and spiral bolt in laboratory.

5.1 록 볼트 및 스파이럴 볼트의 항복 하중

록 볼트와 스파이럴 볼트는 각각 다른 파괴 양상을 보인다. 록 볼트의 경우 인발 하중에 의해 발생한 변위가 천천히 증가하면서 항복점에 이르고 항복점을 지난 후 인발하중이 급격히 감소하는 총 2단계의 인발하중에 따른 변위 관계를 보인다.

스파이럴의 경우 총 3단계의 인발하중에 따른 변위 관계를 보인다. 처음에는 록 볼트와 마찬가지로 하중에 의해 발생한 변위가 천천히 증가하면서 항복점에 이르게 되고 항복점을 지난 후 하중이 록 볼트에 비해 천천히 감소하다가 다시 증가하고, 총 3단계의 과정을 거치는 동안 변위는 계속하여 발생한다.

5.2 양생기간 7일

인발하중과 변위의 관계에서 양생기간 7일의 록 볼트 공시체(이하 RB-7)의 경우 항복 인발하중은 179.83 kN이며 허용 인발강도는 354.90 MPa로 나타났다(Figure 5-2). 초기 인발하중에 의해 변위가 인발하중 6.82 kN에서 서서히 발생하기 시작하여 항복 인발하중인 179.83 kN까지 평균 0.003 mm의 변위 증가량을 보인다. 그 후 항복 인발하중을 지난 뒤 평균 0.004 mm의 간격으로 증가하였다.

양생기간 7일의 스파이럴 볼트 공시체(이하 SB-7)의 경우 인발하중과 변위 관계에서 항복 인발하중은 137.69 kN이었고 허용 인발강도는 478.09 MPa로 나타났다(Figure 5-3). 초기 하중에 의해 변위가 인발하중 13.31 kN에서 서서히 발생하기 시작하여 인발하중 59.29 kN까지 평균 0.0001 mm의 변위 증가량을 보이다 항복 인발하중인 137.69 kN까지 평균 0.004 mm의 변위 증가량을 보인다. 항복 인발하중을 지나 인발하중이 다시 증가하기 시작하는 81.93 kN까지 평균 0.004 mm의 변위 증가량을 보이다가 인발하중이 그 이후로 평균 0.36 mm의 변위 증가량을 보였다.

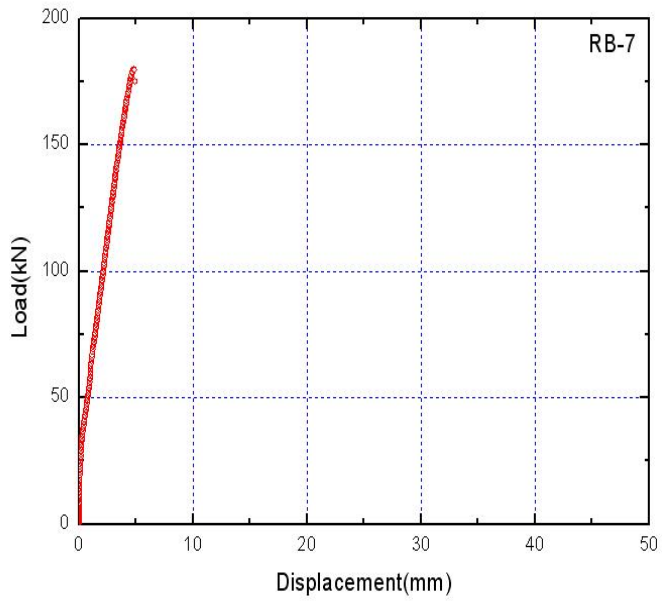


Figure 5-2. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

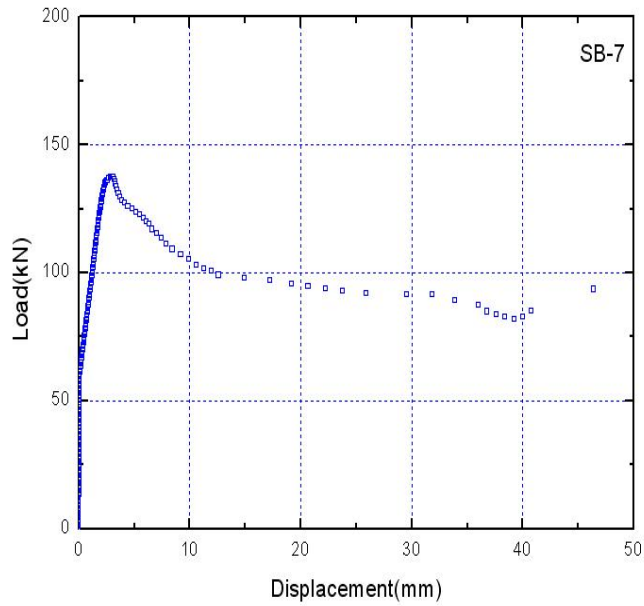


Figure 5-3. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

록 볼트와 스파이럴 볼트의 항복 인발하중과 항복 인발강도에 관해서 Table 5-1에 나타내었다.

Table 5-1. Result of pull-out load and pull-out strength by pull-out test in laboratory : 7days

Sample No.	Yield of pull-out load (kN)	Yield of pull-out strength (MPa)
RB-7	179.83	354.90
SB-7	137.69	478.09

양생기간이 7일인 경우 각 지점에 대한 구속압은 Table 5-2와 같다. 구속압-인발하중 관계에서 RB-7은 항복 인발하중(179.83 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 6.27 MPa, 9.79 MPa, 12.08 MPa, 14.49 MPa의 구속압이 발생하였다(Figure 5-4). $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 인발하중에 따른 구속압의 변화폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 와 비슷한 양상을 보이면서 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 인발하중에 따른 구속압의 변화폭이 감소하였다.

반면 SB-7의 경우 항복 인발하중(137.69 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 5.54 MPa, 9.34 MPa, 11.70 MPa, 12.51 MPa의 구속압이 발생하였다(Figure 5-5). $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=190\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 구속압은 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=280\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 구속압은 비슷한 양상을 보였다.

Table 5-2. Result of external pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 7days

Sample No.	External pressure (MPa)			
	$Z=100\text{ mm}$	$Z=190\text{ mm}$	$Z=280\text{ mm}$	$Z=370\text{ mm}$
RB-7	6.27	9.79	12.08	14.49
SB-7	5.54	9.34	11.70	12.51

이상의 결과를 정리하면 항복 인발하중에 있어서 RB-7은 SB-7에 비해 약 42 kN 정도 크고, 허용 항복강도는 SB-7이 RB-7보다 123.19 MPa 정도 크게 나왔다. 구속압은 각 지점에 따라 RB-7이 SB-7에 비해 0.73 MPa, 0.45 MPa, 0.38 MPa, 1.98 MPa 크게 나왔다.

Figure 5-6, 5-7은 양생기간 7일에 대한 실내인발시험에서 구한 지보재의 구속압에 따른 변위의 관계를 나타낸 것이다.

RB-7의 경우 Figure 5-6에서 볼 수 있듯이 변위의 증가에 따라 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 가장 높게 나왔고 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 순으로 변화폭이 감소하였다. 인발하중-구속압의 관계와 마찬가지로 변위에 따른 구속압의 분포는 $z=370\text{ mm}$ 지점에서 변위에 따른 구속압의 변화폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 와 비슷한 양상을 보이나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 변위에 따른 구속압의 변화 폭이 감소하였다.

SB-7의 경우 Figure 5-7과 같이 변위는 구속압과 함께 증가하며, 인발하중의 감소에 의한 구속압의 감소에도 변위는 계속해서 증가하였다. $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=190\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 구속압의 분포는 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=280\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 구속압의 분포는 비슷한 양상을 보였다.

Figure 5-8, 5-9는 양생기간 7일에 대한 항복 인발하중에서의 Z 지점별 구속압을 나타낸 것이다. RB-7의 경우 Figure 5-8과 같이 Z 지점이 증가할수록 구속압이 선형적으로 증가하는 걸 볼 수 있다. SB-7의 경우 Figure 5-9와 같이 구속압이 선형적으로 증가하다가 록 볼트와는 달리 증가폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

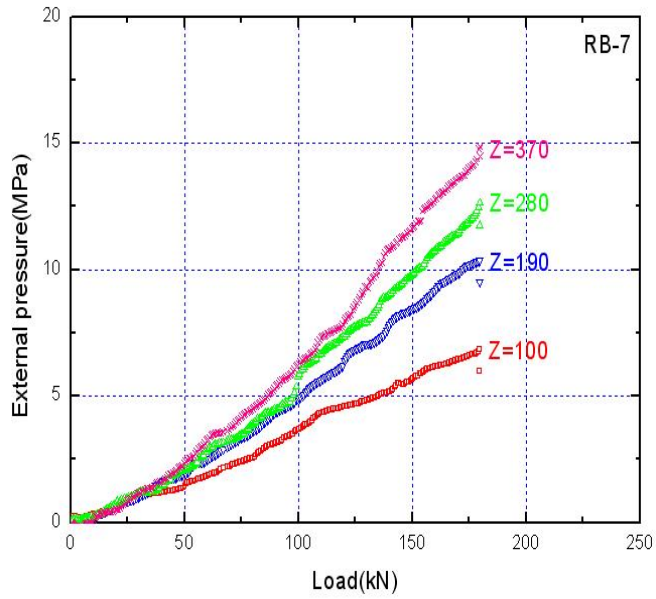


Figure 5-4. Relationship between external pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

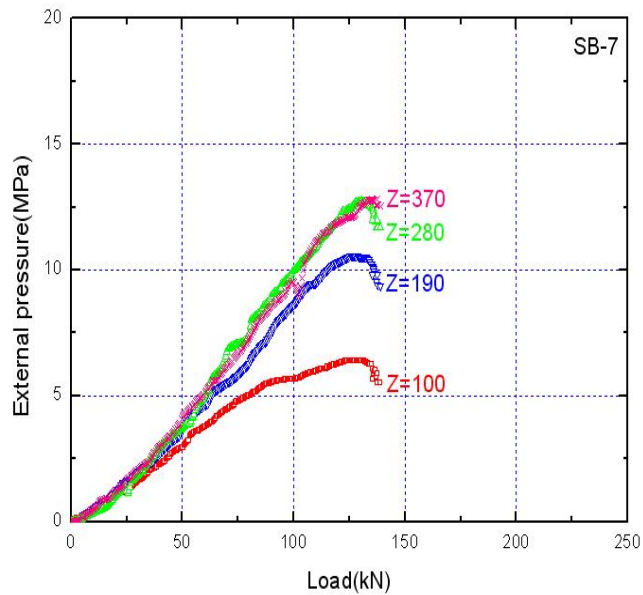


Figure 5-5. Relationship between external pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

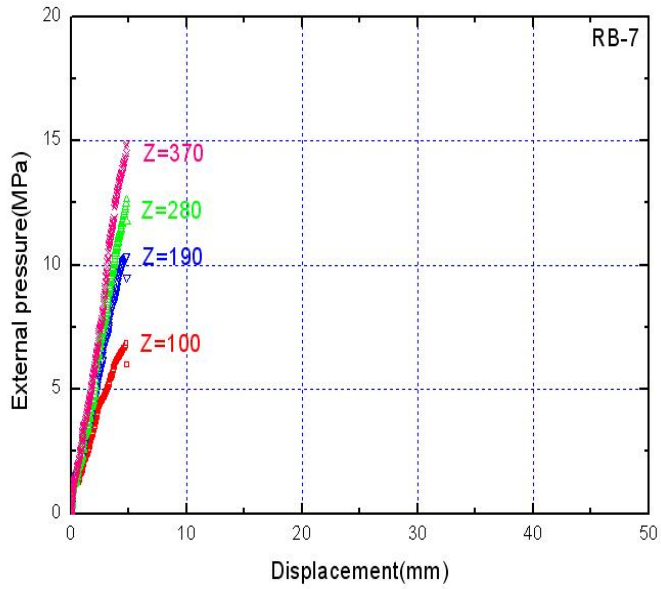


Figure 5-6. Relationship between external pressure and displacement of rock bolt with 7 days.

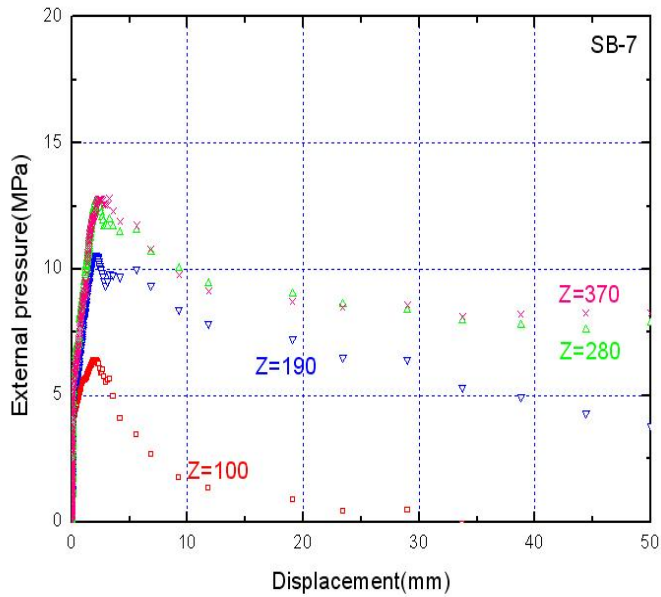


Figure 5-7. Relationship between external pressure and displacement of spiral bolt with 7 days.

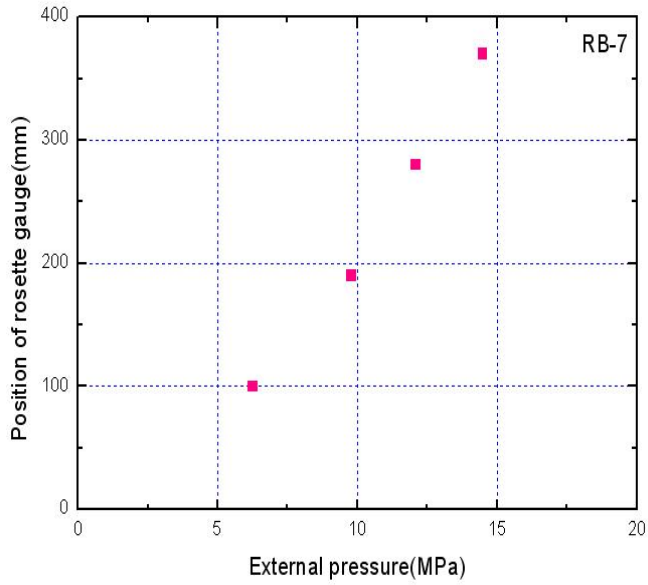


Figure 5-8. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days.

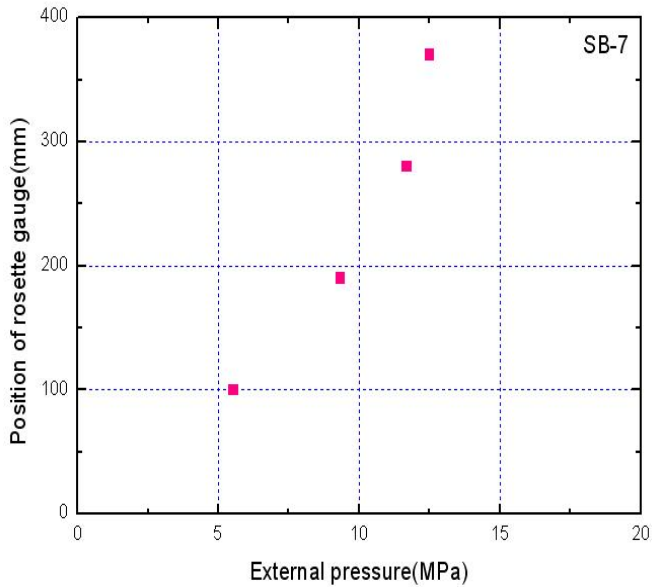


Figure 5-9. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

양생기간이 7일인 경우 각 지점에 대한 내부압은 Table 5-3과 같다. 내부압-인발하중 관계에서 RB-7은 항복 인발하중(179.83 kN)일 때 $z=100\text{ mm}$, $z=190\text{ mm}$, $z=280\text{ mm}$, $z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 21.88 MPa, 34.17 MPa, 42.19 MPa, 50.59 MPa의 내부압이 발생하였다(Figure 5-10). $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 인발하중에 따른 내부압의 변화 폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 와 비슷한 양상을 보이나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 인발하중에 따른 내부압의 변화 폭이 감소하였다.

반면 SB-7의 경우 항복 인발하중(137.69 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 13.15 MPa, 22.17 MPa, 27.78 MPa, 29.71 MPa의 내부압이 발생하였다(Figure 5-11). $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=190\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 내부압은 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=280\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 내부압은 비슷한 양상을 보였다.

Table 5-3. Result of Inner pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 7days

Sample No.	Inner pressure (MPa)			
	$Z=100\text{ mm}$	$Z=190\text{ mm}$	$Z=280\text{ mm}$	$Z=370\text{ mm}$
RB-7	21.88	34.17	42.19	50.59
SB-7	13.15	22.17	27.78	29.71

이상의 결과를 정리하면 내부압은 각 지점에 따라 RB-7이 SB-7에 비해 8.73 MPa, 12.00 MPa, 14.41 MPa, 20.88 MPa 크게 나왔다.

내부압-변위의 관계는 Figure 5-12, 5-13에 도시되어 있다. RB-7의 경우 Figure 5-12에서 볼 수 있듯이 내부압은 변위의 증가에 따라 $Z=370\text{ mm}$ 지점이 가장 높게 나왔고 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 순으로 변화폭이 감소하였다. 인발하중-내부압의 관계와 마찬가지로 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 변위에 따른 내부압의 변화 폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 지점의 경우와 비슷한 양상을 보이나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 변위에 따른 내부압의 변화 폭이 감소하였다.

SB-7의 경우 Figure 5-13과 같이 변위는 내부압과 함께 증가하며, 인발하중의 감소에 의한 내부압의 감소에도 변위는 계속해서 증가하였다. $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=190\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 내부압의 분포는 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=280\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 내부압의 분포는 비슷한 양상을 보였다.

Figure 5-14, 5-15는 양생기간 7일에 대한 항복 인발하중에서의 Z 지점별 내부압을 나타낸 것이다. RB-7의 경우 Figure 5-14와 같이 Z 지점이 증가할수록 내부압이 선형적으로 증가하는 걸 볼 수 있다. SB-7의 경우 Figure 5-9와 같이 내부압이 선형적으로 증가하다가 록 볼트와는 달리 증가폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Figure 5-16, 5-17은 양생기간 7일에 대한 전단응력과 내부압의 관계를 나타낸 것이고, Figure 5-18, 5-19는 항복 인발하중에서의 Z 지점별 전단응력을 나타낸 것이다. 두 지보재 모두 Z 지점이 길어질수록 내부압은 증가하고 전단응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 RB-7, SB-7 모두 Z 지점이 짧을수록 전단응력이 크게 나타났고, $Z=370\text{ mm}$ 지점에서는 6.19 MPa, 3.70 MPa로 2.49 MPa의 차이가 나지만 $Z=100\text{ mm}$ 지점에서는 22.91 MPa, 13.7 MPa로 9.21 MPa 차이가 났다. Z 지점이 짧아질수록 RB-7과 SB-7의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

Figure 5-20, 5-21은 양생기간 7일에 대한 전단응력과 Z 지점의 관계를 계산에 의한 것과 이론식에 의한 것을 비교한 것이다. 계산에 의한 전단응력과 이론식에 의한 전단응력 모두 지수함수적으로 감소하는 비슷한 경향을 볼 수 있다.

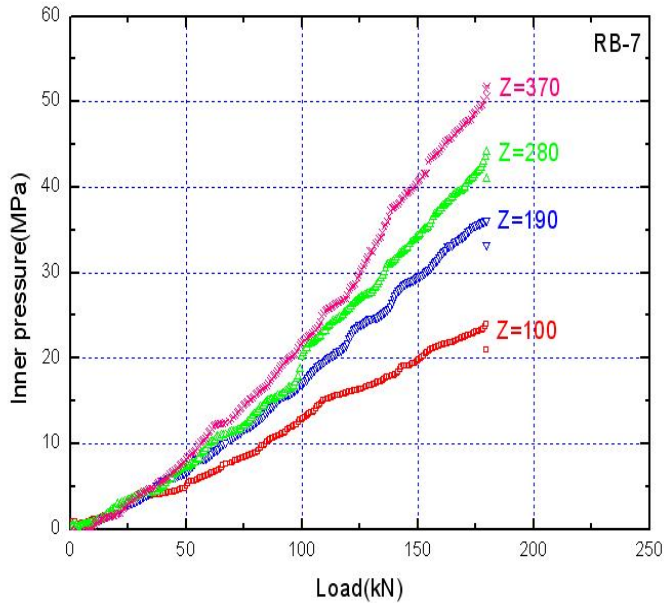


Figure 5-10. Relationship between inner pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

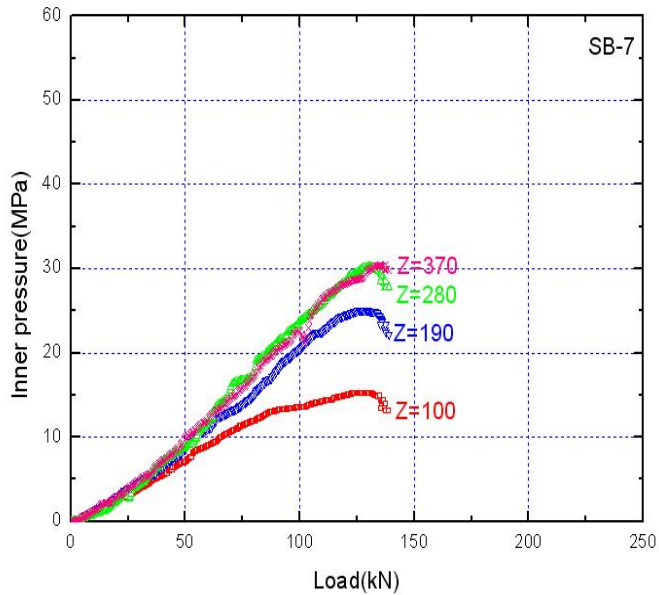


Figure 5-11. Relationship between inner pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

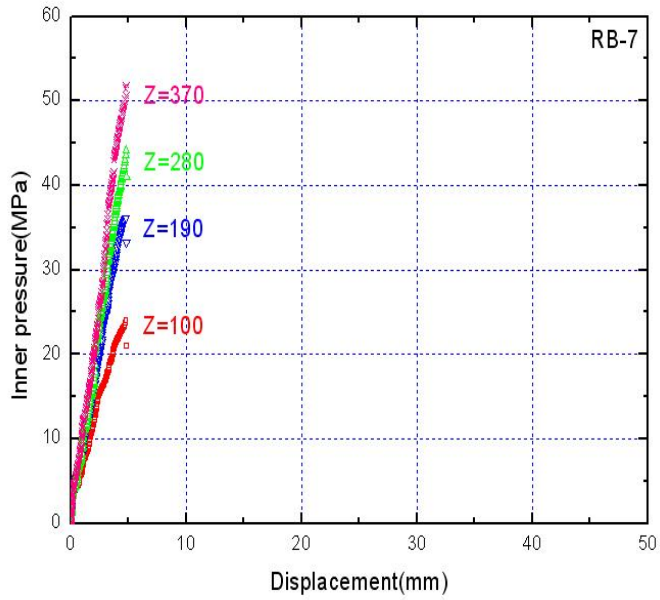


Figure 5-12. Relationship between inner pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

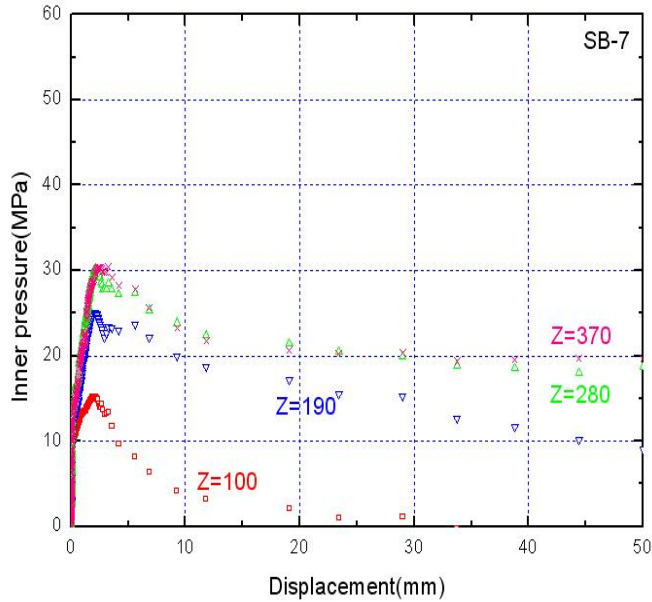


Figure 5-13. Relationship between inner pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

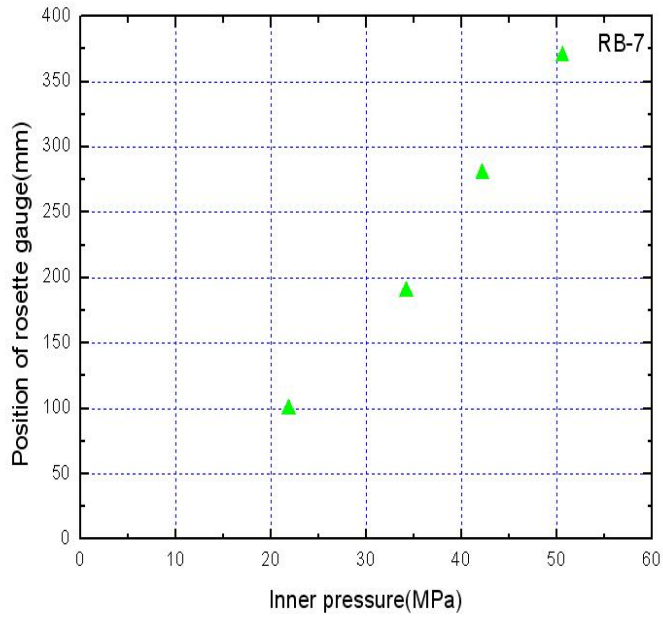


Figure 5-14. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days.

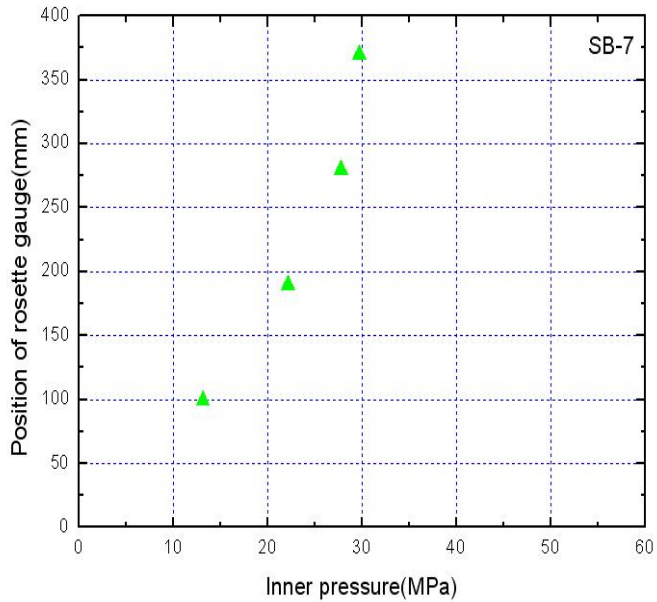


Figure 5-15. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

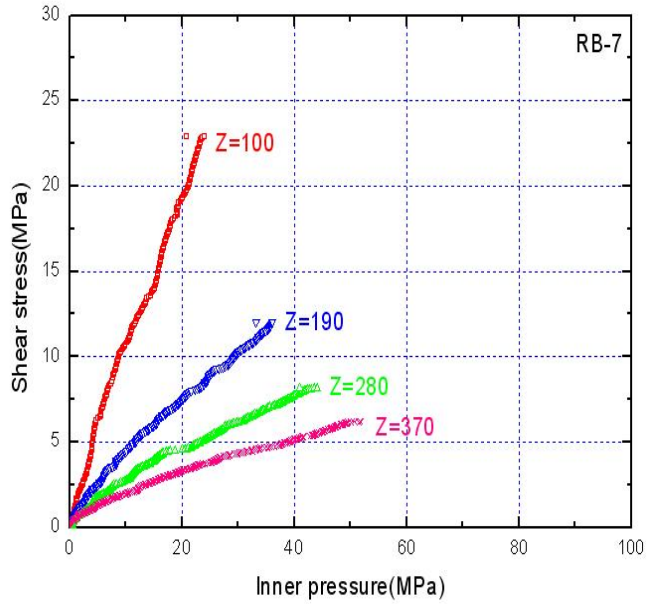


Figure 5-16. Relationship between inner pressure and shear stress of rock bolt with grouted specimen of 7 days.

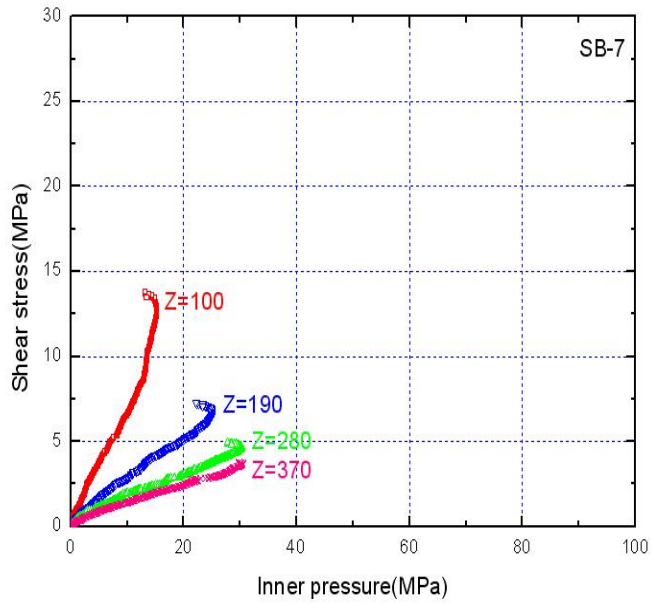


Figure 5-17. Relationship between inner pressure and shear stress of spiral bolt with grouted specimen of 7 days.

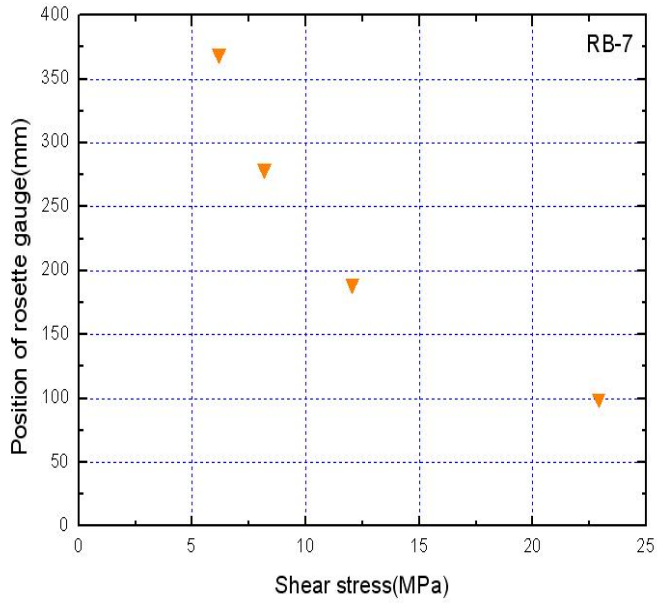


Figure 5-18. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days by calculation.

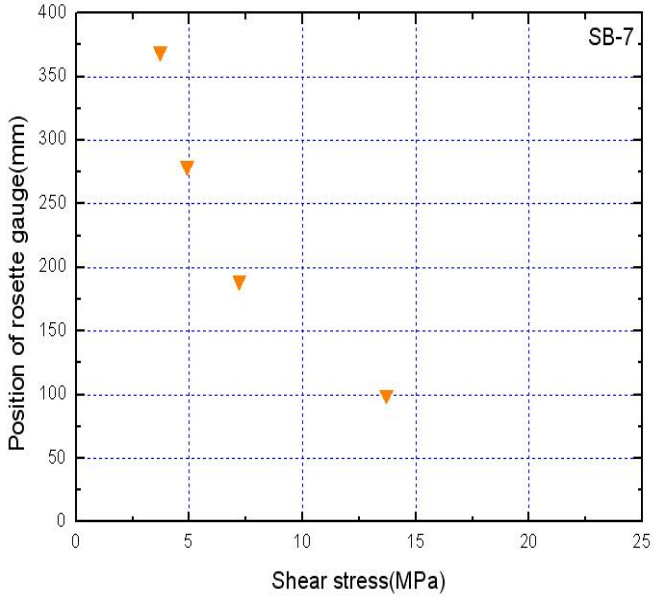


Figure 5-19. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days by calculation.

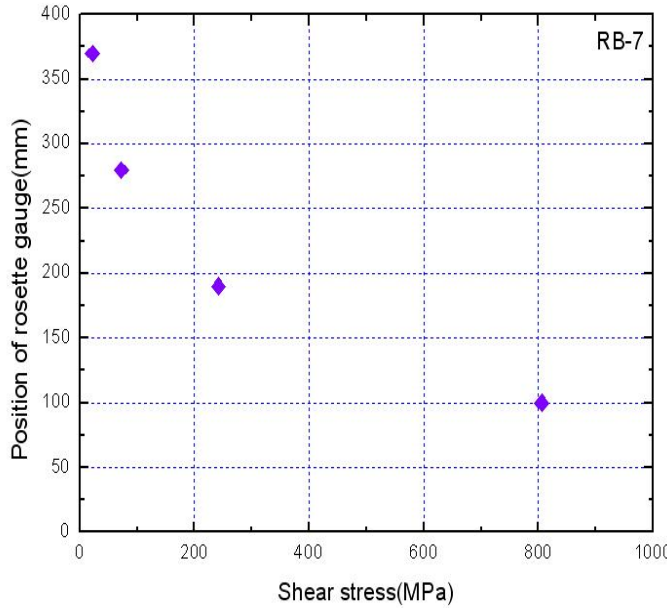


Figure 5-20 Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 7 days calculated by theory.

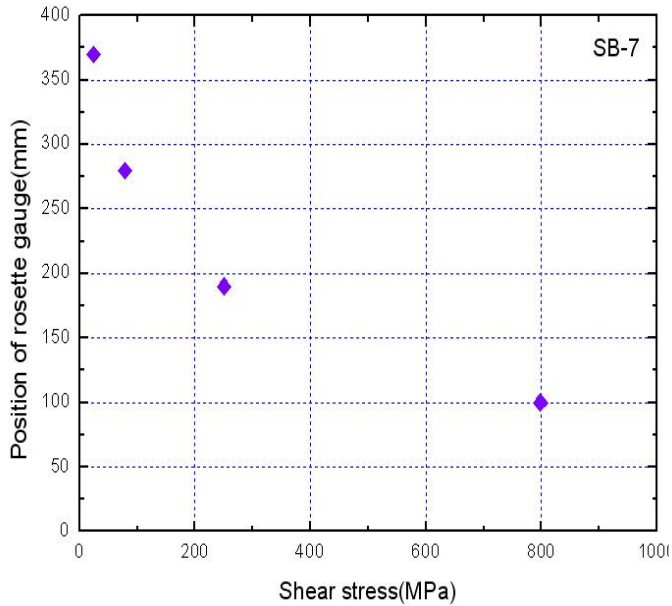


Figure 5-21 Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 7 days calculated by theory.

5.2 양생기간 28일

양생기간이 28일에 대한 실내 인발시험 결과를 Table 5-4에 나타내었다. 인발하중-변위 관계에서 양생기간 28일의 록 볼트 공시체(이하 RB-28)의 경우 항복 인발하중은 193.35 kN이며, 허용 인발강도는 381.80 MPa 로 나타났다(Figure 5-22). 초기 인발하중에 의해 변위가 인발하중 4.47 kN에서 서서히 발생하기 시작하여 항복 인발하중인 193.35 kN까지 평균 0.003 mm의 변위 증가량을 보인다. 그 후 항복 인발하중을 지난 뒤 평균 0.068 mm의 간격으로 증가하였다.

반면, 양생기간 28일의 스퀘어럴 볼트 공시체(이하 SB-28)의 경우 인발하중-변위 관계에서 항복 인발하중은 163.46 kN이고, 허용 인발강도는 566.56 MPa 로 나타났다(Figure 5-23). 초기 인발하중에 의해 변위가 인발하중 38.32 kN에서 서서히 발생하기 시작하여 항복 인발하중인 163.46 kN까지 평균 0.0025 mm의 변위 증가량을 보인다. 그 후 항복 인발하중을 지나 인발하중이 다시 증가하기 시작하는 95.16 kN까지 평균 0.004 mm의 변위 증가량을 보이다가 인발하중이 다시 증가하기 시작하는 95.16 kN 이후로 평균 0.21 mm의 변위 증가량을 보였다.

Table 5-4. Result of pull-out load, pull-out strength by pull-out test in laboratory : 28days

Sample No.	Yield of Pull-out Load (kN)	Yield of Pull-out Strength (MPa)
RB-7	193.35	381.80
SB-7	163.46	566.56

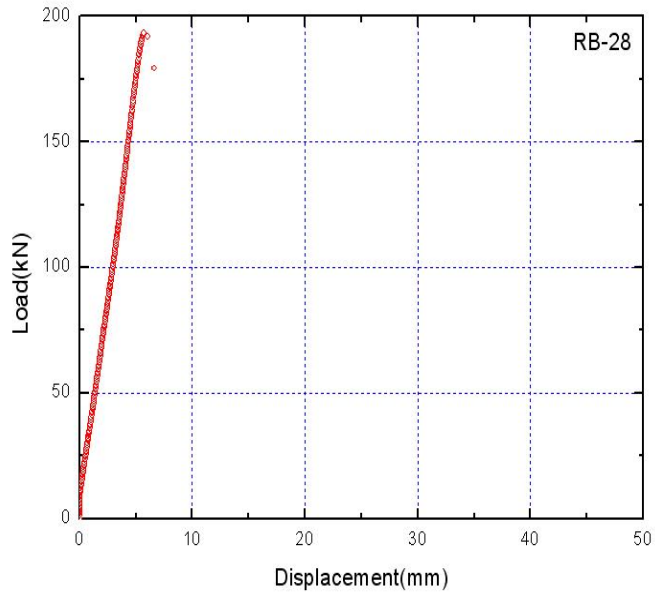


Figure 5-22. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

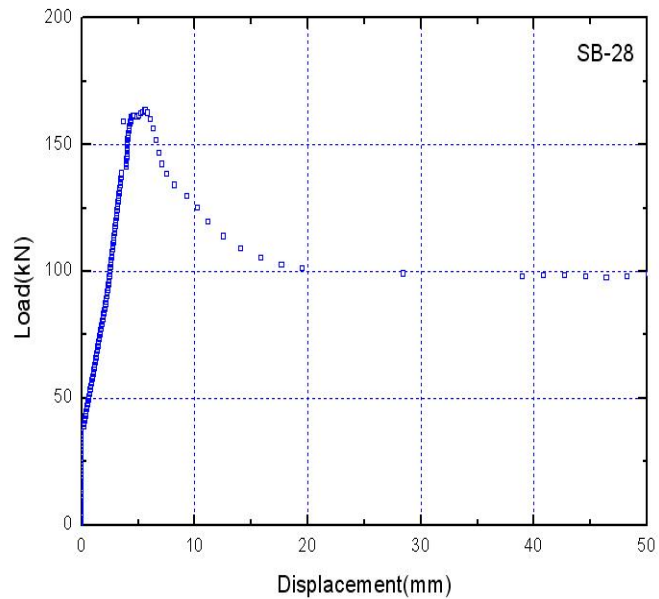


Figure 5-23. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

양생기간이 28일인 경우 각 지점에 대한 구속압은 Table 5-5와 같다. 구속압-인발하중 관계에서 RB-28은 항복 인발하중(193.35 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 20.94 MPa, 33.21 MPa, 36.85 MPa, 42.40 MPa의 구속압이 발생하였다(Figure 5-24). $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 인발하중에 따른 구속압의 변화폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 와 비슷한 양상을 보이나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 인발하중에 따른 구속압의 변화폭이 감소하였다.

반면 SB-28의 경우 항복 인발하중(163.46 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 19.75 MPa, 21.43 MPa, 26.67 MPa, 33.28 MPa의 구속압이 발생하였다(Figure 5-25). $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 구속압은 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=190\text{ mm}$ 지점과 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서는 인발하중에 따른 구속압은 인발하중 80 kN 정도까지 구속압의 변화폭이 비슷한 양상을 보인다 그 이후에는 $Z=280\text{ mm}$ 지점의 인발하중에 따른 구속압의 변화폭이 더 크게 증가하였다.

Table 5-5. Result of external pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 28days

Sample No.	External pressure (MPa)			
	$Z=100\text{ mm}$	$Z=190\text{ mm}$	$Z=280\text{ mm}$	$Z=370\text{ mm}$
RB-28	20.94	33.21	36.85	42.40
SB-28	19.75	21.43	26.67	33.28

이상의 결과를 정리하면 항복 인발하중에 있어서 RB-28은 SB-28에 비해 약 30 kN 정도 크고, 허용 항복강도는 SB-28이 RB-28보다 184.76 MPa 정도 크게 나왔다. 구속압은 각 지점에 따라 RB-28이 SB-28에 비해 1.19 MPa, 11.78 MPa, 10.18 MPa, 9.12 MPa 크게 나왔다.

Figure 5-26, 5-27은 양생기간 28일에 대한 실내인발시험에서 구한 지보재의 구속압과 변위의 관계를 나타낸 것이다.

RB-28의 경우 Figure 5-26에서 볼 수 있듯이 변위의 증가에 따라 지보재의 구속압이 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 가장 높게 나왔고 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 순으로 감소하였다. 인발하중-구속압의 관계와 마찬가지로 변위에 따른 구속압의 분포는 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 변위에 따른 구속압의 변화 폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 와 비슷한 양상을 보이거나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 변위에 따른 구속압의 변화 폭이 감소하였다.

SB-28의 경우 Figure 5-27과 같이 변위는 구속압과 함께 증가하며, 인발하중의 감소에 의한 구속압의 감소에도 변위는 계속해서 증가하였다. $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 구속압의 분포는 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=190\text{ mm}$ 지점과 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 구속압의 분포는 변위가 3 mm 일 때까지 비슷한 양상을 보이다가 그 이후로 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서의 구속압이 더 증가하였다.

Figure 5-28, 5-29는 양생기간 28일에 대한 항복 인발하중에서의 Z 지점별 구속압을 나타낸 것이다. 두 지보재 모두 Z 지점이 깊어질수록 구속압이 증가하지만 서로 다른 경향으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

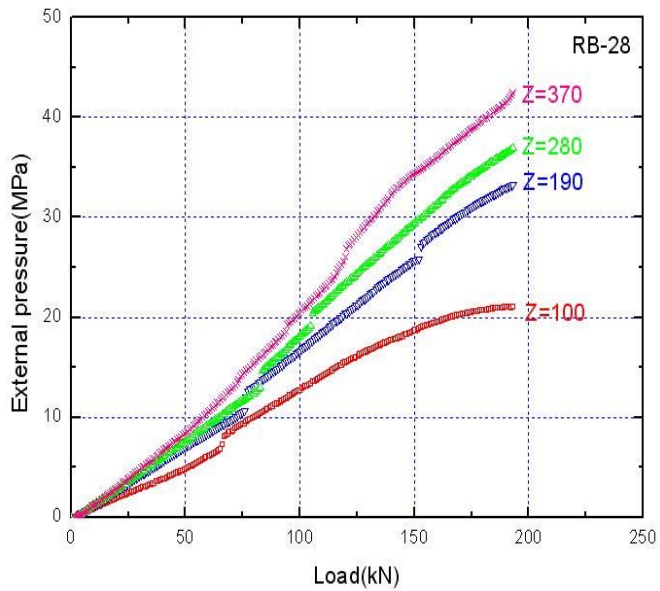


Figure 5-24. Relationship between external pressure and pul-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

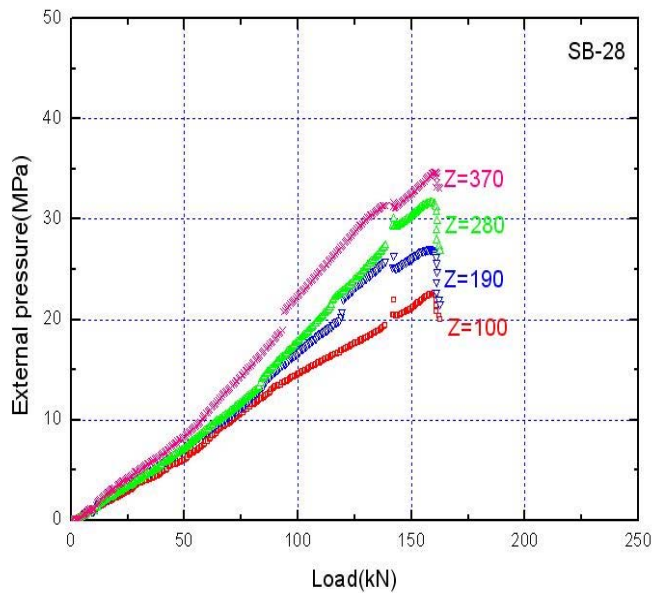


Figure 5-25. Relationship between external pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

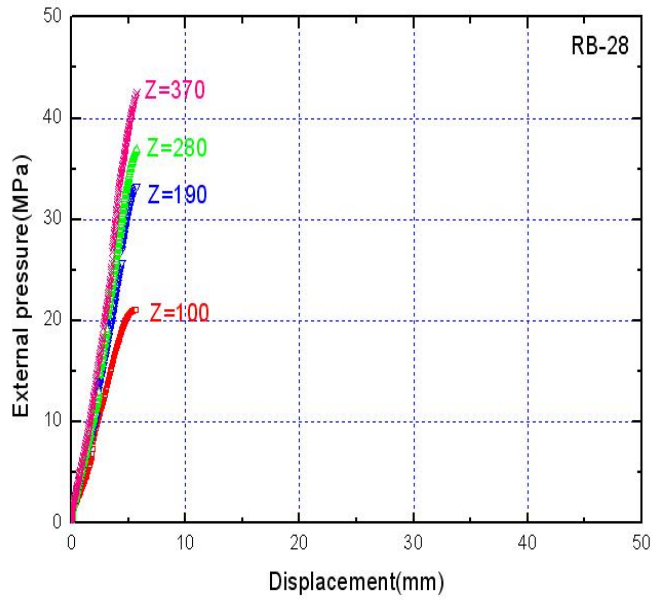


Figure 5-26. Relationship between external pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

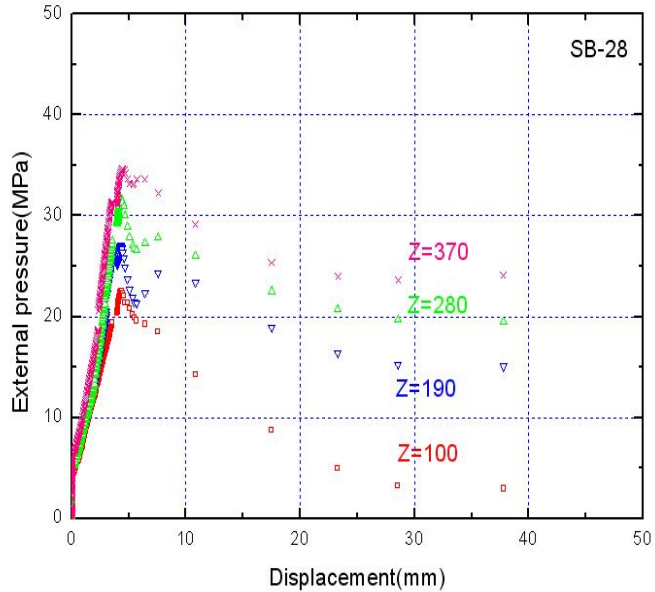


Figure 5-27. Relationship between external pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

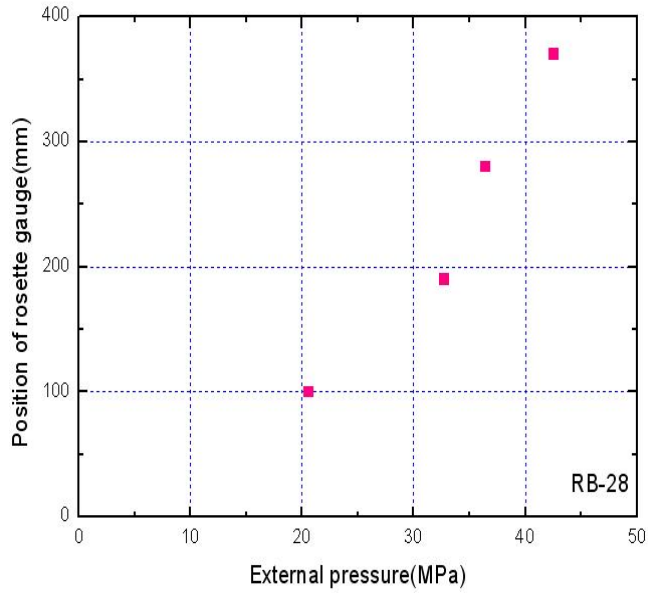


Figure 5-28. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days.

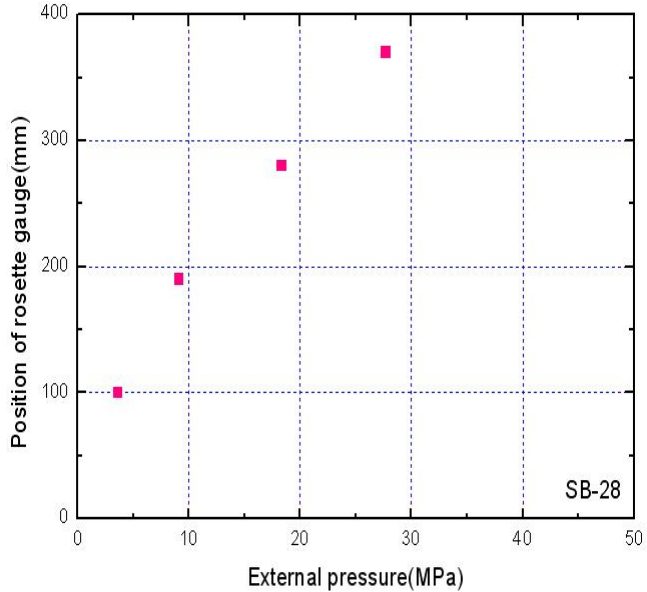


Figure 5-29. Relationship between external pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

양생기간이 28일인 경우 각 지점에 대한 내부압은 Table 5-6과 같다. 내부압-인발하중 관계에서 RB-28은 항복 인발하중(193.35 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 82.99 MPa, 131.61 MPa, 146.06 MPa, 168.07 MPa의 내부압이 발생하였다(Figure 5-30). $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 인발하중에 따른 내부압의 변화 폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 지점과 비슷한 양상을 보이거나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 하중에 따른 내부압의 변화 폭이 감소하였다.

반면 SB-28의 경우 항복 인발하중(163.46 kN)일 때 $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ 인 지점에서 각각 52.04 MPa, 56.48 MPa, 70.26 MPa, 87.68 MPa의 내부압이 발생하였다(Figure 5-31). $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 내부압은 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=190\text{ mm}$ 지점과 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서는 인발하중에 따른 내부압은 80 kN까지 내부압의 변화 폭이 비슷한 양상을 보이다가 그 이후에는 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서의 인발하중에 따른 내부압의 변화 폭이 더 크게 증가하였다.

Table 5-6. Result of Inner pressure in $Z=100\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=280\text{ mm}$, $Z=370\text{ mm}$ by pull-out test in laboratory : 28days

Sample No.	Inner pressure (MPa)			
	$Z=100\text{ mm}$	$Z=190\text{ mm}$	$Z=280\text{ mm}$	$Z=370\text{ mm}$
RB-28	82.99	131.61	146.06	168.07
SB-28	52.04	56.48	70.26	87.88

이상의 결과를 정리하면 내부압은 각 지점에 따라 RB-28이 SB-28에 비해 30.95 MPa, 75.13 MPa, 75.80 MPa, 80.19 MPa 크게 나왔다.

내부압-변위의 관계는 Figure 5-32, 5-33에 도시되어 있다. RB-28의 경우 Figure 5-32에서 볼 수 있듯이 내부압은 변위의 증가에 따라 $Z=370\text{ mm}$ 지점이 가장 높게 나왔고 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 순으로 증가하였다. 인발하중-내부압의 관계와 마찬가지로 변위에 따른 내부압의 분포는 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서 변위에 따른 내부압의 변화 폭이 가장 크고 다른 지점의 경우에도 $Z=370\text{ mm}$ 지점과 비슷한 양상을 보이거나 $Z=280\text{ mm}$, $Z=190\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 의 순서대로 변위에 따른

내부압의 변화 폭이 감소한다.

SB-28의 경우 Figure 5-33과 같이 변위는 내부압과 함께 증가하며, 인발하중의 감소에 의한 내부압의 감소에도 변위는 계속해서 증가하였다. $Z=100\text{ mm}$ 지점과 $Z=370\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 내부압의 분포는 각기 다른 양상을 보였지만, $Z=190\text{ mm}$ 지점과 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서의 변위에 따른 내부압의 분포는 변위 약 3 mm 까지는 비슷한 양상을 보이다가 그 이후로는 $Z=280\text{ mm}$ 지점에서의 내부압이 더 크게 증가하였다.

Figure 5-34, 5-35는 양생기간 28일에 대한 항복 인발하중에서의 Z 지점별 내부압을 나타낸 것이다. 두 지보재 모두 Z 지점이 길어질수록 구속압이 증가하지만 서로 다른 경향으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figure 5-36, 5-37은 양생기간 28일에 대한 전단응력과 내부압의 관계를 나타낸 것이고, Figure 5-38, 5-39는 항복 인발하중에서의 Z 지점별 전단응력을 나타낸 것이다. 양생기간 7일과 마찬가지로 두 지보재 모두 Z 지점이 길어질수록 내부압은 증가하고 전단응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 RB-28, SB-28 모두 Z 지점이 짧아질수록 전단응력이 크게 나타났고, $Z=370\text{ mm}$ 지점에서는 6.56 MPa , 2.61 MPa 로 3.95 MPa 의 차이가 나지만 $Z=100\text{ mm}$ 지점에서는 24.28 MPa , 9.66 MPa 로 14.62 MPa 차이가 났다. Z 지점이 짧아질수록 RB-28과 SB-28의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 5-40, 5-41은 양생기간 28일에 대한 전단응력과 Z 지점과의 관계를 계산에 의한 것과 이론식에 의한 것을 비교한 것이다. 계산에 의한 전단응력과 이론식에 의한 전단응력 모두 지수함수적으로 감소하는 비슷한 경향을 볼 수 있다.

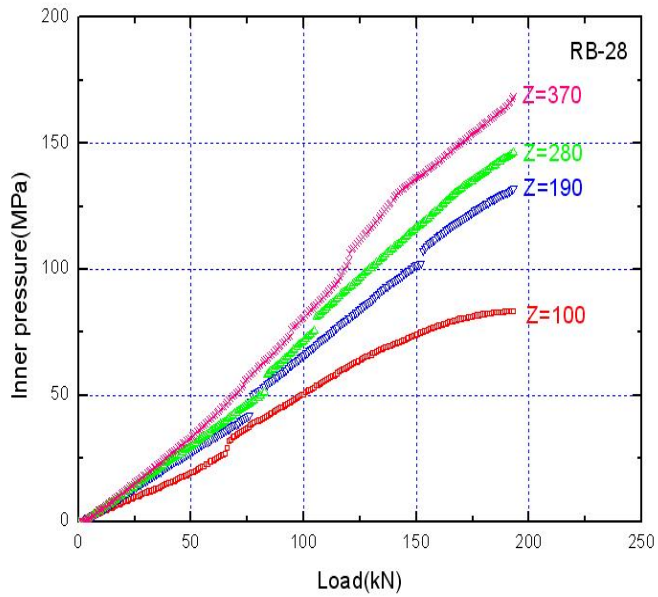


Figure 5-30. Relationship between inner pressure and pull-out load of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

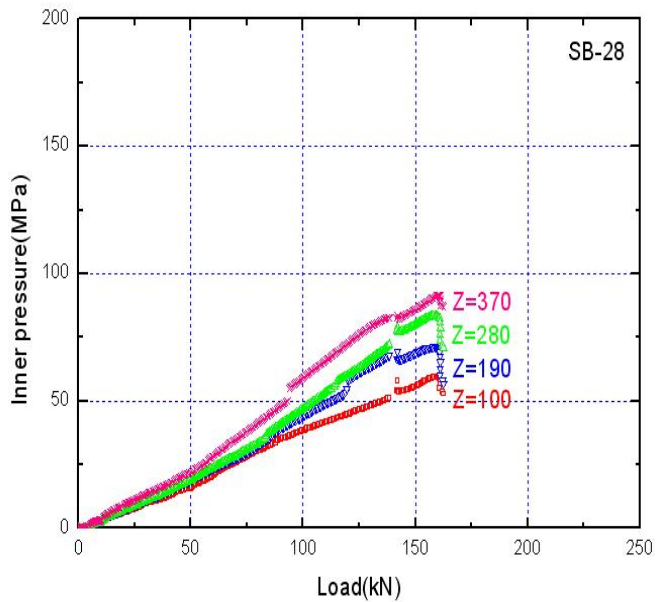


Figure 5-31. Relationship between inner pressure and pull-out load of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

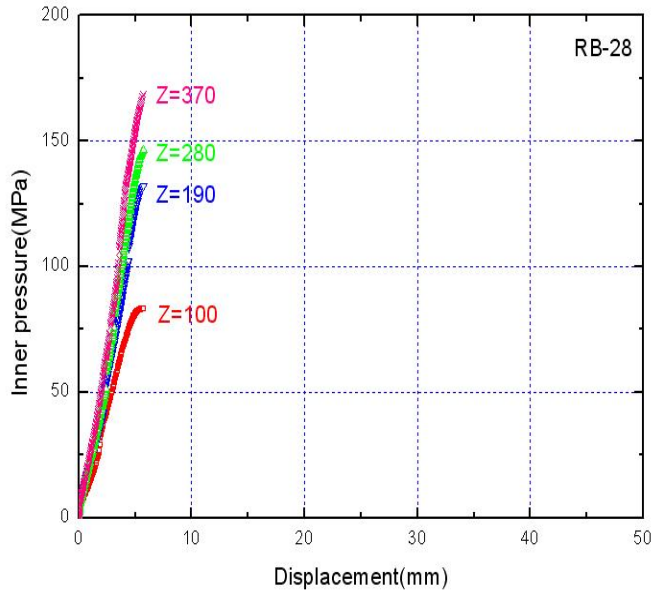


Figure 5-32. Relationship between inner pressure and displacement of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

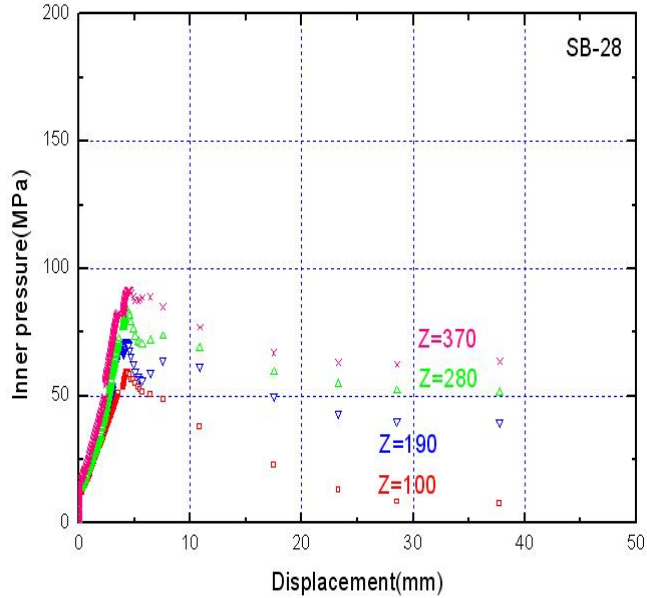


Figure 5-33. Relationship between inner pressure and displacement of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

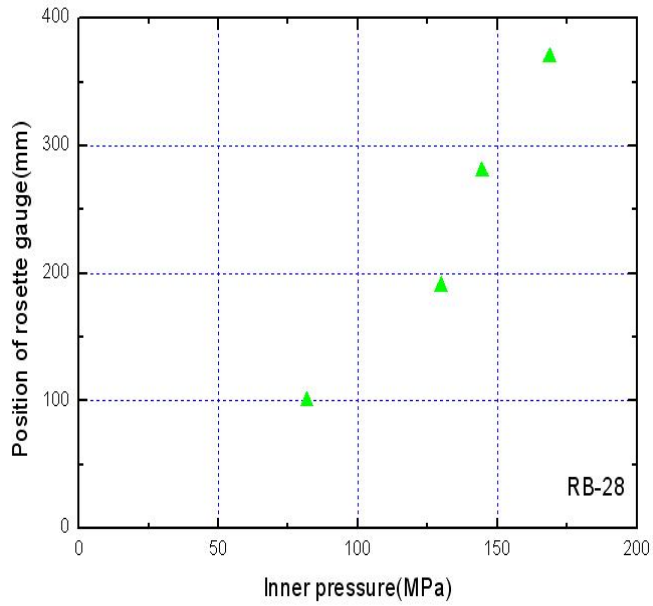


Figure 5-34. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days.

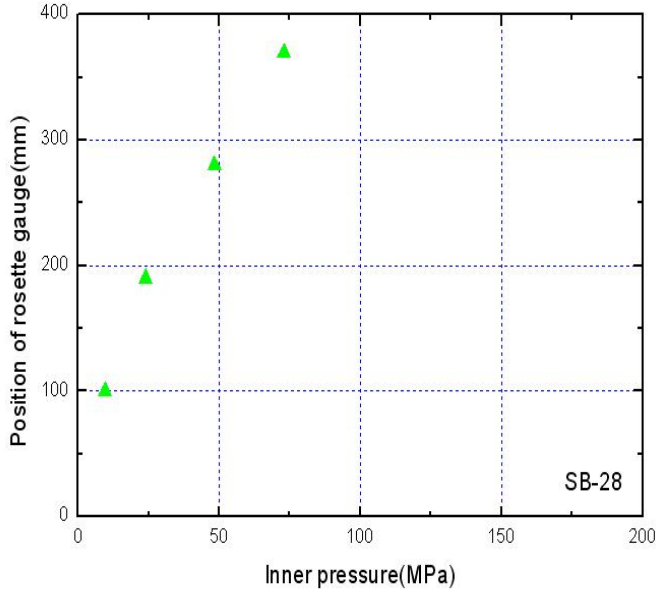


Figure 5-35. Relationship between inner pressure and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

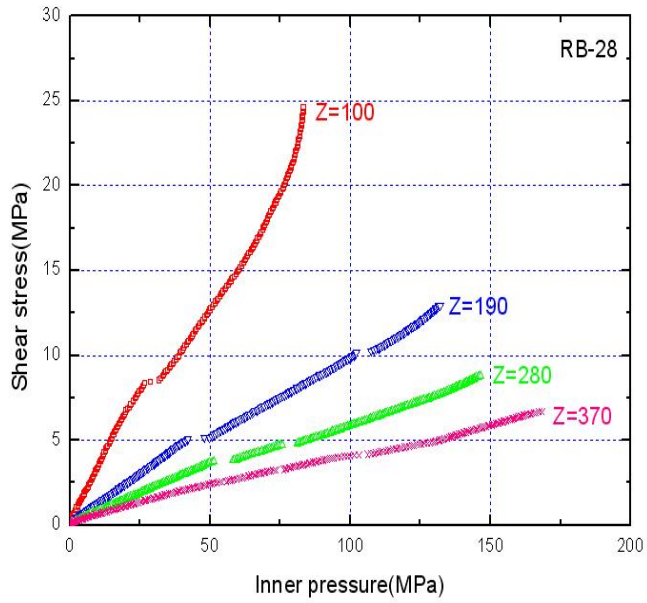


Figure 5-36. Relationship between inner pressure and shear stress of rock bolt with grouted specimen of 28 days.

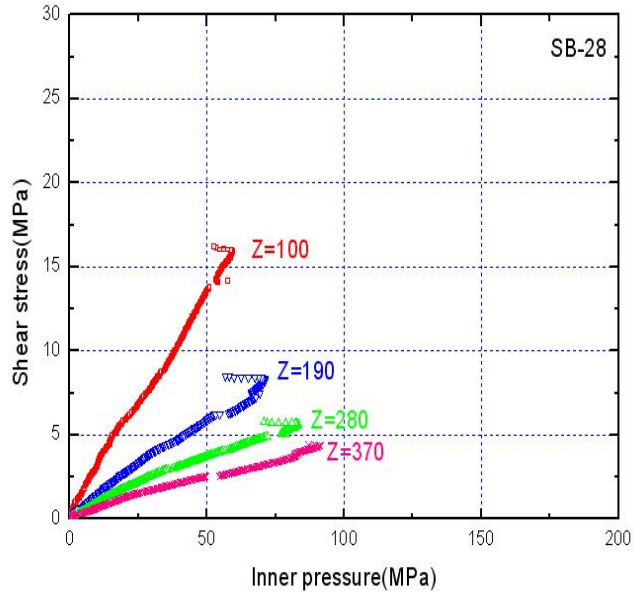


Figure 5-37. Relationship between inner pressure and shear stress of spiral bolt with grouted specimen of 28 days.

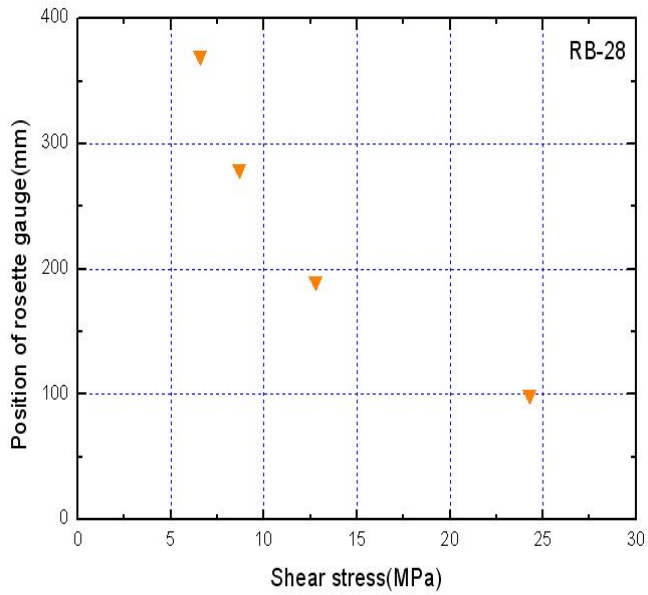


Figure 5-38. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days by calculation.

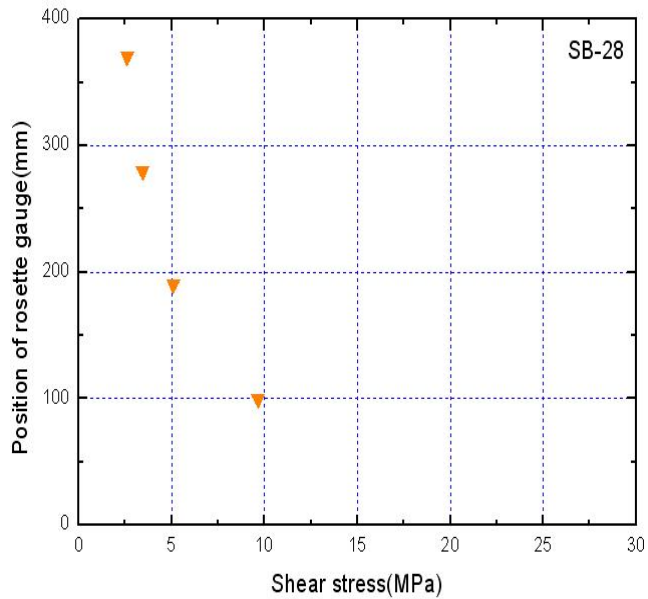


Figure 5-39. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days by calculation.

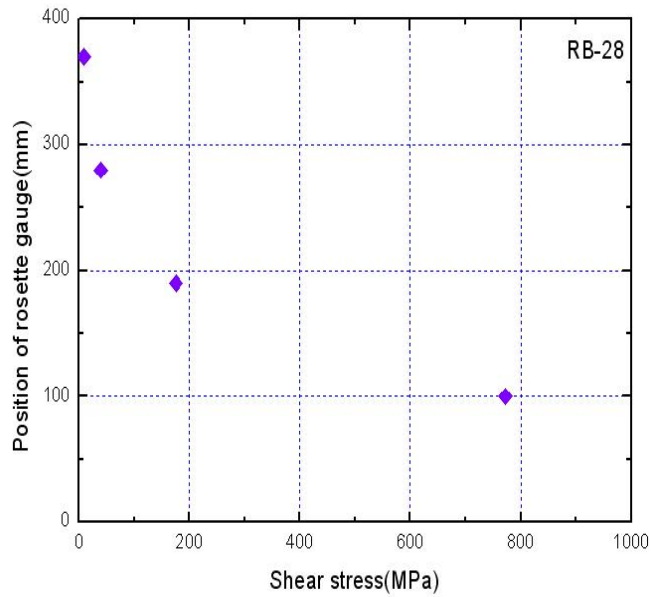


Figure 5-40. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in rock bolt with grouted specimen of 28 days calculated by theory.

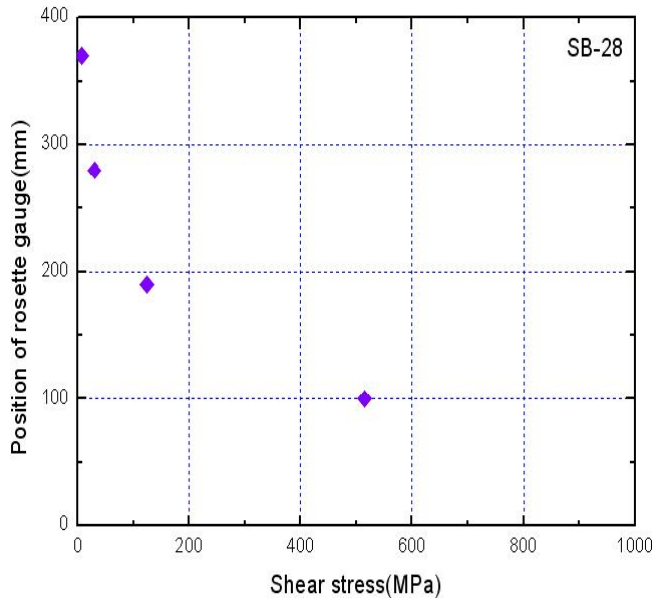


Figure 5-41. Relationship between shear stress and position of rosette gauge in spiral bolt with grouted specimen of 28 days calculated by theory.

양생기간 7일과 28일에 대한 인발하중과 변위를 비교한 결과 록 볼트의 경우 양생기간 7일보다 양생기간 28일의 지보재 항복 인발하중이 13.52 kN 높다. 반면 스파이럴 볼트의 경우 양생기간 7일보다 양생기간 28일의 지보재의 항복 인발하중이 25.77 kN 높은 것으로 나타났다. 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 양생기간에 따른 항복 인발하중의 차이가 더 크게 나타났다.

양생기간 7일과 28일의 구속압을 비교해 볼 때 모든 Z 지점에서의 구속압이 양생기간 28일의 구속압이 양생기간 7일의 구속압에 비해 높았다. 록 볼트의 경우 모든 Z 지점에서 RB-28이 RB-7에 비해 14.67 MPa, 23.42 MPa, 24.77 MPa, 27.91 MPa 높게 나타났고, 스파이럴 볼트의 경우 모든 Z 지점에서 SB-28이 SB-7에 비해 14.21 MPa, 12.09 MPa, 14.97 MPa, 20.77 MPa 높게 나타났다. 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 양생기간에 따라 구속압의 차이가 더 크다는 것을 알 수 있다.

내부압의 경우도 구속압과 마찬가지로 RB-28, SB-28이 RB-7, SB-7보다 높았다. 록 볼트의 경우 모든 Z 지점에서 RB-28이 RB-7에 비해 61.11 MPa, 97.44 MPa, 103.87 MPa, 117.48 MPa 높게 나타났고, 스파이럴 볼트의 경우 모든 Z 지점에서 SB-28이 SB-7에 비해 38.89 MPa, 34.31 MPa, 42.48 MPa, 57.97 MPa 높게 나타났다. 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 양생기간에 따라 내부압의 차이가 더 크다는 것을 알 수 있다.

전단응력의 경우 록 볼트는 RB-7에 비해 RB-28이 전체적으로 증가하였다. 반면, 스파이럴 볼트의 경우는 SB-7에 비해 SB-28의 전단응력이 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 그리고 이론식에 의한 전단응력과 비교했을 때 두 지보재 모두 측정에 의해 계산하여 얻은 전단응력과 이론식에 의해 얻어진 전단응력이 모두 지수함수적으로 감소하는 비슷한 경향을 보였다.

6. 토의

본 연구는 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보 특성을 알아보기 위하여 양생조건을 달리하여 실내 인발시험을 수행하였다.

박병수 등(2006)의 연구에 의하면 지보재의 정착길이가 증가하면, 그 길이의 3배 곱에 비례해서 한계하중이 증가한다고 하였다. 유성원 등(2006)의 연구에 의하면 부착 길이가 증가할수록 부착면적이 커지게 되므로 부착력이 증가하였다. 정해성 등(1999)은 록 볼트를 설치했을 때 공동 벽면 쪽은 지지구간으로서의 전단응력이 발생하고 반대쪽은 고정구간으로서의 전단응력이 발생한다고 하였다. 임경필 등(1999)의 연구에 의하면 지보재의 상부, 즉 벽면쪽에서 전단응력이 가장 크게 발생하며 이론식과 계산식 사이의 관계는 낮은 하중에서는 이론식과 계산식이 유사하지만 하중이 증가할수록 많은 차이를 보였다.

실내 인발시험을 수행하기 전에 1차 실험으로 시멘트 모르타르와 물의 배합 비를 달리하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 배합 비를 달리하여 실내 인발시험을 수행하기 위하여 1차 실험을 하였으나 실험에 적용하지는 못하였다. 록 볼트와 관련된 시방서에 그라우트의 시멘트/물 배합비가 40-50% 인 것을 감안하면 한 가지 배합 비가 아닌 여러 배합 비를 적용하여 인발시험을 수행해 보면 좋을 것으로 사료된다.

지보재를 사용하는 지반이나 암반은 모두 같은 상태는 아니다. Figure 6-1은 최대 부착강도와 여러 가지 변수 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서도 볼 수 있듯이 지보재의 부착강도에 영향을 미치는 요인으로는 여러 변수들이 있다. 그 요소 들로는 암석과 그라우트의 영률, 그라우트의 강도, 천공직경, 볼트와 그라우트의 경계면에서의 마찰계수 등이다. Figure 6-1(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 큰 부착강도는 더 강한 암석과 강한 그라우트에 의해 발생된다. 그리고 Figure 6-1(c)에 두 종류의 굵기가 다른 암석에서의 그라우트의 압축강도의 영향을 나타내었다. Figure 6-1(d)는 천공직경과 부착강도의 관계를 나타내었다(Yazici & Kaiser, 1992). 기존 연구 중 Hyett te al.(1992)이나 강성승 등(2006)의 연구에 의하면 연강으로 된 원통관 뿐 아니라 알루미늄이나 PVC, 연동 관 등을 이용하여 실내 인발시험을 수행하였고 실외실험에서는 석회석, 세일, 화강암 등을 이용하여 인발시험을 수행하였다. 본 연구에서는 연강 원통관을 인공암반으로 가정하고 실내 인발시험을 수행하

였고 지보재의 파괴 양상 중 볼트-그라우트의 접촉면의 파괴로 볼트만 인발하는 경우에 대해서 생각 해 보았다. 강성승 등(2005, 2006)의 연구에서 수행한 수치해석이나 X-ray CT법의 결과에 의하면 스파이럴 볼트 주변의 변형률이라든지 변위의 분포, 파괴형태 등을 알 수 있다. 이러한 방법이나 새로운 방법을 이용하여 차후에 다른 성질의 암반이나 다른 파괴양상에 대해 좀 더 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에 적용된 조건인 지보재의 형상 뿐 아니라 스파이럴 볼트를 이용하여 지보재의 길이, 천공직경에 따른 지보효과 등에 관하여 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

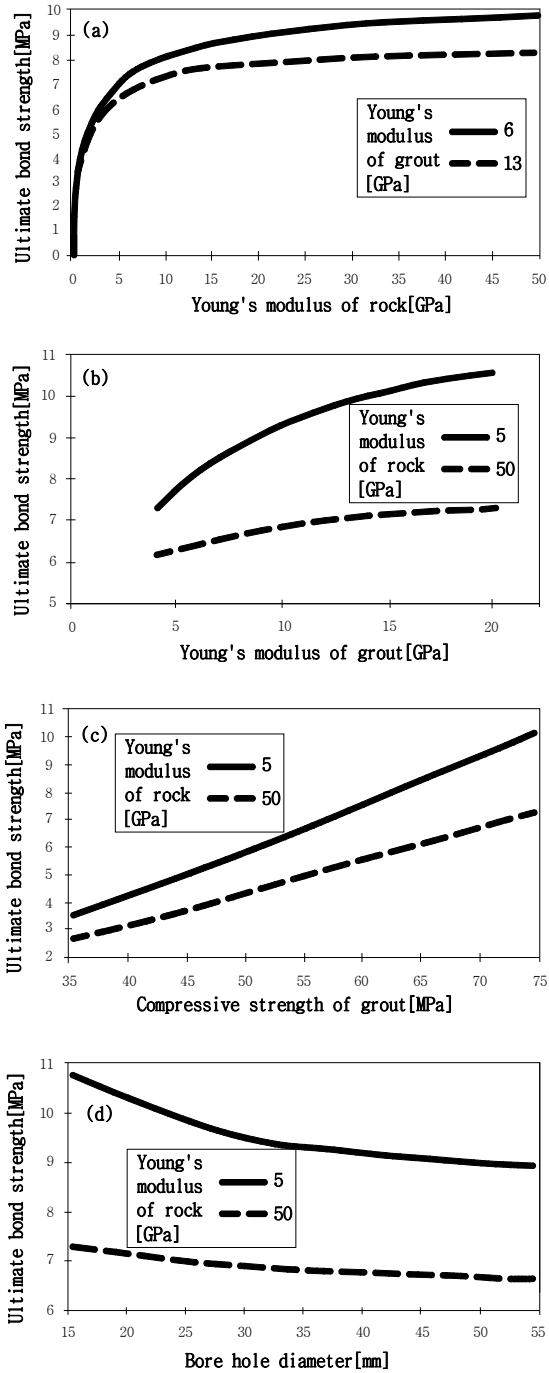


Figure 6-1 Variation of ultimate bond strength with Young's modulus of rock and grout, strength of grout and borehole diameter (Yazici & Kaiser, 1992).

7. 결론

본 연구는 대표적인 지보재인 록 볼트와 새로운 지보재인 스파이럴 볼트의 지보 특성을 규명하기 위함이다. 이를 위하여 직경 25 mm인 록 볼트와 두께 9 mm, 폭 32 mm인 스파이럴 볼트와 직경 76.1 mm의 연강 원통관을 이용한 실내인발시험을 수행하여 인발하중, 변위, 변형률 등을 측정하여 구속압, 내부압, 전단응력 등을 계산하여 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보특성을 규명하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 시멘트-모르타르의 각 양생기간에 대한 실내 인발시험을 수행하여 각 지보재 간의 항복하중, 변위, 구속압, 내부압 전단응력 등을 비교한 결과, 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비하여 항복하중, 구속압, 내부압, 전단응력이 크게 나타났고, 양생기간 7일보다 양생기간 28일이 항복하중, 구속압, 내부압, 전단응력 등에서 크게 나타났다.

2. 록 볼트와 스파이럴 볼트의 인발하중에 대한 변위를 측정한 결과 록 볼트에 비해 스파이럴 볼트의 변위가 더 크게 나타났다. 이는 록볼트의 기계적 성질(Table 3-1)이 스파이럴 볼트보다 크기 때문인 것으로 사료된다. 또한 스파이럴 볼트는 양생기간 7일에 비해 양생기간 28일에 변위가 일어나기 시작한 인발하중이 13.31 kN과 38.32 kN으로 더 크다. 그 원인은 양생기간이 늘어남에 따라 그라우트 된 시멘트-모르타르와 지보재 사이의 부착력이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

3. 두 지보재의 구속압과 내부압을 비교해 본 결과 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 크게 나왔고, 두 지보재 모두 Z=100 mm 지점보다 Z=370 mm지점으로 갈 수록 인발하중과 변위에 따른 구속압과 내부압의 변화 폭이 증가하였다. 즉 터널이나 사면 등에 지보재를 설치했을 경우 벽면보다 암반 안쪽 지보재의 끝부분에 더 큰 구속압과 내부압이 발생한다는 것을 예상 할 수 있다.

4. 실내 인발시험 결과 인발하중과 변위의 관계를 보면 록 볼트에 비하여 스파이럴 볼트가 더 높은 하중에서 변위가 발생하기 시작하며, 록 볼트의 경우 항복 인발

하중을 지나서 하중이 감소하지만 스파이럴 볼트의 경우 항복 인발하중을 지나 하중이 감소하다가 다시 상승하는 양상을 보인다.

5. 실내 인발시험 결과 구속압, 내부압의 경우 Z지점이 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 그러나 전단응력의 경우 Z지점이 증가할수록 감소하였고, 록 볼트는 양생기간이 길어졌을 때 전단응력이 증가한 반면 스파이럴 볼트는 양생기간이 길어졌을 때 전단응력이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 양생기간에 따른 그라우트의 압축강도 증가와 지보재의 형상에 따른 것으로 사료된다.

6. 이상의 결과를 종합해 볼 때 터널이나 사면 등에 지보재를 설치했을 경우 벽면보다 암반 안쪽인 지보재의 끝 부분에서 더 큰 구속압과 내부압이 발생되고 가장 낮은 전단응력이 발생하여 먼저 파괴가 일어날 것으로 예상된다. 그리고 스파이럴 볼트가 록 볼트와 달리 감소하였던 인발하중이 다시 증가하는 이유는 스파이럴 볼트와 시멘트-모르타르 사이에 파괴가 일어나면서 인발하중이 감소하였다가 스파이럴 볼트의 2차 지보효과에 의해 인발하중이 상승한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강성승, 히라타 아츠오, 오바라 유조(2005) 새로운 지보재로 개발된 스파이럴 바의 축방향 저항력 선정법, 대한토목학회, 25, pp : 387-394.
- 강성승, 오바라 유조, 박영석(2006) 인장시험에 의한 스파이럴볼트의 파괴거동, 2006 대한토목학회 정기학술대회, pp.195-198
- 김낙경(2000) 점토지반에 설치된 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, vol. 16, pp. 145-155.
- 김낙경(2001) 인장형 앵커와 압축형 앵커의 하중전이에 관한 연구, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, vol. 17, pp. 59-68.
- 김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경(2002) 현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크립 및 단기거동 특성 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, vol. 22, pp. 585-594..
- 김호영, 이희근(1991) 전면접착형 록볼트의 지보거동 : 이론적 경계요소해석에 대한 적용, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 1, pp.168-180.
- 박병수, 정길수, 전상현, 유남재(2006) 풍화암에 근입된 그라운드 앵커의 인발거동 연구, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 산업기술연구, Vol. 26, pp.109-117.
- 유성원, 정상화, 광기석, 이주형(2006) 부착식 앵커의 인발 특성에 관한 실험적 연구, 대한 토목학회 논문집, Vol. 26, pp.555-563.
- 임경필, 조남준, 황성일(1999) 정적 인발하중을 받는 암반 앵커의 거동 ; 텐던-그라운드 경계면의 전단응력 분포, 대한지반공학회논문집, 대한지반공학회, Vol.15, pp.143-154
- 임종철, 박이근, 고희성(1997) 모래지반 내의 터널 굴착시 볼트의 최적 설치위치 및 설치길이에 관한 실험적 연구, 부산대학교 생사기술연구소논문집, 제53집, pp. 1-11.
- 정해성, 문현구(1999) 전면접착형 록볼트의 보강효과에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 9, pp. 194-203.
- 김일중(2000) 産 · 學人을 위한 지반굴착공학통론, 성안당, pp. 403.
- 대한광업진흥공사(1986) Rock Bolt 지보 기술 광산 적용 시험연구, pp. 4-12.
- 대한터널협회(1999) 터널설계기준, pp. 27-33.

- 황봉갑(2002) 대학과정 재료역학, 일진사, pp. 77-79.
- ASTM, C39-86(1986), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J.(1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, *Rock Mechanics*, Springer-Verlag, vol. 6, pp. 189-236.
- Bawden, W.P., Hyett, A.J., Lausch, P.(1992) An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 29, pp. 525-533.
- Bell, F.G.(1992) Engineering in Rock Masses, Butterworth-Heinemann, pp. 351-363.
- Bhawani Singh, Goel, R.K.(1999) Rock Mass Classification (A Practical Approach), ELSEVIER, pp. 39-40, 44-45, 81-82.
- Bieniawski, Z.T.(1989) Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, p.251.
- Dally, W., Riley, F.(1991) Third Edition Experimental Stress Analysis, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, Third Edition, pp. 311-340.
- Deer, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E., Schmidt, B.(1970) Design of tunnel linings and support systems, Highway Research Record, Washington DC, No. 339, 26-33.
- Farmer, W.(1975) Stress distribution along a resin grouted rock anchor, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 12. 347~351.
- Hoek, E., Brown, E.T.(1980) Underground Excavations in Rock, IMM, pp. 244-258.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. Support of Underground Excavations in Hard Rock, A.A.BALKEMA, Rotterdam, pp. 99-107, 197-228,
- Hirata, A., Kokaji, S., Fujita, M., Akamine, A., Fujita, M., Goto, T.(2003) Dilation stress in borehole induced by spiral anchor, *Proceeding of the 3rd International Symposium on Rock Stress*, Balkema, Rotterdam, pp. 499-505.
- Hirata, A., Kokaji, S., Kang, S.S., Goto, G.(2005) Study on the estimation of the axial resistance of spiral bar based on interaction with ground, *Journal of*

- the Mining and Materials Processing Institute of Japan, MMIJ, vol. 121, pp. 370-377.*
- Hudson J.A.(1989) Rock mechanics principles in engineering practice, CIRIA, London, pp. 40-47.
- Hyett, A.J., Bawden, W.F., Reichert, R.D.(1992) The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 29, pp. 503-524.
- Hyett, A.J., Bawden, W.F., Macsporrán, GR., Moosavi, M.(1995) A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified hoek cell, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 32, pp. 11-36.
- Indraratna, B., Kaiser, P.K.(1990) Design for grouted rock bolts based on the convergence control method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 27, pp. 269-281.
- Ito, F., Nakahara, F., Kawano, R., Kang, S.S., Obara, Y.(2001) Visualization of failure in a pull-out test of cable bolts using X-ray CT, *Construction and Building Materials*, vol. 15, pp. 263-270.
- Jeng, F.-S., Huang, T.-H.(1992) The holding mechanism of under-reamed rock bolts in soft rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, pp. 761-775.
- Kaiser, P.K., Yazici, S., Nosé, J.(1992) Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 29, pp. 293-306.
- Hirata, A., Kokaji, S., Fujita, M., Goto, T.(2003) Dilation stress on borehole induced by a spiral anchor, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Stress, Rotterdam*, pp. 499-505.
- Oreste, P.P., Peila, D.(1996) Radial passive rockbolting in tunneling design with a new convergence-confinement model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 33, pp. 443-454.

- Tannant, D.D., Brummer, R.K., Yi, X.(1995) Rockbolt behavior under dynamic loading: Field tests and modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 32, pp. 537-550.
- Yazici, S., Kaizer, P.K.(1992) Bond strength grouted cable bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 29, pp. 279-292.
- Yu, T.Z., Xian, C.J.,(1983) Behavior of rock bolting as tunnelling support. *Proc.*

저작물 이용 허용서

학과	자원공학과	학번	20077094	과정	석사
성명	한글 : 김 동 조 한문 : 金 東 照 영문 : Kim Dong Jo				
주소	광주광역시 서구 화정동 현대아파트 106동 101호				
연락처	E-MAIL : flexdj@nate.com				
논문제목	한글 : 스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보 메커니즘 영어 : Support mechanism of spiral and rock bolts				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대()

2008 년 12 월 일

저작자: 김 동 조 (인)

조선대학교 총장 귀하