

2008년 2월

석사학위논문

록 볼트와 스파이럴 볼트의
지보특성 연구

조선대학교 대학원

자 원 공 학 과

이 청 신

록 볼트와 스파이럴 볼트의
지보특성 연구

- A study on the characteristics of support between
rock and spiral bolts -

2008년 2월 25일

조선대학교 대학원

자 원 공 학 과

이 청 신

록 볼트와 스파이럴 볼트의
지보특성 연구

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2007년 10월

조선대학교 대학원

자원공학과

이 청 신

이청신의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 천 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 고 진 석 ㉠

위 원 조선대학교 교수 강 추 원 ㉠

2007년 11월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 연구 배경	3
3. 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보재	6
3.1 록 볼트	6
3.2 스파이럴 볼트	7
3.3 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보공법	9
4. 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보재의 특성	10
5. 연구 방법	11
5.1 공시체	11
5.2 실내인발시험	14
5.3 구속압 평가	15
6. 연구 결과	18
6.1 실내 인발시험	18
6.1.1 록 볼트와 스파이럴 볼트의 최대 인발강도와 항복강도	19
6.1.2 양생기간 3일에 대한 실내인발시험	19
6.1.3 양생기간 7일에 대한 실내인발시험	27
6.1.4 양생기간 28일에 대한 실내인발시험	35
7. 고찰	44
7.1 지보필요성의 판정	44
7.2 천공경과 지보재의 크기	46
7.3 지보재 형태	48
7.4 지보재 길이 결정	49
7.5 현장에서의 구속압	50
8. 결론	51

List of tables

Table 4-1. Mechanical properties of rock and spiral bolts by pull-out test	10
Table 5-1. Results of uniaxial compression tests	13
Table 6-1. Results of pull-out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 3 days	22
Table 6-2. Results of pull-out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 3 days	25
Table 6-3. Results of pull out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 7 days	30
Table 6-4. Results of pull-out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 7 days	32
Table 6-5. Results of pull out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 28 days	38
Table 6-6. Results of pull-out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 28 days	40
Table 7-1. Guidelines for excavation and support of rock tunnels in accordance with the rock mass rating system	45
Table 7-2. Rock bolt and drill hole(ϕ)	48

List of figures

Figure 2-1. Relationship between radial load and radial deformation when excavation of tunnel in rock mass	4
Figure 2-2. Suspension effect	5
Figure 2-3. Friction effect	5
Figure 2-4. Keying effect	5
Figure 2-5. Arch effect	5
Figure 3-1. Appearance of rock bolt	7
Figure 3-2. Appearance of rock bolt spiral bolt	8
Figure 3-3. Shape and cross-section of spiral bolt	8
Figure 3-4. Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground	9
Figure 5-1. Specimen of rock and spiral bolts used laboratory pull-out test ..	11
Figure 5-2. Schematic sketch of rock and spiral bolts	11
Figure 5-3. Accessory for laboratory pull-out test	12
Figure 5-4. Specimen for uniaxial compressive test	13
Figure 5-5. Adhering points of rosette gage	13
Figure 5-6. Schematic diagram for pull-out test of rock and spiral bolts and photography	14
Figure 5-7. Data logger and digital displacement indicator used pull-out test of rock and spiral bolts	15
Figure 5-8. Circular cylinder subject to inner pressure	16
Figure 5-9. Relationship between axial and lateral strains and pull-out load ...	16
Figure 6-1. Pull-out test of rock and spiral bolts in laboratory	18
Figure 6-2. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days	21
Figure 6-3. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days	21
Figure 6-4. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt	

with ϕ 32 mm and 3 days	21
Figure 6-5. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days	24
Figure 6-6. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days	24
Figure 6-7. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days	24
Figure 6-8. Relationship between displacement and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days	26
Figure 6-9. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days	26
Figure 6-10. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days	26
Figure 6-11. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days	26
Figure 6-12. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days	27
Figure 6-13. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days	27
Figure 6-14. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days	29
Figure 6-15. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days	29
Figure 6-16. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days	29
Figure 6-17. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days	31
Figure 6-18. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days	31
Figure 6-19. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days	31

Figure 6-20. Relationship between displacement and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days 34

Figure 6-21. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days 34

Figure 6-22. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days 34

Figure 6-23. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days 34

Figure 6-24. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days 35

Figure 6-25. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days 35

Figure 6-26. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days 37

Figure 6-27. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days 37

Figure 6-28. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days 37

Figure 6-29. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days 39

Figure 6-30. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days 39

Figure 6-31. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days 39

Figure 6-32. Relationship between displacement and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days 42

Figure 6-33. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days 42

Figure 6-34. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days 42

Figure 6-35. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with

ϕ 25 mm and 28 days	42
Figure 6-36. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days	43
Figure 6-37. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days	43
Figure 7-1. Stand-up time vs roof span for various rock mass classes as per geomechanics classification	44
Figure 7-2. Tunnel support chart showing 38 support categories	46
Figure 7-3. Pull-test result by effect of drill hole	47
Figure 7-4. Curve of Pull-out load and displacement by pull-out test	50

Abstract

- A study on the characteristics of support between rock and spiral bolts -

By Lee, Chung Shin

Adv. Prof. : Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

NATM has been developed as one of the excavation methods of construction. In these days, it is mostly applied for blasting excavation tunnels. The surrounding ground was unstable by changing the state of the ground stress due to the formation of construction structures such as slopes, tunnels, underground storages, and so on. Therefore, various methods were developed in order to stabilize the ground using some kinds of supports, namely, ground anchor, rock bolt and cable bolt, as well as spiral bolt as a new support .

This study is to clarify the characteristic of supports with respect to rock and spiral bolts. For the purpose of the study, we firstly performed pull-out test in laboratory with respect to three supports, that is, rock bolts with a diameter of 25 mm and spiral bolts with a thickness of 9 mm and a width of 25 mm and 32 mm, on the case of cement-mortar curing periods, 3, 7 and 28 days, respectively. Pull-out load and displacement were secondly measured from the test. The inner pressure was then calculated and evaluated using the results from pull-out load and displacement.

The maximum pull-out load, displacement, and inner pressure were compared in each cement-mortar curing period. Their results in the case of curing 3 days showed the dominant difference, on the other hand, one between curing period 7 days and 28 days was very small.

In relation between pull-out load and displacement, displacement of spiral bolt is larger than one of rock bolt. It is considered that mechanical property of rock

bolt is due to larger than one of spiral bolt. In addition, displacement of supports shows nearly same or decreasing with curing periods. It is considered that because adhesive force between supports and cement-mortar is increasing with compressive strength of cement-mortar according to curing periods.

The inner pressure of spiral bolt is represented larger than one of rock bolt at a step of same pull-out load. Furthermore, the inner pressure at a same position shows 1.5~9.5 times in curing period 3 days, 1.2~5.6 times in curing period 7 days and 1.6~6.6 times in curing period 28 days, respectively. It is suggested that spiral bolt is more stable than rock bolt, maintaining stability of ground or rock mass, when supports are installed in a ground or rock mass under the same condition.

Putting together with above results, we can consider that spiral bolt as a new support on an aspect of pull-out load and inner pressure is larger than rock bolt in a ground or rock mass under the same condition. Moreover, spiral bolt is more effective support than rock bolt, considering an economical and constructive aspects of supports, as well as ground or rock stability before or after installing supports.

1. 서론

굴착공법 중의 하나로서 개발된 NATM(New Austrian Tunneling Method)공법은 원래의 지반이 가지고 있는 지지능력을 최대한 이용하는 공법으로서 오늘날에는 주로 발파식 터널굴착에 이용되고 있다. 이 공법은 지압을 크게 받고 있는 지형, 토층이 얇은 지형, 연약한 암반이나 신선한 암반으로 구성된 지형 등의 다양한 지형환경에 터널을 굴착할 때 적용될 수 있다. 원래의 지반환경은 도로개발에 의한 사면이나 터널의 형성, 그리고 에너지 저장시설을 위한 지하공간 개발과 같은 지하구조물의 형성 등으로 인하여 지반의 응력상태가 변한다. 이러한 지반 응력상태의 변화는 지반을 변형시켜 지반의 불안정성을 가져옴으로서 사면에서 연약대를 따라 미끄러짐이 발생하거나 터널 중 손상대 내에서 붕괴가 발생하거나, 또는 거대한 지하공간에서의 파괴가 나타나는 등의 문제점을 야기한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 불안정한 지반상태를 안정화시키는 작업이 무엇보다 중요하다 하겠다. 불안정한 지반을 적정한 수준까지 안정화시키기 위하여 다양한 방법들이 개발되었는데 그 대표적인 예로는 그라운드 앵커(ground anchor method)나 록 볼트(rock bolt) 및 케이블 볼트(cable bolt)와 같은 지보재이다.

그라운드 앵커는 지반의 안정성을 유지시키기 위하여 사용되는 지보재 중의 하나로서 주로 토사와 같은 연약지반에 사용된다. 이러한 지보재를 이용한 그라운드 앵커공법은 대상지반에 천공한 시추공에 그라우트를 주입하여 정착부에 설치된 강제 케이블을 이용하여 인장력을 가함으로서 정착부와 지반사이에 반력인 압축력을 발생시켜 지반의 전단강도를 증가시킴으로서 지반의 안정화를 유도할 수 있다(김낙경, 2000, 2001; 김래현 외, 2002). 그라운드 앵커공법은 사면붕괴 방지, 구조물의 부상이나 진도 방지 등에 이용되고 있으며, 그 활용 범위와 규모가 다양해지고 있다. 또 다른 형태의 지보재로서 록 볼트와 케이블 볼트를 예로 들 수 있다. 이들 지보재는 주로 터널을 굴착한 후 시멘트 그라우트의 마찰력이나 부착력을 이용하여 지반과 지보재를 고정시킴으로서 지반의 안정성을 확보하는데 주요한 목적이 있다(Hudson, 1989; Indraratna and Kaiser, 1990; Bawden et al., 1992; Kaiser et al., 1992; Yazici and Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992, 1995; Tannant, 1995; Oreste and Peila, 1996; Jeng and Huang, 1999; Ito et al., 2001). 그라운드 앵커공법은 인장력을 유도하지만, 록 볼트나 케이블 볼트공법은 인장력을 유도하지 않는다. 하지

만, 이들 공법들은 기하학적 형상으로 지반의 움직임을 일차원의 저항작용을 이용하여 지반이나 구조물 사이의 안정성을 유지시킨다는 측면에서 유사하다.

스파이럴 볼트는 현재 개발되고 있는 새로운 형태의 지보재로서 판상의 강판에 비틀림 힘을 작용시켜 만든 나선형 형태의 지보재다(Hirata et al., 2003, 2005). 그라운드 앵커 뿐만 아니라 록 볼트나 케이블 볼트 지보재의 경우 연약지반이라 할 지라도 지보재를 지반내에 설치하기 위해서는 일차적으로 지반 천공작업이 이루어져야 한다. 하지만 스파이럴 볼트 지보재를 사용할 경우 천공작업없이 지보재 자체의 회전만으로도 지반내에 설치가 가능하다. 물론 견고한 암반지반일 경우에는 기존의 지보재처럼 스파이럴 볼트를 지반에 적용시킬 수 있다. 즉, 시추공에 스파이럴 볼트를 투입한 후 그라우트를 주입함으로써 스파이럴 볼트와 지반사이를 고정시켜 지보효과를 발휘시킬 수 있다. 이렇듯 스파이럴 볼트는 기존의 그라운드 앵커, 록 볼트, 케이블 볼트의 지보재와는 다른 형태를 가짐은 물론, 기존의 지보재와 비교하여 지보특성이나 지보효과에 있어서도 다르게 나타난다. 하지만 스파이럴 볼트가 지보재로서 갖는 특성이나 효과, 그리고 지보 메커니즘이 구체적으로 규명되지 않고 있다.

따라서 이 연구에서는 현재 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 지보재인 록 볼트와 새롭게 개발되고 있는 지보재인 스파이럴 볼트를 대상으로 그라우트의 양생조건에 따라 실내인발시험을 수행하여 다음과 같은 지보재의 특성을 규명하고자 한다. 첫째, 스파이럴 볼트와 록 볼트의 지보특성의 차이점을 살펴보고, 둘째, 두 지보재의 지보재로서의 효과를 비교하고자 한다. 마지막으로, 스파이럴 볼트와 록 볼트가 지반사이에 작용하는 연성거동 메커니즘을 규명하고자 한다.

2. 연구 배경

현재의 자연상태 암반은 오랜 지질시대를 거치면서 화산활동, 대륙간 판의 이동, 지진활동, 동결과 융해 등과 같은 다양한 요인에 의하여 지질환경이 변화되어 왔다. 이러한 지질환경의 변화는 암반 내에 단층과 절리와 같은 크고 작은 불연속면을 형성시키며 이들 불연속면의 간격이나 방향은 구조물의 거동에 큰 영향을 미친다. 또한 암반에 사면이나 터널 또는 지하 공동시설과 같은 구조물을 건설할 경우 암반의 안정성을 확보하는 일이 매우 중요하다. 하지만 구조물이 건설되기 이전의 안정화된 암반 상태는 구조물이 건설됨으로서 구조물 주변에 존재했던 원래의 암반 응력 상태는 새로운 상태로 변하게 된다. 만약 새로운 응력 상태가 암반의 안정성 유지에 부정적인 영향을 미치게 된다면 안정성을 유지시키기 위한 대책이 절실하게 요구된다. 불안정한 암반을 안정화시키기 위하여 현재까지 다양한 공법들이 개발되어 이용되고 있는데 그 중에서 지보재를 이용하는 방법이 오늘날 일반적으로 이용되고 있다.

지하에 터널이나 지하공간과 같은 공동을 형성할 때 공동으로 인해 발생하는 암반의 거동은 지보의 설치기간과 방법뿐만 아니라 지보와 암반 사이에 작용하는 하중과 변형특성에도 의존한다. 따라서 지보와 암반사이의 상호작용관계를 파악하여 지하 공동의 거동을 예측함으로써 암반의 안정성을 확보할 수 있다. Figure 2-1은 한 예로 암반 내 터널을 굴착했을 경우 지압과 암반 변위의 관계를 나타내는 지반반응 곡선(ground reaction curve)을 보여준다(Deer et al., 1970). 터널이 형성되면 주변 암반에는 터널 내부의 방향으로 변위가 발생하는데 터널의 벽이나 천정에 더 이상 변위가 발생하지 않도록 제한하기 위해서는 적절한 하중을 가해야 한다. 선 OA는 지보가 설치되기 전에 발생한 변위로서 설치된 지보가 완전 비압축성이라면 지보에 걸리는 하중은 선 AA'가 된다. 하지만 지보가 터널벽과 함께 변형을 일으킨다면 점 C에서 평형이 이루어져 터널벽에서의 반경방향변위는 선 OB, 지보변형은 선 AB, 그리고 지보에 걸리는 하중은 선 BC가 된다. 점 C에서의 평형은 지보 형태의 선택과 그 설치기간이 적절해야만 이루어질 수 있다. 선 AeE는 터널이 안정화되기 전에 파괴된 지보의 거동을 보여준다. 여기서 AF와 GH는 지보의 가변성이 너무 큰 것과 지보의 설치기간이 너무 지연되어 비효과적인 경우를 나타낸다. 결국 지보는 빠르게 설치될수록 효과적이며, 지보가 설치된 후 어느 정도 변형이

일어날 수 있는 능동적 지보일수록 암반 자체의 지지력을 최대한 이용할 수 있다.

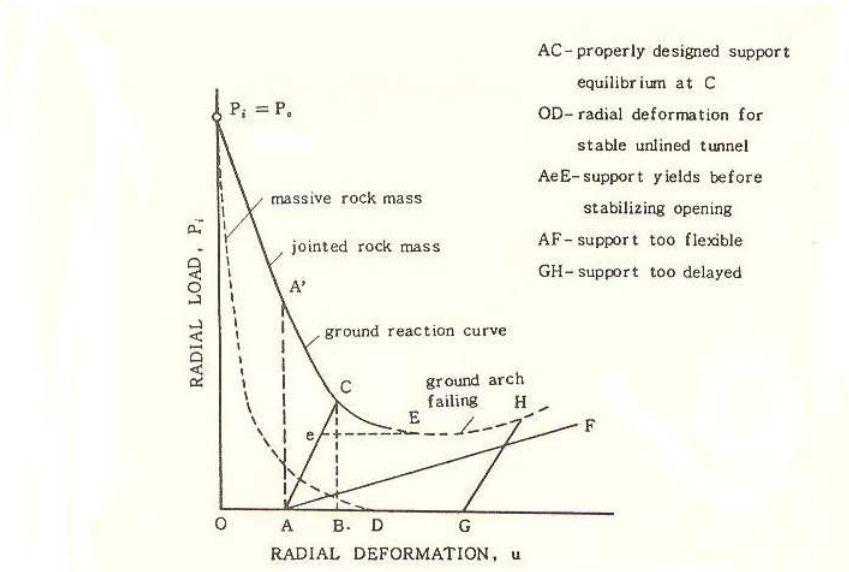


Figure 2-1. Relationship between radial load and radial deformation on an excavated tunnel in rock mass (Deer et al., 1970).

지하 암반 내 공동이 형성됨으로서 발생하는 암반의 불안정성을 안정화시킬 목적으로 지보재를 사용함으로써 크게 다음의 네 가지 효과를 기대할 수 있다(대한광업진흥공사, 1986). 첫째, 매달림 효과(suspension effect)이다(Figure 2-2). 지하에 공동이 형성될 때 층상의 천반부는 자체지지력을 가진 상부의 천반부로부터 분리되어 함몰되는 경향이 있다. 이러한 천반부의 분리와 함몰은 지보재를 설치하여 자체지지력을 가진 상부의 천반부에 지지되게 함으로서 어느 정도 감소시킬 수 있다. 둘째, Figure 2-3에서 보이는 바와 같은 마찰 효과(friction effect)이다. 자체지지력이 없는 층상이 공동 천반부의 어떤 거리까지 계속될 때 이러한 얇은 층들을 지보재로 함께 묶으면 각 층리면에 마찰력이 유발되어 지보재가 설치되지 않았을 경우보다 천반이 분리되거나 함몰되면서 층리면을 따라 일어나는 수평, 수직운동을 억제 또는 감소시켜 지지력을 발휘할 수 있다. 이러한 마찰 효과는 지보재의 인장력과 지보재가 관통한 층의 수에 비례하고 지보재의 설치간격과 천반폭의 크기에 반비례한다. 셋째, 엇물림 효과(keying effect)이다(Figure 2-4). 지하 공동에서 층상의 천반부는 천반의 벽면과 다른 방향으로 발달된 몇 개의 균으로 이루어진 불연속면인 취약면들에 의해 교차되어 있는 경우가 있다. 이러한 취약면들을 관통하도록 지

보재를 설치하면 취약면을 따라 발생하는 변위를 억제시킴으로서 천반부를 안정화시킬 수 있다. 마지막으로 아치 효과(arch effect)이다(Figure 2-5). 암반에 지보재를 설치하여 인장력을 가하면 지보재 주변의 암반에는 압축권(pressure zone)이 형성된다. 아치형의 공동 주변 암반에 지보재를 일정한 간격으로 설치하면 공동 주변 암반은 각각의 지보재에 의해 발생한 압축권이 인접한 지보재의 압축권과 중첩되어 아치형의 압축대가 형성된다. 이러한 압축대의 형성이 공동 주변 암반의 안정화를 유도시킬 수 있다.

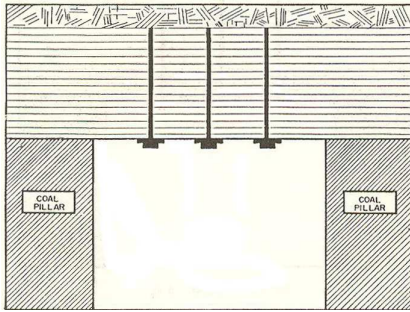


Figure 2-2. Suspension effect.

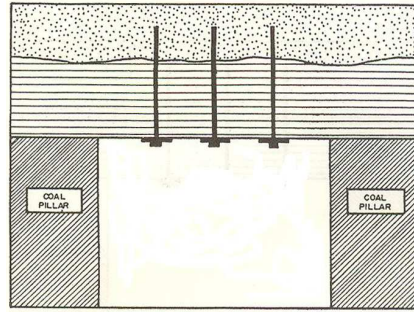


Figure 2-3. Friction effect.

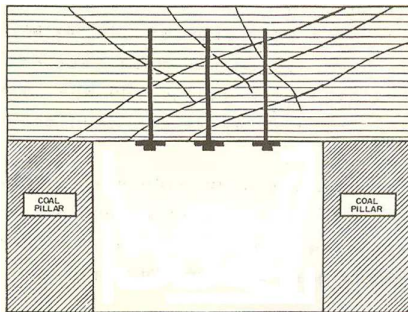


Figure 2-4. Keying effect.

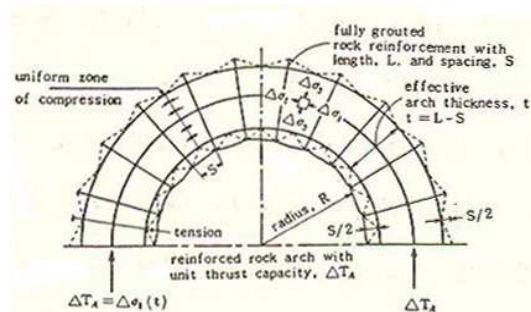


Figure 2-5. Arch effect.

3. 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보재

3.1 록 볼트

록 볼트는 mechanically anchored rock bolts, grouted rock bolts, friction anchored rock bolts 등 볼트의 형상과 설치 방법에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다(대한광업진흥공사, 1986).

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

공과 지보재 사이를 시멘트나 레진(resin)과 같은 충진재료를 주입하여 암반을 지지하는 설치과정이 비교적 간단한 지보 방법인 grouted rock bolts는 완전 충전 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. 이것에 비하여 강철제 thread bar bolt는 설치 후 강하고 지속적인 지지력을 가지며, 특히 불리한 환경에 대한 영향을 적게 받음으로서 영구적인 지지를 목적으로 하는 곳에 사용된다. 하지만 가격이 비싸고, 충전 후 볼트의 지지력이 충분히 발휘되기 위해 선 어느 정도의 경화기간이 요구된다.

Friction anchored rock bolts에는 split set rock bolt 와 swellex rock bolt의 두 가지 형태가 있다. split set rock bolt는 볼트보다 약간 작은 크기의 공경에 이 지

보재를 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 공안에 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 형상을 보여준다.



Figure 3-1. Appearance of rock bolt.

3.2 스파이럴 볼트

스파이럴 볼트는 얇고 긴 강관의 양단면을 고정시킨 후 축회전시켜 만든 나선형 형태의 지보재로서, 금속재료인 연강을 사용하여 쉽게 가공할 수 있다. Figure 3-2는 강관을 가공하여 만든 스파이럴 볼트의 모습을 나타낸다. 스파이럴 볼트는 길이(l), 폭(d), 두께(t)등에 따라 다양한 크기로 가공할 수 있다. 스파이럴 볼트의 가공 특성상 강관의 축 방향에 압축력이 작용하므로 축 중심 부근의 두께가 두꺼워지는 반면, 축 중심에서 가장 멀리 떨어진 양쪽 가장자리 부분에서는 인장력의 작용으로 인하여 두께가 얇아지는 경향이 있다. 그러므로 동일한 단면 내에 함께 작용하는 압축력과 인장력을 완화시키기 위하여 축 방향에 일정한 인장력을 가하면서 비틀림 가공을 수행해야 한다. Figure 3-3은 스파이럴 볼트의 일부분과 이를 확대시켜 나타낸 것으로써, 축 방향과 양쪽 가장자리 부분의 각은 약 45° 의 관계를 이룬다

(Hirata et al., 2003, 2005). 스파이럴 볼트는 단면적 차이가 부착력이나 마찰력에 크게 영향을 미치지 않지만, 회전할 때 발생하는 축 방향 저항력을 갖는 것이 특징이다.



Figure 3-2. Appearance of spiral bolt.

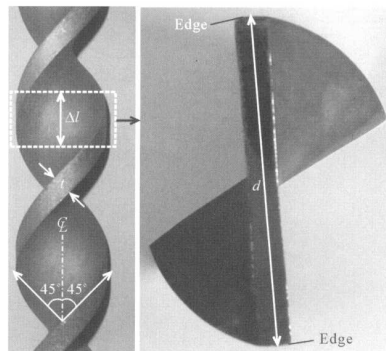


Figure 3-3. Shape and cross-section of spiral bolt.

연약지반의 경우 천공작업을 하지 않고 스파이럴 볼트를 직접 회전시키면서 지반 내에 곧바로 설치할 수 있기 때문에 주위 지반을 교란시키지 않고 지반과 일체화시킬 수 있다. 암반과 같은 견고한 지반의 경우 천공작업을 한 후에 스파이럴 볼트를 시멘트, 레진, 모르타르와 같은 다양한 충전재료를 사용하여 설치할 수 있다. 스파이럴 볼트에 축력이 작용하면 스파이럴 볼트와 지반사이에는 전단파괴대가 형성된다(Figure 3-4). 즉 스파이럴 볼트에 축력이 가해지면 스파이럴 볼트 양쪽 가장자리와 지반의 경계부에 전단파괴대가 발생함을 의미한다. 축 하중이 계속 가해지면 동시에 전단파괴대도 함께 성장하다가 마지막 단계에서는 스파이럴 볼트와 지반의 경계부 사이에 원형의 전단파괴영역이 형성된다. 스파이럴 볼트 주위에 완전한 전단파괴영역이 형성되면 축 방향 저항력은 잔류응력상태가 되므로, 스파이럴

볼트의 크기와 지반의 전단강도를 알면 축 방향 저항력을 알 수 있다.

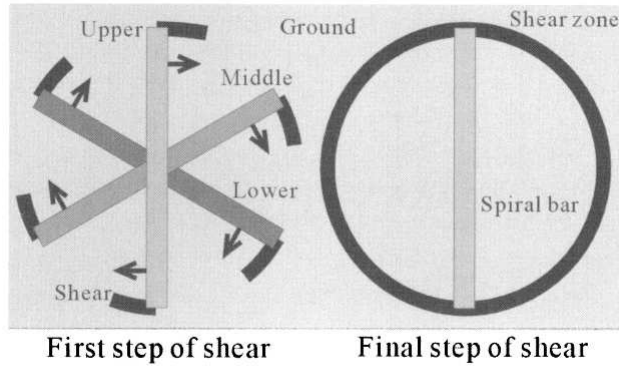


Figure 3-4. Schematic diagram of shear mechanism by interaction of spiral bolt and ground.

3.3 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보공법

록 볼트와 스파이럴 볼트는 굴착 시 발파 등으로 인하여 연약해진 암반의 벽면에 공을 뚫고 견고하고 안정된 암반속에 지보재를 설치함으로써 암반의 손상영역을 안정화 시킬 수 있다. 따라서 불안정한 상태에 놓여있는 암석이나 암체의 낙석, 붕괴, 붕락 현상을 미연에 방지하고 응력상태의 변화로 인해서 발생하는 암반의 변형거동 또한 방지할 수 있다. 록 볼트와 스파이럴 볼트를 이용한 지보공법의 특징을 간략하게 정리하면 다음과 같다. 록 볼트는 원지반 자체의 강도를 이용해서 지반을 지지하지만, 토사지반이나 풍화도가 큰 연약암반에 대해서 볼트의 공 내 설치가 곤란하다. 또한 천반부 또는 상향 경사공 작업 시 충전재료의 흘러내림 현상이 발생하기 쉽다. 반면에 스파이럴 볼트는 원지반 자체의 강도를 이용한 지반의 지지력 발휘 측면에서는 록 볼트와 같지만, 록 볼트와는 다르게 토사나 연암 및 경암과 같은 넓은 범위의 지반 및 암반에 적용할 수 있고, 토사지반이나 연약암반의 경우 스파이럴 볼트의 자체 회전만으로 지반 내 투입이 가능하므로 작업이 용이하고 단시간에 설치가 가능하다. 또한 천반부 또는 상향 경사공 작업 시 모르타르 주입후 볼트 설치 시 나선형 구조로 인하여 밀실한 충전이 가능하다(강성승 외, 2005).

4. 록 볼트 및 스파이럴 볼트 지보재의 특성

본 연구에 사용된 록 볼트와 스파이럴 볼트 지보재의 역학적 성질을 살펴보기 위하여 실내인발시험을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4-1과 같다. Table 4.1에서 알 수 있는 바와 같이 록 볼트의 단면적은 스파이럴 볼트보다 약 3.27배 또는 2.56배 정도 더 크게 나타났다. 인장강도(tensile strength)에 있어서 록 볼트의 경우 항복강도(yield strength)와 최대 인장강도(maximum tensile strength)가 $151 N/mm^2$ 의 차이를 보이는 반면, 스파이럴 볼트에서는 그 차이가 매우 미미하였다.

Table 4-1. Mechanical properties of rock and spiral bolts by pull-out test. ϕ : diameter of rock bolt, A : area of rock and spiral bolts, d : width of spiral bolt, t : thickness of spiral bolt, St_{yield} : yield tensile strength, St_{max} : maximum tensile strength.

Type	Size	Material	St_{yield} (N/mm^2)	St_{max} (N/mm^2)
Rock bolt (RB-25)	$\phi = 25 \text{ mm}$ $A = 506.7 \text{ mm}^2$	SD400	354	505
Spiral bolt (SB-25)	$d = 25 \text{ mm}$ $t = 9 \text{ mm}$ $A = 225 \text{ mm}^2$	SS400	409	426
Spiral bolt (SB-32)	$d = 32 \text{ mm}$ $t = 9 \text{ mm}$ $A = 288 \text{ mm}^2$	SS400	459	464

5. 연구 방법

5.1 공시체

록 볼트와 스파이럴 볼트의 실내인발시험용 공시체는 Figure 5-1에서 나타낸 것과 같이 인공암반으로서 연강 원통관을, 공시체의 그라우트 재료로는 시멘트-모르타르를 사용하였다. 연강 원통관의 크기는 외경 76.3 mm, 내경 69.1 mm, 그리고 길이 450 mm이며, 록 볼트와 스파이럴 볼트의 길이는 모두 550 mm로 제작하였다 (Figure 5-2).

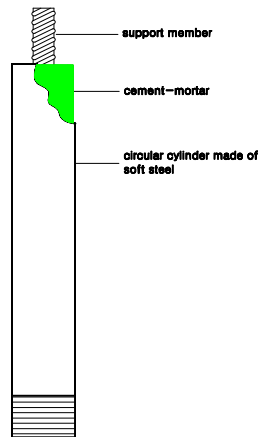


Figure 5-1. Specimen of rock and spiral bolts used laboratory pull-out test.

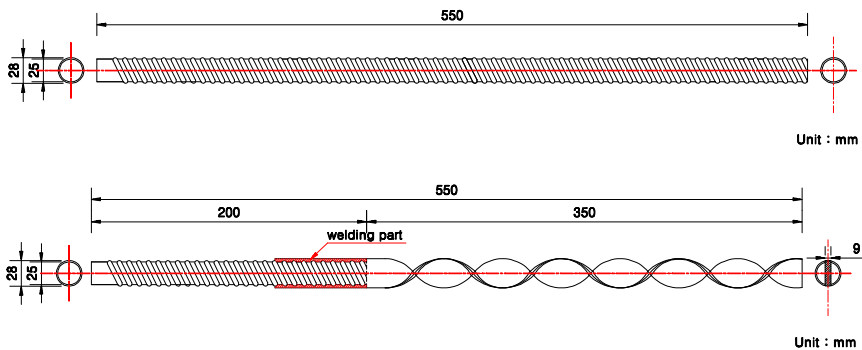


Figure 5-2. Schematic sketch of rock and spiral bolts.

공시체의 제작은 먼저 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보재를 연강 원통관의 중앙에 위치시킨 후 시멘트-모르타르를 투입하여 고정시켰다. 공시체 하부에는 실내인발시험기의 지그에 공시체 하부를 고정시키기 위하여 특별히 제작한 굴곡형 기구를 연결하였다(Figure 5-3). 연강 원통관의 영률(E)은 206 GPa이고 포아송 비(ν)는 0.3이다.

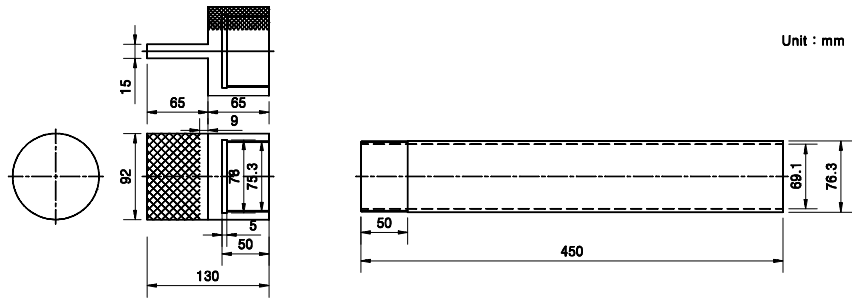
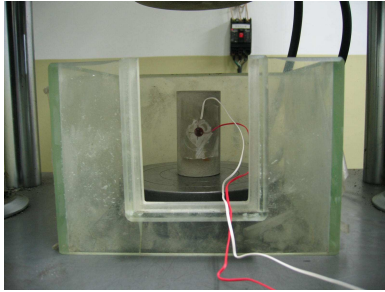


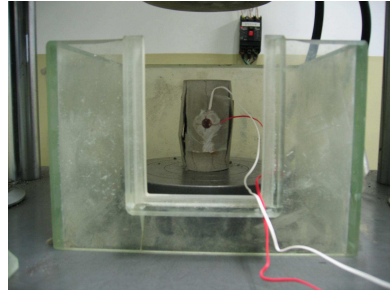
Figure 5-3. Accessory for laboratory pull-out test.

지보재를 설치하기 위하여 사용된 시멘트-모르타르의 재료특성을 본 연구의 목적에 따라 양생기간을 세 가지 경우, 즉 3일, 7일, 28일으로 나누어서 살펴보았다. 물:시멘트-그라우트 혼합비는 모든 경우에 있어서 동일하게 같은 비율 0.288 : 1로 하였다. 실내인발시험용 공시체와 같은 시기에 작성한 원주형 시험편(Figure 5-4)을 이용하여 각각에 대해 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험은 각 경우 별로 3회씩 수행하였으며, 그 평균값을 계산하여 재료특성을 정하였다. 공시체의 양생조건에 따라 일축압축시험으로 구한 재료특성 결과를 정리하여 Table 5-1에 나타내었다. 일축압축강도는 양생기간이 3일 경우 10.40 MPa, 양생기간이 7일인 경우 24.76 MPa, 양생기간이 28일인 경우 36.97 MPa로 양생기간에 따라 재료특성이 각각 다르게 나타남을 알 수 있다. 이것은 그라우트의 주입상태, 양생시 습도와 온도의 차이 등으로 그라우트의 강도 정도가 다르게 나타남을 지시한다.

연강 원통관 공시체의 표면에는 4개의 로제트 게이지(rosette gauge)를 부착하여 연강 원통관에 발생하는 응력을 평가하였다. 로제트 게이지는 Figure 5-5에서 나타내듯이 $z = 100, 190, 280, 370$ mm 위치에 부착되었다.



before of failure



after of failure

Figure 5-4. Specimen for uniaxial compressive test.

Table 5-1. Results of uniaxial compression tests.

Curing	w : m	Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio(ν)
3 days	0.288 : 1	10.40	16.08	0.27
7 days	0.288 : 1	24.76	28.18	0.14
28 days	0.288 : 1	36.97	13.45	0.13

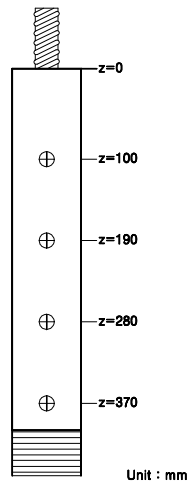


Figure 5-5. Adhering points of rosette gage.

5.2 실내인발시험

실내인발시험에 대한 개략적인 모식도와 인발시험기는 Figure 5-6과 같다. 시험 과정은 우선 공시체의 축을 시험기의 축과 일직선상에 오도록 일치시킨 후, 0.5 kN 정도의 초기하중을 가하여 공시체가 움직이지 않도록 고정시켰다. 이 상태에서 0.5 kN/sec의 하중속도로 인발하중을 가하면서 시험과 계측을 실시하였다. 이 때 시험편에 설치된 공시체는 시험기의 위아래에 놓여있는 고정용 지그를 이용하여 고정시켰다. 재하 장치는 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 재료시험기(Model No. KPUT-100)를 사용하였다. 또한 로제트 게이지로부터 얻은 데이터는 디지털 변형률 측정기(Model No. DC3100)를 이용하여 획득하였으며, 변위는 디지털 변위기(Model No. 543-464B)를 이용하여 측정하였다(Figure 5-7).

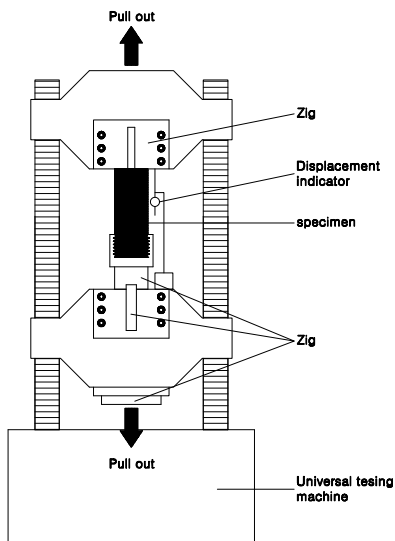


Figure 5-6. Schematic diagram for pull-out test of rock and spiral bolts and photography.



Figure 5-7. Data logger and digital displacement indicator used pull-out test of rock and spiral bolts.

5.3 구속압 평가

실내인발시험을 실시할 때 연강 원통관의 표면에 각 위치별로 부착된 로제트 게이지에서 발생하는 변형률을 측정하여 얻은 결과에 근거하여 연강 원통관에 발생한 응력을 계산하였다. 그 계산 결과를 얇은 두께 원통관 이론(황봉갑, 2002; Beer and Johnston, 1992)을 이용하여 연강 원통관에 의한 록 볼트와 스파이럴 볼트 지보재의 구속압을 검토하였다. 즉, Figure 5-8과 같이 두께 t , 내반경 r , 길이가 l 인 얇은 원통관에 내압 p 가 작용할 때 내압에 의해 상하 방향으로 작용하는 힘은 $2prl$ 이고, 이 힘을 받는 원통관의 축 방향 단면적은 $2tl$ 이므로 원주 응력 (circumferential stress)는 식 (5.1)로 쓸 수 있다.

$$\sigma = \frac{2prl}{2tl} = \frac{pr}{t} \quad (5.1)$$

따라서 원통에 작용하는 내압 p 는 식 (5.1)로부터 다음과 같은 식 (5.2)로 구할 수 있다.

$$p = \frac{t}{r} \sigma \quad (5.2)$$

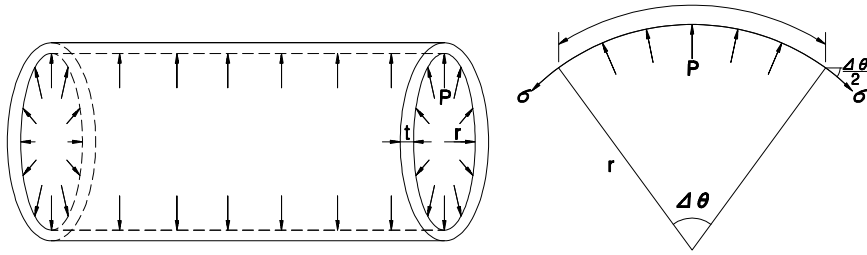


Figure 5-8. Circular cylinder subject to inner pressure.

Case 1, Case 2, Case 3의 연강 원통관 표면에 부착된 게이지 부착 위치 중 $z=100$ mm에서 얻어진 인발하중과 변형률의 변화를 한 예로 Figure 5-9에 나타내었다. 횡축은 변형률을, 종축은 인발하중을 각각 나타낸다. 인발하중이 작용할 때 낮은 하중 단계에서는 선형적인 관계로서 연강 원통관이 탄성적인 거동을 보이지만, 하중이 증가함으로써 변곡점이 나타나 비선형적인 거동을 보임을 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.

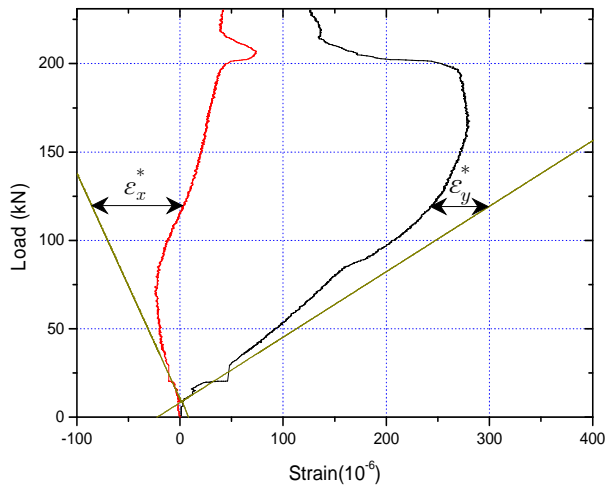


Figure 5-9. Relationship between axial and lateral strains and pull-out load.

선형영역에서는 각각의 게이지에 대한 로제트 게이지 이론(Dally and Riley, 1991)을 이용하면 전단변형률은 거의 0이 되므로, x 와 y 방향의 변형률이 주변형률

이 된다. 반면에 비선형영역에서는 공시체 내부로 변화가 일어나지 않은 경우 연강 원통관 Figure 5-9의 실선으로 나타낸 거동, 즉 실선에서 떨어진 변형률은 연강 원통관 내부의 변화에 의한 것으로 가정할 수 있다. 이러한 가정으로부터 x 와 y 방향에서 측정된 변형률로부터 실선에 나타낸 탄성 변형률을 빼 변형률의 차를 각각의 ε_x^* 와 ε_y^* 라 하면 x 방향의 진변형률(true strain) ε_x 는 연강 원통관의 포아송 비(ν)를 이용하여 아래와 같은 식으로 평가할 수 있다.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^* + \nu\varepsilon_y^* \quad (5.3)$$

또한 연강 원통관에 작용한 응력은 식 5.4을 이용하여 계산할 수 있다. 만약, x 방향의 응력을 σ_x 라 할 때, 연강 원통관의 내압, 즉 지보재의 구속압 p 는 아래 식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$p = \frac{t}{r}\sigma_x \quad (5.4)$$

여기서, t 는 연강 원통관의 두께로서 6 mm, r 은 연강 원통관의 내부 반경으로서 32.15 mm를 각각 나타낸다.

6. 연구 결과

6.1 실내 인발시험

록 볼트(이하 $\phi=25$ mm : RB-25)와 스파이럴 볼트(이하 $d=25$ mm : SB-25, $d=32$ mm : SB-32)에 대해 실내 인발 시험을 총 9번 실시하였고 시험 후 각각의 양생기간에 따른 각 지보재의 인발하중-변위, 구속압-인발하중, 구속압-변위, 구속압분포의 관계를 Figures 6-2~6-37에 도시하였다.



Figure 6-1. Pull-out test of rock and spiral bolts in laboratory.

6.1.1 록 볼트와 스파이럴 볼트의 최대 인발강도와 항복강도

록 볼트는 총 3단계로 인발하중에 따른 변위 관계를 보이고 있다. 1단계는 초기 하중에 의해 발생한 변위가 큰 증가량으로 증가하면서 어느 임의의 하중점(이하 A점)에 도달하게 된다. 2단계에서는 A점 이후로 변위는 인발하중이 증가함에 따라 낮은 증가량을 유지하면서 거의 일정하게 증가한다. 3단계에서는 다시 변위의 증가량이 증가하기 시작하는 하중점(이하 B점)을 시작으로 최대 인발하중(이하 C점)에 이른다. 이때 C점을 지보재가 지지력을 잃고 더 이상 지탱할 수 없는 하중수준으로 보고 이를 최대 인발강도로 하였다. 또한 C점에서 발생한 변위를 지보재의 최대 변위라고 한다.

반면, 스파이럴 볼트는 총 5단계의 변화를 보이면서 최대 인발하중에 도달하게 된다. 1~3단계까지는 록 볼트와 같은 양상을 보이면서 변화하지만 4단계에 이르러서는 하중이 급격히 감소하기 시작한다. 3단계에서 하중이 감소하기 직전의 하중점을 C'점이라고 하고 4단계에서 마지막 하중 즉 다시 인발하중이 증가하기 직전의 하중을 D점이라고 한다. 마지막 단계인 5단계에서는 감소했던 하중이 다시 증가하기 시작하여 지보재의 최대 인발하중(이하 C점)에 이른다. 이처럼 1~5단계를 거치는 동안 변위는 계속하여 발생한다.

스파이럴 볼트의 경우 4단계와 5단계에서 하중이 급격히 감소하다가 다시 하중이 증가하는 이유는 스파이럴 볼트와 시멘트-모르타르 사이에 파괴가 일어나면서 하중이 감소하다가 스파이럴 볼트의 2차적인 지보효과에 의해 하중이 상승한 것이라 생각된다.

또한 록 볼트와 스파이럴 볼트는 각각의 B점과 C'점에 해당하는 하중 이후에서부터 지보재의 지지력에 항복현상이 나타나고 있는 것으로 판단 될 수 있으므로 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보 설계시 사용할 수 있는 항복강도로 하였다. B점과 C'점 이후부터 지보재와 시멘트-모르타르간의 전단파괴가 발생한다.

6.1.2 양생기간 3일에 대한 실내인발시험

그라우트의 양생기간이 3일에 대한 실내인발시험 결과를 정리하면 Table 6-1과 같다. 인발하중-변위 관계에서 RB-25(3 days)의 항복하중은 193 kN이며, 파괴가

일어난 최대 인발하중은 211.68 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대변위량은 17.92 mm이었다. 그리고 RB-25의 허용 인발강도는 38.87 kgf/mm²이고 최대 인발강도는 42.63 kgf/mm²로 나타났다(Figure 6-2). RB-25(3 days)는 인발하중이 약 30kN까지 평균 0.1 mm정도의 간격으로 변위 증가량을 보이다 항복하중인 193 kN까지는 평균 0.02 mm의 변위 증가량을 보인다. 그 후 변위 증가량은 다시 증가하여 평균 0.15 mm의 간격으로 증가한다.

반면, SB-25(3 days)의 경우 항복하중은 154.35 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 235.20 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대변위량은 17.43 mm이었으며, 항복강도는 70 kgf/mm²이고 최대 인발강도는 106.67 kgf/mm²로 나타났다(Figure 6-3). 원점에서 A점까지의 평균 변위 증가량은 0.09 mm, A점에서 B점까지의 평균 변위 증가량은 0.02 mm, B점에서 C'점사이의 평균 변위 증가량은 0.08 mm이었으며, SB-25(3 days)의 D점에 해당하는 하중은 114.17 kN이었다.

SB-32(3 days)의 경우 항복하중은 192.08 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 264.60 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 22.95 mm이었으며, 항복강도는 68.06 kgf/mm²이고 최대 인발강도는 93.75 kgf/mm²로 나타났다(Figure 6-4). SB-32(3 days)는 본 연구에서 나타난 일반적인 인발하중과 변위관계와는 다르게 초기하중에서 인발하중이 감소하기 직전의 하중까지의 변위 증가량이 평균 0.03 mm로 일정하게 증가하였다. 또한 192.08 kN 이후에는 하중의 감소와 증가가 불안정하게 반복되었다.

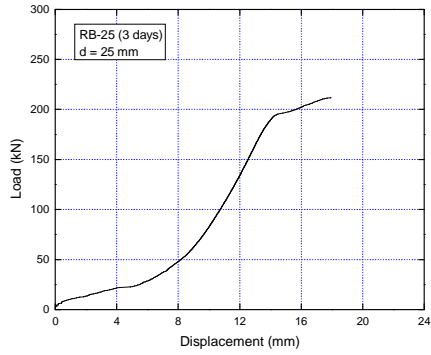


Figure 6-2. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

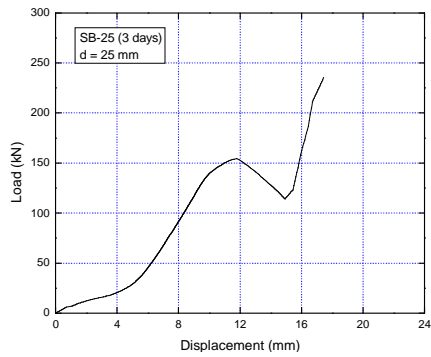


Figure 6-3. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

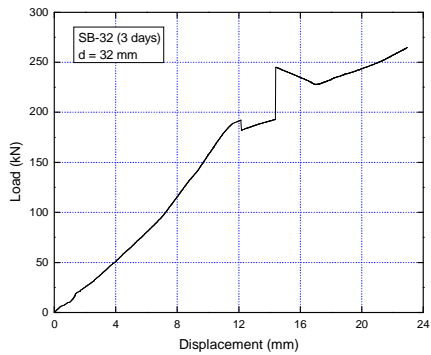


Figure 6-4. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days.

Table 6-1. Results of pull-out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 3 days.

Sample No.	Pull-out strength (kgf/mm ²)		Pull-out load (kN)		Maximum displacement (mm)
	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	
RB-25 (3 days)	38.87	42.63	193.00	211.68	17.92
SB-25 (3 days)	70.00	106.67	154.35	235.20	17.43
SB-32 (3 days)	68.06	93.75	192.08	264.60	22.95

그라우트의 양생기간이 3일인 경우 각 지점에 대하여 구한 구속압은 Table 6-2와 같다. 구속압-인발하중 관계에서 RB-25(3 days)는 최대 인발하중(211.68 kN)일 때 $z=100$ mm, $z=190$ mm, $z=280$ mm, $z=370$ mm인 지점에서 각각 16.27 MPa, 11.59 MPa, 9.32 MPa, 3.20 MPa의 최대 구속압을 갖는다(Figure 6-5).

반면 SB-25(3 days)는 최대 인발하중(235.20 kN)일 때 $z=100$ mm, $z=190$ mm, $z=280$ mm, $z=370$ mm 지점에서 각각 16.94 MPa, 17.01 MPa, 17.53 MPa, 12.64 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-6).

SB-32(3 days)는 최대 인발하중이 284.20 kN일 때 변형률 게이지가 부착된 각 위치 $z=100$ mm에서 14.40 MPa, $z=190$ mm에서 12.97 MPa, $z=280$ mm에서 16.07 MPa, $z=370$ mm 에서 11.47 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-7).

이상의 결과를 정리하면 항복하중에 있어서 RB-25(3 days)은 SB-25(3 days)에 비하여 약 39 kN 정도 컸으며 SB-32(3 days)보다는 1 kN 정도의 차이로 거의 비슷한 수준이었다. 이와는 다르게 최대 인발하중은 SB-25(3 days), SB-32(3 days)가 각각 24 kN, 53 kN 정도 크게 나타났다. 이는 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 항복하중은 크게 나타났지만 반대로 최대 인발하중은 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 크게 나타났음을 알 수 있다. 하지만 파괴시 발생한 최대 변위량은 록 볼트와

스파이럴 볼트의 차가 0.5 mm 정도 크거나 5 mm 정도 작았다. 항복강도는 SB-25(3 days)와 SB-32(3 days)이 RB-25(3 days)보다 약 30 kgf/cm² 정도 높고, 최대 인발강도는 각각 64 kgf/cm², 51 kgf/cm² 정도 높게 나타났다. 또한 구속압 역시 SB-25(3 days)는 0.67~9.44 MPa, 3.4~12.74 MPa 정도 크게 나타났고, SB-32(3 days)는 z=100 mm일 때를 제외하고는 1.38~8.27 MPa 정도 컸다.

구속압-인발하중의 관계에서도 동일한 인발하중단계에서 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 구속압이 크게 나타났으며, 같은 지점에서 스파이럴 볼트와 록 볼트의 구속압을 비교하였을 때 작게는 1.5배 크게는 9.5배로 구속압이 크게 나타났다.

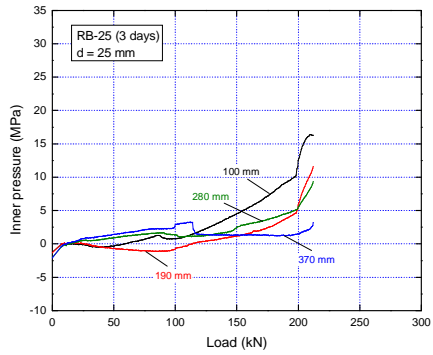


Figure 6-5. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

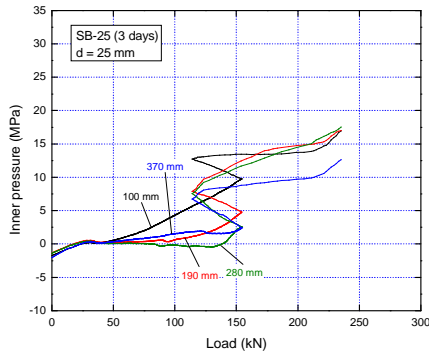


Figure 6-6. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

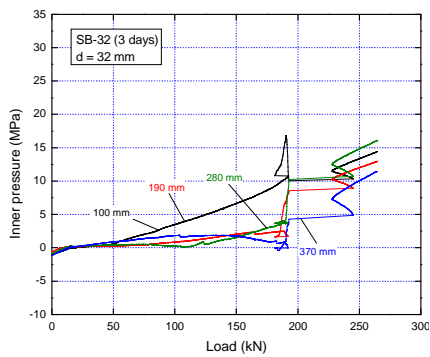


Figure 6-7. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days.

Table 6-2. Results of inner pressure in $z=100$ mm, $z=190$ mm, $z=280$ mm, $z=370$ mm by pull out test in laboratory : 3 days.

Sample No.	Inner pressure (MPa)			
	$z=100$ mm	$z=190$ mm	$z=280$ mm	$z=370$ mm
RB-25 (3 days)	16.27	11.59	9.32	3.20
SB-25 (3 days)	16.94	17.01	17.53	12.64
SB-32 (3 days)	14.40	12.97	16.07	11.47

Figures 6-8, 6-10, 6-12는 3일 동안 양생시킨 그라우트에 대한 지보재의 구속압에 따른 변위의 관계를 도시한 것이다. 또한 Figures 6-9, 6-11, 6-13는 각각의 z 지점에서 지보재의 특정 변위지점(3, 6, 9, 12 mm)에서 구속압의 분포양상을 도시한 것이다.

RB-25(3 days)는 Figure 6-8에서 알 수 있듯이 초기단계에 변위가 발생하였을 때에는 $z=370$ mm지점에서 가장 높은 구속압을 나타냈으나 변위가 증가할수록 $z=100$, 190, 280 mm지점의 구속압은 계속적으로 증가하는 반면 $z=370$ mm의 변위에 따른 구속압은 거의 같은 수준임을 알 수 있다. Figure 6-9는 이러한 사실을 더욱 자세히 도시하여 나타낸 것으로 다른 지점에서는 변위가 증가할수록 구속압이 증가함을 나타내고 있으나 $z=370$ mm지점은 변위가 증가하여도 거의 비슷한 구속압 분포를 보이고 있다.

SB-25(3 days)는 Figure 6-10과 같이 변위는 구속압과 함께 증가하며 그 후 하중의 감소에 의한 구속압의 감소 구간에서도 변위는 계속적으로 증가함을 알 수 있다. Figure 6-11은 SB-25(3 days)의 구속압분포를 더 자세히 나타낸다. 대체적으로 $z=100$ mm지점에서 구속압이 크게 분포하였으며 다음은 z 의 거리가 증가할수록 구속압은 멀어지는 것을 알 수 있다.

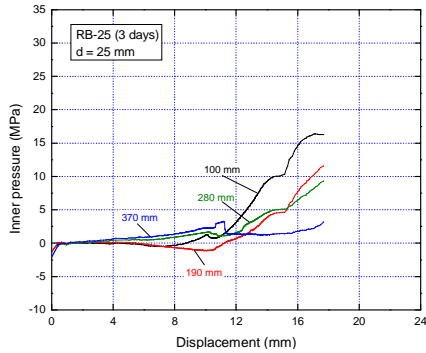


Figure 6-8. Relationship between displacement and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

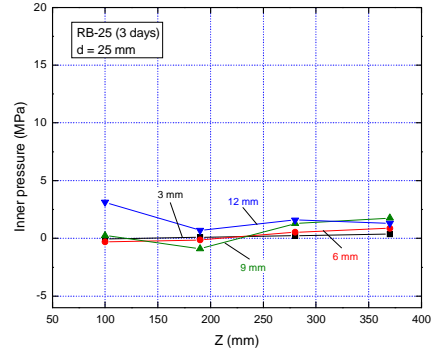


Figure 6-9. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

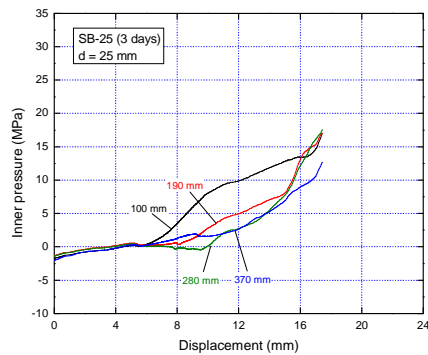


Figure 6-10. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

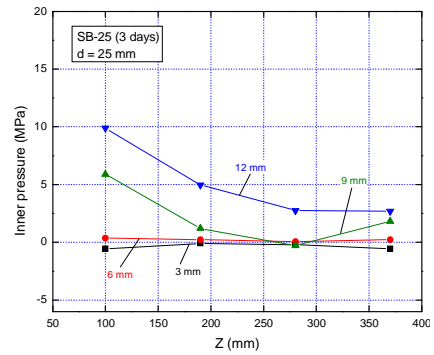


Figure 6-11. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 3 days.

SB-32(3 days) 역시 SB-25(3 days)와 마찬가지로 구속압의 증가와 함께 변위가 증가함을 보이고 있으며 구속압이 감소하는 구간에서도 변위는 여전히 발생하고 있음을 알 수 있다(Figure 6-12). 또한 Figure 6-13에서는 SB-32(3 days)역시 SB-25(3 days)와 같이 $z=100$ mm 지점에서 구속압이 가장 높고 변위가 12 mm일 때, $z=280$ mm 지점의 구속압을 제외하면 z 지점의 거리가 멀어질수록 구속압이 낮아지는 것을 알 수 있다.

구속압이 낮으면 지보재와 시멘트-모르타르간의 전단파괴가 일어나는 것으로 판단되며 각 지보재에서 낮은 구속압을 보이는 z 지점에서 가장 먼저 전단파괴가 일어났을 것으로 예상된다.

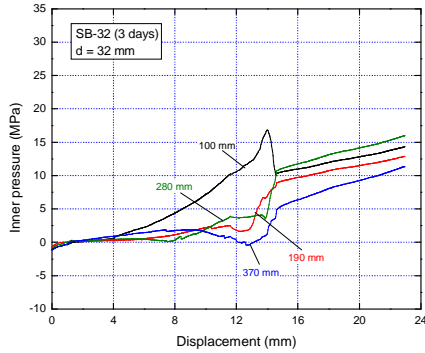


Figure 6-12. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days.

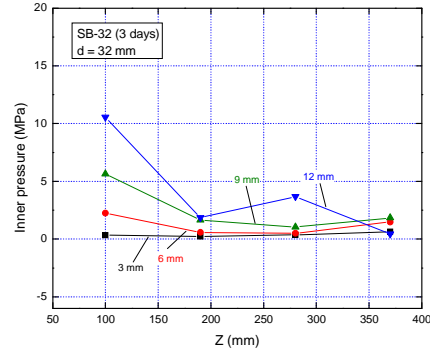


Figure 6-13. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 3 days.

6.1.3 양생기간 7일에 대한 실내인발시험

그라우트의 양생기간이 7일인 경우 인발하중-변위 관계에서 RB-25(7 days)의 항복하중은 194 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 230.3 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 19.28 mm이었다. 그리고 RB-25의 허용 인발강도는 39.07 kgf/mm^2 이고 최대 인발강도는 46.38 kgf/mm^2 로 나타났다(Figure 6-14). 평균 변위 증가량은 원점과 A점 사이(1단계)에서 평균 0.17 mm, A점과 B점간(2단계)에서 평균 0.02 mm, B점과 C점 사이(3단계)에서 평균 0.09 mm이었다.

반면, SB-25(7 days)의 경우 항복하중은 144.06 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 286.36 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 21.84 mm이었으며, 항복강도는 65.33 kgf/mm^2 이고 인발강도는 129.87 kgf/mm^2 로 나타났다(Figure 6-15). 평균 변위 증가량은 0.06 mm, 0.03 mm, 0.07 mm이었으며, SB-25(7 days)가 2차 지보효과를 나타내기 직전의 하중인 D점은 121.72 kN이었다.

SB-32(7 days)의 경우 항복하중은 166.11 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 284.20 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 21.04 mm이었으며, 항복강도는 58.85 kgf/mm^2 이고 인발강도는 100.69 kgf/mm^2 로 나타났다(Figure 6-16). 원점에서 A점까지의 평균 변위 증가량은 0.22 mm, A점에서 B점까

지의 평균 변위 증가량은 0.02 mm, B점에서 C'점사이의 평균 변위 증가량은 0.07 mm이었으며, SB-25(3 days)의 D점에 해당하는 하중은 133.47 kN이었다.

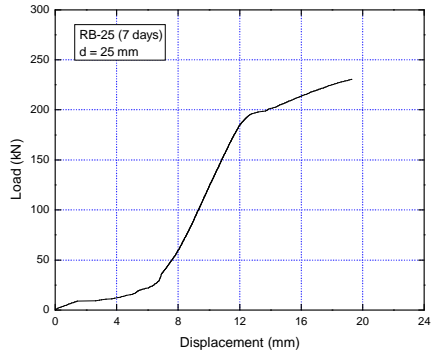


Figure 6-14. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

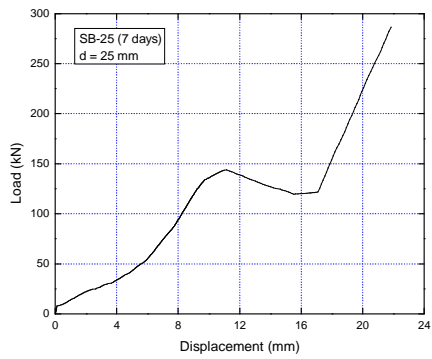


Figure 6-15. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

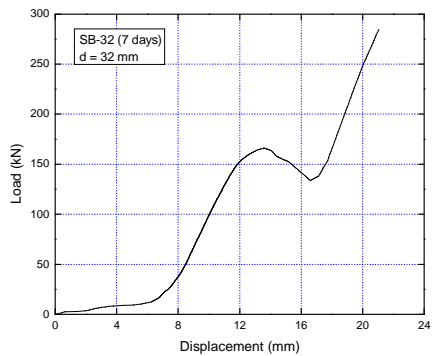


Figure 6-16. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days.

Table 6-3. Results of pull out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 7 days.

Sample No.	Pull out strength (kgf/mm ²)		Pull out load (kN)		Maximum displacement (mm)
	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	
RB-25 (7 days)	39.07	46.38	194.00	230.30	19.28
SB-25 (7 days)	65.33	129.87	144.06	286.36	21.84
SB-32 (7 days)	58.85	100.67	166.11	284.20	21.04

그라우트의 양생기간이 7일인 경우 구속압-인발하중 관계에서 RB-25(7 days)는 최대 인발하중이 230.30 kN일 때 변형률 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 13.70 MPa, z=190mm에서 13.96 MPa, z=280mm에서 9.90 MPa, z=370mm에서 2.68 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-17).

반면 SB-25(7 days)는 최대 인발하중이 286.36 kN일 때 변형률 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 21.45 MPa, z=190 mm에서 16.46 MPa, z=280 mm에서 14.26 MPa, z=370mm 에서 11.91 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-18).

SB-32(7 days)는 최대 인발하중이 284.20 kN일 때 변형률 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 17.14 MPa, z=190mm에서 18.55 MPa, z=280mm에서 22.64 MPa, z=370mm 에서 15.04 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-19).

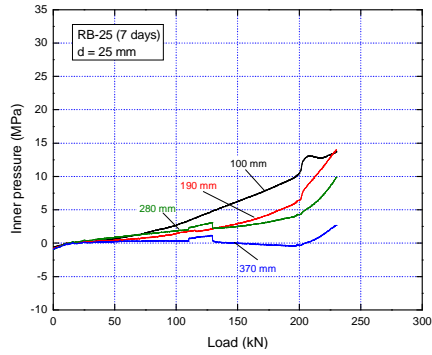


Figure 6-17. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

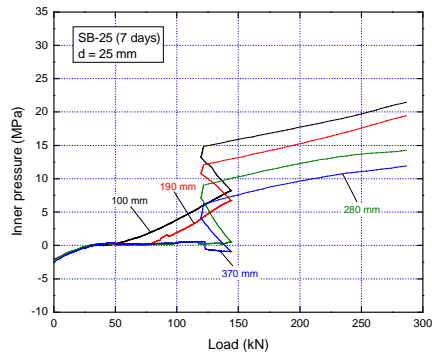


Figure 6-18. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

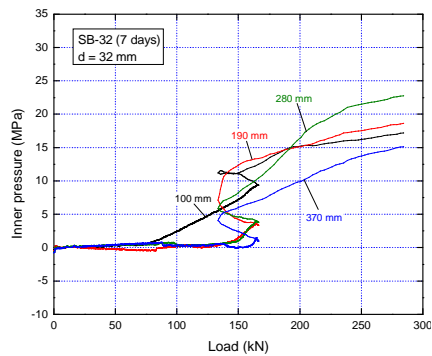


Figure 6-19. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days.

Table 6-4. Results of inner pressure in z=100 mm, z=190 mm, z=280 mm, z=370 mm by pull out test in laboratory : 7 days.

Sample No.	Inner pressure (MPa)			
	z=100 mm	z=190 mm	z=280 mm	z=370 mm
RB-25 (7 days)	13.70	13.96	9.90	2.68
SB-25 (7 days)	21.45	16.46	14.26	11.91
SB-32 (7 days)	17.14	18.55	22.64	15.04

이상의 결과를 정리하면 항복하중에 있어서 RB-25(7 days)는 SB-25(7 days)에 비하여 약 50 kN 정도, SB-32(7 days)보다 28 kN 정도 크게 나타난 반면, 최대 인발하중은 SB-25(7 days), SB-32(7 days)가 각각 56 kN, 54 kN 정도 크게 나타났다. 이는 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 항복하중은 크게 나타났지만 반대로 최대 인발하중은 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 크게 나타났음을 알 수 있다. 하지만 파괴시 발생한 최대 변위량은 록 볼트와 스파이럴 볼트의 차가 1.7~2.6 mm 정도로 큰 차이를 보이지 않았다. 항복강도는 SB-25(7 days), SB-32(7 days)이 RB-25(7 days)보다 약 26 kgf/cm², 20 kgf/cm² 정도 높고, 최대 인발강도는 약 83 kgf/cm², 54 kgf/cm² 정도 높게 나타났다. 또한 구속압 역시 SB-25(7 days)와 SB-32(7 days)가 각각 2.5~9.23 MPa, 3.4~12.74 MPa 정도 크게 나타났다.

구속압-인발하중의 관계에서도 동일한 인발하중단계에서 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 구속압이 크게 나타났으며, 같은 지점에서 스파이럴 볼트와 록 볼트의 구속압을 비교하였을 때 작게는 1.2배 크게는 5.6배로 구속압이 크게 나타났다.

양생기간 3일과 7일에 해당하는 지보재들간의 최대 인발하중과 변위를 비교한 결과 최대 인발하중은 양생기간 7일을 지낸 지보재가 약 20 kN~50 kN 정도 높게 측정되었으나 지보재의 변위는 거의 비슷한 수준이거나 변위가 감소한 경우도 있었다. 이는 시멘트-모르타르의 양생과 관련하여 3일의 양생기간을 지낸 시멘트-모르타르보다 7일의 양생기간을 거친 시멘트-모르타르의 높은 압축강도를 갖고 있기

때문에 지보재와 시멘트-모르타르간의 부착력을 증대시키고 이 때문에 더 높은 수준의 인발하중에서도 지보재는 상대적으로 적은 변위가 발생한 것이라고 판단된다.

RB-25(7 days), SB-25(7 days), SB-32(7 days)의 구속압을 비교해 볼 때 모든 z 지점에서 RB-25(7 days)에 비해 SB-25(7 days)와 SB-32(7 days)의 구속압이 높았으며 그 차이는 각 z 지점별로 평균 5~11 MPa의 차이를 보였다. 또한 SB-25(7 days), SB-32(7 days)의 구속압은 SB-32(7 days)이 높았으나 두 스파이럴 볼트의 구속압은 거의 비슷한 수준을 보였다.

또한 양생기간 7일인 경우의 록 볼트와 스파이럴 볼트를 양생기간을 3일인 경우의 록 볼트와 스파이럴 볼트와 비교하였을 때 록 볼트의 경우는 구속압이 거의 같은 수준이었다. 하지만 SB-25(7 days)는 SB-25(3 days)와 평균적으로 거의 차이가 없었지만 SB-32(7 days)는 SB-32(3 days)에 비해 각 z 지점별로 평균 3~7 MPa의 구속압이 증가되었다.

Figures 6-20, 6-22, 6-24은 7일 동안 양생시킨 시멘트-모르타르에 대한 지보재의 구속압에 따른 변위의 관계를 도시한 것이다. 또한 Figures 6-21, 6-23, 6-25는 각각의 z 지점에서 지보재의 특정 변위지점(3, 6, 9, 12 mm)에서 구속압의 분포양상을 도시한 것이다.

RB-25(7 days)는 변위가 약 8 mm가 발생하기 이전까지는 각 z 지점간의 구속압은 차이가 거의 없었으나 8 mm 이상의 변위가 발생하기 시작하였을 때부터 각각의 z 지점의 구속압은 차이가 나기 시작하며 $z=100 \text{ mm} > z=190 \text{ mm} > z=280 \text{ mm} > z=370 \text{ mm}$ 의 순으로 구속압이 높았다(Figure 6-20). Figure 6-21에서도 이와 같은 사실을 뒷받침 하고 있다.

SB-25(7 days)는 Figure 6-22과 같이 변위는 구속압과 함께 증가하며 변위가 약 6 mm 발생하였을 때 각 z 지점의 구속압은 차이가 나기 시작하고 있다. Figure 6-23을 통해 변위량에 따른 구속압의 분포를 살펴보면 Figure 6-22과 마찬가지로 z 의 거리가 늘어날수록 구속압이 감소하여 $z=370 \text{ mm}$ 일 때 최소의 구속압을 발휘함을 나타내고 있다.

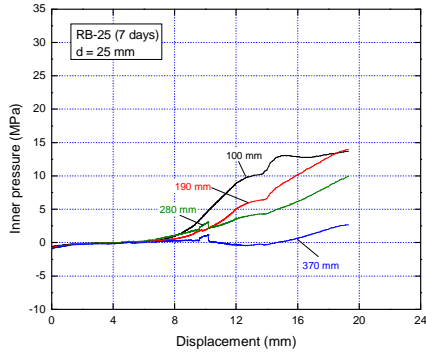


Figure 6-20. Relationship between displacement and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

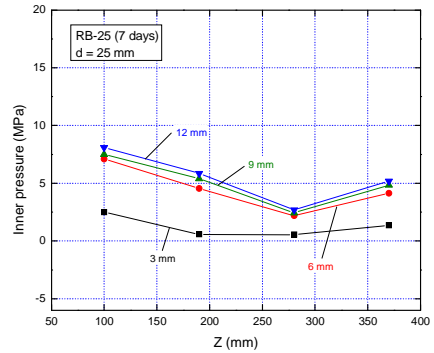


Figure 6-21. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

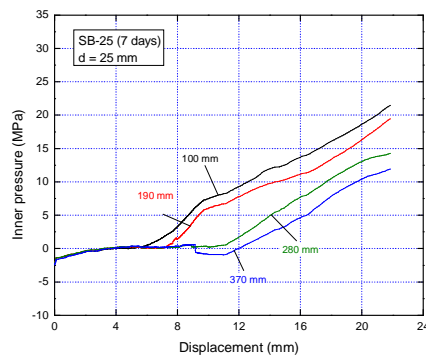


Figure 6-22. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

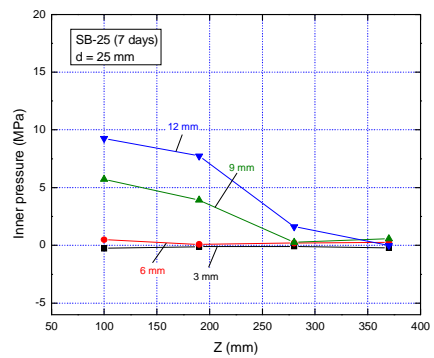


Figure 6-23. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 7 days.

SB-32(7 days)는 Figure 6-24에서 알 수 있듯이 변위가 약 8 mm이하였을 때 그 구속압은 모든 z 지점에서 비슷한 수준이었으나 그 이상의 변위가 발생하였을 때는 그 차이가 벌어지면서 z=100 mm이었을 때 가장 큰 구속압을 나타냈고 z 지점의 거리가 멀어질수록 구속압은 감소하였다. Figure 6-25에서도 이와 같은 사실을 잘 말해주고 있다.

이와 같이 세 경우의 지보재에서는 변위가 증가할수록 구속압도 증가하며 z 지점이 멀어질수록 구속압은 감소함을 알 수 있다.

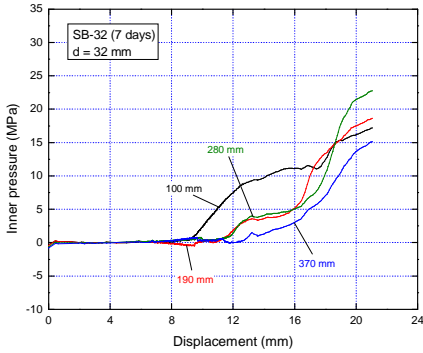


Figure 6-24. Relationship between displacement and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days.

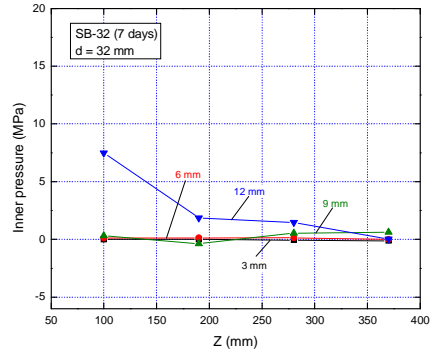


Figure 6-25. Relationship between z point and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 7 days.

6.1.4 양생기간 28일에 대한 실내인발시험

그라우트의 양생기간이 28일인 경우 인발하중-변위 관계에서 RB-25(28 days)의 항복하중은 200 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 240.10 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 14.02 mm이었다. 그리고 RB-25의 허용 인발강도는 40.28 kgf/mm²이고 최대 인발강도는 48.33 kgf/mm²로 나타났다(Figure 6-26). 평균 변위 증가량은 원점과 A점 사이(1단계)에서 평균 0.05 mm, A점과 B점 사이(2단계)에서 평균 0.03 mm, B점과 C점 사이(3단계)에서 평균 0.11 mm이었다.

반면, SB-25(28 days)의 경우 항복하중은 137.69 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 287.14 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 19.08 mm이었으며, 항복강도는 62.44 kgf/mm²이고 인발강도는 130.22 kgf/mm²로 나타났다(Figure 6-27). 평균 변위 증가량에 있어서는 각 단계별로 그 차이가 거의 없고 약 0.04 mm의 증가량을 보이면서 일정하게 증가하였다. 2차 지보효과를 나타내기

직전의 하중인 D점은 109.76 kN이었다.

SB-32(28 days)의 경우 항복하중은 134.75 kN이며, 파괴가 일어난 최대 인발하중은 289.10 kN으로 나타났다. 최대 인발하중시 발생한 최대 변위량은 20.00 mm이었으며, 항복강도는 47.74 kgf/mm^2 이고 최대 인발강도는 102.43 kgf/mm^2 로 나타났다(Figure 6-28). 평균 변위 증가량은 원점과 A점 사이(1단계)에서 0.04 mm, A점과 B점사이(2단계)에서 0.03 mm, B점과 C점 사이(3단계)에서 0.06 mm으로 그 차이가 크지 않았다. D점의 하중은 112.70 kN이다.

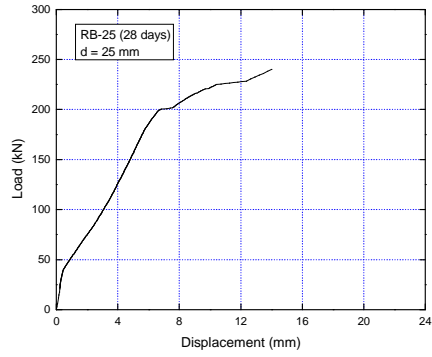


Figure 6-26. Relationship between displacement and pull-out load of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

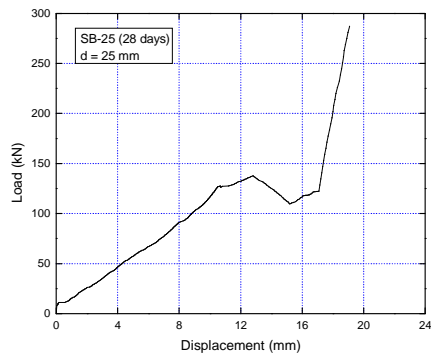


Figure 6-27. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

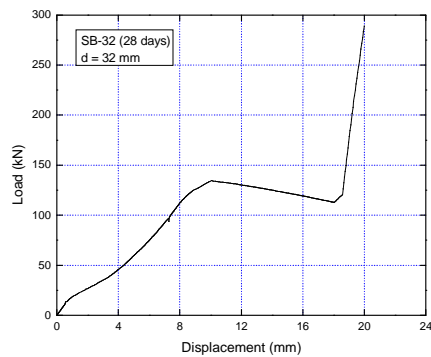


Figure 6-28. Relationship between displacement and pull-out load of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days.

Table 6-5. Results of pull out strength, pull out load and maximum displacement by pull out test in laboratory : 28 days.

Sample No.	Pull out strength (kgf/mm ²)		Pull out load (kN)		Maximum displacement (mm)
	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	<i>Yield</i>	<i>Maximum</i>	
RB-25 (28 days)	40.28	48.33	200.00	240.10	14.02
SB-25 (28 days)	62.44	130.22	137.69	287.14	19.08
SB-32 (28 days)	47.74	102.43	134.75	289.10	20.00

그라우트의 양생기간이 28일인 경우 구속압-인발하중 관계에서 RB-25(28 days)는 최대 인발하중이 240.10 kN일 때 로제트 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 8.31 MPa, z=190mm에서 7.09 MPa, z=280mm에서 3.92 MPa, z=370mm에서 6.34 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-29).

반면 SB-25(28 days)는 최대 인발하중이 287.14 kN일 때 로제트 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 13.45 MPa, z=190 mm에서 19.47 MPa, z=280 mm에서 17.51 MPa, z=370mm 에서 15.98 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-30).

SB-32(28 days)는 최대 인발하중이 289.10 kN일 때 로제트 게이지가 부착된 각 위치 z=100mm에서 16.23 MPa, z=190mm에서 27.02 MPa, z=280mm에서 25.72 MPa, z=370mm 에서 18.29 MPa의 최대 구속압이 발생하였다(Figure 6-31).

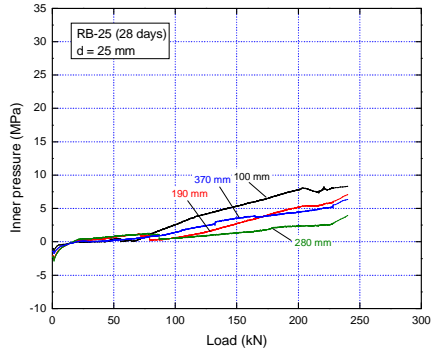


Figure 6-29. Relationship between pull-out load and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

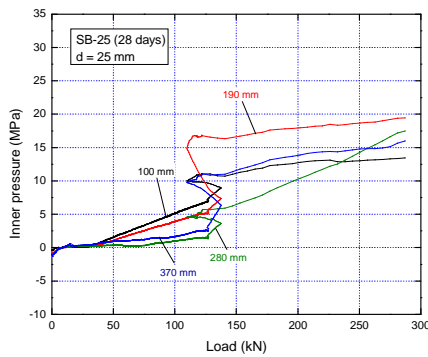


Figure 6-30. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

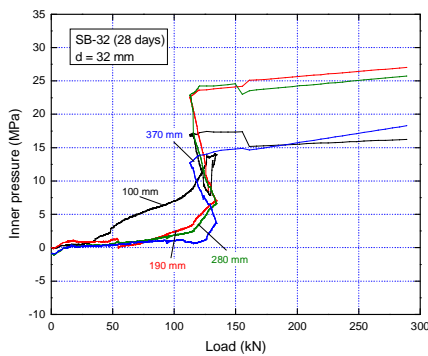


Figure 6-31. Relationship between pull-out load and inner pressure of spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days.

Table 6-6. Results of inner pressure in z=100 mm, z=190 mm, z=280 mm, z=370 mm by pull out test in laboratory : 28 days.

Sample No.	Inner pressure (MPa)			
	z=100 mm	z=190 mm	z=280 mm	z=370 mm
RB-25 (28 days)	8.31	7.09	3.92	6.34
SB-25 (28 days)	13.45	19.47	17.51	15.98
SB-32 (28 days)	16.23	27.02	25.72	18.29

이상의 결과를 정리하면 항복하중에 있어서 RB-25(28 days)는 SB-25(28 days)와 SB-32(28 days)보다 항복하중은 높았다. 그 차이는 SB-25(28 days)보다는 약 62 kN 정도, SB-32(7 days)보다 65 kN 정도이다. 반면, 최대 인발하중은 SB-25(28 days), SB-32(28 days)가 각각 47 kN, 49 kN 정도 크게 나타났다. 이는 양생기간 3일, 7일의 록 볼트와 스파이럴 볼트와 같이 록 볼트가 스파이럴 볼트에 비해 항복하중은 크게 나타났지만 반대로 최대 인발하중은 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 크게 나타났음을 알 수 있다. 하지만 파괴시 발생한 최대 변위량은 록 볼트와 스파이럴 볼트의 차가 5~5.9 mm 정도로 큰 차이를 보였다. 항복강도는 SB-25(28 days), SB-32(28 days)가 RB-25(28 days)보다 약 22 kgf/cm², 7.5 kgf/cm² 정도 높고, 최대 인발강도는 약 82 kgf/cm², 54 kgf/cm² 정도 높게 나타났다. 또한 구속압 역시 SB-25(28 days)와 SB-32(28 days)가 각각 5.1~13.6 MPa, 7.92~21.8 MPa 정도 크게 나타났다.

구속압-인발하중의 관계에서도 동일한 인발하중단계에서 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 구속압이 크게 나타났으며, 같은 지점에서 스파이럴 볼트와 록 볼트의 구속압을 비교하였을때 작게는 1.6배 크게는 6.6배로 구속압이 크게 나타났다.

양생기간 3일과 7일에 해당하는 지보재와 양생기간 28일의 지보재들간의 최대 인발하중과 변위를 비교한 결과 최대 인발하중은 양생기간 3일의 지보재보다 약 24~52 kN 정도 높게 측정된 반면, 7일의 지보재보다는 약 0.8~9.8 kN 정도 높은 것으로 그 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 변위는 양생기간이 길어짐에 따라

감소하는 경향을 보였으며, 특히 양생기간 7일과 28일의 지보재들간의 변위 차이는 그 수준이 미미하였다. 이는 시멘트-모르타르의 양생과 관련하여 양생기간이 3일인 시멘트-모르타르보다 7, 28일의 양생기간을 거친 시멘트-모르타르가 높은 압축강도를 갖고 있기 때문에 지보재와 시멘트-모르타르간의 부착력을 증대시키고 이 때문에 더 높은 수준의 인발하중에서도 지보재는 상대적으로 적은 변위가 발생한 것이라고 판단된다. 이 같은 결과로 보아 지보재를 현장에 적용할시 적어도 그라우트 양생기간이 7일이 지난 후에 그 지보효과를 발휘하는 것으로 판단된다. 또한 양생기간이 지남에 따라 시멘트-모르타르는 높은 압축강도를 갖기 때문에 시멘트-모르타르가 지보재를 구속하는 힘이 증가하여 상대적으로 변위가 적게 발생한 것으로 생각된다.

RB-25(28 days), SB-25(28 days), SB-32(28 days)의 구속압을 비교해 볼 때 모든 z 지점에서 RB-25(28 days)에 비해 SB-25(28 days)와 SB-32(28 days)의 구속압이 높았다. 또한 SB-25(28 days), SB-32(28 days)의 구속압은 SB-32(28 days)이 높았으며 그 차이는 약 2.3~8.2 MPa 정도로 조금 더 높았다.

RB-25(28 days), SB-25(28 days), SB-32(28 days)를 양생기간 3일과 7일의 지보재와 구속압을 비교했을 경우, 변위와는 반대로 양생기간이 길어짐에 따라 구속압은 증가하는 경향을 보였다. 하지만 양생기간이 7일인 지보재와는 그 차이가 거의 미미한 수준이었다.

Figures 6-32, 6-34, 6-36은 RB-25(28 days), SB-25(28 days), SB-32(28 days)의 각각의 게이지 부착위치(z 지점)에서 구속압에 따른 변위를 도시한 것이며 Figures 6-33, 6-35, 6-37은 각각의 z 지점에서 지보재의 특정 변위지점(3, 6, 9, 12 mm)에서 구속압의 분포양상을 도시한 것이다.

RB-25(28 days)는 Figure 6-32와 같이 변위가 증가할수록 구속압 역시 증가함을 보이고 있다. 또한 구속압의 수준이 $z=100\text{ mm} > z=190\text{ mm} > z=370\text{ mm} > z=280\text{ mm}$ 순으로 나타났다. 특히 변위가 약 2 mm정도 발생하였을 때 각 z지점의 구속압의 차이는 커지기 시작하였다. Figure 6-33 역시 같은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

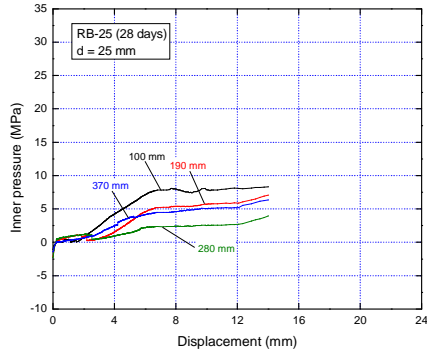


Figure 6-32. Relationship between displacement and inner pressure rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

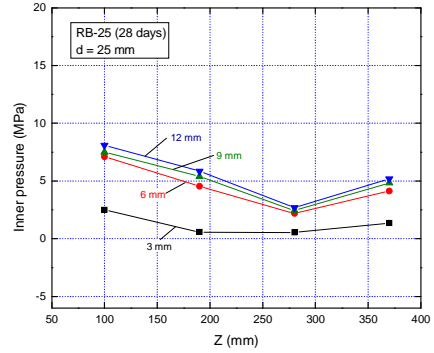


Figure 6-33. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

SB-25(28 days)에 대한 결과 값은 Figure 6-34와 같다. SB-25(28 days)는 약 3 mm의 변위가 발생할 시점부터 각 z 지점의 구속압은 $z=100 \text{ mm} > z=190 \text{ mm} > z=280 \text{ mm} > z=370 \text{ mm}$ 순으로 차이가 나기 시작하였다. Figure 6-35은 이와 같은 사실을 뒷받침해주고 있다.

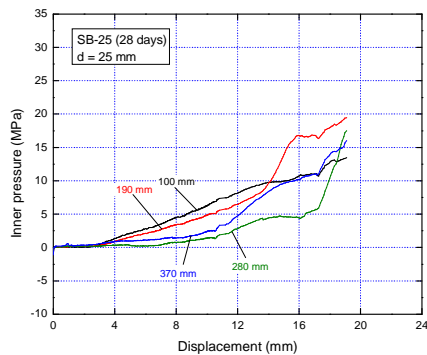


Figure 6-34. Relationship between displacement and inner pressure spiral bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

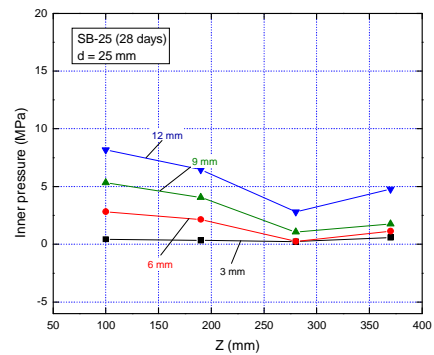


Figure 6-35. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 25 mm and 28 days.

SB-32(28 days)는 Figure 6-36과 같이 약 3 mm의 변위가 발생할 때부터 각 z

지점간의 구속압은 차이가 나기 시작하였으며 $z=100$ mm에서 그 구속압의 수준이 월등히 높음을 알 수 있다. 또한 변위가 약 11 mm 발생하였을때 $z=100$ mm의 구속압이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. Figure 6-37도 마찬가지로 이와 같은 구속압의 분포를 변위가 12 mm일 때를 제외하고는 구속압이 변위에 따라 계속 증가하며, 각각의 변위지점에서 $z=100$ mm > $z=190$ mm > $z=280$ mm > $z=370$ mm 순으로 높은 구속압분포를 나타냈다.

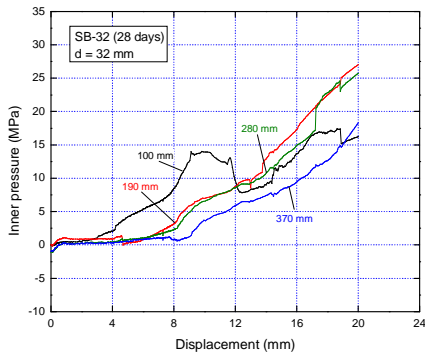


Figure 6-36. Relationship between displacement and inner pressure spiral bolt with ϕ 32 mm and 28 days.

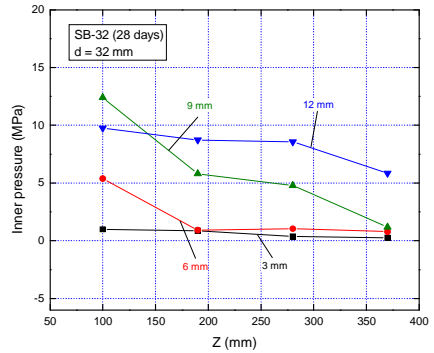


Figure 6-37. Relationship between z point and inner pressure of rock bolt with ϕ 32 mm and 28 days.

7. 고찰

7.1 지보필요성의 판정

지하갱도의 굴착시 지보의 필요성에 대한 판정은 암반의 상태, 즉 암반의 강도, 절리 등의 불연속면의 발달상황, 지압의 크기, 지하수의 영향 등을 조사하고 굴착될 갱도의 규모 및 유지기간 등을 고려하여 결정 되어야 한다.

현장조사에서 구한 RMR과 Q-system의 분류치에 의해 지보의 필요성을 판정할 수 있다. Figure 7-1은 RMR 분류치에 따른 갱도의 폭과 무지보 상태하에서의 유지기간과의 관계를 나타낸 것이다(Singh and Goel, 1999).

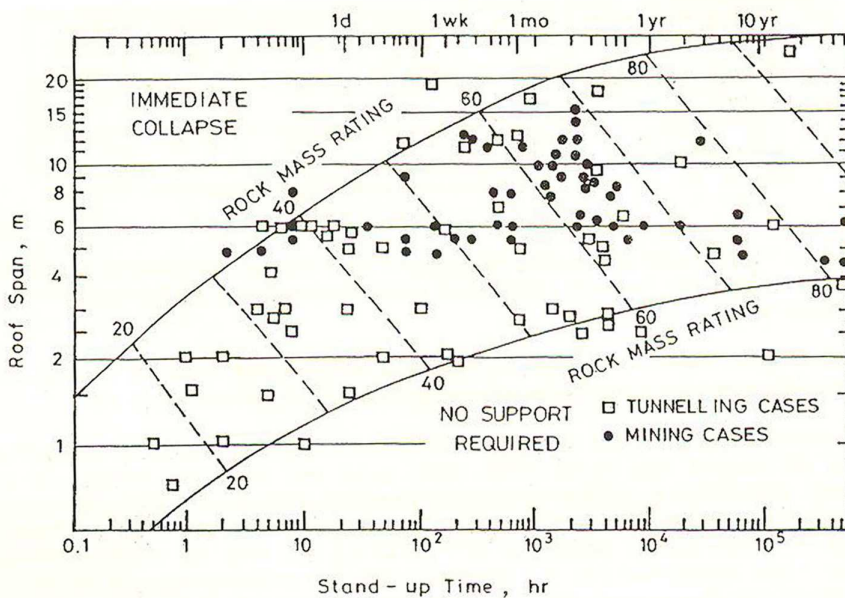


Figure 7-1. Stand-up time vs roof span for various rock mass classes as per geomechanics classification(Bieniawski, 1989).

Table 7-1은 RMR 분류의 암반등급별로 장기적인 안정성 확보를 위한 지보의 선택에 대한 지침이며, 여기에 수록된 지보량은 예비지보가 아닌 영구지보이므로 추가적인 콘크리트라이닝이 필요하지 않다. 그러나 충분한 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 공사기간 중에 암반거동의 안정성 감시를 위한 터널계측을 권장한다 (Singh and Goel, 1999).

Table 7-1. Guidelines for excavation and support of rock tunnels in accordance with the rock mass rating system (Bieniawski, 1989).

Rock Mass Class	Excavation	Rock bolts (20mm diafully Grouted)
Very good rock RMR=81 ~ 100	Full face. 3 m advance	Generally, no support required except for occasional spot bolting
Good rock RMR=61 ~ 80	Full face. 1.0-1.5m advance. Complete support 20m from face	Locally, bolts in crown 3m long, spaced 2.5m with occasional wire mesh
Fair rock RMR=41 ~ 60	<u>Heading and bench.</u> 1.5-3m advance in head-ing. Commence support after each blast. Complete support 10m from face	Systematic bolts 4m long spaced 1.5-2m in crown and walls with wire mesh in crown
Poor rock RMR=21 ~ 40	Top heading and bench. 1.0-1.5m advance in top heading. Install support concurrently with excavation 10m from face	Systematic bolts 4-5m long, spaced 1-1.5m in crown and wall with wire mesh
Very poor rock RMR<20	Multiple drifts 0.5-1.5m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. shot	Systematic bolts 5-6m long spaced 1-1.5m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert

Figure 7-2 은 갱도의 유효크기(De)와 Q값과의 관계를 나타낸 것으로 암반별로 구한 Q값과 유효크기를 이용하여 지보의 필요성을 판정할 수 있다. 이에 의한 결과는 RMR에 의한 판정과 유사하다.

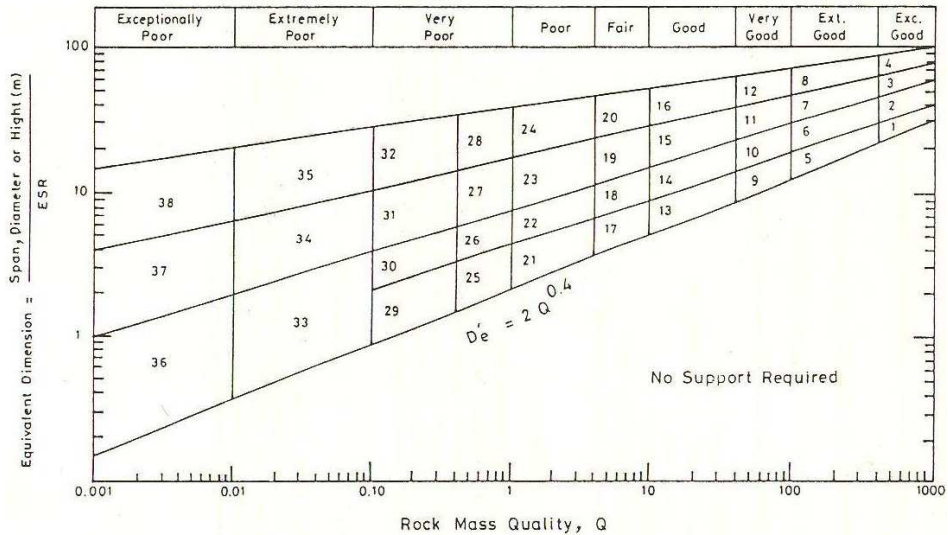


Figure 7-2. Tunnel support chart showing 38 support categories (Barton et al., 1974).

7.2 천공경과 지보재의 크기

천공경과 볼트직경과는 연관관계가 크므로 볼트의 시공시 최대 하중을 받는 천공경을 선택하는 것이 중요하다. 특히 Slot and wedge bolt는 천공경이 너무 크면 볼트와 공벽간의 접촉압력이 충분히 크게 되지 않으며, 천공경이 너무 작아도 wedge가 slot에 적절히 삽입될 수 없어 성능을 발휘하기 어렵다. Expansion shell bolt는 천공경이 큰 경우 썸기에 의해 덮개가 완전히 벌어져도 충분한 접촉압력이 생기지 않기 때문에 지보능력을 잃는다. 이 볼트는 천공경이 작은 것이 유리하다.

Resin bolt와 cement grouted bolt도 천공경과 지보능력 사이에 상관관계가 있다. 볼트가 공 사이의 간극은 resin이 촉매와 잘 섞일 수 있는 정도로 하여야 한다. 간극이 적정수준 보다 크거나 작으면 지보능력이 떨어진다. 연구에 의하면 간극이 6.4 mm(1/4 inch) 정도일 때 지보능력이 가장 큰 것으로 나타났다(Figure 7-3).

간극이 같은 경우 천공경과 볼트직경이 클 때 지보능력이 크고 천공의 벽면이 거친 경우 매끄러운 때보다 지보능력이 월등히 크다.

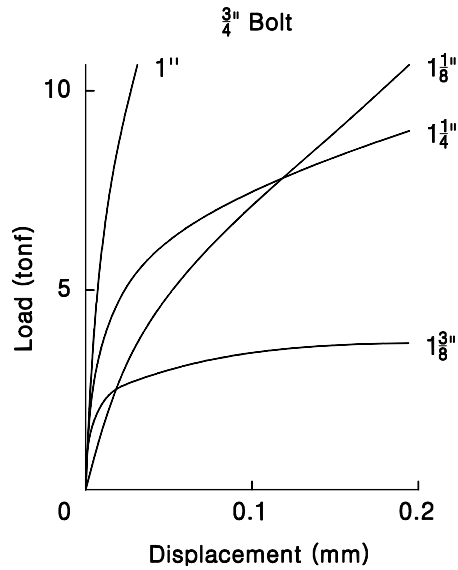


Figure 7-3 Pull-test result by effect of drill hole (used bolt diameter : 19 mm, length : 30 cm, number for end of curve is drill hole diameter)(대한광업진흥공사, 1986).

구체적인 록 볼트의 직경과 천공경과의 관계는 Table 7-2와 같다(김일중, 2000).

Table 7-2 Relationship between types of rock bolt and drill hole(ϕ).

	Rock bolt	Drill hole diameter(ϕ)
Expansion bolts	wedge type	$\phi \leq \text{slit (max)}$
	expansion type	$\phi \leq \text{shell (max)}$
	common resin(capsule type)	$\phi = \text{bolt diameter} + (4 \sim 8\text{mm})$
Fully-grouted bolt	common resin(capsule type)	$\phi = \text{bolt diameter} + (4 \sim 8\text{mm})$
	blowing resin(capsule type)	$\phi = \text{bolt diameter} + (10 \sim 15\text{mm})$
	cement system(capsule type)	$\phi = \text{capsule diameter} + (6\text{mm})$
	cement mortar	$\phi = \text{bolt diameter} + (10 \sim 15\text{mm})$
	perfo type	$\phi = \text{bolt diameter} + (10 \sim 20\text{mm})$
	cement milk type (grouting type)	$\phi = \text{bolt diameter} + (10 \sim 15\text{mm})$ $\phi \leq \text{packer effective diameter}$

스파이럴 볼트의 크기에 대한 연구는 국내에서는 활발하지 않으므로 이에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

7.3 지보재 형태

록 볼트는 현장에서 널리 사용되는 만큼 수백개에 달하는 종류가 있다. 그 형태로는 앵커 또는 그라우트로 고정하는 프리텐션(pre-tension)을 주지 않는 강재 다우엘(anchored or grouted steel dowel), 프리텐션을 주는 기계식 정착형볼트(tensioned mechanically anchored bolt), 그라우트를 실시하여 프리텐션을 주는 록볼트(grouted tensioned rock bolt)이 있다(김일중, 2000).

통상 나사가 붙은 록 볼트에는 역학적 관점에서 나사부분에서의 구속압이 작게 된다. 한편 나사봉강은 소재부 전체에 공칭 단면적과 같은 면적의 나사로 가공되어 있기 때문에 나사부 결손부의 약점에 대해서 어느 정도 대처하고 있다. 또한 트위스트 봉강에서는 볼트 나사부 파단 대책으로 나사부 단면 결손을 최소로 한 두부 단조형 록 볼트가 있다(양재범, 2003).

스파이럴 볼트는 기존의 록 볼트등의 지보재와 비교하여 시공시 간편하고 안정한 시공방법을 도모함과 동시에 나선형 형태로 인하여 모르타르 흘러내림을 방지

하여 천반부에 공극발생을 억제하면서 공내에 균일하고 밀실한 모르타르 충진을 함으로서 시공품질 확보가 가능하다. 또한 스파이럴 볼트는 일정두께의 긴 평철을 축회전시켜 만든 나선형 형태의 지보재로서 기존 이형봉강으로 제작된 록 볼트에 비하여 인장강도의 저하 없이 재료비를 절감시킬 수 있어 경제성을 증대시킬 수 있다. 더군다나 스파이럴 볼트 자체의 중량이 기존의 지보재에 비하여 가벼우므로 시공이 용이하여 시공성을 증진시킬 수 있는 등 경제성, 시공성 및 안전성을 만족시킬 수 있다.

7.4 지보재 길이 결정

록 볼트의 길이는 지반의 상태, 터널단면, 인발내력 등을 고려하여 결정하는데, 일반적으로 터널 직경의 1/3~2/3 정도로 하고, 지반이 불량할 때는 보다 긴 볼트를 사용한다. NATM의 보조공법인 록 볼트 공법은 토사지반에서는 반드시 행해져야 하는 필수적인 보조 공법임에도 불구하고 설치위치 및 설치길이에 대한 연구가 별로 없고, 대부분 경험에 의거하여 시공을 행하고 있는 실정이다. 사질지반에 있어서 경제성이 있는 볼트의 설치길이를 연구한 결과 l/D (l =볼트의 길이, D =볼트의 직경)의 값이 0.5임을 임종철(1997)등이 밝혔다(임종철 외, 1997).

Figure 7-4과 같이 하중-변위 곡선을 그려 인발내력을 구한다. 인발내력은 하중-변위곡선에서 A영역 직선부의 접선과 C영역 접선과의 교점 D이다. C영역은 볼트의 정착효과를 기대할 수 없는 영역이고, D영역까지가 볼트의 정착효과를 기대할 수 있는 영역이다. 암반강도가 낮아서 소정의 인발저항이 얻어지지 않으면 록 볼트의 길이를 길게 할 필요가 있다.

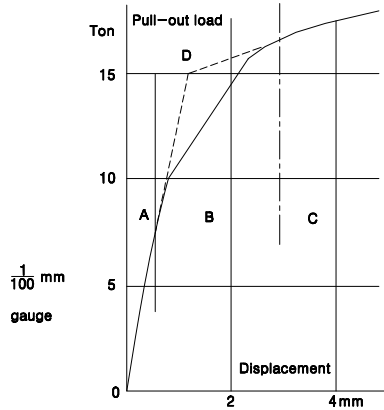


Figure 7-4 Curve of pull-out load and displacement by pull-out test.

록 볼트의 경우 인발내력은 길이의 변화에 대해 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 변위는 공통적으로 길이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다(대한터널협회, 1999).

스파이럴 볼트는 아직까지 그 길이에 대한 연구가 현저히 부족한 실정으로 더욱 활발한 연구가 시급한 현실이다.

7.5 현장에서의 구속압

본 연구에서는 구속압은 대체적으로 록 볼트와 스파이럴 볼트 양쪽 모두 공시체의 앞부분에서 크게 나타나고 공시체의 끝부분에서 작게 나타났다. 이러한 사실은 터널 현장에서 인발시험에 의한 구속압은 터널 벽면에 가까운 거리에서 크게 나타나고 먼 거리에서 작게 나타남을 의미한다. 결론적으로 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보효과를 실내인발시험을 통하여 비교해 볼 때, 단면적에 있어서는 록 볼트가 스파이럴 볼트보다 약 1.8~2.2배 이상 크지만 최대 인발강도, 구속압 등을 고려할 경우 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 약 2.8배의 지보효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

8. 결론

본 연구는 록 볼트와 스파이럴 볼트에 대한 지보특성을 규명하기 위함이다. 이를 위하여 첫째로 직경이 25 mm인 록 볼트와 두께가 9 mm이고 폭이 각각 25 mm와 32 mm인 스파이럴 볼트에 대하여 시멘트-모르타르의 양생기간이 3일, 7일, 28일 경우에 있어서 실내인발시험을 수행하였다. 둘째, 실내인발시험으로부터 인발하중과 변위를 측정하였다. 마지막으로 실내인발시험 결과를 이용하여 구속압을 계산하고 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 시멘트-모르타르의 각 양생기간에 대한 실내인발시험을 수행하여 각 지보재간의 최대 인발하중, 변위, 구속압 등을 비교한 결과, 양생기간이 3일인 시험결과는 양생기간이 7일과 28일인 시험결과와 뚜렷한 차이를 보인 반면, 7일과 28일의 결과에서는 지보재 사이의 차이가 미미하였다.

2. 록 볼트와 스파이럴 볼트의 인발하중에 대한 변위를 측정한 결과 각각의 양생기간에 대해서 스파이럴 볼트가 록 볼트에 비해 변위가 크게 나타났다. 이것은 록 볼트의 기계적 성질이 스파이럴 볼트보다 크기 때문인 것으로 사료된다. 또한 양생기간이 길어질수록 지보재의 변위는 거의 동일하거나 감소하는 경향을 보였는데, 그 원인은 양생기간에 따라 시멘트-모르타르의 압축강도가 증가하므로 지보재와 시멘트-모르타르 사이의 부착력이 증가하기 때문으로 사료된다.

3. 록 볼트와 스파이럴 볼트의 구속압을 비교한 결과 동일한 인발하중단계에서 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 구속압이 크게 나타났다. 더군다나 시멘트-모르타르 양생기간 3일의 경우 같은 지점에서 구속압은 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 1.5~9.5배, 7일의 경우 1.2~5.6배, 28일의 경우 1.6~6.6배의 차이를 보였다. 이러한 사실은 같은 조건하에 있는 지반이나 암반에 지보재를 설치할 경우 시공성 측면에서 스파이럴 볼트가 록 볼트보다 지반이나 암반의 안정성을 확보하는데 더 효과적임을 지시한다.

4. 이상의 결과를 종합해 볼 때 같은 조건하에 있는 지반이나 암반에 지보재를

설치할 경우 새로운 형태의 지보재인 스파이럴 볼트가 기존의 지보재인 록 볼트보다 인발하중과 구속압을 더 크게 발휘하는 것으로 사료된다. 아울러, 지보재에 있어서 경제성, 현장에서의 지보재 시공성 뿐만 아니라 지보재 설치 전후의 지반이나 암반의 안정성 측면 등을 고려할 때 스파이럴 볼트가 록 볼트에 비하여 더 효과적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 강성승, 히라타 아츠오, 오바라 유조(2005) 새로운 지보재로 개발된 스파이럴 바의 축방향 저항력 선정법, 대한토목학회, 25, pp : 387-394.
- 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 크리프 및 단기거동 특성 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, vol. 22, pp. 585-594.
- 김일중(2000) 産 · 學人을 위한 지반굴착공학통론, 성안당, pp. 403.
- 대한광업진흥공사(1986) Rock Bolt 지보 기술 광산 적용 시험연구, pp. 4-12.
- 양재범(2003) 수평 절리암반 터널에서 록볼트의 지보 거동, 아주대학교 대학원, pp. 8.
- 임종철, 박이근, 고희성(1997) 모래지반 내의 터널 굴착시 볼트의 최적 설치위치 및 설치길이에 관한 실험적 연구, 부산대학교 생사기술연구소논문집, 제53집, pp. 1-11.
- 대한터널협회(1999) 터널설계기준, pp. 27-33.
- 황봉갑(2002) 대학과정 재료역학, 일진사, pp. 77-79.
- 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.
- 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.
- 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 rinteraction 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.

감사의 글

먼저 항상 저를 따뜻하게 대해주시고 태어나 가장 저의 능력을 높게 봐주셨으며 2년동안 미흡한 저를 지도해주신 강추원 교수님께 감사드립니다. 교수님 제자라는 사실이 항상 저를 자랑스럽게 합니다.

그리고 저의 논문을 심사해주시고 조언을 아끼지 않으신 박천영 교수님과 고진석 교수님께 감사드립니다. 학부시절부터 대학원을 졸업하는 이 시점까지 좋은 가르침을 주신 박영석 교수님, 한오형 교수님께도 감사드립니다. 이제는 은퇴를 하셔서 많이 그리운 이창신 교수님, 양해승 교수님, 서동우 교수님께도 감사의 말씀 전하고 싶습니다.

또한 부족함이 끝이 없는 저를 위해 논문에 관해 조언을 아끼지 않으셨던 강성승 교수님께도 감사의 말씀 전합니다.

2006, 2007년 두해동안 대학원 생활을 하면서 많은 사람을 만나고 또 많은 일을 겪었습니다. 그 중에서도 저에게 가장 소중했던건 바로 암석역학실험실이라는 테두리에서 만난 선후배님들과 만남과 추억이었습니다. 실험실 생활을 하지 않았더라면 이렇게 좋은 선배님들과 후배님들과의 인연은 없을 뻔 했습니다. 먼저 원우회 선배님이신 원연호 선배님, 김영희 선배님, 추영래 선배님, 한남철 선배님, 조영동 선배님, 노영배 선배님, 이효 선배님, 박정봉 선배님, 문창일 선배님, 최태홍 선배님, 김재웅 선배님, 위장복 선배님, 황남순 선배님, 안기호 선배님, 김연수 선배님, 이창원 선배님, 이창훈 선배님, 저의 몇쟁이 언니들 이수연 선배님, 유기정 선배님과 오현 선배님, 김수로 선배님, 정순오 선배님, 최강일 선배님, 김윤택 선배님께 감사드립니다.

2년동안 가족보다도 더 많은 시간을 보낸 실험실 선후배님들에게도 감사의 말씀 전하고 싶습니다. 먼저 김종인 선배님과 박현식 선배님께 감사드립니다. 그리고 맛있는 간식 잘 사주셨던 영석오빠, 우리 실험실을 잘 이끌어 주시는 호민이 오빠, 복현이 오빠, 내가 좋아하는 선배 광진맨 승현이 오빠, 맨날 청삼이라고 놀리던 규용오빠, 양언니 훈재오빠, 인상 강한 대응오빠, 수다쟁이 동조오빠, 엄청 빠른 태철 오빠 나이 어린 선배 만나서 고생 많았어. 나에게 항상 잔잔한 웃음을 선사해 주는 두성이, 나 논문 쓸때 고생 많이 한 착한 도형이, 아직도 어색한 사이 상곤이 오빠, 인터넷 쇼핑의 절대강자 송하림 군에게도 진심으로 감사의 말을 전합니다. 그리고

대학교 2학년때부터 지금까지 함께한 이제는 친오빠 같은 지우 오빠, 아마 천번은 같이 밥을 먹었을 거란 농담에 소름도 끼치지만 2년이란 대학원 생활 동기인 저를 많이 아껴준 지우오빠에게도 고마움을 전합니다.

같은 실험실은 아니지만 함께 졸업하는 성태오빠, 인희오빠와 대우오빠, 승욱이 오빠, 영인이 오빠에게도 감사의 말을 전합니다.

저에게는 항상 나에게 맞춰주는 소중한 친구들이 있습니다. 나에게 항상 집에서 따뜻한 음식을 만들어다준 아름이 내가 너무 사랑하고 고맙고 보고싶은 내 친구 아름이, 이상하게도 꼭 셔틀버스 안 다닐때만 날 만나러 와서는 힘들다고 투덜 댔지만 그래도 꼭 와주는 내친구 아름이와 나의 대학시절 유일하게 건진 단 하나의 보석 귀진이 나랑 지나긴 시간 기다림을 함께 해준 귀진이 그래도 싫은 내색 한번도 하지 않았던 친구 항상 내 말을 들어주는 정말 너무너무 고마운 엄마 같은 친구 귀진에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 금선이, 하나, 고운이, 미진이, 보미, 우열이, 선우. 선창에게도 감사의 말을 전합니다.

가족이란 이유만으로 아무 조건없이 날 사랑해주시는 아빠와 나이가 많이 든 동생을 아직도 귀여운 막내로 봐주는 우리 오빠에게도 감사의 말을 전합니다. 비록 지금은 내 곁에 안계시지만 항상 날 지켜주시는 우리 엄마께도 감사드립니다. 마지막으로 나를 이렇게 훌륭하게 키워주고 생각만 해도 눈물이 날 것 같은 내생애 최고의 은인, 아마 죽을때까지 갚아도 못갚을 사랑을 주고 항상 나에게 최고라고 말해주는 우리 언니, 13년이란 시간동안 날 지켜줘서 고맙습니다. 영원히 내 곁에서 같이 행복했으면 좋겠다는 말을 전하면서 이 논문을 바칩니다.

이 소중한 분들을 이제는 자주 뵙지 못할 것같아 섭섭한 마음이 앞섭니다. 자주 뵙지 못하더라도 항상 행복한 일만이 가득하길 기도합니다. 감사합니다.

저작물 이용 허용서

학과	자원공학과	학번	20067079	과정	석사
성명	한글 : 이 청 신 한문 : 李 靑 信 영문 : Lee chung shin				
주소	광주광역시 북구 두암1동 318-7				
연락처	E-MAIL : specialcs@naver.com				
논문제목	한글 : 록 볼트와 스파이럴 볼트의 지보특성 연구 영어 : A study on the characteristics of support between Rock and Spiral 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(○) 반대()

2007 년 12 월 일

저작자: 이 청 신 (인)

조선대학교 총장 귀하