

사면보강을 위한 요철형 암반굴착 공법개발

김현기

가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과

Development of Uneven Excavation Method for Reinforcement of Ground Slope

Hyun-Gi Kim

Department of Energy Plant Engineering, Catholic Kwandong University

요약 사면안정공법 중 락볼트 공법은 터널이나 흙막이공법에도 널리 적용되는 공법이나 불안정한 지반을 보강하기 위한 축력이 시간이 경과됨에 따라 감소되고 천공된 원지반과 충전재 사이의 강도가 현저히 줄어들어 내구성이 떨어지거나 설계 성능을 발휘하지 못하는 문제가 발생하고 있다. 본 연구는 성능저하 문제를 해결할 수 있는 요철형 굴착공법 개발을 목표로 드릴링 장비의 개발 및 적용성 평가를 수행하였다. 개발된 드릴비트의 성능평가를 위해 100MPa이상의 암석을 확공굴착 하여 검증하였고, 요철형성 효과에 대한 평가를 위해 요철유무에 따른 실험체를 제작하여 성능실험 및 평가를 수행하였다. 실험결과 요철이 형성된 모델은 요철이 없는 모델의 인발저항 임계하중인 468.7kN의 약 1.7배로 평균값 801.6kN을 나타내어 그 효과를 충분히 확인하였다. 암석과 그라우트 접촉면이 파괴되기 전 암석의 취성으로 인해 실험체가 먼저 파괴되어 요철형성 모델의 임계하중 측정은 불가능 했으나, 암석 파괴하중 도달 전 그라우트 충전부의 슬립이 전혀 발생하지 않았고, 암석파괴시의 하중이 요철이 없는 모델의 임계하중을 충분히 넘어선 점을 감안하면 요철 확공직경이 20mm 증가했음에도 불구하고 저항능력이 획기적으로 늘어날 것으로 기대된다. 향후 최적 요철형성 락볼트 공법개발을 위한 수치해석 모델개발 및 변수연구와 추가 실험에 본 연구의 결과가 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract In this study, required drill bits and excavation methods were developed for an uneven drilling method that can solve the problem of performance degradation of rock bolts. The developed drill bit's excavation performance was verified using rock with a strength of 100 MPa or more. In addition, for the relative evaluation of the uneven excavation method, experimental specimens were prepared for models with and without irregularities, and tests were performed. As a result of the experiment, the model with unevenness exhibited an average critical draw resistance of 801.6 kN, which is about 1.7 times the value of 468.7 kN for the model without unevenness, thus confirming the effect (note: ambiguous) sufficiently. Therefore, it is expected that the resistance performance will significantly increase despite an increase in the uneven hole diameter of 20 mm. In the future, the results of this study could be used as basic data when performing other studies using numerical analysis models and performance verification through experiments to obtain an optimized rock forming method.

Keywords : Rock Bolt, Unevenness, Drilling Bite Tip, Pull-Out Resistance, Drilling Method

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Catholic Kwandong Univ.)

email: khk2696@nate.com

Received June 29, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised August 28, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

사면안정 대책공법은 사면의 종류에 따라 역제공법과 역지공법으로 구분할 수 있으며, 락볼트 공법은 대표적인 역지공법으로 터널시공현장에서 사용되기 시작하여 흙막이 가시설, 사면보강 등 광범위한 지반보강공법으로 적용되고 있다[1,2].

지질상태나 사용목적, 시공방법에 따라 충분한 정착력을 갖도록 이형봉강, 케이블, 강관등의 긴장재를 이용하고 레진 혹은 콘크리트 충전으로 정착강도를 높이는 다양한 공법이 개발되고 있으나, 락볼트는 불안정한 지반보강을 위해 도입된 축력이 시간경과에 따라 암반의 응력이완, 부식, 부착력감소 등으로 정착력은 감소되어 천공된 원지반과 충전재 사이의 강도가 현저히 저하되는 문제가 발생되고 있다[3]. 본 연구에서는 암반에 요철을 형성시켜 시간경과에 따른 락볼트 성능저하 문제를 해결할 수 있는 요철형 암반굴착 공법을 제안하고, 요철 형성을 위한 2차 확공 굴착 단계에 필요한 드릴비트 팁과 드릴링 시스템을 개발하였다.

한편, 하중변화에 따른 락볼트의 힘과 변위추정을 위해 전단응력과 축력변화를 설명한 연구가 최근 수행되었다[4]. 락볼트의 인발저항에 관한 실험은 락볼트 자체의 개선이나 그라우트 종류의 개선 등과 같이 새로운 공법 개발에 따른 변수영향과 전면 및 선단지지 성능평가를 위해 대부분 수행되고 있으나, 대다수 인발실험 방법으로 수행되어 왔다. 압축성 간격재를 설치한 전면접착식 볼트의 인발저항 거동평가를 목적으로 수행된 실내실험에서는 락볼트와 그라우트간 부착강도, 그라우트와 콘크리트간의 부착강도를 평가하기 위해 압축실험을 실시하기도 하였다[5]. 본 연구에서는 암석의 종류와 락볼트의 적용 길이 등을 모두 재현하는 성능평가는 불가능하므로 실내 실험이 가능하도록 암석에 요철을 형성시킨 후 락볼트 삽입과 그라우팅 과정을 거쳐 실험체를 제작하였다. 또한, 요철형성 확공굴착을 위한 파워팩 시스템과 드릴비트의 목표성능을 검증하기 위해 압축강도 100MPa의 경암 굴착을 실험체 제작시 적용하였다. 실험체 제작과정에서 개발된 암반 확공굴착 드릴비트의 성능검증이 수행되었고, 요철이 없는 모델과 요철을 형성시킨 모델에 대해 실험을 수행하여 사면보강을 위한 요철형 암반굴착 공법의 성능을 평가하였다.

2. 요철형 암반 굴착공법

암반 보강을 위한 락볼트의 사용은 1800년 미국 광부에 의해 시작되었고 1900년대 초반 탄광의 지반을 구축하기 위해 락볼트가 도입되었다. 오늘날 지하광산 및 토목분야 터널의 암석지지 시스템에 가장 널리 사용되는 암반지지 시스템이다[6,7]. 락볼트는 이완된 암괴를 원지반에 고정시키는 봉합작용, 절리면의 전단력을 전달하는 보 형성 작용, 직·간접 프리스트레스를 이용해 축응력 상태를 유지시키는 내압작용, 항복이후의 잔류강도를 증가시켜주는 지반보강 작용 등을 한다. 초기에는 경암의 선단정착으로 사용되었지만[8], 이후 전면 접착형 락볼트가 개발되어 경암을 비롯한 연약지반에도 지보효과가 높아 사용범위가 늘어났다[9]. 사면보강공법으로 FRP보강, Soil Nailing, Anchor공법과 락볼트 공법이 있으며, 표토의 심도가 낮은 국내 지반환경 특성상 비탈면이 대형화 될수록 암반비탈면에 대한 보강기술이 요구되기 때문에 현재 국내에는 영구앵커, 락볼트 등 다양한 암반비탈면 보강공법이 적용되고 있다[10].

기존의 락볼트 공법은 ‘천공-락볼트삽입-충진-정착’의 4단계로 이루어져 있다. 락볼트 시공직후 인발시험을 실시하여 시간경과에 따른 락볼트 축력변화 정도를 관리하지만, 시간경과에 따른 원지반과 그라우트간 미세한 간격으로 인해 축력감소 현상이 발생하게 된다. 선단정착공법의 경우 암반의 풍화나 집중호우로 인한 지하수위의 증가로 인해 축력이 감소되어 위험성이 훨씬 커지게 된다. 연암에 주로 사용되는 전면 접착형 방식의 경우에 다양한 공법들이 시도되고 있으나, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 천공단계에서 확공기술을 이용한 요철(凹凸)을 형성시켜 충전재와 원지반 사이의 축력감소를 보완할 수 있는 방안을 제시하였다. Fig. 2는 그라우트에 의해 형성되는 요철의 개념도를 나타낸다. 락볼트 삽입, 충전, 정착 단계를 갖는 기존 공법에도 확공굴착 단계로 추가될 수 있어 활용범위가 넓을 것으로 예상된다. 시공후 시간경과에 따라 원지반과 그라우트 사이 유격이 발생하더라도 요철형성 공법은 충분한 저항력을 유지할 수 있으며, Fig. 3에 예상되는 효과를 나타내었다.

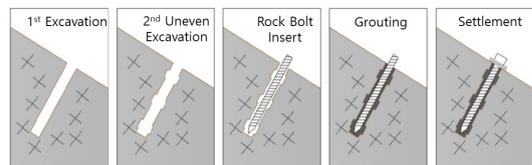


Fig. 1. Construction procedure of uneven excavation method

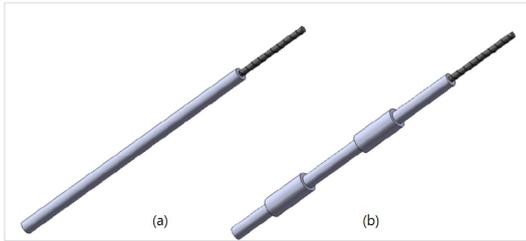


Fig. 2. Concept comparison of uneven formed by grout
(a)Conventional rock bolt (b)Uneven excavation method

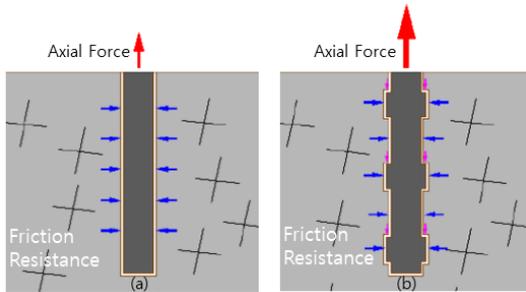


Fig. 3. Effect comparison of uneven excavation
(a)Conventional rock bolt (b)Uneven excavation method

3. 요철형성 확공기술 개발

3.1 드릴링 장비구성

천공기는 토목공사 현장을 비롯하여 자원개발, 암반보강 등 다양한 목적으로 사용된다. 천공방식은 추진력(feed force), 회전력(rotation force), 충격력(percussion force)을 이용하는 Top hammer drilling(THD), Down the hole drilling(DHT) 방식과 추진력과 회전력 2가지 힘만 사용하는 Rotary drilling(RD) 방식과 함께 크게 3가지로 구분된다[11]. 천공기 부품중 암반을 직접 타격하는 용도로 사용되는 드릴비트(drill bit)의 마모를 줄이고 천공효율을 높이기 위해서는 암반의 강도와 굴착, 작업환경에 따른 피드압, 타격압, 타격수, 회전수와 같은 조건들을 적정하게 조절하여 천공작업이 진행되어야 함에도 불구하고 대부분 현장작업자의 경험에 의존하여 작업되고 있다[12,13]. 따라서 요철형 암반굴착 공법에서는 1차 천공은 종래의 규격과 기준에 따르지만 2차로 실시하는 확공굴착 드릴비트는 일정한 간격과 길이로 요철을 형성시키기 위해 용도와 조건에 맞는 개발이 필요하다. 따라서, 암반굴착 드릴링 장비 개발의 목표를 Table 1과 같이 기본굴착 직경 110mm, 요철확공 직경 130mm 이상, 요철부 굴착길이 150mm 이상으로 설

정하고, 추가적으로 133HP 이상의 유압 파워유닛, 구동 모터 등의 시스템을 개발하였다.

요철형 확공굴착을 위한 드릴구동 시스템은 시공현장의 전력수급 문제로 자체동력원을 갖추어야 하므로 드릴구동용 유압모터 63cc, 보조모터 25cc로 계획하여 안정적인 운용을 위한 엔진 소요동력은 Eq. (1)에 따라 150HP로 산정하였다. 유압펌프의 축 토크는 Eq. (2)에 따라 약 40kgf·m로 산정되었다. 유압모터와 엔진을 기본으로 연료 및 작동유 탱크, Radiator, Battery, Valve Block, Control Box & Switch, Air Filter 등을 포함하는 Power pack을 Fig. 4와 같이 제작하였다.

$$L_P = \frac{P \cdot Q}{450} PS \tag{1}$$

Where, P denotes pressure, Q denotes flow rate

$$T_S = 716 \frac{L_S}{N} \tag{2}$$

Where, L_S denotes shaft power, N denotes rpm

Table 1. Development scope of equipment

Expansion Drilling Dimension	Target Level	Remark
Basic Diameter	110mm	Core
Expansion Diameter	Over 130mm	+20mm
Expansion Length	Over 150mm	



Fig. 4. Engine and power pack system

3.2 드릴비트 및 팁

확공 드릴링 장비는 Fig. 5와 같이 Shaft에 연결된 Rod에 Bite가 연결되어 구성되고 Fig. 6의 과정을 통해 개발되었다. 1차 굴착된 상태에서 확공을 위해 접혀진 드릴비트가 외부로 펼치면서 전면부가 굴착되도록 하는 것이 핵심기술이다. 2차원 도면작업을 기초로 3차원 모델링과 프린팅 Mock-up을 제작하여 검토와 수정과정을 3차례 반복하여 최적화 하였다. 확공굴착 드릴은 1차 천공된 홀 내부에서 회전하므로 원심력과 마찰력에 의해 굴

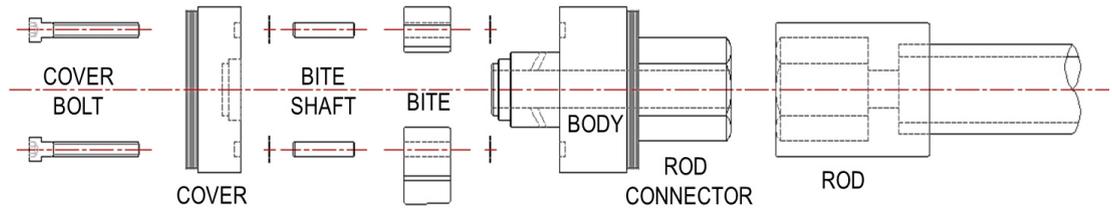


Fig. 5. Composition of expansion drilling equipment

착 Bite가 펼쳐지면서 요철을 형성하게 된다. 그러나, 1차 모델의 경우 Fig. 7과 같이 완전히 펼쳐졌을 때 틱이 생겨 연속 작업이 불가능하므로 2차례의 도면수정과 Fig. 8과 같이 3차원 모델링을 수행하여 적정성을 재확인 하였다. 재질은 기계소재 중에서 기어 가공용으로 이용되는 크롬몰리브덴 강재 SCM21종으로 선정하고, 내마모성을 강화하기 위한 침탄열처리(carburization)를 적용하였다.

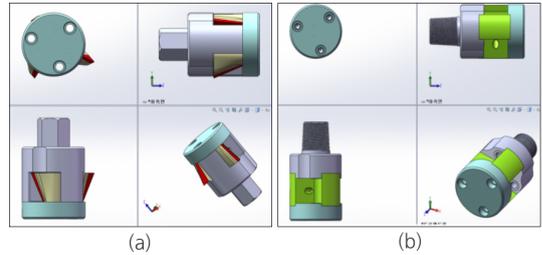


Fig. 8. Drilling bite design modification
(a)2nd Model (b)3rd Model

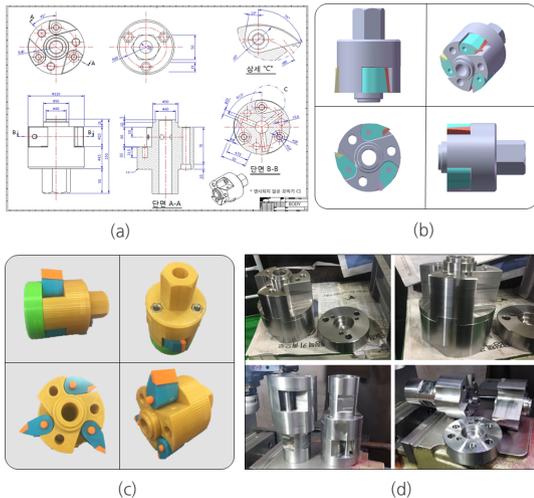


Fig. 6. Development process for expansion drilling equipment
(a)Drawing (b)3D-Modeling (c)3D-Printing (d)Prototype

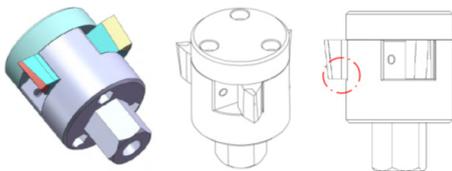


Fig. 7. Identifying problems with extension tips



Fig. 9. Prototype for drilling bite tips

Table 2. Grade and composition of hardmetal

Grade	WC(%)	Co(%)	Kennametal
E1	94	6	RTW-379
E2	93	7	-
E3	92	8	RTW-381
E4	91	9	RTW-376
E5	90	10	RTW-361

드릴비트 Tip의 굴착 성능을 높이기 위해서는 강도와 내구성을 갖춘 재료선정이 중요하므로 중석과 코발트 합금강을 선정하였다. 일반적으로 중석(Tungsten)은 드롭해머의 강도확보를 위해 사용되고 있다. 절삭공구, 내마모 공구로 널리 이용되는 초경합금[14]은 텅스텐카바이드(Tungsten Carbide, WC)와 코발트(Cobalt, Co)의 함량에 따라 American National Carbide, Kennametal 등 제조사별로 등급을 정하여 생산하고 있으며, WC대비 Co의 함량이 낮을수록 경도와 밀도가 높아지고 인성이

낮아져 취성이 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 국내업체인 (주)아시아금에서 생산하는 E1~E5등급 중 E1, E3 두 모델의 시작품을 Fig. 9와 같이 제작하였다[15].

4. 성능시험 및 결과

4.1 실험개요

인발시험의 경우 굴착직경, 그라우트강도, 락볼트길이 등에 따라 허용되는 강도의 변화가 크기 때문에 항복하중을 한정하기 어렵다. 따라서 실험체를 뒤집어 인발시 락볼트를 통해 전달되는 힘을 재현 할 수 있도록 압축시험을 실시하되 그라우트 전면에 압축력이 가해지고 요철형성 효과의 상대비교가 가능하도록 계획하였다.

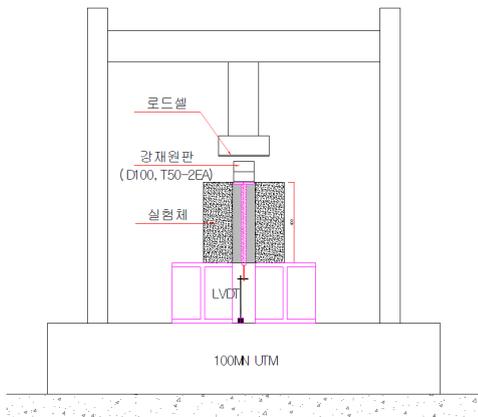


Fig. 10. Experimental execution plan

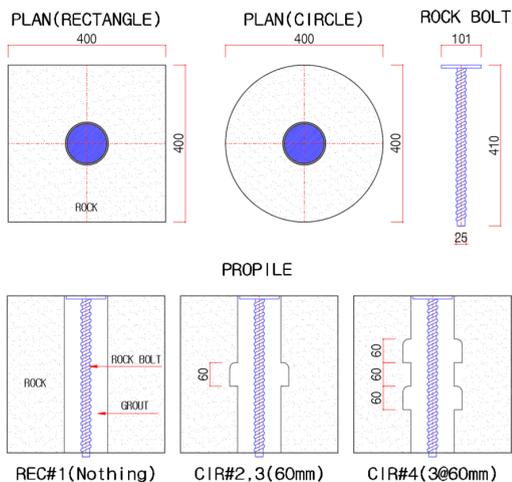


Fig. 11. Specimen production drawing

암석 내부 그라우팅표면의 거칠기는 모두 동일한 것으로 가정하였고, 암석의 경우 생성환경에 따라 결이 다를 수 있어 동일원석을 절단 및 가공하여 제작하였다. Fig. 10은 압축시험 계획도를 나타내고 Fig. 11은 실험체 제작도를 나타낸다.

성능시험은 요철이 없는 모델(REC#1)과 요철의 깊이, 요철의 갯수가 다른 CIR 모델간의 비교를 목표로 수행되었다. 요철 무형성 실험체명은 사각형으로 가공되어 REC로 표현하였으며, 요철형성 실험체는 코어링 장비를 이용한 원형으로 제작하고 CIR로 표기하였다. 요철깊이 60mm의 실험체(CIR#2, CIR#3)는 동일 조건의 반복시험이며, 60mm 요철 2개 형성(CIR#4) 실험체와 비교하여 효과를 분석할 수 있도록 계획하였다. 실험 방법은 하단 가운데 부분이 비도록 지그를 배치하고 상부에서 하중을 가하는 방식으로 그라우트 분리가 발생할 때까지 가력 하였다. 100MN의 만능시험기를 사용하여 변위제어 모드(2.0mm/min)로 하중재하 하고, 하중증가에 따른 변형정도를 분석하고 최대 하중을 확인한 후 파괴시 까지 가력 하여 요철형성 효과에 대한 성능평가를 수행하였다.

4.2 실험체 제작

일축압축강도 100MPa 이상이 암석분류에서 경암으로 분류된다[16]. 경암 이상의 굴착성능 확보를 위한 개발 장비의 검증에 위해 석재는 충남 서산지역에서 생산되는 119~132MPa 조경용 석재를 이용하였다.

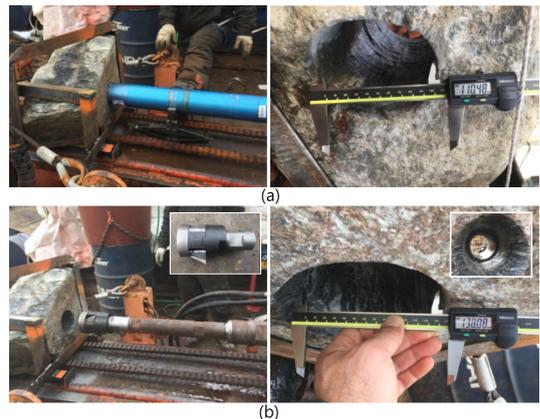


Fig. 12. Pre-testing of excavation equipment (a)1st excavation (b)2nd uneven excavation



Fig. 13. Uneven excavation for production of specimens



Fig. 14. Rock bolt and grouting of specimens

실험체 제작 전 확공굴착 장비의 시운전을 Fig. 12와 같이 수행하였으며, 기본천공 $\phi 110\text{mm}$ 와 확공굴착 $\phi 130\text{mm}$ 를 충분히 확보하여 개발목표에 부합하는 성능을 확인하였다.

실험수행 전 사전발생 응력을 최소화 하기 위해 Fig. 13과 같이 원석을 Core Drilling 방식으로 실험체를 제작하고 표면을 연마하여 편평도를 유지하도록 하였다. 또한, 가려지는 하중을 그라우팅 상단면 전체에 고르게 작용하도록 실험시 원형철판 두겹을 추가 배치하도록 계획하였을 뿐만 아니라, Fig. 14와 같이 실험체 제작시에도 그라우팅 상단면에 작용하는 하중이 하부단면까지 전달 되도록 끝부분이 원형철판으로 용접된 이형봉강 25mm를 중앙부에 매입하고 그라우트를 주입하였다. 그라우트의 강도는 KS F 2405에 규정된 28일 압축강도 18MPa 이상 되도록 W/C 45%에 1.7%의 혼화재를 추가한 배합비를 적용하였다[17].

4.3 실험결과

실험에 사용된 암석은 KS F 2519, 석재의 압축강도 시험방법에 따라 10개의 시편으로 실험한 결과 Table 3과 같이 가로 및 세로방향의 결을 고려하더라도 최소 100MPa, 최대 148MPa의 압축강도를 보였다.

Table 3. Results of compressive strength test of stone

Horizontal Texture Specimen No.	Compressive Strength(MPa)	Vertical Texture Specimen No.	Compressive Strength(MPa)
H1	219	V1	135
H2	153	V2	146
H3	100	V3	106
H4	126	V4	251
H5	140	V5	160
Average	147.60	Average	159.60

Table 4. Results of compressive strength test of grout

Specimen No.	Compressive Strength(MPa)	Remark
1	19.9	KS F 2426 KS F 2403
2	21.3	
3	21.2	

Table 4는 KS F 2426, 주입 모르타르의 압축강도 시험방법에 따른 실험결과를 나타내며 공시체로 3회 반복 실험 수행결과 평균 20MPa을 나타내었다.

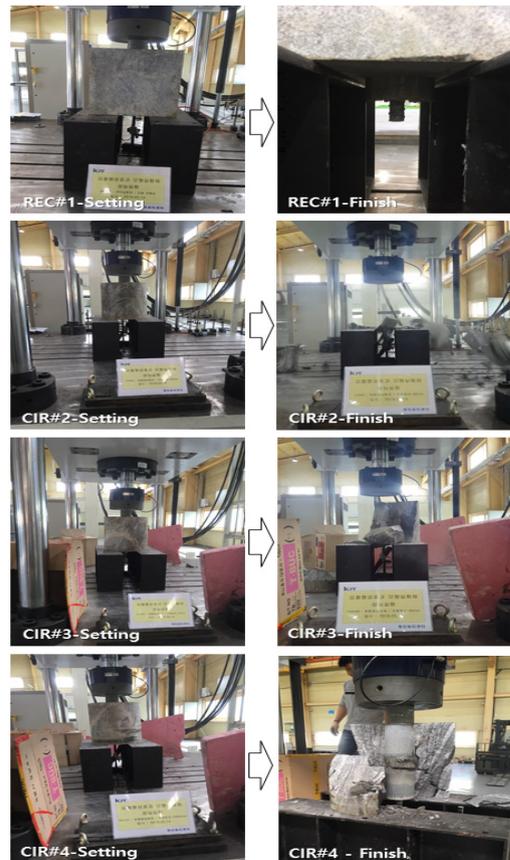


Fig. 15. Scenes of experiment before and after

원형실험체의 경우 사각실험체와 달리 파괴시 실험체의 취성파괴로 인해 암석조각의 비산정도가 심해 가립판을 이용하여 실험장비가 손상되지 않도록 보호하였다. Fig. 15는 각 실험체의 실험수행과 실험완료 직후 장면을 나타내며, 하중은 2개의 강재원판 상단에 작용시켰다. 요철을 형성시키지 않은 REC#1 실험체는 분리된 그라우트와 락볼트가 실험시그 하단으로 돌출되었다. 암석을 실험체로 사용하였으므로 압축강도 100MPa 이상의 하중이 작용할 때 그라우트 분리 발생전에 암석이 먼저 파괴되는 결과를 보였다. 실험체에 작용한 최대하중은 Table 5에 정리하였다.

Fig. 16의 시간증가에 따른 하중관계 그래프에서 REC#1 실험체는 최대하중 468.77kN에서 슬립이 발생하기 시작하였고 초기의 처짐은 실험체 세팅과 재료에서 기인했지만 점차 안정화 양상을 보이며 완만히 증가하다가 최대하중 작용이후 일정한 경사를 유지하면서 증가하였다.

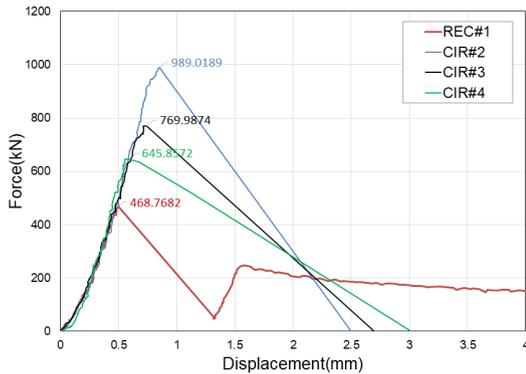


Fig. 16. Load-displacement relation of test results

Table 5. Results of Maximum loading test for performance of uneven excavation model

Specimen No.	Max. Load(kN)
REC #1	468.77
CIR #2	989.02
CIR #3	769.99
CIR #4	645.86

모든 실험체는 선형적인 강도증가를 보이다가 압축강도 임계점에 도달하여 실험체가 파괴되는 시점에서 실험을 중단하였다. 암석의 취성파괴로 인해 정확한 요철형성 효과를 실험체별로 계속하기는 어려웠으나, 요철이 없는 모델이 약 469kN에서 슬립과 처짐이 발생한 것에 비해,

요철이 형성된 모든 실험체가 슬립발생이 없는 상태로 실험체가 먼저 최대 하중점에서 파괴되어 요철형성의 효과를 증명하였다. 실험체 CIR#2와 CIR#3은 동일한 형태의 요철형성 실험체 임에도 불구하고 다른 결과를 나타낸 것은 암석의 불균일성 또는 사전응력발생이 원인일 것으로 추정된다. 그러나 평균 880kN의 결과를 보여 요철이 없는 모델과 비교하여 약 2배의 인발저항력을 나타내었다. 요철 2개를 형성시킨 CIR#4의 경우는 한 개의 요철만 형성시킨 모델보다 더 낮은 하중에서 파괴가 일어났지만, 실험체 크기의 제한과 요철로 인한 단면축소가 원인으로 나타난 결과이며, 자연상태의 암석은 연속체로 구속된 조건으로 볼 수 있으므로 요철로 인한 인발저항 능력은 더 클 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 사면에 적용되는 락볼트의 성능저하 문제를 해결할 수 있는 요철형 암반굴착 락볼트 공법에 관한 것으로, 직경 130mm 및 단차 20mm이상의 연구목표 수준에 따라 개발된 확공 드릴비트와 드릴링 시스템에 대해 검증하였고, 요철형성 효과에 대한 성능실험을 수행하였다.

압축강도 100MPa의 석재 실험체 제작 과정에서 개발된 드릴비트를 이용한 확공굴착을 통해 간접적인 방식으로 성능을 확인하였으며, 실험체 제작 전 사전 테스트를 포함하여 2회에 걸쳐 확공굴착 장비 및 운용시스템의 적용성과 적정성을 충분히 검증하였다.

요철형성 효과에 대한 성능실험 수행결과 요철이 형성된 실험체는 슬립 발생 전 암석의 취성파괴가 발생하였으며, 요철 무형성 모델에 비해 약 2배의 인발 저항효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 60mm 길이의 요철 2개를 내부에 형성시킨 모델의 경우 인발저항력이 더 클 것으로 예상되었으나, 상대적으로 낮은 하중에서 암석파괴가 발생하였다. 코어링으로 제작된 원형실험체로 연속체와 같은 충분한 구속조건을 재현하지 못한 원인으로 파악되었다. 그라우트로 충전된 요철은 압축력에 의해 그라우트가 파괴되더라도 암석 내에서의 2차적인 저항효과를 보였으며, 암석의 취성파괴로 성능실험에서 임계하중 도출은 어려웠으나, 결과적으로 요철형성 효과에 대한 검증은 충분한 것으로 판단된다.

향후 요철의 길이나 개수, 형상 등의 변수에 따른 해석적 연구와 장기적인 성능평가가 요구되며, 본 연구의 결

과는 추가연구의 기초자료나 요철형 암반굴착 공법의 최적설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. G. Han, K. K. Hong, J. Y. Lee, S. K. Jung, "Application Evaluation of Countermeasure Method using Analysis of Failure Causes for Reinforced Slope," *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.1, pp.9-18, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2011.10.1.009>
- [2] D. S. Kim, J. Y. KIM, S. M. Lee, G. N. Kim, J. Y. Jeong, Y. G. Gang, "A Study on the Construction of Major Bolt (Lock Bolts) in Consideration of Safety and Environment," *Construction Engineering and Management*, Vol.15, No.5, pp.36-40, 2014.
- [3] D. Y. Jeong, *A Study on Safety Management of Earth Retaining Structure in the Downtown*, Master's thesis, Department of Civil Engineering, Pusan National University, 2017.
- [4] W. Zhang, L. Huang, C. H. Juang, "An analytical model for estimating the force and displacement of fully grouted rock bolts," *Computers and Geotechnics*, Vol.117, 103222, 2020.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103222>
- [5] Y. S. Hwang, S. D. Lee, "Resisting Behavior of Fully-Grouted Rock Bolts with Compressible Spacers", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol.21, No.5, pp.377-385, 2011.
DOI: <http://doi.org/10.7474/TUS.2011.21.5.377>
- [6] C. C. Li, "Principles of rockbolting design", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.9, No.3, pp.396-414, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.irmge.2017.04.002>
- [7] C. C. Li, *Rockbolting: principles and applications*, p.284, Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 2017.
- [8] Z. Tao, J. X. Chen, "Behaviour of rock bolting as tunneling support", *Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting*, Rotterdam, Balkema, pp.87-92, 1984.
- [9] R. D. Reichert, W. F. Bawden, A. J. Hyett Z. Tao, J. X. Chen, "Evaluation of Design bolt bond strength for fully grouted bolt", 93rd Annual Meeting of Vancouver, pp.1024-1032, 1991.
- [10] M. Choi, S. Seo, "Study on the Anchor Bearing Plate of a Composite Material (SMC+ FRP) Sandwich Panel Structure," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.19, No.7, pp.359-366, 2019.
DOI: <http://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.7.359>
- [11] C. H. Song, K. B. Kwon, D. Y. Shin, W. K. Hwang, J. H. Lim, J. W. Cho, "Trend analysis of drilling technology for top-hammer drilling machine", *Tunnel and Underground Space*, Vol.23, No.4, pp.271-279, 2013.
DOI: <http://doi.org/10.7474/TUS.2013.23.4.271>
- [12] A. Copco, *surface Drilling in Quarry and Construction*, 2006.
- [13] K. B. Kwon, C. H. Song, J. Y. Park, D. Y. Shin, J. W. Cho, S. H. Cho K. B. Kwon, D. Y. Shin, W. K. Hwang, J. H. Lim, J. W. Cho, "Rock fragmentation assessment of a drill bit by Hopkinson bar percussion test", *Tunnel and Underground Space*, Vol.23, No1, pp.42-53, 2013.
DOI: <http://doi.org/10.7474/TUS.2013.23.1.042>
- [14] C. M. Kwon, G. G. Lee, G. H. Ha, "Carbothermal Reduction of Oxide of WC/Co Hardmetal Scrap", *Korean Journal of Metals and Meterials*, Vol.54, No10, pp.743-751, 2016.
DOI: <http://doi.org/10.3365/KJMM.2016.54.10.743>
- [15] Asia Carbide Co., *Special Hardmetals, Asialloy*, c2015, Available From: <http://www.asiacarbide.co.kr> (accessed Aug. 27, 2020)
- [16] ISRM, "Basic geotechnical description of rock masses," *International Journal of Rock Mechanic and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.18, pp.85-110, 1981.
- [17] KS F 2405, "Standard test method for compressive strength concrete", Korean Agency for Technology and Standards (KS), Seoul, Korea, 2017.

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 : 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2005년 10월 ~ 2012년 11월 : (주)동호 기술연구소/구조부 부장
- 2016년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 해상풍력발전, 교량공학