

콘형 케이블볼트의 인발강도 평가 연구

최정인¹, 김원근¹, 이동석¹, 이석원^{2*}

Study on evaluation of bond strength of cone-shaped button cablebolt

Jung-In Choi, Won-Keun Kim, Dong-Seok Lee, Seok-Won Lee

Abstract The cablebolt which secures a workability and stability has been used in foreign countries as one of supporting materials with rebar rockbolt especially in construction of large underground structures. However, only the rebar rockbolt has been applied up to now to all the constructions of underground structures in Korea due to an absence of recognition of cablebolt and large underground structure projects. Consequently, the research for a performance evaluation and verification of cablebolt is very limited and only the proto-type field tests have been conducted. In this study, the cone-shaped button cablebolt is developed by modifying an existing button cablebolt. To evaluate a performance and applicability of cone-shaped button cablebolt, the laboratory pull tests are conducted and bond capacity is analyzed under a various conditions. The rebar rockbolt, plane cablebolt, and bulb cablebolt which has a similar mechanical behavior with cone-shaped button cablebolt, are also tested and their bond capacities are evaluated and compared with cone-shaped button cablebolt under the same condition. The results show that the bond capacity is in the order of (cone-shaped button cablebolt \approx bulb cablebolt) > rockbolt > plane cablebolt. It is found that the bond capacity of cone-shaped button cablebolt developed in this study is at least equivalent with an existing high performance cablebolt developed in foreign countries, therefore the cone-shaped button cablebolt could be used as one of supporting materials for underground structures in construction field.

Keywords: Cone-shaped button cablebolt, bulb cablebolt, rockbolt, pull test, performance evaluation

요 지 국외에서는 대형·대단면 지하공간을 건설할 경우 기존의 이형철근 록볼트와 병행하여 시공이 간편하고 안정성을 확보할 수 있는 케이블볼트를 적용하고 있다. 그러나 국내의 경우 케이블볼트에 대한 인식 부족 및 대형 지하공간의 부재로 인하여 기존에 사용하고 있는 이형철근 록볼트를 계속 사용하고 있으며, 또한 케이블볼트의 성능 평가 및 검증에 대한 연구도 매우 적어 현재 현장 시험시공 수준에서 머무르고 있다. 따라서 본 연구에서는 외국에서 개발된 버튼형 케이블볼트를 수정·보완하여 콘형 케이블볼트를 개발하였다. 개발된 콘형 케이블볼트의 적용성 및 성능 평가를 수행하기 위하여 이형철근 록볼트, 일반(plane) 케이블볼트 그리고 외국에서 다양하게 개선된 케이블볼트 중에서 콘형 케이블볼트와 작용 매커니즘이 비슷한 벌브형 케이블볼트를 함께 사용하여 인발성능을 평가하였다. 실험 결과, 강도 관점에서 (콘형 케이블볼트 \approx 벌브형 케이블볼트) > 록볼트 > 일반 케이블볼트 순으로 인발강도 값이 크게 산정되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트는 기존에 외국에서 개발된 고성능 케이블볼트와 동등 이상의 성능을 보였으며, 결국 실제 현장에서 지보재로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 콘형 케이블볼트, 벌브형 케이블볼트, 록볼트, 인발실험, 성능평가

1. 서 론

터널 및 지하공간을 건설할 때에는 일반적으로 안정성 확보를 위하여 주지보재인 강지보재, 슛크리트 및 록볼트(유광호 등, 2007; 송기일 등, 2008; 유충식 등 2009)를 병행하여 사용하고 있다. 이러한 주지보재 중에서 록볼트 관점에서 보면, 국외에서는 특히 대형·대단면 지하공간을 건설할 경우 기존의 이형철근 록볼트와 병행하

여 시공이 간편하고 안정성을 확보할 수 있는 케이블볼트를 적용하고 있다. 또한 지반이 연약하거나 지중응력이 과다한 경우에도 지하공간의 안정성을 확보를 위하여 일반(plane) 스트랜드(케이블볼트)에서 개선된 고성능 케이블볼트를 사용하기도 한다. 이러한 케이블볼트는 이형철근의 록볼트에 비해 시공성이 우수하며 가격이 저렴하여 경제성이 높다고 알려져 있다. 국외의 경우 케이블볼트 개발이 매우 활발히 진행되어 벌브형 케이블볼트 등 다양한 종류의 개선된 케이블볼트가 개발되고 있으며 현장 적용사례도 계속 증가하고 있는 실정이

¹비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

²정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

*교신저자: 이석원 (E-mail: swlee@konkuk.ac.kr)

다(Hutchinson and Diederichs, 1996). 그러나 국내의 경우, 케이블볼트에 대한 인식 부족 및 대형 지하공간의 부재로 인하여 기존에 사용하고 있는 이형철근 록볼트를 계속 사용하고 있으며, 따라서 케이블볼트의 성능 평가 및 검증에 대한 연구도 매우 적어 현재 현장 시험시공 수준에서 머무르고 있다.

본 연구에서는 기존에 외국에서 개발된 버튼형(button) 케이블볼트를 수정·보완하여 콘형(cone-shaped button) 케이블볼트를 개발하였다. 본 연구에서 수정 개발한 콘형 케이블볼트는 기존에 외국에서 개발한 원통형의 버튼형 케이블볼트보다 충전재의 충전효과 증진과 버튼 체결의 간편성을 확보하고 또한 로얄티를 지불하지 않기 위하여 버튼 모양을 콘형으로 수정하였으며 또한 체결방식을 보다 단순화하여 현장에서 쉽게 스트랜드에 체결할 수 있도록 하였다.

이렇게 개발된 콘형 케이블볼트를 보다 객관적으로 적용성 및 성능 평가를 수행하기 위하여 이형철근 록볼트, 일반(plane) 케이블볼트, 그리고 외국에서 다양하게 개선된 고성능 케이블볼트 중에서 콘형 케이블볼트와 작용 메커니즘이 비슷한 벌브형(bulb) 케이블볼트를 함께 사용하여 인발(결합)성능을 평가하였다. 결국 본 연구에서는 일반 케이블볼트, 콘형 케이블볼트, 벌브형 케이블볼트 그리고 이형철근 록볼트를 다양한 조건에서 인발강도(인발력) 실험을 수행하여 강도 관점에서 상호 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트의 국내 현장 적용성을 검토하고자 한다.

그러나 본 연구에서 수행한 모든 성능평가는 그라우트(충전재)와 볼트 사이에서 발생하는 파괴 조건만을 모

사하고, 시편의 길이 역시 실제 현장에서 적용되는 길이 보다 짧은 한계를 가지고 있다. 실제 케이블볼트/록볼트의 파괴는 지반과 그라우트 접촉면 등 다양한 위치에서 발생 할 수 있으므로, 실제 설계 시에는 볼트와 그라우트 사이에서의 파괴 강도 이외에는 기존의 연구 결과를 참조하여 실제 현장에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

2. 실내 인발 실험

2.1 실험 조건

본 연구에서는 다음과 같이 크게 3가지 조건으로 대별하여 인발실험을 수행하고 결과를 비교·분석하였다. 첫 번째로 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 벌브의 위치(l_f)가 인발(결합)강도의 변화에 미치는 영향을 검토하기 위해서, 콘형 케이블볼트에서는 굴착면으로부터 첫 번째 콘과의 간격(l_f)을 150 mm 그리고 벌브형 케이블볼트에서는 굴착면으로부터 첫 번째 벌브와의 간격(l_f)을 각각 50 mm, 150 mm, 300 mm, 450 mm로 변화시키면서 실험을 총 5회 수행하였다. 이때 콘과 벌브는 1개만 설치하고, 케이블볼트의 근입(매설)길이, l_e 는 1 m로 고정하였다. 두 번째로 콘형 케이블볼트, 벌브형 케이블볼트, 일반 케이블볼트 그리고 기존의 록볼트(D25 이형철근)를 각각 사용하여 표 1과 같이 케이블볼트/록볼트의 근입(매설)길이(l_e), 콘 또는 벌브 설치간격(l_b), 그리고 구속조건의 변화에 따른 인발실험을 총 28회 수행하였다. 본 논문에서 서술한 구속조건의 차이는 외국의 연구와 동일하게(Hyett et al., 1992b; Hyett et al., 1995)

표 1. 실험 조건

l_b (mm) \ l_e (mm)		1,000		2,000	
		낮은 구속압	높은 구속압	낮은 구속압	높은 구속압
콘형 케이블볼트	300	○	○	○	○
	200	○	○	○	○
벌브형 케이블볼트	300	○	○	○	○
	500	○	○	○	○
	900	○	○	○	○
일반 케이블볼트	0	○	○	○	○
록볼트	0	○	○	○	○

여기에서, l_e : 케이블볼트/록볼트 근입(매설)길이, l_b : 콘 또는 벌브 설치간격

인발 실험 시 그라우트(충전재)의 팽창 유무의 조건으로 정의될 수 있다. 즉 PVC관을 사용한 낮은 구속압 조건은 케이블볼트 및 록볼트의 인발에 따라 충전재가 팽창할 수 있는 경우를 의미하고, 강관을 사용한 높은 구속압 조건은 케이블볼트 및 록볼트 인발 시 구속조건에 의하여 충전재가 팽창되지 않는 경우를 의미한다. 마지막으로 위의 두 가지 결과를 종합하고 고성능 케이블볼트가 실제 국내 현장에 적용될 경우를 가정하여, 가상현장을 $l_f=300$ mm, $l_b=1,000$ mm, 나머지 길이는 700 mm, 즉 $l_e=2,000$ mm로 설정하여 콘형 케이블볼트와 별브형 케이블볼트에 대하여 인발실험을 총 2회 수행하였다. 여기에서 선정된 가상현장은 본 연구에서 사용한 장비의 제원을 고려하고 외국에서 시공되고 있는 l_f 및 l_b 를 참조하여 연구목적으로 가정한 것으로 추후 실제

현장에서의 적용사례와 다를 수 있음을 밝혀두고자 한다. 본 연구에서 정의한 l_f , l_b , 그리고 l_e 는 그림 1에 도시되어 있다.

2.2 재료 특성

본 연구에서 사용한 콘형 케이블볼트는 그림 2와 같이 본 연구에서 시작품으로 개발 제작한 콘을 공칭경 15.2 mm의 스트랜드에 설치하여 사용하였다. 별브형 케이블볼트는 공칭경 15.2 mm의 스트랜드에 외경 25 mm의 별브가 설치된 것을 사용하였다. 사용한 별브형 케이블볼트의 제원은 표 2에 제시되어 있다. 일반 케이블볼트는 일반적으로 사용되고 있는 공칭경 15.2 mm의 일반 단일 스트랜드를 사용하였다. 록볼트는 국내 현장에서 많이 사용되고 있는 직경 25 mm에 SD 35인 이형철근을 사용하였고 그 제원은 표 3과 같다.

그라우트(충전재)에 사용한 재료는 외국문헌을 참조하여(Hyett et al., 1992a) 국내 기존 회사에서 제조한 시멘트 모르타르를 물:시멘트비(w:c) 0.4로 하였다. 본 연구에 사용한 그라우트의 품질을 측정하기 위하여 $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 공시체를 제작하여 28일 동안 양생 후 일축 압축강도 실험을 실시하여 측정하였다. 실험 결과, 시편의 일축압축강도(UCS)는 40~50 MPa의 범위에서 측정되었다.

2.3 시편 제작

시편 제작은 그림 3과 같이 철제 틀에 PVC관을 고정 시킨 후 케이블볼트를 삽입한다. 삽입된 PVC관에 그라우트를 부은 후 시편 안에 공기를 제거하기 위해 일정시간동안 진동을 준다. 이때 케이블볼트가 PVC관의 중앙에 올 수 있도록 wedge와 barrel을 사용하여 약간의 인장을 주면서 잡아주었다. 완료된 시편은 28일 동안 양생

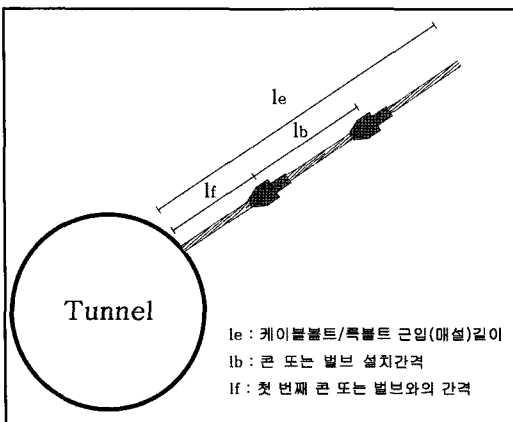


그림 1. l_e , l_b , l_f 개념도

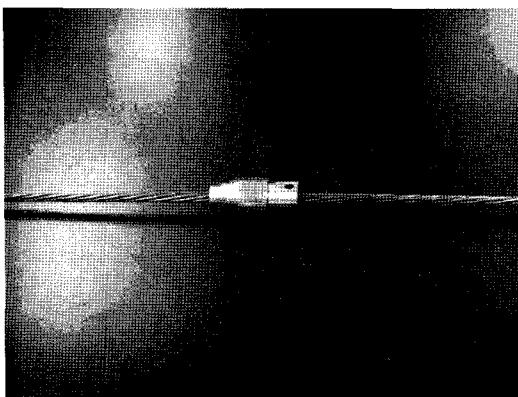


그림 2. 콘형 케이블볼트

표 2. 별브형 케이블볼트 제원(Garford사 제품)

구 분	항복 강도 (kN)	인장 강도 (kN)
15.2 mm 스트랜드	최소: 211.2	최소: 249.1
	최대: 234.1	최대: 269.0

표 3. 록볼트 제원(KS D 3504)

구 분	항복점(MPa)	인장강도(MPa)
SD 35	343~441	490

을 실시한 후 인발실험을 수행하였다.

굴착면으로부터 첫 번째 콘과의 간격(l_f)을 150 mm로 하여 실험을 수행하기 위하여 그림 4(a)와 같이 콘형 케이블볼트를 준비하였다. 또한 굴착면으로부터 첫 번째 벌브와의 간격(l_f)을 각각 50 mm, 150 mm, 300 mm, 450 mm로 변화시키면서 실험을 수행하기 위하여 그림 4(b)와 같이 벌브형 케이블볼트를 준비하였다. 이때 콘과 벌브는 1개만 설치하고, 케이블볼트의 근입길이(l_e)는 1 m로 고정하였다.

콘형 케이블볼트를 사용하여 근입길이(l_e) 1,000 mm와 2,000 mm 각각에 대하여 콘 설치간격(l_b)을 300 mm로 실험을 수행하기 위하여 그림 5와 같이 콘형 케이블볼트를 준비하였다. 또한 벌브형 케이블볼트를 사용하

여 근입길이(l_e) 1,000 mm와 2,000 mm 각각에 대하여 벌브 설치간격(l_b)을 각각 200 mm, 300 mm, 500 mm, 900 mm로 변화시키면서 실험을 수행하기 위하여 그림 6과 같이 벌브형 케이블볼트를 준비하였다. 이때 굴착면을 모사하는 PVC관의 입구와 첫 콘 또는 벌브와의 간격(l_f)은 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)의 1/2을 확보하도록 하였다.

또한 가상 현장을 모사하기 위하여, 그림 7과 같이 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 벌브와의 간격(l_f)은 300 mm, 설치간격(l_b)은 1,000 mm, 나머지 길이는 700 mm, 즉 근입길이(l_e)는 2,000 mm로 하여 콘형 및 벌브형 케이블볼트를 각각 준비하였다.

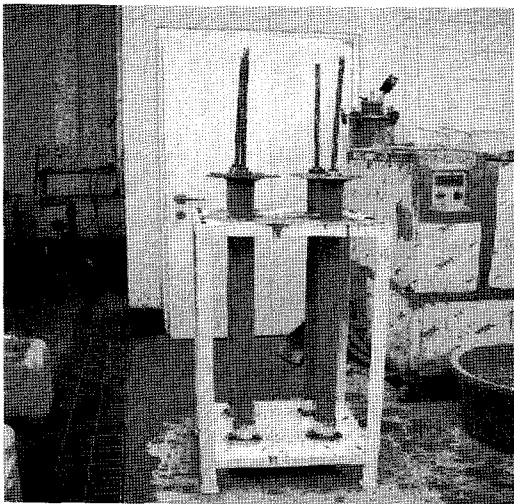


그림 3. 시편 제작

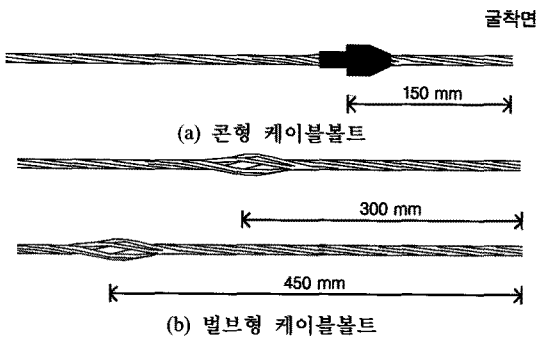


그림 4. 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 벌브와의 간격(l_f)

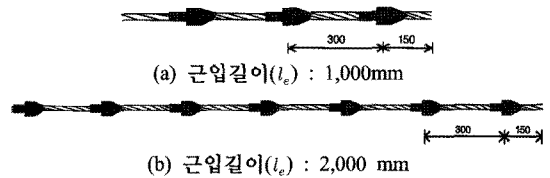


그림 5. 콘 설치간격(l_b)별 케이블볼트

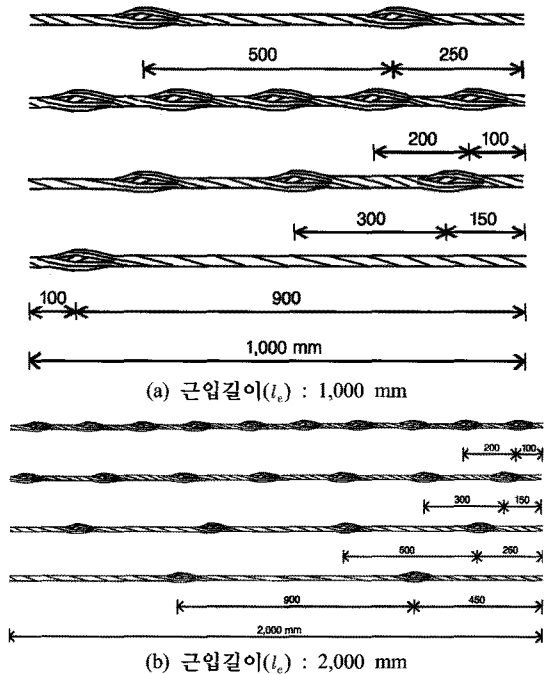
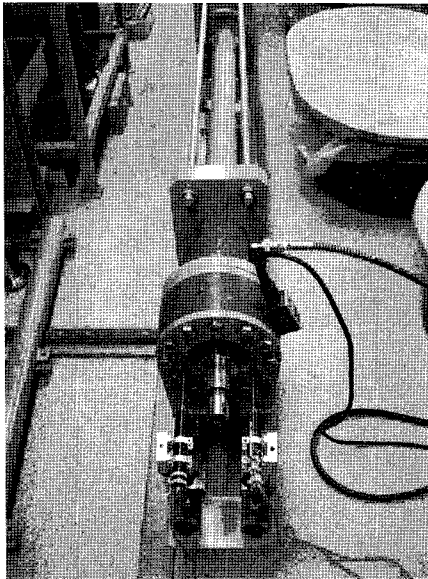
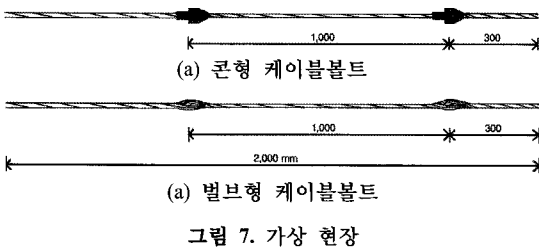


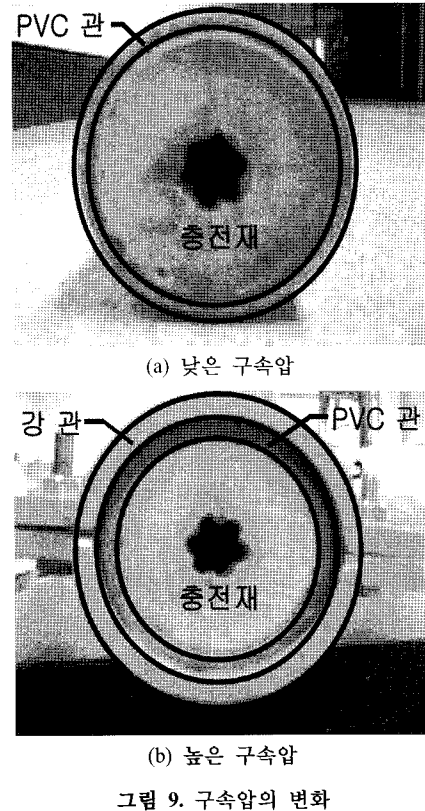
그림 6. 벌브 설치간격(l_b)별 케이블볼트



2.4 실험 방법

본 연구에 사용된 인발실험 장치는 그림 8과 같이 견고한 원형 관(pipe)안에 한쪽은 인발하중을 가할 수 있도록 길게 여유를 두고 다른 한쪽은 인발 실험 중 변위에 따른 일정 근입길이가 유도될 수 있을 정도의 여유폭을 두었다. 케이블볼트/록볼트는 그라우트를 사용하여 굳히고 한쪽에서 인발하중을 가한다. 본 연구에서 사용한 방법은 ASTM D 4435-84를 참조하여 실험을 수행하였다. 실험도중 케이블볼트의 회전(rotation)이 어느 정도 가능하기 때문에 산출되는 인발강도 값은 최저범위에 해당한다(Hutchinson and Diederichs, 1996; Reichert et al., 1992).

본 실험장비는 근입길이에 따른 조절이 가능하도록 제작하였고, 최대 2,500 mm까지 시편을 제작하여 실험을 수행할 수 있다. 앞부분에서는 LVDT를 설치하도록



하여 하중 가압에 따른 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 하중은 유압잭과 유압실린더의 두 부분을 연동하여 가압할 수 있도록 하였고, 최대규격은 2.9 MPa이고 최대 변위는 60 mm이다.

실험 방법은 가장 먼저 근입길이 1 m와 2 m에서 그림 4~그림 7에 보인 조건에 대한 시편을 각각 제작하여 28일간 양생시켰다. 제작된 시편을 낮은 구속압의 조건인 경우 그림 9(a)와 같이 PVC관으로 고정하고, 높은 구속압의 조건인 경우는 강관(steel pipe)으로 감싼 후 그림 9(b)와 같이 인발 실험 장비에 고정한다. 시편의 고정이 완료되면 인발 실험의 변위 측정을 위해 Load cell 앞부분에 LVDT 변위계를 설치한다. 케이블볼트를 잡아주는 wedge를 완전히 정착시키기 위해 초기의 하중을 천천히 가압하여 미끄러짐(slip)현상이 일어나는 것을 최소한으로 줄인 후, 10 kN/min의 속도로 인발하중을 가압하였다.

3. 인발 실험 결과

3.1 콘 또는 밸브 위치(l_f)에 따른 인발강도 변화

실제 케이블볼트가 설치되는 현장에서 천공 홀의 입구(굴착면)에서부터 첫 번째 콘 또는 밸브와의 간격(l_f)에 따른 인발강도 변화를 알아보기 위해, 실내실험에서 PVC관의 입구에서 그림 4와 같이 콘형 케이블볼트의 경우는 첫 콘과의 간격을 150 mm, 밸브형 케이블볼트의 경우는 첫 밸브와의 간격을 각각 50 mm, 150 mm, 300 mm, 450 mm로 시편을 제작한 후 인발실험을 수행하였다. 이는 첫 콘 또는 밸브의 최소 근입깊이를 알아보기 위한 실험이었다. 이때 근입깊이(l_e)는 1 m이고 콘 또는 밸브는 한 개만 설치하였으며 구속조건은 낮은 구속압 조건으로 고정하였다.

실험 결과는 그림 10과 같다. 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 밸브와의 간격(l_f)에 따른 최대 결함(인발)강도와 케이블볼트(스트랜드)의 파단 여부는 표 4와 같다. 밸브형 케이블볼트의 실험결과에서 알 수 있듯이, 굴착

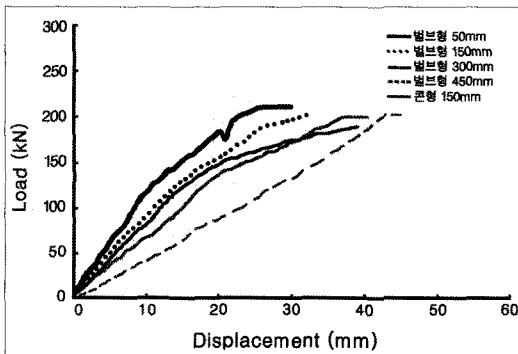


그림 10. 첫 콘 또는 밸브와의 간격(l_f) 변화

표 4. 굴착면에서 첫 콘 또는 밸브와의 간격(l_f)의 변화

종 류	굴착면 으로부터의 간격(mm)	최대 인발강도 (kN)	스트랜드 파단여부 (Y/N)
콘형 케이블볼트	150	190.4	N
밸브형 케이블볼트	50	211.4	N
	150	201.4	N
	300	200.4	N
	450	202.5	N

면으로부터 첫 번째 밸브와의 간격(l_f)에 따라서는 최대 인발강도가 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 이는 최소한의 밸브 근입깊이를 확보한다면 첫 밸브와의 간격(l_f)에 따라서는 인발강도가 크게 변화하지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 해석은 콘형 케이블볼트에도 똑같이 적용될 것으로 판단된다. 그러나 밸브형 케이블볼트의 경우는 밸브 안에 그라우트가 충분히 충전되어야 하고, 콘형 케이블볼트의 경우는 콘 근처에 그라우트가 밀실하게 충전되어야 제 기능을 발휘한다는 전제조건을 생각할 때, 너무 작은 간격(l_f)은 시공 현장에서의 품질 및 시공 상의 불확실성으로 불규칙적이고 특이한 파괴양상을 유발할 수 있다고 판단된다. 버튼형 케이블볼트의 경우에도 최소 첫 번째 버튼의 근입깊이가 100 mm 이상을 확보하여야 한다(Hutchinson and Diederichs, 1996)고 연구 결과에서 밝혀져 있듯이 콘형 및 밸브형 케이블볼트 경우에 있어서도 경제성과 시공성을 고려하여 기존에 외국에서 적용되는 바와 같이 약 300 mm의 간격(l_f)을 확보하는 것이 이상적이라고 판단된다. 단, 이러한 결론은 케이블볼트가 설계 상 요구되는 최소한의 길이가 확보 되었을 때 적용 가능한 결론이다.

3.2 근입(매설)길이 1 m에서의 인발강도 변화

근입길이 1 m에서 콘 또는 밸브 설치간격(l_b)에 따른 인발강도의 변화를 알아보기 위하여 그림 5(a) 및 그림 6(a)와 같이 콘 설치간격(l_b)은 300 mm, 밸브 설치간격은 200 mm, 300 mm, 500 mm, 900 mm로 시편을 각각 제작하여 인발실험을 수행하였다. 또한 일반 케이블볼트 및 현재 터널 현장에서 많이 사용하고 있는 록볼트와의 인발강도를 비교하기 위하여 동일한 방법으로 일반 케이블볼트 및 록볼트 시편을 각각 제작하여 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. 구속조건에 의한 영향을 알아보기 위해서 그림 9와 같이 충전재가 팽창할 수 있는 조건을 모사하기 위해 PVC관으로 낮은 구속압을 모사하였고, 충전재가 팽창할 수 없는 조건을 모사하기 위해 강관으로 높은 구속압을 모사하였다.

3.2.1 낮은 구속압

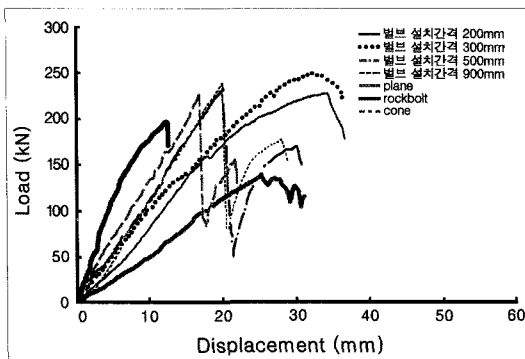
낮은 구속압을 적용한 PVC관에 콘 또는 밸브 설치간격(l_b) 조건에 따라 케이블볼트/록볼트를 매입한 시편을

제작한 후 인발실험을 수행한 결과를 그림 11(a)와 같이 하중-변위 그래프로 나타내었다. 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 최대 인발강도와 케이블(스트랜드)의 파단여부는 표 5에 나타내었다. 벌브형 케이블볼트의 경우, 벌브 설치간격(l_b) 300 mm에서 가장 큰 247.9 kN의 인발강도가 나타났고, 일반(plane) 케이블볼트에서 139.6 kN으로 가장 낮은 인발강도를 보였다. 콘형 케이블볼트는 벌브형 케이블볼트와 비교하여 상대적으로 다소 낮은 225.3 kN이 나타났다. 콘형 케이블볼트와 벌브 설치간격(l_b) 500 mm, 900 mm의 벌브형 케이블볼트에서는 기존 연구결과(Hyett and Bawden, 1996)와 동일하게 wedge와 barrel 부분에서 일부 케이블의 파단이 발생하였고, 파단의 발생으로 하중이 급격히 감소한 후 다시 일정량의 하중증가를 보이다가 나머지 케이블의 파단이 발생하였다. 벌브 설치간격(l_b) 200 mm, 300 mm의 벌브형 케이블볼트와 일반(plane) 케이블볼트는 스트랜드와 그라우트(충전재)사이에서 미끄러짐(slip)현상이 발

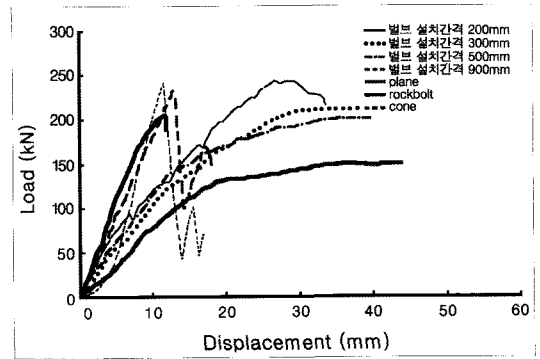
생하였고, 최대하중에 도달한 후 추가적인 하중의 증가는 발생하지 않았다. 록볼트의 경우는 록볼트와 그라우트(충전재) 사이에서 미끄러짐이 상대적으로 적게 발생하여 큰 강성을 보였고, 최대 195.9 kN으로 나타나 벌브형 케이블볼트 평균 인발강도의 약 83%를 나타내었다. 이형철근의 파단은 발생하지 않았다.

3.2.2 높은 구속압

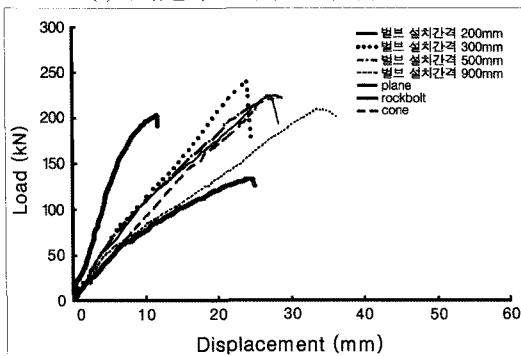
본 실험에서 높은 구속압 조건을 모사하기 위해 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따라 케이블볼트를 매입한 시편을 제작한 후 강관으로 감싸고 인발실험을 수행한 결과를 그림 11(b)와 같이 하중-변위 그래프로 나타내었다. 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 최대 인발강도와 케이블(스트랜드)의 파단여부는 표 5에 나타내었다. 실험결과, 벌브 설치간격(l_b) 200 mm의 케이블볼트에서 가장 큰 244.0 kN의 인발강도가 나타났고, 일반(plane) 케이블볼트에서는 150.6 kN으로 가장 낮은 인발강도가 나



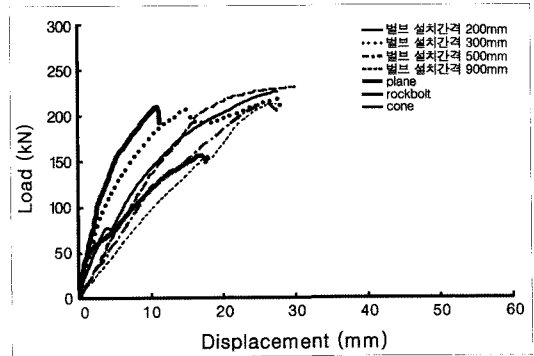
(a) 근입길이 1 m, 낮은 구속압 조건



(b) 근입길이 1 m, 높은 구속압 조건



(c) 근입길이 2 m, 낮은 구속압 조건



(d) 근입길이 2 m, 높은 구속압 조건

그림 11. 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 하중-변위 곡선

표 5. 인발 실험 결과

근입길이(m)	구 분		낮은 구속압(PVC관)		높은 구속압(강관)	
	종 류	설치간격(mm)	최대 인발강도(kN)	스트랜드 파단여부(Y/N)	최대 인발강도(kN)	스트랜드 파단여부(Y/N)
1.0	콘형	300	225.3	Y	230.7	Y
	벌브형	200	226.9	N	244.0	N
		300	247.9	N	211.3	N
		500	230.7	Y	200.9	N
		900	237.5	Y	240.9	Y
	일반	0	139.6	N	150.6	N
	록볼트	0	195.9	N	203.7	N
2.0	콘형	300	223.7	N	232.2	N
	벌브형	200	223.0	N	226.1	N
		300	241.2	Y	218.3	N
		500	225.2	N	215.2	N
		900	209.5	N	213.1	N
	일반	0	134.2	N	156.4	N
	록볼트	0	203.1	N	210.3	N

타났다. 콘형 케이블볼트는 벌브형 케이블볼트와 비교하여 중간보다 약간 큰 정도의 인발강도인 230.7 kN을 나타내었다. 콘형 케이블볼트 및 벌브 설치간격(l_b) 900 mm의 벌브형 케이블볼트에서는 wedge와 barrel 부분에서 케이블볼트의 파단이 발생하였다. 벌브 설치간격(l_b) 200 mm, 300 mm, 500 mm의 벌브형 케이블볼트와 일반(plane) 케이블볼트에서는 스트랜드와 그라우트 사이에서 미끄러짐(slip)현상이 발생하였다. 록볼트의 경우 록볼트와 그라우트 사이에서 미끄러짐(slip)이 상대적으로 발생하지 않았고, 최대 인발강도가 203.7 kN로 나타나 벌브형 케이블볼트 평균 인발강도의 약 91%를 나타내었다. 록볼트의 파단은 발생하지 않았다.

3.3 근입(매설)길이 2 m에서의 인발강도 변화

근입길이 2 m에서 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 인발강도의 변화를 알아보기 위하여 그림 5(b) 및 그림 6(b)와 같이 콘 설치간격(l_b)은 300 mm, 벌브 설치간격은 200 mm, 300 mm, 500 mm, 900 mm로 시편을 각각 제작하여 인발실험을 수행하였다. 또한 일반 케이블볼트 및 현재 터널 현장에서 많이 사용하고 있는 록볼트와

의 인발강도를 비교하기 위하여 동일한 방법으로 일반 케이블볼트 및 록볼트 시편을 각각 제작하여 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. 구속조건에 의한 영향을 알아보기 위해서 그림 9와 같이 충전재가 팽창할 수 있는 조건을 모사하기 위해 PVC관으로 낮은 구속압을 모사하였고, 충전재가 팽창할 수 없는 조건을 모사하기 위해 강관으로 높은 구속압을 모사하였다.

3.3.1 낮은 구속압

인발실험을 수행한 결과를 그림 11(c)와 같이 하중변위 그래프로 나타내었다. 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 최대 인발강도와 케이블(스트랜드)의 파단여부는 표 5에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 벌브 설치간격(l_b) 300 mm에서 가장 큰 241.2 kN의 인발강도가 나타났고, 일반(plane) 케이블볼트에서 134.2 kN으로 가장 낮은 인발강도가 나타났다. 콘형 케이블볼트는 벌브형 케이블볼트와 비교하여 중간 정도의 인발강도인 223.7 kN을 나타내었다. 벌브 설치간격(l_b) 300 mm의 케이블볼트에서는 wedge와 barrel 부분에서 일부 케이블의 파단이 발생하였고, 파단의 발생으로 하중이 급격

히 감소한 후 다시 일정량의 하중증가를 보이다가 나머지 케이블의 파단이 발생하였다. 이때 초기 파단에서 최대 인발강도를 나타내었으며, 이후의 하중증가는 낮은 하중 단계에서 발생하였다. 벌브 설치간격(l_b) 900 mm의 벌브형 케이블볼트와 일반(plane) 케이블볼트는 스트랜드와 그라우트(충전재)사이에서 미끄러짐(slip)현상이 상대적으로 많이 발생하여 낮은 강성을 보였고, 최대 하중에 도달한 후 추가적인 하중의 증가는 발생하지 않았다. 록볼트의 경우는 록볼트와 그라우트(충전재) 사이에서 미끄러짐이 거의 발생하지 않았고, 최대 인발강도가 203.1 kN으로 나타나 벌브형 케이블볼트 평균 인발강도의 약 90%를 나타내었다.

본 실험에서 수행한 근입길이 2 m의 결과를 그림 11(a)의 낮은 구속압에서 근입길이 1 m의 인발강도와 비교하여 보면, 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 기존의 연구 결과(Hyett et al., 1995)가 밝힌 바와 같이 최소 300 mm의 근입길이를 확보하면 최대 인발강도를 유도하기 위한 최소한의 정착길이를 확보한다는 것과 일치하는 결과라고 볼 수 있다.

3.3.2 높은 구속압

본 실험에서 수행한 결과를 그림 11(d)와 같이 하중-변위 그래프로 나타내었다. 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)에 따른 최대 인발강도와 케이블(스트랜드)의 파단여부는 표 5에 나타내었다. 콘형 케이블볼트에서 가장 큰 232.2 kN의 인발강도가 나타났고, 일반(plane) 케이블볼트에서는 156.4 kN으로 가장 낮은 인발강도가 나타났다. 벌브 설치간격(l_b) 500 mm 및 900 mm 그리고 일반 케이블볼트에서는 스트랜드와 그라우트 사이에서 미끄러짐(slip)현상이 발생하였다. 즉 세 가지의 경우에 있어서는 강성이 유사하였다. 록볼트의 경우 록볼트와 그라우트 사이에서 미끄러짐(slip)이 상대적으로 크게 발생하지 않았고, 최대 인발강도가 210.3 kN로 나타나 벌브형 케이블볼트 평균 인발강도의 약 96%를 나타내었다. 록볼트의 파단은 발생하지 않았다.

본 실험에서 수행한 근입길이 2 m의 결과를 그림 11(b)의 높은 구속압에서 근입길이 1 m의 인발강도와 비교하여 보면, 낮은 구속압의 경우와 거의 비슷함을 알 수 있다. 이는 기존의 연구결과와 일치함을 알 수 있다.

전체적으로 본 연구에서 수행된 인발실험 결과를 살펴보면, 콘형 케이블볼트의 경우는 기존 버튼형 케이블볼트의 연구결과(≈220 kN)(Hutchinson and Diederichs, 1996)와 매우 유사한 인발강도(≈190~230 kN)를 보였다. 그러나 벌브형 케이블볼트의 결합강도 값(≈210~250 kN)은 기존의 연구결과(≈240~260 kN)(Hyett et al., 1995)보다 다소 낮게 나왔고, 특히 록볼트의 경우는 본 연구의 인발강도 값(≈196~210 kN)이 기존의 연구결과(≈250~260 kN)(Hyett et al., 1995)보다 상당히 낮게 나왔음을 알 수 있다. 이는 기존의 외국 연구 결과에서 사용된 그라우트 품질이 58~69 MPa인 반면에 본 연구에서 사용된 그라우트의 일축 압축강도는 40~50 MPa의 범위에서 측정되어 강도면에서 낮음을 알 수 있다. 따라서 기존 외국 실험결과는 대부분 스트랜드의 파단이 발생하였으나, 본 연구에서는 일부에서만 스트랜드의 파단이 발생하고 나머지는 스트랜드와 그라우트 사이에서 미끄러짐(slip)이 발생하였다. 케이블이 파단된 경우는 당연히 케이블의 인장강도와 유사한 값을 보이고 있다. 미끄러짐의 경우도 다소 낮기는 하지만 케이블 파단의 강도와 유사한 높은 인발강도를 보이고 있다.

3.4 가상 현장

본 연구에서는 하나의 가상 현장을 설정하고 이를 모사하기 위해 외국 현장에서 많이 적용하고 있는 조건인 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 벌브와의 간격(l_f)을 300 mm, 콘 또는 벌브설치 간격은 1,000 mm로 하고 전체 근입길이는 2,000 mm로 하여 실험을 진행하였다. 실질적으로 본 실험을 수행한 연유는 현장상황을 가장

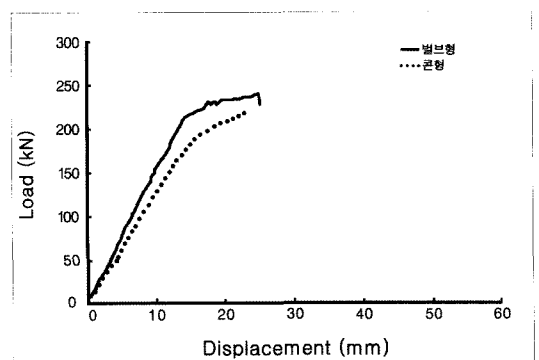


그림 12. 가상현장 조사에 따른 하중-변위 곡선

잘 고려한 설치 조건이라 판단하고 이에 대한 인발(결합)강도를 구하고자 하였다. 실험 결과는 그림 12와 같이 하중-변위 그래프로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 인발(결합)하중은 콘형의 경우는 220.3 kN, 벌브형의 경우는 239.4 kN으로 나타났고, 케이블볼트의 파단은 발생하지 않았다. 이러한 결과를 보면, 인발강도가 거의 케이블(스트랜드) 자체의 인장강도와 유사하고 따라서 충분한 결합강도를 보임을 알 수 있다.

4. 인발실험 결과 분석

4.1 콘 또는 벌브 설치간격(l_b)의 변화

그림 11에서 보인 인발실험 결과에서 알 수 있듯이, 우선적으로 콘 또는 벌브가 없는 일반 케이블볼트와 콘 또는 벌브가 설치된 고성능 케이블볼트의 인발강도를 비교해보면 콘 또는 벌브가 존재할 때 인발강도가 상당히 큰 것으로 나타났다. 그림 11(d) 및 표 5의 결과를 보면 벌브의 설치간격이 가까울수록 다소 큰 인발강도를 보였다. 이는 Hyett and Bawden(1996)의 연구결과와 유사한 경향으로써 벌브의 빈도를 조정함으로써 유도되는 인발강도를 다소 조절할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나 그림 11(a)~11(c)의 그래프를 보면 대체적으로 유사하지만 그림 11(d)와 같이 정확히 일치하지 않음을 알 수 있다. 결론적으로 벌브의 설치간격이 작을수록 다소 높은 인발강도를 유도하나 그 차이는 크지 않다고 판단된다. 이렇게 벌브 설치간격에 따라 인발강도가 크게 변화하지 않는 이유는 본 실험결과의 인발강도 값이 케이블(스트랜드) 자체의 인장강도에 해당하는, 즉 벌브형 케이블볼트가 발휘할 수 있는 최대강도까지 거의 유발되었기 때문으로 판단된다. 또한 전술한 바와 같이 국내에서 사용하고 있는 그라우트의 배합을 고려할 때, 최소의 벌브 설치하는 스트랜드의 인장강도까지 케이블볼트의 인발강도를 유도할 수 있음을 보여주고 있다. 이렇게 벌브형 케이블볼트에서 유도된 벌브 설치간격에 따른 인발강도의 변화를 볼때, 콘형 케이블볼트도 국내 현장에서 최소의 개수를 설치함으로써 충분한 인발강도를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 구속압의 변화

그림 11의 전체적인 경향을 보면, 구속조건에 관계없

이 일정량의 높은 인발강도를 보이고 있고 그 정도가 지보재로서의 역할을 수행할 수 있는 범위에 있음을 알 수 있다. 일반적으로 구속압이 클수록 높은 인발강도를 유도한다고 보고되고 있으나, 본 연구 결과는 이와 달리 낮은 구속압에서도 높은 구속압 수준의 인발강도를 유발하고 있다. 이는 스트랜드에 설치된 콘 또는 벌브에 기인한 것으로, 낮은 구속상황에서 콘형 케이블볼트와 벌브형 케이블볼트를 인발하면 콘 또는 벌브 부근에서 팽창(dilation)이 발생하게 되고 이는 콘 또는 벌브가 앵커 역할을 하게 되어 높은 인발강도를 유도하게 된다. 그러나 이러한 현상은 일반 케이블볼트나 록볼트와 같이 표면이 상대적으로 매끈한 경우는 발생하지 않는다. 따라서 일반 케이블볼트의 경우는 높은 구속압에서 다소 높은 인발강도가 유도되었으나, 콘형 또는 벌브형 케이블볼트의 경우는 낮은 구속압 조건에서도 거의 높은 구속압 수준의 인발강도까지 발현되었다.

본 연구에서 사용된 그라우트는 기존의 외국 연구에서 사용된 그라우트 품질보다 다소 떨어진다. 만약 본 연구의 그라우트 품질이 외국과 동일하게 발휘되었다면 구속압의 변화에 관계없이 대부분의 조건에서 스트랜드의 파단이 발생하였을 것이고 따라서 케이블의 인장강도와 유사한 인발강도를 얻었을 것으로 판단된다. 여기에서 주목할 사실은 일반 케이블볼트나 록볼트와 같이 표면이 매끈한 경우는 높은 구속압에 비하여 낮은 구속압에서 상당히 낮은 인발강도를 유발하게 되나, 콘형 케이블볼트와 벌브형 케이블볼트의 경우는 낮은 구속압에서도 콘 또는 벌브로 인한 팽창효과로 인하여 케이블의 인장강도와 같은 정도의 높은 인발강도를 유발한다는 사실이다. 따라서 콘형 케이블볼트와 벌브형 케이블볼트는 암반조건이 불리한 파쇄된 암반조건에서도 높은 인발강도를 유발함으로써 지보재로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 근입길이(l_e)의 변화

근입길이의 경우 그림 11의 전체적인 실험결과를 보면, 근입길이가 길면 높은 인발강도를 유발할 것이라는 예상과는 달리, 근입길이에 따라 특정한 경향이 없이 유사한 인발강도를 보이고 있음을 알 수 있다. 기존 연구 결과를 보면, 벌브형 또는 버튼형 케이블볼트의 경우 최소 300 mm의 근입길이만을 확보하면 최대 인발강도를

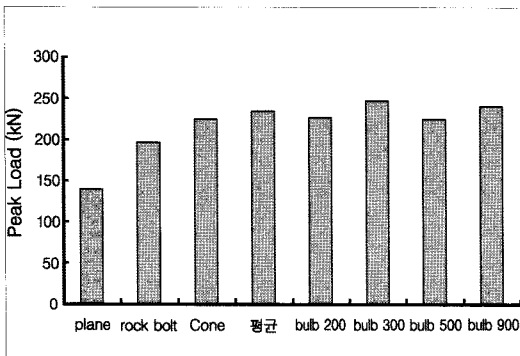
유도할 수 있다(Hutchinson and Diederichs, 1996)고 보고된 바와 같이, 본 연구에서도 근입길이 1 m인 경우 이미 최소한의 정착(근입)길이를 확보하여 근입길이 2 m의 경우와 유사한 인발강도를 유도할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 콘형 또는 벌브형 케이블볼트의 경우, 근입 길이는 어느 정도만 확보된다면 최대 인발강도를 유발 함으로써 인발강도의 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

5. 케이블볼트와 록볼트의 성능 비교

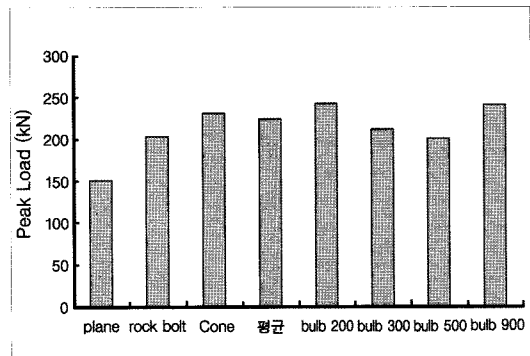
본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트, 벌브형 케이블 볼트, 일반 케이블볼트 그리고 록볼트(이형철근)의 성능을 강도 관점에서 상호 비교·분석하였다. 일반(plane) 케이블볼트 최대 인발강도, 록볼트의 최대 인발강도, 콘형 케이블볼트의 최대 인발강도, 벌브형 케이블볼트의 평균 인발강도, 그리고 각각의 벌브 설치간격(200 mm,

300 mm, 500 mm, 900 mm)에 따른 벌브형 케이블볼트의 최대 인발강도, 즉 8개의 인발강도 값을 그림 13에 순차적으로 나타내었다. 그림 13(a)는 낮은 구속압, 근 입길이 1 m 조건을, 13(b)는 높은 구속압, 근입길이 1 m 조건을, 13(c)는 낮은 구속압, 근입길이 2 m 조건을, 그리고 13(d)는 높은 구속압, 근입길이 2 m 조건의 인발 강도 값을 각각 나타내고 있다.

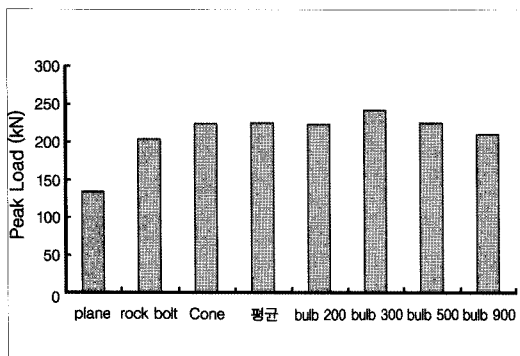
전체적인 결과를 보면, 4가지 모든 경우에 있어서(콘형 케이블볼트≈벌브형 케이블볼트) > 록볼트 > 일반 케이블볼트 순으로 인발강도 값이 크게 산정되었다. 벌브형 케이블볼트에 있어서도 대체적으로 벌브 설치 간 격이 작을수록 다소 큰 인발강도를 유도하는 경향을 보 이고 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트는 기존의 고성능 케이블볼트와 동등 이상의 성능을 보 였으며, 결국 실제 현장에서 지보재로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.



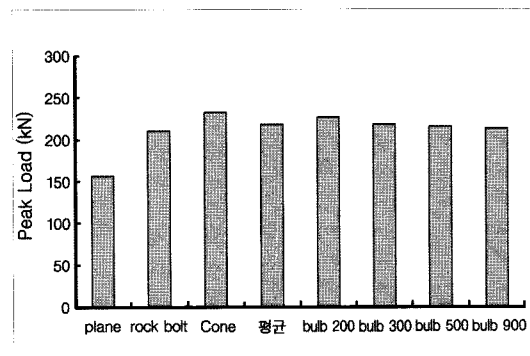
(a) 근입길이 1 m, 낮은 구속압 조건



(b) 근입길이 1 m, 높은 구속압 조건



(c) 근입길이 2 m, 낮은 구속압 조건



(d) 근입길이 2 m, 높은 구속압 조건

그림 13. 케이블볼트와 록볼트의 인발강도 비교

6. 결 론

본 연구에서는 일반(plane) 케이블볼트, 콘형(cone-shaped button) 케이블볼트, 벌브형(bulb) 케이블볼트 그리고 이형철근 록볼트를 다양한 조건에서 인발강도 실험을 수행하여 강도 관점에서 상호 비교를 통하여 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트의 국내 현장 적용성을 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 콘형 및 벌브형 케이블볼트의 경우, 굴착면으로부터 첫 번째 콘 또는 벌브와의 간격(l_f)에 따라서는 최대 인발강도가 크게 변화하지 않으나, 시공조건이나 품질 확보차원에서 보면 기존의 문헌에서 제시하고 일반적으로 외국에서 적용하는 바와 같이 약 300 mm의 간격(l_f)을 확보하는 것이 이상적이라고 판단된다. 단 이러한 결론은 케이블볼트가 설계 상 요구되는 최소한의 길이가 확보 되었을 때 적용 가능한 결론이다
2. 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트는 기존에 개발되어 상용화되어 있는 벌브형 케이블볼트와 같이 실제 현장에서 케이블 파단의 유무에 관계없이 충분한 결합강도를 유발하였다. 또한 만약 현장에서 그라우트 품질이 다소 낮게 시공되더라도 일반 케이블볼트 및 록볼트와는 달리 콘 또는 벌브의 팽창효과로 인하여 콘형 및 벌브형 케이블볼트의 경우는 높은 결합강도를 유발할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 현장 조건을 모사하여 콘형 및 벌브형 케이블볼트의 인발실험을 수행한 결과, 인발강도가 상당히 높게 나왔다. 따라서 본 연구에서 개발한 콘형 케이블볼트는 현장에서 직접 적용 가능하다고 판단된다.
4. 벌브형 케이블볼트의 실험 결과, 벌브의 설치간격이 작을수록 다소 높은 인발강도를 유도하나 그 차이는 크지 않다고 판단된다. 이렇게 벌브 설치간격에 따라 인발강도가 크게 변화하지 않는 이유는 본 실험결과 의 인발강도 값이 케이블의 인장강도에 해당하는, 즉 벌브형 케이블볼트가 발휘할 수 있는 최대강도까지 거의 유발되었기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 수행한 조건 하에서는 콘형 케이블볼트의 경우에도 이와 유사하게 콘의 설치간격은 주요한 설계요소가 되지 않을 것으로 판단된다.
5. 볼트의 길이가 동일하다는 전제를 둘 때, 일반 케이

블볼트나 록볼트와 같이 표면이 매끈한 경우는 높은 구속압에 비하여 낮은 구속압에서 상당히 낮은 인발강도를 유발하게 되나, 콘형 및 벌브형 케이블볼트의 경우는 낮은 구속압에서도 콘과 벌브의 팽창효과로 인하여 케이블의 인장강도와 같은 정도의 높은 인발강도를 유발하였다. 따라서 콘형이나 벌브형 케이블볼트는 충전재의 팽창이 가능한 즉 암반조건이 불리한 파쇄된 암반조건에서도 높은 인발강도를 유발함으로써 지보재로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 콘형 및 벌브형 케이블볼트의 경우, 근입깊이는 어느 정도만 확보(최소 300 mm)된다면 최대 인발강도를 유발함으로써 인발강도의 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
7. 본 연구에서는 록볼트, 일반 케이블볼트, 벌브형 케이블볼트와 개발된 콘형 케이블볼트의 그라우팅과 볼트 사이에서의 인발 성능을 실험적으로 비교하였다. 따라서 실제 현장에서는 록볼트와 동일한 조건으로 이형철근 대신 콘형 케이블볼트가 설치되었을 때, 동등 또는 동등 이상의 성능을 보인다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)에 의하여 지원된 연구로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 송기일, 조계춘, 장석부 (2008), “충격 반향 기법을 이용한 슛크리트 배면 접촉 상태 평가에 관한 수치해석적 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 105-118.
2. 유광호, 이민호, 박연준 (2007), “터널의 정량적 안정성 평가를 위한 슛크리트 모델링 방법 비교 검증에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 99-107.
3. 유충식, 김주미, 김희철 (2009), “2-Arch 터널의 3차원 가동 특성-수치해석 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 255-264.

4. ASTM (Reapproved 1998) : Standard test method for rock bolt anchor pull test : D4435-84.
5. Hutchinson, D. J. and Diederichs, M. S. (1996), "Cablebolting in underground mines", BiTech Publishers Ltd, Canada, pp. 406.
6. Hyett, A. J. and Bawden, W. F. (1996), "The effect of bulb frequency on the behaviour of fully grouted Garford bulb cable bolts", Technical Report, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
7. Hyett, A. J., Bawden, W. F. and Coulson, A. L. (1992a), "Physical and mechanical properties of normal portland cement pertaining to fully grouted cable bolts", Rock Support (eds, Kaiser and McCreath), Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 341-348.
8. Hyett, A. J., Bawden, W. F. and Reichert, R. D. (1992b), "The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 29, No. 5, pp. 503-524.
9. Hyett, A. J., Bawden, W. F., Hedrick, N. and Blackall, J. (1995), "A laboratory evaluation of the 25 mm Garford bulb anchor for cable bolt reinforcement", CIM Bulletin, Vol. 88, pp. 54-59.
10. Reichert, R. D., Bawden, W. F. and Hyett, A. J. (1992), "Evaluation of design bond strength for fully grouted cable bolts", CIM Bulletin, Vol. 85, pp. 110-118.

접수일(2009.10.8), 수정일(2010.1.4), 게재확정일(2010.1.13)