

펄스방전 확공형 앵커용 시공 장비의 적용성 검토

A Case Study of Applicability of Machines of Pulse Powered Underreamed Anchors

강금식¹⁾, Kum-Sik Kang, 김재형¹⁾, Jae-Hyung Kim, 조규연¹⁾, Gyu-Yeon Cho,
김태훈²⁾, Tae-Hoon Kim, 김선주²⁾, Sun-Ju Kim

¹⁾ (주)세원리타 연구원, Research Engineer, SEWON RITA CO.,LTD

²⁾ 대우건설기술연구소 연구원, Research Engineer, Daewoo Research Institute of Technology

SYNOPSIS : This study intends to develop a pulse discharge device to strengthen the pushing power by expanding the cavity of the anchor settlement to form a spheric root for the purpose of constructing the economical and stable anchor. and, a series of field test were carried out in order to check applicability of machines of pulse powered underreamed anchors. Through the experiments, the electrical characteristics of the pulse power equipment had been identified it and the dynamic pressure generated from the subsequent change had been measured. Here, the measured dynamic pressure is the cavity expansion pressure to impact on the ground around the anchor settlement. Since this pressure has effects of cavity expansion and bored surface hardening with dynamic hardening effects on the anchor settlement, it is expected that it will largely contribute the increase of pushing power with a strong frictional resistance.

Keywords : Pulse discharge, Underreamed anchor, Machines of Pulse Power

1. 서론

그라운드 앵커는 앵커체의 모양에 따라 직선 샤프트형과 구근형으로 분류할 수 있다. 구근형 앵커는 직선샤프트형 앵커로 인발력을 얻기 힘든 연약한 지반에 사용되거나, 앵커의 개수를 줄여 비용을 절감하는 용도로 개발되었다. 기존의 확공 공법은 높은 압력으로 그라우트를 주입해 확공하는 가압그라우트 공법, 공벽을 깎아내는 블레이드 공법 등이 있으나 주입재의 강도, 공벽붕괴 등의 문제점으로 인해 세립질 점토지반이나 사질토지반에 적용하기 어려웠다. 따라서 이를 개선하고자 최근 펄스파워기술을 이용한 공법연구가 진행 중이다. 펄스파워기술의 원리는 1J(joule)의 에너지를 1s(초) 동안에 방출하면 1W(watt)의 파워가 되지만 $1\mu s(10^{-6}\text{초})$ 의 짧은 시간에 방출 하면 단위 시간당의 에너지변화량이 아주 큰 1MW(10^6watt)에 이르는 큰 파워를 가지게 되는 에너지 보존 법칙의 원리에 의한 것으로 에너지 저장장치를 통하여 전력변환 혹은 에너지 압축을 이용하는 기술이다. 에너지 저장장치인 캐패시터를 통해 저장된 에너지를 앵커 정착부 절연 매질 내부에 있는 선단장치 양 전극사이에 수십 μs 내에 고전압을 가하면 양극 사이에 큰 에너지가 발생하고 이 에너지가 앵커 정착부 지반 천공벽에 충격파(Shock wave)를 주어 지반이 확공 됨과 동시에 확공 압력으로 인하여 다짐이 된다. 이런 원리를 이용하면 더 큰 인발력에 저항할 수 있는 앵커 정착부가 조성되며 기존앵커 시공방식에서 문제점으로 대두된 적용 인발력 확보를 위해 앵커 자유장이 길어지고 앵커의 개수가 많아지는 단점을 해소할 수 있을 뿐 아니라 공벽붕괴의 위험이 적다. 현재 펄스방전기술을 활용한 현장타설말뚝공법이 2006년 11월 신기술 512호로 지정되어 사용 중에 있지만 시공 장비가 러시아의 것을 유지하고 있어 장비의 국산화가 요구 된다. 본

연구의 목적은 현재 개발 중인 펄스방전기술이 이용된 확공형 앵커공법용으로 개발된 정착부 확공장치에 관한 것으로, 정착부에서 발생한 펄스파워로 인한 압력을 실내모의 실험을 통하여 측정하고 실제 지반을 통한 실험을 실시하여 시공성을 확인하였다.

2. 펄스방전 확공형 앵커 시공 장비 개발

2.1 펄스방전 시스템

펄스 전기에너지를 이용하는 펄스장치는 1차 전원, 전기에너지 저장장치, 제어장치, 고전압 스위치 및 부하인 방전선단으로 구성된다. 그림 1에서는 펄스방전시스템에 대한 회로도도를 나타낸 것이다. 그림 1의 발전기 및 수전반의 전원은 1차 전원으로 사용전원(AC380V) 또는 디젤 발전기와 같은 독립전원을 사용할 수 있으며, 이런 1차 전원을 전파정류하고 필터링하여 안정된 직류전압을 공급하는 전원 공급장치, 고밀도의 에너지를 저장할 수 있는 캐패시터 뱅크(Capacitor Bank), 저장된 에너지를 방전할 수 있는 고전압 대 출력 스위치, 대 전력을 전달하는 송전 케이블(직경 26mm²의 동축 케이블), 방전선단 그리고 이들을 제어할 수 있는 제어부로 구성되어진다.

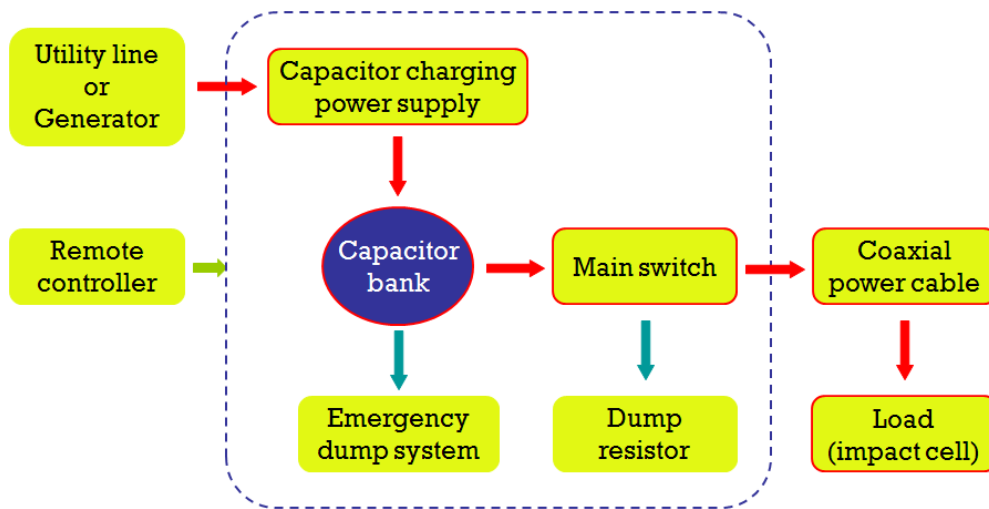


그림 1. Pulsed power system - schematic diagram

2.2 앵커 정착부 확공 장치

2.2.1 확공형 앵커용 펄스발생장치

펄스발생장치는 안정된 직류전압을 공급하는 전원 공급장치, 고밀도의 에너지를 저장할 수 있는 캐패시터 뱅크, 저장된 에너지를 방전할 수 있는 고전압 대 출력 스위치로 이루어진다.

표 1. 앵커용 펄스발생장치 사양

구분	앵커용 펄스발생장치
전압	4~9kV
캐패시턴스	3.3mF
에너지	26.4~133.6kJ
규격	1500(l)×1320(w)×1500(h)
조작방식	로컬 및 유·무선리모콘
스위치	메카닉 스위치
보관방법	컨테이너 불필요



그림 2. 펄스발생장치



그림 3. 컨트롤 BOX



그림 4. 유/무선 리모콘

본 장비는 현장에서 장비의 조작이 수월하도록 유선 및 무선으로 리모콘이 제작되었으며, 최대 100m 지점에서 조작이 가능하다. 다양한 지반조건에 유동적인 적용이 가능하도록 하기 위하여 에어 갭 스위치를 메카닉 타입 스위치로 교체하였다.

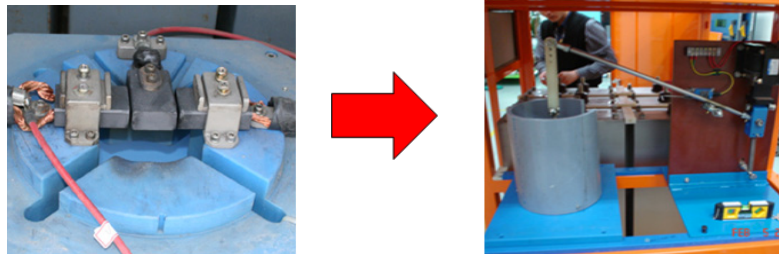


그림 5. 에어 갭 스위치(좌)와 메카니컬 스위치(우)

기존 에어 갭 스위치는 설정 전압에 따라 스위치간의 간격을 일일이 수동으로 조절해야 하고 그 또한 7kV이하의 전압에선 조정이 쉽지 않았다. 이를 개선하기 위하여 메카닉 타입의 스위치를 도입함으로써 다양한 전압에서 확실한 방전을 유도하여, 말뚝에 비하여 상대적 소구경인 앵커에 적용이 용이하도록 제작되었다.

2.2.2 실내 모의실험을 통한 장비의 성능 검증

2.2.2.1 실험장치

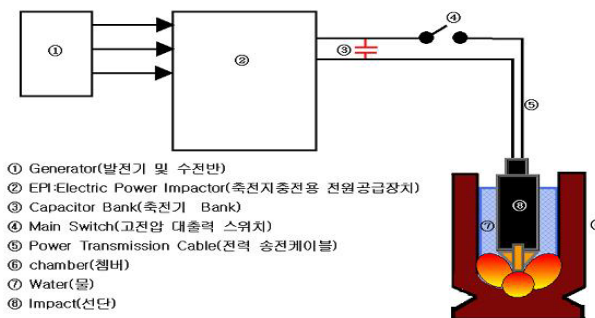


그림 6. 방전실험 개략도

펄스방전 시 앵커 정착부 벽면에 작용하는 압력값을 측정하기 위한 실험장치구성은 1차 전원, 전기에너지 저장장치, 제어장치, 고전압 스위치 및 방전선단으로 구성된다. 그림 7 에서는 펄스방전실험에 대한 개략도를 나타낸 것이고, 펄스방전장치의 사양은 표 1에 나타내었다.

2.2.2.2 실험방법

실험에 사용된 펄스발생장치는 현재 연구가 진행 중인 펄스방전 확공형 앵커공법용으로 제작된 펄스발생장치로 최대 9kV까지 충전이 가능하다. 본 실험은 직경이 250mm인 M.C 재질의 챔버를 사용하였다.

케이블에 흐르는 전류는 CWT600R 로고스코일(0.05mV/A), 발생압력은 Dynamic Pressure Sensor Model M109C12 2개를 각각 DPO4034 오실로스코프에 연결하여 펄스 방전 시 흐르는 전류 값과 챔버 벽에 작용하는 압력을 측정하였다. 각각의 센서는 챔버의 하단 45° 각도 두 부분에서 측정하였다.

압력측정에 사용된 챔버는 그림 8 에 나타내었다. 이 챔버 내부는 원형이며 아래 부분은 반구형으로 제작되어 선단에서부터 압력이 미치는 거리를 동일하게 하여 측정할 수 있게 하였으며 선단은 고정 장치를 통해 일정한 위치를 지정에서 방전하여 실험하였다. 고전압 케이블의 저항 값은 0.1Ω으로 유지하였다.



그림 7. 실험전경

2.2.2.3 실험결과

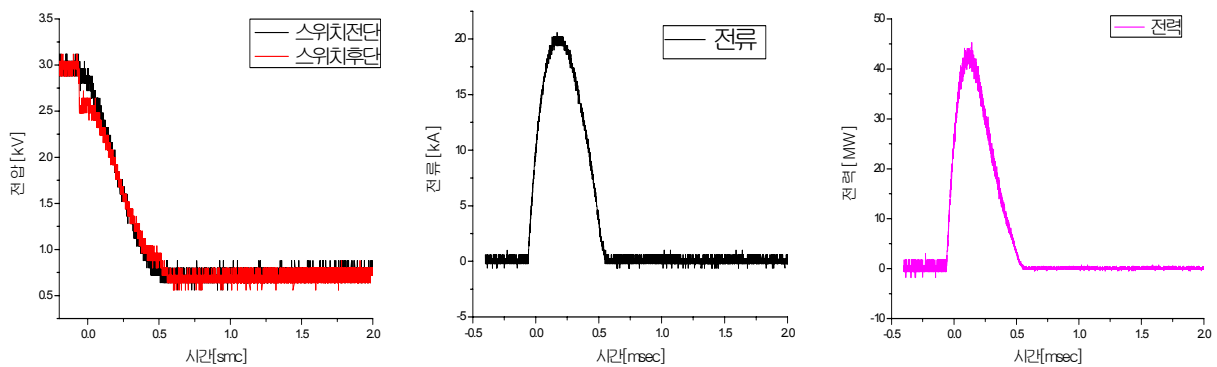


그림 8. 3kV 방전 시 측정 압력, 전류 및 전력

그림 9 에서 설정전압은 3kV이고 충전된 전압 또한 3kV로 충전 된 전압의 손실은 거의 없으며, 방전 순간 스위치 전/후단의 전압 차이는 약 300V정도로 양호하다. 방전 후 잔류전압은 500V정도로 낮으며 이는 저항체를 통하여 모두 Dumping 된다. 이 때 발생된 전류의 최대치는 20kA이며, 전력의 최대 값은 43MW이다.

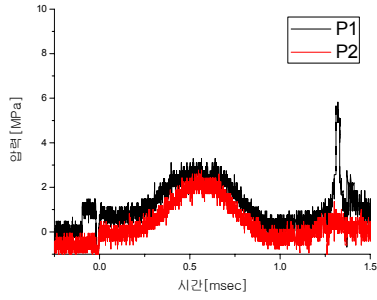


그림 9. 4kV 방전 시 압력

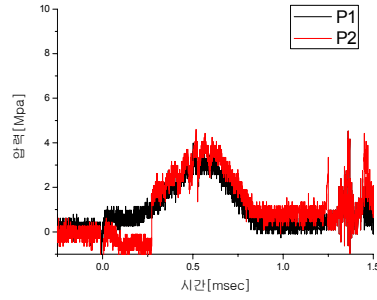


그림 10. 5kV 방전 시 압력

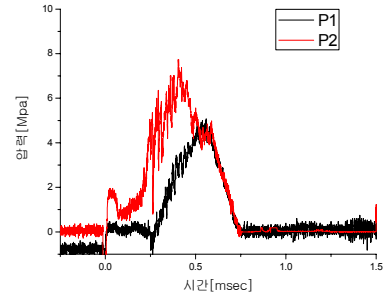


그림 11. 7kV 방전 시 압력

그림 9, 10, 11은 각각 4kV, 5kV, 7kV 방전 시 발생된 압력 값을 나타낸 그래프이고 방전에 걸리는 시간은 약 7~8msec 정도 이다.

표 2. 충전 전압별 에너지와 압력의 최대 값

충전전압	4kV	5kV	7kV
이론 상에너지	26.4 kJ	41.2kJ	80.8kJ
압력 최대 값	3Mpa	4Mpa	8Mpa

에너지는 전압의 제곱에 비례하므로 충전전압이 커짐에 따라 에너지의 값은 커진다. 표 2에서 에너지가 커짐에 따라 방전으로 인해 발생하는 압력의 값도 비례하여 커짐을 볼 수 있다.

3. 현장시험을 통한 적용성 검토

제작된 장비의 현장에 대한 적용성을 평가하고 실내 시험을 통하여 측정된 방전 선단의 압력이 실제 앵커의 극한인발력 상승에 미치는 영향을 현장 시험을 통하여 알아보고자, 풍화토 지반의 현장에 펄스 방전 확공형 앵커를 시공하여 인발시험을 수행하였다. 시험지반은 그림 과 같으며 시험 앵커는 표 2와 같이 시공되었다.

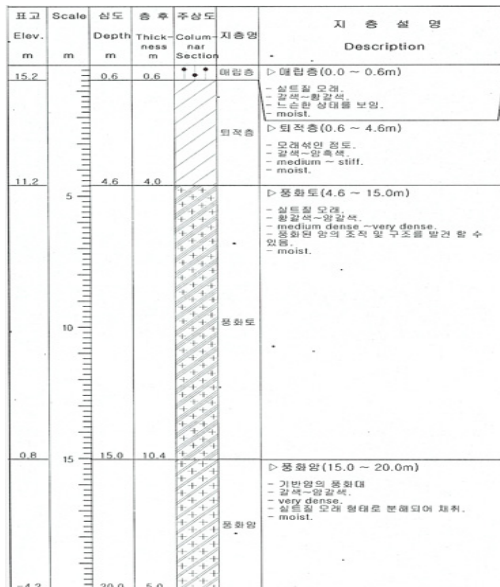


그림 12. 현장시험장 주상도

표 3. 펄스방전 확공형 앵커 시공 조건

공법	구근 갯수	방전 전압	방전 횟수	시공 수량
일반앵커	x	x	x	3
펄스앵커	1	4kv	20	2
			5	3
		5kv	10	3
			20	3
			40	3
			5	3
		7kv	10	3
			20	3
			40	2
			2	5kv
10×2	3			
20×2	4			
구근확인용	1	5kv	10	x
계				38

3.1 현장시험

펄스방전 확공형 앵커 시공은 일반 앵커 시공 공정에서 추가로 펄스방전 공정이 삽입된다. 시공은 ① 케이싱 천공 → ② 케이싱 일부 인발(3m) → ③ 선단파이프와 주입관 삽입 → ④ 주입관으로 1차 그라우트 주입 → ⑤ 펄스방전 및 확공 → ⑥ 선단파이프 인발 → ⑦ 앵커체 삽입 → ⑧ 2차 그라우트 주입 → ⑨ 케이싱 인발 제거 → ⑩ 긴장 순으로 이루어진다.

시공에 있어 기존 펄스방전 현장 타설 말뚝과의 가장 큰 차이점은 시공 시간 단축을 위하여 케이블 보호를 위하여 사용되던 로드파이프(Ø48.6, steel)를 2m단위로 조립 하였으나, 선단 4m를 제외한 나머지 부분에서 제거함으로써 조립 및 분해에 소요되던 약 10여분의 시간을 단축하였다. 케이블 보호 및 선단으로의 누수 방지를 위하여 열수축 튜브를 활용하였다.

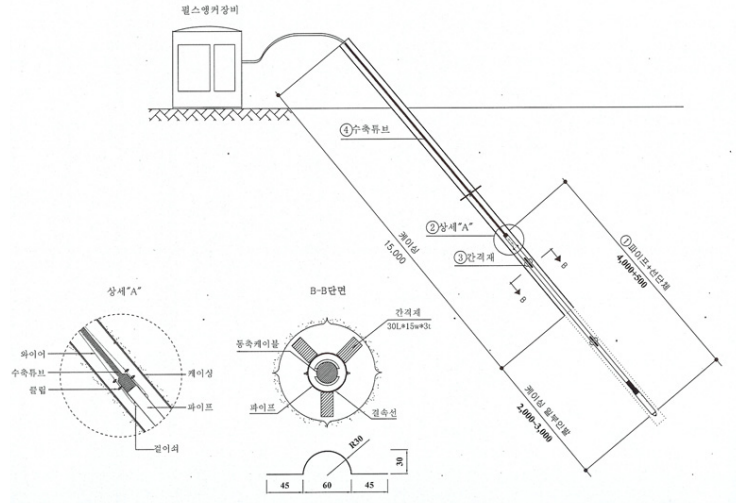


그림 13. 펄스방전 앵커 정착부 확공 공정 상세도

3.2 현장시험 결과 분석

개발된 앵커 정착부 펄스방전 확공 장치를 실제 현장에 적용하여 그 시공성과 극한인발력 테스트를 통하여 인발력 상승의 정도를 확인하였다. 먼저 시공성에서는 기존 로드파이프를 제거함으로써 시공 시간을 상당 부분 단축할 수 있었다. 하지만 방전 선단을 삽입하는 공정에서 케이블의 강성만으로는 삽입이 잘 이루어지지 않아 주입관(XL-Pipe)과 함께 삽입하였다. 또한 방전 후 선단 제거 시 인력만으로는 불가능하여 와이어(Ø6)를 선단에 결속하여 천공장비를 이용해 제거하였다.

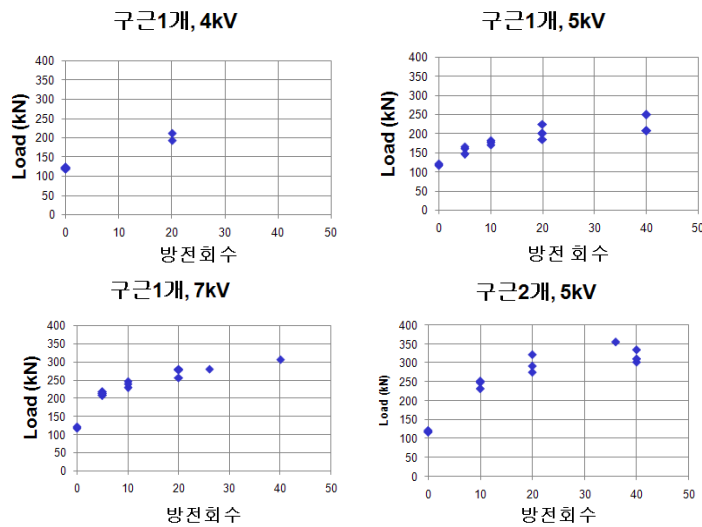


그림 14. 방전회수 및 전압에 따른 극한 인발력

그림에서 방전에 따른 인발력 상승 효과를 확인할 수 있으며, 그 효과는 최대 3배 정도의 상승효과를 나타내었다. 앞선 실내 방전 압력 실험 결과 전압이 높아짐에 따라 선단에서의 방전 압력도 비례하여 증가하는 것을 확인 하였으나 실제 지반에서의 확공에 따른 극한인발력은 전압에 의한 변화보다는 횡수나 구근의 개수의 증가에 더 큰 인발력 상승의 효과를 나타냄을 볼 수 있다. 또한 방전횟수가 20회가 넘어가면 인발력의 상승이 미비한 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연구개발 중인 펄스방전 확공형 앵커공법용 시공장비 중 앵커 정착부 확공장치의 성능과 실제 현장 시험을 통한 적용성을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펄스발생장치의 충전전압별 발생 압력은 4kV에서 최대 3Mpa, 5kV에서 최대 4Mpa, 7kV에서 최대 8Mpa이다. 충전 전압에 비례하여 발생하는 압력이 증가한다. 따라서 다양한 지반 조건에 따라 적절한 압력을 설정하여 확공을 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이는 직경 250mm의 챔버에서의 결과로 앵커의 직경은 이 보다 작아 보다 높은 압력이 천공홀 벽면에 작용할 것이다.
2. 펄스방전을 이용한 확공 공정 시 기존 케이블 보호를 위해 사용하던 로드파이프를 제거함으로써 시공 획기적인 시공 시간의 단축 효과를 볼 수 있었다. 하지만 방전 선단의 삽입 및 제거가 용이하지 못하여 XL-Pipe와 와이어를 이용하여 문제를 해결하였다.
3. 극한인발력 테스트 결과 펄스방전을 이용한 확공으로 인하여 일반 앵커에 비하여 최대 3배 이상의 인발력 상승 효과를 확인하였다.
4. 극한인발력의 증가는 충전전압의 증가 보다는 방전횟수와 구근 개수에 증가에 보다 높은 효과를 보이며, 같은 방전횟수에서 구근 개수를 증가시킴으로 탁월한 인발력 상승을 확인할 수 있었다.
5. 본 현장과 같은 풍화토 지반에서의 펄스방전은 5kV로 구근을 2개로하여 각각 10회, 총 20회의 방전이 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업 건설핵심기술연구개발사업 자유공모과제(C106A1000012-06A06001211) 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. (주)세원리타, 지에스이앤씨(주), (주)대우건설 (2006), “펄스방전기술과 강성체 철근망 및 고강도 모르타르를 사용한 소구경 현장타설 말뚝공법”.(신기술 지정 제 512 호)
2. 윤수동, 신병우(2007), “인발력 증대를 위한 앵커 정착부 확공장치 연구”, 한국구조물 진단학회 2007년도 봄 학술발표 논문집, pp305-310
3. 김낙경, 김성규(2001), ‘압축형 그라운드앵커의 개발 및 성능평가’, 한국지반공학회 2001년 봄 학술발표회 논문집, pp339-346
4. 석영철(1998), “영구앵커의 인발특성에 관한연구”, 한양대학교 사업대학원 석사학위논문, pp2-1
5. Ground Anchor 기술협회(日)1996, “그라운드 앵커공법 설계 시공지침”, 그라운드앵커 기술협회(日)편