

Development of Novel Joint Device for a Disposal Canister in Deep Borehole Disposal

고준위폐기물 심부시추공 처분을 위한 처분용기 접속장치의 개발

Minsoo LEE*, Jongyoul LEE, and Sung-Hoon JI

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

이민수*, 이종열, 지성훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received March 19, 2018 / Revised April 17, 2018 / Approved May 2, 2018)

In this study, to replace the ‘J-slot joint’, a joint device between a disposal canister and an emplacement jig in Deep Borehole Disposal process, a novel joint device was designed and tested. The novel joint device was composed of a wedge on top of a disposal canister and a hook box at the end of a winch system. The designed joint device had merits in that it can recombine an emplaced canister freely without the replacement of the joint component. Moreover, it can be applied to various emplacement jigs such as drill pipes, wire-lines, and coiled tubing. To demonstrate the designed joint device, the joint device (Φ 110 mm, H 148 mm), a twin canister string (Φ 140 mm, H 1,105 mm), and a water tube (Φ 150 mm, H 1,500 mm) as a borehole model were manufactured at 1/3 scale. As deployment muds, Na-type bentonite (MX-80) and Ca-type (GJ II) bentonite muds were prepared at solid contents of 7wt% and 28wt%, respectively. The manufactured joint device showed good performance in pure water and viscous muds, with an operation speed of $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. It was concluded that the newly developed joint device can be used for the emplacement and retrieval of a deep disposal canister, below 3~5 km, in the future.

Keywords: Deep borehole disposal, Emplacement method, Joint device, Deployment mud

*Corresponding Author.

Minsoo LEE, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: minm@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2081

ORCID

Minsoo LEE <http://orcid.org/0000-0001-7928-2415>

Jongyoul LEE <http://orcid.org/0000-0001-8482-9008>

Sung-Hoon JI <http://orcid.org/0000-0002-2506-4049>

심부시추공 처분에서 정치기구와 처분용기 사이를 연결하는 'J-slot joint' 를 대체할 수 있는 새로운 접속장치를 개발하고자 하였다. 새로운 접속장치는 처분용기 쪽의 빼기와 이를 체결할 수 있는 정치기구 쪽의 빼기집으로 구성되었다. 새로운 접속장치는 부품교체 없이도 체결과 분리가 자유롭고, Drill pipe 외에도 Wire-line이나 Coiled tubing 등의 정치기구와도 연결이 가능한 장점을 갖추었다. 새로운 접속장치의 실증을 위해, 1/3 크기로 새로운 접속장치(ϕ 110 mm, H 148 mm), 처분용기 2단 행렬(ϕ 140 mm, H 1,105 mm), 그리고 모의 시험공(ϕ 150 mm, H 1,500 mm)을 설계 및 제작하였다. 새로운 접속장치의 실증시험용 머드로는 Na형 벤토나이트(MX-80)와 Ca형 벤토나이트(GJ-II)를 고형분 함량 7wt% 및 29wt%로 각각 제조하여 사용하였다. 실증시험 결과, 새로운 접속장치는 벤토나이트 머드와 순수 조건에 대해 $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 속도에서 무리없이 작동하였다. 결론적으로, 심부시추공 처분을 위한 새로운 처분용기 접속장치는 정치와 회수를 위한 접속장치로 향후 유용하게 활용될 수 있다고 보았다.

중심단어: 심부시추공 처분, 정치방안, 접속장치, 정치용 머드

1. 서론

현재 대부분의 국내 가압경수로(PWR) 사용후핵연료는 발전소 내 습식 저장조에 보관되고 있으며, 발열량이 낮은 가압중수로(CANDU) 사용후핵연료는 습식 저장 후에 건식저장을 하고 있다. 저장 중인 사용후핵연료는 관리 감독 하에서 보관되고 있으며, 누출사고의 위험을 최소화 하고 있다. 그러나 지상에 장기간 보관하는 방법은 지진이나 쓰나미와 같은 불가항력적인 자연재해, 혹은 테러나 관리부재와 같은 인위적 위해에는 취약할 수 밖에 없다. 이러한 사용후핵연료의 지상보관 위험성은 후쿠시마 사고나 체르노빌 사고의 예에서 잘 드러난다. 하지만 심지층에 사용후핵연료를 처분하면 예기치 않은 사고로 방사성 물질이 지하로 누출되더라도, 지하 암반을 통과하여 지상에 도달하기 위해서는 오랜 기간이 걸리기 때문에, 인간 생활권에 미치는 위험을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 현재 사용후핵연료나 고준위폐기물을 심지층에 처분하려는 연구가 많은 나라에서 진행되고 있다. 특히 최근에는 지하 500 m보다 더 깊은 3~5 km에 이르는 심부시추공에 사용후핵연료를 처분하려는 연구가 국내외적으로 진행되고 있으며, 국내에서는 한국원자력연구원을 중심으로 초보적인 기술검토가 진행 중에 있다[1-4]. 심부시추공 처분에 주목하는 이유는, 처분 심도가 깊을수록 누출된 방사성 핵종이 지상으로 나오는 시간이 더욱 오래 걸리며, 인간에 미치는 영향이 감소될 가능성이 높기 때문이다.

심부시추공 처분공정은 시추공 굴착, 처분용기 정치,

그리고 시추공 밀봉의 3단계로 구성되며, 아직 기술적으로 완벽히 실증되어 있지 않지만, 현대 기술로 충분히 실현 가능할 것으로 보고 있다. 실제로 3~5 km에 이르는 심부시추공을 굴착한 사례는 세계적으로 많이 있다[2, 3]. 하지만 시추공 처분에 적합한, 적어도 1개 PWR 집합체를 적재한 처분용기를 내릴 수 있는 구경 50 cm 이상의 시추공 굴착 경험은 없다. 장심도 굴착기술과 달리, 심부시추공에 처분용기를 안정적으로 내리는 정치 작업은 실제 수행경험이 없고, 기술적으로도 해결해야 할 점이 많다. 처분용기를 심부에 내리는 정치기구로는 석유시추 산업에서 널리 사용되는 Drill pipe와 J-slot Joint 조합이 알려져 있다[5, 6]. 굴착용 Drill pipe 말단에 부착된 J-slot joint 접속장치를 이용하여 처분용기를 결속한 후, 시추공 바닥으로 처분용기를 내리고, 접속장치만 다시 회수하는 방식이다. Drill pipe는 느리고 매우 무겁기 때문에, Coiled tubing나 Wireline 등과 같이 가볍고 빠른 정치기구도 제안되고 있다[7, 8]. 또 다른 획기적인 정치법으로 처분용기를 시추공 아래로 자유낙하 시키는 Free-drop도 언급되고 있다[9, 10]. Free-drop은 처분용기의 위치를 정확하게 파악하기 힘들고, 하강 시 조정이 불가능하기 때문에 크게 주목 받고 있지 않다.

처분용기와 정치기구를 연결하는 J-slot Joint 접속장치는 석유시추 분야에서 Drill pipe에 적합하도록 개발된 것이기 때문에 Wireline이나 Coiled tubing과 같은 다른 정치구에 사용할 수는 없다. 또한 J-slot joint는 단발성 작동 밖에 할 수 없기에, 다시 처분용기를 회수하기 위해서는 지상으로

올려서 회수용 부품으로 교체해야 한다. 이에 J-slot joint 접속장치의 단점을 극복할 수 있는, 심부시추공 처분에 적합한 새로운 접속장치의 개발이 필요하였다. 본 연구에서는 처분 공정 효율과 안전성을 높이기 위하여 처분용기를 심부시추공에 정치한 후, 지상에서 장비를 교체하지 않고도 바로 처분용기를 다시 체결할 수 있는, 심부시추공 처분에 적합한 접속장치를 개발하고자 하였다. 또한 개발한 접속장치는 Drill pipe 외에도 Wire-line이나 Coiled tubing 등의 다양한 정치기구와도 연결이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 새로운 접속장치의 성능시험을 위하여, 실제 심부시추공 처분환경과 유사하게 소규모 목업 환경을 조성하였다. 이를 위하여 접속장치 외에도 시추공을 모사한 원통 수조와 소형 시추공 처분용기를 함께 제작하였다. 그리고 시추공에 들어가는 정치용 머드로는 Na형 와이오밍(MX-80) 벤토나이트와 Ca형 경주(GJ) 벤토나이트 2가지로 제조하여 접속장치의 성능시험에 적용하였다. 본문에서는 새로운 접속장치의 설계와 제작, 그리고 성능시험과 그 결과에 대해 기술하였다.

2. 선행 연구

2.1 정치 방안

심부시추공 처분은 한번에 1개 처분용기부터 최대 40개 처분용기 행렬까지 시추공 하부로 내리는 방안이 검토되고 있다[11-16]. 처분용기를 내리는 정치 방법으로는 한 개 혹은 소수의 처분용기를 Coiled tubing으로 내리는 방법, 한 개의 처분용기를 Wireline으로 내리는 방법, Drill pipe로 다수의 처분용기 행렬을 내리는 방법, 그리고 시추공으로 한 개의 처분용기를 Free drop시키는 방법 등이 제안되고 있다.

Coiled tubing은 최근 석유시추산업에서 점차 빠르게 발전되고 있는 정치장치이다. 최근에는 전기 신호선을 부착하여, 신호의 송수신과 연결/해제 명령이 가능하도록 하고 있다. Drill pipe에 비해 소규모이고, 유지 및 운영비가 저렴한 장점이 있다[7, 16]. Wireline은 유압식 크레인을 이용하여 비교적 작은 규모로 운영이 가능하며, 빠른 속도로 내릴 수 있는 장점이 있다. 하지만 내릴 수 있는 하중 제약이 커서, 한 번에 한두 개의 처분용기만 내리기에 적합하다[11].

Drill pipe는 석유산업에서 사용하는 가장 일반적인 정치기구이다. 고하중의 처분용기 행렬을 운영할 수 있으며, 안전성과 신뢰성도 우수하다[6, 7]. 단점으로는 거대한 지상장비와 넓은 부지를 필요로 한다. Free drop은 이론적으로 제시된 정치 방법이다[9, 15]. 신속하고 매우 경제적인 정치방법이지만, 처분구간에 처분용기가 쌓일수록 하부에 큰 부하를 주게 되므로, 시추공 내 일정 구간 마다 지지층(bridging)을 설치할 필요가 있으며, 이를 위해서는 결국 설치기구가 직접 심부로 내려갈 필요가 있어 보인다.

열거된 정치방법들은 정치속도와 경제성에서 각기 장단점이 있다. Drill pipe는 다수의 처분용기 행렬을 한번에 정치할 수 있지만 속도가 느리고 회당 비용이 많이 든다. 반면 가벼운 Wireline이나 Coiled tubing은 속도가 빠르고 회당 비용은 줄어들지만, 시추공당 정치 횟수는 늘어난다. 한편 Free-drop은 경제성이나 처리능력면에서 매우 우수하지만, 하강용기의 조정과 시추공에 내려진 용기의 위치파악이 힘들다는 단점이 있다[15, 16].

2.2 정치공정에서의 고려사항

시추공 정치공정에서 처분용기를 결정하기 위해서는 한번에 내릴 처분용기의 수량과 행렬무게, 처분구간에서의 예상온도, 사용할 정치기구의 종류 등을 고려해야 한다. 일반적으로 처분 용기는 행렬당 처분용기의 개수, 하강 속도, 정치 구간에서의 작업시간, 정치기구의 회수시간, 그리고 다음 정치작업을 위한 지상 작업시간 등에 의해 결정된다[11]. 그러나 실제 심부시추공 처분에서는 외부적 운영제약과 작업 안전을 고려하여 하루 1회의 정치 작업이 예상된다. 따라서 정치 효율을 높이기 위해, 일회의 정치작업에 다수의 처분용기를 정치하거나[17], 최대 40개의 처분용기 행렬을 정치하는 방안이 제시되었다[18]. 미국 샌디아 국립연구소에서 제안한 40개의 처분용기 행렬(약 200 m 길이)의 무게는 약 70 ton에 달한다. 그리고 5 km 처분구간을 내려가는 Drill pipe 자체 무게도 300 ton 이상으로 상당하다[7].

처분용기의 최대 하강속도는 중력에 의한 자유낙하 속도 이상은 내기 힘들다. 실제 유체로 가득 찬 시추공을 단면적이 조금 작은 처분용기가 내려가게 되면, 하강 속도는 공벽과의 유격에 따른 유체역학의 영향을 받는다. 만약 시추공의 구경을 키워서 공벽과의 간극을 넓힌다면 정치 속도를 올릴 수

있고, 선형성 확보가 쉬워 처분용기가 공벽에 고착될 위험도 줄어든다. 하지만 시추공 직경이 커지면 굴착 비용이 상승할 것이다. 이상적인 처분용기와 공벽과의 간극으로 0.02~0.03 m로 보고 있다[17].

2.3 정치 중 사고

정치 작업에서 일어날 수 있는 사고의 종류에는 처분용기의 시추공 추락, 처분용기의 하강 중의 공벽 고착, 그리고 정치기구의 파단으로 인한 추락 등이 있을 수 있다. 이 중에서 확률적으로 가장 많이 우려되는 것은 처분용기가 처분구역에 도달하지 못하고 공벽에 고착되는 것이다. 이 경우 고비용으로 마련한 시추공을 포기해야 할 수도 있다. 이러한 고착 위험을 줄이는 방법은 안내용 케이싱을 모든 시추공 구간에 설치하는 것이다. 케이싱은 암벽과 처분용기의 충돌을 피하고, 예기치 않은 암벽의 박리에도 대처할 수 있게 한다. 한편, 긴 처분행렬의 경우, 시추공의 선형성과 공벽 간극유지가 사고예방을 위해 중요하다.

2.4 J-slot joint와 자유낙하

석유 및 지열 개발에서 가장 널리 사용되는 Drill pipe와 J-slot joint 조합은 심부 시추공 처분에서도 유력하게 거론되는 정치방안이다[4-6]. 일찍이 SKB에서 심지층 처분의 대안 개념으로 장심도 시추공처분의 공학적 가능성을 조사하였으며, 이때 처분용기를 내리고, 회수하는 방안으로 J-slot joint 방식을 고려하였다[5]. SKB가 고려한 Drill pipe와 J-slot joint는 고하중의 처분행렬을 안정적으로 내릴 수 있는 장점과, 정치 속도가 느린 단점이 함께 거론되었다. J-slot joint의 접속 해제 시 시추공 바닥에 도착하게 되면, 처분용기 위로 Drill pipe 무게가 가해져 Shear pin이 깨지면서 잠금 고리(collet)가 열리는 방식이다. 정치된 처분용기회수는 동일한 Drill pipe에 회수용 J-slot/collet joint로 교체하면 가능하다. 단, 회수 시에는 Drill pipe의 무게를 세심하게 조정하여, J-slot joint 내의 shear pin이 깨지지 않도록 해야 할 것이다[5].

자유낙하는 J-slot joint와 반대되는 무결속 정치법이다. 자유낙하 공정은 지상에서 Drill pipe의 연장 작업이 필요 없고, Drill pipe를 지탱하는 거대한 기중기도 필요 없으므로, 작업 경비와 시간을 대폭 줄일 수 있다. 처분용기는 표면에

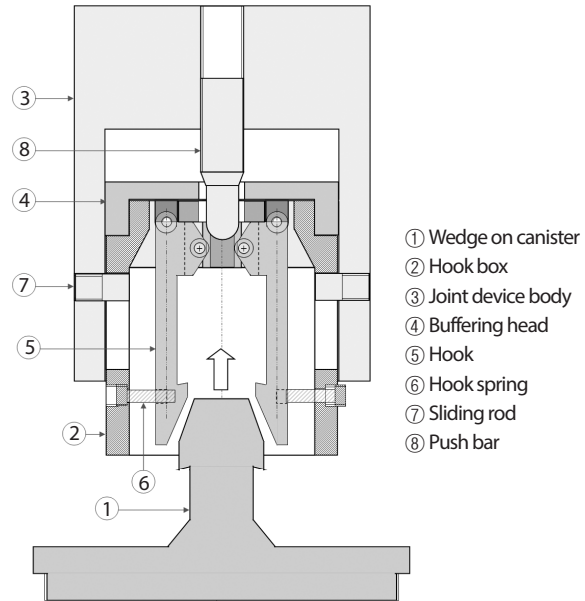


Fig. 1. Schematic drawing of the novel joint device.

공벽과의 마찰을 피하기 위해 가이드 핀을 붙일 수도 있다. 처분용기가 하강하면, 이에 상응하는 양의 유체가 올라와야 하기 때문에 처분용기와 공벽과의 간극이 넓지 않다면, 낙하속도는 많이 제약된다. E. A. Bates [9]는 시추공의 유체를 120℃의 순수로 가정하여 낙하속도를 계산하였으며, Closed boundary에서 처분용기 최대 낙하속도가 약 2.6 m·s⁻¹ 정도 일 것이라 예측하였다. 심부시추공 처분용기는 심부의 높은 수압, 약 57 MPa를 견디도록 설계되기 때문에[6], 이 정도의 낙하 충격은 충분히 견딜 수 있을 것으로 판단된다.

2.5 정치용 머드

일반적으로 장심도 시추공 굴착에는 머드가 사용된다. 밀도와 점도가 높은 벤토나이트 머드는 고속으로 회전하는 드릴 비트를 냉각시켜주고, 파쇄석을 지상으로 밀어 올리는 역할을 한다[4]. 따라서 굴착용 머드는 굴착 작업에서 발생하는 높은 Shear rate에 적합한 점성을 갖도록 배합되어 있다 [19]. 시추공 굴착이 종료되면, 시추공 벽면에 케이싱을 전개하기 전에, 굴착용 머드에서 정치용 머드로 교체될 것이다. 고점성의 머드는 처분용기가 바닥에 내려올 때, 부력을 주어 정치 라인에 걸린 인장력을 줄이는 역할을 한다. 또한

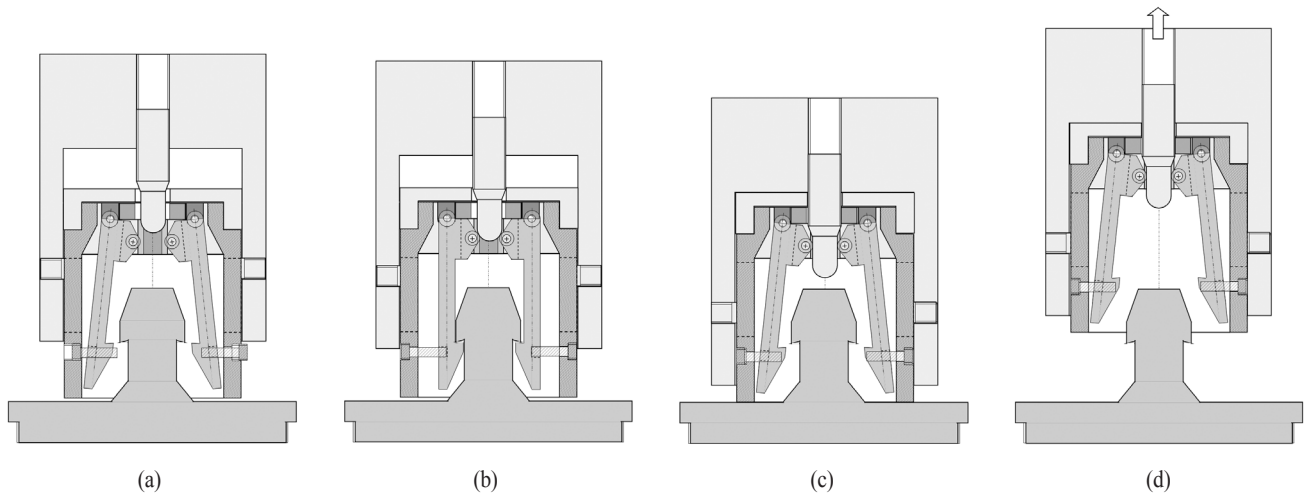


Fig. 2. Operation procedure of the novel joint device.

쇄석이나 낙하물에 의한 충격 시, 하부용기의 충격을 줄이는 완충 역할도 한다. 그리고 시추공의 폐쇄 후에는 누출 핵종의 이동을 어렵게 하는 역할도 한다. 정치용 머드는 고점성이 양호하며, 처분용기가 손상되지 않고 밀치고 들어갈 정도면 된다고 보고 있다[5]. 하지만 심부시추공 처분이 수행된 사례가 없기 때문에 정치용 머드의 특성에 대해 구체적으로 보고된 사례는 없다. 예상컨대, 벤토나이트의 유연학적 특성으로 볼 때, 높은 고형비의 정치용 머드는 처분구간에서 정제된 겔 상태로 있을 것으로 본다. 따라서 처분용기가 겔 상태의 정치용 머드를 밀치고 자리를 잡는 과정에서 Shear thinning에 의한 머드의 점도 감소가 예상된다[20].

3. 설계와 제작

3.1 설계

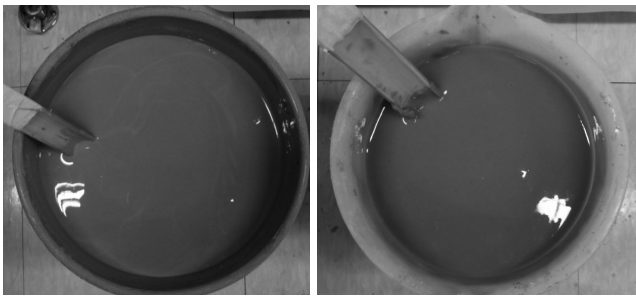
정치기구와 처분용기를 연결하는 새로운 접속장치를 설계하고자 하였다. 신규 접속장치의 설계에서 고려한 사항은 1)해제와 접속 용이성, 2)기계적 작동, 그리고 3)다양한 정치기구와의 연결성이었다. 이 세가지를 충족시킬 수 있도록 새로운 작동방식의 접속장치를 고안하였다. 새로운 접속장치는 시추공 바닥에 도착하면 Shear pin이 깨지는 J-slot joint 개방방식과 달리, 처분용기를 잡고 있는 쐐기걸이가

벌어지도록 하여 연결이 해제되는 방식을 적용하였다. Fig. 1에 고안된 접속장치의 구조를 나타내었다. ①은 처분용기 상단에 고정되는 쐐기(wedge)이다. ②는 쐐기걸이(hook)가 들어가는 쐐기걸이 집(hook box)으로 상하이동이 가능하다. 하강 시에는 쐐기에 걸린 하중에 의해 아래로 처져 있다가, 바닥에 도착하면 접속장치 내부로 올라간다. ③은 접속장치 몸체(joint device body)이다. ④는 완충용 머리(buffering head)이며 피스톤 역할을 한다. ⑤는 쐐기걸이(hook)이며, ⑥의 스프링(hook spring)으로 쐐기를 강하게 물도록 되어 있다. ⑦은 연결봉(sliding rod)으로 접속장치 몸체에 고정되어, 쐐기걸이 집의 상하 이동 범위를 한정한다. ⑧은 누름봉(push bar)이며 시추공 바닥에 도착하면, 쐐기걸이 상부의 피벗지레를 눌러서 쐐기걸이를 열어준다. 접속장치가 다시 상승하면, 누름봉도 함께 올라가고 쐐기걸이는 닫힌다.

새로운 접속장치의 구체적인 작동방식을 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 지상에서 처분용기 상단의 쐐기를 쐐기걸이 집에 밀어 넣어 체결하고(Fig. 2(a)), 처분용기 행렬은 심부시추공의 지하 처분구역으로 하강한다(Fig. 2(b)). 처분구역에 처분용기 행렬이 도달하면, 쐐기걸이 집이 접속장치 몸체 내부로 밀려 올라가면서 쐐기걸이가 벌어져 체결이 이완되고(Fig. 2(c)), 접속장치만 지상으로 상승시킨다(Fig. 2(d)). 처분구역에 정지된 처분용기 행렬을 회수하는 경우에도 동일한 공정을 거쳐 회수가 가능하도록 개념을 설정하였다. 한편, 접속장치의 상승 시, 쐐기걸이 집이 열려 있는



Fig. 3. Compartments (joint body, hook box, and hook) and the assembly of the novel joint device.



(a) Ca type GJ-II (b) Na type MX-80

Fig. 4. Top view of two different bentonite muds after 1 day mixing.

시간은 누름봉이 췌기걸이를 누르고 있는 시간에 비례하게 된다. 따라서 누름 시간은 누름 봉의 길이를 조절함으로써 조절이 가능하다.

3.2 제작

본 연구에서 개발된 접속장치의 성능을 평가하기 위하여, 실제 예상되는 심부시추공 규모의 약 1/3 크기로 신규 접속장치를 제작하였다. 신규 접속장치는 설계에 따라서 STS316 스테인리스강을 사용하여 실제 시추공에 적용되는 장치의 1/3 규모로 제작되었다. 제작된 크기는 직경 110 mm, 길이 약 148 mm 이었다(Fig. 3). 제작된 접속장치의 순수 무게는 약 8.7 kg이며, 상단에 i-bolt를 부착하여 인양용 호이스트에 연결할 수 있도록 하였다.

접속장치의 시험을 위한 모의 시험공은 직경 170 mm(내경 150 mm)의 투명 아크릴 파이프로 제작하였다. 모의 시험공은 처분용기 2단 행렬 및 접속장치 전체가 충분히 잠길 수

Table 1. Specific gravity & solid content of two bentonite muds

Type of Bentonite	Na type MX-80	Ca type GJ-II
Specific Gravity (g·ml ⁻¹)	1.05	1.20
Solid Content (wt%)	7.0	28.0

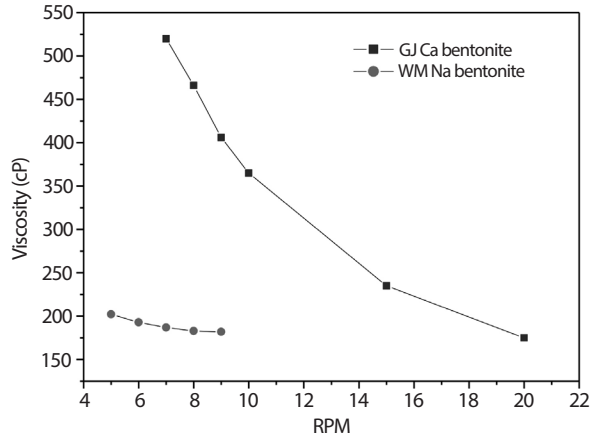


Fig. 5. Viscosity change of Na-type & Ca-type bentonite muds with the increase of the shear rate.

있도록 높이 약 1.5 m의 원통형 수조로 제작되었다.

시험공 정착을 위한 소형 처분용기를 STS304 스테인리스 상용압력관 (STS304 125A Sch,20)을 사용하여 2단 행렬로 제작하였다. 단일 시험용기의 크기는 외경 140 mm, 높이 538 mm이며, 무게는 약 10.6 kg이었다. 2단 행렬의 전체 길이는 약 1,105 mm 이며, thread 방식으로 직렬 연결되었다. 2단 행렬 상단에는 접속을 위한 췌기가 장착되었으며, 췌기의 무게는 약 1.3 kg이었다.

3.3 머드 배합비

시험용 정착용 머드 재료로 Na형 벤토나이트(MX-80)와 Ca형 경주 벤토나이트(GJ-II) 두 가지로 정하였다. 시추공 처분이 실시된 사례가 없어, 팽윤지수 측정에서 얻어지는 벤토나이트 팽윤물의 함수비로부터 정착용 머드의 함수비를 결정하였다. 상온 25℃에서 순수 약 35 ml를 넣은 시험관에 Ca 경주 벤토나이트 6.83 g, 그리고 Na 벤토나이트(MX-80)의

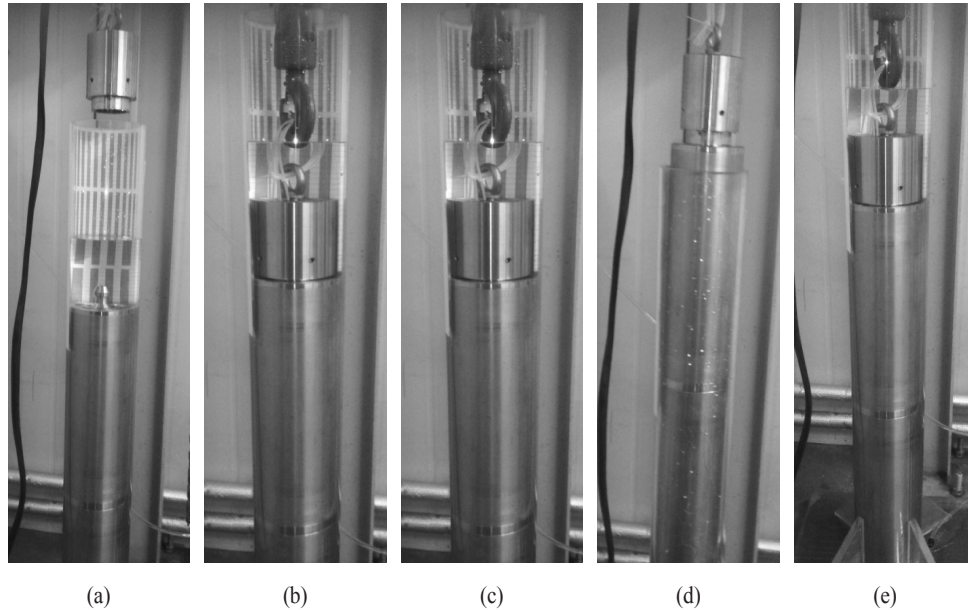


Fig. 6. Demonstration of the novel emplacement joint for deep borehole disposal; (a) Joint descending & Locking, (b) Degasing, (c) Slow Lifting, (d) Parade descending, and (e) Fast lifting with unlocking.

경우에는 2.04 g을 0.1 g 단위로 천천히 뿌려서, 자연 가라앉기를 반복하며, 장시간에 걸쳐 투여하였다. 하루가 지난 후 가라앉은 벤토나이트의 팽윤부피를 측정한 결과, Na형 벤토나이트의 팽윤지수는 27.5 ml/2g로서, Ca형 벤토나이트의 팽윤지수 5.6 ml/2g 보다 약 5배 높은 팽윤도를 나타내었다. 가라앉은 벤토나이트 고형분만 채취하여, 110℃에서 24시간 건조하였다. 이렇게 얻어진 Na형 벤토나이트의 고형물 함량은 약 7.0wt%이었으며, Ca형 경우 벤토나이트는 약 29.4wt%로 측정되었다.

4. 실험

접속 장치의 성능평가는 순수로 채워진 시험공과 실제 처분환경과 유사하게 벤토나이트 머드로 채워진 시험공 2가지 환경에서 실시되었다.

4.1 정치용 머드

벤토나이트 팽윤물의 고형비를 기준으로, Na형과 Ca형 정치용 머드를 다음과 같이 순수와 섞어 제조하였다. Na형

벤토나이트는 450 g을 증류수와 혼합하여 약 5,000 ml의 정치용 머드를 만들었으며, Ca형 경우 벤토나이트는 3,300 g을 증류수와 혼합하여 약 5,000 ml의 정치용 머드를 만들었다. 한편, Ca형 머드는 진흙 상태가 되어, 흐를 수 있도록 증류수를 더 추가하였다. 배합된 2종의 머드는 물과 충분한 평형상태가 되도록 일주일간 숙성하였다. 숙성 기간 중에도 머드 층은 전혀 순수와 층분리가 되지 않았으며, 균질한 머드 상태를 유지하였다(Fig. 4).

배합된 머드 2종에 대해 측정된 비중과 고형분 함량을 Table 1에 나타내었다. Na형 벤토나이트는 증류수보다 5% 높은 비중을 보였으며, Ca형 벤토나이트는 약 20% 더 높은 비중을 나타내었으며, Ca형이 Na형 머드보다 4배가 높은 고형분 함량을 갖고 있었다.

Na형 및 Ca형 머드에 대해 Brookfield viscometer (Brookfield DV-III Ultra V6.1 LV, Spindle SC4-21)로 25℃에서 Shear rate을 20 rpm까지 증가시키며 Kinetic viscosity를 측정하였다. 2종의 머드에 대해 측정된 Shear rate (rpm)에 따른 점도 변화(cP)를 Fig. 5에 나타내었다. 낮은 Shear rate에서는 고형분 함량이 높은 Ca형의 점도가 높지만, Shear rate이 올라가면서 Na형과 Ca형 모두 약 150~200 cP 내외의 비슷한 점도로 감소되었다.

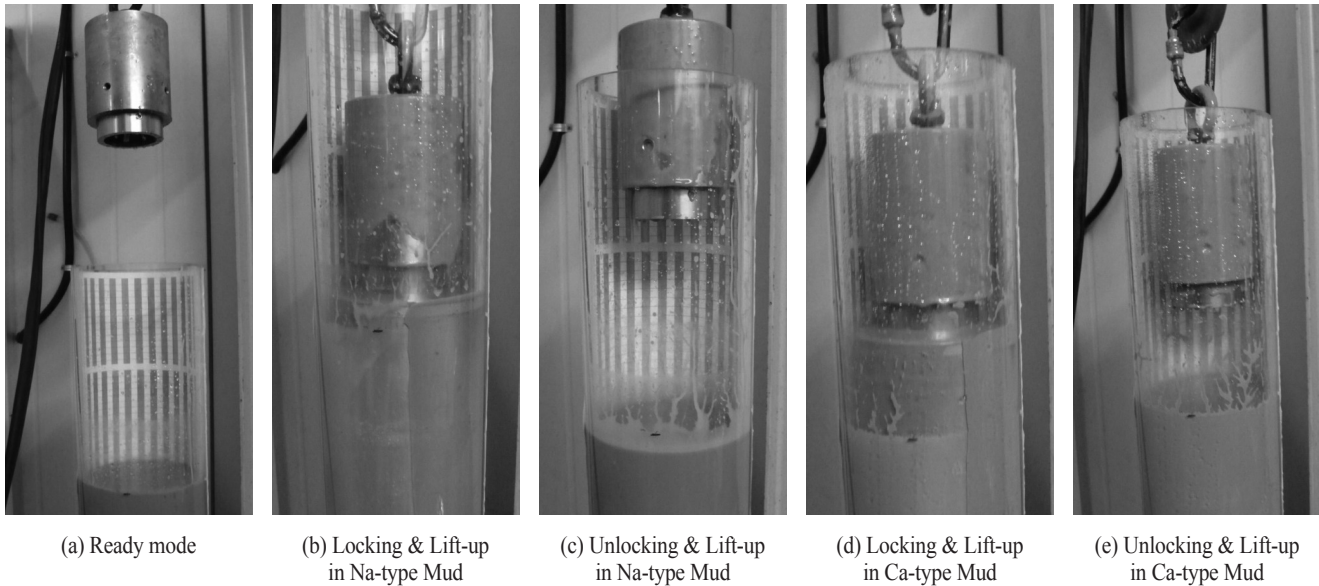


Fig. 7. Demonstration of the novel emplacement joint in Na-type & Ca-type bentonite mud.

이상과 같이 2가지 머드 특성을 분석한 결과, Na형 머드 보다는 Ca형 머드가 정치용 머드에 적합하다고 보았다. 왜냐 하면 첫째, 비중이 15% 가량 더 높아서, 낙하하는 처분용기에 대하여 보다 높은 부력이 작용하여 충격을 줄이는 데 유리하며, 둘째, 정치 종료 후에는 빠르게 겔화가 진행되어 처분용기를 고정시키는 능력이 좋다고 판단되었기 때문이다. 한편, Na형 머드는 적은 양으로도 점성 머드를 형성할 수 있고 흐름성이 좋기 때문에, 소모량이 많은 굴착용 머드에 적합하다고 할 수 있다. 실제 시추공 굴착에서는 Na형의 MX-80이 널리 사용되고 있다[21].

4.2 정치 시험

먼저 순수로 채워진 모의 시험공을 대상으로 신규 접속장치의 실증 시험을 실시하였다. 소형 크레인 하부에 모의 시험공을 설치하고, 처분용기 2단 행렬을 삽입하였다. 처분용기 내부는 물로 채워 넣었으며, 2단 행렬의 전체 무게는 약 35 kg 이었다. 모의 시험공에 약 5.0 L의 물을 채워, 2단 행렬과 접속장치가 충분히 물속에 잠기는 수위를 유지하였다. 신규 접속장치는 i-bolt를 이용하여 크레인 호이스트(극동 호이스트, 모델 KD-2, 최대용량 2 ton)에 연결하였다. 접속장치의

정치 성능시험은 다음의 5개 과정으로 호이스트의 상하운동만으로 진행하였다.

접속장치 성능확인을 위해 수행된 5개 정치 동작 모습을 Fig. 6에 나타내었다. 접속장치를 수중으로 내려서 처분용기 행렬 상단의 썬기와 결합하고(Fig. 6(a)), 접속장치를 상하로 짧게 움직여 접속장치 내부의 잔류 공기를 제거하였으며(Fig. 6(b)), 호이스트를 느리게 상승시켜, 접속 장치와 행렬을 인양을 확인하고(Fig. 6(c)), 호이스트를 다시 내려서 접속 장치와 행렬을 다시 수조 바닥에 정치시킨 후(Fig. 6(d)), 마지막으로 호이스트로 빠르게($10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) 올려 접속장치와 행렬을 분리하였다(Fig. 6(e)).

순수 중 신규 접속장치에 의한 정치시험은 정상적으로 수행되었다. 하지만, 접속장치 직경($\phi 110 \text{ mm}$)이 시험공 직경($\phi 150 \text{ mm}$)보다 작아서 가끔 처분용기($\phi 140 \text{ mm}$) 중심에 맞지 않아 결합되지 않는 경우가 있었다. 이러한 문제는 접속장치 직경을 처분용기 직경과 비슷하게 제작한다면 해결될 것으로 보았다.

다음에는 점성 머드에서의 접속장치 작동을 시험하였다. 수조의 물을 하부 Drain으로 모두 빼내고, 준비된 Na형 벤토나이트 머드 약 5.0 L를 채워 넣었다. 정치시험은 순수 조건과 동일한 방식으로 진행되었다. 앞서 5개 과정으로 접속장치의

작동을 점검한 결과, 정치기구는 Na형 벤토나이트 머드에서도 무리 없이 작동하였다(Fig. 7(a)-7(c)). Na형 벤토나이트 머드 시험 후, 순수로 수조 내부와 처분 행렬 외면을 깨끗이 세척하였다. 그리고 수조에 Ca형 벤토나이트 머드 약 5.0 L를 채워 넣고, 동일한 방법으로 접속장치의 작동을 시험하였다. 그 결과, 접속장치는 Ca형 벤토나이트 머드에서도 무리 없이 작동하였다(Fig. 7(d)-7(e)).

이상으로 순수와 머드에서의 접속장치 작동 실증시험을 통해 신규 접속장치는 처분용기를 심부시추공의 처분구역으로 내려서 분리하고, 다시 필요에 따라 회수를 위하여 접속하는데 전혀 문제가 없음을 축소규모 실증시험으로 확인하였다.

5. 결론

심부 시추공처분에서 처분용기를 정치시키는 기존 접속장치로 고려되는 J-slot joint는 Drill Pipe 외에 Wireline이나 Coiled tubing과 같은 다른 정치기구에는 사용하기 힘들며, 분리 후에는 다시 체결할 수 없는 단발성 작동 밖에 할 수 없는 단점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 심부시추공 처분에 어울리는 새로운 정치용 접속장치를 본 연구에서 개발하였다. 새로운 접속장치는 처분용기 상단에 부착된 썸과 이를 결속하는 정치기구 말단의 썸기집 구조로 구성하였다. 제안된 접속장치는 Drill pipe, Wireline, 그리고 Cable tubing 등의 정치기구에 모두 사용할 수 있으면서, 전기/전자적 구동이 아닌 단순한 기계동작으로 처분용기 분리와 연결이 자유롭게 설계되었다. 제안된 접속장치의 성능평가를 위해, 실제 심부시추공의 약 1/3 규모로 시험용 처분용기 2단 행렬(Φ 140 mm, H 1,105 mm), 접속 장치(Φ 110 mm, H 148 mm), 그리고 시험용 원통 수조(Φ 150 mm, H 1,500 mm)를 제작하였다. 그리고 정치용 머드의 배합비는 팽윤지수 측정을 통해 결정하고, Ca형 벤토나이트의 경우 고형비 28%, Na형 벤토나이트의 경우 고형비 7%로 제조하였다. 제작된 접속장치는 순수, 그리고 점성의 Na형 및 Ca형 벤토나이트 머드 환경에서 이완 속도 10 m·min⁻¹ 조건에서 무리 없이 처분용기를 체결하고 분리하는 것을 실증 실험으로 확인하였다.

이상으로 본 연구에서 개발한 신규 접속장치를 심부시추공 처분 시, 처분용기 행렬을 정치하고 회수하는데 충분히

활용할 수 있다고 결론 내렸다. 또한 본 연구에서 제시된 정치용 머드의 특성치는 향후 정치용 머드 개발에 필요한 기초 자료로 사용 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분지질환경 진화모델 개발(NRF- 2017M2A8A5014 858)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] K.S. Kim, D.K. Cho, S.H. Ji, J.S. Kim, and J.W. Choi, State-of-the-Art Report on the Very Deep Borehole Disposal Concept for High-level Radioactive Waste, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/AR-929/2012 (2012).
- [2] J.Y. Lee, I.Y. Kim, H.J. Choi, D.K. Cho, and M.S. Lee, Establishment of a deep borehole disposal concept for the highly heat-generating radioactive wastes as an alternative concept, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-7015/ 2017 (2017).
- [3] M.S. Lee, J.Y. Lee, and H.J. Choi, Evaluation of Silicon Carbide (SiC) as for a Deep Borehole Disposal Canister, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-6907/2017 (2017).
- [4] H.I. Yoon and S.J. Lee, An Analysis on the Application of Deep borehole Drilling Technology, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/CM-2184/2015 (2015).
- [5] T. Harrison, Very deep borehole; Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report, R-00-35 (2000).
- [6] B.W. Arnold, P.V. Brady, S.J. Bauer, C. Herrick, S. Pye, and J. Finger, Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive

- Waste, Sandia National Laboratory Report, SAND2011-6749 (2011).
- [7] E. Hardin, L. Price, and R. Mackinnon, Deep Borehole Disposal Engineering, Sandia National Laboratory Presentation, SAND2015-2867C (2015).
- [8] P.V. Brady, G.A. Freeze, K.L. Kuhlman, E.L. Hardin, D.C. Sassani, and R.J. Mackinnon, "DEEP BOREHOLE DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE", in: Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste, J.H. Ahn and M. Apte, 2nd Edition, Chapter X (2016).
- [9] E.A. Bates, "A drop-in concept for deep borehole canister emplacement", S.B. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering, May (2011).
- [10] C.L. Hoag, "Canister Design for Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste", S.B. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and Engineering, May (2006).
- [11] A.J. Beswick, F.G.F. Gibb, and K.P. Travis, "Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, ICE Paper 1300016 (2013).
- [12] J. Beswick, Status of Technology for Deep Borehole Disposal, EPS International for the Nuclear Decommissioning Authority Report, NP. 01185 UK (2008).
- [13] F.G.F. Gibb, "An International Perspective on Deep Borehole Disposal", US NWTRB Workshop, Washington DC (2015).
- [14] A.C. Afghoul, S. Amaravadi, and A. Boumali, "Coiled tubing: the next generation", Oilfield Review, 16(1), 38-57 (2004).
- [15] E.A. Bates, M.J. Driscoll, and J. Buongiorno, "Drop-In Concept for Deep Borehole Canister Emplacement" Proc. of the 13th International high-Level Radioactive Waste Management Conference. Albuquerque, NM, April 10-14, American Nuclear Society, Chicago (2011).
- [16] E.A. Bates, "Optimization of deep boreholes for disposal of high-level nuclear waste", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Nuclear Science and Engineering (2015).
- [17] F.G.F. Gibb, B.E. Burakov, and K.J. Taylor, "The 'granite encapsulation' route to the safe disposal of Pu and other actinides", Journal of Nuclear Materials, 374(3), 364-369 (2008).
- [18] B.W. Arnold, P.V. Brady, and S.J. Bauer, Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratory Report, SAND 2011-6749, Albuquerque, NM, USA (2011).
- [19] A Layman's Guide to Clean Water : "Bentonite Properties Are Unique. Bentonite is An Aluminum Silicate Clay That Is Used to Make Drilling Fluid in the Process of Mud Rotary Drilling of Water Wells", Accessed Jan. 30 2018. Available from: <http://www.clean-water-for-laymen.com/bentonite-properties.html>.
- [20] S. Jalal, Nov 24, 2012, "Drilling fluids", Accessed Jan. 30 2018. Available from: <https://www.slideshare.net/sehamjalal/drilling-fluids>.
- [21] W.M. Sutherland, Wyoming Bentonite, Wyoming State Geological Survey Summary Report, September (2014).