

이산화탄소 지중저장용 파일럿 주입플랜트 개발

윤석호, 김 영, 이정호, 이공훈[†]
한국기계연구원 열공정극한기술연구소

Development of Pilot Injection Plant for CO₂ Underground Storage

Seok-Ho Yoon, Young Kim, Jun-Ho Lee, Kong-Hoon Lee[†]

Department of Extreme Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials,
Daejeon 305-343, Korea

(Received April 24, 2013; revision received May 2, 2013)

초 록 : 이산화탄소로 대표되는 온실가스 저감이 세계적인 이슈가 됨에 따라, 이산화탄소 포집 및 저장(CCS: Carbon Capture & Storage)에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 연간 1만 톤급 이산화탄소의 지중저장용 파일럿 주입플랜트를 개발하였다. 주입플랜트의 핵심 구성품은 액상 이산화탄소를 주입조건으로 가압하는 가압펌프, 가압펌프 입구조건 확보를 위한 부스터 펌프, 초임계 상태로 이산화탄소를 승온시키는 인라인 히터 등이 있다. 개발된 구성품들을 바탕으로 전체 주입시스템을 설계, 제작하였다. 제작된 시스템의 시운전을 통하여, 인버터 조절에 따른 압력상승, 펌프 모터 회전수와 주입밸브 제어를 통한 주입압력 유지, PID 제어를 통한 온도확보가 적절히 이루어짐을 확인하였다. 전체 소비 전력은 2,000 ~ 2,500 W로, 가압펌프의 소비전력이 75% 이상을 차지하였다. 본 이산화탄소 주입용 파일럿 플랜트는 향후 온실가스 저감 사업에 유일한 국산화 기기로서 다양하게 활용될 것으로 예상된다.

ABSTRACT : The worldwide issue of greenhouse gas reduction has recently drawn great attention to carbon capture and storage(CCS). In this study, we developed a 10,000 ton/year pilot injection plant for geological storage of carbon dioxide. Major components of the pilot plant include a pressure pump, a booster pump, and an inline heater to bring liquid carbon dioxide into its supercritical state. The test results show that the pilot plant readily achieves the injection pressure and temperature, showing satisfactory control performance. The overall power consumption is 2,000 ~ 2,500 W, more than 75% of which consumed by the pressure pump. This study will facilitate varied research on greenhouse gas reduction as the only domestically developed system for geological injection.

Key words : carbon capture and storage(이산화탄소 포집 및 저장), underground injection(지중주입), geological storage(지중저장)

- 기호설명 -

W : 전력량 (W)

P : 압력 (bar)

T : 온도 (°C)

m : 유량 (kg/min)

1. 서 론

온실가스 저감에 대하여 환경보전 자체에 대한 노력과 탄소배출권 거래제 등 경제적인 이해관계로 인해 각국에서 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 온실가스로 대표적 인 이산화탄소의 처리를 위한 기술적 해결방안은 포집 후 화학적 처리 또는 격리 등의 방안으로 구분할 수 있는

[†] Corresponding author
2012 Korea Institute of Plant Engineering & Construction
E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

이산화탄소 지중저장용 파일렛 주입플랜트 개발

데 본 연구에서는 격리(sequestration) 방안의 하나인 지중저장(geological storage) 방법에 대해 주안점을 두고, 액화되어 수송된 이산화탄소를 초임계화하여 주입정(wellhead)을 통해 지중으로 주입하는 설비를 개발하고자 하였다. 일정 규모 이상의 주입설비는 제어, 모니터링 기능이 모두 포함된 플랜트로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 연간 10,000톤 내외의 주입용량을 갖는 파일렛급의 플랜트를 개발하였다. 개발된 파일렛 플랜트는 현장 설치가 용이한 이동형으로 단일 플랫폼 상에, 초임계화를 위한 라인히터, 주입을 위한 가압펌프, 제어를 위한 계장 및 소프트웨어가 모두 통합된 패키지 형태이다.

2. 본 론

2.1 지중주입 시스템 설계 및 제작

Fig. 1에 파일렛급 이산화탄소 지중주입 설비의 개념도를 나타내었다. 이산화탄소 지중주입 설비의 용량은 실증 주입 이전 단계인 파일렛급으로 연간 10,000톤 규모의 이산화탄소 주입능력을 가진 시스템으로 설계를 하였다. 파일렛급 시스템은 고정된 주입정이 아닌 시험용 주입정을 이동하면서 사용하여야 하기 때문에 이동식 패키지로 설계하였으며, 이 때문에 공급되는 이산화탄소 역시 이동식 탱크로리에서 액상으로 공급받아 90 bar, 35℃의 초임계 상태로 이산화탄소를 주입하도록 설계하였다. 일반적으로 이산화탄소 주입공은 인가와 격리된 오지인 경우가 많기 때문에 5톤 이내의 무게로 이동식 트럭에 탑재하

여 현장까지 이동하며, 현장에서 수평을 맞출 수 있는 프레임 위에 방수 가능한 시험설비를 탑재하는 것으로 구상하였다. 전원은 이동식 발전차에서 공급받을 수 있도록 주입설비 역시 단일 전원으로 설계하였다.

Fig. 2에 파일렛급 이산화탄소 지중주입 설비의 평면도를 나타내었다. 주입설비는 탱크로리의 액상 이산화탄소를 받아서 실제 주입조건으로 이산화탄소를 가압하는 가압펌프, 가압펌프 입구에서 캐비테이션(cavitation)을 방지하기 위해 과냉상태로 만들어주는 부스터 펌프(booster pump)와, 초임계 상태로 이산화탄소를 가열하여 승온시키는 인라인 히터(inline heater)가 핵심 구성 부품이다. 부스터 펌프는 회전수 조절을 하지 않고 등속으로 운전시키며, 이 부스터 펌프에서 약 1 bar의 가압이 이루어진다. 가압펌프는 4단 터빈펌프이며, 각 단에서 약 20 bar의 가압이 이루어지므로 전체적으로 80 bar의 가압이 이루어진다. 인버터를 이용하여 모터의 회전수를 조절하도록 설치하였으며, 정격회전수는 1,800 rpm이다. 주입압력이 너무 높으면 인버터를 통하여 모터 회전수를 감소시키고, 주입압력이 설정압력보다 낮으면 회전수를 증가시켜 주입압력을 일정하게 유지한다. 인라인 히터는 약 7 kW의 카트리지 히터를 고압용기 내에 삽입하여 주입되는 이산화탄소의 온도를 순간적으로 가열하도록 설계되었다. 내부에 유동회전기(swirl)를 장착하여 짧은 길이의 고압용기 내에서 충분히 가열되어 초임계 상태에 도달하도록 하고, 주입온도를 일정하게 제어하기 위하여 PID 제어를 설치하여 히터용량을 가변시켰다. 주입압력이 100 bar 부근이므로 배관은 sch80의 SUS tube를

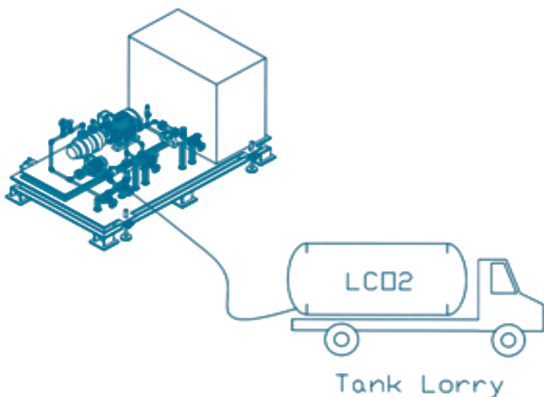


Fig. 1 Concept diagram of CO₂ injection system

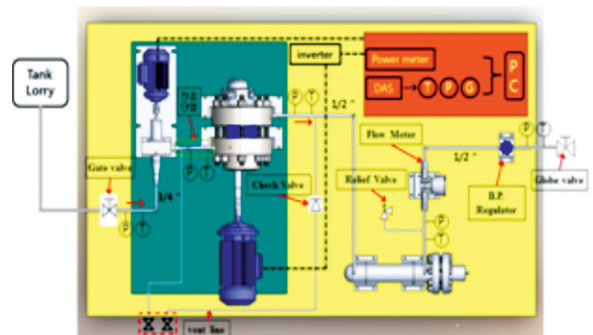


Fig. 2 Schematic diagram of CO₂ injection system



Fig. 3 Pilot-scale CO₂ injection system

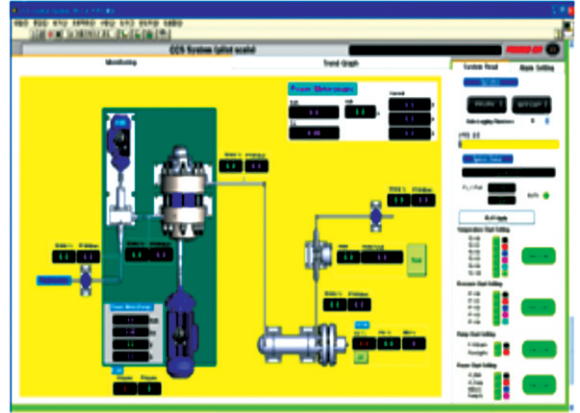


Fig. 4 Screenshot of control program

사용하였으며, 플렌지는 1,500 lb를 사용하였다.

밸브는 유량조절이 필요한 위치에는 글로브 밸브 (globe type)를, 차단이 필요한 위치에는 게이트 밸브 (gate type)를 설치하였다. 주요 밸브 이외에 초기 운전 시 공기를 배기(vent)하기 위한 밸브와 운전 후 드레인 (drain)을 위한 밸브를 추가하였다. 고압부에는 급작스런 압력의 상승으로 인한 배관 파열의 위험을 방지하기 위해 안전밸브(safety relief valve)를 설치하였으며, 배관압력이 100 bar를 넘을 경우 작동하도록 설정하였다.

각 기기의 제어는 PLC를 통해 PC로 제어하도록 하였다. 중요기기의 제어와 획득한 데이터의 기록 역시 모두 PC로 수행하였다. 설비제어 프로그램은 NI사의 Labview 소프트웨어를 이용하여 제작하였다. Fig. 3은 직접 제작한 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설비제어 기기이며, Fig. 4는 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설비제어 프로그램의 스크린샷이다. 제어 프로그램은 부스터 펌프의 on-off 제어, 가압펌프의 회전수 제어, 인라인 히터의 on-off 제어 및 설정온도 입력을 수행하며, 각 측정점에서 계측된 온도, 압력, 유량의 시간에 따른 변화량을 그래프로 표시하며 디지털화하여 저장한다

2.2 지중주입 시스템의 시운전

본 연구에서 제작된 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설비의 시운전 수행 결과를 Fig. 5 ~ 7에 나타내었다. 시

운전은 물을 이용하여 수행하였으며, 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설비가 주입온도 및 압력을 적절히 제어할 수 있는지, 그에 따른 주입유량 변화는 어떻게 되는지 관찰하였다. 초기에 시스템상 모든 배관 내부의 공기를 배출(vent)시키고, 부스터 펌프를 먼저 작동시켜 가압펌프 입구조건을 형성시킨 후, 가압펌프의 회전수를 서서히 증가시켜 정격회전수인 1,800 rpm까지 상승시켰다. 유량이 안정적으로 형성되면 인라인 히터를 작동시켜 주입 온도를 조절하였으며, 본 시운전에서는 주입환경을 모사하기 위해 주입구 측에 압력 손실을 발생시키는 밸브를 설치하여 밸브 개도를 조절함으로써 시스템 주입압력을 생성하였다. Fig. 5에 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설

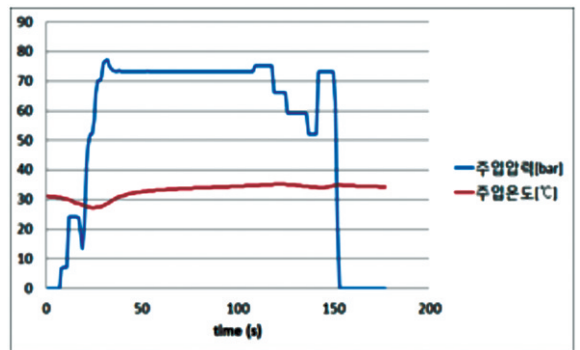


Fig. 5 Injection pressure and temperature during pilot test of injection system

이산화탄소 지중저장용 파일럿 주입플랜트 개발

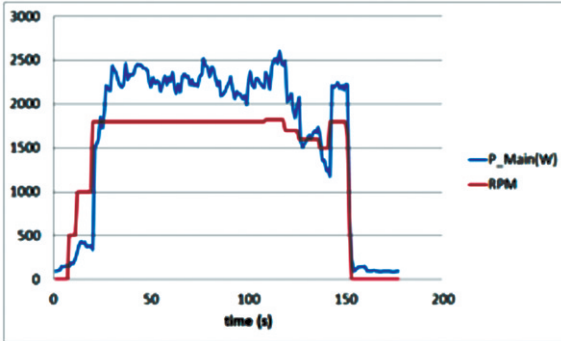


Fig. 6 Power consumption and RPM of main pump during pilot test of injection system

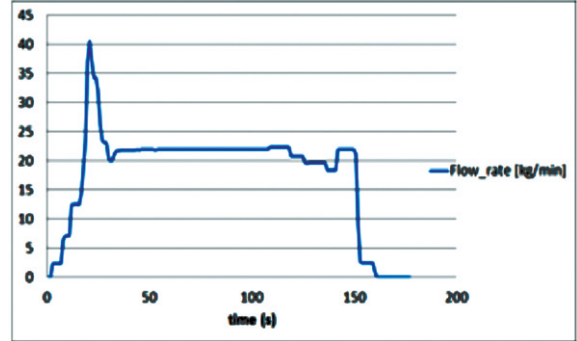


Fig. 7 Injection flow rate during pilot test of the injection system

비 시운전 온도 및 압력 변화를 나타내었다.

인버터 조절에 따른 가압펌프 회전수 증가에 따라 손쉽게 압력상승이 이루어졌으며, 펌프 모터 회전수와 주입 밸브 제어를 통하여 주입압력을 일정하게 유지할 수 있었다. 인라인 히터 역시 정확한 설정온도 제어성을 보여 주었으며, PID 제어를 통하여 신속하게 설정온도를 찾아가는 특성을 보였다. Fig. 6에는 파일럿급 설비의 시운전 시 가압펌프 회전수 변화에 따른 소비전력 변화를 나타내었다. 가압펌프의 소비전력이 전체 소비전력의 75% 이상을 차지하고 있으므로, 전체 소비전력이 가압펌프 회전수 변화를 추종하는 모습을 보였다. 인라인 히터에 의한 소비전력은 온도 상승폭 자체가 크지 않으므로 전체 소비전력에 비해 미미하게 측정되었다.

Fig. 7에는 파일럿급 이산화탄소 지중주입 설비의 주입유량 변화를 나타내었다. 초기 가압펌프 회전수 상승 시 주입유량의 오버슈트(overshoot) 현상이 관찰되었으나, 시스템이 안정된 이후에는 주입유량과 가압펌프 회전수가 거의 동일한 움직임을 보였다.

3. 결론

이산화탄소 지중저장을 위해서 주입용량 연간 10,000 톤급 파일럿 시스템을 개발하였다. 주입에 필요한 핵심 기자재인 가압펌프, 부스터 펌프, 인라인 히터를 개발하였고, 안정적으로 주입 플랜트를 제어 및 모니터링 할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 물을 이용한 시운전을 통하여 주입압력 및 온도, 유량이 설정값으로 적절히 제어

되는 것을 확인하였다. 본 이산화탄소 주입용 파일럿 플랜트는 향후 온실가스 저감 사업에 유일한 국산화 기기로서 다양하게 활용될 것으로 예상된다

후 기

본 연구는 산업기술연구협동사업인 “저탄소 녹색성장을 위한 CO₂ 지중주입시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Lee, J., Lee, K. H., Yoon, S. H., Kim, Y., and Kim, S. H., 2011, “Thermal Mixing characteristics of Line Heater through Swirl Flow”, KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 398–399.
2. Song, C. H., Yoon, S. H., and Lee, K. H., 2010, “Simulation and Experimental Study of Conditions of Storage Tank for CO₂ Sequestration”, KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 2748–2752.
3. Kim, Y., Lee, K. H., Yoon, S. H., Song, S. H., and Lee, J. H., 2010, “Simulation of a Wellbore Pipe in a Geological CO₂ Storage System”, KSME 2011 Spring Annual Meeting, pp. 307–308.