Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 15, No. 12 pp. 6973-6979, 2014

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.6973
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

SO_2 및 NO_2 포함 고압 CO_2 스트림이 인산염 코팅 CO_2 수송관 부식에 미치는 영향

조맹익[1], 강성길[1], 허철[2*], 백종화[1]
[1]한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양CCS연구단
[2]한국해양대학교 해양과학기술융합학과

Study of the corrosion effect of CO_2 stream with SO_2 and NO_2 on a phosphate coated steel tube

Meang-Ik Cho[1], Seong-Gil Kang[1], Cheol Huh[2*], Jong-Hwa Baek[1]
[1]Offshore CCS Research Unit, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Korea Institute of Ocean Science and Technology
[2]Ocean Science & Technology School, Korea Maritime and Ocean University

요 약 지구온난화 및 기후변화 대응기술로써 세계 각국은 CCS(이산화탄소 포집 및 저장)에 주목하고 있으며 관련 기술개발을 위해 노력하고 있다. CCS는 크게 포집, 수송, 저장 공정으로 이루어져 있으며, 이중 포집공정에서는 이산화탄소 외에 다양한 불순물이 불가피하게 유입될 수 있다. 본 연구에서는 SO_2 및 NO_2 가스와 수분이 포함된 CO_2 스트림이 CO_2 수송관 부식에 미치는 영향을 조사하기 위해 실험을 수행하였다. 시편은 인산염 코팅된 철관이며 내부에 SO_2, NO_2, H_2O 불순물이 혼합된 CO_2 스트림을 채우고 이를 100바, 29℃의 환경 하에서 부식특성 변화를 관찰하였다. 시편의 부식특성 변화를 관찰하기 위해 SEM촬영 및 EDS 측정 등을 진행하였다. 실험결과 SO_2나 NO_2가 주입된 모든 시편에서 한계용해도를 초과하지 않는 수분농도 조건 하에서도 부식이 발생하였으므로 불순물 농도를 엄격히 관리할 필요가 있는 것으로 나타났다. 다만 SO_2 및 NO_2와 같은 불순물이 존재하지 않는 상황에서는 한계용해도를 고려한 수분제어만으로 부식관리가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구결과에 근거하여 고압 CO_2 스트림 내 SO_2 및 NO_2의 농도는 각각 175ppm 및 65ppm 미만으로 유지할 것을 제안하는 바이다.

Abstract To mitigate global warming and climate change, many countries are investing massively on the development of CCS technology, which is assumed to be the key technology to reduce CO_2 emissions. CCS technology is comprised of the capture, transport, and storage processes. During the capture process, impurities other than CO_2 are inevitably flowed into the CO_2 stream. In the present study, corrosion characteristics of a phosphate coated tube for CO_2 transportation was investigated with a CO_2 stream composed of CO_2, H_2O, SO_2, and NO_2. The test specimen was a phosphate coated steel tube, which was filled with CO_2 stream with the impurities mentioned above. SEM-EDS analysis is conducted to investigate the corrosion behavior. The results showed that although the H2O concentration did not exceed the solubility limit, corrosion occurred in the specimen, which has an inflow of SO_2 or NO_2. This suggests that the SO_2, NO_2 and H_2O concentration should be strictly controlled. These results suggest that the SO_2 and NO_2 concentration should be controlled below 175ppm and 65ppm, respectively.

Key Words : Carbon dioxide Capture and Storage, Impurity, Corrosion, Transportation, CO_2 Stream

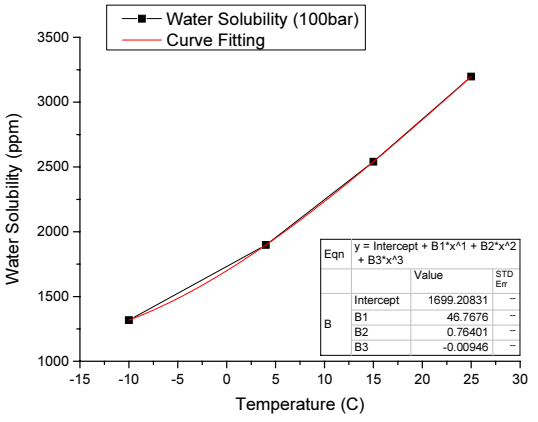
본 연구는 2014년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 "CO2 해양지중저장 기술개발"의 연구결과로 연구비 지원에 감사드립니다.
*Corresponding Author : Cheol Huh(Korea Maritime and Ocean Univ.)
Tel: +82-51-410-5247 email: cheolhuh@kmou.ac.kr
Received November 10, 2014 Revised November 25, 2014 Accepted December 11, 2014

1. 서 론

지구온난화와 이상기후현상 대응을 위해, 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 배출을 저감하기 위한 이산화탄소 포집 및 저장(이하 CCS: Carbon-dioxide Capture and Storage) 기술개발에 각국은 막대한 예산을 투자하고 있다. 우리나라는 2011년 기준 약 7억톤의 온실가스를 배출하였으며 이는 배출량 기준 전세계 8위에 해당한다[1]. 아울러 2011년 더반(Durban)에서 개최된 UN 기후변화 총회에서 2020년 이후 단일 법적체제 하에서 온실가스의 주요배출국은 온난화 억제정책을 취해야함을 의결하였으며, 이는 곧 2020년 이후 우리나라 또한 온실가스 의무감축국에 편입될 수 있음을 의미한다. 현재의 의무감축국들을 고려할 경우 우리나라는 세계 6위의 온실가스 배출국이며[1], 따라서 CCS와 같은 온실가스 감축기술의 중요성이 한층 높아지고 있다.

CCS는 제철소 및 발전소 등의 대규모 CO_2 배출원으로부터 포집된 이산화탄소를 압축, 탈수, 정제, 수송공정을 거쳐 땅속의 안전한 지질구조 내에 장기간 안정적으로 저장함으로써 이산화탄소를 대기로부터 격리시키는 기술이다. CCS 공정 중 포집된 이산화탄소에는 연소, 포집 공정에서 다양한 불순물들이 불가피하게 유입되게 되며, 대표적인 불순물로 N_2, O_2, Ar, H_2O, H_2S, SO_2, NO_2 등이 있다. 이러한 불순물들은 포집된 이산화탄소 혼합물(이하 CO_2 스트림)의 밀도, 점성 등의 물성을 변화시켜 압축효율, 유동양식천이, 압력강하량 등의 공정성능에 영향을 미치게 된다. 그중 H_2O, H_2S, SO_2, NO_2 등의 불순물이 포함될 경우 압축, 수송, 저장공정 상의 관내유체기기 및 수송관 내부에 부식을 일으킬 수 있다. 이러한 부식현상은 초기비용 및 운전비용의 상승을 불러오게 되며 기기이상 및 수송관 파열로 인한 운전 정지에 따른 손실 등의 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 CO_2 스트림 내 불순물로 인한 수송관내 부식에 관한 연구는 안전한 CCS 기술확보 및 CCS의 실증을 위해 반드시 필요하다고 할 수 있다. CO_2 수송관 관련 부식연구로는 Cole[2] 등이 과거의 수송관 부식 연구에 대해 리뷰형식으로 분석·정리한 바 있으며, 미래에 운영될 CCS 수송공정에서 발생될 것으로 예상되는 다양한 성분 및 조성비에서의 부식실험 데이터 확보를 위한 연구가 필요함을 제시한 바 있다. Moraes[3] 등은 석유회수증진 기법에 필요한 CO_2 수송 파이프라인에서의 탄산철 스케일 생성 및 이로 인한 부식방지효과를 실험적으로 분석한 바 있다. Cho[4] 등은 CO_2 수송관 관내부식 모의실험장치를 설계·제작하여 SO_2 불순물 및 수분이 포함된 환경 하에서의 관내 부식실험을 진행하여 시편표면을 관찰한 예비실험결과를 제시한 바 있다.

본 논문은 앞서 언급한 Cho[4]의 결과를 기반으로 추가연구를 수행하여 확장한 논문으로써 SO_2 뿐만 아니라 추가적으로 NO_2 불순물이 수송관 부식에 미치는 영향을 살펴보고 SEM(전자주사현미경) 촬영 및 EDS(X-선 분광분석) 측정결과를 분석함으로써 부식된 표면의 미세표면 형상 및 조성변화를 분석하여 관련 연구를 심화하고자 한다. 본 연구를 통해 CO_2 수송공정에 요구되는 H_2O, SO_2, NO_2 불순물 함량에 대한 기준 정보를 확보할 수 있으며, CO_2 스트림내 불순물의 허용한도는 다양한 CCS 공정의 설계기준으로 활용될 수 있다.



[Fig. 1] Water Solubility in pure CO_2 as a fuction of temperature at 100bar(extracted from Austegard et. al.[6])

2. 실험 조건 및 실험 방법

2.1 실험 조건

Austegard[5] 및 Visser[6] 등은 순수 CO_2 내 H_2O의 용해도를 측정한 결과를 제시한바 있다. 해당 연구결과로부터 온도변화에 따른 물의 용해도 곡선을 Fig. 1과 같이 추출하였으며 외삽법을 통해 유추해보면 압력 100bar 및 29℃에서 약 3467ppm의 한계용해도가 나타날 것으로 판단된다. 통상적으로 압축 및 냉각을 통해 기계적인 방

법으로 약 1500ppm 정도로 탈수 및 수분제어가 가능한 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 이러한 압축과정 중의 탈수로도 Austegard[5] 등이 제안한 한계용해도 이하로 수분제어가 가능할 것이므로 CO_2 수송관내 부식 문제는 상당부분 해소할 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 기계적인 수분제거 장치가 고장 나거나, 초기시동(Start-up) 및 긴급감압(Blow-out) 등의 비정상상태(Transient state) 시, 수분의 한계용해도 이상과 이하조건에서 SO_2, NO_2가 수송관의 부식에 미치는 영향을 실험적으로 분석하는데 목적이 있으며 이를 통해 앞서 언급된 상황 하에서 부식억제제 등의 필요여부를 알아보고자 하였다.

위 목적을 위해 본 연구에서 시편을 부식시키는데 필요한 작동유체의 조성조건(CO_2 내 H_2O, SO_2, NO_2 농도)을 Table 1에 나타내었다. 수분농도가 앞서 언급한 한계용해도 보다 높은 실험조건에서는 자유수분(Free Water)이 존재하여 부식을 가속화시키는 상황을 모사하였고 수분농도가 한계용해도 보다 작은 실험조건은 모든 수분이 CO_2 스트림에 용해되어 자유 수분이 존재하지 않음으로 인해 부식이 발생하지 않을 것으로 예측되는 상황을 모사하였다. 실험 시 관내 압력조건은 통상적인 CCS공정상 CO2 수송압력인 85bar이상 120bar이하의 사이에 위치하는 100bar로 설정하였으며 온도는 29℃로 유지하였다. 본 연구의 시편 부식실험기간은 총 7일이었다.

2.2 실험 시편

실험시편은 아연계 인산염 코팅된 철제 튜브이다. 아연계 인산염 피막은 타 망간 및 철계 인산염 코팅보다 우수한 내식성 을 가진 것으로 알려져 있으며 밀착성이 좋고 두꺼운 피막 두께 형성이 가능함에 따라 방청피막에 적합한 것으로 알려져 있다[8-10].

본 연구에 사용된 인산염 코팅관의 외경과 내경은 각각 12mm, 9mm이며 인산염 코팅의 두께는 25μm이다. Fig. 2는 시편의 사진으로써 각각의 시편을 살펴보면 한쪽 끝은 같은 재질 및 코팅의 플러깅 피팅으로 밀봉하였으며 반대편 끝은 압력센서 및 밸브로 마감되어있다. 시편에 포함된 코팅관, 피팅 및 밸브류는 조립 전, 알코올로 세척한 후, 건조되었으며 이물질 및 유분을 제거하였다.

[Fig. 2] Photograph of test specimen with installation of plug fitting, pressure gauge, and on/off valve

2.3 실험 절차

실험 절차는 다음과 같다. 먼저 고압 실험유체 주입 장치에 조립·완성된 실험시편을 연결한 후, 주입장치 및 시편 내부를 진공상태로 만든 뒤 약 2bar의 CO_2를 주입 후, 퍼지한 뒤 다시 진공상태로 만드는 작업을 수차례 진행하였다. 그 후 CO_2, NO_2, SO_2, H_2O 등의 작동유체를 순서대로 실험조건에 해당하는 양을 주입하였으며 마지막으로 시편의 밸브를 닫아 교반장치에 부착하였다. Fig.3은 본 연구에 사용된 교반장치로써 장착된 시편을 일정한 속도에 맞춰 앞뒤 30° 기울기로 시-소 운동함으로써 시편 내부의 작동유체가 한 곳에 고이지 않고 시편내부를 앞뒤로 유동할 수 있게 해주는 장치이다. 실험 시 작동주기는 왕복 1회 기준으로 분당 3회 움직이도록 하였다.

교반장치를 포함한 모든 시편 및 실험 장치의 외부조건은 별도의 온도제어실 내에서 앞서 언급한 실험 시 온도조건과 같은 29℃로 유지되었다.

[Table 1] H_2O, SO_2, and NO_2 concentration in each test specimen(100bar, 29℃)

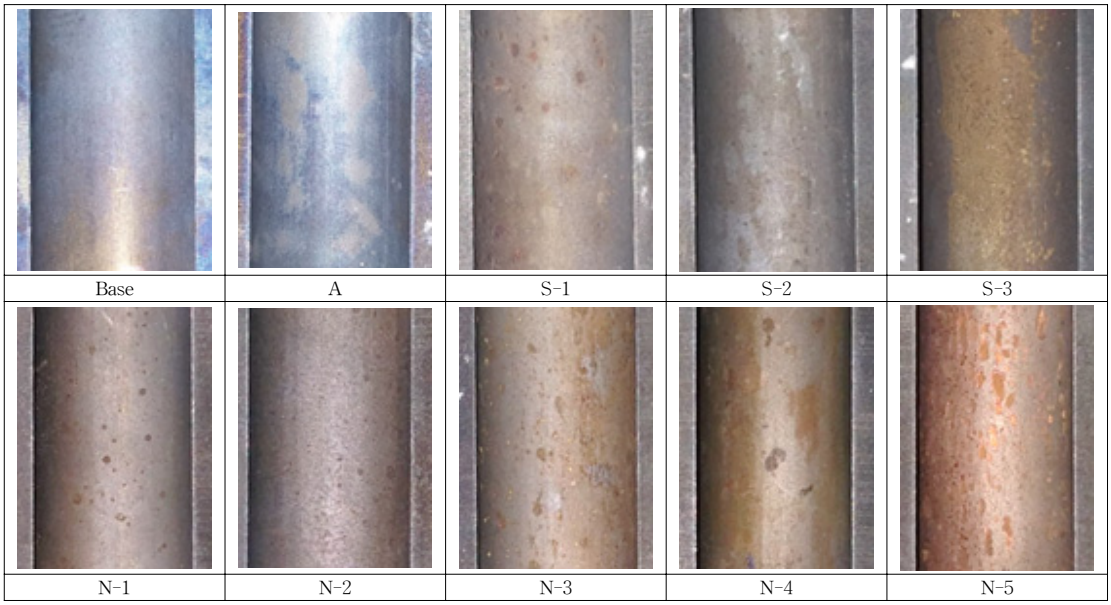
Sample Name	Base	A	S-1	S-2	S-3	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5
H_2O (ppm)	-	2500	2500	4500	4500	2500	2500	4500	4500	4500
SO_2 (ppm)	-	-	550	175	550	-	-	-	-	-
NO_2 (ppm)	-	-	-	-	-	65	130	65	130	519

[Fig. 3] Photograph of swing system for mixing test fluid inside specimen with moving specimen as clock and counter-clockwise alternately

3. 실험결과

앞서 서론에서 서술한 바와 같이 본 연구에서는 CO_2 내 수분의 한계용해도를 초과 또는 이하의 높은 수분 환경에서 SO_2 및 NO_2가 포함된 CO_2 스트림이 수송관 부식에 미치는 영향을 보고자 하였다.

먼저 샘플의 표면을 촬영한 결과(Fig. 4)를 살펴보면 SO_2 및 NO_2가 주입된 환경에서는 모두 부식이 일어났음을 알 수 있다. NO_2가 주입된 조건의 시편에서는 모두 공식형태의 부식이 일어났으며 이는 낮은 농도의 NO_2가 유입될 경우에도 국부부식이 발생할 수 있음을 의미한다. 국부부식이 발생할 경우, 표면적 전체의 부식량을 면적으로 나눈 평균 부식속도만으로는 수송관의 국부적인 부식에 의한 배관 파열 등을 예측할 수 없으며, 이러한 국부부식의 부식속도를 별도로 측정하거나 또는 방식공법 또는 부식방지제 등을 수송관 및 수송공정에 적용하는 등의 추가적인 사항을 고려해야 함을 의미한다. 또 다른 주목할 점으로는 N-1과 N-2의 경우 자유수분형태의 물이 생성되지 않는, 즉 CO_2 내 H_2O 한계용해도 미만의 조건임에도 불구하고 관내부식이 발생하였다. 이는 한계용해도 미만의 수분함량이 포함된다고 하더라도 부식이 발생할 수 있음을 의미한다. 다만 사진에서 볼 수 있듯이 수분이 보다 많이 포함된 케이스 N-3, N-4, N-5보다는 부식의 정도가 보다 낮음을 알 수 있다. 같은 수분함량이 포함된 N-1과 -N2 샘플을 비교해보면 공식부식이 일어나 반점형태의 국부부식이 일어난 흔적은 NO_2 농도가 낮은 N-1 케이스에 더 많은 개소가 관찰되었으나 N-2의 경우 표면 전체적으로 부식산화물이 더 많이 생성되었고 표면이 부식 후 N-1의 표면보다 거칠어진 것을 육안으로 관찰할 수 있었다. 수분이 한계용해도를 초과하여 주입된 N-3, N-4, N-5 샘플을 비교해보면 NO_2가 가장 많이

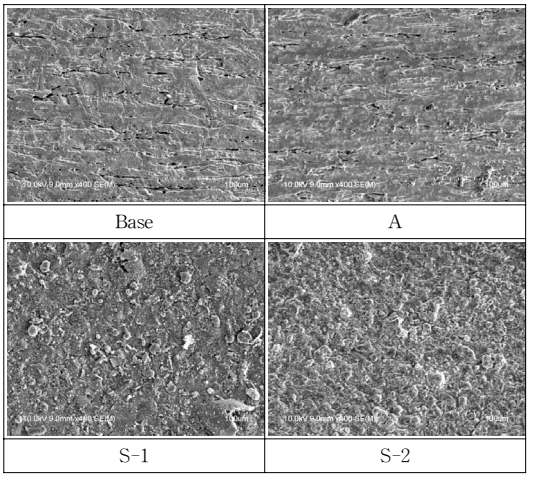


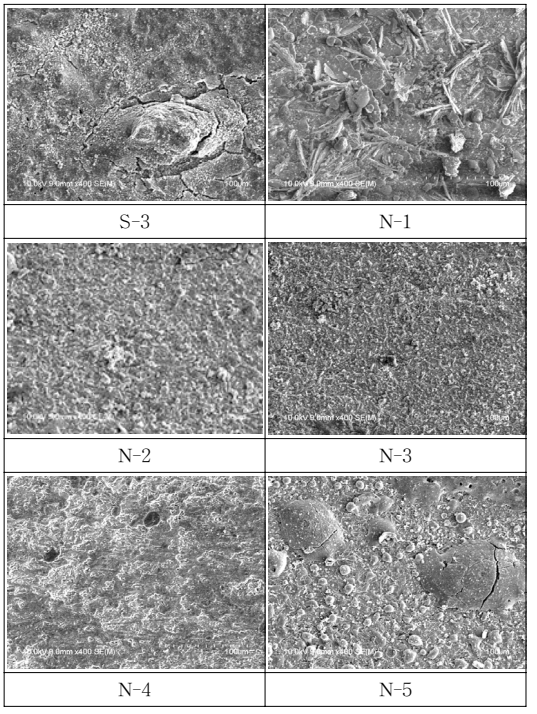
[Fig. 4] Photographs of specimen surface after corrosion test(except Base sample image which shows the sample image before corrosion test)

주입된 N-5의 부식이 전샘플을 통틀어서 가장 많이 부식되었음을 관찰할 수 있었다. 따라서 같은 수분 주입량에서는 NO_2의 농도가 높아짐에 따라 부식이 가속화되는 것으로 판단된다.

SO_2가 주입된 환경의 샘플을 살펴보면 S-1에서만 국부부식에 의한 공식부식이 나타났고 다른 케이스에서는 평활한 부식형태가 나타났다. 국부부식이 일어난 S-1의 경우에 있어서도 NO_2가 주입된 케이스들 보다는 반점의 개수가 작음을 알 수 있다. SO_2의 농도가 가장 낮은 S-2 시편의 경우 비록 작동유체 내 수분의 함량이 한계용해도를 초과한 조건이었음에도 불구하고 부식에 의한 얼룩이 표면에 나타나는 정도에 불과하였으며 여타 SO_2나 NO_2 불순물이 포함된 케이스들 보다는 부식의 정도가 낮은 것으로 판단된다. 수분의 함량이 한계용해도 이상인 S-2와 S-3를 비교해보면 SO_2의 농도가 더 높은 S-3의 표면에 부식산화물이 더욱 많이 생성되었으며 이는 앞선 NO_2 케이스들과 유사하게 같은 수분함량에서 NO_2가 주입된 양이 많을수록 더욱 부식이 가속화되는 것을 보여준 것과 비슷한 양상을 나타낸다고 할 수 있다.

전체적으로 SO_2가 포함된 케이스의 시편들은 비슷한 농도의 NO_2가 포함된 케이스들 보다 부식의 정도가 낮은 것으로 사료되며, 이는 CO_2 수송관 부식에 있어 NO_2의 유입농도에 좀더 유의해야하고 CO_2 수송관 운영 시 NO_2 농도를 상대적으로 엄격히 관리해야됨을 의미하는 것으로 판단된다.





[Fig. 5] SEM images for surface morphology analysis of each specimen

Fig. 5는 각 시편의 표면을 전자주사현미경을 통해 촬영한 사진이다. SO_2가 실험유체에 추가되어 부식실험이 진행된 샘플들을 살펴보면 모두 시편 표면이 부식산화물로 덮여있는 것을 알 수 있다. 특히 SO_2의 농도와 수분농도가 가장 높았던 S-3의 경우 코팅이 표면에서 박리하여 솟아오른 블리스터(Blister)가 생겼음을 알 수 있다. S-1과 S-2의 경우 블리스터가 관측되지 않아 코팅층이 모재로부터 박리되지는 않은 것으로 사료되나 코팅층에 미세크랙이 발생한 것을 알 수 있다. NO_2가 실험유체에 추가되어 부식된 샘플들을 살펴보면 전체적으로 평활한 부식이 발생한 것으로 관찰되었으나 SO_2가 추가된 시편과 마찬가지로 고농도의 NO_2와 높은 양의 수분이 주입된 N-5의 경우 코팅층이 솟아오른 블리스터가 관측되었으며 더불어 N-4와 N-5 시편 모두의 표면의 코팅층이 상당부분 이탈한 형상을 보여주고 있다. 따라서 고농도의 SO_2 또는 NO_2가 높은 수분함량과 함께 고압 CO_2에 포함되어있는 경우 국부적인 블리스터 생성과 함께 박리된 코팅 파티클에 의한 밸브 막힘, 유체기기 파손 등의 2차 피해가 발생할 수 있는 것으로 판단된다. 수분함량이 한계용해도 이하인 N-1 및 N-2와 수분함량이 한계용해도

이상이지만 NO_2 함량이 낮은 N3의 경우 크랙이 일부 관찰되고 표면적 전체에 걸쳐 부식산화물이 덮여있고 평활한 부식이 진행된 것으로 판단된다. 다만 수분의 함량이 최대용해도 이상이고 NO_2 농도가 130ppm인 N-4의 경우 N-5와 유사하게 코팅이 일부 탈락되고 코팅층이 전체적으로 평탄한 부식가 진행된 것으로 보아 부식 생성물로 인해 수송공정 내 유체기기에 문제가 발생할 수 있으므로 높은 수분함량과 더불어 130ppm이상의 NO_2 농도는 피해야 하는 것으로 판단된다.

한편 아래 Table 2의 EDS(X선 분광분석) 성분분석 결과를 살펴보면, 같은 수분함량 대비 SO_2나 NO_2의 양이 더 많이 주입된 실험샘플에서 산소의 비율이 더 높게 나타남을 알 수 있다. 즉 S-2와 S-3의 경우 수분의 함량은 같고 SO_2의 함량이 다른데, SO_2가 더 많이 주입된 S-3샘플에서 산소의 비율이 더 높게 나타나며 이는 N-1과 N-2를 비교할 경우와 N-3, N-4 및 N-5를 서로 비교할 경우에 있어서도 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이는 같은 수분함량 대비 SO_2나 NO_2 함량이 높을 경우 부식산화물이 더 많이 생성됨을 의미하는 것으로 판단된다. 특이점으로는 SO_2가 주입된 실험샘플에 있어 황(S) 원소가 검출되어 황화물이 생성되었음을 알 수 있다. 더불어 SO_2나 NO_2가 주입된 샘플의 경우 Zn이 검출되었으며 이는 SO_2나 NO_2가 본 연구의 시편 표면에 적용된 아연계열 인산염 코팅을 용출 또는 파괴시킴에 따른 것으로 판단되며 이는 인(P)원소 비율이 Base 샘플보다 높게나오는 것에도 영향을 미친 것으로 사료된다.

[Table 2] EDS ananlyses results on test specimen surface

	Atomic percentage(%)					
Sample Name	C	O	P	Fe	Zn	S
Base	32.99	14.45	0.72	51.84	-	-
A	43.23	17.03	0.66	39.07	-	-
S-1	32.88	47.51	3.26	10.76	4.23	1.36
S-2	57.91	30.09	2.60	5.66	3.58	0.16
S-3	45.32	37.82	0.95	10.00	3.18	2.72
N-1	56.26	29.84	2.10	8.61	3.20	-
N-2	49.49	35.22	3.20	8.91	3.18	-
N-3	48.68	35.50	4.18	6.25	5.43	-
N-4	47.80	38.92	3.93	5.05	4.30	-
N-5	24.27	53.21	3.21	14.70	4.61	-

4. 결론

본 연구에서는 아연계 인산염 코팅관의 CO_2 수송관 적용 시, H_2O, SO_2 및 NO_2가 유입되었을 때의 부식거동을 분석하기 위해 실험적 연구를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CO_2 스트림 내에 불순물이 존재할 경우, Dynamis Quality Recommendation[6]에서 제시한 H_2O 한계용해도를 바탕으로 자유수분이 생성되지 않는 조건에서 부식이 발생되지 않을 것이라는 판단은 바람직하지 않는 것으로 사료된다.

(2) CO_2와 수분만 포함된 시편에서는 부식의 뚜렷한 징후는 보이지 않았으며 SO_2, NO_2와 같은 불순물이 존재하지 않는 상황에서는 한계용해도를 고려한 수분제어만으로 부식관리가 가능할 것으로 사료된다.

(3) SO_2보다 NO_2의 주입 함량이 낮음에도 불구하고 부식의 정도는 NO_2가 주입된 시편들에서 더욱 심하게 나타난 것으로 관찰되었다. 또한 SO_2나 NO_2가 주입된 모든 시편에서 한계용해도를 초과하지 않는 수분농도 조건하 에서도 부식이 발생하였으므로 불순물 농도를 엄격히 관리할 필요가 있는 것으로 사료된다.

(4) 같은 수분 함량 하에서는 SO_2 및 NO_2 불순물 주입량이 많을수록 부식이 가속화되는 결과를 얻었다.

(5) 결론적으로 본 실험적 연구결과에 근거하여 고압 CO_2 스트림 내 SO_2 및 NO_2의 농도는 각각 175ppm 및 65ppm 미만으로 유지할 것을 제안하는 바이다.

향후 본 연구에서의 실험조건 및 성분조성비를 확장하고 기타 불순물 유입 조건에서의 부식거동 모사실험을 진행하여 관련 연구를 확장해나갈 계획이다.

References

[1] Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, "National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea", 2013

[2] I. S. Cole, P. Corrigan, S. Sim, N. Birbilis, "Corrosion of pipelines used for CO2 transport in CCS: Is it a real problem", *International J. of Greenhouse Gas Control*, 749-756, July, 2011

DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.05.010

[3] F. D. Moraes, J. R. Shadley, J. Chen, E. F. Rybicki, "Characterization of CO2 Corrosion Product Scales Related to Environmental Conditions", *Corrosion 2000*, 26-31, 2000

[4] M. I. Cho, C. Huh, S. G. Kang, J. H. Baek, "Experimental Study on Corrosion Characteristics of CO2 Pipeline for offshore Transport and Geological Storage", International Conference on Greenhouse Gas Technology, October, 2014

[5] A. Austegard, M. Barrio, "Project Internal Memo DYNAMIS : Inert components, solubility of water in CO2 and mixtures of CO2 and CO2 Hydrates", *Trondheim, Norway*, 2006.

[6] E. D. Visser, C. Hendriks, M. Barrio, M. J. Molnvik, G. D. Koeijer, S. Liljemark, Y. L. Gallo, "Dynamis CO2 Quality Recommendations", *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 478-484, July, 2008
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.04.006

[7] L. Buit, M. Ahmad, W. Mallon, F. Hage, "CO2EuroPipe Study of the Occurrence of Free Water in Dense Phase CO_2 Transport", *Energy Procedia*, Vol. 4, 3056-3062, 2011
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.217

[8] S. C. Shin, E. Y. Chung, "Development of Phosphate-Zinc Pretreatment for Steel Produced by The Electric Furnace", *KSAE Annual Conference*, 2688-2693, 2009

[9] M. Zubielewicz, W. Gnot, "Mechanisms of non-toxic anticorrosive pigments in organic waterborne coatings", *Progress In Organic Coatings*, Vol. 49, 358-371, 2004
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.11.001

[10] Y. J. Lee, S. S. Park, S. S. Hong, S. H. Lee, D. S. Kim, G. D. Lee, "Preparation and Performance Evaluation of Zinc Phosphate-Coated Mica Anticorrrosive Pigment", *Clean Technology*, Vol. 19, No. 3, 257-263, 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.7464/ksct.2013.19.3.257

조 맹 익(Meang-Ik Cho) [정회원]

- 2005년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학사)
- 2007년 6월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 : (주) 한라공조
- 2008년 12월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<관심분야>
이산화탄소 포집 및 저장, 열전달, 이상유동

강 성 길(Seong-Gil Kang) [정회원]

- 1991년 2월 : 서울대 해양학과(이학사)
- 1993년 2월 : 서울대 대학원 해양학과 (이학석사)
- 2000년 8월 : 서울대 대학원 해양학과 (이학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

<관심분야>
해양환경평가 및 관리, 해양 CCS, 유류오염 대비 및 대응

허 철(Cheol Huh) [정회원]

- 1995년 2월 : 경희대 원자력공학과 (공학사)
- 1997년 1월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 : 삼성 엔지니어링
- 2006년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 6월 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 2014년 10월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양과학기술융합학과 교수

<관심분야>
해양 CCS(Carbon Capture and Storage), 해양플랜트 공정해석 및 열유체 해석, 다상유동 및 상변화 열전달

백 종 화(Jong-Hwa Baek) [정회원]

- 2006년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 5월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<관심분야>
이산화탄소 포집 및 저장,