

# 1.25Cr-0.5Mo강을 이용한 합성가스 조성 변화에 따른 SNG 1차반응기의 부식특성에 관한 실험적 연구

김진현<sup>1</sup>, 조홍현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>조선이공대학교 자동차과, <sup>2</sup>조선대학교 기계공학과

## Experimental Study on Corrosion Characteristics of 1.25Cr-0.5Mo in the 1<sup>st</sup>-methanator reactor for Synthetic Natural Gas according to Gas Compositions

Jin-Hyun Kim<sup>1</sup>, Honghyun Cho<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automobiles, Chosun College University of Science & Technology,

<sup>2</sup>Department of Mechanical engineering, Chosun University

요 약 최근 급속한 플랜트 설비의 발전과 더불어 각종 기계 구조물들의 운전조건이 가혹해지고 사용시간이 길어짐에 따라 신뢰성에 대한 문제가 제기되고 있다. 특히, SNG 설비에 사용되는 재료는 설계조건에 따라 1.25Cr-0.5Mo 또는 2.25Cr-1Mo강과 같은 내열강들이 주로 사용된다. 본 연구에서는 Lab-scale용 합성천연가스 반응기를 제작하여 생산공정 반응기 재질인 1.25Cr-0.5Mo강을 이용하여 실제 SNG 공정중 1차반응기와 동일한 운전 조건에서 부식 특성에 대하여 실험적 연구를 진행하였다. 1.25Cr-0.5Mo강을 운전 시간에 따라 각각 배출조성 조건과 주입조성 조건에 노출시켜 부식에 대한 실험을 수행하였으며 실험 결과 내구성에 가장 영향을 미치는 요소는 수소로 인한 수소취성과 산화 부식임을 알 수 있었으며, 배출조성보다 주입조성에서 더 빠른 부식이 발생함을 확인하였다. 그러나 배출조성 조건에서는 산화부식과 더불어 수소취성에 의한 부식이 동시에 발생하여 장시간 운전 후 부식정도가 갑자기 증가하고 부식강도가 급격히 강해지는 것을 나타냈다. 또한 주입조성에서는 산화물들이 시편에 흡착되어 두꺼운 산화층을 형성시켰으며 이로 인하여 재료의 내산화성이 크게 저하되는 것으로 확인되었다.

**Abstract** Recently, the operating conditions of the various mechanical structures have become more severe and the running time has become longer as the development of plant equipment increases with the introduction of high technology. Thus, the reliability of the system and its accessories is becoming a problem. Normally, synthetic natural gas (SNG) plants use 1.25Cr-0.5Mo or 2.25Cr-1Mo heat resistant steel according to the operating conditions. In this study, a lab-scale reactor was set up using 1.25Cr-0.5Mo steel, in order to carry out corrosion tests for producing synthetic natural gas. The corrosive characteristics were investigated under 1st-methanator operating conditions and fundamental data about the durability and reliability were obtained by using the experimental test. The analysis of results obtained on the durability of the reactor under emission and injection compositions showed that the hydrogen embrittlement caused by hydrogen and the oxidation corrosion caused by H<sub>2</sub>O had the most effect on the durability of 1.25Cr-0.5Mo steel in the SNG reactor. However, the hydrogen embrittlement and oxidation corrosion occurred simultaneously under emission conditions, so that the corrosion of the material increased suddenly after a long operating time. Besides, the corrosion of the 1.25Cr-0.5Mo steel under the injection composition was faster than that under the emission composition.

**Keywords** : Synthetic natural gas(SNG), 1.25Cr-0.5Mo, 1<sup>st</sup>-Methanator, Composition, Corrosion  
Corresponding Author : Honghyun Cho(Chosun University)

Tel: +82-62-230-7050 email: hhcho@chosun.ac.kr

Received April 12, 2016

Revised May 11, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

## 1. 서론

최근 급속한 플랜트 설비의 발전과 더불어 각종 기계 구조물들의 운전조건이 가혹해지고 사용시간이 길어짐에 따라 신뢰성에 대한 문제가 제기되고 있다. 특히 고온 고압의 설비에 사용되는 재료는 설계조건에 따라 1.25Cr-0.5Mo 또는 2.25Cr-1Mo의 내열강이 사용된다. 또한 화석연료인 석탄과 석유, 가스 이전 세계 에너지 사용량에 약 80%를 차지하고 있으며 당분간 이와 같은 소비 구조는 지속될 것으로 보인다. 이 중 석탄은 가장 현실적이며 유력한 에너지원이며, 석유와 천연가스와 비교하여 안정적인 공급이 가능하다는 장점이 있다. 최근 국내에서도 수입에 의존하는 LNG(liquefied natural gas)를 대체할 에너지 자원으로 SNG(synthetic natural gas)를 내세우고 있다. SNG는 석탄을 이용하여 경제적이고 친환경적인 천연가스로 LNG와 성분이 같지만 가격이 저렴한데다 매장량이 많은 석탄을 직접 사용하는 것보다 오염물질 발생량도 적은 특징이 있다.

석탄 가스화 기술에 적용할 수 있는 단위 공정 기술로서의 SNG 합성공정만을 본다면, 현재까지 상업화가 되었거나 연구개발이 이루어진 공정은 크게 Table 1에 나타난 바와 같이 분류할 수 있다. SNG 합성공정은 반응기의 형태, 메탄화 반응을 통해 발생하는 반응열을 제어하는 방법, 촉매의 종류, 유입되는 합성가스의 H<sub>2</sub>/CO 비 등이 차이가 나며, 이들 공정중에서 현재 상용화 되었거나 가능한 공정으로는 크게 두가지인데 일반적으로 Conventional shift and methanation 공정과 Combined shift and methanation 공정이다. 두 공정 모두 배관망 투입이 가능한 SNG를 생산하기 위해서는 SNG 합성공정의 전단 혹은 후단에서 CO<sub>2</sub> 제거 공정을 반드시 거쳐야 한다.

Table 1. Synthetic natural gas process

Process	Characteristic
Gasification based process for producing	Main response : $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ The commercialization process
Hydrogasification based process for producing	Main response : $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ Do not commercialization process
Catalyst gasification based process for producing (Hydromethanation)	Main response : $2C + 2H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2$ Do not commercialization process

하지만 가스 시스템의 부식 문제는 가스의 종류와 순도, 수분의 농도와 온도에 영향을 받기 때문에 습기에 강한 반응기에 대한 관심이 요구되고 있으며, 이에 대하여 많은 연구의 진행이 필요하다. 가스반응기 시스템을 공급하는 가스 파이프의 표면에 수분은 흡수 및 부식의 원인이 된다. 기계적인 측면에서는 크리프에 의한 입계슬립, 균열발생 및 성장, 열응력에 의한 균열의 발생, 공동의 발생 및 성장 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 금속학적인 측면에서는 탄화물 및 불순물 원소의 거동에 의한 재료의 기계적 강도특성 변화에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 미국과 일본, EU 등 에너지 선진국에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 구조물에 대한 검사 및 잔여수명 예측을 통하여 효과적인 운용방안을 마련하고 있다<sup>(1-3)</sup>. 특히, 탄소강 또는 저합금강의 경우 재료가 300~600℃의 온도 범위에서 유지될 때 결정입계에 미량원소가 여러 합금원소와 결합하여 안정된 탄화물 등이 입계에 석출되면서 취화현상을 보인다. 열 취화는 재료의 온도가 상승하였을 때 연성이 저하되어 약해지는 현상으로 1차반응기의 작동온도인 400℃ 온도 범위에서의 내구성에 문제가 될 가능성이 높다. 또한 합성가스에는 수소와 일산화탄소가 다

량 포함되어 있으므로 이를 상용화하기 위해서는 혼합가스가 반응기나 배관에 영향을 줄 수 있는 부식특성을 연구할 필요가 있다<sup>(4,8)</sup>.

이와 관련된 기존의 연구를 살펴보면 Hancock 등<sup>(9)</sup>은 산소는 균열을 억제시키고 수소나 수분은 균열속도에 미치는 영향이 크며 철(Fe)과 친화력이 크기 때문에 흡착과정에 있어서 장애물 역할을 할 수 있는 산화물이 형성되지만, 산소가 제거되면 수소가 산화층을 환원시켜 청결한 표면과 다시 반응한다고 보고하였다. Zapffe 등<sup>(10)</sup>은 수소가스압력설을 최초로 제안하여 재료내부의 기공(void)에 침투된 수소기체가 높은 압력으로 작용하여 균열이 일어난다고 보고하였다. 그러나 낮은 압력의 수소분위기에 의한 강의 취화현상은 설명할 수 없으며 저압의 수소분위기가 고체 내에 높은 기체 압력을 발생시킨다는 것은 열역학적 이유로서도 타당하지 않다. 수소취성의 기구에 대한 연구로는 Tetelman<sup>(11)</sup>이 수소로 인하여 격자 결합력이 감소하고 미소균열 내에 갇혀 있는 수소들이 높은 압력을 가짐으로써 수소취성을 일으킨다는 격자 취화설과 수소가스압력설의 복합적인 취성기구를 제안하였다. 그리고, Yang 등<sup>(12)</sup>은 결정립계에 생성되는 탄화물들이 재료를 더욱 취화시킨다고 보고하였다. 또한, Lee 등<sup>(13)</sup>은 화력발전용 고온 배관재료(2.25Cr-1Mo)의 크리프 손상특성 평가기술 개발을 위한 연구에서 재료를 장시간 사용 할 경우 실제 수명이 단축됨을 확인하였다.

수소에 의한 균열 현상에 대해 Barth 등<sup>(13-14)</sup>은 고강도강은 수소취화에 민감한 재료이므로 이 분야에 관해서 많은 연구가 진행되어 왔으며, 음극반응에서 발생된 수소와 금속사이의 상호작용에 의하여 일어나는 수소취화는 고강도강에서의 균열의 생성과 성장을 지배한다고 보고하였다. 그리고 Choi 등<sup>(15)</sup>은 최근에는 모사 합성천연가스를 적용하여 수소함량이 증가함에 따라 연소 속도 차이로 인해 운전범위가 좁아지는 경향을 확인하는 연구를 진행하였다. 또한 Kim 등<sup>(17)</sup>은 석탄 가스화 복합 화력발전(IGCC) 설비의 연속운전 전과 후 부식특성에 대해 연구하여 내부식성의 저하를 일으키는 원인을 규명하였다.

최근 국내에 도입된 SNG 관련 연구를 보면 화학 및 촉매 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 반면 SNG 환경에서의 부식특성에 대한 연구는 미비하고 이에 따른 연구가 필요한 실정이다. 합성가스에는 석탄중의 함유되어 있는 유황성분에 의해 황화합물이 함유되는데 부식의 원인이 되기 때문에 이에 대한 연구는 장기적인 사용을 고려하였을 때 반드시 필요한 연구 중에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 Lab-scale 용 SNG 반응기를 제작하여 1차반응기의 재질(1.25Cr-0.5Mo)과 운전조건(400℃, 4.4 MPa)에 따른 반응기의 표면을 관찰하여 산화물에 의한 부식 특성과 수소취성에 대하여 연구하였으며 내구성 증대 및 신뢰성 향상을 위한 기초 자료를 수집함에 그 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 조건

### 2.1 실험장치 설명

Fig. 1은 본 연구에서 설계된 실험장치의 개략도를 나타내고 있으며 크게 합성가스부, 반응부, 조작부 세 부분으로 구성되어 있다. 또한, 가스공급의 안전성을 확보하기 위해 후드와 강제 피치라인, 가스실린더 고정장치를 설치하였다. 실험시 후단의 압력을 조절하는 압력조정기와 반대 개념으로 전단의 압력을 원하는 압력으로 일정하게 유지되도록 하는 역압력조정기(back pressure regulator)를 설치하였으며 압력계의 제어 오차율은 2% 미만이다. 또한 주입되는 가스의 양을 정확하게 측정하고 제어하기 위해 반응기 전단에 가스공급량을 측정할 수 있는 질량유량계를 설치하였으며 측정 오차율은 1% 미만인 것으로 확인되었다.

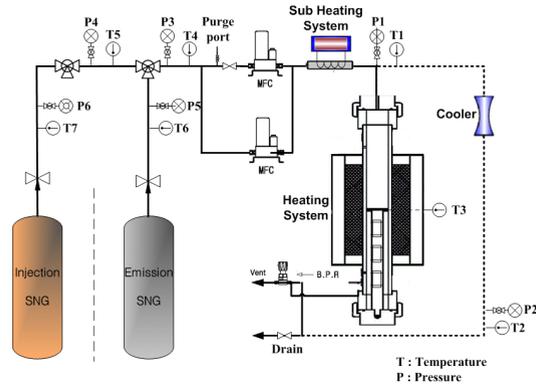


Fig. 1. Schematics of the experimental setup

### 2.2 실험방법 및 조건

본 연구에서는 실제 SNG 제조에 필요한 18단계 공정중 1차반응기 조건을 설정하고 이에 대한 부식반응기 실증설비에 사용되는 용접성, 절삭성 및 가공특성연구를 진행하였다. 시편은 실제 합성천연가스성이 우수하고 석탄가스화기 실제 반응기에 사용되는 시편인 A387 Grade 11 Alloy(1.25Cr-0.5Mo)이며, 화학적 성분은 Table 2에 나타내었다. 또한 시편의 산화량을 측정하기 위하여 알루미늄 도가니 내에 시편을 위치시켜 실험을 진행하였다.

반응기에서 배출되는 합성가스의 조성( $N_2/CH_4/CO/H_2$ ; 배출조성)과 반응기로 들어가는 합성가스의 조성( $CO_2/N_2/CH_4/CO/H_2$ ; 주입조성) 두 가지 조성에서 각각 실험을 실시하였으며 이를 비교 분석하였다. 배출조성과 주입조성에서 혼합가스 비는 Table 3에 나타내었다. 석탄가스화를 기반으로 하는 방법으로, 수성가스 전환과 메탄화 반응을 동시에 진행하는 방법이 있는데 전체 공정의 건설비 및 운영비 절감을 위해 개발되고 있는 방법으로서, 메탄화 공정 후에  $CO_2$  분리공정이 존재한다. 합성가스가 외부의  $CO_2$  분리설비로 보내져서  $CO_2$  제거 공정을 거치기 때문에 Table 3의 주입조성과 배출조성의 양이 이론상 맞지 않지만 합성공정에  $CO_2$ 를 제거하면 성분비가 일치한다.

합성천연가스 반응기에서 합성가스 공정중 1차반응기 공정의 운전조건인  $400^\circ C$ ,  $4.4 MPa$  조건에서 1.25Cr-0.5Mo 시편을 Lab-scale 반응기에 노출시켜 10,080분, 80,064분과 161,280분 동안 실험을 진행하였다. 또한, 실험전 시편의 무게를 전자저울을 이용하여 측정하고 반응 후 시편과 알루미늄 도가니의 무게를 측정하여 산화량을 확인하였으며, 시편은 마운팅(mounting)후 노출면을 SiC 사포로 2,000번까지 연마한 후, SEM-EDS(scanning electron microscope energy dispersive x-ray spectroscopy)과 고속디지털 카메라(i-speed, Olympus)를 이용하여 표면부식 진행 상태 확인하고 이를 정밀 분석하여 고찰하였다.

Table 2. Chemical composition of a 1.25Cr-0.5Mo steel(wt.%)

1.25Cr-0.5Mo(A387 Grade 11)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.05~0.17	0.50~0.80	0.40~0.65	0.035	0.035	1.00~1.50	0.45~0.60

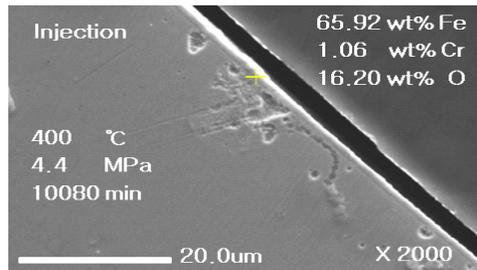
Table 3. Composition of injection and emission synthetic gas in the reactor(mol%)

Injection	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
	0.50	0.52	6.14	22.35	Balance
Emission	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
	0.20	12.38	39.27	Balance	

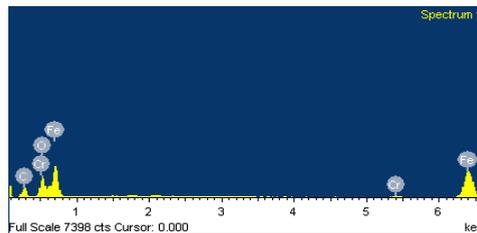
### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 시편을 주입조성 혼합가스 상태에서 1차반응기 조건인 400℃, 4.4 MPa에서 10,080분 동안 반응시킨 표면의 그림이다. SEM 관찰 결과 산화층이 1.2~2 μm 정도 생성됨을 확인하였고 재질균열의 외관적인 특징으로는 종방향 균열을 나타내었다. Fig. 3은 동일한 강재를 운전조건에서 80,640분 동안 반응시킨 표면으로 약 2~4 μm의 산화층이 생성되었으며, 10,080분동안 반응시킨 표면보다 두꺼운 산화층이 형성되었다.

Fig. 4는 동일한 강재와 운전조건에서 161,280분 동안 반응시킨 표면으로 약 8 μm의 산화층이 생성되었으며 80,640분 동안 반응시킨 표면보다 2배 이상 두꺼운 산화층이 형성되었다. 이는 시간이 지남에 따라 점진적으로 산화물이 생성된 것으로 부품의 수명에 영향을 끼치는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 미세 균열은 일직선상에 있지 않고, 비드 표면에서 산재하여 나타났다. 산화에 의하여 산소의 성분이게 증가한 것을 확인할 수 있으며 온도의 영향으로 탄화물 생성 및 성장을 촉진하며, 응력에 의하여 자기확산 활성화 에너지가 감소함을 알 수 있다.

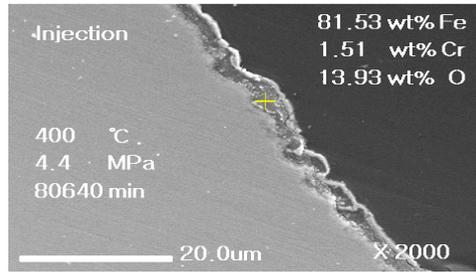


[a] SEM image

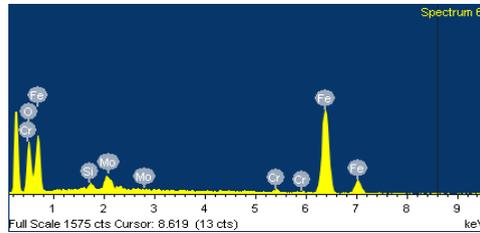


[b] EDS image

Fig. 2. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under injection composition for 10,080 minutes

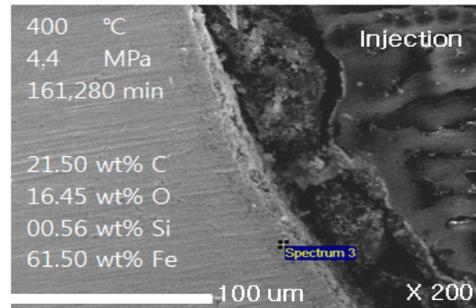


[a] SEM image

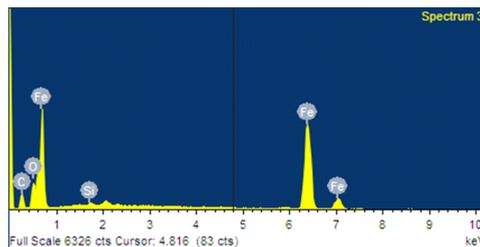


[b] EDS image

Fig. 3. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under injection composition for 80,640 minutes



[a] SEM image



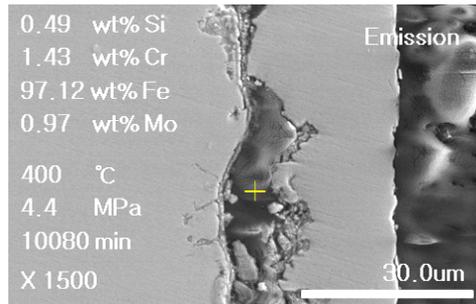
[b] EDS image

Fig. 4. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under injection composition for 161,280 minutes

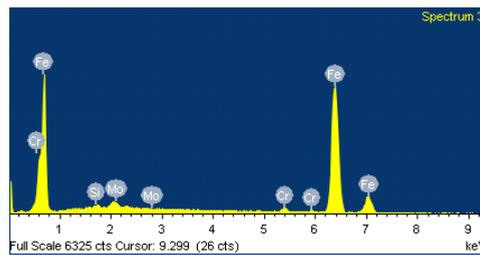
Fig. 5는 배출조성 혼합가스 상태에서 강재를 400℃, 4.4 MPa 조건에서 10,080분 동안 반응기 내에서 반응시킨 후 시편 표면의 SEM 사진이며 실험 후 표면 가장자리에서 산화에 의한 균열이 발생하기 시작함을 보였다. 수소는 반응기내에서 분자상태로 결합하여 존재하므로 균열의 원인인 수소 취성을 일으킨 것으로 보인다. 이러한 수소취화는 저온에서 가열하여 시효처리하면 그 효과가 완화되고 이를 통하여 취화를 방지할 수 있다. 또한 강재에서 시효처리에 의해 감수성을 상실해 가는 것은 그 온도에서 수소의

확산속도가 증가하여 그것이 대기 중으로 방출되기 때문이다. 또한, 강재의 가장자리는 강재중심부에 비해 철 함량이 감소하였음을 확인할 수 있었는데 이는 시편의 가장자리에서 부식이 먼저 일어나기 때문이다.

Fig. 6은 동일한 조건에서 80,640분 동안 반응시킨 표면의 사진으로 산화와 수소취성이 증가하였음을 확인할 수 있다. 시편의 가장자리에서 10,080분 동안 반응시킨 시편에 비해 O가 11.63wt% 생성되는 결과를 나타냈다. 이는 산소에 의하여 산소의 성분이 크게 증가한 것으로 시편의 표면에서 산화 부식이 진행되었음을 알 수 있었다.

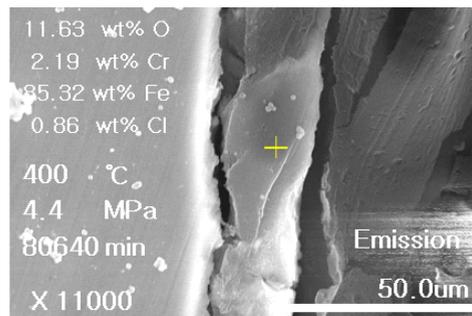


[a] SEM image

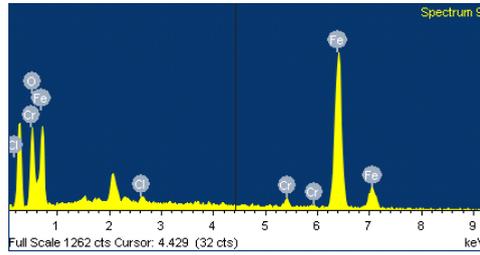


[b] EDS image

Fig. 5. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under emission composition for 10,080 minutes



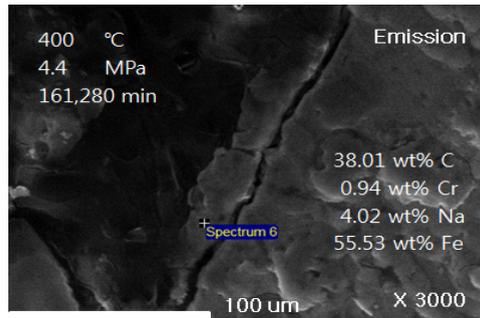
[a] SEM image



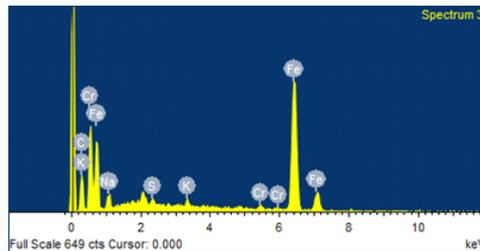
[b] EDS image

Fig. 6. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under emission composition for 80,640 minutes

Fig. 7은 동일한 조건에서 161,280분 동안 반응시킨 표면으로 80,640분 동안 반응시킨 시편에 비해 산화와 수소취성이 더욱 더 증가하였음을 확인할 수 있다. SNG의 배출조성 조건은 환원 과정이기 때문에 수소에 의한 수소취성 현상이 발생되었다. 부식의 주요 원인은 온도의 영향으로 탄화물 생성 및 성장을 촉진 하며, 응력에 의하여 자기확산 활성화 에너지가 더욱 감소됨을 나타낸다. 이는 1차반응기 조건에서 시편이 부식이 천천히 진행되다가 오랜 시간동안 노출되면 재료의 강도를 떨어뜨리면서 부식이 강도가 갑자기 강해지는 현상으로 보이며 SNG 공정의 1차반응기에서 발생하는 부식정도에 대한 정확한 기초자료를 확보하기 위해서는 더욱 긴 시간의 실험 및 다양한 분석이 필요할 것으로 판단된다.



[a] SEM image



[b] EDS image

Fig. 7. SEM fractographs of 1.25Cr-0.5Mo under emission composition for 161,280 minutes

Fig. 8은 주입조성 혼합가스 상태에서 시편과 산화물의 무게변화량을 시간별로 나타낸 그림이다. 시간이 지남에 따라 산화물의 무게는 초기에 급격히 증가하였다가 10,080분 이후에는 거의 일정하게 나타나는 경향을 보였다. 산화물의 무게가 급격히 증가하는 것은 도가니 내에서 생성된 물에 의한 산화부식의

로 인하여 산화량이 급격히 증가하였기 때문이며, 또한 10,080분 이후에 일정하게 나타난 이유는 도가니의 크기의 한계에 의하여 생성된 산화물들이 도가니 내에 위치한 시편에 흡착되었기 때문으로 판단된다. 그로 인하여 산화물의 무게는 크게 증가하지 않는 경향을 보였다. 반면에 시편의 무게변화량은 10,080분까지는 일정하다가 그 이후에 증가하는 경향을 보였으며, 161,280분 이후에는 처음 시편의 무게에 비하여 333 mg 가량 증가하였다. 주입조성에서는 산화에 의한 부식의 결과로 산화물의 생성이 크게 나타나는 결과를 보였다. 또한 주입조성에서는 산화물들이 시편에 흡착되어 두꺼운 산화층의 형성으로 내산화성이 크게 저하된 것으로 나타났다.

Fig. 8. 1.25Cr-0.5Mo fracture under injection composition

Fig. 9은 배출조성 혼합가스 상태에서 시편과 산화물의 무게변화량을 시간별로 나타낸 그림이다. 산화물의 무게는 80,640분까지 0.02 mg 증가하다가 161,280분에는 3.6 mg 증가하였다. 시간이 지남에 따라 시편의 무게와 탄화물의 무게가 더 증가함을 보였다. 특히 시간이 80,640분 이후 그 양이 급격히 증가하는데 이는 시간에 따른 부식의 강도가 점진적으로 강해졌기 때문이다. 시편의 무게변화량은 최초 673 mg에서 161,280분이 이후에 210 mg이 증가하여 883 mg의 증가하는 결과를 보였다. 이는 배출조성에서는 산화 부식과 더불어 수소에 의한 수소취성 현상이 복합적으로 나타나 재료의 부식의 강도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 즉 배출조성에서는 탄화물의 무게증가량이 주입조성에 비하여 더 증가함을 보였다.

Fig. 9. 1.25Cr-0.5Mo fracture under emission composition

#### 4. 결론

본 연구에서는 1.25Cr-0.5Mo 시편을 이용하여 SNG 1차반응기의 운전조건에서 가스의 주입조성과 배출 조성하에서 부식특성에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 시간에 따른 시편의 무게증가량은 주입조성에서 화물들이 시편에 흡착되는 이유로 인하여 배출조성보다 더 크게 나타남을 보였고, 산화물의 무게증가량은 배출조성 조건에서 더 크게 증가함을 보였다. 또한 주입조성에서는 산화물들이 시편에 흡착되어 두꺼운 산화층의 형성으로 재료의 내산화성이 크게 저하되는 것으로 확인되었다.

2) 배출조성 조건과 주입조성에서의 부식정도를 분석한 결과 본 연구에서 내구성에 가장 영향을 미치는 요소는 수소로 인한 수소취성과 산화 부식임을 알 수 있었으며, 배출조성 조건의 SNG 가스는 환원분위기이기 때문에 수소취성 현상이 주로 관찰되었다. 또한 배출조성보다 주입조성에서 더 빠른 부식속도를 보였으나 배출조성 조건에서는 산화부식과 더불어 수소취성의 부식이 발생하여 장시간 운전 후 부식정도가 갑자기 증가하고 부식강도가 강해지는 것을 확인하였다.

#### References

- [1] H. J. Kim, H. S. Ryoo, "Ways to Improve Reliability against Stress-Relief Cracking in Weld Metal", Trans. of KMSE, Vol.25, No.2, pp. 3-5, 2007.
- [2] H. J. Sung, M. S. Ju, J. G. Ju, Y. Y. Kim, "Characteristics of Electro Slag Strip overlaid weldments on the 1.25Cr-0.5Mo Steel", KWJS Conference, Vol. 45, pp. 65-66, 2005.
- [3] D. H. Lee, J. J. Pack, "Effect of Welding Heat Input and PWHT Cooling Rate on Mechanical Properties of Welded Region at SAW of 1.25Cr-0.5Mo Steel for Pressure Vessel", KWJS Vol.22, No.5 pp. 26-31, 2004.
- [4] H. W. Lee, H. T. Yang, S. T. Kim, "The Characteristics of the Hydrogen Embrittlement for the Cr-Mo Steels in Use of Pressure Vessel", Trans. of KSME A, Vol.26, No. 6, pp. 1107-1113, 2002.
- [5] K. D. Park, J. H. Kim, H. K. Yoon, W. J. Park, "Evaluation on High Temperature Fracture Toughness of Pressure Vessel SA516/70 Steel", ISSN, 1225-0767, pp. 99-104, 2001
- [6] J. H. Yun, B. S. Lee, Y. J. Oh, J. W. Kim, J. H. Hong, "Effects of temperature and loading rate about fracture resistance of SA518-Gr.70, Nuclear Reactor Coolant pipe", KMS Conference, 1998.
- [7] Y. D. Yoo, S. H. Kim, Y. S. Yun, G. T. Jin, "Conversion Technology from Coal to Synthetic Natural Gas", Korean Industrial Chemistry News, Vol. 12, No.3, pp. 38-57, 2009.
- [8] H. T. Yang, S. T. Kim, "A Study on the Mechanical Properties and Microstructural Change by the Thermal Embrittlement of Cr-Mo Steel", Proceeding of the KAMES 2002 Joint Symposium, Vol. 2002, No. 11, pp. 65-70, 2002.
- [9] G. G. Hancock, H. H. Johnson, Transactions of Metallurgical Society of AIME, 236, pp. 513-514, 1966
- [10] C. A. Zapffe, C. E. Sims, "Hydrogen Embrittlement, internal stress and defects in steel", Trans. AIME, 145, pp. 225-226. 1941.
- [11] A. S. Tetelman, Hydrogen in Metals, ASM 17, 1974
- [12] H. T. Yang, S. T. Kim, "A Study on the Mechanical strength change by thermal aging of 2.25Cr-1Mo steel", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A Vol.24 No. 7, 1771-1778, 2000.
- [13] S. G. Lee, M. H. Chung, S. K. Oh, J. K. Song, "Creep property Assessment and Creep Life Estimation for High-Temperature Tube Material(2.25Cr1Mo Steel) in Power Plants by LMP", JOET, Vol. 12, No.2, pp. 65-70, 1998.
- [14] C. F. Barth, E. A. Steigerwald, A. R. Troiano, "Hydrogen Permeability and Delayed Failure of Polarized Martensitic Steels", Corrosion, 25(9), pp. 353-358, 1969.
- [15] B. E. Wilde, "Mechanism of Cracking of High Strength Martensitic Stainless Steels in Sodium Chloride Solution", Corrosion, 27(8), pp. 326-333, 1971.
- [16] I. C. Choi, K. M. Lee, "Combustion Characteristics of Dual Swirl Combustor according to Hydrogen Content in Simulated SNG Fuel", KOSCO SYMPOSIUM, pp. 111-113, 2014.
- [17] M. J. Kim, S. W. Chung, J. E. Lee, D. B. Lee, "The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea",

SAREK SYMPOSIUM, pp. 780-784, 2014.

- [18] T. W. Kang, K. S. Yoon, M. S. Yang, J. K. Kim, S. H. Kim, "Synthetic natural gas(SNG) production facility construction projects for the pre-feasibility study", Yooshin technical article, Vol. 19, No.4, pp. 34-47, 2012.

---

김진현(Jin-Hyun Kim)

[정회원]



- 2007년 8월 : 조선대학교 대학원 기계공학과 대학원 (공학석사)
- 2006년 8월 ~ 2007년 8월 : 한국에너지기술연구원 미활용지열에너지센터 석박사연구원
- 2007년 9월 ~ 2012년 5월 : 조선대학교 산학협력단 연구원
- 2011년 3월 : 조선대학교 대학원 기계공학과 박사과정

• 2014년 4월 ~ 현재 : 조선이공대학교 자동차과 조교수

<관심분야>

신재생에너지, 자동차 공기조화, SNG(합성천연가스)

---

조홍현(Honghyun Cho)

[정회원]



- 2005년 8월 : 고려대학교 기계공학과 대학원 (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2006년 10월 : 삼성전자 가전연구소 책임연구원
- 2007년 1월 ~ 2008년 3월 : 미국 NIST 객원연구원
- 2008년 4월 ~ 2014년 2월 : 조선대학교 기계공학과 조교수

• 2014년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

신재생에너지, 냉동공학, 열전달, 공기조화