

소듐과 이산화탄소 반응에 의한 소듐유로막힘 및 재료손상 현상 연구

박선희[†] · 민재홍 · 이태호 · 위명환

한국원자력연구원 SFR계통설계부
34057 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
(2016년 1월 21일 접수, 2016년 7월 12일 수정본 접수, 2016년 8월 30일 채택)

Investigation of Plugging and Wastage of Narrow Sodium Channels by Sodium and Carbon Dioxide Interaction

Sun Hee Park[†], Jae Hong Min, Tae-Ho Lee and Myung-Hwan Wi

Korea Atomic Energy Research Institute, SFR System Design Division, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34057, Korea
(Received 21 January 2016; Received in revised form 12 July 2016; accepted 30 August 2016)

요 약

본 논문의 목적은 소듐냉각고속로(sodium cooled fast reactor, SFR)와 초임계 CO₂ Brayton cycle의 연계 시, 원자로 열수송 계통과 동력변환 계통의 압력 경계를 형성하는 회로인쇄형 열교환기의 경계면에 균열이 발생해 고압(약 200 bar)의 CO₂가 상압 수준의 액체소듐유로 측에 유입되었을 때의 물리/화학적 현상을 파악하여 열교환기 설계에 활용 가능한 실험 자료를 생산하는 것이다. 열교환기의 소듐-CO₂ 경계면 균열 현상은 경계면의 균열 크기에 따라 미세 균열에 의한 소듐유로막힘(plugging) 현상과 상대적으로 큰 균열에 의한 열교환기 재료손상(wastage) 현상으로 나뉜다. Plugging 실험결과, 소듐유로 직경이 3 mm일 때 CO₂ 주입 즉시 소듐 흐름이 정지한 반면 소듐유로 직경이 5 mm일 때는 유량이 감소되기 시작하는 시점은 3 mm의 경우와 유사하게 CO₂ 주입 즉시 나타났지만 소듐의 흐름이 완전히 정지할 때까지는 상대적으로 오랜 시간이 소요되었다. 이러한 실험결과는 실제 열교환기의 소듐-CO₂ 경계면에서 미세균열이 발생했을 때, 소듐유로 직경이 3 mm로 좁을 경우 균열 발생과 동시에 해당 소듐유로가 반응생성물에 의해 막혀 해당 유로 외의 유로들로 지속적인 열교환기 운전이 가능하지만, 소듐유로의 직경이 5 mm로 넓어질 경우 소듐유로가 고체생성물에 의해 즉시 막히지 않고 생성물이 소듐유로를 따라 계통 내부를 이동하다 일정 농도 이상이 되어야 소듐유로를 막게 할 것으로 예상할 수 있는 결과이다. Wastage 실험결과, 열교환의 재질(STS316, Inconel600, G91 합금강), 운전온도(400~500 °C), 노즐직경(0.2~0.8 mm), 시편-노즐 거리(2~6 mm)와 무관하게 고압(약 200~250 bar)의 CO₂ 분사에 의한 시편의 물리적 손상(erosion) 현상은 발생하지 않았다. 노즐에서의 분사되는 CO₂의 분사속도는 마하 0.4~0.7인 것으로 확인되었다. 본 연구의 실험결과는 열교환기 파손 대처 설계에 배경 실험 자료로 활용될 것으로 기대된다.

Abstract – We investigated the physical/chemical phenomena that a slow loss of CO₂ inventory into sodium after the sodium-CO₂ boundary failure in printed circuit heat exchangers (PCHEs), which is considered for the supercritical CO₂ Brayton cycle power conversion system of a sodium-cooled fast reactor (SFR). The first phenomenon is plugging inside narrow sodium channels by micro cracks and the other one is damage propagation referred to as wastage combined with the corrosion/erosion effect. Experimental results of plugging shows that sodium flow immediately stopped as CO₂ was injected through the nozzle at 300–400 °C in 3 mmID sodium channels, whereas sodium flow stopped about 60 min after CO₂ injection in 5 mmID sodium channels. These results imply that if pressure boundary of sodium-CO₂ fails a narrow sodium channel would be plugged by reaction products in a short time whereas a relatively wider sodium channel would be plugged with higher concentration of reaction products. Wastage by the erosion effect of CO₂ (200–250 bar) hardly occurred regardless of the kinds of materials (stainless steel 316, Inconel 600, and 9Cr-1Mo steel), temperature (400–500 °C), or the diameter of the CO₂ nozzle (0.2–0.8 mm). Velocities at the CO₂ nozzle were specified as Mach 0.4–0.7. Our experimental results are expected to be used for determining the design parameters of PCHEs for their safeties.

Key words: SFR, CO₂ Brayton cycle, PCHE, Sodium, CO₂, Plugging, Wastage

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sunheepark@kaeri.re.kr

‡이 논문은 고려대학교 김성현 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)는 소듐을 냉각재로 사용하여, 기존의 경수로와 중수로에 비해 높은 에너지(고속 중성자)로 핵분열을 일으켜 발생하는 열로 전기를 생산하는 제4세대 원자로이다. 경수로에서 사용한 핵연료를 재활용하는 장점을 갖고 있어 미국, 프랑스, 일본, 스페인, 한국 등 여러 나라에서 SFR에 대한 연구 및 개발이 진행되고 있다 [1-20]. 현재 SFR 원형로의 동력 변환 계통으로 개발 중인 과열 증기 Rankine cycle의 안전성을 저해하는 요소인 소듐-물 반응에 대한 위험성을 근본적으로 제거할 수 있고 500 °C 이상의 고온에서 운전 시 효율이 높아 경제성 향상을 기대할 수 있는 초임계 이산화탄소(supercritical CO₂, S-CO₂) Brayton cycle에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다[2,6,10,11,15]. S-CO₂ Brayton cycle에서는 열교환기로 회로인쇄형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)가 고려되고 있는데 PCHE는 다공성 미세유로를 열교환판에 에칭하여 가열로에서 확산접합(diffusion bonding)하는 방법으로 열교환판을 적층하여 제작하는 열교환기이다. 기존의 원통다관식 열교환기(Shell & Tube Heat Exchanger)보다 중소규모에서 효율이 우수하고 고온·고압 환경에 유리한 특징을 갖는다.

본 논문은 SFR과 S-CO₂ Brayton cycle을 연계했을 때, 원자로 열수송 계통과 동력변환 계통의 압력 경계를 형성하는 PCHE의 경계면에 균열이 발생해 고압(약 200 bar)의 CO₂가 상압 수준의 액체소듐 측에 유입되었을 때의 물리/화학적 현상을 파악하여 PCHE 설계에 필요한 실험 자료를 생산하는 것을 목적으로 한다. 소듐-CO₂ 반응은 소듐-물 반응보다 반응성이 크지 않은 것으로 알려져 있지만 반응생성물(Na₂CO₃, CO, amorphous carbon 등)은 계통의 건전성 유지에 부정적 영향을 줄 수 있다[6,7]. 따라서 발전소 수명운전기간 동안의 운전안전성 확보를 위해서는 PCHE 파손에 대한 대처 설계가 마련되어야 하며, 이를 위해 경계면 파손 시 발생할 수 있는 주요 현상에 대한 실험적 검증이 필요하다.

소듐과 CO₂의 경계면 균열 현상은 경계면의 균열 크기에 따라 미세 균열에 의한 소듐유로막힘(plugging) 현상과 상대적으로 큰 균열에 의한 열교환기 재료손상(wastage) 현상으로 나뉜다[17-21]. 본 논문에서는 경계면 균열 정도에 따라 CO₂ 유입의 차이가 발생하는 것을 고려하여 plugging 실험과 wastage 실험으로 구분하여 실험을 수행하였다. Plugging 실험은 PCHE에서 소듐-CO₂ 경계면에 미세하게 균열이 발생하여 CO₂가 소듐 측으로 유입될 때, 소듐과 CO₂의 반응으로 인해 발생하는 생성물에 의해 소듐유로가 막히는 현상을 분석하는 실험이다. 실제 열교환기를 구성하는 다수의 소듐과 CO₂ 유로 중, 일부 유로의 경계면에서 미세한 균열이 발생했을 때 소듐유로가 반응생성물에 의해 저절로 막히게 된다면 CO₂ 누출로 인한 운전 중단을 방지할 수 있는 장점이 있다. Plugging 실험의 주요 평가인자는 소듐유로 직경, 운전온도 변화에 따른 plugging 현상(소듐 유속 감소로 측정) 분석이다. Wastage 실험은 PCHE에서 소듐-CO₂ 경계면에 발생한 균열의 정도가 심하여 고압의 CO₂가 소듐유로로 분사되었을 때, 인접재료의 물리적/화학적 손상 정도를 분석하는 실험이다. 200 bar에 이르는 CO₂ 분사에 의한 물리적 충격과 화학반응에 의한 부식의 영향을 파악함으로써 PCHE 재질 선정 및 사고 전과 정도를 예측하고, 대처설비 개념설정에 활용할 수 있는 자료를 제공하는 것이 실험의 목적이다. Wastage 실험의 주요 평가인자는 시편재질, 분사되는 CO₂ 노즐과 시편 간의 거리, 운전온도, CO₂ 분사 노즐 직경

(균열의 크기 의미) 변화에 따른 시편의 손상도 평가와 분사 CO₂의 역학적 특성 변화 분석이다.

2. 실 험

2-1. 실험장치 구성

실험은 높이 6 m, 폭 3.5 m × 3.5 m의 장치에서 수행된다(Fig. 1). 실험장치는 소듐저장탱크(storage tank), 소듐공급탱크(reservoir tank), 전자기펌프(electromagnetic pump), 전자기유량계(electromagnetic flow meter), 소듐필터(coarse filter, fine filter), plugging 실험 시험부(plugging test section), 소듐증기포획기(vapor trap), wastage 실험 시험부(wastage test section), 폐소듐용기(dump tank), 캐치트레이(catch tray), CO₂증압펌프(CO₂ booster pump), CO₂ 고압가열용기(CO₂ high pressure heating storage), CO₂ 유량제어기(CO₂ mass flow controller), CO₂ 유량계(CO₂ mass flow meter), 공기압축기(air compressor), 가스 집진기(gas collector) 등으로 구성된다. 실험장치 1층에는 저장탱크(약 300 kg 소듐 저장), 폐소듐용기, catch tray, air compressor, MFC,

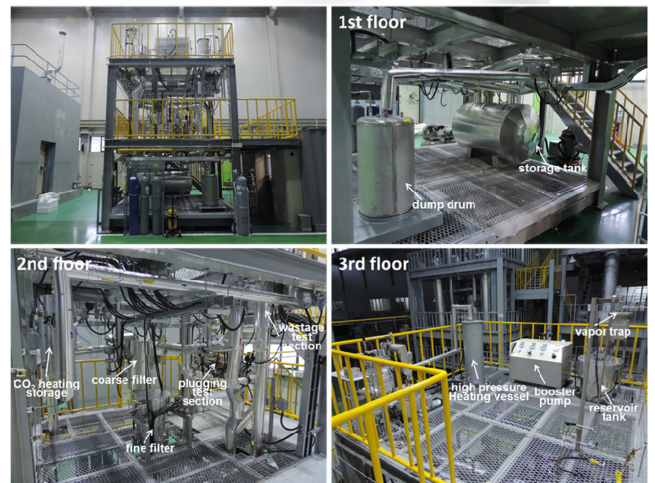
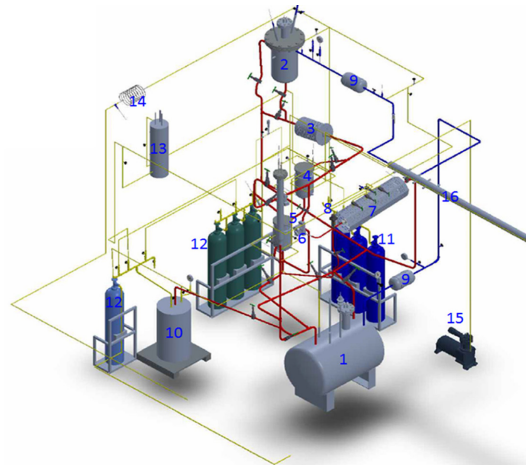


Fig. 1. Facility for the sodium-CO₂ interaction test.

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 1. Storage tank | 9. Vapor trap |
| 2. Reservoir tank | 10. Dump tank |
| 3. Electromagnetic pump | 11. CO ₂ cylinder |
| 4. Coarse filter | 12. Ar cylinder |
| 5. Fine filter | 13. Gas heating storage |
| 6. Electromagnetic flow meter | 14. Gas cooler |
| 7. Plugging test section | 15. Air compressor |
| 8. Wastage test section | 16. Gas collector |

MFM 등이 배치되고, 2층에는 공급탱크, 전자기펌프, 필터, 유량계, plugging 실험 시험부, 가스 collector 등이 설치되고, 3층에는 공급 탱크, booster pump, 고압가열용기, wastage탱크 등이 배치된다. 모든 계측기기(전자기펌프, 전자기유량계, MFC, MFM, 가열선, 전기로 등)는 LabView (NI, 2013 ver.) 제어프로그램으로 제어한다.

2-2. Plugging 실험 절차

Plugging 실험은 장치 내에서 소듐을 순환시키며 시험부 노즐에 CO₂를 주입하는 방법으로 실시한다. 소듐과 시험부의 노즐을 통해 주입된 CO₂가 반응하여 발생하는 생성물에 의해 시험부의 소듐유로가 막힐 때까지 실험을 진행한다. 실험조건은 PCHE의 설계인자를 고려하여 설정한다. PCHE의 단일 소듐유로를 모사하기 위해 길이 1 m [22], 소듐유로 직경 3 mm와 5 mm로 시편을 각각 제작하여

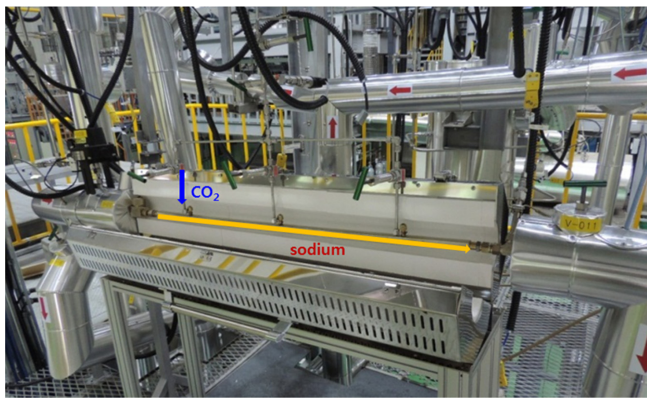


Fig. 2. Equipped plugging specimen for the sodium-CO₂ interaction test.

plugging 실험 시험부로 사용한다(Fig. 2). PCHE 실제 제작 공정에서는 확산접합법으로 채널기판을 적층하는데 본 연구에서 사용된 plugging 실험 시편은 경제적으로 제작하기 위해 모따기 용접법으로 제작하였다. 시편의 안전성 확보를 위해 사전 시험을 통해 용접 부위가 고온(1060 °C, 8시간)에서 벌어지거나 틀어지지 않는 것을 확인하였다. 열교환기 내에서 미세균열이 발생했을 때 CO₂가 소듐 유로로 유입되는 것을 모사하기 위해 시험부의 옆면에 직경 0.1 mm의 노즐을 가공해 CO₂를 30 mL/min 주입한다. 노즐의 형상과 가공 크기에 따른 오차에 의한 실험결과와 재현성 확보를 위해 노즐 가공형상과 치수를 측정을 실시하여 가공성을 확인하였다. Plugging 실험 순서는 개략적으로 다음과 같은 순서로 진행한다 (Fig. 3 참고).

- (1) 시험부를 장치에 체결한 후 실험장치 전체를 예열한다. 장치가 예열되면 실험장치 내부를 Ar가스로 purging 하고 저장탱크에서 공급탱크로 소듐을 충전한다.
- (2) 전자기펌프를 가동시켜 소듐을 순환(0.7 m/s [22])시키면서 소듐을 실험온도(300~500 °C)까지 상승시킨다. CO₂는 고압 용기에서 별도로 가열한다.
- (3) 노즐 부위로 소듐이 역류하는 것을 방지하기 위해 Ar가스를 노즐로 공급한다.
- (4) 소듐과 CO₂ 온도가 실험온도에 도달하면 Ar가스 공급밸브를 차단하고, 시험부 노즐에 설치된 CO₂ 공급 밸브를 개방하여 유동하는 소듐에 CO₂를 주입한다.
- (5) CO₂가 주입되는 동안 소듐의 유량변화를 주시한다.
- (6) 소듐과 CO₂의 반응에 의해 발생한 생성물에 의해 소듐유로가 막혀 순환 중이던 소듐 흐름이 정지(소듐 유속이 0 m/s 도달)하면 CO₂ 주입을 중지하고 실험을 종료한다.

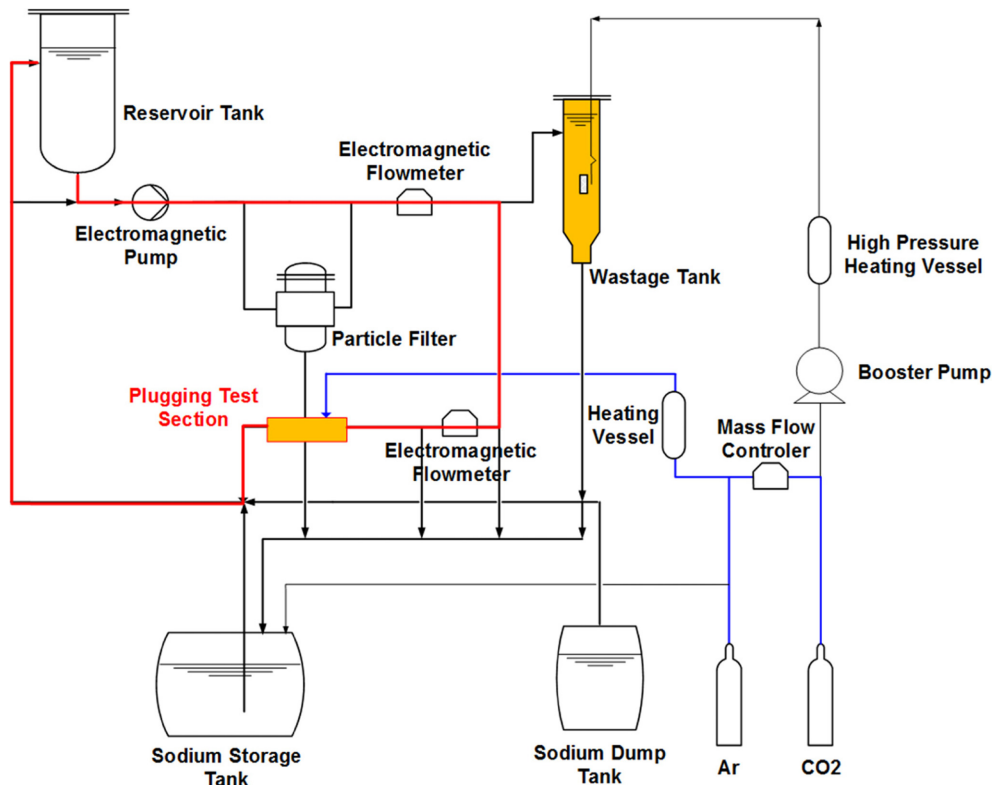


Fig. 3. Schematic diagram for the plugging experiment (red: sodium flow, blue: gas).

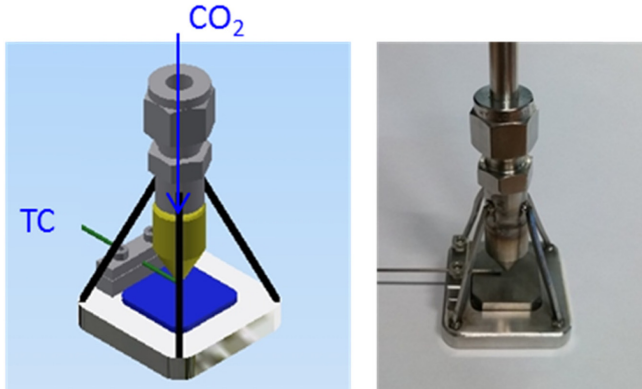


Fig. 4. Wastage specimen.

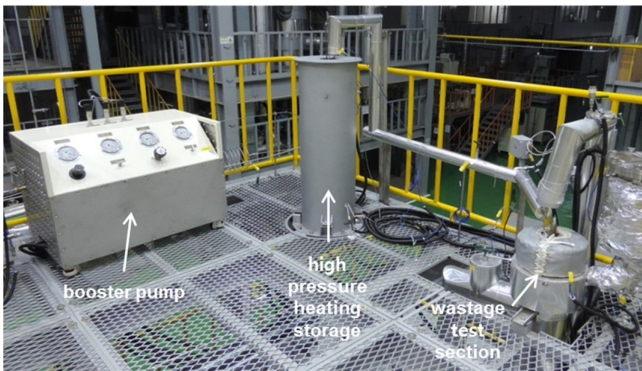
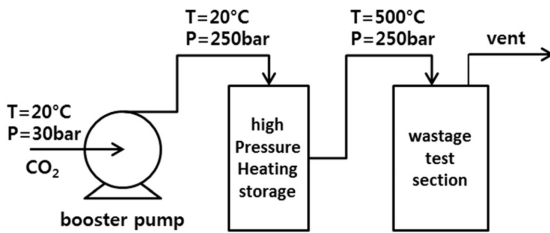


Fig. 5. Wastage experiments system.

2-3. Wastage 실험 절차

Wastage 실험은 wastage test section에 시편(Fig. 4)을 설치한 뒤 고압의 CO₂를 분사 방법으로 실시한다. 시편에는 CO₂ 노즐을 설치하고 고압 분사 시스템(Fig. 5)을 이용해 CO₂를 200 bar 이상 유지되는 범위(250 → 200 bar)에서 지속적으로 분사(약 1분) 한 뒤 시편의 손상도를 확인 및 측정한다. 실제 열교환기에서 소듐과 CO₂ 유로의 경계면에 발생할 수 있는 균열을 0.2~0.8 mm 정도로 가정하여 CO₂ 노즐 직경을 제작하였다(0.2, 0.5, 0.8 mm [22]). 시편 재질은 열교환기 재질로 고려될 수 있는 스테인리스스틸 316(STS316), Inconel600, 9Cr-1Mo(G91) 합금강을 선정하였다. 본 실험에서는 CO₂ 분사 시 CO₂ 온도와 분사 압력 등 물리적 요인에 의한 시편의 손상 정도를 파악하고 노즐에서 분사되는 CO₂의 시편에서의 압력 변화를 측정하는 실험을 수행하였다. Wastage 실험은 다음과 같은 순서로 진행된다.

(1) Wastage 탱크에 시편을 설치하고 장치를 가열한다. 장치가 예열되는 동안 실험장치 내부는 Ar가스 분위기를 유지한다.

(2) CO₂는 booster pump를 이용해 가압하고 고압가열용기에 충전하여 실험온도로 가열한다.

(3) 실험온도에 도달하면 CO₂ 분사 밸브를 개방해 CO₂를 분사하며

압력, 온도, 분사시간을 측정한다.

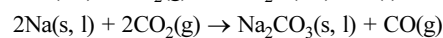
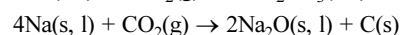
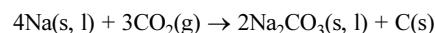
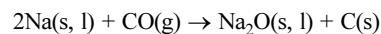
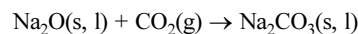
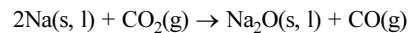
(4) CO₂ 분사가 종료되면 장치를 냉각하고 시편의 손상도를 측정한다. 시편의 손상도는 육안검사를 실시한 뒤, 필요한 경우 ATOS 3D Digitizer (optical 3D scanner)를 이용해 시편의 표면 손상 정도를 정량적으로 평가한다[23].

3. 실험결과

3-1. Plugging 실험결과

PCHE의 단일 소듐유로에 미세균열이 발생해 CO₂가 유입되는 것을 모사하여 소듐유로 직경과 온도 변화에 따른 plugging 현상 특성과 약을 위한 실험 결과는 다음과 같다. 300, 350, 400 °C에서 소듐유로의 직경이 3 mm와 5 mm일 때 모두 CO₂가 주입 즉시 소듐 유량이 감소하는 현상이 발생하였다. 이는 소듐과 CO₂ 반응에 의해 생성되는 고상 물질에 의해 소듐유로가 막히기 시작하기 때문인 것으로 추정된다[6,7,18-21]. CO₂ 주입 밸브를 개방하고 약 3분(주입가스가 Ar에서 CO₂로 전환되는데 필요한 시간) 후부터 소듐 유량이 감소하기 시작되었지만 소듐 흐름이 정지할 때까지 걸린 시간과 유량 감소 양상은 소듐유로 직경과 실험온도에 따라 차이를 보였다. PCHE의 설계 소듐 유속(0.7 m/s)을 고려해 3 mm 직경과 5 mm 직경 소듐유로에서의 소듐 유량은 각각 0.297 L/min, 0.825 L/min로 설정한다.

소듐유로 직경이 3 mm인 경우, 300 °C와 350 °C에서 CO₂ 주입 즉시 소듐 유량이 감소하여 0 L/min에 도달하는 공통적인 결과가 도출되었다(Fig. 6). 이는 PCHE의 소듐유로 직경을 3 mm로 설계했을 때 소듐-CO₂ 경계면에서 미세균열이 발생함과 동시에 해당 소듐유로가 반응생성물에 의해 막혀 해당 유로 외의 유로들로 열교환기 운전이 지속적으로 가능함을 의미한다. 소듐과 CO₂의 반응에 의해 생성되는 sodium carbonate (Na₂CO₃), amorphous carbon (C) 등과 같이 소듐에 대해 용해도가 낮은 염(salt)이나 고상 물질들은 [24] 다음의 경로로 발생하는 것으로 알려져 있다[7].



소듐유로 직경이 5 mm인 경우, CO₂ 주입 후 유량이 감소되기 시작하는 현상은 3 mm의 경우와 유사하게 3분 정도 후부터 나타나지만, 소듐 흐름이 완전히 정지할 때까지 걸리는 시간은 33분(300 °C), 350분(350 °C), 75분(400 °C)으로 3 mm에 비해 상대적으로 오랜 시간이 소요되었다(Fig. 7). 350 °C 실험에서 소듐 유속은 80분 후 0.3 m/s로 감소한 뒤 110분 0.1 m/s로 감소하였다. 즉 plugging 현상은 80분에 발생하기 시작하였는데, 고체 반응생성물이 유로를 막을 때 미세하게 뚫려있는 부분이 있어 실제 소듐의 흐름은 350분까지 지속되었다. 350 °C 실험의 plugging은 80분에 발생하는 것으로 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이러한 실험결과는 소듐유로 면적이 상대적으로 넓은 열교환기에서 소듐-CO₂ 경계면에 미세 균열이 발생한 경우, 소듐유로 면적에 비해 상대적으로 적은 양의 CO₂가 유입되므로 소듐-CO₂ 반응에 의해 고체생성물이 생성되더라도 소듐유로가 고체생성물에 의해 즉시 막히지 않고 소듐유로를 따라 이동하다가 일

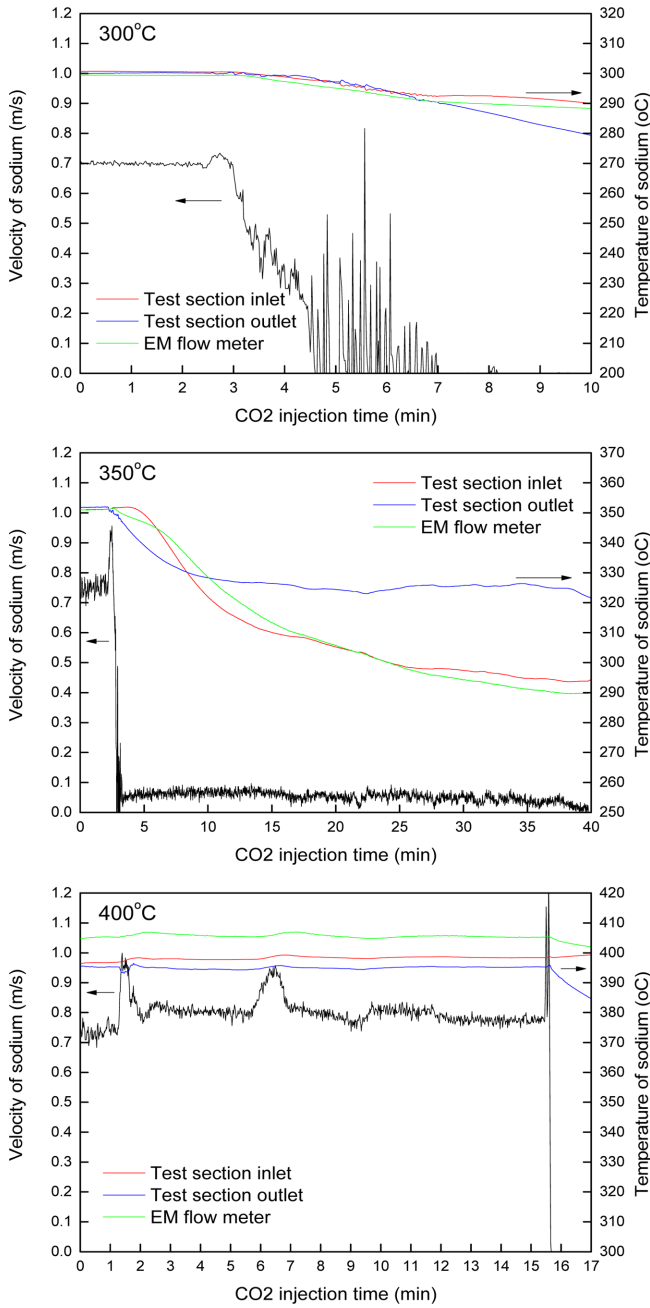


Fig. 6. Flow rates of sodium in 3 mm channel with CO₂ injection into the plugging test section.

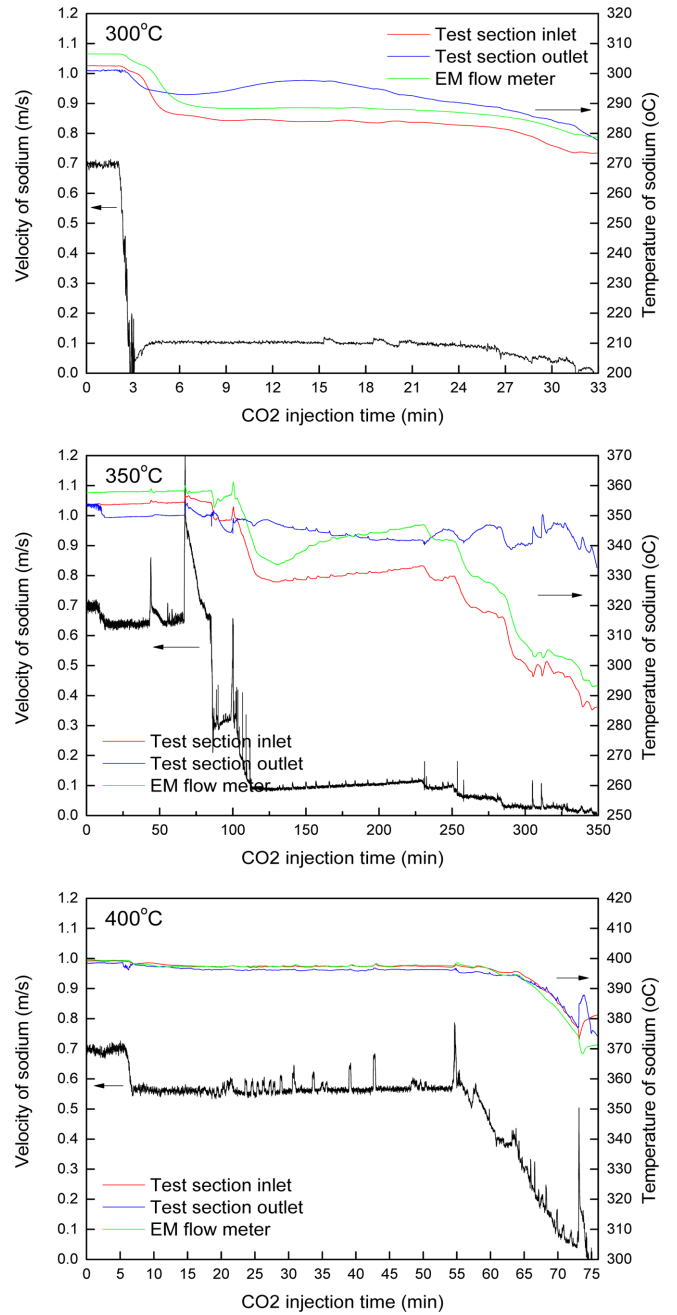


Fig. 7. Flow rates of sodium in 5 mm channel with CO₂ injection into the plugging test section.

정 농도 이상이 되어야 소듐유로를 막을 것을 예상할 수 있는 결과이다. 소듐유로 직경이 3 mm와 5 mm인 경우 모두, 소듐 유속이 감소하면 소듐 온도 또한 감소하는 결과가 나타났다. 이와 같은 온도감소 현상은 소듐과 CO₂가 반응했을 때 반응열에 의해 온도가 상승한다는 기존 문헌들과 다른 실험결과로서 원인 규명을 위한 추가적인 별도의 메커니즘 해석 연구가 필요할 것으로 보인다. 다만 plugging 현상 발생 시 소듐 온도가 하강하는 것을 착안하여, 실제 열교환기 운전 시 소듐유로의 국부적 온도변화 감지를 통해 경계면 손상에 의한 CO₂ 누출을 조기 인지하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 400 °C 이상의 고온 실험에서는 시험부(STS316, Inconel600)의 열팽창에 의해 0.1 mm 직경의 CO₂ 노즐부가 자체적으로 막히는 현

상이 발생했다. Plugging 실험은 소듐을 순환시키며 실험온도까지 장치를 가열시켜, 장치 온도가 정상상태에 도달할 때까지 5~10시간이 소요되는데, 이 시간 동안 순환하는 소듐이 CO₂ 주입 노즐로 역류하는 것을 방지하기 위해 Ar가스를 시험부의 노즐로 지속적으로 주입하다가 주입가스를 CO₂로 교체한다. 이 때 STS316으로 제작한 시험부에 Ar가스 주입 시 400 °C 이하 온도에서는 Ar가스가 일정하게 주입되지만 400 °C 부근에서부터 Ar가스 주입량이 감소하다가 410 °C 부근에서 Ar가스가 주입되지 않는 현상이 나타났다. Inconel600으로 제작한 시험부의 경우 Ar가스 주입량이 감소하기 시작하는 온도가 450 °C에서부터 발생하였다. Ar가스 주입량 변화는 Ar가스 실린더와 가스 주입관 사이의 밸브를 차단했을 때 주입관 내부에 차있는 Ar가

스가 시험부로 빠져나갔을 때 주입관의 압력이 감소하는 것을 확인하는 방법으로 측정이 가능하다. Ar가스의 주입이 원활 했을 때와 시험부의 노즐이 막혀 Ar가스 주입이 원활하지 못했을 때, 가스실린더 측 밸브를 차단 시 가스주입관 내부의 압력이 감소 양상이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 가스 주입이 원활하지 않을 경우 주입관의 압력 하강속도가 가스 주입이 원활했을 때보다 느려진다. 이 시험부의 노즐이 막힌 것은 실험 종료 후 시험부를 해체하여 고압 가스로 노즐을 천공 작업하여 최종적으로 확인한다. 이와 같은 결과는 400 °C 이상의 고온에서 PCHE의 소듐-CO₂ 경계면에 미세한 균열이 발생할 경우 재료의 열팽창 특성에 의해 균열의 크기가 줄어드는 것이 가능할 수 있음을 시사한다.

3-2. Wastage 실험결과

PCHE의 단일 소듐유로에 상대적으로 큰 균열이 발생해 상압 정도의 소듐 측으로 CO₂가 분출되는 것을 모사하고 PCHE 후보재료의 재질, 운전온도, 노즐직경, 시편-노즐 거리의 변화에 따른 wastage 현상 특성 파악을 위한 실험 결과는 다음과 같다. 실험 전/후 시편의 표면 상태 변화를 분석하여 재질의 손상여부를 파악하는데, 후보재료의 재질(STS316, Inconel600, G91 합금강), CO₂ 노즐 직경(0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm), 시편-CO₂ 노즐 거리(2 mm, 4 mm, 6 mm), 운전 온도(400 °C, 450 °C, 500 °C)에 의한 시편 표면 손상은 발생하지 않는 것으로 확인되었다(Fig. 8). 따라서 PCHE의 소듐-CO₂ 경계면에 균열이 0.8 mm 이하로 발생할 경우 CO₂ 압력(200~250 bar)에 의한 인접부 유로의 손상은 PCHE 재질, 균열의 크기(폭 0.8 mm 이하), 운전온도(500 °C 이하)와 무관하게 없을 것으로 예상된다.

소듐-CO₂ 경계면에서 균열 발생 시 소듐유로 측으로 분출되는 CO₂의 역학적 특성 변화 파악을 위해 노즐에서 분사되는 CO₂의 압력 변화를 측정하고 이론적 계산값과 비교하였다. 고압의 CO₂(약 200 bar)를 시편에서 분사할 때, 노즐에서의 CO₂ 평균속도(v)는 뉴턴 제2법칙에 근거한 유선(stream line)에서의 운동방정식(equation of motion)으로부터 계산이 가능하다.

$$\int \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gz = \text{const}$$

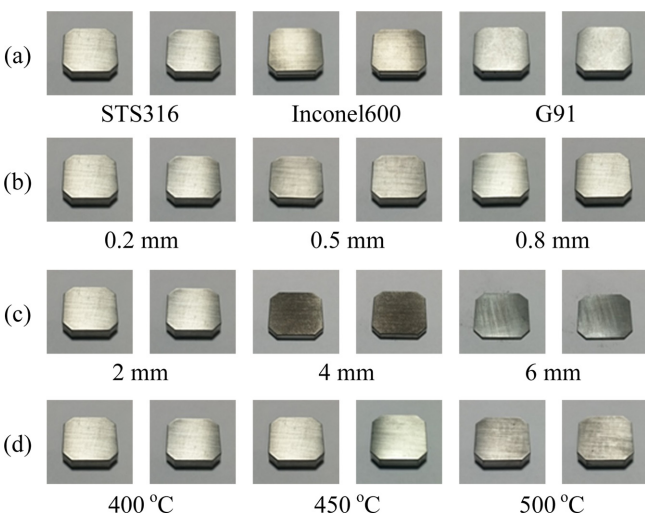


Fig. 8. Surface images of metal plates before (left) and after (right) CO₂ impingement with various (a) metals, (b) diameters of the nozzle, (c) target-nozzle distances; and (d) temperatures.

고온·고압 기체의 노즐에서 분사되는 속도를 구하기 위해 기체의 압축성과 온도에 따른 밀도 변화를 고려하여 다음과 같은 속도식을 도출하여 계산한다.

$$v = \sqrt{\left(\frac{2k}{k-1}\right)\left(\frac{P_{storage}}{\rho_{storage}} - \frac{P_{nozzle}}{\rho_{nozzle}}\right)}$$

(k: CO₂의 specific heat ratio, P_{storage}: 고압가열용기 내 CO₂ 압력, ρ_{storage}: 고압가열용기 내 CO₂ 밀도)

노즐에서의 CO₂ 분사속도를 구한 뒤 분사시간 동안 소모되고 고압가열용기에 남은 CO₂ 압력(P)을 계산하여 실제 압력 측정값을 비교해 CO₂ 분사속도 계산값의 신뢰도를 확인한다(P_{storage,i}: 고압가열용기 내 CO₂ 초기 압력).

$$P = P_{storage,i} - vA\rho \frac{RT}{V_{storage}}$$

(A: 분사 노즐 면적)

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 CO₂ 노즐 직경이 0.2 mm인 경우, 400, 450, 500 °C에서 압력이 약 200 bar(220 bar → 190 bar)가 유지되는 범위에서 CO₂를 분사했을 때 노즐에서의 CO₂ 분사속도는 214.2, 268.5, 299.8 m/s로 계산되었다. 이는 각 온도에서 마하 0.47 0.63, 0.71에 해당하는 분사속도이다. 노즐 직경이 0.5 mm인 경우, 노즐

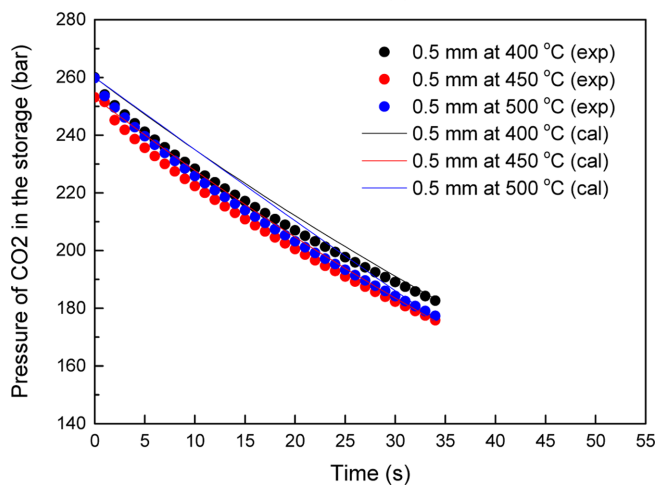
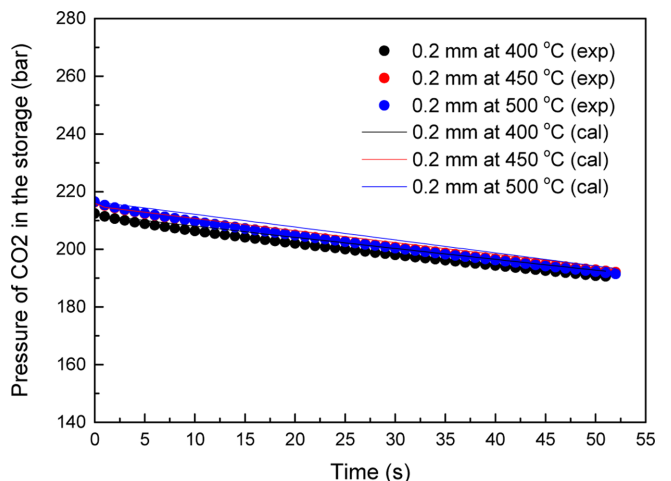


Fig. 9. Comparison of experimental and calculated pressure change in CO₂ storage tank with impingement of CO₂ (nozzle diameter: 0.2 mm (above), 0.5 mm (below)).

면적이 6.25배 증가함에 따라 CO₂ 분사 유량이 약 5~6배 가량 증가하여 260 bar의 CO₂를 고압가열용기에 충전하여 분사하면 30초 정도 후 분사압력이 200 bar로 하강하였다. 노즐에서의 분사속도는 210.9, 226.7, 234.2 m/s로 계산되었다. 이는 400, 450, 500 °C에서 마하 0.44, 0.53, 0.54에 해당하는 분사속도이다. 노즐에서의 고압 CO₂ 분출에 의한 압력 변화 결과는 실제 열교환기의 경계면에서 상대적으로 큰 균열이 발생할 경우, 균열부위에서의 압력 하강에 대한 정량적 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

PCHE의 소듐-CO₂ 압력 경계면에서 균열이 발생하여 CO₂가 소듐 측으로 이동할 때 발생 가능한 현상을 규명하여 PCHE 파손에 대한 대처 설계에 필요한 실험 자료를 산출하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 소듐-CO₂ 경계면에 미세하게 균열이 발생하여 CO₂가 소듐 측으로 유입될 때 소듐과 CO₂의 반응으로 인해 발생하는 고체생성물에 의해 소듐유로가 막히는 현상을 모사하는 plugging 실험과 경계면에 발생한 균열의 정도가 심해 고압의 CO₂가 소듐유로로 분사되는 것을 모사하여 인접재료의 물리적/화학적 손상 정도 평가 및 분사되는 CO₂의 역학적 특성을 분석하는 wastage 실험을 실시하였다.

Plugging 실험에서 소듐유로 직경이 3 mm일 때 CO₂ 주입 즉시 소듐 흐름이 정지한 반면 소듐유로 직경이 5 mm일 때는 유량이 감소되기 시작하는 현상은 3 mm의 경우와 유사하게 CO₂ 주입 즉시 나타났지만 소듐 흐름이 정지할 때까지 걸리는 시간은 상대적으로 오랜 시간이 소요되었다. 이러한 실험결과는 실제 PCHE의 소듐-CO₂ 경계면에서 미세균열이 발생했을 때, 소듐유로가 3 mm로 좁을 경우 소듐유로가 반응생성물에 의해 막혀 해당 유로 외의 유로들로 열교환기 운전이 지속적으로 가능하고 소듐유로가 넓어질수록 균열이 생긴 유로가 고체생성물에 의해 즉시 막히지 않고 소듐유로를 따라 계통을 이동하다 일정 농도 이상이 되어야 유로를 막게 할 것을 예상할 수 있는 결과이다.

Wastage 실험에서는 PCHE 후보재료의 재질(STS316, Inconel600, G91 합금강), 운전온도(400~500 °C), CO₂ 노즐직경(0.2~0.8 mm), 시편-노즐 거리(2~6 mm)와 무관하게 고압(약 200 bar)의 CO₂ 분사에 의한 시편의 물리적 손상(erosion)은 나타나지 않았다. PCHE의 소듐-CO₂ 경계면에 직경 0.8 mm 이하의 균열이 발생할 경우 CO₂ 압력(200~250 bar)에 의한 인접부 채널의 손상은 PCHE 재질, 균열의 크기(폭 0.8 mm이하), 운전온도(500 °C이하)와 무관하게 없을 것으로 예상된다. 경계면 균열에 의한 고압 CO₂ 누출 현상과 유사한 노즐에서의 분사되는 CO₂의 분사속도는 마하 0.4~0.7인 것으로 확인되었다.

감 사

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Dostal, V., Hejzlar, P. and Todreas, N. E., "Medium-power Lead-alloy Fast Reactor Balance-of-plant Options," *Nucl. Technol.*, **147**, 388-405(2004).

2. Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M. J., "High-performance Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next-generation Nuclear Reactors," *Nucl. Technol.*, **154**, 265-282(2006).

3. Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M. J., "The Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle; Comparison to Other Advanced Power Cycles," *Nucl. Technol.*, **154**, 283-301(2006).

4. Chang, Y. I., Konomura, M. and Pinto, P. L., "A Case for Small Modular Fast Reactor," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 264-269(2007).

5. Moiseyev, A. and Sienicki, J. J., "Investigation of Alternative Layouts for the Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle for a Sodium-cooled Fast Reactor," *Nucl. Eng. Des.*, **239**, 1362-1372 (2009).

6. Momozaki, Y., Cho, D. H., Sienicki, J. J. and Moiseyev, A., "Experimental Investigations on Sodium Plugging in Narrow Flow Channels," *Nucl. Technol.*, **171**, 153-160(2010).

7. Miyahara, S., Ishikawa, H. and Yoshizawa, Y., "Experimental Investigation of Reaction Behavior Between Carbon Dioxide and Liquid Sodium," *Nucl. Eng. Des.*, **241**, 1319-1328(2011).

8. Floyd, J., Alpy, N., Moiseyev, A., Haubensack, D., Rodriguez, G., Sienicki, J. and Avakian, G., "A Numerical Investigation of the sCO₂ Recompression Cycle Off-design Behaviour, Coupled to a Sodium Cooled Fast Reactor, for Seasonal Variation in the Heat Sink Temperature," *Nucl. Eng. Des.*, **260**, 78-92(2013).

9. Vivaldi, D., Gruy, F., Simon, N. and Perrais, C., "Modeling of a CO₂-gas Jet Into Liquid-sodium Following a Heat Exchanger Leakage Scenario in Sodium Fast Reactors," *Chem. Eng. Res. Des.*, **91**, 640-648(2013).

10. Yoon, H. J., Ahn, Y., Lee, J. I. and Addad, Y., "Potential Advantages of Coupling Supercritical CO₂ Brayton Cycle to Water Cooled Small and Medium Size Reactor," *Nucl. Eng. Des.*, **245**, 223-232(2012).

11. Jeong, W. S. and Jeong, Y. H., "Performance of Supercritical Brayton Cycle Using CO₂-based Binary Mixture at Varying Critical Points for SFR Applications," *Nucl. Eng. Des.*, **262**, 12-20(2013).

12. Halimi, B. and Suh, K. Y., "Computational Analysis of Supercritical CO₂ Brayton Cycle Power Conversion," *Energ. Convers. Manage.*, **63**, 38-43(2012).

13. Locatelli, G., Mancini, M. and Todeschini, N., "Generation IV Nuclear Reactors: Current Status and Future Prospects," *Energ. Policy*, **61**, 1503-1520(2013).

14. Latgé, C. and Simon, N., "Investigation of Sodium-carbon Dioxide Interactions; Potential Consequences on Reactor Operation," *Proceeding of Global 2007*, Boise, Idaho, September 9-13(2007).

15. Chang, Y. I., Grandy, C., Pinto, P. L. and Konomura, M., "Small Modular Fast Reactor Design Description," ANL-SMFR-1, Argonne National Laboratory, July 1(2005).

16. Dostal, V., Driscoll, M. J. and Hejzlar, P., "A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors," MIT-ANP-TR-100, Massachusetts Institute of Technology, March 10(2004).

17. Hori, M., "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors," *Atom. Energ. Re.*, **18**, 707-778 (1980).

18. Eoh, J.-H., Jeong, J.-Y., Han, J.-W. and Kim, S.-O., "Numerical Simulation of a Potential CO₂ Ingress Accident in a SFR Employing An Advanced Energy Conversion System," *Ann. Nucl. Energ.*, **35**, 2172-2185(2008).

19. Eoh, J.-H., No, H. C., Yoo, Y.-H., Jeong, J.-Y., Kim, J.-M. and

- Kim, S.-O., "Wastage and Self-plugging by a Potential CO₂ Ingress in a Supercritical CO₂ Power Conversion System of An SFR;" *J. Nucl. Sci. Technol.*, **47**, 1023-1036(2010).
20. Eoh, J.-H., No, H. C., Yoo, Y.-H. and Kim, S.-O., "Sodium-CO₂ Interaction in a Supercritical CO₂ Power Conversion System Coupled with a Sodium Fast Reactor;" *Nucl. Technol.*, **173**, 99-114(201).
21. Eoh, J.-H., No, H. C., Lee, Y.-B. and Kim, S.-O., "Potential Sodium-CO₂ Interaction of a Supercritical CO₂ Power Conversion Option Coupled with an SFR: Basic Nature and Design Issues;" *Nucl. Eng. Des.*, **259**, 88-101(2013).
22. Lee, T.-H., Cha, J.-E., Eoh, J.-H., Kim, S.-O. and Hahn, D.-H., "Preliminary Design of PCHE in S-CO₂ Brayton Cycle Coupled to KALIMER-600;" Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting 2008, Gyeongju, Korea, May 29-30(2008).
23. Jeong, J.-Y., Kim, J.-M., Kim, T.-J., Choi, J.-H. and Kim, B.-H., "Wastage Characteristics of a Modified 9Cr-1Mo Steel Tube Material for a SFR SG;" Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting 2009, Jeju, Korea, May 22(2009).
24. Gunther, W. H., "Sodium Technology;" Atomics International, North American Rockwell, California(1970).