

액체중금속에 있어서 스테인레스 강의 부식거동

정지영*, 송대영
한국원자력연구소
(jyjeong@keri.re.kr*)

The Corrosion Behavior of Stainless Steel in Heavy Liquid Metal

Ji Young Jeong*, Tae Yung Song
Korea Atomic Energy Research Institute
(jyjeong@keri.re.kr*)

서론

고속증식로에 있어서 냉각재는 열효율 제고 및 안전성 측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 많은 후보물질들 가운데 액체금속 나트륨이 열물리적, 핵적 특성 등이 매우 우수해 지금까지 연구개발된 모든 고속로에 있어서 냉각재로 사용되어 왔으나 한편으로 이는 화학적인 활성이 매우 커서 대기 중의 산소나 물과 접촉하게 되면 화재 및 폭발을 일으키게 되어 원자로의 안전성과 이에 따른 경제성 확보에 큰 장애요소로 작용하게 되었다. 따라서 많은 나라들이 이를 대체할 수 있는 물질에 대한 연구를 수행하던 가운데 최근들어 납-비스무트 합금이 화학적 활성이 낮고, 비등점이 높으며(1670°C), 계통 내에서의 냉각재 작동압력이 낮아 시설의 안전성을 높이고, 장치설계 및 핵연료 작업환경을 크게 단순화시키는 등의 장점으로 인해 가능성있는 물질로 고려되고 또한 열전달 유체로써 일부 사용되어 왔으며[1-3], 본 연구소에서 개발 중인 미임계 핵변환로의 냉각재 및 표적물질로도 선정되었다.[4]

그러나 납-비스무트 합금을 사용함에 있어서 문제가 되는 것 가운데 하나가 바로 구조재의 부식문제이다. 납-비스무트 합금에 의한 부식을 억제시키고 구조재에 내식성을 주는 방법으로는 강 표면에 산화물 보호막 형성, 냉각재 중의 산소농도 제어 및 적합한 새로운 강의 개발 등이 있는데,[5,6] 본 연구에서는 일반적으로 원자로 구조재로 많이 사용되는 스테인레스 강 316LN에 대해 냉각재 중의 산소 농도를 제어하는 방식으로 정적인 부식실험을 수행하여 이의 활용 가능성을 조사하였다.

실험

실험은 Fig. 1에 보인 것과 같은 정적부식실험장치를 이용해서 수행하였다. 먼저 2mm 두께의 시편을 1050°C에서 1시간, 750°C에서 2시간 동안 열처리 한 후, Al₂O₃ crucible에 담겨있는 납-비스무트 합금(32g)에 넣고 외부 furnace를 이용해 수행하고자 하는 온도까지 가열하여 원하는 시간동안 유지시켰다. 실험을 수행하기 전 장치는 Ar5%H₂ gas를 이용하여 3일 동안 purge 시켰으며, 산소농도는 Ar+H₂+H₂O를 일정 압력비로 혼합한 가스를 이용하여 조절하였다.

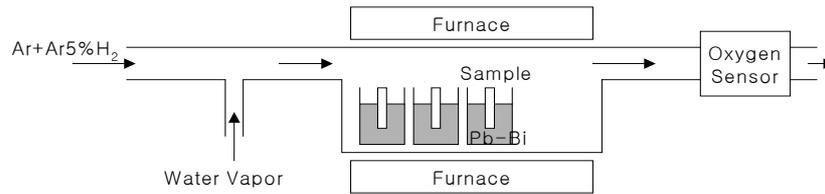


Fig. 1. Sketch of stagnant test apparatus

Crucible에 담겨있는 시편은 500 및 2000시간이 지난 후 장치에서 빼내 주사전자현미경(SEM)과 에너지 분산형 엑스선 분광기(EDX)를 이용해서 시편의 형상과 주요 원소의 화학적 조성을 분석, 조사함으로써 금속의 부식정도를 확인하였다.

결과 및 토론

650°C, 산소농도 $<10^{-8}$ wt%에서 500시간이 지난 후의 SEM 사진을 Fig. 2에 보였다.

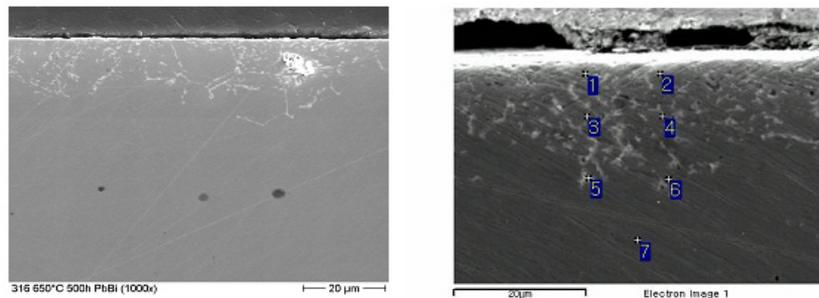


Fig. 2 Image of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C, $O_2 < 10^{-8}$ wt%

그림에서 볼 수 있는 것처럼 납-비스무트 합금과의 접촉면을 따라 아래로 약 $20\mu\text{m}$ 이상 부식이 진행되었음을 알 수 있다. 보다 자세히 알아보기 위해 실시한 EDX 분석결과를 Table 1에 정리하였다. 기준 값은 316LN의 주요성분인 Fe, Cr, Ni과 시편에 침투가 가능한 Pb, Bi, O의 성분만을 더하여 100at%가 되도록 한 것이다.

Table 1. Comparison of the chemical composition of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C, $O_2 < 10^{-8}$ wt%

| | Fe | Cr | Ni | Pb | Bi | O |
|----------|----|----|----|----|----|---|
| Original | 70 | 19 | 11 | | | |
| 1 | 52 | 19 | | | 21 | 8 |
| 2 | 73 | 27 | | | | |
| 3 | 70 | 20 | 9 | | 1 | |
| 4 | 69 | 18 | 11 | | 2 | |
| 5 | 73 | 19 | 8 | | | |
| 6 | 78 | 15 | 2 | 2 | 3 | |
| 7 | 69 | 20 | 11 | | | |

7번 지점을 제외하곤 모두 부식 영향을 받았음을 알 수 있었다. 특히 납-비스무트와 접촉한 표면 바로 아래쪽 1, 2번 지점에서 Ni성분이 전혀 검출되지 않음을 볼 수 있는데, 이

는 납-비스무트 합금에 대한 Ni성분의 용해도가 다른 원소들에 비해 매우 큰 것으로 보고된 연구결과들에 일치된다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 이 조건에서는 316LN을 구조재로 사용할 수 없을 것으로 판단된다.

다음으로 동일온도에서 산소농도를 10^{-6} wt%로 조절한 후 수행한 실험결과를 Fig. 3과 Table 2에 보였다. 표면에 불안정한 산화물 층이 형성된 것이 보이긴하나 이 조건하에서도 부식은 여전히 진행되었으며, 내부 깊숙이 산소와 납, 비스무트 등이 침투되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 이 조건하에서도 316LN은 구조재로 적합하지 않음을 확인할 수 있었다.

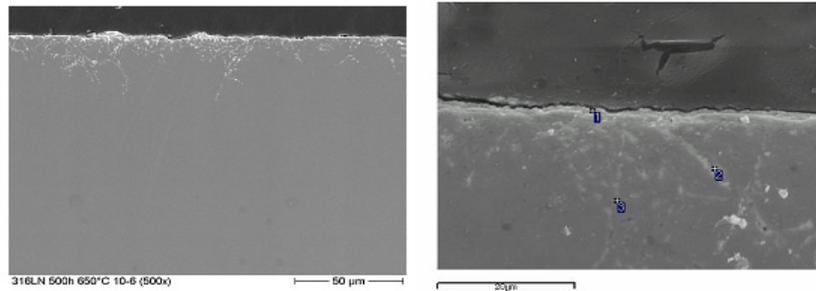


Fig. 3 Image of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C , $\text{O}_2=10^{-6}\text{wt}\%$

Table 2. Chemical composition of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C , $\text{O}_2=10^{-6}\text{wt}\%$

| | Fe | Cr | Ni | Pb | Bi | O |
|---|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 30 | 8 | | 9 | | 53 |
| 2 | 59 | 11 | | 2 | 10 | 18 |
| 3 | 87 | 13 | | | 1 | |

Fig. 4와 Table 3은 산소농도 10^{-5} wt%에서의 실험결과를 보인 것이다. 여전히 부식이 발생하였음을 확인할 수 있어, 650°C 의 온도범위에서는 산소농도 제어만으로는 316LN의 부식을 방지할만한 보호막을 형성할 수 없음이 판명되었다.

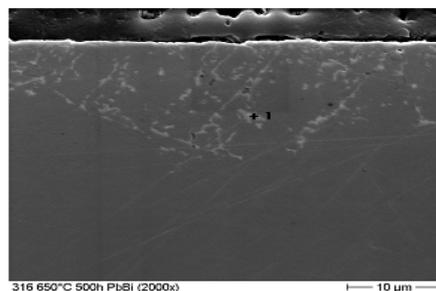


Fig. 4 Image of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C , $\text{O}_2=10^{-5}\text{wt}\%$

Table 3. Chemical composition of the specimen after 500hr exposure to lead-bismuth alloy at 650°C, O₂=10⁻⁵wt%

| | Fe | Cr | Ni | Pb | Bi | O |
|---|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 30 | 8 | | 9 | | 53 |

끝으로 납-비스무트 합금의 온도를 500°C로 낮추어 거의 무산소 분위기로 2000시간동안 부식실험을 수행한 결과를 Fig. 5에 보였다. 온도범위를 상당히 낮추었음에도 불구하고 부식은 여전히 발생하였으며, 표면의 니켈성분이 용해됨을 확인할 수 있었다. 다만, 650°C의 경우에 비해 부식의 정도가 크게 심하진 않았다.

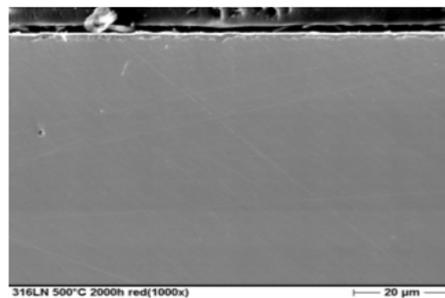


Fig. 5 Image of the specimen after 2000hr exposure to lead-bismuth alloy at 500°C, O₂<10⁻⁸wt%

결론

실험결과들을 종합해볼 때 상기 온도조건에서 산소농도 제어 방식만으로는 스테인레스 강 316LN을 납-비스무트 합금을 냉각재로 사용하는 원자로의 구조재로 사용할 수 없음을 확인하였다. 표면을 내식성이 강한 재료로 코팅하거나 조건에 적합한 새로운 강을 개발하는 방안이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] B.F.Gromov et al., Use of lead-bismuth coolant in nuclear reactors and accelerator-driven systems, Nucl. Eng. Des., 173 (1997) 207-217
- [2] Hiroshi Sekimoto and Zaki Su'ud, Design study of lead- and lead-bismuth-cooled small long-life nuclear power reactors using metallic and nitride fuel, Nucl. Technol. 109 (1995) 307-313
- [3] I.V.Karatushina and A.V.Beznosov, Experimental investigations fo substantiation of the concept of a thermonuclear reactor cooled with lead-based liuid metals, Atomic Energy 78 (1995) 294-295
- [4] W.S.Park et al., HYPER, A system for clean nuclear energy, Nucl. Eng. Des., 219 (2002) 207-223
- [5] A.Ye.Rusanov et al., Problems of structural materials corrosion in lead-bismuth coolant, HLMC-98 Conference (1999) 133-140
- [6] B.F.Gromov, Method of maintaining the corrosion resistance of a steel circulation system with a lead-containing coolant, European Patent 0829556 A1 (1998)