

SFR 핵연료피복관용 FM 강 개발현황

김태규, 한창희, 김성호, 이찬복
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
tkkim2@kaeri.re.kr

1. 서론

현재 주요 원자력 국가에서는 제4세대 원자로인 소듐냉각고속로 (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. SFR에서 핵연료 피복관은 고온에서 핵연료의 핵분열 생성기체에 의한 열적 크립과 고속 중성자 분위기에서 조사 팽윤이 발생하므로, 크립 저항성과 같은 고온 기계적 특성이 우수하여야 한다. 핵연료 피복관의 소재는 조사 저항성이 우수한 것으로 알려져 있는 ferritic/martensitic (FM) 강을 고려하고 있다. 그러나 기존에 개발되었거나 화력발전소에서 상용되는 FM 강은 약 620°C 이상의 온도에서 기계적 특성이 급격히 저하되는 것이 단점으로 지적되고 있다. 따라서 원자로의 안전 운전과 효율성 측면에서 650°C까지 고온에서도 성능이 우수한 FM 강의 개발이 필수적으로 요구된다. 여기에서는 SFR 핵연료피복관용 고성능 FM 강을 개발하는 과정에서 합금원소와 제조공정 등과 관련된 연구개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

2. 실험 및 결과

2.1 합금원소의 영향

FM 강의 기계적 특성에 미치는 탄소 함량의 영향을 평가하기 위하여 Fe-9Cr-2W 기본 조성에 탄소의 함량이 각각 0.05, 0.07 및 0.11 wt%인 3 종류의 FM 강을 설계하였다. 이들 FM 강은 진공유도용해하여 약 30 Kg 용량의 잉고트로 제조하였다 (그림 1). 제조된 잉고트는 1200°C에서 2시간 동안 예열한 후 15 mm 두께까지 열간압연하였다 (그림 2). 열간압연한 판재는 1050°C에서 1시간 동안 노말라이징한 후 750°C에서 2시간 동안 텁퍼링하였다. 열처리를 마친 판재에서 시편을 채취한 후 미세경도를 측정하였다. 또한 판재의 열간압연 방향으로 ASTM E8-04 규격에 따라 인장시험을 채취한 후 650°C에서 2×10^3 /s의 변형률로 인장시험을 함께 수행하였다.



Fig. 1 FM steel ingots



Fig. 2 Hot rolling of FM steel ingot

그림 3은 FM 강의 미세경도에 미치는 탄소 함량의 영향을 보여주고 있다. 탄소 함량이 증가함에 따라 미세경도도 연속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 탄소함량이 증가함에 따라 석출되는 $M_{23}C_6$ 탄화물의 함량이 증가하였기 때문으로 보여진다. 그림 4는 650°C에서 FM 강의 고온 인장 특성에 미치는 탄소 함량의 영향을 보여주고 있다. 탄소함량이 0.05wt%에서 0.07wt%로 증가함에 따라 항복강도와 인장강도는 증가하였다. 그러나 탄소함량이 0.11wt%로 증가함에 따라 항복강도와 인장강도는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 650°C에서 크리프 시험에서도 유사한 결과가 관찰되었다. 이러한 현상은 탄소함량이 0.07wt%까지 증가함에 따라 석출물의 함량은 증가하였으나, 탄소함량이 0.11wt%까지 증가함에 따라 탄화물의 크기가 동시에 증가하였기 때문으로 판단된다.

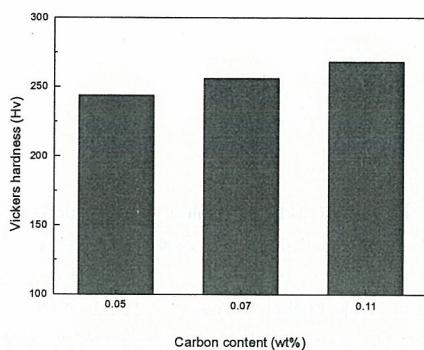


Fig. 3 Microhardness test results

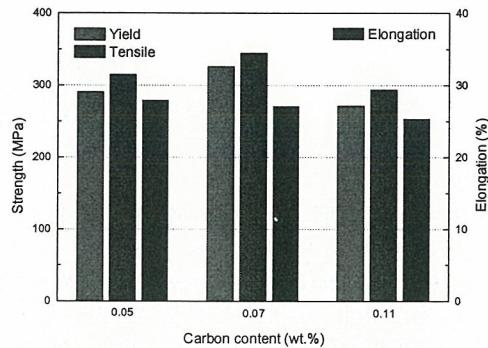


Fig. 4 Tensile test results at 650°C

2.2 제조공정

핵연료 피복관을 제조하기 위하여 열간 단조와 열간 압출한 tube는 cold pilgering과 cold drawing 등과 같은 냉간가공과 열처리 등의 후속 공정을 거치게 된다. 그림 5는 냉간가공 공정을 연구하기 위하여 열간압연 한 FM 강 판재의 냉간압연하고 있는 판재를 보여주고 있다. 그림 6은 두께 1 mm의 제조된 냉간압연 판재를 나타내었다. 이 과정에서 냉간가공과 중간 열처리 등의 제조공정 변수를 조절하면 고온 인장특성을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.



Fig. 5 Cold rolling

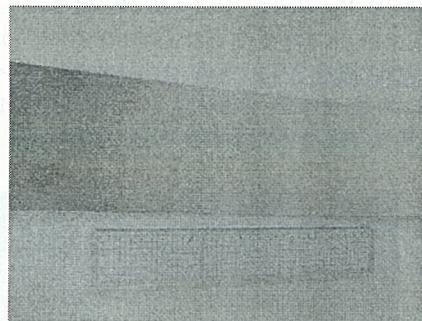


Fig. 6 Cold rolled sheet (1mm T)

3. 결론

SFR 핵연료피복관용 FM 강을 개발하기 위하여 합금조성과 제조공정 등에 대한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 우수한 연구결과를 도출하고 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 원천 물질 및 제조공정 특허를 확보한 후 독자 기술력으로 고성능 핵연료피복관을 제조할 계획이다.

사사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구과제 중의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.