

합금 690의 미세 조직, 기계적 성질 및 부식 특성에 미치는 Mo 첨가의 영향

전 유 택* · 김 영 식** · 박 용 수*** · 장 진 성**** · 국 일 현****

*현대강관 기술연구소, **안동대학교 재료공학부

연세대학교 재료공학부, *한국원자력연구소

Influences of Mo Addition on the Mirostructure, Mehanical Properties and Corrosion Resistance of Alloy 690

Yu Taek Jeon*, Young Sik Kim**, Yong Soo Park***, Jin Sung Jang****, Il-Hiun Kuk****

**Technical Laboratories, Hyundai Pipe Co. Ltd., 540-850*

***Department of Materials Engineering, Andong National University, 760-749*

****Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, 120-749*

*****Korea Atomic Energy Research Institute, 305-353*

Steam generator is the interface between primary side and secondary side of nuclear power plant(NPP). If the primary water with radioactivity may leak to secondary water, it threatens the safety of NPP and shortens the lifetime of steam generator. This work was carried out to improve the corrosion resistance of steam generator tubing materials of NPP. New designed alloy 690 was manufactured, and this molybdenum-bearing alloy 690 was evaluated for microstructure, mechanical properties and corrosion resistance by annealing. With the addition of molybdenum, grain size was decreased. It seemed that grain growth was suppressed due to the precipitation by molybdenum containing carbides. Also, molybdenum addition increased the hardness and improved tensile strength and yield strength without the loss of elongation. The corrosion resistance of alloy 690 was greatly improved by molybdenum addition from the results of pitting test and anodic polarization test. Molybdenum did not also decreased the corrosion resistance in the various ratios of Cu^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} ions in corrosion environments. It can be concluded that molybdenum addition in alloy 690 has a beneficial effect on the mechanical properties and corrosion resistance.

Keywords : nuclear power plant, steam generator tubing, alloy 690, molybdenum, annealing, micro-structure, mechanical properties, pitting, anodic polarization test.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기 발생기 중 중요한 관심의 대

상이 된 전열관에 사용된 재료는 과거에는 304형 스테인리스강이 사용되었으나, Cl-분위기하에서 SCC 문제를 일으켜 합금 600이 개발되어 사용되었다. 그

러나 이 역시 가압수형 원자로(PWR)의 증기발생기의 고온 환경 하에서 IGSCC(Inter-Granular Stress Corrosion Cracking)나 IGA(InterGranular Attack)와 같은 다양한 종류의 입계 손상에 의한 피해를 입었다. 따라서 새로운 대체재료인 합금 690이 개발되었다. 이 합금은 합금 600에 Cr함량을 30%까지 올리고 탄소의 함량도 최대 0.05%까지 낮춘 것이다. 현재까지의 연구 결과에 의하면,¹⁾ 합금 600에 비해 우수한 내식성을 보인다고 보고되어 왔으나 각종 부식 환경하에서의 연구 자료는 부족한 실정이다. 한편 원자력 발전소 증기 발생기 전열관 재료로 사용되고 있는 합금 600 또는 합금 690의 제조 사양에는 Mo의 함량에 대한 규정치가 없다. 그러나 많은 스테인리스강이나 Ni-기 초합금에서 Mo의 첨가에 따라서 탁월한 내식성을 나타내고 있음이 증명되고 있지만, 전열관용 합금 690에서의 Mo의 역할에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있다. 스테인리스강 등에 있어서 Mo첨가에 따른 내식성 향상 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다. : (1) 첨가된 Mo이 부동태 피막 중의 Fe의 용해를 선택적으로 촉진시켜 부동태 피막 중의 Cr양을 증가시켜서 내식성이 향상된다는 제안,²⁻⁵⁾ (2) 합금 중에 Mo를 첨가할 경우, 부동태 피막 중에 여러 가지의 화학적 상태(예, 금속 상태의 Mo, MoO₂, Mo⁴⁺, Mo⁶⁺ 등)에 의해서 내식성이 향상된다는 제안,⁶⁻⁹⁾ (3) Mo-chloride 착화합물의 생성 또는 MoO₄²⁻ 이온의 생성 등에 의한 내식성 향상¹⁰⁻¹³⁾ 등의 여러 이론들이 제안되어 있다. 한편 최근의 연구 결과에 따르면,^{14, 15)} Mo의 첨가 효과가 염화물 환경에서는 항상 부식 저항성을 향상시키고 부동태 전류 밀도를 감소시키지만, 황산 용액 중에서는 부동태 전류 밀도를 증가시키고 있어서 Mo의 첨가 효과에 대한 평가는 합금계와 부식 환경에 따라서 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 합금 690을 연구 대상 합금으로 선정하여 합금 중에 Mo 함량을 변화시키고, 각 합금에 대하여 소둔 열처리를 행하여 이에 따른 미세 조직, 기계적 성질 및 부식 저항성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

실험 합금은 Ni-30%Cr-6%Fe의 기본 조성에 Mo의 함량을 0%(690M0), 3%(690M2)로 변화시켜 진공 고주파 유도 용해로 제작하였다. 주조된 각 합금은 1290°C에서 120분간 균질화 열처리 후 각 시료를 최종 두께 4mm로 열간 압연을 행하였다. 열연 후의 스케일 제거를 위한 산세는 65°C, 4% HF+16% HNO₃ 용액에서 행하였다. 냉간 압연은 열간 압연 방향과 일치되는 방향으로 최종 두께 1.5mm로 각 시편에 대해서 실시하였다. 소둔 열처리는 냉간 압연 조직을 제거하고 주조 시에 생성된 탄화물들을 기지 내에 고용시키는 적절한 온도를 결정하기 위하여 1050°C, 1100°C, 1150°C의 세 가지 온도로 행해졌다. Ar 분위기에서 10분간 행하였고, 소둔 처리 후 곧바로 수냉하였다. Table 1은 실험 합금의 화학 조성이다.

Table 1. Chemical compositions of experimental alloys (wt%)

	C	Mn	Si	Cr	Nb	Ti	Fe	Mo	P	S	Ni
690M0	0.026	0.5	0.3	30.2	0.6	0.24	5.6	-	-	0.003	62.5
690M2	0.023	0.5	0.3	31.5	0.6	0.29	5.5	3.07	0.027	0.005	58.5

2.2 미세 조직 관찰 및 기계적 시험

조직관찰은 25ml 증류수 + 20ml HCl + 20ml HNO₃ + 10ml H₂O₂으로 에칭 후 광학현미경으로 관찰하고 Line Intersection방법에 의해 결정립의 크기를 구하였다.¹⁶⁾ 미세 석출물을 관찰하기 위해 투과 전자 현미경(TEM) 촬영을 행하였다. TEM 용 시편은 1.5mm 판재를 20~30 μ m까지 얇게 가공 후 twin jet polisher(Struers사 Tenupol 3)에서 에탄올(90%) + Perchloric acid(10%)의 전해액으로 전해 연마를 행하였다. 가속 전압 120 kV에서 명시 야상, 극부 전자 회절상을 얻었다. 한편 소둔 온도와 조성의 변화에 따른 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 시험기(1127 Instron)를 이용하여 항복 강도, 인장 강도 및 연신율을 측정하였다. 경도는

Rockwell 경도기를 사용하여 하중 100kg을 가하여 측정하였다. 경도값은 10차례 측정하여 가장 높은 값과 낮은 값은 뺀 나머지 값을 평균하여 구하였다.

2.3 부식 저항성 평가 시험

양극 분극 시험(APT, Anodic Polarization Test) : 시편의 준비는 20mm×20mm×1.5mm로 절단한 시편의 뒷면에 STS 304스테인레스 강봉을 경납을 이용하여 연결하고 고무 튜브를 씌운 다음 상업용 호마이카로 응고, 고정시켰다. SiC 연마지로 600번 까지 연마한 후 에틸 알코올로 초음파 세척하고 시편의 노출 면적을 1cm²로 하고 나머지 부분은 아탈다이트로 칠하여 주었다. 시험 용액은 3.5wt% NaCl 용액, 0.5N HCl이었으며, 용액 중의 용존 산소의 영향을 배제하기 위하여 고순도(순도 99.99%) 질소가스를 100ml/min의 속도로 30분간 주입하였다. 이 용액을 반응조에 넣고 시편을 Potentiostat (Model IM5d, Zahner Elektrik, Germany)에 연결하였다. 그 뒤 시편 표면에 생성되어 있는 산화물의 영향을 제거하기 위하여 -458mV(SHE)의 전위를 10분 동안 가하고 10분 동안 개방 회로 전위 상태로 유지한 뒤 부식 전위를 측정하고 부식 전위보다 약 50mV 낮은 전위부터 양극 방향으로 주사하였다. 이때 주사속도는 1mV/sec이었다. 보조전극으로는 고밀도 탄소봉을 사용하였으며, 참조 전극으로는 포화 감홍 전극(SCE)을 사용하였다. 시험 결과는 전류 밀도 대 전위 도표로 작성하였다.

공식 시험 : 시편은 SiC 연마지로 600번까지 연마한 후 아세톤으로 표면을 세척하고 각각의 표면적과 중량을 측정하였다. 공식 시험은 50℃, 6wt% FeCl₃용액에 24시간 동안 침지한 뒤 무게 감량을 0.1mg까지 측정하여 내식성을 평가하였다.¹⁷⁾

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 소둔 열처리 및 Mo 함량에 따른 합금 690의 미세 조직 특성 및 기계적 성질

Fig. 1은 각 합금의 여러 소둔 온도에서 열처리한 뒤에 미세 조직 관찰을 통하여 얻은 결정립 크기를 나타낸 그림이다. 소둔 온도가 상승할수록 합

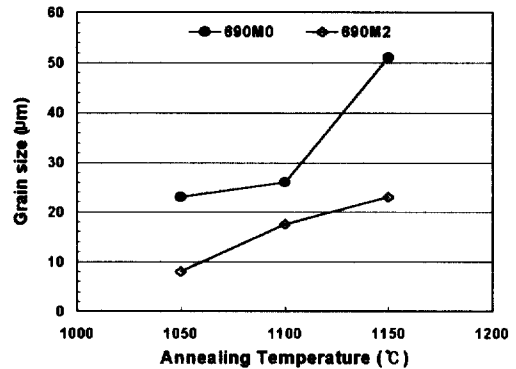


Fig. 1. Grain size coarsening characteristics of Alloy 690M0 and 690M2 with annealing temperature.

금에 관계없이 결정립이 성장하였다. 특히, 합금 중에 Mo이 첨가된 경우보다 첨가되지 않은 경우의 결정립이 더 조대하며 소둔 온도의 상승에 의해서도 더 빠른 속도로 결정립이 성장하고 있음을 알 수 있다. 즉, 합금 690 중에 Mo을 첨가하면 결정립의 성장이 억제되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 Mo 첨가에 따른 미세 조직 변화의 원인을 살펴보기 위하여 투과 전자 현미경 관찰을 행하였다. Fig. 2는 Mo이 첨가된 합금 690M2에 대하여 촬영한 투과 전자 현미경 관찰 사진이다. TEM 관찰 결과, 석출물들이 입내 및 입계에서 균일하게 분포되어 있지 않고 여러 곳에서 집중적으로 석출되어 있는 점이 특징적이었다. 석출물의 크기는 150~200nm 정도였고, Mo이 첨가되지 않은 합금 690M0에서보다 Mo을 첨가한 합금 690M2에서 많이 관찰되었다. Fig. 2(a)와 2(b)는 기지와 석출물에 대한 회절 패턴 분석 결과이다. Fig. 2(a)는 기지의 회절 패턴이며 격자 상수가 약 3.55Å이고, 정대축이 [001]인 fcc 구조로 분석되었다. Fig. 2(b)는 입내 석출물의 회절 패턴 분석 결과이다. 이 석출물은 주조 시 생성된 것으로 보이는 격자 상수가 약 4.3Å 정도인 MC 형태의 석출물인 것으로 확인되었다. 이 석출물은 기지와 아무런 방향성을 갖지 않는 부정형 석출물이었다. 이러한 석출물들이 Mo을 다량 함유한 합금 690M2에서 더 많이 관찰되었는데, 이것이 입계의 성장을 방해하여 합금 690M0보다 합금 690M2의 결정립 성장을 억제시킨 것으로 판단된다.

Fig. 2. Transmission electron micrographs of the Alloy 690M2 annealed at 115°C. (a) Matrix($a=3.55 \text{ \AA}$) (b) Intergranular precipitation($a=4.3 \text{ \AA}$)

Fig. 3은 Mo의 첨가와 소둔 온도에 따른 인장 시험 결과를 도표화한 것이다. 합금 690 중에 Mo을 첨가하면 소둔 온도에 관계없이 항복 강도와 최대 인장 강도가 상승하고 있으며, 연신율에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 합금 690M0에 비해 합금 690M2 시편의 항복 강도와 최대 인장 강도가 증가한 이유는 Mo 첨가에 의한 결정립의 미세화와 Mo의 고용강화에 의한 것으로 판단되며, 약 3%정도의 Mo 첨가는 연신율 감소를 초래하지 않는 것으로 생각된다. 한편 소둔 온도의 상승에 의해서는 항복 강도 및 최대 인장 강도는 감소하고 있으며, 이는 소둔 열처리에 따른 결정립 성장에 기인된 것으로 판단된다. 그리고 연신율은 소둔 온도에 의한 영향을 크게 받지 않고 각 조건에서 유사한

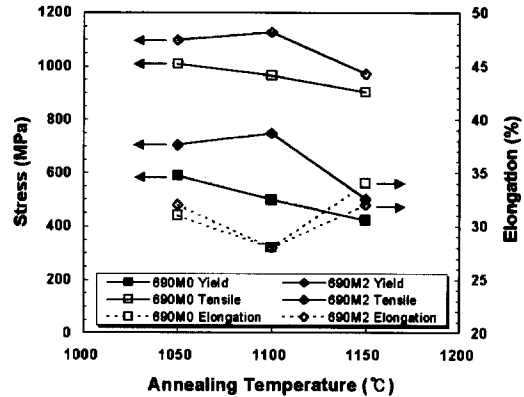


Fig. 3. Effects of annealing temperature on the Mechanical properties of Alloy 690M0 and 690M2.

경향을 보이고 있다. 한편 결정립의 크기에 따른 항복 강도와 인장 강도 값들을 Hall-Petch식을 사용하여 본 실험 합금계에 적용하여 도표화한 결과, 결정립 크기의 제곱근에 반비례하는 관계, 즉 결정립의 크기가 증가함에 따라 강도가 저하되고 있음을 확인하였다.

Fig. 4는 소둔 온도에 따른 경도 변화를 나타낸 것이다. 인장 시험 결과와 마찬가지로 합금 690M0 경우는 소둔 온도가 상승함에 따라 경도가 크게 저하하고 있으나, Mo을 첨가한 합금 690M2는 소둔 온도의 변화에 대해 경도값의 변화가 거의 없었으며 Mo을 첨가하지 않은 합금 690M0보다는 경도값이 3~26(HRB) 정도 크게 나타났다. 이는 앞의 인장 시험 결과와 유사한 경향이다.

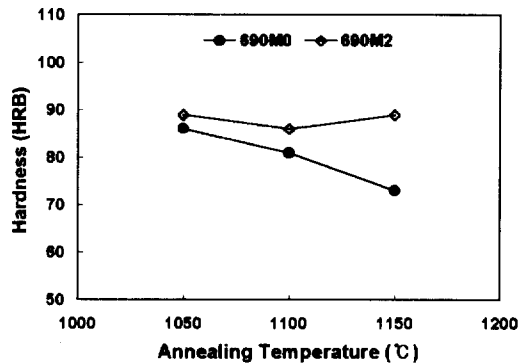


Fig. 4. Effect of molybdenum on the hardness of the designed alloys.

3.2 합금 690의 부식 저항성에 미치는 Mo 함량 및 소둔 열처리의 영향

Fig. 5는 50°C, 3.5% NaCl 용액에서 Mo이 첨가되지 않은 합금 690M0에 대하여 행한 양극 분극 시험 결과이다. 1,050°C와 1,100°C의 소둔 온도에서는 내식성에 변화가 거의 없으나 1,150°C에서는 공식 전위가 상승하며 부동태 전류 밀도도 감소하여

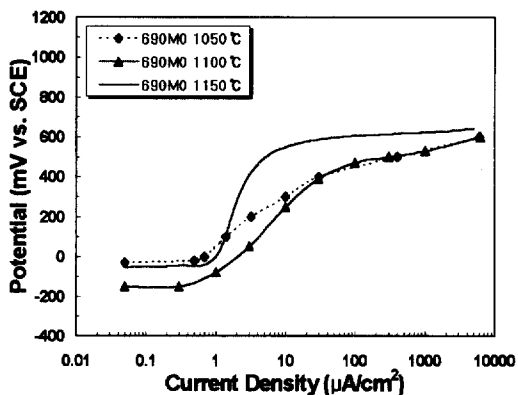


Fig. 5 Anodic polarization curves of Alloy 690M0 in deaerated 3.5wt% NaCl solution at 50°C.

내식성이 1,150°C 소둔재에서 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 6은 Mo을 첨가한 합금 690M2를 50°C, 3.5% NaCl 용액에서 행한 양극 분극 시험 결과이다. 소둔 온도가 1,050°C에서 1,100°C 이상으로 증가함에 따라 공식 전위가 300mV 이상 상승하고

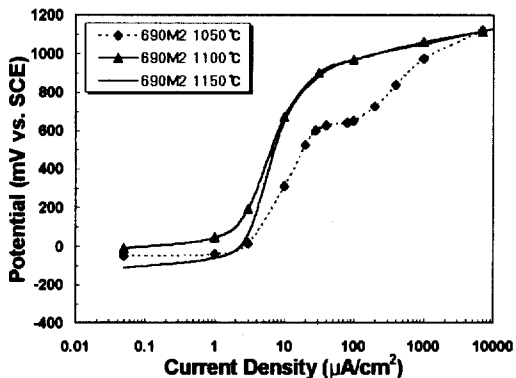


Fig. 6 Anodic polarization curves of Alloy 690M2 in deaerated 3.5wt% NaCl solution at 50°C.

있다. 소둔재에 대해 행한 양극 분극 시험에서 실험 합금 모두 소둔 열처리 온도가 높을수록 부동태 전류 밀도의 감소 및 공식 전위 상승의 경향을 보이며 뚜렷한 내식성 향상을 볼 수 있었다. 이와 같은 경향은 소둔 열처리 온도의 상승에 의하여 냉연 시 도입된 잔류 응력이 제거되고 유해 석출물들이 기지 내로 재용해되기 때문에 얻어진 결과로 판단된다.

Fig. 7은 각 합금에 있어서 내식성이 우수하게 나타난 소둔 온도 1,150°C에서의 양극 분극 곡선을 나타낸 것이다. Mo의 함량이 약 3% 첨가된 합금 690M2는 Mo이 첨가되지 않은 합금 690M0보다 공

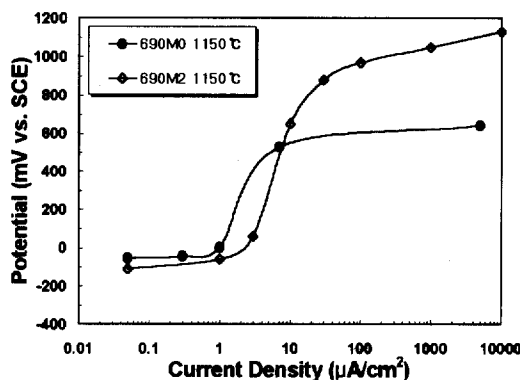


Fig. 7. Effect of molybdenum on the anodic polarization behavior of 690 alloys in deaerated 3.5wt% NaCl solution at 50°C.

식 전위가 크게 상승하고 있음을 알 수 있다. 즉, 스테인리스강에 첨가된 Mo의 효과와 동일한 효과를 나타내고 있다.

Fig. 8은 50°C, 0.5N HCl 용액에서 행한 합금 690M0에 대한 양극 분극 시험 결과이다. 시험 환경에서 부식 저항성이 크지 않아서 각 소둔 온도에 대하여 거의 비슷한 공식 전위를 보이며 부동태 피막이 생성되고 바로 공식이 발생하며 부식이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그러나 Mo이 첨가되면 Fig. 9에서처럼 안정된 부동태 영역이 생성된다. 이러한 50°C, 0.5 N HCl 부식환경 하에서는 Mo의 첨가 유무에 관계없이 소둔 온도가 증가함에 따라 미소하나마 공식 전위의 감소와 부동태 전류 밀도의 증가를 보이고 있다.

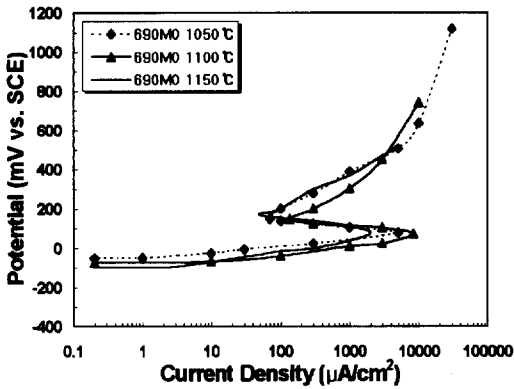


Fig. 8. Anodic polarization curves of Alloy 690M0 in deaerated 3.5wt% 0.5N HCl solution at 50°C.

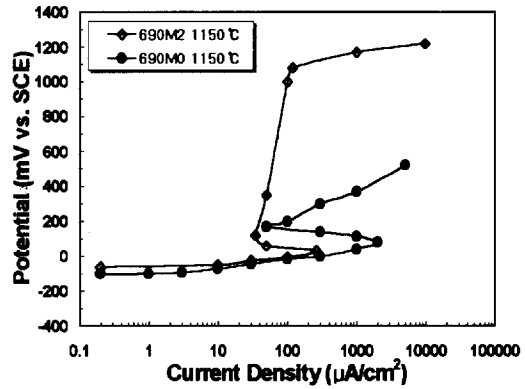


Fig. 10. Effect of molybdenum on the anodic polarization behavior of 690 alloys in deaerated 0.5N HCl solution at 50°C.

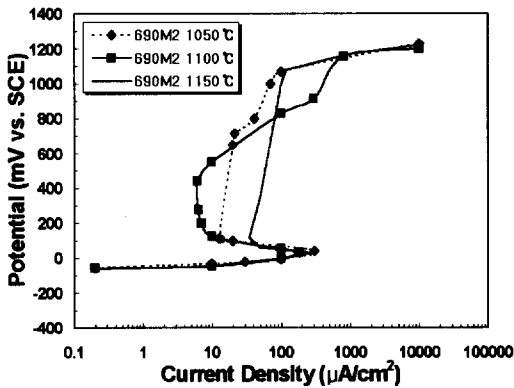


Fig. 9. Anodic polarization curves of Alloy 690M2 in deaerated 3.5wt% 0.5N HCl solution at 50°C.

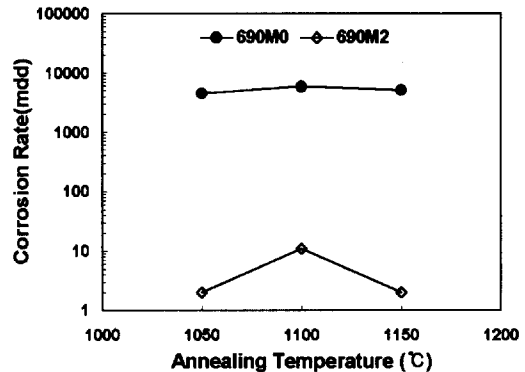


Fig. 11. Immersion test results of the designed alloys in 6wt% FeCl₃ solution at 50°C.

Fig. 10은 소둔 온도 1,150°C에서 열처리한 합금들의 양극 분극 곡선을 그린 것으로서, 합금 중의 Mo 함량이 증가할수록 부동태 영역이 증가하고 부동태 전류 밀도와 초기 부동태화 전류 밀도가 현저히 감소되는 명확한 내식성 향상이 관찰되었다. 이는 앞의 Fig. 7의 3.5% NaCl에서의 경향과 동일하였다. 즉, 합금 중에 첨가된 Mo이 부동태 피막의 특성을 강화시켜서 나타난 결과로 생각된다.

공식 저항성을 평가하는 50°C, 6wt% FeCl₃ 용액에서의 침지 시험 결과는 Fig. 11과 같다. 합금 중에 Mo를 첨가하면 공식 저항성이 현저히 증가함을 볼 수 있었으며, 이는 스테인리스강이나 Hastelloy에서 Mo를 첨가함에 따라 내식성이 향상되는 결과와 일치한다. 특히 합금 690M2 시편의 경우, Mo 첨가로

공식 저항성이 증가하였기 때문에 소둔 온도에 따른 공식 저항성의 변화가 거의 없었다.

합금의 내식성은 표면에 생성되는 부동태 피막의 안정성에 크게 의존한다. 부동태 피막이 치밀하지 못하고 화학적으로 안정하지 못하면 부동태 전류 밀도가 크게 나타나고 공식 전위가 낮게 나타난다. 앞의 양극 분극 시험 및 공식 시험으로부터 합금 690 중에 첨가한 Mo은 공식 속도를 크게 저하시키고, 부동태 전류 밀도를 감소시키고 공식 전위를 크게 상승시키는 것으로 평가되어 원자력 발전소 증기 발생기 전열관 재료로 사용되고 있는 합금 690의 내식성을 향상시키는데 있어서 Mo의 소량 첨가가 매우 유용하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 합

금의 내식성을 크게 향상시키는 Mo의 작용 기구에 대해서 스테인리스강의 경우에 다음과 같이 제안되어 있다. : (1) 첨가된 Mo이 부동태 피막 중의 Fe의 용해를 선택적으로 촉진시켜 부동태 피막 중의 Cr양을 증가시켜서 내식성이 향상된다는 제안.²⁻⁵⁾ (2) 합금 중에 Mo을 첨가할 경우, 부동태 피막 중에 여러 가지의 화학적 상태(예, 금속 상태의 Mo, MoO₂, Mo⁴⁺, Mo⁶⁺ 등)에 의해서 내식성이 향상된다는 제안.⁶⁻⁹⁾ (3) Mo-chloride 착화합물의 생성 또는 MoO₄²⁻ 이온의 생성 등에 의한 내식성 향상¹⁰⁻¹³⁾ 등의 여러 이론들이 제안되어 있다. 최근에 수행된 연구 결과에 따르면,¹⁸⁾ 합금 690에 대하여 3.5% NaCl 단독 용액 및 3.5% NaCl 용액 중에 MoO₄²⁻ 이온을 첨가하여 양극 분극 시험을 행한 결과 MoO₄²⁻ 이온을 첨가하면 안정된 부동태를 얻을 수 있었으나, 부동태 피막의 성분은 서로 상이한 것으로 보고하고 있다. 따라서 스테인리스강에서와 같이 합금 690에 있어서도 첨가한 Mo의 효과가 명확하게 내식성을 향상시키고 있기 때문에 Ni-기 합금에서의 부동태 피막 특성에 미치는 Mo의 작용 기구에 대하여 계속된 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.3 합금 690의 공식 저항성에 미치는 Cu²⁺/Cl⁻/SO₄²⁻ 이온의 효과

원자력 발전소의 복수기의 누설 등으로 인해 증기 발생기 2차측 수화화 계통에 유입될 수 있는 이온 중에서 Cu²⁺, Cl⁻ 그리고 SO₄²⁻의 혼입은 전열관 합금의 내식성에 영향을 미칠 수 있다. 이온별로 합금 690의 공식 저항성에 얼마만큼의 영향을 주는지를 더욱 정확히 조사하기 위해서 우선 이 세 이온의 양을 총 0.3mol로 고정시켰으며, Cu²⁺ 이온의 양을 일정하게 둔 후 Cl⁻/SO₄²⁻의 비를 변화시켜 보았고, 그 후 가장 낮은 부식 저항성을 갖는 조건에서 SO₄²⁻ 이온의 비를 일정하게 하고 Cu²⁺/Cl⁻의 비를 변화시켜 다시 한 번 실험해 보았다. 이 조건을 Table 2와 Table 3에 나타냈으며, Fig. 12 및 Fig. 13은 그 결과이다. 그림에서 E100은 분극 곡선 상에서 공식이 발생되어 전류 밀도가 100μA/cm²일 때의 전위를 말한다. Fig. 12에서 가장 낮은 부식 저항성을 보인 조건인 C1에서의 Cl⁻/SO₄²⁻의 비는 [C1-4]조건인 5였는데, 합금 690M0의 경우에만 그

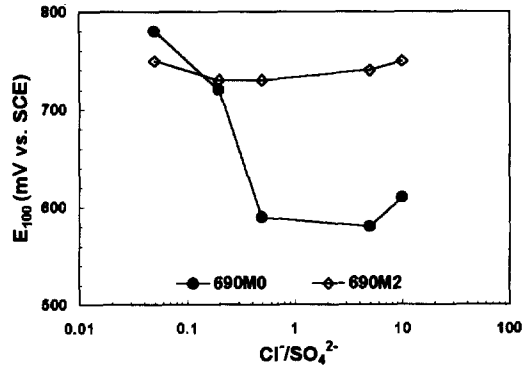


Fig. 12. Effect of Cl⁻/SO₄²⁻ ratio on the pitting potential of the designed alloys.

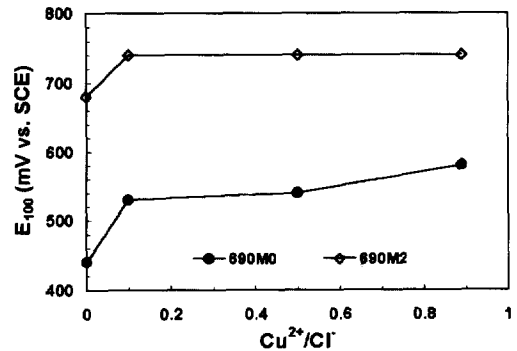


Fig. 13. Effect of Cu²⁺/Cl⁻ ratio on the pitting potential of alloys.

영향이 뚜렷하게 나타났으나 Mo을 첨가한 합금 690M2의 경우는 모든 실험 조건에서 큰 변화가 없이 높은 공식 전위를 나타내었다. Fig. 13에서는 SO₄²⁻이온의 양을 [C1-4]조건인 0.135wt%로 고정시킨 후 Cu²⁺/Cl⁻ 비를 변화시킨 조건에서 가장 낮

Table 2. Test matrix I for anodic polarization tests

No.	Cu ²⁺ (wt%)	SO ₄ ²⁻ (wt%)	Cl ⁻ (wt%)	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻
(C1-1)	0.6	1.741	0.087	0.05
(C1-2)	0.6	1.289	0.260	0.2
(C1-3)	0.6	0.84	0.422	0.5
(C1-4)	0.6	0.135	0.675	5
(C1-5)	0.6	0.0699	0.699	10

(total : 0.3mol)

Table 3. Test matrix II for anodic polarization tests

No.	SO ₄ ²⁻ (wt%)	Cu ²⁺ (wt%)	Cl ⁻ (wt%)	Cu ²⁺ /Cl ⁻
(C2-1)	0.135	0	1.014	0
(C2-2)	0.135	0.096	0.96	0.1
(C2-3)	0.135	0.396	0.792	0.5
(C1-4)	0.135	0.6	0.675	0.89

(total : 0.3mol)

은 부식 저항성을 갖는 조건은 [C2-1]로 그 비는 0 일 경우였다. 이러한 결과로부터 Cl⁻이온이 증가 발생 전열관의 공식에 가장 나쁜 영향을 미치는 이온임을 확인할 수 있으며, 전열관 합금 중에 Mo을 소량 첨가할 경우에 이러한 유형의 부식 조건의 변화에 대한 저항성이 매우 향상됨을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 합금 690에 Mo을 첨가함으로써 기지에 미세한 석출물이 생성되어 결정립이 미세화되는 경향을 보였으며, 연신율의 감소없이 기계적 성질이 향상되었다. 또한 소둔 온도가 상승할수록 결정립 크기가 증가하였으며 그 경향은 Mo 함량이 적을수록 더 컸으며, 이는 Mo 석출물의 생성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

2) 양극 분극 시험 결과, 합금 중에 Mo이 첨가됨에 따라서 부동태 전류 밀도가 크게 감소하며 공식 전위도 상승하였다. 또한 ASTM G48A 시험에 따른 공식 저항성도 합금 중에 Mo이 첨가됨에 따라서 크게 개선되고 있었다. 이는 부동태 피막 중에서 합금 중에 첨가된 Mo이 피막의 특성을 개선시키기 때문으로 판단된다.

3) 부식 용액 중의 Cu²⁺, Cl⁻ 그리고 SO₄²⁻의 비의 영향을 평가한 결과, Mo이 첨가되지 않은 합금은 이 비율에 민감하였으나 Mo을 첨가하면 이 비율에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 부식 저항성이 가장 많이 저하되는 비율은 Cl⁻/SO₄²⁻=5, Cu²⁺/Cl⁻=0이었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 한국원자력연구소에서 시행한 원자력연구개발사업의 결과의 일부로서 이에 감사드립니다.

References

1. I. H. Kuk, "Development of Inconel alloys", 3rd years report-KAERI/RR-1520/94, Korea Atomic Energy Research Institute (1995).
2. Ya. M. Kolotykin and V. M. Knayazheva, 'The role of alloying components in the formation of passivating layers on iron-based alloys', in *Passivity of Metals*, R. P. Frankenthal and J. Kruger eds., p. 678 (1978).
3. C. Leygraf et al., *Corrosion Science*, **19**, P. 343 (1979).
4. R. Goetz and D. Landolt, *Electrochim. Acta*, **29**, P. 667 (1984).
5. I. Olefjord and B. O. Elfstrom, *Corrosion*, **38**, P. 46 (1982).
6. I. Olefjord and B. Brox, "Passivity of Metals and Semiconductors", M. Froment ed., Elsevier Science, Amsterdam, p. 561 (1983).
7. J. N. Wanklyn, *Corrosion Science*, **21**, P. 211 (1981).
8. K. Hasimoto et al., *Corrosion Science*, **19**, P. 3 (1979).
9. J. R. Ambrose, in Ref.2, p. 740 (1978).
10. K. Sugimoto and Y. Sawada, *Corrosion*, **32**, P. 347 (1976).
11. H. Ogawa et al., *Corrosion*, **34**, P. 52 (1978).
12. C. R. Clayton and Y. C. Lu, *J. Electrochem. Soc.*, **133**, P. 2465 (1986).
13. Y. S. Kim and Y. S. Park, *this Journal*, **18**, P. 67 (1989).
14. Y. S. Kim, *Metals and Materials*, **42**, P. 183 (1998).
15. Y. S. Kim, Y. S. Park, B. Mitton, and R.

- Latanision, *Proceedings of the symposium on critical factors in localized corrosion III*, eds. R.G. Kelly, G.S. Frankel, P.M. Natishan, and R.C. Newman, p. 89, The Electrochemical Society, Inc., (1999).
16. Metal Handbook, 9th ed., Vol. 9, p. 129, American Society for Metals.
17. ASTM G48A, "*Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solutions*" (1992).
18. Y. S. Park, Y. S. Kim, and M. Y. Hur, "*Inconel Alloys Development*", 2'nd year's report, KAERI/ CM-079/94, Yonsei University (1995).