

## 인코넬 690의 변형 및 재결정

※표 은 종, 허 무 영  
고려대학교 공과대학 금속공학과

### Deformation and Recrystallization of INCONEL 690

Eun Jong Pyo, Moo Young Huh  
Department of Metallurgical Engineering,  
Korea University

#### ABSTRACT

The formation of preferred orientations in cold rolled and recrystallized Inconel 690 sheets was studied by the x-ray texture measurements and TEM observations. The increasing {220} pole intensity in the plane normal at the higher reductions was related to the {110}<112> texture component. The rolling texture of the Inconel 690 was the pure metal type. The dislocation cells were found in the near {110}<112> oriented grains. The onset of deformation twins in the {112}<111> oriented grains caused the weakening of {112}<111> and the development of {552}<115> in the rolling texture. The annealing texture of the Inconel 690 sheets was dependent on the annealing temperature. The annealing texture of 750°C annealed sheets was similar to the cold rolling texture. The major preferred orientations of the 950°C annealed specimens were {112}<110> and {001}<110>. The formation of fine and closely spaced annealing twins in the specimen annealed at 1150°C led to the randomization of the annealing texture.

#### 1. 서 론

Ni-기지 초합금판재에서 냉간압연에 의하여 생성되는 우선방위의 변화를 x-선 회절상을 이용하여 실험한 연구들은 냉간압연에 따라 {110} 회절피크의 증가를 보고<sup>[1]</sup>하였으나 냉간압연 및 어닐링에 따른 미세조직의 변화와 함께 집합조직에서 우선방위의 변화를 보고한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 x-선집합조직 측정과 함께 투과전자 현미경 미세조직관찰 및 국부방위측정을 통하여 Inconel 690 합금에서 집합조직에 형성되는 우선방위들이 어떻게 발달하며 미세조직에서 어떻게 조직내에 생성되는지 실험하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용한 시료는 Inconel 690 합금으로 화학조성은 표 1과 같다. 진공고주파유도로에서 용해 주조된 잉코트는 1200℃에서 열간압연되어 3mm의 판재로 제조되었다. 3mm의 열연판재를 60%냉간압연하여 두께를 1.2mm로 제조하였다. 이 냉간압연판재를 Ar분위기에서 각각 750℃, 950℃, 1150℃에서 1분에서 3시간까지 어닐링하여 어닐링시편을 제조하였다. X-선 집합조직의 측정은 각 판재의 중앙층에서 행하였다. 집합조직은 집합조직 측정용 고니오메타에서 측정 후 Bunge 방법<sup>[2]</sup>에 의하여 방위분포함수를 계산하였다. 또한 광학현미경과 투과전자현미경용 시편은 압연변형의 정보를 많이 보여주는 압연재의 세로단면에서 제조되었고 관찰방향은 압연재의 측면방향이었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 Inconel 690 합금을 열간압연한 시료의 압연면을 광학현미경으로 관찰한 미세조직으로, 평균 결정립 크기는 약 56 $\mu$ m였고 많은 어닐링 쌍정이 결정립 내부에 고르게 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 2는 열간압연 후의 Inconel 690 판재의 세로단면 미세조직을 나타낸 것이다. 전위밀도는 매우 낮았고 입내 석출물이나 탄화물은 전혀 관찰되지 않았다.

그림 3은 Inconel 690 판재의 압연면에 존재하는 결정면의 분포를 알아보기 위하여 각 결정면의 회절강도를 x-선 회절기를 이용하여 측정한 결과이다. (a)는 열연판재, (b)는 20%, (c)는 40% 그리고 (d)는 60% 냉간압연한 시료로 부터 측정결과이다. (a)의 열연판재에서는 결정면들의 회절강도 I가  $I_{(111)} > I_{(200)} > I_{(220)}$ 의 순서로 얻어졌다. 이 순서는 Ni의 표준분말회절상에서 얻어지는 결과와 일치한다. 그림 3에서 압연가공도가 증가할수록 {111} 극강도는 낮아지고 {220} 극강도는 점차 높아져 60% 냉연한 시료에서는  $I_{(220)} > I_{(111)} > I_{(200)}$ 의 결과가 얻어졌다. 이것은 압연변형에 따라 집합조직이 점진적으로 변하는 것을 보여주는 것이다.

위와 같은 압연변형에 따른 각 결정면의 극강도 변화를 보다 정확히 알아보기 위하여 측정한 집합조직을 그림 4는 보여준다.  $\phi_2=45^\circ$  단면에서 알 수 있듯이 Inconel 690 판재의 압연집합조직에는  $(\phi_1, \phi, \phi_2)=(90^\circ, 35^\circ, 45^\circ)$ 에 존재하는 Cu-방위가  $f(g)=3.9$ 의 방위밀도를 갖는다. 또한  $(60^\circ, 37^\circ, 65^\circ)$ 에 존재하는 S-방위가  $f(g)=4.5$  정도의 그리고  $(55^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$ 와  $(35^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ 에서 나타나는 Bs-방위가  $f(g)=5.7$ 의 방위밀도를 갖어 우선방위로 압연집합조직에서 발달하고 있다. 특히 Bs-방위에서 최대의 방위밀도가 얻어져 주방위를 형성하고 있다. 따라서 그림 3에서 압연가공도가 높아짐에 따라 압연면에 {220} 극강도가 증가한 것은 압연집합조직에서 {110}<112>의 Bs-방위의 발달로 해석할 수 있다.

그림 5의 (a)는 제한구역전자회절상으로 측정하여 {110}<112> Bs-방위에 놓여있는 것이 확인된 결정립의 미세조직이다. 이 미세조직에는 전위셀들이 관찰되고 있다. 전위셀들은 변형시 슬립에 의하여 전위가 집적된 후 동적회복에 의하여 형성되는 전위구조로 알려져 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 Bs-방위에 있는 결정립에서 전위셀이 관찰되는 것은 이 방위에 있는 결정립에서는 주변형기구가 슬립이었다는 것을 의미하는 것이다.

그림 5의 (b)는  $\{112\}\langle 111 \rangle$  Cu-방위를 갖는 결정립에서 관찰한 미세조직이다. 이 결정립에서는 압연방향과 약  $20^\circ$  의 각을 갖는  $\{111\}$ 면에서 변형쌍정이 생성된 것이 관찰되었다. Cu-방위에서 가장 쉽게 쌍정이 형성되는 것은 Cu-방위에 있는 결정립에서 압연면과  $20^\circ$  를 갖는 쌍정면에서 변형쌍정이 형성될때 이 쌍정계는 압연재의 측면방향으로 변형을 일으키지 않아 이 방위에 있는 결정립에서는 쌍정의 형성이 용이하기 때문이다.<sup>[4]</sup>

그림 6은 냉간압연 및  $750^\circ\text{C}$ ,  $950^\circ\text{C}$ ,  $1150^\circ\text{C}$ 에서 어닐링한 판재들의 집합조직을 나타낸 것이다. 냉간압연판재는 그림 6(a)와 같이 집합조직은  $\beta$ 섬유방위를 갖는 fcc순금속 형태의 압연집합조직이었다. 그림 6(b)는  $750^\circ\text{C}$ 에서 3시간 어닐링한 판재의 집합조직을 나타낸 것으로 재결정이 완료되었지만 압연집합조직과 거의 같았다. 이것은 이 온도에서 기지와 동등한 방위를 갖는 재결정 결정립들이 생성하고 성장하기 때문일 것이다.  $950^\circ\text{C}$ 에서 1시간 열처리한 판재에서는 그림 6(c)와 같이 주방위로  $\{112\}\langle 110 \rangle$ 과  $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이 어닐링집합조직에서 일어났다. 이것은 변형미세조직에서 cube방위를 갖는 구역이 형성되지 못하여 기지와 특정한 선택적인 방위관계를 갖는 결정립이 우선성장하였기 때문이다.  $1150^\circ\text{C}$ 에서 20분간 어닐링한 판재에서는 그림 6(d)와 같이 어닐링 쌍정의 생성이 활발하여 우선방위들이 거의 없는 무질서한 집합조직이 일어났다.

#### 4. 결 론

1. 압연가공도가 높아짐에 따라 압연면에  $\{220\}$  극강도가 증가한 것은 압연집합조직에서  $\{110\}\langle 112 \rangle$ 의 Bs-방위의 발달로 해석할 수 있다.
2. 압연집합조직의 주방위는 Bs-방위였으며, 이 방위에 있는 결정립에서의 주변형기구는 슬립이었다.
3. Cu-방위에서는 선택적인 변형쌍정이 일어나 압연집합조직의 우선방위인  $\beta$ -섬유방위들 중에서 특히 Cu-방위가 약하게 형성되었다.
4.  $750^\circ\text{C}$ 에서 어닐링후 어닐링집합조직은 압연집합조직과 거의 같았으며  $950^\circ\text{C}$ 에서 어닐링한 시료의 집합조직에서는  $\{112\}\langle 110 \rangle$ 과  $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이 주방위로 일어났고  $1150^\circ\text{C}$ 에서 어닐링한 시료에서는 무질서한 집합조직이 일어났다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. R.A.Mackay, R.L.Dreshfield and R.D.Maier: "Anisotropy of Nickel-Base Superalloy Single Crystals", Proceeding of the 4th International Symposium of Superalloys, 1980, pp. 385.
2. H.J.Bunge: "Mathematische Methoden der Texturanalyse", Akademie verlag, Berlin, 1969.
3. A.S. Malin and M. Hatherly: "Microstructure of cold-rolled Copper", Met. Sci., 13, 1979, pp. 463
4. 허무영: "FCC 금속에서 Sachs와 Taylor 소성이론에 의한 변형쌍정의 해석", 대한금속학회지, 27, 2, 1989, pp. 113.

Table 1. Chemical composition of Inconel 690 used in this experiment.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Nb	Ti	P	S	Fe	Al	Co	Cu
0.037	0.73	0.39	27.17	bal	0.51	1.06	trace	<0.003	10.19	0.355	0.04	0.17



Fig. 1. Optical micrograph of hot rolled specimen.



Fig. 2. Transmission electron micrograph of hot rolled specimen.

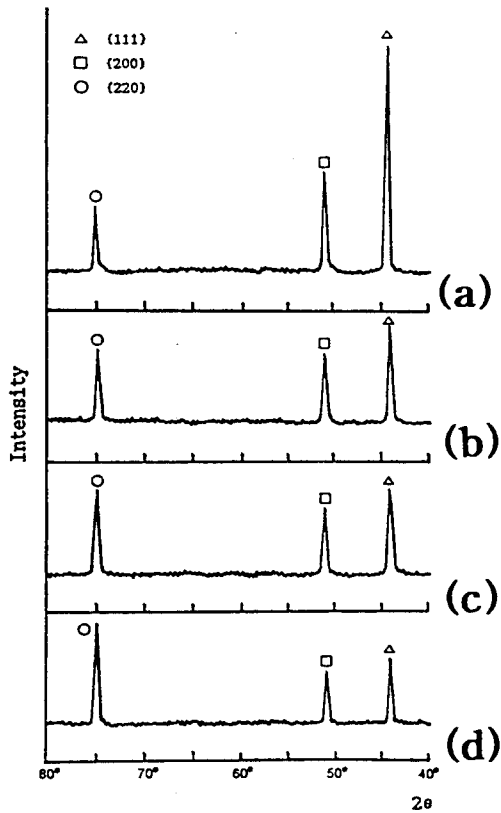


Fig. 3. XRD pattern of the Plane normal. (a) hot rolled, (b) 20% cold rolled, (c) 40% cold rolled, (d) 60% cold rolled.

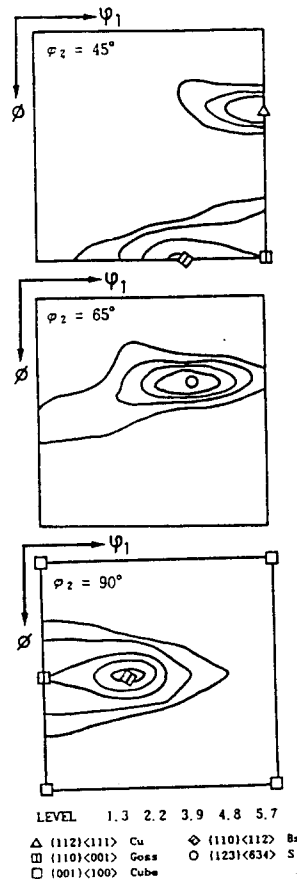


Fig. 4. Orientation Distribution Function of 60% cold rolled Inconel 690.

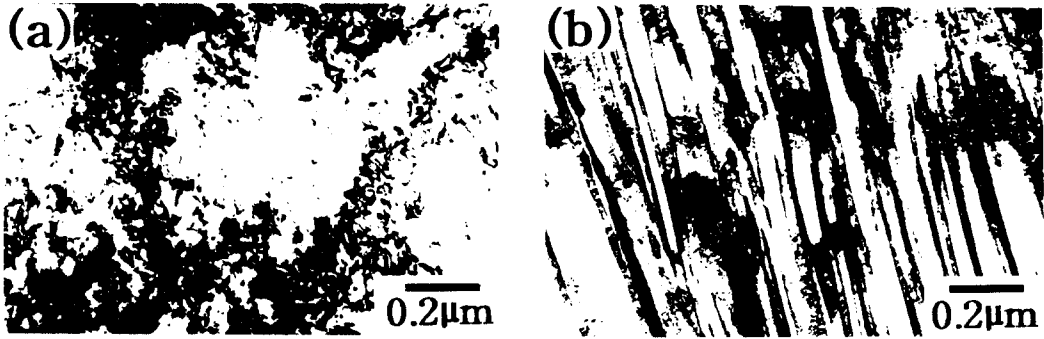


Fig. 5. Microstructure of 60% cold rolled Inconel 690  
 (a)  $\{110\}\langle 112 \rangle$  oriented grain, (b)  $\{112\}\langle 111 \rangle$  oriented grain

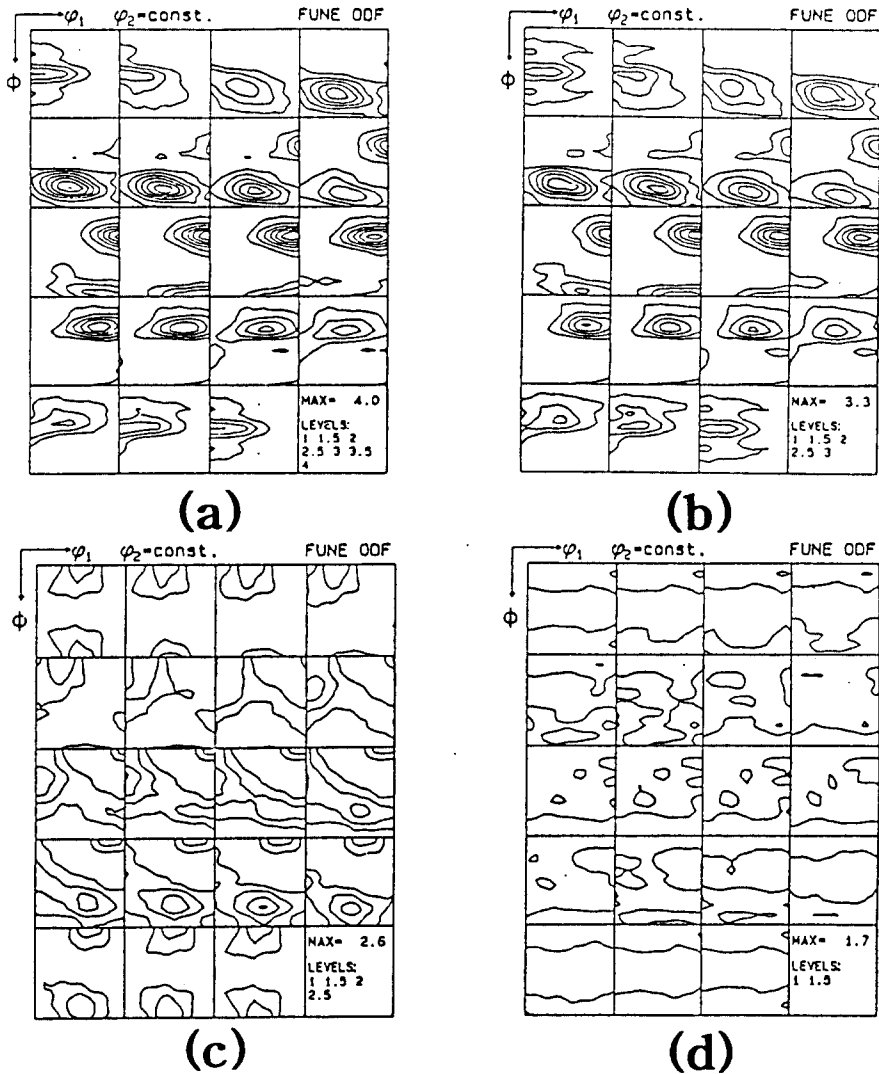


Fig. 6. orientation distribution functions of Inconel 690 specimens;  
 (a) 60% cold rolled, (b) annealed at 750°C for 3 hrs,  
 (c) annealed at 950°C for 1 hr, (d) annealed at 1150°C for 20 min.