

|||||
 論 文
 |||||

Fe-30at.%Al 합금의 압연성에 미치는 Cr, B, Ti 및 Si 첨가효과

최답천[†] · 이지성

Effects of Cr, B, Ti and Si on Rolling Characteristics in Fe-30at.%Al Alloy

Dap-Chun Choi[†] and Ji-Sung Lee

Abstract

Some alloying elements such as Cr, B, Ti and Si were added individually or as a mixture to Fe-30 at.%Al alloys. The alloys were melted using an arc furnace and then heat-treated for homogenization at 1000°C for 7 days and followed by rolling at 1000°C. The alloying elements on rolling characteristics were investigated by the microstructures and fracture mode before and after rolling. The microstructures before rolling showed that all of the alloys had equiaxed grains. On the other hand, the microstructures of rolling plane as well as its perpendicular plane became elongated after rolling. The alloys such as Fe-30Al, Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B, Fe-30Al-5Cr and Fe-30Al-3Ti-0.5B revealed better rolling behaviour from the point that intergranular and cleavage fractures were not fundamentally occurred. But the addition of 5Ti or 3Si to Fe-Al alloys had detrimental effects. The Ti-added alloy system such as Fe-30Al-5Ti, Fe-30Al-5Ti-5Cr, Fe-30Al-3Ti-5Cr and Fe-30Al-5Ti-0.5B were cracked through grain and showed cleavage fracture. The Si-added alloy system such as Fe-30Al-5Si, Fe-27Al-3Si and Fe-27Al-5Cr-3Si were cracked along the grain boundary and showed intergranular fracture. $DO_3 \leftrightarrow B_2$ transition temperature of Fe-30at.%Al alloy was 520°C, whereas the addition of 3Ti and 3Ti+0.5B comparably increased the temperature to 797 and 773°C, respectively.

(Received January 20, 2003)

Key words : Rolling, Fracture mode, Equiaxed grains, Transition temperature, Intergranular fracture, Cleavage fracture

1. 서 론

Fe₃Al합금은 적절한 온도에서 열처리하여 불규칙화할 수 있는 몇몇 안 되는 구조용 금속간화합물중의 하나이다. 이 재료의 상업적인 응용을 지연시키고 있는 주원인은 상온에서의 낮은 연성과 내충격성, 낮은 $DO_3 \leftrightarrow B_2$ 천이온도(Tc) 및 고온에서의 낮은 강도와 내크립성으로 이의 개선을 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 지금까지의 연구결과로부터 최근 상온취성은 대기중의 수분이 Al과 반응할 때에 발생하는 수소에 의한 취성(환경취성)으로 Cr이 환경취성의 억제, 즉 연성개선에 유효한 것이 발견되었으며[1,2], 천이온도를 상승시키고, 고용강화에 의해 고온특성(강도 및 크립특성)을 개선시키는 원소로는 Ti, Mo 및 Si가 가장 효과적이거나 상온연성을 저하시킨다고 보고하고 있다[3-5]. 그리고

이들 합금은 800°C 이상으로 되면 항복응력이 급격히 감소하여 소성가공이 가능하게 되므로, 약1000°C에서 압연을 시작하고 600~650°C에서 마무리 압연하는 방법이 보고되고 있으며[6], 최근에는 Fe₃Al합금의 고온 변형거동 및 가공성[7], Fe₃Al기 합금의 실온 연성 및 인장특성에 대한 thermomechanical 처리의 효과[8-10] 등 주로 기존에 개발된 특정조성의 Fe₃Al기 합금의 고온변형거동 및 실온 특성을 개선키 위한 열간가공공정 등이 주로 보고되고 있다. 그러나 고온구조용 재료로서 Fe₃Al합금을 응용하기 위해서는 $DO_3 \leftrightarrow B_2$ 천이온도의 상승과 고온특성 및 가공성의 향상이 필수적이며, 상술한바와 같이 Ti, Si등을 첨가하면 상온연성이 저하되는 문제점이 있고, 열간가공성에도 영향을 미칠 것으로 판단되나, Ti, Si를 첨가한 Fe₃Al기 합금의 열간 압연가능성과 최대첨가량 등에 대해서 종합적으로 검

전남대학교 신소재공학부(Dept. of Materials Science and Engineering, Chonnam National Univ.)

[†]E-mail : dcchoi@chonnam.chonnam.ac.kr

또한 연구결과는 거의 보고된 바 없다.

본 연구에서는 상온연성이 가장 우수하다고 알려져 있는 Fe-30at.%Al합금을 기본조성으로 환경취성억제를 위해 Cr을, 결정립 미세화와 입계강화를 위해 B을, $DO_3 \leftrightarrow B2$ 천이온도(Tc)의 상승을 위해 Ti과 Si를 목표 조성대로 단독 또는 복합 첨가하고 Ar가스 분위기하에서 아크 용해하여 합금을 제조하고 이를 균질화 및 안정화 열처리한 후 1000°C에서 열간 압연하였다. 이어서 압연 전후의 결정립형태, 파면양상 및 경도의 변화와 천이온도(Tc)등을 조사하여 이들 합금의 열간압연성에 미치는 Ti, Si, Cr 및 B의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

합금제조를 위한 원재료인 전해철 분말은 600°C의 수소분위기하에서 1시간동안 환원처리한 후 약 100 MPa로 압축 성형한 것을, Al은 순도 99.98%의 주괴를 적당한 크기로 절단한 다음 초음파 세척한 것을, Cr은 순도 99.99%의 벌크상을, Ti은 순도 99.9%인 칩상을, Si은 99.9%인 분말상을, B은 순도 99.5% 이상의 결정상을 사용하였다. 상기 원재료를 Table 1과 같이 목표조성대로 배합한 다음 아크용해로내에 장입하고, 4N급 고순도 Ar가스 분위기하에서 잔존산소를 제거하기 위해 스펀지상 Ti를 먼저 용해한 후 원재료를 용해하여 무게가 40 g인 바(bar)형의 시편을 제조하였고, 용해전후의 중량차가 0.2% 이하인 것만을 선택하여 사용하였다. 그리고 Si는 Al의 격자위치를 치환하여 고용하기 때문에 압연성 비교를 위해 Fe-27Al-

3Si계 시편도 동시에 제조하였다. 상기 시편을 열처리로내의 인코넬상자에 장입하고, 고순도 Ar가스 분위기하에서 1,000°C에서 7일간 균질화 열처리한 후 500°C에서 5일간 상안정화 열처리를 하였다. 이어서 상기 바형의 시편을 스테인리스강관내에 넣은 후 약 10^{-3} torr로 진공 봉입하고 최종 압하율이 80%가 되도록 1,000°C를 기준으로 1 pass당 0.2 mm씩 다단계에 걸쳐 압연하였으며 잔류응력을 제거하기 위해 500°C에서 1시간 동안 유지한 후 노랭하였다. 압연 전후 미세조직의 변화는 각 시편을 습식 및 정연마하여 초음파 세척한 후 Keller 부식액(50% H_2O -25% HNO_3 -15% HCl -10% HF)으로 부식하여 광학현미경으로 관찰하였고, 각 시편의 결정립크기는 화상분석, 생성상은 X선 회절분석(XRD)하여 확인하였다. 그리고 $DO_3 \leftrightarrow B2$ 천이온도(Tc)는 Ti를 함유한 시편을 분석하기에 적합한 크기($1 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$)로 가공한 후 Ar가스 분위기하에서 승온 및 감온속도를 10°C/min로 하여 시차열분석기(DTA)에 의해 측정하였다. 각 시편의 경도는 록크웰경도계(HRC)로 각 시편당 7회 이상 측정된 값의 평균치로 하였으며, 각 시료의 압연전 파면 및 압연후 균열부 파면은 주사전자현미경으로, 압연유무는 육안으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압연성, 미세조직 및 파면양상에 미치는 첨가원소의 영향

Fig. 1은 아크용해하여 제조한 몇몇 합금의 XRD결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Fe-

Table 1. The relationship between chemical compositions and rolling performance of the Fe-Al alloys.

Elements Alloys	Chemical Composition(at.%)						Rolling Performance
	Fe	Al	Ti	Cr	B	Si	
Fe-30Al	bal.	30					Success
Fe-30Al-3Ti	bal.	30	3				Success
Fe-30Al-5Ti	bal.	30	5				Failure
Fe-30Al-0.5B	bal.	30			0.5		Success
Fe-30Al-3Si	bal.	30				3	Failure
Fe-30Al-5Cr	bal.	30		5			Success
Fe-30Al-3Ti-5Cr	bal.	30	3	5			Failure
Fe-30Al-5Ti-5Cr	bal.	30	5	5			Failure
Fe-30Al-3Ti-0.5B	bal.	30	3		0.5		Success
Fe-30Al-5Ti-0.5B	bal.	30	5		0.5		Failure
Fe-27Al-3Si	bal.	27				3	Failure
Fe-27Al-3Si-5Cr	bal.	27		5		3	Failure
Fe-27Al-3Si-0.5B	bal.	27			0.5	3	Failure

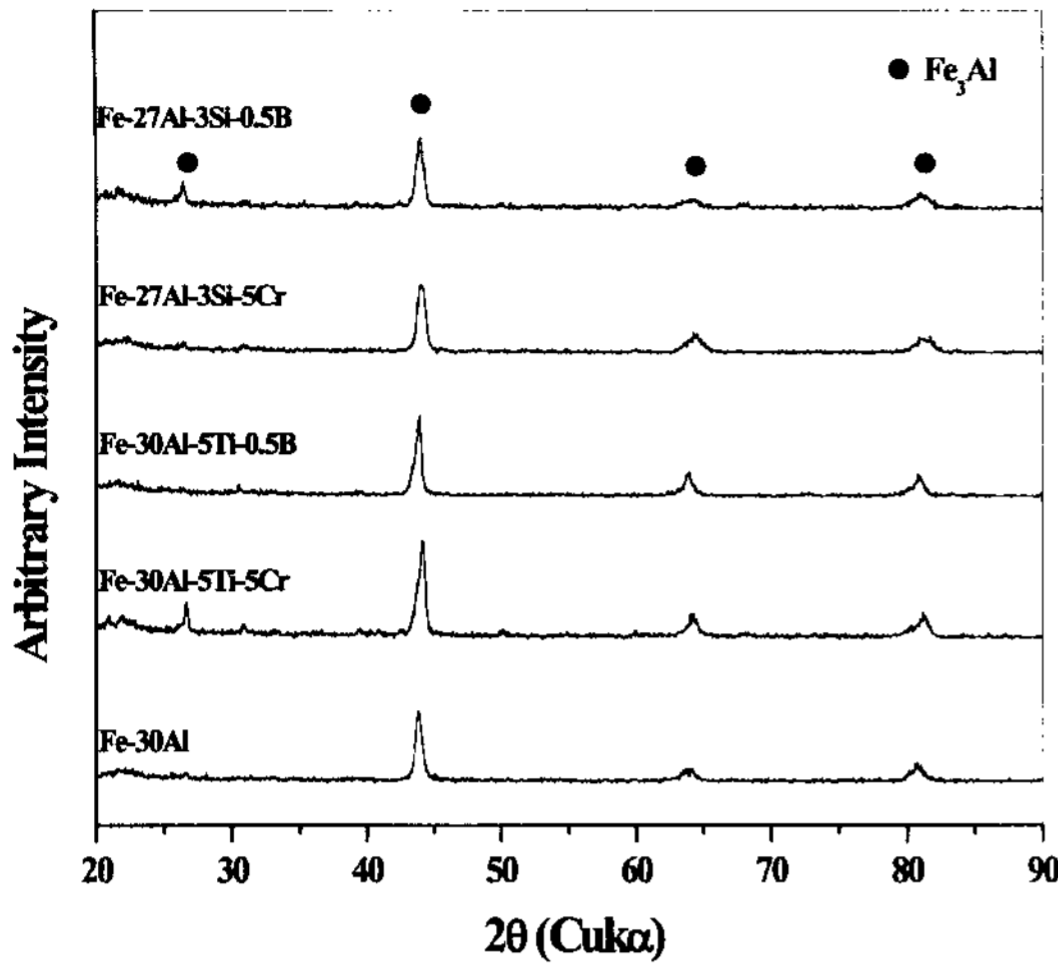


Fig. 1. Typical X-ray diffraction patterns of various Fe-Al alloys.

30Al에 Cr, B, Ti 및 Si을 단독 또는 복합첨가유무에 관계없이 전형적인 Fe₃Al peak을 나타내고 있어 모든 시편이 DO₃단상으로 되어있음을 알 수 있다.

상기 DO₃단상의 시편을 스테인리스강관내에 넣고 진공 봉입한 후 1,000°C에서 압연한 후 압연결과를 Table 1에, 몇몇 합금의 전형적인 압연 형상을 Fig. 2에 나타냈다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 Fe-30Al, Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B, Fe-30Al-5Cr과 Fe-30Al-3Ti-0.5B조성의 시편은 Fig. 2(a)와 같이 압연이 잘 되었으나 나머지 조성의 시편, 즉 5Ti 및 3Si를 단독 또는 다른 원소와 복합첨가한 시편은 Fig. 2(b)~(f)와 같이 압연이 불가능하였고, 외전상 압연이 된 시편의 경우도 시편내부에 미세한 균열이 존재하였다. 여기서 DO₃ ↔ B2 천이온도 이상에서 가공경화속도는 약 800°C에서 가공연화가 보여질 때까지 급속히 감소하며, 연화가 일어나는 온도는 천이온도의 증가에 의해 증가한다는 보고[11]와 Ti 및 Si는 고용강화에 의해 고온인장 및 크랩강도를 증가시키며 강도의 증가는 DO₃ ↔ B2 천이온도의 증가와 직접 관계가 있다는 보고 [3-5]로부터 Ti 및 Si이 함유되면 연화가 일어나는 온도가 상승하고 항복응력도 증가하기 때문에 압연이 잘 안되는 것으로 판단된다. 그리고 Cr은 고온강도증가를 위해 첨가되는 Ti과 같은 원소의 취화효과를 완화시키는 작용을 한다고 보고[12]되고 있으나 본 결과에서는 Ti와 Cr 및 Si와 Cr을 복합첨가한 경우도 압연이 안

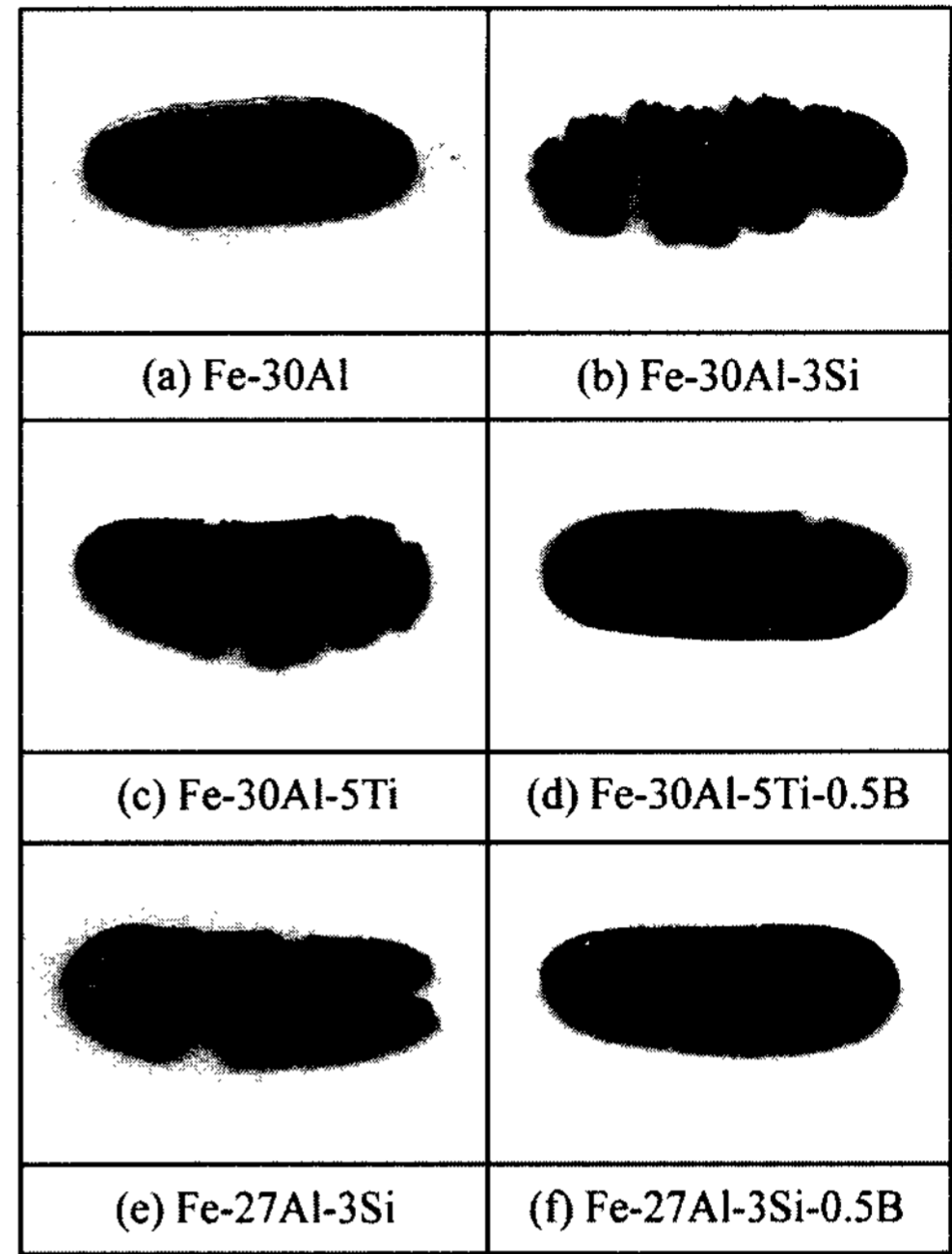
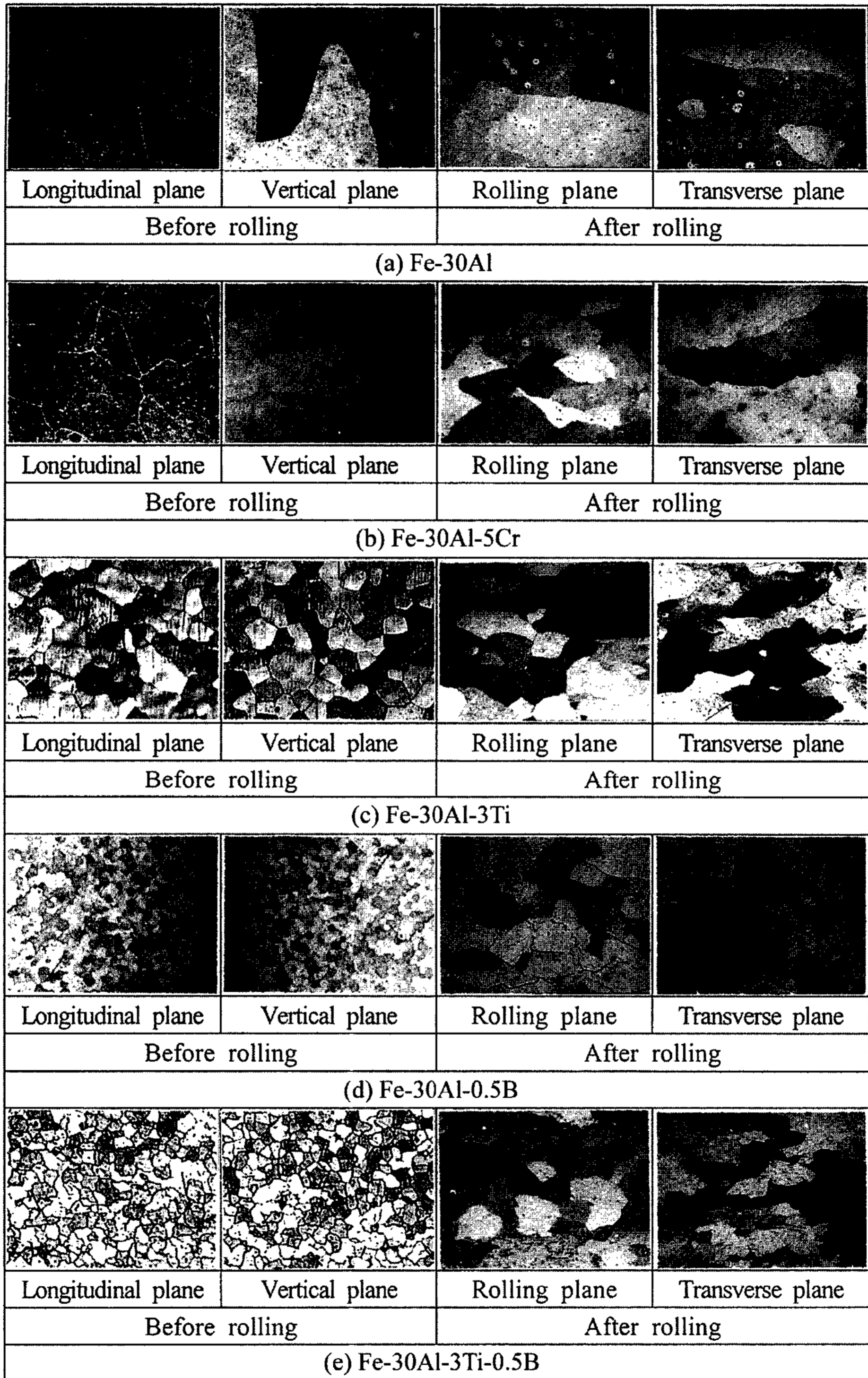


Fig. 2. Typical appearance of rolled specimens after hot rolling.

되는 것으로 보아 Cr의 완화효과는 인식되지 않았다.

Fig. 3은 상기 압연이 잘된 Fe-30Al, Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B, Fe-30Al-5Cr과 Fe-30Al-3Ti-0.5B조성의 시편의 압연 전 길이방향의 면과 이에 수직인 면 및 압연 후 압연면과 이에 수직인 면의 미세조직을 보여 준다. 여기서 압연전 Fe-30Al합금과 여기에 5Cr를 첨가한 합금의 길이방향의 면 및 수직인 면 모두 평균 결정립크기가 800~1000 μm인 조대한 등축정을 나타내나, Fe-30Al에 3Ti 또는 0.5B를 첨가한 합금은 평균 결정립크기가 각각 200, 110 μm 정도인 미세한 등축정을 나타냈다. 그리고 3Ti-0.5B를 복합첨가한 합금은 평균결정립크기가 100 μm 정도로 3Ti를 단독첨가한 합금에 비하여 결정립형상은 동일하나 크기는 더욱 미세화 되었고, 모든 합금에서 수평면과 이에 수직인 면의 결정립형상의 차이는 거의 없었다. 여기서 Cr은 결정립 미세화에는 큰 영향을 미치지 않았는데 이는 Cr이 Fe₃Al 단상에 고용되어 존재하고 천이온도(Tc)를 약간 상승시키지만 결정립 크기나 항복강도에는 영향을 미치지 않는다는 보고[13,14]와 잘 일치하고 있다. 그리고 B 및 Ti는 기 발표된 연구결과[15,16]와 동일하게 결정립을 미세화하였는데 Ti 보다는 B의 효과가



300 μ m

Fig. 3. Optical micrographs of Fe-Al alloys before and after hot rolling.

더 컸다. 그리고 압연후 압연면과 이에 수직한 면의 결정립의 형상은 모든 시편이 압연전에 비해 연신된 형태를 나타내고 있고, 압연면과 수직한 면의 평균 결정립크기는 Fe-30Al 및 Fe-30Al-5Cr합금은 압연전에 비해 압연후에는 각각 800, 500 μm 정도로 약간 미세화 되었으나 Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B 및 Fe-30Al-3Ti-0.5B합금은 압연전에 비해 압연후에는 300, 330 및 280 μm 정도로 오히려 더 조대화되었다. 이는 Fe-16.5Al-5.5Cr-1.0Nb-0.05C합금의 고온변형거동과 가공성을 조사한 결과 3가지 형태의 변형거동 즉 부분적인 동적 연화, 동적 재결정 및 결정립성장을 수반한 동적 재결정이 관찰되었다는 B. Voyzelle 등[7]의 보고로부터 아크 용해하고 열처리한 시편을 다단계로 열간 압연하는 과정에서 주조직이 파괴되면서 회복, 재결정 및 결정립 성장과정을 거쳐 새로운 결정립으로 치환 및 성장하였기 때문에 Fe-30Al 및 Fe-30Al-5Cr합금은 약간 미세화되고, Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B 및 Fe-

30Al-3Ti-0.5B합금은 조대화 된 것으로 생각되며 결정립 형상도 연신된 형태를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 4는 상기 압연이 성공한 시편들에 대한 압연 전후의 파단면을 나타낸다. 여기서 Fe-30Al 및 Fe-30Al-5Cr합금은 압연 전후 동일하게 입내벽개파면을, Fe-30Al-0.5B합금은 압연 전후 동일하게 의사벽개파면을 나타내고 있음에 비해 Fe-30Al-3Ti 및 Fe-30Al-3Ti-0.5B합금은 압연전에는 전형적인 취성 입계파면을 나타내었으나 압연후에는 입내벽개파괴와 입계파괴가 혼합된 파면으로 변화하였다. 여기서 Fe-30Al합금의 경우 2원 Fe_3Al 합금은 연성과 시험환경에 관계없이 항상 벽개파괴를 나타낸다[17,18]는 보고와 파괴양상이 일치하고 있으나, Fe-30Al-5Cr합금은 Fe_3Al 에 6at.%까지의 Cr을 첨가하면 결정립 크기나 항복강도에 영향을 미치지 않으면서 파괴양상이 벽개파괴에서 벽개와 입계파괴의 혼합양상으로 변화된다는 보고[19]와는 약간 다른 결과를 나타내었다. 그리고 Fe-30Al-0.5B합금이 상

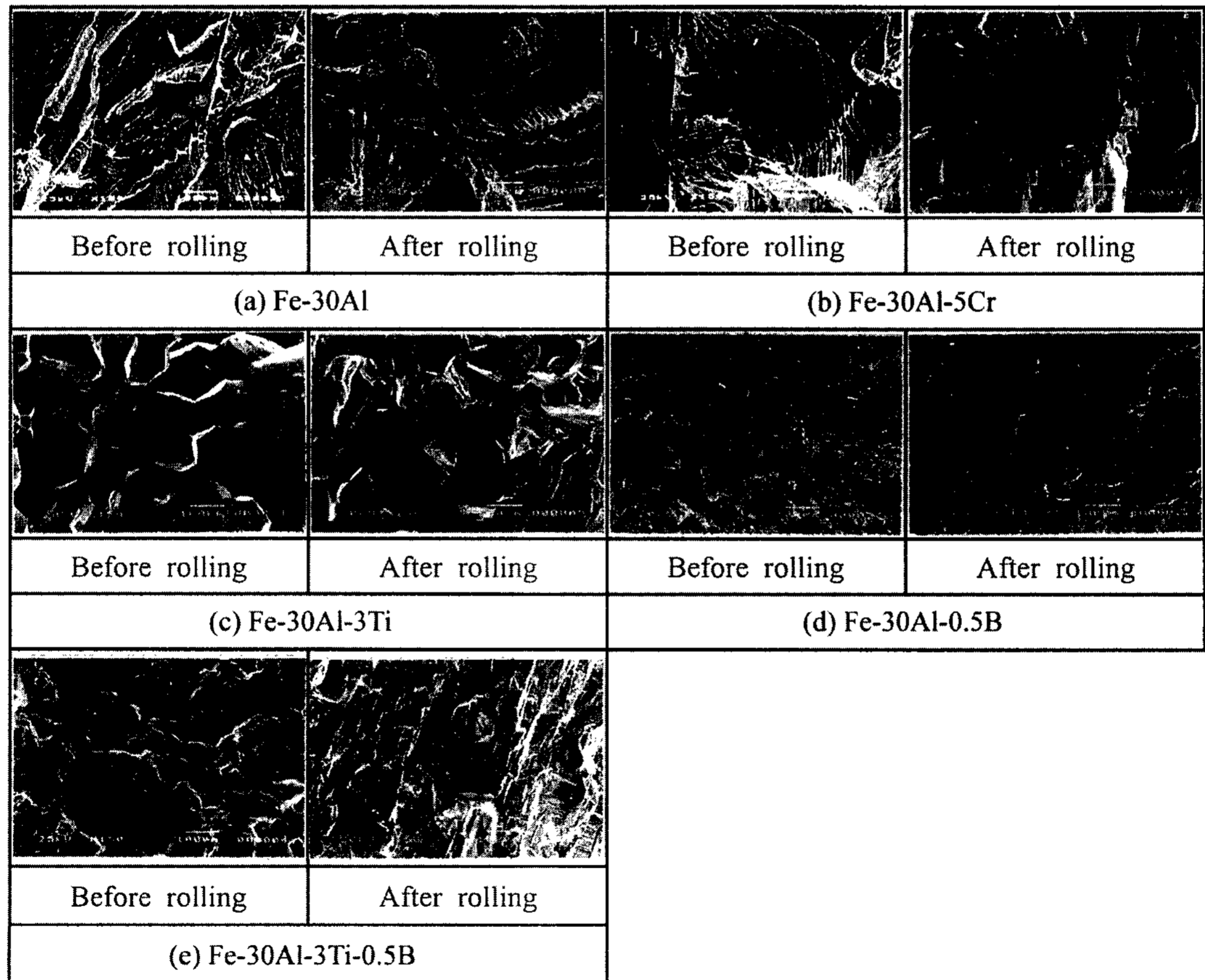


Fig. 4. SEM fractographs of Fe-Al alloys before and after hot rolling.

술한바와 같이 압연전후 모두 의사벽개파면을 나타낸 것은 합금계는 다르나 Ni₃Al합금에서 첨가된 B이 입계구조를 바꾸어 입계결합강도를 증가시키고, 입계의 규칙도를 낮추어 전이의 이동을 용이하게 하기 때문에 연성이 증가한다는 보고[20,21]로부터 B의 결정립계강화와 결정립미세화효과에 의한 것으로 생각되며, Fe-30Al합금에 Ti이 첨가되면 취성 입계파면에서 입내벽개파면과 입계파면이 혼합된 파면으로 변화하였는데, 압연 전후 Ti을 함유한 합금의 파면양상이 변화하는 명확한 원인에 대해서는 아직 보고된 바가 없어 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 5는 압연이 실패한 합금의 압연후 압연면의 미세조직과 균열의 형상을, Fig. 6은 압연후 몇몇 대표적인 합금의 파단면을 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 압연이 가능한 시편의 압연후 압연면의 결정립형태와 압연이 불가능하였던 시편의 압연면의 결정립형태를 비교하여보면 전술한 압연이 성공한 시편은 연신된 형태의 결정립을 나타냈으나 압연이 실패한 시편은 시편의 조성에 무관하게 거의 연신되지 않은 등축정형태의 결정립모양을 보여주고 있다. 그리고 압연중에 발생한 균열의 형태는 Fe-30Al-5Ti, Fe-30Al-5Ti-5Cr, Fe-30Al-3Ti-5Cr 및 Fe-30Al-5Ti-0.5B시편은 모두 결정립내를 따라 균열이 발생되어 있고 모든 시편이 Ti을 함유하고 있으나 Fe-30Al-5Si, Fe-27Al-

3Si, Fe-27Al-5Cr-3Si 및 Fe-27Al-3Si-0.5B시편은 모두 결정립계를 따라 균열이 발생되고 있으며 모든 시편이 Si을 함유하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Ti이 함유된 Fig. 6(a)의 Fe-30Al-5Ti와 (b)의 Fe-30Al-3Ti-5Cr합금은 모두 입내 벽개파면을, Si이 함유된 Fig. 6(c)의 Fe-30Al-3Si와 (d)의 Fe-27Al-3Si합금은 입계파면을 나타내어 상기 Fig. 5의 압연면의 균열발생모양과 잘 일치하고 있으나 Fig. 6(e)의 B이 첨가된 Fe-27Al-3Si-0.5B합금은 입계와 입내 벽개파면이 혼합되어 존재하고 압연면의 균열발생모양과 약간 다른 모양을 나타냈다. 여기서 결정립이 연신되지 않은 형태를 나타내는 것은 전술한바와 같이 Ti 및 Si가 첨가되면 연화온도가 상승하고 항복강도가 증가하여 결정립계면의 이동(migration)이 제약을 받고 이에 의해 동적 재결정도 억제되기 때문[10]인 것으로 판단되나, Ti를 공통적으로 함유하고 있는 시편은 모두 결정립내를 따라, 그리고 Si을 공통적으로 함유하고 있는 시편은 모두 결정립계를 따라 균열이 발생하고 있는 것은 동일한 L₁₂형 금속간화합물의 구조를 갖는다할지라도 구성원자간의 결합이 이방성이 강한(즉 공유결합성 또는 이온결합성이 강함)때는 취약한 입계를 형성하고 반대로 구성원자간의 결합이 등방성이 강한(즉 금속결합성이 강함)때는 강고한 입계를 형성한다는 보고[22]로부터 Ti는 특정 Fe자리를 치환하고, Si은 Al자리를 치환하여

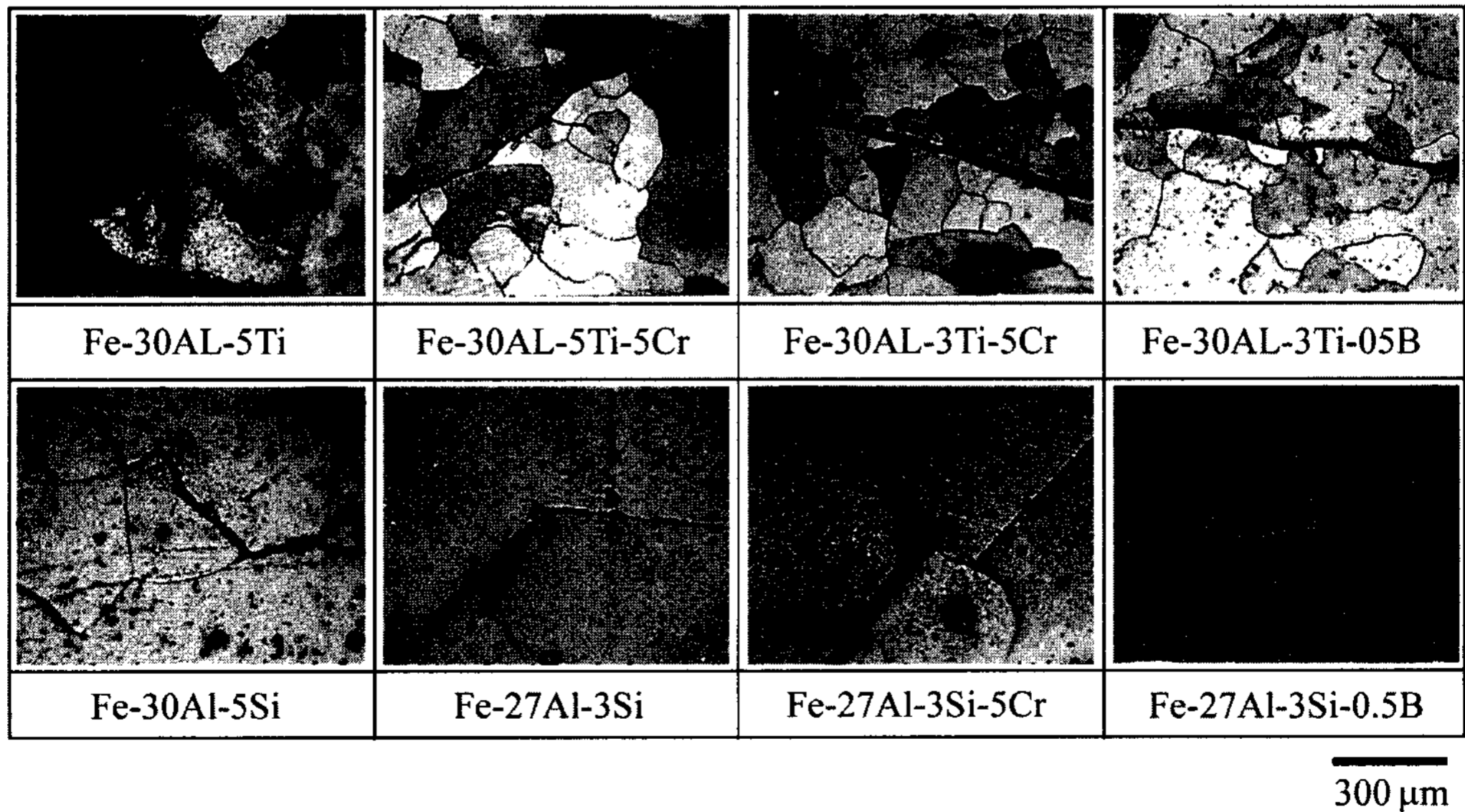


Fig. 5. Crack appearance on rolling plane of alloys formed at hot rolling. (a) Fe-30Al-5Ti (b) Fe-30Al-3Ti-5Cr (c) Fe-30Al-3Si (d) Fe-27Al-3Si (e) Fe-27Al-3Si-0.5B

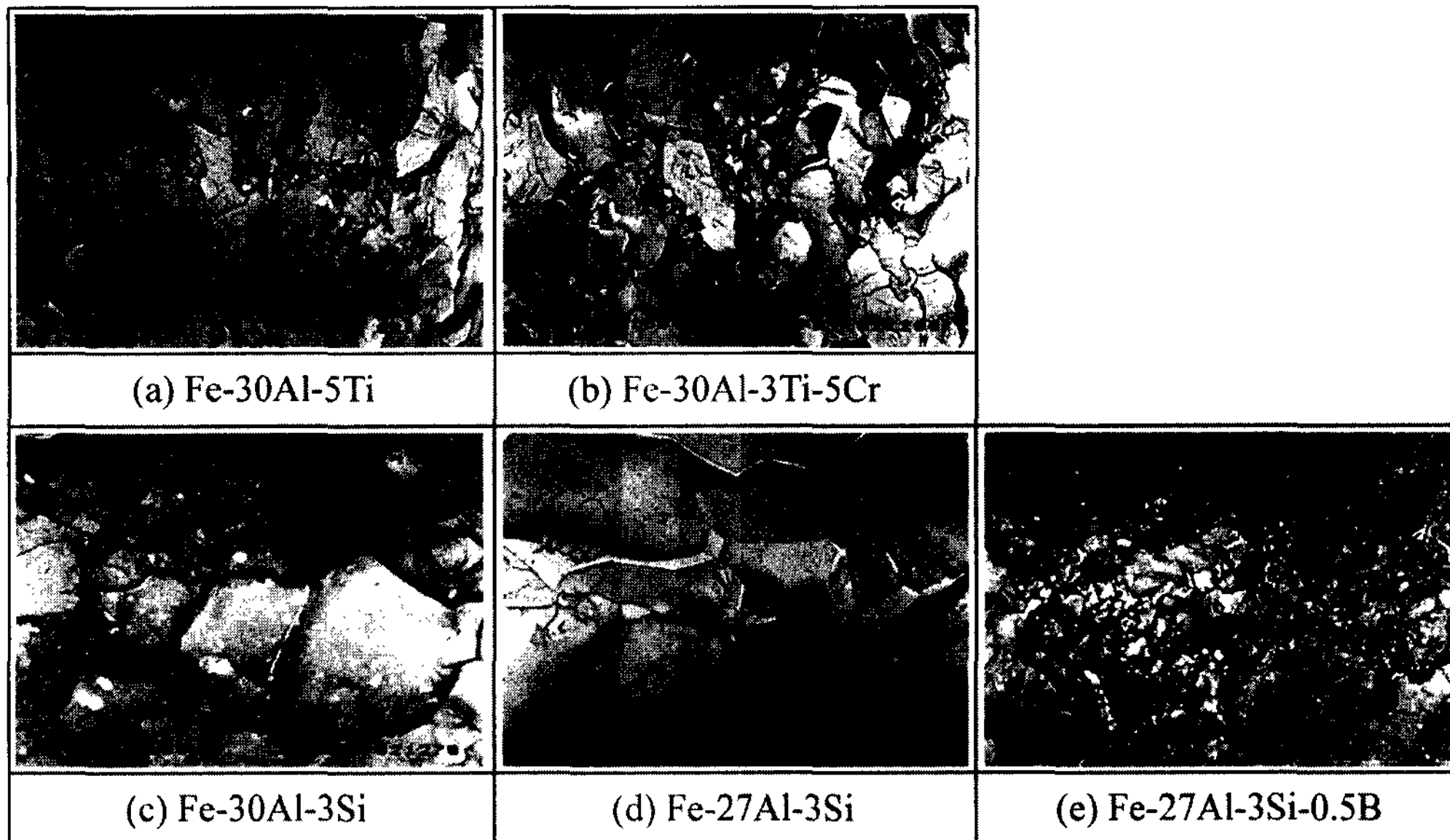


Fig. 6. SEM fractographs in transverse plane of alloys formed at hot rolling.

동일한 DO₃구조를 나타내다할지라도 상대적으로 Ti을 첨가할 때가 Si을 첨가 할 때보다 금속결합성이 강하기 때문에 상기 결과가 나온 것으로 추측되며, Fig. 6(e)의 Fe-27Al-3Si-0.5B합금이 Si이 함유되었음에도 입계와 입내 벽개파면이 혼합된 파면을 나타내는 것은 B의 입계강화효과에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2. 압연가능한 시편의 DO₃↔B2 천이온도(Tc)와 압연전후의 록크웰 경도 변화

상술한바와 같이 압연이 가능한 시편의 실용화를 위해서는 DO₃↔B2 천이온도에 미치는 첨가원소의 영향과 압연전후의 기계적 성질의 변화를 파악하는 것이 중요하며 기계적 성질은 본 실험의 경우 아크용해한 바형의 시편이어서 록크웰 경도만을 측정하였다.

Table 2는 압연이 가능한 합금의 DO₃↔B2 천이온도의 변화를 DTA를 이용하여 측정한 것으로 압연이 실패한 합금은 측정하지 않았다. Fe-30Al 합금의 경우 DO₃↔B2 천이온도는 520°C(상태도에 의함)이고, 여기에 0.5B 및 5Cr을 첨가한 경우 천이온도는 각각 523°C, 535°C로 증가폭이 크지 않은 것으로 보아 B 및 Cr은 천이온도에는 큰 영향이 없었으나 3Ti를 첨가 시에는 797°C, 3Ti+B을 첨가 시에는 773°C로 크게 증가하였고 본 실험조건하에서 3Ti를 첨가한 때가 최고치를 나타냈다. 여기서 천이온도가 증가한 원인은 Ti

이 Fe₃Al(DO₃)구조의 β 위치에 치환형으로 고용하여 고온까지 Fe₃Al구조를 안정화시키기 때문에 Tc가 향상된 것으로 생각된다.

Table 3은 압연이 가능한 시편의 압연 전과 압연 후의 록크웰 경도의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 압연 후 경도는 압연시편의 가로 단면부의 미세조직을 선택하였다. 우선 압연전 각 시편의 경도의 변화를 보면 Fe-30Al 합금은 15HRC, 여기에 5Cr을 첨가한 합금은

Table 2. DO₃ ↔ B2 transition temperature(Tc) of various Fe-Al alloys

Alloys	Tc(°C)
Fe-30Al	520(by Phase Diagram)
Fe-30Al-5Cr	535
Fe-30Al-3Ti	797
Fe-30Al-0.5B	523
Fe-30Al-3Ti-0.5B	773

Table 3. Rockwell hardness of the Fe-Al alloys before and after hot rolling.

Hardness (HRC) Alloys	Before rolling	After rolling
Fe-30Al	15	15
Fe-30Al-5Cr	14	14
Fe-30Al-3Ti	17	15
Fe-30Al-0.5B	25	22
Fe-30Al-3Ti-0.5B	20	18

14HRC로 낮은 값을 나타냈으나 여기에 3Ti를 단독 첨가한 합금은 17HRC로, 0.5B를 첨가한 합금은 25HRC로 증가하였다. 그리고 Fe-30Al에 3Ti-0.5B를 복합첨가한 합금은 20HRC를 나타내었다. 위의 결과로부터 Fe-30Al에 Cr을 첨가한 때 경도 변화는 거의 없었는데 이는 Cr을 첨가하면 항복강도는 낮아지고 실온 연성이 개선된다는 여러 연구자의 보고[2,4] 및 일반적인 강도와 경도와의 상관관계로부터 잘 이해할 수 있다. 그리고 Fe-30Al에 대해 Ti와 0.5B를 단독 및 복합 첨가한 합금에서 경도가 약간 증가하는 것은 상기 원소들의 첨가에 의한 B의 석출강화효과 또는 Ti의 고용강화효과로 판단된다. 그리고 압연 후 경도의 변화를 보면 Fe-30Al 합금은 15HRC, Fe-30Al-5Cr 합금은 14HRC로 압연전후의 차이는 없으나, Fe-30Al-3Ti 합금은 15HRC, Fe-30Al-0.5B 합금은 22HRC, Fe-30Al-3Ti-0.5B합금은 18HRC로 압연전에 비해 약간 낮은 값을 나타냈는데 이는 Fe-25Al을 유도 용해한 후 80%까지 가공을 하고, 750°C에서 1시간 동안 재결정화 열처리를 한 시편에서 가공만 한 시편이 가장 높은 경도를 나타내며, 가공과 재결정화 열처리한 시편이 가장 낮은 경도를 보인다는 Argarwal등의 보고 [8]로부터 상술한바와 같이 시편을 압연하는 과정에서 압연이 이루어지면서 재결정화와 결정립성장이 동시에 일어나기 때문에 경도가 저하한 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Fe-30at.%Al합금을 기본조성으로 Cr, B, Ti 및 Si를 목표조성대로 단독 또는 복합 첨가하고 아크 용해하여 합금을 제조하고 이를 균질화 및 안정화 열처리한 후 1000°C에서 열간 압연하였다. 이어서 이들 합금의 압연 전후의 결정립형태, 파면양상 및 경도의 변화와 천이온도(Tc)등을 조사하여 이들 합금의 열간압연성에 미치는 Ti, Si, Cr 및 B의 영향을 조사하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 열간압연특성은 Fe-30Al, Fe-30Al-3Ti, Fe-30Al-0.5B, Fe-30Al-5Cr과 Fe-30Al-3Ti-0.5B합금은 압연이 성공하였으나, 5Ti 및 3Si를 단독 또는 다른 원소와 복합첨가한 시편은 실패하였다. 그리고 압연이 성공한 합금의 압연후 미세조직은 압연면 및 이에 수직인 면 모두 연신된 결정립을 나타냈으나, 압연이 실패한 시편은 시편의 조성에 무관하게 거의 연신되지 않은 등

축정형태의 결정립모양을 나타냈다.

2. 압연이 실패한 합금의 압연중에 발생한 균열의 형태는 Ti을 함유한 Fe-30Al-5Ti, Fe-30Al-5Ti-5Cr, Fe-30Al-3Ti-5Cr 및 Fe-30Al-5Ti-0.5B시편은 모두 결정립 내를 따라 균열이 발생되었고 입내 벽개파면을 나타냈으나, Si를 함유한 Fe-30Al-5Si, Fe-27Al-3Si 및 Fe-27Al-5Cr-3Si시편은 모두 결정립계를 따라 균열이 발생되었으며 입계파면을 나타냈다.

3. 압연전 미세조직은 전 합금 모두 등축정을 나타냈고, 결정구조는 전부 전형적인 DO₃(Fe₃Al)구조를 나타내어 첨가원소의 영향은 없었으며, DO₃↔B2 천이온도는 Fe-30Al 합금의 경우 520°C 정도임에 비해 3Ti를 첨가시에는 797°C, 3Ti+B을 첨가 시에는 773°C로 크게 증가하여 천이온도에 대한 Ti의 영향이 매우 컸으나 B 및 Cr은 거의 영향이 없었다. 그리고 경도의 변화는 Fe-30Al 합금은 압연전후의 차이는 없으나, Fe-30Al-3Ti 합금, Fe-30Al-0.5B 합금, Fe-30Al-5Cr 합금 및 Fe-30Al-3Ti-5Cr 합금은 압연전에 비해 낮은 값을 나타냈다.

후 기

이 논문은 2000년도 전남대학교 연구년교수 연구비 지원에 의하여 연구하였음.

참 고 문 헌

- [1] C. G. McKamey, J. A. Horton and C. T. Liu : J. of Mater. Res., "Effect of chromium on properties of Fe₃Al", 4(1989) 1156-1163.
- [2] C. G. McKamey and C. T. Liu : Scripta Metall. Mater., "Chromium addition and environmental embrittlement in Fe₃Al", 24(1990) 2119-2122.
- [3] R. T. Fortnum and D. E. Mikkola : Mater. Sci. and Eng., "Effects of molybdenum, titanium and silicon additions on the DO₃↔B2 transition temperature for alloys near Fe₃Al", 91(1987) 223-231.
- [4] C. G. McKamey, J. H. DeVan, P. F. Tortorelli and V. K. Sikka : J. of Mater. Res., "A review of recent developments in Fe₃Al-based alloys", 6(1991) 1779-1805.
- [5] R. S. Diehm and D. E. Mikkola : MRS Symp. Proc. vol.81, "In High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys II", MRS(1987) 329-334.
- [6] V. K. Sikka, S. Viswanathan and C. G. Mckamey : Proc. Inter. Symp. -Structural Intermetallics, "Development and commercialization status of Fe₃Al-based intermetallic alloys",

- TMS(1993) 483-491.
- [7] B. Voyzelle and J. D. Boyd : Mater. Sci. & Eng., "High-temperature deformation behaviour of Fe₃Al", A258(1998) 243-248.
- [8] A. Agarwal, R. Balasubramaniam and S. Bhargava : Metall. and Mater. Trans. A, "Effect of thermomechanical treatments on the room-temperature mechanical behavior of iron aluminide Fe₃Al", 27A(1996) 2985-2993.
- [9] Y. D. Huang, W. Y. Yang, Z. Q. Sun : Mater. Sci. and Eng., "Improvement of room temperature tensile properties for Fe₃Al-based alloys by thermomechanical and annealing process", A263(1999)75-84.
- [10] Y. D. Huang, W. Y. Yang, G. L. Chen and Z. Q. Sun : Intermetallics, "On the effect of B2 thermomechanical treatment in improving the room temperature ductility of Fe₃Al-based alloys", 9(2001) 331-340.
- [11] Edited by A. K. Koul, V.R.Parameswaran, J-P.Immarigeon and W.Wallace : National Research Council of Canada, "Advances in High Temperature Structural Material and Protective Coatings", Ottawa, (1994) 296-308.
- [12] R. S. Diehm, M. P. Kemppainen and D. E. Mikkola : Mater. Manuf. Process Mat. Man. Proc. 4, "Processing and Alloying of Modified Iron Aluminides", (1989) 61-72.
- [13] P. R. Swann, W. R. Duff and R. M. Fisher : Metall. Trans., "Electron metallography of ordering reactions in Fe-Al alloys", 3(1972) 409-419.
- [14] Edited by N. S. Stoloff and V. K. Sikka : Chapman & Hall, "Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds", New York, (1996) 351-391.
- [15] Sung-Su Kim, Sung-Min Joo, Seon-Hun Oh, Kwan-Hyu Kim, Dap-Chun Choi : J. of the Korean Foundrymen's Society, "Effects of titanium, hafnium and zirconium alloying elements on microstructures and DO₃↔B2 transition temperature of Fe-30Al-5Cr alloys", 21(2001) 15-23.
- [16] Kwang-Il Park, Sung-Min Joo and Dap-Chun Choi : J. of the Korean Inst. Met. and Mater., "Effects of Cr, Mo, Nb and B additions on the microstructure and mechanical properties in Fe-25at.%Al alloy", 35(1997) 305-312.
- [17] C. T. Liu, E. H. Lee and C. G. McKamey : Scripta Metall. Mater., "An environmental effects as the major cause for room temperature", 23(1989) 875-880.
- [18] C. T. Liu and E. P. George : MRS Symp. Proc. vol.213, "In High-Temperature Ordered Intermetallics IV", MRS(1991) 527-532.
- [19] Edited by J. H. Westbrook and R. L. Fleischer : John Wiley & Sons, "Intermetallic Compounds vol.2", New York, (1995) 199-209.
- [20] S. P. Chen, A. F. Voter, R. C. Albers, A. M. Boring and P. J. Hay : Scripta. Metall., "Theoretical studies of grain boundaries in Ni₃Al with boron or sulfur", 23(1989) 217-222.
- [21] C. T. Liu : Scripta Metall. Mater., "Environmental embrittlement and grain boundary fracture in Ni₃Al", 27(1992) 25-28.
- [22] Sokeizai Center : The Mater. Process Tech. Center(Sokeizai Center), "Intermetallic Compound", Tokyo, (1996) 37-38.