

논문

Fe-30Al-5Cr 합금의 기계적 성질 및 파면양상에 미치는 Ti, Hf 및 Zr의 첨가효과

김성수 · 주성민[†] · 주형곤 · 이도재 · 최담천

Effects of Ti, Hf and Zr Alloying Elements on Mechanical Properties and Fracture Behaviors of Fe-30Al-5Cr Alloys

Sung-Su Kim, Sung-Min Joo[†], Hyung-Gon Joo, Doh-Jae Lee and Dap-Chun Choi

Abstract

Recently, iron aluminides based on Fe3Al and FeAl are ordered intermetallic alloys that offer good oxidation resistance, excellent sulfidation resistance, and potentially lower cost than many high-temperature structural materials. They have better strength, elasticity to weight ratio and high temperature strength, therefore, they can be considered as candidate heat resistance structural materials for automobiles, ships, airplanes and spaceships applications. The changes in the mechanical properties and fracture behavior were investigated for Fe-30at.%Al-5at.%Cr alloys when Ti, Hf and Zr were added respectively. For mechanical properties such as Rockwell hardness and yield strength at room temperature, those were decreased in the case of Fe-30at.%Al-5at.%Cr alloy then increased in the case of 5at.% and 10at.% addition of Ti alone. However, Rockwell hardness and yield strength decreased again at 15%Ti then increased dramatically due to the precipitation hardening of the second phase on the specimen at 20%Ti. For fracture modes, cleavage fracture showed in the case of Fe-30at.%Al and Fe-30at.%Al-5at.%Cr alloys. As the amount of Ti addition changed cleavage to transgranular fracture and to quasi-cleavage fracture at 20%Ti. When Hf, Zr and Hf+Zr were added respectively, transgranular, cleavage and quasi-cleavage fracture were coexisted.

(Received November 18, 2000)

1. 서론

내열 구조용 재료[1,2]는 고융점, 저밀도의 물리적 성질과 고강도, 내크립 특성, 고인성의 기계적 성질, 그리고 우수한 내식성, 내산화성 외에도 양호한 가공성 및 경제적인 면들이 요구되고 있다. 내열 구조용 재료는 500°C 이상을 사용온도로 하는 보일러와 증기 터빈용 재료, 800°C~900°C를 사용온도로 하는 자동차와 선박용 엔진의 배기계 재료, 1,000°C 이상의 고온에서 사용하는 제트엔진용 터빈 블레이드와 석유화학반응장치용 재료 등으로 나뉘어진다. 이중 내열 구조용 재료로 유망시되고 있는 aluminide계 금속간 화합물은 TiAl, Ti3Al를 기본으로 한 Ti-Al계, NiAl, Ni3Al를 기본으로 한 Ni-Al계, FeAl, Fe3Al를 기본으로 한

Fe-Al계 등이 있고, 이들 중 상당수는 강도의 역온도의존성[3]이라는 특이한 성질을 가지고 있으며, 산화분위기 및 부식매체에서 보호성이 우수하고 치밀하며 얇은 산화물(α-Al2O3)층을 형성할 수 있는 충분한 Al를 함유[4,5]하고 있어 크게 주목 받아왔으나 대부분 상온에서의 연성과 가공성이 좋지 않아 이의 개선을 위한 연구[6,7]가 진행되어 왔다.

Fe-Al계 금속간 화합물중 D03구조의 Fe3Al계는 550°C 부근까지의 고온강도가 높고 산화저항성이 클 뿐만 아니라 중량에 대한 강도 및 탄성비가 커서 자동차, 항공기 및 우주항공용 재료[9,10]로 연구되고 있으며, 혹독한 산화분위기인 황화가스분위기의 열회수장치, 용융염 분위기 등에 이용하기 위해 개발을 서두르고 있다. 또한 배기가스정화장치 및 열교환기용 재

전남대학교 공과대학 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, Chonnam National University)

[†]E-mail : jsm5485@hanmail.net

료, 식품용기, 석유화학조업장비, 화학용기, 핵발전소의 배관등에 사용하는 스테인리스강을 대체하여 고가의 Cr, Ni 등을 절약할 수 있는 가능성에 대한 연구가 계속되고 있다. 이러한 연구동향을 토대로 Fe-Al계의 실용화를 위해서는 첫째, 결정립 미세화 및 파괴거동 그리고 둘째, 경도, 강도, 연성 및 인성등 기계적 성질에 미치는 미량합금원소의 단독 및 복합 첨가효과에 대하여 연구가 계속되어야 한다고 생각된다. 또한 최근에 Fe₃Al계의 미세조직, 파면양상, 기계적 성질 및 부식특성에 미치는 Cr, Mo, Nb 및 B등의 영향[11,12], FeAl계의 미세조직, 파면양상 및 기계적 성질에 미치는 Cr, Mo, Nb 및 B의 영향[13] 및 Fe-38Al 합금의 미세조직, 기계적 성질, 파면양상 및 고온 내산화성에 대한 Zr 및 Hf등의 첨가효과[14]에 관한 연구결과로부터 Zr 및 Hf를 0.1~1.0을 첨가하면 결정립이 미세화되고, 파면양상이 취성벽개에서 덩플파괴(dimple fracture)로 변화하며, 내산화성도 우수함이 확인되고 있으며, 또한 Fe-5Cr 합금을 기본조성으로 Al함량을 20~45 at.%까지 변화시키고 여기에 Hf 및 Zr를 첨가한 결과 D0₃구조의 Fe-30Al-5Cr(at.%, 이하 Fe30Al5Cr) 합금의 경우가 가장 낮은 경도 및 항복강도를 나타낸 것이 확인되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Al함량을 30%로 고정하고 상온연성개선을 위해 Cr함량을 5%를 첨가한 Fe30Al5Cr 합금을 기본조성으로 여기에 Hf, Zr 및 Ti등의 합금원소를 첨가하여 이들을 목표조성대로 아르곤 분위기 하에서 아아크 용해하여 합금을 제조하고, 이를 균질화 및 안정화 열처리한 후 경도시험 및 압축시험 등의 기

계적 성질 그리고 파면조직을 통한 파면양상을 관찰하여 스테인리스강등 기존의 재료에 대한 대체 가능성을 조사하였다.

2. 실험방법

합금제조를 위한 원재료인 Fe분말은 불규칙상의 전해철 분말(美國, SCM Co., A-210)로서 600°C의 수소 분위기 하에서 1시간동안 환원처리 한 후 약 100 MPa로 압축 성형한 것을, Al은 순도 99.98%의 ingot를 적당한 크기로 절단한 다음 초음파세척기로 약 1시간 정도 세척한 것을 사용하였다. 첨가원소인 Cr은 순도 99.99%의 bulk상(日本, (株)重化學工業)을, Hf 및 Zr은 각각 순도 99.5%, 99.8%의 결정상(美國, Cerac Co.)을 사용하였다. 목표조성대로 배합한 상기 원재료를 아아크 용해로(韓國, Ace Vacuum Co.)내에 장입하고, 4N급 고순도 아르곤 가스 분위기 하에서 잔존산소를 제거하기 위해 sponge상의 Ti를 먼저 용해한 후 원재료를 용해하였다. 제조된 시편은 무게가 35g인 bar상으로, 용해전후의 중량차가 0.2%이하인 것만을 선택하여 사용하였다. 상기 시편을 열처리로(英國, Lenton Co.) 내의 상자형 인코넬 chamber에 장입하고, 고순도 아르곤 가스 분위기 하에서 1,000°C에서 7일간 균질화 열처리한 후 500°C에서 5일간 상안정화 열처리를 하였다. 열처리한 시편은 각각의 시험목적에 맞도록 고속정밀절단기로 절단하여 가공하였다. 각 시편의 경도는 록크웰 경도계(H_RC)를 사용하여 측정하였고, 각 시편당 7회 이상 측정된 값의 평균치로 하였으며, 상온

Table 1. Chemical compositions of Fe-Al-Cr alloys(at.%)

	Fe	Al	Cr	Ti	Hf	Zr		Fe	Al	Cr	Ti	Hf	Zr
1	bal.	30					14	bal.	30	5	20	0.1	
2	bal.	30	5				15	bal.	30	5	5	0.3	
3	bal.	30	5	5			16	bal.	30	5	10	0.3	
4	bal.	30	5	10			17	bal.	30	5	15	0.3	
5	bal.	30	5	15			18	bal.	30	5	20	0.3	
6	bal.	30	5	20			19	bal.	30	5	5		0.2
7	bal.	30	5		0.1		20	bal.	30	5	10		0.2
8	bal.	30	5		0.3		21	bal.	30	5	15		0.2
9	bal.	30	5		0.2	22	bal.	30	5	20		0.2	
10	bal.	30	5		0.1	0.2	23	bal.	30	5	5	0.1	0.2
11	bal.	30	5	5	0.1		24	bal.	30	5	10	0.1	0.2
12	bal.	30	5	10	0.1		25	bal.	30	5	15	0.1	0.2
13	bal.	30	5	15	0.1		26	bal.	30	5	20	0.1	0.2

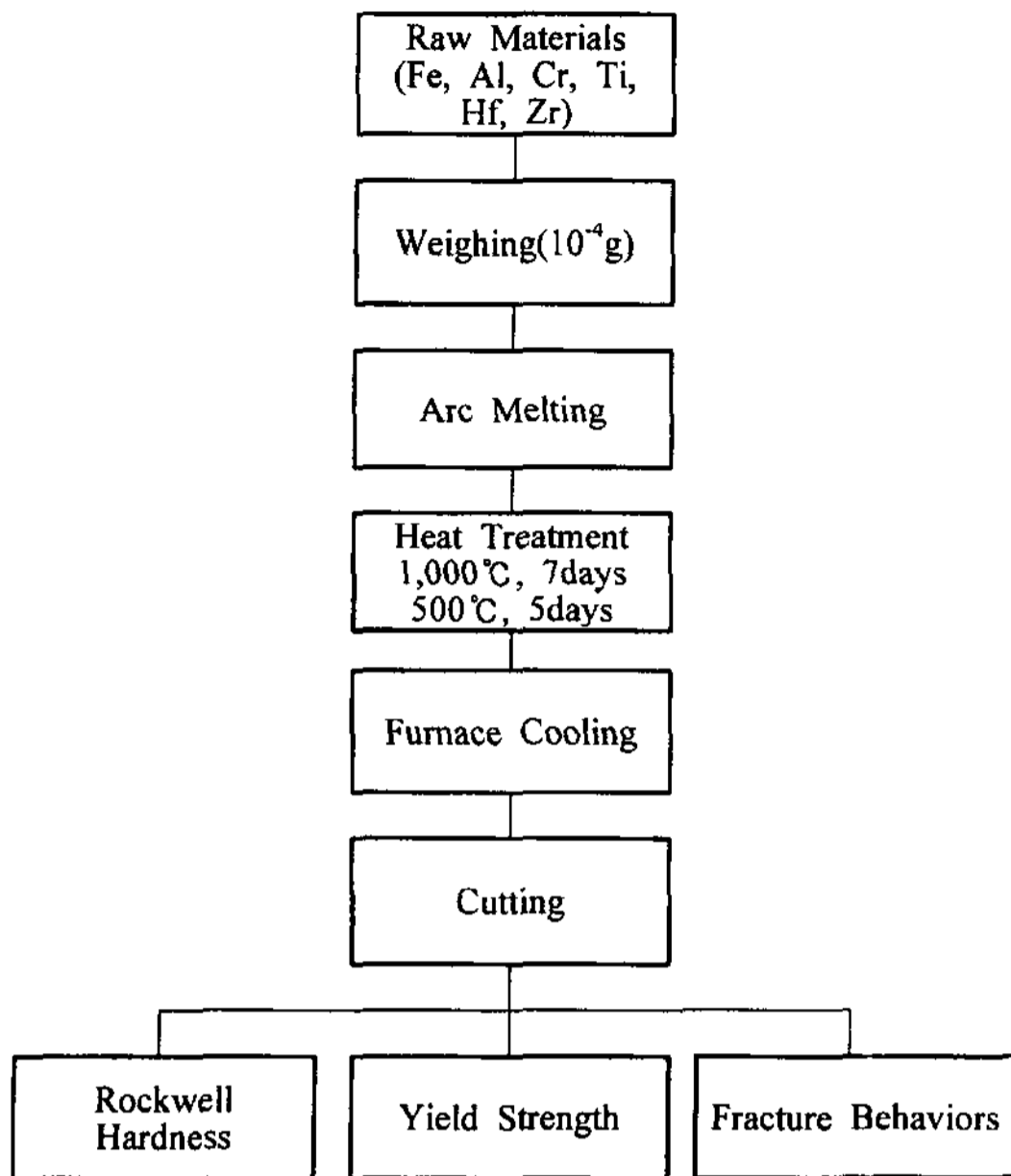


Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure.

을 SiC연마지로 #2,000까지 습식연마한 시편을 UTM (美國, United Calibration Co., SFM-20)으로 최대하중 1400 MPa, 시험하중속도 0.1 mm/min(strain rate($\dot{\epsilon}$) = $1.67 \times 10^{-3} S^{-1}$)로 하여 시험하였고, 상온항복강도는 0.2% offset치로 하였다. 또한 각 시료의 충격파면은 샤르피 충격시험방식으로 시험편을 파단하여 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 본 연구에서 사용한 시료의 화학조성은 표 1에 나타난 바와 같고, 전체실험순서는 그림 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 성질에 미치는 첨가원소의 영향

그림 2 및 3은 Fe30Al5Cr 합금의 Ti함량의 변화에 따른 록크웰 경도 및 상온 항복강도의 변화를 Fe30Al 합금의 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 록크웰 경도는 Fe30Al 합금의 경우 16H_RC이나, 5Cr을 첨가한 Fe30Al5Cr 합금의 경우 14H_RC로 낮아지는 경향을 나타낸다. 그러나 Ti를 5 및 10%를 첨가하게 되면 경도가 다시 증가하여 각각 23 및 25H_RC로 되며, 15%를 첨가한 경우에는 21H_RC로 약간 감소하고, 20%를 첨가하면 다시 42H_RC로 크게 증가한다. 또한, 상온 항복강도의 경우 Fe30Al 합금은 475 MPa로 다소 높으

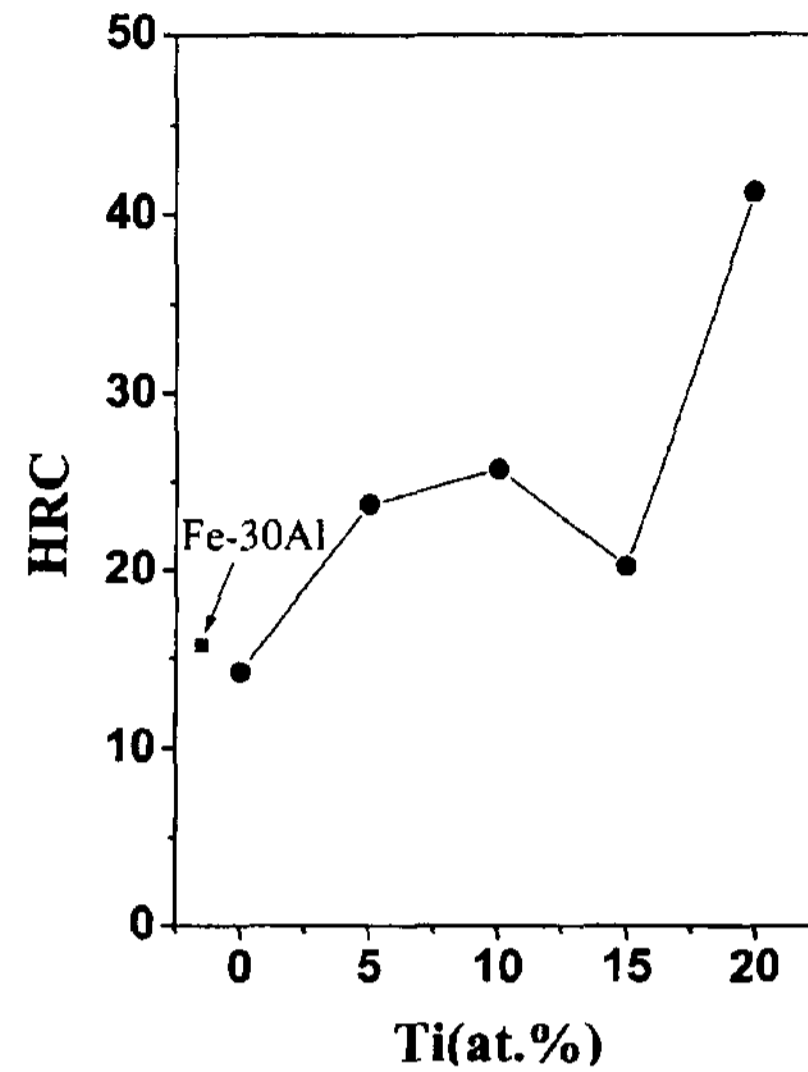


Fig. 2. Hardness of FeAlCr alloys with different Ti concentration.

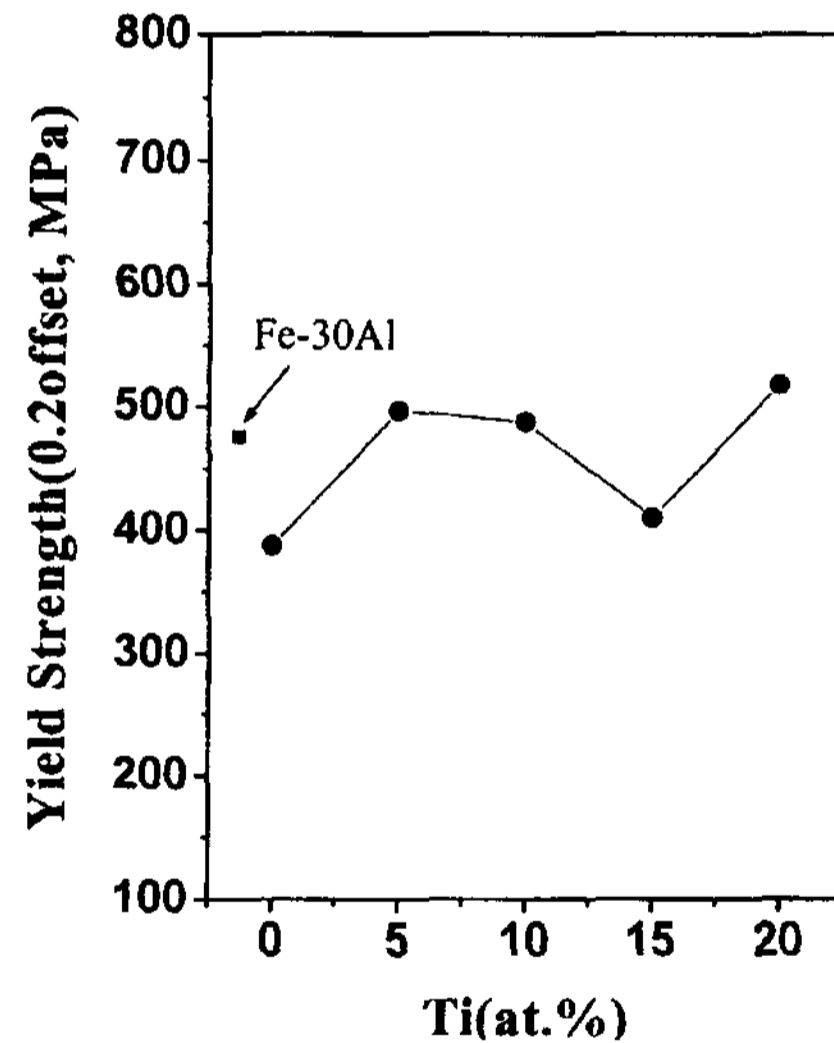


Fig. 3. Yield strength of FeAlCr alloys with different Ti concentration at room temperature.

나, 5Cr 첨가시 388 MPa로 Fe30Al 합금에 비해 항복강도가 상당히 감소하며, Fe30Al5Cr 합금에 Ti를 5 및 10%를 첨가하면 항복강도가 각각 495 및 490 MPa로 높아지고, 15Ti 첨가시는 록크웰 경도와 유사하게 다시 항복강도가 415 MPa로 감소하며, 20Ti 첨가시는 항복강도가 520 MPa로 다시 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 이처럼 록크웰 경도와 항복강도

모두 Fe₃₀Al 합금보다 Fe₃₀Al₅Cr 합금의 경우가 더 낮은 값을 나타내는데, 이는 미세조직을 잘 제어하고, Cr을 적당량 첨가하면 Cr의 선택적 치환에 의해 원자들의 상호작용 에너지가 변화되고 규칙구조(DO₃구조)가 안정화되어 소성가공이 가능한 정도의 상온연성을 확보할 수 있다는 기 보고된 연구결과[15]로부터 충분히 이해할 수 있다. 그리고 Fe₃₀Al₅Cr합금에 Ti를 첨가하지 않은 경우에 비해 Ti를 첨가한 경우 10%까지는 경도와 항복강도가 크게 증가한 이유로는 기지합금인 Fe₃Al에 대한 Ti의 고용강화효과로 인하여 증가된 것으로 판단되나, 반면에 15Ti를 첨가한 때는 미세조직 관찰결과 결정립이 미세화된 단상의 Fe₃Al상을 나타내어 경도 및 항복강도가 증가할 것으로 예상되었음에도 경도와 항복강도가 5Ti 및 10Ti첨가의 경우보다 약간 감소하였는데 Fe₃Al에 대한 Ti의 최대 고용한이 기 보고된 연구결과[16]에 의하면 약 18%인 점으로부터 고용강화효과를 상쇄하는 다른 원인이 있을 것으로 생각되며, 또한 Ti이 농축된 잔류액상이 응고하는 과정에서 미세한 연성상이 결정립계에 생성되어 경도 및 항복강도가 약간 낮아진 것이 아닌가 생각된다. 그러나 20Ti 첨가시는 고용한 이상으로 첨가된 Ti이 다른 원소(특히, Fe)와 합금상을 형성하여 기지에 경한 섬모양의 제 2상을 생성함에 의해 경도 및 항복강도가 증가된 것으로 생각된다.

그림 4 및 5는 상기 합금에 Hf 단독 및 Hf+Ti를

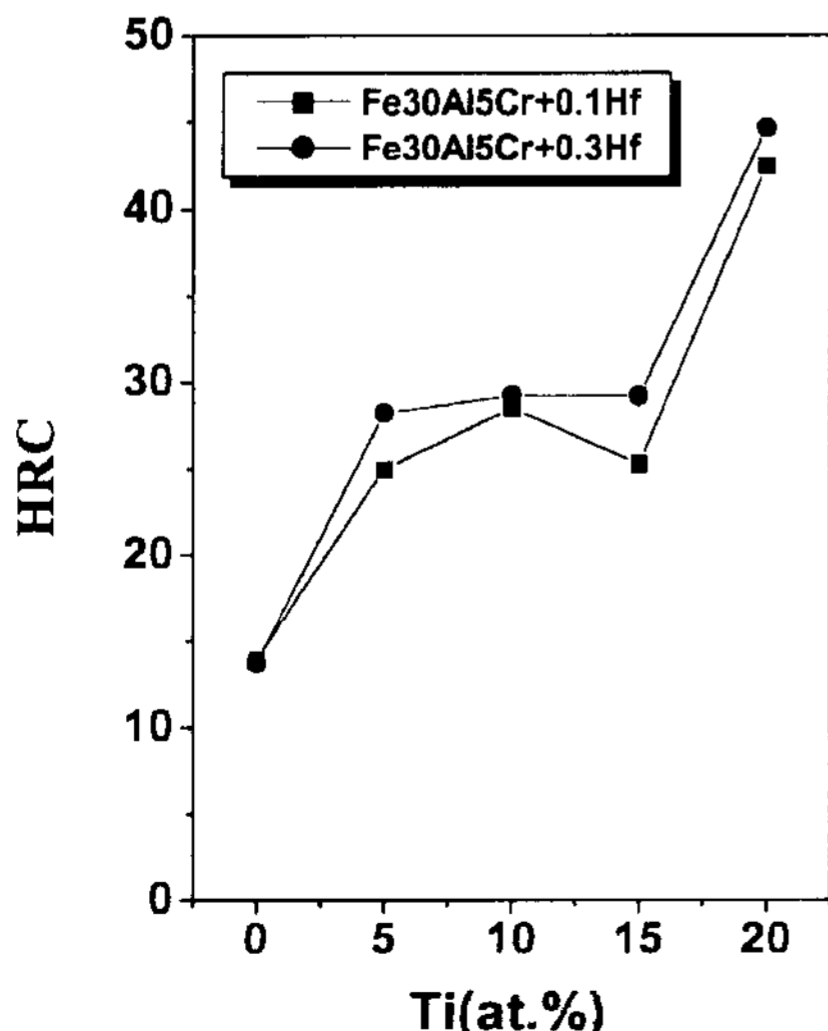


Fig. 4. Hardness of FeAlCr alloys with different Hf and Ti concentration.

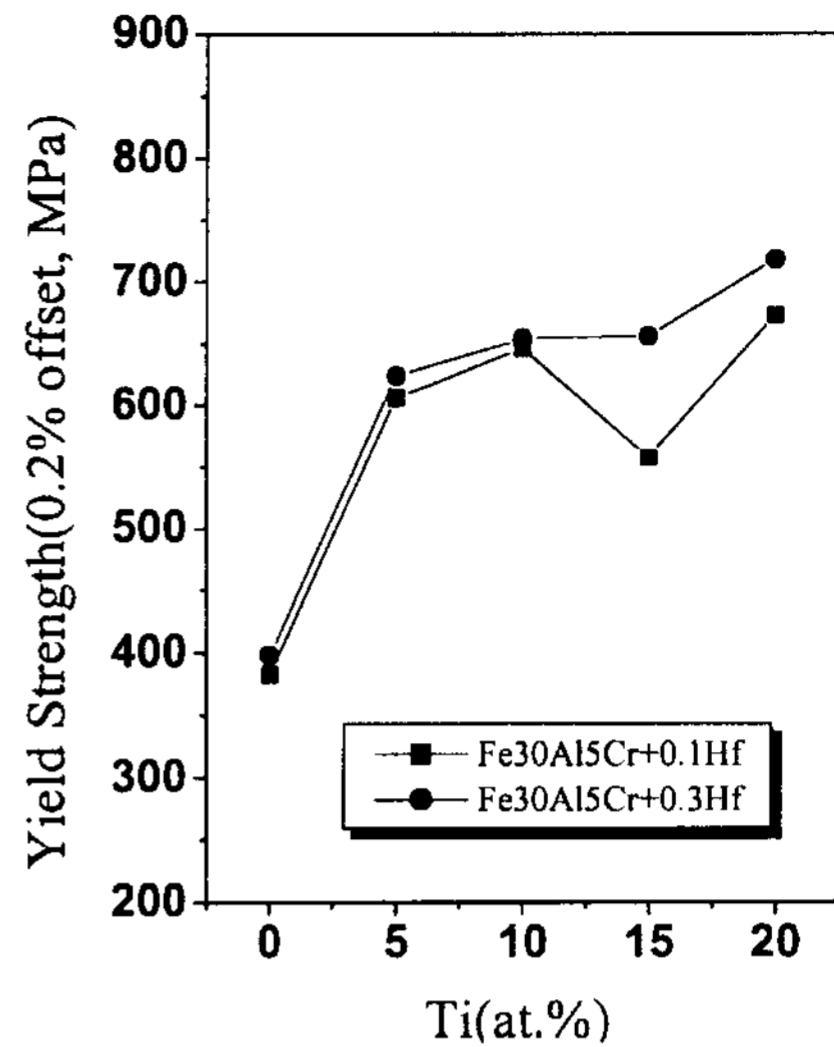


Fig. 5. Yield strength of FeAlCr alloys with different Hf and Ti concentration at room temperature.

복합첨가한 때 록크웰 경도 및 상온 항복강도의 변화를 나타낸 것이다. 록크웰 경도는 Fe₃₀Al₅Cr 합금의 경우 14H_RC이나 0.1Hf 단독첨가시는 13H_RC로 약간 낮아지고, Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf 합금에 Ti를 5 및 10% 첨가하면 록크웰 경도가 증가하여 각각 25 및 28H_RC로 되고, 15%를 첨가하면 25H_RC로 감소하며, 20%를 첨가하면 다시 41H_RC로 증가한다. 그리고 Hf+Zr 복합첨가의 경우 Fe₃₀Al₅Cr+0.3Hf 합금에 Ti를 5, 10 및 15%를 첨가하면 경도가 증가하여 각각 28, 28 및 29H_RC로 되고, 20%를 첨가하면 45H_RC로 급격히 경도가 증가한다. 또한, 상온 항복강도의 경우 Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf 합금에 Ti를 첨가하지 않을 때는 380 MPa이나, Ti를 5 및 10%를 첨가하면 항복강도가 증가하여 각각 600 및 630 MPa로 되며, 15%를 첨가하면 550 MPa로 감소되고, 20%를 첨가하면 다시 증가하여 675 MPa로 된다. 그리고 Fe₃₀Al₅Cr+0.3Hf 합금에 Ti를 첨가하지 않을 때는 390 MPa이나 Ti를 5, 10, 15 및 20%첨가하면 항복강도는 각각 610, 635, 640 및 700 MPa로 증가한다. 여기서 록크웰 경도와 항복강도의 변화는 0.1H+Ti를 복합첨가한때는 상기 Ti를 단독첨가한 때와 비교시 전반적으로 록크웰 경도와 항복강도는 더 높게 나타났으나 Ti 함량에 따른 그 변화경향은 일치하였다. 그러나 0.3Hf+Ti를 복합첨가한 때는 상기 Ti 단독 및 0.1Hf+Ti를 복합첨가한 때보다 전반적으로 경도 및 항복강도가 높았고, 그 증가경향은 10Ti를 첨

가한 때까지는 상기 Ti를 단독첨가한 때와 그 경향이 일치하였으나, 15Ti 첨가에서는 Ti 단독첨가한 때와 달리 Hf+Ti 복합첨가한 때는 경도 및 항복강도가 증가되었다. 이는 Hf+Ti 복합첨가한 때는 기지에 Ti와 Hf의 동시고용에 의한 고용강화효과의 증가에 기인된 것으로 판단되며, 0.1Hf+Ti 첨가보다 0.3Hf+Ti 복합첨가의 경우가 약간 높게 나타나는데 이는 Hf의 첨가량의 차이에 따른 고용강화효과의 차이에 의한 것으로 보이나 추후 구명해야할 것으로 생각된다.

그림 6 및 7은 상기합금에 Zr 단독 및 Zr+Ti 및 Zr+Hf+Ti을 복합첨가한 때 로크웰 경도 및 상온 항복강도의 변화를 나타낸 것이다. 로크웰 경도는 Fe30Al5Cr+0.2Zr 합금의 경우 12H_RC이나, Fe30Al5Cr+0.2Zr 합금에 Ti를 5 및 10%를 첨가하면 경도가 증가하여 각각 25 및 28H_RC로 되며, 15%를 첨가하면 27H_RC로 감소하고, 20%를 첨가하면 다시 41H_RC로 증가한다. 그리고 Zr+Hf 및 Zr+Hf+Ti을 복합첨가한 때 우선 Fe30Al5Cr+0.2Zr+0.1Hf 합금의 경우 16H_RC이나 Fe30Al5Cr+0.2Zr+0.1Hf 합금에 Ti를 5 및 10%를 첨가하면 다른 합금들과 유사하게 증가하여 각각 28 및 30H_RC로 되고, 15%를 첨가하면 27H_RC로 감소하며, 20% 첨가시는 42H_RC로 다시 증가한다. 또한, 상온 항복강도는 Fe30Al5Cr+0.2Zr 합금에 Ti를 첨가하지 않을 때는 470 MPa이나 Ti를 5 및 10%를 첨가하면 항복강도는 각각 550 및 596 MPa로 증가하고, 15% 첨가시는 470 MPa로 감소하며, 20% 첨가시

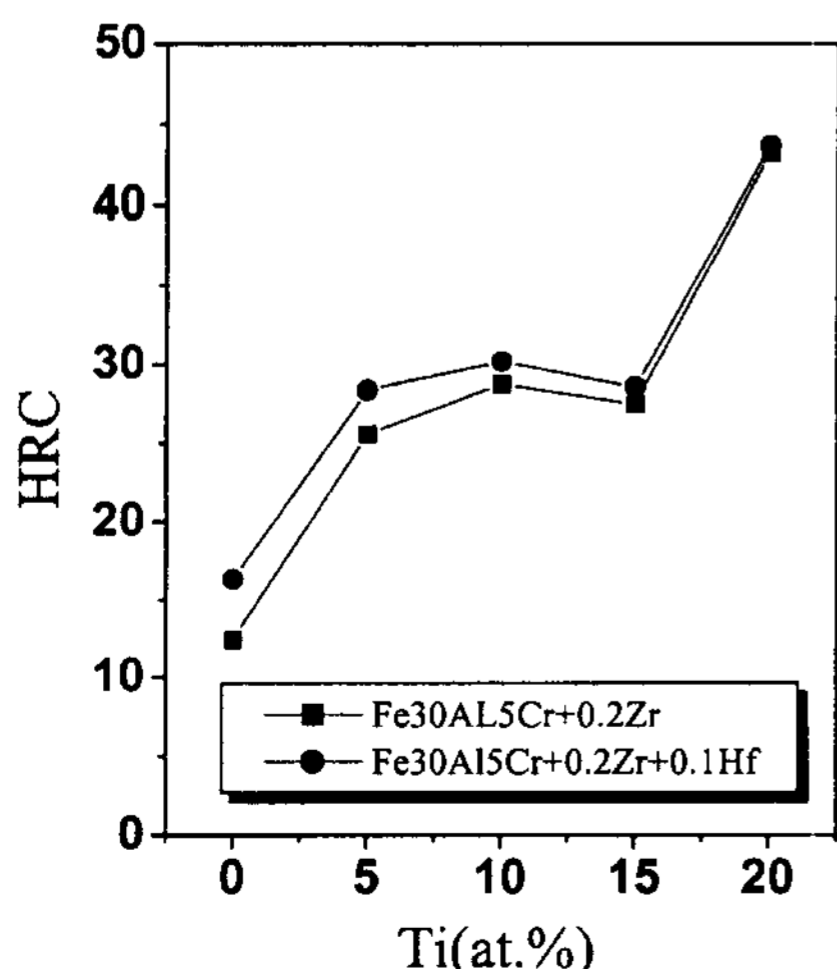


Fig. 6. Hardness of FeAlCr alloys with different Zr, Hf and Ti concentration.

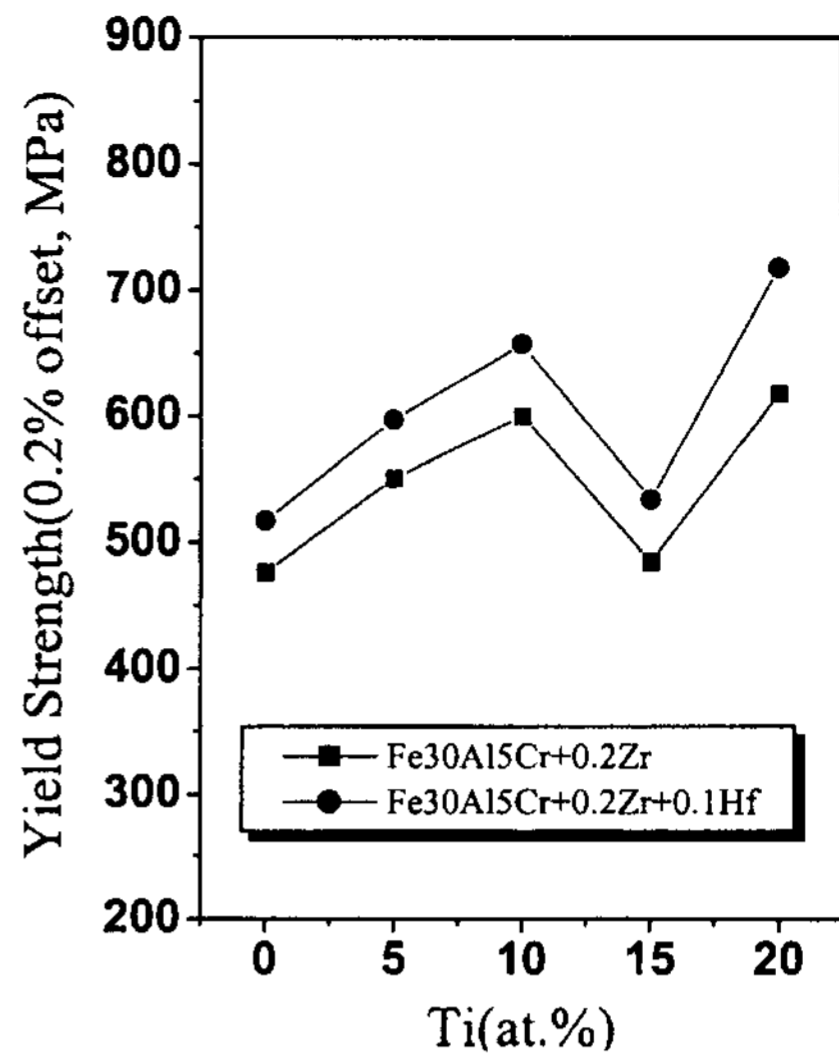


Fig. 7. Yield strength of FeAlCr alloys with different Zr, Hf and Ti concentration at room temperature.

605 MPa로 다시 증가한다. 그리고 Fe30Al5Cr+0.2Zr+0.1Hf 합금에 Ti를 첨가하지 않은 때는 515 MPa이나 Ti를 5 및 10%를 첨가하면 항복강도는 각각 557 MPa 및 655 MPa로 증가하고, 15% 첨가시는 520 MPa로 감소하며, 20% 첨가시 720 MPa로 다시 증가한다. 여기서 로크웰 경도와 항복강도의 변화는 0.2Zr+Ti, 0.2Zr+0.1Hf+Ti를 복합첨가한때가 상기 Ti를 단독첨가한 때와 비교시 전반적으로 로크웰 경도 및 항복강도는 더 높게 나타났으나 그 Ti 함량에 따른 변화경향은 일치하였다. 그리고 0.2Zr+Ti를 복합 첨가한 때보다 0.2Zr+0.1Hf+Ti을 복합 첨가한 때가 전반적으로 로크웰 경도 및 항복강도 모두 약간 더 높은 값을 나타냈으며 0.3Hf+15Ti 첨가합금에서와 같은 로크웰 경도 및 항복강도의 감소경향은 나타나지 않았다. 이상의 결과로부터 Fe30Al5Cr 합금에 0.1Hf 및 0.2Zr을 단독 첨가한 때가 로크웰 경도 및 항복강도가 낮은 값을 나타냈는데, 이는 Hf 및 Zr이 Fe3Al의 Al site의 격자점을 점유하여 결정구조를 안정화함에 기인한 것으로 판단되며, Hf+Ti, Zr+Ti 및 Hf+Zr+Ti 복합첨가한 때는 원자크기가 다른 복수의 원자가 고용됨에 의해 합금결정구조가 불안정하게 되고 기지에 대한 고용강화효과가 더 증대되어 경도 및 항복강도가 증가된 것으로 생각된다.

그림 8 및 9는 Fe30Al5Cr 합금에 Ti, Hf 및 Zr을 단독 또는 복합첨가한 경우의 파괴시까지의 연신율을

나타낸 것이다. 그림 8에서 보면 Fe30Al합금보다 Fe30Al5Cr, Fe30Al5Cr+0.1Hf 또는 Fe30Al5Cr+0.3Hf 합금의 경우 연신율이 약간 상승하였으며, Ti함량에 관계없이 Fe30Al5Cr+0.1Hf 합금이 Fe30Al5Cr+0.3Hf 합금보다 연신율이 증가하였다. 또한 그림 9에서 보면 Fe30Al5Cr+0.2Zr 합금이 Fe30Al5Cr+0.2Zr_0.1Hf 합금보다 연신율이 증가하는 경향을 나타내었으며, 경

도 및 항복강도의 경우와 마찬가지로 Ti 함량이 10%에서 15%로 증가하게 되면 연신율이 약간 상승하였다.

이상의 결과 Ti 함량에 따라 Fe30Al5Cr+0.1Hf 합금의 경우 연신율이 가장 우수하였으며, 0.3Hf, 0.2Zr 및 0.2Zr+0.1Hf 첨가의 경우는 연신율이 낮아졌는데 이는 기지에 대한 고용강화효과보다는 취약한 결정립계의 강화효과가 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.2 파면양상에 미치는 첨가원소의 영향

사진 1~5는 Fe30Al 합금에 Cr, Ti, Hf 및 Zr등을 단독 및 복합첨가시 파괴거동에 미치는 첨가원소에 대한 파면관찰을 주사전자현미경으로 조사하였다.

사진 1은 Fe30Al 합금에 Cr 및 Ti를 첨가한 파면 사진으로써 Cr 및 Ti를 첨가하지 않은 Fe30Al 합금은 기 보고된 바와 같이[11] 전형적인 취성벽개파괴의 양상을 나타내며, Fe30Al5Cr 합금의 경우는 Cr의 영향으로 취성 벽개파괴와 국부적으로 입계파괴가 혼합된 형태를 나타내는데 이는 Cr이 결정립 크기나 강도에는 영향을 미치지 않고 Fe와 Al의 원자사이의 결합을 증

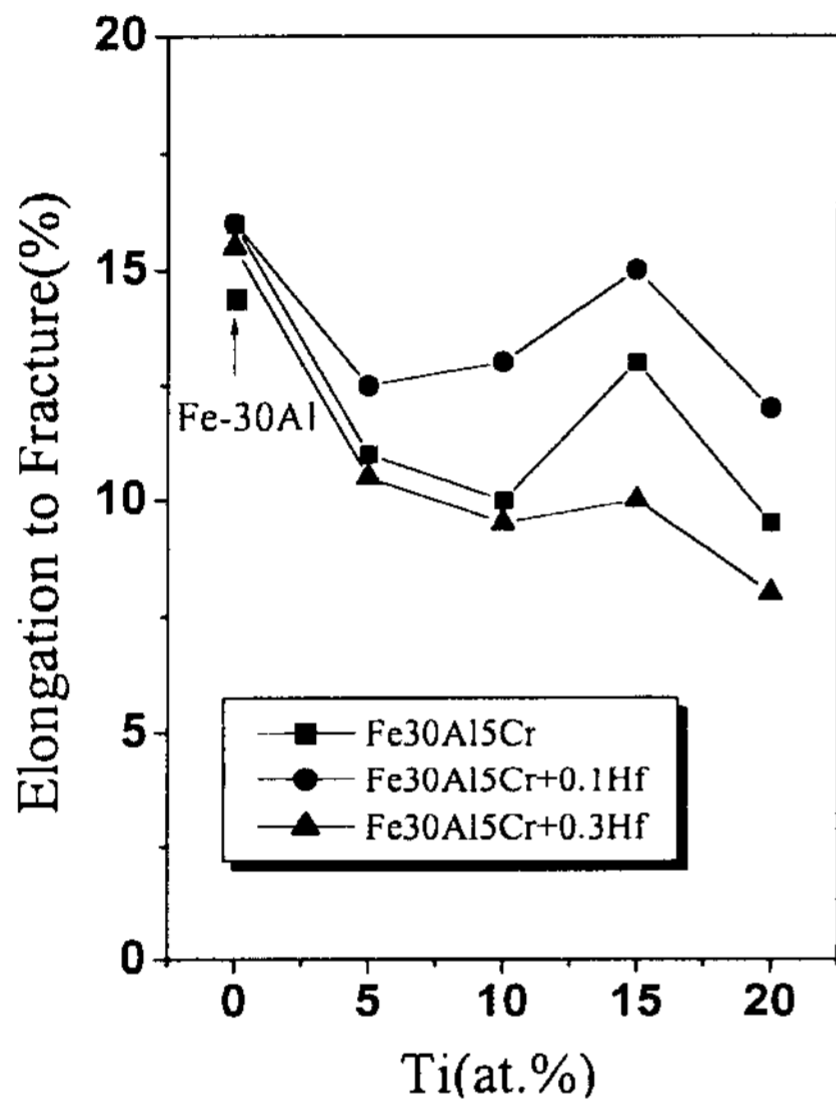


Fig. 8. Elongation to fracture of FeAlCr alloys with different Ti and Hf concentration at room temperature.

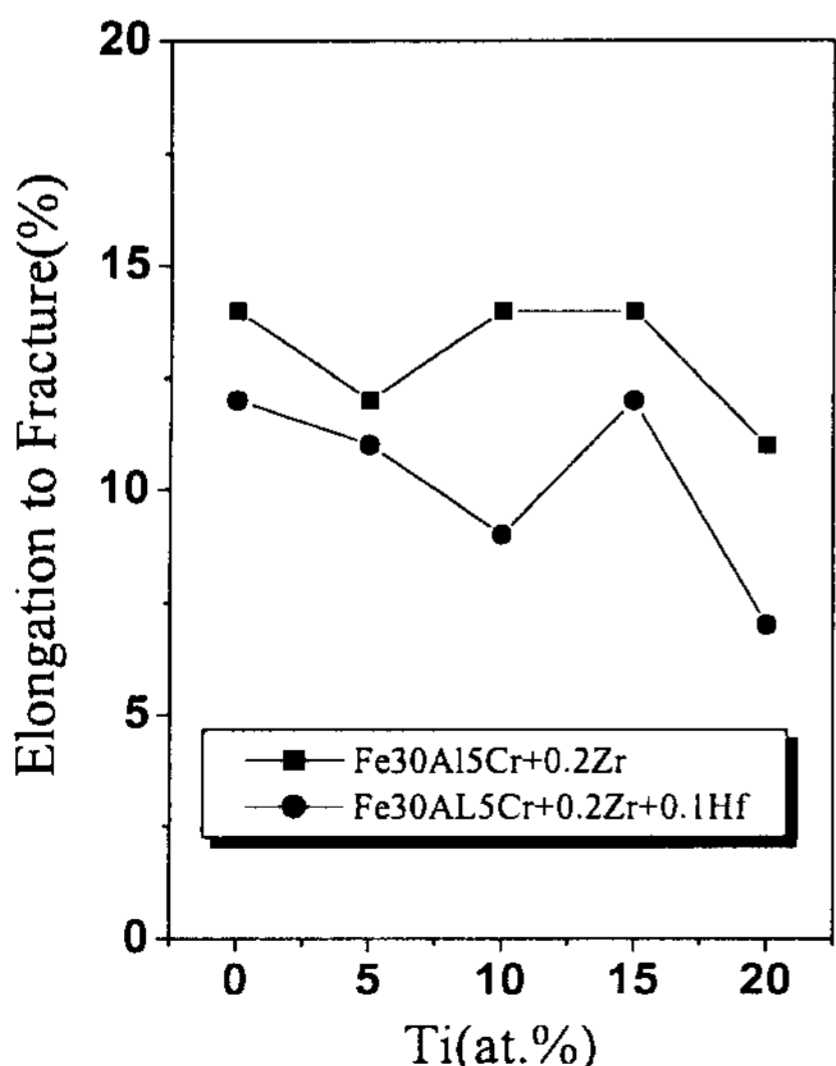


Fig. 9. Elongation to fracture of FeAlCr alloys with different Ti, Hf and Zr concentration at room temperature.

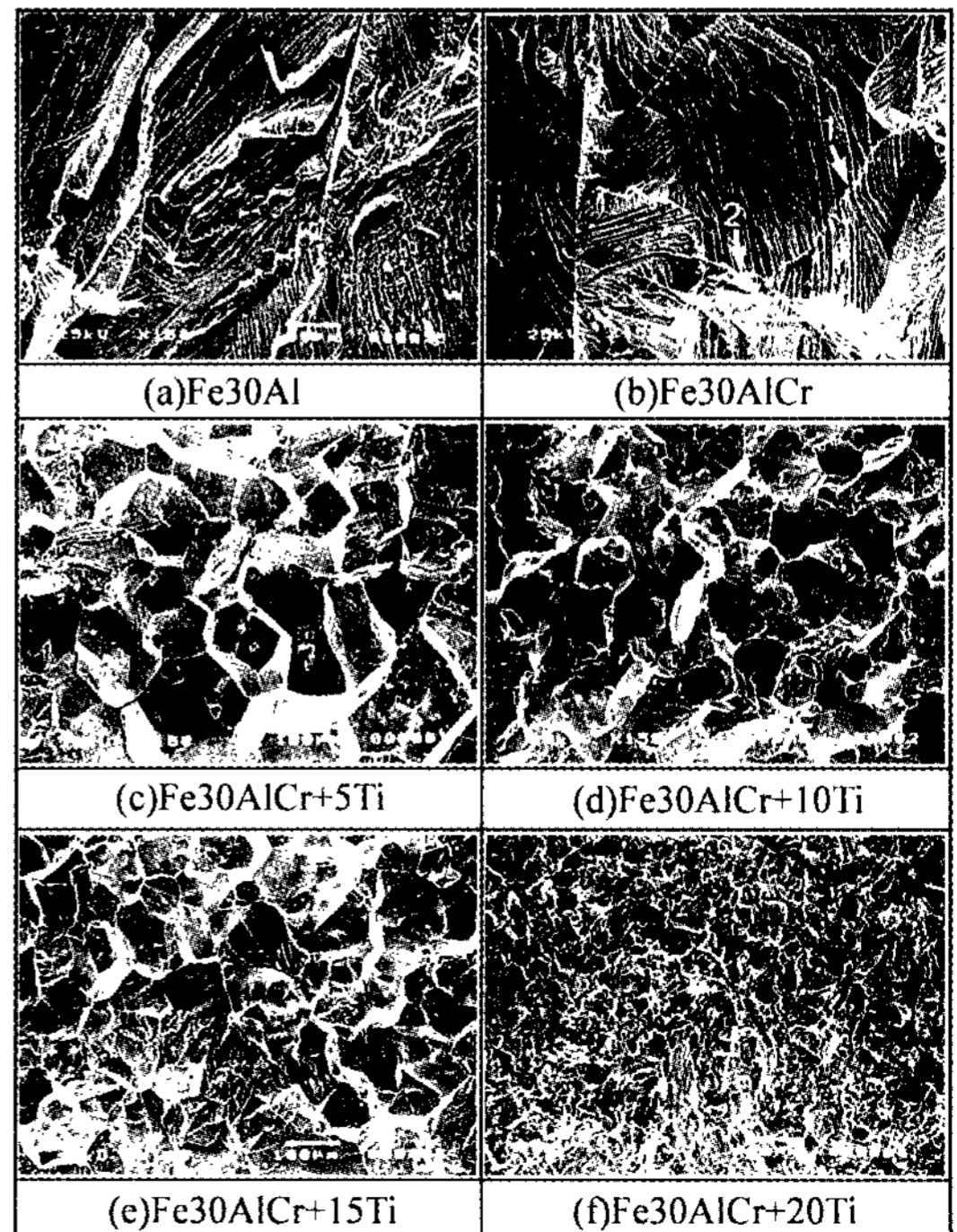


Photo 1. SEM fractographs showing variation of FeAlCr alloys with Ti concentration.

진시켜 벽개면을 가로지르는 응집강도를 증가시키기 때문으로 생각되며, 또한 벽개파괴에서 흔히 나타나는 소경각 입계(tilt boundary; 사진 1(b)의 arrow 1) 및 고경각 입계(twist boundary; 사진 1(b)의 arrow 2)의 양상을 볼 수 있는데 이들의 생성원인은 파괴가 진행 중에 결정립내의 소경각 및 고경각 입계와 마주치면서 벽개개단이 하나의 선 및 면으로 되기 때문에 발생하는 것으로 보고[17]되고 있다. 그리고 Fe₃₀Al₅Cr 합금에 5 및 10Ti를 첨가하게 되면 파괴양상은 취성 벽개 파괴에서 B2형 구조인 FeAl 합금에서 볼 수 있는 전형적인 입계파괴로 변화하며, Fe₃₀Al₅Cr 합금에 15Ti를 첨가한 경우에는 입계파괴와 국부적으로 의사벽개 파괴가 혼합된 파괴양상으로 변화하고, 20Ti를 첨가한 때는 입계파괴에서 전형적인 의사벽개 파괴형태로 변화함을 알 수 있다.

여기서 Ti가 첨가됨에 의해 파괴양상이 변화하였는데 이때는 5 및 10Ti를 첨가한 경우에는 결정립 크기가 비교적 조대하여 파괴방향이 결정립내 보다는 결정립계를 따라서 파괴가 일어나 입계파괴의 형태를 나타내었으며, 15Ti 첨가시는 전체적으로 입계파괴를 나타내나 국부적으로 의사벽개파괴형태를 나타내었는데 이는 결정립이 미세화되어 결정립간의 접촉면이 증가함과 동시에 결정립계에 존재하는 미세한 석출상의 영향으로 결합에너지가 증진되어 이러한 현상이 나타난 것으로 생각되고, 20Ti 첨가의 경우에는 제 2상이 결정립내 및 결정립계에 존재함에 의해 입계가 강화되어 상대적으로 결합에너지가 큰 의사벽개 파괴형태를 나타내었으리라 판단된다.

사진 2는 Fe₃₀Al₅Cr 합금에 Hf 및 Ti를 단독 및 복합첨가 한 파면사진으로써 Ti를 첨가하지 않고 0.1Hf 만을 단독첨가한 때는 전체적으로 취성벽개파괴를 나타내나 국부적으로 의사벽개 파괴형태도 관찰된다. Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf+5Ti 합금의 경우 Hf이 첨가되지 않은 Fe₃₀Al₅Cr+5Ti 합금과 비교하여 보면 입계파괴에서 입계파괴와 취성 벽개파괴의 혼합파면 형태를 나타내며, 0.1Hf+10Ti 및 0.1Hf+15Ti를 첨가한 경우도 의사벽개파괴와 입계파괴의 혼합파괴를 나타내었으나, 0.1Hf+20Ti를 첨가한 경우 20Ti을 단독 첨가한 경우와 거의 동일하게 아주 미세한 의사벽개파괴를 나타내었다. 따라서 Fe₃₀Al₅Cr+Ti 합금에 비하여 Fe₃₀Al₅Cr 합금에 Ti 및 0.1Hf을 복합첨가 하면 파괴형태가 취성벽개 및 입계보다는 흡수에너지가 증가한

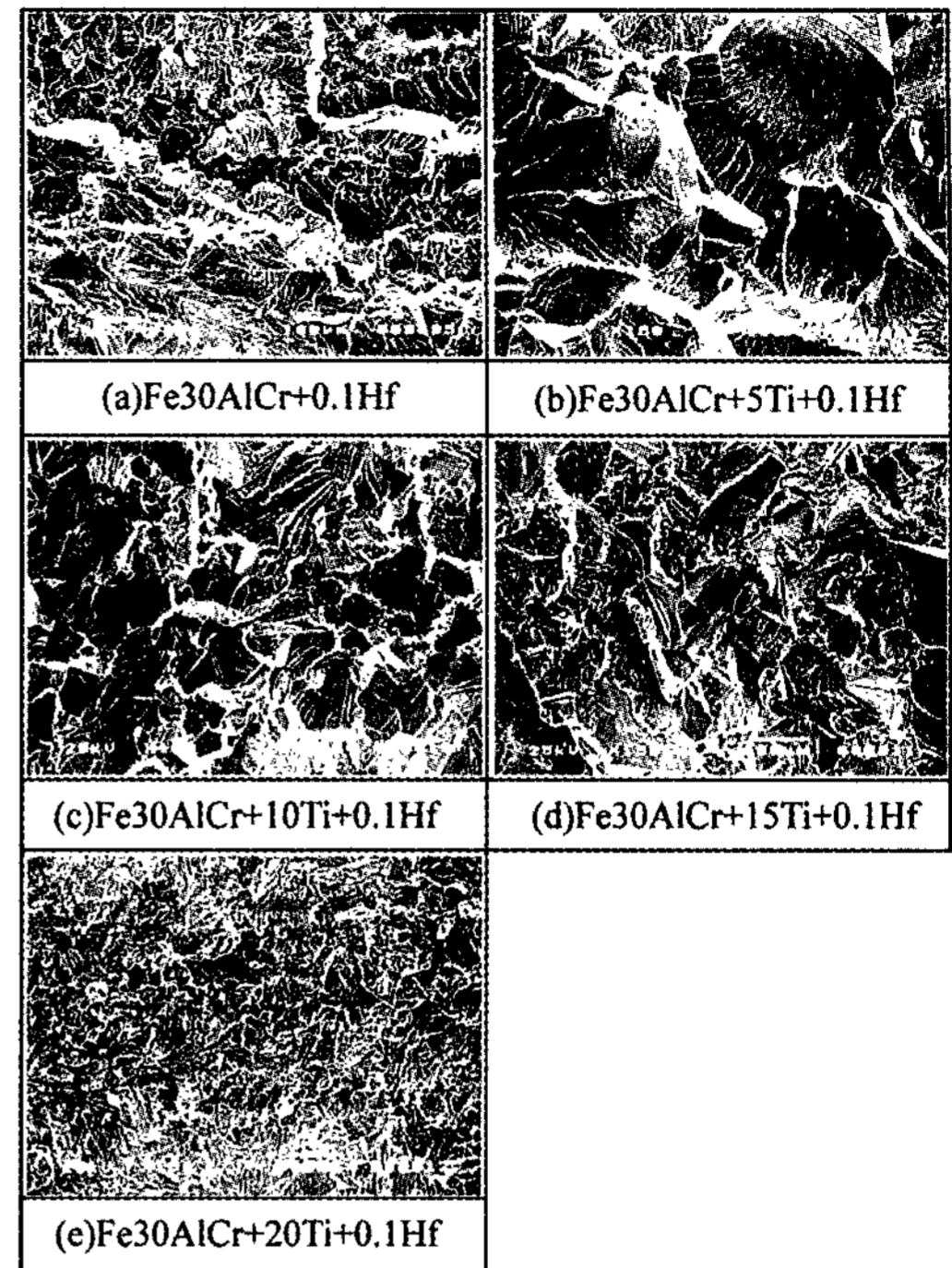


Photo 2. SEM fractographs showing variation of FeAlCr alloys with 0.1Hf + Ti concentration.

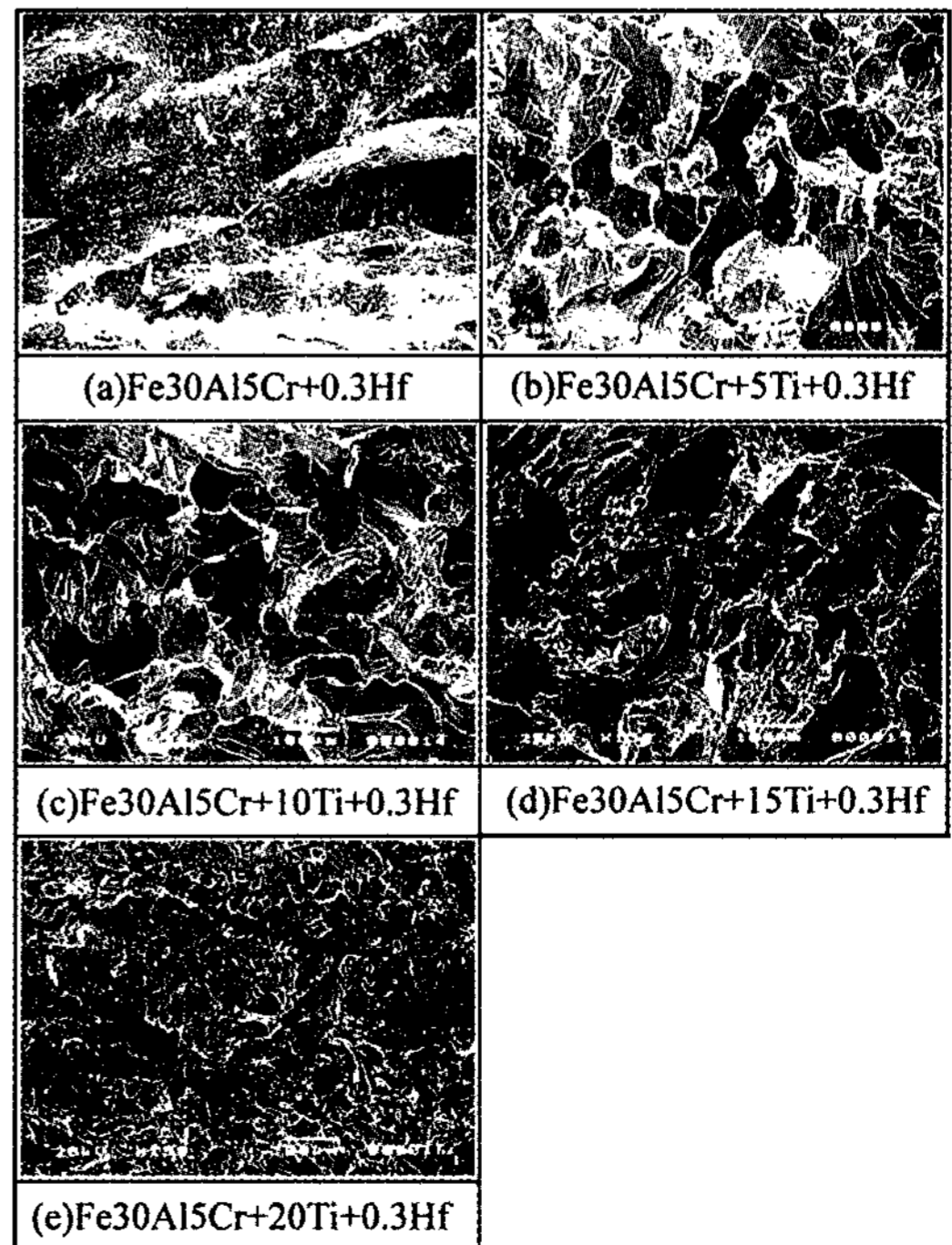


Photo 3. SEM fractographs showing variation of FeAlCr alloys with 0.3Hf + Ti concentration.

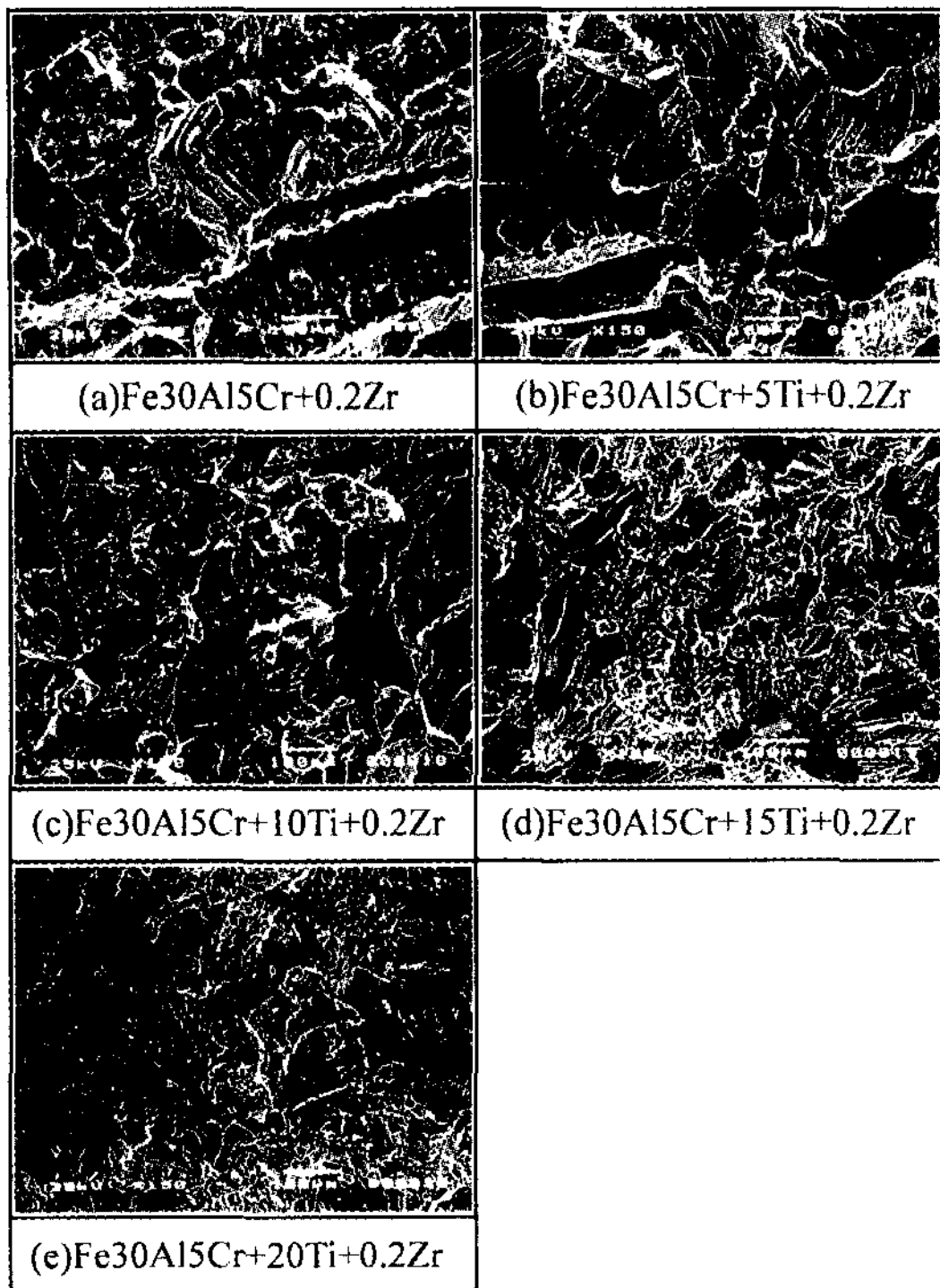


Photo 4. SEM fractographs showing variation of FeAlCr alloys with 0.2Zr + Ti concentration.

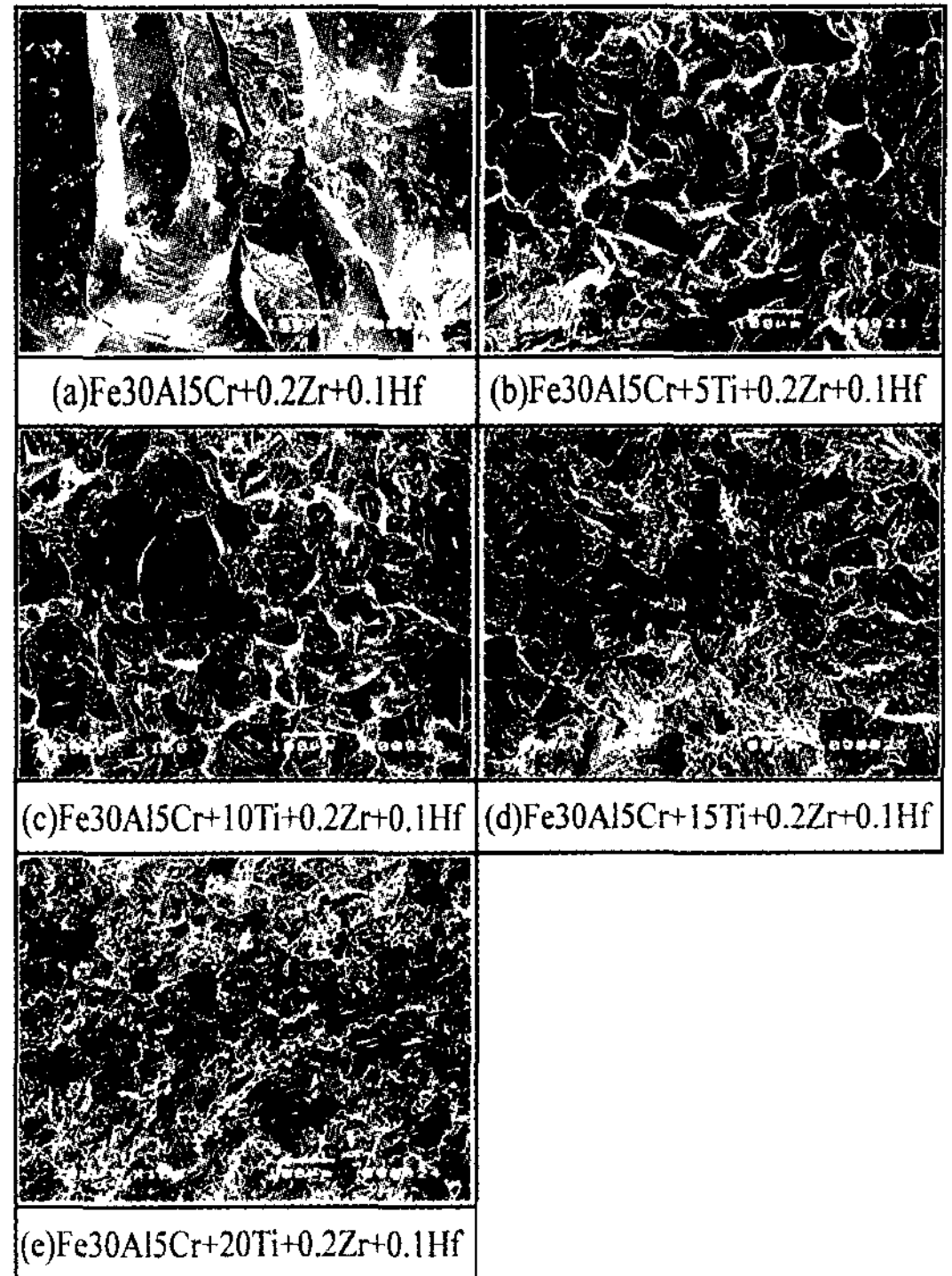


Photo 5. SEM fractographs showing variation of FeAlCr alloys with 0.1Hf + 0.2Zr + Ti concentration.

형태인 혼합파괴 및 의사벽개파괴의 양상을 나타낸다.

사진 3은 Fe₃₀Al₅Cr+0.3Hf 합금에 Ti를 첨가한 파면사진으로써 Ti를 첨가하지 않은 Fe₃₀Al₅Cr+0.3Hf 합금의 경우 입계파괴 및 국부적으로 벽개파괴의 혼합된 형태를 나타내나, 5 및 10Ti를 첨가하면 Ti를 첨가하지 않은 경우에 비하여 입계파괴와 의사벽개파괴의 혼합된 파면으로 변하며, 15 및 20Ti를 첨가하면 입계파괴가 아닌 미세한 의사벽개파괴로 변함을 알 수 있고, Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf 합금의 경우와 유사한 파괴양상을 나타낸다.

사진 4는 Fe₃₀Al₅Cr+0.2Zr 합금에 Ti를 첨가한 파면사진으로써 Ti를 첨가하지 않은 Fe₃₀Al₅Cr+0.2Zr 합금의 경우 의사벽개와 국부적으로 dimple파면이 혼합된 양상을 나타내며, 5Ti를 첨가하게 되면 의사벽개 및 취성벽개 파괴양상으로 변화하며, 10, 15 및 20Ti로 Ti 함량이 증가할수록 미세한 의사벽개 파면으로 변화함을 알 수 있다.

사진 5는 Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf+0.2Zr 합금에 Ti를 첨가한 파면사진으로써 Ti를 첨가하지 않은 Fe₃₀Al₅Cr

+0.1Hf+0.2Zr 합금의 경우 입계와 벽개파괴가 혼합된 양상을 나타내나, 5Ti를 첨가하게 되면 의사벽개와 국부적으로 입계파괴가 혼합된 파괴를 나타내며, 10, 15 및 20Ti를 첨가하면 Hf 및 Zr 단독첨가의 경우와 유사하게 의사벽개 파괴양상으로 변화함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 전술한 바와 같이 Ti를 단독 첨가한 경우는 다량의 Ti(20%Ti)가 첨가된 경우를 제외하고는 입계파괴 또는 입계파괴와 국부적인 벽개파괴가 혼재한 양상을 나타내어 Ti 첨가는 파괴양상에는 좋지 않은 결과를 나타내었으며, Hf 및 Zr이 Ti 또는 Hf+Zr이 Ti와 첨가된 경우는 Ti 단독첨가의 경우와 비교하여 의사벽개 또는 의사벽개와 입계 또는 의사벽개와 국부적으로 dimple 파괴가 혼합된 형태를 나타내어 파괴양상이 변화하였는데 이는 상기 Hf과 Zr이 입계 원자결합의 본질적인 특성을 바꿈에 의해 입계를 강화하여 파괴양상이 입내파괴로 변화하고, 의사벽개파괴가 지배적으로 나타난 것으로 생각된다. 이상의 결과 표 4는 Fe₃₀Al 합금에 Cr, Hf, Zr 및 Ti을 단독 및 복합첨가 했을 때의 각 합금조성에 대한 파괴양상

Table 3. Fracture modes of each composition in Fe₃₀Al₅Cr alloys.

No.	Fracture Modes	No.	Fracture Modes
1	BCF	14	IF(M)+QCF(S)
2	BCF(M)+IF(S)	15	QCF
3	IF	16	QCF
4	IF	17	QCF(M)+DF(S)
5	IF(M)+QCF(S)	18	BCF(M)+QCF(S)
6	QCF	19	QCF
7	BCF(M)+QCF(S)	20	QCF
8	IF(M)+BCF(S)	21	QCF
9	IF(M)+QCF(S)	22	IF(M)+BCF(S)
10	IF(M)+QCF(S)	23	QCF(M)+IF(S)
11	QCF	24	QCF
12	IF(M)+BCF(S)	25	QCF
13	IF(M)+QCF(S)	26	QCF

(M ; Most, S ; Some, BCF ; Brittle Cleavage Fracture, IF ; Inter-granular Fracture, QCF ; Quasi-Cleavage Fracture, DF ; Dimple Fracture)

변화를 종합하여 나타낸 것이다.

4. 결 론

D₀₃구조를 갖는 Fe₃₀Al-5Cr 합금의 Fe-Al계 금속간 화합물에 Ti, Hf 및 Zr을 각각 그 양을 달리하여 단독 또는 복합첨가한 때의 기계적 성질의 변화 및 파면 양상에 관하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 기계적 성질에 미치는 첨가원소의 영향은 Fe₃₀Al 합금에 5Cr을 첨가하면 로크웰 경도 및 항복강도가 저하되었으며, Ti 단독첨가 시는 5% 및 10%까지는 증가하다가, 15%에서는 감소하였고, 20%에서는 다시 로크웰 경도 및 항복강도가 현저히 증가하였다. 그리고 0.1Hf+Ti, 0.2Zr+Ti 및 0.2Zr+0.1Hf+Ti의 복합첨가의 경우도 동일한 변화 경향을 나타냈으나 전반적으로 Ti 단독첨가의 경우 보다 더 높은 값을 나타냈다. 또한 연신율은 Fe₃₀Al₅Cr+0.1Hf 합금이 가장 우수하였다.

2. 파괴양상은 Fe₃₀Al 및 Fe₃₀Al₅Cr 합금은 벽개파괴를 나타냈으나 Ti를 첨가하면 벽개파괴에서 입계파괴로 변화하였고, 20Ti에서는 의사벽개 파괴로 변화하였으며, Hf+Ti 첨가의 경우 Ti 함량이 증가할수록 입계 → 입계 + 의사벽개 → 의사벽개의 파괴양상으로 변화

하였고, Zr+Ti 첨가의 경우 Ti 함량이 증가할수록 Hf 첨가의 경우와 달리 의사벽개 + dimple → 의사벽개 + 벽개 → 의사벽개의 파괴양상을 나타내었다. 그리고 Hf +Zr+Ti 첨가의 경우에는 Ti 함량이 증가할수록 벽개 + 입계 → 입계 + 의사벽개 → 의사벽개의 파괴양상을 나타냈다.

후 기

이 논문은 포항제철 석좌기금 조성 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. H. Yoo, J. A. Horton and C. T. Liu : Acta Metall., Vol. 36 (1988) 2935
- [2] P. H. Thornton, R. G. Davies and T. L. Johnson : Metall. Trans., Vol. 1 (1970) 207
- [3] V. Paidar, D. P. Pope and V. Vitek : Acta Metall., Vol. 32 (1984) 435
- [4] F. H. Stott : Mater. Sci. Tech., Vol. 5 (1989) 734
- [5] S. Taniguchi and T. Shibata : Oxidation of Metals, Vol. 25 (1986) 201
- [6] M. A. Crimp : NASA Cont., Rep., Aug. (1987)
- [7] C. G. Mckamey, J. A. Horton and C. T. Liu : Scr. Metall., Vol. 22 (1988) 1679
- [8] A. J. Bradley and A. H. Jay : Proc. Roy. Soc., London (A)136 (1932) 210
- [9] J. R. Stephens : NASA Tech. Memo., Nov. (1984)
- [10] R. L. Fleischer : J. Mat. Sci., Vol. 22 (1987) 2281
- [11] K. I. Park, S. M. Joo and D. C. Choi : J. Kor. Inst. Met & Mater., Vol. 35 (1997) 305
- [12] H. C. Choi and D. C. Choi : J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 35 (1997) 468
- [13] K. I. Park, S. M. Joo, H. C. Choi and D. C. Choi : J. Kor. Inst. Met & Mater., Vol. 35 (1998) 377
- [14] J. Y. Kim : Chonnam National University Master's Degree Thesis, February (1999)
- [15] T. Ogura, S. Hanada, T. Masumoto and O. Izumi : Metall. Trans., A16 (1985) 441
- [16] V. Raghavan : "The Al-Fe-Ti System", Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys, The Indian Institute of Metals, Calcutta, India Vol. 1 (1987) 9
- [17] G. E. Dieter : Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Publishing Company, NY, (1986) 254