論 文

구상흑연주철의 파괴특성에 미치는 Cu 및 열처리의 영향

김원용*, 나태엽*, 강인찬**, 곽창섭***

Effect of Copper and Heat Treatment on the Fracture Toughness of Ductile Cast Iron

Won-Yong Kim*, Tae-Youb Ra*, In-Chan Kang** and Chang-Sub Kwak***

Abstract

A study was investgated the relationship between fracture characteristics and microstructure changes according to Cu addition and heat treatment methods on the ductile cast iron.

According to increment of Cu addition pearlite volume fraction was increased due to the deffect of anti-ferritizing of Cu. At the case of austempering heat treatment, fracture toughness of Cu contained specimen was decreased. The reason for the results seems to be responsible for decrement of plastic zone size at the crack tip. It was observed that the excellent fracture toughness can be obtained at the condition of normalizing and the specimen was not contained Cu.

Under the such conditions, fractographs is composed of dimple pattern and fracture toughness 71.6MPa $\sqrt{m}$, tensile strength determined as the value of 961.6MPa, respectively.

(Received November 10, 1993)

1. 서 론

최근에 각종 기계부품이나 구조용 소재 및 자동차용 부품소재로 많이 사용되고 있는 구상흑연주철은 주강이나 단강품에 비하여 기지내의 구상흑연으로 인한 기지결합력의 약화나 구상흑연 자체의 낮은 강도로 인한 단점을 갖고 있지만 우수한 주조성이나 기계가공성, 내마모특성 및 저렴한 제조원가 등으로 점차 그 용도가 확대되어 가고 있는 실정이다. 이러한 특성으로 인하여 구상흑연주철에 대한 주조특성, 강도특성 및 금속야금학적인 특성에 관한 연구[3~4]는 꾸준히 연구하고 있는 실정이나 재료의 안전설계측면에서 고려해야 할 피로나 파괴특성에 관한 연구[5]는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 첨가원소로 사용한 Cu의 함량변화 및 열처리방법에 따른 기지조직의 변화와 이에 따른 기계적 성질 및 파괴특성과의 연관성에 관하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 용해 및 시험편제작

본 실험에서 사용한 시료는 100kg 용량이 고주파 유도로에서 강고철과 선철을 장입하고 1500℃로 용해한 후 Fe-Si-8%Mg을 1.3% 첨가하여 샌드위치법으로 흑연을 구상화처리하였고, Fe-75%Si을 0.3% 첨가하여 접종처리하였으며 Fe-Mo, Fe-Cu을 넣어 용탕의 성분을 조정한 후 ASTM A-536 규정에 의거한 1-inch Y-Block의 CO_2주형에 주입하여 제조하였다. 본 시료의 화학성분을 spectrometer를 이용하여 측정한 결과

*생산기술연구원(Korea Academy of Industrial Technology)
**인하대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng. Inha University)
***인천대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Eng., Inchon University)

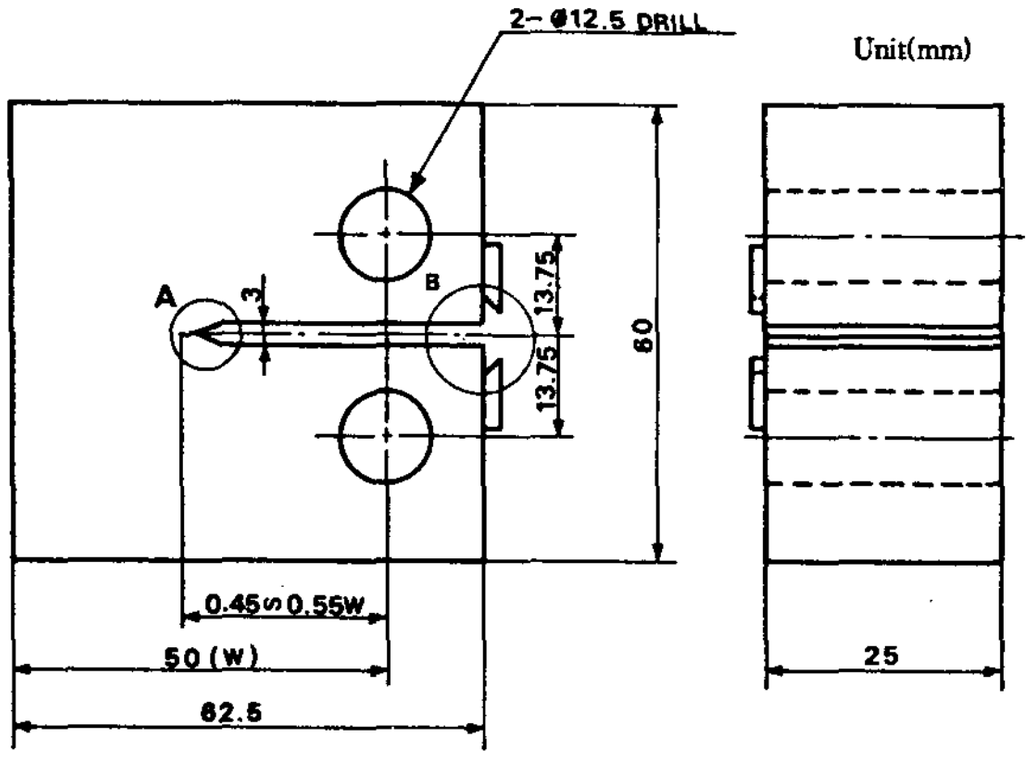
Table 1. Chemical composition of specimens.

(wt.%)

Chemical Component / Specimen No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
1	3.62	2.34	0.40	0.026	0.012	—	0.60
2	3.61	2.34	0.40	0.026	0.011	0.012	0.056
3	3.90	2.45	0.29	0.026	0.010	0.29	0.056
4	3.68	2.35	0.31	0.026	0.010	0.46	0.057

Table 2. Structure analysis of DCI for various heat treatment conditions.

Cu %	Heat treatment	Graphite(%)	Pearlite(%)	Ferrite(%)	Spheroidization(%)
0	as-cast	15.95	27.60	56.90	89.47
	annealing	17.63	5.97	76.39	87.49
	normalizing	15.98	76.39	7.646	89.70
0.1	as-cast	14.55	50.4	35.04	89.05
	annealing	18.04	19.72	64.80	84.10
	normalizing	15.35	79.76	4.52	84.02
0.3	as-cast	13.93	62.41	23.65	89.55
	annealing	15.47	37.29	47.16	82.15
	normalizing	15.72	81.22	3.422	84.18
0.5	as-cast	12.43	80.46	7.104	90.45
	annealing	16.24	55.96	27.70	87.23
	normalizing	16.23	81.59	2.167	90.56



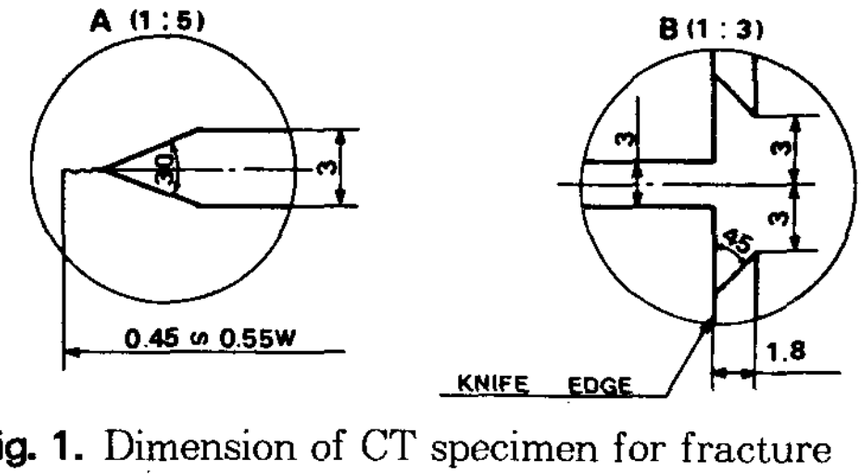


Fig. 1. Dimension of CT specimen for fracture toughness test(unit : mm).

Table 1과 같았다. 또한 image analyser(Luzex-500 NIRECO)를 이용한 조직의 선분석 결과는 Table 2와 같았다. 시편제작은 Y-Block의 유효부를 절단하여 인장시험편은 ASTM A-536, 평면변형파괴인성시험편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 ASTM E-399-78 규정에 따라 시험편을 가공하였다.

2.2 시험편의 열처리

본 실험의 열처리공정은 Fig. 2에 나타내었다. 아닐링의 경우 900℃에서 1시간 오스테나이트화 후 서냉하여 750℃로 온도를 낮춘후 다시 3시간 유지 후 노냉하는 2단계 아닐링을 하였으며 노말라이징의 경우 900℃에서 1시간 오스테나이트화처리를 한 후 $NaNO_2$와 KNO_3가 1 : 1로 혼합된 염욕에서 320℃의 온도에서 5분간 유지후 다시 420℃의 온도에서 30분간 유지하는 two-step 오스템퍼링을 취하였다. 각각의 열처리는 전기로를 이용하였으며 열처리시 오스테니아트화하는 동안 고온산화 및 탈탄되는 것을 방지하기 위하여 시료를 시험편가공 후 남은 chip속에

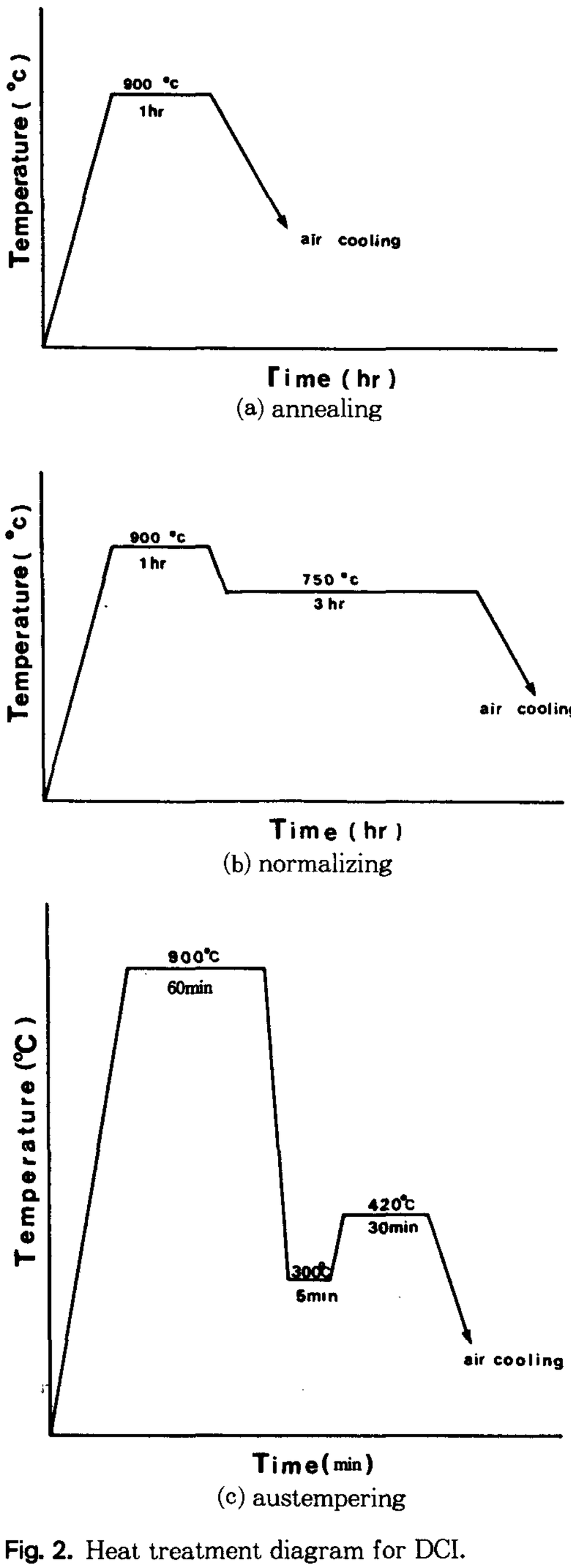


Fig. 2. Heat treatment diagram for DCI.

넣어 산화를 방지하였다.

2.3 기계적 성질시험

본 실험에서 사용한 인장시험편은 ASTM A-536 규정에 의거한 시험편을 사용하였으며 인장시험기는 10톤 용량의 인장시험기(Instron Co. model 1342)를 사용하였으며 크로스 헤드 속도는 1mm/min으로 일정하게 유지하면서 시험하였다.

2.4 파괴인성시험

평면변형 파괴인성(K_{IC})시험은 피로시험기(Saginomia Co., Servopac)인 용량 10톤의 servo-hydraulic dynamic testing machine을 사용하여, 하중제어로 시험편에 피로균열을 도입한 후 다시 하중제어로 단순인장을 행하여 파괴시까지 COD(Crack Openning Displacement) gage를 X-Y recoder에 연결해 하중과 균열개구변위로부터 K_Q값을 얻기 위한 절차는 ASTM E399-78[6]의 규정에 의거하여 산출하였다.

본 연구에서는 정하중을 1톤으로 하였으며 이에 따른 응력비는 0.1로 하여 예비균열을 도입하였다. 예비균열 도입작업이 모두 끝난 뒤 K_Q값을 얻기 위한 인장은 0.55~2.75MPa$\sqrt{m}$/sec의 속도로 하중제어의 조건에서 행하였으며 파괴된 시험편에서의 피로균열의 측정은 시험편 두께의 1/4, 1/2와 3/4지점의 세곳에서 측정하여 평균하여 취하였다.

2.5 미세조직 및 파면관찰

미세조직 관찰은 시료를 연마한 후 3% nital로 부식한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며 시료의 파단면관찰은 파괴인성시험편에서 채취하여 주사전자현미경(Hitachi Co., X-650 SEM)을 이용하였다.

2.6 잔류오스테나이트량의 정량분석

본 연구에서 측정한 잔류오스테나이트량의 정량분석[7]은 X-ray diffractometer(Phillips Co. PW 1700, system Ⅰ)를 이용하여 측정하였다. 이때 사용한 target은 $CuK\alpha_1$ traget(λ=1.5418 Å)을 사용하였으며 40kV 25mA로 가속시킨 X-ray beam을 0.05°/sec의 속도로 입사면에 투과하였다. 시료의 크기는 10×10×2mm로 하여 emery paper로 1200#까지 연마한 후 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰

Photo 1은 본 연구에서 나타난 미세조직 결과를 나타낸 사진으로 주방상태의 경우 구리가 첨가됨에 따라 퍼얼라이트량이 상당히 증가한 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 이유는 구리의 anti-ferrizing 효과[8] 즉 기기조직의 퍼얼라이트를 조직시킨 결과로 생각된다. 아닐링한 시료에서는 구리가 첨가되지 않은 시료의 경우 거의 기기조직이 페라이트화 되었으나 구리가 첨가된 경우는 열처리후에도 기지조직이 페라이트와 퍼얼라이트의 혼합조직을 나타내고 있다. 노말라이징한 시료에서는 구리를 첨가하지 않은 시료와 첨가한 시료와의 기지조직의 현격한 차이는 나타나지 않음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 이유는 구리가 첨가됨에 따라 기지조직의 퍼얼라이트화가 촉진되지만 냉각속도가 증가함에 따라 탄소원자의 확산제어결과 구리가 첨가되지 않은 시료와 기지조직의 현격한 차이를 나타내지 못하는 것이라 생각된다. Fig. 3은 각 열처리방법 및 구리첨가량에 따른 기지조직의 퍼얼라이트 분율을 나타낸 것이다. Photo 2는 오스템퍼링한 경우 구리첨가량에 따른 미세조직의 변화를 관찰한 사진으로

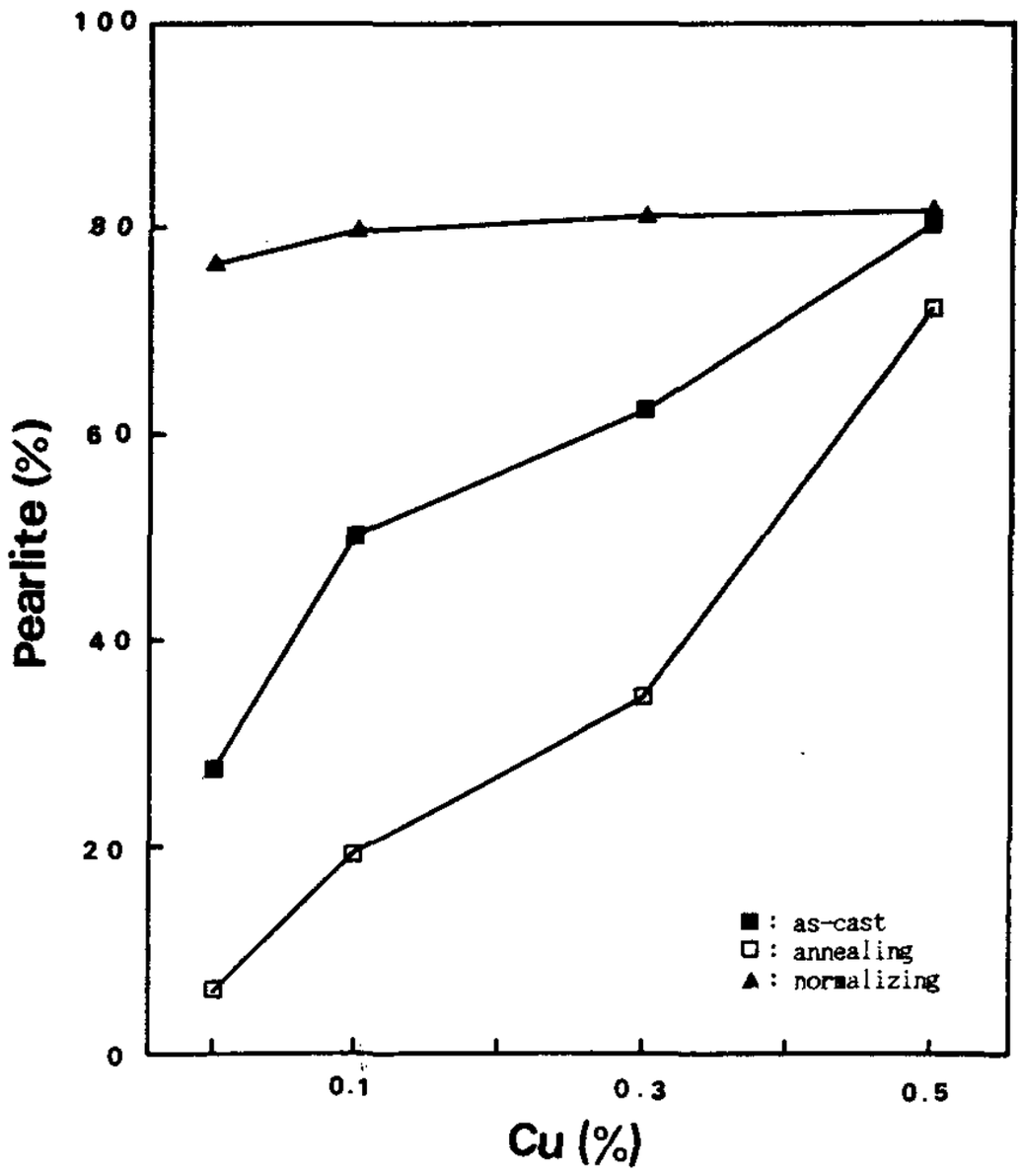


Fig. 3. Effect of Cu on pearlite volume of DCI for various heat treatment.

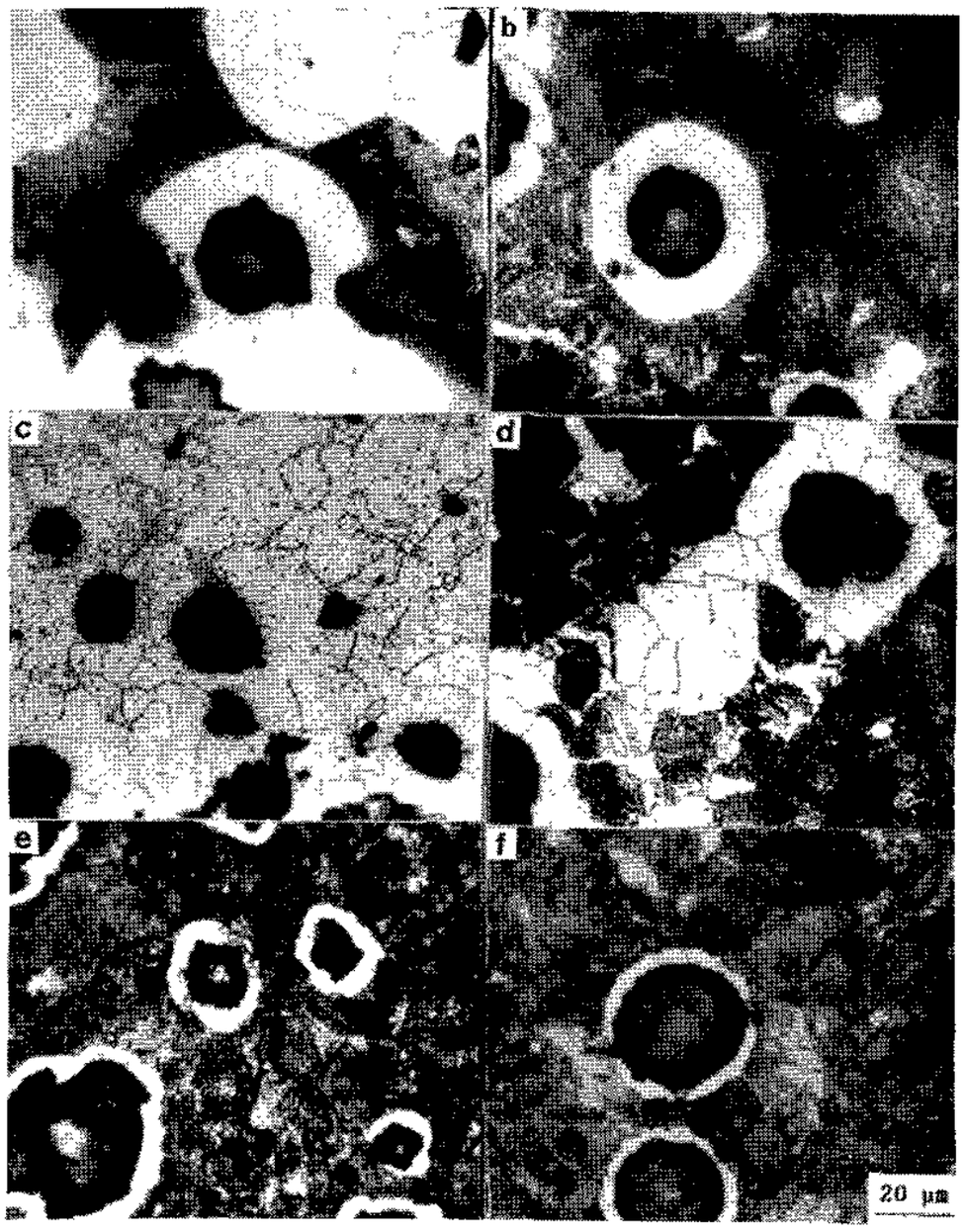


Photo 1. Optical microstructures for each heat teratment methods.

(a) as-cast (b) as-cast-0.5 Cu (c) annealing
(d) annealing-0.5 Cu (e) normalizing (f) normalizing-0.5 Cu

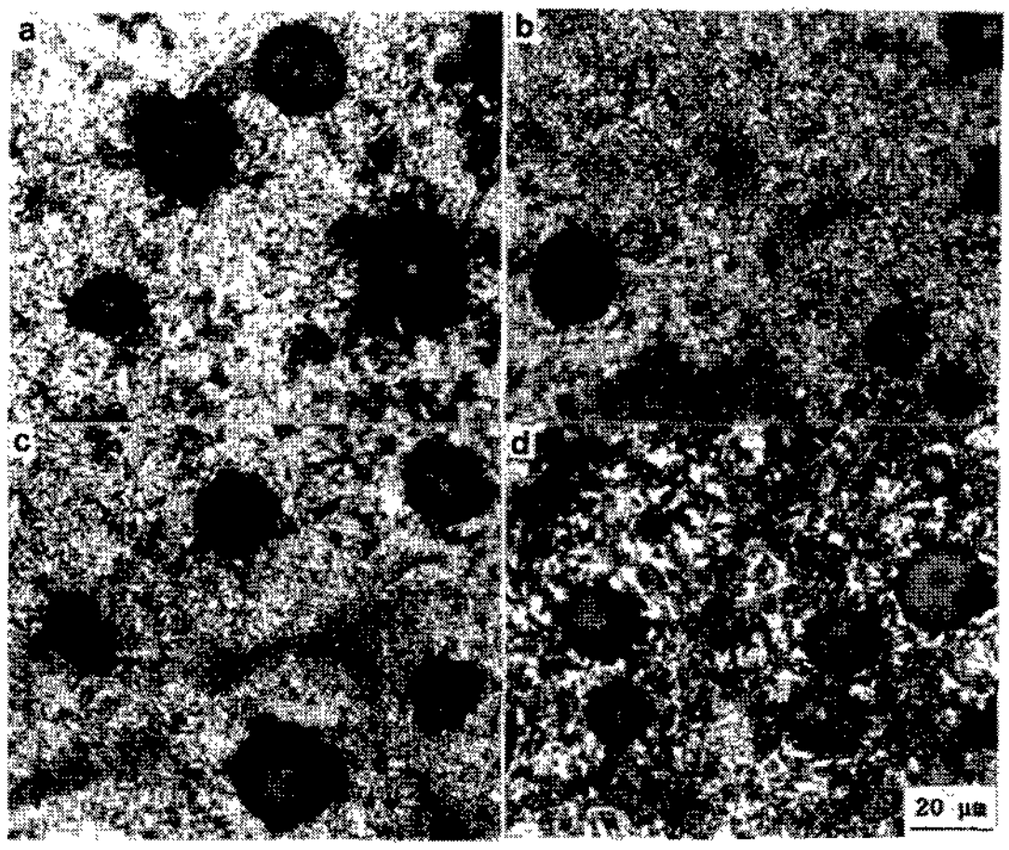


Photo 2. Optical microstructure changes for Cu addition on the austempering heat treatment.

(a) unalloyed con. (b) 0.1 Cu
(c) 0.3 Cu (d) 0.5 Cu

Table 3. Retained austenite volume of DCI for austempered heat treatment conditions.

Cu(%)	Lattice parameter of γ-Fe(220) a_r(Å)	Intensity		α-Fe (200) R_a	γ-Fe (220) R_r	Retained austenite volume(%)
		α-Fe (200) I_a	γ-Fe (220) I_r			
NA	3.6227	88	8	39.725	51.726	10.4
0.1	3.6264	65	7	40.076	52.341	11.6
0.3	3.6312	60	9	41.274	52.468	16.0
0.5	6.6276	73	10	40.675	51.846	14.9

구리의 양이 0.1% 및 0.3%로 증가함에 따라 기지조직인 베이나이트가 점차 치밀하고 균일해져 가는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 구리의 함량이 0.5%로 증가함에 따라서는 치밀한 베이나이트 조직이 점차 분해된 것을 관찰할 수 있다. 이와같은 이유는 구리의 양이 0.3%까지 증가함에 따라 베이나이트 변태의 제1단계가 촉진된 결과라 생각되며 구리의 함량이 0.5%의 경우 베이나이트 변태가 급속히 진행되어 변태의 제2단계인 고탄소를 함유한 잔류 오스테나이트가 페라이트와 카바이드로 분해[9]되어 치밀한 기지조직이 점차 분해되는 것으로 생각된다. Table 3은 오스템퍼링 열처리한 시료에 대하여 잔류오스테나이트 정량분석결과를 나타낸 것으로 오스템퍼링 열처리에 따른 베이나이트 변태의 결과는 잔류오스테나이트의 정량분석결과와도 일치함을 나타내어 주고 있다.

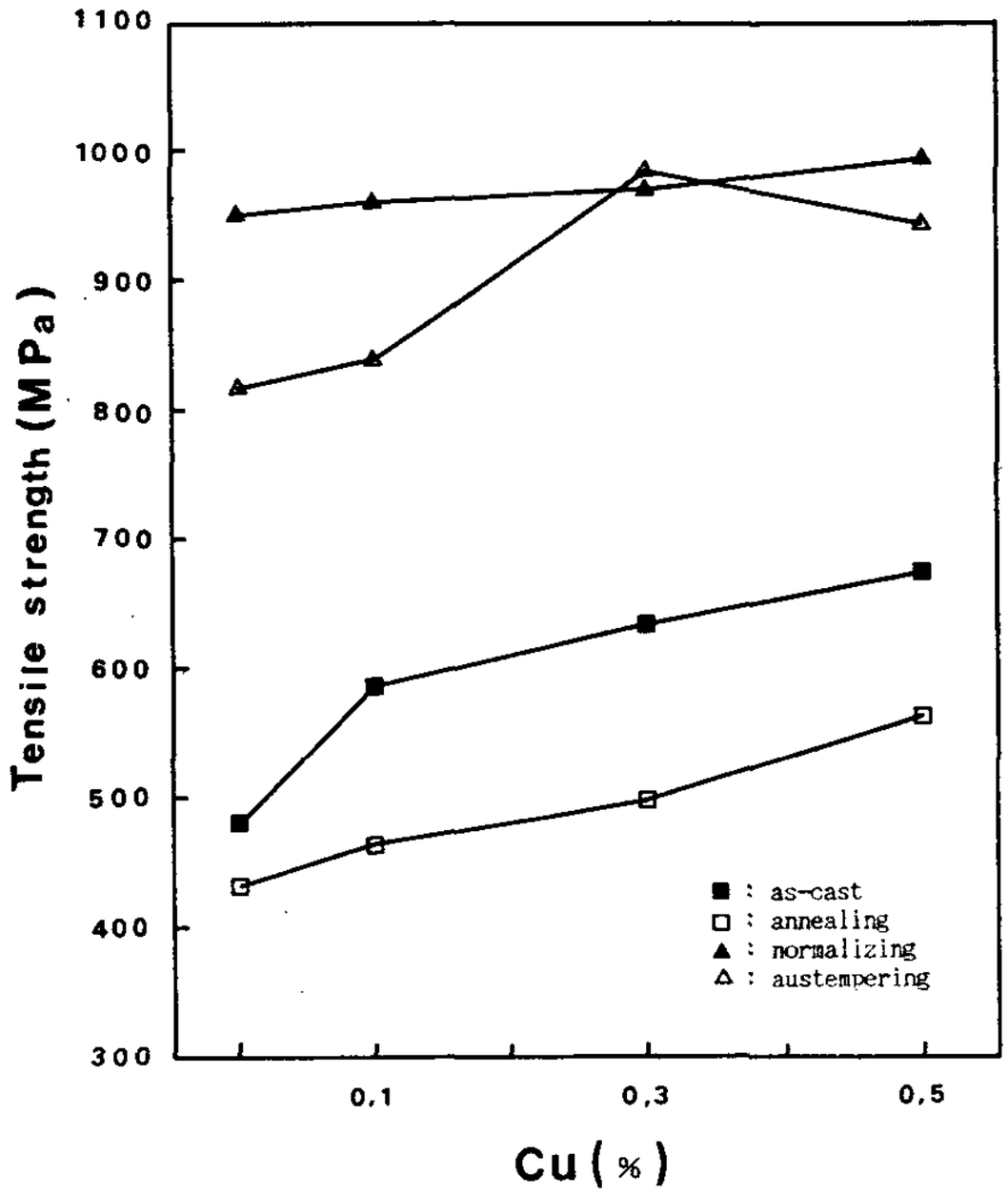


Fig. 4. Effect of Cu on tensile strength of DCI for various heat treatment.

3.2 기계적 성질 및 파괴인성

Fig. 4는 열처리 방법 및 구리함량에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것으로 주조상태 및 아닐링의 경우 구리함량이 증가함에 따라 인장강도는 증가하였으나 노말라이징의 경우 큰 변화를 나타내지 않았다. 한편 오스템퍼링 열처리의 경우 구리함량이 0.3%까지는 증가하다가 0.5%에서는 약간 감소하였다. 이와 같은 이유는 주조상태 및 아닐링의 경우 구리첨가량이 증가함에 따라 퍼얼라이트의 양이 증가함에 기인되고 노말라이징의 경우 구리첨가량에 따라 기지조직의 큰 변화가 없는 것에 기인된다고 생각된다. 한편 오스템퍼링의 경우는 구리함량이 0.3%까지 증가함에 따라 균일하고 치밀한 베이나이트 변태가 진행된 결과 인장강도가 증가하였다고 생각하며 구리함량이 0.5%에서 인장강도의 감소는 베이나이트 변태의 1단계에서 얻어진 균일하고 치밀한 조직이 변태의 2단계 진행으로 인하여 분해된 결과라 생각된다.

Fig. 5는 구리함량 변화 및 열처리방법 변화에 따른 파괴인성치를 나타낸 것으로 구리함량이 증가함에 따라 주조상태 및 아닐링, 노말라이징 모두 파괴인성치가 감소하였으나 오스템퍼링 한 시료의 경우 구리함량이 0.3%로 증가함에 따라 파괴인성치가 증가하였으나 구리함량이 0.5%인 경우에서는 파괴인성치가 약간 감소하였다. 이와

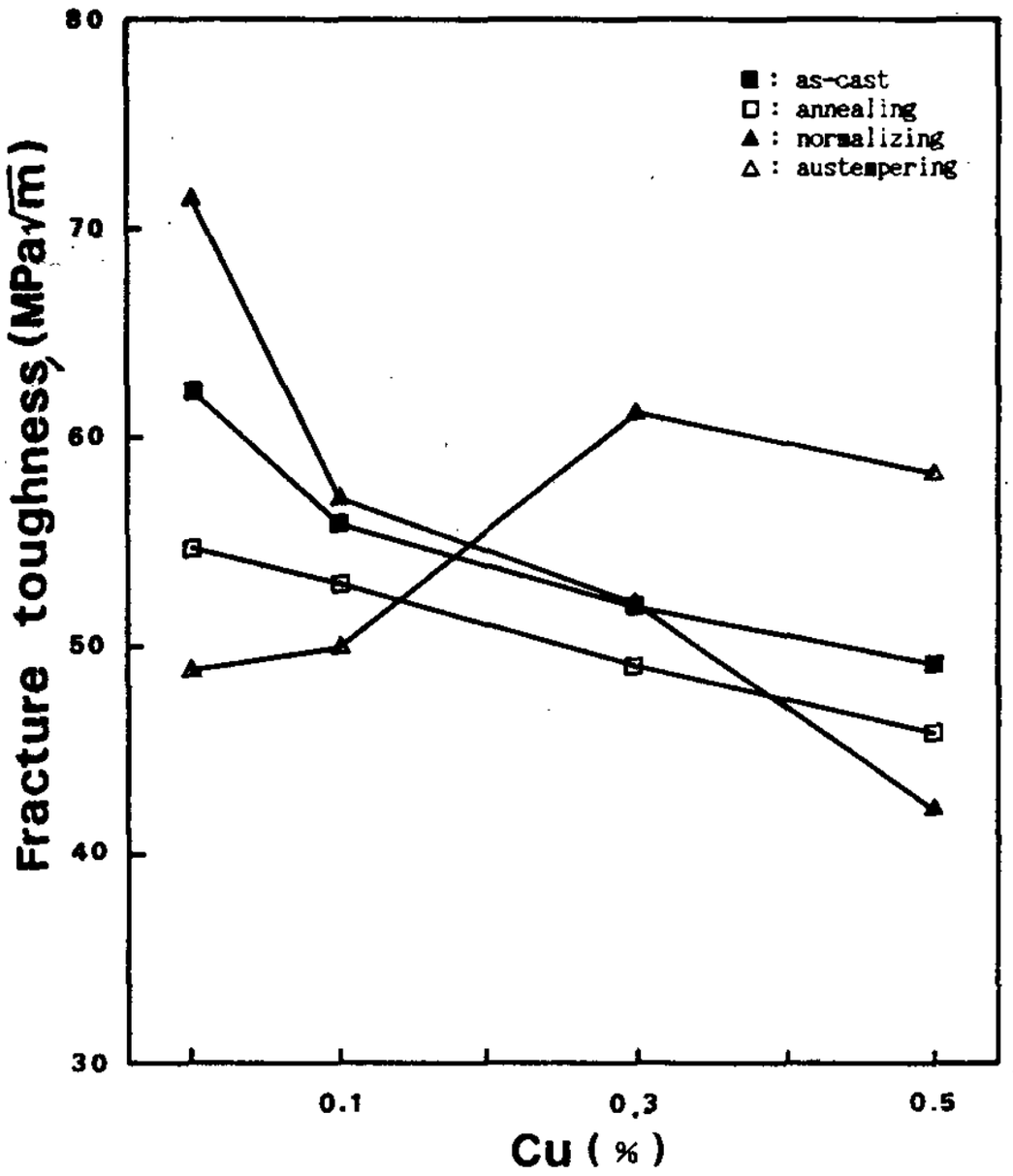


Fig. 5. Effect of Cu on fracture toughness of DCI for various heat treatment.

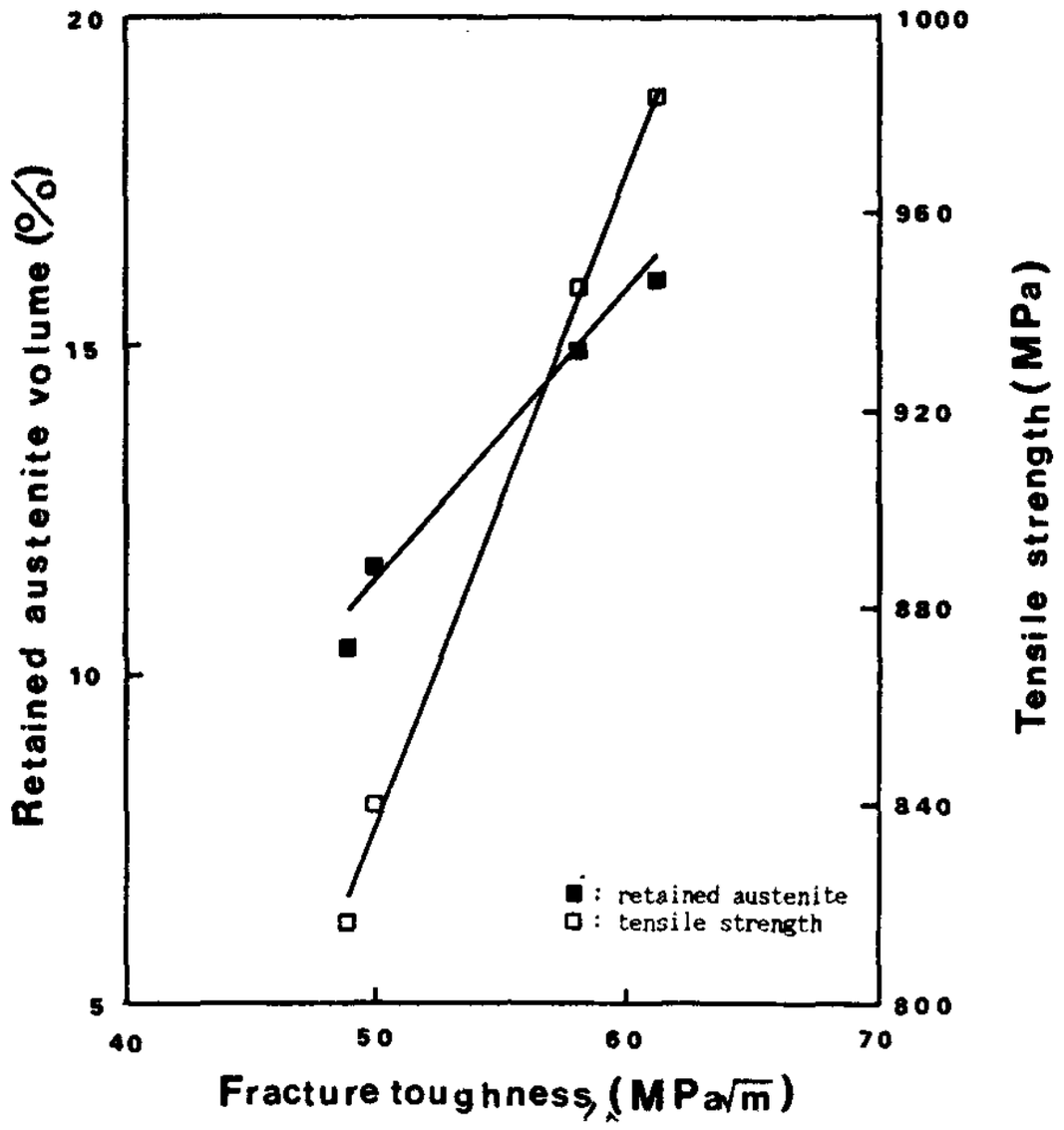


Fig. 6. Relationship between tensile strength, retained austenite volume and fracture toughness.

같은 이유는 주조상태, 아닐링 및 노말라이징의 경우 구리함량이 증가함에 따라 기지조직이 점차 퍼얼라이트화되어 균일산단의 소성역[10]이 감소한 것에 기인된다고 생각된다.

특히 노말라이징한 시료의 경우 구리함량에 따라 파괴인성치가 급격히 감소하는데 이는 기지조직의 대부분이 퍼얼라이트이며 구리첨가가 이러한 효과를 가중시킨 결과라 생각된다. 본 연구에서는 0.5%구리를 함유하고 노말라이징한 시료에서 가장 낮은 결과를 나타내었다. 한편 오스템퍼링한 시료의 경우 구리함량이 0.3%까지 증가함에 따른 파괴인성치의 증가는 구리가 0.3%까지 증가함에 베이나이트 변태가 촉진되어 잔류오스테나이트량이 증가한 결과이며 0.5%구리를 함유한 시료의 경우 0.3%의 경우에 비하여 파괴인성치가 감소하는 것은 베이나이트 변태의 가속화에 기인한 변태의 제2단계가 진행되어 고탄소를 함유한 잔류오스테나이트가 페라이트와 카바이드로 분해되어 잔류오스테나이트의 양이 감소한 결과라 생각된다. Fig. 6은 오스템퍼링한 시료에 대한 잔류오스테나이트와 파괴인성치 및 인장강도와의 상호 연관관계를 나타낸 그림으로 잔류오스테나이트의 양이 증가함에 따라 파괴인성치 및 인장강도가 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 잔류오스테나이트가 균열선단에서 소성역을 증가시킨 결과라 생각된다.

3.3 파면관찰

Photo 3은 구리함량 및 열처리방법에 따른 파면을 나타낸 사진으로 주조상태, 아닐링 및 노말라이징한 시료의 경우 구리를 첨가한 시료의 경우가 첨가하지 않은 시료에 비하여 벽개파괴의 양상을 띄고 있다. 주방상태의 경우 전형적인 river pattern을 나타내며 아닐링한 시료의 경우 구상흑연 주위의 섬유상과 기지의 벽개파괴양상이 혼재한 의벽개파면을 관찰할 수 있다. 노말라이징한 시료의 경우 구리가 포함되지 않은 시료에서는 구항흑연 주위의 void 합체에 의한 dimple pattern을 나타내었으나 구리첨가된 시료에서는 벽개파괴의 양상을 나타내었다. Photo 4는 오스템퍼링 열처리한 경우의 파면으로 구리가 첨가되지 않은 시료와 0.1% Cu의 경우 모두 벽개파괴의 양상을 나타내었으나 0.3%Cu의 경우 구상흑연 주위에 섬유상이 혼재된 의벽개파면을 나

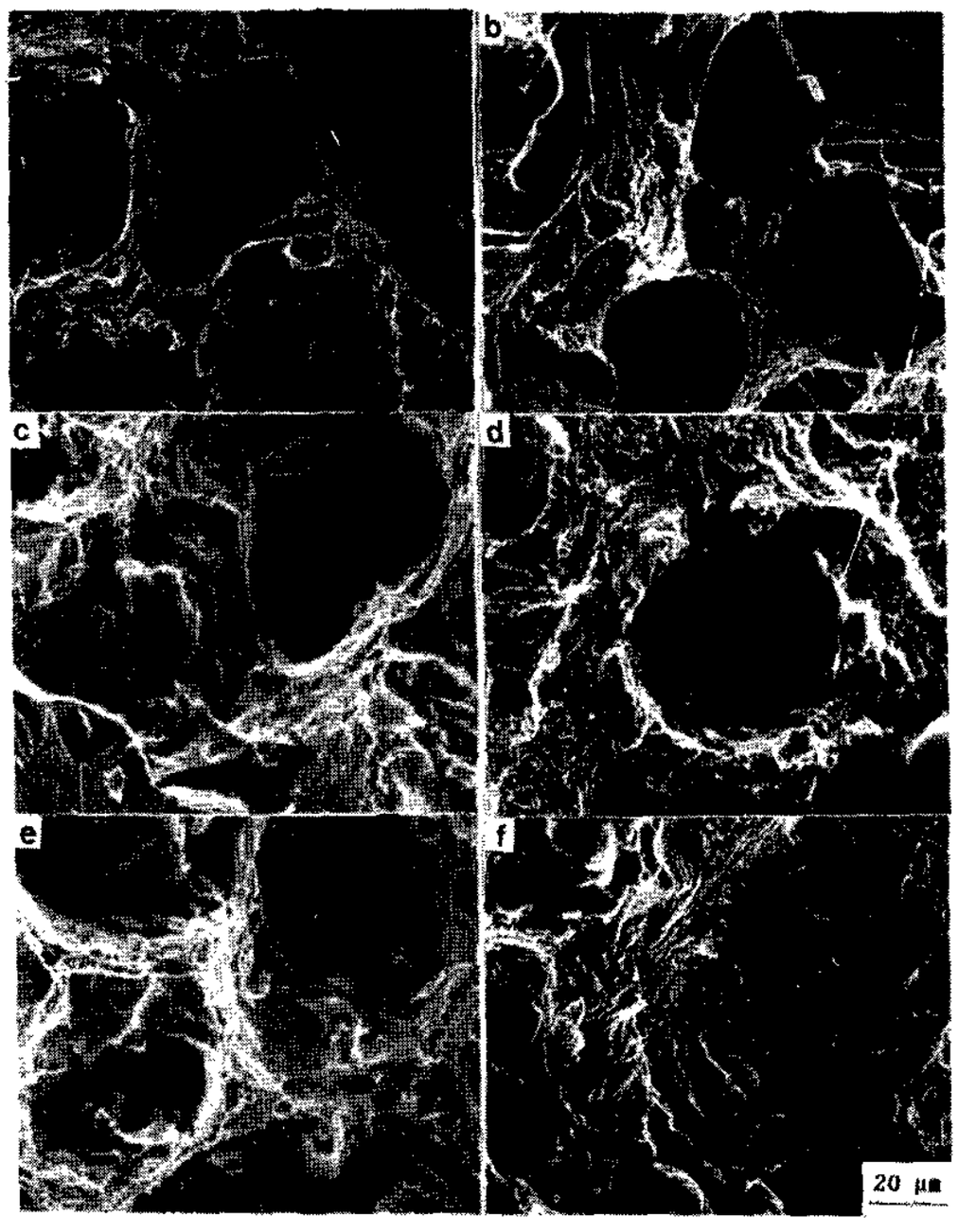


Photo 3. SEM fractographs for each heat teratment methods.

(a) as-cast (b) as-cast-0.5 Cu (c) annealing
(d) annealing-0.5 Cu (e) normalizing
(f) normalizing-0.5 Cu

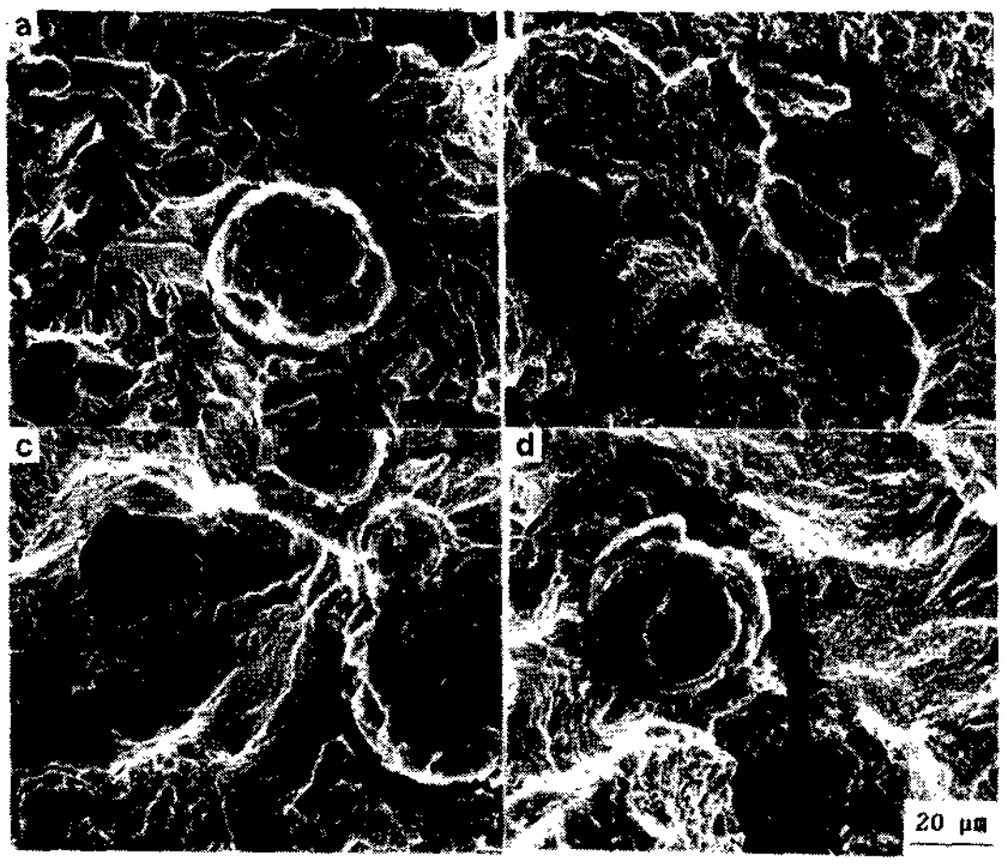


Photo 4. SEM fractograph changes for Cu addition on the austempering heat treatment.

(a) unalloyed con. (b) 0.1 Cu
(c) 0.3 Cu (d) 0.5 Cu

타내고 있으며 이러한 양상은 구리가 0.5% 첨가된 시료에서는 다시 섬유상이 감소함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 판단의 기점인 흑연과 기지계면에서 잔류오스테나이트의 양이 증가함에 따라 섬유상이 비례하여 증가한 결과라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 구상흑연주철을 열처리 및 합금원소(Cu) 첨가량에 따른 파괴특성에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 구리함량이 증가함에 따라 기지조직은 점차 퍼얼라이트화 되었으며 이러한 결과는 아닐링<주조상태<노말라이징 순으로 나타났으며 오스템퍼링한 시료의 경우 구리함량이 0.3%일 때 가장 균일하고 치밀한 베이나이트 조직을 얻을 수 있었으며 구리함량이 0.5%일 때는 균질한 베이나이트 조직이 분해되는 것을 관찰하였다.

2) 평면변형 파괴인성치는 노말라이징 열처리한 경우 구리가 첨가되지 않은 시료에서 가장 우수한 결과를 얻을 수 있었으며 이때 파괴 인성치는 71.6NPa$\sqrt{m}$, 인장강도 950.5MPa을 얻었다. 구리의 양이 증가함에 따라 즉, 퍼얼라이트의 양이 증가함에 따라 파괴인성치는 감소하였다. 한편 오스템퍼링 열처리한 시료에서는 구리의 함량이 0.3%까지는 파괴인성치가 증가하다가 0.5%에서는 다시 감소하였다.

3) 파괴인성치가 높은 파면은 구상흑연 주위의 섬유상이 혼재된 연성파면을 나타내었으며 오스템퍼링 열처리를 제외한 경우 구리함량이 증가함에 따라 의벽개파면에서 점차 벽개파면으로 변하는 파면-천이현상을 관찰하였다. 오스템퍼링 열처리한 경우 파괴인성치는 잔류오스테나이트량이 증가함에 따라 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 大石進：鑄鍛造の 熱處理, 79 (1989) 1.
2. 堀內康雄：綜合鑄物, 83 (1983) 16
3. ASM：Metal Progress, Databook, 81 (1981) 58
4. 岡林邦夫：大韓金屬學會紙, 18(1980) 62

5. 失島次郎 外 3人 : 材料, 32263 (1983) 1335
6. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01 (1985) 552.
7. B. D. Cullity : Elements of X-ray Diffraction, Addison-wesley Pub. Co. Inc., (1967) 391
8. Nobuhisa Tsusumi and Hajime Suzuki : 鑄物, 58 (1986) 293
9. B. Kovacs : Proc. of 2nd Intnl. Conf. on ADI., Univ. of Michigan, (1986) 291
10. S. T. Rolfe and J. M. Barsom : Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 42 (1982) 174