

.....
 論 文

오스템퍼링처리한 C/V흑연주철의 파괴특성에 미치는 기조직의 영향에 관한 연구

김창규, 김홍범*, 최창옥*

Effect of Matrix Structures on the Fracture Characteristics of Austempered C/V Graphite Iron

Chang-Gyu Kim, Hong-Beum Kim* and Chang-Ock Choi*

Abstract

Effect of various austempered structures on fracture characteristics of C/V graphite cast iron has studied.

The tensile strength and hardness reached the maximum value of 971.4MPa and HB302 at the austempering temperature of 250°C, respectively.

As the austempering temperature increased, the amount of retained austenite increased from 18% to 22, 29%, while K_{IC} values ranged from the value of $65\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ to $70\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $66\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. This fact that K_{IC} value was not sensitive to the increase of the amount of the retained austenite was that K_{IC} was dependent on the matrix structure in lower bainitic matrix, while dependent on the notch effect from C/V graphite shape in upper bainitic matrix.

Fractured surfaces showed a ductile fracture pattern at 300°C. Very large coalescence by C/V graphite and relatively small voids by spheroidal graphite were observed.

1. 서 론

C/V흑연주철은 종래 공업용 재료로서 사용되지 않았으나, 최근 고속열차의 disk break, cylinder block, cylinder liner 등의 재료로서 실용화되고 있다[1~6]. 현재 C/V흑연주철은 페라이트와 퍼얼라이트기지의 C/V흑연주철 2종이 있으며, 퍼얼라이트기지의 C/V흑연주철은 인장강도 $460\text{N}/\text{mm}^2$ 까지는 2%의 연신율을 나타내고 있다. 연성은 분명히 적지만 저사이클이거나 열적 피로환경에서는 중요하다.

또한 편상흑연주철과 비교하면 페라이트기지 C/V흑연주철은 열전도성이 더 우수하므로, 이것

은 disk나 break drum에 적용할 때 중요하다.

정상적인 등급의 C/V흑연주철의 인장강도는 다음의 회귀방정식으로부터 정도값에 의하여 예측할 수 있다[7].

$$\text{UTS} = 1.7\text{HB} + 62$$

그러나, 베이나이트기지의 C/V흑연주철은 다음 관계식($\text{UTS} = 2.6\text{HB} + 21$)[7]에 따르면 UTS/HB의 비가 더 양호함을 알 수 있다.

이와같이 C/V흑연주철의 강인화를 필요로 하므로 본 연구에서는 Cu, Mo을 소량 첨가한 C/V흑연주철을 제조한 후, 오스템퍼링 처리온도에 따른 C/V흑연주철의 조직과, 기계적 성질 및 파괴특성에 미치는 기조직의 영향에 대하여 조사

부산공업대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University of Technology)

*동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

본 실험에 사용한 C/V 흑연주철은 용량 100kg의 고주파 유도용해로에서 주물용 선철(Sorel metal)과 강고철을 용해한 후, 전기동(99.9%) 및 Fe-Mo(30%)을 첨가하여 소정의 조성으로 하고, 미리 예열하여 준비한 레들에 출탕하면서 Fe-Si-Mg(5.0%) 합금을 샌드위치법으로 처리하여 C/V 흑연화(소량접종법)하고, Fe-Si계 접종제로 후접종하여 Y블럭형(KSD 4302.A호) CO₂형 주형[8]에 주입하였다.

주조한 시편의 화학성분은 Table 1과 같으며, 또한 주방상태의 조직분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 주조한 Y블럭의 하부를 절단하여 인장, 충격 및 평면변형 파괴인성시편(CT시편)으로 Fig. 1과 같이 가공하였다. 파괴인성시험은 ASTM E-399[9]에 의한 CT시편을 사용하였다. 인장, 충격 및 CT시편은 900°C에서 2시간 동안 오스테나이트화 처리하여 800°C까지 공냉 한 후 350°C, 300°C 및 250°C온도의 염욕에서 각각 1시간 동안 오스테퍼링처리한 후 공냉하였다.

2.2 실험순서

주방상태 및 오스테퍼링처리한 시편의 조직을 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 파괴인성시험 후의 파단면도 주사전자현미경으로 관찰하였다. 기계적 성질을 조사하기 위하여 만능재료시험기로 인장강도와 연신율을 측정하였고, 경도는 브리넬경도기, 그리고 충격시험은 사르피형 시험기로 상온에서 실시하였다. 파괴인성시험은 파괴인성시험의 노치부선단에 피로시험기(Shore Western Co., DI2500A. Cap.

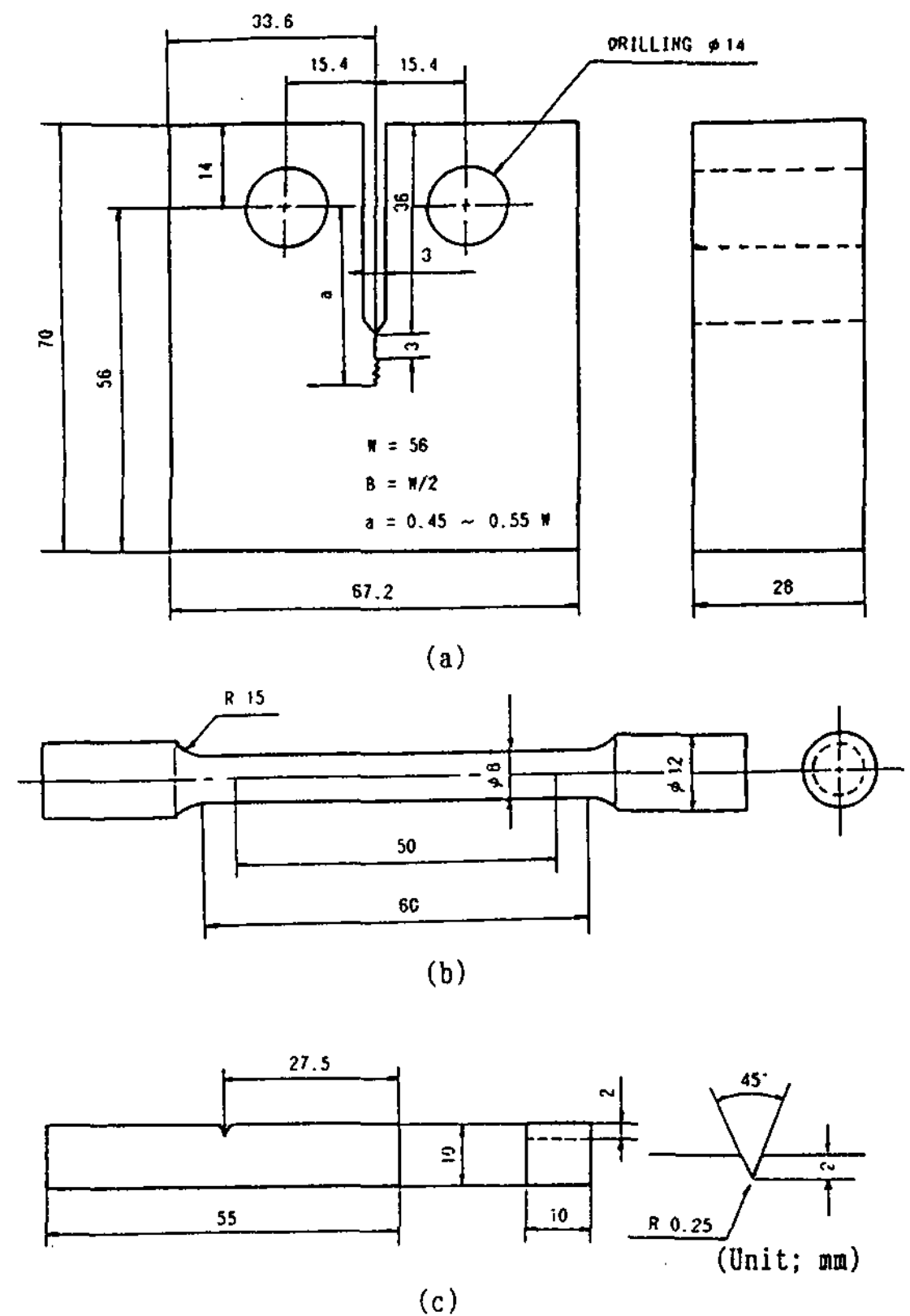


Fig. 1. Geometry of specimens
(a) CT specimen
(b) Tension specimen
(c) CVN-impact specimen

10ton)를 사용하여 10Hz 사인파(sinusoidal)로 1.3mm정도 피로균열을 만든 후, COD게이지를 부착하여 인장시험기(Instron 1334, cap 50ton)로 파단시켜 하중-균열 개구변위(P-COD)곡선을 증폭기를 통한 X-Y기록계를 이용하여 얻었으며, ASTM E-399[9]. 규정에 따라 평면변형 파괴인성치(K_{IC})를 얻었다. 또한 오스테퍼링한 시편의 잔류오스테나이트량의 측정은 X-선 디

Table 1. Chemical composition of C/V graphite cast iron(Wt. %)

T.C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Mo
3.45	3.20	0.56	0.030	0.010	0.020	0.73	0.20

Table 2. Analysis of matrix of as cast specimen

Ferrite(%)	Pearlitw(%)	Graphite(%)	Spheroidizing rate(%)
29.8	56.3	12.8	42

프렉토메타(Rigaku Co., D-maxII A)에 의해서 Cu K α 를 사용하여 30kv, 25mA에서 2°/min의 속도로 측정하여 α -Fe과 γ -Fe의 양을 밀러법으로 계산하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오스템퍼링처리온도에 의한 기지조직

Cu와 Mo를 첨가한 C/V흑연주철의 주방상태 조직과 오스템퍼링처리하여 얻은 미세조직을 Photo 1에 나타내었다.

Photo 1의 A)는 C/V흑연주철의 주방상태의 조직을 나타낸 것이고 B), C), D)는 각 온도별 오스템퍼링처리한 조직을 나타낸 것이다.

Photo 1에서 알 수 있는 바와 같이 A)의 주방 상태에서는 흑연주위에 소량의 페라이트가 존재하고 있고 Cu, Mo등이 첨가됨에 따라 미세한 퍼얼라이트 기지조직을 나타내었다. B)는 250°C에서 오스템퍼링처리한 조직으로써 약간의 마르텐사이트와 18%의 잔류오스테나이트를 함유한 베이나이틱 페라이트와 lath가 미세하고 균일하게 석출한 하부베이나이트로 변태하였으며, C)는 300°C에서 오스템퍼링한 경우 잔류오스테나이트가 약간 증가한 하부베이나이트와 상부베이나이트의 혼합조직을 나타내었다. 한편 D)는 350°C에서 오스템퍼링한 경우이며 기지조직은 베이나이트의 lath가 조대하고 lath의 간격도 비교적 넓어지며 잔류오스테나이트가 차지하는 비율도 증가하였다.

이상의 현미경조직 관찰에서 알 수 있는바와 같이 오스템퍼링처리에 의해 C/V흑연주철의 기지조직이 베이나이트 조직으로 변태되어지며 오스템퍼링처리 온도가 증가할수록 잔류오스테나이트량이 많아지고 있으며, 오스템퍼링처리 온도가 250°C인 경우에는 하부베이나이트가 생성되고 300°C인 경우에는 하부베이나이트와 상부베이나이트가 혼합된 조직이 생성되며, 오스템퍼링처리온도가 350°C가 되면 상부베이나이트가 생성되었다. 이와같이 오스템퍼링처리 온도에 따라 C/V흑연주철의 기지조직이 변화되었다.

3.2 기지조직에 의한 기계적 성질과 파괴특성변화 오스템퍼링 온도에 따른 C/V흑연주철의 기계

적 성질 측정결과를 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. 오스템퍼링 온도 250°C에서 인장강도 791MPa, 경도 HB320으로 최고값을 나타내었으며, 오스템퍼링 온도가 상승함에 따라 인장강도 및 경도는 감소하였다. 이는 오스템퍼링온도가 낮을수록 베이나이트 변태가 가속되고 베이나이트 입자가 미세해지며 잔류오스테나이트량이 적기 때문으로 사료되었다.

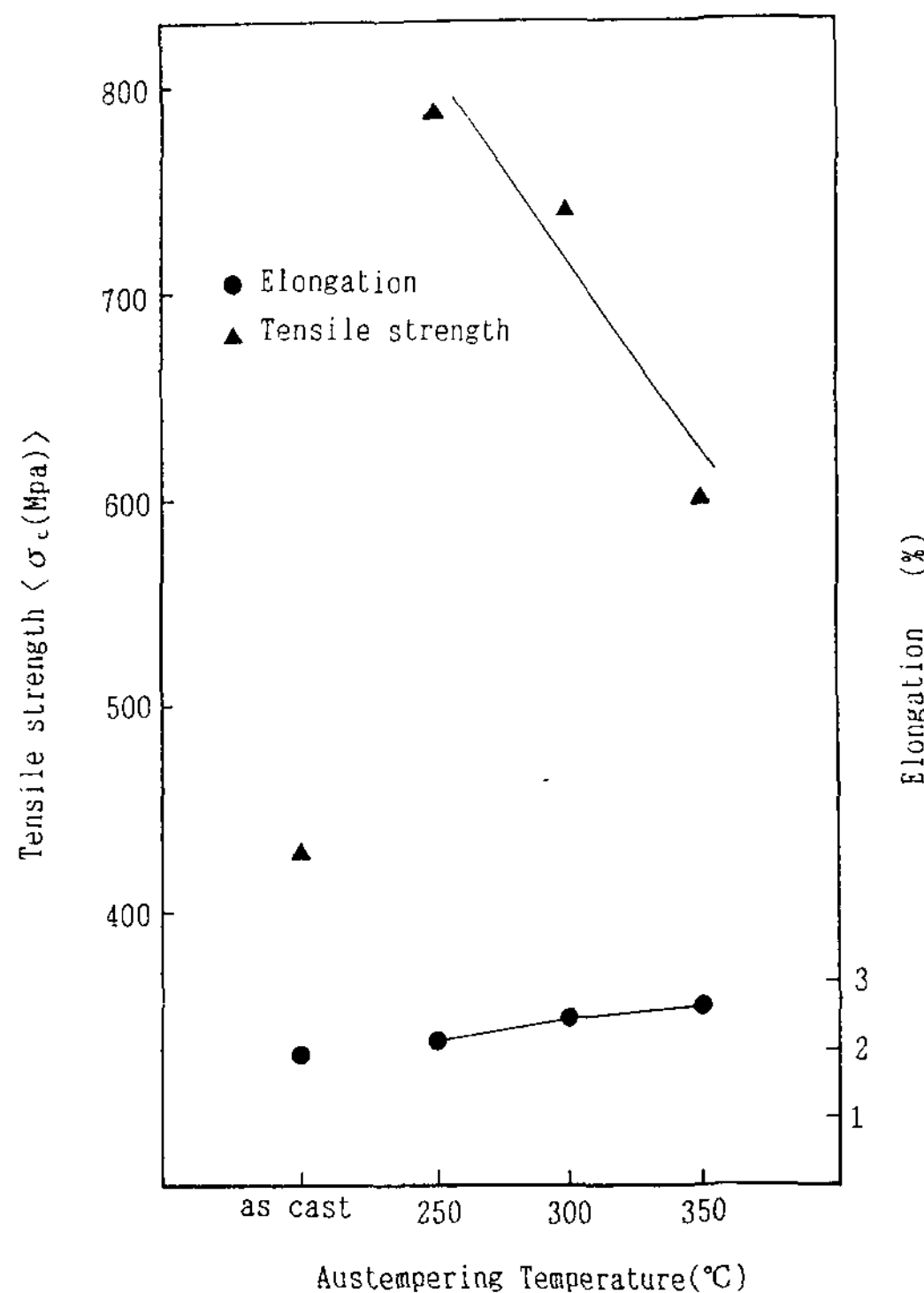


Fig. 2. Effect of austempering temperature on tensile strength and elongation of C/V graphite cast iron

한편, 연신율과 충격치는 오스템퍼링 온도가 상승함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다. 오스템퍼링 온도별로 최대하중을 얻어 초기 단계에서의 선영구역의 기울기보다 5% 낮은 기울기의 직선과의 교점에서 하중치 P_q를 구한 다음, 응력강도계수(K_q)를 계산식에 의하여 구하는데 하중-크랙 개구변위곡선이 III형에 속하므로 P_{max}가 P_q로 된다(Fig. 4). 이렇게 하여 K_{IC} 값을 얻을 수 있었다. 오스템퍼링 온도 300°C의 경우, 파괴하중이 가장 높고 파괴인성치(K_{IC})가

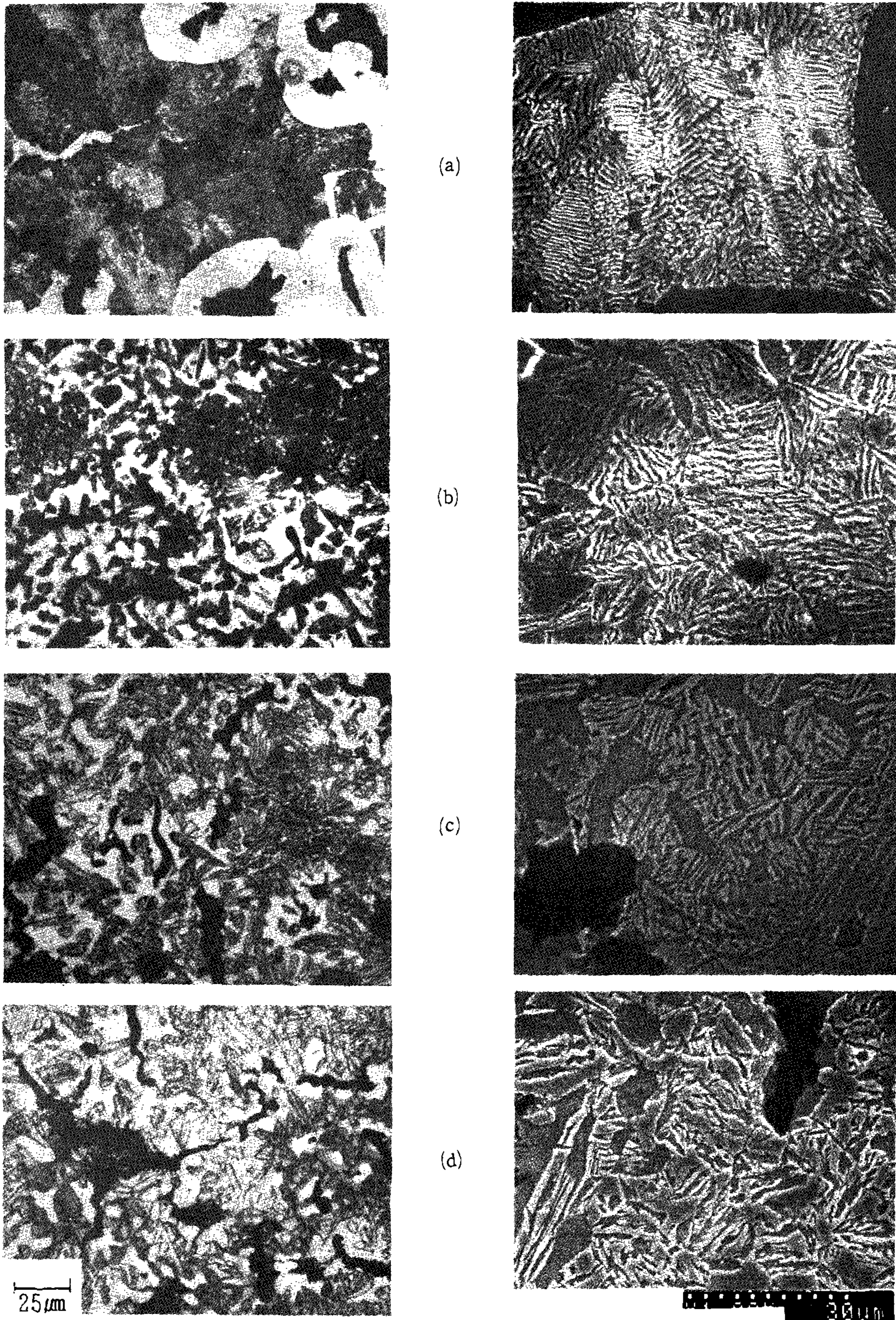


Photo 1. Microstructures of C/V graphite cast iron.

(A) As cast

(B) Austempered for 1 hr at 250°C

(C) Austempered for 1 hr at 300°C

(D) Austempered for 1 hr at 350°C

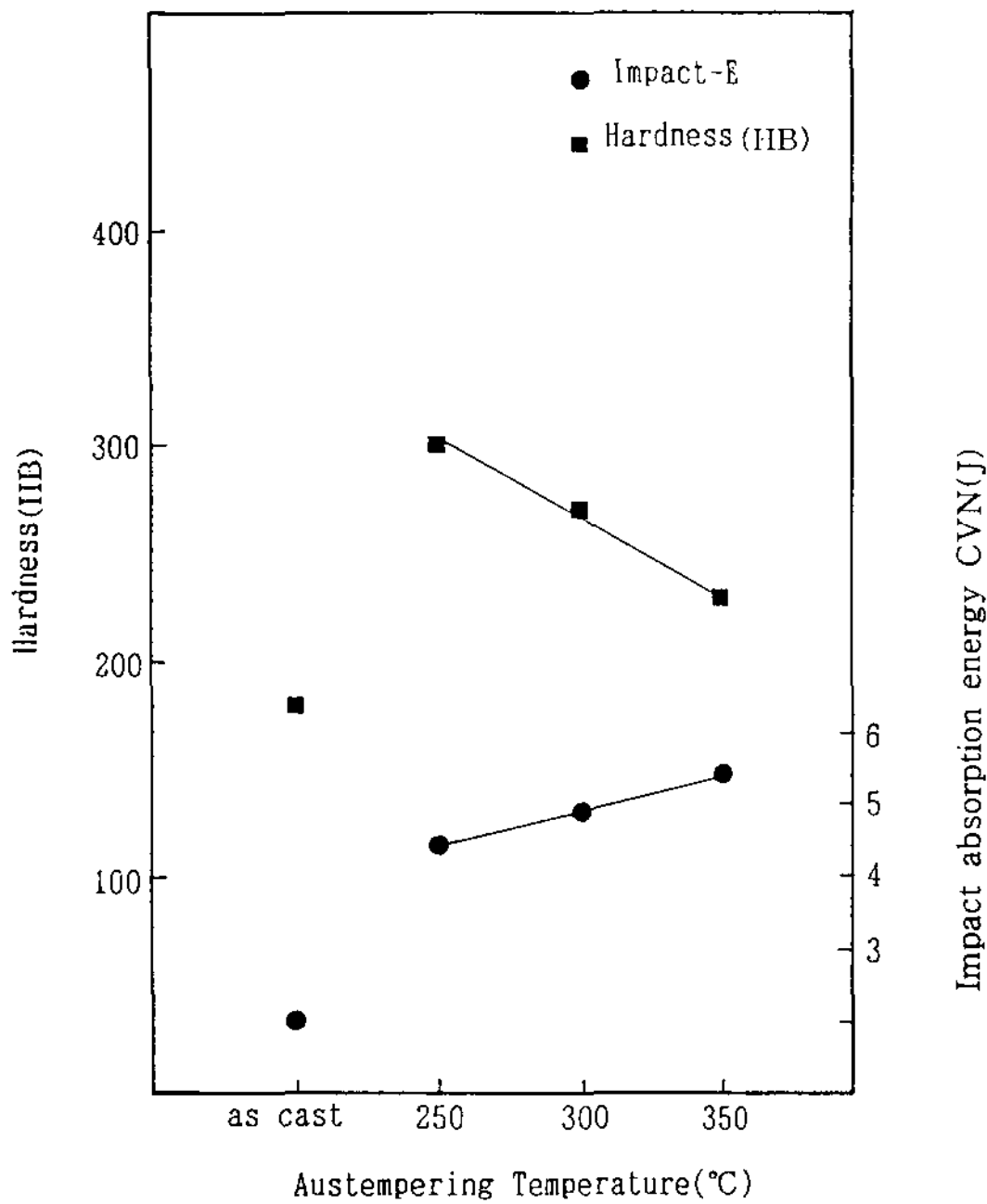


Fig. 3. Effect of austempering temperature on hardness and impact absorption energy of C/V graphite cast iron.

최대로 될 수 있었으며 파괴특성값은 Table 3과 같다. C/V흑연주철의 평면변형 파괴인성값은 오스탬퍼링 온도 300°C에서 70MPa·m^{1/2}, 오스탬퍼링 온도 350°C에 66MPa·m^{1/2}정도로 나타내었으며, 오스탬퍼링 온도상승에 따른 잔류오스테나이트량의 증가추이에는 그다지 민감하지 않았다. 이와같이 잔류오스테나이트량의 변화에 따라 K_{IC} 값이 크게 증가하지 않은 것은 잔류오스테나이트량이 18% 정도인 하부베이나이트에서는 기지조직이 K_{IC}값에 우선적으로 영향을 주고 잔류오스테나이트량이 29% 정도인 상부베이나이트에서는 C/V흑연형상에 따른 노치효과가 K_{IC}값에 우선적으로 영향을 준 것으로 사료된다[10].

C/V흑연주철의 흑연의 형상은 구상흑연과 편

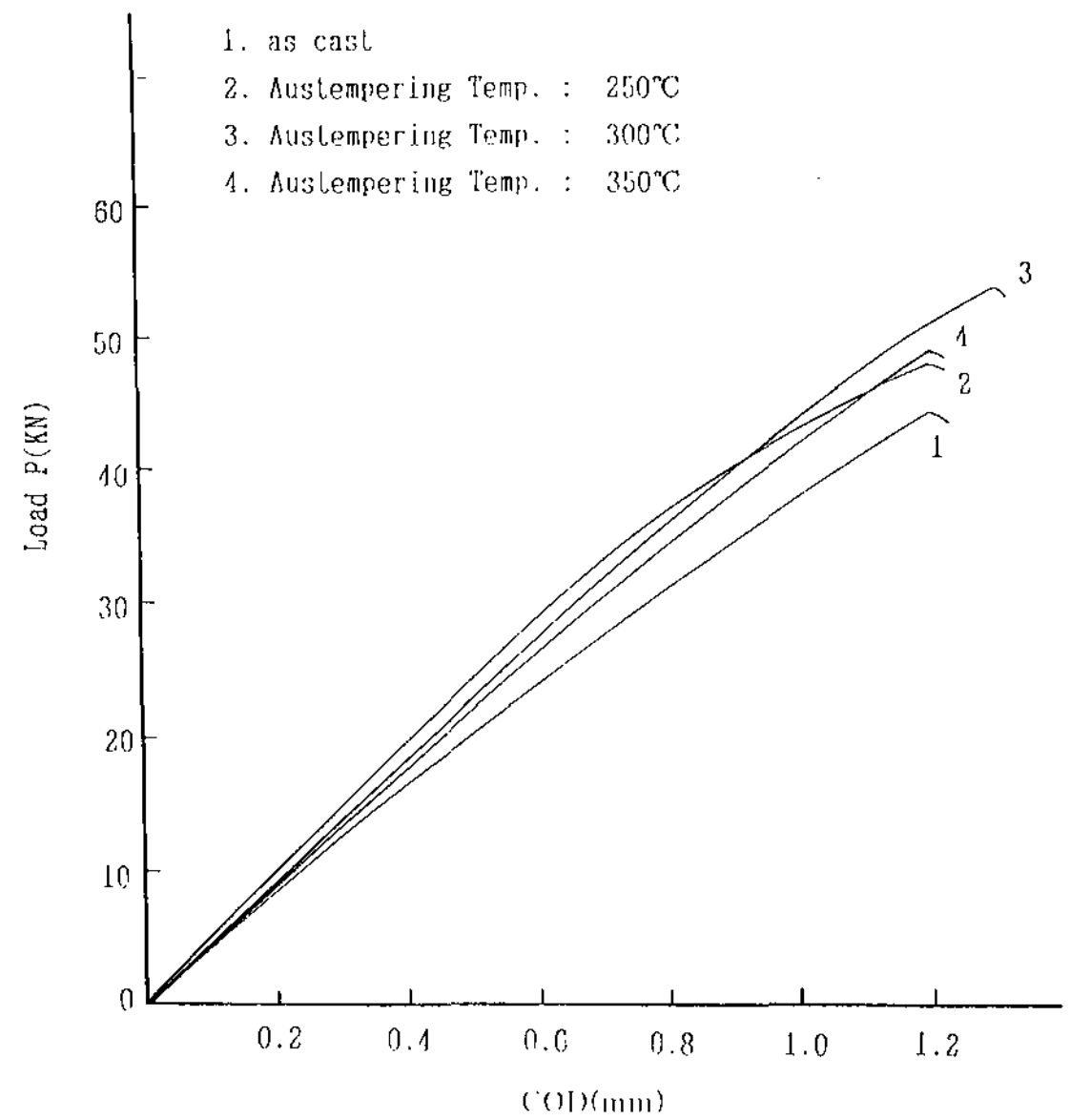
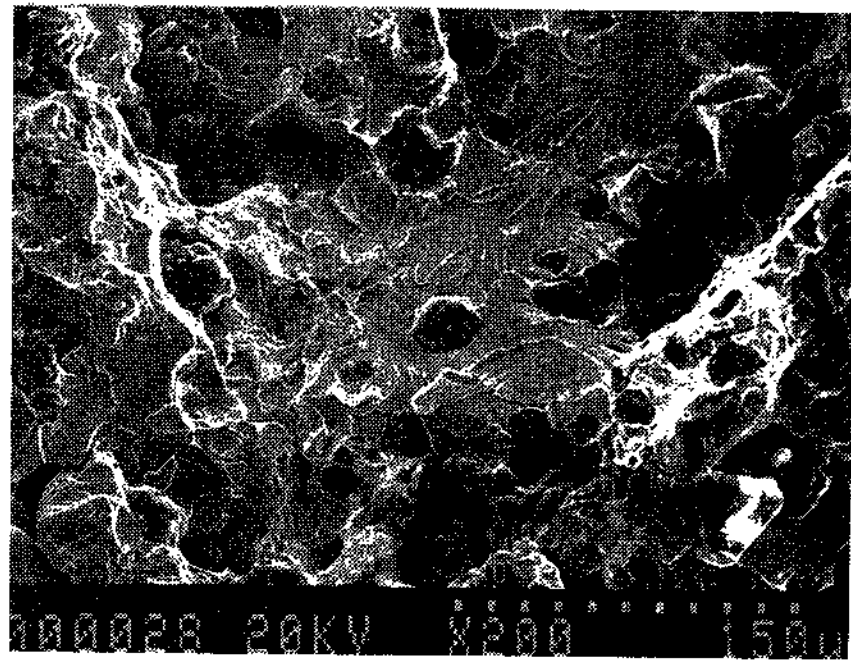


Fig. 4. Load VS. opening displacement test record for C/V graphite cast iron

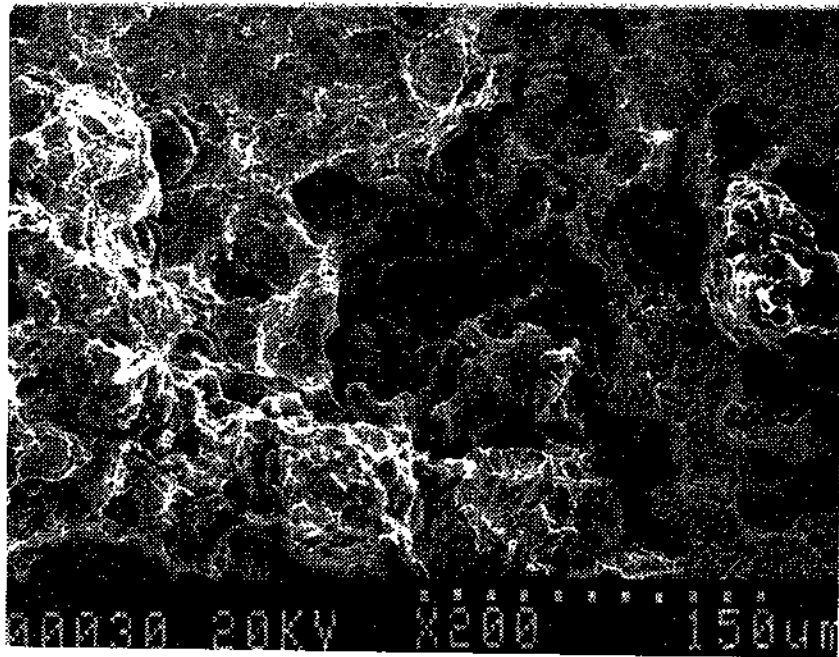
상흑연의 중간 모양이므로 인장과 파괴인성 특성도 회주철과 구상흑연주철의 중간정도로 알려져 있다. C/V흑연주철의 파괴인성에 관한 Riposan [10]등에 의한 연구에 의하면 여러가지 서로 다른 기지조직에 대한 파괴인성에 미치는 C/V흑연은 퍼얼라이트기지 보다 페라이트기지 일때가 더 크다고 한다. Photo 2는 오스탬퍼링한 C/V흑연주철의 파면을 나타내었다. (A)는 주방상태의 파면으로서 C/V흑연에 의한 거대한 결합적 공동과 구상흑연에 의한 비교적 작은 공동이 보이며, 오스탬퍼링 온도가 상승할수록 구상흑연주철과 비슷한 섬유상(fibrous pattern)과 딩플상(dimple pattern)의 연성파면을 보이며 특히 300°C에서 오스탬퍼링한 경우 비교적 뚜렷하게 나타내었다[10].

Table 3. Experimental results of fracture characteristics of C/V graphite cast iron

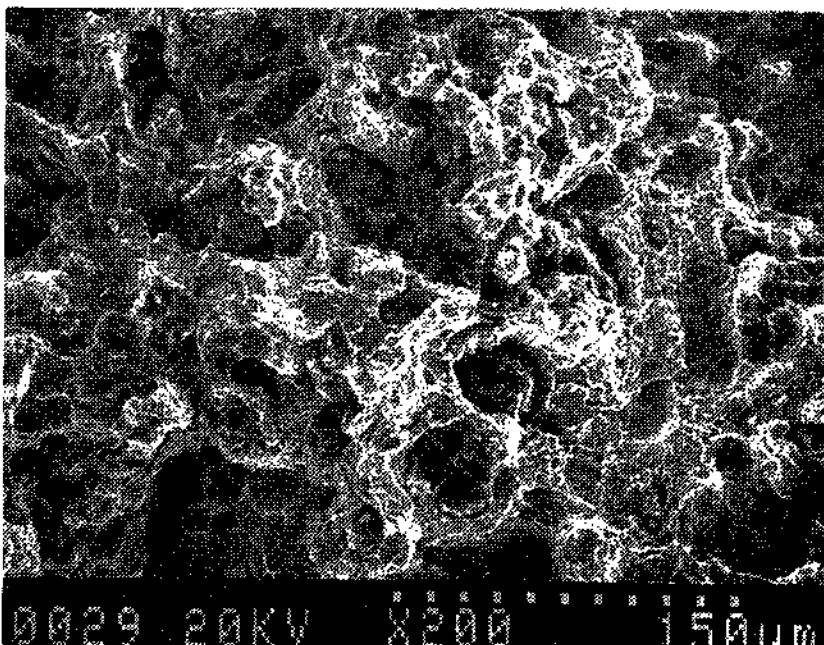
Austempering temperature (°C)	Maximum load (KN)	PQ Pmax (KN)	Fracture toughness K _{IC} , K _Q (MPam ^{1/2})
as cast	43.8	43.8	60.1
250	47.9	47.9	65.1
300	53.9	53.9	70.3
350	48.5	48.5	66.3



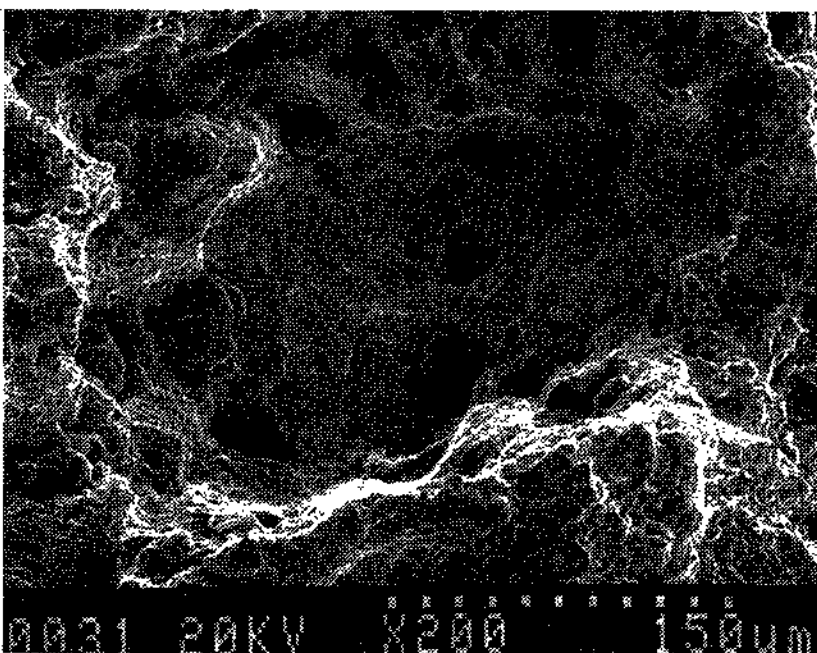
(A) as cast



(B) at 250°C



(C) at 300°C austempering



(D) at 350°C austempering

Photo 2. Fractographs(SEM) of fractured CT specimens of austempered C/V cast iron and as cast

3.3 잔류오스테나이트량과 파괴특성

Fig. 5는 잔류오스테나이트량 측정을 위해 X-선 회절기로부터 얻은 α -Fe과 γ -Fe의 분석결과를 나타내었다. C/V흑연주철은 250°C, 300°C 및 350°C의 오스템퍼링 온도에서 생성된 잔류오스테나이트량은 각각 18%, 22% 및 29%로 온도변화에 따른 잔류오스테나이트량은 약간 증가하였다. 또한 C/V흑연주철의 K_{IC} 값은 오스템퍼링온도 250°C에서 $65\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 오스템퍼링온도 300°C에서 $66\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 정도였으며 오스템퍼링온도 300°C에서 K_{IC} 값은 $70\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로 최고값을 나타내고 있다. 오스템퍼링 온도상승에 따른 잔류오스테나이트량의 증가경향은 그다지 민감하지 않았고, 한편 오스템퍼링 온도상승에 따른 K_{IC} 값의 변화도 민감하지 않았다. 이와같이 잔류오스테나이트량의 변화에 따라 K_{IC} 값이 크게 증가하

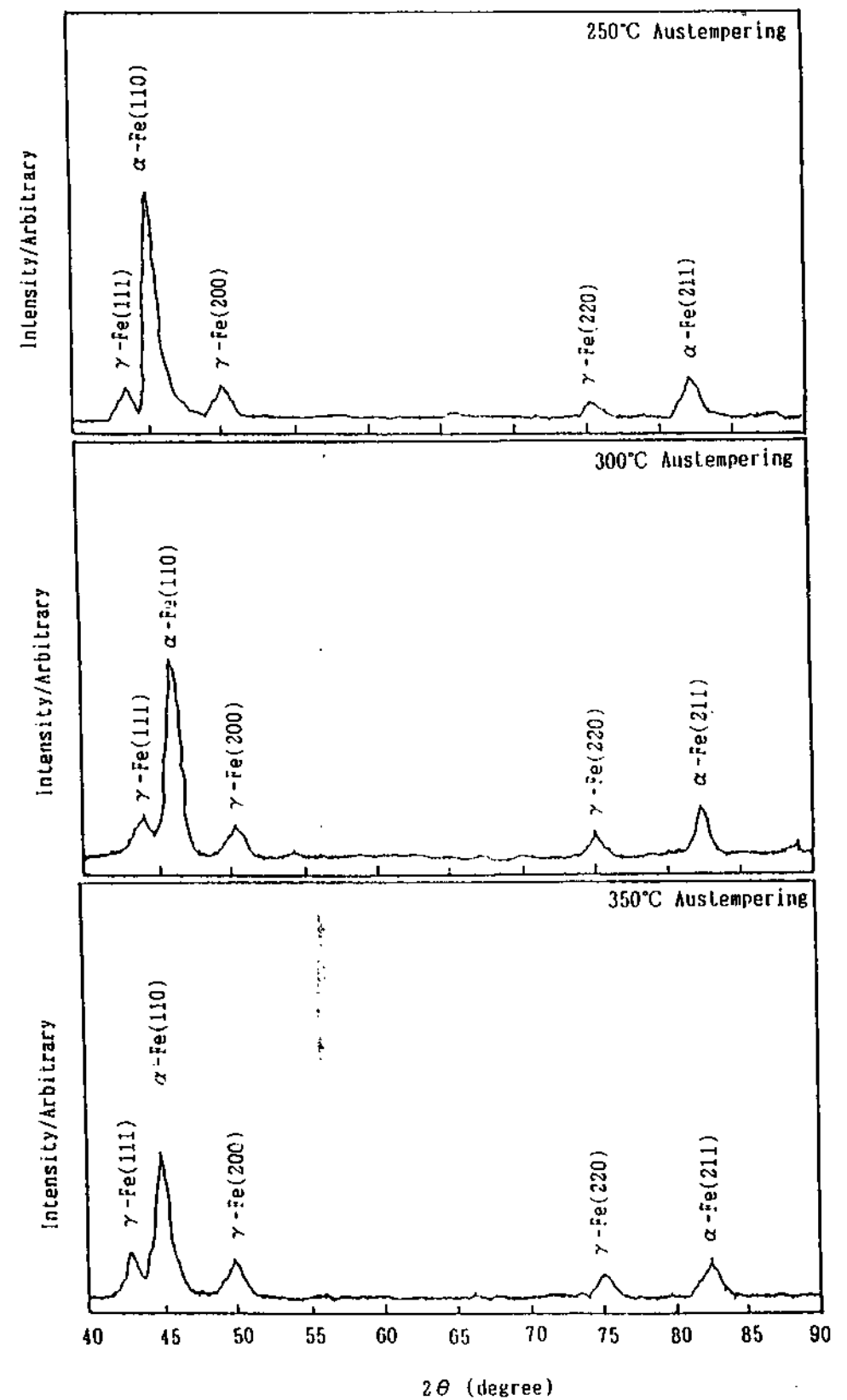


Fig. 5. Diffraction patterns of X-ray for C/V graphite cast irons

지 않는 것은 잔류오스테나이트의 량이 18% 정도인 하부베이나이트에서는 기지조직이 K_{IC} 값에 우선적으로 영향을 주고, 잔류오스테나이트의 량이 29% 정도인 상부베이나이트에서 C/V형상에 따른 노치효과가 K_{IC} 값에 우선적으로 영향을 준 것으로 사료되었다. Fig. 6에 잔류오스테나이트의 량과 K_{IC} 의 관계를 나타내었다.

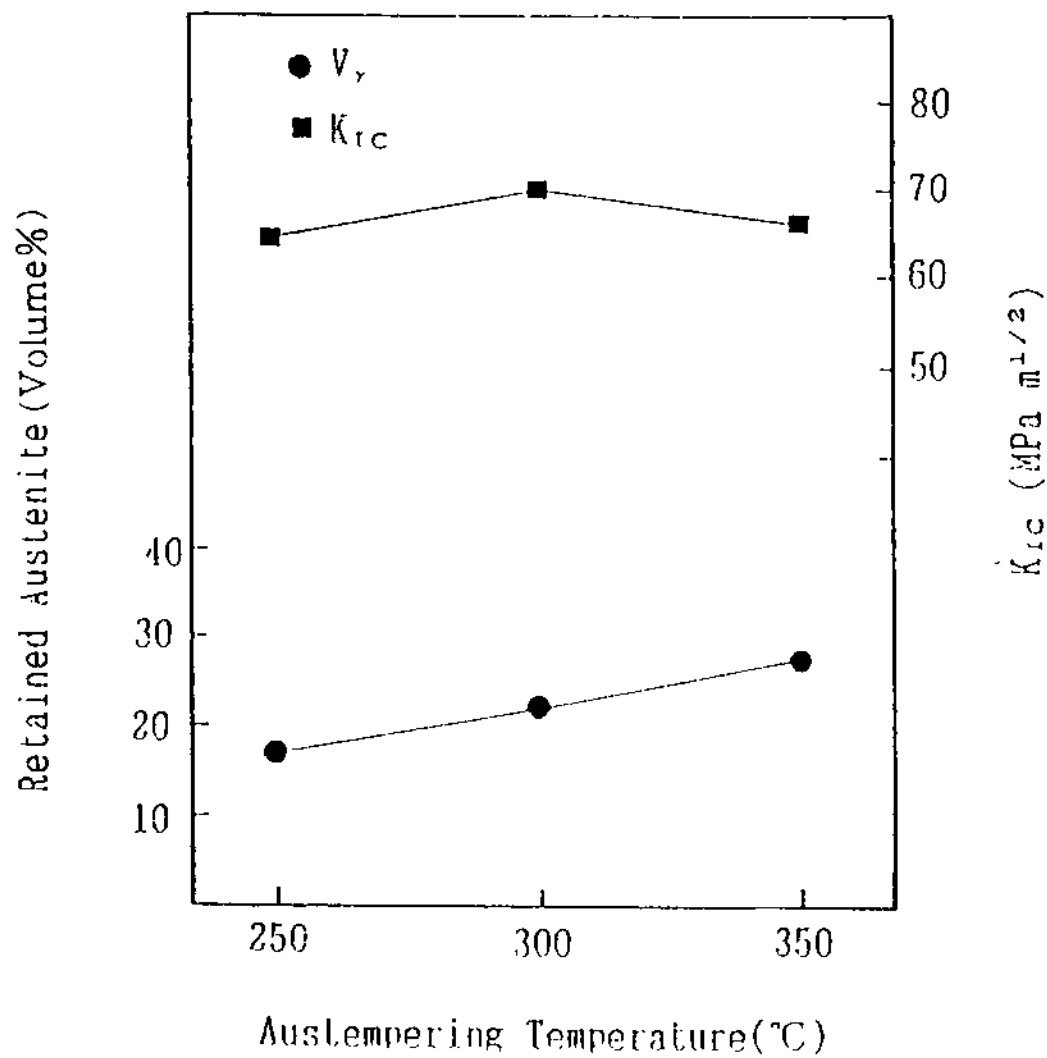


Fig. 6. Relation between retained austenite volume (V_r), fracture toughness value (K_{IC}) and austempering temperature of C/V graphite cast iron

4. 결 론

C/V흑연주철의 파괴특성에 미치는 오스템퍼링 온도의 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장강도와 경도는 오스템퍼링 온도가 250°C에서 각각 971.4MPa, 302HB로 최고값을 나

타내었다.

2) K_{IC} 값은 오스템퍼링온도 300°C에서 70MPa·m^{1/2}로 최고값을 나타내었다.

3) 파괴파면은 C/V흑연에 의한 거대한 결합적 공동과 구상흑연에 의한 비교적 작은 공동을 보이며 300°C에서는 더욱 섬유상과 덩플상의 연성파면을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] 中田利三 : 日本鑄物協會 第98回 全國講演大會 概要集(1980) 90.
- [2] 恒川好樹 : 日本鑄物協會 第100回 全國講演大會 概要集(1981) 10.
- [3] W. Farhurst : Foundry Trade, 155, 3 (1983) 104.
- [4] V. S. R Murth and S. Seshan : Foundry Trade Jr., 159, 3 (1985) 132.
- [5] I. Riposan, M. Chisamera : 3rd International Conference on ADI, Univ of Michigan (1991) 438.
- [6] Sykes, N et al. Soc Environ Eng. Conf., (1981). University of Warwick.
- [7] G. J. Cox : Automotive Engineer(1982) Feb./March 63
- [8] D. J. Moore, T. N. Rouns and K. B. Rundman : Trans., Am. Soc. Met., Vol.4, No.1 (1985) 7
- [9] ASTM E-399-83, : Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials (1993).
- [10] I. Riposan, M. Chisamera : 3rd International Conference on Austempered ductile iron, Univ. of Michigan (1991) 437~445