

論 文

금형주조한 Mo-Ni-Cu계 구상흑연주철의
오스템퍼링 온도 및 시간에 따른 파괴특성

李 榮 商, 康 仁 燦

Fracture Properties of Mo-Ni-Cu Austempered Ductile Iron Cast in
Permanent Mold with Austempering Temperature and Time

Young-Sang Yi, In-Chan Kang

Abstract

Various test specimens were prepared by austempering low alloyed Mo-Ni-Cu ductile iron blocks of high graphite nodule count at 270, 320 or 370°C for 0.5, 1, 3 or 9hrs. Tensile test, CVN impact test and plane-strain fracture toughness test(compact tension specimen of 50mm W) were done for each heat treatment condition at room temperature. X-ray diffractometer and optical microscope were used to investigate the change of microstructure and relationships between microstructure and test results.

The highest retained austenite volume percent at each austempering temperature was corresponded to the highest mechanical property.

The highest elongation value of 17%, U.T.S. value of 1,600 MPa or K_{IC} value of $90\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ were reached at each optimum condition.

The best heat treatment condition for fracture toughness were 3hrs' holding time combined with the austempering temperature of 270 and 320°C, and 1hr's of 370°C.

1. 서 론

오스템퍼 구상흑연주철 (이하, ADI(austempered ductile iron)로 약칭)은 비교적 근년에 개발되어 역사가 짧으나, 동일한 경도를 갖는 다른 주조금속에 비하여 강도와 인성이 우수하여 단조강이나 주강의 대체품으로서 ADI주물을 개발하고자 많은 연구^(1~5)가 이루어지고 있다.

주조상태에서의 주물의 건전성이 ADI의 강도와 인성에 크게 영향을 미치며 또한 합금원소의 편석은 오스템퍼링 반응속도에 영향을 주어 균일한 미세조직을 방해하므로, 흑연립수를 높여줌으로써 편석의 나쁜 영향을 감소시킬 수 있을 것⁽⁶⁾이다.

본 연구에서는, 미세조직의 흑연립수를 높이기

위하여 금속 주형에 시료를 주조하고 오스템퍼링 온도와 유지시간에 따른 미세조직과 파괴인성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시편의 제작

본 실험에서 사용한 시료는 100kg 용량의 중주파 유도로에 선철과 연강고철을 장입하여 용해한 후 합금철 등으로 성분을 조정하여 1,500°C에서 Fe-Si-5.5%Mg을 1.2% 첨가하여 샌드위치법으로 구상화처리하고 Fe-75%Si을 0.6% 첨가하여 동시에 접종하여 Fig.1과 같은 금형에 주조하였다. 주조된 공시재의 화학조성은 Table 1, 미세조직 구성율은 Table 2와 같았다. 미세조직 시편은

인하 대학교 공대 금속공학과 (Department of Metallurgical engineering, Inha Univ.)

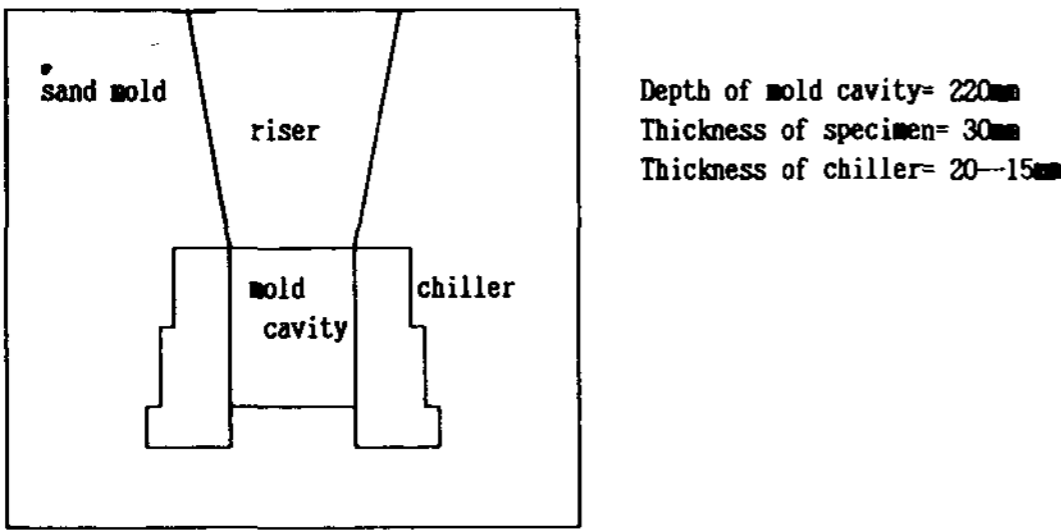


Fig. 1. Section view of metal mold used to cast specimen.

Y字形 공시재의 중앙부에서, 저부로부터 15내지 30mm의 위치로부터 채취하였다.

Y字形 공시재로부터 시편으로 사용할 수 있는 유효부를 채취하여 인장 및 CVN충격시편을 가공하고 ASTM E-399 규정에 따라서 파괴인성 시험을 위한 CT(compact tension)시편을 폭(W) 50mm로 하여 가공하였다.

2.2 열처리

가공된 각 시편은 탈탄을 방지(6)하기 위해, 시편을 흑연계 도형재로 도형하여 노 내에 질소 가스를 취입하면서 전기 머플로에서 900℃에서 1.5시간 가열하여 기지조직을 오스테나이트화 한 후 270, 320 및 370℃의 각 염욕에 켈칭 하고 0.5, 1, 3 및 9시간 오스템퍼링 하였다.

사용한 염은 KNO₃-NaNO₃(Mol% 56:44)의 혼합 용액이었으며 염욕에 켈칭 시, 시료 주위의 국부적인 온도 상승을 막기 위하여 염욕을 교반하면서 항온변태시킨 후 공냉하였다.

2.3 파괴인성 시험

파괴인성 시험은 피로시험기(Saginomiya Co., Servopac, cap., 10 ton)를 사용하여 CT시편의

노치부 침단에 약 2mm의 피로균열을 발생시킨 후 균열개구변위의 측정을 위한 COD 게이지를 부착하고 2mm/min의 크로스 헤드 속도로 인장하중을 가하여 시편을 파괴하였다. 평면변형 파괴인성치는 ASTM E-399 규정에 따라 P-COD(하중-균열개구변위)곡선으로 부터 산출하였다.

2.4 잔류 오스테나이트량의 측정

오스템퍼링한 각 시료의 잔류 오스테나이트량의 측정은 시료를 emery paper #1200까지 연마한 후 X선 회절기(Philips Co., PW1700 system1, CuKα₁ target)로 측정하였으며, 약 1 deg/min의 속도로 X 線束을 시료에 회절시켰다. 회절선의 적분강도 측정 대상면은, 페라이트에 대해서는 (200) 면을, 오스테나이트에 대해서는 (220) 면을 선택하여 직접비교법으로 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기지조직의 베이나이트 변태

본 실험에서 오스템퍼링 처리에 의해서 얻은 각 시료의 조직은 Photo 1과 같았다. 370℃에서 오스템퍼링한 조직이 270℃에서 오스템퍼링한 조직보다 전반적으로 조대하였다. 오스템퍼링 온도가 270℃인 경우 오스템퍼링 시간이 1시간일 때보다는 3시간일 때 더욱 치밀하고 균일한 베이나이트 변태가 이루어지고 있었다. 270℃에서 0.5시간 오스템퍼링한 조직은 베이나이트 변태의 제1단계 반응($\gamma_0 \rightarrow \alpha_B + \gamma_{HC}$)이 완료되지 않은 상태에서 얻어진 것이므로 DTR(Delayed transformation region)(7)이 다소 남아 있다. 370℃의 오스템퍼링 온도에서 유지시간이 9시간으로 길어짐에 따라 베이나이트 래스(lath)의 크기는 비교적 짧고 조밀하여졌는데 이는 고탄소의 잔류 오스테나이트

Table 1. Chemical composition of ductile cast iron.

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo	Mg
Wt. %	3.58	2.60	0.26	0.041	0.014	0.58	0.58	0.18	0.032

Table 2. Phase analysis of matrix for as cast.

Phase	Ferrite(%)	Pearlite(%)	Graphite(%)	No. of graphite nodule (# /mm ²)
Volume %	73.3	15.3	11.4	584

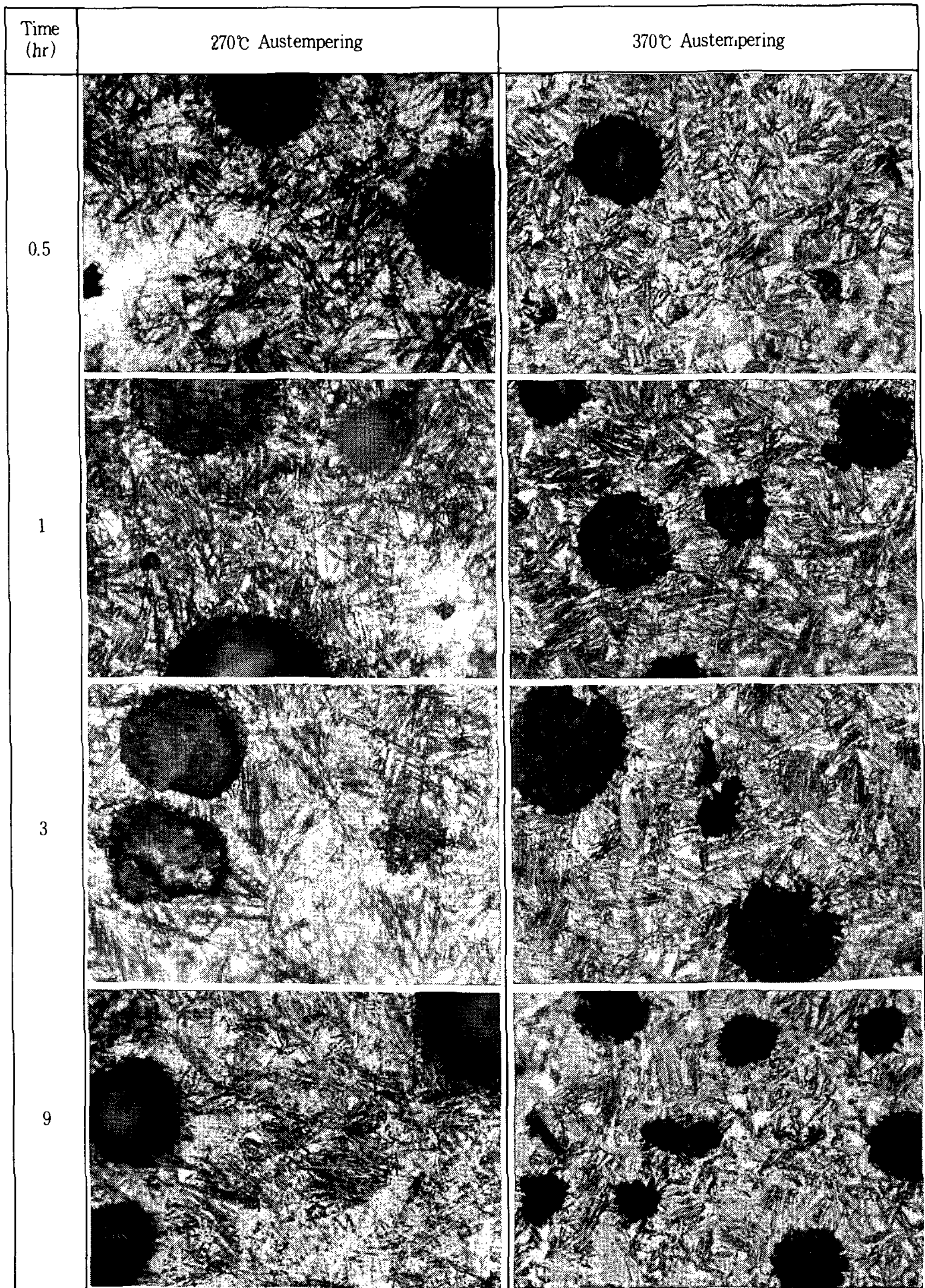


Photo 1. Optical micrographs for various austempering conditions.

트의 일부가 제2단계 반응($\gamma_{HC} \rightarrow \alpha + Fe_3C$)에 의하여 페라이트와 세멘타이트로 분해⁽⁸⁾된 때문이라고 생각된다. 본 연구의 열처리 조건 범위 내에서는, 금형주조한 구상흑연주철을 오스템퍼링하여 얻은 미세조직(기지조직)의 변화가 사형주조를 전제로 한 연구⁽⁹⁻¹²⁾에서 얻은 조직과 상이함을 발견할 수 없었다.

3.2 기계적성질

본 실험에서 사용한 각 시료의 기계적 성질, 잔류 오스테나이트량 및 파괴인성치는 Table 3과 같았다. 항복강도, 인장강도 및 경도는 오스템퍼링 온도가 270℃에서 370℃의 경우보다 크게 나타났다. 이는 낮은 오스템퍼링 온도에서는 침상의 베이나이트가 치밀하여지기 때문이라고 생각된다. 한편 오스템퍼링 시간에 따른 연신율 및 충격값은 370℃에서 처리한 시료가 270℃의 것보다 높았다. 연신율과 충격치의 최대값은 370℃의 경우 1시간, 270℃의 경우는 3시간 오스템퍼링 한 시료에서 각각 얻어졌다. 이는 370℃에서 1시간 미만, 270℃에서 3시간 미만에서는 베이나이트 변태의 제1단계 반응($\gamma_0 \rightarrow \alpha_B + \gamma_{HC}$)이 완료되지 않은 때문이라고 생각되며 한편 370℃의 오스템퍼링 온도의 경우 9시간으로 유지시간이 길어짐에 따라 기계적성질이 감소하는 것은 고탄소 오스테

나이트의 일부가 페라이트와 세멘타이트로 분해됨으로써 잔류 오스테나이트가 감소하였기 때문이라고 생각된다.

본 실험에서 종전의 연구결과에 비해서 기계적 성질이 좋은 원인중의 하나는, 사형주조시 흑연립수가 71~125개/mm²이었으나⁽⁹⁻¹²⁾ 금형주조를 함으로써 흑연립수가 약 580개/mm²로 증가되었기 때문이라고 생각된다.

3.3 파괴인성

Fig.2는 오스템퍼링 온도와 시간에 따른 파괴인성치를 나타내었다. 오스템퍼링 온도 270℃와 320℃에서는 0.5시간에서 3시간으로 유지시간이 길어짐에 따라 파괴인성이 증가하여 최대값을 나타내었으며 9시간에서는 다소 감소하였다. 370℃에서는 1시간일때 파괴인성이 가장 높게 나타났다. 이는 370℃, 1시간 오스템퍼링 했을때 잔류 오스테나이트량이 가장 높았기 때문이라고 생각된다. 한편 9시간 오스템퍼링했을때 파괴인성이 낮은 것은 잔류 오스테나이트가 페라이트와 세멘타이트로 분해되었기 때문이라고 생각된다.

370℃에서 오스템퍼링 한 시료가 270℃에서 처리한 것보다 잔류 오스테나이트량이 증가하였다. 이는 온도가 높을수록 오스테나이트 중으로의 탄소의 확산속도가 높아져서 오스테나이트가 탄소

Table 3. Mechanical properties, retained austenite volume and fracture toughness of austempered ductile iron.

Austempering temperature (℃)	Austempering time (hr)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	EL (%)	Hardness (BHN)	CVN energy (J)	Retained austenite volume(%)	Fracture toughness (MPa √m)
270	0.5	1028	1535	3.6	378	5.0	16.4	59.8
	1	1162	1561	4.4	406	5.1	18.5	63.1
	3	1223	1591	6.5	421	5.2	22.4	65.8
	9	1231	1612	4.9	491	5.0	20.3	62.7
320	0.5	971	1318	12.0	359	6.0	21.9	77.7
	1	1058	1360	12.6	378	7.7	22.8	78.6
	3	1015	1344	9.7	371	7.2	27.7	86.9
	9	988	1328	7.2	348	7.0	23.4	81.9
370	0.5	728	1086	15.3	320	10.4	24.6	85.5
	1	815	1106	17.0	330	11.3	29.7	90.4
	3	798	1071	14.0	308	10.8	28.2	88.9
	9	789	1054	9.1	282	10.4	24.8	86.5

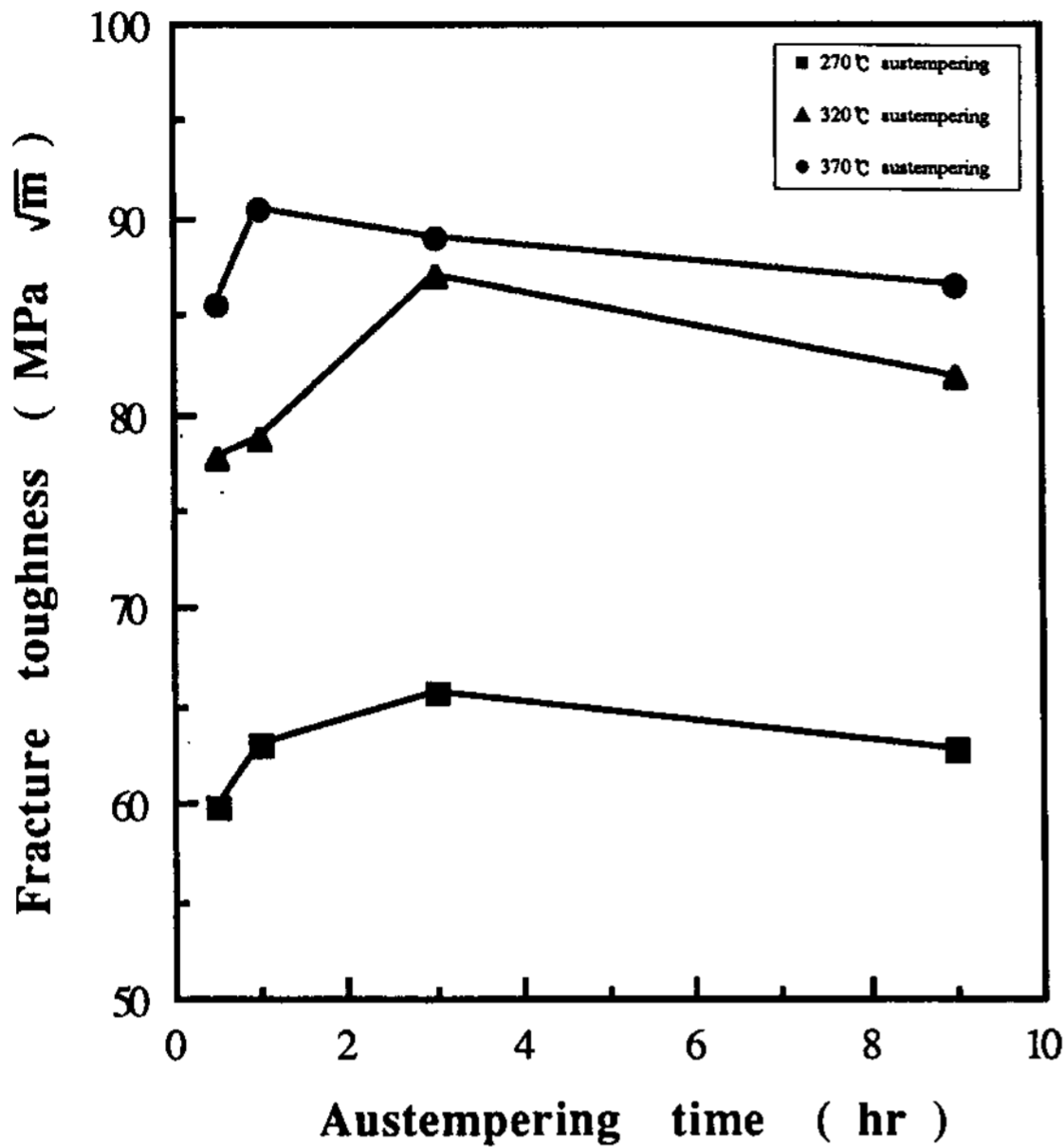


Fig. 2. The relation between austempering time and fracture toughness.

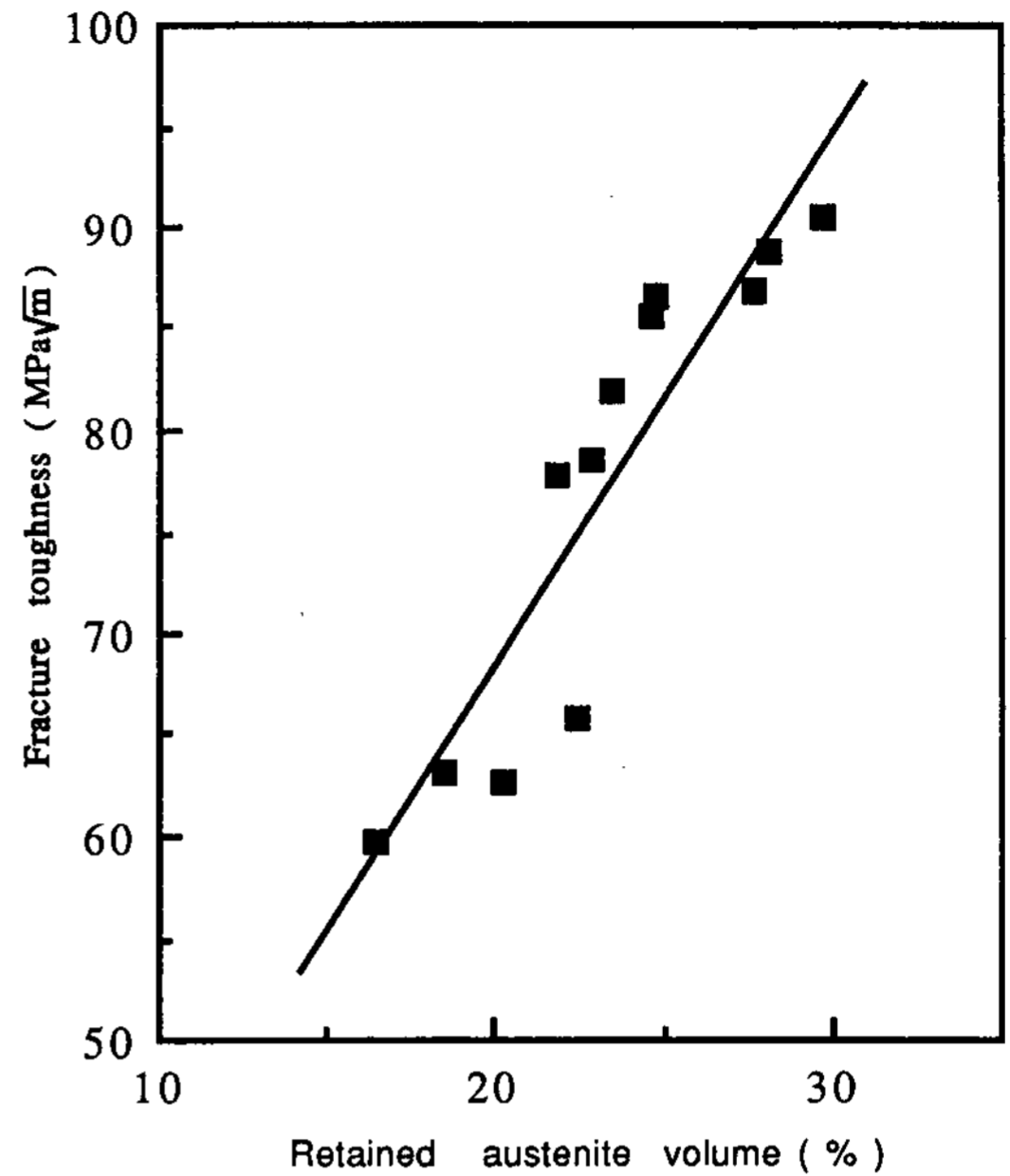


Fig. 3. The relation between retained austenite volume and fracture toughness of ADI.

로 농화(濃化)되어 안정화되기 때문이다.

Fig.3은 잔류 오스테나이트량(γ_R)과 파괴인성치(K_{IC})와의 관계를 나타낸 것이다. 본 시료에서는 잔류 오스테나이트가 약 16%로부터 30%까지 증가함에 따라 파괴인성치와는 비례관계를 보이고 있다. 이와 같이 잔류 오스테나이트가 파괴인성을 향상시키는 것은 변형유기 마르텐사이트를 억제하여 소성역을 증가시키기 때문이라고 생각된다. Fig. 4에는 본 ADI 시료에 대하여 파괴인성치와 CVN 충격흡수 에너지와의 관계를 나타내었다. 재료의 인성은 동적 시험결과인 CVN값과 정적 시험결과인 K_{IC} 값으로 평가할 수 있으며 다 같이 파괴인성이라는 공통성을 가지므로 CVN값이 증가함에 따라 K_{IC} 값도 증가하게 된다. 본 연구에서 항복강도, 충격치 및 파괴인성치의 관계를 조사한 결과, $(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 1.005(CVN/\sigma_{ys} - 0.001)$ 의 관계식을 얻을 수 있었다. Fig. 5는 오스테퍼링 온도 및 시간 변화에 따른 기계적 성질과 파괴인성치를 기준으로 한 적정 열처리 범위를 나타낸 것이다.

Photo 2는 저온 오스테퍼링(270°C)한 시료와 고온 오스테퍼링(370°C)한 시료에 대한 파면사진으로서, 270°C에서 오스테퍼링한 시료의 경우 오

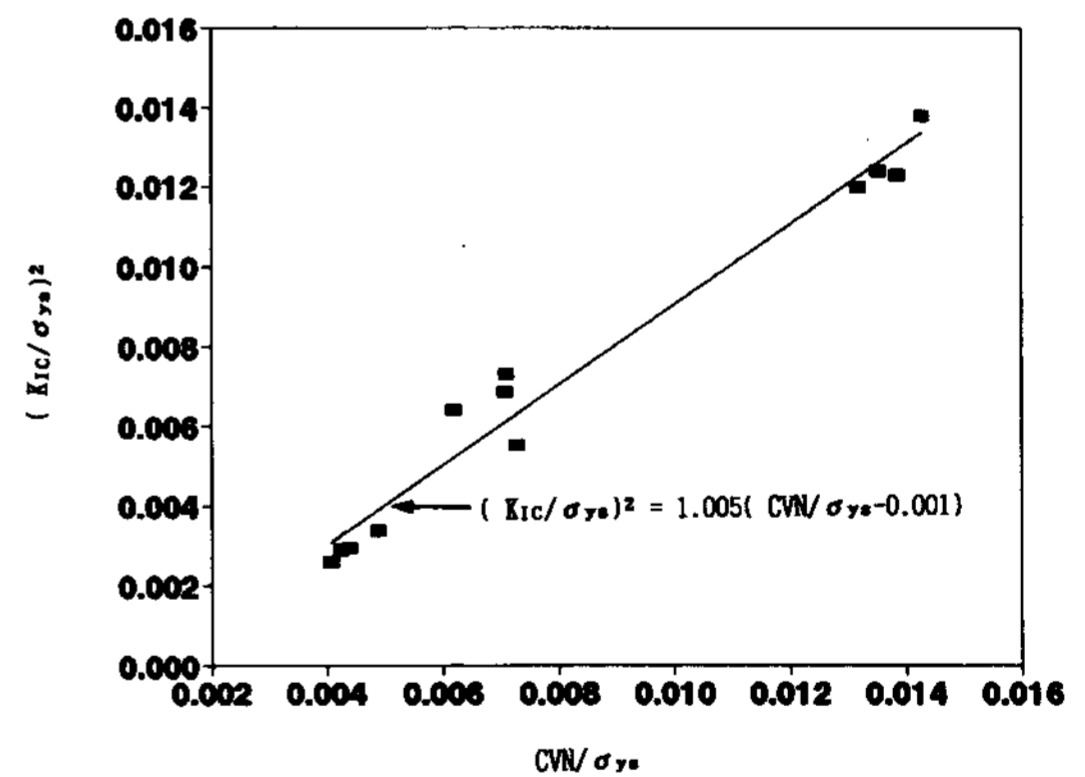


Fig. 4. The relation between CVN energy and fracture toughness of ADI.

스테퍼링 시간이 30분으로부터 3시간으로 증가함에 따라 벽개파면에서 섬유상과 벽개파면이 혼재한 의벽개파면을 나타냈으나 오스테퍼링시간이 9시간으로 더욱 증가함에 따라 벽개파면의 양상을 나타냈다. 370°C에서 오스테퍼링한 시료의 경우 오스테퍼링 시간이 30분으로부터 1시간으로 증가함에 따라 의벽개 파면으로부터 섬유상과 미세공동(micro-void)이 혼재한 연성파면이 나타났으나

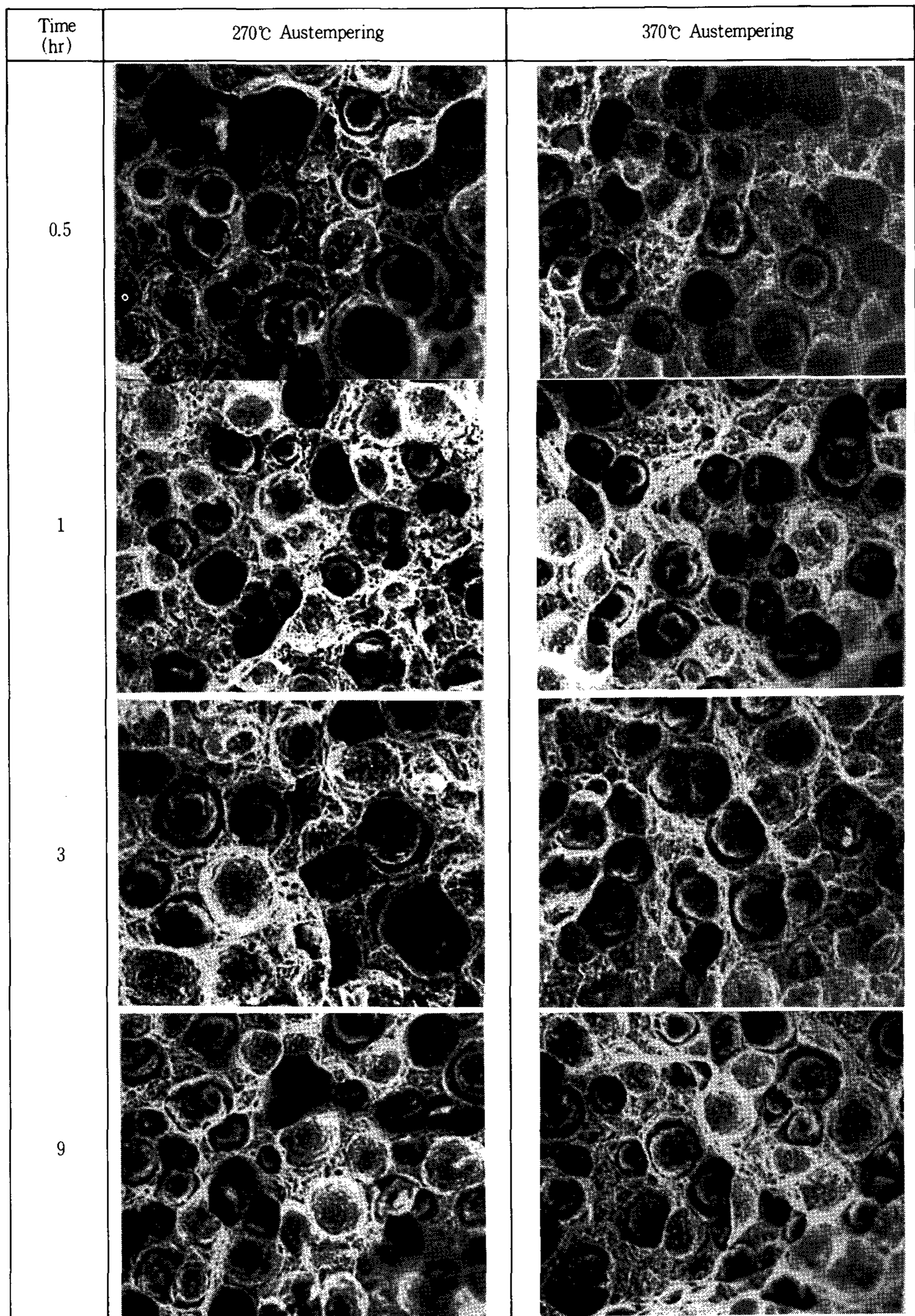


Photo 2. SEM(scanning electron micrographs) of fractured CT specimen of austempered ductile iron.

오스테퍼링 시간이 3시간 및 9시간으로 증가함에 따라 점차 의벽개파면의 양상을 나타냈다. 이는 저온 오스테퍼링의 경우 오스테퍼링 시간이 30분에서는 국부적으로 미변태 오스테나이트가 존재한 것에 기인되며 오스테퍼링 시간이 9시간에서는 베이나이트 변태의 제2단계 반응이 진행되어 잔류 오스테나이트량이 감소한 것에 기인된다고

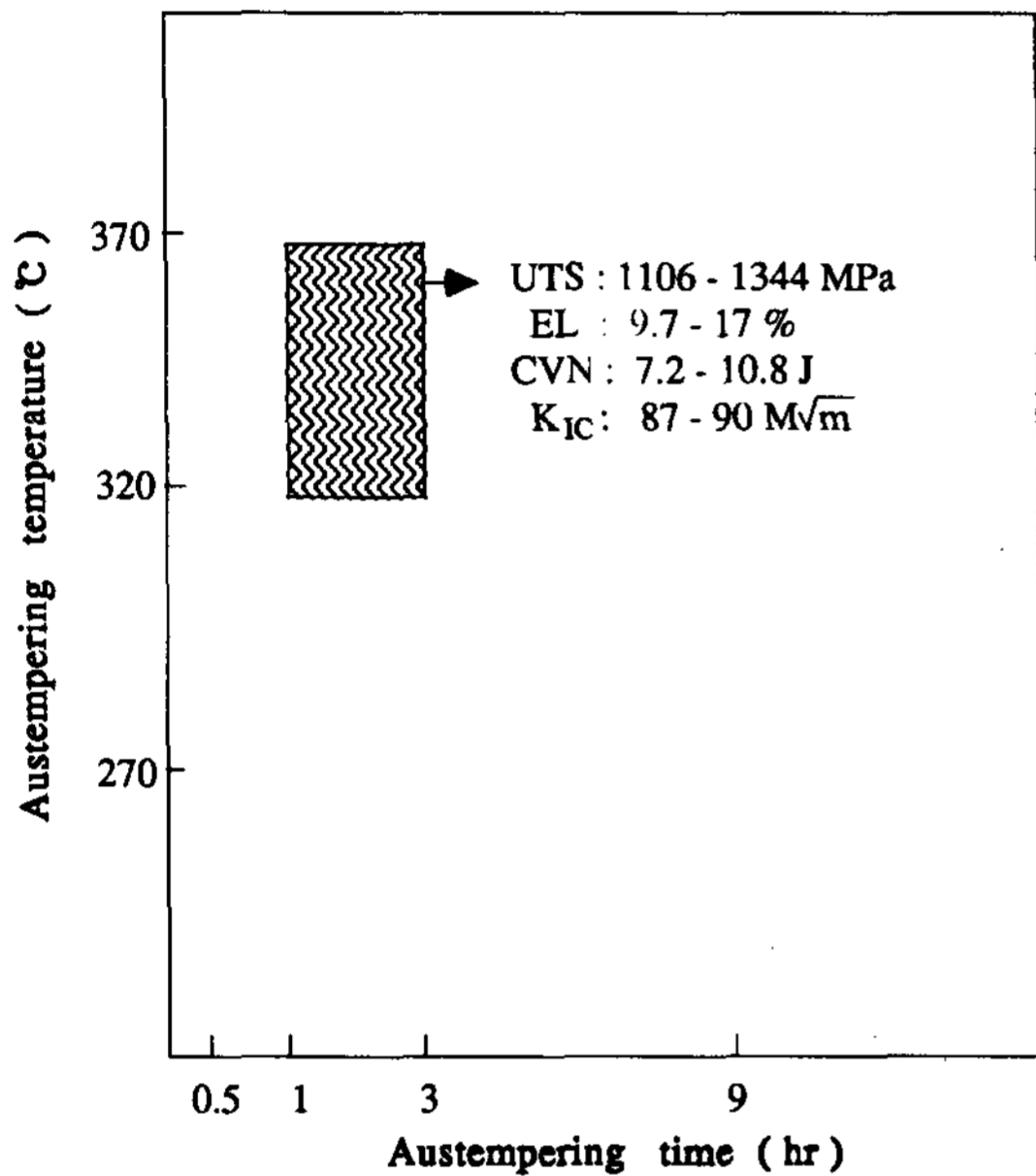


Fig. 5. Processing window for producing optimum ADI mechanical properties and fracture toughness.

생각된다.

4. 결론

금형주조한 0.18 Mo-0.58 Ni-0.58 Cu 구상흑연 주철을, 270, 320 및 370°C의 온도와 0.5, 1, 3 및 9시간의 유지시간으로 오스테퍼링 열처리하여 얻은 시편에 대하여 기계적성질과 파괴특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다,

1. 오스테퍼링 온도가 270°C일 경우 침상의 베이나이트 조직이 관찰되었으며 오스테퍼링 온도 370°C에서는 깃털상의 베이나이트조직이 관찰되었다. 특히 270°C × 0.5시간 오스테퍼링의 경우 국부적인 미변태 오스테나이트

도 나타났다.

2. 인성의 측면에서 270°C 오스테퍼링의 경우 3시간, 370°C 오스테퍼링의 경우 1시간이 적절하였다.
3. 잔류 오스테나이트량이 증가함에 따라 파괴인성치는 증가하였으며 본 연구에서 나타난 최대치의 잔류 오스테나이트량은 29.7%이었다.
4. 열처리 조건에 따라서 17%의 높은 연신율, 1,600MPa의 높은 인장강도 및 90MPa√m의 높은 파괴인성치를 얻을 수 있었으며 이는 금형주조로 높은 흑연립수와 주물의 건전성이 확보되었기 때문에 가능했던 것으로 추정된다.
5. 본 연구에서 얻은 항복강도, 충격치와 파괴인성치의 관계는 Rolfe-Novac-Barsom의 제안식, $(K_{IC} / \sigma_{ys})^2 = CVN / \sigma_{ys}$ 과 거의 일치하였다.

참 고 문 헌

1. M.Johansson:AFS Trans., 85(1977), 117-122
2. D.J.Moore, T.N.Rouns, K.B.Rundman: AFS Trans., 94(1986), 255-264
3. D.J.Moore, T.N.Rouns, K.B.Rundman: AFS Trans., 95(1987), 765
4. Bela V.Kovacs, Sr.:Modern Casting. 80 (March 1990), 38-41
5. 河部 昭雄, 小林 俊郎:鑄物, 59(1987), 102
6. T.N.Rouns, K.B.Rundman, D.M.Moore: AFS Trans., 92(1984) 815
7. R.C.Voigt:Cast Metals, vol 2, 2(1989), 71-93
8. R.C.Voigt, C.R.Lopper, Jr:MRS. symposium proceeding., vol.34 (1985) 377.
9. 康仁燦, 白承浩:대한금속학회지 26(10) 1988, 951
10. 康仁燦, 白承浩:대한금속학회지 27(3) 1989, 205
11. 金元鎔, 李榮商, 金光培, 康仁燦:주조 10(5) 1990, 51
12. 朴賢九, 白承浩, 李元植, 康仁燦:주조 11(2) 1991, 135-141