

.....  
**論 文**  
 .....

## Mo-Ni-Cu계 오스템퍼 구상흑연주철의 고온특성

李榮商\*, 康仁煥\*

### Elevated Temperature Tensile Properties of Austempered Ductile Iron

Young-Sang Yi\*, In-Chan Kang\*

#### Abstract

The relationships between the microstructure changes, retained austenite volume and elevated temperature tensile properties of Mo-Ni-Cu ADI corresponding to various austempering temperatures and time were investigated. After the 250°C tensile test for the test piece austempered at 270°C the acicular bainite structure was observed blunted under room temperature microscope. In the case of 370°C austempering, the feathery bainite lath spacing was observed broadened. But after the 450°C tensile test, bainitic features could not be observed. As the testing temperature increased, retained austenite volume tested at room temperature decreased. Especially, after the 450°C tensile test retained austenite volume approached nearly to zero.

A little higher tensile properties appeared at 250°C testing than those at room temperature.

#### 1. 서론

ADI(Austempered Ductile Iron)에 관한 연구는 1980년대 부터 본격적으로 유럽이나 미국, 일본 등지에서 활발히 진행<sup>1,4)</sup>되었으며 아직까지도 많은 연구가 진행되고 있다. 이와같이 ADI에 대한 많은 연구가 이루어지는 이유는 기존의 자동차 부품 및 구조용으로 쓰이는 단조강이나 주강에 비하여 제품의 경량화를 꾀할 수 있을 뿐만 아니라 제조공정 등의 유리한 측면 때문이다. 그러나 기존의 ADI에 관한 연구는 상온에서의 특성을, ADI의 특성에 영향을 주는 인자에 대하여 연구하여 왔을 뿐 증가된 온도영역에서의 연구는 상당히 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 니켈과, 경도 및 내식성을 향상<sup>5,6)</sup>시키는 것으로 알려진 구리를 첨가하여 시편을 제작한 후 온도증가에 따른 베이나이트조직의 변화 및 잔류 오스테나이트량의 변화를 광학현미경 및 X-ray회절기를 이용하여 관찰하였으며 이러한 조직변화와 기계적특성과의 연관성을 고찰하였다.

#### 2. 실험방법

##### 2.1 시편제작

본 실험에서 사용한 시편은 100kg 용량의 중주파 유도로에서 선철과 연강고철을 장입하여 용해한 후 Fe-60%Mo, 전해 니켈등을 사용하여 성분을 조정하였다. 구상화 처리는 1500°C에서 Fe-Si-5.5%Mg을 1.2%첨가하여 샌드위치법으로 하였으며 Fe-75%Si을 0.6%첨가하여 동시접종 후 Y-Block형의 금형에 주조하였다.

##### 2.2 열처리 및 고온인장 시험

시편의 열처리는 탈탄을 방지하기 위하여 전기로내에서 질소가스 분위기를 이용하여 900°C에서 1.5시간 유지하여 오스테나이트화 한 후 270, 320, 370°C의 각 염욕(몰비 KNO<sub>3</sub>:NaNO<sub>3</sub>=56:44의 혼합염)에서 퀘칭 한 후 0.5, 1, 3, 9시간 각각 유지 한 후 공냉하였다. Fig.1은 본연구에서 이용한 열처리 곡선을 나타낸것이다.

\* 인하 대학교 공대 금속공학과(Dept of Metallurgical Eng., Inha Univ.)

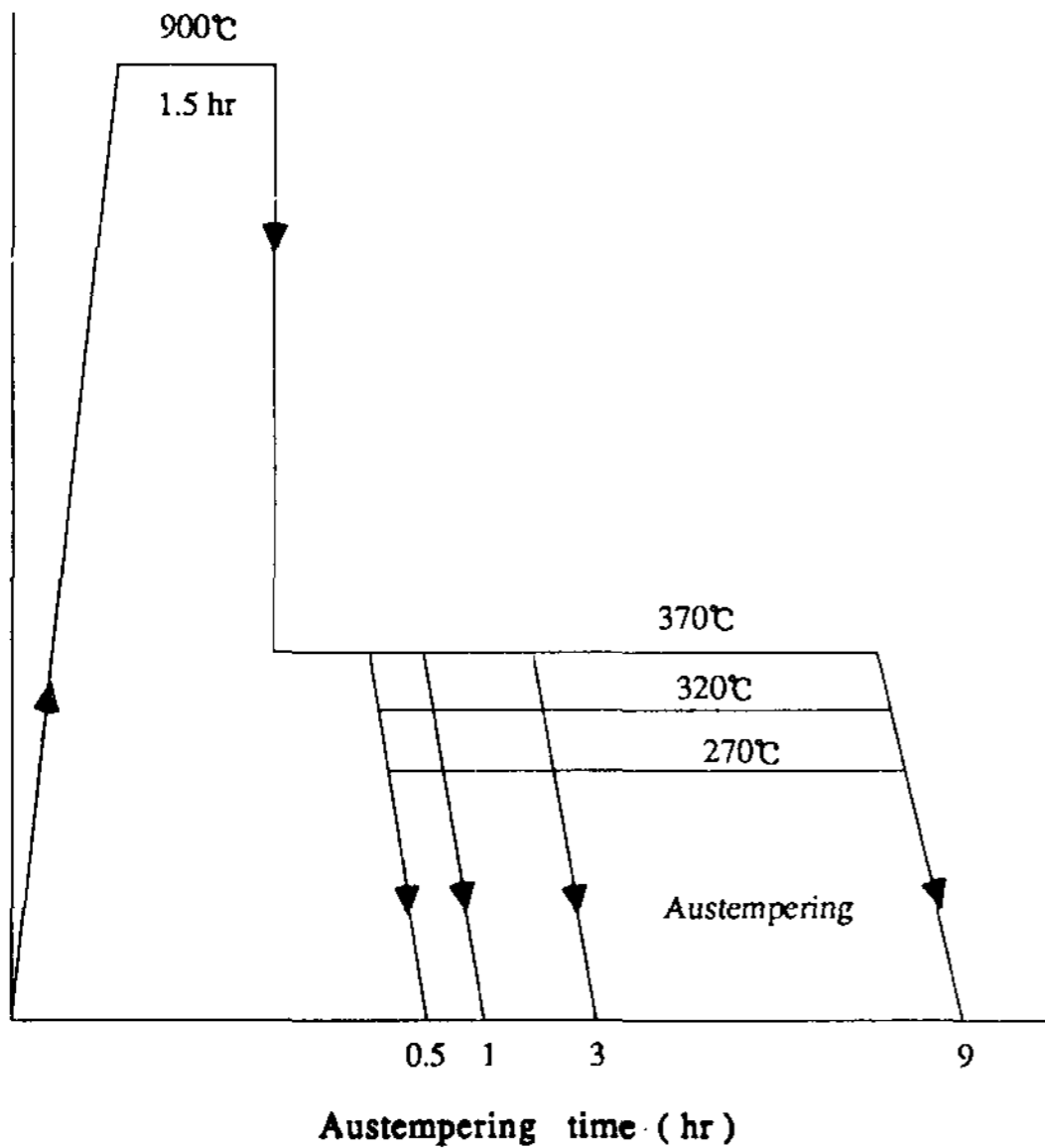


Fig.1. Heat treatment cycle for austempering of ductile cast iron.

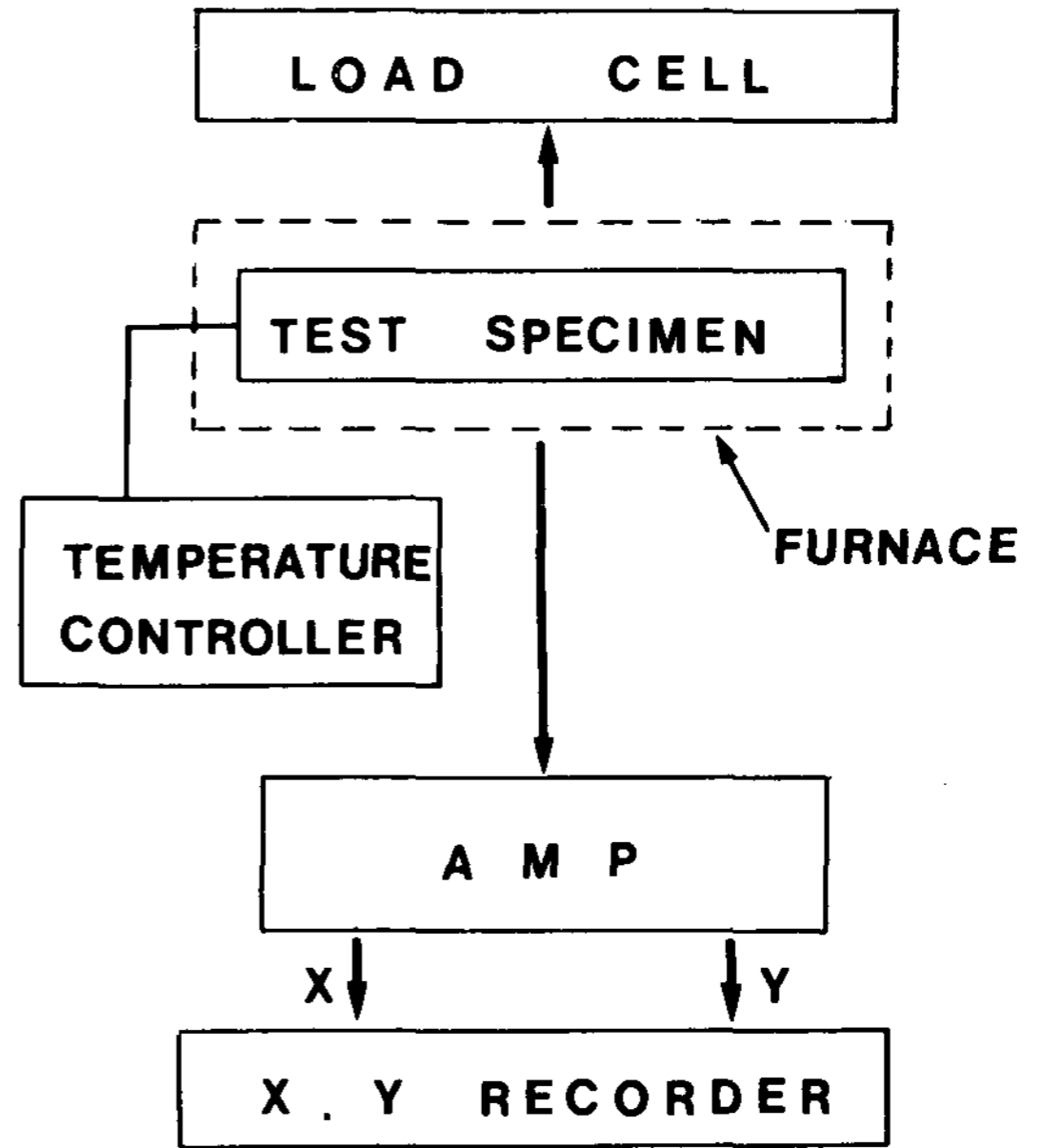


Fig.2. Block diagram of testing apparatus

고온인장 시험은 ASTM E-21규정을 따랐으며 시험기는 원통형의 가열로가 부착된 10톤 용량의 자동화 시험기(Instron Co. model 1127)를 이용하였으며 시험온도는 250, 350, 450°C에서 각각 시험하였다. 인장시험 개시전까지는 온도상승에 따른 압축응력이 시험편에 걸리지 않도록 조정하였으며 각각의 온도에서 10분간 유지 한 후 cross head 속도를 2mm/min로하여 시험하였다. Fig. 2는 본 시험에서 사용한 실험장치의 Block diagram을 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직 변화

미세조직의 관찰을 위한 시편의 채취는, 소성 변형에 의한 조직의 변화를 일정 수준으로 유지할 수 있다고 생각되는, 시편의 물림부 중에서 평행부에 가장 가까운 부분으로부터 채취하였다. Photo 1은 본 연구에서 관찰한 현미경조직으로서 270°C와 370°C의 오스템퍼링 조건에서 각각 1시간 유지하였을 때의 조직을 나타낸 것이다. 상온 조직을 관찰하면 270°C에서 오스템퍼링한 시료의 경우 미세한 침상의 하부 베이나이트 조직을 얻을 수 있었으며 370°C에서 오스템퍼링 한 시료의 경

우 조대하고 균일한 깃털상의 상부 베이나이트 조직을 얻을 수 있었다. 이는 저온에서의 오스템퍼링의 경우 베이나이트의 핵생성속도가 빠르고 성장속도가 느리기 때문이며 고온에서는 이와 반대로 베이나이트의 성장속도가 빠르기 때문이다.<sup>7,8</sup> 270°C에서 오스템퍼링한 시료를 250°C에서 시험한 경우 상온에 비하여 침상의 베이나이트 래스 사이의 간격이 넓어지며 370°C의 오스템퍼링 조건에서는 베이나이트 래스의 간격이 넓어지고 일부 래스의 길이가 짧아진 것도 관찰할 수 있었다. 270°C 오스템퍼링, 시험온도 350°C인 경우에는 더욱 이와 같은 현상이 심화되어 특징적인 침상의 베이나이트 조직을 관찰할 수 없었다. 370°C의 오스템퍼링의 경우 시험온도 250°C의 경우보다 래스 간격이 더욱 넓어진 것을 볼 수 있었다. 이는 250°C의 시험의 경우 하부 베이나이트 온도영역이므로, 270°C의 오스템퍼링한 시료의 경우 베이나이트 변태가 일어났으며, 370°C의 오스템퍼링의 경우는 베이나이트 변태의 제1단계가 거의 완료된 상태에서 온도상승이 래스의 분해를 조장한 결과라 생각된다. 시험온도가 450°C의 경우에는 270°C 및 370°C 오스템퍼링 모두, 베이나이트 조직의 분해가 관찰되었다.



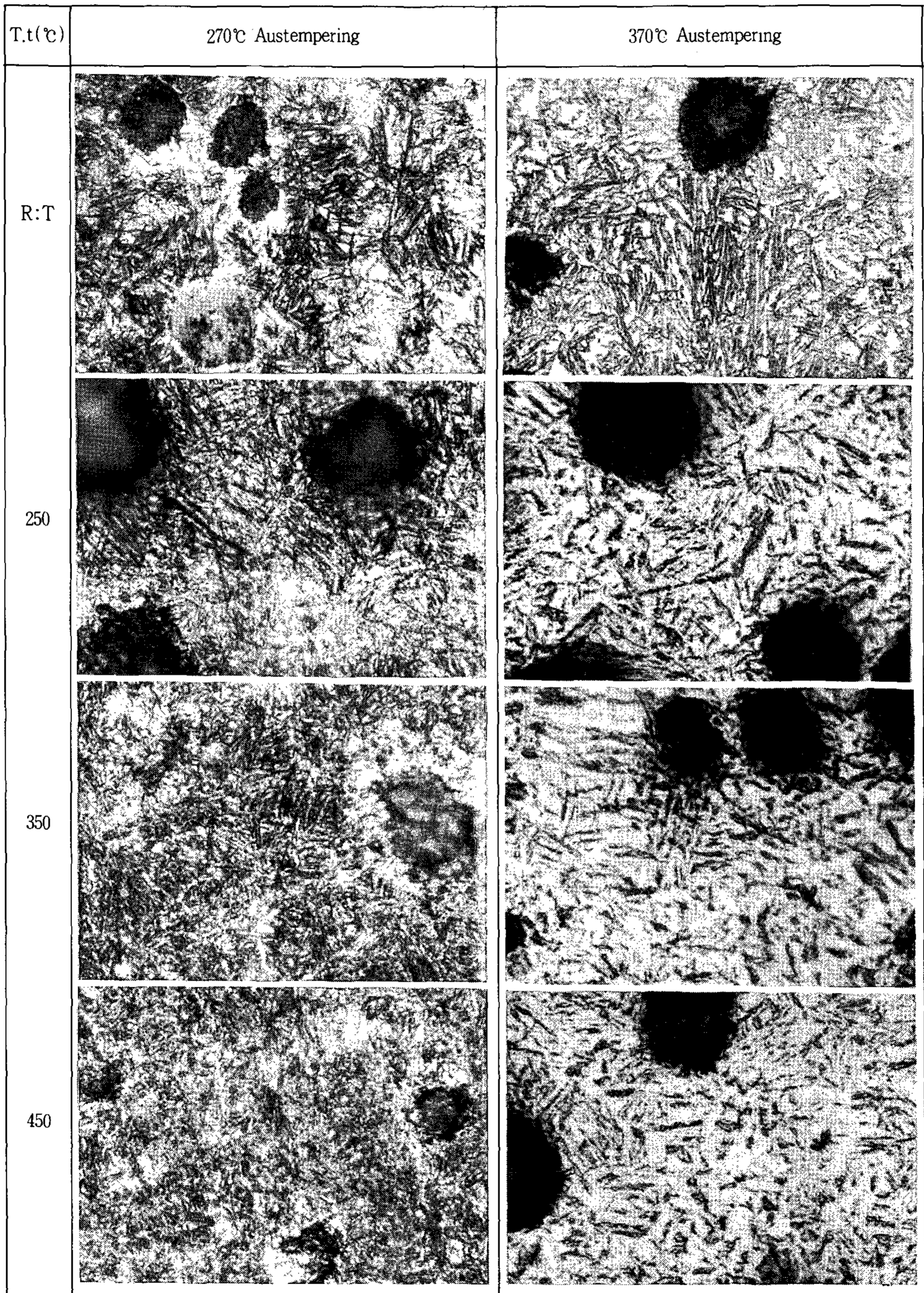


Photo 1. Optical microstructures after elevated temperature tensile testing for 1hr austempering.

3.2 잔류 오스테나이트량 및 열팽창량

Table 1은 고온인장 시험한 후 공냉한 각 시편의 잔류 오스테나이트량( $V_\gamma$ ) 및 고용탄소량( $C_\gamma$ )의 변화를 나타낸 것이다. 잔류 오스테나이트량의 측정에는 X-ray 회절기를 이용하였으며 측정방법중 직접비교법<sup>9)</sup>을 이용하였다. Fig.3은 시험온도에 따른 잔류 오스테나이트량 및 고용탄소량의 변화를 나타낸 것이다. 시험온도가 증가함에 따라 잔류 오스테나이트량은 270°C 및 370°C의 오스테이퍼링의 경우 모두 감소하였다. 270°C 오스테이퍼링 한 시료의 경우 상온에 비하여 시험온도의 상승과 더불어 상온에 비하여 11-29%의 감소폭을 보이며 370°C 오스테이퍼링의 경우 10-21%의 감소폭을 보

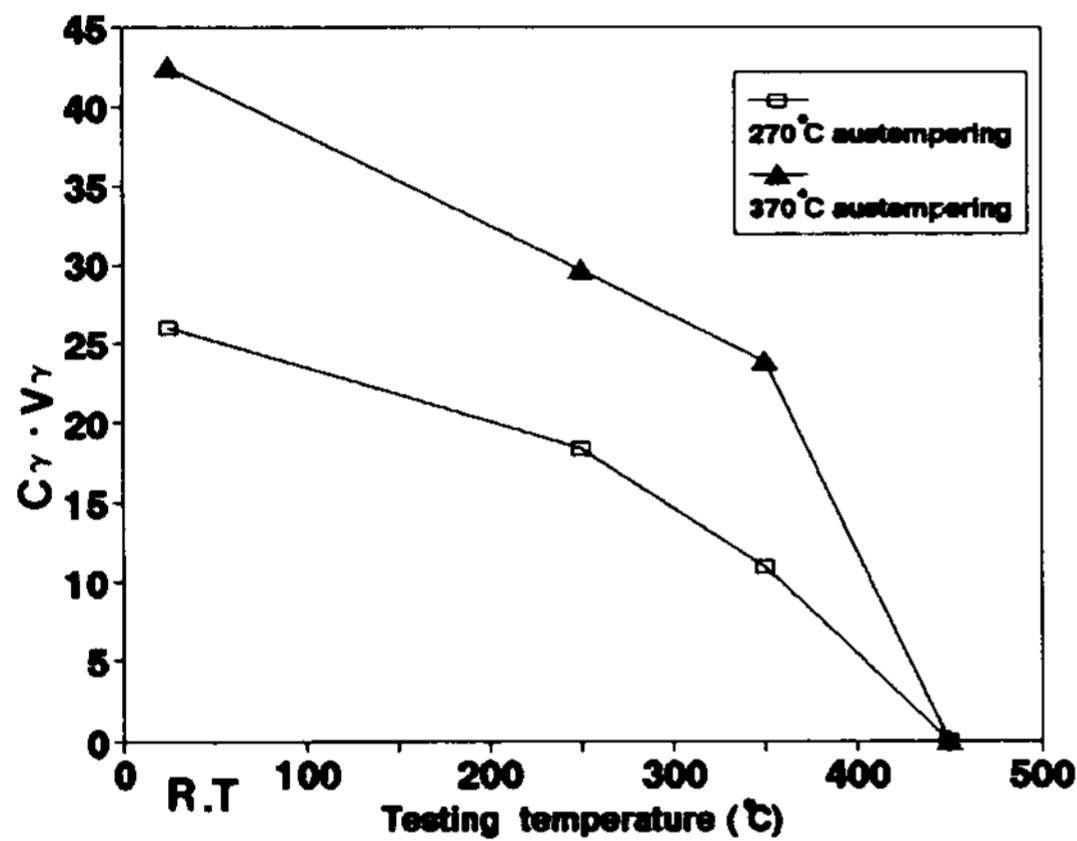


Fig.3. The relationship between the testing temperature and  $C_\gamma \cdot V_\gamma$  for 1hr austempering.

였다. 450°C 경우에는 잔류 오스테나이트가 검출되지 않았다. 이와 같이 저온 오스테이퍼링에서의 감소폭이 큰 것은 잔류 오스테나이트의 안정성에 기인된다고 생각되며 시험온도가 올라갈수록 잔류 오스테나이트가 감소 하는 것은 시험온도의 상승 및 변형에 기인하여 잔류 오스테나이트가 페라이트와 탄화물로 분해되는 베이나이트 변태의 제2단계의 반응이 진행된 때문이라 생각된다. Fig.4는 온도 상승에 따른 열팽창 곡선을 나타낸 것이다. H.Nieswaag등의 베이나이트 변태에 따른 ADI의 체적변화에 대한 연구<sup>10)</sup>에 의하면, 제1단

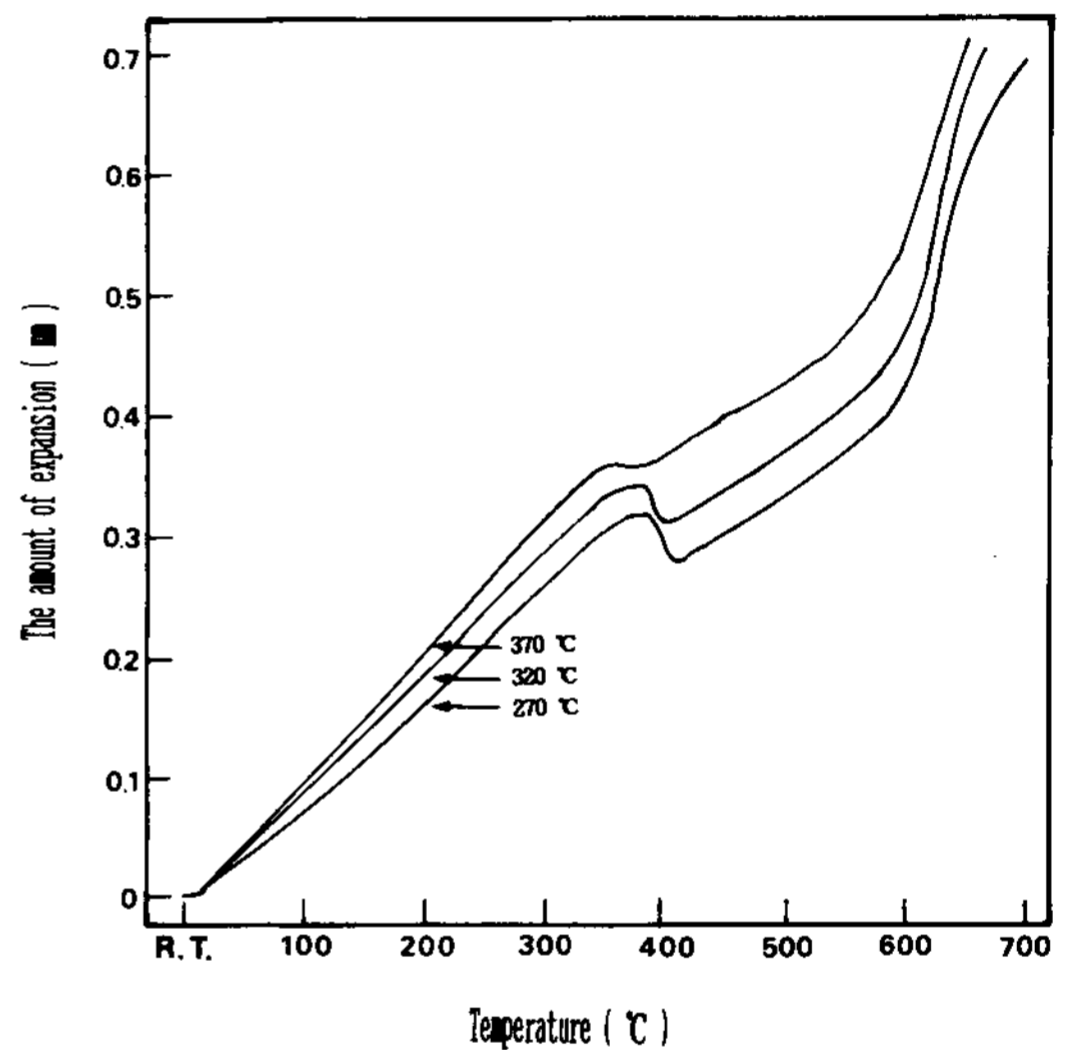


Fig.4. The relationship between the amount of expansion and temperature.

Table 1. Retained austenite volume and carbon content in retained austenite for 1hr austempering.

Austempering conditions (°C/hr)	Testing temperature (°C)	Retained austenite volume(%)	Lattice parameter of $R_\gamma$ ( $\text{Å}^0$ )	Carbon content in retained austenite(%)
270/1	R. T	18.5	3.6170	1.41
	250	16.4	3.6043	1.12
	350	13.1	3.5913	0.83
	450	*	*	*
370/1	R. T	29.7	3.6178	1.43
	250	26.8	3.6040	1.11
	350	23.4	3.5997	1.02
	450	*	*	*

\* R.T:Room temperature.,  $R_\gamma$ :Retained austenite.



계 반응에서는 체적의 변화,  $\Delta V$ 가  $\Delta V > 0$ 이지만, 제2단계 반응에서는 고탄소 오스테나이트의 탄소 농도 감소에 따른 격자상수의 감소에 의하여  $\Delta V < 0$ 가 된다고 하였다. Fig.4로부터 각각의 오스탬퍼링 온도에 대하여 390°C 내지 410°C의 온도범위에서 베이나이트 변태의 제2단계 반응이 일어남을 알 수 있었으며<sup>11)</sup> 또한 오스탬퍼링 온도가 370°C인 경우가 270°C 및 320°C인 경우보다 변태가 느린것을 알 수 있었다.

3.3 기계적 성질

본 연구에서 사용한 각 시료의 기계적성질은 Table 2와 같이 나타났다.

오스탬퍼링 온도가 270°C에서 370°C로 증가함에 따라 인장강도 및 항복강도는 감소하였으나 연신율은 증가하였다. 이는 오스탬퍼링 온도가 증가함에 따라 기지조직이 미세한 침상에서 조대한 것 탈상으로 변화한 것에 기인된다. Fig.5는 각 오스탬퍼링 온도 조건에서 1시간 항온유지하였을 때의 시험온도에 따른 항복강도의 변화를 나타낸 것이다. 오스탬퍼링 온도가 270°C의 경우, 시험온도 250°C에서는 증가하다가 시험온도가 350°C 및 450°C로 더욱 증가함에 따라 큰 폭으로 감소하였다. 이는 저온 오스탬퍼링의 경우 시험온도 250°C

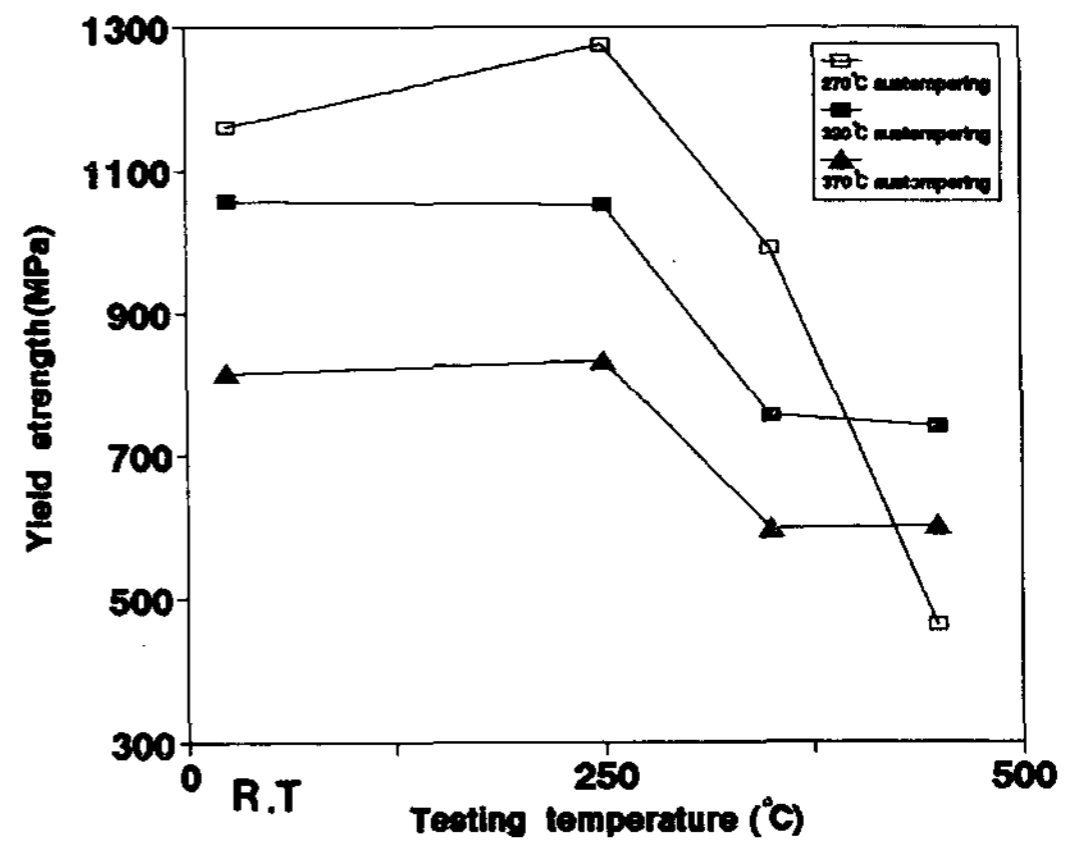


Fig.5. The relationship between the testing temperature and yield strength.

에서는 불완전한 베이나이트 변태의 제1단계 반응이 진행된 것에 기인한다고 생각된다. 그러나 시험온도가 350°C 이상으로 더 높아짐에 따라 항복강도가 급격히 감소한 이유는 침상의 베이나이트 조직이 분해되어 나타난 결과라 생각된다. 오스탬퍼링 온도가 370°C의 경우 시험온도 250°C에서는 항복강도가 미소하게 증가하다가 350°C 이상에서는 급격하게 감소하였다. 이는 시험온도

Table 2. Mechanical properties tested at elevated temperatures.

A.T	T.t	M.P	250°C testing			350°C testing			450°C testing		
			Y.S (MPa)	UTS (MPa)	EL. (%)	Y.S (MPa)	UTS (MPa)	EL. (%)	Y.S (MPa)	UTS (MPa)	EL. (%)
270	0.5		1162	1448	14.4	949	1080	11.2	624	651	12.4
	1		1275	1478	13.2	993	1123	11.2	464	568	10.8
	3		1335	1526	14.4	971	1093	9.6	780	811	6.4
	9		1205	1318	12.4	954	1045	8.8	815	849	6.4
320	0.5		1092	1357	22.4	759	867	10.0	755	815	7.6
	1		1053	1279	16.8	754	876	10.4	741	785	7.2
	3		1040	1167	12.8	712	845	12.0	724	758	6.4
	9		1128	1287	14.0	815	923	12.0	650	702	10.0
370	0.5		850	1179	27.6	612	750	14.8	633	685	11.6
	1		832	1101	25.6	598	741	18.8	602	685	8.8
	3		871	1166	26.8	615	733	14.0	624	672	10.0
	9		859	1119	23.6	651	702	10.0	615	681	11.6

\* Y.S: Yield strength, UTS:Ultimate tensile strength, EL:Elongation A.T.:Austempering temperature, A.t.:Austempering time, M.P.:Mechanical property, T.t:Testing temperature

250℃에서는 깃털상의 베이나이트 래스의 조대화 및 깃털상의 베이나이트 래스가 각형으로 분해되었기 때문이라고 생각된다. 또한 본 연구에서 나타난 베이나이트 래스의 분해현상은 준안정한 잔류 오스테나이트를 포함한 지역인, 흑연립 사이의 중간지역에서부터 일어나고 있음을 알 수 있었다.

Fig.6은 각 오스템퍼링 온도조건에서 1시간 항온유지 하였을 때 시험온도에 따른 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 오스템퍼링 온도가 270℃의 경우 시험온도 250℃에서는 연신율이 급격히 증가하다가 시험온도가 350℃ 및 450℃로 더욱 증가함에 따라 서서히 감소하였다. 이는 250℃ 시험온도의 경우에 연신율이 증가한 것은 침상의 베이나이트 형상이 무디어지고, 베이나이트 변태의 제1단계 반응이 더 진행된 것에 기인된 것으로 생각되며, 350℃ 및 450℃의 시험온도에서 약간 감소된 것은 준안정한 잔류 오스테나이트가 분해되어 페라이트 및 탄화물이 석출하고 침상의 베이나이트가 완전히 분해된 데에 기인한다고 생각된다.

오스템퍼링 온도가 370℃의 경우에서도 마찬가지로 시험온도 250℃에서는 연신율의 증가현상을 나타내었는데 이는 깃털상의 베이나이트 래스가 조대화여진 결과에 기인되며 시험온도가 350℃ 및 450℃로 증가함에 따라 큰폭으로 감소한 것은 깃털상의 베이나이트 래스가 짧은 각형의 베이나이트로 분해된 데에 기인한다고 생각된다.

Fig.7은 시험온도 변화에 따른 항복비의 변화를 나타낸것인데 전반적으로 시험온도의 상승과 더불어 증가하였다. 이는 시험온도의 상승에 따

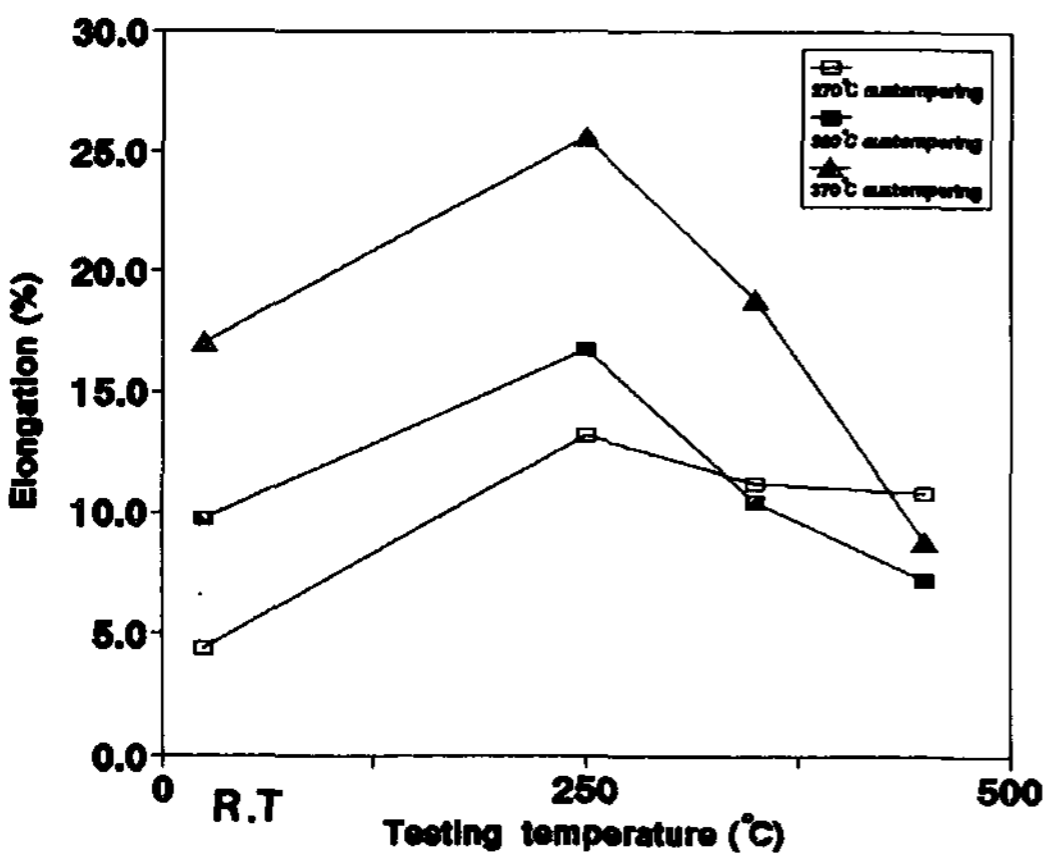


Fig.6. The relationship between the testing temperature and elongation.

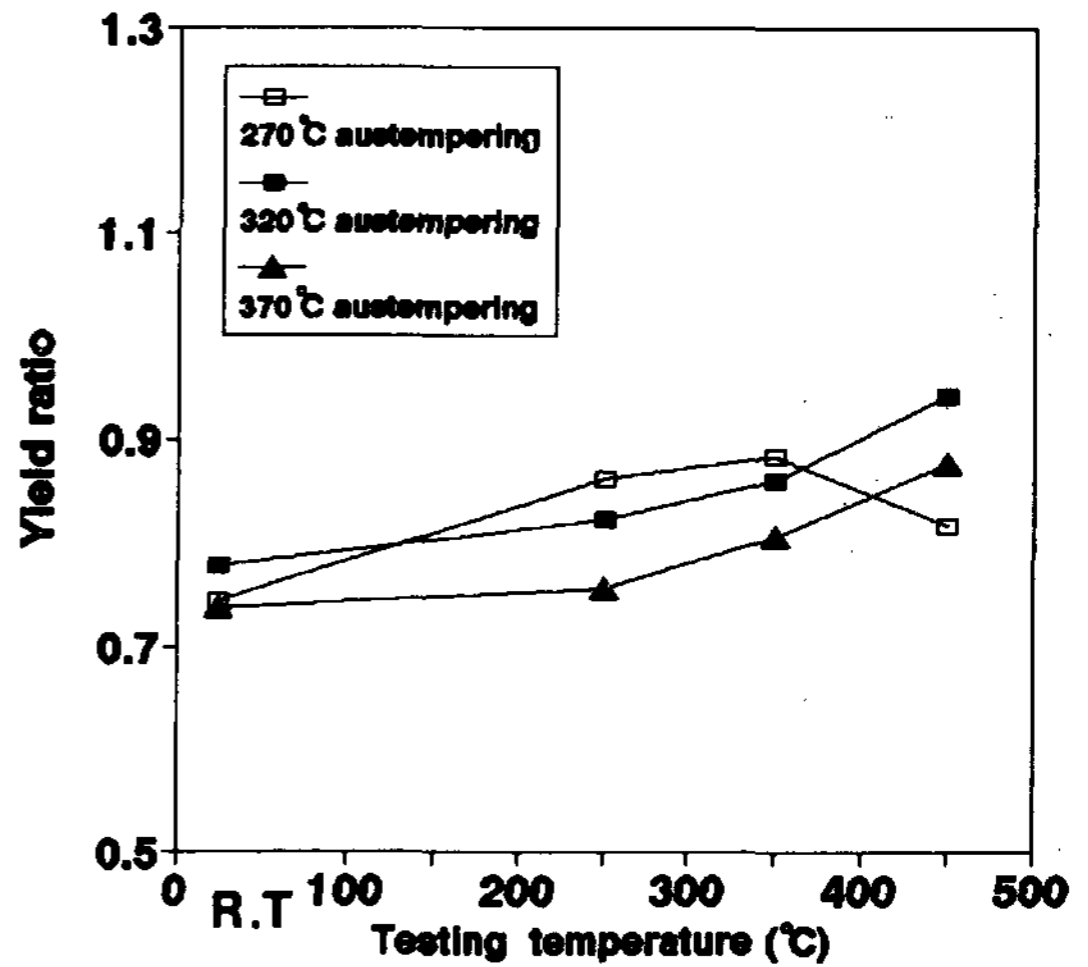


Fig.7. The relationship between the testing temperature and yield ratio.

른, 인성의 기반이 되는 잔류 오스테나이트량의 감소와 부합되는 결과라 생각된다.

고온인장시험과 열팽창곡선 시험결과를 아울러 생각할 때, 안전한 ADI의 사용온도 범위는 250℃ 이하이며 400℃ 이상에서는 급격한 조직의 열화가 일어난다.

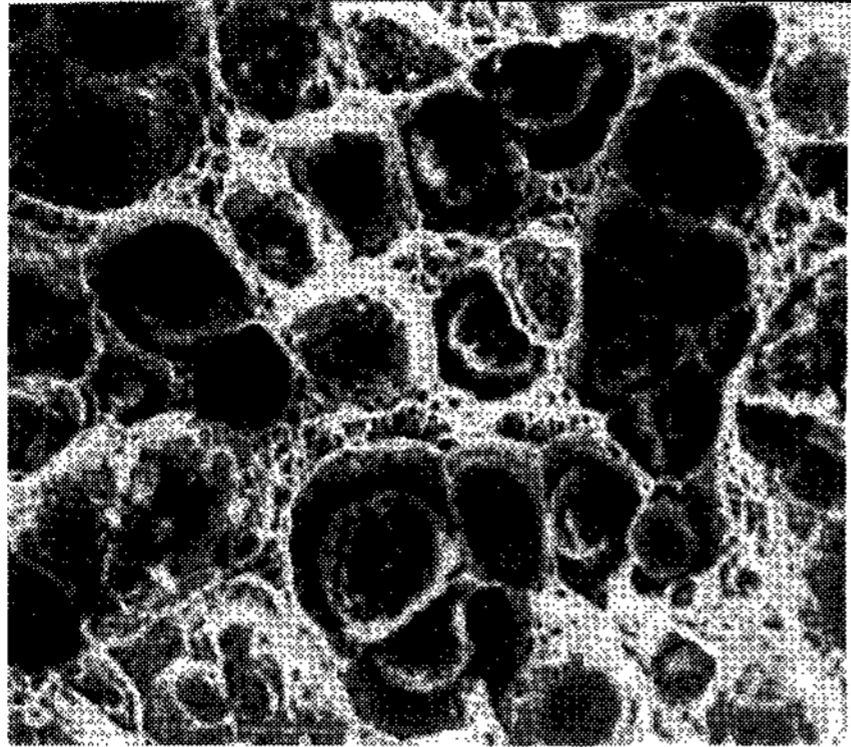
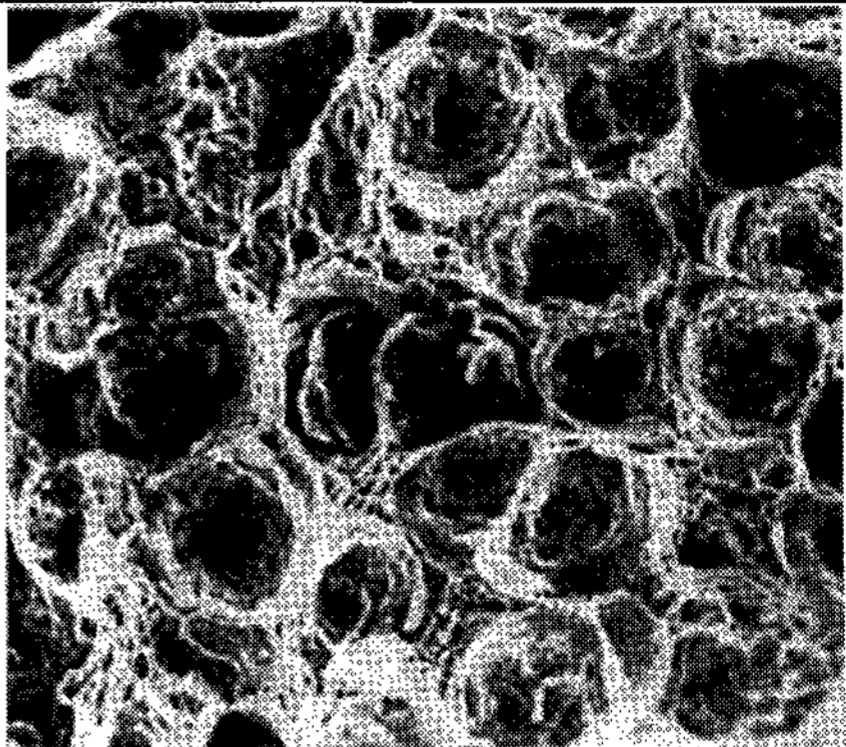
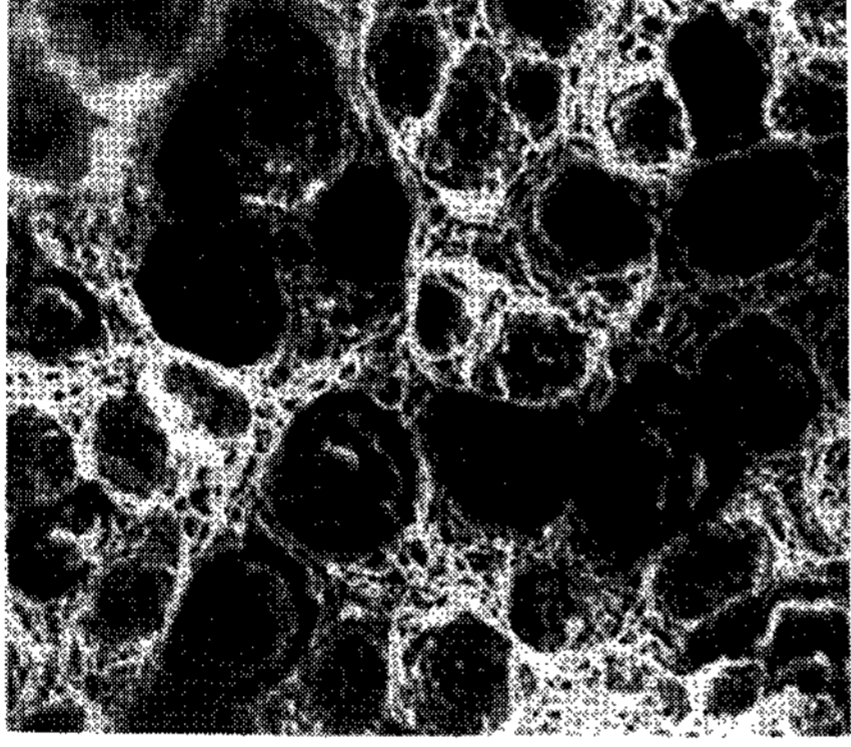
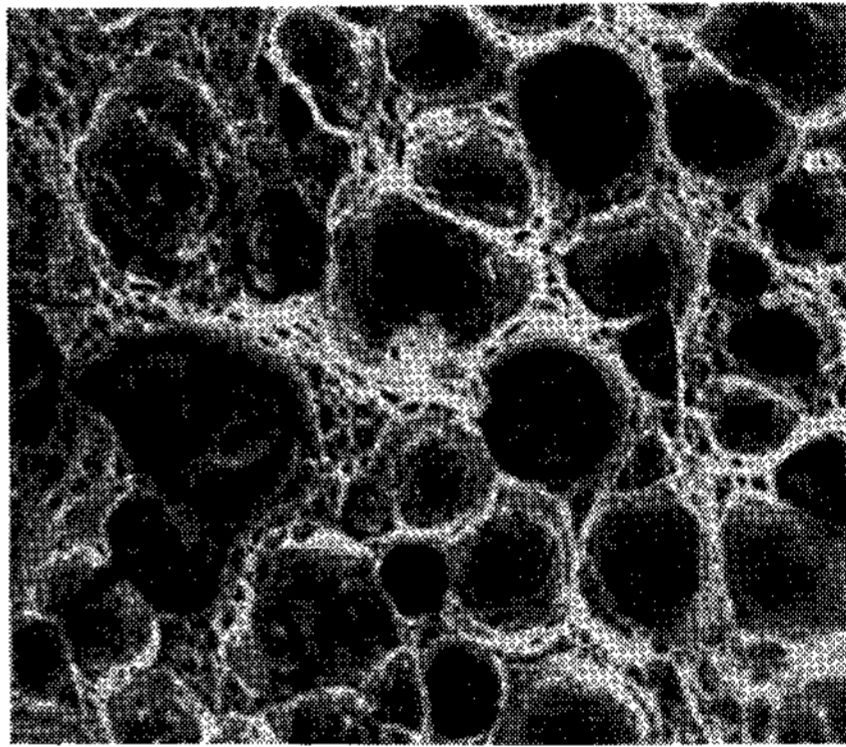
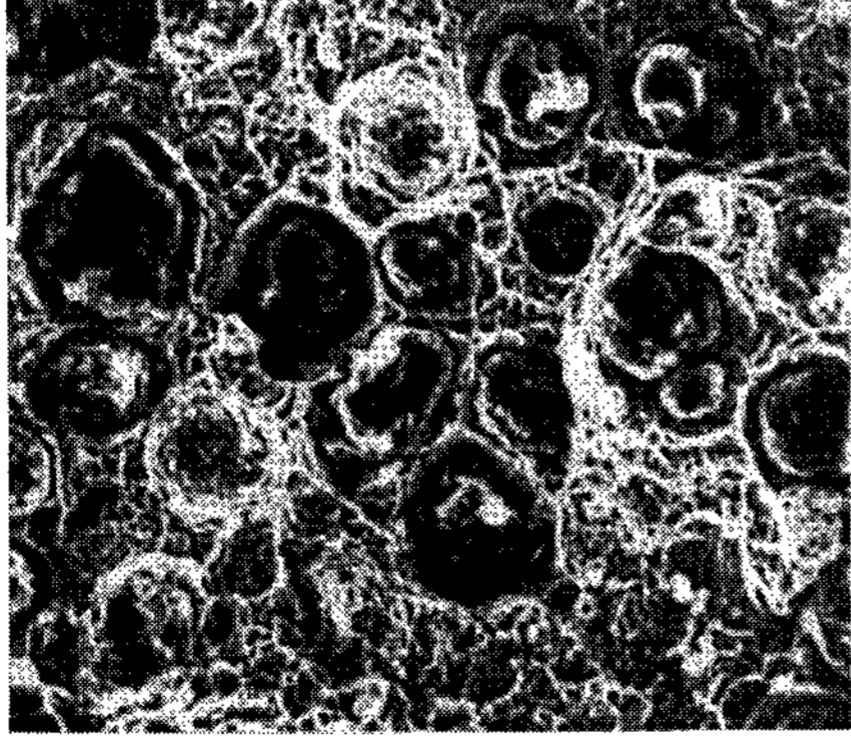
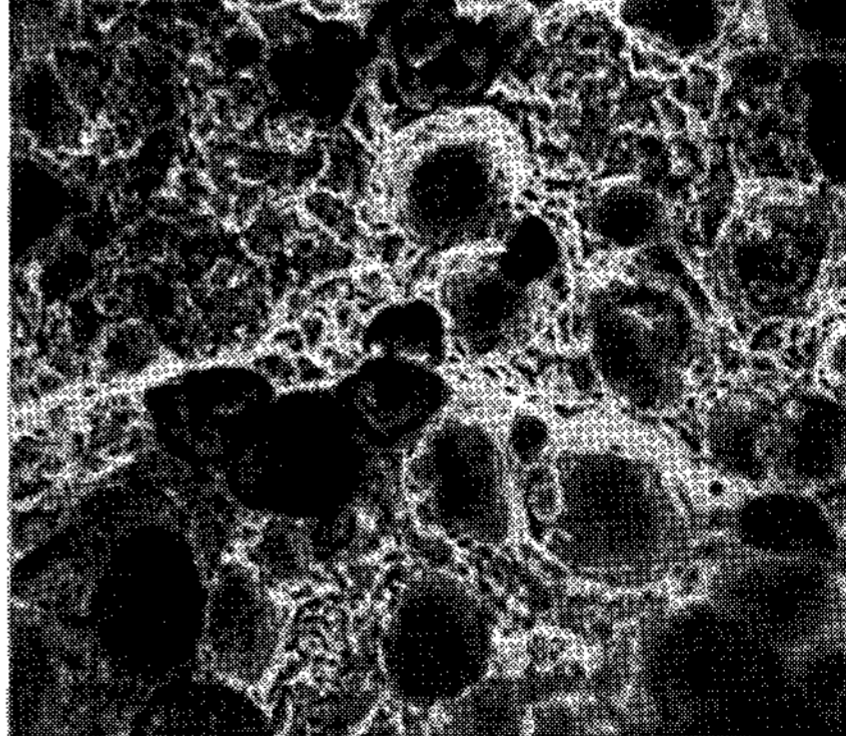
### 3.4 파면관찰

Photo 2는 270℃ 및 370℃의 오스템퍼링 조건에서 1시간 항온유지한 인장시험편의 시험온도에 따른, 고온인장 시험후의 상온에서의 파면을 나타낸 것으로서 시험온도가 250℃로부터 350℃ 및 450℃로 증가함에 따라 각 오스템퍼링 조건에서 모두 micro-void가 합쳐진 섬유상의 연성파면으로부터 섬유상과 벽개파면이 혼재한 의벽개 파면의 양상을 나타내었다. 이는 온도 상승에 따른 잔류오스테나이트의 감소와 베이나이트 조직의 분해에 따른 결과라고 생각된다.

### 4. 결론

금형주조한 Mo-Ni-Cu계 구상흑연주철의 오스템퍼링 온도 및 시간변화에 따른 미세조직 변화 및 잔류 오스테나이트량과 고온인장 특성과의 연관성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 오스템퍼링 조건에서 270℃의 오스템퍼링의 경우 시험온도 250℃에서는 침상의 베이나

T.t(°C)	270°C Austempering	370°C Austempering
250		
350		
450		

T.t(°C) : Testing temperature

Photo 2. Fractographs of fractured tensile specimen after elevated temperature tensile testing for 1hr austempering.

이트가 둔화되었으며 370°C 오스테퍼링의 경우에는 베이나이트 래스가 상당히 조대화된 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 시험온도가 350°C 이상에서는 각 오스테퍼링 조건에서 모두 베이나이트 조직의 분해 현상을 관찰하였다.

2. 잔류 오스테나이트량은 시험온도가 증가함에

따라 감소하였으며 270°C 오스테퍼링의 경우가 370°C의 경우보다 약간 큰 폭으로 감소하였다. 또한 시험온도가 450°C의 경우에는 잔류 오스테나이트가 검출되지 않았다.

3. 가장 우수한 고온인장 성질은 시험온도가 250°C의 경우에서 얻을 수 있었으며 이때의 인장강도 및 연신율의 범위는 각각 1,100-1,530

MPa, 12-27%로 나타났다.

- 4. 파면은 시험온도가 250℃의 경우 오스템퍼링 온도 270℃ 및 370℃의 경우 모두 연성파면의 양상을 나타내었다.
- 5. ADI의 안전한 사용 온도 범위는 250℃ 이하이며 400℃ 이상에서는 급격한 조직의 열화가 일어난다.

### 참고문헌

- 1. B. Kovacs:2nd Inter. conf. on ADI, Univ. of Michigan,(1986) 291
- 2. Morrogh, H and Williams, W.J:JISI 158 (1984), 306-322
- 3. R. D. Forest:The foundary man,(Apr. 1988) 168-181
- 4. 龍華文隆 外 3人:鑄物, 60(1988), 615
- 5. F. S. Lepera:Jounal of metals, 3(1980), 38
- 6. 河部照雄 外 2人:鑄物, 59(1987), 102
- 7. R. C. Voigt:AFS. Trrans., 91(1983), 253
- 8. K. Rundman, T. Rouns, W. Dubensky and D. Moore:2nd Inter. Conf. on ADI, Univ. of MIchigan,(1986) 157
- 9. B. D. Cullity:Elements of X-ray diffrac-tion, Addison-wesley pub. co. Inc.(1967) 391
- 10. H. Nieswaag:MRS symp. proc., vol 34 (1985), 415
- 11. 石原安興:鑄物, 57(1985), 250