

.....  
 論 文  
 .....

## 고강도 ADI의 기어부품 개발에 관한 연구

金元鎔\*, 金光培\*\*, 康仁燦\*, 安相郁\*\*\*

### Development of Control Technology of Austempered Ductile Iron with High Strength and High Toughness for Gear Parts.

Won-Yong Kim\*, Kwang-Bae Kim\*\*, In-Chan Kang\* and Sang-Uk An\*\*\*

#### Abstract

In this study, it was examined the relationship between the microstructure, fatigue properties, mechanical properties and retained austenite volume of Mo-Ni ADI corresponding to various austempering temperatures.

When the austempering temperature is increased to 370°C, acicular bainite structure was found to be transformed to feathery bainite structure. But at the austempering temperature of 420°C, the dissolved bainite lath was shown. Up to the austempering temperature of 370°C, the volume of retained austenite was increased. However at the austempering temperature of 420°C a large amount of retained austenite was decreased. In this study, the retained austenite volume was determined by XRD(X-ray diffraction). It was observed that the optimum fatigue properties can be obtained at the condition of austempering temperature 370°C.

Under the such conditions, fatigue limit determined as the value of 290 MPa, tensile strength 877MPa elongation 6%, hardness 285(BHN), impact values(CVN) 9.2J and retained austenite volume 30.3%, respectively.

#### 1. 서 론

지금까지 자동차부품 및 각종 기계구조용으로 사용되어온 단조강이나 주강의 대체소재로써 ADI(Austempered Ductile Iron)는 구상흑연주철을 오스템퍼링 한 소재로써 기조직내에 흑연이 존재함으로써 내마모 특성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 종래의 주강이나 단조강으로 사용된 소재에 비하여 제조공정을 줄일수있어 제품의 경량화 및 경제성의 측면에서 우수한 재질로 평가<sup>1)~5)</sup> 받고있다. 또한 ADI는 austempering처리중에 형

상이나 치수의 변화 및 균열 발생이 거의 없으므로 정밀주조를 하거나 기계가공한 완제품의 열처리가 용이하며 또한 열처리 조건에 따라 여러가지 용도에 맞게 등급별로 사용하기도 한다.

ADI의 변태기구(mechanism)는 강에있어서 bainite변태기구와 달리 오스테나이트상에 고용된 탄소 함유량이 많기 때문에 오스테나이트의 안정성을 피할수 있으며 이러한 안정한 잔류오스테나이트가 베이나이트 래스(lath)사이 에 고르게 분포함으로 인하여 고강도, 고인성 및 내마모특성을 향상<sup>6)</sup>을 도모할 수 있어 자동차의 gear, cam

\* 인하대학교 공과대학 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, In-ha University)

\*\* 항공대학교 재료공학과(Department of Mechanical Engineering, Hang-gong University)

\*\*\* 인하대학교 공과대학 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, In-ha University)

shafts, connecting rods 등의 주요부품으로 대치가 가능한 재료이다.

따라서 본 연구에서는 앞으로 그 수요가 증대될 ADI에 대하여 오스템퍼링 온도변화에 따른 미세조직, 잔류오스테나이트량 및 기계적성질과 피로성질과의 연관성을 규명하여 보다 우수한 ADI를 제조하는데 그 목적이있다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 시편제작

본 실험에서 사용한 시료는 100kg의 고주파유

도로에서 선철과 강고철을 장입하여 용해한 후 1500°C로 용해한 후 Fe-Si-Mg(%)을 1.3% 첨가하여 sand witch법으로 흑연을 구상화 처리 하였고, Fe-Si(75%)을 0.3%첨가하여 접종처리 하였으며 Fe-Mo, Fe-Ni을 넣어 용탕의 성분을 조정한 후 1-inch Y-Block의 CO<sub>2</sub>주형에 주입하여 제조하였다. Table 1은 시료의 화학조성을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical composition of ductile cast iron.(wt. %)

Material	T.C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg
Mo-Ni	3.98	2.47	0.26	0.078	0.016	1.12	0.18	0.024

#### 2.2 시편의 열처리 및 피로시험

고온산화를 방지하기 위하여 시험편 제작시 발생한 chip속에 시료를 묻고 전기로를 이용하여 900°C에서 1시간 유지하여 용체화 한 후 270°C ~420°C의 각 염욕(NaNO<sub>2</sub> : KNO<sub>3</sub>=54 : 56)에서 각각 퀘칭하여 1시간 유지 후 공냉하였다. Fig. 1은 본 연구에서의 열처리 곡선을 나타낸 것이다.

피로시험은 회전굽힘 피로시험기를 이용하여

시험방법중 통계적 방법인 stair-case법<sup>7)</sup>에 따라 실시하여 50% 비파괴확율을 갖는 피로 수명을 산정하였으며 정격주파수 60Hz, 반복속도 3600rpm으로 상온, 대기중에서 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직관찰 및 잔류오스테나이트량

Photo 1은 본 연구에서 나타난 각 오스템퍼링 조건(270°C~420°C)에서의 미세조직 결과를 나타낸것이다. 오스템퍼링 온도가 270°C일때 베이나이트 조직은 아주 미세한침상(acicular)의 베이나이트 조직을 관찰 할 수 있었으며 베이나이트 래스의 폭 및 래스와 래스사이의 간격도 좁게 나타났다. 또한 부분적으로 미변태 오스테나이트(untransformed austenite)도 관찰 할 수 있었다. 이는 저온에서 오스템퍼링 할 경우 베이나이트의 핵 생성속도가 성장속도 보다도 빨라서 미세한 침상의 베이나이트조직이 나타났으며 또한 부분적인 미변태오스테나이트의 생성은 본 연구에서 시도한 1시간의 항온변태 유지시간이 270°C에서의 베이나이트변태의 제1단계( $r_0 \rightarrow B\alpha + r_{HC}$ )반응을 완료 시키기에는 부족한 것 때문이라고 생각된다. 오스템퍼링 온도가 320°C일때는 270°C의 오스템퍼링에서 나타난 미변태 오스테나이트는 온도증가와 더불어 탄소의 활발한 확산거동에 의

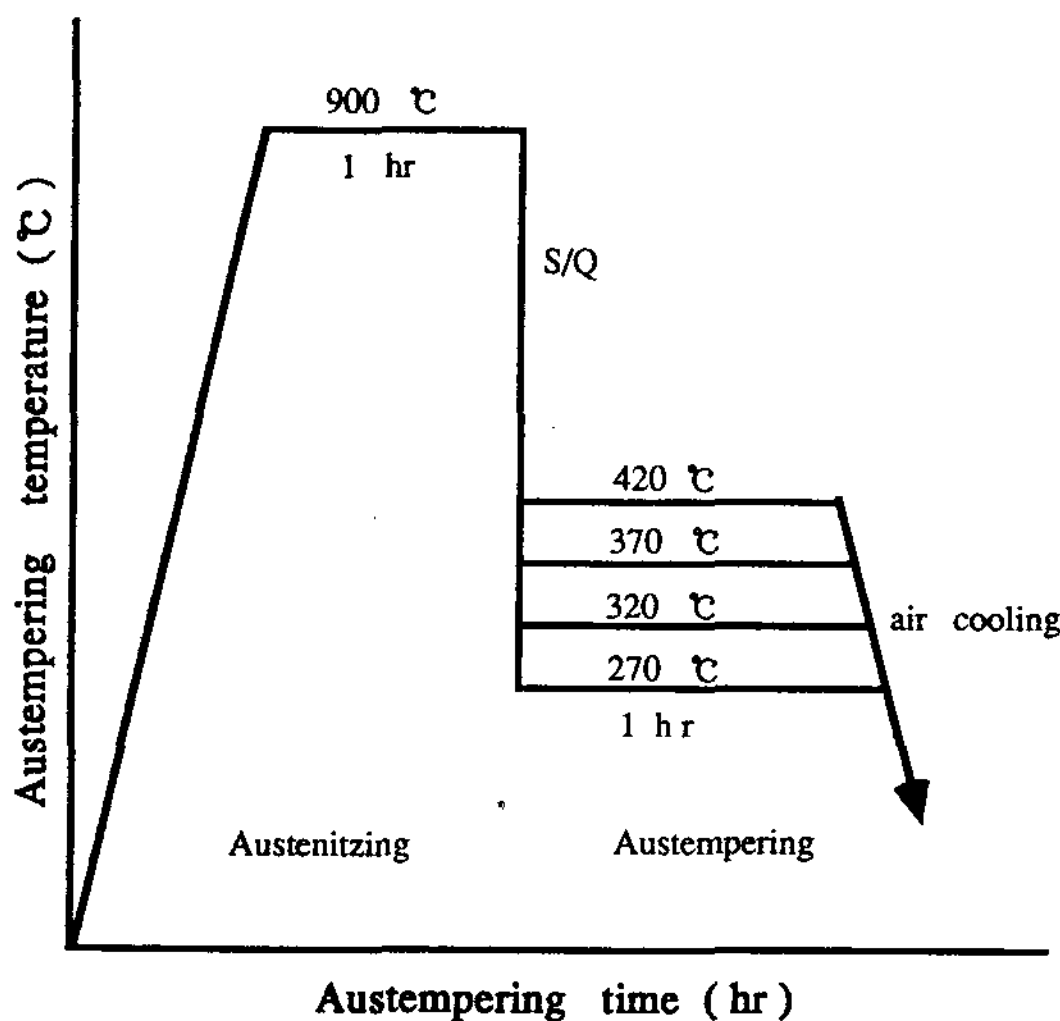


Fig. 1. Heat treatment cycle for austempering of ductile cast iron.



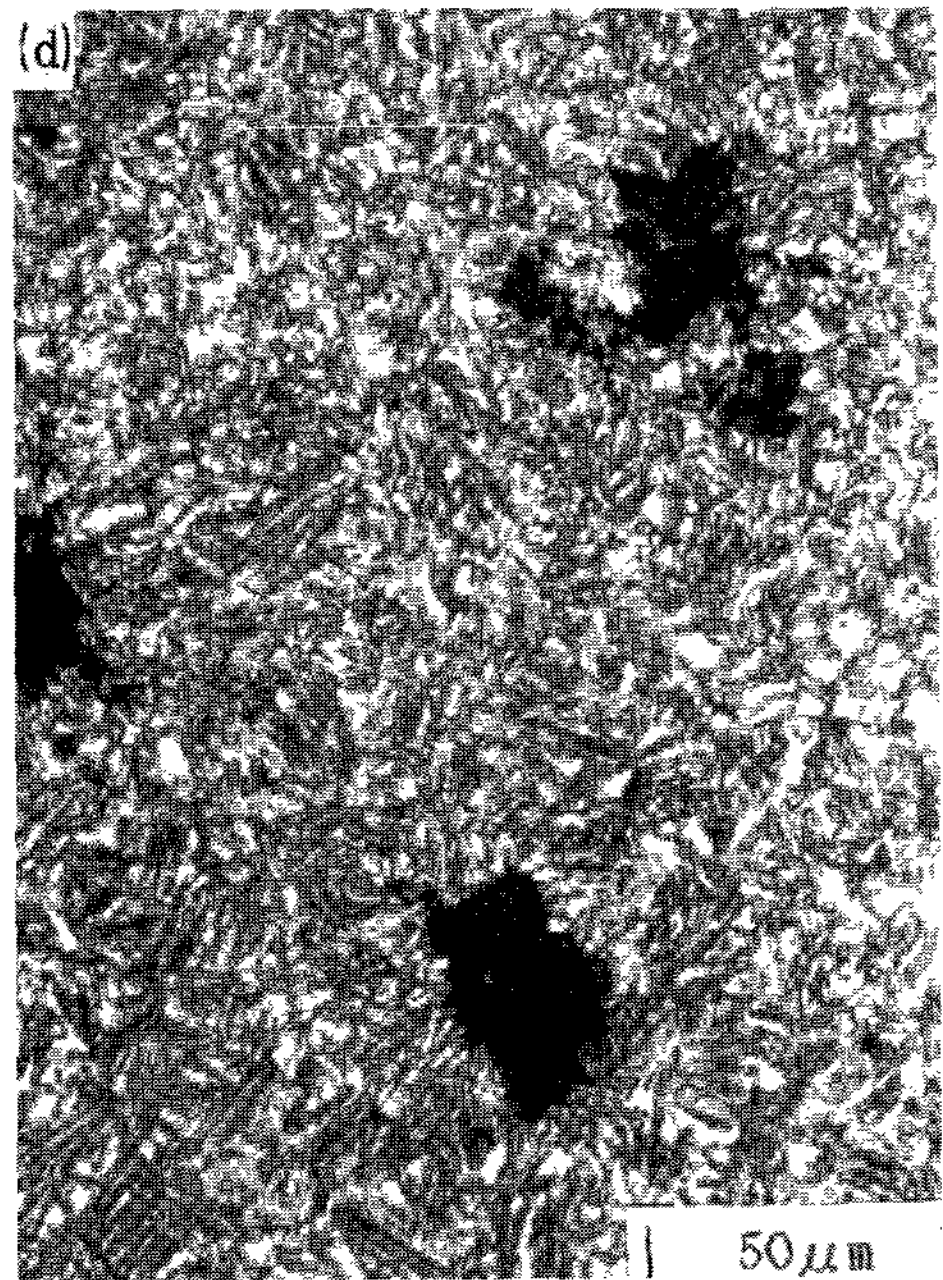
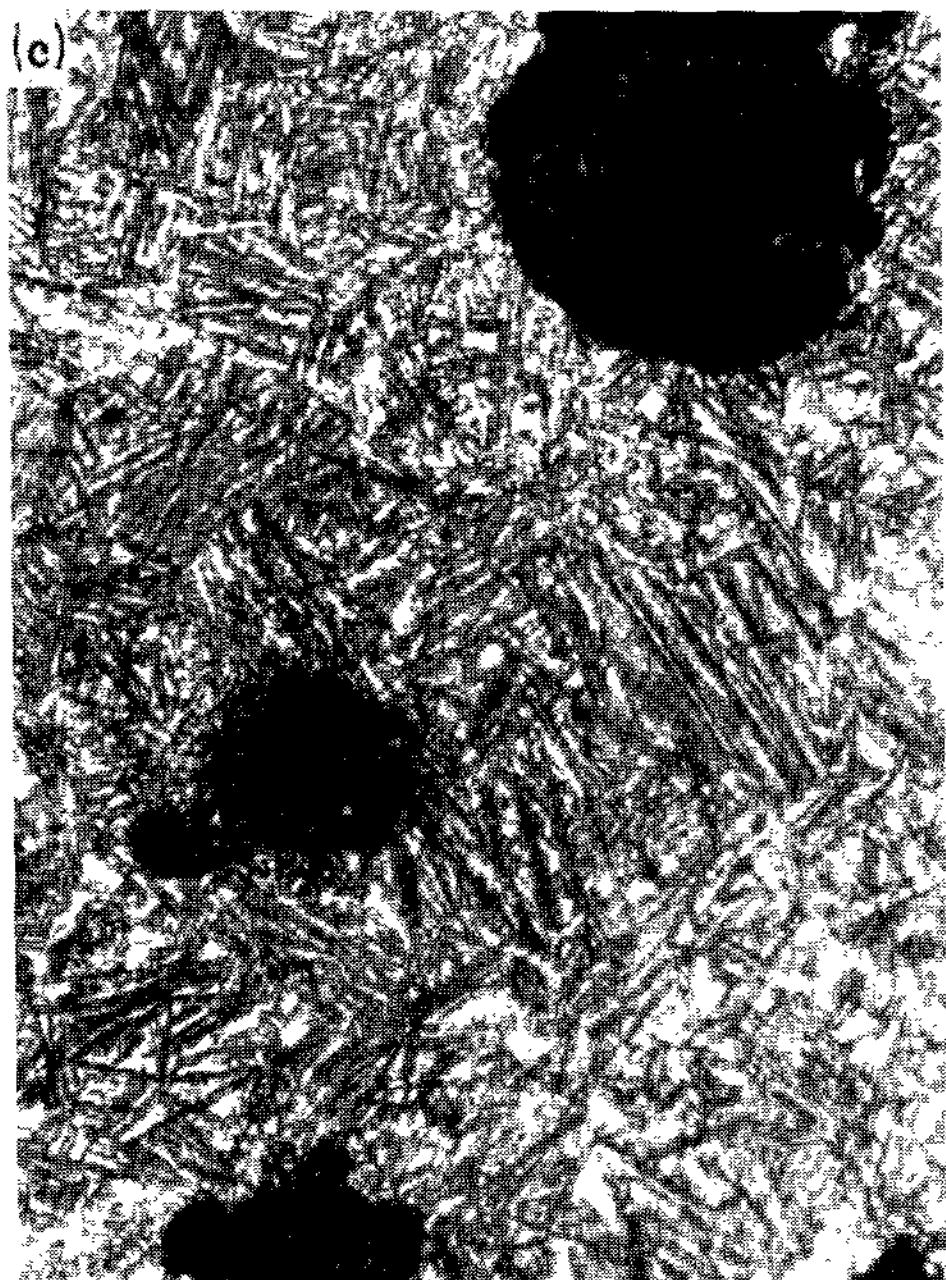
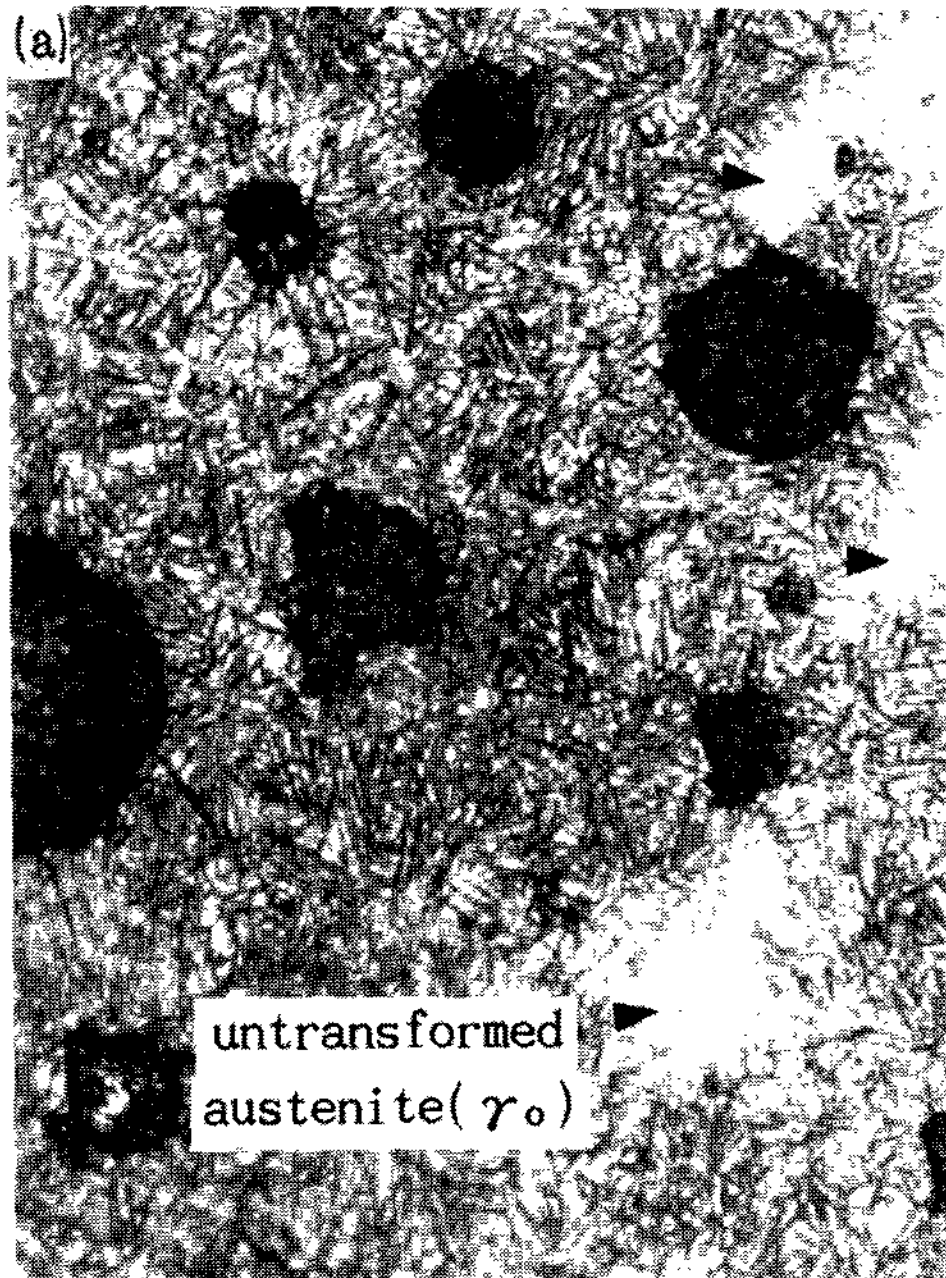


Photo 1. Optical micrographs of austempered ductile irons(ADI)

(a) 270°C austempering

(b) 320°C austempering

(c) 370°C austempering

(d) 420°C austempering

하여 사라졌으며 베이나이트 래스는 전형적인 하부 베이나이트 조직이 나타났다.

한편, 고온영역인 370°C에서 오스템퍼링한 시료의 경우 베이나이트 조직은 깃털상의 베이나이트 래스 즉, 전형적인 상부 베이나이트조직을 관찰 할 수 있었다. 이때 베이나이트 래스의 폭 및 래스사이의 간격도 저온영역에서의 침상의 조직보다 상당히 큰것을 관찰 할 수 있었다. 오스템퍼링 온도가 더욱더 증가하여 420°C 일때는 베이나이트 래스 사이의 간격이 상당히 넓어지고 있는 반면 lath의 길이는 감소하였고 국부적인 lath의 분해현상을 관찰 할 수 있었다. 이는 420°C에서의 오스템퍼링의 경우 탄소의 급속한 확산 거동이 베이나이트 변태의 제1단계 반응을 끝내고 국부적인 제2단계 반응이 진행되었기 때문이라 생각된다.<sup>8)</sup> 한편, 420°C의 오스템퍼링의 경우 잔류오스테나이트량은 온도증가와 더불어 급격한 감소현상을 보이는데 이는 bainite변태의 제1단계 반응이 끝나고 제2단계 반응이 진행되어 고탄소 오스테나이트가 페라이트( $\alpha$ )와 탄화물로 분해되었기 때문이라 생각된다.

### 3.2 기계적 성질

Table 2는 본 연구에서 얻은 ADI시료의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 오스템퍼링온도가 저온영역(270°C, 320°C)에서의 인장특성이 고온영역(370°C, 420°C)에서의 특성보다 높게 나타났는데 이는 고온영역에서의 경우보다 저온영역에서의 경우가 베이나이트의 핵생성속도가 성장속도보다도 빨라서 베이나이트 래스가 미세한 침상구조를 나타내며 또한 래스입자내의 미세한 세멘타이트( $Fe_3C$ )가 분산되어 강화 효과를 일으키고 잔류오스테나이트량은 작기때문이라 생각된다.<sup>8,10)</sup> 오스템퍼링 온도가 270°C에서 320°C로 증가함에 따라 인장강도 및 항복강도는 약간 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 탄소확산 거동에 기인한 베이나이트 래스의 폭 및 래스사이의 간격이 커진것에 기인된다고 생각된다. 그러나 오스템퍼링 온도가 420°C의 경우에는 베이나이트 변태의 제2단계 반응의 결과로 베이나이트 래스크기가 작고 부분적인 베이나이트 래스의 분해 현상이 일어나 인장특성이 더욱더 저하 했다고 생각된다.

**Table 2.** Mechanical properties of austempered ductile iron

Austempering temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Percent elongation (%)	Hardness (BHN)	Impact absorption energy(J)
270	1174	1046	4.3	409	4.2
320	1121	920	5	367	6.9
370	877	718	6.2	285	9.2
420	788	643	3.5	272	2.5

오스템퍼링 온도가 270°C에서 320°C로 증가함에 따라 연신율 및 충격흡수에너지는 증가하는 경향을 나타내는데 이는 오스템퍼링 온도증가와 더불어 탄소확산에 의한 미변태오스테나이트의 베이나이트 변태진행으로 잔류오스테나이트량의 증가 및 less acicular bainite lath에 기인된다고 생각된다.

오스템퍼링 온도가 370°C에서는 가장높은 충격흡수에너지 및 연신율값을 얻을 수 있었는데 이는 고온 오스템퍼링의 경우 베이나이트의 성장속도가 핵 생성속도보다도 빨라서 조대하고 균

일한 깃털상의 베이나이트 래스와 안정한 잔류오스테나이트가 최대값을 나타낸 원인이라고 생각된다.

### 3.3 피로특성

Fig. 2는 각 오스템퍼링 조건에서 응력과 회전수와의 관계를 나타낸 것으로써 270°C 오스템퍼링한 시료의 피로한이 가장 낮게 나타났으며, 이와반대로 370°C에서 오스템퍼링한 시료의 피로한이 최대치를 나타내었다. 이와같이 270°C 오스템퍼링한 시료의 피로한이 가장 낮게 나타난 이



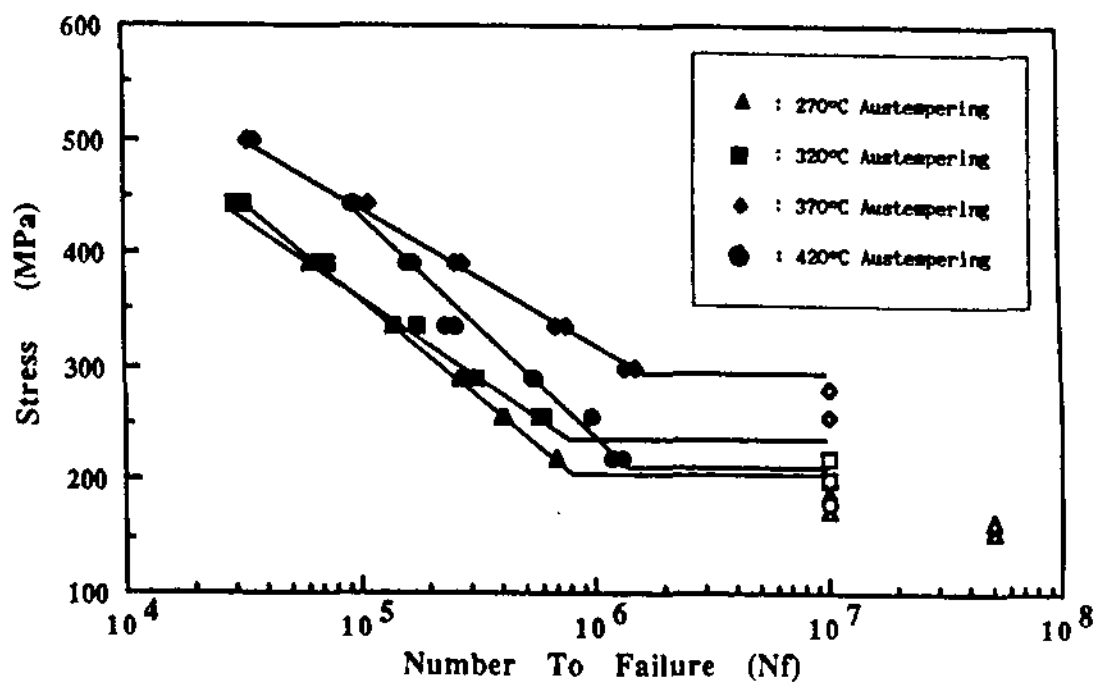


Fig. 2. S-N curves for ADI on rotary bending fatigue test.

유는 잔류오스테나이트량이 적고 또한 불충분한 변태조건으로 인한 국부적인 미변태오스테나이트가 잔존한 결과라 생각되며 최대치의 피로한을 나타낸 이유는 상온에서 안정한 잔류오스테나이트량이 많고 또한 균일한 깃털상의 베이나이트 조직이 나타난 결과라 생각된다. 즉 잔류오스테나이트가 잔존함으로 인하여 균열선단에서 가공유기(strain-induced)마텐사이트 변태를 일으켜 균열생성 및 전파의 장벽역활을 하기 때문이라 생각된다.

한편 오스템퍼링온도 420°C 조건의 경우 베이나이트 변태의 제2단계 반응이 진행되어 깃털상 미세조직의 분해현상과 잔류오스테나이트량의 감소에 기인된다고 생각된다. Fig. 3은 잔류오스테나이트량과 피로강도지수와와의 관계를 나타낸 것으로 피로강도지수는 균열생성 및 전파에 대한 민감성을 나타내는 것으로 잔류오스테나이트량이 증가함으로 균열에 대한 저항성이 큰것으로 나타났다. Fig. 4는 인장강도와 내구비 및 피로한과의 관계를 나타낸 것으로 인장강도가 877MPa 일때 내구비 및 피로한이 가장 큰것으로 나타났는데 이와같은 이유는 균열저항성이 크고 또한 소성변형이 쉬운 잔류오스테나이트량이 가장 많고 깃털상의 상부베이나이트조직이 혼재한 결과라 생각된다.

4. 파면관찰

Photo 2는 각 오스템퍼링 조건에서의 피로파면을 관찰한 사진으로 오스템퍼링 온도가 270°C

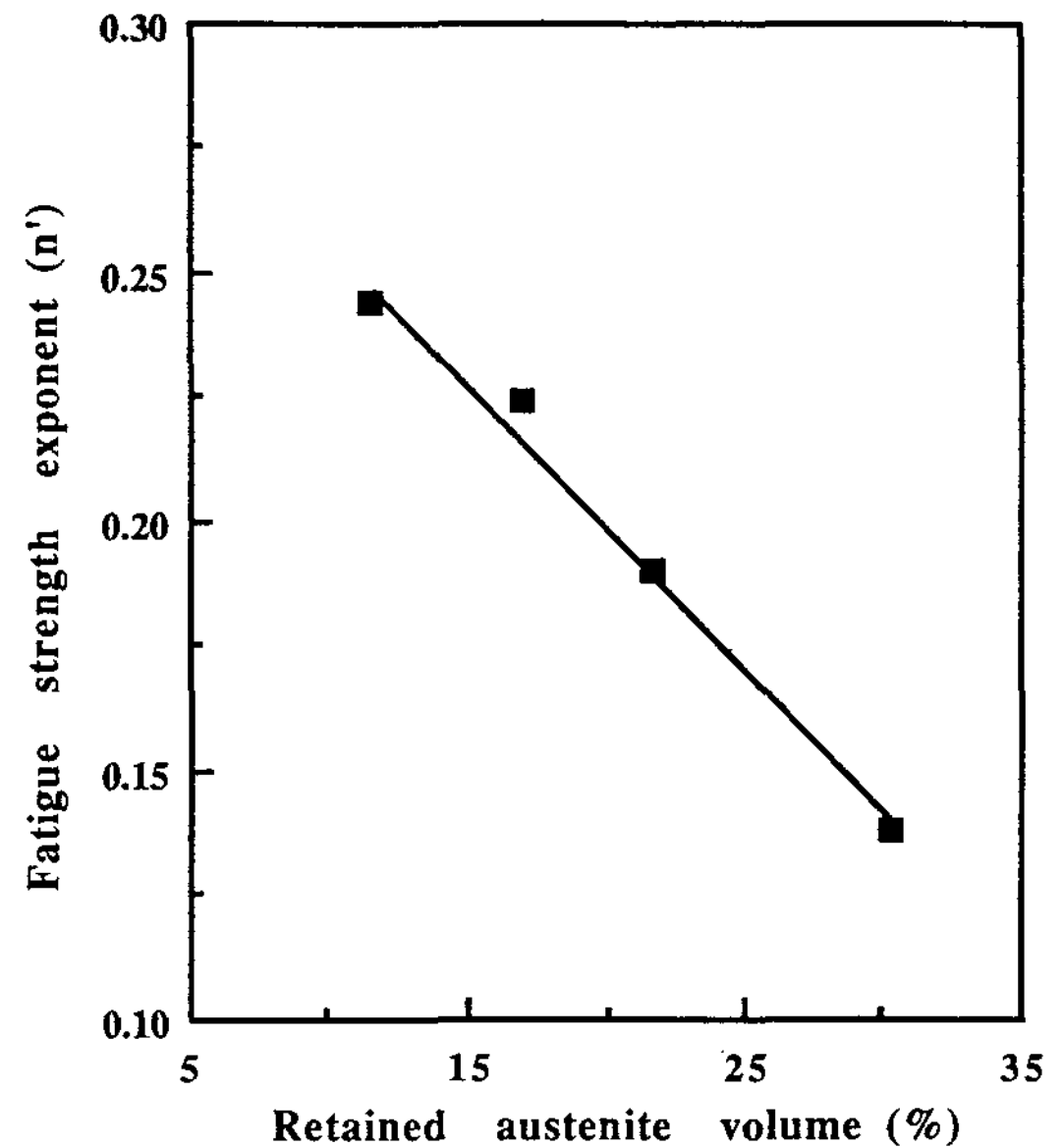


Fig. 3. Relation between retained austenite volume and fatigue strength exponent of ADI.

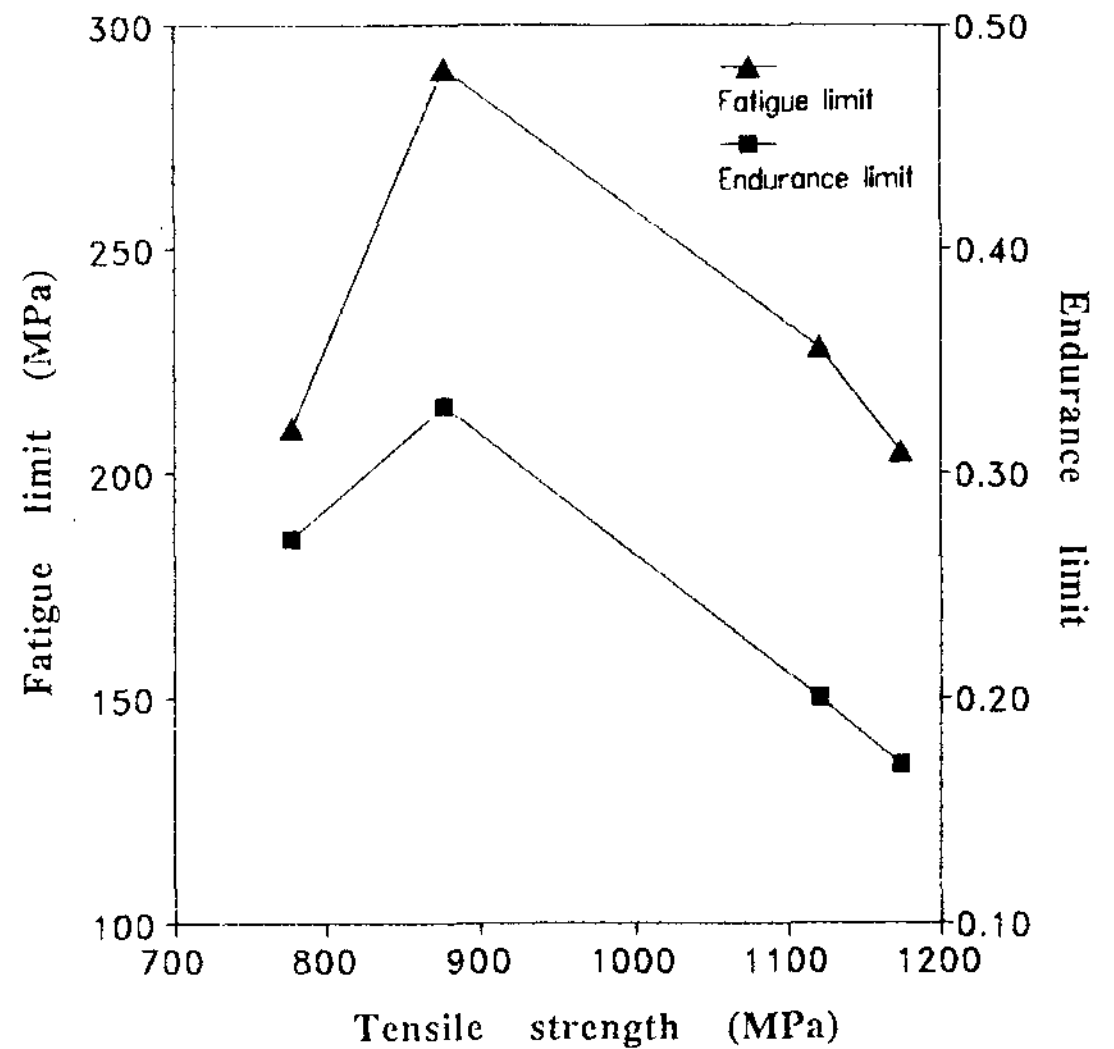


Fig. 4. Relation between tensile strength and fatigue limit, endurance limit of ADI.

의 경우 벽개면을 따라 균열이 성장하는 취성과 파괴의 양상을 나타내고 있으며 오스템퍼링 온도가 증가하여 370°C의 경우 미세한 섬유상과 미세공동이 혼재한 연성파면을 나타내고 있다. 그러나 오스템퍼링 온도 420°C의 경우 섬유상의 파면이

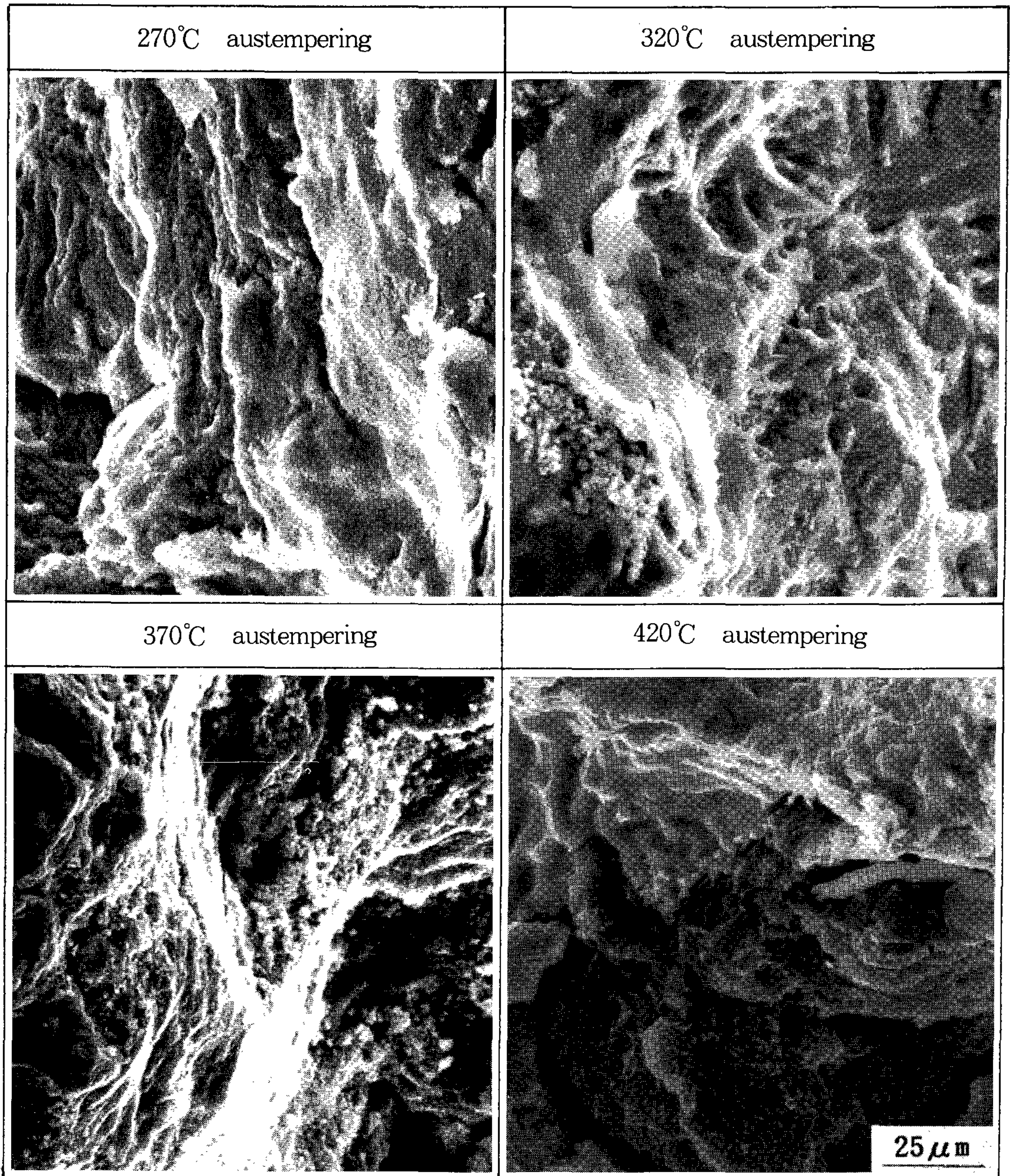


Photo 2. Fatigue fracture surface of ADI.  
( $N_f = 5 \times 10^5$ )

줄고 벽개파면의 양상을 띄며 2차균열이 혼재하여 나타났다. 이와같은 결과는 안정한 잔류 오스테나이트를 다량 함유하고있는 370°C의 경우 연성과파면 형태를 나타내며 오스텨퍼링 조건 270°C 및 420°C의 경우 잔류오스테나이트량이 적으며 특히 420°C 오스텨퍼링의 경우 베이나이트 변태 2단계반응에 기인된 베이나이트 래스 분해현상이 가중된 결과라 생각된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 Mo-Ni계 구상흑연주철을 austempering 온도 변화에 따른 피로특성을 고찰한결과 다음과같은 결론을 얻었다.

1. 오스텨퍼링 온도가 증가함에 따라 베이나이트 래스는 침상에서 깃털상으로 변화하였고, 래스사이의 간격도 커지는 것을 볼수 있었으나 420°C에서 오스텨퍼링 한 시료의 경우 베이나이트래스의 분해 현상을 볼 수 있었다.
2. 회전굽힘 피로시험 결과 피로한의 크기는 370°C에서 오스텨퍼링 한 시료가 가장 우수하게 나타났고, 이때 잔류오스테나이트량은 30.3% 이었다.
3. 오스텨퍼링 온도에 따른 내구비의 크기는 370°C > 420°C > 320°C > 270°C의 순으로 높았다.
4. 피로한이 우수한시료(370°C 오스텨퍼링)의 미세조직은 상부 베이나이트 조직이었으며, 파면은 미세한 fibrous pattern이 나타났다.

### 후 기

본 연구는 산학협동재단의 1991년도 연구비에 의한 것으로서 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 matching fund를 부담하고 편의를 제공한 인천금속에도 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. R.D. Forest; The foundry man April. 1988 p168-181.
2. 龍華文陵 外 3人; 鑄物, 第60卷, 第10號(1988) 615.
3. B. Kovacs; 2nd International Conferences on ADI, Univ. of Michigan, (1986) 291.
4. K. Venneemann, K. Hornung and G. Fischer; 2nd International Conference on ADI, Univ. of Michigan,(1986) 373.
5. J. Lincoln; 2nd International Conference on ADI (1986) 381.
6. Svwn-Eric stenfors; Mat. res. soc. sym. proc. vol 34(1985) 423.3.
7. 統計的 疲勞試驗方法, JSME S 002-1981, 日本機械學會基準, 36-37.
8. R.C.Voigt; AFS Trans., vol 91(1983) 253.
9. R.C.Voigt, C.R. Lopper Jr; MRS sym. proceeding, vol 34(1985) 377.
10. K. Rundman, T. Rouns, W.Dubensky and D. Moore; 2nd International conference on ADI, University Michigan,(1986) 157.
11. J.M. Barsom and S.T.Rolfe; ASTM STM-466 (1970) 281-301.