

오스텨퍼 회주철의 파괴강도 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of Strength and Fracture of Austempered Graphite Cast Iron

이 하 성* · 강 동 명* · 이 영 상**

Ha-Sung Lee · Dong-Myeong Kang · Young-Sang Yi

ABSTRACT

The mechanical properties and fatigue crack growth rate fracture toughness of permanent mould cast austempered gray cast iron(AGI) were compared to those of sand cast AGI. Specimens prepared for tensile, impact and fatigue test were austenitized at 900°C and austempered at 270°C, 320°C, 370°C and 420°C for 1 hour.

The strength, impact and fatigue crack propagation behavior of permanent mold cast AGI were found to be superior to those of sand cast AGI. Maximum values in tensile strength, BHN, Charpy impact energy, were obtained at the austempering temperature of 270°C. Samely, the slowest fatigue crack growth rate was appeared at the austempering temperature of 270°C. But ductility of AGI was not improved by permanent mould casting.

1. 서 론

주철은 일반적으로 강에 비하여 기계적 성질이 크게 떨어지는 결점이 있으므로 강에 버금가는 고강도, 고인성 및 내마모성이 우수한 주철의 개발이 요구되어 왔다. 근래 이러한 요구에 부응 할만한 강의 대체 재료로서 기대를 모으고 있는 오스텨퍼 구상흑연주철(austempered ductile iron, ADI)

에 대한 활발한 근년의 연구^{1~4)}를 배경으로 최근에는 편상흑연주철을 오스텨퍼링하여 얻는 오스텨퍼 회주철(austempered gray iron, AGI)에 관한 연구^{5,6)}도 시도되고 있다.

금형주조주철의 조직은 웨라이트 기지와 공정상 흑연으로 되어 있으며, 미세흑연이 분포되어 있어서 습태마모에 강하고 주물의 표면부는 절삭성이 매우 좋은 독특한 장점등이 널리 알려져 있다^{7,8)}.

* 유한전문대학 금형설계과

** 생산기술연구원

본 연구에서는 주형조건으로 금형주조 및 사형 주조의 두가지로 하고, 열처리조건은 노말라이징과 네가지 온도로 오스테퍼링하여, 인장, 경도, 충격시험과 피로파괴시험을 행함으로써 새로운 주조재료인 오스테퍼 회주철(AGI)의 안전설계자료를 제공하였다.

2. 실험방법

2.1 시편의 제작

본 실험에서 사용한 시료는 50kg 용량의 중주파 유도로에서 선철과 연강고철을 장입하여 용해한 후, 소량의 규소철로 접종하고 약 1,350°C에서 준비된 각종의 주형에 주조하였다. 인장시험용 공시재는 직경 16mm의 원형봉으로 주조하고, 충격시험용 및 피로시편은 두께 30mm의 Y블록(Fig. 1)을 주조하여 얻었다. 위의 각각을 사형(CO₂형)과 주철제의 2종의 주형을 써서 주조하였다. 주조된 공시재의 조성은 Table 1과 같다. Fig. 1과 같이

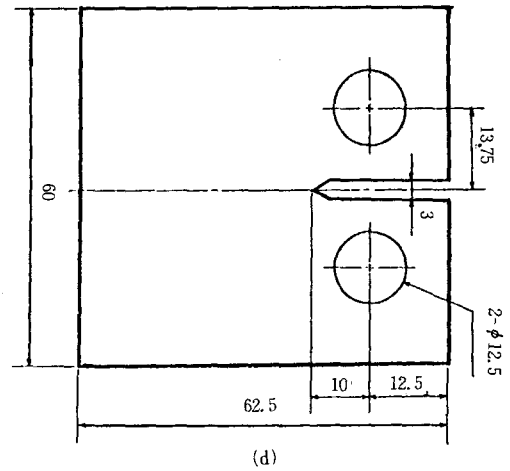
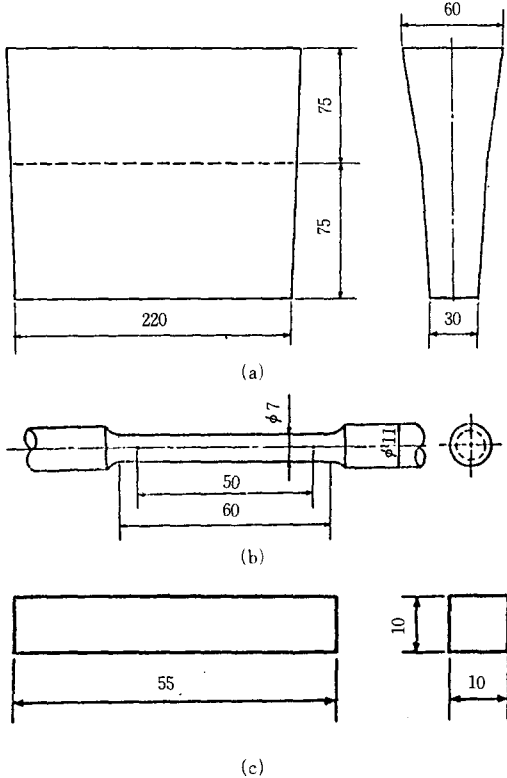


Fig. 1 Dimension of (a) Y-block, (b) Tensile test specimen, (c) Charpy impact specimen and (d) CT specimen. (unit : mm)

Table 1 Chemical composition of cast iron

Specimen	Element				
	C	Si	Mn	P	S
Plain iron	3.35	2.46	0.42	0.10	0.02

원형봉상의 공시재료로부터 인장시편(b)을, Y字形 공시재료로부터는 시편으로 사용할 수 있는 유효부를 채취하여 충격시편(c)을 가공하고, ASTM E-647 규정에 따라서 피로균열시험을 위한 CT시편을 Fig. 1(d)과 같이 폭(W)과 두께(t)를 각각 50mm 와 10mm로 하여 가공하였다. 시편 열처리시에 탈탄을 막기 위하여 질소 가스 분위기를 이용하였으며 전기 머플로에서 900°C에서 1.5시간 가열하여 오스테나이트화 한 후 270°C, 320°C,

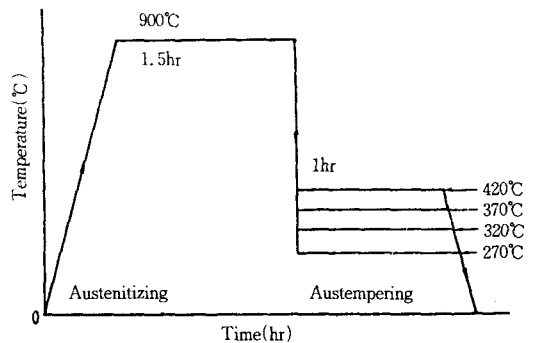


Fig. 2 Heat treatment cycles for austempered gray cast iron

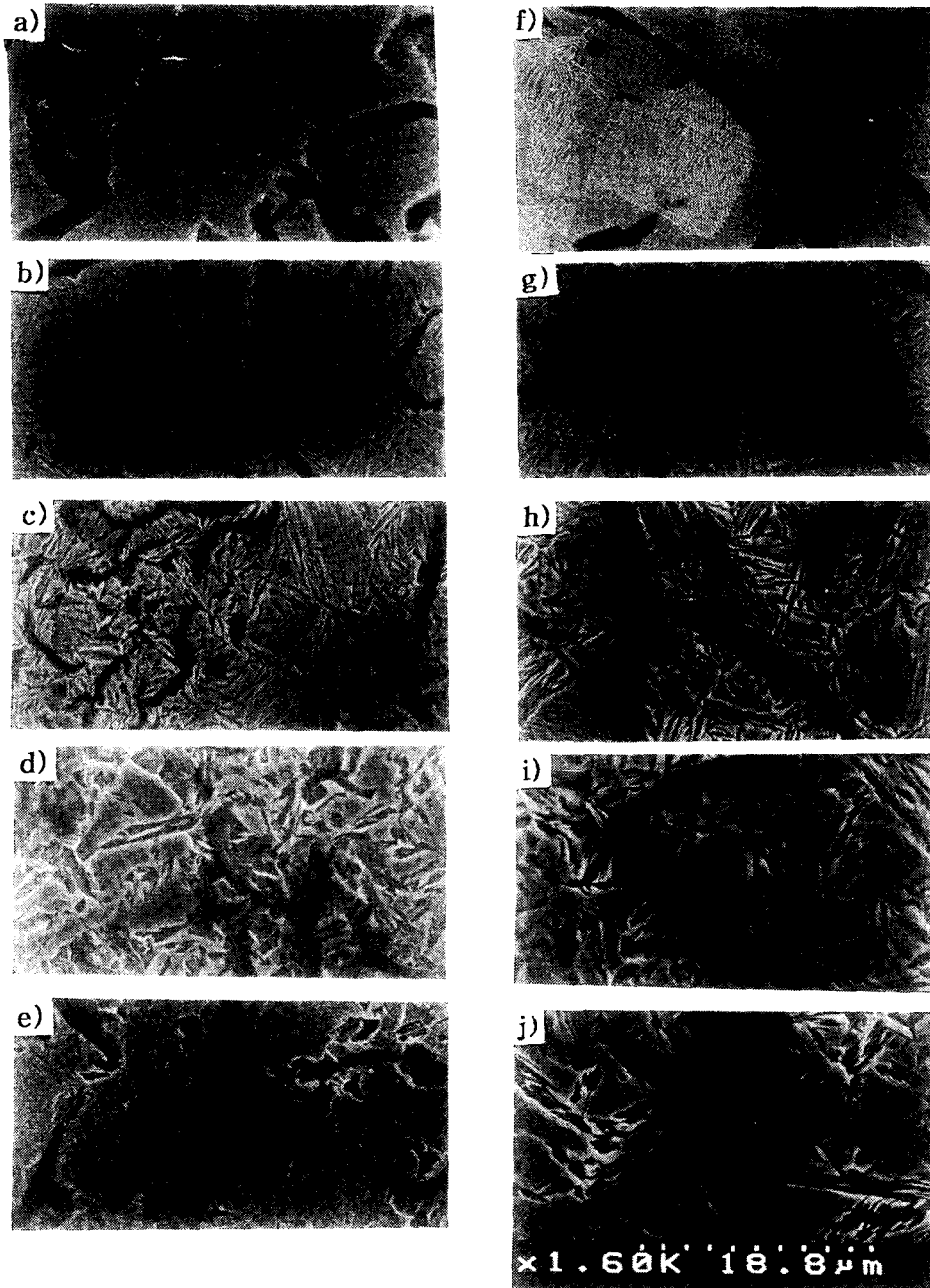


Photo. 1 Scanning electron micrographs of normalized cast iron and AGI
Permanent mold : a) normalized b) 270°C c) 320°C d) 370°C e) 420°C
Sand cast : f) normalized g) 270°C h) 320°C i) 370°C j) 420°C

370°C 및 420°C의 염욕에 퀘칭하여 Fig. 2와 같이 오스테퍼링 하였다.

2.2 기계적성질 시험 및 조직검사

인장시험은 만능 재료시험기(toyo baldwin Co., Cap., 10ton)를 사용하였으며 크로스 헤드의 속도는 2mm/min.으로 하였다. 경도시험은 CT 시험편을 브린넬 경도 시험기(otto wolpert-werke사, dia testor 3a, Max. 3,000kg)로 측정하였다.

조직검사는 인장시험을 한 시편의 물립부로부터 시편을 채취하여 주사전자현미경으로 관찰하였다. 각 시료의 잔류 오스테나이트량의 측정은 X선 회절시험기로 기지의 미세조직 분율을 측정하였다.

2.3 충격시험 및 피로시험

충격시험은 샤르피 형 충격시험기(satec system Inc., S1-1D3)를 사용하여 상온에서 무노치 상태로 시험하였다⁹⁾.

피로시험은 용량 15ton의 피로시험기(simadzu Co.)를 사용하고, 시편에 따라 최대하중(P_{max})을 400Kgf에서 700Kgf로 하고, 응력비(R)는 각 시편 공히 0.2를 유지하며 실험을 행하였다. 피로시험의 따른 응력확대계수폭(ΔK)을 얻기 위한 절차는 ASTM E-647규정에 따라 계산하였다¹⁰⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시료의 조직변화

금형주조 및 사형주조한 시료에 대한 열처리 조건별 주사 전자현미경 조직을 Photo. 1에 나타내었다. 흑연조직은, 금형주조한 것은 대부분의 D형과 약간의 E형을, 사형주조한 것이 A형을 보인다. 오스테퍼링 온도가 낮아짐에 따라 조직이 미세화하고 치밀하게 분포 됨을 알수가 있다. 온도가 270°C와 320°C 일때의 베이나이트 조직은 베이나이트 내에 미세한 세멘타이트가 분산된 침상조직이며, 매우 조밀하게 분포 됨으로써 침상(acicular) 베이나이트와 잔류 오스테나이트가 혼합된 조직을 나타내었다. 320°C 오스테퍼링의 경우가 270°C 오스테퍼링 보다 침상조직의 조대함을 보이고 있다. 또한, 온도가 370°C와 420°C 일때의 베이나이트 조직은 베이나이트 래스(lath)가 조대하고 래스간 간격이 비교적 넓어지고 깃털상조직(feathery bainite)이다. 이 역시 420°C 오스테퍼링의 경우가 370°C 오스테퍼링 보다 깃털상조직의 조대함을 보이고 있다. 이상의 결과를 보면 오스테퍼링 온도가 270°C 및 320°C에서 형성된 조직은 하부 베이나이트이며, 370°C 및 420°C에서 형성된 조직은 상부 베이나이트임을 알 수 있다.

X-ray 회절시험으로부터 얻은 결과는 Table 2에

Table 2 Results of x-ray diffractometry of AGI

Austempering Temp. and Time	Permanent Mold AGI			Sand Cast AGI		
	Lattice Parameter, a_T (Å)	Retained Austenite Volume, V_T (%)	Carbon Content in Retained Austenite, C_T (%)	Lattice Parameter, a_T (Å)	Retained Austenite Volume, V_T (%)	Carbon Content in Retained Austenite, C_T (%)
270°C (1Hr)	3.6222	17.0	1.42	3.6180	23.4	1.36
320°C (1Hr)	3.6304	20.5	1.49	3.6297	33.4	1.57
370°C (1Hr)	3.6198	27.8	1.74	3.6249	38.9	1.72
420°C (1Hr)	3.6132	19.3	1.38	3.6150	17.9	1.27

나타내었으며, Fig. 3에는 잔류 오스테나이트량을 오스테퍼링 온도와의 관계로 나타내었는데, 금형주조와 사형주조가 마찬가지로 370°C일 때까지 증가하다가 420°C에 감소함을 알 수 있다. 이는 오스테퍼링 온도가 높아지면 오스테퍼링시에 오스테나이트 중으로의 탄소의 확산속도가 높아져서 고용

탄소량이 증가하여 안정한 잔류 오스테나이트가 많아지기 때문이라고 생각된다. 420°C에서 잔류 오스테나이트 량이 감소한 것은 온도의 상승에 따라 잔류오스테나이트가 페라이트와 세멘타이트로 분해되었기 때문이라 생각된다. 또한, 오스테퍼링의 온도가 낮을수록 잔류오스테나이트 량이 감소한

것은 핵생성은 많지만 베이나이틱 페라이트 성장 속도가 느리고 탄소의 농축이 어려워 잔류오스테나이트량이 감소한 것으로 사료된다.

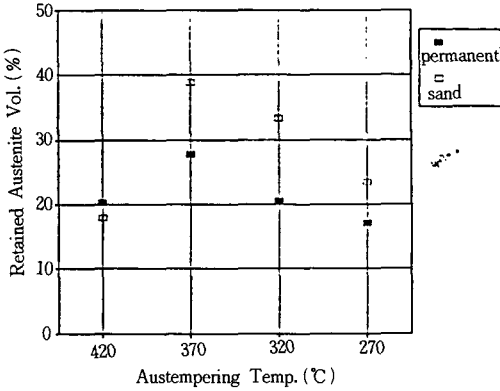


Fig. 3 Retained austenite Vol. vs. austempering temp.

3.2 기계적성질 시험

인장시험으로부터 얻은 시료의 기계적성질을 Table 3에 나타내었다. 금형주조한 시료가 사형주조 시료보다 인장강도가 크게 나타났다. 노말라이징한 시료의 인장강도는 금형주조의 경우 367MPa이며 사형주조의 경우 263MPa로서 사형주조에 대한 금형주조한 시료의 인장강도의 증가는 39%였다. 오스템퍼링한 시료들은 인장강도가 훨씬 높게 나타났는데 270°C 오스템퍼링의 경우 금형주조시 836MPa, 사형주조의 경우 446MPa로서 사형주조에 대한 금형주조에 의한 강도의 증가는 87%이었고, 320°C 오스템퍼링의 경우 금형주조시 747MPa, 사형주조의 경우 412MPa로서 금형주조에 의한 강도의 증가는 81%이었다. 또한, 370°C 오스템퍼링의 경우는 금형주조 598MPa, 사형주조의 경우 367MPa로서 금형주조에 의한 강도의

Table 3 Mechanical properties for permanent mold and sand cast austempered gray cast iron

Austempering Temp. and Time	Permanent Mold AGI				Sand Cast AGI			
	Yield Strength, σ_y , MPa	Tensile Strength, σ_u , MPa	BHN	Charpy Impact Energy, J	Yield Strength, σ_y , MPa	Tensile Strength, σ_u , MPa	BHN	Charpy Impact Energy, J
Normal.	349	367	140	3.0	243	263	105	2.8
270°C (1Hr)	824	836	310	5.2	433	446	235	4.2
320°C (1Hr)	732	747	281	4.8	403	412	214	3.9
370°C (1Hr)	586	598	264	4.6	354	367	205	3.7
420°C (1Hr)	504	517	245	4.0	306	319	187	3.3

증가는 63%이었고, 420°C 오스템퍼링의 경우는 금형주조 517MPa, 사형주조의 경우 319MPa로서 금형주조에 의한 강도의 증가는 62%이었다. 이것은 오스템퍼링 온도가 270°C 및 320°C에서 형성된 하부 베이나이트에서 인장강도가 높게 나타나고, 370°C 및 420°C에서의 상부 베이나이트로 갈수록 인장강도가 떨어짐을 나타낸다. 연신율은 큰 차이가 없이 1% 내로 나타났다. 이상의 인장 시험의 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

경도시험의 결과는 Fig. 5에 나타내었는데 금형주조의 경우, 노말라이징한 시료는 HB 140, 오스템퍼링 온도가 270°C에서 HB 310, 320°C에서는 HB 281, 370°C에서 HB 264 및 420°C에서는 HB

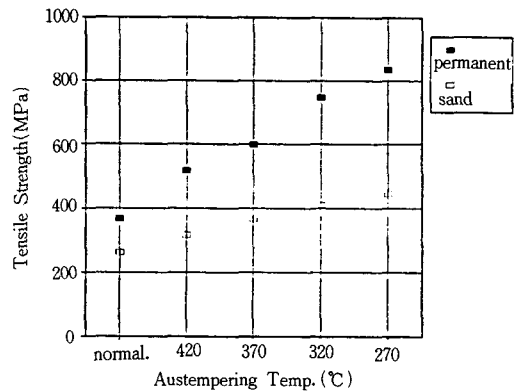


Fig. 4 Tensile strength vs. austempering temp.

245로 나타났으며, 사형주조의 경우 노말라이징 한 시료가 HB 105, 오스테퍼링 온도가 270°C에서 HB 235, 320°C에서는 HB 214, 370°C에서 HB 205 및 420°C에서는 HB 187로 나타났다. 이상의 결과에서 사형주조에 대한 금형주조의 경도치의 증가는 노말라이징의 경우 33%, 오스테퍼링 온도 270°C의 경우는 32%, 320°C의 경우는 31%, 370°C의 경우는 32% 및 420°C에서는 31% 증가하였다. 경도 시험 역시 270°C, 320°C에서 오스테퍼링한 하부 베이나이트 시료는 경도가 높게 나타나고, 370°C, 420°C에서 오스테퍼링한 상부 베이나이트 시료는 경도가 떨어짐을 알 수 있다.

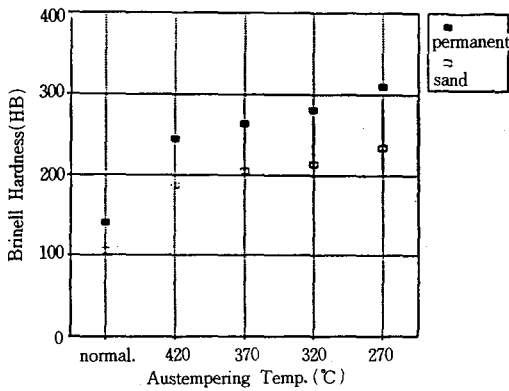


Fig. 5 Brinell hardness vs. austempering temp.

이상의 기계적성질을 고찰해보면 금형주조의 경우 하부베이나이트는 세멘타이트가 미세분산된 침상조직으로 인하여 상대적으로 강도와 경도의 상승을 일으키나, 단위 체적당 갯수, 즉 밀도가 높은 미세흑연의 노치 효과에 의하여 연신율은 낮은 것으로 사료되며, 오스테퍼링 온도가 370°C일 때의 상부 베이나이트 조직은 베이나이트 래스 간 간격이 넓어짐에 따라 강도와 경도가 하부 베이나이트 보다 떨어짐을 보였고 연신율이 낮은 것은 상부 베이나이트에서와 같은 이유인 것으로 사료된다.

3.3 충격시험 및 피로시험

충격시험의 결과는 Fig. 6에 나타내었는데 충격치 역시 금형주조의 경우가 사형주조보다 크게 나타나고, 오스테퍼링 온도가 270°C 때의 충격치가 가장 크고, 320°C, 370°C 및 420°C 순으로 나타남

을 보였다.

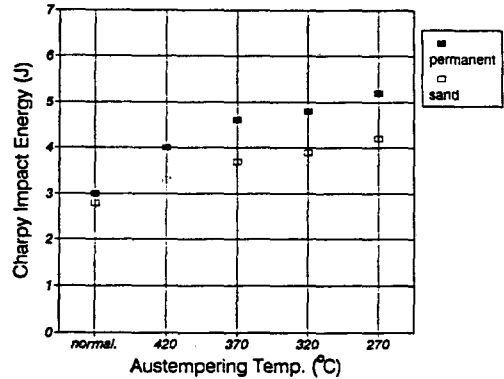


Fig. 6 Charpy Impact energy vs. austempering temp.

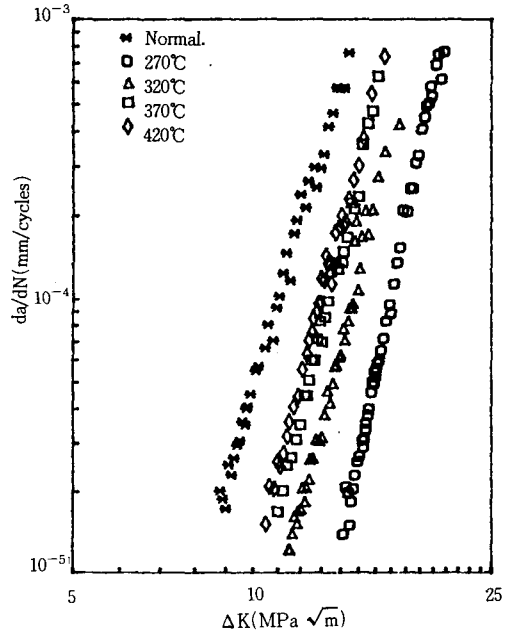


Fig. 7 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range(permanent mold)

피로시험의 시험결과는 금형주조의 경우 피로균열진전 속도(da/dN)와 응력확대계수 폭(ΔK)의 관계로 정리하여 노말라이징 한 시험편의 시험결과와 오스테퍼링 온도 270°C, 320°C, 370°C 및 420°C의 시험편에 대한 시험 결과 Fig. 7에 함께 나타내었다. 또한, 사형주조의 경우 노말라이징 한 시험편의 시험결과는 Fig. 8에 나타내었다.

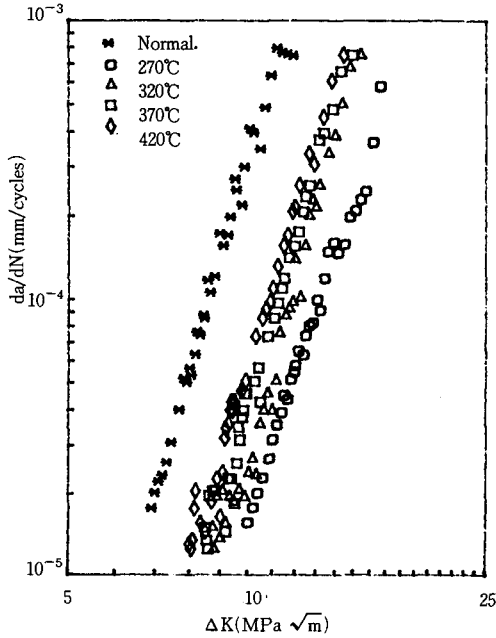


Fig. 8 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range(sand cast)

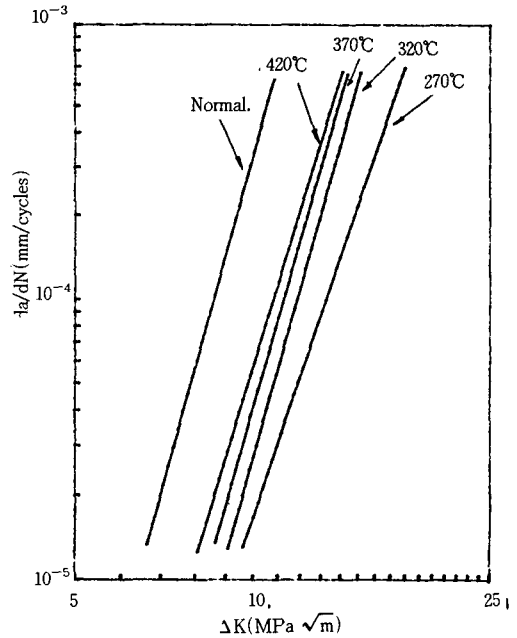


Fig. 10 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range(sand cast)

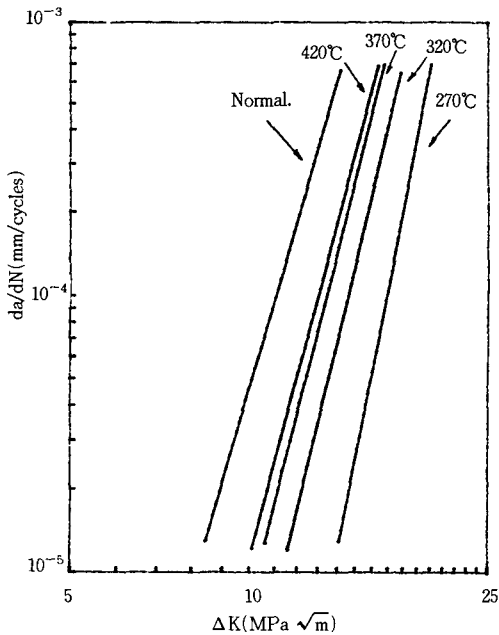


Fig. 9 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range(permanent mold)

Table 4 Constant m and C of fatigue crack growth in AGI

Austempering Temp. and Time	AGI Permanent Mold		Sand Cast AGI	
	m	C	m	C
Normal.	7.63	1.08E-12	7.82	4.98E-12
270°C	11.27	1.42E-18	6.31	8.23E-12
320°C	9.18	2.06E-15	7.63	6.39E-13
370°C	8.72	1.45E-14	7.55	1.16E-12
420°C	8.32	5.37E-14	7.06	4.89E-12

피로균열진전거동은 금형주조시험편이 사형주조시험편에 비하여 느리게 나타났으며, 노말라이징한 시편의 피로균열전파속도가 가장 빨랐고, 오스템퍼링 온도가 420°C, 370°C, 320°C 및 270°C의 시편의 순으로 온도가 낮아짐에 따라 피로균열진전속도가 느려지는 것으로 나타났다. 피로균열진전 속도를 Paris식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 을 적용하여 구한 값을 Table 4에 나타내었다. 또한, 이 식에 의한 직선 식을 Fig. 9에 금형주조 한 시편의 피로 시험 결과를 종합하여 나타내었고, 사형주조의 경우는 Fig. 10에 나타내었다.

충격시험과 피로시험의 결과를 고찰하여 보면 ADI와는 상이하게¹¹⁾ 오스템퍼 회주철(AGI)에서는 하부베이나이트 시료가 보다 높은 값을 보이는데, 이것은 잔류 오스테나이트량이 충격 및 피로 파괴인성치에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 의미하고, 이의 원인은 금형주조에서는 미세흑연, 사형주조에서는 편상흑연의 노치효과에 의하여 오스테나이트상에 의한 연성의 증가가 완전히 지워져 버리는데 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 금형주조 및 사형주조한 공정조성의 주철을 오스템퍼링하여 잔류 오스테나이트상을 함유하는 오스템퍼회주철(AGI)을 제조하고 기계적 특성, 피로균열진전거동을 서로 비교 검토하였는데 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 금형주조한 AGI가 사형주조한 AGI보다 강도, 경도 및 충격치가 크게 나타나며, 오스템퍼링에 의하여 기계적성질을 향상시킬 수 있는데, 인장강도, 경도 및 충격치는 오스템퍼링 온도가 270°C인 경우가 가장크고, 320°C, 370°C 및 420°C의 순으로 나타나나 연신율은 모두 1% 미만으로 어느 오스템퍼링온도에서도 개선되지 아니하였다.
- 2) 피로균열진전거동은 금형주조시험편이 사형주조시험편에 비하여 느리게 나타났고, 피로균열진전거동이 노말라이징한 시편이 가장 빨랐고, 오스템퍼링 온도가 420°C, 370°C, 320°C 및 270°C로 낮아짐에 따라 피로균열진전속도가 느려지는 것으로 나타났다.
- 3) 잔류 오스테나이트량의 증가가 피로파괴인성 및 충격치의 개선에 기여하지 못 하였는데 이것은 흑연의 노치효과에 의하여 오스테나이트 相에 의한 연성의 증가가 완전히 지워져 버리는데 있다고 사료된다.

본 연구는 유한 산업과학기술연구소의 학술연구 지원에 의하여 수행되었으며 연구소 관계자분들께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Muhlberger, H., Proc. of 2nd Intl. Conf. on ADI, Univ. of Michigan, p. 55, 1986.
- 2) Kovacs, B., Proc. of 2nd Intl. Conf. on ADI, Univ. of Michigan, p. 291, 1986.
- 3) Vennemann, K., Hornung, K. and Fischer, G., Proc. of 2nd Intl. Conf. of ADI, Univ. of Michigan, p. 373, 1986.
- 4) Lincoln, J., Proc. of 2nd Intl. Conf. on ADI, Univ. of Michigan, p. 381, 1986.
- 5) 이영상, 이하성, 강동명, 금형주조한 오스템퍼회주철의 기계적성질 및 파괴인성, 제15권 3호, pp. 291~297, 1995.
- 6) VanMald, M. D., Rundman, K. B., On the Structure and Properties of Austempered Gray Cast Iron, AFS Trans. 86-47.
- 7) 日本鑄物協會編, 鑄鐵의金形鑄造, p. 72, 1976.
- 8) 素形材センター, 日本の新素形材, p. 3, 1991.
- 9) 함경춘, 단일하중을 받는 재료의 파괴역학적 거동에 관한 연구, 박사학위논문, 인하대학교, 1985.
- 10) ASTM E-647, Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/cycle, Appendix I, 1993.
- 11) 이영상, 강인찬, 금형주조한 Mo-Ni-Cu계 구상흑연주철의 오스템퍼링 온도 및 시간에 따른 파괴특성, 주조학회논문집, 제11권 4호, p. 331, 1991.