

|||||||  
論 文  
|||||||

### 주철의 절삭성에 미치는 조직의 영향

박희상 · 이상용\* · 김정석\* · 박익민†

## Effect of Microstructure on the Machinability of Cast Iron

Hee-Sang Park, Sang-Young Lee\*, Jeong-Suk Kim\*, and Ik-Min Park†

### Abstract

The machinability of cast iron is closely related to its microstructural property. In this study, the effect of graphite morphology and matrix microstructure on machinability in several commercial cast irons (GC 25, GCD 45, GCD 50, GCD 70, GCD HSMo, GCMP) was investigated. To estimate the machinability, turning test was carried out under conditions of spindle speed 80 m/min, depth of cut 0.25 mm, feed 0.16 mm/rev and cutting distance 1 km. Thrust force in turning test decreases in the order of GCMP, GCD 70, GCD 50, GC 25, GCD 45 and GCD HSMo. i.e. machinability increases in this order. The superior machinability of GC 25 is caused by flake type graphite which acts as chip braker and provides lubrication during machining. Consequently, soft ferritic cast irons exhibit superior machinability compared with pearlitic cast irons.

(Received November 17, 2001)

**Key words :** Cast iron, Machinability, Graphite morphology, Matrix structure

### 1. 서 론

자동차 power train 부품용으로 회주철, 구상흑연주철, 가단주철, ADI주철 등 흑연형상과 강도가 상이한 주철이 상용화 되고 있다. 근년 주물사 및 조형기술의 향상, 용해 및 접종처리기술의 향상 등으로 상당부분 균일 특성의 주철제품이 생산되고 있다. 그러나, 주철의 절삭가공시의 불균일성의 문제로 주철의 절삭가공에 있어 최대 생산성과 최소 생산비를 달성하기 위해서는 적절한 절삭조건 선정이 매우 중요하며, 이는 주철의 조직학적 특성과 깊은 연관을 가지고 있어 이에 대한 검토가 요구된다[1].

주철은 조직중 흑연이 칩 브레이커(chip braker)역할을 하여 절삭칩을 세분화시키고, 또한 흑연이 고체윤활제 역할을 하기 때문에, 일반적으로 절삭저항이 적고 공구마멸율이 낮은 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 주철의 절삭성은 주철의 용해, 성분조정, 접종처리, 냉

각속도 등에 따라 흑연입수, 기지조직 등이 크게 변화하므로 이에 대한 충분한 이해가 요구되나, 주철조직과 절삭성과의 관련 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 흑연형상과 기지조직이 상이한 회주철(GC 25), 구상흑연주철(GCD 45, GCD 50, GCD 70, GCD HSMo), 펄라이트(pearlite) 가단주철(GCMP)에 있어서, 주철의 조직이 절삭성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 일정한 절삭조건하에서 선삭가공(turning) 후 각 주철의 절삭저항, 공구의 마모, 그리고 절삭가공 표면조도 등에 대한 절삭성을 비교하여[3], 주철의 흑연형상, 기지조직 변화와 절삭성에 따른 상관관계를 검토하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 기계적 특성 평가 및 조직관찰

본 실험에 사용된 주철의 화학조성을 Table 1에 나

부산대학교 재료공학부(Department of Metallurgical Engineering, Pusan National University)

\*부산대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Pusan National University)

†E-mail : impark@hyowon.pusan.ac.kr

Table 1. Chemical composition of specimens

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Sn	Mg
GC 25	3.227	1.966	0.842	0.033	0.120	0.160	0.398	0.028	0.035	
GCD 45	3.654	2.612	0.287	0.052	0.008	0.025	0.087	0.024		0.038
GCD 50	3.657	2.653	0.392	0.063	0.002	0.030	0.285	0.027		0.037
GCD 70	3.501	2.610	0.444	0.059	0.001	0.034	0.459	0.029		0.038
GCD HSMo	3.492	3.484	0.32	0.054	0.005	0.026	0.040	0.419		0.032
GCMP	2.571	1.393	0.411	0.032	0.048	0.021	0.207	0.225		

타내었으며, 영화금속에서 제공하였다. 주철의 경도측정은 ASTM E 10의 규격에 따른 브리넬 경도(Brinell hardness) 측정법 중 3000 kg 하중, 10 mm indenter diameter, 30 sec load time의 방식으로 실행하였다. 시편의 두께는 8 mm로 가공하였으며, 각 시편당 10회씩 경도값을 측정하였다. 인장시편은 ASTM 규격에 맞추어 제조하여, 8516(Instron co.)시험기를 사용하여, cross head speed 2 mm/min에서 각 조건당 3개의 시험편을 사용하여 평균한 결과를 관찰하였다. 각 시편의 흑연분포 및 기지조직, 절삭면 및 칩의 관찰은 광학현미경, FE-SEM(Jeol type)으로 행하였고, 조직의 정량적 분석은 Image analyzer(Pro-Plus2)로 행하였다.

### 2.2 절삭시험

본 실험에서는 흑연형상과 기지조직이 상이한 회주철(GC 25), 구상흑연주철(GCD 45, GCD 50, GCD 70, GCD HSMo), 펄라이트 가단주철(GCMP)의 시편을 준비하여 범용 선반에서 텅스텐탄화물(WC)에 부분적으로 티탄탄화물, 탄탈과 니오븀의 복합탄화물을 첨가시켜 코발트(Co)결합제를 사용한 초경공구 중에서 주철절삭용인 K계열의 초경공구(SNGN120408 K20)로 절삭속도 80 m/min, 절삭깊이 0.25 mm, 이송속도 0.16 mm/rev, 절삭거리 1 km의 일정한 절삭조건하에서 선삭가공을 행하면서 절삭성을 평가하였다. 고응답성을 가진 압전형 힘센서(Kistler사, type : 9257B)를 이용한 3축 공구동력계를 이용하여 절삭력의 신호를 획득하고 그에 따른 공구마멸과 표면조도를 측정 비교하였다.

절삭력을 통한 가공성 평가를 위해 본 실험에서 사용된 실험장비와 사양을 Table 2에 나타내었다[4]. 절입에 따른 주속을 일정하게 유지하기 위하여 공작물 반경에 따른 일정한 주속에 해당하는 보정된 회전수로 조절하는 변속기(inverter)를 사용하여 실험을 행하였으며, 주축에 물린 공작물의 반대쪽을 센터(center)가공하

Table 2. Instruments and specifications

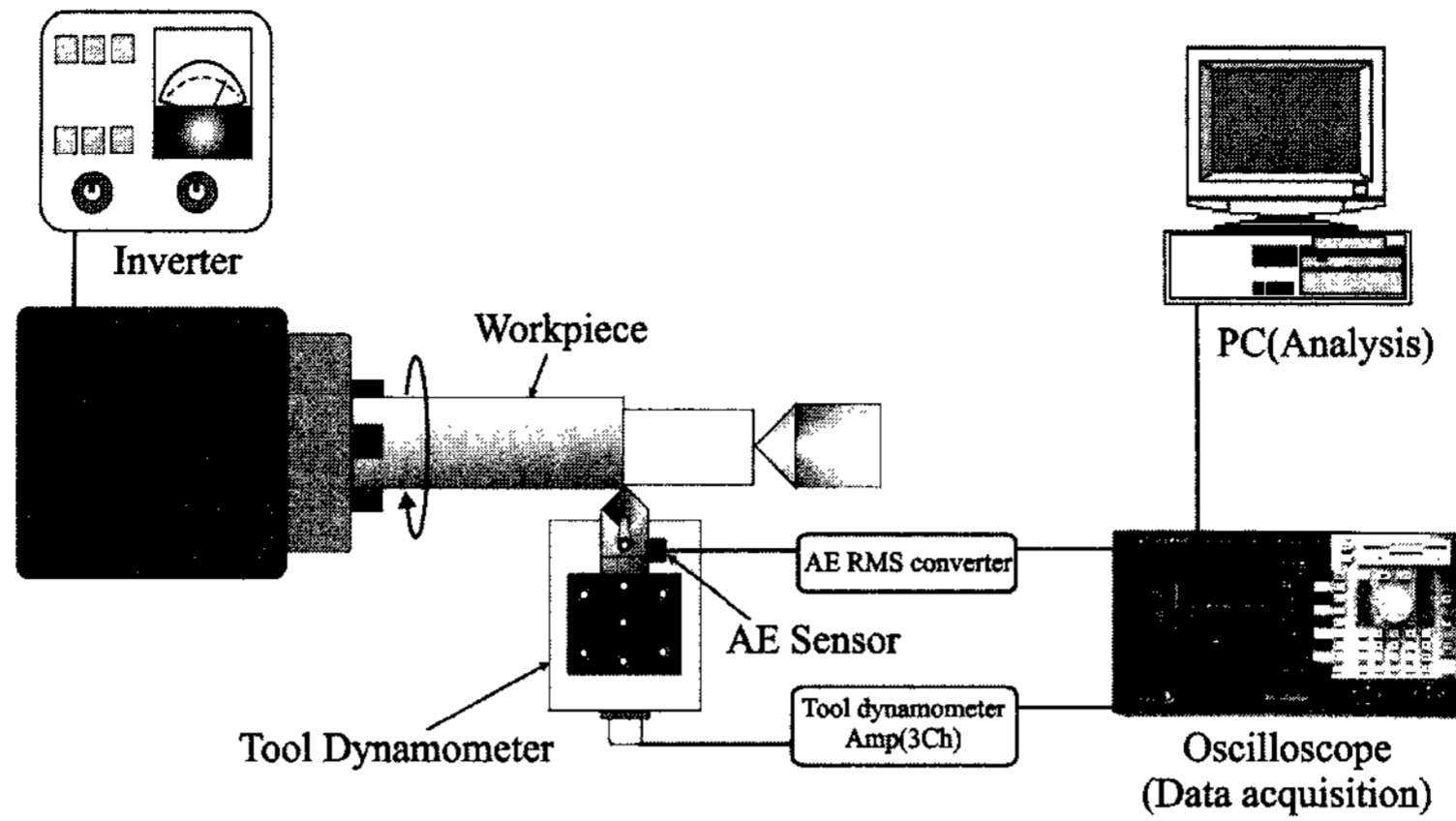
Instrument	Specification
Cutting machine	High Speed Precision Lathe
Tool dynamometer	9257B (Kistler)
Oscilloscope	4Ch 200MHz (Lecroy LT224)
Inverter	Control of spindle speed
Microscope	Max × 500 (Olympus STM-MJS2)
Surface tester	Stylus type (Misutoyo)
Tool	SNGN120408 K20

Table 3. Cutting conditions

Depth of cut (mm)	Spindle speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Cutting fluid
0.25	80	0.16	Dry

여 물림으로써 chatter진동을 방지하였다. Fig. 1에 전체적인 실험장치의 개략도를 나타내었다.

본 실험에서는 절입과 이송, 회전속도를 일정하게 고정시키고 실험을 행하였으며, Table 3에 가공조건을 나타내었다. 본 연구의 실험방법은 직경 30 mm의 환봉형 시편을 선반가공하여 3축 공구동력계를 이용 절삭방향과 평행하며 공구의 절삭방향과는 반대로 작용하는 주분력(principal cutting force), 절삭깊이의 반대방향으로 작용하는 배분력(thrust force), 그리고 이송방향과 반대방향으로 작용하는 이송분력(feed force)을 매 가공 패스(pass)마다 1번씩 동일한 시점에서 획득하고 [5], 공구현미경을 통해 가공시 피삭재의 표면과 마주보는 여유면(flank face)과 칩이 흘러가는 공구의 윗면인 경사면(rake face)의 공구마멸정도를 측정하였으며 [6], 가공후 절삭방향과 수직인 방향으로 각 시편의 표면조도를 비교하였다. 표면조도는 절삭깊이 1000 μm 가공후 기준길이 2.5 mm로 하여 측정된 중심선 평균 거칠기(Arithmetical Mean Deviation of the Profile: Ra)와 십점 평균 거칠기(Ten Point Height of Irregularities: Rz)를 측정하였다.



Shape of Workpiece	Cutting Tool
GC25, GCD45, GCD70, GCD HSMo, GCMP	SNGN120408 K20

Fig. 1. The schematic map of experimental setup.

Specimen	(a) GC25	(b) GCD45	(c) GCD50
Microstructure			
Matrix	Pearlite	Ferrite	Ferrite+Pearlite
Specimen	(d) GCD70	(e) GCD HSMo	(f) GCMP
Microstructure			
Matrix	Pearlite	Ferrite	Pearlite

Fig. 2. Microstructure of matrix.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 주철의 조직 및 기계적특성

본 실험에 사용한 지지조직과 흑연형상이 상이한 6

종의 주철의 광학현미경 조직을 Fig. 2에, SEM 조직을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 3에서 (a)는 GC25 조직으로 ASTM규격 size No. 3~4, A형 편상흑연이 펄라이트 지지 중에 균일분포하고 있다. (b)는

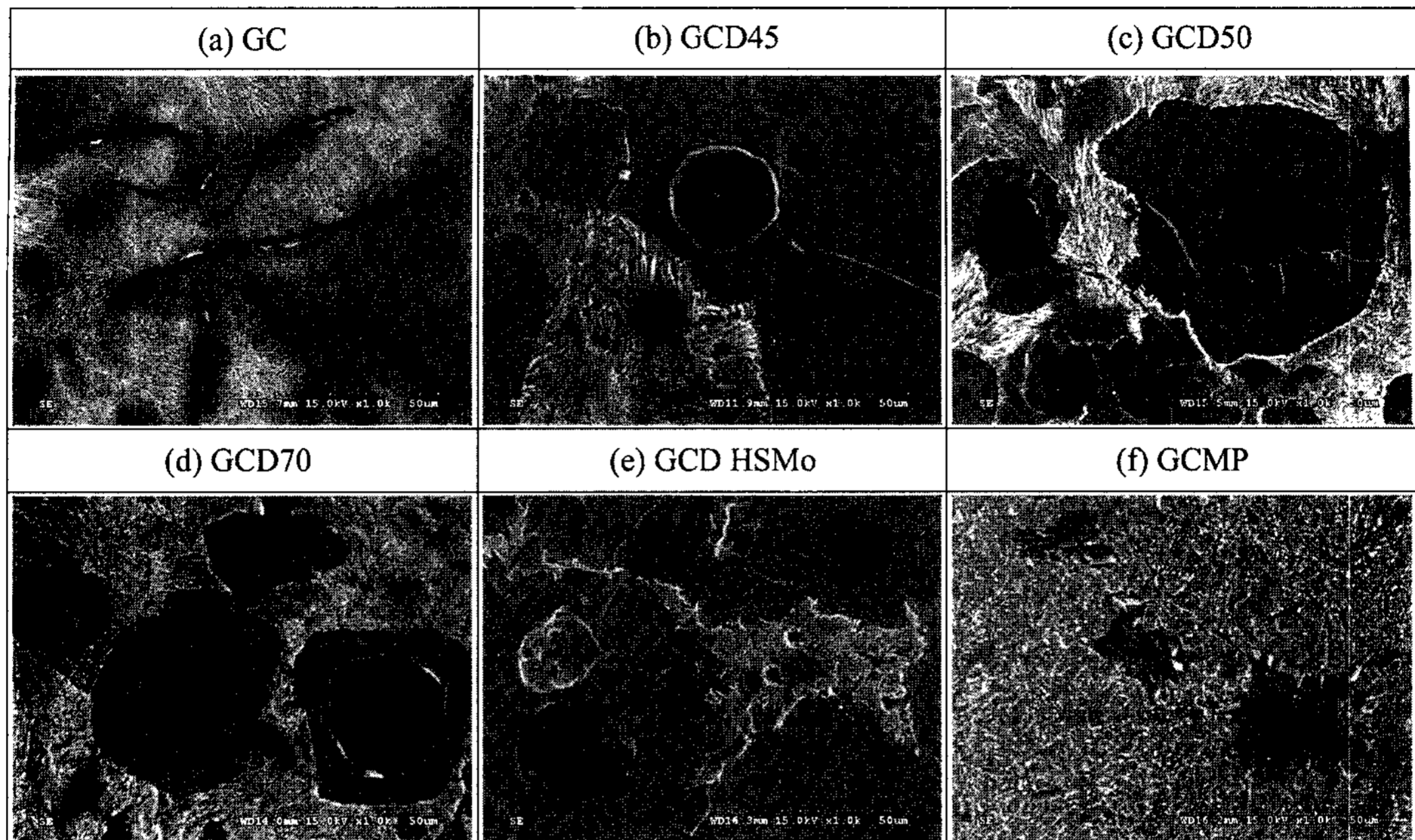


Fig. 3. SEM photographs of specimens.

Table 4. Microstructural analysis data

Specimen	Area fraction of graphite (%)	Nodule count of graphite (#/mm <sup>2</sup> )	Mean diameter of graphite (μm)	Area fraction of pearlite (%)
GCD 45	17.5	239	27.6	12.2
GCD 50	15.8	154	24.6	53.9
GCD 70	14.7	133	22.8	71.4
GCD HSMo	19.8	367	21.6	-

GCD 45 구상흑연주철의 조직으로 페라이트(ferrite) 기지와 입계부근의 소량의 퍼얼라이트를 가지는 페라이트 + 펄라이트 혼합조직을 나타내고 있다. (c)와 (d)는 GCD 50과 GCD 70의 구상흑연주철조직으로 펄라이트 기지와 구상흑연 주위의 백색 페라이트 조직을 갖는 전형적인 Bull's eye조직을 보여주고 있다. 강도가 증가하는 GCD 45, GCD 50, GCD 70 순으로 기지내 펄라이트 분율이 증가함을 알 수 있다. Table 4에는 Image analyzer의 상분석 결과를 나타내는데, GCD 45, GCD 50, GCD 70 순으로 펄라이트 분율이 12, 54, 74%로 증가하고 흑연입수 및 직경은 감소하고 있다. (e)는 GCD HSMo 구상흑연주철조직으로 흑연화조장원소인 Si과 강도 향상을 위해 Mo이 첨가됨에 따라 기지전체가 페라이트 조직으로 변화하고, 흑연의 평균입경이 감소하는 대신 단위면적당 흑연입수가 증가하였으며 입자간 간격이 감소하였음을 알 수 있다.[7-

Table 5. Mechanical properties of the specimens

Specimen	Hardness (HB)	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )
GC 25	204	29
GCD 45	170	50
GCD 50	203	56
GCD 70	247	76
GCD HSMo	205	60
GCMP	223	71

10] (f)는 가단주철의 조직으로 펄라이트 기지내 분산 분포된 괴상형태의 소려탄소(tempered carbon)를 관찰할 수 있다[11]. Table 5에는 상용주철의 브리넬 경도 및 인장특성을 나타낸다. 금속의 경도는 절삭율을 결정하는 중요한 요소로서 연질의 페라이트 분율의 증가에 따라 경도가 감소하지만, Si과 Mo이 다량 첨가된 경우 기지조직이 페라이트화가 되어도 경도가 상당히

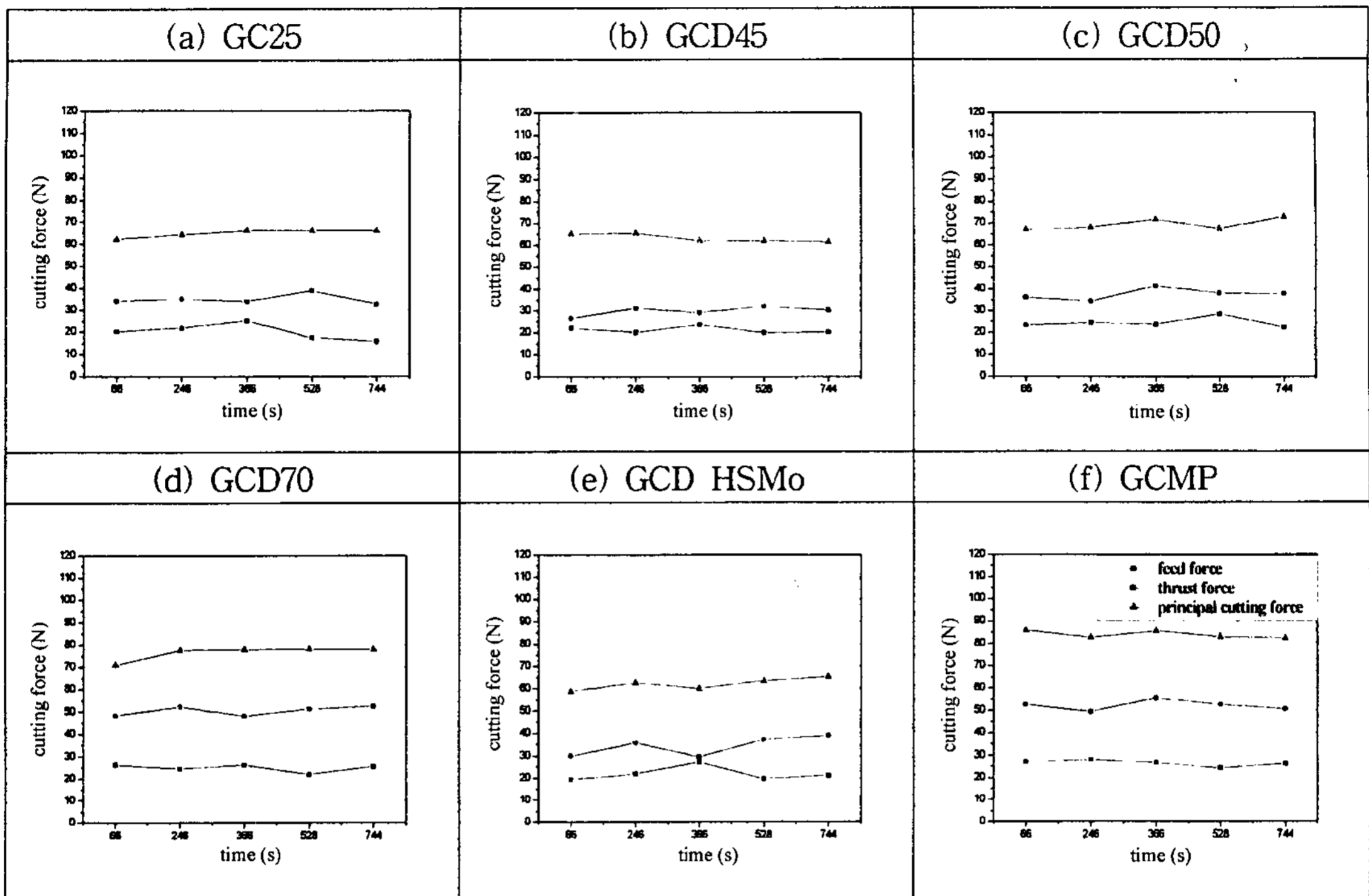


Fig. 4. Comparison of cutting forces.

높음을 알 수 있고, 이는 페라이트 기지조직의 고용경화에 의한 것으로 사료된다[12]. 인장특성에 있어서 같은 구상흑연의 경우 경도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하였으며, 회주철의 경우 편상의 흑연선단부가 응력집중부로 작용함으로 높은 경도에도 불구하고 매우 낮은 인장강도를 갖고 있으며, 가단주철은 회주철과 구상흑연주철의 중간적인 기계적 성질을 갖고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 절삭 특성

Fig. 4에는 각종 주철의 절삭저항을 나타내는데, 80 m/min의 일정한 주속으로 절삭거리를 1000 m로 했을 때 각 시편의 시간의 변화에 따른 주분력, 배분력, 이송분력 세 절삭력의 크기와 변화를 나타내었다. 주분력(principal cutting force)은 절삭방향과 평행하며 공구의 절삭방향과는 반대로 작용하는 절삭저항을 나타내며, 배분력(thrust force)은 절삭깊이의 반대방향으로 작용하는 절삭저항을, 그리고 이송분력(feed force)은 이송방향과 반대방향으로 작용하는 절삭저항을 나타낸다(Fig. 5). 주분력과 이송분력의 경우 GCMP,

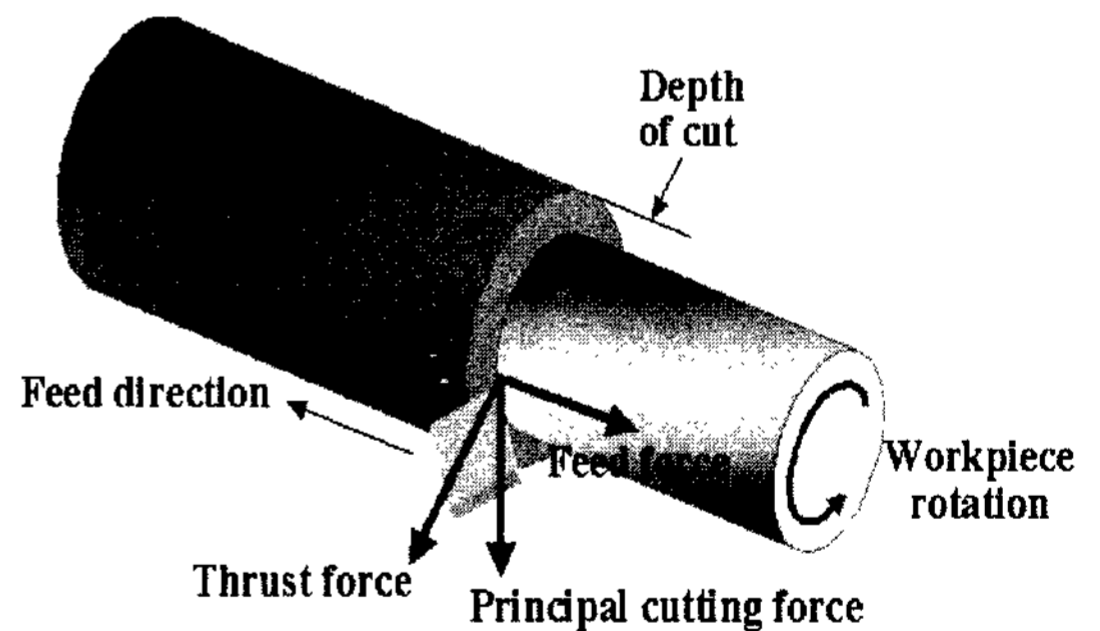


Fig. 5. The schematic diagram of cutting force system.

GCD 70, GCD 50, GCD 45, GC 25, GCD HSMo 순으로, 배분력은 GCMP, GCD 70, GCD 50, GC 25, GCD 45, GCD HSMo 순으로 감소하였다. 절삭거리 에 따른 공구의 마멸량을 Fig. 6에 나타내었다. 절삭길 이가 증가함에 따라 공구마멸량은 증가하며, 절삭력이 클수록 공구마멸량이 많은 것을 관찰할 수 있었다. 주 철종류별로는 GCMP, GCD 70, GCD 50, GC 25, GCD 45, GCD HSMo 순으로 공구마멸량이 감소하였 다. 절삭력이 가장 큰 GCMP의 경우 다른 재종에 비

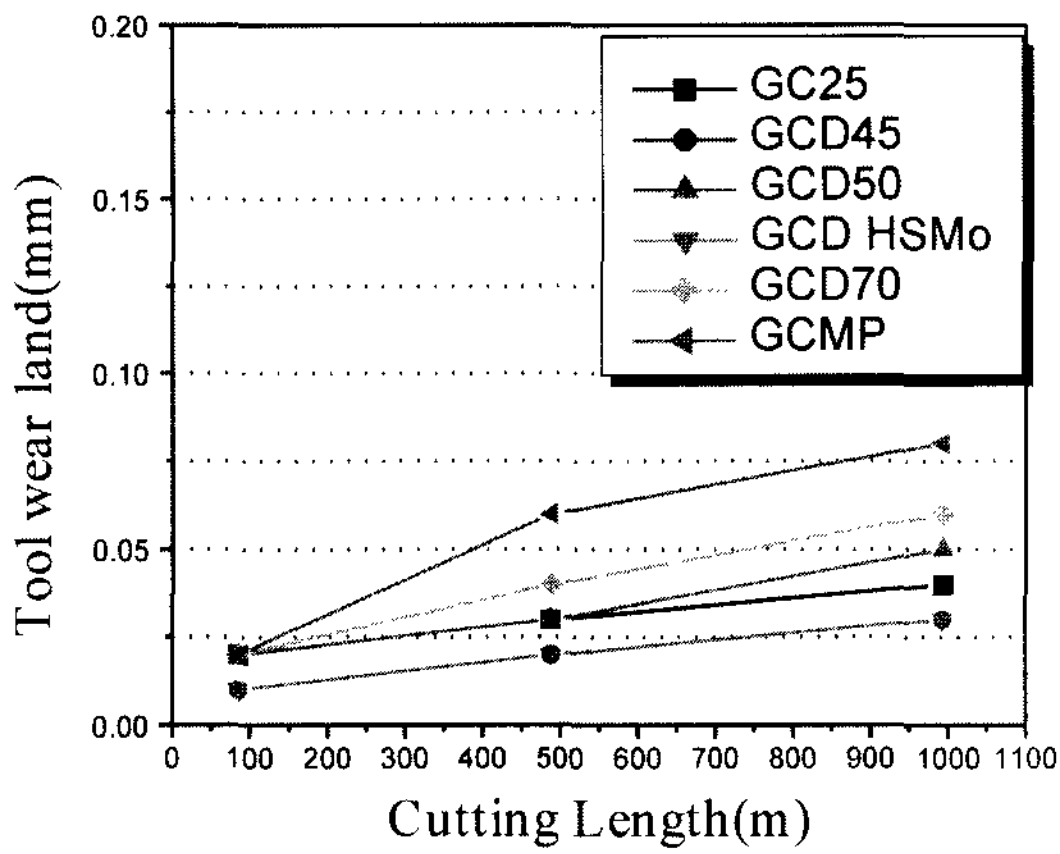


Fig. 6. Characteristics of tool wear according to cutting length.

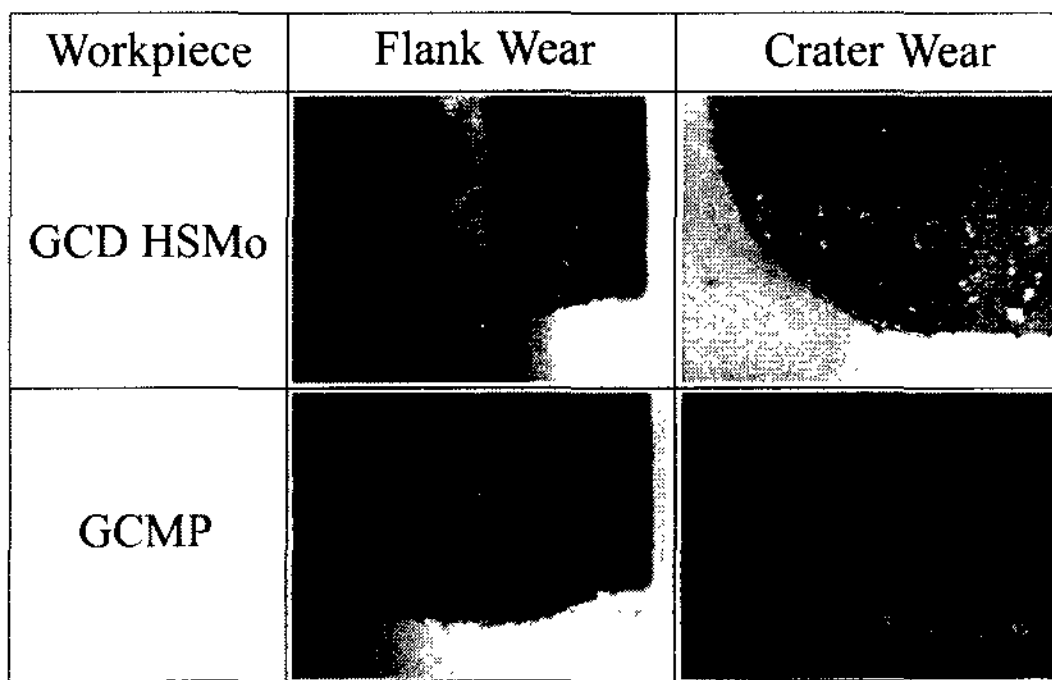


Fig. 7. The photographs of flank and crater wear.

해 공구마멸이 가장 크게 나타났으며, 절삭력이 가장 작은 GCD HSMo가 공구마멸량이 가장 작게 나타났다. 각 시편에서 모두 공구 여유면에 칩의 일부가 달라붙는 구성인선이 발생하였다. Fig. 7에는 GCD HSMo와 GCMP의 절삭거리 1000 m 가공후 공구 마멸사진을 나타내며, 여유면 끝단 아래로 튀어나온 부분이 구성인선을 나타내며, GCMP가 GCD HSMo에 비해 여유면과 경사면에 있어서 검은색으로 나타나는 공구마멸영역이 넓은 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 8은 최종 절삭가공후의 표면거칠기를 가공방향에 수직방향으로 측정된 값을 표시한 것으로서, 중심선 평균 거칠기(Ra)와 십점 평균 거칠기(Rz)를 표시하였다. GCMP, GC 25, GCD 70, GCD 50, GCD 45, GCD HSMo 순으로 표면조도가 감소하고 있다. GCMP의 표면조도가 가장 나쁘며, GCD HSMo의 표면조도가 가장 양호한 것으로 나타났다.

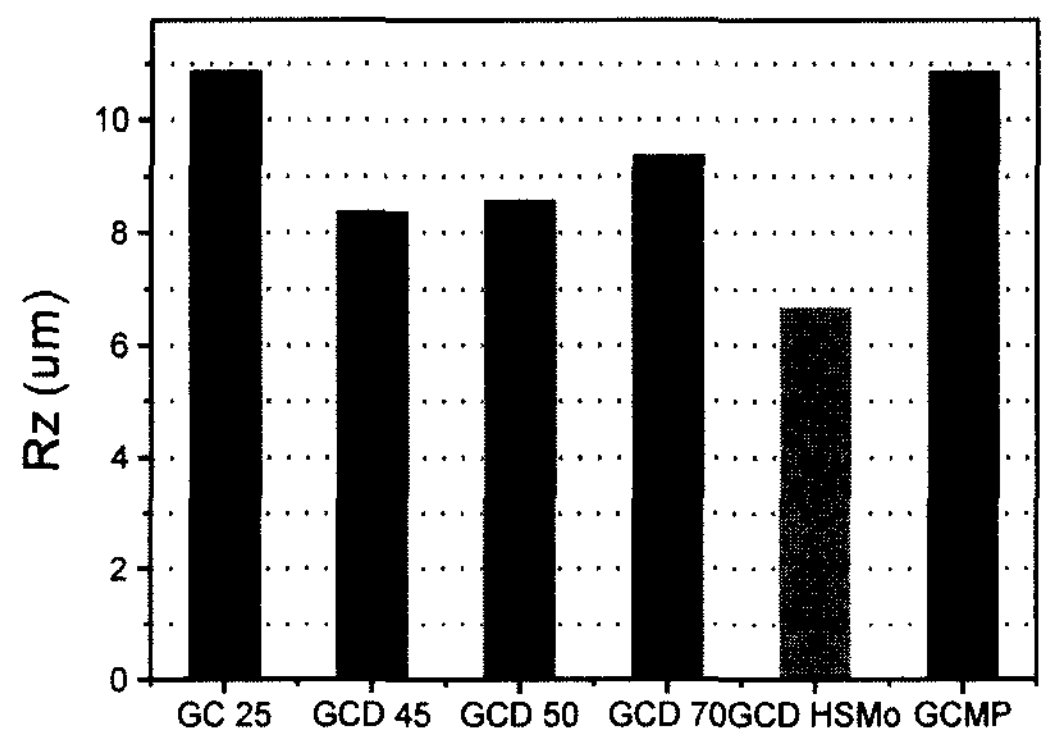
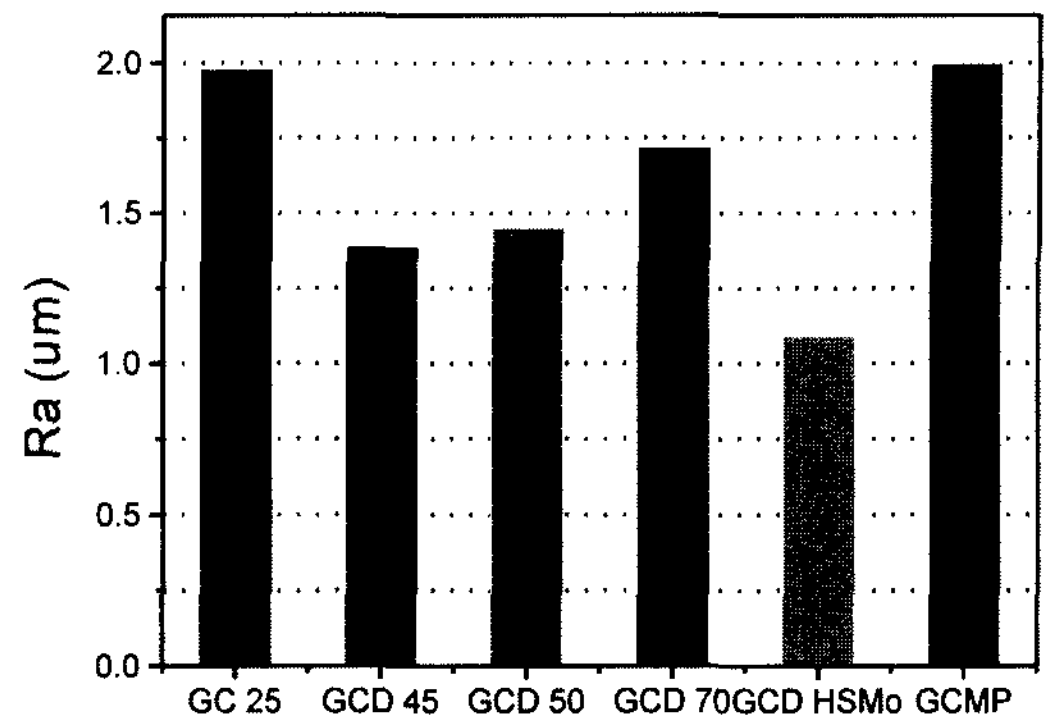


Fig. 8. The results of surface roughness test.

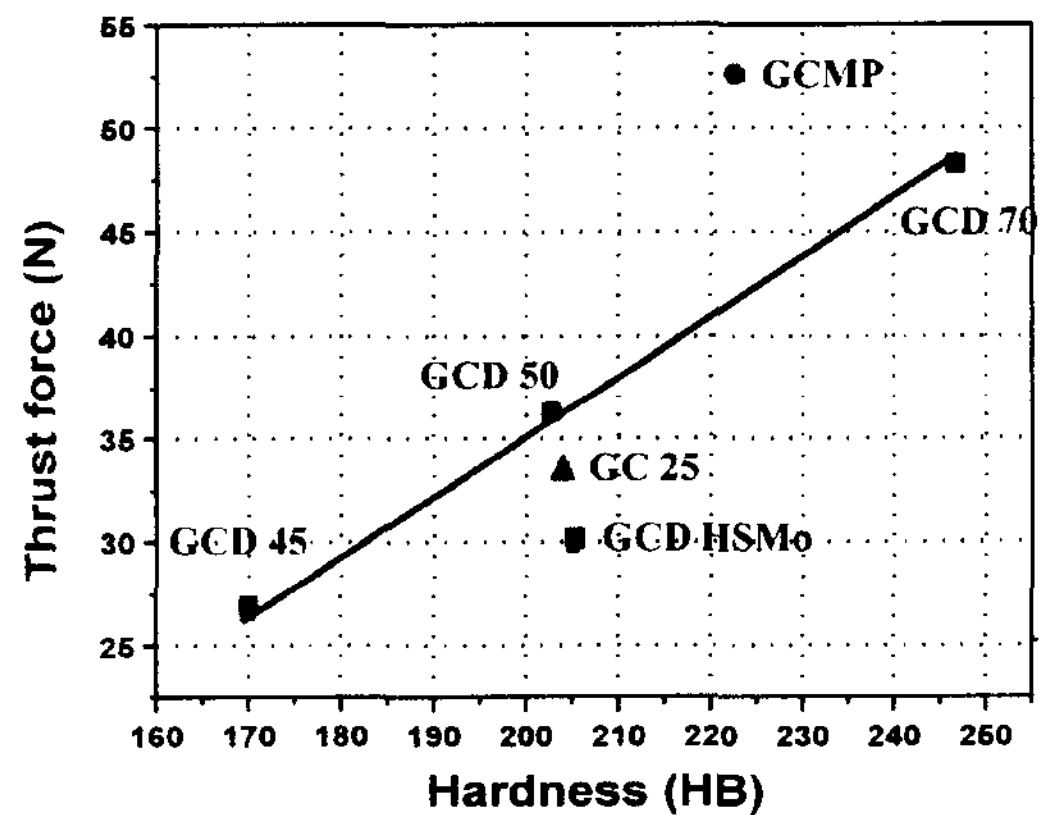


Fig. 9. Relationship between hardness and cutting force.

### 3.3 절삭성에 미치는 조직의 영향

Fig. 9에는 흑연형상과 기지조직이 상이한 6종의 주철에서 경도와 절삭력 중 초기 배분력과의 관계를 나타내었다. 우선 같은 구상흑연주철로 기지조직과 경도를 달리하는 GCD 45, 50, 70의 관계를 살펴보면 경도가 증가할수록 배분력이 증가하는 비례관계를 보

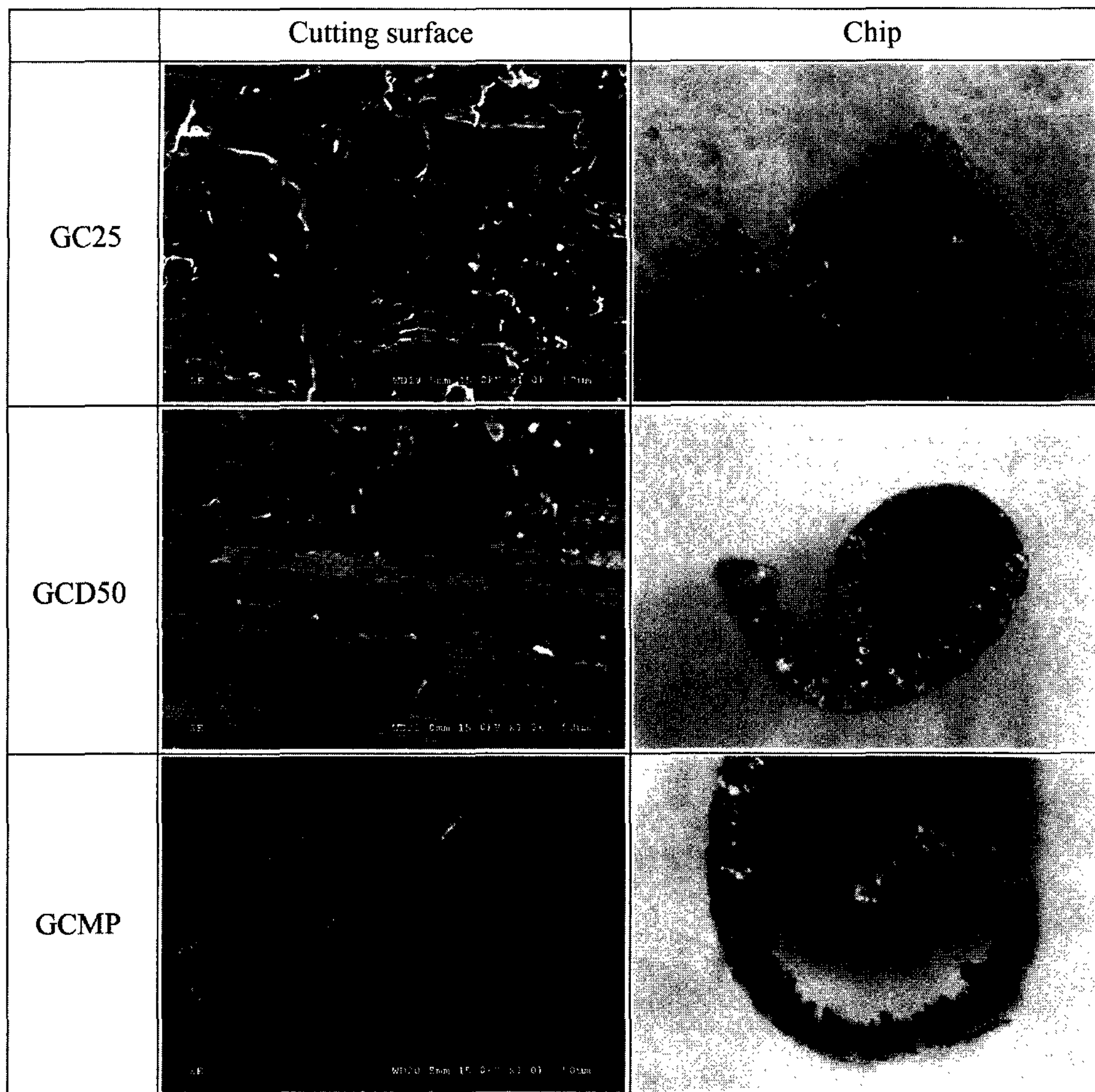


Fig. 10. The photographs of cutting surface and chip shape.

였다.

즉 연질의 페라이트 분율이 커질수록 배분력이 낮아짐을 알 수 있다. 기지내 페라이트 분율이 증가함에 따라 절삭저항이 낮게 나타났다. 흑연형상은 다르지만 비슷한 경도를 갖는 GC 25와 GCD 50을 비교했을 때, GC 25가 GCD 50보다 절삭력이 작게 나타났으며, GC 25가 경질의 페라이트 분율이 GCD 50보다도 큼을 고려하더라도 절삭저항력은 편상흑연의 경우가 구상흑연에 비해 낮은 것으로 판단된다. Fig. 10에는 GC 25, GCD 50, GCMP의 절삭면의 SEM 조직과 칩 사진을 병행하여 나타내었다. 절삭방향으로 흑연입자주위의 기지가 연신되고 흑연입자의 탈락이 일어나거나 절단된 모습을 볼 수 있었으며, 칩에서도 검은 색으로 나타나는 흑연입자의 모습을 관찰할 수 있었다.

GCD 50과 GCMP의 경우는 연속적인 칩 형상을 보이나, GC 25은 단속적인 형태의 칩이 나타났다. 이는 흑연의 선단형상이 예리한 편상흑연의 경우 흑연선단에서 응력집중이 용이하고 이에따른 흑연과 기지조직간의 균열발생에 따라 계면분리가 용이하여 절삭가공중 칩 브레이크로서의 역할이 증대되는 것으로 사료된다. 즉 흑연형상의 선단의 예리한 정도에 따라 칩 브레이크 역할이 증가된다고 생각되어지고, 피상의 소려탄소를 가지는 가단주철의 경우는 편상흑연과 구상흑연의 중간정도의 칩 브레이크 역할을 하는 것으로 사료된다. 또한 칩 브레이크의 역할정도에 따라 고체윤활제로서의 흑연작용도 커지고, 표면조도도 변화될 것으로 사료된다. GCD HSMo의 경우 낮은 배분력을 나타내었는데 이는 기지가 100% 페라이트화 함에 따

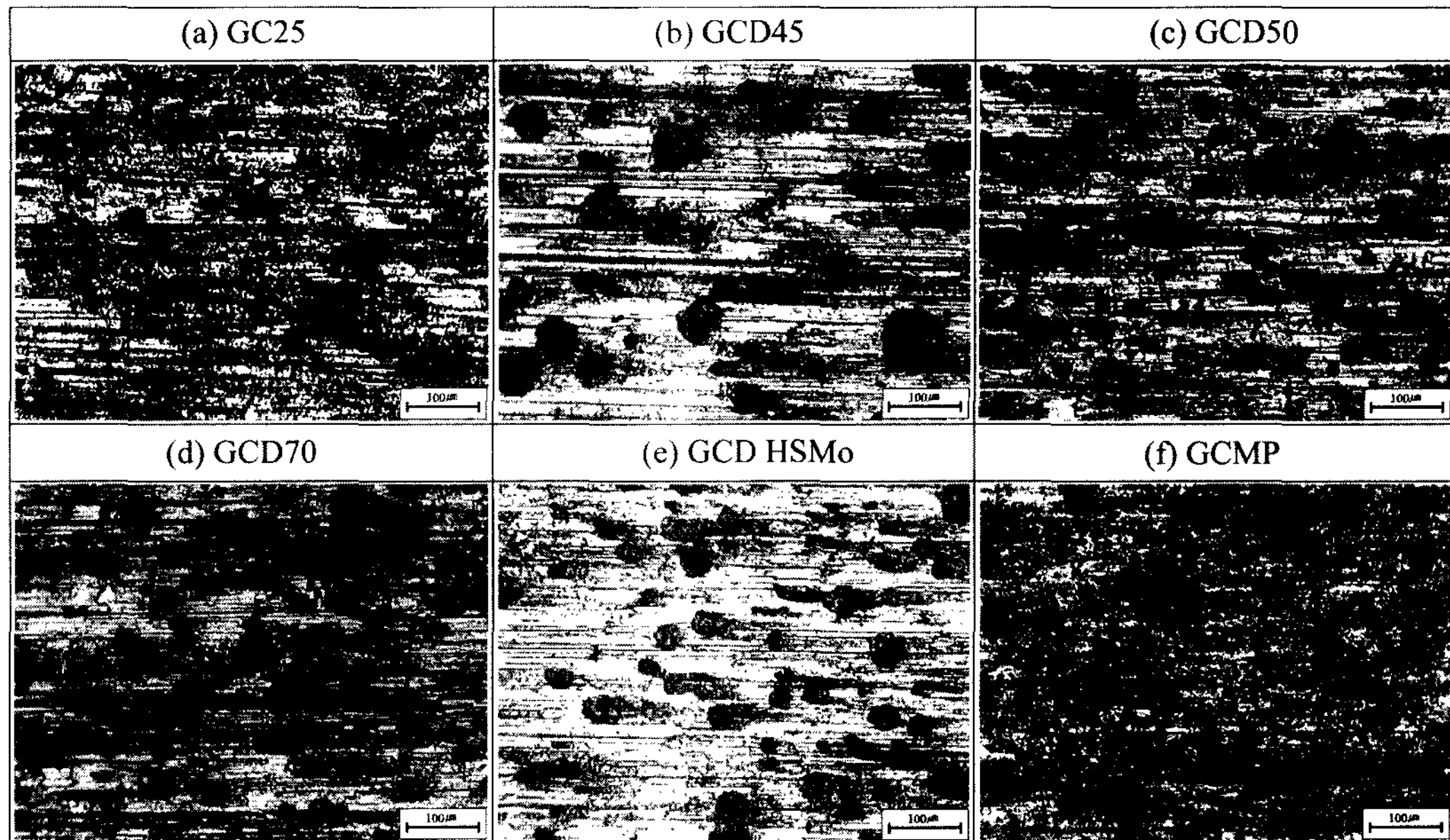


Fig. 11. The photographs of cutting surfaces (Cutting direction →).

른 것으로 사료되고, GCMP의 경우는 100% 펄라이트 기지를 가지면서 괴상의 소러탄소가 편상흑연만큼 칩 브레이커 역할을 하지 못하고 고체 윤활제로 절삭시 절삭면에 도포되는 양이 적기 때문일 것으로 사료된다. 흑연화조장원소가 첨가된 GCD HSMo의 경우 기지의 페라이트화와 함께 기지내 흑연입수의 증가와 흑연간격의 축소가 절삭성 향상에 크게 기여한 것으로 판단된다.

즉, 흑연은 강도 및 경도가 아주 낮으며 절삭시 발생하는 칩의 파괴를 돕고, 절선으로부터 쉽게 분리되는 작용을 함과 동시에 공구에 칩이 소착되는 것을 방지하므로 흑연량과 분포, 그리고 흑연의 형상은 주철의 절삭성과 밀접한 관계를 갖고 있다고 할 수 있다. Fig. 11에 절삭면의 광학현미경 사진을 나타내었다. 각 주철의 절삭면에서 흑연의 탈락흔적을 관찰할 수 있었으며, 구상흑연주철로 흑연의 형상이 큰 경우 흑연이 탈락한 곰보상태의 표면이 나타났다[13]. 절삭면을 비교하면 펄라이트 가단주철의 경우 전송마크가 불확실할 뿐만아니라, 표면조도도 가장 나쁘다는 것을 관찰할 수 있다.

이상과 같이 절삭력, 공구마멸특성, 표면조도, 흑연형상과 기지조직과의 관계를 비교 검토한 결과 기지내 페라이트 분율의 증가는 절삭성을 향상시키며, 흑연형

상의 선단이 예리한 편상흑연일수록 절삭성이 향상되고, 또한 흑연의 입수가 많고 간격이 좁을수록 절삭성이 향상되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

흑연형상과 기지조직이 상이한 주철을 선삭가공을 통하여 흑연형상 및 기지조직이 절삭성에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 선삭시의 배분력은 GCMP, GCD 70, GCD 50, GC 25, GCD 45, GCD HSMo 순으로 분력이 감소하여 동순으로 절삭성이 증가하는 것으로 나타났다. 절삭력이 클수록 공구마멸량이 많으며, 절삭력이 가장 큰 GCMP가 공구마멸량이 가장 많았다. 표면조도는 GCD HSMo가 가장 양호하였으며, 기지내 페라이트 분율이 증가할수록 표면조도가 양호한 것으로 나타났다.

2. 같은 구상흑연형상을 가지는 GCD HSMo, GCD 45, 50, 70의 경우 절삭성은 기지조직이 연질의 페라이트가 감소하는 GCD HSMo, GCD 45, 50, 70 순으로 절삭성이 감소하였다.

3. 비슷한 경도를 가지는 GC 25, GCD 50의 비교에서는 GC 25가 펄라이트 분율이 높음에도 불구하고 절삭성에 있어 편상흑연이 구상흑연보다 우수하였다.



### 참 고 문 헌

- [1] N. Ikawa : Ultraprecision Metal Cutting-The Past, The Present, and The Future, CIRP vol.40 (1991) 55 ~ 58
- [2] Manfred Tholl, 曲田 , Steve Dawson : 鑄物 67 (1995) 898
- [3] 上原邦雄 : 切削加工の概論と今後の方向, 精密工學會第239回講習會テキスト, (1997) 5
- [4] F. M. Kustas : Nanocoatings on Cutting Tools for Dry Machining, Annalysis of the CIRP 46 (1997) 39
- [5] Black J T. et al. : Materials and processes in manufacturing, Eighth edition, Prentice Hall 1997
- [6] J. T. Black and Kavir R. Antani : Machinability of Gray and Ductile Irons, SAE, Inc. (1999) 9-11
- [7] Charls F. Walton : Iron Castings Handbook, Iron Castings Society, Inc. (1981) 141, 325, 491-528
- [8] Keith D. Millis : Ductile Iron Data for Design Engeeriners, QIT-Fer et Titane Inc (1990), III
- [9] S. W. Kim : Journal of the Korean Foundarymen's Society, 18 (1998) 167
- [10] D. H. Yang : Wear, 173 (1994) 129
- [11] 박익민 정원섭 최내영 : 주철주물의 기초와 실무, 세종출판사 (1996) 2-8
- [12] Erich Nechtelberger : Gu eisenwerkstoff, Fachverlag Schiele & sch n GmbH (1977) 29-32
- [13] H. S. Park, J. S. Kim, I. M. Park : Journal of the Korean Foundarymen's Society, vol. 21 (2001) 206-207