

304 스테인레스강에서 첨가원소에 따른 미세조직 및 절삭성 연구

강석순 · 김현철 · 이재현[†] · 조종래* · 정윤교* · 장철호** · 황호순**

장원대학교 재료공학과, *장원대학교 기계공학과
**장원특수강(주) 기술연구소

Microstructure and Machinability with Alloying Elements in the 304 Stainless Steel

S. S. Kang, H. C. Kim, J. H. Lee[†], J. R. Cho*, Y. G. Jung*, C. H. Jang** and H. S. Hwang**

Department of Materials Science and Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

**R&D Center, Changwon Specialty Steel Co., Changwon, Korea

(2006년 7월 12일 접수, 2006년 9월 7일 최종수정본 접수)

Abstract To enhance the machinability of the austenite stainless alloys, Mn and S were added to form MnS in the austenite matrix. Recently, Ca is also added to increase machinability. The alloying elements, such as C, Mn, S, Ca, and Al, are known to affect machinability, but those roles are not well understood. In this study, the ingots, controlled of alloying elements, C, Mn, S, Ca, Al, were prepared in the 304 stainless steel. The relationship between microstructure and machinability was compared to understand the role of alloying elements. It was proved that Mn and S enhanced machinability but C reduced it by analyzing cutting force on machining in the lathe. The alloying elements, Ca and Al, made a complex oxide compound of Mn-S-Ca-Al-Si-O, which results in increasing tool life. The ferrite volume fraction was changed with alloying elements and the effect of the ferrite fraction on machining was also discussed.

Keywords Machinability, Austenite, Ferrite, MnS, Inclusion.

1. 서 론

오스테나이트 기지의 304 스테인레스강은 내식성 및 고온 특성이 우수한 합금으로 일반 가정용뿐만 아니라 발전소 보일러 같은 산업용 재료로도 널리 사용되고 있다.¹⁾ 304 스테인레스강은 Cr 18, Ni 8 wt%를 기본으로 강도, 내열, 내식성을 높이기 위해 Mo, Al, Cu 등의 합금원소를 포함하고 있다. 오스테나이트계 스테인레스강은 FCC 구조의 기지를 가지고 있어 인성과 인성이 높지만 기계가공 중 칩이 끊어지지 않고 길게 형성되어 피삭성이 떨어지며 가공성이 좋지 않아 공구의 수명이 낮아지게 된다. 또한 가공경화성이 커 절삭성이 더욱 나빠진다. 오스테나이트강에서 가공의 정밀도 및 가공속도가 요구되는 부분에는 쾌삭성이 요구된다. 이에 적정량의 S를 첨가하여 MnS화합물을 형성, 쾌삭성을 증가시키고 있으며,²⁻⁶⁾ 최근 Ca를 첨가하여 절삭성과 공구의 수명을 증가 시킨 합금이 개발되고 있다.^{7,8)}

Ca이 첨가된 쾌삭강은 S와 함께 Ca를 첨가시켜 MnS

등과 반응하여 생성된 저융점 복합개재물에 의해 부착물(belag)의 등환삭용으로 공구와 피삭재의 응착을 억제시켜 절삭저항을 감소시키는 효과로 공구수명 향상에 도움을 준다고 알려져 있다.^{7,8)} Ca이 첨가되지 않을 때는 MnS 화합물이 형성되나 Ca이 첨가될 때는 Mn-S-Al-Ca-O의 복합산화물이 형성되는 것으로 보고되고 있으나 Ca이 복합개재물을 형성시키는 형성기후와 절삭성을 향상시키는 명확한 원인은 밝혀지지 않고 있다. 잉곳 제조 공정에서 용탕에 Ca의 첨가로 인해 생성된 저융점 복합산화물은 미금속 개재물로 밀도가 낮아 잉곳 내 미세, 균일하게 분포시키기 어렵고 S의 반응성과 석출의 형성 기동이 잘 알려져 있지 않다. 특히 Ca과 S의 첨가시 용탕에 투입량 및 투입 시기에 따라 잉곳 불량 및 절삭특성에도 영향을 미치고 있으나 석출물, 개재물 등 응고조직 형성기후에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 복합산화물의 형성은 Ca의 첨가에 의해 형성되는 것으로 알려져 있지만 다른 합금원소인 Mn, S의 함량 및 Al의 첨가에 따라 영향을 받을 것으로 예상되며 이에 따른 절삭성에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 탄소의 함량이 높을수록 절삭성이 저하되는 것으로 알려져 있

[†]E-Mail : ljh@changwon.ac.kr

으며,⁹⁾ 오스테나이트 기지에 잔류하는 페라이트의 분율도 절삭성에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 304 스테인레스강에서 절삭성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 철기원소(C, Mn, S, Ca, Al)에 따른 MnS 및 복합산화물의 석출, 오스테나이트 기지에 페라이트의 분율 등의 미세조직의 변화를 관찰하였고 이에 따른 절삭성 평가를 통하여 철기원소가 미세조직 및 절삭성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편준비

본 연구에서 사용된 소재는 상업적으로 사용되는 304 스테인레스강으로 쾌삭성에 영향을 미치는 C, Mn, S, Ca, Al 등의 함량을 제어하였다. 각 합금의 조성은 Table 1에 나타내었다. 합금은 35 ton 전기로에서 410×250 mm 사가 봉상으로 0.5 m/min의 속도로 연속주조한 후 직경이 약 100 mm 봉재로 열간 압연하여 준비하였다. 부분적으로 LC-CA-Al-2 및 LC-CA-Al-3 합금은 직경 70 mm 봉재의 상용합금으로 구입되어 제조 공정을 알 수 없으나 연속주조 및 열간 압연에 의해 제작된 것으로 추정하고 있다. 합금에서 HC는 0.05 wt.% 수준의 높은 탄소함량과 LC합금제로 탄소 함량이 0.015 wt.% 수준의 낮은 탄소함량의 합금으로 우선 구분 하였다. CA는 Ca이 0.002 wt.% 수준을 포함하고 HCA는 Ca 함량이 0.0043 wt.% 수준을 포함하고 있다. AL은 0.02 wt.% 수준의 Al을 포함하고 있다. 각 합금의 Cr과 Ni의 당량비(Cr_{eq}/Ni_{eq})를 다음의 식에 따라 계산하여 나타내었다.

$$\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}} = \frac{(\%Cr + 1.37\%Mo + 1.5\%Si + 2\%Nb + 3\%Ti)}{(\%Ni + 0.31\%Mn + 22\%C + 14.2\%N + \%Cu)}$$

2.2. 일방향응고

본 실험에 사용된 시편은 잉곳 제조 공정에서 열이력이 조금씩 차이가 있으며 시편 중에는 제조공정을 알 수 없이 구입된 시편(LC-CA-Al-2, 3)도 있어 미세조직 분석에서 같은 열이력 조건에서 미세조직을 비교하기 힘

들다. 따라서 각 합금에서 같은 응고조건에서의 응고조직을 비교하기 위하여 낮은 응고속도(5 $\mu\text{m/s}$)와 비교적 빠른 응고속도(100 $\mu\text{m/s}$)에서 일방향응고 실험을 하였다. 일방향응고 후 응고세면에서 합금의 조성 및 응고속도에 따라 초정 수지상의 형성 거동을 관찰하였고 일방향 응고세면으로부터 1 cm 및 4 cm 아래 부분의 종단면에서 페라이트 분율, MnS 및 복합개재물 등의 석출물을 관찰하였다.

일방향응고 상미는 일방향 열전달을 위해 액상을 형성 시키는 hot zone과 냉각을 시키는 cold zone으로 구성되어 있으며, 응고 세면은 이 두 지역 사이에서 형성된다. 시편을 고정시키고 로와 냉각 장치인 냉각대(cold finger)를 일정한 속도로 움직여 응고세면을 일방향으로 이동시키도록 장치되어 있다. 또한 일방향 응고 중 시편을 장치 아래의 냉각수로 떨어뜨려 응고세면을 보존하고 응고세면의 형상 및 상변화를 관찰하였다. 본 일방향응고 상미의 온도구배는 20.5°C/mm이다.

2.3. 미세조직 관찰

미세조직은 연마 후 육상산 용액에서 전해 에칭을 하고 관찰 하였으며 광학 현미경(OM)은 Nikon EPIPHOT-200 광학현미경을 이용하였고 주사전자현미경(SEM)은 JEOL-5800을 이용하여 관찰하였다. 육상산 용액의 성분은 H₂O 90 ml + HOCCOOH 10 g이며, 전해부식은 전압 6 V에 전류 1 A로 30~120 sec의 조건에서 수행 되었다. Ferrite, 석출물 및 개재물 분율 측정은 주사전자 현미경의 BSE(back scattered image) image에 이미지 분석기를 사용하여 측정 하였다.

2.4. 절삭성 평가

스테인레스강의 절삭을 위해 화친기계의 CNC선반을 사용하였다. 절삭지향의 3분력(주분력, 배분력, 이송분력)은 Kistler사의 9257B 압전소자형 공구동력계를 이용하였고, 지구를 제작하고 선반에 부착시켜 A/D Converter 와 PC를 사용하여 측정하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 실험장치 사양은 Table 2에 나타내었다.

철기원소가 제어된 각 합금의 가공성의 변화를 관찰하

Table 1. Chemical composition and Cr_{eq}/Ni_{eq} of 304 stainless steels(wt.%).

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Ca	N	Cr_{eq}/Ni_{eq}
HC	0.048	0.395	1.48	0.0330	0.022	8.28	18.28	-	0.0006	0.0606	1.76
HC-CA	0.054	0.390	1.50	0.0298	0.026	8.10	18.21	0.002	0.0021	0.0663	1.75
HC-HCA	0.053	0.394	1.48	0.0281	0.022	8.02	18.11	0.003	0.0043	0.0666	1.74
LC-CA- AL-1	0.015	0.287	1.82	0.0269	0.029	8.21	18.23	0.017	0.0017	0.0849	1.78
LC-CA- AL-2	0.015	0.230	1.79	0.0223	0.024	8.29	18.58	0.023	0.0028	0.0782	1.81
LC-CA- AL-3	0.015	0.560	1.88	0.0278	0.031	7.98	18.03	0.023	0.0025	0.0978	1.81
LC	0.016	0.502	1.34	0.0290	0.027	8.78	18.04	-	0.0006	0.0645	1.76

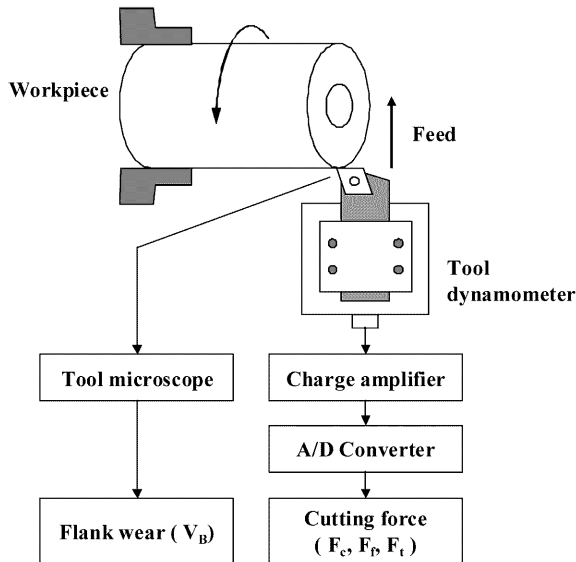


Fig. 1. Schematic drawing of experimental set-up for machinability.

Table 2. Instruments of the experimental set-up for machinability test.

Instrument	Specification
CNC lathe	Hi-ECO 10 (HWACHEON)
Tool Dynamometer	9257B(Kistler)
Charge amplifier	5019A(Kistler)
A/D converter	PCL-812PG(Advantech)
Insert tip	CNMG120408-WF(SANDVIK)
Tool holder	DCLNL2525M12(SANDVIK)
Tool microscope	MF-1030TH (Mitutoyo)

기 위하여 공작물의 형상을 같게 가공하였으며 공작물(합금)의 형상은 외경과 내경이 각각 Ø64 mm, Ø20 mm인 중공봉으로 단면을 절삭하였다. 절삭공구는 스테인레스 가공용 바이트를 사용하였고, 절삭조건은 Table 3과 같다. 절삭유제는 일반용 절삭제로 많이 사용되는 에멀전형을 사용하였다.

Table 3. Condition of machinability experiment.

Items	Conditions
Cutting speed (rpm)	600
Feed (mm/rev)	0.15
Depth of cut (mm)	2.0 mm
Coolant	Emulsion

Table 3. The volume fraction of inclusions in 304 stainless alloys.

Sample	HC	HC-CA	LC-CA-AL-1	LC-CA-AL-2	LC-CA-AL-3
Volume fraction of inclusion	0.22%	0.32%	0.34%	0.32%	0.41%

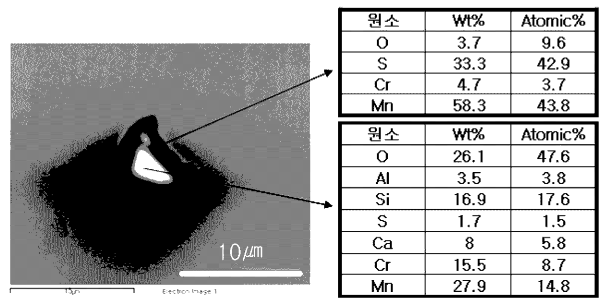


Fig. 2. Complex oxide inclusion and its EDS analysis in Ca added alloy of LC-CA-Al-1.

3. 결과 및 고찰

3.1 MnS 화합물

MnS 화합물은 절삭성에 중요한 영향을 미치는 인자로서 크기와 형상 분율을 측정하고 석출물의 성분을 분석하였다. 칼슘이 첨가되지 않은 HC, LC 합금의 경우 개재물의 대부분이 MnS 이었으며 칼슘이 첨가된 합금에서는 MnS와 함께 Mn-S-Ca-Al-Si-O 복합개재물이 발견되었다. 복합개재물은 EDS 성분 분석을 하였고 EDS mapping 분석을 통하여 부위별로 성분을 확인하였다. 복합개재물은 Fig. 2와 같이 중심부에는 Ca-Al-Si-O가 주 성분으로 이루어졌고 그 주위에 MnS가 둘러 싸여진 모습을 보여주었다. Fig. 3에서는 복합개재물의 주요 성분인 Mn, S, Al, Si, Ca, O의 EDS mapping 결과와 기지의 주요 성분인 Ni, Cr의 EDS mapping 결과를 보여 주고 있다. 개재물의 중심부에는 Al, Si, Ca, O 성분으로 구성되고 있고 가장자리는 Mn 및 S가 주성분으로 구성되고 있음을 보여주었다. 이는 복합개재물이 형성될 때 Al-Si-Ca 산화물이 핵으로 먼저 형성이 되고 그 주위에 MnS가 형성됨을 알 수 있다.

개재물 분율 측정 시 사용한 back scattering image 미세조직은 Fig. 4에 나타내었으며 개재물의 분율은 Table 3에 나타내었다. MnS 및 Mn-S-Ca-Al-Si-O 복합개재물은 미세조직상으로 구별되지 않았다. 개재물의 양은 MnS를 형성시키는 원소인 Mn 및 S, 복합개재물을 형성시키는 Ca, Al 함량이 높은 합금(LC-CA-AL계 합금)에서 다소 높은 것으로 나타났다.

3.2 페라이트 분율

각 합금에서 페라이트 분율을 측정하여 Table 4에 나타내었다. 페라이트 분율은 Cr/Ni 당량비가 증가함에 따

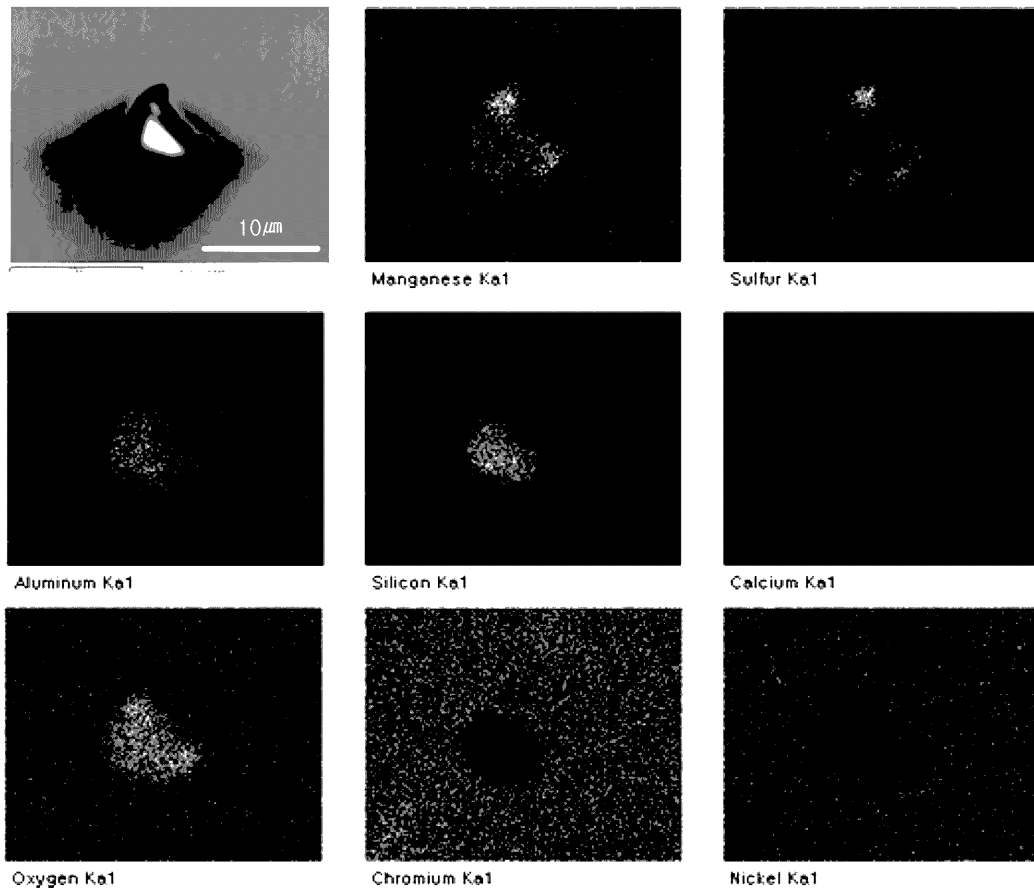


Fig. 3. EDS mapping analysis in the complex oxide inclusion.

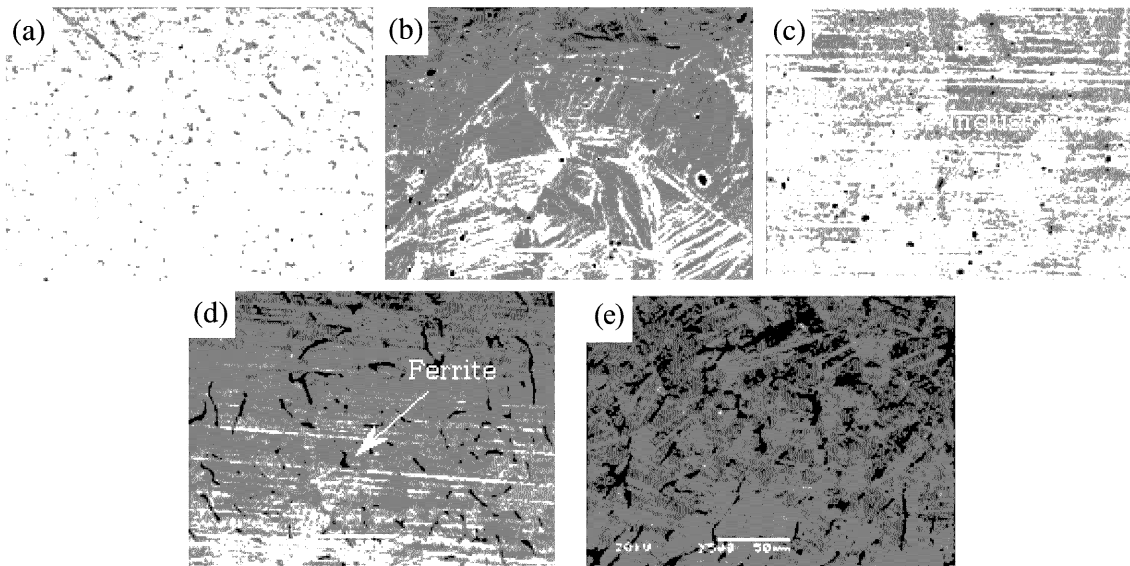


Fig. 4. Back scattered electron image of ferrite and inclusions in 304 stainless steels. (a)HC, (b)HC-CA, (c)LC-CA-AL-1, (d)LC-CA-AL-2 and (e)LC-CA-AL-3.

라 증가하는 경향을 보여주었다. 그러나 페라이트 분율은 합금의 냉각조건 및 열처리 이력에 따라 변화하였다.

LC-CA-AL-3 합금은 주조 및 압연에 의해 제작되었을 것으로 예상되는 원소재, 원소재로부터 열간 단조 된 시

Table 4. The ferrite volume fraction in 304 stainless steels (%).

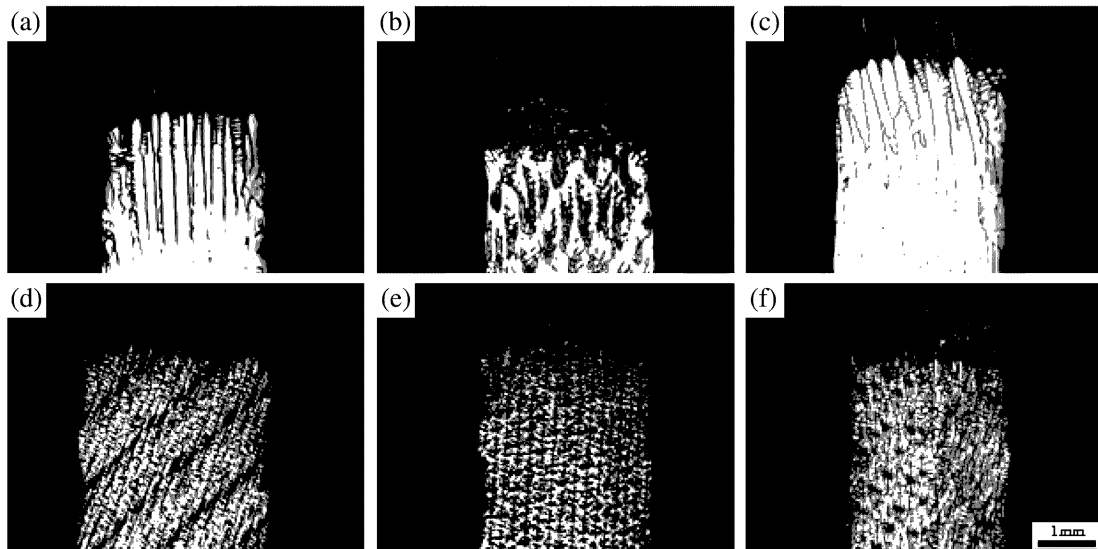
Sample	HC	HC-CA	HC-HCA	LC-CA-AL-1	LC-CA-AL-2	LC-CA-AL-3		
						As received	Hot forming	Hot forming /annealing
Ferrite volume fraction	0.44	0.16	0.4	0.89	3.47	2.58	1.44	0.28
Cr/Ni equation	1.76	1.75	1.74	1.78	1.81		1.81	

편, 그리고 단조 후 열처리된 시편을 이용하여 페라이트 분율을 측정된 결과 열처리 이력이 많을수록 페라이트 분율은 감소하였다.

열이력 조건을 배제하고 동일한 냉각조건에서 합금 조성에 따른 페라이트 분율을 측정하기 위해 각 합금에서 일방향 응고 실험을 한 후 페라이트 분율을 측정하였다. 일방향 응고 후 고/액 계면을 Fig. 5에 나타내었다. 각 합금에서 응고가 빠른 조건인 $50 \mu\text{m/s}$ 응고속도에서 수지상은 페라이트가 형성되었다. 느린 응고속도인 $5 \mu\text{m/s}$ 의 속도에서는 오스테나이트 수지상이 형성되었고 LC-CA-2 합금에서만 페라이트 수지상이 생성되었다. 304계 스테인레스강 합금은 초정은 페라이트가 형성되는 것으로 알려져 있으며,¹⁰⁾ 본 실험의 빠른 응고속도의 응고계면에서도 수지상은 페라이트가 형성되는 것으로 확인하였다. 응

고속도가 빠른 경우 수지상 끝 온도는 거의 액상선 온도에 근접하여 평형상인 페라이트가 형성된다. 그러나 응고속도가 느린 경우 수지상 끝의 온도가 액상선 온도 아래로 과냉되며 오스테나이트 초정이 형성될 가능성이 있으며 특히 크롬당량이 낮은 조성에서는 오스테나이트 수지상이 형성되기 쉬울 것으로 예상된다. 본 실험 결과에서도 낮은 응고속도에서 크롬당량이 가장 높은 합금인 LC-CA-AL-2 합금에서는 낮은 응고속도에서도 초정 페라이트가 안정하게 형성될 수 있는 것으로 판단된다.

일방향 응고 합금의 페라이트 분율은 Table 5에 나타내었다. 일방향 응고 시편에서 성장 방향에 수직한 단면으로 응고계면으로부터 1 cm 및 4 cm 아래 부분에서 미세조직을 관찰하여 페라이트 분율을 측정하였다. 일방향 응고 장비의 온도구배(20.5°C/cm)를 고려하면 계면 1cm

**Fig. 5.** The Solid/Liquid interface morphologies in (a)HC, (b)LC-CA-AL-2, (c)LC-CA-AL-3 alloys at $5 \mu\text{m/s}$, and (d)HC, (e)LC-CA-AL-2, (f)LC-CA-AL-3 alloys at $50 \mu\text{m/s}$.**Table 5.** The ferrite volume fraction with solidification rate in directionally solidified samples (%).

Solidification rate	Length from liquid/ solid interface	Alloy				
		HC	HC-CA	LC-CA-AL-1	LC-CA-AL-2	LC-CA-AL-3
$5 \mu\text{m/s}$	1Cm	1.45	0.14	0.84	2.56	1.83
	4Cm	2.39	1.86	1.86	1.92	3.41
$100 \mu\text{m/s}$	1Cm	3.19	2.99	3.36	8.39	6.41
	4Cm	2.44	1.99	3.26	5.77	5.49

아래 부분은 액상선 온도로부터 약 205°C 아래 온도까지 상변태 된 조직이며, 계면 4 cm 아래 부분은 액상선 온도로부터 약 840°C까지 상변태 된 조직이다. 응고속도가 50 μm/s에서 응고 계면이 1 cm 및 4 cm 아래까지 도달되는 시간은 약 3분 및 16분으로 상변태 시간은 충분하지 않을 것으로 예상되나 응고속도가 5 μm/s에서는 50 μm/s에 비해 10배 상변태 시간을 가지므로 4 cm 아래에서는 상당한 상변태 시간(액상선 온도로부터 약 840°C까지 160 분)을 가질 것으로 예상된다. 크롬 당량이 높은 합금에서, 응고속도가 빠를 때 페라이트 분율이 높았다. 페라이트 수지상 계면을 보여준 50 μm/s에서는 페라이트 분율이 계면에서 아래로 갈 때 감소하였다. 5 μm/s의 속도에서는 페라이트 응고계면에서부터 응고계면으로부터 아래로 내려갈수록 페라이트가 증가하였고 페라이트 수지상 계면을 가진 LC-CA-AL-2 합금에서는 계면으로부터 아래로 내려갈수록 페라이트 양이 감소하였다. 초정오스테나이트가 생성될 때는 오스테나이트 기지로부터 페라이트가 형성 되므로 응고계면에서 멀어질수록 페라이트 분율이 증가하고 초정오스테나이트가 생성될 때는 페라이트 기지로부터 오스테나이트로 변태 하므로 응고계면에서 멀어질수록 페라이트의 양이 줄어드는 것으로 예상된다.

3.3 절삭 특성

각 합금에서 절삭력 시험한 결과를 주분력, 이송분력,

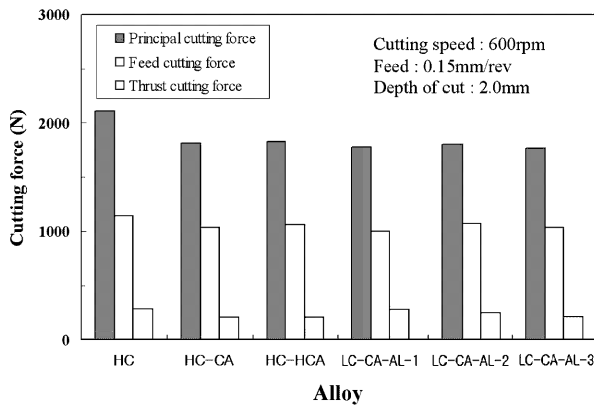


Fig. 6. Cutting force of 304 stainless steels.

Table 6. Fracture time of tool in 304stainless steels (sec).

Alloy	1st	2nd	3rd	4th	5th	Deviation	Average
HC	60	30	60	60	60	13	54
HC-CA	180	30	120	60	120	58	102
HC-HCA	360	240	30	30	30	154	138
LC-CA-AL-1	600	360	300	240	300	141	360
LC-CA-AL-3	360	300	286	343	-	35	322
LC	220	44	176	132	-	75	143

배분력으로 나누어 나타내었다(Fig. 6). HC합금의 절삭력이 가장 크게 나타났으며, LC-CA-AL-1, 2, 3 합금이 다소 낮게 나타났다. 스테인레스강의 재료특성은 가공경화 되기 쉽고 열전도율이 작으며 공구재료와의 친화성이 높기 때문에 정상손상으로서의 마모도 쉽게 발생하지만 치핑이나 결손 등의 이상손상도 쉽게 발생한다. 본 실험 조건에서의 공구손상 형태가 치핑이나 결손에 의해 것이므로 정확한 공구수명의 비교가 어려워 반복실험을 통한 평균 공구수명을 구하였다. 반복실험은 동일한 조건으로 4-5회 실시하였으며 이때 얻어진 절삭시간을 평균하여 공구수명을 구하여 Table 6에 나타내었다. LC-CA-AL-3 및 LC-CA-AL-1 합금의 공구 수명이 가장 높았으며 LC-CA-AL-1 합금은 수명은 가장 높으나 실험 횟수에 따라 다소 높은 편차를 보여주었다.

HC 합금의 경우 탄소함량이 높고 쾌삭 첨가원소인 Mn, S, Ca, Al의 함량이 전반적으로 낮기 때문에 절삭력이 크며 공구수명도 낮은 것으로 판단된다. HC-CA, HC-HCA 합금은 쾌삭 첨가원소인 Mn, S, Ca 등이 HC 합금 보다 다소 높아 공구수명이 HC보다 향상되었으나 LC-CA-AL-2, LC-CA-AL-3의 수명보다 크게 낮음을 알 수 있다. LC-CA-AL 계 합금은 HC-CA 및 HC-HCA 합금에 비해 탄소 함량이 낮고 또한 Al 함량이 높게 나타났다. 따라서 공구 수명은 탄소함량 및 쾌삭 첨가원소(Mn,S,Ca,Al)가 직접적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.3.1 탄소의 영향

탄소의 함량은 우선적으로 공구수명 및 절삭력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 절삭력에서 HC계 합금과 LC계 합금을 비교하여 보면 Fig. 6에서 보는 바와 같이 LC계가 다소 낮게 나타났다. 공구수명에서는 HC계 합금인 HC, HC-CA, HC-HCA 합금이 LC계 합금인 LC-CA-AL-1 및 LC-CA-AL-3 합금 보다 현저히 낮았다. 이와 같이 탄소는 절삭성에 일차적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 Table 6의 LC 합금의 공구수명 결과에서 보여주는 바와 같이 탄소 함량이 낮더라도 쾌삭 첨가원소(Ca, Al, Mn, S)가 낮을 때 공구수명이 낮은 것으로 나타났다. 이결과는 탄소는 절삭특성을 감소시키나 낮은 탄소를 가지는 합금이라도 쾌삭 첨가원소가 낮을 때 절삭특성도 우수하지 않음을 알 수 있다.

3.3.2 쾌삭 첨가 원소(Mn,S,Ca,Al)의 영향

쾌삭 첨가원소에 따른 석출물 분석결과 쾌삭 첨가원소는 기본적인 첨가원소인 Mn 및 S와 복합 산화물을 형성시키는 이차적인 첨가원소인 Ca 및 Al로 나눌 수 있다. Table 6에서 HC 합금과 HC-CA 및 HC-HCA 합금의 공구 수명을 비교해 보면 Ca이 첨가된 합금에서공구 수명이 높게 나타났다. 그러나 Ca과 함께 Al이 첨가된 합금인 LC-CA-AL-1, LC-CA-AL-3 합금에서 가장 높은 공구수명을 보여 주었다. 따라서 복합개재물은 Ca뿐만 아니라 Al이 함께 있을 때 효과적으로 Mn-S-Ca-Al-O를 형성시키며 이는 공구수명 향상에 직접적인 영향을 주는 것으로 판단된다. Ca에 의한 공구수명 향상은 Kano와 Hanyuda⁷⁾가 공구의 표면 성분분석을 통해 Ca첨가에 따라 생성된 복합개재물은 저융점 화합물로서 절삭 시 용해되어 공구 표면에 부착물(belag)을 형성시켜 공구 수명을 향상 시킬 수 있다는 결과를 보여주었으나 아직 Ca 첨가에 따른 복합개재물의 형성기구 및 공구수명 향상 원인을 규명하지 못하고 있다.

3.3.3 페라이트의 영향

오스테나이트계 스테인레스강에서는 잔류 페라이트를 오스테나이트 기지 내 포함하고 있으며 높은 페라이트 분량은 기계적 특성에 영향을 미치므로 페라이트 분량을 제한하고 있다. 그러나 LC-CA-AL-1, 2, 3 합금은 쾌삭 합금 원소의 첨가에 따른 MnS 복합개재물 형성에 의해 절삭특성이 우수한 것으로 나타났으나 이 합금들은 페라이트 분량을 더 많이 포함하고 있다. 또한 인성이 높은 오스테나이트 기지 내 포함하고 있는 페라이트의 경도가 높기 때문에 페라이트가 절삭성에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 페라이트가 가공성에 미치는 영향을 알아보기 위해 페라이트를 다량 함유하고 있는 LC-CA-AL-3(원소재)합금과 이 원소재 합금을 열간 단조하여 페라이트 함량을 낮춘 LC-CA-AL-3(단조), 단조 된 소재를 열처리하여 페라이트가 없는 LC-CA-AL-3(단조 후 열처

Table 7. Cutting length to fracture of tool with the ferrite volume fraction.

Sample	LC-CA-AL-3 (As received)	LC-CA-AL-3 (Hot forming)	LC-CA-AL-3 (Hot forming/ annealing)
Ferrite Volume (%)	2.58	1.44	0.28
Cutting length (mm)	374	210	252

리)를 이용하여 페라이트 량에 따른 절삭력 및 공구수명 실험 결과를 Fig. 7 및 Table 7에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 단조 및 열처리 시편은 현장에서 사용되는 시편을 입수하여 실험하여 정확한 열처리 이력은 알 수 없으나 열이력을 많이 거칠수록 페라이트 분량이 감소하였다. 절삭력에서는 페라이트 함량이 높은 LC-CA-AL-3 합금(원소재)이 단조 및 단조 후 열처리 된 합금에 비해 다소 높으나 공구의 수명에서는 원소재가 높은 것으로 나타났다. 오스테나이트보다 강도가 높은 페라이트 상의 분포는 절삭력은 더 요구되나, 오스테나이트 기지가 가지는 공구와의 친화성을 낮추어 공구수명을 증가시킬 수 있는 것으로 예상된다.

4. 결 론

304 스테인레스 강에서 첨가 원소에 따른 조직의 변화와 절삭성의 관계를 연구한 결과 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 쾌삭성 향상을 위한 첨가원소인 Mn과 S의 함량은 일차적으로 절삭성 향상에 기여하고, Ca과 함께 Al 첨가 원소는 Mn-S-Al-Ca-Si-O 저융점 복합개재물을 형성시켜 공구 수명 향상에 주요한 역할을 함을 확인 하였다.
- (2) 오스테나이트 기지에 잔류하고 있는 페라이트 상은 절삭력은 다소 더 요구되나 공구 수명은 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 탄소함량이 낮은 합금에서 절삭성이 향상됨을 보여주었으나 탄소함량이 낮더라도 쾌삭 합금 원소인 Mn, S, Ca, Al 첨가원소가 포함되지 않을 경우 복합개재물이 형성되지 않아 우수한 절삭특성을 기대하기 힘든 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 창원특수강의 연구비 지원 및 학술진흥재단 중점 연구소 사업에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. T.-K. Kim, S.-T. Park and S.-S. Kim, J. Korean Inst. of Met. & Mater., **35**(6), 697 (1997).

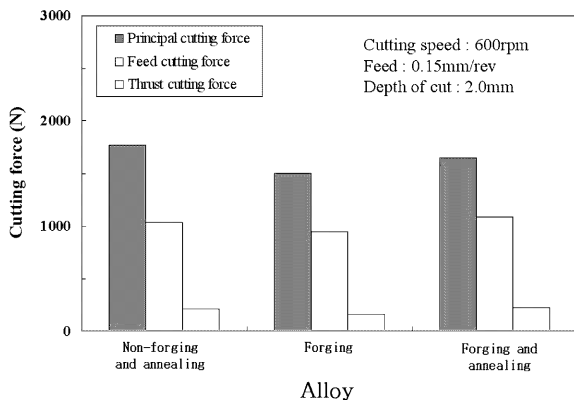


Fig. 7. Cutting force with ferrite volume fraction in HC-CA-AL-3.

2. C. W. Kovach, Pro. International Symposium on Sulfide Inclusions in steel, ASM, Port Chester, 459 (1974).
3. V. A. Tipnis and F. K. Bloom, The Iron Age, Jun. **20**, 285 (1969).
4. P. E. Waudby, International Metals Review, **2**, 74 (1978)
5. F. B. Pickering, Mechanical Working and Steel Processing, 381 (1989).
6. S. K. Paul, A. k. Chakrabarty and S. Basu, Metall. Trans. **13B**, 185 (1982).
7. Takashi Kano, Tomoki Hanyuda, Denkiiseikou, **75**(1), 27 (2004).
8. J.-S. Kim, S.-D. Wang and Y.-S. Jo, J. Korean Inst. of Met. & Mater., **33**(2), 267 (1995).
9. Stainless Steels Handbook, Ed. Hasegawa Showgi, Translated by Sewha Publishing Co. 815 (1992).
10. T. Koseki and M.C. Flemings, Metall. Trans., **26A**, 2991 (1995).