

Ni-Co 합금강의 기계적 특성에 대한 탄소함량의 영향

장경천*, 국중민+, 정장만++, 권택용+++, 최병기++++

Influence of Carbon Content on the Mechanical Properties of the Ni-Co Alloy

K.C. Jang*, J.M. Kuk+, J.M. Jung++, T.Y. Kwon+++, B.K. Choi++++

Abstract

This study was to evaluate the effect of carbon content on metallic change and fatigue characteristics with Fe-29%Ni-17%Co, low heat expansion alloy, widely using electronic components, precision machines, and sealing with glass and metal etc. The steels were fabricated with variation of carbon content, 0, 0.03, 0.06, 0.1, and 0.20% with VIM and tensile test and fatigue test were performed to achieve the above purpose.

The more carbon content, the higher hardness value and yield strength. But elongation of 0.03%C, 0.06%C, and 0.10%C specimen decreased about 2.2%, 1.5% and 0.8% respectively more than that of the base metal. Especially the strength and elongation of 0.20%C specimen increased simultaneously about 14.4% and 7.5%. Fatigue life of 0.03%C specimen decreased but the more carbon content, the higher fatigue life over 0.06% carbon content more than that of base metal.

Key Words : Carbon content, Yield strength, Elongation, Fatigue life, Base metal

1. 서론

탄소강으로 시작한 철강산업은 오랜 세월이 지나 스테인리스강의 개발과 더불어 고도성장을 이루게 되었고, 현재에 이르러 용도 및 목적에 따라 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있으며, 합금소재에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 그 결과 많은 합금이 개발되고, 초고온 내산·내부식에

장기간 사용할 수 있고 경제성 있는 대체합금 개발에 연구가 집중되고 있으며, 이러한 용도의 합금 중에서 대표적으로 Ni합금강을 들 수 있다.

Ni합금강 중에서 일반적으로 54%Fe-29%Ni-17%Co 성분의 페르니코계의 합금으로 극저온에서 435℃까지 열팽창이 거의 일어나지 않는 ($\alpha \approx 4.6 \sim 5.2 \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) 저열팽창성 특성을 나타내고 있다¹⁾. 즉, 이 합금의 열팽창 거동은 Fe-Ni 이원계 인바 합금에 비하여 상당히 높은 온도까지 낮은 열팽창계수가 유지되어 유리나 세라믹과 비슷한 열적 특성을 나타내는 독특한 성질을 지니고 있다²⁾. 또한 적절한 용접성 및 기계적 성질, 넓은 범위에서의 오스테나이트 안정성 등의 많은 장점을 가지고 있으므로 그 용도는 점차 확대되고 있다.

* 발표자, 한국생산기술연구원 (kcjang@kitech.re.kr)
주소: 500-712 광주광역시 북구 오룡동 1

+ 한국생산기술연구원

++ 성화대학 항공자동차정비과

+++ 전북기능대학 산업설비자동화과

++++ 조선대학교 기계공학과

따라서 밀봉접착산업, 정밀기기산업, 진공튜브산업, 전자·통신산업 등에서 다양한 반도체 부품 및 전자 제품의 실링 및 접합 소재로 폭넓게 응용되고 있다³⁾. 또한 국내 광학관련 산업의 발전으로 레이저 다이오드, 광 다이오드, 압력 센서 및 트랜지스터 등의 분야까지 널리 이용되고 있다. 특히, 반도체의 고집적화에 따른 동작온도의 상승으로 상이한 열팽창계수를 갖는 반도체 및 기판 사이에 열팽창 차이에 따른 열응력이 유발되어 칩의 손상 등을 유발시켜 반도체의 신뢰성을 저하시키는 원인이 되고 있으므로 저열팽창성 합금 및 열전도도가 우수한 인바 또는 코바강의 중요성이 점차 대두되고 있다⁴⁾.

그러나 지금까지 저열팽창성 합금에 대한 연구는 매우 미흡하다고 할 수 있으며, 대표적인 연구문헌으로 Ni 베이스에 Co의 함량을 0~60wt%로 변화시켜 제조한 합금의 가공조직에 관한 연구⁵⁾, Co-Ni 증착막의 형성과 자기특성에 관한 연구⁶⁾ Fe-Ni-Co 저열팽창성 합금의 고온변형 특성 및 열간가공에 따른 열팽창 거동 연구⁷⁾ 및 고온산화거동과 표면개질에 관한 연구 등⁸⁾을 들 수 있다.

또한, 저열팽창성 합금들의 열적특성은 합금의 조성, 냉간가공 및 열처리조건 및 미세조직의 변화에도 큰 영향을 받는 것으로 보고^{9, 10)}되고 있으므로 여러 가지 요인에 의해 변화되는 강도 및 조직 등의 금속학적인 연구는 앞으로도 많은 분야에서 연구가 필요하다고 사료된다. 또한 열적특성의 향상뿐만 아니라 기본조성 외의 원소 첨가가 강도에 미치는 영향 등의 평가 등도 필수적으로 수반되어 소재의 성질개선 및 개발에 필요한 데이터의 확립도 중요하다. 따라서 본 연구에서는 경도 및 열팽창계수 측정, 인장시험, 피로 시험 등을 행하여 탄소함량이 저열팽창성합금의 기계적 성질에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용한 시험재료는 Ni-Co계 합금강으로서 탄소함량이 강도에 미치는 영향을 분석하고자 표준 화학적 성분 분해 탄소를 각각 0.00%, 0.03%, 0.06%, 0.10% 및 0.20% 첨가시킨 5가지의 소재를 진공유도용해로(VIM)를 이용하여 잉곳을 제조하였다. 사용된 진공유도용해로는 50kg의 용량에 최고 가열온도는 1,650℃이며, 진공도는 10⁻³Torr, 용해시간은 45min/charge이었다.

Table 1은 코바강의 기본 조성 및 탄소 함량을 달리하여 제조한 잉곳의 화학적성분을 나타내고 있으며, 이들의 성분

분석에 사용된 장치는 고체시료 무기원소 정량분석에 널리 이용되는 C/S동시분석기(Maker : LECO) 및 습식분석장치(Maker : METROHM)로서 0.06%C의 경우는 목표함량과 0.01%의 차이가 나타났으나 그 외의 소재는 의도된 합금성분과 거의 일치함을 알 수 있다.

제조된 5가지의 잉곳을 모두 동일하게 1,220℃에서 3시간 열처리 후 7단계 자동 열간압연을 실시하여 최종 압연두께 13mm를 만들었다. 압연된 판재로부터 각각의 시험편의 채취는 압연 시종단 및 가장자리에서 충분한 여유를 두고 판 중앙부에서 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metals

Materials	Ni	Co	Mn	Si	C	Fe
0.00%C	29.1	17.0	0.30	0.11	0.002	bal
0.03%C	28.9	17.1	0.28	0.09	0.029	bal
0.06%C	28.8	17.0	0.31	0.10	0.070	bal
0.10%C	29.0	16.9	0.30	0.10	0.105	bal
0.20%C	29.05	16.9	0.31	0.12	0.217	bal

인장시험을 위한 시험편의 가공은 압연된 판재를 약 13×13×150mm 크기로 절단하여 인장시험편은 Fig. 1과 같이 ASTM E-8¹¹⁾의 규정에 따라 평활부의 직경을 6.25mm, 표점거리 30mm인 환봉으로 CNC선반을 이용하여 가공한 다음 정밀 연삭을 실시하였다. 피로시험을 위한 시험편 가공은 압연된 판재를 약 160(W)×500(L)로 절단한 후 양면을 약 1.45mm씩 밀링가공하여 약 10.1mm 두께로 만들었다. 그리고 1차 연삭을 실시한 후 ASTM E647-83¹²⁾의 규격에 맞추어 와이어 방전가공기(와이어 직경 0.2mm)를 사용하여 Fig. 2에 나타난 CT시험편의 형상 및 치수로 가공하였다. 이렇게 가공된 60×62.5mm 시험편의 양면을 2차 정밀연삭을 통하여 마무리를 하였으며 예비노치는 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 3mm 깊이로 해당위치에 가공하여 완성하였다. 이 때 시료 채취는 균열진행방향이 압연방향과 직각인 L-T방향이 되도록 채취하였다¹³⁾.

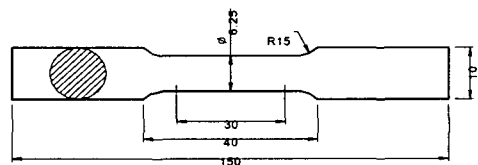


Fig. 1 Geometry of the tensile and compressive test specimen

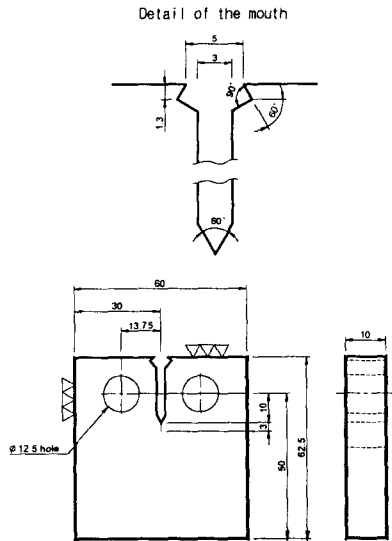


Fig. 2 Standard compact-tension (CT) specimen for fatigue crack growth rate testing

열팽창계수 측정은 Dilatometer를 이용하여 5×5×50mm (b×h×l)의 시료를 5℃/min의 속도로 온도를 상승시키며 50℃~400℃까지 측정하였으며, 측정된 값을 Al₂O₃의 열팽창계수와 비교 하였다. 경도시험은 시료를 마운팅 프레스로 몰딩 한 후 고찰하고자하는 면을 연마포 #1,500까지 연마하고 1 μ m의 다이아몬드 페이스트 및 0.3 μ m의 Al₂O₃를 사용하여 경면을 얻은 다음 로크웰경도계(HRA)를 사용하여 측정하였다. 인장시험은 Instron5582(15ton)를 사용하여 상온에서 3mm/min 속도로 시험하였으며, 피로시험에 사용한 기기는 최대용량 10ton의 전기유압식 서보 피로시험기(SHIMADZU)로서 A/D, D/A 변환기를 내제한 컴퓨터에 의해 하중을 설정 및 제어하도록 되어있으며, 제어방식은 close-loop식 제어기구를 이용하여 설정하중 및 수시로 검출되는 로드셀의 신호를 컨트롤러 안에 내재된 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력해 오차를 보정하는 방법을 택함으로써 고정도의 실험이 가능한 기기이며, 피로균열 전파시험은 ASTM standard E647-88의 규정¹⁴⁾에 의하여 실시하였으며, 시험조건으로서 주파수는 10Hz, 응력비는 0.1, 파형은 정현파 곡선으로 모두 동일하게 상온에서 수행하였다. 크랙측정은 시험편 전면에 클립게이지를 장착하여 크랙 개구변위를 측정하였으며, 이 변위와 하중신호로부터 컴플라이언스를 구하여 환산하는 방법을 이용하였다. 크랙길이 측정의 정밀도는 컨트롤러 안에 내재된 12bit A/D변환기의 분해능을 고려하면 크랙 개구변위의 측정정밀도가 약

0.0001mm 정도이며, 이를 크랙길이로 환산하면 0.01mm 정도가 된다. 따라서 시험편 탈착을 제외한 하중제어, 크랙길이 측정 및 데이터처리 등이 모두 프로그램화되어 자동으로 수행되었기 때문에 신뢰도가 우수하다고 사료된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경도 및 열팽창계수의 변화

Fig. 3에 나타난 바와 같이 측정된 경도값을 평균하여 살펴보면 0.20% C 시험편은 54.4, 0.10% C 시험편은 52.01, 0.06% C 시험편은 50.72, 0.03% C 시험편은 50.25 및 C를 함유하지 않은 시험편은 48.97로 조사되었다. 따라서 탄소의 함량이 높을수록 측정된 평균 경도값은 증가하는 결과를 나타내었다.

Fig. 4는 C의 첨가량이 열팽창계수에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 50℃~400℃까지 온도를 상승시켜 온도와 $\Delta L/L_0$ 의 관계를 나타낸 선도이다. 또한 본 연구에서 사용한 시험재료와 일반적으로 열팽창계수가 낮은 소재로 알려져 있는 Al₂O₃의 열팽창계수와의 비교를 위하여 동일한 시험 온도 구간에서 얻어진 Al₂O₃의 $\Delta L/L_0$ 을 함께 나타내었다. Table 2는 본 연구에서 적용한 5가지 소재 및 Al₂O₃의 50℃와 400℃일 때의 대표적인 $\Delta L/L_0$ 및 측정된 온도구간에서의 열팽창계수를 나타내었다.

고찰한 온도구간에서는 모든 시험편의 $\Delta L/L_0$ 은 Al₂O₃보다 낮았으며 온도 증가에 따른 기울기 역시 낮게 나타나며 직선적인 상승을 보이고 있다. 탄소가 첨가되지 않은 기본 조성의 코바강 시험편의 열팽창계수는 약 4.42 μ m/m·℃로 측정된 시험편 중에서 가장 낮게 나타났으며, 0.03% C, 0.06% C, 0.10% C, 0.20% C 시험편의 열팽창계수는 각각 4.8320, 5.0157, 5.4189 및 5.7206 μ m/m·℃로 측정되어 탄소의 함량이 증가할수록 열팽창계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 한편 동일한 온도구간에서 측정된 Al₂O₃의 열팽창계수는 7.0679 μ m/m·℃로서 본 연구에서 수행한 시험편들의 열팽창계수는 Al₂O₃의 62~81%의 범위 내에 있었다. 그러나 일반적으로 코바강은 열팽창계수가 4.6~5.2 μ m/m·℃ 범위를 갖는 저열팽창성 합금으로 알려져 있으므로 이 범위 내에 속하는 시험편에는 0.00%, 0.03% 및 0.06%의 탄소를 함유한 시험편임을 알 수 있었다.

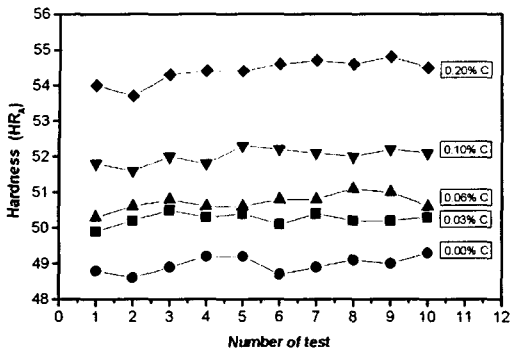


Fig. 3 Rockwell hardness value distribution

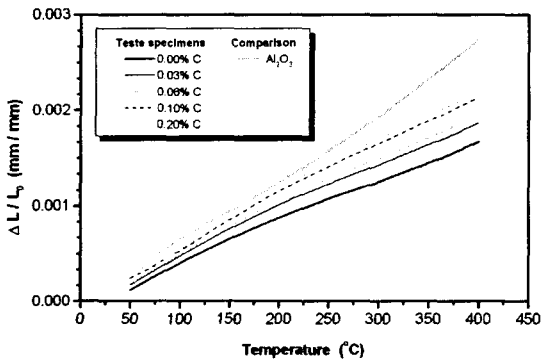


Fig. 4 Relation between thermal expansion and temperature

Table 2 $\Delta L/L_0$ at 50 °C and 400 °C and coefficient of thermal expansion

Specimens	$\Delta L/L_0$ (mm/mm)		Coefficient from 50 °C to 400 °C ($\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)
	at 50 °C	at 400 °C	
0.00%C	0.000121	0.00167	4.4220
0.03%C	0.000173	0.00186	4.8320
0.06%C	0.000185	0.00194	5.0157
0.10%C	0.000238	0.00214	5.4189
0.20%C	0.000196	0.0022	5.7206
Al ₂ O ₃	0.000189	0.00274	7.0679

3.2 항복강도 및 연신율의 변화

Fig. 5 및 6은 탄소 함량에 따른 항복강도와 인장강도의 변화 및 연신율의 변화를 각각 나타내고 있다. 탄소가 함유되지 않은 모재를 기준으로 살펴보면 탄소함량이 각각 0.03%, 0.06%, 0.10% 및 0.20% 높아질수록 항복강도는 2.5%, 3.9%, 10% 및 14.4% 증가하였으며, 인장강도 역시

6.5% 12.3%, 18.1% 및 32.5% 증가하였다. 그러나 신율은 0.10%의 탄소함량까지는 2.2%, 1.5%, 0.8%로 각각 감소하였으나 0.20%C에서는 7.5%로 상승하는 결과를 보였다. 따라서 일반적으로 금속에 탄소가 많이 포함될수록 강도는 증가하나 연신율은 감소하는 결과와 유사하게 나타났으나 0.20%C에서는 강도도 높고 연신율도 증가하여 가장 양호한 결과를 나타내었다.

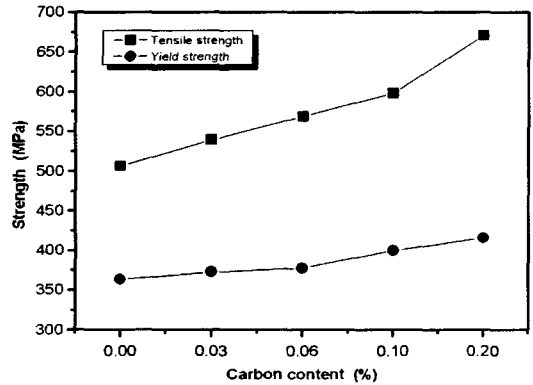


Fig. 5 Tensile and yield strength of the specimens

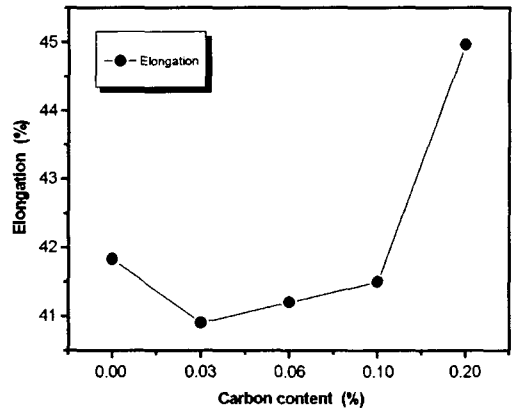


Fig. 6 Effect of carbon content on the elongation

3.3 피로수명의 변화

Fig. 7은 상온에서 피로시험을 수행한 탄소의 함량에 따른 피로크랙성장특성을 나타내는 a-N선도이며, Fig. 8은 이들 피로수명을 비교하기 위한 그래프이다.

먼저 탄소를 함유하고 있지 않은 모재의 경우 피로수명은 0.03%C 보다는 높고 0.06%C 시험편의 피로수명보다는 다소 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 탄소함량이 증가될수록

피로수명은 증가하는 경향을 보이며 0.03% 탄소가 첨가된 시험편을 제외한 모든 시험편의 피로수명이 탄소가 첨가되지 않은 모재의 피로수명 보다 높았다. 특히 0.20%C 시험편은 탄소가 첨가되지 않은 시험편의 피로수명보다 약 46% 증가하여 가장 우수한 피로수명을 보였다. 탄소 함량의 증가에 따라 피로수명의 증감을 살펴보면 탄소함량이 0.00%에서 0.03%로 변화 시 약 20% 감소하였으나, 0.03%에서 0.06%, 0.10% 및 0.20%로 탄소함량이 증가할수록 각각 21.0%, 15.7% 및 25.3%의 피로수명이 증가하였다.

위의 결과를 종합하면 0.03%에서 0.20%까지 탄소함량이 증가할수록 피로수명은 증가하여 0.20% 탄소함량에서 가장 우수한 피로수명을 보였다. 그러나 탄소가 첨가되지 않은 시험편의 피로수명은 0.03%C 시험편보다 높고 0.06%C 시험편과 거의 유사하였으므로 피로수명 향상을 위한 탄소 첨가 시 적어도 0.06%C 이상 조성이 필요하다고 판단된다.

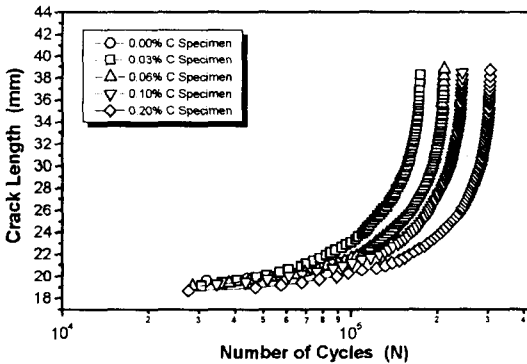


Fig. 7 Relation between crack length and number of cycles

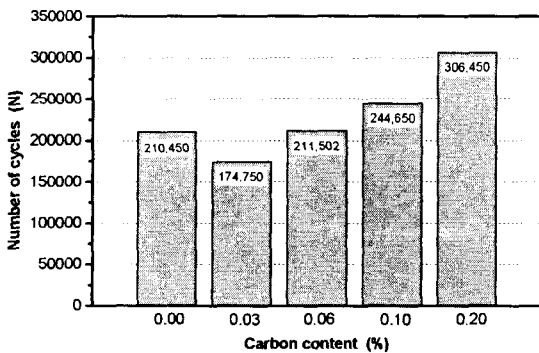


Fig. 8 Relation between fatigue life and carbon content

3.4. 피로크랙 전파속도와 응력확대계수 범위와의 관계

피로크랙 전파속도를 예측하기 위하여 일반적으로 사용되는 Paris식¹⁵⁾은 피로크랙 안정성장구간에 한하여 성립되는데, 이 구간에서 피로크랙 전파속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계가 양대수 선도상에서 선형적으로 나타난다.

본 연구에서의 응력확대계수 계산은 컴퓨터 프로그램에 내장되어 있는 Paris식이 적용되었으며, 이 때 적용된 구간은 위하여 중간속도 영역(영역 II)의 범위로 하였다. 따라서 $2.5 \times 10^{-8} \sim 10^{-5} \text{ mm/cycle} < da/dN \leq 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ 구간의 데이터를 도시하였으며, 이 구간에서 전파곡선은 직선으로 표시된다. 또한 Paris를 포함한 많은 실험 결과 $m=0.5 \sim 8.0$ 정도의 광범위한 값을 취할 수 있다고 하였으며, C과 m 사이에는 $C=AB^m$ 의 관계가 주어져 있다.

Fig. 9는 위의 식에 의해서 구해진 탄소의 함량에 따른 $\log(da/dN)-\log(\Delta K)$ 관계를 나타낸 것이며, Table 3은 실험 상수 m 및 C를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 각 시험편 모두 탄소함량에 관계없이 거의 직선적이며 데이터가 좁은 밴드 내에 모이고 있으며, m은 약 2.4~2.8의 범위로 조사되어 위의 보고한 결과 내에 있음을 알 수 있었다.

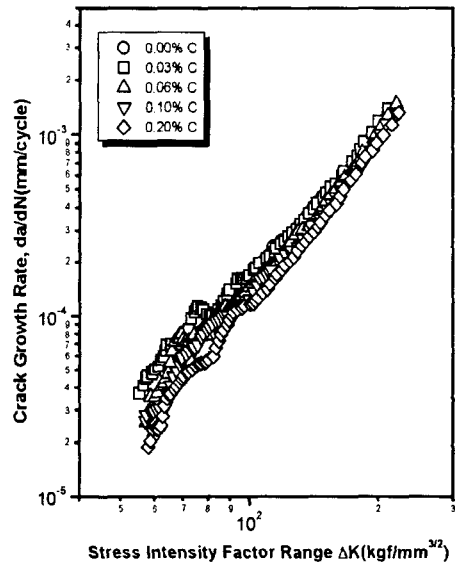


Fig.9 Relation between crack propagation rate and stress intensity factor range

Table 3 Experimental material constants for the equation, $da/dN=C(\Delta K)^m$

Specimens	Material constants	
	C	m
0.00%C	1.166×10^{-9}	2.572
0.03%C	2.381×10^{-9}	2.438
0.06%C	1.298×10^{-9}	2.539
0.10%C	5.816×10^{-10}	2.680
0.20%C	2.861×10^{-10}	2.807

3.5 피로파단면 고찰

피로파괴의 과정은 크게 3단계로 구분되며, 제 1단계는 단결정의 표면 슬립밴드에서 크랙이 개시되는 단계로서 슬립밴드의 생성을 포함하는 재료의 주 슬립면을 따라 크랙이 진행되는 미시적 거동의 단계이며, 피로파면에 스트라이에이션 등과 같은 전형적인 피로파괴의 특징이 나타나는 것은 일반적으로 제 2단계이므로 본 연구에서는 이 단계의 전자현미경 사진 해석을 통하여 피로수명에 미치는 영향을 고찰하였다.

피로크랙의 발생 및 진전 기구에서 인장하중의 작용으로 응력이 크랙선단에 집중하는 동안 재료 표면에 존재하는 계재물이나 노치 등으로 인하여 국부적인 소성미끄럼이 일어나는 반면 압축하중이 작용하는 동안 앞에서의 미끄럼은 변형경화 및 새로이 형성된 자유면의 산화에 의하여 미끄럼을 방해하므로 미끄럼은 평행한 다른 면에서 반대방향으로 일어난다. 이와 같은 작용의 반복으로 크랙이 진전하여 파단에 이르게 된다¹⁶⁾.

Photo. 1은 탄소 함량에 따라 각각 달리 제조된 시험편의 피로파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진으로서 관찰부위는 파단면 폭의 중앙이며 예비노치 3mm에서 약 5mm 떨어진 곳이다. 이들 사진에 나타난 바와 같이 모든 시험편의 파단면은 큰 입계 주위에서 소성변형을 그다지 동반하지 않은 취성 스트라이에이션으로 보이는 무늬가 일부 관찰되는데 이는 크랙이 벽계면을 따라 취성적으로 진행하고 응력이 커지면 다소의 소성변형이 일어나서 크랙이 둔화하여 진전이 정지하면서 형성된 것으로 생각된다. 그러나 전체적으로 볼 때 C의 함량에 큰 영향없이 모든 시험재료는 전형적인 취성파면을 나타내고 있다고 할 수 있다.

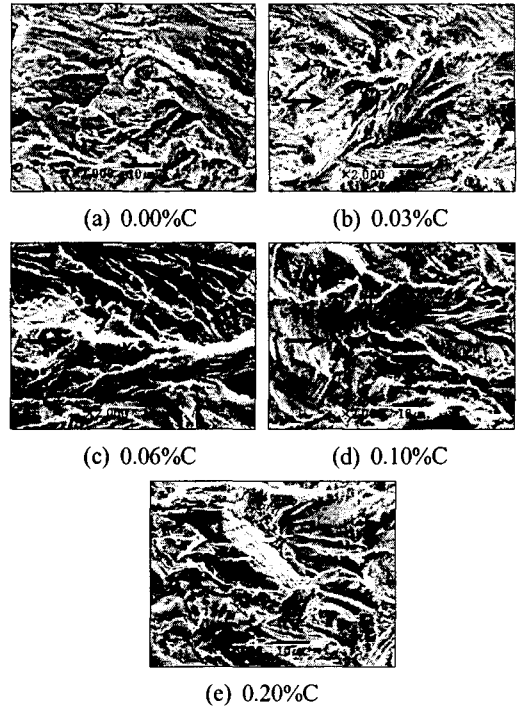


Photo. 1 SEM fractographs of the fatigue test specimens($\times 2000$)

4. 결론

본 연구에서는 저열팽창성 합금 중에서도 최근 크게 주목을 받으며 전자부품, 정밀기기용 및 유리 및 금속의 봉착 등에 많이 사용되고 있는 Fe-29%Ni-17%Co의 코바강을 대상으로 탄소 함량이 0.00%, 0.03%, 0.06%, 0.10% 및 0.20%가 각각 되도록 제조한 후 열팽창계수 측정, 인장시험, 피로시험 등을 실시하여 탄소함량이 코바강의 강도에 미치는 영향을 평가결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경도값은 탄소의 함량이 높을수록 증가하였으며, 미세조직 관찰 결과 모든 재료에서 전체적으로 약 15~50 μm 의 입자들이 혼재한 조직으로 구성되어 있었으며, 이상 조직으로서 탄화물 등은 전혀 관찰되지 않았다.
- 2) 항복강도 및 인장강도는 탄소 함량이 증가할수록 높아진 반면 연신율은 약 2.2%, 1.5%, 0.8%씩 각각 감소하였으나 특히, 0.20%C에서는 7.5% 상승하여 강도 및 연신율이 동시에 증가하여 가장 양호함을 알 수 있었다.
- 3) 피로수명은 0.03%C에서 모재 비해 다소 감소하였으나 0.06%C 이상에서는 탄소함량이 증가할수록 피로수명도

증가함을 알 수 있었다.

4) 피로크랙 전파속도와 응력확대계수 범위의 관계에서 시험편 모두 탄소함량에 관계없이 거의 직선적이며 데이터가 좁은 밴드 내에 모이고 있으며, m 은 약 2.4~2.8의 범위로 조사되어 Paris의 결과와 잘 일치함을 알았다.

참 고 문 헌

- (1) Gehrman, B., Heubner, U. and Kolb-Telieps, A. Ed. J. Wittenauer, 1992, "The Minearls", *Metals and Materials Society*, p.3
- (2) Harner, L. L., Stephens, J. J. and Frear, D. R., 1992, "The Minerals", *Metals and Materials Society*, p.3
- (3) Y. J. Kwon and C. M. Lee, 1999, "Silicidation and Thermal Stability of the Co/refractory Metal Bilayer on the Doped Polycrystalline Si Substrate", *J. of the Korean Ceramic Society*, Vol. 36. No. 6, pp. 604~610
- (4) C. S. Choi and Y. S. Kim, 1991, "Study on Recrystallization of Ni-Co Alloys", *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol. 29, No. 9, pp. 902~910
- (5) C. S. Choi and T. Suzuki, 1983, "Study on Deformed Structures of Ni-Co Alloys", *J. of the Korean Inst. of Metals*, Vol. 21, No. 9, pp. 796~801
- (6) Y. B. Park, D. Raabe and T. H. Yim, 1996, "Rolling and Recrystallization Textures in Fe-Ni Alloys", *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol. 2, No. 3, pp. 151~157
- (7) K. A. Lee, J. H. Park, B. H. Cho, N. G. Jung and M. C. Kim, 2003, "Hot Deformation and Thermal Expansion Behavior of Fe-Ni-Co Low Thermal Expansion Alloy", *J. of Inst. Met. & Mater.*, Vol. 41, No. 9, pp. 539~549
- (8) Park, Y. B., Raabe, D. and Yim, T. H., 1996, "Rolling and Recrystallization Textures in Fe-Ni Alloys", *Metal and Materials*, Vol. 2, No. 3 pp. 151~157
- (9) Kim, D. K., Kim, D. H., Choo, D. K. and Moon, H. K., 1996, "Microstructural evolution in a strip-cast Ni-base superalloy", *Metal and Materials*, Vol. 2, No. 4 pp. 211~217
- (10) Grujicic, M., 1991, "Implication of Elastic Coherency in Secondary Harening of High Co-Ni Matensitic Steels" *Journal of Materials Science*, Vol. 26, No. 5, pp. 1357~1362
- (11) *Annual Book of ASTM Standards*, Section 3, 1996, "Matal Test Methods and Analytical Procedures", E 8M-96, Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials, pp. 76~96
- (12) *Annual Book of ASTM Standards*, Section 3, 1996, Matal Test Methods and Analytical Procedures, E 647-96, Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth rates, pp. 565~601
- (13) B. K. Choi and K. C. Jang, 2002, "A Study on the Fatigue Crack Propagation in the SB41 Welding Material", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 43~49
- (14) *ASTM E647-83*, 1985, Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-8} mm/Cycle, pp. 765~783
- (15) P. C. Paris and F. Erdogan, 1963, "A critical analysis of crack propagation laws", *J. Basic eng.*, Trans. ASME, Vol, 85, No. 4, p. 528
- (16) David Broek, 1986, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, pp. 57~68