

SM45C강의 열처리변형 제어를 위한 냉각매질의 특성

류성기 · 남태현* · 안민주** · 박종학**

경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터

*경상대학교 재료공학부, 항공기부품기술연구센터

**경상대학교 대학원

Characteristic of Refrigerant for Heat-treatment Deformation Control of SM45C Steel

S. Lyu, T. Nam*, M. Ahn** and J. Park**

School of Transport Vehicle Eng. Res. Center for Aircraft Parts Tech., Gyeongsang Univ., Chinju 660-701

*Division of Materials Science and Eng. Res. Center for Aircraft Parts Tech., Gyeongsang Univ., Chinju 660-701

**Graduate School of Gyeongsang Univ., Chinju 660-701

Abstract This study deals with the characteristic of refrigerant for heat-treatment deformation control of SM45C steel. The control of heat-treatment deformation must need the progress of production parts for a landing gear. Most of the deformation is occurred on unequal cooling. The unequal cooling is occurred by a property of quenching refrigeration. When a heated metal is deposited in the refrigeration, the cooling speed is so slow in early period of cooling because of occurring a steam-curtain. After more cooling, the steam-curtain is destroyed. In this progress, the cooling speed is very fast. The object of this study is to control the deformation of heat-treatment for landing gear by improving the conditions of quenching. The cooling curves and cooling rates of water, oil and polymer solution are obtained and illustrated. From the characteristics of the quenching refrigerant, the effects of heat-treatments on thermal deformation and fatigue strength are also investigated.

(Received July 18, 2000)

Key words: Refrigerant, Heat-treatment deformation, Landing gear, Quenching refrigeration, Conditions of quenching, Fatigue strength

1. 서 론

항공기용 랜딩기어는 항공기의 핵심부품이며 고부가가치 제품이다. 랜딩기어의 제조과정 중 열처리와 표면처리는 중요하다. Lisic[1]은 퀘칭매질을 체계적으로 평가할 수 있는 장치를 고안하였으며, Beck[2]은 은과 강으로 만든 시험편에 대한 냉각곡선을 그려 여러 가지 경화용 기름의 냉각능을 조사하였다. 그리고 Ueyma[3] & Kim[4]은 유한요소법을 사용하여 열변형을 해석하였지만 열처리 변형에 대한 원인은 규명되지 않았다.

현재 열처리 변형이 생산 가공부품의 불량 원인 중 가장 많이 차지하고 있다. 따라서 부품 가공 산업체들의 가장 큰 현상으로 기술로 도출되고 있는 열변형제어에 관한 연구가 요구되고 있다.

항공기의 랜딩기어는 4340강과 300M강을 주로 사용하고 있다. 이들 재료는 모두 퀘칭에 의하여 마르텐사

이트를 형성시키고 템퍼링하는 열처리를 통하여 고강도를 얻는 대표적인 고장력강에 속한다. 따라서 보통의 탄소강에 비하여 합금원소에 의하여 경화능이 매우 향상된 강으로 보통 오일 침을 이용한다. 그러나 랜딩기어와 같이 부품의 크기가 큰 경우 크기효과와 불균일 냉각에 의하여 열처리 변형이 발생한다. 랜딩기어의 경우 열처리변형을 기계적으로 조정하는 공정이 금지되어 있으므로 공정의 마지막 단계에 속하는 열처리 공정에서 열처리변형의 발생은 곧 부품의 사용가능 여부를 결정하는 중요한 인자가 된다. 따라서 열처리변형의 정확한 제어는 랜딩기어의 제조공정에 있어 반드시 필요하다.

열처리변형의 대부분은 불균일 냉각에 기인한다. 불균일 냉각은 부품의 형상에 기인할 수도 있지만 퀘칭냉매의 냉각특성에 보다 근본적인 원인이 있다. 가열된 금속을 퀘칭냉매에 침적시키면 냉각초기에는 증기막이 발생하여 냉각속도가 매우 느리다. 그 후 냉각이 더욱

더 진행되면 증기막은 파괴되고 냉매의 증발열에 의하여 냉각되는 단계에 접어들게 되고 이 단계에서 매우 빠른 냉각속도가 얻어진다. 물과 오일을 냉매로 사용하는 경우 증기막의 파괴는 국부적으로 발생하게 되어 냉각속도의 불균일이 발생하고 그 결과 변형이 발생한다. 따라서 불균일 냉각에 의한 열처리변형을 억제하기 위해서는 증기막의 파괴가 부품 전체에서 균일하게 발생할 수 있는 냉매의 사용이 필수적이다. 폴리머 솔루션(polymer solution)에서는 증기막이 부품전체에 걸쳐 파괴되므로 불균일 냉각에 따른 열처리변형을 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 켈칭조건을 개선하여 항공기 랜딩기어의 열처리변형을 제어하는 기술을 개발하는데 목적이 있다. 켈칭조건을 개선하기 위하여 물, 오일, 폴리머솔루션의 켈칭냉매의 냉각곡선과 냉각속도를 고찰하여 켈칭냉매의 특성을 밝히고, 각종 냉각매질이 열처리 변형과 피로강도에 미치는 영향에 대하여 고찰 하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용한 재료는 SM45C를 사용하였으며 화학적 조성비를 Table 1에 나타냈다. 랜딩기어는 형상이 복잡함으로 본 연구에서는 표점거리 50 mm, 직경 12.5 mm의 표준 인장시험편[5](제10호)을 채택하였다. 표준 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타냈다.

2.2. 시험편 가공 및 열처리

직경 18 mm의 SM45C 환봉을 절단하여 선반으로 센터구멍을 만들어 CNC선반을 사용하여 프로그램한 후 시험편을 제작하였다. 그리고 시험편의 표면은 원통연삭기

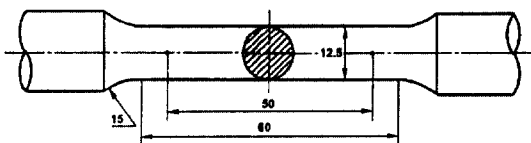


Fig. 1. Shape of standard tensile test piece.

를 사용하여 진원도와 진직도가 0이 되도록 연삭하였다.

본 연구에서는 폴리머솔루션 중 PAG(polyalkylene glycols)를 사용하였으며, 비교시험을 위한 다른 냉매로 물과 오일을 사용하였다. 냉각속도측정은 Fig. 2에 나타난 냉각속도측정장비(IVF Corp. Quencotest)를 사용하였다. 원리는 probe를 로에서 845°C로 가열한 후에 bath에 켈칭하게 되면 probe 내에 있는 thermocouple이 온도를 감지하여 그 신호를 기록장치에 보내게 된다. 그리고 이것을 컴퓨터로 전송함으로써 냉각속도 데이터를 얻을 수 있게 된다.

폴리머 솔루션의 경우 교반속도를 2.36 m/s로 고정하고 각각 농도를 15, 20%, 온도를 20, 40, 60°C 변화시키면서 냉각속도를 측정하였고, 물의 경우는 농도의 변수가 없기 때문에 교반속도를 2.36 m/s로 고정하고 온도만 20, 40, 60°C로 변화시키면서 냉각속도를 측정하였다. 오일의 경우는 온도를 20, 40, 60, 80°C로 변화시켰다.

열처리과정은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 845°C에서 1시간 오스테나이트화 후 켈칭을 하였으며, 425°C에서 1시간동안 템퍼링처리를 하였다. 모든 열처리 공정은 산화방지를 위하여 아르곤가스분위기에서 실시하였다.

2.3. 열처리변형 측정

열변형 측정은 열처리를 하기 전에 연삭하여 진원도와

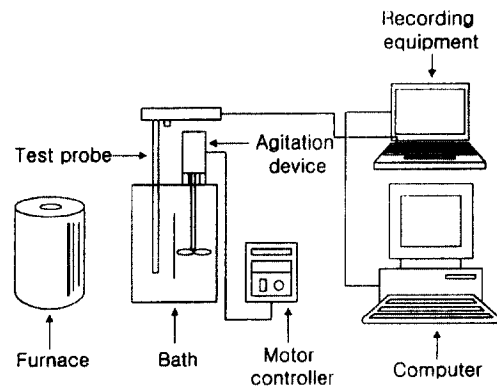


Fig. 2. Apparatus for measuring cooling rate

Table 1. Chemical composition of SM45C [wt. %]

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Range	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	≤0.03	≤0.035	≤0.25	≤0.25	≤0.20
Measured	0.44	0.28	0.73	0.026	0.019	0.12	0.20	0.16

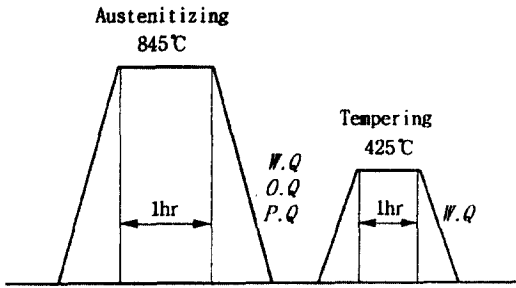


Fig. 3. Schematic diagrams of heat treatment.

진직도를 “0”(zero)으로 맞춘 다음 위의 실험에서 결정된 최적의 열처리 조건으로 S45C 강을 열처리를 실시한 후, 원통연삭기에 시험편과 다이얼 인디케이터를 설치하여 시험편을 회전시키면서 진원도[6]를 측정하고, 테이블을 이송시켜 진직도[7]를 측정하였다.

2.4. 시험편의 미세조직과 경도

시험편의 표면경도는 로크웰 경도기(DYH-100)를 사용하여 측정하였다. 그리고 금속조직 관찰은 금속현미경(Nikon EPIPHOT 200)을 사용하였으며, 시험편의 금속조직은 몇 개의 시험편을 절단한 후 마운팅하여 연마를 한 다음 5 ml의 질산과 100 ml의 에틸알콜 혼합액 속에 넣어 부식을 시킨 후 흐르는 물에 깨끗이 세척하여 얼룩이 생기지 않도록 드라이로 건조시켜 금속현미경을 이용하여 관찰하였다.

2.5. 회전굽힘피로시험

회전굽힘피로시험은 가장 널리 사용되는 양단 지지식 4점굽힘형 오노식(小野式) 회전굽힘 피로시험기를 사용하였다. 추의 하중을 P, 편축의 knife edge 간의 거리를 a라 하면 시험편에 가해지는 굽힘 모멘트 M은

$$M=(P/2)a \tag{1}$$

가 되며 이 굽힘모멘트가 시험편의 전체에 균일하게 가해져 시험부의 직경을 d라하면 굽힘 응력 σ 는

$$\sigma=32M/\pi d^3 \tag{2}$$

으로부터 구해진다.

각 시험편의 피로강도는 스테이케이스(staircase)방법[8,9]의 식(3)을 이용하여 구하였다.

$$\sigma_u=S_0+\Delta d \tag{3}$$

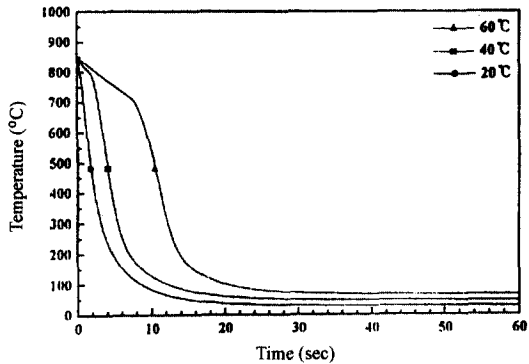
여기서, S_0 는 시험을 시작할 때 응력레벨값이며, d 는 응력레벨값의 간격을 나타내고 있다. 계수 Δ 는 피로 시험결과 응력레벨값의 간격(d)와 피로강도, 표준편차(σ)의 비로서 계산된다.

3. 실험결과 및 고찰

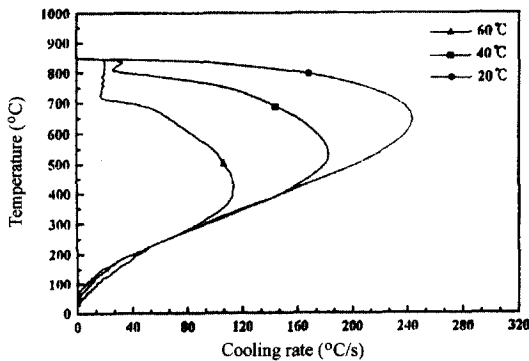
3.1. 냉각매질의 특성

(1) 물(Water)

850°C로 가열한 Ni base super alloy를 2.36 m/s의 교반속도로 고정된 후 켄칭냉매 물속에 켄칭 시켰을 때의 냉각곡선과 냉각속도의 측정결과를 Fig. 4(a), (b)에 나타냈다. 냉매의 온도가 20°C일 때는 거의 증기막 단계가 보이지 않지만 온도가 40°C에서 60°C로 증가함에 따라 증기막단계가 증가하였다.



(a) Temperature-time cooling curve



(b) Differential cooling rate curve

Fig. 4. The quenching characteristics of water.

(2) 폴리머 솔루션(Polymer solution)

일반적으로 재료의 열처리 변형에 영향을 미치는 인자는 온도와 농도이다. 온도의 영향을 고찰하기 위하여 폴리머 솔루션 15%농도의 수용액의 온도를 변화시키면서 냉각곡선과 냉각속도의 측정결과를 Fig. 5(a), (b)에 나타냈다. 온도가 20°C에서 40°C까지 증가하면서 증기막 단계 구간이 약간 증가하다가 60°C가 되면 크게 증가하였다. 그 이유는 사용하는 폴리머 솔루션을 60°C 이상 가열하게되면 물에서 폴리머의 분리가 일어나서 냉각능이 떨어지기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 냉매온도의 최적조건을 20°C로 선택하였다. 폴리머 솔루션의 농도가 냉각속도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 온도를 20°C로 고정하고 농도를 변화시키면서 냉각속도를 측정된 결과를 Fig. 6(a), (b)에 나타냈다. Fig. 6(a), (b)에는 쿨링냉매가 물인 경우의 결과도 함께 나타냈다.

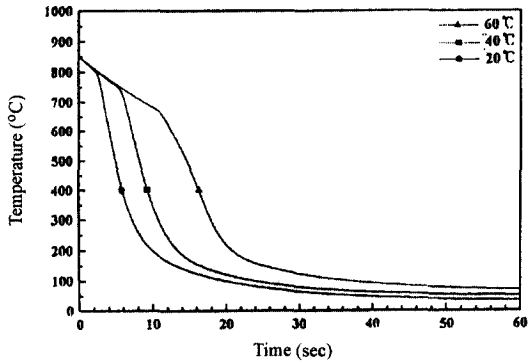
Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 폴리머 솔루션의 농도가 20%인 경우 증기막 단계구간이 크게 증가하였다. 그리

고 Fig. 6(b)에서 농도 15%인 경우 최대 냉각속도가 농도 20%보다 크고 물보다 작지만 철강재료의 마르텐사이트 변태 개시온도 부근인 400°C에서 속도가 느리다. 경화효과를 극대화시키면서 열처리 변형을 극소화시키기 위해서는 증기막 단계 구간이 짧아야하고 대류단계의 냉각속도가 느린 냉매를 선택하여야 한다.

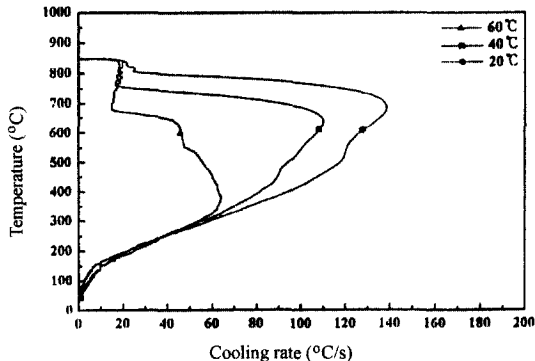
따라서 본 연구에서는 15% 폴리머 솔루션을 최적의 농도로 결정하였다.

(3)오일(Oil)

Fig. 7(a)는 상온용 열처리 오일을 이용하여 온도를 변화시키면서 시간에 따른 온도변화를 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 냉각초기에는 모든 온도의 오일이 비슷한 냉각특성을 나타내었지만 80°C의 오일이 미소 하지만 약간 더 양호하다. 그 이유는 이 오일이 상온보다 더 높은 온도에서 우수한 유동성을 가지므로 좀 더 빨리 냉각되기 때문이다. 특히 80°C오일은 300°C이

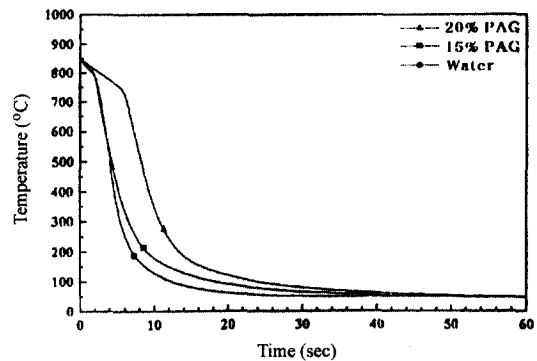


(a) Temperature-time cooling curve

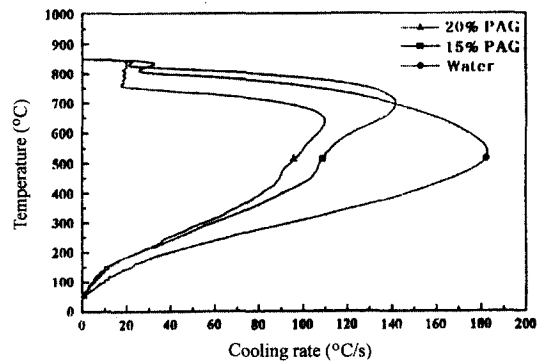


(b) Differential cooling rate curve

Fig. 5. The quenching characteristics of polymer solution (concentration=15%).

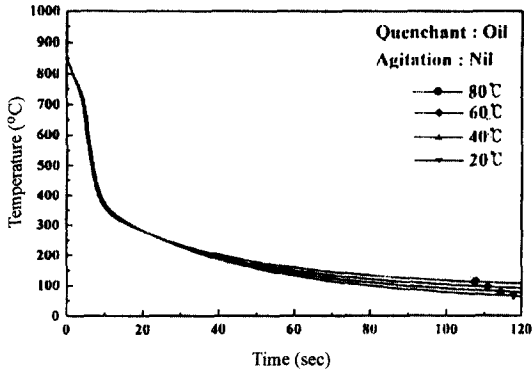


(a) Temperature-time cooling curve

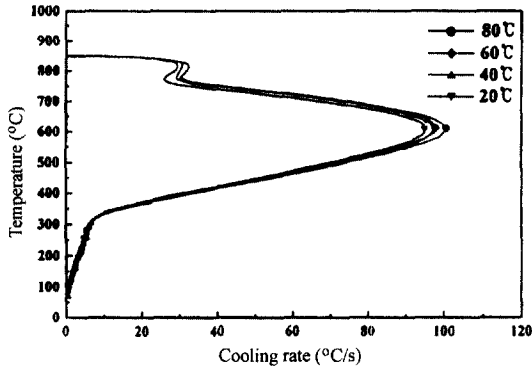


(b) Differential cooling rate curve

Fig. 6. The quenching characteristics of polymer solution (Temp.=20°C).



(a) Temperature-time cooling curve



(b) Differential cooling rate curve

Fig. 7. The quenching characteristic of oil.

하의 온도에서 다른 냉매들보다 천천히 냉각되는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 7(b)를 보면 최대냉각속도도 또한 가장 빠르기 때문에 오일 온도가 80°C일 때가 가장 적합한 조건이라 할 수 있다.

냉각 속도는 물이 가장 빠르고, 오일이 가장 느리게 나타났다. 그리고 수냉의 경우에는 680°C, 폴리머 솔루션과 유냉의 경우에는 590°C부근에서 냉각속도가 가장 높게 나타났다. 폴리머 솔루션은 증기막을 한꺼번에 제거하기 때문에 수냉 시에 발생하는 증기막을 제거할 수 있으며, 최대 냉각속도에 도달하는 시간이 수냉보다 빠르게 나타났다.

3.2. 열처리변형

시험편을 15% 20°C 폴리머 솔루션, 80°C 오일, 그리고 20°C의 물에 교반속도는 2.36 m/s로 하여 열처리 한 후 진원도와 진직도를 측정하여 Fig. 8, 9에 나타냈다. 냉매로써 물을 사용한 경우 초기에 피냉각물의 주

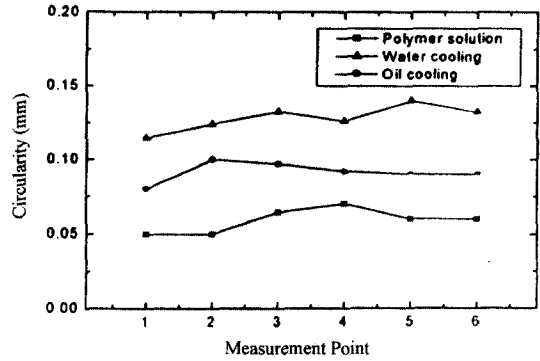


Fig. 8. Circularity of standard test piece.

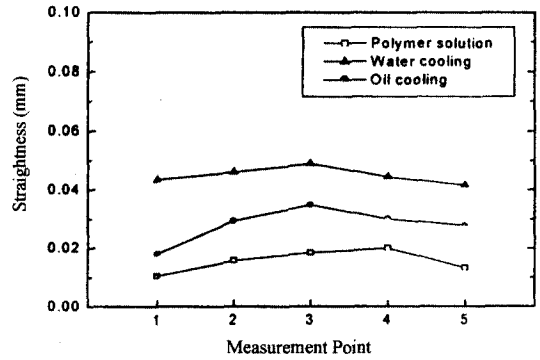


Fig. 9. Straightness of standard test piece.

위에 둘러쌓인 증기막이 서서히 깨어지면서 불균일냉각을 초래하고, 마르텐사이트 변태개시온도 부근인 400°C에서도 냉각속도가 빠르기 때문에 열처리 변형량이 가장 큰 것으로 사료된다. Fig. 8, 9에서 알 수 있듯이 진원도와 진직도는 폴리머 솔루션, 오일, 물 순으로 나타났으며, 15% 20°C 폴리머 솔루션의 경우가 가장 양호한 진원도와 진직도를 보였다

3.3. 시험편의 경도 및 미세조직

물, 오일, 폴리머 솔루션의 냉매를 사용하여 열처리한 시험편을 로크웰 경도기를 사용하여 측정된 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

각각의 시험편의 로크웰 경도측정 결과 로크웰경도 차는 크게 나타나지 않았으며, 각각의 시험편에서 물을 냉매로한 시험편의 경도가 가장 높게 나타났다.

시험편의 금속조직 관찰은 금속현미경(Nikon EPIPHOT 200)을 사용하였으며, 금속조직의 관찰위치는 표면부근에서 관찰하였으며 금속현미경으로 관찰한

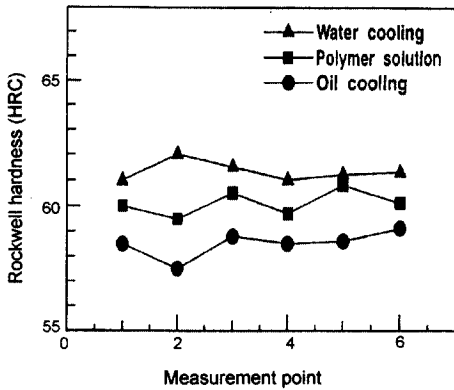


Fig. 10. Rockwell hardness distribution of standard test piece.

각 시험편의 금속조직 사진을 Fig. 11에 나타냈다.

물을 냉매로 열처리한 시험편은 대부분 마르텐사이트 조직이 관찰되었으며, 평균경도는 HRC 61.3으로 나타났다. 그리고 폴리머를 냉매로 사용한 시험편 베이나이트 분율이 다소 많이 나타났으며, 평균경도는 HRC 60으로 나타났다. 오일을 냉매로 사용한 시험편은 퍼얼라이트 분율이 다소 많이 나타났으며, 평균경도는 HRC 58로 나타났다.

3.4. 피로강도

피로시험은 오노식 회전 굽힘피로시험기를 사용하여 열처리를 하지 않는 시험편과 물, 오일, 폴리머 솔루션의 냉매를 사용하여 열처리한 시험편을 사용하여 피로 시험을 하였으며, 그 시험결과를 정리하여 S-N곡선의 경사부와 수평부를 구하여 Fig. 12에 나타냈다.

각 시험편의 피로강도는 스테이케이스방법으로 5회 반복실험한 결과의 평균값을 사용하였으며, 열처리를 하지 않는 시험편의 피로강도는 271MPa, 오일을 냉매로 열처리한 시험편의 피로강도는 342MPa, 물을 냉매로 열처리한 시험편의 피로강도는 356MPa, 폴리머 솔루션을 냉매로 열처리한 시험편의 피로강도는 377MPa이 얻어졌다.

본 시험결과 피로강도는 열처리 전에 비하여 26~39% 향상되었으며, 폴리머 솔루션을 냉매로 사용한 경우가 다른 냉매에 비해 피로강도가 가장 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 쿨링조건을 개선하여 항공기 랜딩기어

Fig. 11. Metallography of surface.

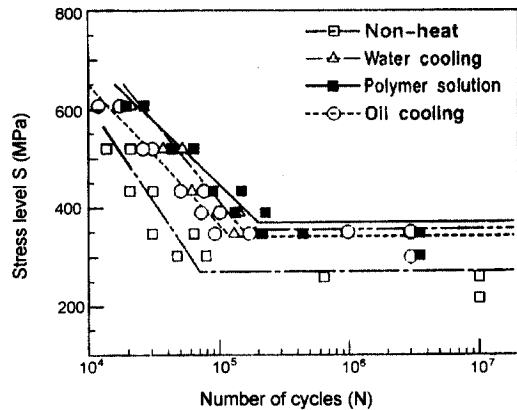


Fig. 12. S-N curves of test pieces.

의 열처리변형을 제어하는 기술을 개발하기 위하여 물, 오일, 폴리머 솔루션 퀴칭냉매의 냉각곡선과 냉각속도를 고찰하고, 퀴칭냉매의 특성을 밝혀, 각종 냉각매질이 열처리 변형과 피로강도에 미치는 영향에 대하여 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 퀴칭냉매의 최적조건은 물의 경우 20°C, 폴리머 솔루션의 경우 농도는 15%, 온도는 20°C, 오일의 경우 80°C로 나타났다.

2. 진원도와 진직도는 폴리머 솔루션, 오일, 물 순으로 나타났으며, 농도가 15% 온도가 20°C인 폴리머 솔루션이 가장 열변형이 적게 나타났다.

3. 경도 측정결과 경도는 물, 폴리머 솔루션, 오일 순으로 높게 나타났다.

4. 피로강도는 열처리전에 비하여 26~39% 향상되었으며, 폴리머 솔루션을 냉매로 사용한 경우 다른 냉매에 비해 6~10% 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 지역연구협력센터인 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lisic, B.,: "Assessing the Absolute Quenching Capacity During Hardening from the Surface Temperature Gradient", *Härterei-Techn, Mitt.*, 33. No. 4 (1978) 179.
2. Beck, G., DUMONT, C., MOREAUX, F, and SIMON, A., : "Guiding Principles in Choosing and Selection a Hardening Oil", *Härterei-Techn, Mitt.*, 30. No. 6 (1975) 558.
3. T. Ueyama etc.,: "Improved Computer simulation Method for shadow Mask Thermal Deformation", *Japan Display 89* (1989) 558.
4. H. Kim and S. Im: "Analysis of Beam Landing Shifts due to 새 Thermal Deformation of a Shadow Mask", *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol. 40, No. 1 (1993) 47.
5. 李澤淳: 材料試驗, 螢雪出版社 (1994) 379.
6. 宋地復, 鄭泰煥: 精密機械設計製圖法, 성안당 (1999) 46.
7. 宋地復, 鄭泰煥: 精密機械設計製圖法, 성안당 (1999) 39.
8. ISO/DP 6335/III: Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears, Part 3 (1980) 78.
9. Little, R. E.: Probabilistic Aspects of Fatigue, *ASME Spec. Tech. Pull*, Vol. 5, No. 11(1972) 54.