

# 초음속 비행체 구조재료에 대한 열기계적 특성

Thermomechanical Characteristics for Structural Material of Supersonic Vehicle

**김종환\***      **이기범\***      **이경용\***  
Kim, Jong-Hwan      Lee, Kee-Bhum      Lee, Kuong-Yong

## ABSTRACT

The thermomechanical characteristics were evaluated for 17-4PH stainless steel widely used in supersonic airframe subjected to both aerodynamic loading and heating. The thermomechanical tests were conducted under both elevated temperature and rapid heating condition from 1°C/sec to 28°C/sec. The thermomechanical behaviors under rapid heating were compared with those of elevated temperature after 1/2 hour exposure in terms of yield stress to investigate the influence of heating rates. A heating rate-yield temperature parameter was suggested for rapid heating based on time-temperature parameters, and master yield stress curve was obtained by using these parameters. The experimental results and methodology from this study can be used as basic engineering data when designing supersonic vehicle structures subjected to aerodynamic loading and severe heating environment.

주요기술용어(주제어) : Aerodynamic Heating(공력가열), Rapid Heating(급속가열), Yield Stress(항복응력), Yield Temperature(항복온도), Thermomechanical Characteristics(열기계적 특성), Heating Rate-Yield Temperature Parameter(가열률-항복온도 계수)

## 1. 서론

초음속 비행체가 1950년대 초에 개발되고, 성능이 고도화됨에 따라 열하중에 대한 이해와 열구조 설계의 필요성이 대두되었다. 기존의 아음속 비행체는 비행 중에 받는 공력 하중 및 기동시의 하중을 지탱할 수 있도록 구조강도를 설계하는 반면에, 초음속 비행체 구조물 설계는 외력 외에 공력가열(aerodynamic heating)현상<sup>[1]</sup>을 고려한 설계가 필요하다. 초음속 비

행체의 기체 표면은 이러한 열악한 열환경에 노출됨으로써 온도가 급상승하게 된다. 이런 환경에서 구조물은 상온에서 운용될 때 보다 강도가 감소한다. 초음속 비행체 설계뿐만 아니라 고온 환경에 노출되는 구조설계는 강도유지 및 열차단을 통한 내부 구성품 보호와 요구성능을 만족시켜야 한다. 이런 목적을 달성하기 위해서 외부적으로는 열차단이 우수한 열방어 재료를 선정해야 하고, 구조물 측면에서는 고온에서 강도 감소가 작으면서 인성이 우수한 재료를 선택해야 한다. 이러한 열기계적 특성이 우수한 재료를 개발하고 구조물에 적용하기 위해서는 실험 및 해석을 통한 구조적 강도 및 건전성 평가가 필수적이다. 일반적으로 구조재료의 강도데이터로 제시되는 기계적

† 2005년 4월 22일 접수~2005년 6월 7일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : kjh5938@add.re.kr

물성은 열과 기계적 하중이 혼합된 복합하중에 대하여 단일화된 재료의 물성을 제시하기 어렵다. 그 이유는 이런 구조재료의 열기계적 특성이 변형률 속도, 일정 온도 유지 상태, 온도 상승률, 하중 크기 등 다양한 외란에 의하여 지배를 받기 때문이다. 현재 비행체 구조해석의 재료 물성치로 많이 활용되고 있는 미군사규격<sup>[2]</sup> 데이터는 30분 이상 온도가 유지된 상태의 기계적 물성만 제시할 뿐 순간적으로 시편 표면 온도가 증가하는 급속 가열 환경에 대한 강도는 제시되어 있지 않다. 따라서 실제 초음속 비행체 구조설계시 이런 일정온도하의 물성을 적용할 경우는 실제 예상값 보다 훨씬 높은 안전율이 적용되므로 비행체의 무게 감량 및 성능 측면을 볼 때 불리하다.

열과 외력이 동시에 작용하는 구조재료의 열기계적 특성 연구는 거시적인 응력과 변형을 거동 관점에서 크게 일정 온도 환경과 급속 가열 환경으로 분류할 수 있다. 일정 온도 환경은 초음속 비행체의 엔진과 같이 몇 분 또는 몇 시간 동안 온도가 유지되는 환경을 말하며, 급속 가열 환경과 비교할 수 있는 기준 데이터로 활용된다. 급속 가열 환경은 초음속 비행에 따른 구조재료의 표면온도가 수 초 내지 수십 초 안에 수백 ℃로 상승하는 환경을 말한다. 급속 가열 환경에서 구조재료의 열기계적 거동 연구는 1950년대 초에 초음속 비행체의 개발과 함께 날개 및 동체 구조재료에 대하여 활발히 진행되었다<sup>[3~7]</sup>. Smith 등<sup>[3]</sup>은 강과 알루미늄합금에 대하여 30 분간 노출된 상태에서의 인장강도와 용접기를 이용한 급속 가열 실험 결과를 비교·고찰하였다. Kurg<sup>[4]</sup>는 Inconel-X에 대하여 급속가열하의 인장물성을 연구하였고, 급속 가열환경과 30분간 노출환경의 강도를 비교분석하였다. Lipkin<sup>[5]</sup>은 Al6061에 대하여 급속가열하의 항복강도를 구하고, 항복강도에 대한 시간, 온도 및 변형률 속도의 영향을 연구하였다. Nichols 등<sup>[6]</sup>은 레이저에 의한 급속가열방법을 통하여 Al6061 재료에 대한 파괴 거동을 연구하였다. 최근에 Liu 등<sup>[7]</sup>은 시편에 직접 전류를 통과시키는 급속 가열 방법을 사용하여 철강 재료에 대하여 가열률 조건에 따른 항복거동을 실험적으로 연구하였다.

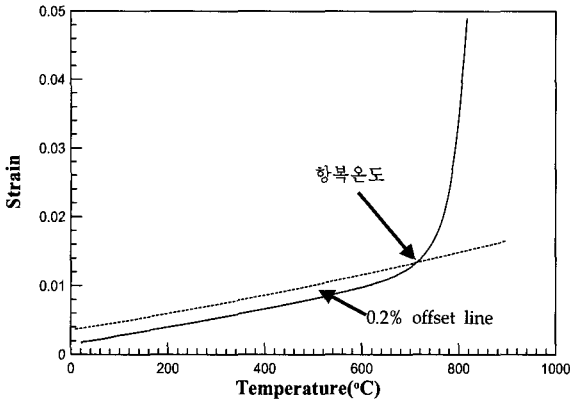
본 연구에서 다루고자 하는 구조재료는 초음속 비행체의 내열구조재료로 활용되고 있는 17-4PH 강이

다. 이 강은 상온에서 높은 강도를 가지며, 고온에서 강도 감소가 작은 장점을 가지고 있다. 본 재료와 관련된 열기계적 거동 연구는 주로 일정 온도 환경에 대한 물성자료<sup>[2~8]</sup>만 제시되어 있을 뿐 급속 가열 환경에 대한 열기계적 거동 연구는 거의 없다. 또한 이러한 열과 외력을 동시에 받는 재료거동에 대하여 체계적인 실험과 해석적 접근을 시도한 연구도 전무한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 초음속 비행체 내열구조재료로 활용되고 있는 17-4PH 강에 대하여 일정 온도 환경과 급속 가열 환경에 대한 열기계적 특성을 규명하고자 한다. 먼저 이 재료가 실제로 경험할 수 있는 표면가열현상을 실험적으로 모사할 수 있는 복사 가열 장치를 고안하고, 실제 예상되는 운용조건에 가열률 범위에서 열기계적 특성을 평가하였다. 또한 가열 환경에 따른 재료강도를 평가하기 위하여 급속 가열 실험결과와 일정 온도에서 30분 노출된 실험결과를 항복강도 측면에서 비교 고찰하였다. 급속 가열하의 열기계적 실험결과로부터 시간-온도계수를 응용한 가열률-항복온도 계수를 도출하였으며, 항복응력을 가열률과 항복온도로 표현되는 실험적 마스터(master) 수식을 제안하였다. 본 연구 결과를 통하여 내열구조재인 17-4PH 강에 대하여 운용조건에서 예상되는 물성을 제시함으로써 초음속 비행체 설계시 선정재료에 대한 안전여유의 판단자료로 활용될 수 있는 공학 자료를 제시하였다.

## 2. 열기계적 실험 관련 이론

급속 가열하의 열기계적 실험은 상온에서 행해지는 인장실험과는 달리 재료의 탄성, 열팽창 및 점성이 혼합된 열기계적 거동을 파악하기 위한 실험이다. 본 실험에서는 상온 인장시험에서 구한 항복강도를 근거로 하여 탄성 영역 내에 있는 하중을 선정한 다음 가열률을 변화시켜 재료의 파괴 거동 특성을 파악한다. 그림 1은 초기 예하중(pre-load) 유지 상태에서 시간 경과에 따른 시편 표면 온도 및 변형률 변화를 나타낸 예이다. 그림의 변형률-온도선도에서 0.2% offset 되는 지점을 항복온도(yield temperature,  $T_y$ )로 정



[그림 1] Example of strain-temperature curve under rapid heating

의하였다<sup>[3~4]</sup>. 이 용어는 기존의 인장실험에서 도출되는 응력-변형률 선도로부터 항복응력을 정의하는 방법과 유사하게 응용된다. 항복온도 개념은 급속 가열하의 열기계적 실험을 통하여 가열률 및 초기 예측중 변화에 따른 재료의 강도를 평가하기 위하여 도입되었다. 모든 급속 구조물의 강도 평가는 주로 항복강도를 기초로 설계하는 것이 보통이기 때문에 이러한 급속 가열 조건에서 온도변화에 따른 열팽창과 탄성계수의 변화가 0.2%의 연신율을 초과할 때, 이때의 온도를 설계기준으로 하는 항복온도로 정하는 것은 타당성이 있다고 판단된다.

한편, 고온에서 행해지는 크립시험에 있어서 실험적 데이터가 없는 조건에서 고온 강도 데이터가 필요한 경우가 있으며, 제품 개발 동안에 장시간의 사용연수에 대한 강도를 예측할 필요성이 제기되었다. 크립시험에서 시간-온도계수는 동일 응력의 온도 조건보다 높은 온도에서 단시간에 이루어지는 크립파단으로부터 외삽법(extrapolation)을 통하여 장시간의 파단거동을 예측할 수 있는 실험적 기법이다. 급속 가열하의 열기계적 실험에서 도출된 항복온도와 가열률의 관계를 크립시험의 시간-온도 계수와 연관시켜 새로운 개념의 가열률-항복온도 계수를 구할려는 시도가 있었다<sup>[4]</sup>.

Larson-Miller방법은 장시간 고온 환경에 노출되는 재료의 파단수명을 예측하는 외삽법으로서 다음과 같이 표현된다<sup>[9]</sup>.

$$P_{LM} = T(\log t_r + C_{LM}) \quad (1)$$

위 식에서  $P_{LM}$ 은 시간-온도 계수를 나타내는 상수이며,  $T$ 는 유지온도,  $t_r$ 은 파단 시간,  $C_{LM}$ 는 Larson-Miller 상수를 나타낸다. Manson-Haferd<sup>[10]</sup>는 시간-온도계수를 다음과 같이 표현하였다.

$$P_{MH} = \frac{T - T_a}{\log t_r - \log t_a} \quad (2)$$

여기서  $P_{MH}$ 는 시간-온도 계수를 나타내는 상수,  $T$ 는 유지온도,  $t_r$ 은 파단시간,  $T_a$ 와  $t_a$ 는 직선들이 만나는 교차점의 온도 및 시간을 나타낸다. White-LeMay<sup>[11]</sup>는 시간-온도 계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$P_{WL} = \frac{1/T_w - 1/T}{\log t_w - \log t_r} \quad (3)$$

여기서  $P_{WL}$ 은 시간-온도 계수를 나타내며,  $T_w$ 와  $t_w$ 는 교차점에서의 온도 및 시간을 나타낸다.

본 연구와 관련하여 Kurg<sup>[5]</sup>는 Inconel-X에 대해서 통전 방식에 의한 급속 가열 실험을 통하여 가열률 변화에 따른 항복온도를 구하였으며, Manson-Haferd가 제안한 선형 온도-시간 계수를 응용하여 가열률과 항복온도와의 관계식을 다음과 같이 표현하였다.

$$S = \frac{T_y - T_a}{\ln h_r - \ln h_a} \quad (4)$$

여기서  $S$ 는 가열률-항복온도 계수를 나타내는 상수이며,  $T_y$ 와  $h_r$ 은 항복온도와 가열률을 나타내고,  $T_a$ 와  $h_a$ 는 교차점에서의 온도 및 가열률을 나타낸다. 식 (4)를 이용하여 급속 가열하의 가열률-항복온도 계수를 적용하였을 때 각각의 예측중에서 구한 가열률-항복온도 계수가 가열률이 음수인 쪽으로 수렴하는 특징을 나타낸다. 그러나 가열률이 음수인 경우는 재료가 냉각되는 경우이며 이는 본 연구의 급속 가열 환경과는 현상적으로 맞지 않다고 판단되었기 때

문에 가열률-항복온도 계수를 구하는 과정에서 가열률이 양수인 쪽으로 수렴하도록 다음과 같이 제안하였다<sup>[12]</sup>.

$$K = \frac{\ln h_r - \ln h_a}{1/T_y - 1/T_a} \quad (5)$$

식 (5)에서  $K$ 는 가열률-항복온도 계수를 나타내는 상수이며,  $h_r$ 은 가열률,  $T_y$ 는 항복온도,  $h_a$ 와  $T_a$ 는 교차점에서의 가열률과 온도를 나타낸다. 본 연구의 결과고찰에서는 식 (4)를 이용하여 가열률-항복온도 계수를 구하고, 수정된 제안식인 식 (5)로부터 구한 가열률-항복온도 계수의 결과와 비교해 보았다.

앞에서 구한 가열률-항복온도 계수를 이용하면 어떤 항복온도 및 가열률에 대하여 항복응력을 유추할 수 있는 실험적 마스터 곡선식을 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_y = f(K) \text{ or } f(S) \quad (6)$$

식 (6)의  $\sigma_y$ 는 항복응력을 나타내고,  $f(K)$  또는  $f(S)$ 는  $K$  또는  $S$ 의 함수를 나타낸다. 본 연구에서는 초음속 비행체 구조재료인 17-4PH 강에 대하여 실제로 운용될 수 있는 1°C/sec~28°C/sec의 가열률 범위에서 항복응력의 실험적 마스터 곡선식을 도출하였다.

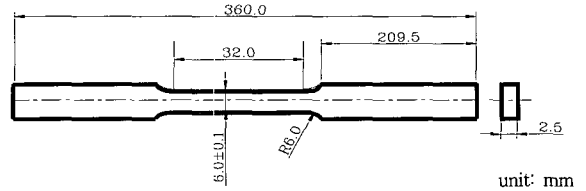
### 3. 실험

#### 가. 시험 시편

본 연구에 사용한 시편재료는 내열성 및 고온 강도가 요구되는 비행체 외피 및 내부 구조용 재료로 활용되고 있는 17-4PH 강이다. 이 강은 석출경화형 스테인레스강으로서 마르텐사이트 기지 중에 구리를 경화원소로 함유시켜 석출상이 미세하게 분산되면서 강화시키기 때문에 내식성과 강도가 높으며, 주조재 및 단조재 용도로 사용 범위가 넓다. 본 실험에 사용된 17-4PH 강에 대한 열처리 조건은 H1075로서 1,038°C에서 30분 용체화 처리(solution treatment)후

[표 1] Chemical composition of 17-4PH stainless steel(%)

C	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	Ni	P	S	Si	Fe
0.0416	15.53	3.435	0.54	0.0994	0.34	4.2	0.0199	0.0027	0.589	Bal.



[그림 2] Dimension of thermomechanical test specimen

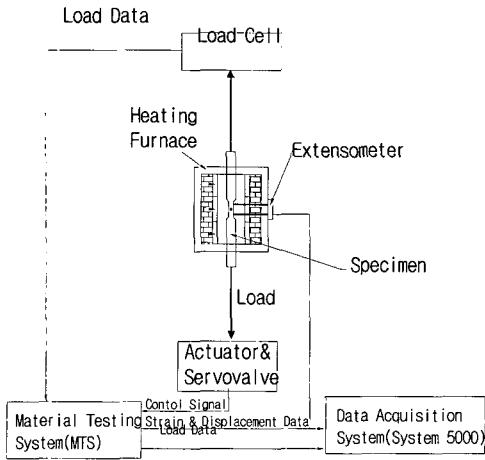
579°C에서 4시간 시효(age) 처리한 상태이다. 17-4PH 강의 화학적 조성은 표 1과 같다.

시편형상은 압연 제품인 판(sheet) 소재를 ASTM 규격<sup>[13]</sup>에 의거하여 제작한 사각형의 인장시편이다. 그림 2는 열기계적 실험에 사용된 시편형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 재료가 파단되는 게이지 길이 부분은 표준시편과 동일하게 설계하였으나, 시편의 그림부분은 시편의 설치 및 제거가 용이하고, 가열로의 가열면적 및 열손실에 따른 시편의 온도 구배를 줄이기 위하여 가열로 밖에서 시편이 고정되도록 길게 제작하였다.

#### 나. 실험 방법

##### 1) 일정 온도하의 열기계적 실험

그림 3은 일정 온도하의 열기계적 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 실험장치는 MTS사 제품의 고온 가열로 및 인장시험기로 구성된다. 고온 가열로의 최대 가열온도는 1,000°C이고, 세 개의 가열영역으로 구성된다. 인장시험기의 최대 하중 부가능력은 10톤이다. 시편의 온도부가는 시편의 길이방향에 따라 3개의 분리된 가열영역으로 이루어진다. 온도제어용 센서는 최대 1,250°C까지 측정 가능한 K형 열전대를 사용하였다. 열전대는 시편의 게이지 길이 중심부분과 각 가열영역 위아래 지점에 점용접으로 부착하였으며, 게이지 길이 부분의 중심부 온도가 일정한 온도로 유지될 때 하중을 부가하였다. 하중

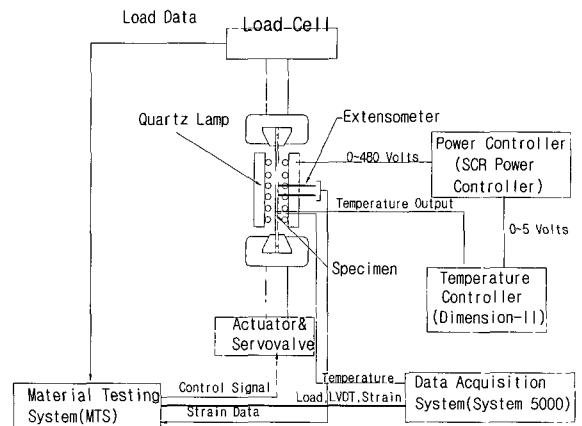


[그림 3] Schematic diagram of tensile testing machine and heating furnace

측정은 인장시험기에 설치된 로드셀을 통하여 계측되며, 변형을 측정은 silicon carbide 봉으로 된 신장계(extensometer)를 이용하여 계측하였으며, 이 신장계의 최대 사용 온도는 1,500℃이다. 시험 진행중 데이터 획득은 MG사의 System 5000을 사용하여 시간 경과에 따른 하중, 변형을 및 온도 데이터를 획득하였다. 일정 온도하의 열기계적 실험조건은 시편의 표면 온도를 10분 이내로 실험온도까지 상승시킨 후 30분 동안 유지시킨다. 이런 온도로 계속 유지하면서 변위 제어 방식을 사용하여 2mm/min의 속도로 실험을 진행하였다. 실험 온도는 기존 미군사규격, ASM<sup>[8]</sup>등에서 제시하는 기계적 물성치를 참고하여 상온, 200℃, 400℃, 500℃, 600℃까지 수행하였다. 실험에 사용된 시편수는 각 온도 조건별로 3개 이상을 사용하였다.

## 2) 급속 가열하의 열기계적 실험

그림 4는 급속 가열하의 열기계적 실험을 구현하기 위한 전체 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 실험장치는 10톤 용량의 MTS사 재료시험기를 하중부가 용 장치로 사용하면서 시편에 가해지는 열량을 계산하여 설계 제작한 석영램프 가열장치를 설치하는 개념으로 구성하였다. 시편 가열 방법은 그림 4에서와 같이 복사 가열 방식의 석영 램프 가열기를 이용하여 온도제어 방식 또는 전압제어 방식으로 온도를 부가



[그림 4] Schematic diagram of thermomechanical test under rapid heating

한다. 석영 램프 가열기의 전력 공급은 온도제어기에서 입력전압을 온도 또는 백분율로 프로그램하면 이 입력이 0~5V의 전압으로 환산되어 전력제어기로 보내어지고, 0~5V의 입력전압은 0~500V의 전압으로 변환되어 시편을 가열하게 된다. 온도제어 방식은 온도제어기에서 입력된 온도와 시편에서 측정된 온도가 일치하지 않으면 이 온도 편차 만큼 다시 전력제어기로 전압을 보내어 석영 램프 가열기의 가열량을 조절하는 원리로 이루어진다. 전압 제어 방식은 가열기에 단순히 전압만을 공급하는 방식으로서 온도 제어기에서 피드백 되는 입력 단자를 서로 연결시켜 입력신호가 없도록 한 후에 PID 제어에서 게인(gain)값을 1로 고정함으로써 입력 전압만을 전력제어기로 보내도록 하는 원리이다. 본 실험에서는 전압 조절 방식을 택하였다. 이는 급속 가열하의 열기계적 실험 도중에 시편의 파단으로 인한 열전대의 파손이 우려되며, 전기 입력단 접촉에 의해 인체 및 장비에 치명적인 안전상의 문제가 야기될 수 있기 때문이다. 그리고 가열기의 전력 손실을 줄이고, 가열기에서 시편으로 전달되는 열효율을 높이기 위하여 반사경 내부에 2 kg/cm<sup>2</sup>이상의 냉각수가 흐르도록 하였다.

급속 가열하의 열기계적 실험은 시편에 외력을 부가한 상태에서 석영 램프 복사 가열기를 이용하여 온도를 부가한다. 먼저 시편의 균일한 외부 열입력을 확인하기 위하여 K형 열전대를 사용하여 시편의 중심에서 상하 15mm의 간격을 두고 위에서부터 양면

에 총 6개를 부착하여 가열속도에 따른 온도편차 정도를 확인하였으며, 하중유지를 위한 하중 설정은 상온 정적 인장시험을 통하여 구한 응력-변형을 선도로 부터 이 재료의 항복강도를 구한 다음 항복강도의 90%, 70%, 50%, 30%의 하중을 유지시킨 후 가열률을 달리하면서 시험을 수행하였다. 시험중 데이터 처리는 MG사의 System 5000을 사용하여 로드셀에서 측정된 하중과 시편의 변형을 및 온도를 시간경과에 따라 획득하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 가. 일정 온도하의 열기계적 실험 결과

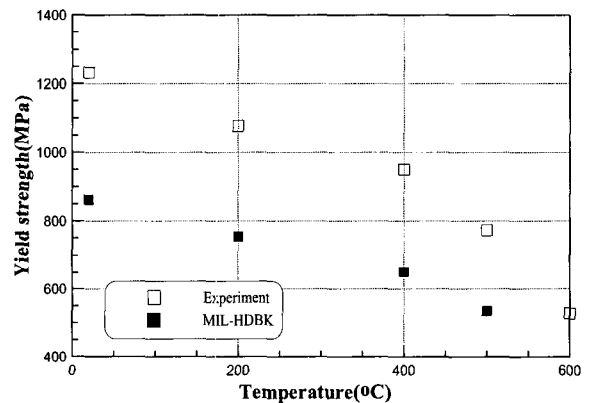
실험 결과에서 제시된 탄성계수는 각 온도별 실험 결과에 대한 통일성을 기하기 위하여 600°C의 응력-변형을 선도를 기준으로 정하였으며, 선형 구간의 변형률이 0.0025(2,500  $\mu\epsilon$ )인 지점의 기울기로부터 구한 값이다<sup>[13]</sup>.

표 2는 일정 온도하의 열기계적 실험에서 구한 각 온도조건의 항복 및 인장강도, 탄성계수 결과를 정리한 것이다. 표에서 제시된 시험결과를 보면 각 시험 온도별 항복강도, 인장강도 및 탄성계수는 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었다. 실험 온도가 200°C인 경우는 상온 결과에 비하여 항복 및 인장강도는 13%이하, 탄성계수는 7%이내로 감소폭이 작으나, 400°C 이후부터는 항복 및 인장강도는 20%범위, 탄성계수는 18%로 감소폭이 서서히 증가함을 알 수 있다. 여기서 볼 때 400°C 이후부터 내부조직의 변화가 시작되고 있다고 추측할 수 있다.

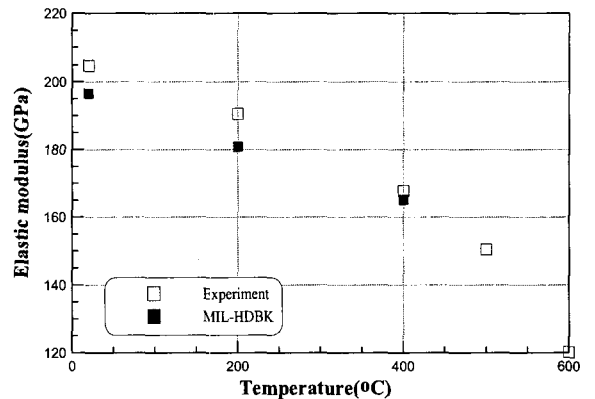
그림 5와 그림 6은 각 실험 온도별 항복강도와 탄성계수를 미군사규격 강도데이터와 비교한 결과를 나타낸 것이다. 항복강도 결과를 비교해 볼 때, 본 실험결과 데이터가 미군사규격 데이터 보다 대체로 높게 나타났다. 특히 상온강도는 미군사규격 데이터 보다 20%이상 높았다. 여기서 미군사규격의 강도데이터는 A-basis나 B-basis 또는 S-basis로 제시된 데이터를 나타내며, 시편의 제작 로트, 두께, 시편 형태를 달리하는 100개 이상의 시편들에 대하여 인장시험을 수행하여 실험결과가 A-basis는 전체의 99%,

[표 2] Tensile properties of 17-4PH stainless steel at elevated temperature

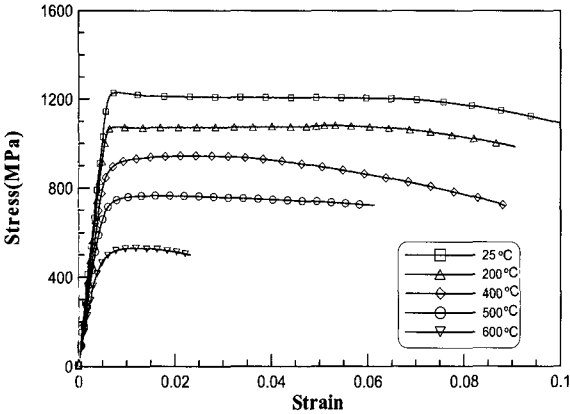
Temperature (°C)	Properties		
	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
25	1,232	1,232	204.7
200	1,077	1,068	190.5
400	950	907	167.8
500	773	739	150.4
600	528	495	120.2



[그림 5] Yield strength of 17-4PH stainless steel at various temperatures



[그림 6] Elastic modulus of 17-4PH stainless steel at various temperatures



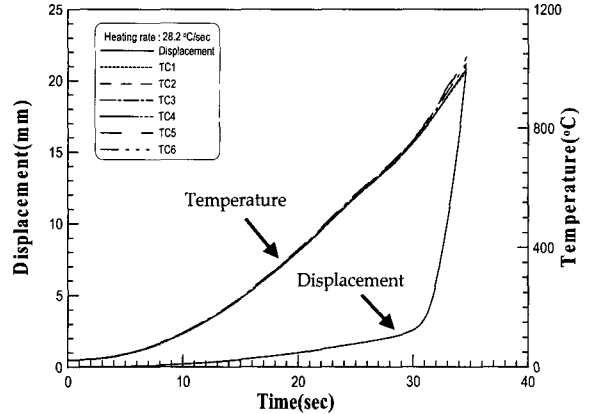
[그림 7] Stress-strain curves for 17-4PH stainless steel at elevated temperatures

B-basis는 90%이상이 여기에 제시된 강도를 넘는 최소값을 나타내는 값이며, S-basis는 이들 중 가장 최소인 값을 나타낸다. 이런 이유로 본 연구의 실험 결과 보다 미군사규격 값이 낮게 나타났다고 볼 수 있다. 온도가 증가함에 따라 실험결과와 강도 감소폭이 미군사규격의 감소폭보다 다소 높았다. 특히, 600°C부터는 상온 강도의 50%이하로 떨어진다. 즉, 이 온도이상에서 17-4PH 강은 구조재료로서의 기능이 거의 상실된 것으로 추측된다.

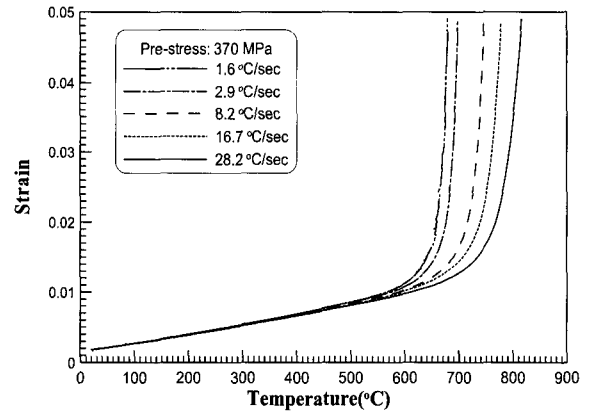
그림 7은 일정 온도하의 열기계적 실험에서 구한 응력-변형을 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 상온과 200°C경우는 재료의 항복이 일어나기까지 가파르게 응력이 증가하다가, 항복 이후 갑자기 응력이 완화된 현상을 관찰할 수 있었다. 400°C이후부터는 소성거동이 완만하게 증가하는 경향을 보여주었으며, 이는 일반적인 연성재료의 기계적 거동에서 볼 수 있는 결과이다. 또한 400°C이후부터 인장강도가 현저히 저하되는 경향을 볼 수 있다.

#### 나. 급속 가열하의 열기계적 실험 결과

그림 8은 본 실험의 최대 가열률에서 시편의 온도 분포 및 변위를 나타낸 것이다. 여기서 TC1~TC6는 시편의 양면에 부착된 열전대를 표시한다. 시편 파단 시점의 온도는 게이지 길이 지점에서 1,010°C에 도달할 때까지 20°C이내의 온도편차를 보여주었다. 이런 높은 가열률을 고려해 볼 때 시편이 전반적 균일하게



[그림 8] Displacement and temperature-time curves of 17-4PH stainless steel under rapid heating



[그림 9] Strain-temperature curves at pre-stress of 370 MPa according to various heating rates

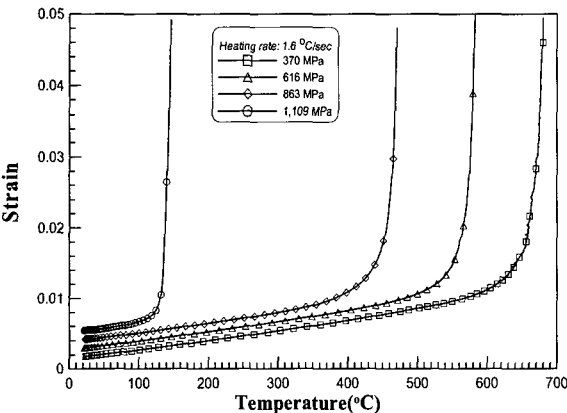
가열되었음을 알 수 있다. 또한 가열시간에 따라 재료가 탄성에서 소성유동이 시작하자마자 급격히 증가하여 파단되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 급속 가열 환경에서 한번 소성변형이 시작되면 급속하게 구조 지지력을 상실하게 된다는 것을 의미한다.

그림 9는 초기 예하중 유지상태에서 가열률에 따른 변형률-온도 선도를 나타낸 것이다. 여기서 변형률은 전체 변형률을 나타내며, 초기 탄성과 소성변형률, 열적 변형률, 온도와 함께 감소한 탄성 변형률, 온도 증가와 함께 발생한 소성 변형률을 포함한다. 소성유동

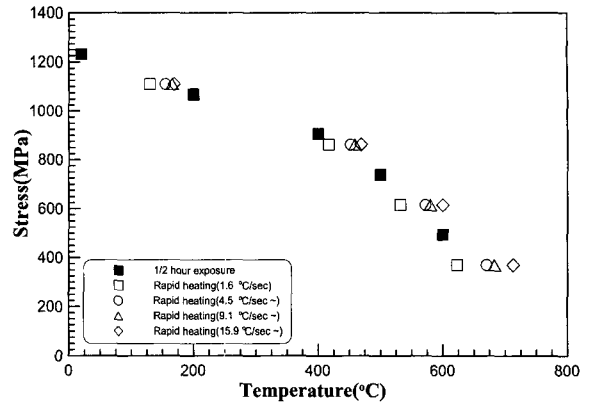
이 시작되기 전까지 모든 급속 가열하의 열기계적 실험 곡선은 가열률에 상관없이 하나의 곡선에 합병되는 것을 알 수 있다. 즉, 소성유동이 발생하기 전의 선형구간은 온도의 상승에 따른 열팽창과 탄성계수의 변화라고 할 수 있다<sup>[3,4]</sup>. 그림 9에서 보면 가열률의 증가와 함께 소성유동이 온도가 증가하는 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 이는 가열속도가 빠를수록 재료의 소성거동이 더 높은 온도에서 일어남을 의미한다<sup>[7]</sup>.

그림 10은 동일한 가열률에서 응력 변화에 따른 변형을 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 변형률 곡선의 수직 상승은 응력 증가에 따라 재료가 파단되는 것을 의미하는 것으로, 이런 수직 상승의 경향이 온도가 감소하는 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 특히, 변형률-온도선도에서 소성유동이 급격히 변하기 전까지 선형구간의 기울기가 비슷하다. 이는 가열률에 따른 선형구간의 변형이 온도가 증가함에 따라 탄성변형보다는 열팽창에 의한 변형이 지배적으로 일어난다는 것을 의미한다.

그림 11은 급속 가열하의 열기계적 실험에서 도출한 항복 온도와 일정 온도하의 열기계적 실험에서 구한 항복응력과 비교한 그래프이다. 전반적으로 가열률이 증가할수록 급속 가열하의 열기계적 실험결과가 일정 온도에 대한 항복응력과 인장강도 보다 증가함을 알 수 있었다. 다만 17-4PH 강은 알루미늄



[그림 10] Strain-temperature curves for different pre-stresses under the heating rate of 1.6°C/sec



[그림 11] Tensile yield stress for rapid heating and elevated temperature(1/2 hour exposure)

재료의 연구결과<sup>[12]</sup>와 달리 본 연구의 관심 가열률 범위에서 가열률 증가에 따른 강도 변화 폭이 작게 나타났다. 이는 재료마다 열전도 특성 및 용융점에 따른 고온 거동이 다르기 때문으로 추측된다. 일정 온도하의 열기계적 실험과 급속 가열하의 열기계적 실험결과에서 보면 가열률이 1.6°C/sec의 비교적 낮은 가열률에서는 30분 이상 유지한 결과와 비슷하다. 즉, 이 가열률 이하에서는 가열속도에 따른 강도와 일정온도에서 30분 노출시 강도와 차이가 없음을 예측할 수 있다. 또한 낮은 온도에서 가열률 증가에 따른 강도 증가폭 보다 고온으로 갈수록 가열률 증가에 따른 강도 증가폭이 크게 나타났다.

그림 12, 그림 13은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구한 항복응력의 마스터 곡선을 나타낸 그림이다. 여기서 가열률-항복온도계수는

$$S = \frac{(T_y - 75)}{(\ln h_r + 17.75)}, \quad K = \frac{(\ln h_r - 20.1)}{(1/T_y - 1/3895.6)}$$

로 표현된다. 항복응력은 여기서 구한 가열률-항복온도 계수인 S와 K값으로 표현되는 함수로 나타낼 수 있으며, 본 연구의 가열률(1°C/sec~28°C/sec) 범위에서 다음과 같은 근사식으로 표현되었다.

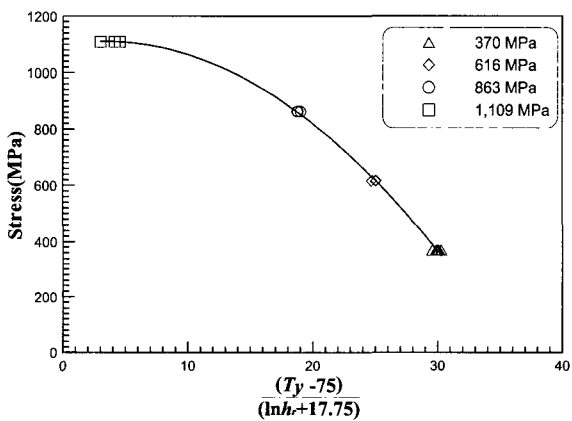
$$\sigma_y = 1099.1 + 6.96S - 1.05S^2 \quad (7)$$

$$\sigma_y = 1118.2 - 9.85(K \times 10^{-3}) - 4.25(K \times 10^{-3})^2 \quad (8)$$

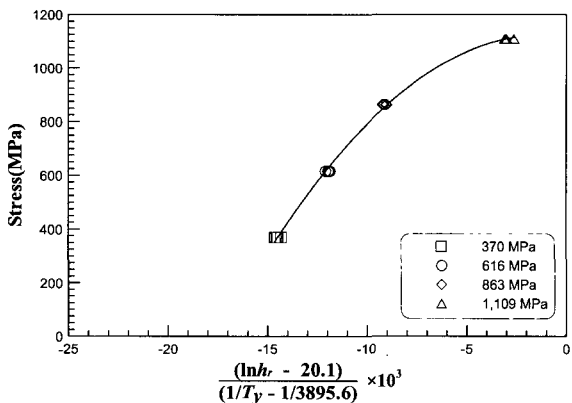


식 (7)과 식 (8)은 그림 12, 13에서와 같이 전 가열률 범위에서 실험결과 데이터의 퍼짐 정도가 작게 나타났다. 이런 결과는 마스터 곡선들이 실험구간 내에서 가열률과 항복온도를 하나의 곡선으로 표현할 수 있는 도구임을 나타낸다.

표 3은 이 마스터 곡선식을 이용하여 주어진 가열률과 항복온도에 대하여 역으로 초기 예하중을 구한 결과를 정리한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 두 개의 제안식 모두 실험값과 최대 6%이내의 오차를 보여주었다. 이로써 이 가열률 범위내에서 급속 가열하



[그림 12] Master yield stress curves for rapid heating using heating rate-yield temperature parameter(S parameter)<sup>(4)</sup>



[그림 13] Master yield stress curves for rapid heating using a new heating rate-yield temperature parameter(K parameter)

의 열기계적 특성을 잘 표현하는 수식임이 확인되었다. 위 결과로 미루어 볼 때 크립시험의 단시간 크립과 단 결과로부터 장시간의 크립수명을 예측하는데 사용되는 시간-온도 계수기법을 응용하면, 금속재료에 대한 급속 가열하의 열기계적 특성을 적절히 표현할 수 있는 가열률-항복온도 계수가 구해질 수 있음이 확인되었다.

표 4는 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 10°C/sec와 20°C/sec에 대하여 구한 항복응력과 일정 온도에서 구한 항복응력을 비교한 결과를 정리한 것이다. 전반적으로 일정 온도하의 강도보다 급속 가열하의 강도 여유가 크게 나타났다. 표에서 보는 바와 같이 온도가 높을수록 노출 환경에 따른 강도의 영향이 크게 나타났으며, 가열률이 높을수록 강도 안전여유도 증가하였다. 일정 온도와 급속 가열하의 항복강도를 정량적으로 비교해 볼 때, 200°C에서는 가열률이 10°C/sec와 20°C/sec인 경우 모두 3%이내의 작은 강도 증가를 보여주었고, 가열률 차이에 의한 강

[표 3] Master yield stress results using heating rate-yield temperature parameters

Heating rate (°C/sec)	Yield temperature (°C)	Equation(7) (MPa)	Equation(8) (MPa)	Pre-stress (MPa)
28.2	713	348.7	352.9	370
8.2	670	364.7	360.5	
1.6	623	358.6	360.9	
25.1	600	615.4	627.2	616
7.9	572	613.2	616.1	
1.6	532	613.1	615.6	
24.1	469	858.1	861.2	863
7.6	452	851.5	847.7	
1.6	417	859.8	851.4	
15.9	169	1,108.9	1,108.5	1,109
4.5	155	1,109.9	1,109.5	
1.6	130	1,110.5	1,114.6	

[표 4] Comparison results of yield strength for rapid heating and elevated temperature(1/2 hour exposure)

Temperature (°C)	Equation(7) (MPa)		Yield stress (1/2 hour exposure) (MPa)	Percent of yield stress for elevated temperature	
	Yield stress (10°C/sec)	Yield stress (20°C/sec)		(10 °C/sec)	(20 °C/sec)
200	1,101	1,103	1,068	103.1	103.3
400	936	950	907	103.2	104.7
600	562	603	495	113.5	121.8

Temperature (°C)	Equation(8) (MPa)		Yield stress (1/2 hour exposure) (MPa)	Percent of yield stress for elevated temperature	
	Yield stress (10°C/sec)	Yield stress (20°C/sec)		(10 °C/sec)	(20 °C/sec)
200	1,095	1,098	1,068	102.5	102.8
400	929	946	907	102.4	104.3
600	565	612	495	114.1	123.6

도 변화폭이 미비하였다. 그러나 600°C에서는 가열률이 10°C/sec에서 14%, 20°C/sec에서 22%의 강도 증가를 보여 주었고, 가열률에 의한 강도 변화폭이 1.5배 이상 나타났다.

따라서 위 연구 결과를 통하여 급속 가열하의 열기계적 실험에서 도출된 가열률-항복온도 계수는 어떤 가열률에서 구조재료의 항복강도를 예측할 수 유용한 도구임이 입증되었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 초음속 비행체 구조재료로 사용되는 17-4PH 강에 대하여 외력 및 공력 가열에 의하여 야기될 수 있는 다양한 온도 환경을 실험을 통하여 체계적으로 접근하는 방법을 제시하였다. 외부 온도 환경은 크게 일정 온도환경과 급속 가열환경으로 분

류하고, 이런 환경에서 17-4PH 강의 열기계적 특성을 연구하였다. 특히, 비행체 구조재료에 대하여 실제로 운용되는 표면 가열조건을 모사할 수 있는 복사가열기를 제작하였으며, 실제 예상되는 운용조건의 가열률 범위에서 열기계적 특성을 평가하였다. 또한 가열환경에 따른 재료강도를 평가하기 위하여 급속 가열 실험결과와 일정 온도에서 30분 노출된 실험결과를 항복강도 측면에서 비교 고찰하였다. 급속 가열하의 열기계적 실험결과로부터 시간-온도계수를 응용한 가열률-항복온도 계수를 도출하였으며, 항복용력을 가열률과 항복온도로 표현되는 실험적 마스터 수식을 제안하였다. 이러한 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) 일정 온도하의 열기계적 특성에 있어서, 비행체 구조물 설계시에 적용소재에 대한 인장 실험결과에서 구한 물성치를 적용하는 것이 미군사규격 데이터를 사용하는 것 보다 무게감량 및 성능 향상 측면에서 유리할 것으로 예측되었다.
- 2) 급속 가열 환경에서 17-4PH 강은 일정 온도에서의 강도 보다 증가하며, 항복거동은 가열률과 초기 하중의 크기에 영향을 받는다. 초기하중이 증가함에 따라 시편의 파단온도가 감소하며, 동일한 초기 하중에서 가열률이 높을수록 파단시간이 짧아진다. 가열률이 높을수록 항복온도 및 항복용력은 증가하고, 초기 유지 용력이 높을수록 항복온도와 항복용력은 감소한다.
- 3) 급속 가열하의 17-4PH 강에 대하여 가열률-항복온도 계수를 제안하고 이 계수로 표현되는 실험적 항복 강도식을 도출하였다. 제안된 가열률-항복온도 계수는 실험결과와 6%이내의 오차를 보여줌으로써 이 재료가 1°C/sec~28°C/sec 가열률 범위에서 적용될 때 급속 가열하의 열기계적 특성을 잘 표현하는 계수임을 확인하였다. 이로써 크립수명을 예측하는 데 사용되는 시간-온도 계수 기법을 응용하여 제안된 가열률-항복온도 계수는 유사 구조재료의 적용 가열률 범위에서 항복강도를 예측할 수 있는 유용한 도구라고 판단된다.

4) 17-4PH 강과 같은 구조재료를 이용하여 구조 설계시 급속 가열하의 열기계적 실험결과에서 도출된 강도 물성치를 적용하는 것이 일정 온도에서 30분간 노출될 때의 강도보다 안전여유가 있음이 확인되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Thorton, A., Thermal Structures for Aerospace Application, AIAA Inc, 1996.
- [2] MIL-HDBK-5F, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures. 1998.
- [3] Smith, W. K., Woolsey, C. C. Jr., and Wetmore, W. O., "Effect of High Temperature Tensile Properties of Metals", Transactions of the ASM, Vol. 44, 1952, pp.689~704.
- [4] Kurg, I. M., "Tensile Properties of Inconel-X Sheet Under Rapid Heating and Constant Temperature Conditions", NACA TN 4065, 1957.
- [5] Lipkin, J., Swearingen J. C. and Karnes, C. H., "Mechanical Properties of 6061 Al-Mg-Si Alloy after very Rapid Heating", J. of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 21, 1973 pp.91~112.
- [6] Nichols, J. W., Mall, S., "The Fracture Behavior of Thin 6061T-6 Aluminum at Rapid Heating Rates", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, 1989, pp.787~794.
- [7] Liu, Z., Bai, S.L., Yang, K. and Han, M., "Experimental Studies on Yield Behavior of Steel Under Rapid Heating", International J. of Plasticity, Vol. 17, 2001, pp.671~701.
- [8] Harvey, P. D., Engineering Properties of Steel, American Society for Metals, 1982.
- [9] Penny, P. K. and Marriott, D. L., Design for Creep, Chapman & Hall, 1995.
- [10] Manson, S. S. and Haferd, A. M., "A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress-Rupture Data", NACA TN 2890, 1953.
- [11] White, W. E., LeMay, I., "On Time-Temperature Parameters for Correlation of Creep-Rupture Data in Stainless Steel", Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 100, 1978, pp.319~332.
- [12] 김종환, 김재훈, "급속가열환경에서 A12024-T3의 인장 특성", 한국항공우주학회지, 제 32권, 제 8호, 2004, pp.101~108.
- [13] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[Metric]", ASTM E 8M-88, 1988.