

내환경 온도시험의 촉진시간에 관한 연구[§]

한철호** · 김경훈* · 김형의**

* 금오공과대학교 기계공학부, ** 한국기계연구원 기계류부품 신뢰성평가센터

A Study on the Promotion Time in Environmental Temperature Test

Chul Ho Han^{*†}, Kyoung Hoon Kim^{*} and Hyoung Eui Kim^{**}

* Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh Nat'l Inst. Technology(KIT),

** Reliability Assessment Center, Korea Inst. of Machinery and Materials(KIMM)

(Received August 30, 2010 ; Revised January 4, 2011 ; Accepted January 5, 2011)

Key Words: Environmental Test(내환경시험), High & Low Temperature Test(고온 및 저온 시험), Lumped Analysis(집중용량 해석), Temperature Promotion Time(온도 촉진시간)

초록: 내환경 시험시 시험물체가 요구시험온도가 되게 온도시험조를 가열 또는 냉각하는 계단형 온도시험 프로파일에서 적정 촉진온도 유지시간을 예측하는 집중용량법에 의한 새로운 해석적 방법을 제안하였다. 해석은 주어진 온도시험조건에 대해 시험시간을 줄이고 에너지를 절약하는 촉진시간이 존재함을 보여주고 있다. 이론결과는 작업소재로 강을 사용한 몇 가지 실험결과와 비교적 잘 부합하고 있다. 제안된 적정촉진시간은 동일재료에 대해 시편의 질량/표면적비와 근사적으로 비례한다.

Abstract: A new method to predict the proper promotion time on the near-step-temperature test profile when heating or cooling the test-piece in a test chamber to the test temperature for environmental tests has been proposed by using the lumped analysis. For a given test condition the analysis shows the existence of a promotion time that reduces the testing time and saves energy. The theoretical results are in reasonably good agreements with experimental results for steel specimens. The suggested promotion time is approximately proportional to the mass/surface area of the test-piece for a given material.

- 기호설명 -

1. 서 론

- A : 표면적
- B_i : Biot수
- C_p : 비열
- $f(t)$: 온도제어 강제함수
- h : 대류열전달계수
- $T(t)$: 시험품온도
- T_t, T_o : 시험온도와 초기온도
- T_p, t_p : 촉진온도와 촉진시간
- ρ, m : 밀도와 질량
- γ : 온도제어율

내환경 시험은 신뢰성 평가의 핵심 시험요소로 각 환경요소에 대한 시험조건, 시험절차, 시험방법은 부품의 제작으로부터 수송, 보관, 사용과정에서의 환경조건을 고려하여 결정하게 된다. 내환경시험은 자연환경적 요소와 유도환경적 요소에 대한 시험이 있으며 시험품에 따라 다양한 환경적 요소에 대한 시험을 하게 된다.

고온시험과 저온시험은 내환경시험의 필수 시험에 속하며 대개 온도시험조에 넣어 요구 시험 온도 조건에 도달하게 한 후 시험을 하게 된다. 그러나 시험조 내의 시험품을 요구 시험온도까지 가열시키거나 냉각시키는 데는 상당한 시간과 에너지 비용이 소요된다. 그리고 시험조의 온도와 시험품과의 온도차가 존재하며 시험품 내부의 온도가 균일한 시험온도에 도달할 때까지의 안정화가 필요하다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 신뢰성부문 춘계 학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문 보완편임.

† Corresponding Author, chhan@kumoh.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

국제적인 규격 등^(1~6)에서는 시험조의 온도 프로파일을 개략적으로 제시하고 필요에 따라 시험조의 온도를 시험온도보다 높게(가열시) 또는 낮게(냉각시)할 수 있도록 되어 있으나 그 촉진온도와 유지시간(촉진시간)이 명확하게 제시되지 않고 있으며 구체적 결정방법도 발표된 바 없다. 따라서 시간과 비용을 절약하며 시험조의 온도를 제어하기 위해서는 좀 더 구체적이며 효율적인 온도 프로파일의 제시가 필요한 실정이며 최근 국내에서 이에 관한 연구가 시도되었다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 내환경 온도시험의 시험조와 시험품 사이의 열전달을 고려하여 온도시험 종류와 시험품의 재질과 형상에 따라 온도시험 프로파일의 적정 촉진온도 유지시간을 결정하는 실용적 방법을 제안하고 온도 환경시험을 통하여 그 타당성을 확인하고자 한다.

2. 온도시험조내 시험품의 열전달

2.1 집중용량법에 의한 시험조 내 열전달

Fig. 1은 고온시험 온도프로파일의 한 예이다.⁽⁶⁾ 시험품의 온도를 시험온도 T_i 에 맞추기 위해 시험조의 온도 프로파일을 $f(t)$ 로 제어하며 시험품의 온도가 시험온도 T_i 로 빠른 시간에 도달하도록 시험온도 보다 높은 촉진온도 T_p 에서 유지시간 t_p 즉 $t_2 - t_1$ 만큼 유지하고 냉각하면 시험품의 온도는 시간에 따라 실선 $T(t)$ 처럼 변할 수 있다.

일반적으로 시험조 내 동일 재질 시험품의 Biot수 B_i 가 0.1 이하이면 집중질량계로 가정할

수 있으며⁽⁸⁾ $t > 0$ 인 경우 열전달 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho V C_p dT(t)/dt = -hA[T(t)-f(t)] \quad (1)$$

$$\text{B.C. } T = T_o \text{ at } t = 0 \quad (2)$$

식 (1)의 일반해를 촉진시간 t_p 에 대하여 구하면 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$t_p = t_p(m, A, C_p, h, \theta_p, \gamma) \quad (3)$$

$f(t)$ 를 그림과 같은 계단형의 가열-유지-냉각의 불연속함수로 하면 구간에 따라 식 (1)의 해 형태가 다르지만 T_p 로 계속 촉진 시키고 있는 상태일 때 시험품 온도가 T_i 에 도달하는 시간을 기준으로 하여 촉진시간 t_p 를 구하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$t_p = \frac{mC_p}{hA} \ln \left[\frac{mC_p \gamma}{hA(T_p - T_i)} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-hA(T_p - T_o)}{mC_p \gamma} \right) \right\} \right] \quad (4)$$

2.2 열전달 해석에 및 촉진시간의 해석적 표현

이론해석 계산에서는 기계 부품에 가장 많이 사용되는 탄소강을 기준 소재로 하고 시험조건에 해당하는 값은 통상 시험용으로 많이 사용하고 있는 시험조에서 가능한 Table 1과 같은 가열속도 γ_1 및 냉각속도 γ_2 로 선정하였다.

Fig. 2에는 재질과 열전달 조건이 Table 1로 주어진 경우 질량/표면적비에 따른 식 (4)의 이론해석결과를 실선으로 표현하고 이 해석결과를 1차 선형식으로 회귀화한 것이 점선으로 표현되어 있다. 그림에서와 같이 질량/표면적비가 30 kg/m² 이상인 경우는 촉진유지시간이 질량/표면적비에 대해 1차 직선으로 근사화 할 수 있다. 즉 식 (4)의 이론해는 식 (5)와 같이 근사화가 가능하다.

$$t_p = a(\theta_p) + b_1(\theta_p) \frac{mC_p}{hA} \quad (5)$$

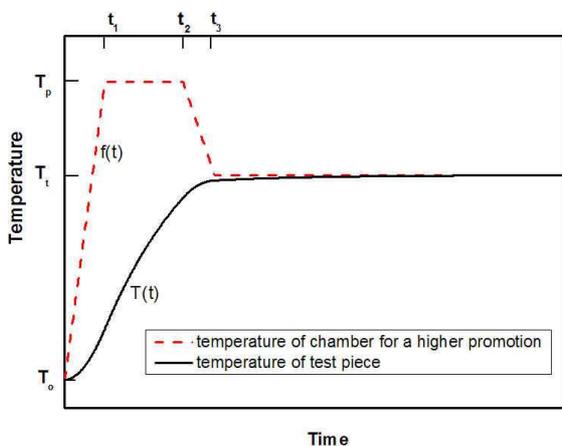


Fig. 1 Test profile of high temperature test

Table 1 Input data of simulation

ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg K)	h (W/m ² K)	γ_1 (K/min)	γ_2 (K/min)
7897	450	30	2.5	1.0

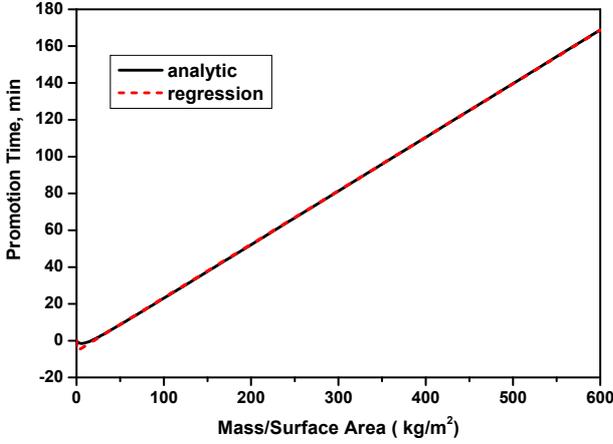


Fig. 2 Theoretical analysis and regression

이 식의 각 항을 분석해 보면 다음과 같은 특성들의 영향을 받는 것으로 분류 가능하다.

- 1) 재료특성 : m (mass), C_p (specific heat)
- 2) 재료형상 : A (surface Area)
- 3) 시험방법 연계항목 : $a(\theta_p)$, $b_1(\theta_p)$, h , γ

$$\text{여기서 } \theta_p = \frac{T_p - T_o}{T_t - T_o}$$

$$\gamma = \frac{T_p - T_o}{t_1}$$

특정한 온도시험조건 및 가열이나 냉각 방법이 정해지면 식 (5)는 다음과 같이 근사화 된다.

$$t_p = a + b_2 \cdot C_p (m/A) \quad (6)$$

여기서 a 와 b_2 는 주어진 챔버의 가동조건과 능력 등에 따라 결정될 수 있을 것이다.

식 (6)의 결과로부터 재료특성과 형상의 변화가 촉진요구시간에 미치는 영향을 알 수 있으며 m/A 값이 같은 경우 C_p 가 크면 촉진 요구시간이 길어진다.

만약 시험대상물 재료가 결정되면 C_p 가 정해지고 식 (6)은 다음과 같은 1차 비례식으로 표현할 수 있다.

$$t_p = a + b(m/A) \quad (7)$$

질량/면적비 m/A 의 크기가 작은 경우는 Fig. 3과 같으며 앞의 근사식과 이론 엄밀해는 상당한 차이가 생기며 식 (7)의 비례근사식은 오차가 상당히 커짐을 알 수 있다. 즉 30 kg/m^2 이하에서는

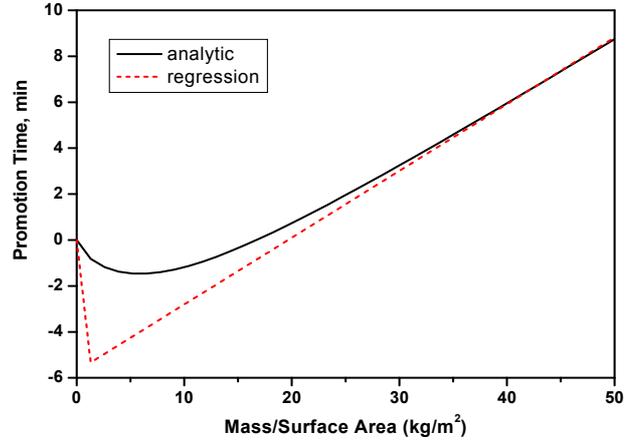


Fig. 3 Promotion time vs (Mass/Surface area) 55°C -45°C for very small mass zone

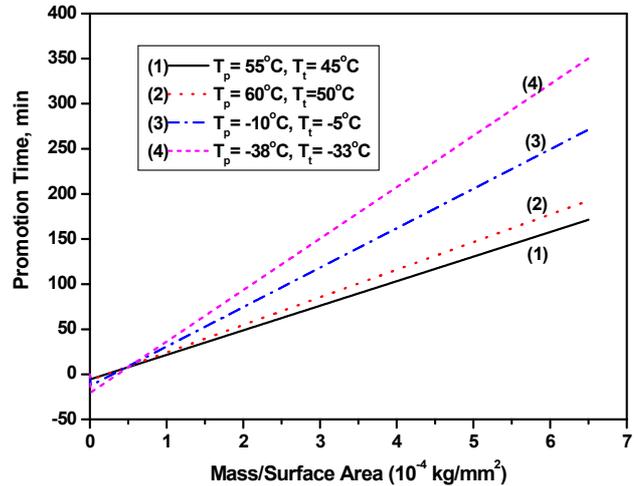


Fig. 4 Mass/area ratio effect on the promotion time in temperature test conditions

촉진시간이 필요하지 않음을 알 수 있다.

집중용량법 해석에 의한 결과를 시험조건(실내 고온, 실외고온, 실내저온, 실외저온)에 따라 근사 선형식으로 표현하면 Fig. 4와 같다.

시험조건이 달라지면 적정 촉진 유지시간이 달라지며 그림에서 오른쪽 위부터 국내 신뢰성규격의 환경시험 조건의 실외저온, 실내저온, 실외고온, 실내고온 조건 상태를 나타내고 있으며 시험조의 초기온도는 23°C 를 기준으로 한 값이며 촉진온도와 시험온도차가 10°C 이지만 초기온도와의 온도편차가 큰 실외시험조건에서 촉진시간이 커져야 하고, 냉각속도가 가열속도 보다 낮기 때문에 저온시험의 촉진시간이 더 길어진다.

이론해석 결과와 실험결과의 정확한 비교를 위해서는 열전달 계수의 실험적 결정 등이 필요하

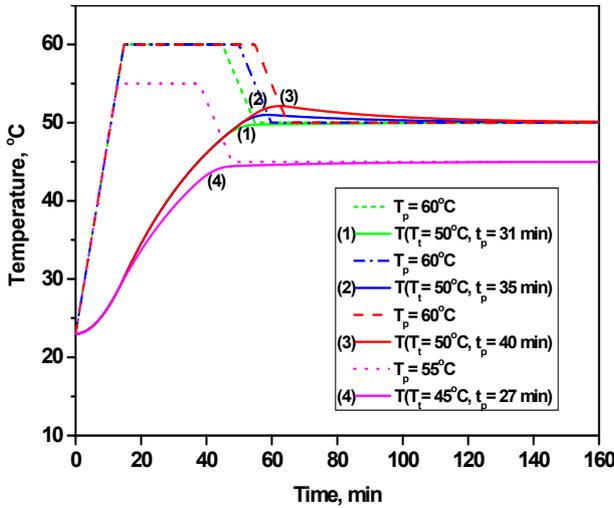


Fig. 5 Effect of promotion time on test-piece

지만 이론해석 결과들은 대상물의 재료가 결정되고 시험방법과 조건이 정해지면 그에 해당하는 질량/면적비와 촉진시간과의 근사 선형 관계가 성립함을 알 수 있다.

2.3 촉진시간변화에 따른 시험온도 도달시간

Fig. 5는 100φ x 100h인 탄소강 소재의 가열 중 촉진온도 유지시간이 시험품의 온도 변화에 미치는 영향을 보여 주고 있으며 최초 가열이 시작되면 시험조 온도의 선형적 상승에도 불구하고 시험품은 약간 지연하여 상승하게 된다. 시험온도 50 °C와 45 °C 어느 경우도 촉진온도에 따라 시험품 온도가 시험온도를 넘지 않는 최적조건이 존재함을 알 수 있다. 즉 최적 촉진시간은 해당촉진온도에서 시험품의 온도가 시험요구온도 보다 높지 않도록 하면서 오버슈팅 없이 요구시험온도로 빨리 안정화되게 결정하여야 한다. 촉진시간이 짧거나 없는 경우 시험품이 요구 시험온도에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있다.

2.4 촉진온도에 따른 시험온도 도달시간 변화

Fig. 6은 시험온도가 45 °C로 일정한 경우 100 φ x 100h인 탄소강재 시험품에 대한 촉진온도에 따라 시험품의 온도가 요구 시험온도에 도달하는 최소 촉진 유지시간이 존재함을 보여 주고 있다. 촉진온도가 60 °C인 경우는 촉진하지 않은 경우에 비해 시험온도 도달시간이 1/4 이하가 됨을 알 수 있다. 즉 시험품의 성능에 영향을 주진 않는 범위에서는 촉진온도가 높을수록 짧은 촉진시

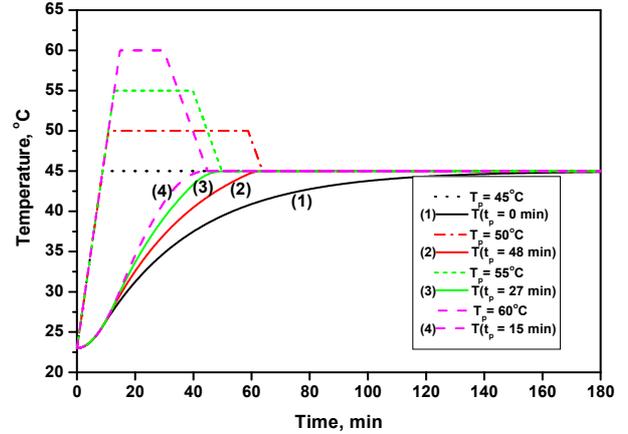


Fig. 6 Effect of promotion temperature on the stabilized time

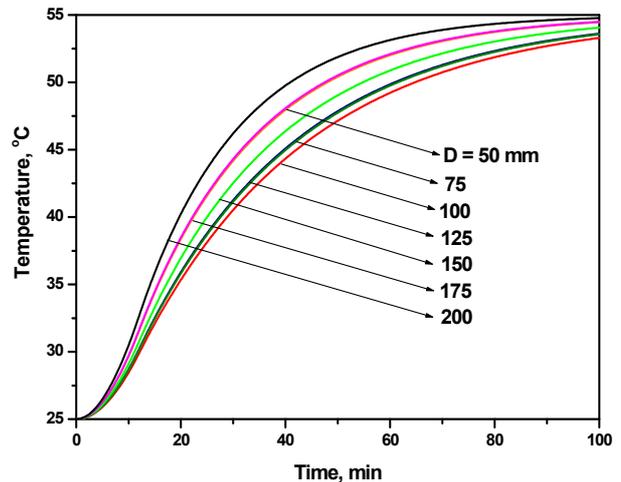


Fig. 7 Effect of diameter change on the test-piece temperature

간의 유지로도 충분히 시험품이 요구온도에 도달하는 시간을 줄일 수 있다. 또한 실내 고온시험 온도 조건인 55 °C 촉진온도 조건에서 안정화를 위한 최적유지시간으로 촉진하면 시험온도 45 °C에 도달하는 시간이 무촉진의 경우 보다 1/3이하로 줄일 수 있다.

2.5 직경변화의 시험품 온도에 미치는 영향

실린더형 시험품의 경우 동일 질량(6.1 kg)에 대해 실린더 직경의 변화가 시험품의 온도에 미치는 영향이 Fig. 7에 표현되어 있다. 그림에서 직경이 100 mm인 경우가 시험품 온도변화를 가장 지연시키고 있으며 이것은 동일 질량에서 표면적이 제일 작기 때문이며 실린더 길이가 직경과 거의 같은 상황으로 구형에 가까울수록 시험품이

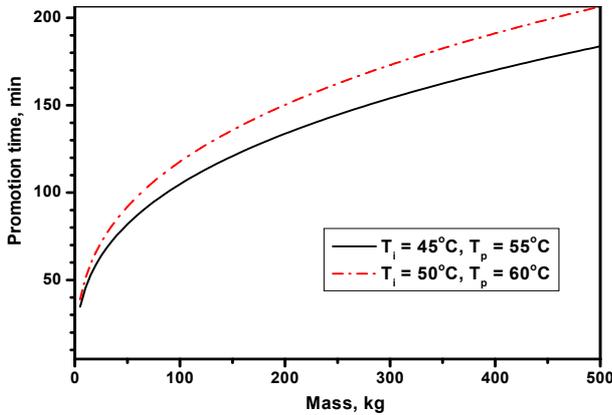


Fig. 8 Mass effect on the promotion time

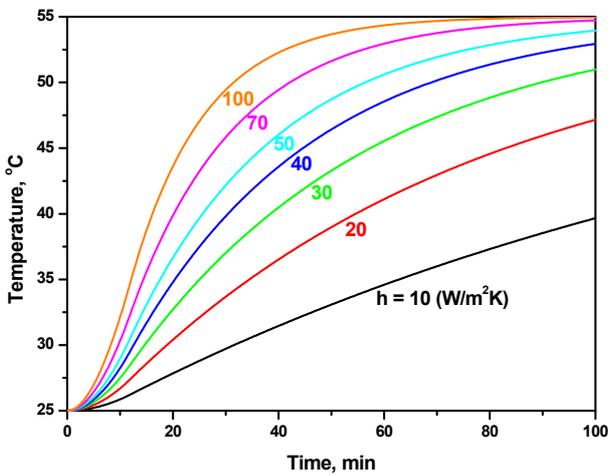


Fig. 9 Effect of h on the temp. of test piece

균질화 되는데 시간이 더 소요된다.

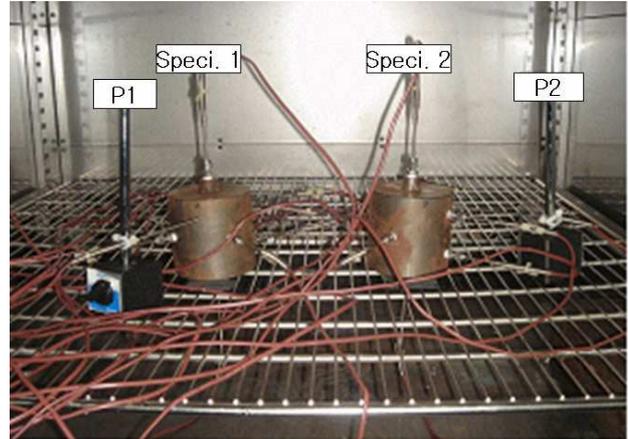
2.6 온도편차가 같은 경우 촉진온도의 영향 구형의 집중용량은 면적대비 질량이 가장 큰 경우에 해당하며 질량 변화에 따른 촉진유지 시간을 이룬 해석해 보면 Fig. 8과 같은 경향을 띠고 있다. 그림은 촉진온도와 시험온도차를 10 °C로 유지하는 경우에는 촉진온도가 높은 경우가 촉진 유지시간이 더 길어짐을 알 수 있다.

2.7 열전달계수의 시험품 온도에 미치는 영향 열전달 계수 h가 큰 경우 Fig. 9에서와 같이 열전달이 커져 빠른 속도로 시험품 온도가 시험조 내의 분위기 온도에 가까워짐을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 시험장치 및 방법

시험품의 크기와 질량에 따른 영향을 보기 위



100Φ medium size workpiece

Fig. 10 Temperature measurements in the chamber

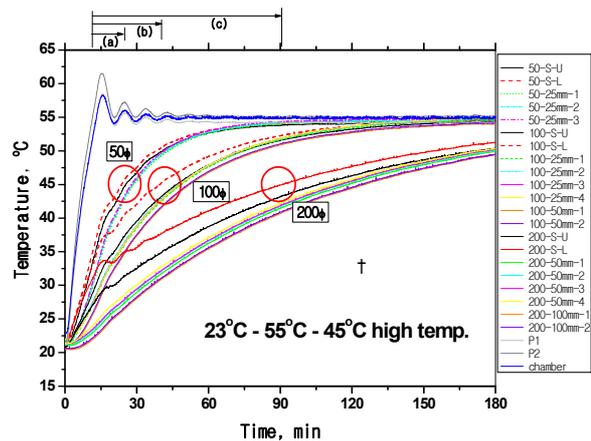


Fig. 11 Temp. of test-pieces for different sizes

해 소형(50Φx100 mm), 중형(100Φx100 mm), 대형 (200Φx200 mm) 3종의 S45C 시험품을 각각 2개씩 제작하여 Fig. 10과 같이 시험조 TH/TC-G/I-1000L(JEIO Tech.) (1570(W)*1445(D)* 2060 (H), 1000L)에 넣고 시험품의 표면에서 중심까지 세 곳에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 시험조의 온도는 시험조 성능의 확인 규격에 따라 9개 지점의 온도를 측정 평균을 취하였다.

온도시험은 가열속도를 2.5 °C/min 로 냉각속도를 1.0 °C/min로 시험조 온도를 조정하였으며 온도시험 조건에 따라 온도가 도달할 때까지의 시간을 측정하였다.

3.2 실험결과 및 해석결과 검토

Fig. 11은 시험조를 실외 고온시험의 촉진온도

Table 2 Promotion time of theory and experiment

Size	Indoor high spec. 55 °C → 45 °C		Out door high spec. 60 °C → 50 °C	
	Exp.	Theory	Exp.	Theory
50Φ	10	17.2	11	19.3
100Φ	30	32.5	34	36.5
200Φ	78	70.8	84	79.5

(unit: min)

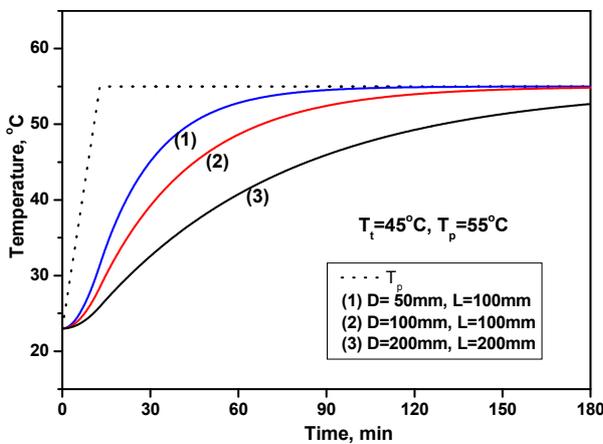


Fig. 12 Temp. change of test-pieces for high temperature test in outdoor

인 55 °C까지 가열하고 이온도를 유지하며 50 φ, 100 φ, 200 φ 시편의 온도변화를 측정된 결과의 한 예이며 촉진온도에 시험조가 도달한 시간에서 각 시편의 상하 표면(s, u) 및 중간(m)이 45 °C에 도달할 때 까지 걸린 평균시간을 각각 (a), (b)와 (c)로 표현하고 이것을 각 시편의 촉진시간으로 결정하였다.

일반적으로 55 °C의 촉진온도 유지후 45 °C 시험 온도까지의 냉각과정을 포함하여 각 시편에 대하여 실험하여야 하나 여기서는 동일 조건하의 시편 거동을 동시에 보기 위하여 간이 시험을 수행하였다. 시험결과 시험조는 촉진온도 근처에서 온도요동이 나타난 후 정상상태를 유지하게 되며 소형, 중형, 대형의 순으로 촉진시간이 더 커지며 표면온도가 시험온도에 도달한 후 중심부가 같은 온도가 될 때 까지 추가시간이 필요하며 시험품이 대형일수록 촉진시간이 더 요구된다.

Table 2는 실외 및 실내 고온 시험결과와 앞의 집중용량법에 의한 이론해석 결과를 비교한 것이다. 이론 해석에서의 열전달 계수와 가열 및 냉각 속도 설정값이 실제 조건의 실험에 의해 결정

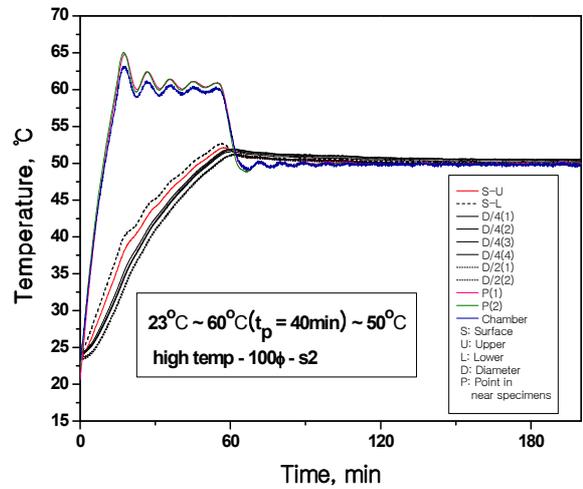


Fig. 13 Temp. distributions for a given profile

된 값이 아니라 부분적으로 오차가 있지만 이론 해석 결과는 실험결과와 정량적 정성적으로 근사함을 알 수 있다.

Fig. 12는 집중질량법을 이용한 이론해석에 의한 시험품의 예측온도로 시험품내의 온도분포는 나타나지 않지만 전반적으로 Fig. 11의 결과와 매우 유사하며 이 논문에서 제안된 해석방법이 유효함을 알 수 있다.

Fig. 13은 촉진온도를 60°C, 유지시간을 40분으로 했을 경우 100φ x 100h의 대상물의 위치에 따른 온도와 챔버의 온도를 표현한 그림으로 Fig. 5의 (3)에 해당하며 촉진시간이 최적촉진시간 보다 약간 긴 경우이다. 강제대류로 챔버내 공기온도가 촉진시간중 요동이 심하지만 대부분의 구간에서 이론해석 결과가 실제 실험과 정량적 정성적으로 근사함을 알 수 있다.

4. 결론

온도 환경시험에서 온도시험종류와 시험품의 재질과 형상에 따른 촉진온도 유지시간을 구하는 실용적 해석 방법을 제안하였으며 실험적으로 확인한 결론은 다음과 같다.

(1) 시험품의 시험온도 도달 시간을 단축하기 위해 촉진온도가 필요하며 촉진온도 별로 최적 유지시간(촉진시간)이 존재한다.

(2) 동일 부하조건하에서 동일 재료의 시험품에 대한 온도시험 촉진유지시간은 질량 표면적비 $M/A > 30(kg/m^2)$ 인 경우는 근사적인 비례식

$t_p = a + b(m/A)$ 으로 표현 가능함이 이론 및 실험적으로 확인되었다.

(3) 실내 고온시험온도 조건인 55℃ 촉진온도 조건에서 100Φ x 100h인 탄소강재 시험품을 안정화를 위한 최적유지시간으로 촉진하면 시험온도 45℃에 도달하는 시간이 무촉진의 경우 보다 1/3이하로 줄일 수 있다.

(4) 집중용량법으로 온도 시험 프로파일의 촉진 시간 결정을 위한 근사해석이 가능하며 온도 시험 프로필을 적정하게 테일러링(tailoring)하는 유용한 도구가 될 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비의 지원으로 수행하였음.

참고문헌

(1) Department of Defense, 2000, Environmental Engineering

Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810F, METHOD 501.4-9~11502.4-8.

(2) Department of Defense, 2000, Reliability test, MIL-HDBK-781, pp. 69~70.

(3) Department of Defense, 2000, MIL-STD-810F, Appendix A, Task 405, Part One A-11~13, Appendix C, Table C-1.

(4) IEC, 1994, IEC 721-3-3, Table 1- Classification of Climate Condition.

(5) Department of Defense, 2000, MIL-STD-810F, 2000, Part One 5.4.2.

(6) RCTA, Inc., 2004, "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment," RCTA/DO-160E, pp. 4-4~4-12.

(7) Han, C. H., Kim, K. H., Kang, B. S. and Kim, H. E., 2008, "Analysis of the Promotion Time in Test Profile of a Temperature Environment by Lumped Analysis," 2008 KSME Spring Conf. *Trans. Reliability Engineering*, pp. 9~12.

(8) Cengel, Y. A., 2003, *Heat Transfer: A Practical Approach*, pp. 212~213.