◎ 논 문

장축 실린더의 열변형 최소화를 위한 차열관 효과 해석 및 실험 연구

안상태*

An Analytical and Experimental Study on the Thermal Shroud Effect to Minimize Thermal Deformation of a High L/D Ratio Cylinder

Sang Tae Ahn*

Key Words : High L/D ratio cylinder(장축 실린더), Barrel(포열), Thermal shroud(차열관), Thermal deformation(열변형), Flow field(유동장), Thermal stress(열응력)

ABSTRACT

A barrel is a high length-to-diameter ratio cylinder that is influenced by environmental factors such as sunlight, precipitation, wind and clouds. Cross-barrel temperature differences caused by uneven heating or cooling lead to thermal deformation that degrades accuracy. Therefore, a barrel is covered by thermal shrouds to minimize the type of thermal deformation, "fall-of-shot". In this paper, an analytical and experimental study is presented to design the thermal shrouds for a gun barrel and to evaluate the thermal shroud effect. First, an analytical study on the thermal shroud effect to minimize thermal deformation of a gun barrel by sunlight and wind is performed. The coupled analysis of thermal fluid dynamics of the air flow between a barrel and thermal shrouds and thermal stresses of a barrel is performed to clarify both the thermal shroud effect and the drift in gun muzzle orientation by thermal deformation. Second, experiments are carried out to test and evaluate the thermal shroud effect on the performance of a gun barrel. The drift in gun muzzle orientation against the solar radiation is confirmed by the experiments, and the results well agree with the analytical estimation. Third, three principal design factors that are presumed to have an effect on the performance of the thermal shrouds are also analyzed; sorts of shroud materials, wall-thickness of thermal shrouds, and distance of the gap between a barrel and thermal shrouds.

1. 서 론

총포의 구성품 중에서 탄자의 가속 경로 역할을 하는 포열은 대표적인 장축 실린더이다. 이러한 포열은 일반 장축 실린더와 구별되는 몇 가지 차이점을 갖는다. 가장 큰 차이점은 포열이 한 쪽 끝 부분만 지지된 외팔보와 유사한 상태로 운용되고, 외부환경에 노출되어 태양, 강수, 바람, 구름 등 다양한 대기 환경 요소에 영향을 받는다는 것이다. 이러한 외부의 열적 변화 요인은 포열의 열적 휨을 야기한다.

* 국방과학연구소
E-mail : congzi@add.re.kr

유체기계저널:제10권, 제5호, PP.54-63, 2007(논문접수일자:2007.6.7, 심사완료일자:2007.8.28)

따라서 전차포와 같이 높은 정확도를 요구하는 경우, 이러한 포열의 열적 휨은 포구조준점 변화에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이를 최소화하기 위하여 포열에 차열관을 장착하여야 한다. 차열관은 포열 외부를 길이 방향으로 감싸고 있는 원통형 관으로서 포열 전장에 걸쳐 온도차를 줄여 열평형을 유지함으로써 포열의 열적 변형을 최소화시키는 역할을 하는 기능 부품이다.

차열관의 기능을 살펴보면, 차열관 자체가 일차적으로 외부 환경의 열적 영향을 차단하고, 차열관과 포열 사이에 존재하는 공기층의 대류현상에 의해 포열 원주 방향의 온도를 균일하게 만든다. 차열관은 이와 같은 작용에 의해 포열의 열변형의 최소화, 즉 포구조준점의 변화를 최소화하도록 하는 효과를 나타내며 이를 차열관 효과라 한다.[1]

본 연구에서는, 차열관 효과에 대한 수치해석 연구와 실험 연구를 수행하였다. 수치해석 연구는, 차열관 외부 유동장 해석을 통해 CFD solver를 검증하고, 차열관 내부 유동장 해석을 수행하였으며, 포열 열응력 해석을 통해 포구조준점 변화를 고찰하였다. 실험 연구를 통하여 온도 변화와 열변형의 상관관계를 확인하고 포구조준점 변화를 고찰함으로써 수치해석 결과와 비교하여 해석 기법의 타당성을 확인하고 해석 모델을 보완하였다. 또한 보완된 해석 프로그램을 이용하여, 차열관 효과를 극대화하기위한 차열관의 설계 인자 특성 분석을 통하여 차열관의 최적화 설계를 수행하였다. 단, 본 연구에서는 사격 간에 포강 내부로부터 발생하는 열원에 대해서는 해석에서 고려하지 않았다.

2. 차열관 효과 수치해석

2.1. 지배방정식

열응력 해석은 주로 유한요소해석 (FEM, finite element method)으로 접근하는 것이 일반적이기 때문에 전산유체해석 (CFD, computational fluid dynamics)과 연동하여 사용하는 것은 다소 어려움이 있다. 서로 다른 격자를 사용함으로써 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위해 CFD의 해석 결과를 열응력 해석의 경계조건으로 활용하기 위하여 유동해석 결과를 구조해석용 격자에 사상 (mapping)시켜 열응력 해석을 수행한다.

유체 및 에너지의 이동 현상을 해석하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.[2],[3] 식 (1)은 질량 보존 방정식의 일반적인 형태이고, 압축 및 비압축 유동에 모두 적용된다. 관성 (비가속)좌표계의 i방향에 대한 운동량 보존은 식 (2)와 같다. FLUENT에서 에너지 보존 방정식은 엔탈피 h의 보존 항으로 풀어지며, 식 (3)은 이를 h의 term으로 에너지 보존 방정식을 나타낸 것이다. 아래의 식 (1)~(3)에서 p는 정압, τ_{ij}는 응력텐서, g_i는 중력과 체적력, μ는 분자 점성도, 응력텐서를 정의한 식의 우변 두 번째 항은 체적확장, E는 단위 질량당 총에너지, h는 엔탈피, T와 T_{ref}는 온도와 기준온도 (298.15 K), K는 혼합물의 열전도 계수, S_h는 화학반응이나 복사, 열교환 등에 의한 엔탈피 증가, 그리고 $C_{p,i'}$는 정압에서의 비열을 나타낸다.

• 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

• 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i \tag{2}$$

$$\tau_{ij}=\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}$$

• 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(K\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+\frac{\partial p}{\partial t}+u_i\frac{\partial p}{\partial x_i}+\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+S_h \tag{3}$$

$$h=\sum_{i'} m_i h_{i'}{}^{T}_{T_{r,i}} C_{p,i'}dT$$

운동량 해석에 있어서는 난류유동의 해석을 위한 방정식을 포함해야 하며 이를 정리하면 다음과 같다.

• 난류 모델(Standard $k-\varepsilon$ 모델)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G_k+G_b+\rho\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{m_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+(1-C_{3\varepsilon})G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

$$C_{1\varepsilon}=1.44,\ C_{2\varepsilon}=1.92,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3$$

$$G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i},\ G_b=-g_i\left(\frac{\mu_t}{\rho\sigma_h}\cdot\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right)$$

복사 열전달을 계산하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 이용한다.

• 복사 열전달 모델(P1 모델)

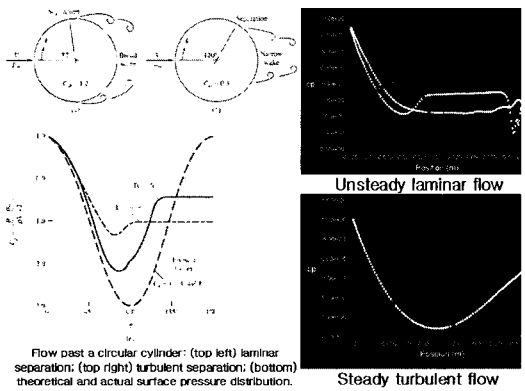
$$\nabla(\Gamma\nabla G)-aG+4a\sigma T^4=0 \qquad (6)$$

$$q_r=-\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}\nabla G, \quad \Gamma=\frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s}$$

$$q_r=-\Gamma\nabla G$$

열응력 계산 시에는 다음 식에 따른 지배방정식을 사용하게 된다.

• 열응력 지배방정식



Flow past a circular cylinder: (top left) laminar separation; (top right) turbulent separation; (bottom) theoretical and actual surface pressure distribution.

(a) Experiment data (b) Analysis data

Fig. 4 Pressure coefficient around a cylinder

$$\mu\nabla^2\tilde{u}+(\lambda+\mu)\nabla\nabla\cdot\tilde{u}+\tilde{F}-\beta\nabla T=0 \qquad (7)$$

위의 식 (4)~(7)에서 k는 난류운동에너지, ε은 k의 소산율, μ_t는 와점성계수, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k, σ_ε는 모델상수, G_k는 난류응력에 의한 k의 생성항, G_b는 부력에 의한 k의 생성항, a는 흡수 계수, σ_s는 산란 계수, h는 열전달 계수, G는 입사 복사, C는 linear-anisotropic phase function coefficient, σ는 Stefan-Boltzmann 상수 (5.669×10^{-8} W/m^{2}K^4), 그리고 q_r은 복사유속을 나타낸다.

2.2. 차열관 열전달 계수

차열관 및 포열 사이의 열전달 해석을 수행하기 위해서는 외부 유동장 해석을 수행하여 차열관의 열전달 계수를 적절하게 예측하는 것이 중요하다. 외부 열유동

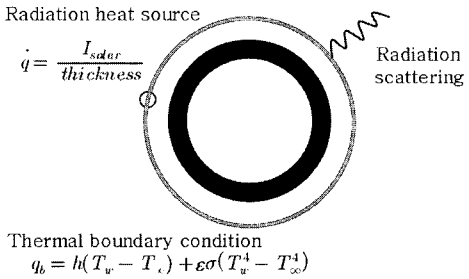


Fig. 1 Thermal boundary condition

해석 시 포열 표면 또는 차열관 표면에 초기조건으로 일정 대기온도를 설정하여 해석을 수행한 후에 해석 결과로부터 열전달량 또는 국부 열전달 계수와 박막 온도 값 (film temperature)을 이용하여 열전달 계수 h를 결정한다.[4]

$$h=\frac{q}{A(T_w-T_\infty)}$$

$$h=h_L\frac{T_w-T_f}{T_w-T_\infty}\cong h_L\frac{T_w-\frac{T_w+T_\infty}{2}}{T_w-T_\infty}=\frac{h_L}{2} \qquad (8)$$

2.3. 태양 복사열 열전달 모델링

태양 복사 에너지는 차열관 및 포열 내부의 정상상태 해석에 사용되는 열원이며, 입사, 확산, 반사의 세 성분으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 반사를 무시하고 차열관 및 포열 표면의 방사율을 고려하여 태양 복사 에너지를 차열관 혹은 포열 표면에서의 열원으로 모델링하였다.[5]

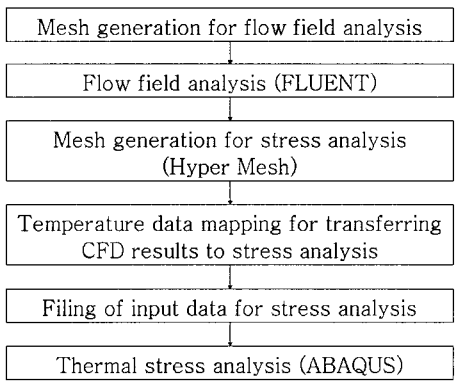
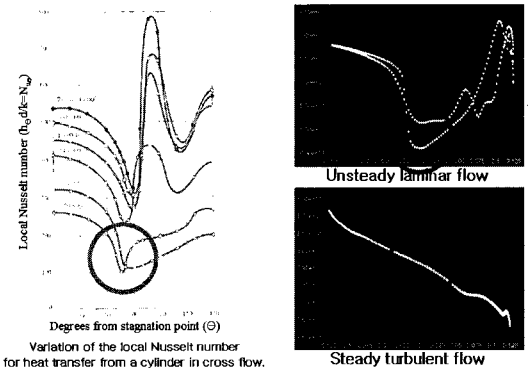


Fig. 2 Flow chart of the analysis



(a) Experiment data (b) Analysis data

Fig. 3 Heat transfer coefficient around a cylinder

2.4. 열유동 해석 및 열응력 해석의 연계

먼저 FLUENT[6],[7]를 이용하여 포열 외부 2차원 유동에 대한 해석을 수행함으로써 열전달 계수를 도출하였으며, 3차원 포열 열유동 해석에서는 2차원 유동 해석에서 얻은 열전달 계수 및 태양 복사 에너지를 외부 조건으로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한, 유동장 해석 결과를 활용하여 포열에서의 온도 값을 열응력 해석 격자에 설정한 다음 ABAQUS[8]를 이용하여 열응력 해석을 수행함으로써 포열의 열변형을 계산하였다. (Fig. 2)

2.5. 차열관 외부 유동장 해석

외부 환경조건에 해당하는 횡풍의 속도가 0.5, 3.0, 5.0 m/sec일 때 Reynolds number는 각각 6,000, 36,000, 60,000이 되는 데 이 경우 $St = fD/U$가 대략 0.21 정도로 비정상 유동 영역이다. 이 영역에서 유동은 전체적으로 층류영역이며 대략 실린더의 앞쪽인 82° 정도에서 유동 박리가 발생되며 층류에서 난류로 유동 천이가 발생하기 때문에 난류모델을 전 영역에 적용할 경우에 $Nu = hD/K$ 값을 결정하기란 상당히 어려울 것이다. 또한 2차원 해석 결과를 비교하여 볼 때 층류 유동 해석에서의 Nu (Nusselt number) 값이 실험과 더 일치하는 결과를 보여주었다. (Fig. 3) 본 연구의 계산 대상인 차열관의 경우 포열의 길이와 지름의 비가 커서 2차원 실린더 문제로 파악하여도 무방하다는 것을 해석을 통해 확인하였고, 많은 계산 시간이 요구되는 3차원 해석보다는 결과가 유사한 것으로 확인된 2차원 해석을 수행하는 것이 합리적이다.[9] Fig.3은 비정상상태의 층류유

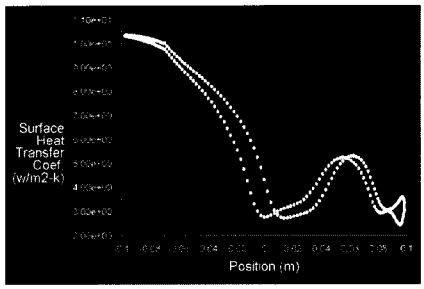


Fig. 5 Heat transfer coefficient around the thermal shrouds in unsteady analysis

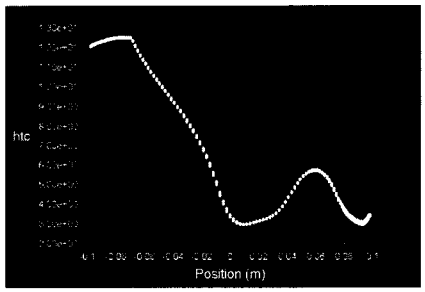


Fig. 6 Time average of heat transfer coefficient around the thermal shrouds

동과 정상상태의 난류유동에서의 열전달 계수를 실험과 비교하여 보여주고 있다. 왼쪽에 있는 실험값[10]을 볼 때 일반적으로 Reynolds number가 작은 경우 (70,800, 101,300), 열전달 계수의 최소점이 박리점 근처에서 나타나며, 또한 박리유동에서의 난류 와운동 (turbulent eddy motion) 때문에 원동의 후면에서 열전달 계수가 증가한다. Reynolds number가 더 커지면 최소점이 2개가 관찰되는데 오른 쪽 계산 결과를 보면 비정상상태의 층류의 경우 박리점 근처에서 최소점을 보여주고 있으며 후면으로 가면서 열전달 계수가 커지게 되는 비교적 유사한 형태를 보여주고 있으나 정상상태의 난류유동의 경우 전혀 다른 결과를 보여주고 있다. 이는 전 영역에 난류 모델을 적용할 경우 층류에서 난류로의 유동천이나 현상을 고려할 수 없기 때문이며, 본 해석과 같이 비정상상태 층류유동이나 또는 LES (large eddy simulation) 방법으로 접근해야만 현상을 정확하게 해석할 수 있음을 보여주고 있다. 압력 계수를 보여주는 Fig. 4에서도 마찬가지로 비정상상태의 층류유동의 경우에는 왼쪽의 실험값[11],[12]과 거의 유사한 형태를 보여주고 있으며 정상상태의 난류유동의 경우에는 전혀 다른 형태로 나타나고 있다.

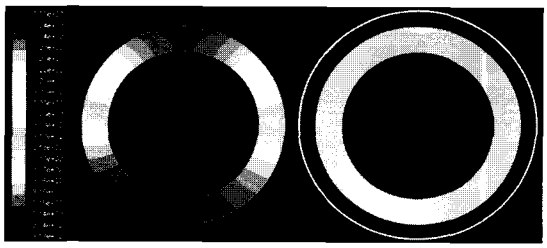
Figure 5와 Fig. 6은 앞에서 정리한 해석 방법들을 이용하여 비정상상태에서 차열관 유무에 따른 외부 유동 해석 결과이다. 계산 조건은, 실험 당일의 실험 시간 동안의 평균 풍속을 적용하여 횡풍 속도를 0.5 m/sec로 주었고, 실린더 외벽에는 $Q=constant$ 조건을 부여하고 식 (8)을 이용하여 시간 평균된 벽면온도와 far field 상의 온도조건을 이용하여 열전달 계수를 도출하였다.

Figure 6은 비정상 상태 및 시간평균을 하였을 경우에 대한 열전달 계수를 비교하여 보여주고 있다. 약간의 수치적인 차이가 있기는 하지만 전체적인 경향은 거의 동일하게 나타나고 있다.

2.6. 차열관 내부 유동장 해석

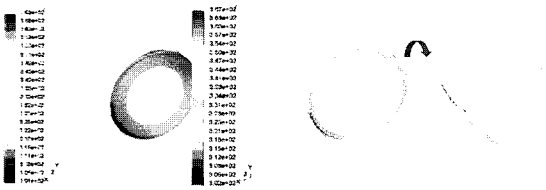
차열관의 효과를 규명하기 위하여 먼저 차열관의 장착 여부에 따른 2차원 열유동 해석을 수행하였다. 이 경우 포열의 고체영역을 해석 대상에 포함하고 포열 안쪽 면을 단열벽으로 가정하였다.

Figure 7은 하절기 낮 12시에 태양 복사 에너지에 의해 포열이 가열될 때 포열 단면의 온도분포를 해석한 결과이다. 차열관을 장착하지 않은 포열의 경우, 태양



(a) Unshrouded barrel (b) Shrouded barrel

Fig. 7 Temperature contours of the cross-section of an unshrouded gun barrel and a shrouded gun barrel



(a) Temperature contour (b) Velocity vectors

Fig. 8 Temperature contour and velocity vectors of an air flow between a barrel and thermal shrouds

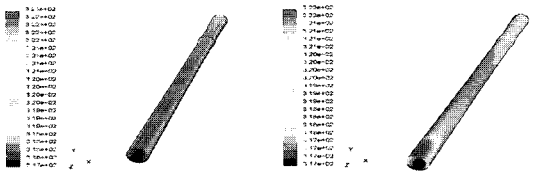
복사열의 영향을 직접적으로 받기 때문에 포열의 상부는 온도가 높으며 포열 하부는 직접적으로 태양열이 작용하지 않기 때문에 온도가 낮은 특성을 나타내므로 포열의 상하부 온도차가 12 ℃가 된다. 그러나 차열관이 장착된 포열의 경우에는 차열관이 태양 복사열을 1차적으로 차단해주고 차열관과 포열 사이에 공기층이 존재하기 때문에 포열 상하부의 온도차가 3 ℃ 이내가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 차열관은 포열 원주방향의 온도 분포를 균일하게 함을 확인할 수 있다.

Figure 8은 차열관과 포열 사이 공기층에 대한 3차원 열유동 현상을 해석한 결과이다. 차열관에 의해 태양 복사열이 일차적으로 차단되어도 상하부의 온도차는 확연하게 존재하지만, 차열관과 포열 사이 공기층에서 자연대류에 의한 유동 현상이 발생하여 포열의 온도 편차를 줄여준다는 사실을 확인할 수 있다. 이때 포열 상하부의 온도차는 3 ℃ 이내이지만 포열과 공기층을 포함한 전체 영역에서 온도의 최대 편차는 약 60 ℃이고 공기층에서의 최대 유속은 3.4 cm/sec이다.

2.7. 포열 열응력 해석

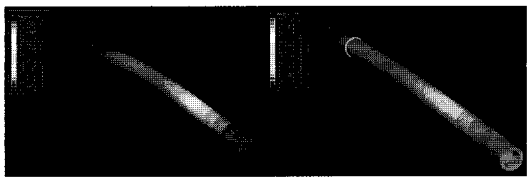
차열관 내부 유동장 해석결과에서 획득한 포열 외벽 온도값을 경계조건으로 설정하여 포열 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 9는 차열관 장착 여부에 따른 포열 전장의 온도 분포를 나타내고, Fig. 10은 이러한 온도 분포의 차이에 의해 발생하는 포열의 열적 휨량을 나타낸다. 차열관을 장착하지 않은 경우에는 포열 전장에 걸쳐 온도가 전반적으로 높으며 원주방향으로의 온도 편차가 커서 이에 의한 포열의 휨량이 큼을 알 수 있다. 그러나 차열관을 장착한 경우에는 차열관을 장착하지 않은 경우와 비교해 포열의 온도가 전반적으로 낮고 원주방향으로의 온도 편차도 상대적으로 적어서 포열의 열에 의한 휨 현상 또한 매우 적게 나타난 것을 확인할 수 있다.

이러한 포열의 열적 변형은 자중에 의한 처짐과 함께 포구조준점 변화에 영향을 미친다. Fig. 11은 차열관 장착 여부에 따른 포의 변형을 포구조준점의 관점에서 비교한 것이다. 하절기 조건에 대하여 남북 방향으로 위치한 포열에 대하여 아침부터 저녁까지 포구조준점의 변화를 해석한 결과이다. 차열관을 장착한 경우에 차열관을 장착하지 않은 경우보다 포구조준점의 변화가 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 포열에 차열관을 장착함으로써 내부 공기층에서 자연대류가 발생하여 포열



(a) Unshrouded barrel (b) Shrouded barrel

Fig. 9 Temperature contours of gun barrel (out of scale)



(a) Unshrouded barrel (b) Shrouded barrel

Fig. 10 Thermal deformation of gun barrel (exaggerated)

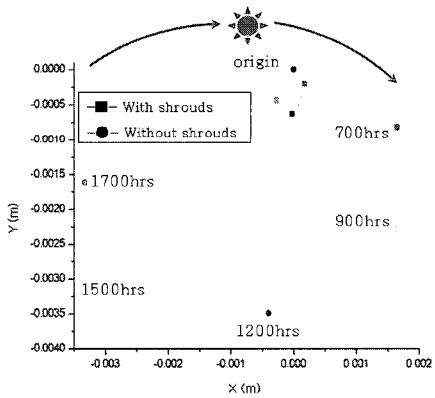


Fig. 11 The effect of sunlight on "fall-of-shot" for an unshrouded barrel and a shrouded barrel

표면 온도를 균일하게 하여 포열의 열적 변형을 감소시키는데 기여함을 알 수 있다.

3. 실 험

2장에서 수행한 수치해석의 타당성을 검증하고 차열관 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 실험장치를 구현하여 포열 열변형에 의한 포구조준점 변화에 대한 실험을 수행하였다.

3.1. 포구조준점 변화 실험

본 절에서는 하절기에 아침부터 저녁까지 태양 복사

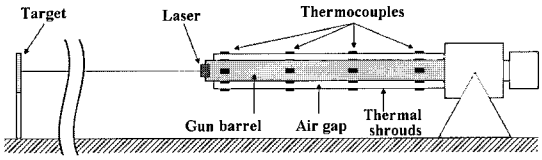
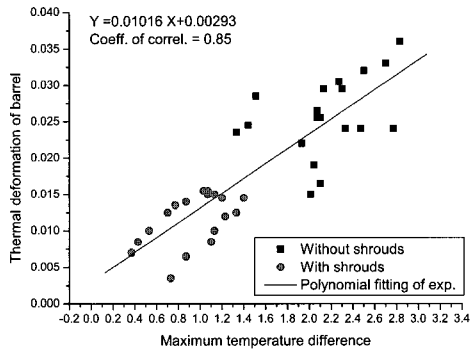
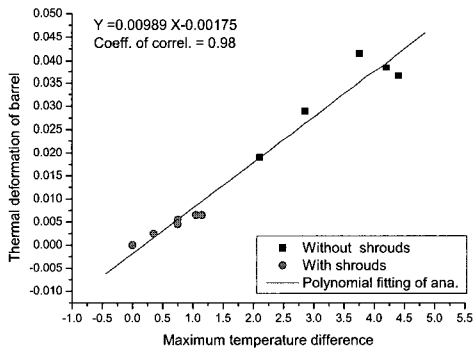


Fig. 12 Experimental setup (out of scale)



(a) Experiment results



(b) Analysis results

Fig. 13 Correlation of maximum temperature difference and thermal deformation of a barrel

에너지의 입사각이 달라짐에 따라 포열과 차열관의 표면 온도 변화와 포구조준점의 변화를 계측하였다.

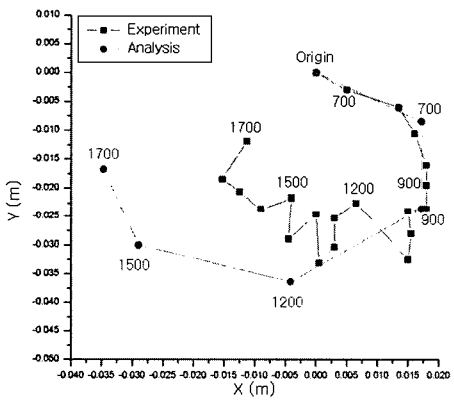
Figure 12는 포구조준점 변화 측정을 위한 실험을 위한 실험 개념도이다. 개활지에 포열이 남북 방향으로 향하도록 실험장치를 설치하고 제작된 차열관을 장착하였다. 포열 외부 표면의 4개 지점에 0°, 90°, 180°, 270° 방향으로 각각 4개씩 총 16개의 열전대를 부착하였고, 차열관 외부 표면에도 포열과 동일한 방법으로 동수의 열전대를 동지점에 부착하였다. 이는 포열 표면과 차열관 표면의 온도 변화를 실시간으로 계측하기 위한 것이다. 또한 포구에 레이저 발사장치를 설치하고

포구 전방으로 일정 거리에 표적 역할을 하는 레이저 감지장치를 설치하여 포열의 열변형에 따라 달라지는 포구조준점의 변화를 계측할 수 있도록 하였다.

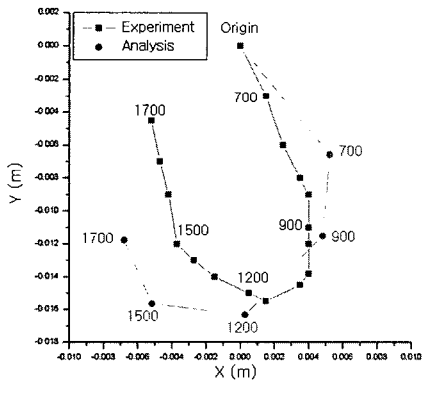
Figure 13은 포열의 최대온도차 변화에 따른 포열 열변형량의 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 실험과 해석 결과 모두 차열관을 장착함으로써 포열의 최대온도차가 작아지고 포열의 열변형이 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13에 포열의 최대온도차와 열변형량과의 상관관계를 분석하고 선형 근사화를 한 결과도 함께 도시하였다. 포열의 최대온도차와 열변형량과의 상관계수는 해석결과의 경우 0.98, 실험결과의 경우 0.85로 두 변량이 매우 강한 정의 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 두 변량에 대한 선형 근사식도 실험결과와 해석결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Figure 14는 차열관 장착 여부에 따른 포구조준점의 변화를 측정한 실험 결과를 그래프로 도시한 것이다. 차열관을 장착하지 않은 포열의 포구조준점 변화와 비교하여 차열관을 장착한 경우에 그 변화량이 약 50% 수준으로 감소하여 해석 결과와 마찬가지로 차열관의 효과를 실험적으로도 확인할 수 있었다. 참고로, 차열관을 장착하지 않은 포열의 포구조준점 변화가 오후 12시부터 매우 불규칙하게 나타나는 것은 실험이 진행되던 중에 오후 12시부터 17시까지 구름이 끼었다 걷혔다 하는 상황이 반복되어 태양 복사 에너지의 영향이 포열에 불규칙적으로 전달되었고 간간히 바람이 불었기 때문이다.

실험 시에 대기환경 조건이 안정적인 구간에서는, 포구조준점 변화에 대한 실험 결과와 차열관 효과에 대한 수치해석 결과가 매우 유사하다는 것을 확인하였고, 이를 통하여 차열관 효과에 대한 해석 기법의 타당성을 입증하고 해석 프로그램을 검증하였다.



(a) Without shrouds



(b) With shrouds

Fig. 14 The drift in gun muzzle orientation

3.2. 수냉 실험

본 절에서는 강수를 가정한 물을 이용한 냉각 실험을 수행하였다. 이는 외부 대기환경이 짧은 시간 내에 변화할 때 차열관의 효과를 확인하기 위한 실험이다.

Figure 15에서 점선은 오전 7시부터 오후 5시까지 태양 복사 에너지에 의한 포구조준점 변화를 계측한 결과이고, 실선은 오후 5시에 수냉 실험에 의해 10분간 급격하게 변하는 포구조준점의 변화를 도시한 것이다. 이와 같이 차열관이 장착되지 않은 경우에는 외부 대기환경이 짧은 시간 안에 빠르게 변하면 포구조준점 또한 급격하게 변하지만, 차열관을 장착하면 차열관 효과가

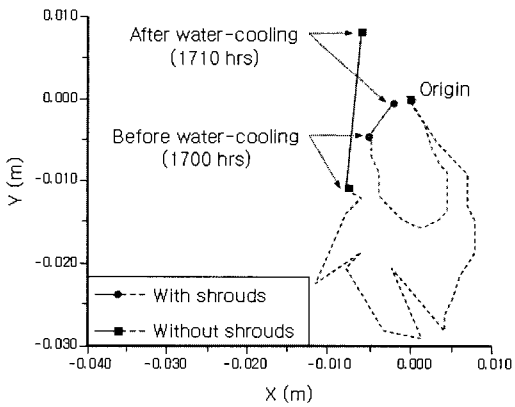


Fig. 15 The results of the water-cooling test

외부 대기 환경의 급격한 변화에 의한 영향을 최소화시켜준다는 사실을 알 수 있고, 정량적으로는 약 20 % 수준으로 감소됨을 확인하였다.

4. 차열관 설계인자 분석

지금까지 수치해석과 실험을 통하여 차열관 효과에 대한 수치해석 기법을 정립하고 이를 정량적으로 평가함으로써 차열관 효과를 입증하였다.

본 장에서는, 차열관의 설계를 위하여 차열관의 소재, 두께 및 차열관과 포열 사이의 간격 등을 설계인자로 선정하여 열유동 해석 및 포열의 열변형 해석을 앞에서 검증한 수치해석 기법을 이용하여 수행하였고, 이러한 설계인자들이 차열관 효과에 미치는 영향을 포구조준점 변화의 관점에서 확인하였다.

4.1. 차열관 소재

차열관의 소재에 따른 차열관 효과를 확인하기 위하여 FRP (fiberglass reinforced plastics, 유리 섬유 강화 플라스틱), 알루미늄 (aluminum), 티타늄 (titanium)의 3가지 소재를 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 1 Properties of shroud materials

Property	FRP	Aluminum	Titanium
Density (kg/m^3)	2,540	2,719	4,850
Conductivity (W/m-K)	1.0344	202.4	7.44
Specific heat (J/Kg-K)	795.5	871	554.25

Table 1은 해석에 이용된 3가지 차열관 소재의 물리적 특성을 나타낸 것으로서 각 소재의 특성이 잘 구별된다는 것을 알 수 있다.

Figure 16은 차열관 소재 변화에 따른 포구조준점 변화를 나타낸 것이며, 포구조준점 변화 특성이 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 소재에 따른 전도성 (conductivity)과 비열 (specific heat)의 차이는 열전달 과정에서 시간에 따른 차이가 발생할 뿐 최종적인 포열의 열적 변형에는 거의 동일하다는 것을 확인하였다.

4.2. 차열관 두께

차열관의 두께가 차열관 효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하나의 소재로 두께를 달리하여 해석을 수행하였다.

Figure 17은 차열관의 두께 변화에 따른 포구조준점 변화를 나타낸 것이고, 포구조준점 변화 특성이 큰 차이가 없이 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 차열관의 두께가 두꺼워지면 열 차단 효과와 보온 효과 때문에 미소한 차이가 나타나지만 큰 영향은 없는 것으로 보인다. 따라서 차열관 두께의 차이는 포열 내부온도 크기에만 영향을 미치고 포의 변형에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

4.3. 차열관과 포열 사이의 간격

차열관과 포열 사이의 간격이 차열관 효과에 미치는

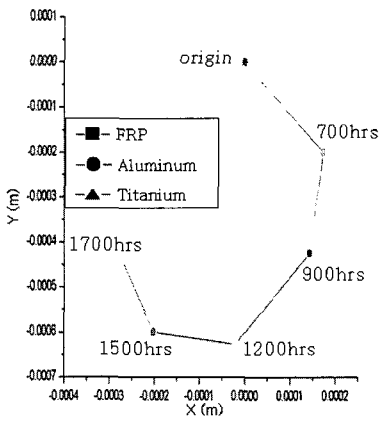


Fig. 16 Comparison of the drift in gun muzzle orientation relating to the sorts of shroud materials

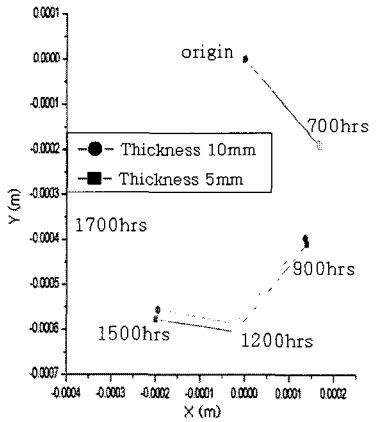
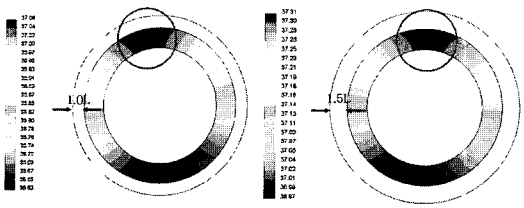
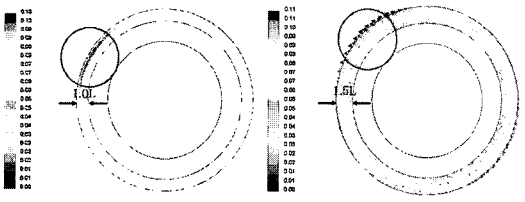


Fig. 17 Comparison of the drift in gun muzzle orientation relating to the wall-thickness of thermal shrouds



(a) 1.0L (b) 1.5L

Fig. 18 Temperature contours of gun barrel (at 9 a.m.)



(a) 1.0L (b) 1.5L

Fig. 19 Velocity vectors of the air flow between a barrel and thermal shrouds (at 9 a.m.)

영향을 확인하기 위하여 하나의 소재를 간격을 달리하여 해석을 수행하였다.

Figure 18은 차열관과 포열 사이의 간격 변화에 따른 2차원 포열에서의 하절기 오전 9시경의 온도 분포를 나타낸 것이다. 포열과 차열관 사이의 기준 간격을 L mm라 하면, 간격이 1.0L mm일 때와 비교하여 간격이 1.5L mm일 때에 포열 단면의 온도차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 포열 단면에서의 최고 및 최저 온도 위치가 상이하다는 것을 알 수 있다.

Figure 19는 차열관과 포열 사이의 간격 변화에 따른 공기층에서의 유동현상의 차이를 유속에 대한 속도 벡터로 나타낸 것이고, 하절기 오전 9시를 기준으로 해석한 것이다. 차열관과 포열 사이의 간격이 넓을수록 공기층에서 발생하는 자연대류의 속도가 증가하면서 유동방향으로 최고 및 최저 온도 위치가 이동한다는 것을 알 수 있다. 차열관과 포열 사이 공기층에서의 자연대류 속도는 간격이 1.0L mm일 때보다 1.5L mm일 때 약 10 % 증가하였다.

Figure 20은 차열관과 포열 사이의 간격을 보다 다양하게 변화시켜가면서 포구조준점의 변화를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 차열관과 포열 사이의 간격을 L-2 mm, L mm, L+5 mm, L+20 mm, L+30 mm로 증가시켜 나갈수록 포구조준점의 변화가 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 간격을 L-2 mm에서 L+5 mm로 증가시

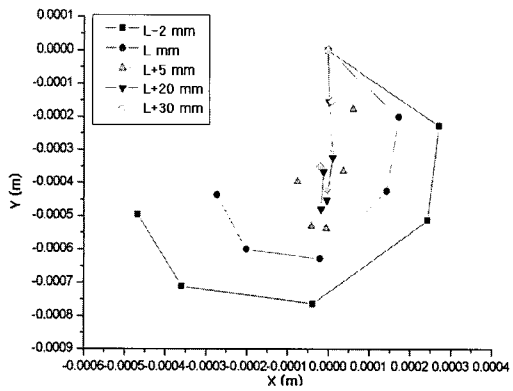


Fig. 20 Comparison of the drift in gun muzzle orientation relating to the distance of the radial gap between a barrel and thermal. shrouds

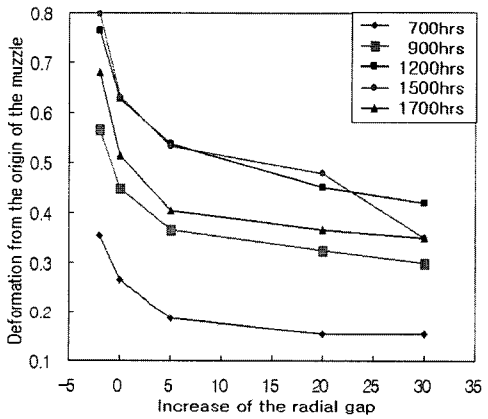


Fig. 21 Deformation from the origin of the muzzle relating to the increase of the distance of the radial gaprelating to the sorts of shroud materials

키는 과정에서는 포구조준점의 변화가 현저하게 감소하지만, 간격이 L+5 mm 이상이 되면 간격 증가에 따른 포구조준점 변화의 감소량 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다. (Fig. 21) 따라서 차열관 효과를 극대화하기 위해서 차열관의 지름을 무작정 키울 것이 아니라, 해석을 통하여 적합한 차열관 지름을 결정하는 것이 차열관 설계에 효율적이라는 것을 알 수 있다.

4장에서는 차열관의 소재, 두께 및 차열관과 포열 사이의 간격 등을 설계인자로 선정하여 열유동 해석 및 포열의 열변형 해석을 수행하였다. 차열관의 소재와 두께는 차열관 효과에 거의 영향을 미치지 않고, 차열관과 포열 사이의 간격이 증가할수록 포구조준점의 변화량이 감소한다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 대표적인 장축 실린더인 포열의 열변형을 최소화하기 위하여 포열에 장착하는 차열관의 효과를 열유동 해석 및 포열 열응력 해석을 통하여 확인하였고, 실험을 통하여 해석 기법의 타당성을 입증하였다. 차열관 효과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 차열관의 설계인자에 대한 해석을 수행하여, 차열관의 소재와 두께보다는 차열관과 포열 사이 간격이 차열관에 의한 포열의 열변형에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.

참고문헌

(1) 안상태, 강국정, 한태호, 김인우, 안병국, 김영남, 2004, "포열 열변형에 대한 차열관 효과 해석," 제12회 지상무기체계 발전 세미나, pp. 87~90.

(2) Ferziger, J. H. and Peric, M., 1996, "Computational Methods for Fluid Dynamics," Springer, Berlin, pp. 3~20.

(3) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere Publishing Corp., Washington, pp. 11~23.

(4) Holman, J. P., 1986, "Heat Transfer," 6th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 207~299.

(5) Threlkeld, J. L., 1970, "Thermal Environmental Engineering," 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, pp. 279~311.

(6) Fluent Software, http://www.fluent.com.

(7) Fluent Inc., 1996, "User's Guide for FLUENT/UNS & RAMPANT," Release 4.0, Fluent Inc., New Hampshire, pp. 13-1~13-74.

(8) Abaqus Software, http://www.simulia.com.

(9) 강국정, 안상태, 한태호, 김인우, 2005, "포열 열변형에 대한 차열관 효과 해석," GSDC-519-050340, 국방과학연구소, 대전, pp. 8~18.

(10) Giedt, W. H., 1949, "Investigation of Variation of Point Unit-Heat-Transfer Coefficient around a Cylinder Normal to an Air Stream," Trans. ASME, Vol. 71, pp. 375~381.

(11) White, F. M., 2003, "Fluid Mechanics," 5th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 476~484.

(12) Hoerner, S. F., 1965, "Fluid-Dynamics Drag; Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance," published by the author, New Jersey, pp. 3-1~3-28.