

## 해양플랜트용 H-120급 방화 댐퍼의 열전달 특성에 관한 연구

### A Study on Heat Transfer Characteristics of H-120 Class Fire Damper for Offshore Structures

장성철\* · 이종환\*\* · 이치우\*\*\*\*

Sung-Cheol Jang\*, Jong-Hwan Lee\*\* and Chi-Woo Lee\*\*\*\*

(접수일 : 2013년 08월 12일, 수정일 : 2013년 12월 09일, 채택확정 : 2013년 12월 11일)

**Abstract:** This research conducts CAE analysis of fire damper and design of damper controlling system. The prediction of the design heat transfer was done the answer of fire damper could be obtained by using continuity equation of damper controlling and orthogonal array. Through the design analysis of optimal offshore construction, new fire damper of H-120 class was designed. Accordingly, this equipment will be tested in actual offshore construction. Finally, we could obtain fire damper of optimal design with orthogonal array. With the CAE results of this research, The offshore plant will obtain eco-friendly fire damper with a method to select optimal condition of fire damper with orthogonal array.

**Key Words :** Fire Damper, Damper Control, Heat Transfer, Offshore Structures

## 1. 서 론

화재가 발생하면 방화벽을 통과하는 덕트 등을 통하여 유독가스 및 화염이 순식간에 이동하며, 한 쪽 구역에서 발생한 화재의 영향이 다른 구역으로 영향을 미치게 되는데 이 중 화염에 의한 피해를 방지할 목적으로 불길을 차단하기 위하여 설치되는 댐퍼를 방화 댐퍼(fire damper)라고 한다.

해양 구조물에서의 화재는 선박의 안전을 위협하는 가장 위험한 요소 중의 하나이고, 폭발 시 화염이 발생하더라도 화재가 쉽게 확산되지 않도록 하는 것이 중요하다.<sup>1)</sup> 해양플랜트라 하면 해저

석유개발에 사용되어 왔던 시추/생산용 플랫폼이나 오일리프 등이 대표적인 것으로 인식되고 있다. 국내 중공업체들은 해양구조물 및 해양토목 등 세계적인 대규모 해양플랜트 개발 및 시공 경험이 풍부한 고급인력을 확보하고 있으므로 기술 개발 및 설치와 시공에 유리한 산업 여건을 보유하고 있다.<sup>2)</sup>

이러한 해양구조물 및 해양플랜트 산업에 있어서 댐퍼는 필수 설비로 해양플랜트 개발 및 시공 산업이 활발하게 진행됨에 따라 관련기술의 활성화가 예상된다. 댐퍼의 제작은 비교적 단순하나 덕트의 유량조절 및 안전기능에 대해서는 많은

\*\*\*\* 이치우(교신저자) : 경남과학기술대학교 자동차공학과  
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-3643

\*장성철 : 한국폴리텍대학 항공캠퍼스 항공메카트로닉스과

\*\*이종환 : 한국폴리텍대학 항공캠퍼스 항공메카트로닉스과

\*\*\*\* Chi-Woo Lee(corresponding author) : Automobile Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology.

E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-3643

\*Sung-Cheol Jang : Department of Aviation Mechatronics, Korea Aviation Polytechnic.

\*\*Jong-Hwan Lee : Department of Aviation Mechatronics, Korea Aviation Polytechnic.

기술적 검토가 요구되어 진다.

해양플랜트용 방화 댐퍼에 관한 실질적인 연구는 최근 들어 본격적으로 시작되어 국내외에서 그 결과물들이 다수 발표되고 있다. 965℃에서 가열시간 및 방열성에 60분 견디는 A-60급(class)에 대한 연구로 국한되어 수행되었지만 1,100℃에서 가열시간 및 방열성에 120분 견디는 H-120급에 관한 연구는 수행된 경우가 없는 것으로 조사되었다.<sup>3)</sup> 일반적으로 열전달을 향상시키면 유체유동의 저항도 동시에 증가된다. 유체유동의 거동을 정확히 예측하여 주어진 유체마찰에 대하여 최선의 열전달성능을 얻을 수 있는 형상을 고려하여 연구를 진행하였다.<sup>4,5)</sup>

본 연구에서는 이를 위해 해양플랜트용 방화 댐퍼 내에서의 정상상태, 비압축성 유동상태를 3차원 전산유동해석으로 H-120 급 해양플랜트용 방화 댐퍼의 설계 및 제작을 위한 기초연구로서 방화 댐퍼에 관한 열전달 해석을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

해양구조물의 HVAC System에서 기관구역, 거주구역, 제어룸, 저장품실 등과 같은 공간에서는 복도측보다 50Pa 정도의 높은 압력을 유지하는 것이 규정이며, 급기 쪽 유량을 제어하여 풍량과 온도를 적정수준으로 유지시키고 있는 방식을 채택하고 있다. 반면 배기 쪽의 경우 유량을 제어하기 보다는 화재 시 방재목적으로 방화 댐퍼를 설치하여, 앞서 언급된 구역이나 지역에서 화재가 발생할 경우 온도센서나 가스탐지 센서에 의해 자동적으로 방화 댐퍼가 차단된다. 이때 급기 쪽에서 화재구역에 불활성 가스를 독립적으로 공급하여 산소농도를 낮추고, 외부에서 유입되는 산소를 차단시켜 화재를 진압하게 된다.

본 연구에서는 먼저 화염유동(fire-flow)의 유체-열 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하여, 그 결과로부터 도출된 덕트와 방화 댐퍼의 내부 고체 부의 벽면에서의 온도분포를 추출하여 열전달 해석을 통해 방화 댐퍼의 발열상태를 수치해석 하였다. Conjugated Heat Transfer

(CHT)는 고체 및 유체와의 열전달이 고려된 해석이다. 고체부분에 의한 전도 열전달과 덕트 내부에서의 화염에 의한 열-유동 분포를 함께 고려해야 정확한 온도분포 예측이 가능하다.

Fig. 1은 유체-열-구조 연성체 (Fluid-Structural Coupling System) 해석의 개략도이다. 본 연구에서는 단방향(One-Way Coupling)해석을 수행하였다. 즉 유체-열 CFD 해석으로부터 화염 유동을 계산하고, 벽면에서의 열전달량을 추출하여 열전달 해석을 위한 입력자료로 활용하였다.

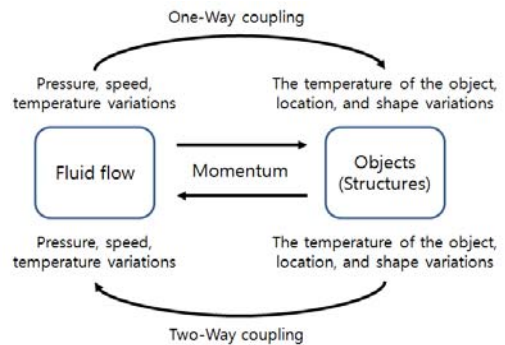


Fig. 1 Fluid-Structural coupling system

## 3. 해석결과

복합적인 물리현상의 다물리계 해석 (Multiphysics Analysis)에 강점을 가진 ANSYS 제품군을 활용하여 방화 댐퍼의 열-유동현상 및 열변형에 의한 열응력을 평가하였다. 방화 댐퍼의 작동환경 특성상 여러 가지 물리계가 서로 연성된 다물리계의 현상들이 동시에 고려되어야 한다. 본 연구는 유체-열-구조(Fluid-Thermal-Structure) 연성체의  $k-\epsilon$  난류모델중 Boussinesq 모델을 활용해서 수치해석을 수행했으며, 수렴기준은 잔차값이  $10^{-4}$ 에 도달하면 수렴한 것으로 판단하였다.

### 3.1 유체-열 CFD 해석

화재시 1,100℃의 화염이 덕트의 입구쪽으로 유입되고, 방화 댐퍼의 블레이드에 의해 화염의 유동이 차단되어 120분의 시간이 경과된 이후의 정상상태에 대한 시뮬레이션을 하기 위해

Ansys-CFX 유동해석 툴을 활용하였다.

Table 1에 격자망의 절점 수와 요소 수를 나타내었고, Fig. 2에 방화 댐퍼와 덕트의 유한체적모델을 도시하였다.

본 연구에서의 유체-열 CFD 시뮬레이션은 확산 화염에 관한 것으로 그 지배미분방정식은 낮은 마하수 근사법이 적용된 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (3)$$

여기서,  $\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot U)$  이고,  $h_{hot} = h + \frac{1}{2}U^2$  이다. 그리고  $u, p, \tau$ 는 속도, 압력 및 응력을 나타낸다. 또한  $S_M = (\rho - \rho_{ref})g$ 는 부력 항에 관한 것으로 운동방정식에 생성 항으로 추가되며, 밀도차  $(\rho - \rho_{ref})$ 는 전 부력 모델(Full Buoyancy model) 또는 Boussinesq 모델로 사용되어진다.

Fig. 3은 CFD 해석을 수행하기 위해 설정된 경계조건을 도시하였다. 덕트의 입구쪽은 Open 경계조건을 활용하여 화염의 유입 및 유출이 가능하도록 조사하였고, 그 경계면에서의 압력 값을 20Pa로 설정하였다. 그리고 부력을 받는 확산 화염을 고려하여 화염의 유동이 덕트 내부에서 형성될 수 있도록 조사하였다.

덕트와 방화 댐퍼는 상온상태, 20°C의 분위기 온도에 노출되어 있는 것으로 가정하였으며, 분위기 온도와 고체부 벽면 사이에 대류경계조건을 설정하여 열전달이 이루어지도록 하였다. 또한, 덕트와 방화 댐퍼 내부의 화염 유동과 고체부 간 접촉 경계조건을 설정하여 화염과 고체벽면 간 열전달이 이루어 질 수 있도록 조사하였다.

Table 1 Nodes and elements for CFD analysis

Number of Nodes	256,938
Number of Element	606,687

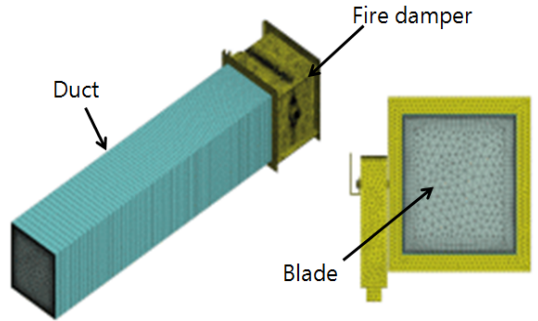


Fig. 2 Finite volume element for thermal-fluid coupling analysis

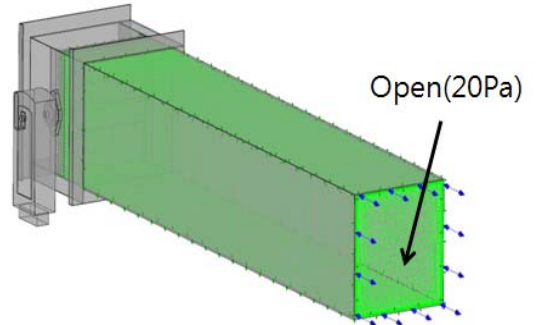


Fig. 3 Boundary conditions for CFD analysis

Fig. 4는 덕트와 방화 댐퍼 내부에서의 화염 유동에 대한 압력 분포도이다. 방화 댐퍼의 블레이드 근방 상부 층의 압력이 다소 낮고 하부 층의 압력이 다소 높은 것으로 나타났으며, 이는 유동이 블레이드 하부 층에서 압축되고 있음을 나타낸다.

Fig. 5는 속도 분포도이다. 덕트의 중심면 부근에서 속도분포가 거의 영(0)인 것을 알 수 있으며, 방화 댐퍼 블레이드 하부 층에서 속도가 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한, Open 경계면의 하부에서의 속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 전체 화염 유동의 속도가 영(0)인 지점을 기준으로

로 상부 층은 방화 댐퍼 쪽으로 유동이 형성되고, 하부 층은 방화 댐퍼에서 덕트 경계면으로 유동이 발생하였다. 화염 유동의 속도가 영(0)이 나타나는 이유는 Open 경계면의 상부 층에서 1,100°C의 화염으로 인해 덕트 내부의 공기가 부력 발생으로 인해 중간 지점을 제외하고 상하로 분자가 활발하게 이동하기 때문이다.

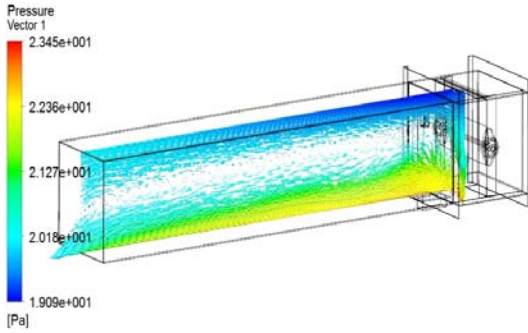


Fig. 4 Pressure distribution

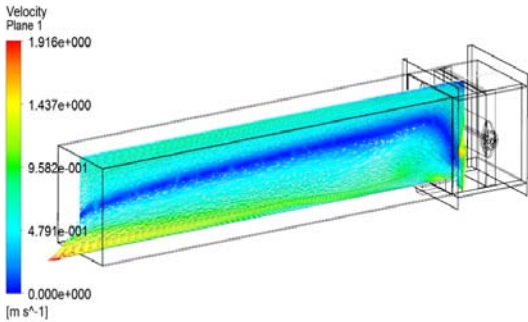


Fig. 5 Velocity distribution

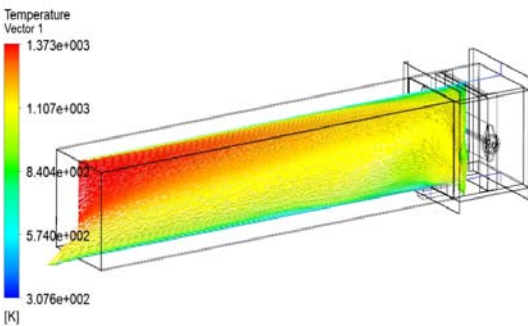


Fig. 6 Temperature distribution in fire-flow

Fig. 6은 온도분포도를 나타낸 것이다. Open 경계면의 상부 층에서 1,100°C의 화염이 유입되고 방화 댐퍼 부근에서는 약 1,000°C의 화염이 전달되었다. 덕트 내부의 상부 층보다 하부 층의 온도가 다소 낮게 분포하고 있다. 사각 단면의 덕트가 갖는 온도분포는 속도분포와 공통적으로 유선형의 경향을 가지므로 유동의 속도에 의해 온도의 차이가 나타났다.

### 3.2 열전달 해석

화염의 유동에 따라 질량, 운동량 및 에너지의 이동에 따른 덕트와 방화 댐퍼 내부 벽면으로의 대류 열전달은 유체-열 CFD 해석으로부터 결정하였다. 이와 같이 계산된 열을 추출하여 열전달 해석을 위한 열 하중으로 활용하였다.

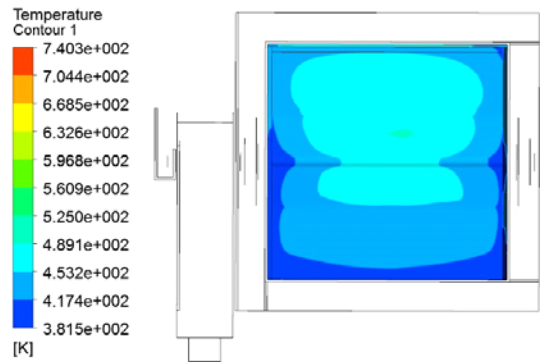


Fig. 7 Temperature distribution on wall surfaces of duct

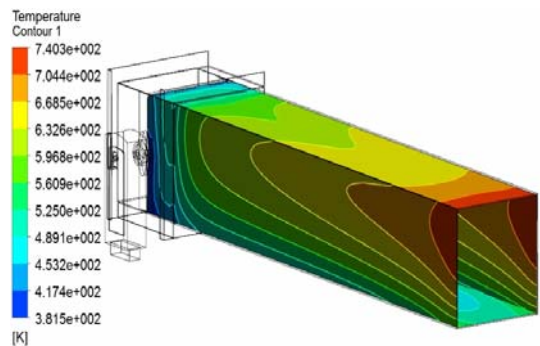


Fig. 8 Temperature distribution on wall surfaces of fire-damper

Fig. 7은 유체-열 CHT 연성해석으로부터 도출된 덕트 내부 벽면에서의 온도 분포도이다. 그림에서 보는 것과 같이 덕트 내부 벽면 온도의 경우, 중간 지점보다 벽면 하부의 온도가 높은 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 언급한 것과 같이 댐퍼 하부층에서 속도가 가장 빠름으로 해서, 열전달이 상부에 비해 용이하게 이루어진 것으로 추측되며, 유동이 블레이드 하부 층에서 압축되는 현상과 관계가 있다고 생각된다.

Fig. 8은 유체-열 CHT 연성해석으로부터 도출된 방화 댐퍼 내부 벽면에서의 온도 분포도이다. 열의 흐름(flow of heat)이 시간에 따라 변하지 않을 때의 열전달을 정상상태(steady state)라 한다. 본 연구에서는 방화 댐퍼의 블레이드가 화염의 유동을 차단한 이후부터 120분의 시간이 경과된 시점에서의 방화 댐퍼에 관한 온도 분포를 고려하기 때문에 열적 평형상태에 도달한 정상상태라고 가정하였다. 열의 흐름이 시간에 따라 변하지 않으므로, 해석 대상물의 온도와 열하중(thermal loads)도 변하지 않는다.

정상상태에 대한 덕트와 방화 댐퍼 고체 구조 부재의 열전달 상태를 묘사할 수 있는 열전도 지배미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $K$ 는 열전도계수이며,  $\dot{q}$ 은 자체 발열(heat generation) 향으로 본 연구에서는 자체 발열이 없다. 또한 상온 상태 20 °C의 외부 공기와 덕트 및 방화 댐퍼 간은 자연 대류에 의해 열전달이 이루어진다. 뉴턴의 냉각법칙에 대한 대류 열전달식은 다음과 같다.

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

여기서,  $h$ 는 대류 열전달계수(convection coefficient)이고,  $T_s$ 는 덕트와 방화 댐퍼의 외부 공기층과 접촉하는 표면온도(surface temperature)이며,  $T_\infty$ 는 외부 공기층의 온도(bulk temperature of surrounding fluid)를 의미한다.

마지막으로 복사 열전달에 의해 덕트와 방화 댐퍼의 표면으로부터 빛의 형태로 외부 공기층으로 열을 방출할 수 있다. 즉, 온도차에 따른 전자기적인 열의 흐름으로 최대 방출 열량은 단위 표면적당( $\sigma = 5.673 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ : Stefan-Boltzmann 상수)를 넘지 못한다. 회체의 복사열전달 방정식은 다음과 같다.

$$q = \epsilon \sigma A T^4 \quad (6)$$

여기서,  $\epsilon (0 \leq \epsilon \leq 1)$ 은 방사율이다. 본 연구에서는 복사열전달을 고려하지 않았다. 따라서, 보다 보수적인 해석결과가 도출된 것으로 예상된다.

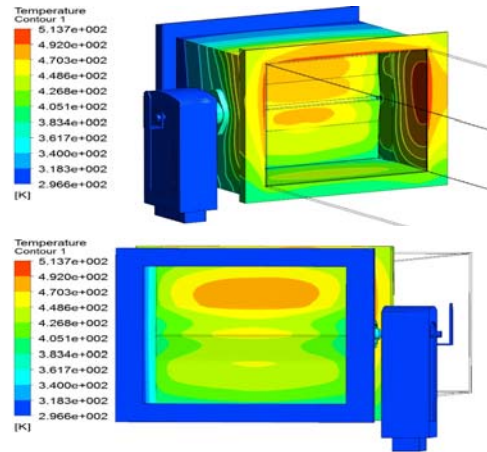


Fig. 9 Temperature distribution on the fire-damper

Fig. 9는 방화 댐퍼의 온도 분포도이다. 방화 댐퍼 내부의 양 측면에서의 온도가 약 250°C로 가장 높게 나타났다. 그리고 실내 공기 20°C와 접촉하는 외부 측면에서 약 187°C로 나타났다. 그리고 블레이드의 화염 유동 접촉면에서 약 210°C 정도로 온도가 상승하였다. 전자제어 장치부의 컨트롤 박스 부의 온도는 약 50°C 정도로 나타났다. 방화 댐퍼 전체의 평균 온도는 약 132°C로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 H-120급 해양플랜트용 방화 댐

퍼의 설계 및 제작을 위한 기초연구로서 방화 댐퍼에 관한 열전달 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Power System Engineering, vol.9, no.1, 2005.2, pp. 30-35

(1) 방화 댐퍼의 유동이 블레이드 하부 층에서 압축되고 있는 것은 블레이드 근방 상부 층의 압력이 다소 낮고 하부 층의 압력이 다소 높기 때문이었다.

(2) 전체 화염 유동의 속도가 영(0)인 지점을 기준으로 상부 층은 방화 댐퍼 쪽으로 유동이 형성되고, 하부 층은 방화 댐퍼에서 덕트 경계면으로 유동이 발생하였다.

(3) 복사 열전달에 의해 덕트와 방화 댐퍼의 표면으로부터 빛의 형태로 외부 공기층으로 열을 방출할 수 있다. 본 연구에서는 복사열전달을 고려하지 않았다. 따라서 보다 보수적인 해석결과가 도출된 것으로 판단된다.

(4) 실내 공기 20°C와 접촉하는 외부 측면에서 약 187°C로 나타났고, 블레이드의 화염 유동 접촉면에서 약 210°C 정도로 온도가 상승하였으며, 방화 댐퍼 전체의 평균 온도는 약 132°C로 나타났다.

## References

1. S. C. Jang, "Analysis CFD/CAE of Fire Damper for Offshore Structures", Proc. of KSMTE 2011 Spring Conf., pp. 375-376.
2. S. C. Jang, "Performance Experiment of Fire Damper for Ocean Plants", Proc. of KSMTE 2012 Spring Conf., pp. 222
3. H. W. Seo, "A Study on the Fire Resistance Performance Evaluation of Fire Dampers", Proc. of KIFSE 2010 Spring Conf., pp. 90-95
4. S. W. Ahn, "The Effect of Rib Shapes on the Heat Transfer in the Rectangular Duct", Proc. of KSPSE 2000 Fall Conf., pp. 132-138
5. S. T. Bae, "Effect of Number of Rough Walls on Heat Transfer in the Square Channel with a Uniform Heat Flux", The Korean Society for