

방폭성능 향상을 위한 액추에이터-모터 어셈블리의 최적설계

윤석규* · 김재희* · 김윤제**†

Optimal Design of Explosion-Proofed Actuator-Motor Assembly

Seok-Gyu Yoon*, Jae-Hee Kim*, Youn-Jea Kim**†

Key Words : Offshore Plant(해양 플랜트), Explosion-Proof(방폭), Response Surface Method(반응표면법), Actuator-Motor Assembly(액추에이터-모터 어셈블리)

ABSTRACT

In order to secure the offshore plants, explosion-proofed components should be designed and equipped due to their flammable gas environment. Moreover, it is important to retain the stability of equipment that can cause ignition of combustible gas in the outside, such as the motor which causes the internal explosive flame, and to provide appropriate reinforcement measures, if necessary. In this study, equivalent stress of motor case according to the explosion of ethylene was numerically analyzed to confirm the fracture point and variation by using the commercial CFD code, ANSYS ver. 17.1. Also, the explosion-proof performance was verified and improved by optimizing the shape of motor case having the geometrical parameters such as angle and length.

1. 서 론

천연가스 산업은 단기간에 비약적으로 발전하였지만, 빈번한 사고 등⁽¹⁾ 안전문제가 대두되면서 산업안전에 대한 인식이 고양됨에 따라 다양한 분야에서 사고 방지를 위한 연구가 수행되고 있다. 특히, 모터와 같은 전자기기는 용기 내로 침입한 가스가 내부 열원으로 인해 불꽃이나 발열을 유발하여 폭발의 원인이 될 수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 연구가 최근 주목받고 있다. 그 중, 용기의 접합부에서는 내부 또는 외부로의 순환유동이 있을 수 있으며 모터 내부에서 화염이 발생할 시 외부 전파에 의한 2차 폭발을 방지할 수 있는 내압 방폭 구조에 대한 설계 개선 연구가 필요한 실정이다.

선례로 Hwang 등⁽²⁾은 최대안전틈새(maximum experimental safe gap, MESG) 개념을 도입하여 장치 내부에서 발생할 수 있는 폭발 압력과의 상관관계 분석을 통해 화염이 외부로 전파되지 않는 접합부 최대 허용 틈새를 고찰하였다. Yeo 등⁽³⁾은 내압 방폭 구조의 LED 유도등을 설계하고 시제작한 후,

유도등으로써의 규격 적합성 및 방폭 성능을 평가하였다. 또한 Park 등⁽⁴⁾은 적외선 센서를 이용하여 방폭형 휴대용 가연성가스 누출검지기를 개발하고 가스의 농도를 측정하여 정확도를 향상시키는 알고리즘을 제안하는 등 폭발 방지를 위한 연구를 수행한 바 있다.

방폭 검증 방법은 기기가 설치된 환경에 따라 구분할 수 있다. 해양 플랜트와 같이 외부 대기에 가연성 기체가 존재하는 경우, 외부와 전기기기를 격리하는 방법 중 하나인 내압 방폭 구조가 폭발 방지를 위한 중요 수단 중 하나가 될 수 있다. 또한 한국산업안전보건공단의 방폭전기기기 인증현황에 따르면 가스·증기 폭발에 사용되는 방폭기기가 전체 중 약 92%에 해당하고 있으며 그 중, 내압 방폭 구조의 방폭기기는 약 37%로 모든 방폭인증 취득기기의 30%를 차지하고 있어 내압 방폭 구조에 대한 실질적인 연구 필요성이 있음을 알 수 있다⁽⁵⁾.

해양 플랜트는 운전 특성상 고온·고압의 작동 환경에 주기적으로 노출되며 특히, 액추에이터 작동을 위한 모터는 고온·고압 환경에서 지속적인 운전이 요구된다. 이러한 지속

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

Table 1 Definition of the explosion-proof symbols⁽³⁾

Division	Mark	Indication
Explosion proof	Ex	Symbol
Type of protection	d	Flame proof Enclosure
	p	Pressurized Apparatus
	e	Increased Safety
	ia or ib	Intrinsic Safety
	o	Oil Liquid Immersion
	s	Special
Equipment group	I	Mining Industries
	II	Surface Industries
Gas group	I	Methane
	II A	Propane
	II B	Ethylene
	II C	Acetylene, Hydrogen
Temperature classification	T1	< 450 °C
	T2	< 300 °C
	T3	< 200 °C
	T4	< 135 °C
	T5	< 100 °C
	T6	< 85 °C

적인 고부하 운전은 열팽창 및 파단을 초래하여 부품들 간의 상대변위와 유격현상을 유발할 수 있으며, 결과적으로 형상의 변화는 방폭 성능을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Oh 등⁽⁶⁾에 의해 고찰된 가스 혼합물의 폭발압력과 연소열의 상관관계를 이용하여 모터 내부에서의 예상 폭발 압력을 추산하고 구조해석을 통해 von Mises 등가응력을 계산하여 응력집중이 발생하는 지점을 확인하였다. 또한 응력집중 지점에서 폭발압력에 따른 모터 케이스의 형상 변화를 고찰하고 모터와 미들 조인트의 접합 부분을 설계 변수로 설정하여 방폭 성능에 따른 모터 형상 최적화 작업을 수행하였다.

2. 이론적 배경

방폭 기준 및 방폭 구조는 다양한 조건에 의해 구분되는데 기호에 대한 각각의 의미를 Table 1에 나타내었다. Ex는 방폭 구조의 기호이며, 나머지 기호들은 위에서부터 순차적으로 방폭 구조의 종류, 장비 사용 환경 그룹, 사용 가스의 그룹, 그리고 기기 표면의 온도 등급에 따른 분류이다.

내압 방폭은 기본적인 방폭 구조이며, 가장 먼저 고안된 방폭 방법으로써 용기 내부에서 가연성 가스가 폭발하였을 경우 용기가 그 폭발 압력에 견디고, 내부 폭발 시 발생하는 불꽃이 틈새나 구조적인 접합면을 통하여 용기 밖에 존재하는 위험 가스에 점화되지 못하도록 유도할 뿐만 아니라, 구조용기 표면의 온도에 의해서도 점화가 일어나지 않도록 설계된 구조를 말한다.⁽⁷⁾ 그 중, 구조적인 접합부에서는 인화성 가스의 그룹에 따라 최소 폭 및 최대 틈새가 정해져 있

Table 2 MESG according to the group of chemicals⁽⁸⁾

Group	Chemicals	MESG
II A	Acetone, Ammonia, Amyl acetate, Aniline, Benzene, n-Butanol, Carbon monoxide, Cyclohexane, Ethane, Ethanol, Ethyl acrylate, Propane etc	MESG ≥ 0.9mm
II B	Acrolein, Acrylonitrile, 1,3-Butadiene, Cyclopropane, Diethyl ether, Ethylene, Ethylene oxide, Methyl acetate, Coke-oven gas	0.9mm ≥ MESG > 0.5mm
II C	Acetylene, Carbon Disulide, Hydrogen	0.5mm ≥ MESG

며, 이를 최대 안전 틈새라 한다. 최대 안전 틈새는 틈새 조정 장치를 이용하여 내부 폭발이 25 mm의 틈새 길이를 통하여 외부로 유출되어지는 최소 틈새를 실험적으로 측정하는 것을 말하는데, 인화성 가스 군에 따른 최대 안전 틈새를 Table 2에 나타내었다.

3. 수치해석

Fig. 1은 해양 플랜트용 초고압 유압 액추에이터를 작동시키기 위한 모터의 수치해석 모델이다. 수치해석을 위해 Fig. 1(b)와 같이 프로토타입 모터 케이스를 간략화하여 이용하였으며, 모터 케이스가 미들 조인트와 결합될 시 내압 방폭 구조를 형성한다. 해석에 사용된 모터 케이스는 내경 139 mm, 외경 160 mm, 총 길이 299.5 mm 이며, 케이스에 사용되는 알루미늄 합금 ADC-12강의 물성치는 Table 3에 나타내었다. Figure 1의 3차원 모델을 바탕으로 내부 가연성 가스의 용적 및 농도에 따른 폭발압력을 추산하였으며, 수치해석은 변위 및 강성도의 수렴 기준이 1.0×10^{-8} 을 만족할 때 해석이 완료되도록 설정하였다. 폭발압력에 의한 파단지점 예측을 위해 상용 프로그램인 ANSYS ver. 17.1.을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 PCG (preconditioned conjugate gradient) 반복해법을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 관련 방정식은 다음과 같다.⁽⁹⁾

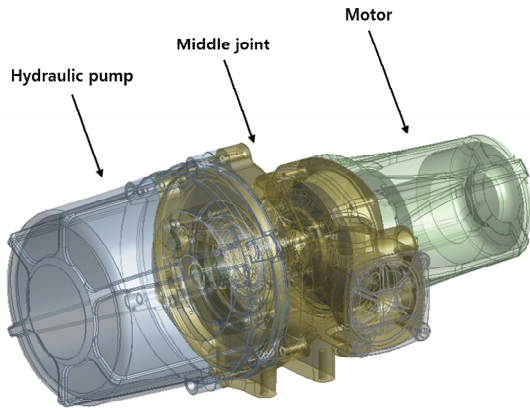
$$Ax = b \tag{1}$$

여기서 A 는 대칭 양정(symmetry positive definite)으로 이루어진 강성도 행렬(stiffness matrix), x 는 변위장(displacement field), 그리고 b 는 구조물에 가해지는 외력을 의미한다.

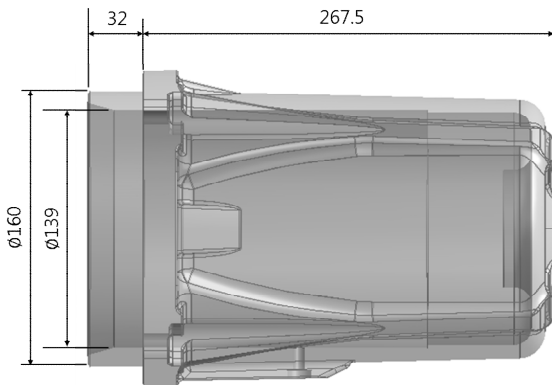
Fig. 2는 경계조건에 대한 정보이다. 가연성 가스가 모터 내부에서 폭발할 경우, 모터 내부 로터로 인해 폭발이 모터 전체 보다는 모터와 미들 조인트가 결합된 공간에 대한

Table 3 Material properties of ADC-12

Type of material	Aluminum, ADC-12
Density (kg/m ³)	2823
Yield tensile strength (MPa)	165
Ultimate tensile strength (MPa)	331
Poisson's ratio	0.3
Elastic modulus (GPa)	76
Hardness (HBR)	53



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Hydraulic pump and motor for actuator, (b) Dimensions of motor case [unit: mm]

영향이 상대적으로 크므로, 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 결합면에 추산된 폭발압력을 경계조건으로 입력하여 해석을 수행하였다. 미들 조인트의 경우 하단은 액추에이터와 결합되어 있으므로 완전 고정 조건을 주었으며, 해석을 위해 자른 좌측 단면은 로터 축 방향으로의 변화를 고정한 채 나머지 방향에 대한 자유도를 자유조건으로 주어 폭발에 대한 모터 케이스의 변화를 모사하였다. 판단점의 판단은 von Mises 등가응력을 이용하여 평가하였으며, 결합부의 형상 변화를 통해 방폭 성능에 따른 모터 형상 최적화 작업을 수행하였다. 구조해석을 수행하기 위해 Fig. 3(a)와 같이 모터

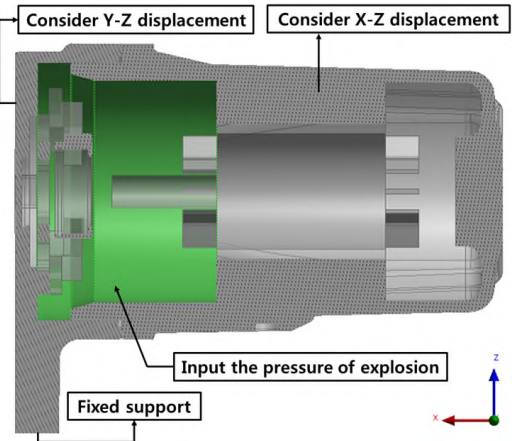
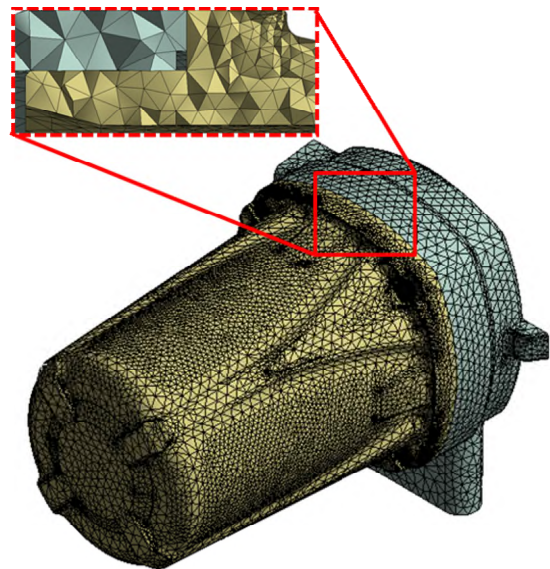
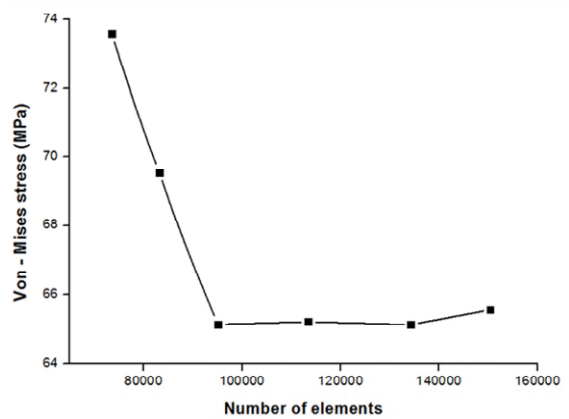


Fig. 2 Boundary and initial conditions



(a) Grid systems



(b) Grid dependency test

Fig. 3 Grid systems and dependency test

케이스와 미들 조인트에 4면체(tetrahedron) 형상의 격자를 형성하였으며, 해석의 타당성을 판단하기 위해서 등가응력에 대한 격자 의존도를 분석하고 이를 Fig. 3(b)에 도시하였

Table 4 Properties of Ethylene

Type of gas	Ethylene
Volume (cm ³)	1514.61
Molecular formula	C ₂ H ₄
Lower calorific value (kcal/mol)	316.197
Explosive range	2.7 - 36
Nomality (%) (In the air)	25
Minimum ignition energy (mJ)	0.07
Ignition temperature (°C)	490

다. 도시한 바와 같이 격자수가 약 10만개부터 유사한 경향을 나타내었으며 본 연구에서는 약 13만개의 격자수로 해석을 수행하였다.

4. 방폭성능 평가 및 모터 케이스 최적설계

4.1 폭발압력 추산

원유 생산을 위한 해양 플랜트에는 대기 중에 가연성 혼합가스인 에틸렌이 존재할 수 있으며, 해당 가스가 전자기기에 스며들 경우 점화에 의한 폭발로 이어질 가능성이 있다. 이러한 가연성 혼합가스의 폭발은 에너지의 변환형태인 폭발압력을 발생시키고 구조물의 파괴와 피해를 주는 원인으로 작용한다. 따라서 Table 4에 기술한 바와 같이 해양 플랜트의 대기 상황을 가정하고 모터 내부 용적에 따른 반응열을 계산하였으며, 가연성 혼합가스에 대한 반응열과 폭발압력의 상관관계⁽⁶⁾를 통해 에틸렌의 폭발압력을 추산하였다. 반응열에 대한 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{re} = \frac{V_g \times H_c \times C_g}{V_m} \quad (1)$$

여기서 H_{re} 는 가연성 혼합가스의 반응열(kcal), H_c 는 1몰 연소열(kcal), C_g 는 가연성 가스의 농도, 그리고 V_g , V_m 은 각 가스 및 1몰에 대한 부피(cm³)를 나타낸다. 또한 반응열과 폭발압력과의 상관관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = 0.67x + 4.18 \quad (2)$$

여기서 x 는 에틸렌의 반응열(kcal), y 는 폭발압력(kPa)을 나타낸다. 계산 결과, 대기 중 에틸렌의 물성에 따른 반응열은 5.34 kcal가 나왔으며 760.9 kPa의 폭발압력이 산출되었다. 따라서 본 연구에서는 산소 중 에틸렌이 당량농도일 경우 최대 폭발압력이 산출되었으므로,⁽⁶⁾ 760.9 kPa을 에틸렌의 최대 폭발압력이라 가정하였다.

4.2 폭발압력에 따른 방폭성능 평가

Von Mises 응력은 등가응력(equivalent stress)이라고도 부르며, 각 지점에서 응력 성분들의 조합에 의해 야기되는 비틀림 에너지와 단순 인장시험의 뒤틀림 에너지가 평형을 이룰 때, 항복을 유발하는 특수한 유형의 응력이다. 파단은 다음과 같은 변형률 에너지 가설을 기초로 하여 결정할 수 있으며, 항복응력과 von Mises 응력이 같아지는 시점을 파단이 발생하는 시점으로 판단한다.⁽¹⁰⁾

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3)$$

$$\sigma_{vm} \leq \sigma_{yield}$$

여기서 σ_{vm} 은 von Mises 응력, σ_{yield} 은 항복응력을 나타내며 σ_1 , σ_2 , σ_3 은 각 축 방향의 주응력을 나타낸다.

파단점 예측을 위해 반응열로부터 계산된 폭발압력을 모터 내부 벽면에 적용시키고 von Mises 등가응력을 이용하여 응력집중이 일어나는 부분을 확인하였다. 이때 Fig. 4에 도시한 바와 같이 모터 케이스 내에서 최고 von Mises 등가응력은 모터와 미들 조인트의 체결부에서 응력집중이 발생하였으며, 최대 폭발압력일 때 등가응력은 65.137 MPa이므로 폭발이 모터 케이스에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 또한 폭발에 따른 모터 케이스의 실제 틈새 길이 변화는 0.02 mm로 모터 케이스 변화에 따른 방폭 성능 저하도 미미한 것으로 판단된다.

4.3 모터 케이스 최적설계

에틸렌 폭발이 모터 케이스에 미치는 영향은 미미하였으나 수차례 폭발로 인한 점진적인 소성변형은 방폭 성능의 저하로 이어질 수 있으며, 대기 중에 존재하는 가연성 가스를 점화시켜 2차 폭발을 유발할 수 있다. 따라서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 모터 케이스 결합부의 모서리 각도 및 길이를 변수로 설정하고 등가응력을 분산시켜 방폭 성능 향상을 위한 모터 케이스 최적설계를 수행하였다.

최적설계를 위한 출력변수 도출을 위해 정해진 설계점을 기본으로 설계공간을 선택하고 자세한 분석을 할 수 있는 실험계획법(design of experiment, DOE)을 사용하였으며, 전산 수치 실험에서 많이 사용되고 있는 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 이용하여 실험점을 추출하였다. 이 기법은 최소한의 실험으로 최대 효과를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 실험점에 대한 추출은 다음 식으로 구성된다.

$$y = 2^k + 2k + 1 \quad (4)$$

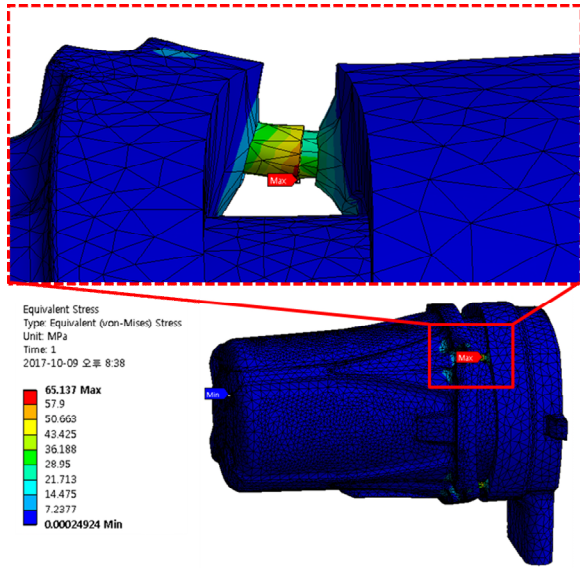


Fig. 4 Position of maximum von Mises value

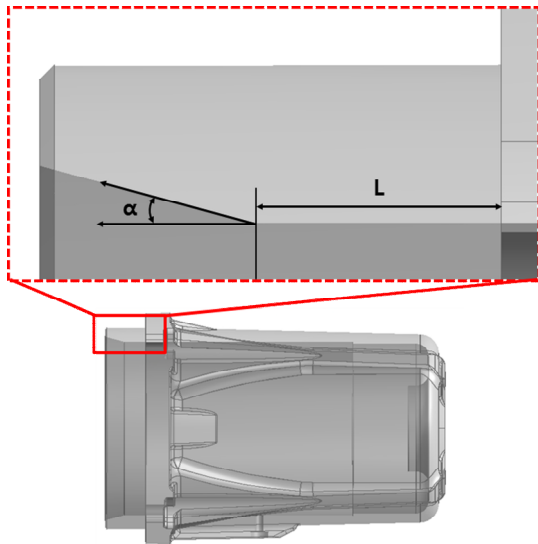


Fig. 5 Description of design parameters

여기서 k 는 설계변수의 수, y 는 실험의 수이다. 설계변수 2 개에 대한 총 실험 개수는 9개가 도출되며, 선정된 실험점과 수치해석에 대한 결과를 Table 5에 나타내었다. 또한 회귀모형을 만들어 결과 값을 추정하기 위해 실험계획법에 의해 도출된 결과를 바탕으로 독립변수의 복합적인 작용 효과를 추정하는 방법인 반응표면법(response surface method)을 이용하였으며, 반응표면에 대한 근사식은 다음과 같다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

여기서 Y 는 반응표면 함수이며, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 는 미정계

Table 5 Central composite design of design matrix

No.	α° (angle)	L (m)	Mass (kg)	Von-Mises (MPa)
1	15	0.017	10.287	65.137
2	13.5	0.017	10.291	64.839
3	16.5	0.017	10.283	64.652
4	15	0.0153	10.262	66.137
5	15	0.0187	10.312	64.217
6	13.5	0.0153	10.266	66.147
7	16.5	0.0153	10.258	66.652
8	13.5	0.0187	10.316	64.552
9	16.5	0.0187	10.308	64.509

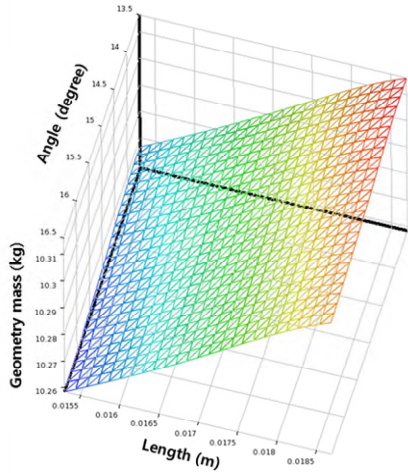
수, x_i, x_j 는 설계변수이다.

본 연구에서는 실험계획법 및 반응표면법을 이용하여 모터 케이스의 최적설계를 수행하였다. 실험점 도출을 위한 설계 변수 범위는 모터 케이스의 질량 변화를 최소한으로 하고 미들 조인트와 결합 시 방해받지 않는 수준으로 산정하였다. 등가응력 감소에 따른 모터 케이스 변화량 감소는 방폭 성능 증가로 이어지므로, 폭발 압력에 따른 모터 케이스 구조해석을 통해 계산된 등가응력을 최적설계 목적함수로 선정하였다. 제한조건으로는 케이스 전체의 질량으로 선정하여 현재 수준을 유지하거나 경제성을 고려해 보다 작은 중량을 선택하도록 하였다.

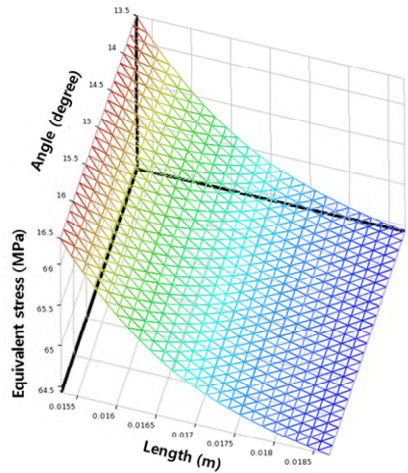
4.4 민감도 분석

모터 케이스 결합부의 2가지 설계변수인 길이(L)와 각도(α°)가 목적함수인 등가응력 및 질량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. Figure 6(a)와 6(b)는 각 설계변수에 대한 목적함수 변화를 분석한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 결합부 모서리의 길이 및 각도의 변화가 전체적인 모터 케이스 질량 변화에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 설계변수 변화에 따라 등가응력이 변하는 것을 확인할 수 있었으며, 모서리 각도 변화 보다는 길이 변화가 등가응력 변화에 더 민감하게 작용한다는 것을 Fig. 6(c)를 통해 확인할 수 있었다.

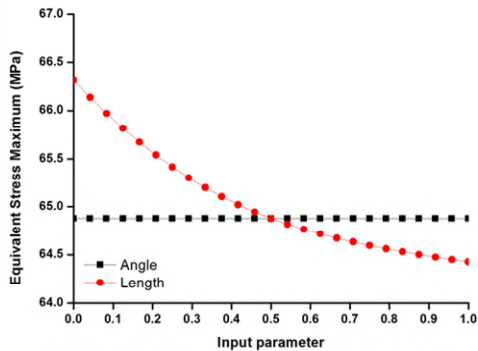
Table 6는 기존 모델과 반응표면법으로 도출된 최적화 형상에 대한 해석결과이다. 등가응력에 관한 근사모델과 CFD 결과의 상대오차는 약 0.14% 정도 발생하였으며, 이를 통해 근사모델에 대한 해석이 적합하다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 모터 케이스 전체 질량이 유지되는 상태에서 목적함수인 등가응력은 64.895 MPa로 기존 형상 대비 0.37% 감소하였으며, 미들 조인트와 모터 케이스 결합부 사이 거리인 최대 안전 틈새길이 변화량 또한 0.016 mm로 기존 0.02 mm에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다.



(a) Sensitivity surface with geometry mass



(b) Sensitivity surface with equivalent stress



(c) Result of sensitivity with equivalent stress

Fig. 6 Sensitivity analysis

5. 결 론

본 연구에서는 가연성 가스인 에틸렌이 모터 내부에서 폭발할 경우를 가정하고, 반응표면법을 이용하여 모터 케이스의 구조적 안전성에 영향을 미치는 설계 인자에 대한 최적화 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원유 생산을 위한 해양 플랜트 특성을 고려하여 대기

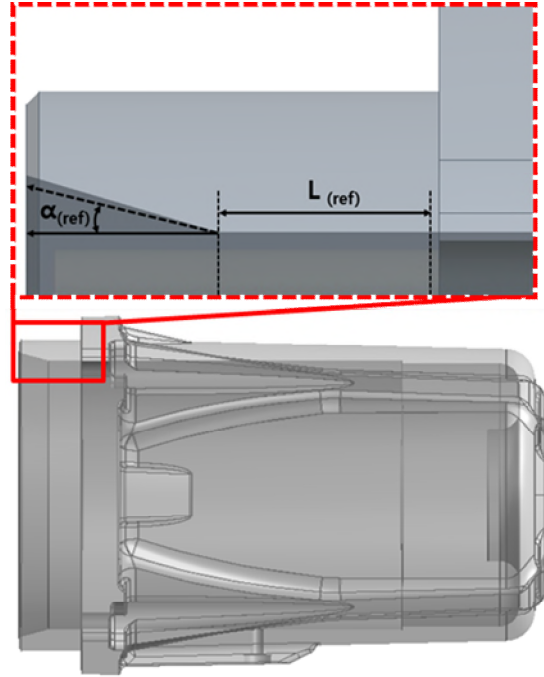


Fig. 7 Optimal model

Table 6 Comparison result between Ref. model and optimal model

Model	α° (angle)	L (m)	Mass (kg)	Von-Mises (MPa)
Ref.	15	0.017	10.287	65.137
Optimal model (RMS)	16.337	0.017184	10.286	64.799
CFD	16.337	0.017184	10.286	64.895

중에 에틸렌이 포함되었다고 가정하였으며, 에틸렌의 반응열과 폭발압력과의 상관관계식을 통해 760.9 kPa의 모터 내부 폭발압력을 산출하였다.

- 2) 산출된 폭발압력이 가해질 경우, 모터 케이스의 예상 파단지점을 von Mises 등가응력을 이용하여 예측하였으며, 최대 등가응력은 65.137 MPa로 모터 케이스와 미들 조인트의 체결부에서 응력집중이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 폭발압력에 따른 모터 케이스의 변화는 미비하였으나 수차례 폭발로 인한 점진적 소성변형을 고려하여 최대 등가응력 감소를 위해 모터 케이스의 최적설계를 수행하였다.
- 4) 설계변수에 대한 민감도 분석을 통하여 등가응력 및 모터 케이스의 질량에 영향을 주는 인자를 확인하였다.
- 5) 최적설계는 실험계획법 및 반응표면법을 이용하였으며, 결과적으로 초기결과인 65.137 MPa 보다 약 0.37% 감소한 64.895 MPa의 응력이 발생하여 구조적 안전성이 증가함을 확인하였다. 이는 프로토타입의 모터 형상 최적화를 통해 향후 제작될 모터 형상의 구조적

안전성 확보 및 제작 단가 절감 효과를 가져올 것으로 사료된다.

- 6) 최종적으로 에틸렌의 폭발 압력에 따른 모터 케이스와 미들 조인트 사이 거리인 최대 안전 틈새 변화량을 확인하였으며, 형상 최적화로 구조적 안전성을 확보하여 모터 케이스에 가해지는 등가응력 감소를 확인하였다. 이는 가연성 가스 에틸렌에 해당하는 방폭등급 Ex d IIB T4 중 온도 조건에 해당하는 T4 등급을 제외한 Ex d IIB 방폭 등급을 만족한다는 것을 확인할 수 있었으며, 최적화된 모터 케이스 형상은 Fig. 7에 나타내었다. 향후에는 본 연구에서 수행한 해석의 정확성을 판단하기 위해 프로토타입으로 제작된 모터 케이스 및 미들 조인트에 대해 방폭 실험을 수행할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원 국제공동기술개발사업 [N017100045, 해양 플랜트 제어용 Combination Explosion-proof Electro-Hydraulic Control Actuator System 국산화 기술개발]의 일환으로 수행하였으며, 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

(1) Park, G. D., Gas Accident Yearbook, 2016, Korea Gas Safety Corporation.
 (2) Hwang, K. Y., Shin, W. C. and Lee, T. K., 2016, "A Study on the Correlation of MESG and Explosion Pressure," The KIGAS Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 20, No. 1, pp. 29~39.
 (3) Yeo, J. H., Kim, J. S. and Yu, Y. M., 2017, "Study on

the Design and Optical Characteristics of LED Emergency Exit Lighting with Flamerproof Enclosure," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 31, No. 1, pp. 49~55.
 (4) Park, G. T., Lyu, G. J., Jo, Y. D., Kwon, J. R., Ahn, S. G. and Kim, H. S., 2014, "A Study on the Development and Accuracy Improvement of an IR Combustible Gas Leak Detector with Explosion Proof," The KIGAS Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 18, No. 3, pp. 1~12.
 (5) Min, Y. S., 2016, "Safety Certificate Status of Explosion-proof," Korea Testing Laboratory.
 (6) Oh, K. H., Kim, H., Yoo, J. H. and Kim, T. J., 1997, "A Study on the Relationship of Explosion Characteristics and Combustion Heat of Gas Mixtures," The KIGAS Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 1, No. 1, pp. 49~55.
 (7) PHILLIPS, H., 1972, "Theory of Suppression of Explosions by Narrow Gaps," Chem. E. Symposium Series, No. 33, pp. 17~23.
 (8) Strehlow, R. A., Nicholls, J. A., Magison, E. C. and Schram, P. J., 1979, "An Investigation of The Maximum Experimental Safe Gap Anomaly," Journal of Hazardous Materials, Vol. 3, pp. 1~15.
 (9) Kim, H. S., Lee, K. M., Kim, M. G. and Cho, S. H., 2010, "Parallelized Topology Design Optimization of the Frame of Human Powered Vessel," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 47, No. 1, pp. 58~66.
 (10) Von Mises, R., 1913, Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. Göttin. Nachr. Math. Phys., Vol. 1, pp. 582~592.