

증기제트 충돌하중 평가를 위한 CFD 해석

최청열[†]·오세홍^{*}·최대경^{*}·김원태^{**}·장윤석^{***}·김승현^{***}

CFD Analysis for Steam Jet Impingement Evaluation

Choengryul Choi[†], Se-Hong Oh^{*}, Dae Kyung Choi^{*}, Won Tae Kim^{**}, Yoon-Suk Chang^{***} and Seung Hyun Kim^{***}

(Received 18 November 2016, Revised 15 December 2016, Accepted 26 December 2016)

ABSTRACT

Since, in case of high energy piping, steam jets ejected from the rupture zone may cause damage to nearby structure, it is necessary to design it into consideration of nuclear power plant design. For the existing nuclear power plants, the ANSI / ANS 58.2 technical standard for high-energy pipe rupture was used. However, the US Nuclear Regulatory Commission (USNRC) and academia recently have pointed out the non-conservativeness of existing high energy pipe fracture evaluation methods. Therefore, it is necessary to develop a highly reliable evaluation methodology to evaluate the behavior of steam jet ejected during high energy pipe rupture and the effect of steam jet on peripheral devices and structures. In this study, we develop a method for analyzing the impact load of a jet by high energy pipe rupture, and plan to carry out an experiment to verify the evaluation methodology. In this paper, the basic data required for the design of the jet impact load experiment equipment under construction, 1) the load change according to the jet distance, 2) the load change according to the jet collision angle, 3) the load variation according to structure diameter, and 4) the load variation depending on the jet impact position, are numerically obtained using the developed steam jet analysis technique.

Key Words : High-Energy Pipeline (고에너지 배관), Steam Jet (증기 제트), Jet Impingement (제트충돌), Dynamic Load (동적 하중), CFD (Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)

기호설명

A	= Antoine reference state constant (23.1512)	D_{nozzle}	= diameter of the injection nozzle [m]
B	= Antoine Enthalpic coefficient (-3,788.02 K)	d_p	= diameter of droplet [m]
C	= Antoine temperature coefficient (-47.3018 K)	D_{target}	= diameter of the target disk [m]
$C_{p,mix}$	= specific heat of mixture [J/kg-K]	$H_{LT,eq}$	= enthalpy of water at saturation temperature [J/kg]
D	= diffusivity of steam [m ² /s]	H_{VT}	= enthalpy of steam at given temperature [J/kg]
$D_{Cylinder}$	= diameter of the target cylinder [m]	L_{target}	= distance from nozzle tip to target [m]
		m_p	= evaporation mass of single droplet [kg]
		m_{vap}	= mass of vapor that need to condense [kg/m ³]
		P_{sat}	= saturation pressure of vapor [Pa]
		P	= pressure scale [Pa]

[†] 책임저자, 회원, ㈜엘솔텍
crchoi@elsoltec.com

TEL: (031)203-5172 FAX: (031)203-5174

^{*} ㈜엘솔텍

^{**} ㈜아리텍

^{***} 경희대 원자력공학과

Q	= condensation heat [J/m^3]
Sh	= Sherwood number [-]
T_{eq}	= saturation temperature [K]
T_{gas}	= temperature of gas [K]
W_{mix}	= molecular weights of the mixture [g/mole]
W_{vap}	= molecular weights of the steam [g/mole]
X_s	= equilibrium mole fraction at the droplet surface [-]
X_{vap}	= mole fraction in the gas phase [-]
ρ	= density [kg/m^3]
θ_{inc}	= inclination angle of the target disk [$^\circ$]
θ_{tan}	= tangential angle at impinging point of target cylinder [$^\circ$]

1. 서 론

고에너지배관은 온도 200°F 혹은 압력 275psig를 초과하여 운전되는 유체계통 배관으로서 원자력발전소의 경우에 주증기계통, 주급수계통, 화학 및 체적제어 계통, 증기발생기 취출계통, 안전주입계통, 잔열제거계통, 원자로냉각재계통 등이 이에 해당된다¹⁾. 고에너지 배관 파단 시 초기에는 고온/고압 상태의 유체가 순간적으로 방출되어 폭발파(blast wave)가 발생하여 인접 구조물과 기기에 매우 큰 하중을 가할 수 있고, 폭발파의 반향(reflection)에 의한 진동이 발생할 수도 있다. 폭발파 발생 이후에는 파단부를 통한 제트분사 현상이 발생한다. 제트분사에 의한 추력은 손상배관에 추가적인 하중을 가하고, 제트분사 범위 내 구조물, 배관, 기기 등에 제트충돌 하중을 유발한다. 또한, 제트방출 시 발생하는 압력파(pressure wave)의 반사에 의한 제트의 비정상(unsteady) 거동이 유발될 수 있다. 제트의 비정상 거동이 제트 회절 등 불규칙한 분사 패턴을 형성할 경우에는 분사 범위 내의 구조물, 배관, 기기 등의 진동 및 공진을 유발할 수 있다.

원자력발전소 고에너지배관 설계 단계에서는 고에너지배관에서 파단이 발생할 경우, 파단부에서 분출되는 증기제트에 의해 인근 구조물과 기기의 손상이 발생할 수 있으므로²⁾ 기술기준인 ANSI/ANS 58.2에 근거하여 배관 휨(whip), 제트 충돌(jet impingement), 소격실 가압, 환경 및 침수 영향 평가를 수행하여 안전성 기기의 건전성이 유지되도록 법제화되어 있다. 그러나, 2004년에 Wallis, G.³⁾와 Ransom, V.⁴⁾ 등은 배관 파단 평가

에 사용되는 기존 방법의 비보수성을 지적하였고, 2010년에 USNRC는 ANSI/ANS 58.2 '제트충돌영향' 관련 기술기준의 문제점을 지적하며, 해당방법이 비보수적이며, 실제적인 현상을 반영하고 있지 않아 인허가 기준 SRP 3.6.2를 개정하여 제트충돌에 따른 하중의 동적 영향을 평가할 것을 언급하였다⁵⁾.

본 연구팀에서는 고에너지배관 파단 시 폭발파, 증기제트의 정상/비정상 거동과 제트충돌에 의한 주변 구조물, 배관, 기기 등에 미치는 영향 평가를 위한 보다 체계적이고 신뢰성 높은 평가방법을 개발 중이다. 이의 일환으로 고에너지배관 파단 시 상기에 언급된 복잡하고 다양한 물리적 현상들을 해석하기 위한 유동해석과 구조해석 기법을 개발 중이다. 또한, 평가방법의 검증에 의한 고에너지배관 파단에 의한 제트충돌하중 평가 실험장치를 구축 중이다. 본 논문에서는 개발된 증기제트 해석기법을 사용하여 구축 중인 제트충돌하중 실험장치 설계에 필요한 기초자료인 1) 제트거리에 따른 하중변화, 2) 제트충돌각에 따른 하중변화, 3) 구조물 직경에 따른 하중변화, 4) 제트충돌 위치에 따른 하중변화를 해석하였다.

2. 제트충돌 하중평가 실험장치

제트충돌 하중평가를 위하여 구축 중인 실험장치는 크게 증기발생기(steam generator), 증기저장탱크(receiver tank), 제트생성 배관부(steam pipe), 측정부(measuring section)로 구분할 수 있다 (Fig. 1, Fig. 2). 증기발생기 내부에 삽입된 전기히터를 통해 물을 가열하여 증기를 생성하고, 생성된 증기는 증기저장탱크 내에 모이게 된다. 저장탱크 내부 압력이 목표 압력에

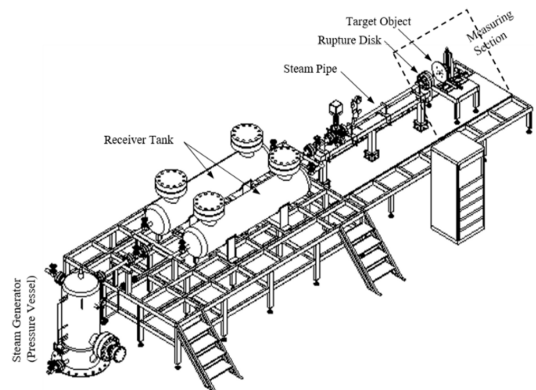


Fig. 1 Configuration of overall experiment facility

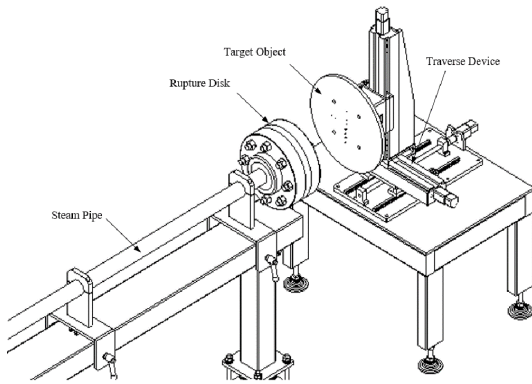


Fig. 2 Configuration of detailed test section

도달하면 제트생성배관부 끝단에 설치된 파열판(rupture disk)이 개방되면서 측정부 측으로 증기를 방출하여 증기제트가 생성된다. 실험 조건에 따라 증기제트는 target object에 부딪힌다.

3. 해석방법 및 조건

3.1 CFD 해석방법

제트충돌 하중평가 실험장치의 제트생성배관부 끝단에 설치된 파열판이 개방되면서 측정부 측으로 증기를 방출하여 증기제트가 생성된다. 증기제트가 공기 중으로 분출되면 압축성유동, 난류유동, 다상유동(multi-phase flow) 및 상변화(기화/응축) 현상 등의 복잡한 물리 현상이 발생한다. 이들 현상을 해석하기 위하여 3차원 비정상 압축성 다상유동 상변화 CFD (computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다.

CFD 해석은 유한체적법(FVM, Finite Volume Method) 기반의 상용 CFD 소프트웨어인 CFX ver.5 (ANSYS, USA)를 사용하였다⁶⁾. 유체거동을 해석하기 위하여 연속방정식과 운동량방정식이 고려되었고, 온도해석을 위하여 에너지방정식이 고려되었다. 공기-증기-액적 혼합물의 거동을 해석하기 위하여 species transport 방정식이 포함되었다. 유체의 난류 거동을 고려하기 위하여 난류모델로 standard k-ε를 사용하였다. 공기와 증기의 압축성효과와 부력효과를 고려하기 위하여 공기는 이상기체로 처리하였고, 증기에 대해서는 IAPWS-IF97 Formulation을 사용하였다. 증기 응축에 의해 생성되는 액적은 비압축성으로 처리하였다. 다상유동 현상을 고려하기 위하여

Eulerian multi-phase model을 적용하였으며, 증기와 액적 간의 상변화를 모사하기 위하여 응축(condensation) 및 기화(evaporation) 모델을 적용하였다⁷⁾.

3.1.1 증기 응축현상 모델링

증기의 응축에 의한 액적 생성을 모델링 하기 위하여 아래 식(1)에 나타난 Antoine 식을 사용하여 격자 내 증기 포화압력(saturation pressure)을 평가하고, CFD 해석에서 계산된 격자 내 증기 분압(vapor partial pressure)을 계산하여 증기분압이 포화압력보다 크면 응축현상이 발생하는 것으로 하여 식(2)와 식(3)에 나타난 열평형방정식을 통해 증기 응축량과 이에 따른 상변화 에너지를 평가하였다. 계산된 증기 응축량을 격자 내 증기에 대해서는 증기 질량 소멸(mass sink)로 처리하였고, 액적에 대해서는 액적의 질량 생성(mass source)으로 처리하였다. 상변화 에너지는 열 발생(heat source)로 처리하였다.

$$P_{sat} = P_{scale} \exp\left(A + \frac{B}{T_{gas} + C}\right) \quad (1)$$

$$m_{vap} = \frac{\rho C_{p,mix} (T_{eq} - T_{gas})}{H_{VT} - H_{LTEq}} \quad (2)$$

$$Q = \rho C_{p,mix} (T_{eq} - T_{gas}) \quad (3)$$

3.1.2 액적 기화현상 모델링

증기의 응축에 의해 생성된 액적이 기화하는 현상을 모델링 하기 위하여 식(1)에 나타난 Antoine 식을 사용하여 격자 내 증기 포화압력(saturation pressure)과 포화온도(saturation temperature)를 평가하고, CFD 해석에서 계산된 격자 내 증기 분압(vapor partial pressure)을 계산하여 증기분압이 포화압력보다 작고, 격자 내 증기의 온도가 포화온도 보다 작으면 기화현상이 발생하는 것으로 간주하였다. 기화현상 발생 시 기화량은 아래 식(4)에 나타난 물질전달 방정식을 통하여 계산하였다. 계산된 기화량을 격자 내 증기에 대해서는 증기 질량 생성(mass source)으로 처리하였고, 액적에 대해서는 액적의 질량 소멸(mass sink)로 처리하였다. 상변화 에너지는 열 소실(heat sink)로 처리하였다.

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho D Sh \frac{W_{vap}}{W_{mix}} \ln\left(\frac{1 - X_s}{1 - X_{vap}}\right) \quad (4)$$

3.2 해석조건

제트충돌 하중평가 실험장치의 제트생성배관부 끝단에 설치된 파열판이 개방되면서 측정부 측으로 증기를 방출하여 증기제트가 생성된다. 본 논문에서는 개발된 증기제트 해석기법을 사용하여 구축 중인 제트충돌하중 실험장치 설계에 필요한 기초자료인 1) 제트거리에 따른 하중변화, 2) 제트충돌각에 따른 하중변화, 3) 구조물 직경에 따른 하중변화, 4) 제트 충돌 위치에 따른 하중변화를 해석하였다.

제트거리에 따른 하중변화와 제트충돌각에 따른 하중변화를 해석하기 위하여 Fig. 3(a)에 나타난 해석모델 I에 대하여 해석을 수행하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 12개의 해석이 수행되었으며, 분사구로부터의 거리에 따른 해석과 제트가 충돌하는 대상물의 기울기에 따른 해석을 수행하였다. 분사노즐 직경(D_{nozzle})은 57.3 mm이고, 충돌 대상의 형태는 원형 디스크 형태이다. 디스크의 직경은 노즐 직경의 6배이고, 두께는 5 mm이다. 증기 분사 속도는 441.1 m/s, 증기 온도는 255.99 °C, 마하수는 0.96, 증기 건도는 0.923, 초기 공기 온도는 25 °C이다.

증기발생기와 같은 대형 기기 혹은 배관과 같은 실린더 형태의 형상에 제트가 충돌하는 경우에 실린더 형상의 직경과 제트충돌 위치에 따른 해석을 수행하여

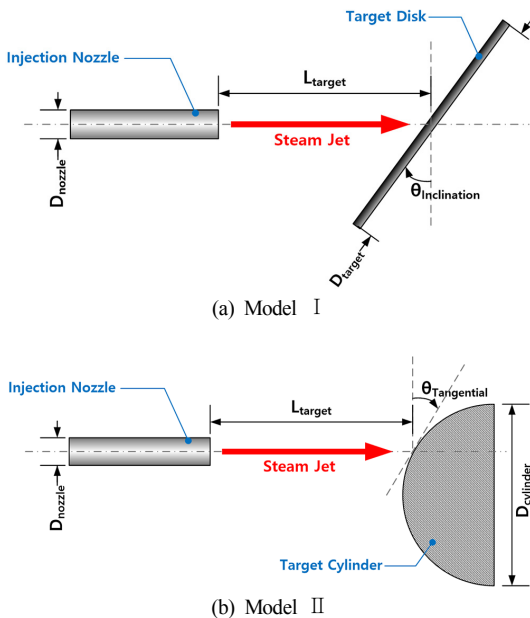


Fig. 3 Description of analysis conditions

하중을 평가하였다. 이들 해석을 위하여 Fig. 3(b)에 나타난 해석모델 II에 대하여 해석을 수행하였다. 해석은 Table 2에 나타난 8개의 조건에 대하여 수행되었다. 분사노즐 직경(D_{nozzle})은 57.3 mm이고, 충돌 대상의 형태는 실린더 형의 반쪽 부분이다. 실린더의 직경은 노즐 직경의 3 ~ 18배이다. 증기 분사 속도는 441.1 m/s, 증기 온도는 255.99 °C, 마하수는 0.96, 증기 건도는 0.923, 초기 공기 온도는 25 °C이다.

CFD 해석 시에 사용된 격자의 수는 대략 100만개이다. CFX는 정상상태해석 시에도 비정상상태 해석과 유사하게 해석을 수행하기에 시간증분값의 설정이 필요하다. 본 해석에 설정된 시간증분값은 0.001 초~0.01초이며, 대략 10초 이내에 수렴된 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에 제시된 결과는 완전히 수렴된 상태의 결과들이다.

Table 1. Analysis conditions for model I

Case #	Distance between nozzle tip and target disk (L_{tar}/D_{noz})	Inclination angle of target disk (θ_{inc})
1-1	3	0°
1-2	6	0°
1-3	9	0°
1-4	12	0°
2-1	3	30°
2-2	6	30°
2-3	9	30°
2-4	12	30°
3-1	3	60°
3-2	6	60°
3-3	9	60°
3-4	12	60°

Table 2. Analysis conditions for model II

Case #	Diameter of target cylinder (D_{cyl}/D_{noz})	Tangential angle at jet impact point (θ_{tan})
4-1	3	0°
5-1	6	0°
6-1	12	0°
6-2	12	30°
6-3	12	60°
7-1	18	0°
7-2	18	30°
7-3	18	60°

4. 해석결과

4.1 증기제트 거리와 충돌각에 따른 하중변화

증기제트의 거리와 충돌각에 따른 하중의 변화를 해석하기 위하여 Fig. 3(a)에 나타낸 해석모델 I 을 사용하여 Table 1에 나타낸 12개의 해석이 수행되었다. 해석을 통하여 얻어진 증기제트의 거리와 충돌각에 따른 속도분포를 Fig. 4 ~ Fig. 6에 나타내었다.

실험장치 구축 시 적절한 target disk의 크기를 선정하기 위하여 해석된 결과들을 바탕으로 각 해석 경우에서 Fig 7(a)에 나타낸 것과 같이 하중평가 면적에 따른 하중을 계산하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. Target disk에 작용하는 하중은 직경 $5D_{noz}$ 이상인 영역에서 대부분 유사한 값에 수렴하는 경향을 보여주었다. 이런 경향을 바탕으로 증기제트 충돌하중을 평가하기 위한 target disk의 직경을 $6D_{noz}$ 로 선정하였다.

제트가 분사되는 노즐 팁으로부터 target disk에 이르는 거리에 따른 target disk에 작용하는 하중변화를 Fig. 8에 나타내었다. 노즐 팁으로부터 target disk 간의 거리가 $3D_{noz} \sim 6D_{noz}$ 인 구간과 $6D_{noz}$ 이상인 구간에서 다른 경향성을 보였다. $3D_{noz} \sim 6D_{noz}$ 인 경우, 거리가 증가함에 따라 target disk가 받는 하중이 증가하는데 비하여, $6D_{noz}$ 이상인 경우에서는 거리가 증가함에 따라 하중이 감소하는 경향을 보여 주었다. 향후 실험 시 $12D_{noz}$ 이상의 위치에서도 실험을 수행하여 결과를 함께 검토할 필요가 있어 보인다.

Target disk의 경사각에 따라서 target disk가 받는 하중의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. Target disk의 경사각이 증가함에 따라 target disk가 받는 하중이 크게 감소하는 것으로 평가되었다. 경사각이 30° 인 경우, 경사각이 없는 경우에 비하여, 하중이 11% ~ 19% 감소하였다. 경사각이 60° 인 경우, 경사각이 없는 경우에 비하여, 하중이 49% ~ 53% 감소하는 결과를

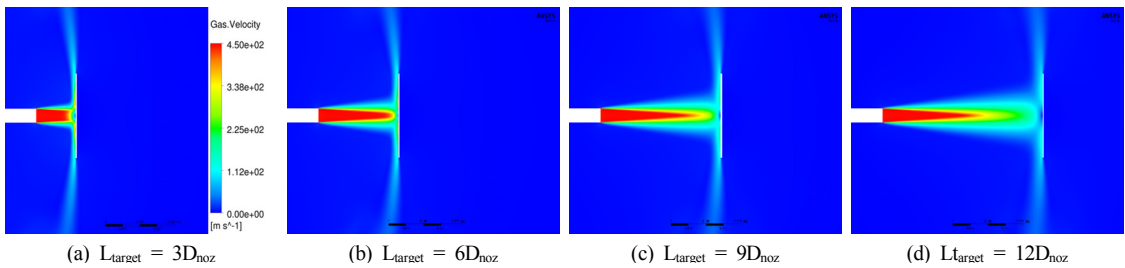


Fig. 4 Velocity - Model I (Inclination Angle 0°)

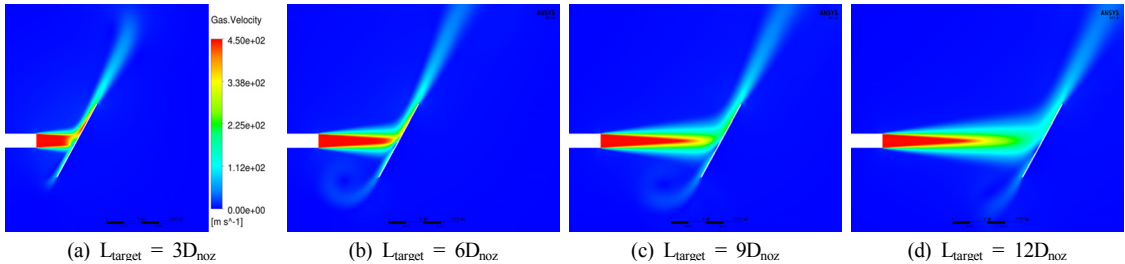


Fig. 5 Velocity - Model I (Inclination Angle 30°)

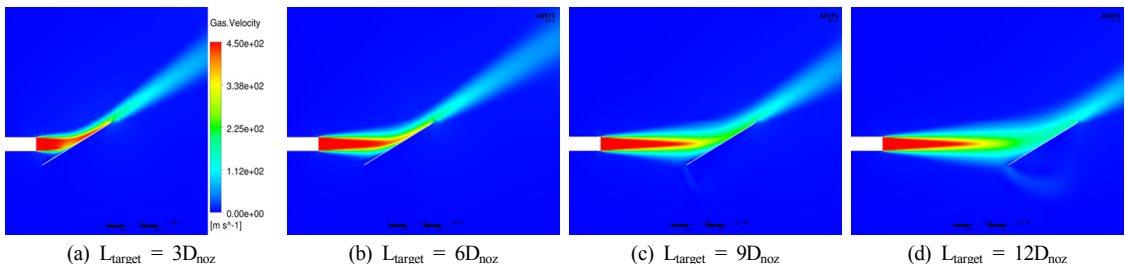
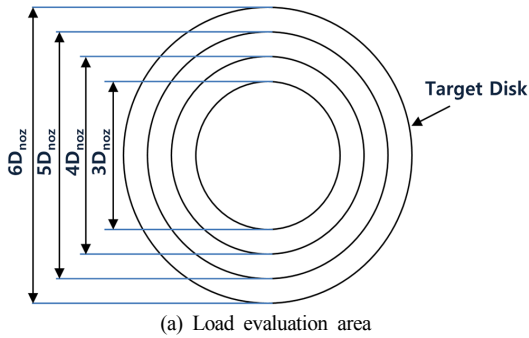
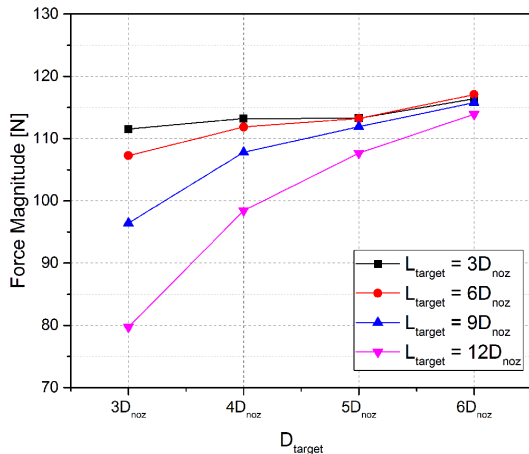


Fig. 6 Velocity - Model I (Inclination Angle 60°)

보여주었다. 그림에 참고로 0°인 경우의 평균 하중을 사용하여 코사인 곡선을 추가하였다. 경사각에 따른 하중 변화는 이 곡선과 유사하게 거동함을 볼 수 있다.



(a) Load evaluation area



(b) Load variation

Fig. 7 Load variation with respect to load calculation area

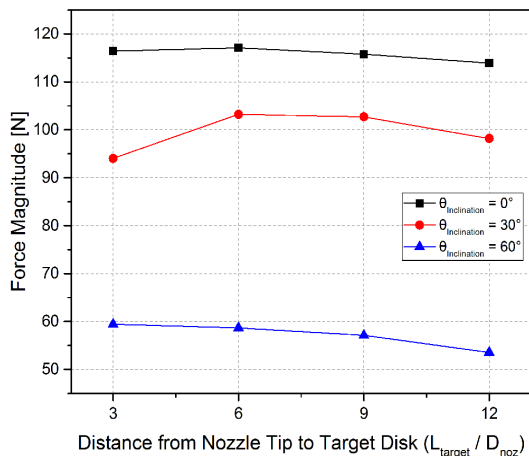


Fig. 8 Load variation with respect to jet distance

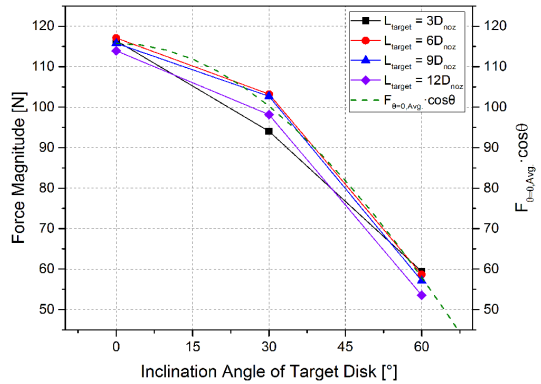


Fig. 9 Load variation with respect to inclination angle

4.2 구조물 직경과 제트충돌각에 따른 하중변화

증기발생기와 같은 대형 기기 혹은 배관과 같은 실린더 형태의 형상에 제트가 충돌하는 경우에 실린더 형상의 직경과 제트충돌 위치에 따른 해석을 수행하여 하중을 평가하였다. 해석은 Fig. 3(b)에 나타난 해석모델 II에 대하여 Table 2에 나타난 해석조건 하에서 8개의 해석을 수행하였다.

각 해석 경우의 속도분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 제트 충돌 대상물의 형상이 현재 고려된 것과 같이 단면이 반원 형상인 경우와 실제 원형 형상인 경우에 제트 충돌 배면의 고려에 따른 유동장과 작용 하중에 차이가 있을 수 있으나, 제트 충돌면에서의 하중이 상대적으로 크므로 이에 따른 차이는 무시할 만한 수준으로 생각된다.

Target cylinder의 직경에 따라서 cylinder가 받는 하중의 변화를 Fig. 12에 나타내었다. Cylinder의 직경이 증가할수록 cylinder가 받는 하중은 증가하는 경향을 보인다. θ_{tan}=0° 인 경우, cylinder 직경이 증가할수록 target이 disk인 경우에 근접한 결과를 보일 것으로 예상된다.

Target cylinder에 제트가 충돌하는 지점에서의 tangential angle에 따라서 cylinder가 받는 하중의 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 충돌 지점에서의 제트와 cylinder가 이루는 tangential angle이 증가할수록 cylinder가 받는 하중은 감소하는 것으로 평가되었다. 그림에 참고로 0°인 경우의 평균 하중을 사용하여 코사인 곡선을 추가하였다. 경사각에 따른 하중 변화는 충돌면의 형상이 곡면임에 따라 충돌각이 커짐에 따라 이 곡선과 차이가 증가하는 거동을 보여 준다.

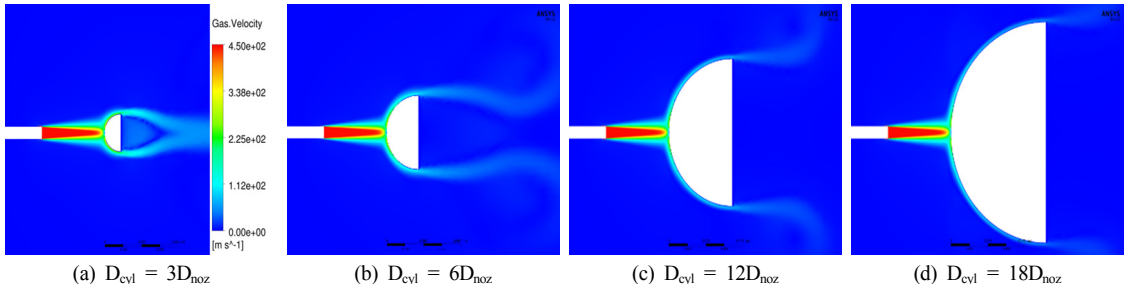


Fig. 10 Velocity – Model II

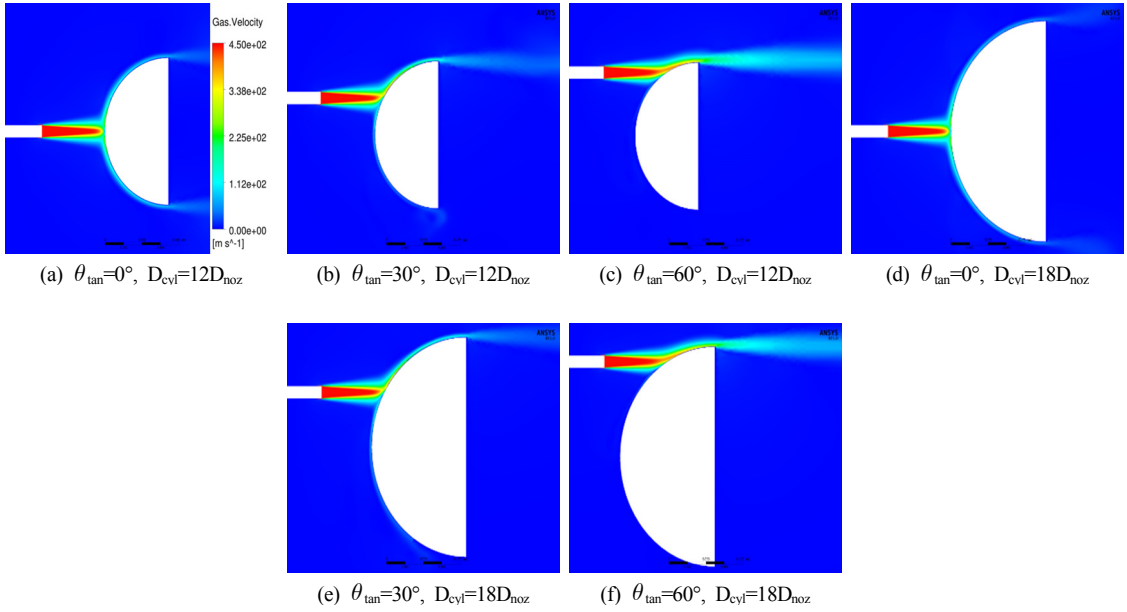


Fig. 11 Velocity – Model II

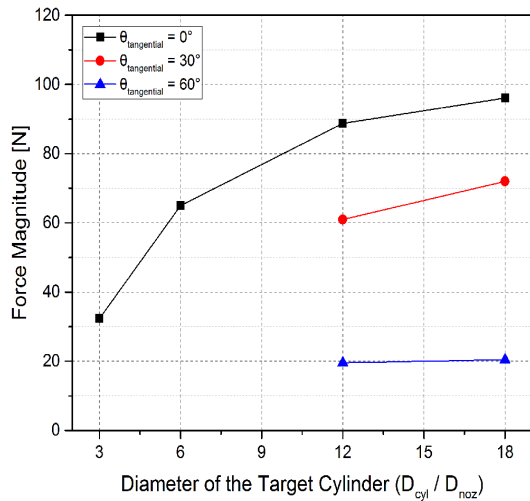


Fig. 12 Load variation with respect to cylinder diameter

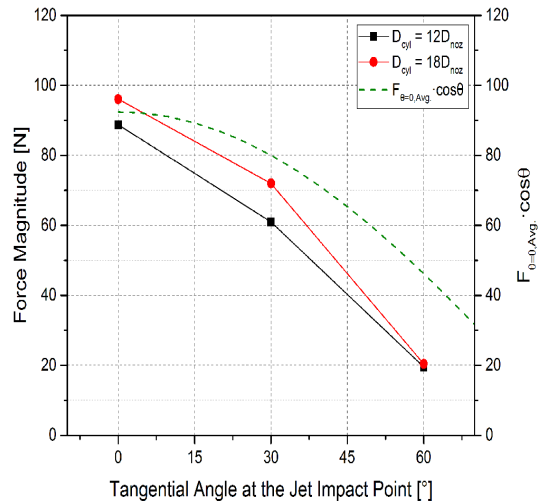


Fig. 13 Load variation with respect to jet impact angle

5. 결 론

본 연구에서는 고에너지배관 파단 시 폭발파, 증기 제트의 정상/비정상 거동과 제트충돌(jet impingement)에 의한 주변 구조물, 배관, 기기 등에 미치는 영향 평가를 위한 보다 체계적이고 신뢰성 높은 평가방법을 개발 중이다. 이 연구의 일환으로 고에너지배관 파단 시 복잡하고 다양한 물리적 현상들을 해석하기 위한 유동해석과 구조해석 기법을 개발 중 개발된 증기제트 해석기법을 사용하여 평가방법의 검증을 위해 구축 중에 있다. 고에너지배관 파단에 의한 제트충돌하중 평가 실험장치의 설계에 필요한 기초자료인 1) 제트거리에 따른 하중변화, 2) 제트충돌각에 따른 하중변화, 3) 구조물 직경에 따른 하중변화, 4) 제트충돌 위치에 따른 하중변화를 해석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 시험장치 구축에 직접적으로 활용할 예정이다.

본 연구에서 수행된 결과들을 종합적으로 보면 고압배관 파단 시, 증기제트가 공기 중으로 분출되는 과정에서는 압축성유동, 난류유동, 다상유동 및 상변화(기화/응축) 현상 등의 복잡한 물리 현상이 발생하는데, 현재 구축된 해석방법은 이러한 복합 열/유동 현상을 적절하게 잘 모사하는 것으로 사료되며, 향후 이들 물리적인 현상 해석에 대한 추가적인 검토를 실험과 병행하여 수행할 예정이다.

향후 연구에서는 본 연구를 통해 구축된 해석방법론을 이용하여 제트충돌하중 실험장치의 설계자료 구축을 위한 CFD 해석을 추가적으로 수행하고, 이를 통해 실험장치의 설계 타당성, 계측기의 설치 위치 및 계측범위 등을 평가할 예정이다. 상기의 과정을 통해 구축된 실험장치를 이용한 실험이 완료되면, 반대로 실험결과를 바탕으로 제트충돌하중 해석 방법론의 타당성 평가가 수행될 예정이다. 또한, 제

트충돌하중 해석방법론을 적용하여 다양한 파라미터를 고려한 제트충돌하중 평가를 수행하고, 해석 결과를 기반으로 제트충돌하중을 평가하기 위한 상관식을 도출하고, 상관식을 적용하여 원전 내 제트충돌하중을 평가하기 위한 평가 방법론을 구축하고, 평가 해석을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20151520101080)

참고문헌

- (1) 김원태, 최청열, 장윤석, 장훈, 오세홍, 김승현, 2015, “고에너지배관파단 시 제트하중 및 동적 구조건전성 평가방법 개발,” *KPVP 2015년도 연차학술대회 요약논문집*, pp. 61~62.
- (2) Schnieder, E., Ballew, D. and Gurecky, W., 2012, “*Calibration and Benchmarking of Single and Two-Phase Jet CFD Model*,” The University of Texas at Austin.
- (3) Wallis, G., 2004, *The ANSI/ANS Standard 58.2-1988: Two Phase Jet Model*.
- (4) Ransom, V., 2004, *Comments on GSI-191 Models for Debris Generation*, 9/14/2004.
- (5) USNRC, 2007, “*Determination of Rupture Locations and Dynamics Effects Associated with the Postulated Rupture of Piping*, Rev. 2, Standard Review Plan 3.6.2.,” *NUREG-0800*.
- (6) ANSYS CFX, *Theory guide*.
- (7) 최대경, 오세홍, 김원태, 장윤석, 최청열, 2016, “고에너지배관 파단에 의한 제트충돌하중 평가 실험을 위한 예비 CFD 해석,” *KPVP 2016년도 연차학술대회 요약논문집*, pp. 31~32.