

순산소와 미분탄 가스 연소에 의한 용융로 풍구 선단부 손상 모델링: 폭굉 압력파에 의한 영향

곽민철* · 권기웅** · 이상호** · 여재익*
* 서울대학교 기계항공공학부, ** POSCO 기술 연구소

Modeling of Damage Caused to Injectors Used in Pulverized - Coal-Oxygen - Combustion Furnace

Min-cheol Gwak*, Ki-woong Kwon**, Sang-ho Lee**, and Jai-ick Yoh**

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,
** POSCO R&D Center.

(Received November 2, 2009 ; Revised August 25, 2010 ; Accepted August 27, 2010)

Key Words: Oxy-Fuel Combustion(순산소 연소), DDT(폭연에서 폭굉으로 천이), Detonation(폭굉), Hydrocode(하이드로코드)

초록: 본 연구에서는 친환경 연소로서 순산소 연소의 내제한 문제점에 대하여 논의하고 있다. 그 중 DDT의 발전에 의해 발생하는 강한 압력 충격파에 의한 구조물의 손상에 대한 내용을 다루고 있다. 이를 위하여 DDT에 대해 인식시키기 위하여 기본적인 개념과 더불어 이를 발전시키는 요인들에 대해서 논의해 보았다. 그리고 순산소 연소의 DDT 발생에 의한 압력과 생성과 더불어 이에 따른 구조물 손상을 설명하기 위하여 순산소 연소를 사용하는 친환경 용융로(미분탄과 순산소 연소를 사용한 용융로) 내부의 풍구 손상을 AUTODYN hydrocode를 이용하여 모델링하였다. 이를 통하여 순산소 연소에 내제된 위험성에 대하여 살펴보았다.

Abstract: The deflagration-to-detonation transition (DDT) causes a strong pressure wave that can adversely affect surrounding structures. The pressure generated by multiple detonative pulses is strong enough to cause metal surface erosion and chipping of the edges of bulk structures. In this study, we investigate the damage caused by the DDT phenomenon and perform hydrocode simulations to evaluate the structural damage caused to a metallic pulverized-coal injector used in a pulverized-coal-oxygen combustion furnace. The experimental conditions are selected in order to accurately model the damage caused to metal injectors that are exposed to multiple DDT pulses.

- 기호설명 -

- ρ : 밀도
- P : 압력
- Q : 에너지 방출량
- v_i : 속도 벡터
- f_i : 외력
- u : 속도
- H : 엔탈피
- E_c : 점화 에너지
- q : 임의의 점성력
- S_{ij} : 스트레스 텐서

1. 서론

기술이 발전하고 산업이 선진화됨에 따라 환경에 대한 관심과 인식이 크게 높아지고 있다. 특히 2005년 교토 의정서가 공식적으로 발표되면서 친환경에 대한 인식이 다시금 고무되고 있는데, 이러한 관점에서 순산소 연소는 공기를 산화제로 사용한 연소와는 다르게 많은 이점을 가지고 있기에 다양한 연구가 진행되고 있다.^(1,2) 순산소 연소는 대기 환경오염 원인 중 하나인 NO_x의 발생을 줄일 수 있다는 이점 이외에도 높은 발열량을 바탕으로 강한 화력을 낼 수 있다. 하지만 순산소 연소를 사용할 경우 많은 이점들이 있는 반면 간과하지 말아야 할 문제

† Corresponding Author, jjyoh@snu.ac.kr

점들이 있는데 본 연구에서는 공기 연소일 경우에는 발생하지 않으나 순산소 연소일 경우에 발생할 수 있는 문제에 대해서 논의한다. 즉, DDT(Deflagration to Detonation Transition)에 의해 발전하는 폭굉의 강한 압력파가 구조물을 손상 시키는 현상에 대한 것이다. 일반적인 예로서 폭굉에 의해 발생하는 구조물의 손상은 자동차 엔진의 노킹을 들 수 있다. 노킹은 자동차 실린더 내에서 정상 연소 현상과는 달리 화염면 전방의 조기 점화에 의해 생성되는 압력파에 의한 실린더 밸브 및 피스톤에 손상을 입히는 현상을 말한다. 아래의 Fig. 1은 실린더 내 노킹에 의해 발생할 수 있는 손상된 밸브와 피스톤의 사진이다. 노킹과 같은 원리로서 폭굉 압력파에 의한 피해는 DDT 발전 조건만 충족된다면 연소가 존재하는 어디에서나 발생할 수 있다. 또한 순산소 연소의 경우는 연소 온도 및 화학 조성을 비롯한 여러 측면에서 DDT로의 발전에 많은 유리한 점을 가지고 있기 때문에 공기 연소에 비해 더욱 위험하다. 실제 순산소 연소에서 구조물 손상을 확인하기 위하여 아래의 Fig. 2와 같은 순산소 연소를 이용하는 용융로에서의 풍구 손상을 살펴보면, 그림에서 확인할 수 있듯이 동일한 연소 환경에서도 손상의 정도가 다르게 나타난다. 이는 DDT 발전의 정도가 연소 환경의 변화에 따라 달라지기 때문이다. 이러한 불규칙한 DDT 현상을 규명하기 위하여 우선 기본적인 DDT에 대한 설명(정의, 발생 조건, 영향)을 하고 폭굉으로 발전하였을 경우 발생하는 강한 압력파에 의해 손상되는 풍구를 hydrocode를 사용하여 모델링하였다.



(a) Damaged valve (b) Damaged piston
Fig. 1 Picture of damaged car cylinder



(a) Mild damage case (b) Serious damage case
Fig. 2 Comparison of damaged injector fronts

2. 개념 설명

본 연구에서 다루고자 하는 폭굉 압력파에 의한 손상을 설명하기 위해서 우선적으로 폭굉의 의미 및 발전 조건 그리고 그에 따른 영향에 대한 설명이 필요하다. 그래서 본 장에서는 기본적인 DDT 및 폭굉에 대한 설명을 하였다.

2.1 2가지 화염 전파 모드 설명

화염 전파 현상은 크게 2가지 모드로 나눌 수 있는데 이는 폭연과 폭굉이다. 정상 상태의 아음속 화염을 폭연이라고 한다면 비정상 상태의 초음속 화염을 폭굉이라고 한다. 폭연과 폭굉을 구분은 아래 Fig. 3과 같은 R-H curve를 통하여 쉽게 확인할 수 있다.

Fig. 3에서의 점들은 Table 1과 같이 간략하게 설명할 수 있다.

일반적으로 CJ detonation point의 위쪽 구간과 CJ deflagration point 아래 구간을 각각 폭굉과 폭연이라고 한다. 그리고 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 폭연과 폭굉은 모드 자체가 크게 다른 연소 현상을 나타내게 된다. 폭굉의 경우는 폭연과는 달리 강한 압력 상승을 동반하게 되고 높은 속도의 증가를 가져오게 된다. 폭연에서 폭굉으로의

Table 1 Explanation of R-H Curve

Upper of the point J	Strong detonation
Point J	CJ detonation
Between points J and V	weak detonation
Between points P and C	strong deflagration
Point C	CJ deflagration
bottom of the point C	weak deflagration

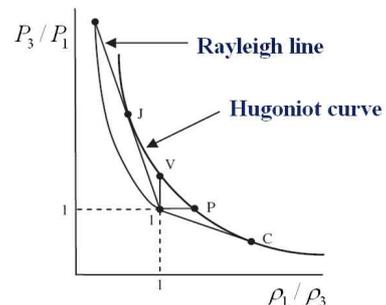
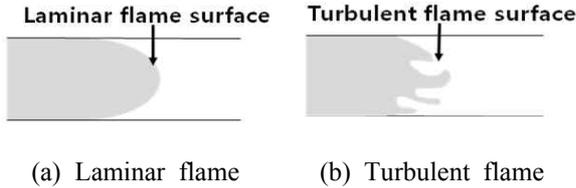


Fig. 3 R-H (Rankine-Hugoniot) Curve



(a) Laminar flame (b) Turbulent flame
Fig. 4 Comparison of laminar and turbulent flame surface

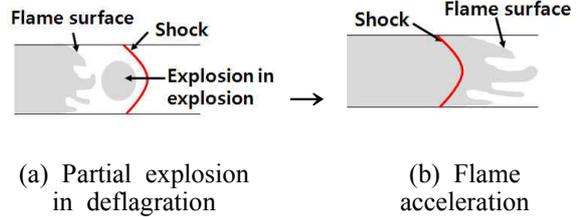
연소 모드 변화를 DDT라고 하는데 이러한 DDT가 발생하기 위해서는 아래 설명할 몇 가지 조건이 충족되어야 한다.

2.2 DDT의 발생 조건

화염 전파 모드가 폭연에서 폭굉으로 발전하기 위해서는 화염 가속(FA, Flame Acceleration) 과정이 필요하다. 화염 가속 과정은 turbulent flame에 의한 화염면 증가, explosion in explosion, Taylor interface instability 등이 원인으로 서로 복합적으로 작용하여 DDT로 발전시키는 것으로 알려져 있다.⁽³⁻⁸⁾ 본 절에서는 화염 가속을 발생시키는 몇 가지 원인에 대하여 설명할 것인데, 우선 turbulent flame에 의한 화염면 증가를 살펴보면 아래 Fig. 4와 같이 층류 화염면에 비해서 난류 화염면이 더 넓은 것을 확인할 수 있다.

여기서 화염면은 열전달과 더불어 반응 면적의 척도를 제공하는데 이러한 화염면의 증가는 연소 반응에 의해 발생하는 열 에너지가 반응물에 더 많이 전달될 수 있음을 의미하고 이로 인하여 더욱 활발한 연소 반응이 발생한다. 또한 난류 화염에 의한 화염면 증가는 추후에 DDT 발생의 원인으로 설명될 explosion in explosion이나 장애물에 의한 화염 가속 과정 촉진에도 유사한 원리로 영향을 준다. 다음으로 Explosion in explosion에 의한 화염 가속을 살펴보면 다음과 같다. 우선, 화염 전파 현상을 보았을 때 앞서 언급하였듯이 폭굉의 경우는 초음속 화염이다. 즉, 폭굉은 압력파 전방부에 화염이 위치한다(Fig. 5(b)). 이와는 반대로 폭연은 아음속 화염으로서 압력파 후방부에 화염이 위치하게 된다(Fig. 5(a)). 즉, DDT란 화염이 압력파를 앞지르게 되는 현상이다.

여기서 explosion in explosion은 위의 Fig. 6과 같은 원리로서 화염이 존재하는 거의 전 범위가 폭발(점화) 가능 영역이라고 할 경우 화염면 전방 충격파와 화염면 사이에서 국소 폭발이 발생하여 화염면이 충격파를 앞질러 나가는 현상을 유발한



(a) Partial explosion in deflagration (b) Flame acceleration
Fig. 5 Flame acceleration due to explosion in explosion

다. 이러한 현상은 대체로 높은 온도와 압력의 관이나 기타 밀폐된 공간에서 주로 발생되게 되며 최근 좁은 관(mm단위)에서의 DDT 발생의 주요 원인으로 explosion in explosion이 실험적으로 연구되고 있다.⁽⁴⁾ 마지막으로 Taylor interface instability에 의한 가속을 살펴보면 다음과 같다. 일반적으로 Rayleigh-Taylor instability는 밀도 차에 의해 혼합되는 현상을 말하는데 Taylor interface instability는 이와 같은 원리로서 연소 가스와 미연소 가스의 밀도 차(거의 7배 정도)에 의한 혼합이 반응 면적을 증가시켜 연소 반응이 촉진된다. 또한 장애물이나 구슬과 같은 알갱이로 채워져 공극을 가지는 packed bed에 의해 화염 보다 앞서 가는 압력파가 반사되었을 경우 반사압력파와 화염과의 충돌에 의해서도 DDT로 발전할 수 있으며 이에 대해서도 많은 연구가 이루어졌다.⁽⁵⁻⁸⁾

친환경 연소인 순산소 연소의 경우 일반 공기 연소보다 앞서 언급한 여러 측면에서 DDT가 보다 잘 이루어져 폭굉에 의한 강한 압력파의 피해가 발생할 가능성이 높다.⁽⁹⁾ 그래서 다음 장에서는 순산소 연소의 폭굉 압력파에 의해 손상될 수 있는 친환경 용융로의 풍구를 예로 들어 확인하였다.

3. 손상 모델링

폭굉의 높은 압력을 출력으로 사용하는 PDE (Pulse Detonation Engine) 연소의 경우는 폭굉이 보다 잘 발생할 수 있는 조건을 만들어야 하지만 일반적인 연소 현상에서 원하지 않는 폭굉의 발생은 주변 구조물의 손상을 발생시킬 수 있다. 본 장에서는 순산소 연소를 이용하는 친환경 용융로의 풍구 손상을 예로 들어 폭굉에 의한 구조물 손상을 설명한다. 이를 위하여 우선 용융로 내부 환경에 대해서 설명하고 이러한 환경이 DDT로 발전할 수 있는지에 대해서 살펴본다. 이

를 바탕으로 hydrocode를 사용하여 폭굉 압력파에 의한 풍구 손상을 모델링하였다.

3.1 친환경 용융로의 환경

친환경 용융로는 순산소 연소를 사용하여 운용된다. 아래의 Fig. 6은 용융로 내부를 간략히 보여주고 있다.

위의 그림에서 풍구(tuyeres blast, injector)를 통하여 들어온 미분탄과 산소는 연소대(raceway)에서 연소 반응을 일으키게 된다. 연소대 환경은 아래 Table 2를 통하여 확인 할 수 있는데, 순산소 연소를 이용하는 용융로와 공기 연소를 이용하는 용융로의 비교를 통하여 차이점을 확인하면 순산소 연소일 경우 높은 압력과 화염 온도를 가지게 된다. 그리고 풍구의 손상 자체가 공기 연소일 경우에는 발생하지 않지만 순산소 연소일 경우에 발생한다는 점을 통하여 순산소 연소의 위험성을 지적할 수 있다. 본 연구에서는 이 손상의 원인을 DDT에 의한 강한 폭굉 압력파로 보고 이에 대한 모델링을 수행하였다. 모델링의 내용을 설명하기에 앞서 순산소 연소대 내의 환경과 이전에 지적한 DDT 발전 조건을 비교하면 아래의 Table 3과 같이 3가지 조건에 대해 순산소 연소대 내에서의 DDT 발생 가능성을 확인할 있는데 이는 충분히 간헐적으로 DDT가 발생하여 강한 폭굉 압력파를 전파할 수 있음을 의미한다.

노 내 미분탄과 순산소 연소에서 DDT가 발생하여 강한 폭굉 압력파가 전파될 경우, 이에 따른 전파 속도와 압력 상승비는 각각 대략 1.67km/s와 25이다.⁽¹⁰⁾ 이를 바탕으로 hydrocode를 이용하여 압력파에 의한 풍구 손상 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 풍구 손상의 주요 원

Table 2 Comparison of air and oxygen combustion environment

Condition		Air combustion	Oxygen combustion
Ventilation condition	Oxidizer	Air	Oxygen
	Tuyere flux	5500Nm ³ /h	2300Nm ³ /h
	Tuyere velocity	250m/s	190m/s
	Temperature	1200℃	21℃
Pressure		3.2bar	4.8bar
Flame temperature		2200℃	3100℃

인이 열적 하중에 있는 상태에서 DDT 발생에 의한 폭굉 압력파로 보았기 때문에 화염에 대한 해석(유동장, 화학 반응)을 생략하고 압력파의 전파 속도 및 압력 상승비로 표현되는 압력파의 강도에 초점을 맞추어 모델링을 수행하였다.

3.2 모델링 설정

Hydrocode로서 AUTODYN을 이용하여 충격에 의한 풍구 손상 모델링을 하기 위하여 우선 풍구의 손상을 모사하기 위한 상태 방정식과 강성 모델을 정의하였다. 다음으로 폭굉에 의해 발생하는 압력파의 에너지와 전파 속도를 결정하고 이를 통하여 계산을 수행하였다.

3.2.1 풍구 모델링

본 연구에서 사용하는 AUTODYN hydrocode의 지배 방정식은 아래의 식 (1)-(5)와 같다. 이는 각각 질량, 운동량, 에너지, 스트레스, 그리고 상태 방정식이다.⁽¹¹⁾

Table 3 DDT possibilities in raceway

Condition of DDT occurrence	Environment of raceway
Turbulent flame	Strong turbulent flame products due to fast tuyere velocity(high Re) and mixing of pulverized coal.
Explosion in explosion	A whole raceway region is auto-ignition region due to high temperature and pressure. So local explosion (explosion in explosion) occurrence is possible.
Taylor interface instability	The mixing of flame and contact with reflection shock by deadman as packed bed is possible.

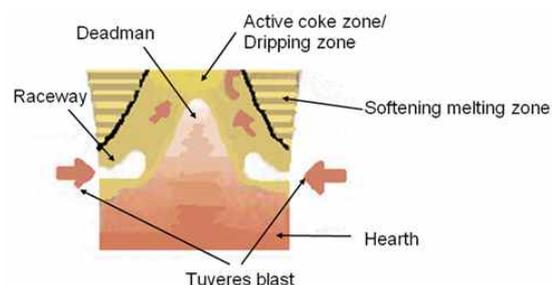


Fig. 6 Schematic of inside of the furnace

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ji}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \phi + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - P \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + S_{ji} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - \delta_{ij} P \quad (4)$$

$$P = P(\rho, e) \quad (5)$$

$$Y = Y_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n \times \left[1 + \left(\frac{Y_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (7-1)$$

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{G_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (7-2)$$

$$Y_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n = Y_{MAX}, \frac{1}{Y_0} Y_p)_0 \approx \frac{1}{G_0} G_p)_0 \quad (7-3)$$

여기서 β , n 은 가공경화 변수이고 물성치 및 변수는 아래 Table 5와 같다.

3.2.2 초기 조건

풍구에 대한 모델을 결정한 후에 아래 Fig. 7과 같은 초기 조건을 설정하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 임의의 폭발 시작 지점으로 정의하고 이 부분에 1.67km/s의 속도와 120bar의 압력으로 전파되는 압력파를 설정하였다. 그리고 주위를 온도 1000℃, 압력 4.8bar로 설정하였으며 마지막으로 풍구의 중앙에서는 190m/s의 산소가 나온다고 설정한 후 계산을 수행하였다. 그림에서 Point (1)-(6)은 각 지점에서의 손상 정도를 확인하기 위한 유효 소성 변형(effective plastic strain)을 구하기 위하여 설정하였다.

위의 지배 방정식을 통하여 구조물의 변형을 해석할 수 있는데 이 때 현재 본 연구에서 고려하는 문제를 해석하기 위해서는 우선적으로 손상되는 풍구에 대한 상태 방정식과 강성 모델을 결정해야 한다. 풍구 모델의 상태 방정식으로 Tillotson 상태 방정식을 강성 모델은 Steinberg Guinan 강성 모델을 사용하였다. Tillotson 상태 방정식을 사용한 이유는 압력파에 의한 변형 및 삭마 현상을 고려하기 위해서이고 Steinberg Guinan 강성 모델을 사용한 이유는 전단 계수 상에 압력의 영향을 고려하기 위해서이다. 우선, Tillotson 상태 방정식을 간단히 살펴보면 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.⁽¹²⁾

$$P_1 = \left[a + b \left(1 + \frac{e}{e_0 \eta^2} \right) \right] \eta \rho_0 e + A \psi + B \psi^2 \quad (\eta > 1) \quad (6-1)$$

$$P_2 = \left[a + b \left(1 + \frac{e}{e_0 \eta^2} \right) \right] \eta \rho_0 e + A \psi \quad (\eta < 1) \quad (6-2)$$

여기서, $\eta = \rho / \rho_0$ 이고 $\psi = \eta - 1$ 이며 식에서의 물성치 및 변수들은 아래의 Table 4와 같이 모델링하였다.

다음으로 Steinberg Guinan 강성 모델은 아래의 식 (7)과 같이 계산된다.

Table 4 Parameters of Tillotson EOS

Density	2.97 [g/cm ³]
A	7.499999e+7 [kPa]
B	6.5e+7 [kPa]
a	0.5
b	1.63
e ₀	5e+6 [kPa]

Table 5 Parameters of Steinberg Guinan strength model

Shear modulus	2.67e+7 [kPa]
Yield stress	4.2e+5 [kPa]
G _p	1.741
G _T	-1.645e+4 [kPa]
Y _p	0.02738
Melting temperature	1.22e+3 [K]

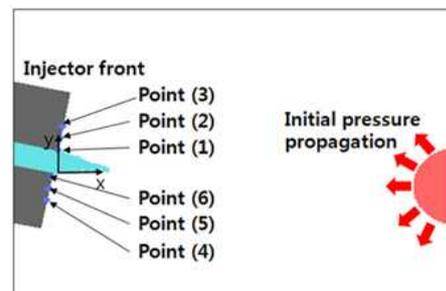


Fig. 7 Initial setup of DDT simulation Six strain gauges are attached at six points on tuyere inlet. Computational domain is 45 cm by 30 cm

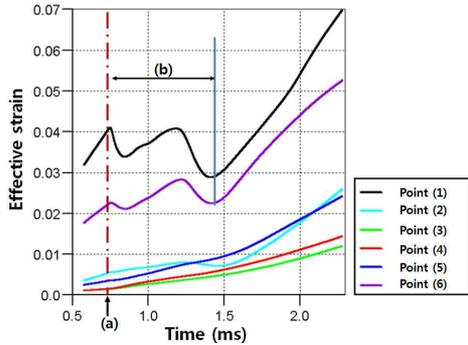


Fig. 8 Time history of the effective plastic strain due to first pulse applied at time (a)

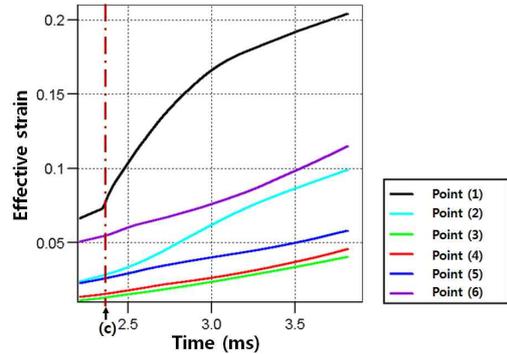


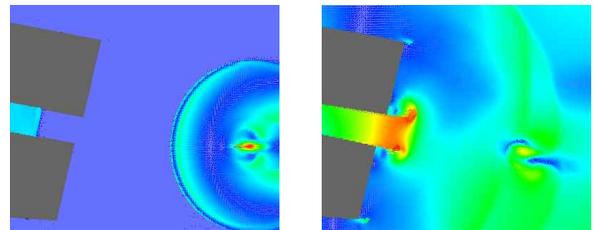
Fig. 9 Time history of the effective plastic strain due to second pulse applied at time (c)

3.3 모델링 결과

위의 설정에 따라 폭발 시작 지점에서 펄스 압력파를 풍구 선단 쪽으로 보내 풍구의 손상을 모델링하였다. 우선, 펄스 압력파에 따른 각 point에서의 시간에 따른 유효 변형을 살펴 보면 아래의 Fig. 8과 같다. 여기서 (a)는 펄스 압력파가 풍구 선단과 부딪치면서 유효 변형이 급격히 증가하는 시간을 보여준다. 그리고 (b)라고 표시된 영역에서 산소가 나오는 송풍구 근처 point (1), (6)의 유효 변형이 시간에 따라 증가하였다가 감소하는 변화가 발생하는데 이는 압력파와 풍구에서 나오는 산소의 충돌에 의하여 유효 소성 변형의 미소한 변화가 발생하기 때문이다. 또한 point (1), (6)에서 가장 높은 유효 변형을 겪게 되는데 이는 풍구 선단, 특히 중앙 부분에 온도가 높아 열적 유화 (thermal softening)가 많이 발생하기 때문이며 또한 풍구를 모델링한 Tillotson EOS에서 압력이 에너지 즉, 온도에 직접적으로 영향을 받기 때문이다.

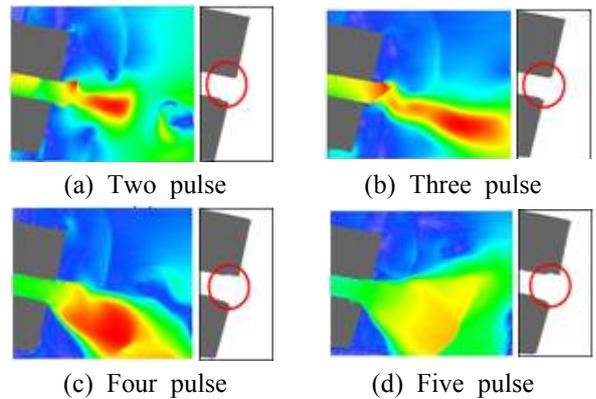
다음으로 추가적인 펄스 압력파에 의한 유효 변형에 대해 살펴보면 아래의 Fig. 9와 같이 시간에 따른 유효 변형을 확인할 수 있다. 그림에서 시간 (c)는 추가되는 펄스 압력파가 풍구 선단에 부딪치는 시간이다. 시간 (c) 이후에 풍구 중앙 지점들, 특히 point (1)에서 급격한 유효 변형의 증가를 확인할 수 있다.

즉, 펄스 압력파의 횟수 증가는 유효 변형을 가속시키며 이에 따라 풍구 손상을 유발하게 한다. 이를 확인하기 위하여 6회의 펄스 압력파의 전파에 따른 풍구 손상을 모델링하였다. Figs. 10과 11은 각각 첫 번째 펄스 압력파의 전파와 2,3,4,5 회 펄스 압력파의 전파에 의한 손상을 보여주고 있다. 우선 Fig. 10에서 Fig. 10(a)는 초기



(a) Propagation of initial pressure wave (b) Reflection of pressure wave on injector head

Fig. 10 The snapshots of propagation and reflection of first pulse pressure wave



(a) Two pulse (b) Three pulse (c) Four pulse (d) Five pulse
Fig.11 Sequence of DDT pressure wave and injector structure interaction showing repeated impingement on the metal front

펄스 압력파가 풍구 선단을 향해 전파하는 유동장을 보여주고 있으며 Fig. 10(b)는 펄스 압력파가 전파되어 풍구 선단에 부딪쳐 반사되는 반사 압력파의 유동장을 보여주고 있다. 이러한 과정을 거치면서 풍구 선단이 압력을 받아 손상이 발생하는 것이다. Fig. 11(a)~(d)는 각각 2~5회의 펄스 압력파의 전파 후 유동장(좌측)과 이에 따른 풍구 손상 모습(우측)을 보여주고 있다.

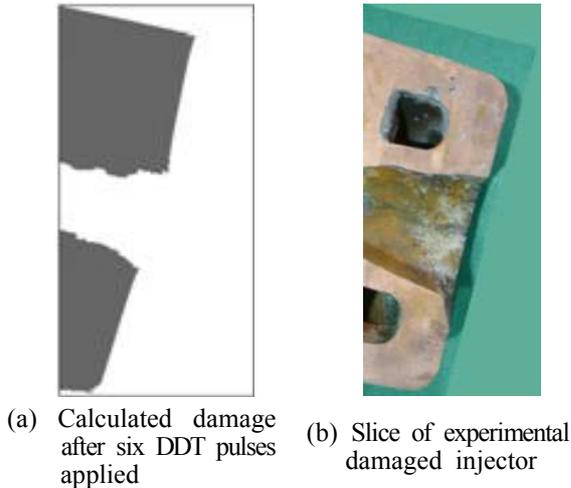


Fig. 12 Comparison of numerical and experimental injector damage

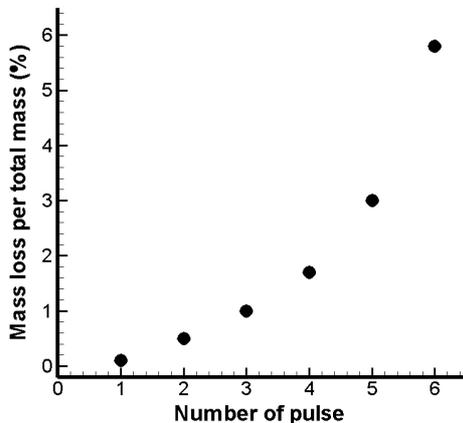


Fig. 13 Mass loss of injector versus number of shock pulses

이러한 과정을 통하여 6회의 펄스 압력파에 의한 풍구 손상(Fig. 12(a))을 실제 손상된 풍구(Fig. 12(b))와 비교하면 보는 바와 같이 유사함을 확인할 수 있다. 또한 모델링을 통하여 펄스 압력파의 횡수에 따른 풍구 손상 정도를 용융로에 노출된 풍구 전체 질량 대비 손실된 질량의 비로 나타내면 아래의 Fig. 13과 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 확인할 수 있듯이 펄스 압력파의 횡수가 많아짐에 따라 풍구 손상이 증가하고 증가폭 또한 커진다. 이는 지속적인 펄스 압력파에 의해 풍구의 변형률이 축적되어 풍구 손상이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 친환경 연소 가운데 하나인 순

산소 연소를 사용함에 있어서 고려해야 할 문제점 중 DDT의 발전에 의해 발생하는 강한 폭굉 압력파에 대한 내용을 설명하고 있다. 이러한 강한 압력파는 주위 구조물 손상을 발생시킬 수 있다. 이를 설명하기 위하여 DDT의 기본적인 설명 및 발전에 대한 내용을 설명하였다. 그리고 DDT의 발생에 의해 생성되는 강한 폭굉 압력파에 의해 운용 수명이 단축되는 친환경 용융로의 풍구에 대한 모델링을 AUTODYN hydrocode를 활용하여 수행하였다. 모델링을 수행함에 있어서 풍구 손상의 지표로서 유효 소성 변형의 변화를 사용하였다. 그리고 유효 소성 변형이 압력파의 횡수에 따라 증가하는 경향성을 확인하였다. 또한 폭굉 압력파에 의한 풍구 손상 가능성을 실제 손상된 풍구의 단면적과 비교하여 유사한 형태를 가진다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 이공계 국가 연구 장학생 사업과 포스코 위탁 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Baukal. C. E., 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion," *CRC Press*, Vol. 23, No. 5, pp. 137~145.
- (2) Buhre. B, J. P., Elliott. L. K., Sheng. C. D., Gupta. R. P. and Wall. T. F., 2005, "Oxy-Fuel Combustion Technology for Coal-Fired Power Generation," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, pp. 283~307.
- (3) Ciccarelli. G. and Dorofeev. S., 2008, "Flame Acceleration and Transition to Detonation in Ducts," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol 34, pp. 499~550.
- (4) Hsu. Y. C. and Chao. Y. C., 2009, "An Experimental Study on Flame Acceleration and Deflagratio to Detonation Transition in Narrow Tubes," *7th Asia-Pacific Conference on Combustion*.
- (5) Oran. E. S. and Gamezo. V. N., 2007, "Originas of the Deflagration to Detonation Transition in Gas Phase Combustion," *Combustion and Flame*, Vol. 148, pp. 4~47
- (6) Gamezo, V. N., Ogawa. T. and Oran. E. S., 2008, "Flame Acceleration and DDT in Channels with

- Obstacles: Effect of Obstacle Spacing," *Combustion and Flame*, Vol. 155, pp. 302~315.
- (7) Kuznetsov. M., Ciccarelli. G., Dorofeev. V., Alekseev. V., Yankin. Y. and Kim. T. H., 2002, "DDT in Methane-Air Mixture," *Shock Wave*, Vol. 12, pp. 215~220.
- (8) Hluschko. S. and Ciccarelli. G., 2008, "Interaction of a High-Speed Combustion Front with a Closely Packed Bed of Spheres," *Shock Waves*, Vol. 18, pp 317~327.
- (9) Kaneshige. M. and Shepherd. J. E., 1999, "Detonation Database," *Graduate Aeronautical Laboratories California Institute of Technology Pasadena, CA991125*.
- (10) Fedorov. A. V., Khmel. T. A., 2002, "Mathematical Simulation of Detonation Processes in a Coal-Particle Suspension," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 38, No. 6, pp. 700~708.
- (11) Tham, C. Y., 2005, "Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation Using AUTODYN-3D," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 1401~1410
- (12) Tillotson. J. H., 1962, "Metallic Equations of State for Hypervelocity Impact," *Air Force Special Weapone Center*.