

## 표준 사이클론 집진기 내 유동특성에 관한 수치해석

이치우<sup>#</sup>

### A Numerical Analysis on Flow Characteristic in a Standard Cyclone Dust Separator

Chi-Woo Lee<sup>#</sup>

(Received 21 July 2011; received in revised form 17 August 2011; accepted 6 October 2011)

#### ABSTRACT

This study is numerical analysis on flow characteristic in a standard cyclone dust separator. The cyclone dust separator is widely used in a industrial applications as a method for dust removed from gases. In cyclone chamber, a very complex flow field is formed, involving the interaction between highly swirling velocity and turbulent field. Numerical analysis with computational fluid dynamics(CFD) was carried out to investigate the working fluid that flow into cyclone dust separator. Helical entry type was increasing flow rate compared with tangent entry type. And according to increasing pressure difference was increased fan power. But, helical entry type was high performance dust separator, in comparison with tangent entry type.

**Key Words** : Cyclone Dust Separator(사이클론 집진기), Tangent Entry Type(접선유입식), Extension Entry Type(확장유입식)

#### 1. 서 론

본 연구는 대형 용접작업장에서 발생하는 용접 흄 및 분진을 제거하는 사이클론 집진기에 대한 설계모델을 제시하고자 한다. 기존의 중력 집진기의 경우 건조하고, 중량이 있는 입자상 물질이 자중(自重)에 의해 분리되는 장치로서 비교적 설계가 간단한 것이 특징이다. 이 장치는 입자의 크기가 50 $\mu\text{m}$  이상에서 집진효율이 높은 반면 미세입자에 대하여 집진효율이 낮은 것이 일반적이다. 이에 비해 사이클론 집진기는 사이

클론을 이용하여 25 $\mu\text{m}$  이상의 입자에 대하여 90% 이상의 집진효율이 있고, 고효율인 경우 8 $\mu\text{m}$  이상의 입자에서 80%까지 집진효율을 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 환기되는 물질의 특성에 따라 사이클론 집진기를 사용할 경우 공학적인 설계기준을 마련하고자 한다.

본 연구는 오염물질을 배출하는 환기시스템에서 비교적 큰 입자상 물질을 분리 및 제거하는 방법으로 구조가 간단하고, 유지비 및 설치비가 저렴할 뿐 아니라 압력손실이 낮은 장점을 가지고 있는 반면 시설의 규모가 크고 미세입자에 대한 집진효율이 낮은 것이 단점으로 지적되고 있다. 사이클론 집진기의 경우 충돌식 중력 집진기와 마찬가지로 여과 집진기나 전기 집

<sup>#</sup> 교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과  
E-mail : leecw@gntech.ac.kr

진기와 같은 고효율 집진장치를 유지·관리하기 위한 목적으로 조대입자를 전처리하는 목적으로 많이 사용됨에 따라 보조 집진기로 분류할 수 있다. 사이클론 집진기의 경우 설치비용 및 유지비용이 많이 요구되지 않으며, 높은 온도에서 작동이 가능할 뿐 아니라 분진량이 많아도 처리가 가능하다는 장점이 있다. 반면 미세한 입자에 대한 집진효율이 낮고, 압력손실이 높기 때문에 운전비용이 많이 요구되는 단점을 가지고 있다.

기존의 선행연구자들의 연구결과를 보면 우선 유동 해석과 실험으로 크게 나누어져 있었고, CFD를 활용한 설계기법은 20년이 넘게 광범위하게 사용되고 있었다. Chio<sup>[1,2]</sup> 등은 축방향 속도분포를 실험과 수치해석 결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 주장하였고, 계산을 통해 포집효율을 예측하는 시도를 하였다. Chung<sup>[3]</sup> 등은 고효율 사이클론 집진효율에 대한 연구로서 입자의 투입량에 따른 출구 유속변화나 등급 집진효율을 실험과 계산을 통해 비교분석하였다. Kim<sup>[4]</sup> 등은 Realizable k-ε 난류모델을 도입하여 축류형 사이클론 집진기에 대한 유동해석에서 나선형 유도선의 형상이 압력강하와 먼지배출에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Heo<sup>[5]</sup> 등은 사이클론 집진기 내경이 블록할 경우에 대한 집진효율 실험에서 표준 사이클론 집진기에 비해 압력손실은 감소하였으나 집진효율이 2% 내외 낮게 나타나는 결과를 도출하였다. 또한 Choi<sup>[6]</sup>는 사이클론 내 활성탄 체류시간을 수치해석을 통해 내부 유동장을 계산하였다. 이외에 많은 선행연구가 있었고, 일반적으로 초기 설계시 입·출구 압력손실과 집진효율에 초점이 맞춰져 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 기초적인 자료를 수집하고 데이터를 확보하는데 목적이 있기 때문에 작동유체를 공기로 가정하여 압력강하 및 속도분포에 주안점을 두어 연구를 수행하고자 한다.

## 2. 사이클론 집진기 설계인자

사이클론 집진장치를 설계할 경우 기본적인 구조에 대한 치수선정은 Table 1과 같이 치수를 무차원 (dimensionless)화 하여 용도에 맞는 설계사양을 적용

할 수 있다. 이러한 사이클론 집진기에 대한 최적의 규격은 1940년에 Shepherd와 Lapple에 의해 제시되었다<sup>[7]</sup>. 이후 선행 연구자들에 의해 검증이 이루어져 왔다. 사이클론 집진기 형상을 결정하는 일은 매우 신중하고, 조심스럽게 접근해야 된다. 만일 집진

Table 1 Design factor for standard cyclone dust separator

구 분	고효율 집진기		일반 집진기		고용량 집진기	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
몸통 직경 (D/D)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
입구 높이 (H/D)	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
입구 폭 (W/D)	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
상부 출구 직경 (De/D)	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
선회류 길이 (S/D)	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
몸통 길이 (Lb/D)	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
원추 길이 (Lc/D)	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
하부 출구 직경 (Dd/D)	0.375	0.4	0.25	0.25	0.375	0.4

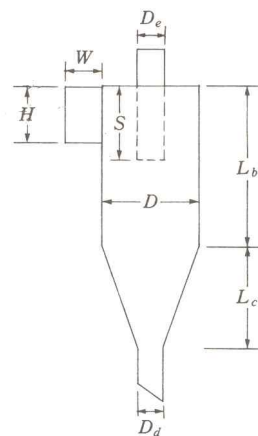


Fig. 1 Designation of standard cyclone

기의 형상이 잘못 설계될 경우 송풍기용량 변경하거나 기타 효율적인 측면에서 부수적으로 설치되는 장치가 추가되기 때문이다. 이러한 경우 비용증가와

생산력 저하 및 유지보수에 많은 어려움이 따르게 된다. 설계조건에서 덕트의 직경이 0.84m일 경우 입구 높이를  $H=0.84m$ 로 설정하면 몸통길이, 원추의 길이 등을 설정할 수 있다. 따라서 Table 1의 (3)을 사용하여 유입구 높이와 집진기 직경을 유도하면 아래의 식 (1)~(7)과 같은 기본형상이 결정된다. 따라서 도출된 모델을 근거로 국소환기설비의 개선을 위해 기존 후드의 덕트<sup>[8]</sup>와 연결하면 Fig. 2와 같이 모델링 되어진다. 여기서 설계변수를 접선 유입식과 확장 유입식 2가지 모델에 대한 검토를 수행하고자 한다.

$$\frac{H}{D} = \frac{0.84m}{D} = 0.5 \quad (1)$$

$\therefore D = 1.68 \text{ m}$  (몸통직경)

$$\frac{W}{D} = \frac{W}{1.68m} = 0.25 \quad (2)$$

$\therefore W = 0.42 \text{ m}$  (입구폭)

$$\frac{L_b}{D} = \frac{L_b}{1.68} = 2 \quad (3)$$

$\therefore L_b = 3.36 \text{ m}$  (몸통길이)

$$\frac{L_c}{D} = \frac{L_c}{1.68} = 2 \quad (4)$$

$\therefore L_c = 3.36 \text{ m}$  (원추길이)

$$\frac{S}{D} = \frac{S}{1.68} = 0.625 \quad (5)$$

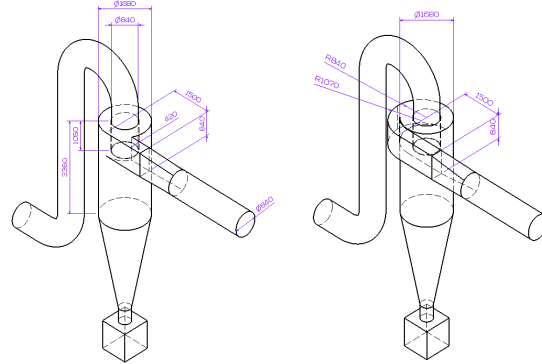
$\therefore S = 1.05 \text{ m}$  (선회류길이)

$$\frac{D_c}{D} = \frac{D_c}{1.68} = 0.5 \quad (6)$$

$\therefore D_c = 0.84 \text{ m}$  (상부 출구직경)

$$\frac{D_d}{D} = \frac{D_d}{1.68} = 0.25 \quad (7)$$

$\therefore D_d = 0.42 \text{ m}$  (하부 출구직경)



(a) Tangent entry type (b) Extension entry type

Fig. 2 Geometry of cyclone models by design parameters

### 3. 사이클론 집진기 수치해석

#### 3.1 지배방정식

본 연구에서는 도금 공정시 유해물질의 분리배출에 대한 원심력 집진기 내부의 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 공기유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동량 소산 방정식이 함께 계산되었다. 또한 유동장내의 밀도변화에 대한 부력항을 사용하기 위해 에너지 방정식도 포함되어 있다. 난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준  $\kappa-\varepsilon$ 모델을 사용하였다.

#### 3.2 경계조건

실제 도금공정시 설치되는 국소환기 설비 전체에 대한 시뮬레이션에 대한 해석을 수행하는 것을 컴퓨터 용량 및 처리속도와 밀접한 관련이 있으며, 본 연구에서 조사하고자 하는 원심력 집진기의 최적형상을 도출하는 것이 목적일 경우 각각의 모델에 대한 성능이 상대적으로 적용되기 때문에 본 연구에서는 원심력 집진기 부분만 해석을 수행하고자 한다. 따라서 본 연구에서 관심 영역인 집진효율에 초점

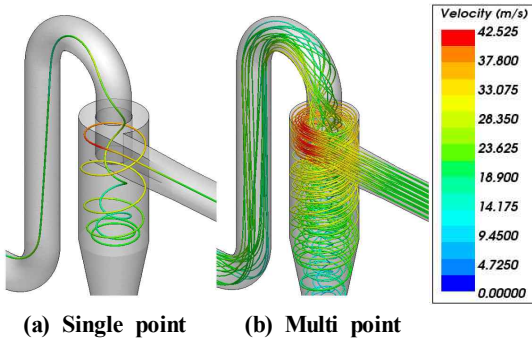


Fig. 3 Particle tracking in tangent entry type at  $Q=450\text{m}^3/\text{min}$

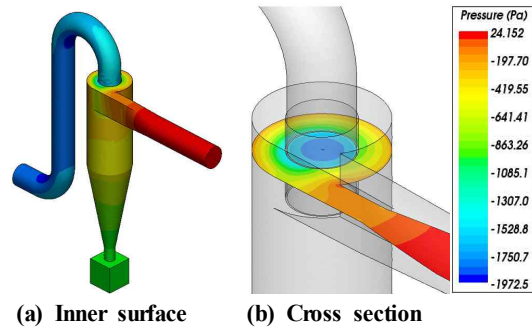


Fig. 5 Pressure distribution at tangent entry type at  $Q=450\text{m}^3/\text{min}$

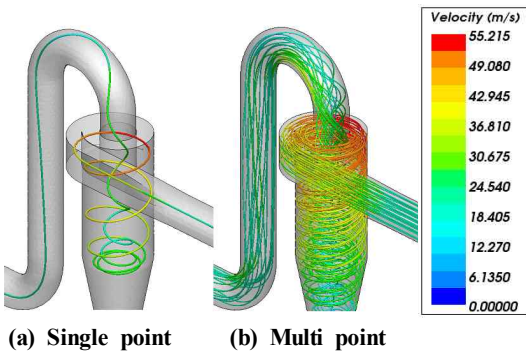


Fig. 4 Particle tracking in extension entry type at  $Q=450\text{m}^3/\text{min}$

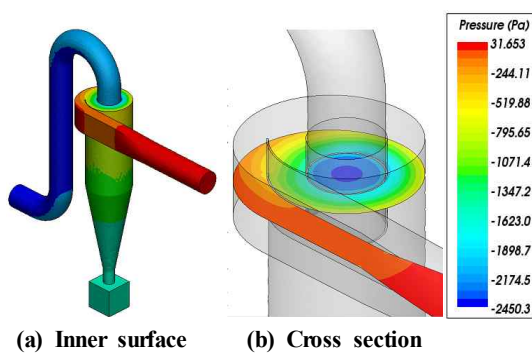


Fig. 6 Pressure distribution at extension entry type at  $Q=450\text{m}^3/\text{min}$

맞추면 원심력 집진기로 유입되는 유량을 속도로 환산하여 입구 경계조건으로 부여하고, 출구의 경우 유동과 온도 기울기가 Zero가 되도록 설정하여 순수하게 원심력 집진기 내부에서 발생하는 유동패턴을 계산하였다.

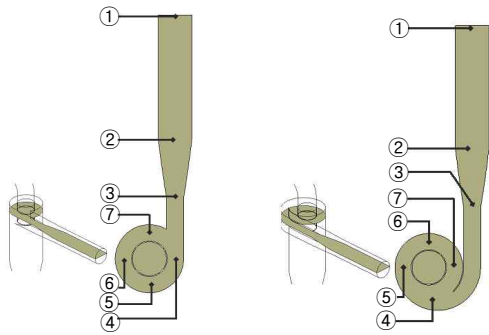
#### 4. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 입자추적 결과를 나타내고 있다. Single point의 위치는 유입구 중앙에서 입자가 출발한 것이며, multi point는 입구면에 등간격으로 25개 지점에서 출발한 결과이다. 해석결과 single point를 기준으로 접선유입식의 경우 사이클론 내부회전수는 4회전 하였고, 확장유입식은 5회전함을 알 수 있었다. 확장유입식의 경우 접선유입식에 비해 원심력을

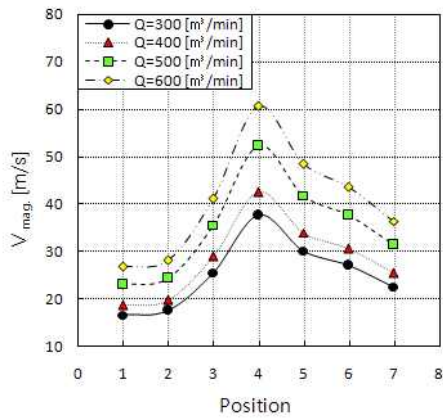
충분히 받을 수 있기 위해 사이클론 본체로 유입되는 유입구가 90° 뒤에 있기 때문에 최대유속 지점이 그만큼 이동하였기 때문에 본체 내부의 회전수가 증가하였다. 또한 전반적인 속도가 빠르기 때문에 그만큼 원심력에 의한 집진효과가 우수할 것으로 예상된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 사이클론에서 발생하는 압력분포를 나타내고 있다. 여기서 유입구측 내벽의 압력이 높으며 출구로 이동할수록 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 외측의 압력이 내측의 압력에 비해 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 유동이 회전력을 가지고 있기 때문이다.

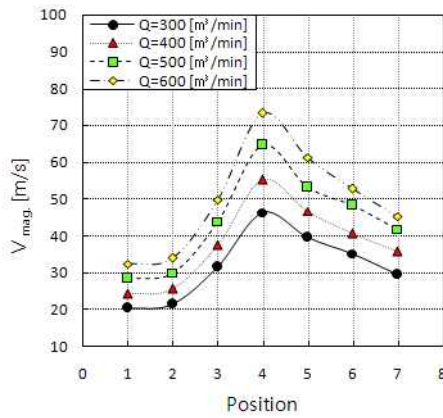
Fig. 7은 유입구 중심에서 수평단면에 대한 속도크기 값을 취득하기 위한 위치를 나타낸 것으로 각각의 모델에 대하여 7개의 센서를 설치하였다.



(a) Tangent entry type (b) Extension entry type  
 Fig. 7 Sensing positions of velocity magnitude



(a) Tangent entry type



(b) Extension entry type

Fig. 8 Comparison of velocity magnitude at sensing positions

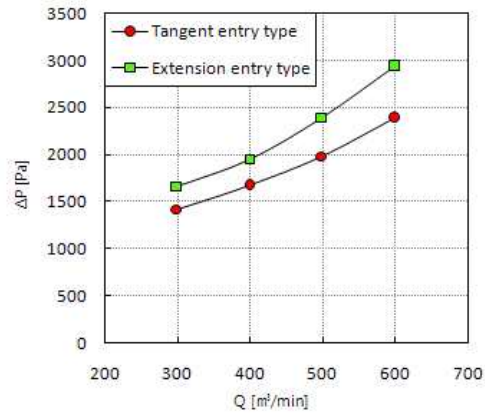


Fig. 9 Comparison of pressure difference at inlet and outlet

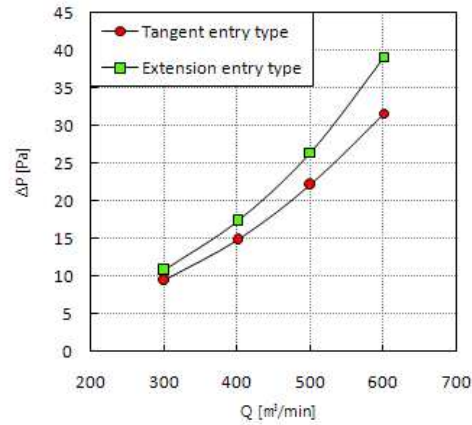


Fig. 10 Comparison of necessary power at fan

그 이유는 입구에서 유입되어 사이클론 본체로 유입되어 본체에서 회전하는 속도가 가장 크기 때문에 원심력이 가장 큰 영역이 된다. 결국 이 영역에 대한 속도를 파악함으로써 사이클론의 성능을 예측할 수 있기 때문이다. 따라서 유량변화에 따른 속도크기에 대한 결과는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 확장 유입식의 경우 접선 유입식에 비해 앞서 입자추적의 결과에 보듯이 사이클론 내부의 속도가 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 접선 유입식의 경우 ④번 위치에서 최대 유속이 발생하는 한편 확장 유입식의 경우 ⑤번 위치에서 최대속도가 발생함에 따라 원심력이 충분히 증가시킬 수 있는 구조를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 사

이클론 집진기에서 가스 유입형태가 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 유입되는 유량에 대한 사이클론 집진기 입·출구 압력손실을 나타내고 있다. 유입유량이 300~500 m<sup>3</sup>/min으로 증가할수록 압력손실은 증가함을 알 수 있었고, 접선유입식의 경우 확장유입식에 비해 낮게 발생하였다. 반면 확장유입식의 경우 유입유량이 증가할수록 접선유입식에 비해 대략 250~500Pa 정도씩 차이가 발생함을 알 수 있었다. 유량증가에 따른 압력손실은 아래의 식 (8)과 식 (9)와 같은 상관식을 유도할 수 있었다.

- Tangent entry type

$$\Delta P = 0.003Q^2 - 0.089Q + 1120 \quad (8)$$

- Extension entry type

$$\Delta P = 0.006Q^2 - 1.285Q + 1491 \quad (9)$$

Fig. 10은 동력요구량을 나타낸 것으로 흡입유량과 압력손실의 곱으로 나타낼 수 있다. 압력손실이 유량의 증가에 따라 높아지기 때문에 동력요구량 또한 이에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 또한 확장유입식의 경우 압력손실이 큰 만큼 동력요구량 또한 증가하였기 때문에 운전비는 접선유입식에 비해 상대적으로 증가함을 알 수 있었다. 반면 유량이 적을 경우 동력차가 감소하기 때문에 고용량일 경우 접선유입식을 사용하고, 저용량일 경우 확장유입식을 사용하는 것이 유지비 관리에 유리할 것으로 판단된다. 따라서 유량증가에 따른 동력요구량에 대한 상관식은 아래의 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있었다.

- Tangent entry type

$$L = 0.00001Q^2 - 0.02Q + 6.06 \quad (10)$$

- Extension entry type

$$L = 0.00001Q^2 - 0.043Q + 10.01 \quad (11)$$

## 5. 결론

사이클론 집진기에 대한 내부 유동해석을 통해 기초적인 성능과 유동현상을 파악하여 직접적인 설계 자료로 활용하기 위해 CFD를 통한 수치해석 결과

다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사이클론 본체 벽면 곡률로 인해 본체로 유입되는 구간의 외벽에서 강한 선회류가 형성되어 힘과 평형을 유지하기 위해 강한 압력구배가 형성되었다.
2. 확장유입식의 경우 접선유입식에 비해 선회류가 본체내부에서 1회전 증가함에 따라 원심력에 의한 집진효과는 우수한 것으로 나타났다.
3. 유량이 증가할수록 확장유입식의 경우 접선유입식에 비해 압력차가 증가하기 때문에 이에 따른 송풍기 동력요구량이 증가하는 단점이 발생하였다. 전반적으로 접선유입식의 경우 분리시킬 입자의 질량이 클 경우 적합할 것으로 판단되며, 확장유입식의 경우 입자의 질량이 작을 경우 보다 유효할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. H.K.Choi, Y.T.Choi, K.S.Lee, Y.T.Kim, "Computation of Turbulent flow in a Cyclone Separator", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 195-198, 1994.
2. H.K.Choi, Y.T.Choi, K.S.Lee, "A Numerical Study of Gas-Solid flow in a Cyclone Separator", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 416-420, 1995.
3. Jin-Do Chung, Sang-Gwon Lee, M.Bohnet, "A Study of High Particle Collection Efficiency of Cyclone", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 2227-2232, 2003.
4. Jong Soon Kim, Tong Uk Lee, Tae Ho Kang, In Kwan Kim, Young Soo Kim, "A CFD Analysis on Axial Inlet Cyclone using Realizable k-ε Turbulence Model", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 1327-1332, 2006.
5. Heo Kwang-Su, Seol Seoung-Yun, Li Zhen-Zhe, "A Study of Convex Cyclone with Continuous Curve", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 1576-1581, 2007.
6. Choeng Ryul Choi, "Flow Characteristics and Residence Time of Activated Carbon in the Cyclone for Optimized Design of an Adsorption/Catalysis

- Reactor", Transactions of the KSME, Vol. 31, No. 5, pp. 416-424, 2007.
7. Copper, C. D. and Alley F. C., "Air Pollution Control: A Design Approach", Waveland Press, New York, pp. 133-150, 1994.
  8. Chung seub Yi, Sung Cheol Jang, Kang Ro Yoon, Keon Je Oh, "A Study of Local Ventilation Hood for Improvement with Zinc Plating Process", Proceeding of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 1212-1218, 2007.