

유류 발전 보일러의 연소용 공기공급 계통 개선에 관한 연구

고영건, 최상민, 김영주\*

한국과학기술원, \*한전 전력연구원

A Study on the Improvement of Non-Uniform Flow Distribution in a Windbox of an Oil-Fired Boiler

Young Gun Go, Sangmin Choi, Young-zoo Kim\*

KAIST, \*KEPRI

1. 서론

중유화력 발전은 발전량이 지속적으로 감소 추세에 있으나 뛰어난 설비 가용성과 안정적인 동력원 확보의 일환으로 실시되고 있는 연료 다변화 정책의 큰 부분을 담당하고 있으며, 정부의 환경 규제의 강화 정책으로 인해 발전업체 및 관련 기관에서도 발전효율 증진과 함께 유해 NOx 저감 등 연소생성물 저감에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1,2,3,4]</sup>

중유 화력발전에서는 다수의 버너를 사용하기 때문에 연소용 공기를 각 버너로 적절히 분배할 필요가 있으며, 발전 보일러에서는 윈드박스(Windbox)라는 구조물을 통하여 공급된다. 그 기본 구조는 Fig. 1과 같이 버너가 설치된 보일러의 외벽을 공기가 흐르는 큰 덕트 형태의 구조물이 둘러싸여 있는 구조이며 공기 예열기로부터 연소용 공기를 공급 받는다. 윈드박스 내부에는 연소용 공기의 유동을 안정화시키기 위한 에어포일(Airfoil)과 댐퍼(Damper)가 설치되며 다수의 격막에 의해 내부가 구분되어 적절한 양의 공기를 각 버너로 공급된다. 그러나 윈드박스의 통상적인 구조는 입구에서부터 버너출구까지 유로가 급격히 변하는 부분이 존재하기 때문에 내부유동이 불균일하게 형성되며, 그 결과로 각 버너로 공급되는 공기 유동이 불안정해지게 된다. 또한 윈드박스 내부에는 각 버너로 공급되는 공기유량을 자체적으로 제어할 수 있는 방법이 없기 때문에 각 버너의 위치에 따라 공급되는 공기 유량이 편차가 발생하게 되며 이런 요인들이 보일러내 연소 환경을 나빠지게 하는 요인이 될 수 있다. 중유화력 발전에 사용되는 버너의 기본적인 형태는 Fig. 2에서 보듯이 공기 유량을 제어하는 Air register vane, 화염을 안정적으로 유지시키는 Impeller(Flame Stabilizer), 버너의 외관을 구성하는 버너 타일 그리고 연료유를 무화시키는 노즐로 구성된다. 여기에 NOx의 생성을 줄이기 위한 다단연소 방식을 도입하기도 하며 이런 다단 연소에 관한 연구는 Air register vane등에 의해 형성되는 선회강도와 연관되어 Syred<sup>[5]</sup> 등에 의해 많은 연구들이 진행되어 왔다. 중유화력 발전에 사용되는 버너의 형태는 기본적으로 축대칭적인 형상을 하고

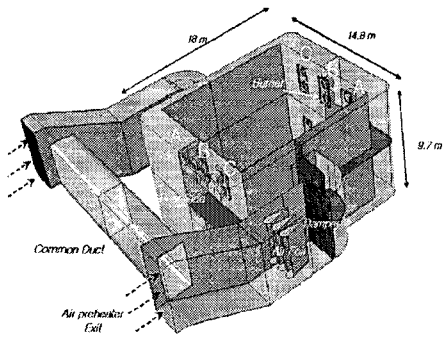
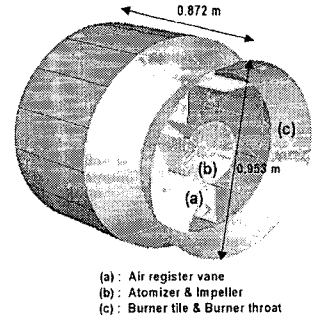


Fig. 1. Outline of a calculated windbox



(a) : Air register vane  
(b) : Atomizer & Impeller  
(c) : Burner tile & Burner throat

Fig. 2. Outline of an oil-fired burner

(a) Schematic diagram (b) Photo of windbox cold flow model  
 Fig. 3. Windbox cold flow model test

있지만 앞에서 언급했듯이 윈드박스 내부의 불균일한 유동으로 인해 버너로 공급되는 공기는 중심축을 기준으로 비대칭적인 형태로 공급될 수 있다.<sup>[6]</sup>

이에 따라 본 연구에서는 실제 운전되고 있는 중유 화력 발전소에 대해 윈드박스를 통해 각 버너로 공급되는 연소용 공기량의 편차와 개별 버너의 Air register vane을 통해 공급되는 유동 형태가 이상적인 조건과 얼마나 차이가 있는가를 전산유동해석, 모형실험 그리고 실제 발전소에서의 유속측정을 통해 확인하고자 하며 윈드박스의 형상변경 및 배플 설치를 통한 개선방향을 제시하고자 한다.

## 2. 윈드박스내 유동실험 및 전산해석

### 2.1 해석 대상 개요

본 연구 대상 윈드박스의 기본 형태는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연소로 주위에 공기를 공급하는 덕트로 둘러싼 형태로 되어 있으며 상부층(1floor), 하부층(2floor), Front(F) 및 Rear(R)의 4부분이 격막에 의해 구분된다. 또한 2개의 버너가 상부버너와 하부버너로 하나의 셀을 구성하며, 총 12개의 버너셀이 설치되어 있다. 각각의 버너셀은 윈드박스 바깥쪽에서 버너셀을 봤을 때 왼쪽부터 A,B,C의 기호를 갖게 된다. 또한 각 버너셀에서 위쪽의 상부버너는 Upper(U), 아래쪽의 하부버너는 Lower(L) 버너로 불린다. 그러므로 하부층의 Front면의 왼쪽 버너셀은 2FA라고 표시되며 2FA 버너셀의 하부버너는 2FAL로 표시된다.

### 2.2 실험장치

실험에 사용된 모형은 실물의 1/20 scale로 축소된 모형을 사용하였다. Fig. 3에서 보듯이 장치 구성은 크게 윈드박스 모형, 공기를 공급하기 위한 송풍기, 압력측정장치, 측정 포트의 위치를 이동시키는 X/Y Robot 그리고 제어 및 데이터 획득을 위한 PC로 구성된다. 송풍기는 인버터를 통해서 유량을 조절할 수 있으며 윈드박스의 입구 전단에서 양쪽으로 유동이 분기되어 공급된다. 공급된 공기는 윈드박스 내부덕트를 거쳐 최종적으로 버너의 Air register vane을 통해 공급된다. 공급 공기 유량은 피토판과 마노미터를 이용해서 측정을 하며, 피토판은 PC에 의해 제어되는 X/Y Robot에 의해 이동되어 각 버너의 유량을 측정하여 PC에 저장된다.

본 실험에서는 작동유체를 원형과 똑같은

Table 1. 실험조건

항 목	단 위	원형	모형
		설계조건 4/4 Load	실험조건
송풍기 회전수	RPM		913
총유량	m <sup>3</sup> /min	30,730	163
버너유량	m <sup>3</sup> /min	1,099	6.79
온도	℃	293	20
점도	kg/m · s	2.90×10 <sup>-5</sup>	1.78×10 <sup>-5</sup>
밀도	kg/m <sup>3</sup>	0.6527	1.225
버너 출구 직경	m	0.96	0.048
출구 유속	m/s	25.3	77
Re(버너출구)		5.467×10 <sup>5</sup>	2.528×10 <sup>3</sup>

공기를 사용하기 때문에 모형과 원형 사이의 레이놀즈수를 상사하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나 레이놀즈수가 충분히 발달된 난류영역에 속하는 경우에는 레이놀즈수 값에 큰 영향을 받지 않는기 때문에 원형과 같은 차수의 레이놀즈수를 유지하면 어느 정도 원형과 실물 사이의 상사 조건을 만족한다고 가정할 수 있다.

### 2.3 실험 및 전산해석 조건

실험조건은 상온의 공기를 Table 1의 유량 조건하에 실험을 하였다. 전산해석은 실제 윈드박스 형상에 대해 4/4 (100%) 부하 기준에 대해서 Fluent 6.0을 이용하여 해석을 하였으며 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$ 을 사용하였다. 또한 해석 영역은 윈드박스입구에 연결된 곡관 덕트부분부터 버너의 Air register vane 까지를 해석대상으로 설정하였다. 또한 가운데 버너를 중심으로 완벽한 좌우 대칭 형태를 보이고 있기 때문에 Symmetric 경계조건을 사용하여 전체 윈드박스 중에 1/2 에 해당하는 영역에 대해서만 해석을 하였다.

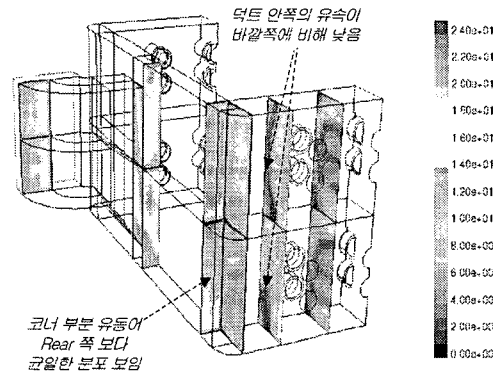


Fig. 4. Velocity distribution in the windbox (m/s) (Calculation)

## 3. 전산해석 및 실험 결과

### 3.1 윈드박스 내 유동분포(전산해석)

유동분포를 확인하기 위한 전산해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림은 Front쪽의 단면 속도 분포를 나타낸 것으로 덕트가 꺾이는 부분들로 인해서 전체적으로 덕트의 안쪽면 보다는 바깥쪽에서 빠른 유동 분포를 보이고 있다. 버너가 설치된 덕트로 연결되는 윈드박스의 코너 부분에서는 덕트 아래면 쪽의 유속이 윗면 쪽보다 빠르게 나타나고 있으며, 이는 입구부분의 덕트가 아래쪽으로 굽어져 있기 때문에 전체적으로 윈드박스 바닥면 부근의 유속이빠르게 분포하고 있다.

### 3.2 버너셀별 유량 편차(전산해석 및 모형실험)

앞 절의 전산해석 결과를 보면 윈드박스 내부 단면을 따라 유량 분포가 윈드박스의 형상에 크게 영향을 받음을 알 수 있으며 이는 각 버너로 공급되는 연소용 공기유량에도 영향을 주게 된다. Table 2에는 각 버너 출구에서의 유량 편차를 전산해석을 통해 계산한 결과와 실험결과의 일부를 나타낸 것이다. 발전소 현장에서의 측정은 실제 운전 중인 발전소에서 측정을 하기 때문에 측정 조건이 매우 제한되며 이로 인해 2개의 버너셀에 대한 측정만 실시하였다. 기본적으로 전산해석 결과와 모형실험의 결과는 두 경우 모두 B열의 버너에 공기가 많이 공급되며 A열과 C열의 버너에는 상대적으로 적게 공급되는 것으로 나타난다. 이

Table 2. Air flow rate deviation

버너	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
편차	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
Front 상부층	upper	-4.6	12.8	-4.6	1.24	2.66	1.85	.	12.51	-1.62
	lower	-4.5	17.1	-4.5	-1.26	3.00	1.45	.	-5.99	-4.9
Rear 하부층	upper	-8.0	15.0	-8.0	-1.92	-0.73	-1.88	.	.	.
	lower	-16.8	8.4	-16.8	-2.31	-0.27	-2.32	.	.	.

외에도 하부층의 Rear쪽 A, C 버너가 가장 적게 공급이 되는 것도 공통적으로 나타났다. 그러나 전산해석과 모형실험 결과의 가장 큰 차이점은 버너 출구의 유량 편차가 모형실험 결과보다는 전산해석 결과에서 훨씬 크게 예측이 되고 있다. 여기서 실제 운전되고 있는 발전소의 일부 버너에서 측정된 현장실험 결과에서는 윈드박스 중앙에 위치한 B열 버너로 역시 많은 공기가 공급되며 유량편차 크기는 모형실험 보다 전산해석 결과와 비슷하게 나타나고 있다. 이는 모형실험보다는 전산해석 결과의 유량 편차가 실제 상황을 더 정확히 예측한다고 볼 수 있다. 또한 모형 실험은 단순히 레이놀즈 수만을 기준으로 원형과 상사성을 유지시켰기 때문에 모형의 크기에 비해 과다한 유량이 공급되는 조건이 된다. 이로 인해 모형 실험에서는 각 버너출구에서의 압력손실이 내부에서의 압력손실보다 상대적으로 매우 크기 때문에 각버너로 공급되는 공기 유량 편차가 원형보다는 작게 측정되게 된다. 전산해석과 현장실험 결과를 기준으로 판단하면 각 버너별로 공급되는 공기 유량 편차가 크게 발생함으로 전체적인 연소효율, 오염물질 생성 등의 문제가 발생할 수 있으며 원형 윈드박스는 구조적으로 개선할 여지가 있다고 할 수 있다.

#### 4.3 개별 버너에서 비대칭적인 공기유입

Fig. 5는 전산해석을 통해 각 버너의 Air register vane에서의 공기 유량 분포를 나타낸 것으로 하나의 버너셀을 구성하는 상부와 하부버너를 각각의 그래프에 나타낸 것이다. 모든 버너의 공통적인 특징으로 각 버너 셀의 상부 버너와 하부 버너가 중심축을 기준으로 상하로 대칭적인 유동형태를 보이고 있다. 이는 버너셀의 위쪽 공간과 아래쪽 공간보다 버너셀을 이루는 두 버너사이의 공간이 협소하기 때문에 이 부분으로 유입되는 공기유량은 적고 반대로 버너셀의 위쪽과 아래쪽으로 들어오는 공기유량은 크기 때문에 모든 버너들에서 상부 버너와 하부 버너는 버너셀이 중심축을 기준으로 서로 반대되는 형태의 유량분포를 공통적으로 보이고 있다. 유입되는 공기유량이 큰 B열 버너의 경우는 버너 상하의 유동차이가 더욱 크게 나고 있다.

A열 버너는 버너 상부와 하부뿐만 아니라 좌우로도 유동이 불균일하게 나타나고 있다. Front쪽의 A열은 버너 중심에서 왼쪽에서, Rear쪽의 C열은 버너 중심에서 오른쪽에서 유입 유량이 크게 나타난다. 즉 윈드박스의 코너부분 쪽으로는 유속이 줄어들기 때문에 윈드박스의 코너쪽 보다는 중심 쪽에 위치한 Air register vane을 통해 유입되는 유량이 크게 나타나고 있다. 이렇게 Air register vane별로 유입되는 공기유량의 차이가 발생하게 되면 버너 내부에서도 버너축을 중심으로 균일한 유동분포가 나타나지 않고 한쪽으로 유동이 치우치게 되므로 버너 내에서 연료와 공기의 분포가 균일하지 않게 되어 연소가 불안정해지는 원인이 될 수 있다.

#### 5. 구조변경을 통한 윈드박스내유동 개선

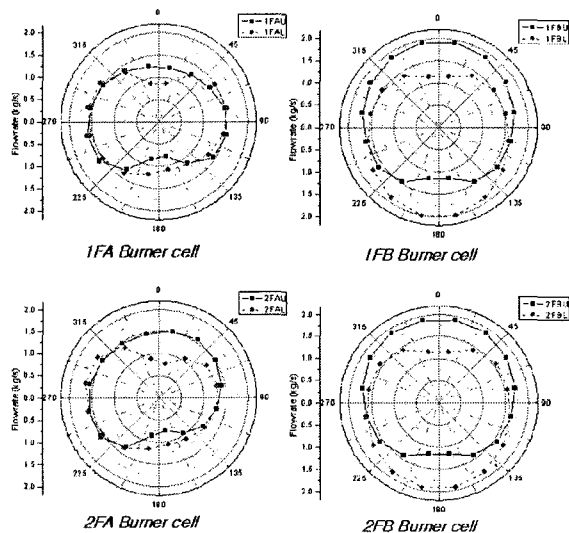


Fig. 5. Air flow shape at the exits of each burner (Calculation)

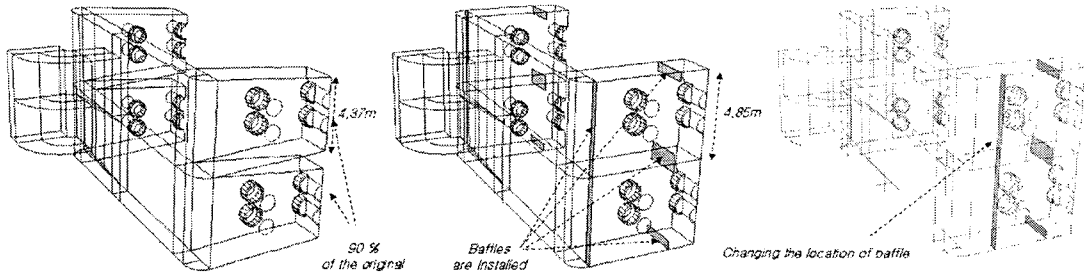


Fig. 6. Shapes of Modified Windbox

### 5.1 구조변경

기존 윈드박스에서는 각 버너로 공급되는 공기유량 편차가 존재하고 개별 버너에서도 비축대칭적으로 공기가 공급되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 개선하기 위해 윈드박스의 구조를 Fig. 6과 같이 변경하여 개선방향을 검토하였다.

Case M-1은 상부층과 하부층의 윈드박스 중심부 덕트 높이를 10% 줄여 B열 버너 부분의 단면적을 줄인 형태이다. 이는 대상 Windbox에서 B열 버너로 공기가 많이 공급되기 때문에 B열 부분의 유로를 좁게 하여 B열로 공급되는 공기 유량을 줄이기 위한 방안이다. Case M-2는 윈드박스의 코너에 폭 40cm의 배플을 설치하고 A,C열 버너와 B열 버너사이에 높이 50cm의 Baffle을 덕트의 천정과 바닥에 설치한 경우이다. 코너에 설치된 Baffle은 덕트내 유동이 윈드박스의 코너부분을 지나면서 덕트내 바깥면쪽 면의 속도가 높아지기를 것을 상쇄하기 위한 것이며, A,C열 버너와 B열 버너 사이에 위치한 Baffle은 유동이 A,C 열 버너를 지나면서 덕트의 천정과 바닥에서 유속이 빨라지기 때문에 이를 상쇄하기 위한 것이며, Case M-3은 코너 부분의 배플의 위치를 조절한 것이다.

### 5.2 구조 변경 해석 결과

Table 3은 변경된 형상의 윈드박스에서 상부층의 Front쪽 버너들의 출구에서의 유량 편차를 나타낸 것이며, Fig. 7은 각 버너출구로 공급되는 공기 유동 형태를 나타낸 것이다. Case M-1의 경우는 윈드박스 중심부의 단면이 축소됨으로 인한 압력손실 증가로 B열 버너로 공급되던 유량이 줄어드는 효과를 보이는 하나 윈드박스내부에서의 공기 유동이 원형에서의 유동형태를 그대로 유지하기 때문에 여전히 높은 수준의 유량 편차를 보인다. 또한 윈드박스 중앙에서의 좁은 유로로 인해 B열의 상부와 하부 버너는 원형의 경우보다 더 상하로 비대칭적인 유동형태를 보이고 있다. 그러나 윈드박스 형상은 그대로 두고 내부에 배플을 설치한 Case M-2과 M-3

Table 3. Air flow rate deviation of modified windbox(Calculation)

Case M-1		A	B	C
		편차 %	편차 %	편차 %
Front 상부층	upper	-4.5	14.8	-4.5
	lower	-2.8	6.5	-2.8
Case M-2		A	B	C
		편차 %	편차 %	편차 %
Front 상부층	upper	1.6	6.9	1.6
	lower	-3.5	8.2	-3.5
Case M-3		A	B	C
		편차 %	편차 %	편차 %
Front 상부층	upper	-2.6	6.3	-2.6
	lower	0.3	7.6	0.3

의 경우도 B열 버너로 더 많은 공기가 공급되지만 원형과 Case M-1에 비해 편차가 크게 줄어든다. 이는 윈드박스 내부 유동에서 유량이 큰 부분에 배플 설치로 인한 압력손실 증가에 의해 직접적으로 유량을 통제하기 때문에 다른 경우들에 비해 각 버너로 비교적 균일하게 공기가 공급된다고 할 수 있다. 그러나 Case M-3는 코너에 설치된 배플이 A와 C열 버너에 근접하여 위치하기 때문에 배플이 설치된 쪽의 Air register vane으로는 공기 공급이 오히려

제한된다. 이로 인해 버너출구의 유동형태는 가장 비대칭적으로 나타나게 된다. 윈드박스의 개선 방향을 유량편차와 유동형태의 대칭성 기준으로 판단하면 덕트의 형상을 변형하기 보다는 윈드박스내부의 적절한 위치에 배플을 Case M-2의 경우가 원형의 윈드박스를 개선할 대안이라 할 수 있다.

## 6. 결론

다수의 버너를 사용하는 발전용 보일러에서는 각 버너별로 공급되는 공기유량의 차이가 발생함으로 인해 개별버너 주변에서의 유동이 불안정할 수 있다. 이로 인하여 버너의 연소 불안정성을 초래할 수 있으며 전체적인 연소효율 저감과 공해물질 발생이 증가할 수 있다. 본 연구에서는 실제 운전되고 있는 발전용 보일러의 윈드박스를 통해 각 버너로 공급되는 공기유량을 축소모형 실험과 전산해석 방법을 사용하여 예측하였다.

전체적인 유동의 경향은 윈드박스의 Rear 쪽 보다는 Front쪽으로 공기의 공급이 많으며 주로 윈드박스의 대칭축에 위치한 B열로 공기의 공급이 많이 되고 있는 경향을 보여주고 있다. 이런 경향은 공급 층의 유량변화와는 상관없이 동일한 경향을 보여주고 있다. 또한 버너 출구에서 형성된 연소용 공기 유동형태는 보일러에서 버너의 위치에 따라 버너 중심축을 기준으로 상하좌우로 비대칭적인 유동형태를 보이고 있다. 이런 공기 공급의 불균일성은 윈드박스내부에 비교적 간단한 배플을 설치하여 유동의 불균일성을 효과적으로 제어할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 전력기반기술 개발 연구사업으로 선정된 『중유화력 분진배출저감에 관한 연구』와 연소기술연구센터(Combustion Engineering Research Center)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 신명철; 안재현; 김세원. 다단 공기 공급 저 NOx 버너의 선회유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구, 한국연소학회지, 2003, 8(1), 25-35
2. Charles E. Baukal Jr. Industrial Burners Handbook, CRC Press, 2004
3. Maria da Graca Caarvalho; Woodrow A Fiveland; F. C. Lockwood; Christos Papadopoulos. Combustion Technologies For a Clean Environment, Gordon and Breach Publishers, 1991, 11~130 & 203~258
4. Syred, N.; Beer, J. M. Combustion in Swirling Flow : A Review, Combustion and Flame, 23, 1974, 143-201
5. 김병윤; 백희석. 산업용 보일러 윈드박스 유동해석, 2002 Fluent Users's Group Meeting, 2002.
6. Charles E. Baukal Jr.; Robert E. Schwartz. The John Zink Combustion Handbook, CRC Press, 2001, 547-586

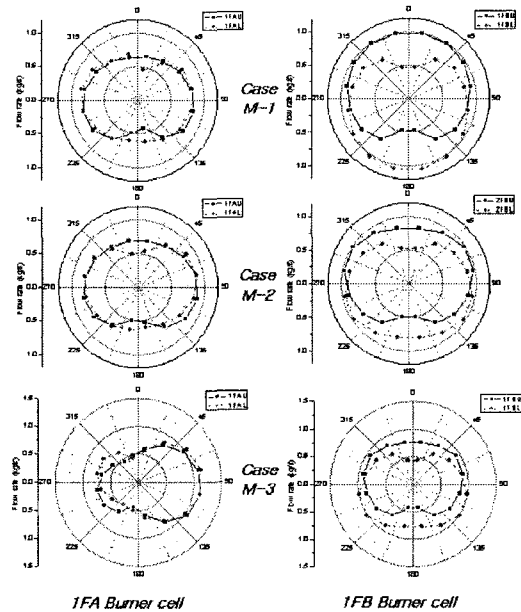


Fig. 7. Air flow shape at the exits of each burner (Modified windbox, Calculation)