

시멘트 공정사용 석탄의 분류 및 물성평가

이 근 성

〈동양시멘트(주)삼척공장〉

1. 서론

시멘트 공정에서 사용하고 있는 석탄은 소성용 열원으로서 만 아니라, 석탄 중의 ash 성분은 원료로서도 사용되기 때문에, 시멘트 공정에서 사용하는 석탄 물성은 주/부원료 물성 뿐 만 아니라 원, 연료로서 중요한 고려항목이다. 특히 국내 시멘트 산업에서 사용하는 대부분의 석탄은 중국, 호주, 남아프리카 등에서 수입하는 석탄이기 때문에, 석탄 채광지역에 따라 연/원료로서의 물성차이가 크게 나타난다. 또한 시멘트 산업의 주/부원료 환경에 따라 각각 요구하는 물성이 다르기 때문에, 본 연구에서는 보다 다양한 석탄사용의 경험이 있는 당 공장의 사용 석탄(1984~1994년)으로부터 각 지역의 석탄물성의 정리 및 평가를 함으로서 시멘트산업 환경에 따라 요구되는 석탄 물성에 대한 보다 넓은 정보를 제공하고자 한다. 일반적으로 시멘트 산업에서의 석탄물성 평가는 석탄분류, 공업분석 및 발열량, ash 성분, ash 용융온도, 분쇄성 등의 물성측정을 통해 이루어지지만, 특히 본 연구에서는 위의 석탄물성 이외에 석탄 중 포함된 염소 성분이 킬른 공정 내에 미치는 영향을 고려하여 물성평가 및 석탄 염소농도 관리기준을 도출하였다.

시멘트 소성공정 내에서 휘발과 응축의 반복되는 알칼리/유황물질의 순환은 이미 일반적으로 알려진 현상이다. 석탄 중에 포함된 염소성분은 휘발물질의 응축온도가 매우 낮은 alkali chloride 화합물(KOH, NaCl, CaCl₂ 등)을 형성하여 알칼리/유황물질 순환에 상승작용을 일으킴으로서, 보다 격렬한 농축작용을 야기하는 비정상적인 순환현상을 일으키기 때문에, 킬른공정 cyclone이나 duct에 build-up을 초래하여 킬른공정 휴지를 야기하게 된다. 이와같이 공정 불안정을 제공하는 석탄 중에 포함된 염소농도의 관리를 위해, 석탄배합시 불안정 조업을 일으키지 않는 염소농도를 도출하는 방법을 제시하였다.

2. 연구결과 및 고찰

2-1. 석탄물성 측정방법

본 연구에서 측정된 석탄물성은 입하탄의 분말도(residue % under 1mm)이외에도, 고유적인 석탄물성인 공업분석(proximate analysis), 전유황 함량(total sulfur), 발열량(heating value), ash 중의 화학성분, Hardgrove index, ash 용융온도(ash fusion temperatures) 및 석탄 중의 염소농도(chlorine content)이다. 대부분의 측정방법은 ASTM에서 제시하고 있는 석탄물성 측정방법을 통해 수행되었으나, ASTM에서 제시하고 있는 석탄 중의 염소농도 측정방법(ASTM D2361)은 약 300ppm 이하의 석탄염소 농도를 측정할 수 없기 때문에, ISO 352에서 제시하고 있는 "High-Temperature Combustion Method"와 유사한 방법인 "Oxidative pyrolysis-Coulometric titration" 방법을 채용하여 측정하는 system을 이용하였다[1]. 〈표-1〉은 본 연구에서 석탄물성을 측정된 방법 및 system을 보여주고 있다.

2-2. 석탄물성

〈표-2〉에는 본 연구에서 측정된 석탄물성의 개략적 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 호주탄의 ash 함량은 Blair Athol 탄을 제외하고는 중국탄 및 남아프리카탄 보다 높게 나타나며, 특히 Ulan탄의 경우 약 18%까지 높게 나타나고 있다. 또한 중국탄인 Tatung탄의 ash 함량은 8~10%로 낮게 나타나고 있으며, 특히 입하탄 중 1mm이하의 미분말이 약 12~39%정도까지 변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 석탄채광시 water washing을 통해 석탄의 유황분 및 ash함량 조절을 하기 때문에, water

〈丑-1〉 Testing methods and apparatus for coal analysis.

Measurements	Items	Testing apparatus	Methods
Proximate Analysis	Inherent Moisture(IM) Volatile Matter (VM) Fixed Carbon(FC) Ash	TGA-500 Thermogravimetric Analyzer, LECO	ASTM D121
Sulfur	Total Sulfur	CSA302 C/S determinator, LEYBOLD-HERAEUS	ASTM D3177-73
Heating Value	Calorific Value	CA-3 Automatic Bomb Calorimeter Shimadzu	ASTM D2015
Chemical Composition of Ash	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O, SO ₃ , TiO ₂	Chemical Analysis	ASTM D2795
Chlorine Analysis	Chlorine	TOX-10Σ Chlorine Analyzer, Mitsubishi Kasei	Oxidative Pyrolysis-Coulometric Titration
Grindability	Hardgrove Index	LC-100 Gilson	ASTM D409
Ash Fusibility	Initial Deformation Softening Hemi-spherical Fluid	AF-600 Ash Fusibility Determinator, LECO	ASTM D1857

washing과정에서 석탄의 미분말이 동시에 제거된다. 따라서 본 결과로부터 호주, 중국, 남아프리카 등에서 수입한 입하탄 대부분이 washed coal이지만 Tatung탄의 경우 미분말 함량이 매우 높고 변화가 크게 나타나는 것으로 보아, water washing공정이 없이 raw coal 채탄으로 이루어지는 것으로 사료된다.

중국탄 중 Pingshuo탄의 염소농도가 약 630ppm 까지 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 남아프리카탄에서는 매우 낮은 염소농도를 갖고 있다. 석탄 ash fusion temperature는 Pingshuo탄에서 매우 높게 나타나고 있으며, Tatung탄에서 매우 낮게 나타난다. 석탄중의 고유수분은 BlairAthol 탄 및 Tatung

탄에서 높게 나타나고 있다.

2-2.1. 석탄분류

일반적으로 석탄물성 분류는 ASTM D 388-66의 석탄분류 방법에 의해 크게 anthracitic, bituminous, subbituminous, lignitic으로 구분되며, 각 분류별 세부 group으로 나누어진다. 각각의 석탄물성 분류는 dmmf(dry mineral matter free)기준으로 고정탄소량, 휘발분 함량 및 mmmf(mineral matter free)기준으로 발열량에 의해 구분된다. Anthracitic 및 bituminous 석탄의 hvA (high volatile A)까지는 고정탄소와 휘발분 함량으로, bitum

(丑-2) Basic properties of coals used in Tong Yang

Country	Coal Name	Air dry basis			Residue % under 1 mm	Total alkali % in ash	Ash fusion temperatures(°C)				Hard- grove index	Cl content (ppm)
		Inherent Moisture (%)	Ash(%)	Heating Value (kcal/kg)			IDT	ST	HT	FT		
Australia	Blair Athol	7.5	7.3	6,618	16.6	0.53	1,620	1,649	55.4	244		
	Bloomfield	2.1	16.2	6,712	9.1	1.43						
	Carrington	3.0~3.2	13.0~14.2	6,744~6,807	8.7~9.6	1.19~1.62	1,357	1,379	1,402	1,453		127
	Coalex	2.0~2.4	13.2~13.9	6,890~6,980	9.1~12.7	0.17						29
	Clarence	2.5	13.4	6,941	14.0	0.97						
	Clutha-B	1.2	16.5	6,847	15.3	1.89						
	Gunnedah	2.7~3.8	14.6~15.9	6,562~6,704	8.2~13.4	0.53~1.26						
	NWCC	2.5	14.8	6,647	14.6	1.53						
	Saxonville	3.0	13.9	6,845	10.1	1.0						
Ulan	2.3~3.1	15.3~18.1	6,468~6,755	7.1~11.6	0.32~0.57	1,504	1,517	1,546	1,609		99~136	
China	Tatung	3.6~6.0	8.5~10.1	6,734~7,118	12.3~38.9	2.2~2.6	1,094	1,123	1,218	1,294	48.0	111~193
	Pingshuo	2.1~3.7	12.3~14.5	6,432~6,700	9.9~19.0	0.17~0.96	1,579	1,630	1,638	>1,650	46.2	385~633
S / Africa	Athur Taylor	2.3	13.1	6,752	9.5	1.72	1,323	1,331	1,347	1,382	49.9	32
	Duiker	1.8	10.9	6,970	11.5	1.95	1,360	1,361	1,366	1,385	49.9	44
	Vaalbult	2.5~3.4	13.1~14.0	6,663~6,734	9.5~10.2	1.5~2.3						

inous hvB부터 lignite석탄까지는 발열량으로 석탄을 분류하고 있다. 당 공장에서 사용한 석탄의 ASTM분류는 <표-3>에서 보여주고 있다. 대부분 사용한 석탄은 bituminous석탄으로서 hvA group이다. 특히 국내에서 많이 사용하고 있는 Pingshuo탄의 경우 hvA와 hvB사이로 구분되며, Tatung탄의 경우 hvB group의 bituminous석탄이다.

2-2.2. 공업분석(proximate analysis)

본 연구에서 검토한 석탄의 공업분석 및 발열량 결과를 Fig.1에서 보여주고 있다. 석탄의 고유수분 함량은 Blair Athol탄이 가장 높게 나타나고 있으며,

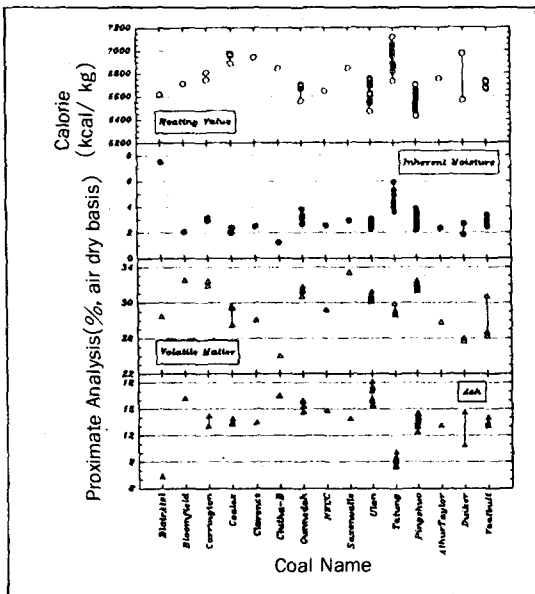
Tatung탄도 3~6% 정도로서 다른 석탄의 1~3.8% 정도 고유수분 수준보다 높게 나타나고 있다. 석탄 ash 함량은 Ulan탄이 15%이상으로 높고, Tatung탄이 8~11%로서 다른 탄에 비해 매우 낮은 함량을 갖고 있다. 일반적으로 석탄 ash 함량이 높을수록 고품위 석회석이 요구될 수 있기 때문에, 사용원료의 환경에 따라 석탄 ash함량을 고려하여 사용하여야 할 것이다.

석탄이 고유적으로 가지고 있는 ash 및 고유수분에 따른 석탄의 발열량 변화를 Fig.2에서 보여주고 있다. 석탄의 지역에 따라 다소 추이에 편차는 보이지만 석탄의 ash 및 고유수분 함량이 증가함에 따라 air dry basis의 발열량은 감소하는 것으로 나타난다.

(丑-3) Classification of coal used in Tong Yang by ASTM classification

Class	Group	Fixed Carbon (% dmmf)	Volatile Matter (% dmmf)	Heating Value (kcal/kg, mmf)	Coal Name
I. Anthracitic	1. Meta-anthracite	> 98	< 2		
	2. Anthracite	92 ~ 98	2 ~ 8		
	3. Semi-anthracite	86 ~ 92	8 ~ 14		
II. Bituminous	1. Low volatile	78 ~ 86	14 ~ 22		
	2. Medium volatile	69 ~ 78	22 ~ 31		• Clutha-B • Duiker
	3. High Volatile A	< 69	> 31	> 7,771	• Bloomfield, Carrington, Coalex, Clarence, Gunnedah, NWCC, Socconvalle, Ulan • Pingshuo • Athur Taylor, Vaalbult, Goedhope
	4. High Volatile B			7,216 ~ 7,771	• Tatung (Pingshuo)
	5. High Volatile C			5,828 ~ 7,216	• Blair Athol
III. Subbituminous	1. Subbituminous A			5,828 ~ 6,383	
	2. Subbituminous B			5,273 ~ 5,828	
	3. Subbituminous C			4,607 ~ 5,273	
IV. Lignitic	1. Lignite A			3,497 ~ 4,607	
	2. Lignite B			< 3,497	

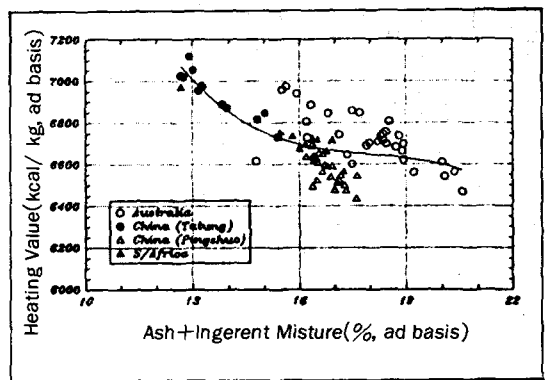
Fig. 1. Proximate analysis and heating value (air dry basis) of coal.



2-2.3. 전유황분 및 분말도

석탄 중의 전유황 함량은 시멘트 소성공정 내에서 순환되는 유황물질의 주원으로서, 킬른내에서 안정된 알카리/유황물질 순환을 위해서 사용되는 주/부원

Fig. 2. Relationship between heating value and contents of ash and inherent moisture based on air dry basis



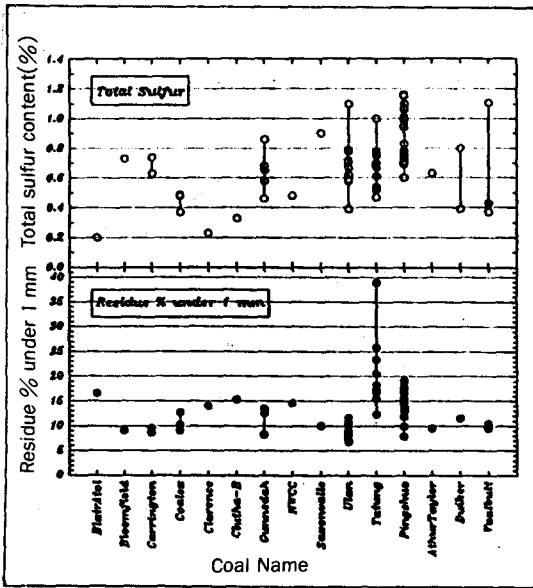
료의 알카리 함량과 매우 밀접한 관계를 갖는다.

Fig. 3에 사용 석탄의 전유황 함량 및 분말도를 보여주고 있다. Pingshuo탄의 전유황 함량이 다소 높게 나타나며, 호주탄인 Blair Athol, Coalex탄에서 낮게 나타나고 있다. 입하탄의 분말도는 석탄 야적 및 취급시에 고려하여야 할 매우 중요한 변수로서, 석탄 미분말이 증가할수록 비산분진이 증가할 수 있다. 일반적으로 석탄채광시 유황 및 ash함량 조절을 위해 water washing을 통해 대부분의 미분말 석탄이 제거되고 있으나, Tatung탄의 경우 raw coal이기 때

〈丑-5〉 Condensation temperatures and volatility of volatile matters in kiln

Volatile Matter	Condensation Temperatures	Volatility	Compounds	Remark
Chlorides	650~800°C	0.97~1.0 (0.99)	KCl, NaCl, CaCl ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Hardly leave the kiln via clinker • Larger volatile cycle within kiln system
Sulfates	800~1000°C	0.9~1.0	K ₂ SO ₄ , Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ K ₃ Na(SO ₄) ₂ , Ca ₂ K ₂ (SO ₄) ₂	

Fig. 3. Total sulfur content and residue % under 1 mm of raw coal

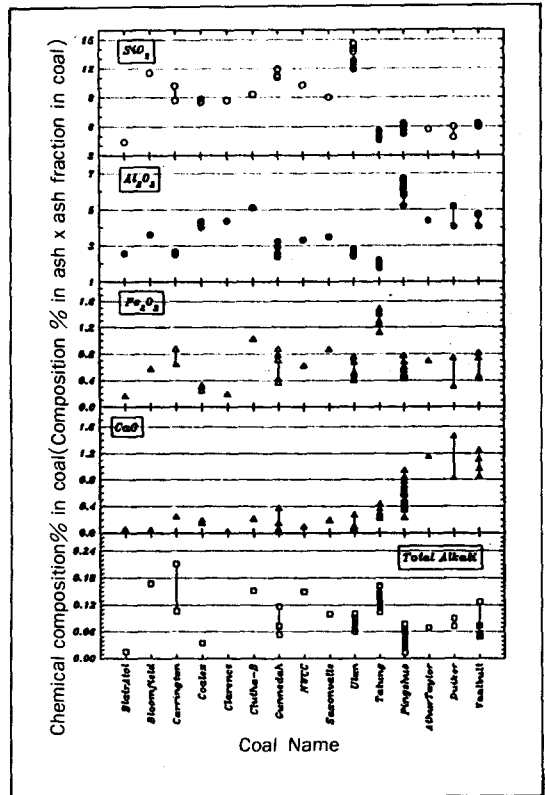


분에 약 40%까지의 1mm이하 미분말을 갖고 있으며, 따라서 Tatum탄 사용/취급시 석탄 비산분진 방지를 위해 세심한 주의가 필요하다.

2-2.4. Ash 화학분석

시멘트 산업에서 연료로 사용되는 석탄 중 ash는 클링커 제조를 위한 일부 원료로 사용되기 때문에, 석탄 ash의 화학성분은 원료배합 뿐만아니라, ash중에 포함된 각 성분에 따라 부원료 보충으로도 사용될 수 있기 때문에 석탄사용시 매우 중요한 고려항목이다. Fig. 4 및 5는 각 석탄종류에 따라 석탄중에 포함된 ash 성분의 무게%(석탄중 ash 함량% x ash 중 성분분율)와 ash 성분의 modulus를 각각 보여주고 있

Fig. 4. Chemical composition % in coal according to coal name.



다. 일반적으로 호주탄에서 SiO₂함량 및 SM 값이 높게 나타나며 특히 Ulan탄의 SiO₂함량 (SM 값)이 가장 높다. Al₂O₃성분은 Pingshuo탄에서 Fe₂O₃성분은 Tatum탄에서 높게 나타난다. 따라서 각 시멘트 산업의 원료환경에 따라 사용하는 석탄을 조정하여 일부 필요한 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃등을 보충할 수 있을 것이다. 또한 Tatum탄의 경우 total alkali함량이 다소 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 석탄의 공업분석(dry free basis)과 ash

〔丑-4〕 Results of correlation for the ash fusion temperatures

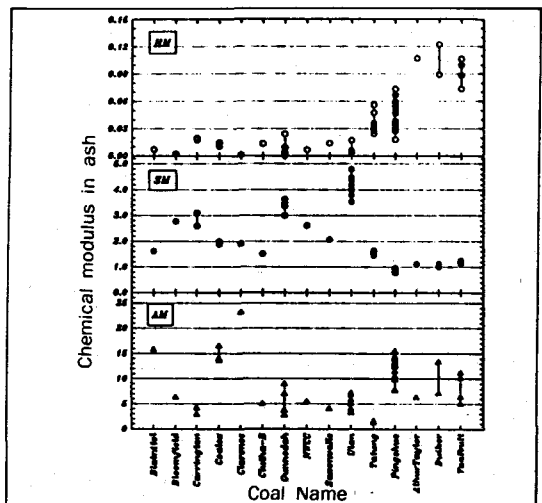
Ash fusion temperatures	Correlation equations	Correlation coefficient
Initial	• IDT=1727.0-2141.8(Base / Acid ratio)	0.897
Deformation	• IDT=567.5(S) ^{0.0885} (A) ^{0.1308} (F) ^{-0.1308} (C) ^{-0.0522}	0.910
Temperature (IDT)	• IDT=450.0(S) ^{0.1405} (A) ^{0.2344} (F) ^{-0.1096} (C) ^{-0.0444} (M) ^{-0.0322} (K) ^{-0.0293} (N) ^{0.0256} (T) ^{-0.0259}	0.925
Softening	• ST=1753.6-2199.3(Base / Acid ratio)	0.896
Temperature	• ST=226.2(S) ^{0.2885} (A) ^{0.3279} (F) ^{-0.1026} (C) ^{-0.0505}	0.914
(ST)	• ST=135.0(S) ^{0.3371} (A) ^{0.3296} (F) ^{-0.0768} (C) ^{-0.0252} (M) ^{-0.0277} (K) ^{-0.0286} (N) ^{0.0011} (T) ^{-0.0533}	0.931
Hemispherical	• HT=1736.5-1888.6(Base / Acid ratio)	0.905
Temperature	• HT=197.6(S) ^{0.2614} (A) ^{0.3272} (F) ^{-0.0605} (C) ^{-0.0471}	0.922
(HT)	• HT=86.0(S) ^{0.4069} (A) ^{0.3630} (F) ^{-0.0420} (C) ^{-0.0126} (M) ^{-0.0427} (K) ^{-0.0008} (N) ^{-0.0079} (T) ^{-0.0729}	0.956
Fluid	• FT=1731.7-1615.4(Base / Acid ratio)	0.912
Temperature	• FT=232.7(S) ^{0.2481} (A) ^{0.2886} (F) ^{-0.0365} (C) ^{-0.0440}	0.909
(FT)	• FT=106.5(S) ^{0.3973} (A) ^{0.3192} (F) ^{-0.0261} (C) ^{-0.0106} (M) ^{-0.0409} (K) ^{-0.0171} (N) ^{-0.0106} (T) ^{-0.0351}	0.947
<p>• Symbols</p> <p>Base / Acid ratio = $\frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$ in coal ash</p> <p>S, A, F, C, M, K, N, T : Chemical composition % of</p> <p>SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂ in coal ash, respectively</p>		

의 성분(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)의 ternary diagram 을 보여주고 있다. 사용한 석탄의 bituminous hvA~hvB group으로서 비슷한 지점에서 공업분석 값을 보이고 있으나, ash 성분에서는 각각의 성분이 매우 넓은 범위에 걸쳐 다양하게 나타나고 있다.

2-2.5. Ash 용융온도(fusion temperatures)

일반적으로 석탄의 ash 용융온도(fusion temperature)는 initial deformation (IDT), softening(ST), hemispherical(HT), fluid temperatures (FT) 에서 ST를 일컬으며, 각각의 용융온도는 석탄 ash의 각 성분에 따라 온도가 다르게 나타난다. 본 연구에서는 석탄 ash의 oxides 함량에 따른 ash 용융온도의 변화를 검토하였다. 일반적으로 산성산화

Fig. 5. Chemical modulus (HM, SM, AM) in coal ash according to coal name.



물인 SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 는 용융온도를 증가시키며, 염기성 산화물은 Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O 는 용융온도를 저하시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 산성 및 염기성 성분의 상호작용에 의해 용융온도가 결정되기 때문에, 본 연구에서는 석탄 ash의 oxides 함량에 따른 ash용융온도의 변화를 검토함으로써 석탄 ash의 화학성분으로부터 간단하게 ash용융온도를 예측하는 상관식을 도출하였다.

석탄 ash의 용융온도는 ash중의 Fe_2O_3 함량이 증가함에 따라 감소하고 있는 것을 볼 수 있으며(Fig. 7), 또한 석탄 ash중 염기성과 산성성분의 비가 증가함에 따라 용융온도가 감소하는 것(Fig. 8)을 볼 수 있다. 각각의 석탄 ash성분이 용융온도에 미치는 영향을 검토하여 상관식을 <표-4>와 같이 도출하였다. 각각 상관식의 지수에서 볼 수 있는 것 처럼 Fe_2O_3 가 용융온도에 미치는 영향이 IDT에서 FT로 갈수록 감소하고 있으며, SiO_2 , Al_2O_3 의 영향은 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 석탄 ash성분 중 초기 용융온도의 차이는 주로 Fe_2O_3 함량에 의해서 결정된다고 사료된다.

2-3. 석탄 염소농도 기준도출

킬른공정 내에서 주입된 휘발성분은 킬른내에서 휘발하여 킬른입구 및 예열기 부분에서 응축되어 다시 킬른으로 투입되는 휘발/응축과정을 반복함으로써 킬른내에서 휘발물질 순환현상을 이룬다. 특히 킬른내의 휘발물질 중 염소성분은 휘발도가 매우 높고, 알칼리 물질과 반응한 alkali chloride 화합물은 $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ 정도에서 99%이상 휘발하여, $650\sim 800^\circ\text{C}$ 정도에서 응축되기 때문에, alkali sulphates 화합물 보다 응축온도가 보다 낮아 대부분의 alkali chloride 코팅은 예열기 부분에서 응축된다. <표-5>는 킬른내의 휘발물질 화합물 및 응축온도를 보여주고 있다. 킬른내에 주입된 염소성분이 어느 이상 높아지면 응축의 과정에서 코팅생성이 증가하면서 최종적으로는 build-up을 야기하게 된다. 따라서 본 연구에서는 안정된 킬른운전을 유지하기 위해서 킬른내로 주입되는 석탄 염소농도에 대한 관리기준을 도출하였다.

본 연구에서는 킬른 요구에서 킬른으로 주입되는 원료 중 SO_3 와 염소농도에 따른 공정상태를 제시한 Holderbank자료를 이용하여[1] 석탄의 염소농도 관리기준 도출을 위한 전개를 하였다. Fig. 9는 킬른

Fig. 6. Ternary diagram of proximate analysis (dry free basis) and ash components (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)

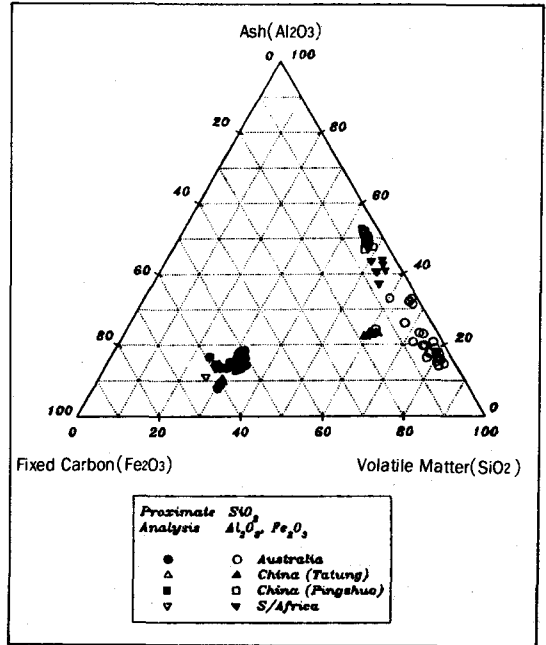
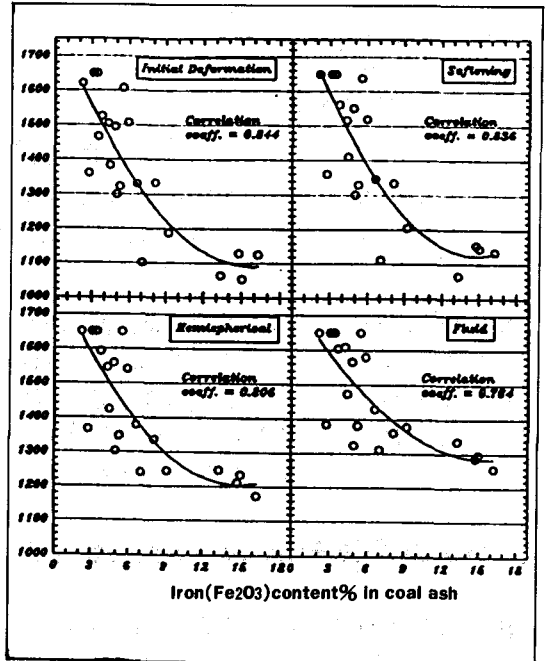


Fig. 7. Ash fusion temperatures with iron content in coal ash



요구원료의 SO_3 농도에 따른 염소농도 임계치를 각각 보여주고 있다. 각각의 임계치에서 요구원료에서 염소농도가 증가할수록 SO_3 농도가 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 염소농도가 증가함에 따라 alkali

sulphates 휘발성분의 응축온도를 낮추기 때문이다.

킬른 요구원료에서 각각의 염소 임계농도는 다음과 같이 표현된다.

(1) 공정휴지 (Frequent blockage)

$$C_{Cl} (\%) > C_I \quad (1)$$

(2) 빈번한 염소코팅에 의한 공정불안정 (Intense cleaning)

$$C_I > C_{Cl} (\%) > C_{II} \quad (2)$$

(3) 정기적 염소코팅에 의한 공정 불안정 (Normal cleaning)

$$C_{II} > C_{Cl} (\%) > C_{III} \quad (3)$$

(4) 염소코팅 불안정 없음 (No Encrustations)

$$C_{III} > C_{Cl} (\%) \quad (4)$$

여기서

C_{Cl} , C_{SO_3} : 킬른 요구원료에서 염소농도 및 SO_3 농도(%)

$$C_I (\%) = -0.40(C_{SO_3} \%) + 2.0 \quad (5)$$

$$C_{II} (\%) = -0.375(C_{SO_3} \%) + 1.4 \quad (6)$$

$$C_{III} (\%) = -0.32(C_{SO_3} \%) + 0.8 \quad (7)$$

킬른형식 및 용량, 사용원료/연료에 따라 요구원료에서의 SO_3 농도는 다르게 나타나지만 본 연구에서 조사한 킬른 요구원료의 SO_3 농도평균은 1.03%이었다. 따라서 각각의 염소농도 임계치는 다음과 같이 계산된다.

$$C_I = 1.59\%, C_{II} = 1.02\%, C_{III} = 0.47\% \quad (8)$$

또한 킬른공급 석탄 염소농도에 따라 요구원료의 염소농도는 다음과 같이 측정되었다.

$$C_{Cl} (\text{ppm}) = 122(C_{Cl, \text{c}} \text{ppm}) - 15,460 \quad (9)$$

여기서 $C_{Cl, \text{c}}$: 킬른공급 취입탄 염소농도(ppm)

따라서 식(8) 및 (9)로부터 다음과 같이 각각의 취입탄 염소농도 임계구간을 구할 수 있었다.

- ① 공정휴지 (Frequent blockage): $C_{Cl, \text{c}} > 260$ ppm
- ② 빈번한 염소코팅에 의한 공정불안정 (Intense cleaning): $260 \text{ppm} > C_{Cl, \text{c}} > 210 \text{ppm}$
- ③ 정기적 염소코팅에 의한 공정불안정 (Normal cleaning): $210 \text{ppm} > C_{Cl, \text{c}} > 165 \text{ppm}$
- ④ 염소코팅 불안정 없음 (No Encrustations): $C_{Cl, \text{c}} < 165 \text{ppm}$

Fig. 10은 배합석탄 염소농도 관리기준을 도출하는 계산 flow sheet를 보여주고 있다. 킬른공정의 형태, 사용 주/부원료의 성분함량에 따라 도출되는 석탄 염소농도 기준이 다르게 나타나기 때문에, 위의 전개 과정을 통해 적절한 석탄 중의 염소농도 관리기준을

Fig. 8. Ash fusion temperatures with base/acid ratio in coal ash

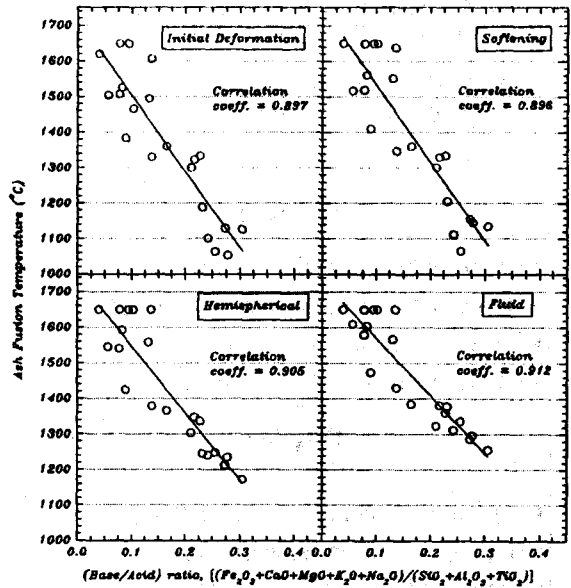
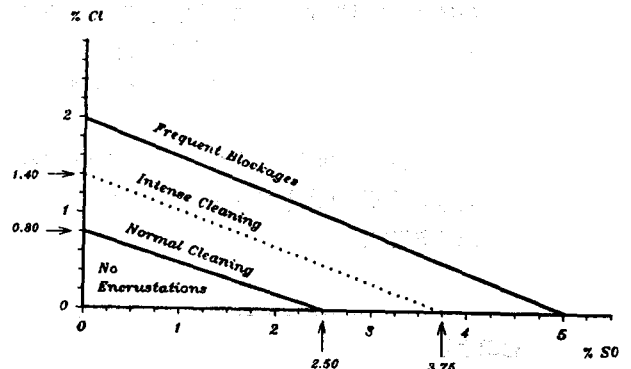


Fig. 9. Maximum tolerable concentrations in the hot meal of kiln inlet. (Combination of sulfur and chlorine based on the data of Holderbank)



도출 할 수 있을 것이다. 당 공장에서는 위의 전개 과정을 통해 염소코팅 불안정이 없는 석탄 취입탄 염소 농도를 맞추기 위해 석탄의 염소농도에 따라 이성분, 삼성분 배합을 통해 어느 이하의 석탄 염소 농도로 안정된 석탄공급을 이룸으로서 염소코팅에 의한 공정 불안정 요인을 해소하고 있다.

3. 결론

- (1) 당사에서 사용한 대부분의 석탄이 ASTM 분류 bituminous hvA 석탄이며, Tatung 탄의 경우 bituminous hvB 석탄으로 분류된다.
- (2) 석탄의 발열량 (air dry basis)은 석탄의 ash

- 및 고유수분 함량이 증가함에 따라 감소한다.
- (3) 호주탄의 경우 ash함량 및 ash 중 SiO₂ 함량이 높게 나타난다.
- (4) 중국탄의 Tatung 탄 및 Pingshuo 탄은 다음과 같은 특성을 갖는다.

Tatung 탄
<ul style="list-style-type: none"> • Higher inherent moisture : 4~5% • Higher Fe₂O₃ content in ash : 13~21% • Lower ash fusion temperatures • Higher residue under 1 mm : 15~40%
Pingshuo
<ul style="list-style-type: none"> • Higher Al₂O₃ content in ash : 42~49% • Higher ash fusion temperatures • Higher chloride content : 300~650ppm

- (5) Ash fusion temperatures는 ash 성분의 Fe₂O₃ 및 (base/acid)비가 증가함에 따라 감소하며, ash성분으로 부터 ash fusion temperatures을 예측할 수 있는 식을 제시하였다.
- (6) 킬른 요구원료의 SO₃ 및 염소농도로부터 공정 안정을 위한 취입탄 석탄 염소농도 배합기준을 도출하였다.

참고문헌

1. Akstinat, M.H. and Rott, C. : "Coulometric Determination of Low Halide Concentrations in Inorganic Binders and Mineral Raw Materials," Zem-Kalk-Gips, 41(5), Ed. B, 117-120(1988).
2. Holderbank : Cement Seminar-Process Technology, Holderbank Management and Consulting Ltd. (1994).

Fig. 10. Schematic flow sheet for the derivation of chlorine criteria in coal

