

# 크링카 粉砕助劑로 使用되는 Sodium Acetate의 Mechanism에 관한 研究

許 金 廷

<雙龍洋灰生産管理部代理>

◆…… 譯者註：本稿는 이태리 국립 연구소 (Italian National Research Council)의 鑛物試驗室……◆  
◆……에 근무하는 Giorgio Gighi 교수의 연구 報文을 번역한 것임 (Cement Technology……◆  
◆……May/June 1972). ……◆

## I. 序 言

異物質을 粉砕하는데는 막대한 에너지가 소모되므로 이것이 계기가 되어 粉砕效率增大에 관한 研究가 各分野에서 활발히 전개되었다. 지금까지 알려진 가장 좋은 방법의 하나는 化學助劑를 合理的으로 사용하는 方法이다. 그러나 效果的으로 사용하기 위해서는 使用方法에 대한 예비 지식이 필요하다.

Rehbinder와 그의 동료들은 鑛物質을 습식 분쇄할 경우에 관하여 實驗室的 研究를 하였다. 이들은 화강암, 석영, 석회석 같은 단단한 岩石을 시추할 때 착암수(drilling water)에 0.01~0.1% 농도의 전해 흡착제나 계면 활성제의 사용으로 굴진 속도를 20~60% 증진시킬 수 있다는 것을 발견하였다.

이런 연구는 Shepherd에 의해서 재확인되었으나 한편 Gilbert와 Hughes의 실험으로 확인되지 않았다.

석영과 석회석을 습식 분쇄하는데 사용된 有機 혹은 無機 첨가물은 粉砕效率를 감소시키거나 전혀 영향을 미치지 않는다.

Hukki와 Reddy도 첨가물의 영향에 관해서 뚜렷한 경향이 없다고 했다. 그러나 크링카를 비롯해서 여러가지 物質을 건식 분쇄할 때 化學첨

가제가 有益한 영향을 미친다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 크링카에 粉砕助劑를 사용하는 30年前부터이나 그 메카니즘에 대해서는 별로 알려져 있지 않고 많은 實驗만 行해졌다.

現在까지 이루어진 結果로는 粉砕助劑가 agglomeration 혹은 coating reducer로 또 hardness reducer로 혹은 이 두 作用을 同時에 한다는 것이다.

어떤 경우에도 Rehbinder의 micro-flaw hypothesis(micro-flaw를 메우지 않고 그 벽으로 첨가제가 흡수된다)의 범주를 벗어나지 못하고 있다. 이와 같은 배경을 가지고 크링카 분쇄에 대한 粉砕助劑의 메카니즘에 관한 實驗을 이태리 국립 연구소 (Italian National Research Council)의 鑛物試驗室에서 실시했다.

## II. 實 驗

벽이 smooth한 Abbe-type mill(內徑: 200×200mm)에서 batch grinding test를 行했다. 특별한 test에 따라서 6, 12, 19, 25 mm 강구를 mill에 volume으로 40% 약간 넘을 만큼 채웠다. 각 batch는 시멘트 1kg(0.6 mm 이하 74 $\mu$  이상 size)을 미분하여 100°C에서 건조시킨 석고 30g을 첨가했다. 크링카의 表面積은 47cm<sup>2</sup>/g이고 grain size 분포는 <表-1>과 같다.

<表-1> grain size

sieve aperture (mm)	% retained
0.59	2.28
0.42	36.89
0.30	65.51
0.21	83.07
0.15	94.26
0.10	98.82
0.07	99.37

mill speed는 임계 속도(critical speed)의 64, 72, 80, 88, 96%에 해당하는 속도로 變更시킬 수 있도록 하였다.

drive motor의 전력 소모는 무첨가時 grinding test에서 agglomeration이 일어나지 않는 속도를 선택하여 그 값에 固定시켰다. 따라서 mill 내에서 粉碎媒體에 의해 크링카에 傳達된 total energy는 강구 diameter나 mill 속도에 관계 없이 一定하게 유지된 것이다. test가 끝나면 mill에서 시멘트를 全部 꺼냈다. mill 内部나

<表-2> Total specific surface of the clinker ground at constant mill speed

ball size (mm)	concentration of the grinding aid; %				
	0	0.25	0.50	1.00	1.50
6	2,146±172	2,553±137	3,264±129	3,601±153	3,628±57
12	2,821±90	3,099±53	3,337±24	3,827±80	3,824±85
19	2,870±75	3,061±68	3,322±79	3,845±57	3,823±41
25	2,960±105	3,122±57	3,557±60	3,537±100	3,490±81

<表-3> Total specific surface of the clinker ground at different mill speeds

ball size (mm)	mill speed % critical	concentration of the grinding aid; %				
		0	0.25	0.50	1.00	1.50
12mm balls						
64		3,316±120	3,333±130	3,259±57	3,373±57	3,537±55
72		3,287±127	3,306±123	3,342±148	3,694±63	3,725±73
80		3,170±59	3,479±34	3,521±133	3,794±10	3,924±50
88		2,821±90	3,099±53	3,337±24	3,827±80	3,824±85
96		2,747±143	2,745±86	2,988±52	3,402±114	3,430±157
25mm balls						
64		2,813±11	2,853±21	2,916±33	3,005±33	3,049±101
72		2,760±52	3,018±31	3,073±102	3,208±19	3,287±59
80		2,959±66	3,309±68	3,419±80	3,509±58	3,566±56
88		2,960±105	3,122±57	3,357±60	3,537±100	3,490±81
96		2,969±184	3,071±139	3,401±105	3,561±51	3,667±65

ball에 붙어 있는 시멘트도 회수하여 무게를 달고 이 값을 코팅으로 기록했다. additive를 첨가하지 않는 test에서도 특별히 agglomeration이 예상될 때 그 sample은 additive treatment로 간주했다.

cement sample은 200 mesh Talyer sieve로 screening하여 +74 $\mu$  fraction과 -74 $\mu$  fraction으로 Blaine을 측정하여 이 값을 粉碎生産物의 total specific surface로 決定했다.

粉碎助劑로 사용한 分析用 sodium acetate는 mill 운전 전에 feed charge와 충분히 混合하여 사용했다.

### III. 結 果

實驗은 두 종류로 실시했다.

#### 實 驗 1

速度: 一定(임계 속도의88%)

投入鋼球 : unmixed  
ball size : 6, 12, 19, 25mm.

實驗 2

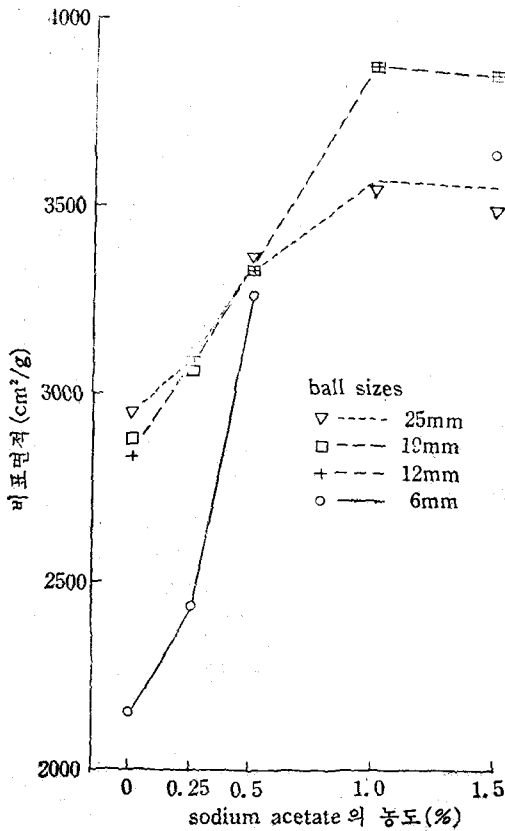
速度 : 變更(임계 속도의 64, 72, 80, 88, 96%)

投入鋼球 : unmixed

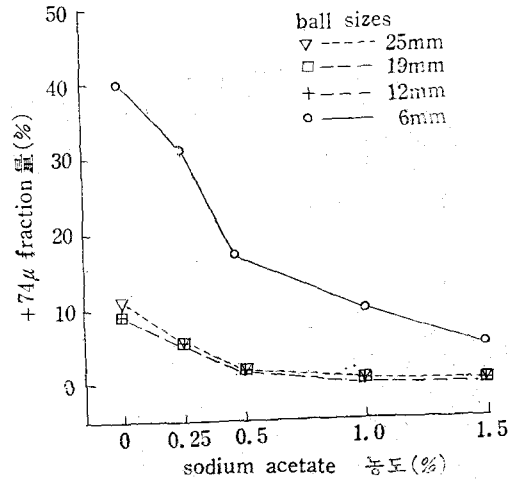
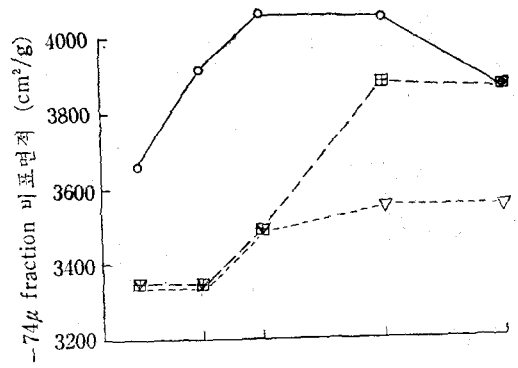
ball size : 12, 25mm.

粉碎助劑 첨가량(실험 1, 2 공통) : 크링카에 대해 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5%.

<表-2>와 <表-3>은 product의 비표면적을 算術平均値와 범위로 表示한 것이다. 實驗은 各 test마다 3회씩 실시했다. 어떤 경우에는 범위가 너무 커서 平均値間의 差의 信賴度를 체크하기 위해 student의 "t" 檢定을 적용해 보았으나 5% 信賴限界內에서 有意差가 없으므로 이 값을 plotting 했다(<그림-1>, <그림-4> 참조).



<그림-1> 粉碎助劑濃度와 比表面積(Blaine)과의 關係(mill 速度 一定時)



<그림-2> 一定速度粉碎時 添加劑濃度와 +74μ fraction 重量과 -74μ fraction 比表面積과의 關係

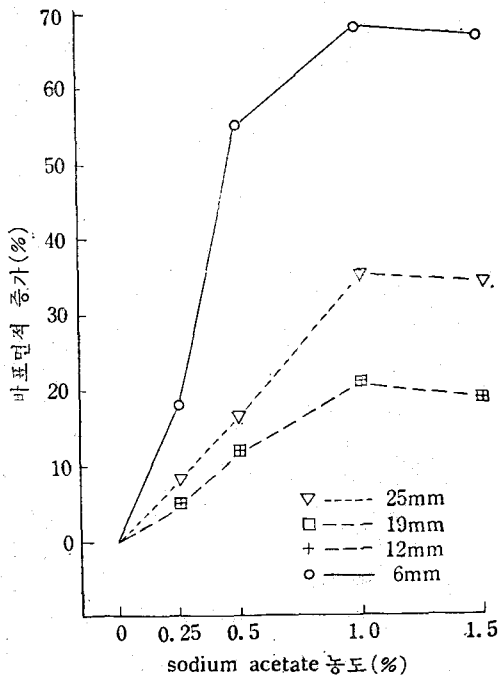
이 結果를 보면 mill speed를 一定하게 維持시켰을 때 sodium acetate는 粉碎效率를 분명히 向上시키고 있으나 기계적 조건, 化學的 조건이 變할 때는 product의 fineness의 變化가 심하다.

粉碎助劑의 效果는 粉碎助劑의 濃度가 증가함에 따라 증가하다가 최고치에 도달하게 되면 粉碎媒體의 크기에 關係 없이 一定한 값을 유지하게 되며 粉碎助劑가 效果를 나타내는 범위는 ball size에 따라 다르다. fineness가 가장 좋을 때의 條件은 ball size 12 혹은 19mm, 粉碎助劑인 sodium acetate 약 1%일 때이며 sodium acetate 1%에서 ball size 6mm와 25mm는 ball size 12mm, 19mm 때보다 훨씬 coarse하다.

粉碎助劑가 0.5%일 때는 모든 ball size에서

fineness 가 同一하며 0.25%에서는 12mm, 19mm, 25mm ball 을 사용했을 때는 fine 하지 못 하지만 6mm ball 을 사용했을 때는 더욱 그렇다. 이 결과로서 더욱 알기 쉬운 도표를 얻기 위하여 +74 $\mu$  fraction 에 대한 상대적인 量과 -74 $\mu$  fraction 의 비표면적을 <그림-2>에 plotting 했다. 이 그림에서 보면 grinding aid 의 농도와 ball size 의 效果를 분명히 알 수 있다.

粉碎助劑를 첨가하지 않았을 때 굵은 粒子를 부수는 때는 6mm ball 이 다른 ball 보다 效果가 적지만 fine 한 粒子를 분쇄하는 때는 다른 ball 보다 效果의이다. 12, 19, 25mm ball 은 이와 같은 관점에서 보면 큰 차이가 없다. 粉碎助劑를 사용하면 6mm ball 로서는 粗粒粉을 粉碎할 때나 微粒粉을 粉碎할 때나 共히 效果가 있으며 12mm ball 이나 19mm ball 을 사용할 때와 25mm ball 을 사용할 때는 粉碎助劑의 量的인 效果가 다르다. grinding aid 의 效果는 grinding media 의 size 에 따라 다르긴 하지만 <그림-3>에서는 grinding aid 를 사용하면 全體적으로 비



<그림-3> 一定速度粉碎時 添加劑와 比表面積 增加

<表-4> Analysis of variance. Grinding tests at constant mill speed

Source of variation	Degree of freedom	Estimated variance	F calc.	F 99%
Main effect:				
balls size	3	396, 053	36.2	4.13
aid concentration	4	2, 345, 999	214.5	3.65
Interaction	12	103, 345	9.4	2.50
Error	40	10, 936		
<b>Total</b>	<b>59</b>			

표면적이 증가한다는 사실을 나타내고 있다.

test 結果를 잘못 解析할 우려는 없다 할지라도 統計的 確認은 필요할 것으로 생각했다. 두 factor 間에 交互作用이 存在(즉 분쇄 조제의 농도에 따른 效果는 ball size 에 영향을 받는다)한다는 사실은 分散分析으로 알 수 있었다(<表-4> 참조). 또 시멘트의 비표면적과 mill operation 을 特定짓는 2개의 parameter 間의 關係를 나타내는 方程式은 수차의 회기분석에 의하여 다음과 같이 결정지어진다.

$$F = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y^3 + a_4xy + a_5e^y$$

여기서  $a_0 = 0.03416$      $a_1 = 1.1756$

$a_2 = -0.2654$      $a_3 = -1.0806$

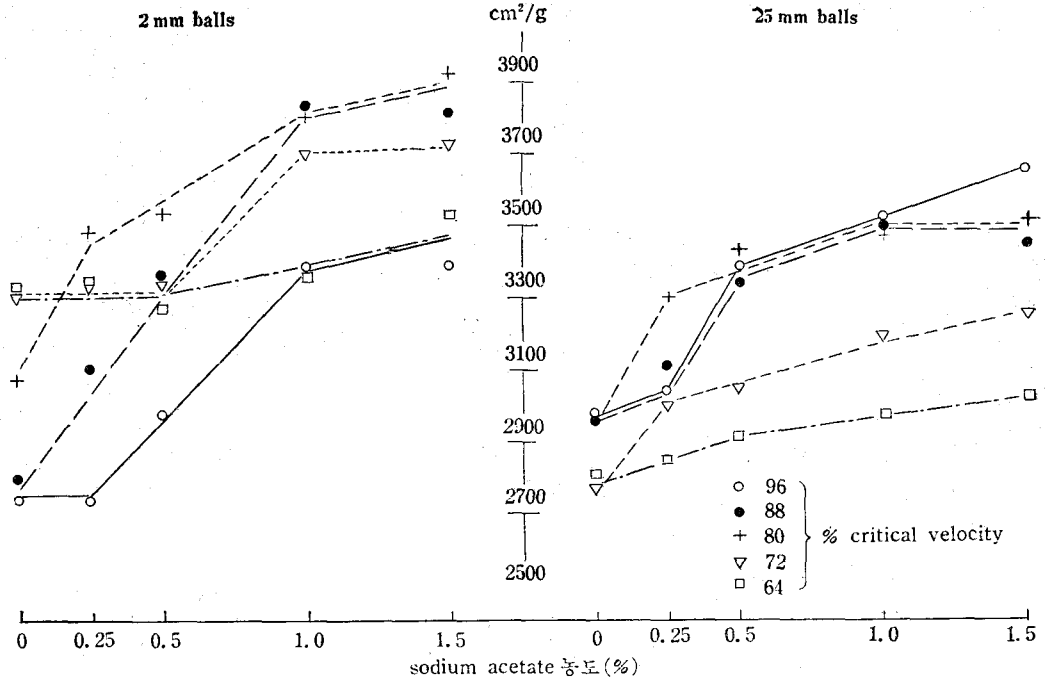
$a_4 = -0.3428$      $a_5 = 1.5688$

그리고  $x =$  粉碎媒體의 直徑

$y =$  sodium acetate 의 농도

위 方程式은 平均 deviation 2%를 갖는 각 실험치를 연결한 식이며 각 실험치의 오차는 -5.7%이다. 粉碎助劑의 농도가 더 큰 비중을 차지하고 있는 셈이다. mill speed 를 달리 해서 시험한 경우에도 粉碎助劑는 크링카의 粉碎性을 向上시키고 있다(<그림-4> 참조).

粉碎助劑의 농도가 0.5% 이하일 때는 가끔 效果가 없는 것처럼 보이지만 결코 분쇄 效果를 저하시키지는 않는다. ball size, mill speed, grinding aid 의 charge 量間에는 분명히 交互作用이 있다. 이 結果로서 確實한 結論을 얻을 수는 없지만 grinding aid 와 operating condition 間의 뚜렷한 경향성이 존재하는 것만은 사실이다. grinding aid 를 첨가하지 않았을 때 시멘트의 fineness 는 12mm ball 을 사용하면 mill speed



<그림-4> 실험 mill 속도와 비표면적과의 관계

가 줄어들수록 증가하고 25mm를 사용하면 mill speed가 증가할수록 시멘트의 fineness가 증가한다.

sodium acetate를 0.5% 첨가했을 때 12mm ball을 사용하든 임계 속도의 80%에서 가장 fine한 분말을 얻을 수 있고 64, 82, 88%에서는 중간 fineness의 분말, 96%에서 가장 coarse한 분말이 얻어진다. 25mm ball을 사용하면 임계 속도의 80, 88, 96%에서 가장 고운 분말을 얻을 수 있고 64%에서 가장 coarse한 분말이 되며 72%에서 중간 수준의 제품을 얻을 수 있다.

sodium acetate를 1% 첨가했을 때 25mm ball을 사용하면 결과에 변화가 없고 12mm ball을 사용하든 critical speed의 80, 88%에서 finest product, 72%에서 intermediate product, 64, 96%에서 coarsest product가 생긴다. 全般的으로 볼 때 finest product는 ball size 12mm, speed 80~88%, sodium acetate 1%일 때 얻어진다.

粉砕助劑의 效力은 25mm 보다는 12mm 에서, low speed 보다는 high speed 에서 더 크고 speed와 분쇄 조제의 交互作用에 관한 것은 다른 유형

에 따른다(<그림-6>).

12mm ball을 사용할 때 sodium acetate의 效果는 mill speed가 임계 속도의 80~88%까지는 농도 증가에 따라 上昇하고 그 以上の 속도에서는 감소한다.

25mm ball과 grinding aid 농도 0.5~1.0% 사용시에는 임계 속도의 80, 88, 96%에서 效果가 同一하다.

grinding aid로서의 效果를 나타내는 최저 농도는 ball size와 mill speed에 따라 다르다. 실험 결과의 解析으로부터 도출된 앞의 結論은 다시 統計的으로 確認되었다. <表-5>에서 보는 바와 같이 두 factor間에 交互作用이 存在한다는 사실을 알 수 있다. 이것은 분쇄 조제의 농도에 따른 效果는 ball size와 mill speed에 크게 좌우된다는 것을 뜻한다. 다시 말하면 cement product의 비표면적과 grinding test의 3개의 parameter(분쇄 매체의 직경, mill speed, 분쇄 조제의 농도)間的 複合關係를 나타내는 방정식은 축차 회기 분석(multiple, regression analysis)으로 다음과 같이 결정지어진다.

$$F = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y + a_4yz + a_5 \tan y + a_6 e^{1.3z}$$

<表-5> Analysis of variance. Grinding tests at different mill speeds

Source of variation	Degree of freedom	Estimated variance	F calc.	F 99%
Main effect:				
A=ball size	1	933, 781	92.95	6.85
B=mill speed	4	866, 581	36.49	3.48
C=aid conc.	4	1, 639, 320	163.18	3.48
Interactions				
AB	4	734, 571	73.12	3.48
AC	4	85, 224	8.48	3.48
BC	16	83, 552	9.32	2.20
ABC	16	19, 880	1.98	2.20
Error	100	10, 048		
<b>Total</b>	<b>149</b>			

여기서  $a_0=0.06144$   $a_1=-0.08023$   
 $a_2=-10.7664$   $a_3=1.0004$   
 $a_4=17.9584$   $a_5=-0.1175$

그리고  $x$ =grinding media의 dia  
 $y$ =mill speed  
 $z$ =sodium acetate의 농도

위 방정식은 平均 deviation 9.8%를 갖는 각 Point(실험치)를 연결하는 식이며 각 point의 오

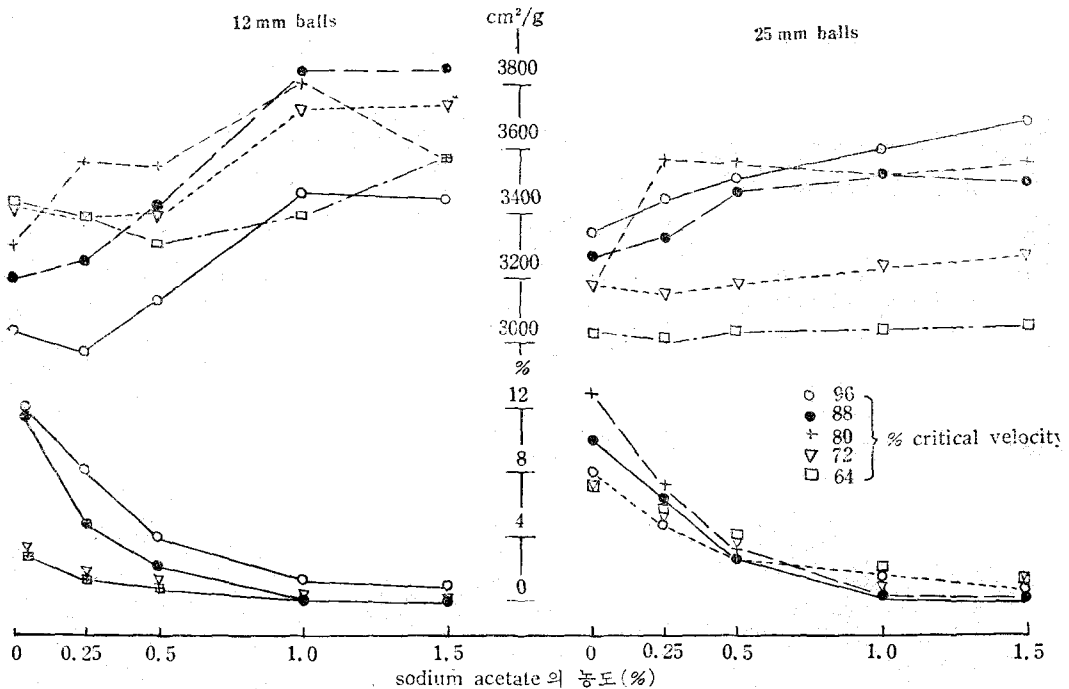
차는 -11.8%이다. 이 경우 역시 분쇄 조제의 농도가 가장 큰 비중을 차지하고 있다는 사실을 알 수 있다.

#### IV. 檢 討

이 結果로서 크링카 粉砕時 sodium acetate를 使用한다면 분쇄 효율을 向上시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 건식 분쇄에는 두 가지 factor가 grinding에 영향을 미친다. 즉 하나는 agglomeration과 coating이고 다른 하나는 분쇄에 관한 factor이다.

本實驗은 添加物을 加하지 않았을 때도 agglomeration과 coating이 생기지 않도록 실시했다. 따라서 添加物은 크링카의 各 particle의 粉砕에만 영향을 미쳤다. 즉 粉砕에 대한 物質 저항(material's resistance)을 감소시키는 효과만을 일으켰다.

이것은 가장 작은 ball로서 시험한 <그림-2>의 結果에 明確히 나타나 있다. 즉 가장 작은 ball의 충격 에너지로서는 가장 큰 size의 크링카를 분쇄하기에 不足하지만 크링카의 破碎抵抗



<그림-5> 첨가제 %에 따른 +74 $\mu$  fraction과 -74 $\mu$  fraction의 표면적과의 관계

을 감소시키는 sodium acetate의 存在下에서는 가능하다. hardness reducers로서의 계면 활성제의 역할에 대한 설명은 Griffith's theory에서 알 수 있는데 이 理論은 잘 부수어지는 物質은 미세한 flaw나 crack들을 갖고 있으며 이것은 물질을 통한 불연속적인 확산에 의해 부수어진다는 것이다. 결국 flaw의 확산 정도는 물질 표면에 존재하는 flaw의 size와 數에 의존한다.

tumbling mill의 경우 기계적인 stress는 불연속적인 방법으로 진행한다. 즉 물질이 움직여지는 동안 새로운 미세한 crack이 발생하기도 하고 固體表面에 이미 존재하고 있던 crack이 확산되기도 한다. 또 물질이 기계적 stress가 제거되어 정지 상태에 있게 되면 flaw는 物質表面에 산재하던 flaw 자신들의 불완전한 원자간의 인력에 의해 다시 회복되며 하나의 화학 반응으로서 Gaudin의 분쇄 이론과 일치한다.

Rehbinder는 flaw內에서 선택 흡수 능력이 있는 物質이 잔존하는 전기력 사이의 공격을 차단한다고 주장했다.

즉 物質의 저항력이 약화되고 flaw의 회복이 불가능하게 된다. 변형력(deforming force) 때문에 microflaw들은 파편이 될 때까지 점점 물질의 內部로 진행하게 된다. 이미 보인 바와 같이 고체의 표면 에너지가 크면 클수록 microflaws의 생성이 어렵다. 비록 표면 활성제의 역할은 flaw의 생성 혹은 확산을 쉽게 하는데 도움을 주지만 표면 에너지를 감소시킴으로써 새로운 표면을 만들지는 못한다. 이 理論에 의하면 hardness를 감소시키고 뭉침(agglomeration)을 방해시키는 粉碎助劑의 효과를 기대한다는 것은 비논리적인 것 같다. 이것은 분쇄를 용이하게 하고 덩어리 형성을 방해하는 즉 flaws나 새로 형성된 표면 벽 반응 부위의 첨가제의 흡착과 같은 mechanism이기 때문이다.

첨가제 분자는 먼저 hardness 감소제로 작용함으로써 고체 입자가 완전히 파괴될 때까지 flaw벽의 sealing을 방해한다. 그 다음 tumbling media에 의해 새로 형성된 파편의 재결합을 방해하는 agglomeration 감소제 역할을 한다. 이 테스트에 의하여 粉碎助劑의 효과는 크링카 粒子와 粉碎媒體間의 충돌로 轉移된 에너지와 상관

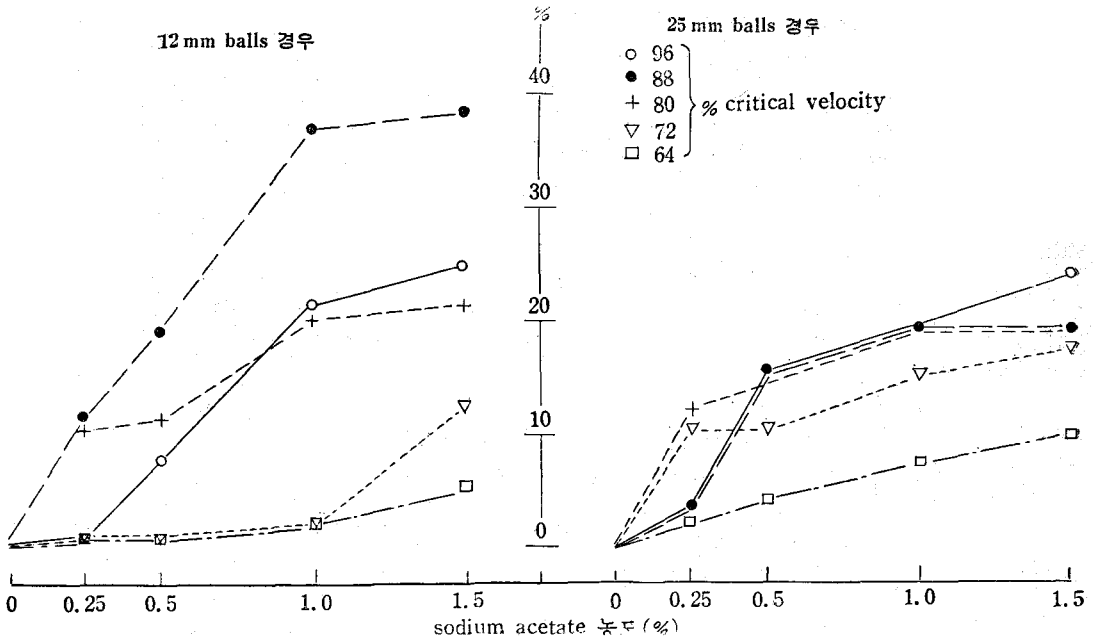
된다는 것을 이미 시험한 結果로 확실하게 한다. 즉 분쇄 과정에 屬하는 기계적 조건, 분쇄 매체의 크기 및 밀의 속도 등에 의존한다. 첫번째 要因에 대해서는 일정한 밀 속도로 테스트한 결과이며 <그림-1>, <그림-2>에 명백하게 나타나 있다. 어떤 분쇄 조제 사용도 없이 충분한 에너지 공급만으로 분쇄할 경우는 대형 ball을 사용하는 것이 효과적이고 소형 ball을 사용할 경우는 微 flaw가 sealing되기 때문에 아주 비효과적이다. 그러나 sealing을 방해하는 첨가제를 사용할 경우 새로운 표면 생성에는 소형 ball을 많이 사용하는 것이 효과적이다. mill이 임계 속도에 가까우면 매체의 움직임이 격동하여지나 임계 속도의 70% 정도일 때가 가장 적당하다. 격동하게 운동할 때 즉 임계 속도 가까워서 소요되는 에너지는 임계 속도 70% 정도 때보다 더 크다. 따라서 mill의 원주 속도 및 ball이 크면 클수록 소요되는 에너지는 더 크다. 이 결론은 <그림-4>에서 알 수 있는 바와 같이 분쇄 조제 없이 mill 속도 변화에 따른 전류를 조사해 보면 직경 25mm ball을 사용했을 경우가 微粉碎되고 12mm ball일 경우 속도가 느릴수록 더 微粉碎된다는 것을 알 수 있다.

mill이 임계 속도의 64, 72, 80%의 속도로 회전할 때 이 두 종류의 ball을 사용했을 경우를 비교해 보면 12mm ball의 경우가 25mm ball 경우보다 더 미분쇄되는 반면 88%일 경우는 그 반대임을 알 수 있다.

이 결과는 분쇄 과정에서 이러한 행동에 관계 있는 부분 및 mill 내부의 분쇄 매체의 움직임(낙하, 굴음, 미끄러짐) 등과 마찬가지로 분쇄, 충격, 마찰 등 기본 mechanism의 本性에 대한 지식의 한계가 있음을 보여 준다. 결과적으로 이 테스트의 결과를 해석하는 것은 결코 쉬운 일은 아니다. 이의 개략적인 해석은 다음과 같다.

분쇄 조제와 mill 속도와는 상호 관계는 12mm ball을 사용하여 테스트한 결과로 확실히 규명되었다(<그림-6>). 분쇄 조제의 효과는 임계 속도 88%까지는 증가했으나 96%에서는 감소했다. 입자의 微 flaw가 가장 크게 확산되는 것은 임계 속도 88%가 최대이다.

이 flaw의 network은 가장 낮은 속도에서 미



<그림-6> sodium acetate 濃度와 mill 速度變化에 따른 比表面積增加

약한데 이것은 충분한 기계적 stress 를 공급하지 못하고 빈도가 적기 때문이다.

또 network 의 發達은 最高速度에서도 制限을 받는다. 그것은 stress 가 너무커서 미세한 crack 이 생기지 않고 粒子가 급속히 쪼개지고 첨가제가 충분한 역할을 하지 못하기 때문이다. 이러한 현상은 25mm ball 을 사용했을 경우 저속에서도 나타나는데 이 경우는 분쇄 매체의 크기의 영향이 mill 속도의 영향보다 크기 때문이다.

sodium acetate 의 작용은 농도가 약 1%까지는 증가한다. 이것은 점차적인 시약의 흡착을 의미하며 이 흡착은 물체내에 存在하는 粒子나 flaw 表面의 원자가가 만족할 때까지 또 單分子層이 형성될 때까지 농도에 적비례한다.

농도가 너무 짙으면 분쇄에 도움이 되지 않고 오히려 저해하는 複分子 흡착이 일어날 수 있다. 이 현상은 12mm ball 을 사용할 경우보다 25mm ball 을 사용할 경우 더욱 흔하며(<그림-1>, <그림-3>) ball 이 다른 ball 에 쉽게 미끄러지기 위한 潤滑 역할을 하기 쉽다. ball size 가 크면 클수록, 표면적이 적으면 적을수록 또 단위 면적당 첨가제의 농도가 클수록 rolling 현상과 slipping 현상이 용이하게 일어난다. 그러므로 다음과 같이 가정하는 것이 논리적이다. 즉 ball 의 slip 때문에 spinning 되어야 하는 효과는 특히 입자들이 밀집되지 못했을 때 ball 潤滑 역할이

마찰 계수를 감소시키는 결과가 되기 때문에 상당히 적다고 가정할 수 있다. tumbling mill 에서의 분쇄 mechanism 은 abrasion 이나 chipping 보다도 impact 에 의한 것이 대부분이라고 일반적으로 알고 있지만 粉砕助劑는 아마도 impact 에 의한 분쇄보다 abrasion 에 의한 분쇄의 상대적 빈도에 더욱 영향을 줄 것이며 결과적으로는 微 flaw 의 network 을 확대시켜 분쇄 능력을 양호하게 한다.

## V. 結 論

1) sodium acetate 와 같은 粉砕助劑는 크링카의 분쇄 저항을 감소시키는 역할을 한다. 분쇄 조제의 작용은 물리적이라기보다 화학적이고 선택적으로 분쇄 효과를 증가시킨다.

2) 분쇄 능력을 최대로 할 수 있는 첨가제의 최적 농도는 단분자층을 형성할 수 있는 정도이고 이 이상이면 비효과적이거나 도리어 해로울 수 있다.

3) mill 운전의 기계적 조건은 첨가제의 작용 효과에 밀접한 관계가 있다. 그것은 기계적인 조건이 各粒子內의 flaw network 생성을 결정짓기 때문이다.

4) 첨가제를 사용할 경우 분쇄 최적 기계적 상태는 첨가제를 사용하지 않을 때와 다르다. 그것은 분쇄 조제 농도에 따라 다르기 때문이다.