

최 종
연구보고서

범용 Ceramic Roll Mill 소재 및
생산기술 개발

Development of Materials and Production
Technology for General-purpose
Ceramic Roll Mill

연구기관

강원대학교

농 립 부

1999-15

농 립 부 자 료 실
등록번호: 5475
등록일: 2001년 3월 7일
기증:

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “범용 ceramic roll mill 소재 및 생산기술 개발에 관한 연구” 과제 의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 10. 30.

주관연구기관명 : 강원대학교

총괄연구책임자 : 강 위 수

세부연구책임자 : 한 상 목

연 구 원 : 이 해 익

연 구 원 : 이 귀 현

연 구 원 : 양 승 기

연 구 원 : 강 상 규

연 구 원 : 박 재 우

연 구 보 조 원 : 목 효 균

연 구 보 조 원 : 박 인 근

연 구 보 조 원 : 최 상 근

연 구 보 조 원 : 이 승 섭

연 구 보 조 원 : 이 병 민

요 약 문

I. 제 목

범용 ceramic roll mill 소재 및 생산기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

식품 가공 산업분야에서 가공재료를 분쇄하는 목적은 ①가공재료 중 유효한 성분의 추출용이, ②표면적 증가로 건조, 추출, 용해능력 향상, ③혼합능력과 가공효율을 향상시키기 위함이다. 분쇄된 작은 입자는 표면적이 증가하므로 반응능력, 물리적 특성 등이 상승하고 이용범위도 넓어지고 또 효율적인 가공재료로 이용된다. 1990년대부터 우리 나라의 식생활 패턴은 재료의 고유한 풍미와 영양분을 보유한 상태를 유지하면서, 양보다 질을 선호하는 경향으로 변화되고, 따라서 다양한 분쇄입자 크기의 분말을 제공할 수 있는 분쇄기와 분쇄 방법 기술개발이 요구되고 있는 실정이다.

국내 식품가공산업분야에서는 일반적으로 햄머밀과 롤밀 분쇄기를 사용하여 분쇄하고 있다. 롤밀은 분쇄시 열이 적게 발생되어 식품의 영양분 파괴를 적게 할 수 있으나, 섬유질이 많은 고추 등 분쇄시 분쇄효율이 낮고, 주철제 롤러가 마모됨으로서 분쇄생성물에 쇳가루가 소량 혼입이 되는 원인 때문에 인체에 유해한 문제점을 초래하고 있다. 그러므로 식품분쇄기로서는 내마모성이 우수하면서 쇳가루 혼입을 방지할 수 있는 소재가 개발되어야 한다.

세라믹 분쇄롤을 사용하면 Al_2O_3 은 회주철 롤보다 탄성계수가 2배 이상, 경도가 10배 높아, 내마모성이 우수하여 식품재료가 단단하거나, 섬유질이 많이 함유한 식품 공정상에서 근본적으로 쇳가루 혼입을 없앨 수

있을 것이다. 그러나 세라믹스는 취성이 크므로 장시간 분쇄시 롤의 파괴를 저항할 수 있는 파괴인성이 높은 구조 세라믹스 소재로 분쇄롤을 만들어야 한다. 구조 세라믹 재료는 파괴저항이 좋으나 고가의 원료비, 높은 온도의 소결온도로 인하여 생산단가가 높기 때문에 원료비가 저렴하면서 일반롤을 사용할 수 있도록 1300℃ 온도에서 소결할 수 있어야 하고, 장기간 롤을 분쇄공정에서 사용하여도 손상되지 않는 소재로 구성되어야 한다. 롤 성형공정은 롤의 크기가 $\phi 150 \sim 300 \times 300^L$ 인 원주형이고, 롤의 파괴를 억제하기 위해서는 30^Tmm 정도의 두께를 가진 성형체이어야하고 이를 생산하기 위해서는 이에 대한 기술이 개발되어야 한다.

종래에 절구를 이용하다가 1960년대 중반부터 국내에서 압착식 롤 분쇄기가 개발되었으나, 개발당시와 비교하면 분쇄원리나 전체적 구조가 크게 변화된 것이 없다. 롤 분쇄기의 효율을 향상시킬 수 있는 롤 분쇄 메카니즘, 롤과 롤 사이의 간격, 분쇄처리 횟수, 분쇄속도, 롤 회전비 등이 분쇄 생성물과 분쇄 소요 에너지에 미치는 영향에 대한 연구로 분쇄효율을 향상시킬 수 있는 롤 분쇄 기술향상에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 분쇄공정상에서 찧가루 혼입을 근본적으로 방지할 수 있는 내마모성과 파괴 고인성을 가진 세라믹 롤 소재개발과, 경제적으로 대량 생산 할 수 있는 생산기술 개발과 롤 분쇄기의 분쇄효율을 향상 시키기 위한 분쇄속도, 롤 간격, 롤 회전비, 분쇄처리횟수 등의 분쇄조건을 분쇄 이론하에 설계하였다. 또한, 분쇄 생성물의 특성 및 분쇄소요 에너지를 분석하여 기존의 분쇄기 보다 분쇄효율이 우수하고, 찧가루 혼입이 없으며, 분쇄시 발생열이 적은 세라믹 롤 분쇄기를 개발하는 것을 목적으로 하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

세라믹 롤 소재 개발 분야 :

롤 분쇄기용에 사용되는 롤의 소재는 국내에서 손쉽게 대량 구입할 수 있는 원료를 공시재료로 선택하여 세라믹 분쇄롤의 취성 문제, 즉 파괴인성을 향상시키기 위해 구조재료용인 알루미늄, 지르코늄등을 첨가하여 롤의 소재를 개발하였다. 공시 재료의 치밀화 및 기계적 성질을 향상시키기 위해 소결온도를 증가시키면서 비중, 압축강도, 파괴인성을 측정하였고 공시재료의 내구성 향상을 분석하였다. 롤 성형 공정은 압출성형 방법과 냉간 정수압(Cold -Isostatic Prssing) 방법을 이용하여 대량생산 방법에 대해 연구하였다. 공시재료에 알루미늄 0% ~ 100%, 지르코늄 0 ~ 15%의 첨가량에 따른 소결온도 1200℃ ~ 1650℃ 범위 별 물리적 성질 및 기계성적 강도에 미치는 영향을 화학성분 분석, 공시체의 결정상 분석, 비중측정, x-ray을 이용하여 광물상 분석, 파괴인성 측정, 전자현미경을 이용하여 미세구조 관찰등으로 세라믹 롤의 내구성을 분석하였다.

세라믹 롤 설계 및 시제품 제작 :

세라믹 롤 설계에서는 롤과 롤사이의 간격, 분쇄속도, 분쇄처리 횟수 등의 분쇄조건이 분쇄시 소요되는 분쇄에너지와 분쇄물의 입도크기에 미치는 영향을 분석하여 현재의 회주철 롤 분쇄기보다 분쇄효율을 더욱 향상시킬 수 있는 기술을 개발하기 위하여 다음과 같은 연구를 하였다 :

- 1) 롤 분쇄 매카니즘에 관한 이론
- 2) 곡물 분쇄시 평롤의 분쇄효율 향상에 대한 설계 :

롤의 속도, 롤사이의 간격, 분쇄처리 횟수가 분쇄생성물의 특성과

분쇄 소요에너지에 미치는 영향에 대한 분석

- 3) 섬유질을 많이 포함한 고추분쇄시 치형롤의 분쇄효율 향상에 대한 설계 :

롤의 속도, 롤 회전비, 분쇄처리 횟수가 분쇄생성물의 특성과 분쇄 소요에너지에 미치는 영향에 대한 분석

세라믹 평롤과 치형롤 분쇄기의 분쇄효율 향상에 대한 분석시험 :

기존의 회주철 롤과 본 연구에서 개발한 세라믹 롤을 이용하여 분쇄시 분쇄조건인 분쇄속도, 롤의 간격, 분쇄처리 횟수가 분쇄 소요에너지와 분쇄 생성물의 입자의 크기에 미치는 영향을 분석하고, 분쇄효율을 향상시키기 위해 동일한 분쇄조건에서 회주철롤과 세라믹롤에 따라 소요되는 동력, 분쇄생성물의 입도의 크기, 분쇄처리량, 싯가루 혼입량, 색도에 미치는 영향을 비교 분석하여 분쇄능률 향상에 대한 기술 개발에 치중하였다.

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발 결과

가. 세라믹 롤 분쇄기의 롤 소재 기술 개발

- 1) K 및 H-공시체에는 침상형의 물라이트상의 상호교차와 매트릭스상과 SiO₂ 상과의 열팽창 차이로 인한 잔류 압축응력의 존재로 1,300℃에서 가장 높은 강도(94kg/mm²) 및 파괴인성(1.07MPa/m²)을 나타내었다.

- 2) K-공시재료에 부분안정화 15wt.%ZrO₂를 첨가한 공시체는 물라이트와 ZrO₂의 상호 치완적 고용효과로 1.38MPa/m², 특급시약인 Al₂O₃ 10.wt%

첨가한 소결체는 1,280℃에서 1.34MPa/m²로 파괴인성이 증가하였다.

3) K 및 H-공시재료에 순도 96%인 공업용 50wt%Al₂O₃를 첨가하여 1,200℃에서 5시간 열처리한 공시체의 3점곡강도는 135MPa, 파괴인성은 2.25MPa/m²로 파괴인성이 증가하였고, H-세라믹스 소지에 A1160SE를 첨가하여 1,200℃에서 열처리한 시편의 3점곡강도는 141MPa, 파괴인성은 2.7MPa/m²이었다.

4) 순도 96%의 공업용 Al₂O₃ 단미를 1,400℃에서 5시간 열처리한 시편의 3점곡강도는 118MPa, 파괴인성은 1.8MPa/m²이었으나 1,650℃에서 5시간 열처리한 시편의 3점곡강도는 220MPa, 파괴인성은 3.06MPa/m²의 값을 나타내어 순수한 Al₂O₃의 공시체가 가장 높은 기계적 강도를 나타내었다.

5) A1160SE와 순도 96%의 공업용 Al₂O₃ 단미를 1,650℃에서 열처리한 공시체가 기계적 성질이 매우 우수하였으나, 세라믹스 롤용 원료로 사용하기에는 고가이며 높은 소결온도가 높아 경제성이 문제가 되었다. 따라서, 세라믹스 롤로 사용하기에 충분한 강도를 지니며 제조원가가 저렴한 K와 H-세라믹스 소지에 순도 96%인 공업용 Al₂O₃를 40wt%첨가하여 1,200℃에서 5시간 열처리한 공시체를 세라믹 롤의 소재로 결정하였다.

나. 세라믹 평롤과 치형롤의 이론, 설계, 제작

본 연구에서는 국내 이미 기존의 식품분쇄업체에 사용되고 있는 롤분쇄기의 회주철 롤러를 세라믹 롤러로 대체하여 사용 할 수 있도록 세라믹 롤의 크기를 동일한 크기(직경 169mm, 길이 298mm)로 설계하였다.

또한 롤의 길이대 직경의 변화비와 두 롤의 회전비는 식품분쇄 생성물과 분쇄효율에 중요한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 분쇄이론에 의한

설계 기준 설정을 중점적으로 연구하였다.

본 세라믹 롤 소지 개발 연구에서 선정된 분말재료를 정수압 성형을 이용하여 100MPa 성형압력조건하에서 Φ 250 x 400mm 크기로 성형 한 후 선반가공으로 롤의 크기를 Φ 200 x 330mm로 제작하였고, 압출성형기로 동일한 성형체를 만들어 선반가공하였다. 1300℃에서 24시간 소성후 롤의 내경에 Φ 70 x 450mm 축을 넣고 에폭시계통의 접착제로 축을 고정시켜 세라믹 평 롤을 제작하였다. 치형 세라믹 롤은 선반으로 각 8°도로 경사지게 v형으로 홈 간격은 5mm, 깊이는 3mm로 가공하여 제작하였다.

다. 세라믹 평롤과 회주철 평롤의 분쇄효율향상에 대한 연구

본 연구에서는 식품 가공에 사용 할 수 있는 범용 세라믹 평롤의 기계적 성질과 분쇄효율을 분석하기 위하여 세라믹 평롤 분쇄기를 설계하였다. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 제작하여 분쇄에 중요한 요인인 두 롤러의 간격, 분쇄속도, 분쇄물의 롤 통과 횟수 등의 분쇄조건을 변화시키면서 분쇄 소요 에너지와 분쇄 생성물 특성을 쌀 분쇄 실험을 통하여 분쇄조건이 분쇄효율에 미치는 영향을 분석하였으며, 연구의 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 쌀 함수율이 25%이상에서 분쇄소요동력은 9.81N-m가 소요되는 것으로 분석되었다.
- 2) 쌀 분쇄시 세라믹 평롤의 경우 두 롤러의 간격이 쌀 지름(D=2mm)의 D/4~D/8(0.50~0.25mm) 경우 4.905~5.886N-m 토크가 소요되었고, 간격을 D/16~D/32(0.13~0.05mm)로 분쇄한 경우 4.905~7.848N-m 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질 수록 1.962N-m 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 3) 회주철 평롤 롤의 경우 두 롤러 간격이 쌀 지름(D=2mm)의 D/4~D/8(0.50~0.25mm) 경우 4.905~6.867N-m 토크가 소요되었고, 간격을

- D/16~D/32(0.13~0.05mm)로 분쇄한 경우 6.867N-m 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질수록 1.962N-m 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 4) 세라믹 평롤과 회주철 평롤 롤이 분쇄속도 47.4, 101.6rpm조건에서는 세라믹 평롤이 각각 5.984, 2.550N-m정도 토크가 증가된 것으로 분석되었다.
- 5) 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 회주철 평롤의 분쇄속도는 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 이며, 동일 분쇄속도에서 세라믹 평롤의 경우는 소요토크가 3.924N-m로 분석되었고, 속도를 $R_f : R_s = 101.6 : 50.8\text{rpm}$ 으로 2배 증가시켰을 경우에는 0.7N-m 토크가 소요되어 롤의 속도가 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 일 때 보다 토크가 63%정도 증가 되는 것으로 분석되었으며, 국내에서 사용하고 있는 롤러밀의 분쇄속도를 2배로 증가시켰을 경우 소요되는 토크는 9.81N-m이하로 분석되어 분쇄시 소요되는 동력비는 그리 큰 영향을 미치지 않을 것으로 분석되었다.
- 6) 분쇄시 세라믹 평롤의 분쇄생성물의 평균입자 크기는 $300\mu\text{m}$ 이고, 회주철 평롤 롤러를 사용한 경우는 $780\mu\text{m}$ 이므로, 세라믹 평롤이 평균입자 크기가 2배이상 작게 나타나 분쇄능이 향상되는 것으로 나타났다.
- 7) 현재 국내에서 일반적으로 사용하는 롤의 분쇄속도가 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 인 경우 평균입자 크기는 1차 분쇄시 0.35mm, 2차분쇄 후 0.30mm로 측정되었고, 롤의 분쇄속도를 $R_f : R_s = 101.6 : 50.8$ 로 증가시킨 경우 평균입자 크기는 1차 분쇄 후 0.37~0.41mm, 2차 분쇄 후 0.21~0.26mm로 측정되었다. 즉, 종래의 분쇄회전 속도보다 2배 증가시켜도 입자의 평균 크기는 오히려 0.5mm 작아짐으로써 분쇄능이 향상됨이 분석되었다.
- 8) 세라믹 평롤을 이용하여 분쇄한 분쇄생성물(쌀가루)은 50mesh 이상

이 27%, 50~100mesh가 38.5%, 100mesh이하가 34.5%의 입도 분포로 구성되었고, 평균입도는 162 μ m로 분석되었다.

9) 회주철 평롤을 이용하여 분쇄한 쌀가루분쇄생성물은 297 μ m(50mesh) 이하가 39.5%, 297~149 μ m(50~100mesh)가 42.1%, 149 μ m(100mesh)이상이 21.3%의 입도 분포로 구성되었고, 평균입도는 187 μ m로 분석되었다.

10) 100mesh 이상인 경우 미분쇄 효율은 13%정도 높게 분석됨으로서 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 분쇄생성물의 분쇄효율이 우수하게 나타났다.

이상의 실험 결과, 실험용으로 설계 제작한 세라믹 평롤과 회주철 평롤의 분쇄효율을 비교하면 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 분쇄 입도가 2배정도 더 미분쇄 되는 것으로 분석되어 세라믹 평롤 분쇄기의 분쇄효율이 우수한 것으로 분석되었다.

라. 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤의 분쇄효율향상에 대한 연구

본 연구에서는 세라믹 치형롤의 기계적 강도 향상과 분쇄효율을 향상시켜 식품 가공 분야에서 섬유질을 많이 포함하거나, 많은 수분함량 갖고 있는 식품등의 재료가공에 범용으로 사용 할 수 있는 세라믹 치형롤 분쇄기를 개발하고자 하였다. 기존 압착식 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm 분쇄조건에서 분쇄속도를 80rpm으로 증가시켜 분쇄처리량을 향상시키는 방법과 기존의 롤 회전비 1:2에서 1:5까지 증가시켜 전단력을 향상시켜 분쇄효율을 향상시키는 분쇄 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 치형롤 분쇄기를 사용하여 섬유질이 많은 건고추를 분쇄하기 때문에, 이를 공시재료로 선택하여 굵은 고춧가루, 보통고춧가루 생산하는데 롤의 회전비별, 분쇄처리 횟수별에 따른 분쇄생성물의

입도크기에 미치는 분쇄생성물의 특성, 분쇄 소요동력, 고춧가루 1ton 생산하는데 소요되는 에너지 즉 비분쇄동력 등을 실험을 통하여 세라믹 치형롤의 기계적 강도와 분쇄효율을 분석하였다. 분쇄시 롤소재의 마모에 의하여 싯가루가 고춧가루에 혼입된 철함량을 조사하였으며, 분쇄시 마찰열 발생에 의하여 고춧가루 분쇄 생성물의 품질에 미치는 영향을 측정하기 위하여 색도를 측정하였으며, 그 연구 내용의 요약은 다음과 같다.

- 1) 현재 국내에서는 회주철 치형롤 분쇄기를 이용하여 대부분 분쇄속도 40rpm, 롤 회전비 1:2인 분쇄조건에서 고춧가루를 생산하고 있다. 이 기존의 분쇄조건에서는 8차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루만 생산 할 수 있었다 ($d_{45} = <850 \mu\text{m}$). 8차 분쇄 처리까지 총 0.4kw(84.366N·m) 동력이 소요되었고, 분쇄처리량은 1차 분쇄처리과정에서 100kg/hr, 8차 분쇄처리과정에서는 241kg/hr로 미분쇄 되면서 점차 분쇄처리량이 증가되었다. 또한 굵은 고춧가루 1톤 생산하는데 7.15kwh에너지가 소요되었다.
- 2) 기존의 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 롤의 회전비 1:2에서 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 5차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루가 생산되었고 ($d_{45} < 850\mu\text{m}$), 이 때 0.5kw(59.841N·m) 동력이 소요되었고, 1차 분쇄처리 과정에서 126kg/hr로, 8차분쇄처리 과정에서는 252kg/hr로 각각 126%, 105% 분쇄처리량이 증가되었고, 비분쇄동력은 3.73kwh/ton으로 분석되었다. 기존의 분쇄조건에서 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤보다 분쇄처리횟수 3회를 단축할 수 있고, 굵은고춧가루 1톤당 생산시 21% 정도 에너지가 절감됨으로써 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤보다 분쇄효율이 높은 것으로 분석되었다.
- 3) 고춧가루 분쇄 효율을 증가시키기 위하여 기존의 회주철 치형롤 분쇄속도

40rpm, 롤 회전비 1:2에서 롤 회전비 1:3, 1:4, 1:5로 증가시킨 경우 굵은 고춧가루($d_4 < 850 \mu\text{m}$)를 생산하는데 필요한 분쇄처리 횟수는 롤 회전비 1:2보다 1:3 경우 4회, 1:4 경우 4회, 1:5 경우 5회까지 단축되었다. 시간당 분쇄처리량은 롤 회전비 1:4와 1:5에서 1차 분쇄과정에서 >135%, 분쇄 8차 과정에서 >109%정도가 증가되었고, 분쇄 소요동력은 0.39 - 0.42kw로 비슷하게 소요되었으나, 비분쇄동력은 2.80 - 3.12kwh/ton으로 기존의 롤 회전비 1:2보다 35% ~ 41% 정도 에너지가 절약되었다. 롤 회전비 1:3에서의 비분쇄동력은 1:2보다 4% 증가하였으나, 롤 회전비 1:5에서 8차 분쇄처리 후 고춧가루 입도크기 $< 425 \mu\text{m}$ 를 40%이상 통과되어 보통고춧가루를 생산할 수 있었고, 이 때 분쇄동력 0.79kw이 소요되었고, 비분쇄동력 7.15kwh/ton이 분석되었다. 본 실험 결과를 통하여 분쇄시 롤의 회전비에 의하여 전단력이 증가되어 고춧가루 분쇄효율 증가됨이 분석되었다.

- 4) 분쇄효율을 향상시키기 위하여 회주철 치형롤의 분쇄조건인 기존의 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가시킴으로서 롤 회전비 1:2에서 굵은 고춧가루($d_4 < 850 \mu\text{m}$) 생산은 분쇄속도 40rpm보다 80rpm 경우 분쇄처리횟수 3회가 단축됨으로서, 소요동력 0.31kw, 비분쇄동력 4.59kwh/ton으로 3%에너지가 절약되었다. 롤 회전비 1:3과 1:4에서는 분쇄처리횟수, 분쇄처리량, 비분쇄동력은 같은 수준이었다. 롤 회전비 1:5에서는 분쇄처리 횟수를 2회로 1회 단축됨으로서 분쇄소요동력은 0.21kw로 50%가 절약되었고, 비분쇄동력은 2.02kwh/ton으로 35%정도 에너지가 절약됨이 분석되었으나 보통고춧가루($d_{60} < 850 \mu\text{m}$, $d_{40} < 425 \mu\text{m}$)는 생산할 수 없었다.

회주철 롤을 이용하여 굵은 고춧가루 생산시 기존의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2보다 분쇄속도 80rpm, 회전비 1:5로 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수는 6회 단축가 되었고, 분쇄처리량은 1회 분쇄처리과정에서 30kg/hr, 8회 분쇄

과정에서 88kg/hr을 증가 시켰고 분쇄소요동력은 47.5%, 비분쇄동력은 57.4%가 절약됨이 분석되었다.

- 5) 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm 조건에서 굵은 고춧가루($d_{45} < 850\mu m$) 생산은, 롤 회전비 1:2보다 1:3 ~ 1:5로 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수가 5차에서 각각 3차로 각각 2회씩 단축되었고, 분쇄처리량은 1차 분쇄과정에서는 125kg/hr로 비슷하였으나, 8차에서는 29kg/hr ~ 66kg/hr로 125% 미분쇄량이 증가되었고, 분쇄소요동력은 1:3에서는 26%, 1:4에서는 0.22%, 1:5에서는 48%가 절약되었고, 비분쇄동력은 1:3에서는 35%, 1:4에서는 8%, 1:5에서는 37%가 절약되었다.

회전비 1:5에서 7차 분쇄처리 후 보통 고춧가루($d_{60} < 825\mu m$, $d_{40} < 425\mu m$)를 생산할 수 있었으며 분쇄소요동력은 1.2kw, 비분쇄동력은 5.22kwh/ton가 소요됨이 분석되었다.

40rpm 분쇄속도에서 굵은 고춧가루 생산시 본 연구에서 개발한 세라믹 치형롤 1:5 회전비가 기존의 회주철 치형롤 1:2보다 분쇄처리횟수를 5회 단축시켰고, 분쇄처리량은 1회 분쇄과정에서 17kg/hr, 8회 분쇄과정에서 77kg/hr을 증가 시켰고, 분쇄소요동력은 35%, 비분쇄동력은 50% 정도가 절약되었다.

- 6) 굵은 고춧가루($d_{45} < 850\mu m$) 생산기준하에서 세라믹 롤분쇄기의 분쇄 효율을 향상시키기 위하여 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가시켰더니 분쇄속도 40rpm보다 롤 회전비 1:2 경우 분쇄처리횟수가 1회 단축됨으로서 분쇄소요동력은 0.35kw로 30%절약되었고, 비분쇄동력은 2.5kwh/ton으로 34%에너지가 절약되었다. 롤 회전비 1:3과 1:4에서는 분쇄처리횟수, 분쇄처리량, 비분쇄동력은 같은 수준이었으나, 롤 회전비 1:5에서는 분쇄처리 횟수가 2회로 1회 단축됨으로서, 분쇄소요동력은 0.21kw로 19%가 절약되었고, 비분쇄동력

은 2.02kwh/ton으로 14%정도 에너지가 절약됨이 분석되었다.

를 회전비 1:5분쇄조건하에서 5차 분쇄처리 후 보통고춧가루($d_{60} < 850 \mu\text{m}$, $d_{40} < 850 \mu\text{m}$)를 생산할 수 있었고, 이때 분쇄소요동력은 0.38kw, 비분쇄동력은 5.22kwh/ton이 소요됨이 분석되었다.

굵은 고춧가루 생산시 본 연구에서 개발한 세라믹 치형롤의 분쇄속도 80rpm, 회전비 1:5가 기존의 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2보다 분쇄처리횟수는 6회 단축되었고, 분쇄처리량은 1회 분쇄과정에서 147%, 8회 분쇄과정에서 126%가 증가되었고, 분쇄소요동력은 48%, 비분쇄동력은 57%가 절약되었다.

7) 를 분쇄기를 이용하여 고추 분쇄시 분쇄되는 고춧가루의 입자의 크기는 롤의 지름, 분쇄속도, 롤의 회전비 등의 분쇄조건이 일정한 경우 분쇄처리 횟수가 증가하여도 분쇄입자의 크기가 더 이상 미분쇄되지 않는 임계처리 횟수가 5~6회 임을 분석할 수 있었다.

8) 공시재료의 철분함량은 21.77mg/kg로 분석되었고, 회주철 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 회주철 롤의 마모에 의하여 고춧가루 생성물에 혼입된 Fe는 기존의 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 를 회전비 1:2에서는 88.76mg/kg으로 공시재료의 철함량보다 408%가 증가되었고, 를 회전비 1:3와 1:4 경우 회주철 롤의 마모로 인하여 1,529%, 1,304%만큼 철함량이 증가되었으나, 1:5 를 회전비에서는 640%로 감소되었다. 회주철 치형롤의 분쇄속도를 80rpm으로 증가시킨 시료에서는 1:2, 1:4, 1:5 를 회전비 경우 분쇄속도 40rpm 시료보다 2배정도 감소되었고, 1:3 를 회전비에서만 공시재료의 철분함량보다 1,315% 증가됨으로서 롤의 회전속도가 증가되면 회주철롤의 마모에 의한 철함량도 감소됨이 분석되었다. 세라믹 치형롤에서는 분쇄속도와 를 회전비에 영향 받지 않고 철분함량이 24.25 ~ 43.30mg/kg으로 고춧가루에 쇳가루가

제거된 청결식품을 제공할 수 있음이 분석 되었다.

9) 회주철 치형롤과 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 롤의 소재와 분쇄 속도가 색도에 미치는 영향은 단시간 실험 측정에 의하여 색도에 차이점이 없었고, 분쇄처리 횟수 증가가 고춧가루의 색도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 고춧가루의 명암 'L' 값은 분쇄처리 후 28 ~ 34정도로 명암의 변화는 적었으나, 붉은색 'a'값은 1차 분쇄 처리 후 18 ~ 20, 8차 분쇄처리 후 22 ~ 28로 미분쇄되면서 'a'값이 4 ~ 8정도 상승되었고, 노란색 'b'값은 1차 처리 후 17 ~ 26이 8차 처리 후 고추 씨앗이 미분쇄되면서 26 ~ 33으로 'b'값은 7 ~ 9정도 상승되었다.

치형롤 분쇄기롤을 이용하여 고추분쇄시 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤 보다. 재료의 내마모성이 우수하여 분쇄효율도 증가되었고, 섯가루 혼입없는 청결고춧가루를 생산 할 수 있는 기술을 개발 할 수 있었다.

기존의 고춧가루 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 롤 회전비 1:2보다 본 연구에서 개발한 분쇄속도 80rpm, 롤 회전비 1:5인 분쇄조건이 분쇄처리량 증가, 분쇄처리 횟수 단축, 분쇄소요동력 절감, 비분쇄 동력 절감등이 분석됨으로서 섬유질이 많이 포함된 고춧가루 등의 재료가공 분쇄기술이 향상되었다고 사료된다.

2. 연구 결과 활용에 대한 건의

전국의 농협에 소속된 고춧가루 전문 생산공장이 10개 있다. 본 연구에서 개발한 세라믹 치형롤을 현 공장 중 1개 공장에 투입하여 섯가루가 혼입되지 않는 청결고춧가루 생산에 활용하고자 한다. 본 연구에서 개발한 고춧가루 분쇄 기술을 이용하면 기존의 분쇄기술보다 고춧가루 생산단가를 크게 절감할 수 있을 것이다.

세라믹 롤러가 기존의 회주철 롤러 보다 우수한 분쇄효율과 찳가루 혼입이 없음을 실험에 의하여 분석되었으므로, 국민 보건차원에서 현재 회주철 롤러를 사용하고 있는 방앗간등인 영세 식품 분쇄 가공업체에 세라믹 롤러를 대체 할 수 있도록 정부차원에서 지원하여 주기를 건의한다.

SUMMARY

This study was to develop the ceramic roller materials with wear resistance and fracture toughness, preventing iron powder from milling process and the production technology about the economical mass production. To determine the optimum grinding efficiency of the mill, the conditions of milling including milling velocity, gap between rollers, speed ratio of rollers and the number of milling treatment were investigated.

With a ceramic roll mill developed in this study the physical properties and mechanical behavior of a ceramic-roller were investigated. The grinding energy and particulate characteristics for rice and red pepper milling were also investigated by comparing ceramic and gray-cast-iron rollers.

1. Materials development for ceramic roller

Densification process, microstructure and mechanical strength of the ceramic body materials for ceramic roller were investigated as a function of Al_2O_3 addition. A maximum flexural strength and fracture toughness were obtained by 100 wt% of Al_2O_3 (purity; 96%) and by subsequent sintering at 1650°C . Since Al_2O_3 (purity; 96%) was expensive for preparation of a ceramic roll mill, in this study, the mixture of Al_2O_3 (purity; 96%) and H- or K-ceramic materials were used as a materials for ceramic roll mill. The optimum mechanical strengths of ceramics body for ceramic roll mill were obtained by addition of 40wt% of Al_2O_3 (purity; 96%)

and by firing at 1200°C for 5hrs.

2. Theory, design and manufacture of ceramic smooth and grooved rollers

The mixture of powders were molded by using CIP (Cold Isostatic Pressure : 100MPa , ϕ 200×400mm). The specimen of ceramic roller was the shape of cylinder with the outer diameter of 200mm and the length of 330mm. After sintering at 1300°C for 24hrs, a steel shaft with ϕ 70×450mm was inserted into sintered specimen, then it was fixed by epoxy-system. The grooved ceramic roller(Type : V, Grooved gap : 5mm, Depth : 3mm, Slop angle : 8°) was manufactured by lathe operation.

3. Effect of milling condition on consumption of grinding energy and particulate characteristics

A. Grinding energy

- 1) In the ceramic roll mill for hulled rice(D=2mm) milling, as the gap between rolls was decreased from 0.5~0.25mm to 0.13~0.05mm, the required torque was increased from 5.9 to 7.8 N-m and the same results was obtained used with the gray-cast-iron roll mill.
- 2) When the milling velocity was increased from $R_f : R_s = 47.4 : 23.7$ rpm (conventional setting used in korea) to $R_f : R_s = 101.6 : 50.8$ rpm, the torque was more needed by 63%. As the milling velocity was increased by two times in the smooth roll, the required torque was analyzed below 9.81N-m and the required torque ratio was analyzed to have no effect on the torque.

B. Particulate characteristics

- 1) Since the surface of ceramic roller is higher than surface of gray-cast-iron roller on hardness, it was analyzed that the particle size of milled powder from ceramic roller was more fined than gray-cast-iron roller by $70\sim 80\mu\text{m}$ at the gap of $0.13\sim 0.25\text{mm}$. Therefore, the grinding ability was increased.
- 2) In the ceramic roller for milling, the average particle size of milled powder was $300\mu\text{m}$. In the case of gray-cast-iron roller, it was $780\mu\text{m}$. The average particle size in the ceramic roller was two times as small as gray-cast-iron roller, so the grinding efficiency turned out being improved.
- 3) In the case of roller velocity conventionally used in Korea ($R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$), the average particle size was measured $350\mu\text{m}$ after the first milling treatment, and $300\mu\text{m}$ after the second milling treatment. Increasing roller velocity ($R_f : R_s = 101.6 : 50.8$), the average particle size was measured $370\sim 410\mu\text{m}$ after the first milling treatment and $210\sim 260\mu\text{m}$ after the second.

The result of this study showed that the particle size of the powder in the ceramic roller was two times as small as the particle size of powder in the gray-cast-iron roller, so the grinding efficiency could be increased with the ceramic roller.

4. When grinding red pepper, the ceramic grooved roll was better than the gray-cast-iron grooved roller in the aspect of grinding efficiency because of

wear resistance, and also it was analyzed that iron powder was not observed during the milling process.

- 1) To produce coarse red pepper of 1 ton with the grinding condition of milling velocity 40rpm, speed ratio of roll(1:2), the ceramic grooved roller consumed the energy of 3.73kwh while gray-cast-iron grooved roller consumed the energy of 7.15kwh.
- 2) In the ceramic grooved roller with milling velocity 80rpm, speed ratio of roll(1:5), 2 times of milling treatment, the power consumption was 0.21kw, and the specific power was 2.02kwh/ton. Comparing with gray cast iron grooved roller, the number of milling treatment was reduced by 6 times, the power consumption and the specific grinding power were reduced by 48% and 57%, respectively.
- 3) Fe content in the red pepper used in the experiment was 21.77mg/kg. Red pepper powder milled by the gray-cast-iron grooved roller contained the iron powder of 88.76mg/kg~332.94mg/kg. Red pepper powder milled by the ceramic grooved roller contained the iron powder of 24.25~43.3mg/kg. Since the small amount of iron powder was observed as much as in the level of Fe content in the red pepper, it was concluded that the iron powder was not contained in red pepper powder under the milling process with the ceramic grooved roller.

CONTENTS

Chapter I. Introduction	1
Section 1. Background of research	1
Section 2. Necessity of research	3
Section 3. The purpose and details of the research	8
Section 4. The details and range of research	9
Chapter II. The material development for ceramics roller	11
Section 1. Introduction	11
Section 2. Raw materials, Forming, Processing	12
1. The characterization of raw materials	12
2. The forming	29
3. The processing of green ceramics body	41
4. The evaluation of life for ceramics roller	43
Section 3. Experimental method	46
1. The preparation of specimen	46
2. Characterization of properties	48
Section 4. Results and discussions	52
1. Thermal analysis	52
2. Microstructure of ceramics body	52
3. Analysis of crystal phase	54
4. Physical properties of specimen	64
5. Mechanical properties of specimen	66

6. Observation of microstructure of specimen	72
Section 5. Conclusions	77
Section 6. References	79
Chapter III. Design and manufacture of ceramics roll mill	83
Section 1. Introduction	83
Section 2. Principles of roll milling and material of roller for roll mill	85
Section 3. Milling mechanism for roll mill	92
Section 4. Design and manufacture for roll mill	101
1. Design of smooth and grooved roll mill	101
2. Design of ceramic and gray cast iron smooth rollers for rice milling	107
3. Design of ceramic and gray cast iron grooved rollers for red pepper milling	108
4. Manufacture of ceramics rollers	108
Section 5. References	113
Chapter IV. Analysis of particulate characteristics and grinding energy in rice milling using ceramic and gray-cast-iron smooth roller	117
Section 1. Introduction	117
Section 2. Raw materials and experimental procedure	117
1. Raw materials	119
2. Apparatus of experimental	120
3. Experimental method	122

Section 3. Results and discussions	123
1. Effects of the gap between rollers, the velocity and the number of treatment milling on particulate characteristic in rice milling using ceramic and gray-cast-iron smooth rollers	123
2. Particle size distribution of the milled powder using ceramic and gray-cast-iron smooth rollers	145
3. Chromaticity measurement of rice milled powder	146
4. Analysis of Fe content in rice milling using ceramic and gray-cast- iron smooth rollers	149
5. Effects of the gap between rollers, the velocity and the number of treatment milling on the consumption of grinding energy in rice milling using ceramic and gray-cast-iron smooth rollers	150
6. Analysis of the specific grinding energy in rice milling using ceramic and gray-cast-iron smooth rollers	156
7. Analysis of the consumption of grinding energy in rice milling using ceramic and gray cast iron rollers	159
Section4. Conclusions	161
Chapter V. Analysis of particulate characteristics and grinding energy in red pepper milling using ceramic and gray-cast-iron grooved rollers	165
Section 1. Introduction	165
Section 2. Raw materials and experimental procedure	167
1. Raw materials	167
2. Experiment method	168

Section 3. Results and discussions	171
1. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on particulate characteristic in red pepper milling using gray-cast-iron grooved rollers	171
2. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on particulate characterization in red pepper milling using ceramics grooved rollers	190
3. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on required torque in red pepper milling using gray-cast-iron grooved rollers	205
4. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on required torque in red pepper milling using ceramics grooved rollers	212
5. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on the amount of milling process per hour in red pepper milling using gray-cast-iron grooved rollers	217
6. Effects of the milling velocity, ratio of rollers and the number of treatment on the consumption of grinding energy in red pepper milling using ceramics and gray-cast iron grooved rollers	224
7. Analysis of Fe content in milled red pepper using ceramic and gray-cast-iron grooved rollers	237
8. Effects of materials of roll and conditions of milling on chromaticity change in milled red pepper powder	237
Section4. Conclusions	243

목 차

제1장 서 론	1
제1절 연구의 배경	1
제2절 연구의 필요성	3
제3절 연구개발의 목표 및 연구내용	8
제4절 연구개발 내용 및 범위	9
제2장 세라믹 롤 분쇄기 소재 개발	11
제1절 서설	11
제2절 원료, 성형 및 가공	12
1. 원료의 특성	12
2. 성형방법	29
3. 성형체 가공(Green machining)	41
4. 세라믹스의 수명 평가	43
제3절 실험방법	46
1. 공시체의 제조	46
2. 특성분석	48
제4절 결과 및 고찰	52
1. 열분석	52
2. 세라믹스 소지의 미세조직	52
3. 공시체의 결정상 분석	54
4. 공시체의 물리적 성질	64

5. 공시체의 기계적 성질	66
6. 미세구조 관찰	72
제5절 연구 결과	77
제6절 참고 문헌	79
제3장 세라믹 롤 분쇄기 설계 및 제작	83
제1절 서 설	83
제2절 분쇄원리와 롤 분쇄기의 소재	85
제3절 롤분쇄기의 분쇄 메카니즘	92
제4절 롤 분쇄기 설계 및 제작	101
1. 세라믹 평·치형 롤 분쇄기 설계	101
2. 쌀 분쇄시 세라믹·회주철 롤에 대한 설계	107
3. 고추 분쇄시 세라믹·회주철 치형롤밀에 대한 설계	108
4. 세라믹 롤 제작	108
제5절 참고문헌	113
제4장 세라믹 평롤밀과 회주철 평롤밀의 쌀 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특 성 분석	117
제1절 서 설	117
제2절 재료 및 실험방법	119
1. 공시재료	119
2. 실험장치	120
3. 실험방법	122
제3절 결과 및 고찰	123
1. 롤간격, 분쇄속도, 분쇄처리횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향	123

2. 세라믹 평롤과 회주철 평롤의 분쇄생성물의 입도분포	145
3. 분쇄생성물의 색도 측정	146
4. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 철분(Fe)함량 비교	149
5. 롤간격, 분쇄 속도, 분쇄처리횟수 증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향	150
6. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 비분쇄 동력 분석	156
7. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄 소요동력 분석 ...	159
제4장 요약 및 결론	161
제5장 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤 분쇄기의 고추분쇄 소요에너지와 분쇄생성물의 특성분석	165
제1절 서 설	165
제2절 재료 및 방법	167
1. 공시재료	167
2. 실험방법	168
제3절 결과 및 고찰	171
1. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비 및 분쇄처리횟 수가 분쇄 생성물에 미치는 영향	171
2. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비 및 분쇄처리횟 수가 분쇄 생성물에 미치는 영향	190
3. 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리 횟 수에 따른 고춧가루 분쇄 소요 토크	205

4. 세라믹 치형 롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄 처리 횟수에 따른 평균 소요 토크	212
5. 세라믹 치형 롤러와 회주철 치형 롤러의 분쇄속도별, 롤의 회 전비별, 분쇄 처리횟수별에 따른 시간당 분쇄처리량	217
6. 세라믹, 회주철 치형롤을 이용한 분쇄시 분쇄속도, 롤의 회전 비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요에너지 분석	224
7. 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤 분쇄기를 이용하여 고추분쇄시 고춧가루 분쇄생성물의 철분함량 분석	236
8. 롤분쇄기의 롤의 소재 및 분쇄조건이 고춧가루 색도변화에 미 치는 영향	237
제4절 요약 및 결론	243

제 1 장

서 론

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

현재 식품가공 분야에서 사용하고 있는 롤 분쇄기는 주로 중간미분쇄 용으로서 분쇄 생성물의 입자 크기와 형태에 따라 롤의 표면에 치형이 있는 치형롤과 치형이 없는 평롤로 구별하여 사용하고 있다. 제분 가공 공정에서는 치형롤을 이용하여 조분쇄시킨 후 평롤을 이용하여 미분쇄하고 있다. 섬유질이 많이 포함된 고추를 고춧가루로 분쇄하기 위하여 종래 사용되던 절구의 충격분쇄방법을 이용하여 빵의 방식에서 생산성을 향상시키기 위해 1960년대 중반부터 치형롤이 사용되었으며, 롤의 치형 간격은 5- 10mm, V형 치형의 크기 3 - 5mm, 치형의 각도는 8 - 25 ° 등 국내 특유의 압축식 롤 밀 형태의 분쇄기를 각 분쇄기회사들이 독자적인 유형으로 제조하였으나, 지금까지 전체적인 구조는 크게 변화가 없었으며, 이에 대한 분쇄메카니즘의 분석과 분쇄효율 향상에 대한 기술 개발에 대한 연구가 미비한 상태이다.

우리 나라의 식품가공은 대부분 재래식 방앗간에서 평롤을 이용하여 쌀가루, 콩가루, 밀가루 등을 분쇄하는데 사용하고 있다. 우리 나라 경우 김치류, 고추장 등의 전통발효식품의 숙성을 위하여 고춧가루의 수축 복원력을 향상시킬 수 있는 압축력과 전단력을 동시에 이용하여 분쇄하는 압축식 치형 분쇄롤을 사용하고 있다. 고춧가루의 생산은 롤의 회전 비율 1:2(분쇄속도는 40rpm : 20rpm)에 의하여 전단력이 작용되며, 롤 사이의 간격을 밀착시켜 최대 압축력이 작용하는 분쇄조건하에서 분쇄생

성분이 발생된다. 공회전시 두 롤 표면이 마찰이 일어나, 결국 롤 재료의 내마모성에 의하여 결정된다. 내마모성이 우수한 회주철 롤러는 고추 표면의 왁스층으로 이루어진 매끄러운 성질에 의하여 롤사이로 압입이 불완전하게 되어 분쇄처리량이 크게 감소된다. 국내에서 사용하고 있는 회주철은 탄소함량이 많아 분쇄시 취성인 Fe_3C 성분에 의해 표면의 마모로 인하여 분쇄시 표면마모로 인해 근본적으로 찻가루가 분쇄생성물에 혼입될 수밖에 없다. 분쇄처리횟수 증가에 의하여 입자 크기는 미세하게 되고, 굵은 고춧가루는 분쇄처리 통과 횟수 5-8회 범위에서 생산되고 고추가 미분화되기 위해서는 분쇄처리횟수가 더 증가됨에 따라서 찻가루의 혼입량은 더욱 증가될 것이다.

실제 분쇄경우 소요에너지의 95%이상은 마찰열로 변하고, 나머지 5%이하가 분쇄에 소요되기 때문에 마찰열로 인하여 롤의 표면온도는 $40^{\circ}C$ 이상 높아지게 되고, 고추의 색도는 마찰열에 의하여 변색되므로, 식품의 고유한 풍미와 영양분의 파괴원인이 될 것이다.

최근 국민보건에 대한 관심이 고조되고, 고춧가루에 혼입된 찻가루의 잔존문제가 여론화되면서 이를 최소화하기 위한 방안들이 제기되고 있는데, 국립기술 품질원에서 선행 연구된 “분쇄기의 표준화에 관한 연구”에 대한 보고서에 의하면 고추에 혼입된 찻가루를 제거하기 위하여 영구자석 또는 전자석 선별기로 3차 공정을 거쳐 찻가루를 제거하고 있으나, 고추 수분 함량 13%(KS H 2157-93) ~ 15%(식품공전 14-11) 범위에서 자석등으로 혼입된 찻가루를 제거하기 어려우며, 찻가루 혼입을 최소화하기 위해서는 단지 사용자가 분쇄기 관리 및 조작에 대한 주의 사항들을 지적하였고, 근본적으로 찻가루 혼입을 방지하기 위해서는 내마모성인 roll mill 재질을 개발하여야 한다고 연구 보고하였다.

식품가공 산업분야의 90%이상이 사용하고 있는 현재 방앗간의 롤 분쇄

기는 식품의 물성이 단단하든, 섬유질을 많이 함유하였든, 식품의 수분 함량이 높든간에 범용으로 사용되고 있기 때문에 섯가루 혼입을 방지할 수 없으며, 인체에 유해한 섯가루 혼입을 근본적으로 방지하기 위한 방법으로 회주철롤을 분쇄과정에서 롤의 마모에 의하여 섯가루가 식품에 혼입되지 않는 세라믹 롤로 대체화할 필요가 있으며, Ceramic의 특성은 상온 및 고온에서 내마모성 및 내부식성이 우수하여 식품 분쇄 공정과정에서 발생하는 섯가루 혼입을 근본적으로 제거함으로써 청정식품을 생산할 수 있을 것이다.

주로 롤분쇄기를 가장 많이 사용하는 쌀과 고추분쇄 경우 분쇄조건인 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리 횟수등에 의한 분쇄 소요동력과 분쇄 생성물의 입도크기에 미치는 영향 등을 분석하여 다양한 분말 입도 크기와, 풍미 보존 향상, 영양분 파괴감소 등으로 식품의 품질 향상과 다양한 식품가공 원료를 경제적으로 공급하여야 할 것이다.

제 2 절 연구의 필요성

국민의 90%이상이 국내 4만여개의 방앗간에 보급된 10만여개의 roll mill을 이용하여 고추등의 탄성 성질을 갖은 섬유질이 많은 식품이나, 또는 마른 메주처럼 단단하고 전분이 많이 함유된 식품, 또는 젓은 식품등을 분쇄하는 다용도 분쇄기로써 사용하고 있다. 그러나 이 roll 분쇄기는 분쇄공정상에서 roll mill 간의 접촉압력과 회전비에 의하여 접촉 부위에 마찰열이 발생되어 양 roll 면간에 표면 부분이 용착을 일으켜 그 필름이 제거되고 다시 새로운 접촉면이 나타나게 되는 압착분리 현상이 반복적으로 일어나게 되어, roll이 마모됨으로서 분쇄물에 섯가루가

혼입 되는 것이다. 또한 roll mill의 금속 재질 측면에서 마모를 관찰할 수 있다는데, 우리나라 roll mill은 대부분 3.0 ~ 3.6wt% C, 4.5 ~ 4.8wt% Si, 0.3 ~ 0.7wt% Mn, 0.03 ~ 0.1wt% P, 0.02 ~ 0.09wt% S 인 금속 성분을 가진 회주철 금속소재로서 식품가공 기계업체들에 의해서 만들지고 있다. 이런 금속 성분비를 가진 roll mill의 표면은 생산시 냉각속도에 의해 경도가 50HRC 이상이 되는 경질상인 백주철 조직을 갖게 되나, 표면에서 깊이 2mm 이상 들어가면 경도가 10HRC인 연질상인 회주철 금속 조직을 갖게 된다. 이러한 조직을 가진 roll mill를 사용함으로써 단단한 식품 분쇄시 연질상을 가진 roll mill 표면이 마모되어 분쇄물에 섯가루가 혼입된다. 또한 금속조직면을 관찰하면 roll mill의 표면 경도가 높더라도 유리 페라이트가 혼재되어 있기 때문에 마모가 쉽게 일어나게 되어 분쇄물에 혼입이 될 수 있다. 또한 다른 면에서 관찰하면 roll mill 표면이 녹이 쓴 상태에서 분쇄하였을 때 용이한 마모로 인해 섯가루가 분쇄물에 혼입이 되는 큰 원인이 된다. 이와 같은 현상 때문에 회주철 소재로 된 roll mill은 분쇄시 분쇄된 식품 표면에 항상 섯가루가 소량이 혼입되는 원인이 되는 것이다.

이상적인 압착식 롤 분쇄기의 롤은 다음과 같은 성질을 만족하여야 할 것이다 :

- 식품의 물성이 단단하거나 섬유질 함유량이 많거나 식품의 수분 함량이 많은 식품을 분쇄하여도 마모에 의한 섯가루가 식품 분쇄물에 혼입되지 않는 내마모성 소재로 구성된 롤을 사용하여야 하고,
- 물이나 화학성분에 롤이 부식되지 않는 내부식성 성질을 갖추어야 한다.
- 분쇄시 롤 표면의 거칠기 R_z : $\approx 10\mu\text{m}$ 가 되면 왁스층이 있는 고무

등의 곡물은 분쇄과정에서 slip현상을 방지할 수 있어야 한다.

- 식품 분쇄시 소요에너지의 95%이상이 마찰열로 변하고, 5%이하가 분쇄에 이용되기 때문에 롤의 마찰열롤 인하여 변질되지 않도록 열 전달 계수가 낮은 소재로 구성되어야 한다.
- 각 식품 가공시 분쇄효율을 향상시키 위해 분쇄 소요에너지와 분쇄 입도 크기에 미치는 영향에 대한 분쇄기술이 개발되어야 한다.

회주철 롤을 세라믹 롤로 대체한다면 세라믹 소재는 회주철보다 탄성계수가 2배(Al_2O_3) ~ 3배(SiC 같은 엔지니어링 세라믹스)높고, 경도가 10배정도 향상되어, 내마모성 향상되므로 단단하거나 섬유질을 많이 함유한 식품 분쇄 공정에서 섯가루 혼입 문제를 근본적으로 완전히 해결 할 수 있다. 습도나 화학적 성분 등에 부식되지 않는 내부식성과 내열성 등의 특성을 갖고 있으나, 강한 충격에 의하여 취성과 파괴가 발생하는 것이 ceramic의 특징이며 가장 큰 단점이다. 또한 금속보다 열전달 계수가 낮기 때문에 마찰열에 의한 색상 및 고유 성분 변화를 억제 할 수 있어 분쇄 생성물의 품질을 향상시킬 수 있는 것이다.

본연구에서는 식품용 압축식 분쇄기를 내마모성, 내부식성, 낮은 열전달 계수를 갖는 세라믹 롤을 개발하기 위해 ceramic 소재 개발, 경제적인 성형공정 방법, 건조공정 방법, 소결공정 등의 기술을 연구 하고자 하였다. 즉, 세라믹 롤의 취성을 방지하고 파괴인성을 향상시키기 위하여 경제적인 점토재료에 알루미늄, 지르코니아 등의 첨가와 알루미늄을 소지로 하여 내구성을 향상시켜서 파괴증진을 억제시키는 소재 개발을 연구하였다.

1. 기술적 측면

가. 식품의 물성이 단단하거나 혹은 섬유질 함유량이 많거나, 식품의 고유 수분함량을 갖고 있는 식품을 롤 분쇄기를 이용하여 분쇄시 롤이 마모되어 섯가루 및 중금속이 혼입되지 않는 내마모성과 내부식성을 갖춘 세라믹 롤 소재 기술이 개발에 대하여 연구를 하였다.

나. 식품의 성분 및 색상이 분쇄시 발생하는 마찰열에 의해 변질되지 않도록 열전달 계수가 낮은 롤소재가 개발에 대하여 연구를 하였다.

다. 세라믹 롤의 균일한 기계적 성질인 내마모성과 내구성을 향상 시키기 위하여 롤의 성형공정, 건조공정, 가공공정, 소결공정기술에 대한 각 공정의 생산 기술을 단계적으로 연구하였다.

라. 분쇄시 roll mill표면에 적당한 마찰력을 갖고 있어 왁스층을 함유한 식품 분쇄시 slip를 억제하기 위하여 롤 표면의 거칠기는 $R_z : \approx 10 \mu m$ 를 갖도록 연구 하였다.

마. 우리나라 국민의 90%이상이 사용하는 방앗간의 roll mill은 고추, 메주, 쌀, 콩, 밀등의 분쇄에 범용적으로 사용할 수 있도록 각 곡물에 대한 분쇄조건 : 롤 간격, 분쇄속도, 분쇄처리 횟수 등이 분쇄소요에너지, 분쇄 생성물의 입도 크기, 분쇄 처리량에 미치는 영향에 대한 조사로 분쇄효율 향상 및 분쇄물의 품질향상에 미치는 효과를 분석하였다.

2. 경제·산업적 측면

가. 마모에 의해 2년정도마다 교체되는 회주철 롤을 반영구적으로 사용할 수 있는 세라믹 롤로 대체 하여 경제적으로 우수하며,

- 나. 세라믹 롤의 생산 공정에 대한 기술이 개발됨으로서 품질 균일화로 품질 향상에 대한 연구를 하였으며,
- 다. 내마모성이 우수한 세라믹 롤이 개발되서 식품가공분야, 한약제 가공분야 등에 쇳가루 혼입이 방지되어 고품질 청정 가공 식품을 생산 할 수 있고,
- 라. 신제품 개발로 식품 기계 중소기업 육성과 기업체 이윤 확대에 이바지 할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

3. 사회·문화적 측면

- 가. Ceramic roll mill을 이용하여 분쇄한 식품의 쇳가루 문제를 근본적으로 해결하여 국민보건 향상에 기여할 수 있고,
- 나. 방앗간에서 쇳가루가 혼입되지 않는 롤을 사용함으로써 국민들에게 청정 식품 보급함으로써,
- 다. 국민 건강 증진에 기여할 것으로 사료된다.

4. 국내·외 기술 현황

국내의 견고추 분쇄 방법은 종래 질구로 짚어 뺀 방법에 의존하였는데 분쇄과정의 생산성을 높이기 위하여 1960년 중반부터 국내 압축식 roll mill 형태 분쇄방법을 사용하였으나, 최근 국민 보건에 대한 관심이 고조되고 고춧가루에 혼입된 쇳가루의 잔존문제가 크게 대두되면서 한국 기기 유화 연구소에서 이를 최소화하기 위한 방안을 조사 및 분석하여 고춧가루 분쇄기의 한국산업 규격화하기 위해 검토중이며, roll mill 소재는 회주철로 규정하면서 이에 대한 연구가 더 수행되어야 한다고 지적하였다. 농협대학과 농업기계 연구소에서도 단지 쇳가루 혼입의 최소화를 하기 위한 연구를 수행하였다.

국외의 식품가공업계에서도 내마모성 ceramics 소재를 이용한 쇳가루 혼입 억제 roll mill을 아직 개발하지 못하였고, 국내에서는 식품 기계 가공 업체인 태광 식품기계에서 1990년부터 개발하여 96년부터 상품화 하였으나, 아직 ceramic roll mill의 기계적 성질 향상을 위한 소재 기술 개발, 성형, 소성, 가공공정 기술이 미흡한 실정이므로 본 연구를 통하여 세라믹 분쇄기의 양산화를 기대할 수 있을 것이다.

5. 앞으로 전망

세라믹 롤분쇄기를 이용하여 건고추, 매주, 쌀, 밀등 건조된 식품의 분쇄와 다량의 수분함량이 포함된 식품분쇄에도 근본적으로 쇳가루 혼입을 완전히 배제하여 인체에 전혀 무관한 분쇄생성물을 보급함으로써 국민 건강에 기여할 수 있을 것이다. 현재 국내에 4만여개의 방앗간에 10여만개의 분쇄기가 보급되어 있으며 국민의 90% 이상이 방앗간을 사용하고 있는데, 세라믹 롤 분쇄기를 사용함으로써 분쇄시 쇳가루 혼입이 되지 않은 청정 가공 식품을 보급할 수 있을 것이다. 국외의 식품가공업계에서는 아직 내마모성 ceramic 소재를 이용하여 쇳가루 혼입을 억제할 수 있는 roll mill을 아직 개발하지 못하였으나, 국외에 세라믹 롤 분쇄기를 수출 할 수 있을 것이다.

제 3 절 연구개발의 목표 및 연구내용

본 연구에서는 세라믹 롤의 내마모성과, 파괴인성을 향상시키고, 경제적인 롤의 교체로 대량 생산 할 수 있는 생산기술 개발과 현재 사용되고 있는 롤 분쇄기의 분쇄효율을 증가시키면서 쇳가루 혼입을 근본적으로

방지하고, 분쇄시 발생하는 마찰열에 의한 품질의 변화를 방지하는 분쇄기 분쇄기술을 개발하는데 연구목적을 두었다.

제 4 절 연구개발 내용 및 범위

세라믹 롤 소재 개발 분야 :

롤 분쇄기용 롤 소재개발은 국내에서 저렴한 가격으로 원료 구입이 가능하다. 세라믹롤의 성형은, 비중이 균일하면서 기계적 강도가 일정하게 유지되어야 하며, 일반소성로를 사용하기 위해 소성온도를 1300℃정도에서 소결할 수 있는 재료의 조성을 연구의 방향에 치중하였다. 세라믹 분쇄물의 취성을 보강하기 위하여 점토계열에 알루미늄, 지르코늄 등의 함량 첨가와 소성온도에 따른 기계적 강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 비중, 곡강도, 파괴인성(K_{Ic}), 전자 현미경에 의한 세라믹 조직 관찰, x-Ray에 의한 상(Phase)의 분석 등을 통하여 세라믹 롤의 내구성 향상에 관한 연구를 실시하였다.

세라믹 롤 설계 및 제작 분야 :

세라믹 롤 설계에서는 롤과 롤사이의 간격, 분쇄속도, 분쇄처리 횟수 등의 분쇄조건이 분쇄시 소요되는 분쇄에너지와 분쇄물의 입도크기에 미치는 영향을 분석하여 현재의 회주철 롤 분쇄기보다 분쇄효율을 더욱 향상시킬 수 있는 분쇄 매카니즘에 관한 연구에 치중을 두었다.

세라믹 평롤과 치형롤 분쇄기의 분쇄효율 향상에 대한 기술 개발 :

기존의 금속재료인 회주철 롤과 본 연구에서 개발한 세라믹 롤을 이용

하여 분쇄시 분쇄조건인 분쇄속도, 룰의 간격, 분쇄처리 횟수가 분쇄 소요에너지와 분쇄 생성물의 입자 크기에 미치는 영향을 분석하고, 분쇄효율을 향상시키기 위해 동일한 분쇄조건에서 회주철룰과 세라믹룰에 따라 소요되는 동력, 입도의 크기, 분쇄처리량, 쇳가루 혼입량, 색도에 미치는 영향을 비교 분석하여 분쇄효율 향상에 대한 기술개발에 치중하였다.

제 2 장

세라믹 롤 분쇄기 소재 개발

제2장 세라믹 롤 분쇄기 소재 개발

제1절 서설

세라믹스 소지를 고온에서 소성할 때 형성되는 물라이트(mullite, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)는 주로 내마모 기계부품인 롤, 체인벨트, 고온 내열부품인 노심관, 도가니, 보호관, 단열용 부품, 열교환기 및 전기 절연부품으로 이용되고 있다. 이들 재료 중 세라믹스 롤 부품은 종래의 금속제품에 비하여 열에 의한 온도변화가 작고 부분적인 팽창이 작기 때문에 분산성이 향상되고 롤면의 경도가 높으므로 마모량이 적어 수명이 길고 취급과 세척이 용이하다. 그러나, 물라이트는 상온에서 비교적 낮은 강도와 파괴인성으로 인하여 취성파괴가 발생하여 구조재료로서 물라이트의 효용을 극대화하기 위해서는 고인성화가 필요하다.

물라이트 세라믹스의 인성을 증가시키기 위하여 물라이트에 ZrO_2 를 첨가하여 정방정(tetragonal)으로부터 단사정(monoclinic)으로의 상전이에 의한 transformation toughening과 crack deflection을 이용하여 균열이 지닌 탄성에너지를 흡수하여 인성을 증진시킨다. 또한, 세라믹스 소지가 고온에서 물라이트와 유리 SiO_2 (free SiO_2)로 전이될 때 물라이트의 생성량을 높이기 위해 유리 SiO_2 에 상당하는 Al_2O_3 를 첨가하여 소성한다. 이 때 첨가된 Al_2O_3 의 일부가 $\alpha-Al_2O_3$ (corundum)로 잔존하거나 혹은 자기소지에 함유되어 있는 불순물로 인하여 유리상이 형성되어 물라이트의 특성에 영향을 미친다. 따라서, 물라이트에 강화재로 Al_2O_3 를 첨가하여 물라이트의 생성량을 증가시켜 복합체의 기계적 성질을 향상시키는 연구가 널리 수행되고 있다. 또한, 물라이트- ZrO_2 복합체는 물라이트 매트릭

스의 낮은 열팽창계수와 고온에서의 우수한 크립(creep) 특성과 ZrO_2 의 첨가로 인하여 기계적 성질이 향상되어 고온 구조재료로 주목받고 있다.

세라믹스 롤 제조 공정 중, 세라믹스 제품의 물리적 성질은 성형법에 따라 크게 영향을 받는다. 성형체에 요구되는 중요한 물성은 치밀성(compactness)과 균질성(uniformity)이다. 성형체에는 크거나 작은 기공이 함유되어 있어 건조와 소결과정에서 수축이 발생하여 치밀성과 균질성이 이루어지지 않으면 소결 중에 변형이나 균열이 발생하여 소결체의 특성이 감소한다. 따라서, 성형체의 치밀성과 균질성을 달성하기 위한 성형법에 관한 많은 연구가 수행되어 왔으며 세라믹스의 형상과 특성에 따라 여러 성형법들의 연구가 진행되고 있다. 성형체의 치밀성과 균질성은 냉간정수압성형(CIP, Cold Isostatic Press)에 의하여 일축가압성형에 비해 많이 개선되었으나 종방향과 횡방향 수축률의 이방성은 입자의 마찰저항에 의한 성형압력의 감소영향에 의하므로 이들 입자간의 마찰을 감소시킬 수 있는 성형조제의 첨가가 필요하다.

본 연구에서는 세라믹스 소지를 이용하여 플라이트를 합성하고 공업용 Al_2O_3 (순도: 87%, 96% 및 A1160SE)와 부분안정화 ZrO_2 를 첨가하여 출발원료의 혼합조성, 반응인자에 따른 결정상의 변화, 성형방법에 따른 고인성 세라믹 롤의 최적 제조조건을 제시하고자 하였다.

제2절 원료, 성형 및 가공

1. 원료의 특성

가. 세라믹스 소지

세라믹스 소지의 구성성분은 점토부분과 용제부분 및 골격부분으로 분

류할 수 있다. 점토는 작업성과 건조강도의 발현 뿐 만 아니라 물에 풀어 현탁액을 만들면 균질한 성질을 가지며, 또한 점토는 카올린(kaolin)과 볼-클레이(ball-clay)와 같은 가소성 점토의 혼합체이다. 가소성 점토는 매우 미세한 입자로 작업성이 우수하고 건조강도가 높으며 카올린보다 소성 후의 색상이 어두우며 다양한 점토광물과 부수광물을 포함하고 있다. 카올린은 가소성 점토보다 조립(組立)이며 주로 카올리나이트(kaolinite, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)를 포함하고 있으며 제품의 소성강도를 증가시키는 물라이트를 주로 생성한다.

용제부분은 주로 장석(feldspar, $R_2O \cdot Al_2O_3 \cdot nSiO_2$)과 하석섬장석(nepheline syenite, $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)으로 구성되어 있으며 점성의 액상을 형성하여 소성수축과 함께 치밀한 소지를 형성한다. 부용제로는 석회석(lime stone, $CaCO_3$), 활석(talc, $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) 및 규회석(wollastonite, $CaO \cdot SiO_2$) 등이 있으며, 이들은 장석의 성분에 큰 변화를 주지 않는 범위 내에서 소지의 용융을 조절하기 위해 소량 첨가한다.

골격부분인 규석(SiO_2)은 일반적인 내화성 원료로 소지 내에서 충전제(充填劑)역할을 하며 Al_2O_3 도 많이 사용되고 있으나 고가(高價)이므로 비경제적인 원료이다.

1) 소성시 일어나는 반응

순수한 카올리나이트로 구성되어 있는 점토의 소성시 반응은 다음과 같다.

100~200℃ : 자유수 이탈, 건조완료

450~600℃ : 화학결합수의 분리, 13.9%의 중량감소,

메타카올린 형성, 일부 수축

925~980℃ : 스피넬 형성과 비정질 SiO₂ 생성

1050~1,100℃ : 스피넬상이 비정질 SiO₂의 증가와 함께 결정화되어

1차 물라이트 형성.

카올리나이트의 13.9%증량 감소 후 1,100℃로 가열하면 64%의 결정성 물라이트와 36%의 미세하게 분리된 반응성 유리 SiO₂로 분리된다.

1,100℃로부터 1,000℃까지 느리게 냉각하면 일부 유리 SiO₂는 크리스토팔라이트(cristobalite)로 변화한다.

2) Silica(SiO₂)

SiO₂는 3가지 동질이상(polymorphism)인 퀴츠(quartz), 크리스토팔라이트, 트리디마이트(tridymite)외에 실리카유리로 되어있다. 이들의 열팽창곡선은 Fig.2-1과 같다. 573℃로 가열하면 퀴츠는 실온형(α -quartz)으로부터 고온형(β -quartz)으로 전이가 발생하며 이러한 전이는 계(system)에 가해진 열에너지에 의하여 발생하는 것으로 이 에너지는 SiO₄⁴⁻사면체를 서로 회전시켜준다. 이 전이기간에 Si-O의 결합은 단절되지 않지만 냉각 시에는 부피가 크게 감소하여 급격한 변화를 발생한다. 1,200℃로 가열하면 고온형-퀴츠는 크리스토팔라이트로 전이하고 Si-O의 결합이 단절된다. 이 변화는 이온들 간에 재배열이 일어나면서 서서히 진행되는 비가역과정이다.

SiO₂의 전이는 팽창을 수반하여 가열과 냉각시 세라믹스 소지에 영향을 미친다. 세라믹스 소지가 소성시 온도변화에 견디는 능력은 매우 중요하다. 그러나 원료로 첨가된 SiO₂와 1,000℃에서 메타카올린으로부터 생성된 실리카와 구별하여야 하며 이때 생성된 SiO₂는 아주 미세하며 결

정도도 나쁘다.

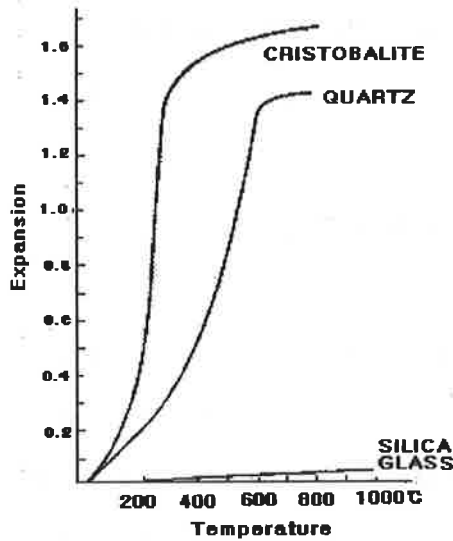
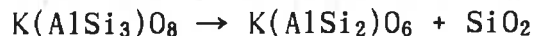


Fig. 2-1. Thermal expansion curves of SiO₂.

3) 장석(feldspar)

세라믹스 소지에 사용되는 장석은 칼리장석(K(AlSi₃)O₈)과 소다장석(Na(AlSi₃)O₈)이다. 장석과 유사한 광물인 하석섬장석(nepheline syenite, K₂O · Al₂O₃ · 2SiO₂)은 50%의 소다장석, 25%의 칼리장석과 25%의 네펠라인의 혼합물이다. 장석의 평형상태도를 관찰하면 가열시의 변화를 알 수 있다. 칼리장석은 저온에서 쉽게 용융하지 않고 1,150°C에서 점성이 높은 유리를 형성하는데, 이 때 K(AlSi₂)O₆와 크리스토팔라이트로 변화하며,



K(AlSi₂)O₆는 1,520°C가 되어야 완전히 용융한다.

소다장석은 1,118°C이면 완전히 용융되고 이때 생성된 유리는 칼리장

석 유리보다 점도가 낮으며 이 두 장석의 차이는 가열시 가스의 발생이다. 소다장석은 가스의 발생에 의하여 작은 기포를 발생시켜 용액에 잔존해 있을 가능성이 높고 칼리장석은 비교적 큰 기포를 발생시키며 장석질 유리액의 높은 점성으로 인하여 이 기포들은 쉽게 제거되지 않는다.

4) 점토-장석-규석 소지의 반응

40wt%점토-30wt%장석-30wt%규석 소지에서 점토는 보통 들 또는 그 이상의 성분으로 구성되어 있으며 카올린과 가소성 점토를 사용하는 경우에는 소성 전에 입자사이의 공간을 포함하여 약 35%의 기공을 함유하고 있다. Fig. 2-2에 40wt%점토-30wt%장석-30wt%규석 소지의 가열시 기공율의 변화와 결정상의 변화를 나타낸다. 주요 변화를 온도변화로 설명하면 다음과 같다.

가) 100-200℃

이 온도 범위에서 입자표면에 흡착되어 있는 자유수가 완전히 제거되는 건조가 완료된다. 이 때 크기의 변화는 거의 없다.

나) 450-600℃

화학적으로 결합된 물분자가 점토성분으로부터 제거된다. 카올린은 메타카올린으로 변하면서 약간의 수축과 기공율의 증가가 생긴다. 카올리나이트, 규석과 장석의 곡선이 끊어지는 것은 카올리나이트로부터 물의 제거를 뜻하며 세 성분의 비율이 변하는 것을 나타낸다.

다) 573℃

쿼츠는 저온형에서 고온형으로 변한다. 순수한 쿼츠의 팽창곡선이 갑자기 나타나나 미분이고 쿼츠의 양이 소량이므로 소지 자체에 크게 영향을 주지 않는다. 이 때 보상효과에 의하여 팽창과 동시에 450-600℃에서 수축이 발생한다.

라) 300-700℃

유기물과 같은 불순물이 산화되어 제거된다. 이는 전기로 내 분위기로부터 과잉의 공기가 생성되는 기간이므로 반응이 완료될 때까지 충분한 시간을 유지하여야 한다. 유리질의 형성이 시작된 후에 환원입자가 생성되면 발포(broating)의 원인이 된다.

마) 980℃

메타카올린은 스피넬(spinel)과 미세하고 반응성이 강한 SiO₂를 생성한다.

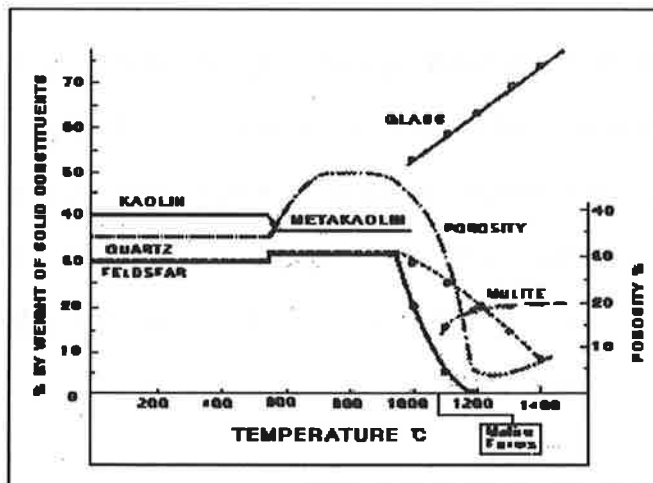


Fig. 2-2. The phase diagram of clay-feldspar-silica system.

바) 1,050~1,100℃

메타카올린으로부터 생성된 스피넬은 물라이트로 변하기 시작한다. 1,100~1,200℃ 범위에서 침상의 물라이트가 생성됨과 동시에 장석이 용융하여 장석의 양이 감소하며 유리상이 생성된다. 유리상은 물라이트가 형성되는 동안에 카올린의 미분의 실리카와 반응하여 용해한다. 소지에 함유되어 있는 SiO의 일부가 용해되나 Al₂O₃는 용해되지 않는다.

사) 1,200℃

이 온도에서 장석이 용융하여 XRD분석으로는 더 이상 장석의 확인이 불가능하다. 유리상의 양이 증가하면서 기공률이 급격히 감소하여 최소로 되어 4~5%의 기공률을 나타낸다. 이는 일반적인 열처리에 의하여 제거가 불가능한 폐기공의 형성에 기인한다.

아) 1,100~1,250℃

남아있는 퀴츠는 모두 크리스토팔라이트로 변화한다. Fig. 2-2에서는 크리스토팔라이트가 나타나지 않는데 이는 퀴츠로부터 전이된 크리스토팔라이트는 반응성이 매우 높아 크리스토팔라이트가 유리상에 용융되었기 때문이다. 장석 이외의 용제들도 퀴츠에서 크리스토팔라이트로의 전이를 돕는다. 1,250℃이상으로 소성하면 크리스토팔라이트가 존재하여 냉각시에 주의를 요하며 고온형에서 저온형으로의 전이는 200℃부근에서 일어나게 된다. (Fig. 2-1 참조)

자) 1,200℃이상

이 온도 이상에서는 물라이트는 더 이상 성장하지 않고 폐기공 내의 가스의 팽창에 의하여 발포하거나 팽창하게 되면 기공률이 증가한다.

이와 같은 3성분은 퀴츠나 크리스토팔라이트의 형태로 잔존한다. 1,200°C 이상에서 장시간 열처리하면 크리스토팔라이트의 생성량은 증가하고 퀴츠는 적어진다.

5) 소성 소지와 응력

소성 소지에 발생하는 미세 균열(micro crack)은 주로 퀴츠 입자와 관계가 있다. 장석의 용액에 용해되는 퀴츠 입자는 액상에서 용해가스를 방출하여 퀴츠 입자들 주위에 기포들이 존재하게 된다. 퀴츠 입자가 용해되면 입자 주위에 SiO₂질이 높은 유리액을 형성하고 냉각을 하면 수축의 차이에 의하여 발생하는 응력에 의하여 미세 균열의 원인이 된다. SiO₂ 용액은 팽창이 적으나 퀴츠 입자는 매우 높은 팽창계수를 갖는다. 냉각 시 열팽창계수 차이로 인하여 퀴츠 입자들이 높은 응력에 노출되므로 큰 결정입자에는 균열이 발생한다. 30 μm보다 작은 입자의 퀴츠 결정은 내용력성이 감소하여 균열이 발생하지 않고 약 8 μm의 퀴츠는 장석질 용액에 완전히 용융된다.

Fig. 2-3에서 냉각 시 700°C 이하의 장석질 유리상 내에 발생하는 응력은 수축률의 차이에 의하여 발생한다. 700°C의 열처리에 의하여 장석질 유리상은 점성이 높게 되어 고체처럼 작용하며 변형이 없는 응력을 발생한다. 작은 균열들은 대개 퀴츠 입자를 둘러싸고 몇 μm 정도의 주위에 형성된다. 규석은 크기가 8~30 μm이면 응력을 받는 큰 입자가 존재하지 않기 때문에 미세 균열이 발생하지 않게 된다. 또한, 매우 작은 입자들은 실리카질 유리상으로 용융하여 소멸되므로 팽창에 영향을 미치지 않게 된다.

퀴츠 용액의 양은 다음의 네가지 인자에 의해 좌우된다.

가) 소성 온도

나) 소성 시간

다) 쿼츠 입자의 크기: 장석질 용액과 접촉하는 쿼츠의 표면적을 좌우

라) 장석질 유리의 종류: 하석섬장석이나 석회석에 생성된 유리질은 쿼츠를 빠르게 용해한다.

용제로 Al_2O_3 만을 함유하는 소지에는 15%정도의 소성수축이 발생하는데, 이는 Al_2O_3 가 장석질 용액에 용해되지 않기 때문이다. 쿼츠는 비중이 2.65이고 SiO_2 유리는 2.20이므로 쿼츠가 유리상으로 변화하면 약 20.5%의 팽창이 일어난다. 이 때 발생하는 팽창은 장석질 유리상이 입자들을 끌어들이는 표면장력에 의해 수축을 방해하므로 규석을 포함하는 소지는 약 13%의 소성수축이 발생한다.

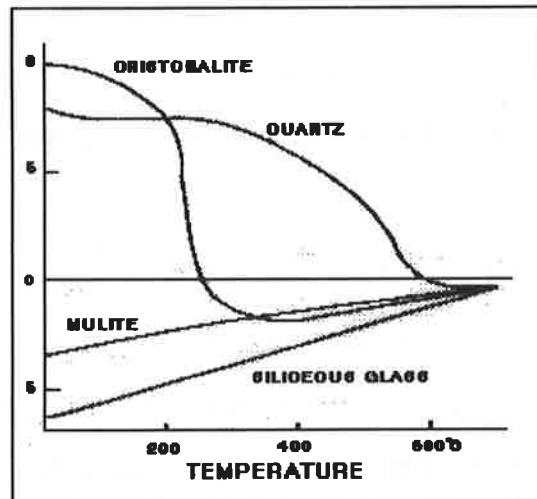


Fig. 2-3. The stress curves of feldspar.

Table 2-1. The Thermal Expansion Coefficients of Materials

	Expansion (%)							
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
Silica glass	0.004	0.009	0.015	0.021	0.026	0.31	0.035	0.038
Mullite	0.008	0.050	0.098	0.152	0.206	0.265	0.324	0.387
α -Alumina	0.050	0.100	0.160	0.250	0.330	0.420	0.520	0.620
Nepheline-syenite	0.050	0.150	0.240	0.330	0.420	0.520	0.620	0.730
Orthoclase	0.062	0.145	0.228	0.312	0.395	0.478	0.561	0.644
Albite	0.061	0.143	0.225	0.307	0.389	0.471	0.553	0.635
Cristobalite	0.120	0.380	1.390	1.520	1.570	1.610	1.640	1.650
Quartz	0.090	0.190	0.310	0.540	0.830	1.310	1.410	1.410

Table 2-1에 일반 소지원료의 열팽창계수의 백분율을 보인다. 응력에 의하여 균열이 발생하는 것은 각 성분의 팽창계수 차이에 의한 것이므로 소성과 냉각 과정에서 이들 팽창계수를 고려하여야 물리적 성질이 우수한 최종 제품을 제조할 수 있다.

나. Mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)

몰라이트(mullite)는 사방정계(orthorhombic system)로서, 화학식이 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, 비중이 3.03, 경도가 7.5, 열팽창계수가 $4.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 용융점이 $1,850 \text{ } ^\circ\text{C}$ 인 침상형태의 무색 결정이다. 천연 몰라이트는 매우 드물지만 스코트랜드의 Mull섬에서 산출되는 열변성암 중에서 처음으로 발견되어 몰라이트라 명명되었으며, 1,924년 Bowen 등에 의하여 점토소지를 고온으로 열처리하면 몰라이트 결정이 생성되는 것을 확인하여 Al_2O_3 - SiO_2 계 평형상태도를 제작하였다. Fig. 2-4에 SiO_2 와 Al_2O_3 의 상태도를 보인다.

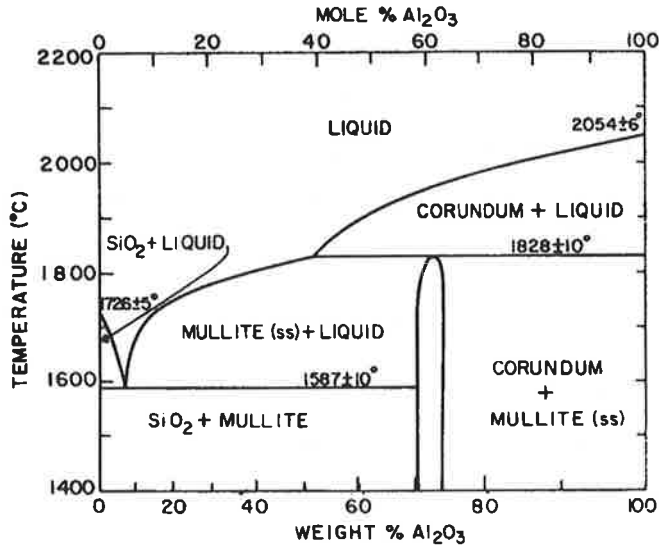
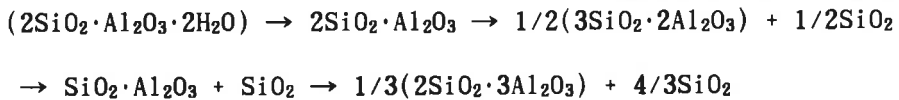


Fig. 2-4. Equilibrium SiO₂-Al₂O₃ phase diagram according to Al₂O₃ content.

카올린(2SiO₂·Al₂O₃·2H₂O)으로부터 물라이트의 합성은 다음과 같은 연속반응에 의한다.



카올린으로부터 메타-카올린(2SiO₂·Al₂O₃), 메타-카올린으로부터 스피넬(3SiO₂·2Al₂O₃), 스피넬로부터 전이 물라이트(SiO₂·Al₂O₃), 전이 물라이트로부터 물라이트로 연속반응이 진행되면서 SiO₂성분은 점차 모상으로부터 방출되어 2SiO₂·Al₂O₃에서 2SiO₂·3Al₂O₃의 조성으로 변화한다. 특히, 전이물라이트는 a축의 격자상수가 물라이트의 격자상수보다 길고 b축의 격자상수와 비슷하여 정방정형 물라이트(tetragonal-like mullite)라 하며 Al₂O₃가 과량 함유된 조성이다.

카올린, 납석(pylopilite), 점토, 규선석(sillimanite) 및 홍주석(andalusite) 등과 같은 규산알루미나(alumino-silicate)계의 세라믹 원료를 고온으로 처리하면 안정한 물라이트와 크리스토팔라이트가 생성되지만, 크리스토팔라이트는 원료에 불순물로 존재하는 Na_2O , CaO , MgO 등과 반응하여 유리상을 만들어 매트릭스로 남게 된다.

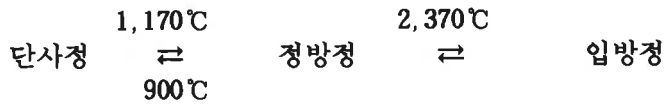
물라이트는 화학적으로 안정하고 내식성이 뛰어나지만 아니라 산화물 세라믹스 중에서 내열성 및 고온강도가 우수하여 고온 구조재료로 주목받고 있다. 이는 물라이트의 낮은 열팽창계수, 1850°C 의 높은 용융점, 높은 하중연화점, 침상구조의 특성에 기인한다. 물라이트는 주로 내마모성 기계부품인 롤, 고온내열부품, 도가니, 열교환기, 물라이트 자기, 접화전용 애자 및 전기 절연품으로 이용되고 있다. 특히 세라믹스 롤부품은 종래의 금속제품에 비하여 열에 의한 온도변화가 작고, 부분적 팽창이 작기 때문에 분산성이 향상되며, 롤의 경도가 높기 때문에 마모량이 적어서 수명이 길고 취급과 세척이 용이하다는 특징을 가지고 있다. 그러나, 물라이트는 상온에서 비교적 낮은 강도와 파괴 인성으로 인하여 취성파괴를 일으키는 문제점이 있으므로 구조재료로서 물라이트의 효용을 극대화하기 위해서는 고인성화가 필요하다.

다. Zirconia(ZrO_2)

물라이트에 ZrO_2 를 첨가한 복합체는 물라이트 매트릭스의 낮은 열팽창계수, 고온 크립(creep)특성과 ZrO_2 첨가로 인한 기계적 성질의 증가로 인하여 고온구조재료로 주목을 받고 있다. 특히, ZrO_2 는 균열 전파시 정방정(tetragonal)으로부터 단사정(monoclinic)으로의 응력유기(stress induced) 상전이로 인하여 균열이 지닌 탄성에너지를 흡수하여 파괴인성

이 증가하므로 구조재료의 강화재로 널리 이용되고 있다. 또한, 자기소지의 카올린이 고온에서 물라이트와 유리 SiO_2 로 전이될 때 물라이트의 생성량을 높이기 위하여 유리 SiO_2 에 상당한 양만큼의 Al_2O_3 를 첨가하여 소성한다. 이 때 첨가된 Al_2O_3 의 일부가 α - Al_2O_3 로 잔존하거나, 혹은 카올린의 불순물로 인하여 비정질인 유리상이 생성되어 물라이트의 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 물라이트에 강화재로 ZrO_2 와 Al_2O_3 를 첨가하여 물라이트의 생성량을 증가시켜 이에 따른 복합체의 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 연구가 수행되고 있다.

순수한 ZrO_2 에는 단사정(monoclinic), 정방정(tetragonal) 및 입방정(cubic)의 세가지 동질이상(polymorphosm)이 있다.



정방정으로부터 단사정으로의 전이는 마르텐사이트(martensite) 전이로 전이 시 균열선단(advancing crack tip)에서 에너지를 흡수하여 균열전파에너지를 감소시켜 세라믹스의 파괴인성을 증진시킨다.

Fig.2-5와 같이 ZrO_2 복합체의 파괴인성 증진기구에는 transformation toughening, microcrack toughening, crack deflection 등이 있으며 이들이 단독이나 복합적으로 작용하고 있다.

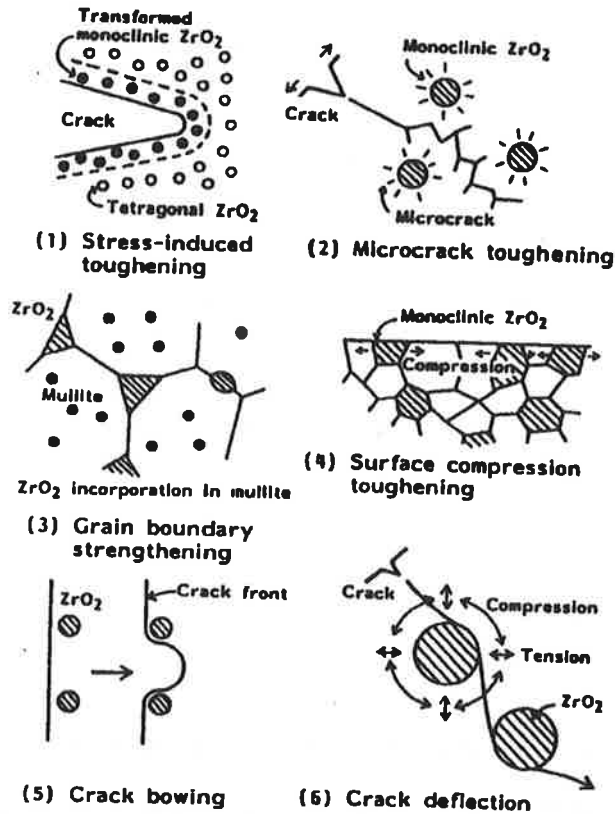


Fig. 2-5 Schematic models of proposed toughening mechanism by ZrO_2 addition.

1) Transformation toughening

파괴균열 선단의 응력장에 존재하는 준안정상인 정방정이 단사정으로 전이할 때 균열선단으로부터 에너지를 흡수하여 파괴인성 및 강도가 증진된다. 상전이에 수반된 부피팽창이 기지에 압축응력을 유발하여 균열의 전파를 억제한다.

2) Microcrack toughening

매트릭스 내에 포함된 정방정의 단사정으로의 전이에 의하여 3~5vol%의 부피팽창에 의하여 매트릭스 내에 미세균열이 발생한다. 이 때 균열

이 외부로부터 전파되면 이러한 미세균열은 균열선단의 응력장을 확대시키는 역할을 하며 또한 전파된 균열이 미세균열에 의해서 분산되어 에너지가 흡수된다.

3) Crack deflection

진행하고 있는 균열선단의 불균일성에 의하여 균열 선단에서 진행방향이 교란되는 경우 에너지가 감소한다. 즉, 국부적인 응력장이나 강한 2차상 등에 의하여 균열이 굴절되는 과정에서 균열전파의 구동력이 감소한다.

라. Alumina(Al_2O_3)

알루미나(Al_2O_3)는 산화물 세라믹스 중에서 가장 널리 다량으로 사용되고 있다. 이것은 구조용 세라믹스로서 필요한 모든 성질을 지니면서 저렴하고, 제조방법도 확립되어 있기 때문이다.

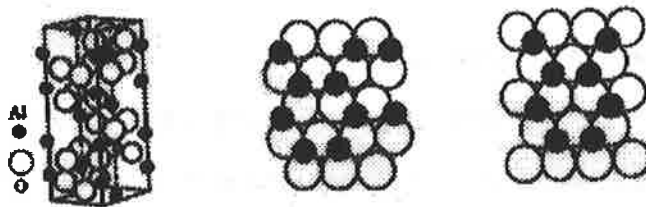


Fig. 2-6. The crystal structures of α - Al_2O_3

Al_2O_3 에는 $\gamma, \eta, \delta, \chi, \kappa, \theta, \alpha$ 의 각 상이 있는데, 이 중에서 가장 안정한 것은 α - Al_2O_3 뿐이다. α - Al_2O_3 는 육방정계로서 격자상수는 $a=4.76 \text{ \AA}$, $c=12.99 \text{ \AA}$ 이고 비중은 3.98이다. Fig. 2-6은 α - Al_2O_3 의 결정구조를 나타낸 것이다.

모스경도는 9로 산화물 중 가장 딱딱하고 열전도율이 크지만 열팽창계수가 크기 때문에 열충격 저항성은 별로 좋지 않다. 영률은 380GPa(상온)이다. Al_2O_3 의 강도는 미세구조에 크게 의존하는데, 보통 3점곡강도는 300~400MPa정도이다. 고온강도는 1,000℃이상에서 Fig. 2-7과 같이 급격히 감소한다.

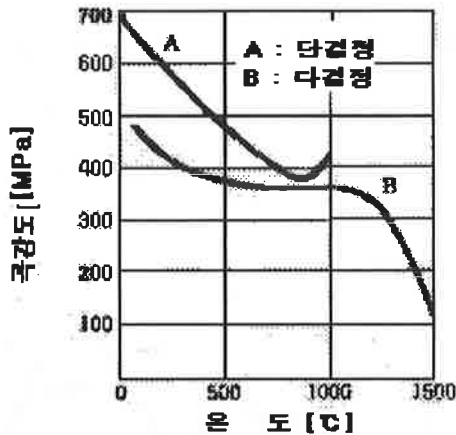


Fig. 2-7. The high-temperature strength of α - Al_2O_3 .

Al_2O_3 를 소결할 때 여러 가지의 첨가제가 이용되는데, 그 중 가장 중요한 것은 TiO_2 와 MgO 이다. TiO_2 는 공용온도를 낮추고 소결 중에 액상을 형성하기 때문에 1%의 첨가로 소결온도를 1,500~1,550℃까지 낮출 수 있으나 이상 입성장을 일으키는 결점이 있다. 여기에 MgO 를 1.0~1.5%첨가하면 Al_2O_3 의 소결성을 높이고 입성장을 억제할 수 있으므로 평균입경은 3~5 μ m이 된다. 첨가제로는 이외에 CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , NiO , SiO_2 등이 있다.

Al_2O_3 세라믹스 중에서 현재 가장 주목을 받고 있는 것은 Al_2O_3 - ZrO_2 세라믹스이다. 이것은 ZrO_2 의 상변태를 이용하여 고인성화 시킨 것으로 Al_2O_3 매트릭스 중에 ZrO_2 입자를 분산시키면 소결 후 냉각 시에 정방정

에서 단사정으로의 변태가 일부 동결된다. 이 상변태에서 6vol%의 체적 팽창을 동반하기 때문에 매트릭스는 미세균열이 분산된 상태가 된다.

매트릭스 중에 거시적 균열(macro crack)이 발생하면 균열선단부에 존재하는 정방정 ZrO_2 입자는 상변태하여 탄성스트레인 에너지를 흡수하여 파괴인성을 향상시킨다. 또한, 매트릭스 중에 존재하는 미세 균열은 랜덤(random)하게 배향하고 있기 때문에 거시적 균열과 합체하였을 때 균열선단의 응력확대계수를 감소시켜 파괴인성치를 높인다.

Claussen 등은 Al_2O_3 매트릭스 중의 ZrO_2 첨가량 및 ZrO_2 입경이 곡강도 및 파괴인성치에 미치는 영향을 조사하여 Fig. 2-8에 나타낸 실험 결과를 얻었다.

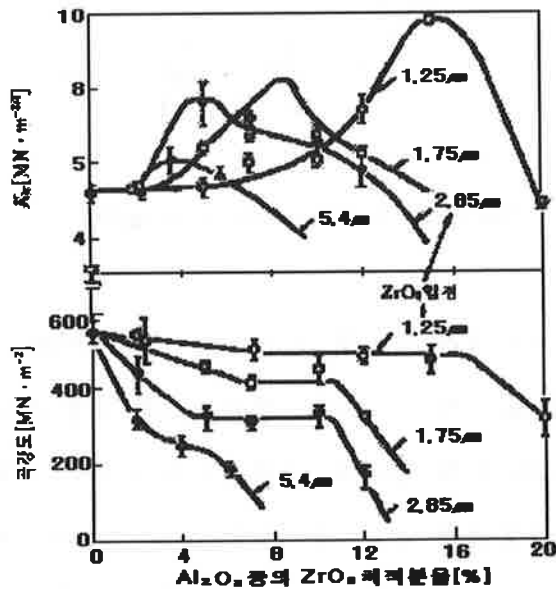


Fig. 2-8. The mechanical strength of Al_2O_3 - ZrO_2 ceramics with particle size and volume fraction of ZrO_2 .

Fig. 2-8에 의하면 Al_2O_3 - ZrO_2 계 세라믹스의 곡강도는 ZrO_2 입경 1.25 μm 의 것을 제외하면 ZrO_2 의 첨가량이 증가할수록, 또한 입경이 클수록

감소한다. 한편, 파괴인성치 K_{Ic} 는 어느 입경에서나 ZrO_2 의 첨가에 의하여 최대치를 나타내는데 입경이 $1.25\mu m$ 일 때 무첨가재의 약 2배정도 증가하였다.

2. 성형방법

세라믹스의 성형공정에는 가압성형, 주입성형, 가소성가압성형 등 여러 가지 방법이 있다. 이 중, 가압성형은 결합제 또는 윤활제와 혼합되었거나 유동성의 증진을 위해 조립화된 분말을 성형틀에 넣고 압력을 가하여 압축성형시키는 방법으로 일축가압성형, 정수압가압성형, 고온가압성형, 고온정수압성형의 방법이 있으며 세라믹스 롤, 축전기와 같은 단순한 모양에서부터 진공관, 스위치, 트랜지스터의 기판 등의 복잡한 모양의 성형이 가능하다. 그러나 이 방법은 부적당한 밀도의 차이로 인한 치수의 변형, 성형틀 마모에 의한 치수의 변화, 균열 등의 문제점이 있고 고가의 장비가 필요하다는 단점이 있다. 주요 성형공정은 Table 2-2에 보인다.

가. 가소성가압성형(Plastic forming)

가소성가압성형은 압력으로 변형이 가능한 분말과 첨가제 혼합물로 성형을 한다. 이 혼합물은 점토광물에 물, 소량의 해교제, 계면활성제, 윤활제를 첨가하여 제조된다. 점토를 포함하지 않는 조성인 순수한 산화물, 탄화물 및 질화물의 경우 가소성을 부여하기 위해 유기물을 물 대신 첨가하거나 물과 혼합하여 첨가한다. 성형에 적합한 가소성을 얻기 위하여 약 20-50vol%의 유기물을 이용한다. 가압과 동시에 가열을 하는

것이 일반적이다.

가소성가압 성형공정의 가장 큰 문제점은 소성 전에 유기물을 제거하는 것이다. 점토-물계의 경우에는 건조 시 큰 수축이 발생하므로 수축에 의한 균열 위험성이 증가한다. 또한, 유기물 첨가제를 이용할 때 가장 큰 문제점은 충분히 높은 성형밀도를 얻는 것과 유기물을 제거하는 것이다. 유기물의 제거속도가 너무 빠르면 균열, 부풀음 및 비틀림 등의 원인이 되기도 한다. 부적합한 제거로 인하여 고온 치밀화 과정 중에 균열, 부풀음, 오염 등이 발생하기도 한다.

가소성가압성형은 도자기, 식기와 같은 고전 세라믹스 제조에 광범위하게 이용되고 있다. 점토를 함유하고 있는 조성에 물을 첨가하여 작업을 용이하게 한다.

Table 2-2. Shape-Forming Process

가압성형(Pressing)	일축가압성형(Uniaxial Pressing) 정수압가압성형(Cold Isostatic Pressing) 고온가압성형(Hot Pressing) 고온정수압성형(Hot Isostatic Pressing)
주입성형(Casting)	니장주입성형(Slip Casting)
가소성성형(Plastic Forming)	압출성형(Extrusion) 사출성형(Injection Molding) 압축성형(Compression Molding)
기타	테이프성형(Tape Forming)

1) 주입성형(Casting)

주입성형은 가장 상업적이며 경제적인 방법으로 세라믹 입자를 물에

분산시킨 현탁액을 제조하여 다공성의 석고 성형틀에 주입하는 방법으로 니장주입성형, 요변성주입성형 등이 있으며, 니장주입성형 중에는 배출주입성형, 고히주입성형, 진공주입성형, 원심주입성형 등이 있다. 이 중, 현재 예술품, 하수구, 위생도기, 도자기 등을 제조할 때 사용되며 부수공구 및 재료 등이 적게 들어 경제적이고 원통과 같은 모양을 손쉬운 방법으로 만들 수 있는 배출주입성형법(drain casting)이 가장 널리 사용되고 있다. Fig. 2-9에 배출주입성형(drain casting)의 공정도를 보인다.

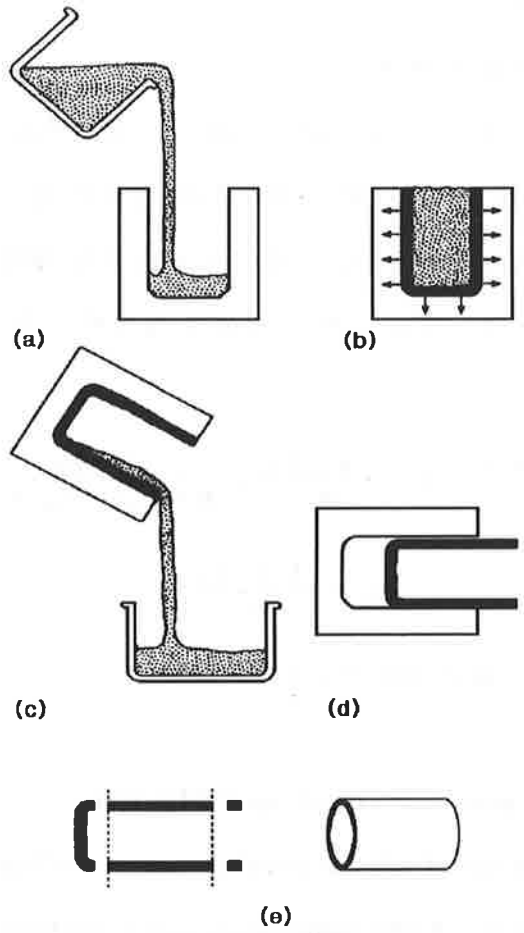


Fig. 2-9. Processing of drain casting.

니장(泥匠, slip)은 세라믹스 분말과 물 또는 유기용매를 공정첨가제와 함께 혼합한 상태를 말하며 이 니장을 준비된 성형틀에 주입하여 성형틀의 삼투압에 의하여 형상을 제조한다. 액체가 성형틀의 내부로 여과·확산되어 성형틀의 벽에 위치한 세라믹스 분말이 치밀화된다. 배출주입성형 성형틀의 삼투압에 의하여 공정이 진행되는데, 이 삼투압은 Laplace식에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = S \sigma \cos \gamma$$

이때, S : 석고 성형틀 비표면적

σ : 물의 표면장력

γ : 물과 성형틀의 접촉각

위 식으로부터 니장주입(slip casting)에서 성형시간을 좌우하는 삼투압에 직접적인 영향을 미치는 석고 성형틀이 중요한 변수이다. 니장주입 공정 전반에서 성형틀에 미치는 변수는 비압축성 성형체의 여과반응식 모델에 의하여 설명하였다. 이 모델에서 성형체의 두께는 다음과 같다.

$$\xi_c = \frac{\xi_s^0 - \xi_s}{n} = \frac{-\epsilon_m \xi_m}{n} \left[\frac{2Pt}{n \eta \epsilon_m (n \alpha_m + \alpha_c)} \right]^{1/2}$$

$$n = \frac{1 - C - \epsilon_c}{C}$$

여기서, ξ_c : cast layer thickness

t : time

P : total pressure effecting filtration

ξ_s^0 : position of the suspension-air interface at t=0

ξ_s : position of the suspension-air interface during filtration

ξ_m : position of the filtrate-air interface in the mold

η : viscosity of the suspending medium

C : volume fraction of solids in the slip

ϵ_m, ϵ_c : void ratios of the mold and cast

α_m, α_c : specific hydraulic resistance of mold and cast

위 식으로부터 성형률의 증가는 α_m 과 α_c 의 감소와 P, C, ϵ_m 과 ϵ_c 의 증가에 기인한다. 성형률의 높은 기공률은 α_m 의 감소효과를 가져와 성형률을 증가시키며 니장의 높은 충전률은 α_c 의 감소로 인한 높은 성형률을 가져온다.

2) 압축성형 (compressing molding)

압축성형, 전달성형 (transfer molding) 및 가온성형 (warm molding)은 사출성형과 유사한 가소성가압성형법이다. 세라믹 분말은 유기 전달체와 혼합되어 있고 가온·가압 하에서 성형기로 보내진다. 압축성형은 공급원료가 유동성이 좋은 분말 대신 덩어리인 점을 제외하고는 가압성형과 유사하다. 성형체는 가압기 평판 또는 성형기 표면에 적층되고 가압 하에서 소성변형되어 공간을 채운다.

3) 압출 (extrusion)

압출은 벽돌, 타일, 관, 봉 및 롤과 같은 균일한 단면을 지니며 긴 형상의 세라믹스 제조에 널리 이용되며 압출기를 Fig. 2-10에 보인다.

세라믹 분말과 점토 또는 유기 첨가제의 가소성 혼합물을 진공실린더에 넣고 탈기와 혼련을 위한 가공과 반죽을 한다. 이 혼합물은 토련기

에 의해 운반되어 성형틀로 보내진다. 성형된 가소성 혼합물이 압출기를 통해 압출되면 적당한 받침을 이용하여 변형을 방지해 주며 원하는 길이로 절단한다.

점토를 함유하거나 물의 첨가로 가소성을 지닌 조성의 압출방법은 오랜 기간 동안 이용되어 잘 발달되어 있다. 비점토 조성의 압출은 개발이 별로 되어 있지 않기 때문에 새로운 계마다 실험적인 최적화가 필요하다.

나. 가압성형(Pressing)

가압성형은 결합제 또는 윤활제와 혼합되었거나 유동성의 증진을 위하여 조립화된 분말을 성형틀에 넣고 압력을 가하여 압축성형하는 방법이다. 조립화와 분무건조법을 이용하는 전형적인 공정을 Fig. 2-11에 보인다.

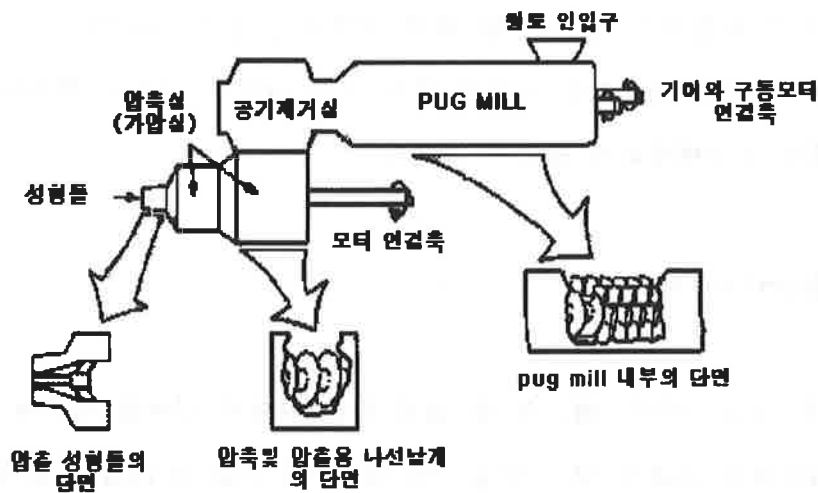


Fig. 2-10. The Schematic of extruder.

말을 이용한다. 이 방법은 건식, 반건식 또는 분진성형으로 분류된다. 성형은 과립의 분쇄와 입자의 기계적인 재배치에 의한 최밀충전으로 이루어진다. 윤활제와 결합제는 재배치 과정을 도와주며 결합제는 입자를 결합시킨다. 건식가압성형은 과립 분말을 분쇄하고 균일한 성형이 이루어지도록 일반적으로 고압이 이용된다.

건식가압성형으로 생산속도의 증가와 정밀한 공차를 얻을 수 있으며 이 방법으로 약 0.05cm(0.02in)두께를 지닌 수 백만 개의 유전체가 정밀한 공차를 갖도록 제조된다. 일반적인 응용을 위해서는 공차가 $\pm 1\%$ 정도가 요구되나 특별한 경우에는 더 정밀한 공차를 얻을 수 있다.

(2) 습식가압성형(Wet pressing)

습식가압성형은 원료로 10~15%의 수분을 함유한 분말을 사용하며 점토를 포함하는 조성에 사용된다. 공급원료는 성형 중에 소성변형되어 성형틀과 같은 모양이 된다. 가압성형체는 보통 flash(성형틀 사이를 빠져나오는 벽면에 생성된 얇은 층)를 갖고 있으며 변형이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 습식가압성형은 자동화에는 적합하지 않으며 치수공차는 $\pm 2\%$ 에 불과하다.

(3) 가압기(Press)의 종류

대부분의 가압기는 기계식 또는 유압식이다. 기계식 가압기는 일반적으로 성형속도가 빠르며 Fig. 2-12에 전형적인 1단계(stroke) 기계식 가압기의 가압과정을 보인다. 가압 후, 성형체가 원하는 치수를 갖도록 분말의 충전비를 근거로 미리 계산된 공간이 생길 수 있도록 펀치를 성형틀 내에 적절히 위치한다. 원료공급부(feed shoe)가 정해진 위치로 움직여 적당한 결합제, 수분 및 윤활제를 함유한 유동성이 좋은 분말로 확보

된 공간을 채워준다. 원료공급부가 분말표면을 평활히 해주고 원위치로 돌아간 후, 상부펀치가 내려와 분말을 예비 압축시키며 상하부 펀치가 독립적으로 정해진 위치로 이동해 동시에 분말을 압축한다. 상부펀치가 원위치로 돌아가고 하부펀치가 성형체를 성형틀로부터 밀어내고 정확한 원료공급을 위해 하부펀치는 정해진 위치로 돌아간다. 이 과정은 가압기와 성형체 모양에 따라 일반적으로 분당 6~100회 반복된다. 이러한 종류의 가압용량은 1~20톤이나 때로는 100톤 정도가 사용될 때도 있다.

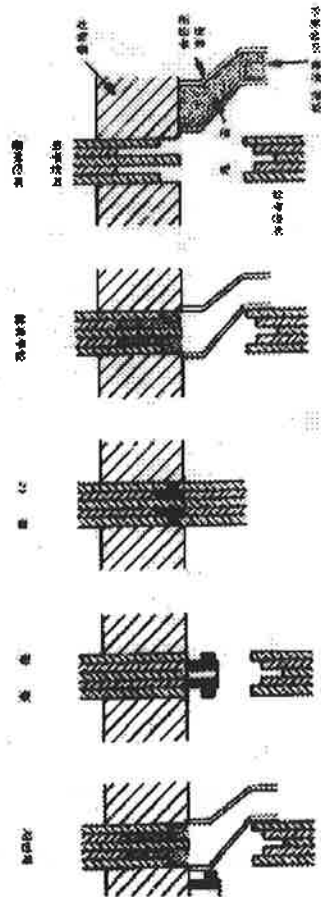


FIG. 2-12 The process of uniaxial pressing

기계식 가압기의 다른 종류로는 회전식 가압기가 있다. 다수의 성형틀이 회전탁자 위에 위치한 구조로서 성형틀 편치는 탁자가 회전하는 동안 캠을 따라 움직인다. 원료 채우기, 가압 및 밀어내기 과정은 1단계 가압기와 유사하며 회전식 가압기의 생산속도는 분당 2,000개까지 가능하며 가압용량은 1~100톤 정도이다.

또다른 종류의 기계식 가압기로 토글가압기가 있다. 이는 내화벽돌 성형에 자주 이용되며 가압용량이 약 800톤에 달한다. 토글가압기는 정해진 부피를 정확히 성형하므로 공급분말의 특성에 따른 최종밀도의 조정 범위가 넓다.

유압식 가압기는 피스톤에 접촉된 유체를 통해 압력을 전달하며 일반적으로 압력을 고정시켜 사용하므로 성형체의 크기와 특성은 공급원료의 특성과 원료공급량 및 가해진 압력에 의해 결정된다. 유압식 가압기의 일주기 속도는 기계식 가압기보다 매우 느린 단점을 갖고 있다.

(4) 일축가압성형의 문제점

일축가압성형의 단점은

- (가) 부적당한 밀도와 치수
- (나) 성형틀 마모
- (다) 균열
- (라) 밀도 변동

(가)과 (나)항은 성형 후, 즉시 성형체를 측정하여 간단히 알아낼 수 있다. 부적당한 밀도와 치수는 규격에 맞지 않는 공급원료에 기인하는 경우가 많으므로 비교적 쉽게 해결된다. 성형틀의 마모는 치수의 차이에 의하여 발생하나 이는 품질관리와 공정관리를 통해 일상적으로 해결되어야만 한다.

균열의 원인은 성형틀의 부적절한 설계, 공기의 포집, 성형체의 탈형시의 반동 및 성형틀의 마모 등에 의하여 발생된다. 일상적인 육안 검사법으로 균열의 관찰이 불가능할 때는 염료침투법이나 비파괴검사법인 X-선 투과법으로 검사를 한다.

일축가압 성형시 가장 큰 문제점은 불균일한 밀도 분포이다. 성형체 내의 밀도변화는 소성하는 동안 변형과 균열을 초래한다. 밀도변화의 한 가지 원인은 분말과 성형틀 및 분말과 분말간의 마찰에 의한다. Fig. 2-13과 같이 성형틀에 채워진 분말의 한쪽 끝에서 가해지는 일축압은 마찰에 의해 소실되어 실제 작용되는 힘은 가해진 압력보다 훨씬 작게 된다. 이런 영역에서는 높은 압력이 가해지는 영역보다 낮은 밀도를 갖는다. 압력의 차이는 길이 대 지름의 비가 증가함에 따라 커진다. 소성하는 동안 저밀도영역은 불완전하게 치밀화 되거나 주위 영역보다 많이 수축되어 결함이 발생한다.

적절한 결합제와 윤활제 사용은 성형틀의 벽면 마찰과 입자-입자간 마찰을 감소시킬 수 있어 성형체 내의 밀도변화를 감소시켜 준다. 성형틀 양쪽에서 가하는 압력 역시 도움이 된다.

2. 등압성형(Isostatic pressing)

등압성형(정수압성형)은 분말에 모든 방향에서 같은 압력을 가하는 방법이다. 이 방법은 성형틀 벽면과 분말 사이의 마찰에 기인한 밀도변화를 효과적으로 제거해 주며 길이 대 지름의 비를 갖는 모양을 포함한 큰 부피의 분말을 균일하게 압축시킬 수 있다. 등압성형 장치를 Fig. 2-14에 보인다.

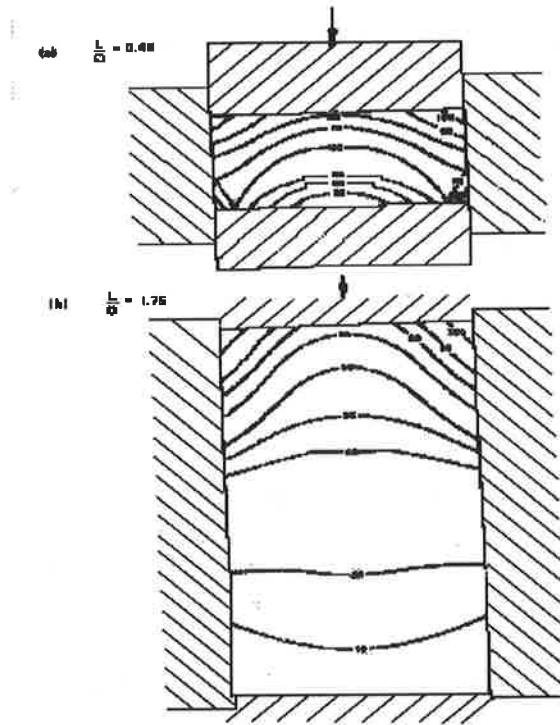


Fig. 2-13. Pressure distribution of uniaxial pressing.

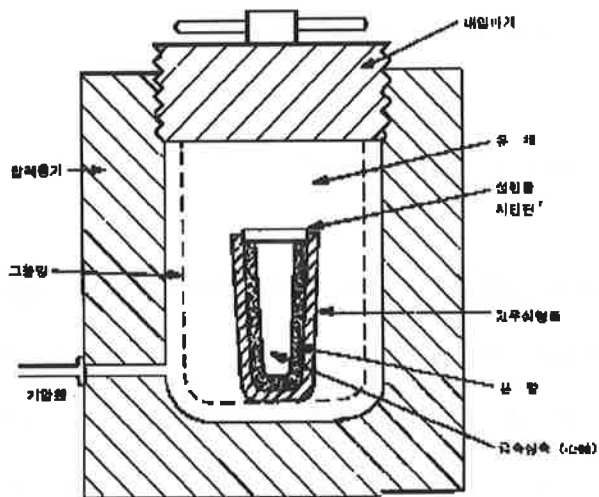


Fig. 2-14. The schematic of isostatic pressing

두꺼운 벽을 지닌 강철압력용기와 breach-lock 또는 내압마개로 이루어져 있다. 분말이 고무 성형틀에 채워져 압력용기 내의 액체 속에 잠겨진다. 글리세린, 유압용 기름, 물(방청제 첨가) 또는 비압축 유체가 이용되며 액체에 압력이 가해지면 압력이 성형틀 표면 전체에 균일하게 전달된다. 고무형이 변형되고 분말이 압축되나, 압력이 제거되면 고무형은 원래의 형태로 돌아와 성형체를 쉽게 분리해 낼 수 있다.

실험실용 등압성형 장치는 압력범위가 35~1,380MPa (5,000-200,000 psi)로 설계된다. 그러나 생산용 장치는 일반적으로 207MPa (30,000 psi) 이하에서 사용된다.

등압성형에서 첫째로 고려할 점은 성형틀을 균일하게 채우는 것이다. 이는 일반적으로 유동성이 좋은 분무건조나 조립화 된 분말을 진동시켜서 얻게된다. 일축성형에 비해 등압성형은 더 높은 압력을 균일하게 가할 수 있어 균일한 성형체의 제조가 가능하며 후공정인 소결과정에서 치밀화가 향상되어 균일하며 결함이 없는 부품의 제조가 가능하다.

등압성형은 생산속도가 제한되고 정밀한 공차와 표면 마무리가 곤란하다. 이를 해결하기 위하여 두꺼운 벽을 지닌 단일 또는 혼합조성 고무형과 가압을 위해 조절된 유체흐름을 함께 이용한다. 고무는 압력을 충분히 전달시킬 수 있고 불균일하게 변형되지 않을 정도로 유연하다. 성형틀은 일반적으로 시간당 1,000~1,500회의 속도로 자동으로 채워지며 가압되고 비워질 수 있어야 한다.

3. 성형체 가공(Green machining)

성형체 가공은 세라믹 부품이 최종 소결되기 전에 재료가 압축되어 분말이 약하게 결합되어 있을 때의 가공을 의미한다. 이 때의 재료는 최종

소결된 재료보다 연질이며 다이아몬드 같은 공구를 필요로 하지 않아 매우 경제적으로 가공할 수 있다. 그러나, 재료가 파괴되기 쉬워 다양한 모양으로 가공하는 동안 정확하고 균일한 가공을 위해 공구와 고정구의 설계 및 제작에 많은 주의를 기울여야한다. 또한, 파괴되기 쉬운 재료 내에 과잉응력이 가해지거나, 파편, 균열, 파괴 및 거친 표면이 발생하지 않도록 가공 변수를 주의하여 제어하여야만 한다.

가공시 성형체의 고정은 일반적으로 정밀한 금속 고정구와 밀랍을 이용한다. 부품은 단단히 고정되어야 하며 변형과 응력의 집중이 없어야 한다. 금속 고정구는 일반적으로 부품의 외경 또는 외부면을 고정시키는데, 이는 가공된 부품을 고정구로부터 분리시킬 때 왁스의 연화를 위해 가해진 열로 인하여 금속공구가 세라믹스 내로 팽창하여 발생하는 부품의 파손을 방지하기 위함이다. 만일, 부품의 내경을 고정해야 하면 금속은 차게 유지하고 세라믹스만 급격히 가열하여야 한다.

세라믹 부품을 고정구에 고정시킨 후 회전, 절삭, 천공, 회전연마, 측면연마 등 다양한 가공을 행할 수 있다. 가공에는 습식과 건식방법이 있으며 두 경우 모두 성형체가 연마되고 공구의 마모도 발생시킨다. 절단기 날의 마모폭이 0.005in이하인 경우에도 절단압력의 집중이 일어나 세라믹스에 손상이 발생한다.

성형체 가공은 고속도 강 또는 초경 절삭공구로도 가능하나 모든 조성의 성형체에 사용이 가능하지 않으며 공구의 마모가 심한 경우에는 성형체에 손상이 발생할 수 있다. 성형체의 가공은 다양한 연마 입자가 수지나 금속 기지 내에 결합되어 있는 연마지석을 이용하기도 한다. 고속 표면속도, 넓은 접촉면, 절삭깊이의 감소가 이 기술의 특징이며 손상 감소와 양호한 표면을 얻을 수 있다. 조립 연마재는 거친 표면가공에 사용되고 최종 마무리는 미립 연마재를 이용한다.

4. 세라믹스의 수명 평가

세라믹스의 수명 예측은 균열성장속도 데이터를 이용하여 가능하다. 수명예측에 관하여는 일정 하중 하에서의 계산이 간단하지만 반복 응력이나 열응력의 반복(열피로)에의 적용, 와이블(Weibull) 통계와 조합시킨 SPT선도(strength - probability - time diagram)와 T-SPT선도(thermal -shock- severity probability - time diagram)의 이용도 제안되고 있다.

가. 일정 하중 하에서의 피로(정피로)

일정 하중 하에서 세라믹스의 균열성장(Fig. 2-15)과 수명의 관계를 개략적으로 나타내면 Fig. 2-16과 같다. 즉, 초기균열 길이가 a_1 인 세라믹스에 일정응력 σ 를 계속적으로 가하면 균열은 서서히 성장하여 1,000시간 후에는 균열의 길이가 a_2 이 된다. 그러나 이 단계에서는 응력확대계수 K_{I1} 이 파괴인성 K_{IC} 에 도달하지 못하므로 급격한 파괴는 발생하지 않는다.

균열이 더욱 성장하여 a_2 로 된 2,000시간만에 $K_{I2} = \sigma Y \sqrt{a_2} = K_{IC}$ 의 조건이 성립한다면 이 순간에 균열은 급격히 성장하여 세라믹스 재료의 수명이 다하게 된다. 균열성장속도 V 는 응력확대계수 K_I 의 함수로서 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 수명계산을 할 수 있다. 길이 a_1 의 균열을 가진 재료에 일정한 응력 σ 를 장시간 부가한다.

$$V = AK_I^N$$

$$K_I = Y \sigma \sqrt{a} \quad (K_{I1} = Y \sigma \sqrt{a_1})$$

여기서, A는 단면적, Y는 형상계수이며 위의 관계로부터

$$V = da / dt = AK_I^N = A\sigma^N Y^N a^{N/2} \quad (1)$$

식(1)을 하중을 걸어주는 순간부터 파괴될 때까지의 전 과정에 대해서 적분한다.

$$\int_0^{t_f} \sigma^N dt = \frac{1}{AY^N} \int_{a_i}^{a_{IC}} a^{-N/2} da$$

$$\sigma_N t_f = \frac{2}{(2-N)AY} N(a_{IC}^{(2-N)/2} - a_i^{(2-N)/2}) \quad (2)$$

여기서 a_{IC} 는 K_{IC} 에 대응하는 균열의 크기이며, $a_{IC} > a_i$ 이고 N 도 비교적 큰 (Al_2O_3 : 39, $1,400^\circ C$ 의 SiC : 20, $1,200^\circ C$ 의 Si_3N_4 : 50)것을 고려하면 식(2)의 $a_{IC}^{(2-N)/2}$ 의 항은 무시할 수 있으므로 최종적으로는 일정 응력 σ 를 받고 있는 재료의 파괴에 필요한 시간 t_f 는 다음 식으로 주어진다.

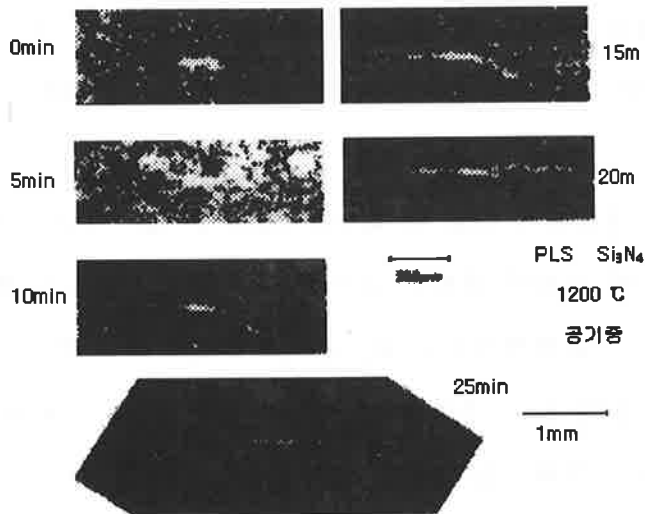


Fig. 2-15. Model of crack growth of sintered Si_3N_4 .

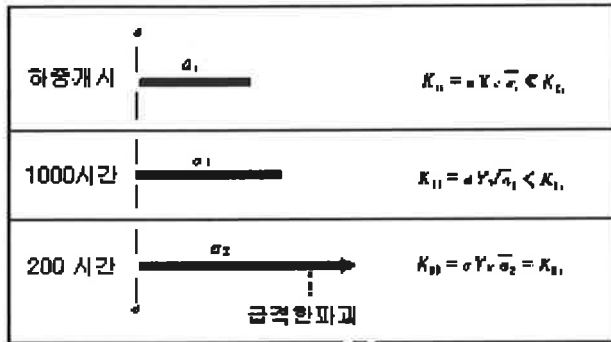


Fig. 2-16. The crack growth and expected life span of ceramics.

$$t_f = 2K_{I1}^{(2-N)} / A\sigma^2 Y^2 (N-2) \quad (3)$$

여기서, K_{I1} 는 길이가 a_1 인 균열선단에 있어서 초기 응력확대계수이다. 실제로는 재료에 기존의 균열이나 흠의 길이 a_1 를 측정하고 K_{I1} 를 결정하는 것은 곤란하므로 사용하고자 하는 응력보다 큰 응력 σ_p 를 재료에 단시간 동안 가하는 보증시험(proof test)을 행하여 재료의 최저수명을 측정하는 것이 보통이다. 임의의 재료에 대하여 파괴가 일어나지 않을 정도의 응력 σ_p 를 걸어주면 응력확대계수 K_{IP} 는 K_{Ic} 보다 작으므로 다음 식이 성립한다.

$$K_{IP} = \sigma_p Y a_i^{1/2} < K_{Ic} \quad (4)$$

한편, 실제로 재료가 사용될 때의 응력 σ 하에서 초기 응력확대계수는 다음 식으로 주어진다.

$$K_{I1} = \sigma Y a_i^{1/2} \quad (5)$$

식(4)와 (5)로부터 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$K_{I1} < (\sigma/\sigma_p)K_{Ic} \quad (6)$$

식(3)과 (6)을 이용하고, 또 실험적으로 $N > 2$ 인 것으로부터 응력 σ 하에서는 재료의 수명 t_f 는 다음과 같은 부등식으로 주어진다.

$$t_f > 2(\sigma/\sigma_p)^{(2-N)} K_{IC}^{(2-N)} / A\sigma^2 Y^2 (N-2) \quad (7)$$

일반적으로 예측되는 수명은 안전한 값을 취해야 하므로 재료의 최저 수명은 다음 식과 같이 주어진다.

$$t_{min} = 2K_{IC}^{(2-N)} (\sigma/\sigma_p)^{(2-N)} / A\sigma^2 Y^2 (N-2) \quad (8)$$

나. 반복피로

주기적으로 변동하는 압력하에서 세라믹스의 수명이 K_I-V 의 관계로 나타나는 균열성장에 의해서만 지배된다고 하면 피로수명회수 M 과 변동응력의 최대치 σ_M 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_1/M_2 = (\sigma_{M2}/\sigma_{M1})^N \quad (9)$$

제3절 실험방법

1. 공시체의 제조

Table 2-3과 2-4의 조성을 갖는 세라믹스 소지(K소지 및 H소지로 명명)를 불밀에서 12시간 분쇄한 후, 표준체 #45(0.35mm)를 이용하여 입도를 조정하였다. 분쇄한 원료에 특급시약인 Al_2O_3 와 부분안정화 ZrO_2 를 0~15wt%, 공업용 Al_2O_3 (순도 87% 및 96%)와 입경이 $1\mu m$ 이하인 Al_2O_3 (A1160SE)를 0~50wt% 첨가하여 불밀을 이용하여 5시간 분쇄·혼합한 후, 특급시약인 Al_2O_3 와 부분안정화 ZrO_2 를 0~15wt%를 첨가한 혼합분말을 250MPa의 압력으로 일축유압프레스를 이용하여 지름 28.8mm인 원형 시편과 $3 \times 4 \times 40$ (mm)의 각주상의 시편을 성형하였다.

Table 2-3. Chemical Compositions of K-Material (Unit : wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	lg. loss	기타
K-원료	63.12	23.22	1.38	1.32	1.19	1.12	0.24	8.3	0.11

Table 2-4. Chemical Compositions of H-Material (Unit : wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	lg. loss	기타
H-원료	67.83	18.97	0.79	2.76	0.28	0.85	0.23	5.95	2.19

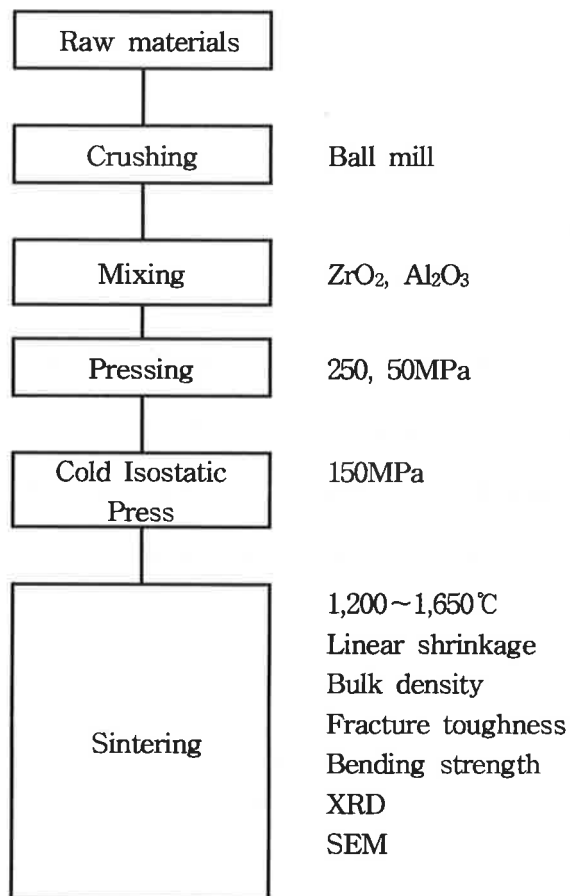


Fig. 2-17. Flow chart for the experimental procedure.

공업용 Al_2O_3 와 Al160SE를 첨가한 혼합분말은 50MPa의 압력으로 성형한 후, 냉간정수압성형기(Cold Isostatic Press, CP 3-10-40, Reaction Eng.,)를 사용하여 150MPa의 압력으로 성형하였다. 이들 성형체를 전기로에서 $5^\circ C/min.$ 의 승온속도로 $1,200\sim 1,650^\circ C$ 에서 5시간 유지 후, 로냉하여 공시체를 제조하였다. Fig.2-17에 제조공정을 보인다.

2. 특성분석

가. 화학성분 분석

공시원료인 세라믹스 소지의 성분은 XRF(Philips, PW1480, Holland)를 이용하여 분석하였다.

나. 공시체의 결정상 분석

조성과 열처리 온도에 따른 공시체의 결정상을 조사하기 위하여 XRD회절분석기(Philips. Co. Pw 1710)를 이용하여 $CuK\alpha$, Ni filter, 30kV, 20mA의 조건으로 측정하였다. XRD 패턴 중 $2\theta = 28\sim 32^\circ$ 범위의 정방정(111), 단사정(111), $(11\bar{1})$ 피크의 적분강도로부터 다음 식에 의하여 정방정 ZrO_2 를 정량하였다.

$$X_t = \frac{I_{t(111)}}{I_{m(111)} + I_{\bar{m}(111)} + I_{t(111)}}$$

여기서, t는 정방정, m은 단사정, ()은 면지수, I는 적분강도이다.

다. 부피비중 측정

조성과 열처리 온도에 따른 공시체에 대하여 KS L 3114에 따라 아르키메데스법을 이용하여 부피비중을 측정하였다.

라. 광물상의 정량분석

고순도 Al_2O_3 는 1,600℃에서 1시간 열처리한 것을 표준물질로 하여 $2\theta = 43.3^\circ$ 의 피크 강도를 이용하였다. 유리질량은 시편을 분쇄하여 ASTM 170 mesh채를 통과한 분말 5g 측정하여 HF 10% 수용액을 첨가하여 공시원료를 천천히 교반하여 상온에서 2시간 유지한 후 1,000℃에서 1시간 열처리하여 다음 식에 의하여 광물상을 정량분석 하였다.

Mullite의 양(wt%) = f (HF처리 잔량 무게비 - α - Al_2O_3 의 양)

유리량(wt%) = 100 - (α - Al_2O_3 의 양 + mullite량)

f : Mullite의 HF산에 대한 용해보정 계수(1.01)

마. 곡강도 측정

열처리 온도와 조성에 따른 공시체의 곡강도는 $3 \times 4 \times 40$ (mm)의 공시체를 UTM(Universe Testing Machine, United Co., SMF Model)을 이용하여 변위제어 하에서 0.5mm/min.의 cross head speed로 span거리 30mm의 조건으로 5개의 시편을 측정하여 다음 식을 이용하여 곡강도 δ_{b_3} 를 산출하였다.

$$\delta_{b_3} = \frac{3RL}{2bw^2}$$

여기서, δ_{bs} 은 3점 곡강도, R은 최대하중, L은 하부지점간의 거리, b를 시편의 두께, 그리고 w는 시편의 폭이다.

바. 파괴인성 측정

취성재료인 세라믹스는 불안정한 균열전파가 일어나게 되면 파괴가 진행되는데 이러한 균열의 전파에 대한 저항성을 파괴인성(fracture toughness)이라 하여 재료의 고유 특성치로서 정의한다. 선탄성 파괴 역학적(LEFM) 관점에서 균열이 성장하여 파괴를 일으킬 때 재료에 따른 응력확대계수의 임계값이 존재하며 그때의 주어진 응력 σ 에 대한 균열선단에서의 응력확대 계수 $K_I = K_{Ic}$ 는 다음과 같다.

$$K_{Ic} = Y\sigma(\pi a)^{1/2}$$

여기서, Y는 재료 및 균열형태에 따른 매개변수이다.

압흔(indentation)법은 vicker's pyramid indenter를 이용하여 연마된 시편표면에 하중을 가하여 사각형의 압흔(indentation mark)을 형성시키고 그 사각형 모서리로부터 전파된 균열의 길이를 측정하여 파괴인성을 측정한다. 압흔에 의한 파괴인성 측정법은 전파된 균열길이와 재료의 파괴인성과의 관계를 이용한 것이다.

본 연구에서의 파괴인성 측정은 시편의 모양, 크기에 관계없이 측정이 간편하며 여러번 측정이 가능한 장점을 갖고 있는 IM(Indentation Microfracture)법에 의하여 경도 및 파괴 인성을 측정하였다. 지름 28mm의 원형 공시체를 #2000의 SiC 연마지로 연마한 후, 2 μ m와 0.05 μ m 알루미늄 분말을 이용하여 경면연마한 공시체를 Vickers경도시험기

(Akashi. Co., MVK-G2)를 이용하여 공시체의 표면에 5kg의 하중으로 15초간 유지하여 경도 및 파괴 인성을 계산하였다. 경도는 Lee와 Brum이 제시한 식을 이용하여 계산하였다.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2}$$

$$HV = 1854 \frac{F}{d^2}$$

HV : 경도

F : 시험 하중

A : 압자의 면적

θ : 압자 사이의 각

d : 압입 후 대각선의 길이

파괴인성은 Niihara가 제시한 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{K_{IC} \varphi}{Ha^{1/2}} \left(\frac{H}{E\varphi} \right)^{2/5} = 0.035 \left(\frac{l}{a} \right)^{-1/2}$$

K_{IC} : 파괴 인성

a : 압자 압입 후 압흔의 대각선 길이의 반

l : Palmqvist crack의 길이

E : 영률

φ : 억제 상수로 경도(H)를 항복 응력으로 나눈값(=3)

H : 경도

사. 미세 구조 관찰

공시체의 미세구조는 $0.1\mu\text{m}$ 까지 연마한 시편을 5% HF 수용액에서 8분간 에칭한 후, Au를 코팅하여 주사전자현미경(Akashi Co., SS130, Japan)을 이용하여 관찰하였다.

제4절 결과 및 고찰

1. 열분석

Fig. 2-18에 K-세라믹스 소지와 50wt%의 공업용 Al_2O_3 (순도 96%)와 50wt%의 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 공시원료의 열분석(TG-DTA) 결과를 보인다. 세라믹스 소지의 530°C 부근의 흡열피크는 OH형태로 결정격자에 존재하는 결정수의 탈수에 의한 것이며 980°C 부근의 발열피크는 Al_2O_3 와 SiO_2 가 반응하여 Al-Si 스피넬 형성에 의한 것이며 H-세라믹스 소지의 열분석 결과는 K-세라믹스 소지의 열분석 결과와 일치하였다. 50wt% Al_2O_3 와 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 공시원료의 경우, 270°C 부근의 무게감소는 OH기의 탈수로 인한 흡열피크에 의한 것이며 650°C 부근에서 공시원료의 분해반응에 의한 발열피크와 무게감소가 관찰되었다.

2. 세라믹스 소지의 미세조직

Fig. 2-19에 열처리 온도에 따른 K-공시체의 미세조직을 보인다. 열처리 온도가 증가함에 따라 매트릭스 내에 생성된 기공의 성장이 관찰되

있으며 1,300℃이상에서는 기공의 급격한 성장이 관찰되었다.

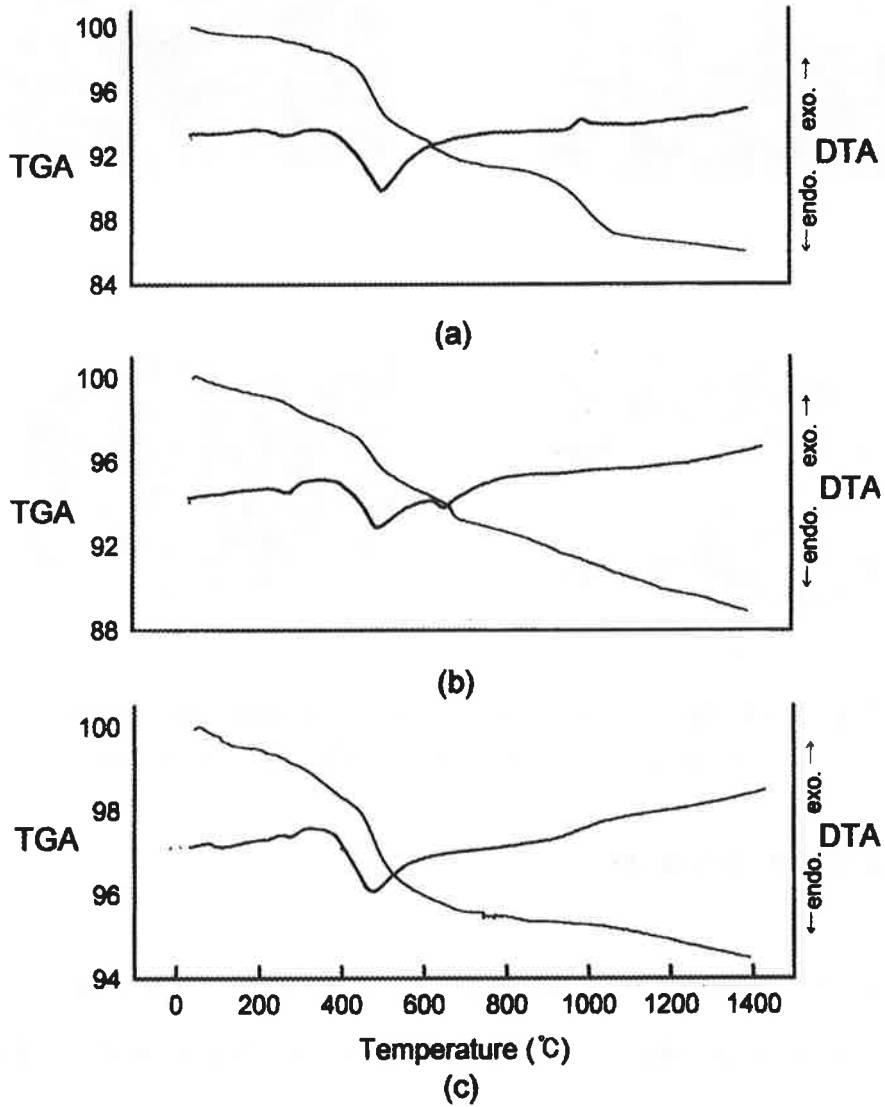


Fig. 18. TG-DTA curves of K-ceramics material(a), K-ceramics material with 50wt% Al₂O₃(purity 96%)(b) and 50wt% PSZ(c).

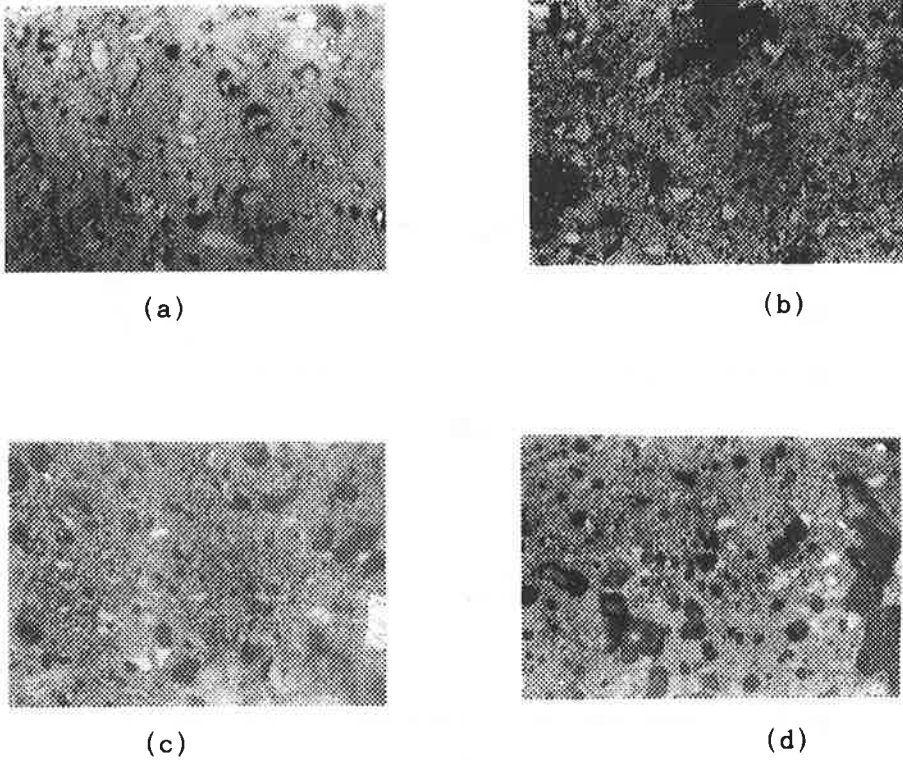


Fig. 2-19. Optical microstructures of K-specimen heated at 1,280°C (a), 1,300°C (b), 1,320°C (c) and 1,340°C (d).

3. 공시체의 결정상 분석

Fig. 2-20~25에 K와 H-세라믹스 소지에 Al_2O_3 (특급, 순도 96%와 87%, A1160SE)와 부분안정화 ZrO_2 의 첨가량 및 열처리 온도에 따른 XRD분석을 보인다.

Fig. 2-20의 K-세라믹스 소지는 열처리 온도가 증가함에 따라 SiO_2 의 피크 강도는 감소하고 물라이트의 피크 강도가 증가하였다. 이는 Fig.2-19의 세라믹스 소지의 TG-DTA분석 결과와 같이 1,200°C 이상에서부터 물라이트와 유리 SiO_2 가 생성되었기 때문이다.

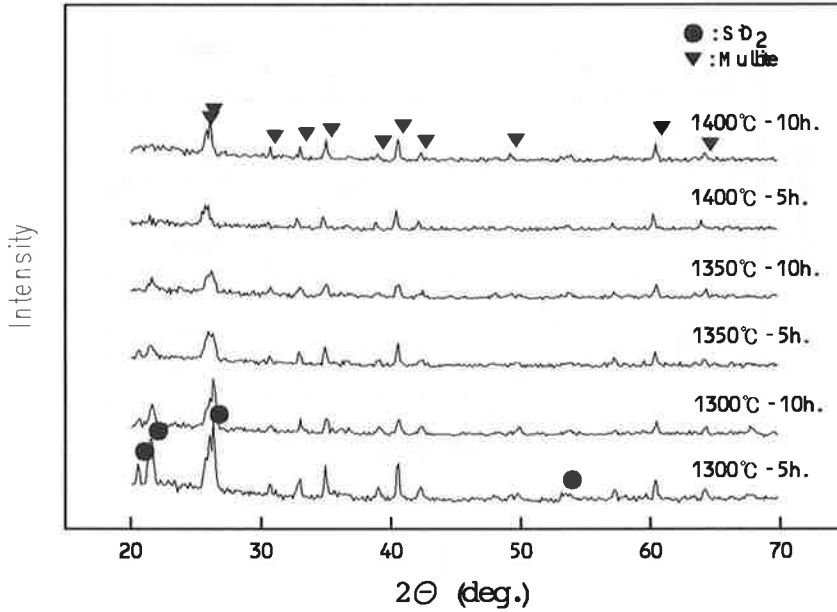


Fig. 2-20. XRD patterns of K-ceramics material heated at different temperatures.

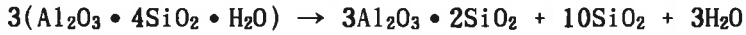
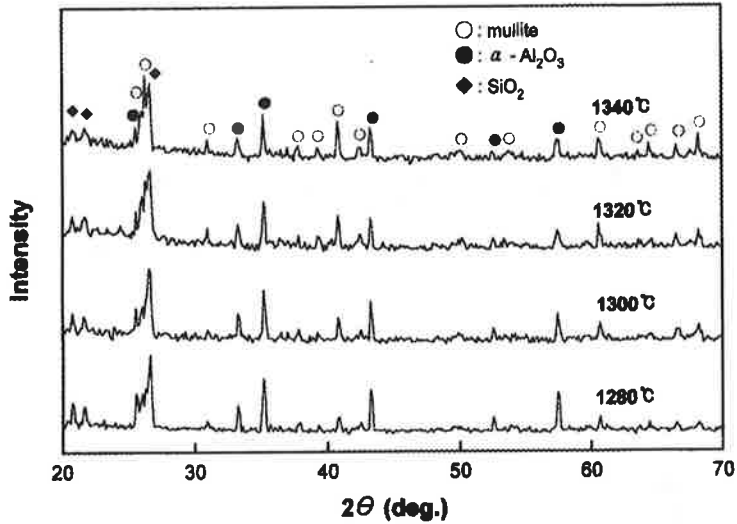


Fig. 2-21의 K-세라믹스 소지에 특급시약인 Al_2O_3 를 첨가하여 $1,300^\circ\text{C}$ 에서 5시간 열처리한 공시체는 Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 물라이트의 생성량이 증가하였다. Al_2O_3 를 10wt%를 첨가하여 $1,280\sim 1,340^\circ\text{C}$ 로 열처리 한 공시체의 경우, 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 피크 강도가 증가하고 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 피크 강도가 감소함을 관찰할 수 있었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 피크강도가 증가하는 것은 Al_2O_3 가 유리 SiO_2 와 반응하여 더 많은 물라이트가 생성되었기 때문이며 공시체 내에 과량으로 존재하는 Al_2O_3 는 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (corundum)으로 존재하고 있다.



(b)

Fig. 2-21. XRD patterns of K-ceramics material with Al_2O_3 (EP grade) contents heated at 1,300°C and K-ceramics material with 10wt% Al_2O_3 heated at different temperatures(b).

Fig. 2-22와 2-23에 K와 H-세라믹스 소지에 순도 96%의 공업용 Al_2O_3 를 50wt% 첨가하여 1,200~1,400°C로 열처리한 공시체의 XRD분석은 Fig. 2-21과 같이 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 피크 강도가 증가하고 α - Al_2O_3 의 피크 강도가 감소하였다.

Fig. 2-24에 H-세라믹스 소지에 1 μm 이하의 입도를 갖는 Al_2O_3 (A1160SE)의 첨가량과 열처리 온도에 따른 XRD분석을 보인다.

Al_2O_3 의 첨가량과 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 피크 강도가 증가하였으나 Al_2O_3 의 첨가량이 30wt%인 시편에서는 α - Al_2O_3 의 피크가 관찰되었다.

Fig. 2-25의 K-세라믹스 소지에 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 경우에는 물라이트, 단사정- ZrO_2 , 정방정- ZrO_2 이외에 지르콘(zircon, ZrSiO_4)이 생성되었음을 관찰할 수 있으며 열처리 온도가 증가함에 따라 지르콘의 피

크 강도가 증가하였다. 또한, 부분안정화 ZrO_2 의 함량이 많기 때문에 정방정- ZrO_2 의 분율이 증가되었다.

Al_2O_3 첨가량과 열처리 온도에 따른 물라이트 생성량의 변화를 Fig. 2-26에 보인다. Al_2O_3 첨가량과 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 생성량은 증가하였으며 단미의 K-세라믹스 소지에 비하여 물라이트의 생성량이 10%정도 증가하였다.

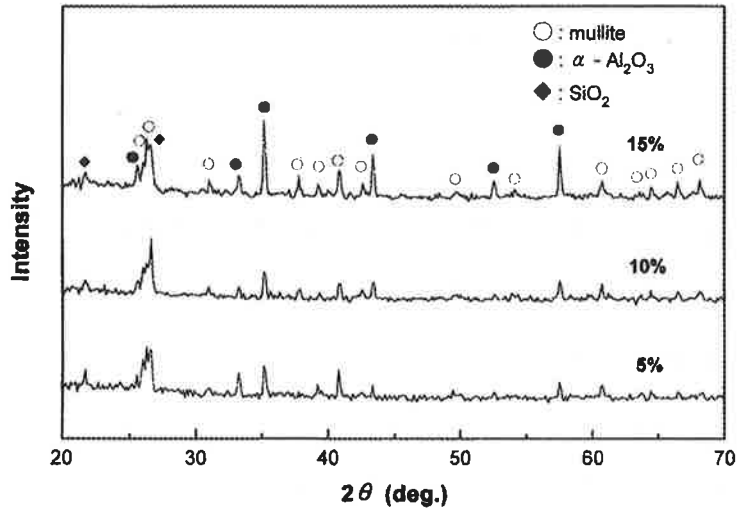
1280℃와 1340℃에서 부분안정화 ZrO_2 첨가량에 따른 정방정- ZrO_2 의 생성량 변화를 Fig. 2-27에 보인다. ZrO_2 의 함량이 증가할수록 잔존하는 정방정- ZrO_2 의 분율은 증가하였으나 열처리 온도가 증가함에 따라 지르콘의 생성에 의하여 잔존하는 정방정- ZrO_2 의 분율은 ZrO_2 를 5wt%첨가한 경우 5.5%에서 2.4%로 감소하였다. 이는 고온에서 정방정- ZrO_2 와 크리스토팔라이트의 반응에 의하여 지르콘의 생성량 증가하였기 때문이다.

일반적으로 지르콘의 생성은 온도가 증가함에 따라 다음의 4단계로 나누어진다.

- ① amorphous SiO_2 + t- ZrO_2
- ② cristoballite + t- ZrO_2 (SiO_2 에 의한 Hedvall effect)
- ③ cristoballite + t- ZrO_2
- ④ cristoballite + m- ZrO_2

단사정- ZrO_2 보다 정방정- ZrO_2 가 먼저 크리스토팔라이트와 반응을 하는 것은 정방정- ZrO_2 가 지르콘의 구조와 유사하고 고온에서 열역학적으로 더 불안정한 SiO_2 와 ZrO_2 사이의 입계에너지를 낮출 수 있기 때문이다.

지르콘이 낮은 온도에서도 생성될 수 있는 것은 원료 내에 존재하는 알카리 이온과 금속이온에 의하여 생성이 촉진되었기 때문이다.



(a)

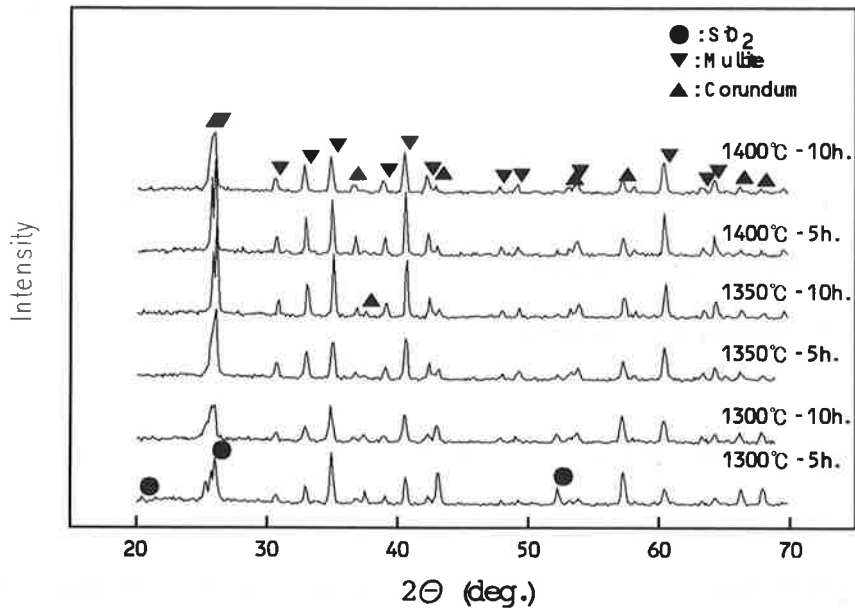
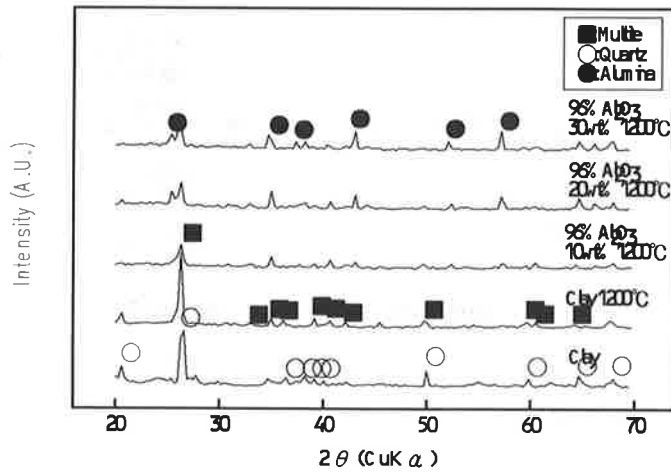
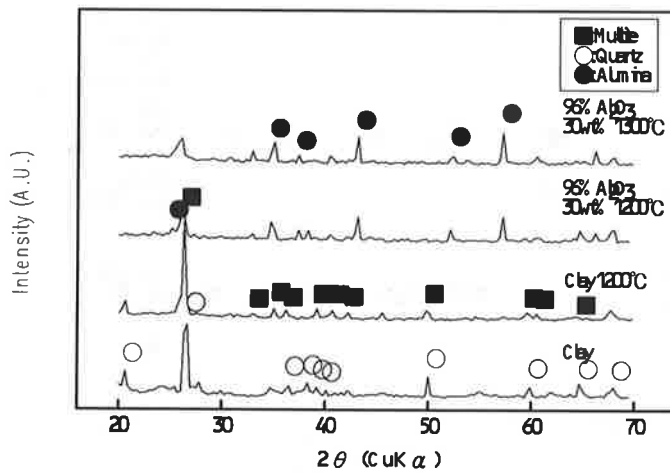


Fig. 2-22. XRD patterns of K-ceramics material with Al_2O_3 (purity 96%) contents and heated at different temperatures.

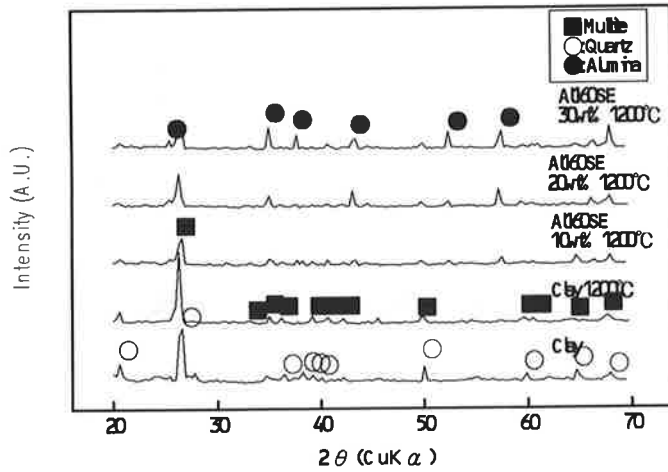


(a)

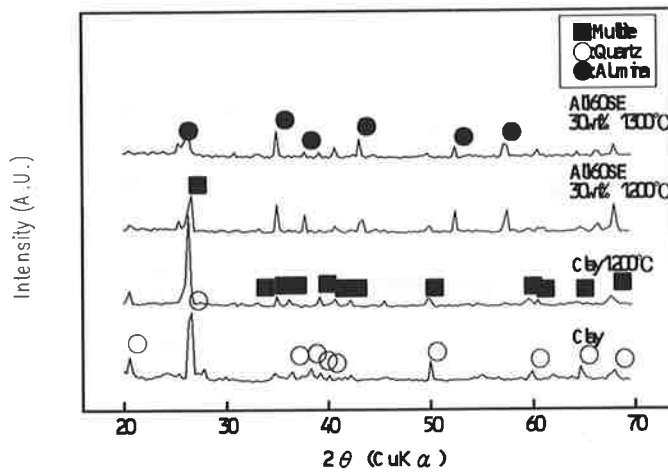


(b)

Fig. 2-23. XRD patterns of H-ceramics material with Al₂O₃(purity 96%)contents heated at 1,200°C(a) and H-ceramics material with 30wt% Al₂O₃ heated at different temperatures(b).

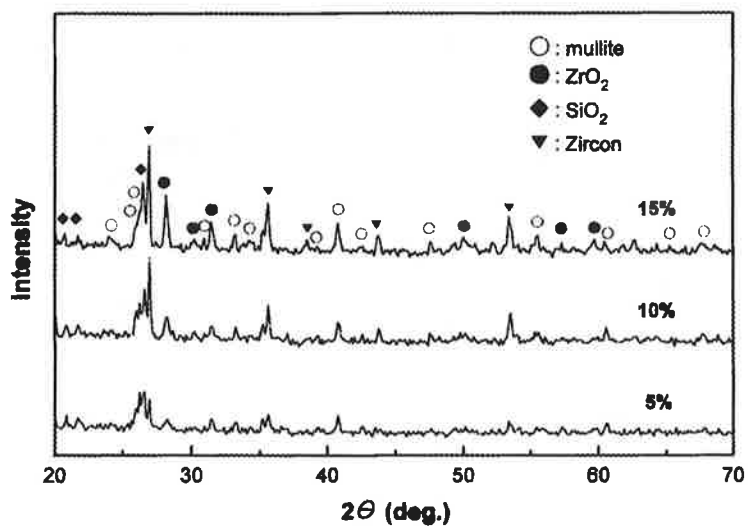


(a)

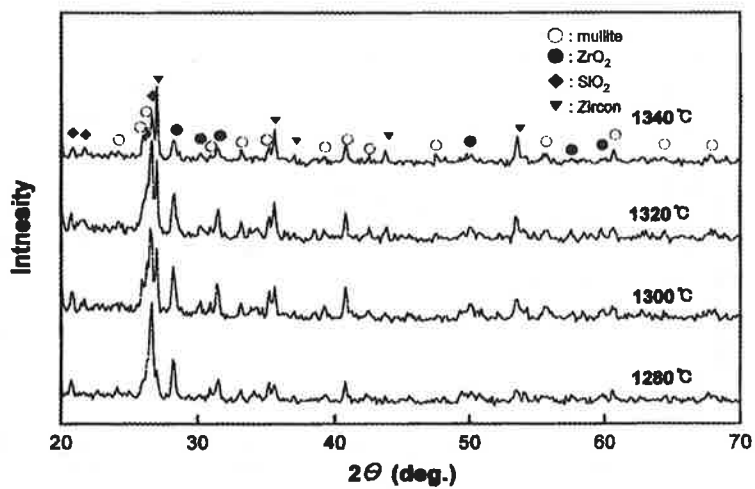


(b)

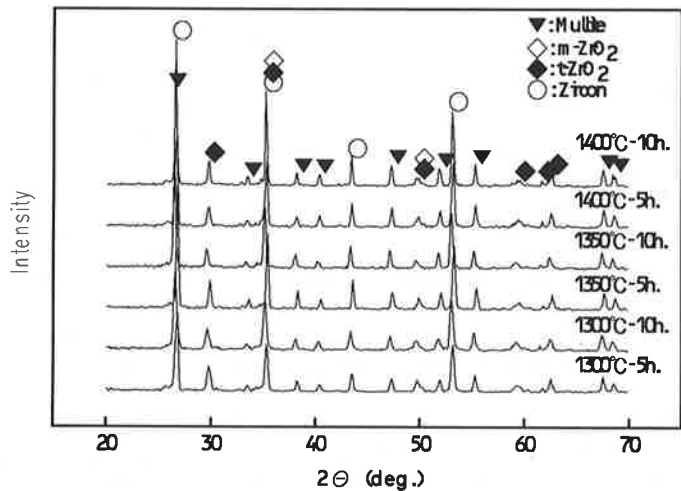
Fig. 2-24. XRD patterns of H-ceramics material with Al_2O_3 (Al160SE)contents heated at 1,200°C(a) and H-ceramics material with 30wt% Al_2O_3 heated at different temperatures(b).



(a)

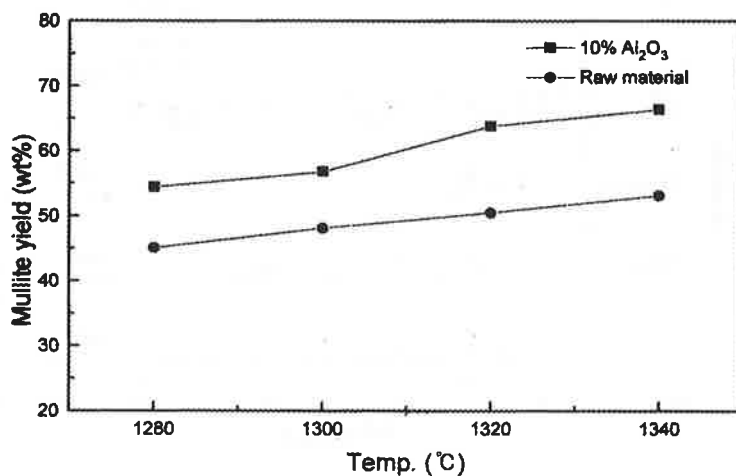


(b)

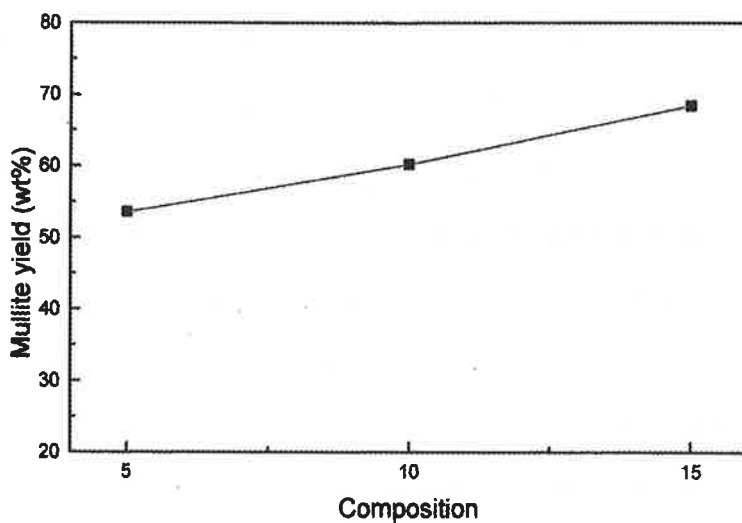


(c)

Fig. 2-25. XRD patterns of K-ceramics material with ZrO₂ contents heated at 1,300°C(a) and with 10wt% ZrO₂(b) and 50wt%(c) ZrO₂ heated at different temperatures.



(a)



(b)

Fig. 2-26. Change of mullite yields on K-ceramics material with 10wt% Al_2O_3 (a) and Al_2O_3 contents heated at different temperature(b).

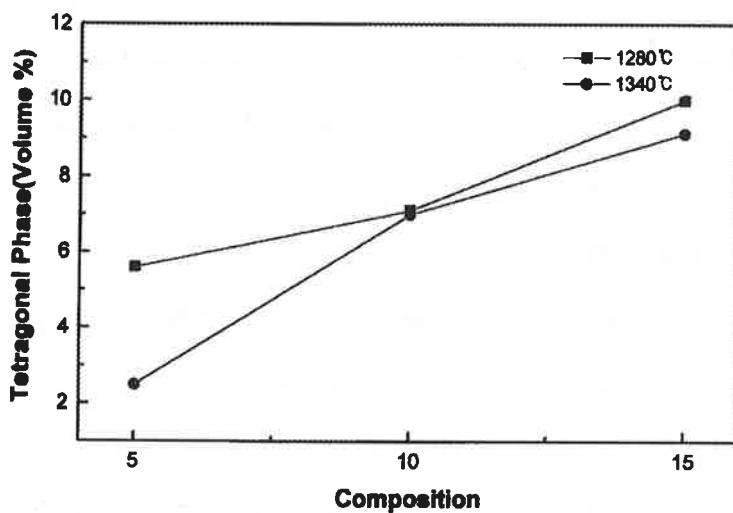


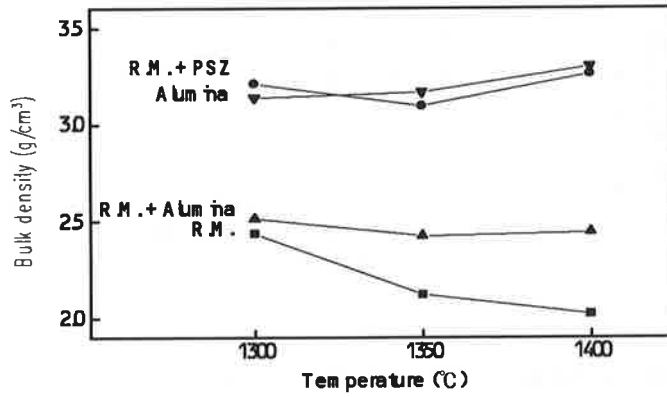
Fig. 2-27. Variation of amounts of tetragonal ZrO_2 with content.

4. 공시체의 물리적 성질

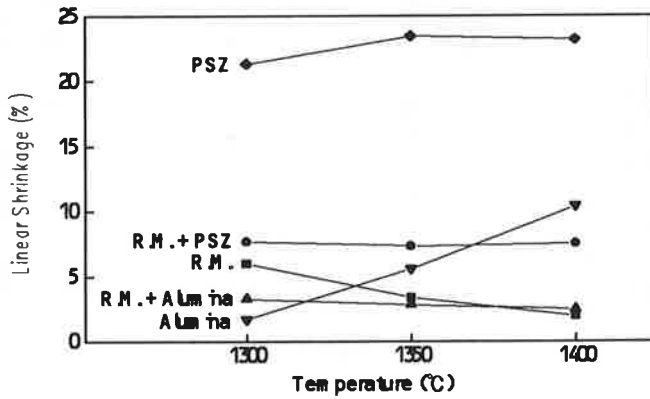
K-공시체, 공업용 Al_2O_3 (순도 96%)와 부분안정화 ZrO_2 를 50wt% 첨가한 공시체의 열처리 온도에 따른 부피비중과 선수축률과 부피비중의 관계를 Fig. 2-28에 보인다. K-공시체는 열처리 온도가 증가함에 따라 이상팽창이 발생하여 부피비중이 $2.436g/cm^3$ (1,300℃-5h)에서 $2.022g/cm^3$ (1,400℃-5h)으로 감소하였다. 물라이트의 생성량 증가에 따른 부피팽창으로 인하여 선수축률도 5.995%(1,300℃-5h)에서 1.951%(1,400℃-5h)로 감소하였다. 50wt%의 Al_2O_3 를 첨가한 공시체는 열처리 온도에 따른 부피비중과 선수축률은 물라이트 생성에 따른 부피팽창과 $\alpha-Al_2O_3$ 의 반응에 의해 약간의 선수축률의 감소와 부피비중의 감소를 나타내었다. 50wt%의 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 시편의 경우, 부피비중이 큰 지르콘($4.66 \sim 4.7g/cm^3$)의 생성과 물라이트와 ZrO_2 간의 상호 치환적 고용효과로 인하여 약간의 변화가 일어난 것으로 생각된다. 또한, 열처리 온도가 증가함에 따라 Al_2O_3 와 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 시편과 원료시편의 비중과 수축률의 차이가 커지는 것은 Al_2O_3 를 첨가한 공시체가 물라이트의 생성량이 많아 부피가 팽창하는 반면에 고온에서 수축률이 증가하는 $\alpha-Al_2O_3$ 이 생성되어 큰 변화가 일어나지 않기 때문이다. 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 공시체는 지르콘이 형성되어 부피비중이 상대적으로 증가하여 큰 변화가 일어나지 않기 때문이다.

K-공시체에 공업용 Al_2O_3 (순도:96%)를 첨가한 시편의 첨가량과 열처리 온도에 따른 부피비중의 변화를 Fig.2-29에 보인다. 열처리 온도와 Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 부피비중은 증가하였지만 Al_2O_3 의 첨가량이 40wt%이상인 시편은 물라이트 생성에 따른 부피팽창과 $\alpha-Al_2O_3$ 의 반응에 의하여 부피비중이 약간 감소하였으나 100wt%의 Al_2O_3 공시체의 경우 부피비중이 급격히 증가하여 1,400℃에서 열처리한 공시체의 부피비중은 $3.45g/cm^3$ 이었다. H-공시체에 공업용 Al_2O_3 (순도 96%, A1160SE)

를 첨가한 공시체의 첨가량과 열처리 온도에 따른 부피비중의 변화를 Fig. 2-30에 보인다. 열처리 온도와 Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 부피비중이 증가하였다.



(a)



(b)

Fig. 2-28. Bulk density(a) and linear shrinkage(b) of K-ceramic material with 50wt% Al_2O_3 (purity, 96%) and PSZ heated at different heating temperatures.

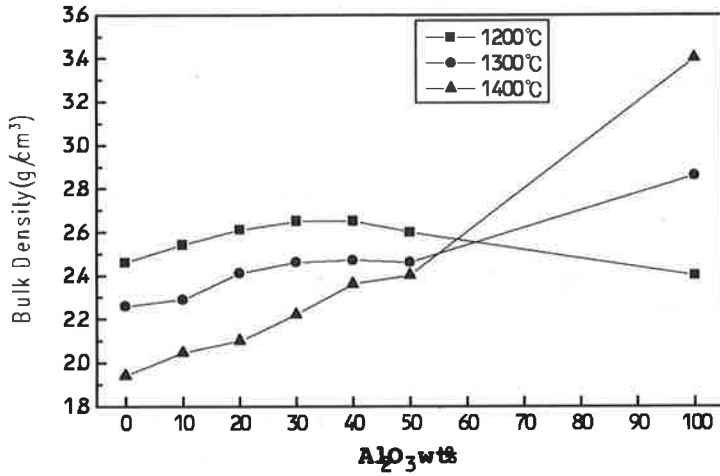


Fig. 2-29. Bulk density of K-ceramic material with Al₂O₃(purity, 96%)contents and different heating temperatures.

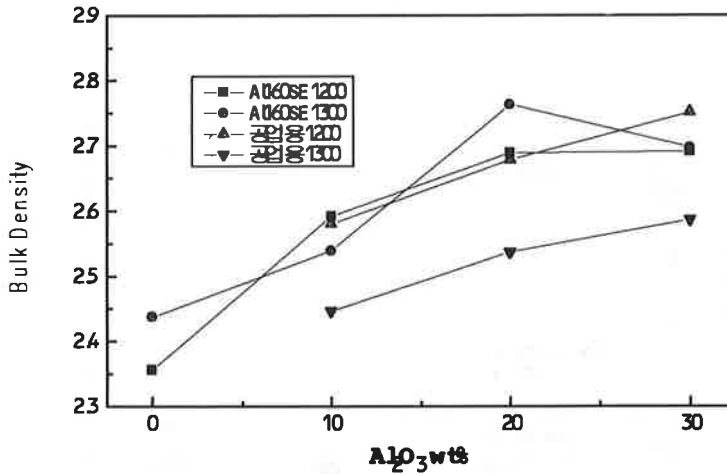
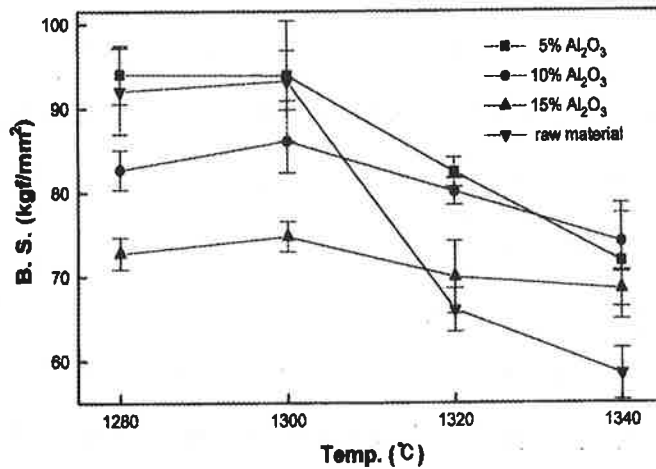


Fig. 2-30. Bulk density of H-ceramic material with Al₂O₃(purity, 96% and Al160SE) contents and different heating temperatures.

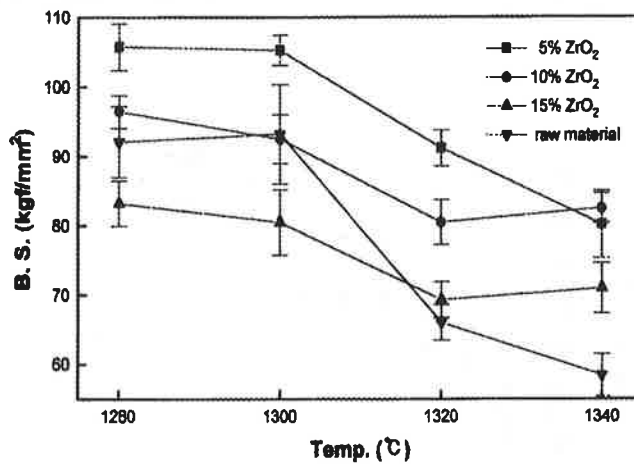
5. 공시체의 기계적 성질

Al₂O₃(특급시약)와 부분안정화 ZrO₂ 첨가량 및 열처리 온도에 따른 3점

곡강도 변화를 Fig. 2-31에 보인다. K-공시체의 경우, 열처리 온도가 증가함에 따라 3점곡강도 값이 95kgf/mm^2 에서 60kgf/mm^2 으로 감소하였는데, 이는 저온에서 미세하게 분포되어 있는 기공들이 온도가 증가함에 따라 성장하였기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 2-31. 3-point bending strength of K-specimen with Al₂O₃(a) and ZrO₂ contents(b) heated at different temperatures.

Al_2O_3 첨가량이 증가함에 따라 3점곡강도 값은 감소하였으나, 1,340℃의 공시체는 K-공시체보다 10~20kgf/mm²정도 높은 값을 나타내었다. 부분안정화 ZrO₂의 첨가량이 5wt%인 공시체는 치밀화에 의하여 3점곡강도 값이 1,280℃에서 105kgf/mm²로 최대로 되었다. 부분안정화 ZrO₂의 첨가량이 증가하게 되면 3점곡강도 값은 감소하였으나 1,340℃에서는 K-공시체보다 높은 값을 나타내었다. 부분안정화 ZrO₂의 첨가량 증가에 따른 강도의 감소는 상전이에 의하여 유발된 큰 부피팽창이 입계 주위에 압축응력이 발생하여 유리상이 다량 존재하게 되면 미세균열이 발생되어 기계적 강도가 감소하기 때문이다.

K-공시체에 공업용 Al_2O_3 (순도 96%)의 첨가량 및 열처리 온도에 따른 3점곡강도 변화를 Fig. 32에 보인다. Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 3점곡강도는 증가하였으나 Al_2O_3 100wt%인 공시체는 열처리 온도가 낮아 3점곡강도는 감소하였으며 열처리 온도가 증가함에 따라 3점곡강도는 증가하였다. 50wt%의 Al_2O_3 를 첨가하여 1,200℃에서 5시간 열처리한 공시체의 3점곡강도는 K-세라믹스 소지에 비하여 90~110MPa정도 증가하였다.

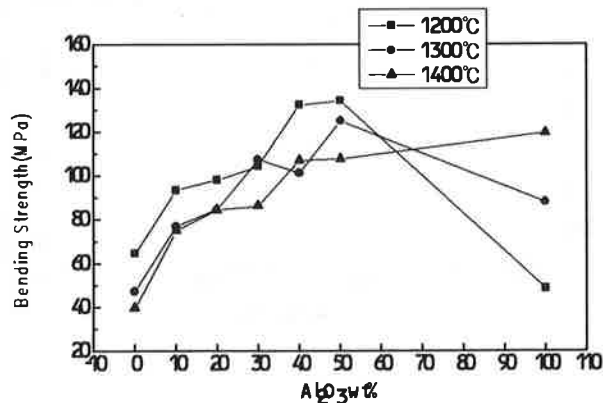


Fig. 2-32. 3-point bending strength of K-specimen with Al_2O_3 (purity, 96%) heated at different temperatures.

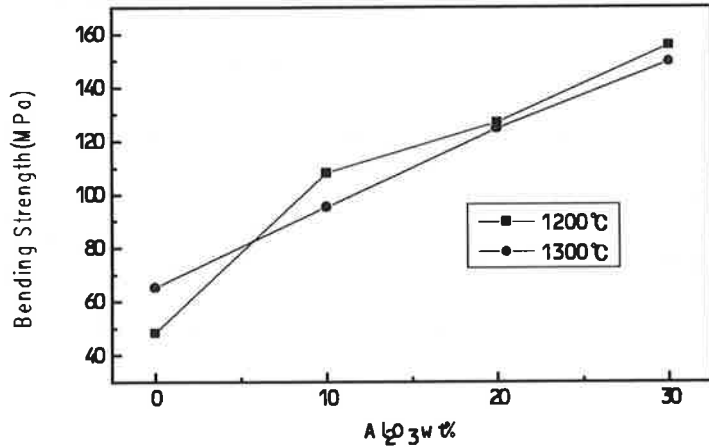


Fig. 2-33. 3-point bending strength of H-specimen with Al₂O₃(purity 96%) heated at different temperatures.

Fig. 2-33의 H-공시체에 공업용 Al₂O₃(순도 96%)의 첨가량 및 열처리 온도에 따른 3점곡강도 변화를 보인다. Fig. 2-32와 같이 Al₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 3점곡강도는 증가하였다.

Al₂O₃(특급시약)와 부분안정화 ZrO₂ 첨가량 및 열처리 온도에 따른 파괴인성의 변화를 Fig. 2-34에 보인다. K-공시체의 경우, 특급시약인 Al₂O₃와 ZrO₂를 첨가하게 되면 1.07MPa/m²의 파괴인성을 나타내었으며 K-공시체에 비하여 0.4MPa/m²정도의 파괴인성 증가를 나타내었다. K-공시체의 경우, 1,280°C보다 1,300°C에서 침상형 물라이트상의 상호교차와 매트릭스와 SiO₂ 및 유리상 부분과의 열팽창 차이에 의하여 잔류 압축응력이 매트릭스에 부여되어 최대 강도와 파괴인성을 나타내었다. 265°C 부근에서 β-크리스토팔라이트는 α-크리스토팔라이트로 상전이하여 이 때 수반되는 약 5.6%의 부피감소가 크리스토팔라이트 입자 주위에 압축응력의 형태로 나타나기 때문이다. Al₂O₃를 첨가한 시편의 경우, 파괴인성 증가는 매트릭스 내에 존재하는 α-Al₂O₃로 인하여 진행되는 균열

선단의 진행방향이 교란되어 균열이 굴절되는 microcrack toughening 현상 및 침상형 물라이트의 상호교차에 의한 것으로 생각되며, ZrO₂의 경우는 정방정-ZrO₂의 분율이 지르콘의 생성에 의하여 감소되므로 열처리 온도의 증가에 따라 파괴인성이 감소하였으며 정방정-ZrO₂의 분율이 높은 ZrO₂ 15wt% 첨가한 시편에서 1.38MPa/m²으로 높은 값을 나타내었다.

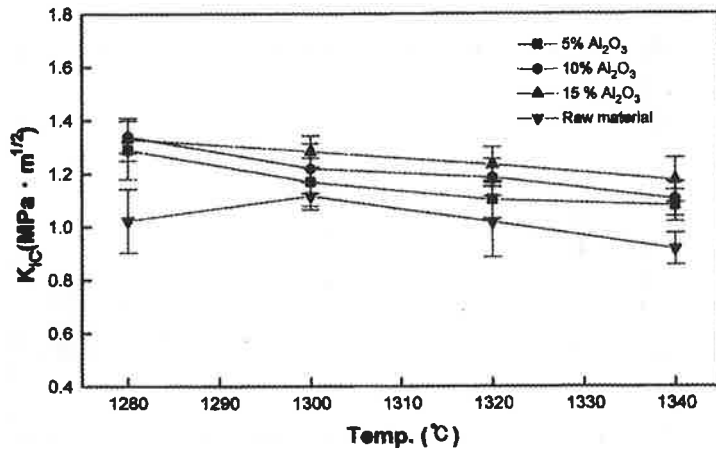
ZrO₂의 첨가에 의하여 transformation toughening, 단사정-ZrO₂ 생성으로 인한 microcrack toughening과 crack deflection 효과가 복합적으로 작용을 하여 인성이 증가하였다.

K-공시체에 공업용 Al₂O₃(순도 96%)의 첨가량 및 열처리 온도에 따른 파괴인성의 변화를 Fig. 2-35에 보인다. Al₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 파괴인성이 증가하였으나 열처리 온도가 증가함에 따라 파괴인성은 감소하였다. 30wt%의 공업용 Al₂O₃를 첨가하여 1,200℃에서 5시간 열처리한 공시체의 파괴인성은 2.25MPa/m²의 값을 나타내었다.

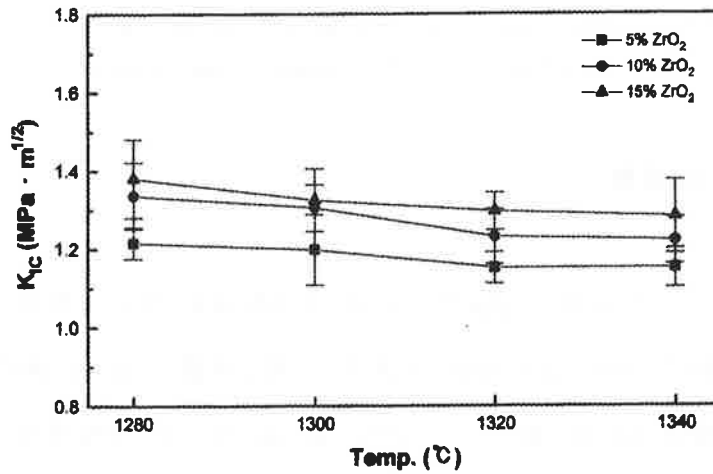
Table 2-5에 1,650℃에서 5시간 열처리한 공업용 Al₂O₃(순도 96%)의 성질을 보인다.

Table 2-5. The Physical and Mechanical properties of Al₂O₃(Purity 96%)Specimen

Prop. Sample	Bulk density (g/cm ³)	3-point bending strength (MPa)	Fracture Toughness (MPa)
100wt% Al ₂ O ₃	3.65	220	3.06



(a)



(b)

Fig. 2-34. Fracture toughness of K-specimen with Al₂O₃(a) and ZrO₂ contents(b) heated at different temperatures.

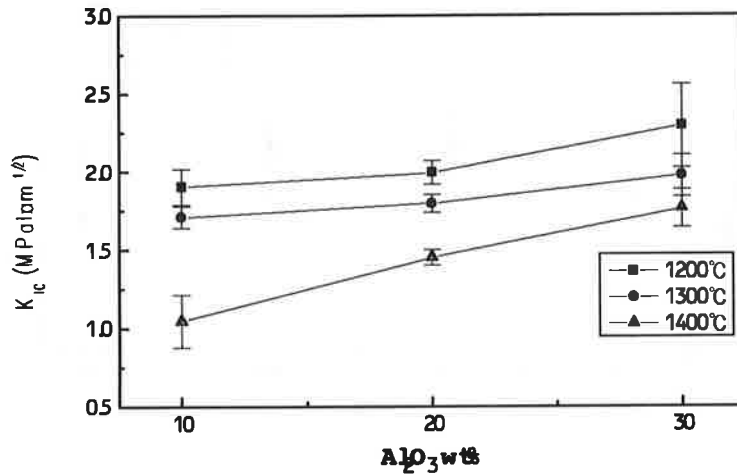


Fig. 2-35. Fracture toughness of K-specimen with Al₂O₃(purity, 96%) heated at different temperatures.

6. 미세구조 관찰

K-공시체에 10wt%의 Al₂O₃(특급시약)와 10wt%의 부분안정화 ZrO₂를 첨가하여 1,300°C에서 열처리한 시편의 미세구조를 Fig. 2-36에 보인다.

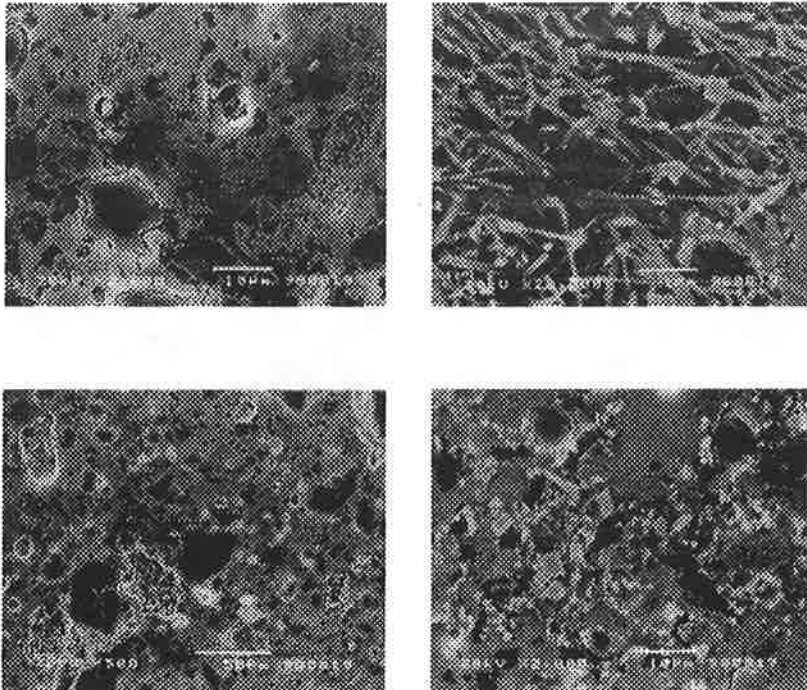
Fig. 2-36의 ZrO₂를 첨가한 시편이 Al₂O₃를 첨가한 공시체에 비하여 조직이 치밀하였으며 Al₂O₃를 첨가한 공시체가 ZrO₂를 첨가한 공시체보다 침상형 플라이트 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. Al₂O₃를 첨가한 공시체는 퀴츠 입자 주위로 기공이 분포되어 있음을 관찰할 수 있는데, 이러한 기공들이 부가된 응력에 대하여 작용하지 못할 뿐만 아니라 큰 기공들은 균열의 출발점 역할을 하여 강도가 감소하게 된다.

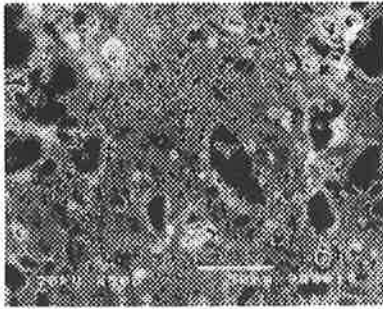
Fig. 2-37과 2-38에 1300°C에서 5시간 열처리한 K-공시체와 50wt%의 공업용 알루미나(순도:96%)와 부분안정화 ZrO₂의 첨가를 첨가하여 130

0~1400℃에서 열처리한 공시체의 미세구조를 보인다. Fig. 37의 K-공시체에는 몰라이트의 침상구조가 관찰되었다. Al₂O₃를 첨가한 공시체는 열처리 온도가 증가함에 따라 몰라이트 매트릭스에 α-Al₂O₃가 관찰되어 보다 치밀한 구조를 이루고 있음을 관찰할 수 있었다. Fig. 38의 부분 안정화 ZrO₂를 첨가한 공시체는 열처리 온도가 증가함에 따라 치밀화가 진행되었음을 관찰할 수 있었다.

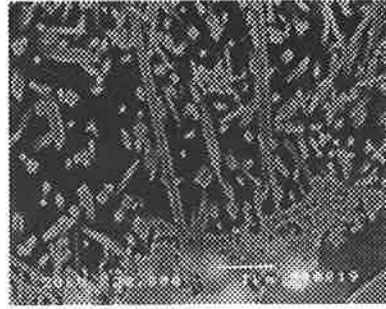
Fig. 2-39의 순도 96%의 공업용 Al₂O₃ 단미의 공시체는 열처리 온도가 증가함에 따라 치밀화가 진행되었으나 낮은 소결온도로 인하여 소결이 완전히 진행되지 않아 기공이 존재하였으며 1,650℃에서 열처리한 공시체는 치밀한구조를 이루고 있음을 관찰할 수 있었다.

Fig. 2-40에 K-공시체에 5wt%의 Al₂O₃를 첨가하여 1,300℃에서 소결한 공시체에 비커스 입자를 압입하였을 때 발생한 균열의 모습을 보인다.



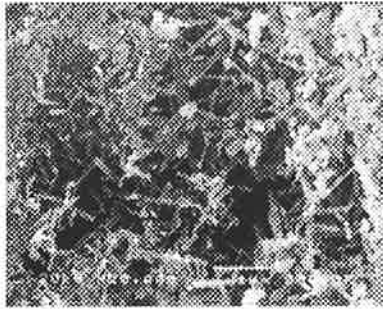


(a)

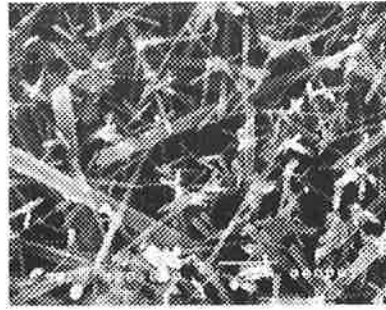


(b)

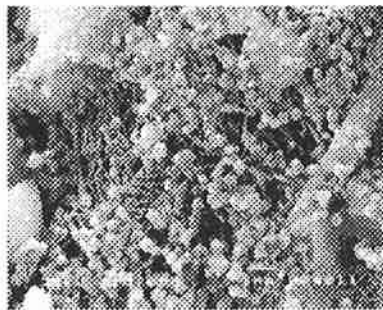
Fig. 2-36. SEM photographs of K-specimen with 10wt% Al_2O_3 (a) and 10wt% ZrO_2 contents(b) heated at 1,300°C.



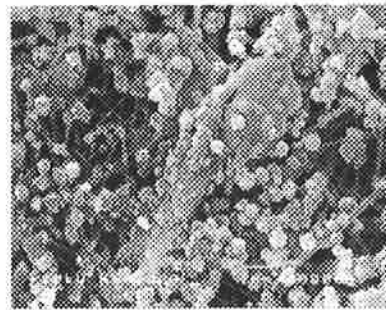
(a)



(b)

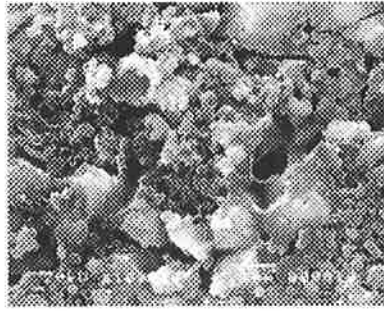


(c)



(d)

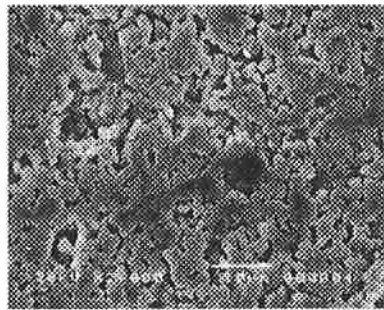
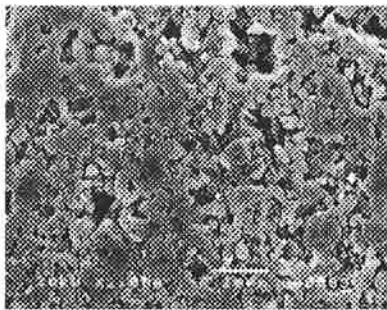
Fig. 2-37. SEM photographs of K-specimen heated at 1,300°C (a) and 1,350°C (b), 50wt% Al_2O_3 (purity, 96%) contents heated at 1,300°C (c) and 1,350°C (d).



(a)

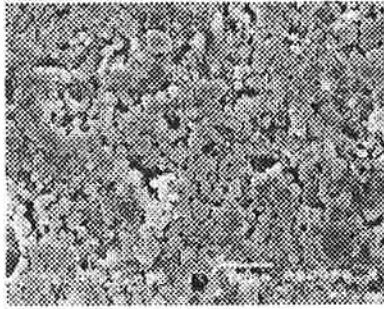
(b)

Fig. 2-38. SEM photographs of K-specimen with 50wt% ZrO_2 contents heated at 1,300°C (a) and 1,350°C (b).

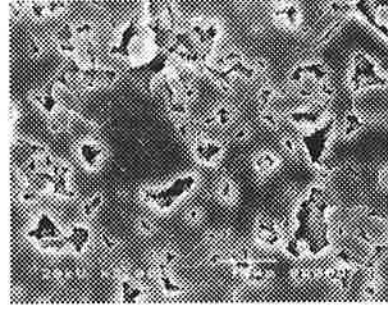


(a)

(b)



(c)



(d)

Fig. 2-39. SEM photographs of Al_2O_3 (purity, 96%) heated at 1,200°C (a), 1,300°C (b), 1,400°C (c) and 1,650°C (d).

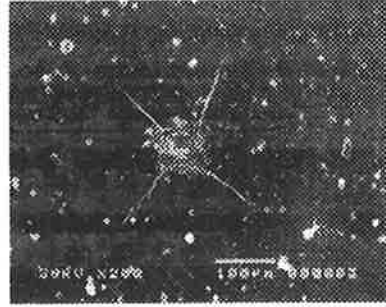
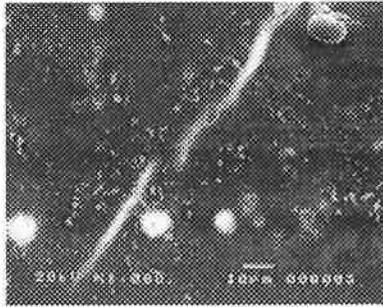


Fig. 2-40. Crack paths of K-specimen with 50wt% Al_2O_3 (purity, 96%) heated at 1,300°C.

제5절 연구 결과

세라믹스 롤용 소재 개발을 위하여 K 및 H-세라믹스 소지에 특급시약인 Al_2O_3 와 ZrO_2 , 공업용 Al_2O_3 (순도 96%, 87%) 및 입경이 $1\mu m$ 이하인 A1160SE를 0~100wt% 첨가하여 일축가압성형과 CIP를 이용하여 제조한 성형체를 $1,200\sim 1,400^\circ C$ 에서 열처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. K 및 H-공시체에는 침상형의 물라이트상의 상호교차와 매트릭스상과 SiO_2 상과의 열팽창 차이로 인한 잔류 압축응력의 존재로 $1,300^\circ C$ 에서 가장 높은 강도($94kg/mm^2$) 및 파괴인성($1.07MPa/m^2$)을 나타내었다.

2. K 및 H-세라믹스 소지에 특급시약인 Al_2O_3 를 첨가한 공시체는 Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 부피비중은 증가하였으나 열처리 온도가 증가함에 따라 물라이트의 생성에 따른 부피팽창과 기공의 증가로 인하여 부피비중이 감소하였다. 부분안정화 ZrO_2 를 첨가한 공시체는 물라이트와 ZrO_2 의 상호 치환적 고용효과로 인하여 더욱 치밀한 공시체를 얻을 수 있었다. ZrO_2 를 15wt%첨가한 소결체는 $1.38MPa/m^2$, 특급시약인 Al_2O_3 10wt% 첨가한 소결체는 $1,280^\circ C$ 에서 $1.34MPa/m^2$ 로 파괴인성이 증가하였다.

3. K 및 H-세라믹스 소지에 순도 96%인 공업용 Al_2O_3 를 첨가한 공시체는 Al_2O_3 첨가량 증가에 따라 부피비중은 증가하였으나 열처리 온도가 증가함에 따라 부피비중이 감소하였다. 3점곡강도와 파괴인성은 Al_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 향상되어 50wt%의 Al_2O_3 를 첨가하여 $1,200^\circ C$ 에서

5시간 열처리한 공시체의 3점곡강도는 135MPa, 파괴인성은 $2.25\text{MPa}/\text{m}^2$ 로 파괴인성이 증가하였다. H-세라믹스 소지에 A1160SE를 첨가하여 $1,200^\circ\text{C}$ 에서 열처리한 시편의 3점곡강도는 141MPa, 파괴인성은 $2.7\text{MPa}/\text{m}^2$ 이었다. 순도 96%의 공업용 Al_2O_3 단미를 $1,400^\circ\text{C}$ 에서 5시간 열처리한 시편의 3점곡강도는 118MPa, 파괴인성은 $1.8\text{MPa}/\text{m}^2$ 이었으나 $1,650^\circ\text{C}$ 에서 5시간 열처리한 시편의 3점곡강도는 220MPa, 파괴인성은 $3.06\text{MPa}/\text{m}^2$ 의 값을 나타내어 순수한 Al_2O_3 의 공시체가 가장 높은 기계적 강도를 나타내었다.

4. 본 연구의 결과, A1160SE와 순도 96%의 공업용 Al_2O_3 단미를 $1,650^\circ\text{C}$ 에서 열처리한 공시체가 기계적 성질이 매우 우수하였으나, 세라믹스 톨용 원료로 사용하기에는 고가이며 높은 소결온도가 요구되어 경제성이 문제가 되었다. 따라서, 세라믹스 톨로 사용하기에 충분한 강도를 지니며 제조원가가 저렴한 K와 H-세라믹스 소지에 순도 96%인 공업용 Al_2O_3 를 40wt%첨가하여 $1,200^\circ\text{C}$ 에서 5시간 열처리한 공시체가 세라믹 톨 분쇄기의 톨에 적당하다고 분석되었다.

제6절 참고 문헌

1. T. Mah and K. S. Mazdidasni, "Mechanical Properties of Mullite," *J. Am. Ceram. Soc.* 66(10), pp. 699-703 (1983).
2. S. Kansaki and H. Tabata, T. Kumagawa and S. Ohta, "Sintering and Mechanical Properties of Stoichiometric Mullite," *J. Am. Ceram. Soc.*, 68(1), C6-C7 (1985).
3. Michael D. Sacks and Joseph A. Pask, "Sintering of Mullite-Containing Materials : I, Effect of Composition," *J. Am. Ceram. Soc.* 65(2) (1982).
4. Kiyoshi Okada and Nozomu Otsuka, "Review of Mullite Synthesis Routes in Japan", *Ceramic Bulletin*, 70(10) (1991).
5. Byung Hoon Kim and Yung Han Na, " Fabrication of Porous Mullite Ceramics and its Properties," *J. Kor. Ceram. Soc.*, 31(3) (1994).
6. J.S. Wallace, N. Claussen, M. Ruhle and G. Petzow, "Development of Phase in in-situ Reacted Mullite-Zirconia Composites," in *Surface and Interfaces in Ceramic Ceramic Metal System*, J.A. Park and A.G. Evans, Plenum Press, New York, (1981).
7. S. Prochazka, J.S. Wallace and N. Claussen, "Microstructure of Sintered Mullite-Zirconia Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, 66, C-125 (1983).
8. E.d. Rupo, T.E. Carruthers and R.J. Brook, "Identification of Stages in Reactive Hot Pressing," *J. Am. Ceram. Soc.*, 61, 486 (1978).
9. E. C. Subbarao, " Advances in Ceramics," *The Am. Ceram. Soc. Inc.*, 3, (1981).
10. R. C. Garvie, " Zirconium Dioxide and Some of its Binary System" pp. 117-166 in *High Temperature Material Part II*," edited by A. M. Alper, *Academic press*, (1970).
11. H. Schneider, K. Okada and J. Pask, "Mullite and Mullite Ceramics" John Wiley & Sons pp209-219 (1993).
12. P. Duwez and L. Zwell, AIME Tech. Publ. 2515, *Metals Trans.* 1, 137 (1946).
13. W. D. Kingery, Hydrostatic molding, in *Ceramic Fabrication*

- Process* (W. D. Kingery, ed), MIT Press, Cambridge, Mass., pp. 70-73 (1963).
14. P. H. Dal and W. H. H. Berden, The Capillary Action of Plaster Molds, *Science of Ceramics*, Vol 4, G. Stewart, ed., The British Ceramic Society, 113-131 (1968).
 15. D. S. Adcock and I. C. Macdowall, The Mechanism of Filter Pressing and Slip Casting , *J. Am. Ceram. Soc.*, 40, 355-362 (1957).
 16. R. C. Garviee and P. S. Nicholson, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 55(303) (1972).
 17. S. Palmqvist, "Occurance of Crack Fromation During Vickers Indentation as a Measure of Toughness of Hard Metals," *Archiv fur das Eisenhutten wesen*, 33, pp. 620-34 (1962).
 18. B. R. Lawn and E. R. Fuller, "Equilibrium Penny like Cracks in Indentation Fracture," *J. Mat. Sci.*, 10, pp. 2016-24 (1975).
 19. Lee and Brun, *Cer. Sci. Eng. Proc.* 863 (1983).
 20. K. Niihara, R. Morena and D. P. H. Hasselman, "Evaluation of K_{Ic} of Brittle Solids by the Indentation Method with Low Crack-to-Indent Ratio", *J. Mat. Sci. Lett.*, 1, pp. 13-16 (1982).
 21. Hisao Yamada and Shiushichi Kimura, "Studies on the Nature of the Mullite Formed from Co-precipitation of Alumina and Silica Gels", *J. Ceram. Assoc. Japan.* 70(8) (1962).
 22. L. C. De Jonghe and M. N. Rahaman, "Sintering Stress of Homogeneous and Heterogeneous Powder Compacts," *Acta Metall.*, 36(10), 223-229 (1988).
 23. Y. Kanno and T. Suzuki, *Zairyo*, 37(378) (1988).
 24. Y. Kanno and T. Suzuki, *Hyomen-Kagaku*, 9(434) (1988).
 25. Y. Kanno, "Thermodynamic and Crystallographic Discussion of the Formation and Dissociation of Zircon," *J. Mater. Soc.*, 24 pp. 2415-2420 (1989).
 26. T. M. Kyaw, Y. Okamoto, K. hayashi and T. Nishikawa, *Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress*, Vol. 2, Ed. by Y. Bando and K. Kosuge, JSPM pp. 1333-36 (1993).
 27. A. H. Heuer, M. Ruhle and D. B. Marshall, *J. Am Cream. Soc.*, 73, pp. 1084-93 (1990)
 28. T. K. Gupta, J. H. Bechtold, R. C. Kuznicki, L. H. Cadoff and

- B. R. Rossing, *J. Mater. Sci.*, 12, 2424-26 (1977).
29. K. H. Schuller, "Reaction Between Mullite and Glassy Phase in Porcelains," *Trans. Brit. Ceram. Soc.* 63(2), pp. 103-117 (1964).
30. Yuichi Kobayashi, Osamu Ohira, Yasuo Ohashi and Etsuro Kato, "Vitrification of Whiteware Bodies in Alumina-Feldspar-Kaolin System," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 100(5) (1992).
31. P. Pena, P. Miranzo, J.S. Moya, S. De Aza, "Multicomponent Toughened Ceramic Materials Obtained by Reaction Sintering," *J. Mater. Sci.*, 20, pp. 2011-2022 (1985).

제 3 장

세라믹 롤 분쇄기 설계 및 제작

제3장 세라믹 롤 분쇄기 설계 및 제작

제1절 서 설

국내 식품가공산업분야에서는 일반적으로 햄머밀과 롤밀 분쇄기를 사용하여 분쇄하고 있다. 롤밀은 분쇄시 열이 적게 발생되어 식품의 영양분 파괴를 적게 할 수 있으나, 섬유질이 많은 원료(고추 등) 분쇄시 분쇄효율이 낮고, 주철제 롤러가 마모됨으로서 분쇄생성물에 쇳가루가 소량 혼입이 되는 원인 때문에 소비자의 기호와 제품품질의 청결성 문제점을 초래 하고 있는 실정이다. 식품분쇄기로서는 내마모성이 우수하고 기존의 회주철롤의 쇳가루 혼입을 방지할 수 있는 소재가 개발되어야 한다.

경제적인 분쇄공정은 원하는 크기의 분말을 가장 값싸게 얻는 것이다. 시설비, 운영비 및 유지비가 분쇄공정의 수입성에 큰 영향을 주는데, 분쇄시설을 선정하기 전에 이러한 요소들을 면밀히 검토해야 한다. 이를 위해서는 원료물질의 특성, 사용 가능한 분쇄기의 종류, 분말제품의 특성을 파악하여야 한다. 분쇄 원료 물질의 특성 중 중요한 요인은 경도, 질긴 정도(roughness), 표면의 거칠은 정도, 수분함량, 화학적 안정성 등이다.

그리고 경제적인 분쇄공정을 얻을 수 있는 또 하나의 방안은 롤의 크기 및 형상에 좌우될 것이다. 기존의 식품분쇄업체에서 사용하는 분쇄기의 롤은 분쇄생성물의 특성(분쇄물의 크기, 색도 등)을 고려하지 않고 대부분 중소기업의 롤을 사용하다보니 롤의 크기나 형상이 일정하거나,

아니면 직경이나 길이에서 그 차이가 조금 있을 뿐이다. 이러한 롤을 이용하여 여러 가지 분쇄물을 분쇄하다보니 자연 기계에 무리가 오고 동력 손실 또한 크게 발생하며, 분쇄효율이 저하되는 요인이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 분쇄물의 특성에 맞는 롤의 개발이 시급하나 이에 관한 연구가 미비한 실정이다.

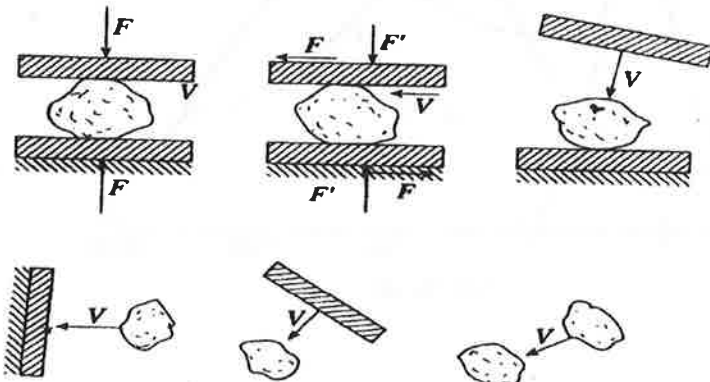
일반적으로 경도가 높은 물질일수록 표면이 거칠고 모가 나서 분쇄기의 마모가 심해진다. 따라서 이런 경우에 분쇄가 실제로 일어나는 “분쇄 표면(working surface)”은 마모를 견뎌낼 수 있는 내마모성이 큰 금속재료가 요구되지만 식품가공용으로는 근본적으로 섯가루 혼입 억제에 어려움을 것이다. 분쇄 원료물질의 물리적 성질을 정확하게 파악한다면 적절한 분쇄기 선택으로서 분쇄효율을 향상시킬 수 있을 것이다. 즉, 대부분의 식품은 섬유조직을 갖고 있으며, 압축력이나 충격력(impact force)에 의하여 쉽게 분쇄되지 않으므로, 전단이나 전단력을 이용하면 효과적일 것이다.

롤밀의 분쇄는 두 개의 롤 사이로 식품 분쇄물이 접선의 마찰력과 접선에 수직인 구심력 작용으로 분쇄공간으로 끌어들여 입자를 작게 만들어 표면적을 증가시키는 압착(압축)분쇄 방법과 두 롤의 회전비 편차로 인한 전단응력 작용으로 마모와 전단이 발생되어 분쇄하는 분쇄 메카니즘을 가지고 있으므로 식품의 분쇄 방법에 따라 압착방법 혹은 압착과 전단 방법을 혼용하여 분쇄시킨다. 그러나 실제 식품 분쇄시에는 압축, 마모, 충격, 전단 등에도 영향을 받는 동시에 식품재료의 굴절(bending)과 비틀림(torsion)등에도 영향을 받으나 이에 대한 연구는 아직 미비한 상태이므로, 본 연구에서는 분쇄시 전단력의 증가가 분쇄소요 동력과 분쇄생성물에 미치는 영향에 대한 이론과 분쇄시 섯가루 혼입을 근본적으로 억제할 수 있는 세라믹 롤 설계 및 제작에 대하여 연구하였다.

제2절 분쇄원리와 롤 분쇄기의 소재

입자의 입도크기를 작게하는 분쇄는 comminution, crushing, grinding, milling이란 용어로 사용되고 있다. 고체를 분쇄하여 부피당 표면적 증가로 건조, 추출, 용해능력이 향상되고, 가공재료 중 유효한 성분의 추출과 혼합능력과 가공효율을 향상시킨다.

고체를 분쇄하는 메카니즘은 대개 4가지로 분류된다. 그림 3-1에서 (a) 압축, (b) 마모와 절단, (c) 충격의 원리를 응용하여 분쇄장치에 이용하고 있다. 일반적으로 압축의 원리는 딱딱한 고체를 조분쇄하는 데 쓰이고, 충격은 조분쇄나 미분쇄에 함께 쓰이며, 마모의 원리는 연하고 마모가 잘 되는 물질을 미분말로 분쇄하는 데 쓰인다. 절단의 원리는 일정한 크기나 모양의 입자를 생산하는데 쓰인다. 그러나 어떤 한 가지 분쇄기에서 분쇄되는 과정은 대개의 경우, 앞의 4가지 원리가 동시에 적용된다.



(a) 압축 (b) 전단응력이 작용하는 마모와 절단 (c) 충격

그림 3-1. 분쇄의 원리

분쇄물의 입도와 형상은 분쇄물의 종류와 분쇄기의 분쇄작용이 양쪽에 의존한다. 즉, 같은 분쇄물이라도 작용하는 힘에 따라서 입자의 크기, 형상, 분포 등의 특성이 달라지게 되기 때문이다. 그 일반적인 경향은 그림 3-2에서 보듯이 전단력이 작용하는 분쇄는 입도의 구간이 0.5~50 μm 로 가장 미분쇄되고, 또한 입도분포의 폭도 좁다. 이에 비해 압축력만으로 이루어지는 분쇄는 입도구간이 약 30~40,000 μm 로 미세화가 어렵고 입도 크기의 분포 폭도 넓다. 충격력을 이용한 분쇄는 전단과 압축력을 이용한 분쇄의 중간적 특성을 지니고 있지만 미분쇄의 빈도는 적게 분포되어 있다. 그러나 전단력을 이용한 분쇄는 입자를 가장 미세화하는데는 효과적이거나, 미끄럼 변형에 의한 격자 스트레인의 발생이 현저하고, 입자 자체의 물리·화학적 변화가 일어나기 쉬운 단점이 있다.

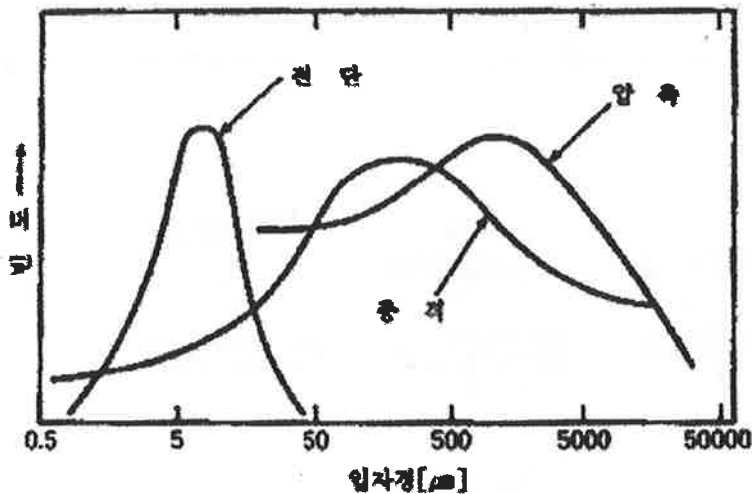


그림 3-2. 분쇄의 원리에 따른 분쇄생성물의 입도변화

표 3-1과 그림 3-3은 분쇄기의 종류에 따른 분쇄메카니즘을 나타내고 있다. 압축력은 벽개성(劈開性)이 있는 광물 원료의 분쇄에 이용되는데

조크러셔(Jaw crusher)나 자이레토리크러셔(Gyratory crusher) 등이 그 대표적인 것이다.

표 3-1. 분쇄기의 메카니즘

Milling machine	Compression	Impact	Friction	Shear	Bend
(a) Jaw crusher	○				
(b) Gyratory crusher	○				○
(c) Roll crusher	○			○	
(d) Edge runner	○		○	○	
(e) Hammer crusher		○			
(f) Ball mill		○	○		
(g) Jet mill		○	○		
(h) Disc crusher			○	○	

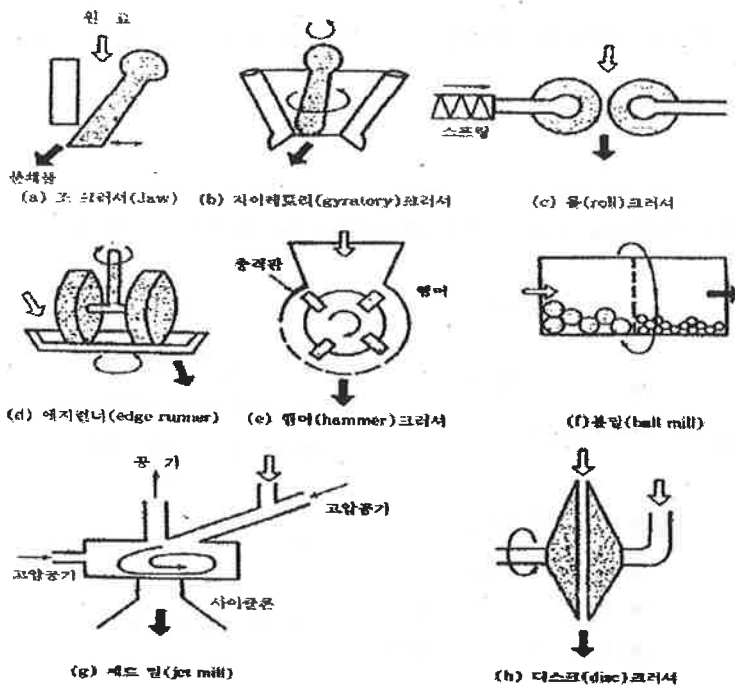


그림 3-3. 분쇄기의 종류

롤밀(Roll mill)과 에지런너(Edge runner) 등도 이에 해당되는데, 이러한 것은 혼합기로서도 사용되고, 점토나 페라이트의 미분쇄나 혼합에 널리 이용되고 있다. 충격력을 이용하는 기종으로서는 볼의 충격을 이용한 볼밀(Ball mill)과 튜브밀(Tube mill), 회전햄머의 충격을 이용한 햄머밀(Hammer mill) 등이 있고, 전단력을 이용하는 대표적인 것은 돌절구나 롤밀에 의한 분쇄이다. 그러나 실제의 분쇄기에서는 이러한 힘이 단독으로 작용하는 것이 아니고, 이러한 힘들이 조합하여 분쇄원료가 효율적으로 분쇄될 수 있도록 설계되고 있다.

표 3-1에서 보듯이 (a), (b), (c)는 조분쇄기로 1,500~100mm의 원료 크기를 500~25mm로 분쇄하는 데 이용되고, (d), (e)는 중간조분쇄기로 500~6mm의 원료를 50~1mm로 하고, (f)는 미분쇄기로 12.5~1mm의 원료를 2~0.1mm로 분쇄하는 데 이용되어지고 있다. (g)는 초미분쇄기로 6~0.1mm를 0.1~0.01mm로 분쇄한다. 조분쇄기, 중간분쇄기, 미분쇄기, 초미분쇄기의 분쇄시(원료와 분쇄물과의 크기의비)는 각각 4~3, 7~5, 20~10, 50~10이다.

표 3-2. 햄머밀(Hammer mill)과 롤밀(Roller mill)의 비교

	햄머밀	롤밀
장 점	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 다목적 분쇄 ◎ 구조가 간단 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 마찰열 적게 발생 ◎ 소요동력 낮음 ◎ 소음, 먼지 적음
단 점	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 마찰열 발생 ◎ 소요동력 높음 ◎ 소음, 먼지 발생 ◎ 마모⇒씻가루 발생 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 섬유질 식품 분쇄시 분쇄효율 저하 ◎ 마모⇒씻가루 발생

전단력을 이용한 분쇄기는 분쇄효율이 우수하나 식품 분쇄에서는 일반적으로 충격력을 이용하는 햄머밀과 압축력과 전단력을 이용하는 롤밀을 사용하고 있다. 표 3-2는 햄머밀과 롤밀의 장단점을 비교한 것이다.

햄머밀은 충격력에 의하여 분쇄하는 다목적 분쇄기로서 섬유질이 많거나 단단하게 굳은 전분, 곡류 등의 원료를 다목적으로 분쇄하는데 사용되고 있으며, 구조가 간단하고 공회전 시에도 분쇄기 손상이 적어 보수비를 최소화할 수 있는 장점을 가졌으나, 분쇄 소요 에너지는 롤 밀 보다 약 2배정도 더 소요되고, 분쇄시 열이 많이 발생하는데, 쌀분쇄시는 75℃, 코코아 분쇄시는 60~80℃까지 가열됨으로서 영양분 파괴의 원인이 될 수 있고, 먼지가 많이 발생됨으로써 먼지 제거기가 필요하고, 소음이 커서 분쇄 작업 환경이 열악한 것이 단점이다.

이에 비해 롤밀은 압축력과 전단력을 이용함으로 분쇄소요에너지가 작고, 쌀 분쇄시 열이 30℃로 적게 발생되어 식품의 영양분 파괴를 적게 할 수 있으며, 분쇄 생성물의 입자분포의 폭이 좁게되어 균일하게 분쇄할 수 있고, 먼지와 소음이 적게 발생하는 장점이 있다. 그러나 섬유질이 많은 원료를 분쇄시 분쇄효율이 낮고, 주철재 롤이 마모되어 분쇄 생성물에 쇳가루가 혼입되는 문제점을 갖고 있기 때문에 분쇄물의 증균속 혼입을 억제하거나 근본적으로 혼입을 막을 수 있는 롤의 내마모성을 갖는 소재와 생산기술 개발에 관한 연구가 요구되고 있는 실정이다.

표 3-3은 회주철 평롤밀과 본 실험에서 제작한 세라믹 평롤밀의 장·단점을 비교하여 놓은 것이다. 일반적으로 분쇄기는 회주철 평롤밀이 사용되는데, 회주철 평롤밀은 제작비가 저렴하고 가공이 쉽지만, 경도가 낮고 부식성이 낮아 사용시 분쇄물에 쇳가루 혼입으로 인한 인체의 부작용을 초래하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 경도와, 부식성이 높은 반영구적인 특성을 가진 세라믹롤을 제작하여 실험하였

다.

표 3-3. 회주철 평롤밀과 세라믹 평롤밀의 비교

	회주철 평롤밀	세라믹 평롤밀
장 점	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 제작비 저렴 ◎ 성형가공이 용이 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 경도(내마모성) 높음 ◎ 내부식성 높음 ◎ 반영구적임 ◎ 중금속 혼입이 없음
단 점	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 경도(내마모성) 낮음 ◎ 내부식성 낮음 ◎ 마모⇒숫가루 혼입 ◎ 영구적이지 못함 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 취성이 크다 ◎ 성형가공이 어려움

하지만 세라믹롤은 취성이 크고 성형가공이 어렵다는 단점이 있으나 숫가루의 혼입을 근본적으로 방지할 수 있으므로 있어 국민보건 증진에 기여할 수 있다는 장점이 있다.

표 3-4. 재료의 경도

	Mohs' scale	Constituent hardness	
		HRC	HV
Diamond	10	-	8000
Silicon carbide	-	-	2500
Corundum (Al ₂ O ₃)	9	-	2000
High-carbon martensite	6 ^{1/2}	62	770 to 800
Austenite in high-chromium irons	-	-	350 to 400
High-carbon pearlite	-	-	240 to 425

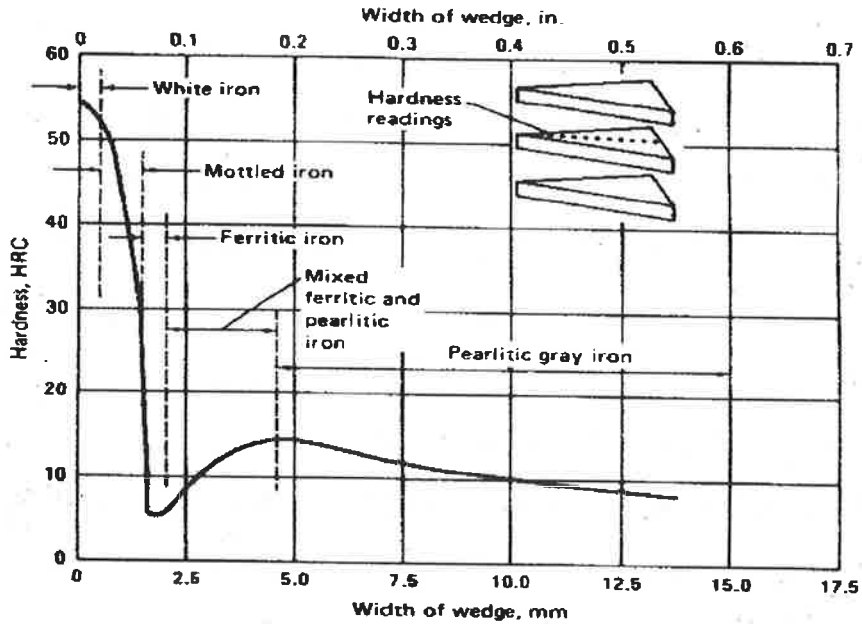


그림 3-4 회주철의 표면 깊이에 따른 경도 및 구조변화

국내에서 이루어지는 분쇄는 대부분 회주철롤을 이용하여 섬유질이 많거나 단단하며 전분이 많이 함유된 것, 또는 젖은 재료 등을 분쇄하는 다용도 분쇄기를 사용하고 있다. 표 3-4, 그림 3-4는 금속과 세라믹계의 경도를 나타낸 것이다. 그러나 이 회주철롤은 분쇄 공정 상에서 두 롤 간의 접촉압력과 회전 속도차에 의해 발생하는 전단력으로 접촉부위에 마찰열이 발생되어 마찰 부분이 용착을 일으켜 그 필름이 제거되고, 다시 새로운 접촉면이 나타나게 되는 압착분리 현상이 반복적으로 일어나게 되어 롤의 마모가 발생하게 된다. 일반적으로 우리나라에서 사용하고 있는 롤의 금속성분은 3.0~3.6wt.%C, 4.5~4.8wt.%Si, 0.3~0.7wt.% Mn, 0.03~0.1wt.%P, 0.02~0.09wt.%S인 금속 성분을 가진 회주철 금속소재로 생산되고 있다. 이런 금속성분비를 가진 롤의 표면은 표

3-4와 3-4에서 보듯이 주물 생산시 냉각속도에 의해서 경도가 50HRC 이상이 되는 경질상인 백주철 조직을 갖게 되나, 표면에서 깊이 2mm 이상 들어가면 경도가 10HRC인 연질상의 회주철 금속 조직을 갖게 된다. 이러한 조직을 가진 롤을 사용함으로써 단단한 재료의 분쇄시 연성을 가진 롤 표면이 마모되면서 분쇄생성물에 섯가루의 혼입이 초래된다. 금속 조직면에서는 롤의 표면 경도가 높더라도 유리 페라이트가 혼재되어 있기 때문에 마모가 쉽게 일어나게 되어 분쇄생성물에 혼입이 될 수 있다. 이와 같은 현상으로 회주철 소재로 된 롤은 분쇄시 분쇄생성물에 섯가루가 항상 소량이 혼입되는 원인이 될 것이다.

기존의 회주철 롤 표면의 vickers 경도는 425HV이나 표면에서 2mm 깊이 이상에서는 200HV로 감소되어 분쇄시 마모에 의하여 섯가루가 분쇄생성물에 혼입되는 문제점이 야기되고 있는 실정이다. 표 3-4에서 보듯이 ceramic 소재인 Al_2O_3 는 vickers 경도가 2000HV로서 내마모성은 회주철의 경도보다 5배~10배정도 크기 때문에 회주철 롤보다 내구성이 크며 또한 분쇄시 섯가루의 혼입을 근본적으로 방지할 수 있다. 그러므로 식품 분쇄기 분야는 내마모성이 우수하고 섯가루의 혼입이 방지되는 ceramic 소재를 사용하는 분쇄기계가 지속적으로 연구 개발되어야 할 것이다.

제 3 절 롤분쇄기의 분쇄 메카니즘

일반적으로 국내에서 사용하고 있는 Roll mill에서 roller의 소재는 회주철 성분으로 구성되어 있어 식품 분쇄시 섯가루 혼입이 국민 건강에

문제점을 야기 시키고 있으나, 본 연구에서는 분쇄시 쇳가루 혼입을 근본적으로 억제 할 수 있는 ceramic 소재로 된 범용 ceramic roll mill에 관한 연구에 목적이 있다. 현재 국내에서는 곡물 분쇄를 하기 위해 식품 분쇄업체를 이용하는데, 이는 거의 roll mill을 사용하여 분쇄하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 ceramic roll mill을 이용하여 단단하고, 섬유질이 많으며, 수분을 포함한 연한 물성의 식품등을 분쇄할 수 있는 식품용 다용도 분쇄기 개발에 주안점을 두었으므로, 이에 알맞은 분쇄원리 이론에 근거하여 범용 ceramic roll mill을 설계 및 제작에 관하여 연구를 수행하였다.

Roller의 표면이 매끄러운 것은 평롤이라 하여 중간 미분쇄용으로 사용되고 있고, 흠이 파여진 것은 치형이라 하여 중간 조분쇄용으로 사용되고 있으며, 본 연구에서는 1차적으로 중간 미분쇄용인 평롤에 대하여, 2차적으로는 중간조분쇄용인 치형롤에 대하여 설계 및 제작에 관하여 연구를 수행하였다.

Roll mill의 분쇄는 두 개의 roller面 간격 사이로 식품 분쇄물이 접선의 마찰력과 접선에 수직인 구심력 작용에 의하여 분쇄 입자를 분쇄공간으로 끌어들여 입자를 작게 만들어 표면적을 증가시키는 압착분쇄방법과, 두 roller의 회전 속도편차에 의하여 전단응력 작용에 의하여 마모와 절단을 발생시켜 분쇄하는 분쇄 메카니즘을 갖고 있으므로 식품 분쇄 방법에 따라 압착방법 혹은 압착과 전단 방법을 혼용하여 분쇄시킨다. 그러나 실제 식품 분쇄시에는 압축, 마모, 충격, 절단 등에도 영향을 받는 동시에 식품 재료의 굴절(bending)과 비틀림(torsion)등에도 영향을 받으나, 아직 국내에서는 이에 관한 연구수행이 미비한 상태이다.

일반적으로 식품용 roll의 직경은 15.2cm(6inch) ~ 30.5cm(12inch)범

위에서 사용되고 있으나, 밀 제분의 경우 직경은 22.9cm(9inch), 길이는 61 ~ 125cm 범위가 적당하다고 연구보고 되었다. 분쇄공정에서는 길이 대 직경의 비에 따라 분쇄 생성물의 특성과 분쇄 효율에 큰 영향을 미치나, 일반적으로 길이 대 직경의 비는 약 3.5이하로 설계되었을 경우에 경제적이라고 연구 조사되었다.

분쇄시 두 롤은 서로 반대 방향으로 회전하는데, 회전 속도비가 1:1인 경우 압축력에 의하여 분쇄되지만, 두 roller의 회전 속도비의 차이가 클수록 식품 분쇄물에 전단응력이 증가되어 연성이 큰 재료에서는 마모에 의하여 미분쇄 생성물 특성을 유도 할 수 있기 때문에 밀 제분공정에서는 회전 속도비가 1 : 2.5 경우 백색도가 가장 좋다고 연구 보고되었으며, 섬유질이 많은 식품인 고추에서는 절단(찢어짐)에 의하여 입도 감소를 증가시킬 수 있다. 즉 roll mill을 이용한 식품 분쇄 효율은, roller에 가해지는 힘의 부하가 작용력의 크기, 방향 및 각도(압축력 혹은 전단력), roller 속도에 위해서 영향을 받는 것이 그 원인이다. 분쇄시 작용된 부하는 분쇄될 물질의 탄성한계를 약간 초과하면 분쇄가 되고, 그 이하이면 복원되어 열로 변환된다. 실제로 분쇄장치에 공급되는 에너지의 1~ 2% 정도만이 분쇄물의 표면 에너지를 증가시키는데 기여하고, 즉 분쇄에너지로 변하고, 98%이상은 열로 소비된다. 그러므로 실제 분쇄기 설계에서는 분쇄시 소요되는 분쇄에너지, 즉 분쇄동력비가 가장 중요한 역할을 하게 된다.

분쇄원료 크기가 D_{p1} 이고, 분쇄생성물의 크기 D_{p2} 로 분쇄하는데 필요한 이론적 에너지량은 일반적으로 세가지 법칙을 이용하여 단위질량의 분쇄물 분쇄에 소요되는 동력 P 를 계산할 수 있다. :

표면적 증가량과 표면에너지의 증가는 비례관계가 있다는 기본구상에서 유도된 Rittinger의 분쇄법칙에 의하면,

$$\text{단위부피당 일 에너지} = 3BK(D_{p2}^{-1} - D_{p1}^{-1}) \quad (1)$$

B : 분쇄물의 단위에너지(또는 단위표면을 생성하는 데 필요한 일 에너지) [joule/m²]

K : 상수

경험을 토대로한 Kick의 분쇄법칙에 의하면,

$$\text{단위부피당 일 에너지} = C \ln (D_{p1}/D_{p2}) \quad (2)$$

C : 상수

반 경험적 이론에 입각한 Bond의 분쇄법칙에 의하면,

$$\text{단위부피당 일 에너지} = C(D_{p2}^{-1/2} - D_{p1}^{-1/2}) \quad (3)$$

분쇄기 효율이 일정하다면 분쇄원료의 평균입도 D_{p1} 과 분쇄생성물의 입도 D_{p2} 를 측정하고, roll mill 분쇄장치에 공급된 분쇄물량 m 와 분쇄동력 P 를 알면 다른 조건에서의 분쇄동력 P' , 분쇄처리량 m' , 분쇄물 입도 D_{p1}' 혹은 D_{p2}' 를 계산할 수 있다.

만일 분쇄원료의 80%가 D_{p1} [mm]의 체를 통과하고, 분쇄생성물의 80%가 D_{p2} [mm]의 체를 통과하는 조건이 결정된 분쇄장치에서는 다음과 같은 비분쇄 동력 [KWh/ton] 식을 이용할 수 있다.

$$P/m = 0.3162W_i(D_{p2}^{-1/2} - D_{p1}^{-1/2}) \quad (4)$$

단일 곡물 입자를 분쇄하는 경우 여러 가지 분쇄공정에 따라서 분쇄 생성물 20 ~ 70 μ m로 분쇄하는데 소요되는 비분쇄 동력은 30 ~

70[KWh/ton]으로 연구 조사되었다.

Roller mill에서 분쇄기의 설계나 분쇄조작(운전)에 있어서 분쇄용량의 추산은 분쇄효율 및 분쇄 생성물 특성에 큰 영향을 미친다. 분쇄생성물의 입도는 두 롤 사이의 간격 크기에 의하여 결정되고, 파쇄용량은 roller 사이의 간격과 롤의 폭 및 회전속도에 의해서 결정된다. Roll mill 분쇄기의 이론적 분쇄능력(용량) C을 식으로 표현하면,

$$C = (3600)(u)(w)(2d) = 7200uwd \quad (5)$$

C : 이론적 분쇄용량 [m³/h]

u : roll의 원주속도 [m/s]

w : roll의 폭 [m]

d : 두 roll사이의 간격의 절반 [m]

만일 롤 회전속도를 N[rpm], roll의 지름을 D[m]라 하면

$$u = \pi ND/60 \quad (6)$$

분쇄물의 처리용량 Q

$$Q = 7200 \frac{\pi ND}{60} \omega d \rho_b = 120 \pi ND \omega d \rho_b \quad (7)$$

Q : 처리용량 [ton/h]

ρ_b : 겉보기 비중 [ton/m³]

위의 이론치는 실제의 파쇄용량의 1/3 ~ 1/10 정도가 된다.

Roll mill 분쇄기에서 파쇄 될 수 있는 최대입도 D_{plmax} 과 주어진 입도의 분쇄원료를 파괴하는 데 필요한 roll의 지름 2R는 다음과 같은 바이트각 혹은 무는각(angle of bite or angle of nip)의 이론으로 결정할 수 있다. 바이트각(혹은 무는각)이라 함은, roll 반지름 R의 roll표면에

분쇄물 반지름 $r = D_p/2$ 의 입자가 놓이게 되고, 그것이 분쇄 시작 될 아랫부분으로 이동되기 직전 상태에 있을 때, 입자와 롤표면의 접촉점 C에서 형성되는 접선과 수직선 사이의 각을 α 라 정의한다.

두 롤 사이의 틈새간격을 $2d$ 라고 하면 그림 3-5에서 선 AB는 입자와 왼쪽 롤의 중심을 지나 점 C를 통과한다. 각 α 는 선 AB와 수평축, 즉 두 롤의 중심을 잇는 선으로 형성되는 각이고, 선OE는 C점을 통과하는 접선이다.

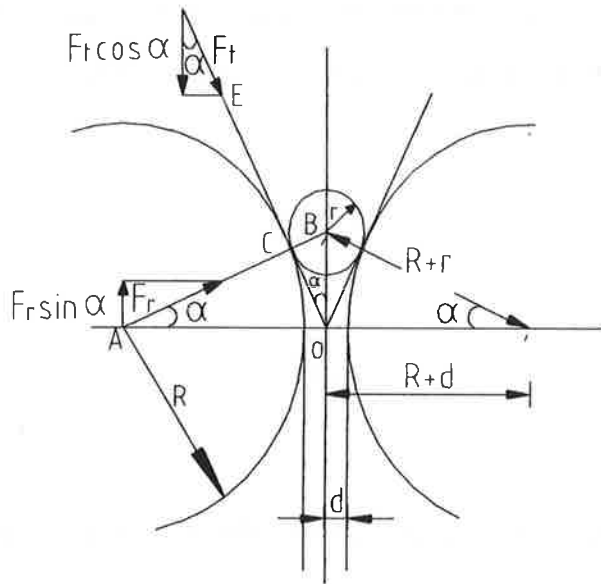


그림 3-5. Roll mill에서 두 roller 사이의 분쇄물에 작용하는 힘

중력의 효과를 무시하면, 점 C에 작용하는 힘은 접선방향의 마찰력 F_t 와 접선에 수직인 구심력 F_r 이다. F_t 의 수직방향 분력은 $F_t \cos \alpha$ 이며, F_r 의 수직방향 분력은 $F_r \sin \alpha$ 이고, 마찰력 F_t 와 구심력 F_r 는 롤 표면과 입자 표면의 마찰계수 μ' 와 더불어 $F_t = \mu' F_r$ 의 관계가 있다.

힘 $F_r \sin \alpha$ 는 롤 표면에서 입자를 튕겨내는 경향이 있고, 힘 $\mu' F_r \cos \alpha$ 는 입자를 분쇄공간으로 끌어들이는 경향이 있다. 입자가 분쇄되

려면 :

$$F_r \mu' \cos \alpha \geq F_r \sin \alpha$$

$$\text{즉 } \mu' \geq \tan \alpha \quad (8)$$

의 관계가 성립된다. $\mu' = \tan \alpha$ 일 때 각 α 를 이 분쇄조작에서의 무는각(즉 입자를 분쇄공간으로 끌어들이기 때 생성되는 각)이라 부른다.

그림 3-5에서 롤의 반지름 R 와 분쇄원료입도 $D_{p1max} = 2r$ 및 롤의 틈새 크기 $2d$, 즉 분쇄생성물 입도 사이에는 다음의 관계식이 성립하므로,

$$\cos \alpha = \frac{R+d}{R+r}$$

$$\text{즉, } \alpha = \cos^{-1} \frac{R+d}{R+r} \quad (9)$$

분쇄생성물의 입도 크기가 roll의 직경과 입자를 분쇄공간으로 끌어들이는데 생성되는 각 (angle of nip)의 크기에 따라 변화되는 것을 식으로 표시하면,

$$\text{호의 길이 } CO = (R/2) \cdot \alpha \quad (10)$$

분쇄과정에서는 동적 조건이므로 정마찰 계수 보다 동마찰 계수에 영향을 고려하여야 하므로, 이것을 식으로 표시하면 :

$$\mu_k = \frac{[1+(0.0012)\mu]}{[1+0.0600v]} \quad (11)$$

여기서 μ_k : 동마찰 계수

μ : 정마찰 계수

V : 속도 [cm/s]

분쇄 공정중 분쇄물이 빠르게 움직일 때 μ_k 는 μ 의 1/5값으로 작아지게 된다.

roll 분쇄기는 두 roll mill간의 속도 편차에 의하여 분쇄되는데, 빨리 회전하는 roll의 속도를 V_f , 느리게 회전 roll의 속도를 V_s 라 하면 roll mill의 평균 속도 V_z 는 :

$$V_z = \left(\frac{V_f + V_s}{2} \right) \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

롤 분쇄기에서 roller의 직경 크기와 두 Roll 사이의 간격에 의하여 분쇄 입자(곡물)를 분쇄 공간으로 끌어 들이는데 생성되는 각을 α 라 하면, 이 α 각의 크기에 의하여 분쇄 생성물의 입도 크기가 결정된다. 본 실험용 ceramic roll mill 설계에서는 식(9)을 이용하여 이론적으로 α 를 6.22° , 정마찰 계수 $\mu = 1.089$ 로 계산하였다. 일반적으로 동마찰 계수는 정마찰 계수의 1/3정도이므로, μ_k 는 0.04로 상당히 작게 분석되므로서 분쇄시 소요 동력에너지도 작게 소요됨을 추정 할 수 있었다.

분쇄물과 두 roll사이에 접촉된 점에서 두 roll 분쇄 공간 중심까지의 거리 C_0 는 선분 $C_0 = 4.5\text{mm}$ 로 설계하였기 때문에 백미 분쇄에서 분쇄 효율을 증가시킬 수 있을 것이다. 분쇄기의 roll 직경 크기가 일정한 조건

일 경우 분쇄물의 크기가 2배 증가한다면, 정마찰 계수는 2배정도 증가하고, CO의 길이도 2배정도 증가하게 되나, 반대로 분쇄물의 입도 크기를 일정하게 고정시킨 조건에서는 분쇄기 roll의 직경 크기만 2배 증가시킬 경우 정마찰 계수 및 CO의 길이도 2배정도 증가하게 될 것이다.

를 분쇄기 설계 및 제작상에서의 고려사항들은 다음과 같다 :

- 1) 분쇄원료의 입도는 적당한가? 또 공급속도는 균일한가?
- 2) 분쇄생성물은 필요한 입도가 되자마자 곧 장치 밖으로 배출되는가?
- 3) 파쇄되지 않을 물질을 처음부터 장치 속에 들어가지 않도록 조치가 되는가?
- 4) 낮은 온도에서도 녹거나, 열에 민감한 물질을 분쇄함에 있어서 발생하는 열을 쉽게 제거 할 수 있는가? 등을 고려해야 한다.

또한 분쇄동력과 분쇄비 및 처리량을 설계 및 제작에 고려하기 위해서는 분쇄물 톤당 마력수 HP는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{HP}{t} = \left(\frac{r^{1/2}}{m} \right)^{1/2} \quad (13)$$

r은 분쇄비로서 분쇄생성물의 80%가 통과하는 체구멍 크기에 대한, 원료의 80%가 통과하는 체구멍 크기의 비이다. m은 분쇄물 처리량[ton/h]이다.

원료의 종류, 수분함량, 쇄성물의 입도, 투입률, 투입률, 분쇄기의 작동조건 등에 의하여 영향을 받기 때문에 정확한 소요동력을 결정하는 것은 쉽지 않다. 그러나, 보리와 같은 섬유질곡물은 옥수수과 같은 결정성(結晶性) 곡물보다 소요동력이 도 큰 것을 알 수 있으며, 수분함량이 높은 곡물이 낮은 곡물보다 동

력을 더 많이 요하는 것을 알 수 있다.

표 3-5은 대표적인 사료분쇄의 소요동력을 보여주고 있다.

표 3-5 사료분쇄의 소요동력(단위 : kWh/t)

구 분	해머밀	버밀	구 분	해머밀	버밀
옥수수	7.4	3~5.8	통옥수수	6~8	-
귀 리	11.5~14	5~14	건 초	8~16	-
보 리	9~14	4~10			

제 4 절 룰 분쇄기 설계 및 제작

1. 세라믹 평·치형 룰 분쇄기 설계

본 연구에서는 곡물이나 섬유질이 많은 식품 및 무르기가 단단한 식품을 분쇄하기에 알맞고, 다양한 물리적 성분 특성 및 화학적 조성을 가진 식품을 분쇄 할 수 있도록 금속·세라믹 평룰과 치형룰을 제작하여 효율적인 룰 분쇄기의 분쇄조건을 찾고자 평룰은 백미를, 치형룰은 섬유질이 많은 고추를 공시재료로 선택하여 분쇄시 소요에너지 및 분쇄 생성물의 특성을 조사하여 룰 분쇄기 설계의 기초자료로 이용하였다.

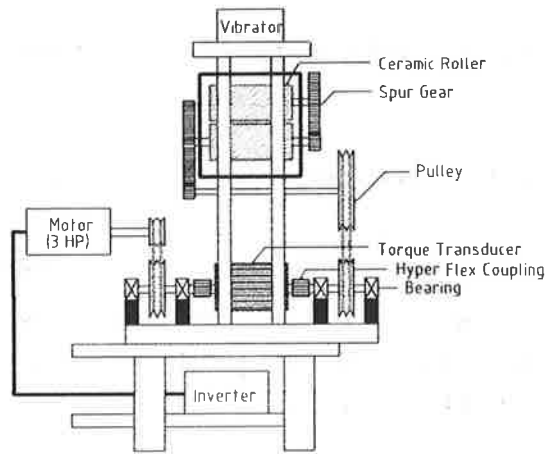


그림 3-6. 실험용 롤 분쇄기의 설계도

분쇄에너지(분쇄 동력비) 및 분쇄처리량은 이론적으로 계산하였고, 분쇄 생성물의 특성은 실제 분쇄 실험을 통하여 실험 결과치와 이론적 설계치를 비교 분석하였다. 본 연구를 위하여 제작한 실험용 롤 분쇄기의 설계도는 그림 3-6과 같고, 그림 3-8과 같이 제작하였다.

일반적으로 국내에 보급된 롤 분쇄기의 크기는 직경 168mm, 길이 298mm가 많이 보급되어 있다. 본 실험에서는 롤 분쇄기를 개발하여 국내 기존 식품분쇄업체에 사용되고 있는 회주철 평·치형 롤과 비교 실험용인 세라믹 평·치형 롤을 동일한 크기로 설계·제작하여 비교 실험을 하였다.

롤 분쇄기 두 개의 롤은 한 쌍으로 24° 경사지게 설계하였고, gear에 의하여 두 roller의 속도 회전비가 2 : 1이 되도록 하였다. 각 식품 분쇄물의 물리적 성질, 특히 섬유질 식품은 두 roller의 속도 회전비가 식품 분쇄생성물의 특성에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 두 roller의 속도 회전비 변화에 따른 식품 분쇄 생성물의 특성을 분석하기 위하여 두 roller의 속도 회전비를 조정할 수 있는 실험용 롤 분쇄기를 설계

하였다.

또한 롤 사이에 간격 조절을 위한 spring을 삽입하여, 볼트로 된 핸들(handle)을 이용하여 간격을 일정하게 조절할 수 있도록 하였다. 그림 3-7는 롤 사이의 간격을 조절할 수 있도록 제작한 설계 도면을 나타낸다.

분쇄기 roller의 회전 속도는 1,750rpm, 동력은 3HP motor를 설치하였고, pulley 및 gear를 이용하여 $R_f : R_s$ 를 2:1~5:1까지 속도비를 조정할 수 있도록 설계하였다(R_f = fast roller, R_s = slow roller). 그리고 각 식품 분쇄물의 물리적 성질에 따른 roller의 회전속도 변화비가 식품

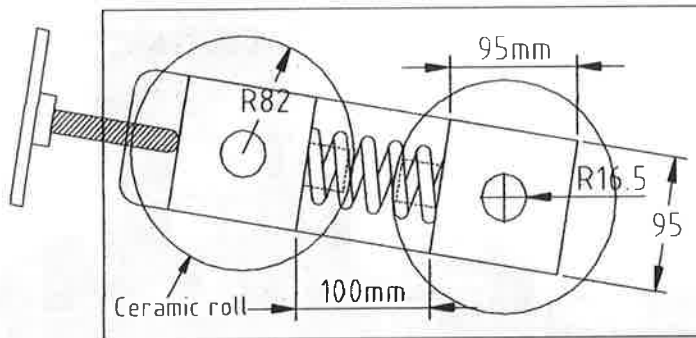


그림 3-7. 롤 간격 조절 장치

분쇄생성물의 특성에 미치는 영향을 분석하고자 속도 변환기 (Inverter : SV015iG-2 (LG회사))를 장착하여 Roller의 회전속도를 0~110rpm까지 조정할 수 있도록 설계 및 제작하였고, 소요동력을 측정하기 위하여 Torque transducer(KYOWA : TP-10kgf·m)를 양 축단 가운데에 설치하였으며, 각각 Hyper flex coupling(NS24, 대유)으로 연결하도록 설계 및 제작을 하였다(그림 3-6,7). 실험용 롤 분쇄기를 이용하여 분쇄물 분쇄

시, 분쇄물을 정량으로 공급하기 위하여 vibrator(신창 SMF-01S)를 설치하였다. Vibrator는 원료 투입 속도와 양을 조절하므로 분쇄물이 투입 동시에 분쇄되어 줄림현상(chock crushing) 방지와 분쇄기의 부하가 허용이상 커짐을 방지할 수 있다. Vibrator는 쌀의 경우 시간당 최대 132kg까지, 고추는 200kg까지 공급할 수 있도록 설계하였다.

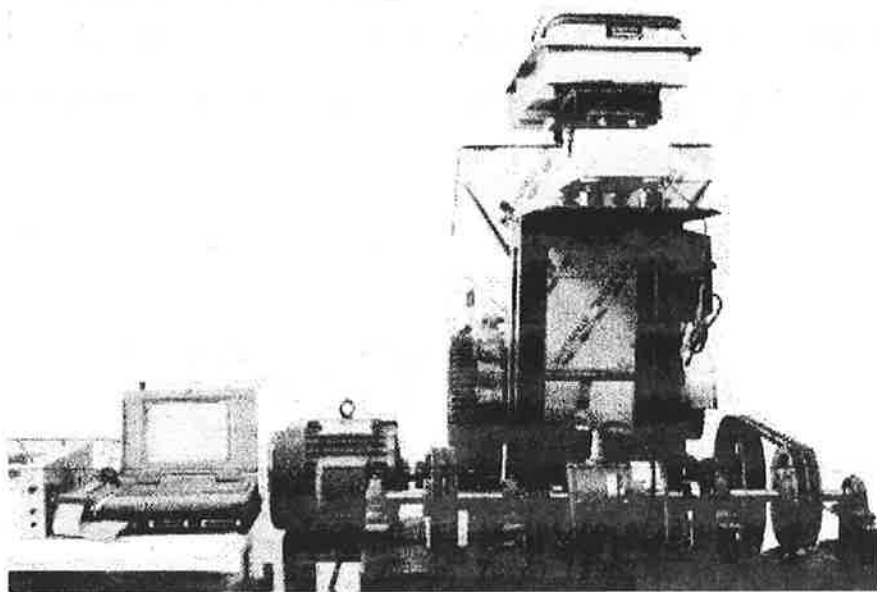


그림 3-8. 실험용으로 제작한 롤 분쇄기 및 주변 장치

일반적으로 국내에 보급된 롤 분쇄기의 크기는 직경 168mm, 길이 298mm가 가장 많이 보급되어 있다. 식품용 롤의 직경은 15.2cm(6inch)~30.5cm(12inch)에서 사용되고 있고, 밀 제분에서는 22.9cm(9inch)가 적당하고, 길이는 61~125cm 범위에서 사용시 적당하다고 연구보고 되었다. 분쇄 공정에서 길이 대 직경의 비에 따라 분쇄생성물의 특성과 분쇄 효율에 큰 영향을 미치나, 일반적으로 길이 대 직경의 비는 약 3.5이하

로 설계되었을 때가 가장 경제적이라고 연구조사 되었다.

본 실험에 실제 적용된 회주철, 세라믹롤밀의 직경은 16.8cm(6.6inch) 이고, 길이는 29.6cm(11.6inch)로 위의 내용에 적합하다고 볼 수 있다.

롤 밀을 이용하여 식품 분쇄시 우선 선행되어야 할 것이 시료가 롤에 유입되는 것이다. 시료의 유입성능은 유입각과 마찰계수와의 관계로부터 구할 수 있다. 일반적으로 유입각은 롤이 증가할수록 작아진다.

$$\cos \alpha = \frac{R+d}{R+r} = \frac{81.5+(0.25/2)}{81.5+(2/2)} = 0.989$$

$$\cos \alpha = 0.989 \quad \text{로부터,}$$

$$\alpha = \cos^{-1}(0.989) = 8.506$$

$$\mu \geq \tan \alpha = \tan(8.506) = 0.1495 \approx 0.15$$

여기서, R : 롤의 반지름

d : 롤 간격의 1/2

r : 분쇄물 지름의 1/2

α : 접선과 수직선 사이의 각

위의 식에서 알 수 있듯이 재료의 롤에 대한 마찰계수 μ 가 0.15이상 이면 롤에 재료의 유입이 가능함을 알 수 있다.

식품 분쇄시 ceramic roll mill 축에 응력집중 현상이 발생하므로 축 설계는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 모터의 동력을 3HP, 최소 회전수 15rpm, 폴리의 지름이 7.5“(반지름 95.5mm), 축의 안전율 $n = 2.5$ 조건에서 축의 재료를 항복강도 390MPa인 AISI 1020 냉인발(cold-drawn)을 사용하였을 때 아래와 같은 식에 의하여 이론적 축경 d의 지름이 47.3mm로 계산되었다.

$$\begin{aligned}
 d &= \left[\frac{32n}{\pi \cdot S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/2} \\
 &= \left[\frac{32 \times 3}{\pi \cdot 392} (331,056^2 + 131,287^2)^{1/2} \right]^{1/2} \\
 &= 47.3(\text{mm})
 \end{aligned}$$

여기서 $S_y =$ 항복강도 $[\text{N}/\text{mm}^2]$

$M =$ 축의 최대모멘트 $[\text{N} \cdot \text{mm}]$

$T =$ 축의 토오크 $[\text{N} \cdot \text{mm}]$

$n =$ 안전율

축의 직경을 구하기 위해서 최소 회전수 16rpm일 때 축의 최대 모멘트 (M)와 축에 작용하는 토오크(T)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{75 \times PS}{\omega} = \frac{75 \times PS}{\frac{2\pi n}{60}} \\
 &= \frac{75 \times 3}{\frac{2\pi \times 16}{60}} = 134.287 \text{kg} \cdot \text{m} = 1317287 \text{N} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

여기서 $PS =$ 마력

$\omega =$ 각속도

$N =$ 회전수

축에 작용하는 힘 (F)은 축에 작용하는 토크 $T[\text{N} \cdot \text{mm}]$ 와 플리의 반지름 $r[\text{mm}]$ 에 의해서 결정되고 :

$$F = \frac{T}{r} = \frac{1317287}{95.5} = 13794 \text{N}$$

힘의 작용점에서 축을 지지하는 베어링 중심부간의 최대길이 $L = 24\text{mm}$ 일 때 축의 최대 모멘트(M)는:

$$M = F \cdot L = 13794 \times 24 = 331056 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

이 된다.

2. 쌀 분쇄시 세라믹·회주철 롤에 대한 설계

쌀 분쇄기의 이론적 분쇄용량 설계는 일반적으로 국내에서 식품 분쇄 용에 가장 많이 보급된 roll 규격 : 직경 168mm, 길이 298mm에, 백미 2mm 크기를(겉보기 밀도 588kg/m³) 분쇄시 식(5)를 이용하여 표1과 같이 이론적 분쇄용량을 분석하였고, 식(7)을 이용하여 표3-7과 같이 실험용 ceramic roll mill의 이론적 처리용량을 분석하였다.

표3-6. 이론적 분쇄 용량

이론적 분쇄용량 [m ³ /h]	두 roller 사이의 간격 [mm]	원주속도 [m/s]		
		0.2762 (R _f =31.4rpm)	0.4170 (R _f =47.4rpm)	0.8937 (R _f =101.6rpm)
0.50		0.296	0.450	0.944
0.25		0.148	0.225	0.471
0.13		0.077	0.117	0.245
0.05		0.030	0.045	0.094

표3-7. 쌀 분쇄시 세라믹 롤의 이론적 분쇄 처리 용량[kg/h]

이론적 분쇄처리 용량 [kg/h]	두 roller 사이의 간격 [mm]	원주속도 [m/s]		
		0.2762 (R _f =31.4rpm)	0.4170 (R _f =47.4rpm)	0.8937 (R _f =101.6rpm)
0.50		174.05	264.60	555.07
0.25		87.02	132.30	276.95
0.13		45.28	68.80	144.06
0.05		29.40	26.46	55.27

일반적으로 국내에서 roll mill을 이용한 백미 분쇄시 원주속도 0.44m/s(R_f = 50rpm), 두 roller사이의 간격은 0.05mm인 분쇄조건에서 쌀을 분쇄하였다. 즉, 시간당 27kg 쌀의 분쇄로 분쇄 처리 용량이 매우

적기 때문에, 본 연구에서는 실험용 ceramic roll mill의 분쇄 처리 용량을 증가시키기 위해서 원주속도를 0.9m/s($R_f=100$)까지 증가시킬 수 있도록 설계 제작하였다. 본 연구에서는 원주속도를 증가시켰을 때 분쇄 생성물 입도 크기에 미치는 영향을 실험 분석하였다. 만약 roller의 길이를 2배로 증가할 경우 표 3-6의 이론 설계치와 같이 분쇄처리 용량도 2배로 증가할 수 있을 것이다.

3. 고추 분쇄시 세라믹·회주철 치형롤밀에 대한 설계

가. 실험장치의 설계 및 제작

본 연구에서는 범용으로 회주철과 세라믹 치형롤을 이용하여 두 롤의 회전비를 1:2~1:5로 증가시키고 또한 분쇄물의 롤 통과횟수를 1~8차까지 두어, 두 롤의 회전비와 분쇄물의 롤 통과횟수, 롤 속도를 변화시키면서 여러 가지 물리적 및 화학적 성질을 가진 식품의 분쇄시 각 물성에 따라 소요되는 분쇄소요에너지, 분쇄처리량 및 분쇄생성물에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 세라믹 롤밀이 국내 기존의 식품분쇄업체에 사용되고 있는 회주철롤 대체용으로 양산화하기 위하여 세라믹 롤의 크기를 동일한 크기(직경 169mm, 길이 298mm)로 설계하였다. 또한 롤의 길이대 직경의 변화비와 두 롤의 회전비에 따른 식품분쇄 생성물과 분쇄효율에 중요한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 분쇄이론에 의한 설계 기준 설정을 중점적으로 연구하였다.

4. 세라믹 롤 제작

본 세라믹 롤 소지 개발 연구에서 선정된 분말재료를 정수압 성형기로

1,000mPa로 그림 3-9와 같이 Φ 250 x 400mm크기로 성형하였다. 그림 3-10과 3-11와 같이 선반가공으로 롤의 크기를 Φ 200 x 330mm로 제작하였다. 1300℃에서 28시간 소성후 롤의 내경에 Φ 70 x 450mm 축에 넣고 에폭시계 접착제로 축을 고정시켜 세라믹 평 롤을 제작하였다. 치형 세라믹 롤은 선반으로 각 8°도로 경사지게 v형으로 홈 간격은 5mm, 깊이는 3mm로 가공하여 치형 세라믹 롤을 제작하였다. 그림 3-14는 2단 세라믹 평롤 분쇄기와 1단 치형 세라믹 롤 분쇄기를 제작한 사진이다.

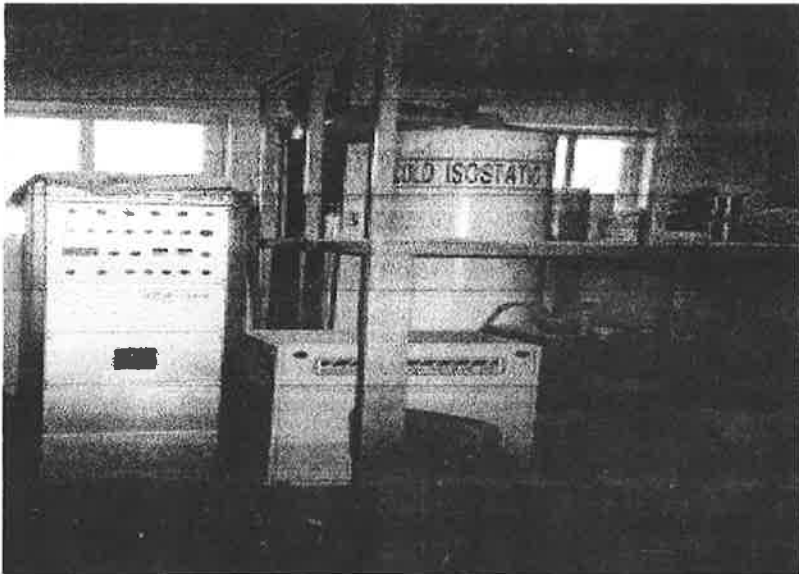


그림 3-8: 정수압 성형기

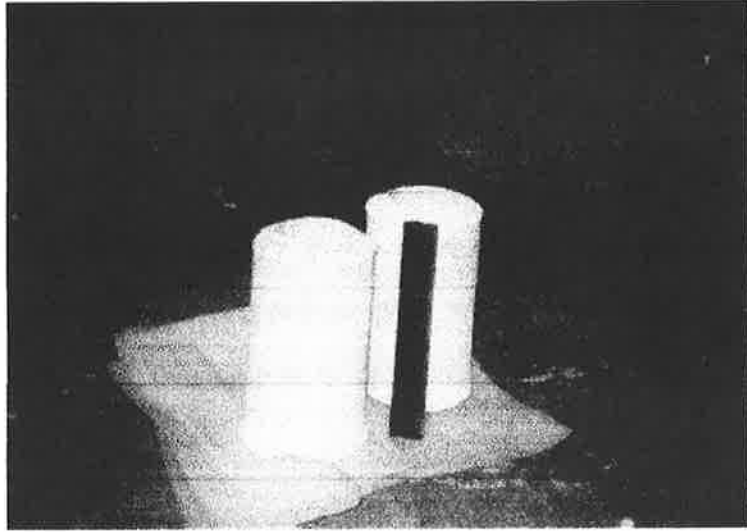


그림 3-9 : 정수압 성형압력 1,000M 성형후 green body 세라믹롤의 상태

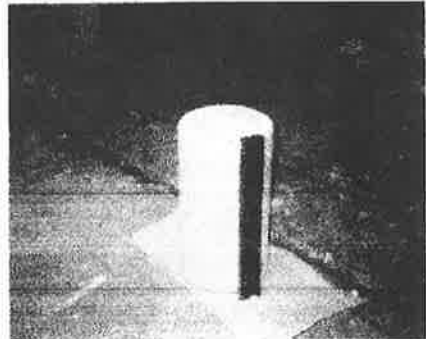
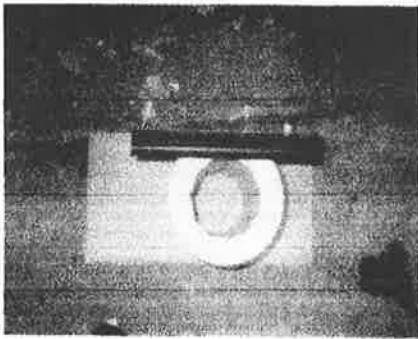


그림 3-10 선반가공 후의 green body 세라믹 롤

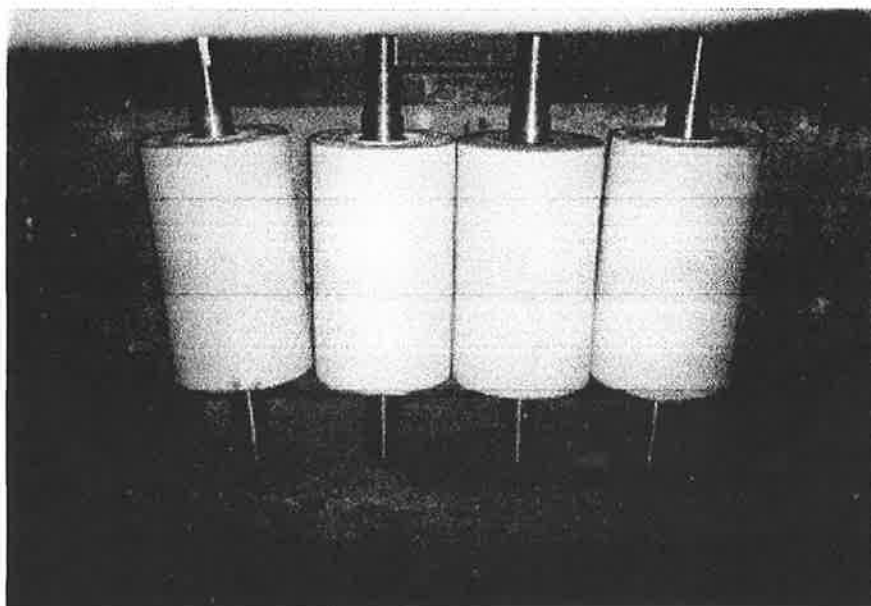


그림 3-11 燒成 후 축가공한 세라믹 평롤

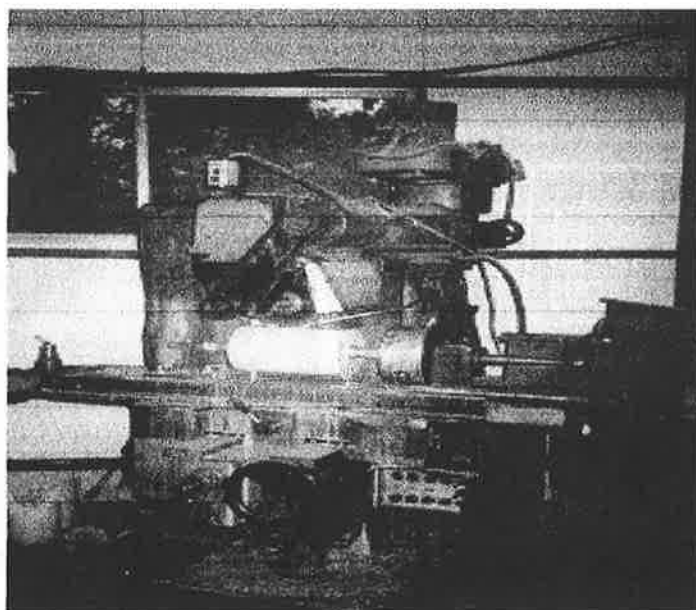


그림 3-12 롤의 치형가공을 위한 선반작업기

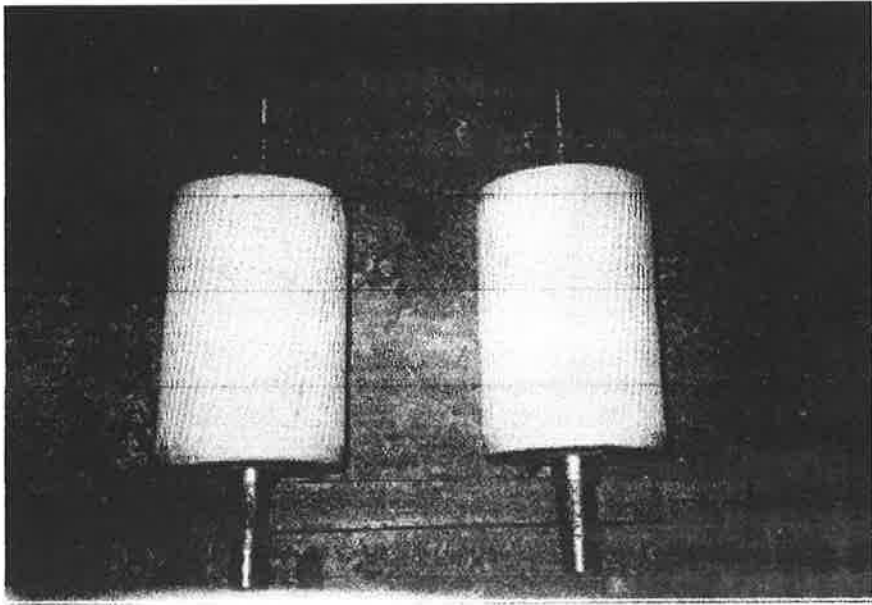


그림 3-13 선반가공으로 세라믹 치형 롤 제작과정과
축 삽입 후의 세라믹 치형롤

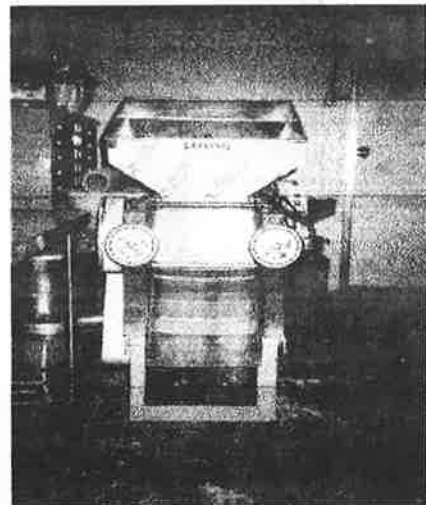
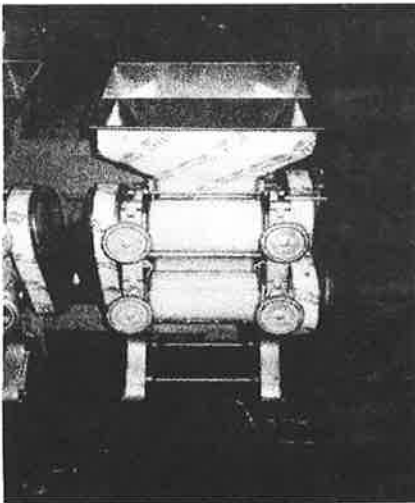


그림 3-14 2단 세라믹 평롤 분쇄기와 1단 세라믹 치형롤 분쇄기

제 5절 참고문헌

1. 강석호, 1995. 분체공학. 희중당.
2. 강위수, 강화석, 이귀현, 양승기, 목효균, 1999. 세라믹 롤러와 금속 롤러의 쌀 분쇄소요에너지. 한국농업기계학회지 1999년 동계학술대회 논문집, vol.4(1), p384~389
3. 강위수, 강화석, 이귀현, 양승기, 목효균, 1999. 세라믹 롤러와 금속 롤러의 쌀 분쇄생성물 특성분석. 한국농업기계학회지 1999년 동계학술대회 논문집, volpl.4(1), p378~383
4. 강위수, 양승기, 목효균, 1999. 치형 세라믹 롤러와 금속 롤러의 고추 분쇄생성물 특성 분석. 한국농업기계학회지 1999년 하계학술대회, vol.(4(2), p234~239
5. 고춧가루 분쇄기의 표준화에 관한 연구보고서(1996, 12). 국립기술품질원.
6. 高學均, 琴東赫, 金滿水, 盧祥夏, 文城弘, 朴京圭, 張東日, 1996. 農産加工機械學. 郷文社.
7. 金滿秀, 李鍾瑚, 1974. 穀物の 動摩擦係數 測定에 關한 研究. 韓國農業機械學會 第1卷 第1號
8. 김창은, 이홍림, 이형직, 이형복 공역, 세라믹 분체 재료학, 1994. 반도출판사.
9. 박재복, 1991. 고추분말의 가공기술개발에 관한 연구(2차 연도). 한국식품개발연구원.
10. 박희만, 정성근, 최희석, 이선호, 홍성기, 정종훈, 1999. 고춧가루 분쇄기 개발.
11. 오건웅, 정영춘, 김동식, 함재호, 권영문, 1996. 고춧가루 분쇄기의 표준화에 관한 연구보고서. 한국기기유화시험연구원.
12. 한국식품개발 연구원, 1994. 용도별 쌀가루의 특성규명 및 제조방법에 관한 연구.
13. 한국식품개발 연구원, 1998. 쌀가루의 기능성 변형기법 개발. 과학기술처.
14. 한응수, 홍성희, 배민정, 고경옥, 박지현, 1995. 고추와 고춧가루의 품질관리체계연구개발. 농협대학 농산물가공기술연구소.
15. 한응수, 홍성희, 배민정, 고경옥, 박지현, 1996. 고추와 고춧가루의 품질관리체계연구개발. 농협대학 농산물가공기술연구소.
16. American Feed Industry Association, Inc(AFIA). 1985. Feed Manufacturing Technology III. Arlington, Virginia.

17. American Feed Industry Association, Inc(AFIA). Feed Manufacturing Technology IV. 1994.
18. Appel, W.B. 1986. Comparison of hammer mill and roller mill grinding of grain sorghum and corn. M.S. thesis, Kansas State Univ. Manhattan.
19. ASAE Standards, 33rd Ed. 1985. S319.1. St Joseph, MI : ASAE
20. Austin, L.G., D.R. Van Orden and J.W.Perez. 1980. A Preliminary analysis of smooth roll crushers. International Journal of Mineral Processing 6:321
21. Bickert, W.G. and F.H. Buelow. 1966. Kinetic friction of grain on surfaces. Trans. of the ASAE. 9(1) : p.129-131,134.
22. Creason, H. 1975. Grinding and corrugating rolls. A.O.M. Technical Bulletin, No. 3:124, Kansas City, MO: Association of Operative Millers.
23. Daniel W. Rexroat. Material Processing Cost Center. ACCO Feeds.
24. Dedrick, B.W. 1924. Practical Milling. Chicago, IL: National Miller.
25. E. Haque. 1991. Three-Roller Cereal Mill Using Triangular Roll Configure roll Configuration. ASAE Paper No.0001-2351/91/3405-2104.
26. Elliott, R.R. 1083. The effect of differential roll speed on particle size reduction and particle size control in roller mill grinders. Presented at First international symposium on particle size reduction in the feed industry. Department of Grain Science and Industry, Kansas State Univ, Manhattan.
27. Feed Manufacturing Technology III. Hammer mills and Roller mills.
28. Grain Grading Standards in Feed Manufacturing. MF-2034. Department of Grain Science and Industry.
29. Grinding Methods : Their Impact on Rice Flour Properties. K.D.NISHITA and M.M.BEAN, Western Regional Research Center, Agricultural Research Service, USDA, Berkeley, CA 94710.
30. Handerson, J.M. 1967. Measuring Kinetic friction coefficients using oscillatory motion. Trans. of the ASAE. 10(3) : p.348-351.
31. K. D. Nishit and M. M. Bean, 1982. Grinding Methods: Their Impact on Rice Flour Properties, cereal chemistry, Vol.59, No 1.
32. Kim Koch Northern Crops Institute North Dakota State Univ. Fargo, ND. Feed Manufacturing MF-2048. Hammer mills and Roller mills. Cooperative Extension Service. Kansas State University, Manhattan.

33. Kolos, I. 1967. Technology of Grain Processing and Provender Milling. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations.
34. Kozmin, P.A. 1921. Flour Milling. Translated from Russian by M. Falkner and Theodor Fjelstrup, 3rd Impression. Lodon, United Kingdom: George Routledge & Sons Ltd.
35. Marston, H. 1937. The development of the modern British roller mill. Technical Educations Series, Pamphlet No. 7, 2nd rev. ed. London, United Kingdom: The National Joint Industrial Council for the Flour Milling Industry.
36. McCabe, W.L. and J.C. Smith. 1976. Unit Operations of Chemical Engineering, 3rd Ed. New York: McGraw Hill Book Co.
37. Metals Handbooks(1987). in properties and selection iron and steel. Vol.1, American Society for metals.
38. Naylor, J.L. and R. Smith. 1981. Roller mills (Current state of the industry). ASAE Paper No. 81-3027. St. Joseph, MI: ASAE.
39. Neirnberger, F.F. and speed on first break grinding of wheat. A.O.M. Bulletin No. 3154. Kansas City, MO: Association of Operative Millers.
40. Physical properties of Plant and Animal Material Nuri N. Mohsenin. Gordon and Breach Science Publishers.
41. Richter, D.W. 1954. Friction coefficient of some agricultural materials. Agricultural Engineering. 35(6) : p.411-413.
42. Schneider, S. 1982. 1981-82. A.O.M. roller mill survey. A.O.M. Bulletin. Presented at the annual technical conference and trade show. Atlanta, GA: Association of Operative Millers.
43. Smith, R.M. and J.l. Naylor. 1981. History of grinding (The development of the roller mill). ASAE Paper No. 81-3026. St. Joseph, MI: ASAE.
44. Snyder, L.H., W.L. Roller, and G.E.Hall. 1967. Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces. Trans. of the ASAE. 10(3) : p.411-413, 419.

제 4 장

세라믹 평롤과 회주철 평롤 분쇄기의 쌀 분쇄 소요에너지와 분쇄 생성물의 특성분석

제 4 장 세라믹평롤밀과 회주철평롤밀의 쌀 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특성분석

제 1 절 서 설

우리 나라 주식인 쌀을 가공산업화 하기 위한 연구의 일환으로 쌀가공의 기초가 되는 쌀가루 제조에 있어서 전처리 하거나 롤의 종류에 따라 쌀가루의 성질에 큰 영향을 미치기 때문에 가공용도에 적합한 쌀가루의 제조 필요성이 요구되므로 본 연구를 수행하였다. 일반적으로 분쇄기는 회주철롤밀이 사용되는데, 회주철 롤을 사용시 분쇄물에 섯가루 혼입으로 인한 인체의 부작용을 초래하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 마모가 쉽게 일어나지 않고, 부식이 없으며, 반영구적 특성을 가진 세라믹 평롤밀을 제작하여 실험하였다. 국내에서 사용하고 있는 Roller mill 경우 roller의 소재는 회주철 성분으로 구성되어 있어 식품 분쇄시 섯가루 혼입을 근본적으로 방지한다는 것은 상당히 어려운 문제점으로 지적되었다. 곡물을 분쇄 하기 위해서는 식품 분쇄업체(방앗간)를 이용하는데, 이 경우 거의 금속 roller mill을 사용함으로써 분쇄물에 섯가루 혼입의 문제를 근본적으로 해결하기란 어려운 과제이다.

기존 회주철롤에 대한 중금속 오염도를 측정한 실험이 이미 선행되었지만 아직 세라믹 평롤과 비교실험의 선행연구가 없었으므로 본 연구는,

회주철롤의 섯가루 혼입의 문제점 해결을 위해 세라믹 평롤밀을 제작하여 회주철밀과 비교 실험을 하였다. 분쇄시 두 roller는 서로 반대 방향으로 회전하는데, 회전 속도비가 1:1인 경우 압축력에 의하여 분쇄되지만, 두 roller의 회전 속도비의 차이가 클수록 식품 분쇄물에 전단응력이 증가되어 연성이 큰 재료에서는 마모에 의하여 미분쇄의 특성을 유도할 수 있기 때문에 밀 제분공정에서는 회전 속도비가 1 : 2.5의 경우 백색도가 가장 좋다고 연구 보고되었으며, 섬유질이 많은 식품인 고추에서는 절단(찢어짐)에 의하여 입도 감소를 증가시킬 수 있다. 즉 roller mill을 이용한 식품의 분쇄 효율은, roller에 가해지는 힘의 작용력 크기, 방향 및 각도(압축력 혹은 전단력), roller 속도 등에 의해서 영향을 받는 것이 그 원인이다. 분쇄시 작용된 부하는 분쇄될 물질의 탄성한계를 약간 초과하면 분쇄가 되고, 그 이하이면 복원되어 열로 변환된다. 실제로 분쇄장치에 공급되는 에너지의 1~ 2% 정도만이 분쇄물의 표면 에너지를 증가시키는데 기여하고, 즉 분쇄에너지로 변하고, 98%이상은 열로 소비된다. 그러므로 실제 분쇄기 설계에서는 분쇄시 소요되는 분쇄 에너지, 즉 분쇄동력비가 가장 중요한 역할을 하게 된다. 분쇄는 비교적 큰 동력이 소요되는 작업으로서 소요동력의 크기는 분쇄할 원료와 분쇄 생성물의 크기 및 처리량, 분쇄방식, 분쇄기의 종류, 원료의 물리적 특성 등 여러 가지 성질에 의하여 크게 좌우된다. 분쇄기의 성능을 분석하기 위해서는 분쇄입자의 크기나 모양을 결정할 수 있는 방법이 필요하다. 또한 분쇄시 소요동력은 원료의 종류, 수분함량, 분쇄생성물의 입도, 투입률, 분쇄기의 작동조건 등에 의하여 영향을 받기 때문에 정확한 소요동력을 결정하는 것은 쉽지 않고, 기존의 분쇄에 관한 연구는 분쇄 생성물의 특성에 관해서만 연구가 수행되어졌고, 분쇄기의 특성에 관한

연구는 미비한 편이다.

본 연구의 목적은 기존의 회주철물을 대체할 수 있는 범용 세라믹 롤의 설계 및 제작에 관한 연구를 수행하여 세라믹 평롤밀을 이용하여 다양한 물리적 성분 특성 및 화학적 조성을 가진 식품의 분쇄능력을 분석하기 위하여 롤간격, 속도, 분쇄물의 롤 통과횟수의 3가지 변수로 실험을 하여, 식품가공에 적합한 분쇄생성물의 특성을 규명하고, 분쇄시 소요되는 에너지의 측정과 세라믹 평롤밀의 효율적인 작동조건과 최적의 설계조건을 규명하여 분쇄의 기초자료를 제공하고자 하였다.

제 2 절 재료 및 실험방법

1. 공시재료

본 연구에서 1차적 예비실험단계로 공시재료는 1997년도 강원도 철원에서 재배된 오대벼 품종으로 춘천농협에서 도정된 백미(품질 인증미)를 구입하여 상온(24℃)에서 저장하여 사용하였으며, 원료의 일반 성분 조성은 표 4-1과 같다.

표 4-1. 공시재료의 일반 성분 조성 (%)

수 분	조단백질	조지방	조회분	탄수화물
11.5	7.5	0.6	0.6	79.8

2. 실험장치

가. 분쇄기

본 연구에서는 소요동력 3마력(model KMi03HK1)의 세라믹 평롤과 회주철롤을 제작하여 사용하였다. 두 개의 롤은 스퍼기어(spur gear)를 사용하여 속도비를 조절할 수 있도록 제작하였으며, 본 실험에서는 분쇄 속도비를 2:1로서 실험하였다.

나. 토오크 변환기

분쇄시 소요되는 소요동력(입력토크)을 측정하기 위하여 토오크 변환기(TP-10KMCB)를 사용하였다. 토오크 변환기의 정격용량은 10kgf·m이고, 입력전압은 교류 2Volt를 이용하였다. 토오크 변환기에서 읽혀지는 Data값은 입력토크 값으로 이 값들은 Voltage로 나타난다. Voltage로 읽혀진 Data값들은 아래의 식에 의해서 토크(kgf·m)값으로 변환하였다.

$$\text{토크 (Torque)} = 1.764 \times \text{Voltage} \quad (1)$$

위의 식은 토오크 변환기의 성적표를 이용하여 계산되어진 것이다.

다. 스트레인 증폭기

스트레인 게이지를 사용하여 각종 변형을 측정하는 반송파형 스트레인 증폭기(YOKOGAWA 3134-01)를 사용하였다. 출력전압은 교류 2Volt로 설정하였고, 토오크 측정을 위한 Strain Range는 5000×10^{-6} 스트레인으로 설정하였으며, 내장된 Lowpass filter의 Band Limit 설정은 100Hz로 설정하였다. 또한 스트레인 증폭기의 최대강도는 $0.5V/10 \times 10^{-6}$ 스트레인으로 하였다.

라. 자료수집장치

토포크 변환기와 스트레인 증폭기로부터 받아들여진 Data값을 수집하기 위하여 자료수집장치(Daqbook/100)를 사용하였다. 자료수집장치의 분해능은 12bits이고, Range 설정은 Bipolar Mode의 $\pm 5\text{Volt}$ 로 설정하였다.

마. 쌀의 공급장치

쌀과 분쇄된 쌀가루를 일정한 속도로 분쇄기에 공급하기 위하여 Vibrator(SMF-01S, 신창)를 롤 상부에 설치하였다.

바. 속도 변환기

식품 분쇄물의 물리적 성질에 따른 분쇄생성물의 특성에 미치는 영향을 분석하고자 속도 변환기(Inverter : SV015iG-2, LG)를 장착하여 롤의 회전속도를 0~102rpm까지 조절할 수 있도록 하였다.

사. 입도분포 조사장치

쌀 분쇄생성물의 입도분포는 Sieve number 20, 30, 40, 70, 100, 200, 270, pan을 사용하여 Sieve shaker(홍진정밀, HJ-215)로 15분간 진탕한 후 각 Sieve에 잔류된 쌀가루의 양을 전기저울(AND FA300KV, JAPAN)로 칭량하여, 입도분포를 분석하였다. 또한 수분함량은 건조기(국제, SDO 135) 105 \pm 5 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 건조시킨후 데시케이터에 넣어 실온에서 방치냉각시킨 다음 무게를 측정후 다시 1시간 건조하여 항량이 될 때까지 같은 조작을 반복한후 수분함량을 측정하였다.

3. 실험방법

실험용 롤을 설계 및 제작하여 분쇄조건(롤간격, 분쇄 속도, 분쇄물 처리횟수)을 변화 시켰을 때 분쇄생성물의 특성과 분쇄 소요에너지에 미치는 영향을 측정하기 위하여 아래와 같은 조건하에서 실험을 하였다. 공시재료인 쌀은 상온에서 1시간 수침 시킨 후, 건포로 쌀 표면의 물기를 제거한 후 실험에 이용하였다. 분쇄생성물의 특성과 분쇄시 소요되는 동력측정을 위한 분쇄조건은 아래 표 4-2와 같다.

표 4-2. 분쇄생성물의 특성과 분쇄소요에너지 측정을 위한 분쇄조건

구 분	롤간격 (mm)	롤속도 ($R_{fast} : R_{slow}$)	롤 통과횟수
수 준	0.05	47.4 : 23.7 rpm	1
	0.13		2
	0.25	101.6 : 50.8 rpm	3
	0.50		

분쇄물인 쌀의 직경은 평균적으로 $R = 2\text{mm}$ (M1형 vernier calipers, Mitutoyo, Japan.을 사용하여 4분법을 이용하여 측정한 값임)이므로, 본 실험에서는 분쇄시 롤의 간격을 쌀 직경의 $R/4=0.50$, $R/8=0.25$, $R/16=0.13\text{mm}$, $R/32=0.05\text{mm}$ 의 4수준으로 하여 실험을 하여 분쇄생성물의 특성과 분쇄 소요에너지를 측정하였다.

분쇄시 두 roller 간의 회전 속도비는 R_f (고속 roll) : R_s (저속 roll) = 2 : 1로 고정하였고, 분쇄 속도를 $R_{fast} : R_{slow} = 47.5 : 23.8$, $R_{fast} : R_{slow} = 101.6\text{rpm} : 50.8\text{rpm}$ 의 2 수준으로 분쇄하여 분쇄속도가 분쇄소요에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 분쇄속도를 최대 47.4, 101.6rpm으로 선정한 것은 일반적으로 우리 나라에서 사용하고 있는 분

쇄 속도는 50rpm 정도에서 쌀 분쇄를 하고 있기 때문에, 본 실험용으로 제작한 세라믹 평롤에서도 47.5rpm과 약 2배인 100rpm을 설정하여 비교 실험을 하였다.

롤을 통과한 공시재료의 쌀은 같은 간격, 같은 속도 하에서 3회 통과를 시켜, 각각의 통과시 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특성을 분석하였다. 현행 우리 나라 대부분의 식품분쇄업체에서 쌀 분쇄시 2차 분쇄까지만 이루어지고 있는 실정이어서 본 연구에서는 그 보다 한 번 더 롤을 통과시켜 비교 실험을 하였다.

제 3 절 결과 및 고찰

본 연구의 수행을 위하여 실험용으로 제작된 회주철과 세라믹 두 종류의 롤을 이용하여 롤간격, 분쇄속도, 분쇄처리횟수 등의 분쇄조건에 따른 분쇄생성물의 특성 및 분쇄소요에너지를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같이 분석되었다.

1. 롤간격, 분쇄속도, 분쇄처리횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

가. 롤간격이 분쇄생성물에 미치는 영향

표 4-3과 그림 4-1은 회주철평롤과 세라믹평롤을 이용하여 롤간격증가가 분쇄생성물에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다.

표 4-3, 그림 4-3에서 살펴보면 롤간격 0.05mm에서 회주철롤과 세라믹평롤 간에는 272, 274 μ m로 근소차를 보여 분쇄생성물의 평균입도는 큰

유의차가 없었으며, 0.50mm에서도 449, 425 μ m로 분쇄생성물의 평균입도에는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 물간격 0.13mm경우는 세라믹 평롤이 295 μ m, 회주철롤이 362 μ m로 세라믹 평롤이 회주철롤보다 67 μ m정도 더 미분이 되었고, 0.25mm경우도 세라믹 평롤이 83 μ m정도 더 미분쇄 되는 것으로 분석되어 분쇄효율이 향상된 것으로 나타났다.

표 4-3 세라믹 평롤과 회주철롤을 이용하여 쌀 분쇄시 물간격이 분쇄생성물에 미치는 영향

회주철롤		세라믹 평롤	
물간격 (mm)	평균입도 (μ m)	물간격 (mm)	평균입도 (μ m)
0.05	272 c	0.05	274 b
0.13	362 b	0.13	295 b
0.25	357 b	0.25	274 b
0.50	449 a	0.50	425 a

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

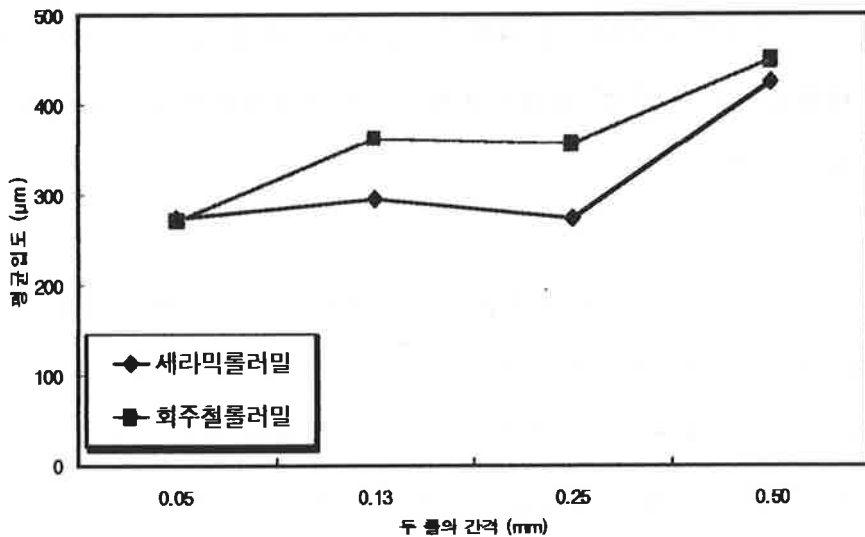


그림4-1. 물간격증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

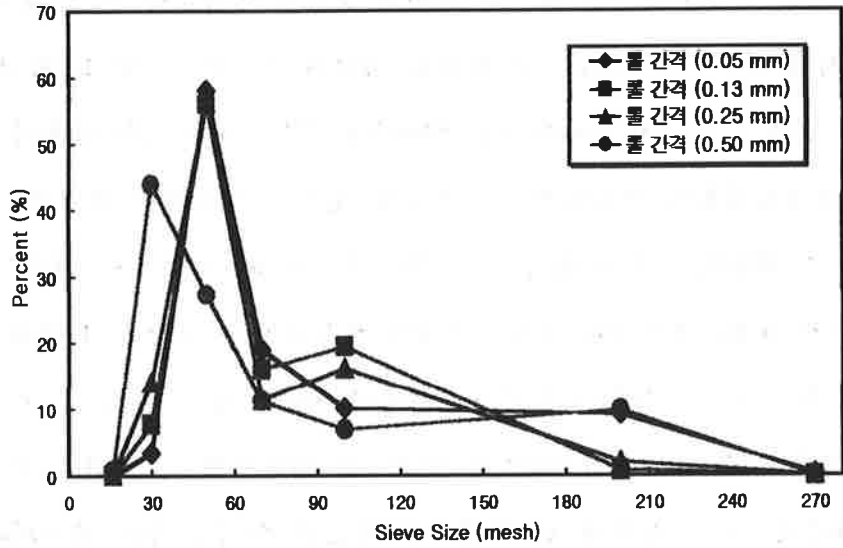


그림 4-2. 회주철평몰을 이용하여 싯분쇄시 물간격변화에 따른 체구간별 입도분포

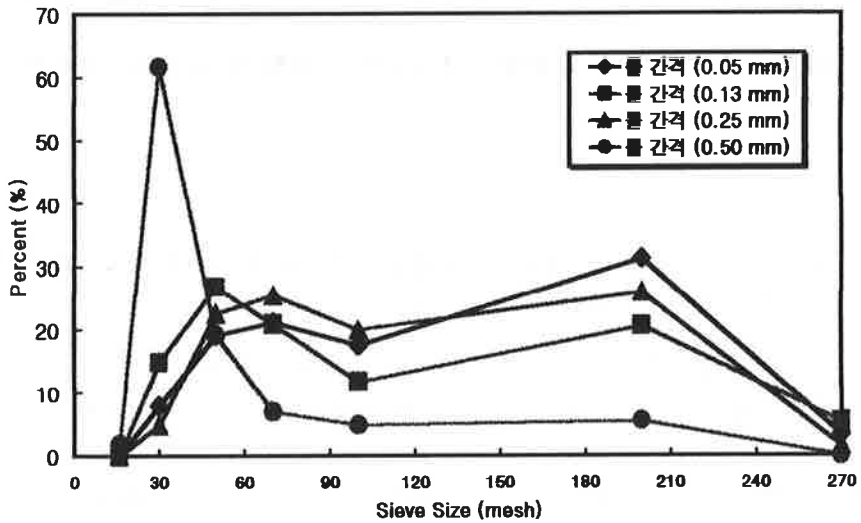


그림 4-3. 세라믹평몰을 이용하여 싯분쇄시 물간격변화에 따른 체구간별 입도분포

그림 4-2, 4-3은 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 롤 간격변화에 따른 체 구간별 입도분포를 나타낸 것이다. 그림 4-2에서 보듯이 회주철의 간격 0.50mm에서는 30mesh통과분이 45%, 50mesh통과분이 55%로 분쇄생성물이 생성됨으로서 회주철 평롤은 롤간격이 좁혀져도 미분쇄에 큰 영향이 미치지 않음이 분석되었다. 4-3에서 보듯이 세라믹 평롤은 간격 0.5mm에서 30mesh입자가 60% 생성되었고 롤간격 0.25mm에서 0.05로 좁혀지면서 200mesh입자가 15%에서 30%로 증가 되었다. 기존의 회주철들은 주로 50mesh입자크기의 쌀가루를 생산하였고, 세라믹 평롤은 200mesh입자크기의 미분쇄 된 쌀가루를 생산할 수 있으므로 롤분쇄기에서는 롤의 재질이 분쇄에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

나. 롤의 분쇄속도 변화가 분쇄생성물에 미치는 영향

표 4-4와 그림 4-4은 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용한 롤의 분쇄속도 변화가 쌀가루의 분쇄생성물에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다.

표 4-4. 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 롤의 분쇄속도가 쌀가루 분쇄생성물에 미치는 영향

회주철 평롤		세라믹 평롤	
분쇄 속도(rpm) (R _f : R _s)	평균입도 (μ m)	분쇄 속도(rpm) (R _f : R _s)	평균입도 (μ m)
47.4 : 23.7	375 a	47.4 : 23.7	299 a
101.6 : 50.8	368 a	101.6 : 50.8	327 a

* R_f = Fast roller, R_s = Slow roller

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

표 4-4, 그림 4-4에서 살펴보면 분쇄속도 47.4rpm의 경우 회주철 평롤은 분쇄생성물의 평균입도가 375 μm , 세라믹 평롤은 299 μm 로 세라믹 평롤이 약 76 μm 정도 더 미분쇄 되었고, 분쇄속도 101.6rpm의 경우도 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 41 μm 정도 더 미분쇄 되는 것으로 분석되었다. 쌀분쇄에서 롤의 분쇄속도 47.4~101.6rpm 범위인 분쇄조건에서는 쌀가루의 입도크기에 영향을 미치지 않으므로 분쇄속도가 증가되어 분쇄량도 증가시킬 수 있음을 분석 할 수 있었다.

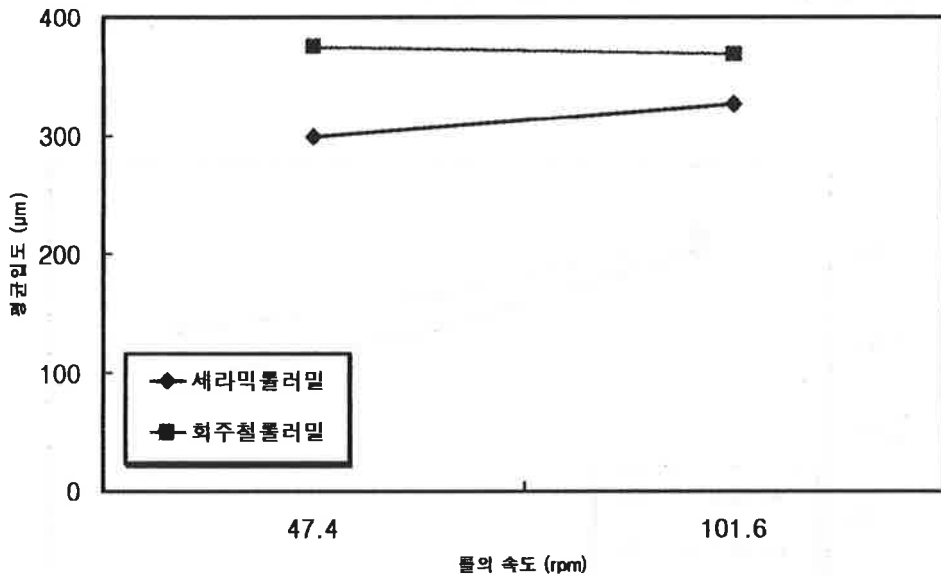


그림 4-4. 분쇄 속도 변화가 분쇄생성물에 미치는 영향

다. 분쇄물의 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

표 4-5와 그림 4-5은 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용한 분쇄처리횟수가 쌀가루분쇄생성물에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다.

표 4-5. 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용한 쌀 분쇄시 분쇄처리횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

회주철 평롤		세라믹 평롤	
분쇄처리횟수 (회)	평균입도 (μm)	분쇄처리횟수 (회)	평균입도 (μm)
1	424 a	1	402 a
2	349 b	2	312 b
3	307 c	3	248 c

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

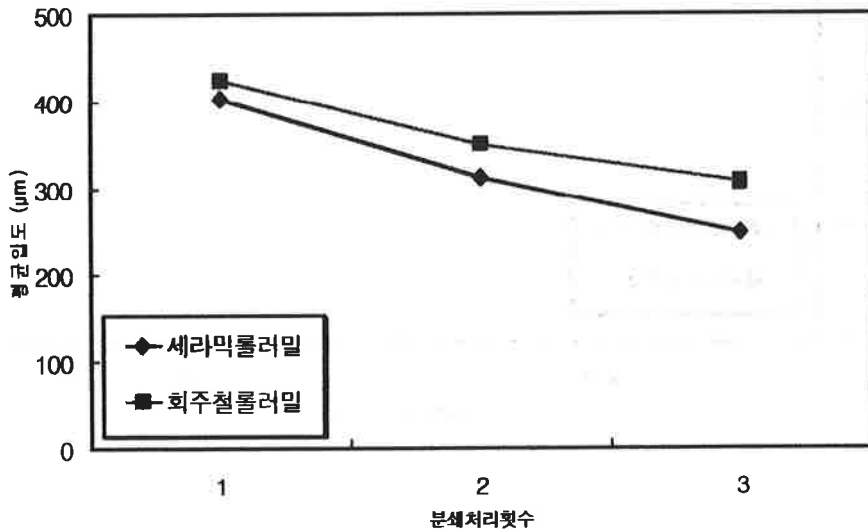


그림 4-5. 분쇄물의 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물의 평균입도에 미치는 영향

표 4-5에서 살펴보면 쌀가루 분쇄물의 분쇄처리횟수가 1회일 때 회주철 평롤은 424 μm , 세라믹 평롤은 402 μm 로, 세라믹 평롤이 22 μm 정도 미분화 되었고 분쇄처리횟수가 2회일 때는 회주철 평롤이 349 μm , 세라믹 평롤이 312 μm 로, 세라믹 평롤이 37 μm 정도 미분화되었지만 분쇄생성물의

평균입도는 큰 유의차를 나타내지 않았고, 3회 통과 시에는 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 60 μ m 정도 더 미분쇄 되어 분쇄횟수를 증가시켰을 경우 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 미분쇄 효율이 증가되는 것으로 분석되었다.

라. 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄생성물의 입도분포

그림 4-6~4-9은 분쇄속도 47.4rpm일 때 롤간격에 따른 분쇄처리횟수 증가가 쌀가루분쇄생성물의 입도분포에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과이다.

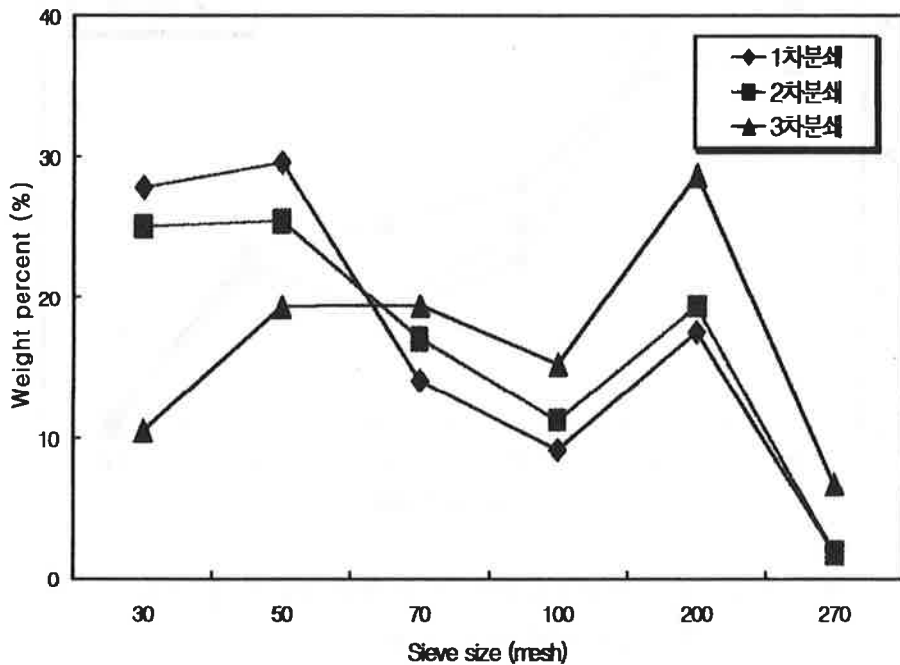


그림 4-6. 회주철 롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄속도40rpm 롤간격 0.05mm 분쇄조건에서 분쇄처리 횟수가 쌀가루 입자크기에 미치는 영향

그림 4-6에서 살펴보면 분쇄물 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시 30~50mesh영역이 60%, 50~100mesh영역이 25%, 100~200mesh영역이 15%범위로 나타났고, 2차 분쇄시는 30~50mesh영역이 50%, 50~100mesh영역이 30%, 100~200mesh영역이 20%범위로 나타났으며 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 30%, 50~100mesh영역이 35%, 100~200mesh영역이 35%범위로 분석되었다. 분쇄처리 횟수 2차까지는 30~50mesh영역이 50%였으나 분쇄처리 횟수 3차후에는 50~200mesh로 입도 크기의 분포영역이 넓어짐을 분석 할 수 있었다.

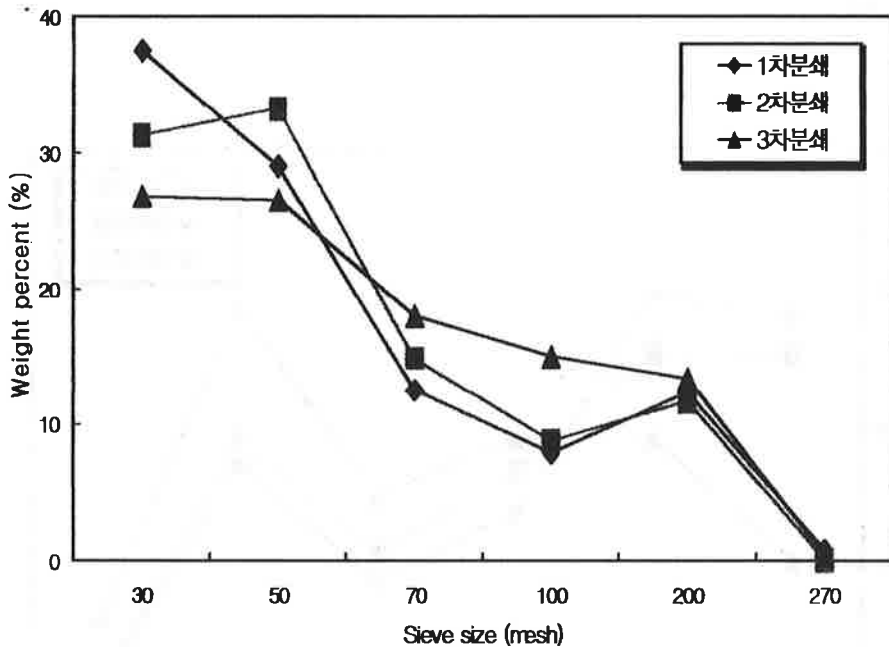


그림 4-7. 롤간격 0.13mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-7에서 살펴보면 롤 통과횟수에 따른 입도분포 변화는 1차 분쇄시는 30~50mesh영역이 65%, 50~100mesh영역이 23%, 200mesh영역이 12%정도로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 65%, 50~

100mesh영역이 25%, 200mesh영역이 10%정도, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 50%, 50~100mesh영역이 35%, 200mesh영역이 15%정도로 분석었다. 쌀분쇄시 롤간격 0.13mm까지 분쇄처리 횟수가 증가하여도 쌀가루의 입도크기는 더 작아지지 않음을 분석 할 수 있었다.

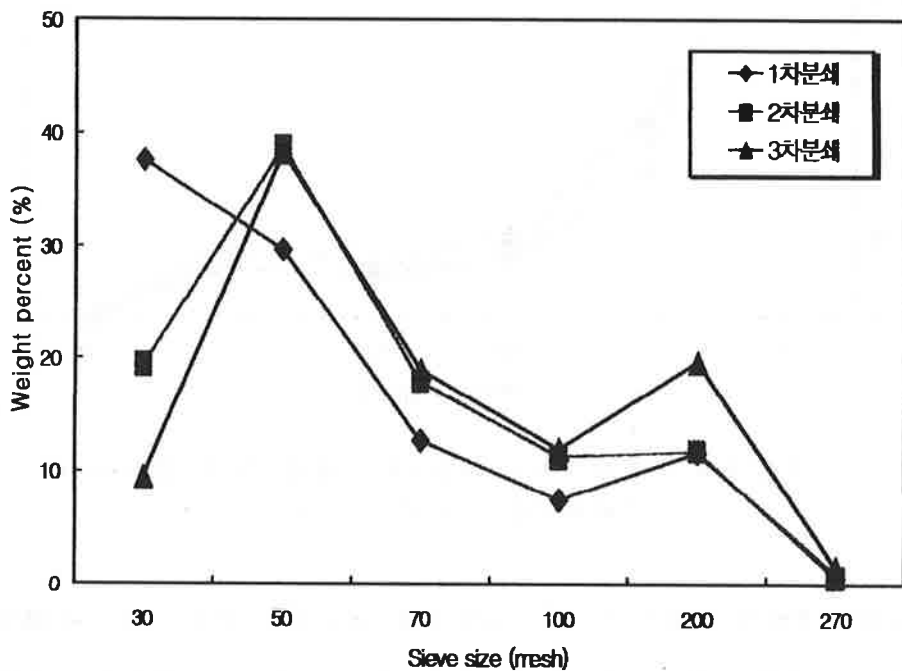


그림 4-8. 롤간격 0.25mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-8에서 살펴보면 롤 통과횟수에 따른 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 70%, 50~100mesh영역이 20%, 200mesh영역이 10%정도로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 60%, 50~100mesh영역이 30%, 200mesh영역이 10%정도로 나타났으며 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 50%, 50~100mesh영역이 30%, 200mesh영역이 20%범위로 분석되었다. 쌀분쇄시 롤간격이 0.25mm에서 분쇄처리횟수가 증가하

여도 쌀가루의 입도크기는 더 이상 미 분쇄 시킬 수 없음이 분석되었다.

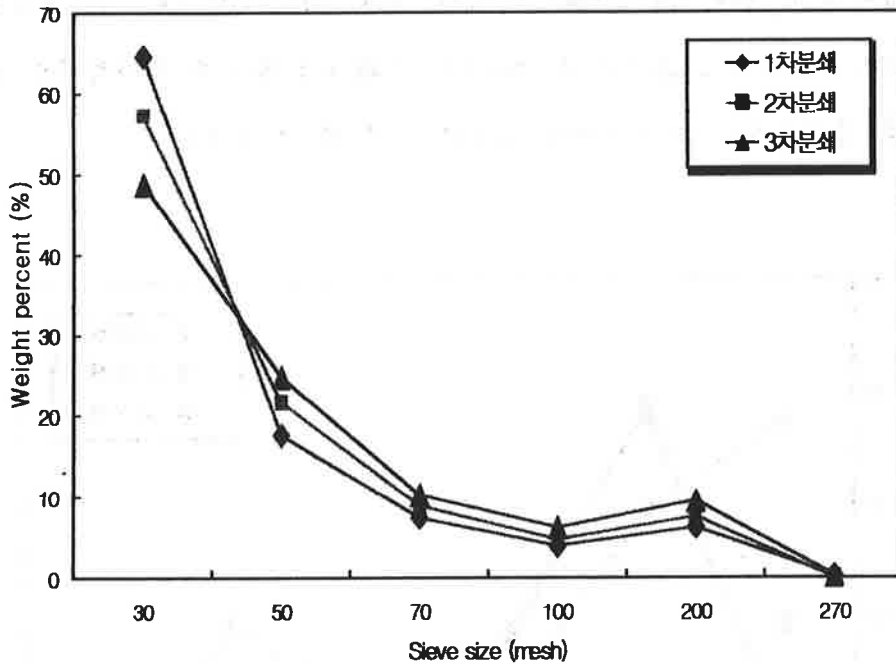


그림 4-9. 롤간격 0.50mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-9에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시 30~50mesh영역이 80%, 50~100mesh영역이 12%, 200mesh영역이 8%범위로 나타났고, 2차 분쇄시는 30~50mesh영역이 80%, 50~100mesh영역이 13%, 200mesh영역이 7%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 75%, 50~100mesh영역이 15%, 200mesh영역이 10%범위로 분석됨으로서 롤간격 0.5mm 분쇄조건에서는 분쇄처리 횟수가 증가하여도 쌀가루의 입도 크기는 작아짐이 않음이 분석되었다. 롤간격이 0.15~0.5mm범위에서는 분쇄처리 횟수가 증가하여도 쌀가루입자의 크기는 작아지는 경향이 미비하였으나 롤간격 0.05mm에서는 3차 분쇄처리 과정에서 쌀가루의 입자크기를 더 분쇄시킬 수 있음을 분석 할 수 있었다.

그림 4-10~4-13는 분쇄속도를 47.4rpm에서 101.6rpm으로 증가시켰을 때 롤간격별 분쇄물 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물의 입도분포에 미치는 영향에 대하여 나타낸 것이다.

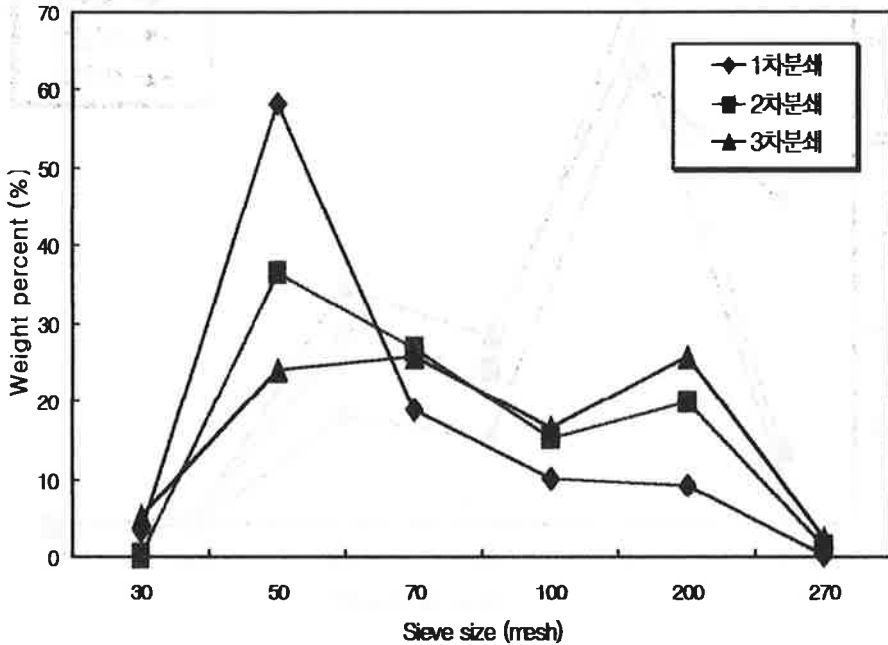


그림 4-10. 회전롤을 이용하여 쌀분쇄시 분쇄속도 101.6rpm, 롤간격 0.05mm 분쇄조건에서 분쇄처리횟수가 쌀가루 입자크기에 미치는 영향

그림 4-10에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차분쇄시에는 30~50mesh영역이 60%, 50~100mesh영역이 30%, 200mesh영역이 10%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 35%, 50~100mesh영역이 45%, 200mesh영역이 20%범위로 나타났다. 1차 분쇄에 비해 30~50mesh영역은 50%정도 감소하였고, 50~100mesh영역은 증가하였으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 30%, 50~100mesh영역이 40%, 200mesh영역이 30%범위로 분석되어 분쇄처리횟수가 증가함에 따라 롤간격

0.05mm 분쇄조건에서 분쇄속도 40rpm에서 80rpm을 증가시켜도 쌀가루 입자크기에는 큰 영향을 미치지 않았음을 분석 할 수 있었다.

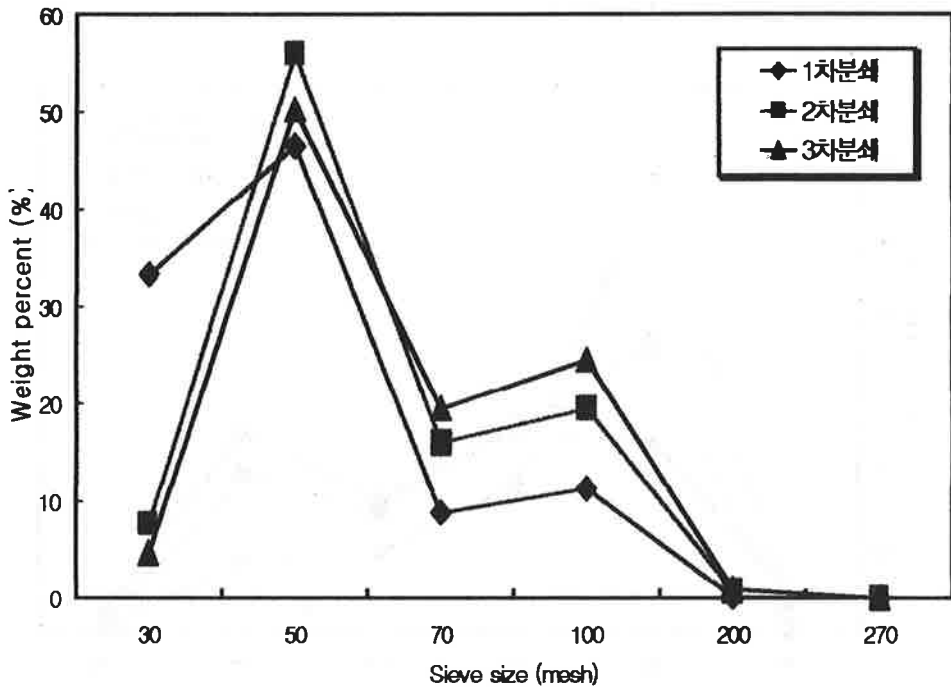


그림 4-11. 물간격 0.13mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-11에서 살펴보면 물 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 80%, 50~100mesh영역이 20%로 미분쇄 영역에서는 분쇄생성물이 거의 나타나지 않았고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 65%, 50~100mesh영역이 35%로 나타나, 1차 분쇄와 마찬가지로 미분쇄 영역에서의 분쇄물의 생성은 거의 없었으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 55%, 50~100mesh영역이 44%, 200mesh영역이 1%범위로 분석되었으나 미분쇄 영역에서는 분쇄물이 생성되지 않아 분쇄효율이 상당히 감소한 것으로 분석되었다.

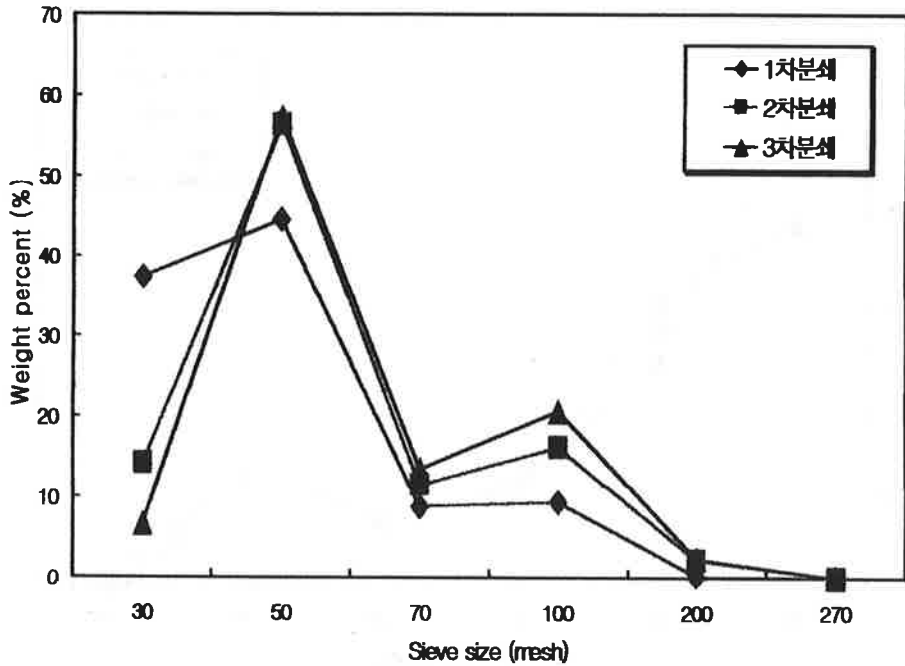


그림 4-12. 물간격 0.25mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-12에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 82%, 50~100mesh영역이 12%로 200mesh 영역에서는 분쇄생성물이 거의 나타나지 않았고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 70%, 50~100mesh영역이 28%, 200mesh영역이 약 2%가 생성되어 1차 분쇄와 마찬가지로 200mesh 영역에서는 분쇄효율이 감소하였고, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 64%, 50~100mesh영역이 34%, 200mesh영역이 2% 범위로 분석되었으며, 전체적으로 200mesh 영역에서는 분쇄 생성물이 감소하여 분쇄효율이 저하되는 것으로 분석되었다.

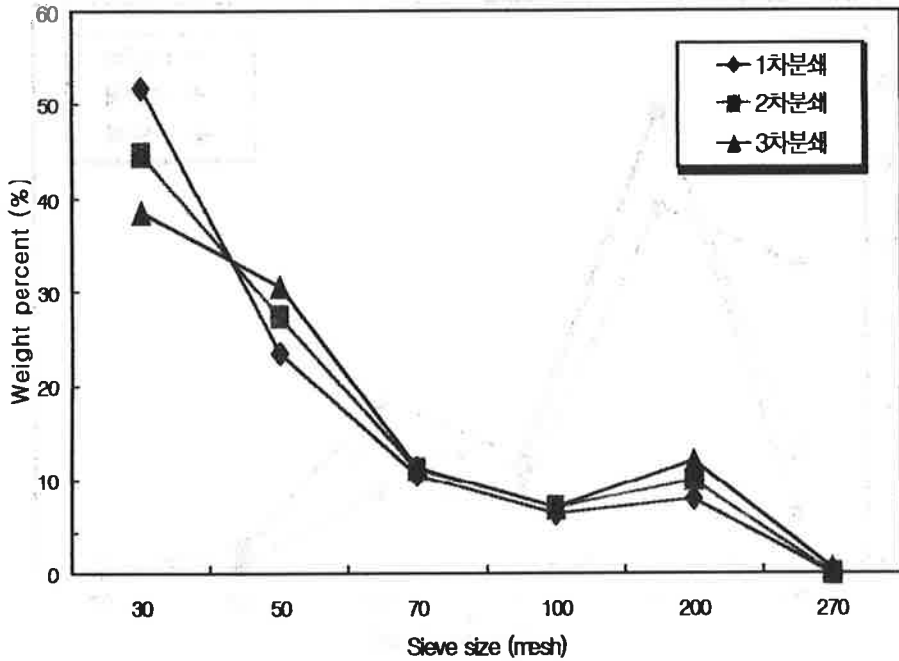


그림 4-13. 롤간격 0.50mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-13에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 75%, 50~100mesh영역이 17%, 200mesh영역이 8%로 나타나 롤간격 0.25mm보다 200mesh 영역에서는 분쇄효율이 조금 증가하였고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 72%, 50~100mesh영역이 18%, 미분쇄 영역에서 약 10%가 생성되었으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 69%, 50~100mesh영역이 18%, 200mesh영역이 13%범위로 분석되었으나 분쇄효율 면에서는 저하되는 것으로 분석되었다.

전체적으로 회주철 치형롤의 경우 간격별 분쇄처리횟수 증가에 따른 분쇄생성물의 입도분포는 분쇄 속도 47.4rpm이 101.6rpm일 때보다 중간 조파쇄 영역과 미분쇄 영역에서 분쇄효율이 증가하는 것으로 분석되었다.

다. 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄생성물의 입도분포

그림 4-14~4-17는 세라믹 평롤을 이용하여 쌀분쇄시 분쇄속도 47.4rpm일 때 롤간격별 분쇄물의 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물의 입도분포에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과이다.

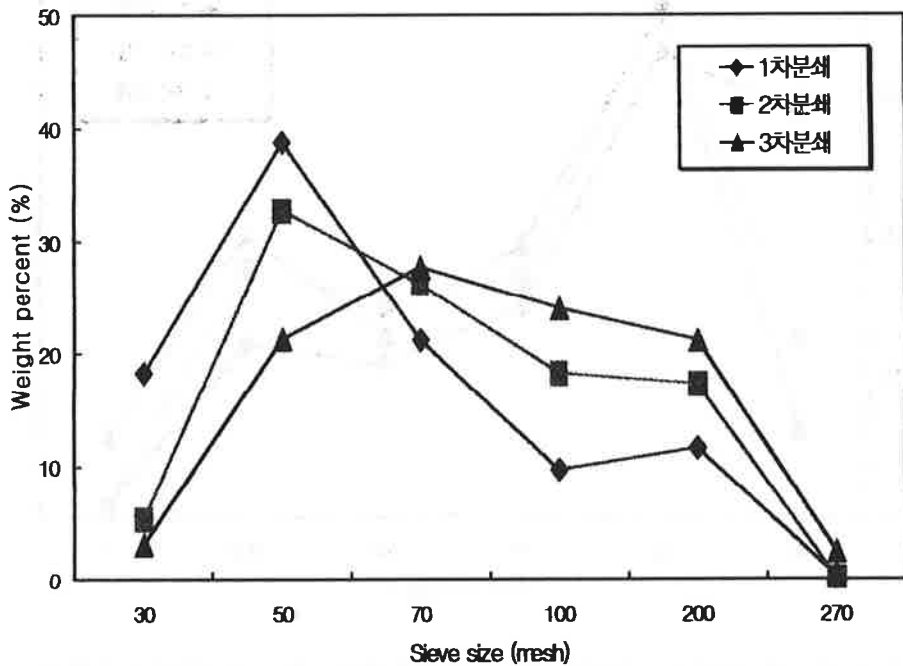


그림 4-14. 세라믹 평롤을 이용하여 쌀분쇄시 분쇄속도 40rpm, 롤간격 0.05mm 일 때 분쇄처리 횟수증가가 쌀가루 분쇄 생성물에 미치는 영향

그림 4-14에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 57%, 50~100mesh영역이 31%, 200mesh영역이 12% 범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 38%, 50~100mesh영역이 44%, 200mesh영역이 18%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 24%, 50~100mesh영역이 52%, 200mesh영역이 24%범위로 조

사되었다. 2차 분쇄처리까지 쌀가루는 50~70mesh 입자크기 분포에서 3차 분쇄처리 후 70~200mesh 입자크기 분쇄영역으로 분포됨을 분석할 수 있었다.

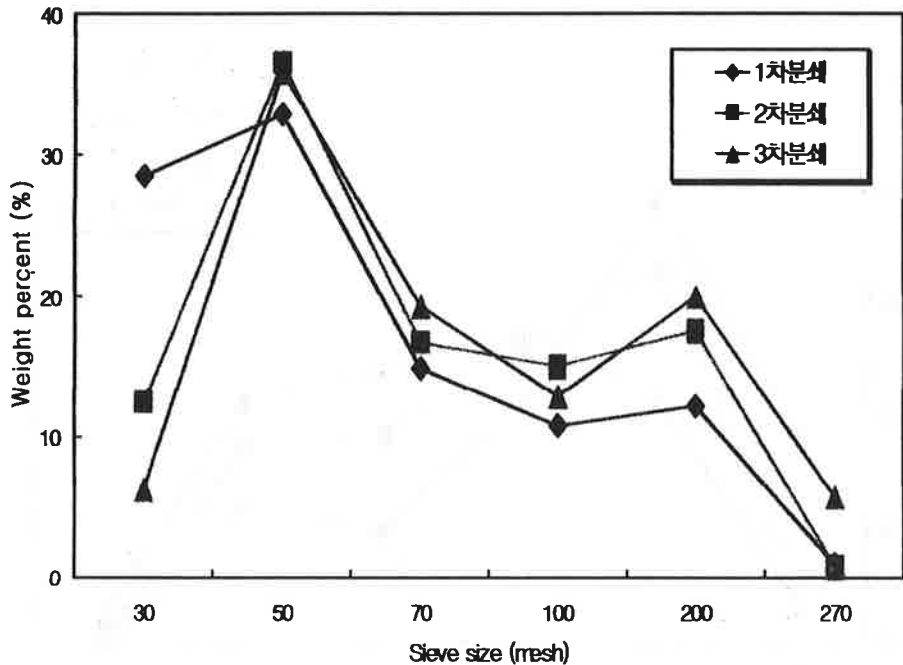


그림 4-15. 롤간격 0.13mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-15에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 62%, 50~100mesh영역이 25%, 200mesh영역이 13%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 49%, 50~100mesh영역이 31%, 200mesh영역이 20%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 42%, 50~100mesh영역이 32%, 200mesh영역이 26%범위로 분석되어 롤간격 0.05mm경우와 유사한 입도분포를 보였고, 분쇄효율도 향상된 것으로 분석되었다.

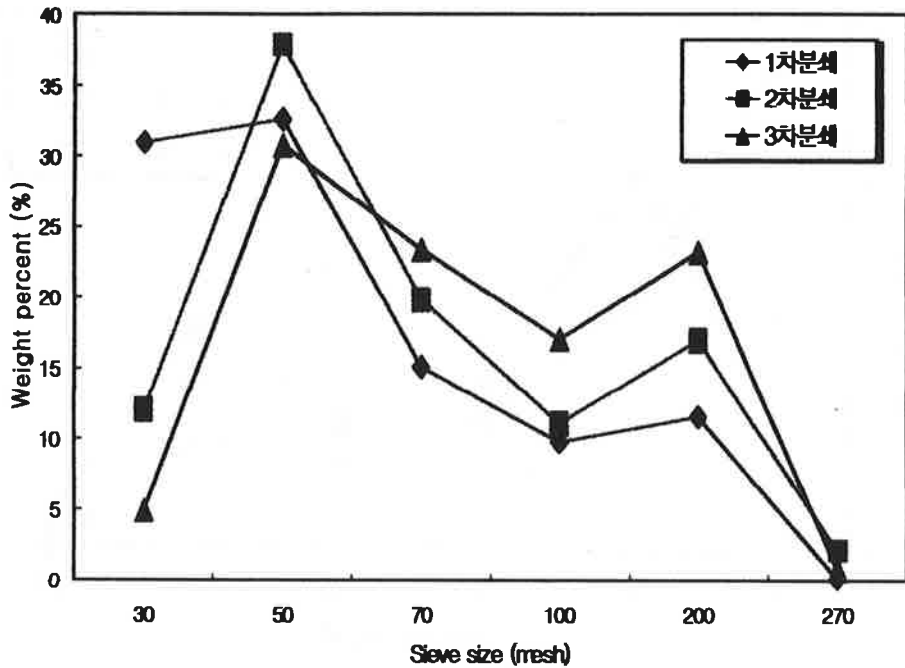


그림 4-16. 물간격 0.25mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-16에서 살펴보면 물 통과횟수별 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 63%, 50~100mesh영역이 25%, 200mesh영역이 12%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 50%, 50~100mesh영역이 31%, 200mesh영역이 19%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 35%, 50~100mesh영역이 40%, 200mesh영역이 25%범위로 분석되어 분쇄처리 횟수가 증가함에 따라 분쇄효율이 향상된 것으로 분석되었다.

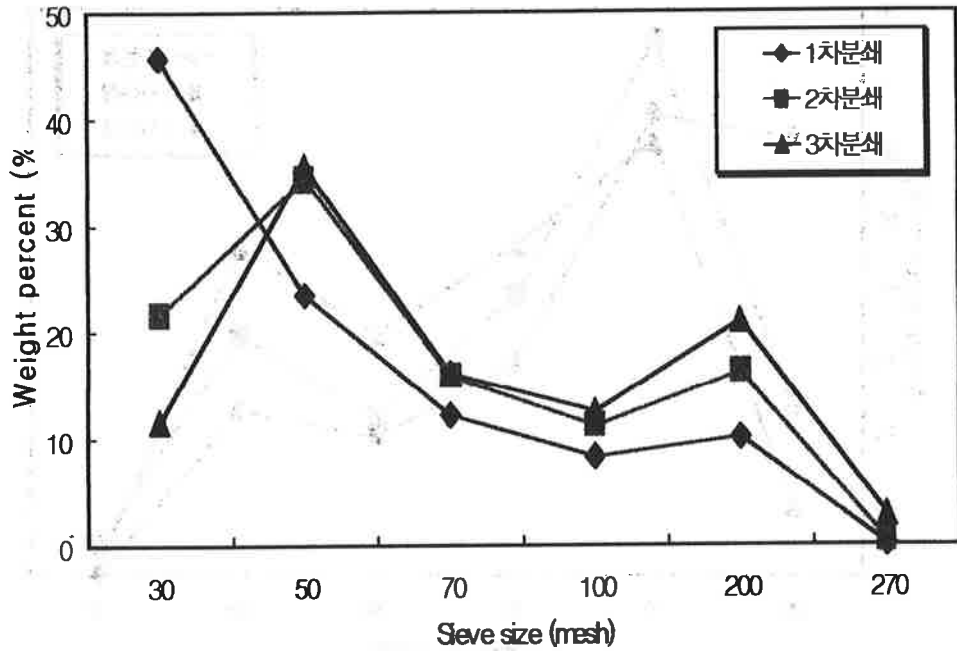


그림 4-17. 롤간격 0.50mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-17에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 69%, 50~100mesh영역이 20%, 200mesh영역이 12%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 56%, 50~100mesh영역이 27%, 200mesh영역이 17%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 47%, 50~100mesh영역이 29%, 200mesh영역이 24%범위로 분석되어 롤간격 0.25mm경우와 비슷한 입도분포를 보였고, 분쇄효율도 약간 향상된 것으로 분석되었다.

그림 4-18~4-21은 분쇄속도를 47.4rpm에서 101.6rpm으로 증가시켰을 때 롤간격별 분쇄물 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물의 입도분포에 미치는 영향에 대하여 나타낸 것이다.

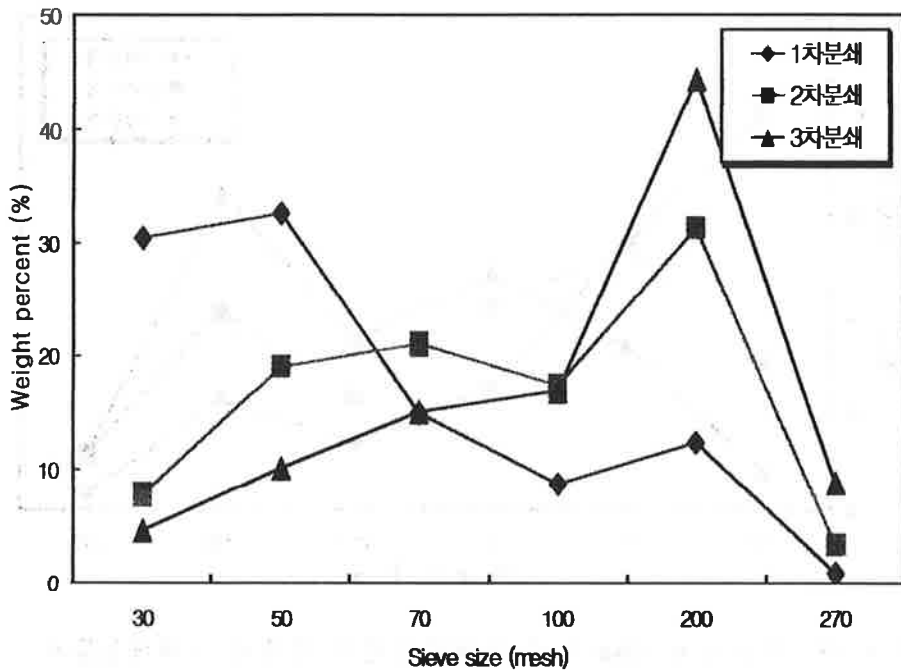


그림 4-18. 세라믹 평롤을 이용하여 쌀분쇄시 분쇄속도 101.6rpm, 롤간격 0.05mm 분쇄조건에서 롤 분쇄처리횟수가 쌀가루 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-18에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 63%, 50~100mesh영역이 23%, 200mesh영역이 24%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 27%, 50~100mesh영역이 38%, 200mesh영역이 35%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 20%, 50~100mesh영역이 42%, 200mesh영역이 38%범위로 분석되었는데, 3차 분쇄 경우 200mesh영역을 롤속도 40rpm과 비교하면 분쇄효율이 45%정도 향상된 것으로 분석되었다.

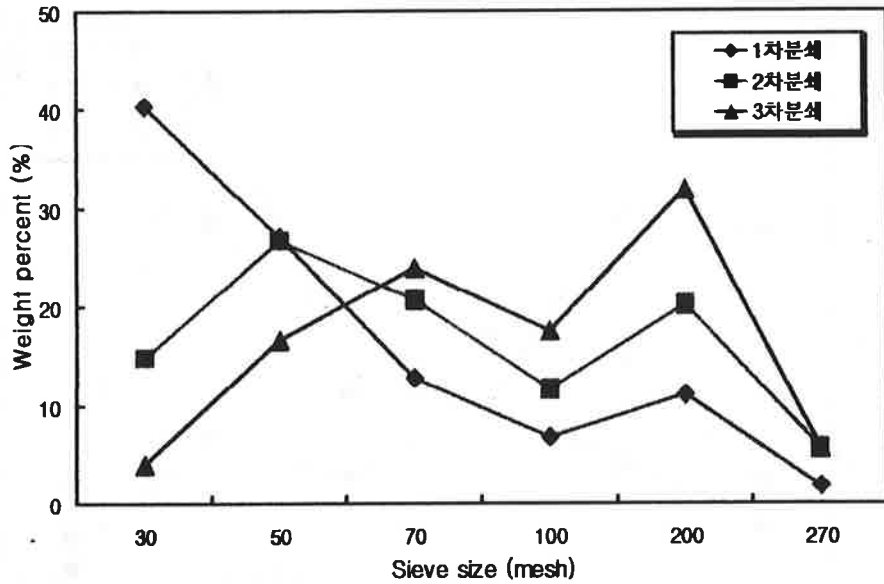


그림 4-19. 롤간격 0.13mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-19에서 살펴보면 롤 통과횟수별 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 67%, 50~100mesh영역이 20%, 200mesh영역이 13%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 41%, 50~100mesh영역이 32%, 200mesh영역이 27%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 21%, 50~100mesh영역이 42%, 200mesh영역이 37%범위로 분석되었는데, 3차 분쇄 경우 200mesh영역을 롤속도 40rpm과 비교하면 분쇄효율이 68%정도 향상된 것으로 분석되었다.

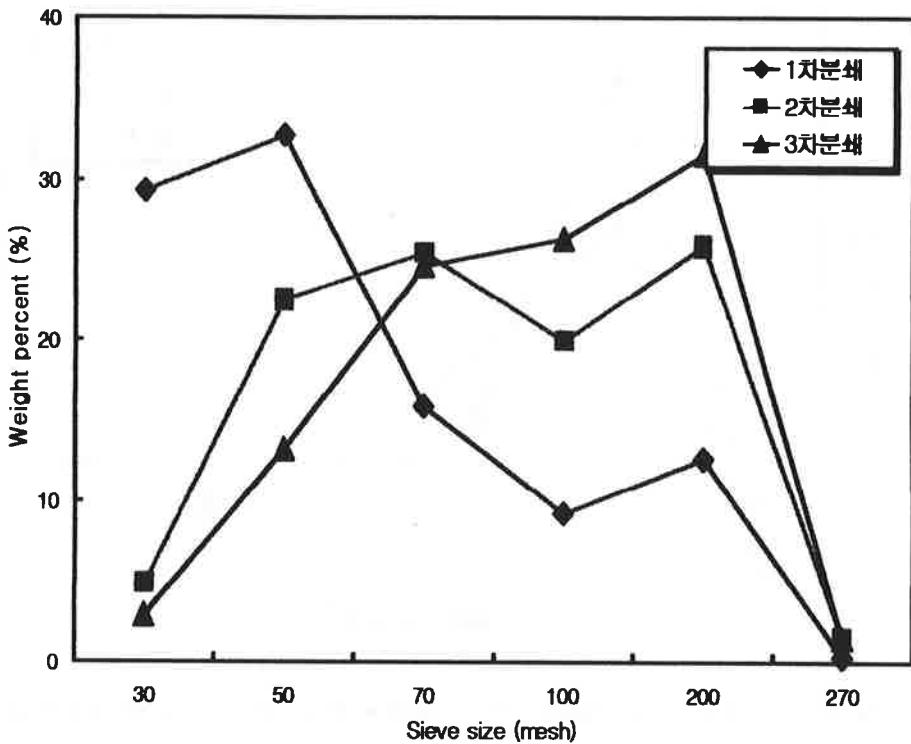


그림 4-20. 룰간격 0.25mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-20에서 살펴보면 룰 통과횟수별 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 62%, 50~100mesh영역이 25%, 200mesh영역이 13%정도로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 27%, 50~100mesh영역이 45%, 200mesh영역이 28%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 16%, 50~100mesh영역이 51%, 200mesh영역이 33%범위로 분석되었는데, 3차 분쇄 경우 200mesh영역을 룰속도 40rpm과 비교하면 분쇄효율이 73%정도 향상된 것으로 분석되었다.

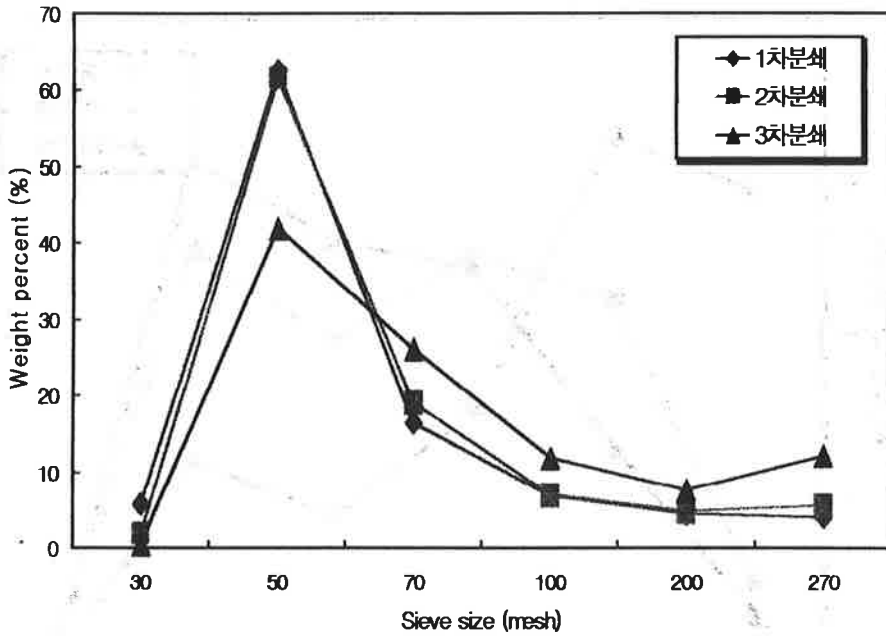


그림 4-21. 물간격 0.50mm일 때 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 4-21에서 살펴보면 롤 통과횟수에 따른 입도분포의 변화는 1차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 68%, 50~100mesh영역이 23%, 200mesh영역이 9%범위로 나타났고, 2차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 63%, 50~100mesh영역이 26%, 200mesh영역이 11%범위로 나타났으며, 3차 분쇄시에는 30~50mesh영역이 42%, 50~100mesh영역이 38%, 200mesh영역이 20%범위로 분석되었는데로, 3차 분쇄시 200mesh 경우 분쇄 영역을 분쇄 속도 40rpm과 비교하면 분쇄효율은 1.2%정도 감소되었고, 물간격 0.05, 0.13, 0.25mm보다도 분쇄효율이 상당히 감소하여 물간격이 넓은 경우 분쇄효율이 저하되어 물간격은 분쇄효율에 영향을 크게 미치는 요인으로 분석되었다.

회주철 평롤은 분쇄 속도 40rpm이 101.6rpm보다 중간조파쇄 영역과

미분쇄 영역에서 분쇄효율이 향상된 것으로 나타났으나, 세라믹 평롤은 분쇄 속도 40rpm보다 101.6rpm에서 입도의 200mesh 효율이 향상된 것으로 분석되었다.

2. 세라믹 평롤과 회주철 평롤의 분쇄생성물의 입도분포

표 4-6은 본 연구에서 설계 제작한 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄생성물의 체 구간별 입도 분포를 분석한 결과이다.

표 4-6. 회주철 평롤과 세라믹 평롤의 분쇄생성물 비교

	롤간격 (mm)	함수율 (%)	체크기 (μm , %)						평균입도 (μm)
			1190 ~590	590 ~297	297 ~210	210 ~149	149 ~74	74 ~53	
회주철 평롤	0.05	25.8	0.3	36.5	26.9	15.2	20.0	1.3	187
	0.13	25.8	7.7	56.0	16.1	19.5	0.8	0	288
	0.25	25.8	14.1	56.2	11.4	16.2	2.0	0	308
	0.50	25.8	44.7	27.3	11.2	6.9	9.9	0	319
세라믹 평롤	0.05	25.8	8.0	19.0	21.1	17.4	31.2	3.3	162
	0.13	25.8	14.9	26.8	20.8	11.8	20.3	5.4	177
	0.25	25.8	4.8	22.5	25.4	20.0	25.8	1.5	170
	0.50	25.8	63.6	19.1	7.0	4.8	5.5	0	436

표 4-6에서 살펴보면 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 함수율 (26%, w. b.), 롤간격(0.05mm), 분쇄속도(101.6rpm), 분쇄처리횟수(2회)가 모두 동일한 분쇄조건에서 분쇄생성물의 평균입도를 비교하면 아래와 같다.

- ① 회주철 평롤의 분쇄생성물은 50mesh이상이 39.5%, 50~100mesh가 42.1%, 100mesh이하가 21.3%의 입도로 나타났고, 평균입도는 187 μm 로 분석되었다.

② 세라믹 평롤의 분쇄생성물은 50mesh이상이 27%, 50~100mesh가 38.5%, 100mesh이하가 34.5%의 입도로 나타났고, 평균입도는 162 μ m로 분석되었다.

위와 같은 결과로 분쇄효율을 비교하면 평균입도 면에서는 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 평균입도가 더 미분쇄 되었고, 100mesh이하인 경우 미분쇄 효율은 13%정도 높게 분석됨으로서 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 분쇄효율이 우수하게 나타났다.

3. 분쇄생성물의 색도 측정

표 4-7은 회주철 평롤을 이용한 분쇄생성물(쌀가루)의 색도를 조사한 결과이고, 표 4-8은 세라믹 평롤을 이용하여 색도를 조사한 결과이다. 색도 측정은 롤간격(0.05~0.50mm), 분쇄속도 $R_f = 101.6\text{rpm}$ 경우이며, 쌀의 함수율은 26%일 때를 기준으로 하였다.

표 4-7. 회주철 평롤의 분쇄 경우 롤간격증가가 분쇄생성물의 색도에 미치는 영향

롤간격 (mm)	L	a	b	HUE	SI
0.05	93.12	-0.36	3.62	84.41	3.64
0.13	93.31	-0.34	3.61	84.61	3.62
0.25	95.61	-0.35	3.26	83.87	3.28
0.50	93.62	-0.55	4.91	83.61	4.94

쌀가루의 색도는 입자가 미세해 짐에 따라 색의 밝기를 나타내는 L값은 회주철 평롤에서는 93.85~96.09, 세라믹 평롤에서는 93.12~95.61정도로 분석되었다.

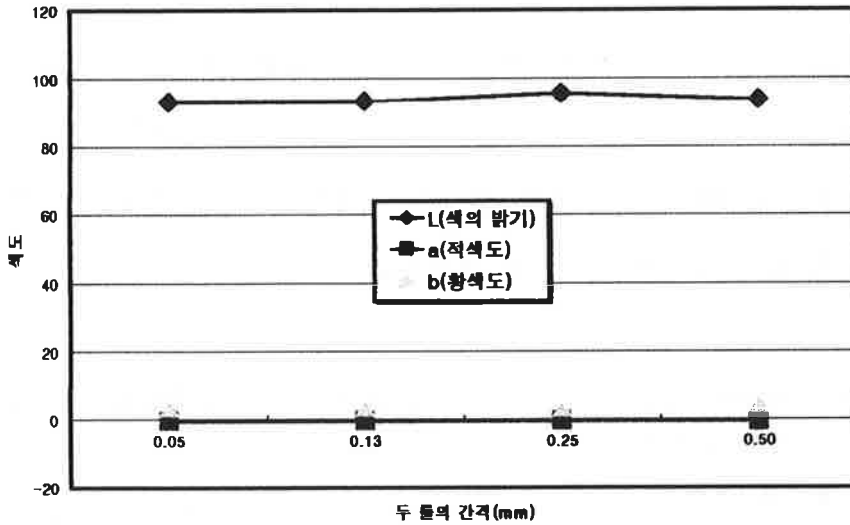


그림 4-22. 회주철 평롤을 이용하여 롤간격증가가 분쇄생성물의 색도에 미치는 영향

적색도를 나타내는 a값은 회주철 평롤에서는 -0.32~-0.37, 세라믹 평롤에서는 -0.34~-0.55로 조사되었다. 또한 황색도를 나타내는 b값은 회주철 평롤에서는 2.66~3.06, 세라믹 평롤에서는 3.26~4.91로 분석되었다.

$$\dagger \text{HUE} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad , \quad \text{SI} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

표 4-7과 그림 4-22에서 살펴보면 색의 밝기를 나타내는 L값은 롤간격 0.05, 0.13, 0.50mm에서는 93.12~93.62범위로 나타나 색도에는 큰 차이가 없었고, 롤간격 0.25mm에서는 95.61로 색의 밝기가 조금 증가하였다. 그리고 적색도를 나타내는 a값은 롤간격 0.05, 0.13, 0.25mm에서는 -0.36~-0.35범위로 거의 비슷한 수준을 나타냈으나 롤간격이 0.50mm

경우는 -0.55로 증가하는 경향을 보였다. 황색도를 나타내는 b값도 적색도를 나타내는 a값과 마찬가지로 물간격이 0.05, 0.13, 0.25mm에서는 3.62~3.26범위로 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 물간격이 본 실험에서 최대인 0.50mm에서 4.91로 증가하여 물간격이 증가할수록 적색도와 황색도의 값이 증가하는 것으로 분석되었다.

표 4-8. 세라믹 평롤의 분쇄 경우 물간격증가가 분쇄생성물의 색도에 미치는 영향

물간격 (mm)	L	a	b	HUE	SI
0.05	93.85	-0.37	2.66	82.04	2.68
0.13	95.73	-0.32	2.67	83.26	2.69
0.25	95.63	-0.37	2.88	82.74	2.90
0.50	96.09	-0.35	3.06	83.49	3.08

$$\dagger \text{HUE} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad , \quad \text{SI} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

표 4-8, 그림 4-23에서 살펴보면 색의 밝기를 나타내는 L값은 물간격 0.05에서는 93.85로, 0.13, 0.25mm에서는 95.73~95.63범위, 0.50mm에서는 96.09로 나타나, 물간격이 증가할수록 색의 밝기가 증가하는 것으로 분석되었고, 적색도를 나타내는 a값은 물간격 0.05, 0.13, 0.25, 0.50mm에서 -0.37~-0.35범위로 나타나 물간격이 증가하여도 색도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었으며, 황색도를 나타내는 b값은 물간격이 0.05, 0.13, 0.25mm에서는 2.66~2.88범위로 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 본 실험의 경우 물간격이 최대인 0.50mm에서 3.06으로 증가하여 물간격이 증가할수록 황색도의 값이 증가하는 것으로 분석되었고, 표4-7~8을 살펴보면 세라믹, 회주철 평롤 모두 분쇄생성물의 색도

에는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다.

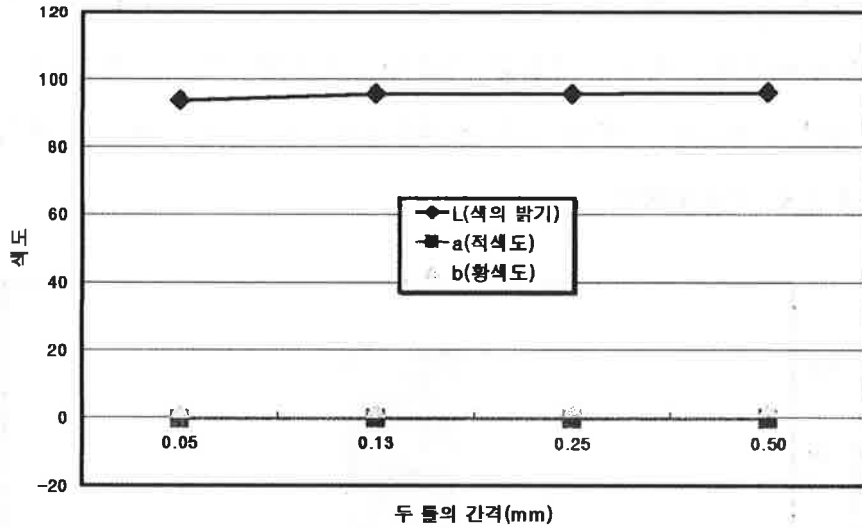


그림 4-23. 세라믹 평롤을 이용하여 롤간격증가가 분쇄생성물의 색도에 미치는 영향

4. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 철분(Fe)함량 비교

표 4-9. Fe함량 비교

	함수율 (%)	롤간격	분쇄 속도 (R _f : R _s)	분쇄처리 횟수	철(Fe)함량 (kg/mg)
Control (무처리)					26.75
회주철 평롤	27	0.05	101.6 : 50.8 rpm	2	105.00
세라믹 평롤					30.36

표 4-9는 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용한 쌀 분쇄시 분쇄생성물에 포함되어 있는 Fe의 함량을 분석한 것이다.

표 4-8, 그림 4-24에 나타난 바와 같이 무처리시 쌀의 철(Fe)함량은 26.75kg/mg이었고, 회주철 평롤을 이용한 경우는 무처리시의 4배 가량인 105.00kg/mg으로, 세라믹 평롤을 이용하여 분쇄한 경우는 30.36으로 나타나 세라믹 평롤을 이용할 경우 쌀가루분쇄물의 섯가루 혼입을 억제할 수 있음으로 분석되었다.

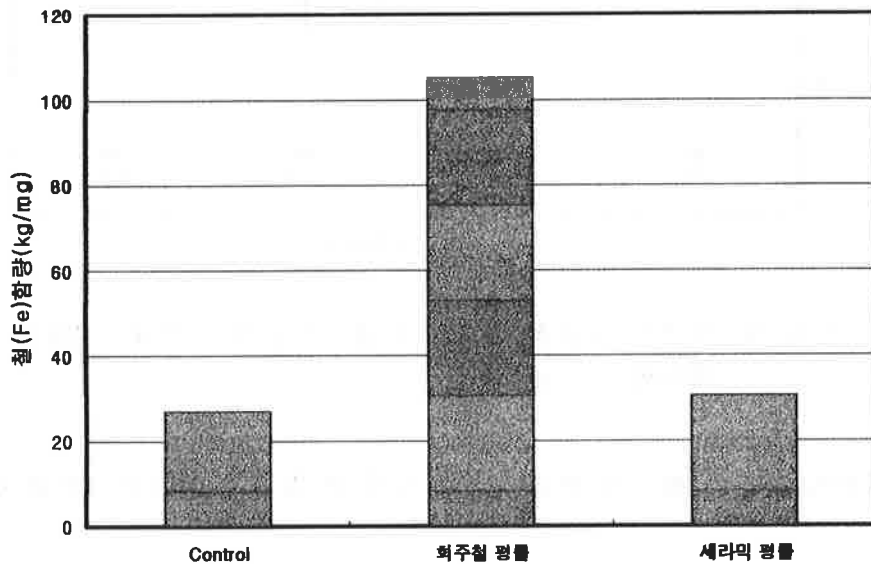


그림 4-24. 회주철 평롤, 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄생성물중 철분(Fe)함량 비교

5. 롤간격, 분쇄 속도, 분쇄처리횟수 증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향

회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 롤의 간격, 분쇄속도, 분쇄처리횟수 등의 분쇄조건에 따른 분쇄소요에너지를 측정하였고, 아래의 결과값은 수집된 자료를 분산분석 하여 정리한 것이며, 그 결과는 다음과 같이 분석되었다.

가. 룰 사이의 간격 증가시 분쇄소요에너지 변화

표 4-10, 그림 4-25은 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 룰의 간격증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향에 대해 조사한 것이다.

표 4-10. 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 룰의 간격이 분쇄소요에너지에 미치는 영향

회주철 평롤		세라믹 평롤	
룰간격 (mm)	평균소요동력 (N-m)	룰간격 (mm)	평균소요동력 (N-m)
0.05	6.463 a	0.05	7.964 a
0.13	7.113 a	0.13	5.053 b
0.25	6.454 a	0.25	6.293 b
0.50	4.748 b	0.50	5.028 b

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

표 4-10에서 살펴보면 룰간격이 0.05mm에서 회주철 평롤은 6.463N-m, 세라믹 평롤은 7.964N-m로 세라믹 평롤이 1.500N-m정도 소요동력이 증가하였고, 룰간격 0.13~0.25mm범위에서는 회주철 평롤이 7.113~6.454N-m범위로, 세라믹 평롤이 5.053~6.293N-m범위로 분석되었으며, 회주철 평롤이 2.060~0.161N-m정도 소요동력이 증가하였고, 룰간격 0.50mm에서는 회주철 평롤이 4.748N-m로, 세라믹 평롤이 5.028N-m로 세라믹 평롤이 0.280N-m정도 소요에너지가 증가하는 것으로 분석되었으며, 그림 4-25에서 보는바와 같이 룰간격 0.05mm에서는 세라믹 평롤이, 0.13mm에서는 회주철 평롤이 소요동력이 높게 나타났고, 룰간격 0.25, 0.50mm에서는 회주철 평롤이 세라믹 평롤보다 소요동력이 높은 것으로 분석되었으나 회주철 평롤, 세라믹 평롤 모두 소요동력에는 큰 차이가

없는 것으로 분석되었다.

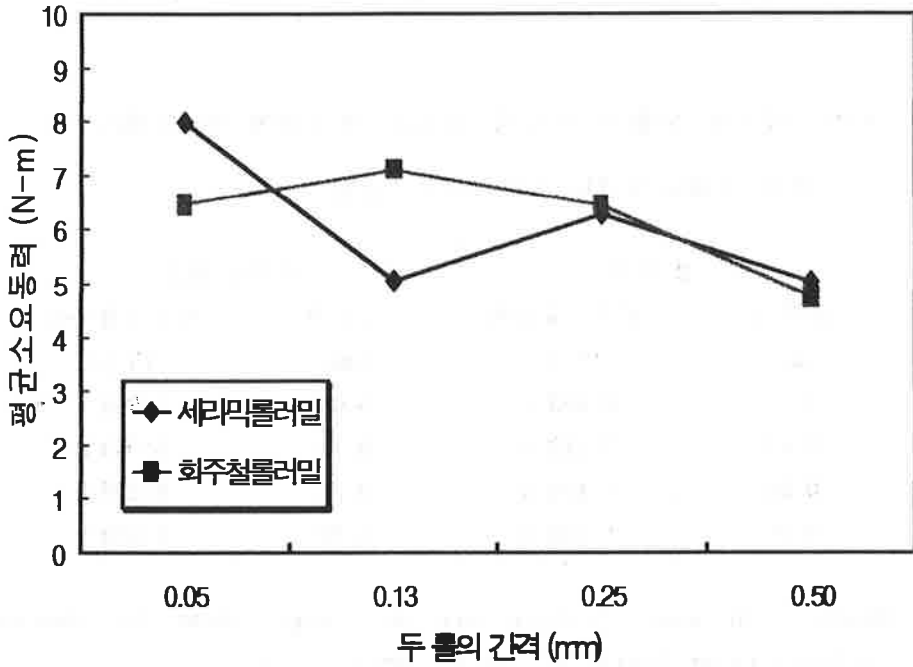


그림 4-25. 회주철물과 세라믹물을 이용하여 찰분쇄시
물간격 증가에 따른 분쇄소요에너지 변화

나. 물속도 증가에 따른 분쇄소요에너지 변화

표 4-11과 그림 4-26은 회주철 평물과 세라믹 평물을 이용하여 물의
속도 증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다.

표 4-11. 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 롤의 속도가 분쇄소요에너지에 미치는 영향

회주철 평롤		세라믹 평롤	
분쇄 속도(rpm) ($R_f : R_s$)	평균소요동력 (N-m)	분쇄 속도(rpm) ($R_f : R_s$)	평균소요동력 (N-m)
42.4 : 23.7	3.527 b	42.4 : 23.7	4.126 b
101.6 : 50.8	4.153 a	101.6 : 50.8	6.679 a

* R_f = Fast roller, R_s = Slow roller

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

표 4-11과 그림 4-26에서 분쇄속도 47.4rpm의 경우, 회주철 평롤은 소요동력이 3.527N-m로, 세라믹 평롤은 4.126N-m로 세라믹 평롤이 0.598N-m 정도 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었고, 분쇄속도 101.6rpm의 경우 회주철 평롤은 4.153N-m, 세라믹 평롤은 6.679N-m로 세라믹 평롤이 2.526N-m 정도 소요동력이 증가되는 것으로 분석되었다.

그리고 회주철 평롤과 세라믹 평롤 모두 분쇄속도가 증가함에 따라 소요동력이 증가하였고, 회주철 평롤 보다 세라믹 평롤이 분쇄시 소요동력이 증가되는 것으로 분석되었다.

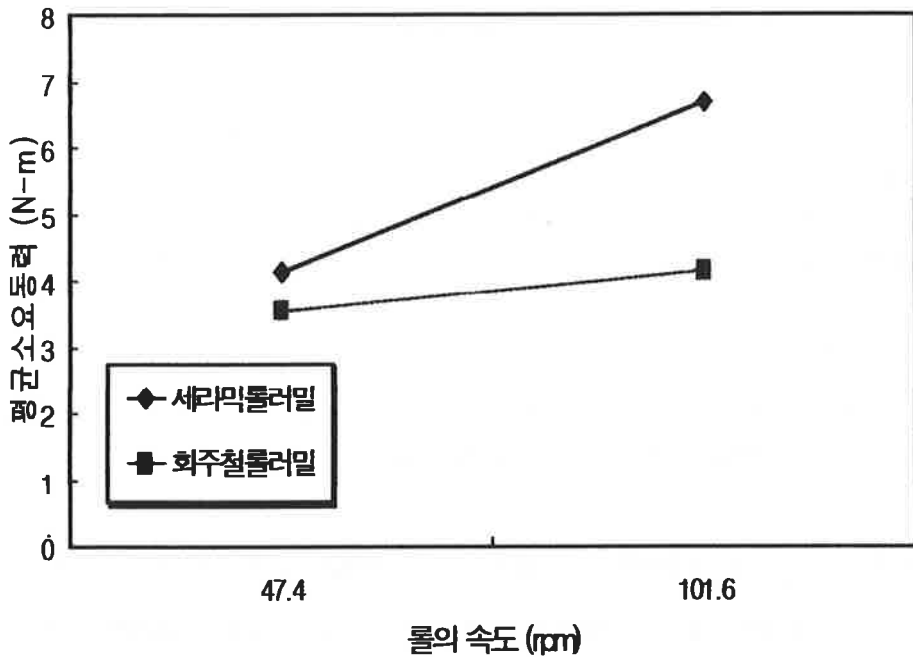


그림 4-26. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀분쇄시 분쇄 속도 증가에 따른 분쇄소요에너지 변화

다. 분쇄처리횟수 증가에 따른 분쇄소요에너지 변화

표 4-12와 그림 4-27는 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 분쇄물의 분쇄처리횟수 증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향에 대하여 조사한 것이다.

표 4-12와 그림 4-27에서 살펴보면 회주철 평롤의 경우 1차 분쇄에서 9.074N-m, 세라믹 평롤에서 7.512N-m로, 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 1.478N-m로 소요동력이 증가되는 것으로 분석되었고, 2차 분쇄의 경우 회주철 평롤은 5.651N-m로, 세라믹 평롤은 5.917N-m로 세라믹 평롤이 0.265N-m정도 소요동력이 증가되는 것으로 분석되었다. 3차 분쇄의 경우는 4.646N-m, 세라믹 평롤은 3.883N-m로 세라믹 평롤이 0.786N-m 정도 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었다.

표 4-12. 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄처리
횟수가 분쇄소요에너지에 미치는 영향

회주철 평롤		세라믹 평롤	
분쇄처리횟수 (회)	평균소요동력 (N-m)	분쇄처리횟수 (회)	평균소요동력 (N-m)
1	9.074 a	1	5.742 a
2	5.651 b	2	5.917 b
3	3.860 b	3	4.646 b

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

그리고 회주철 평롤과 세라믹 평롤의 경우 분쇄처리횟수가 증가할수록 소요동력이 감소되는 것으로 분석되었고, 회주철 평롤보다는 세라믹 평롤에서 분쇄처리 횟수에 따라 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 회주철 평롤과 세라믹 평롤에서 1차 분쇄의 경우 2차, 3차 분쇄보다 소요동력이 비교적 높게 나타났는데, 이것은 분쇄물이 1차 분쇄의 경우 원시료가 30~50mesh 입자크기로 분쇄되는 과정에서 소요동력이 높게 나타났고, 2차, 3차 분쇄에서는 30~50mesh 영역에서 150~200mesh 영역으로 넘어가는 단계이므로 소요동력이 1차 분쇄 보다 감소하는 것으로 분석되었다.

세라믹 평롤과 회주철 평롤의 소요동력을 측정한 결과 표 4-10, 11, 12에서와 같이 롤 사이의 간격, 분쇄속도, 분쇄횟수의 증가시 롤간에는 큰 차이는 없었으나, 비교적 회주철 평롤이 적은 토크(Torque)가 소요되는 것으로 분석되었다.

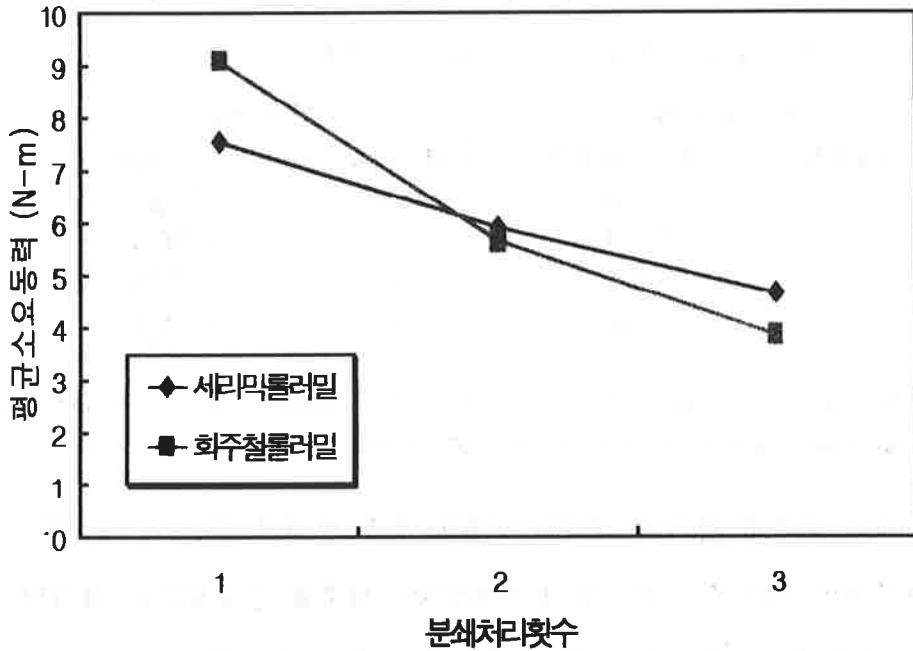


그림 4-27. 세라믹롤과 회주철편롤을 이용하여 쌀 분쇄시 분쇄물의 분쇄처리횟수 증가에 따른 분쇄소요에너지 변화

6. 세라믹 펄과 회주철 펄을 이용하여 쌀 분쇄시 바분쇄 동력 분석

분쇄동력과 분쇄비 및 처리량을 설계 및 제작에 고려하기 위해서는 분쇄물 톤당 마력수를 알아야만 한다. 분쇄물 톤당 마력수 HP는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\frac{HP}{T} = \left(\frac{r^{1/2}}{\dot{m}} \right)^{1/2}$$

여기서, r = 분쇄비(reduction ration)로서 분쇄 생성물의 80%가 통과하는 체구멍 크기에 대한, 원료의 80%가 통과하는 체구멍 크기의 비

\dot{m} = 분쇄물 처리량 [ton/h]

시료의 크기 80%가 2.0mm이라면, 이 시료가 체를 통과하려면 체 구멍의 크기가 2.0mm보다 커야 한다. 여기서는 시료의 80%가 통과하는 체 구멍의 크기를 2.1mm라고 가정을 하였다.

그리고, Vibrator의 speed(10단계)를 7로 놓았을 때 시간당 롤에 투입되는 양은 0.0864[ton/hr]으로 나타났고, 이것으로부터 80%를 통과한 톤당 마력 수를 구하면 표 4-13과 같다.

표 4-13에서 살펴보면 쌀 1톤 분쇄시 소요되는 분쇄동력은 분쇄속도 $R_f = 47.4\text{rpm}$ 일 때, 세라믹 평롤은 분쇄처리 1회일 때 6.40hp/ton, 2회일 때 5.38hp/ton, 3회일 때 4.96hp/ton으로 소요동력이 감소하였고, 회주철 평롤의 경우도 분쇄처리 1회일 때 7.50hp/ton, 2회일 때 7.66hp/ton, 3회일 때 6.44hp/ton으로 소요동력이 감소하는 것으로 분석되었으나, 회주철 평롤이 세라믹 평롤보다 소요동력이 평균적으로 1.4hp/ton정도 더 소요되는 것으로 분석되었다.

분쇄속도 $R_f = 101.6\text{rpm}$ 일 경우, 세라믹 평롤은 분쇄처리 1회일 때 7.13hp/ton, 2회일 때 5.14hp/ton, 3회일 때 4.35hp/ton으로 소요동력이 감소하였고, 회주철 평롤의 경우도 분쇄처리 1회일 때 7.07hp/ton, 2회일 때 6.18hp/ton, 3회일 때 6.00hp/ton으로 소요동력이 감소하는 것으로 분석되었다.

표 4-13. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀분쇄시 쌀가루 1
톤당 소요되는 분쇄에너지

	Roll speed (rpm)				Roll speed (rpm)			
	Fast		Slow		Fast		Slow	
	47.4		23.7		101.6		50.8	
	간극 (mm)	통과 횃수	80% 통과 입자	톤당 마력수 (hp/t)	간극 (mm)	통과 횃수	80% 통과 입자	톤당 마력수 (hp/t)
세라믹 롤	0.05	1	0.589	6.130	0.05	1	0.789	7.094
	0.13	1	0.753	6.931	0.13	1	0.798	7.135
	0.25	1	0.789	7.094	0.25	1	0.789	7.094
	0.50	1	0.470	5.476	0.50	1	0.812	7.197
	0.05	2	0.461	5.423	0.05	2	0.406	5.089
	0.13	2	0.528	5.804	0.13	2	0.419	5.170
	0.25	2	0.534	5.836	0.25	2	0.400	5.051
	0.50	2	0.313	4.468	0.50	2	0.435	5.268
	0.05	3	0.352	4.739	0.05	3	0.267	4.127
	0.13	3	0.486	5.568	0.13	3	0.309	4.440
	0.25	3	0.449	5.352	0.25	3	0.285	4.264
	0.50	3	0.274	4.181	0.50	3	0.325	4.553
회주철 롤	0.05	1	0.771	7.103	0.05	1	0.510	5.704
	0.13	1	0.877	7.480	0.13	1	0.833	7.290
	0.25	1	0.868	7.441	0.25	1	0.871	7.454
	0.50	1	1.00	7.987	0.50	1	0.965	7.846
	0.05	2	0.718	6.768	0.05	2	0.431	5.243
	0.13	2	0.806	7.170	0.13	2	0.527	5.798
	0.25	2	0.595	6.161	0.25	2	0.562	5.987
	0.50	2	0.982	7.915	0.50	2	0.929	7.698
	0.05	3	0.447	5.340	0.05	3	0.414	5.139
	0.13	3	0.745	6.894	0.13	3	0.510	5.704
	0.25	3	0.516	5.737	0.25	3	0.523	5.776
	0.50	3	0.949	7.781	0.50	3	0.859	7.402

분쇄처리 1회의 경우 세라믹 평롤이나 회주철 평롤에서는 분쇄물 톤당 마력수의 차이는 없는 것으로 분석되었으나, 2회와 3회에서는 회주철 평

롤이 세라믹 평롤보다 소요동력이 평균적으로 1.35hp/ton정도 더 소요되는 것으로 분석되었다. 이처럼 회주철 평롤이 세라믹 평롤보다 분쇄시 소요되는 동력이 크게 나타나는 것은 롤 자체의 무게가 회주철 평롤이 세라믹 평롤보다 무거워 롤에 걸리는 하중이 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

7. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 소요동력 분석

회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 롤에 걸리는 소요동력 변화에 대하여 조사하기 위해 토크변환기와 스트레인 증폭기, 자료수집장치로부터 얻어진 데이터(data)값을 이용하여 그래프로 나타내어 소요동력의 변화를 분쇄물(쌀)이 롤에 투입되기 직전, 즉 공회전시와 롤에 투입시 분쇄가 이루어지면서 진행되는 동안 걸리는 소요동력의 변화량을 조사하였다. 아래의 그림 4-28, 29는 회주철 평롤과 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 소요동력의 변화량에 대하여 나타낸 것이다. 회주철 평롤과 세라믹 평롤 모두 공시재료 쌀을 1시간 수침시켰고, 분쇄속도는 101.6 : 50.8rpm, 롤간격은 0.25mm, 분쇄물(쌀)의 롤 통과횟수는 1회 통과시를 기준으로 하여 나타낸 것이다.

그림 4-28은 회주철 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 쌀이 롤에 투입되기 직전과 롤에 투입되면서 소요동력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 쌀이 롤에 투입되기 직전(A)의 롤에 걸리는 소요동력은 0.078N-m로 동력손실이 거의 없었고, 쌀이 롤에 투입되면서(B) 걸리는 소요동력은 3.364N-m로 롤에 투입되기 직전보다 10배 가까이 소요동력이 증가하였으나, 쌀을 분쇄하는 데는 큰 무리가 없는 것으로 분석되었다.

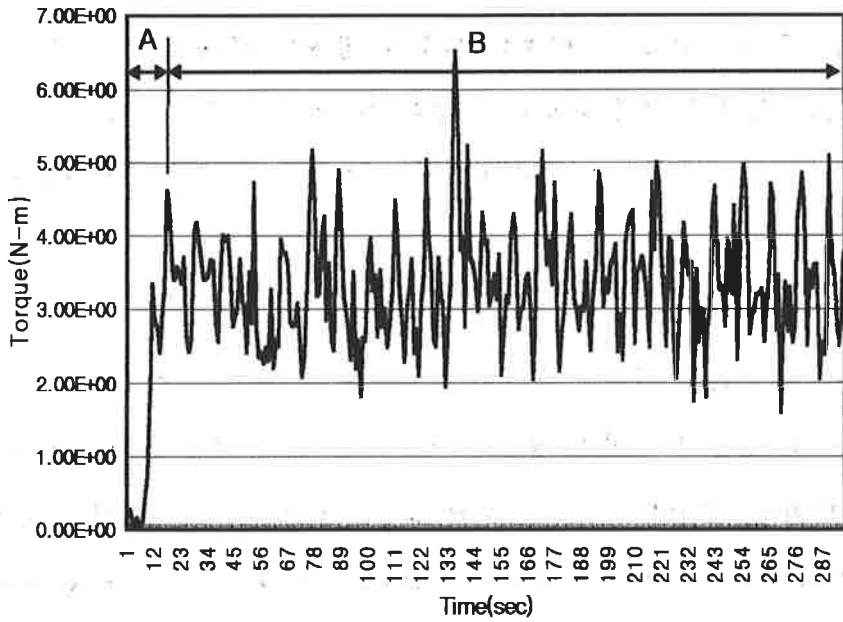


그림 4-28. 회주철 평롤을 이용하여 분쇄속도도 $R_f:R_s=106.6:50.8\text{rpm}$,
롤의 간격 0.25mm 분쇄조건에서 쌀 분쇄시 소요동력 변화량

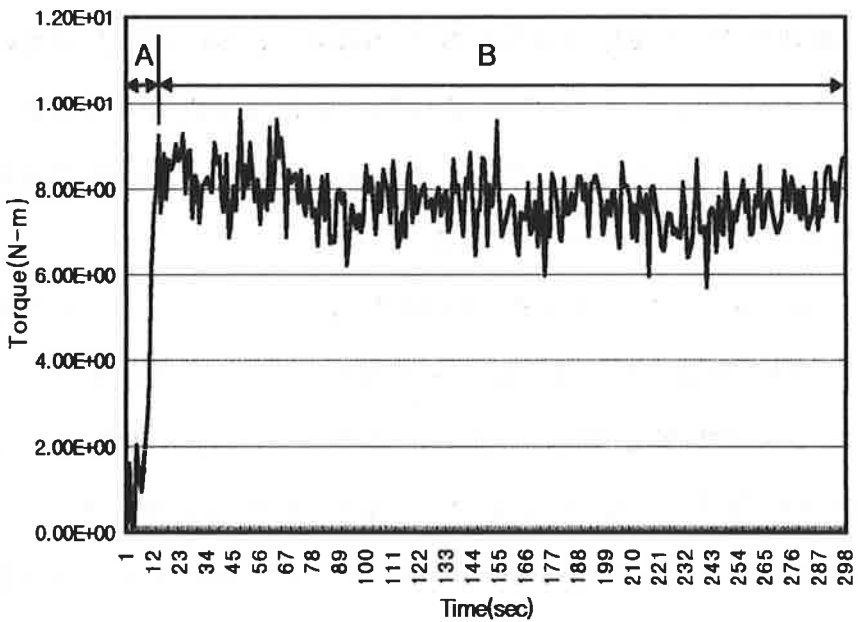


그림 4-29. 세라믹 평롤을 이용하여 분쇄속도 $R_f:R_s=106.6:50.8\text{rpm}$,
롤간격 0.25mm 분쇄조건에서 쌀 분쇄시 소요동력 변화량

그림 4-29는 세라믹 평롤을 이용하여 쌀 분쇄시 쌀이 롤에 투입되기 직전과 롤에 투입되면서 소요동력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 4-29에서 쌀이 롤에 투입되기 직전(A)의 롤에 걸리는 소요동력은 0.725N-m로 동력손실이 적었고, 쌀이 롤에 투입되면서(B) 걸리는 소요동력은 7.720N-m로 롤에 투입되기 직전보다 10배 가까이 소요동력이 증가하였으나, 쌀을 분쇄하는 데는 큰 무리가 없는 것으로 분석되었다.

그림 4-27, 29에서 쌀이 롤에 투입되기 직전에는 6.347N-m, 쌀이 롤에 투입되면서 분쇄가 진행되는 동안의 소요동력은 4.355N-m정도 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 증가하는 것으로 분석되었고, 그래프의 파형을 보면 세라믹 평롤이 회주철 평롤보다 쌀이 롤에 투입되면서 분쇄가 이루어지는 동안 비교적 분쇄물(쌀)이 일정하게 투입되는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 식품 가공에 사용 할 수 있는 범용 세라믹 평롤의 기계적 성질과 분쇄효율을 분석하기 위하여 세라믹 평롤 분쇄기를 설계하였다. 세라믹 평롤과 회주철 평롤을 제작하여 분쇄에 중요한 요인인 두롤러의 간격, 분쇄속도, 분쇄물의 롤 통과 횟수 등의 분쇄조건을 변화시키면서 분쇄 소요 에너지와 분쇄 생성물 특성을 쌀 분쇄 실험을 통하여 분쇄조건이 분쇄효율에 미치는 영향을 분석하였으며, 연구의 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 쌀 함수율이 25%이상에서 분쇄소요토크은 9.81N-m가 소요되는 것으

로 분석되었다.

- 2) 쌀 분쇄시 세라믹 평롤의 경우 두 롤러의 간격이 쌀 지름($D=2\text{mm}$)의 $D/4 \sim D/8(0.50 \sim 0.25\text{mm})$ 경우 $4.905 \sim 5.886\text{N}\cdot\text{m}$ 토크가 소요되었고, 간격을 $D/16 \sim D/32(0.13 \sim 0.05\text{mm})$ 로 분쇄한 경우 $4.905 \sim 7.848\text{N}\cdot\text{m}$ 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질 수록 $1.962\text{N}\cdot\text{m}$ 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 3) 회주철 평롤 롤의 경우 두 롤러 간격이 쌀 지름($D=2\text{mm}$)의 $D/4 \sim D/8(0.50 \sim 0.25\text{mm})$ 경우 $4.905 \sim 6.867\text{N}\cdot\text{m}$ 토크가 소요되었고, 간격을 $D/16 \sim D/32(0.13 \sim 0.05\text{mm})$ 로 분쇄한 경우 $6.867\text{N}\cdot\text{m}$ 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질수록 $1.962\text{N}\cdot\text{m}$ 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 4) 세라믹 평롤과 회주철 평롤 롤이 분쇄속도 $47.4, 101.6\text{rpm}$ 조건에서는 세라믹 평롤이 각각 $5.984, 2.550(\text{N}\cdot\text{m})$ 정도 분쇄소요에너지가 증가된 것으로 분석되었다.
- 5) 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 회주철 평롤의 분쇄속도는 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 이며, 동일 분쇄속도에서 세라믹 평롤의 경우는 소요토크가 $3.924\text{N}\cdot\text{m}$ 로 분석되었고, 속도를 $R_f : R_s = 101.6 : 50.8\text{rpm}$ 으로 2배 증가시켰을 경우에는 $0.7\text{N}\cdot\text{m}$ 토크가 소요되어 롤의 속도가 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 일 때 보다 토크가 63%정도 증가되는 것으로 분석되었으며, 국내에서 사용하고 있는 롤러밀의 분쇄속도를 2배로 증가시켰을 경우 소요토크는 $9.81\text{N}\cdot\text{m}$ 이하로 분석되어 분쇄시 소요되는 동력비는 그리 큰 영향을 미치지 않을 것으로 분석되었다.
- 6) 분쇄시 세라믹 평롤의 분쇄생성물의 평균입자 크기는 $300\mu\text{m}$ 이고, 회주철 평롤 롤러를 사용한 경우는 $780\mu\text{m}$ 이므로, 세라믹 평롤이 평

균입자 크기가 2배이상 작게 나타나 분쇄효율이 향상되는 것으로 나타났다.

- 7) 현재 국내에서 일반적으로 사용하는 롤의 분쇄속도가 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 인 경우 평균입자 크기는 1차 분쇄시 0.35mm, 2차 분쇄 후 0.30mm로 측정되었고, 롤의 분쇄속도를 $R_f : R_s = 101.6 : 50.8$ 로 증가시킨 경우 평균입자 크기는 1차 분쇄 후 0.37~0.41mm, 2차 분쇄 후 0.21~0.26mm로 측정되었다. 즉, 종래의 분쇄회전 속도보다 2배 증가시켜도 입자의 평균 크기는 오히려 0.5mm 작아짐으로써 분쇄효율이 향상됨이 분석되었다.
- 8) 세라믹 평롤을 이용하여 분쇄한 분쇄생성물(쌀가루)은 50mesh 이상이 27%, 50~100mesh가 38.5%, 100mesh이하가 34.5%의 입도 분포로 구성되었고, 평균입도는 $162\mu\text{m}$ 로 분석되었다.
- 9) 회주철 평롤을 이용하여 분쇄한 쌀가루분쇄생성물은 $297\mu\text{m}$ (50mesh) 이하가 39.5%, $297\sim 149\mu\text{m}$ (50~100mesh)가 42.1%, $149\mu\text{m}$ (100mesh) 이상이 21.3%의 입도 분포로 구성되었고, 평균입도는 $187\mu\text{m}$ 로 분석되었다.
- 10) 100mesh 이상인 경우 미분쇄 효율은 13%정도 높게 분석됨으로서 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 분쇄생성물의 분쇄효율이 우수하게 나타났다.

이상의 실험 결과, 실험용으로 설계 제작한 세라믹 평롤과 회주철 평롤의 분쇄효율을 비교하면 세라믹 평롤이 회주철 평롤 보다 분쇄 입도가 2배정도 더 미분쇄 되는 것으로 분석되어 세라믹 평롤 분쇄기의 분쇄효율이 우수한 것으로 분석되었다.

제 5 장

세라믹 치형롤 분쇄기와 회주철
치형롤 분쇄기의 고추분쇄시
분쇄소요에너지와 분쇄생성물의
특성분석

제5장 세라믹 치형틀과 회주철 치형틀

분쇄기의 고추분쇄 소요에너지와

분쇄 생성물의 특성분석

제1절 서 설

고추는 국내에서 미곡 다음으로 주요한 농산물로서 연간 생산량은 건고추를 기준으로 18~20만톤 규모이며, 시장규모는 약 1조원으로 추정되는 매우 중요한 조미 채소류이고, 고춧가루의 일인당 소비량은 2.5 kg이다.

현재 전국 고추 주요산지에 소재하고 있는 10여 개의 청결 고춧가루 가공 공장에서 양질의 고춧가루를 생산하여 소비자에 공급하므로 생산농가의 소득증대 향상에 크게 기여하고 있으며, 이러한 변화는 향후 10년 이내에 현행 고춧가루의 유통체계를 건고추 원료에서 규격화된 고품질의 고춧가루 제품으로 전환될 것으로 예측되고 있다.

현재 국내 고추의 소비형태는 대부분 소비자가 시장에서 건고추를 직접 구매하여 소규모의 방앗간에서 분쇄 가공하여 사용하는 단계에 머무르고 있다. 그러나 최근 고춧가루 가공제품의 생산이 증가되고 있는데 제품품질의 고급화와 청결성이 강조되어 소비자의 기호도 점차 높아지며 시장규모도 증가하고 있다.

반면 국내의 방앗간에서 사용되어지고 있는 분쇄기는 대부분 물러밀을

사용하여 분쇄가 이루어지고 있다. 롤러밀은 분쇄시 열이 적게 발생되어 식품의 영양분 파괴를 적게 할 수 있으나, 섬유질이 많은 원료(고추 등) 분쇄시 분쇄효율이 낮고, 주철제 롤러가 마모됨으로서 분쇄생성물에 쇳가루가 소량 혼입이 되는 원인이 되어, 소비자의 기호와 제품품질의 청결성에 문제점이 야기되고 있는 실정이다.

경제적인 분쇄공정은 원하는 크기의 분말을 가장 값싸게 얻는 것이다. 시설비, 운영비 및 유지비가 분쇄공정의 생산비에 큰 영향을 주는데, 분쇄시설을 선정하기 전에 이러한 요소들을 면밀히 검토해야 한다. 이를 위해서는 원료물질의 특성, 사용 가능한 분쇄기의 종류, 분말제품의 특성을 잘 알아야 한다. 원료 물질의 특성 중 중요한 것들은 경도, 질긴 정도(roughness), 표면의 거칠은 정도, 수분함량, 화학적 안정성 등이다.

그리고 경제적인 분쇄공정을 얻을 수 있는 또 하나의 방안은 롤의 크기 및 형상에 좌우될 것이다. 기존의 방앗간에서 사용하는 분쇄기의 롤은 분쇄생성물의 특성(분쇄생성물의 크기, 색도 등)을 고려하지 않고 대부분 중소기업의 롤을 사용하다보니 롤의 크기나 형상이 일정하거나, 아니면 직경이나 길이에서 그 차이가 조금 있을 뿐이다. 이러한 롤을 이용하여 여러 가지 분쇄물을 분쇄하다보니 자연 기계에 무리가 오고 동력손실 또한 크게 발생하며, 분쇄효율이 저하되는 요인이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 분쇄물의 특성에 맞는 롤의 개발이 시급하지만 아직까지는 실험이 미비한 상태여서 차후에 여기에 대한 실험이 연구되어야 할 것이다.

섬유질을 많이 포함한 식품들은, 압축력이나 충격력(impact force)에 의하여 쉽게 분쇄되지 않으므로, 전단이나 전단력을 이용하면 효과적이다.

롤러밀은 두 롤의 회전비에 따라 기어를 이용하여 자유자재로 조절할 수 있어 햄머밀이나 핀밀 등의 분쇄기에 비해 전단력의 실험이 용이하다. 하지만 아직까지 분쇄기의 전단력에 관한 연구가 미비한 상태여서, 본 연구에서는 이러한 전단력의 실험을 통하여 전단력의 증가가 분쇄소요동력과 분쇄생성물에 미치는 영향에 대하여 실험하고자 하였다.

본 연구의 목적은 기존의 회주철 치형롤의 싯가루 혼입 문제점과 경도 및 내마모성의 문제점을 보완하고, 견고추 또는 조파쇄한 고춧가루를 분쇄할 때 발생할 수 있는 싯가루 발생을 최소화하기 위한 방안을 연구하기 위하여 세라믹 치형롤 분쇄기의 소재와 생산기술의 설계 및 제작에 중점을 두었고, 기존의 두 롤의 회전비는 1:2의 문제점을 보완하기 위하여 두 롤의 회전비를 1:3~1:5로 증가시키고 또한 분쇄물의 롤 처리횟수를 1~8차까지 두어, 두 롤의 회전비와 분쇄물의 롤 처리횟수, 롤 속도 간 분쇄소요에너지와 분쇄생성물에 미치는 영향을 분석하여 특성을 규명하고, 세라믹 롤러밀의 소재와 생산기술 설계 및 개발에 이용하도록 최적의 설계조건을 찾는데 그 목적이 있다.

제2절 재료 및 방법

1. 공시재료

본 연구는 1차 실험으로 98년산 홍천산 태양초(다복)를 공시재료로 택하여 저온(-2℃)에서 저장하여 사용하였다. 공시재료 구입시 1차적으로 고추씨 제거기로 고추씨의 양을 약 80%정도 제거를 하고, 2차적으로 고추의 표면을 수포로 닦아낸 후, 3등분하여 또 한번 고추씨를 제거하여 전체적으로 90%이상 고추씨를 제거하여 실험에 이용하였다.

2. 실험방법

실험용 세라믹 치형롤분쇄기와 회주철 치형분쇄기를 설계 및 제작하여 분쇄조건(두 롤의 회전비별, 속도별, 통과횟수 증가별)을 변화 시켰을 때 분쇄소요에너지와 분쇄생성물특성에 미치는 영향을 측정하기 위하여 아래와 같은 조건에서 실험을 하였다.

표 5-1은 분쇄생성물의 특성을 조사하기 위한 분쇄조건이다.

표 5-1. 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특성 조사를 위한 분쇄조건

	롤 회전비	분쇄속도 ($R_f : R_s$)	롤 통과횟수
수 준	1:2	40.2 : 20.1 rpm 80.2 : 40.1 rpm	1~8차
	1:3		
	1:4		
	1:5		

분쇄물인 건고추는 두 롤의 간격이 조금이라도 떨어져 있으면 분쇄효율이 떨어지므로 본 실험에서는 두 롤의 간격을 밀착시키고 실험을 하였고, 밀착상태시의 스프링의 압축력과 탄성계수를 구하였다.

분쇄시 두 롤러간의 회전 속도비는 R_f (고속 roll) : R_s (저속 roll) = 2 : 1로 고정하였다. 분쇄 속도를 $R_f : R_s = 40.2 : 20.1$, $R_f : R_s = 80.2rpm : 40.1rpm$ 의 2 수준으로 분쇄하여 분쇄속도가 분쇄소요에너지와 분쇄생성물에 미치는 영향을 분석하였다. 분쇄속도를 최대 40.2, 80.2rpm으로 선정한 것은 일반적으로 우리나라에서 사용하고 있는 롤의 속도는 40rpm 정도에서 고추 분쇄를 하고 있기 때문에, 본 실험용으로 제작한 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤에서도 40.2rpm에서 분쇄속도를 증가시켰을 때 분쇄처리량이 분쇄효율에 미치는 영향을 비교분석 하였

다.

두 롤러를 통과한 공시재료인 고추는 롤을 밀착시킨 상태에서, 동일 속도조건에서 두 롤의 회전비의 변화를 1:2~1:5까지 변화를 두고, 분쇄물(건고추)의 롤 통과횟수를 8차까지 두어 각각의 분쇄물의 롤 통과시 발생하는 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특성을 분석하였다. 현행 우리나라 대부분의 방앗간에서 건고추 분쇄시 8차 분쇄까지 이루어지고 있는 실정이어서 본 실험에서도 그것과 같은 수준인 8차 분쇄까지 롤을 통과시켜 비교 실험을 하였다.

가. 소요동력 측정

본 실험에서 분쇄시 소요되는 에너지 및 소요동력을 측정하기 위하여 소요동력측정기, 스트레인 증폭기 등을 사용하였다. 소요동력측정기 (KYOWA, TP-10KMCB, Japan)의 정격용량은 10kgf·m이고, 입력전압은 교류 2Volt를 이용하였다. 소요동력측정기에서 읽혀지는 Data값은 입력토크 값으로 이 값들은 Voltage로 나타나며, Voltage로 읽혀진 Data값들은 아래의 식 (1)에 의해서 토크(kgf·m)값으로 변환된다.

$$\text{토크 (Torque)} = 1.764 \times \text{Voltage} \dots\dots\dots (1)$$

소요동력측정기로부터 얻어진 데이터 값을 토크로 변환하기 위하여 스트레인 증폭기를 (YOKOGAWA 3134-01)를 사용하였다. 출력전압은 교류 2Volt로 설정하였고, 토크 측정을 위한 Strain Range는 5000×10^{-6} 스트레인으로 설정하였으며, 내장된 Lowpass filter의 Band Limit 설정은 100Hz로 설정하였다. 또한 스트레인 증폭기의 최대감도는 $0.5V/10 \times 10^{-6}$ 스트레인으로 하였다.

소요동력측정기와 스트레인 증폭기로부터 받아들여진 Data값의 수집은 자료수집장치(Daqbook/100)를 사용하였으며, 자료수집장치의 분해능은 12bits이고, Range 설정은 Bipolar Mode의 -5~5Volt로 설정하였고 소수점 3자리(0.001g)까지 측정하였다.

나. 입도분포 조사장치

분쇄생성물의 입도 분포를 조사하기 위하여 고춧가루 100g을 정량하여 표준망체(Mesh No. 4, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50)의 무게를 측정을 하고, 고춧가루 입자들을 골고루 분산시키기 위하여 Sieve shaker(홍진정 밀, HJ-215)로 15분간 진탕한 후 각 Sieve에 잔류된 쌀가루의 양을 전기저울(AND FA300KV, JAPAN)로 소수점 3자리(0.001g)까지 칭량한 후, 다시 5분 정도 진탕하여 무게의 변동이 0.2%이내일 때 입도 분포를 분석하였다(ASAE : S-319.1).

다. 수분함량

식품분쇄시 분쇄물의 수분함량에 따라 분쇄소요에너지 및 분쇄생성물에 큰 영향을 미치기 때문에 각 분쇄물의 특성에 맞게 함수율을 조절하였다. 고춧가루 5g을 정량하여 건조기(국제, SDO 135) 105℃에서 3시간 건조한 후, 데시케이터에 넣어 실온에서 방치 냉각시킨 다음 무게를 측정 후 다시 1시간 건조하여 항량이 될 때까지 같은 조작을 반복한 후 수분함량을 측정하였다(한국산업규격 H-2157).

라. 고춧가루 색도(L, a, b값)

고춧가루 시료의 표면 색도는 색도계(Minolta, CR-300, Japan)를 이용하여 3회 반복하여 측정하였고, 명도(L값), 적색도(a값, + : 적색, - :

녹색), 황색도(b값, + : 황색, - : 청색)로 나타내었다. 고춧가루 색도는 분쇄물의 분쇄 처리 횟수에 따른 색도와 각각의 분쇄처리 횟수별, 고춧가루 입자크기별(20mesh, 30mesh, 40mesh) 기준을 각각 선별하여 색도를 측정하여 비교하였다. 이 때 사용한 표준백색판의 L, a, b값은 각각 91.7, 0.08 및 -0.41 이었다.

마. 철(Fe) 함량

본 연구의 수행을 위하여 제작된 실험용 회주철 및 세라믹치형틀을 이용하여 물의 분쇄속도, 회전비, 분쇄생성물의 처리횟수의 분쇄조건으로 고추분쇄시 분쇄생성물 중의 철분(Fe)함량 조사를 위하여 공시재료고추와 초기단계인 1차 분쇄생성물과 최종단계인 8차 분쇄처리후의 분쇄생성물에서 Fe함량을 분석하였다. 분쇄처리 횟수 1차와 8차 처리 후에 분쇄생성물을 임의 추출하여 철분(Fe)함량을 조사하였다.

철분(Fe)함량 조사를 위하여 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu, AA-6701F, Japan)기기를 이용하여 삼각플라스크에 고춧가루 1g과 H₂SO₄ 10ml를 첨가한 후 다시 H₂O₂(산호보조제)를 30분당 다시 2ml씩 첨가하여 고춧가루가 완전히 탈색될 때까지 진탕한 후, 용액속에 있는 표백된 고춧가루 입자를 필터링(filtering) 처리를 하여 분리해 내고 증류수 50ml로 표선하여 측정하였다.

아래의 식은 철분(Fe)함량을 구하기 위한 것이다.

$$\text{AAS 측정치(ppm)} \times 50 = \text{철분(Fe)함량} \dots\dots\dots (2)$$

제3절 결과 및 고찰

본 연구에서는 범용 세라믹 치형 롤러밀의 분쇄 효율을 향상시킬 수 있는 기술을 개발하기 위한 실험으로 롤러 분쇄기에서 섬유질이 많은 식품재료의 분쇄가 어렵기 때문에 섬유질을 많이 포함한 건고추를 공시재료로 선택하였다. 세라믹 치형 롤러와 회주철 치형롤을 이용하여 분쇄시 롤의 소재가 분쇄소요동력과 분쇄입도 크기에 미치는 영향에 대한 결과치를 비교 분석하여 기존의 롤러보다 찧가루 혼입이 없는 즉 청결 고춧가루이며 분쇄효율을 향상시킬 수 있는 세라믹 롤러 분쇄 기술의 기초자료로서 사용하고자 하였다.

롤러분쇄기의 3가지 분쇄요인인 두 롤의 회전비율, 롤의 회전속도별 및 분쇄물의 롤 통과횟수별 등의 증가가 분쇄소요에너지와 분쇄생성물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분쇄소요동력과 분쇄입도 크기, 시간당 분쇄 능력 등을 측정하였다. 분쇄시 분쇄조건별 롤러의 마모로 의하여 발생하는 찧가루 혼입량과 분쇄시 발생하는 마찰열 그리고 미분화가 고춧가루 색상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 철 성분과 색상을 측정하였다.

1. 회주철치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 두 롤의 회전비 및 분쇄처리횟수가 분쇄 생성물에 미치는 영향

가. 두 롤의 회전속도 : 40rpm(0.354m/s)경우 롤의 회전 증가와 분쇄 통과처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

1) 롤러의 회전비 증가 및 분쇄처리횟수가 분쇄생성물의 평균 입도에 미치는 영향

본 연구에서는 분쇄생성물의 입자의 크기가 2mm이상이면 조파쇄, 1~2mm는 중간조파쇄, 0.5~1mm사이에 있으면 중간미분쇄, 0.5mm이하이면 미분쇄로 정의하였고, 분쇄생성물의 50%를 통과한 구간인 d50을 기준으로 비교 분석하였다.

표 5-2,3 및 그림 5-1~5는 금속 치형롤의 경우 40rpm일 때 두 롤의 회전비가 $R_{fast} : R_{slow} = 1 : 2(40rpm : 20rpm)$, $1 : 3(40rpm : 13.3rpm)$, $1 : 4(40rpm : 10rpm)$, $1 : 5(40rpm : 8rpm)$ 로 증가 시킨 분쇄조건에서 분쇄생성물을 1차에서 8차까지 통과시켰을 때의 분쇄조건이 고춧가루 분쇄입도 크기변화에 미치는 영향을 측정 분석한 결과치이다.

표 5-2. 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm일 때 롤러의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수증가가 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도에 미치는 영향에 대한 분석결과

	두 롤의 회전비			
	$R_{fast} : R_{slow} =$	$R_{fast} : R_{slow} =$	$R_{fast} : R_{slow} =$	$R_{fast} : R_{slow} =$
	1 : 2 (40rpm : 20rpm)	1 : 3 (40rpm : 13rpm)	1 : 4 (40rpm : 10rpm)	1 : 5 (40rpm : 8rpm)
1차분쇄	3.148 mm	2.550 mm	1.970 mm	1.670 mm
2차분쇄	2.170 mm	1.550 mm	1.410 mm	1.270 mm
3차분쇄	1.815 mm	1.420 mm	1.250 mm	1.030 mm
4차분쇄	1.473 mm	1.110 mm	1.170 mm	0.920 mm
5차분쇄	1.294 mm	1.080 mm	1.060 mm	0.870 mm
6차분쇄	1.286 mm	1.070 mm	0.950 mm	0.800 mm
7차분쇄	1.226 mm	1.030 mm	0.940 mm	0.730 mm
8차분쇄	1.128 mm	0.910 mm	0.870 mm	0.700 mm

표 5-2은 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm일 때 롤러의 회전비 증가 및 분쇄통과처리 횟수증가가 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도에 미치는

영향에 대한 분석결과이고, 그림 5-1은 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도 분포도를 나타낸 것이다.

표 5-2와 그림 3-1에서 보듯이 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도는 두 롤의 회전비 1:2경우 1차 분쇄는 3.148mm, 2차 분쇄에서는 2.170mm로서 평균입도 크기가 2mm이상으로 조파쇄 영역으로, 3차에서 8차까지 분쇄통과처리횟수를 증가시켜도 평균입도 크기 1.815~1.128mm 중간조파쇄영역으로 분쇄효율이 낮게 나타났고, 분쇄처리 횟수 5차 이상에서는 더 이상 분쇄가 증가 되지 않는 것으로 분석 되었다.

두 롤의 회전비 1:3경우 회전비 1:2와 마찬가지로 1차 분쇄 구간에서는 평균입도의 크기가 2.550mm로 조파쇄 영역이고, 2~7차 분쇄 구간에서는 1.550~1.030mm로 중간조파쇄되었고, 평균입도는 회전비 1:2에 비해 0.2 - 0.3mm 정도가 미분화되었다.

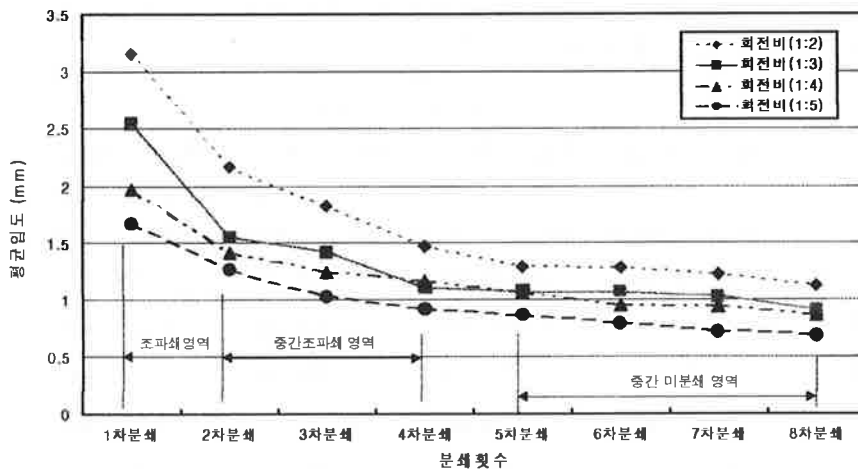


그림 5-1. 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm일 때 두롤의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수증가별 분쇄생성물의 고춧가루 평균입도 분포곡선

두 롤의 회전비 1:4경우 1~5차 분쇄 구간에서 1.970~1.060mm로 중간조파쇄, 6~8차 분쇄 구간에서 0.950~0.870mm로 중간미분쇄 영역으로

나타났고, 두 롤의 회전비 1:3의 경우보다 고춧가루의 입도 크기가 0.1mm 더 미분쇄화 되었다.

두 롤의 회전비 1:5경우 1~3차 분쇄 구간에서 1.670~1.030mm로 중간 조파쇄, 4~8차 분쇄 구간에서는 0.920~0.700mm의 중간미분쇄 영역으로 분쇄되었고, 회전비 1:4보다 고춧가루의 입도크기가 0.2mm 더 미분쇄되었다.

건고추 분쇄시 두 롤러의 회전비를 1:2에서 1:5까지 증가시켰을 때 분쇄에 작용하는 전단력이 증가되면서 고춧가루의 입도크기가 작아지는 경향을 나타냄으로서 전단력의 증가가 고춧가루 미분쇄 향상에 큰 영향을 미치는 결과를 분석 할 수 있었다.

2) 롤러의 회전비 증가와 분쇄처리통과횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

표 5-3와 그림 5-3 는 금속치형롤의 분쇄속도가 40rpm일 때 롤러의 회전비 증가 및 분쇄통과처리 횟수증가별에 따른 분쇄생성물의 잔류 입도 분포 실험결과치이고, 그림 5-2는 분쇄생성물의 50%가 통과한 고춧가루 입자크기를 나타낸 입도분포곡선이다.

한국산업규격의 고춧가루 품질기준에서 굵은 고춧가루규격인 표준체 850 μ m위에 55%이상 남아야하고, 보통고춧가루는 표준체 850 μ m를 60% 통과하고, 425 μ m 위에 60% 이상 남아야 하며, 고운고춧가루는 표준체 425 μ m를 95%이상 통과하여야 한다고 규정하였다.

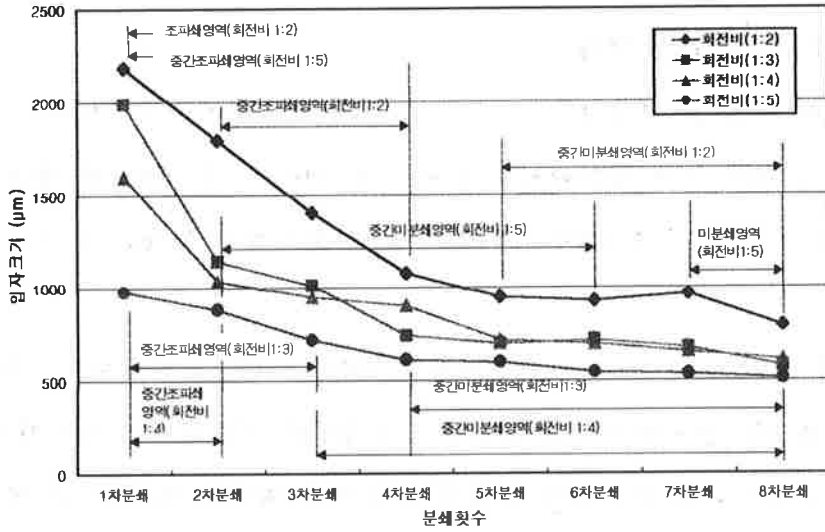


그림 5-2. 회주철 치형틀의 분쇄속도 40rpm 조건에서 두롤러의 회전비를 1:2에서 1:5로 증가별 분쇄처리 횟수1차에서 8차 증가별 분쇄생성물의 50% 통과한 고춧가루 입자크기 분포곡선

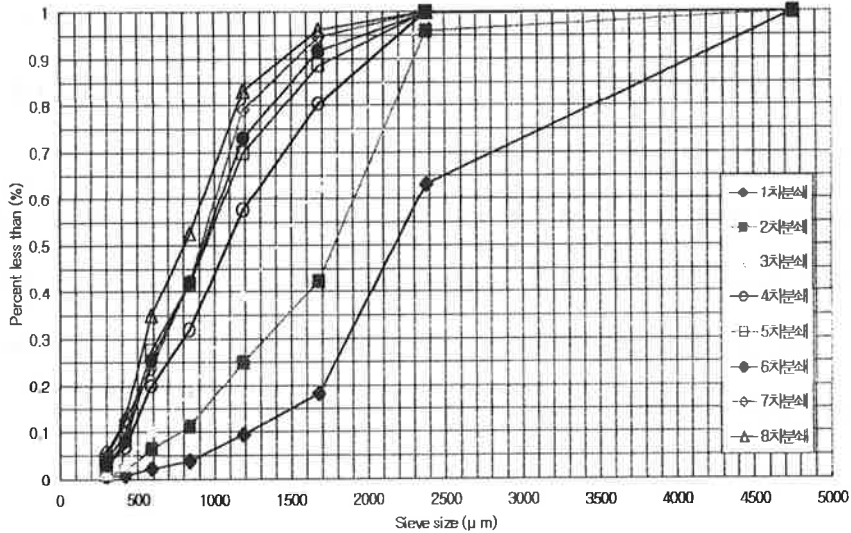


그림 5-3. 회주철치형틀의 분쇄속도 40rpm 조건에서 두롤러의 회전비를 1:2로 하였을 때 분쇄처리 횟수증가별 분쇄생성물의 누적 고춧가루 입도 분포곡선

표 5-3과 그림 5-2에서 보듯이 롤의 회전비 1:2경우 분쇄생성물의 50% 통과한 d50 구간의 입도는 1차 분쇄 후 $2,185\mu\text{m}$ 로 조파쇄, 2~4차 분쇄 경우 $1,794\sim 1,076\mu\text{m}$ 로 중간조파쇄, 5~8차 분쇄 경우 $946\sim 794\mu\text{m}$ 로 중간미분쇄의 분포로 분석되었다. 그림 5-3에서 보듯이 8차 분쇄처리후에 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었다. 현재 국내에서 견고추용으로 사용하고있는 분쇄기의 롤회전비는 1:2로 고정되어 있으며, 일반적으로 굵은 고춧가루를 생산하기 위해서는 8차까지 분쇄하여야 함을 알 수 있었다.

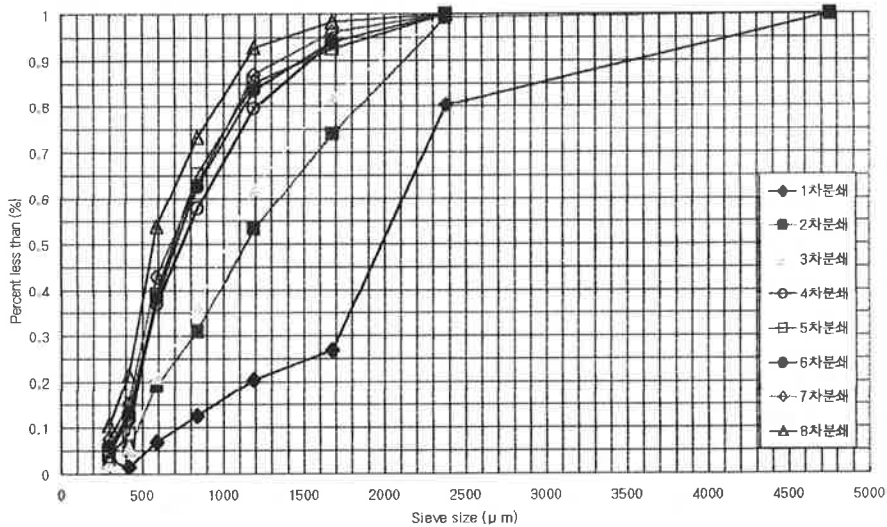


그림 5-4. 회주철치 형롤의 분쇄속도 40rpm 조건에서 두 롤의 회전비 1:3일 경우 분쇄처리 횟수증가별 분쇄생성물의 고춧가루 누적 입도 분포곡선

표5-3 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm일 때 두롤러의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수증가별에 따른 분쇄생성물의 잔류 입도 분포 (40rpm)

회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:2), μm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	3533	2185	2011	1685	1467	1380	1207	1141
d60	2337	1924	1620	1250	1076	1033	1011	924
d50	2185	1794	1402	1076	946	924	962	794
d40	2011	1598	1185	946	794	837	794	674
회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:3), μm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2380	1837	1598	1185	1098	1141	1087	967
d60	2098	1358	1163	859	783	804	794	674
d50	1989	1141	1011	739	696	717	674	576
d40	1859	989	880	630	609	609	576	522
회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:4), μm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2120	1576	1359	1141	1054	924	902	794
d60	1793	1152	1000	924	804	674	652	576
d50	1598	1022	870	815	696	576	565	522
d40	1359	891	761	696	587	522	511	478
회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:5), μm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	1948	1424	1098	989	924	837	717	652
d60	1489	1065	837	717	652	587	544	522
d50	1250	945	717	587	565	533	500	478
d40	1087	794	587	522	500	467	435	413

- ‡ d80 : 분쇄생성물의 80% 통과
- d60 : 분쇄생성물의 60% 통과
- d50 : 분쇄생성물의 50% 통과
- d40 : 분쇄생성물의 40% 통과

롤의 회전비가 1:3로 증가한 경우 분쇄생성물 d50 구간의 입도는 1차 분쇄가 1989 μm 로 중간조파쇄의 영역에서 조파쇄의 구간에 근접한 형태

를, 2~3차 분쇄후 1,141~1,011 μm 로 중간조파쇄, 4~8차 분쇄 후 739~576 μm 로 중간미분쇄 영역으로 나타났다(그림 5-4, 표 5-3). 표 5-3와 그림 5-3,4에서 보듯이 1:2에서 1:3으로 롤러의 회전비를 증가시킴으로서 분쇄처리 횟수 4차에서 고춧가루 850 μm 를 55% 이상 통과함으로서 롤러의 회전비 1:2보다 4회나 단축되었다. 그림 5-4에서 보듯이 d50의 분쇄 입자의 크기는 4차 분쇄처리 이후에는 분쇄효율의 향상이 매우 작아지므로에서 8차 분쇄처리 후까지 약 150 μm 정도만 작아짐으로서 분쇄입계처리횟수가 4차임을 분석할 수 있었다.

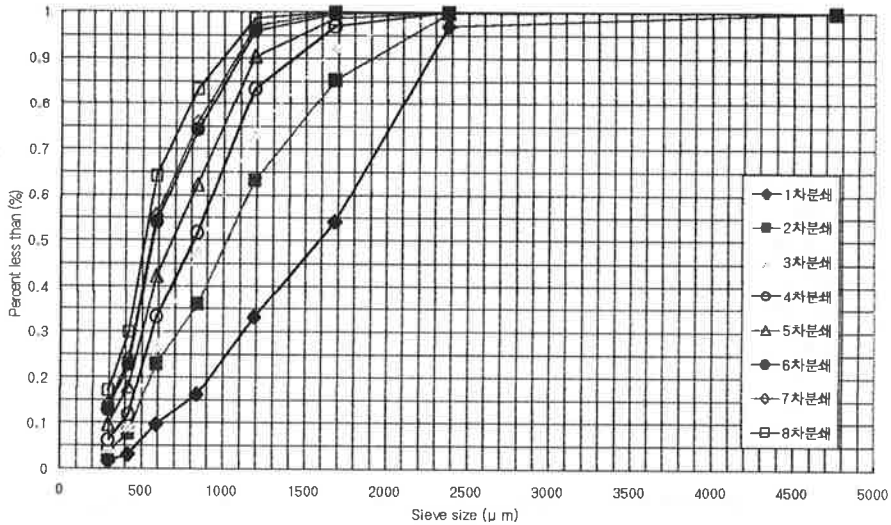


그림 5-5. 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm 조건에서 두 롤러의 회전비를 1:4로 하였을 때 분쇄처리 횟수증가별 분쇄생성물의 고춧가루 누적 입도 분포곡선

롤의 회전비가 1:4의 경우 분쇄생성물 d50 구간의 입도를 분석해 보면 1~2차 분쇄 구간에서 1,598~1,022 μm 로 중간조파쇄, 3~8차 분쇄 구간에서는 870~522 μm 로 중간미분쇄 형태를 나타냈고, 6차 분쇄이후부터는 중간미분쇄 구간에서 미분쇄 구간으로 전환되었다. 롤러의 회전비 1:4에

서는 1:3과 같은 4차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루 규정내에 들었고(850 μm , 55%이상 통과), 5차 분쇄처리 이상에서는 고춧가루의 입도 크기가 850 μm 을 60% 이상 통과하였으나 425 μm 는 8차 분쇄처리 후 20%정도 통과 되어 보통고춧가루 생산규격에 미달됨을 알 수 있었다. 그림 5-5에서 보듯이 6차분쇄 처리 후 분쇄효율이 분쇄 처리 임계 횟수는 6차인 것으로 분석되었다.

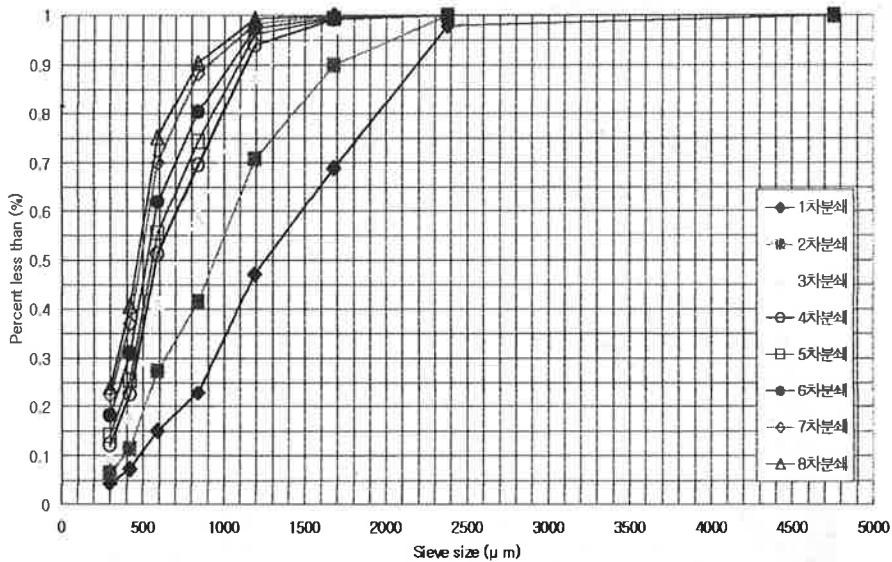


그림 5-6. 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm 조건에서 두 롤러의 회전비를 1:5로 하였을 때 분쇄처리 횟수증가별 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 분포곡선

롤의 회전비가 1:5의 경우 분쇄생성물 d50구간의 입도는 1차 분쇄시 1,250 μm 로 중간조파쇄, 2~6차 분쇄는 945~533 μm 로 중간미분쇄, 7~8차 분쇄는 500~478 μm 의 미분쇄 형태로 분석되었다(표5-3, 그림5-5). 그림 5-6에서 보듯이 2차 분쇄 처리 후 고춧가루의 입자의 크기 850 μm 을 55%이상 통과시킴으로서 롤러의 회전비 1:4보다 분쇄처리회수를 1회 단

측시킬 수 있었다. 보통고춧가루 규정인 $850\mu\text{m}$ 60%이상은 3차 분쇄처리 후 분쇄생성 되었으나, $425\mu\text{m}$ 40% 통과는 6,7차에서 분쇄되었다. 8차 분쇄처리 후에서 $413\mu\text{m}$ 까지 분쇄 되었다. 4차 분쇄처리 후 분쇄 효율이 작아지다가 7차분쇄처리 후 분쇄효율이 매우 작아지므로 분쇄 임계 처리횟수는 7차인 것으로 분석되었다.

현재 국내 고춧가루 생산에 사용하고 있는 롤러 분쇄기는 롤러의 회전비를 1:2로 사용하고 있으며, 8차 분쇄처리통과후에 굵은 고춧가루를 생산하고 있다. 롤러의 회전비를 1:3과 1:4로 회전비를 증가시켰을 경우 굵은 고춧가루는 분쇄처리 4차에서 생산 할 수 있었고, 1:2경우보다 분쇄처리 횟수를 4회 단축 할 수 있었고, 1:5에서는 5회를 단축시킬 수 있었다.

보통고춧가루생산은 롤러의 회전비 1:2 분쇄조건에서 생산 할 수 없었으나, 1:5에서 8회이상 분쇄처리후 생산 할 수 있었다. 즉 롤러의 회전비가 커질수록 전단력이 증가하여 분쇄효율이 향상됨을 증명 할 수 있었다.

나. 롤의 회전속도 : $80\text{rpm}(0.708\text{m/s})$ 경우 롤의 회전비 증가와, 분쇄통과처리 횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

1) 롤러의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수증가가 분쇄생성물의 균입도에 미치는 영향

본 연구에서는 시간당 고추 분쇄처리량을 증가시키기 위하여 기존의 분쇄속도 40rpm 에서 80rpm 으로 증가시켰다. 고추 분쇄조건인 롤의 회전비 증가와 분쇄처리 횟수가 분쇄생성물의 입도크기에 미치는 영향을 분석하였다.

표 5-4. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 롤러의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 분쇄생성물의 평균입도

	두 롤의 회전비			
	1 : 2	1 : 3	1 : 4	1 : 5
1차분쇄	3.151 mm	2.350 mm	1.930 mm	1.300 mm
2차분쇄	2.013 mm	1.840 mm	1.440 mm	1.170 mm
3차분쇄	1.552 mm	1.510 mm	1.330 mm	1.010 mm
4차분쇄	1.314 mm	1.370 mm	1.290 mm	0.920 mm
5차분쇄	1.076 mm	1.250 mm	1.090 mm	0.910 mm
6차분쇄	1.006 mm	1.150 mm	1.060 mm	0.820 mm
7차분쇄	0.971 mm	1.120 mm	1.020 mm	0.810 mm
8차분쇄	0.924 mm	1.040 mm	0.990 mm	0.770 mm

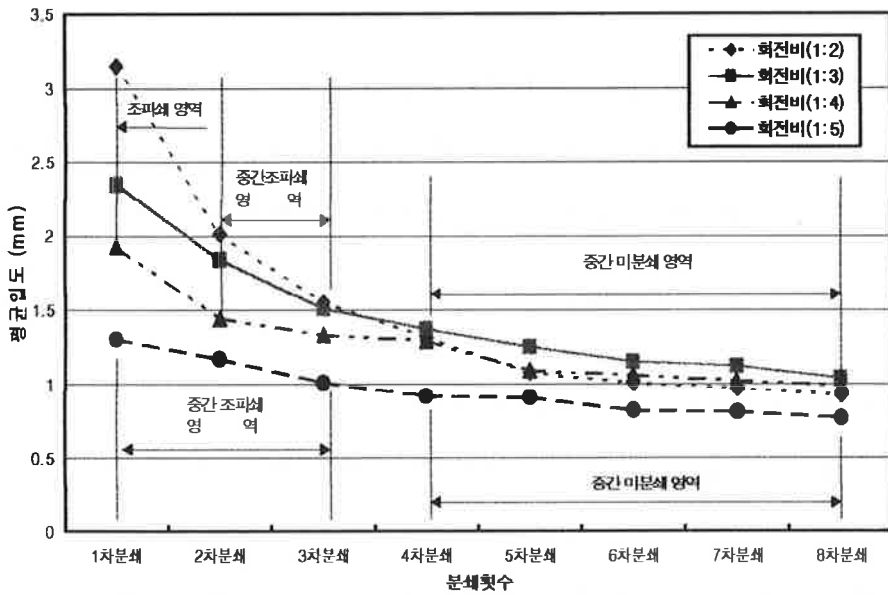


그림 5-7. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 롤러의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별 고추 분쇄생성물의 평균입도 분포곡선

표 5-4와 그림 5-7은 회주철치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 두 롤러의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 고춧가루의 평균입도를 분석한 결과치와 평균 입도 분포곡선이다.

표 5-4과 그림 5-7에서 보듯이 롤의 회전비 1:2 경우, 1~2차 분쇄 구간에서는 평균입도의 크기가 3.151~2.013mm로 조파쇄 영역이고, 3~6차 분쇄 구간에서는 1.552~1.006mm로 중간조파쇄 영역, 7~8차 분쇄 구간에서는 0.971~0.924mm로 중간 미분쇄의 영역을 나타냈고, 분쇄처리 5차 이상에서 평균입도의 크기는 균일하여져, 분쇄효율이 증가되지 않았다.

롤의 회전비가 1:3 경우 분쇄 구간에서는 평균입도의 크기가 2.350mm로 조파쇄 영역이고, 2~8차 분쇄 구간에서는 1.840~1.040mm로 중간조파쇄 영역을 나타냈으며, 6차 이상 분쇄처리 후부터는 더 이상 미분화되지 않았고, 회전비 1:2 보다 분쇄 효율도 향상되지 않았다.

롤의 회전비가 1:4 경우, 1~7차 분쇄 구간은 1.930~1.020mm로 중간조파쇄 영역, 8차 분쇄 구간에서는 0.990mm로 중간미분쇄 영역으로 나타났으며, 1:3 보다 조파쇄 영역만 미분화되었다. 5차 이상 분쇄처리 후 더 이상 분쇄되지 않았다.

롤의 회전비가 1:5의 경우, 1~3차 분쇄처리 과정에서 1.300~1.010mm로 중간조파쇄 영역이고, 4~8차 분쇄 구간에서는 0.920~0.770mm로 중간 미분쇄영역을 나타냈다. 6차분쇄 이상처리 후 분쇄 효율은 향상되지 않았다. 롤의 회전비를 1:2에서 1:5로 증가시키면 고추는 전단력에 의하여 분쇄효율이 크게 향상됨을 증명할 수 있었다.

롤의 속도를 40rpm에서 80rpm으로 증가시켜도 분쇄생성물의 평균입도 변화에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 현 분쇄업체에서 관행으로 사용된 분쇄속도보다 분쇄효율을 크게 증가시킬 수 있음을 분석할 수 있었다.

2) 롤러의 회전비 증가 및 분쇄처리횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

표 5-5와 그림 5-9~5-12는 회주철치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 롤러

의 회전비 1:2에서 1:5 증가시 분쇄처리 횟수 1차에서 8차 까지 증가별
 에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 잔류 입도 분포에 대한 결과치와 누적분
 포곡선이다. 그림 5-8은 고춧가루 분쇄생성물의 50%가 통과한 입자크기
 에 대한 입도분포이다.

표 5-5. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 롤러의 회전비 증가별
 분쇄 처리 횟수 증가별에 따른 분쇄생성물의 잔류입도 분석

	회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:2), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	3424	2120	1794	1424	1120	1076	1054	967
d60	2315	1837	1315	1065	880	794	739	696
d50	2185	1685	1120	946	761	652	587	576
d40	2054	1424	989	837	587	565	544	533
	회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:3), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2294	2054	1717	1511	1337	1163	1141	1076
d60	2000	1707	1294	1120	1011	924	913	826
d50	1859	1446	1120	1000	902	815	794	717
d40	1728	1228	989	880	772	696	674	500
	회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:4), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2098	1598	1402	1294	1076	1033	989	946
d60	1772	1163	1054	1011	837	794	761	717
d50	1576	1033	946	902	717	696	652	609
d40	1337	902	815	794	587	576	565	544
	회주철 치형롤 두 롤의 회전비 (1:5), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	1554	1337	1076	989	967	859	826	772
d60	1120	1011	859	739	728	620	587	565
d50	978	880	717	609	598	544	533	511
d40	837	717	565	522	522	478	457	457

† d80 : 분쇄생성물의 80% 통과

d60 : 분쇄생성물의 60% 통과

d50 : 분쇄생성물의 50% 통과

d40 : 분쇄생성물의 40% 통과

표 5-5와 그림 5-8에서 보듯이 롤의 회전비 1:2에서 분쇄생성물 d50 구간의 입도를 분석해 보면, 분쇄처리 1차 후 2,185 μm 로 조파쇄의 구간 영역, 2~3차 분쇄 후 1,685~1,120 μm 로 중간조파쇄 영역, 4~8차 분쇄 처리 후 946~576 μm 로 중간미분쇄의 영역으로 구분되었고, 5차 이상 분쇄 처리 후에는 고춧가루 미분쇄효율의 증가폭이 낮았다.

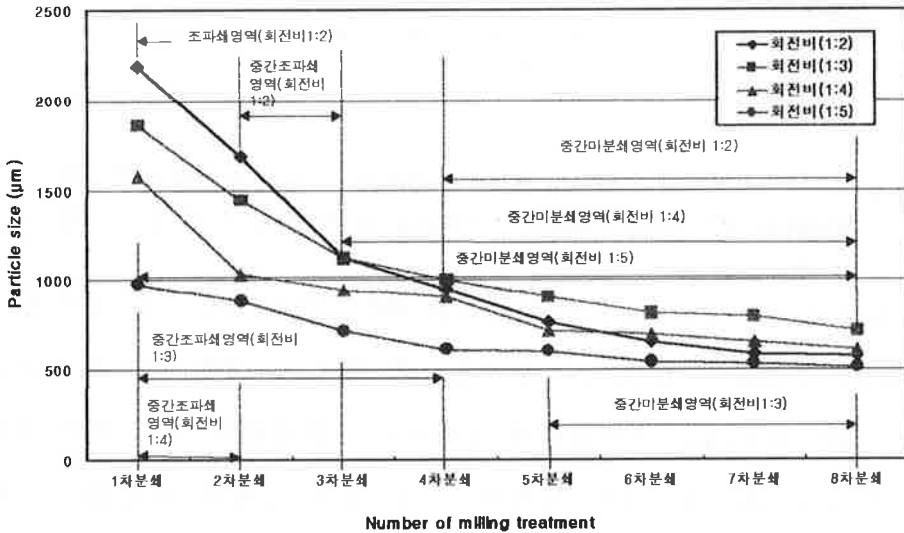


그림 5-8. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm 조건에서 두롤러의 회전비를 1:2에서 1:5로 증가별 분쇄처리 횟수1차에서 8차 증가별 분쇄생성물의 50% 통과한 고춧가루 입자크기 분포도

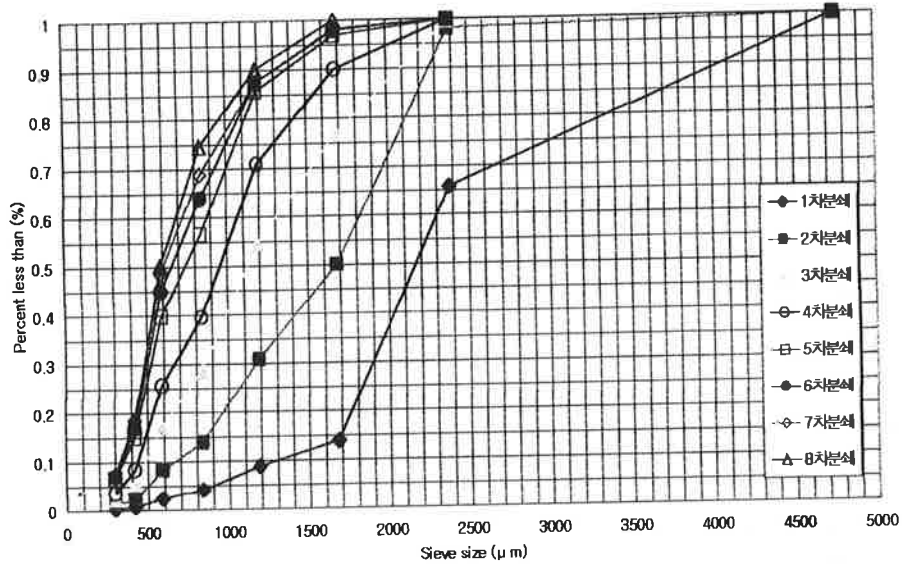


그림 5-9. 회주철 치형틀의 분쇄속도 80rpm 조건에서 두 롤의 회전비 1:2일 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄 생성물의 누적입도분포

두 롤의 회전비가 1:3에서 분쇄생성물 d50 구간의 입도는 1~4차 분쇄 구간에서는 1,859~1,000 μm로 중간조파쇄 영역, 5~8차 분쇄 처리과정에서는 902~717 μm로 중간미분쇄 영역으로 구분되었고, 6차 이상 분쇄 처리 후에는 50% 통과하는 입자의 크기 감소 구배가 작아졌다(그림 5-8). 표 5-5와 그림 5-10에서 보듯이 4차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루를 생산할 수 있었고, 5차 이상 분쇄처리 후에는 임계 분쇄 처리횟수임을 분석 할 수 있었다.

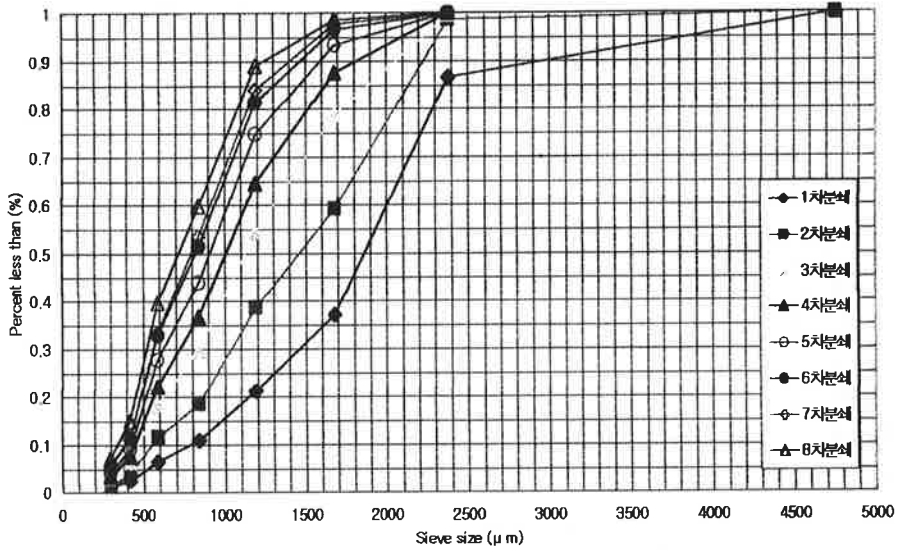


그림 5-10. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm 조건에서 롤의 회전비가 1:3일 경우 분쇄통과처리 1차부터 8차까지 고춧가루 분쇄 생성물의 누적 입도 곡선

롤의 회전비가 1:4 경우 분쇄생성물 d50 구간은 1~2차 분쇄 구간에서 1,576~1,033 μm로 중간조파쇄, 3~8차 분쇄 구간에서는 946~609 μm로 중간미분쇄, 6차 이상 분쇄 처리는 중간미분쇄에서 미분쇄 구간으로 미분화되었고, 5차 이상 분쇄처리 후에는 d50의 입도크기가 미소하게 감소됨으로서 고춧가루 미분쇄효율은 미소하게 증가하였다(그림 5-8). 그림 5-11과 같이 3차 분쇄처리 후에 굵은 고춧가루를 생산할 수 있었고, 6차 분쇄처리 후 850 μm을 80%이상 통과하였으나 425 μm을 20% 정도 통과시켜 보통고춧가루 생산을 할 수 없었고, 4차 이상 분쇄처리 후에도 미분쇄 효율이 작아짐으로서 임계 분쇄횟수가 4차임을 분석할 수 있었다.

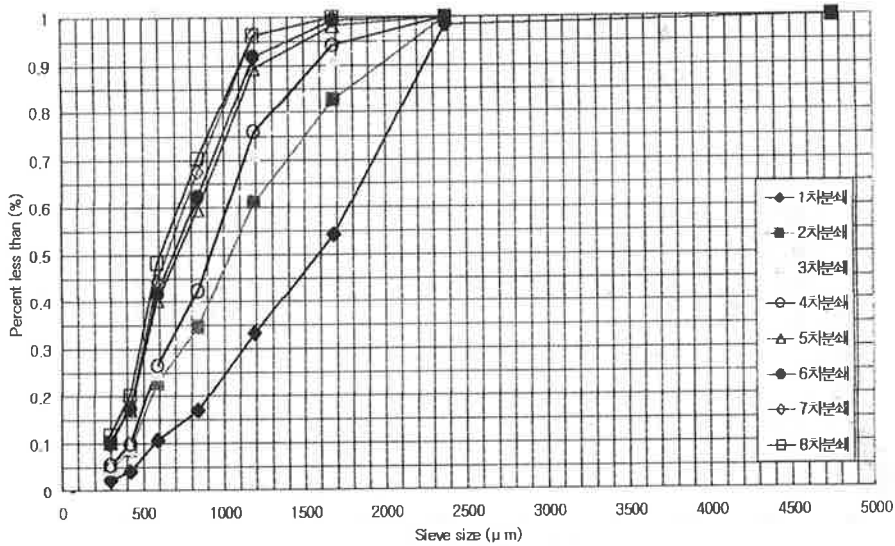


그림 5-11. 회주철 치형롤의 분쇄속도 80rpm 조건에서 두 롤의 회전비 1:4일때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 분포도

롤의 회전비가 1:5 경우 분쇄생성물 d50구간의 입도는 1~3차 분쇄처리까지 978~717 μm 로 중간미분쇄 영역이고, 4~8차 분쇄처리까지 609~511 μm 로 분석되었다. 4차 이상 분쇄처리 후부터는 중간미분쇄에서 미분쇄 구간으로 분쇄생성물의 미분화가 되었으나, d50 입자크기의 변화 폭은 작게 분석되었다(그림 5-8). 그림 5-12와 표 5-5에서 보듯이 분쇄처리 2차 분쇄처리후 후 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었고, 4차 분쇄처리 후 825 μm 을 60%이상 통과하였으며, 8차 분쇄 처리후 425 μm 고춧가루 입자가 30% 통과되어, 보통고춧가루를 생산할 수 없었다. 6회 이상 분쇄처리 후 입자의 크기변화가 작아짐으로서 임계 분쇄 처리 횟수는 6차임을 분석할 수 있었다.

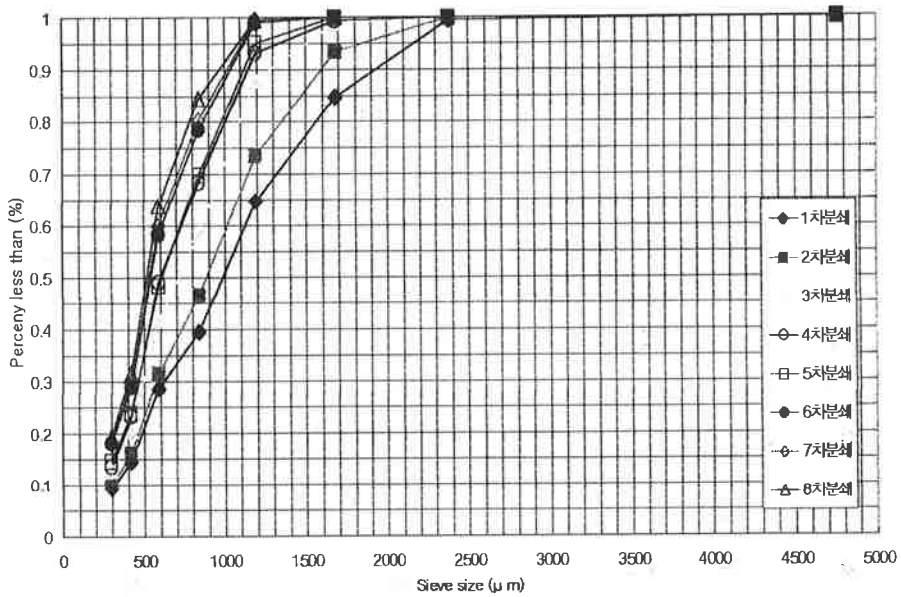


그림 5-12. 회주철 치형물의 분쇄속도 80rpm 조건에서 물의 회전비 1:5일때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 곡선

굵은 고춧가루 입도는 $850\mu\text{m}$ 을 45%통과하는 기준으로 분류되는데 본 연구에서 기존의 물 속도가 40rpm에서 80rpm으로 증가시켜 실험 한 결과, 물의 회전비가 1:2일 때는 5차 분쇄에서, 1:3경우 5차 분쇄에서, 1:4는 3차 분쇄에서, 1:5경우는 2차 분쇄에서 각각 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었다. 기존의 물분쇄기 속도를 증가하여 사용한다면 분쇄횟수를 2~5회 정도 감소할 수 있어 분쇄 효율상승과 소요에너지 면에서 상당한 절약을 할 수 있는 것으로 나타났고, 또한 분쇄생성물의 미분쇄 향상에 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다

2. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비 및 분쇄처리횟수가 분쇄 생성물에 미치는 영향

가. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤러의 회전비 및 분쇄처리횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

1) 롤의 분쇄속도 40rpm(0.345m/s)일 때 회전비와 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

표 5-6와 그림 5-14는 분쇄속도 40rpm에서 롤의 회전비 1:2에서 1:5까지 분쇄시 고춧가루 생성물의 평균 입도 결과치와 평균 입도 분포도이다.

표 5-6와 그림 5-13에서 보듯이 롤의 회전비 1:2 경우, 1차 분쇄 구간에서 평균입도의 크기가 2.247mm로 조파쇄 영역이고, 2~7차 분쇄 구간에서는 1.730~1.006mm로 중간조파쇄 영역, 8차 분쇄 구간에서는 0.986mm로 중간 미분쇄 영역으로 구분되었으며, 5차 이상 분쇄처리 후에는 고춧가루의 평균입도 크기 변화는 미세하게 작아졌다.

표 5-6. 세라믹 치형 롤의 분쇄속도 40rpm일 때 회전비, 분쇄 처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도 분석

	두 롤의 회전비			
	1 : 2	1 : 3	1 : 4	1 : 5
1차분쇄	2.247 mm	2.340 mm	1.970 mm	2.510 mm
2차분쇄	1.730 mm	1.720 mm	1.500 mm	1.740 mm
3차분쇄	1.495 mm	1.220 mm	1.220 mm	1.380 mm
4차분쇄	1.246 mm	1.050 mm	1.080 mm	1.100 mm
5차분쇄	1.106 mm	0.980 mm	1.070 mm	0.880 mm
6차분쇄	1.133 mm	0.890 mm	1.040 mm	0.810 mm
7차분쇄	1.006 mm	0.890 mm	1.020 mm	0.700 mm
8차분쇄	0.986 mm	0.870 mm	1.020 mm	0.690 mm

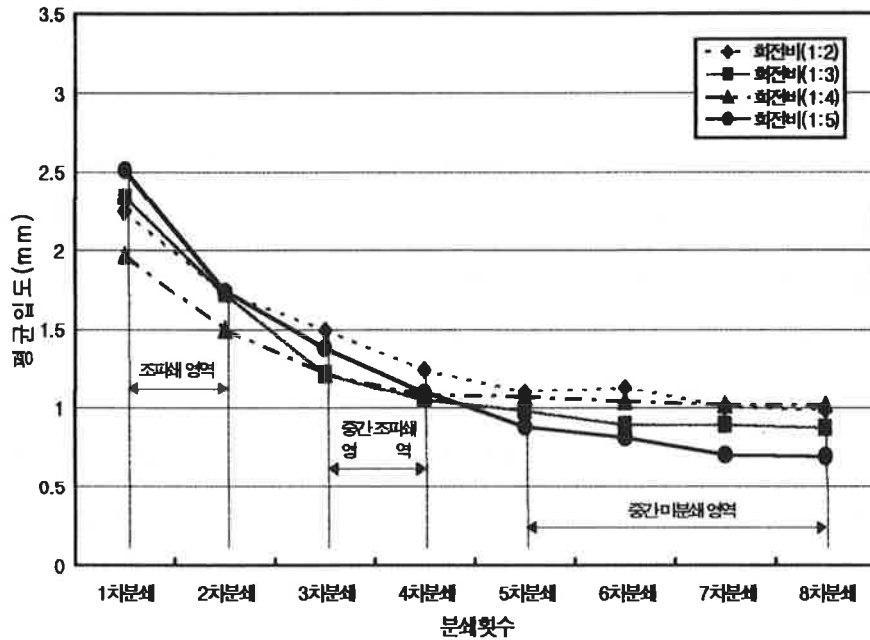


그림 5-13. 세라믹 치형틀의 분쇄속도 40rpm일 때 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도 분포도

롤의 회전비 1:3 경우, 1차 분쇄 구간에서는 평균입도의 크기가 2.340mm로 조파쇄 영역, 2~4차 분쇄 구간에서는 1.720~1.050mm로 중간 조파쇄 영역, 5~8차 분쇄 구간에서는 0.980~0.870mm로 중간 미분쇄 영역으로 구분되었다. 롤의 회전비 1:2에 비해 평균입도 크기는 0.1mm 이상이 미분쇄 되었으며, 분쇄처리 4차 후 입도크기의 구배는 미세하게 감소되었다. 롤의 회전비가 1:4의 경우, 1~8차 분쇄 구간에서는 조파쇄 영역 구간 없이 1.970~1.020mm로 중간조파쇄 구간 영역으로 분쇄되었다. 1차 분쇄 경우를 비교하면 회전비 1:4 경우 1:2, 1:3 보다 약 0.3~0.4mm정도 더 미분쇄 되었고, 4차 분쇄 처리 후 평균입도의 크기변화는 미소하였다. 회전비 1:5 경우, 1차 분쇄 구간에서 2.510mm로 조파쇄 영역, 2~4차 분쇄 구간에서는 1.740~1.100mm로 중간조파쇄 영역, 5~8차 분쇄 구간에서는 0.880~0.690mm로 중간미분쇄 영역으로 구별되었고, 회전비 1:2, 1:3, 1:4와 비교하여 보면 중간미분쇄의 고춧가루 평균입도는

약 0.2mm정도 미분화됨이 분석되었다.

2) 룰의 회전비 및 분쇄 처리 횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 5-15는 고춧가루 분쇄 생성물의 50%가 통과한 입자 크기에 대한 입도분포도이고, 표 5-7과 그림 5-16~5-19는 세라믹 치형룰의 분쇄속도 40rpm일 때 회전비 및 분쇄 처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 잔류 입도 분포에 대한 결과치와 입도 분포다.

표 5-7과 그림 5-15에서 보듯이 회전비1:2경우 분쇄생성물의 d50 구간의 입도 크기는 1~3차 분쇄처리과정에서 1,837~1,076 μm 로 중간조파쇄 영역, 4~8차 분쇄처리 후 902~717 μm 로 중간미분쇄 영역으로 구별되었고, 5차 이상 분쇄처리 후에는 50% 통과하는 고춧가루 입자의 크기는 미소한 변화로 작아졌다.

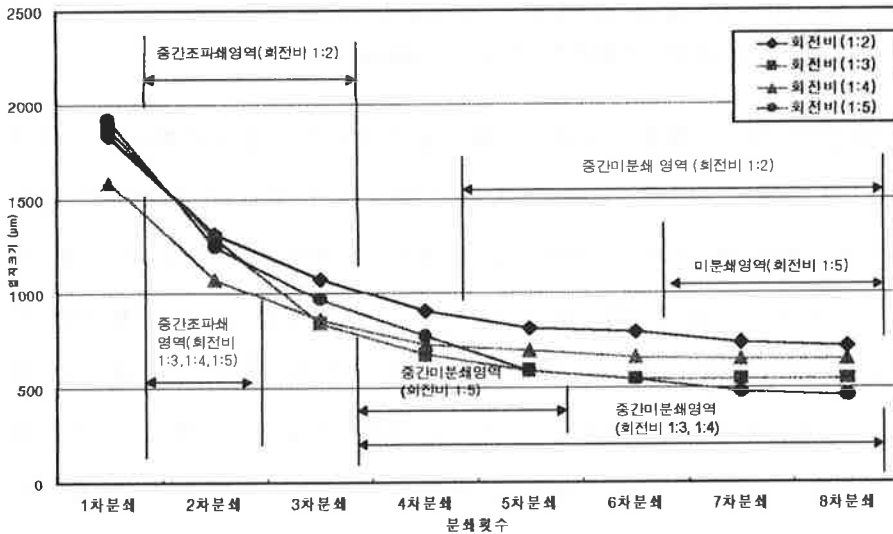


그림 5-14. 세라믹 치형 룰의 분쇄속도 40rpm일 경우 회전비 1:2 에서 1:5로 증가시켰을 때 1차에서 8차 분쇄시 고춧가루 분쇄생성물 50% 통과(d50) 구간 영역의 입자크기 분포도

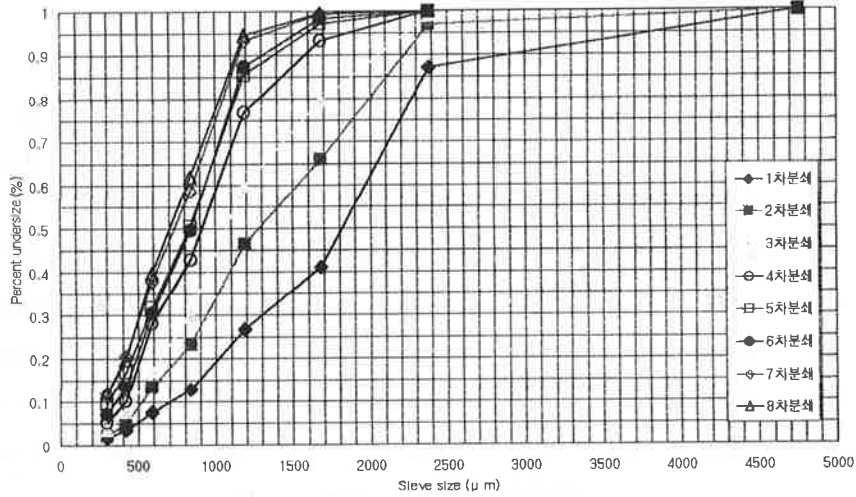


그림 5-15. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2일 때 분쇄 처리횟수 1차에서 8차분쇄시 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도곡선

그림 5-6과 표 5-7에서 보듯이 굵은 고춧가루는 5차 이상 분쇄처리 후에 생성할 수 있었고, 7차 이상 분쇄처리 후 825 μ m 고춧가루 입자크기를 60% 이상 통과하였으나, 425 μ m 통과량은 20%정도였다. 입자의 크기 변화는 6차 이상 분쇄 처리 후 작아짐으로서 임계 분쇄처리 횟수가 6차임을 분석 할 수 있었다.

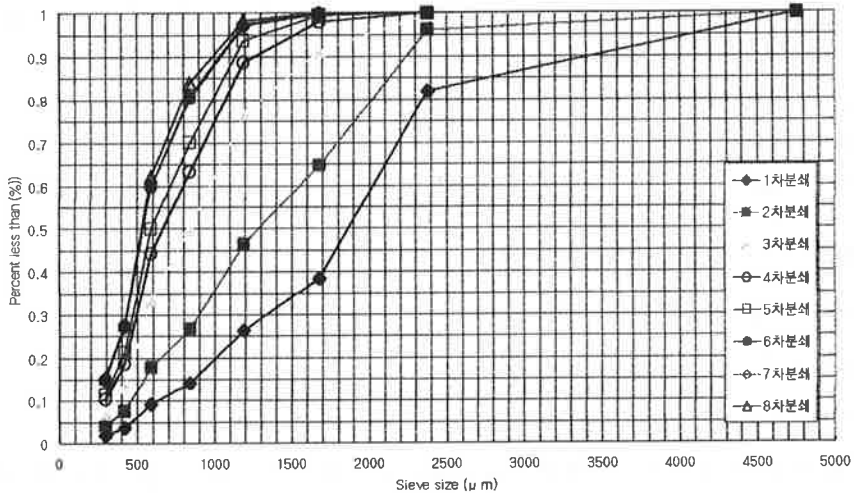


그림 5-16. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:3일 때 분쇄
누적 입도곡선 처리횟수 1차에서 8차 분쇄시 고춧가루 분쇄
생성물의 누적 입도곡선

표 5-7. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm일 때 두 롤의 회전비 별
및 분쇄 처리 횟수에 따른 분쇄생성물의 잔류 입도 분포

	세라믹 치형롤 회전비 (1:2), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2294	2011	1707	1294	1141	1120	1054	1033
d60	1989	1533	1207	1011	924	924	837	794
d50	1837	1315	1076	902	815	794	739	717
d40	1554	1098	924	794	717	696	630	609
	세라믹 치형롤 회전비 (1:3), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2359	2033	1294	1076	989	837	837	794
d60	2033	1554	967	794	717	598	587	565
d50	1881	1294	837	674	587	544	544	544
d40	1728	1076	696	565	544	489	489	489
	세라믹 치형롤 회전비 (1:4), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2131	1663	1184	1087	1076	1044	1044	1033
d60	1794	1228	967	837	825	772	772	761
d50	1598	1076	859	728	696	663	652	652
d40	1337	946	728	587	587	576	576	565
	세라믹 치형롤 회전비 (1:5), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2533	1967	1511	1141	967	859	717	696
d60	2098	1511	1098	902	696	609	522	511
d50	1924	1250	967	772	587	544	478	457
d40	1772	1076	859	641	522	478	413	391

‡ d80 : 분쇄생성물의 80% 통과

d60 : 분쇄생성물의 60% 통과

d50 : 분쇄생성물의 50% 통과

d40 : 분쇄생성물의 40% 통과

롤의 회전비 1:3경우 분쇄생성물 d50 구간의 입도 분포를 비교해 보면

1~2차 분쇄처리 과정에서 1,881~1,294 μm 로 중간조파쇄 영역, 3~8차 분쇄 과정에서 837~544 μm 로 중간미분쇄 영역으로 구별되었고, 6차 이상 분쇄처리 후 d50의 크기는 균일한 상태로 나타나 고춧가루의 입도 크기 변화가 작아짐을 알 수 있다. 그림 5-16과 표 5-7에서 보듯이 3차 분쇄처리 후 고춧가루 입자크기 825 μm 가 >45% 통과하여 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었고, 4차 분쇄처리 후 60%이상이 825 μm 를 통과하였으며, 425 μm 는 10%정도 통과하였으나, 8차 분쇄 후 20%로 상승하였다. 5차 이상 분쇄처리 후 분쇄처리 과정에서 입도의 크기 변화폭이 작아짐으로서, 입계 분쇄처리횟수는 5차임을 분석할 수 있었다.

롤의 회전비 1:4의 경우 분쇄생성물의 d50 구간 입도를 비교해 보면 1~2차 분쇄 구간에서 1598~1076 μm 로 중간조파쇄, 3~8차 분쇄 구간에서는 870~522 μm 로 중간미분쇄 형태를 나타냈으나, 6차 분쇄이후부터는 점차적으로 중간미분쇄 구간에서 미분쇄 구간으로 분쇄생성물의 미분화가 진행되는 것으로 분석되었다.

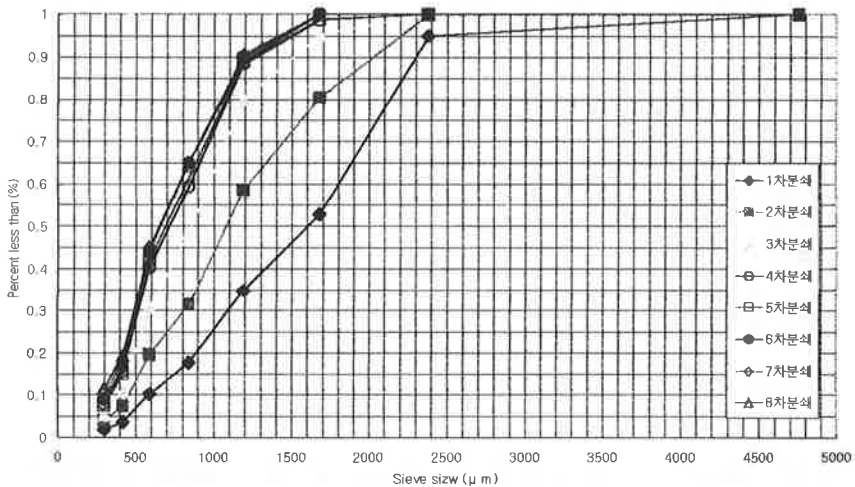


그림 5-17. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:4일 때 분쇄 처리 횟수 1차에서 8차시 증가별 고춧가루 분쇄생성물의 누적입도 분포곡선

그림 5-17과 표 5-7에서 보듯이 3차 분쇄처리 후 고춧가루 입자크기 $825\mu\text{m}$ 가 >45% 통과함으로서 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었고, 회전비 1:3과의 고춧가루 생성물의 특성은 유사하게 분석되었고, 5차 분쇄처리 횟수가 임계분쇄 처리횟수임을 분석할 수 있었다.

롤의 회전비 1:5의 경우 분쇄생성물의 d50구간 입도를 비교해 보면 1~2차 분쇄는 $1,924\sim 1,250\mu\text{m}$ 로 중간조파쇄, 3~6차 분쇄는 $967\sim 544\mu\text{m}$ 로 중간미분쇄, 7~8차 분쇄는 $478\sim 457\mu\text{m}$ 로 미분쇄의 형태로 분석되었고, 7회 이상 분쇄처리 d50의 값은 변화되지 않았다. 그림 5-18과 표 5-7에서 보듯이 3차 분쇄 처리 후 굵은 고춧가루를 생산할 수 있었고, 5차 분쇄처리 후 $696\mu\text{m}$ 이 >70% 통과, $425\mu\text{m}$ 는 15%정도 통과하였으며, 7차 분쇄 후 >40%로 상승하였다. 7차 이상 처리 후 입도의 크기 변화폭이 작아짐으로서, 임계 분쇄처리횟수는 7차임을 분석할 수 있었다.

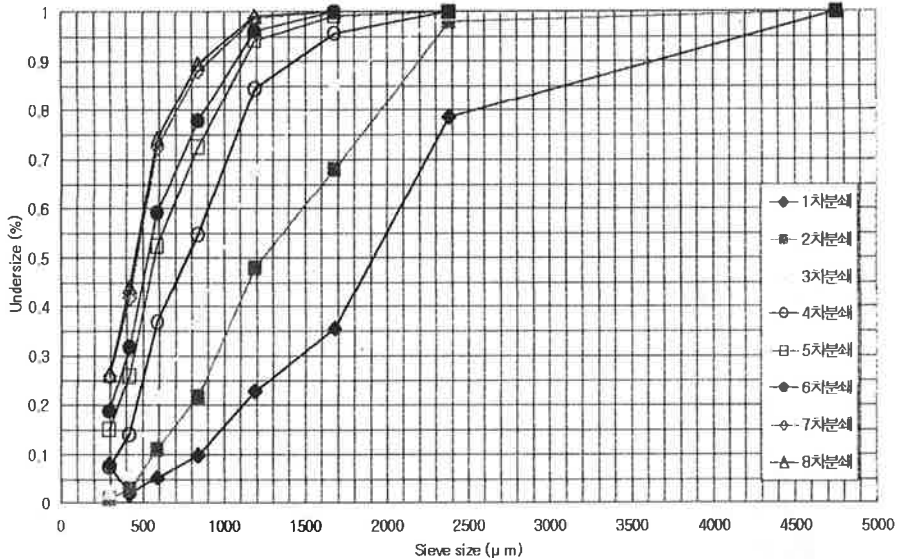


그림 5-18. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:5일때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차시 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 분포곡선

세라믹 치형롤을 이용한 분쇄생성물 특성실험에서는 굵은 고춧가루 입도의 크기 $850\mu\text{m}$ 를, 45% 이상 통과된 분쇄처리횟수를 분석한 결과 롤의 회전비 1:2에서는 5차 분쇄에서, 회전비 1:3에서 1:5까지는 3차 분쇄과정에서 생산할 수 있었고, 보통고춧가루는 회전비 1:5에서 7차 분쇄 처리에서 생산되는 것으로 분석됨으로서 굵은 고춧가루를 생산하는 기준으로 세라믹 치형롤과 회주철롤을 비교하면 다음과 같다.

회주철 치형롤러 회전비 1:2에서 8차, 1:3과 1:4에서 4차, 1:5에서 2차, 7차 분쇄에서 보통고춧가루를 생산할 수 있었고, 세라믹 치형롤러에서는 회전비 1:2에서 5차, 1:3 ~ 1:5에서 각각 3차, 보통 고춧가루를 1:5에서 7차분쇄처리 후 생산할 수 있었다. 즉 세라믹 치형롤러는 1-3차 정도 분쇄처리 횟수를 감소 시킬 수 있었다.

나. 롤의 분쇄속도 80rpm일 경우 회전비 증가와 분쇄처리횟수 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향

1) 롤러의 회전비 증가와 분쇄처리횟수가 분쇄생성물의 평균입도에 미치는 영향

표 5-8과 그림 5-19에서 보듯이 회전비 1:2 경우 1차 분쇄 처리 후 평균입도의 크기가 2.991mm 로서 조파쇄 영역이고, 2~5차 분쇄 처리 후 $1.986\sim 1.034\text{mm}$ 로 중간조파쇄 영역, 6~8차 분쇄 과정에서는 $0.989\sim 0.892\text{mm}$ 로 미분쇄 영역으로 구분되었으며, 5차 이상 분쇄 처리 후부터 평균입도의 크기는 미소하게 감소되었다.

표 5-8. 세라믹 치형 롤의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비, 분쇄 처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도 분석치

	회전비			
	1 : 2	1 : 3	1 : 4	1 : 5
1차분쇄	2.991 mm	1.870 mm	1.800 mm	1.320 mm
2차분쇄	1.986 mm	1.440 mm	1.350 mm	1.060 mm
3차분쇄	1.409 mm	1.240 mm	1.220 mm	0.890 mm
4차분쇄	1.263 mm	1.150 mm	1.090 mm	0.790 mm
5차분쇄	1.034 mm	1.090 mm	1.020 mm	0.700 mm
6차분쇄	0.989 mm	1.050 mm	0.970 mm	0.630 mm
7차분쇄	0.929 mm	0.990 mm	0.940 mm	0.600 mm
8차분쇄	0.892 mm	0.920 mm	0.890 mm	0.560 mm

롤의 회전비 1:3에서는 1~6차 분쇄 처리과정에서 평균입도의 크기가 1.870~1.090mm로 중간조파쇄, 7~8차 분쇄 구간에서는 0.990~0.920mm로 중간미분쇄 영역으로 구분되었고, 4차 이상 분쇄처리 후에는 평균 입자의 크기 변화폭이 작았다. 회전비 1:4경우 1~5차 분쇄 구간에서는 1.800~1.020mm로 중간조파쇄, 6~8차 분쇄 구간에서는 0.970~0.890mm로 중간미분쇄 영역으로 구분되었다. 분쇄처리횟수에서 회전비1:3과 1:4의 경우 1:2보다 1mm이상 미분쇄되었다. 5차 이상 분쇄처리 후의 미분쇄는 적게 향상되었다. 회전비 1:5 경우 1~2차 분쇄 구간에서 1.320~1.060mm로 중간조파쇄 영역, 3~8차 분쇄부터는 중간미분쇄의 영역으로 구분되었으며, 6차 이상 분쇄처리 이후부터는 점차적으로 미분쇄 구간으로 분쇄생성물의 미분화가 진행되었고, 분쇄생성물의 미분화는 세라믹치형롤도 회주철치형롤과 마찬가지로 속도와는 무관하고, 회전비 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

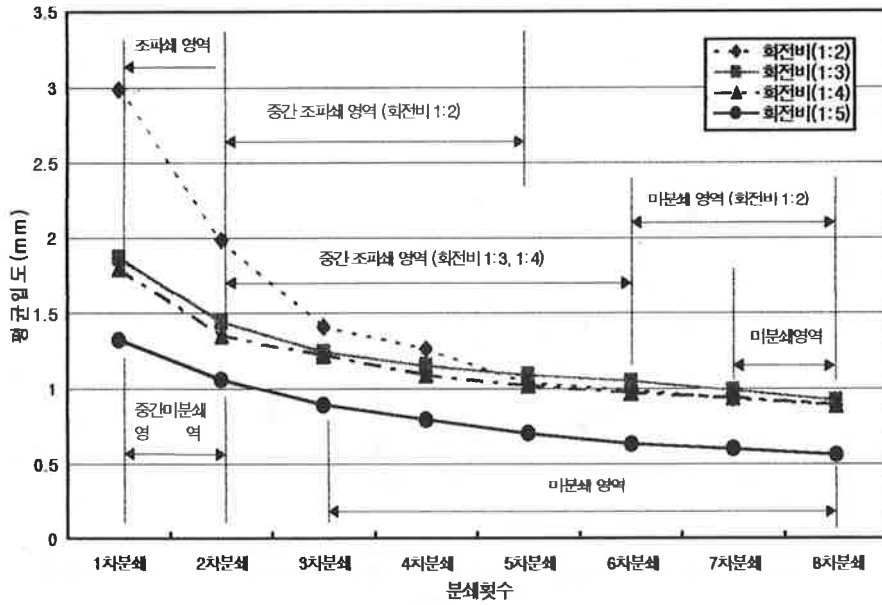


그림 5-19. 세라믹 치형 롤의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비 증가별, 분쇄처리횟수 증가에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 평균입도 분포도

2) 롤의 회전비 및 분쇄 처리 횟수가 분쇄생성물에 미치는 영향

그림 5-20은 고춧가루 분쇄 생성물의 50%가 통과한 입자 크기에 대한 입도분포도이고, 표 5-9과 그림 5-21~5-24는 세라믹 치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비 및 분쇄 처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 잔류 입도 분포에 대한 결과치와 입도 분포도이다.

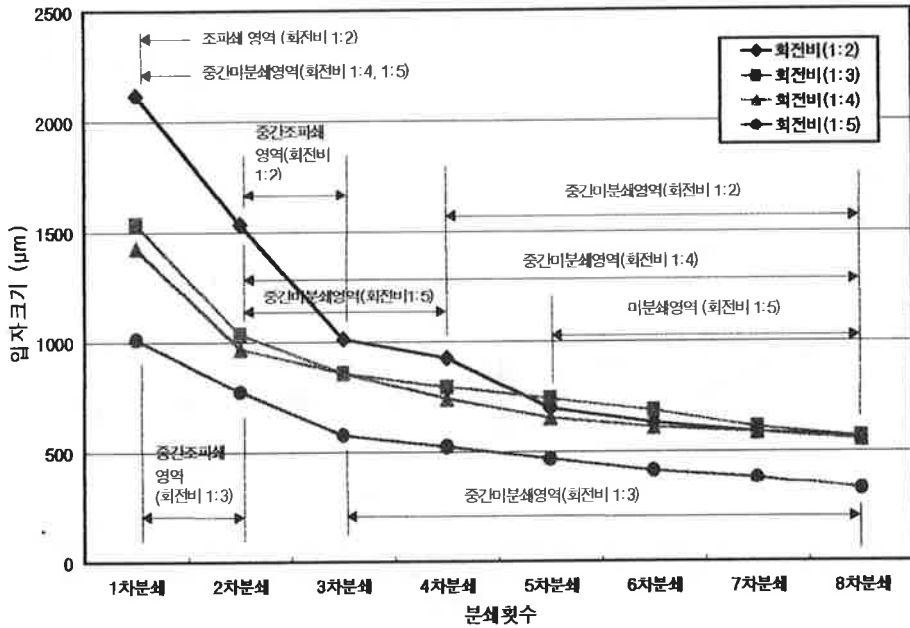


그림 5-20. 세라믹 치형틀의 분쇄속도 80rpm 경우 회전비를 1:2에서 1:5로 증가시켰을 때 분쇄처리 1차에서 8차 증가별 고춧가루 분쇄생성물 50% 통과한(d50) 구간 영역의 입자 크기 분포도

표 5-9와 그림 5-21에서 보듯이 롤의 회전비 1:2 경우 분쇄생성물의 d50 구간의 입도를 비교해 보면 1차 분쇄는 2,120 μm로 조파쇄, 2~3차 분쇄는 1,533~1,011 μm로 중간조파쇄, 4~8차 분쇄 처리과정에서는 924~565 μm로 중간미분쇄 영역으로 구별되었다.

4차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루를 생산할 수 있는 구간에 속하게 되었고, 6차 분쇄 처리 후 <825 μm 입자크기 60%이상을 분쇄 할 수 있었다. 5차 이상 분쇄처리 후부터 고춧가루의 입자크기 미분쇄 변화폭이 작아져 임계 분쇄처리 횟수가 5차임을 분석 할 수 있었다.

표 5-9. 세라믹 치형롤의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비별 및 분쇄 처리횟수에 따른 분쇄생성물의 잔류 입도 분석

	세라믹 치형롤의 회전비 (1:2), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	3359	2054	1663	1359	1098	1054	989	902
d60	2294	1294	1185	1033	837	772	696	652
d50	2120	1533	1011	924	696	630	587	565
d40	1967	1380	859	794	576	544	522	522
	세라믹 치형롤의 회전비 (1:3), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2098	1707	1294	1141	1076	1011	946	880
d60	1783	1207	989	902	837	783	728	641
d50	1533	1033	859	794	739	685	609	565
d40	1185	902	739	674	630	587	544	522
	세라믹 치형롤의 회전비 (1:4), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	2054	1467	1185	1076	1011	946	902	815
d60	1684	1076	967	848	761	696	652	609
d50	1424	967	859	739	652	609	587	554
d40	1174	837	728	609	565	544	533	500
	세라믹 치형롤의 회전비 (1:5), μm							
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
d80	1707	1120	967	815	696	587	565	522
d60	1163	902	696	587	522	467	446	391
d50	1011	772	576	522	467	413	380	326
d40	858	609	511	467	402	337	304	<326

- † d80 : 분쇄생성물의 80% 통과
- d60 : 분쇄생성물의 60% 통과
- d50 : 분쇄생성물의 50% 통과
- d40 : 분쇄생성물의 40% 통과

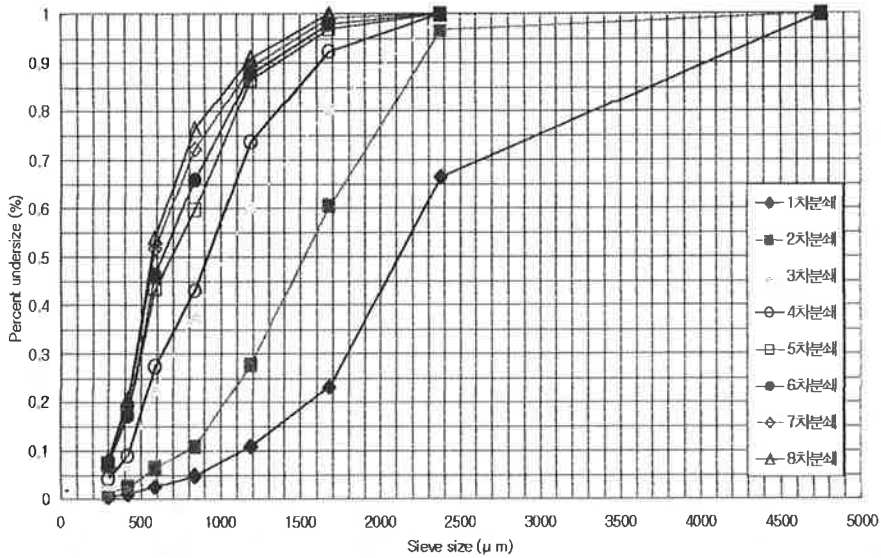


그림 5-21. 세라믹 치형의 분쇄속도 80rpm 경우에서 회전비 1:2일때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 분포곡선

롤의 회전비 1:3에서 분쇄생성물의 d50 구간의 입도를 비교해 보면 1~2차 분쇄는 1,533~1,033 μm 로 중간조파쇄, 3~8차 분쇄는 859~565 μm 로 중간미분쇄 영역으로 분석되었다. 그림 5-22과 표 5-9에서 보듯이 3차 분쇄 처리 후 굵은 고춧가루를 생산 할 수 있었고, 5차 분쇄 처리 후 60%가 <825 μm 이하 였으며, < 425 μm 는 20% 정도 분쇄 되었다. 4차 이상 분쇄처리 후 미분쇄량이 증가되지 않음으로서 임계 분쇄 처리 횟수는 4차임을 분석 할 수 있었다.

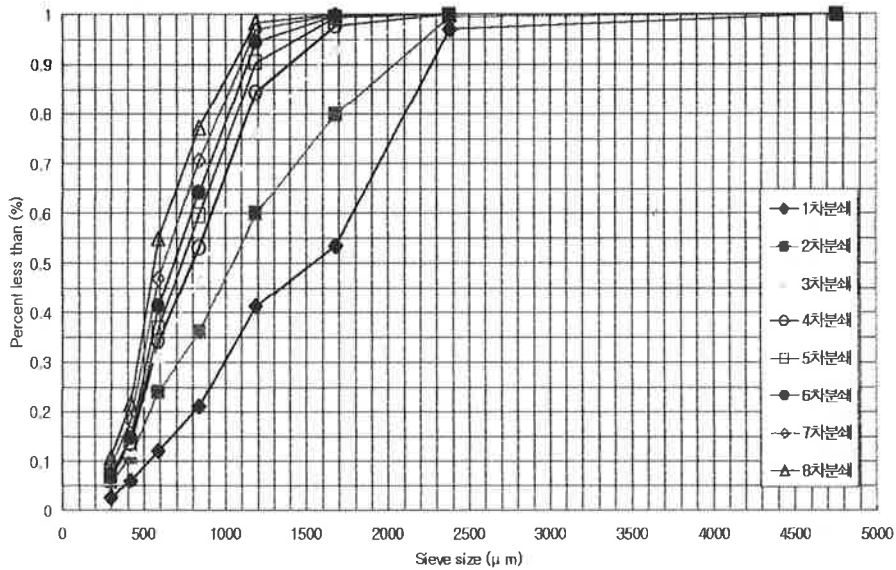


그림 5-22. 세라믹 칩형 룰의 분쇄속도 80rpm 조건에서 회전비 1:3 일 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄 생성물의 누적 입도 분포도

룰의 회전비 1:4 경우 분쇄생성물의 d50 구간의 입도를 비교해 보면 1차 분쇄 구간에서 $1,174\mu\text{m}$ 로 중간조파쇄 영역, 2~8차 분쇄 구간에서는 $967\sim 554\mu\text{m}$ 로 중간미분쇄 영역인 구간을 나타냈으며, 6차 분쇄에서 8차 분쇄까지 d50이 $100\mu\text{m}$ 정도가 미분쇄 되었다. 표 5-9과 그림 5-23에서 보듯이 3차 분쇄 후 $<825\mu\text{m}$ 고춧가루 입자가 45%정도이고, 4차 분쇄처리 후 $<848\mu\text{m}$ 가 60% 였고, $<425\mu\text{m}$ 가 10%정도 분쇄되었다. 8차 분쇄 후 $<825\mu\text{m}$ 가 80%이상 이 되었고, $<425\mu\text{m}$ 는 20%정도로 미분쇄량이 향상되었다. 5차 이상 분쇄처리 후부터 미분쇄량이 미세하게 증가됨으로서 임계 분쇄처리횟수는 5차임을 분석 할 수 있었다.

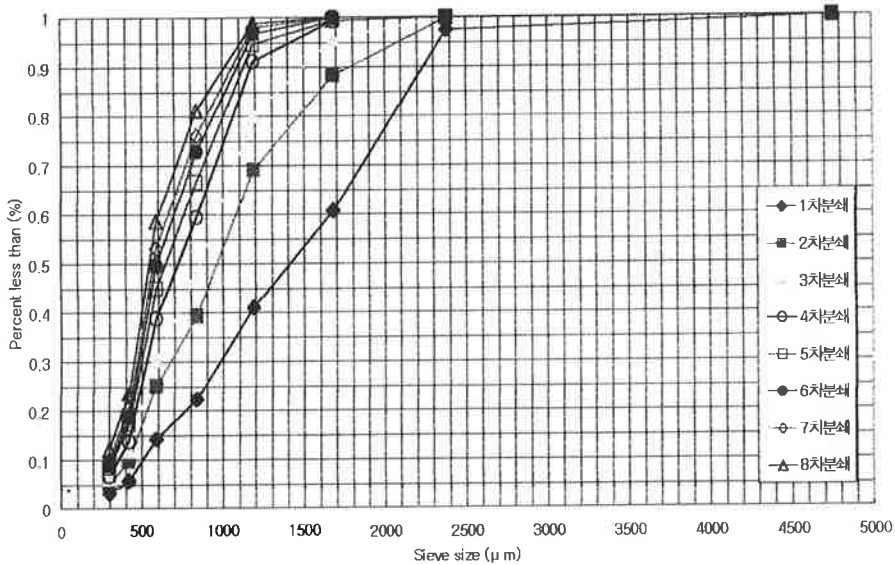


그림 5-23. 세라믹 칩형 물의 분쇄속도 80rpm 조건에서 회전 1:4 일 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄생성물의 누적 입도 분포곡선

물의 회전비 1:5 경우 분쇄생성물의 d50구간의 입도를 비교해 보면 1차 분쇄 과정에서 1011 μ m로 중간조파쇄, 2~3차 분쇄 처리 과정에서 609~511 μ m로 중간미분쇄, 4~8차 분쇄처리 과정에서는 467~326 μ m로 미분쇄 영역으로 구분되었다. 그림 5-24와 표 5-9에서 보듯이 2차 분쇄 처리 후 <825 μ m이 55%정도 분쇄되었고(굵은 고춧가루 기준 : 45%), 4차 분쇄 처리 후 <825 μ m이 80%정도, <425 μ m가 20% 정도 분쇄되었다. 5차 분쇄처리 후 <825 μ m가 90%, <425 μ m가 40% 이상이 분쇄됨으로서 5차 분쇄에서 보통 고춧가루를 생산할 수 있는 것으로 분석되었다. 6차 분쇄처리 과정까지 미분쇄량이 증가되는 경향이였으며, 7차 이상 분쇄처리 과정에서부터 미분쇄량의 증가폭이 미세함으로서 임계 분쇄 처리횟수가 7차임을 분석 할 수 있었다.

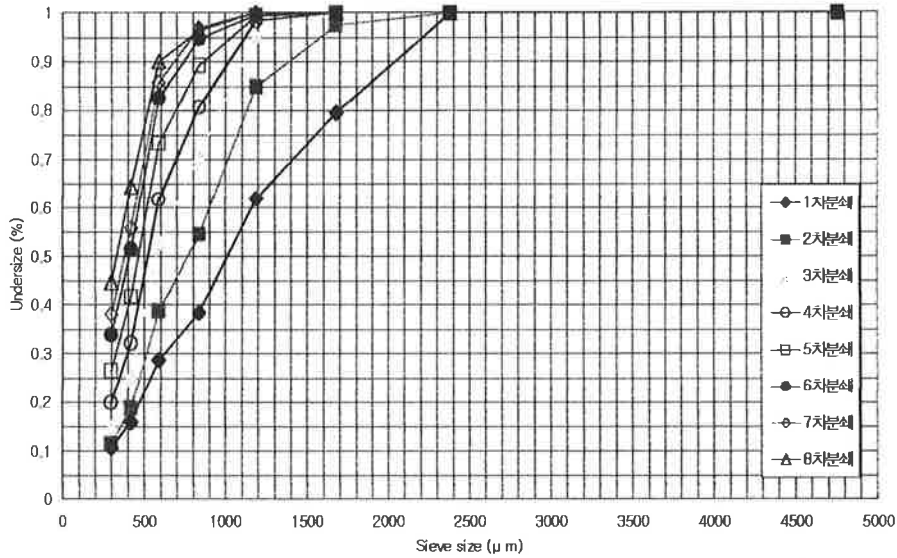


그림 5-24. 세라믹 치형 롤의 분쇄속도 80rpm 조건에서 회전비 1:5 일 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차로 증가하였을 때 고춧가루 분쇄 생성물의 누적 입도 분포도

세라믹 치형롤은 분쇄속도80rpm에서 굵은 고춧가루를 생산하기위한 분쇄조건은 1:2에서 4차분쇄처리, 롤회전비1:3과 1:4에서 3차분쇄처리, 롤회전비 1:5에서 2차분쇄처리, 보통고춧가루는 롤회전비 1:5에서 5차분쇄 처리후 생산할 수 있었다.

본 실험을 통하여 고추분쇄시 분쇄속도 80rpm, 롤회전비 1:5인 분쇄조건이 분쇄효율을 가장 많이 향상시켰음을 분석 할 수 있었다.

3. 회주철치형롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄 소요토크

가. 회주철치형롤분쇄기의 분쇄속도 40rpm경우 롤의 회전비별 분쇄 처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 측정

표 5-10 및 그림 5-25은 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 고춧가루 소요동력

측정 결과와 소요동력 분포도이다.

표 5-10. 회주철 치형롤분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 고춧가루 소요동력 측정 결과치

	평균 소요동력 (N-m)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	13.125	16.157	17.167	19.884
2차분쇄	10.741	9.270	13.871	13.439
3차분쇄	10.202	19.129	15.764	16.412
4차분쇄	9.241	25.662	21.287	19.767
5차분쇄	9.692	28.792	25.241	22.327
6차분쇄	10.104	28.017	26.094	23.642
7차분쇄	10.526	28.527	24.426	25.894
8차분쇄	10.879	26.683	25.927	25.927

표5-10에서 보듯이 롤의 회전비 1:2, 1:3, 1:4, 1:5모두 1차 분쇄보다 2차 분쇄시 소요동력이 감소하였는데 롤의 1:2에서 1.962N-m, 1:3에서 9.867N-m, 1:4에서 2.943N-m, 1:5에서는 6.867N-m 감소하고 3차 분쇄부터 5차분쇄까지는 소요동력차가 높게 증가하였으나 6-8차는 소요동력차가 작게 분석되었다.

이것은 1차 분쇄시에는 고추시료를 조파쇄 하는 동안 소요동력이 많이 소모되었기 때문인 것으로 분석되었고, 2차 분쇄에서 소요동력이 1차 분쇄보다 감소한 원인은 1차 분쇄에서 조파쇄 된 것을 중간조파쇄 시킴으로서 소요동력이 감소한 것으로 판단되며, 3차 분쇄부터는 중간조파쇄 된 분쇄물이 중간 미분쇄 단계로 들어가면서 소요동력이 단계별로 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

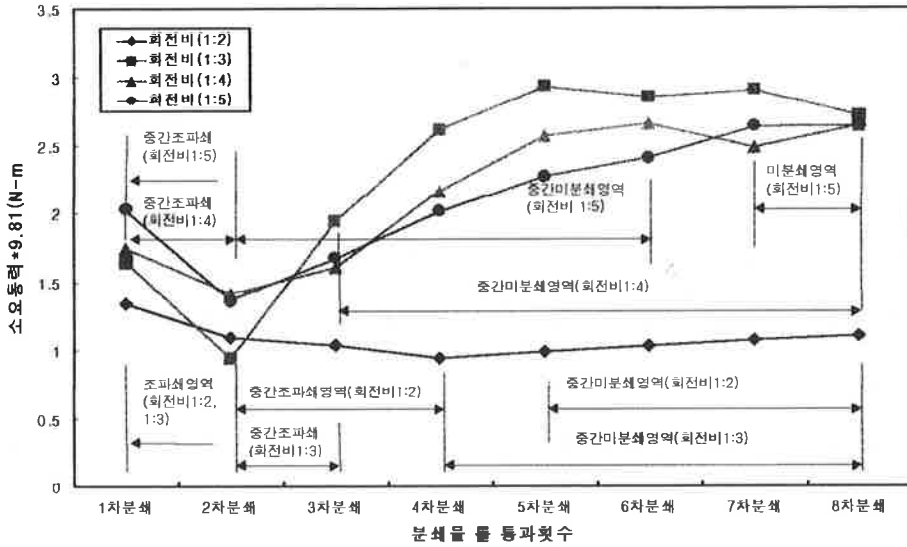


그림 5-25. 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 및 분쇄처리 횟수 증가에 따른 고춧가루 소요 동력 분포도

그림 5-25에서 보듯이 롤의 회전비, 분쇄물의 롤 통과횟수에 따른 회주철 치형롤의 소요동력을 비교하면 롤의 회전비 1:2에서는 소요동력이 9.241~13.125N-m로 최대·최소치 차가 약 3.924N-m로 큰 차이를 보이지는 않았다. 조분쇄 영역인 1차 분쇄에서 13.125N-m로 소요동력이 가장 많이 소요되었으며, 중간조파쇄 영역인 2~4차 분쇄에서는 10.742~9.241N-m로 약 10.104N-m가 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 5~8차 분쇄에서는 9.692~10.879N-m로 약 10.300N-m가 소요되어 롤의 회전비 1:2에서는 평균 소요동력이 약 10.791N-m가 소요되는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:3에서는 소요동력이 9.270~28.792N-m로 최대·최소치 차가 약 19.620N-m로 큰 차이를 보였고, 그림 5-25에서 보면 중간조파쇄 영역인 1~3차 분쇄시에는 16.157~19.129N-m로 약 114.715N-m로, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 25.662~26.682N-m로 27.468N-m로 중간조파쇄 영역에 비해 약 12.753N-m가 더 소요되어 분쇄물이 미분화 되

면서 소요동력이 증가하였고, 전체적으로 약 22.563N·m가 소요되는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:4에서는 소요동력이 13.871~26.094N·m로 최대·최소치가 112.753N·m로 나타났고, 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄시에는 17.167~13.871N·m로 약 15.696N·m로, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 15.764~25.839N·m로 약 23.544N·m가 소요되어, 중간조파쇄 영역에 비해 7.847N·m 동력이 더 소요되어 롤의 회전비 1:3과 마찬가지로 분쇄물이 미분화로 인하여 소요동력이 증가하였으며, 전체적으로 21.582N·m가 소요되는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:5에서는 소요동력이 13.439~25.839N·m로 최대·최소치의 차가 12.753N·m로, 회전비 1:4와 같았고, 중간조파쇄 영역인 1차 분쇄에서는 19.884N·m로 비교적 소요동력이 크게 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 2~6차 분쇄에서는 13.439~23.642N·m로 약 18.639N·m가 소요되었다. 미분쇄 영역인 7~8차 분쇄에서는 25.898~25.839N·m로 약 25.506N·m로 나타나 전체적으로 20.601N·m가 소요되었으며, 회전비 1:5 경우도 분쇄물이 미분화되면서 소요동력이 증가됨이 분석되었다.

롤의 회전비 1:2 경우 굵은 고춧가루의 생산을 위해 8차분쇄 처리한 결과 84.366N·m 동력이 소요되었고(<825 μ m가 48%통과), 1:3 회전비 경우 4차 분쇄처리한 결과 73.575N·m(<825 μ m가 58%통과), 1:4 경우 3차 분쇄처리한 결과 46.107N·m(<825 μ m가 48%통과), 1:5 경우 3차 분쇄처리한 결과 50.031N·m(<825 μ m가 58%통과)동력이 소요되는 것으로 분석되었다.

보통고춧가루 생산(<825 μ m가 45% 통과) 경우 회전비 1:2에서는 5차 이상 분쇄처리 후에는 미분쇄량의 증가가 미약하기 때문에 동력이 소요되어도 보통고춧가루를 생산 할 수 없었으나, 1:5 회전비에서는 회전비차

에 의한 전단력이 향상되어 8차 분쇄처리에서 167.75N·m 소요동력으로 보통고춧가루(<825 μ m가 65%, <425 μ m가 45%)를 생산 할 수 있는 것으로 분석되었다.

나. 회주철 치형 롤의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 및 분쇄

처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 측정

표 5-11 및 그림 5-26은 회주철 치형롤러 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가 및 분쇄처리 횟수 증가가 고춧가루분쇄 소요동력에 미치는 영향을 측정한 결과치이다. 표 5-11에서 보면, 롤의 회전비 1:2에서는 소요동력이 8.613~9.751N·m로 최대·최소치 차가 0.981N·m로 근소하였다. 그림 5-26에서 보듯이 조분쇄 영역인 1차 분쇄에서 9.751N·m로 소요동력이 가장 많이 소요되었으며, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서는 9.015~9.191N·m로 약 8.827N·m가 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 8.946~8.613N·m 동력임 소요되었다.

표 5-11. 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 고춧가루분쇄 소요동력 측정 결과치

	평균 소요 동력 (N·m)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	9.751	13.586	17.559	14.028
2차분쇄	9.015	8.034	11.065	11.556
3차분쇄	9.191	8.936	11.605	11.693
4차분쇄	8.946	8.681	11.016	11.507
5차분쇄	8.927	8.466	11.821	11.536
6차분쇄	9.172	8.593	11.507	11.673
7차분쇄	9.133	8.858	11.310	11.359
8차분쇄	8.613	8.907	11.409	11.114

분쇄처리 횟수가 5회 이상 과정에서는 미분쇄가 계속증가되지 않음으로서 분쇄시 사용되는 동력도 일정하게 소요됨을 분석할 수 있었다.

롤의 회전비 1:3에서는 소요동력이 8.034~13.586N-m로 최대·최소치의 차가 약 5.886N-m로 큰 차이가 없었고, 그림 5-26에서 분쇄소요 동력을 비교하면 중간조파쇄 영역인 1~4차 분쇄시에는 13.586~8.681N-m로 약 1.0N-m로, 중간미분쇄 영역인 5~8차 분쇄에서는 8.466~8.907N-m로 약 8.829N-m가 소요되어 중간조파쇄 영역에 비해 약 0.981N-m가 감소하였고, 전체적으로 8.829N-m가 소요되는 것으로 분석되었다.

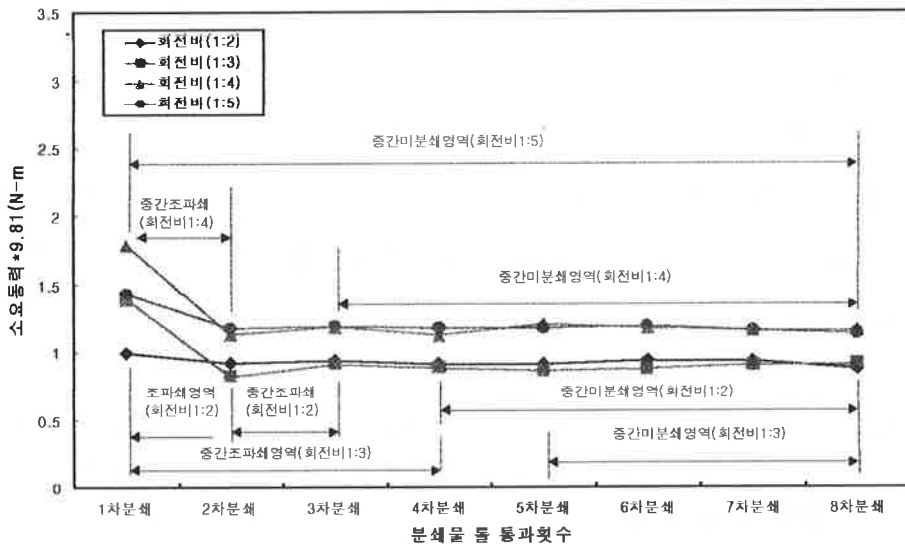


그림 5-26. 회주철 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 고춧가루 소요동력 분포도

롤의 회전비 1:4에서는 소요동력이 11.016~17.589N-m로 최대·최소치 차가 6.572N-m로 나타났고, 그림 5-26에서 보듯이 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄시에는 17.559~11.065N-m로 약 14.715N-m로, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 11.605~11.409N-m로 약 11.772N-m가 소요되어, 중간조파쇄 영역에 비해 2.943N-m가 감소되어 롤의 회전비 1:3과 마

찬가지로 분쇄소요동력이 감소되는 원인은 비분쇄효율이 증가되지 않았기 때문인 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:5에서는 소요동력이 11.114~11.693N·m로 최대·최소치차가 0.578N·m로 그림 5-26에서와 같이 1~8차 분쇄까지 중간미분쇄 영역을 나타내고 있으며 14.028~11.114N·m로 전체적으로 약 11.772N·m의 동력이 요구되었고, 전반적으로 분쇄물의 롤 통과횟수의 증가에 상관없이 소요동력이 일정함을 나타내는 것으로 분석되었다.

굵은 고춧가루를 분쇄속도를 40rpm에서 80rpm으로 증가시키면서 시간당 분쇄처리량을 증가시키기 위한 분쇄 실험에서 롤의 회전비 1:2 경우 5차분쇄 46.107N·m 동력이 소요되었고(<825 μ m가 57%통과), 1:3 회전비 경우 5차 분쇄처리 횟수로 4.9N·m(<825 μ m가 45%통과), 1:4 경우 5차 분쇄처리로 62.784N·m(<825 μ m가 60%통과), 1:5 경우 2차 분쇄처리로 25.506N·m(<825 μ m가 46%통과)동력이 소요됨을 분석할 수 있었다.

보통고춧가루(<825 μ m가 60%, <425 μ m가 45%) 생산 경우 롤의 회전비 1:2에서는 8차 분쇄 후 72.594N·m 동력이 소요되었음에도 6차 이상 분쇄처리 후에는 미분쇄량이 증가가 미세하기 때문에 분쇄처리 횟수를 더 증가시켜도 즉, 더 많은 동력이 소요되어도 보통고춧가루를 생산할 수 없으나, 분쇄시 전단력을 증가시킨 1:5 회전비에서는 8차 분쇄처리에서 94.176N·m 소요동력으로 보통고춧가루를 생산할 수 있음을 분석할 수 있었다. 회주철 치형롤의 회전비 1:5에서 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가 시킴으로서 166.770N·m에서 94.176N·m으로 소요동력을 감소시킬 수 있음을 실험으로 분석할 수 있었다.

4. 세라믹 치형 롤 분쇄기의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄 처리 횟수에 따른 평균소요토크

가. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 및 분쇄처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 측정

표 5-12와 그림 5-27은 세라믹 치형 롤러 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 및 분쇄처리 횟수 증가가 고춧가루 분쇄 소요동력에 미치는 영향을 측정한 결과치이다.

표 5-12. 세라믹 치형롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄 소요 동력 측정 결과치

	평균소요동력 (N-m)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	9.044	15.303	19.325	9.966
2차분쇄	7.926	11.359	14.715	7.612
3차분쇄	14.665	17.157	11.968	13.400
4차분쇄	14.077	15.283	10.594	17.422
5차분쇄	13.665	23.867	10.496	24.946
6차분쇄	13.881	23.073	10.202	23.740
7차분쇄	15.107	16.510	10.006	24.426
8차분쇄	15.646	22.857	10.006	23.318

표 5-12에서 보듯이 세라믹 치형롤러도 회주철 치형롤러와 마찬가지로 전체적으로 2차 분쇄에서 소요동력이 1차 분쇄보다 감소하고 3차 분쇄시 부터는 소요동력이 일정한 경향을 나타냄을 분석 할 수 있었다. 이러한 경향으로 미루어 회주철 치형 롤러나 세라믹 롤러 분쇄기에서의 분쇄생성물은 롤러의 속도, 롤의 회전비에 따른 소요동력의 증가·감소 형태는 비슷하게 분석되었다.

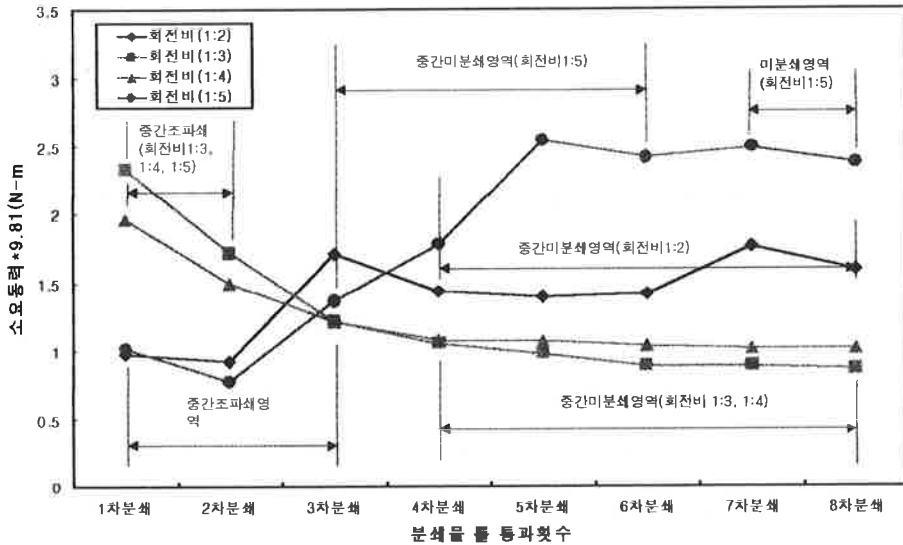


그림 5-27. 세라믹 치형롤러 분쇄기의 분쇄속도 40rpm일 때 물의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 분포도

물의 회전비, 분쇄물의 물 통과횟수에 따른 세라믹 치형 롤러의 속도에 따른 소요동력을 비교하면 물의 회전비 1:2에서는 소요동력이 7.926~15.646N-m로 최대·최소치 차가 6.867N-m로 근소하나, 그림 5-27에서 보면, 중간조파쇄 영역인 1~3차 분쇄에서는 9.044~14.665N-m로 약 10.791N-m가 소요되었으며, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 14.007~15.646N-m로 약 14.715N-m가 소요되어 물의 회전비 1:2에서는 분쇄생성물이 조파쇄 영역에서 미분쇄의 영역으로 들어가면서 소요동력이 증가하였고, 평균적으로 약 12.753N-m가 소요되는 것으로 분석되었다.

물의 회전비 1:3에서는 소요동력이 11.357~223.867N-m로 최대·최소치 차가 12.753N-m로 나타났고, 그림 5-27에서 분쇄영역을 비교하여 보면 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄시에는 15.303~11.359N-m로 약 13.734N-m가, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 17.167~22.875N-m로 약 19.620N-m로 중간조파쇄 영역에 비해 약 15.696N-m가 더 소요되어

분쇄물이 미분화 되어감으로 분쇄기에 걸리는 소요동력이 증가하였고, 평균적으로 약 18.639N·m가 소요되어 분쇄시 소모되는 동력은 미분쇄구간에서 주로 소요되는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:4에서는 소요동력이 10.006~119.325N·m로 최대·최소치 차가 9.319N·m로 나타났고, 그림 5-26과 비교하여 살펴보면 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄시에는 19.325~14.715N·m로 약 16.677N·m가, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 11.968~10.006N·m로 약 10.791N·m가 소요되어 오히려 중간조파쇄 영역에 비해 5.886N·m가 감소되는 것을 볼 수 있었고, 평균적으로 12.753N·m정도 소요되는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:5에서는 소요동력이 7.612~24.946N·m로 최대·최소치 차가 17.658N·m로, 큰 차이를 나타냄을 분석 할 수 있었다. 그림 5-27에서 소요동력을 보면 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄에서는 9.966~7.612N·m로 약 8.829N·m가, 중간미분쇄 영역인 3~6차 분쇄에서는 13.400~23.740N·m로 약 19.620N·m가 소요되었고, 미분쇄 영역인 7~8차 분쇄에서는 24.426~23.318N·m로 약 23.544N·m로 나타나 롤의 회전비 1:5에서는 분쇄생성물이 미분화가 진행되면서 소요되는 동력이 점차적으로 증가하였고, 평균적으로 17.658N·m가 소요되는 것으로 분석되었다.

세라믹 치형 롤러를 이용하여 굵은고춧가루를 생산하기 위해서 롤의 회전비 1:2 경우 5차분쇄 처리에 59.841N·m 동력이 소요되었고(<825 μ m가 49%통과), 1:3 회전비 경우 3차 분쇄처리 횟수로 44.145N·m(<825 μ m가 50%통과), 1:4 경우 3차 분쇄처리로 46.107 N·m(<825 μ m가 48%통과), 1:5 경우 3차 분쇄처리로 48.167N·m(<825 μ m가 55%통과)동력이 소요됨을 분석 할 수 있었다.

보통고춧가루 생산 경우 롤의 회전비 1:2에서는 5차 이상 분쇄처리 후에는 미분쇄량이 증가되지 않으면서, 단지 동력만 소요되면서 보통고춧

가루를 생산 할 수 없으나, 1:5 회전비에서는 미분량이 증가되어 7차 분쇄처리에서 145.188N·m 소요동력으로 보통 고춧가루를 생산 할 수 있음을 분석할 수 있었다.

나. 세라믹 치형 롤러 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비

분쇄처리 횟수에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 측정

표 5-13과 그림 5-28는 세라믹 치형 롤러 분쇄기의 분쇄속도를 40rpm에서 80rpm증가 시켰을 때 롤의 회전비 및 분쇄처리 횟수 증가가 고춧가루 분쇄 소요동력에 미치는 영향을 측정한 결과치이다.

표 5-13에서 보면, 롤의 회전비 1:2에서는 소요동력이 8.564~14.126N·m로 최대·최소치 차가 5.886N·m로 큰 차이를 보이지는 않았고, 그림 5-28에서 소요동력을 비교하여 보면 조분쇄 영역인 1차 분쇄에서 8.966N·m로, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서는 8.564~14.126N·m로 약 11.772N·m가 소요되었으며, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 10.065~13.940N·m로 11.772N·m가 소요되었고, 분쇄시 소요되는 동력은 약 10.790N·m가 소요되는 것으로 분석되었다.

표 5-13. 세라믹 치형롤러 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 측정 결과치

	평균 소요 동력 (N·m)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	8.966	18.344	17.658	7.151
2차분쇄	8.564	14.126	13.243	7.014
3차분쇄	14.126	12.164	11.968	9.211
4차분쇄	10.065	11.281	10.692	10.791
5차분쇄	13.027	10.692	10.006	10.761
6차분쇄	10.133	10.300	9.515	13.145
7차분쇄	11.673	9.711	9.221	14.352
8차분쇄	13.940	9.025	8.730	18.276

롤의 회전비 1:3에서는 소요동력이 9.025~18.344N-m로 최대·최소치 차가 8.829N-m로, 그림 5-28에서 소요동력을 비교하여 보면 조파쇄 영역인 1차 분쇄시에는 18.344N-m로, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서는 14.126~12.164N-m로 약 12.753N-m가, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 11.281~9.025N-m로 약 9.81N-m가 소요되었고, 전체적으로 11.772N-m가 소요되는 것으로 분석되었다.

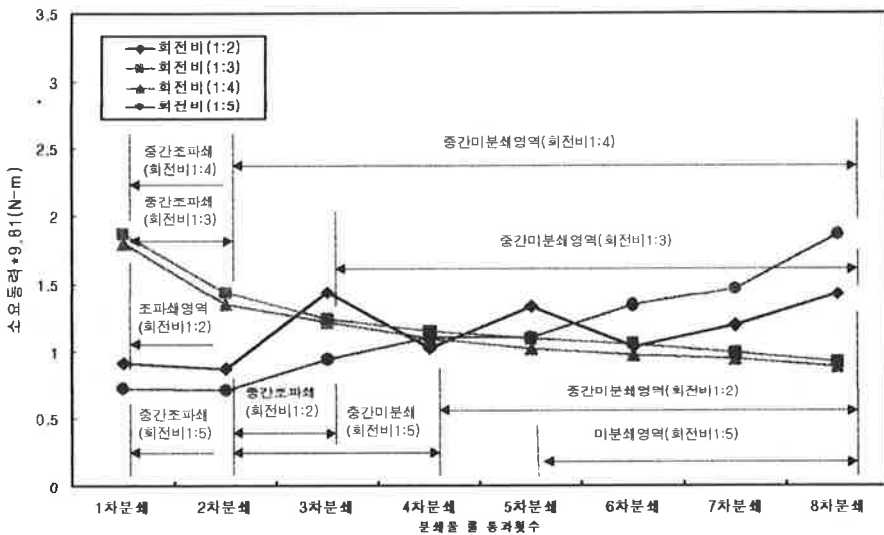


그림 5-28. 세라믹 치형 롤러 분쇄기의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄 소요동력 분포도

롤의 회전비 1:4에서는 소요동력이 8.730~17.658N-m로 최대·최소치 차가 8.927N-m로, 그림 5-28에서 살펴본 바와 같이 중간조파쇄 영역인 1차 분쇄시에는 17.658N-m로, 중간미분쇄 영역인 2~8차 분쇄에서는 13.243~8.730N-m로 약 10.791N-m가 소요되어, 중간조파쇄 영역에 비해 6.867N-m가 감소되어 롤의 회전비 1:3과 마찬가지로 분쇄물이 미분화 되어감으로 소요동력이 감소하는 것으로 분석되었다.

롤의 회전비 1:5에서는 소요동력이 7.151~18.276N·m로 최대·최소치차가 11.124N·m로 나타났고, 그림 5-28에서 살펴보면 중간미분쇄 영역인 1~3차 분쇄시에는 7.151~9.211N·m로 약 7.848N·m가 소요되었고, 미분쇄 영역인 4~8차 분쇄시에는 10.791~18.276N·m로 약 13.734N·m가 소요되었고, 전체적으로 약 11.772N·m의 동력이 요구되었으며, 전반적으로 분쇄생성물이 미분화가 되어갈수록 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었다.

세라믹 롤러 분쇄기의 분쇄속도를 40rpm에서 80rpm으로 증가 시킨 굵은고춧가루 생산 분쇄조건에서 롤의 회전비 1:2 경우 4차분쇄 처리에 42.183N·m 동력이 소요되었고(<825 μ m가 42%통과), 1:3 회전비 경우 4차 분쇄처리 횟수로 55.917N·m(<825 μ m가 46%통과), 1:4 경우 3차 분쇄처리로 43.164N·m(<825 μ m가 47%통과), 1:5 경우 2차 분쇄처리로 13.734N·m(<825 μ m가 45%통과)동력이 소요됨을 분석 할 수 있었다.

보통고춧가루 생산 경우 롤의 회전비 1:2에서는 5차 이상 분쇄처리 후에는 미분쇄량이 증가되지 않으면서 동력만 소요되면서 보통고춧가루를 생산 할 수 없으나, 1:5 회전비에서는 미분쇄량이 증가되어 6차 분쇄처리에서 57.879N·m 소요동력으로 보통고춧가루를 생산 할 수 있음을 분석할 수 있었다.

5. 세라믹 치형 롤러와 회주철 치형 롤러의 분쇄속도별, 롤의 회전비별, 분쇄 처리횟수별에 따른 시간당 분쇄처리량

가. 회주철 치형 롤러의 회전속도, 롤의 회전비, 분쇄물의 롤 통과횟수가 시간당 분쇄처리량에 미치는 영향

본 연구에서는 분쇄 작업시 롤러의 분쇄속도, 롤의 회전비, 미분쇄되는 입도의 크기에 따라 롤러에 투입되는 량을 균일하게 공급하기 위해서 분쇄 조건에 따른 시간당 분쇄 능력량을 분석하기 위하여 시간당 분쇄량

을 측정하였다. 표 5-14과 그림 5-29는 금속 치형롤러의 분쇄속도 40rpm 일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄 처리 횟수 증가별 시간당 롤 분쇄량을 측정한 결과치와 분포도이다.

표 5-14. 회주철 치형롤러 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄 처리량

	분쇄물의 시간당 롤 투입량 (kg/hr)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	99.6	102.4	148.0	134.4
2차분쇄	100.3	112.5	122.6	106.0
3차분쇄	148.4	120.4	150.9	170.0
4차분쇄	159.4	135.6	176.3	212.3
5차분쇄	185.0	136.2	243.9	245.0
6차분쇄	202.7	168.9	260.3	251.0
7차분쇄	215.4	186.2	275.5	248.4
8차분쇄	241.2	199.2	279.2	262.0

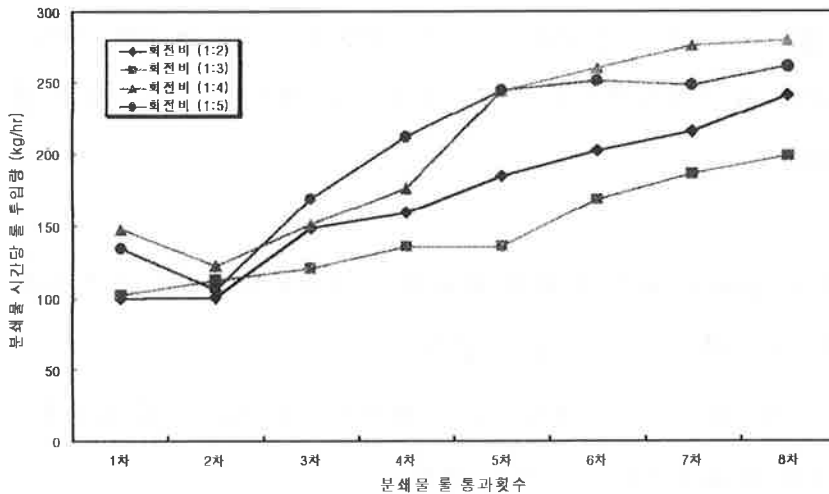


그림 5-29. 회부철치형롤러 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄 처리량 분포도

5-14과 그림 5-29에서 보듯이 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 1:2 경우 1차 분쇄처리과정인 조파쇄영역에서 99.6kg/hr인 량이 분쇄 되고 중간미분쇄영역인 5차부터 8차 까지 185 - 241kg/hr으로 분쇄 할 수 있는 처리량이 증가되었다.

롤의 분쇄비 1:3, 1:4, 1:5에서도 분쇄처리 횟수가 증가됨에 따라 분쇄 처리량이 증가됨이 분석되었다. 2차 분쇄처리과정에서 분쇄 처리량이 감소된 원인은 1차 분쇄처리 과정에서는 큰 입자인 고추와 롤러와의 접촉각이 큰 상태였으나, 1차 분쇄 처리후 2-3.5로 조파쇄된 고추조각은 아직 표면에 왁스층이 존재하고 있는 상태에서 2차 분쇄 과정에서 롤러와 고춧가루 입자 사이에서 접촉되는 각이 작아져서 롤 사이로 고춧가루를 끌어들이는 힘이 약, 즉 마찰력이 작게 발생되어 되어 분쇄처리량이 감소되었을 것으로 사료된다. 3차 이상 분쇄처리과정에서는 고춧 표면의 왁스층이 감소된 상태이고, 두 롤 사이에 미 분쇄에 의하여 고춧가루 크기가 작아지면서 롤과의 접촉이 증가됨으로서, 즉 접촉각이 증가되어 분쇄 처리 횟수가 증가될수록 분쇄처리량이 증가되었다고 사료된다. 롤의 회전비 1:2에서 1:5로 증가 시켰을 경우 롤의 회전비 차이에 의하여 롤 표면과 고추 사이에 접촉면이 증가됨으로서 마찰계수가 증가될 수 있고, 또한 전단력이 크게 발생되어 고추에 소성변형이 증가하는 원인으로 미분쇄를 촉진시킬 수 있는 원인에 의하여 고춧분쇄처리량이 증가될 것으로 사료된다.

표 5-15와 그림 5-30은 분쇄속도 80rpm으로 증가 시켰을 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄 처리 횟수 증가별 시간당 롤 분쇄처리량을 측정한 결과치와 분포도이다. 회전속도 40rpm과 같이 80rpm에서도 회전비와 분쇄 횟수가 증가하면서 분쇄 처리량도 같은 경향으로 증가되었다.

표 5-15. 회주철 치형롤러 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄처리량

	분쇄물의 시간당 롤 투입량 (kg/hr)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	102.1	96.3	175.8	119.5
2차분쇄	93.0	67.1	92.7	93.1
3차분쇄	133.2	106.1	141.9	208.1
4차분쇄	139.0	111.5	152.4	239.1
5차분쇄	145.1	116.1	218.4	246.7
6차분쇄	170.9	154.3	244.0	292.8
7차분쇄	174.5	164.2	245.1	320.6
8차분쇄	201.8	174.8	249.2	329.3

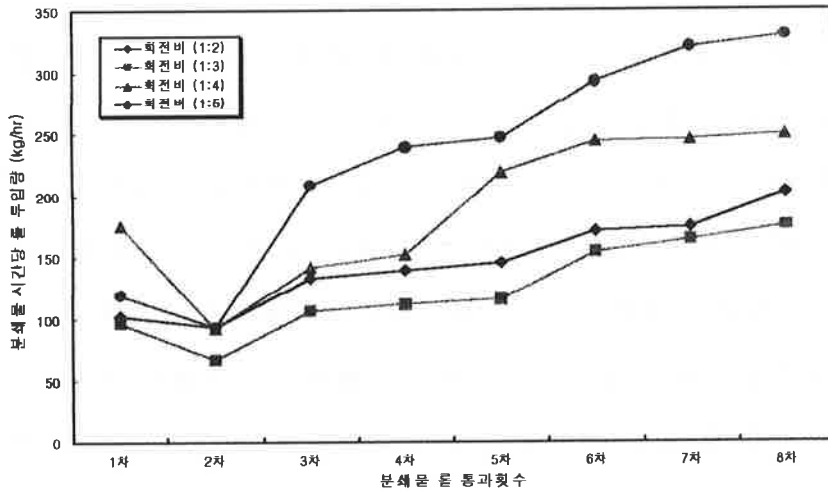


그림 5-30. 회주철치형롤러 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄처리량 분포도

2차 분쇄처리 후 분쇄처리량은 40rpm경우보다 감소된 원인은 회전속도가 빨라지면서 롤 사이에 고추 표면의 왁스층과 롤과 조파쇄된 고추조각과의 접촉각이 2차 분쇄처리과정에서 작아지기 때문에 마찰계수가 작아

저 분쇄처리량도 줄어들게 된다고 사료된다. 분쇄처리 8차 후 분쇄처리량은 분쇄처리 1차 보다 약 2배 정도 상승하였고, 회전비 1:5에서는 1:2보다 1.5배 정도 증가하였다.

나. 세라믹 치형롤러의 회전속도, 롤의 회전비, 분쇄물의 롤 통과횟수가 시간당 분쇄 처리량에 미치는 영향

표 5-16과 그림 5-31은 회주철 치형롤러의 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄 처리 횟수 증가별 시간당 분쇄처리량을 측정한 결과치와 분포도이다.

세라믹 치형롤러 분쇄기의 분쇄속도 40rpm 에서의 분쇄처리량은 표 5-16와 그림 5-31에서 보듯이 분쇄처리 1차 경우 회전비 증가시 분쇄처리량은 약 120kg/hr 정도로 변화량이 적었고, 분쇄처리 횟수 8차 후 분쇄처리량이 2배 정도 증가함을 분석할 수 있었다. 중간 미분쇄 영역인 5차와 8차 분쇄과정에서는 롤의 회전비 1:2에서 1:5로 증가하면 50kg/hr 정도 분쇄처리량이 증가되는 경향을 분석할 수 있었다.

표 5-16. 세라믹 치형 롤러 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄처리량

	분쇄물의 시간당 롤 투입량 (kg/hr)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	126.0	128.2	125.4	116.9
2차분쇄	109.9	129.3	85.7	92.4
3차분쇄	116.6	208.1	143.1	117.5
4차분쇄	132.8	209.7	205.0	218.2
5차분쇄	197.6	214.4	235.6	276.2
6차분쇄	231.1	220.6	237.2	276.8
7차분쇄	232.4	223.6	243.5	285.8
8차분쇄	251.8	280.8	301.3	318.2

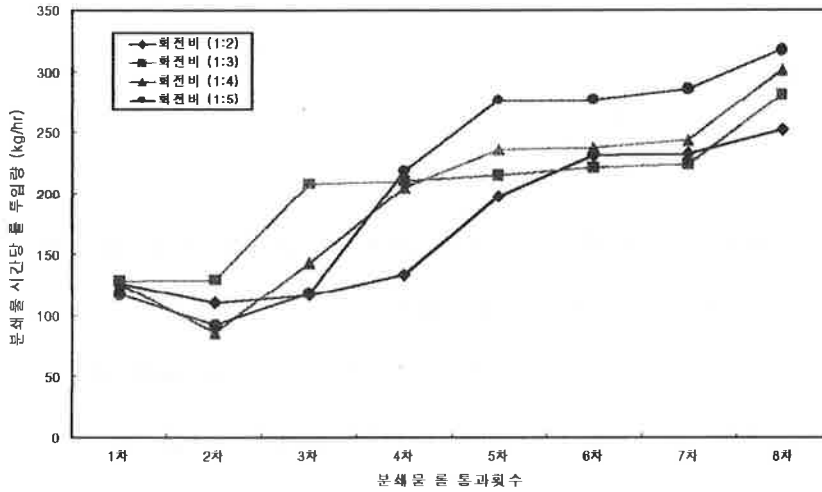


그림 5-31. 세라믹 치형롤러 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄 처리량 분포도

표 5-17과 그림 5-32는 세라믹 치형 롤러의 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄 처리 횟수 증가별 시간당 분쇄처리량을 측정한 결과치와 분포도이다.

표 5-17. 세라믹 치형 롤러 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄처리량

	분쇄물의 시간당 롤 투입량 (kg/hr)			
	회전비 (1:2)	회전비 (1:3)	회전비 (1:4)	회전비 (1:5)
1차분쇄	121.6	130.0	130.0	146.1
2차분쇄	116.5	127.3	93.7	164.2
3차분쇄	154.1	129.5	110.4	237.0
4차분쇄	178.1	136.8	193.8	265.3
5차분쇄	179.6	149.3	252.4	292.3
6차분쇄	182.6	224.2	295.2	293.8
7차분쇄	199.6	230.7	297.4	297.4
8차분쇄	212.6	233.3	321.0	303.6

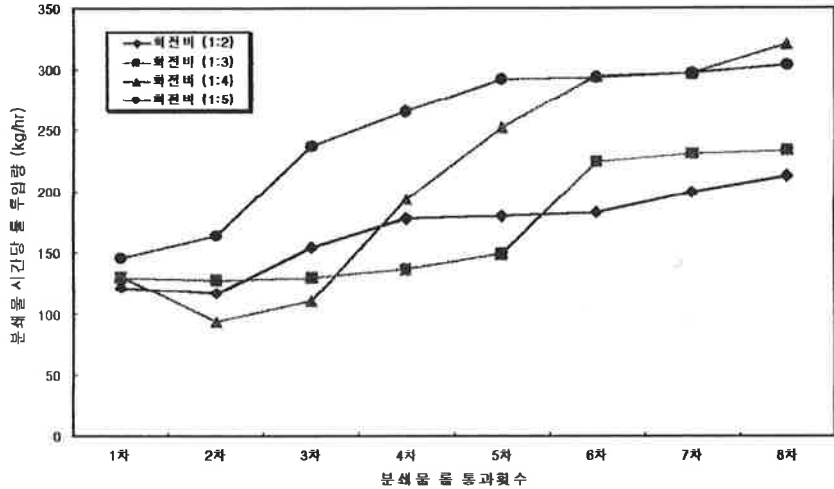


그림 5-32. 세라믹 치형 롤러 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비 증가별, 분쇄처리 횟수 증가별에 따른 시간당 고춧가루 분쇄처리량 분포도

분쇄속도 80rpm과 같이 회전비가 같은 경우 분쇄처리 횟수가 1차에서 8차로 증가에 따라 분쇄처리량이 120 - 145kg/hr에서 210 - 300kg/hr로 증가됨에 따라 조분쇄 영역보다 미분쇄 영역에서 분쇄처리량이 증가됨을 분석 할 수 있었다. 회전비 1:2에서 1:5로 증가 경우 조분쇄영역에서는 분쇄처리량이 증가폭이 작았으나, 중간 미분쇄 영역인 5회 분쇄처리 이후부터 분쇄처리량이 80 - 120kg/hr증가 됨을 분석 할 수 있었다.

회전비 1:2에서 1:5로 증가 시킨 경우 조파쇄 영역인 분쇄처리 횟수 1 - 2차 처리 과정에서는 분쇄 처리량이 45 - 50kg/hr증가 되었고, 중간미분쇄 영역인 4차 분쇄처리 이후에는 80 - 100kg/hr까지 증가된 원인은 미분쇄된 입도크기가 롤과의 접촉각이 증가되고, 고추 표면의 왁스층이 제거되었기 때문이라 사료된다.

전반적으로 분쇄물의 시간당 롤 투입량을 살펴보면 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤보다 롤 속도 40rpm에서는 최소 4kg에서 최대 80kg까지, 롤 속도 80rpm에서는 최대 70kg까지 더 투입되는 것으로 분석되었다. 회

주철 치형 롤러에서 탄소성분이 증가되면 표면경도가 높아지게 되어 마찰계수가 증가된다. 본연구에서도 세라믹 치형 롤이 회주철 치형롤보다 표면의 경도가 높기 때문에 롤과 고추표면사이에 마찰계수가 증가되어 분쇄처리량이 증가되리라 사료되고, 롤의 회전비가 증가 할수록 고추에 작용되는 전단력이 증가되어 소성변형을 향상시켜 미분쇄량을 증가시키게 됨으로서 분쇄처리량도 증가되었다고 사료된다.

6. 세라믹, 회주철 치형롤을 이용한 분쇄시 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요에너지 분석

본 연구에서 개발한 세라믹치형롤을 이용하여 고추분쇄시, 분쇄조건인 분쇄속도별, 롤의 회전비별, 분쇄처리횟수 증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향을 분석하기 위한 방법으로 분쇄소요동력과 비분쇄동력 (specific grinding power)을 측정하여, 기존의 회주철 치형롤과 연구 개발한 세라믹 치형롤의 분쇄소요에너지를 비교·분석하였다.

가. 회주철 치형롤의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리 횟수가 분쇄 에너지에 미치는 영향

표 5-18과 그림 5-33은 회주철 치형롤을 이용하여 분쇄속도 40rpm으로 고추분쇄시, 롤의 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄동력을 측정한 결과이다. 표 5-18에서 살펴보면 회전비 1:2의 경우 1~2차분쇄, 즉 조파쇄 구간에서는 소요동력이 0.110~0.090kw였고, 중간조파쇄 구간인 3~8차 분쇄에서는 소요동력이 0.085~0.091kw로 나타났고, 그림 5-33에서 보는 바와 같이 비분쇄동력은 분쇄처리횟수가 증가할수록 1.146~0.377kwh/tokg으로 감소하였으며, 굵은 고춧가루(8차분쇄)

1tokg을 생산하는데는 0.359kw의 소요동력과 4.742kwh/tokg의 비분쇄동력이 소요되었다.

표 5-18. 회주철 치형롤을 이용하여 분쇄속도 40rpm으로 고추분쇄시, 물의 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄동력

	물의 회전비							
	1 : 2		1 : 3		1 : 4		1 : 5	
	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)
1차분쇄	0.110	1.146	0.135	1.318	0.144	0.973	0.167	1.243
2차분쇄	0.090	0.897	0.078	0.693	0.116	0.946	0.113	1.066
3차분쇄	0.085	0.573	0.160	1.329	0.132	0.875	0.137	0.806
4차분쇄	0.077	0.483	0.215	1.586	0.178	1.010	0.166	0.782
5차분쇄	0.081	0.438	0.241	1.769	0.211	0.865	0.187	0.763
6차분쇄	0.085	0.419	0.235	1.391	0.218	0.837	0.198	0.788
7차분쇄	0.088	0.409	0.239	1.284	0.205	0.744	0.217	0.874
8차분쇄	0.091	0.377	0.223	1.119	0.216	0.774	0.216	0.824

회전비 1:3의 경우 조파쇄 영역인 1차 분쇄에서는 소요동력이 0.135kw가 소요되었고, 중간조파쇄 구간인 2~7차 분쇄에서는 0.078~0.239kw로 분쇄구간별로 큰 차이를 보였다. 중간미분쇄 영역인 8차 분쇄에서는 0.223kw로 4~8차 분쇄구간의 중간조파쇄 영역과 큰 차이를 나타내지 않아, 굵은 고춧가루가 생산되는 4차 분쇄부터는 소요동력에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그림 5-33에서 보는 바와 같이 비분쇄동력은 굵은 고춧가루가 생산되는 4차 분쇄에서 1.586kwh/ton으로 3차 분쇄부터 증가하기 시작하여 5차 이후 점차적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 그리고 굵은 고춧가루(4차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.588kw의 소요동력과

4. 926kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:4의 경우 중간조파쇄 영역인 1~5차 분쇄에서의 소요동력은 0.144~0.211kw로 5차 분쇄까지 0.781kw가 소요되었고, 중간조파쇄 영역인 6~8차 분쇄에서는 0.218~0.216kw로 근소한 분쇄생성물 비분쇄효율이 증가되지 않았기 때문이다. 비분쇄동력은 그림 5-33에서 보는 바와 같이 분쇄생성물이 미분쇄 되어감에 따라 0.973~0.774kwh/ton으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.392kw의 소요동력과 2.794kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:5의 경우 중간조파쇄 영역인 1~3차 분쇄에서 소요동력은 0.167~0.137kw로 3차 분쇄까지 0.417kw가 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 0.166~0.216kw로 분쇄처리횟수 증가로 인하여 분쇄생성물이 미분화 되어갈수록 소요동력이 증가하는 것으로 나타났으며, 비분쇄동력은 그림 5-33에서 보는 바와 같이 분쇄생성물이 미분쇄 되어가고, 굵은 고춧가루가 생산되는 3차 분쇄부터 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는데는 1~3차 분쇄까지 0.417kw의 소요동력과 3.115kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회주철 치형률 40rpm의 경우 회전비 1:2, 1:4의 경우 소요동력은 0.359~0.392kw로 유사하게 나타났고, 회전비 1:3의 경우 0.588kw로 비교적 높게 소요되었으며, 비분쇄동력은 회전비 1:4, 1:5의 경우 2.794, 3.115kwh/ton로 회전비 1:2, 1:3보다 적게 소요되어 회전비가 증가하면서도 비분쇄동력은 감소하는 것으로 분석되었다.

분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2 분쇄조건에서 굵은 고춧가루(1,825 μ m가 45%) 1톤 생산하는데 4.742kwh가 소요되었고 회전비 1:5에서 3.115kwh가 소요됨으로 회전비 1:5에서 분쇄소요에너지를 절약할 수 있었다.

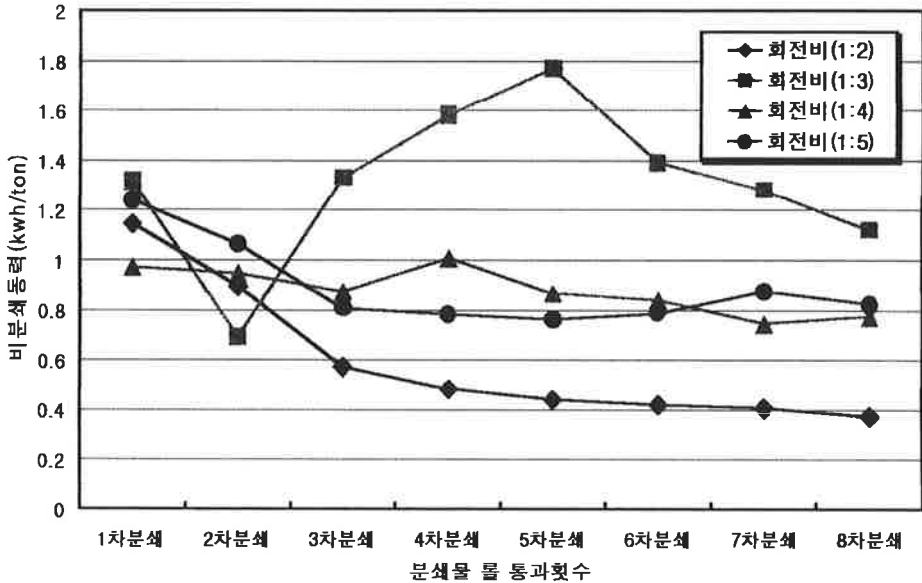


그림 5-33. 회주철 치형롤 분쇄속도 40rpm일 때 롤의 회전비, 분쇄 처리횟수에 따른 비분쇄동력곡선

회주철 치형롤을 이용한 고추분쇄시 분쇄속도를 40rpm에서 80rpm으로 증가시켰을 때, 롤의 회전비와 분쇄처리횟수 증가가 분쇄기의 소요동력과 비분쇄동력에 미치는 영향을 조사한 결과를 표 5-19, 그림 5-34와 같다. 표 5-19에서 살펴보면 회전비 1:2의 경우 조분쇄 영역인 1차 분쇄에서는 소요동력이 0.082kw였고, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서는 소요동력이 0.075~0.077kw로 나타났으며, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 0.075~0.072kw로 분석되어, 조파쇄 영역에서만 소요동력 값이 증가한 것으로 나타났다. 그림 5-34에서 보는 바와 같이 비분쇄동력은 분쇄처리횟수가 증가할수록 0.803~0.357kwh/ton으로 감소하였으며, 굵은 고춧가루(8차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.309kw의 소요동력과 4.586kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되어 분쇄속도 40rpm의 경우보다 감소한 것으로 나타났다.

표 5-19. 회주철 치형롤을 이용한 고추분쇄시 분쇄속도 80rpm일 때, 롤의 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄동력

	롤의 회전비							
	1 : 2		1 : 3		1 : 4		1 : 5	
	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)
1차분쇄	0.082	0.803	0.114	1.184	0.147	0.836	0.117	0.979
2차분쇄	0.075	0.806	0.067	0.999	0.093	1.003	0.097	1.042
3차분쇄	0.077	0.578	0.075	0.707	0.097	0.684	0.098	0.471
4차분쇄	0.075	0.540	0.073	0.655	0.092	0.604	0.096	0.402
5차분쇄	0.075	0.517	0.071	0.612	0.099	0.452	0.097	0.393
6차분쇄	0.077	0.451	0.072	0.467	0.096	0.393	0.098	0.335
7차분쇄	0.076	0.436	0.074	0.451	0.095	0.388	0.095	0.296
8차분쇄	0.072	0.357	0.075	0.429	0.096	0.385	0.093	0.282

회전비 1:3의 경우 중간조파쇄 영역인 1~4차 분쇄에서는 소요동력이 0.114~0.073kw가 소요되었고, 중간미분쇄 구간인 5~8차 분쇄에서는 0.071~0.075kw로 분쇄구간별 큰 차이를 나타내지 않았으며, 굵은 고춧가루가 생산되는 5차 분쇄부터는 소요동력에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그림 5-34에서 보는 바와 같이 비분쇄동력은 분쇄처리횟수가 증가할수록 점점 감소하는 것으로 나타났고, 굵은 고춧가루(5차분쇄) 1ton을 생산하는데는 1~5차 분쇄까지 전체 0.400kw의 소요동력과 4.157kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:4의 경우 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄에서의 소요동력은 0.147~0.093kw로, 0.240kw가 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 0.097~0.096kw로 큰 차이를 나타내지 않았다. 비분쇄동력은 그림 5-34에서 보는 바와 같이 분쇄생성물이 미분쇄 되어감에 따라

0.836~0.385kwh/ton으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 굵은 고춧가루(5차분쇄) 1ton을 생산하는데는 1~5차 분쇄까지 전체 0.528kw의 소요동력과 3.579kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

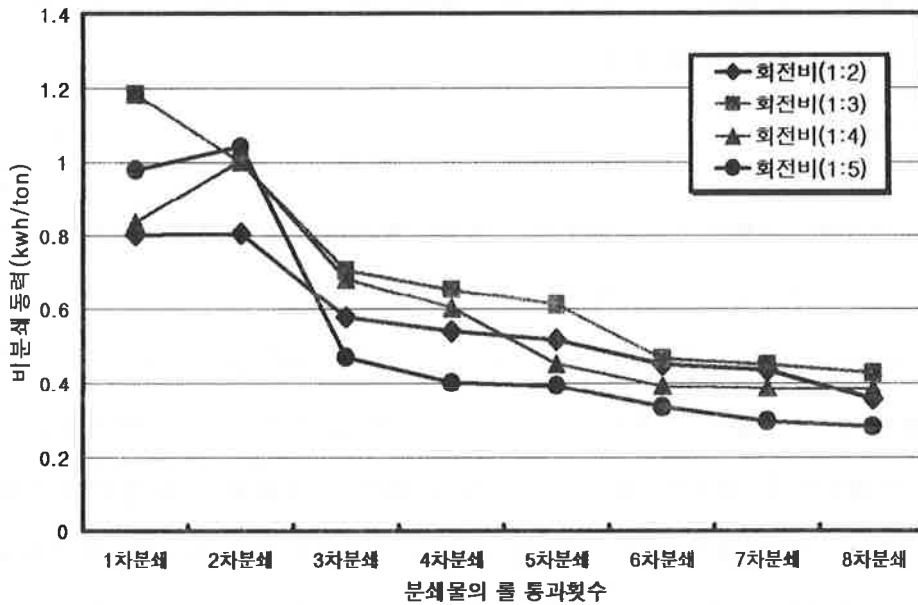


그림 5-34. 회주철치형롤 분쇄속도 80rpm일 때 물의 회전비, 분쇄 처리횟수에 따른 비분쇄동력곡선

회전비 1:5의 경우 1~8차 분쇄까지 중간미분쇄 영역으로 소요동력은 0.117~0.093kw로, 비분쇄동력은 그림 5-34에서 보는 바와 같이 굵은 고춧가루가 생산되는 2차 분쇄에서 증가하다가 3차 분쇄부터 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 굵은 고춧가루(2차분쇄) 1ton을 생산하는데는 1~2차 분쇄까지 전체 0.214kw의 소요동력과 2.021kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회주철 치형롤 80rpm의 경우 회전비 1:2, 1:3, 1:4의 경우 소요동력은 0.309~0.528kw로 회전비가 증가할수록 소요동력이 증가하였고, 회전비 1:5의 경우는 0.214kw로 소요동력이 크게 감소 하는 것으로 나타났다.

비분쇄동력의 경우 회전비가 증가할수록 4.586~2.021kwh/ton로 감소하는 경향을 보여, 회전비 1:5의 경우 소요동력과 비분쇄동력이 1:2경우보다 고춧가루를 1톤 생산하는데 2,3배정도 분쇄소요에너지를 절약할 수 있었다. 따라서 굵은 고춧가루 1톤 생산시 회전비 1:5 경우 분쇄속도 40rpm에서 3.115kwh에서 분쇄속도 80rpm으로 증가시키면 2.021kwh로 1.5배정도 분쇄소요에너지가 절감되었다.

나. 세라믹 치형롤의 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리 횟수가 분쇄 에너지에 미치는 영향

표 5-20와 그림 5-35은 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄속도 40rpm일 때, 롤의 회전비별, 분쇄처리횟수 증가에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄동력을 측정한 결과이다. 표 5-20에서 살펴보면 회전비 1:2의 경우 중간조파쇄 영역인 1~3차 분쇄에서는 소요동력이 0.076~0.123kw였고, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 소요동력이 0.118~0.131kw로 나타났고, 그림 5-35에서 보는 바와 같이 비분쇄동력은 공시재료가 조파쇄에서 중간조파쇄 영역으로 넘어가는 3차 분쇄에서 1.055kwh/ton으로 증가하였으며, 굵은 고춧가루가 생성되는 5차 분쇄부터는 0.577kwh/ton로 감소하였고, 중간미분쇄에서 미분쇄 영역으로 넘어가는 6~8차 분쇄는 0.502~0.520kwh/ton으로 유사하게 동력이 소요되는 것으로 분석되었다. 또한 굵은 고춧가루(5차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.497kw의 소요동력과 3.725kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:3의 경우, 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄에서는 0.128~0.095kw로 공시재료가 1차 조파쇄에서 2차 중간조파쇄 영역으로 넘어갈 때 소요동력이 감소하였고, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 0.144~0.191kw로 소요동력이 증가하였고, 굵은 고춧가루가 생산되는 3차 분

쇄에서 소요동력이 증가하여 분쇄생성물이 미분쇄가 되어갈수록 소요동력이 증가하는 것으로 나타났다.

표 5-20. 세라믹 치형롤을 이용하여 분쇄속도 40rpm으로 고추분쇄시, 롤의 회전비, 분쇄처리횟수에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄동력

	롤의 회전비							
	1 : 2		1 : 3		1 : 4		1 : 5	
	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)
1차분쇄	0.076	0.603	0.128	0.999	0.162	1.284	0.083	0.710
2차분쇄	0.066	0.601	0.095	0.735	0.123	1.435	0.064	0.693
3차분쇄	0.123	1.055	0.144	0.692	0.100	0.699	0.112	0.953
4차분쇄	0.118	0.889	0.128	0.610	0.089	0.434	0.146	0.669
5차분쇄	0.114	0.577	0.200	0.933	0.088	0.374	0.209	0.757
6차분쇄	0.116	0.502	0.193	0.875	0.085	0.358	0.199	0.719
7차분쇄	0.126	0.542	0.138	0.617	0.084	0.345	0.205	0.717
8차분쇄	0.131	0.520	0.191	0.680	0.084	0.279	0.195	0.613

비분쇄동력은 중간조파쇄 영역부분인 1~4차 분쇄에서 0.999~0.610kwh/ton으로 점차적으로 감소하다 미분쇄가 이루어지는 5차 분쇄에서 소요동력이 증가하기 시작하여 점차적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 그리고 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.367kw의 소요동력이, 비분쇄동력은 2.426kwh/ton이 소요되었다.

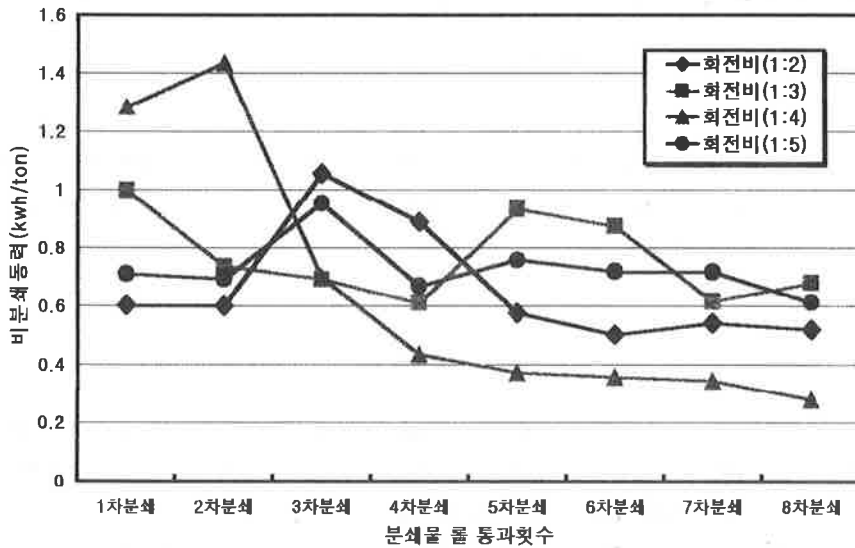


그림 5-35. 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄속도 40rpm 일 때 롤의 회전비별, 분쇄처리횟수 증가에 따른 비분쇄 동력

회전비 1:4의 경우 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄에서는 0.162~0.123kw의 동력이 소요되었고, 중간미분쇄 영역인 3~8차 분쇄에서는 0.100~0.084kw로 큰 차이를 나타내지 않았고, 분쇄생성물의 미분쇄량이 적어 소요동력도 감소하는 경향을 보였다. 그리고 비분쇄동력은 1차 조파쇄에서 2차 중간조파쇄 영역 단계로 넘어갈 때 소요동력이 증가하였고, 굵은 고춧가루가 생산되기 시작하는 3차 분쇄부터 감소하는 것은 미분쇄에 소요되는 동력이 작음을 분석할 수 있다. 또한 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.385kw의 소요동력과 3.418kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:5의 경우 중간조파쇄 영역인 1~2차 분쇄에서 소요동력은 0.083~0.064kw로, 중간미분쇄 영역인 3~6차 분쇄에서는 0.112~0.199kw로, 미분쇄 영역인 7~8차 분쇄에서는 0.205~0.195kw로 나타났고, 굵은 고춧가루가 생산되는 3차 분쇄에서 미분쇄 영역으로 넘어갈수록 소요동력이 증가하는 것으로 나타났다. 비분쇄동력도 그림 5-35에서

보는 바와 같이 굵은 고춧가루가 생산되는 3차 분쇄에서 증가하다 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는 데는 0.259kw의 소요동력과 2.356kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

세라믹 치형롤 40rpm의 경우 회전비가 증가할수록 소요동력이 감소하는 경향을 보였고, 비분쇄동력은 회전비 1:2, 1:4에서 3.725~3.418kwh/ton으로 비슷한 경향을 보였고, 회전비 1:3, 1:5에서는 2.426~2.356kwh/ton으로 1:2, 1:4보다 적게 소요되는 것으로 분석되었다.

세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가시 롤의 회전비와 분쇄처리횟수 증가가 분쇄기의 소요동력과 비분쇄동력에 미치는 영향을 조사한 것을 표 5-21과 그림 5-36에 나타내었다.

표 5-21에서 살펴보면 회전비 1:2의 경우 조파쇄 영역인

표 5-21. 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄속도 80rpm일 때, 롤의 회전비별, 분쇄처리횟수 증가에 따른 분쇄소요동력 및 비분쇄 동력

	두 롤의 회전비							
	1 : 2		1 : 3		1 : 4		1 : 5	
	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)	소요 동력 (kw)	비분쇄 동력 (kwh/ton)
1차분쇄	0.075	0.617	0.154	1.185	0.148	1.138	0.060	0.411
2차분쇄	0.072	0.618	0.118	0.927	0.111	1.185	0.059	0.359
3차분쇄	0.118	0.766	0.102	0.788	0.100	0.906	0.077	0.325
4차분쇄	0.084	0.472	0.094	0.687	0.090	0.464	0.090	0.339
5차분쇄	0.109	0.607	0.090	0.603	0.084	0.333	0.090	0.308
6차분쇄	0.085	0.465	0.086	0.379	0.080	0.271	0.110	0.374
7차분쇄	0.098	0.491	0.081	0.351	0.077	0.259	0.120	0.403
8차분쇄	0.117	0.550	0.076	0.326	0.073	0.227	0.153	0.504

1차 분쇄에서는 소요동력이 0.075kw였고, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서는 소요동력이 0.072~0.0.118kw로 나타났고, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 0.084~0.117kw로 나타나, 분쇄생성물이 미분쇄 되어감에 따라 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었고, 중간미분쇄가 시작되는 4차 분쇄에서 굵은 고춧가루가 생성되면서 소요동력도 증가하는 것으로 나타났다. 그림 5-36에서 살펴보면 비분쇄동력은 굵은 고춧가루가 생성되는 5차 분쇄에서 일시적으로 감소하다 5차 분쇄에서 증가하여 8차 분쇄까지 0.607~0.550kwh/ton으로 일정한 경향을 보였다. 그리고 굵은 고춧가루(4차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.349kw의 소요동력과 2.473kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:3의 경우, 조파쇄 영역인 1차 분쇄에서 0.154kw로, 중간조파쇄 영역인 2~3차 분쇄에서 0.118~0.102kw, 중간미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 0.094~0.076kw로, 분쇄처리횟수가 증가함에 따라 분쇄생성물이 미분화가 되어갈수록 소요동력이 감소하는 것으로 나타났다. 비분쇄동력도 분쇄처리횟수가 증가하면서 1.185~0.326kwh/ton으로 감소하는 것으로 분석되었다. 그리고 굵은 고춧가루(4차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.468kw의 소요동력이, 비분쇄동력은 3.587kwh/ton이 소요되었다.

회전비 1:4의 경우 중간조파쇄 영역인 1차 분쇄에서 0.148kw, 중간미분쇄 영역인 2~8차 분쇄에서는 0.111~0.073kw로, 비분쇄동력은 1.138~0.227kwh/ton으로 큰 차이를 나타냈고, 회전비 1:3의 경우와 마찬가지로 분쇄생성물량이 증가되지 않아 소요동력과 비분쇄동력이 감소하는 경향을 보였다. 또한 굵은 고춧가루(3차분쇄) 1ton을 생산하는데는 0.359kw의 소요동력과 3.229kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

회전비 1:5의 경우 중간미분쇄 영역인 1~3차 분쇄에서 소요동력은 0.060~0.077kw로 약 0.065kw 정도 동력이 손실되어 동력의 소모가 적게

들었고, 미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 0.090~0.153kw로, 0.096kw로, 미분쇄 영역인 4~8차 분쇄에서는 중간미분쇄 영역보다 약 68%정도 소요동력이 더 소모된 것은 미분쇄에 필요한 에너지가 더 많이 소요되었음을 분석할 수 있다. 보통고춧가루가 생산되는 4-6차 분쇄처리 과정에서 소요동력이 0.09~0.11kw이고 비분쇄동력도 0.3kw/ton가 소요되었다. 6차 분쇄처리 이상에서는 고춧가루 입도키기가 $425\mu\text{m}$로 50%증가되는 영역으로 소요동력도 0.15kw로 비분쇄동력도 0.5kw/ton으로 증가되었다. 굵은 고춧가루(2차분쇄) 1ton을 생산하는데 0.214kw의 소요동력과 2.021kwh/ton의 비분쇄동력이 소요되었다.

세라믹치형롤 80rpm의 경우 회전비 1:5에서 소요동력이 감소하여 분쇄효율이 향상되었고, 비분쇄동력도 1:2, 1:3, 1:4보다 적게 소요되는 것으로 분석되었다.

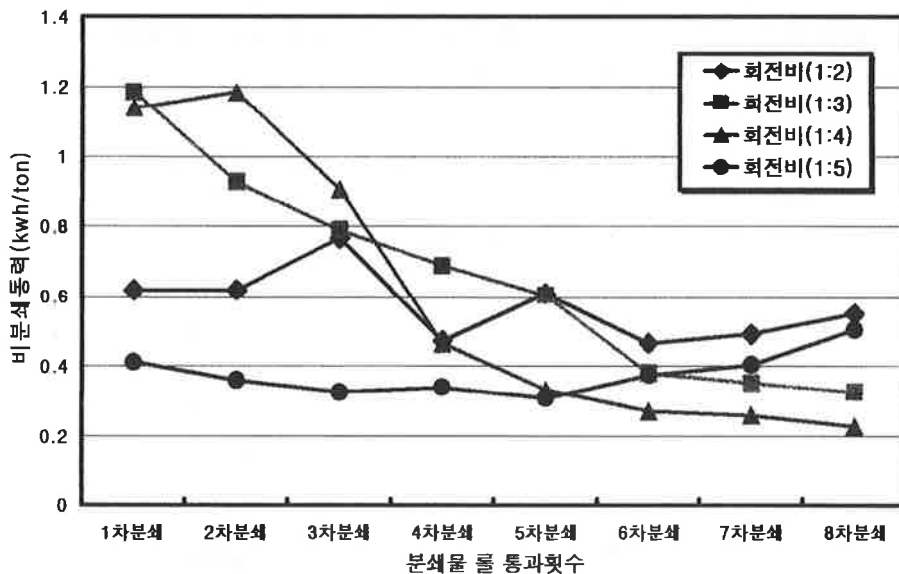


그림 5-36. 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 분쇄속도 80rpm일 때 롤의 회전비별, 분쇄처리횟수 증가에 따른 비분쇄동력

회주철, 세라믹 치형롤러밀을 이용하여 분쇄시 분쇄속도, 롤의 회전비, 분쇄처리횟수가 증가시 분쇄소요에너지를 분석한 결과 회주철, 세라믹치형롤 모두 분쇄속도 80rpm, 회전비 1:5에서 분쇄효율이 회전비 1:2, 1:3, 1:4보다 우수하게 나타났고, 분쇄속도 40rpm보다 80rpm에서 소요동력과 비분쇄동력면에서 분쇄효율이 우수하게 나타남을 분석할 수 있었다.

7. 세라믹 치형롤과 회주철 치형롤을 분쇄기를 이용하여 고추분쇄시 고춧가루 분쇄생성물의 철분함량 분석

표5-22는 회주철치형롤과 세라믹롤 분쇄기를 이용하여 회전비별 8차 고춧가루 분쇄처리 후 고춧가루 분쇄생성물에 싯가루 혼입량을 측정하기 위하여 FAAS(Atomic Absorption Spectorphotometer)로 Fe 함량을 측정한 분석 결과치이다.

표 5-22. 회주철 치형롤과 세라믹 치형롤 분쇄기를 이용하여 회전비별 8차 고춧가루 분쇄처리 후 고춧가루 생성물에 Fe함량을 AAS로 측정한 분석 결과치

	롤의 속도(rpm)	회전비	Fe 함량(mg/kg)
Control			21.77
회주철치형롤	40	1 : 2	88.76
		1 : 3	332.94
		1 : 4	283.91
		1 : 5	139.28
	80	1 : 2	51.02
		1 : 3	286.22
		1 : 4	112.21
		1 : 5	86.87
세라믹치형롤	40	1 : 2	25.36
		1 : 3	24.47
		1 : 4	24.25
		1 : 5	34.60
	80	1 : 2	43.30
		1 : 3	30.56
		1 : 4	31.13
		1 : 5	26.31

공시재료의 철분함유량은 21.77mg/kg으로 분석되었다. 회주철 치형롤 40rpm 분쇄속도에서 회전비 1:2 경우 고춧가루 분쇄처리과정에서 회주철의 마모에 의하여 철함량이 공시재료보다 4배 이상 상승한 89mg/kg로 분석되었고, 회전비 1:3와 1:4 경우 13 - 15배정도로 철함량이 상승하였고, 1:5 경우 6배정도로 감소하였다. 분쇄속도를 80rpm으로 증가시킨 시료에서 분쇄시 롤의 마모에 의하여 발생한 철의 함량은 공시재료보다 회전비 1:2 경우 2.3배, 1:3 경우 13배, 1:4 경우 5배, 1:5 경우 4배정도 철함량이 증가되었다.

분쇄속도 80rpm에서의 철의 량은 분쇄속도 40rpm보다 회전비 1:3경우를 제외하고는 쇧가루 함량이 2배정도 감소 되었다. 회전비 1:3 분쇄조건인 경우 철 함량이 분쇄속도 40rpm에서 333mg/kg, 분쇄속도 80rpm에서 286mg/kg으로 많이 발생한 원인은 분쇄시 롤과 롤사이를 밀착하여 롤을 회전시켰을 때에 발생하는 표면마찰 작용에 의하여 회주철 치형롤의 표면이 많이 마모되었다고 사료된다.

세라믹 치형롤에서는 분쇄속도 40rpm에서의 쇧가루 발생량은 공시재료의 철 함량과 비슷하게 1.2 - 1.6배정도로 8차 분쇄처리 후 고춧가루 분쇄생성물에서 분석되었고, 분쇄속도 80rpm에서도 공시재료보다 1.2 - 2.0배 정도 철 함량이 분석되었다. 세라믹 치형롤을 이용하여 고춧가루 분쇄시 롤의 분쇄속도, 회전비차등인 분쇄조건이 쇧가루 발생에 영향을 주지 않음을 철분 함량측정으로 분석할 수 있었다.

8. 롤분쇄기의 롤의 소재 및 분쇄조건이 고춧가루 색도변화에 미치는 영향

가. 회주철 치형롤

1) 롤의 분쇄속도 40rpm일 때 회전비차 및 분쇄 처리 횟수가 색도에 미치는 영향

표 5-23은 회주철치형롤 분쇄속도 40rpm 경우 회전비 1:2에서 1:5까지 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차까지 분쇄처리 과정에서 고춧가루 분쇄생성물의 색도를 색도계로 측정한 분석치이다.

표 5-23. 회주철 치형롤 분쇄속도 40rpm 경우 회전비별 및 분쇄 처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 색도값 분석

회주철 치형롤의 회전비차 (1:2), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	30.15	34.72	35.68	31.49	33.80	29.33	29.31	28.93
a	18.69	23.60	23.96	25.42	24.01	21.55	22.19	22.70
b	17.19	24.62	28.22	27.71	28.16	24.65	23.99	26.01
회주철 치형롤의 회전비차 (1:3), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	30.83	30.33	28.88	27.68	28.62	29.13	29.05	29.99
a	17.84	18.08	21.28	22.62	23.55	23.89	24.46	26.42
b	15.45	16.78	19.91	21.96	22.18	23.02	24.07	27.03
회주철 치형롤의 회전비 (1:4), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	30.25	29.02	29.03	31.34	32.07	31.48	33.69	32.96
a	17.40	21.19	20.64	21.21	23.39	24.78	25.20	25.29
b	15.73	21.93	22.19	24.20	27.50	28.79	30.41	30.10
회주철 치형롤의 회전비 (1:5), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	30.23	34.05	30.96	31.87	33.74	32.60	32.16	33.46
a	20.53	21.03	21.32	24.57	21.90	25.92	25.74	26.81
b	21.97	23.44	24.83	29.18	24.75	32.50	32.43	34.34

고추의 색도 'L'값은 29 ~ 33으로 회전비 증가와 분쇄처리횟수 증가에 큰 영향을 받지 않았고, 붉은색 'a'값도 회전비 증가에는 큰 영향을 받지 않았으나, 분쇄처리과정에서 고춧가루가 미분화되면서 분쇄 1차

처리 후 18 ~ 20정도에서 8차 분쇄처리 후 23 ~ 27로 붉은색이 짙어졌다. 노란색 'b'값도 1 분쇄처리 후 17 ~ 22에서 8차 분쇄처리 후 고추씨가 미분쇄되어 노란색이 26 ~ 34로 짙어졌다.

2) 룰의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비 및 분쇄 처리 횟수가 색도에 미치는 영향

표 5-24는 회주철 치형룰 분쇄속도 80rpm 경우 회전비 1:2에서 1:5까지 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차까지 분쇄처리 과정에서 고춧가루 분쇄생성물의 색도를 색도계로 측정하여 분석한 분석치이다.

표 5-24. 회주철 치형룰 분쇄속도 80rpm 경우 회전비별 및 분쇄처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 색도 분석

회주철 치형룰의 회전비차 (1:2), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	33.34	30.50	30.61	30.95	26.53	30.80	30.80	30.25
a	17.94	19.66	20.55	22.16	23.05	20.97	24.30	22.72
b	20.53	20.02	22.82	24.73	24.66	24.47	27.72	26.69
회주철 치형룰의 회전비차 (1:3), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	27.66	27.40	29.26	31.29	29.52	32.49	32.66	32.27
a	16.19	22.47	23.36	22.84	22.99	24.95	24.26	25.44
b	14.58	19.54	23.48	24.06	23.06	28.47	25.58	27.84
회주철 치형룰의 회전비 (1:4), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	31.98	32.01	31.87	32.03	33.55	32.28	33.83	31.97
a	20.04	22.43	22.50	22.07	25.24	22.50	24.84	24.44
b	22.49	22.58	24.67	23.83	30.36	25.98	30.64	29.18
회주철 치형룰 두 룰의 회전비 (1:5), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	21.62	32.21	29.95	31.23	32.29	30.66	32.92	33.28
a	20.52	23.09	21.82	24.58	23.50	25.56	28.36	28.02
b	19.08	28.31	26.01	29.22	26.23	30.20	35.18	34.68

고추의 색도 'L'값은 28 ~ 33으로 회전비 증가와 분쇄처리횟수 증가에 큰 영향을 받지 않았고, 붉은색 'a'값도 회전비 증가에는 큰 영향을 받지 않았으나, 분쇄처리과정에서 고춧가루가 미분화되면서 분쇄 1차처리 후 18 ~ 20정도에서 8차 분쇄처리 후 22 ~ 28로 붉은색이 짙어졌다. 노란색 'b'값도 1 분쇄처리 후 16 ~ 20에서 8차 분쇄처리 후 고추씨가 미분쇄되어 노란색이 27 ~ 36로 짙어졌다.

나. 세라믹 치형롤

1) 롤의 분쇄속도 40rpm일 때 회전비차 및 분쇄 처리 횟수가 색도에 미치는 영향

표 5-25는 세라믹 치형롤 분쇄속도 40rpm 경우 회전비 1:2에서 1:5 까지 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차까지 분쇄처리과정에서 고춧가루 분쇄생성물의 색도를 색도계로 측정한 분석치이다.

고추의 색도 'L'값은 32~34로 회전비 증가와 분쇄처리횟수 증가에 큰 영향을 받지 않았고, 붉은색 'a'값도 회전비 증가에는 큰 영향을 받지 않았으나, 분쇄처리과정에서 고춧가루가미분화되면서 분쇄 1차처리 후 20 ~ 23정도에서 8차 분쇄처리 후 22~28로 붉은색이 짙어졌다. 노란색 'b'값도 1 분쇄처리 후 22~26에서 8차 분쇄처리 후 고추씨가 미분쇄되어 노란색이 27 ~ 31로 짙어졌다.

표 5-25. 세라믹 치형롤 분쇄속도 40rpm 경우 회전비차별 및 분쇄 처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 색도 분석

세라믹 치형롤의 회전비차 (1:2), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	34.37	34.73	33.55	34.87	33.24	32.80	33.52	33.92
a	24.87	25.62	27.31	28.62	22.38	27.53	27.49	28.56
b	22.15	23.23	23.99	30.29	30.22	30.58	31.42	31.77
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:3), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	33.25	34.26	34.65	33.65	34.20	33.20	35.28	35.16
a	22.35	21.96	23.65	22.52	23.15	22.98	23.15	27.26
b	21.23	22.02	21.36	22.45	23.45	25.21	24.98	26.78
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:4), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	32.61	34.97	34.39	33.93	33.53	33.45	32.58	33.68
a	20.64	21.54	21.31	22.52	22.00	22.39	22.05	22.39
b	25.19	27.85	26.71	26.76	26.77	27.06	25.58	27.27
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:5), 40rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	30.76	30.06	30.09	31.19	32.39	32.25	31.29	32.01
a	22.86	22.39	24.26	22.96	22.86	23.64	23.73	24.00
b	25.68	25.50	27.59	25.54	27.27	26.66	26.40	27.29

2) 롤의 분쇄속도 80rpm일 때 회전비 및 분쇄 처리 횟수가 색도에 미치는 영향

표 5-26는 세라믹 치형롤 분쇄속도 80rpm 경우 회전비 1:2에서 1:5까지 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수 1차에서 8차까지 분쇄처리과정에서 고춧가루 분쇄생성물의 색도를 색도계로 측정한 분석치이다. 고추의 색도 'L'값은 32 ~ 34로 회전비 증가와 분쇄처리횟수 증가에 큰 영향을 받지 않았고, 붉은색 'a'값도 회전비 증가에는 큰 영향을 받지 않았으나, 분쇄처리과정에서 고춧가루가 미분화되면서 분쇄 1차처리 후 붉은색 'a'값

은 17 ~ 20정도에서 8차 분쇄처리 후 22 ~ 28로 붉은색이 짙어졌다. 노란색 'b'값도 1 분쇄처리 후 20 ~ 27에서 8차 분쇄처리 후 고추씨가 미분쇄되어 노란색이 26 ~ 33로 짙어졌다.

표 5-26. 세라믹 치형롤 분쇄속도 80rpm 경우 회전비차별 및 분쇄 처리 횟수별에 따른 고춧가루 분쇄생성물의 색도 분석

세라믹 치형롤의 회전비차 (1:2), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	32.49	32.46	29.68	28.83	28.51	29.73	29.75	34.16
a	17.30	21.58	20.54	23.05	20.44	24.65	26.68	28.73
b	18.58	21.50	19.82	26.82	21.31	24.76	27.47	32.90
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:3), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	31.25	32.56	32.15	33.12	32.94	34.26	32.15	34.21
a	18.52	20.15	21.22	22.05	21.43	23.56	26.31	27.56
b	29.56	20.34	21.56	23.14	22.46	25.46	26.54	27.32
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:4), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	32.55	33.94	32.94	31.62	33.75	33.46	32.42	32.65
a	19.95	19.90	21.56	21.33	21.35	22.39	22.39	22.24
b	24.68	25.63	26.91	24.34	26.70	26.63	25.86	26.05
세라믹 치형롤의 회전비차 (1:5), 80rpm								
	1차분쇄	2차분쇄	3차분쇄	4차분쇄	5차분쇄	6차분쇄	7차분쇄	8차분쇄
L	34.56	33.51	33.46	32.46	32.69	33.24	32.43	34.04
a	19.93	20.18	20.06	20.26	20.68	20.19	20.98	21.94
b	27.68	25.14	25.21	24.35	25.87	25.61	26.46	28.92

회주철 치형롤과 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 고춧가루 분쇄생성물의 색도, 붉은색, 노랑색은 분쇄조건인 분쇄속도 40, rpm, 80rpm, 분쇄처리 횟수 증가에 영향을 받지 않음을 실험으로 분석되었다. 장시간 고춧가루를 생산하였다면 분쇄시 마찰열에 의하여 롤 표면에 잠

열이 축적되어 고춧가루 생성물의 색도가 변화되었으리라 사료된다.

제4절 요약 및 결론

본 연구에서는 세라믹 치형롤의 기계적 강도 향상과 분쇄효율을 향상시켜 식품 가공 분야에서 섬유질이 많이 포함하거나, 많은 수분함량 갖고 있는 식품등의 재료가공에 범용으로 사용 할 수 있는 세라믹 치형롤 분쇄기를 개발하고자 하였다. 기존 압착식 회주철 치형 롤 분쇄기의 분쇄속도 40rpm 분쇄조건에서 분쇄속도를 80rpm으로 증가시켜 분쇄처리량을 향상시키는 방법과 기존의 롤 회전비 1:2에서 1:5까지 증가시켜 전단력을 향상시켜 분쇄효율을 향상시키는 분쇄기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 치형 롤 분쇄기를 사용하여 섬유질이 많은 건고추를 분쇄하기 때문에, 이를 공시재료로 선택하여 굵은 고춧가루, 보통고춧가루 생산하는데 롤의 회전비별, 분쇄처리 횟수별에 따른 분쇄생성물의 입도크기에 미치는 분쇄생성물의 특성, 분쇄 소요동력, 고춧가루 1ton 생산하는데 소요되는 에너지 즉 비분쇄동력 등을 실험을 통하여 세라믹 치형롤의 기계적 강도와 분쇄효율을 분석하였다. 분쇄시 롤소재의 마모에 의하여 쇳가루가 고춧가루에 혼입된 철함량을 조사하였으며, 분쇄시 마찰열 발생에 의하여 고춧가루 분쇄 생성물의 품질에 미치는 영향을 측정하기 위하여 색도를 측정하였으며, 그 연구 내용의 요약은 다음과 같다.

- 1) 현재 국내에서는 회주철 치형 롤 분쇄기를 이용하여 대부분 분쇄속도 40rpm, 롤 회전비 1:2인 분쇄조건에서 고춧가루를 생산하고 있다. 이 기존의 분쇄조건에서는 8차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루만 생산 할 수 있었다 ($d_{45} = <850 \mu\text{m}$). 8차 분쇄 처리까지 총 0.4kw(84,366N·m) 동력이 소요되

었고, 분쇄처리량은 1차 분쇄처리과정에서 100kg/hr, 8차 분쇄처리과정에서는 241kg/hr로 미분쇄되면서 점차 분쇄처리량이 증가되었다. 또한 굵은 고춧가루 1톤 생산하는데 7.15kwh에너지가 소요되었다.

2) 기존의 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 물의 회전비 1:2에서 세라믹 치형롤을 이용하여 고춧가루 분쇄시 5차 분쇄처리 후 굵은 고춧가루가 생산되었고 ($d_{45} < 850\mu\text{m}$), 이 때 0.5kw($59.841\text{N} \cdot \text{m}$) 동력이 소요되었고, 1차 분쇄처리과정에서 126kg/hr로, 8차분쇄처리 과정에서는 252kg/hr로 각각 126%, 105% 분쇄처리량이 증가되었고, 비분쇄동력은 3.73kwh/ton으로 분석되었다. 기존의 분쇄조건에서 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤보다 분쇄처리횟수 3회를 단축할 수 있고, 굵은고춧가루 1톤당 생산시 21% 정도 에너지가 절감됨으로서 세라믹 치형롤이 회주철 치형롤보다 분쇄효율이 높은 것으로 분석되었다.

3) 고춧가루 분쇄 효율을 증가시키기 위하여 기존의 회주철 치형롤 분쇄속도 40rpm, 물 회전비 1:2에서 물 회전비 1:3, 1:4, 1:5로 증가시킨 경우 굵은 고춧가루($d_{45} < 850\mu\text{m}$)를 생산하는데 필요한 분쇄처리 횟수는 물 회전비 1:2보다 1:3 경우 4회, 1:4 경우 4회, 1:5 경우 5회까지 단축되었다. 시간당 분쇄처리량은 물 회전비 1:4와 1:5에서 1차 분쇄과정에서 >135%, 분쇄 8차과정에서 >109%정도가 증가되었고, 분쇄 소요토크는 0.39 - 0.42kw로 비슷하게 소요되었으나, 비분쇄동력은 2.80 - 3.12kwh/ton으로 기존의 물 회전비 1:2보다 35% ~ 41% 정도 에너지가 절약되었다. 물 회전비 1:3에서의 비분쇄동력은 1:2보다 4% 증가하였으나, 물 회전비 1:5에서 8차 분쇄처리 후 고춧가루 입도크기 $< 425\mu\text{m}$ 를 40%이상 통과되어 보통고춧가루를 생산할 수 있었고, 이 때 분쇄동력 0.79kw이 소요되었고, 비분쇄동력 7.15kwh/ton

이 분석되었다. 본 실험 결과를 통하여 분쇄시 롤의 회전비에 의하여 전단력이 증가되어 고춧가루 분쇄효율 증가 됨이 분석되었다.

- 4) 분쇄효율을 향상시키기 위하여 회주철 치형롤의 분쇄조건인 기존의 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가시킴으로서 롤 회전비 1:2에서 굵은 고춧가루 ($d_{45} < 850 \mu\text{m}$) 생산은 분쇄속도 40rpm보다 80rpm 경우 분쇄처리횟수 3회가 단축됨으로서, 소요토크 0.31kw, 비분쇄동력 4.59kwh/ton으로 3%에너지가 절약되었다. 롤 회전비 1:3과 1:4에서는 분쇄처리횟수, 분쇄처리량, 비분쇄동력은 같은 수준이었다. 롤 회전비 1:5에서는 분쇄처리 횟수를 2회로 1회 단축됨으로서 분쇄소요토크는 0.21kw로 50%가 절약되었고, 비분쇄동력은 2.02kwh/ton으로 35%정도 에너지가 절약됨이 분석되었으나 보통고춧가루 ($d_{60} < 850 \mu\text{m}$, $d_{40} < 425 \mu\text{m}$) 는 생산 할 수 없었다.

회주철 롤을 이용하여 굵은 고춧가루 생산시 기존의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2보다 분쇄속도 80rpm, 회전비 1:5로 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수는 6회 단축가 되었고, 분쇄처리량은 1회 분쇄처리과정에서 30kg/hr, 8회 분쇄과정에서 88kg/hr을 증가 시켰고 분쇄소요토크는 47.5%, 비분쇄동력은 57.4% 가 절약됨이 분석되었다.

- 5) 세라믹 치형 롤의 분쇄속도 40rpm 조건에서 굵은 고춧가루($d_{45} < 850 \mu\text{m}$) 생산은, 롤 회전비 1:2보다 1:3 ~ 1:5로 증가시켰을 때 분쇄처리 횟수가 5차에서 각각 3차로 각각 2회씩 단축되었고, 분쇄처리량은 1차 분쇄과정에서는 125kg/hr로 비슷하였으나, 8차에서는 29kg/hr ~ 66kg/hr로 125% 미분쇄량이 증가되었고, 분쇄소요토크는 1:3에서는 26%, 1:4에서는 0.22%, 1:5에서는 48%가 절약되었고, 비분쇄동력은 1:3에서는 35%, 1:4에서는 8%, 1:5에서는 37%가 절약되었다.

회전비 1:5에서 7차 분쇄처리 후 보통 고춧가루($d_{60} < 825 \mu\text{m}$, $d_{40} < 425 \mu\text{m}$)를 생산할 수 있었으며 분쇄소요토크는 1.2kw, 비분쇄동력은 5.22kwh/ton가 소요됨이 분석되었다.

40rpm 분쇄속도에서 굵은 고춧가루 생산시 본 연구에서 개발한 세라믹 치형롤 1:5 회전비가 기존의 회주철 치형롤 1:2보다 분쇄처리횟수를 5회 단축시켰고, 분쇄처리량은 1회 분쇄과정에서 17kg/hr, 8회 분쇄과정에서 77kg/hr을 증가시켰고, 분쇄소요토크는 35%, 비분쇄동력은 50% 정도가 절약되었다.

- 6) 굵은 고춧가루($d_{45} < 850 \mu\text{m}$) 생산기준하에서 세라믹 롤분쇄기의 분쇄 효율을 향상시키기 위하여 분쇄속도 40rpm에서 80rpm으로 증가시켰더니 분쇄속도 40rpm보다 롤 회전비 1:2 경우 분쇄처리횟수가 1회 단축됨으로서 분쇄소요토크는 0.35kw로 30%절약되었고, 비분쇄동력은 2.5kwh/ton으로 34%에너지가 절약되었다. 롤 회전비 1:3과 1:4에서는 분쇄처리횟수, 분쇄처리량, 비분쇄동력은 같은 수준이었으나, 롤 회전비 1:5에서는 분쇄처리 횟수가 2회로 1회 단축됨으로서, 분쇄소요토크는 0.21kw로 19%가 절약되었고, 비분쇄동력은 2.02kwh/ton으로 14%정도 에너지가 절약됨이 분석되었다.

롤 회전비 1:5분쇄조건하에서 5차 분쇄처리 후 보통고춧가루($d_{60} < 850 \mu\text{m}$, $d_{40} < 850 \mu\text{m}$)를 생산할 수 있었고, 이때 분쇄소요토크는 0.38kw, 비분쇄동력은 5.22kwh/ton이 소요됨이 분석되었다.

굵은 고춧가루 생산시 본 연구에서 개발한 세라믹 치형롤의 분쇄속도 80rpm, 회전비 1:5가 기존의 회주철 치형롤의 분쇄속도 40rpm, 회전비 1:2보다 분쇄처리횟수는 6회 단축되었고, 분쇄처리량은 1회 분쇄과정에서 147%, 8회 분쇄과정에서 126%가 증가되었고, 분쇄소요토크는 48%, 비분쇄동력은 57%가 절약되었다.

7) 롤 분쇄기를 이용하여 고추 분쇄시 분쇄되는 고춧가루의 입자의 크기는 롤의 지름, 분쇄속도, 롤의 회전비 등의 분쇄조건이 일정한 경우 분쇄처리 횟수가 증가하여도 분쇄입자의 크기가 더 이상 미분쇄되지 않는 임계처리 횟수가 5~6회 임을 분석할 수 있었다.

8) 공시재료의 철분함량은 21.77mg/kg로 분석되었고, 회주철 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 회주철 롤의 마모에 의하여 고춧가루 생성물에 혼입된 Fe는 기존의 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 롤 회전비 1:2에서는 88.76mg/kg으로 공시재료의 철함량보다 408%가 증가되었고, 롤 회전비 1:3와 1:4 경우 회주철 롤의 마모로 인하여 1,529%, 1,304%만큼 철함량이 증가되었으나, 1:5 롤 회전비에서는 640%로 감소되었다. 회주철 치형롤의 분쇄속도를 80rpm으로 증가시킨 시료에서는 1:2, 1:4, 1:5 롤 회전비 경우 분쇄속도 40rpm 시료보다 2배정도 감소되었고, 1:3 롤 회전비에서만 공시재료의 철분함량보다 1,315% 증가됨으로서 롤의 회전속도가 증가되면 회주철롤의 마모에 의한 철함량도 감소됨이 분석되었다. 세라믹 치형롤에서는 분쇄속도와 롤 회전비에 영향 받지 않고 철분함량이 24.25 ~ 43.30mg/kg으로 고춧가루에 섯가루가 제거된 청결식품을 제공할 수 있음이 분석 되었다.

9) 회주철 치형롤과 세라믹 치형롤을 이용하여 고추분쇄시 롤의 소재와 분쇄속도가 색도에 미치는 영향은 단시간 실험 측정에 의하여 색도에 차이점이 없었고, 분쇄처리 횟수 증가가 고춧가루의 색도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 고춧가루의 명암 'L' 값은 분쇄처리 후 28 ~ 34정도로 명암의 변화는 적었으나, 붉은색 'a'값은 1차 분쇄 처리 후 18 ~ 20, 8차 분쇄처리 후 22 ~ 28로 미분쇄되면서 'a'값이 4 ~ 8정도 상승되었고, 노란색

'b'값은 1차 처리 후 17 ~ 26이 8차 처리 후 고추 씨앗이 미분쇄되면서 26 ~ 33으로 'b'값은 7 ~ 9정도 상승되었다.

치형을 분쇄기롤을 이용하여 고추분쇄시 세라믹 치형 롤이 회주철 치형 롤보다 재료의 내마모성이 우수하여 분쇄효율도 증가되었고, 섯가루 혼입없는 청결고춧가루를 생산 할 수 있는 기술을 개발 할 수 있었다.

기존의 고춧가루 분쇄조건인 분쇄속도 40rpm, 롤 회전비 1:2보다 본 연구에서 개발한 분쇄속도 80rpm, 롤 회전비 1:5인 분쇄조건이 분쇄처리량 증가, 분쇄처리 횟수 단축, 분쇄소요토크 절감, 미분쇄 동력 절감등이 분석됨으로서 섬유질이 많이 포함된 고춧가루 등의 재료가공 분쇄기술이 향상되었다고 사료된다.