결석분쇄에 미치는 체외충격파 빈도의 영향

연세대학교 대학원
의 학 과
고 우 진

결석분쇄에 미치는 체외충격파 빈도의 영향

지도교수 이 무 상

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2003년 6월 일

연세대학교 대학원

의 학 과

고 우 진

고우진의 석사 학위논문을 인준함

심사위원_________________________인

심사위원_________________________인

심사위원_________________________인

연세대학교 대학원

2003년 6월 일

감사의 글

본 실험을 시작하여 논문을 완성하기까지 모든 면에서 세심한 지도와 적극적인 지원을 해주신 이무상 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 연구 방법과 이론적 배경에 도움을 주신 양승철 교수님께 깊은 감사를 드리며 세심한 조언과 격려를 아끼지 않으신 최영득 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 연구기간 동안 여러모로 도와주신 김영식 선생님과 비뇨기과 교실원들께도 감사드립니다. 끝으로 저를 위해 항상 기도해주시고 보살펴 주시는 부모님과 언제나 남편을 위해 헌신하는 사랑하는 아내 그리고 건강하고 맑게 자라는 윤수, 윤재와 기쁨을 나누고 싶습니다.

저자 씀

차 례

그 림 차 례

표 차례

국문요약

결석분쇄에 미치는 체외충격파 빈도의 영향

체외충격파쇄석술이 도입된 후 요로결석 제거에 획기적인 변화가 있어 체외충격파쇄석술은 상부요로결석 처치에 우선적으로 선택되는 치료법이 되었다. 체외충격파쇄석술에서 요로결석의 분쇄는 주로 결석의 구성 성분, 쇄석기의 성능, 충격파 강도 그리고 충격파 빈도(시간당(분당) 결석에 가하는 충격파의 수) 등 여러 요인에 의하여 결정된다. 요로결석의 분쇄에 영향을 미치는 요인 중 충격파 빈도에 대한 연구는 일부 있으나 아직까지 결석분쇄에 있어서 충격파 빈도의 역할에 대해서는 확실하게 밝혀진 바가 적다. 일부 실험에서 감소된 충격파 빈도가 결석분쇄에 효과적이라는 보고가 있지만 결석 크기에 따른 분쇄 효과의 분석은 미비하다. 따라서 본 연구에서는 상부요로와 유사한 관 모양의 수용기를 이용하여 체외충격파쇄석술시 충격파 빈도의 차이에 따른 결석분쇄 효과를 결석의 크기에 따라 살펴보아 결석분쇄에 효과적인 충격파 빈도를 구하고자 하였다.

본 실험에서는 실리콘 관에(길이 35㎜, 직경 6㎜, 두께 1㎜) 세가지 종류(길이: 5㎜, 11㎜, 15㎜, 직경: 5㎜)의 원통형「Piezolith 2501 실험용 석고」를 넣고 충격파쇄석술을 하였다. 길이가 11㎜와 15㎜인 인공결석에 가한 충격파의 총 횟수는 500회로 하였고, 길이가 5㎜인 인공결석은 총 횟수를 400회로 하였다. 충격파 강도는 세가지 결석 모두 100MPa로 일정하게 하였다. 충격파 빈도는 분당 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150회의 일곱 단계로 나누어서 인공결석의 종류별로 각각 6번씩 반복 실험을 하였다. 충격파쇄석후 실리콘 관에 있는 분쇄된 결석 조각을 2㎜ 간격의 그물 망에 통과시켜 크기가 2㎜ 미만인 결석을 제거하고, 그물 망에 남은 결석을 배양 접시(petri dish)에 넣어 40℃ 오븐에서 30분간 건조 시켰다. 건조 시킨 2㎜ 이상의 잔여 결석의 무게와 개수를 측정하였다.

충격파쇄석술후 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게는 세가지 결석 모두 통계학적 의미가 없었고(길이 5㎜ 결석; $p=0.2048$, 길이 11㎜ 결석; $p=0.7739$, 길이 15㎜ 결석; $p=0.2213$) 잔여 결석의 개수는 결석의 종류에 따라 차이가 있었다. 길이 5㎜ 결석은 빈도에 따른 잔여 결석의 개수가 통계학적으로 의미가 없었으나($p=0.6917$), 길이 11㎜ 와 15㎜ 결석에서는 빈

도에 따른 잔여 결석의 무게 차이 없이($p>0.05$) 빈도가 감소할 수록 분쇄된 결석이 균일하게 작아지고 잔여 결석의 개수는 통계학적으로 의미 있게 증가하여($p<0.0001$) 충격파 빈도가 감소할 수록 결석은 잘게 분쇄되는 것으로 관찰되었다. 이런 현상은 충격파 빈도가 분당 50회 이하에서 다른 충격파 빈도 결과보다 잘 나타났고, 130회 이상으로 증가된 충격파 빈도에서는 잔여 결석이 현저하게 크게 남았다.

이상의 결과에서 결석 크기가 초점면적보다 작은 결석에서는 충격파 빈도가 결석을 분쇄 시키는데 영향을 미치지 않지만, 초점면적과 같거나 큰 결석에서는 충격파의 시간당 빈도를 분당 50회 이하로 하는 것이 결석이 작고 균일하게 분쇄되어 체외충격파쇄석술에 효과적일 것으로 생각된다.

핵심되는 말: 충격파쇄석술, 충격파 빈도, 상부요로, 결석분쇄

결석분쇄에 미치는 체외충격파 빈도의 영향

<지도교수 **이 무 상**>

연세대학교 대학원 의학과

고우진

I. 서 론

인체의 요석 치료를 위하여 1982년에 처음 사용된 체외충격파쇄석술은[1] 술기가 용이하고 안전하며 입원 및 마취가 필요 없어 상부요로결석 치료에 우선적으로 선택되는 치료법이 되었다. 이러한 체외충격파쇄석술의 효과를 높이기 위해서 쇄석기의 기술적인 면을 향상시켜 결석 분쇄력이 증가된 쇄석기가 많이 개발되었고[2,3] 조직에 손상을 적게 주면서 보다 효과적으로 결석을 분쇄하기 위하여 충격파 강도(energy)와 한번 시술할 때 사용하는 충격파의 총 횟수(총량) 그리고 충격파 빈도(frequency; 시간당(분당) 결석에 가하는 충격파의 수)에 대한 연구가 있었다.[4-6] 여러 연구에서 충격파 강도가 세거나 충격파의 총 횟수가 많을 때 조직 손상이 커지는 것으로 연구되었고,[7-9] 동물 모델에서 충격파 빈도를 증가하였을 때 신조직의 손상이 커지는 것이 밝혀 졌다.[4,5]

최초로 인체에 적용한 상업용 충격파쇄석기인 Dornier HM3 (Dornier Medical System, Munich, Germany)는 환자의 심전도와 동시성을 나타내서 충격파가 분당 60-80회를 넘지 않았으나 환자의 심전도와 무관하게 시행한 2, 3세대 쇄석기(nonsynchronous shock wave)의 경험에서 조기심실수축과 같은 심장 이상이 거의 없어[10-12] 일반적으로 충격파쇄석술에서 충격파 빈도는 분당 90-120회로 사용되고 있다.[13,14] 그러므로 초기의 쇄석술보다는 짧은 시간에 같은 충격파의 총량을 결석에 가할 수 있게 되었지만 충격파의 단위 시간당 빈도를 증가하는 것이 인체의 결석분쇄에 어떤 효과가 있는지는 분명하지 않다.

충격파 빈도와 결석분쇄 관계를 연구한 그룹에서 Vallancien 등은[15] 분당 75회와 150회의 충격파를 가한 것이 분당 300회와 600회의 충격파를 가한 것보다 결석분쇄에 효과가 있다고 하였고, Wiksell 과 Kinn은[16] 2초 마다(분당 30회) 충격파를 준 것이 0.4초 마다(분당 150회) 한번씩 충격파를 준 것보다 더 잘 분쇄되었다고 하였으며, Weir 등은[17] 충격파를 분당 60, 80 그리고 117회 시행하였을 때 80과 117회에서 완전히 결석이 분쇄 될 때까지 충격파의 총 횟수가 더 많이 필요하다고 하여 감소된 충격파 빈도가 결석분쇄에 효과적이라고 하였다. 그렇지만 Robert 등은[18] 상부요로결석 치료성공률 연구에서 충격파를 분당 60회 시행한 군과 240회 시행한 군을 비교하였을 때 요관 결석의 분쇄 성공은 충격파 빈도에 통계적으로 영향을 받지 않는다고 하였다.

이와 같이 결석분쇄에 효과적인 충격파 빈도에 대하여 다양한 의견이 있을 뿐 아니라 체외의 결과와 실제로 인체의 결석분쇄에 적용하는 충격파 빈도는 차이가 있다. 또한 기존에 보고된 연구에서는 대부분 한가지 크기의 구형 결석과 반구형이나 그물망 형태의 결석 수용기를 사용하여 실험을 하였기 때문에 직경과 길이가 다른 원통형의 결석과 인체의 상부요로에 있는 결석에도 기존의 결과를 그대로 적용할 수 있을지 의문이 제기되었고 효율적인 결석분쇄를 위해 결석의 크기에 따라 충격파의 시간당 빈도가 결석분쇄에 어떤 영향을 미치는지 연구할 필요성이 있었다.

따라서 연구하는 결석을 여러 크기로 나누고 원통형 수용기를 사용하여 각각의 결석에 대한 충격파의 시간당 빈도의 영향을 알아보았으며 충격파 빈도를 세분화하여 결석분쇄에 효과적인 충격파 빈도를 구해서 기존의 연구 결과와 비교하여 임상에 적용하고자 본 실험에 착수하였다.

II. 재 료 및 방 법

1. 인공결석 쇄석모델

가. 인공결석

본 실험에서는 인체에서 관찰되는 결석이 완전한 구형은 거의 없고, 직경과 길이가 다른 결석이 많다는 점을 감안하여 원통형의 인공결석을 사용하였다. 인공결석은 초점에서 충격파의 영향이 미치는 면적을(초점 면적: 직경 11㎜) 기준으로 하여 세가지 크기(직경: 5㎜, 길이: 5㎜, 11㎜, 15㎜)로 하였고 Wolf사에서 제공한「Piezolith 2501」의 실험용 석고를 사용하였다. 실험에 사용할 인공결석은 실험 전에 무게를 측정하여 실험 후 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 길이 5㎜ 결석은 0.130±0.005gm, 11㎜ 결석은 0.260±0.005gm, 15㎜ 결석은 0.350±0.005gm으로 측정되었다. 인공결석 내부의 기포가 실험 결과에 주는 영향을 없애기 위해서 인공결석을 식염수에 30분간 담가 인공결석 내부의 기포를 제거한 후 사용하였다.

나. 인공결석수용기

인공결석의 수용기로 인체의 상부요로는 관 모양이라는 가정 하에 수용기 모양을 원통형으로 하였다. 결석 수용기의 재질은 내부를 관찰할 수 있는 투명한 실리콘으로 하였고 길이는 35㎜, 직경은 6㎜, 두께는 1㎜이었다.

2. 체외충격파쇄석기

본 실험에서는 압전기방식인(piezoelectric type) Wolf사의「Piezolith 2501」을 사용하였다. 충격파 지속시간(positive pulse duration)은 1μsec 이하이고, 충격파 상승시간(rise time)은 30nsec 이하이었다. 초점에서 충격파가 영향을 주는 초점면적은 직경이 11㎜인 원형이었다. 이 충격파쇄석기의 충격파 강도 범위는 50-150MPa이었다. 본 실험에 사용될 충격파의 강도를 결정하기 위해 세가지 크기의 인공결석을 대상으로 본 실험 전에 충격파 강도 실험을 하였다. 충격파 총 횟수를 500회로, 충격파 빈도를 분당 90회로 하였을 때 충격파 강도가 50MPa에서는 인공결석의 분쇄가

잘 일어나지 않았고 150MPa에서는 세가지 인공결석이 대부분 완전히 분쇄되는 등 차이가 있어 결석분쇄에 충격파 강도의 영향을 최소화하기 위해 중간값인 100MPa로 하였다. 길이 5㎜ 결석은 충격파 총 횟수를 500회로 하였을 때 보다 400회로 하는 것이 결석분쇄 양상을 관찰하는데 용이하여 충격파 총 횟수를 400회로 하였다.

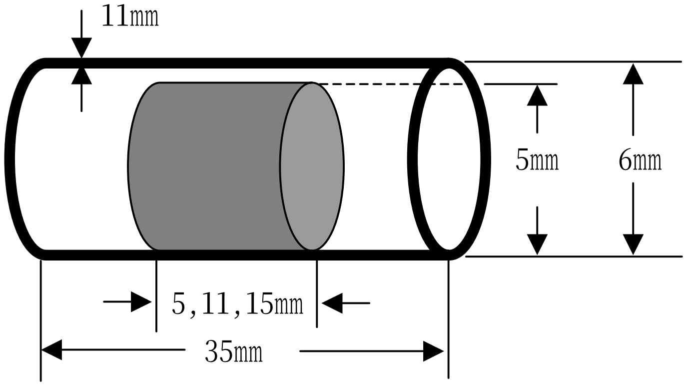
3. 실험방법

본 실험은 기포를 제거한 인공결석을 미리 식염수에 담가 내부의 공기를 제거한 실리콘 관의 중앙에 넣고(그림 1.A) 이것을 식염수로 채운 「Piezolith 2501의 실험용 기구」안에 놓은 다음 실리콘관 안에 놓인 인공결석의 정 중앙이 초점에 위치하도록 조절하였다(그림 1.B). 길이가 11㎜와 15㎜인 인공결석은 충격파 총 횟수를 500회로 하였고 길이 5㎜인 인공결석은 충격파 총 횟수를 400회로 하였다. 충격파 강도는 세가지 결석 모두 100MPa로 일정하게 하였다. 충격파 빈도는 분당 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150회의 일곱 단계로 나누어서 인공결석의 종류별로 각각 6번씩 반복 실험을 하였다. 충격파가 가해지는 동안 결석이 분쇄되는 과정을 관찰하여 결석의 크기와 충격파 빈도 별로 분쇄양상을 기록하였다. 정해진 충격파를 가한 다음 실리콘 관에 있는 분쇄된 결석 조각을 2㎜ 간격의 그물 망에 통과시켜 크기가 2㎜ 미만인 결석을 제거하고, 그물 망에 남은 결석을(그림 2) 유리로 된 배양 접시(petri dish)에 넣고 40℃ 오븐에서 30분간 건조시켰다. 건조 시킨 잔여 결석의 무게와 개수 및 결석의 크기를 측정하였다.

4. 통계분석

쇄석후 그물 망에 남은 2㎜ 이상의 결석의 개수와 무게를 측정하여 평균과 표준오차를 구하였으며, 인공결석의 종류별로 충격파 빈도에 대한 잔여 결석의 총무게와 개수를 one-way ANOVA test를 사용하여 분석하였고, p값이 0.05 미만일 때 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 판정하였다.

A.



B.

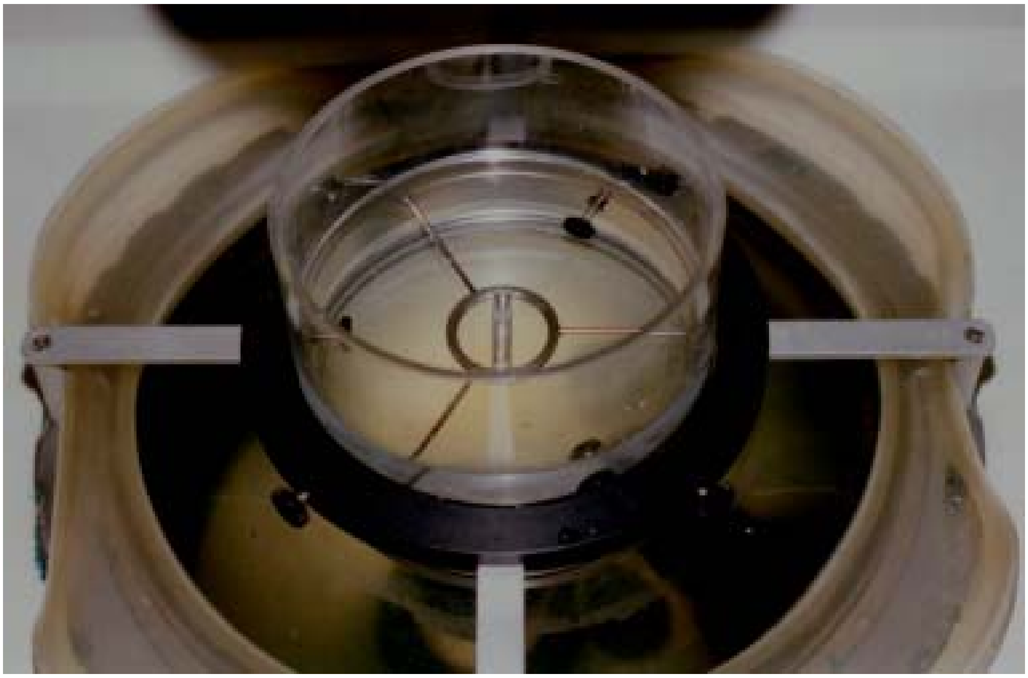


그림 1. Piezolith 2501 실험용 기구. A. 인공결석이 들어있는 실리콘 관의 도식화. B.「Piezolith 2501의 실험용 기구」에 인공결석이 들어 있는 실리콘 관을 놓고 초점을 맞춘 상태.

III. 결 과

1. 충격파에 의한 인공결석의 분쇄 양상

충격파에 의한 결석의 분쇄 양상은 실험에 사용된 세가지 크기의 결석 모두 유사하였다. 충격파를 가할 때 먼저 나타나는 현상은 충격파와 처음 접하는 면에서의 미란이었고, 다음으로 반대면에 가로 또는 세로의 균열이었다. 충격파 횟수가 증가할 수록 충격파가 직접 처음 닿는 면의 결석분쇄가 발생하였고 결석 측면의 균열이 관찰되었다. 실험에 정해진 충격파를 가하고 난 뒤 관찰한 분쇄형태는 충격파와 바로 접한 면은 아주 미세한 가루 층이 형성되었고 반대면으로 갈수록 결석의 입자 크기가 커지는 쐐기 모양의 양상을 보였다(그림 3).

2. 길이 5㎜ 인공결석

충격파를 가하기 전에 측정한 결석의 평균 무게는 0.130±0.005gm이었고 충격파를 가한 후 남은 길이 2㎜ 이상의 결석 수는 충격파 빈도가 분당 30회인 경우 8.7±1.0개, 50회인 경우 8.2±2.5개, 70회인 경우 7.8±1.5개, 90회인 경우 7.0±0.9개, 110회인 경우 7.3±1.4개, 130회인 경우 7.5±1.6개, 150회인 경우 7.8±2.2개였고, p 값은 0.6917로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 개수는 통계학적 의미가 없었다($p>0.05$; 표 1). 남은 결석의 총 무게는 충격파 빈도가 분당 30회인 경우 0.030±0.006gm, 50회인 경우 0.038±0.015gm, 70회인 경우 0.043±0.008gm, 90회인 경우 0.035±0.005gm, 110회인 경우 0.042±0.012gm, 130회인 경우 0.033±0.008gm, 150회인 경우 0.042±0.012gm으로 측정되었고, p 값이 0.2048로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게는 통계학적인 차이가 없었다($p>0.05$; 표 1). 그림 5와 6에 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게와 개수를 그래프로 나타내었다.

3. 길이 11㎜ 인공결석

충격파를 가하기 전에 측정한 결석의 평균 무게는 0.260±0.005gm이었고 충격파를 가한 후 남은 길이 2㎜ 이상의 결석 수는 충격파 빈도가 분당 30회인 경우 21.2±3.0개, 50회인 경우 18.3±3.3개, 70회인 경우 12.8±3.5개, 90회인 경우 13.7±2.3개, 110회인 경우 12.5±2.5개, 130회인 경우 11.2±2.2개, 150회인 경우 9.0±2.7개였고, p 값이 0.0001 미만으로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 개수는 통계학적 의미가 있었다($p<0.05$; 표 1). 잔여 결석의 총 무게는 충격파 빈도가 분당 30회인 경우 0.112±0.013gm, 50회인 경우 0.115±0.018gm, 70회인 경우 0.118±0.021gm, 90회인 경우 0.110±0.020gm, 110회인 경우 0.108±0.017gm, 130회인 경우 0.110±0.017gm, 150회인 경우 0.102±0.012gm으로 측정되었고, p 값은 0.7739로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게는 통계학적인 차이가 없었다($p>0.05$; 표 1). 잔여 결석의 크기는 충격파 빈도가 분당 30회와 50회인 경우 2x2㎜와 3x3㎜가 대부분이고 결석의 크기도 균일한 반면 분당 130회와 150회에서는 4x5㎜와 5x5㎜ 크기의 결석 조각들이 주로 관찰되었다(그림 4.A). 그림 5와 6에 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게와 개수를 그래프로 나타내었다.

4. 길이 15㎜ 인공결석

충격파를 가하기 전에 측정한 결석의 무게는 0.350±0.005gm이었고 충격파를 가한 후 남은 길이 2㎜ 이상의 결석 수는 충격파 빈도가 분당 30회인 경우 24.5±6.3개, 50회인 경우 21.3±3.2개, 70회인 경우 17.0±2.8개, 90회인 경우 14.5±2.3개, 110회인 경우 15.7±1.9개, 130회인 경우 11.7±4.5개, 150회인 경우 12.5±3.1개였고, p 값이 0.0001 미만으로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 개수는 통계학적 의미가 있었다($p<0.05$; 표 1). 잔여 결석의 총 무게는 충격파 빈도가 분당 30회 인 경우 0.187±0.018gm, 50회인 경우 0.182±0.021gm, 70회인 경우 0.177±0.016gm, 90회인 경우 0.172±0.024gm, 110회인 경우 0.188±0.022gm, 130회인 경우 0.167±0.025gm, 150회인 경우 0.198±0.024gm으로 측정되었고, p 값이 0.2213으로 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게는 통계학적인 차이가 없었다($p>0.05$; 표 1). 잔여 결석의 크기는 충격파 빈도가 분당 30회와 50회인

경우 2x3mm와 3x3mm가 대부분이고 결석의 크기도 균일한 반면 분당 130회와 150회에서는 4x5mm와 5x5mm 크기의 결석 조각들이 다수였다(그림 2, 4.B). 그림 5와 6에 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게와 개수를 그래프로 나타내었다.

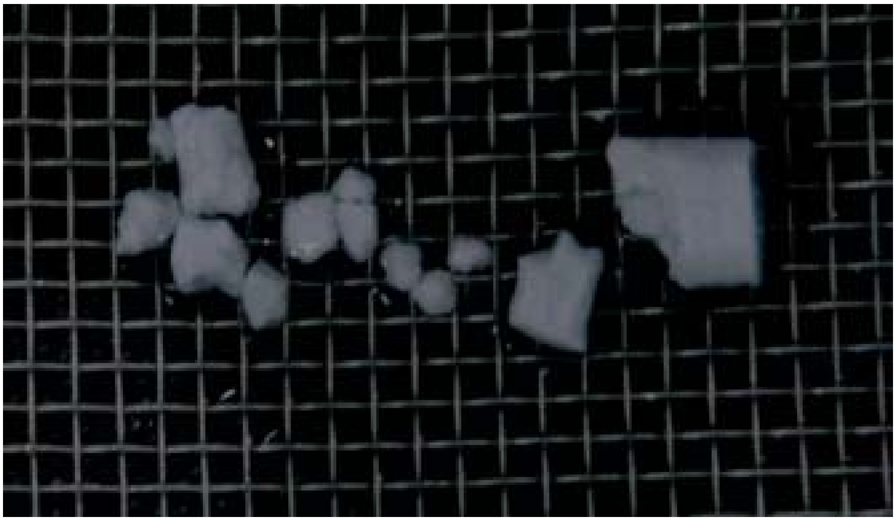
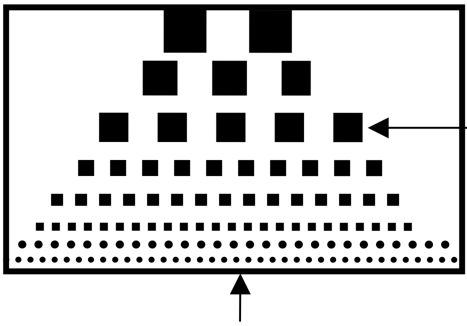


그림 2. 잔여 결석. 길이 15㎜ 결석에 충격파 빈도를 분당 130회로 하여 충격파를 총 500회 가한 뒤 분쇄된 결석을 그물망에 통과시키고 남은 결석 모양으로 결석의 양쪽 끝(특히 우측)에 완전히 분쇄되지 않은 큰 결석이 관찰된다.

A.



B.

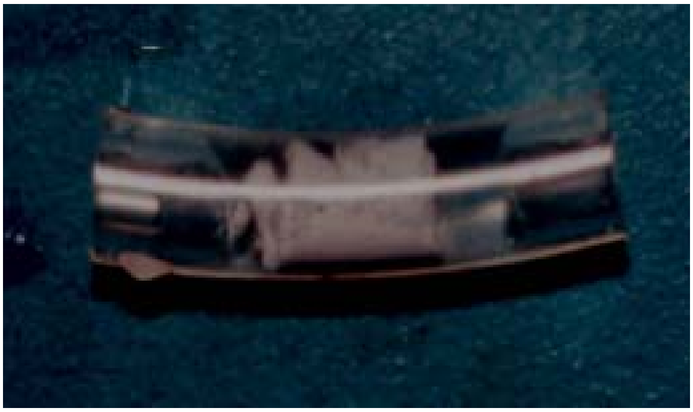
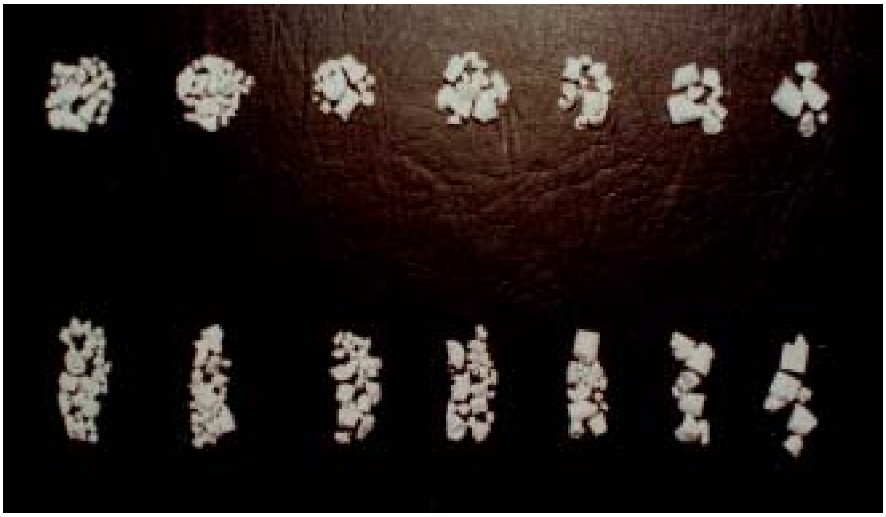


그림 3. 충격파에 의해 인공결석이 분쇄되는 양상. A. 인공결석이 분쇄되는 양상을 도식화한 것. B. 길이 11㎜ 결석에 충격파 빈도를 분당 90회로 하여 충격파를 총 500회 가한 후 나타난 결석의 분쇄 모습으로 충격파가 직접 처음 닿는 면(아래면)은 미세하게 분쇄되고 반대면(윗면)으로 갈수록 분쇄되는 결석의 크기가 커지는 소견을 보였다.

A



B

30 50 70 90 110 130 150

그림 4. 인공결석의 충격파 빈도 별 분쇄 양상. A. 길이 11㎜ 결석의 충격파쇄석술후 분쇄 모양. B. 길이 15㎜ 결석의 충격파쇄석술후 분쇄 모양. A, B 모두 맨 좌측의 충격파 빈도는 분당 30회이고, 20회씩 충격파 빈도를 증가하여 맨 우측은 분당 150회의 충격파를 가한 후 남은 결석의 분쇄 모양이다. 충격파 빈도가 증가할 수록 잔여 결석 개수가 감소하며 결석 크기가 커짐을 알 수 있다.

표 1. 충격파 빈도에 따른 결석 크기 별 실험 결과

결석 크기(길이)	충격파 빈도(/min)	잔여 결석의 개수*	잔여 결석의 총 무게(gm)**
5mm	30	8.7±1.0	0.030±0.006
	50	8.2±2.5	0.038±0.015
	70	7.8±1.5	0.043±0.008
	90	7.0±0.9	0.035±0.005
	110	7.3±1.4	0.042±0.012
	130	7.5±1.6	0.033±0.008
	150	7.8±2.2	0.042±0.012
	p value	0.6917	0.2048
11mm	30	21.2±3.0	0.112±0.013
	50	18.3±3.3	0.115±0.018
	70	12.8±3.5	0.118±0.021
	90	13.7±2.3	0.110±0.020
	110	12.5±2.5	0.108±0.017
	130	11.2±2.3	0.110±0.017
	150	9.0±2.7	0.102±0.012
	p value	< 0.0001	0.7739
15mm	30	24.5±6.3	0.187±0.018
	50	21.3±3.2	0.182±0.021
	70	17.0±2.8	0.177±0.016
	90	14.5±2.3	0.172±0.024
	110	15.7±1.9	0.188±0.022
	130	11.7±4.5	0.167±0.025
	150	12.5±3.1	0.198±0.024
	p value	< 0.0001	0.2213

세가지 결석 모두 충격파 빈도 별로 각각 여섯 번씩 반복 실험하였고, 실험 결과를「one-way ANOVA test」로 통계 처리 하였다.
p value가 0.05 미만 일 때 통계학적으로 의미가 있는 것으로 하였다.
*, ** : 실험 결과를 평균±표준오차로 나타냄.

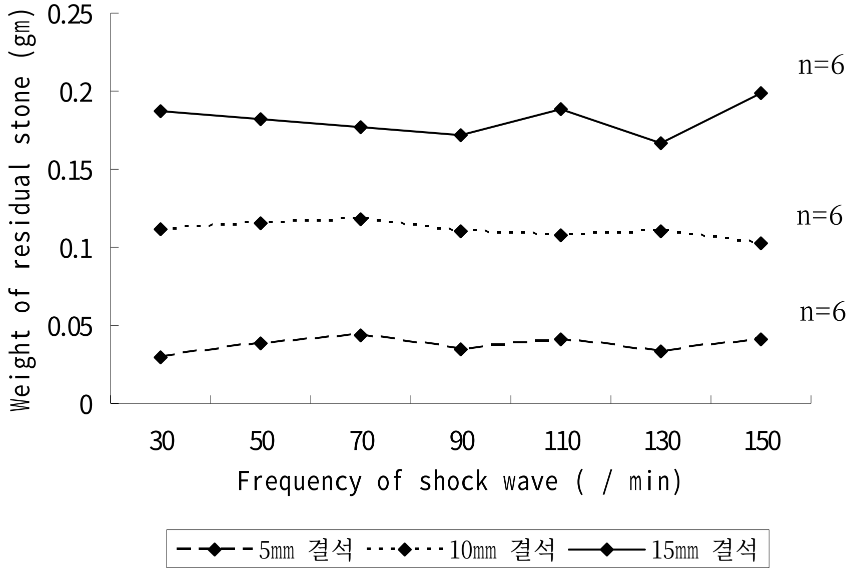


그림 5. 결석 크기에 따른 충격파 빈도 별 잔여 결석의 총 무게.

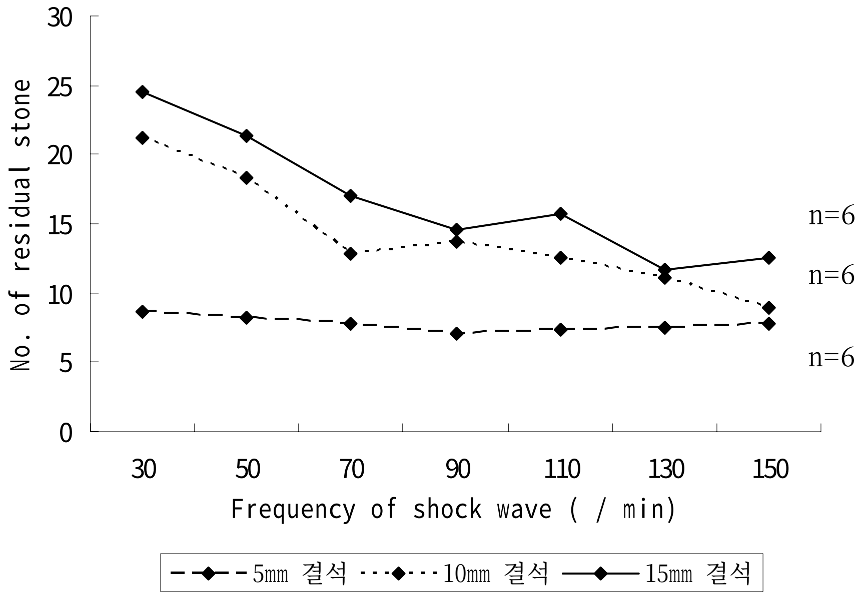


그림 6. 결석 크기에 따른 충격파 빈도 별 잔여 결석 개수.

IV. 고 찰

체외충격파쇄석기가 인체의 요로결석 치료에 사용되면서 충격파쇄석술의 치료 효과를 높이기 위한 방법 중 하나로 충격파 빈도에 대한 연구가 진행되어 왔다. 체외충격파쇄석술 초기에는 충격파가 심장에 영향을 주는 것을 우려하여 충격파 빈도를 심장박동과 연계하여 시술하였지만 계속된 연구[10-12] 에서 충격파에 의한 심장이상이 거의 나타나지 않아서 충격파 빈도는 일반적으로 분당 90-120회로 사용되고 있다.[13,14] 그렇지만 아직까지 인체 요로 결석의 다양한 모양과 다양한 구성 성분에 따른 결석분쇄에 효과적인 충격파 빈도는 정해진 것이 없다고 하겠다.

현재까지 알려진 체외충격파쇄석기의 결석분쇄 주기전은 충격파와 진공현상(cavitation phenomenon)에 의해 발생되는 기계적인 자극이다.[19] 체외충격파쇄석술에서 충격파란 작은 공간에서 갑자기 에너지를 방출함으로써 공기 중 또는 물속에서 발생되는 높은 압력의 고 에너지를 의미하고, 짧고 가파르게 상승하는 양 압력(positive pressure)과 이어서 나타나는 길고 낮은 음 압력(negative pressure)으로 이루어진다. 충격파의 분쇄력은 두 개의 서로 다른 음향 성질을 가진 물질을 충격파가 통과하면서 나타나는 압력 차이로 만들어지는데, 강력한 양 압력이 결석의 앞 표면에 작용할 때 이 힘이 결석의 표면을 유지하고 있는 힘보다 더 커지면 압축파쇄(compressive fracture)가 일어나고 부숴지기 쉬운 물질에서는 양 압력이 진행하는 방향과 평행하게 미세균열을 형성한다.[19] 결석 앞면을 투과한 충격파는 결석에서 주위의 액체나 조직으로 진행할 때 음향 임피던스가 감소되기 때문에 결석의 뒷면에서 충격파가 발생된 지점으로 반사되는 항장분력(tensile component)과 결석을 관통하여 앞으로 나아가는 압축분력(compressive component)이 발생한다. 연속적으로 반사된 항장분력은 결석 안에서 중첩되고 결석 뒷면으로부터 약간 떨어진 곳에 강력한 항장압력을 만들고 이 결과 압축력과 항장력의 차이로 결석 뒷면으로부터 결석 조각을 분리시키는 ‘spalling’이 발생한다.[20-22] Zhong 등은[22] 충격파쇄석술시 결석에서 ‘spalling’이 일어나는 최소거리를 구하였는데 struvite인 경우 2.7㎜이었고, 수산칼슘석(calcium oxalate monohydrate)에서는 4.5㎜로 측

정되었다(최소거리 = $c_L * t^+/2$; c_L :longitudinal wave speed, t^+ :positive pulse duration). 그러므로 남은 결석조각의 크기가 이 최소 거리보다 작을 때 결석에 가해지는 충격은 의미 있게 감소될 것이다. 2001년 Eisenmenger가[23] 초점면적이 결석보다 클 때 충격파는 결석보다 결석 주위의 액체에서 천천히 진행하기 때문에 결석 주위로부터 결석으로 압력이 작용하여 결석을 분쇄 시킨다는 ‘squeezing’ 이론을 제시하여 충격파에 의한 결석분쇄 기전을 설명하였다.

충격파 빈도를 분당 30회에서 150회까지 20회씩 증가시키면서 시행한 본 실험에서는 시술 초기에 충격파가 직접 닿는 결석면(결석 아랫면)의 분쇄가 관찰되었고 충격파가 가해지는 결석의 반대면(결석 윗면)에서 긴 축(가로) 또는 짧은 축(세로)의 균열이 생겼으며 결석의 측면에도 균열이 관찰되었다. 이런 현상은 충격파 빈도와 관계 없이 세가지 인공결석에서 모두 관찰되었으나 길이 15㎜ 결석에서는 충격파 빈도를 증가할 수록 결석 아랫면의 초점면적보다 큰 부분은 결석분쇄가 잘 나타나지 않았고 결석 윗면에는 주로 짧은 축의 균열이 발생하였다. 본 실험에서 쇄석술 초기에 나타난 결석분쇄 양상은 초점면적 이하의 결석에서는 충격파에 의한 압축파쇄, ‘spalling’ 그리고 ‘squeezing’ 현상이 복합적으로 작용하는 것으로 판단되나 충격파의 초점면적을 벗어난 결석 부위에서는 결석분쇄가 잘 나타나지 않는 것으로 관찰되어 충격파에 의한 결석분쇄 기전이 국소적으로 작용하는 것으로 추정되었다. 따라서 초점면적보다 큰 결석에 대한 체외충격파쇄석술에서 분쇄 기전으로 충격파만 작용한다면 결석분쇄에 한계가 있어 결석조각의 크기는 자연 배출이 가능한 작은 크기로 분쇄되기 어려울 것이다.[24]

다른 결석분쇄 기전인 진공현상은 압력의 변화가 액체 내에서 기포를 급속히 확장 시켜 만들어내는 음향 현상이다.[25,26] 충격파에서 초기에 급격히 나타나는 양 압력은 직경이 1㎛ 이하로 되는 기포를 유발하고, 다음 음압력 시기에 기포의 성장이 시작된다.[27] 기포는 극도로 불안정하고 뒤이어 가해지는 충격파에 의해 폭발적으로 터지게 되어 미세 분출(microjet)을 형성하여 높은 속도로 결석 표면을 쳐서 주로 결석 표면에 미란과 미세한 결석 골절을 일으킨다.[28,29] 진공현상에 의한 기포의 미세분출은 결석 안으로 깊게 통과하지 않지만 남아있는 결석의 표면 구조를 약하게 하여 결석

이 연속적으로 충돌하는 충격파에 보다 더 잘 분쇄될 수 있도록 한다.[29,30] 또한 결석 표면에 생기는 균열을 따라 액체가 결석 안으로 들어가고 주로 균열 부위에 기포가 모여 결석 내로 기포가 확산되면서 결석의 균열이 커지도록 유도한다.[25,30] 따라서 결석 조각이 증가하면서 결석의 전체 표면적은 빠르게 증가할 것이고 기포에 의한 손상도 더욱 촉진될 것이다. 본 실험에서도 세가지 크기의 결석 모두 충격파와 기포가 많이 접할 수 있었던 결석 아래면은 결석이 아주 잘게 넓은 부위에서 분쇄가 나타났고 결석 윗면으로 갈수록 분쇄된 결석의 크기는 커지면서 주로 중심부에서만 결석분쇄가 일어나서 충격파와 기포의 영향이 결석 윗면으로 갈수록 감소하는 쐐기 모양의 분쇄 형태를 보였다(그림 2). 이런 현상은 충격파쇄석술의 초기에는 압축분쇄, ‘spalling’ 그리고 ‘squeezing’ 같은 충격에 의한 기전이 결석 분쇄의 주된 원인이 되고 충격파가 계속 될수록 기포는 결석을 약하게 하고 미세균열을 일으켜 결석이 충격파에 의해 더 잘 분쇄될 수 있도록 역할을 하는 것으로 생각된다.[24] 이와 같이 충격파에 의해 만들어지는 기포는 결석을 작은 크기로 분쇄하는데 중요한 역할을 하는 것으로 생각되기 때문에 기포의 특성을 알고 조절하는 것이 결석분쇄에 중요하다.[31]

Huber 등은[32,33] 충격파 강도와 충격파 빈도가 진공현상에 주는 영향을 연구하여 충격파 빈도가 증가함에 따라 기포의 발생 수는 증가하나 충격파 강도는 기포 발생에 의미 있는 영향을 주지 않았다고 하였고, Zeman 등은[34] 충격파 빈도를 초당 1.0회(분당 60회)에서 1.8회(분당 108회)로 높일 때 기포의 발생이 증가한다고 하였다. 그렇지만 Lifshitz 등은[28] 충격파의 시간당 빈도를 높일수록 알루미늄 박 표면의 손상이 적어진다고 하였고, Weir 등은[17] 충격파 빈도가 빠를수록 결석을 분쇄하는데 많은 수의 충격파가 필요하다고 하였다. 이런 현상은 충격파의 시간당 빈도가 빠를수록 기포 핵의 수는 더 많이 생성되지만 선행된 충격파에 이어 오는 다음 충격파는 앞선 충격파에 의해 만들어진 기포로 인해 물속의 가스량이 감소되어 낮은 에너지를 갖는 기포를 형성하게 되며[17] 기포는 충격파에 의해 만들어질 때 원통형 군집 형태로 나타나고 충격파의 진행경로를 따라 위치하기 때문에 남아 있는 기포로 인해 충격파의 산란과 에너지의 흡수가 일어나서 충격파 에너지가 감소되고 결석분쇄에 많은 수의 충격파가 필요하게 되는 것이다.[35,36] 또한 충격파 빈도가 증가할 수록 기포의 크기는 작아지고 군집

은 치밀해지며 기포가 터지는 시간이 길어지지만 기포의 크기가 아주 작을 때 미세분출은 결석에 손상을 일으키는 주요 요소가 될 수 없다.[28,37] 즉, 충격파 빈도가 증가할 수록 기포는 작아지고 군집밀도는 증가하여 기포에 의한 미세분출의 영향이 감소되고, 충격파 에너지를 흡수하거나 산란시키는 정도가 커서 충격파 에너지가 결석에 도달하는 것이 감소되는 것으로 생각할 수 있다.

본 실험에서는 충격파 빈도에 따른 결석분쇄 효과를 알아 보기 위해 잔여 결석의 무게와 개수 및 크기를 평가 대상으로 하였다. 초점면적보다 작은 길이 5㎜ 결석의 경우 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게와 개수는 통계학적으로 의미가 없어 충격파 빈도에 상관 없이 분쇄되는 것으로 나타났고 분쇄된 결석의 크기도 충격파 빈도에 관계 없이 관찰되었다. 길이 11㎜와 15㎜ 결석에서는 충격파 빈도에 따른 잔여 결석의 무게는 통계학적으로 의미가 없었지만 충격파 빈도가 감소할 수록 잔여 결석의 개수는 증가하였으며($p<0.05$; 표 1) 분쇄된 결석의 크기가 작고 일정해지는 것으로 관찰되었다. 특히, 충격파 빈도가 분당 50회 이하에서 잔여 결석 개수의 증가가 뚜렷하게 나타났고 충격파 빈도가 분당 130회 이상으로 증가될 때 현저히 감소되었는데(그림 4) 이런 결과는 Greenstein 과 Matzkin 이[38] 구형의 인공결석으로 실험하여 결석분쇄에 효과적인 충격파 빈도를 분당 60회로 보고한 것과 유사하였다. Sapozhnikov에[27] 의하면 기포의 군집밀도는 충격파 빈도가 분당 30회와 60회 일 경우 성기게 생성되고 120회와 180회에서는 치밀하게 생성되어 충격파 빈도가 증가할 수록 원통형 군집 형태는 커진다고 하여서 충격파 빈도에 따라 발생되는 기포의 군집 밀도가 결석분쇄에 영향을 주는 것으로 생각된다. 본 실험에서 충격파 빈도를 증가하였을 때 관찰되는 굵고 큰 잔여결석은 주로 인공결석의 양단과 결석 윗면에서 관찰되었는데 이런 결과는 앞에서 설명한 데로 충격파 빈도가 감소되면 비록 적은 수의 기포지만 하나의 기포가 가지고 있는 에너지는 크며, 기포가 분산하면서 결석의 넓은 면에 작용하고 균열된 결석 사이로 기포가 침투하여 결석 내부에도 영향을 줄 수 있지만 충격파 빈도가 증가될 때는 초점면적에 치밀한 기포 군집이 형성되어 기포가 퍼지지 못하고 결석 중심부에만 위치하여 결석에 가해지는 충격파를 산란 또는 흡수시키기 때문인 것으로 생각된다.

이상에서 초점면적보다 작은 결석은 충격파 빈도에 관계 없이 결석분쇄가 일어나서 충격파 빈도는 인체 결석 치료에 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각되며, 초점면적 이상의 결석에서는 충격파 빈도가 감소될 수록 잔여 결석의 수가 통계학적으로 유의하게 증가하고 작고 균일하게 분쇄되었기 때문에 인체 결석 치료에 충격파 빈도를 감소하여 실행하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

V. 결 론

체외충격파쇄석술에서 결석분쇄에 영향을 미치는 충격파 빈도에 대해 알아 보기 위해 크기가 다른 세가지 원통형 인공결석과 관 모양의 결석 수용기를 사용하여 실험을 하였다. 충격파 빈도는 분당 30회에서 20회씩 증가하여 분당 150회까지 일곱 단계로 세분하여 실험을 하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 원통형 결석에서 결석분쇄 양상은 충격파가 처음 접하는 면(아랫면)부터 미란이 일어나고 그 반대면(윗면)과 결석의 양단은 결석분쇄가 잘 되지 않았다.
2. 결석분쇄에는 주로 충격파와 기포가 작용을 하지만 충격파쇄석술의 성공 여부를 결정짓는 자연배출이 가능한 크기로의 결석분쇄에는 기포가 중요한 역할을 하는 것으로 생각되고, 이런 기포의 발생은 충격파 빈도에 의해 달라질 수 있다.
3. 충격파의 초점면적보다 작은 결석을 분쇄하는데 충격파 빈도는 통계학적으로 의미가 없었다.
4. 충격파의 초점면적 이상인 결석에서는 충격파 빈도가 감소할수록 결석분쇄가 잘 되었고 이 결과는 통계적으로 유의하였다($p<0.0001$).
5. 충격파 빈도가 분당 50회 이하일 때 다른 충격파 빈도의 결과보다 쇄석 후 잔여 결석이 작고 균일하게 분쇄되었다.

이상의 결과에서 체외충격파쇄석술을 시행 할 때 초점면적과 결석의 크기를 고려하여 충격파 빈도를 조정하여 실행하는 것이 결석분쇄에 효과적이며, 초점면적 이상인 결석에서는 충격파 빈도를 분당 50회로 하는 것이 결석분쇄에 유용할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Chaussy C, Schmiedt E, Jocham D, Brendel W, Forssmann B, Walther V. First clinical experience with extracorporeally induced destruction of kidney stones by shock waves. J Urol 1982;127:417-420.
2. Brian KA, Glenn MP. Update on shock wave lithotripsy technology. Curr Opin Urol 2002;12(4):287-290.
3. Clayman RVMB, Garvin TJ, Denstedt JD, Andriole GL. Lithostar: an electromagnetic acoustic shock wave unit for extracorporeal lithotripsy. J Endourol 1989;3:307-313.
4. Delius M, Jordan M, Eizenhoefer H, Marlinghaus E, Heine G, Liebich HG, et al. Biological effects of shock waves: kidney hemorrhage by shock waves in dogs: administration rate dependence. Ultrasound Med Biol 1988;14:689-694.
5. Ryan PC, Jones BJ, Kay EW, Nowlan P, Kiely EA, Gaffney EF, et al. Acute and chronic bioeffects of single and multiple doses of piezoelectric shockwaves (EDAP LT.01). J Urol 1991;145:399-404.
6. Zhong P, Xi X, Zhu S, Cocks FH, Preminger GM. Recent developments in SWL physics research. J Endourol 1999;13:611-617.
7. Delius M, Enders G, Xuan Z, Liebich HG, Brendel W. Biological effects of shock waves: kidney damage by shock waves in dogs: dose dependence. Ultrasound Med Biol 1988;14:117-122.
8. Willis LR, Evan AP, Lingeman JE. The impact of high-dose lithotripsy on renal function. Contemp Urol 1999;11:45-50.
9. Connors BA, Evan AP, Willis LR, Blomgren PM, Lingeman JE, Fineberg NS. The effect of discharge voltage on renal injury and impairment caused by lithotripsy in the pig. J Am Soc Nephrol 2000;11(2):310-318.
10. Winters JC, Macaluso JN Jr. Ungated Medstone outpatient lithotripsy. J Urol 1995;153:593-595.

11. Lingeman JE, Newman DM, Siegel YI, Eichhorn T, Parr K. Shock wave lithotripsy with the Dornier MFL 5000 lithotriptor using an external fixed rate signal. J Urol 1995;154(3):951-954.
12. Cass AS. The use of ungating with the Medstone lithotriptor. J Urol 1996;156:896-898.
13. Ryan FP, Ramsay LK, James EL. The effect of rate of shock wave delivery on the efficiency of lithotripsy. Curr Opin Urol 2002;12(4):291-295.
14. Greenstein A, Kaver I, Lechtman V, Braf Z. Cardiac arrhythmias during nonsynchronized extracorporeal shock wave lithotripsy. J Urol 1995;154(4):1321-1322.
15. Vallancien G, Munoz R, Borghi M, Veillon B, Brisset JM, Daudon M. Relationship between the frequency of piezoelectric shock waves and the quality of renal stone fragmentation. Eur Urol 1989;16(1):41-44.
16. Wiksell H, Kinn AC. Implications of cavitation phenomena for shot intervals in extracorporeal shock wave lithotripsy. Br J Urol 1995;75(6):720-723.
17. Weir MJ, Tariq N, Honey RJ. Shockwave frequency affects fragmentation in a kidney stone model. J Endourol 2000;14:547-550.
18. Robert M, Rakotomalala E, Delbos O, Navratil H. Piezoelectric lithotripsy of ureteral stones: influence of shock wave frequency on sedation and therapeutic efficiency. J Endourol 1999;13:157-160.
19. Lokhandwalla M, Sturtevant B. Fracture mechanics model of stone comminution in ESWL and implications for tissue damage. Phys Med Biol 2000;45:1923-1940.
20. Gracewski SM, Dahake G, Ding Z, Burns SJ, Everbach EC. Internal stress wave measurements in solids subjected to lithotripter pulses. J Acoust Soc Am 1993;94:652-661.
21. Xi XF, Zhong P. Dynamic photoelastic study of the transient stress field in solids during shock wave lithtripsy. J Acoust Soc Am

2001;109:1226-1239.
22. Zhong P, Chuong CJ, Preminger GM. Characterization of fracture toughness of renal calculi using a microindentation technique. J Materials Sci Lett 1993a;12:1460-1462.
23. Eisenmenger W. The mechanisms of stone fragmentation in ESWL. Ultrasound in Med & Biol 2001;27(5):683-693.
24. Zhu S, Cocks FH, Preminger GM, Zhong P. The role of stress waves and cavitation in stone comminution in shock wave lithotripsy. Ultrasound in Med. & Biol 2002;28(5):661-671.
25. Sass W, Braunlich M, Dreyer H, Matura E, Folberth W, Priesmeyer H, et al. The mechanisms of stone disintegration by shock waves. Med Biol 1991;17:239-243.
26. Holmer NG, Almquist LO, Hertz TG, Holm A, Lindstedt E, Persson HW, et al. On the mechanism of kidney stone disintegration by acoustic shock waves. Ultrasound Med Biol 1991;17:479-489.
27. Sapozhnikov OA, Khokhlova VA, Bailey MR, Williams JC Jr, McAteer JA, Cleveland RO, et al. Effect of overpressure and pulse repetition frequency on cavitation in shock wave lithotripsy. J Acoust Soc Am 2002;112(3):1183-1195.
28. Lifshitz DA, Williams JC Jr, Sturtevant B, Connors BA, Evan AP, McAteer JA. Quantitation of shock wave cavitation damage in vitro. Ultrasound Med Biol 1997;23(3):461-471.
29. Howard D, Sturtevant B. In vitro study of the mechanical effects of shock-wave lithotripsy. Ultrasound Med Biol 1997;23:1107-1122.
30. Field JE. The physics of liquid impact, shock wave interactions with cavities, and the implications to shock wave lithotripsy. Phys Med Biol 1991;36:1475-1484.
31. Bailey MR, Blackstock DT, Cleveland RO, Crum LA. Comparison of electrohydraulic lithotripters with rigid and pressure-release ellipsoidal reflectors. II. Cavitation fields. J Acoust Soc Am

1999;106:1149-1160.
32. Huber P, Jochle K, Debus J. Influence of shock wave pressure amplitude and pulse repetition frequency on the lifespan, size and number of transient cavities in the field of an electromagnetic lithotriptor. Phys Med Biol 1998;43:3113-3128.
33. Huber P, Debus J, Jochle K, Simiantonakis I, Jenne J, Rastert R, et al. Control of cavitation activity by different shockwave pulsing regimens. Phys Med Biol 1999;44:1427-1437.
34. Zeman RK, Davros WJ, Garra BS, Horii SC. Cavitation effects during lithotripsy. Radiology 1990;177:157-161.
35. Coleman AJ, Choi MJ, Saunders JE, Leighton TG. Acoustic emission and sonoluminescence due to cavitation at the beam focus of an electrohydraulic shock wave lithotripter. Ultrasound Med Biol 1992;18:267-281.
36. Jochle K, Debus J, Lorenz WJ, Huber P. A new method of quantitative cavitation assessment in the field of a lithotripter. Ultrasound ed Biol 1996;22:329-338.
37. Kodama T, Takayama K. Dynamic behavior of bubbles during extracorporeal shock wave lithotripsy. Ultrasound Med Biol 1998;24(5):723-738.
38. Greenstein A, Matzkin H. Does the rate of extracorporeal shock wave delivery affect stone fragmentation. Urology 1999;54:430-432.

Abstract

The effect of shockwave frequency on the fragmentation of stone using extracorporeal shock wave lithotripsy

Woo Jin Ko

Department of Medicine
The Graduate School, Yonsei University

(Directed by Professor Moo Sang Lee)

Since its introduction, extracorporeal shock wave lithotripsy(ESWL) has grown to be the most preferred choice of treatment for the stone in the upper urinary tract. In ESWL, the effectiveness of fragmentation of the stone depends on the factors such as makeup of the stone, capability of lithotriptor, shockwave pressure(energy), and shockwave frequency. Among the elements that affect the fragmentation of the stone, several studies currently exist on the effect of shockwave frequency on the fragmentation of stone but to our knowledge, a little information is known on the effect of shockwave frequency for the treatment of stone. Although current studies report the effectiveness of the decreased shockwave frequency on fragmentation of the stone, there are few reports on the effectiveness of shockwave frequency for the stones of different sizes. In this study, using tube like stone receptor which is similarly shaped to the upper urinary tract, we tried to determine the most effective shockwave frequency on the fragmentation of the stone with three different sizes of stones.

In this study, three different sized stones(length: 5mm, 11mm, 15mm, diameter: 5mm) were each placed in a silicon tube(length 35mm,

diameter 6mm, thickness 1mm) and lithotripsy was performed. The total number of pulses of shockwave on 11mm and 15mm stones was 500 and on a 5mm stone, it was 400. The shockwave pressure was equally 100MPa for all. The shockwave frequency was divided 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 per minute and the test was repeated 6 times per different sized stones. After applying shockwave, we strained the pieces of stones in the net with 2mm holes, placed the strained stones in petri dish and dried them in 40℃ oven. We measured the weight and the number of pieces of residual stones.

After ESWL, there was no statistical significance on the weight of the residual stones(5mm stone; p=0.2048, 11mm stone; p=0.7739, 15mm stone; p=0.2213) but there was statistical significance on the number of residual stone fragments per different sizes. For the 5mm stone, there was no statistical significance on the number of stone fragments(p=0.6917). For the 11mm stone, as the shockwave frequency decreased, the number of stone fragments increased and it was statistically significant(p<0.0001). It was also statistically significant for the 15mm stone(p<0.0001). In the 11mm and 15mm stones, as the shockwave frequency decreased, the sizes of the fragmented stones were smaller and more regular. This result was shown more clearly where the shockwave frequency was 50 per minute. The sizes of residual stones were clearly larger where the shockwave frequency was 130 per minute or over.

In conclusion, the shockwave frequency does not affect the fragmentation of the stone where its size is smaller than the focus area. However, if the size of the stone is the same or larger than the focus area, the shockwave frequency of 50 per minute will fragment the stone in smaller and regular sizes and will be most effective.

Key words: shockwave lithotripsy, shockwave frequency, upper urinary

tract, fragmentation of the stone