

## 공진주시험을 통한 Bottom Ash의 특성 연구

### A Study on the Bottom Ash Characteristics of Resonant Column Tests

윤 원 섭<sup>1</sup> Yoon, Won-Sub

채 영 수<sup>2</sup> Chae, Young-Su

#### Abstract

This study investigates relative density test of standard sand and bottom ash which were divided into No.40, No.60, No.100, No.200 and resonant column tests were conducted for samples with the relative density of 40%, 55%, and 70% on the basis of the test results. Resonant column tests were also conducted for each residual bottom ash which contains the passing sample of No.200 with the relative density of 55%. By compressing each residual sample with the compaction energy of A-compact mold test, the passing percentage of No.200 sieve increased up to 30%, which led to the adjustment of relative density to 10%, 20%, and 30%. Test results show that maximum shear modulus and damping ratio of bottom ash are smaller than those of standard sand because crushing strength and unit weight of the former are smaller than those of the latter.

#### 요 지

본 연구에서는 표준사와 bottom ash를 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체로 분류하여 상대밀도시험을 실시하였으며, 시험결과를 토대로 40%, 55%, 70%의 상대밀도로 공진주시험을 실시하였다. 또한, 각 체에 잔류한 bottom ash에 대해 55%의 상대밀도로 No.200체 통과시료를 함유하여 공진주시험을 실시하였다. 각 체 잔류시료에 대해 A다짐시험에 해당하는 다짐에너지로 다짐을 하면 No.200체 통과율이 약 30%까지 증가하게 되어 함유량을 10%, 20%, 30%로 조정하였다. 시험결과 bottom ash의 경우 파쇄강도와 단위중량이 표준사에 비해 작아 최대전단탄성계수, 감쇠비 등의 결과값이 표준사의 결과에 비해 작았다.

**Keywords** : Bottom ash, Resonant column test, Maximum shear modulus, Damping ratio

#### 1. 서 론

화력발전소에서 석탄회가 생성되는 과정은 미분쇄기를 거친 석탄이 보일러의 연소실에서 연소가 되면서 석탄회가 발생하기 시작한다. 이렇게 발생된 석탄회 중에 연소실 하부에서 채취되는 bottom ash와 연소실에서 생성되어 공기 유동을 따라 이동하여 집진기에서 채취되는 fly ash로 분류된다(산업자원부, 2002). 이러한 석탄회의 국내 재활용 전망으로 환경부(2008)에서는 2008

년 재활용률은 73.5%였고, 2010년 이후에는 73.3%로 재활용률이 예상된다고 하였다. 이중 bottom ash는 지금까지 콘크리트 골재로 많이 활용되어 왔으며, 그 외 대부분은 매립에 의존되어 왔다. 일반적으로 bottom ash의 입도 분포는 입경 0.1mm~1mm의 입자가 50%, 1mm이상의 입자가 50%를 차지하고 있어 입도 조정을 할 경우 잔골재와 굵은 골재로의 활용이 가능하며, 건설재료로 사용 시 bottom ash의 재료적인 연구가 필요한 실정이다.

1 정회원, 수원대학교 토목공학과 공학박사, (Member, Ph.D., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon, totomal3@suwon.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

국내에서 bottom ash의 활용율을 높이기 위한 연구로 산업자원부(2005)에서 bottom ash를 활용한 CCP(chemical compaction pile)제조 및 시공기술 개발연구에서 연약지반의 개량효과와 구조적 지지말뚝으로서의 기능을 확인하기 위해 실내토조 시험과 팽창량 시험, 온도측정 시험, 그리고 몰드에서 양생한 공시체를 통하여 일축압축 시험을 실시한 연구를 수행한 바 있다. 연구결과 CCP타설 후 3일~7일 이내에 연약지반의 함수비와 전단강도가 증가함으로써 개량효과를 얻을 수 있었으며, 주변에 미치는 유해성 또한 기준치에 훨씬 못 미치는 것으로 판단하였다. 또한, 외국의 경우 Sweeny(1996) 등은 bottom ash와 일반자연골재에 동다짐 시험결과 입자의 파쇄 혹은 붕괴현상이 자연골재에서 보다 bottom ash에서 크게 나타났음을 밝혔으며, bottom ash 입자의 파쇄현상과 그에 따른 영향은 동다짐 실시되는 시기에만 제한된다고 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 bottom ash의 건설재료로서 활용가능성을 평가하기 위해 현재 일반적인 건설재료로 활용되고 있는 표준사의 공진주시험 결과와 bottom ash의 공진주시험 결과를 비교하였다. Bottom ash는 표준사에 비해 고른 입도를 보여 입자의 크기에 따라 공진주시험 특성 차이가 있을 것으로 판단되어 시료를 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체에 잔류한 시료로 분류하여 시험하였다. 시료의 성형 시 느슨하고 조밀한 정도를 고려하기 위해 각 체 잔류시료에 상대밀도시험을 실시하여 40%, 55%, 70%의 상대밀도로 표준사와 bottom ash의 공진주시험 특성을 분석하였다. 또한, No.200체 통과시료를 세립분으로 간주하고, 다짐에 따른 세립분 증가량을 고려하여 중간정도 조밀한 55% 상대밀도의 bottom ash에 대해 10%, 20%, 30%로 세립분을 함유하여 공진주시험을 분석하였다.

## 2. 지반의 동적 특성

국내 내진설계기준(1997)에 의하면 설계지반운동은 보통암 지반의 지표면 자유장 운동으로 정의하고 있으며, 현장시험은 관입시험과 탄성파시험으로 구분할 수 있다. 주로 표준관입시험 N치, 콘관입시험  $q_c$ 값으로부터 지반정수와 동적 물성치를 구하고, 실내에서는 공진주시험을 실시하여 전단탄성계수, 감쇠비와 같은 지반의 동적 특성을 결정하여 지진응답해석을 위한 입력물성치로 이용하고 있다.

전단탄성계수의 경우 여러 구속압 단계의 결과를 정규화하여 정규화전단탄성계수( $G/G_{max}$ ) 감소곡선을 설계에 이용하게 되며, 전단탄성계수와 감쇠비 곡선을 선택할 때 대상지반의 평균유효구속압(mean effective stress)을 고려하여 결정하게 된다. 이와 같은 지반의 동적물성치는 지진응답해석을 통하여 액상화 상세평가를 위한 전단응력비의 산정에 중요한 요소로 이용된다. 기존의 연구 결과에 의하면 그림 1은 Seed 등(1970, 1984)이 발표한 모래와 자갈의 일반적인 정규화탄성계수 감소곡선으로 입자크기에 따라 분포범위가 크고 넓게 분포하며, 입자가 클수록 좌측 아래로 그래프가 내려가는 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 Iwasaki 등(1976)이 발표한 구속압에 따른 모래의 정규화 탄성계수 감소곡선으로 구속압이 증가함에 따라 정규화 탄성계수 감소곡선은 오른쪽으로 이동하게 되는 것을 알 수 있다. 그림 3은 Seed

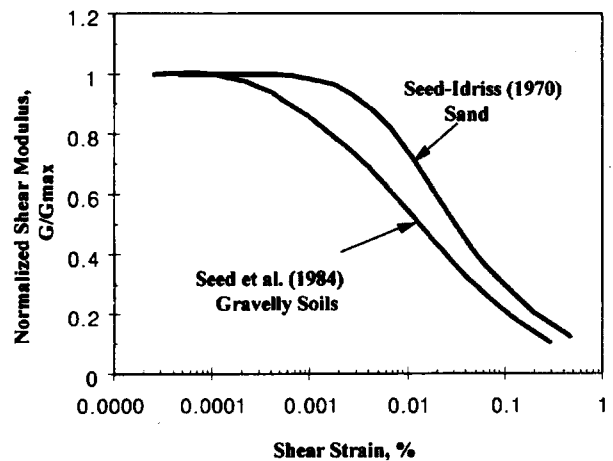


그림 1. 모래와 자갈의 정규화탄성계수 감소곡선(Seed 등, 1970, 1984)

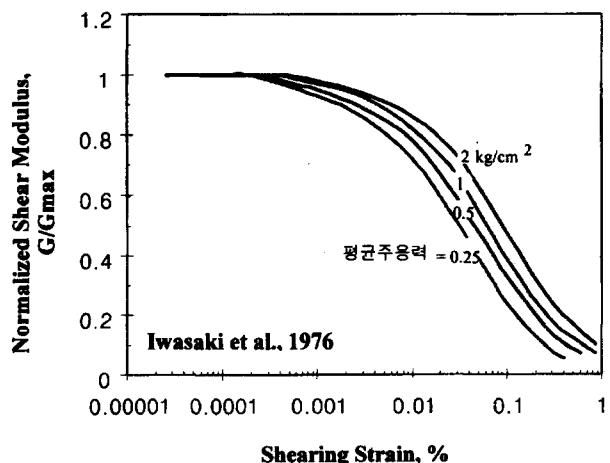


그림 2. 모래의 구속응력에 따른 정규화탄성계수 감소곡선(Iwasaki 등, 1976)

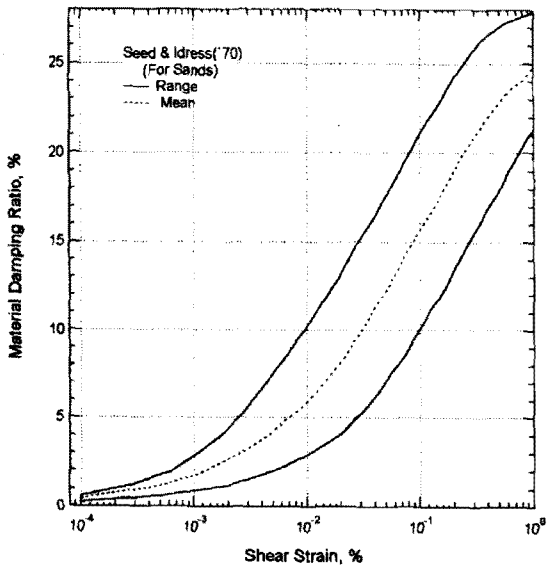


그림 3. 전단변형률에 따른 재료감쇠비 곡선(Seed 등, 1970)

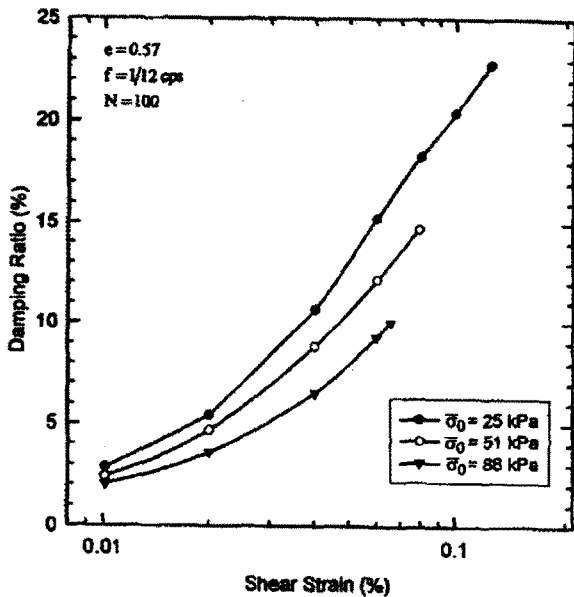


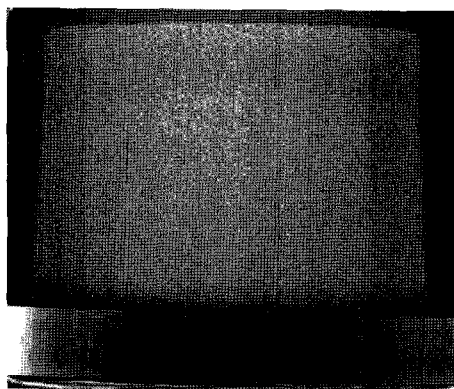
그림 4. 구속압에 따른 사질토 재료감쇠비 곡선(Hardin 등, 1972, Park, 1998)

등(1970)이 제안한 사질토에 대한 감쇠비의 범위로 비교적 넓은 범위로 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 4는 Hardin 등(1972)와 Park(1997)이 제안한 구속압에 따른 사질토의 재료감쇠비 곡선으로 일정한 변형률에서 구속압이 증가할수록 감쇠비가 감소함을 보여준다.

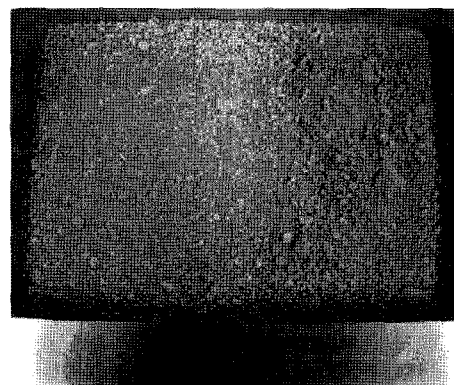
### 3. 시험내용

Bottom ash는 석탄의 종류와 발전소의 처리과정과 입자의 크기에 따라 공진주시험 특성이 달라질 수 있어 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체에 잔류한 시료로 나누어 시험을 실시하였다. 또한, 각 체 잔류시료에 대해 다짐으로 인해 발생하는 No.200체 통과시료를 세립분으로 간주하여 세립분 함유량에 따른 공진주시험을 실시하였다. 공진주시험에 사용된 bottom ash는 체가름 시험결과 입도가 불량한 모래 혹은 실트질 모래(SP-SM)로 표준사에 비해 비교적 고른 입도를 보였으며, 비중값은 평균 2.0으로 표준사에 비해 작은 값을 보였다. 연구에 사용된 bottom ash는 영흥화력발전소에서 채취한 시료를 사용하였으며, 표준사와 bottom ash는 그림 5와 같고, 각 체에 잔류한 시료와 세립분 시료는 그림 6, 그림 7과 같다.

물성시험 결과 bottom ash는 사질토로 상대밀도에 따라 특성이 달라져 시료의 느슨하고 조밀한 경우를 고려하여 40%, 55%, 70%의 상대밀도로 시험하였으며, 세립분 함유량에 따른 공진주시험에서는 40%, 55%, 70%의 상대밀도에 대해 시험을 실시할 경우 시험의 양이 많아 세립분 함유량에 따른 시료의 특성을 평가하기 위해 중간정도 조밀한 시료에 해당하는 상대밀도 55%를 대표적으로 사용하였다. 상대밀도시험은 몰드의 진동하중으

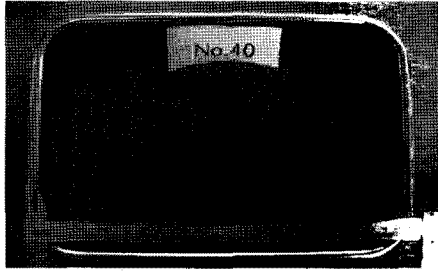


(a) 표준사

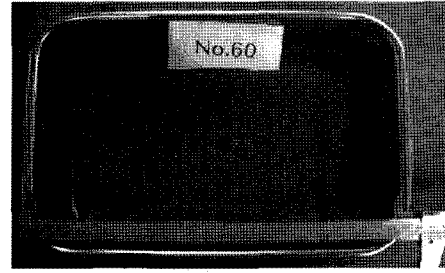


(b) 회처리과정을 거친 Bottom Ash

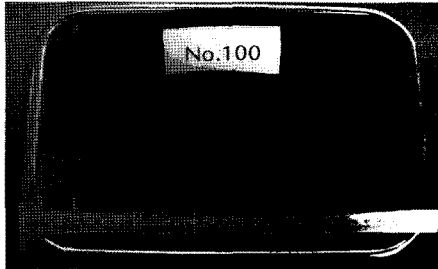
그림 5. 회처리 과정을 거친 Bottom Ash와 표준사의 시료 전경



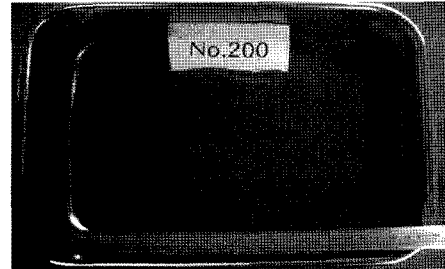
(a) No.40체



(b) No.60체



(c) No.100체



(d) No.200체

그림 6. 입경별 잔류 시료

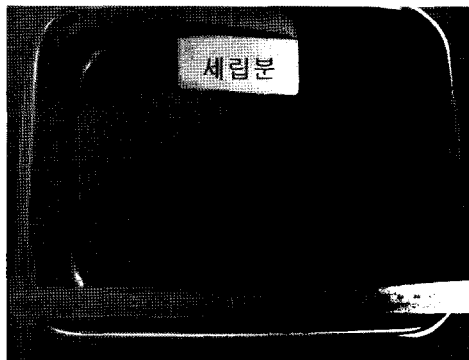


그림 7. 세립분 시료

로 최대 상대밀도 3회, 최소 상대밀도 3회를 측정하여 평균한 값으로 최대 상대밀도, 최소 상대밀도 값을 각각 결정하였으며, bottom ash의 경우 파쇄강도가 약하여 상대밀도시험 시 상재하중을 제거하고 진동하중만을 주어 시험을 실시하여 입자의 파쇄를 최소화 하였다. 또한, Sweeny 등(1996)은 bottom ash 입자의 파쇄현상은 시공이 실시되는 시기에만 제한된다고 하였으므로 bottom ash의 경우 다짐이 완료된 후는 파쇄가 추가적으로 진행되지 않을 것으로 판단되어 다짐시험을 실시하여 세립분의 증가량을 확인할 필요가 있었다. 따라서 다짐 시 발생하는 파쇄를 확인을 위해 KS F 2312의 A다짐 시험 몰드와 햄머, 다짐층수, 다짐횟수를 이용하여 건조 시료에 대해 다짐시험을 실시하였다.

상대밀도와 세립분 함유량 변화에 따른 공진주시험은

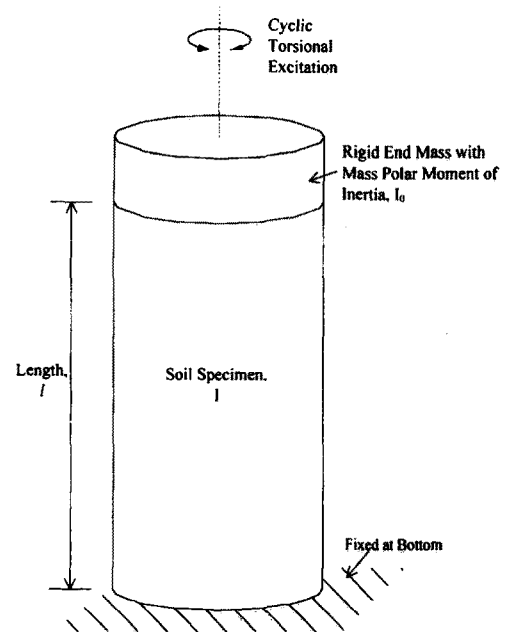


그림 8. 고정-자유단 조건의 공진주시험의 이상화(추연욱, 1997)

전단탄성계수, 전단변형률, 감쇠비를 산정하여 사질토 및 점성토의 동적거동 특성을 판단하는 시험으로 본 연구에 사용한 공진주시험장치는 GEO TM사의 시험장치를 사용하였으며, 그림 8과 같은 고정-자유단의 조건으로 시험을 실시하였고, 시험기 모식도는 그림 9와 같다.

시료의 성형은 직경과 높이를 측정하여 부피를 구한 후 각각의 상대밀도에 해당하는 시료의 중량을 산정하여 성형하였다. 공진주시험은 별도의 포화과정이 없어 건조

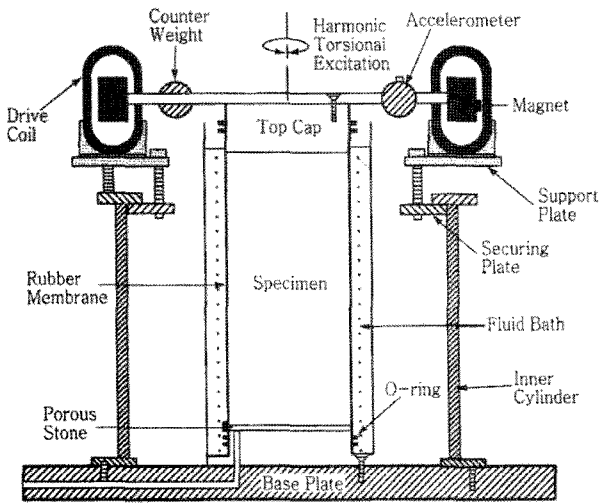


그림 9. 공진주시험 모식도

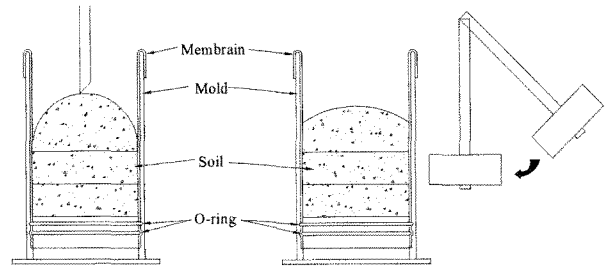
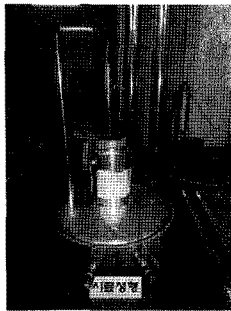
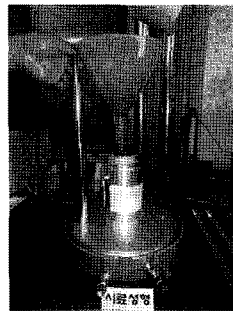


그림 11. 시료성형방법

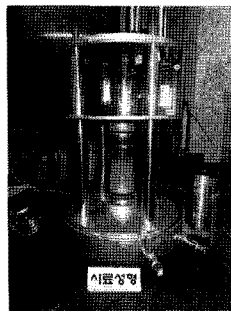
시료를 사용할 경우 압밀하중에 의한 간극수는 발생되지 않는다. 본 연구에서 사용한 시료는 건조한 시료를 사용하여, 시료의 성형완료 후 구속압 50kPa, 100kPa, 200kPa의 3단계에 해당하는 압밀하중을 압축공기를 사용하여 등방의 구속응력을 약 2시간정도 가한 후 시료에 전단변형을 가하였다. 각 구속압에서 1차 모드의 공진주파수  $F_1$ 과 진도의 크기  $A_1$ 를 구한 후 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도  $V_s$ , 전단탄성계수  $G$  및 전단변형률을 구하며, 자유진동 감쇠곡선을 이용하여 재료의 감쇠비를 측정한다. 시험과정과 시료성형방법은 그림 10, 그림 11과 같으며, 표 1은 시료의 종류와 상대밀도, 세립분 함유량, 구속압 등에 따른 공진주시험 조건이다.



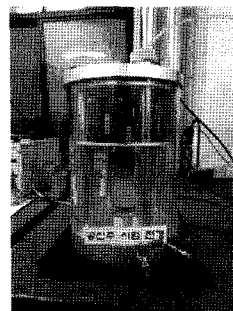
(a) 멤브레인 Setting



(b) 시료 성형



(c) 시료 성형 완료



(d) 시료 압밀 및 비틀전단력재하

그림 10. 공진주시험 과정

#### 4. 시험결과

본 연구에서는 공진주시험 시 시료의 조건을 통일하기 위해 실시한 입경에 따른 상대밀도 시험 결과는 표 2와 같다. 표준사의 최대 건조단위중량은  $15.9\text{kN/m}^3$ , 최소 건조단위중량은  $13.7\text{kN/cm}^3$ 이며, bottom ash의 최대 건조단위중량은  $9.3\text{kN/m}^3$ , 최소 건조단위중량은  $8.4\text{kN/m}^3$ 의 결과를 보였다. 상대밀도의 시험 결과를 토대로 bottom

표 1. 공진주시험 조건

| 구분        |            | 상대밀도( $D_r$ , %) | 세립분 함유량(%) | 구속응력(kPa)    | 비고 |    |            |
|-----------|------------|------------------|------------|--------------|----|----|------------|
| 공진주<br>시험 | 표준사        | 40, 55, 70       | -          | 50, 100, 200 |    |    |            |
|           | Bottom Ash | 40, 55, 70       | -          |              |    |    |            |
|           | Bottom Ash | No.40체           | 40, 55, 70 |              |    | -  |            |
|           |            | No.60체           |            |              |    | -  |            |
|           |            | No.100체          |            |              |    | -  |            |
|           |            | No.200체          |            |              |    | -  |            |
|           |            | No.40체           |            |              |    | 55 | 10, 20, 30 |
|           |            | No.60체           |            |              |    |    |            |
| No.100체   |            |                  |            |              |    |    |            |
| No.200체   |            |                  |            |              |    |    |            |

표 2. 입경에 따른 상대밀도시험 결과

| 구 분        | 최소건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 최대건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 시료성형조건   |                          |        | 비 고 |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|--------------------------|--------|-----|
|            |                               |                               | 상대밀도 (%) | 단위중량(kN/m <sup>3</sup> ) | 시료무게   |     |
| No.40체     | 5.50                          | 7.30                          | 40       | 6.10                     | 119.77 |     |
|            |                               |                               | 55       | 6.36                     | 124.88 |     |
|            |                               |                               | 70       | 6.65                     | 130.57 |     |
| No.60체     | 6.43                          | 8.00                          | 40       | 7.00                     | 133.45 |     |
|            |                               |                               | 55       | 7.21                     | 141.57 |     |
|            |                               |                               | 70       | 7.45                     | 146.28 |     |
| No.100체    | 7.67                          | 9.28                          | 40       | 8.24                     | 161.79 |     |
|            |                               |                               | 55       | 8.48                     | 166.51 |     |
|            |                               |                               | 70       | 8.73                     | 171.41 |     |
| No.200체    | 8.97                          | 11.00                         | 40       | 9.68                     | 190.07 |     |
|            |                               |                               | 55       | 9.98                     | 195.96 |     |
|            |                               |                               | 70       | 10.30                    | 202.24 |     |
| Bottom Ash | 8.40                          | 9.30                          | 40       | 8.73                     | 171.41 |     |
|            |                               |                               | 55       | 8.88                     | 174.36 |     |
|            |                               |                               | 70       | 9.03                     | 177.30 |     |
| 표준사        | 13.70                         | 15.90                         | 40       | 14.50                    | 284.64 |     |
|            |                               |                               | 55       | 14.83                    | 291.19 |     |
|            |                               |                               | 70       | 15.17                    | 297.79 |     |

표 3. 입경에 따른 파쇄시험 결과

| 구 분             | 다짐 후 시료 |       |        |        |       |
|-----------------|---------|-------|--------|--------|-------|
|                 | No.40   | No.60 | No.100 | No.200 | 세립분   |
| No.40체 잔류율 (%)  | 35.72   | 17.01 | 17.34  | 22.29  | 7.64  |
| No.60체 잔류율 (%)  | -       | 44.95 | 20.52  | 27.09  | 7.44  |
| No.100체 잔류율 (%) | -       | -     | 45.79  | 27.82  | 26.39 |
| No.200체 잔류율 (%) | -       | -     | -      | 37.67  | 32.33 |

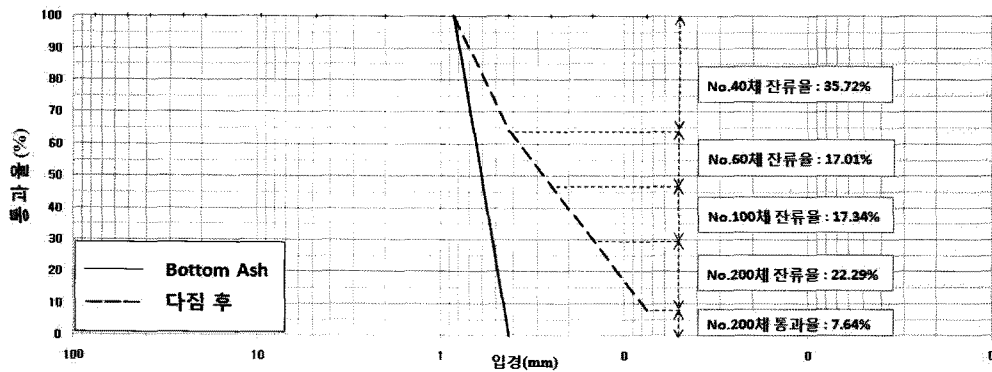


그림 12. No.40체의 파쇄시험 결과

ash와 표준사의 시험 시 시료의 단위중량을 계산하여 시료의 사용 중량을 결정하였다.

또한, bottom ash의 경우 입자의 기공이 존재하고, 입자의 파쇄강도가 작아 다짐에너지의 영향으로 입자의 파쇄가 발생할 것으로 판단되어 다짐에너지 563kN·m/m<sup>3</sup>의 크기로 다짐시험을 실시하였다. 표 3, 그림 12에서

그림 15는 입경별 파쇄 특성 확인을 위한 시험 결과이다. 시험 결과 No.40체, No.60체 잔류시료의 다짐시험 후 세립분의 잔류율은 7.64%, 7.44%로 세립분이 10%이 내였으나, No.100체, No.200체 잔류시료의 경우 세립분 잔류율이 26.4%와 32.3%로 다짐시험 후 세립분이 약 30%까지 증가하여 각 체 잔류시료에 세립분의 함유량

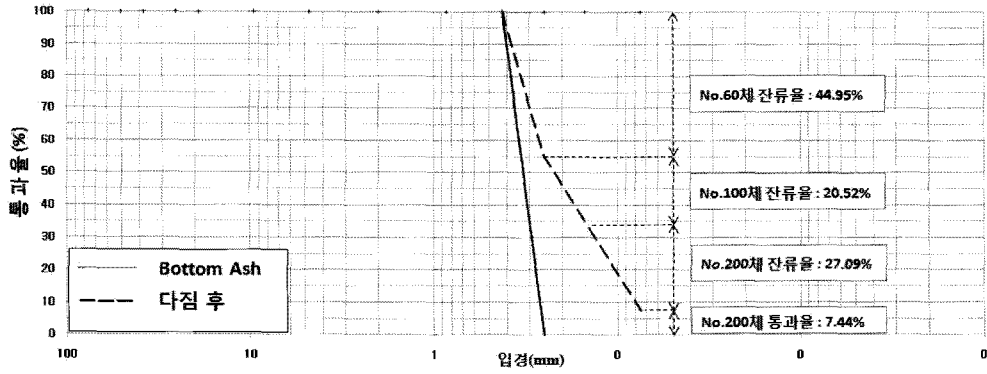


그림 13. No.60체의 파쇄시험 결과

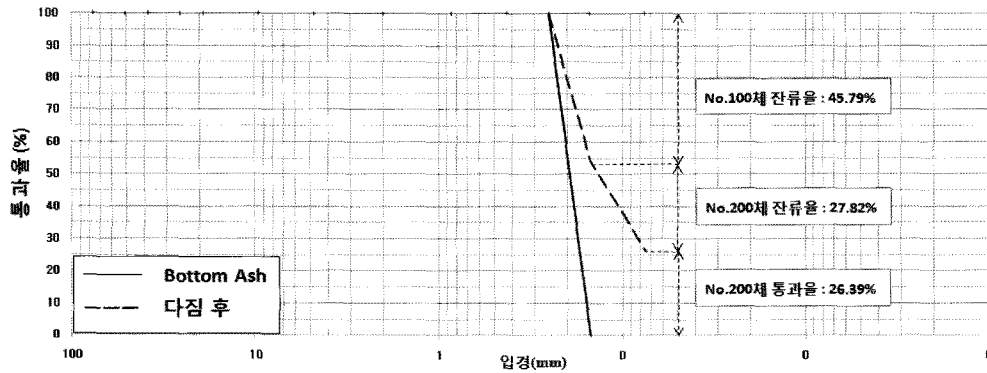


그림 14. No.100체의 파쇄시험 결과

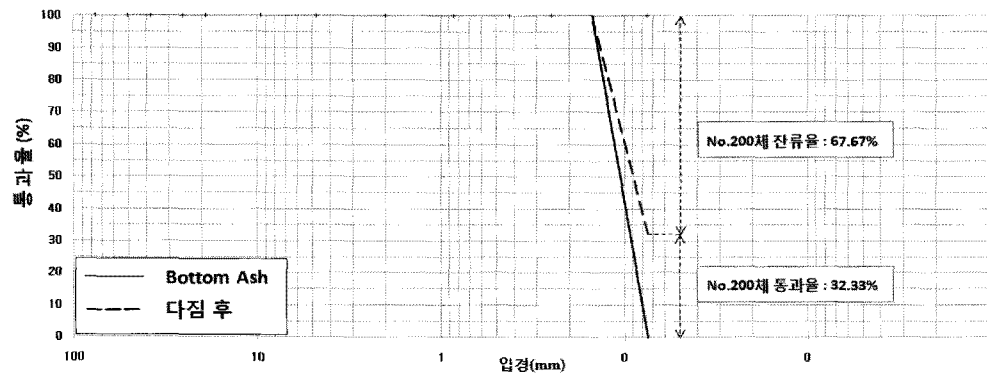


그림 15. No.200체의 파쇄시험 결과

을 10%, 20%, 30%로 결정하였다. 각 체 잔류시료 중량에서 세립분의 중량이 10%, 20%, 30%가 되도록 시료를 섞어 상대밀도시험을 실시하였으며, 시험 결과는 표 4와 같다. 상대밀도시험을 통해 55%에 해당하는 단위중량을 산정하고, 각 체 잔류시료의 시료성형 시 필요한 시료 무게를 계산하여 시험에 사용하였다.

Bottom ash의 공진주시험 특성을 평가하기 위해 건설재료로 일반적으로 많이 사용되는 표준사를 평가 기준으로 사용하였으며, 공진주시험 결과는 일반적으로 구속압밀하중에서 전단변형에 대한 전단탄성계수와 정규

화전단탄성계수, 재료감쇠비의 곡선으로 표시된다. 지진응답해석에서 비선형 특성을 고려하기 위해 등가선형형태의 전단탄성계수와 감쇠비의 변형률 의존곡선이 사용되며, 공진주시험 결과를 통해 변형률 의존곡선을 표현할 수 있다. 공진주시험은  $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 의 작은 변형률 범위에서 지반의 동적 특성치의 변화 양상을 파악하는 시험으로 정규화전단탄성계수( $G/G_{max}$ ) 감소곡선을 이용하며, 시험결과를 초과하는 부분은 Ramberg-Osgood model을 이용하여 정규화 곡선을 그렸다. 또한, 재료감쇠비의 곡선은 Hyptrbolic model을 이용하여 시험결과

를 초과한 부분에 대한 곡선을 그려 결과를 초과한 부분에 대한 시료의 특성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 먼저 표준사의 정규화전단탄성계수와 재료감쇠비 곡선의 범위를 결정하고, 회처리과정을 거친 bottom ash와 입경 및 세립분의 함유량에 따른 bottom ash의 공

진주시험 특성을 비교한 결과는 다음과 같다.

#### 4.1 입경에 따른 특성

표 5, 그림 16은 표준사와 회처리과정을 거친 bottom

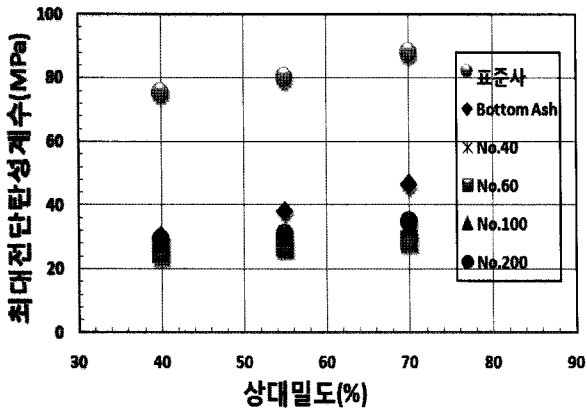
표 4. 세립분 함유량에 따른 상대밀도시험 결과

| 구분      | 세립분 (%) | 최소건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 최대건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> ) | 시료성형조건   |                          |          |
|---------|---------|-------------------------------|-------------------------------|----------|--------------------------|----------|
|         |         |                               |                               | 상대밀도 (%) | 단위중량(kN/m <sup>3</sup> ) | 시료무게 (g) |
| No.40체  | 0       | 5.50                          | 7.30                          | 55       | 6.36                     | 124.88   |
|         | 10      | 6.38                          | 7.90                          |          | 7.14                     | 140.19   |
|         | 20      | 7.14                          | 8.90                          |          | 8.01                     | 157.28   |
|         | 30      | 7.72                          | 9.71                          |          | 8.70                     | 170.82   |
| No.60체  | 0       | 6.43                          | 8.00                          |          | 7.21                     | 141.57   |
|         | 10      | 6.73                          | 8.56                          |          | 7.63                     | 149.82   |
|         | 20      | 7.50                          | 9.49                          |          | 8.48                     | 166.51   |
|         | 30      | 8.07                          | 10.19                         |          | 9.11                     | 178.88   |
| No.100체 | 0       | 7.67                          | 9.28                          |          | 8.48                     | 166.51   |
|         | 10      | 7.49                          | 9.81                          |          | 8.61                     | 169.06   |
|         | 20      | 8.01                          | 10.26                         |          | 9.11                     | 178.88   |
|         | 30      | 8.34                          | 10.87                         |          | 9.56                     | 187.80   |
| No.200체 | 0       | 8.97                          | 11.00                         |          | 9.98                     | 195.96   |
|         | 10      | 9.11                          | 11.20                         |          | 10.15                    | 199.33   |
|         | 20      | 9.78                          | 11.52                         |          | 10.67                    | 209.43   |
|         | 30      | 10.15                         | 11.89                         |          | 11.04                    | 216.74   |
| 표준사     | 0       | 13.70                         | 15.90                         | 40       | 14.50                    | 284.64   |
|         |         |                               |                               | 55       | 14.83                    | 291.19   |
|         |         |                               |                               | 70       | 15.17                    | 297.79   |

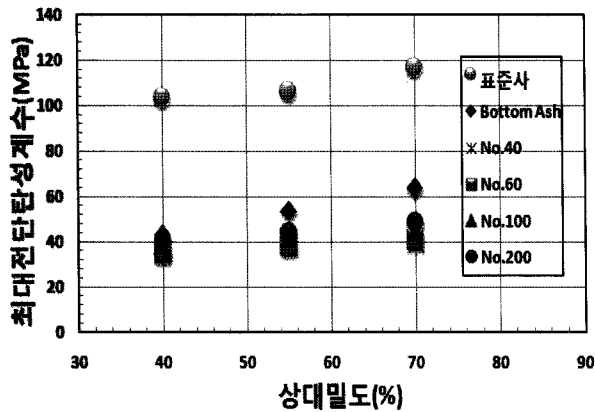
표 5. 상대밀도 및 구속압에 따른 전단탄성계수 결과

| 구분         | 상대밀도 (Dr, %) | 구속압 50kPa        | 구속압 100kPa       | 구속압 200kPa       |
|------------|--------------|------------------|------------------|------------------|
|            |              | G <sub>max</sub> | G <sub>max</sub> | G <sub>max</sub> |
| 표준사        | 40           | 75.39            | 103.33           | 133.21           |
|            | 55           | 80.08            | 106.07           | 129.01           |
|            | 70           | 87.87            | 116.72           | 145.80           |
| Bottom Ash | 40           | 30.19            | 42.91            | 61.13            |
|            | 55           | 37.98            | 53.29            | 75.26            |
|            | 70           | 46.29            | 63.42            | 89.29            |
| No.40체     | 40           | 25.14            | 35.25            | 49.27            |
|            | 55           | 27.30            | 38.46            | 53.82            |
|            | 70           | 28.14            | 40.46            | 55.79            |
| No.60체     | 40           | 24.62            | 34.64            | 48.92            |
|            | 55           | 26.77            | 37.83            | 50.05            |
|            | 70           | 28.14            | 40.46            | 55.79            |
| No.100체    | 40           | 27.90            | 38.25            | 53.90            |
|            | 55           | 30.18            | 41.19            | 56.66            |
|            | 70           | 33.16            | 44.66            | 60.71            |
| No.200체    | 40           | 29.06            | 40.25            | 57.11            |
|            | 55           | 30.80            | 44.00            | 61.19            |
|            | 70           | 34.74            | 48.31            | 68.43            |

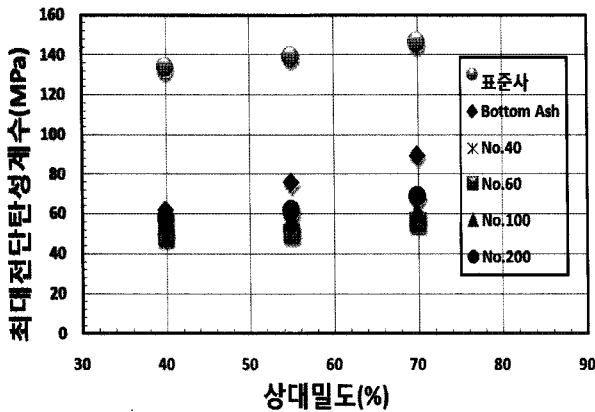




(a) 구속압 50kPa



(b) 구속압 100kPa



(c) 구속압 200kPa

그림 16. 상대밀도에 따른 전단탄성계수

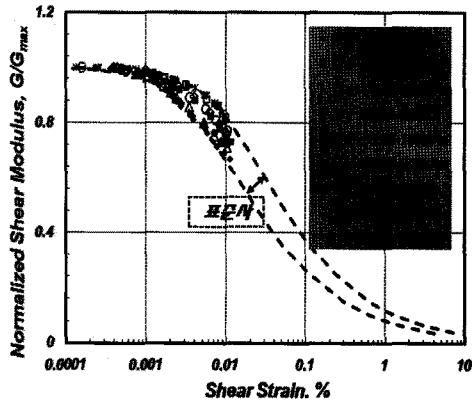
ash의 상대밀도 40%, 55%, 70%, 구속압 50kPa, 100kPa, 200kPa에 따른 최대전단탄성계수 결과이다. 시험 결과 표준사의 경우 최대전단탄성계수는 75.39MPa에서 145.80MPa를 보였고, 회처리과정을 거친 bottom ash는 30.19MPa에서 89.29MPa를 보였다. 구속압의 증가에 따른 전단탄성계수의 증가는 표준사가 bottom ash보다 컸으며, 각 체 잔류시료의 경우 구속압이 증가할수록 입경에 따른 전단탄성계수 증가폭은 컸고, bottom ash의 입경이 작을

수록 전단탄성계수의 값이 컸다. 상대밀도에 따른 전단탄성계수의 증가는 회처리과정을 거친 bottom ash와 표준사가 비교적 동일한 크기로 증가하였으며, 상대밀도 증가에 따른 각 체에 잔류된 bottom ash의 전단탄성계수 증가폭보다 회처리과정을 거친 bottom ash의 전단탄성계수 증가폭이 컸다. 입도가 고르게 분포된 bottom ash의 경우 전단탄성계수 값이 비교적 크게 나타났다. Bottom ash의 파쇄강도는 입자가 클수록 작아지고, 입자가 클수록 입자내의 기공이 많이 존재하여 전단응력이 가해지면 입자의 파쇄가 진행되어 전단탄성계수는 표준사에 비해 약 40%~60%정도 작게 발생되었다.

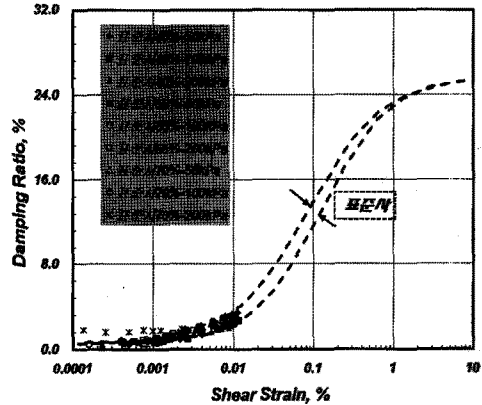
그림 17은 표준사의 정규화전단탄성계수와 감쇠비 결과로 점선은 표준사의 구속압 50kPa, 100kPa, 200kPa에서의 정규화전단탄성계수와 감쇠비의 범위를 곡선으로 표시한 것이다. 정규화전단탄성계수 감소곡선의 경우 Seed 등(1970)이 제안한 사질토의 정규화전단탄성계수 감소곡선과 대체로 비슷한 곡선을 보였으며, 감쇠비 곡선은 Seed 등(1970)이 제안한 곡선에 비해 좁은 분포를 보였다. 그림 18은 회처리과정을 거친 bottom ash의 공진주시험 결과로 그림 18(a)는 정규화전단탄성계수 시험 결과이다. 시험 결과 표준사의 정규화전단탄성계수값의 범위보다 상한값을 벗어나 표준사보다 넓게 분포하였다. 또한, 그림 18(b)는 bottom ash의 감쇠비 결과로 bottom ash의 감쇠비는 5%보다 낮은 값을 보였으며, 표준사에 비해 하한값의 오른쪽 방향으로 벗어나 넓은 분포를 나타냈다.

그림 19는 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체의 정규화전단탄성계수와 감쇠비 곡선이다. 시험 결과 표준사의 정규화전단탄성계수 범위보다 상한값을 벗어나 분포하였으며, 감쇠비는 4%보다 낮은 값을 보였다. 감쇠비는 표준사에 비해 하한값의 오른쪽 방향으로 벗어나 좁은 분포를 나타냈다. 입자의 크기와 회처리과정을 거친 bottom ash의 경우 정규화전단탄성계수 감소곡선과 재료감쇠비 곡선은 일반적인 사질토의 경우 입자가 작고 구속압이 증가하는 경우에 발생하는 결과의 분포를 보였으며, 입자의 크기가 큰 No.40체에서 결과가 가장 많이 벗어난 분포를 보였다.

입자의 크기에 따른 시험결과 구속압에 따른 전단탄성계수의 결과 입도가 작을수록 구속압에 지배를 크게 받아 전단탄성계수의 값의 범위가 증가하였다. 표준사와 bottom ash의 공진주시험 결과 상대밀도와 구속압이 증가할수록 전단탄성계수의 값이 증가하였으며, 표준사

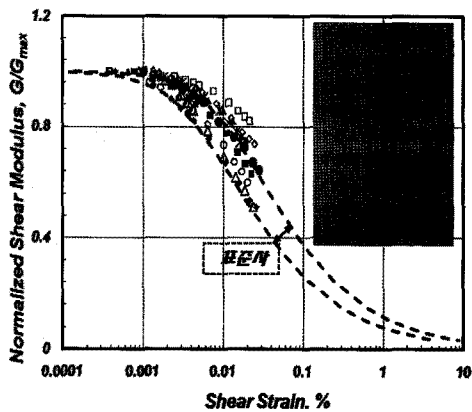


(a) 정규화전단탄성계수 곡선

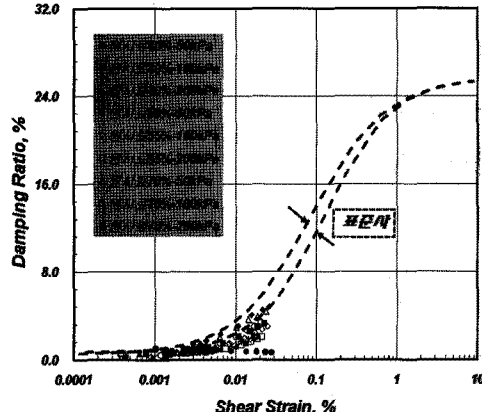


(b) 감쇠비 곡선

그림 17. 표준사의 공진주시험 결과



(a) 정규화전단탄성계수 곡선



(b) 감쇠비 곡선

그림 18. Bottom Ash의 공진주시험 결과

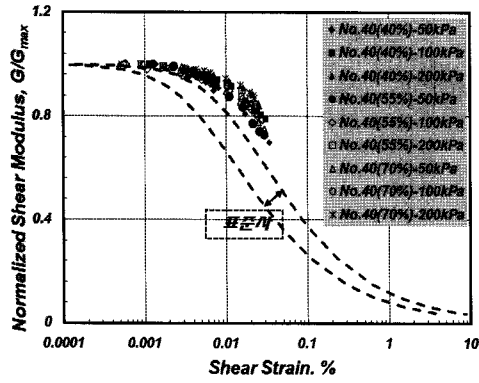
에 비해 bottom ash의 전단탄성계수의 값이 약 45% 작은 값을 보여 내진설계에 영향을 줄 것으로 판단되었다.

#### 4.2 세립분 함유량에 따른 특성

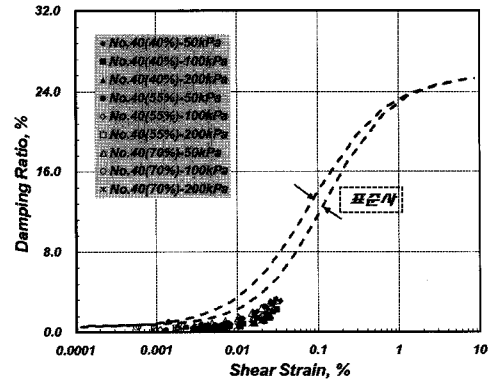
표 6, 그림 20은 각 체 잔류시료의 세립분 함유량에 따른 최대전단탄성계수 시험 결과이다. No.40체, No.60체 잔류시료의 경우 세립분 20%를 기점으로 전단탄성계수가 증가하다가 감소되었다. No.100체는 세립분 함유량의 증가로 전단탄성계수 값이 감소하였으며, No.200체 잔류시료의 경우 20%를 기점으로 전단탄성계수 값이 증가하였다. 구속압이 증가할수록 세립분에 따른 전단탄성계수 값의 범위가 작아졌으며, 전단탄성계수는 No.40체와 No.60체 잔류시료의 경우 세립분 함유량이 20%인 경우 가장 큰 값을 보였고, 세립분 함유량 10%와 30%는 세립분 함유량 0%와 비슷하였다.

회처리과정을 거친 bottom ash의 결과 입도가 양호한 경우 전단탄성계수 값이 크게 나타나므로 No.40체와 No.60체 시료는 세립분 함유량 20%까지 전단탄성계수의 증가는 시료의 입도를 양호하게 조정하는 역할을 한 것으로 판단되며, 세립분이 20%이상에서는 오히려 세립분의 양이 간극의 크기보다 많은 양이 함유되어 전단탄성계수를 감소시키는 요소로 작용된 것으로 판단된다. 그러나 No.200체의 경우 입자 간극의 크기가 작아 작은 양의 세립분이 함유되더라도 간극을 초과하여 세립분이 함유되어 전단탄성계수의 값이 감소하였으며, 20%이상에서는 오히려 No.200체 잔류시료의 성질보다 세립분 시료의 성질로 바뀌게 되어 전단탄성계수가 증가된 것으로 판단된다.

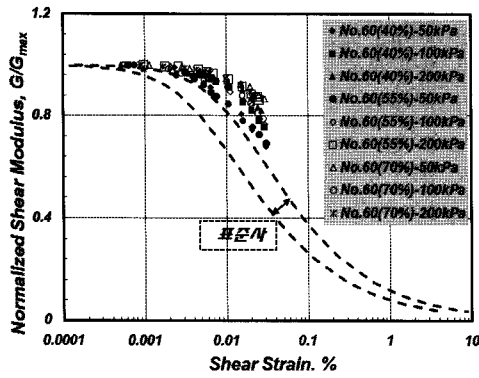
그림 21은 No.40체, No.60체, No.100체와 No.200체 잔류시료의 세립분 함유량에 따른 공진주시험 곡선이다. 시험결과 표준사의 정규화전단탄성계수보다 상한값



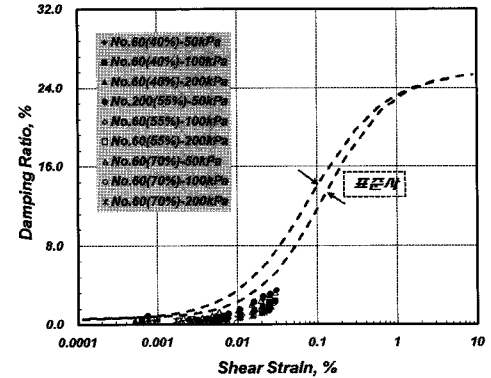
(a) No.40체 정규화전단탄성계수 곡선



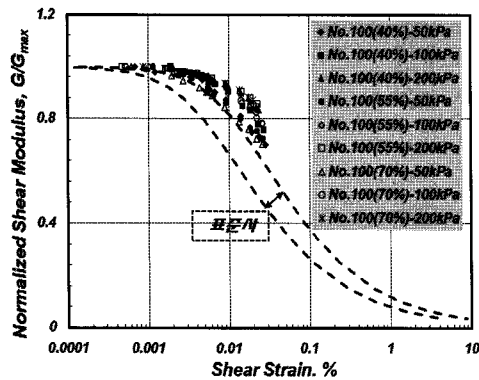
(b) No.40체 감쇠비 곡선



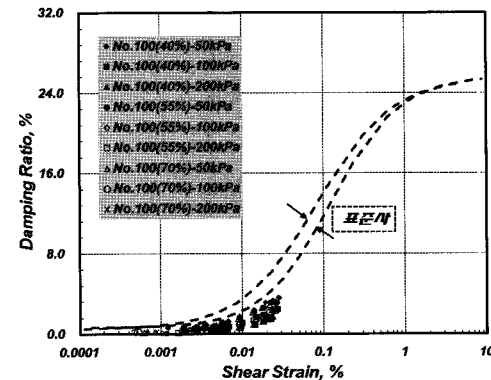
(c) No.60체 정규화전단탄성계수 곡선



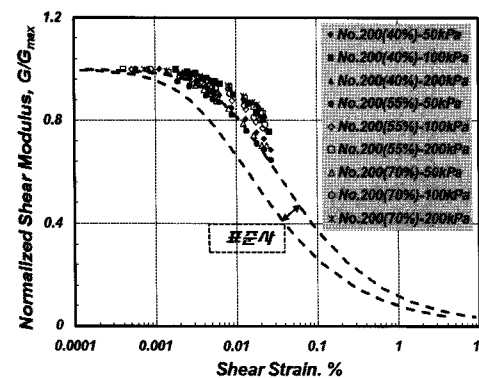
(d) No.60체 감쇠비 곡선



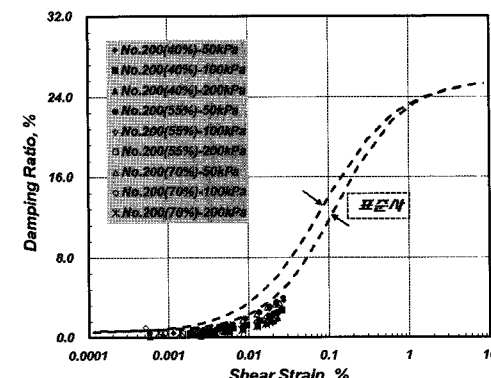
(e) No.100체 정규화전단탄성계수 곡선



(f) No.100체 감쇠비 곡선



(g) No.200체 정규화전단탄성계수 곡선



(h) No.200체 감쇠비 곡선

그림 19. 입자의 크기에 따른 정규화전단탄성계수와 재료감쇠비 곡선

표 6. 세립분 함유량에 따른 최대전단탄성계수

| 체 번호    | 상대밀도(Dr, %) | 세립분 함유량 | 구속압(kPa) | 최대전단탄성계수(MPa) |
|---------|-------------|---------|----------|---------------|
| No.40체  | 55          | 0%      | 50       | 27.30         |
|         |             |         | 100      | 38.46         |
|         |             |         | 200      | 53.82         |
|         |             | 10%     | 50       | 27.32         |
|         |             |         | 100      | 38.48         |
|         |             |         | 200      | 53.85         |
|         |             | 20%     | 50       | 30.17         |
|         |             |         | 100      | 39.83         |
|         |             |         | 200      | 57.04         |
|         |             | 30%     | 50       | 26.80         |
|         |             |         | 100      | 37.23         |
|         |             |         | 200      | 52.38         |
| No.60체  | 55          | 0%      | 50       | 26.77         |
|         |             |         | 100      | 37.83         |
|         |             |         | 200      | 50.05         |
|         |             | 10%     | 50       | 25.19         |
|         |             |         | 100      | 36.88         |
|         |             |         | 200      | 51.20         |
|         |             | 20%     | 50       | 28.75         |
|         |             |         | 100      | 38.85         |
|         |             |         | 200      | 54.69         |
|         |             | 30%     | 50       | 26.81         |
|         |             |         | 100      | 37.89         |
|         |             |         | 200      | 52.01         |
| No.100체 | 55          | 0%      | 50       | 30.18         |
|         |             |         | 100      | 41.19         |
|         |             |         | 200      | 56.66         |
|         |             | 10%     | 50       | 28.75         |
|         |             |         | 100      | 38.20         |
|         |             |         | 200      | 53.91         |
|         |             | 20%     | 50       | 27.36         |
|         |             |         | 100      | 36.92         |
|         |             |         | 200      | 52.78         |
|         |             | 30%     | 50       | 23.92         |
|         |             |         | 100      | 31.08         |
|         |             |         | 200      | 46.11         |
| No.200체 | 55          | 0%      | 50       | 30.80         |
|         |             |         | 100      | 44.00         |
|         |             |         | 200      | 61.19         |
|         |             | 10%     | 50       | 26.56         |
|         |             |         | 100      | 38.90         |
|         |             |         | 200      | 53.98         |
|         |             | 20%     | 50       | 25.22         |
|         |             |         | 100      | 35.69         |
|         |             |         | 200      | 53.22         |
|         |             | 30%     | 50       | 28.24         |
|         |             |         | 100      | 40.59         |
|         |             |         | 200      | 58.78         |

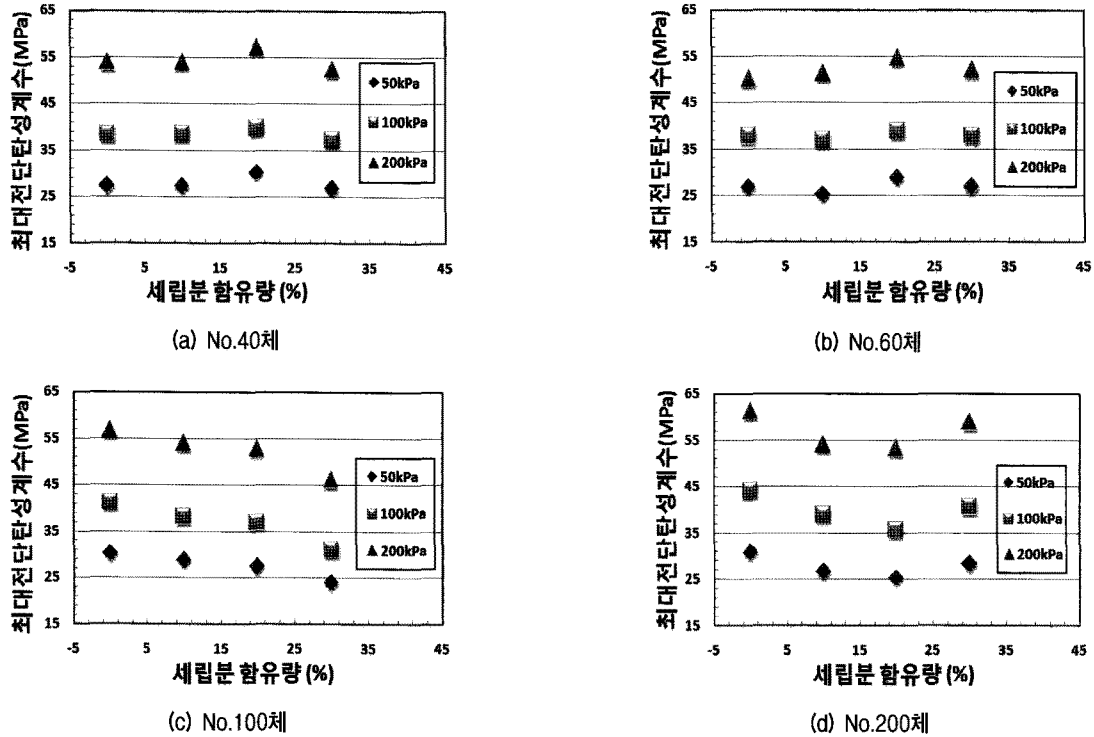


그림 20. 세립분 함유량에 따른 공진주시험 결과

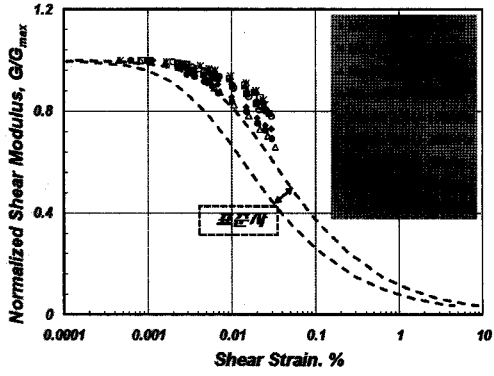
을 벗어나 비교적 넓게 분포하였으며, 감쇠비는 4%보다 낮은 값을 보였다. 감쇠비는 표준사에 비해 하한값의 오른쪽 방향으로 벗어나 좁은 분포를 나타냈다. 그림 21(e)에서 그림 21(h)는 No.100체와 No.200체의 시험결과로 No.100체의 세립분 30%, 구속압 50kPa은 표준사의 시험결과 범위내에 존재하였고, No.200체의 구속압 50kPa 역시 범위안에 분포하였다.

세립분을 함유한 bottom ash 역시 입경에 따른 시험결과와 마찬가지로 정규화전단탄성계수 감소곡선과 재료감쇠비 곡선은 일반적인 사질토의 입자가 작고, 구속압이 증가하는 경우에 발생하는 결과의 분포를 보였으며, 입자의 크기가 큰 No.40체에서 결과가 가장 많이 벗어난 분포를 보였다. 또한, 구속압에 따른 전단탄성계수의 결과 입도가 작을수록 값이 증가하는 결과를 보였으며, 세립분이 함유된 bottom ash는 표준사에 비해 전단탄성계수의 값이 약 45% 작은 값을 보여 내진설계에 영향을 줄 것으로 판단되었다. No.40체와 No.60체 잔류시료의 경우 다짐에 의해 고른 입도를 보여 동적 특성이 클 것으로 판단되므로 동적 특성이 요구되는 지반에 사용되는 경우 Sweeny 등(1996)의 연구결과를 고려하여 다짐 후의 입도가 비교적 고르게 파쇄되는 No.40체와 No.60체에 잔류하는 시료의 사용이 적당할 것으로 판단된다.

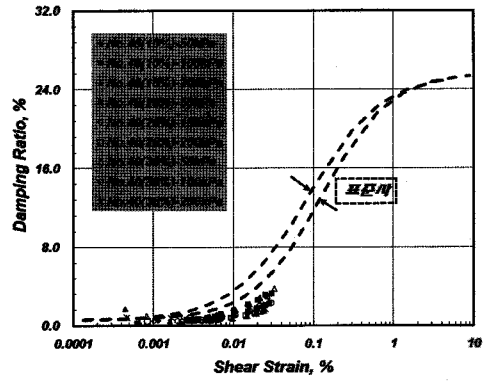
## 5. 결론

본 연구에서는 석탄회인 bottom ash의 공진주시험 특성을 평가하였다. 시료의 시험조건을 통일하기 위해 상대밀도시험을 실시하였으며, 시료의 다짐에너지에 의한 세립분의 증가량을 확인하기 위해 다짐시험을 실시하고, 각각의 시험 조건을 통일하여 bottom ash, 표준사에 대해 공진주시험을 실시하였으며, 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

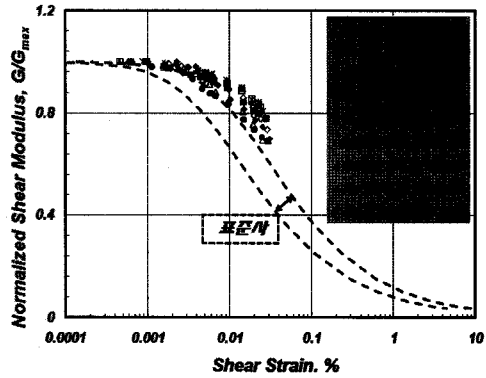
- (1) 표준사의 최대전단탄성계수는 75.39MPa에서 145.80 MPa, 화력발전소에서 회처리과정을 거친 bottom ash는 30.19MPa에서 89.29MPa로 bottom ash는 입자의 파쇄강도가 약하고, 단위중량이 작아 공진주시험에 의한 전단탄성계수는 표준사에 비해 약 40%~60% 정도 작았다.
- (2) 각 체 잔류시료의 경우 파쇄강도는 입자의 직경이 클수록 작아지고, 입자가 클수록 입자내의 기공이 많이 존재하여 입자 파쇄에 의해 전단탄성계수가 작게 발생되었으며, 세립분 함유량이 증가할수록 입자의 직경이 비교적 큰 시료의 경우 세립분 20%에서 전단탄성계수가 가장 컸으며, No.100체는 세립분 함유량의 증가로 전단탄성계수 값이 감소하였



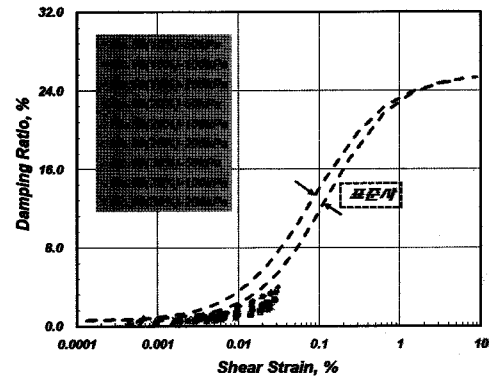
(a) No.40체 정규회전단탄성계수 곡선



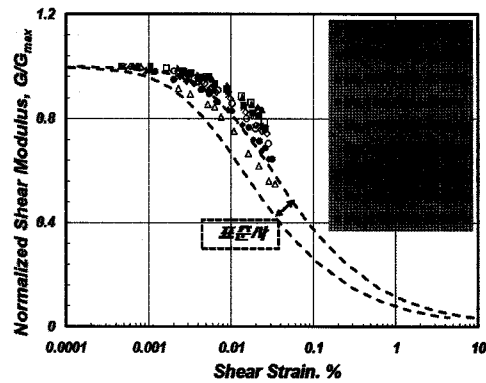
(b) No.40체 감쇠비 곡선



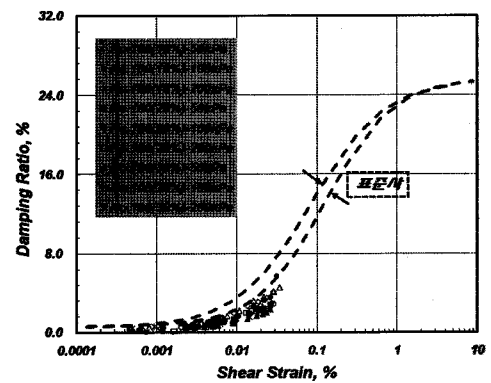
(c) No.60체 정규회전단탄성계수 곡선



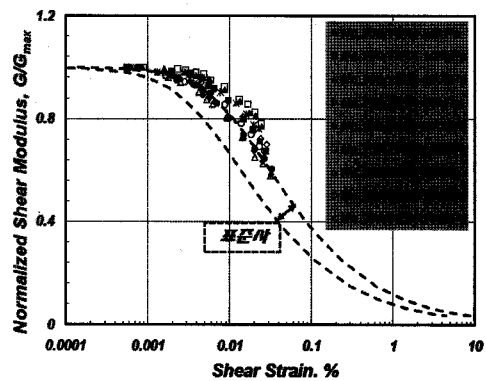
(d) No.60체 감쇠비 곡선



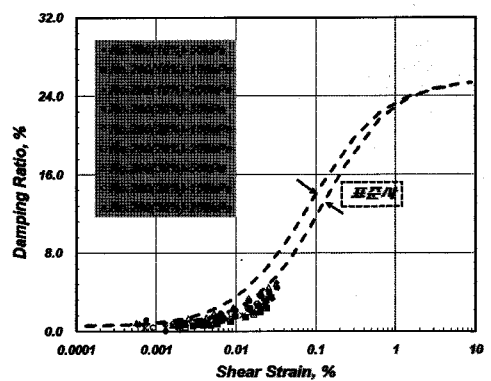
(e) No.100체 정규회전단탄성계수 곡선



(f) No.100체 감쇠비 곡선



(g) No.200체 정규회전단탄성계수 곡선



(h) No.200체 감쇠비 곡선

그림 21. 세립분 함유량에 따른 정규회전단탄성계수와 재료감쇠비 곡선

고, No.200체 잔류시료의 경우 20%에서 전단탄성 계수 값이 가장 작았다.

- (3) 표준사의 공진주시험결과 정규화전단탄성계수 감소곡선의 경우 Seed 등(1970)이 제안한 사질토의 감소곡선과 대체로 비슷한 곡선을 보였으나 감쇠비 곡선은 좁은 분포를 보였다. 또한, 회처리과정을 거친 bottom ash의 경우 표준사의 정규화전단탄성계수값의 범위보다 상한값을 벗어나 표준사보다 넓게 분포하였으며, 감쇠비는 5%보다 낮은 값을 보였고, 표준사에 비해 하한값의 오른쪽 방향으로 벗어나 넓은 분포를 나타냈다.
- (4) 각 체에 잔류한 시료와 세립분을 함유한 시료의 경우 정규화전단탄성계수는 표준사의 범위보다 상한값을 벗어나 분포하였으며, 감쇠비는 4%보다 낮은 값을 보였고, 감쇠비는 표준사에 비해 하한값의 오른쪽 방향으로 벗어나 좁은 분포를 나타냈다. 정규화전단탄성계수 감소곡선과 재료감쇠비 곡선은 일반적인 사질토의 경우 입자가 작고 구속압이 증가하는 경우에 발생하는 결과의 분포를 보였으며, 입자의 크기가 큰 No.40체에서 결과가 가장 많이 벗어난 분포를 보였다.
- (5) 따라서 bottom ash는 입도가 큰 경우 다짐에 의한 세립분의 잔류율이 10%이내로 파쇄에 따른 입도특성을 고려하여 실제 현장 다짐에너지를 고려하여 재료의 품질관리가 요구되며, 입도가 작은 경우 다짐시험에 의한 세립분의 증가가 약 30%로 발생되므로 추가적인 연구가 수행되어야 하지만 세립분의 함유량에 따른 사용에 주의가 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. 산업자원부 (2005), "Bottom Ash를 활용한 Chemical Compaction Pile 제조 및 시공기술 개발".
2. 산업자원부 (2002), "석탄회를 이용한 환경친화 건자재의 개발".
3. 추연옥 (1997), "공진주/비틀전단시험을 이용한 사질토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 관한 연구", 한국과학기술원 토목공학과 석사학위 논문.
4. 환경부 (2008), "제 4차 자원재활용 기본계획", pp.100-102.
5. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원 (1997), "내진설계기준 연구(II)", 건설교통부, pp.29-41.
6. Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98, July, pp.603-624.
7. Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equation and Curves", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98, July, pp.667-692.
8. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Takagi, Y. (1976), "Dynamic Shear Damping Properties of Sand for Wide Strain Range", Report of Civil Engineering Institute, 1085, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.25.
9. Park, D.K. (1998), "Evaluation of Dynamic Soil Properties : Strain Amplitude Effects on Shear Modulus and Damping Ratio", Ph.D. Dissertation, Cornell University.
10. Seed, H.B., Idriss, I.M. (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis", Report No.EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., pp.37
11. Seed, H.B., Wang, R.T., Idriss, I.M., Tokmatsu (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkely.
12. Sweeny, L.R., Rivard-Lentz, D.J., Demars, K.R. (1996), "Physical Chemical Behavior of Incinerator Bottom Ash", Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Geotechnolgy, San Diego, California, USA, 1, pp.416-425.

(접수일자 2011. 5. 19, 심사완료일 2011. 6. 21)