creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000240192

2010年 8月

博士學位論文

石造 構造體의 非破壞 試驗法에 의한 强度 推定에 관한 研究

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 正 勳

石造 構造體의 非破壞 試驗法에 의한 强度 推定에 관한 研究

A Study on the Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Stone Structures

2010年 8月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 正 勳

石造 構造體의 非破壞 試驗法에 의한 强度 推定에 관한 研究

指導敎授 金 政 燮

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2010年 5月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 正 勳

金正勳의 工學博士學位論文을 認准함.

委 員 長	檀國大學校	敎授	鄭 尙 鎭	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	金 義 植	印
委 員	全南道立大學	敎授	曺 昌 鎬	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	曺 昌 根	印
委 員	朝鮮大學校	敎授	金 政 燮	印

2010年 6月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

목 차

Abstract

기 호

Ⅰ. 서 론 1

1.1 연구배경 및 목적 1

1.2 연구의 범위 및 방향 3

1.3 기존 연구의 동향 4

1.3.1 석재 강도 연구 4

1.3.2 석조 문화재 보존 연구동향 11

1.4 연구 진행 흐름도 13

Ⅱ. 이론적 연구 14

2.1 지역별 석재산지의 분포유형과 특성 14

2.2 석조 문화재 현황 17

2.3 화강암의 암석학적 특성 22

2.4 암석물성의 평가방법 24

2.5 석조문화재의 훼손요인 29

2.6 초음파속도법(超音波速度法) 32

2.7 암석의 풍화도와 초음파속도의 상관관계 35

2.8 초음파속도와 강도의 상관관계 36

2.9 암석의 거칠기 분류 38

Ⅲ. 실험계획 40

3.1 실험 개요 40

3.2 실험 변수 42

3.3 사용 재료 43

3.3.1 석재 43

3.3.2 접촉재 43

3.4 실험체 제작 ····· 44
3.5 실험 방법 ····· 50
3.6 실험 기기 ····· 50

Ⅳ. 신석재(新石材) 실험 결과 ····· 52
4.1 신석재 접촉재에 따른 실험 결과 ····· 52
4.2 신석재 탐촉자 거리에 따른 실험 결과 ····· 56
4.3 신석재 탐사방법에 따른 실험 결과 ····· 60
4.4 신석재 표면 거칠기에 따른 실험 결과 ····· 62
4.5 소 결 ····· 64

Ⅴ. 구석재(舊石材) 실험 결과 ····· 66
5.1 구석재 접촉재에 따른 실험 결과 ····· 66
5.2 구석재 탐촉자 거리에 따른 실험 결과 ····· 70
5.3 구석재 탐사방법에 따른 실험 결과 ····· 75
5.4 구석재 표면 거칠기에 따른 실험 결과 ····· 78
5.5 소 결 ····· 81

Ⅵ. 석재 비파괴 추정식 제안과 비교 ····· 82
6.1 석재 표면 거칠기에 따른 추정식 제안 ····· 83
6.2 기존 제안식과의 비교 ····· 88
6.3 소 결 ····· 101

Ⅶ. 결론 ····· 102

참고문헌 ····· 104
부 록 ····· 115

표 목 차

<표 1.1> 일축압축강도와 슈미트해머 반발치 관계 ····· 5
<표 1.2> 일축압축강도와 초음파속도 관계 ····· 5
<표 1.3> 일축압축강도와 점하중지수 관계 ····· 6
<표 1.4> Subtopics and number of papers presented at the International Congress ····· 12
<표 1.5> Major parameters studied for structural analysis of ancient structures ····· 12

<표 2.1> 지역별 화강암 분포 현황 및 색상 ····· 16
<표 2.2> 국가지정 석조 문화재 현황(1) ····· 18
<표 2.3> 국가지정 석조 문화재 현황(2) ····· 19

<표 3.1> 실험 변수 ····· 42
<표 3.2> 석재의 화학적 성질 ····· 43
<표 3.3> 석재의 물리적 성질 ····· 43
<표 3.4> 신석재의 실험체 수량 ····· 44
<표 3.5> 구석재의 실험체 수량 ····· 47

<표 4.1> 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도 ····· 52
<표 4.2> 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도 ····· 54
<표 4.3> 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파 속도 비교 및 보정계수 ····· 56
<표 4.4> 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파 속도 비교 및 보정계수 ····· 58
<표 4.5> 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 60
<표 4.6> 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 61
<표 4.7> 신석재 거칠기에 따른 초음파속도 비교 ····· 62

<표 5.1> 구석재 간접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과 ····· 66
<표 5.2> 구석재 직접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과 ····· 68
<표 5.3> 구석재 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파 속도 비교 및 보정계수 ····· 70
<표 5.4> 구석재 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파 속도 비교 및 보정계수 ····· 72
<표 5.5> 구석재 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 75
<표 5.6> 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 76
<표 5.7> 구석재 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 비교 ····· 78
<표 5.8> 구석재 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 비교 ····· 79

<표 6.1> 신석재 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식 ····· 83
<표 6.2> 구석재 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식 ····· 84
<표 6.3> 통합 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식 ····· 86
<표 6.4> 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c ····· 88
<표 6.5> 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 90
<표 6.6> 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c ····· 92
<표 6.7> 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 94
<표 6.8> 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c ····· 95
<표 6.9> 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 97
<표 6.10> 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c ····· 98
<표 6.11> 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 100

그 림 목 차

[그림 1.1] 연구 진행 흐름도 ····· 13

[그림 2.1] 지역별 국내 석재 분포 ····· 14
[그림 2.2] 국내 암종별 분류 ····· 15
[그림 2.3] 석재문화재의 성능저하 요인 ····· 29
[그림 2.4] 초음파속도 실험장치의 개념도 ····· 34
[그림 2.5] 탐촉자 배치방법 ····· 34
[그림 2.6] 초음파속도와 압축강도와의 관계 ····· 37
[그림 2.7] 거칠기별 프로파일 게이지의 JRC의 기준(Barton N. & Choubey, 1977) ····· 39

[그림 3.1] 신석재 실험체 전경 및 전개도 ····· 46
[그림 3.2] 구석재 실험체 전경 및 전개도 ····· 49

[그림 4.1] 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도 ····· 53
[그림 4.2] 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도 ····· 55
[그림 4.3] 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파속도 비교 ····· 57
[그림 4.4] 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파속도 비교 ····· 59
[그림 4.5] 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 60
[그림 4.6] 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 61
[그림 4.7] 신석재 표면 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 실험 결과 ····· 63
[그림 4.8] 신석재 표면 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 실험 결과 ····· 63

[그림 5.1] 구석재 간접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과 ····· 67
[그림 5.2] 구석재 직접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과 ····· 69
[그림 5.3] 구석재 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파속도 비교 ····· 71
[그림 5.4] 구석재 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파속도 비교 ····· 73

[그림 5.5] 구석재 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 75
[그림 5.6] 구석재 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교 ····· 76
[그림 5.7] 구석재 표면 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 실험 결과 ····· 78
[그림 5.8] 구석재 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 비교 ····· 80

[그림 6.1] 신석재 거칠기별 초음파속도에 의한 강도 추정식 ····· 84
[그림 6.2] 구석재 거칠기별 초음파속도에 의한 강도 추정식 ····· 85
[그림 6.3] 통합 거필기별 초음파속도에 의한 강도 추정식 ····· 87
[그림 6.4] 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교 ····· 89
[그림 6.5] 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 91
[그림 6.6] 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교 ····· 91
[그림 6.7] 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 93
[그림 6.8] 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교 ····· 96
[그림 6.9] 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 97
[그림 6.10] 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교 ····· 99
[그림 6.11] 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율 ····· 100

사 진 목 차

<사진 2.1> 국가 지정 중요 석재 문화재 ····· 21
<사진 2.2> 초음파속도 실험장비 ····· 34

<사진 3.1> 프로파일게이지 및 분황사 석탑 거칠기 측정 전경 ····· 40
<사진 3.2> 접촉재 전경 ····· 44
<사진 3.3> 초음파속도 측정 전경 ····· 50

부 록 사 진 목 차

사진 1. 구석재 실험체 가공 후 전경 ····· 118
사진 2. 신석재 실험체 가공 후 전경 ····· 118
사진 3. 실험체 거칠기 측정 전경 ····· 119
사진 4. 간접법에 의한 구석재 초음파 속도 측정 전경 ····· 119
사진 5. 직접법에 의한 구석재 초음파 속도 측정 전경 ····· 120
사진 6. 압축강도 실험체의 초음파 속도 측정 전경 ····· 120
사진 7. SI1 실험체 겔 도포 후 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 121
사진 8. SI1 실험체 그리스 도포 후 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 121
사진 9. TD2 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 122
사진 10. TD2 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 122
사진 11. SD2 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 123
사진 12. SD2 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 123
사진 13. SD3 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 124
사진 14. SD3 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 124
사진 15. SD4 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 125
사진 16. SD4 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경 ····· 125

기 호

f_c : 석재 파괴압축강도(MPa)

f_{su} : 석재의 초음파속도 추정강도(MPa)

f_{su}/f_c : 추정압축강도/파괴 압축강도

V_p : 초음파속도(km/sec)

R^2 : 결정계수(coefficient of determination)

Abstract

A Study on the Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Stone Structures

By Kim, Jeong-Hoon
Adviser : Prof. Kim, Jeong-Sup, Ph.D.
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

In this study, old stone and new stone specimens for destructive and nondestructive testings were used to estimate the strength of stone cultural properties and to suggest a new estimation formula to obtain strength of stone materials using nondestructive methods.

1) According to the experiment conducted to measure the pulse velocity for different contact materials, SNUG and grease showed little difference of pulse velocity for different roughness of stone surfaces unlike gel and therefore it is suggested that the use of SNUG and grease is better to measure pulse velocity. Grease, however, showed some pollution on the surface of cultural properties when it is used as contact material of stone cultural properties and therefore the use of SNUG rather than grease is more advisable since the contact material prevents pollutions on cultural properties surfaces and hence gives more accurate pulse velocity measurements.

2) According to the experiment conducted to measure the pulse velocity for different distances between the sender and receiver devices, the indirect method

showed 4.4~29.4% decrease of pulse velocity for the probe distance more than 300㎜ and the direct method 14.1~25.1% decrease of the pulse velocity for the probe distance 400㎜ in comparison of pulse velocity measured for 100㎜ of probe distance. It is therefore suggested that the indirect method must be used for the probe distance less than 200㎜ and the direct method for the probe distance within 300㎜ to get more accurate pulse velocity measurements.

3) In the experiment conducted to find the effect of two different methods for pulse velocity measurement, it was shown that new stone specimen had faster pulse velocities with the indirect method while the old stone specimen showed faster pulse velocities when the direct method was used. This difference seems to be caused by the diffraction of pulse at the weathered surface of the old stone specimen which brings about the decreased strength of the stone materials

4) According to the regression analysis of the correlation between pulse velocity and destructive compression strength for each specimen, finely trimmed specimen showed a little higher coefficient of determination in regression analysis than the roughly trimmed specimen.

It is thought that the irregular surfaces of roughly trimmed specimen decrease the pulse velocity and this lower pulse velocity decreases the correlation between the pulse velocity and compression strength which in turn, lowers the coefficient of determination in regression analysis.

5) When applying the numerical values of pulse velocity to the existing estimation formulae, estimated strength values with Iksan Mireuksaji stone pagoda diagnosis formula and Kahraman formula showed around 25.9~29.6%

underestimation of the destructive compressive strength values. Estimated strength values with Baek Seung Cheol's formula, on the other hand, showed around 94.4~101.2% overestimation of the destructive compressive strength values. In old stone specimen, all the existing formulae showed underestimation of 56.6~62.0% in comparison with the destructive compression strength values.

It seems that the existing formulae, unlike this study suggests, use new stone materials without any weatherings on the surface and result in lower estimated values of compressive strength than the destructive compressive strength values.

6) Comparing the existing formulae and a new estimation formula suggestion from this study, the new estimation formula suggestion shows lower error rates and therefore it seems that this formula is more desirable when estimating the strength of stone cultural properties with rough surfaces. The followings suggest the new estimation formula suggestion according to kinds of stone material and surface roughness.

Ⅰ. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

한반도의 반만년 역사와 국토의 70% 정도가 산악의 지형적 특성으로 인해 석재로 축조된 문화재는 전국에 걸쳐 분포하고 있다. 우리나라에서 석조 문화재는 180여개의 석불과 300여개의 석조물, 그리고 수많은 석탑과 비석, 석교, 당간지주 등의 국가지정 석조 문화재가 전국에 분포되어 있다.

우리나라의 국가지정 문화재 1650기 중에서 석조문화재는 533기로써 약 33%를 차지하고 있다. 이러한 석조 문화재는 우리나라의 반만년의 역사성과 예술성뿐만 아니라 문화적, 교육적 가치로서도 세계적인 문화유산이며 오늘날 남아있는 고대유적·유물 중 단연 으뜸이다.

이는 우리나라 전국에 걸쳐 화강암 등 여러 종류의 석재가 풍부할 뿐만 아니라 수많은 역사적 재난을 통해 많은 문화유산들이 소실될 때도 견고하게 남아있었기 때문이다.[6)]

강도가 높은 석재를 사용한 구조물이라도 수 천년동안 자연환경의 노출 되어 표면풍화가 발생되고 있다. 이러한 석조 문화재의 보존에 있어서 가장 위험이 되는 요인들은 석재 자체의 풍화현상과 대기오염에 따른 산성비 등의 환경적 요인, 지의류, 이끼류 등의 생물학적 요인, 과하중, 지반침하 등의 구조적 요인에 따라 성능저하가 심화되고 있다.

석조 문화재의 구조부재는 외부에 노출되어 대부분 시간의 경과에 따라 재료의 풍화, 하중, 지반의 침하, 자연적 및 인위적 환경요인에 의해 손상 받게 되며 전반적인 구조적 안전성도 낮아진다. 석조 문화재의 훼손을 최소화하기 위한 체계적인 보존관리 방안의 정립과 비파괴 강도 평가의 필요성이 대두되고 있다.

이를 위해서는 석조 문화재의 재료적 강도평가가 반듯이 필요하는데 문화재의

특성상 시료의 채취 또는 손상을 주어서는 안 되므로 점검 및 진단 시에는 주로 비파괴 시험법 중 초음파 속도법을 주로 이용된다.

독일, 일본 등 선진 국가에서는 자국의 석조 문화재 뿐만 아니라 세계문화유산으로 지정된 대형 석조 문화재에 대해서도 비파괴진단을 통한 과학적 보존연구를 활발히 진행하고 있으며 국내에서도 많은 연구자들에 의해서 석조 문화재의 비파괴 탐사가 실시되고 있다.[8)~13)]

그러나 석조 문화재의 비파괴진단은 문화재 특성상 많은 제약이 따르고 철근콘크리트 구조물에 비해 진단장비나 시험법 등이 상대적으로 보편화 되어 있지 않은 실정이다.[12)]

현재 사용되고 있는 초음파속도법은 석재의 표면거칠기, 석재 두께, 직접법과 간접법 등에 의한 보정이 없을 뿐만 아니라 그리스와 같은 접촉재 사용에 따른 오염에 대한 단점을 가지고 있다.

이로 인해 같은 유형의 석조 문화재에 대한 비파괴 진단에서도 서로 다른 방법으로 부재들의 물성을 추정하고 있다.

따라서 본 연구에서는 석조 문화재의 강도 추정시 이용되고 있는 초음파속도법이 가지고 있는 한계점을 보완할 수 있는 보정방법을 정립하여 석조 문화재 안전진단에 적합한 비파괴 강도 추정 방법에 대한 실제적인 자료를 제공하는데 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방향

우리나라 석조 건조물은 화강암이 주로 사용되어 실험에 사용된 신석재는 석조 건조물의 보존 및 활용성의 확대 등 실험의 취지에 부합되도록 화강암 석조 문화재가 비교적 풍부하게 산재하는 익산지역의 황등석을 사용한다.

구석재는 현재 보존되는 석조 문화재에서 실험체를 채취할 수 없기 때문에 기존에 석조 문화재로 사용되었던 풍화된 경기지역 포천석 석재를 수집하여 사용한다.

본 연구에서는 석재의 비파괴 실험체와 파괴압축 실험체를 제작하여 실험하며, 파괴압축실험 실시 후 석재 시료를 채취하여 물리적 성질을 분석한다.

실험체 가공 후 파괴 실험체의 표면은 JRC(Joint Roughness Coefficient)에 의해서 잔다듬 실험체는 'JRC 2' 정도, 거친다듬 실험체는 'JRC 4' 정도의 표면 거칠기로 실험체를 제작한다.

비파괴 실험체는 표면 거칠기(잔다듬, 거친다듬)별, 탐촉자간 거리별(100~800㎜), 초음파속도 측정 방법(직접법, 간접법)별, 접촉재(그리스, 겔, 스너그(SNUG)) 종류별로 초음파속도를 측정한다.

비파괴 실험 실시 후 각 실험체별로 압축강도실험의 실험체를 제작하여 KSF2519 (석재의 압축강도 시험방법, 2000.11.) 규격에 의해 파괴 실험을 실시한다.

석재 표면거칠기, 탐촉자간 거리, 접촉재 종류에 따른 초음파속도와 석재압축강도를 비교함으로써 석조 문화재의 현장 상황에 따른 비파괴 석재압축강도를 추정하여 석조 문화재 보존 및 유지관리를 위한 기본적 자료를 제공하는 것이 연구의 기본 방향이다.

1.3 기존 연구의 동향

1.3.1 석재 강도 연구[14)]

석재의 강도 측정 시험 방법에는 슈미트햄머(Schmidt Hammer) 시험법, 초음파 속도법, 점하중 시험법 등이 이용되고 있다.

슈미트햄머법은 일반적으로 반발경도법이라고 불리며 측정방법이 간편하고 건축물에 손상을 주지 않으면서 구조물의 강도를 추정할 수 있는 방법으로 이미 세계적으로 널리 사용되고 있다.

슈미트햄머법은 슈미트햄머로 강도를 측정하고자 하는 모체의 표면을 타격하여 햄머의 타격에너지에 따른 반사되는 반동량인 반발경도에 의해 구조물의 강도를 측정한다.

슈미트 햄머법은 현장에서 암반의 표면 풍화정도, 일축압축강도를 추정할 수 있는 비교적 신뢰성 있는 지수를 제공한다. 슈미트햄머법은 암석의 일축압축강도와 비교적 상관성이 좋아 일축압축강도를 추정하는데 적합한 시험으로 알려져 있으나 슈미트햄머의 타격으로 인해 모체에 손상을 발생할 수 있다.

슈미트햄머는 N형, NR형이 가장 많이 사용되고 있으며 타격에너지가 적은 L형은 타격시 암석에 손상을 발생시키지 않아 이용되고 있다.

슈미트햄머법에 의한 시험결과는 국내에서 정량적인 현장 암판정 기준으로 이용하는 등 많은 활용성이 알려져 있으며, 지금까지 발표된 일축압축강도와 슈미트해머 반발지수와의 관계식은 <표 1.1>에 제시되어 있다.

초음파속도법은 강도 측정하고자하는 모체에 탐촉자를 접촉시켜 초음파의 통과 소요시간을 측정하여 모체의 강도를 측정하는 비파괴 실험법이다. 초음파의 속도를 측정하고 이를 고유물성으로서 활용하거나 관계식을 구하여 동탄성계수를 구하거나, 일축압축강도와 같은 다른 특성과 비교 또는 분석에 이용되기도 한다.

초음파속도는 암반 등급분류나 석재의 강도를 추정하는데도 이용되고 있다.

지금까지 실험적 연구에 의해 발표된 일축압축강도와 초음파속도 관계식은 <표 1.2>와 같으며 아직 초음파속도를 활용한 암석의 일축압축강도를 추정하는 방법은 그 활용도가 미비하다.

<표 1.1> 일축압축강도와 슈미트해머 반발치 관계[14)]

발 표 자	제 안 식
Deer and Miller[1966]	$q_u = 6.9 \times 10^{[0.16 + 0.0087(R_n \rho)]}$
Aufmuth[1973]	$q_u = 6.9 \times 10^{[1.348\log(R_n \rho) - 1.325]}$
Beverly et al.[1979]	$q_u = 12.74e^{[0.0185(R_n \rho)]}$
Kidybinski[1980]	$q_u = 0.477e^{(0.045R_n + \rho)}$
Sheorey et al.[1984]	$q_u = 0.4R_{LM} - 3.6$
Haramy and DeMarco[1985]	$q_u = 0.094R_n - 0.383$
Cargill and Shakoor[1990]	
(1) Sandstones	$\ln q_u = 4.3 \times 10^{-2}(R_n \rho_d) + 1.2$
(2) Carbonates	$\ln q_u = 1.8 \times 10^{-2}(R_n \rho_d) + 2.9$
Kahraman[2001]	$q_u = 6.97e^{0.014R_n \rho}(r = 0.78)$

q_u in MPa and ρ in g/cm^3

<표 1.2> 일축압축강도와 초음파속도 관계[14)]

발 표 자	제 안 식
Inoue and Ohomi[1981]	$q_u = k\rho V_p^2 + A$
Göktan[1988]	$q_u = 0.036\,V_p - 31.18$
Kahraman[2001]	$q_u = 9.95\,V_p^{1.21}(r = 0.83)$

Inoue and Ohomi[1981] : q_u in kg/cm^2, ρ in g/cm^3, V_p in $km/\sec$
Göktan[1988] : q_u in MPa, V_p in $m/\sec$
Kahraman[2001] : q_u in MPa, V_p in $km/\sec$

석재의 강도 측정 방법 중 점하중시험은 현장에서 수행할 수 있는 가장 간단한 시험방법이다. 비정형 암반에 대해서도 시험이 가능하며, 시험법이 간단하고 짧은 시간에 결과를 얻을 수 있기 때문에 많은 시료에 대하여 실시할 수 있다.

또한 시험법도 간단하여 이동할 수 있는 장점이 있으며, 시험결과는 암반분류 또는 일축압축강도와 관련되어 이용되고 있다. 지금까지 연구 발표된 일축압축강도와 점하중지수와의 관계식은 <표 1.3>과 같다.[14)]

<표 1.3> 일축압축강도와 점하중지수 관계[14)]

발 표 자	제 안 식	상관계수(R)
D'Andrea et al.[1964]	$q_u = 15.3 I_{s(50)} + 16.3$	0.947
Broch and Franklin[1972]	$q_u = 24 I_{s(50)}$	0.880
Bieniawski[1975]	$q_u = 23 I_{s(50)}$	
Hassani et al.[1980]	$q_u = 29 I_{s(50)}$	0.940
Read et al.[1980]		
(1) Sedimentary rocks	$q_u = 16 I_{s(50)}$	
(2) Basalts	$q_u = 20 I_{s(50)}$	
Foster[1983]	$q_u = 14.5 I_{s(50)}$	
Gunsallus and Kulhawy[1984]	$q_u = 16.5 I_{s(50)} + 51.0$	0.690
ISRM[1985]	$q_u = (20 \sim 25) I_{s(50)}$	
Cargill and Shakoor[1990]	$q_u = 23 I_{s(54)} + 13$	
Grasso et al.[1992]	$q_u = 9.30 I_{s(50)} + 20.4$	
Chau and Wong[1996]	$q_u = 12.5 I_{s(50)}$	
Kahraman[2001]		
(1) Coal	$q_u = 23.62 I_{s(50)} - 2.69$	0.930
(2) Other rocks	$q_u = 8.41 I_{s(50)} + 9.51$	0.850

q_u and I_s in MPa

일반적으로 대부분의 암석은 방향에 따른 물리적 성질(physical property)과 역학적 성질(mechanical property)이 다르게 나타나는 특성을 가지고 있다.

이러한 성질을 암석의 이방성(異方性)이라고 하는데, 이방성 암석의 역학적 성질은 광물학적 요인, 암석학적 요인, 구조적 요인 등 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

광물학적 요인에는 암석을 구성하는 광물입자들의 배열, 결합형태 그리고 입자들의 모양 등을 들 수 있다.[58)]

암석학적 요인에는 특정 광물입자 내에서 보여지는 쌍정면(雙晶面)과 미세균열들의 발달형태 등을 들 수 있다.

구조적 요인의 예로는 퇴적 당시에 쌓인 층리(層理)나 온도나 열로 인한 변성(變成)에 의하여 암석 원래의 구조가 재배열된 상태, 즉 일정한 방향성을 갖게 되는 편리나 엽리(葉理)구조 등을 들 수 있다.[68),69),103)]

외부에서 관찰되는 비교적 큰 규모를 갖는 암반의 경우, 불연속성을 초래하는 구조로서 단층(單層)이나 절리 등과 같은 그 형태를 육안으로 명료하게 판별할 수 있는 가시적 불연속면 구조를 관찰할 수 있다. 반면에 실내 암석실험에 사용되는 작은 규모의 시험편의 경우 현지 암반에 존재하는 것과 같은 가시적 불연속면은 관찰되지 않는다.

다만, 층리(層離), 편리(片理) 또는 암석 내부의 미세결함구조 등에 의하여 암석의 역학적 성질이 다르게 나타난다. 특히, 암석 내부를 현미경으로 관찰할 경우 암석은 서로 다른 물리적 성질을 갖는 광물입자들의 집합체라고 할 수 있다. 더구나, 그 내부에는 입자경계균열, 입자관통균열, 입자내 균열 등과 같은 다양한 형태의 미세 균열들이 존재하는 경우도 있다. 이상과 같은 이유로 암석은 다양한 형태의 역학적 특성을 보이게 된다.[70),71)]

암석의 공학적 이방성을 추정하는 방법으로 암석을 파괴하지 않고 물성에 대한 정보를 보다 간편하고 쉽게 얻을 수 있는 탄성파 속도를 이용한 연구가 널리 사용된다(송무선과 황인선, 1993; 정희옥, 1993; 박형동, 1995; 김영환과 이승석, 1997). 그리고 층리나 엽리(葉理)가 발달한 암석에서 이방성 특성에 대한 연구는 Crampin et al.(1980), Anderson et al.(1980), Ramamurthy et al.(1993), King and Chaudhry (1995) 등에 의해서 수행된 바 있다.

슬레이트(slate)나 셰일(shale)과 같은 이방성의 형태가 육안으로 관찰되는 암석의 파괴거동은 Hoek (1964), Chenvert and Gatlin(1965), Maclamore and Gray(1967), Donath(1972), Attewell and Sandford(1974), Brown(1977) 등 많은 학자들에 의하여 연구되었으며, 천매암(千枚岩)은 Ramamurthy(1988)와 Singh(1988) 등이 연구한

바 있다.

편마암(片麻岩)과 편암(片岩)은 Deklotz(1966), McCabe and Koerner(1975) 등에 의해 연구되었으며, 사암(砂岩)은 Horino and Elickson(1970), Arora(1987) 등에 의하여 각각 연구되었다.

화강암(花崗岩)의 경우는 거시적(巨視的)으로 균질하고 연속적이며 등방성을 갖는 것으로 취급되고 있으나, Birch(1960, 1961); Osborne(1965); McWilliams(1966), Douglass and Voigt(1969), Peng(1972), Soga et al.(1978), Anderson et al.(1974, 1980), Teufel(1989) 등의 연구에 의하면, 암석 내부에 발달해 있는 미세균열의 방향성 등에 의하여 암석의 강도나 탄성파속도가 다르게 나타나는 것으로 보고하였다.

이와 같이 복잡, 다양한 상태로 존재하는 암석의 특성을 나타내는 물리적·역학적 성질에는 암석의 비중, 공극률(孔隙率), 함수율, 초음파속도, 강도, 탄성계수, 포와송비(Poisson's retio), 점착력, 내부마찰각 등을 들 수 있다.

이들 물성 사이에서 보여지는 일반적인 상관관계는 직선관계, 곡선관계 및 Zone 형태 등으로 분류되며, 대부분의 물성치들은 Zone의 형태를 보이는 것으로 알려져 있다.[97)]

실내시험에 사용된 암석은 화성암의 경우 국내에 비교적 넓게 분포하고 있으며 건축물의 내외장용으로 흔하게 사용되는 화강암으로서, 익산지역에 분포하는 황등석(黃橙石) 화강암을 대상으로 시료를 선택하였다.

퇴적암(堆積岩)의 경우는 강원도와 충청북도 지역에 전체 분포 면적의 95% 이상을 차지하면서 주로 시멘트와 제철용으로 사용되는 석회암(石灰巖)을 이용하였으며, 영월지역에 분포하는 석회암 시료를 대상으로 하였다.

변성암(變成岩)에 있어서는 편리(片理)와 엽리구조가 비교적 잘 관찰되는 화강편마암을 선택하였으며, 장성지역에 분포하는 화강편마암을 시료로서 사용하였다.

암석은 다양한 광물의 집합체로 구성되며, 그 조직이나 구성광물은 암석의 형성과정 즉, 성인(成因)에 의하여 지배된다. 암석을 성인에 의하여 분류하면, 화성(化成)기원의 화성암, 퇴적기원의 퇴적암 및 변성기원의 변성암 등으로 배별할 수 있으며, 이들은 각기 형성된 환경이나 물질의 차이에 따라 세분된다.

다양한 연구결과에 의하면 자연상태의 암석은 지질학적 시기를 거치면서 내·외부적인 크고 작은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.[98)~110)]

대부분의 암석은 불균질하고 이방성을 나타내며, 암석의 이방성은 주로 입자의 배열이나 미세균열의 방향성 등에 기인한 것으로 보고되고 있다.[68),102),103)]

입자배열에 의한 이방성은 퇴적암이나 변성암에서 주로 관찰된다. 퇴적암의 경우 석회암이나 사암에서 층리구조 형태를 쉽게 관찰할 수 있다. 변성암의 경우 편마암과 같은 암석에서는 광물이 일정한 배열상태를 보이는 엽리나 편리구조를 관찰할 수 있다. 하지만 화성암의 화강암과 같은 암석에서는 육안으로 관찰되는 뚜렷한 구조적인 이방성을 보이는 경우는 드물지만, 몇몇 연구결과에 따르면 암석내부 미세균열들의 분포형태나 방행 등이 암석의 역학적 성질에 영향을 미친다고 보고된바 있다.[23),98),104)]

미세균열에 의한 이방성은 주로 상부압력의 감소에 따른 이완균열의 형성과 관련된 것으로 밝혀져 있다.[105)]

이상에서 설명한바와 같이 다양한 원인으로 인하여 암석의 물리적, 역학적 특성은 다양하게 나타나며, 특히 외부하중의 작용방향에 따라서도 암석의 강도 및 변형은 매우 상이하게 나타난다. 또한 암종(巖種)에 따라 각기의 그 물성 값들이 다양하게 나타난다. 일반적으로 비중, 함수율, 공극률, 마모도, 초음파속도, 강도, 탄성계수, 포와송비, 접착력, 내부마찰각 등을 들 수 있다.

이들 물성 사이에 나타나는 일반적인 상관관계는 직선관계 Zone의 형태 등으로 분류할 수 있다. 그러나 이론적으로 양호한 상관관계가 기대되는 몇몇 탄성계수 상호간이나 탄성계수와 특정한 물성간의 관계를 제외한 대부분의 경우는 Zone의 형태를 보인다.[97)]

암상(巖像)이 비교적 단순하고 물리적으로 비교적 등방성이고 균질한 것으로 간주되는 화강암의 경우라 하더라도 각 물리적 특성치는 상당히 흩어진 Zone형태의 상관성을 보인다.

그러나 선택되는 물리적 특성치의 종류에 따라서 상관의 정도가 크게 달라지며 이는 다시 암종에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타난다.(김영화와 홍순호

,1990). 이러한 암석의 물리적, 역학적 특성과 이들 사이의 상관관계에 관한 연구로서 외국논문은 Press(1966), Balakrishna and Ramama(1967), Deere(1968), Ducan (1969), Hamrol(1969), Iliev(1970), Barton(1971), Inoue and Ohomi(1981) 등에 의하여 다양한 연구성과가 보고된바 있다.

국내논문의 경우 이정인 외 3인(1982)과 이희근 외 2인(1983)은 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적인 특성에 관한 연구를 발표하였으며, 양형식(1992)은 국내 주요암석의 파괴조건 계수를 발표 한바 있다. 박철환(2001)은 이방성 암석의 탄성상수를 분석한 연구결과를 발표하였으며, 장보안 외 2인(2001)은 단일시편을 이용한 평면이방성 암석의 탄성계수를 결정하는 논문을 발표하였다. 그 외에도 이경운 외 1인(1988), 박형동(1995), 김영수(1998), 등에 의해 국내산 암석류의 역학적 특성과 상관관계에 관한 연구가 활발히 진행되어 그 연구성과가 보고되었다.

1.3.2 석조 문화재 보존 연구동향

우리나라에서는 현재까지 석조 문화재에 대해 주로 건축사학적인 측면에서 연구되어 왔지만 최근에는 보존측면에 대한 노력이 활발하게 진행되고 있다. 공주무령왕릉의 유지관리에 대한 용역, 석굴암 구조안전진단, 중원 미륵사지 석불입상 보호석실 구조안전진단, 익산 미륵사지 석탑 구조안전진단, 강진 월남사지 정밀안전진단, 경주 석빙고 안전진단, 나주 석당간 정밀안전진단, 경주 불국사 석가탑 구조안전진단 등 석조 문화재의 유지관리를 위한 안전진단이 수행된 바 있으며, 지금도 여러 건의 석조 문화재의 안전진단이 수행 중에 있다. 향후에도 구조적 손상과 지반침하 등의 구조적 요인을 고려할 때 지속적으로 안전진단에 대한 중요성은 높아질 것으로 판단된다.[56)]

또한 문화재의 보존에 관한 연구도 점차 활발해지고 있는데 반면 문화재의 유지관리를 위한 구조적 측면에서의 조직적인 연구는 거의 없는 상태이다. 또한 석조 문화재의 진동특성과 구조해석에 대한 연구는 일부에서 발표되고 있다.

해외에서는 문화재의 구조적인 측면을 다루는 연구가 비중을 많이 차지하고 있으며 <표 1.4>와 같이 석조 문화재의 연구는 사학적 측면, 재료측면, 구조적 측면, 보존측면, 환경측면 분야의 연구들이 균형있게 진행되고 있음을 알 수 있다.

구조해석측면 20편의 논문을 대상으로 구조물의 형식, 연구분야, 연구방법으로 분류하면 <표 1.5>와 같다. 구조형식은 대부분 석조구조물이었는데 목조건축물이 주류를 이루는 우리나라와는 달리 유럽지역은 석조구조물이 주류를 이루고 있기 때문이다. 이 점을 고려하면 석조 문화재의 강도추정을 다루는 본 연구는 우리나라 뿐 아니라 외국의 연구와도 연계시킬 수 있을 것으로 기대된다. 연구내용은 대부분 지진에 대한 안전성이나 구조물의 동적 특성 평가를 위한 동역학분야를 다루는 연구가 많았으며, 연구방법으로는 유한요소법에 의한 컴퓨터해석에 바탕을 둔 것이 많았다.

<표 1.4> Subtopics and number of papers presented at the International Congress[56)]

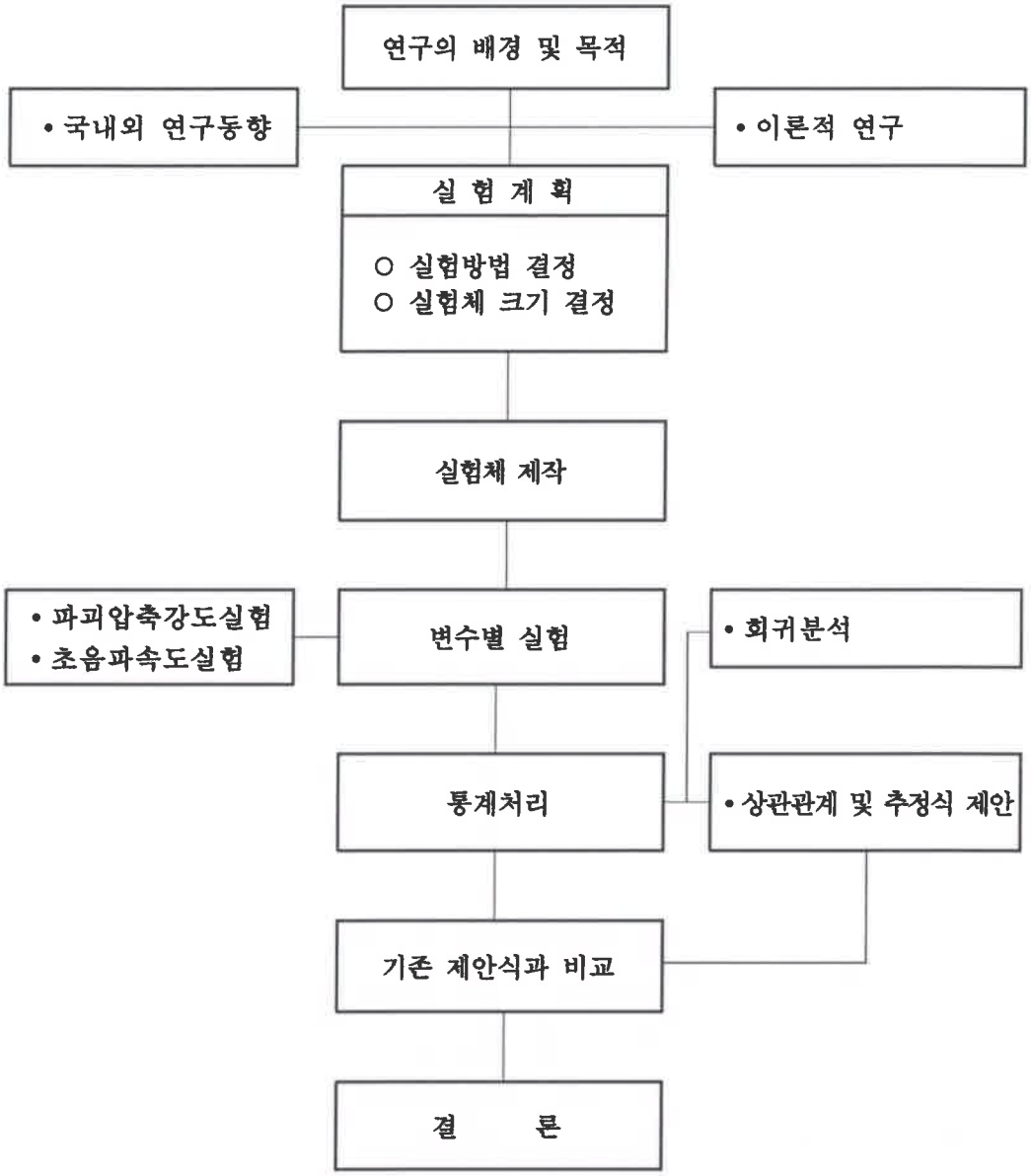
논 문 분 야	발표편수	
	2001년	1997년
historical and architecture aspect	21	16
Experimental Method and Tests Results in Building Materials	24	12
Structural Concepts and Analysis	20	23
Restoration and Preservation Techniques	16	12
Environmental Aspect and Future	16	
Documentation	6	
Planning and Future		4
Total	103	69

<표 1.5> Major parameters studied for structural analysis of ancient structures[56)]

분 류	내 용		편 수
구조물 형식	목구조(사원건물 등)		2
	석구조	사원, 교회등 건물	11
		탑형 구조물	2
		석축	3
		기타(콜롯세움 등)	2
연구분야	Dynamic 분야		11
	기타 일반구조분야		9
연구방법	컴퓨터 모델링 중점		7
	수치해석 중점		5
	현장실측 중점		3
	기타 일반구조		5

1.4 연구 진행 흐름도

본 연구를 수행하기 위하여 진행된 연구 흐름도는 다음과 같다.



[그림 1.1] 연구 진행 흐름도

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 지역별 석재산지의 분포유형과 특성[15)]

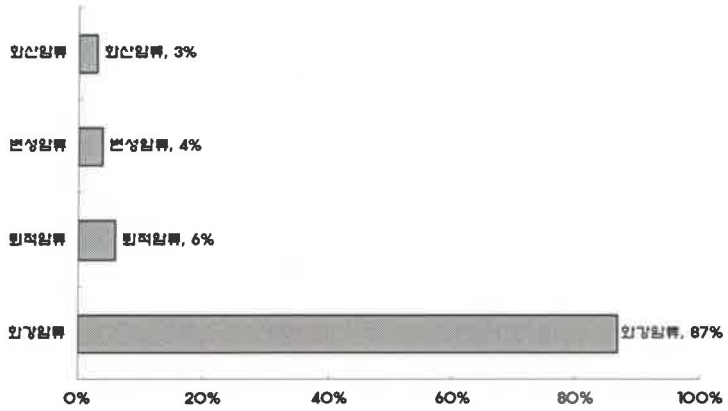
국내의 석재산지는 전국적으로 고르게 분포하고 있으며 분포 유형의 구분은 [그림 2.1]과 같다.

Cretaceous Granite, Jurassic Granite, Triassic Granite
Paleozoic Granite, Precambrian Granite
● marble, ● sandstone, ♦ schist, ♦ gneiss, ♦ slate, ▲ tuff, ▲ andesite, ▲ rhyolite,
★ basalt, □ felsite, ■ amphibolite, ■ gabbro, ■ diorite, ■ syenite, ■ granite

[그림 2.1] 지역별 국내 석재 분포[15)]

석재산지가 가장 집중되어 분포하는 지역은 원주에서 거금도로 이어지는 북북동 방향의 지역이 국내 석재석산의 약 50%의 점유율을 보이며, 우리나라의 주요 석재 벨트를 이루고 있다. 그 다음으로는 강경-익산-김제 벨트, 경기도의 포천-의정부 일대, 충청남도의 보령일대가 주 석재 채석산지로 알려져 있다.

국내에서 채석되었던 석재석산의 대표암종별로 분류한 것은 [그림 2.2]와 같으며 화강암류가 87%, 퇴적암류가 6%, 변성암류가 4%. 화산암류가 3%이며 심성암류에서는 화강암과 섬록암, 퇴적암류에서는 사암, 변성암류에서는 대리암이 주요 채석 대상 암종이다. 도별 점유율을 보다라도 모든 도에 분포되는 석재자원의 80~90%는 화강암류이며, 예외적으로 지질학적 특수성으로 인하여 제주도는 화산암이 현무암이 개발되었다.



[그림 2.2] 국내 암종별 분류[15)]

국내에서 채석되었던 석재의 종류는 사암, 대리암, 슬레이트, 편암, 편마암, 응회암, 현무암, 안산암, 유문암, 규장암, 각섬암, 반려암, 섬록암, 섬장암, 화강암의 15개 암종에 국한된다.

그러나 이들 중 현재는 화강암, 섬록암, 대리암 등의 7~8개 암종의 석재만이 생산되고 있으며 나머지 암종의 생산실적은 거의 없는 편이다.

현재까지 가행된 적이 있었던 석재석산의 수는 전북지역이 100여 개소 이상으로

가장 많은 점유율을 보이고 있으며, 그 다음으로 경북, 경기, 전남, 경남의 순으로 점유율이 감소하는 것으로 나타났다.

석재 암종별 분포를 보면 화강암 석재가 전국적으로 가장 많이 분포하나 전남지역은 타도와는 달리 섬록암 석재 자원이 풍부한 것으로 조사되었다. 또한 강원도와 충청북도는 대리석 석재자원이 타도에 비해 비교적 우세하게 분포하고 있으며, 충청남도는 사암(오석) 석재자원이 생산되는 유일한 지역으로 조사되었다. 이러한 도마다의 석재의 품종이 다른 것은 그 지역의 지질학적 암층발달의 특성에 따른다.

국내 석재의 입도 분포를 보면 600여개의 석산 중 중립질 내지 조립질의 입도를 보이는 석산이 50% 이상을 점하고 있으며, 거의 모두 화강암 석재이다. 그 다음으로는 세립질 화강암 석재로 약 10% 내외의 점유율을 나타낸다.

<표 2.1> 지역별 화강암 분포 현황 및 색상

도 명	산지별 명칭	색 상
경기도	종암석, 상계석, 홍제석	백색
	불광석, 포천석, 가평석	분홍색
	김포석, 강화석, 덕정석	회색
	여주석, 신산리석, 신북석, 양주석	녹색
충청도	계룡석, 아산석, 온양석	백색
	충주석, 음성석, 보온석	흑색
	제천석, 도곡석, 괴산석, 천안석	분홍색
경상도	보성석, 마천석, 합천석	백색
	지리산석, 영천석, 양주석	녹색
	상주석, 거창석, 경주석	흑색
	외관석, 남해석, 성주석, 문경석	쑥색
전라도	익산 황등석, 김제석, 광양석	백색
	익산석, 함열석, 여수석	쑥색
	고흥석, 여천석, 남원석, 정읍석, 순천석	분홍색
기 타	경원석, 대광석, 봉암석, 후동석, 원주석	

2.2 석조 문화재 현황

중요 국가지정문화재 및 중요민속자료에 속하는 건조물 문화재는 석재, 목재, 철재 등의 다양한 재질로 구성되어 있다.

우리나라는 국토의 약 70%가 산악지형으로 이루어져 있으며, 양질의 화강암이 대량으로 분포된 지질학적 조건과 석재의 우수한 내구성으로 인해 석조 문화재가 많이 존재하고 있다. 석조 문화재에는 석탑(石塔), 부도(浮屠), 당간(幢竿), 석등(石燈), 석교(石橋), 석불(石佛), 마애불(磨崖佛), 비석(碑石), 석빙고(石氷庫), 첨성대(瞻星臺), 암각화(巖刻花) 등 석재로 구성된 20여종의 문화재가 있다.

우리나라의 석조 문화재는 국보 64기(基), 보물 449기 등 총 533기의 국가지정문화재와 673기의 각 시도 유형문화재가 있다. 이외에도 지정되진 않은 많은 유물은 수천 수만점 이상일 것으로 추정된다.

석조 문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적연구[6), 7)] 내용을 통하여 살펴보면 경기도 용인군 및 이천군에서 22기, 전남 나주시, 화순군 및 장흥군에서 22기, 강릉 및 속초지역에서 27기, 경기도 하남시, 양평 및 여주 일대에서 26기, 그리고 강원도 원주, 횡성, 홍천 등지에서 38기의 탑 및 부도, 비석, 석불, 석등, 석당간(石幢竿) 등의 석조 문화재가 존재하는 것으로 조사되었다.

특히, 우리나라의 국가지정 문화재 1650기 중 533기가 석재로 건조된 문화재로서 32.3%를 차지하고 있다.

우리나라에는 화강암류가 넓게 분포하고 있으며, 조사대상의 석조 문화재를 구성하는 암석의 종류는 거의 대부분이 주변에서 취득하기 쉬운 화강암이 주를 이루는 것으로 조사되었다.

<표 2.2> 국가지정 석조 문화재 현황(1)

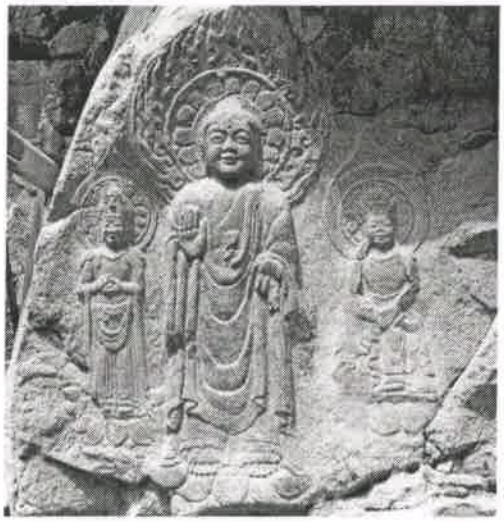
구분	명 칭	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	강원	계
1.	전탑(塼塔)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	석탑(石塔)	9	1	2	1	2	0	1	17	33
3.	모전탑(塼塔)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.	사리탑(舍利塔)	8	0	0	0	0	0	0	1	9
5.	봉발탑(奉鉢塔	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.	탑기타		0	0	0	0	0	0	0	0
7.	석등(石燈)	2	0	0	0	1	0	0	2	5
8.	석교(石橋)	1	0	0	0	0	0	0	2	3
9.	석조(石造)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.	석종(石鐘)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.	석굴(石窟)		0	0	0	0	0	0	0	0
12.	석불(石佛)(부동산)	0	0	1	1	1	0	1	7	11
13.	부도(浮屠)	2	0	3	0	0	0	3	3	11
14.	석표(石標	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.	각석(角石)	0	0	0	0	0	0	1	0	1
16.	석비(石扉)	6	0	1	0	0	0	0	5	12
17.	당간지주(幢竿支柱)	1	0	1	0	0	0	0	5	7
18.	석연지(石蓮池)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.	석(계)단(石壇)	0	0	1	0	0	0	0	0	1
20.	석연대(石連臺)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21.	석빙고(石氷庫	0	0	1	0	0	0	0	0	1
22.	석조각(石彫刻)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23.	첨성대(瞻星臺)		0	0	0	0	0	0	0	0
24.	마애불((磨崖佛)(부동산)	2	0	1	0	0	0	0	0	3
25.	지석묘(支石墓)(부동산)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26.	암각화(巖刻畫)	0	0	0	0	0	0	0	1	1
27.	석조(石造)기타	3	0	0	0	0	0	0	1	4
소계		34	1	11	2	4	0	7	43	102

<표 2.3> 국가지정 석조 문화재 현황(2)

구분	명 칭	경기	경남	경북	전남	전북	충남	충북	제주	계
1	전탑(塼塔)	1	0	4	0	0	0	0	0	5
2	석탑(石塔)	6	21	52	27	11	14	12	1	144
3	모전탑(塼塔)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	사리탑(舍利塔)	2	0	3	4	2	1	3	0	15
5	봉발탑(奉鉢塔	0	1	0	0	0	0	0	0	1
6	탑기타	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	석등(石燈)	3	3	2	2	5	2	3	0	20
8	석교(石橋)	0	1	2	4	0	0	0	0	7
9	석조(石造)	0	0	1	0	0	4	0	0	5
10	석종(石鐘)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	석굴(石窟)	0	0	2	0	0	0	0	0	2
12	석불(石佛)(부동산)	4	16	36	4	6	9	6	0	81
13	부도(浮屠)	3	4	1	11	1	1	2	0	23
14	석표(石標	0	1	0	0	0	0	0	0	1
15	각석(角石)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	석비(石扉)	8	5	12	14	3	5	8	0	55
17	당간지주(幢竿支柱)	1	0	8	2	3	6	1	0	21
18	석연지(石蓮池)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	석(계)단(石壇)	0	0	0	0	1	0	0	0	1
20	석연대(石連臺)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	석빙고(石氷庫	0	1	3	0	0	0	0	0	4
22	석조각(石彫刻)	0	0	1	0	0	0	0	0	1
23	첨성대(瞻星臺)	0	0	1	0	0	0	0	0	1
24	마애불((磨崖佛)(부동산)	4	4	12	3	3	4	4	0	34
25	지석묘(支石墓)(부동산)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	암각화(巖刻畫)	0	0	0	1	0	0	0	0	1
27	석조(石造)기타	1	1	3	1	2	0	1	0	9
소계		33	58	144	72	37	46	40	1	431

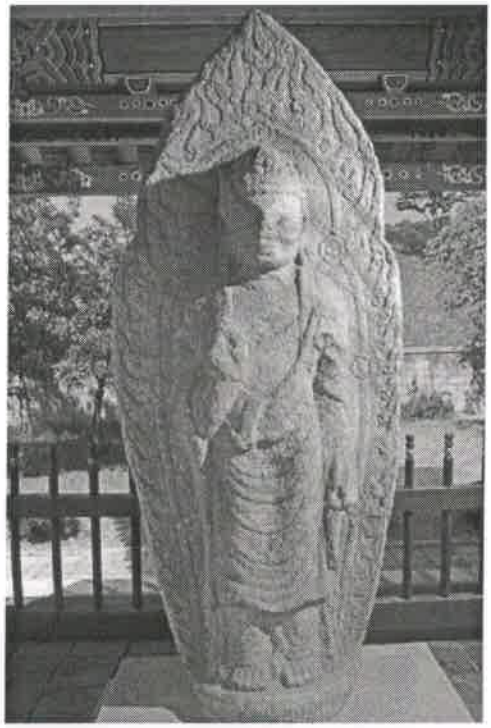
(a) 부여정림사지 5층석탑(국보 제225호)

(b) 부여 정림사지 석불좌상(국보 제108호)

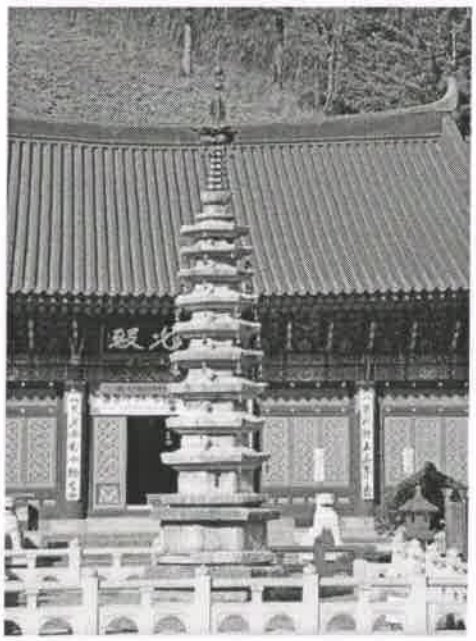


(c) 서산 마애삼존불상(국보 제84호)

(d) 경주 분황사 석탑(국보 제30호)



(e) 영주 가흥리 마애삼존불상(국보 제84호)　(f) 나주 석당간(보물 제49호)



(g) 불국사 다보탑(국보 제20호)　(h) 월정사 팔각 구층석탑(국보 제32호)

<사진 2.1> 국가 지정 중요 석재 문화재

2.3 화강암의 암석학적 특성

1) 화강암의 정의

화강암은 화성활동을 통하여 만들어지는 암석으로 화성암(igneous) 중에서 심성암(pluton)에 해당한다. 화성활동은 지하 깊숙한 곳에서 녹아있는 마그마가 지각의 약한 틈을 뚫고 지표로 분출하거나 지하에서 굳어져 암석을 만드는 과정을 말한다. 이 과정에서 규장질 마그마(felsic magma)가 상승하여, 지하 심부에서 천천히 고결되어 생성된 화강암은 심성암 중에서 입자가 거칠고 완정질(完晶質)인 암석이다. 구성광물은 사장석, 알칼리장석, 석영, 흑운모로 구성되며, 그 밖에 각섬석과 백운모가 포함되기도 한다.

화강암은 구성광물 중 석영, 알칼리 장석, 사장석의 체적비에 따라 세분되어지며, 석영 함량은 20~60% 정도를 차지한다. 암석 전체의 화학조성비에서는 SiO_2의 함량이 65% 이상의 범위를 가지며, 낮은 MgO, FeO, CaO 함량비와 높은 Na_2O, K_2O 함량비를 가진다. 또한 이들은 구조와 조직적 특징에 따라 다양한 양상으로 산출된다.[54)]

2) 화강암의 산출 및 산상

화강암은 심성암으로 대부분 관입암(intrusive rock)으로 산출된다. 이러한 관입암은 마그마가 지표까지 도달하지 못하고 지각 내에 굳은 암석을 말하며, 지표에 노출되는 형태나 주변 암석과의 구조적인 관계에 따라 저반, 암주, 병반, 그리고 암맥으로 나눌 수 있다.

저반(batholith)은 지하에 들어 있는 큰 심성암체를 말하며, 불규칙한 대상(帶狀)의 형태로 산출된다. 우리나라의 경우 중생대 쥬라기(Jurassic) 대보 화강암류가 대표적으로, 연구 지역인 익산의 미륵산 화강암이 여기에 해당한다. 암주(stock)는 지표에 나타나는 심성삼체의 면적이 100㎢ 이하인 것으로 지하에서는 저반과 연결되어 있다. 지표에서는 동심원의 형태로 산출되며, 우리나라에서는 중생대 백악기(Cretaceous)의 불국사 화강암류가 대표적이다. 이들은 경상분지 내에서 동심원의 형태로 잘 나타나며, 연구 지역인 경주 남산의 불국사 화강암류는 암주상의 형태로 나타난다.[54)]

3) 화강암의 조직

화강암은 마그마가 서서히 냉각되어 생성되었기 때문에 입자가 큰 광물로 성장할 시간이 충분하여 결정도가 아주 높다. 이러한 광물들의 입자크기와 광물들 경계면에서 나타나는 다양한 특징에 따라 다양한 특징에 따라 다양한 조직적 특징으로 구분된다.

화강암은 육안으로 광물들을 구별할 수 있을 정도의 입자크기를 가지므로 현정질 조직을 보이며, 입자의 크기에 따라 조립질(coarse, 5mm 이상), 중립질(medium, 1-5mm 이하), 세립질(fine, 1mm 이하)로 분류할 수 있고, 입자크기가 균질할 경우 등립질, 균질하지 않을 경우 비등립질 조직으로 분류한다. 비등립질 조직의 경우에는 조립질의 광물들이 세립질의 광물과 혼합되어 반상(斑狀)조직이 잘 나타나는데 전자를 반정(phenocryst)이라 하고, 후자를 기질 혹은 석기(matrix)라 한다. 반상조직은 급랭에 의한 특징을 잘 보여준다.

4) 화강암의 지표노출과 지형의 변화

지하에 있던 화강암이 지표에 노출되면 다양한 형태의 지형을 형성한다. 이러한 지형형성에 영향을 주는 인자로는 조직, 지각변동, 기후, 시간 등이 있다. 화강암은 지하에서는 변화가 적지만, 지표로 상승하는 과정에서 구조운동을 받으면 상황에 따라 균열이나 절리가 잘 발달한다. 지표에서의 2차 균열의 차이가 지표에서 침식의 차이를 가져와 결국 지형을 변화시킨다. 화강암체가 상승하는 도중에 일시적으로 융기가 정체되고 침식이 진행되면 준평원이 발달한다. 그 후 지각이 융기하여 지하 깊은 곳까지 심층풍화가 진행되고 침식을 받으면 화강암 산지 특유의 풍화지형이 발달하게 된다.

우리나라는 오랜 동안의 침식으로 지하 깊은 곳에 있던 화강암이 돔(dome) 형태나 석산의 형태로 지표에 드러나서 다양한 형태의 암석구릉을 만들었다. 이러한 산지의 화강암은 우리들의 생활에 많은 영향을 주었는데, 지표에 드러난 화강암은 채석이나 가공이 쉽기 때문에 석조 건조물과 석불을 만드는데 석재로 이용되어 우리 문화의 일부를 구성하여 왔다.[54]

2.4 암석물성의 평가방법

1) 초음파속도[58]

초음파 속도는 통과하는 매질의 입자조직과 구조에 의해 영향을 받으며, 암석시편 내에 존재하는 균열의 분포, 암석 입자조직의 방향성을 추정하고 암석시편의 다른 공학적 성질과 관련성을 찾는데 널리 이용되고 있다.[75),100),114)~118)]

이러한 비파괴 실험은 암석을 파괴하지 않고 물성에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 원칙적으로 탄성파 속도측정에 사용한 시료를 다른 실험에 사용할 수 있는 장점이 있다.[39)]

또한 탄성파속도는 암석의 동적인 성질에 관한 정보로서 가장 중요한 물성치이다. 암석내부를 전파하는 탄성파에는 P파와 S파가 있고 그 속도는 암석의 탄성계수, 전단탄성계수(강성율), 포아송비 및 밀도에 의존하며, 탄성파속도 시험은 암석의 동적인 특성을 파악하기 위하여 사용된다.[65)]

탄성파속도를 계산하는 식은 다음과 같다.[120)]

$$V_p = \frac{L}{t_p} \tag{2-1}$$

$$V_s = \frac{L}{t_s} \tag{2-2}$$

여기서 V_p, V_s : P 파, S 파의 전파속도

t_p , t_s : P 파, S 파의 측정된 시간

L : 시험편의 길이

2) 일축압축강도[58]

일반적으로 일축압축강도는 암석공시체의 일축압축강도를 구하기 위해 실시된다. 또한, 강도를 구하는 것 외에 공시체 변형율량을 측정해서 응력-변형률 곡선을 얻음으로서 탄성계수나 포아송비 등의 역학적 성질을 계산해 낼 수 있다.[122),123),130)]

모든 암석은 외견상의 특징과 무관하게 어느 정도의 구조적 및 역학적 이방성을

갖고 있기 때문에 하중의 재하방향에 따라서도 일축압축강도는 매우 상이하게 된다. 변성암의 경우, 엽리나 편리구조, 퇴적암의 경우는 층리구조에 의하여 뚜렷한 이방성을 보이는 반면, 화성암 경우는 육안으로 관찰되지 않는 미세균열 등에 의한 이방성을 보인다.[68),69),103)]

편리나 층리의 방향에 대한 암석의 역학적 거동에 대한 실험적 연구는 Deklotz 외(1966), McCabe 외(1975) 등에 의해 발표되었고 이들 시험결과에서는 연약면이 하중방향에 대해 30° 경사진 상태에서 최소강도를 보인다고 보고하였다. 국내에서는 김기주(1986), 김영근(1993), 김영수 외(1998, 2001), 최안식 외(2000) 등에 의해 이러한 층리, 엽리, 편리구조 등의 광물학적 구조특성을 지닌 암석에 대한 강도특성 및 역학적 거동에 관한 연구가 수행되었다. 화강암의 경우 Brich(1960, 1961), Osborne(1965), McWilliams(1966), Douglsss and Voigt(1969), Peng(1972) 등의 학자들에 의해 강도의 이방성이 규명되었으며, 국내에서는 박덕원(1994), 이상은(1993, 1995) 등에 의해 연구되었다.

원주형 시험편의 경우 일축압축강도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{2-3}$$

여기서, P는 파괴시의 작용하중, A는 시료의 단면적이다.[124)]

3) 탄성계수와 포아송비[58)]

변형율이란 물체가 하중을 받아서, 변형을 일으켰을 때, 전체 길이에 대한 변형량의 비를 말한다. 즉, 단위면적당 가해진 힘인 응력이 작용하였을 때, 단위길이에 대한 압축 또는 인장되는 변형량이다. 변형율의 단위는 무차원이며, 일축압축시험에서 가압방향으로의 변형은 압축상태이며, 가압방향에 수직한 방향은 인장상태를 나타낸다. 압축방향의 변형률은 양(+), 이에 수직한 방향의 변형률은 음(-)으로 한다. 방향에 따른 변형율과 각 물질 상수들은 다음과 같이 정의된다.[124,125)]

1) 축방향 변형율(ε_a) : 가압방향으로의 변형율(a : axial)

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2-4}$$

l_0 : 축방향의 원래 길이 Δl : 축방향의 길이변화

2) 횡방향 변형율(ε_l) : 가압방향에서 직각방향의 변형율(l : lateral)

$$\varepsilon_l = \frac{-\Delta d}{d_0} \tag{2-5}$$

d_0 : 시편의 원래 지름 Δd : 지름의 변화

3) 체적변형율(volumetric strain, ε_{vol}) : 가압 후 체적의 변화율을 나타내며, 탄성이론에서 축방향 변형율과 횡방향 변형율로부터 다음과 같이 나타낸다.

$$\varepsilon_{vol} = -\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_a + 2\varepsilon_l \tag{2-6}$$

4) 탄성계수(E) : 물체가 탄성적으로 거동할 때 응력과 변형율 사이에 Hooke의 법칙이 성립하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = E\varepsilon \tag{2-7}$$

여기서, 상수 E를 탄성계수(elastic modulus) 또는 영율(Young's modulus)이라 부르고, 추강향 변형에서 응력-변형율 관계곡선을 그렸을 때 그래프의 기울기로 나타난다. 위의 응력-변형율 관계에서 E는 다음과 같이 나타내며, 응력과 같은 단위(N/㎟)를 가지는 물질상수이다.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{l_0 \cdot P}{\Delta l \cdot A} \tag{2-8}$$

P : 가해진 하중, A : 물체의 단면적

탄성계수(E)는 공학적으로 여러 가지 방법으로 결정될 수 있으며, 가장 흔히 사용되는 것으로 다음과 같은 방법들이 있다.

① 접선영율(Tangent Young's modulus) : 최종응력의 특정 Percentage의 응력 수준에서 측정(통상 최종강도의 50% 지점 선택)

② 평균영율(Average Young's modulus) : 응력-변형률 곡선의 다소 직선인 구간의 평균 기울기로 결정

③ 할선영율(Secant Young's modulus) : 0 응력에서 어느 정도의 응력까지의 기울기(통상 최종강도의 50% 지점 선택)

5) 포아송비(ν) : 축방향의 변형율과 직각 방향의 변형율의 비를 말하며, 이는 물질에 따라 일정하다. 단축압축시험에서 축방향 변형율이 압축이므로 횡방향은 팽창이 일어나며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_a} \tag{2-9}$$

4) 슈미트해머 반발치[58)]

슈미트해머(Schmidt hammer)는 콘크리트의 압축강도나 탄성계수를 파괴하지 않고 현장에서 곧바로 측정하기 위하여 고안된 것이다. 이는 후에 암석의 강도를 추정하는데 사용되었다.[126),127)]

슈미트해머를 이용하여 암석과 콘크리트의 압축강도를 추정하고자 하는 연구는 Deere and Miller (1966), Irfan and Dearman (1978), Hucka (1965), Kolaiti and Papadopoulos (1993), Yaalon & Singer (1974) 등에 의해 수행되었으며, 이들은 표준시험법에 의한 압축강도와 슈미트해머 반발치 사이의 경험적인 상관관계로서 콘크리트와 암석의 강도를 추정하였으며, 이들 연구결과에서는 일반적으로 점이적으로 증가하는 역학적 특성 평가와 이들 사이의 상관관계를 규명하고자 하였다.

슈미트해머는 연한 암석이나 강한 암석의 반발경도를 측정하는데 적합하며, 측정시 슈미트해머를 시험편에 대고 누르면 플런져(plunger)가 해머 내로 밀려들어가 스프링에 에너지가 축적되어 규정에너지 수준에서 저절로 방출되어 시험편에 충격을 가한다. 이렇게 하여 얻어진 반발 높이가 경도의 측정치로 된다. 이렇게 얻은

경도치는 해머의 위치에 따라 달라지며, 하나의 암석에 20회 이상의 시험을 실시하여, 측정치의 낮은 값 50%는 없애고 높은 값 50%의 평균치를 구한 후, 이 값에 보정계수(correction factor)를 곱하여 Schmidt 반발경도를 얻는다.(ISRM, 1987) 보정계수의 계산방법은 다음과 같다.

$$Correction\,factor = \frac{specified\ \ standard\ \ value\ \ of\ \ anvil}{average\ \ of\ \ W\ \ reading\ \ on\ \ calibration\ \ anvil} \qquad (2\text{-}10)$$

2.5 석조 문화재의 훼손요인

[그림 2.3] 석재문화재의 성능저하 요인

1) 빗물에 의한 풍화작용

빗물에 의한 풍화작용은 신선한 암석의 경우에는 그 속도가 상당히 느리다. 그러나 우리나라의 대부분의 석조 문화재들은 천년이 넘게 계속하여 빗물과 반응해 왔기 때문에 상당히 풍화되어 있다.

암석의 풍화는 주로 암석을 구성하고 있는 장석(長石), 유색광물(흑운모, 각섬석(角閃石), 휘석(輝石), 감람석(橄欖石)), 황화철광물이 빗물과 반응하여 용해되면서 시작된다.

용해된 대부분의 성분들은 빗물과 함께 제거되지만 알루미늄, 철, 망간 이온들은 단독으로 또는 다른 양이온들과 결합하여 점토광물, 수산화철광물, 수산화망간광물 등을 만들면서 근처에 침전된다.

암석이 풍화를 계속 받으면 암석의 조직이 이완되고 공극률(孔隙率)이 커지다가 잔류하던 광물입자(주로 석영, 장석)들마저 저절로 떨어져 나올 정도로 강도가 약해진다.

2) 대기 오염물에 의한 풍화작용

대기 오염물은 주로 SOx와 NOx로서 각종 공장 등 산업시설의 부산물로 대기 중에 배출된 것들이다. 이들은 지상에 건조된 상태 또는 빗물 및 수분에 녹은 상태로 침적된다. 빗물은 원래 대기 중의 CO_2 때문에 약한 산성을 띠고 있지만, 강한 산성비는 대기오염물 때문이다.

산성비는 일반적인 빗물과 마찬가지로 광물들을 용해하고 또 점토광물과 같은 이차 생성광물들을 침전시킬 뿐만 아니라, 빗물에 녹아 있던 SO_2 가스가 빗물에 들어있는 양이온 또는 장석이 용해되어 생성된 양이온과 결합하여 황산염광물(주로 석고)을 침전시킨다.

석고는 물에 쉽게 녹지만 용액으로부터 정출될 때에는 정출압력이 크기 때문에 암석에 균열과 피각을 형성시킨다.

3) 수분 동결에 의한 풍화작용

기온이 내려가면 대기 중의 습기가 차가운 암석 표면에 결로현상을 일으키고 또 암석 자체가 수분을 함유하고 있는 경우도 있어서 기온이 영하로 내려가면 암석 중에 존재하던 수분의 결빙현상이 일어난다. 물이 결빙(結氷)과 해빙(解氷)을 반복할 때에는 결빙 때의 압력으로 인하여 암석에 균열과 박리를 생기게 한다.

4) 지반 습기 침투 및 염분 정출에 의한 풍화작용

석조 문화재의 지반이 다습한 경우에는 수분이 모세관작용에 의하여 석조물을 타고 상승하는 경우가 많다.

이렇게 되면 석조물의 하단부가 항상 수분을 함유하고 있어서 생물의 서식이 촉진될 뿐만 아니라, 수분이 운반해 온 염분들이 암석 표면에서 정출(挺出)되면서 백화현상을 일으킨다. 백화현상이 계속되면 암석에 균열과 탈락현상이 일어난다.

5) 생물 서식에 의한 풍화현상

석조물의 표면에 서식하는 조류(藻類), 균류(菌類), 지의류(地衣類), 박테리아, 이끼류 등은 석조물의 외관을 해칠 뿐만 아니라 이들의 뿌리로부터 분비되는 유기산으로 인하여 암석이 풍화되는 것으로 알려져 있다.

따라서 암석의 풍화를 일으키는 것으로 알려진 생물종에 대하여는 이를 제거하는 것이 바람직하다. 그러나 일부 지의류는 암석에 대하여 보호적 기능도 있는 것으로 알려져 있다.

6) 석재 부재간 결합상태 불안정

석재 부재간의 결합상태가 어떤 원인에 의하여 원래의 제 위치에 있지 못하고 어긋나거나 간격이 생기는 것은 결합상태가 불안정하여 보다 안정된 상태로 가는 과정에 나타난 현상이다. 이러한 현상이 있는 석조물에서는 빗물이 이들 틈 사이로 흘러 내려서 암석을 다습(多濕)하게 만들고 또한 생물의 서식을 촉진시켜 암석을 훼손시킨다.

7) 지반 불안정에 의한 구조결함

지반을 구성하고 있는 토사층이 장기간의 풍화작용을 받거나 또는 지하수 환경의 변화 등으로 인하여 지반이 불안정한 상태에 있는 경우에는 석조물의 부재간의 접합에 틈이 생기고 부재간의 압력편중 현상이 생겨 부재에 균열이 발생하고 구조물의 침하현상이 일어난다.

8) 해수(海水) 분무(噴霧) 염분(鹽分)

우리나라는 국토의 면적이 좁은데다가 그 형태가 좁고 길며 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있어서 바다에서 가까운 위치에 있는 석조물들은 해수 분무로 인한 염분의 영향을 크게 받고 있다.

해수 분무에 의하여 생성된 에어로졸에 함유된 염분은 주로 소금이지만 그 이외의 염들도 함유되어 있다. 해수 분무에 의하여 생성된 에어로졸은 300 km까지 내륙으로 분산되는 것으로 알려져 있다.

9) 유수(流水)에 의한 침식

석조 문화재가 강이나 호수와 같은 물의 영향을 직접적으로 받는 위치에 있는 경우에는 물에 의한 침식작용이 석조 문화재의 훼손에 큰 영향을 준다. 우기에 주기적으로 많은 물이 흘러 내려가면서 석조 문화재에 침식을 일으키는 예도 있다.

10) 인위적 요인

인간 활동에 의하여 의식적으로 또는 무의식적으로 석조 문화재가 훼손되는 예는 상당히 많다. 석조 문화재가 인위적으로 훼손되지 않도록 보존관리를 철저히 해야 할 것이다.

2.6 초음파속도법(超音波速度法)[62)]

본 방법은 석재(石材) 중에 입력된 초음파[1)]로부터 이미 알고있는 거리사이를 전파하는데 소요되는 시간을 측정해서 속도를 산출하고, 그 값을 회귀식(回歸式)에 대입해서 강도를 추정하는 것이다. 석재의 강도와 초음파전파속도는 직접적으로는 관계가 없지만 경험적으로는 그 양자가 상당히 밀접한 비례관계에 있는 것으로 알려져 있고, 이를 실험적으로 얻은 회귀식으로써 이용하고 있다.

초음파법은 발진단자(發振端子)부터 수진단자(受振端子)까지의 전파경로 전체의 성질이 전파속도에 영향을 미치므로 대상 석재부재의 내부상태 파악이 가능하다는 특징이 있다. 한편 강도추정(强度推定)의 정도(精度)가 충분히 만족하지 않다라는 문제점도 지적되고 있다.

고체 중에 있어서는 전파의 성질로부터 종파(縱波), 횡파(橫波) 및 표면파(表面波)로 대별되고, 그 외에 전파의 대향면(對向面)으로부터의 반사파(反射波)나 균열부분의 회절파(回折波)도 존재하여 이들 각종 파동이 혼재해 있다.

이들의 각종 전파파(傳播波) 중에서 속도는 종파가 최대이고, 통상 실행되고 있는 입력 제 1파의 측정은 종파를 대상으로 하는 것이 비교적 용이해서 판단하기 쉽고 오차도 적다. 또 종파는 파장[2)]이 크기 때문에 미소균열(微小龜裂) 등의 불연속면(不連續面)에 대한 영향이 적고 석재 강도추정의 목적에 유리한 것으로 알려져 있다.

한편 횡파는 종파에 비해서 전파속도가 느린 것이 특징이고 표면파는 더욱 느리다. 그 결과 파장은 영향인자 만큼 적게 되기 때문에 전파경로 중에 불연속부의 검출 등으로 측정정도(測定精度)가 향상되고 석재의 내부상태의 측정, 소위 내부탐사에 유효하다. 그러나 이들 파동은 서로 다른 파동과 겹쳐져서 그에 대한 판별이 어렵고 정확한 판정에는 전문적인 지식이 요구된다.

---

1) 음파(音波)란 물질의 탄성(彈性)과 관성(慣性)에 의해서 전해지는 파동현상(波動現象)으로 가청 음역(可聽音域)보다도 고주파수음역(高周波數音域)을 초음파(超音波)라 한다. 일반적으로 20kHz(20,000Hz = 20,000cycle/sec.) 이상의 주파수(周波數)를 말하며 지향성(指向性)이나 전파(傳播)의 직진성(直進性) 등의 성질을 가지고 있고 측정의 정도(精度)가 우수하다.

2) 매질중 음파의 전파에 있어서 그 속도와 파장 및 주파수 사이에는 $Vp=f \cdot M$의 관계식이 있다. 여기서 Vp:전파속도(m/sec), f:주파수(Hz) M:파장(m)

(1) 측정방법

전파속도측정을 위한 진동자의 배치는 [그림 2.7]에 나타내는 것과 같이 직접법(대칭법(對稱法)), 반직접법(사각법(斜角法)) 및 간접법(표면법(表面法))이 이용되고 있다.

대칭법은 석재의 마주보는 면에 발·수진자를 대향시키는 방법으로, 감도가 가장 좋고 전파시간도 정확하게 측정할 수 있다.

사각법은 석재의 품질, 우각부의 균열깊이 및 표층부의 열화깊이 등을 측정하기 위한 배치방법이다. 표면법은 석재에 적용되고 있는 초음파의 지향성이 나쁘고 표면에도 종파가 전파하는 것을 이용한 배치방법으로 대칭법 또는 사각법 등을 적용할 수 없는 경우의 표층부 열화깊이, 표면에 직각인 균열깊이 및 층두께 등의 측정에 적용되고 있다.

또한 표면법에서 수진자에 전파되는 종파의 에너지는 직접법의 2~3%에 지나지 않는다고 전해지고 있으며, 시험대상 부재의 품질의 변화에 따라 동일한 부재에서 펄스속도는 직접법보다 항상 5~20% 정도 적은 값으로 나타난다.

초음파전파속도를 측정하기 위한 진행순서는 다음과 같다.

가. 측정하기 10~30분 전에 측정기의 전원을 넣고 충분히 안정된 상태로 둔다.

나. 표준시험기(test specimen)를 이용하여 장치의 교정을 행한다.

다. 측정하고자 하는 위치(석재 구조체)의 발진자와 수진자의 거리(L)을 측정한다. 측정거리는 원칙적으로 10cm 이상으로 한다.

라. 측정 대상면에 그리스, 교체형 파라핀 등의 밀착제를 바르고 단자를 대서 공극이 발생되지 않도록 힘을 가한다. 1mm 이하의 두께이면 음속측정치에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다.

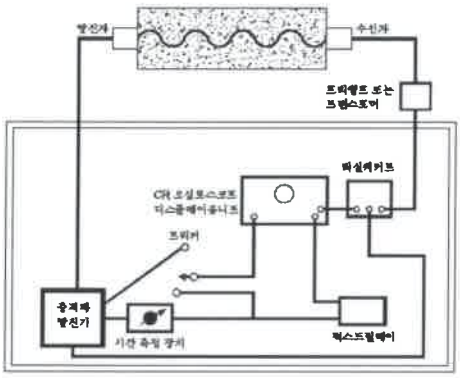
또한 단자에 힘을 가할 때 누르는 압력에 의해 ±0.25μs 정도의 차이가 발생된다.

마. 단자를 댄 상태로 표시단자의 수신신호가 안정될 때의 전파시간(T)를 기록한다.

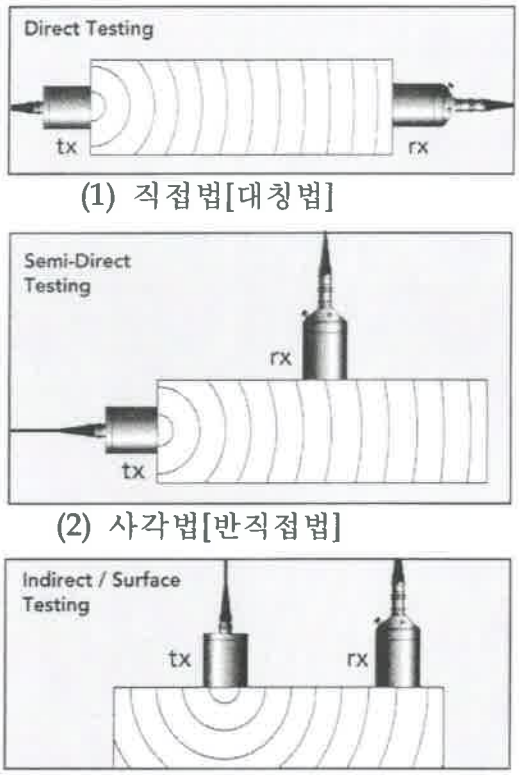
바. 초음파의 펄스속도(V_p)를 구한다.

$$V_p(km/\sec) = \frac{L(km)}{T(\sec)}$$

<사진 2.2> 초음파속도 실험장비



[그림 2.4] 초음파속도 실험장치의 개념도



(1) 직접법[대칭법]

(2) 사각법[반직접법]

(3) 표면법[간접법]

tx : 발진단자 rx : 수신단자

[그림 2.5] 탐촉자 배치방법

2.7 암석의 풍화도와 초음파속도의 상관관계

암석의 풍화정도(Weathering Degree)를 규명하기 위한 연구는 1957년 Ruston과 Berry에 의한 「조암(造巖)광물의 조성에 관한 지질학적 연구」를 시작으로 암석의 역학적 성질의 변화에 관한 연구와 종파속도와 역학적 특성을 중심으로 한 각 풍화 특성 상호간의 관련성 등에 이르기까지 다양한 연구성과가 보고되고 있다.[34)]

초음파속도법은 구조체 내의 초음파전파속도를 구해서 강도나 탄성계수, 열화정도나 균열 등의 품질을 평가하는 비파괴 진단방법의 일환으로 사용되어 왔다. 일반 시설물에 사용되는 콘크리트의 경우는 1930년대부터 연구하기 시작하여 압축강도의 추정이나 이것들의 한계를 밝히는 성과를 거두었다. 그러나, 암석의 경우는 초음파속도법을 이용한 비파괴방법으로 석재의 역학적 성질을 평가하기 위해서는 암석물리학적 관점에서 풍화의 진행에 따른 암석의 물리적 특성 상호간에 존재하는 상관성이 규명되어져야 한다.

따라서 풍화에 대한 절대적인 기준이 현재 존재하지 않는 상황에서 초음파속도법을 이용해 석재의 상태평가를 효과적으로 판단하기 위해 풍화지수의 관점에서 지진파속도, 압축강도, 공극율(또는 최대함수비), 비중 등의 물리적 특성치를 상호 비교한 연구결과[35)]를 참고로 하였다.

동일한 암상의 쥬라기 화강암 시료 21개를 대상으로 물리적 특성치간의 상관도 분석결과를 알아보면, 화강암의 물리적 특성치 중에서 P파속도와 공극율 사이에서 가장 좋은 상관관계가 나타내고 있으며, P파속도와 공극율은 현미경과 육안관찰에 의한 풍화도와도 가장 좋은 상관도를 보여 암석강도 측정치 이상으로 효과적인 풍화기준이 될 수 있는 것으로 나타났다. 또한 시료가 동일한 암상이거나 암상에 따라 세분이 가능한 경우에는 P파속도를 풍화도 기준으로 함이 가장 효과적이며 그렇지 못한 경우에는 공극율을 풍화도 기준으로 하는 것이 보다 효과적으로 나타났다.

2.8 초음파속도와 강도의 상관관계

석조 구조물의 품질은 일반적으로 석재 강도의 관점에서 설명되며, 강도를 측정하기 위해서는 초음파 속도 측정이 유용한 수단으로 이용될 수 있다.

강도를 추정할 경우에는 대상 석재의 특정 강도와 초음파 속도간의 상관관계를 확립하는 것이 필요하며, 이 상관관계는 실험적으로 예상되는 강도의 범위를 포함하고 통계적으로 신뢰도를 가질 수 있는 만큼의 충분한 시험을 통해 확립되어야 하지만 그렇지 못한 것이 석재강도추정의 현실이다.

초음파속도와 강도와의 관계는 기존 연구에서도 확인되었듯이 암석의 화학적 특성과 물리적 특성에 따라 다수의 영향을 받고 있어 양자의 상관성을 도출하기는 쉽지 않지만, 경험적으로는 상당히 밀접한 비례관계에 있는 것으로 알려져 있고 실험적으로 얻은 추정식이 이용되고 있다.

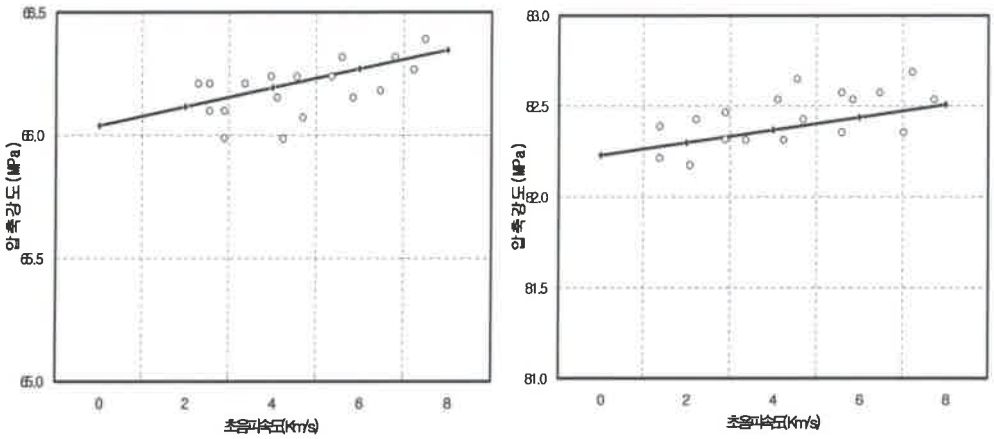
따라서 일반적으로 실무에서는 초음파속도와 암석의 일축압축강도와의 관계를 나타내는 경험식을 이용하여 석재의 압축강도을 추정한다.

경험식의 적용은 「익산 미륵사지 석탑 구조안전진단[52]」 시 적용하였던 경험식 1과 화강암의 물리적 특성치 자료를 근거로 산출한 경험식 2를 비교평가하여 결정계수 가 높은 경험식 1을 적용하여 석재 압축강도를 추정하였다.

경험식 (1) : $f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$

경험식 (2) : $f_{su} = 82.23 \times \exp^{(0.000422 \times V_p)}$

여기에서 f_{su} : 추정압축강도, V_p : 초음파속도



(a) 경험식 (1) (b) 경험식 (2)

[그림 2.6] 초음파속도와 압축강도와의 관계[52)]

2.9 암석의 거칠기 분류

일반적으로 암석의 역학적 거동은 암석내에 존재하는 불연속면(절리, 층리, 단층, 균열)의 기하학적 형태와 역학적 성질, 강도에 크게 영향을 받는다.

이러한 불연속면의 강도에 영향을 미치는 요소들은 불연속면 주변 암석의 강도, 암석의 기본 마찰각, 불연속면의 풍화정도, 불연속면의 거칠기 등이 있다.

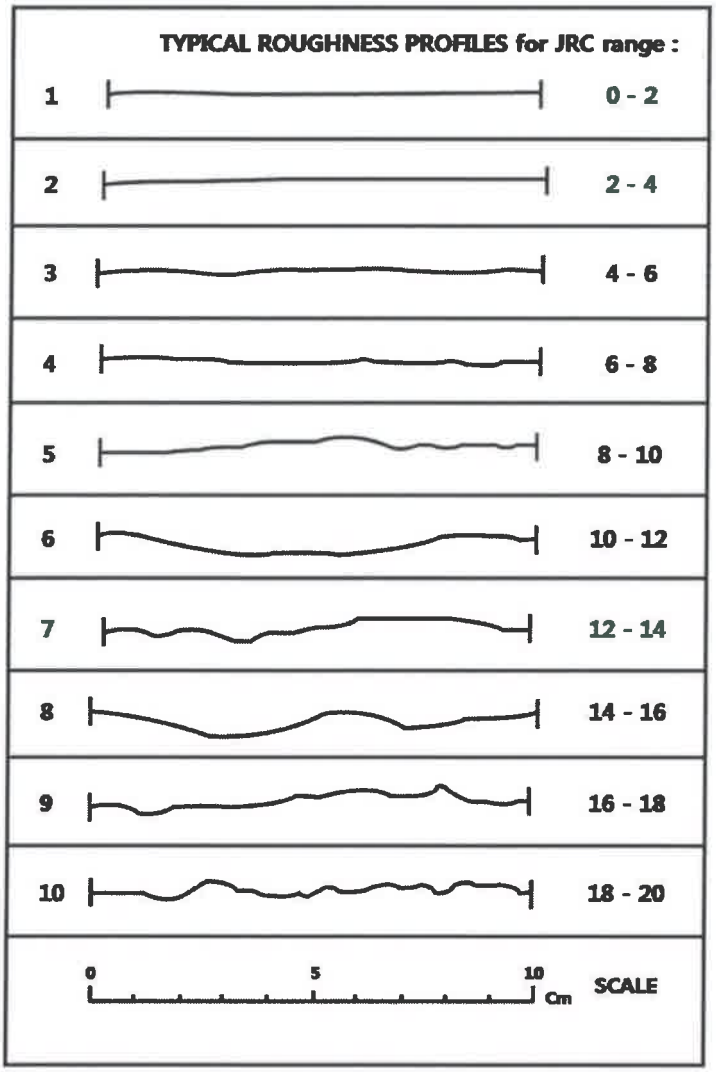
특히 거칠기는 응력을 받는 절리면의 들뜸과 변위를 좌우하고 강도와 균열의 수리적 유동특성도 지배하게 된다. 이러한 암석의 거칠기에 대한 정량화 연구는 처음 Barton과 Choubey(1977)[66]가 표준 절리 모델을 제안하여 정량화 시도하였으며 이후 많은 연구가 계속 되었다.

탄성파시험이나 반발경도시험 시 보편적인 경우에는 시험부위의 면을 매끄럽게 가공한 후 시험을 실시하는 것이 일반적이다.

그러나 시료채취와 같은 훼손이 불가능한 문화재의 경우 시험면에 대한 가공이 어려우므로 부재면의 요철인 거칠기가 시험결과에 큰 영향요소로 작용한다.

따라서 거칠기는 Profile Gauge를 이용하여 부재별 굴곡계수(JRC)를 측정하며 탄성파나 초음파속도 시험을 이용한 일축압축강도를 추정할 때 고려되어야 할 것이다.

JRC값을 평가하는 방법은 Barton과 Choubey(1977)에 의해 발표된 <그림 2.7>와 같다.



[그림 2.7] 거칠기별 프로파일 게이지의 JRC의 기준(Barton N. & Choubey, 1977)[66]

Ⅲ. 실험계획

3.1 실험 개요

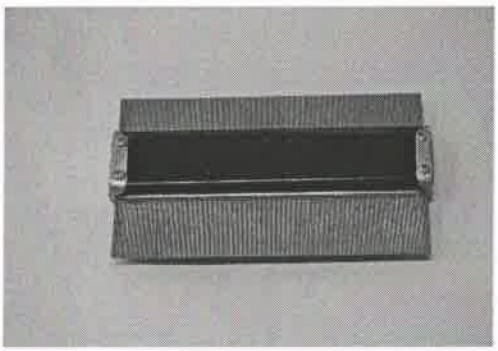
석조 문화재의 석재는 화강암이 주를 이루었으며, 이외에 편마암(片麻巖), 역암(礫巖), 응회암(凝灰巖) 등이 소수 사용된 것으로 나타났다.

따라서 실험에 사용된 신석재는 석조 문화재의 보존 및 활용성의 확대 등 실험의 취지에 부합되도록 화강석을 사용한다. 또한, 구석재는 문화재로 사용되었으나 풍화되어 수리시 교체된 부재를 이용한다.

실험체는 석재 표면 거칠기, 초음파탐사 방법, 접촉재 등에 따른 석재의 강도특성에 관한 실험을 실시한다.

실험은 석조 문화재 압축강도 추정을 위해 초음파속도 시험과 파괴압축강도 시험을 실시하며, 재료실험은 본 실험에 사용될 재료인 석재의 압축강도를 측정하기 위하여 U.T.M을 이용하여, KSF 2519(석재압축강도 시험 방법, 2000.11)규격에 의하여 파괴압축강도 실험체를 제작하여, 파괴압축강도를 파악한다.

석조 문화재별로 풍화 및 석재 가공 등의 요인으로 표면 거칠기를 가지고 있으며 석조 문화재의 표면 거칠기를 <사진 3.1> 과 같이 프로파일게이지를 이용하여 석조 문화재의 표면 거칠기를 측정하였으며 JRC(Joint Roughness Coefficient)에 의해서 거칠기를 정량적으로 평가한다.



(a) 프로파일게이지

(b) 분황사 석탑 거칠기 측정

<사진 3.1> 프로파일게이지 및 분황사 석탑 거칠기 측정 전경

석조 문화재 거칠기를 측정한 결과, 잔다듬은 JRC "2" 정도, 거친다듬은 JRC "4" 정도로 조사되었다. 그러므로 석재의 표면거칠기는 초음파속도의 지연 저해요소로써 표면 거칠기는 잔다듬 수준의 거칠기, 거친다듬 수준의 거칠기로 제한하였다. 실험체는 잔다듬 수준의 거칠기는 JRC "2" 정도, 거친다짐 수준의 거칠기는 JRC "4" 정도의 거칠기로 제작 및 프로파일게이지로 확인하여 실험한다.

실험체 제작 및 실험시 동일한 절리조건에서 실험을 실시하여 초음파속도법에 대한 방해인자를 제어한다.

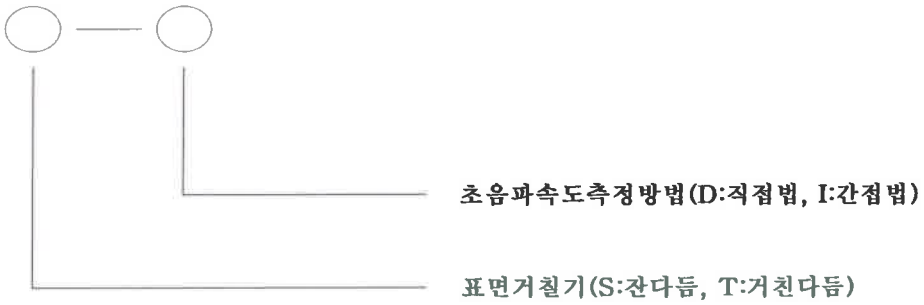
실험체 모체와 탐촉자의 밀착을 돕는 접촉재는 그리스(grease), 겔(gel), 스너그(SNUG)를 사용하며 겔은 알갱이 등의 함유물질이 없는 수용성의 겔을 사용한다.

초음파속도시험은 동일한 실험체에 직접법과 간접법으로 방법을 달리하여 탐촉자간 거리를 직접법은 100~800㎜와 간접법은 100~400㎜로 초음파속도를 측정하고, 초음파속도 측정시 동일 위치에서 3회씩 수진자와 발진자를 번갈아 바꾸어 실시한다.

본 실험에서는 각 변수별로 초음파속도를 측정하여 추정압축강도를 산출하고 파괴실험에 따른 압축강도와 비교하여 검토한다.

3.2 실험 변수

본 실험에서 고려되는 변수는 표면거칠기(잔다듬, 거친다듬) 직접법과 간접법초음파속도 측정방법(간접법, 직접법), 탐촉자간 거리, 접촉재별(스너그, 겔, 그리스)로서 초음파속도 측정 방법, 탐촉자간 거리와 표면거칠기에 따라 실험체를 제작하여, 접촉재를 달리하여 초음파 속도를 측정한다. 압축파괴 실험체는 초음파속도법에 사용된 석재에서 100㎜×100㎜×110㎜ 크기의 실험체를 가공하여 KSF 2519(석재 압축강도 시험 방법, 2000.11)에 의거하여 파괴압축강도를 파악한다.



<표 3.1> 실험 변수

실 험 요 인		수 준
일반사항	실험종류	파괴압축강도, 초음파속도 측정
	석재종류	신석재, 구석재
	표면거칠기	JRC기준-잔다듬(S), 거친다듬(T)
초음파속도 측정 방법	탐촉자 배치	간접법(I), 직접법(D)
	탐촉자 접촉재	그리스(Grease), 겔(Gel), 스너그(SNUG)
	탐촉자 거리별	100㎜, 200㎜, 300㎜, 400㎜, 600㎜, 800㎜

3.3 사용 재료

3.3.1 석재

실험체 제작에 사용된 석재는 풍화가 되지 않은 익산 황등과 풍화가 진행된 경기 포천석 화강석을 사용하였으며 사용석재의 화학적 성질 및 물리적 성질은 <표 3.2>~< 표3.3>과 같다.

<표 3.2> 석재의 화학적 성질

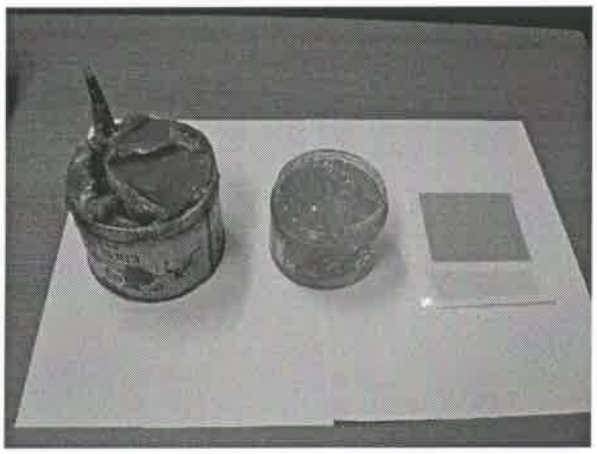
구 분	화 학 성 질(%)								
	SiO_2	Na_2O	MgO	Al_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5
익산 황등석	72.9	3.5	0.5	14.4	3.8	2.1	0.4	2.1	0.1
경기 포천석	74.9	3.8	0.2	14.0	4.3	2.07	-	3.8	0.1

<표 3.3> 석재의 물리적 성질

구분	비 중	흡수율	공극률	압축강도 (MPa)
익산 황등석	2.64	0.38	1.0	105
경기 포천석	2.59	0.39	1.1	55

3.3.2 접촉재

초음파 속도 측정에서 탐촉자와 실험체의 밀착시키기 위해 <사진 3.2>와 같은 그리스, 수용성겔, 스너그를 접착시킨다.



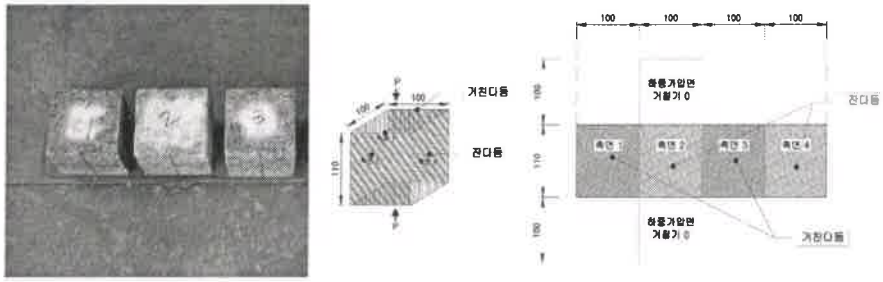
<사진 3.2> 접촉재 전경

3.4 실험체 제작

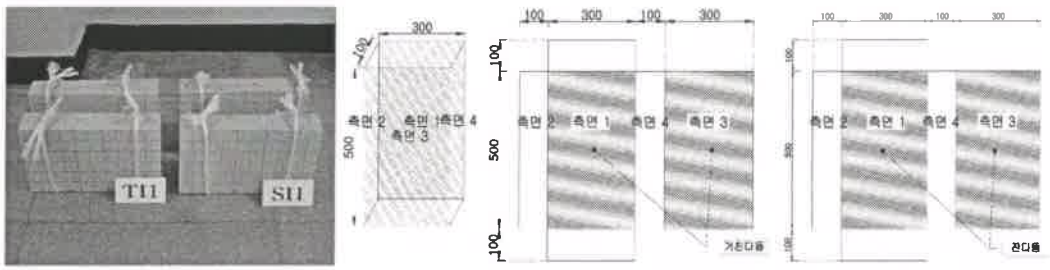
실험체 수량은 [그림 3.1]에 도시된 형태의 석재 크기와 거칠기별로 각각 1개 이상 제작한다. 실험체 제작시 석재의 두께는 거칠기 처리를 위한 다듬과정을 실시한 후의 치수로서, 석재 절단시 잔다듬과 거친다듬으로 인한 손실을 염두해 두고 석재절단작업을 실시한다.

<표 3.4> 신석재의 실험체 수량

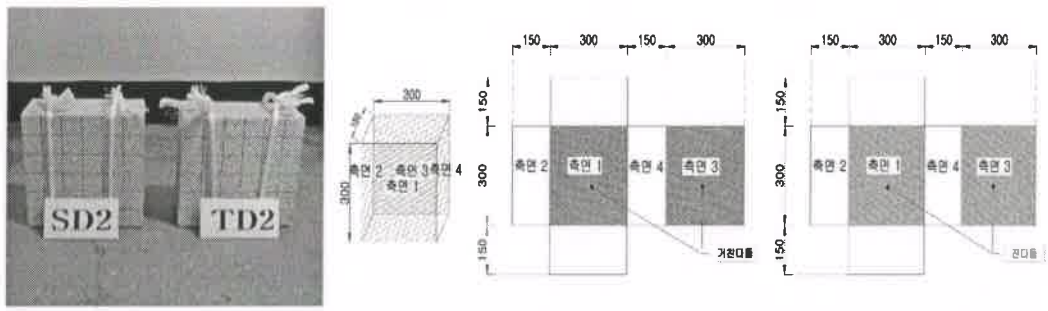
실험체명	부재 크기	표면 거칠기	수량	비 고
1-1	300㎜×100㎜(두께)×500㎜	거친다듬(측면 1, 3)	2EA	
1-2	300㎜×100㎜(두께)×500㎜	잔다듬(측면 1, 3)	2EA	
2-1	300㎜×150㎜(두께)×300㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
2-2	300㎜×150㎜(두께)×300㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
3-1	300㎜×200㎜(두께)×300㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
3-2	300㎜×200㎜(두께)×300㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
4-1	300㎜×300㎜(두께)×300㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
4-2	300㎜×300㎜(두께)×300㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
5-1	300㎜×400㎜(두께)×300㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
5-2	300㎜×400㎜(두께)×300㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
Total			12EA	



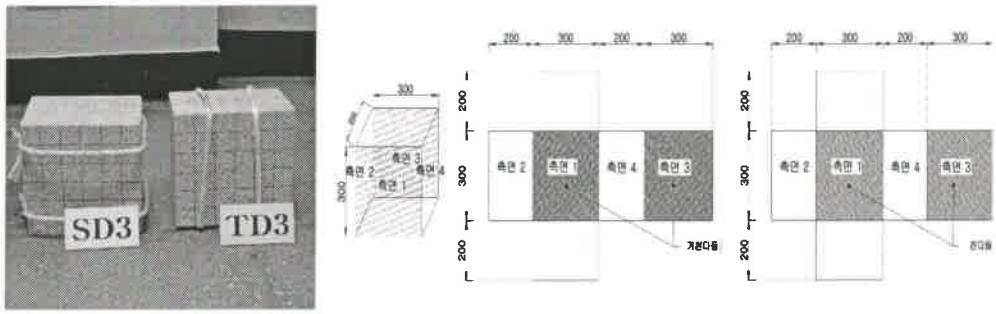
(a) 100×100×110㎜ 압축파괴 실험체



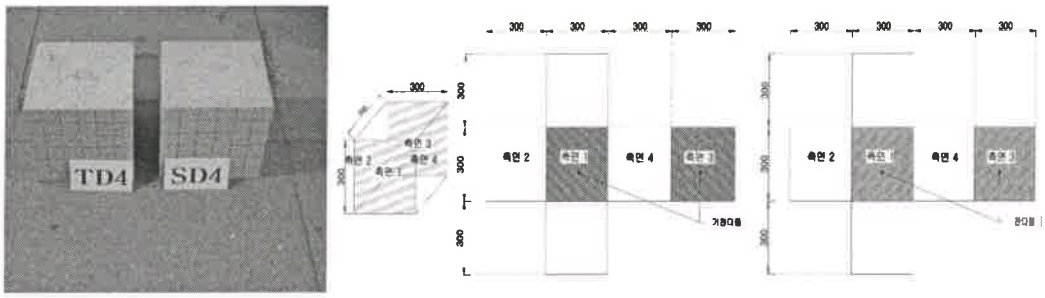
(b) 300×100×500㎜ 실험체



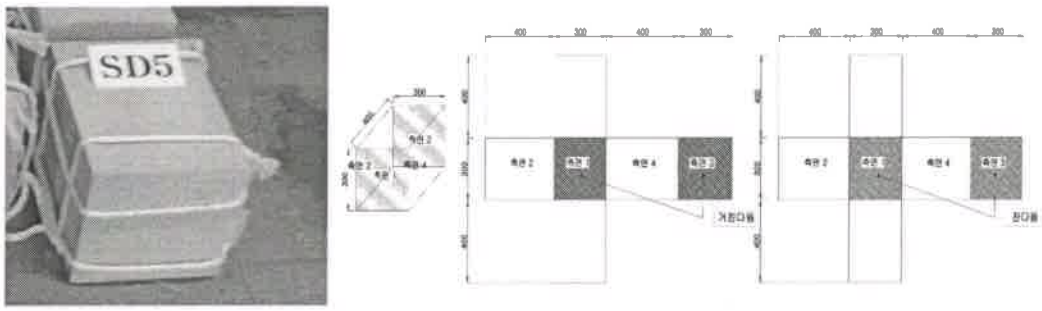
(c) 300×150×300㎜ 실험체



(d) 300×200×300㎜ 실험체



(e) 300×300×300㎜ 실험체

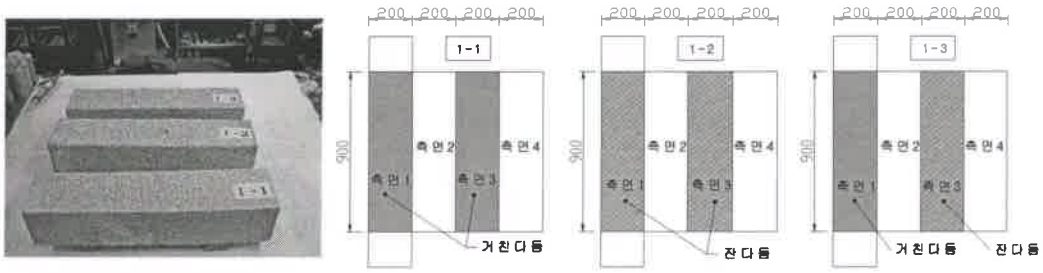


(f) 300×400×300㎜ 실험체

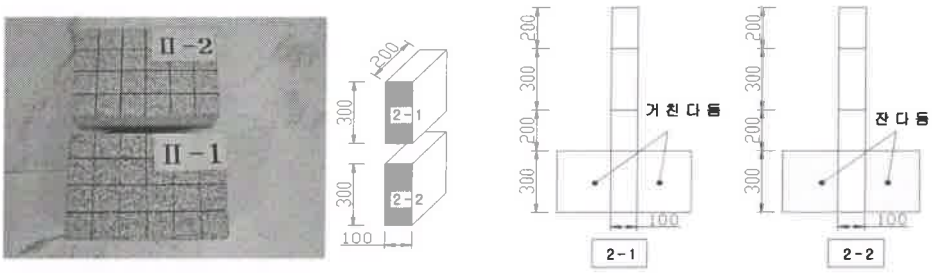
[그림 3.1] 신석재 실험체 전경 및 전개도

<표 3.5> 구석재의 실험체 수량

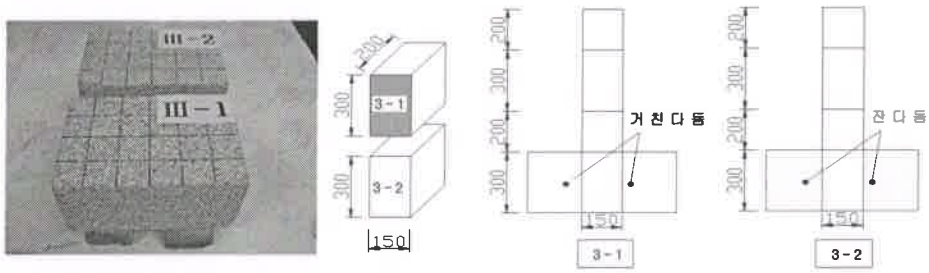
실험체명	부재 크기(size)	거칠기	수량	비고
1-1	200㎜×200㎜(두께)×900㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
1-2	200㎜×200㎜(두께)×900㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
1-3	200㎜×200㎜(두께)×900㎜	잔다듬(측면 1), 거친다듬(측면 3)	1EA	
2-1	300㎜×100㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
2-2	300㎜×100㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
3-1	300㎜×150㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
3-2	300㎜×150㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
4-1	300㎜×300㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
4-2	300㎜×300㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
5-1	300㎜×400㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
5-2	300㎜×400㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
6-1	300㎜×600㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
6-2	300㎜×600㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
7-1	300㎜×800㎜(두께)×200㎜	거친다듬(측면 1, 3)	1EA	
7-2	300㎜×800㎜(두께)×200㎜	잔다듬(측면 1, 3)	1EA	
Total			15EA	



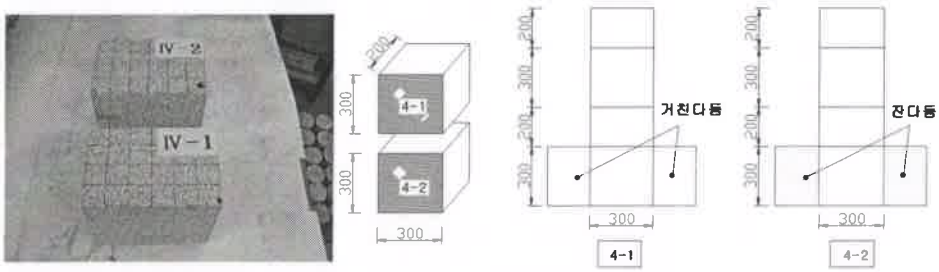
(a) 200×200×900㎜ 실험체



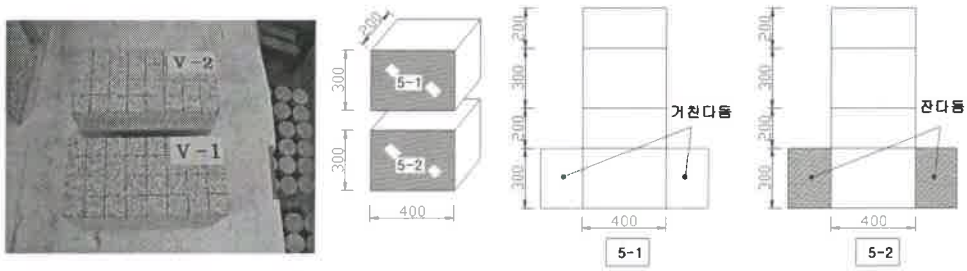
(b) 300×100×200㎜ 실험체



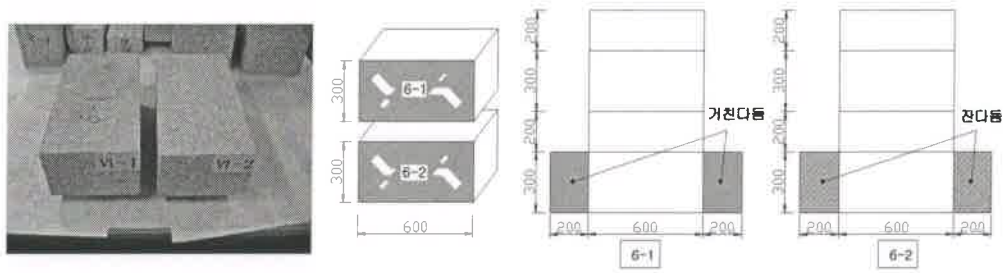
(c) 300×150×200㎜ 실험체



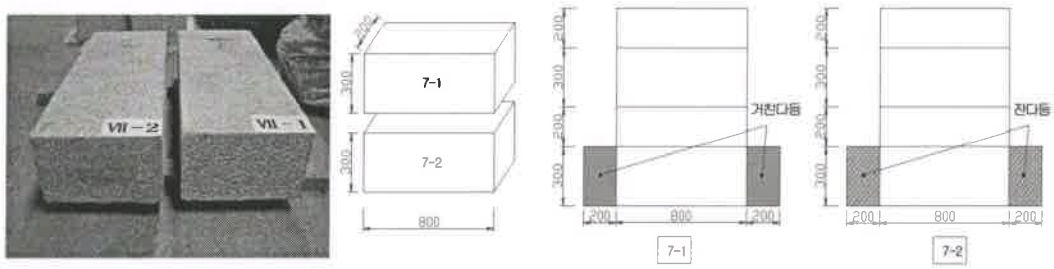
(d) 300×300×200㎜ 실험체



(e) 300×400×200㎜ 실험체



(f) 300×600×200㎜ 실험체



(g) 300×800×200㎜ 실험체

[그림 3.2] 구석재 실험체 전경 및 전개도

3.5 실험 방법

초음파속도법은 실험체 내부를 전파하는 초음파 전파 시간(T)과 발진자 및 수진자간의 거리에 따른 음속을 측정하여 이 값에 의해 콘크리트의 동적 특성, 강도, 균열 깊이, 내부 결함 등을 추정하는 방법이다.

발진자와 수진자의 배치는 직접법, 사각법, 간접법 등의 종류가 있으며 일반적으로 콘크리트에서는 직접법이 가장 신뢰성이 있는 것으로 알려져 있다.

초음파전달 시간을 측정할 때는 가능한 한 이 배치로 하는 것이 바람직하지만 측정 대상물의 형상에 따라 대칭형 배치가 불가능한 경우에는 다른 배치 방법을 적용한다.

(a) 직접법

(b) 간접법

<사진 3.3> 초음파속도 측정 전경

초음파속도 측정은 두 진자의 밀착도를 높이기 위하여 그리스, 스너그, 겔을 얇게 도포한 후, 발진자와 수진자의 축이 일직선상에 있도록 하여 각 측정점에서 수진자와 발진자를 서로 교대하여 일정한 힘으로 양면을 가압한 후 3회 이상의 측정을 실시하여 그 평균값을 초음파실험의 측정값으로 한다.

3.6 실험 기기

본 실험에 사용될 측정기구는 파괴압축실험은 만능구조실험기(Universal Testing

Machine, U.T.M)가 설치된 실험실에서 행하며, 실험체로 완전 파괴 될 때까지 가력하여 최대 압축강도를 산출한다. 그리고 PUNDIT를 이용하여 석재의 초음파속도를 측정하여 석재의 비파괴 압축강도를 추정한다.

본 실험에 사용된 실험기구는 다음과 같다.

- 만능구조시험기(U.T.M)

(1) 기 기 명 : 만능구조실험기 (Universal Testing Machine)

(2) 제 조 사 : 한국 흥진정밀

(3) 용　　량 : 1 MN

(4) 작　　동 : 유압식

(5) 용　　도 : 압축, 인장, 휨, 전단실험

- PUNDIT

(1) 기 기 명 : PUNDIT

(Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)

(2) 발 명 자 : R. H Elvery (England)

(3) 제 조 사 : 영국 C.N.S Instrument Ltd.

(4) 측정 정도 : ±0.1μsec

(5) 시간 측정 범위 : 0.1μsec~1,000μsec(표준 type)

(6) 전달 능력 : 0~15m (양쪽 표면에서 측정, 횡파 측정인 경우 0~1.5m)

(7) 입력 감도 : 54kHz로서 Signal 100μVolt, Impedence는 2MΩ

(8) 측정 온도 범위 : 0℃~40℃

Ⅳ. 신석재(新石材) 실험 결과

4.1 신석재 접촉재에 따른 실험 결과

신석재 표면 거칠기별 실험체의 그리스, 겔, 스너그 등의 접촉재에 따른 탐촉자 거리별로 간접법 초음파속도 측정 결과는 <표 4.1> 및 [그림 4.1]과 같다.

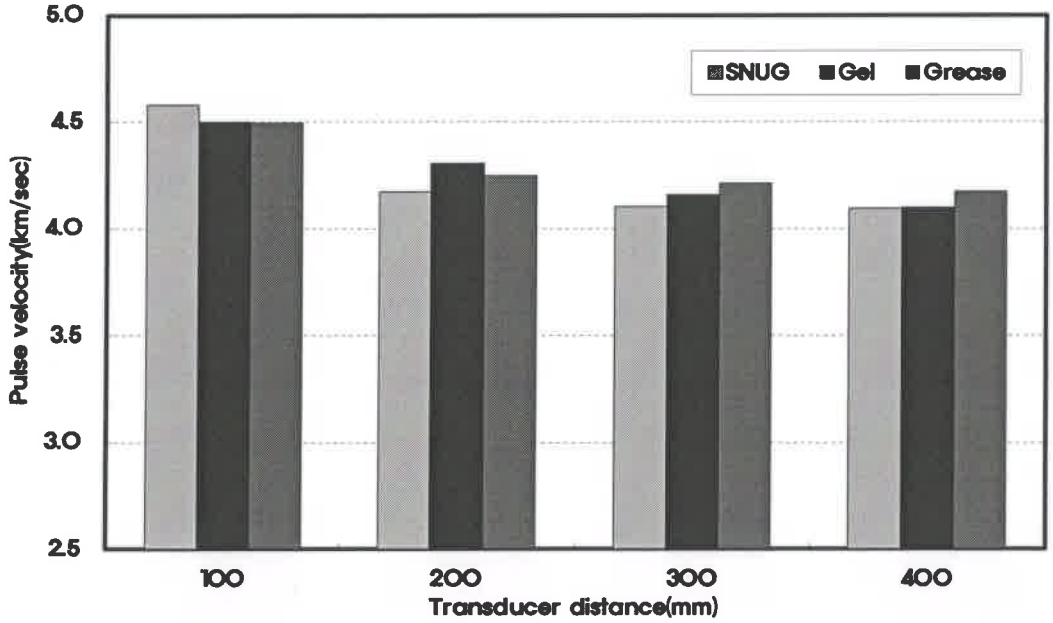
<표 4.1> 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도

표 면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도(km/sec)		
		스너그	겔	그리스
잔다듬	100	4.58	4.50	4.49
	200	4.17	4.30	4.25
	300	4.10	4.16	4.21
	400	4.09	4.10	4.17
거친다듬	100	4.54	4.83	4.81
	200	4.10	3.71	4.32
	300	4.02	3.51	4.15
	400	3.99	3.78	4.06

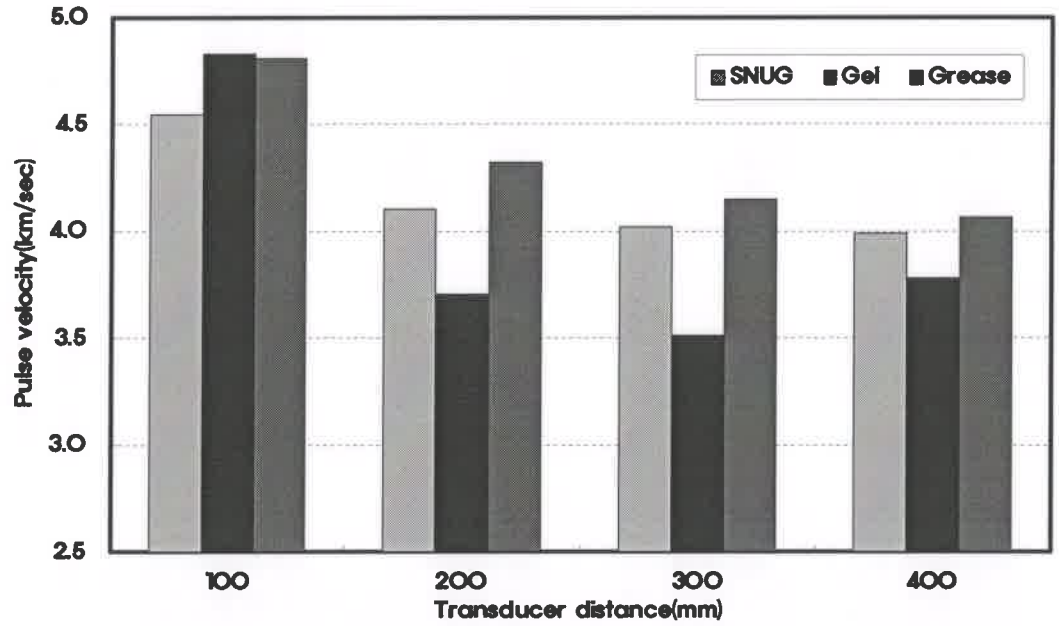
신석재 잔다듬 실험체의 접촉재별 간접법으로 초음파속도를 측정한 결과, 탐촉자 거리별로 스너그는 4.09~4.58km/sec 정도, 그리스의 경우는 4.17~4.49km/sec, 겔의 경우는 4.10~4.50km/sec으로 측정되었으며 접촉재별로 거의 유사한 초음파속도를 보였다.

거친다듬 실험체의 경우 탐촉자 거리별로 그리스는 4.06~4.81km/sec, 겔은 3.51~4.83km/sec, 스너그는 3.99~4.54km/sec 정도로 초음파속도가 측정되었으며 다른 접촉재에 비해 겔은 7~18% 정도 초음파속도가 낮게 나타났으며 그리스와 스너그는 유사한 초음파속도를 보였다.

이는 겔을 표면의 요철이 심한 거친다듬에 사용했을 때 탐촉자와 실험체 표면과의 미끌림 현상과 부재의 표면이 전체적으로 탐촉자와 밀착되지 않고 특정 요철부위만 접촉함으로 인한 것으로 사료된다.



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

[그림 4.1] 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도

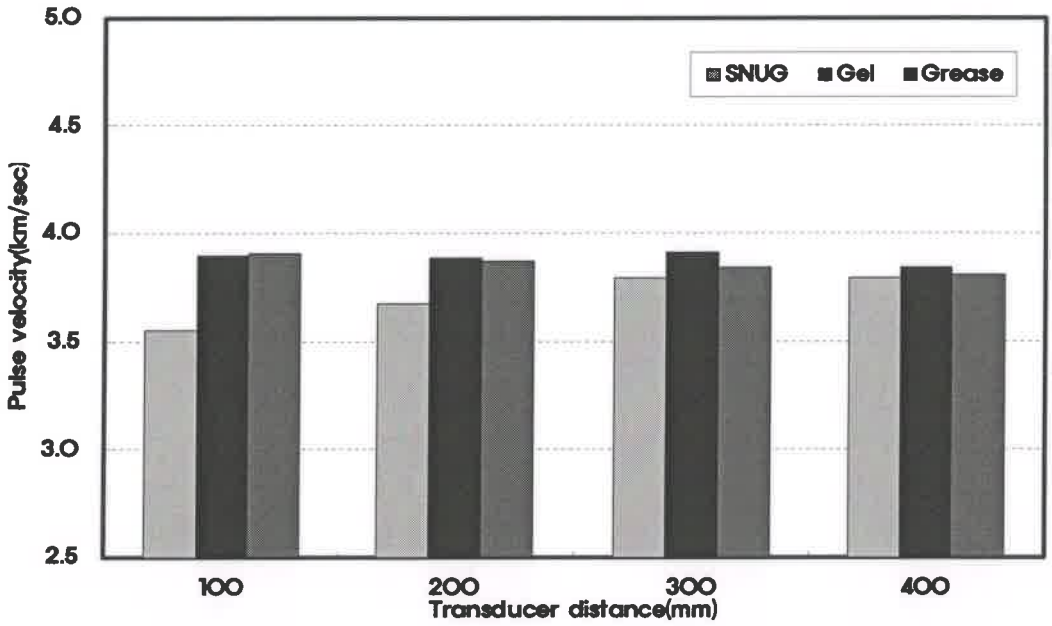
신석재 표면 거칠기별 실험체의 그리스, 겔, 스너그 등의 접촉재에 따른 탐촉자 거리별로 직접법 초음파속도 측정 결과는 <표 4.2> 및 [그림 4.2]와 같다.

<표 4.2> 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도

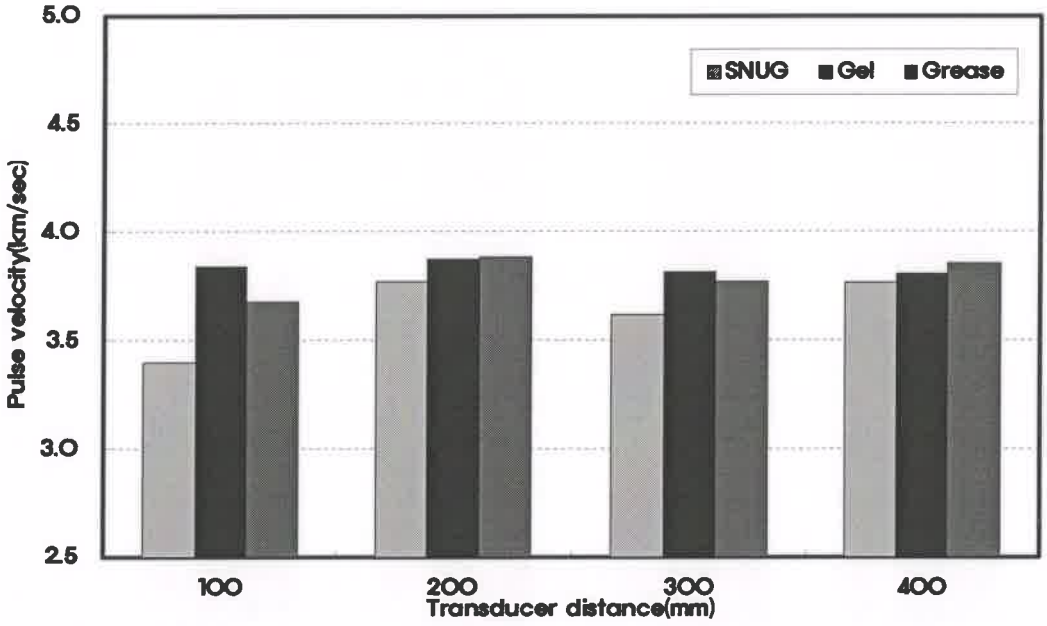
표 면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도(km/sec)		
		스너그	겔	그리스
잔다듬	100	3.55	3.90	3.90
	200	3.68	3.88	3.87
	300	3.79	3.91	3.84
	400	3.79	3.84	3.81
거친다듬	100	3.40	3.84	3.68
	200	3.77	3.87	3.88
	300	3.62	3.81	3.77
	400	3.76	3.81	3.86

신석재 잔다듬 실험체의 접촉재별 직접법으로 초음파속도를 측정한 결과, 탐촉자 거리별로 스너그는 3.55~3.79km/sec 정도, 그리스의 경우는 3.81~3.90km/sec, 겔의 경우는 3.84~3.91km/sec로 측정되었으며 그리스와 겔은 비슷한 초음파속도를 나타냈으나 스너그는 그리스와 겔에 비해 1.3~8.9% 정도 다소 차이를 보이는 경향을 보였다.

거친다듬 실험체의 경우, 스너그는 3.40~3.77km/sec 정도, 그리스는 3.68~3.88km/sec, 겔은 3.81~3.87km/sec 정도로 초음파속도가 측정되었으며 잔다듬 실험체와 마찬가지로 그리스와 겔은 유사한 초음파속도를 나타냈으나 스너그는 경우는 3~12% 정도 초음파속도가 낮게 나타났다. 이는 그리스와 겔과 달리 스너그 패드의 두께와 실험체별 재료적 차이로 인해 초음파속도가 느려져 초음파속도가 차이를 보이는 것으로 나타나 접촉자 거리별로 보정이 필요한 것으로 사료된다.



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

[그림 4.2] 접촉재에 따른 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도

4.2 신석재 탐촉자 거리에 따른 실험 결과

신석재 간접법에 의한 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도에 대비 탐촉자 거리별로 간접법 초음파속도를 비교한 결과는 <표 4.3> 및 [그림 4.3]과 같다.

<표 4.3> 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파 속도 비교 및 보정계수

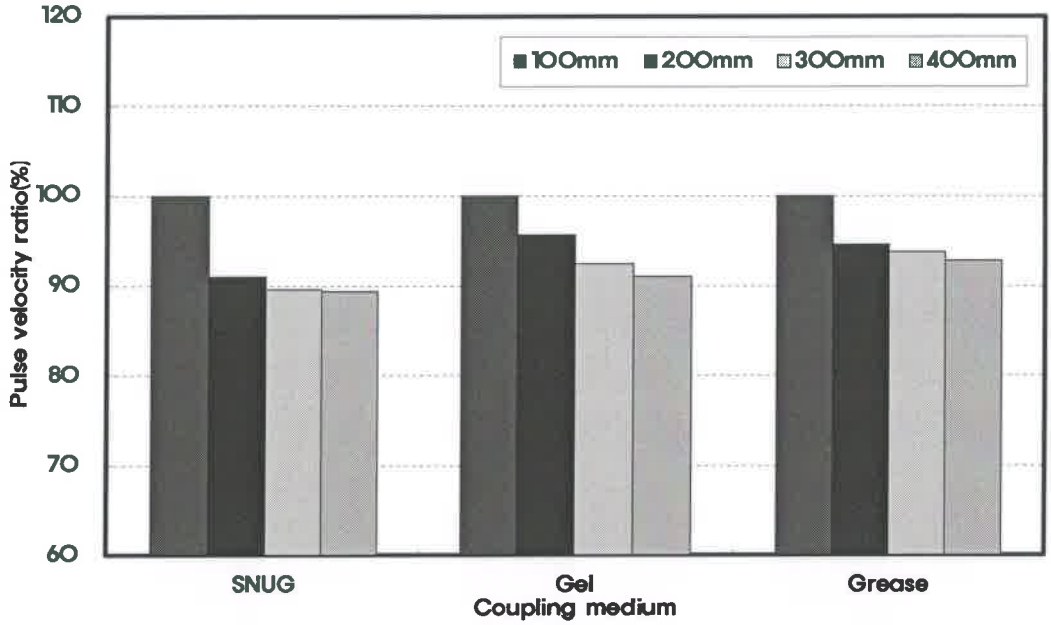
표 면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도비(%)					
		스너그		겔		그리스	
		속도비	보정계수	속도비	보정계수	속도비	보정계수
잔다듬	100	100	1.000	100	1.000	100	1.000
	200	91	1.099	96	1.042	95	1.053
	300	90	1.111	92	1.087	94	1.064
	400	89	1.123	91	1.099	93	1.075
거친다듬	100	100	1.000	100	1.000	100	1.000
	200	90	1.111	77	1.299	90	1.111
	300	89	1.123	73	1.350	86	1.163
	400	88	1.136	78	1.282	84	1.190

잔다듬 실험체의 경우, 탐촉자 거리 100㎜ 초음파 속도에 대한 탐촉자간 거리가 400㎜ 까지 스너그는 9~11% 정도, 그리스는 5~7% 정도, 겔은 4~9% 정도의 차이로 나타내어 탐촉자 거리 100㎜에 비해 90% 이상의 다소 양호한 초음파속도를 보였다.

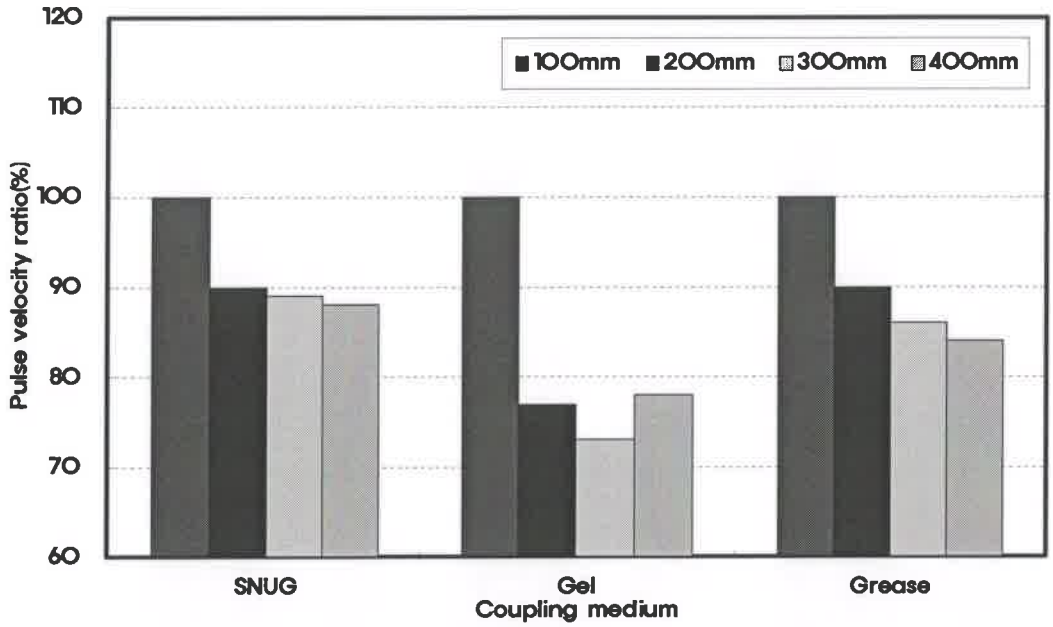
거친다듬 실험체의 경우는 스너그는 10~12% 정도, 그리스는 10~16% 정도, 겔은 22~27% 정도의 차이로 나타내어 초음파속도는 감소하는 경향을 보였으며 겔에서 거리에 따른 초음파속도의 차가 가장 크게 나타났다.

이는 앞의 접촉재 따른 실험 결과와 마찬가지로 겔을 표면의 요철이 심한 거친다듬에 사용했을 때 탐촉자와 실험체 표면과의 미끌림 현상과 부재의 표면이 전체적으로 탐촉자와 밀착되지 않고 특정 요철부위만 접촉함으로 인한 것으로 사료된다.

간접법의 탐촉자 거리별로 초음파속도의 차이에 따라 <표 4.3>과 같이 스너그에서 1.099~1.136의 거리별 보정계수의 적용이 필요한 것으로 사료된다



(a) 잔다듬



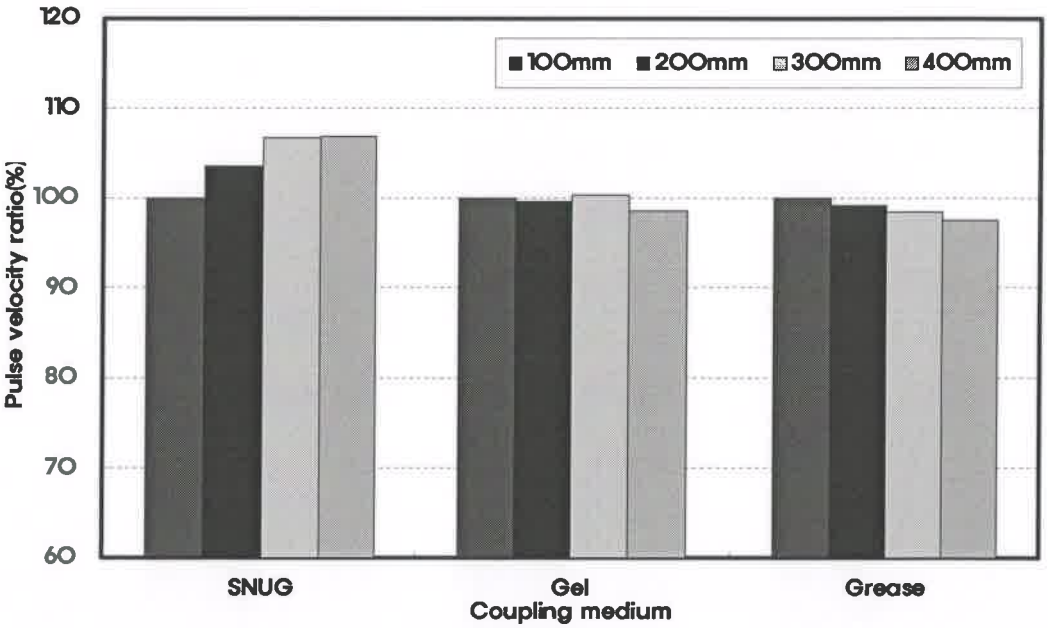
(b) 거친다듬

[그림 4.3] 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파속도 비교

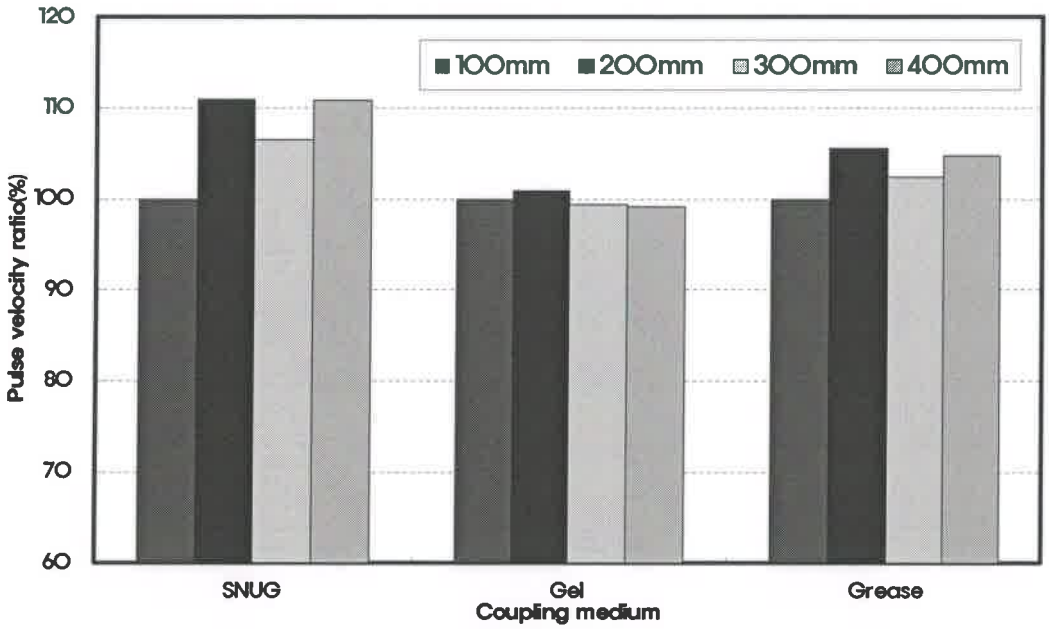
신석재 직접법에 의한 탐촉자 거리 100㎜ 기준 탐촉자 거리별로 초음파속도를 비교한 결과는 <표 4.4> 및 [그림 4.4]와 같다.

<표 4.4> 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파 속도 비교 및 보정계수

표 면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도비(%)					
		스너그		겔		그리스	
		속도비	보정계수	속도비	보정계수	속도비	보정계수
잔다듬	100	100	1.000	100	1.000	100	1.000
	200	103	0.971	100	1.000	99	1.010
	300	107	0.935	100	1.000	98	1.020
	400	107	0.935	99	1.010	98	1.020
거친다듬	100	100	1.000	100	1.000	100	1.000
	200	111	0.901	101	0.990	106	0.945
	300	106	0.943	99	1.010	102	0.980
	400	111	0.901	99	1.010	105	0.952



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

[그림 4.4] 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파속도 비교

잔다듬 실험체의 탐촉자 거리 100㎜ 초음파 속도에 대한 탐촉자간 거리가 400㎜ 까지 스너그는 3~7% 정도 빠른 경향을 보였다. 그리스는 1~2% 정도, 겔은 1% 정도로 탐촉자간 거리 100㎜ 초음파속도에 대비 초음파속도가 감소하는 경향을 보였다.

앞의 간접법에 탐촉자거리별 초음파속도 차이에 비해 직접법 탐촉자 거리별 초음파속도의 차이는 없는 것으로 나타났다.

거친다듬 실험체의 경우, 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도에 대비 스너그은 6~11% 정도, 그리스는 2~6% 정도 차이를 보였으며, 겔의 경우는 앞의 잔다듬 실험체와 마찬가지로 탐촉자 거리별 1% 정도 감소하는 차이를 보였다.

직접법의 탐촉자 거리별 초음파속도의 차이에 따라 <표 4.4>과 같이 스너그에서 0.9~0.971의 거리별 보정계수의 적용이 필요한 것으로 사료된다.

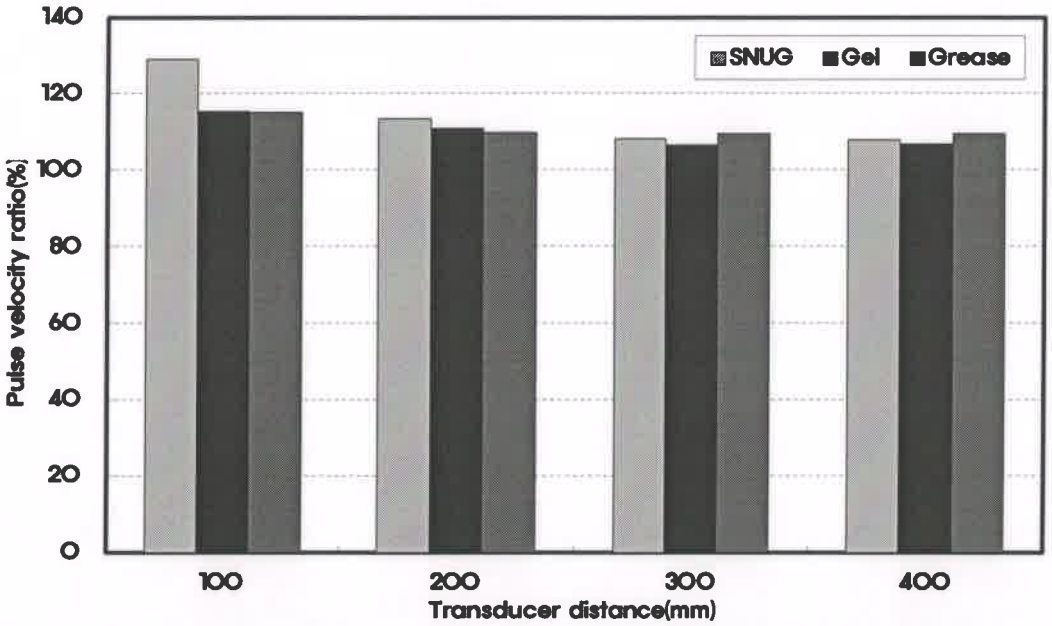
4.3 신석재 탐사방법에 따른 실험 결과

잔다듬 실험체의 간접법과 직접법의 탐사방법에 따른 간접법 초음파속도를 직접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 다음 <표 4.5> 및 [그림 4.5]와 같다.

간접법 초음파속도를 직접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 스너그는 8~29% 정도, 그리스의 경우 10~15%, 겔은 6~15% 정도 탐촉자 거리별로 직접법에 비해 간접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였으며, 그리스와 겔은 거의 비슷한 초음파속도비를 나타냈으나 스너그는 큰 차이를 보였다.

<표 4.5> 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

측정방법	탐촉자간거리 (㎜)	초음파속도 비(%)		
		스너그	겔	그리스
간접법	100	129	115	115
	200	113	111	110
	300	108	106	110
	400	108	107	110



[그림 4.5] 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

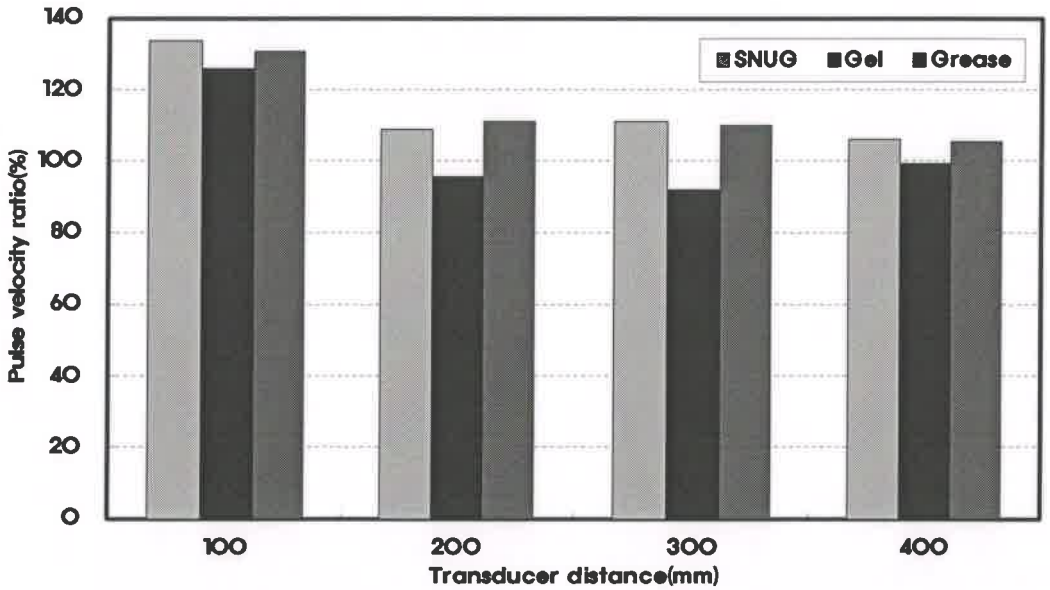
거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 직접법에 대한 간접법의 초음파속도 비교는 다음 <표 4.6> 및 [그림 4.6]과 같다.

간접법 초음파속도를 직접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 그리스의 경우 5~31%, 스너그는 6~34% 정도 탐촉자거리별로 간접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였다. 겔의 경우는 탐촉자거리 100㎜에서는 26% 정도 간접법이 빠른 것으로 나타났으나, 200㎜이후에는 1~8% 정도 직접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였다.

이는 직접법에서 빠른 초음파속도를 나타내는 콘크리트와 달리 암석 내부의 절리나 암(巖)조직의 성상 등 육안으로 구별되지 않는 암석의 특성요인으로 인해 초음파의 전달 경로가 회절된 것으로 추정되며 간접법의 경우 고강도 암석에서는 내부 특성요인의 영향을 적게 받는 것으로 사료된다.

<표 4.6> 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

측정방법	탐촉자간거리 (㎜)	초음파속도 비(%)		
		스너그	겔	그리스
간접법	100	134	126	131
	200	109	96	111
	300	111	92	110
	400	106	99	105



[그림 4.6] 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

4.4 신석재 표면 거칠기에 따른 실험 결과

신석재 거칠기에 따른 초음파속도 비교는 <표 4.7> 및 [그림 4.7]~[그림 4.8]과 같다.

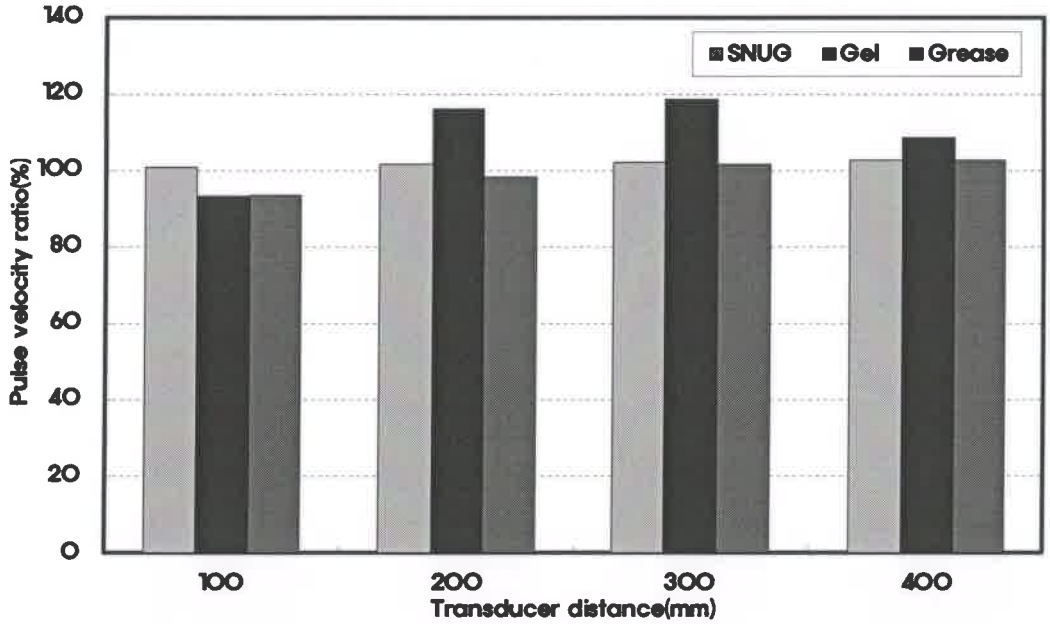
<표 4.7> 신석재 거칠기에 따른 초음파속도 비교

측정방법	탐촉자간 거리 (㎜)	초음파속도 비 (%)		
		그리스	겔	스너그
간접법	100	93.4	93.2	100.8
	200	98.3	116.1	101.6
	300	101.6	118.4	102.1
	400	102.7	108.4	102.6
직접법	100	106.1	101.6	104.5
	200	99.6	100.3	97.4
	300	102.0	102.5	104.8
	400	98.8	101.0	100.8

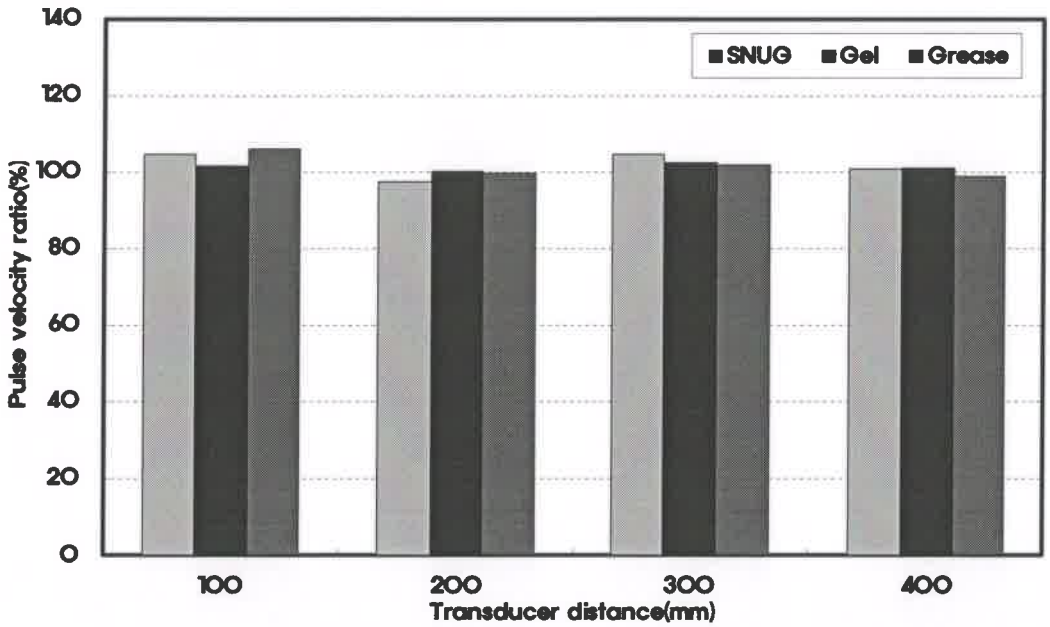
간접법의 잔다듬 실험체의 초음파속도를 거친다듬 실험체의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비의 경우, 스너그는 1~3% 정도, 그리스는 1~7% 정도, 겔은 7~16% 정도의 차이를 보였다.

겔과 달리 그리스와 스너그는 거칠기에 따른 초음파속도의 편차가 적어 석조 문화재 진단시 접촉재로 사용하는 것이 좋을 것으로 사료되나 그리스는 석조 문화재의 오염을 유발시켜 스너그를 접촉재로 사용하는 것이 좋을 것이며 석조 문화재의 신뢰성 있는 강도를 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

직접법의 잔다듬 실험체의 초음파속도에 대한 거친다듬 실험체의 초음파속도 비의 경우, 스너그는 3~5% 정도, 그리스는 2~6% 정도, 겔은 1~3% 정도의 차이를 보였다.



[그림 4.7] 신석재 표면 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 실험 결과



[그림 4.8] 신석재 표면 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 실험 결과

4.5 소 결

신석재에 대한 초음파 속도를 접촉재의 종류, 탐촉자간 거리, 측정방법 등에 따라 초음파 속도를 측정하고 그 자료를 분석하여 얻어진 소결은 다음과 같다

1) 접촉재 종류에 따른 간접법의 초음파 속도는 잔다듬 실험체에서 모든 접촉재가 유사한 것으로 나타났다. 거친다듬 실험체에서는 그리스와 스너그에 비해 겔의 초음파속도가 가장 느린 것으로 나타났다.

2) 스너그는 겔의 경우와 달리 스너그 패드(pad)의 쿠션이 부재 표면의 요철을 메워 탐촉자와 부재의 밀착이 양호하여 탐촉자거리별 초음파속도의 편차가 적은 것으로 판단된다. 그러므로 석조 문화재 진단에서는 오염을 유발시키는 그리스와 표면 요철을 메우는데 한계가 있는 겔에 비해 스너그를 접촉재로 사용하는 것이 신뢰성 있는 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 잔다듬 실험체에서 측정된 초음파 속도는 거친다듬 실험체보다 0.93~1.18배 정도로 빠르게 측정되어, 거친다듬 실험체에 비해 대부분 빠르게 나타났다. 이는 거친다듬 실험체의 표면 요철의 영향으로 초음파 속도가 저하된 것으로 사료된다.

4) 간접법 실험체에서 탐촉자간 거리에 따른 초음파속도는 접촉재 및 거칠기에서 거리가 증가할수록 초음파속도가 저하되는 것으로 나타났다. 직접법 실험체의 경우, 그리스를 접촉재로 사용한 잔다듬 실험체에서는 거리 증가에 따른 초음파속도 또한 저하되는 경향을 보였으나 그 외의 거칠기 및 접촉재에서는 이같은 양상이 나타나지 않아 상관관계가 명확하지 않은 것으로 사료된다.

5) 신석재의 초음파 측정 방법에 따른 초음파 속도는 간접법이 직접법에 비해 잔다듬 실험체에서 6~29% 정도, 거친다듬 실험체에서 5~34% 정도 빠른 것으로 나타났다. 이는 직접법에서 간접법 보다 빠른 초음파속도를 나타내는 콘크리트와 달리 암석내부의 절리나 암(巖)조직의 성상 등 육안으로 구별되지 않는 암석의 특성

요인으로 인해 초음파의 전달 경로가 회절(回折)된 것으로 추정되며 간접법의 경우 신석재인 고강도 암석에서는 내부 특성요인의 영향을 적게 받는 것으로 사료된다.

V. 구석재(舊石材) 실험 결과

5.1 구석재 접촉제에 따른 실험 결과

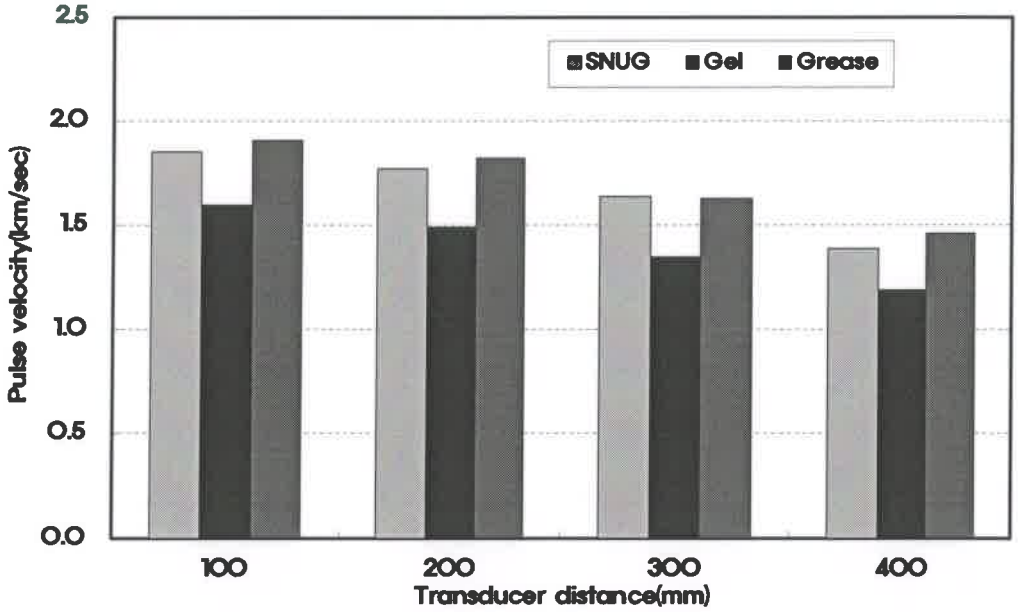
표면거칠기 따른 구석재 실험체를 그리스, 겔, 스너그 등의 접촉제별로 간접법으로 초음파속도 측정 결과는 다음 <표 5.1> 및 [그림 5.1]과 같다.

<표 5.1> 구석재 간접법에 의한 접촉제별 초음파속도 실험 결과

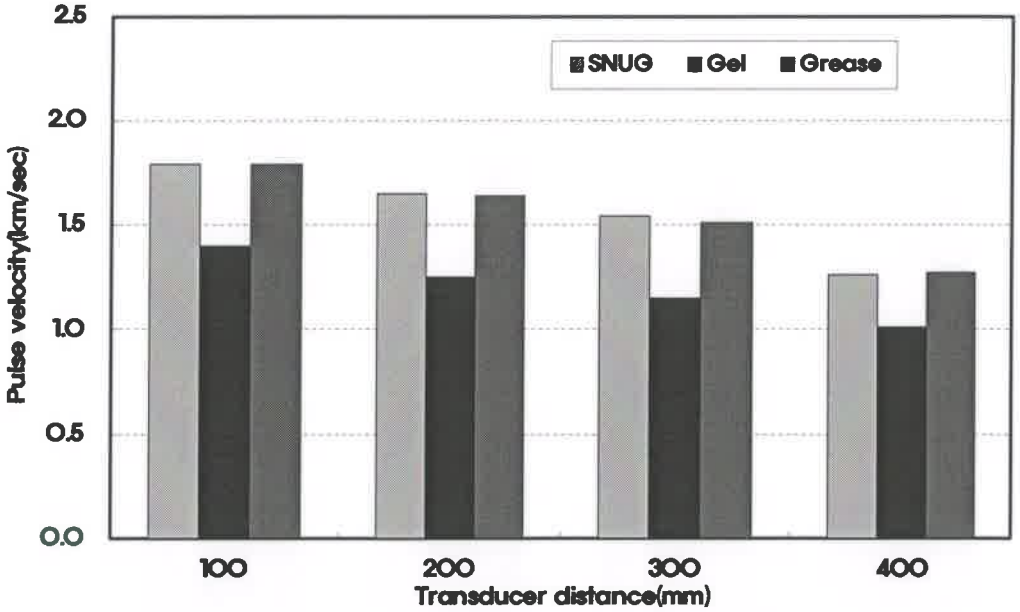
표면 거칠기	탐촉자간 거리 (㎜)	초음파속도(㎞/sec)		
		스너그	겔	그리스
잔다듬	100	1.85	1.60	1.91
	200	1.77	1.49	1.82
	300	1.64	1.35	1.63
	400	1.39	1.19	1.46
거친다듬	100	1.79	1.40	1.79
	200	1.65	1.25	1.64
	300	1.54	1.15	1.51
	400	1.26	1.01	1.27

구석재 잔다듬 실험체의 간접법으로 접촉제별로 초음파속도를 측정한 결과, 탐촉자 거리별로 스너그의 경우는 1.39~1.85km/sec, 겔의 경우는 1.19~1.60km/sec, 그리스의 경우는 1.46~1.91km/sec 정도로 초음파속도가 측정되었으며 스너그와 그리스는 유사한 초음파속도를 나타냈으나 겔은 스너그와 13.5~17.7% 정도, 그리스와 16.2~18.5% 정도의 차이를 보였다.

거친다듬 실험체의 경우 스너그의 경우는 1.26~1.79km/sec, 겔의 경우는 1.01~1.40km/sec, 그리스의 경우는 1.27~1.79km/sec 정도 초음파속도가 측정되었다. 앞의 잔다듬 실험체와 마찬가지로 겔은 스너그와 19.8~25.3% 정도, 그리스와 20.5~23.8% 정도의 차이를 보였으며 스너그와 그리스는 유사한 초음파속도를 나타냈다.



(a) 잔다듬 실험체



(b) 거친다듬 실험체

[그림 5.1] 구석재 간접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과

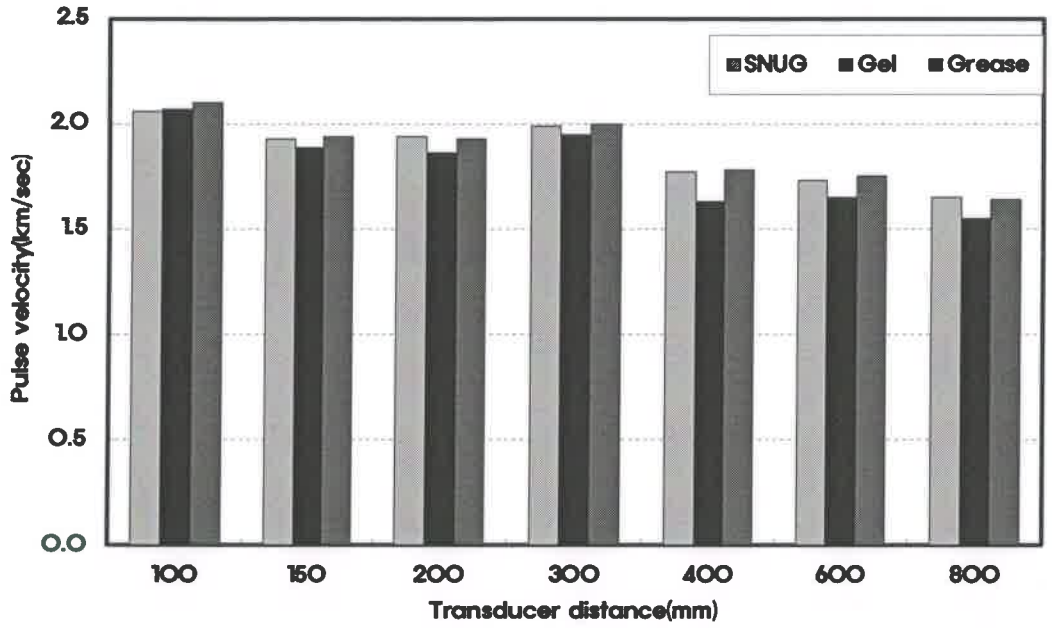
구석재 직접법에 의한 표면거칠기에 따른 실험체의 그리스, 겔, 스너그 등의 접촉재별 초음파속도 측정 결과는 다음 <표 5.2> 및 [그림 5.2]와 같다.

구석재 잔다듬 실험체의 직접법으로 접촉재별로 초음파속도를 측정한 결과, 탐촉자 거리별로 스너그의 경우는 1.65~2.06km/sec, 겔의 경우는 1.55~2.07km/sec, 그리스의 경우는 1.64~2.10km/sec 정도로 간접법과 달리 접촉재별로 유사한 초음파속도를 보였다.

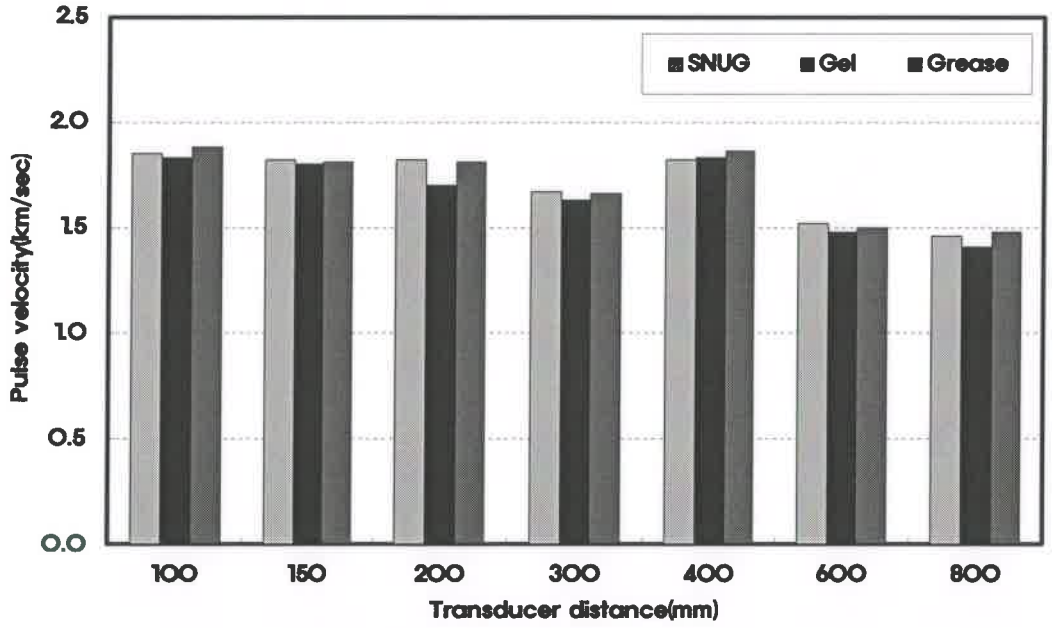
<표 5.2> 구석재 직접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과

표면 거칠기	탐촉자간 거리 (㎜)	초음파속도(km/sec)		
		스너그	겔	그리스
잔다듬	100	2.06	2.07	2.10
	150	1.93	1.89	1.94
	200	1.94	1.86	1.93
	300	1.99	1.95	2.00
	400	1.77	1.63	1.78
	600	1.73	1.65	1.75
	800	1.65	1.55	1.64
거친다듬	100	1.85	1.83	1.88
	150	1.82	1.80	1.81
	200	1.82	1.70	1.81
	300	1.67	1.63	1.66
	400	1.82	1.83	1.86
	600	1.52	1.48	1.50
	800	1.46	1.41	1.48

구석재 거친다듬 실험체의 직접법으로 접촉재별로 초음파속도를 측정한 결과, 스너그의 경우는 1.46~1.85km/sec, 겔의 경우는 1.41~1.83km/sec, 그리스의 경우는 1.48~1.88km/sec 정도 초음파속도가 측정되었다. 앞의 거친다듬 실험체와 마찬가지로 접촉재별로 유사한 초음파속도를 보였다.



(a) 잔다듬 실험체



(b) 거친다듬 실험체

[그림 5.2] 구석재 직접법에 의한 접촉재별 초음파속도 실험 결과

5.2 구석재 탐촉자 거리에 따른 실험 결과

구석재 간접법에 의한 측정된 탐촉자 거리별 초음파속도를 탐촉자 거리 100㎜ 대비 탐촉자 200㎜, 300㎜, 400㎜의 초음파속도를 비교한 결과는 <표 5.3> 및 [그림 5.3]과 같다.

<표 5.3> 구석재 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파 속도 비교 및 보정계수

표면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도 비(%)					
		스너그		겔		그리스	
		속도비	보정계수	속도비	보정계수	속도비	보정계수
잔다듬	100	100.0	1.000	100.0	1.000	100.0	1.000
	200	92.2	1.085	89.3	1.120	91.6	1.092
	300	86.0	1.163	82.1	1.218	84.4	1.185
	400	70.6	1.416	72.1	1.387	70.9	1.410
거친다듬	100	100.0	1.000	100.0	1.000	100.0	1.000
	200	95.7	1.045	93.1	0.074	95.3	1.049
	300	88.6	1.155	84.4	1.185	85.3	1.172
	400	75.1	1.332	74.4	1.344	76.4	1.139

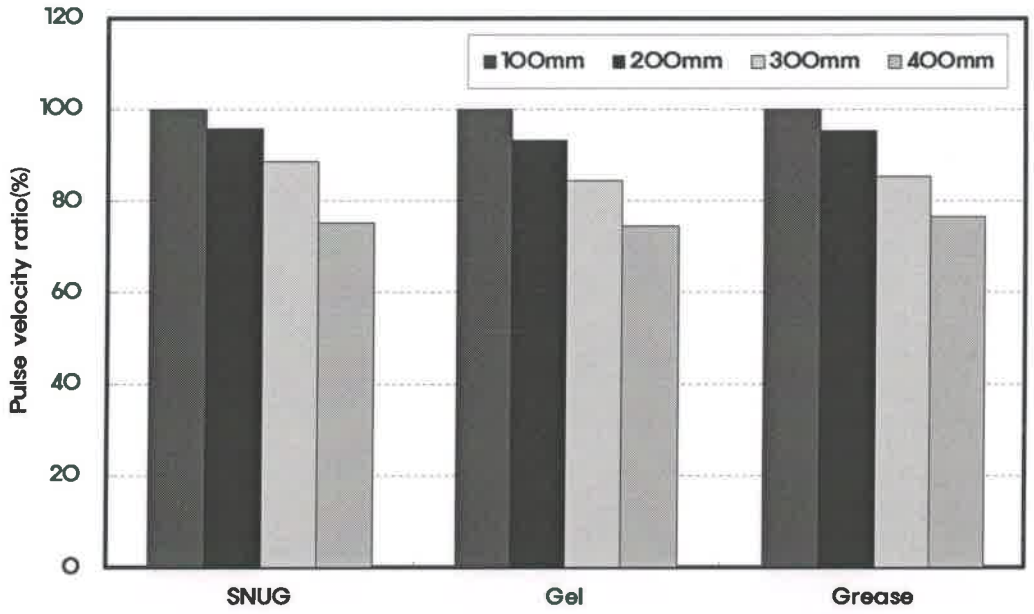
구석재 잔다듬 실험체의 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 스너그는 7.80~29.4%, 겔은 10.7~27.9%, 그리스는 8.4~29.1% 정도의 초음파속도 저하를 나타냈다.

접촉재별로 유사하게 초음파속도가 감소하는 경향을 보였으나 다른 접촉재에 비해 겔은 2.1~4.3% 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

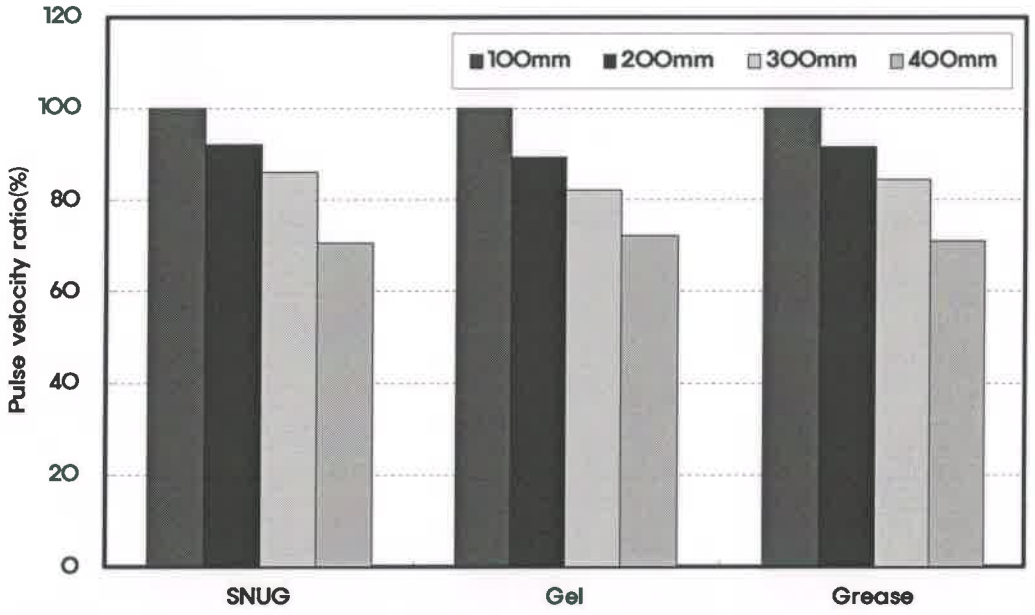
거친다듬 실험체의 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 스너그는 4.3~24.9%, 겔은 6.9~25.6%, 그리스는 4.71~23.6% 정도의 초음파속도 저하를 나타냈다.

잔다듬 실험체와 마찬가지로 거친다듬 실험체도 접촉재별로 탐촉자 거리가 증가할수록 유사하게 초음파속도가 감소하는 경향을 보였으나 겔은 1.6~4.3% 정도의 차이를 보였다.

간접법의 탐촉자 거리별 초음파속도의 차이에 따라 <표 5.3>과 같이 스너그에서 1.045~1.416, 겔에서 1.074~1.387, 그리스에서 1.049~1.410의 보정계수의 적용이 필요한 것으로 사료된다.



(a) 잔다듬 실험체



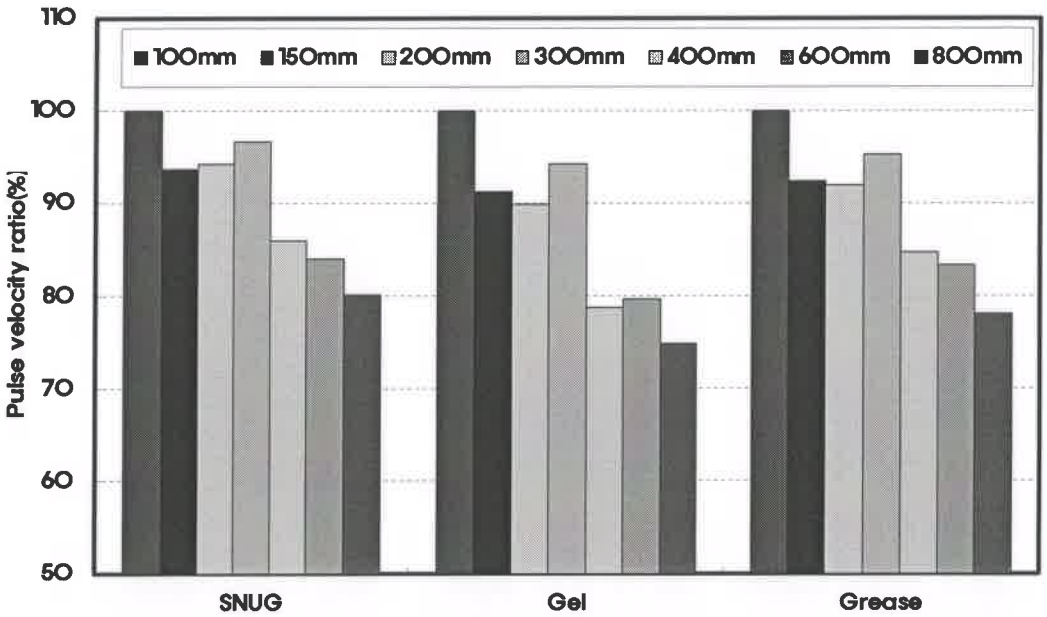
(b) 거친다듬 실험체

[그림 5.3] 구석재 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파속도 비교

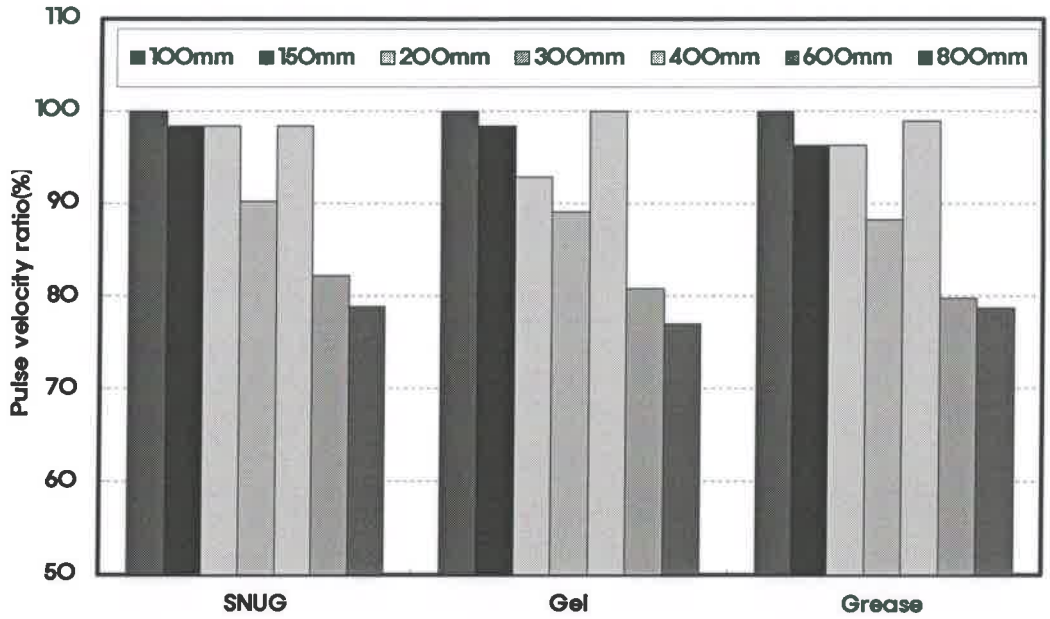
구석재 직접법에 의한 측정된 탐촉자 거리별 초음파속도를 탐촉자 거리 100㎜ 대비 탐촉자 150~800㎜의 초음파속도를 비교한 결과는 <표 5.4> 및 [그림 5.4]와 같다.

<표 5.4> 구석재 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파 속도 비교 및 보정계수

표면 거칠기	탐촉자간 거리(㎜)	초음파속도비(%)					
		스너그		겔		그리스	
		속도비	보정계수	속도비	보정계수	속도비	보정계수
잔다듬	100	100.0	1.000	100.0	1.000	100.0	1.000
	150	93.7	1.067	91.3	1.095	92.4	1.082
	200	94.2	1.062	89.9	1.112	91.9	1.088
	300	97.6	1.025	94.2	1.062	94.8	1.055
	400	85.9	1.164	78.7	1.271	84.8	1.179
	600	84.0	1.190	79.7	1.255	83.3	1.200
	800	80.1	1.248	74.9	1.335	78.1	1.280
거친다듬	100	100.0	1.000	100.0	1.000	100.0	1..000
	150	98.4	1.016	98.4	1.016	96.3	1.038
	200	98.4	1.016	92.9	1.076	96.3	1.038
	300	90.3	1.107	89.1	1.122	88.3	1.133
	400	98.4	1.016	100.0	1.000	98.9	1.011
	600	82.2	1.217	80.9	1.236	79.8	1.253
	800	78.9	1.267	77.0	1.299	78.7	1.271



(a) 잔다듬 실험체



(b) 거친다듬 실험체

[그림 5.4] 구석재 탐촉자 거리에 따른 직접법 초음파속도 비교

구석재 잔다듬 실험체의 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 탐촉자 거리별로 스너그는 6.3~19.91%, 겔은 8.71~25.1%, 그리스는 7.61~21.9% 정도의 초음파속도 저하를 나타냈으며 그리스와 스너그 보다 겔이 탐촉자거리에 따른 초음파속도가 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다.

스너그와 그리스는 탐촉자 거리 300㎜ 이하에서는 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 90% 이상의 초음파속도를 나타냈으나 탐촉자 거리 400~600㎜에서는 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 85% 정도, 탐촉자 거리 800㎜에서는 80% 이하의 초음파속도를 나타내 직접법으로 석재 초음파속도를 측정시 탐촉자 거리 300㎜ 이하 초음파속도를 측정하는 것이 보다 정확한 초음파속도를 측정을 할 수 있을 것으로 사료된다.

구석재 거친다듬 실험체 경우, 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 탐촉자 거리별로 스너그는 1.6~21.1%, 겔은 1.6~23.0%, 그리스는 1.1~21.3% 정도의 초음파속도 저하를 나타냈다.

탐촉자 거리 400㎜는 탐촉자 거리 300㎜에 비해 초음파속도가 증가하는 경향을 보였으며 이는 직접법 실험체 두께 400㎜ 실험체가 다른 실험체에 비해 풍화가 덜 진행되어 초음파속도가 증가한 것으로 사료된다.

또한 스너그와 그리스는 탐촉자 거리 400㎜ 이하에서는 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 90% 이상의 초음파속도를 나타냈으나 탐촉자 거리 400~600㎜에서는 탐촉자 거리 100㎜ 초음파속도 대비 85% 정도, 탐촉자 거리 800㎜에서는 80% 이하의 초음파속도를 나타냈다.

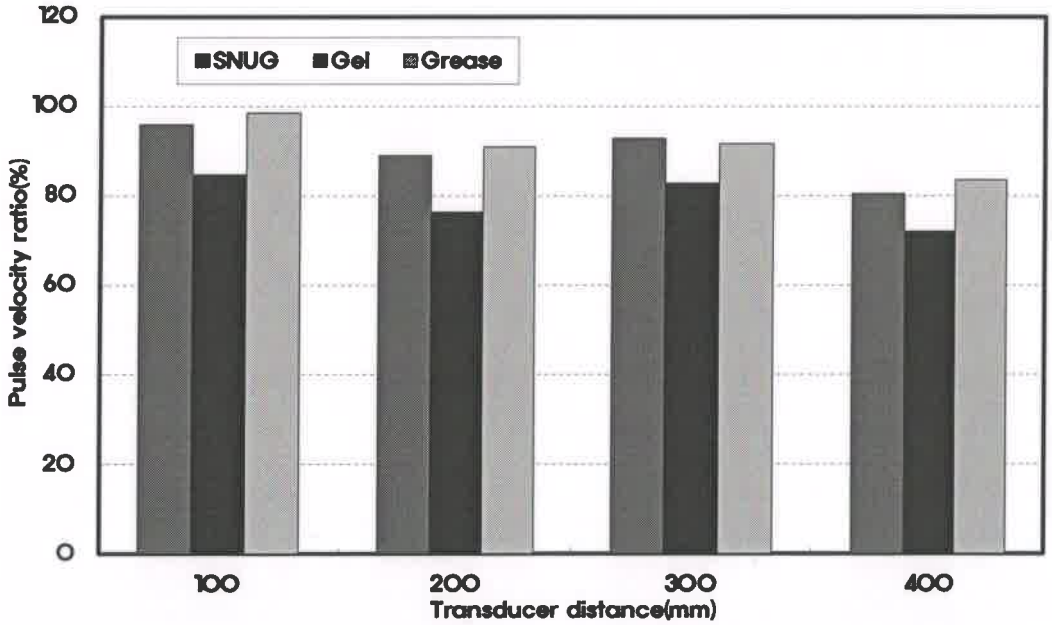
직접법의 탐촉자 거리별 초음파속도의 차이에 따라 <표 5.4>와 같이 스너그에서 1.016~1.267, 겔에서 1.016~1.335, 그리스에서 1.011~1.280의 보정계수의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

5.3 구석재 탐사방법에 따른 실험 결과

구석재 잔다듬 실험체의 간접법과 직접법의 탐사방법에 따라 초음파속도를 측정하여 간접법의 초음파속도에 대한 직접법의 초음파속도 비교는 다음 <표 5.5> 및 [그림 5.5]와 같다.

<표 5.5> 구석재 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

탐사방법	탐촉자간거리 (㎜)	초음파속도 비(%)		
		스너그	겔	그리스
간접법	100	96	85	98
	200	89	76	91
	300	93	83	92
	400	80	72	83



[그림 5.5] 구석재 잔다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

잔다듬 실험체의 간접법 초음파속도를 직접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 스너그는 4~20% 정도, 겔은 15~28% 정도, 그리스는 2~17% 정도 탐촉자

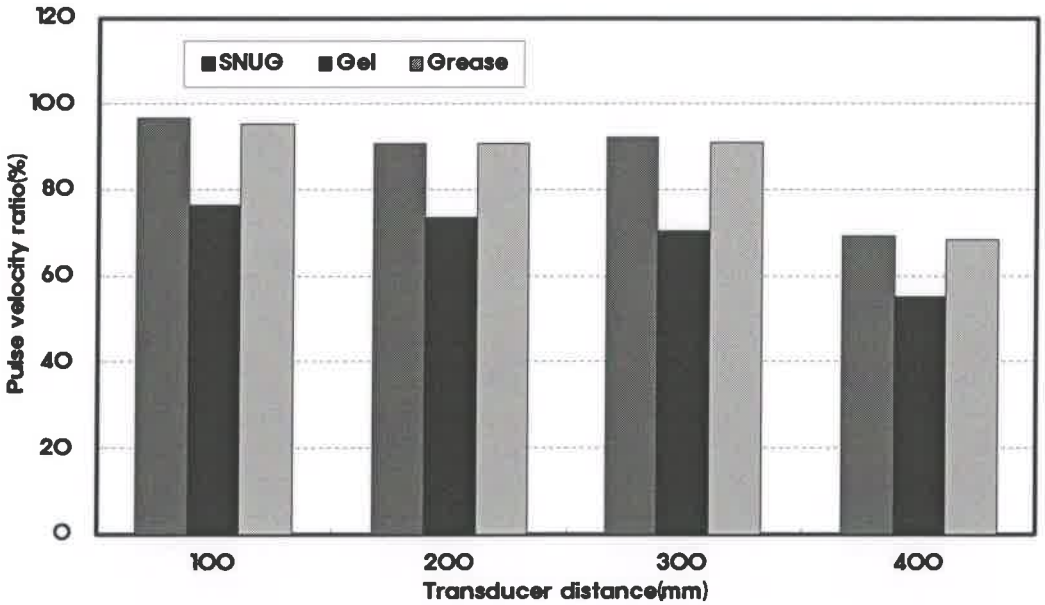
거리별로 간접법에 비해 직접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였으며, 스너그와 그리스는 거의 유사한 초음파속도비를 나타냈으나 겔은 큰 차이를 보였다.

4장 신석재의 초음파속도 탐상방법에 따른 실험 결과와 달리 직접법이 간접법보다 초음파속도가 빠른 이유는 구석재는 풍화로 인한 암석의 강도저하와 내부의 특성요인으로 인해 간접법에서 초음파의 전달 경로가 회절된 것으로 추정된다.

구석재 거친다듬 실험체의 간접법과 직접법의 탐사방법에 따라 초음파속도를 측정하여 간접법의 초음파속도에 대한 직접법의 초음파속도 비교는 다음 <표 5.6> 및 [그림 5.6]과 같다.

<표 5.6> 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

탐사방법	탐촉자간거리 (㎜)	초음파속도 비(%)		
		스너그	겔	그리스
간접법	100	97	77	95
	200	91	74	91
	300	92	71	91
	400	69	55	68



[그림 5.6] 구석재 거친다듬 실험체의 탐사방법에 따른 초음파속도 비교

거친다듬 실험체의 간접법 초음파속도를 직접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도비는 스너그는 3~31% 정도, 겔은 23~45% 정도, 그리스는 5~32% 정도의 차이가 나타났다.

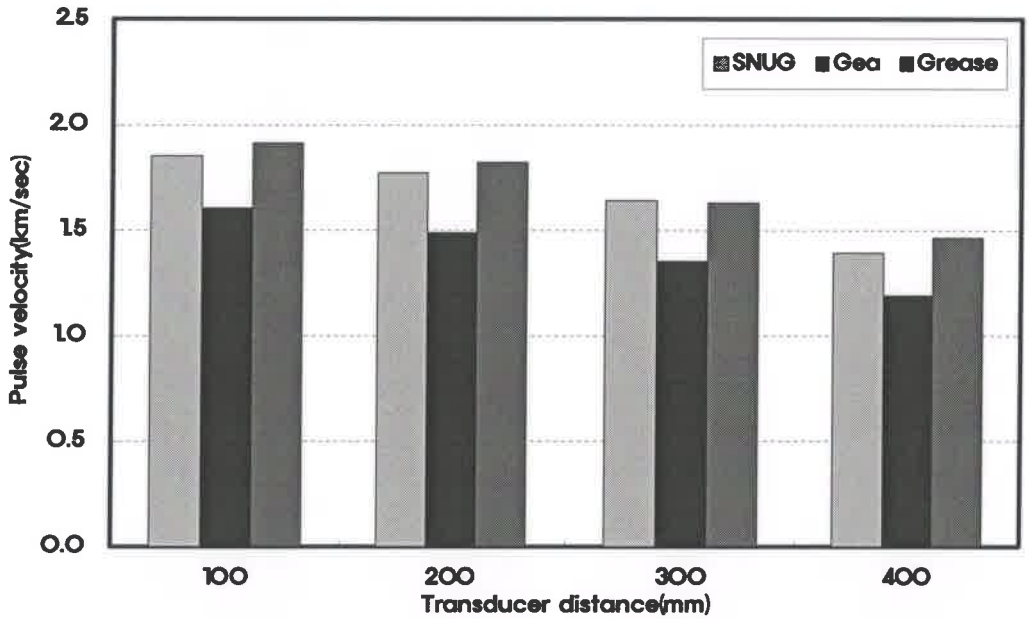
잔다듬 실험체의 비해 거친다듬은 표면 요철에 의해 간접법 초음파속도와 직접법의 초음파속도 차이가 크게 나타났으며 탐촉자 거리별로 간접법에 비해 직접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였으며, 스너그와 그리스는 거의 유사한 초음파속도비를 나타냈으나 겔은 큰 차이를 보였다.

5.4 구석재 표면 거칠기에 따른 실험 결과

구석재 거칠기에 따른 간접법의 초음파속도 실험 결과는 <표 5.7> 및 [그림 5.7]과 같다.

<표 5.7> 구석재 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 비교

접촉재	탐촉자 거리별 초음파속도비(%)			
	100㎜	200㎜	300㎜	400㎜
스너그	103.3	107.3	106.5	110.1
겔	114.4	119.2	117.4	117.8
그리스	107.1	111.0	107.9	115.0



[그림 5.7] 구석재 표면 거칠기에 따른 간접법 초음파속도 실험 결과

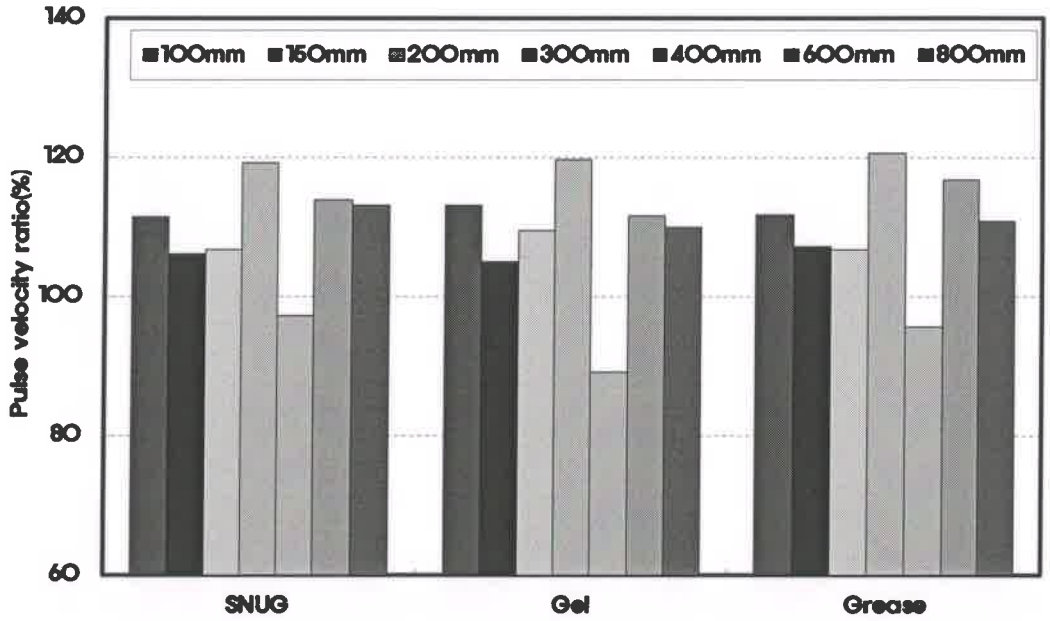
잔다듬 실험체의 초음파속도를 거친다듬 실험체의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비의 경우, 스너그는 3~10% 정도, 겔은 14~19% 정도, 그리스는 7~15% 정도의 차이를 보였다.

4장 신석재 실험 결과와 마찬가지로 스너그와 그리스는 겔과 달리 거칠기에 따른 초음파속도의 편차가 적어 초음파속도 측정시 스너그를 사용함으로써 보다 정확한 초음파속도를 측정과 초음파속도 측정시 발생할 수 있는 문화재 표면 오염 유발을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

구석재 거칠기에 따른 직접법의 초음파속도 실험 결과는 <표 5.8> 및 [그림 5.8]과 같으며 잔다듬 실험체의 초음파속도를 거친다듬 실험체의 초음파속도 비의 경우, 스너그는 3~20% 정도, 겔은 5~20% 정도, 그리스는 4~20% 정도의 차이를 보였다.

<표 5.8> 구석재 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 비교

탐촉자간 거리 (㎜)	초음파속도비(%)		
	스너그	겔	그리스
100	111.4	113.1	111.7
150	106.0	105.0	107.2
200	106.6	109.4	106.6
300	120.4	119.6	119.9
400	97.3	89.1	95.7
600	113.8	111.5	116.7
800	113.0	109.9	110.8



[그림 5.8] 구석재 거칠기에 따른 직접법 초음파속도 비교

5.5 소 결

구석재에 대한 초음파속도를 접촉재의 종류, 탐촉자간 거리, 측정방법 등에 따라 초음파 속도를 측정하여 그 자료를 분석하여 얻어진 소결은 다음과 같다.

1) 접촉재 종류에 따른 간접법 초음파속도를 측정한 결과, 스너그와 그리스는 유사한 초음파속도를 나타냈으나 겔은 13.5~23.8% 정도 차이를 보였다. 직접법에서 초음파속도는 접촉재별로 큰 차이를 보이지 않았다.

2) 탐촉자 거리에 따른 간접법 초음파속도 측정 결과, 탐촉자 거리 100㎜에서 측정된 초음파속도에 비해 탐촉자 거리 200㎜에서는 4.3~10.7% 정도, 탐촉자 거리 300㎜에서는 11.4~17.9% 정도, 탐촉자 거리 400㎜에서는 13.6~29.4% 정도의 초음파속도의 저하를 보여 간접법으로 초음파 속도를 측정할 경우 탐촉자 거리를 200㎜ 이하에서 측정하는 것이 보다 정확한 초음파속도를 측정할 수 있을 것으로 사료된다.

탐촉자 거리에 따른 직접법 경우는 탐촉자 거리 300㎜ 까지는 탐촉자 거리 100㎜에서 측정된 초음파속도 대비 10% 이하의 초음파 속도 저하를 보여 직접법으로 초음파 속도를 측정할 경우 탐촉자 거리를 300㎜ 이하에서 측정하는 것이 보다 정확한 초음파속도를 측정할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 초음파 탐사 방법에 따른 초음파속도는 신석재 실험체와 달리 잔다듬 실험체에서는 2~28% 정도, 거친다듬 실험체에서는 3~45% 정도 직접법에 비해 간접법에서 초음파 속도의 저하를 나타냈다. 이는 신석재와 달리 구석재는 표면 풍화에 따른 강도저하로 인해 간접법의 초음파가 회절됨으로써 직접법에서 간접법의 초음파속도 보다 빠른 것으로 사료된다.

4) 석재 표면 거칠기에 다른 초음파속도는 신석재와 마찬가지로 스너그에서 겔보다 거칠기에 따른 초음파속도의 차이가 비교적 적은 것으로 나타나 초음파속도 측정시 접촉재로 스너그를 사용하면 문화재 표면 오염 방지 및 정확한 초음파속도를 측정을 할 수 있을 것으로 사료된다.

Ⅵ. 석재 비파괴 추정식 제안과 비교

석재 및 콘크리트 강도 추정에 있어서 압축강도와 반발경도, 초음파속도간의 함수관계를 규명하는 것은 보다 정확한 강도 추정을 위해 무엇보다 중요하다.

이러한 변수들 중 다른 변수들에 의해 영향을 받는 변수를 종속변수(dependent variable) 또는 반응 변수(response variable)라 하고, 이러한 종속변수에 영향을 주는 변수를 독립변수(independent variable)라 하며, 이러한 변수간의 함수관계를 통계적으로 분석하는 방법을 회귀분석(回歸分析)이라 한다.

일반적으로 회귀분석은 한 개뿐만이 아닌 여러 독립변수와 한 개의 종속변수 사이를 규명하는데 주로 사용된다.

주로 종속변수는 독립변수의 변화에 의하여 변하게 되므로 이를 회귀분석 할 때에는 신뢰성 있는 독립변수들을 이용하여야 신뢰성을 확보할 수 있다.

한 개의 독립변수와 종속변수의 관계분석을 단순회귀분석(simple regression analysis)이라 하며, 두 개 이상의 독립변수가 사용되는 선형회귀분석을 중선형회귀분석(multiple linear regression analysis)이라 부르며, 간단히 중회귀분석(multiple regression analysis)이라 한다.

본 연구에서는 석재 강도 추정식의 신뢰성을 확보하고 보다 정확한 추정식을 결정하기 위하여, 각 석재의 거칠기별, 탐촉자거리별, 접촉재별로 석재 초음파속도를 SPSS(Statistical Package for the Social Science)win.(Windows) 10.0 통계분석 프로그램을 이용하여 단순회귀 및 중회귀분석을 실시하여 상관계수(CR, coefficient of coreation) 및 결정계수(R^2, coefficient of determination) 등을 구하였다.

6.1 석재 표면 거칠기에 따른 추정식 제안

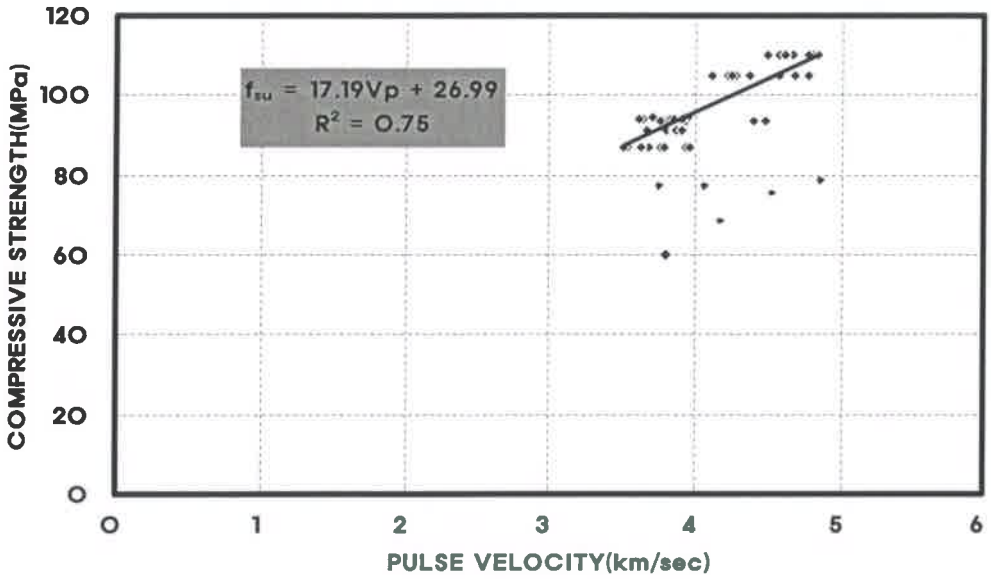
신석재 실험체별로 측정한 초음파속도와 파괴압축강도에 대한 회귀분석 결과는 다음 <표 6.1> 및 [그림 6.1]과 같다.

잔다듬 실험체의 결정계수는 75%, 거친다듬 실험체의 결정계수는 73%로 나타났다.

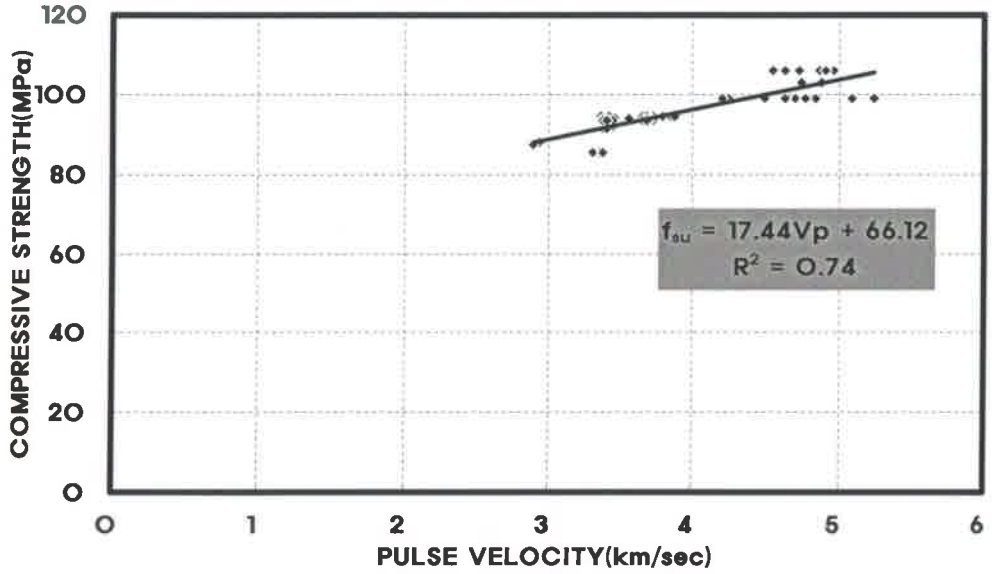
추정식의 신뢰성을 나타내는 결정계수가 잔다듬 실험체에 비해 거친다듬 실험체에서 낮게 나타난 것은 석재 표면의 심한 요철로 인하여 초음파속도와 파괴압축강도간에 상관성이 다소 저하되어 결정계수가 낮은 경향을 보인 것으로 사료된다.

<표 6.1> 신석재 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식

구 분	표면 거칠기	추정식	결정계수(R^2)
신석재	잔다듬	f_{su} = 17.19×Vp+26.99	0.75
	거친다듬	f_{su} = 17.44×Vp+66.12	0.74



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

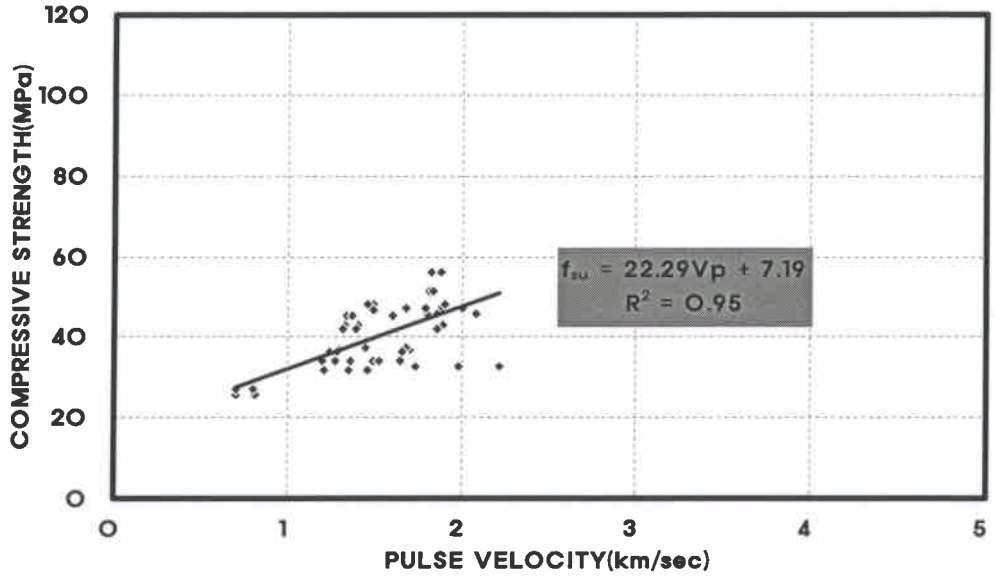
[그림 6.1] 신석재 거칠기별 초음파속도에 의한 강도 추정식

구석재 실험체별로 측정한 초음파속도와 파괴압축강도에 대한 회귀분석 결과는 다음 <표 6.2> 및 [그림 6.2]와 같다.

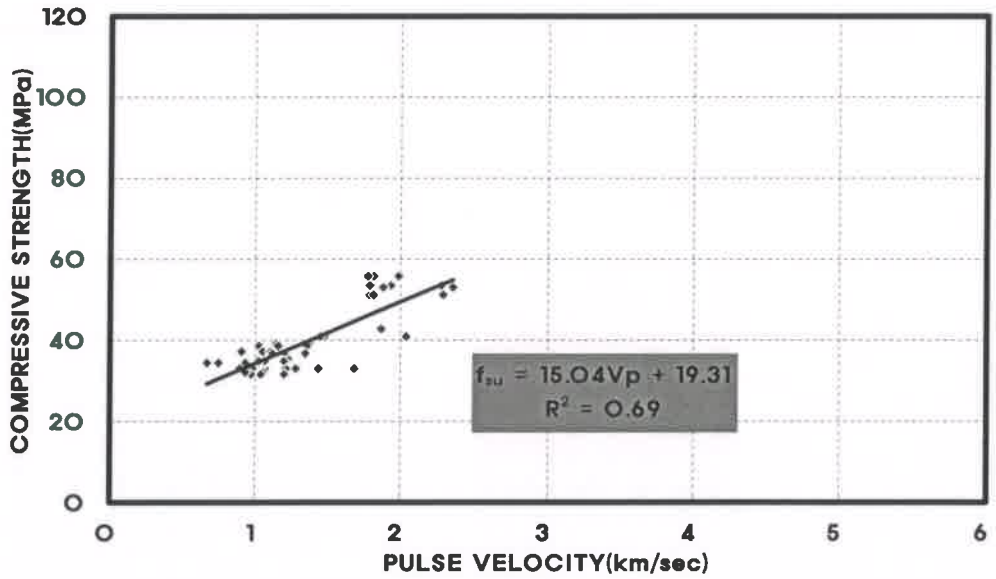
잔다듬 실험체의 결정계수는 95%, 거친다듬 실험체의 결정계수는 69%로 나타났다.

<표 6.2> 구석재 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식

구 분	표면 거칠기	추정식	결정계수(R^2)
구석재	잔다듬	f_{su} = 22.29×Vp+7.19	0.95
	거친다듬	f_{su} = 15.04×Vp+19.31	0.69



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

[그림 6.2] 구석재 거칠기별 초음파속도에 의한 강도 추정식

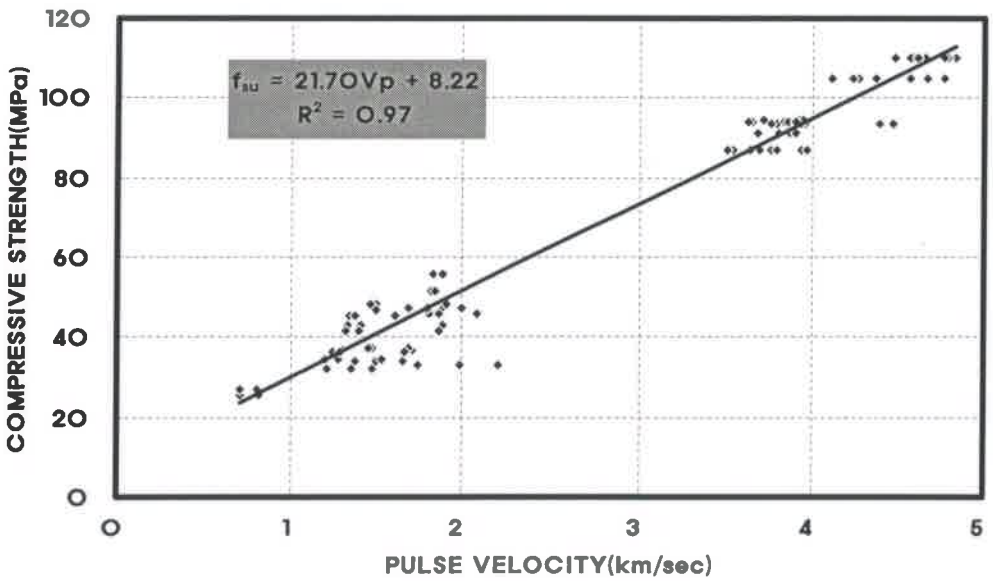
신석재와 구석재 실험체별로 측정한 초음파속도와 파괴압축강도에 대한 회귀분석 결과는 다음 <표 6.3> 및 [그림 6.3]과 같다.

잔다듬 실험체의 결정계수는 97%, 거친다듬 실험체의 결정계수 92% 정도로 나타났으며 앞의 신석재와 구석재 회귀분석보다 결정계수가 높게 나타났다.

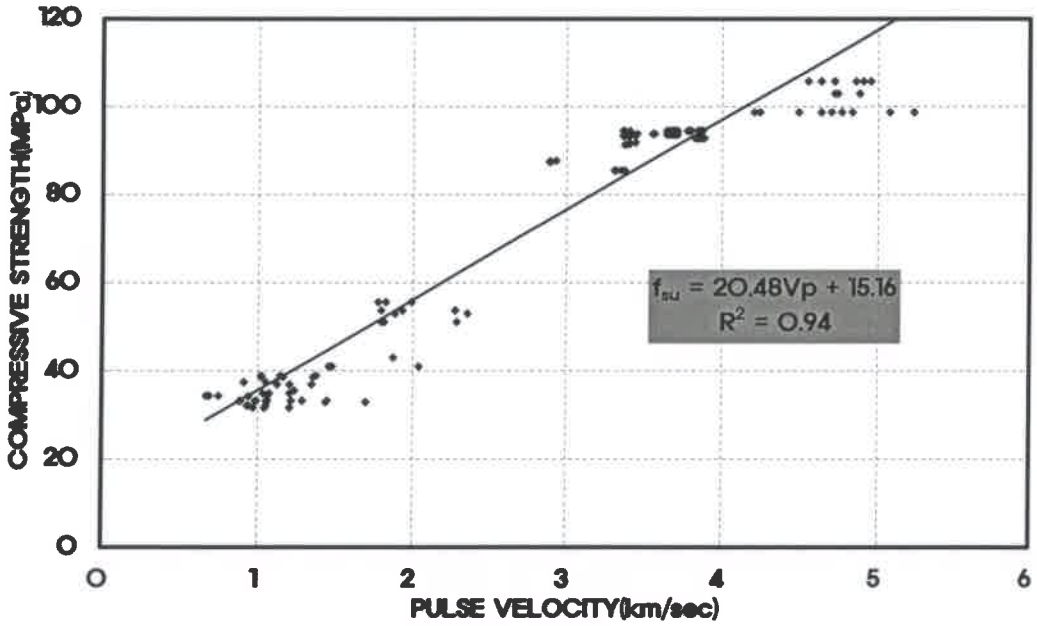
이는 신석재와 구석재의 실험값을 통합함으로써 실험값이 증가하였고 신석재와 구석재의 변수 무리군이 형성되어 회귀분석의 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

<표 6.3> 통합 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정식

구 분	표면 거칠기	추정식	결정계수(R^2)
통합식	잔다듬	f_{su} = 21.70×Vp+8.22	0.97
	거친다듬	f_{su} = 20.48×Vp+15.16	0.94



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

[그림 6.3] 통합 거칠기별 초음파속도에 의한 강도 추정식

6.2 기존 제안식과의 비교

신석재 잔다듬 실험체의 초음파속도를 기존제안식과 본 연구의 추정식에 적용한 추정강도와 파괴압축강도는 다음 <표 6.4>~<표 6.5> 및 [그림 6.4]~[그림 6.5]와 같다.

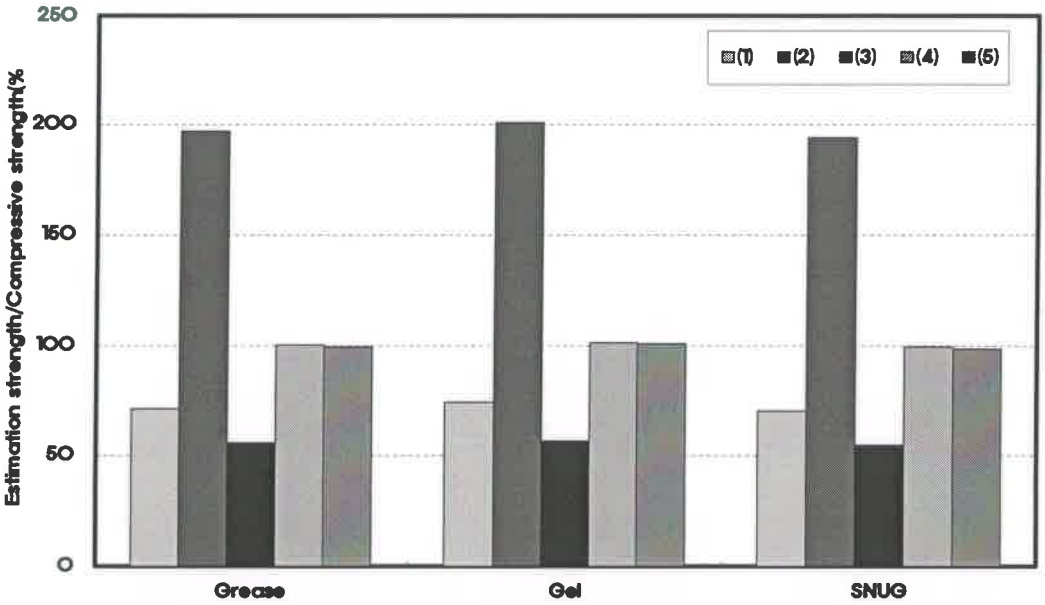
<표 6.4> 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c

구 분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	f_{su}(MPa)														
			스너그					겔					그리스				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	4.48	110	93	228	63	106	107	108	246	67	110	113	88	222	61	104	106
2	4.65	110	93	228	63	106	107	105	243	66	109	112	97	234	64	107	109
3	4.59	110	95	231	63	106	108	104	241	66	109	112	94	229	63	106	108
4	4.37	105	104	241	66	109	112	71	197	55	98	98	83	214	59	102	103
5	4.22	105	99	235	64	107	110	78	208	58	100	101	76	204	57	100	100
6	4.65	105	93	228	63	106	107	77	205	57	100	100	97	234	64	107	109
7	3.69	87	59	174	50	92	90	51	157	46	88	85	56	167	48	90	88
8	3.76	87	64	184	52	95	94	51	156	46	88	85	58	172	49	92	90
9	3.64	87	66	186	53	95	94	50	155	45	87	84	54	163	47	90	87
10	3.95	94	59	173	50	92	90	84	215	60	102	103	65	185	52	95	94
11	3.89	94	59	174	50	92	90	84	215	60	102	103	63	181	51	94	93
12	3.94	94	58	172	49	92	90	87	221	61	104	105	64	184	52	95	94
13	3.81	91	56	168	48	91	88	61	178	51	93	92	60	175	50	92	91
14	3.80	91	56	167	48	90	88	62	179	51	94	92	60	175	50	92	91
15	3.85	91	55	166	48	90	88	63	182	52	94	93	61	178	51	93	92
16	3.93	95	56	167	48	90	88	62	179	51	93	92	64	184	52	95	93
17	3.89	95	56	168	49	91	89	64	184	52	95	93	63	181	51	94	93
18	3.91	95	57	169	49	91	89	65	185	52	95	94	63	182	52	94	93
19	3.89	94	55	164	48	90	87	61	177	51	93	91	63	181	51	94	93
20	3.88	94	54	164	48	90	87	61	178	51	93	92	62	181	51	94	92
21	3.87	94	54	162	47	89	87	63	182	52	94	93	62	179	51	94	92
평균	4.03	97	66	180	51	92	91	69	186	52	93	93	66	182	51	92	92

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식 - $f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$
(2) : 백승철 제안식 - $f_{su} = 31.7V_p - 80.7$
(3) : Kahraman 제안식 - $f_{su} = 9.95V_p^{1.21}$
(4) : 본 연구 신석재 잔다듬 제안식 - $f_{su} = 17.19V_p + 26.99$
(5) : 본 연구 통합식 - $f_{su} = 21.7V_p + 8.22$

신석재 잔다듬 실험체의 초음파속도(V_p)를 익산미륵사지 진단식에 적용한 결과, 파괴 압축강도에 비해 그리스는 71.3% 정도, 겔은 74.1% 정도, 스너그는 70.4% 정

도의 강도로 추정되었으며 실제 파괴압축강도 보다 평균 25.9~29.6% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다.



[그림 6.4] 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교

백승철외 4인 제안식의 경우, 파괴 압축강도에 비해 그리스는 197.5% 정도, 겔은 201.2% 정도, 스너그는 194.4% 정도의 강도로 추정되어 다른 기존 제안식에 비해 가장 큰 파괴압축강도와의 차이를 보였다. 이는 추정강도가 실제 압축강도 보다 94.4~101.2% 정도 과대평가 되는 것으로 나타났다.

Kahraman 제안식의 경우는 파괴 압축강도에 비해 그리스는 55.8% 정도, 겔은 56.6% 정도, 스너그는 55.1% 정도의 강도로 추정되었으며 다른 제안식에 비해 오차율은 다소 낮게 나타났으나 추정강도가 파괴압축강도보다 43.4~44.9% 정도 과소평가 되는 경향을 보였다.

본 연구의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식은 파괴압축강도 대비 그리스에서는 100.1%정도, 겔은 101.0% 정도, 스너그의 경우는 99.3% 정도의 강도로 추정되었다.

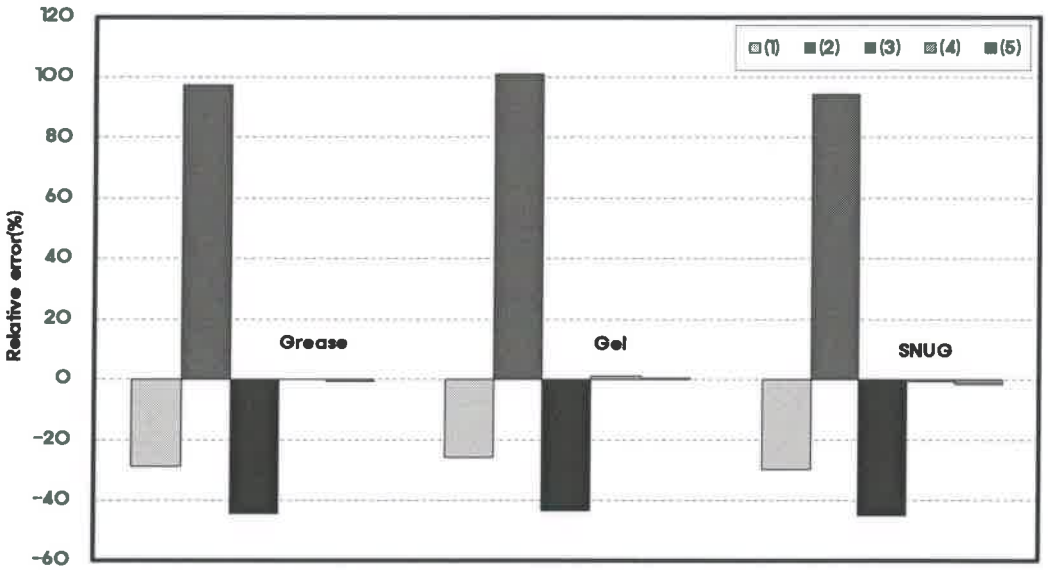
본 연구의 신석재와 구석재 잔다듬 실험체의 통합 제안식은 파괴압축강도에 비

해 그리스에서는 99.4% 정도, 겔은 100.5% 정도, 스너그의 경우는 98.4% 정도의 강도로 추정되었으며 앞의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식과 마찬가지로 양호한 강도를 추정하는 것으로 나타났다.

<표 6.5> 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율

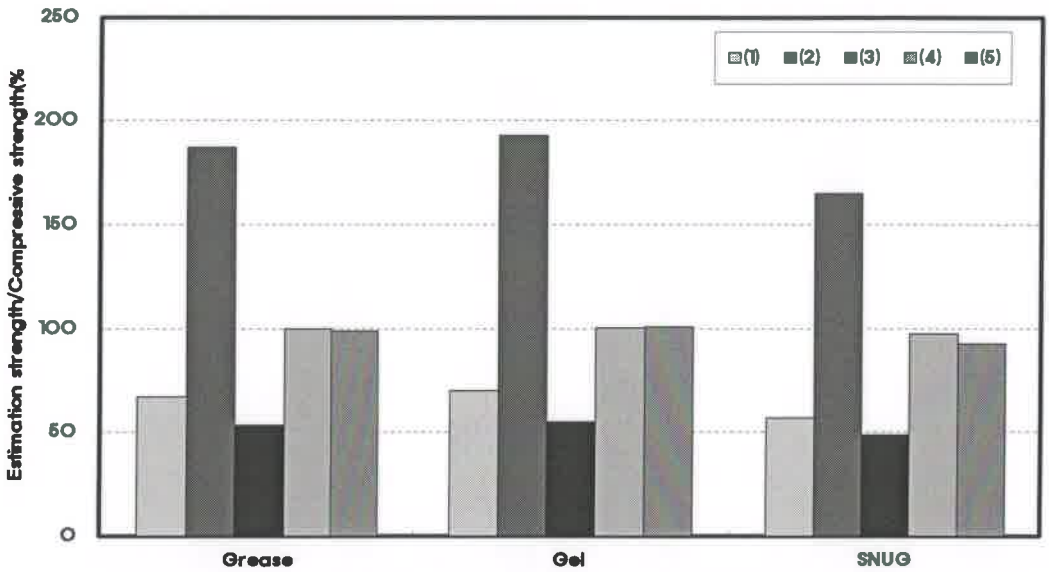
구분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	4.48	110	-20	102	-44	-5	-4	-2	124	-39	0	3	-16	107	-43	-4	-2
2	4.65	110	-11	113	-42	-3	-1	-4	121	-40	-1	2	-16	107	-43	-4	-2
3	4.59	110	-15	109	-43	-4	-2	-6	120	-40	-1	1	-14	110	-43	-3	-2
4	4.37	105	-21	104	-43	-3	-2	-32	88	-47	-7	-7	-1	131	-37	4	7
5	4.22	105	-28	95	-46	-5	-5	-25	98	-45	-4	-4	-6	125	-39	3	5
6	4.65	105	-7	123	-39	2	4	-27	96	-45	-5	-4	-11	118	-40	1	2
7	3.69	87	-36	92	-44	4	2	-41	81	-47	1	-2	-32	100	-43	6	4
8	3.76	87	-33	98	-43	5	3	-41	80	-47	1	-2	-26	112	-40	9	8
9	3.64	87	-38	88	-45	3	0	-42	78	-48	0	-3	-25	115	-39	10	9
10	3.95	94	-30	98	-44	2	1	-11	130	-36	10	11	-37	85	-47	-2	-4
11	3.89	94	-33	94	-45	0	-1	-11	130	-36	10	11	-37	86	-47	-1	-3
12	3.94	94	-31	97	-44	1	0	-7	136	-35	11	12	-38	84	-47	-2	-4
13	3.81	91	-34	92	-45	1	-1	-33	95	-44	2	1	-39	83	-47	-1	-3
14	3.80	91	-35	91	-45	1	-1	-32	96	-44	2	1	-39	82	-47	-1	-4
15	3.85	91	-33	95	-44	2	1	-31	99	-43	3	2	-39	82	-47	-1	-4
16	3.93	95	-32	94	-45	0	-1	-35	89	-46	-1	-3	-41	77	-49	-4	-7
17	3.89	95	-34	92	-45	-1	-2	-32	94	-45	0	-1	-40	78	-49	-4	-6
18	3.91	95	-33	93	-45	0	-2	-31	96	-45	0	-1	-40	78	-49	-4	-6
19	3.89	94	-33	93	-45	0	-1	-35	89	-46	-1	-3	-42	75	-49	-4	-7
20	3.88	94	-33	92	-45	0	-1	-35	90	-46	-1	-2	-42	75	-49	-4	-7
21	3.87	94	-34	91	-45	0	-2	-33	94	-45	0	-1	-43	73	-50	-5	-7
평균	4.03	97	-29	97	-44	0	-1	-26	101	-43	1	1	-30	94	-45	-1	-2

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식, (2) : 백승철 제안식, (3) : Kahraman 제안식
(4) : 본 연구 신석재 잔다듬 제안식, (5) : 본 연구 통합식



[그림 6.5] 신석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율

신석재 거친다듬 실험체의 초음파속도를 기존제안식과 본 연구의 추정식에 적용한 추정강도와 파괴압축강도는 다음 <표 6.6>~<표 6.7> 및 [그림 6.6]~[그림 6.7]과 같다.



[그림 6.6] 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교

<표 6.6> 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c

구분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	f_{su}(MPa)														
			그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	4.83	98.7	108	246	67	102	114	125	263	71	104	119	88	222	61	99	107
2	4.69	98.7	100	237	65	101	111	137	274	74	105	122	77	205	57	98	102
3	4.63	98.7	96	232	64	101	110	104	241	66	102	113	75	203	57	97	101
4	4.85	105.7	110	248	67	102	115	92	226	62	100	108	101	238	65	101	112
5	4.95	105.7	116	255	69	103	117	96	232	64	101	110	111	250	68	102	115
6	4.90	105.7	113	251	68	103	116	101	238	65	101	112	102	240	65	101	112
7	3.38	85.5	47	145	43	91	84	45	142	43	91	83	36	115	37	88	75
8	3.36	85.5	46	144	43	91	84	45	141	42	91	83	35	112	36	88	75
9	3.38	85.5	47	145	43	91	84	47	145	43	91	84	35	112	36	88	74
10	3.57	93.8	52	159	46	93	88	48	148	44	92	85	35	112	36	88	75
11	3.46	93.8	49	151	45	92	86	52	158	46	93	88	35	112	36	88	75
12	3.46	93.8	49	151	45	92	86	48	149	44	92	85	35	112	36	88	74
13	3.66	94.5	55	165	48	93	90	59	174	50	94	93	47	145	43	91	84
14	3.65	94.5	55	164	48	93	90	60	175	50	94	93	46	145	43	91	84
15	3.69	94.5	56	167	48	94	91	59	174	50	94	93	48	148	44	92	85
16	3.70	94.5	56	168	49	94	91	62	179	51	95	94	47	145	43	91	84
17	3.72	94.5	57	169	49	94	91	62	179	51	95	94	48	148	44	92	85
18	3.69	94.5	56	167	48	94	91	62	180	51	95	95	48	148	44	92	85
19	3.65	94.5	55	164	48	93	90	61	178	51	95	94	47	145	43	91	84
20	3.68	94.5	55	166	48	93	90	61	178	51	95	94	49	150	44	92	86
21	3.68	94.5	55	166	48	93	90	62	180	51	95	95	47	147	44	91	85
22	3.66	93.6	55	165	48	93	90	59	174	50	94	93	47	145	43	91	84
23	3.65	93.6	55	164	48	93	90	60	175	50	94	93	46	145	43	91	84
24	3.69	93.6	56	167	48	94	91	59	174	50	94	93	48	148	44	92	85
25	3.70	93.6	56	168	49	94	91	62	179	51	95	94	47	145	43	91	84
26	3.72	93.6	57	169	49	94	91	62	179	51	95	94	48	148	44	92	85
27	3.69	93.6	56	167	48	94	91	62	180	51	95	95	48	148	44	92	85
28	3.65	93.6	55	164	48	93	90	61	178	51	95	94	47	145	43	91	84
29	3.68	93.6	55	166	48	93	90	61	178	51	95	94	49	150	44	92	86
30	3.68	93.6	55	166	48	93	90	62	180	51	95	95	47	147	44	91	85
31	3.88	92.8	62	180	51	95	95	61	177	51	95	94	62	179	51	95	94
32	3.88	92.8	62	180	51	95	95	60	177	50	95	94	62	179	51	95	94
33	3.89	92.8	63	181	51	95	95	61	177	51	95	94	61	178	51	95	94
평균	3.86	94.6	62	174	50	92	92	65	179	51	93	93	53	153	45	90	86

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식 - $f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$
(2) : 백승철 제안식 - $f_{su} = 31.7 V_p - 80.7$
(3) : Kahraman 제안식 - $f_{su} = 9.95 V_p^{1.21}$
(4) : 본 연구 신석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 7.44 V_p + 66.12$
(5) : 본 연구 통합식 - $f_{su} = 20.49 V_p + 15.16$

신석재의 거친다듬 실험체의 초음파속도를 익산미륵사지 진단식에 적용한 결과, 실제 파괴압축강도와 비교 했을 때 그리스는 파괴압축강도와 66.8% 정도, 겔의 경

우는 69.9% 정도, 스너그는 56.7% 정도의 강도로 추정되어 접촉재별로 실제압축강도 보다 30.1~43.3% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다.

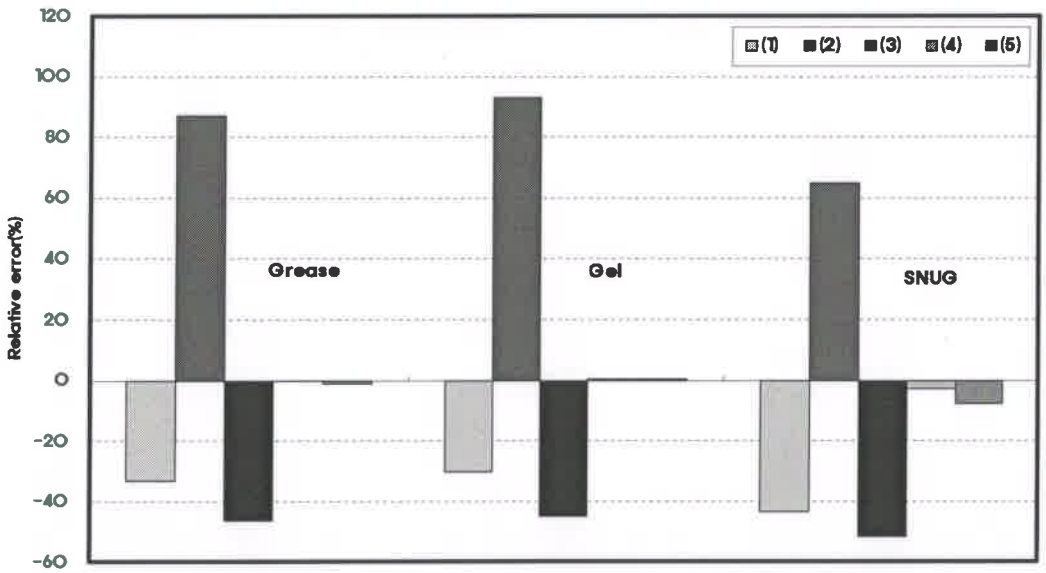
백승철외 4인 제안식은 파괴 압축강도에 비해 그리스는 187.1% 정도, 겔은 192.9% 정도, 스너그는 164.9 정도의 강도로 추정되었다.

백승철외 4인 제안식은 앞의 신석재 잔다듬 실험체와 마찬가지로 다른 기존 제안식에 비해 가장 큰 파괴압축강도와의 차이를 보였으며 실제 압축강도 보다 추정강도가 64.9~92.9% 정도 과대평가 되는 것으로 나타났다.

Kahraman 제안식은 파괴 압축강도에 비해 그리스는 53.5% 정도, 겔은 54.8% 정도, 스너그는 48.5% 정도의 강도로 추정되었으며 추정강도가 파괴압축강도보다 45.2~51.5% 정도 과소평가 되는 경향을 보였다.

본 연구의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식은 파괴압축강도 대비 그리스는 99.7% 정도, 겔은 100.4% 정도, 스너그의 경우는 97.4% 정도의 강도로 추정되었다.

본 연구의 신석재와 구석재 잔다듬 실험체의 통합 제안식은 파괴압축강도에 비해 그리스에서는 98.4% 정도, 겔은 100.6% 정도, 스너그의 경우는 92.3% 정도의 강도로 추정되었으며 앞의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식과 마찬가지로 기존 제안식에 비해 0.3~7.7% 정도의 오차율을 보였다.



[그림 6.7] 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율

<표 6.7> 신석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율

구분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	4.83	98.7	5	140	-35	-1	11	21	156	-31	1	16	-14	116	-40	-3	4
2	4.69	98.7	-2	133	-36	-1	9	34	170	-27	3	20	-25	102	-44	-4	0
3	4.63	98.7	-5	130	-37	-1	9	3	139	-35	0	11	-26	100	-44	-4	0
4	4.85	105.7	6	141	-35	-1	11	-11	120	-40	-3	5	-2	132	-37	-2	9
5	4.95	105.7	12	145	-34	-1	12	-7	124	-39	-3	6	7	141	-35	-1	11
6	4.90	105.7	9	143	-34	-1	12	-2	131	-37	-2	8	-1	132	-37	-2	9
7	3.38	85.5	-49	59	-52	0	-8	-51	55	-53	0	-9	-61	25	-60	-4	-18
8	3.36	85.5	-49	58	-53	0	-8	-51	55	-54	0	-9	-61	23	-60	-4	-18
9	3.38	85.5	-49	59	-52	0	-8	-49	59	-52	0	-8	-61	22	-61	-4	-19
10	3.57	93.8	-44	71	-50	0	-5	-49	59	-53	-1	-8	-62	21	-61	-6	-20
11	3.46	93.8	-47	64	-51	0	-6	-44	72	-50	1	-4	-62	22	-61	-5	-19
12	3.46	93.8	-47	64	-51	0	-6	-48	62	-52	0	-7	-62	21	-61	-5	-19
13	3.66	94.5	-41	77	-49	0	-4	-37	86	-47	1	-1	-50	56	-54	-2	-10
14	3.65	94.5	-42	76	-49	0	-4	-36	87	-46	1	0	-50	55	-54	-2	-10
15	3.69	94.5	-40	78	-48	0	-3	-37	85	-47	1	-1	-49	58	-53	-2	-9
16	3.70	94.5	-40	79	-48	0	-3	-34	91	-46	1	0	-50	55	-54	-3	-10
17	3.72	94.5	-40	80	-48	0	-3	-34	90	-46	1	0	-49	57	-53	-3	-9
18	3.69	94.5	-40	78	-48	0	-3	-34	92	-45	1	1	-49	58	-53	-2	-9
19	3.65	94.5	-42	76	-49	0	-4	-35	90	-46	1	1	-50	56	-54	-2	-10
20	3.68	94.5	-41	77	-49	0	-3	-35	90	-46	1	0	-48	61	-52	-2	-8
21	3.68	94.5	-41	77	-49	0	-3	-34	92	-45	1	1	-50	57	-53	-2	-9
22	3.66	93.6	-41	77	-49	0	-4	-37	86	-47	1	-1	-50	56	-54	-2	-10
23	3.65	93.6	-42	76	-49	0	-4	-36	87	-46	1	0	-50	55	-54	-2	-10
24	3.69	93.6	-40	78	-48	0	-3	-37	85	-47	1	-1	-49	58	-53	-2	-9
25	3.70	93.6	-40	79	-48	0	-3	-34	91	-46	1	0	-50	55	-54	-3	-10
26	3.72	93.6	-40	80	-48	0	-3	-34	90	-46	1	0	-49	57	-53	-3	-9
27	3.69	93.6	-40	78	-48	0	-3	-34	92	-45	1	1	-49	58	-53	-2	-9
28	3.65	93.6	-42	76	-49	0	-4	-35	90	-46	1	1	-50	56	-54	-2	-10
29	3.68	93.6	-41	77	-49	0	-3	-35	90	-46	1	0	-48	61	-52	-2	-8
30	3.68	93.6	-41	77	-49	0	-3	-34	92	-45	1	1	-50	57	-53	-2	-9
31	3.88	92.8	-35	89	-46	0	-1	-36	86	-47	-1	-2	-35	88	-46	0	-1
32	3.88	92.8	-35	89	-46	0	-1	-36	85	-47	-1	-2	-35	88	-46	0	-1
33	3.89	92.8	-34	90	-46	0	-1	-36	86	-47	-1	-2	-36	86	-47	-1	-2
평균	3.86	94.6	-33	87	-46	0	-1	-30	93	-45	1	1	-43	65	-52	-3	-8

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식, (2) : 백승철 제안식, (3) : Kahraman 제안식
(4) : 본 연구 신석재 거친다듬 제안식, (5) : 본 연구 통합식

구석재 잔다듬 실험체의 초음파속도를 기존제안식과 본 연구의 추정식에 적용한 추정강도와 파괴압축강도는 다음 <표 6.8>~<표 6.9> 및 [그림 6.8]~[그림 6.9]와 같다.

<표 6.8> 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c

구 분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	f_{su}(MPa)														
			그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0.71	27.1	10	-40	6	23	23	10	-33	8	25	26	10	-40	7	23	24
2	0.70	25.7	10	-40	6	23	23	11	-33	8	25	26	10	-40	6	23	23
3	1.29	36.9	18	30	19	45	45	14	1	14	36	36	14	1	14	36	36
4	1.34	45.3	17	23	18	43	43	15	7	15	38	38	14	4	14	37	37
5	0.70	27.1	10	-40	6	23	23	10	-33	8	25	26	10	-40	6	23	23
6	1.50	46.9	19	41	21	49	49	16	15	16	41	41	16	15	16	41	41
7	1.50	48.3	20	44	22	50	50	15	12	16	40	40	16	15	16	41	41
8	1.33	42.9	15	9	15	39	39	20	42	21	49	49	14	3	14	37	37
9	1.32	41.8	15	8	15	38	39	19	40	21	49	49	14	3	14	37	37
10	1.74	32.9	24	64	26	56	56	21	48	23	51	51	18	32	19	46	46
11	1.68	47.2	21	50	23	52	52	19	36	20	47	47	17	28	19	45	45
12	1.81	45.7	22	55	24	54	53	19	40	21	49	49	19	37	20	48	47
13	1.83	51.5	19	39	21	48	48	19	37	21	48	48	19	38	21	48	48
14	1.88	55.9	20	41	21	49	49	19	38	21	48	48	20	41	21	49	49
15	1.47	37.4	17	28	19	45	45	15	12	16	40	40	15	13	16	40	40
16	1.28	34.3	16	17	17	41	41	13	-6	12	34	34	14	0	13	36	36
17	1.37	34.1	17	26	18	44	44	16	15	16	41	41	15	6	15	38	38
18	1.24	36.5	17	26	18	44	44	14	1	14	36	36	14	-3	13	35	35
19	1.21	31.9	15	13	16	40	40	14	5	14	37	38	13	-5	13	34	34
평균	1.36	39.4	16	20	17	41	41	15	12	15	38	38	14	6	14	36	36

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식 - $f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$
(2) : 백승철 제안식 - $f_{su} = 31.7V_p - 80.7$
(3) : Kahraman 제안식 - $f_{su} = 9.95V_p^{1.21}$
(4) : 본 연구 구석재 잔다듬 제안식 - $f_{su} = 22.29V_p + 7.19$
(5) : 본 연구 통합식 - $f_{su} = 21.7V_p + 8.22$

구석재의 잔다듬 실험체의 파괴압축강도와 초음파속도에 익산미륵사지 진단식에 적용한 추정강도 비교 했을 때 그리스는 파괴압축강도와 43.5% 정도, 겔의 경우는 40.6% 정도, 스너그는 38.0% 정도의 강도로 추정되어 접촉재별로 실제압축강도 보다 56.6~62.0% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다.

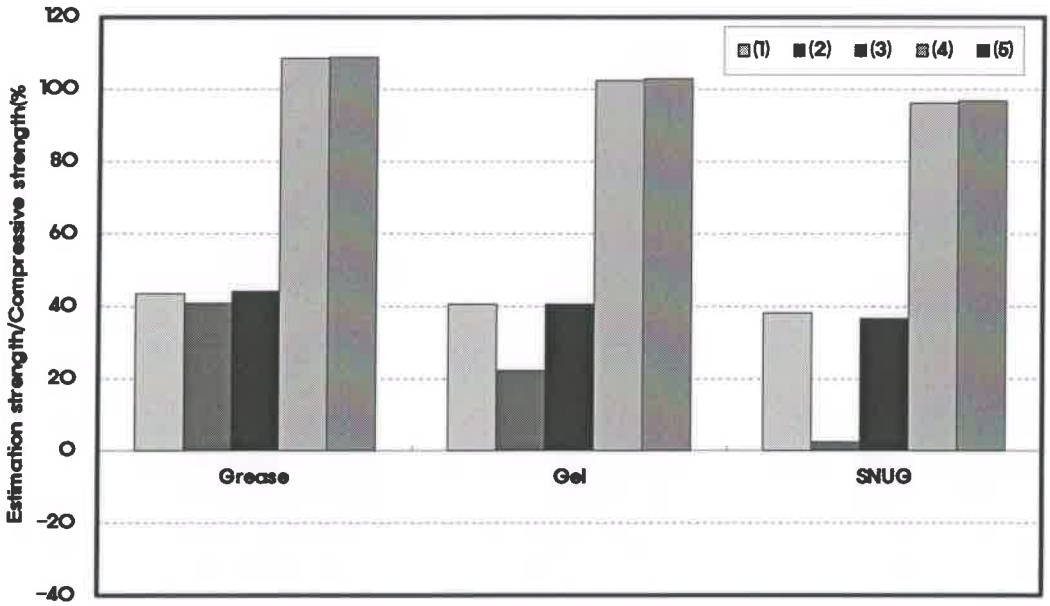
백승철외 4인 제안식 경우는 파괴 압축강도에 비해 그리스는 40.8% 정도, 겔은 22.2% 정도, 스너그는 42.3% 정도의 강도로 추정되었다.

백승철외 4인 제안식은 앞의 신석재 실험체와 마찬가지로 다른 기존 제안식에 비해 가장 큰 파괴압축강도와의 차이를 보였으며 실제 압축강도 보다 추정강도가 59.2~77.8% 정도 과소평가 되는 것으로 나타났다.

Kahraman 제안식은 파괴 압축강도에 비해 그리스는 44.0% 정도, 겔은 40.3% 정도, 스너그는 36.6% 정도의 강도로 추정되었으며 추정강도가 파괴압축강도보다 56.0~63.4% 정도 과소평가 되는 경향을 보였다.

본 연구의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식은 파괴압축강도에 비해 그리스는 108.4% 정도, 겔은 102.4% 정도, 스너그의 경우는 96.0% 정도의 강도로 추정되었다.

본 연구의 신석재와 구석재 잔다듬 실험체의 통합 제안식은 파괴압축강도에 비해 그리스에서는 108.7% 정도, 겔은 102.9% 정도, 스너그의 경우는 96.7% 정도의 강도로 추정되었으며 파괴압축강도에 비해 2.4~8.7% 정도 오차율을 보였다.

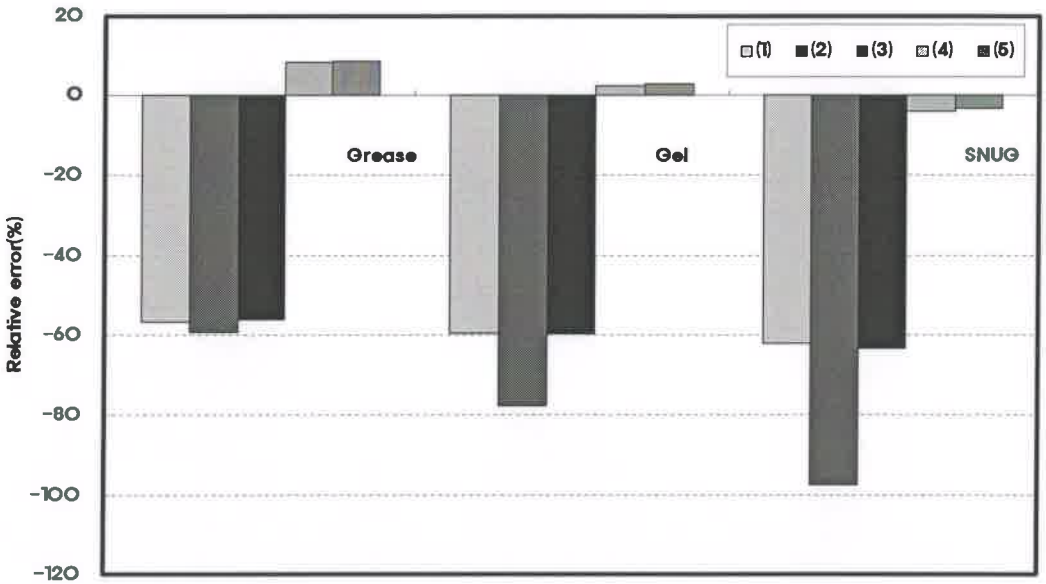


[그림 6.8] 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교

<표 6.9> 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율

구분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	오차율(%)														
			그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	0.71	27.1	-63	-249	-76	-16	-14	-61	-224	-72	-8	-6	-63	-247	-76	-15	-13
2	0.70	25.7	-61	-257	-75	-11	-9	-59	-228	-70	-2	0	-61	-257	-75	-11	-9
3	1.29	36.9	-52	-20	-48	23	23	-62	-97	-63	-2	-1	-62	-99	-63	-3	-2
4	1.34	45.3	-63	-50	-61	-5	-5	-68	-85	-68	-16	-16	-68	-91	-69	-18	-18
5	0.70	27.1	-63	-249	-76	-16	-14	-61	-224	-72	-8	-6	-63	-249	-76	-16	-14
6	1.50	46.9	-58	-13	-55	4	4	-66	-68	-65	-13	-13	-66	-68	-65	-13	-13
7	1.50	48.3	-59	-10	-55	3	3	-68	-74	-67	-18	-17	-67	-69	-66	-16	-16
8	1.33	42.9	-65	-79	-65	-10	-10	-54	-2	-50	15	15	-67	-92	-67	-14	-14
9	1.32	41.8	-64	-80	-64	-8	-8	-54	-4	-50	16	16	-66	-94	-67	-12	-12
10	1.74	32.9	-28	96	-21	72	71	-37	47	-31	56	56	-45	-3	-41	40	40
11	1.68	47.2	-55	6	-51	10	9	-60	-24	-57	0	0	-63	-42	-61	-5	-5
12	1.81	45.7	-52	21	-47	17	17	-58	-12	-54	6	6	-59	-20	-55	4	4
13	1.83	51.5	-63	-25	-60	-6	-7	-63	-28	-60	-7	-7	-63	-26	-60	-7	-7
14	1.88	55.9	-65	-26	-62	-12	-12	-66	-32	-63	-14	-14	-65	-26	-62	-12	-12
15	1.47	37.4	-53	-26	-50	19	19	-59	-69	-58	6	6	-59	-65	-58	7	7
16	1.28	34.3	-53	-50	-51	20	21	-61	-117	-64	-1	0	-60	-100	-61	4	5
17	1.37	34.1	-50	-25	-47	29	29	-54	-56	-52	19	20	-57	-82	-57	11	11
18	1.24	36.5	-53	-28	-50	21	21	-62	-99	-63	-2	-1	-63	-108	-65	-5	-4
19	1.21	31.9	-52	-59	-50	25	26	-55	-85	-55	17	18	-58	-116	-61	7	8
평균	1.36	39.4	-56	-59	-56	8	9	-59	-78	-60	2	3	-62	-98	-63	-4	-3

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식, (2) : 백승철 제안식, (3) : Kahraman 제안식
(4) : 본 연구 구석재 잔다듬 제안식, (5) : 본 연구 통합식



[그림 6.9] 구석재 잔다듬 실험체의 제안식별 오차율

구석재 거친다듬 실험체의 파괴압축강도와 초음파속도를 기존제안식과 본 연구의 추정식에 적용한 추정강도는 다음 <표 6.10>~<표 6.11> 및 [그림 6.10]~[그림 6.11]과 같다.

<표 6.10> 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c

구 분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	f_{su}(MPa)														
			그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	1.79	51.1	25	70	27	54	62	19	37	20	47	52	19	35	20	46	52
2	1.87	43.0	26	75	28	55	64	20	41	21	48	54	19	41	21	47	53
3	1.23	35.5	18	28	19	45	50	15	10	15	41	44	13	-4	13	38	40
4	1.93	53.7	25	69	27	54	62	19	35	20	46	52	20	45	22	48	55
5	1.47	41.0	21	53	24	50	57	15	12	16	41	45	15	13	16	41	45
6	1.82	55.6	21	49	23	49	56	18	34	20	46	51	19	37	21	47	52
7	1.28	33.2	15	11	15	41	45	13	-5	13	38	40	14	0	13	39	41
8	0.69	34.3	10	-37	7	31	31	10	-42	6	29	29	10	-41	6	30	29
9	1.14	38.9	15	6	15	40	43	12	-18	10	35	36	13	-10	12	36	39
10	1.16	38.6	14	5	14	40	43	12	-18	10	35	36	13	-8	12	37	39
11	0.98	33.1	12	-16	11	35	37	11	-28	9	33	33	12	-21	10	34	35
12	0.99	33.2	12	-15	11	35	37	11	-27	9	33	33	12	-20	10	34	35
13	1.05	37.4	13	-12	11	36	38	11	-26	9	33	34	12	-16	11	35	37
14	1.05	32.1	11	-24	9	33	34	11	-24	9	33	34	12	-16	11	35	37
15	1.06	34.2	11	-24	9	33	34	11	-24	9	33	34	12	-15	11	35	37
16	1.04	31.6	13	-6	12	37	40	12	-22	10	34	35	12	-17	10	35	36
17	1.07	34.9	13	-6	12	37	40	12	-18	10	35	36	12	-15	11	35	37
18	1.55	40.5	16	18	17	42	47	16	14	16	42	45	16	19	17	43	47
19	1.20	36.9	14	4	14	39	43	13	-11	11	36	38	13	-6	12	37	40
평균	1.28	38.9	15	13	15	40	43	13	-4	12	36	38	13	0	13	37	40

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식 - $f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$
(2) : 백승철 제안식 - $f_{su} = 31.7V_p - 80.7$
(3) : Kahraman 제안식 - $f_{su} = 9.95V_p^{1.21}$
(4) : 본 연구 구석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 15.04V_p + 19.31$
(5) : 본 연구 통합식 - $f_{su} = 20.49V_p + 15.16$

구석재의 잔다듬 실험체의 초음파속도에 익산미륵사지 진단식에 적용한 추정강도 비교 경우 파괴압축강도에 비해 그리스는 39.1% 정도, 겔의 경우는 33.2% 정도, 스너그는 34.6% 정도의 강도로 추정되어 접촉재별로 실제압축강도 보다 60.9~66.

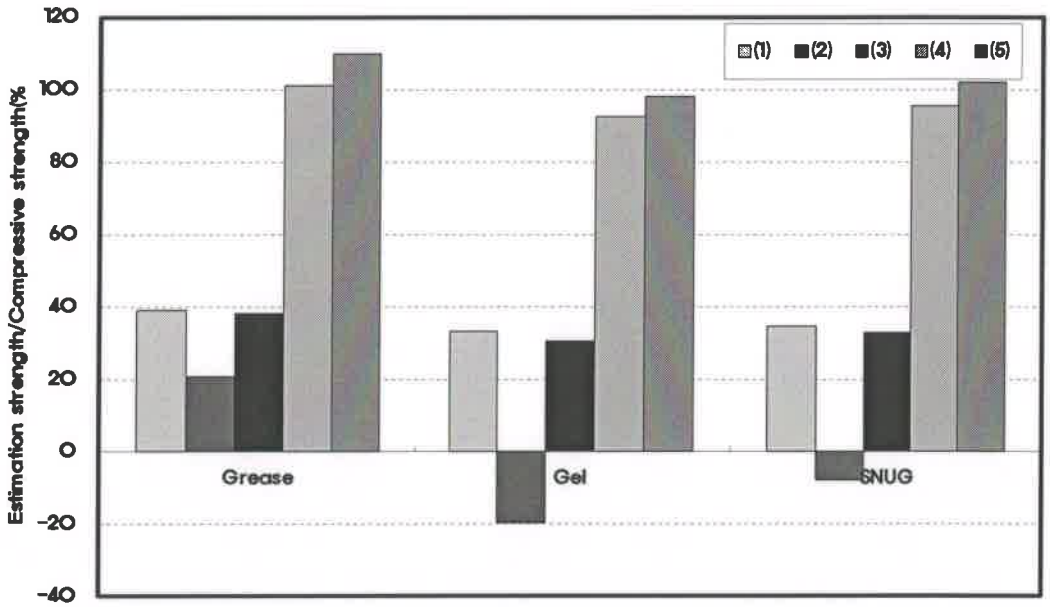
8% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다.

백승철외 4인 제안식 경우는 파괴 압축강도에 비해 그리스는 20.6% 정도, 겔은 -19.5% 정도, 스너그는 -7.9% 정도의 강도로 추정되었으며 실제 압축강도 보다 추정강도가 79.4~119.5% 정도 과소평가 되는 경향을 보였다.

Kahraman 제안식은 파괴 압축강도에 비해 그리스는 38.0% 정도, 겔은 30.5% 정도, 스너그는 32.7% 정도의 강도로 추정되었으며 추정강도가 파괴압축강도보다 62.0~69.5% 정도 과소평가 되는 경향을 보였다.

본 연구의 신석재 잔다듬 실험체의 제안식은 파괴압축강도에 비해 그리스는 101.2% 정도, 겔은 92.5% 정도, 스너그의 경우는 95.4% 정도의 강도로 추정되었다.

본 연구의 신석재와 구석재 잔다듬 실험체의 통합 제안식은 파괴압축강도에 비해 그리스에서는 110.0% 정도, 겔은 98.1% 정도, 스너그의 경우는 102.0% 정도의 강도로 추정되었으며 파괴압축강도에 비해 1.2~10.0% 정도의 오차율을 보였다.

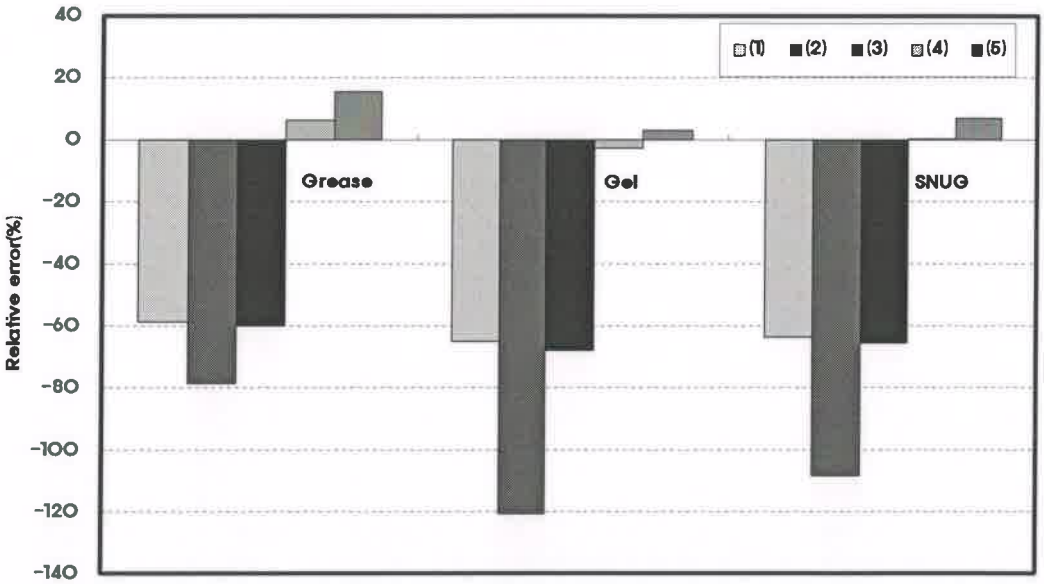


[그림 6.10] 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 f_{su}와 f_c의 비교

<표 6.11> 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율

구분	V_p (km/sec)	f_c (MPa)	오차율(%)														
			그리스					겔					스너그				
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	1.79	51.1	-51	37	-47	5	21	-63	-28	-60	-9	2	-64	-31	-61	-10	1
2	1.87	43.0	-45	41	-47	3	20	-63	-22	-60	-10	1	-55	-5	-51	10	24
3	1.23	35.5	-55	-14	-43	36	51	-54	-69	-53	24	35	-62	-110	-64	7	14
4	1.93	53.7	-46	29	-50	0	15	-65	-34	-63	-14	-4	-62	-16	-59	-10	2
5	1.47	41.0	-50	28	-42	22	39	-63	-72	-62	0	9	-62	-68	-61	1	10
6	1.82	55.6	-51	-12	-59	-11	1	-67	-39	-64	-17	-8	-66	-33	-63	-16	-6
7	1.28	33.2	-59	-67	-53	23	35	-60	-115	-62	13	20	-58	-100	-60	16	25
8	0.69	34.3	-69	-208	-80	-11	-11	-72	-224	-82	-14	-16	-71	-220	-81	-13	-15
9	1.14	38.9	-60	-84	-63	3	11	-69	-147	-74	-11	-7	-67	-125	-70	-6	-1
10	1.16	38.6	-60	-88	-63	3	11	-69	-147	-74	-10	-7	-67	-122	-69	-5	1
11	0.98	33.1	-65	-149	-68	6	11	-67	-184	-74	-2	0	-65	-163	-71	3	6
12	0.99	33.2	-65	-146	-68	6	11	-67	-182	-74	-2	1	-65	-161	-70	3	7
13	1.05	37.4	-64	-132	-70	-4	1	-70	-169	-76	-12	-10	-68	-143	-72	-6	-2
14	1.05	32.1	-67	-176	-72	4	7	-65	-174	-71	4	7	-62	-150	-67	9	14
15	1.06	34.2	-67	-169	-73	-2	1	-67	-169	-73	-2	1	-64	-145	-69	3	8
16	1.04	31.6	-63	-118	-61	18	26	-63	-169	-70	7	11	-62	-153	-67	11	15
17	1.07	34.9	-63	-116	-64	7	14	-66	-150	-70	0	4	-65	-142	-69	1	6
18	1.55	40.5	-58	-56	-59	5	15	-62	-66	-61	3	12	-60	-54	-58	5	16
19	1.20	36.9	-61	-89	-62	7	15	-66	-131	-69	-2	3	-64	-115	-66	1	8
평균	1.28	38.9	-59	-78	-60	6	15	-65	-121	-68	-3	3	-64	-108	-66	0	7

※ (1) : 익산 미륵사지 진단식, (2) : 백승철 제안식, (3) : Kahraman 제안식
(4) : 본 연구 구석재 거친다듬 제안식, (5) : 본 연구 통합식



[그림 6.11] 구석재 거친다듬 실험체의 제안식별 오차율

6.3 소 결

1) 실험체별 초음파속도와 파괴압축강도에 의한 회귀분석 결과, 잔다듬 실험체는 거친다듬 실험체보다 회귀분석의 결정계수가 다소 높게 나타났다. 이는 거친다듬 실험체가 표면 요철에 의해 실험체의 초음파속도가 다소 저하되어 초음파속도와 압축강도 간에 상관성이 저하되어 회귀분석의 결정계수가 낮은 경향을 보인 것으로 사료된다.

2) 실험체에서 측정된 초음파속도를 기존 제안식에 적용한 결과, 신석재 실험체에서는 잔다듬의 경우 익산미륵사지석탑 진단식과 Kahraman 제안식의 추정강도는 파괴압축강도 보다 25.9~29.6% 정도 과소평가 되었으며, 백승철 제안식은 파괴압축강도보다 추정강도가 94.4~101.2% 정도 과대평가 되는 것으로 나타났다. 구석재 실험체에서는 기존 제안식 모두 파괴압축강도 보다 추정강도가 56.6~62.0% 정도 과소평가 되는 것으로 나타났다. 이는 본 연구와 달리 기존 제안식에 사용된 석재가 풍화가 진행되지 않은 신재(新材)를 기준으로 하였고 표면의 요철을 고려하지 않았기 때문에 추정강도가 파괴강도보다 과소평가 된 것으로 사료된다.

3) 기존 제안식과 본 연구의 추정식을 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 기존 제안식에 비해 오차율이 감소하여 표면의 요철이 있는 석조 문화재의 강도 추정식에 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Ⅶ. 결 론

본 연구는 석조 문화재의 비파괴 강도 추정을 위하여 신석재와 구석재에 대한 파괴실험과 비파괴실험용 실험체를 제작하고 실험을 통해 석재 강도 추정식을 제안한 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

1) 접촉재별로 초음파 속도를 측정한 결과, 스너그와 그리스는 겔과 달리 거칠기에 따른 초음파속도의 차이가 적어 초음파속도 측정시 스너그와 그리스의 사용이 양호한 것으로 사료된다. 그러나 그리스는 석조 문화재의 접촉재로 사용했을 경우 문화재 표면에 오염이 발생하여 그리스보다는 스너그를 사용하는 것이 문화재 표면 오염 방지 및 정확한 초음파속도를 측정을 할 수 있을 것으로 사료된다.

2) 탐촉자 거리에 따른 초음파속도 측정 결과, 탐촉자 거리 100㎜에서 측정된 초음파속도에 비해 간접법은 탐촉자 거리 300㎜ 이상에서는 4.4~29.4% 정도, 직접법은 탐촉가 거리 400㎜ 이상에서는 14.1~25.1% 정도의 저하를 보여 간접법으로 초음파 속도 측정시는 탐촉자 거리 200㎜ 이하, 직접법으로 초음파 속도 측정시에는 300㎜ 이내에서 측정하는 것이 보다 정확한 초음파속도를 측정 할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 초음파 탐사 방법에 따른 초음파속도를 측정한 결과, 신석재 실험체에서는 직접법에 비해 간접법의 초음파속도가, 구석재 실험체에서는 간접법 보다는 직접법의 초음파속도가 빠른 것으로 나타났다. 이는 신석재와 달리 구석재의 표면 풍화에 따른 석재 강도의 저하로 인해 간접법에서 초음파가 회절에 의한 것으로 사료된다.

4) 실험체별 초음파속도와 파괴압축강도에 의한 회귀분석 결과, 잔다듬 실험체는 거친다듬 실험체보다 회귀분석의 결정계수가 다소 높게 나타났다.

이는 거친다듬 실험체에서 표면 요철에 의해 초음파속도가 저하되어 초음파속도와 압축강도 간에 상관성이 저하되어 회귀분석의 결정계수가 상대적으로 낮은 경향을 보인 것으로 사료된다.

5) 실험체에서 측정된 초음파속도를 기존 제안식에 적용한 결과, 신석재 실험체에서는 잔다듬의 경우 익산미륵사지석탑 진단식과 Kahraman 제안식의 추정강도는 파괴압축강도 보다 25.9~29.6% 정도 과소평가 되었으며, 백승철 제안식은 파괴압축강도보다 추정강도가 94.4~101.2% 정도 과대평가 되는 것으로 나타났다. 구석재 실험체에서는 기존 제안식 모두 파괴압축강도 보다 추정강도가 56.6~62.0% 정도 과소평가 되는 것으로 나타났다. 이는 본 연구와 달리 기존 제안식에 사용된 석재가 풍화가 진행되지 않은 신재(新材)를 기준으로 하였고 표면의 요철을 고려하지 않았기 때문에 추정강도가 파괴강도보다 과소평가 된 것으로 사료된다.

6) 기존 제안식과 본 연구의 추정식을 비교했을 경우, 본 연구의 추정식은 기존 제안식에 비해 오차율이 감소하여 표면에 요철이 있는 석조 문화재의 강도 추정시 적용하는 것이 바람직한 것으로 사료되며 다음과 같이 석재 종류 및 표면 거칠기에 따른 추정식을 제안하고자 한다.

○ 신석재(익산 황등석) 표면 거칠기별 추정식은 다음과 같다.

① 잔다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 17.19V_p + 26.99$

② 거친다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 7.44V_p + 66.12$

○ 구석재(경기 포천석) 표면 거칠기별 추정식은 다음과 같다.

① 잔다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 22.29V_p + 7.19$

② 거친다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 15.04V_p + 19.31$

○ 통합식 표면 거칠기별 추정식은 다음과 같다.

① 잔다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 21.70V_p + 8.22$

② 거친다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 20.49V_p + 15.16$

참고문헌

1) 김정섭외 2인, "화강석 건조물의 표면 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정" 한국건축시공학회 논문집, 제 10권 1호, pp.137~145, 2010.2

2) 김정섭외 4인, "콘크리트 응력 추정에 따른 초음파속도와 반발경도의 상쇄효과에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제 12권 11호, 1996.11.

3) 김정섭외 4인, "현장 콘크리트 강도추정에 있어서 코어를 이용한 복합 비파괴 시험법에 관한 실험적 연구", 대한건축학회, 논문집, 제 13권 7호, 1997.7

4) 김정섭외 1인, " 현장콘크리트 강도추정을 위한 복합비파괴시험법의 신뢰도에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제 12권 1호, pp.169~179, 1996.2

5) 김수주, "석조문화재의 비파괴강도 추정에 관한 연구', 조선대학교 석사학위논문, 2007.

6) 이상헌외 1인, "석조문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적 연구(I)-강원도 원주시·원주군·횡성군 및 홍천군 지역", 보존과학회논문집, 제1권 1호, pp.40~59, 1992.

7) 이상헌, "석조문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적 연구 (III) -경기도 하남시, 양평군 및 여주군을 중심으로", 강원대학교 자원개발연구소 논문집, pp.75~106, 1995.

8) 박일철외 1인, "석조문화재의 구조안전진단 방법 연구", 한국구조물진단유지관리학회 논문집, 제9권 4호, pp.36~41, 2005.

9) 서만철외 2인, "암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단", 대한지구물리학회 논문집, 제4권 1호, pp.57~69, 2001.

10) 서만철외 2인, "초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조 안전 진단", 대한지구물리학회 논문집, 제5권 3호, pp.199~209, 2002.

11) 손호웅외 1인, "석조구조물의 효율적 유지관리를 위한 지질공학적 및 구조동역학적 특성연구", 대한지구물리학회 논문집, 제6권 4호, pp.277~294, 2003.

12) 이성민, "[진단사례] 석조문화재의 비파괴 안전진단 기술과 사례", 한국구조물진단유지관리학회 논문집, 제8권 4호, pp.50~57, 2004.

13) 조용훈외 3인, "석조문화재 표면풍화도 평가를 위한 초음파 탐사의 응용", 대한

지질공학회 학술발표논문집, pp.188, 2008.
14) 백승철외 4인, "초음파 속도를 이용한 암석의 일축압축강도 평가" 한국지반환경공학회 논문집, 제 7권 2호, pp.33~42, 2006.
15) 이춘오외 4인, "국내 석재산지의 지역별 분포유형과 특성", 한국암석학회지, 제15권 3호, pp.154~166, 2006.9
16) 조기만, "경주지역 석조문화재의 석재공급지에 관한 연구", 한국지역지리학회지, 제11권 4호, pp440~452, 2005.
17) 조기만외 1인, "석조문화재의 석재 공급지에 관한 연구", 한국암석학회 논문집, 제14권 1호, pp.24~37, 2005.3
18) 이수곤외 1인, "슈미트햄머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법", 대한토목학회논문집, 제15권 1호, pp.199~210, 1995.1
19) 윤지선외 2인, "서울화강암의 암석강도 측정치의 비교 평가 연구", 한국암반공학회 논문집, 제 5권 2호, pp.144~154, 1995.6
20) 박철환, "이방성 암석의 탄성상수 분석연구", 한국암반공학회지, 제11권 1호, pp.59~63, 2001.1.
21) 양형식, "국내 주요암석의 파괴조건계수", 한국자원공학회지, 제29권 2호, pp.21~37, 1993.2.
22) 이경운외 1인, "국내 화강암의 역학적 특성", 한국과학기술원단체 총연합회, pp78~86, 1988.
23) 이상은외 인, "조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포 성상평가, 한국암반공학회지, 제9권 4호 pp.364~372, 1999.
24) 이정인외 3인, "우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성(제1부)", 대한광산학회지, 제19권 4호, pp.260~267, 1982.
25) 이희근외 2인, "우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성 연구", 대한광산학회지, 제20권 1호, pp.101~109, 1983.
26) 장보안외 2인, "단일시편을 이용한 평면이방성 암석의 탄성계수 결정", 한국암반학회지, 제11권 1호, pp.72~78, 2001.

27) 김종태외 4인, "암반 불연속면의 거칠기 특성" 대한지질학회 논문집, 제14권 2호, pp.147-168, 2004.6.
28) 조규성외 1인, "'익산 미륵사지 석탑에 사용된 화강암에 대한 암석학적 연구", 전북대학교 과학교육연구소 논문집, 제27권, pp.33~45, 2002.2.
29) 이상헌, "석탑의 석재와 보존에 관한 지질학적 연구", 문화재관리국 문화제 제 14집, pp.34~47, 1981.
30) 김수진, "옥외 석조문화재 보존에 있어서 사이트환경 관리의 중요성", 제18차 한국문화재보존과학회 학술발표논문집, pp.17~23. 2003.
31) 이찬희외 4인, "감은사지 서탑의 풍화훼손도 진단 및 석재의 산지추정", 대한 환경지질학회 논문집 제37권 5호, 2004.5.
32) 서만철외 2인, "초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조안전진단", 대한 지구물리학회 논문집 제 5권 3호, pp.199~209, 2002.9.
33) 이찬희외 1인, 우리나라 석조문화유산의 현황과 보존방안, 한국구조물진단학회 논문집 제 9권 4호, pp.13~21, 2005.10.
34) 김영화외 1인, "풍화현상에 수반되는 화강암의 물리적 변화에 관한 연구", 광산지질학회지, 제 23권, pp.221~232, 1990.
논문집 제2권 1호, pp.36~462, 1992.5.
35) 김영화외 1인, "화강암의 풍화현상에 수반되는 물성변화의 특성", 대한지질학회 논문집 제2권 1호, pp.36~462, 1992.5.
36) 천득염, "석조문화재의 보존방안", 대한건축학회지 논문집, 제49권 제12호, pp.38~45, 2005.12.
37) 송무영외 1인, "한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구(2)-퇴적암류 코아시료의 탄성파 속도와 점재하 강도 비교", 대한지질학회 논문집, 제3권 1호, pp.21~37, 1993.4
38) 정희옥, "미세균여을 포함하는 암석의 탄성파 속도와 감쇄에 관한 연구", 한국지구과학회 논문집, 제 14권 2호, pp.212~218, 1993.
39) 박형동, "암석의 공학적 이방성 측정을 위한 실험실내 P파 속도 측정기법에 대

한 연구, 대한지질공학회 논문집, 제 5권 3호, 1995.
40) 김영수외 2인, "퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구(대구지역), 한국지반공공학회논문집, 제 14권 4호, 1998.
41) 김영화외 1인, "화강암의 풍화현상에 수반되는 물성변화의 특성", 대한지질공학회논문집, 제 2권 1호, pp.36~46, 1992.
43) 이희근외 2인, "우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성 연구', 대한광산학회논문집, 제 19권 4호, pp.101~109, 1982.
44) 양형식, "국내 주요암석의 파괴조건계수", 한국자원공학회논문집, 제 29권 2호, pp.91~102, 1992.
45) 박철환, "이방성 암석의 탄성상수 분석연구", 한국암반공학회논문집, 제 11권 1호, pp.59~63, 2001.
46) 장보안외 2인, "단일시편을 이용한 평면이바성 암석의 탄성계수 결정", 한국암반공학회논문집, 제 11권 1호, pp.72~78, 2001.
47) 이경운외 1인, "국내 화강암의 역학적 특성", 한국과학기술원단체 총연합회, pp.73~86, 1988.
48) 이상은외 3인, "조사선을 이용한 화강암의 미세 불연속면 분포 성상 평가, 한국암반공학회논문집, 제 9권 3호, pp.364~372, 1999.
49) 김영수외 4인, "셰일(혈암)의 이바성 파괴 특성, 한국지반암반공학회논문집, 제 17권 2호, pp.5~15, 2001.4.
50) 최안식외 2인, "화강편마암의 강도 특성 실험 및 파괴메커니즘에 관한 연구", 한국암반공학회논문집, 제10권 2호, pp.165~172, 2000.
51) 이상은외 1인, "화강암 채석장(採石場)에 있어서 화강암의 " 결 " 의 방향성과 이방성", 한국자원공학회논문집, 제30권 6호, pp.364~372, 1993

52) 한국건설안전기술원, "익산미륵사지 석탑 구조안전진단", pp.34, 1998.
53) 국립문화재연구소, "국가지정 중요문화재 안전점검 기술용역 보고서", 2007.
54) 조기만, 화강암과 석조문화재에 관한 지형·지질학적 연구", 경상대학교 박사학

위논문, 2004.
55) 이상은, "화강암의 역학적 이방성 및 균열제어 발파에 관한 연구", 전북대학교 박사학위논문, 1995.
56) 이성민, "石彫文化財의 動的特性에 관한 硏究", 전남대학교 박사학위논문, 2002.
57) 김열, "절리면 거칠기 정량화에 대한 연구", 강원대학교 석사학위논문, 2005.
58) 원연호, "암석의 종류와 방향에 따른 물리적 특성과 상호관계", 조선대학교 박사학위논문, 2003.
59) 김기주, "불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구', 서울대학교 박사학위논문, 1986.
60) 김영근, "절리특성이 인공절리에 포함한 불연속암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문, 1996.
61) 박덕원, "중생대 화강암에 발달된 결의 역학적 특성", 경북대학교 박사학위논문, 1995.
62) 나주시, 한국건설안전기술원, 『나주북문삼층석탑』, pp. 70~84, 2004.08
63) 한국구조안전연구원, "강진 월남사지석탑 정밀안전진단", 2005.
64) 조선대학교 산학협력단 김정섭, "문화재 모니터링 기술개발", 2007.
65) 윤지선, "암반의 조사와 시험', 구미서관, pp.483~492, 1991.

66) Barton, N. and Choubey, "The Shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mech. Vol. 10, pp.1~54, 1977.
67) Pomeroy C. D., Morgan W. T. A., "The tensile strength of coal.", Brit. Jour. Appl. Phys., Vol. 7, pp.243~246, 1956.
68) Backus G. E., Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering, Jour. Geophys. Res., Vol. 67, pp.4427~4440, 1962.
69) Brace W. F., Relation of elastic properties of rocks the fabric, jour. Geophys. Res., Vol. 70, pp.5657~5667, 1978.
70) Walsh J, B., The Effect of Cracks on the Compressibility of Rock, Journal of

Geophysical, Vol. 70, No. 20, pp.381~389, 1965.

71) O'Connel. R. J., Budiansky B., Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Soilds, Journal of Geophysical Research, Vol. 79, No. 35, pp.5412~5426, 1974.

72) Crampin S., Mcgonigle R. P., Engineering classification and index properties for intact rock, Air Force Weapons Laboratory Technical Report, AFWL-TR-65-116, Kirtland Base, new Mexico, pp.300, 1966.

73) Anderson D. L., Minster B. and Bamford D., Estimating crack parameter from observations of P-wave velocity anisotropy, Geophysics, Vol. 45, pp.345~360, 1980.

74) Ramamurthy T., Venkatappa Rao G. and J Singh, Engineering behaviour of phyllites, Engin, Geol., Vol. 33, pp.209~225, 1993.

75) King M. S., Chaudhry N. A., Shakeel A., Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks, int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomexh. Abstr., Vol. 32, No. 2, pp.155~163, 1995.

76) Hoek E. Fracture of anisotropic rock, J. S. Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 64, pp. 510~518, 1964.

77) Chenevert M. E. and Gatlin C., Mechanical anisotropic of laminated sedimentary rocks, Soc. Pet. Eng. jour., Vol. 5, pp.67~77, 1965.

78) Mclamore R. and Gray K. E., The mechanical behaviour of anisotropic sedimentary rocks, Amer. Soc. Mech. Eng. Trans., Series B, pp.62-76, 1967.

79) Donath F. A., Effects of cohesion and granularity on the deformation behaviour of anisotropic rock, Geol. Soc. Amer., Memoir 135, pp.95~128, 1972.

80) Attewell P. B. and Sandford M. R., Intrinsic shear strength of a brittle anisotropic rock I, Experimental and mechanical interpretation, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Gromech. Abstr, Vol. 11, pp,423~430, 1974.

81) Brown E. T., Richard L. R. and Barr M. V., Shear strength characteristics of Delabole slate, In Proc. Conf. Rock Eng., Newcasle-upon-Type, pp.31~51, 1977.

82) Ramamurthy T., Rao G. V. and Singh J. A., A strength criterion of anisotropic rocks, In Proc, 5th Australlia-New Zealand Conf. on Geomechanics, Sydney, Vol. 1, pp.253~257, 1988.

83) Singh J., Strength prediction of anisotropic rock, Ph. D. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, 1988.

84) Deklotz E. Z., Brown J. W. and Stemler O. A., Anisotropic of a schistose gneiss, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech. Lisbon, Vol. 1. pp.465~470, 1966.

85) McCabe W. M. and Koermer R. M., High Pressure shear strength of anisotropic micaschist rock, Int. Jour, Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. Vol. 12, pp. 219~228, 1975.

86) Horino F. G. and Ellickson M. L., A method of estimating the strength of rock containing planes of weakness, U.S. Bureau of Mines, Report Investigation 7449. 1970.

87) Arora V. K., Strength and deformational behavior of jointed rock, Ph, D. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, 1987.

88) Birch F., The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 1, Journal of Geophysical Res., Vol. 65, pp1,083~1,102, 1960.

89) Birch F., The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2, Journal of Geophysical Res., Vol. 66, pp.2,199~2,224, 1961.

90) Osborne F. F., Rift, grain and hardway in some Rre-Cambrian granites, Quebec, Econ. Geol., 30, pp. 540~551, 1965.

91) McWilliams J. R., The role of microstructure in the physical properties of rock, In : Testing techniques for rock mechanics, Am. Soc, Test Mat., STP 402, pp. 175~189, 1966.

92) Douglass P. M. and Voigt B., Anisotropy of granites, A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, pp. 376~389, 1969.

93) Peng S. S, and Johnson, A. M., Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Celmsford granite, Int. J, Rock Mech. Min. Sci., 9, pp.37~86, 1972.

94) Soga N., Mizutani H., Spetzler H., Martin R., The sffect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, J. Geophy. Res., 83, pp.4,451~4,458.

95) Anderson D. L., Minster B. and Bamford D., The effect of oriented cracks on seismic velocity, J. Geophy. Res., 79, pp.4,011~4,015, 1974.

96) Teufel L. W., "Acoustic Emissions during Anelastic Strain Recovery of Cores Form Deep Boreholes", Proceedings, 30th U.S. Symp. on Rock Mech., Morgantown, WV, pp.269~276, 1989.

97) Judd W. and Huber C., Correlation of rock properties by statistical method, Int. Symp. Minigng Res., Missouri Sch. Mines, Rolla, Mo., 1961.

98) Kranz R. L., Crack-crack and crack-pole interactions in stressed granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 16, pp.37~47, 1979.

99) Ingraffea A. R., and Heuze F., Finite element models for rock fracture mechanical, Int. J. Numerical and Analytical method in Geomechanics, 4, pp. 24~43, 1980)

100) Reyes O. and Einstein, H.H., Failure mechanism of fractured rock-A fracture coalescence model, Proc. 7th ISRM Congr. Achen, Germany, pp. 333~340, 1991.

101) Wu H. and pollard D. D., Possible Secondary fracture patterns duo to a change in the direction of loading, Preprints of the Conference on "Fractured and jointed rock masses", Lake Tahoe, Califonia, pp.505~512, 1993.

102) Ashbridge M., Correlation of tensile strength anisotropy with natural joint direction in the Rosemanowes area : Final year projects report, Camborne School of Mines, 1982.

103) Postma G. W., Wave propagation in a stratified medium, Geophysics, Vol. 20, pp.780~806, 1955

104) Siegfried R., Simmons G., Characterization of oriented cracks with DSA, J. Geophy. Res., Vol. 83, pp.1,269~1,278, 1978.

105) Einstein H. H., and Dershowitz W. S., Tensile and shear fracturing in predominantly compressive stress fields-A review, Eng. Geol., 29, pp.149~172, 1990.

106) Press F., Seismic velocities, Handbook of physical constants, Ceol. Soc. Am.

Memoir, No. 97, 1966.

107) Balakrishna S. and Ramana Y. V,, Laboratory and field velocity measurements in granites, Indian Geophys. Union, Vol. 4, pp.147~156, 1967.

108) Deere D. U., Geological consideration, Rock mechanics in engineering practice, pp. 1~20, 1968

109) Ducan N., Microcracks in crustal igneous rocks : Physical properties, in the Earth's Crust, Geophys. Monogr, Ser., Vol. 20, pp.95~117, 1969.

110) Hamrol N., A quantitative classification of weathering and weatherbility of rocks, Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. En., Vol. 5, pp.771~774, 1969.

111) Illve I. G., An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from. their physicochemical properties Proc. Int. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Vol. 2, pp.109~114, 1970.

112) Barton N. R., A relationship between joint roughness and joint shear strength, Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics(Rock Fracture), Nancy, France, pp.1~8, 1971.

113) Inoue M. and Ohomi M., Relation Uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock, Proc. Int. Symp. of weak rock, Vol. 1, pp.9~14, 1981.

114) King M. S., Wave velocities and dynamic elastic moduli of sedimentary rocks, phD thesis, University of California, Berkeley, pp.116, 1964.

115) Podi-Lucioni A., Experimental determination of the dynamic elastic properties of anisotropic rocks, ultrasonic pulse method, PhD thesis, University of Texas at Austin, pp.182, 1968.

116) Singh V. P., Investigations of attenuation and internal friction of rocks by ultrasonics, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 13, pp.69~74, 1976.

117) Zang A., Wolter K. and Berckhemer H., Stain recovery, microcracks and elastic anisotropy of drill cores from KTB deep well, Scientific Drilling, Vol. 1, pp.115~126, 1989.

118) Siegesmund S., Kern H. and Vollbrecht A,, The effect of oriented microcracks

on seismic velocities in an ultramylonite, Tecotonophysics, Vol,186, pp. 241-251, 1991.

119) Xu S. and King M. S., Modelling of the elastic and hydraulic properties of fractured rocks, Marine and Petrology, Vol. 44, pp.1,016~1,023, 1974.

120) ISRM(International Society for Rock Mechanics), "Suggested method for determining sound velocity", Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci & Geomechanics Abstracts, Vol. 15, pp.53~58, 1978a.

121) Hawkes I. & Mellor M., Uniaxial testing in rock mechanics laboratories, Eng. Geol, Vol. 4, pp.177~285, 1970.

122) Hudson J. A., Crouch S. L. and Fairhurst C., Soft and servo-controlled testing machines, Eng. Geol., Vol. 6, pp.155~189, 1972a.

123) 山口梅太郎, 西松裕一, 岩石力學入門, 東京大學出版會, 제4章, pp.126~128 1976a.

124) ISRM(International Society for Rock Mechanics), "Suggested method for determining deformability of rock materials in triaxial compression", Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci & Geome. Abstr, Vol. 16, pp.135~140, 1979b.

125) ASTM(American Society for Testing and Materials), Standard method of test for elastic moduli of rock core specimens in uniaxial compression., ASTM Designation : D 3148-72, 1985a.

126) Cargill J. S., Shackoor A. E., Evaluation of empirical method for measuring the uniaxial compressive strength of rock. Int Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 57, pp.495~503, 1990.

127) Israely A. A., Study of the engineering geological characteristics of the bedrock in the Jerusalem area, MSc thesis, The Hebrew University Jerusalem, 1973.

128) Deere D. U. and Miller R. P., Engineering classification crack prameters from observation of P-wave velocity anisotropy, Geophysics, Vol. 45, pp.345~360, 1980.

129) Irfan T. Y. and Dearman W. R., Engineering classification and index properties

of weathered granite, Bulletin of the Int. Association of Eng. Geology, No. 17, 1978.

130) Hucka V., A rapid method of determining the strength of rocks in situ, Int. Jour. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr., U.S. Bureau of Mines, Report Investigation 7449, 1970.

131) Kolaiti E., Papadopoulos Z., Evaluation of Schmidt rebound hammer testing : a critical approach, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol. 48, pp.69~76, 1993.

132) Yaalon D. H., Singer S., Vertical variation in strength and porosity of calcrete(nari) on chalk, Shefela, Israel and Interpretation of its origin, Jour. of Sedimentary Petrology, Vol. 44, pp.1,016~1,023, 1974.

133) ISRM(International Society for Rock Mechanics), "Suggested method for determining hardness of rock", Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Sci & Geomech. Abstr, Vol. 15, pp.89~97, 1987.

부 록 Ⅰ. 석조문화재 제안식 적용

<부표 1.1> 석굴암 제안식 적용 결과

No.	부 재	측점	초음파속도 (km/sec)	추정 강도(MPa)		
				(1)	(2)	(3)
1	내부기둥	(1)	4.48	85.2	104.0	107.0
		(2)	4.42	82.4	103.1	105.8
		(3)	4.76	83.4	108.8	113.3
2	정면대좌상판 상부 바닥	(1)	3.89	81.3	93.8	93.8
		(2)	3.68	81.3	90.2	89.1
		(3)	3.78	81.5	91.9	91.4
3	본존 중대석 정면	(1)	2.96	95.7	77.9	73.3
		(2)	3.01	97.9	78.7	74.2
		(3)	2.98	96.3	78.3	73.7
4	본존 하부 기대석	(1)	3.50	84.0	87.2	85.3
		(2)	3.65	81.7	89.7	88.5
		(3)	3.61	82.3	89.1	87.8
5	비도 측면하부 (좌측)	(1)	4.20	67.0	99.2	100.8
		(2)	4.85	64.7	110.4	115.4
		(3)	4.63	65.2	106.6	110.4
6	비도 측면하부 (우측)	(1)	5.14	58.2	115.3	121.7
		(2)	5.02	58.3	113.2	119.0
		(3)	5.17	58.9	115.9	122.5
7	홍예기둥 우측	(1)	3.62	85.7	89.3	88.0
		(2)	3.66	84.3	89.9	88.7
		(3)	3.63	83.8	89.4	88.1
8	전신 좌측 상·하부	(1)	4.97	62.7	112.4	117.9
		(2)	5.02	61.9	113.2	119.0
		(3)	5.14	62.2	115.3	121.7
9	전신 우측 상·하부	(1)	4.32	71.6	101.3	103.5
		(2)	4.39	71.7	102.4	105.0

(1) : 신석재 잔다듬 제안식 - $f_{su} = 17.19V_p + 26.99$
(2) : 구석재 잔다듬 제안식 - $f_{su} = 22.29V_p + 7.19$
(3) : 통합식 잔다듬 제안식- $f_{su} = 21.70V_p + 8.22$

<부표 1.2> 분황사 석탑 제안식 적용 결과

No.	부 재	측점	초음파속도 (km/sec)	추정 강도(MPa)		
				(1)	(2)	(3)
1	남측면 인방석	(1)	3.20	89.9	67.4	80.7
		(2)	3.30	90.6	68.9	82.7
		(3)	3.28	90.5	68.7	82.4
2	동측면 하방석	(1)	5.42	106.4	100.8	126.1
		(2)	5.54	107.3	102.6	128.6
		(3)	5.51	107.1	102.3	128.2
3	북측면 하방석	(1)	3.33	90.9	69.4	83.5
		(2)	3.25	90.3	68.2	81.8
		(3)	3.27	90.4	68.5	82.1
4	서측면 인방석	(1)	3.46	91.9	71.4	86.1
		(2)	3.26	90.4	68.4	82.0
		(3)	3.36	91.1	69.8	83.9
5	남측면 기단석	(1)	2.32	83.4	54.2	62.7
		(2)	2.27	83.0	53.4	61.7
		(3)	2.30	83.3	54.0	62.4
6	동측면 기단석	(1)	3.03	88.7	64.9	77.3
		(2)	2.84	87.2	62.0	73.3
		(3)	2.85	87.3	62.1	73.5
7	북측면 기단석	(1)	4.78	101.7	91.2	113.0
		(2)	4.63	100.6	88.9	110.0
		(3)	4.73	101.3	90.5	112.1
8	서측면 기단석	(1)	3.72	93.8	75.3	91.4
		(2)	3.41	91.5	70.6	85.0
		(3)	3.44	91.7	71.1	85.7
9	서측면 박석2단	(1)	5.86	109.7	107.4	135.2
		(2)	5.95	110.4	108.8	137.1
		(3)	5.88	109.9	107.8	135.7
10	북측면 박석1단	(1)	5.68	108.4	104.8	131.6
		(2)	5.49	107.0	101.9	127.7
		(3)	5.62	107.9	103.8	130.3
11	남측면 박석3단	(1)	5.64	108.1	104.1	130.7
		(2)	5.68	108.4	104.8	131.6
		(3)	5.66	108.2	104.4	131.1

(1) : 신석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 7.44 V_p + 66.12$
(2) : 구석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 15.04 V_p + 19.31$
(3) : 통합식 거친다듬 제안식- $f_{su} = 20.49 V_p + 15.16$

<부표 1.3> 경주 첨성대 제안식 적용 결과

No.	부 재	측점	초음파속도 (km/sec)	추정 강도(MPa)		
				(1)	(2)	(3)
1	정면-좌측면 지대석	(1)	4.69	101.0	89.8	111.2
		(2)	5.10	104.1	96.0	119.7
		(3)	4.98	103.2	94.3	117.3
2	정면-우측면 지대석	(1)	5.02	103.4	94.8	118.0
		(2)	4.76	101.5	90.9	112.7
		(3)	4.93	102.8	93.5	116.3
3	우측-배면 지대석	(1)	4.64	100.7	89.2	110.3
		(2)	4.64	100.7	89.2	110.3
		(3)	4.66	100.8	89.4	110.6
4	좌측-배면 지대석	(1)	4.82	102.0	91.9	114.0
		(2)	4.66	100.8	89.4	110.6
		(3)	4.57	100.1	88.1	108.9

(1) : 신석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 7.44V_p + 66.12$
(2) : 구석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 15.04V_p + 19.31$
(3) : 통합식 거친다듬 제안식- $f_{su} = 20.49V_p + 15.16$

<부표 1.4> 경주 첨성대 제안식 적용 결과

No.	부 재	측점	초음파속도 (km/sec)	추정 강도(MPa)		
				(1)	(2)	(3)
1	동측면 기단석 탱주	(1)	1.80	79.5	46.4	52.0
	서측면 기단석 탱주	(2)	2.24	82.8	53.0	61.1
	남측면 기단석 탱주	(3)	2.08	81.6	50.6	57.8

(1) : 신석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 7.44V_p + 66.12$
(2) : 구석재 거친다듬 제안식 - $f_{su} = 15.04V_p + 19.31$
(3) : 통합식 거친다듬 제안식- $f_{su} = 20.49V_p + 15.16$

부 록 Ⅱ. 실험사진

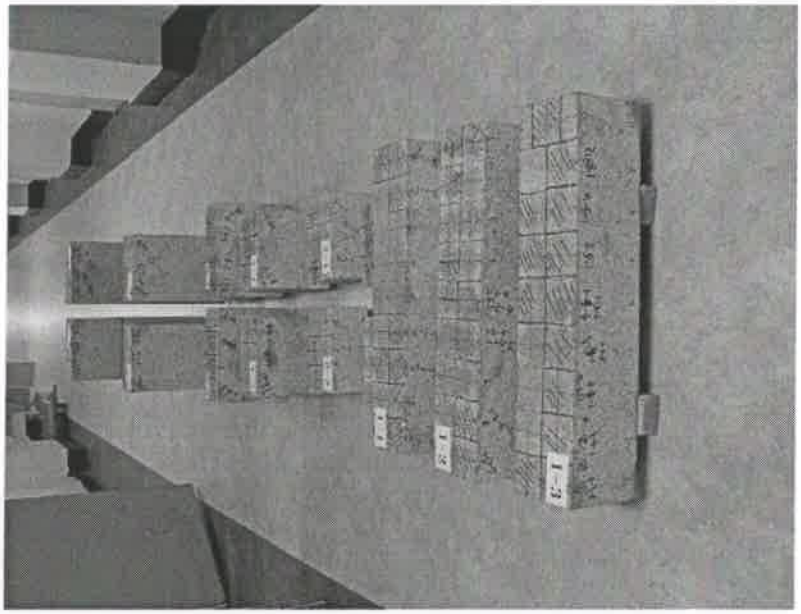


사진 1. 구석재 실험체 가공 후 전경

사진 2. 신석재 실험체 가공 후 전경

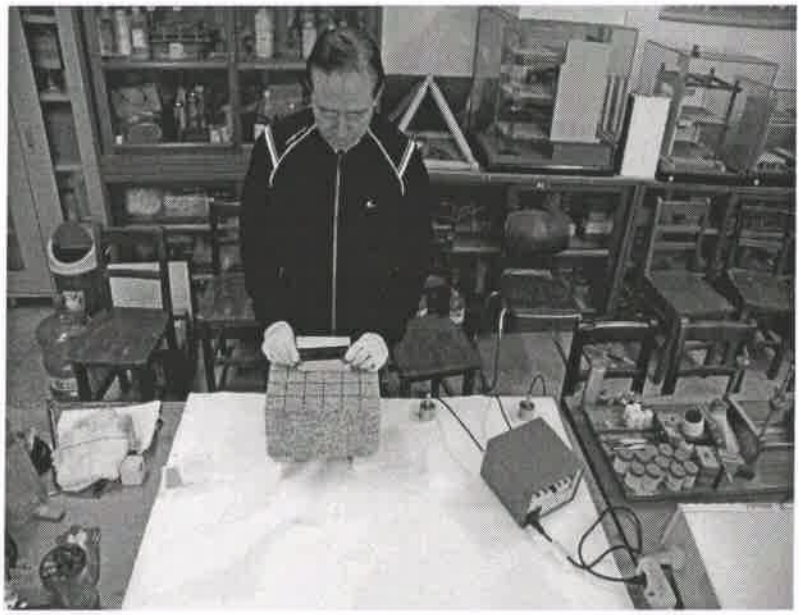


사진 3. 실험체 거칠기 측정 전경

사진 4. 간접법에 의한 구석재 초음파 속도 측정 전경

사진 5. 직접법에 의한 구석재 초음파 속도 측정 전경

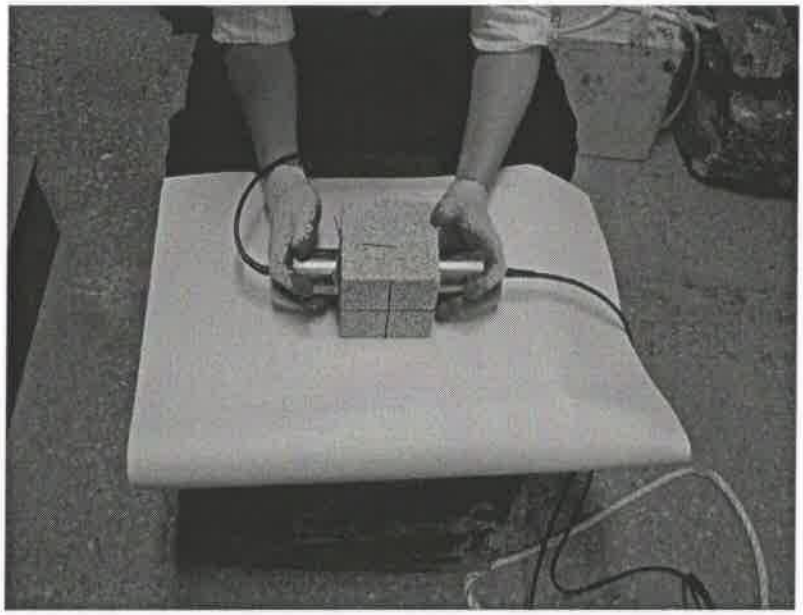


사진 6. 압축강도 실험체의 초음파 속도 측정 전경

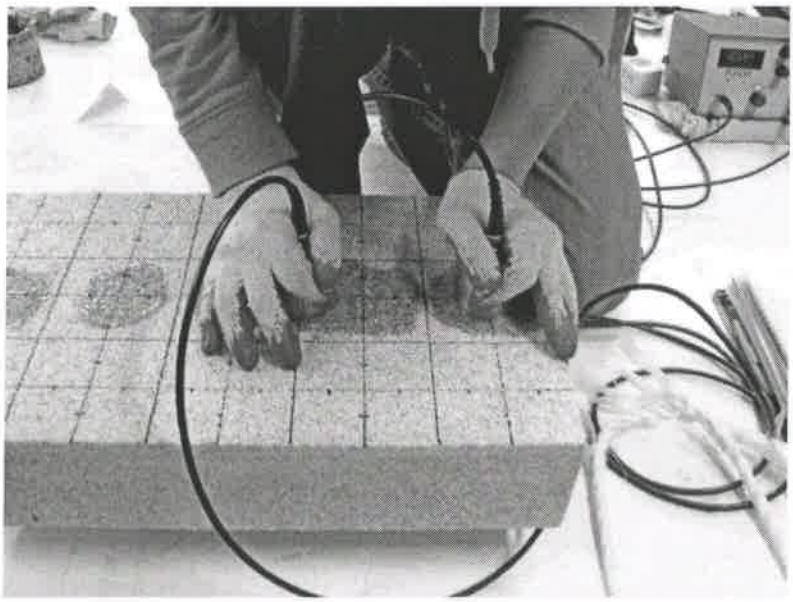


사진 7. SI1 실험체 겔 도포 후 간접법 초음파 속도 측정 전경

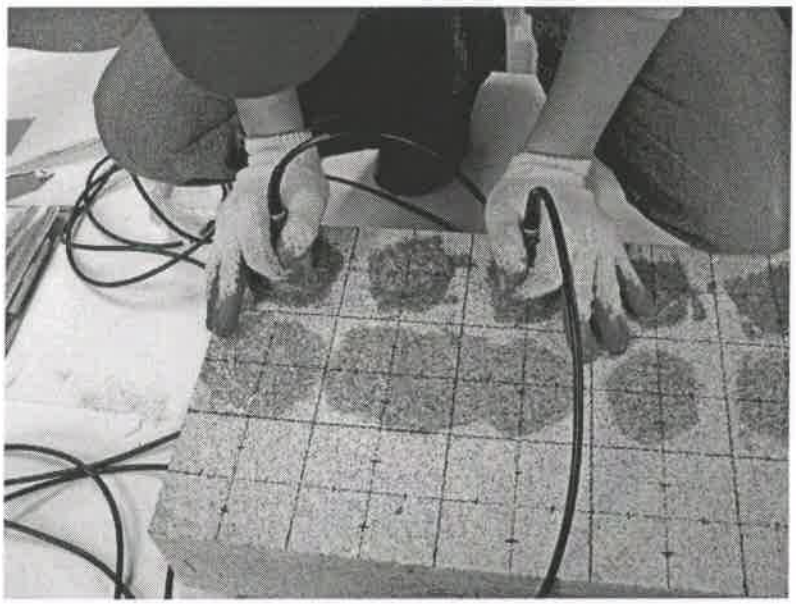


사진 8. SI1 실험체 그리스 도포 후 간접법 초음파 속도 측정 전경

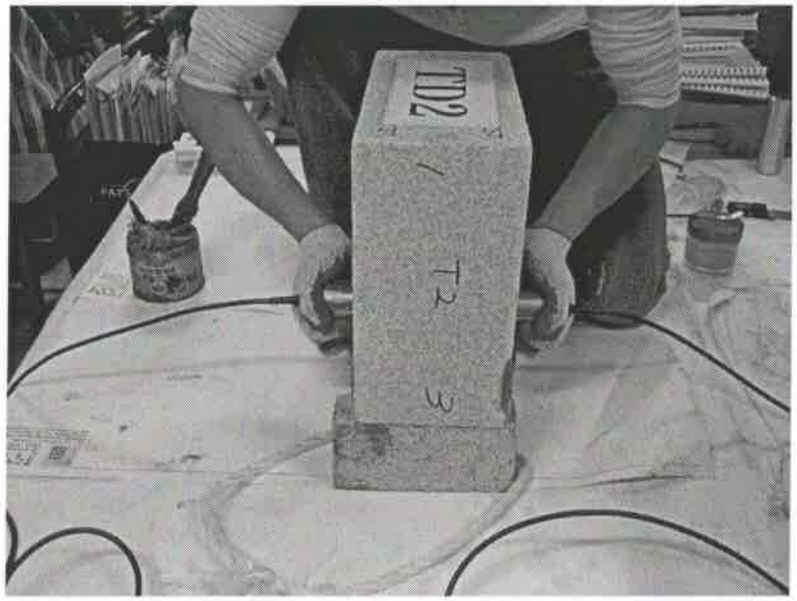


사진 9. TD2 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경

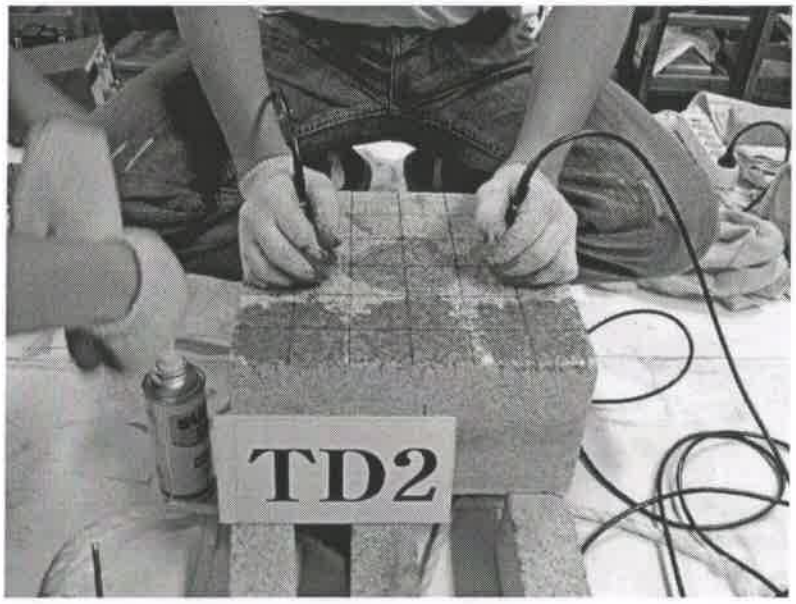


사진 10. TD2 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경

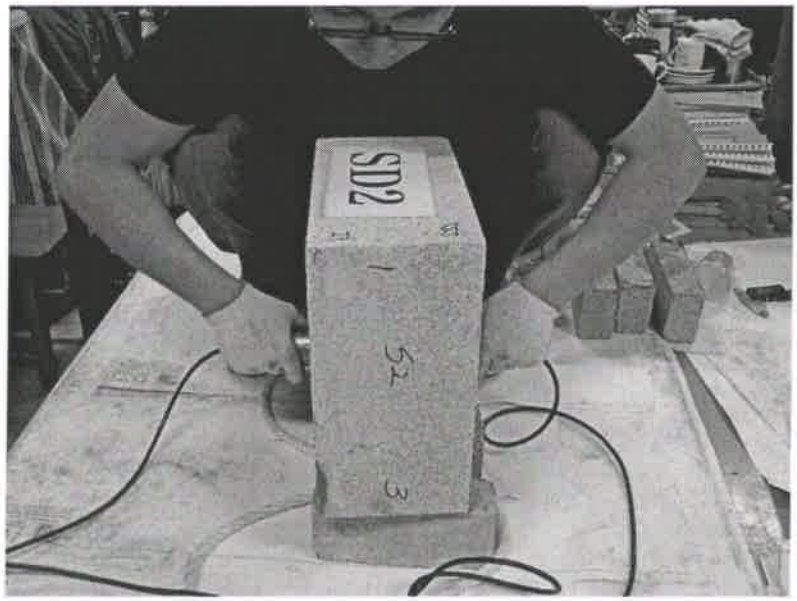


사진 11. SD2 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경

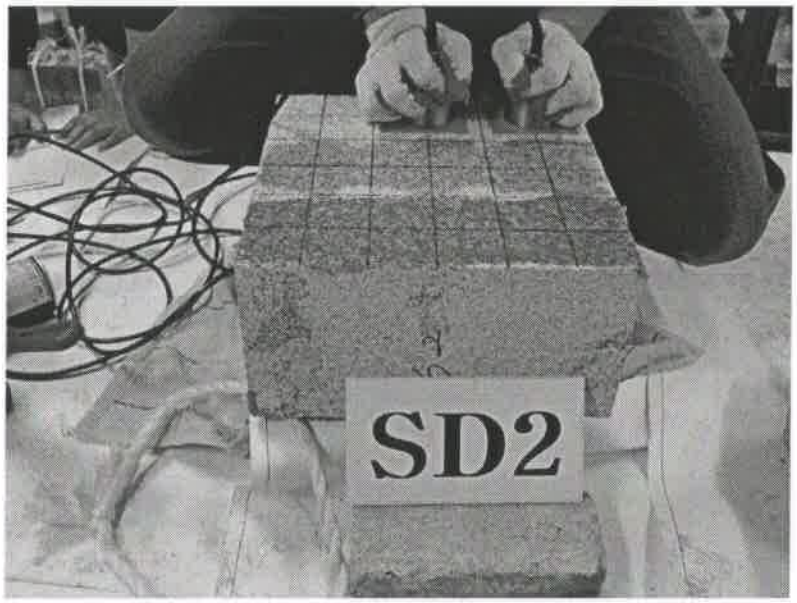


사진 12. SD2 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경

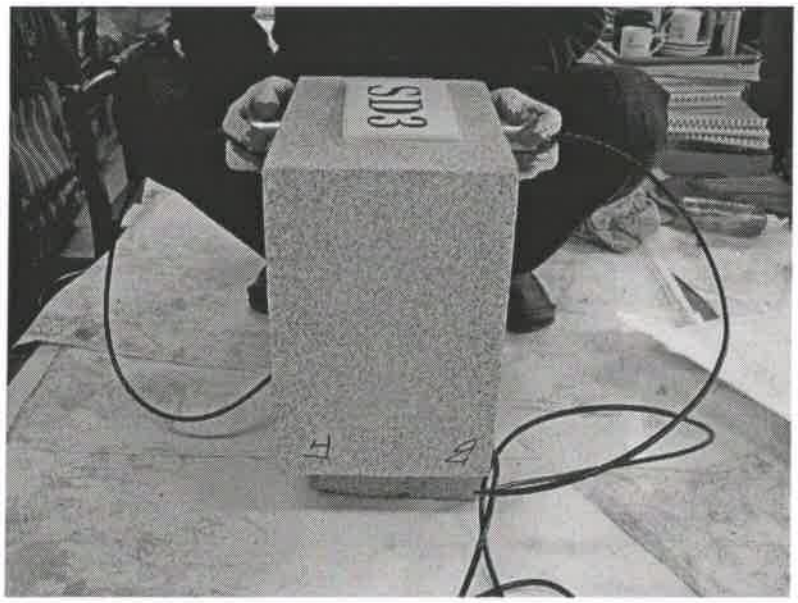


사진 13. SD3 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경

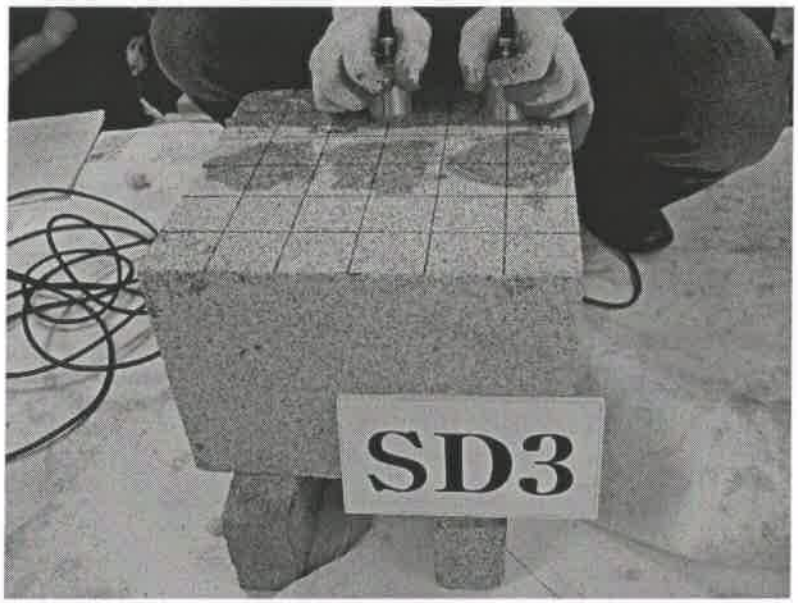


사진 14. SD2 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경

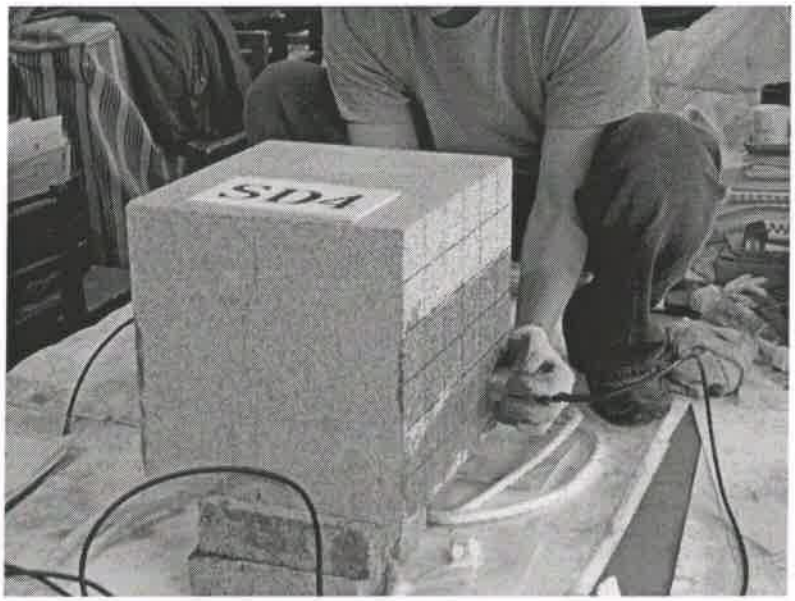


사진 15. SD4 실험체 직접법 초음파 속도 측정 전경

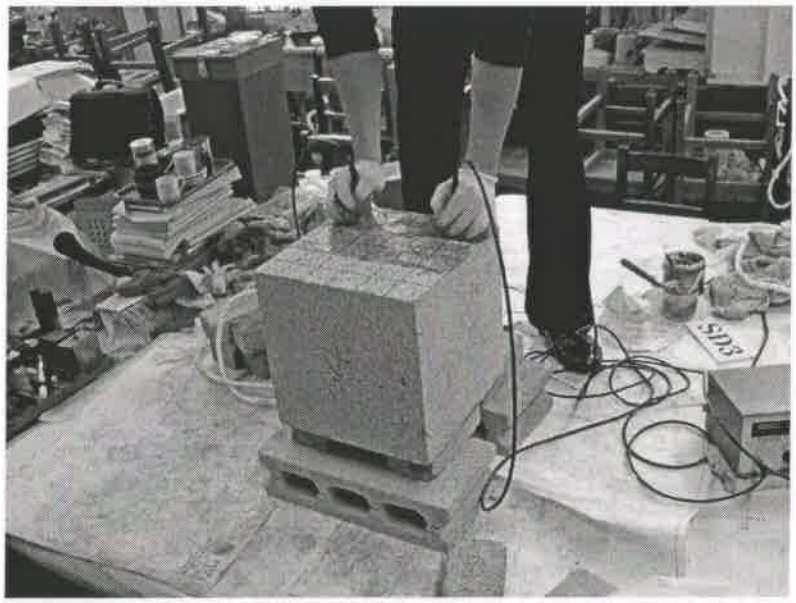


사진 16. SD4 실험체 간접법 초음파 속도 측정 전경

저작물 이용 허락서

학 과	건축공학과	학 번	20077570	과 정	석사, 박사
성 명	한글: 김정훈 한문 : 金正勳 영문 : Kim, Jeong-Hoon				
주 소	서울시 강남구 논현동 176-15				
연락처	010-2955-5800	E-MAIL	kimth1950@chosun.ac.kr		
논문제목	한글 : 石造 構造體의 非破壞 試驗法에 의한 强度 推定에 관한 硏究				
	영어 : A Study on the Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Stone Structures				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2010년 7월 일

저작자: 김 정 훈 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하