[UCI]I804:24011-200000233326

2006年 8月

博士學位論文

혼화재 및 섬유 사용 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도 추정

朝鮮大學校 大學院

建築工學科

金 判 善

혼화재 및 섬유 사용 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도 추정

Strength Estimation by Non-Destructive Testing of Concrete using Admixture and Fiber

2006年 8月 25日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 判 善

혼화재 및 섬유 사용 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도 추정

指導敎授　金　政　燮

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함.

2006年　4月　17日

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

金　判　善

金判善의 工學博士學位論文을 認准함.

委 員 長	教授	印
委 員	教授	印
委 員	教授	印
委 員	教授	印
委 員	教授	印

2006年 6月 21日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

목 차

Abstract

기 호

Ⅰ. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적 ····· 2
1.2 연구 범위 및 방법 ····· 4
1.3 기존 연구의 동향 ····· 6
1.3.1 기존 연구 ····· 6
1.3.2 외국의 연구동향 ····· 6
1.3.3 국내의 연구동향 ····· 9
1.4 연구 진행 흐름도 ····· 14

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 압축강도 추정 ····· 15
2.1.1 비파괴 시험의 개요 ····· 15
2.1.2 비파괴 시험 방법의 분류와 특징 ····· 16
2.2 콘크리트 구조물의 주요 비파괴 검사법 ····· 20
2.2.1 슈미트햄머법(Schumidt hammer test) ····· 20
2.2.2 초음파속도법 ····· 24
2.2.3 복합법 ····· 27
2.3 코어(core)에 의한 압축강도 추정 ····· 28
2.4.1 코어 채취법의 개요 ····· 28
2.4.2 코어 공시체의 압축강도 시험 ····· 29
2.4.3 코어시험 강도추정에 미치는 영향인자 ····· 30

Ⅲ. 실험계획

3.1 실험의 개요 ····· 33
3.2 사용 재료 ····· 35
3.2.1 시멘트 ····· 35

3.2.2 골재 ····· 35
3.2.3 혼화재 ····· 35
3.2.4 섬유 ····· 36
3.2.5 콘크리트 배합 ····· 36
3.3 시험체 제작 ····· 37
3.4 실험 방법 ····· 40
3.4.1 압축강도 ····· 40
3.4.2 반발경도 측정 ····· 40
3.4.3 초음파속도 측정 ····· 42
3.5 실험기기 ····· 43

Ⅳ. 실험결과

4.1 실험결과 ····· 44
4.1.1 파괴 압축강도 ····· 49
4.1.2 반발경도 ····· 55
4.1.3 초음파속도 ····· 61
4.2 기존 제안식 적용결과 ····· 66
4.2.1 반발경도법에 의한 기존 제안식 적용 결과 ····· 66
4.2.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식 적용 결과 ····· 75
4.2.3 복합법에 의한 기존 제안식 적용 결과 ····· 84
4.3 소 결 ····· 93

Ⅴ. 회귀분석에 의한 강도 추정식 제안

5.1 보통콘크리트의 회귀분석 ····· 96
5.2 플라이애시 치환 콘크리트 회귀분석 ····· 98
5.3 고로슬래그 치환 콘크리트 회귀분석 ····· 101
5.4 실리카흄 치환 콘크리트 회귀분석 ····· 103
5.5 폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트 회귀분석 ····· 106
5.6 강 섬유 혼입 콘크리트 회귀분석 ····· 108
5.7 소 결 ····· 111

Ⅵ. 기존 제안식과 추정식 비교
6.1 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 112
6.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 121
6.3 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 130
6.4 소 결 ····· 140

Ⅶ. 재령 보정계수의 적용에 따른 추정 ····· 141

Ⅶ. 결 론 ····· 143

참고문헌 ····· 146

부록 ····· 149

표 목 차

<표 1.1> 슈미트 햄머법(Schumidt hammer test)의 연구동향(국외) ····· 7
<표 1.2> 초음파속도법의 연구동향(국외) ····· 8
<표 1.3> 복합법의 연구동향(국외) ····· 8
<표 1.4> 슈미트 햄머법의 연구동향(국내) ····· 10
<표 1.5> 초음파속도법의 연구동향(국내) ····· 11
<표 1.6> 복합법의 연구동향(국내) ····· 12
<표 1.7> 기타 콘크리트 압축강도 추정에 관한 연구동향(국내) ····· 12

<표 2.1> 비파괴 시험 방법의 분류 및 특징 ····· 16
<표 2.2> 슈미트햄머의 종류 및 특성 ····· 20
<표 2.3> 반발경도에 영향을 미치는 인자 ····· 21
<표 2.4> 타격방향 보정 값 ····· 21
<표 2.5> 재령(材齡)에 의한 보정 값 ····· 22
<표 2.6> 슈미트햄머법에 관한 각국의 기준 ····· 23
<표 2.7> 반발경도에 의한 콘크리트 강도 추정식 ····· 23
<표 2.8> 각국의 초음파속도법 적용범위 ····· 24
<표 2.9> 초음파속도에 의한 콘크리트 강도 추정식 ····· 25
<표 2.10> 콘크리트 온도에 따른 초음파속도 수정계수 ····· 26
<표 2.11> 음속(音速)에 의한 품질판정 ····· 26
<표 2.12> 복합법에 의한 콘크리트 강도 추정식 ····· 27
<표 2.13> 코어 높이와 지름비 변화에 따른 보정계수 ····· 31

<표 3.1> 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질 ····· 35
<표 3.2> 골재의 물리적 성질 ····· 35
<표 3.3> 혼화재의 화학적 성질 ····· 36
<표 3.4> 섬유의 물리적 특성 ····· 36
<표 3.5> 콘크리트 배합표 ····· 37
<표 3.6> 실험 변수 ····· 39

<표 4.1> 원주형 공시체의 실험결과 ····· 44
<표 4.2> 코어 공시체의 실험결과 ····· 46
<표 4.3> 보통콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 66
<표 4.4> FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 68
<표 4.5> BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 69
<표 4.6> SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 71
<표 4.7> PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 72
<표 4.8> S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의추정강도와 파괴강도 비교 ···· 74
<표 4.9> 보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 75
<표 4.10> FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 77
<표 4.11> BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 78
<표 4.12> SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 80
<표 4.13> PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 81
<표 4.14> S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 83
<표 4.15> 보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 84
<표 4.16> FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 86
<표 4.17> BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의추정강도와 파괴강도 비교 ····· 87
<표 4.18> SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 89
<표 4.19> PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 90
<표 4.20> S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 92

<표 5.1> 보통 콘크리트 강도 추정식 ····· 96
<표 5.2> FA 치환 콘크리트 강도 추정식 ····· 99
<표 5.3> BF 치환 콘크리트 강도 추정식 ····· 101
<표 5.4> SF 치환 콘크리트 강도 추정식 ····· 103
<표 5.5> PP 혼입 콘크리트 강도 추정식 ····· 106
<표 5.6> S 혼입 콘크리트 강도 추정식 ····· 108

<표 7.1> 시험체별 단일법의 재령 보정계수 ····· 141

그 림 목 차

[그림 1.1] 비파괴 시험법의 사용빈도 ····· 5
[그림 1.2] 연구 진행 흐름도 ····· 14

[그림 3.1] 추정식 작성 흐름도 ····· 34
[그림 3.2] 부재 시험체 평면도, 입면도, 입체도, 배근도 ····· 37
[그림 3.3] 부재 시험체 코어 채취도 및 코어 채취 전경 ····· 38

[그림 4.1] 보통 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 50
[그림 4.2] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 50
[그림 4.3] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 51
[그림 4.4] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 52
[그림 4.5] PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 53
[그림 4.6] S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 54
[그림 4.7] 보통 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화 ····· 55
[그림 4.8] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화 ····· 56
[그림 4.9] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화 ····· 57
[그림 4.10] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화 ····· 58
[그림 4.11] PP 섬유 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화 ····· 59
[그림 4.12] S 섬유 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화 ····· 60
[그림 4.13] 보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 61
[그림 4.14] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 62
[그림 4.15] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 63
[그림 4.16] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 64
[그림 4.17] PP 섬유 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 64
[그림 4.18] S 섬유 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화 ····· 65
[그림 4.19] 보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도 비교 ····· 67
[그림 4.20] FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 68

[그림 4.21] BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 70
[그림 4.22] SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 71
[그림 4.23] PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 73
[그림 4.24] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 74
[그림 4.25] 보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ·· 76
[그림 4.26] FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ·· 77
[그림 4.27] BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ·· 79
[그림 4.28] SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ·· 80
[그림 4.29] PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ·· 82
[그림 4.30] S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 83
[그림 4.31] 보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 85
[그림 4.32] FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ··· 86
[그림 4.33] BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 88
[그림 4.34] SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 89
[그림 4.35] PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ···· 91
[그림 4.36] S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 92

[그림 5.1] 보통 콘크리트 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 97
[그림 5.2] 보통 콘크리트 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 97
[그림 5.3] 보통 콘크리트 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 98
[그림 5.4] FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 99
[그림 5.5] FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 100
[그림 5.6] FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 100
[그림 5.7] BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 102
[그림 5.8] BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 102
[그림 5.9] BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 103
[그림 5.10] SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 104
[그림 5.11] SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 105
[그림 5.12] SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 105
[그림 5.13] PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 107

[그림 5.14] PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 107
[그림 5.15] PP콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 108
[그림 5.16] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 109
[그림 5.17] S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석 ····· 110
[그림 5.18] S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석 ····· 110

[그림 6.1] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교 ····· 112
[그림 6.2] 시험체별 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 113
[그림 6.3] 보통콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 116
[그림 6.4] FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 117
[그림 6.5] BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 118
[그림 6.6] SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 118
[그림 6.7] PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 119
[그림 6.8] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 120
[그림 6.9] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정 강도와 파괴 강도 비교 ····· 121
[그림 6.10] 시험체별 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 122
[그림 6.11] 보통콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ··· 125
[그림 6.12] FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ··· 126
[그림 6.13] BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ··· 126
[그림 6.14] SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ··· 127
[그림 6.15] PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ··· 128
[그림 6.16] S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 129
[그림 6.17] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정 압축강도와 파괴 압축강도 비교 ····· 130
[그림 6.18] 시험체별 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교 ····· 131
[그림 6.19] 보통콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 134
[그림 6.20] FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 135
[그림 6.21] BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 136
[그림 6.22] SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 137
[그림 6.23] PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 138
[그림 6.24] S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율 ····· 139

사 진 목 차

[사진 3.1] 파괴 압축강도 실험 전경 ····· 40
[사진 3.2] 반발경도 측정 전경 ····· 41
[사진 3.3] 초음파속도 측정 전경 ····· 42

부 록 사 진 목 차

사진 1. 부재 시험체 바닥 철근 배근 전경 ····· 149
사진 2. 부재 시험체 철근 배근 및 거푸집 제작 전경 ····· 149
사진 3. 슬럼프 테스트 전경 ····· 150
사진 4. 부재시험체 부어넣기 후 전경 ····· 150
사진 5. 코어 채취 전경 ····· 151
사진 6. 재령 90일 압축강도 실험 전경 ····· 151
사진 7. 재령 90일 반발경도 측정 전경 ····· 152
사진 8. 재령 90일 초음파속도 측정 전경 ····· 152
사진 9. 재령 365일 반발경도 측정 전경 ····· 153
사진 10. 재령 730일 코어 채취 전경 ····· 153
사진 11. 재령 730일 부재 시험체 반발경도 측정 전경 ····· 154
사진 12. 재령 730일 코어 채취후 부재 시험체 전경 ····· 154

기 호

f_{ck} : 설계기준강도

f_c : 콘크리트 압축강도

f_{cu} : 콘크리트의 추정 압축강도

f_{cu}/f_c : 압축강도/추정 압축강도

R : 반발경도

R_a : 테스트 앤벌(test anvil)에 따른 하향 타격시(α=-90°)의 반발경도

R_1 : 공시체에서 측정한 반발경도의 평균값

R_2 : 구조체에서 측정한 반발경도의 평균값

V_p : 초음파 속도(km/s)

β_n : 재령 보정계수

CR : 상관계수(coefficient of correlation)

CR^2 : 결정계수(coefficient of determination)

ASTM : 미국 재료 시험 협회(American Society of Testing Materials)

ACI : 미국 콘크리트학회(American Concrete Institute)

Abstract

Strength Estimation by Non-Destructive Testing Concrete using Admixture and Fiber

By Kim, Pan-Sun
Director : Prof. Kim, Jeong-Sup
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

This study aims to estimate strength approximate to actual concrete strength by presenting appropriate non-destructive strength estimation expression with admixtures such as fly ash, blast furnace slag and silica fume which are used as cement substitute and polypropylene fiber and steel fiber and owing to their s of cement owing to their equal conditions to blending characteristics of concrete used for domestic structures and their recyclable properties.

1) As a result of destructive and non-destructive test, manifestation of strength over design standard strength was found at the 28 days of age and normal concrete strength was lowered after 60 days of age, but strength of concrete using admixtures and fiber showed increase after 90 days of age. In addition, it was found that PP fiber and S fiber had little influence on compressive strength and had

influence on bending and tensile strength through existing studies and this study.

2) Concrete using admixtures showed lower trend in early compressive strength, ultrasound speed and repulsive hardness than normal concrete, but existing expressions were applied on the basis of result that as age is longer, it had higher result than normal concrete, it is considered that destructive and estimated strength showed much difference and it is judged that new estimation expression suitable to concrete using admixtures and fiber is needed.

3) In case of re-bound hammering, equation by Japanese Architecture Society was estimated 26～40% higher than destructive strength and remaining suggested equation was estimated 2%~18% lower. In case of ultrasound velocity, equation by Japanese Architecture Society was estimated 4%～11% higher than destructive strength till 60 days of age, but as age progresses, i is estimated to 15% lower than destructive strength and remaining suggested equation was estimated 3%～27% lower than destructive strength in almost age. In case of complex methods, all suggested equations were estimated to 24%～94% higher than destructive strength.

4) In case of comparing complex methods by multiple regressive analysis using single method, re-bound hammering and ultrasound velocity, there are a little differences by specimens, but it is considered that it shows 0.2%～11.0% of decisive coefficient compared

to ultrasound velocity method and 0.2%～9.8% of decisive coefficient compared to re-bound hammering and complex method may estimate more accurate strength than single method.

5) As a result of comparing error rates between conventional suggested equations and this estimation equations, there are a little differences by age, but error rate of this study was reduced to 0. 3%～15.5% compared to conventional equations by re-bound hammering, 0.6%～18.6% by ultrasound velocity method and 0.6%～34.2% by complex method and it is judged that it is desirable to be used for concrete using admixture and fiber

6) Since application of existing expression of normal concrete against concrete using admixtures and fiber causes error rate, this study suggests the following estimation expression depending on the kind of admixtures and fiber of concrete using them and position of non-destructive experiment.

Ⅰ. 서 론

콘크리트는 사용성 측면에서 내구성(耐久性) 및 내화성(耐火性)이 우수하고, 재료 공급이 용이하여 건축물 등에 많이 사용되고 있다. 또한, 콘크리트는 압축력에는 강하지만 인장력은 압축강도의 약 1/6 밖에 안돼 취성(脆性)파괴(Brittle Failure)되는 특성을 가지고 있다.

인장력에 약한 콘크리트의 단점을 보완하기 위하여 철근이나 용접철망을 보강함으로써 구조적 상호보완작용을 통해 외력에 효과적으로 저항할 수 있는 철근콘크리트구조를 형성한다.

콘크리트는 시멘트와 골재, 물 등과 결합하여 혼합 구성되는 고형(固形)물질로서 역학적으로 요구되는 강도를 발현(發現)하기 위해서는 물시멘트비(W/C)가 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 콘크리트는 혼합 구성되는 불균일한 재료이고, 수화반응 및 양생과정에서 수축(Shringkage)으로 인한 미세한 균열 및 결함을 내포하는 재료로 볼 수 있다.

시멘트의 주재료인 산화칼슘(CaO)은 석회석에서 추출되는데 자원의 한정과 자연환경의 측면에서 시멘트를 대체자원인 혼화재로 치환하여 사용한다. 이 콘크리트를 혼화 콘크리트라고 한다.

콘크리트는 이러한 재료 및 역학적인 단점을 갖고 있어, 이를 보완하기 위해 그 성질에 따라 각종 보강 및 혼화 콘크리트를 개발하여 사용하고 있다.

섬유보강 콘크리트는 건조나 온도에 의해 수축될 때 구속에 의해 발생하는 인장응력 및 균열을 제어(制御)하고, 인성(靭性)의 증가와 충격, 마모(磨耗), 피로에 대한 저항성을 증대시키며 내구성을 증대시키는 등의 여러 가지 장점을 가지고, 역학적 단점인 취성을 보완하고 연성(延性) 확보와 에너지 흡수 능력을 증대시켜 그 사용이 증대되고 있다.

철근콘크리트 건축물에서 콘크리트의 강도에 대한 평가는 유지관리 및 구조적 안전성 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 콘크리트 강도에 대한 평가는 구조체에서 코어를 채취하여 파괴 시험을 하거나, 구조체에서 반발경도법과 초음파속도법에 의

한 시험값을 기존 강도 추정식에 적용하는 비파괴 시험이 주로 사용되고 있다. 그러나 실제 사용하는 건축물의 콘크리트 강도를 평가하기 위하여 손상을 주는 파괴시험은 건축물에 구조적인 문제점을 초래할 수 있어 비파괴시험을 통해서 강도를 평가하는 것이 바람직할 것이다.

따라서 보통콘크리트뿐만 아니라 일반적으로 사용되어지는 혼화 및 섬유보강 콘크리트에 대한 비파괴시험법이 연구되어 실제 구조물에 적용되어져야 한다.

1.1 연구 배경 및 목적

철근콘크리트 구조물에 있어서 콘크리트의 강도는 구조물의 안전성(安全性) 및 내구성을 평가하는 기본적인 요소로서, 콘크리트가 소정의 강도를 확보하고 균일성을 유지하도록 하는 것은 구조적 안전성을 확보하는데 중요하다.

기존 콘크리트 구조물에 대한 압축강도 추정은 일반적으로 현장의 콘크리트 부어넣기와 병행하여 제작된 공시체를 재령(材齡)에 따라 실험한 결과를 이용하여 간접적인 방법으로 추정하고 있으나, 이 추정 값은 실제 건축물에 부어넣기된 콘크리트 강도와 다소 차이를 보이는 것이 보통이다.

또한 품질관리용 공시체가 없는 구조체의 경우에는 콘크리트 강도를 직접 측정해야 하며, 이 경우에는 구조체로부터 코어(core)를 채취하여 강도시험을 하는데 코어의 채취 위치나 개수의 한정 및 철근의 절단과 콘크리트의 내구성 저하 등과 같은 부분적인 손상을 줄 수 있어 파괴시험보다는 비파괴 시험을 통해서 강도를 평가하는 것이 바람직할 것이다.

비파괴 시험에는 **반발경도법**과 **초음파속도법**에 의한 **단일법, 반발경도**와 **초음파속도**를 조합한 **복합법**이 주로 사용되고 있다.

하지만, 이런 단일법과 복합법에 대한 제안식은 국내 실정에 맞는 제안식이 없어서 외국의 제안식을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 또한 외국의 제안식도 실험실에서 제작한 공시체를 수중양생(水中養生)에 의한 제안식을 작성하고 있어서, 이 제안식을 현장의 기중양생(氣中養生) 콘크리트 구조물에 적용시키는 것은 양생방법에 따른 추정강도와 파괴강도의 오차가 발생하므로 적합하지 않다.

이로 인해 몇 가지 문제점이 지적되고 있다.

1) 보통콘크리트 압축강도 추정식을 사용하여 혼화재(混和材) 및 섬유를 사용한 콘크리트의 강도를 추정하고 있다.

2) 콘크리트에 사용되는 골재, 시멘트, 혼화재 등에 따라 외국과 상이한 점이 크지만 철저한 검증 절차 없이 외국의 추정식을 사용하는 실정
이다.

3) 국내에서 연구되어지고 있거나 발표된 추정식은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법)에 지정된 원주(圓柱)형 공시체를 제작하여 강도 추정식을 제안하므로써 실제 구조물의 강도와 차이가 있다.

4) 추정강도와 실제 기중양생된 파괴강도와의 차이가 발생한다.

이러한 문제점을 내포한 상황에서 콘크리트의 강도를 평가함에 있어 추정강도를 실제 강도보다 낮게 평가하여 불필요한 보강을 초래할 수 있고, 추정강도를 너무 높게 평가하면 안전성을 과대 평가하여 구조물에 손상을 가져올 수 있게 되는 의 문제점을 갖고 있다.

따라서 본 연구는 국내 구조물에 사용된 콘크리트의 배합특성 및 실제 구조물과 동일한 기중조건과 자원의 재활용 및 각종 장점으로 인해 시멘트의 대체 사용이 일반화 되고 있는 플라이애시(fly ash ; 이하 FA), 고로(高爐)슬래그(blast furnace slag ; 이하 BF), 실리카흄(silica fume ; 이하 SF) 등의 혼화재와 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber ; 이하 PP), 강섬유(steel fiber ; 이하 S) 등의 섬유를 대상으로 적정한 비파괴 강도 추정식을 제안함으로써 실제 콘크리트의 강도에 근접한 강도를 추정하는데 목적이 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

철근콘크리트건축물에 대해 유지관리상과 구조적 안전성 및 내구성을 확보하기 위해 안전점검 및 진단을 실시하는데 혼화재료 및 섬유보강 콘크리트의 특성에 적정한 비파괴식을 적용하여야 하지만, 보통콘크리트를 기준으로 하여 제안된 추정식을 일반적으로 사용하고 있다.

콘크리트에 사용되는 골재, 시멘트 및 혼화재료 등에 따라 국내의 여건은 외국과 상이한 점이 크지만 철저한 검증절차 없이 외국의 추정식들을 사용하는 실정이다. 한편, 콘크리트 압축강도 추정식은 크게 기준이 되는 공시체의 양생조건이 수중양생과 기중양생으로 구분되어 제안되었으나 기중양생으로 건설되어지는 구조물에 무분별하게 사용하는 문제점을 내포하고 있다.

콘크리트는 내화성이 우수한 성질을 가지고 있지만 일정시간 이상 화재에 노출되게 되면 압축력 및 부착력과 알카리성을 잃어버리는 것으로 알려져 있다. 또한 고강도 콘크리트는 고온(高溫)을 받으면 폭열(爆裂) 하는 것으로 알려져 있다.

여러 가지의 문제점을 내포한 상황에서 콘크리트의 강도를 평가함에 있어 추정강도를 실제 강도보다 낮게 평가하면 불필요한 보강을 초래할 수 있고, 추정강도를 너무 높게 평가하면 안전성을 과대평가하여 구조물의 붕괴를 일으킬 수 있는 문제점을 갖는다.

따라서 본 연구는 국내 건축물에 사용된 콘크리트의 배합특성 및 기중조건에 적정한 비파괴 시험법을 제안함으로써 실제 콘크리트의 압축강도에 근접한 강도를 추정하는데 목적이 있다.

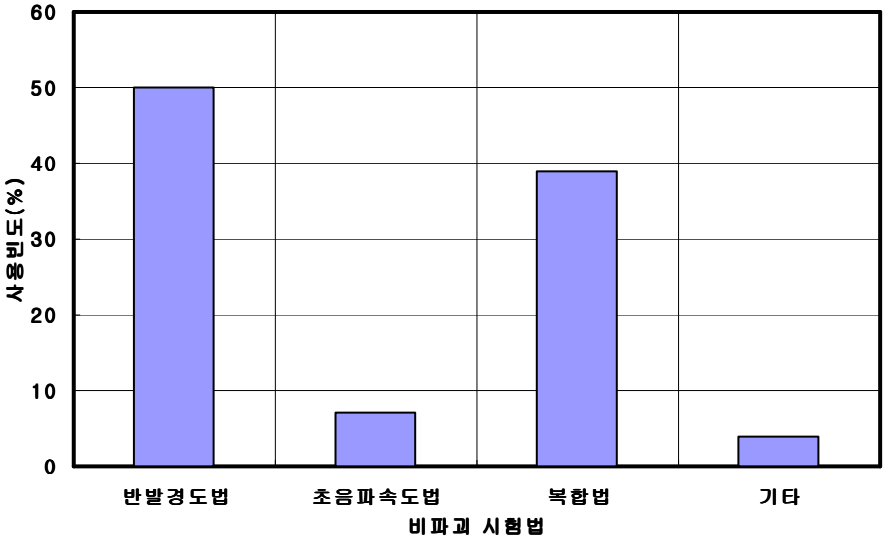
콘크리트의 강도를 정밀하게 평가하는 것은 콘크리트 건축물의 안전진단이나 거푸집 탈형(脫形) 시기 결정 등에 있어서 매우 중요하다.

콘크리트 압축강도를 추정하는 방법으로는 파괴 시험과 비파괴 시험이 있으나, 현장에서는 건축물에 손상을 주지 않는 비파괴 시험이 주로 사용되고 있다.

현재 국내에서 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위하여 사용되는 비파괴 실험법은 반발경도법이 50%로 가장 많고 초음파속도법이 7%, 초음파속도법과 반발경도법을 동시에 사용한 복합법이 39%로 나타나 있으며 강도추정의 방법으로는 대부분 외국의 기존 압축강도 추정식을 이용하고 있다.[1)]

---

1) "콘크리트 구조물 비파괴검사의 신뢰도 향상을 위한 관리체계 구축방안" 표준과학연구원, 1998.11



[그림 1.1] 비파괴 시험법 사용빈도

비파괴 압축강도 제안식은 파괴 시험에 의해 측정된 압축강도 값과 비파괴 시험을 통한 압축강도 추정값 사이의 상관관계를 나타내는 식이다. 따라서 동일한 콘크리트를 대상으로 파괴 시험 및 비파괴 시험을 실시하고, 그 결과값을 통계 처리하여 강도추정식을 작성할 수 있다.

본 연구에서는 보통 콘크리트와 혼화재를 사용한 플라이애시(FA), 고로슬래그(BF), 실리카흄(SF) 등의 혼화재 및 폴리프로필렌 섬유(PP), 강 섬유(S) 등의 섬유를 사용한 콘크리트 공시체와 같은 조건의 부재 시험체에서 코어를 채취한 코어공시체에 대하여 반발경도와 초음파속도를 측정하여, 실제 파괴 압축강도(f_c)와의 상관관계를 구하여 건축물의 안전성 확보에 관한 자료를 제공하고자 한다.

1.3 기존 연구의 동향

1.3.1 기존 연구

콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도평가 방법은 주로 반발경도법과 초음파속도법을 이용하고 있다.

각 방법을 별도로 사용하는 경우는 신뢰성이 매우 저하되어 현재에는 반발경도법과 초음파속도법을 동시에 사용하는 복합법이 주로 사용되고 있다.

이외에도 최근에는 충격탄성파, 적외선, X선, 전자파 등을 이용한 다양한 검사 방법이 개발되어 사용되고 있지만, 이러한 최신방법도 현재에는 신뢰성이 떨어진다.

또한, 주로 외국에서 개발된 것으로 국내 조건의 콘크리트 강도평가에는 맞지 않는 것으로 나타나고 있다.

콘크리트 강도를 반발경도법으로 추정하고자 하는 국내의 연구는 최근 들어 대한주택공사 부설 주택연구소와 과학기술처 한국표준연구소를 중심으로 콘크리트 강도, 재령, 타격방향, 온도, 습도 등을 변수로 연구가 진행되었다. 그러나 이 연구에서는 비파괴 시험 강도에 큰 영향을 미치는 응력의 크기, 골재의 입도(粒度), 콘크리트 두께, 사용기기의 종류, 콘크리트 표면의 탄산화 정도, 골재 배합비 및 슬럼프(slump) 등에 대한 변수가 반영되지 않아 콘크리트의 강도를 판정하는 일반적인 추정식을 제안하기에는 아직까지 충분하지 않은 것으로 판단된다.

또한, 초음파속도법을 이용하여 콘크리트 강도를 추정하는 연구로는 충남대학교를 중심으로 물-시멘트비(W/C)와 재령을 변수로 둔 연구, 고강도 콘크리트 압축강도추정식을 위한 연구를 발표한 적이 있으며, 최근에 단국대학교에서 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험식에 대한 연구를 발표한바 있다.

1.3.2 외국의 연구동향

콘크리트의 반발경도법에 대한 국외 연구는 일본건축학회 지침서 및 ASTM C 805-85에서 이미 제안하여 광범위하게 사용되고 있다.

이 지침서에서는 조사대상 콘크리트를 두께 10cm이상, 압축강도 10~60MPa 등으로 제한하고 있고, 측정부위, 사용 기기의 종류, 타격방향, 타격횟수, 재령 등에 따라 측정값을 조정하도록 하고 있다.

그러나 이 지침서에서도 조사대상 콘크리트에 작용하고 있는 응력의 크기, 골재의 종류, 콘크리트 표면의 탄산화 정도, 골재의 배합비 등이 포함되어 있지 않아

추가적인 연구가 필요한 실정이다.

또한 외국에서의 콘크리트 구조물에 대한 비파괴검사와 평가방법에 대한 개발은 최근 10여년 사이에 활발히 시도되고 있다. 미국에서는 MIT, Cornell University, University of California at Berkeley 및 미공병대 연방운송국(Federal Highway Administration)과 각 주의 운송국에서 연구를 진행하고 있다.

그리고 초음파를 이용한 검사방법으로 약 10여개의 회사가 미국 내에서 특정목적을 위한 상업용 기기를 개발하여 판매하고 있다.

유럽에서는 영국, 독일, 프랑스를 중심으로 건축·토목분야에 걸쳐 초음파를 이용한 탐사방법개발에 노력을 기울이고 있고, 일본 역시 터널탐사 등의 적용에 대하여 활발히 연구를 진행하고 있다.

2종류 이상의 비파괴 시험법의 복합에 의해서 콘크리트 강도를 추정하는 방법은 오래전에 Kesler, Higuchi, Facaoaru, Wiebenga 등에 의해 시작되었으며, 1968년 Jones와 Facaoaru는 초음파 속도법과 반발경도법의 조합을 가장 유망한 조합으로 제안하기에 이르렀다.

<표 1.1> 슈미트햄머법(Schumidt hammer test)의 연구동향(국외)

연구자	연구년도	연 구 내 용
E.Schmidt	1948	슈미트 햄머 제안
E.Schmidt	1951	슈미트 햄머의 타격각도에 대한 보정치 ΔR을 구함
G.W Green	1954	슈미트 햄머로 평평한 면을 가진 경화 콘크리트 강도를 측정하는 방법과 동일 구조물에서 위치에 따른 강도차이를 확정할 수 있음을 연구.
板靜雄 松井敏	1955	콘크리트는 기중 상태로 있다가 일시적으로 습윤상태가 되면 강도와 반발경도가 다같이 저하하기 때문에 측정곡선에는 영향을 미치지 않음을 연구.
木材專雄	1956	곡면과 평면의 반발경도 값은 다르며 기중양생과 표준양생은 같은 강도에 대하여 반발경도의 차이가 6~8정도임을 연구.
N.G Zoldners	1957	충분한 양생 후 건조된 실험체를 일시적으로 습윤상태로 하면, 반발경도는 작아지고, 보통콘크리트와 AE콘크리트의 반발경도는 초기에는 차이가 없으나 재령이 커짐에 따라 약간의 차이를 보이나 실용상 차이는 없음을 연구
J.Koler	1958	슈미트 햄머의 타격각도에 대한 R_o의 보정식을 구함.
E.Schmidt K.Gaede	1960	슈미트 햄머를 이용한 콘크리트 강도를 측정할 수 있는 실험결과와 장기재령시 반발경도를 측정할 경우는 보정계수를 고려하며, 타격각도에 대한 보정식을 실험에 의하여 적합함을 연구
S.A Proceg	1977	슈미트 햄머 N, NR형의 사용 설명서에서 콘크리트 및 철근콘크리트 강도의 결정방법, 측정곡선의 유효성의 한계를 상세히 설명.
LILEM	1977	국제지침안을 제정.
尼崎省二 明石外 世樹	1979	시험체의 재령이 다르더라도 표면을 같게 하면 반발경도와 강도는 일정함을 연구.

<표 1.2> 초음파 속도법의 연구동향(국외)

연 구 자	연구년도	연 구 내 용
J.R Lesile, W.J Bone	1949	최초로 Sonicscope를 이용하여 댐의 콘크리트 열화(劣化)와 균열(龜裂)을 측정함.
S.M Breuning A.J Bone	1954	초음파속도법을 이용하여 열화된 부분을 논함.
明石外 世樹	1960	콘크리트의 양생방법이 초음파속도와 콘크리트 강도에 미치는 영향을 알기 위한 실험결과표를 알지 못하면 강도 추정시 큰 오차를 유발할 수 있음을 연구.
R.Jones I.Facaoaru	1969	초음파속도법을 측정함에 있어서 0점 보정은 거리와 시간을 고려해서 측정정도를 ±3% 이하로 하여야 하며, 습도에 의한 보정치도 논함.
R.H Elvery	1971	휴대용 음속 측정기를 개발.
R.H Elvery	1972	PUNDIT는 현장에서 콘크리트의 초음파 속도를 측정할 수 있기 때문에 초기에 개발된 장비를 사용하였을 경우보다 콘크리트의 균열성, 공극(空隙), 균열 등 콘크리트 내부결함의 여부와 콘크리트 강도측정의 용이함을 논함.
G.Swift N.M Moore	1972	대칭 측정법과 표면 전파법에서 대칭 측정법이 표면 전파법보다 초음파 속도가 약 3% 빠른 것을 연구.

<표 1.3> 복합법의 연구동향(국외)

연 구 자	연구년도	연 구 내 용
R.Jones	1962	실험실 및 건축물에 대한 비파괴시험의 통용방법을 구체적으로 제시
I.Facaoaru	1968	보통콘크리트, 철근콘크리트, 프리스트레스 건축물의 품질관리를 위한 시험법으로 초음파속도법과 표면경도법 등의 복합법을 제시하여, 루마니아에서 사용되는 중요한 비파괴시험 중 하나가 됨.
J.G.Wiebenga	1968	반발경도(R) 및 초음파속도(V_p)와 추정압축강도(f_{cu})의 관계를 $logf_{cu}=b_0-b_1R+b_2V_p$ (b_0 : 회귀식의 상수값, b_1, b_2 : 회귀계수)
I.Facaoaru	1970	복합법에 관하여 광범위한 시험을 하여 루마니아 지침의 표준콘크리트 20cm입방체 공시체의 종파속도(V_p), 슈미트햄머 N, NR형의 반발경도(R)와 압축강도(f_{cu})의 관계를 도면으로 제시.
I.Facaoaru, P.Popescu, G.Stamate M.Tannedaum	1970	복합법에 의한 비파괴시험법으로 콘크리트 구조물에 통용할 수 있도록 기존의 자료를 수정보완한 것으로 반발경도, 초음파속도, 콘크리트 강도를 측정하여 실험결과의 값에 대한 정확도를 제시.
G.Swift N.M.Moore	1970	콘크리트 구조물에서 코아채취는 바닥, 벽 등으로 제한되므로, 비파괴적이고 저렴하여 신속한 콘크리트 강도의 측정시험을 강조함.

연구자	연구년도	연 구 내 용
尼崎省二, 明石外 世樹	1979	사용골재, 양생방법 및 실험체의 종류 등을 변화시킨 반발경도 및 초음파속도와 콘크리트 강도의 관계를 나타내고 도면화함. $V_p/f_{cu}=b_1R_1-b_2R_2+b_3R_3$
F.Cianfrone I.Facaoaru	1979	표준콘크리트와 조건이 다른 경우에 측정강도는 보정계수를 측정표준콘크리트 강도에 곱하여 보정하도록 함.
容川港雄 山田和夫	1979	복합법에 의하여 콘크리트 강도를 측정하며, 이 실험결과 콘크리트 초음파속도와 압축강도의 관계는 W/C, S/A(잔골재율) 및 양생방법 등에 따라 다르기 때문에 복합법으로 강도를 측정하는 것이 좋음을 밝힘.
小阪義夫 容川港雄	1980	초음파속도와 반발경도를 적용한 복합비피괴실험과 측정정도를 좋게 하기 위하여 굵은골재 최대치수, 용적혼합률 등을 추가한 중회귀식을 제시함.

1.3.3 국내 연구동향

우리나라에서는 1970년대에 비파괴 기술을 도입하여 소수의 연구자에 의하여 검토되었으며, 1980년대에 들어오면서 반발경도법과 초음파속도법을 이용하여 화재를 입은 구조물의 성능 평가를 위한 연구 등 몇몇 연구자에 의해 연구가 이루어져 왔다. 1990년대에 들어 관련 공공기관, 관련학회, 안전진단기관, 건설업체의 연구소 등에서 안전관리 및 안전진단 기법, 보수·보강 기법 등에 대한 기술지침서 등이 발행 되었으나 거의 외국의 연구사례를 소개하는 정도에 그치고 있으며, 국내에서 이루어진 연구결과의 종합적이고 분석적인 작업이 부족한 실정이다.

1990년대 말부터 반발경도법 및 초음파속도법, 복합법에 대한 국내 실정에 맞는 표준화 연구가 단국대학교 정란 교수, 청주대학교 한천구 교수 등에 의해 진행 중이다.

국내에서 주로 이용되는 강도 추정식은 일본건축학회식과 일본재료학회식 등의 추정식을 사용하고 있으며, 추정식의 제안자에 따라 각각 다른 결과를 나타내며, 사용되는 재료의 물성차이 등으로 인하여 동일한 적용성이 있다고는 보기 어렵다.

따라서 강도 추정결과에 대한 신뢰도에 문제가 되므로 콘크리트 건축물의 공사관리의 오류나 잘못된 안전성 평가로 인하여 심한 경우 건축물의 손상 및 붕괴 등 심각한 문제를 야기할 소지가 있다.

본 논문에서는 현장상황과 동일한 기중조건에서 보통콘크리트 및 혼화재를 사용한 콘크리트의 부재시험체를 제작하여 코어를 채취 후, 비파괴 시험과 파괴 시험을 통해 혼화콘크리트 및 보통 콘크리트 강도 추정식을 제안하고자 한다.

<표 1.4> 슈미트햄머법의 연구동향(국내)

연구자	연구년도	연 구 내 용
한천구 외 2인	1986	일반강도 범위에서 W/C, 원주형 공시체 크기에 따른 슈미트 햄머에 의한 콘크리트 공시체 강도와 비파괴시험법에 관하여 연구함.
한천구 외 2인	1987	슈미트 햄머에 의한 콘크리트 강도 비파괴 시험의 영향인자(공시체의 크기, W/C) 분석함.
권영웅	1990	실존 콘크리트 구조물의 강도 추정을 위하여 각종 시험법의 신뢰특성과 장·단점을 분석함.
은충기 외 5인	1998	반발경도법에 의해서 고강도콘크리트의 강도 추정식을 제안하였으며 아울러 국내에서 사용되는 기존 외국의 제안식과 비교함.
구해식	1997	춤이 큰 보나 벽체에 대한 비파괴 시험들로 각 위치변화에 대한 압축강도와 반발경도를 측정하여 부재위치에 대한 강도변화를 연구하여 위치별 콘크리트 강도 추정식을 제안함.
정란 외 2인	2000	전라도 지역에서 채취한 안산암 골재를 사용한 콘크리트의 구조물의 실제 압축강도와 반발경도의 시험값과의 상관관계를 분석하여 슈미트 햄머에 의한 반발경도 추정식을 제안함.
한천구외 5인	2000	반발경도에 영향을 줄 수 있는 타격간격, 모서리 이격거리, 재타격 획수(1~10회), 재하하중(1~10MPa), 타격위치 등의 요인에 대하여 반발경도를 비교 분석함.
김진근외 3인	2001	일반강도 범위에서 W/C, 재령 및 양생조건에 따른 반발도 및 복합법에 의한 강도를 비교·분석하여 국내의 콘크리트 강도 비파괴 시험의 추정식 및 재령계수를 제안함.
권영웅 외 4인	2001	국내 대학 및 연구기관에서 수행된 연구결과를 바탕으로 일반강도 범위에서 W/C, 재령 및 양생조건에 따른 반발도 및 복합법에 의한 강도를 비교·분석하여 국내의 콘크리트 강도 비파괴 시험의 추정식을 제안함.
김무한 외 6인	2002	설계기준강도 60~70MPa의 고강도 콘크리트에 적합한 강도추정을 위해 고강도콘크리트 모의 부재를 제작한 후, 코어 공시체의 압축강도 N형, M형 슈미트햄머의 반발경도와의 상관관계를 비교·검토한 것으로 N형, M형 슈미트햄머 모두 고강도 콘크리트에 모두 유용.
배석중 외 2인	2002	국내의 댐 콘크리트 구조물들에 대한 각종 시험 자료를 이용하여 콘크리트 코어 압축강도, 반발경도, 초음파속도 등에 대한 상관관계를 분석하여 강도 추정식을 제안함.
권영웅 외 5인	2002	설계기준강도 20MPa, 25MPa, 60MPa의 콘크리트 구조체를 제작하여 재령에 따라 상중하로 코어를 채취하여 일본 K사의 슈미트 햄모로 측정한 반발경도와 실제 압축강도를 상관분석하여 슈미트 햄머에 의한 실존 콘크리트 구조체의 강도 추정식을 제안함.
한천구외 4인	2003	시멘트 종류, 혼화재 치환율에 따른 반발경도에 미치는 결합재의 영향을 분석함.
한천구외 4인	2003	P형 슈미트 햄머를 이용하여 초기압축강도를 추정하였으며, 이 추정식을 토대로 측면 거푸집 탈형기시결정에 대한 방안을 제시함.

연구자	연구년도	연 구 내 용
한천구외 4인	2004	저강도(5~15MPa)콘크리트를 저강도용 P형 슈미트햄머를 이용하여 타서로딘 콘크리트 압축강도를 정확히 추정함으로써 초기 콘크리트 품질관리 방안을 제시함.
한천구 외 2인	2005	설계기준강도 65MPa의 콘크리트 구조체를 제작하여 재령에 따른 실제압축강도와 일본 K사의 슈미트 햄머로 측정한 반발경도를 상관분석하여 슈미트 햄머에 의한 고강도 콘크리트의 강도 추정식을 제안함.

<표 1.5> 초음파속도법의 연구동향(국내)

연구자	연구년도	연 구 내 용
김완규 외 2인	1984	초음파를 이용한 콘크리트에 대한 음속측정과 실측강도를 비교함으로써 그들의 상관관계및 타당성을 통계적으로 고찰하고 추정식(회귀식)을 구하여 초음파에 의하여도 콘크리트의 강도를 추정함.
김완규 외 2인	1991	저주차 초음파를 이용하여 콘크리트 구조물의 비파괴적인 강도 추정법에 대하여 초음파속도법의 가능성, 초음파속도법의 오차, 초음파속도와 실제압축강도의 상관관계를 분석함.
한천구 외 4인	2001	제주지역의 현무암 2종류와 육지의 화강암을 비교하여 W/C 및 재령변화에 따른 압축강도와 초음파속도를 측정하여 제주지역 콘크리트의 초음파속도법에 의한 추정식을 제안함.
임서형 외 1인	2001	설계기준강도 60~100MPa 고강도 콘크리트를 대상으로 초음파속도법을 이용하여 강도 추정식을 제안함.
이회근 외 3인	2002	플라이애시와 고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 이를 관입저항 시험결과와 비교하였으며, 이로부터 초음파속도와 응결과의 관계를 분석 후 초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정식을 제안함.
한천구외 4인	2003	시멘트 종류, 혼화재 치환율에 따른 초음파속도에 미치는 결합재의 영향을 분석함.
권영웅 외 3인	2004	설계기준강도 38~69MPa 고강도 콘크리트 구조체의 코어 공시체를 채취하여 초음파속도법에 의한 고강도 콘크리트의 강도 추정식을 제안함.

<표 1.6> 복합법의 연구동향(국내)

연구자	연구년도	연 구 내 용
김정섭외 1인	1996	시험체의 제작 장소(실험실, 현장)에 따라서 실제 압축강도에 영향을 주는 인자들을 분석·비교하였으며, 실험값을 기존 제안식에 적용하여 추정강도와 실제압축강도를 비교하였다. 또한 현장조건에 맞는 강도 추정식을 제안함.
김무한 외 2인	1997	W/C, 앵생온도, 재령 등의 요인별로 반발경도, 초음파속도, 동통성계수 등의 비파괴 시험을 실시하여 통계처리 및 해석으로 복합비파괴 시험식을 제안함.
김무한 외 4인	1999	국내산 골재 및 시멘트 등을 사용하여 국내 규준의 배합방법에 따라 대학 연구실에서 1988~]1997년 사이에 제작된 콘크리트의 압축강도, 초음파속도, 반발경도 데이터를 외국의 기존 제안식에 적용하교 비교·검토하여 국내 실정에 맞는 복합비파괴 시험식을 제안함.

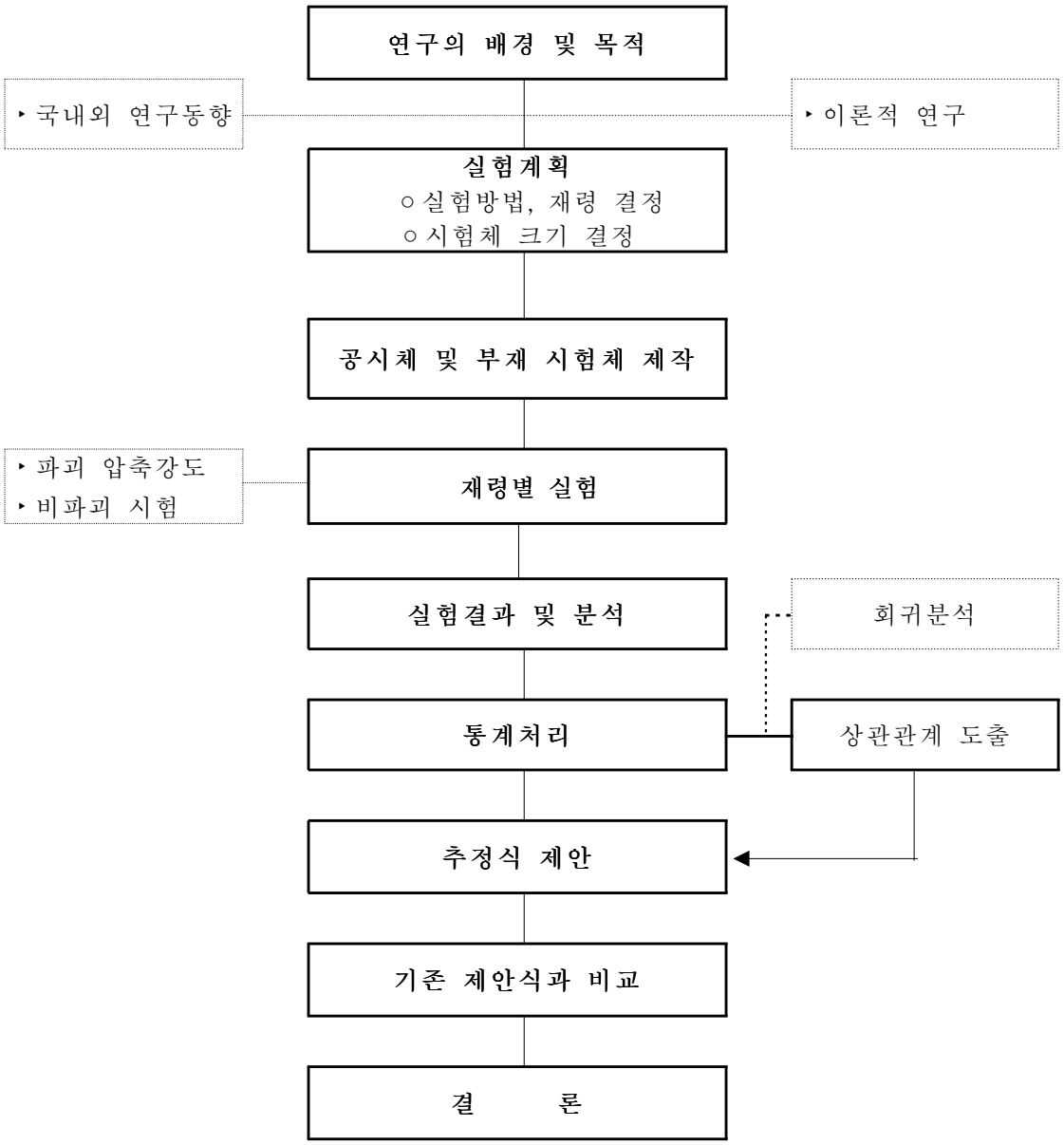
<표 1.7> 기타 콘크리트 압축강도 추정에 관한 연구동향(국내)

연구자	연구년도	연 구 내 용
김정섭외 4인	1997	초음파속도법과 반발경도법 두가지 시험법을 병행하여 콘크리트의 강도 추정식을 제안하였으며, 반발경도와 초음파속도의 재령경과에 따른 상호관계에서 콘크리트 강도 추정값을 서로 상쇄하는 「상쇄효과」가 성립됨을 증명함.
한천구 외 4인	1998	구조물 안전진단에 있어 콘크리트 강도평가식 적용에 대한 국내의 안전진단 업체에서 사용되는 외국의 추정식의 실태조사 및 국내 실무조건에 맞는 강도평가식의 개발을 절실히 요구함.
이리형 외 6인	2002	공시체의 높이와 직경과의 비를 달리하여 KS규준에 따라 보편화된 압축강도 실험을 수행하여 기본이론을 재검토하고 기존 구조물에서 채취한 다양한 크기의 코어 공시체 강도 등을 예측한 것으로서 공시체의 높이에 따른 강도환산계수를 추정함.
한천구 외 4인	2002	구조체의 내력에 손상을 주지 않는 소구경 코어를 이용하여 소구경 코어의 직경을 변화 시키면서 기존의 코어와 비교분석하여 소구경 코어의 적용성 검토 및 추정법을 제안함.
한천구 외 4인	2002	다양한 크기의 코어 공시체에 의한 압축강도 추정에 관한 연구로 표준양생 원주형 공시체와 코어 공시체의 압축강도를 비교분석함으로써 코어 공시체에 의한 강도 추정식을 제안함.
한천구 외 4인	2002	코어 공시체의 강도에 미치는 시멘트(보통포틀랜드, 초조강, 알루미나 시멘트)의 종류 및 혼화재료(플라이애시, 고로슬래그)에 따른 코어 구경(口徑)별 압축강도 특성을 검토함.
한천구 외 2인	2003	소구경 코어에 의한 압축강도 추정에 관한 연구의 일환으로 시멘트 종류, 혼화재 치환율, 골재 종류 및 굵은골재 최대치수 등 사용재료에 따른 영향을 분석하여 소구경 코어에 의한 압축강도 추정식을 제안함.

연구자	연구년도	연 구 내 용
한천구 외 2인	2003	소구경 코어에 의한 압축강도 추정에 관한 연구의 일환으로 시멘트 종류, 혼화재 치환율, 골재 종류 및 굵은골재 최대치수 등 사용재료에 따른 영향을 분석하여 소구경 코어에 의한 압축강도 추정식을 제안함.
권영웅 외 2인	2003	관입시험법을 통하여 설계기준강도 20MPa, 250MPa, 600MPa로 제작된 원주형 공시체의 압축강도 추정식을 제안함.
지남용 외 2인	2003	레미콘의 시방배합표와 실험실에서의 품질 시험결과를 바탕으로 배합표상의 배합인자들과 압축강도와의 관계를 통계적으로 분석하고, 혼화재를 함유한 콘크리트의 강도를 예측할 수 있는 강도 추정식을 도출함.
정상진 외 5인	2003	저열 포틀랜드 시멘트와 재생골재를 이용한 콘크리트의 강도를 추정하기 위하여 마이크로파 가열시간에 따른 강도발현 성상, 양생기간에 따른 강도발현성상을 각 W/C별로 비교·분석하여 이에 따른 상관성을 검토함.
정상진 외 5인	2004	매스콘크리트 부재와 단열양생조의 수화열을 비교하였으며, 원주형 공시체는 표준양생, 대기양생, 현장봉함양생, 현장수중양생 단열양생으로 양생종류별로 재령별로 원주형 공시체를 비교 분석함.

1.4 연구 진행 흐름도

본 연구를 수행하기 위하여 진행된 연구 흐름도는 다음과 같다.



[그림 1.2] 연구 진행 흐름도

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 압축강도 추정

2.1.1 비파괴 시험의 개요

콘크리트 건축물에 대한 비파괴 시험 종류는 크게 콘크리트의 강도에 관한 것과 그 외의 것으로 분류할 수 있다.

이렇게 분류하는 것은 콘크리트 건축물을 검사하는데 가장 먼저 고려하여야 할 사항이 구조물의 강도이며, 그 외의 검사는 건축물의 강도가 충분하다는 전제하에 그 건축물의 내구성에 관한 조사이기 때문이다. 그러나, 건축물의 내구성에 대해서 조사할 때, 콘크리트 강도뿐만 아니라 기타 품질에 대한 조사도 하여야 하며, 강도만으로는 충분한 진단을 수행할 수 없다.

지금까지 개발되어 사용되고 있는 콘크리트 건축물의 비파괴 검사를 대상으로 하여 조사목적별로 요약하면 다음과 같다.

(1) 강도(압축강도, 인장강도, 휨강도 등)
(2) 동탄성계수, 정탄성계수
(3) 치수, 두께(직접 치수를 측정할 수 없는 경우 등)
(4) 변위, 변형
(5) 강성(剛性, rigidity)
(6) 균열(위치, 깊이, 폭, 진행성)
(7) 결함, 공극(孔隙)(충전이 불충분한 개소 등)
(8) 콘크리트의 온도
(9) 콘크리트 중의 수분
(10) 철근(위치, 직경, 피복두께)
(11) 강재부식
(12) 기타

상기의 조사목적 중 (1)~(5)는 예전부터 중요시되었던 것이며 콘크리트 건축물의 강도 및 변형에 관한 것이다. 특히, 강도에 관한 것은 이미 많은 연구가 되었으며,

실용화되고 있는 방법도 많다.

또한, 위의 조사목적 중 (6)~(12)은 최근에 주목되고 있는 것으로 기존 구조물의 내구성에 관한 것이다. 최근에는 비파괴 검사에 의한 「진단시스템」도 개발되어 이용되고 있다.

2.1.2 비파괴 시험 방법의 분류와 특징

비파괴 검사를 측정원리에 따라 분류하면, <표 2.1>에 나타낸 것과 같이 다양한 방법이 있다. 이러한 방법으로는 적외선법, X선법, 레이더(rader)법, Acoustic Emission 법 등이 있으나, 이러한 것들 중에는 아직 콘크리트 기술자들에게 잘 알려지지 않은 것이 많이 있어 비파괴 검사법이 많이 사용되지 못하고 있는 실정이다.

그러나, 이러한 방법은 콘크리트 이외의 분야에도 광범위하게 사용되고 있으며, 최근에는 기술혁신에 따라서 계속 새로운 것이 개발되고 있다.

이와 같은 분류로부터 알 수 있는 것과 같이 콘크리트 구조물의 비파괴 검사법에는 아주 많은 종류가 있으며 그 적용대상도 서로 다르다.

비파괴 검사를 사용하는 입장에서 보면, 어떤 조사나 검사를 실시할 경우엔 어떤 방법을 이용하면 좋은지를 판단하는 것도 쉽지 않다. 따라서, 전술한 바와 같이 비파괴 검사를 콘크리트 강도 및 철근탐사에 관한 방법에 대하여만 특징을 정리하면 다음과 같다.

<표 2.1> 비파괴 시험 방법의 분류 및 특징

종 류			측 정 방 법	적 용 범 위	장 점	단 점	비 고
타격법	표면경도법	○낙하식햄머법 ○스프링식 햄머법 ○회전식햄머법 ○피스톤 강구 타격법	○좌기와 같은 각종 기기를 이용하여 콘크리트의 표면을 타격하여 압입(壓入)자국의 깊이, 직경, 면적 등을 측정	○압축강도 추정	○측정이 비교적 용이 ○피측정물의 형상, 치수와 관계없이 적용	○측정부위가 콘크리트의 표층에 한함 ○동일개소에 재적용 불가	○최근에 많이 사용되지 않는다.
	반발경도법	○슈미트 햄머법	○좌기의 기기에 의한 콘크리트의 표면을 타격하고 그 반발경도를 측정	○압축강도 추정	○측정 간편 ○ 피측정물의 형상, 치수와 관계없이 적용	○측정부위가 콘크리트의 표층에 한함 ○동일개소에 재적용 불가	○ 가장 많이 사용되고 있다. M형

종 류			측 정 방 법	적 용 범 위	장 점	단 점	비 고
타격법	표면경도법	○낙하식햄머법 ○스프링식 햄머법 ○회전식햄머법 ○피스톤 강구 타격법	○좌기와 같은 각종 기기를 이용하여 콘크리트의 표면을 타격하여 압입(壓入)자국의 깊이, 직경, 면적 등을 측정	○압축강도 추정	○측정이 비교적 용이 ○피측정물의 형상, 치수와 관계없이 적용	○측정부위가 콘크리트의 표층에 한함 ○동일개소에 재적용 불가	○최근에 많이 사용되지 않는다.
	반발경도법	○슈미트햄머법	○좌기의 기기에 의한 콘크리트의 표면을 타격하고 그 반발경도를 측정	○압축강도 추정	○측정 간편 ○피측정물의 형상, 치수와 관계없이 적용	○측정부위가 콘크리트의 표층에 한함 ○동일개소에 재적용 불가	○ 가장 많이 사용되고 있다. M형
진동법	음속법	○초음파법 ○충격파법 ○상위법	○초음파 Pulse(종파) 전파속도의 측정 ○ 충격파(종파,횡파)의 전파속도의 측정 ○ 표면파의 전파속도 측정	○콘크리트 두께 측정 ○콘크리트 내부결함 측정 ○동탄성계수 측정 ○ 압축강도 추정	○사용 주파수가 높을수록 지향성은 양호하나, 음파의 감쇠가 크게 된다. ○단독으로 사용한 경우 강도 측정 정도는 좋지않다.	○사용 주파수가 높을수록 지향성은 양호하나, 음파의 감쇠가 크게 된다. ○단독으로 사용한 경우 강도 측정 정도는 좋지 않다.	○초음파법에서는 측정 불가능한 두꺼운 쿤크리트의 측정도 가능하다. ○충격파법 및 상위법은 거의 쓰여지지 않는다.
	공진법	○종공진법 ○횡공진법 ○비틀림 공진법	○특정형태, 치수의 콘크리트 공시체의 공진진동수, 대수 감쇠율 등의 측정	○동적특성(동탄성계수, 동전단탄성계수, 동포아송비 등) ○동결융해 저항성의 측정 ○압축강도의 추정	○피측정물의 형상, 치수에 제약이 있다. ○동적특성을 단독으로 이용할 경우 강도 추정 정도는 그다지 좋지 않음.	○피측정물의 형상, 치수에 제약이 있다. ○동적특성을 단독으로 이용할 경우 강도추정 정도는 그다지 좋지 않음.	○시험방법은 JIS A 1127 (공명진동에 관한 콘크리트의 동탄성계수, 동전단탄성계수 및 포아송비 시험방법에 규정되어 있다.
방사선·중성자법	방사선법	○X선법 ○ν선Radiography법 ○ν선Radiometry법	○방사선 투과 상황의 투영	○내부결함의 탐사 ○철근탐사	○콘크리트 내부의 상황이 직접 관찰	○방사선의 위험이 수반 ○장치가 대형	○방사선·중성자 등의 취급에 제한이 있고 그다지 실용화 안됨
	중성자법	○중성자함수량 측정법 ○중성자활화분석법	○중성자 감쇠 상황의 측정	○콘크리트 함수량 측정 ○단위시멘트量추정	○ 측정정도가 비교적 좋다.	○위험이 수반 ○장치가 대형	

종 류			측정방법	적용범위	장 점	단 점	비 고
국부파괴법	관입법	○신비햄머법 ○Speedpin법 ○Windsor probe법 등	○관입깊이 측정	○압축강도 추정	○측정이 비교적 용이	○화약을 사용하므로 위험 ○시험후 보수가 필요	○사용한 예가 별로 없다.
	인발법	○못, 볼트 등 인발법	○콘크리트에 매립한 못, 볼트 등을 묻어두고 인발하여 그 내력을 측정	○압축강도 추정	○强度測定정도가 비교적 양호	○콘크리트 부어넣기 전에 준비가 필요 ○시험후 보수가 필요	
	국부압축법		○ ψ 15mm정도의 강판에 국부압축내력을 측정	○압축강도 추정	○강도측정정도가능	○실시가 약간 곤란 ○시험후 보수가 필요	○적용 예가 적다
전·자기법	전기법	○전기저항법 ○투전율법 ○자연전극전위법	○전기저항의 측정 ○투전율 측정 ○자연전극 전위의 측정	○콘크리트의 두께, 밀도, 함수율 등 측정 ○콘크리트내의 철근부식상황의 추정	○측정은 비교적용이 ○동일개소에 반복하여 적용할 수 있다.	○측정정도는 그다지 좋지 않다.	○적용 예가 비교적 적다.
	자기법	○ 파코meter법 ○ Cover meter법 ○ Reter법 ○와류탐사법	○철근의 존재에 따른 자기의 변화 측정	○철근탐사	○측정은 비교적 용이 ○동일개소에 반복적용가능	○배근이 조밀한 경우 탐사 곤란 ○깊은(10cm정도이상) 위치에 있는 철근의 탐사는 곤란 ○철근과 매설배관을 구별 곤란	
전자파법	○ 레이더파법	○전자 Pulse의 측정			○측정은 비교적용이 ○조사개소 단면의 상태를 화상으로 볼 수 있다.	○사용주파수가 낮으면 장치가 대형화 된다. ○ 배근형태가 조밀한 경우, 탐사 곤란	○조사개소 단면의 화상(실체상은 아님)을 기록으로 남길 수 있다.

종 류		측 정 방 법	적 용 범 위	장 점	단 점	비 고
복합법	○음속·슈미트 햄머법	○초음파속도와 슈미트햄머 반발경도 측정	○ 압축강도 추정	○측정이 간편 ○형상, 치수에 관계없이 적용 가능	○ 강도판정식이 확립되어 있지 않다.	
	○음속·음파 감쇠율법	○초음파속도와 감쇠율 측정	○ 압축강도 추정	○음속단독으로 시행했을 때 보다 강도측정 정도가 양호	○감쇠율의 측정이 곤란	○연구 단계
	○동탄성계수 •대수감쇠율법	○동탄성계수와 대수감쇠율의 측정	○ 압축강도 추정	○ 동탄성계수만으로 시행했을 때 보다 강도측정 정도가 양호	○피측정물의 형상, 치수에 제약이 있다.	○최근 이용되고 있지 않다.

2.2 콘크리트 구조물의 주요 비파괴 검사법

2.2.1 슈미트햄머법*(Schumidt hammer test)*

슈미트햄머법은 일반적으로 반발경도법이라고 불린다. 측정방법이 간편하고 건축물에 손상을 주지 않으면서 구조물의 강도를 추정할 수 있는 방법으로 이미 세계적으로 널리 사용되고 있으며 이에 대한 관련규정도 마련되어 있다.

슈미트햄머법은 슈미트햄머로 경화 콘크리트 면을 타격시 햄머의 타격에너지에 따라 반사되는 반동량을 반발경도로 표시하고, 이때의 반발경도와 콘크리트 파괴 압축강도와의 상관관계식을 실험적으로 구하여 콘크리트 구조물의 강도를 측정한다.

슈미트햄머는 콘크리트의 구성성분 및 시공상태에 따라 여러 가지 유형의 기종이 있으나, 일반적으로 건축물에서는 N형과 NR형이 가장 많이 사용되고 있다. 슈미트햄머의 사용목적에 따른 유형 및 기종은 다음 <표 2.2>와 같다.

<표 2.2> 슈미트햄머의 종류 및 특성

기 종	적용 콘크리트	충격에너지 (kgf · cm)	강도 측정범위 (MPa)	비 고
N	보통 콘크리트	0.225	15 ~ 60	직독식(直讀式, direct-reading)
NR	보통 콘크리트	0.225	15 ~ 60	자동기록식
L	경량 콘크리트	0.075	10 ~ 60	직독식
LR	경량 콘크리트	0.075	10 ~ 60	자동기록식
P	저강도 콘크리트	0.090	5 ~ 15	진자식(振子式, a pendulum)
M	매스 콘크리트	3.000	60 ~ 100	직독식

(1) 슈미트햄머법 원리

슈미트햄머를 이용한 반발경도법의 원리는 스프링의 탄성을 이용하여 햄머로 콘크리트를 타격하여 반발도를 측정한다. 반발도에 의한 강도 추정은 콘크리트 표면

타격시 반발경도(R)와 콘크리트 압축강도(f_{ck})와의 사이에 특정 상관관계를 구하여 강도를 추정하는 것이다. 특히 반발경도법은 콘크리트와 같은 불균질한 재료표면에서 국부적인 반발경도를 구하는 것이기 때문에 측정면에 있어서 골재의 유무, 콘크리트의 습윤상태, 콘크리트의 재령 등에 따라 반발경도에 많은 영향을 미친다.

(2) 반발경도에 미치는 영향인자

슈미트햄머 추정식 반발경도에 대해 여러 가지 영향을 미치므로 이에 대한 내용을 정리하면 <표 2.3>과 같다.

<표 2.3> 반발경도에 영향을 미치는 인자

요 인	영 향 인 자
측 정 방 법	타격에너지, 사용햄머, 타격방향, 부재강성, 콘크리트 표면상태 및 건조상태, 측정회수, 측정간격
콘크리트 품질	사용재료, 배합조건, 양생조건, 초기경화속도, 재령, 탄산화 정도 등

1) 타격방향에 따른 보정치

<표 2.4>는 타격방향에 따른 보정치를 나타낸 것인데, N형 슈미트햄머는 타격방향에 따라서 반발경도가 달라지게 되므로 타격 각도에 따른 보정계수를 적용하도록 하고 있다.

<표 2.4> 타격방향 보정값

반발경도 R	수평과 이루는 각도				비 고
	+90°	+45°	-45°	-90°	
10	-	-	+2.5	+3.4	+부호는 上向, -는 下向
20	-5.4	-3.5	+2.4	+3.2	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.0	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.7	+1.6	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	

2) 압정력에 따른 경도보정치

20cm 입방 공시체에 의한 반발경도 측정시, 그 압정상태에 의해 R값이 변화한다. 실험결과에 의하면 압정력이 작을수록 R값이 작아지는 것을 알 수 있다.

3) 재령에 따른 보정

재령이 경과함에 따른 건조상태의 콘크리트는 탄산화에 기인하여 경도가 비교적 크게 되고, 강도와 경도는 비례되지 않는다. 따라서 이에 따른 추정강도는 실제 강도보다 큰 값을 나타내게 되는데 <표 2.5>의 재령에 따른 보정계수를 이용하여 오차를 줄일 수 있다.

<표 2.5> 재령(材齡)에 의한 보정값

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1,000	3,000
보정계수	1.55	1.15	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

(3) 슈미트햄머 측정시 기기보정

슈미트 햄머를 사용하는 경우 사전에 Test Anvil에 의한 보정을 하여야 한다. 보정은 Test Anvil의 반발경도(R) 80을 기준으로 하고, 80±2의 범위를 정상으로 하나 될 수 있는 한 80±1의 범위 내에 들도록 조정을 한다. 이 범위의 값을 벗어날 경우 슈미트햄머의 조정나사를 조작하여 보정하여야 한다.

(4) 측정부위 상태 및 위치 선정

1) 측정면은 평활한 면을 선정하고 요철, 마감재 또는 도장면은 제거한다.
2) 콘크리트 두께는 최소 10cm 이상 되는 면을 선정한다.
3) 보, 기둥 등의 모서리에서는 최소 3~6cm 이격된 개소에서 측정한다.
4) 콘크리트 표면함수율 : 습윤상태가 건조한 상태보다 반발도가 약 5% 낮다.
5) 타격면의 평활도 : 거친면을 타격하면 반발도는 10~15%로 낮다.
6) 벽, 기둥의 측정 : 상부, 중앙부, 하부 등에서 측정한다.
7) 보 측정 : 단부와 중앙부에서 측정한다.
8) 구조물 전체의 콘크리트 강도를 판단할 수 있도록 측정위치를 정한다.

(5) 측정방법

슈미트햄머법의 측정방법은 국가마다 다소 차이가 있으며, 이에 대한 내용을 정리

하면 <표 2.6>과 같다.

<표 2.6> 슈미트햄머법에 관한 각국의 기준

항 목	일본(JIS)	미국(ASTM)	영국(BS)	불가리아	RILEM
1측정개소의 영역	-	직경 15cm	30×30cm	10×10～15×15cm	30×30cm
타격회수	20회	10회	9～25회	-	9～25회
2측정간의 최소간폭	30mm	25mm	20～50mm	30mm	30mm
부재단부와 측정점의 최소간격	30mm	-	20mm	50mm	30mm
부재 최소두께	10cm 15cm	10cm	10cm	10cm	-
측정치의 처리	>±20%	ΔR^{***}>±7	전부사용	ΔR^{***}>±3	-
강도판정식 규정 유무	유	무	무	유	무

(주) * 판, ** 기둥, *** 반발경도와 평균과의 차

(6) 반발경도에 의한 콘크리트 강도추정식

반발경도에 의한 콘크리트 강도 추정식은 다음 <표 2.7>과 같이 외국의 여러 학자들이 많은 시험을 통해 얻은 자료를 바탕으로 강도추정식을 제안하고 있는데 연구자에 따라 많은 차이를 보이고 있어 무조건적으로 사용한다면 추정 오차는 크게 발생될 수 있다. 따라서 반발경도를 이용한 콘크리트 강도추정식은 코어시료의 파괴강도와 반발경도와의 상관관계를 고려하는 것이 바람직한 방법이다.

<표 2.7> 반발경도에 의한 콘크리트 강도 추정식

구 분	제 안 식
일본 건축학회式	$f_{cu} = 7.3R + 100$
일본 재료학회式	$f_{cu} = 13R - 184$
동경 건축재료검사소式	$f_{cu} = 10R - 110$
U.S.Army 시험소式	$f_{cu} = -120.6 + 8.0R + 0.0932R^2$
木村	$f_{cu} = 9.37\times(0.987)r^t + (1.3t - 109)$

2.2.2 초음파속도법

초음파속도를 이용한 콘크리트 압축강도 추정은 초음파속도와 압축강도와의 상관관계를 이용하여 강도를 추정하는 것이다.

초음파속도와 강도와의 관계에 큰 영향을 미치는 것은 골재·시멘트 용적비, 골재의 종류, 굵은골재의 최대치수 및 함수율에 의해 영향을 받는다.

강도추정시 이와같은 인자를 고려하여 압축강도를 추정하고 통계적인 신뢰성과 강도범위를 정하기 위해서는 많은 실험을 통해 상관관계를 설정하여야 한다.

초음파속도와 압축강도간에는 상관계수가 상당히 낮아 반발경도법보다 신뢰성이 떨어지므로, 초음파속도를 이용하여 콘크리트의 강도를 추정할 때에는 이 방법을 단독으로 사용하기 보다 2가지 시험법을 병행하여 추정하는 복합법을 이용하는 것이 신뢰성이 높다는 보고가 있다.

초음파속도와 압축강도의 상관관계를 설정할 때 압축강도에 영향을 미치는 여러 가지 영향인자를 고려함으로써 압축강도 추정의 신뢰성을 높일 수 있으나, 실제 조사대상 구조물에서 이러한 인자들을 알 수 없는 경우가 많아 초음파속도만으로 강도추정을 행할 경우에는 신뢰성에 문제가 있을 수 있다.

외국의 경우는 초음파속도법을 균열 및 공극 등을 검출하고 콘크리트의 균질성을 조사하는 품질관리 목적으로 이용하고 콘크리트 강도추정은 보조수단으로 사용하고 있는 실정이다.

<표 2.8> 각국의 초음파속도법 적용범위

구 분	적 용 범 위
일본건축학회	• 콘크리트 공사 및 강도 관리수단 • 콘크리트 강도 추정 보조수단
ASTM	• 콘크리트 품질의 균질성을 조사하는 수단 • 콘크리트 강도를 결정하는 대체 수단은 아님
ACI	• 콘크리트 균질성을 판단하는 수단 • 균열 및 공극의 검출수단 • 콘크리트 강도추정의 수단

(1) 측정방법

음속측정을 이용하는 방법으로 콘크리트 매질에서의 음속측정은 발신자(發信者)로

부터 발신한 음파가 수신자에 도달할 때까지의 전파시간을 측정해 전파거리를 전파시간으로 나눔으로써 콘크리트 매질의 전파속도를 측정한다.

(2) **초음파속도에 의한 콘크리트 강도 추정식**

음속에서 압축강도를 추정하는 것은 측정기 개발과 동시에 이루어졌으며 많은 추정식이 제안되어져 있다. <표 2.9>는 기존연구에서 제안한 초음파속도법에 의한 콘크리트 강도추정식이다.

<표 2.9> 초음파속도에 의한 콘크리트 강도 추정식

구 분	제 안 식
일본 건축학회식	$f_{cu} = 215V_p - 620$
일본 재료학회식	$f_{cu} = 102V_p - 117$
J.Pyszniak 식	$f_{cu} = 92.5V_p^2 - 508V_p + 782$
谷川 식	$f_{cu} = 172.5V_p - 499.6$

(3) **초음파속도에 영향을 미치는 인자**

1) 콘크리트 함수율

일반적으로 콘크리트중의 함유수분은 음속에 큰 영향을 미치며 습윤상태일수록 파속은 커지게 된다. 따라서 초음파속도는 콘크리트 함수율에 따라 보정하여야 하며 함수율이 1% 증가하면 음속은 약 50～100m/sec 증대된다.

2) 콘크리트 배합비

압축강도와 음속과의 관계는 배합비에 따라서 현저하게 차이가 난다.

즉, W/C가 작고, 굵은골재량이 많은 배합 등에서는 초음파속도가 빠르게 된다.

3) 내부철근

강재를 통과하는 음속(약 5m/sec)은 콘크리트를 통과하는 음속보다 빠르기 때문에 내부에 철근 등이 존재할 경우에는 기존의 연구결과에 따라 측정된 음속값을 보정해야 한다.

4) 콘크리트 온도

10°C～30°C까지는 콘크리트의 온도변화가 초음파속도에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 이 범위 이상에서는 <표 2.10>과 같이 초음파속도를 수정해야 한다.

5) 철근의 영향

철근을 통해 전달되는 초음파속도가 콘크리트를 통해 전달되는 속도보다 2배 정도 빠르기 때문에 초음파속도 측정 시 미리 철근의 위치를 탐지하여 철근의 영향을 받지 않는 곳에서 초음파속도를 측정할 필요가 있다.

6) 습도환경의 영향

초음파는 0°C～40°C 범위에서는 습기의 차가 거의 없는 환경 등이 고려되어야 한다.

(4) 음속에 의한 품질판정

음속에 의한 품질의 판정은 <표 2.10>과 같다.

<표 2.10> 콘크리트 온도에 따른 초음파속도 수정계수

온 도(°C)	초음파속도 수정계수(%)		비 고
	기건 콘크리트	습윤 콘크리트	
60	+5	+4	0°C 이하에서는 사용을 금하는 것이 바람직함
40	+2	+1.7	
20	0	0	
0	-0.5	-1	
-4	-1.5	-7.5	

<표 2.11> 음속(音速)에 의한 품질판정

전파속도 (km/sec)	품 질 기 준	비 고
4.6이상	우수	(미국, 캐나다 기준)
3.7～4.6	양호	
3.1～6.7	보통	
2.1~3.1	불량	
2.1이하	극히 불량	

2.2.3 복합법

복합 비파괴 시험법이란 2종류 혹은 그 이상의 비파괴 실험결과를 조합하여 콘크리트 강도를 추정하기 위한 인위적 시험기법으로, 강도추정의 정확도를 높이기 위한 시험법이다.

각종 비파괴 시험값을 조합시키는 방법으로는 2종 시험법 조합과 3종 시험법 조합이 있으며, 단일법과 비교할 때 상관계수(相關係數, coefficient of correlation) 및 결정계수(決定係數, coefficient of determination)가 높은 강도추정시 높은 신뢰성의 확보가 가능한다.

1980년 RILEM(국제 건설재료 구조연구기관 엽합)은 복합 비파괴 시험법의 조합으로 초음파속도, 반발경도, 인발력 등 7종의 시험치에서 2종류를 조합해서 9가지의 복합 예를 열거하였다.

본 연구에서는 가장 경제적이며 우수한 방법은 반발경도법과 초음파속도법을 병행한 복합 비파괴 시험법(Combinde Non-Destructive Testing Methods)이며, 이를 이용하여 강도를 추정한다. 강도 추정식의 작성은 미리 시험할 콘크리트에 가까운 사용재료와 조합범위를 포함한 콘크리트에 대해서 3종류의 W/C로 시험하여 다음식 (2.1)나 (2.2)와 같은 강도추정식을 작성하며 대표적인 추정식은 <표 2.12>와 같다.

$$f_{cu} = k_1 R + k_2 V_P + C \tag{2.1}$$

$$\log f_{cu} = k_1 R + k_2 V_P + C \tag{2.2}$$

여기서 f_{cu} : 추정강도, R : 반발경도, V_P : 초음파속도, k_1, k_2, C : 시험상수

<표 2.12> 복합법에 의한 콘크리트 강도 추정식

구 분	제 안 식	비 고
일본 건축학회식	$f_{cu} = 8.2R_0+269V_p-1094$ $f_{cu} = 4.1R_0+334V_p-1022$	보통 콘크리트 경량 콘크리트
곡천(谷川)식	$f_{cu} = 10.2(K \cdot R_o)+223V_p-960$	

주: f_{cu} : 압축강도(kgf/cm^2), V_p: 초음파속도(km/sec), R_o : 반발도

K: 재령에 의한 보정계수

· 재령 13주 이내, K=1.0

· 재령 13주～26주 이내, K=1.0～0.9사이 직선보간

· 재령 26주 이상, K=0.9

2.3 코어(core)에 의한 압축강도 추정

2.3.1 코어 채취법의 개요

코어 채취법은 기존 콘크리트 구조물에서 코어를 채취하여 강도나 기타 물성을 확인하는 것으로서 강도나 기타 물성을 설계상 소요강도가 만족되고 있는가를 조사하는 관리상의 요구 외에 건축물의 노화상태를 조사하는 것이다. 중요한 것은 시험의 목적에 따라 대표적인 코어공시체를 채취할 장소, 개소 그리고 수량을 충분히 검토한 후 선정하는 것이다.

코어 채취는 콘크리트 코어 드릴링(drilling) 및 커터(cutter)를 이용하여 건축물 및 공시체가 손상되지 않도록 하여야 한다.

그러나 코어 실험의 경우에는 구조체 콘크리트의 코어를 채취하고 이것을 이용하여 구조체 콘크리트의 강도를 추정하므로 추정값의 정밀도는 높으나 코어 채취시에 있어서 기둥, 보 등의 중요한 구조부재에 대하여 채취가 어렵고, 채취 후에도 코어 채취위치의 보수 등에 어려움이 있어 현재 구조체 내력을 손상시키지 않으면서 강도추정을 정밀성을 높일 수 있는 시험방법을 연구 중에 있다.

콘크리트 코어 공시체의 채취 방법 및 유의사항으로는 먼저 코어 공시체의 채취는 모르터와 굵은 골재가 충분히 부착되도록 경화된 후 하여야 하고, KS F 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험 방법)에서 정한 재령 14일 이후에 채취하는 것이 바람직하며, 표면에 직각으로 채취해야 한다.

또한 코어 공시체의 채취 위치는 조사목적에 따라 적절한 평가가 이루어지도록 하여야 한다. 즉, 가능한 구조내력에 영향을 주지 않는 곳을 택하도록 함과 더불어 외관상 문제가 되는 곳은 가능한 피하는 것이 바람직하다. 특히, 세장한 부재에서는 코어 채취 후 문제가 야기 될 수 있으므로 위험하지 않은 부위에서 행하여야 한다.

콘크리트 중의 철근은 원칙적으로 절단되지 않도록 하여야 하며, 작업이 용이한 곳에서 채취하여야 한다.

즉 콘크리트 코어 채취 전에 철근탐사기를 이용하여 피복콘크리트를 제거하여 매입(埋入)된 철근의 유무 및 위치를 정확히 측정하여 철근이 절단되지 않도록 한다.

부득이하게 철근이 절단된 경우에는 철근의 재질, 직경 및 양을 고려한 용접 보수(補修)·보강(補强) 등 배근상태에 따른 보정을 해야 한다. 단, 가압축(加壓軸)에 평행한 방향이거나 경사방향으로 철근이 들어 있는 코어 공시체는 강도시험을 하지 않는다.

코어의 외관, 구조물의 환경, 채취위치의 방향, 건습의 조건 등에 대해서도 기록해 둘 필요가 있으며, 채취된 코어는 헝겊 또는 물로 깨끗이 세척하여 채취위치, 번호 등

의 필요한 사항을 기입한 후 비닐봉지에 넣어 봉인하고 직사광선이 닿지 않도록 보관한다.

또, 채취한 부위에는 팽창재를 혼입한 모르터 등을 이용하여 즉시 보수하며 코어는 가능한 전문기관에 의뢰하여 다이아몬드 또는 초경합금을 부착한 코어드릴을 사용하여 채취하도록 하며, 구조물 및 시험체가 손상되지 않도록 하여야 하고, 파손되거나 굵은 골재가 흔들리는 코어 공시체는 강도시험에서 제외시킨다.

그리고 코어 공시체의 강도는 채취한 코어의 상태에 따라 그 강도에 큰 편차를 나타내므로 보링기술은 극히 중요하게 된다. 아무리 성능이 좋은 비트(bit)나 코어 채취기를 사용해도 채취시 설치가 미흡하거나, 냉각수의 공급부족이던가, 작업능률을 올리기 위하여 불필요한 하중 등으로 절단 작업을 행하면 코어 공시체는 극도로 손상을 받아 코어 공시체의 강도가 저하된다.

즉, 코어 채취시 비트에 반력이 발생하므로 코어 채취기를 앵커볼트 등으로 충분히 고정하여야 한다. 코어 시험체는 가압면(加壓面)이 수평이 되도록 커터로 절단하거나 연마(硏磨)한 후, 20±3℃의 수중에서 40～48시간 습윤 상태로 한다.

또한, 채취된 코어 공시체는 다음과 같은 외관검사를 실시한다.

① 채취위치와 부재

② 콘크리트의 응결이나 분리상태

③ 중성화 깊이

④ 철근을 절취한 경우는 철근의 직경, 종류, 위치, 녹의 상태

⑤ 기타 이물질 혼합, 균열유무 등을 관측한다.

2.3.2 코어 공시체의 압축강도 시험

채취된 코어의 양 단면은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 캡핑(capping)하거나, 소정의 평활도를 갖도록 마무리한 다음, KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 코어의 압축강도 시험을 행한다. 한편, 시험준비와 연관하여 압축강도 시험전에 코어시료는 규정에 따라 마무리하는데, 특히 양단면은 코어축선에 대하여 직각이 되게 하고, 캡핑할 때에는 가압면의 마감에 주의해야 한다.

코어공시체의 압축강도는 시험체의 평균 직경으로 전체 단면적을 산정하여 계산하고, 필요한 경우는 <표 2.13>에 의거하여 시험체의 H/D비에 따른 보정계수를 계산된 압축강도에 곱함으로써 환산 압축강도를 구한다.

또한, 압축강도 시험 후 코어채취법에 의한 콘크리트 강도평가 보고서 작성시에

는 다음과 같은 사항을 기록하도록 한다.

(1) 측정대상물의 명칭
(2) 측정 연월일
(3) 측정자
(4) 콘크리트 타설 연월일 및 재령
(5) 사용 재료
(6) 콘크리트의 배합조건
(7) 콘크리트 표면의 상태
(8) 코어 시험체 번호
(9) 코어 시험체의 채취 위치
(10) 콘크리트의 타설방향과 코어 시험체의 가압방향과의 관계
(11) 코어 시험체의 채취방법
(12) 코어 시험체의 캡핑방법
(13) 코어 시험체의 지름, 높이 및 보정계수
(14) 매입철근의 유무 및 상태
(15) 압축강도

2.3.3 코어시험 강도추정에 미치는 영향인자

(1) 코어지름*(D)*

코어 시험체의 바깥지름은 시험체의 상하면에 서로 직교하는 두 방향의 지름을 0.25mm까지 측정하여 그 평균값을 시험체의 지름(D)으로 한다. 콘크리트 코어의 채취시 코어 절단면의 요철, 골재와 페이스트(paste)의 부착저하, 굵은 골재의 강도저하 등으로 인하여 절단면이 결손에 의한 코어 강도의 편차가 증대되거나 강도가 저하될 수 있으며, 이와 같은 현상은 코어 지름이 작을수록 커진다.

따라서, 코어의 최소지름은 스위스에서 50mm를 사용하고 있으나 작은 시험체로부터 발생될 수 있는 변수를 줄이기 위하여 일반적으로 100mm 이상, 굵은 골재 최대치수의 3배 이상으로 하고 있다.

(2) 코어 높이*(H)*와 지름*(D)*과의 비

지름방향의 두 지점에서 0.25mm까지 측정하여 그 평균값을 시험체의 높이(H)로 한다.

코어 압축강도는 높이/지름의 비가 작을수록 증가하는 현상을 나타내므로 시험체의 높이는 될 수 있는 한 지름의 1~2배로 한다. 따라서, 2배보다 작은 경우의 압축강도는 KS G 2422 (콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험 방법)에 정한 <표 2.13>의 보정계수를 곱하여 지름의 2배의 높이를 갖는 시험체의 강도로 환산하도록 하며, 이에 관련된 외국의 보정계수도 <표 2.13>에 나타내었다.

<표 2.13> 코어 높이와 지름비 변화에 따른 보정계수

높이(H)/지름 (D)	보 정 계 수				비 고
	KS F 2422	ASTM C 42-87	BS 1881	JIS A 1107	
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	H/D가 표시된 값의 중간에 있는 경우에는 보정계수를 직선보간법으로 구한다.
1.75	0.98	0.98	0.97	0.98	
1.50	0.96	0.96	0.95	0.96	
1.25	0.93	0.93	0.92	0.93	
1.10	-	-	0.90	-	
1.00	0.89	0.87	0.87	0.89	

(3) 코어 절단면의 요철

코어 절단면의 요철에 의한 코어 강도 저하는 1mm일 때 4% 정도, 2mm 이상일때 7% 이상으로서 가능한 요철이 발생하지 않도록 주의한다. 따라서, 코어 시험체의 단면의 5mm 이상의 요철이 있는 경우나 단면과 코어 축이 이루는 각이 85° 이하인 경우에는 단면을 콘크리트 커터(cutter) 등으로 90°가 되도록 마무리한다.

(4) 코어의 채취방향 및 위치

코어의 채취방향은 통상 타설방향에 대하여 수평 또는 수직이며, 타설방향으로 채취된 코어의 강도는 기둥이나 벽체에서와 같이 타설 직각방향으로 채취된 경우보다 5%~8% 정도 크게 나타났다. 일반적으로 코어는 구조물의 최상단에서 가장 낮은 강도를 갖고 하부로 깊이 내려 갈수록 코어강도는 증가하게 된다. 이는 상부 표면에서 코어를 채취하면 블리딩(bleeding)과 굵은 골재의 침하 등에 의하여 하부에서 채취한 코어에 비하여 강도가 저하하기 때문이다. 따라서, 타설방향 및 채취위치가 코어 시험체의 강도에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다.

(5) **코어 채취시기(콘크리트의 재령)**

초기재령에서 채취한 콘크리트 코어의 강도는 절단면의 굵은 골재와 모르터의 부착력 감소 또는 코어 시험체의 절단면 결손으로 실제 값보다 낮게 평가될 수 있다. 따라서, 코어채취 시기는 재령 14일 이후로 하는 것이 바람직하다. 또한, 실제 구조물에서는 표준 공시체의 양생조건과 동일한 양생조건 및 방법을 기대할 수 없기 때문에 콘크리트 구조물이 재령이 경과함에 따라 강도가 증가한다 할지라도 표준양생한 공시체의 28일 압축강도보다 항상 크지는 않다. 따라서, 현장에서 양생된 구조물의 코어 강도는 표준공시체의 28일 압축강도와 동일하게 보는 것이 일반적이며 코어강도에 대해서는 재령에 대한 보정은 하지 않는 것이 바람직하다.

(6) **코어 채취기 회전속도 및 채취속도**

코어 채취기 회전속도는 코어 보링중의 절삭, 마모(다이아몬드의 집중도, 특성 및 비트의 구속과 채취속도, 피절단물의 성질에 따라 다름)와 코어 채취기의 진동 파괴 등에 의해서 생기는 비틀림 전단력이 원동기의 구축에 걸리는 전단저항으로 드릴링 시 토크(Torque)가 크면 클수록 코어강도는 저하되며 드릴링 속도도 빠르면 코어강도는 작아지게 된다. 또한, 드릴링 작업에 의해서 코어 시료가 어느 정도 교란되기 때문에 코어 공시체의 압축강도는 동일 조건의 표준공시체 압축강도 보다 항상 작은 값을 나타내게 된다. 따라서, 콘크리트 코어의 강도는 채취기토크에 반비례하여 감소되며, 코어 절단면의 요철 발생에 의한 강도저하를 방지하기 위하여 채취기토크 및 채취도를 조절하는 것이 바람직하고, 드릴링 작업을 조심스럽게 행하여 그 영향을 줄여야 한다.

(7) **매입된 철근**

철근콘크리트 구조물에서 철근을 절단하지 않고 코어 채취하는 것이 현장 여건상 불가능한 경우가 있으나, 이러한 매입 철근의 영향에 관한 연구가 비교적 적고, 그 결과도 상당히 상이하다. 철근을 절단하는 경우에 있어서 재하축과 수직인 방향으로 철근이 있는 경우에는 묻혀진 철근의 직경이 클수록 강도의 저하는 현저해진다. 철근의 직경이 19mm 이상의 경우 강도 저하율은 약 10%에 달하기 때문에 이러한 코어는 제외하는 것이 좋지만 부득이 강도 시험을 하는 경우에는 겉보기 강도가 저하하는 것에 유의할 필요가 있다. 따라서, 콘크리트 중의 철근은 원칙적으로 절단되지 않도록 하는 것이 바람직하다.

Ⅲ. 실험계획

3.1 실험의 개요

본 연구에서는 보통콘크리트와 자원 재활용 및 각종 장점으로 인해 시멘트의 대체 자원으로서 사용이 일반화되고 있는 혼화재인 플라이애시(FA), 고로(高爐)슬래그(BF), 실리카흄(SF) 등의 혼화재를 치환한 콘크리트와 폴리프로필렌 섬유(PP), 강섬유(S) 등의 섬유를 혼입한 콘크리트를 대상으로 한다.

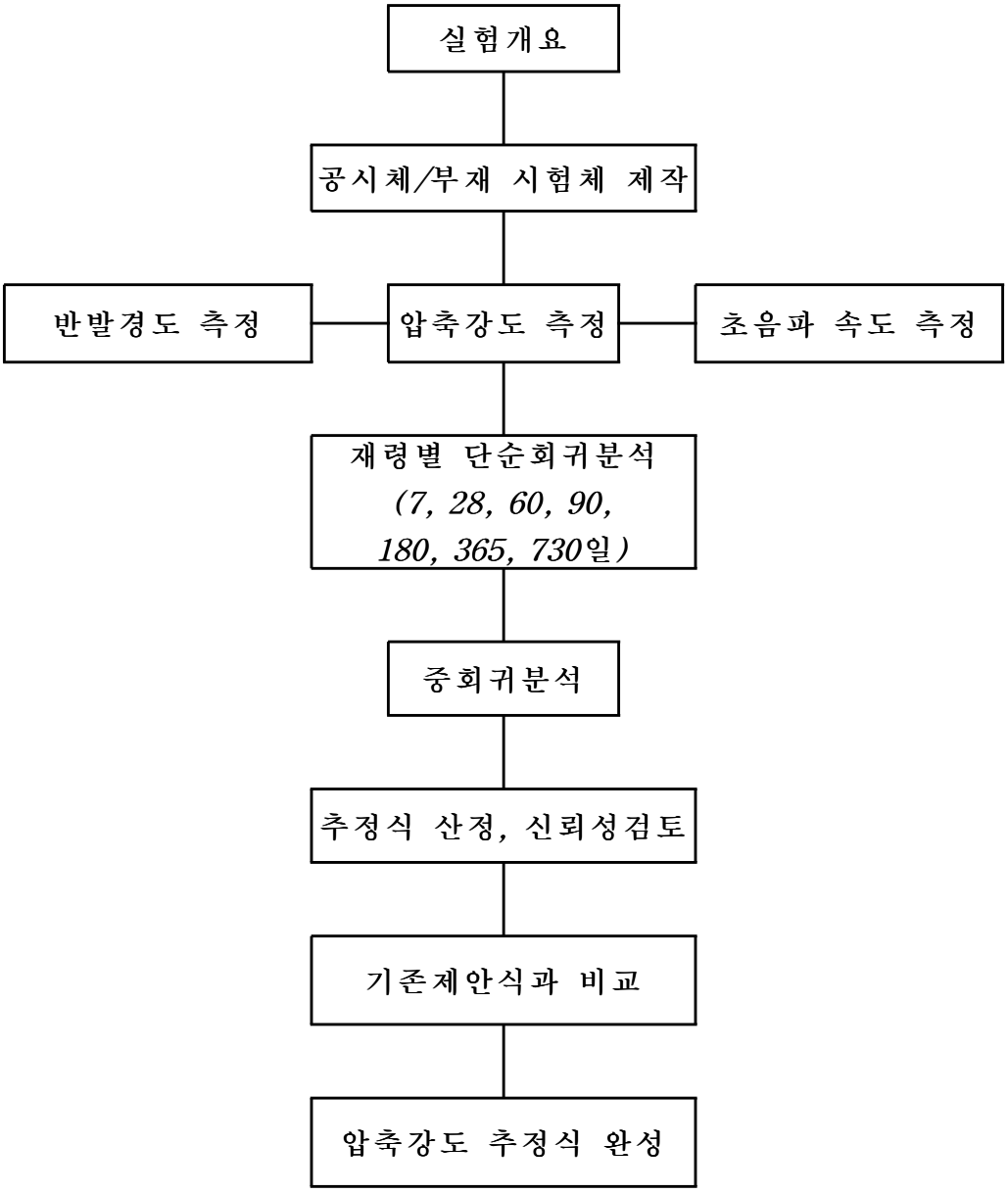
보통콘크리트와 혼화재와 섬유를 사용한 콘크리트를 재령경과에 따른 반발경도와 초음파속도에 의한 단일법과 반발경도와 초음파속도를 적용한 복합법을 이용한 콘크리트 압축강도의 추정에 관한 연구로, 실제 현장여건과 유사한 조건을 적용하여 신뢰도를 높이기 위하여 부재 시험체를 제작하여 기중양생 후 코어 채취를 한다.

보통콘크리트를 설계기준강도 24MPa로, 대상콘크리트는 문헌조사를 통해 강도발현이 우수하고 최근 현장에서 사용되고 있는 배합비를 적용하여 예비실험을 실시 후 배합비를 결정한다.

실험에 사용된 시험체는 공시체(Ø100mm×200mm)와 코어 채취를 위한 콘크리트 벽체를 제작하여 파괴 압축강도 시험과 비파괴 시험을 실시한다.

콘크리트는 현재 시공현장에서 가장 많이 사용하는 굵은 골재 최대치수 20mm, 콘크리트 배합강도는 24MPa, 슬럼프는 15±2cm를 기준으로, 추정식 작성을 위한 공시체를 재령 7일, 28일, 60일, 90일, 180일, 365일, 730일로 결정한다.

양생 후 파괴 압축강도 시험과 비파괴 시험을 실시하여 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트별, 비파괴 시험 측정 위치에 따른 추정식을 제안하고, 기존 제안식과 비교를 통해 추정식의 신뢰성을 검토한다.



[그림 3.1] 추정식 작성 흐름도

3.2 사용 재료

3.2.1 시멘트

본 실험에 사용할 시멘트는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)에 규정된 S사 제품을 사용하고, 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질은 <표 3.1>과 같다.

<표 3.1> 시멘트의 화학적 성분 및 물리적 성질

구 분	화 학 성 분 (%)							비 중
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	*Ig. loss*[4]	
보통 포틀랜드 시멘트	21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

3.2.2 골재

잔골재는 KS F 2502(골재의 체가름 실험 방법)의 규격에 적합한 섬진강사 강모래를 사용하며, 굵은골재는 KS 규격에 적합한 깬 자갈을 사용한다. 잔 골재와 굵은 골재의 물리적 성질은 <표 3.2>와 같다.

<표 3.2> 골재의 물리적 성질

골재 종류	최대치수 (*mm*)	단위용적질량 (kg/m^3)	밀 도	흡수율 (%)	조립율 (*F. M*)[5]
잔골재	5	1,653	2.61	1.05	2.69
굵은골재	20	1,550	2.67	1.24	6.83

3.2.3 혼화재

혼화재로서 플라이애시는 충남보령발전소에서, 고로슬래그 미분말은 광양제철소에서, 실리카흄은 삼림산업에서 수입한 Elkern Micosilica를 사용한다.

---

4) *Ig. loss* (강열감량, 强熱減量, Loss of ignition) : 시멘트나 석회 등을 고온에서 가열할 때에 잃는 수분, 결정수, 탄산가스, 휘발성 물질 등의 무게.

5) 조립율(fineness modulus : F.M) : 골재의 입도를 표시하는 계수로서 10개의 표준체를 이용해서 체가름 한후에 각 체에 남은 양을 전시료의 중량백분율로 계산한 후에 이들 합계를 100으로 나눈값.

콘크리트에 사용된 혼화재의 화학적 조성은 <표 3.3>과 같다.

<표 3.3> 혼화재의 화학적 조성

구 분	화 학 성 분 (%)							비 중
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$Ig.loss$	
플라이애시	52.09	25.36	12.90	2.58	1.37	0.07	3.70	2.15
고로슬래그	34.14	17.04	0.32	43.31	6.35	0.08	0.88	2.90
실리카흄	90.00	1.50	3.00	2.00	3.00	-	3.00	2.51

3.2.4 섬유

시험체에 사용된 강섬유, 폴리프로필렌섬유의 물리적 특성은 다음 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> 섬유의 물리적 특성

종류	밀 도	파괴시 변형률(%)	극한변형률 (%)	인장강도 (MPa)	휨탄성계수 (MPa)
강섬유	7.86	0.3	0.5～3.5	0.7～2,100	2.1×10^5
폴리프로필렌섬유	0.91	5～21	～25	0.26～710	$0.36\sim3.8\times10^2$

3.2.5 콘크리트 배합

시험체에 사용된 콘크리트의 설계기준강도(f_{ck})는 24MPa이며, 콘크리트의 배합 순서는 잔골재, 시멘트, 혼화재, 굵은골재 순서로 투입하며 비빔을 한 후 KS F 2402(포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험 방법)의 규격에 의하여 슬럼프를 확인한 후 부어넣기 한다.

동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)의 규격에 따라 원주형 시험체를 재료별로 30개씩 제작하여 재령별 압축강도를 측정하며 콘크리트 배합표는 <표 3.5>와 같다.

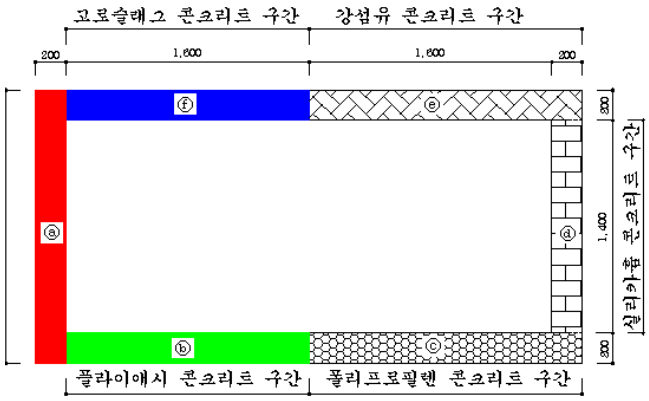
<표 3.5> 콘크리트 배합표

재료 / 종류	W/C (%)	치환율 (%)	질 량 배 합 (kg/m³)				
			W	C	S	G	혼화재
보 통 콘크리트	50	0	158	350	889	907	0
고로슬래그 콘크리트		30	158	245	889	907	105
플라이애시 콘크리트		20	158	280	889	907	70
실리카흄 콘크리트		20	158	280	889	907	70
폴리프로필렌 섬유 콘크리트		0.1	158	350	889	907	0
강섬유 콘크리트		0.1	158	350	889	907	0

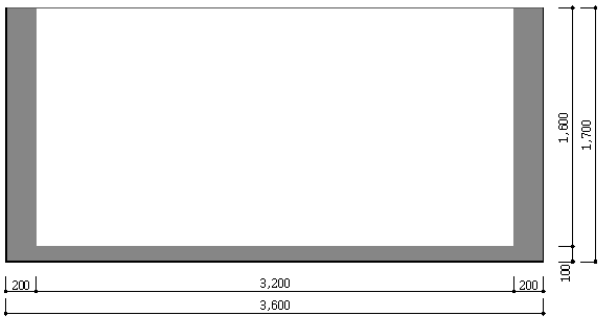
3.3 시험체 제작

본 연구에서는 비파괴 강도를 추정하기 위하여 실험변수에 따라 원주형 공시체와 코어 채취용 부재 시험체를 제작한다.

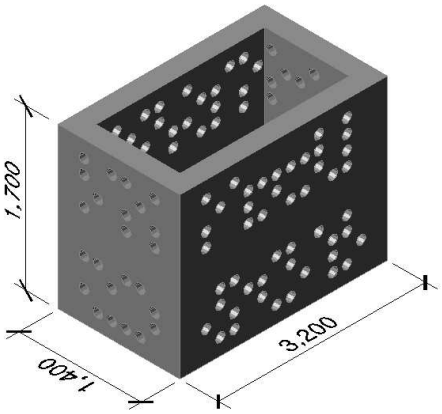
공시체는 Ø100mm×200mm로, 코어 공시체 채취를 의한 부재 시험체는 [그림 3.2]~[그림 3.3]과 같이 3,600mm(L)×1,800mm(W)×1,700mm(H)×200mm(t)로 실제 구조물과 같이 철근을 배근하여 콘크리트 벽체를 제작한다.



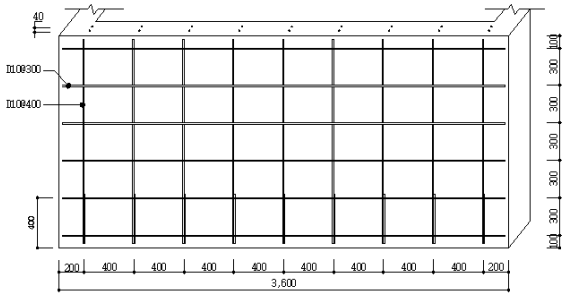
(a) 평면도



(b) 입면도

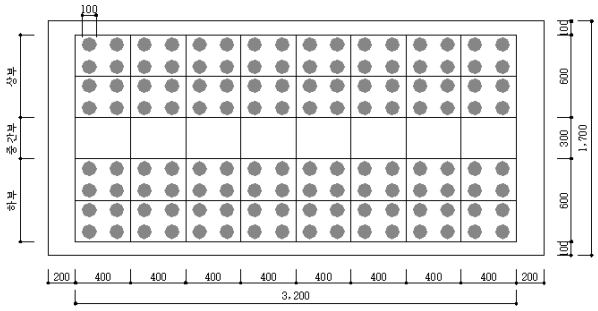


(c) 입체도



(d) 장방향 배근도

[그림 3.2] 부재 시험체 평면도, 입면도, 입체도, 배근도



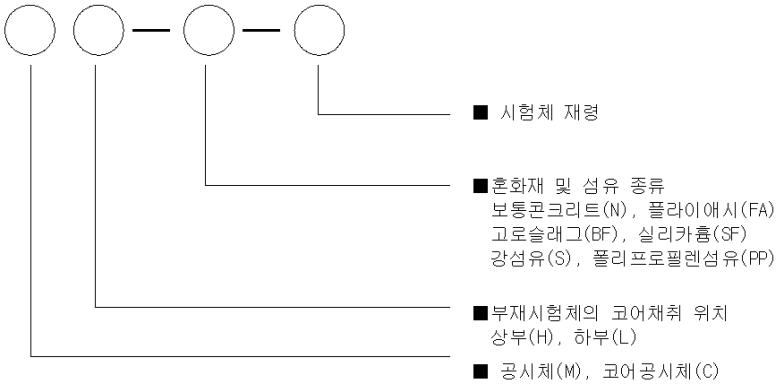
(a) 코어 채취도

(b) 코어 채취 전경

[그림 3.3] 부재 시험체 코어 채취도 및 코어 채취 전경

본 연구에서 시험체는 크게 보통콘크리트와 혼화재와 섬유를 사용한 콘크리트의 원주형 공시체와 코어공시체 구분하며, 시험체명에 따른 실험 변수별 구분은 다음 <표 3.6>과 같다.

코어 공시체 및 공시체에 따른 실험 변수별 구분은 다음과 같다.



<표 3.6> 실험 변수

실 험 요 인		수 준	
배합사항	W/C	50%	
	혼 화 재	플라이애시(FA, 20%치환) 고로슬래그(BF, 30%치환) 실리카흄(SF, 20%치환) 강섬유(S, 0.1%) 폴리프로필렌 섬유(PP, 0.1%)	
	슬 럼 프	15±2cm	
	공 기 량	4±1%	
부재	공 시 체	공시체(M)	
	부 재	벽 체	상 부(CH)
			하 부(CL)

3.4 실험 방법

3.4.1 압축강도 시험

공시체는 시험일까지 각 조건에 맞추어 폭로시켜 두며 표면을 연마한 후 0.05mm 정밀도를 갖는 버어니어캘리퍼스(Vernier Calipers)로 지름과 길이를 2회씩 측정한 후 평균값으로 단면적을 구한다.

시험은 최대하중 1,000kN, 최대높이 3m, 테이블 길이 4.2m의 만능구조시험기에 가압판과 구좌(球座, Sperical Block)를 사용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 실험한다.

[사진 3.1] 압축강도 시험 전경

3.4.2 반발경도 측정

반발경도의 측정은 KS F 2730(콘크리트 압축 강도 추정을 위한 반발 경도 시험 방법)에 의하여 실시한다. 본 실험에 사용된 측정기는 스위스 NR형을 사용하며, 측정에 앞서 테스트 앤벌(test anvil)을 이용하여 반발경도값을 80±1로 교정하여 실시한다.

시험할 콘크리트 부재의 시험면은 다공질의 조악한 면을 피하고 평활한 면을 선택해야 한다. 사용된 거푸집의 재질과 다르거나 미장 및 도장이 되어 있는 면은 평

활한 콘크리트의 반발경도와 크게 차이가 있으므로 마감면을 완전히 제거한 후 시험을 해야 한다.

시험값의 20개의 평균으로부터 오차가 20% 이상이 되는 경우의 시험값은 버리고 나머지 시험값의 평균을 구한다. 이때 범위를 벗어나는 시험값이 4개 이상인 경우에는 전체 시험값군을 버리고 다시 시험체에 슈미트햄머를 타격하여 반발경도를 구하여야 한다.

(a) 구조체에서 반발경도 측정

(b) 공시체에서 반발경도 측정

[사진 3.2] 반발경도 측정 전경

3.4.3 초음파속도 측정

초음파속도는 KS F 2731(콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파펄스속도 시험방법)에 의하여 실시한다. 이 실험은 콘크리트 구조물의 인정거리를 통과하는 발진자와 수잔자의 사이의 펄스 통과 시간으로부터 초음파속도를 측정함으로써 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위한 것이다.

실험을 실시전에 레이턴스 바를 이용하여 영점보정을 하여야 하며 시험체와 표면과 발신자와 수신자가 밀착을 위해서 발신자와 수신자 양쪽에 그리스(grease)를 바르고 측정하며 수신자와 발신자의 방향을 바꾸어서 2번 실시한다.

[사진 3.3] 초음파속도 측정 전경

3.5 실험 기기

본 실험에 사용될 비파괴 측정기구는 초음파속도 측정기(PUNDIT), 반발경도 측정기(Schumidt Hammer)이며 만능구조시험기(U.T.M) 등이 사용된다.

가. 압축강도 측정기

(1) 기 기 명 : 만능구조시험기(Universal Testing Machine)
(2) 제 조 사 : 한국 흥진정밀
(3) 용　　량 : 1,000 kN
(4) 작　　동 : 유압식
(5) 용　　도 : 압축, 인장, 휨, 전단실험

나. 초음파속도 측정기

(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 : 54㎑로써 Signal 100μVolt,
Impedence는 2MΩ
(8) 측정 온도 범위 : 0℃～40℃

다. 반발경도 측정기

(1) 기 기 명 : Schumidt Hammer NR type
(2) 발 명 자 : Schumidt(Swizerland)
(3) 제 조 사 : 스위스 Proceq
(4) 타격 에너지 : 0.225 m・kgf

Ⅳ. 실험결과

4.1 실험결과

보통 콘크리트와 혼화재 및 섬유를 사용한 공시체와 부재 시험체의 코어 공시체를 대기중에서 양생시켜 재령에 따라 만능구조시험기를 이용한 파괴 실험을 실시하였다.

각 시험체별로 파괴 시험과 비파괴 시험 결과는 <표 4.1>~<표 4.2>와 같다.

<표 4.1> 원주형 공시체 실험 결과

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1
보 통 콘크리트	7	M-N-7	16.3	3.646	27.6
	14	M-N-14	18.1	3.751	28.4
	28	M-N-28	24.1	3.880	33.5
	60	M-N-60	26.4	4.164	36.8
	90	M-N-90	34.0	4.205	38.3
	180	M-N-180	34.5	4.276	40.9
	365	M-N-365	34.3	4.305	41.8
	730	M-N-730	34.7	4.321	42.4
FA 치환 콘크리트	7	M-FA-7	18.1	3.852	26.0
	14	M-FA-14	24.2	4.021	29.3
	28	M-FA-28	26.7	4.051	31.2
	60	M-FA-60	30.9	4.247	35.6
	90	M-FA-90	31.2	4.262	35.7
	180	M-FA-180	35.0	4.441	37.1
	365	M-FA-365	35.5	4.540	39.8
	730	M-FA-730	35.5	4.574	42.2

f_c : 파괴압축강도, V_p : 초음파속도, R_1 : 원주형, 코어 공시체의 반발경도
M : 원주형 공시체, N : 보통콘크리트, FA : 플라이애시

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1
BF 치환 콘크리트	7	M-BF-7	15.0	3.669	26.7
	14	M-BF-14	18.4	3.762	29.1
	28	M-BF-28	19.4	3.903	30.6
	60	M-BF-60	26.9	4.058	35.1
	90	M-BF-90	27.2	4.146	35.3
	180	M-BF-180	33.2	4.278	39.4
	365	M-BF-365	34.0	4.301	40.0
	730	M-BF-730	36.3	4.366	41.4
SF 치환 콘크리트	7	M-SF-7	11.7	3.319	23.4
	14	M-SF-14	14.7	3.569	25.1
	28	M-SF-28	19.3	3.829	30.1
	60	M-SF-60	25.1	3.940	30.8
	90	M-SF-90	25.8	3.955	32.0
	180	M-SF-180	26.7	4.039	33.9
	365	M-SF-365	26.5	4.130	36.1
	730	M-SF-730	28.5	4.158	38.3
PP 혼입 콘크리트	7	M-PP-7	18.2	3.652	27.4
	14	M-PP-14	18.3	3.829	27.5
	28	M-PP-28	26.6	4.045	33.9
	60	M-PP-60	30.6	4.151	33.6
	90	M-PP-90	33.4	4.183	37.2
	180	M-PP-180	37.6	4.246	40.7
	365	M-PP-365	36.4	4.439	40.9
	730	M-PP-730	33.8	4.327	42.2

BF : 고로슬래그 , SF : 실리카흄, PP : 폴리프로필렌 섬유

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1
S 혼입 콘크리트	7	M-S-7	14.0	3.604	23.0
	14	M-S-14	18.4	3.773	26.4
	28	M-S-28	23.4	3.967	32.2
	60	M-S-60	31.8	4.009	33.6
	90	M-S-90	35.6	4.106	36.4
	180	M-S-180	32.2	4.099	37.7
	365	M-S-365	33.0	4.114	40.3
	730	M-S-730	34.5	4.115	42.0

S : 강섬유

<표 4.2> 코어 공시체 실험 결과

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1	R_2
보 통 콘크리트	7	C-N-7	16.3	3.646	27.6	-
	14	C-N-14	18.1	3.751	28.4	
	28	CH-N-28	28.6	4.195	33.5	35.3
		CL-N-28	32.4	4.235	36.7	38.5
	60	CH-N-60	29.9	4.204	36.5	39.6
		CL-N-60	34.5	4.276	37.2	40.5
	90	CH-N-90	33.8	4.230	37.5	41.3
		CL-N-90	36.2	4.286	38.1	42.1
	180	CH-N-180	36.0	4.295	38.6	41.6
		CL-N-180	36.6	4.302	39.4	42.6
	365	CH-N-365	36.0	4.295	38.6	42.6
		CL-N-365	36.6	4.302	39.4	43.5
	730	CH-N-730	36.0	4.295	38.6	42.6
		CL-N-730	36.6	4.302	39.4	43.6

C : 코어 공시체, H : 구조체의 상부, L : 구조체의 하부, R_2 : 구조체의 반발경도

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1	R_2
FA 치환 콘크리트	7	C-FA-7	18.1	26.0	3.852	-
	14	C-FA-14	24.2	28.4	4.021	-
	28	CH-FA-28	26.2	35.3	4.028	37.4
		CL-FA-28	29.3	36.4	4.107	38.5
	60	CH-FA-60	29.2	36.2	4.153	38.3
		CL-FA-60	31.9	36.3	4.170	39.1
	90	CH-FA-90	34.9	38.3	4.271	39.9
		CL-FA-90	35.2	39.1	4.366	41.1
	180	CH-FA-180	35.0	41.0	4.455	42.4
		CL-FA-180	36.3	42.1	4.456	44.3
	365	CH-FA-365	35.1	41.1	4.456	43.2
		CL-FA-365	35.6	42.5	4.474	45.2
	730	CH-FA-730	33.5	41.3	4.454	43.2
		CL-FA-730	38.6	41.4	4.434	45.7
BF 치환 콘크리트	7	C-BF-7	14.9	26.7	3.667	-
	14	C-BF-14	18.0	29.1	3.762	-
	28	CH-BF-28	30.7	36.9	4.201	38.2
		CL-BF-28	30.8	36.7	4.228	39.5
	60	CH-BF-60	31.2	36.6	4.252	38.3
		CL-BF-60	31.2	36.6	4.281	39.8
	90	CH-BF-90	33.9	37.9	4.305	39.9
		CL-BF-90	36.2	39.2	4.379	41.4
	180	CH-BF-180	34.8	41.0	4.446	42.4
		CL-BF-180	36.2	42.0	4.457	44.5
	365	CH-BF-365	36.7	41.5	4.420	43.2
		CL-BF-365	37.2	41.6	4.448	45.6
	730	CH-BF-730	37.2	41.7	4.447	43.5
		CL-BF-730	39.0	41.9	4.407	45.5

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1	R_2
SF 치환 콘크리트	7	C-SF-7	11.7	23.4	3.319	-
	14	C-SF-14	14.7	25.1	3.569	-
	28	CH-SF-28	22.8	29.8	3.846	31.4
		CL-SF-28	26.9	30.3	4.049	32.1
	60	CH-SF-60	25.1	30.8	3.941	32.0
		CL-SF-60	27.8	31.4	4.050	34.5
	90	CH-SF-90	27.6	32.7	4.010	35.8
		CL-SF-90	31.8	34.3	4.032	36.2
	180	CH-SF-180	29.3	34.9	4.103	37.7
		CL-SF-180	33.9	35.3	4.134	37.2
	365	CH-SF-365	30.5	35.4	4.115	38.1
		CL-SF-365	31.6	35.6	4.141	37.8
	730	CH-SF-730	30.9	35.7	4.142	39.0
		CL-SF-730	33.7	37.2	4.159	41.5
PP 혼입 콘크리트	7	C-PP-7	18.2	27.4	3.652	-
	14	C-PP-14	18.3	27.5	3.829	-
	28	CH-PP-28	26.8	35.6	4.192	39.3
		CL-PP-28	29.1	35.6	4.205	40.4
	60	CH-PP-60	30.2	37.0	4.335	40.0
		CL-PP-60	35.5	37.2	4.293	41.7
	90	CH-PP-90	31.4	37.0	4.190	40.6
		CL-PP-90	35.4	37.3	4.365	42.3
	180	CH-PP-180	32.8	37.7	4.312	41.9
		CL-PP-180	35.2	39.4	4.421	45.7
	365	CH-PP-365	33.2	39.8	4.361	42.5
		CL-PP-365	35.5	41.0	4.446	46.5
	730	CH-PP-730	33.1	41.1	4.268	44.7
		CL-PP-730	34.2	42.2	4.331	46.1

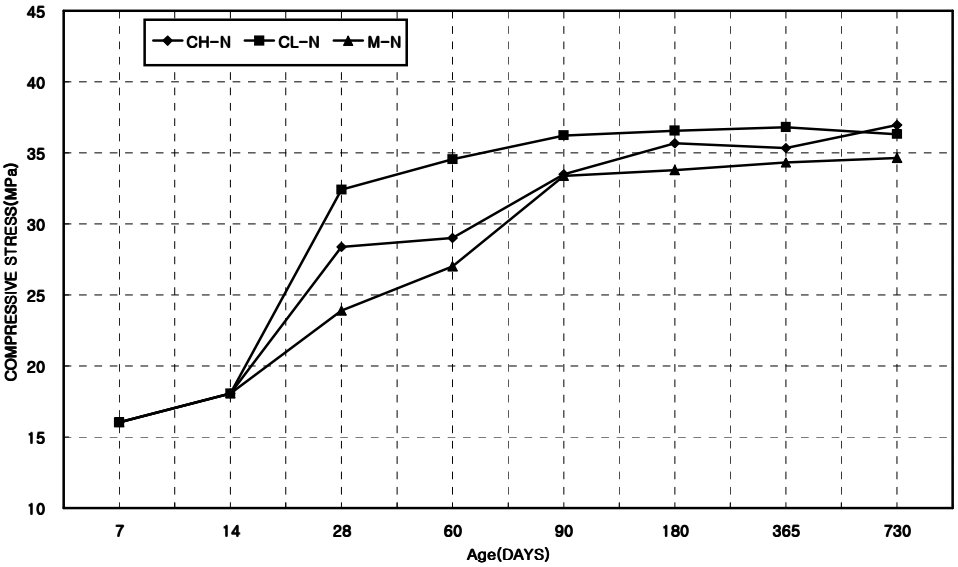
종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	R_1	R_2
S 혼입 콘크리트	7	C-S-7	13.4	23.0	3.604	-
	14	C-S-14	18.4	26.4	3.772	-
	28	CH-S-28	25.9	35.4	4.163	38.5
		CL-S-28	24.3	35.3	4.064	41.1
	60	CH-S-60	28.9	36.9	4.256	40.4
		CL-S-60	31.7	37.6	4.277	42.5
	90	CH-S-90	32.7	38.6	4.288	41.1
		CL-S-90	31.3	39.5	4.311	43.3
	180	CH-S-180	32.1	40.9	4.401	42.3
		CL-S-180	33.9	41.3	4.274	45.7
	365	CH-S-365	32.0	41.6	4.285	43.3
		CL-S-365	32.7	41.8	4.322	46.3
	730	CH-S-730	31.5	42.8	4.288	46.00
		CL-S-730	35.1	44.3	4.284	49.3

4.1.1 파괴 압축강도

보통콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 28.58MPa, 코어공시체의 하부는 32.41MPa, 원주형 공시체 24.05MPa 정도 설계기준강도 24MPa 이상의 압축강도를 나타냈으며, 원주형 공시체보다는 코어공시체가, 코어공시체의 상부보다는 코어 공시체 하부가 높은 압축강도를 보였다.

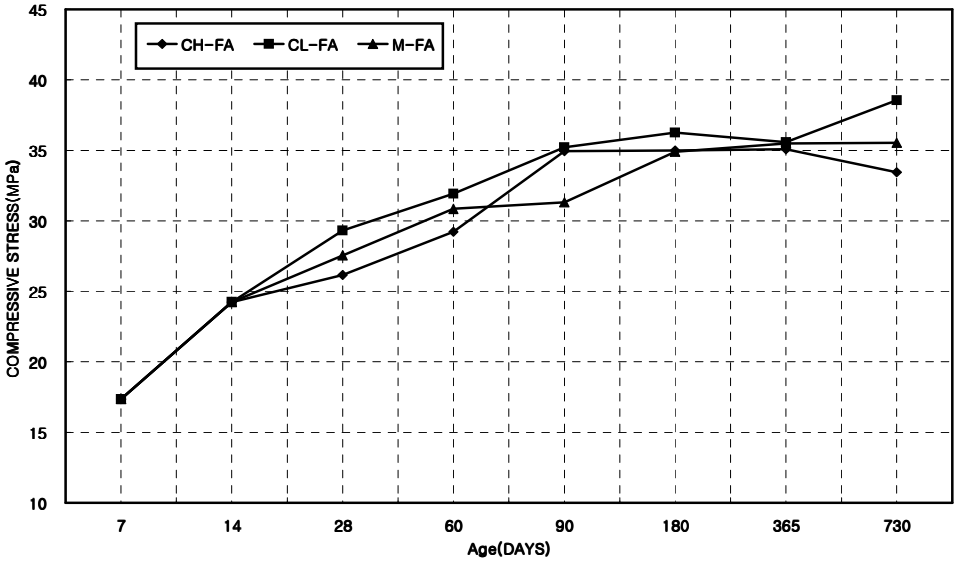
재령 14일부터 28일까지 압축강도 발현율이 가장 크게 나타났으며, 재령 60일 부터는 36MPa 정도의 일정한 압축강도를 보였다.

재령에 따른 보통콘크리트의 압축강도 변화는 [그림 4.1]과 같다.



[그림 4.1] 보통 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 변화는 [그림 4.2]와 같으며, 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 26.17MPa, 코어공시체의 하부는 29.31MPa, 원주형 공시체 26.68MPa 정도로 설계기준강도 이상의 압축강도를 나타냈으며, 원주형 공시체보다는 코어공시체가, 코어공시체의 상부보다는 코어 공시체 하부의 압축강도가 높게 나타났다.

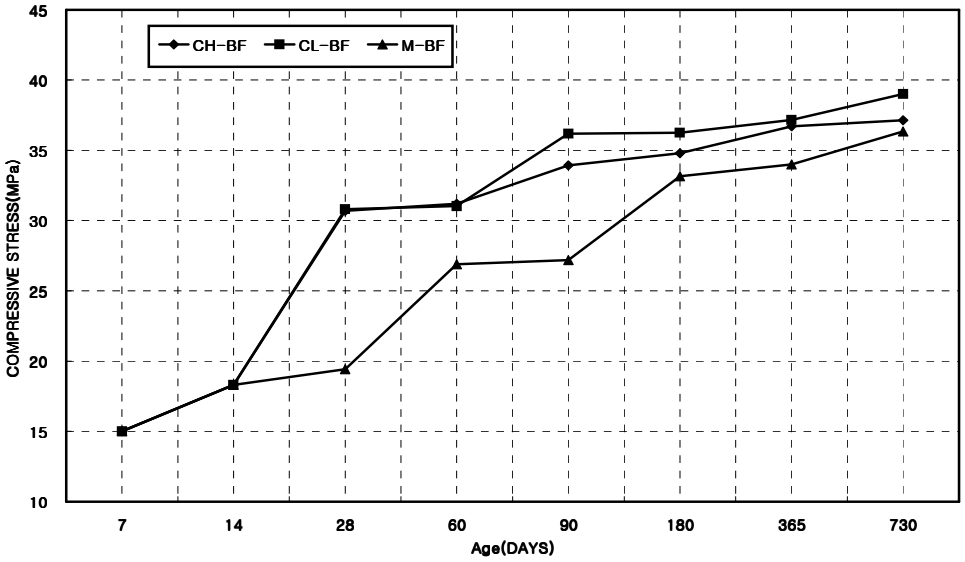


[그림 4.2] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 9.2%, 코어공시체의 하부는 10.6% 정도 높게 원주형 공시체는 9.9%정도 보통콘크리트의 압축강도가 낮게 나타났다.

재령 90일까지 압축강도는 완만한 증가를 보였으며, 재령 90일부터는 보통콘크리트의 압축강도와 유사한 압축강도를 나타냈다.

BF 치환한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 변화는 [그림 4.3]과 같으며, 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 30.68MPa, 코어공시체의 하부는 30.81MPa, 원주형 공시체 26.88MPa 정도로 설계기준강도 이상의 압축강도를 나타냈으며, 원주형 공시체보다는 코어공시체가, 코어공시체의 상부보다는 코어 공시체 하부의 압축강도가 높게 나타났다.

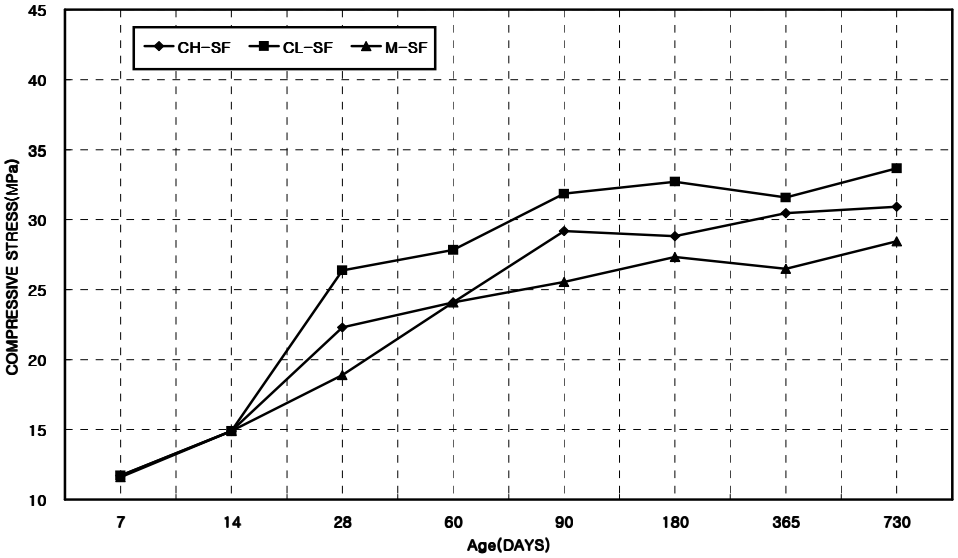


[그림 4.3] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 6.8%, 원주형 공시체는 11.7% 정도 보통 콘크리트의 압축강도가 높고, 코어공시체의 하부는 6.5% 정도 보통 콘크리트의 압축강도가 낮게 나타났다.

재령 14일부터 28일까지 압축강도 발현율이 가장 크게 나타났으며, 플라이애시 치환 콘크리트와 마찬가지로 재령 90일부터는 보통 콘크리트의 압축강도와 유사한 압축강도를 보였다.

SF 치환한 콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어공시체의 상부는 22.81MPa, 코어공시체의 하부는 26.88MPa, 원주형 공시체 19.27MPa 정도로 코어공시체의 상부와 원주형 공시체는 설계기준강도 이하의 압축강도를 나타냈으며, 다른 혼화재를 치환한 콘크리트에 비해 가장 낮은 압축강도 발현율을 보였다.



[그림 4.4] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 20.2%, 코어 공시체의 하부는 17.1%, 원주형 공시체는 24.8% 정도 보통콘크리트의 압축강도가 높게 나왔다.

재령에 14일부터 28일까지 압축강도 발현율이 가장 크게 나타났으며, 다른 혼화재를 치환한 콘크리트에 비해 실리카흄 치환 콘크리트는 재령이 경과할수록 보통콘크리트보다 다소 낮은 압축강도를 보였다.

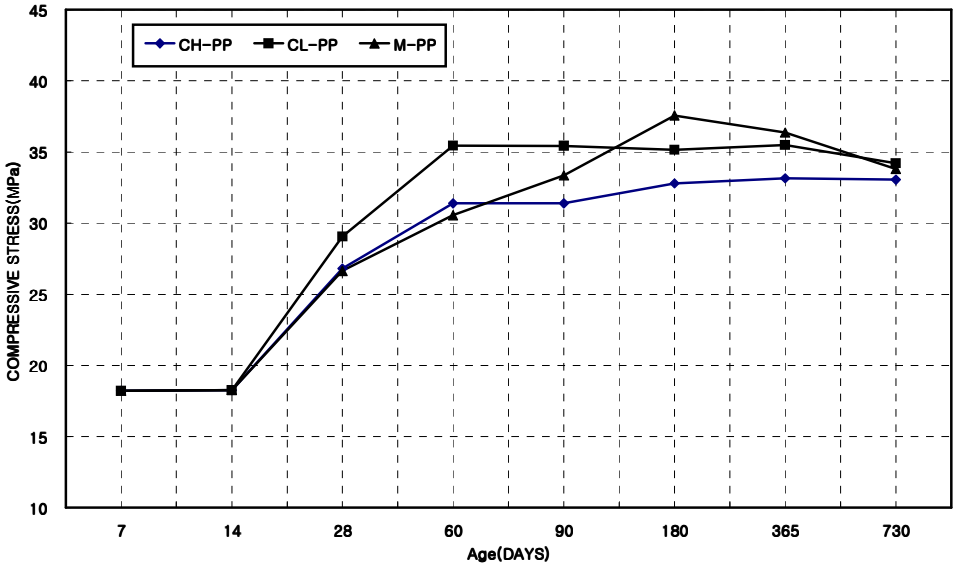
PP 섬유 혼입한 콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어 공시체의 상부는 26.81MPa, 코어공시체 하부는 29.06MPa, 원주형 공시체는 26.64MPa로 설계기준강도 이상의 강도발현을 보였다. 재령 14일부터 60일까지의 강도 발현율이 가장 크게 나타났으며, 재령 60일 이후부터는 35MPa 정도의 압축강도를 보였다.

재령 28일 보통 콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는

6.6%, 코어공시체의 하부는 11.5% 정도 보통 콘크리트의 압축강도가 높게 나왔으며, 원주형 공시체는 11.2% 정도로 낮게 나타났다.

또한 재령이 경과할수록 보통 콘크리트와 비슷한 압축강도를 나타냈으며 기존의 연구 및 본 실험과 같이 폴리프로필렌 섬유 혼입은 압축강도의 증가에는 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다.

PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 결과는 [그림 4.5]와 같다.



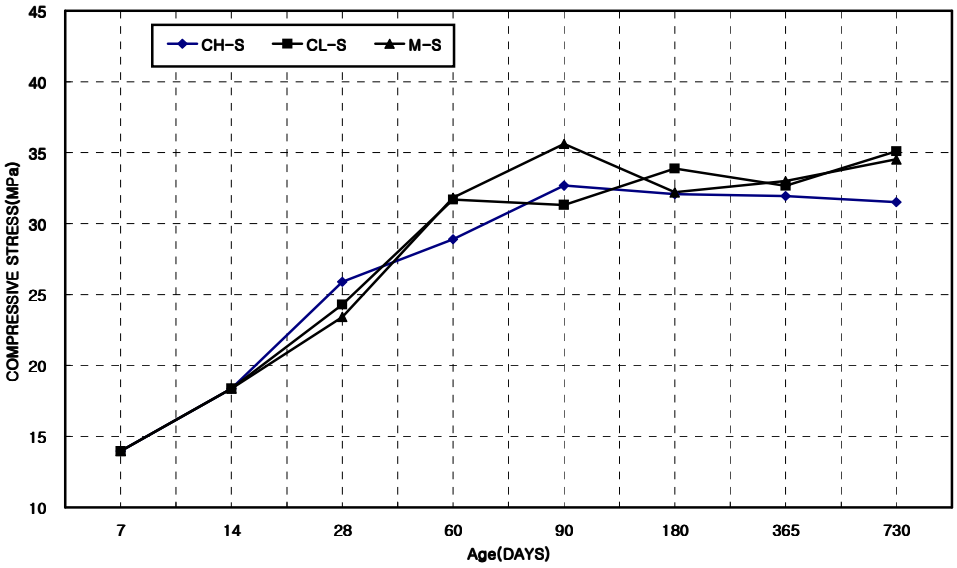
[그림 4.5] PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

강섬유 혼입한 콘크리트 경우는 재령 28일 강도가 코어 공시체의 상부는 25.89MPa, 코어공시체 하부는 24.29MPa, 원주형 공시체는 23.42MPa로 설계기준강도 정도의 강도발현을 보였다.

재령 7일부터 90일까지의 강도발현율이 크게 나타났으며, 재령 90일 이후부터는 32MPa 정도의 압축강도를 보였다.

재령 28일 보통콘크리트의 압축강도와 비교했을 경우, 코어공시체의 상부는 10.5%, 코어공시체의 하부는 33.4%, 원주형 공시체는 12.5%정도 보통콘크리트의 압축강도가 높게 나타났다.

폴리프로필렌 섬유를 혼입한 콘크리트와 마찬가지로 기존의 연구 및 본 실험과 같이 강섬유 0.1%의 혼입은 압축강도의 증가에는 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다.



[그림 4.6] S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화

4.1.2 반발경도

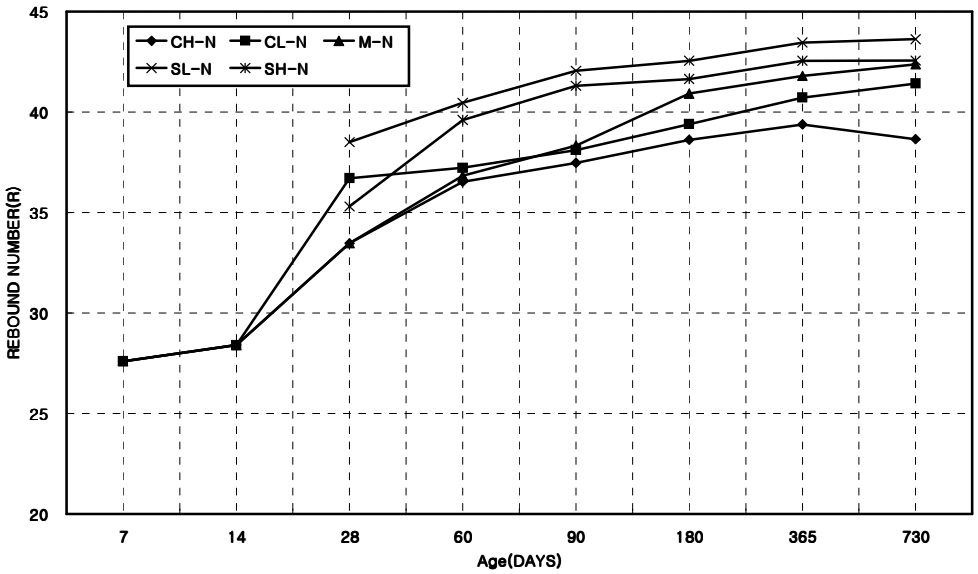
재료별로 재령에 따른 반발경도를 비교했을 경우, 모든 콘크리트가 재령이 경과할수록 반발경도는 증가하였으며, SF 치환 콘크리트가 다른 콘크리트보다 낮은 반발경도를 나타냈다.

또한 파괴 압축강도와 마찬가지로 재령 14일부터 재령28일 사이의 반발경도 증가폭이 가장 크게 나타났다.

보통 콘크리트 경우는 재령 28일 반발경도가 코어 공시체는 35.3, 원주형 공시체는 33.5, 구조체에서는 38.8 정도로 구조체에서 측정한 반발경도값이 원주형 공시체보다는 10.2% 정도, 코어 공시체보다는 5.2% 정도 높게 나타났다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 2.9%~10.2% 정도, 코어공시체보다는 5.2%~10.3% 정도 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 각각의 차이는 감소하는 경향을 보였다.

보통 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.7]과 같다.



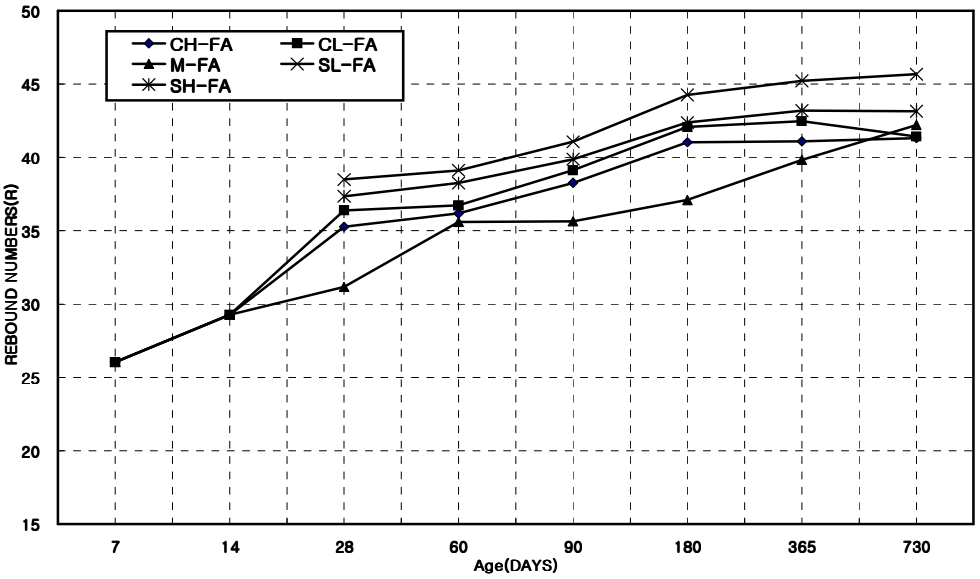
[그림 4.7] 보통 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.8]과 같다.

원주형 공시체와 코어공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 코어 공시체는 35.8, 원주형 공시체는 31.2 정도로 코어공시체가 15.0% 정도 높게 나타났다.

구조체에서 측정한 반발경도와 원주형 공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형 공시체보다 21.7% 정도 높게 나타났으며 코어공시체와 구조체에서 측정한 반발경도를 비교했을 경우 5.8% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높은 경향을 보였다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 5.2%~21.7% 정도, 코어공시체보다는 4.3%~7.3% 정도 높게 나타났다.



[그림 4.8] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

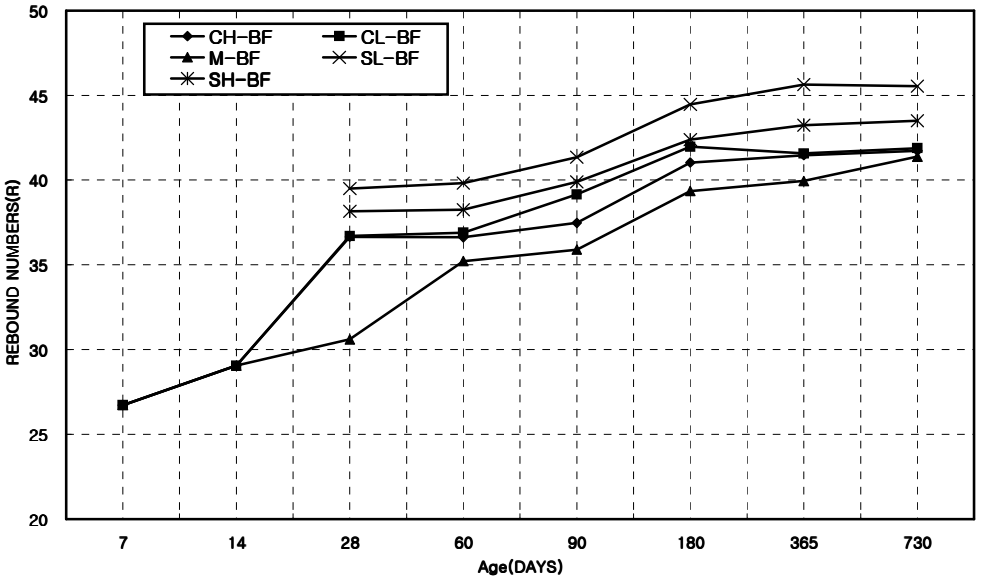
BF 치환 콘크리트 경우, 원주형 공시체와 코어공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 때 코어 공시체는 36.7, 원주형 공시체는 30.6 정도로 나타났으며 코어공시체가 19.9% 정도 높은 경향을 보였다.

구조체에서 측정한 반발경도와 원주형 공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 26.9% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높게 나타났으며, 코어공시체와 구조체에서 측정한 반발경도를 비교했을 경우 5.9% 정도 구조체에서 측정한 반

발경도가 높은 경향을 보였다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 7.6%~26.9%정도, 코어공시체보다는 4.6%~7.0% 정도 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 각각의 차이는 감소하는 경향을 보였다.

BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.9]와 같다.

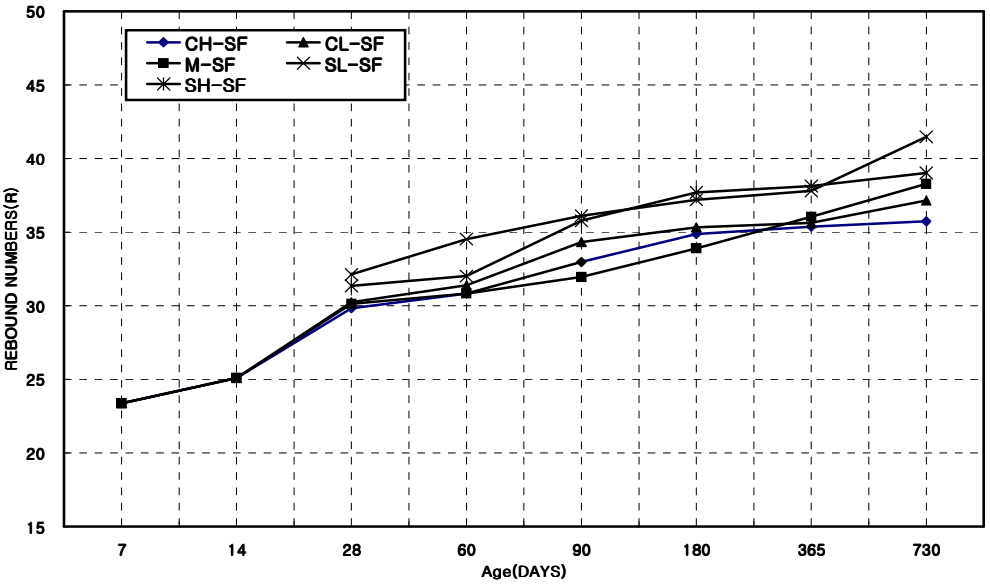


[그림 4.9] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.10]과 같으며 원주형 공시체와 코어공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 때 코어 공시체는 36.7, 원주형 공시체는 30.6 정도로 나타났으며 원주형 공시체보다 코어공시체가 19.9% 정도 반발경도가 높은 경향을 보였다.

구조체에서 측정한 반발경도와 원주형 공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 5.3% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높게 나타났으며, 코어공시체와 구조체에서 측정한 반발경도를 비교했을 경우 5.7% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높은 경향을 보였다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 5.1%~11.7%정도, 코어공시체보다는 5.7%~10.4% 정도 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 각각의 차이는 감소하는 경향을 보였다.



[그림 4.10] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

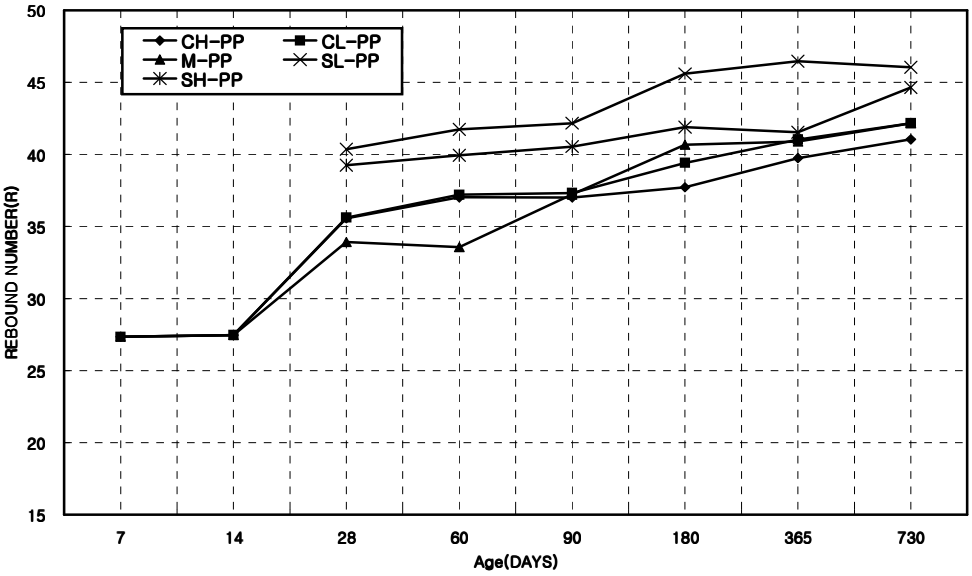
PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.11]과 같으며 원주형 공시체와 코어공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 때 코어 공시체는 35.6, 원주형 공시체는 33.9 정도로 나타났으며 코어 공시체보다 원주형 공시체가 4.9% 정도 반발경도가 높은 경향을 보였다.

구조체에서 측정한 반발경도와 원주형 공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 구조체에서 측정한 반발경도가 17.3% 정도 높게 나타났다.

코어공시체와 구조체에서 측정한 반발경도를 비교했을 경우 11.8% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높은 경향을 보였다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 7.5%~21.7% 정도, 코어공시체보다는 9.0%~13.5% 정도 높게 나타났으며 재령이 경과할

수록 각각의 차이는 감소하는 경향을 보였다.



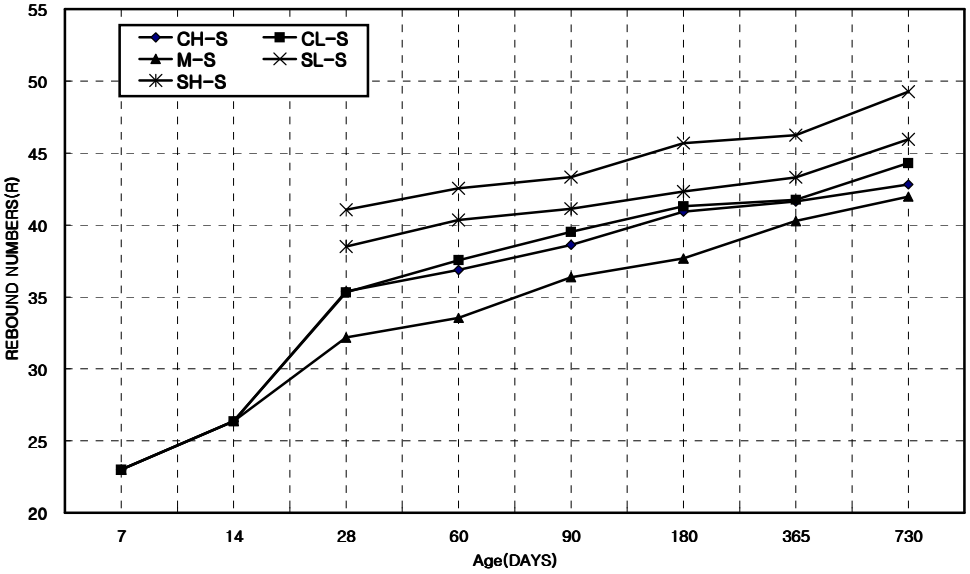
[그림 4.11] PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

S 혼입 콘크리트의 경우, 원주형 공시체와 코어공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 때 코어 공시체는 35.4, 원주형 공시체는 32.18 정도로 나타났으며 코어 공시체보다 원주형 공시체가 9.9% 정도 반발경도가 높은 경향을 보였다.

구조체에서 측정한 반발경도와 원주형 공시체의 재령 28일 반발경도를 비교했을 경우, 23.6% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높게 나타났으며, 코어공시체와 구조체에서 측정한 반발경도를 비교했을 경우 12.5% 정도 구조체에서 측정한 반발경도가 높은 경향을 보였다.

재령이 경과할수록 구조체에서 측정한 반발경도가 원주형공시체 보다는 11.2%~23.6%정도, 코어공시체보다는 7.0%~12.5% 정도 높게 나타났다.

S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도 변화는 [그림 4.12]와 같다.



[그림 4.12] S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 반발경도의 변화

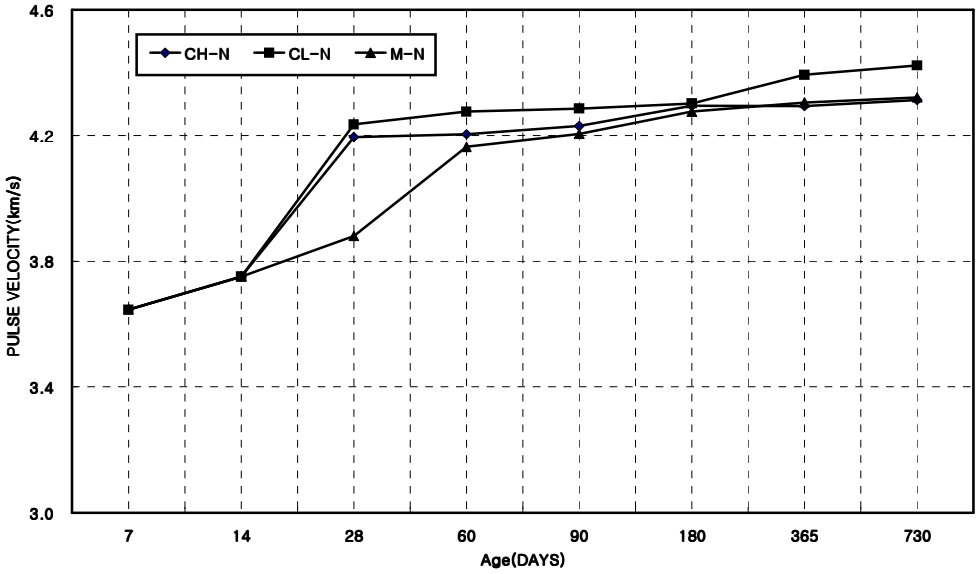
4.1.3 초음파속도

보통 콘크리트 경우는 재령 28일 초음파속도가 원주형 공시체보다는 코어 공시체가 8.6% 정도, 코어공시체의 상부보다는 하부의 초음파속도가 1.0% 정도 높게 나타났다.

재령 14일부터 28일까지의 초음파속도 발현율은 12.4% 정도로 다른 재령에 비해 크게 나타났으며, 재령 28일 부터는 일정한 증가를 보였다.

재령 경과에 따른 원주형 공시체와 코어 공시체를 비교했을 경우, 코어공시체가 원주형 공시체보다 1.0%~8.6%정도 높게 나타났으며, 코어 공시체의 상부와 하부를 재령에 따라 비교했을 경우, 코어 공시체의 하부가 상부보다 0.2%~2.6%정도 높은 경향을 보였다.

보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도는 [그림 4.13]과 같다.



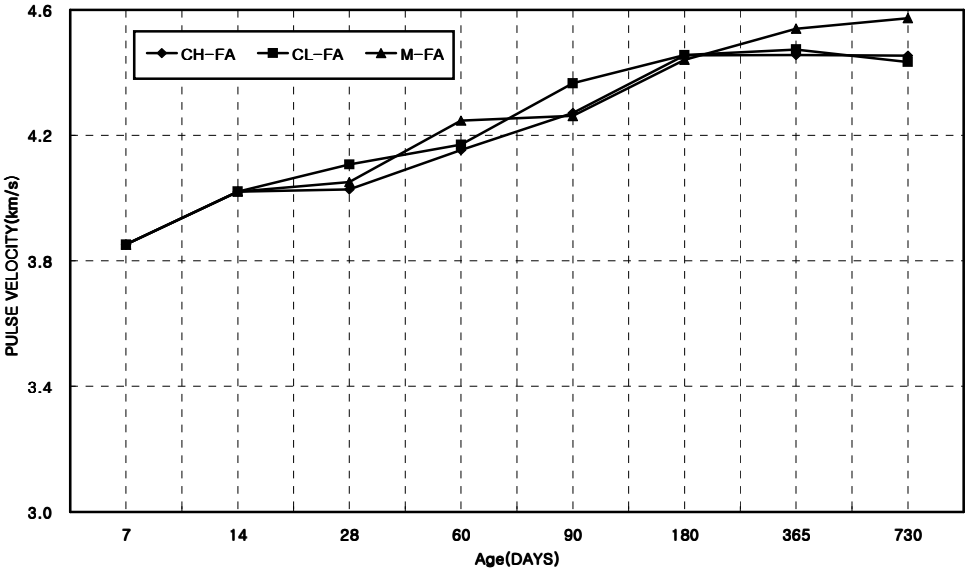
[그림 4.13] 보통 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도는 [그림 4.14]와 같으며, 재령 28일 초음파속도를 비교했을 경우, 원주형 공시체보다는 코어공시체가 0.4%정도 높게 나타났다.

재령 28일의 코어 공시체의 상부와 하부를 비교했을 경우 코어공시체의 하부가 2.0% 정도 높은 경향을 보였으며 보통 콘크리트에 비해 재령이 경과할수록 급격히 증가하는 구간 없이 재령 7일부터 재령이 증가할수록 완만한 발현율을 보였다.

재령 경과에 따른 원주형 공시체와 코어 공시체를 비교했을 경우, 코어 공시체가 원주형 공시체보다 0.3%~1.3%정도 높게 나타났으며, 코어 공시체의 상부와 하부를 재령에 따라 비교했을 경우, 코어 공시체의 하부가 상부보다 0.4%~2.0% 정도 높은 경향을 보였다.

재령에 따른 보통 콘크리트의 초음파속도를 비교했을 경우, 재령 28일에는 FA 치환 콘크리트가 보통 콘크리트보다 다소 낮은 초음파속도를 보였으나, 재령이 증가할수록 FA 치환 콘크리트가 보통 콘크리트보다 초음파속도가 5.8% 정도 높게 나타났다.



[그림 4.14] FA 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

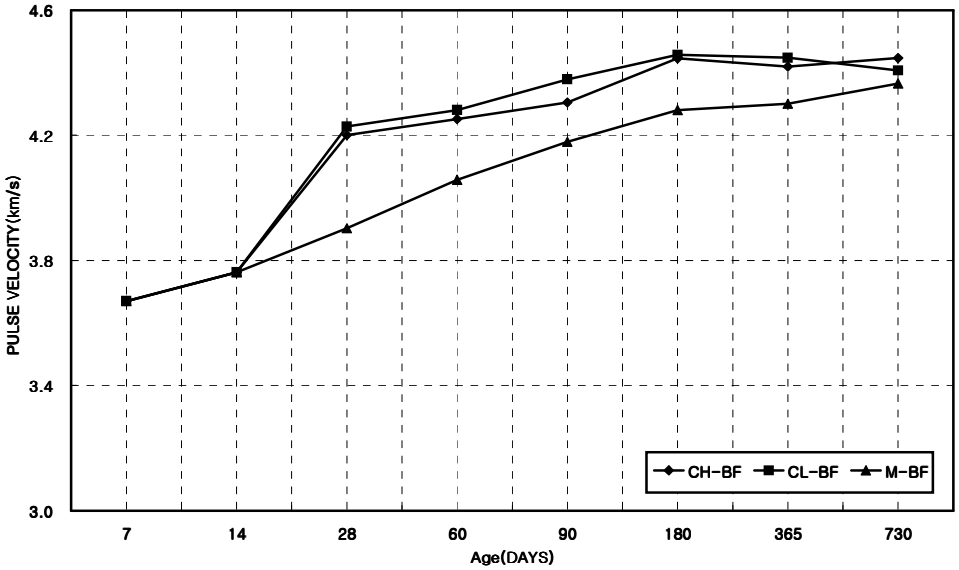
BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.15]와 같으며 재령 28일 원주형 공시체와 코어 공시체의 초음파속도를 비교했을 경우 코어 공시체가 원주형 공시체 보다 8.0% 정도 높게 나타났다.

재령 28일 코어 공시체 상부와 하부의 초음파속도를 비교했을 경우, 코어 공시

체의 하부가 코어 공시체의 상부보다 0.6%정도 높게 나타났다.

재령 14일부터 28일까지 초음파속도 발현율은 다른 재령에 비해 12.4% 정도 크게 나타났으며, 재령 28일 이후에는 재령이 증가할수록 완만한 발현율을 보였다.

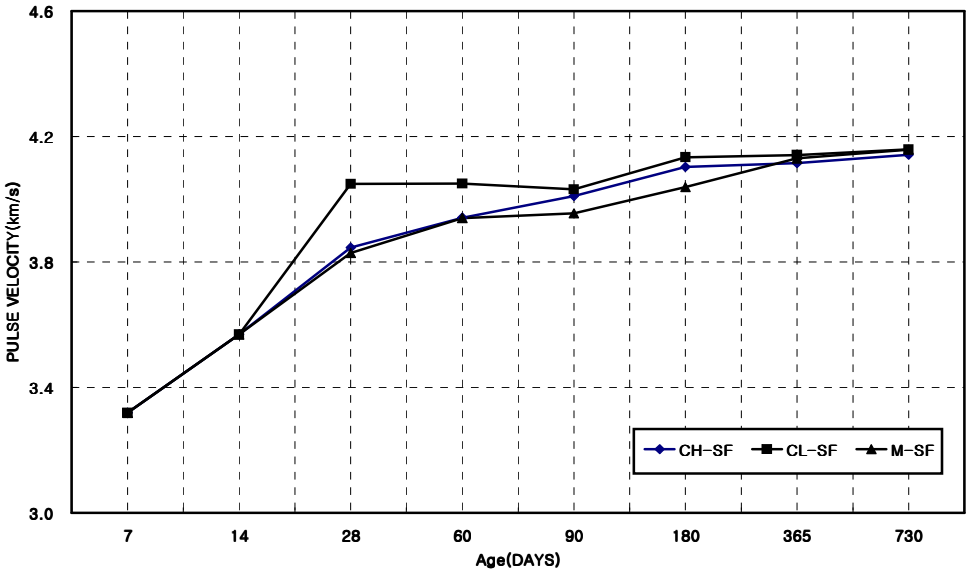
재령에 따른 보통 콘크리트의 초음파속도를 비교했을 경우, 재령 28일에는 BF 치환 콘크리트가 보통 콘크리트와 비슷한 초음파속도를 보였으나, FA 치환 콘크리트와 마찬가지로 재령이 증가할수록 혼화재의 특성상 BF 치환 콘크리트가 보통 콘크리트 보다 초음파속도가 최대 2.5% 정도 높게 나타났다.



[그림 4.15] BF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.16]과 같으며 재령 28일 원주형 공시체보다는 코어 공시체의 하부가 5.7% 정도, 코어 공시체의 상부보다는 하부의 초음파속도가 5.2% 정도 높게 나타났으며, 재령 14일부터 28일까지 초음파속도 발현율이 11.3%정도 크게 나타났으며, 재령 28일 이후에는 재령이 증가할수록 완만한 발현율을 보였다.

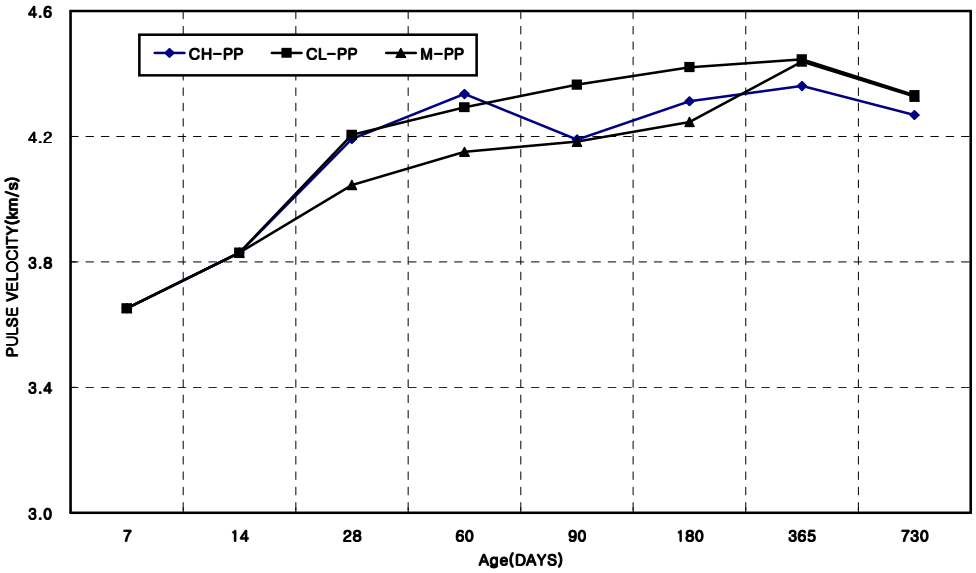
재령에 따른 보통 콘크리트의 초음파속도를 비교했을 경우, SF 치환 콘크리트가 보통콘크리트 보다 최대 6.3% 정도 낮은 초음파속도를 보였으며 혼화재를 치환한 콘크리트 중 가장 낮은 발현율을 보였다.



[그림 4.16] SF 치환 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.17]과 같다.

재령 28일의 원주형 공시체와 코어 공시체의 초음파속도를 비교했을 경우, 원주형 공시체보다는 코어 공시체가 3.8%정도, 코어 공시체의 하부가 코어 공시체의 상부보다 0.3% 정도 초음파속도가 높게 나타났다.



[그림 4.17] PP 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

재령 14일부터 28일까지 초음파속도 발현율이 5.3%로 가장 크게 나타났으며, 재령 28일 이후에는 재령이 증가할수록 완만한 발현율을 보였다.

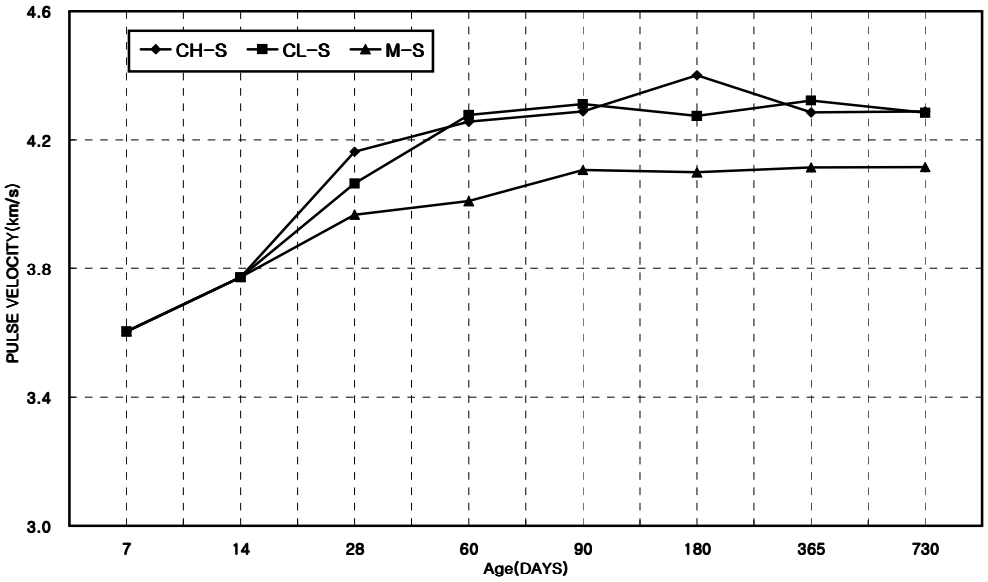
재령에 따른 보통 콘크리트의 초음파속도를 비교했을 경우, PP 혼입 콘크리트가 보통콘크리트와 비슷한 초음파속도를 보였으며, 재령이 증가할수록 보통 콘크리트보다 초음파속도는 높게 나타났다.

S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도 변화는 [그림 4.18]과 같다.

재령 28일의 원주형 공시체와 코어 공시체의 초음파속도를 비교했을 경우, 원주형 공시체보다는 코어 공시체가 3.7%정도, 코어 공시체의 상부가 코어 공시체의 하부보다 2.4% 정도 초음파속도가 높게 나타났다.

재령 14일부터 28일까지 초음파속도 발현율이 7.7%로 가장 크게 나타났으며, 재령 28일 이후에는 재령이 증가할수록 완만한 발현율을 보였다.

재령에 따른 보통 콘크리트의 초음파속도를 비교했을 경우, S 혼입 콘크리트가 보통 콘크리트와 비슷한 초음파속도를 보였으며, 재령이 증가할수록 보통 콘크리트보다 초음파속도는 높게 나타났다.



[그림 4.18] S 혼입 콘크리트의 재령에 따른 초음파속도의 변화

4.2 기존 제안식 적용 결과

4.2.1 반발경도법에 의한 기존 제안식 적용 결과

시험체별 반발경도 측정결과를 기존 제안식에 적용하여 추정강도와 파괴강도를 비교한 것은 <표 4.3>~<표 4.86> 및 [그림 4.19]~[그림 4.24]와 같다.

1) 보통 콘크리트

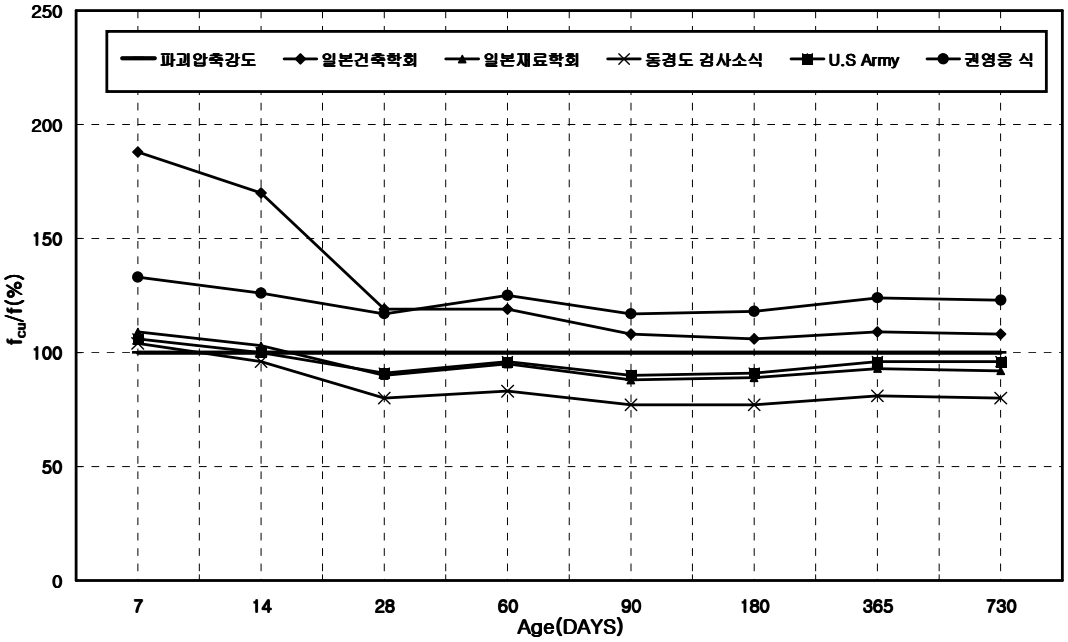
보통콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 6%~88% 정도, 일본재료학회식은 5%~11% 정도, 동경도 건축재료 검사소식은 4%~23% 정도, U.S Army 시험소식은 4%~10% 정도, 권영웅 식은 18%~33% 정도 차이를 보였으며, 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식은 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이었으며 일본건축학회식은 최대 88%로 가장 큰 차이를 보였다.

<표 4.3> 보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_1	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
보통콘크리트	7	M-N-7	16.3	27.6	30.2	17.5	16.6	17.1	21.3
	14	M-N-14	18.1	28.4	30.7	18.5	17.4	18.1	22.9
	28	M-N-28	24.1	33.5	34.4	25.1	22.5	25.1	32.5
	60	M-N-60	26.4	36.8	36.9	29.5	25.8	29.9	38.9
	90	M-N-90	34.0	38.3	38.0	31.4	27.3	32.2	41.7
	180	M-N-180	34.5	40.9	39.9	34.8	29.9	36.1	46.6
	365	M-N-365	34.3	41.8	40.5	35.9	30.8	37.5	48.3
	730	M-N-730	34.7	42.4	40.9	36.7	31.4	38.4	49.4
	7	C-N-7	16.3	27.6	30.2	17.5	16.6	17.1	21.3
	14	C-N-14	18.1	28.4	30.7	18.5	17.4	18.1	22.9
	28	CH-N-28	28.6	33.5	34.4	25.1	22.5	25.1	32.5
		CL-N-28	32.4	36.7	36.8	29.3	25.7	29.8	38.7
	60	CH-N-60	29.9	36.5	36.7	29.1	25.5	29.5	38.3
		CL-N-60	34.5	37.2	37.2	30.0	26.2	30.5	39.6
	90	CH-N-90	33.8	37.5	37.4	30.3	26.5	30.9	40.1
		CL-N-90	36.2	38.1	37.8	31.1	27.1	31.8	41.3
	180	CH-N-180	36.0	38.6	38.2	31.8	27.6	32.6	42.3
		CL-N-180	36.6	39.4	38.8	32.8	28.4	33.8	43.8
	365	CH-N-365	36.0	38.6	38.8	32.8	28.4	33.8	43.7
		CL-N-365	36.6	39.4	39.7	34.5	29.7	35.8	46.3
	730	CH-N-730	36.0	38.6	38.2	31.9	27.7	32.7	42.3
		CL-N-730	36.6	39.4	40.2	35.4	30.4	36.9	47.6

1. 일본 건축학회식 f_{cu}=(7.3R+100)/10
2. 일본 재료학회식 f_{cu}= (13R-184)/10
3. 동경도 건축재료검사소식 f_{cu}=(10R-110)/10
4. U.S Army 시험소식 f_{cu}=(-120.6+8R+0.0932R^2)/10
5. 권영웅 식 f_{cu}=(19R-311)/10

일본건축학회식과 권영웅 식은 모든 재령에서 파괴강도보다 높게 추정되었으며 나머지 제안식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 추정강도가 높게 나왔으며, 재령 28일후부터는 파괴강도보다 추정강도가 낮은 경향을 보였다.



[그림 4.19] 보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

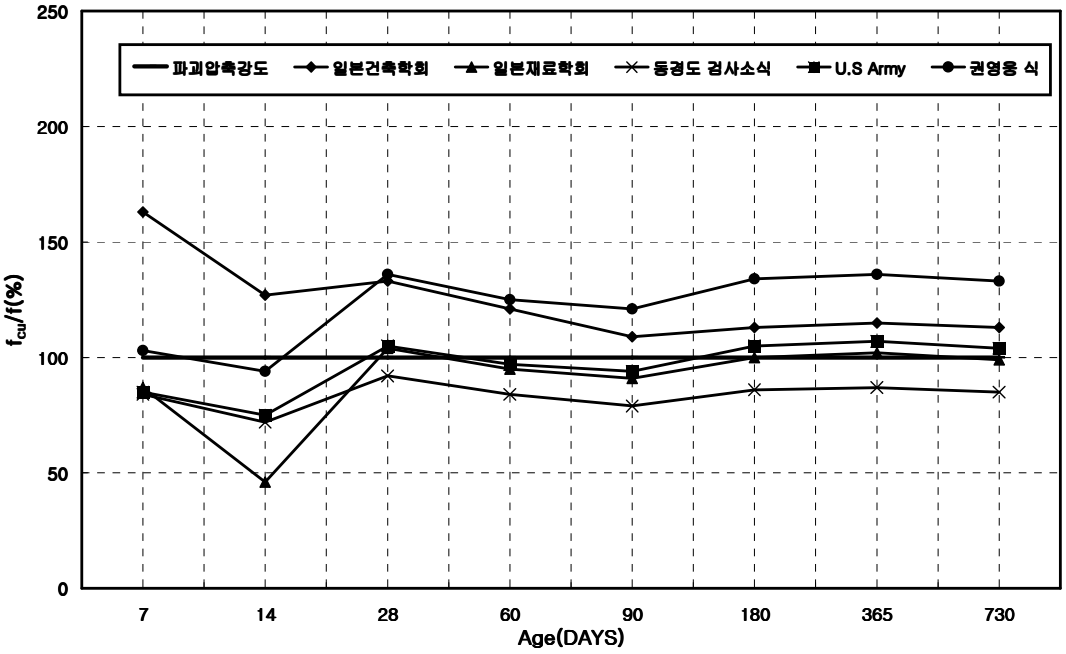
2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 9%~63%정도, 일본재료학회식은 5%~13% 정도, 동경도건축재료 검사소식은 8%~18% 정도, U.S Army 시험소식은 23%~74% 정도, 권영웅 식은 6%~36% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 나타냈으며 일본건축학회식과 U.S Army 시험소식은 파괴강도와 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 U.S Army 시험소식의 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며 일본재료학학식과 동경도 건축재료 검사소식의 추정강도는 파괴강도보다 낮은 경향을 보였다. 권영웅 식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 낮게 추정되었으며, 재령 28일부터는 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.4> FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_I	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
플라이애시 치환 콘크리트	7	M-FA-7	18.1	26.0	29.0	15.4	15.0	31.0	21.4
	14	M-FA-14	24.2	29.3	31.4	19.7	18.3	34.1	25.5
	28	M-FA-28	26.7	31.2	32.8	22.1	20.2	35.9	33.7
	60	M-FA-60	30.9	35.6	36.0	27.9	24.6	40.1	39.4
	90	M-FA-90	31.2	35.7	36.0	28.0	24.7	40.1	43.2
	180	M-FA-180	35.0	37.1	37.1	29.8	26.1	41.5	43.2
	365	M-FA-365	35.5	39.8	39.1	33.4	28.8	44.1	45.2
	730	M-FA-730	35.5	42.2	40.8	36.5	31.2	46.4	43.2
	7	C-FA-7	18.1	26.0	29.0	15.4	15.0	31.0	46.6
	14	C-FA-14	24.2	28.4	30.7	18.5	17.4	33.2	25.5
	28	CH-FA-28	26.2	35.3	35.8	27.5	24.3	39.8	33.7
		CL-FA-28	29.3	36.4	36.6	28.9	25.4	40.8	38.7
	60	CH-FA-60	29.2	36.2	36.4	28.6	25.2	40.6	39.0
		CL-FA-60	31.9	36.3	36.8	29.3	25.7	41.1	39.9
	90	CH-FA-90	34.9	38.3	37.9	31.4	27.3	42.6	40.6
		CL-FA-90	35.2	39.1	38.6	32.5	28.1	43.4	41.5
	180	CH-FA-180	35.0	41.0	40.0	34.9	30.0	45.2	42.4
		CL-FA-180	36.3	42.1	40.7	36.3	31.1	46.2	44.1
	365	CH-FA-365	35.1	41.1	40.0	35.0	30.1	45.3	44.1
		CL-FA-365	35.6	42.5	41.0	36.8	31.5	46.6	45.2
	730	CH-FA-730	33.5	41.3	40.2	35.3	30.3	45.5	43.0
		CL-FA-730	38.6	41.4	40.2	35.4	30.4	45.6	47.6



[그림 4.20] FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

3) *BF* 치환 콘크리트

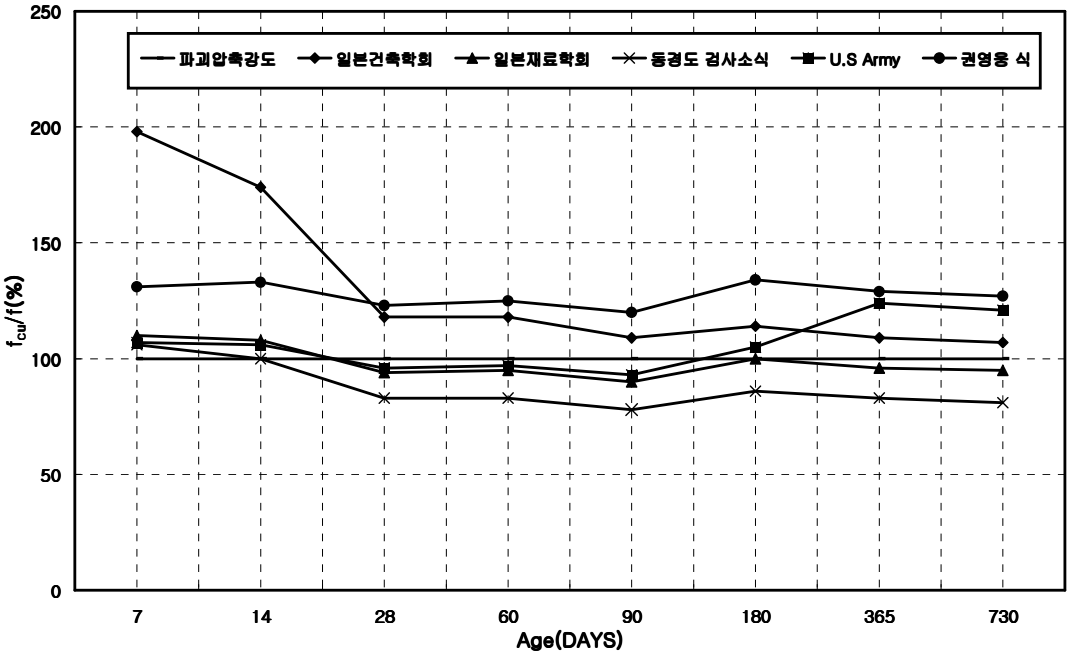
BF 치환 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 7%~98% 정도, 일본재료학회식은 4%~10% 정도, 동경도건축재료 검사소식은 6%~22% 정도, U.S Army 시험소식은 21%~112% 정도, 권영웅 식은 20%~34% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식과 U.S Army 시험소식은 파괴강도와 큰 차이를 나타냈다.

일본건축학회식과 권영웅 식은 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며, 나머지 기존 제안식은 재령 14일까지는 파괴강도보다 높게 추정되었으며 재령이 경과할수록 파괴강도 보다 낮게 추정 되었다.

FA 치환한 콘크리트와 마찬가지로 BF 치환한 콘크리트를 반발경도법에 의해서 일본건축학회식와 권영웅 식으로 추정했을 경우는 추정강도가 파괴강도보다 과대평가 될 것이며, 일본재료학학식과 동경도 건축재료 검사소식은 추정강도는 파괴강도보다 과소 평가 될 것으로 사료된다.

<표 4.5> BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_I	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
고로슬래그 치환 콘크리트	7	M-BF-7	15.0	26.7	29.5	16.3	15.7	31.6	21.1
	14	M-BF-14	18.4	29.1	31.2	19.4	18.0	33.9	24.8
	28	M-BF-28	19.4	30.6	32.3	21.4	19.6	35.3	28.9
	60	M-BF-60	26.9	35.1	35.6	27.2	24.1	39.6	35.8
	90	M-BF-90	27.2	35.3	35.8	27.6	24.3	39.8	37.9
	180	M-BF-180	33.2	39.4	38.7	32.8	28.4	43.6	37.9
	365	M-BF-365	34.0	40.0	39.2	33.5	29.0	44.2	44.2
	730	M-BF-730	36.3	41.4	40.2	35.4	30.4	45.6	45.3
	7	C-BF-7	14.9	26.7	29.5	16.3	15.7	31.6	47.5
	14	C-BF-14	18.0	29.1	31.2	19.4	18.1	33.9	27.5
	28	CH-BF-28	30.7	36.9	36.8	29.2	25.7	41.1	38.5
		CL-BF-28	30.8	36.7	36.7	29.2	25.6	41.0	394
	60	CH-BF-60	31.2	36.6	37.2	30.0	26.2	41.6	39.3
		CL-BF-60	31.2	36.6	36.9	29.6	25.9	41.3	39.5
	90	CH-BF-90	33.9	37.9	37.6	30.8	26.9	42.2	41.5
		CL-BF-90	36.2	39.2	38.6	32.5	28.2	43.4	44.8
	180	CH-BF-180	34.8	41.0	40.0	34.9	30.0	45.2	47.1
		CL-BF-180	36.2	42.0	40.6	36.2	31.0	46.1	48.3
	365	CH-BF-365	36.7	41.5	40.3	35.5	30.5	45.6	47.7
		CL-BF-365	37.2	41.6	40.3	35.6	30.6	45.7	48.1
	730	CH-BF-730	37.2	41.7	40.5	35.9	30.7	45.9	48.4
		CL-BF-730	39.0	41.9	40.6	36.1	30.9	46.0	48.5



[그림 4.21] BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

4) SF 치환 콘크리트

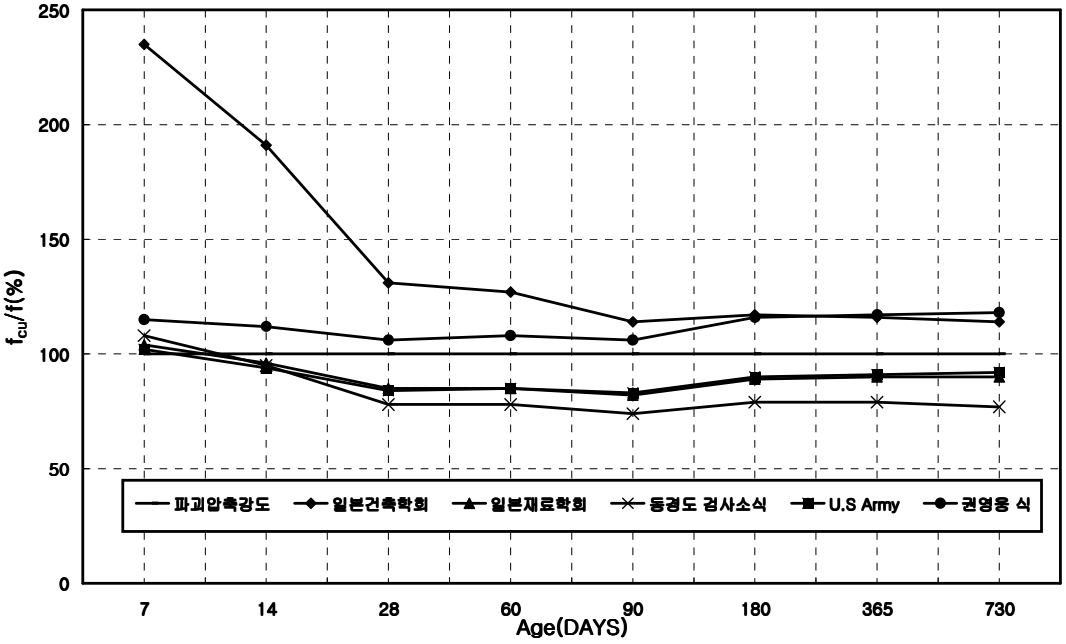
SF 치환 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파과강도간에 일본건축학회식은 10%~135%정도, 일본재료학회식은 5%~27% 정도, 동경도건축재료 검사소식은 5%~27% 정도, U.S Army 시험소식은 6%~22% 정도, 권영웅 식은 7%~19% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식은 파괴강도와 큰 차이를 나타냈다.

모든 제안식이 재령 초기에는 추정강도가 파괴강도보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 일본건축학회식과 권영웅 식은 추정강도는 파괴강도보다 높게 나타났으며 일본재료학학식, 동경도 건축재료 검사소식, U.S Army 시험소식의 추정강도는 파괴강도보다 낮은 경향을 보였다.

FA, BF 치환한 콘크리트와 마찬가지로 BF 치환한 콘크리트를 일본건축학회식과 권영웅 식으로 추정했을 경우는 추정강도가 파괴강도보다 과대 평가 될 것으로 사료된다.

<표 4.6> SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_1	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
실리카흄 치환 콘크리트	7	M-SF-7	11.7	23.4	27.1	12.0	12.4	11.7	14.0
	14	M-SF-14	14.	25.1	28.3	14.2	14.1	13.9	18.7
	28	M-SF-28	19.3	30.1	32.0	20.8	19.1	20.5	27.1
	60	M-SF-60	25.1	30.8	32.5	21.7	19.8	21.5	27.7
	90	M-SF-90	25.8	32.0	33.3	23.1	21.0	23.0	31.1
	180	M-SF-180	26.6	33.9	34.8	25.7	22.9	25.8	31.1
	365	M-SF-365	26.5	36.1	36.3	28.5	25.1	28.9	34.4
	730	M-SF-730	28.5	38.3	37.9	31.4	27.3	32.2	38.4
	7	C-SF-7	11.7	23.4	27.1	12.0	12.4	11.7	41.6
	14	C-SF-14	14.7	25.1	28.3	14.2	14.1	13.9	19.2
	28	CH-SF-28	22.8	29.8	31.8	20.4	18.8	20.1	26.6
		CL-SF-28	26.9	30.3	32.1	20.9	19.2	20.7	27.2
	60	CH-SF-60	25.1	30.8	32.5	21.7	19.8	21.5	28.2
		CL-SF-60	27.8	31.4	32.9	22.4	20.4	22.2	27.8
	90	CH-SF-90	27.6	32.7	33.9	24.1	21.7	24.1	31.8
		CL-SF-90	31.8	34.3	35.1	26.2	23.3	26.4	34.3
	180	CH-SF-180	29.3	34.9	35.5	26.9	23.9	27.2	35.1
		CL-SF-180	33.9	35.3	35.8	27.5	24.3	27.9	36.3
	365	CH-SF-365	30.5	35.4	35.8	27.6	24.4	27.9	35.5
		CL-SF-365	31.6	35.6	36.0	27.9	24.6	28.3	36.1
	730	CH-SF-730	30.9	35.7	36.1	28.1	24.7	28.4	37.6
		CL-SF-730	33.7	37.2	37.1	29.9	26.2	30.5	39.5



[그림 4.22] SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

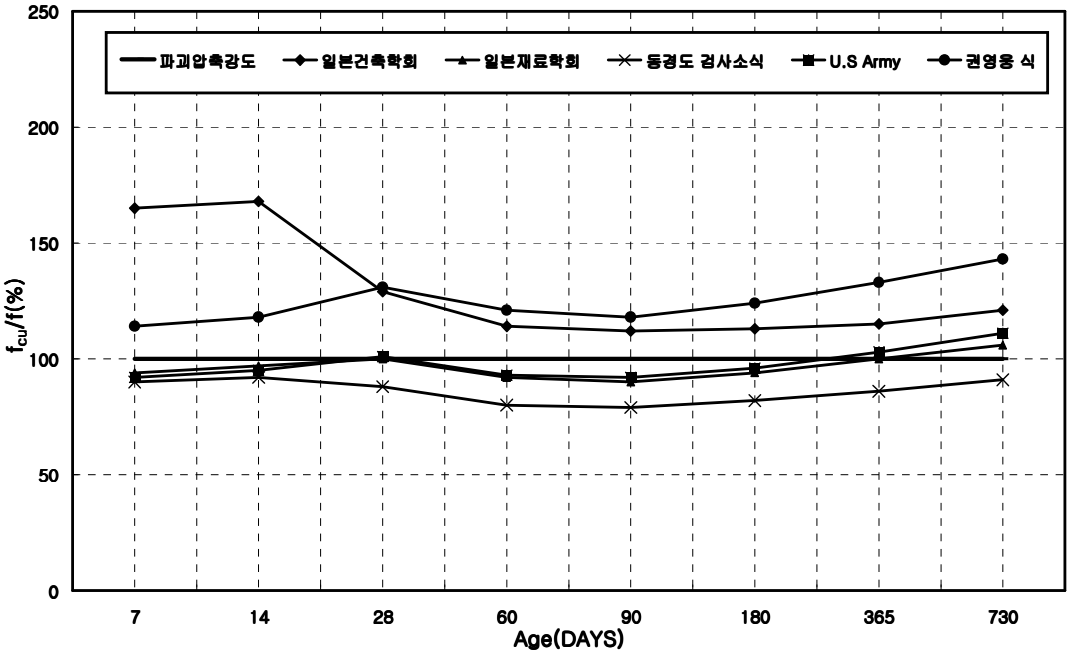
5) PP 혼입 콘크리트

PP 혼입 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 5%~68% 정도, 일본재료학회식은 4%~15% 정도, 동경도 건축재료 검사소식은 8%~26% 정도, U.S Army 시험소식은 3%~14% 정도, 권영웅 식은 15%~43% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식은 파괴강도와 큰 차이를 나타냈다.

일본건축학회식과 권영웅 식을 제외한 제안식이 재령 180일까지는 추정강도가 파괴강도보다 낮은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 다소 추정강도가 파괴강도보다 높아지는 경향을 보였다.

<표 4.7> PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_1	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트	7	M-PP-7	18.2	27.4	30.0	17.2	16.4	16.7	20.6
	14	M-PP-14	18.3	27.5	30.1	17.3	16.5	16.9	24.0
	28	M-PP-28	26.6	33.9	34.8	25.7	22.9	25.7	33.4
	60	M-PP-60	30.6	33.6	34.5	25.2	22.6	25.2	33.1
	90	M-PP-90	33.4	37.2	37.2	30.0	26.2	30.5	41.4
	180	M-PP-180	37.6	40.7	39.7	34.5	29.7	35.7	41.4
	365	M-PP-365	36.4	40.9	39.9	34.8	29.9	36.1	46.1
	730	M-PP-730	33.8	42.2	40.8	36.4	31.2	38.1	47.4
	7	C-PP-7	18.2	27.4	30.0	17.2	16.4	16.7	49.0
	14	C-PP-14	18.3	27.5	30.1	17.3	16.5	16.9	25.9
	28	CH-PP-28	26.8	35.6	36.0	27.8	24.6	28.1	36.3
		CL-PP-28	29.1	35.6	36.0	27.9	24.6	28.2	37.6
	60	CH-PP-60	30.2	37.0	37.0	29.7	26.0	30.2	39.2
		CL-PP-60	35.5	37.2	37.2	30.0	26.2	30.5	39.3
	90	CH-PP-90	31.4	37.0	37.0	29.7	26.0	30.2	39.7
		CL-PP-90	35.4	37.3	37.2	30.1	26.3	30.7	40.5
	180	CH-PP-180	32.8	37.7	37.5	30.6	26.7	31.3	41.9
		CL-PP-180	35.2	39.4	38.8	32.8	28.4	33.8	43.6
	365	CH-PP-365	33.2	39.8	39.0	33.3	28.8	34.3	45.0
		CL-PP-365	35.5	41.0	40.0	34.9	30.0	36.3	47.3
	730	CH-PP-730	33.1	41.1	40.0	35.0	30.1	36.3	47.4
		CL-PP-730	34.2	42.2	40.8	36.4	31.2	38.1	49.0



[그림 4.23] PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

6) S 혼입 콘크리트

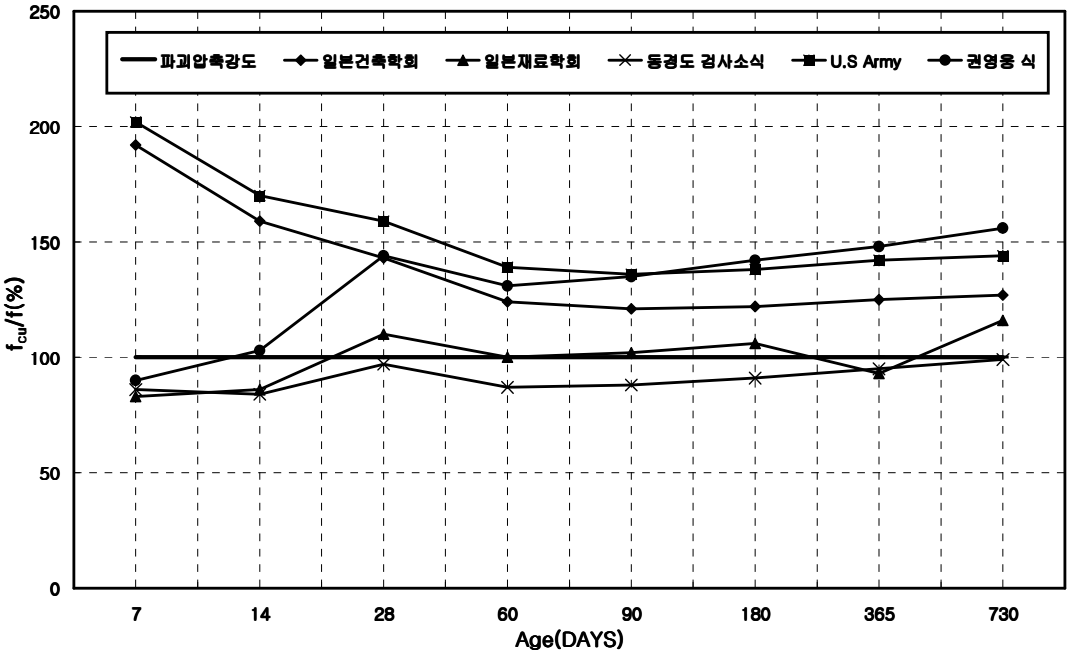
S 혼입 콘크리트의 경우, 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도간에 일본건축학회식은 17%~92% 정도, 일본재료학회식은 5%~24% 정도, 동경도 건축재료 검사소식은 6%~15% 정도, U.S Army 시험소식은 32%~102% 정도, 권영웅 식은 4%~56% 정도 차이를 보였으며, 일본재료학회식과 동경도 건축재료 검사소식이 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며 일본건축학회식과 U.S Army 시험소식은 파괴강도와 큰 차이를 나타냈다.

일본건축학회식 및 U.S Army 시험소식과 권영웅 식은 파괴강도보다 높게 추정되는 경향을 보였으며, 나머지 제안식은 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

동경도 검사소식을 제외한 제안식의 추정강도는 파괴강도보다 높은 경향을 보였으며 재령이 경과할수록 더욱 커지는 것으로 나타났다.

<표 4.8> S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R_1	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
강섬유 혼입 콘크리트	7	M-S-7	14.0	23.0	26.8	11.5	12.0	28.1	14.3
	14	M-S-14	18.4	26.4	29.3	15.9	15.4	31.3	22.0
	28	M-S-28	23.4	32.2	33.5	23.4	21.2	36.8	30.8
	60	M-S-60	31.8	33.6	34.5	25.2	22.6	38.1	33.9
	90	M-S-90	35.6	36.4	36.6	28.9	25.4	40.8	38.4
	180	M-S-180	32.2	37.7	37.5	30.6	26.7	42.1	38.4
	365	M-S-365	33.0	40.3	39.4	34.0	29.3	44.5	41.7
	730	M-S-730	34.5	42.0	40.6	36.2	31.0	46.1	46.8
	7	C-S-7	13.4	23.0	26.8	11.5	12.0	28.1	48.6
	14	C-S-14	18.4	26.4	29.3	15.9	15.4	31.3	23.9
	28	CH-S-28	25.9	35.4	35.8	27.6	24.4	39.9	35.7
		CL-S-28	24.3	35.3	35.8	27.5	24.3	39.8	36.5
	60	CH-S-60	28.9	36.9	36.9	29.5	25.9	41.3	39.4
		CL-S-60	31.7	37.6	37.4	30.4	26.6	41.9	40.6
	90	CH-S-90	32.7	38.6	38.2	31.8	27.6	42.9	42.6
		CL-S-90	31.3	39.5	38.9	33.0	28.5	43.8	44.3
	180	CH-S-180	32.1	40.9	39.9	34.8	29.9	45.1	46.9
		CL-S-180	33.9	41.3	40.2	35.3	30.3	45.5	47.4
	365	CH-S-365	32.0	41.6	40.4	24.0	30.6	45.8	48.0
		CL-S-365	32.7	41.8	40.5	35.9	30.8	45.9	48.9
	730	CH-S-730	31.5	42.8	41.3	37.3	31.8	46.9	50.4
		CL-S-730	35.1	44.3	42.3	39.2	33.3	48.3	53.1



[그림 4.24] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

4.2.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식 적용 결과

(1) 보통콘크리트

보통콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 4%～18%, 일본재료학회식은 5%～59%, J. Pysziak식은 5%～17%, 谷川식은 18%～30%, 한전기술연구원식은 3.7%～19.4% 정도 압축강도와 차이를 보였다.

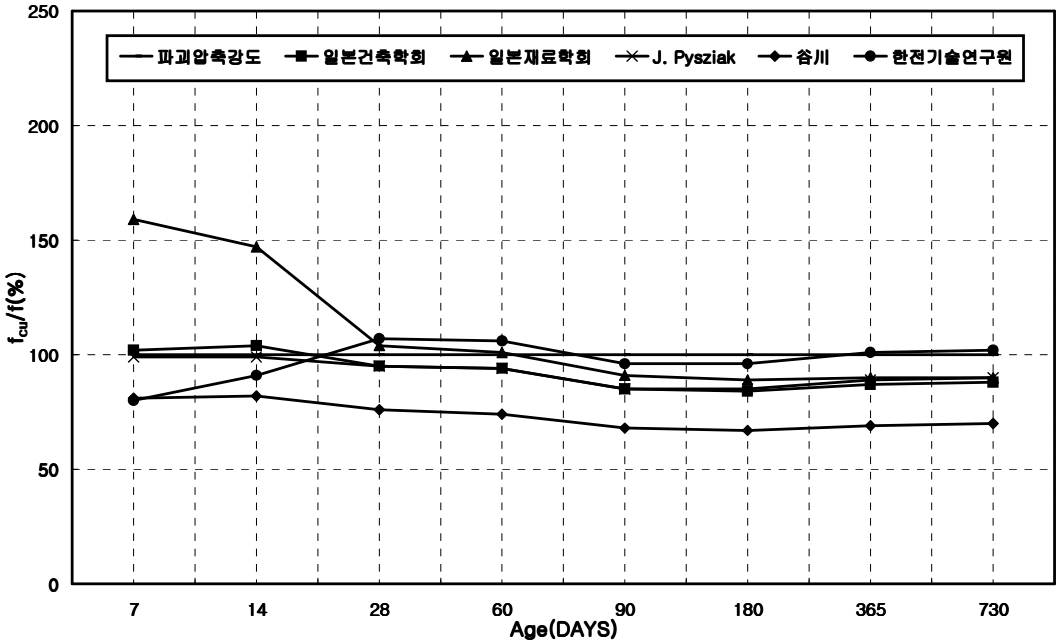
일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식의 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 최대 30%로 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 추정강도가 파괴강도보다 낮은 경향을 보였다. J. Pysziak식과 谷川식은 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

<표 4.9> 보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
보통콘크리트	7	M-N-7	16.3	3.646	16.4	25.5	16.0	12.9	14.3
	14	M-N-14	18.1	3.751	18.7	26.6	17.8	14.8	17.7
	28	M-N-28	24.1	3.880	21.4	27.9	20.4	17.0	23.4
	60	M-N-60	26.4	4.164	27.5	30.8	27.1	21.9	31.3
	90	M-N-90	34.0	4.205	28.4	31.2	28.2	22.6	32.5
	180	M-N-180	34.5	4.276	29.9	31.9	30.1	23.8	32.5
	365	M-N-365	34.3	4.305	28.4	31.3	28.2	22.6	34.5
	730	M-N-730	34.7	4.321	29.9	31.9	30.1	23.8	35.6
	7	C-N-7	16.3	3.646	16.4	25.5	16.0	12.9	35.8
	14	C-N-14	18.1	3.751	18.7	26.6	17.8	14.8	20.6
	28	CH-N-28	28.6	4.195	28.2	31.1	27.9	22.4	31.7
		CL-N-28	32.4	4.235	29.2	31.5	29.1	23.1	32.8
	60	CH-N-60	29.9	4.204	28.4	31.2	28.1	22.6	32.5
		CL-N-60	34.5	4.276	29.9	31.9	30.1	23.8	34.2
	90	CH-N-90	33.8	4.230	29.0	31.5	28.9	23.0	33.3
		CL-N-90	36.2	4.286	30.3	32.0	30.4	24.0	34.7
	180	CH-N-180	36.0	4.295	30.3	32.1	30.7	24.1	34.9
		CL-N-180	36.6	4.302	30.5	32.2	30.9	24.3	35.1
	365	CH-N-365	36.0	4.295	30.3	32.1	30.6	24.1	35.7
		CL-N-365	36.6	4.302	32.4	33.1	33.5	25.8	37.6
	730	CH-N-730	36.0	4.295	30.7	32.3	31.2	24.5	36.2
		CL-N-730	36.6	4.302	33.1	33.4	34.5	26.3	39.3

(1) 일본건축학회 $f_{cu}=(215V_P-620)/10$ (2) 일본재료학회식 $f_{cu}=(102V_P-117)/10$
(3) J. Pysziak의 제안식 $f_{cu}=(92.5V_P^2-508V-782)/10$ (4) 谷川의 제안식 $f_{cu}=(172.5V_P-499.6)/10$
(5) 한전기술연구원식 $f_{cu}=(339.1V_P-1107)/10$



[그림 4.25] 보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 86%~117%, 일본재료학회식은 87%~155%, J. Pysziak식은 87%~112%, 谷川은 68%~93%, 한전기술연구원식은 102.0%~116.1% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

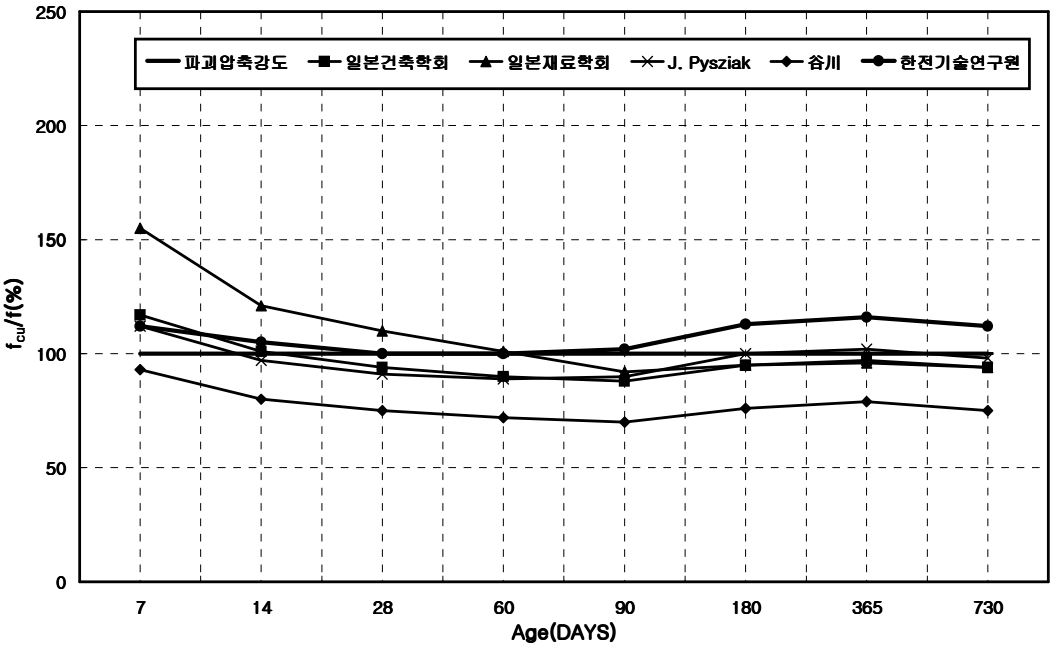
일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 14일까지는 파괴강도와 큰차이를 보였으며 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 4%~13%, 일본재료학회식은 3%~13%, 한전기술연구원식은 2.0%~16.1% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다. J. Pysziak식은 6%~15%, 谷川식은 7%~31% 정도 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

<표 4.10> FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
플라이애시치환콘크리트	7	M-FA-7	18.1	3.852	20.8	27.6	19.8	16.5	21.5
	14	M-FA-14	24.2	4.021	24.4	29.3	23.5	19.4	25.9
	28	M-FA-28	26.7	4.051	25.1	29.6	24.2	19.9	28.3
	60	M-FA-60	30.9	4.247	29.3	31.6	29.3	23.3	33.5
	90	M-FA-90	31.2	4.262	29.6	31.8	29.7	23.6	35.1
	180	M-FA-180	35.0	4.441	33.5	33.6	35.0	26.7	35.1
	365	M-FA-365	35.5	4.540	35.6	34.6	38.2	28.4	40.7
	730	M-FA-730	35.5	4.574	36.3	35.0	39.4	28.9	43.6
	7	C-FA-7	18.1	3.852	20.8	27.6	19.8	16.5	44.4
	14	C-FA-14	24.2	4.021	24.4	29.3	23.5	19.4	25.6
	28	CH-FA-28	26.2	4.028	24.6	29.4	23.7	19.5	26.5
		CL-FA-28	29.3	4.107	26.3	30.2	25.6	20.9	28.7
	90	CH-FA-60	29.2	4.153	27.3	30.7	26.8	21.7	30.3
		CL-FA-60	31.9	4.170	27.7	30.8	27.2	22.0	31.5
	365	CH-FA-90	34.9	4.271	29.8	31.9	30.0	23.7	34.7
		CL-FA-90	35.2	4.366	31.9	32.8	32.7	25.4	38.3
	180	CH-FA-180	35.0	4.455	33.8	33.7	35.5	26.9	40.4
		CL-FA-180	36.3	4.456	33.8	33.8	35.5	26.9	40.6
	365	CH-FA-365	35.1	4.456	34.2	33.9	36.1	27.2	41.1
		CL-FA-365	35.6	4.474	34.2	34.0	36.1	27.2	40.9
	730	CH-FA-730	33.5	4.454	33.8	33.7	35.5	26.9	40.1
		CL-FA-730	38.6	4.434	33.3	33.5	34.8	26.5	39.7

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원



[그림 4.26] FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(3) BF 치환 콘크리트

BF 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 88%~113%, 일본재료학회식은 88%~173%, J. Pysziak식은 91%~110%, 谷川식은 70%~89%, 한전기술연구원식은 91.6%~115.3% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 14일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타내었고, 谷川식은 최대 30%로 가장 큰 차이를 보였다.

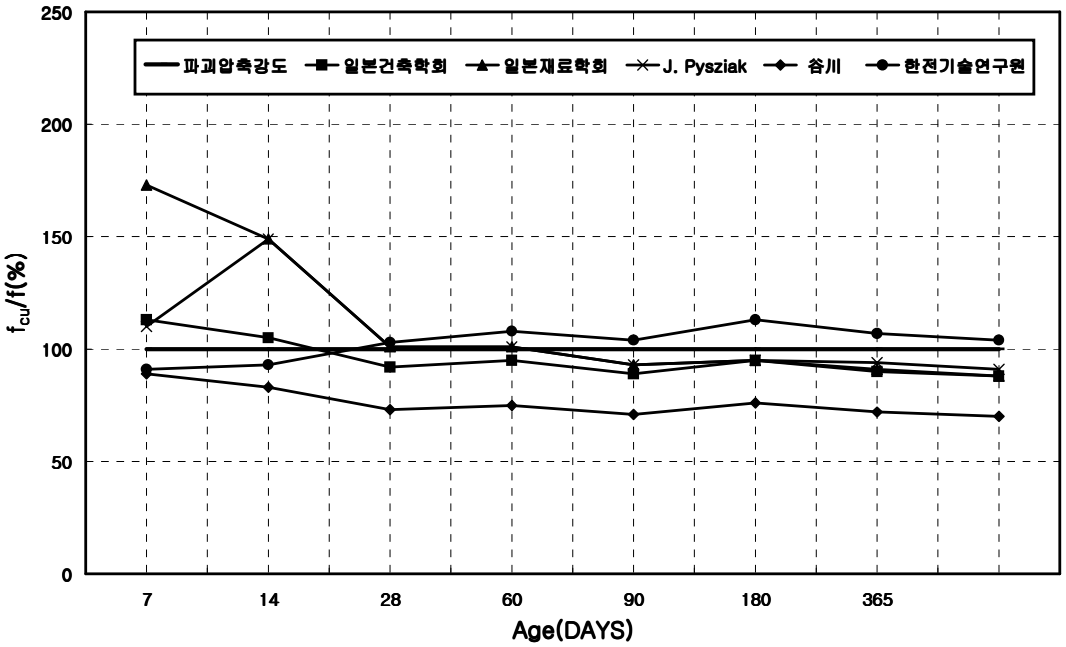
일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 8%~12% 정도, 일본재료학회식은 5%~12% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다. 한전기술연구원식은 재령 14일까지는 6.2%~8.4% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었으나 재령이 경과할수록 3.9%~15.3% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.11> BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
고로슬래그치환콘크리트	7	M-BF-7	15.0	3.669	16.9	25.7	16.3	13.3	14.7
	14	M-BF-14	18.4	3.762	18.9	26.7	18.0	14.9	17.6
	28	M-BF-28	19.4	3.903	21.9	28.1	20.8	17.4	23.1
	60	M-BF-60	26.9	4.058	25.3	29.7	24.4	20.1	27.2
	90	M-BF-90	27.2	4.146	27.2	30.6	26.6	21.6	31.0
	180	M-BF-180	33.2	4.278	30.0	31.9	30.2	23.8	31.0
	365	M-BF-365	34.0	4.301	30.5	32.2	30.8	24.2	34.5
	730	M-BF-730	36.3	4.366	31.9	32.8	32.7	25.4	35.6
	7	C-BF-7	14.9	3.667	16.8	25.7	16.3	13.3	37.4
	14	C-BF-14	18.0	3.762	18.8	26.7	18.0	14.9	20.6
	28	CH-BF-28	30.7	4.201	28.3	31.2	28.0	22.5	31.9
		CL-BF-28	30.8	4.228	28.9	31.4	28.8	23.0	33.5
	60	CH-BF-60	31.2	4.252	29.4	31.7	29.5	23.4	33.5
		CL-BF-60	31.2	4.281	30.0	32.0	30.3	23.9	34.1
	90	CH-BF-90	33.9	4.305	30.6	32.2	31.0	24.3	35.7
		CL-BF-90	36.2	4.379	32.2	33.0	33.1	25.6	38.6
	180	CH-BF-180	34.8	4.446	33.6	33.7	35.2	26.7	40.2
		CL-BF-180	36.2	4.457	33.8	33.8	35.5	26.9	40.8
	365	CH-BF-365	36.7	4.420	33.0	33.4	34.4	26.3	39.4
		CL-BF-365	37.2	4.448	33.6	33.7	35.2	26.8	40.1
	730	CH-BF-730	37.2	4.447	33.6	33.7	35.2	26.8	40.0
		CL-BF-730	39.0	4.407	32.8	33.3	34.0	26.1	38.8

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원

J. Pysziak식은 6%~10%, 谷川식은 11%~30% 정도 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.



[그림 4.27] BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(4) SF 치환 콘크리트

SF 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 85%~93%, 일본재료학회식은 96%~192%, J. Pysziak식은 78%~89%, 谷川식은 63%~78%, 한전기술연구원식은 70%~96% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

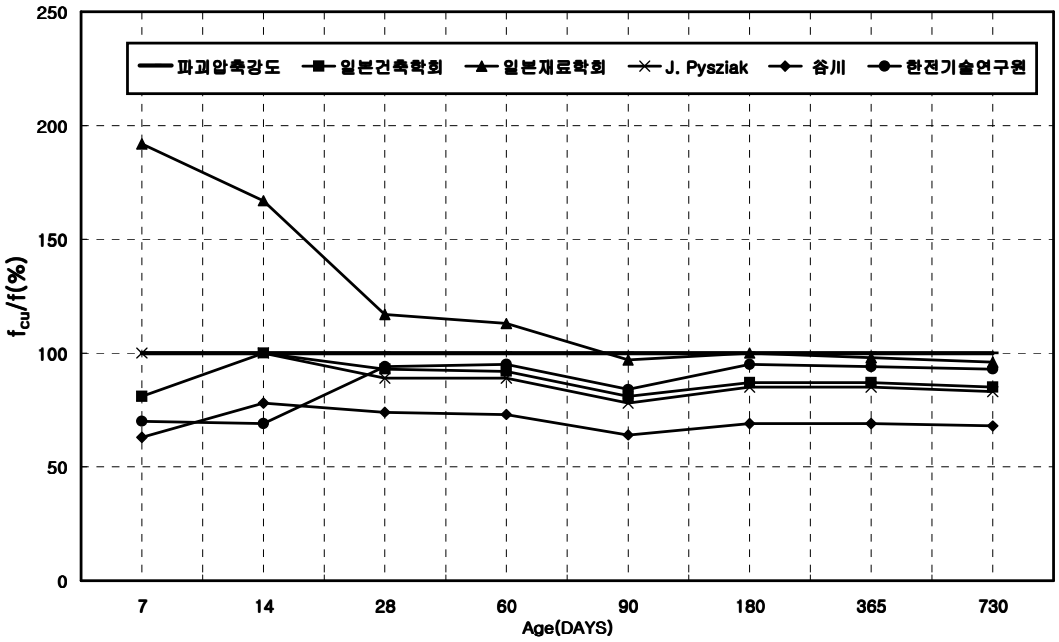
일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 28일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 최대 37%로 가장 큰 차이를 보였다.

일본재료학회식의 제안식은 재령 60일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 2%~4% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다. 일본건축학회식은 7%~15%, J. Pysziak식은 11%~22%, 谷川식은 22%~27%, 한전기술연구원식은 4%~30% 정도로 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

<표 4.12> SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
실리카흄	7	M-SF-7	11.7	3.319	9.4	22.2	11.5	7.3	4.0
	14	M-SF-14	14.7	3.569	14.7	24.7	14.7	11.6	12.2
	28	M-SF-28	19.3	3.829	20.3	27.4	19.3	16.2	20.1
	60	M-SF-60	25.1	3.940	22.7	28.5	21.6	18.0	23.0
	90	M-SF-90	25.8	3.955	23.0	28.6	22.0	18.3	24.3
	180	M-SF-180	26.6	4.039	24.8	29.5	23.9	19.7	24.3
	365	M-SF-365	26.5	4.130	26.8	30.4	26.2	21.3	27.0
	730	M-SF-730	28.5	4.158	27.4	30.7	26.9	21.8	29.6
치환콘크리트	7	C-SF-7	11.7	3.319	9.4	22.2	11.5	7.3	4.0
	14	C-SF-14	14.7	3.569	14.7	24.7	14.7	11.6	12.3
	28	CH-SF-28	22.8	3.846	20.7	27.5	19.7	16.4	21.9
		CL-SF-28	26.9	4.049	25.1	29.6	24.2	19.9	25.8
	60	CH-SF-60	25.1	3.941	22.7	28.5	21.7	18.0	24.3
		CL-SF-60	27.8	4.050	25.1	29.6	24.2	19.9	25.9
	90	CH-SF-90	27.6	4.010	24.2	29.2	23.2	19.2	25.7
		CL-SF-90	31.8	4.032	24.7	29.4	23.8	19.6	26.5
	180	CH-SF-180	29.3	4.103	26.2	30.2	25.5	20.8	29.0
		CL-SF-180	33.9	4.134	26.9	30.5	26.3	21.4	29.3
	365	CH-SF-365	30.5	4.115	26.5	30.3	25.8	21.0	28.8
		CL-SF-365	31.6	4.141	27.0	30.5	26.5	21.5	29.5
	730	CH-SF-730	30.9	4.142	27.1	30.6	26.5	21.5	29.9
		CL-SF-730	33.7	4.159	27.4	30.7	26.9	21.8	30.3

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원



[그림 4.28] SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(5) PP 치환 콘크리트

PP 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 91%~113%, 일본재료학회식은 96%~153%, J. Pysziak식은 89%~101%, 谷川식은 72%~90%, 한전기술연구원식은 72%~114% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 28일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 최대 28% 정도로 가장 큰 차이를 보였다.

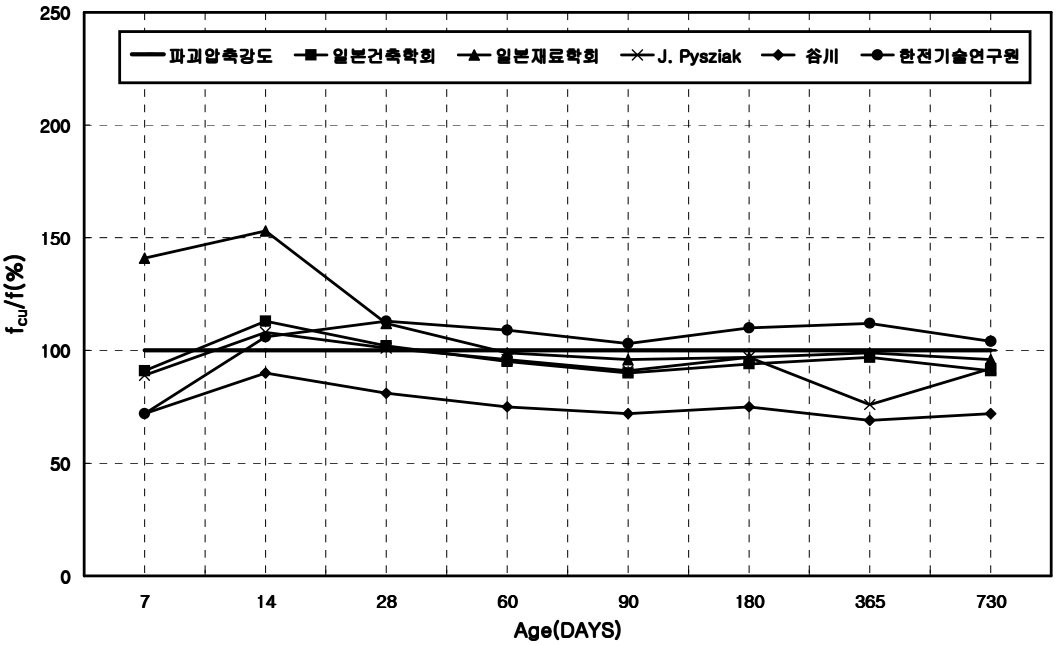
일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 28일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 5%~10%, 일본재료학회식은 3%~4% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다. J. Pysziak식은 4%~9%, 谷川식은 10%~28% 정도 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

<표 4.13> PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)				
					1	2	3	4	5
폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트	7	M-PP-7	18.2	3.652	16.5	25.6	16.1	13.0	14.3
	14	M-PP-14	18.3	3.829	20.3	27.4	19.3	16.1	21.6
	28	M-PP-28	26.6	4.045	25.0	29.6	24.1	19.8	27.6
	60	M-PP-60	30.6	4.151	27.3	30.6	26.7	21.7	30.3
	90	M-PP-90	33.4	4.183	27.9	31.0	27.6	22.2	31.1
	180	M-PP-180	37.6	4.246	29.3	31.6	29.3	23.3	31.1
	365	M-PP-365	36.4	4.439	33.4	33.6	35.0	26.6	34.9
	730	M-PP-730	33.8	4.327	31.0	32.4	31.6	24.7	38.8
	7	C-PP-7	18.2	3.652	16.5	25.6	16.1	13.0	36.0
	14	C-PP-14	18.3	3.829	20.3	27.4	19.31	16.1	22.3
	28	CH-PP-28	26.8	4.192	28.1	31.1	27.8	22.4	31.9
		CL-PP-28	29.1	4.205	28.4	31.2	28.2	22.6	33.2
	60	CH-PP-60	30.2	4.335	31.2	32.5	31.8	24.8	36.3
		CL-PP-60	35.5	4.293	30.3	32.1	30.6	24.1	34.4
	90	CH-PP-90	31.4	4.190	28.1	31.0	27.8	22.3	32.7
		CL-PP-90	35.4	4.365	31.8	32.8	32.7	25.3	37.1
	180	CH-PP-180	32.8	4.312	30.7	32.3	31.1	24.4	35.9
		CL-PP-180	35.2	4.421	33.1	33.4	34.4	26.3	38.6
	365	CH-PP-365	33.2	4.361	31.8	32.8	32.6	25.3	37.8
		CL-PP-365	35.5	4.446	33.6	33.7	35.2	26.7	39.8
	730	CH-PP-730	33.1	4.268	29.8	31.8	30.0	23.7	34.6
		CL-PP-730	34.2	4.331	31.1	32.5	31.7	24.7	36.2

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원

한전기술연구원식은 재령 7일에서는 27% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었으나 재령이 경과할수록 4%~14% 정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.



[그림 4.29] PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(6) S 치환 콘크리트

S 치환 콘크리트의 초음파속도를 측정하여 그 결과를 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 92%~114%, 일본재료학회식은 97%~180%, J. Pysziak식은 92%~110%, 谷川식은 73%~88%, 한전기술연구원식은 83%~115% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

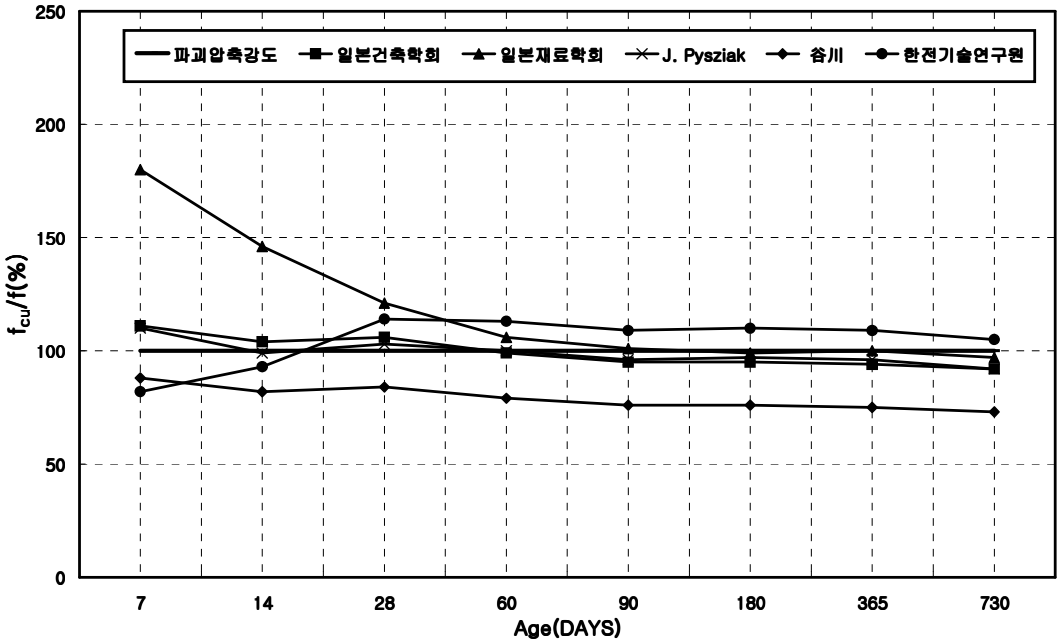
일본건축학회식과 J. Pysziak식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 일본재료학회식은 재령 60일까지는 파괴강도와 큰 차이를 보였으나 재령이 경과할수록 파괴강도와 비슷한 경향을 나타냈으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 28일까지 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났으며 재령이 경과할수록 일본건축학회식은 5%~8%, 일본재료학회식은 2%~4% 정도 파괴강도보다 낮게 추정되었다. J. Pysziak식은 3%~8%, 谷川식은 12%~27% 정도 모든 재령에서 파괴강도보다 낮게 추정되었다.

<표 4.14> S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa) 1	2	3	4	5
강섬유혼입콘크리트	7	M-S-7	14.0	3.604	15.5	25.1	15.3	12.2	12.8
	14	M-S-14	18.4	3.773	19.1	26.8	18.2	15.1	19.4
	28	M-S-28	23.4	3.967	23.3	28.8	22.3	18.5	24.2
	60	M-S-60	31.8	4.009	24.2	29.2	23.2	19.2	26.1
	90	M-S-90	35.6	4.106	26.3	30.2	25.6	20.9	28.4
	180	M-S-180	32.2	4.099	26.1	30.1	25.4	20.8	28.4
	365	M-S-365	33.0	4.114	26.5	30.3	25.8	21.0	28.5
	730	M-S-730	34.5	4.115	26.5	30.3	25.8	21.0	28.8
	7	C-S-7	13.4	3.604	15.5	25.1	15.3	12.2	28.8
	14	C-S-14	18.4	3.772	19.1	26.8	18.2	15.1	21.3
	28	CH-S-28	25.9	4.163	27.5	30.8	27.1	21.9	30.3
		CL-S-28	24.3	4.064	25.4	29.8	24.6	20.1	28.8
	60	CH-S-60	28.9	4.256	29.5	31.7	29.5	23.5	33.9
		CL-S-60	31.7	4.277	29.9	31.9	30.1	23.8	34.4
	90	CH-S-90	32.7	4.288	30.2	32.0	30.5	24.0	35.0
		CL-S-90	31.3	4.311	30.7	32.3	31.1	24.4	36.1
	180	CH-S-180	32.1	4.401	32.6	33.2	33.8	26.0	37.4
		CL-S-180	33.9	4.274	29.9	31.9	30.0	23.8	34.3
	365	CH-S-365	32.0	4.285	30.1	32.0	30.4	24.0	34.9
		CL-S-365	32.7	4.322	30.9	32.4	31.4	24.6	35.3
	730	CH-S-730	31.5	4.288	30.2	32.0	30.5	24.0	34.9
		CL-S-730	35.1	4.284	30.1	32.0	30.4	24.0	34.6

(1) 일본건축학회 (2) 일본재료학회식 (3) J. Pysziak의 제안식 (4) 谷川의 제안식 (5) 한전기술연구원



[그림 4.30] S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

4.2.3 복합법에 의한 기존 제안식 적용 결과

(1) 보통 콘크리트

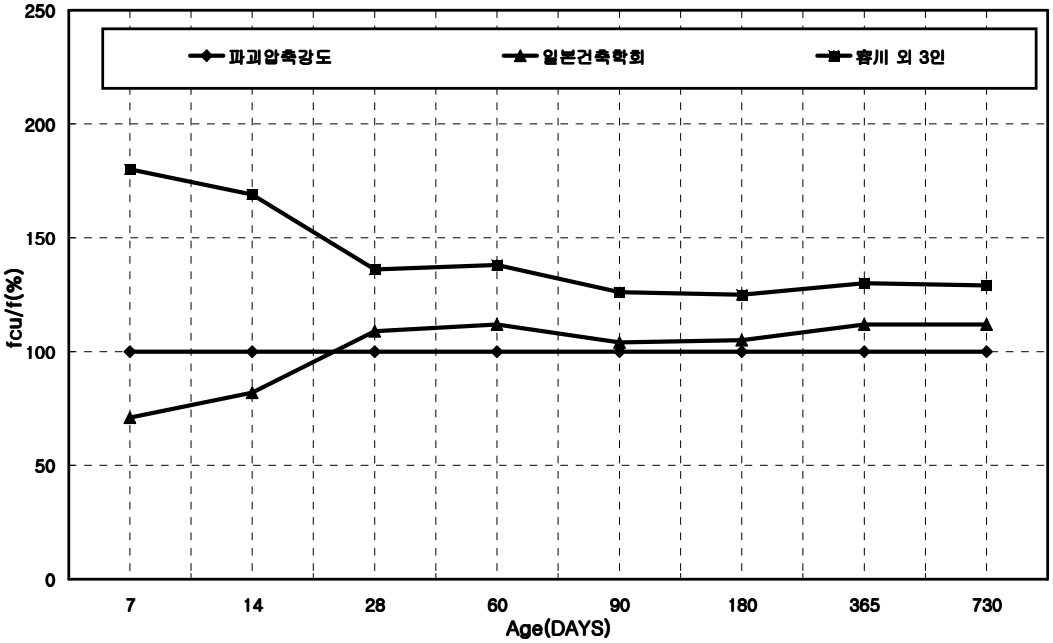
보통 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 71%～112%, 谷川식은 125%～180% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 18%～29% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 4%～12%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다. 谷川식은 재령 14일까지 69%～80% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 25%～38%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.15> 보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (㎞/sec)	추정 강도(MPa)	
						1	2
보통 콘크리트	7	M-N-7	16.3	27.6	3.646	11.3	21.0
	14	M-N-14	18.1	28.4	3.751	14.8	23.2
	28	M-N-28	24.1	33.5	3.880	22.4	29.9
	60	M-N-60	26.4	36.8	4.164	32.8	36.9
	90	M-N-90	34.0	38.3	4.205	35.2	38.9
	180	M-N-180	34.5	40.9	4.276	39.2	42.4
	365	M-N-365	34.3	41.8	4.305	37.9	40.3
	730	M-N-730	34.7	42.4	4.321	40.4	43.0
	7	C-N-7	16.3	27.6	3.646	11.3	28.9
	14	C-N-14	18.1	28.4	3.751	14.8	30.5
	28	CH-N-28	28.6	33.5	4.195	30.9	39.1
		CL-N-28	32.4	36.7	4.235	34.6	42.6
	60	CH-N-60	29.9	36.5	4.204	33.6	42.2
		CL-N-60	34.5	37.2	4.276	36.1	43.4
	90	CH-N-90	33.8	37.5	4.230	35.1	43.3
		CL-N-90	36.2	38.1	4.286	37.1	44.4
	180	CH-N-180	36.0	38.6	4.295	37.8	45.0
		CL-N-180	36.6	39.4	4.302	38.6	45.8
	365	CH-N-365	36.0	38.6	4.295	38.4	45.7
		CL-N-365	36.6	39.4	4.302	42.2	47.8
	730	CH-N-730	36.0	38.6	4.295	38.3	45.1
		CL-N-730	36.6	39.4	4.302	43.6	48.7

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P-1094 (2) 谷川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P-273



[그림 4.31] 보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(2) FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 88%~128%, 谷川식은 135%~163% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

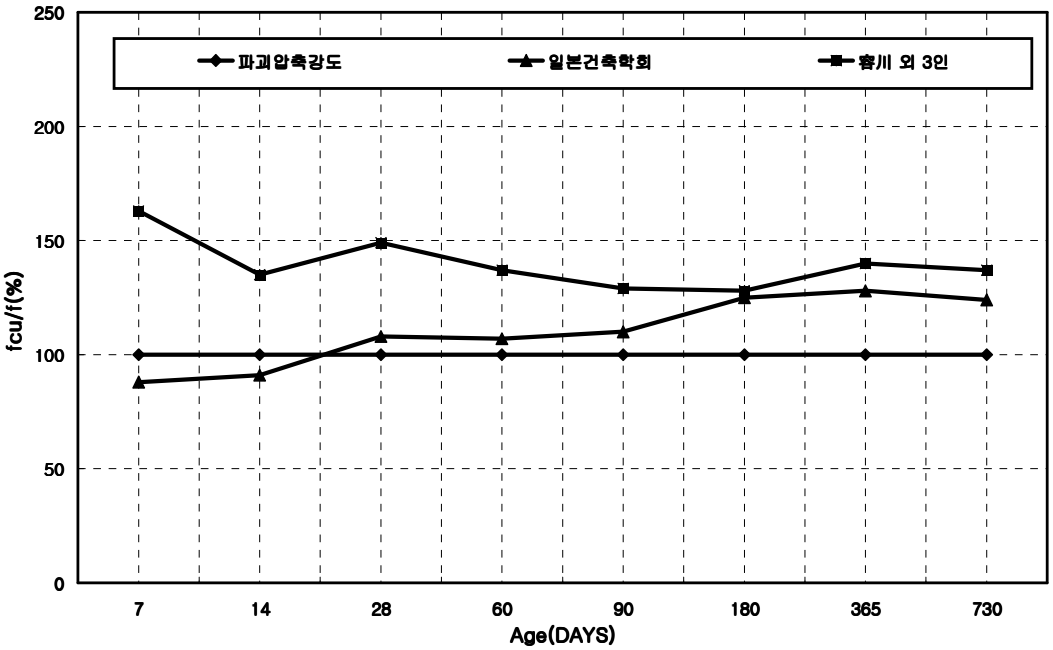
일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 9%~12% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 7%~25%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

谷川식은 재령 7일에 63% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 35%~49%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.16> FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa) 1	2
플라이애시치환콘크리트	7	M-FA-7	18.1	26.0	3.852	15.6	22.1
	14	M-FA-14	24.2	29.3	4.021	22.8	27.6
	28	M-FA-28	26.7	31.2	4.051	25.1	29.8
	60	M-FA-60	30.9	35.6	4.247	34.0	36.8
	90	M-FA-90	31.2	35.7	4.262	34.5	37.0
	180	M-FA-180	35.0	37.1	4.441	40.5	40.8
	365	M-FA-365	35.5	39.8	4.540	45.4	44.8
	730	M-FA-730	35.5	42.2	4.574	48.3	47.6
	7	C-FA-7	18.1	26.0	3.852	15.6	29.0
	14	C-FA-14	24.2	28.4	4.021	22.1	32.7
	28	CH-FA-28	26.2	35.3	4.028	27.9	39.5
		CL-FA-28	29.3	36.4	4.107	30.9	41.3
	60	CH-FA-60	29.2	36.2	4.153	32.0	41.4
		CL-FA-60	31.9	36.3	4.170	32.9	42.1
	90	CH-FA-90	34.9	38.3	4.271	36.9	44.4
		CL-FA-90	35.2	39.1	4.366	40.1	46.0
	180	CH-FA-180	35.0	41.0	4.455	44.1	48.6
		CL-FA-180	36.3	42.1	4.456	45.0	49.6
	365	CH-FA-365	35.1	41.1	4.456	44.7	48.8
		CL-FA-365	35.6	42.5	4.474	45.8	50.2
	730	CH-FA-730	33.5	41.3	4.454	44.3	48.9
		CL-FA-730	38.6	41.4	4.434	43.9	48.8

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P−1094 (2) 容川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P−273



[그림 4.32] FA치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(3) BF 치환 콘크리트

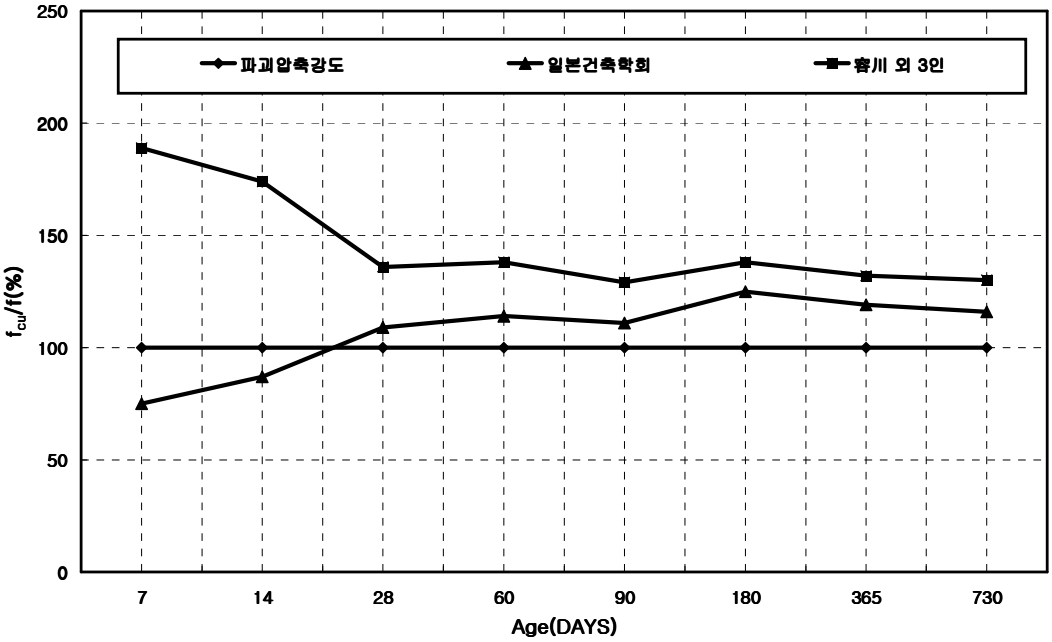
BF 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 75%～125%, 谷川식은 129%～189% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일까지 13%～25% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났으며 재령이 경과할수록 9%～25%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다. 谷川식은 재령 14일에 74%～89% 정도 추정강도가 파괴강도보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 29%～36%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.17> BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)	
						1	2
고로슬래그치환콘크리트	7	M-BF-7	15.0	26.7	3.669	11.2	20.4
	14	M-BF-14	18.4	29.1	3.762	15.6	24.0
	28	M-BF-28	19.4	30.6	3.903	20.7	27.3
	60	M-BF-60	26.9	35.1	4.058	28.5	33.8
	90	M-BF-90	27.2	35.3	4.146	31.1	35.2
	180	M-BF-180	33.2	39.4	4.278	38.0	40.9
	365	M-BF-365	34.0	40.0	4.301	39.1	41.8
	730	M-BF-730	36.3	41.4	4.366	42.0	44.1
	7	C-BF-7	14.9	26.7	3.667	11.1	28.2
	14	C-BF-14	18.0	29.1	3.762	15.6	31.3
	28	CH-BF-28	30.7	36.9	4.201	33.7	42.3
		CL-BF-28	30.8	36.7	4.228	34.3	42.4
	60	CH-BF-60	31.2	36.6	4.252	35.5	43.2
		CL-BF-60	31.2	36.6	4.281	36.0	43.1
	90	CH-BF-90	33.9	37.9	4.305	37.5	44.3
		CL-BF-90	36.2	39.2	4.379	40.5	46.1
	180	CH-BF-180	34.8	41.0	4.446	43.9	48.5
		CL-BF-180	36.2	42.0	4.457	44.9	49.5
	365	CH-BF-365	36.7	41.5	4.420	43.5	48.8
		CL-BF-365	37.2	41.6	4.448	44.3	49.1
	730	CH-BF-730	37.2	41.7	4.447	44.5	49.2
		CL-BF-730	39.0	41.9	4.407	43.5	49.1

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P-1094 (2) 容川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P-273



[그림 4.33] BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(4) SF 치환 콘크리트

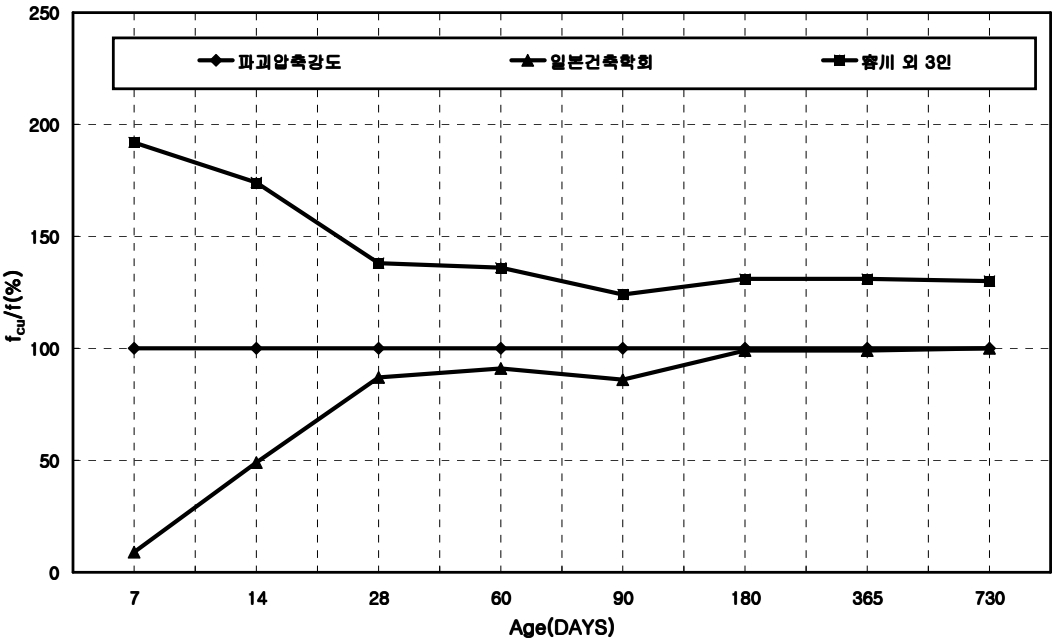
SF 치환 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 재령 49%～99%, 谷川식은 124%～192% 정도 파괴강도와 일치를 보였다. 일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 가장 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 7일에서 추정강도값이 마이너스 값이 추정되었으며 재령이 경과할수록 13%～51% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 나타났다. 谷川식은 재령 14일에 74%～92% 정도 추정강도가 파괴강도보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 24%～38%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.18> SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa) 1	2
실리카흄 치환 콘크리트	7	M-SF-7	11.7	23.4	3.319	-0.9	12.6
	14	M-SF-14	14.7	25.1	3.569	7.2	17.5
	28	M-SF-28	19.3	30.1	3.829	18.3	25.9
	60	M-SF-60	25.1	30.8	3.940	21.9	28.1
	90	M-SF-90	25.8	32.0	3.955	23.2	29.4
	180	M-SF-180	26.6	33.9	4.039	27.0	32.4
	365	M-SF-365	26.5	36.1	4.130	31.3	35.7
	730	M-SF-730	28.5	38.3	4.158	33.8	38.3
	7	C-SF-7	11.7	23.4	3.319	-0.9	22.1
	14	C-SF-14	14.7	25.1	3.569	7.2	25.8
	28	CH-SF-28	22.8	29.8	3.846	18.5	32.7
		CL-SF-28	26.9	30.3	4.049	24.3	34.7
	60	CH-SF-60	25.1	30.8	3.941	21.9	34.4
		CL-SF-60	27.8	31.4	4.050	25.3	35.9
	90	CH-SF-90	27.6	32.7	4.010	25.3	36.8
		CL-SF-90	31.8	34.3	4.032	27.2	38.6
	180	CH-SF-180	29.3	34.9	4.103	29.6	39.7
		CL-SF-180	33.9	35.3	4.134	30.8	40.4
	365	CH-SF-365	30.5	35.4	4.115	30.3	40.3
		CL-SF-365	31.6	35.6	4.141	31.2	40.8
	730	CH-SF-730	30.9	35.7	4.142	31.3	40.9
		CL-SF-730	33.7	37.2	4.159	32.9	42.4

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P−1094 (2) 容川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P−273



[그림 4.34] SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(5) PP 치환 콘크리트

PP 혼입 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 재령 62%～123%, 谷川식은 131%～169% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

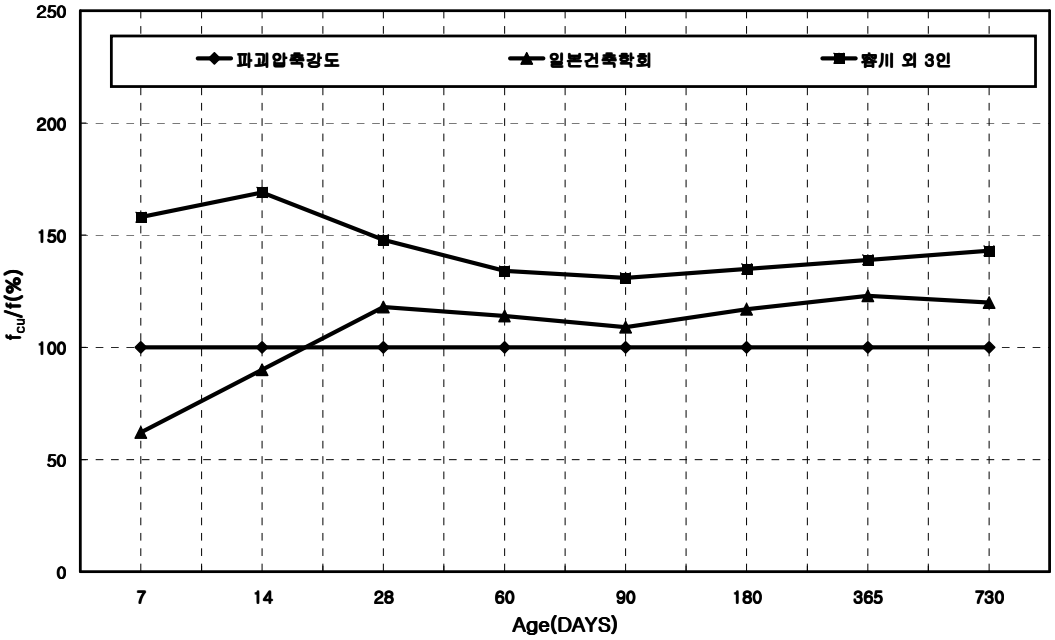
일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 큰 차이를 보였다.

일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일에서 10%～38% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 추정되었으며 재령이 경과할수록 9%～23% 정도 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났다. 谷川식은 재령 14일에 58%～69% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 31%～48%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.19> PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa)	
						1	2
폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트	7	M-PP-7	18.2	27.4	3.652	11.3	20.8
	14	M-PP-14	18.3	27.5	3.829	16.1	23.3
	28	M-PP-28	26.6	33.9	4.045	27.2	32.5
	60	M-PP-60	30.6	33.6	4.151	29.8	33.5
	90	M-PP-90	33.4	37.2	4.183	33.7	37.6
	180	M-PP-180	37.6	40.7	4.246	38.2	41.8
	365	M-PP-365	36.4	40.9	4.439	43.6	44.5
	730	M-PP-730	33.8	42.2	4.327	41.6	44.3
	7	C-PP-7	18.2	27.4	3.652	11.3	28.7
	14	C-PP-14	18.3	27.5	3.829	16.1	30.2
	28	CH-PP-28	26.8	35.6	4.192	32.5	41.1
		CL-PP-28	29.1	35.6	4.205	32.9	41.3
	60	CH-PP-60	30.2	37.0	4.335	37.6	43.7
		CL-PP-60	35.5	37.2	4.293	36.6	43.5
	90	CH-PP-90	31.4	37.0	4.190	33.7	42.5
		CL-PP-90	35.4	37.3	4.365	38.6	44.2
	180	CH-PP-180	32.8	37.7	4.312	37.5	44.2
		CL-PP-180	35.2	39.4	4.421	41.9	46.7
	365	CH-PP-365	33.2	39.8	4.361	40.5	46.6
		CL-PP-365	35.5	41.0	4.446	43.8	48.5
	730	CH-PP-730	33.1	41.1	4.268	39.1	47.1
		CL-PP-730	34.2	42.2	4.331	41.7	48.7

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P-1094 (2) 容川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P-273



[그림 4.35] PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

(6) S 혼입 콘크리트

S 혼입 콘크리트의 파괴강도와 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 재령 46%~126%, 谷川식은 142%~172% 정도 파괴강도와 일치를 보였다.

일본건축학회식의 제안식이 추정강도가 파괴강도와 비슷한 경향을 보였으며, 谷川식은 큰 차이를 보였다.

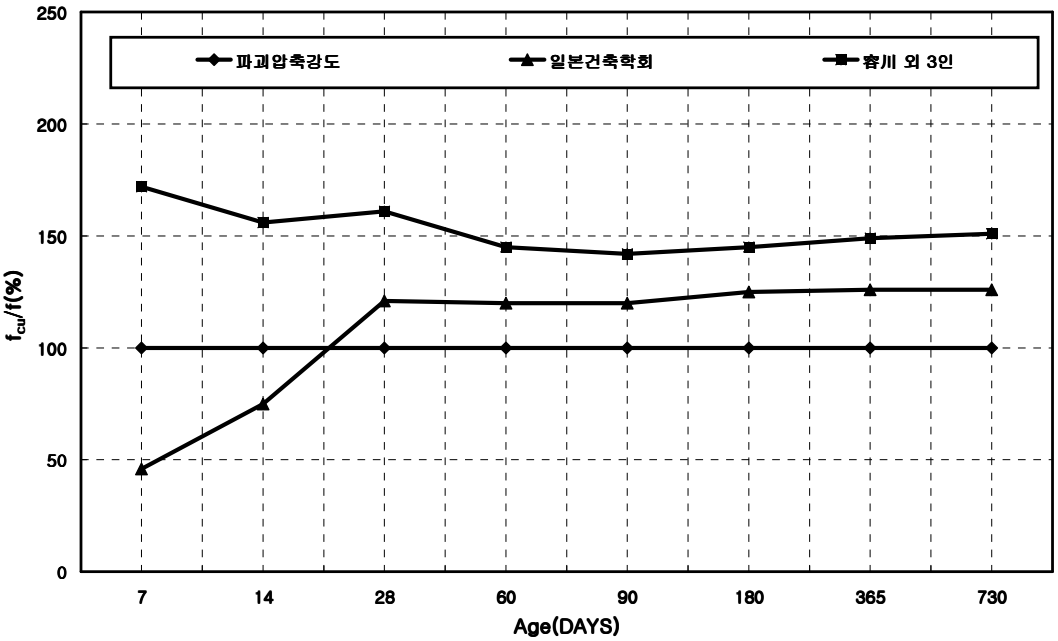
일본건축학회식과 일본재료학회식의 제안식은 재령 14일에서 25%~54% 정도 추정강도가 파괴강도보다 낮게 추정되었으며 재령이 경과할수록 20%~26% 정도 추정강도가 파괴강도보다 높게 나타났다.

谷川식은 재령 14일에 56%~72% 정도 추정강도가 파괴강도 보다 높은 경향을 보이다가 재령이 경과할수록 42%~49%정도 파괴강도보다 높게 추정되었다.

<표 4.20> S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

종 류	재 령 (일)	시 험 체 명	f_c (MPa)	R	V_p (km/sec)	추정 강도(MPa) 1	2
강	7	M-S-7	14.0	23.0	3.604	6.4	15.9
	14	M-S-14	18.4	26.4	3.773	13.7	21.4
	28	M-S-28	23.4	32.2	3.967	23.7	29.7
섬	60	M-S-60	31.8	33.6	4.009	26.0	31.7
	90	M-S-90	35.6	36.4	4.106	30.9	35.7
유	180	M-S-180	32.2	37.7	4.099	31.8	36.9
	365	M-S-365	33.0	40.3	4.114	34.3	39.7
	730	M-S-730	34.5	42.0	4.115	35.7	41.4
혼	7	C-S-7	13.4	23.0	3.604	6.4	24.0
	14	C-S-14	18.4	26.4	3.772	13.7	28.7
입	28	CH-S-28	25.9	35.4	4.163	31.6	40.7
		CL-S-28	24.3	35.3	4.064	28.9	39.9
콘	60	CH-S-60	28.9	36.9	4.256	35.3	42.9
		CL-S-60	31.7	37.6	4.277	36.4	43.7
	90	CH-S-90	32.7	38.6	4.288	37.6	44.9
크		CL-S-90	31.3	39.5	4.311	39.0	46.0
	180	CH-S-180	32.1	40.9	4.401	42.5	48.1
		CL-S-180	33.9	41.3	4.274	39.4	47.4
리	365	CH-S-365	32.0	41.6	4.285	40.0	47.9
		CL-S-365	32.7	41.8	4.322	41.1	48.3
트	730	CH-S-730	31.5	42.8	4.288	41.1	49.1
		CL-S-730	35.1	44.3	4.284	42.2	50.5

(1) 일본 건축학회식 f_{cu}= 8.2R+269V_P−1094 (2) 容川 외 3인 제안식 f_{cu}= 9.9R+79.2V_P−273



[그림 4.36] S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교

4.3 소 결

1) 파괴시험 및 비파괴시험 결과 재령 28일에 설계기준강도 24MPA 이상의 강도 발현을 보였으며, 보통 콘크리트는 재령 60일 이후부터는 강도 증가율은 떨어졌으나 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트의 강도는 90일 이후까지도 계속 증가하는 경향을 보였다. 또한 PP 섬유 및 S 섬유는 기존의 연구와 본 연구을 통해 압축강도에는 거의 영향을 주지 않고 휨 및 인장강도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

2) 시험체별로 비교할 경우, 원주형 공시체, 코어 공시체, 부재 구조체 순으로 압축강도가 높게 나타났다. 이는 콘크리트의 단면 특성상 내부적으로 안정된 부재 구조체가 높고, 코어 공시체는 부재 구조체에서 채취시 손상에 의한 강도 저하인 것으로 사료된다.

3) 혼화재를 사용한 콘크리트의 특성상 보통 콘크리트보다 초기의 압축강도 및 초음파속도, 반발경도가 낮게 나오는 경향을 보였으나, 재령이 경과할수록 보통콘크리트보다 높게 나오는 결과를 토대로 기존 제안식을 적용할 경우 파괴강도와 추정강도는 많은 차이를 보일 것으로 사료되며 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트에 맞는 새로운 추정식이 필요할 것으로 판단된다.

4 시험체별 반발경도 결과를 적용했을 경우, 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식은 2%~12%, 동경도 건축재료 검사소식은 13%~18%, U.S Army 시험소식은 1%~12% 정도 파괴압축강도보다 추정강도가 낮게 나타났으며, 일본건축학회식은 26%~40%정도, 권영웅 식은 18%~33% 정도 추정강도가 높게 나타났다. 재료별 차이는 있지만 일본건축학회식은 126%~140%, 일본재료학회식은 88~98%, 동경도 건축재료검사소식은 82%~87%, U.S Army 시험소식은 88%~99% 정도, 권영웅 식은 113%~133% 정도 파괴강도와 일치를 보였으며, 기존 제안식중 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 나타냈다.

5) 시험체별 초음파속도를 기존 제안식에 적용했을 경우, 일본건축학회식은 4%~

11%, J.Pysziak의 제안식은 3%～12%, 谷川의 제안식은 24%～30%정도 파괴 압축강도 보다 추정강도가 낮게, 일본재료학회식은 7%～11%정도 추정강도가 높게 나타났다. 일본건축학회식은 89%～96%, 일본재료학회식은 107%～121%, J.Pysziak의 제안식은 88%～97%, 谷川의 제안식은 73%～76% 정도, 한전기술연구원식은 80%～108% 정도 파괴압축강도와 일치를 보였으며, 파괴압축강도와 4%～11% 차이를 보인 일본건축학회식과 3%～12% 차이를 보인 J.Pysziak의 제안식이 파괴 압축강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식으로 나타났다.

6) 시험체별 파괴시험과 비파괴시험을 실시하여 그 결과를 복합법에 의한 기존 제안식에 적용하여 강도를 추정해본 결과, 일본건축학회식은 77%～108%, 容川 외 3인 제안식은 140%～145%정도 파괴압축강도와 일치를 보였으며, 기존 제안식중 실리카흄 시험체를 제외한 나머지 시험체에서 1%～8%정도 차이를 보인 일본건축학회식이 파괴 압축강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식으로 나타났다.
모든 제안식이 추정강도가 파괴강도보다 높게 나와 현장에서 기존 제안식을 사용했을 경우 추정강도가 파괴강도보다 높게 평가될 것으로 사료된다.

V. 회귀분석에 의한 강도 추정식 제안

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 추가하는 방법을 회귀분석이라 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 보통콘크리트와 혼화콘크리트의 강도 추정식의 신뢰성을 확보하고 보다 정확한 추정식을 결정하기 위하여, 각 시험체의 측정치를 재령별, 시험체별로 SPSS(Statistical Package for the Social Science)win(Windows) 10.0 통계분석 프로그램을 이용하여 단순회귀 및 중회귀 분석하여 상관계수(CR, coefficient of coreation) 및 결정계수(CR^2, coefficient of determination) 등을 구하였다.

5.1 보통 콘크리트의 회귀분석

보통 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시후 그 결과값으로 통계프로램(SPSS 10.0)을 이용하여 단순회귀분석과 중회귀분석한 결과, 반발경도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 무구분 시험체 결정계수는 89.7%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 91.2%~94.4%로 나타났다.

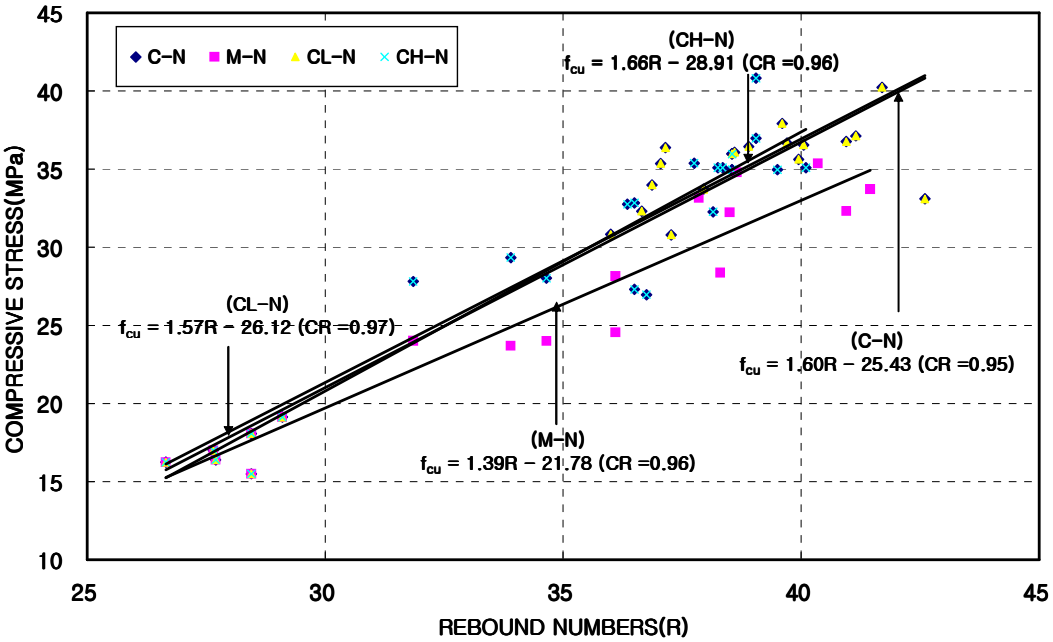
초음파 속도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체 결정계수는 88.7%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 83.7%~92.4%로 나타났으며, 코어공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 초음파속도법보다 0.1%~8.6%, 반발경도법보다는 0.8%~2.1%정도 결정계수가 높게 나와 초음파속도법보다는 반발경도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용했을 경우 적합할 것으로 사료되며 상부와 하부를 구분하지 않는 회귀식보다는 구조체의 높이에 따른 회귀식이 현장에서 적용하면 좋을 것으로 판단된다.

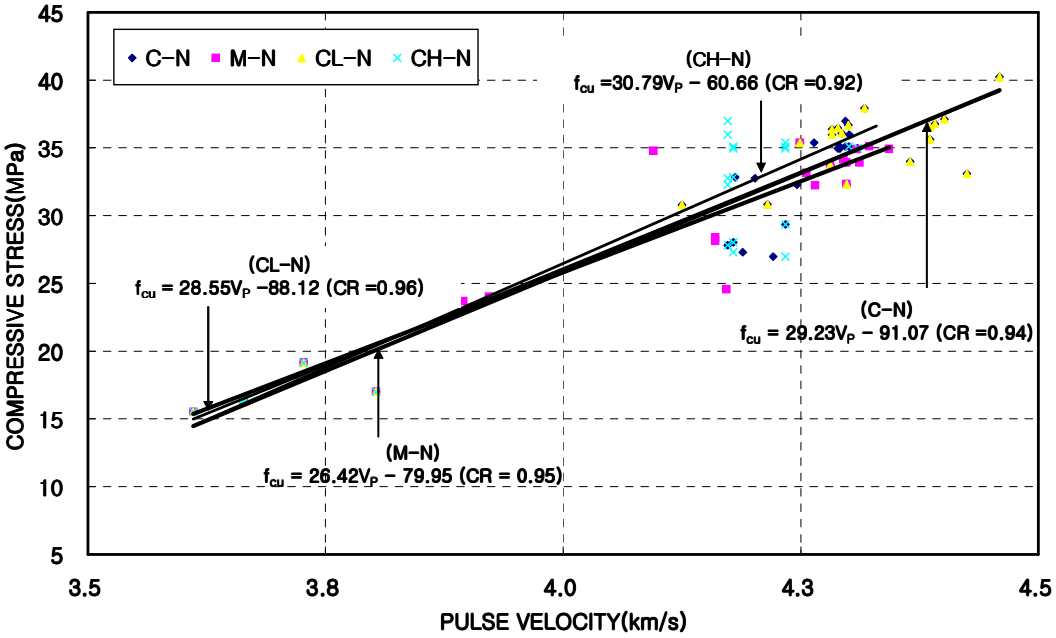
<표 5.1> 보통 콘크리트 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-N	f_{cu}=1.56R-25.43	0.953	0.897
		CL-N	f_{cu}=1.57R-26.12	0.961	0.924
		CH-N	f_{cu}=1.66R-28.91	0.957	0.912
		M-N	f_{cu}=1.39R-21.78	0.961	0.920
	초음파속도법	C-N	f_{cu}=29.23V_P-91.07	0.943	0.887
		CL-N	f_{cu}=28.55V_P-88.12	0.972	0.944
		CH-N	f_{cu}=30.78V_P-69.66	0.919	0.837
		M-N	f_{cu}=26.42V_P-79.95	0.951	0.900
복 합 법		C-N	f_{cu}=0.71R+16.66V_P-64.44	0.954	0.905
		CL-N	f_{cu}=0.51R+19.81V_P-69.85	0.974	0.945
		CH-N	f_{cu}=1.22R+9.34V_P-51.83	0.964	0.923
		M-N	f_{cu}=0.85R+11.00V_P-48.02	0.969	0.933

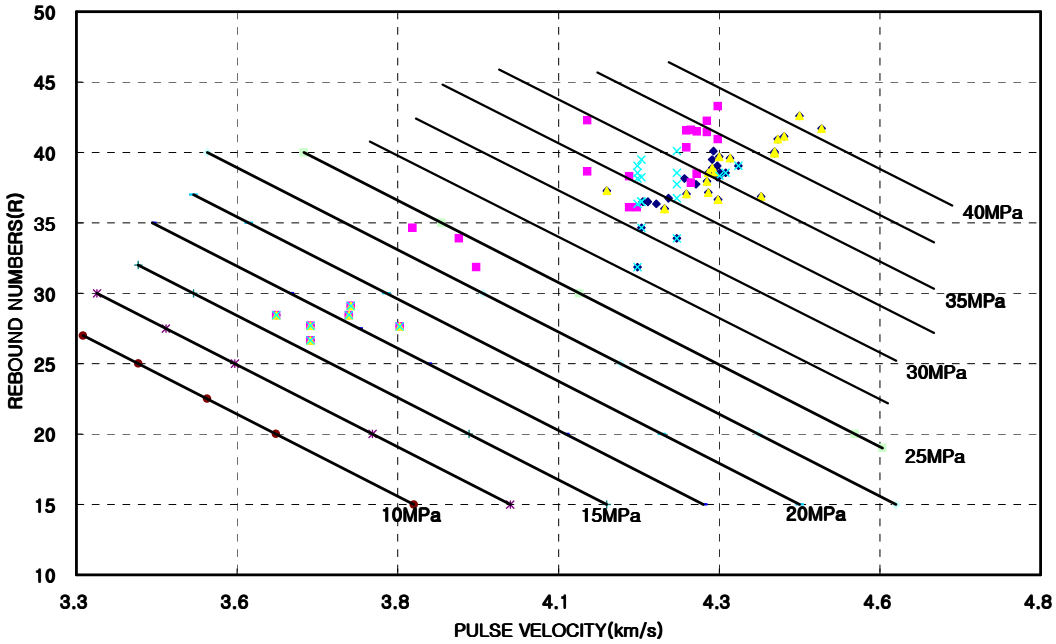
• C-N : 보통 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-N : 보통 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-N : 보통 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-N : 보통 콘크리트 원주형 공시체



[그림 5.1] 보통 콘크리트 반발경도법에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.2] 보통 콘크리트 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.3] 보통 콘크리트 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.2 플라이애시 치환 콘크리트 회귀분석

FA 치환 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시 후 그 측정값으로 단순회귀석과 중회귀분석한 결과, 반발경도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 82.2%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 83.9%~89.0%로 나타났다.

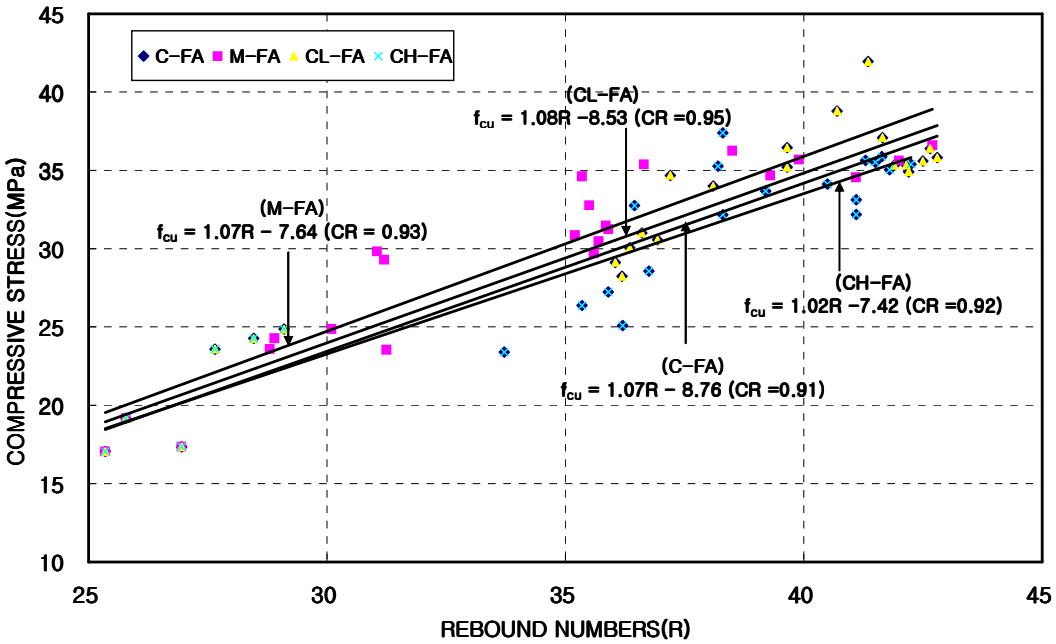
초음파 속도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 79.6%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 81.8%~86.5%로 나타났으며 코어공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 초음파속도법보다 0.9%~2.5%, 반발경도법보다는 0.4%~4.4%정도 결정계수가 높게 나와 구조체의 상부와 하부를 구분하지 않은 회귀식보다 구분한 회귀식이, 초음파속도법보다는 반발경도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용했을 경우 적합할 것으로 본다.

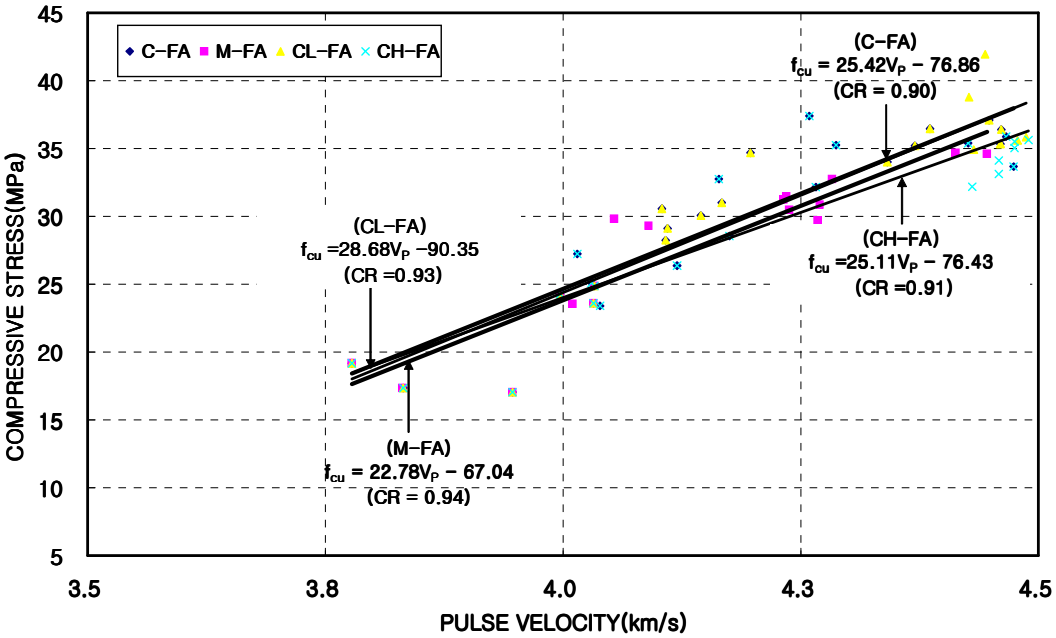
<표 5.2> FA 치환 콘크리트의 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-FA	f_{cu}=1.07R-8.76	0.909	0.822
		CL-FA	f_{cu}=1.08R-8.53	0.946	0.890
		CH-FA	f_{cu}=1.02R-7.42	0.920	0.839
		M-FA	f_{cu}=1.07R-7.46	0.926	0.852
	초음파속도법	C-FA	f_{cu}=25.42V_P-76.86	0.895	0.796
		CL-FA	f_{cu}=28.68V_P-90.35	0.933	0.865
		CH-FA	f_{cu}=25.11V_P-76.43	0.909	0.818
		M-FA	f_{cu}=22.78V_P-67.04	0.937	0.873
복 합 법		C-FA	f_{cu}=0.66R+10.78V_P-39.19	0.921	0.840
		CL-FA	f_{cu}=0.71R+10.92V_P-40.65	0.953	0.899
		CH-FA	f_{cu}=0.61R+11.31V_P-40.05	0.934	0.861
		M-FA	f_{cu}=0.40R+14.82V_P-46.95	0.942	0.877

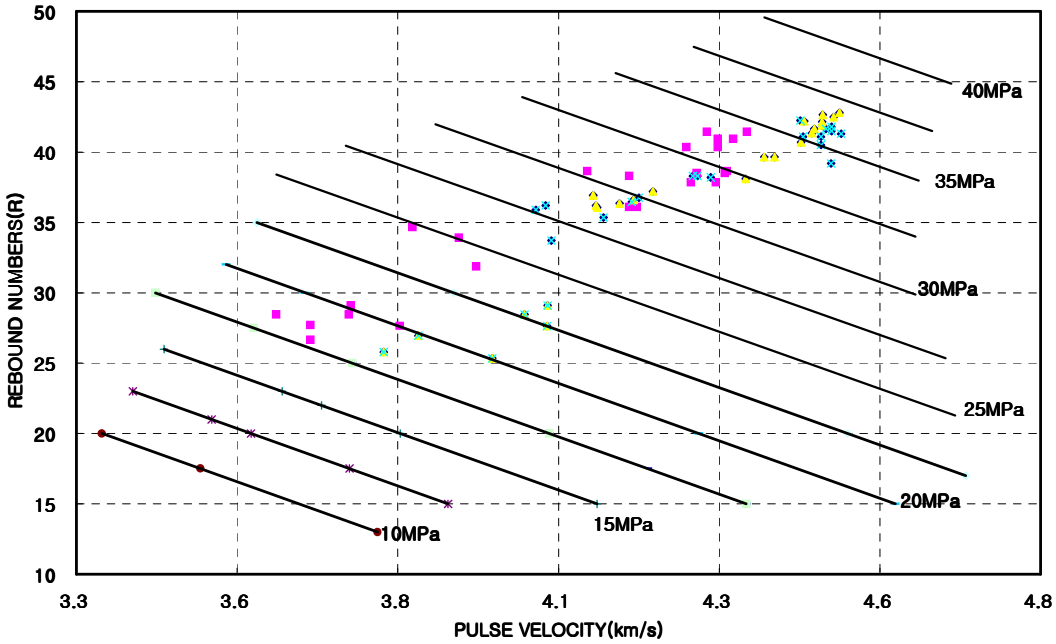
• C-FA : FA 치환 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-FA : FA 치환 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-FA : FA 치환 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-FA : FA 치환 콘크리트 원주형 공시체



[그림 5.4] FA 치환 콘크리트의 반발경도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.5] FA 치환 콘크리트의 초음파속도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.6] FA 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.3 고로슬래그 치환 콘크리트 회귀분석

BF 치환 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시 후 그 측정값으로 단순회귀분석과 중회귀분석한 결과, 반발경도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체 결정계수는 92.1%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 93.4%~95.8%로 나타났다.

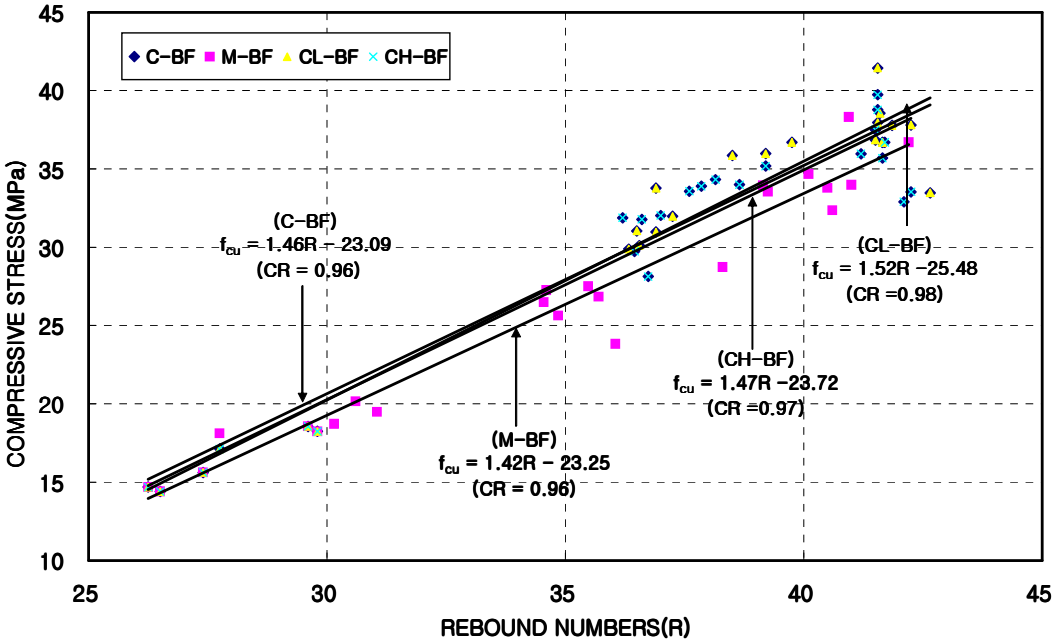
초음파 속도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체 결정계수는 91.2%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 94.4%~95.1%로 나타났으며 코어공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 초음파속도법보다 0.2%~3.1%, 반발경도법보다는 0.2%~3.4%정도 결정계수가 높게 나와 구조체의 상부와 하부를 구분하지 않은 회귀식보다 구분한 회귀식이, 초음파속도법보다는 반발경도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용할 경우 적합할 것으로 본다.

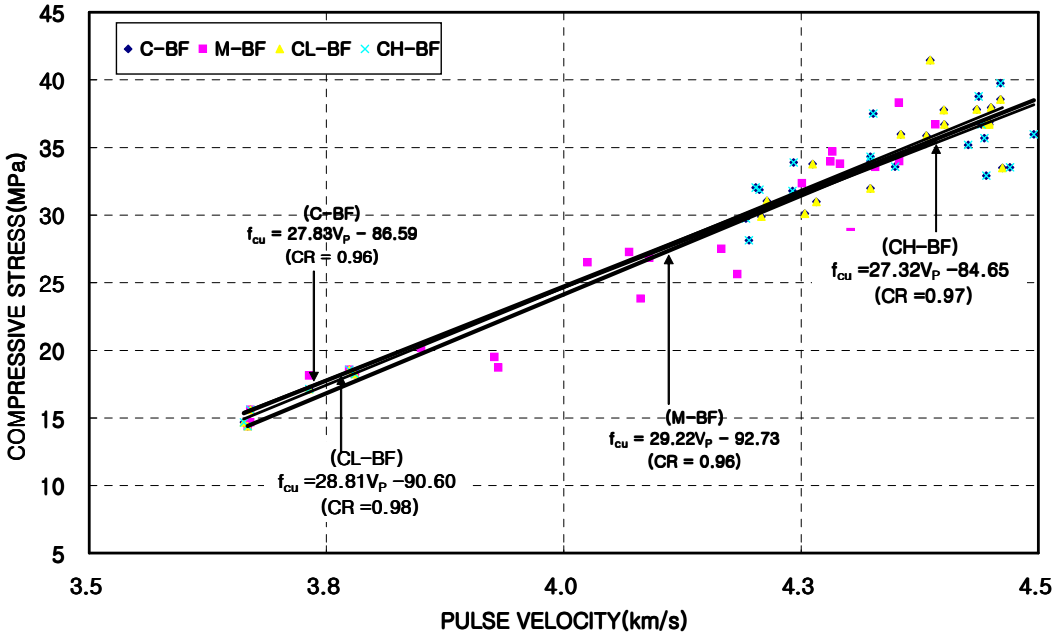
<표 5.3> BF 치환 콘크리트의 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-BF	f_{cu}=1.46R-23.09	0.961	0.921
		CL-BF	f_{cu}=1.52R-25.48	0.980	0.958
		CH-BF	f_{cu}=1.47R-23.72	0.968	0.934
		M-BF	f_{cu}=1.42R-23.25	0.961	0.921
	초음파속도법	C-BF	f_{cu}=27.83V_P-86.59	0.956	0.912
		CL-BF	f_{cu}=28.81V_P-90.60	0.976	0.951
		CH-BF	f_{cu}=27.32V_P-84.65	0.973	0.944
		M-BF	f_{cu}=29.22V_P-92.73	0.963	0.924
복 합 법		C-BF	f_{cu}=0.56R+17.50V_P-63.55	0.964	0.925
		CL-BF	f_{cu}=0.58R+18.08V_P-66.68	0.981	0.960
		CH-BF	f_{cu}=0.49R+18.41V_P-65.10	0.974	0.944
		M-BF	f_{cu}=1.30R+2.55V_P-29.40	0.979	0.955

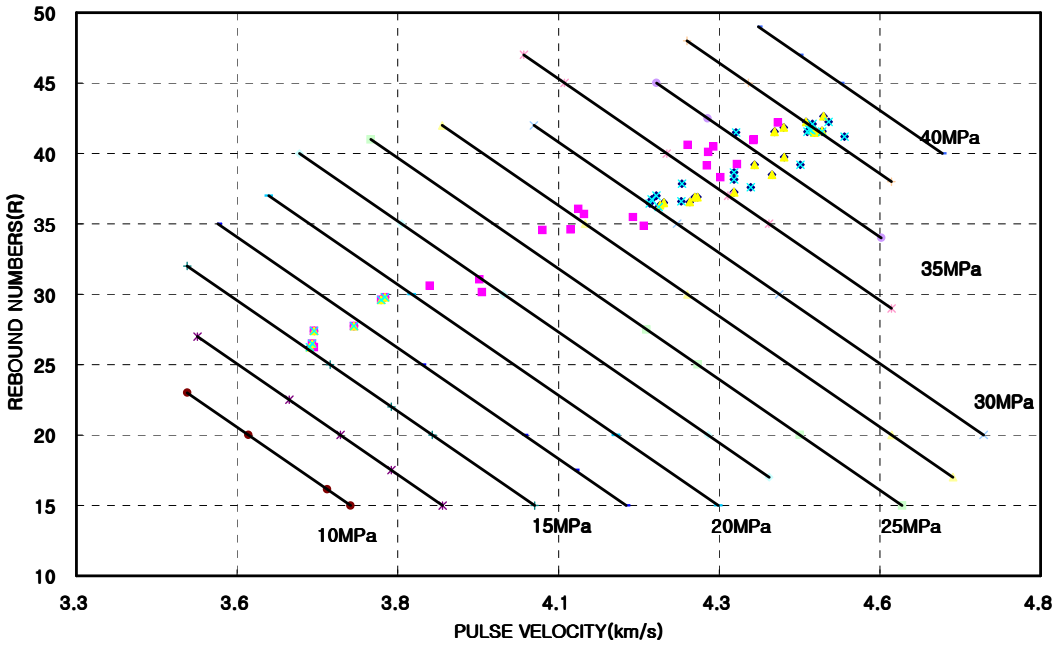
• C-BF : BF 치환 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-BF : BF 치환 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-BF : BF 치환 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-BF : BF 치환 콘크리트 원주형 공시체



[그림 5.7] BF 치환 콘크리트의 반발경도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.8] BF 치환 콘크리트의 초음파속도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.9] BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.4 실리카흄 치환 콘크리트 회귀분석

SF 치환 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시 후 그 측정값으로 단순회귀분석과 중회귀분석한 결과, 반발경도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 89.2%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 92.5%~92.9%로 나타났다.

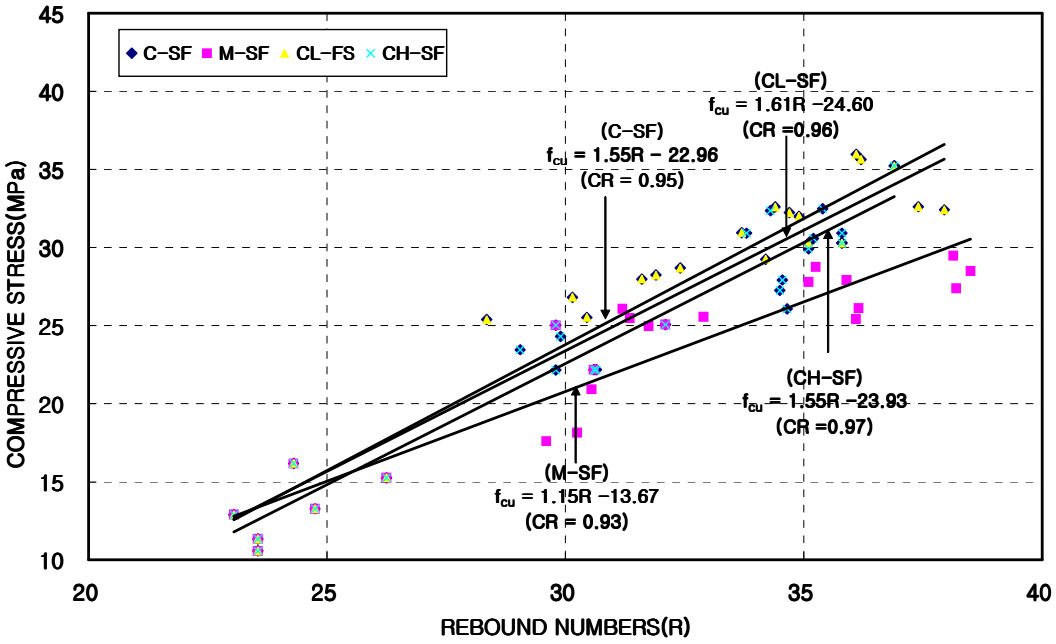
초음파 속도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 85.3%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 89.1%~90.3%로 나타났으며 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 초음파속도법보다 0.5%~6.1%, 반발경도법보다는 0.5%~6.1%정도 결정계수가 높게 나와 구조체의 상부와 하부를 구분하지 않은 회귀식보다 구분한 회귀식이, 초음파속도법보다는 반발경도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용했을 경우 적합할 것으로 본다.

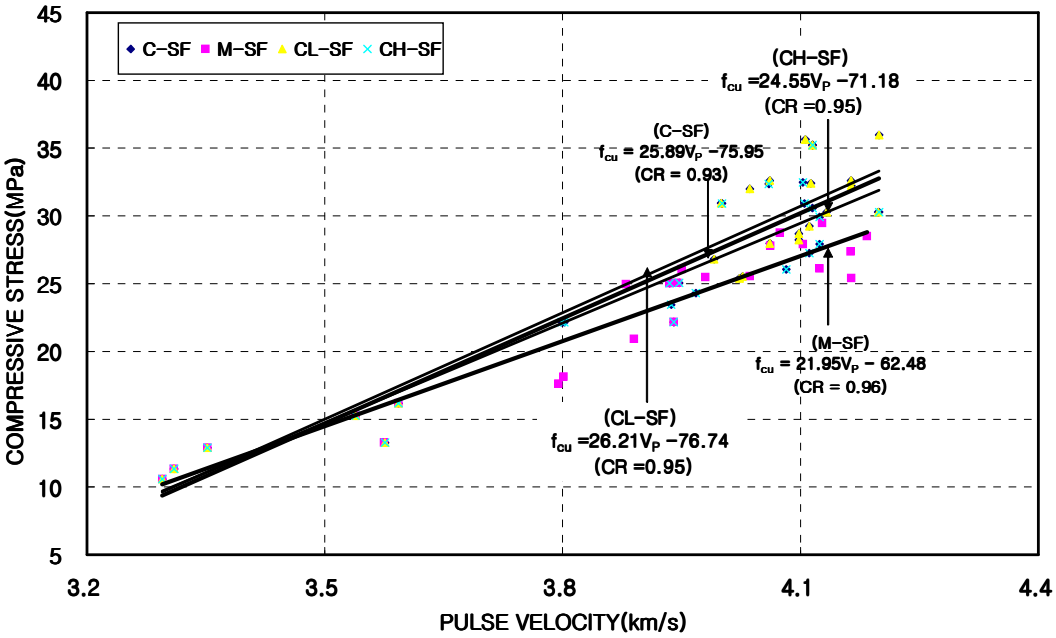
<표 5.4> SF 치환 콘크리트의 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-SF	f_{cu}=1.55R-22.96	0.946	0.892
		CL-SF	f_{cu}=1.61R-24.60	0.964	0.925
		CH-SF	f_{cu}=1.55R-23.93	0.966	0.929
		M-SF	f_{cu}=1.15R-13.67	0.928	0.856
	초음파속도법	C-SF	f_{cu}=25.89V_P-75.95	0.926	0.853
		CL-SF	f_{cu}=26.21V_P-76.74	0.953	0.903
		CH-SF	f_{cu}=24.55V_P-71.18	0.946	0.891
		M-SF	f_{cu}=21.95V_P-62.48	0.957	0.912
복 합 법		C-SF	f_{cu}=0.98R+10.58V_P-46.87	0.959	0.916
		CL-SF	f_{cu}=0.95R+11.98$_P$-50.65	0.979	0.959
		CH-SF	f_{cu}=1.13R+7.19V_P-38.67	0.969	0.934
		M-SF	f_{cu}=0.20R+17.59V_P-52.03	0.963	0.917

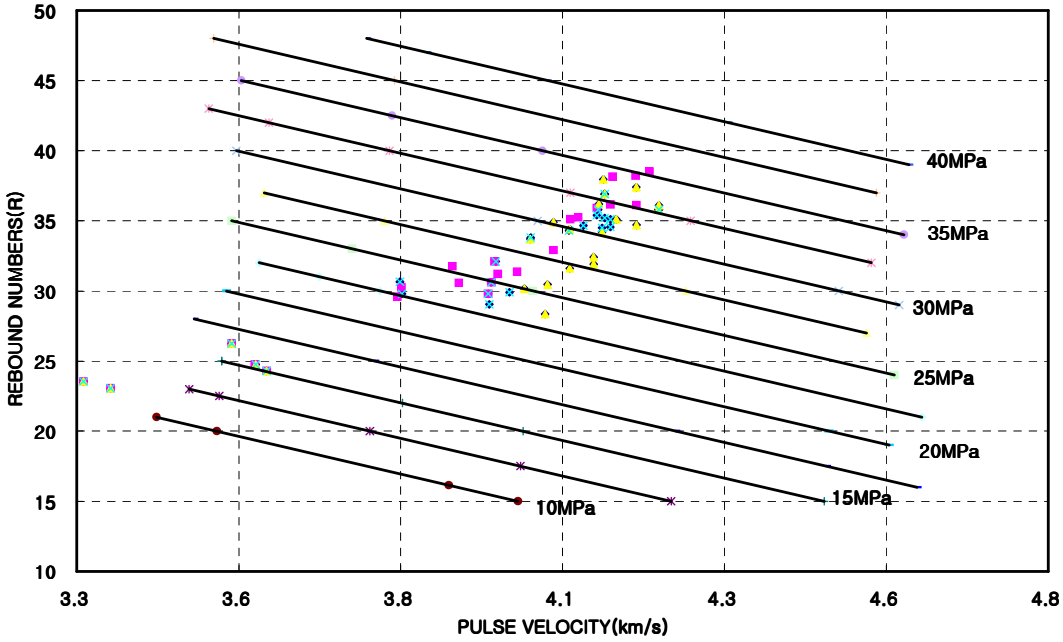
• C-SF : SF 치환 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-FA : SF 치환 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-FA : SF 치환 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-FA : SF 치환 콘크리트 원주형 공시체



[그림 510.] SF 치환 콘크리트의 반발경도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.11] SF 치환 콘크리트의 초음파속도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.12] SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.5 폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트 회귀분석

PP 혼입 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시 후 그 측정값으로 단순회귀분석과 중회귀분석한 결과, 초음파속도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 무구분 시험체 결정계수는 77.5%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 77.4%~86.4%로 나타났다.

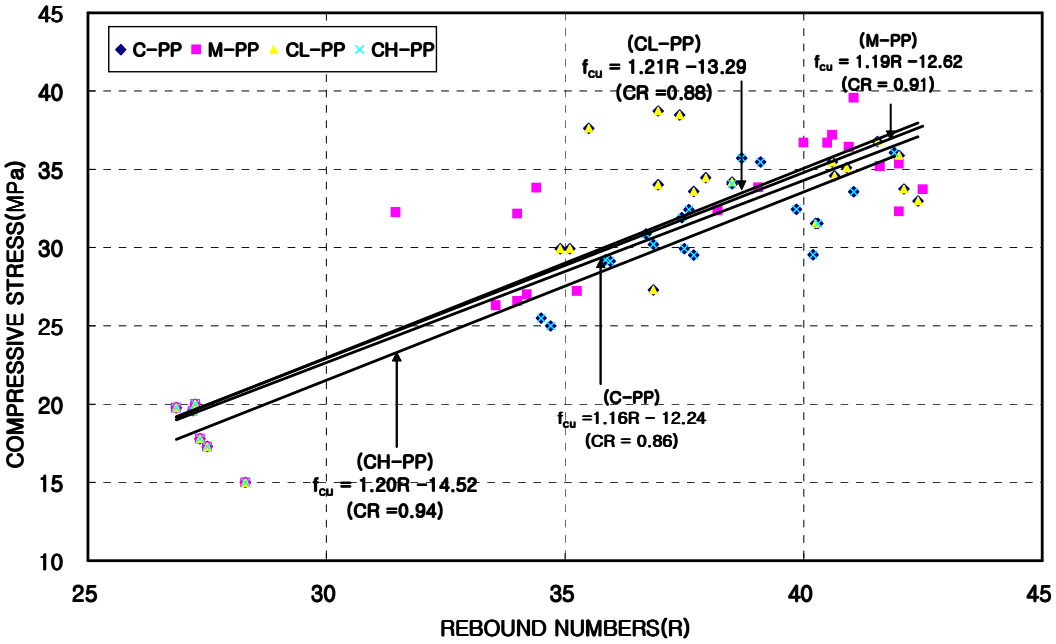
반발경도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 73.3%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 76.2%~88.7%로 나타났으며 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 반발경도법보다 3.0%~9.8%, 초음파속도법보다는 2.5%~11.0% 정도 결정계수가 높게 나와 구조체의 상부와 하부를 구분하지 않은 회귀식보다 구분한 회귀식이, 반발경도법보다는 초음파속도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용했을 경우 적합할 것으로 본다.

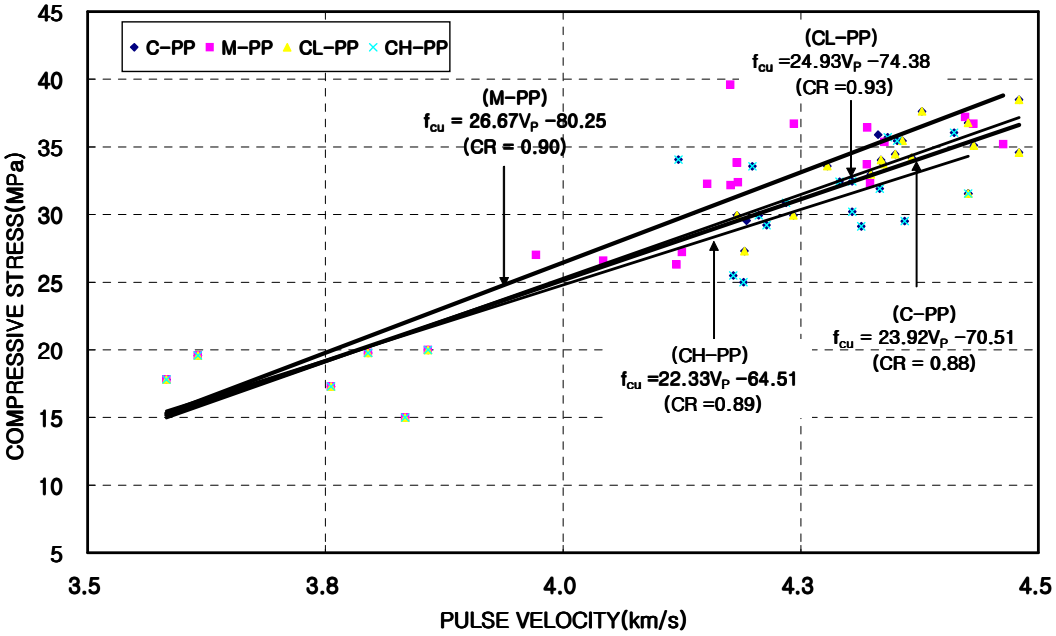
<표 5.5> PP 혼입 콘크리트의 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-PP	f_{cu}=1.16R-12.24	0.860	0.733
		CL-PP	f_{cu}=1.21R-13.29	0.879	0.762
		CH-PP	f_{cu}=1.20R-14.52	0.944	0.887
		M-PP	f_{cu}=1.19R-12.62	0.905	0.812
	초음파속도법	C-PP	f_{cu}=23.92V_P-70.51	0.884	0.775
		CL-PP	f_{cu}=24.93V_P-74.38	0.933	0.864
		CH-PP	f_{cu}=22.33V_P-64.51	0.885	0.774
		M-PP	f_{cu}=26.67V_P-80.25	0.904	0.810
복 합 법		C-PP	f_{cu}=0.49R+15.25V_P-51.96	0.900	0.800
		CL-PP	f_{cu}=0.18R+21.69V_P-67.29	0.934	0.860
		CH-PP	f_{cu}=1.04R+3.51V_P-23.34	0.946	0.885
		M-PP	f_{cu}=0.63R+13.76V_P-49.41	0.925	0.842

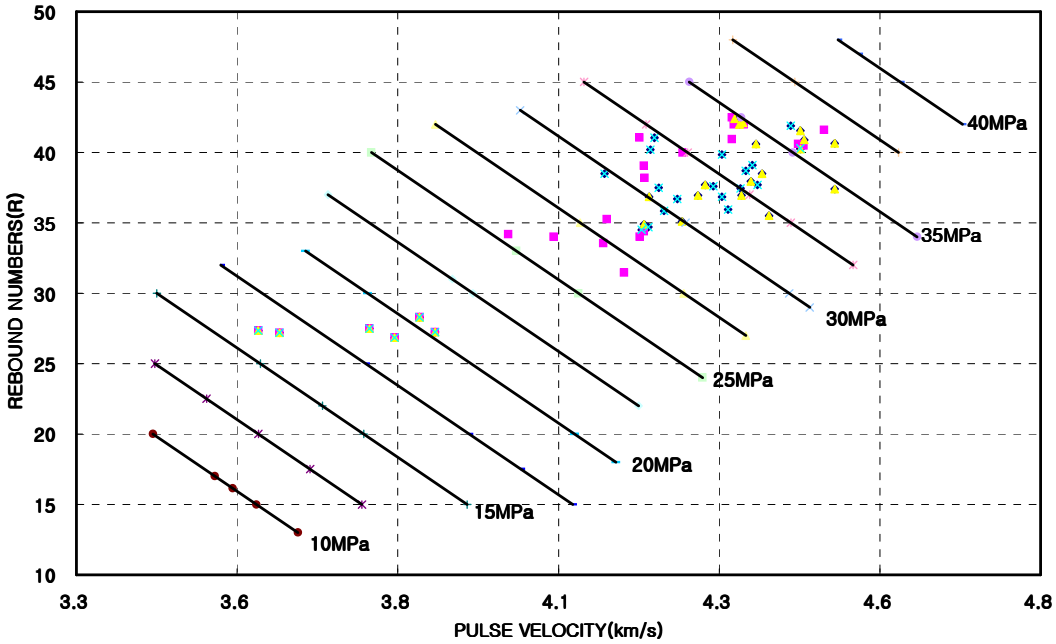
• C-PP : PP 혼입 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-PP : PP 혼입 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-PP : PP 혼입 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-PP : PP 혼입 콘크리트 원주형 공시체



[그림 5.13] PP 혼입 콘크리트의 반발경도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.14] PP 혼입 콘크리트의 초음파속도에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.15] PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.6 강 섬유 혼입 콘크리트 회귀분석

S 혼입 콘크리트를 파괴시험과 비파괴시험을 실시 후 그 측정값으로 단순회귀분석과 중회귀분석한 결과, 반발경도법에 의한 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않는 시험체 결정계수는 86.3%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 89.7%~91.9%로 나타났다.

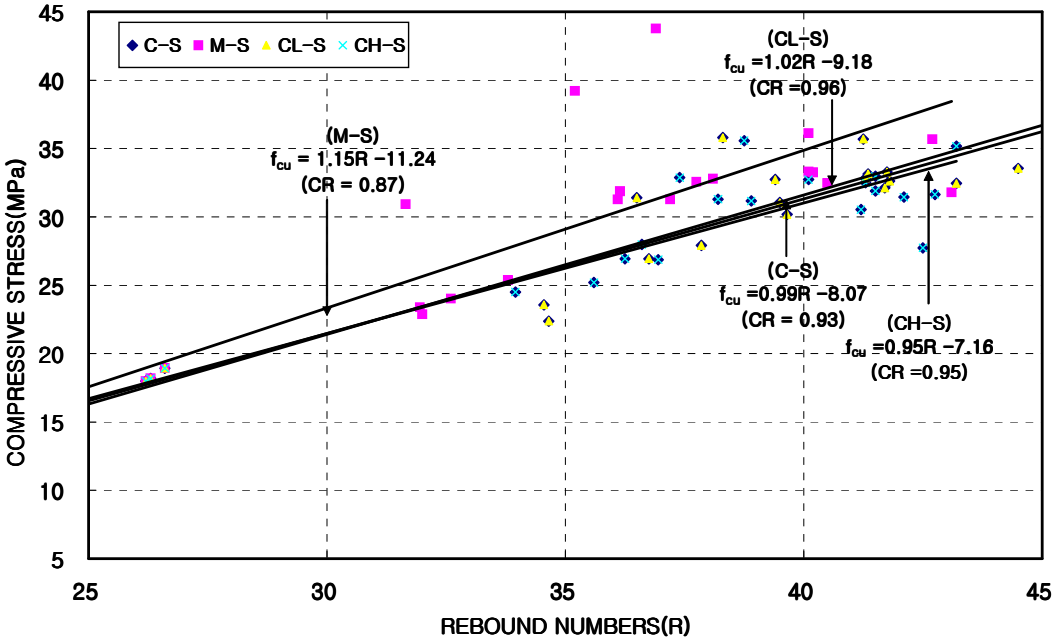
초음파속도법의 경우 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체 결정계수는 82.6%, 상부와 하부로 구분한 시험체는 89.1%~89.7%로 나타났으며 코어 공시체의 상부와 하부를 구분하지 않은 시험체보다 상부와 하부를 구분한 시험체의 결정계수가 높게 나온 것은 상부와 하부의 상관성이 높아 상부와 하부를 구분한 시험체의 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수가 높게 나온 것으로 사료된다.

복합법에 의한 회귀분석의 경우 반발경도법보다 1.1%~3.8%, 초음파속도법보다는 2.0%~4.8%정도 결정계수가 높게 나와 구조체의 상부와 하부를 구분하지 않은 회귀식보다 구분한 회귀식이, 초음파속도법보다는 반발경도법이, 단일법보다는 복합법의 회귀식이 현장에서 사용했을 경우 적합할 것으로 본다.

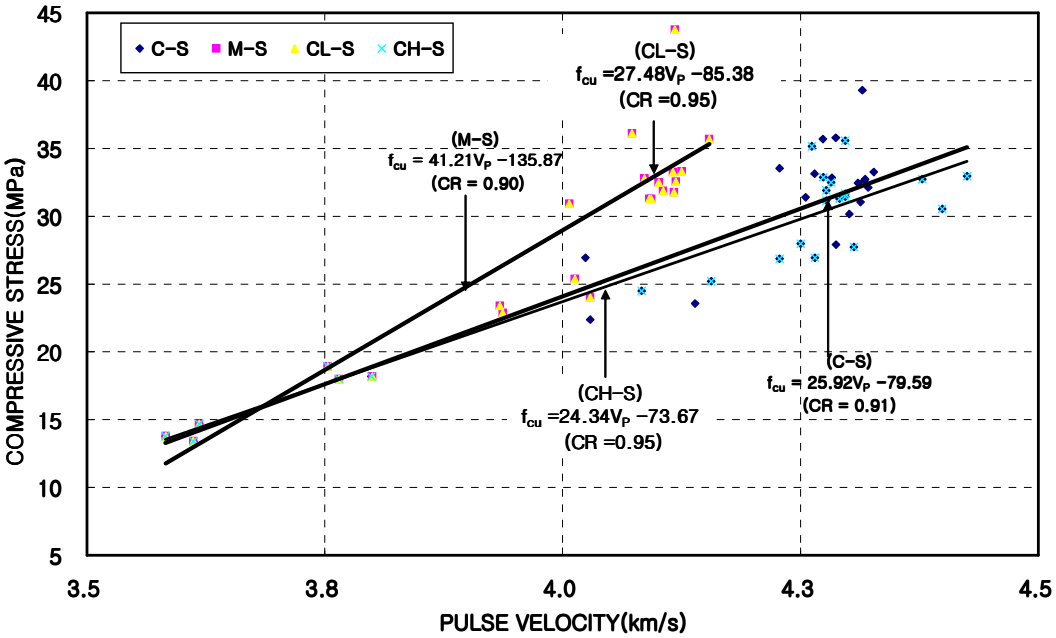
<표 5.6> S 혼입 콘크리트의 강도 추정식

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-S	f_{cu}=0.99R-8.07	0.931	0.863
		CL-S	f_{cu}=1.02R-9.18	0.961	0.919
		CH-S	f_{cu}=0.95R-7.16	0.949	0.897
		M-S	f_{cu}=1.15R-11.24	0.873	0.751
	초음파속도법	C-S	f_{cu}=25.92V_P-79.59	0.911	0.826
		CL-S	f_{cu}=27.41V_P-85.38	0.947	0.891
		CH-S	f_{cu}=24.34V_P-73.67	0.950	0.897
		M-S	f_{cu}=41.21V_P-135.87	0.896	0.793
복 합 법		C-S	f_{cu}=0.66R+9.33V_P-34.95	0.938	0.874
		CL-S	f_{cu}=0.692R+9.36V_P-35.85	0.965	0.932
		CH-S	f_{cu}=0.48R+12.52V_P-41.95	0.958	0.917
		M-S	f_{cu}=0.30R+31.32V_P-106.71	0.898	0.789

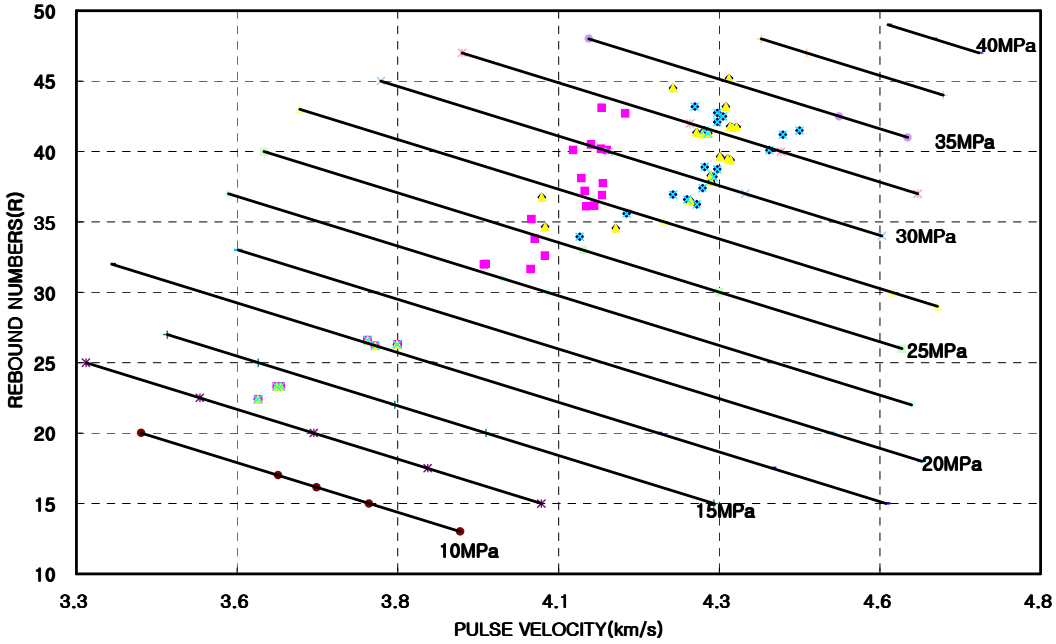
• C-S : S 혼입 콘크리트 코어 공시체(상, 하부 無구분), • CL-S : S 혼입 콘크리트 코어 공시체 하부
• CH-S : S 혼입 콘크리트 코어 공시체 상부, • M-S : S 혼입 콘크리트 원주형 공시체



[그림 5.16] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.17] S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 강도 회귀분석



[그림 5.18] S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 강도 회귀분석

5.7 소 결

1) 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트를 파괴 시험과 비파괴 시험을 실시하여 그 실험값으로 단순회귀분석 및 중회귀 분석 결과 상관계수는 86.0%~98.1%로, 결정계수는 73.3%~96.0% 으로서 다소 높은 회귀식의 상관성과 적합도를 가지는 것으로 나타났다.

2) 반발경도법과 초음파속도법으로 회귀분석한 단일법을 비교했을 경우, 시험체별로 다소 차이는 있지만 초음파속도법보다 0.2%~3.9% 정도 반발경도법의 결정계수가 높게 나와 현장에서 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트에 단일법으로 강도를 추정할 경우 초음파속도법보다는 반발경도법이, 반발경도법보다 복합법이 적합할 것으로 사료된다.

3) 코어 채취 높이에 따른 회귀식을 비교했을 경우, 구분하지 않은 시험체보다 반발경도법에서는 1.3%~15.4% 정도, 초음파속도법에서는 2.2%~8.9% 정도, 복합법에서는 1.8%~8.5% 정도 상부와 하부를 구분한 회귀식의 결정계수가 높게 나타났다. 이는 측정위치에 따른 상관성이 높게 나와서 구분하지 않은 회귀식보다 다소 높은 결정계수를 보인 것으로 사료된다.

4) 단일법과 반발경도와 초음파속도로 중회귀분석한 복합법을 비교했을 경우, 시험체별로 다소 차이는 있지만 초음파속도법보다 0.2%~11.0% 정도, 반발경도법보다는 0.2%~9.8% 정도 결정계수를 나타내 단일법보다는 복합법을 이용하면 좀더 정확한 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

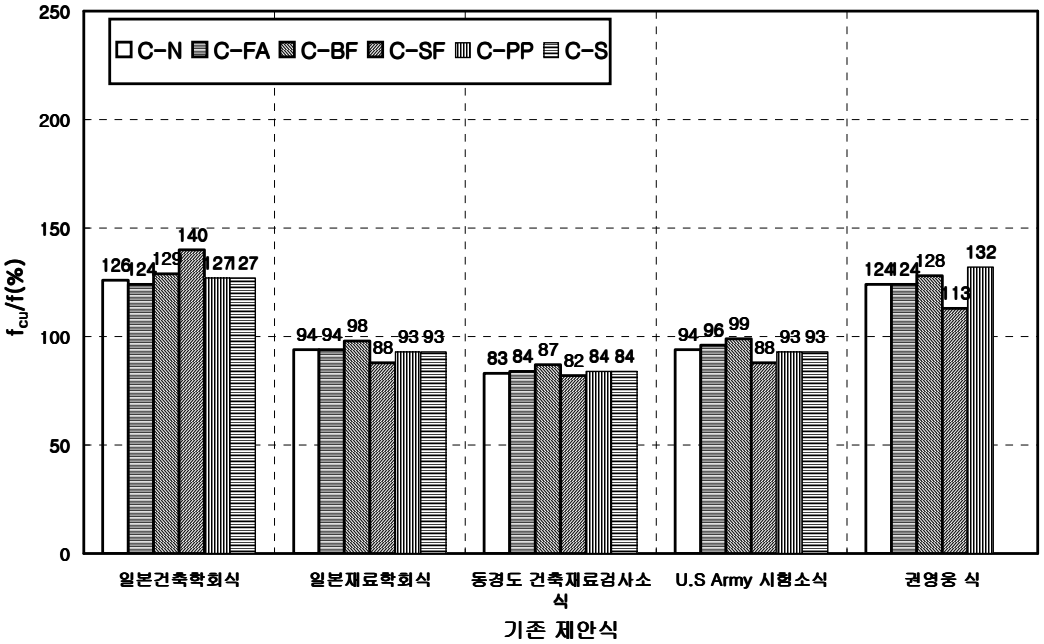
Ⅵ. 기존 제안식과 추정식 비교

6.1 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

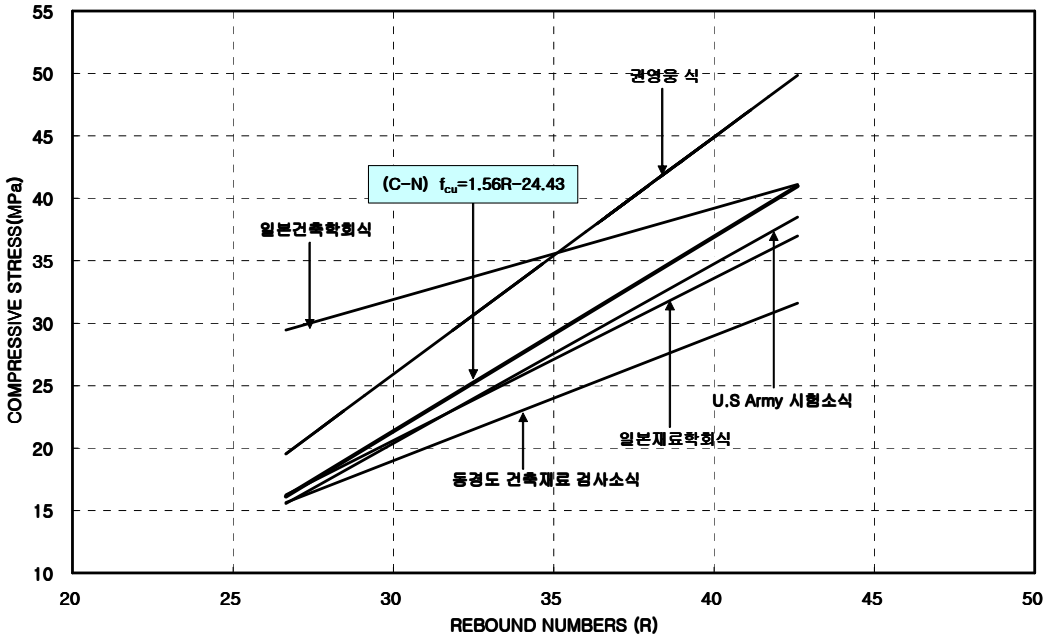
반발경도법에 이용한 기존 제안식에 본 연구에 의한 코어 공시체의 반발경도 결과를 적용했을 경우, 재료별 차이는 있지만 일본건축학회식은 126%~140%, 일본재료학회식은 88~98%, 동경도 건축재료검사소식은 82%~87%, U.S Army 시험소식은 88%~99% 정도, 권영웅 식은 113%~132% 정도 파괴강도와 일치를 보였으며, 기존 제안식 중 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 나타냈다.

기존 제안식 중 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 보인 일본재료학회식, U.S Army 시험소식과 본 연구의 추정식과의 오차율을 비교해 보면, 재령 초기와 재령 60일부터 90일까지의 기존 제안식의 오차율보다 본 연구의 추정식의 오차율이 큰 감소를 보였으며, 본 연구의 추정식이 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

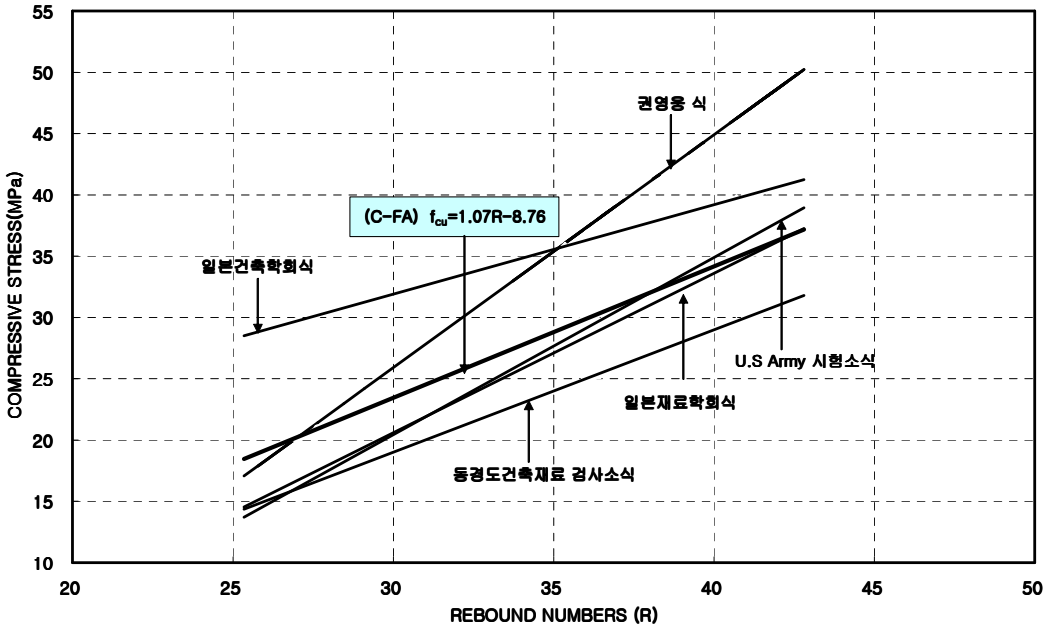
반발경도법에 의한 기존 제안식과 본 연구 추정식의 비교는 [그림 6.1]~[그림 6.2]와 같다.



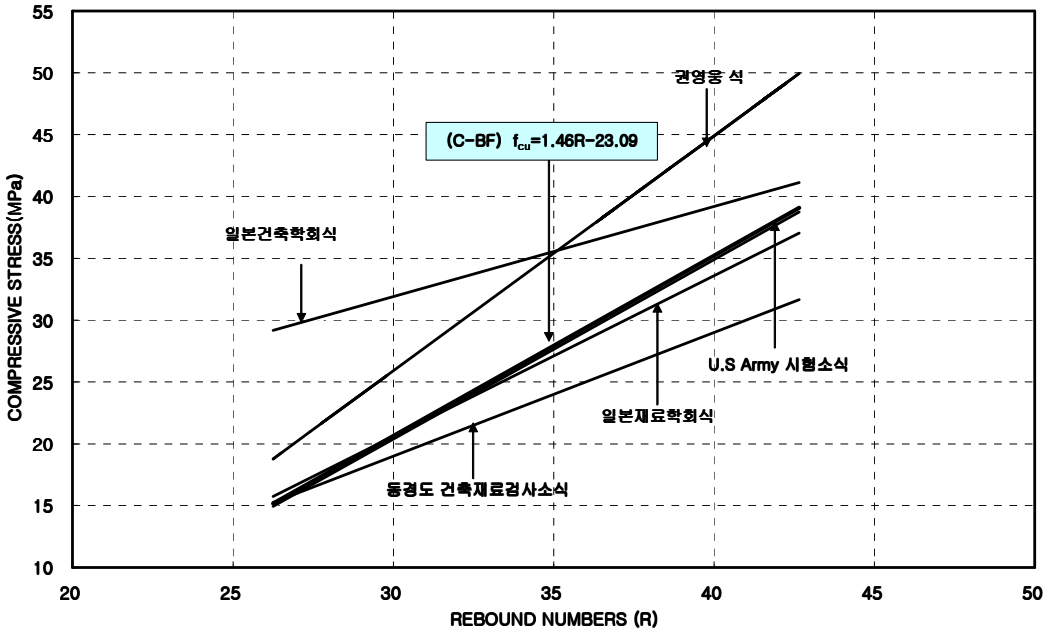
[그림 6.1] 반발경도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교



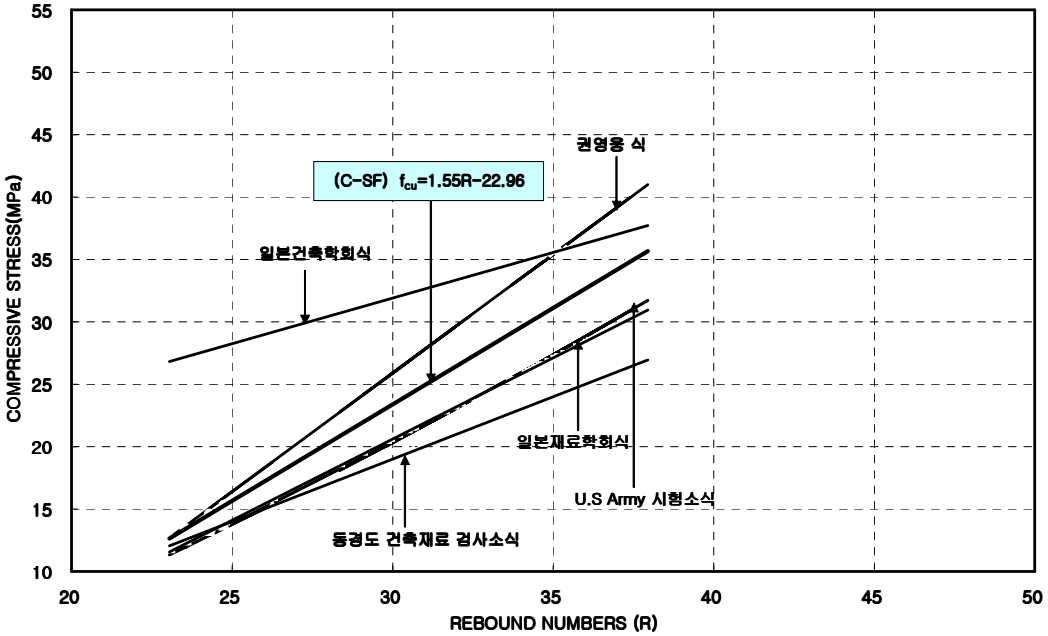
(a) 보통 콘크리트



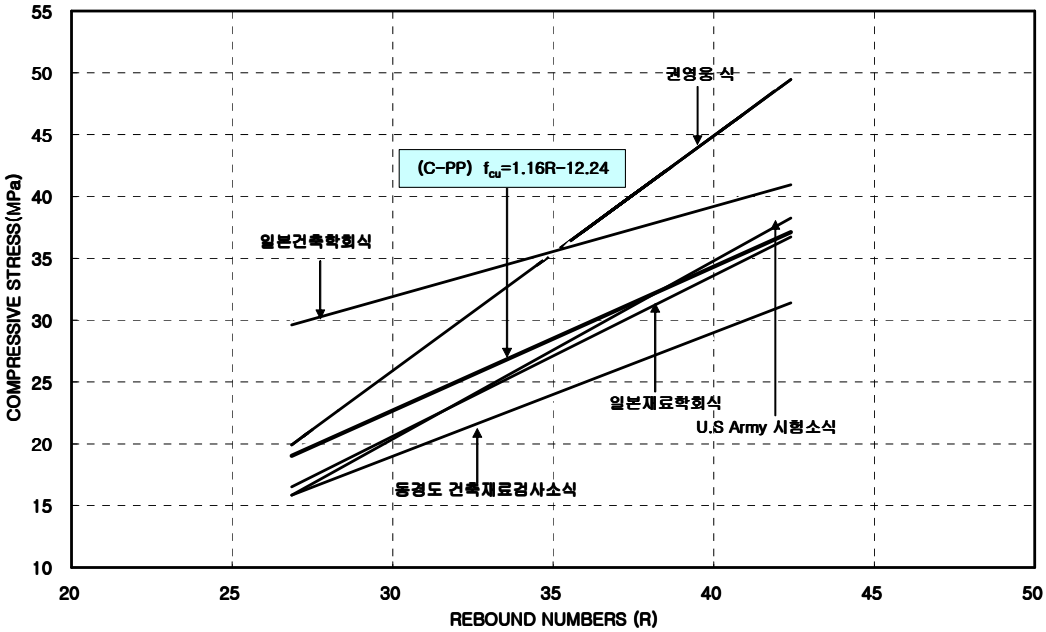
(b) FA 치환 콘크리트



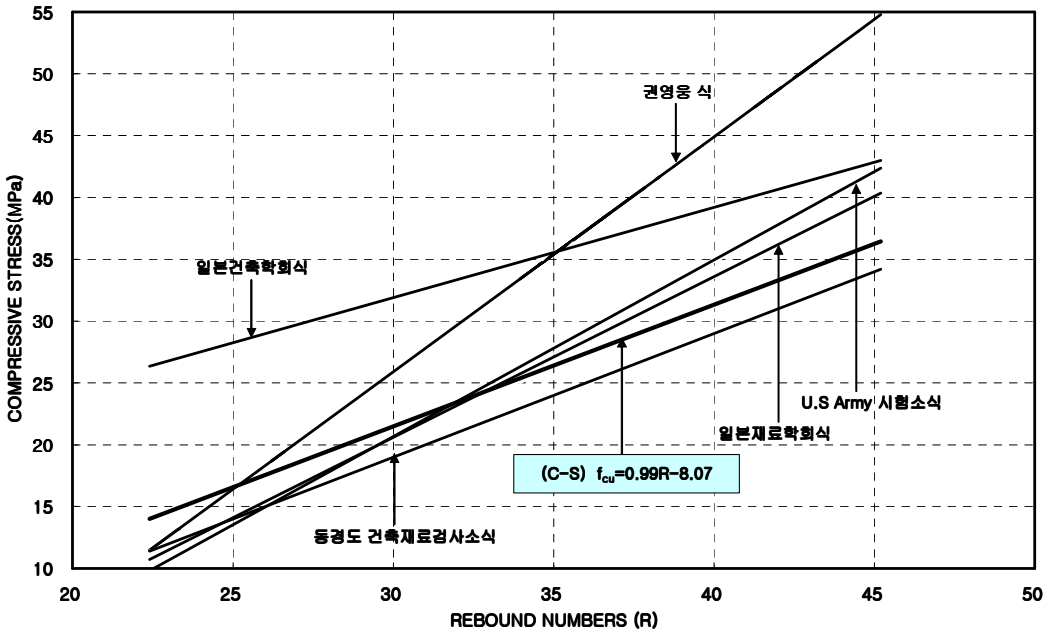
(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트



(e) PP 혼입 콘크리트



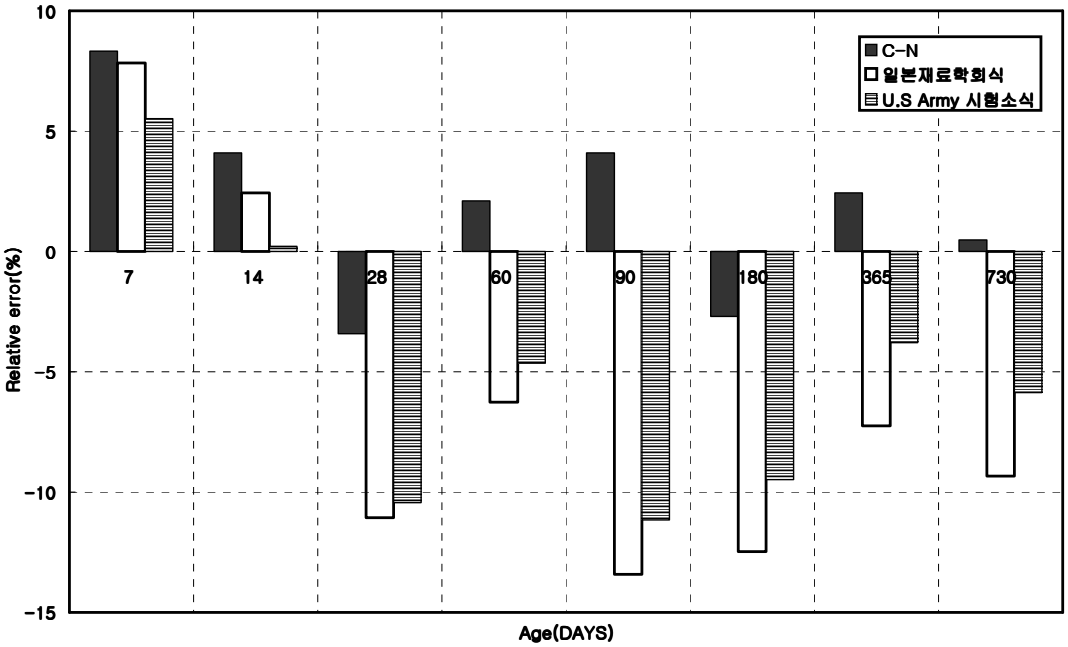
(f) S 혼입 콘크리트

[그림 6.2] 시험체별 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.3]과 같다.

보통 콘크리트의 재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 3.41%, 일본재료학회식은 11.07%, U.S Army 시험소식은 10.43%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 낮게 나타났다.

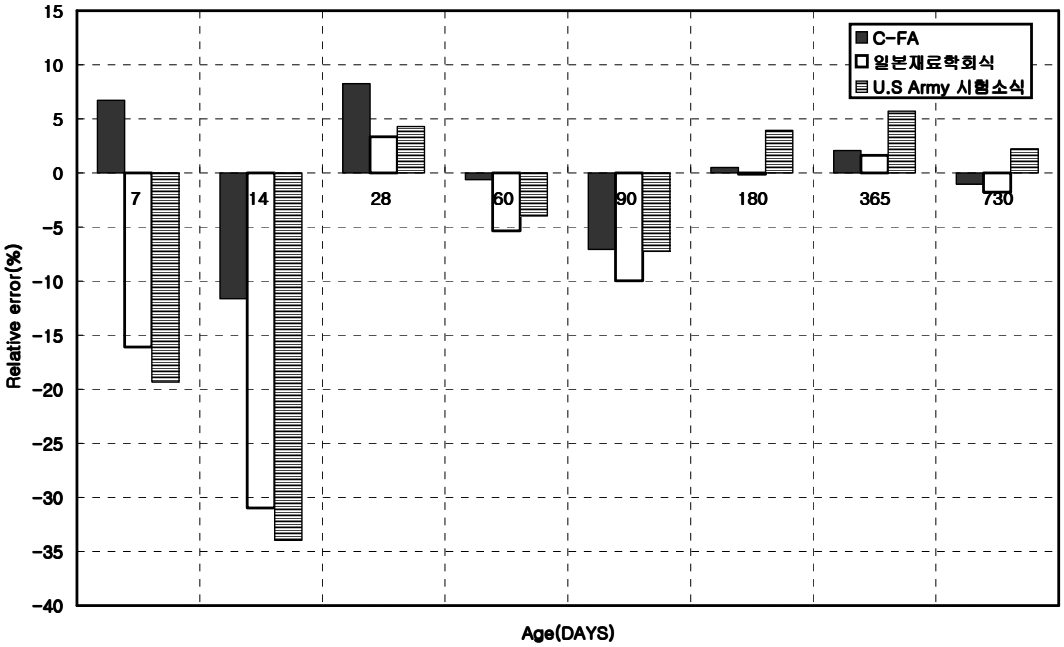
일본재료학회식은 2.44%~11.1%로, U.S Army 시험소식은 0.2%~11.2%로, 본 연구의 추정식은 0.5%~8.3%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



[그림 6.3] 보통 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.4]와 같으며 재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 8.3%, 일본재료학회식은 3.3%, U.S Army 시험소식은 4.3%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 높은 것으로 나

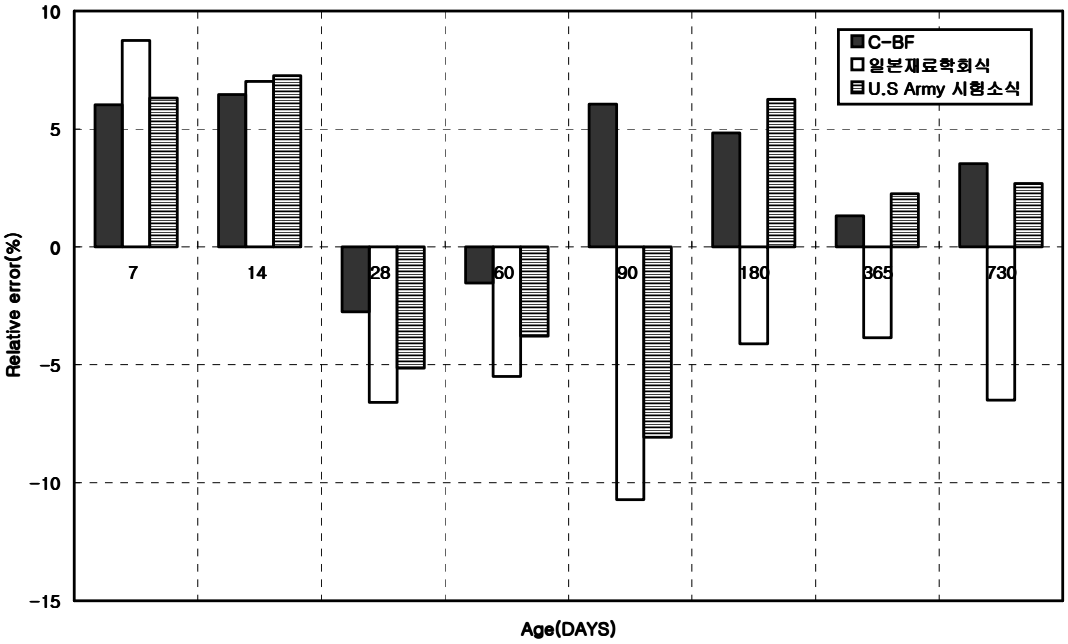
타났고, 재령이 경과할수록 일본재료학회식은 0.1%~31.0%로, U.S Army 시험소식은 2.2%~34.0%로, 본 연구의 추정식은 0.5%~11.6%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



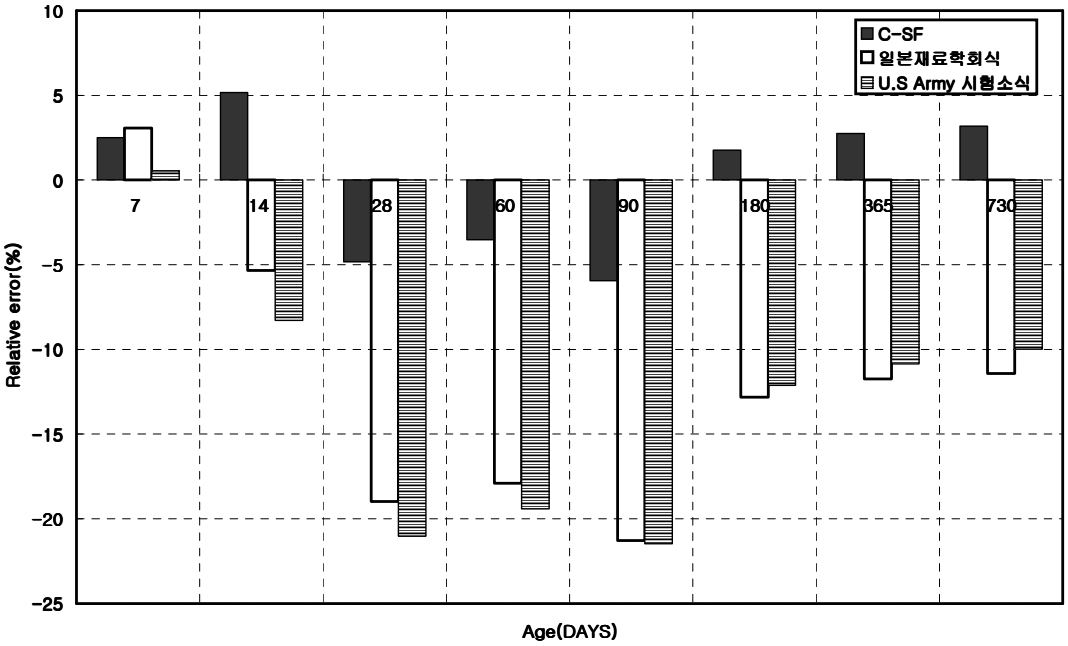
[그림 6.4] FA 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.5]와 같으며 재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 2.8%, 일본재료학회식은 6.6%, U.S Army 시험소식은 5.14%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 낮게 나타났다.

재령의 경과에 따라 일본재료학회식은 3.9%~10.7%로, U.S Army 시험소식은 3.8%~8.1%로, 본 연구의 추정식은 1.3%~6.5%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



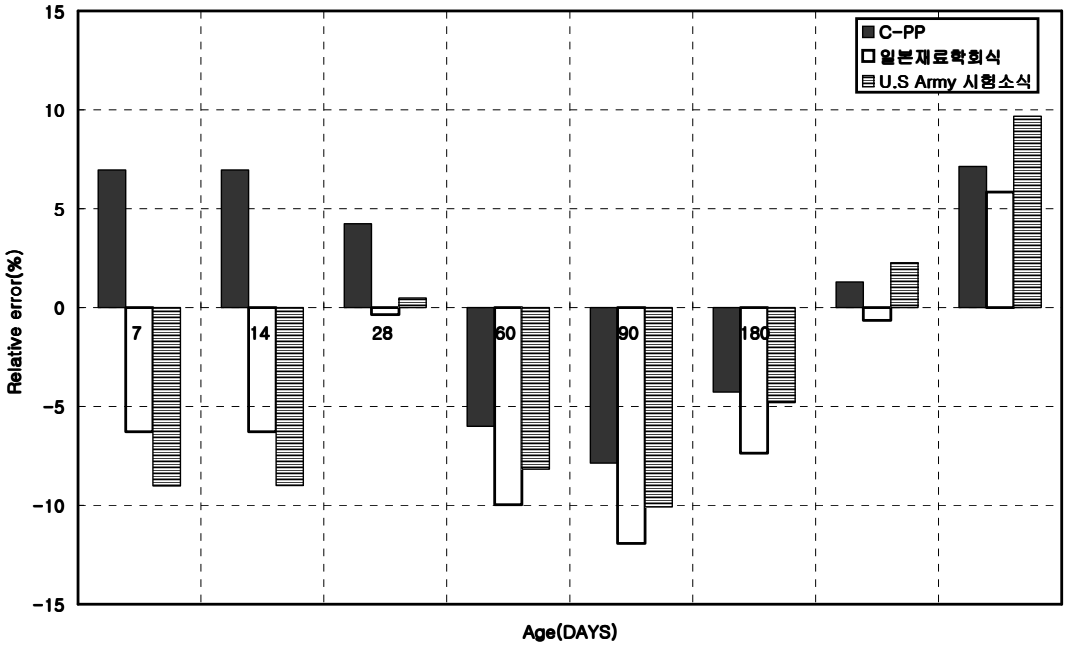
[그림 6.5] BF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율



[그림 6.6] SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

SF 치환 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.6]과 같으며 재령에 따른 기존제안식과 본 연구의 추정식 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 4.8%, 일본재료학회식은 18.67%, U.S Army 시험소식은 21.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 낮게 나타났다.

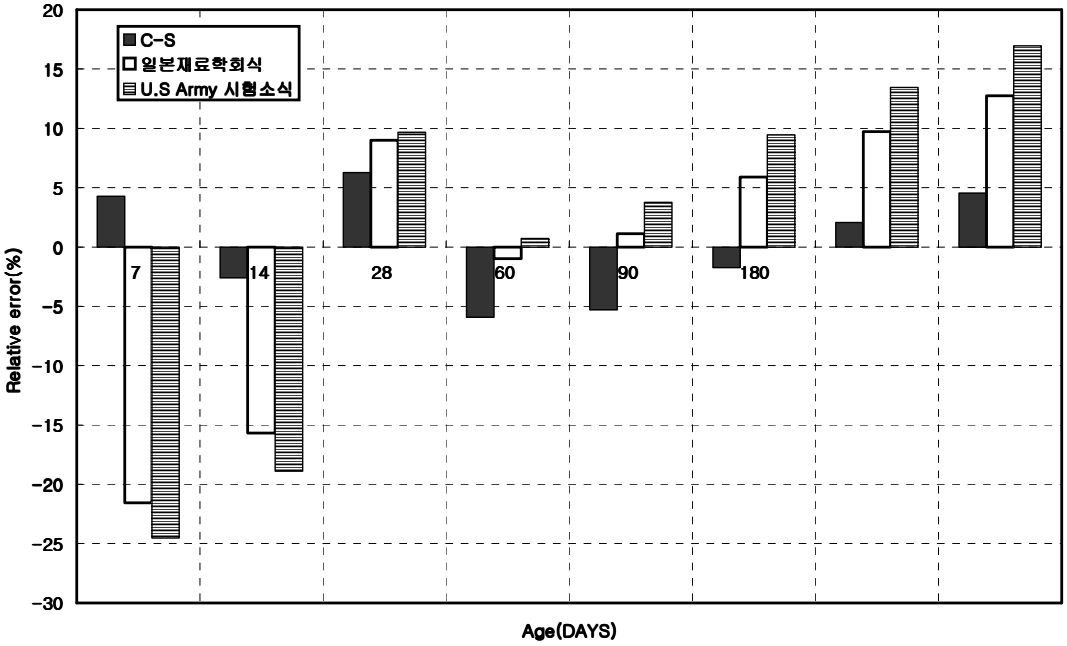
재령의 경과에 따라 일본재료학회식은 3.1%~21.3%로, U.S Army 시험소식은 0.5%~21.5%로, 본 연구의 추정식은 1.8%~6.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



[그림 6.7] PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

PP 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.7]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 4.3%, 일본재료학회식은 0.4%, U.S Army 시험소식은 0.5%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 높게 나타났으나, 재령이 경과 따라 일본재료학회식은 0.7%~11.9%로, U.S Army 시험소식은 0.5%~10.1%로, 본 연구의 추정식은 1.3%~7.9%로 본 연구의 추정식이

기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



[그림 6.8] S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

S 혼입 콘크리트의 반발경도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.8]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 6.3%, 일본재료학회식은 9.0%, U.S Army 시험소식은 9.7%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 낮게 나타났다.

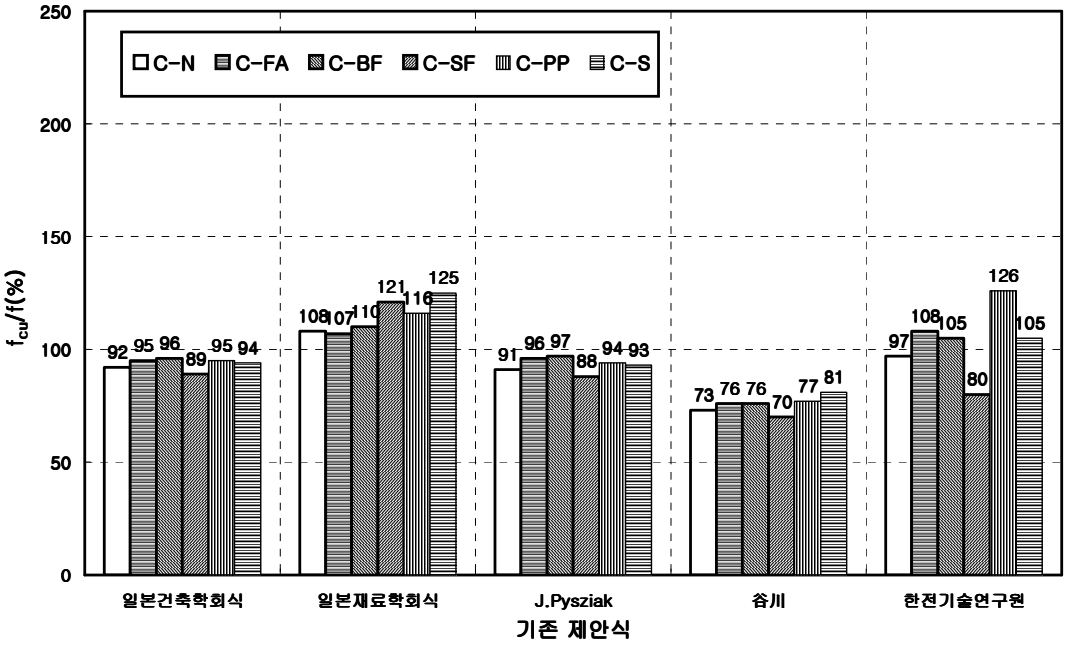
재령의 경과에 따라 일본재료학회식은 1.0%~21.6%로, U.S Army 시험소식은 0.7%~24.5%로, 본 연구의 추정식은 1.7%~6.3%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.

6.2 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

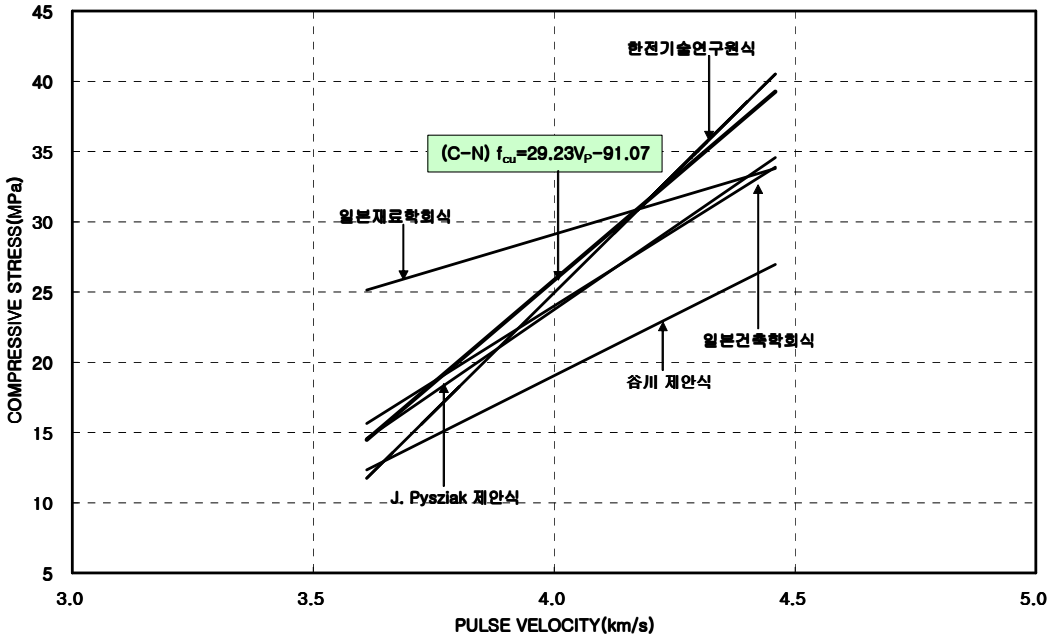
초음파속도법에 이용한 기존 제안식에 본 연구에 의한 시험체의 초음파속도를 적용했을 경우, 일본건축학회식은 89%~96%, 일본재료학회식은 107%~121%, J.Pysziak의 제안식은 88%~97%, 谷川의 제안식은 73%~76% 정도, 한전기술연구원식은 80%~108% 정도 파괴압축강도와 일치를 보였으며, 파괴압축강도와 4%~11% 차이를 보인 일본건축학회식과 3%~12% 차이를 보인 J.Pysziak의 제안식이 파괴 압축강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식으로 나타났다.

기존 제안식 중 파괴 압축강도와 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식, J.Pysziak의 제안식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 전반적으로 기존 제안식보다 본 연구 추정식의 오차율이 감소하여 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

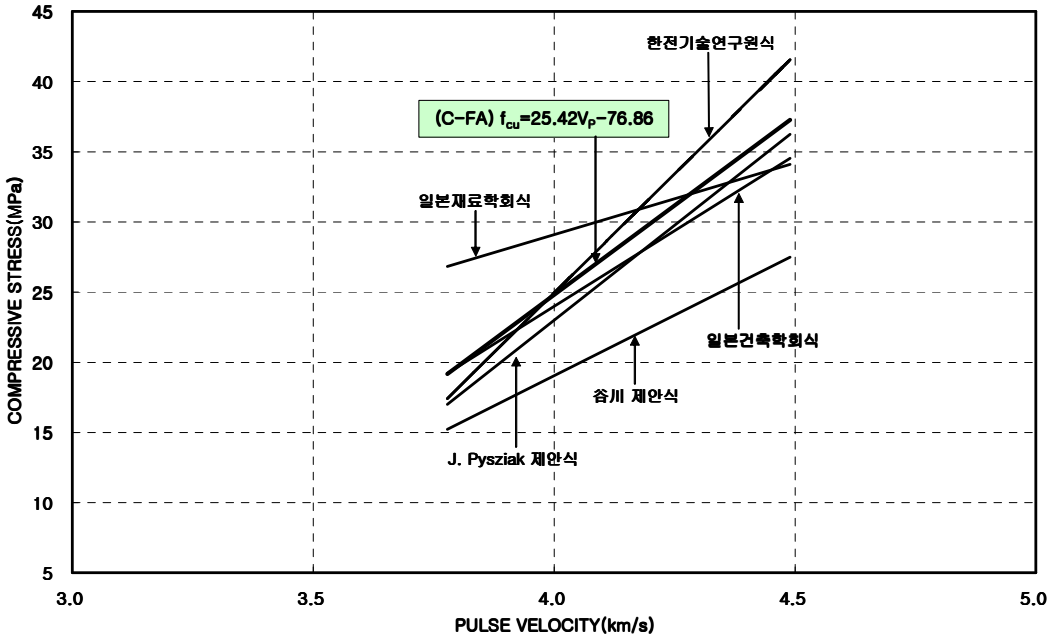
초음파속도에 의한 기존 제안식과 본 연구에 의한 추정식의 비교는 [그림 6.9]~[그림 6.10]과 같다.



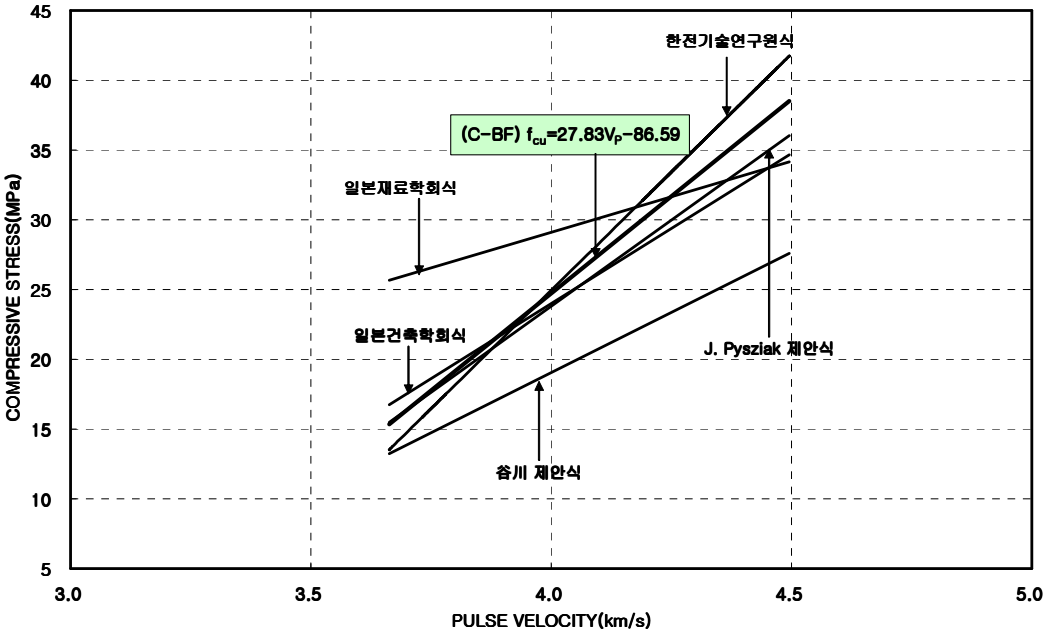
[그림 6.9] 초음파속도법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교



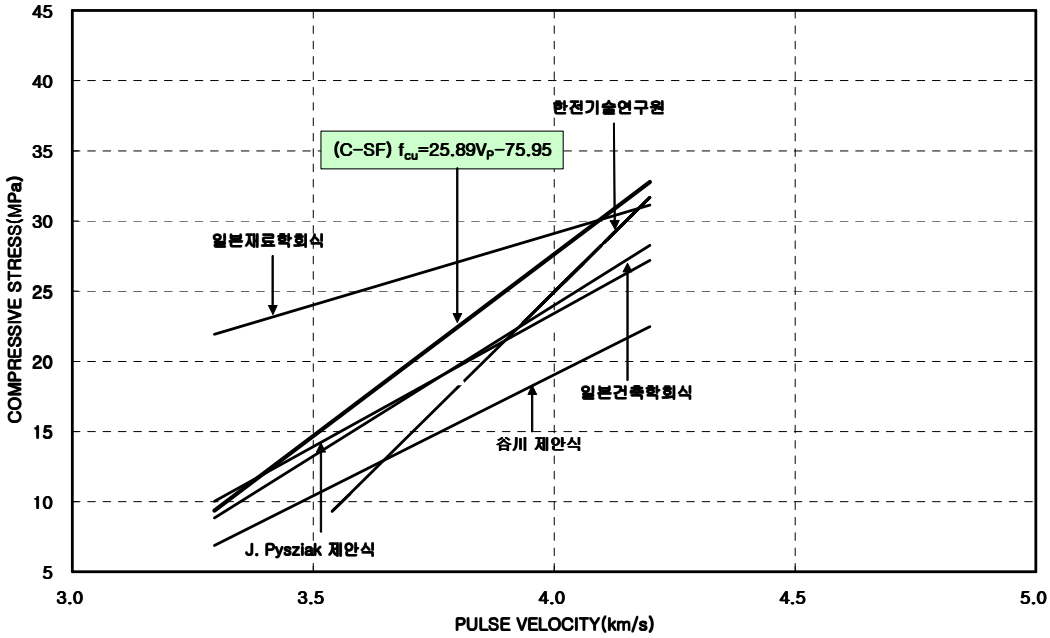
(a) 보통콘크리트



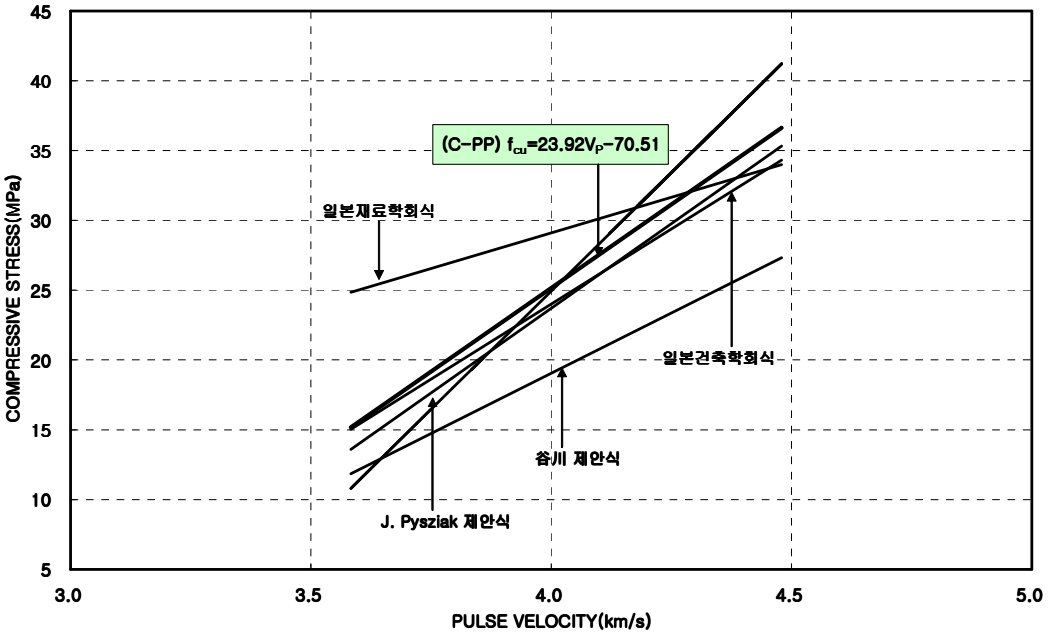
(b) FA 치환 콘크리트



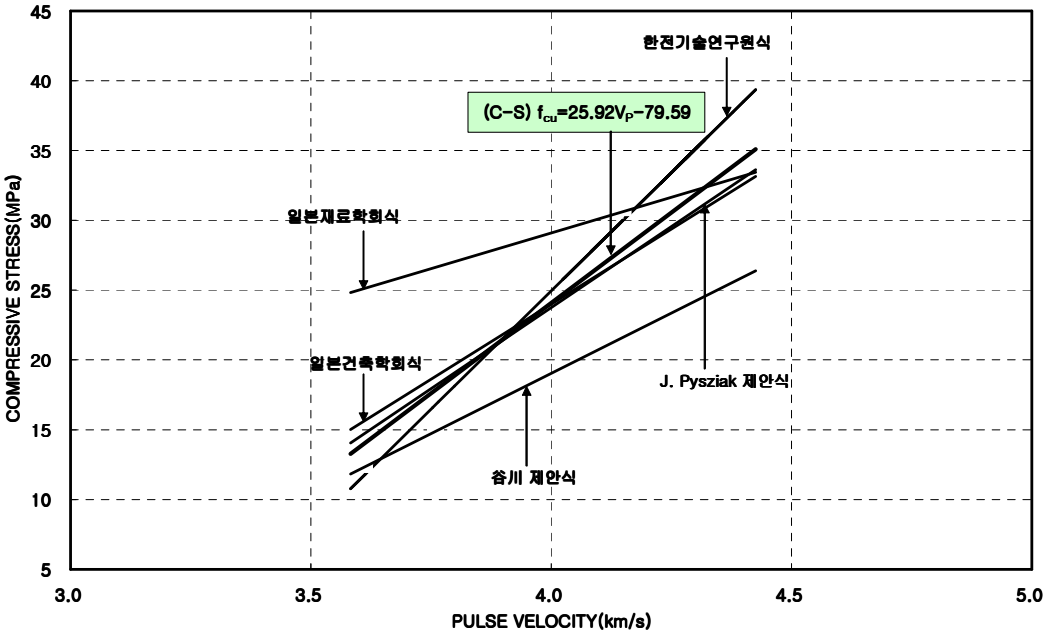
(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트



(e) PP 혼입 콘크리트

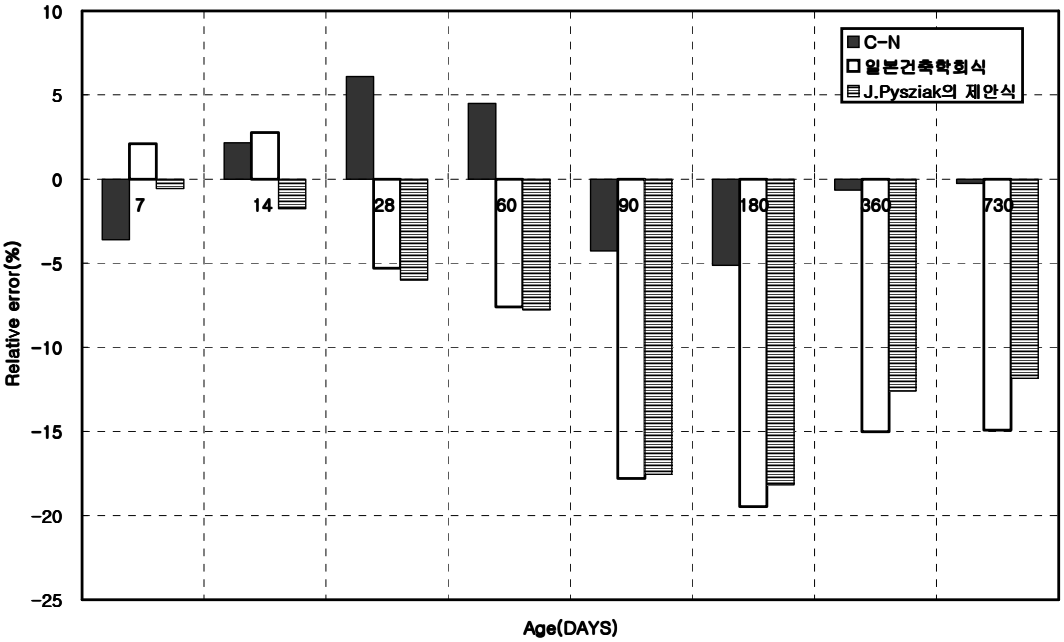


(f) S 혼입 콘크리트

[그림 6.10] 시험체별 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.11]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 6.1%, 일본건축학회식은 5.3%, J.Pysziak의 제안식은 6.0%로 다소 비슷한 오차율을 보였다.

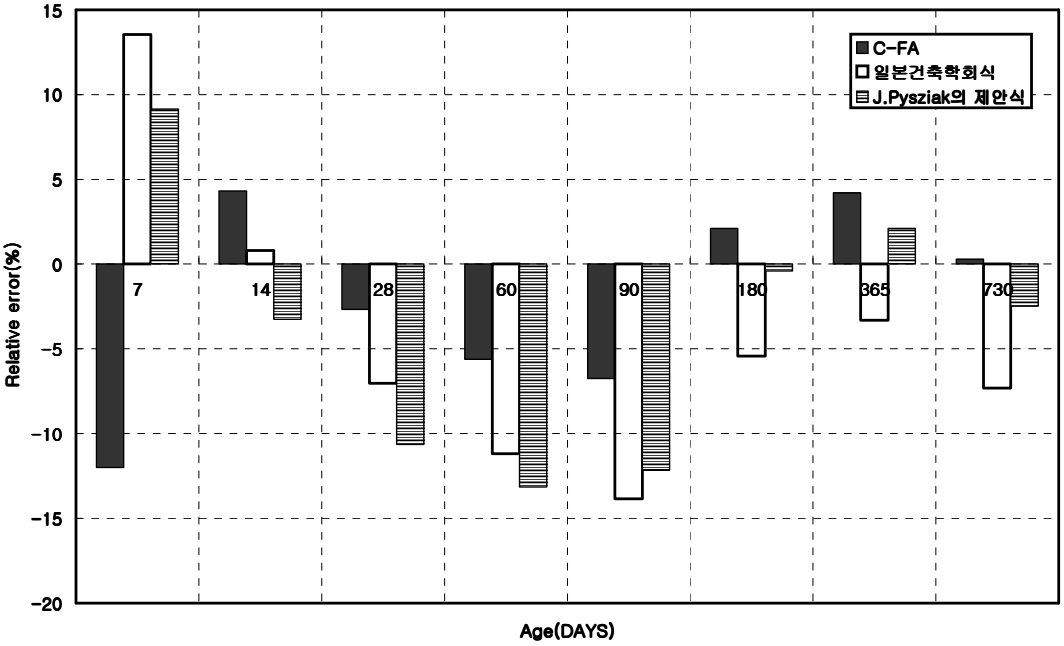
재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 2.1%~19.5%로, J.Pysziak의 제안식은 0.6%~18.2%로, 본 연구의 추정식은 0.3%~6.1%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



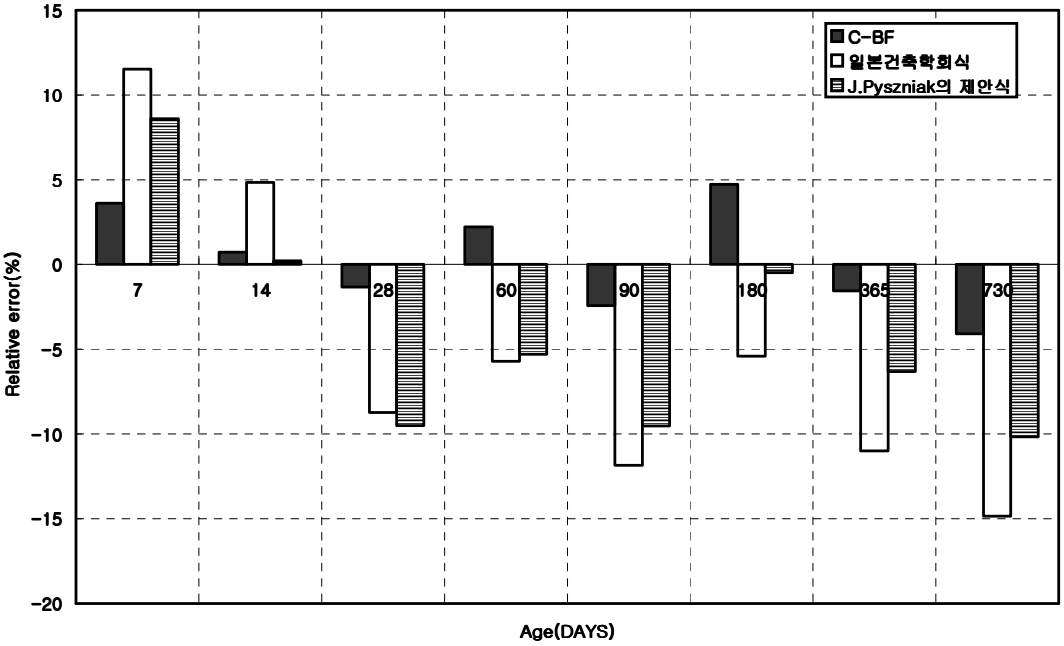
[그림 6.11] 보통 콘크리트 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

FA 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.12]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 2.7%, 일본건축학회식은 7.0%, J.Pysziak의 제안식은 10.6%로 본 연구의 추정식의 오차율이 낮게 나타났다.

재령잉 경과 따라 일본건축학회식은 8.0%~13.7%로, J.Pysziak의 제안식은 0.4%~13.2%로, 본 연구의 추정식은 0.3%~12.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.



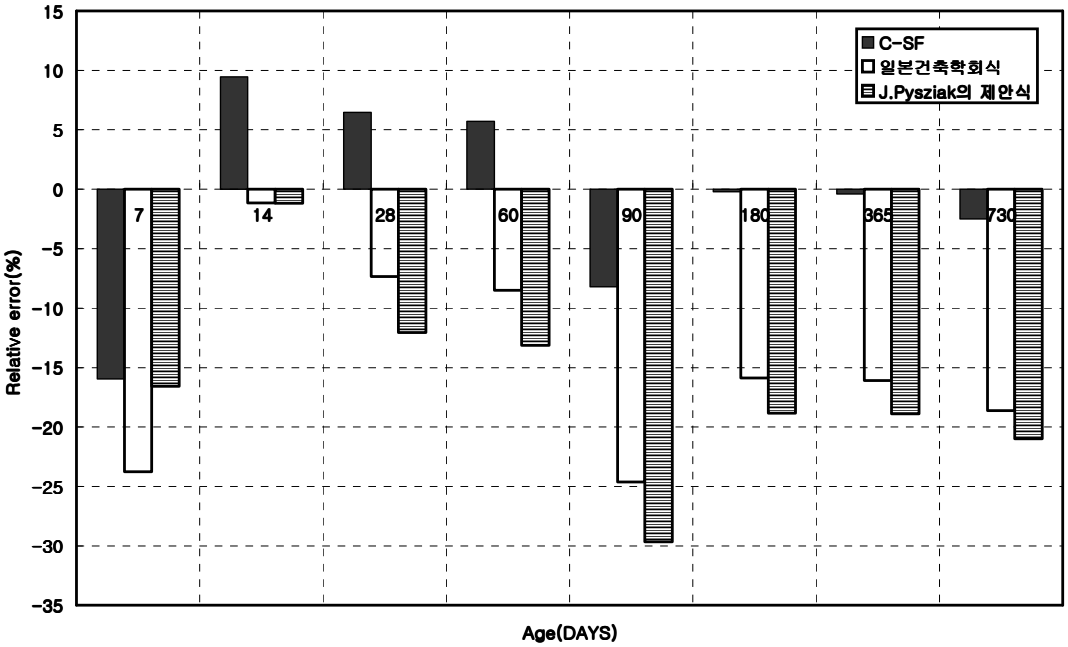
[그림 6.12] FA 치환 콘크리트 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율



[그림 6.13] BF 치환 콘크리트 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

BF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.13]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 1.3%, 일본건축학회식은 8.7%, J.Pysziak의 제안식은 9.5%로 본 연구 추정식의 오차율이 낮게 나타났다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 4.8%~11.9%로, J.Pysziak의 제안식은 0.2%~10.2%로, 본 연구의 추정식은 0.7%~4.7%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하였다.

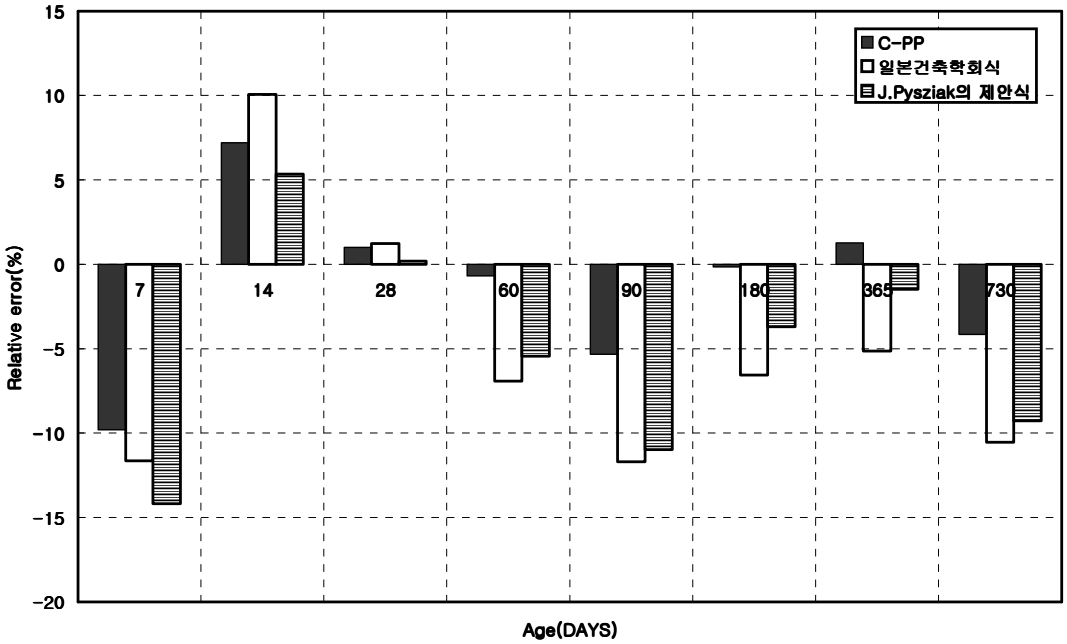


[그림 6.14] SF 치환 콘크리트 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

SF 치환 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.14]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 6.5%, 일본건축학회식은 7.3%, J.Pysziak의 제안식은 12.1%로 본 연구 추정식의 오차율이 낮게 나타났다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 1.2%~23.8%로, J.Pysziak의 제안식은 1.2%~29.7%로, 본 연구의 추정식은 0.2%~16.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안

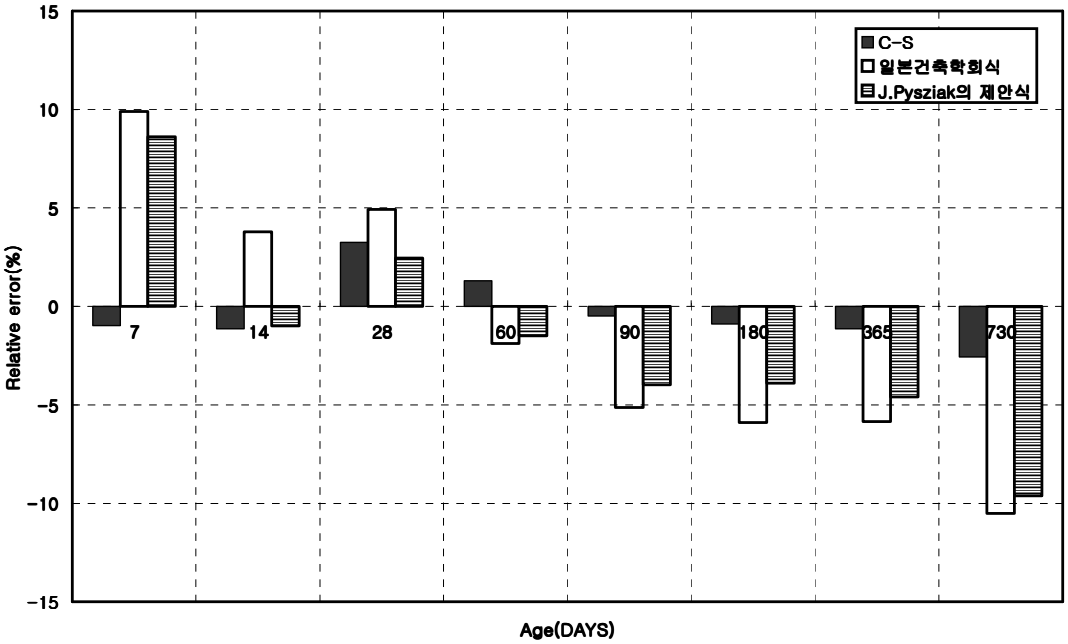
식보다 오차율이 감소하였다.



[그림 6.15] PP 혼입 콘크리트 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

PP 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.15]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구 추정식은 1.0%, 일본건축학회식은 1.2%, J.Pysziak의 제안식은 0.2%로 모든 식이 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 1.2%~11.7%로, J.Pysziak의 제안식은 0.2%~14.2%로, 본 연구의 추정식은 0.7%~9.8%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.



[그림 6.16] S 혼입 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

S 혼입 콘크리트의 초음파속도법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.16]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구 추정식은 3.3%, 일본건축학회식은 4.9%, J.Pysziak의 제안식은 2.5%로 모든 제안식이 비슷한 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 3.8%~10.5%로, J.Pysziak의 제안식은 1.0%~9.6%로, 본 연구의 추정식은 0.5%~3.3%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

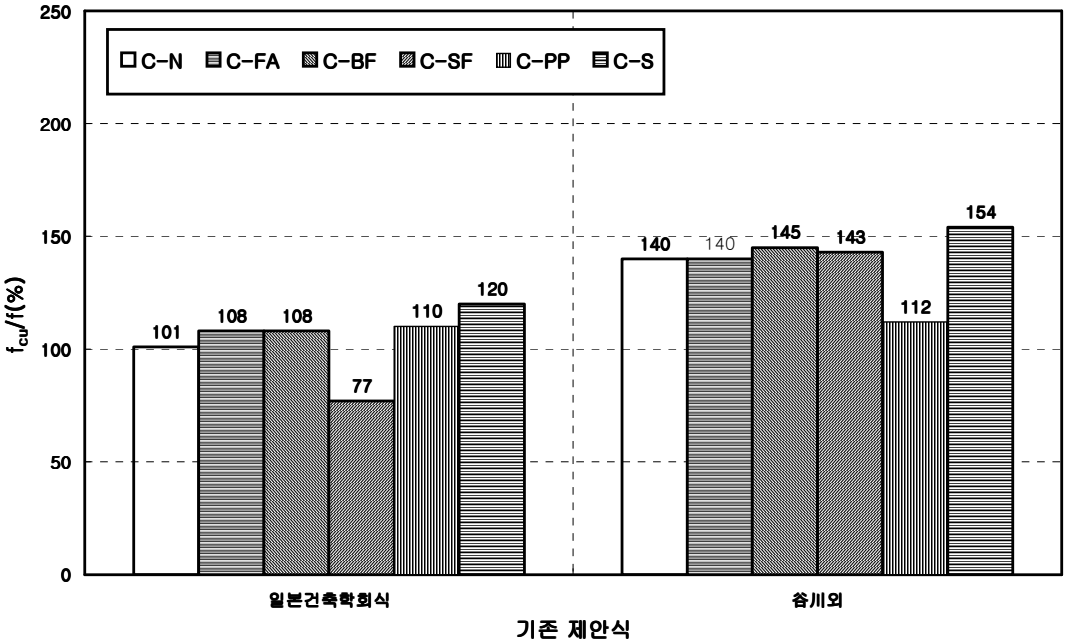
6.3 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

복합법에 이용한 기존 제안식에 본 연구에 의한 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트의 반발경도와 초음파속도를 적용했을 경우, 일본건축학회식은 77%~108%, 谷川 제안식은 140%~145% 정도 파괴강도와 일치를 보였으며, 기존 제안식 중 실리카흄 시험체를 제외한 나머지 시험체에서 1%~8%정도 차이를 보인 일본건축학회식이 파괴강도와 가장 비슷한 경향을 보인 제안식으로 나타났다.

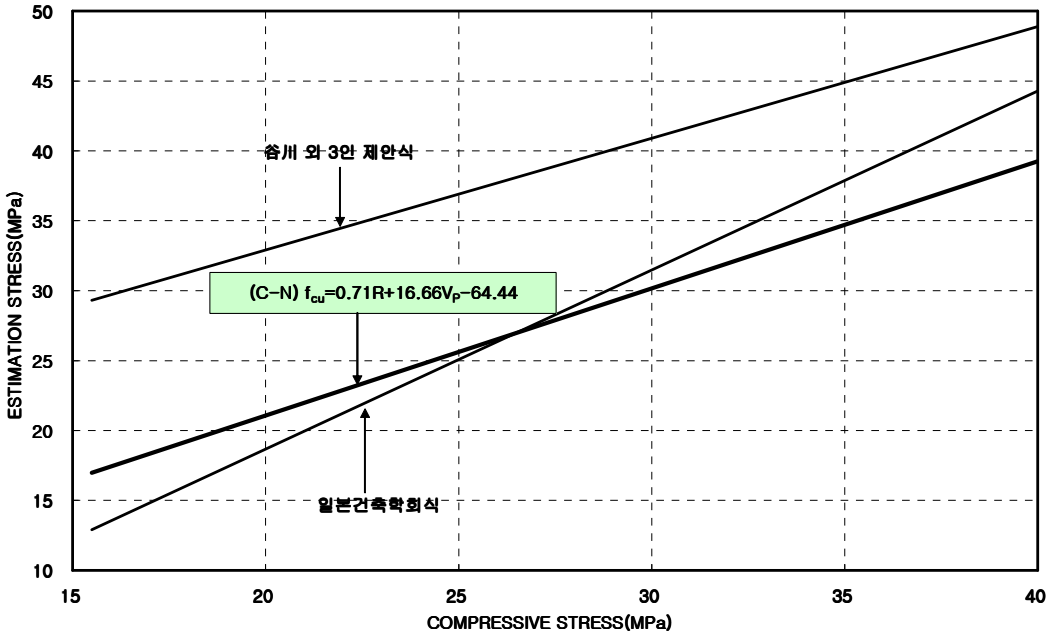
기존 제안식 중 파괴강도와 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 전반적으로 기존 제안식보다 본 연구 추정식의 오차율이 감소하여, 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

위의 결과를 통해 혼화재를 사용한 콘크리트에 기존 제안식을 사용할 경우, 반발경도법은 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식을, 초음파속도법은 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식을, 복합법은 일본건축학회식을 사용하는 게 바람직할 것으로 사료된다.

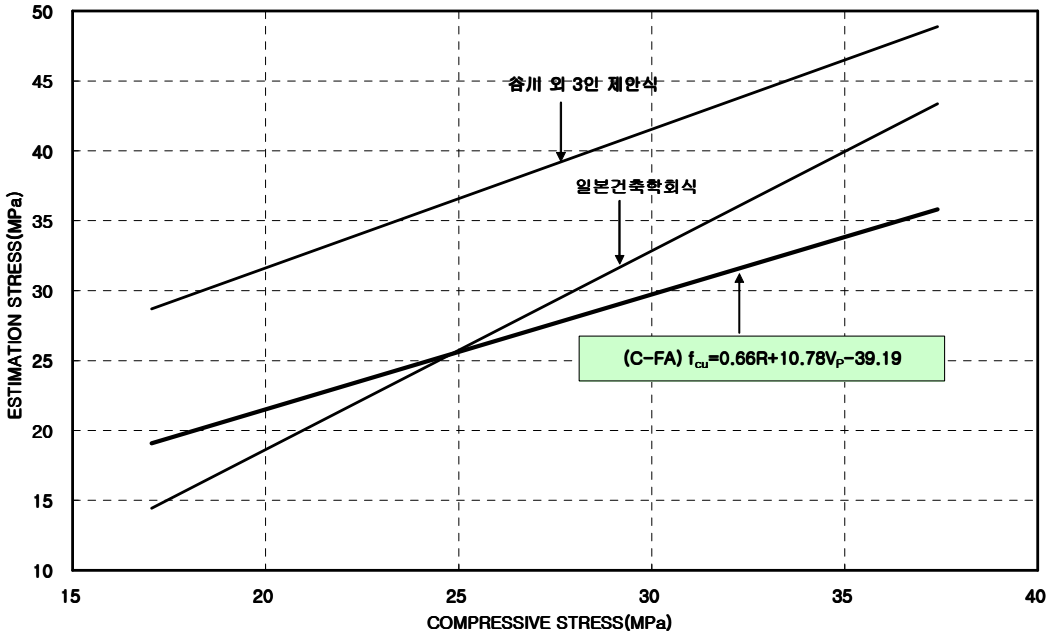
복합법에 의한 기존 제안식과 본 연구에 의한 추정식의 비교는 [그림 6.17]~[그림 6.18]과 같다.



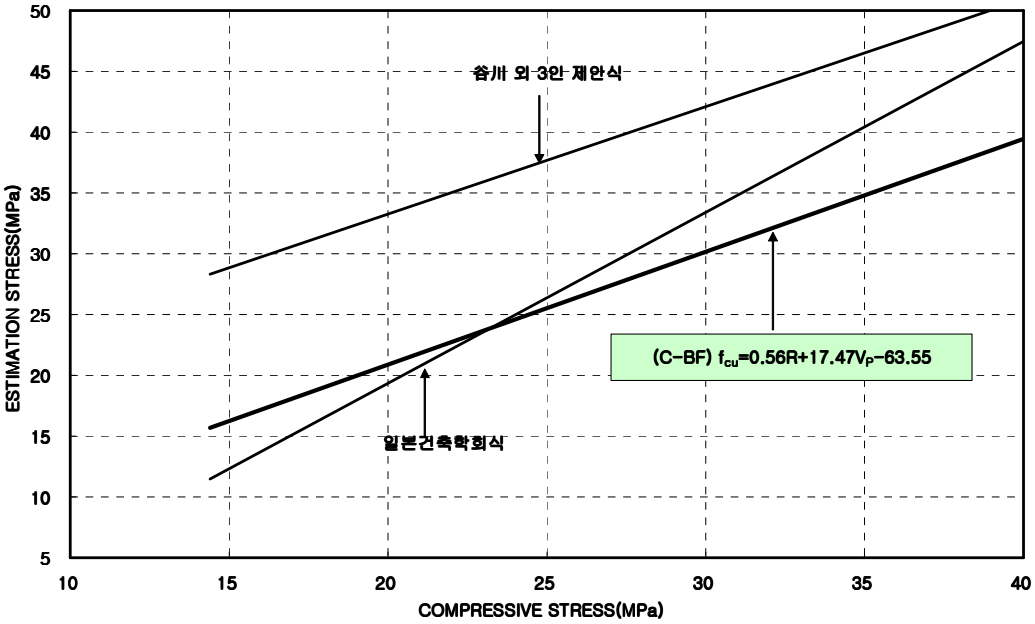
[그림 6.17] 복합법에 의한 기존 제안식의 추정강도와 파괴강도 비교



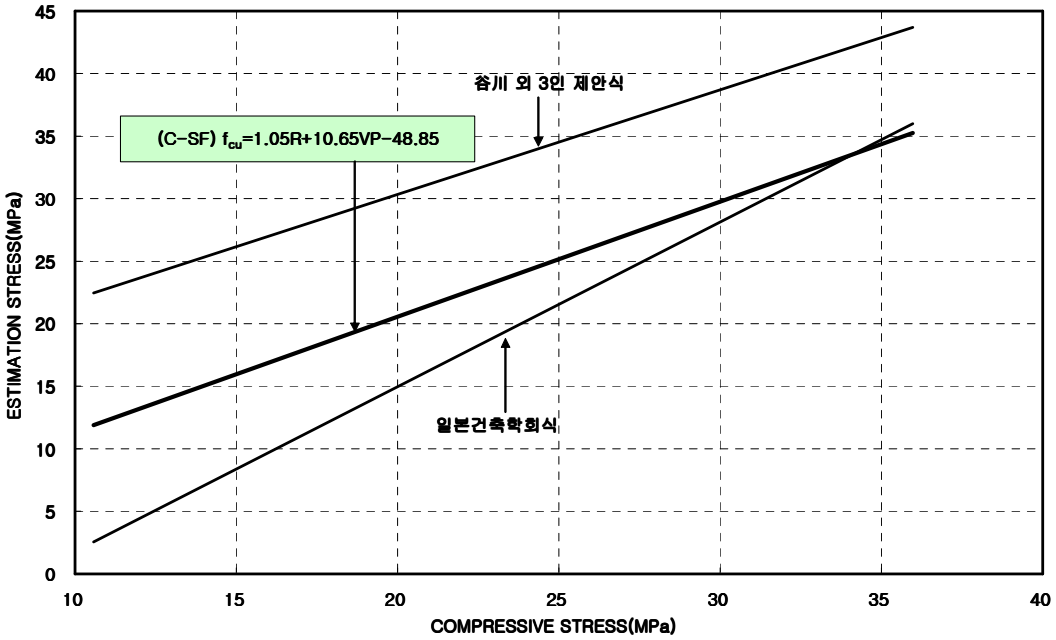
(a) 보통콘크리트



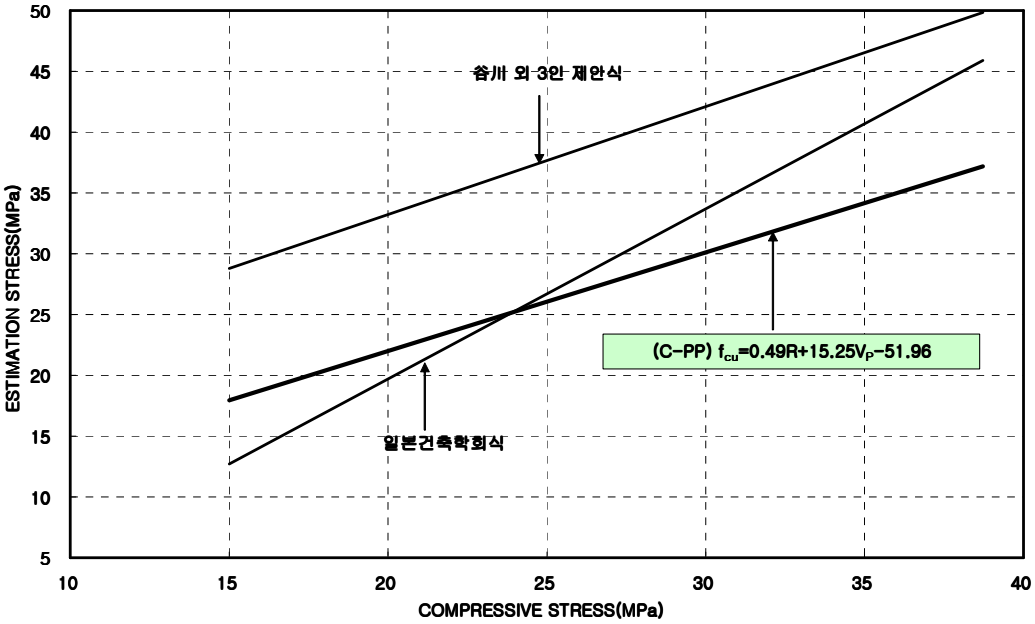
(b) FA 치환 콘크리트



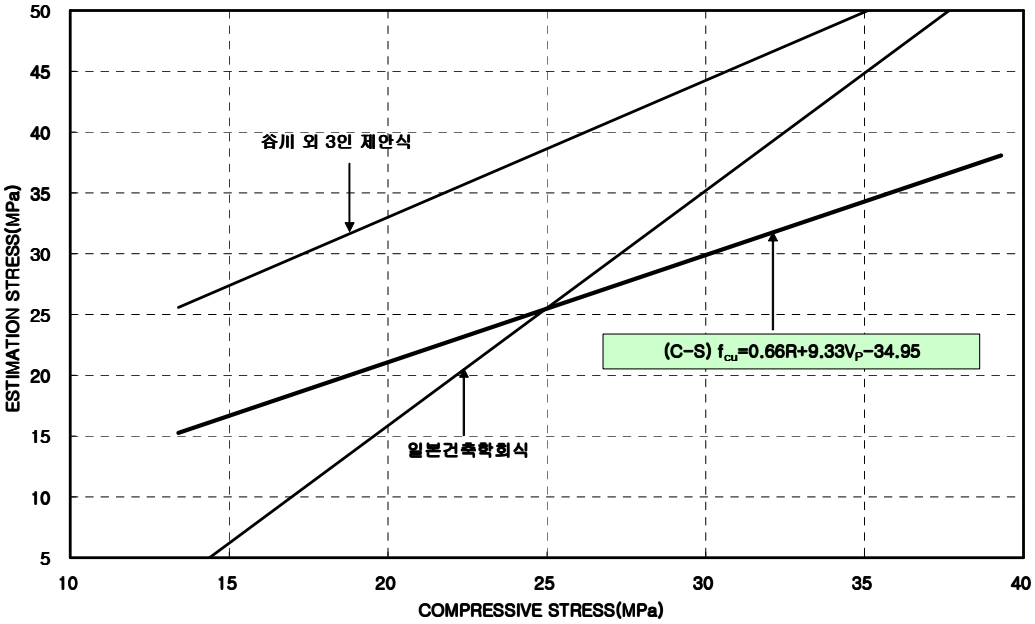
(c) BF 치환 콘크리트



(d) SF 치환 콘크리트



(e) PP 혼입 콘크리트



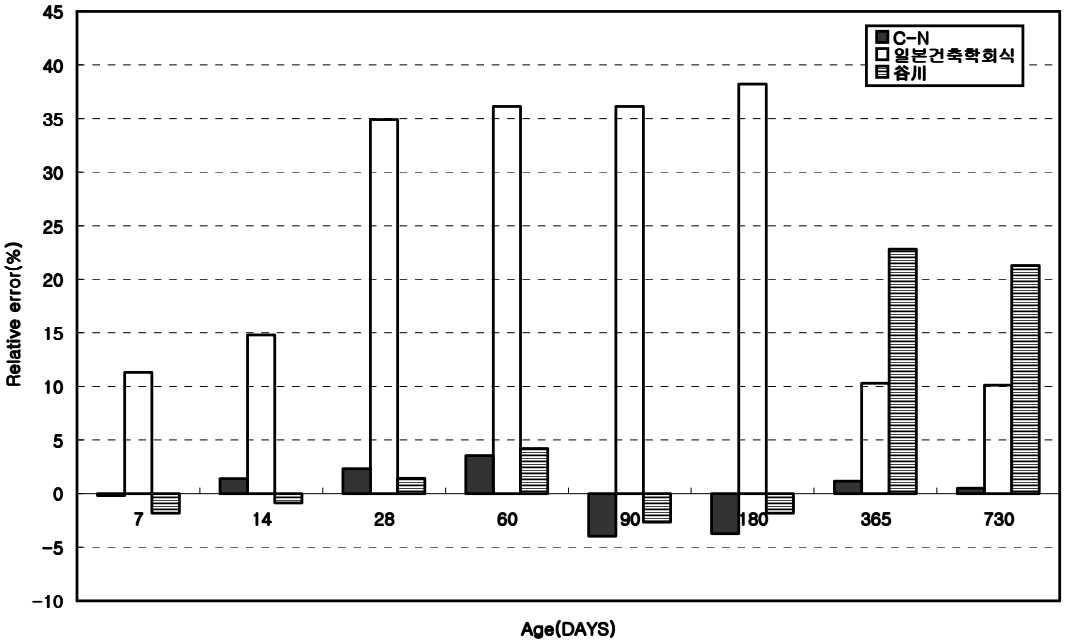
(f) S 혼입 콘크리트

[그림 6.18] 시험체별 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식 비교

보통 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.19]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 2.3%, 일본건축학회식은 34.9%, 谷川 제안식은 26.2%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 10.1%~36.1%, 谷川 제안식은 19.9%~44.4%로 본 연구의 추정식은 0.2%~4.0%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

보통 콘크리트의 복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 반발경도법보다는 0.8% 정도, 초음파속도법보다는 52%정도 복합법의 오차율이 감소하였다.

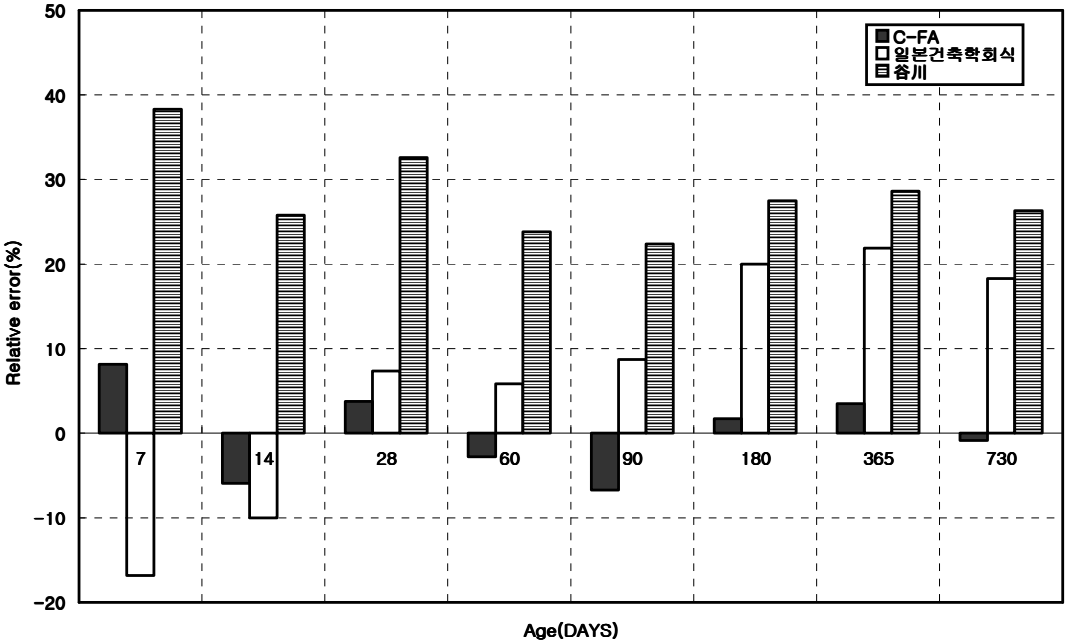


[그림 6.19] 보통 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

FA 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.20]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 3.75%, 일본건축학회식은 7.36%, 谷川 제안식은 32.57%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 5.9%~21.9%, 谷川 제안식은 25.8%~38.3%로 본 연구의 추정식은 0.9%~8.1%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 반발경도법보다는 최대 44% 정도, 초음파속도법보다는 48%정도 복합법의 오차율이 감소하였다.

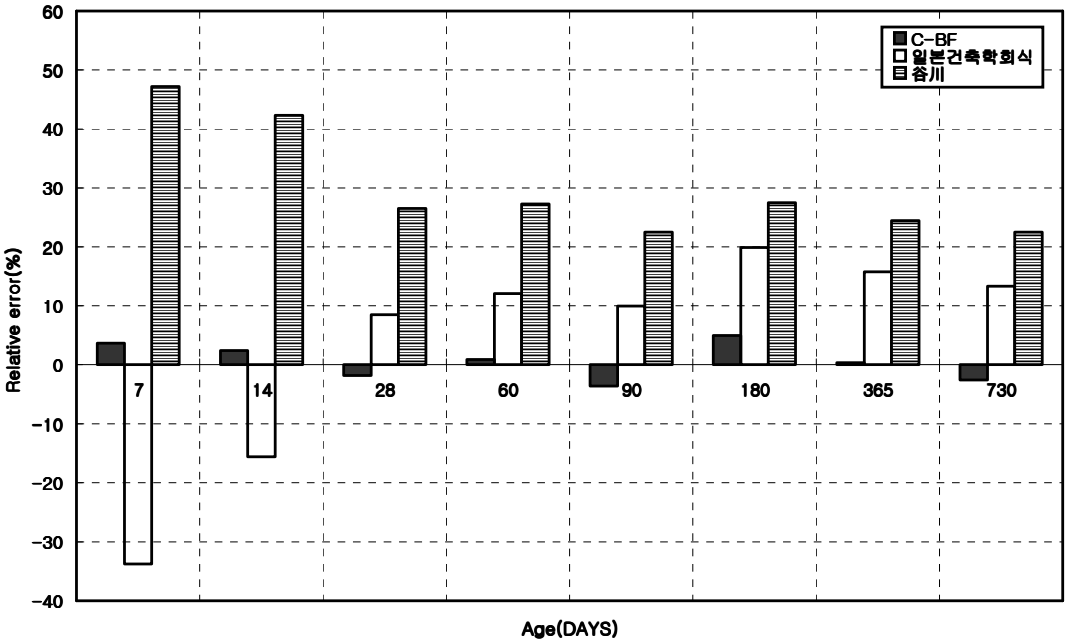


[그림 6.20] FA 치환 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

BF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.21]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 28일에 본 연구의 추정식은 1.9%, 일본건축학회식은 8.47%, 谷川 제안식은 26.5%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 8.5%~33.8%, 谷川 제안식은 22.5%~47.2%로 본 연구의 추정식은 0.9%~8.1%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 반발경도법보다는 최대 29% 정도, 초음파속도법보다는 31%정도 복합법의 오차율이 감소하였다.



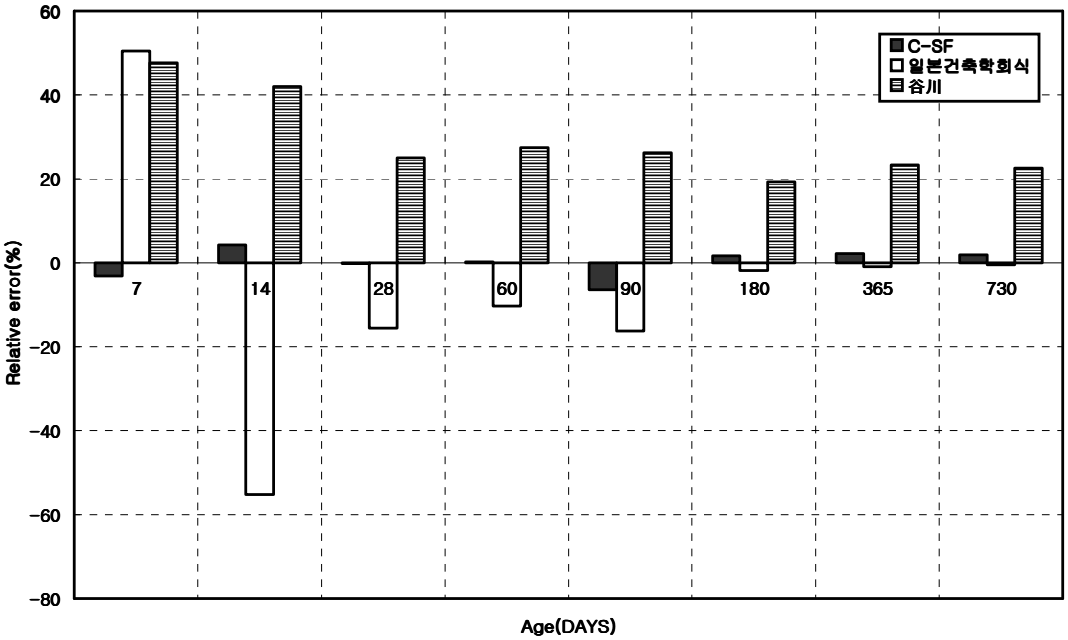
[그림 6.21] BF 치환 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

SF 치환 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.22]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 7일부터 14일까지의 기존 제안식의 오차율은 일본건축학회식은 50.5%~55.2%, 谷川 제안식은 42.25%~47.6% 정도로 추정강도와 파괴강도간에 50% 정도의 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

재령 28일에 본 연구의 추정식은 0.2%, 일본건축학회식은 15.6%, 谷川 제안식은 27.4%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 0.5%~55.2%, 谷川 제안식은 19.3%~47.6%로 본 연구의 추정식은 0.2%~6.4%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 복합법이 반발경도법보다는 최대 6% 정도 높게 나타났으며, 초음파속도법보다는 50%정도 복합법의 오차율이 낮게 나타났다.



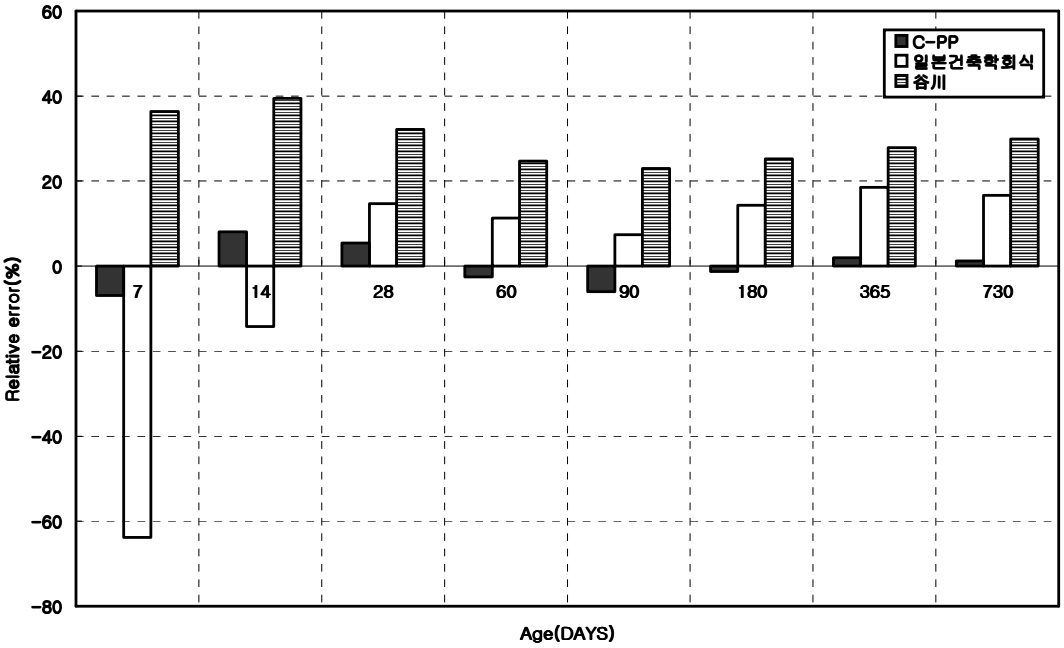
[그림 6.22] SF 치환 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

PP 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.23]과 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 7일부터 14일까지의 기존 제안식의 오차율은 일본건축학회식은 14.2%~63.8%, 谷川 제안식은 36.4%~39.4% 정도로 추정강도와 파괴강도간에 큰 오차율을 보였다.

재령 28일에 본 연구의 추정식은 5.5%, 일본건축학회식은 14.7%, 谷川 제안식은 32.2%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령에 경과에 따라 일본건축학회식은 7.4%~63.8%, 谷川 제안식은 23.0%~39.4%로 본 연구의 추정식은 1.2%~8.1%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 복합법이 반발경도법보다는 최대 1.3% 정도 높게 나타났으며, 초음파속도법보다는 21%정도 복합법의 오차율이 낮게 나타났다.



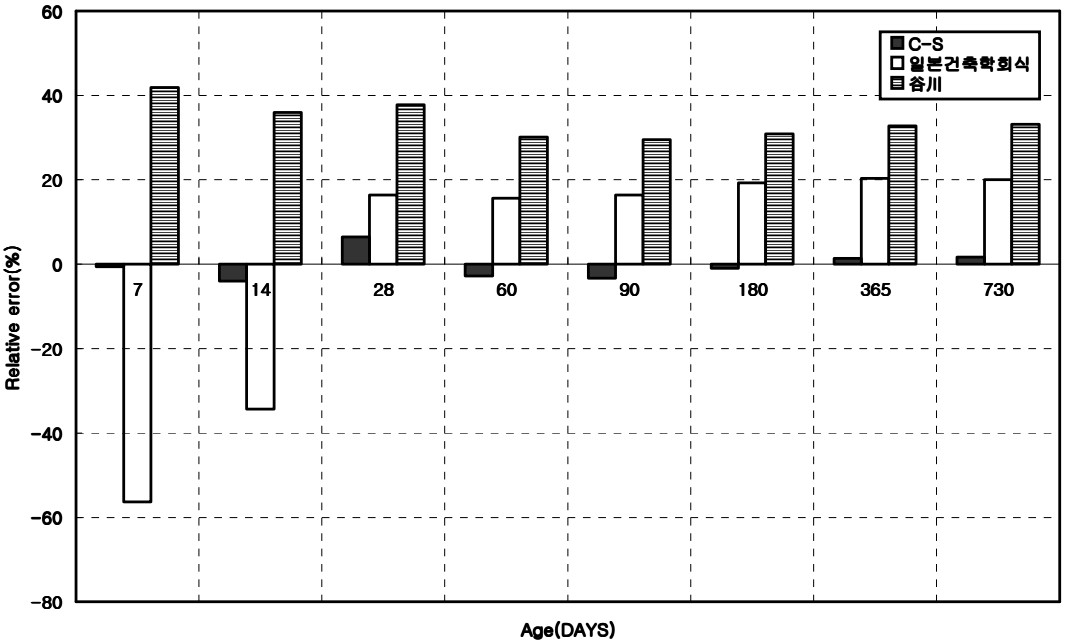
[그림 6.23] PP 혼입 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

S 혼입 콘크리트의 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율은 [그림 6.24]와 같으며 재령에 따른 기존 제안식과 본 연구의 추정식의 오차율을 비교했을 경우, 재령 7일부터 14일까지의 기존 제안식의 오차율은 일본건축학회식은 34.31%~56.3%, 谷川 제안식은 36.0%~41.9% 정도로 추정강도와 파괴강도간에 큰 오차율을 보였다.

재령 28일에 본 연구의 추정식은 6.4%, 일본건축학회식은 16.4%, 谷川 제안식은 37.8%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 낮은 오차율을 보였다.

재령의 경과에 따라 일본건축학회식은 15.6%~56.3%, 谷川 제안식은 29.5%~41.9%로 본 연구의 추정식은 0.6%~6.4%로 본 연구의 추정식이 기존 제안식보다 오차율이 감소하는 경향을 나타냈다.

복합법과 단일법의 오차율을 비교했을 경우, 복합법이 반발경도법보다는 최대 20% 정도, 초음파속도법보다는 30%정도 오차율이 낮게 나타났다.



[그림 6.24] S 혼입 콘크리트 복합법에 의한 기존 제안식과 추정식의 오차율

6.4. 소결

1) 반발경도법에 의해서 기존 제안식 중 파괴강도와 추정강도가 가장 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식과 U.S Army 시험소식을 본 연구의 추정식과 비교했을 경우, 본 연구의 추정식과의 오차율을 비교해보면, 재령 초기와 재령 60일부터 90일까지의 기존 제안식의 오차율보다 본 연구의 추정식의 오차율이 0.3%~15.5% 정도 감소를 보였으며, 본 연구의 추정식이 적합도가 높은 것으로 판단된다.

2) 초음파속도법에 의해서 기존 제안식중 파괴강도와 비슷한 경향을 보인 일본건축학회식, J.Pysziak의 제안식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 전반적으로 기존 제안식보다 본 연구 추정식의 오차율이 0.6%~18.6% 정도 감소하여, 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

3) 복합법에 기존 제안식과 본연구의 추정식을 비교했을 경우, 일본건축학회식과 谷川식 모두 다소 큰 오차율을 보였으며, 전반적으로 기존 제안식보다 본 연구 추정식의 오차율이 0.6%~34.2% 정도로 감소하여, 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

4) 위의 결과를 통해 혼화재를 사용한 콘크리트에 기존 제안식을 사용할 경우, 반발경도법은 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식을, 초음파속도법은 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식을, 복합법은 일본건축학회식을 사용하는것이 다소 바람직할 것으로 사료되며, 보다 정확한 강도를 추정하기 위해서는 본 연구의 추정식을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Ⅶ. 재령 보정계수의 적용에 따른 추정

콘크리트 강도는 일반적으로 재령의 경과에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 강도는 콘크리트의 제반물성에 의해 좌우되며, 재료자체의 불균질성과 변동성으로 인해 정확한 추정이 곤란하다.

비파괴 시험법은 이러한 강도 증가에 따른 측정값의 변화를 이용하는 방법으로, 특정부위에만 한정된 실험을 통해 압축강도와의 상관성을 이용하여 추정하기 때문에 정확한 추정이 어려워 두가지 이상의 비파괴시험법을 조합한 복합비파괴 시험법을 통해 추정하고 있다. 그러나 단일법 경우 재령이 경과할수록 설계기준강도 변동성에 대해 민감하게 대응하지 못하기 때문에 상관성이 저하되면 불가피하게 오차가 발생하게 된다.

이러한 오차율은 비파괴시험법 자체만으로는 감소시키기 어려우며, 이에 따라 각각의 변동성에 대한 보정이 필요하다.

본 연구에서는 재령경과에 따라 발생하기 쉬운 콘크리트의 열화현상 등에 따라 강도 변동에 대한 보정을 각 재령별로 실시하고 보정계수의 적용에 따른 추정식의 수정결정계수를 비교・검토하여 추정식의 신뢰성을 높이고자 하였다.

단일법의 경우 재령계수는 <식 7.1>~<식 7.2>와 같이 각 시험체별 각 재령의 추정강도를 구한 후 재령 28일 강도에 대한 비로 재령계수를 산정한 결과이다.

단일법에 대한 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트 강도 추정식의 재령 보정계수는 <표 7.1>과 같으며, 재령 28일을 1.0이라 할 때 재령 7일 및 14일의 재령계수는 이보다 크게 나타났고, 재령 28일 이후에서는 재령 28일 강도보다 높게 나타나 1.0 보다 감소하는데, 이는 콘크리트의 표면탄산화로 인해 강도의 증진 없이도 반발경도 및 초음파속도가 증가하기 때문으로 사료된다.

$$f_{cu} = (k_1 R + C) \times \beta_n \qquad \text{<식 7.1>}$$

$$f_{cu} = (k_2 V_P + C) \times \beta_n \qquad \text{<식 7.2>}$$

여기서 f_{cu} : 추정강도, R : 반발경도, V_P : 초음파속도, β_n : 재령 보정계수,
k_1, k_2, C : 시험상수

<표 7.1> 시험체별 단일법의 재령 보정계수

종 류 \ 재 령		7	14	28	60	90	180	365	730
보 통 콘크리트	반발경도법	1.27	1.24	1.00	0.95	0.93	0.90	0.88	0.88
	초음파속도법	1.16	1.12	1.00	1.00	0.99	0.97	0.97	0.97
FA 치환 콘크리트	반발경도법	1.38	1.26	1.00	0.98	0.93	0.86	0.86	0.86
	초음파속도법	1.06	0.01	1.00	0.98	0.94	0.91	0.91	0.91
BF 치환 콘크리트	반발경도법	1.37	1.26	1.00	0.99	0.99	0.88	0.88	0.88
	초음파속도법	1.15	1.12	1.00	0.99	0.97	0.95	0.95	0.95
SF 치환 콘크리트	반발경도법	1.28	1.20	1.00	0.99	0.90	0.86	0.85	0.82
	초음파속도법	1.19	1.11	1.00	0.99	0.98	0.96	0.96	0.95
PP 혼입 콘크리트	반발경도법	1.30	1.30	1.00	0.99	0.96	0.92	0.88	0.86
	초음파속도법	1.15	1.10	1.00	0.98	0.98	0.96	0.95	0.95
S 혼입 콘크리트	반발경도법	1.54	1.34	1.00	0.95	0.90	0.85	0.85	0.85
	초음파속도법	1.14	1.09	1.00	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95

Ⅷ. 결 론

본 연구는 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트의 원주형 공시체와 코어채취용 부재 시험체를 제작하여 비파괴 시험과 파괴 시험을 통해 강도 추정식을 제안한 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

1) 파괴시험 및 비파괴시험 결과, 재령 28일에 설계기준강도 이상의 강도 발현을 보였으며, 보통 콘크리트는 재령 60일 이후부터는 강도가 떨어졌으나 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트의 강도는 90일 이후까지도 계속 증가하는 경향을 보였다.
   또한, PP 섬유 및 S 섬유는 기존의 연구와 본 연구을 통해 압축강도에는 거의 영향을 주지 않고 휨 및 인장강도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

2) 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 기존 제안식에 적용한 강도를 추정한 결과, 반발경도법의 경우 일본재료학회식과 U.S Army 시험소식이, 초음파속도법에서는 일본건축학회식과 J.Pysziak의 제안식이 파괴압축강도와 가장 비슷한 경향을 보였다.

3) 반발경도법의 경우 일본건축학회식은 파괴강도보다 26%~40% 정도 높게 추정되었고, 나머지 제안식은 2%~18% 정도 낮게 추정되었다. 초음파속도법의 경우 일본건축학회식은 보통 재령 60일까지는 파괴강도보다 4%~11% 정도 높게 추정되었으나 재령이 경과할수록 파괴강도보다 최대 15% 정도 낮게 추정되었으며 나머지 제안식은 거의 모든 재령에서 파괴강도보다 3%~27% 정도 낮게 추정되었다. 복합법의 경우는 모든 제안식이 파괴강도보다 24%~94% 정도 높게 추정되는 경향을 보였다.

4) 단일법과 반발경도와 초음파속도로 중회귀분석한 복합법을 비교했을 경우, 시험체별로 다소 차이는 있지만 초음파속도법보다 0.2%~11.0% 정도, 반발경도법보다는 0.2%~9.8% 정도 결정계수를 나타내 단일법보다는 복합법을 이용하면

보다 정확한 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

5) 기존 제안식과 본 연구 추정식의 오차율을 비교한 결과, 재령별로 다소 차이는 있지만 반발경도법에 의한 기존 제안식보다는 0.3%~15.5% 정도, 초음파속도법에 의한 기존제안식보다는 0.6%~18.6% 정도, 복합법에 의한 기존제안식보다는 0.6%~34.2% 정도로 기존의 제안식보다 본 연구의 추정식 오차율이 감소하여 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트에 사용이 바람직할 것으로 판단된다.

6) 혼화재 및 섬유를 사용한 콘크리트에 대해 기존의 보통콘크리트 제안식을 적용하면 오차율이 발생되므로, 본 연구에서는 혼화재와 섬유를 사용한 콘크리트에 대한 혼화재와 섬유의 종류와 비파괴 시험 위치에 따라 다음과 같은 추정식을 제안한다.

보통 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-N	f_{cu}=1.6R-25.43	0.953	0.897
	초음파속도법	C-N	f_{cu}=29.23V_P-91.07	0.943	0.887
복 합 법		C-N	f_{cu}=0.71R+16.66V_P-64.44	0.954	0.905

FA 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-FA	f_{cu}=1.07R-8.76	0.909	0.822
	초음파속도법	C-FA	f_{cu}=25.42V_P-76.86	0.895	0.796
복 합 법		C-FA	f_{cu}=0.66R+10.78V_P-39.19	0.921	0.840

BF 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-BF	f_{cu}=1.46R-23.09	0.961	0.921
	초음파속도법	C-BF	f_{cu}=27.83V_P-86.59	0.956	0.912
복 합 법		C-BF	f_{cu}=0.56R+17.50V_P-63.55	0.964	0.925

SF 치환 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-SF	f_{cu}=1.55R-22.96	0.946	0.892
	초음파속도법	C-SF	f_{cu}=25.89V_P-75.95	0.926	0.853
복 합 법		C-SF	f_{cu}=0.98R+10.58V_P-46.87	0.959	0.916

PP 섬유 혼입 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-PP	f_{cu}=1.16R-12.24	0.860	0.733
	초음파속도법	C-PP	f_{cu}=23.92V_P-70.51	0.884	0.775
복 합 법		C-PP	f_{cu}=0.49R+15.25V_P-51.96	0.900	0.800

S 섬유 혼입 콘크리트의 강도 추정식은 다음과 같다.

구 분		시험체명	추 정 식	상관계수 (CR)	결정계수 (CR^2)
단일법	반발경도법	C-S	f_{cu}=0.99R-8.07	0.931	0.863
	초음파속도법	C-S	f_{cu}=25.92V_P-79.59	0.911	0.826
복 합 법		C-S	f_{cu}=0.66R+9.33V_P-34.95	0.938	0.874

【참고 문헌】

1. 김정섭외 3인, “혼화재를 사용한 콘크리트의 비파괴 시험에 의한 강도 추정에 관한 연구”, 대한건축학회논문집 제22권 4호, pp. 111～118, 2006.4.
2. 김정섭외 3인, “혼화콘크리트 비파괴 강도 추정에 관한 연구”, 구조물진단학회논문집 제 9권 4호, pp. 217～226, 2005. 10.
3. 김판선외 4인, “혼화재를 사용한 콘크리트의 복합법 비파괴시험에 의한 강도 추정에 관한 연구” 대한건축학회 학술발표논문집, 제 25권 1호, pp 129～132, 2005. 10.
4. 신용석외 4인, “반발경도에 의한 혼화재를 혼입한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구” 대한건축학회 학술발표논문집, 제 24권 1호, pp 379～382, 2004.10.
5. 김정섭외 4인, “콘크리트 응력 추정에 따른 초음파속도와 반발경도의 상쇄효과에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 제12권 11호, pp. 201～210, 1996.11.
6. 김정섭외 4인, “현장 콘크리트 강도추정에 있어서 코어를 이용한 복합 비파괴 시험법에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 제13권 7호, pp. 209～221, 1997.07.
7. 김정섭외 3인, “혼화재를 활용한 콘크리트의 내구성 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권 2호, pp. 637～642, 1999.10.
8. 노운기, “콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴실험식에 관한 연구”, 단국대학교 석사학위논문, 2001.01.
9. 이승엽, “複合非破壞試驗法을 利用한 現場콘크리트의 壓縮强度 推定에 관한 實驗的 硏究(材齡 730日을 中心으로)”, 조선대학교 석사학위논문, 1998.08
10. 임창훈, “現場콘크리트 材齡에 따른 複合非破壞試驗法의 相殺效果에 관한 實驗的 硏究”, 조선대학교 석사학위논문, 1997.12.
11. 오승석, “현장콘크리트 강도추정을 위한 복합비파괴시험법의 실험적 연구”, 조선대학교 석사학위논문, 1996.12.
12. 권영웅외 2인, “슈미트 햄머 시험법에 의한 재령 180일이하 콘크리트의 압축강도식의 제안”, 한국구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 61～65, 2003.05.
13. 권영웅외 3인, “슈미트햄머 시험체에 의한 실존 콘크리트 구조체의 압축강도

추정식에 관한 연구", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 2002.11.
14. 권영웅외 2인, "슈미트햄머에 의한 콘크리트 구조체의 압축강도 추정식", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 65~70, 2003.10.
15. 한천구외 4인, "코어공시체 강도에 미치는 시멘트 종류 및 혼화재료의 영향", 대한건축학회 학술발표논문집 제 22권 2호, pp 335~338, 2002.10.
16. 한천구외 4인, "슈미트 햄머의 반발경도 및 초음파속도에 미치는 결합재의 영향", 대한건축학회 학술발표논문집 제 23권 1호, pp. 299~302, 2003.04.
17. 한천구외 4인, "코어공시체에 의한 콘크리트구조물의 압축강도 평가에 관한 문헌적 검토", 한국구조물진단학회 학술발표논문집, pp. 65~68, 2004.05.
18. 임서형외 1인, "초음파속도법에 의한 고강도 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구", 한국구조물진단학회논문집, pp. 123~130, 2001.07.
19. 한준회, "고로슬래그 콘크리트의 구조체 강도발현 성상에 관한연구", 한양대학교 석사학위논문, 2001.06.
20. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조물의 비파괴검사 및 안전진단", 기문당, 2001.04.
21. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서 해설", 기문당, 2003.05.
22. 한국표준과학연구원, "콘크리트 구조물 비파괴검사의 신뢰도 향상을 위한 관리체계 구축방안", 표준과학연구원, 1998.11.
23. 대한주택공사 부설 주택연구소, "비파괴 검사 활용기술 연구(Ⅰ)", 대한주택공사, 1998.07.
24. 한혁상, "복합비파괴검사법에 의한 콘크리트 강도평가와 그 응용", 한국비파괴검사학회 학술발표대회논문집, pp. 35~39, 1992.05
25. 시설안전기술공단, "콘크리트구조물의 비파괴검사에 의한 진단시험기준연구", 시설안전기술공단, 1997.12.
26. 과학기술처 한국표준연구소, "콘크리트 구조물에 대한 초음파 탐상법 개발", 과학기술처, 1986.06
27. 이승석외 1인, "비파괴검사기술의 최신 연구동향", 비파괴검사학회지, 2004.02
28. R. Jones "Non-destructive testing of Concrete", Cambridge university press,

1962

29. I. Facaoaru “Non-destructive testing of Concrete in Romania”, Architecture and city planning/Building research Institute, 1968

29. R. J Wheen, “Non-destructive testing of Concrete”, Building Science, Vol. 9, No.4, 1974

30. I. Facaoaru “Non-destructive testing of Concrete in Romania, Symposium on NDT of Concrete and timber”, Inst. of Civil engineer, Londin, 1970

31. ACI 318-89 ; Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.

32. KS F 2404, “현장에서 콘크리트의 압축 및 강도 시험체용 공시체를 제작하고 양생하는 방법”, 1995.

33. KS F 2405, “콘크리트 압축강도 시험방법”, 2001.

34. KS F 2730, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발 경도 시험 방법”, 2003

35. KS F 2731, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파 펄스 속도 시험 방법”, 2003

【부 록】

사진 *1.* 부재 시험체 바닥철근 배근 전경

사진 *2.* 부재 시험체 철근 배근 및 거푸집 제작 전경

사진 *3.* 슬럼프 테스트 전경

사진 *4.* 부재 시험체 콘크리트 부어넣기 후 전경

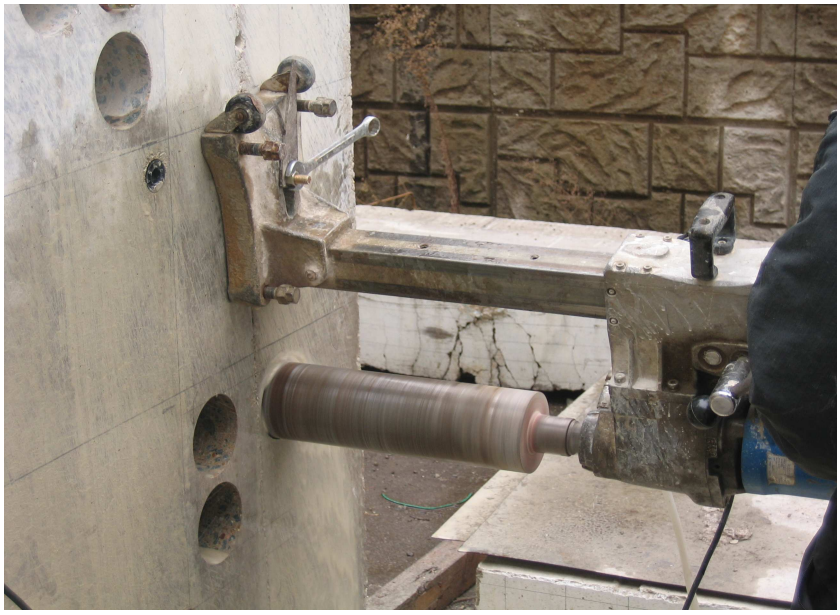


사진 *5.* 코어채취 전경

사진 *6.* 재령 *90*일 파괴 압축강도 시험 전경

사진 *7.* 재령 *90*일 반발경도 측정 전경

사진 *8.* 재령 *90*일 초음파속도 측정 전경

사진 *9.* 재령 *365*일 반발경도 측정 전경

사진 *10.* 재령 *730*일 부재 시험체 코어채취 전경

사진 *11.* 재령 *730*일 부재 시험체 반발경도 측정 전경

사진 *12.* 재령 *730*일 코어 채취후 부재 시험체 전경