일반 과제 / 공개
국토교통기술사업화지원사업 제2차연도 최종보고서

R&D / 16TBIP-C111156-01

장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더교의 실용화 연구

최종보고서

2018. 05. 23.

주관연구기관 / 브릿지테크놀러지(주)
협동연구기관 / (주)삼보기술단
연세대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

16TBIP-C111156-01

장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더교의 실용화 연구 최종보고서

Ministry of Land and Transport Infrastructure R&D Report

2018

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

'장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더교의 실용화 연구'
(연구개발 기간 : 2016. 04. 27 ~ 2018. 02. 26) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 03. 23.

주관연구기관명 : 브릿지테크놀러지(주) (대표자) 김 성 재 (인)

공동연구기관명 : (주)삼보기술단 (대표자) 신 병 관 (인)

공동연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이 원 용 (인)

주관연구기관책임자: 김 성 재

공동연구기관책임자: 박 명 균

공동연구기관책임자: 김 장 호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>16TBIP
-C111156-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2017.02.27.
~ 2018.02.26</td><td>단계구분</td><td>2차년도 /
2차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화지원 사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화지원 사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">장지간 바닥판 아치덱을 활용한
바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더교의 실용화 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김 성 재</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 14 명
내부: 10 명
외부: 4 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부: 130,000천원
기업: 150,000천원
정부 외: 천원
계: 280,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 30 명
내부: 21 명
외부: 9 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부: 261,000 천원
기업: 250,000 천원
정부 외: 천원
계: 511,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">브릿지테크놀러지(주) 기술연구소
(주)삼보기술단 기술연구소
연세대학교산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명
브릿지테크놀러지(주)
(주)삼보기술단</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명</td><td colspan="2">상대국 연구기관명</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명</td><td colspan="2">연구책임자</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약
○ 목표
1. 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더 교량 시템 상부구조 개발 및 상용화
2. 기존 개량형 PSC-I 형식 대비 10% 예산 절감
○ 내용
1. 아치덱을 활용한 바닥판과 거더의 설계 유효성 검토
2. 단면최적화 및 표준단면 제시
3. 바닥판 주철근 연결방안 개선
4. 아치덱의 정밀해석과 구조모형 실험
5. 60m 아치덱 거더의 정밀해석과 구조모형 실험
6. 설계예제 및 시공지침 개발
○ 연구개발성과
1. 아치덱 단면 최적화 및 상세해석을 통한 아칭효과 (비합성 단계 41% 단면력 감소) 검증
2. 아치덱 거더 단면 최적화 및 표준단면(30m~60m) 제시
3. 바닥판 주철근 연결방안 검토 및 성능 검증
① 아칭효과 발현이 가능한 거더와 바닥판의 철근 이음 방법 검토
→ 그립커플러 적용 [p47 2.1~2.2]
② 실험을 통한 그립 커플러의 성능 검증 [p52 3.1]
4. 실험 및 구조해석을 통한 아치덱의 성능 검증
5. 실험 및 구조해석을 통한 아치덱 거더의 성능 검증
6. 설계 예제(30m~60m) 및 시공지침 작성
7. 경제성 분석을 통한 예산 절감효과 검증 (14%절감)
○ 활용계획
1. 본 기술은 장지간 구조적 안전성, 시공성, 미관 및 경제성을 확보하여 기존 PSC거더 시장의 진입이 가능한 공법이다.
2. 또한, 강교 등 유사 거더 건설시장까지 사업 확대 가능 하다.</td><td colspan="2">보고서 면수 209 쪽</td></tr>
</table>

요 약 문

연구의 목적 및 내용	○ 목표 1. 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더 교량 시스템 상부구조 개발 및 상용화 2. 기존 개량형 PSC-I 형식 대비 10% 예산 절감 ○ 내용 1. 아치덱을 활용한 바닥판과 거더의 설계 유효성 검토 2. 단면최적화 및 표준단면 제시 3. 바닥판 주철근 연결방안 개선 4. 아치덱의 정밀해석과 구조모형 실험 5. 60m 아치덱 거더의 정밀해석과 구조모형 실험 6. 설계예제 및 시공지침 개발
연구개발성과	1. 아치덱 단면 최적화 및 상세해석을 통한 아칭효과 (비합성 단계 41% 단면력 감소) 검증 [p22 1.1] 2. 아치덱 거더 단면 최적화 및 표준단면(30m~60m) 제시 [p31 1.2~1.4] 3. 바닥판 주철근 연결방안 검토 및 성능 검증 ① 아칭효과 발현이 가능한 거더와 아치덱 및 바닥판의 철근 이음 방법 검토 → 그립커플러 적용 [p46 2.1~2.2] ② 실험을 통한 그립 커플러의 성능 검증 [p50 3.1] 4. 아치덱의 정밀해석과 구조모형 실험을 통한 성능 검증 [p59 3.2] 5. 60m 아치덱 거더의 정밀해석과 구조모형 실험을 통한 성능 검증 [p137 3.3] 6. 아치덱 거더의 설계 예제(30m~60m) 및 시공지침 작성 [부록 참조] 7. 주요 성과 아치덱 거더와 기존 개량형 PSC 거더의 경제성 분석을 통한 예산 절감 효과 검증 (14% 절감) [p186 4.1~4.2], 특허 출원 및 등록 1건, 국내 논문 2건, SCI논문 1건, 학술발표 7건, 인력양성 2건, 시방서 및 유지관리지침서 3건, 시제품 15건, 설계예제(30m~60m) 8건 등 [p21 연구 수행 내용 및 성과]
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 기술은 장지간 아치덱 바닥판과 바닥판 일체 저형고 PSC-I 거더의 구조적 안전성 및 시공성을 검증하였고 기존 개량형 PSC 거더보다 경제성이 우수한 공법이다. 따라서 아치덱과 아치덱 거더는 기존의 PSC거더 시장뿐 아니라 장지간 교량에 적용 가능하여 강교 등 유사 거더 건설시장까지 대체 가능하기 때문에 활용 가능성이 높을 것으로 예상된다.

핵심어 (5개 이내)	교량	아칭효과	아치덱	프리캐스트덱	PSC 거더

SUMMARY

Purpose & Contents	○ Purpose 1. Development and commercialization of slab integrated low height PSC-I girder upper bridge system using long span arch-deck panel 2. 10 % less budget savings compared to existing enhanced PSC - I type ○ Contents 1. Review design validation of slab and girder using arch-deck 2. Sectional optimization and standard sectional sugestion 3. Research for the connection method of slab reinforcing bars 4. Precise analysis and structural experiment of arch-deck 5. Precise analysis and structural experiment of 60m arch-deck girder 6. Development of design example and specification for construction
Results	1. Optimization of Arch deck section and verification of arching effect by detailed analysis (41% reduction in section force) 2. Optimization of Arch-deck Girder section and suggestion of standard section (30m~60m) 3. Review of slab reinforcing bars connection method and performance verification ① Review of girder and slab reinforcing bars joining method for arch effect → Apply grip coupler ② Verification of performance of Grip Coupler by experiment 4. Precise analysis of Arch deck and verification of performance by structural model experiment 5. Precise analysis of 60m Arch-deck Girder and verification of performance by structural model experiment 6. Create a design example (30m~60m) and specification for construction 7. Major achievements Verification of budget saving(14%) through economical analysis of arch deck girder and existing improved PSC girder, Patent application and registration 1, Thesis(domestic) 2, thesis(SCI) 1, Academic presentation 7, Traning of technical professionals 2, specification for construction and Instructions for maintenance 3, Experimental product 15, Design Example 8 and so on(page. 21)
Expected Contribution	This technology secures the structural safety, construction and aesthetics of long slab and girder and more economical than the conventional improved PSC girder It can be applied to long-distance bridges and is expected to be highly applicable because it can replace the existing PSC girder market as well as the girder construction market such as steel bridge.

Keywords	Bridge	Arching Effect	Arch Deck	Precast Deck	Prestressed Concrete Girder

〈 Contents 〉

1. Outline of R&D task ····· 15

2. Status of domestic and overseas technology development ····· 19

3. Research performance and achievements ····· 21

4. Achievement of goal and contribution to relevant field ····· 201

5. Plan to utilize R&D achievements ····· 205

6. Overseas science and technology information collected during the research process ····· 207

7. Security rating of R&D achievements ····· 207

8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System ····· 207

9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks ····· 207

10. Representative research achievements of R&D tasks ····· 208

11. The others ····· 208

12. Reference ····· 209

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 15

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 19

3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 21

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 201

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 205

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 207

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 207

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 207

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 207

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 208

11. 기타 사항 ····· 208

12. 참고 문헌 ····· 209

〈 그림 목차 〉

1장

그림 1.1 현재 공용 중인 대표적인 거더 교량 (공법) ····· 16
그림 1.2 기존의 바닥판 설치 공법 ····· 17
그림 1.3 아치덱 거더의 기술개발 목표 ····· 18

3장

그림 1.1 아치구조의 효과 ····· 22
그림 1.2 두께 60mm～120mm 일반 덱 형태의 Arch Deck 도면 및 개념도 ····· 24
그림 1.3 60mm～120mm 하프 덱 형태의 Arch Deck 도면 및 개념도 ····· 25
그림 1.4 교축방향 루프이음 ····· 25
그림 1.5 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck) 모델링 형상 ····· 26
그림 1.6 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck) 모델링 형상 ····· 27
그림 1.7 아치덱 거더 복부 두께 ····· 34
그림 1.8 거더를 바닥판에 매립할 경우 바닥판의 최소두께(도로교설계기준 2010) 35
그림 1.9 프리스트레스트 콘크리트의 기본 개념 ····· 35

그림 2.1 가스압접 이음 ····· 46
그림 2.2 용접 이음 ····· 47
그림 2.3 나사식 이음 ····· 47
그림 2.4 편체식 이음 ····· 48
그림 2.5 그립커플러 시공사례 ····· 49

그림 3.1 일방향 인장 시험의 응력-변위 곡선 ····· 50
그림 3.2 저사이클 반복 시험 방법의 개요도 ····· 50
그림 3.3 정적 내력 시험(잔류변형량측정) 방법의 개요도 ····· 51
그림 3.4 일방향 인장시험 하중-변위 그래프 ····· 52
그림 3.5 일방향 인장시험 후 파단 위치 ····· 53
그림 3.6 저사이클 반복시험 하중-변위 그래프 ····· 55
그림 3.7 그립 커플러 품질성능 성적서 ····· 56
그림 3.8 아치구조와 단순보 구조의 개념도 ····· 60
그림 3.9 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 상세도 ····· 64
그림 3.10 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 반력대 및 설치 상세도 ····· 65
그림 3.11 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 상세도 ····· 66
그림 3.12 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 반력대 상세도 ····· 67

그림 3.13 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD 1) 상세도 ····· 68
그림 3.14 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD 2)의 확대형 아치덱 상세도 ····· 69
그림 3.15 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD 2) 상세도 ····· 70
그림 3.16 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 반력대 상세도 ····· 71
그림 3.17 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 단면상세 ····· 72
그림 3.18 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD)
단면상세 ····· 73
그림 3.19 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 단면상세 ····· 73
그림 3.20 실험체 제작과정 ····· 75
그림 3.21 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적 휨 거동 실험 전경 ····· 76
그림 3.22 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적 휨 거동 실험 상세도 ····· 77
그림 3.23 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적 휨 거동 실험 전경 ····· 78
그림 3.24 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적 휨 거동 실험 상세도 ·· 79
그림 3.25 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 피로 실험 전경 ····· 80
그림 3.26 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 정적 휨 거동 실험 상세도 ····· 81
그림 3.27 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 펀칭전단 실험 전경 ····· 82
그림 3.28 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 펀칭전단 실험 상세도 ····· 83
그림 3.29 정적 변형률 측정장비(TDS-303) ····· 84
그림 3.30 AD 실험체 계측도 ····· 86
그림 3.31 BD 실험체 계측도 ····· 88
그림 3.32 PD 실험체 계측도 ····· 89
그림 3.33 하중-변위 곡선(AD 1) ····· 91
그림 3.34 철근 하중-변형률 곡선(AD 1) ····· 93
그림 3.35 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 위치별 철근 변형률 및 응력 ····· 94
그림 3.36 콘크리트의 하중-변형률 곡선 ····· 95
그림 3.37 균열형상 ····· 96
그림 3.38 균열도 ····· 96
그림 3.39 위치별 하중-변위 곡선 ····· 97
그림 3.40 철근의 하중-변형률 곡선 ····· 99
그림 3.41 콘크리트의 하중-변형률 곡선 ····· 100
그림 3.42 균열형상 ····· 101
그림 3.43 균열도 ····· 101
그림 3.44 균열게이지의 균열 곡선 ····· 102
그림 3.45 하중-변위 곡선 ····· 103
그림 3.46 1회 정재하와 200만회 후 정재하 처짐 비교 ····· 103
그림 3.47 하중-변위 곡선 ····· 104
그림 3.48 위치별 하중-변위 곡선 ····· 105
그림 3.49 위치별 하중-철근 변형률 곡선 ····· 107
그림 3.50 위치별 하중-콘크리트변형률 곡선 ····· 109
그림 3.51 균열형상 ····· 112
그림 3.52 균열도 ····· 112

그림 3.53 이격 및 균열곡선 ····· 113
그림 3.54 콘크리트 압축 및 인장 모델 ····· 118
그림 3.55 Bar Section과 철근 절점 ····· 118
그림 3.56 철근 바 세그먼트 및 입체요소에 삽입되는 철근 바 세그먼트와
위치절점 ····· 119
그림 3.57 해석에 사용된 Solid element 요소 형상 ····· 119
그림 3.58 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석 ····· 120
그림 3.59 아치덱 합성 전 정적재하 실험체(3D View) ····· 121
그림 3.60 아치덱 합성 전 정적재하 실험체(Side View) ····· 121
그림 3.61 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 하중 위치(3D View) ····· 122
그림 3.62 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 하중위치(Side View) ····· 122
그림 3.63 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체(3D View) ····· 123
그림 3.64 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체(Side View) ····· 123
그림 3.65 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 하중 위치(3D View) ····· 124
그림 3.66 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 하중 위치(Side View) ····· 124
그림 3.67 아치덱 합성 후 정적재하 실험체(3D View) ····· 125
그림 3.68 아치덱 합성 후 정적재하 실험체(Side View) ····· 125
그림 3.69 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 하중 위치(3D View) ····· 126
그림 3.70 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 하중 위치(Side View) ····· 126
그림 3.71 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 처짐형상 ····· 127
그림 3.72 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 균열형상 ····· 127
그림 3.73 아치덱 합성 전 정적재하 중앙부 하중-처짐 ····· 128
그림 3.74 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 처짐형상 ····· 129
그림 3.75 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 균열형상 ····· 129
그림 3.76 아치덱 합성 후 펀칭전단 중앙부 하중-처짐 ····· 130
그림 3.77 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 처짐형상 ····· 131
그림 3.78 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 균열형상 ····· 131
그림 3.79 아치덱 합성 후 정적재하 중앙부 하중-처짐 ····· 132
그림 3.80 아치덱 합성 전 정적재하 모델 및 모든 실험체의 중앙부 하중-처짐 ····· 133
그림 3.81 아치덱 합성 전 정적재하 모델 및 실험체의 중앙부 하중-처짐 ····· 133
그림 3.82 아치덱 합성 후 펀칭전단 중앙부 하중-처짐 ····· 134
그림 3.83 아치덱 합성 후 정적재하 중심부 Load-Displacement ····· 135
그림 3.84 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 하중재하도 ····· 138
그림 3.85 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 바닥판도 ····· 139
그림 3.86 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 강연선 배치도 (1) ····· 140
그림 3.87 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 강연선 배치도 (2) ····· 141
그림 3.88 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 배근도 ····· 142
그림 3.89 실험체 제작 과정 ····· 144
그림 3.90 실험 전경 ····· 145
그림 3.91 실험 개념도 ····· 146
그림 3.92 정적 변형률 측정장비(TDS-303) ····· 147

그림 3.93 P형 전기저항식 변형률게이지 ····· 147
그림 3.94 F형 전기저항식 변형률게이지 ····· 148
그림 3.95 변위&균열 계측도 ····· 149
그림 3.96 철근 계측도 ····· 151
그림 3.97 콘크리트 계측도 ····· 152
그림 3.98 하중-변위 곡선 ····· 155
그림 3.99 중앙부 단면에서의 하중-변위 관계 ····· 157
그림 3.100 하부 종방향 철근의 위치별 하중-변형률 관계 ····· 157
그림 3.101 상부 종방향 철근의 위치별 하중-변형률 관계 ····· 158
그림 3.102 하중에 따른 거더의 중립축 ····· 158
그림 3.103 콘크리트의 하중-변형률 곡선 ····· 159
그림 3.104 분절부 이격 곡선 ····· 160
그림 3.105 아치덱 거더 균열형상 ····· 161
그림 3.106 Druker-Prager 항복기준 ····· 168
그림 3.107 Bar Section과 철근 절점 ····· 169
그림 3.108 철근 바 세그먼트와 위치절점 ····· 169
그림 3.109 해석에 사용된 Solid element 요소 형상 ····· 170
그림 3.110 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석 ····· 171
그림 3.111 PSC-I 거더 실험체(3D View) ····· 171
그림 3.112 PSC-I 거더 실험체(Side View) ····· 172
그림 3.113 PSC-I 거더 실험체 하중위치 및 하중면적(3D View) ····· 172
그림 3.114 PSC-I 거더 실험체 하중위치 및 하중면적(Side View) ····· 172
그림 3.115 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(3D View) ····· 173
그림 3.116 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(Side View) ····· 173
그림 3.117 PSC-I 거더 실험체의 중앙하부 하중-처짐 ····· 174
그림 3.118 PSC-I 거더 실험체의 지점별 하중-처짐 ····· 174
그림 3.119 PSC-I 거더의 중앙하부 하중-처짐 ····· 176
그림 3.120 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체(3D View) ····· 177
그림 3.121 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체(Side View) ····· 177
그림 3.122 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치 및
하중면적(3D View) ····· 178
그림 3.123 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치
및 하중면적(Side View) ····· 178
그림 3.124 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체 처짐형상
(3D View) ····· 179
그림 3.125 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체 처짐형상
(Side View) ····· 180
그림 3.126 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 데크하부
지점별 하중-처짐 ····· 180
그림 3.127 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 중앙거더 하부
지점별 하중-처짐 ····· 181

그림 3.128 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 외부거더 하부 지점별 하중-처짐 ····· 181

그림 4.1 대상교량 횡단면도 ····· 184
그림 4.2 기존 기술의 동바리 및 낙하물 방지시설 설치 ····· 194
그림 4.3 아치덱 설치 및 일체형 캔틸레버 거더 ····· 194
그림 4.4 에코장안 일반산업단지 조성사업 그립커플러 이음 적용 ····· 199
그림 4.5 구리-포천 고속도로 민간투자사업(2공구) 그립커플러 이음 적용 ····· 199
그림 4.6 원주강릉 1공구 철도 그립커플러 이음 적용 ····· 200

〈 표 목차 〉

3장

표 1.1 해석조건 및 제원 ····· 26
표 1.2 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck) 해석 결과 ····· 27
표 1.3 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck) 해석 결과 ····· 29
표 1.4 해석 결과 비교 (중앙부 모멘트) ····· 30
표 1.5 철근 및 프리스트레싱 강재의 내구성을 고려한 최소피복두께 ····· 32
표 1.6 부착에 대한 요구사항을 고려한 최소피복두께 ····· 32
표 1.7 돌출 플랜지 크기에 따른 단면 계수 ····· 35
표 1.8 돌출 플랜지 높이에 따른 응력검토 ····· 36
표 1.9 돌출 플랜지 크기에 따른 처짐 검토 ····· 37
표 1.10 프리스트레스 도입 시 응력검토 ····· 38
표 1.11 사용하중 작용 시 응력검토 ····· 38
표 1.12 아치덱 거더의 단면별 횡단면도 및 중량 ····· 39
표 1.13 I형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 및 저형고(바닥판 포함) ····· 40
표 1.14 Box형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 (바닥판 포함) ····· 42

표 2.1 그립커플러 규격 ····· 49

표 3.1 일방향 인장시험 결과 ····· 51
표 3.2 저사이클 반복시험 결과값 ····· 54
표 3.3 잔류변형량 ····· 57
표 3.4 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 실험 개요 ····· 60
표 3.5 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 실험 개요 ····· 61
표 3.6 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 실험 개요 ····· 61
표 3.7 재료 특성 ····· 75
표 3.8 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적하중재하 실험방법 ····· 76
표 3.9 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적하중재하 실험방법 ····· 78
표 3.10 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 피로 실험방법 ····· 80
표 3.11 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 정적하중재하 실험방법 ····· 82
표 3.12 P형 변형률게이지 제원 ····· 85
표 3.13 철근게이지의 제원 ····· 85
표 3.14 CDP형 전기식 변위계의 형상 및 제원 ····· 86
표 3.15 설계-실험 데이터 비교 ····· 90
표 3.16 하중-변위 결과 ····· 92
표 3.17 철근의 하중-변형률 결과 ····· 93

표 3.18 콘크리트의 하중-변형률 결과 ····· 95
표 3.19 설계-실험 데이터 비교 ····· 97
표 3.20 하중-변위 결과 ····· 98
표 3.21 철근의 하중-변형률 결과 ····· 99
표 3.22 콘크리트의 하중-변형률 결과 ····· 100
표 3.23 설계-실험 데이터 비교 ····· 104
표 3.24 중앙지점 하중-변위 결과 ····· 106
표 3.25 철근의 하중-변형률 결과 ····· 108
표 3.26 콘크리트의 하중-변형률 결과 ····· 111
표 3.27 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 구조해석 개요 ····· 115
표 3.28 Midas FEA에 적용된 상세 재료특성 ····· 120
표 3.29 아치덱 거더 휨 거동 실험 개요 ····· 138
표 3.30 재료 특성 ····· 143
표 3.31 거더의 긴장력과 긴장순서 ····· 143
표 3.32 정적하중재하 실험방법 ····· 146
표 3.33 P형 변형률게이지의 제원 ····· 148
표 3.34 철근게이지의 제원 ····· 148
표 3.35 CDP형 전기식 변위계의 형상 및 제원 ····· 149
표 3.36 아치덱 거더 하중-변위 결과 ····· 154
표 3.37 아치덱 거더 설계-실험 데이터 비교 ····· 155
표 3.38 아치덱 거더 철근 하중-변형률 결과 ····· 156
표 3.39 아치덱 거더 콘크리트 하중-변형률 결과 ····· 159
표 3.40 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 구조해석 개요 ····· 164
표 3.41 Midas FEA에 적용된 상세 재료특성 ····· 170

표 4.1 아치덱 거더 공사비 (L=40.0m, B=24.3m) ····· 185
표 4.2 개량형 PSC 거더 공사비 (L=40.0m, B=24.3m) ····· 185
표 4.3 공사비 비교 ····· 185
표 4.4 공사기간 비교 ····· 195

5장

표 5.1 단계별 사업화 추진계획 ····· 206

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

일반적인 중소규모의 교량계획 시 검토해야 할 주요 인자는 경간장, 형고, 거더간격 등이 있다. 경간장은 도로, 철도, 하천 등의 장애물을 횡단하는 조건에 의해 고려되고 형고는 통과조건의 시설한계, 홍수 여유고 확보를 위해 중요한 요소이다. 거더 간격은 거더의 적절한 횡분배가 이루어 질 수 있는 간격으로 정해진다. 그러나 현 설계의 거더 간격은 바닥판의 내구성, 주거더의 형고가 높아지는 문제점을 가지고 있어 제한된 계획을 하고 있다.

본 연구에서는 기존의 제한된 횡방향 거더 배치를 장지간 바닥판을 활용하여 효율적인 계획을 할 수 있고 이를 이용한 최적화된 거더 개발을 통해 기존 개량형 PSC 거더교 대비 구조적 안전성, 시공성, 경제성 및 미관을 향상 시킬 수 있는 교량 상부 구조물 개발을 목적으로 한다.

① 장지간 바닥판 개발

일반적인 개량형 PSC 거더의 바닥판은 거더 간격이 넓어질수록 균열에 의한 내구성이 감소하여 공용연수가 짧아지는 이유로 제한된 거더 간격 내에서 횡방향으로 거더 배치를 하고 있다. 거더의 횡방향 배치는 횡분배를 통하여 각 거더에 하중이 전달되므로 최적화된 거더 배치는 효율적인 하중 전달에 의해 거더의 안전성 및 경제성 분석에 매우 중요한 요소이다.

또한 바닥판을 시공함에 있어 동바리 및 거푸집, 낙하물 방지공 등의 설치 및 해체 공정이 매우 복잡하고 이는 교량 상부구조물의 대부분의 공기를 차지하고 있어 공사기간의 단축에 어려움이 있다. 또한 작업자가 고공에서 작업해야하므로 시공성과 안전성에 취약하고, 통과시설물에 영향을 미치기 때문에 유의해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 보다 효율적이고 폭 넓은 거더 배치 및 시공 시 안전성, 공기단축 등의 시공성을 고려한 바닥판 개발을 목적으로 한다.

② PSC-I 거더교 개발

이러한 장지간 바닥판의 적용이 가능하려면 이에 적합한 거더 개발이 이루어져야 한다. 현재 개량형 PSC 거더는 형고를 낮추기 위하여 거더 가설 후 2차 긴장, 강판 보강 등이 이루어지고 있다. 이는 복잡한 시공성 및 유지관리의 문제점을 가지고 있다. 최근 건설 재료의 발달로 인하여 고강도 콘크리트, 고강도 강연선 등이 사용되어 지고 있기 때문에 이를 이용한 저형고의 최적화된 거더 개발이 가능할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 장지간 바닥판을 활용하되 안전성, 시공성, 경제성 및 미관까지 고려된 최적화된 개량형 PSC 거더의 개발을 목적으로 한다.

2. 연구개발의 필요성

교량은 도로, 철도 및 하천 등 장애물을 통과하는 것이 주목적이며 최근 기술과 경제 발전에 따라 안전성, 경제성, 기능성 및 미관 등을 고려한 효율적인 교량 설계를 요구하고 있어 기존의 다양한 교량형식들을 개선·발전시키려는 노력이 끊임없이 진행되고 있다.

이러한 교량형식들 중에서 가장 보편적이고 많이 건설 된 거더 교량은 그림 1.1에서 보는 바와 같다. 거더 교량은 지리적·환경적 여건에 따라 사용재료, 단면형상, 교량의 평면형상, 통과조건 및 경간장 등 각 공법별로 세분화 및 특화되었으며, 현재까지도 다양한 공법이 개발되어 적용되고 있다. 특히 PSC(Pre-Stressed Concrete) 구조를 적용한 거더 형식의 교량은 경제성과 안전성이 우수한 형식으로 국내뿐만 아니라 전 세계에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 공법이다. 또한 최근에는 PSC 거더의 장경간화, 교량 하부 공간 확보를 위하여 2차긴장 또는 강판 보강 등의 공정을 도입하는 개량형 PSC 거더의 공법의 개발이 끊임없이 진행되고 있다. 그리고 재료 기술의 발달로 고강도 콘크리트, 고강도 강연선 등이 개발 및 상용화 되고 있어 PSC 거더에 보다 많은 긴장력 도입이 가능하여 교량의 저형고 및 장경간화가 가능하도록 기술 개발이 진행되고 있다.



그림 1.1 현재 공용 중인 대표적인 거더 교량(공법)

현재 국내에서 가장 많이 적용되는 PSC 거더 교량은 계획 및 설계 단계에서 바닥판의 지간장이 길어질 경우 내구성 저하 및 공용연수가 감소되는 문제점이 있어 거더 간격을 제한적으로 배치하고 있다. 교량 시공과정에 있어서 일반적으로 거더 교량은 지상(地上)에서 거더를 제작하여 하부구조(교대, 교각)에 인양 및 거치하며, 바닥판은 동바리 및 거푸집 설치 후 콘크리트를 타설한다. 이러한 현장 타설에 의한 바닥판 시공은 공기 지연의 원인이며, 바닥판 철근을 별도로 배근해야 하므로 시공성과 작업성이 떨어지는 단점이 있다.

특히, 그림 1.2와 같이 바닥판 시공을 위해서는 거푸집 및 동바리 설치 후 고공 작업을 실시하기 때문에 안전성과 경제성 측면에서도 불리한 시공방법이다.

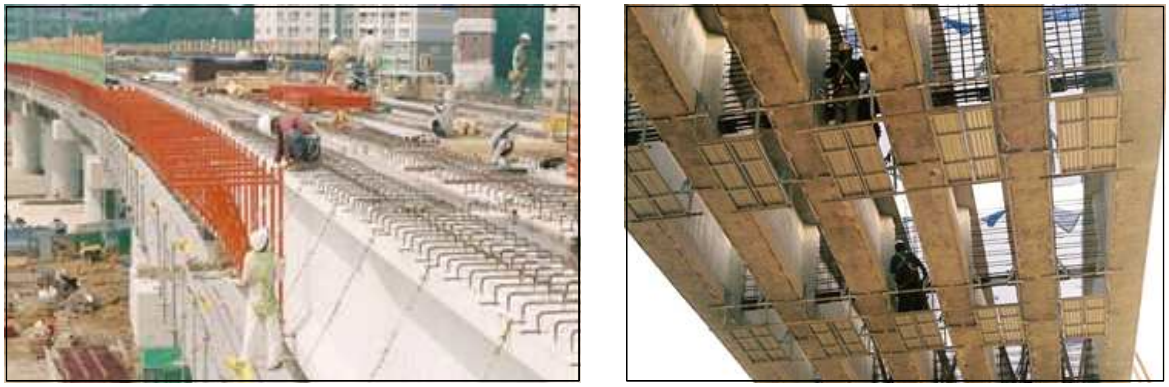


그림 1.2 기존의 바닥판 설치 공법

이러한 문제점을 해결하기 위하여 안전성, 시공성, 경제성 및 미관이 확보된 장지간 바닥판의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 아치구조의 장점인 중앙부 휨모멘트를 감소시켜 내구성 및 구조 안전성을 확보할 수 있고 프리캐스트 데크 형식을 적용하여 시공성 및 작업성을 확보 할 수 있는 바닥판 형식을 개발 하고자 한다. 따라서, 장지간 아치덱 바닥판의 형상, 제원, 거동 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한 바닥판의 지간 길이가 길어지게 되면 거더에 작용하는 하중의 크기가 커지고 형고가 높아지는 단점이 발생하기 때문에, 장지간 바닥판을 적용하여도 안전성, 시공성 및 경제성을 만족하고 저형고 장지간이 가능한 거더 형식의 개발이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 장지간 바닥판의 아칭액션이 발생할 수 있도록 거더 단면의 개발이 필요하며, 더불어 구조 안전성, 시공성, 저형고 및 장지간이 가능한 거더의 형식에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 연구개발 범위

본 연구개발의 범위는 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더 교량 시스템의 상부구조 개발 및 상용화 이며 이에 대한 세부 범위는 다음과 같다.

최종 목표	• 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더 교량 시스템 상부구조 개발 및 상용화 • 기존 개량형 PSC-I 형식 대비 10% 예산 절감

세부 목표	기술 범위
바닥판 포함 최적 거더 단면 산정	개량형 PSC-I 거더 형식 대비 동일 형고로 표준횡단의 주형 개수를 9본에서 7본으로 최적화 (**B=24.3m, 7본**)
아치덱 활용 최적 거더 간격 산정	아치덱을 적용하여 거더 간격을 3.6m로 늘림으로써 주형 개수 감소 (**기존 바닥판 평균 = 2.75m**)
개량형 PSC-I 형식 대비 공사비 10% 절감	거더 최적화와 바닥판 지간장 증가에 의한 **공사비 10% 절감**
바닥판 철근 연결 상세 개발	**그립(Grip) 커플러**의 **적용** 방안 검토
시제품 제작 및 성능 평가	- **바닥판 요소 실험** (정재하 및 피로실험) - 지간 **60m 시작품 제작** 및 하중재하실험을 통한 **성능 검증**



그림 1.3 아치덱 거더의 기술개발 목표

제2장. 국내외 기술 개발 현황

본 기술은 프리캐스트 하프덱과 PSC 거더에 대한 내용으로 유사한 국내외 기술 개발 현황은 다음과 같다.

지적재산권 명	등록번호	개발자 (지적재산권자)	비고
외부로 노출된 교량용 강선 긴장 시스템	10-0554026	(주)인터컨스텍	신기술 453호
	기술내용	▪ 빔 제작시 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로 긴장력을 도입하여 형고를 줄이거나 장지간 가설이 가능한 PSC공법	
	공법의 원리, 특징 및 기능	▪ 일반 PSC 빔과 달리 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1, 2차) 긴장력을 도입 하여 일반 PSC 빔보다 형고를 낮추고, 장경간이 가능함 ▪ 전경간 연속 배치된 2차 강선이 연속부 강선 역할을 겸용하며, 2차 정착구에 같이 매설된 비부착 강선이 추후 유지관리에 사용	
	보유기술의 차별성	▪ 본 기술은 단계적인(1, 2차) 긴장으로 시공성이 불리 ▪ 신청기술은 2차 공정이 없고 아치덱과 단면 효율을 증가 시킨 거더를 이용한 교량 시공 기술이다.	

지적재산권 명	등록번호	개발자 (지적재산권자)	비고
피씨 강선 및 티형 강판을 이용한 프리스트레스트 철근콘크리트 빔 및 이를 이용한 교량 시공방법	10-0499976	우경건설 (주)	신기술 517호
	기술내용	▪ 상부플랜지에 강판을 합성시켜 PS긴장재의 편심효율성을 증대시킴으로 저형고, 장지간 가설이 용이하고 연속지점부를 강판+철근+PS긴장재로 일체화 시킨 PSC 공법	
	공법의 원리, 특징 및 기능	▪ 상부플랜지에 강판 합성으로 인한 중립축 상승으로 편심거리 증대 ▪ 연속지점부 완전체결(강판+철근+PS긴장재)로 내구성 증대 ▪ 변지간 구성시 동일 형고 가능(형고적용성 증대)	
	보유기술의 차별성	▪ 본 기술은 강판을 합성시키는 2차공정으로 시공성이 불리함. ▪ 신청기술은 2차 공정이 없고 아치덱과 단면 효율을 증가 시킨 거더를 이용한 교량 시공 기술이다.	

지적재산권 명	등록번호	개발자 (지적재산권자)	비고
긴장력 조절이 가능한 정착구를 이용한 피에스씨 거더교량의 시공방법	10-0724739	(주) 장헌산업	신기술 582호
	기술내용	▪ PSC 빔단면과 반단면 프리캐스트 바닥판을 이용하여 비합성 상태에서 긴장력을 도입하여 강선의 도입효율을 높이고, 연속화 강선의 편심량을 극대화하여 구조적 효율성 및 경제성을 추구한 공법	
	공법의 원리, 특징 및 기능	▪ 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1, 2차) 긴장력을 도입 ▪ 제작장 1차 긴장 후 바닥판 비합성 상태에서 2차긴장 ▪ 전경간 연속배치된 2차강선이 연속부강선 역할을 겸용 ▪ 내하력 저하 시 2차 PS강선으로 추가긴장	
	보유기술의 차별성	▪ 본 기술은 반단면 프리캐스트 바닥판을 가설 후 비합성 단계에서 2차 긴장을 하는 공법으로 시공성이 불리함. ▪ 신청기술은 2차 공정이 없고 아치덱과 단면 효율을 증가 시킨 거더를 이용한 교량 시공 기술이다.	

지적재산권 명	등록번호	개발자 (지적재산권자)	비고
교량 슬래브 시공방법 및 그에 적용되는 피씨플레이트	10-0724739	(주) 효성엘비데크	신기술 553호
	기술내용	▪ 공장에서 제작된 프리캐스트 콘크리트 판재 위에 현장타설 바닥판 콘크리트와 합성이 용이하도록 철근을 돌출시켜 제작한 후, 현장에서 거더 사이의 상면에 거치하는 공법	
	공법의 원리, 특징 및 기능	▪ 작업발판, 동바리가 필요 없어 공기 단축 및 시공성 우수 ▪ 공장 제작을 하므로 품질 우수 ▪ 현장타설 바닥판 대비 공사비 절감	
	보유기술의 차별성	▪ 본 기술은 반단면 프리캐스트 바닥판을 이용한 바닥판 시공방법으로 리브 보강, 강연선 보강을 하지 않을 시 긴 연장의 적용은 불가능함. ▪ 신청기술은 Arch 형상의 반단면 프리캐스트 바닥판을 적용하여 아칭효과를 이용하여 구조효율을 높였으며 하면이 아치형상을 가지고 있어 미관 개선효과도 우수함.	

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

■ 연구 수행 내용 및 성과

구분		핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)		최종 성과점검기준				해당 기관	양적 성과목표	양적 성과목표 달성치	목표 달성율
					질적 성과지표		목표치	달성치				
총괄	1차년도	A	A-1	거더 및 아치댁의 아칭 효과에 대한 상세해석	①	국내 논문 (아치댁 구조성능)	설계치의 1.3배	설계치의 1.6 ~ 1.9배	주관 공동2	논문 : 1 건	논문 : 2 건	100%
			A-2	아치댁과 거더의 연결상세 개발	①	특허출원 (공법개발)	1 건	1 건	주관	특허 : 출원 1 건	특허 : 출원 1 건	100%
		초과달성			①	학술발표	초과달성	초과달성	공동2	초과달성	학술발표 : 5 건	초과달성
					②	아치댁 시제품			주관		시제품 : 8 건	
					③	그립 커플러 시제품			주관		시제품 : 6 건	
					④	아치댁 구조성능			주관 공동1 공동2		실험성적서 : 8 건	
					⑤	그립 커플러 구조성능			주관		실험성적서 : 6 건	
					⑥	시공지침			공동1		시공지침 : 1 건	
	2차년도	A	A-2	아치댁과 거더의 연결상세 개발	②	특허등록 (공법개발)	1 건	1 건	주관	특허 : 등록 1 건	특허 : 등록 1 건	100%
		B	B-1	실물 실험을 통한 구조안정성 검증	①	SCI 논문 (합성구조체 구조성능)	설계치의 1.5배	설계치의 24배	주관 공동2	논문 : 1 건	논문 : 1 건	100%
					②	학위논문 (인력양성)	2 건	2 건	공동2	인력양성 : 2 건	인력양성 : 2 건	100%
					③	설계예제 및 시공지침 (아치댁 거더 시제품 / 경간별 설계예제 / 시공지침)	1건	1 건	주관	시제품 : 1 건	시제품 : 1 건	100%
					④		1 식	1건	공동1	설계예제 : 1 건	설계예제 : 8 건	100%
					⑤		1 건	1건	공동1	시공지침 : 1 건	시공지침 : 2 건	100%
		초과달성			①	학술발표	초과달성	초과달성	공동2	초과달성	학술발표 : 2 건	초과달성
					②	아치댁 거더 구조성능			주관 공동1 공동2		실험성적서 : 1 건	
					③	원가 계산서			주관		원가계산서 : 1 건	
					④	사업화			주관		사업화 : 7 건	
계										특허 : 출원 1 건 등록 1 건 논문 : 2 건 인력양성 : 2 건 시제품 : 1 건 설계예제 : 1 건 시공지침 : 1 건	특허 : 출원 1 건 등록 1 건 논문 : 3 건 인력양성 : 2 건 시제품 : 15 건 설계예제 : 8 건 시공지침 : 3 건 실험성적서 : 15 건 학술발표 : 7 건 원가계산서 : 1 건 사업화 : 7 건	

※ 주관 : 브릿지테크놀러지(주), 공동1 : (주)삼보기술단, 공동2 : 연세대학교

1. 단면 최적화 및 표준단면 제시

1.1 아치덱을 활용한 바닥판의 단면 최적화

(1) 아치구조의 정의

아치는 그림 1.1과 같이 수직으로 작용한 외력 때문에 양단 지점에서 중앙으로 향하는 수평 반력을 발생시킨다. 이 수평 반력은 각 단면에서의 휨모멘트를 현저하게 감소시키며 동시에 전단력도 감소시킨다. 따라서 부재의 단면력은 주로 축방향 압축력이라고 할 수 있다. 이는 아치 구조의 중요한 특성이다. 양단의 지점에서 수평반력을 유발한다는 말은 지점에서의 수평변위가 없어야 한다는 뜻이기도 하다. ('구조역학, 양창현 지음' 발췌.)

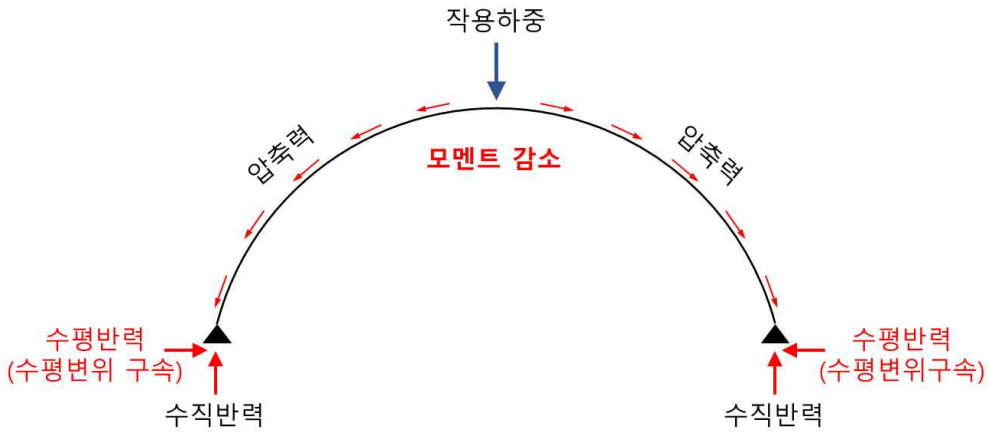


그림 1.1 아치구조의 효과

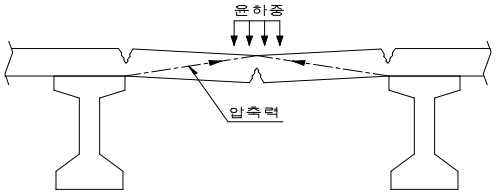
(2) 아치덱의 개발배경 및 효과

기존 바닥판은 대부분 현장에서 직접 동바리와 거푸집을 설치하고 철근을 배근한 뒤 콘크리트를 타설하여 바닥판을 시공하는 공정으로 진행된다. 동바리와 거푸집을 설치하여 바닥판을 시공하는 공정은 공사기간이 길고 인건비가 많이 투입되며 결정적으로 고소작업에 의한 작업자의 안전성이 저하되는 문제점이 있다. 또한 도심지 교량 건설시 현장타설 콘크리트를 적용하면 동바리·낙하물방지공 등의 설치 및 해체작업 중 낙하물에 의한 교량 하부의 안전이 위협되는 문제가 있다.

그리고 최근 교량 건설 분야에서 해결해야 할 과제 중 하나는 교량의 공용수명 연장이다. 일반적으로 거더의 공용연수는 약 40년~50년이며, 바닥판의 공용연수는 거더에 비해 상대적으로 짧다. 바닥판은 지간이 길어질수록 내구성 저하로 인해 공용연수가 짧아지는 것으로 분석되며, 거더의 형고가 높아지는 단점을 지닌다. 이러한 이유로 기존 거더 교량은 경제성이 불리함에도 바닥판의 장기간 사용과 교량 밑 공간 확보를 위하여 대부분의 거더 간격(바닥판 지간)을 3.0m 이하로 배치하고 있다.

본 연구는 기존 하프덱의 공기단축, 품질, 안전성 확보 등의 장점을 유지하면서 아치구조를 적용하여 내구성을 향상시키고 장지간 바닥판이 가능하도록 한다. 한국도로공사에서 2002년과 2006년 발표된 실무지침서 중 "거더교 등방배근 바닥판 적용 실무지침서"와 "교량 바닥판 프리캐스트 판넬공법의 경험적 설계법 적용방안 검토(안)"에서는 바닥판의 아칭작용에 대하여 다음과 같이 규정하였다.

▪ 경험적 설계법의 원리



가. 경험적설계법은 트럭 윤하중을 지지하는 교량바닥판의 주요한 구조적 거동이 전통적으로 인식되었던 휨거동이 아닌 바닥판 단면에 발생하는 면내 압축력이 발생하는 아칭 작용에 근거하고 있다.

나. 거더교의 바닥판 아칭작용 거동은 정모멘트 구간의 교량바닥판에 균열이 발생하면 바닥판의 중립축 상승에 의해 형성되는데 바닥판의 자유로운 처짐과 회전을 주변 콘크리트 바닥판과 바닥판을 지지하는 거더나 바닥틀의 횡방향 구속력에 의해 발생되는 면내 압축력에 의해 바닥판의 휨강성이 크게 증가된다.

다. 이 아칭작용에 의하여 교량바닥판은 휨파괴가 발생하지 않고 윤하중 접지면 경계 부근의 과다한 변형으로 인한 펀칭 전단파괴가 발생한다.

라. 이때 파괴면의 각도는 일반적으로 면내 압축력에 의하여 45°보다 크며 이때 통상 파괴하중의 크기는 설계활하중의 10배 이상이 된다.

마. 따라서 바닥판과 거더가 합성으로 거동하는 거더교의 경우에는 상기 원리를 근거로 한 경험적설계법 적용이 가능하다.

경험적 설계법의 원리를 요약하면, 바닥판의 구조적 거동은 휨거동이 아니라 바닥판 단면에 압축력이 발생하는 아치작용에 근거하고 있으며, 이러한 아치작용에 의하여 교량 바닥판은 휨파괴가 아니라 윤하중 접지면의 과다한 변형으로 인한 펀칭 전단파괴가 발생한다. 이때의 파괴하중 크기는 설계활하중의 10배 이상이 된다.

본 연구는 이러한 경험적 설계법의 원리 및 아치구조의 장점을 활용하여 아치형상의 프리캐스트 하프덱인 아치덱을 개발하였다. 아치덱은 윤하중에 의한 과도한 변형이나 균열발생 후 아치작용이 발현되는 기존 바닥판과 달리, 아치덱 설치 및 커플러 체결 이후부터 아치작용이 발현되며 기존 바닥판보다 내구성이 증대되고 장지간화가 가능하다.

(3) 아치덱의 최적단면 산정

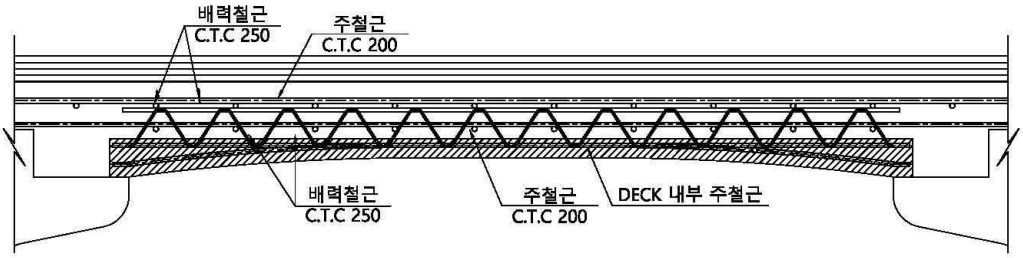
아치덱은 일반 하프덱과 달리 아치형상으로 제작되어 최대 휨모멘트가 감소되는 아칭효과를 기대할 수 있다. 이로 인해 바닥판의 내구성이 증대되고 장지간 바닥판을 구현할 수 있으며, 하부의 미관 개선이 가능하다.

아치덱을 개발하기 위하여 그림 1.2~그림 1.3과 같이 아치덱 단면을 검토하였다. 그림 1.2는 중앙부 두께 60mm, 거더 지지부(단부)는 120mm이며 상부에 래티스바를 설치하는 형태이다. 그림 1.3은 중앙부 두께 100mm, 거더 지지부(단부)는 160mm이며 상부 전단연결재를 설치하고, 교축방향 이음부에 루프 형태의 철근을 겹이음하는 하프 데크 형태이다. 데크의 길이는 2.52m에 대하여 검토를 수행하였다.

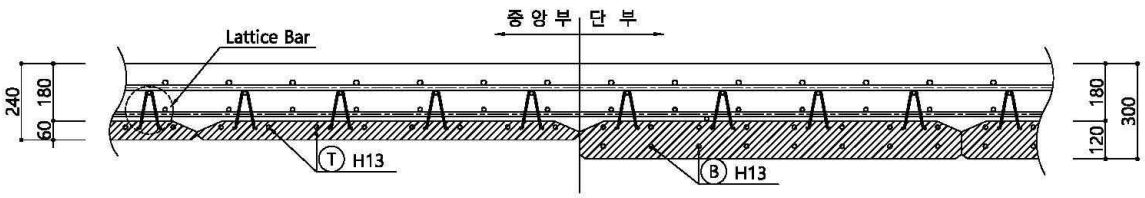
중앙부 두께 60mm 아치덱의 시공방법은 덱 설치 후 바닥판 상하부 철근을 배근하고 콘크리트를 타설하기 때문에 합성 전 단면에서 횡방향 변위가 구속되지 않아 합성 후부터 아칭효과가 발현 될 것이다. 그러나, 중앙부 두께 100mm 아치덱의 시공방법은 덱 설치 후 덱

의 철근과 거더의 돌출플랜지 철근을 기계 이음하여 횡방향 구속을 하고 바닥판 상부철근만 배근 후 콘크리트를 타설하므로 합성 전에 아칭효과가 발현되어 시공성이 향상되고 전도에 대한 안전성이 확보 될 것이다. 또한 중앙부 두께 100mm 아치덱은 설계 휨 저항 강도 M_r=18.499kN·m로 산정되었고 작용하중에 의한 계수모멘트 M_u=11.893kN·m의 약 1.5배의 안전율을 확보 하고 있어 아치덱의 안전성은 충분히 확보 될 것으로 사료된다.

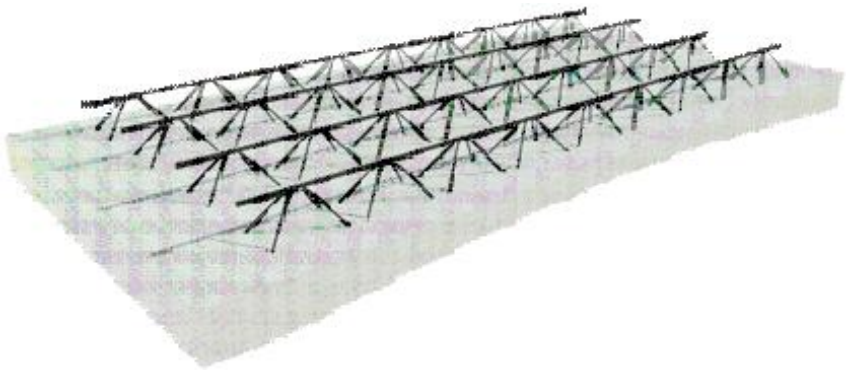
본 연구에서는 안전성 및 내구성이 우수하고 합성 전 아칭효과를 발현할 수 있는 두께 100mm~160mm의 아치덱 단면으로 결정하고 연구를 수행하였다. 중앙부 두께 100mm 아치덱은 두께 및 휨 강성 증가로 기존 프리캐스트 덱의 문제점인 운반 및 설치 시에 발생하는 균열, 탈락 등의 문제를 해결할 수 있다. 그림 1.4와 같이 교축방향 이음부에 루프형태의 철근을 겹이음하여 구조적으로 취약한 교축방향 이음부를 개선하고 연속성을 확보 하였다.



(a) 횡단면도

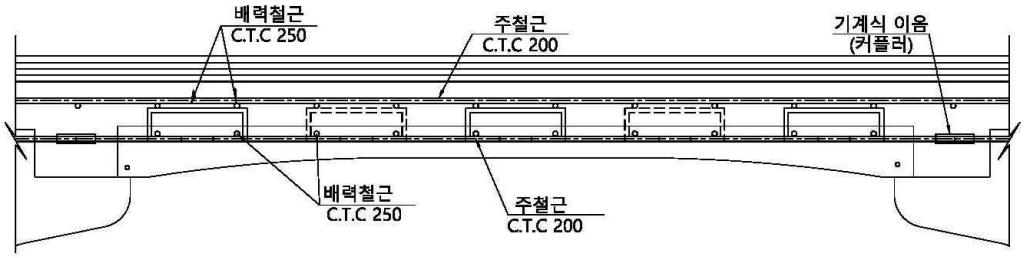


(b) 종단면도

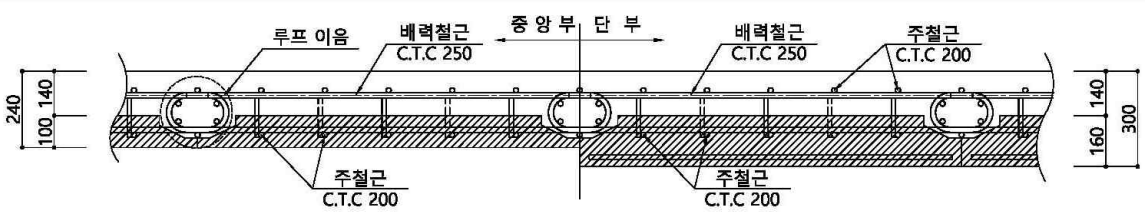


(c) 개념도

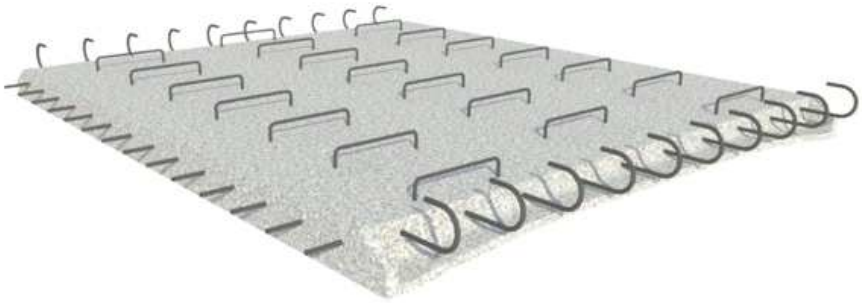
그림 1.2 두께 60mm~120mm 일반 덱 형태의 Arch Deck 도면 및 개념도



(a) 횡단면도



(b) 종단면도



(c) 개념도

그림 1.3 두께 60mm~120mm 하프 덱 형태의 Arch Deck 도면 및 개념도

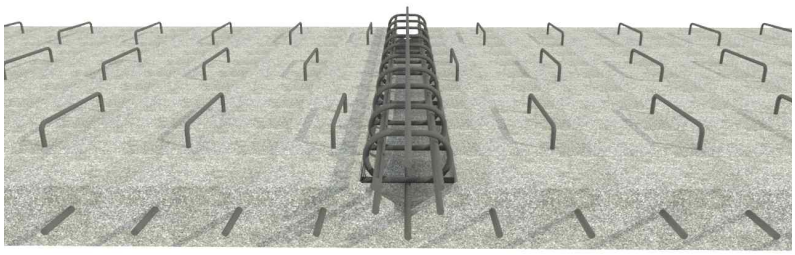


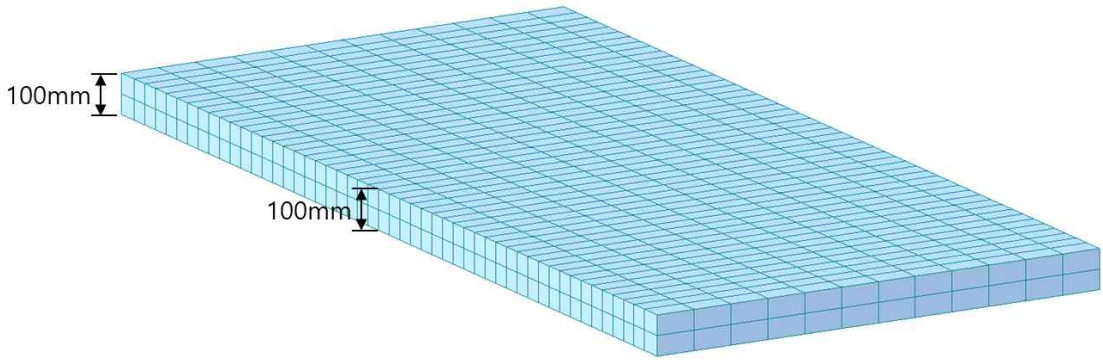
그림 1.4 교축방향 루프이음

(4) 아치덱의 아칭효과 검증

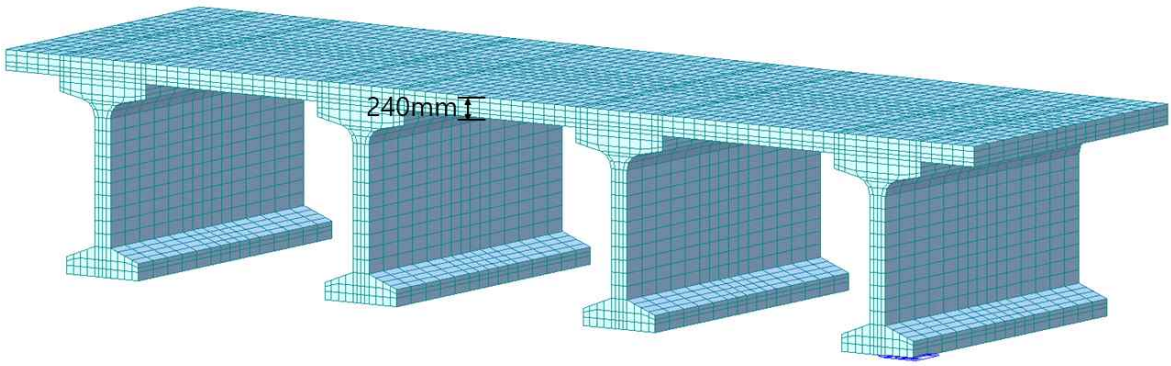
아치덱의 아칭효과 검증을 위하여 3차원 정밀 해석을 실시하였으며 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck)과 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck)을 비교 분석하였다. 범용 유한요소 프로그램인 MIDAS의 솔리드요소를 사용하여 비합성 모델과 합성모델을 모델링하여 해석하였다. 작용하중은 덱 자중, 바닥판 하중, 2차고정하중(포장, 방호벽), 활하중(DB-24)을 적용하였다. 표 1.1은 하프덱 및 바닥판, 거더의 해석조건과 제원이며, 그림 1.5와 그림 1.6은 모델링 형상이다.

표 1.1 해석조건 및 제원

구 분	설계기준 강도(f_{ck})	지 간 (L)	두께 (t)	
하프덱 (합성전)	40 MPa	2.52m	Flat Deck	100mm
			Arch Deck	100mm~160mm
바닥판 (합성후)	30 MPa	2.40m	Flat Deck	240mm
			Arch Deck	240mm~300mm
거더	60 MPa	3.60m	-	

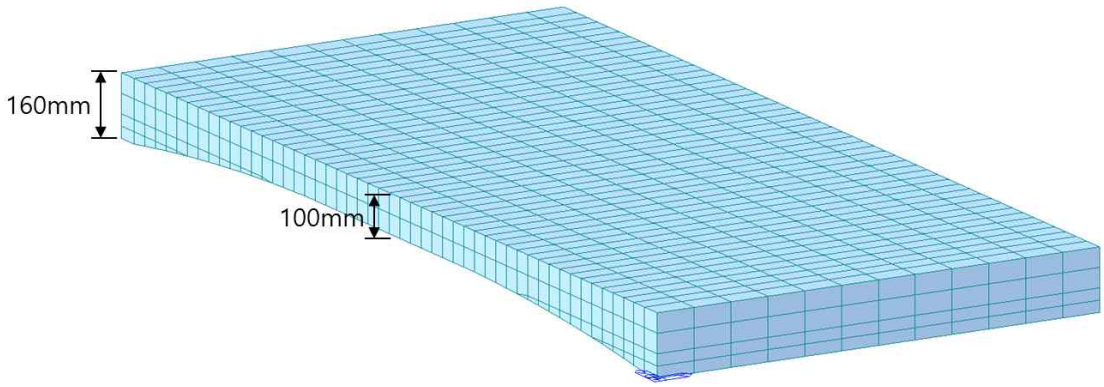


(a) 합성 전 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck)

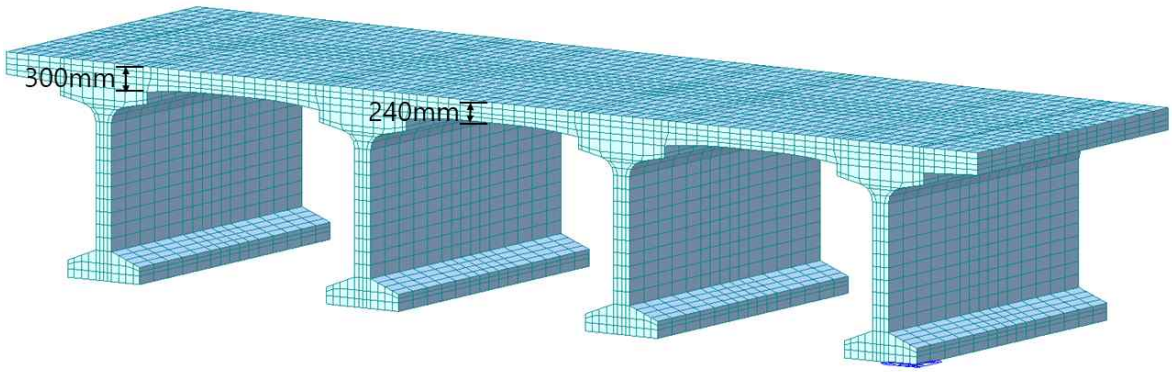


(b) 합성 후 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck)과 거더

그림 1.5 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck) 모델링 형상



(a) 합성 전 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck)



(b) 합성 후 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck)과 거더

그림 1.6 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck) 모델링 형상

표 1.2와 표1.3은 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck)과 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck)의 해석 결과이며 표 1.4에 해석 결과를 비교 검토하였다.

표 1.2 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck) 해석 결과 (계속)

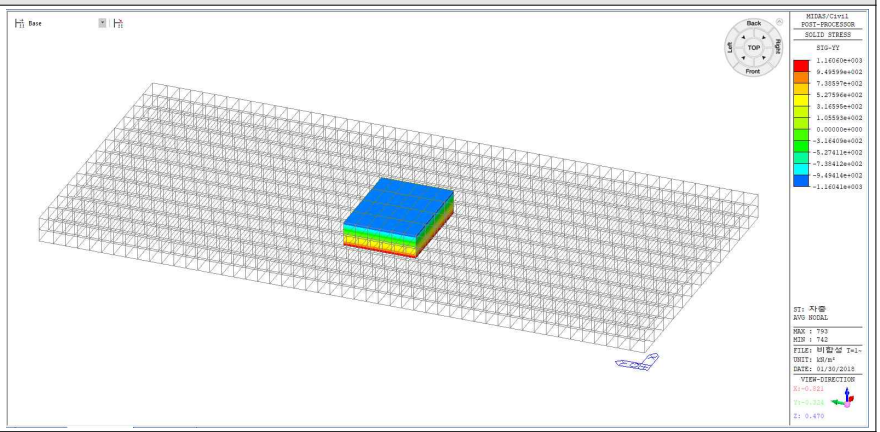
구 분			해석결과
자중	응력도		
	응력	상연	-1.16 MPa
		하연	1.16 MPa
	단면력	축력	0 kN
		모멘트	1.93 kN·m

표 1.2 일반 프리캐스트 하프덱(Flat Deck) 해석 결과

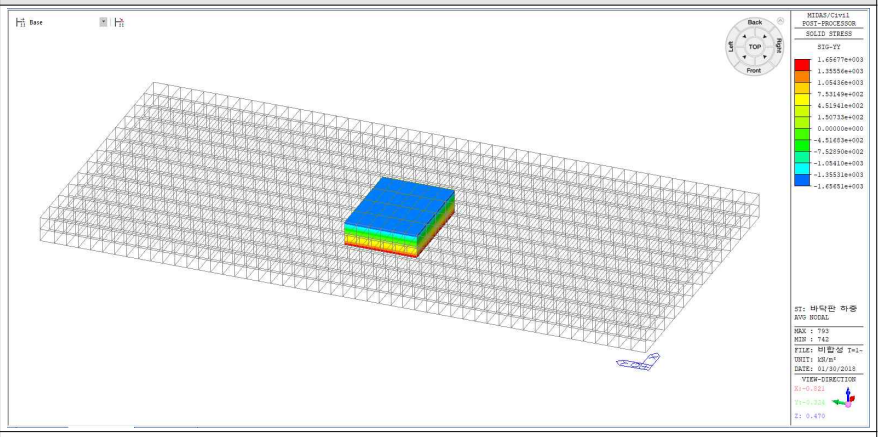
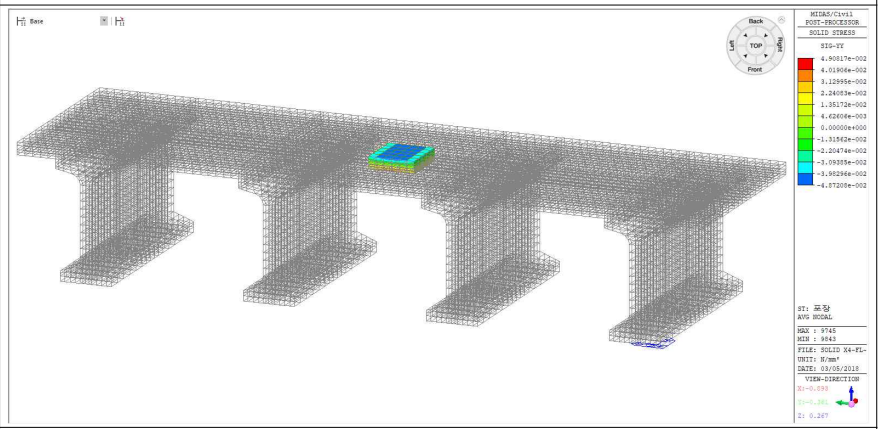
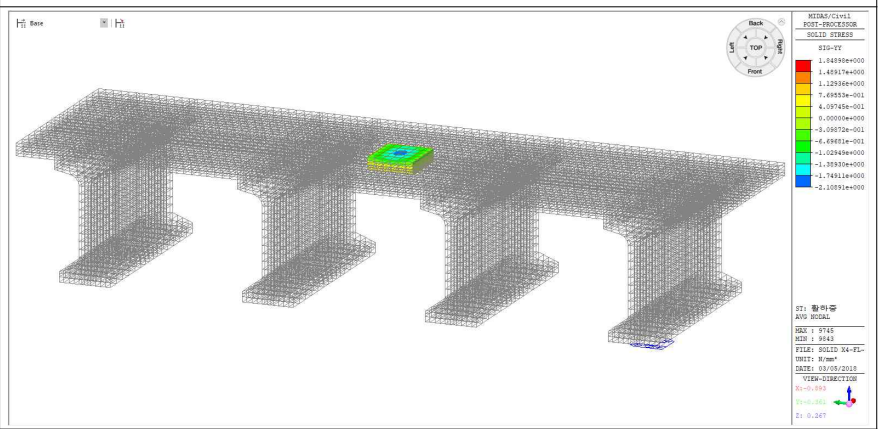
구 분			해석결과
바닥판 하중	응력도		
	응력	상연	-1.66 MPa
		하연	1.66 MPa
	단면력	축력	0 kN
		모멘트	2.76 kN·m
2차 고정 하중 (포장)	응력도		
	응력	상연	-0.05 MPa
		하연	0.05 MPa
	단면력	축력	0.0 kN
		모멘트	0.48 kN·m
활하중	응력도		
	응력	상연	-2.11 MPa
		하연	1.85 MPa
	단면력	축력	-31.2 kN
		모멘트	19.01 kN·m

표 1.3 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck) 해석 결과 (계속)

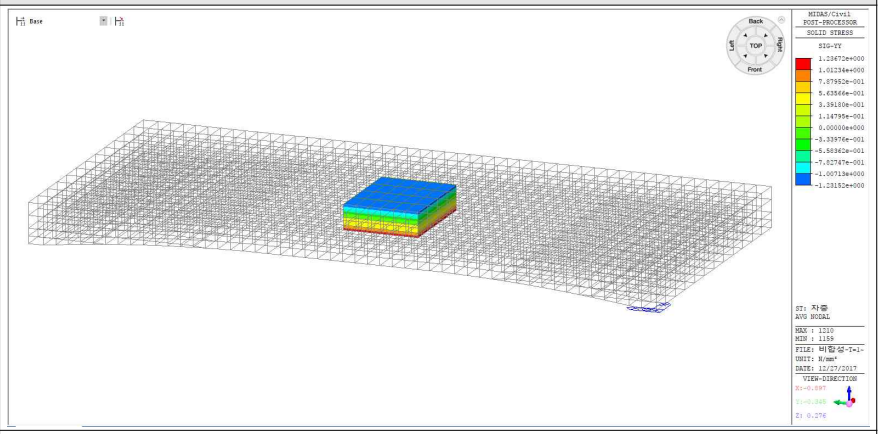
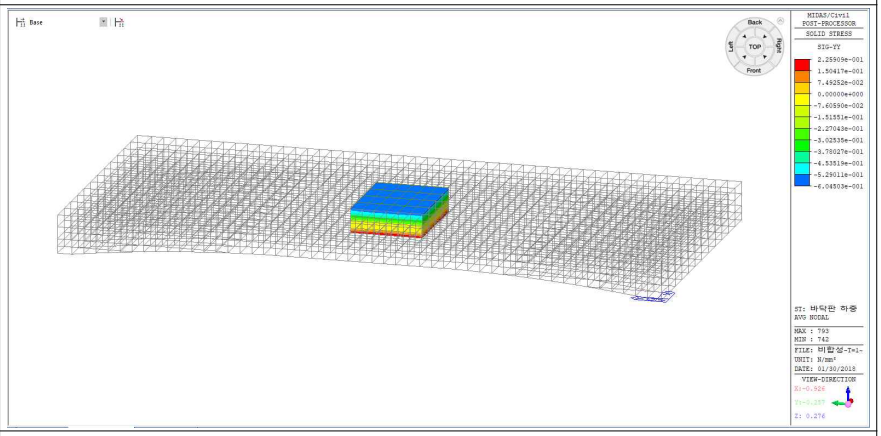
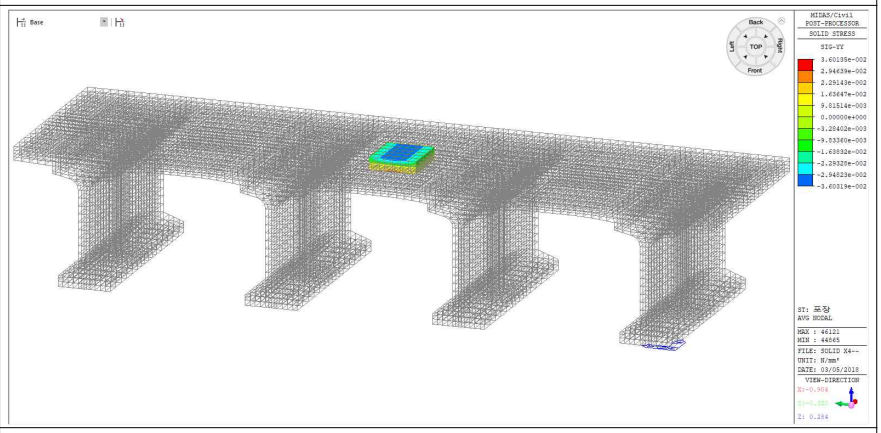
구 분			해석결과
자중	응력도		
	응력	상연	-1.23 MPa
		하연	1.24 MPa
	단면력	축력	0.25 kN
		모멘트	2.06 kN·m
바닥판 하중	응력도		
	응력	상연	-0.60 MPa
		하연	0.23 MPa
	단면력	축력	-18.91 kN
		모멘트	0.69 kN·m
2차 고정 하중 (포장)	응력도		
	응력	상연	-0.04 MPa
		하연	0.04 MPa
	단면력	축력	0.0 kN
		모멘트	0.38 kN·m

표 1.3 아치형상 프리캐스트 하프덱(Arch Deck) 해석 결과

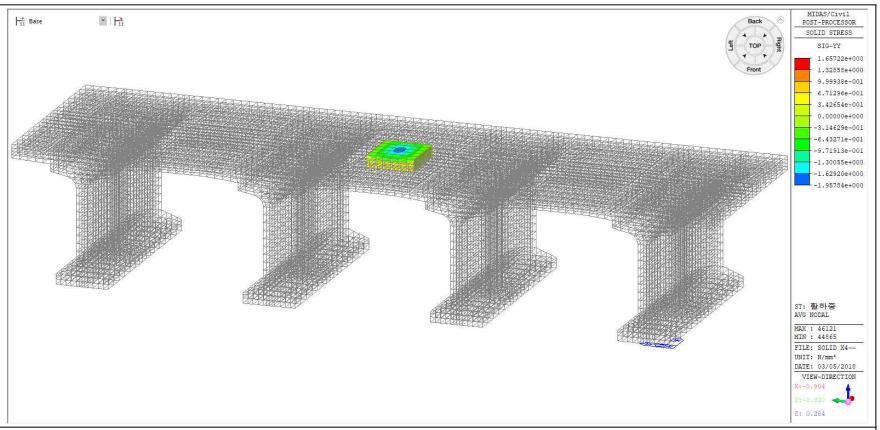
활하중	응력도		
	응력	상연	-1.96 MPa
		하연	1.66 MPa
	단면력	축력	-36.0 kN
		모멘트	17.37 kN·m

표 1.4 해석 결과 비교 (중앙부 모멘트)

구 분	Flat Deck	Arch Deck	비 율 (Arch Deck / Flat Deck)
자 중	1.93 kN·m	2.06 kN·m	106.7 %
바닥판 하중	2.76 kN·m	0.69 kN·m	25.0 %
2차고정하중	0.48 kN·m	0.38 kN·m	79.2 %
활 하 중	19.01 kN·m	17.37 kN·m	91.4 %
합 계	24.18 kN·m	20.50 kN·m	84.8 %

단면 해석 비교 결과, 아치형상 프리캐스트 하프덱은 일반 프리캐스트 하프덱에 비해 발생 응력이 작았으며, 2차고정하중으로 인한 부모멘트는 더 크게 발생하여 최종발생 응력을 감소시키는 요인이 되었다. 또한, 모멘트 비교 결과 아치형상 프리캐스트 하프덱 모멘트가 합성 전에는 약 41%, 전체 하중으로는 약 15% 감소하여 아칭효과가 충분히 발현되는 것으로 확인되었다.

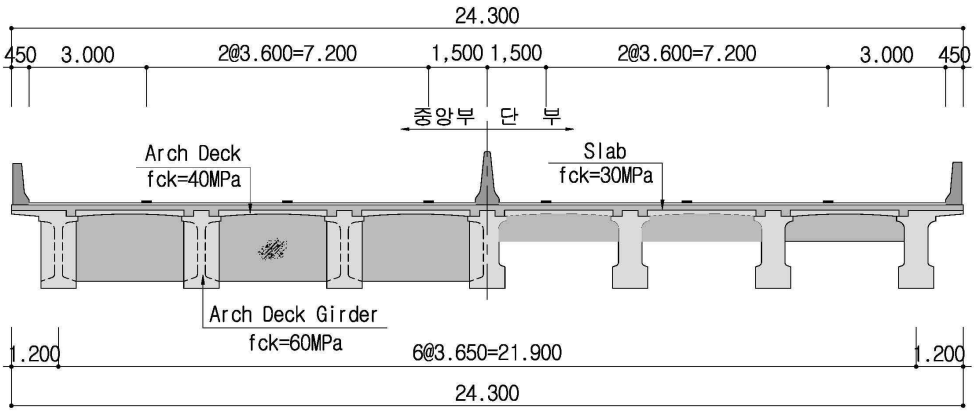
1.2 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 거더의 단면 최적화

본 기술은 상기 내용과 같이 아치형상 프리캐스트 하프덱을 장지간 바닥판에 적용할 수 있는 공법으로 거더 간격을 늘리고 거더 본 수를 감소 할 수 있다. 이에 따라, 기존 개량형 PSC 거더 대비 동일 지간·동일 형고를 확보할 수 있는 저형고 PSC 거더 개발을 위하여 단면 최적화 방안에 대하여 검토하였다.

(1) 대상교량 및 설계조건

아치덱 거더의 단면최적화를 위하여 다음과 같은 대상교량 및 상부플랜지 폭원, 하부플랜지 폭원, 복부 두께, 상부 돌출플랜지 두께와 폭원 등 변수를 선정하여 설계조건을 만족하도록 검토를 수행하였다.

① 횡단면도 (설계단면)



② 경 간 구 성 : 40.0m (단경간)
③ 교 량 등 급 : 1등급교량 (KL-510)
④ 설 계 기 준 : 한계상태설계법
⑥ 강 도 : 거더 60MPa, 데크 40MPa, 바닥판 30MPa
⑦ PS 강 연 선 : fpu = 1,900 MPa
fpy = 1,600 MPa
⑧ 곡률 마찰계수 : μ = 0.19
⑨ 파상 마찰계수 : κ = 0.001 ~ 0.007
⑩ 철근 항복강도 : 400MPa

⑪ 사용한계상태 하중조합 응력한계

항 목	하중조합	응력한계	비고
콘크리트 압축응력	PS 도입시	0.60 f_{ci} = -30.6 MPa	
	유효PS + 사용하중조합-Ⅰ	0.60 f_{ck} = -36.0 MPa	
	유효PS + 사용하중조합-Ⅴ	0.45 f_{ck} = -27.0 MPa	
콘크리트 인장응력	PS 도입시	0.70 f_{ctm} = 3.1 MPa	
	유효PS + 사용하중조합-Ⅰ	0.70 f_{ctm} = 3.4 MPa	
	유효PS + 사용하중조합-Ⅴ	f_{cta} = 0.0 MPa	영응력한계상태
PS강재 응력	최대 긴장력($f_{0,max}$)	0.80 f_{pu} = 1,520 MPa	두 값 중 작은 값
		0.90 f_{py} = 1,440 MPa	
	PS도입 직후(f_{pmo})	0.75 f_{pu} = 1,425 MPa	두 값 중 작은 값
		0.85 f_{py} = 1,360 MPa	

(2) 단면 최적화

① 복부두께

복부 두께는 휨 및 전단 설계에 사용하는 단면적, 단면 1차모멘트, 단면 2차모멘트 등의 단면계수 산정에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 복부에 설치되는 철근, 쉬스관 등을 고려한 시공성과 중량 최소화를 위하여 최소피복두께를 만족하는 범위 내에서 복부두께를 산정하였다. 최소피복두께는 도로교설계기준(한계상태설계법)과 한국도로공사에서 시행하고 있는 콘크리트 거더교 최소피복 적용(안)을 기준하였다. 표 1.5는 철근 및 프리스트레싱 강재의 내구성을 고려한 도로교설계기준에서 제시하는 최소피복두께 이고, 표 1.6은 부착에 대한 요구사항을 고려한 최소피복두께이다.

표 1.5 철근 및 프리스트레싱 강재의 내구성을 고려한 최소피복두께

강재종류	노출등급						
	E0	EC1	EC2/EC3	EC4	ED1/ES1	ED2/ES2	ED3/ES3
철근	20	25	35	40	45	50	55
프리스트레싱 강재	20	35	45	50	55	60	65

표 1.6 부착에 대한 요구사항을 고려한 최소피복두께

강재종류	최소피복두께 ($t_{c,\min,b}$)
일반	철근 지름
다발	등가 지름
포스트텐션 부재	원형 덕트 경우 : 덕트 지름 직사각형 덕트 경우 : 작은 치수 혹은 큰 치수의 1/2배 중 큰 값으로 50mm 이상인 값 (단. 두 종류의 덕트에 대하여 피복두께가 80mm보다 큰 경우는 없음)
프리텐션 부재	강연선 및 원형 강선 경우 : 지름의 2배 이형 강선 경우 : 지름의 3배

□ 도로교설계기준 2015 (한계상태설계법)

○ 기본 개념 및 공칭피복두께 결정 절차

- 콘크리트 부착과 부식관련 환경에 따른 최소피복 결정 후
- 시공조건, 콘크리트 강도, 품질관리 조건에 따라 최소 피복 감소
- 설계편차를 추가하여 공칭피복두께 결정

$$t_{c,\min} = \max\{t_{c,\min,b};\ t_{c,\min,dur} + \Delta t_{c,dur,\gamma} - \Delta t_{c,dur};\ 10mm\}$$

$$t_{c,nom} = t_{c,\min} - \Delta t_c + \Delta t_{c,dev}$$

- $t_{c,\min}$ = 최소 피복 두께(mm)
- $t_{c,\min,b}$ = 부착의 요구사항 만족하는 최소피복두께(mm)
- $t_{c,\min,dur}$ = 환경조건에 의한 요구사항 만족하는 최소피복두께(mm)
- $\Delta t_{c,dur,\gamma}$ = 고부식성 노출환경에서 피복두께 증가값(mm)
  : 5 mm(ED1/ES1), 10 mm(ED2/ES2), 15 mm(ED3/ES3)
- Δt_c = 강도, 품질관리 등에 따른 피복두께 감소값(mm)
- $t_{c,nom}$ = 공칭 피복 두께(mm)
- $\Delta t_{c,dev}$ = 설계 편차 허용량(mm)

□ 한국도로공사 최소피복두께 적용(안) : 피복두께 관련 규정

○ 고부식성 환경에서의 피복두께 추가 기준 [5.10.4.2 (2)]

- 염화물 또는 해수에 노출되는 고부식성 환경에서는 추가적 안전을 위해 최소 피복두께 만큼 증가

  $\Delta t_{c,dur,\gamma}$ = 5 mm(ED1/ES1), 10 mm(ED2/ES2), 15 mm(ED3/ES3)

  ☞ PS강재는 철근 안쪽에 배치되므로 추가 피복두께기준을 적용하지 않아도 무방할 것으로 판단됨

○ 최소피복두께 감소 기준 [5.10.4.2 (6)]

- 환경조건의 기준강도보다 설계강도가 일정량 큰 경우 : 5mm 감소

  ☞ 피복이 부족한 경우 거더의 강도 상향 검토

- 시공 중 철근 위치 변동 없는 슬라브 형상 부재 : 5mm 감소

  ☞ PS강재는 일반적으로 복부 중앙에 위치하고, 그에 따른 철근 배치 변동이 없는 것으로 판단하여 피복두께 감소 가능

- 콘크리트 제조의 특별한 품질관리방안이 확보된 경우 : 5mm 감소

  ☞ 레미콘 공장을 관리(공급원 승인 제도)하므로 피복두께 감소 가능

○ 설계 편차 허용량 [5.10.4.3]

- 일반적인 경우 : $\Delta t_{c,dev}$ = 10mm
- 콘크리트 피복두께를 측정하는 품질보증시스템이 있는 경우 :

  5mm ≤ $\Delta t_{c,dev}$ ≤ 10mm

  ☞ 현장에서 피복을 검측하므로 5mm 감소 가능

상기 기준 ED1 노출등급으로 검토한 결과 콘크리트 강도 및 품질, 철근 배치 등의 조건에 의해 총 10mm 피복두께 감소가 가능하여 최소 피복두께는 35mm이상을 만족하면 된다. 따라서, 덕트의 최대 직경을 65mm 이하로 사용한다는 조건하에 복부두께를 200mm로 결정하였다. 한계상태설계법에서는 덕트 규격에 대한 기준이 없기 때문에 덕트면적은 도로교설계기준(2010)을 준용하여 PS강재의 순단면의 2배 이상으로 적용하였다. 65mm 덕트 사용 시 강연선의 개수는 최대 10가닥까지 적용 가능하며, 덕트 당 강연선 개수가 추가로 필요한 경우에는 일반 강연선이 아닌 인장강도 2400MPa의 고강도 강연선을 적용하여 필요 긴장력을 만족 할 수 있다.

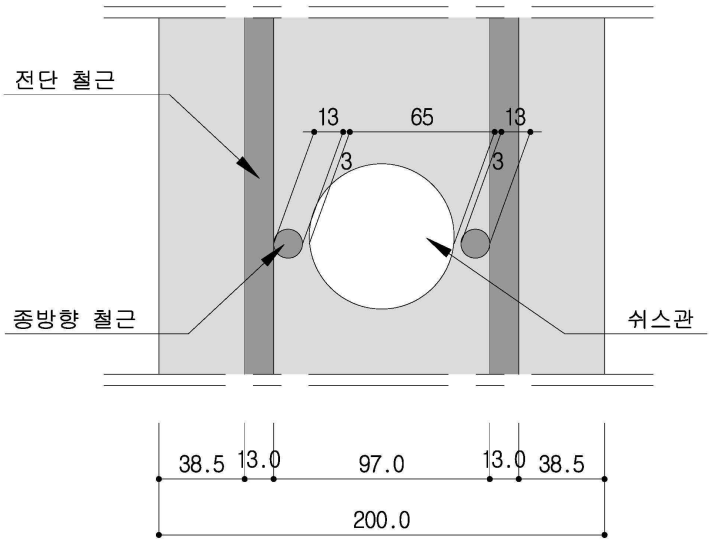


그림 1.7 아치덱 거더 복부 두께

② 돌출플랜지 크기

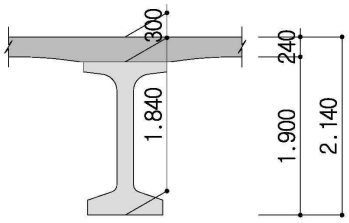
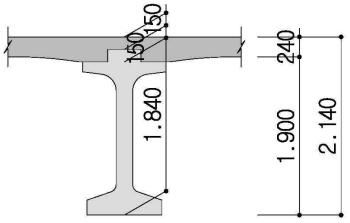
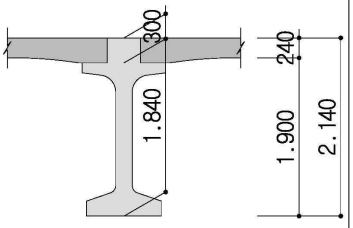
아치덱 거더의 돌출플랜지는 아치덱 설치 후 바닥판 하중, 2차고정하중, 활하중이 작용할 때 바닥판의 아칭작용 발현을 위하여 횡방향 구속 역할을 하며, 거더의 단면효율을 증가시킨다.

앞서 언급하였듯이 아치덱과 거더의 돌출플랜지 철근을 연결하기 위해서는 돌출플랜지 측면으로 작업 공간이 300mm이상 필요하다. 이와 같은 조건을 고려하여 상부플랜지 폭은 1,000mm, 돌출플랜지의 폭은 400mm로 결정하였다. 돌출플랜지의 높이에 대한 검토는 다음과 같다.

㉮ 돌출플랜지의 효과

돌출플랜지의 단면 효과를 확인하기 위해 표 1.7과 같이 세 가지 단면을 비교하였다. Type 1은 일반 PSC 거더와 동일한 돌출플랜지가 없는 단면이며, Type 2는 바닥판을 일부 포함하는 단면, Type 3는 바닥판 높이까지 돌출플랜지를 갖는 거더 단면이다. (지간 40m, 형고 2.14m(바닥판포함) 단면 형상으로 비교) 특히, Type 2 단면은 그림 1.8과 같이 거더를 바닥판에 매립할 경우 바닥판의 최소두께를 만족하는 기준(도로교설계기준 2010)을 적용하여 돌출플랜지의 높이를 산정하였다.

표 1.7 돌출 플랜지 크기에 따른 단면 계수

구 분	Type 1 돌출 플랜지 없음	Type 2 돌출 플랜지 높이(150mm)	Type 3 돌출 플랜지 높이(300mm)
단 면			
A (m^2)	0.666	0.726 (109%)	0.786 (118%)
e (m)	0.879	0.964 (110%)	1.048 (119%)
I (m^4)	0.301	0.360 (120%)	0.427 (142%)

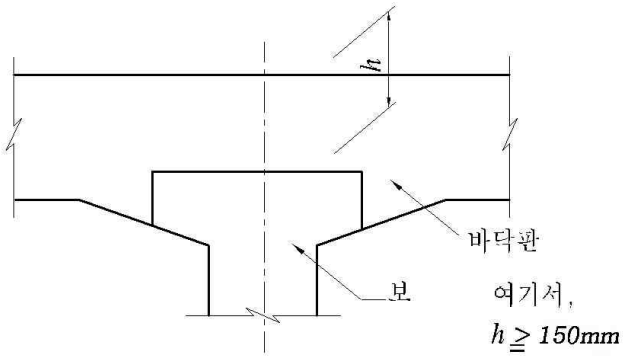


그림 1.8 거더를 바닥판에 매립할 경우 바닥판의 최소두께(도로교설계기준 2010)

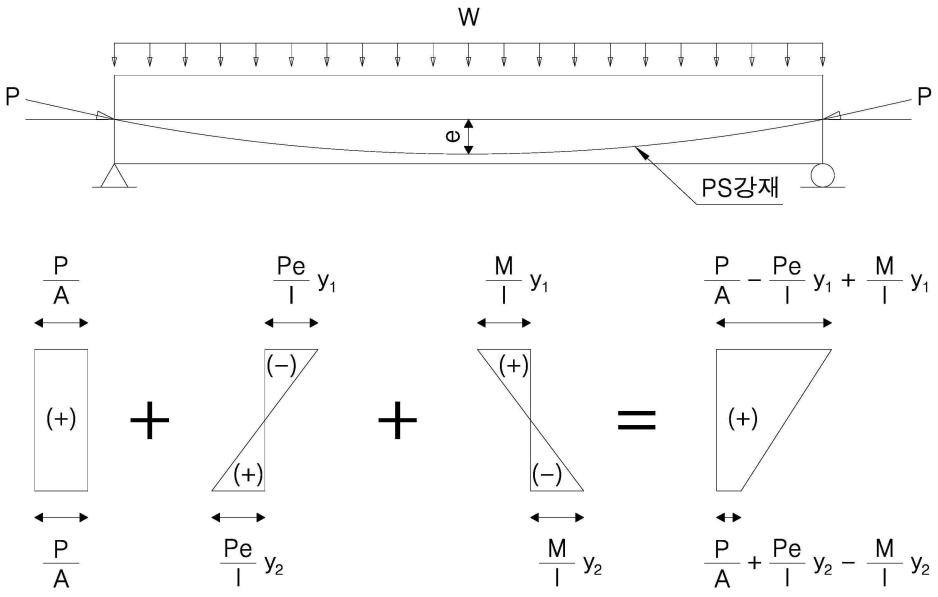
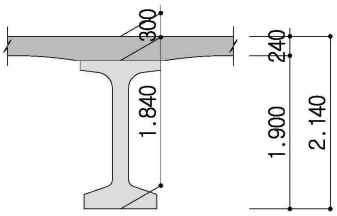
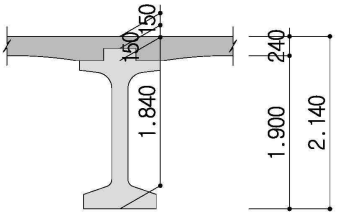
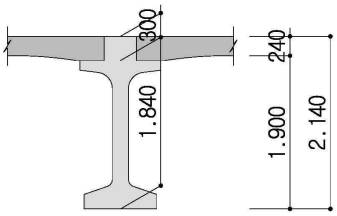


그림 1.9 프리스트레스트 콘크리트의 기본 개념

표 1.7의 Type 2, Type 3과 같이 바닥판을 포함한 동일 형고에서 바닥판 면적의 일부분을 거더 단면으로 포함하면, 거더 단면적은 Type 1에 비해 9%, 18% 증가하며, 편심은 각각 10%, 19% 증가하고, 단면 2차모멘트는 20%, 42%가 증가한다. 그림 1.9의 프리스트레스트 콘크리트의 기본 개념에서 알 수 있듯이, 동일 긴장력 일 때 편심의 증가는 모멘트를 증가시켜 단면효율을 높이며, 단면 2차모멘트의 증가는 작용하중에 대한 응력을 감소시켜 단면효율을 높인다.

표 1.8은 돌출플랜지에 대한 영향을 앞 절과 동일한 조건으로 응력에 대해 검토한 결과이다. 돌출플랜지가 없는 Type 1의 경우 긴장 시 하연에서 허용응력을 초과하였으며, 사용하중 작용 시에는 하연 응력이 허용응력을 만족하지만 허용응력에 대한 안전율은 없는 것으로 판단된다. Type 1의 경우 허용기준을 만족하기 위해서는 거더의 형고를 높여 단면계수를 증가하여야 한다. Type 3는 긴장 시와 사용하중 작용 시 허용기준을 만족하지만, 긴장 시 상연에 인장응력이 발생하므로 예기치 못한 상황에 대한 안전율이 부족하다. Type 2의 응력 검토 결과 긴장시와 사용하중 작용 시 허용기준을 모두 만족한다.

표 1.8 돌출 플랜지 높이에 따른 응력검토

구 분	Type 1 돌출 플랜지 없음			Type 2 돌출 플랜지 높이(150mm)			Type 3 돌출 플랜지 높이(300mm)		
단 면									
긴장 시 응력검토	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	2.03	**31.15**	**N.G**	0.31	30.40	O.K	-1.00	29.60	O.K
사용하중 작용 시 응력검토	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	24.43	-0.78	O.K	21.75	0.09	O.K	29.86	0.72	O.K

㉯ 솟음량 검토

교량 시공에서 중요한 요소 중 하나는 도로 종단선형을 맞추기 위한 솟음량 관리이다. 따라서 상기 검토된 아치넥 거더의 Type1 ~ Type3의 단면 중 허용응력을 만족하는 Type2와 Type3에 대한 솟음량 검토를 수행하였다. 동일 지간에 대해 동일한 강선량으로 긴장한다면 자중과 단면 2차모멘트 영향에 의해 Type 2가 Type 3 보다 큰 솟음이 발생한다. 하지만, 바닥판 타설단계에서는 바닥판 하중이 Type 2가 Type3 보다 크게 되므로 Type 3이 Type 2보다 큰 솟음이 발생한다. 그리고 Type 3은 돌출플랜지가 바닥판 상면까지 돌출되어 시공 중 발생할 수 있는 솟음 오차에 대하여 조절 할 수 있는 여유가 없을 것으로 판단되며, Type 3는 Type 2에 비해 중량이 커서 제작 및 운반시 시공성과 경제성이 결여되는 단점이 있다.

따라서, Type 2 형태가 교량 시공 시 솟음량에 대한 시공오차를 조절 할 수 있기 때문에 관리 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

표 1.9 돌출 플랜지 크기에 따른 처짐 검토

솟음량	Type 2		Type 3	
	단계별	누 계	단계별	누 계
자중	47.6	-	43.5	-
프리스트레스	-129.4	**-81.8**	-122.0	**-78.5**
바닥판 타설 전 크리프	-64.7	**-146.5**	-60.8	**-139.3**
바닥판 하중	66.4	**-80.1**	55.1	**-84.2**
2차고정하중	11.2	**-68.9**	11.1	**-73.1**
완공 후 크리프	6.9	**-62.0**	-3.7	**-76.8**
프리스트레스 장기손실	9.4	**-52.6**	9.5	**-67.3**

③ 상·하부플랜지 폭원

아치텍 거더의 최적단면 산정을 위하여 상부플랜지와 하부플랜지 폭원이 거더 단면에 미치는 영향을 검토 하였다. 상·하부 플랜지의 영향을 검토하기 위하여 폭 24.3m 연장 60.0m의 대상교량을 선정하였고, 콘크리트 강도(f_{ck})와 복부폭(b_w), 돌출플랜지폭(b_p), 형고(H)에 대한 변수는 각각 60MPa, 200mm, 400mm, 1.99m (바닥판 포함한 총 형고 2.14m)로 설정하였다. 표 1.10은 상부플랜지 900mm~1200mm, 하부 플랜지 800mm~1100mm에 대한 각 단면의 프리스트레스 도입 시 응력을 검토한 결과이며, 표 1.11은 사용하중 재하 시 응력검토 결과이다. 표 1.12는 단면별 거더의 횡단면도 및 중량이다.

상부플랜지와 하부플랜지의 폭원을 결정하기 위하여 프리스트레스 도입 시와 사용하중 작용 시의 응력을 검토 하였다. 응력 검토 결과, 하부 플랜지가 800mm인 경우 프리스트레스 도입 시 허용 응력을 모두 초과하였으며, 하부플랜지가 900mm이상인 경우는 프리스트레스 도입 시와 사용하중 작용 시 모두 허용응력을 만족하였다. 따라서, 응력 검토 결과와 거더의 중량을 고려 할 때 상부플랜지와 하부플랜지의 폭원이 900mm인 단면이 최적화된 단면이다.

하지만, 돌출플랜지 폭이 400mm일 때 상부플랜지 폭을 900mm로 적용하면 아치텍 설치 후 횡방향 구속을 위한 커플러 체결 시 단턱(돌츨플랜지 측면)의 폭이 250mm가 되어 작업공간이 협소하기 때문에 설치가 불가능하다. 커플러 체결을 위하여 돌출플랜지의 폭을 300mm로 할 수도 있으나, 이 경우 거더의 응력이 허용기준을 만족하지 못한다. 따라서, 허용응력을 모두 만족하며 중량이 가볍고 커플러 체결 등 시공성이 확보된 상부플랜지 1,000mm, 하부플랜지 900mm인 단면이 아치텍 거더의 최적단면으로 판단된다.

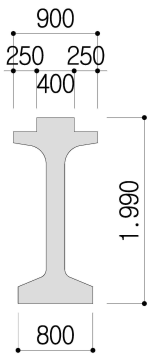
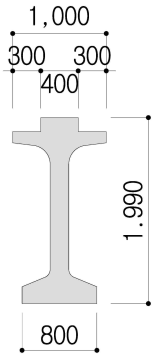
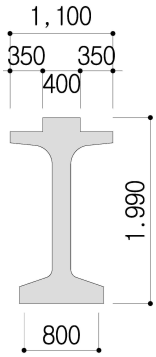
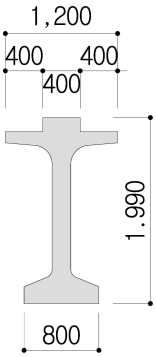
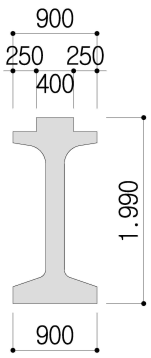
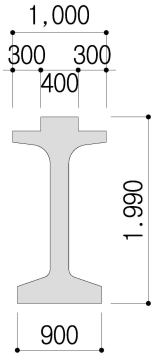
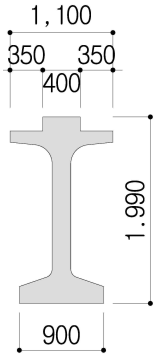
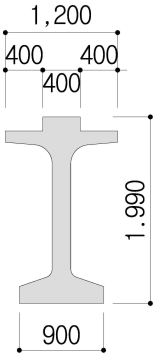
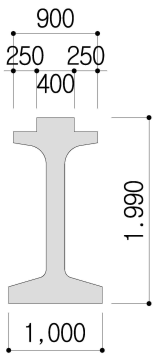
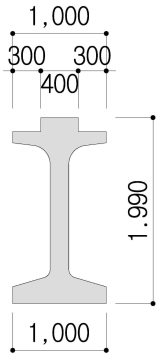
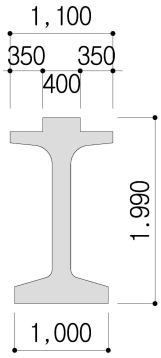
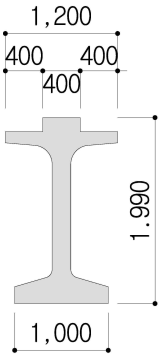
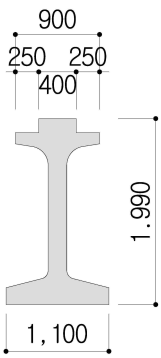
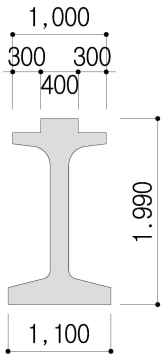
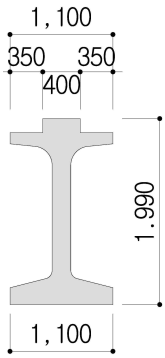
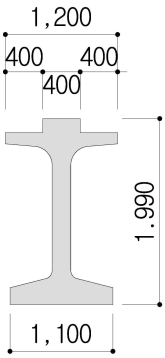
표 1.10 프리스트레스 도입 시 응력검토

상부 / 하부	900mm			1000mm			1100mm			1200m		
800mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	-0.83	33.61	N.G	-0.80	33.45	N.G	-0.45	32.97	N.G	-0.43	32.81	N.G
900mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	0.31	30.55	O.K	0.31	30.40	O.K	0.30	30.27	O.K	0.31	30.12	O.K
1000mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	1.22	28.37	O.K	1.22	28.46	O.K	1.15	28.12	O.K	1.12	28.00	O.K
1100mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	1.83	27.06	O.K	1.77	26.94	O.K	1.71	26.84	O.K	1.67	26.72	O.K

표 1.11 사용하중 작용 시 응력검토

상부 / 하부	900mm			1000mm			1100mm			1200m		
800mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	21.89	0.68	O.K	21.18	0.60	O.K	20.80	0.35	O.K	20.13	0.35	O.K
900mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	22.48	0.16	O.K	21.75	0.09	O.K	21.04	0.12	O.K	20.37	0.13	O.K
1000mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	22.94	0.05	O.K	22.15	0.17	O.K	21.47	0.03	O.K	20.77	0.04	O.K
1100mm	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정	상연	하연	판정
	23.20	0.16	O.K	22.44	0.44	O.K	21.70	0.48	O.K	20.99	0.49	O.K

표 1.12 아치텍 거더의 단면별 횡단면도 및 중량

상부 / 하부	900mm	1000mm	1100mm	1200m
800mm				
	76.2 ton (N.G)	77.6 ton (N.G)	80.9 ton (N.G)	82.2 ton (N.G)
900mm				
	78.8 ton (N.G)	80.2 ton	81.6 ton	82.9 ton
1000mm				
	81.5 ton (N.G)	82.9 ton	84.2 ton	85.6 ton
1100mm				
	84.2 ton (N.G)	85.6 ton	86.9 ton	88.2 ton

1.3 연장별 표준단면

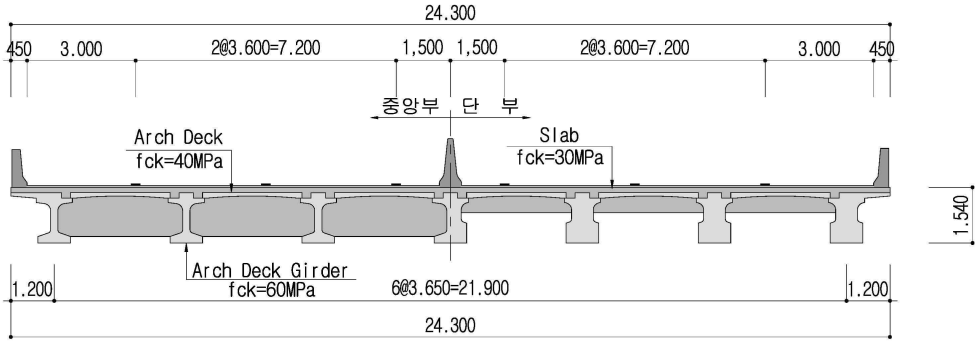
표 1.13은 I형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 및 저형고이다.

표 1.13 I형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 및 저형고(바닥판 포함)

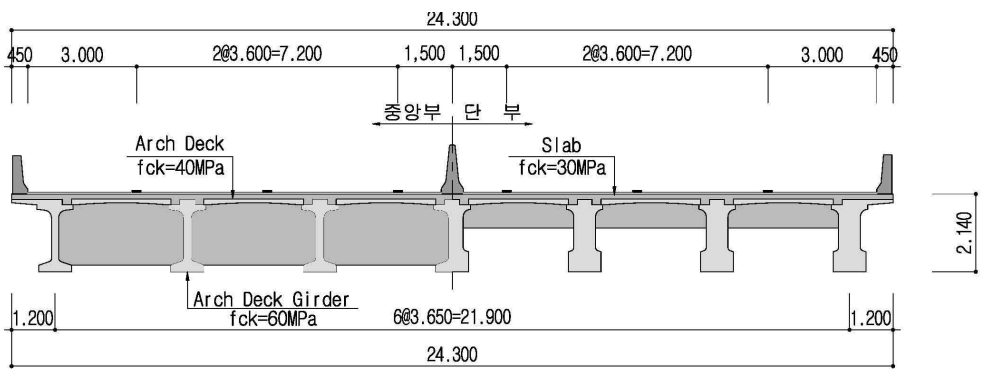
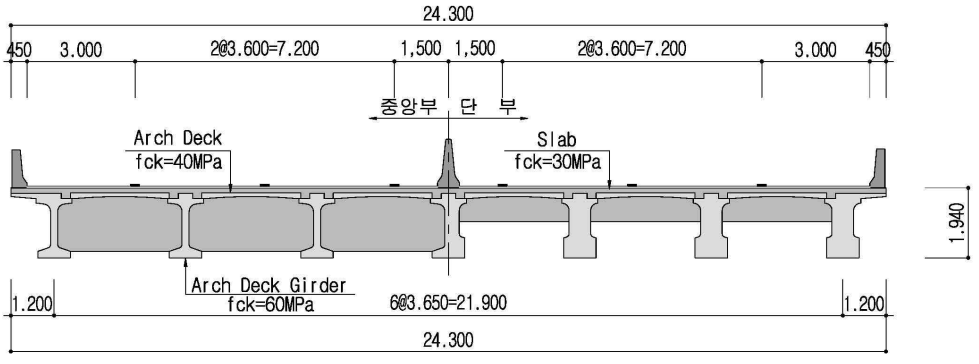
구 분	30 m	40 m	50 m	60 m
표준형고	1.54 m	2.14 m	2.74 m	2.74 m
저 형 고	1.54 m	1.94 m	2.54 m	2.74 m

I형상 아치덱 거더를 적용한 폭 24.3m에 대한 지간 30m~60m의 표준단면은 다음과 같다.

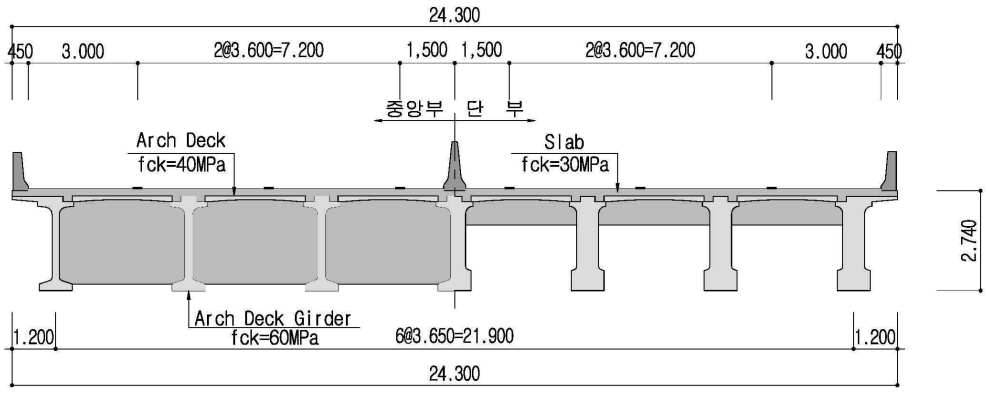
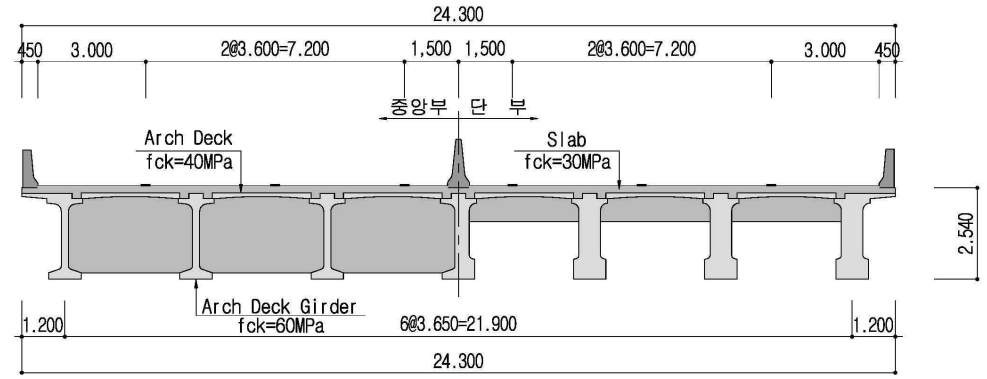
① L=30m

표준 / 저형고 H = 1.54m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	

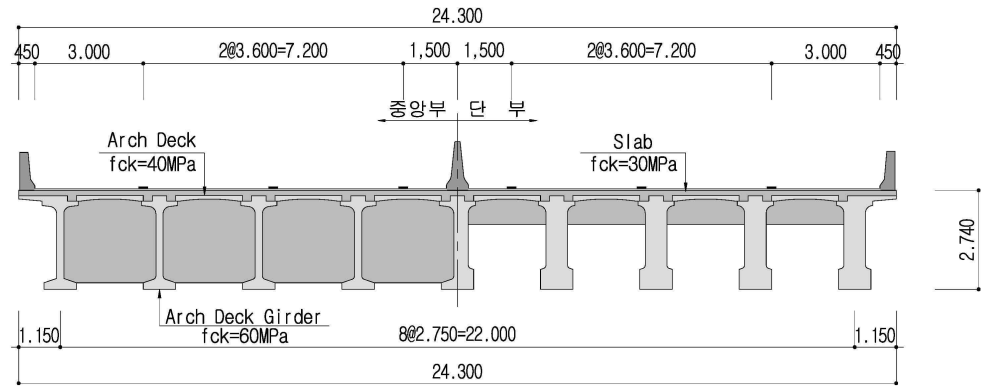
② L=40m

표 준 H = 2.14m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	
저 형 고 H = 1.94m 7주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

③ L=50m

표 준 H = 2.74m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	
저 형 고 H = 2.54m 7주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

④ L=60m

표준 / 저형고 H = 2.74m 9주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

상기와 같이 지간 30m 거더의 표준형고와 저형고는 정착구 설치를 위해 필요한 최소 형고 1.39m(바닥판 포함 형고 1.54m)로 동일하다. 지간 40m와 50m의 경우, 프리스트레스 도입 시 강도(f_{ci})를 설계기준강도(f_{ck})의 100%를 확보하게 되면 추가적인 긴장력 도입이 가능하여 표준형고($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)에 비해 형고가 0.2m 더 낮아 질 수 있다. 또한, 거더 본수를 추가하여 거더간 간격을 3.65m이하로 설계한다면 형고를 더 낮출 수 있다. 60m의 경우, 거더 중량 및 시공성을 고려하여 형고 2.59m로 설계하였다. 아치덱 거더는 기존 개량형 PSC 거더 보다 형고가 낮아 다리 밑 공간 확보에 유리할 뿐만 아니라 우수한 경쟁력을 보유할 것으로 예상된다.

1.4 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 Box 형상 거더의 표준단면

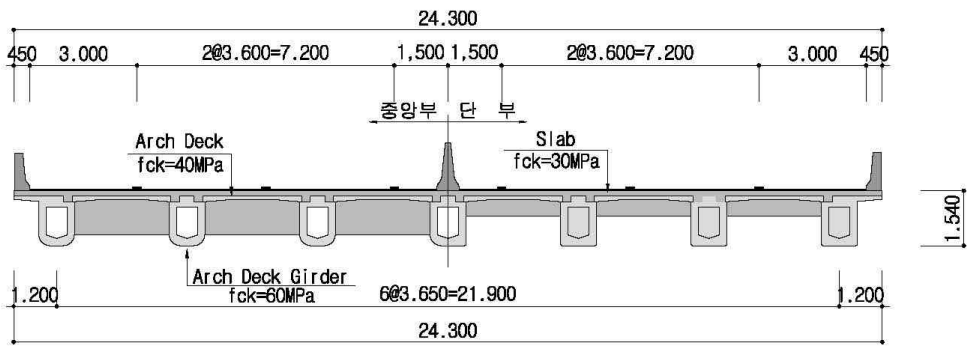
아치덱을 적용한 장지간 바닥판은 I형상의 PSC 거더에만 적용 가능한 것이니라 Box 형상의 PSC 거더에도 적용할 수 있다. Box 형상의 거더는 I형상의 거더와 동일하게 거더 상부에 돌출 플랜지를 형성하여 아치덱의 아칭액션이 발생할 수 있도록 경계조건을 형성하였고 돌출 플랜지로 인하여 거더의 단면적, 강연선의 편심 및 단면 2차 모멘트를 증가 시킬 수 있다. Box형상은 I형상 보다 비틀림에 대한 강성이 커서 제작, 운반 및 가설 시 안정성이 우수한 장점이 있으며, I형상의 PSC 거더 보다 단면적이 커서 더 많은 긴장력 도입이 가능하여 거더의 형고를 낮출 수 있는 장점을 지닌다. 표 1.14는 Box 형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 및 저형고이다.

표 1.14 Box형상 아치덱 거더의 지간별 표준형고 (바닥판 포함)

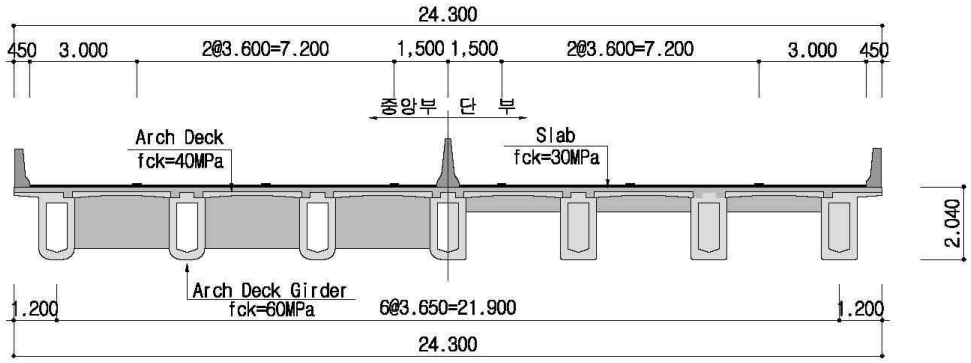
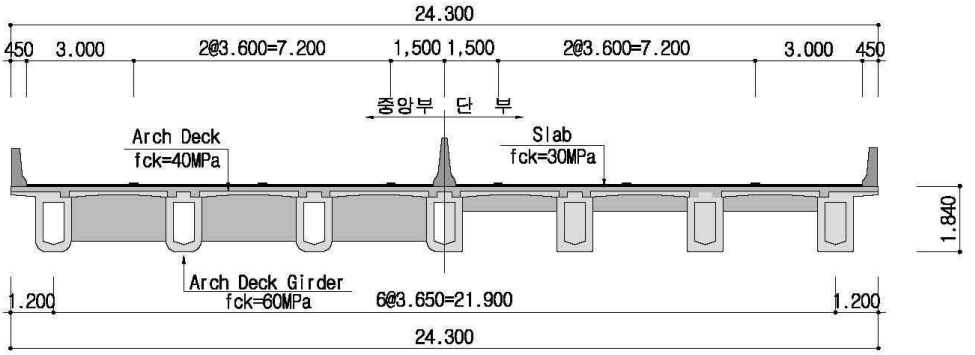
구 분	30 m	40 m	50 m	60 m
표준형고	1.54 m	2.04 m	2.54 m	2.64 m
저 형 고	1.54 m	1.84 m	2.34 m	2.54 m

Box 형상 아치덱 거더를 적용한 폭 24.3m에 대한 지간 30m~60m의 표준단면은 다음과 같다.

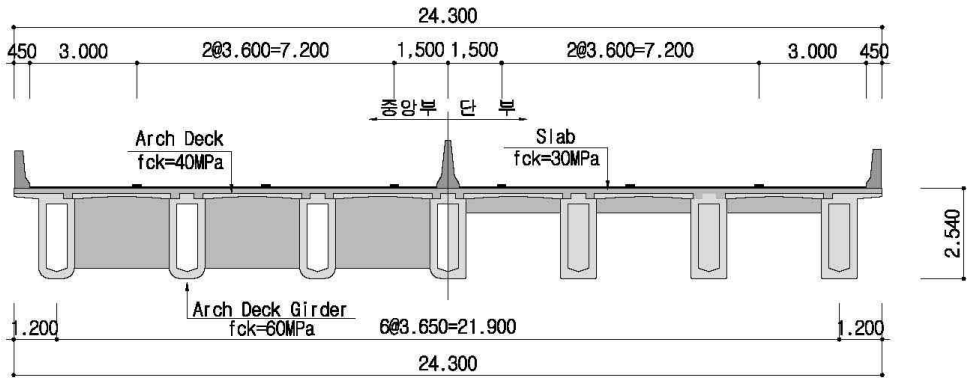
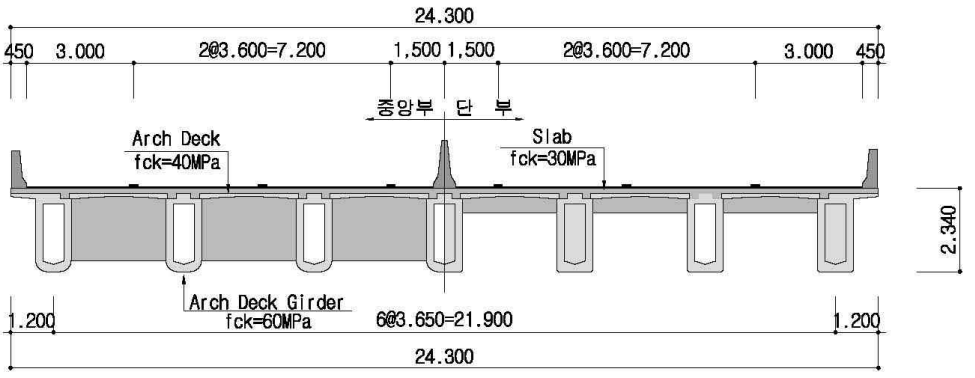
① L=30m

표준 / 저형고 H = 1.54m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	

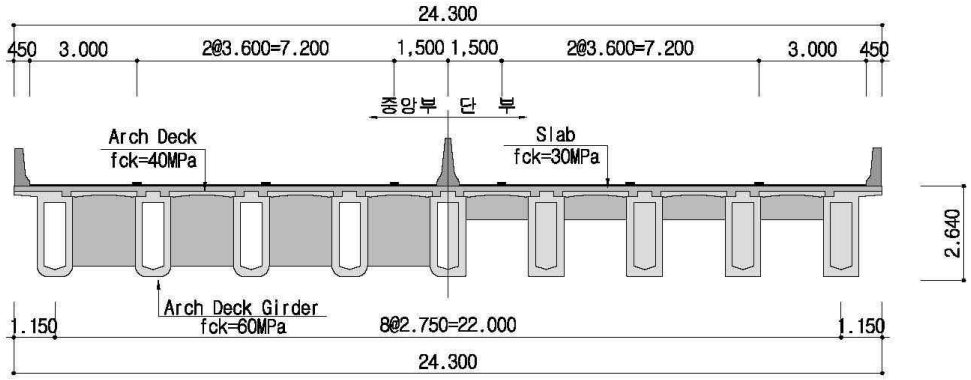
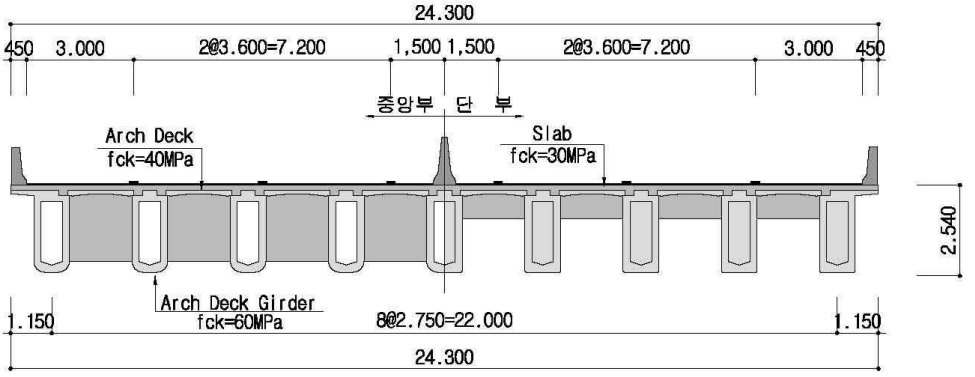
② L=40m

표 준 H = 2.04m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	
저 형 고 H = 1.84m 7주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

③ L=50m

표 준 H = 2.54m 7주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	
저 형 고 H = 2.34m 7주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

④ L=60m

표 준 H = 2.64m 9주형 ($f_{ci} = 0.85 f_{ck}$)	
저 형 고 H = 2.54m 9주형 ($f_{ci} = 1.0 f_{ck}$)	

1.5 결 론

① 아치덱의 단면은 안전성 및 내구성이 우수하고 합성전 횡방향 구속이 가능하여 아칭효과를 발현할 수 있는 두께 100mm~160mm의 단면으로 결정하였다.

② 두께 100mm~160mm의 아치덱은 두께 및 휨강성이 증가하여 운반 및 설치 시 기존 프리캐스트 하프덱에 발생하는 균열, 탈락 등의 문제를 해결 할 수 있을 것으로 사료된다.

③ 또한, 아치덱은 교축방향 이음부에 루프형태의 철근을 겹이음하여 기존 프리캐스트 하프덱의 구조적 취약부인 교축방향 이음부를 개선하고 연속성을 확보하였다.

④ 아치덱의 단면 해석 결과, 기존 프리캐스트 하프덱(Flat Deck)에 비해 합성 전에는 약 41%, 전체 하중으로는 약 15%의 모멘트가 감소하여 아치덱의 아칭효과가 충분히 발현되는 것으로 확인되었다.

⑤ 아치덱의 아칭효과로 인하여 장지간 적용이 가능함에 따라 거더간 간격을 효율적으로 배분 할 수 있고, 기존 PSC 공법 교량에 비해 거더 본 수를 줄일 수 있어 경제성이 우수 할 것으로 사료된다.

⑥ 아치덱 거더의 복부 두께는 철근 및 쉬스관의 피복두께, 거더 중량 등을 고려하여 200mm로 결정하였다.

⑦ 아치덱 거더의 상부 플랜지와 하부 플랜지 폭원 검토 결과, 허용기준을 모두 만족하며 중량이 가볍고 커플러 체결 등 시공성이 확보된 상부플랜지 1000mm, 하부플랜지 900mm의 단면이 아치덱 거더의 최적단면으로 판단된다.

⑧ 아치덱 거더의 돌출플랜지 검토 결과, 도로교 설계기준, 응력검토 및 솟음량 등을 고려하였을 때, 바닥판을 일부 포함하는 돌출플랜지의 높이는 150mm가 적정할 것으로 판단된다.

⑨ 단면최적화를 통한 아치덱 거더의 표준화를 수행하였으며 I형상과 Box형상의 저형고 및 표준형고는 표 1.13과 표 1.14와 같은 결과를 도출하였다.

2. 아치덱 적용을 위한 바닥판 주철근의 연결방안

철근콘크리트 구조에서 사용하는 철근은 시공방법 및 생산규격에 의하여 시공 시 이음이 필요하다. 철근이음은 구조적으로 영향을 미칠 뿐만 아니라 구조물의 시공법 및 안전성과 밀접한 관계를 갖고 있다. 국내의 건설현장에서 주로 사용하고 있는 이음 방법에은 겹침이음, 가스압접, 용접이음, 기계적 이음 등이 있다.

겹침이음은 콘크리트를 타설하여 경화되어야 비로소 인장력을 발휘할 수 있으며, 콘크리트 강도와 피복두께가 충분치 못하면 철근에서 발생되는 응력에 의하여 콘크리트는 균열이 발생되기 시작한다. 겹침이음에서 외력에 의하여 콘크리트 부착균열 파괴가 형성되면 이는 휨 파괴에 비하여 급격한 내력 상실을 초래하므로 설계서 이음위치, 겹이음 길이, 피복두께, 철근간격 등을 충분히 고려하여 양생을 포함한 높은 품질의 콘크리트를 타설 할 필요가 있다. 기계적 이음은 2개의 철근을 모재와 같이 연결하여 시공함에 콘크리트의 부착강도와 관계없이 인장력에 저항할 수 있는 철근의 이음방법과 고도의 안전성 및 내구성을 갖고 있으며 비숙련공도 별도의 장비 없이 시공이 용이하고 경쟁력 있는 비용과 공기를 단축할 수 있는 철근의 이음방법으로, 기존 겹침 이음이나 가스압접보다도 높은 품질의 시공성과를 얻을 수 있다.

본 기술은 아치덱 설치 후, 거더의 돌출플랜지와 철근연결을 실시하여 횡방향(교축직각방향)으로 구속함으로써 아칭효과를 발현할 수 있도록 하여야 한다. 따라서, 콘크리트 타설 후 비로소 인장력을 발휘하는 겹침이음을 제외하고 가스압접, 용접이음 및 기계적 이음에 대하여 검토를 실시하였다.

2.1 철근 이음의 종류 (용접이음, 기계적 이음)

(1) 가스압접 이음

가스압접은 2개의 철근단부를 맞대어 놓고 산소-아세틸렌 가스 불꽃으로 약 1300℃로 가열하여 철근을 고상 상태에서 압력을 가한다. 접합면의 양원자 재배열이 곤란하므로 접합면을 그라인더(전기숫돌)로 깨끗이 마무리해서 시공하여야 한다.

가스압접은 철근의 단부를 국부적으로 가열하여 접합하므로 철근의 열 영향부와 시방규준의 상온가공 원칙에 의한 검토가 필요하다. 특히, 고강도 철근(SD40이상)은 고탄소, 고망간강으로 이루어져 압접 후 취약부가 발생할 수 있기 때문에 철저한 품질관리가 요구된다.

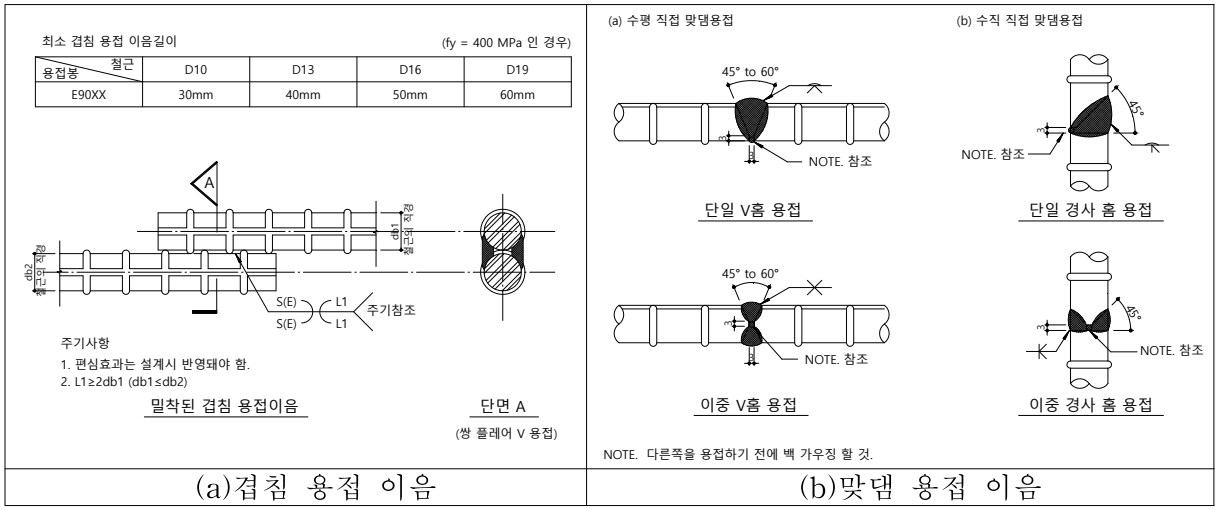




그림 2.1 가스압접 이음

(2) 용접 이음

철근의 용접이음은 열 에너지원으로 철근을 유연하게 녹여서 접합하는 방법으로서, 철근 단부와 용접봉이 녹은 혼합철 부분, 용접열에 의해 열 영향을 받은 철 부분으로 구성된다. 용접이음은 철이 고온에 가열되기 때문에 적절한 대책을 세우지 않으면, 철이 가열되어 산화해 철근 속에 들어있는 미소량의 원소(탄소, 망간등)를 연소시켜 버리므로 강도와 인성이 떨어지는 문제점이 생긴다.



(a)겹침 용접 이음 (b)맞댐 용접 이음

그림 2.2 용접 이음

(3) 기계적 이음

① 나사식 이음

단부 나사 가공이음은 이형철근의 단부에 나사가공을 하거나, 철근 단부에 별도로 나사를 마찰 압접한 후 커플러와 너트를 사용하여 접합하는 방식으로서 프리캐스트 콘크리트 부재 및 선 조립 공법 등의 특수한 목적 등에 사용이 용이한 이음이다.

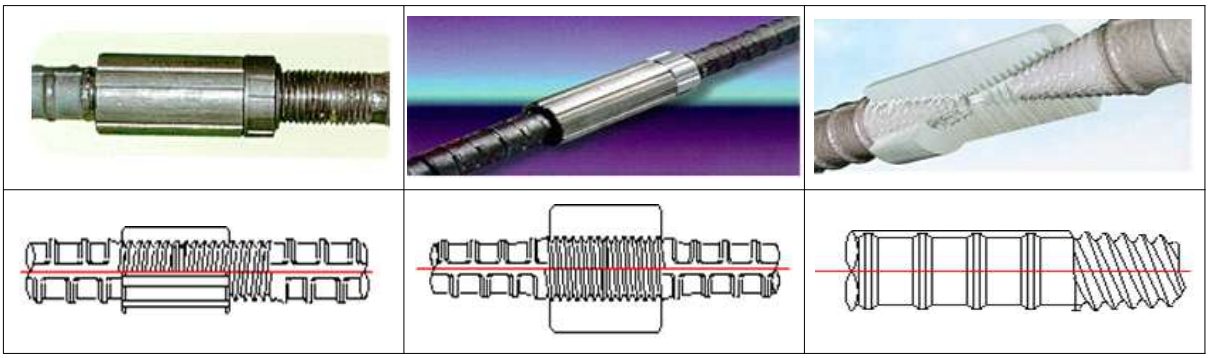


그림 2.3 나사식 이음

② 편체식 이음

마디 편체식 이음은 철근의 원주형마디 형상을 갖는 편체를 이용하는 이음방법으로서, 현장 시공이 간편하지만 철근 형상에 따른 호환성이 떨어지고 Rebar Slip이 발생하므로 모르타르 충진 등의 후속작업이 필요하다.

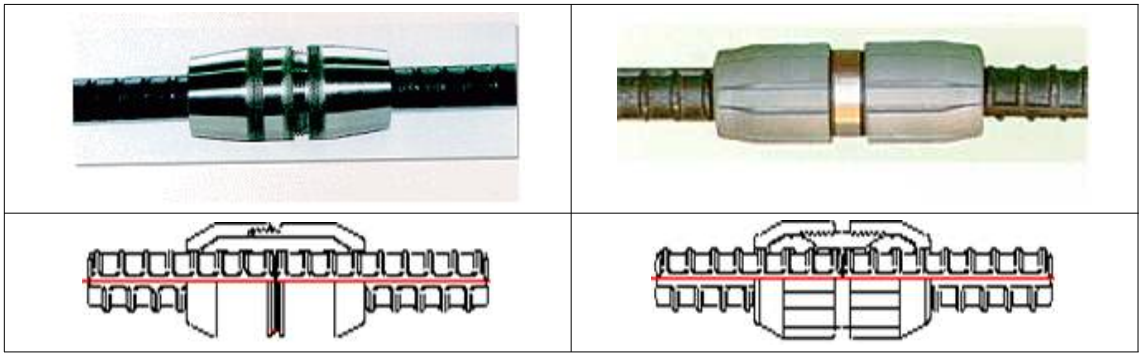
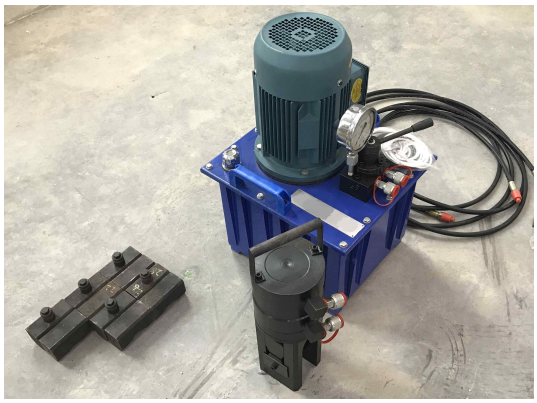


그림 2.4 편체식 이음

2.2 바닥판 주철근 연결 방안 결정

본 과제에서는 아치덱의 아칭효과 발현을 위하여 아치덱과 거더의 철근 (바닥판 주철근) 연결방안을 검토하였다. 검토 결과, 기계적 이음 중 콘크리트의 부착강도와 관계없이 인장력에 저항할 수 있으며 비숙련공도 시공이 용이하고 경제성이 우수한 강관 압착이음을 채택하였다. 강관 압착이음(이하 그립커플러) 관련 장비 및 부속품은 국내에서 생산 및 판매하지 않으므로 중국에서 사용되고 있는 그립 커플러와 유압 장비, 각 커플러별 압착 가능한 몰드(OCEPO사 제품)를 수입하여 사용하였다. 그림 2.7, 표 2.1은 OCEPO사의 그립 커플러 규격과 장비 사양이며, 국내에서 사용되는 철근 H16~H32까지 적용 가능하다.



(a) 그립커플러 장비



(b) 그립커플러 체결 준비



(c) 그립커플러 체결 작업



(d) 그립커플러 체결 완료

그림 2.5 그립커플러 시공사례

표 2.1 그립커플러 규격

	적용 철근 직경	커플러 제원(mm)		
		외경지름	두께	길이
	H16	30	5.0	120
	H19, H22	40	6.4	132
	H25	45	7.5	150
	H29	50	8.0	168
	H32	56	9.0	192

3. 성능평가

3.1 그립 커플러(Grip Coupler)의 성능평가

(1) 그립 커플러(Grip Coupler)의 검증 시험 방법

그립커플러의 적용을 위하여 기계식 이음의 KS 시험 규격인 KS D 0249에 의한 일방향 인장 실험, 잔류 변형량 및 저사이클 반복 시험을 통하여 그립 커플러의 성능을 검증 하였다. 각 항목에 대한 시험 방법 및 판정기준은 다음과 같다

① 일방향 인장 시험

일방향 인장 시험은 체결된 연결체의 결합력을 측정하는 평가 항목으로 KS B 0802에 따른다. 다람 이음의 인장 강도를 구하는 경우의 단면적은 이형 봉강에 대하여는 KS D 3504에 규정한 공칭 단면적으로 하고, 원형 봉강에 대하여는 KS D 3051에 표시한 표준 지름에 의하여 구한 단면적으로 한다. 또한 일방향 인장 시험의 결과는 모든 시험편이 모재 철근 규격 항복점의 125% 이상 또는 모재 철근의 규격 인장 강도 이상이어야 한다.

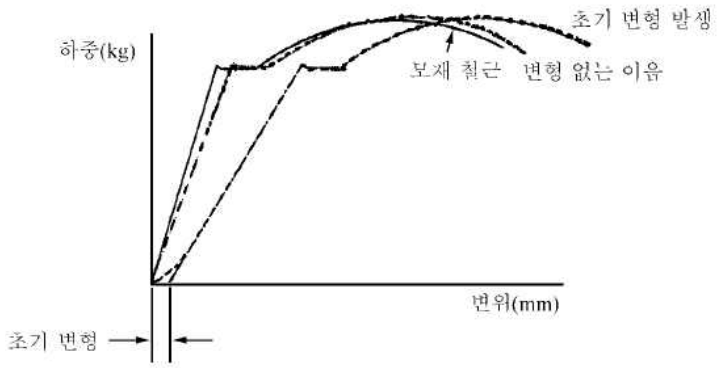


그림 3.1 일방향 인장 시험의 응력-변위 곡선

② 저사이클 반복 시험

저사이클 반복 시험은 모재 철근 규격 항복점의 90%(0.9 σ_y)에 해당하는 상한점과 5%(0.05 σ_y)에 해당하는 하한점을 100회 연속적으로 반복재하한 후 재차 파단될 때까지 인장 시험을 행한다.

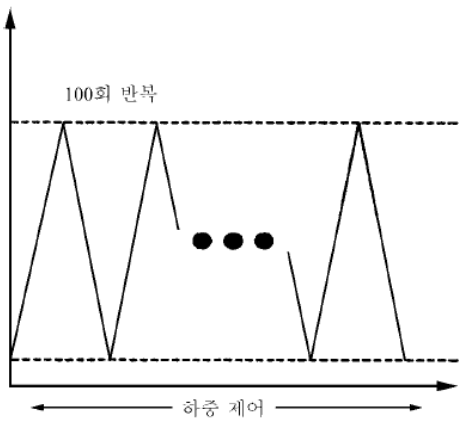


그림 3.2 저사이클 반복 시험 방법의 개요도

③ 정적내력 시험 (잔류변형량)

정적내력시험은 상온에서의 정적 인장 시험을 통하여 작용하는 하중하에서의 부재의 건전성을 평가하는 항목으로 응력 변화에 대한 변형량을 측정한다.

그림 3.3과 같이 시험은 철근 모재 규격의 항목점의 95%(0.95 σ_y)까지 하중을 가한 후 다시 모재 규격 항복점의 2%(0.02 σ_y)까지 재하하여 잔류변형량을 측정한다.

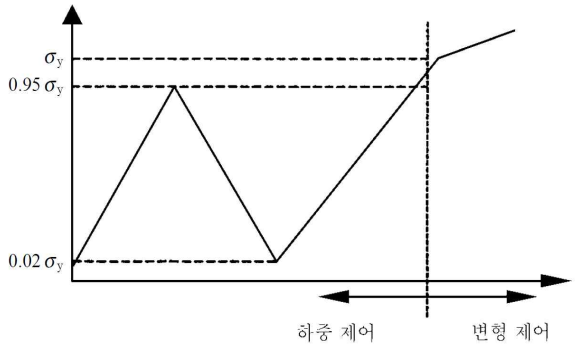


그림 3.3 정적 내력 시험(잔류변형량측정) 방법의 개요도

(2) Grip Coupler의 검증

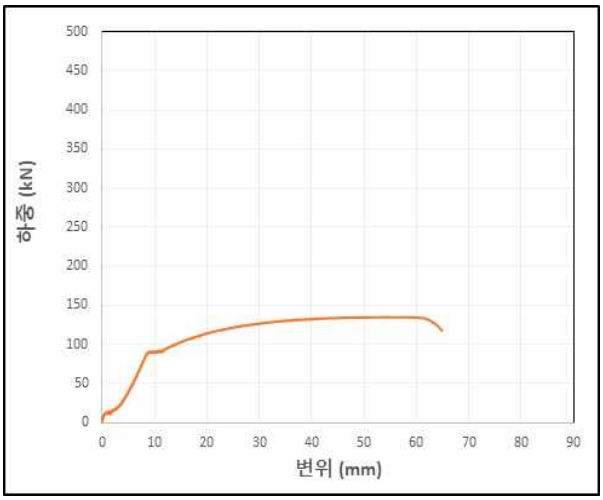
그립 커플러의 성능을 검증하기 위하여 SD40 철근 (인장강도 400MPa, 항복강도 560MPa)을 각 규격별(H16, H19, H22, H25. H29, H32) 각각 3개의 시편을 제작하여 일방향 인장시험, 저사이클 반복시험 및 정적내력시험(잔류변형량)을 수행하였다.

① 일방향 인장 시험

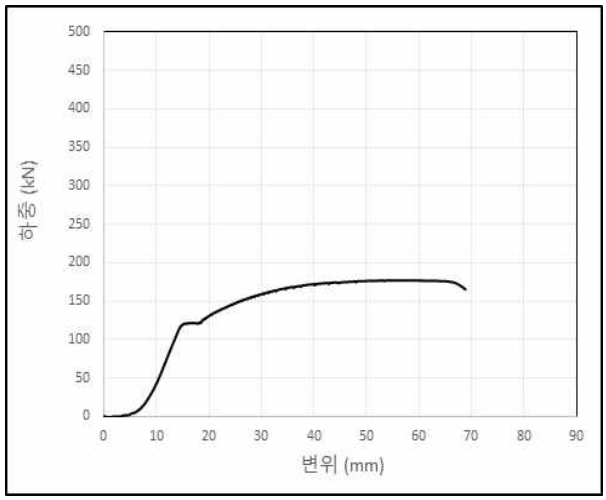
표 3.1과 그림 3.4는 그립커플러를 체결한 시편의 일방향 인장시험 결과값이며, 모든 시편의 인장강도 결과값이 한국산업표준의 인장강도 560N/mm^2(SD40 기준)을 만족한다. 또한 모든 시편의 파단위치가 철근에서 발생하여 그립 커플러 성능을 모두 만족하였다.

표 3.1 일방향 인장시험 결과

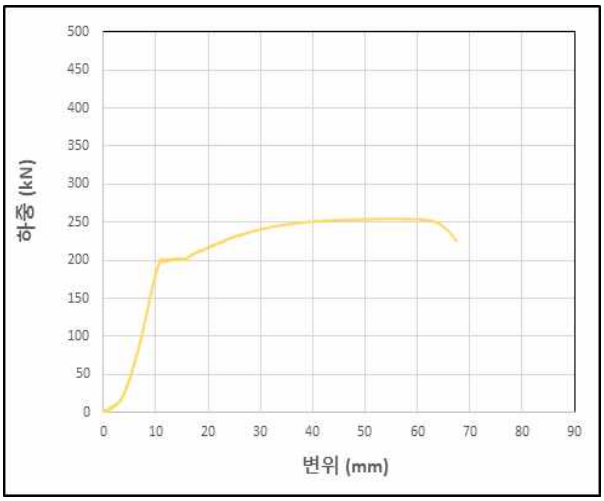
구 분	단면적 [mm^2]	항복하중 [N]	항복강도 [N/mm^2]	최대하중 [N]	인장강도 [N/mm^2]	파단위치	비 고
H16	198.6	89001.5	448.1	135199.2	680.8	철근	**O.K**
H19	286.5	120340.0	420.0	176980.1	617.7	철근	**O.K**
H22	387.1	200008.8	516.7	254754.8	658.1	철근	**O.K**
H25	506.7	234320.2	462.4	310918.5	613.6	철근	**O.K**
H29	642.4	286538.0	446.0	375316.0	584.2	철근	**O.K**
H32	794.2	337561.6	425.0	457361.6	575.9	철근	**O.K**
판정기준					**560.0**	**철근**	



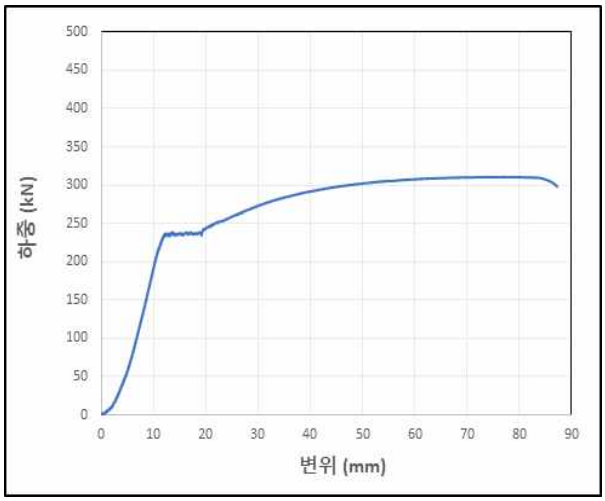
(a) H16



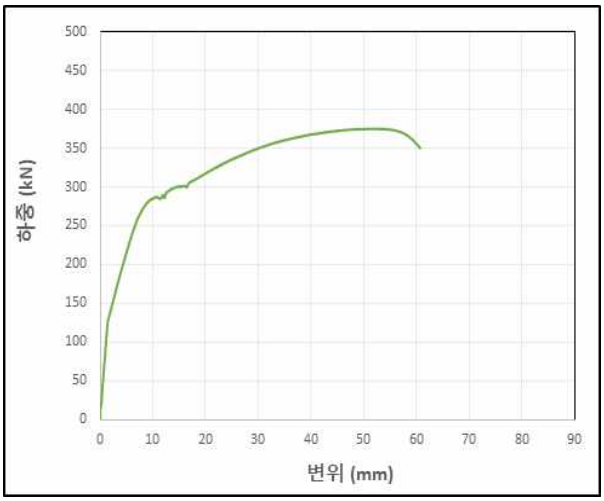
(b) H19



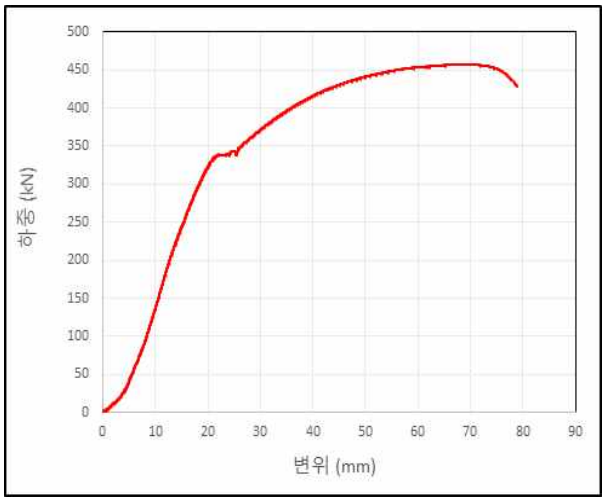
(c) H22



(d) H25



(e) H29



(f) H32

그림 3.4 일방향 인장시험 하중-변위 그래프



(a) H16 (파단위치 : 철근)



(b) H19 (파단위치 : 철근)



(c) H22 (파단위치 : 철근)



(d) H25 (파단위치 : 철근)

그림 3.5 일방향 인장시험 후 파단 위치 (계속)



(e) H29 (파단위치 : 철근)



(f) H32 (파단위치 : 철근)

그림 3.5 일방향 인장시험 후 파단 위치

② 저사이클 반복시험

표 3.2는 그립커플러를 체결한 시편의 저사이클 반복시험 결과값이다. 저사이클 반복시험의 결과는 모든 시험편이 다음 각 항목을 만족하여야 한다.

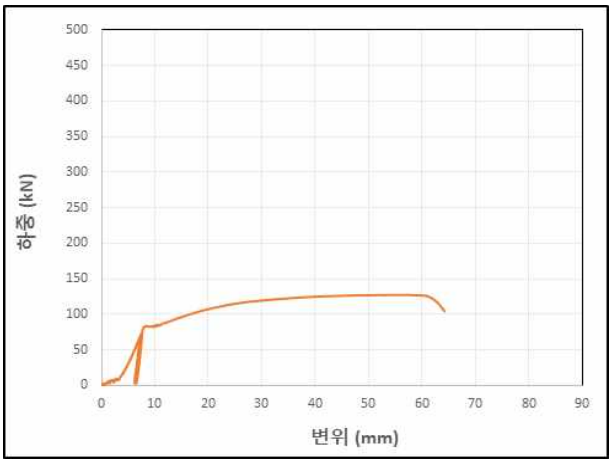
a) 100회 반복 시험 후 파단될 때까지 인장시험을 한다. 이 때의 강도는 철근 규격 항복점의 125% 이상(500N/mm^2, SD40 기준)이어야 한다.

b) 사이클 반복 시험 후 인장시험을 하였을 때, 파단 위치는 철근 파단을 원칙으로 한다.

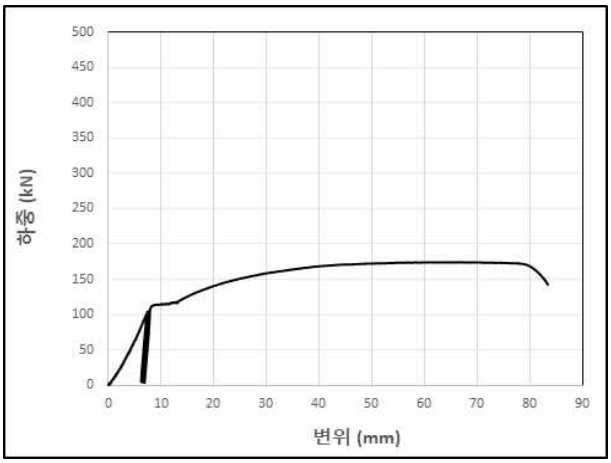
저사이클 반복실험 결과 표 3.2, 그림 3.6과 같이 그립 커플러를 체결한 철근의 인장강도는 기준치의 약 15%~28%를 상회하는 결과 값이 측정되었으며, 파단위치는 그림 3.7 품질검사 성적서 내용과 같이 모든 시편이 철근에서 파단되어 한국산업표준에 의한 허용기준을 만족함을 확인할 수 있다.

표 3.2 저사이클 반복시험 결과값

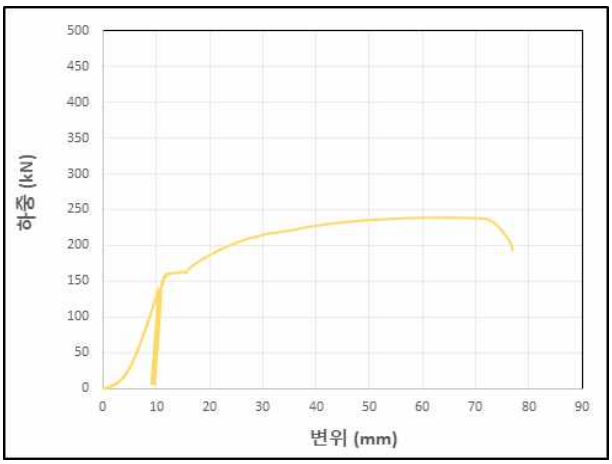
구 분	단면적 [mm^2]	최대하중 [N]	인장강도 [N/mm^2]	반복횟수	파단위치	비고
H16	198.6	127482.2	641.9	100	철근	O.K
H19	286.5	174478.5	609.0	100	철근	O.K
H22	387.1	239208.9	618.0	100	철근	O.K
H25	506.7	319669.1	630.9	100	철근	O.K
H29	642.4	370727.7	577.1	100	철근	O.K
H32	794.2	457438.4	576.0	100	철근	O.K
판정기준			**500.0**		**철근**	



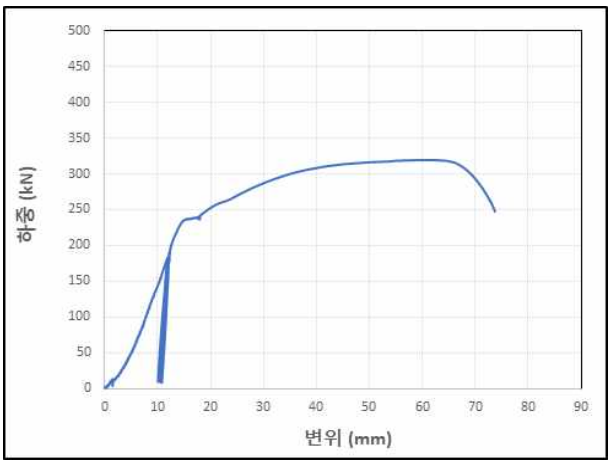
(a) H16



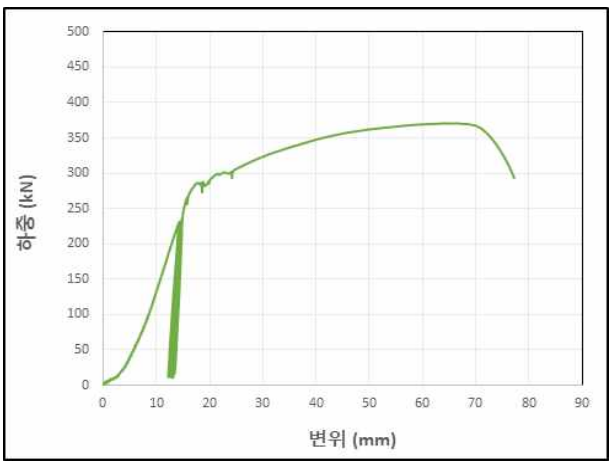
(b) H19



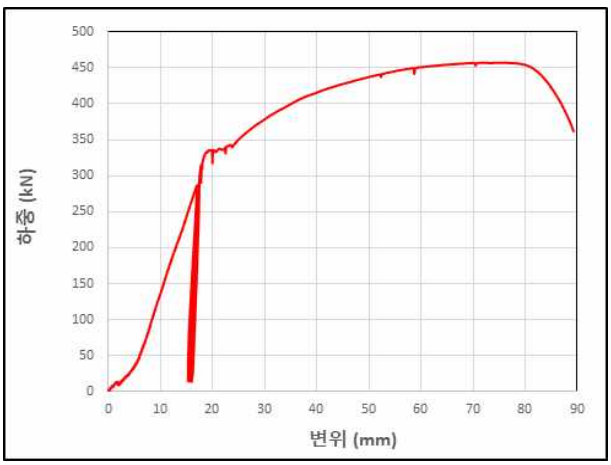
(c) H22



(d) H25

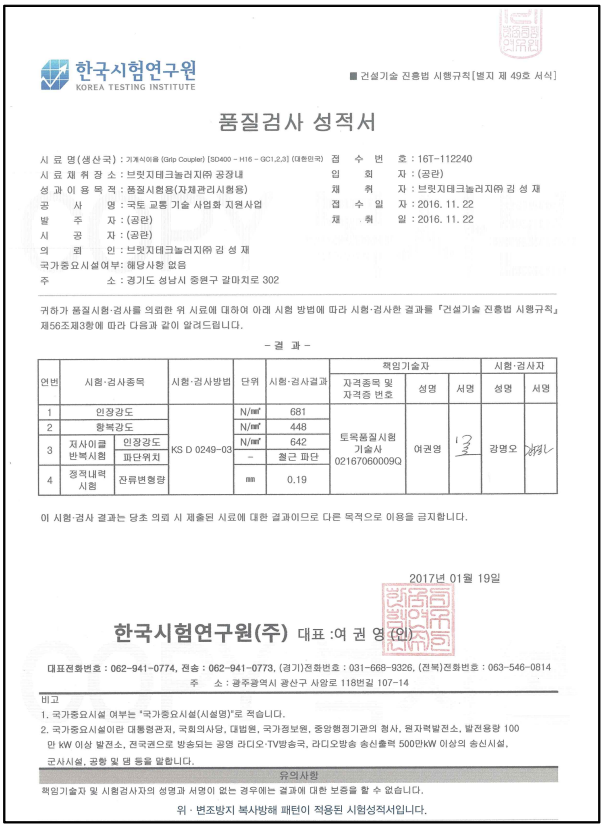


(e) H29



(f) H32

그림 3.6 저사이클 반복시험 하중-변위 그래프



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) [SD400 – H16 – GC1,2,3] (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T–112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	681	토목품질시험기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	448					
3	저사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	642					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.19					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

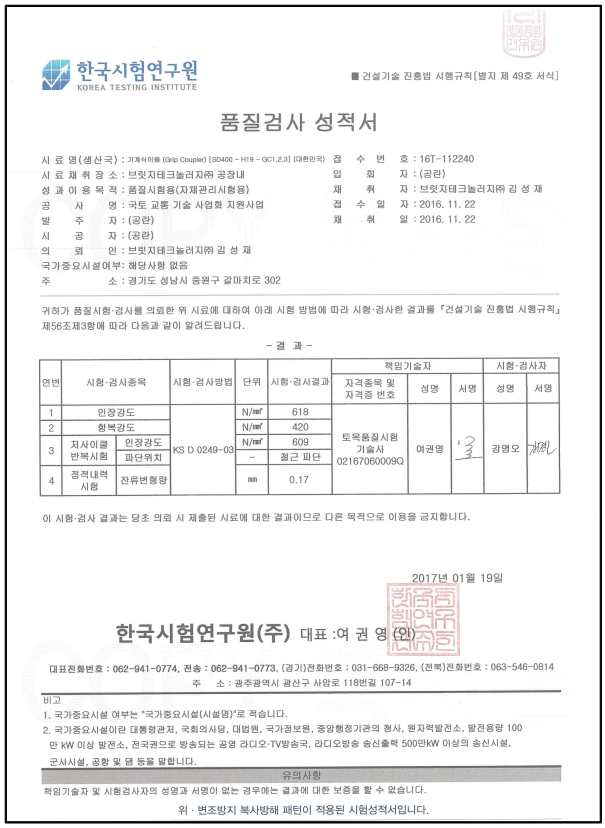
대표전화번호 : 062-941-0774, 전송 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100 만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(a) H16



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) [SD400 – H19 – GC1,2,3] (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T–112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	618	토목품질시험기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	420					
3	저사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	609					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.17					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

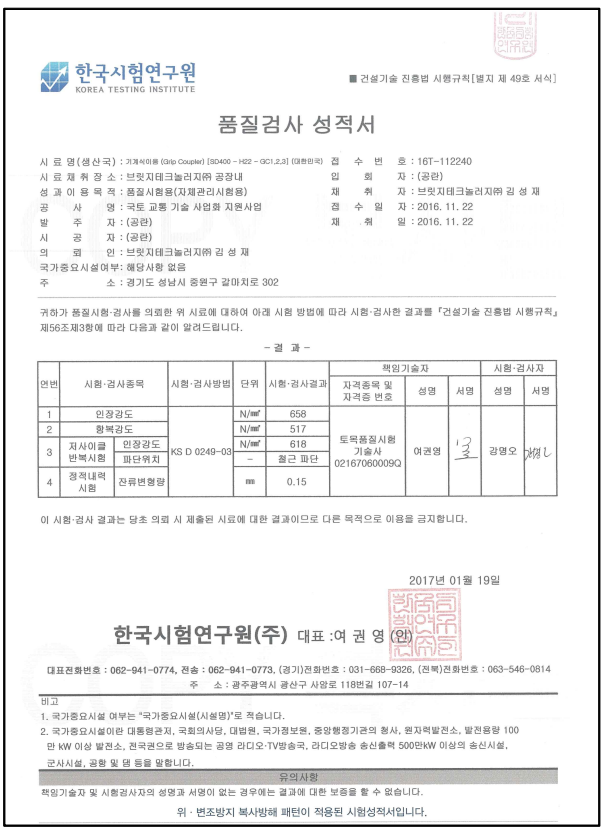
대표전화번호 : 062-941-0774, 전송 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100 만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(b) H19



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) [SD400 – H22 – GC1,2,3] (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T–112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	658	토목품질시험기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	517					
3	저사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	618					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.15					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

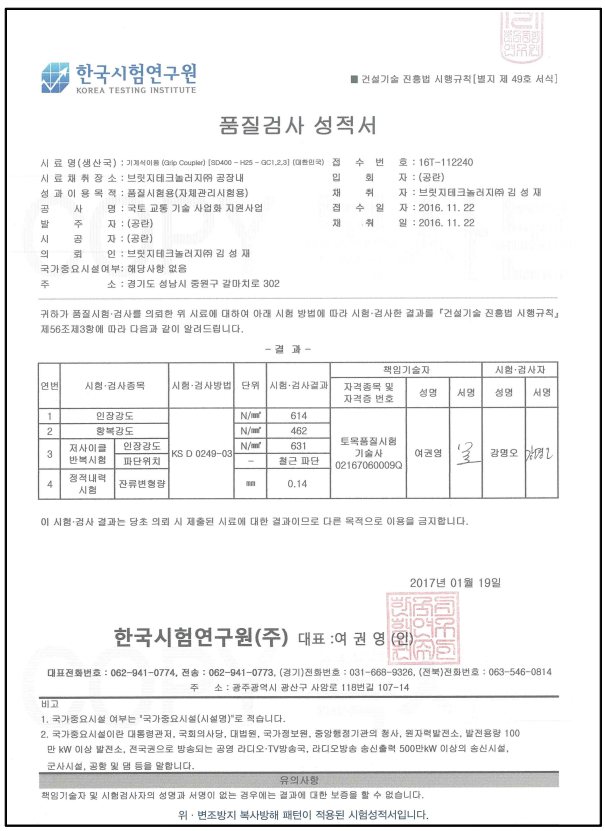
대표전화번호 : 062-941-0774, 전송 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100 만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(c) H22



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) [SD400 – H25 – GC1,2,3] (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T–112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	614	토목품질시험기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	462					
3	저사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	631					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.14					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

대표전화번호 : 062-941-0774, 전송 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

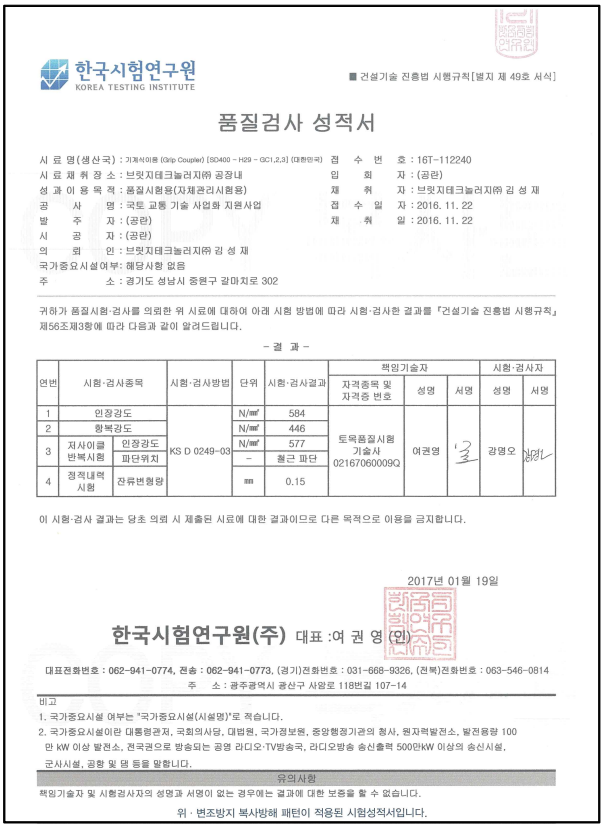
비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100 만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(d) H25

그림 3.7 그립 커플러 품질성능 성적서(계속)



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) (SD400 – H29 – GC1,2,3) (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T-112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	584	토목품질시험 기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	446					
3	자사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	577					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.15					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

대표전화번호 : 062-941-0774, 팩스 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(e) H29



한국시험연구원
KOREA TESTING INSTITUTE

■ 건설기술 진흥법 시행규칙[별지 제 49호 서식]

품질검사 성적서

시 료 명(생산국) : 기계식이음 (Grip Coupler) (SD400 – H32 – GC1,2,3) (대한민국)
시 료 채 취 장 소 : 브릿지테크놀러지㈜ 공장내
성 과 이 용 목 적 : 품질시험용(자체관리시험용)
공 사 명 : 국토 교통 기술 사업화 지원사업
발 주 자 : (공란)
시 공 자 : (공란)
의 뢰 인 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
국가중요시설여부: 해당사항 없음
주 소 : 경기도 성남시 중원구 갈마치로 302

접 수 번 호 : 16T-112240
입 회 자 : (공란)
채 취 자 : 브릿지테크놀러지㈜ 김 성 재
접 수 일 자 : 2016. 11. 22
채 취 일 : 2016. 11. 22

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 「건설기술 진흥법 시행규칙」 제56조제3항에 따라 다음과 같이 알려드립니다.

– 결 과 –

연번	시험·검사종목		시험·검사방법	단위	시험·검사결과	책임기술자			시험·검사자	
						자격종목 및 자격증 번호	성명	서명	성명	서명
1	인장강도		KS D 0249-03	N/㎟	576	토목품질시험 기술사 02167060009Q	여권영		강명오	
2	항복강도			N/㎟	425					
3	자사이클 반복시험	인장강도		N/㎟	576					
		파단위치		–	철근 파단					
4	정적내력 시험	잔류변형량		㎜	0.13					

이 시험·검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로 이용을 금지합니다.

2017년 01월 19일

한국시험연구원(주) 대표 :여 권 영 (인)

대표전화번호 : 062-941-0774, 팩스 : 062-941-0773, (경기)전화번호 : 031-668-9326, (전북)전화번호 : 063-546-0814
주 소 : 광주광역시 광산구 사암로 118번길 107-14

비고
1. 국가중요시설 여부는 "국가중요시설(시설명)"로 적습니다.
2. 국가중요시설이란 대통령관저, 국회의사당, 대법원, 국가정보원, 중앙행정기관의 청사, 원자력발전소, 발전용량 100만 kW 이상 발전소, 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송국, 라디오방송 송신출력 500만kW 이상의 송신시설, 군사시설, 공항 및 댐 등을 말합니다.

유의사항
책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

위 · 변조방지 복사방해 패턴이 적용된 시험성적서입니다.

(f) H32

그림 3.7 그립 커플러 품질성능 성적서

③ 잔류변형량

표 3.3은 잔류변형량 결과 값이다. 잔류 변형량은 모재 철근 규격 항복점의 95%~2%에 해당하는 응력을 1회 반복한 후 2%일 때의 변형량이 0.3mm 이하이어야 한다. 정적내력시험에 의한 잔류변형량 측정결과 잔류변형량은 0.13mm~0.19mm로 한국산업표준에 의한 허용기준을 모두 만족한다.

표 3.3 잔류변형량

구 분	H16	H19	H22	H25	H29	H32
잔류변형량[mm]	0.19	0.17	0.15	0.14	0.15	0.13
판정기준	0.3 mm 이하					
비 고	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

(3) 결론

그립커플러를 이용한 강관 압착이음의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 KS D 0249에 의한 검증시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

① 기계적 이음은 겹이음과 달리 콘크리트의 부착강도와 관계없이 인장력에 저항할 수 있으며, 용접이음 등은 숙련공에 의한 이음이 가능하지만 기계적 이음은 비숙련공도 시공이 용이하며 경제성이 우수하다.

② 그립커플러를 적용한 기계식이음의 일방향 인장시험 결과, 인장강도는 576MPa~681MPa로 계측되었으며 철근 콘크리트 봉강의 기계식 이음 검사방법 (KS D 0249) 허용기준인 인장강도 560N/mm^2(SD40 기준)을 모두 만족한다.

③ 그립커플러를 적용한 기계식이음의 저사이클 반복시험 결과, 인장강도는 576MPa~642MPa로 계측되었으며 철근 콘크리트 봉강의 기계식 이음 검사방법 (KS D 0249) 허용기준인 철근 규격 항복점의 125%이상(500N/mm^2, SD40 기준)을 만족하고 파단위치가 모두 철근에서 발생하였다.

④ 그립커플러를 적용한 기계식 이음의 잔류변형량 측정 결과, 0.13mm~0.19mm로 측정되었으며 허용기준인 0.3mm를 모두 만족한다.

⑤ 그립커플러를 적용한 기계식 이음의 일방향 압축시험, 저사이클 반복시험 및 잔류변형량 측정결과는 그림 3.7의 품질검사 성적서와 같이 허용기준을 상회하는 성능을 확보하고 있어, 그립커플러를 이용한 철근 이음 시 충분한 저항성능을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가

3.2.1 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 실험

(1) 개 요

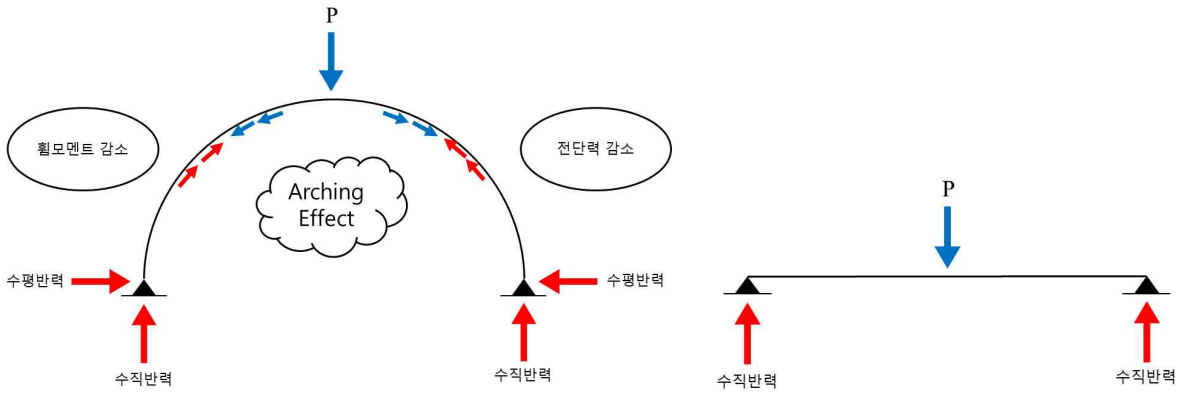
전 세계적으로 2차 산업혁명으로 촉진된 고도성장기의 건설경향이 지나고, 최근에는 안정기에 들어서며 무분별한 사회기반시설의 확충보다는 경제성 또는 유지관리 등의 효과적인 건설기술에 초점을 맞추고 있다. 이에 따라 재난사고, 전쟁 등에 의한 구조물의 파괴나 노후 구조물의 피로파괴 등에 대비한 신속교체 및 응급보수 기술을 효과적으로 적용하는 것이 화두이다. 특히 다른 사회기반시설에 비하여 관리 개수가 많고 노후화의 정도가 심한 교량 구조물에 이 기술을 적용한다면 시간적, 경제적 손실을 최소화 할 수 있을 것이다.

급속시공 공법 중에는 조립식 모듈형 기술인 프리캐스트 바닥판을 활용한 급속시공 교량기술이 있다. 프리캐스트 바닥판을 활용한 급속시공 공법은 구조물의 전체적인 보수가 아닌 부분적인 보수 및 보강, 개량 등이 가능하여 재해, 재난, 피로파괴 등에 효과적으로 대응할 수 있는 큰 장점이 있다. 그러나 프리캐스트 공법은 구조물의 안전성, 접합부 처리기술, 연결부 처리기술, 각종 부속장치의 개발 등 많은 해결과제를 안고 있다.

프리캐스트 공법의 해결과제 중 가장 중요한 핵심요소는 구조물의 안전성이다. 구조물의 안전성을 높이기 위해서는 구조성능을 보강하고 발전시켜야하며, 다음과 같은 방법이 있다. 첫 번째, 콘크리트 구조물의 콘크리트 성능 보강과 같은 시공재료의 성능 보강이다. 두 번째, 구조물의 형태를 반영한 구조적 성능 보강이며, 이를 통해 구조설계에 기반한 다양한 구조형태를 반영함으로써 구조물의 안전성을 개선시킬 수 있다.

그림 3.8에 단순보 구조과 아치구조의 개념도를 비교하였다. 단순보 또는 연속보 구조물은 하중 재하 시 작용하는 하중이 지점에서 축방향력과 전단력으로 분산되는 반면, 아치(Arch)형태의 구조물은 구조물 전체에 하중이 균일하게 분산되는 구조로써 휨모멘트와 전단력 부담이 작아져 일반적인 구조물에 비해 구조적으로 더 큰 하중을 견딜 수 있다. 또한 축방향력이 지배적인 아치구조의 특성상 압축력에 강한 철근콘크리트 부재를 사용하여 아치형태의 이점을 극대화할 수 있다. 고대부터 아치형태의 구조적 장점을 활용하여 많은 구조물이 건축되었다. 아치 형식을 사용한 구조물은 장경간 및 고층 구조물 건축이 가능하며, 프랑스의 개선문, 로마 시대의 콜로세움, 유럽의 대성당 등과 같이 미적으로도 우수하여 전 세계의 랜드마크로 자리잡았다.

본 연구에서는 기존 프리캐스트 바닥판 공법개발에서 한 단계 더 나아가 아치형상의 프리캐스트 아치덱 및 이를 활용한 거더를 개발하고 있다. 이를 위해 철근콘크리트 아치덱의 정적하중재하 및 펀칭전단, 피로 실험을 수행하여 구조적 성능을 평가하고자 한다.



(a) 아치형 구조 개념도 (b) 단순보 개념도

그림 3.8 아치구조과 단순보 구조의 개념도

표 3.4 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 실험 개요

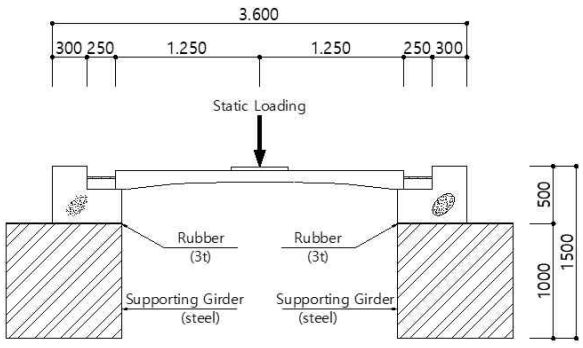
구 분	아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)	
재료특성	아치덱 콘크리트	f_{ck} = 40MPa / f_{cu} = 49.5MPa
	철근 (SD 400)	f_y = 400 MPa
제 원	아치덱	길이 2.5 m / 폭 1.2 m 중앙두께 100 mm / 단부두께 160 mm
	전체	길이 3.6 m / 폭 1.2 m / 높이 500 mm
경계조건	양단 고정	
하중재하	정적재하 / 5000 kN UTM / 230 x 580 mm^2 (도로교설계기준)	
실험조건		

표 3.5 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 실험 개요

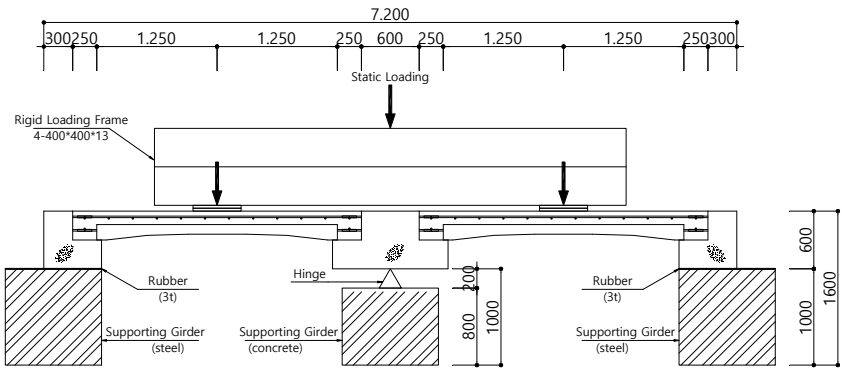
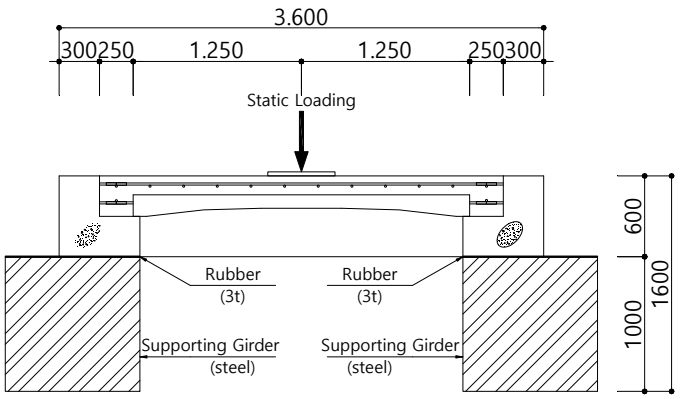
구 분	2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD)	
재료특성	아치덱 콘크리트	f_{ck} = 40MPa / f_{cu} = 49.5MPa
	상부 현장타설 콘크리트	f_{ck} = 30MPa / f_{cu} = 38.5MPa
	철근 (SD 400)	f_y = 400 MPa
제 원	아치덱	길이 2.5 m / 폭 1.2 m 중앙두께 100 mm / 단부두께 160 mm
	전체	길이 7.2 m / 폭 2.4 m / 높이 600 mm
경계조건	양단 고정 / 중앙 힌지	
하중재하조건	정적재하 및 피로 / 5000 kN Actuator / 230 x 580 mm^2 (도로교설계기준)	
실험조건		

표 3.6 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 실험 개요

구 분	아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)	
재료특성	아치덱 콘크리트	f_{ck} = 40MPa / f_{cu} = 49.5MPa
	상부 현장타설 콘크리트	f_{ck} = 30MPa / f_{cu} = 38.5MPa
	철근 (SD 400)	f_y = 400 MPa
제 원	아치덱	길이 2.5 m / 폭 1.2 m 중앙두께 100 mm / 단부두께 160 mm
	전체	길이 3.6 m / 폭 2.8m / 높이 600 mm
경계조건	양단 고정	
하중재하조건	펀칭전단 / 5000 kN Actuator / 230 x 580 mm^2 (도로교설계기준)	
실험조건		

(2) 실험체 제원

본 연구에서는 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위해 총 4가지의 실험을 수행하였다.

- 정적 휨 거동 평가를 위해 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)
- 아치덱에 바닥판을 현장 타설한 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)
- 2경간 아치덱 합성 실험체와 동일한 제원의 피로 실험체(FD)
- 펀칭전단을 유도하기 위해 4면이 지지된 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)

① 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)

실험의 정확성과 통계적인 수치 확보를 위하여 총 3개의 동일한 실험체를 제작하였다. 실험체는 길이 2.5 m, 폭 1.2 m, 중앙 두께 100 mm, 단부 두께 160 mm 의 철근콘크리트 아치덱과 이를 지지하는 철근콘크리트 반력대로 구성되며, 각각 AD 1, AD 2, AD 3로 명명하였다.

- 실험체 설계 (한계상태 설계법 적용)

필요철근량	사용철근량	조합모멘트 (M_u)	극한 모멘트 (M_r)	비고
600.6 mm^2	H16@200=993mm^2	11.893 kN·m	18.499 kN·m	O.K

- 실험체의 극한하중(Pr) 및 균열하중(Pcr) 산정

극한 모멘트 (M_r)	극한 하중 (P_r)	균열 모멘트 (M_{cr})	균열하중 (P_{cr})
18.499 kN·m	27.32 kN	6.640 kN·m	7.555 kN

② 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)

총 2경간으로 제작되어, 각 경간에는 길이 2.5 m, 폭 1.2 m, 중앙 두께 100 mm, 단부 두께 160 mm의 철근콘크리트 아치덱(AD) 2개를 반력대와 연결하였다. 아치덱 설치 후 상부에 콘크리트를 타설하여 중앙두께 240mm, 단부두께 300mm의 아치덱을 적용한 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)를 제작하였다.

- 실험체 설계 (경험적 설계법 적용)

경간방향 : 하부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
상부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
경간방향에 직각방향 : 하부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
상부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상

구 분	주철근		배력철근	
	하부 철근	상부 철근	하부 철근	상부 철근
필요철근량	720.0 mm^2	720.0 mm^2	720.0 mm^2	720.0 mm^2
사용철근량	H16@200 =993.0 mm^2	H16@200 =993.0 mm^2	H16@250 =794.4 mm^2	H16@250 =794.4 mm^2

- 실험체의 극한하중(Pr) 및 균열하중(Pcr) 산정

극한 모멘트 (M_r)	극한 하중 (P_r)	균열 모멘트 (M_{cr})	균열하중 (P_{cr})
162.153 kN·m	262.543 kN	89.823 kN·m	141.993 kN

③ 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)

2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 제원과 동일하다.

④ 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)

실험 데이터 확보와 실험체간 비교를 위해 총 3개의 실험체를 제작하였다. 1.2 m x 2.5 m의 아치덱 2개소를 반력대와 연결 한 후, 콘크리트를 타설하여 동일한 실험체 PD 1-1, PD 1-2를 제작하였다. 나머지 1개는 2.5 m x 2.5 m의 확대형 아치덱 1개를 설치한 후 콘크리트를 타설하여 PD 2 실험체를 제작하였다. 완성된 실험체는 길이 3.6 m, 폭 2.8 m, 높이 600 mm이다.

▪ 실험체 설계 (경험적 설계법 적용)

경간방향 : 하부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
상부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
경간방향에 직각방향 : 하부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상
상부 철근량 = 콘크리트 바닥판 단면의 0.3% 이상

구 분	주철근		배력철근	
	하부 철근	상부 철근	하부 철근	상부 철근
필요철근량	720.0 mm^2	720.0 mm^2	720.0 mm^2	720.0 mm^2
사용철근량	H16@200 =993.0 mm^2	H16@200 =993.0 mm^2	H16@250 =794.4 mm^2	H16@250 =794.4 mm^2

▪ 실험체의 뚫림(펀칭) 전단하중 산정

최대 전단강도 (ν_u)	최대 전단하중 (V_u)	뚫림 전단강도 (ν_{cd})	뚫림 전단하중 (V_{cd})
0.343 MPa	303.75 kN	0.579 MPa	478.60 kN

실험체 제작 시, 아치덱과 반력대의 연결부 철근은 그립 커플러(Grip coupler)를 사용하여 시공성과 작업성을 확인하면서 연결하였다. 그림 3.9~그림 3.19는 위 실험체의 상세 도면이다.

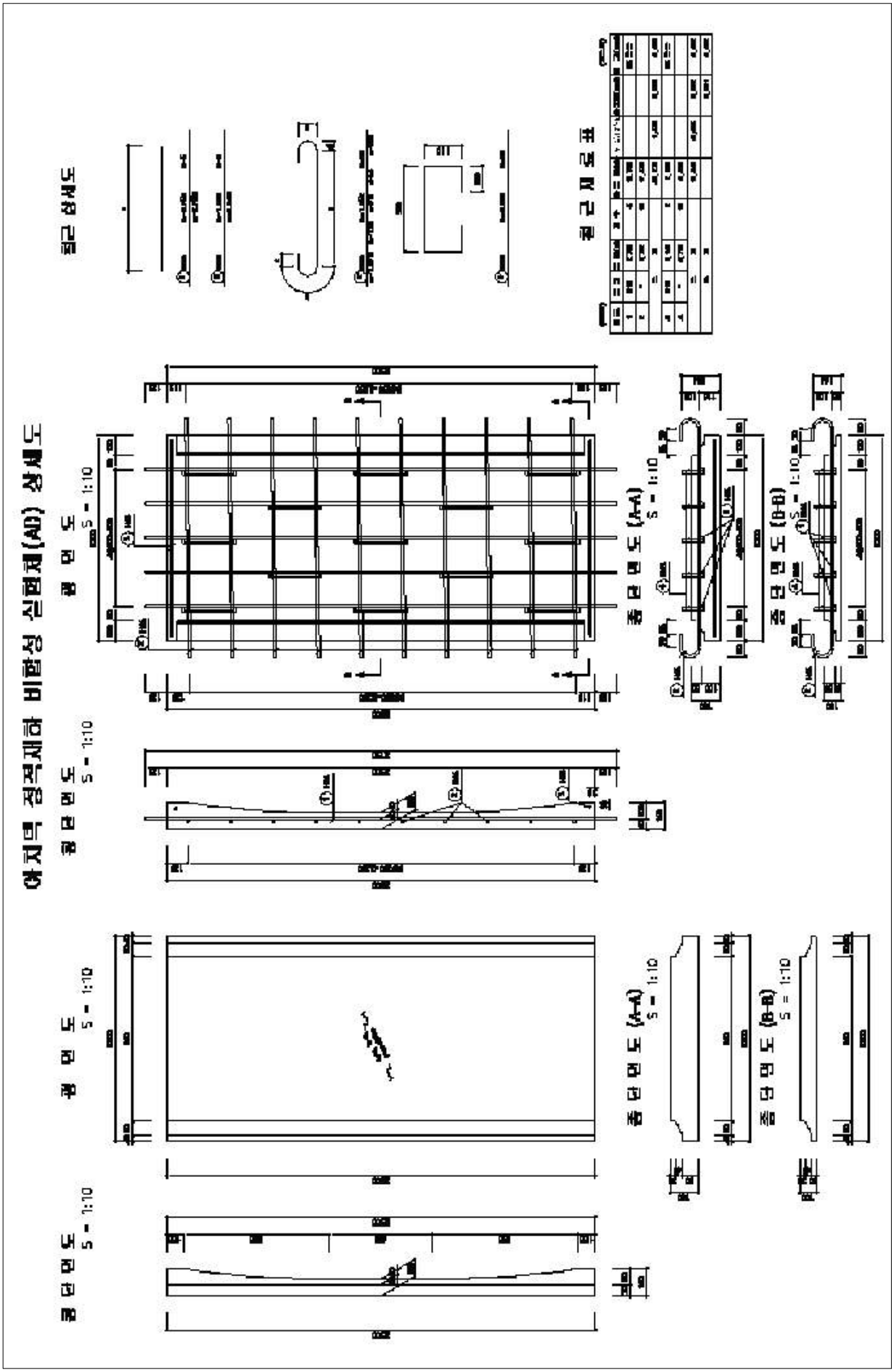


그림 3.9 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 상세도

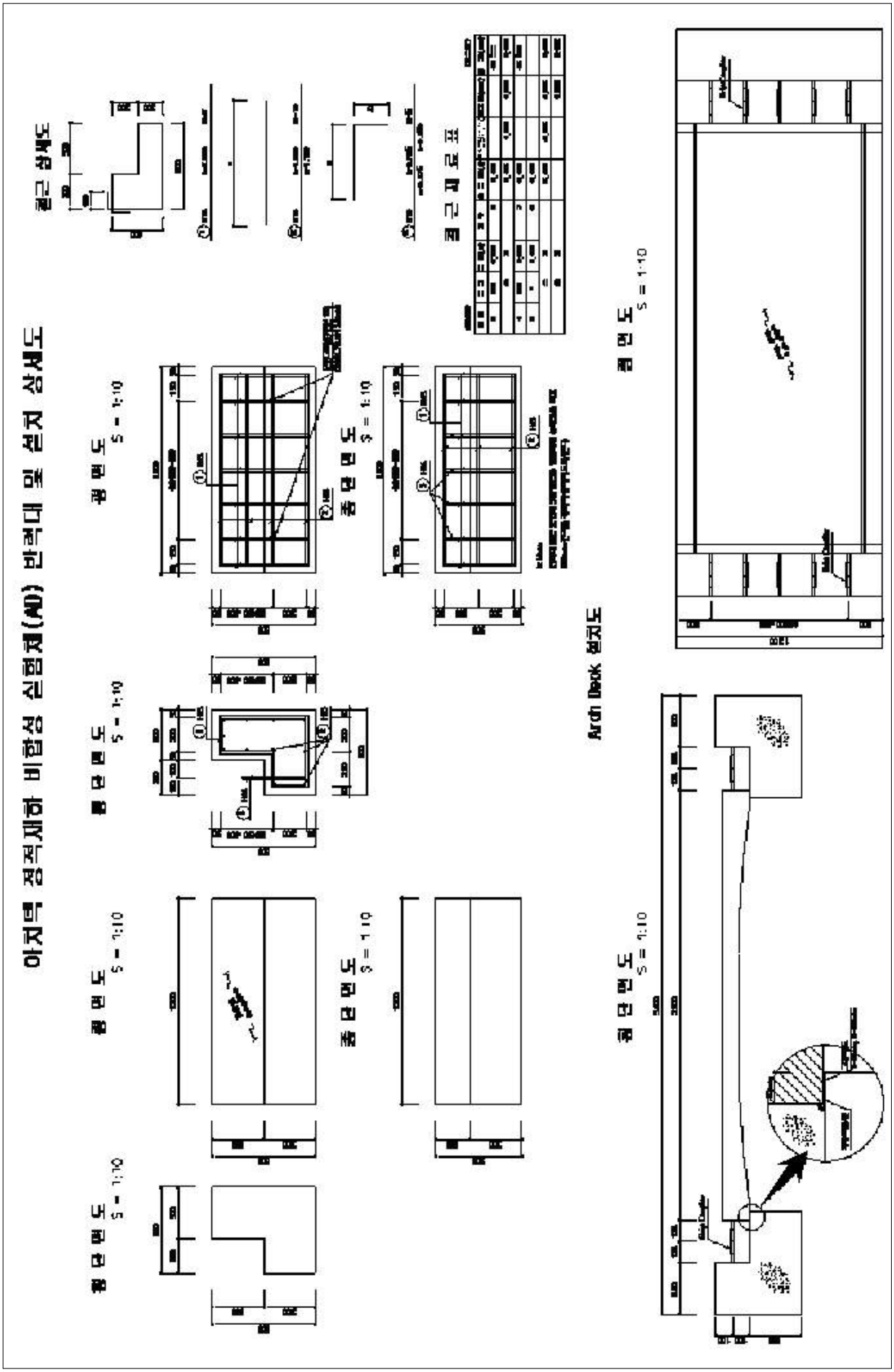


그림 3.10 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 반력대 및 설치 상세도

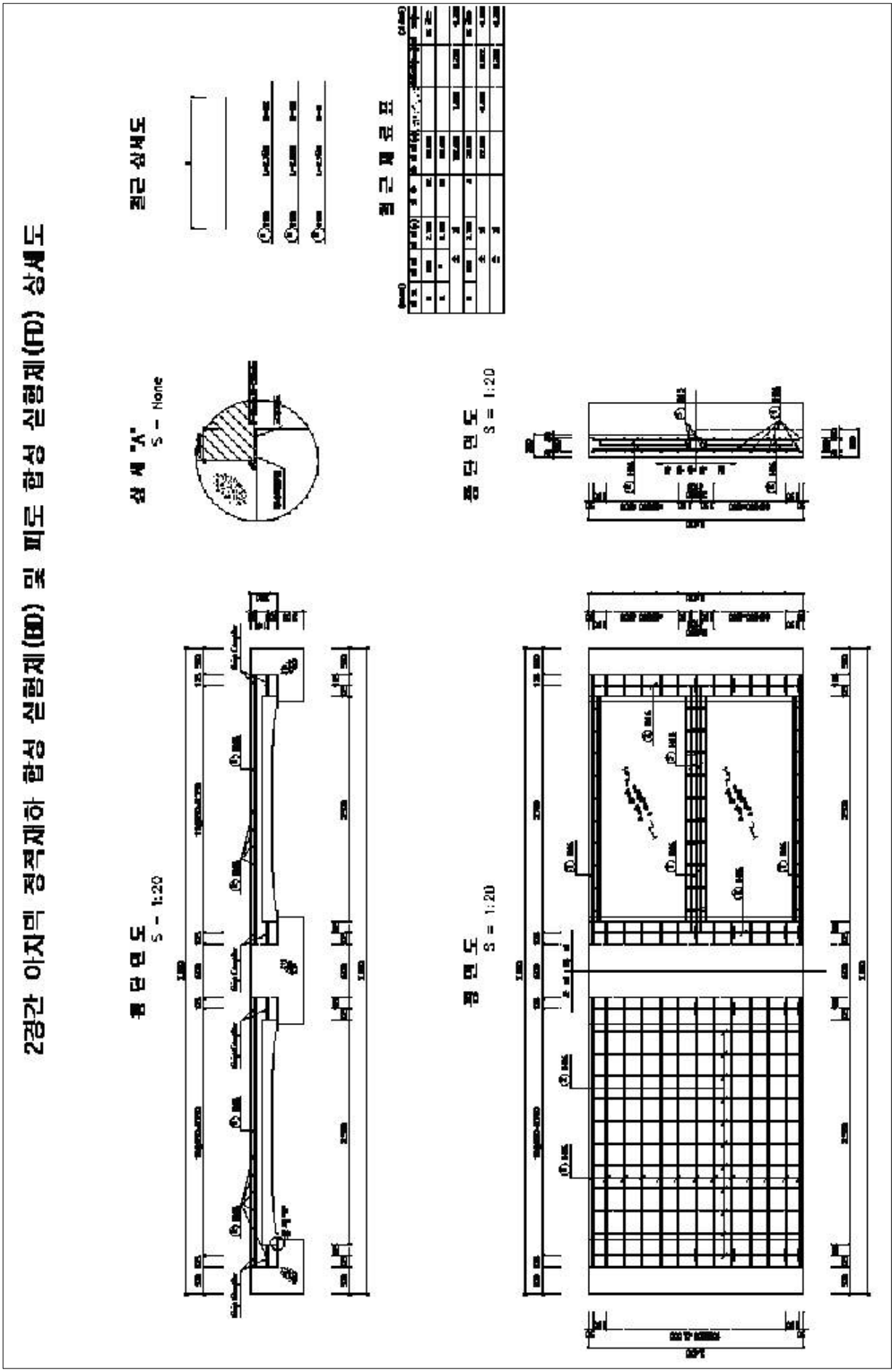


그림 3.11 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 상세도

그림 3.12 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 반력대 상세도

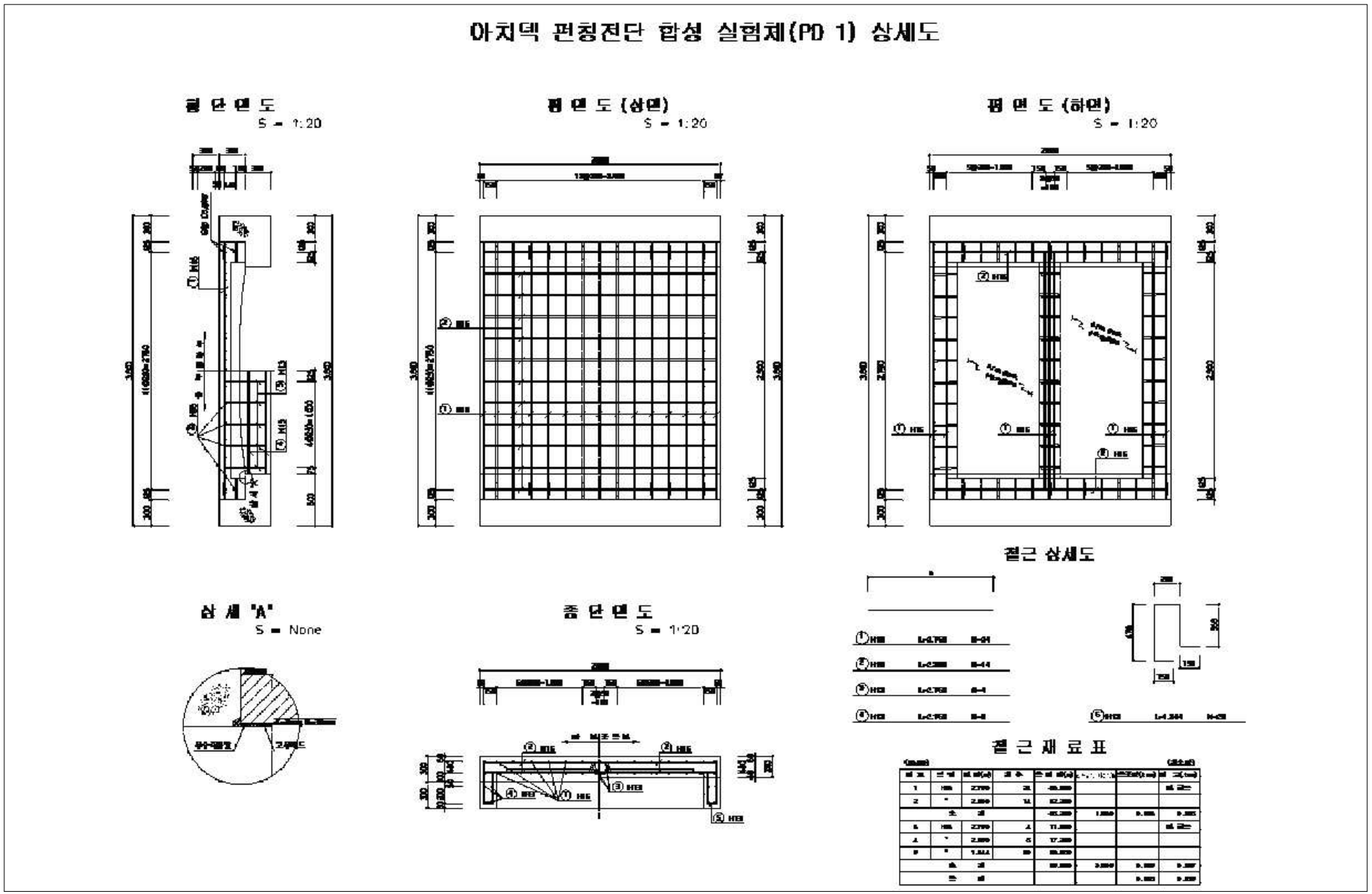


그림 3.13 아치댁 편칭전단 합성 실험체(PD 1) 상세도

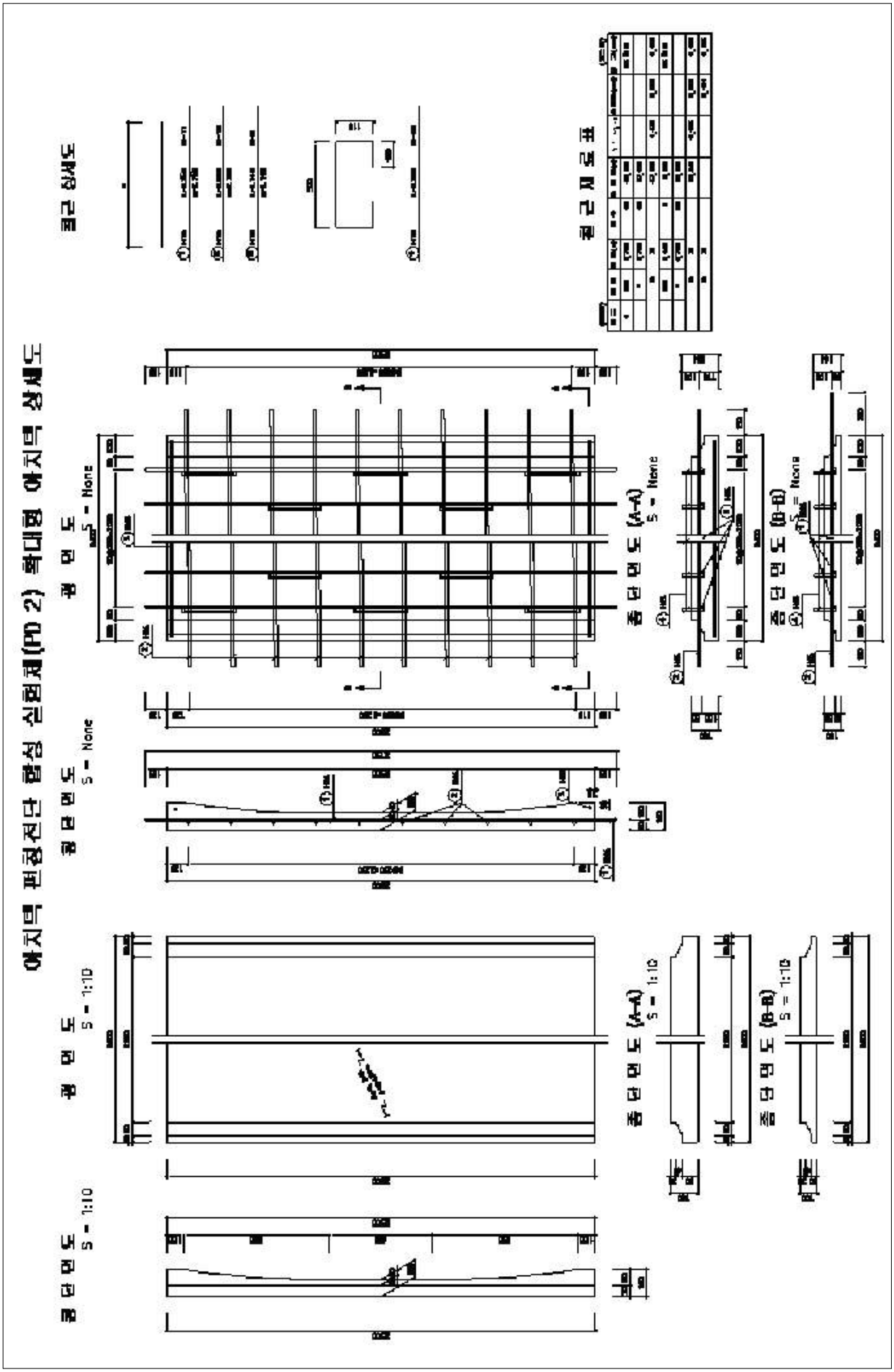


그림 3.14 아치텍 펀칭전단 합성 실험체(PD 2)의 확대형 아치텍 상세도

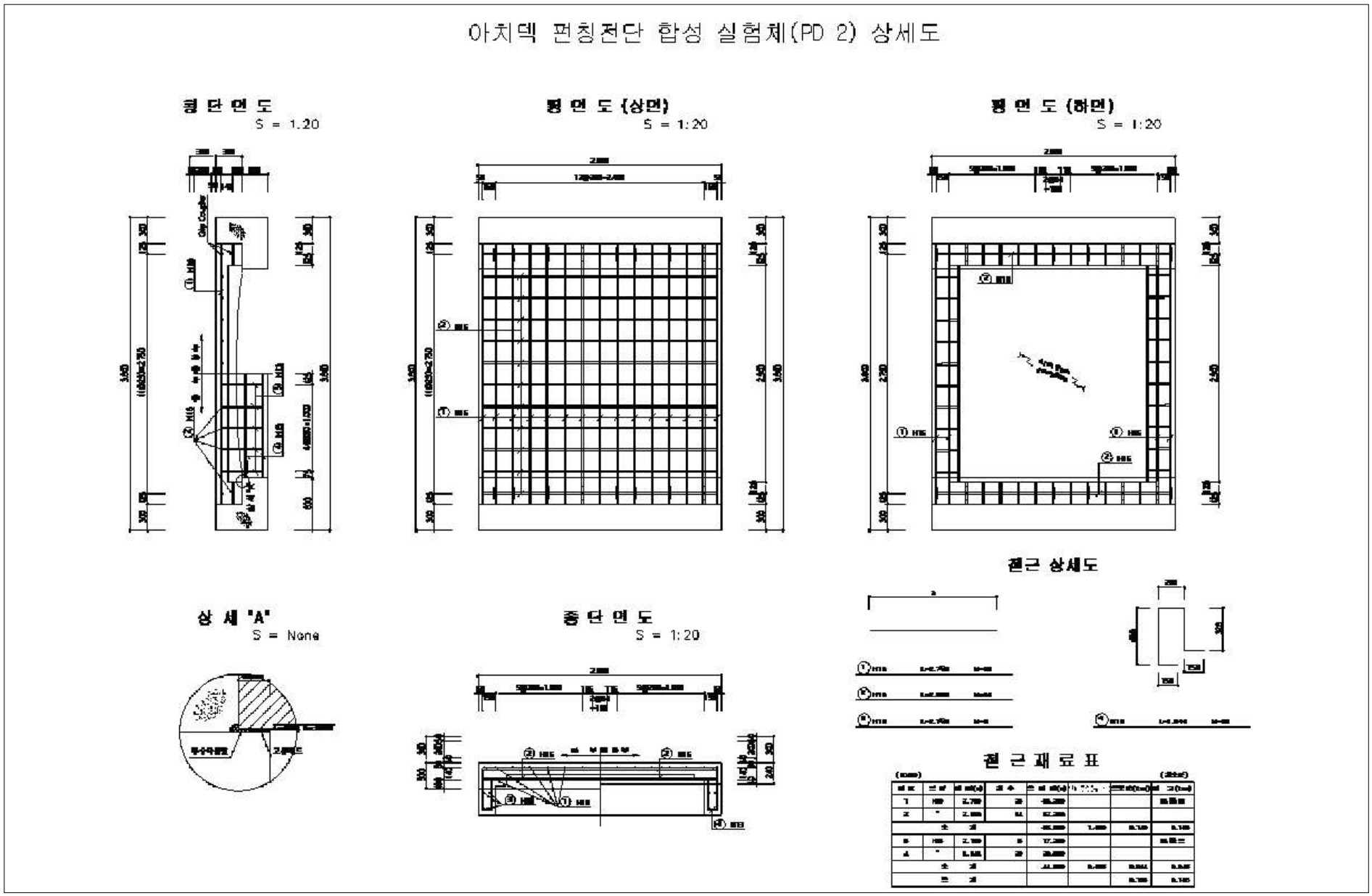


그림 3.15 아치덱 편칭전단 합성 실험체(PD 2) 상세도

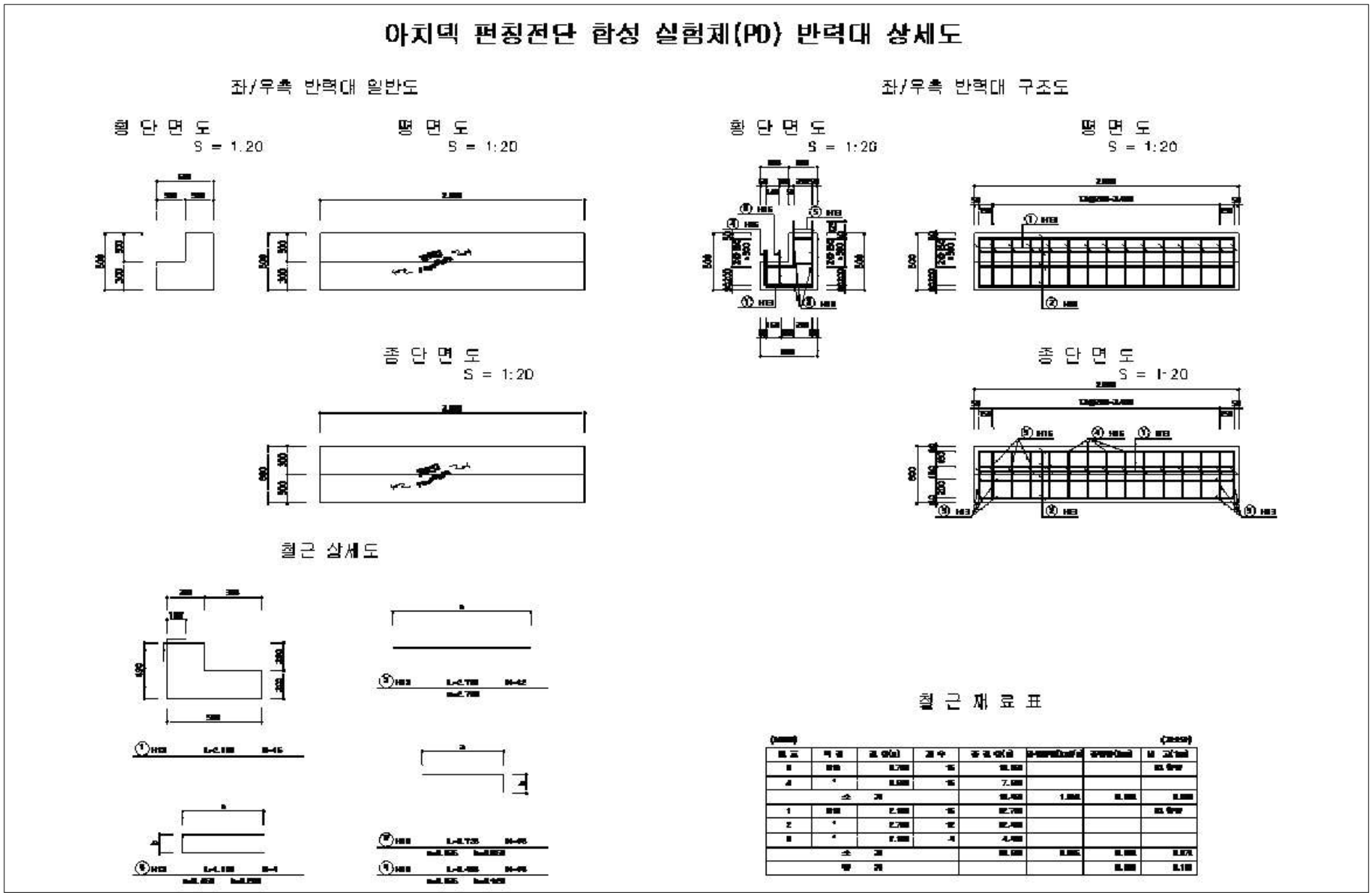
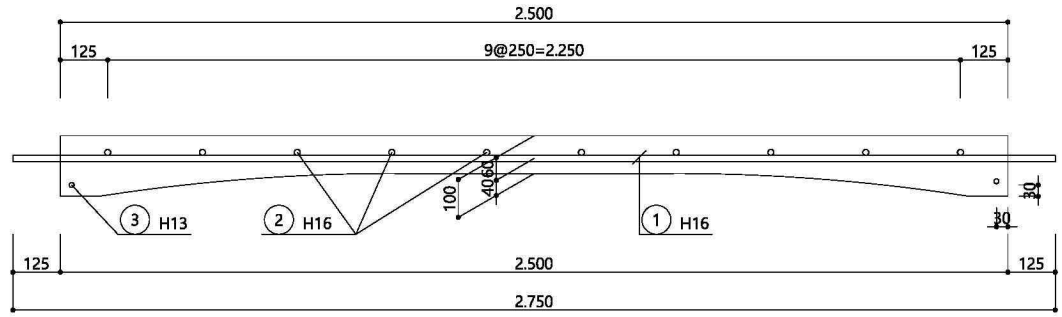
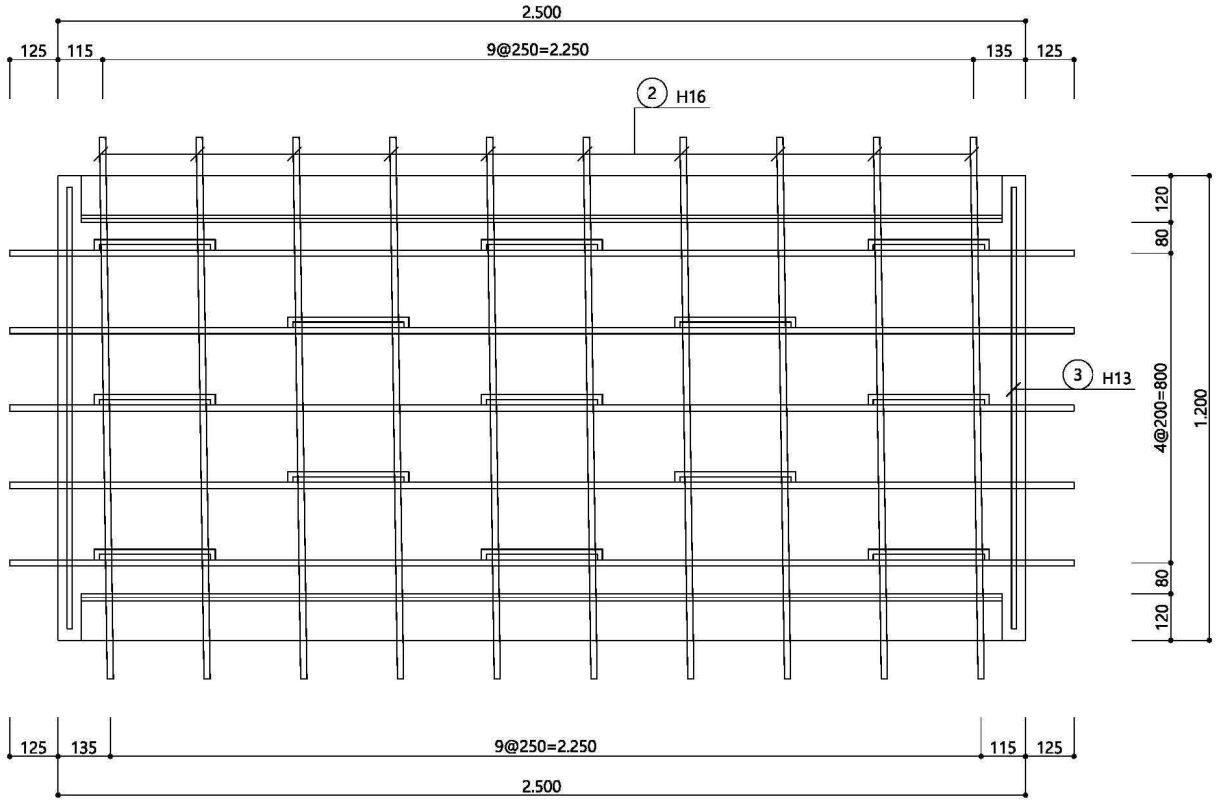


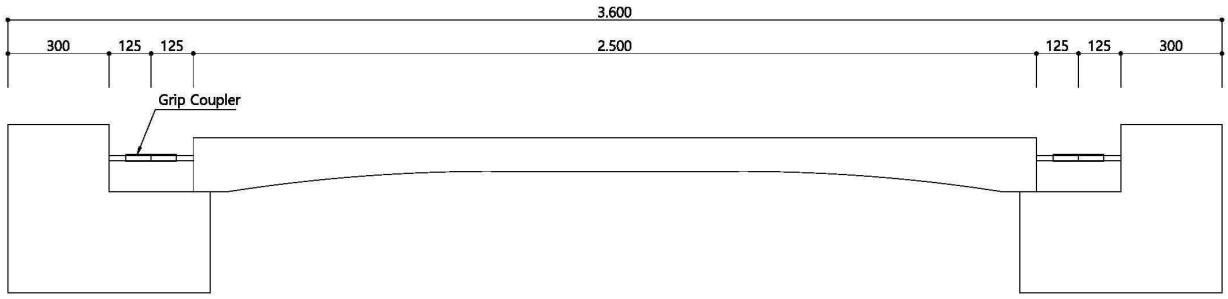
그림 3.16 아치덱 편칭전단 합성 실험체(PD) 반력대 상세도



(a) 철근 배근 정면도

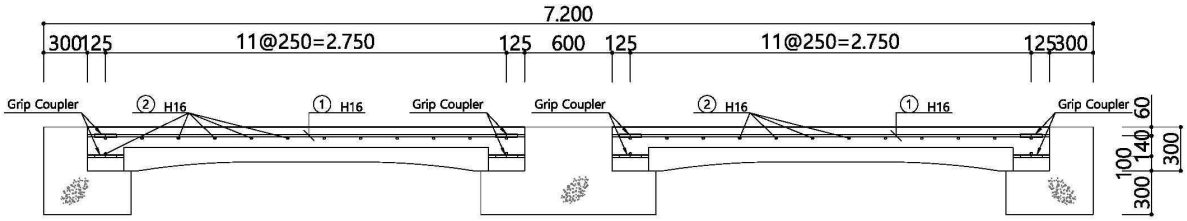


(b) 철근 배근 평면도

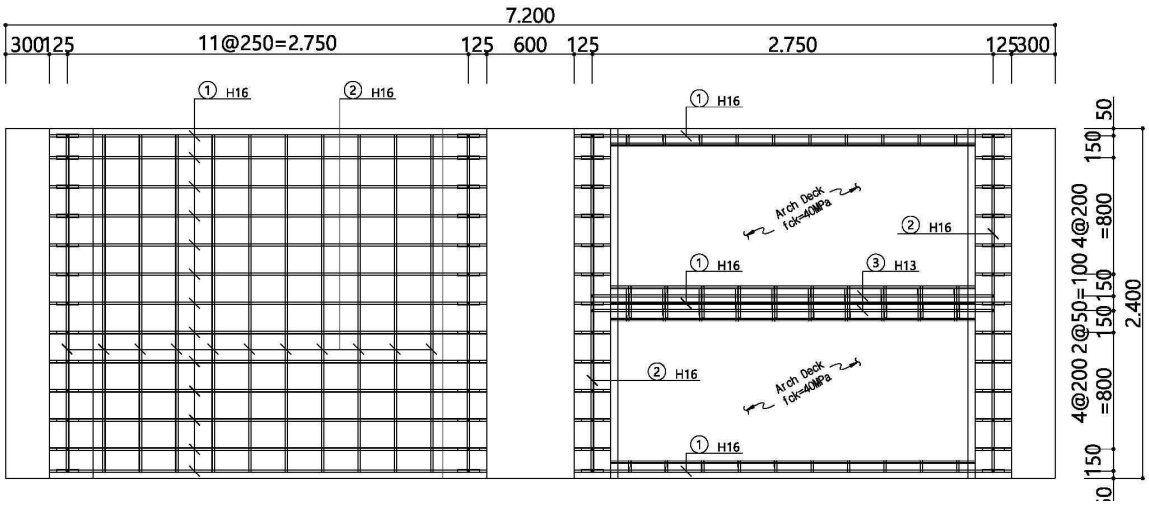


(c) 실험체 정면도

그림 3.17 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 단면상세

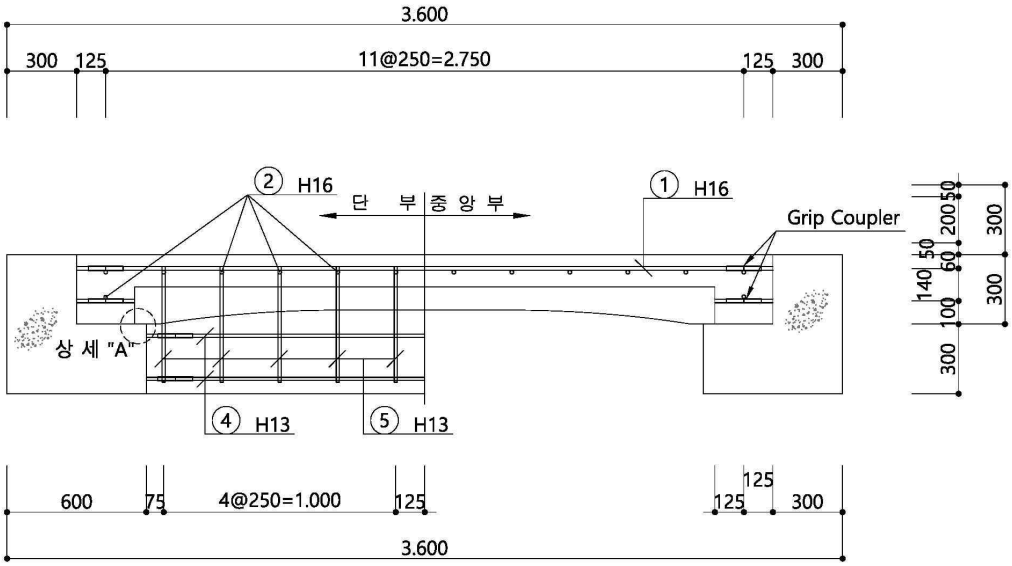


(a) 정면도



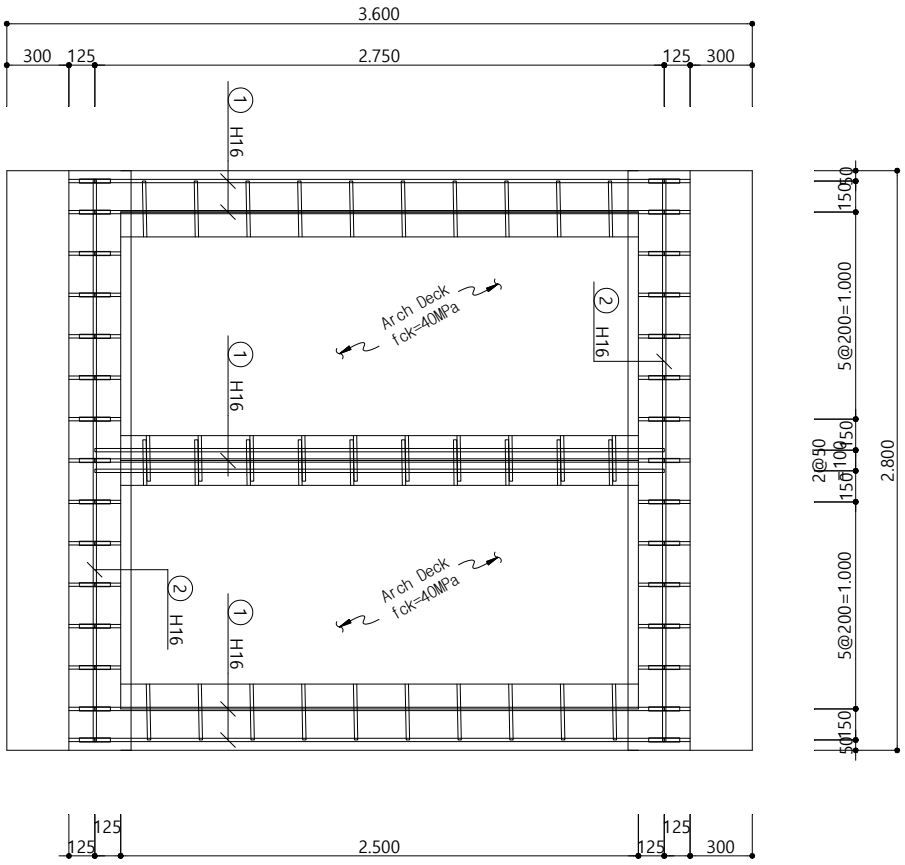
(b) 평면도

그림 3.18 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD) 및 피로 합성 실험체(FD) 단면상세

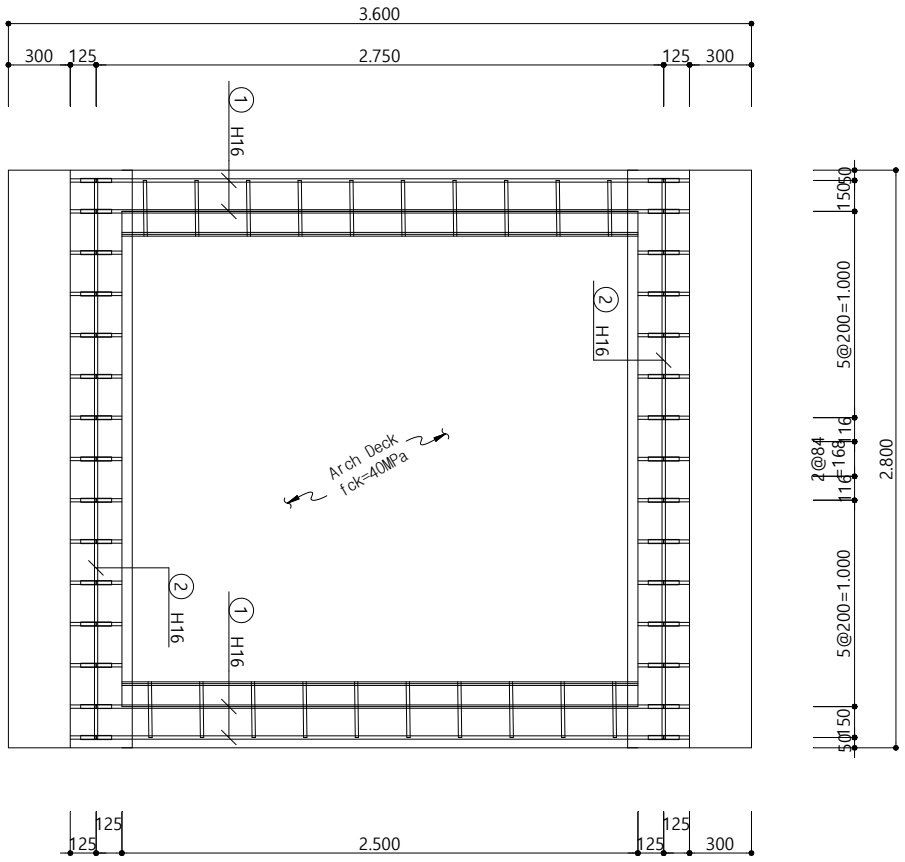


(a) 정면도

그림 3.19 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 단면상세 (계속)



(b) 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD 1) 평면도



(c) 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD 2) 평면도

그림 3.19 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD) 단면상세

(3) 실험체 설계 및 제작

그림 3.20은 실험체의 제작 과정이다. 아치덱은 강재 거푸집을 이용하여 철근 조립 후 콘크리트를 타설하였으며, 조기 강도발현을 위하여 증기양생을 실시하였다. 아치덱의 콘크리트 설계기준강도는 40 MPa, 상부 현장타설 바닥판은 30 MPa이다. 실험 직전 콘크리트 공시체의 압축강도를 측정한 결과 아치덱 49.5 MPa, 상부 현장타설 바닥판 38.5 MPa로 모두 설계기준강도를 만족하는 것으로 확인되었다. 철근은 KS D 3504 항복강도 400 MPa의 이형철근을 사용하였으며, 위 내용을 요약하여 표 3.7에 정리하였다.



(a) 아치덱 철근조립



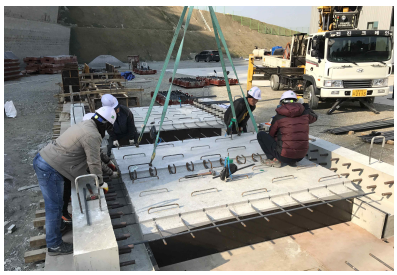
(b) 아치덱 콘크리트 타설



(c) 아치덱 제작완료



(e) 반력대 설치



(d) 아치덱 거치



(f) 그립커플러 체결



(g) 바닥판 철근 배근

(h) 바닥판 콘크리트 타설

(i) 실험체 제작완료

그림 3.20 실험체 제작과정

표 3.7 재료 특성

구 분	콘크리트 압축강도 (MPa)		철근 항복강도 (MPa) (KS D 3504)
	설계기준강도	실험압축강도	
아치덱 (Arch Deck)	40	49.5	400
상부바닥판	30	38.5	

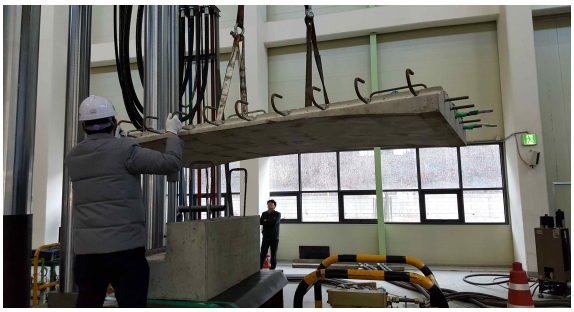
(4) 실험 방법

① 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 실험방법

본 실험에서는 도로교설계기준에 따른 차량 윤하중을 모사하기 위하여 환산된 차량 후륜의 접지면적 폭 230 mm, 길이 580 mm의 강판을 실험체의 중앙 지점에 설치한 후 가력하였으며, 상세도면과 전경을 그림 3.21~22에 나타내었다. 실험에 사용된 가력장비는 최대용량 5,000 kN을 갖는 UTM (Universal Testing Machine)을 사용하였다. 하중 재하는 변위제어 방식과 하중제어 방식을 사용하였으며, 실험체의 하중재하는 총 3 단계로 나누어 수행하였다. 1단계에서는 균열하중에 대한 결과를 얻기 위해 균열이 예상되는 0 ~ 10 kN 구간에 하중제어방식으로 1 kN/min의 속도를 적용해 정적하중을 재하 하였으며, 균열체크는 1분에 한번씩, 즉 2 kN마다 체크를 진행하였다. 2단계는 균열 이후 실험체의 하중별 구조적 거동을 확인하기 위해 10 ~ 30 kN구간에 하중제어방식으로 2 kN/min의 속도를 적용하였고, 균열체크는 1단계와 동일하게 진행하였다. 3단계는 하중제어의 압축강도가 변위제어보다 크게 나오는 점을 감안하여 30 kN부터 변위제어방식으로 0.5 mm/min의 속도를 적용하였고, 균열체크는 4분당 한 번씩, 즉 2 mm 마다 진행하였다. 모든 실험에서는 가력장비의 유압이 감소하는 시기, 즉, 실험체가 파괴에 이르기 직전까지 정적하중을 재하하였다. 이를 표 3.8에 요약하였다.

표 3.8 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적하중재하 실험방법

구 분	실험 단계 (kN)	하중재하 방법	하중재하 속도	균열체크
아치덱 정적재하 비합성 실험체 (AD)	0 ~ 10	하중 제어	1 kN/min	1 kN
	10 ~ 30		2 kN/min	
	30 ~ P_u	변위 제어	0.5 mm/min	2 mm



(a) 실험체 설치



(b) 하중재하 중앙부

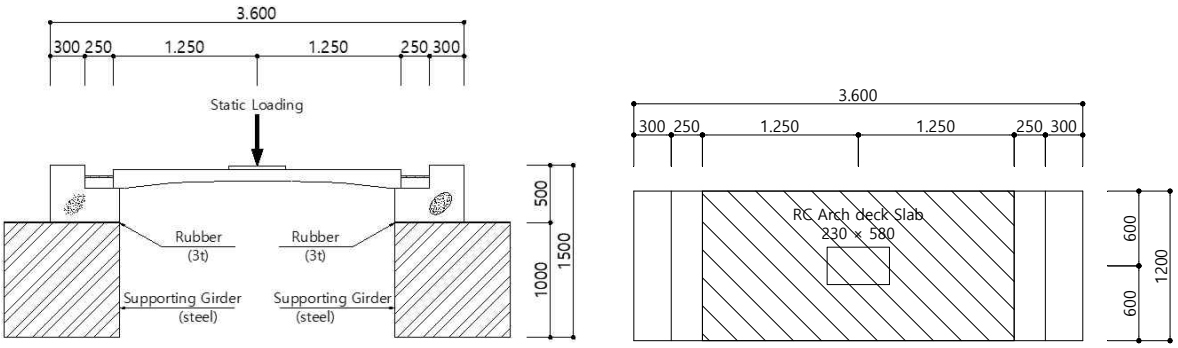


(c) 가력부 상세



(d) 정적하중재하

그림 3.21 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적 휨 거동 실험 전경



(a) 정면도 (b) 평면도

그림 3.22 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 정적 휨 거동 실험 상세도

② 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 실험방법

정적 휨 거동 실험은 양쪽 경간의 중앙부에 차량 윤하중을 모사해 가력하였다. 차량 윤하중을 모사하기 위해 도로교설계기준에 따른 차량 후륜의 접지면적을 환산하여 폭 230 mm, 길이 580 mm의 강판을 제작해 실험체 양쪽 경간의 중앙부에 설치하였다. 이후 양쪽 경간의 강판 위에 강재프레임을 설치하여 최대 용량 5,000 kN을 갖는 정적 유압가력기(Static Actuators)로 가력하였다. 실험체 설치과정과 이를 도식한 그림을 그림 3.23와 그림 3.24에 각각 나타내었다. 하중재하 방법은 총 2단계로 나누어 수행하였다. 1단계 구간인 0 ~ 500 kN 구간에서는 변위제어방식으로 0.3 mm/min의 속도를 적용해 정적하중을 재하하였으며, 2단계 구간인 500 kN ~ 항복 구간에서는 변위제어방식으로 0.5 mm/min의 속도를 적용해 정적하중을 재하하였다. 실험에서는 가력장비의 유압이 급감하는 시기, 즉 실험체가 항복하는 시점까지 정적하중을 재하하였으며, 실험상의 안전을 고려하여 실험체의 파괴단계까지 정적하중을 재하하지는 않았다. 또한 약 100 kN부터 500 kN까지 하중이 50 kN 증가할 때마다 육안으로 균열을 측정하였다. 단계별 하중재하 방법과 균열 측정 시기 등을 표 3.9에 작성하였다.

표 3.9 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적하중재하 실험방법

구 분	실험 단계 (kN)	하중재하 속도 (mm/min)	균열체크
2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체 (BD)	0 ~ 100	0.3	-
	100 ~ 500		50 kN 마다
	500 ~ P_u	0.5	-



(a) 실험체 운반



(b) 실험체 설치



(c) 하중재하 중앙부



(d) 경계조건

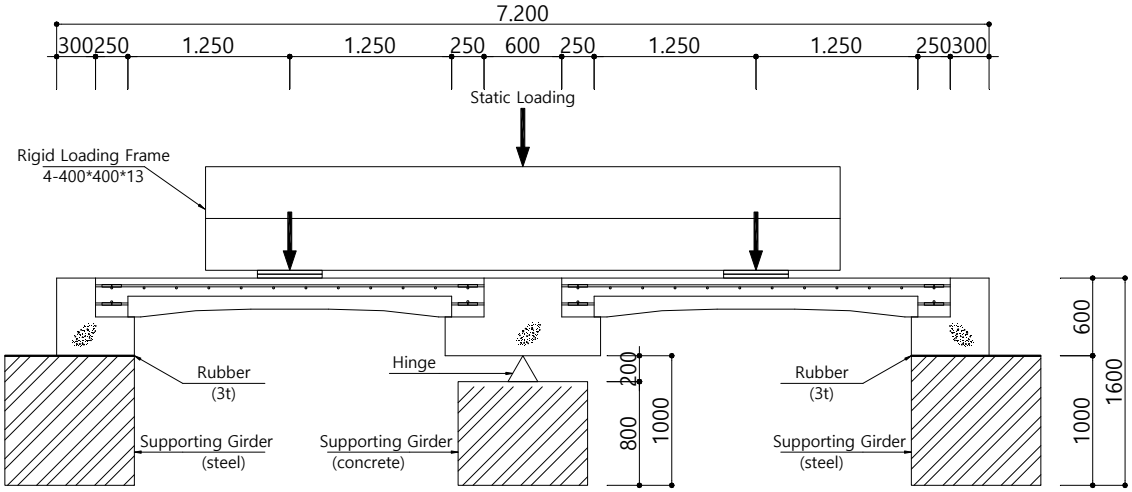


(e) 계측기 설치

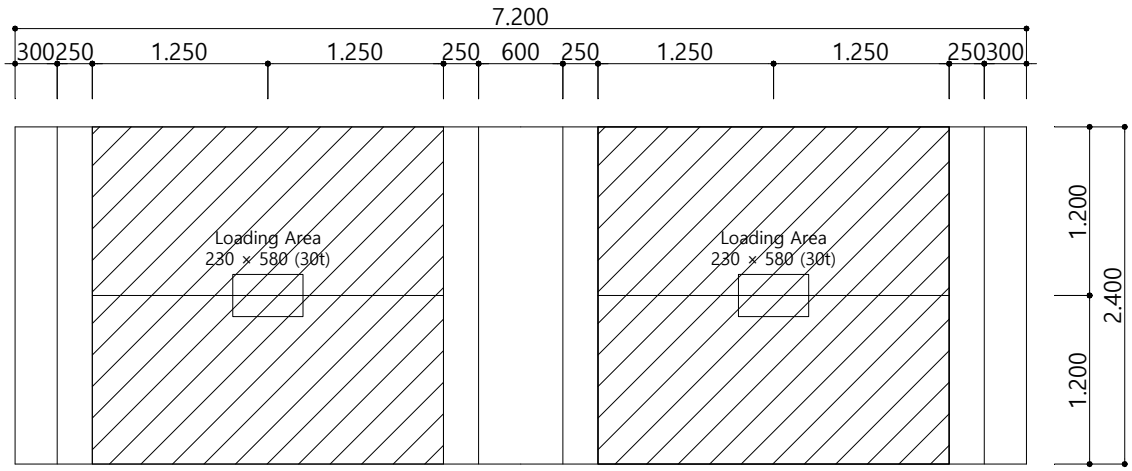


(f) 정적 휨 거동 실험

그림 3.23 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적 휨 거동 실험 전경



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 3.24 2경간 아치텍 정적재하 합성 실험체(BD)의 정적 휨 거동 실험 상세도

③ 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 실험방법

피로 실험은 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)와 동일한 제원의 실험체를 추가 제작해 수행하였다. 피로하중재하 장비는 최대용량 1,000 kN의 동적 액츄에이터(Dynamic actuator)를 사용하였으며, 총 2백만 회의 피로하중을 재하하였다. 충격하중을 방지하기 위해 피로하중의 최소값은 10 kN으로 설정하였다. 또한 도로교설계기준에서 규정한 1등급 교량에 대한 차량의 최대하중 96 kN에 충격계수 1.3을 고려하여 최대값을 125 kN으로 환산하였다. 하중재하 속도는 3Hz로 채택하였으며, 정해진 회수마다 125 kN의 정적하중을 재하하여 실험체의 변위를 계측하였다. 이를 표 3.10에 정리하였다.

표 3.10 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 피로 실험방법

구 분	피로하중 (kN)	하중재하 속도 (Hz)	정적하중재하 시기 (Cycle)
2경간 아치덱 피로 합성 실험체 (FD)	10 ~ 125	3	1
			$1x10^2$
			$1x10^3$
			$1x10^4$
			$1x10^5$
			$1x10^6$
			$2x10^6$



(a) 실험체 운반



(b) 실험체 세팅



(c) 하중재하 중앙부



(d) 경계조건

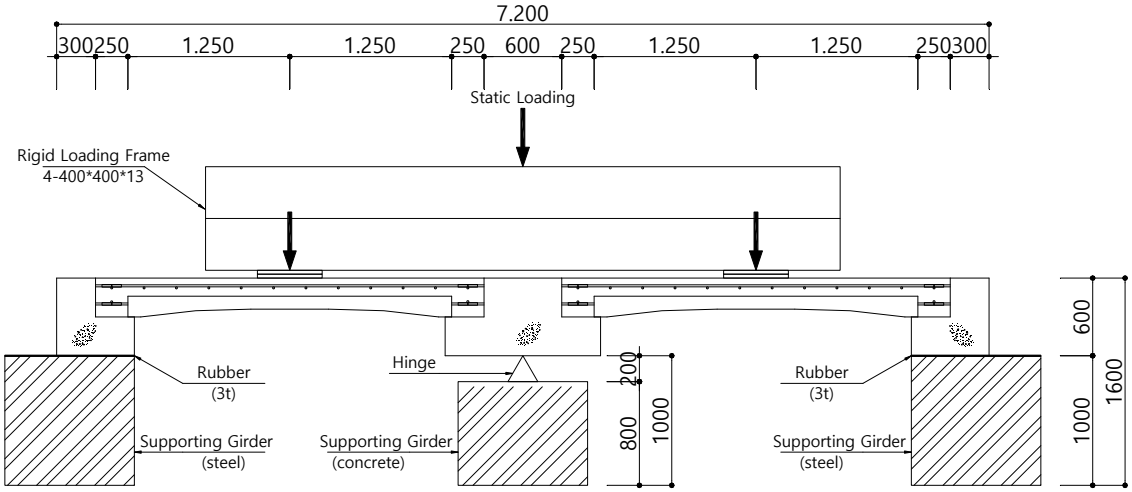


(e) 계측기 설치

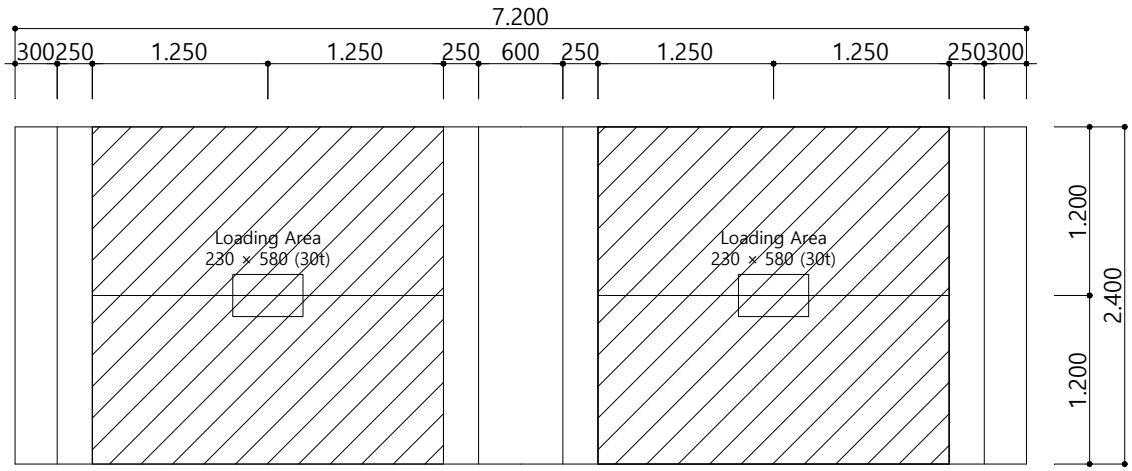


(f) 피로 실험

그림 3.25 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 피로 실험 전경



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 3.26 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 정적 휨 거동 실험 상세도

④ 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 실험방법

펀칭전단 실험은 각 실험체의 중앙부에 차량 윤하중을 모사해 최대 용량 5,000 kN을 갖는 정적 유압가력기 (Static Actuators)로 가력하였다. 본 실험에서는 차량 윤하중을 모사하기 위해 도로교설계기준에 따른 차량 후륜의 접지면적을 환산하여 폭 203 mm, 길이 580 mm의 강판을 제작해 실험체 중앙부에 설치하였다. 또한 실험체의 횡 방향 양쪽에 강재프레임으로 반력대를 설치해 실험체를 세팅하였다. 실험체 설치과정과 이를 도식화한 그림을 그림 3.25~26에 각각 나타내었다. 하중재하 방법은 변위제어방식으로 재하하였으며 하중속도는 총 3단계로 나누어 수행하였다. 1단계 구간인 0 ~ 300 kN에서는 0.1 mm/min의 속도로 정적하중을 재하하였으며, 2단계 구간인 300 ~ 650 kN에서는 0.2 mm/min의 속도를, 3단계 구간인 650 kN ~ 항복 구간에서는 0.5 mm/min의 속도로 정적하중을 재하하였다. 실험에서는 가력장비의 유압이 급감하는 시기, 즉 실험체가 항복하는 시점까지 정적하중을 재하하였으며, 실험상의 안전을 고려하여 실험체의 파괴단계까지 정적하중을 재하하지는 않았다. 300 kN부터 매 50 kN마다 700 kN까지 육안으로 균열체크를 하였으며 700 kN이후에는 설계극한강도를 넘어서므로 안전상의 이유로 균열체크를 진행하지 않았다. 이를 명확히 나타내기 위해 단계별 하중재하 방법과 균열 측정 시기 등을 표 3.11에 작성하였다.

표 3.11 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 정적하중재하 실험방법

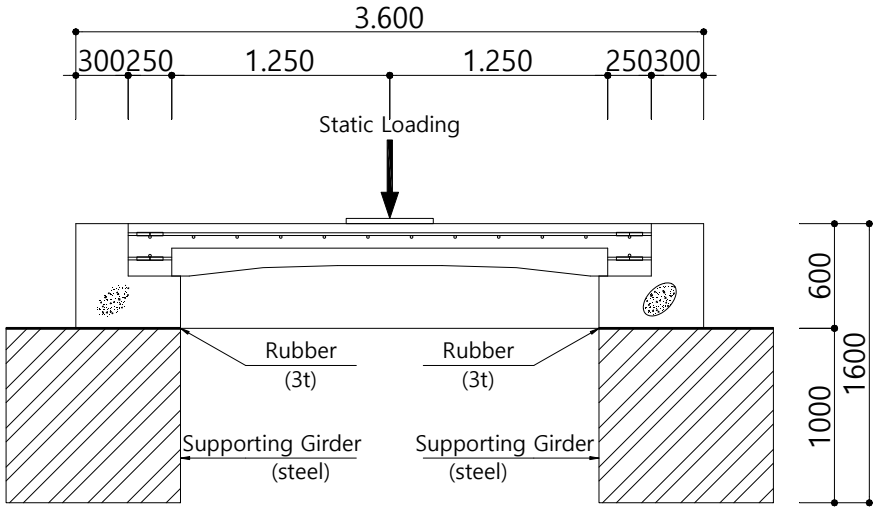
구 분	실험 단계 (kN)	하중재하 속도 (mm/min)	균열체크
아치덱 펀칭전단 합성 실험체 (PD)	0 ~ 300	0.1	-
	300 - 650	0.2	50 kN 마다
	650 - 700	0.5	50 kN 마다
	700 - P_u	0.5	



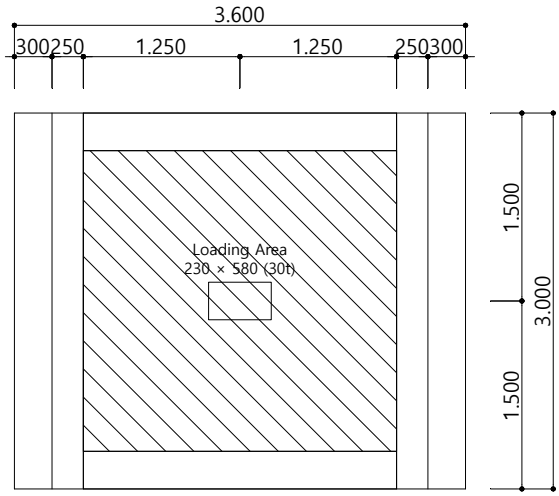
(a) 실험체 운반 (b) 실험체 거치 (c) 하중재하 중앙부

(d) 변형률 게이지 설치 (e) 계측기 설치 (f) 하중재하 전경

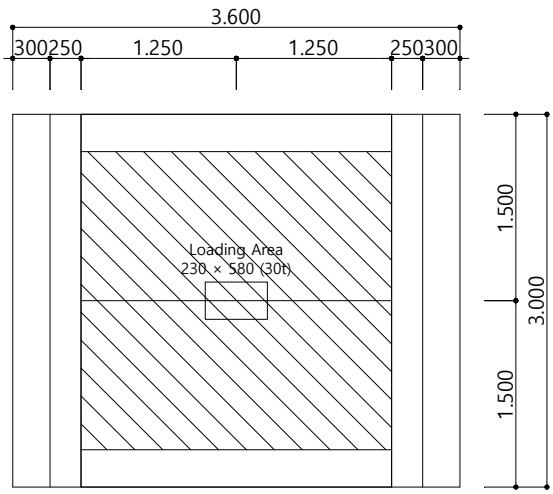
그림 3.27 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 펀칭전단 실험 전경



(a) 정면도



(b) 펀칭전단 실험체 평면도 (PD 1)



(c) 펀칭전단 실험체 평면도 (PD 2)

그림 3.28 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 펀칭전단 실험 상세도

(5) 계측방법

① 계측장비

실험에 사용된 데이터 로거는 일본 Tokyo Sokki 제품의 계측 장비인 TDS-303(그림 3.29)을 사용하였다. TDS-303은 strain gauge를 비롯하여 직류전압이나 열전대, 백금측온저항체 등의 다점의 자동절환측정을 목적으로 한 데이터로거 이다. 측점점수는 본체만으로 최대 30점, 외부 스위치박스를 병용해서 최대 1000점까지 측정을 할 수 있으며, 본 성능평가에서는 50채널의 연결채널 2개소와 30채널의 연결채널 1개소를 사용하여 총 170여 점의 측점을 수행하였다. 또한, TDS-303은 A/D 변환부의 새로운 삼중 적분방식을 한층 더 개량한 것으로 1점당 0.06초의 고속, 고정도, 고안정을 실현하고 있다. 조작방법은 터치 판넬에 의한 메뉴형식이기 때문에 누구라도 간단하게 사용할 수 있다. 측정한 data는 고속 print를 비롯하여, 데이터 메모리, 플로피디스크 등으로 기록하거나, GP-IB, RS-232C를 연결하여 외부 컴퓨터로 전송, 자유롭게 사용자가 필요한 데이터를 얻을 수 있다.

- 외형치수 : 320(W)×130(H)×440(D)mm
- 전원 : AC85-250V 50/60Hz 90VA MAX

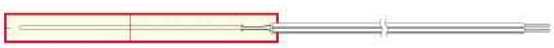


그림 3.29 정적 변형률 측정장비(TDS-303)

② 계측센서

㉮ P형 전기저항식 변형률게이지

P형 변형률게이지는 콘크리트, 모르타르 등의 표면 거동이나 정탄성계수 측정에 사용된다. 게이지의 베이스가 견고하고 투명하기 때문에 접착위치의 적절성을 판별하기 쉽고 야외에서 계측할 시 아주 편리하다.



PL-60-11-5L

표 3.12 P형 변형률게이지 제원

주된 대상재료	콘크리트, 몰탈	베이스재료	폴리에스텔
사용온도범위	-20～80℃	저항소자	Cu-Ni선
온도보상범위	10～80℃	실온에 있어서의 strain 한계	2% (20000×10-6)
주된 적용접착제	CN-E, RP-2	실온에 있어서의 피로한계	1×105 (±1000×10-6)

㉯ F형 전기저항식 변형률게이지

수 미크론의 합금박을 이용하여,베이스에는 두께 약 0.03mm의 절연성이 높은 에폭시 수지를 사용한 비닐 리드선을 붙인 게이지이다. 게이지는 리드선 부착 폴리미드 피복선으로 이어져 있다. 게이지 단자의 부착이나 결선이 불필요하여 작업시간이 짧다.



FLA-2-11-1L

표 3.13 철근게이지의 제원

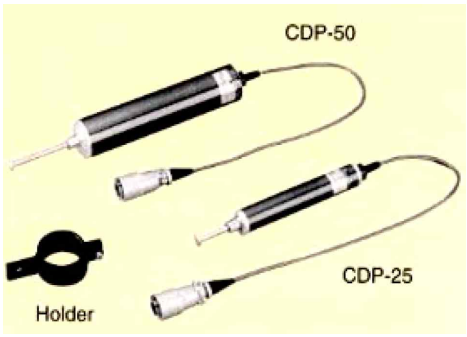
주된 대상재료	금속, 유리, 세라믹	베이스재료	에폭시
사용온도범위	-20～+80℃	저항소자	Cu-Ni박
온도보상범위	+20～+80℃	실온에 있어서의 strain 한계	3% (20000×10-6)
주된 적용접착제	CN, P-2, EB-2	실온에 있어서의 피로한계	1×106 (±1500×10-6)

㉰ CDP형 전기식 변위계 (LVDT : linear variational deformation transducer)

LVDT (linear variational deformation transducer)는 대상 구조물의 처짐, 솟음이나 회전 등의 변위를 측정하는 전기적 변환기 형태를 말하며 실험에 사용된 CDP형식의 LVDT는 외형이 간편해서 취급이 용이하고 안정적인 변위계로서 고정도 측정, 고출력, 뛰어난 응답성으로 정·동적 계측에 널리 사용되고 있다.

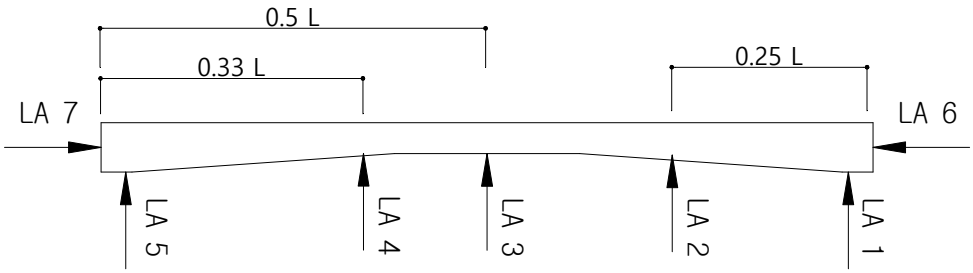
표 3.14 CDP형 전기식 변위계의 형상 및 제원

형식	CDP-50	CDP-100	
용량 (mm)	50	100	
정격출력	5mV/V±0.1%) (10000×10-6±0.1%)		
민감도(1×10-6/mm)	200	100	
비직선성	0.1%RO		
측정력	4.9N	5.4N	
응답주파수(Hz)	6Hz	3Hz	
영점의 온도영향	1×10-6/℃ (0~+40℃)		
허용온도범위	0~+60℃		
입출력 저항	350Ω		
허용인가전압	10V		

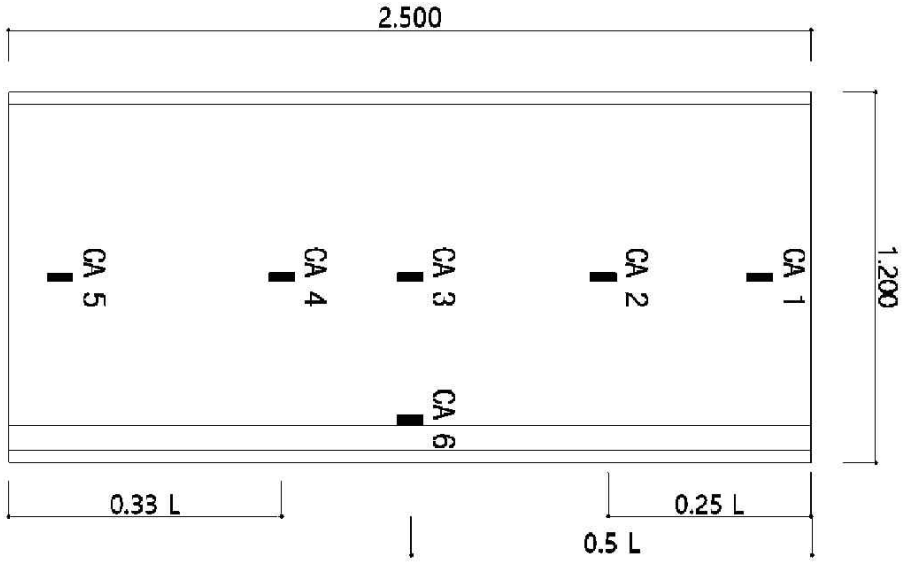


③ 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 계측위치

그림 3.30은 실험체에 부착한 측정센서를 표시한 것이다. 실험체의 위치별 구조적 거동을 확인하기 위해 횡방향 경간의 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 중앙 지점(0.5 L) 변위와 변형률을 측정하였다. 이를 위해 실험체 하면에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였으며, 철근에 5 mm 스트레인 게이지, 콘크리트 평면에 60 mm 스트레인 게이지를 부착하였다.

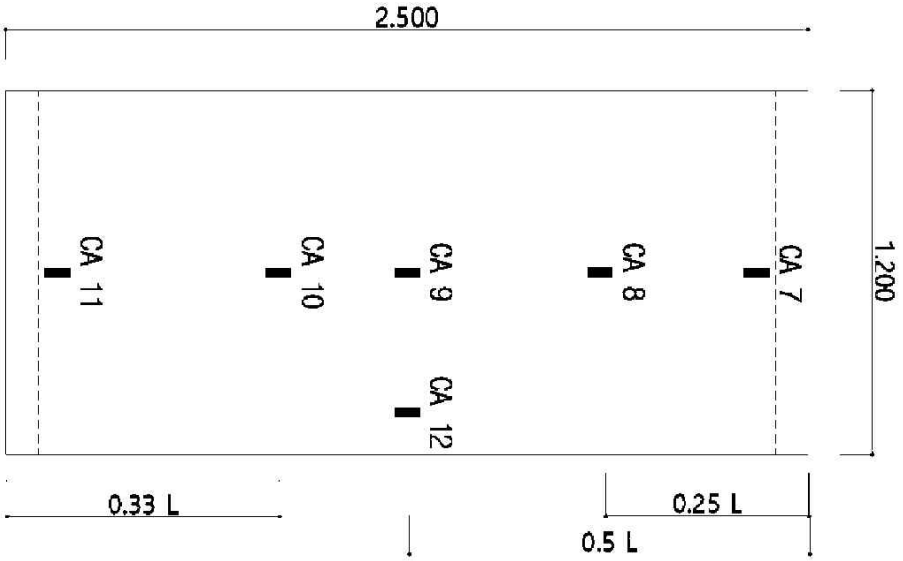


(a) LVDT 위치

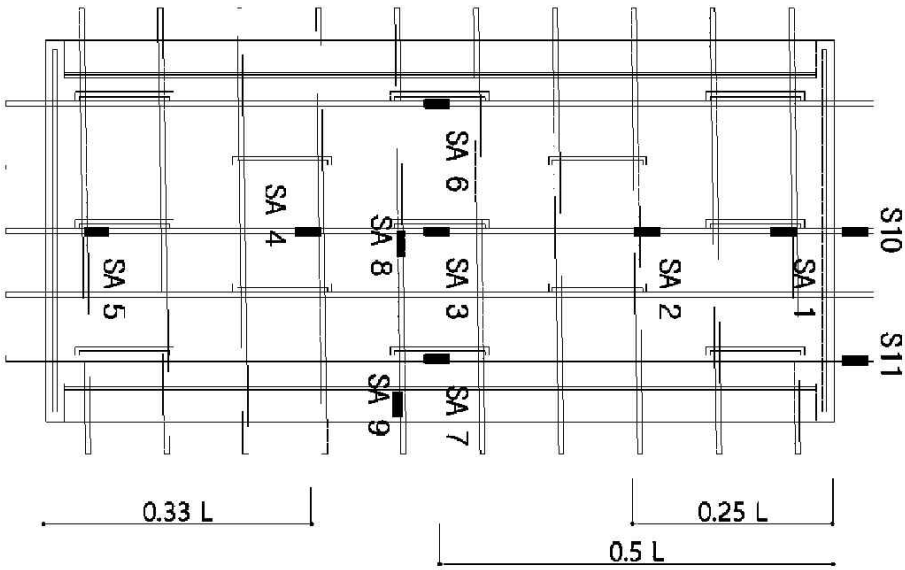


(b) 상면 콘크리트 게이지 부착위치

그림 3.30 AD 실험체 계측도 (계속)



(c) 하면 콘크리트 게이지 부착위치

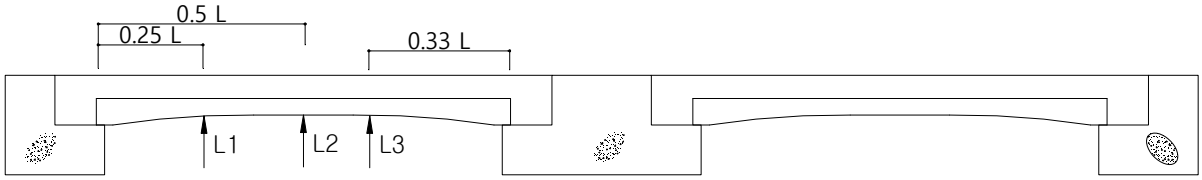


(d) 철근 게이지 부착위치

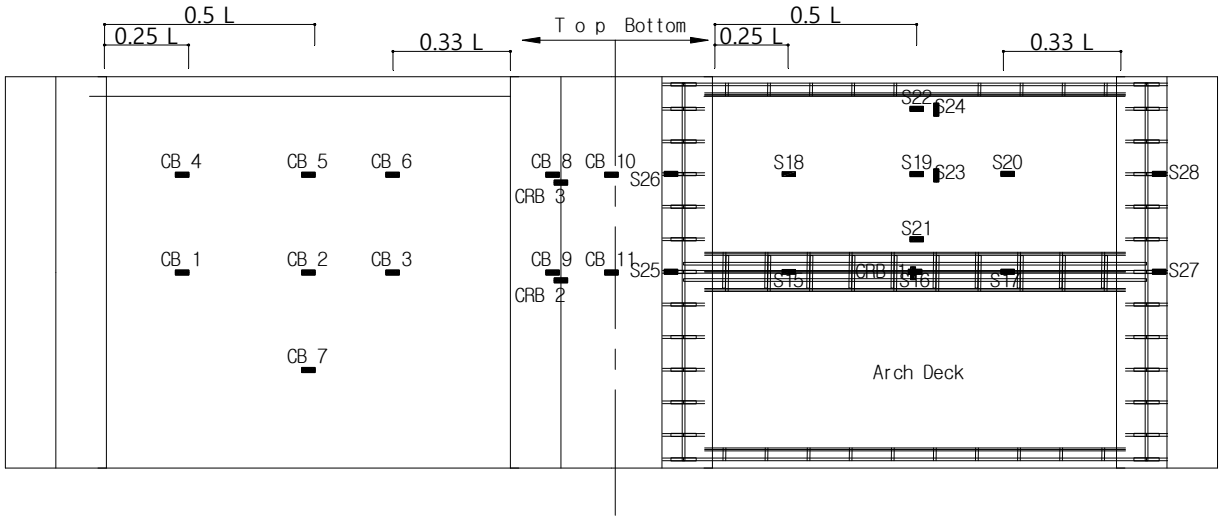
그림 3.30 AD 실험체 계측도

④ 2경간 아치덱 정적재하 및 피로 합성 실험체(BD)의 계측위치

중앙부의 집중하중 재하에 따른 실험체 (BD)의 휨 거동을 확인하기 위해 실험체 중요 부위의 처짐, 철근 및 콘크리트 변형률을 측정하였다. 실험체 (BD)의 위치별 거동을 확인하기 위해 횡방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 변위와 변형률을 측정하였다. 수직변위를 측정하기 위해 실험체 (BD) 하면에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였으며 철근과 콘크리트 변형률을 측정하기 위해 각각 5 mm, 60 mm 전기식 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 부착하였다. 또한 육안을 통한 철근콘크리트 아치덱(AD) 하면의 균열 측정 이외에도 아치덱 이음부의 이격을 파악하기 위해 Ω형 균열 게이지를 이음부에 부착하였다. 이와 같은 계측도를 그림 3.31에 나타내었다.



(a) LVDT 계측도

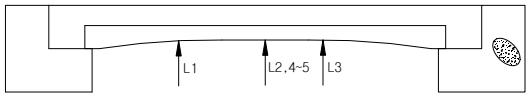


(b) 콘크리트 및 철근 스트레인 게이지 계측도

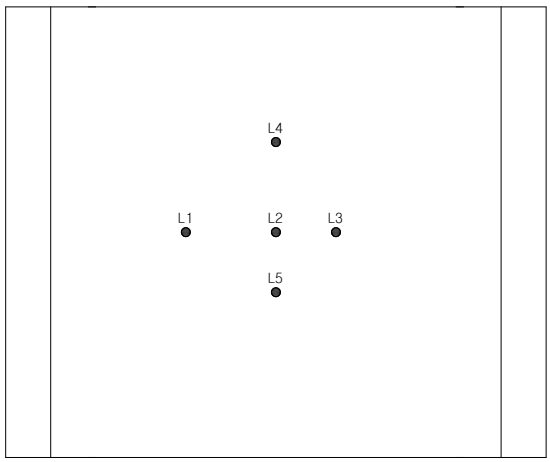
그림 3.31 BD 실험체 계측도

⑤ 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 계측위치

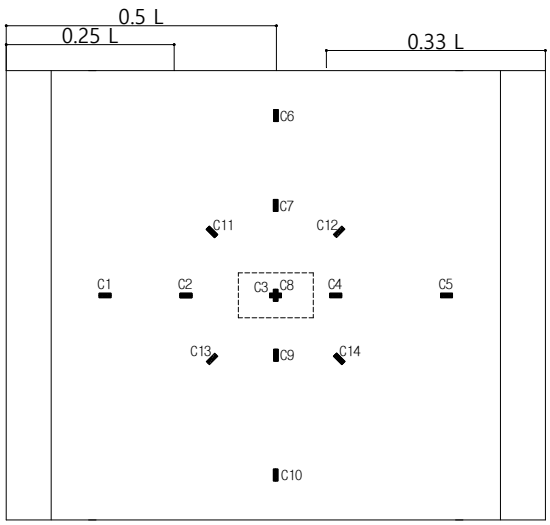
중앙부의 정적하중 재하에 따른 펀칭전단 실험체 (PD)의 펀칭전단 거동을 확인하기 위해 실험체 중요 부위의 처짐, 철근 및 콘크리트 변형률을 측정하였다. 실험체 (PD)의 위치별 거동을 확인하기 위해 횡방향 및 종방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 변위와 변형률을 측정하였다. 수직변위를 측정하기 위해 실험체 (BD) 하면에 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였으며 철근과 콘크리트 변형률을 측정하기 위해 각각 5 mm, 60 mm 전기식 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 부착하였다. 또한 육안을 통한 철근콘크리트 아치덱(AD) 하면의 균열 측정 이외에도 아치덱 이음부의 이격을 파악하기 위해 Ω형 균열 게이지를 이음부에 부착하였다. 이와 같은 계측도를 그림 3.32에 나타내었다.



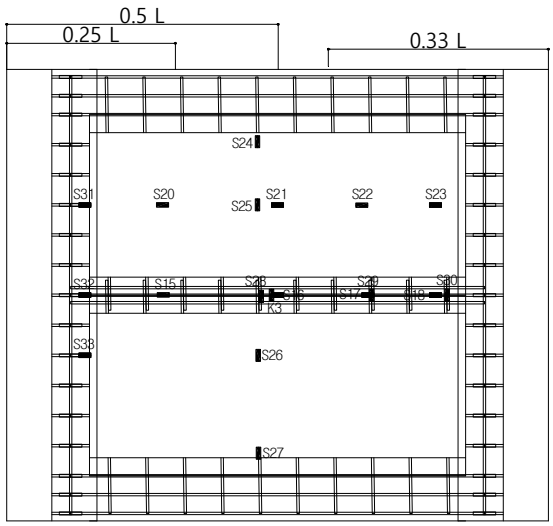
(a) LVDT 정면 계측도



(b) LVDT 평면 계측도



(c) 상부 콘크리트 게이지 계측도



(d) 하부 철근 및 균열 게이지 계측도

그림 3.32 PD 실험체 계측도

(6) 실험 결과

① 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 실험결과

㉮ 하중-변위 관계

표 3.15에 실험체의 균열하중(P_{cr})과 극한하중(P_r)의 처짐을 설계 및 실험값과 비교하였으며, 그림 3.33-(a)는 실험체 중앙 지점의 하중-변위 곡선이다. 전체적인 변위곡선을 보았을 때, 첫 번째, 약 0 ~ 10 kN 구간과 두 번째, 약 10 ~ 60 kN 구간과 세 번째 60 kN 이후 구간에서 각각의 기울기가 다름을 알 수 있다. 이처럼 전체적인 구조거동의 형상이 bi-linear로 나타난 것은 다음과 같은 이유로 분석된다.

0 ~ 10 kN 구간에서는 실험체가 하중을 받기 시작하여 강재 프레임으로 제작된 반력대에 정착되는 과정에서 나타난 현상으로 사료되며, 10 ~ 60 kN 구간에서는 선형거동을 하는 것으로 보아, 실험체가 완전히 정착된 후 철근콘크리트 아치덱의 구조거동을 나타낸 것이라고 판단하였다.

60 kN이후 구간에서는 실험체의 변위가 급격하게 증가하는데, 콘크리트에 균열이 발생하고 철근이 항복하는 등의 작용으로 구조물의 저항성능이 저하된 것으로 판단된다. 세 번째 구간의 시작점인 약 60 kN 부근은 극한하중(P_r) 27.32 kN의 약 2.2배 수준으로, 충분한 안전율이 확보된 것으로 판단된다.

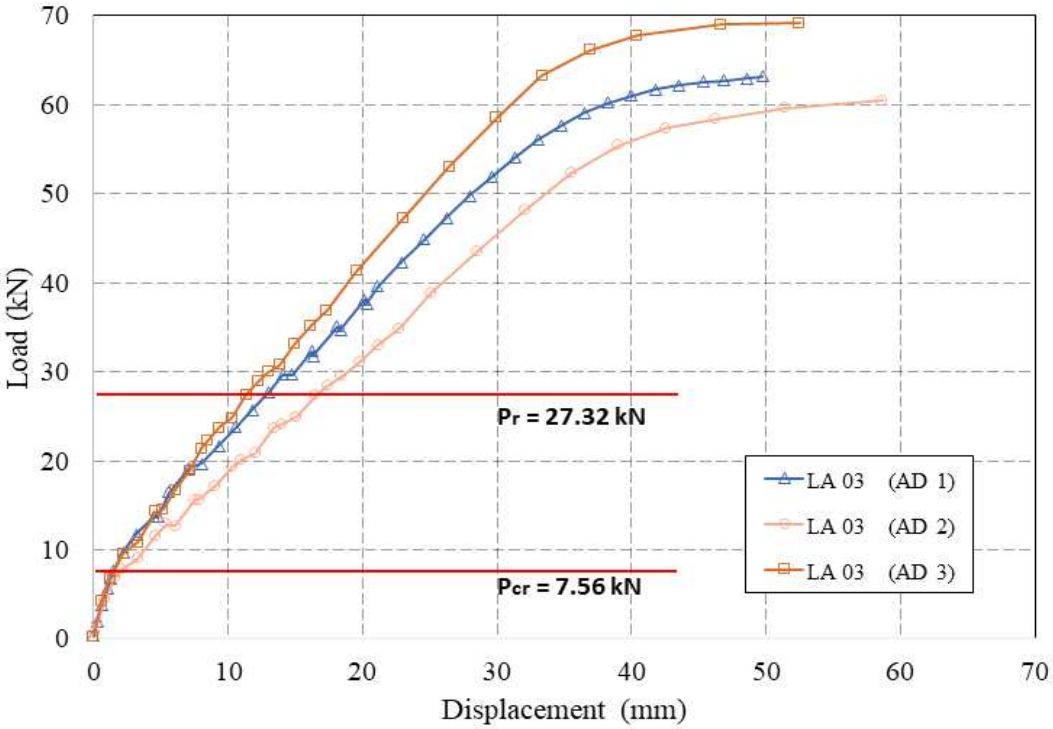
각 실험체의 최대재하하중은 63.20 kN, 61.10 kN, 69.15 kN이며 평균은 64.48 kN이다. 이는 극한하중(P_r) 27.32 kN의 약 2.2 ~ 2.5배 수준이다. 결과를 종합하였을 때, 아치효과로 인하여 철근콘크리트 아치덱의 구조성능은 충분히 안정적이라고 판단되며, 추후 상부 현장타설 바닥판 콘크리트와 합성 후에도 충분한 저항성능을 확보 할 수 있을 것이라고 사료된다.

그림 3.33-(b)와 표 3.16은 지점별 하중-변위의 관계이며, 하중증가에 따른 지점별 최대 처짐은 중앙부에서 발생하였다. 최소 처짐은 극한하중의 1.1배인 30kN을 기준으로 하였을 때, 1/4 지점에서 발생하였으며 최대 처짐이 발생한 중앙 지점에 비하여, 약 63 %의 처짐이 발생하였고, 1/3 지점은 약 86 %의 처짐이 발생하였다.

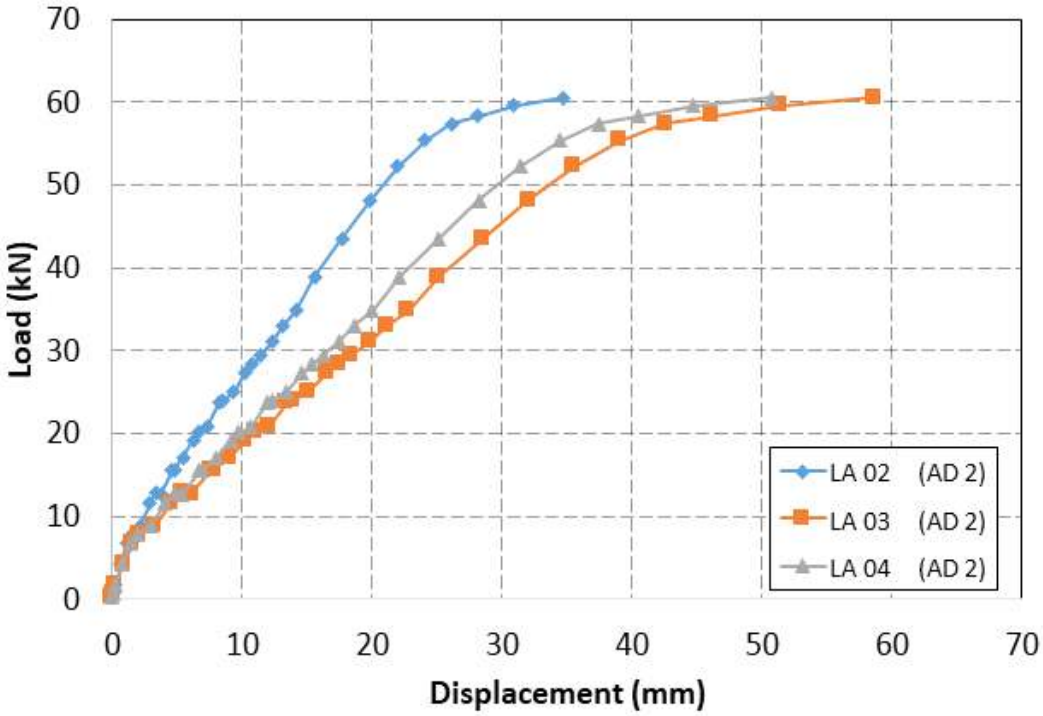
표 3.15 설계-실험 데이터 비교

구 분			AD 1	AD 2	AD 3	평균
설계값	P_r (kN)		27.32			
	P_{cr} (kN)		7.56			
실험값	P_{cr} (kN)	Load (kN)	12.00			
		Disp. (mm)	4.87	4.83	3.45	4.38
	P_{max} (kN)	Load (kN)	63.20	61.10	69.15	64.48
		Disp. (mm)	51.17	62.99	52.49	55.55

▪ P_r : 극한하중, ▪ P_{cr} : 균열하중



(a) 중앙부 단면에서의 하중-변위 곡선



(b) 위치별 하중-변위 곡선(AD 1)

그림 3.33 하중-변위 곡선

표 3.16 하중-변위 결과

위치	하중 (kN)	변 위 (mm)			
		AD 1	AD 2	AD 3	평균
1/2 지점 LA 03	0	0	0	0	0.00
	10	2.19	3.27	2.19	2.55
	30	14.75	18.43	12.97	15.38
	60	38.25	58.63	29.94	42.27
1/3 지점 LA 04	0	0	0	0	0.00
	10	1.8	2.94	1.77	2.17
	30	13.15	16.26	10.47	13.29
	60	33.07	50.7	24.77	36.18
1/4 지점 LA 02	0	0	0	0	0.00
	10	1.82	2.16	1.32	1.77
	30	10.05	11.45	7.62	9.71
	60	26.23	34.71	19.27	26.74

㈏ 하중-변형률 관계

i. 철근의 하중-변형률 관계

그림 3.34와 표 3.17은 실험체 횡 방향 경간의 1/4 지점(SA 02), 1/3 지점(SA 04), 중앙 지점(SA 03)의 철근 변형률 곡선이다. 각 지점별 변형률 수치를 보았을 때, 중앙 지점(0.5 L)에서 최대 변형률이 측정되었으며, 극한하중의 1.1배인 30kN을 기준으로 하였을 때 1/4 지점(SA 02)은 중심지점 변형률의 약 74%, 1/3 지점(SA 04)은 36% 수준으로 분석되었으며 단부로 갈수록 변형률이 작은 이유는 위치별 단면적의 변화와 아칭액션에 의한 결과로 사료된다.

사용된 철근의 항복강도가 400 MPa이므로 약 0.002의 변형률 이후부터 철근이 항복할 것으로 예측되었다. 본 실험에서는 약 0.0026의 변형률 이후부터 중앙 지점 철근이 항복되는 것으로 판단된다. 상기와 같은 결과는 철근뿐 아니라 아치형태의 콘크리트 구조물이 합성되어 항복점이 높아진 것으로 사료된다. 반면, 중앙 지점(0.5 L)을 제외한 1/4 지점(0.25 L), 1/3 (0.33 L)의 철근은 파괴하중단계에서 0.002의 변형률에 근접하였으나, 변형률의 급격한 증가는 관찰되지 않았다. 이는 파괴하중단계에서도 각 지점의 철근이 항복되지 않았음을 의미한다.

전체적인 거동을 철근 변형률로 확인하기 위하여 그림 3.35-(a)와 그림 3.35-(b)에 실험체의 각 위치별 철근 변형률과 응력 결과를 표현하였다.

철근의 변형률을 인장변형률로 확인되었으며 철근이 구조물의 중립축 아래에 존재하며 인장철근의 역할을 하는 것으로 사료된다.

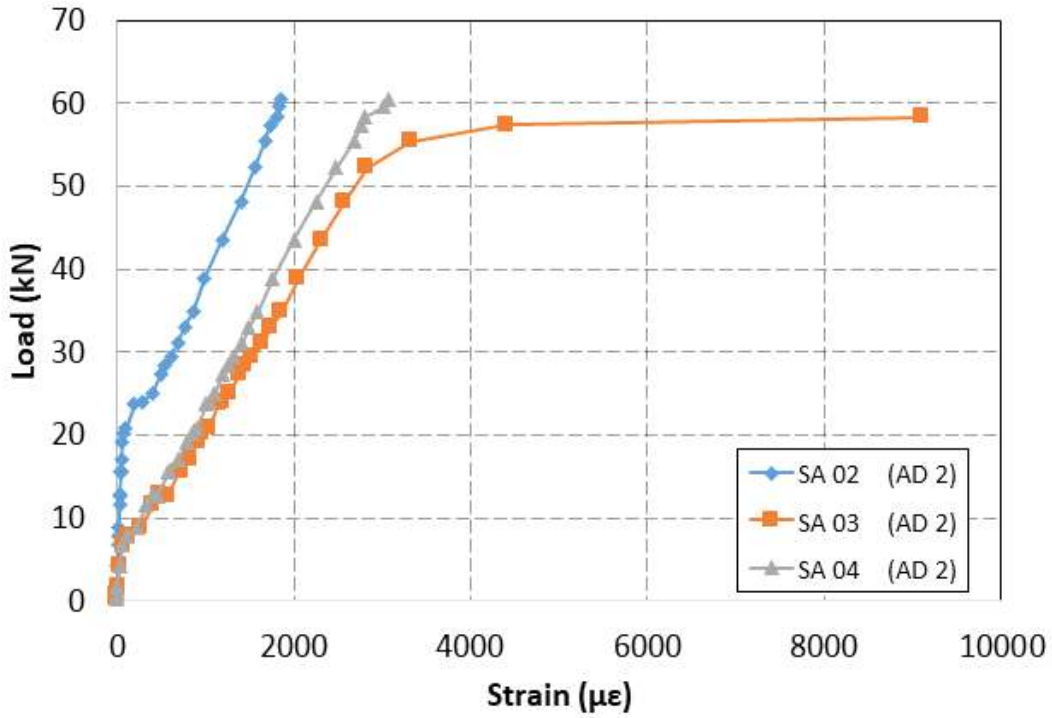
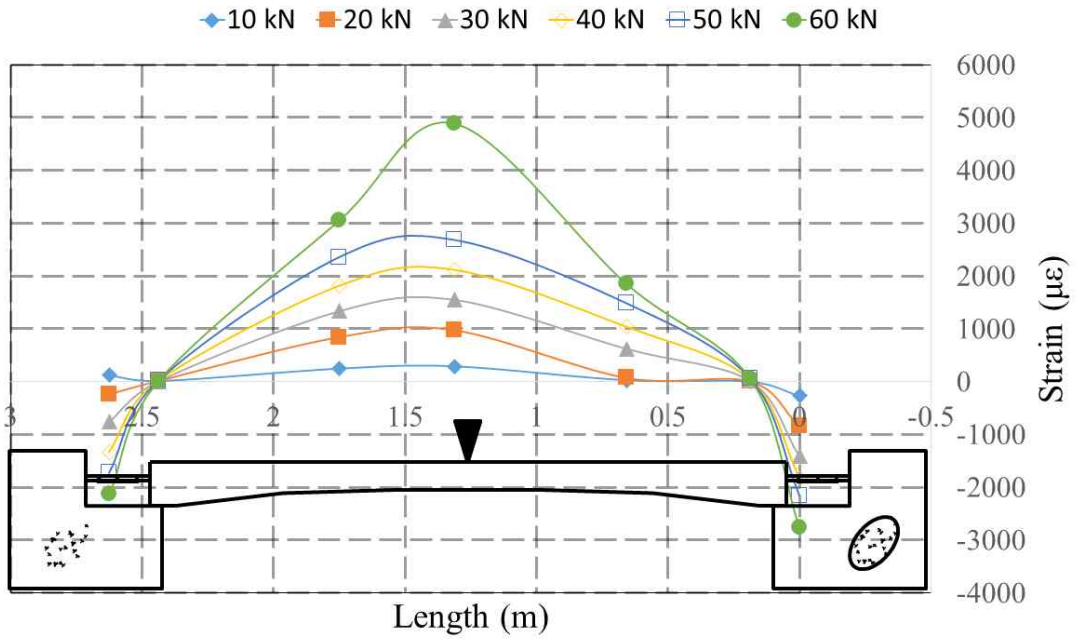


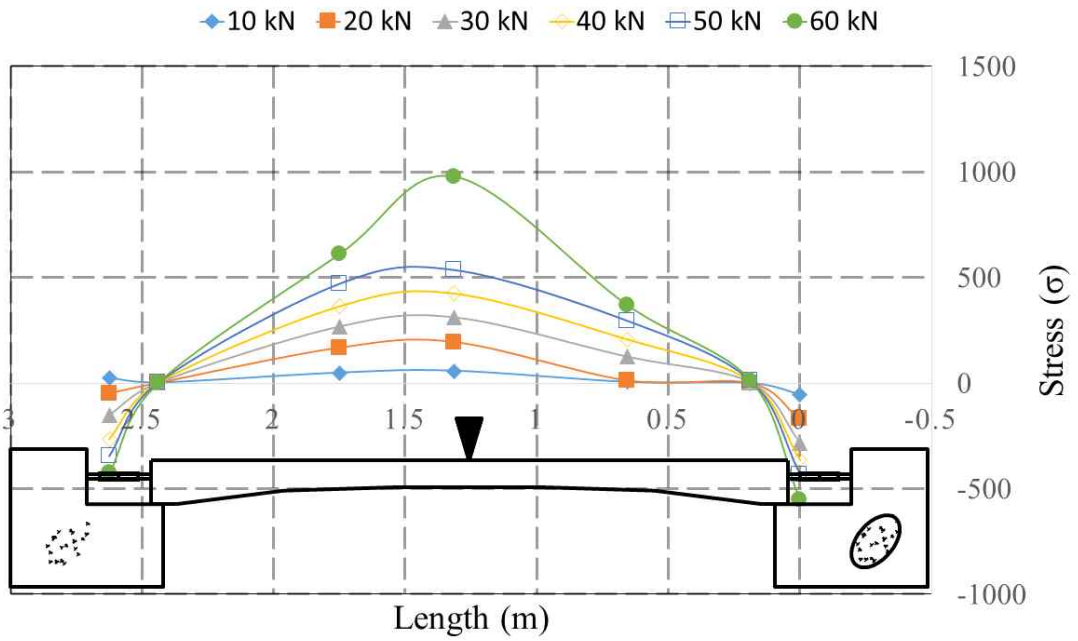
그림 3.34 철근 하중-변형률 곡선(AD 1)

표 3.17 철근의 하중-변형률 결과

위 치	하중 (kN)	변형률 (με)			
		AD 1	AD 2	AD 3	평균
1/2 지점 SA 03	0	0	0	0	0
	30	1159	1530	1470	1386
	60	3515	4406	2781	3567
1/3 지점 SA 04	0	0	0	0	0
	30	761	1321	986	1023
	60	1748	3070	2356	2391
1/4 지점 SA 02	0	0	0	0	0
	30	755	611	130	499
	60	1864	1846	1338	1683



(a) 위치별 철근 변형률도



(b) 위치별 철근 응력도

그림 3.35 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD) 위치별 철근 변형률 및 응력

ii. 콘크리트의 하중-변형률 관계

중앙부 상면에 부착한 콘크리트 게이지 측정 데이터는 최종 파괴단계인 약 60 kN에서도 콘크리트 압축파괴 시의 변형률 0.003에 도달하지 않았으며, 압축파괴는 발생하지 않았다.

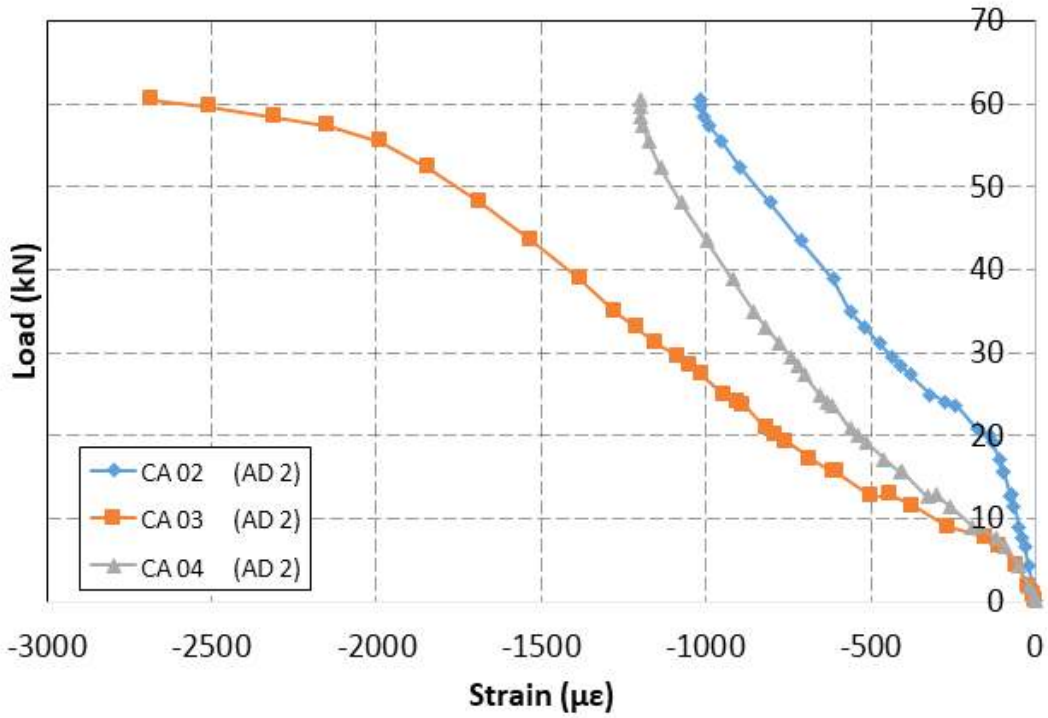


그림 3.36 콘크리트의 하중-변형률 곡선

표 3.18 콘크리트의 하중-변형률 결과

위 치	하중 (kN)	변형률 (με)			
		AD 1	AD 2	AD 3	평균
1/2 지점 CA 03	0	0	0	0	0
	30	-693	-1085	-923	-900
	60	-1710	-2679	-1707	-2032
1/3 지점 CA 04	0	0	0	0	0
	30	-540	-744	-602	-629
	60	-981	-1200	-1239	-1140
1/4 지점 CA 02	0	0	0	0	0
	30	-141	-437	-288	-289
	60	-642	-1018	-781	-814

㈐ 균열형상

실험체의 균열확인은 매 2 kN 마다하였으며, 초기 재하부터 10 kN까지는 균열이 없었으나, 12 kN에서 초기균열이 발견되었고 이는 설계 균열하중인 7.56 kN을 상회하는 값이다. 초기균열 발생 이후, 12 kN ~ 30 kN의 하중 재하 시에는 새로운 균열이 지속적으로 발생하였으며, 30 kN 이후부터는 새로운 균열발생보다는 기존의 균열폭이 커지는 양상을 보였다. 실험체의 하면 콘크리트가 인장파괴 이후 더 이상 저항을 하지 못하고 철근이 구조물의 인장응력을 모두 부담하는 것으로 판단된다.

전체적인 균열양상은 중앙 지점에서 1/4지점까지는 다수의 종방향 균열이 발생하였으며, 1/4 지점과 단부 사이에서는 균열이 발생하지 않았다. 구조물의 아치형상으로 단면이 두꺼워지며 단면력에 대한 저항성이 증가했기 때문에 단부로 이어지는 균열을 방지한 것으로 보인다. 그림 3.37과 그림 3.38에 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 균열형상과 균열도를 나타내었다.



그림 3.37 균열형상

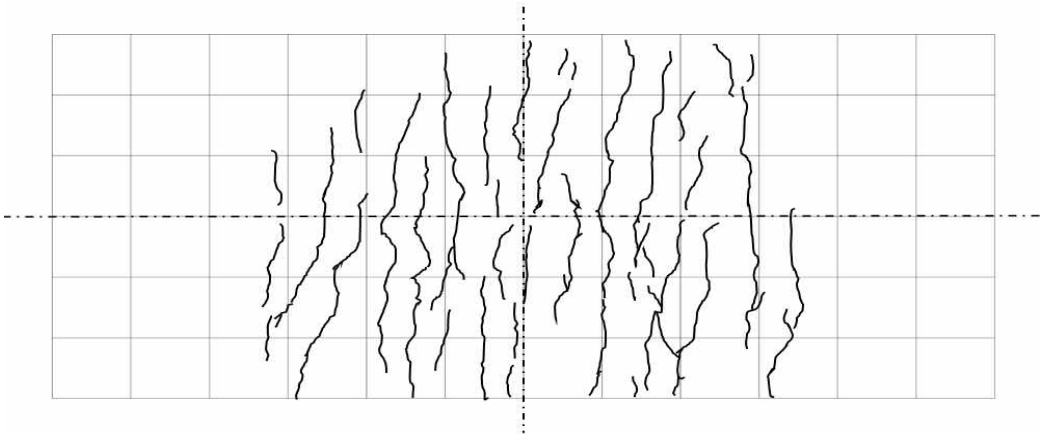


그림 3.38 균열도

② 2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체(BD)의 실험결과

㉮ 하중-변위 관계

설계균열하중(P_{cr})과 설계극한하중(P_r)과 비교한 하중-변위 곡선을 그림 3.39에 나타내었다. 2경간 아치덱 철근콘크리트 합성 실험체(BD)의 최대재하하중은 922.80 kN으로 나타났다. 이는 설계극한하중(P_r)인 262.54 kN에 비하여 약 3.5배에 해당하는 수준으로써 철근콘크리트 아치덱의 구조저항성능은 설계수치와 비교하여 월등히 높은 것을 알 수 있다 설계값과 실험값을 비교한 데이터를 표 3.19에 나타내었다..

2경간 아치덱 철근콘크리트 합성 실험체(BD) 제1경간의 횡방향 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 변위량을 설계값과 비교하여 표 3.20에 정리하였다. 각 하중에 따른 실험체의 최대 처짐은 1/2 지점(0.5 L)에서 12.41 mm로 관찰되었다. 1/2지점(0.5 L)에 비하여 1/4 지점(0.25 L)은 약 67 %, 1/3 지점(0.33 L)은 약 76 %의 처짐이 관찰되었다.

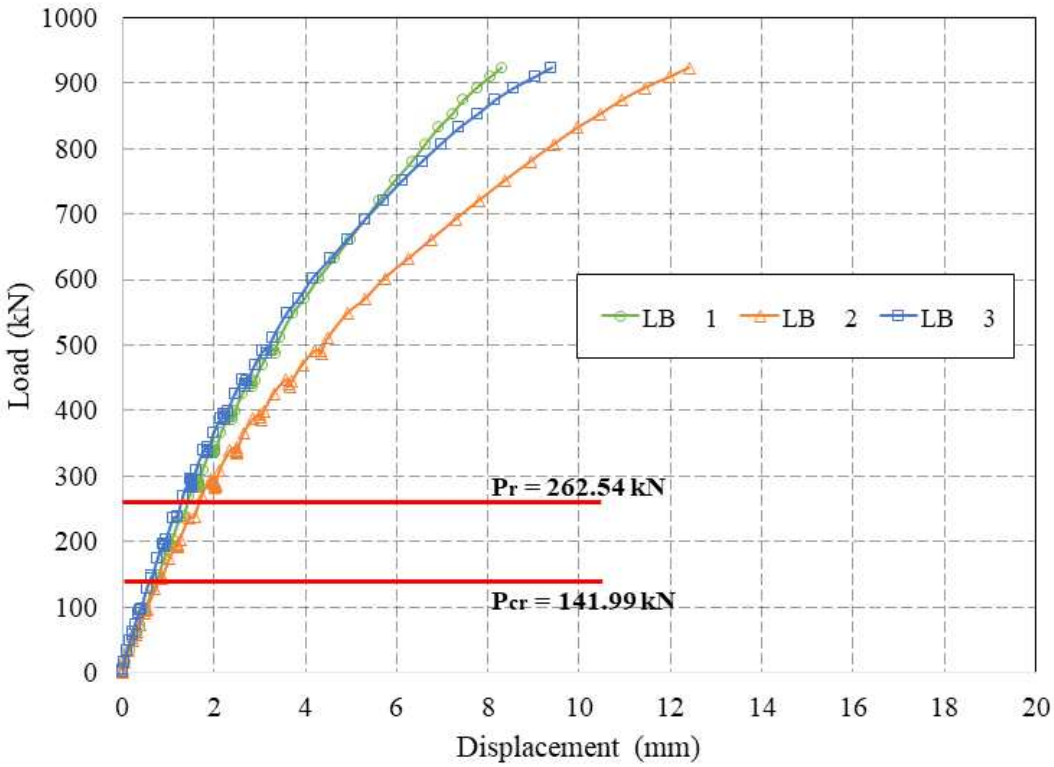


그림 3.39 위치별 하중-변위 곡선

표 3.19 설계-실험 데이터 비교

구 분	P_{cr} (kN)	P_r (kN)	P_{max} (kN)
설계값	141.99	262.54	-
실험값	250.00	-	922.80

표 3.20 하중-변위 결과

구 분	하 중 (kN)	변 위 (mm)		
		1/4 지점 (0.25 L) LB 1	1/2 지점 (0.5 L) LB 2	1/3 지점 (0.33 L) LB 3
2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체 (BD)	0	0	0	0
	300	1.76	2.13	1.61
	400	2.47	3.01	2.30
	500	3.44	4.49	3.28
	600	4.30	5.74	4.16
	700	5.31	7.29	5.31
	800	6.64	9.46	6.97
	900	8.07	11.99	8.58
	922.80	8.30	12.41	9.39

㈏ 하중-변형률 관계

i. 철근의 하중-변형률 관계

그림 3.40에 제1경간 횡 방향 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 철근 변형률 곡선을 나타내었다. 철근의 최대 변형률은 최대정적하중인 922.80 kN에서 약 0.0034가 나타났다. 최대변형률이 계측되기 이전인, 약 0.0025 부근에서 철근의 영구변형이 발생하여 급격한 변형이 나타나는 것으로 관찰되었다. 이러한 변형률 결과를 분석하기 위해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

선행연구결과에서 분석한 바와 같이 철근의 영구변형은 약 0.0026의 변형률 이후부터 나타난 것으로 관찰되었다. 상기와 같은 이유로 인하여 변형률 0.002에 대응하는 하중인 약 750 kN이 아닌 변형률 0.0026에서의 정적하중인 약 900 kN 부근에서 철근의 영구변형이 발생한 것으로 사료된다.

1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L)에서는 최대재하하중 상태에서도 최대변형률 약 0.0005 ~ 0.0013을 나타내는 것으로 보아 철근이 영구변형에 도달하지는 않았다는 것을 확인할 수 있었다.

철근이 인장변형률을 나타내는 것으로 보아 해당 철근은 중립축 아래에 위치하여 인장철근의 역할을 수행하는 것으로 판단된다. 콘크리트의 취약점인 인장력을 보완하는 측면에서 해당 철근의 배치와 역할은 올바르게 작용되었다고 판단된다. 표 3.21에는 실험체의 제1경간의 횡방향 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 철근 변형률 데이터를 나타내었다.

표 3.21 철근의 하중-변형률 결과

구 분	하 중 (kN)	변형률 (με)		
		1/4 지점 (0.25 L) SB 15	1/2 지점 (0.5 L) SB 16	1/3 지점 (0.33 L) SB 17
2경간 아치덱 정적재하 합성 실험체 (BD)	0	0	0	0
	300	101	335	157
	400	114	628	218
	500	124	1000	277
	600	133	1445	442
	700	188	1770	683
	800	333	2160	1159
	900	463	2438	1302
	922.80	531	3445	1329

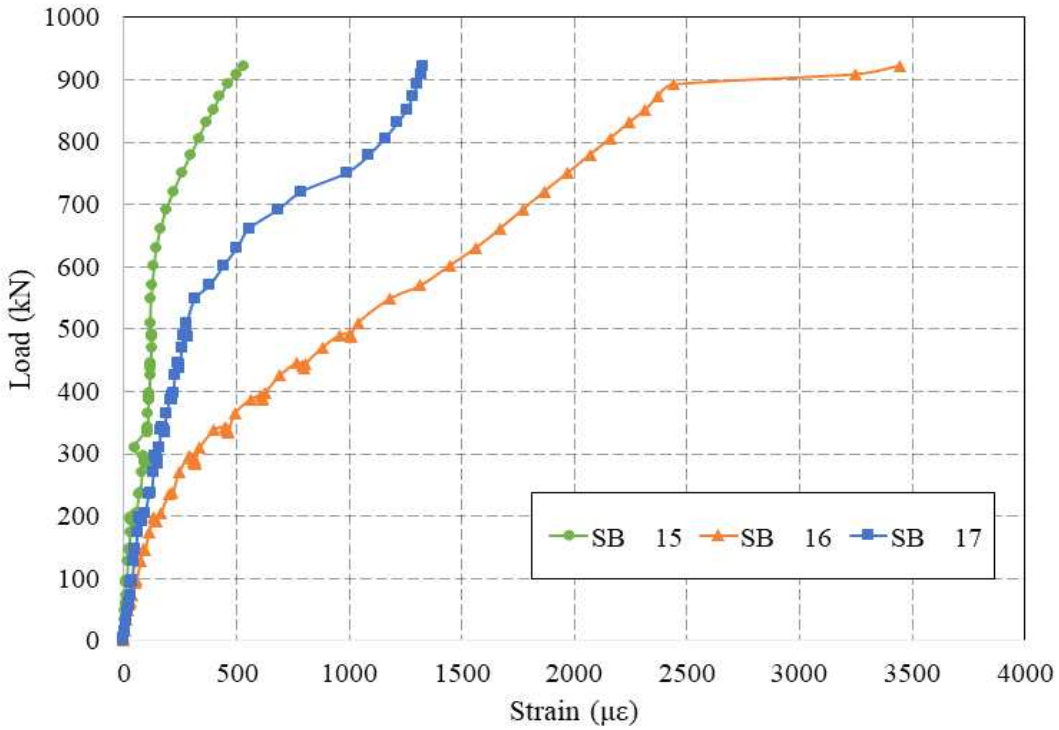


그림 3.40 철근의 하중-변형률 곡선

ii. 콘크리트의 하중-변형률 관계

그림 3.41에 1경간의 횡 방향 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 콘크리트 하중-변형률 곡선을 나타내었다. 현장타설 바닥판 콘크리트는 압축연단으로써 횡방향의 1/2 지점(0.5 L)에서 최대 변형률이 나타났다. 최대변형률은 약 0.0017로 나타나 콘크리트의 극한변형률인 0.003에 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아, 실험체는 극한하중인 922.80 kN에도 압축파괴가 발생하지 않아 압축연단에서 구조적 저항성능을 확보하였다는 결론을 내릴 수 있었다. 종 방향의 1/4지점(0.25L)에 부착한 CB 5와 CB 7 또한 최대변형률은 약 0.001 수준에서 머무는 것으로 보아, 안전성에는 이상이 없는 것으로 나타났다.

또한 횡방향의 1/4 지점(0.25L)과 1/3 지점(0.33L)에 부착한 CB 1,3과 CB 4,6은 변형률이 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 중앙에서 비교적 멀리 떨어져 있기도 하지만, 아치넥에 가해진 하중이 수직 및 수평반력으로 적절히 분산되고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다. 종 방향의 중앙 및 횡 방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)의 변형률 데이터를 표 3.22에 나타내었다.

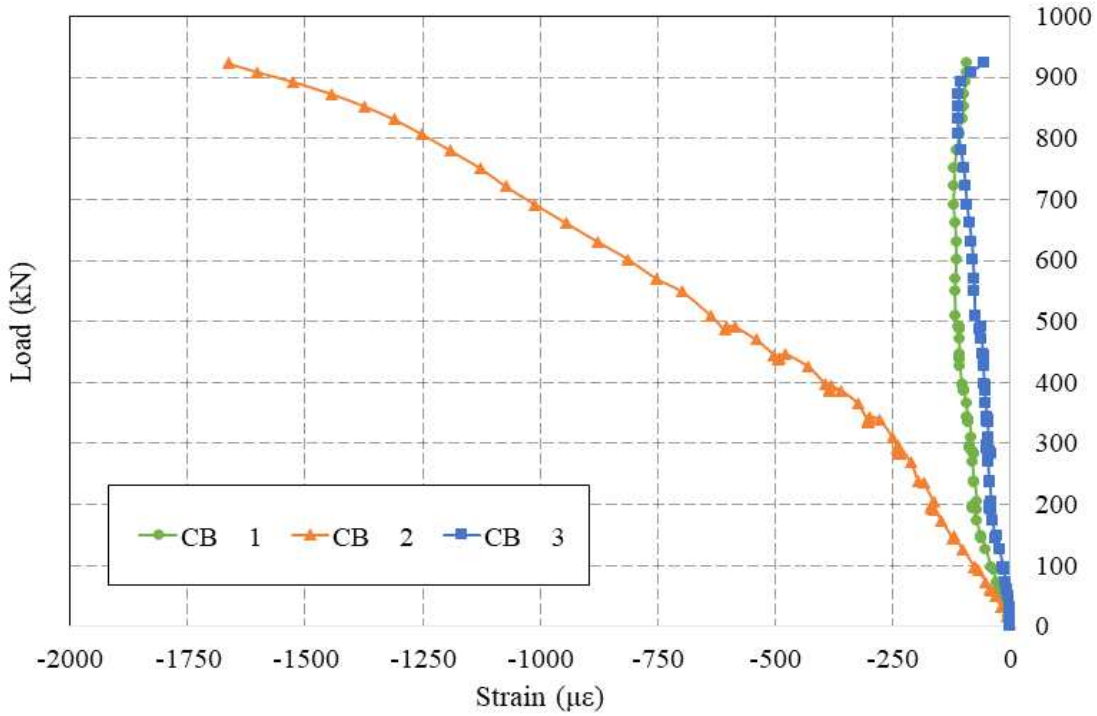


그림 3.41 콘크리트의 하중-변형률 곡선

표 3.22 콘크리트의 하중-변형률 결과

구 분	하중 (kN)	변형률 (με)		
		1/4 지점 (0.25 L) CB 1	1/2 지점 (0.5 L) CB 2	1/3 지점 (0.33 L) CB 3
2경간 아치넥 정적재하 합성 실험체 (BD)	0	0	0	0
	300	-82	-250	-46
	400	-103	-395	-55
	500	-109	-605	-62
	600	-115	-813	-79
	700	-121	-1011	-92
	800	-109	-1251	-110
	900	-96	-1525	-106
	922.80	-93	-1664	-55

㈐ 균열형상

휨 거동의 영향을 받아 종방향 균열이 발생하였으며, 그림 3.42는 실험체의 균열형상 그림 3.43은 균열도이다. 100 kN부터 매 50 kN 간격으로 균열을 확인한 결과, 초기균열은 약 250 kN에서 발생하였다. 설계균열하중(P_{cr})이 141.99 kN 임을 감안하면 실제균열하중은 설계균열하중에 비하여 약 1.76배를 상회하는 것으로 나타났다. 아치형태 바닥판의 구조적 이점이 우수한 결과로 이어진 것으로 판단된다.

2개의 철근콘크리트 아치덱(AD) 이음부인 가력지점의 균열 혹은 분리현상을 확인하기 위해 균열게이지 CRB 1을 부착하였고, 현장타설 바닥판과 반력대의 균열을 확인하기 위해 CRB 2와 CRB 3을 부착하였다. 그림 3.44에 균열게이지의 균열 곡선을 나타내었다. CRB 1의 경우, 약 300 kN을 이후로 이음부의 균열이 급격히 진행되었으나, 수치상으로 두드러진 결과는 아니었다. 균열이 급격히 진행되기 시작하는 300 kN을 기준으로 보았을 때, 설계균열하중(P_{cr})에 비하면 약 2.1배의 높은 수준이므로 구조적 결함이 없다고 판단된다. 반면 현장타설 콘크리트와 반력대의 균열을 측정한 CRB 2와 3은 유사한 거동을 보였으며, CRB 1과는 달리 약 900 kN까지는 선형으로 나타났다. 이를 통해 설계극한하중(P_r)에서도 현장타설 상부 바닥판과 반력대의 균열현상은 안정적인 거동을 보였다고 분석되었다.

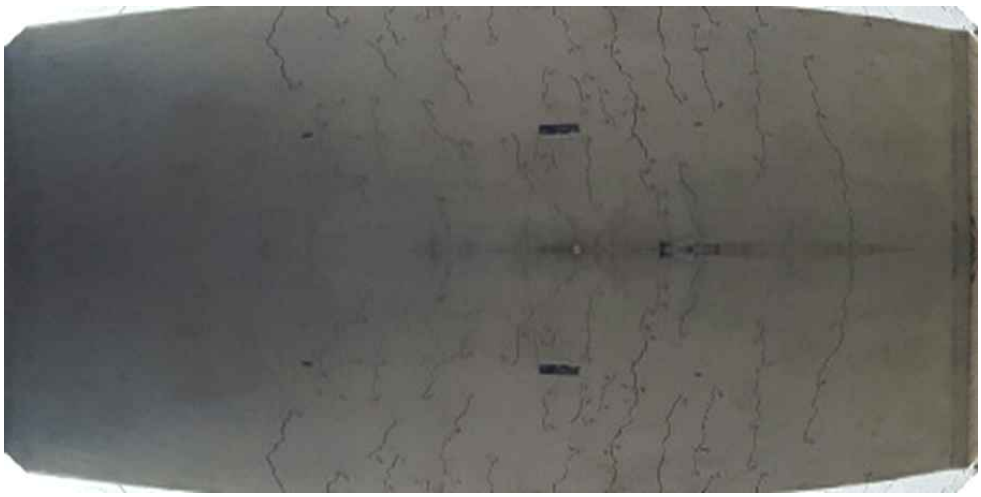


그림 3.42 균열형상

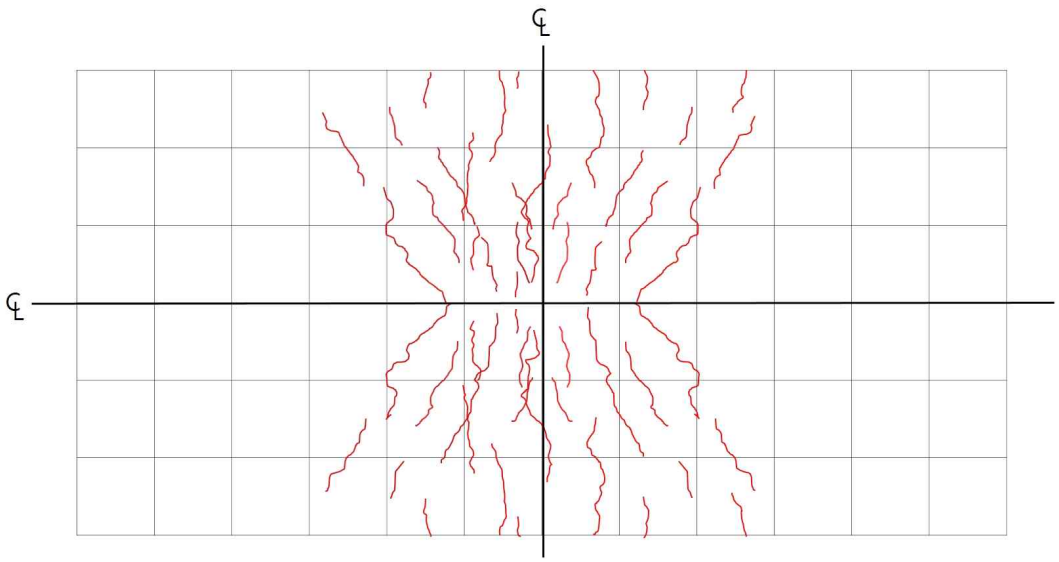


그림 3.43 균열도

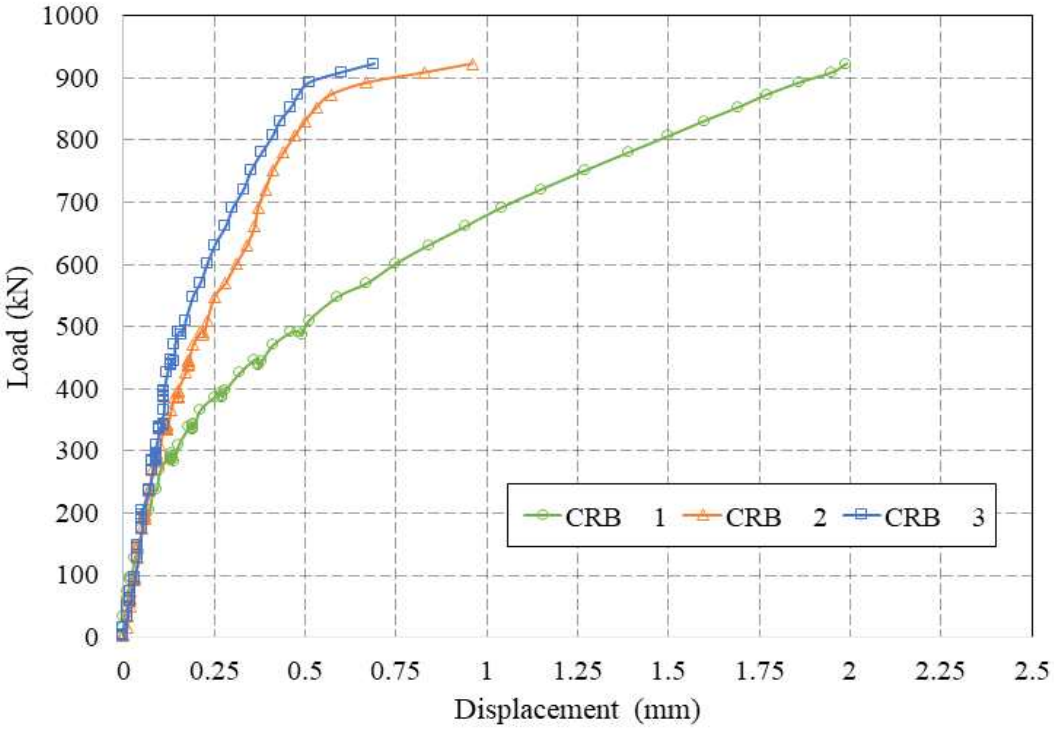


그림 3.44 균열게이지의 균열 곡선

③ 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 실험결과

㉮ 하중-변위 관계

그림 3.45에 하중-변위 곡선을 나타내었다. 10~125 kN의 하중을 1회 재하하였을 때 최대처짐은 약 1.3 mm가 발생하였고, 1만번 재하 하였을 때에는 약 1.9 mm, 200만회 재하하였을 때에는 약 2.5 mm가 발생하였다. 잔류처짐은 최대 약 1.7 mm까지 발생하는 것으로 나타났다. 그림 3.46에 1회 정재하와 200만회 후 정재하 처짐을 비교하였다. 설계 활하중인 125kN까지 두 그래프가 유사한 거동을 보이고 있으며 200만회 재하 후에 액츄에이터 최대용량 까지 재하를 실시한 결과 1/4지점(0.25 L)에서는 최대변위 1.9 mm, 1/3지점(0.33 L)에서는 2.7 mm, 1/2지점(0.25 L)에서는 7 mm 가 발생하였다. 또한 충격계수를 포함한 설계활하중 재하 시 두 값의 차이는 약 0.4mm로 미소한 차이를 보이고 있어 안전성 및 사용성에 충분한 내구성을 확보한 것으로 사료된다.

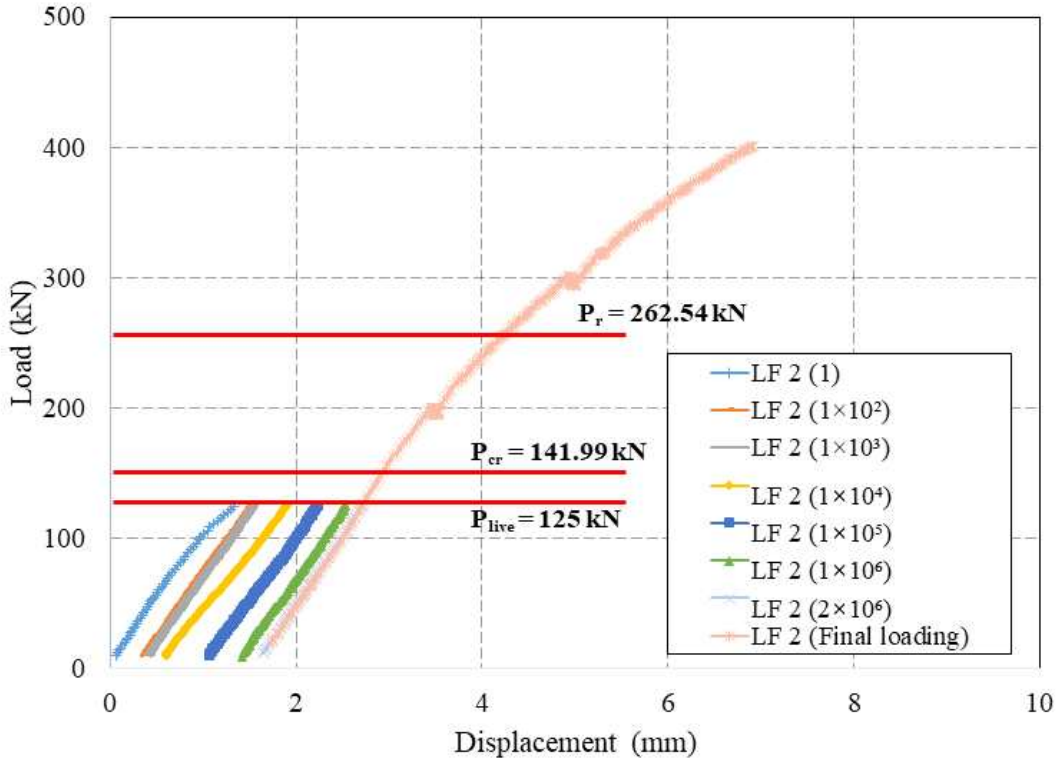


그림 3.45 하중-변위 곡선

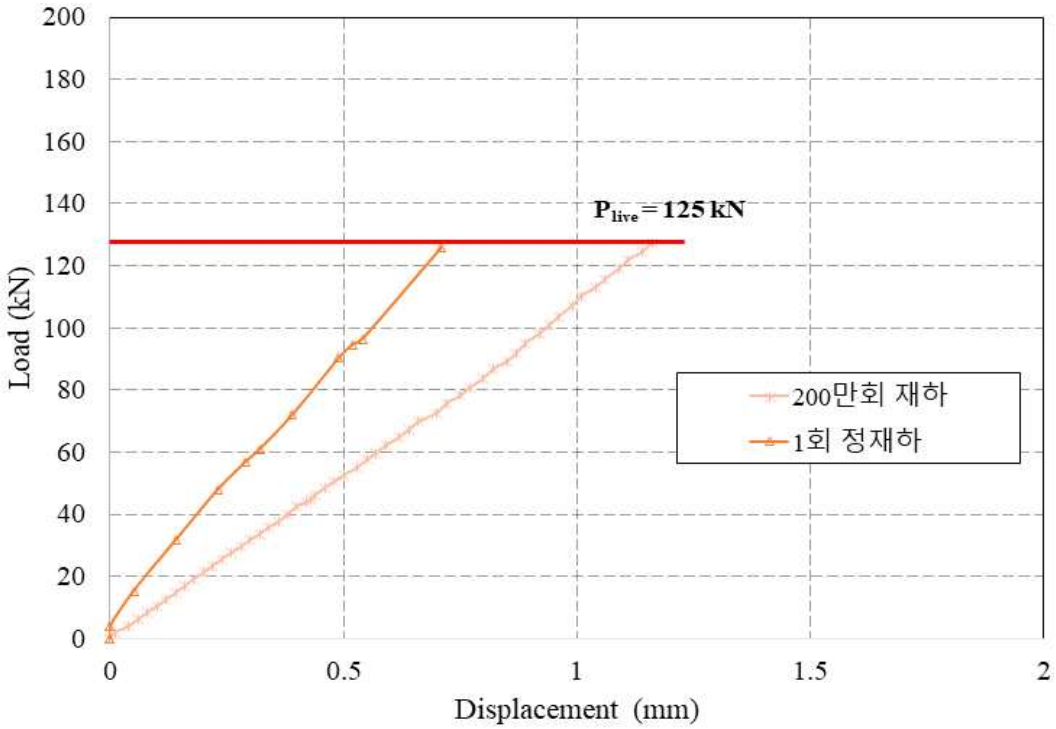


그림 3.46 1회 정재하와 200만회 활하중 재하 시 처짐 비교

④ 아치덱 펀칭전단 합성 실험체(PD)의 실험결과

㉮ 하중-변위 관계

그림 3.47는 하중-변위 곡선이며 설계 펀칭전단강도(V_c)를 표시하였다. PD 1의 경우 첫 번째 실험 시 4면 지지를 위하여 격벽을 설치하였지만 격벽의 강성이 부족하여 펀칭전단 파괴가 발생하지 않았다. PD 1 두 번째 실험체와 PD 2는 격벽부를 보강하여 실험을 실시하였다. 전반적인 곡선의 개형을 보면 기울기가 초반에 꺾이는 부분이 발생한다. 이는 아치덱과 함께 연결된 반력대 및 상부 현장타설 바닥판이 복합거동을 하며 발생한 결과라고 판단된다. PD 1, PD 2의 설계펀칭전단강도는 V_{cd} =478.60 kN(도로교설계기준 2015)으로 산정되었다. 펀칭전단 실험의 최대 하중은 PD 1의 경우 825.7 kN, PD 2는 819.5 kN으로 나타났다. PD 1의 경우, 펀칭전단하중에 비하여 약 1.73배, PD 2의 경우, 약 1.71배 우수한 성능을 나타내었다. 이를 토대로 실험체의 구조적인 성능은 입증되었다고 판단되며 표 3.23에 데이터를 나타내었다.

위치별 하중-변위 곡선과 데이터를 그림 3.48와 표 3.24에 나타내었다. 횡방향 및 종방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L) 모두 각각 대응되는 위치에 대해서는 모두 유사한 거동을 나타내었다. 이는 실험체의 실험조건이 모두 동일하게 적용되어 유사한 거동을 나타낸 것으로 판단된다.

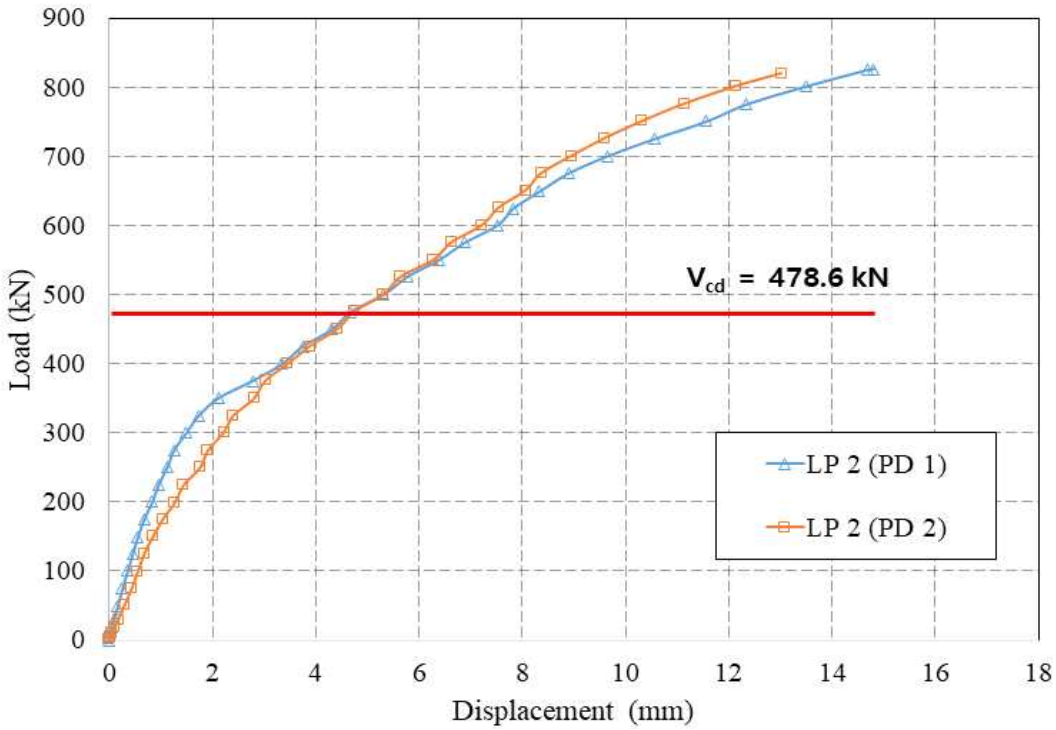
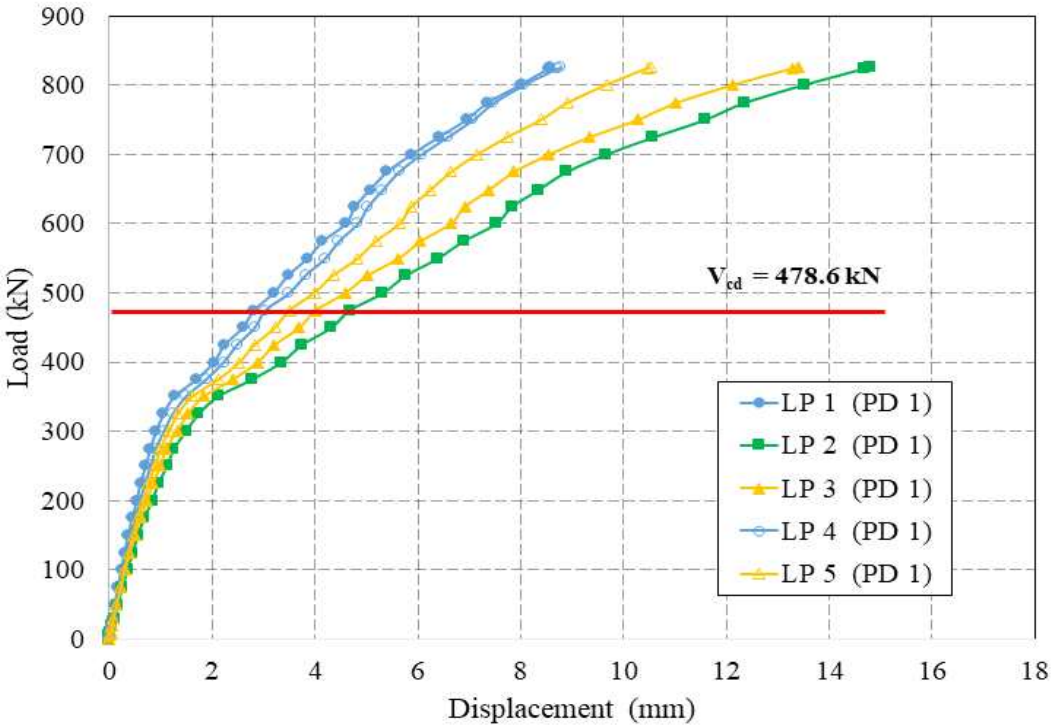


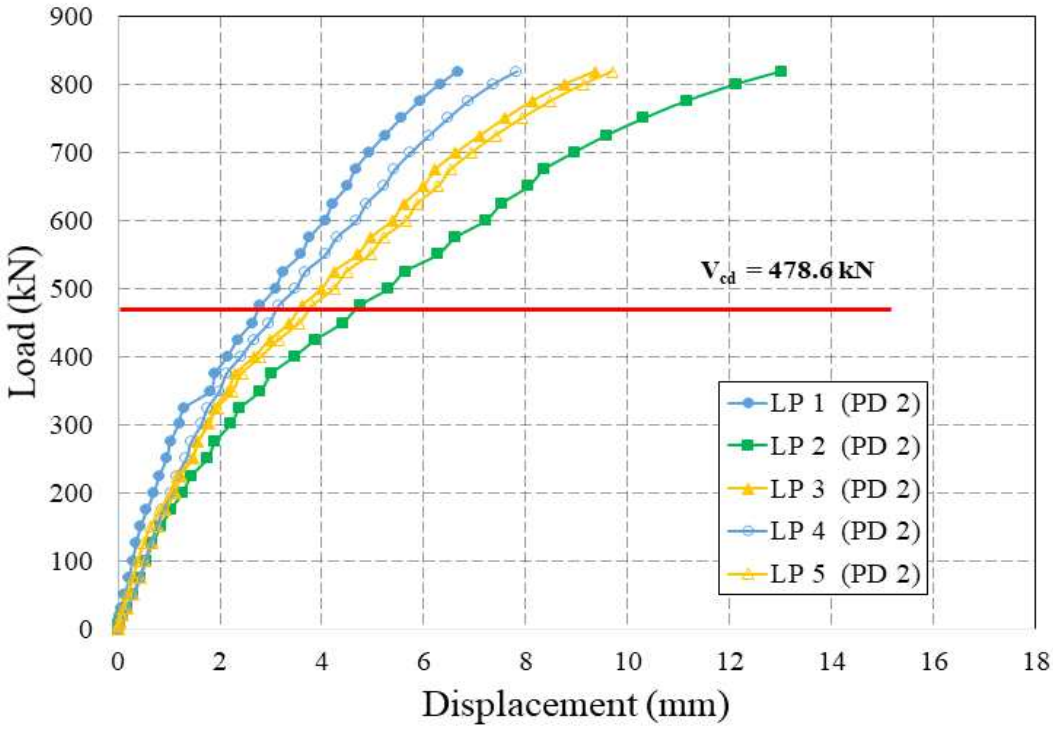
그림 3.47 하중-변위 곡선

표 3.23 설계-실험 데이터 비교

구 분	PD1	PD2
설계값 (V_{cd})	478.6 kN	
실험값 (V_{max})	825.7 kN	819.50 kN
설계값 / 실험값	1.73 배	1.71 배



(a) 위치별 하중-변위 곡선(PD 1)



(b) 위치별 하중-변위 곡선(PD 2)

그림 3.48 위치별 하중-변위 곡선

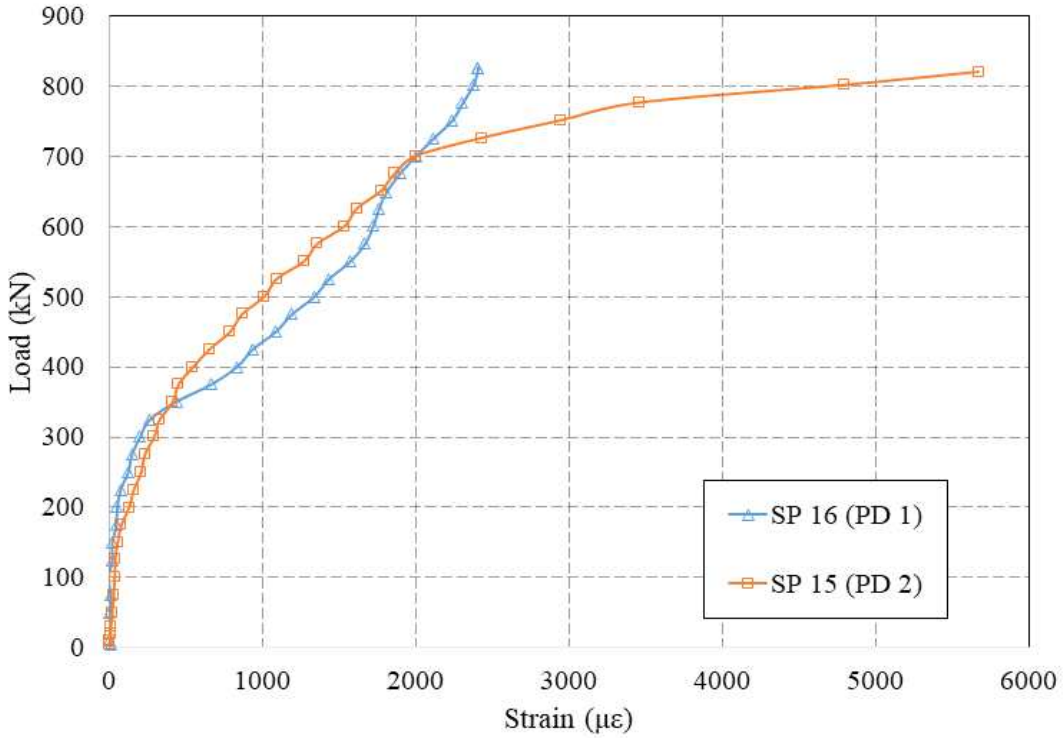
표 3.24 중앙지점 하중-변위 결과

구 분	하 중 (kN)	Displacement (mm)	
		PD 1	PD 2
아치덱 펀칭전단 합성 실험체 (PD)	0	0	0
	300	1.49	2.22
	400	3.35	3.46
	500	5.31	5.31
	600	7.52	7.22
	700	9.65	8.95
	800	13.51	12.14
	최대하중	14.8 (825.7 kN)	13.02 (819.5 kN)

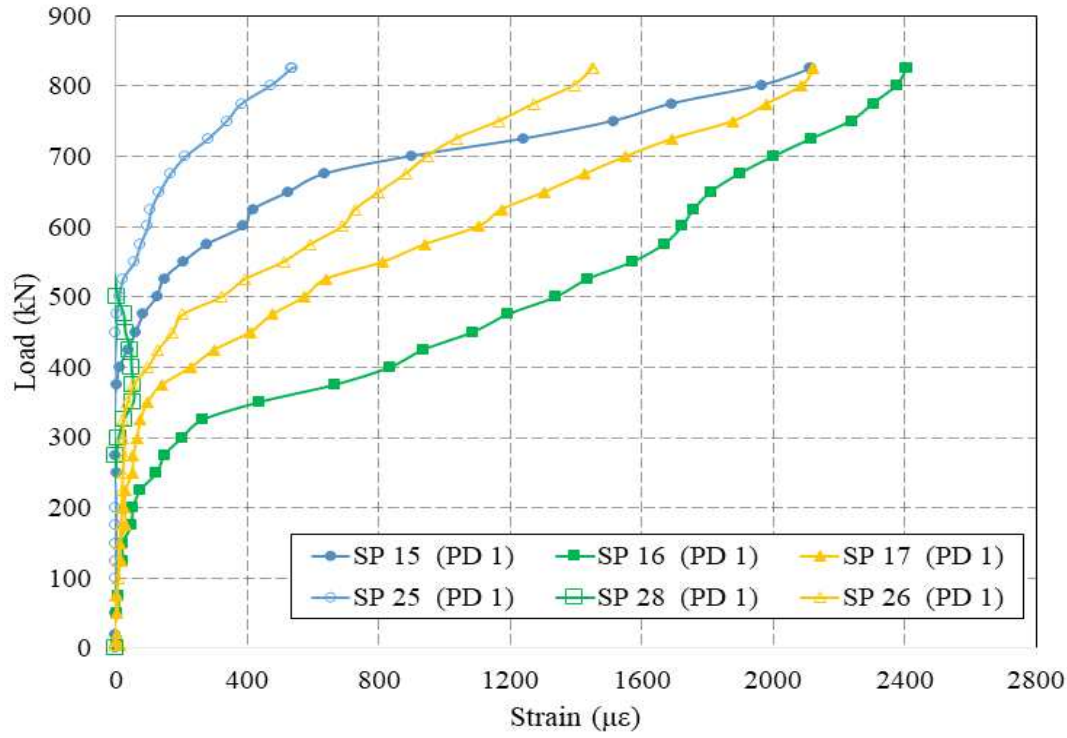
㉯ 하중-변형률 관계

i. 철근의 하중-변형률 관계

PD 1의 횡방향 1/4 지점(0.25 L)은 SP 15, 1/3 지점(0.33 L)은 SP 17, 1/2 지점(0.5 L)은 SP 16으로 표기하였으며, 종방향 또한 동일한 순서로 SP 25, 26, 28로 표기하였다. PD 2도 위와 동일한 순서로 횡방향 SP 14, 15 16, 종방향 SP 19, 20, 21로 표기하였으며, 위의 철근 변형률 곡선을 그림 3.49에 나타내었다. 하중-변위 곡선와 유사하게 약 300 kN 부근에서 곡선의 기울기 변화가 관찰되었다. 이는 앞서 다룬 내용과 같이, 실험체에 하중이 가해지며 정착되는 과정에서 발생하는 현상이라고 판단되었다. 또한 사용된 철근은 KS D 3504 기준의 400 MPa이다. 철근의 탄성계수를 고려하였을 때 약 0.002의 변형률을 나타냈을 때 항복된다고 판단된다. 본 실험체에서도 선행연구와 마찬가지로 실제 철근의 항복점은 약 0.0025의 변형률 이후부터 발생한 것으로 판단된다. 그 근거는 곡선에서 나타나듯이 0.0025의 변형률 이후부터 철근의 변형률이 급격하게 늘어나는 것을 통해 확인할 수 있었다. 콘크리트의 균열 및 파괴현상으로 인해 철근의 인장응력부담이 증가하였음은 물론, 항복변형률 이후 하중을 지속적으로 견디며 철근의 연화현상이 나타난 것이라고 판단되었다. 항복변형률에 해당하는 0.0025부근의 하중은 PD 1의 경우 약 825 kN, PD 2 약 725 kN으로 나타났다. 이는 설계펀칭전단하중인 478.6kN에 비해 1.5~1.7배 높은 수준으로써 구조물의 안전성이 확보되었다고 판단되는 지표로 활용할 수 있다. 또한 분석한 철근의 변형률이 인장변형률을 나타내는 것으로 보아 해당 철근은 중립축 아래에 위치해 인장철근의 역할을 수행하는 것으로 판단된다. 콘크리트의 취약점인 인장력을 보완하여 철근의 설계와 배치는 올바르게 되었다고 판단할 수 있었다. 전반적인 철근의 변형률이 안정적인 거동을 하는 것으로 보아, 아치형상의 단면이 재하되는 하중을 적절히 분배하여 우수한 구조성능을 확보하였다고 사료된다. 다음의 철근의 데이터를 표 3.25에 정리하였다.

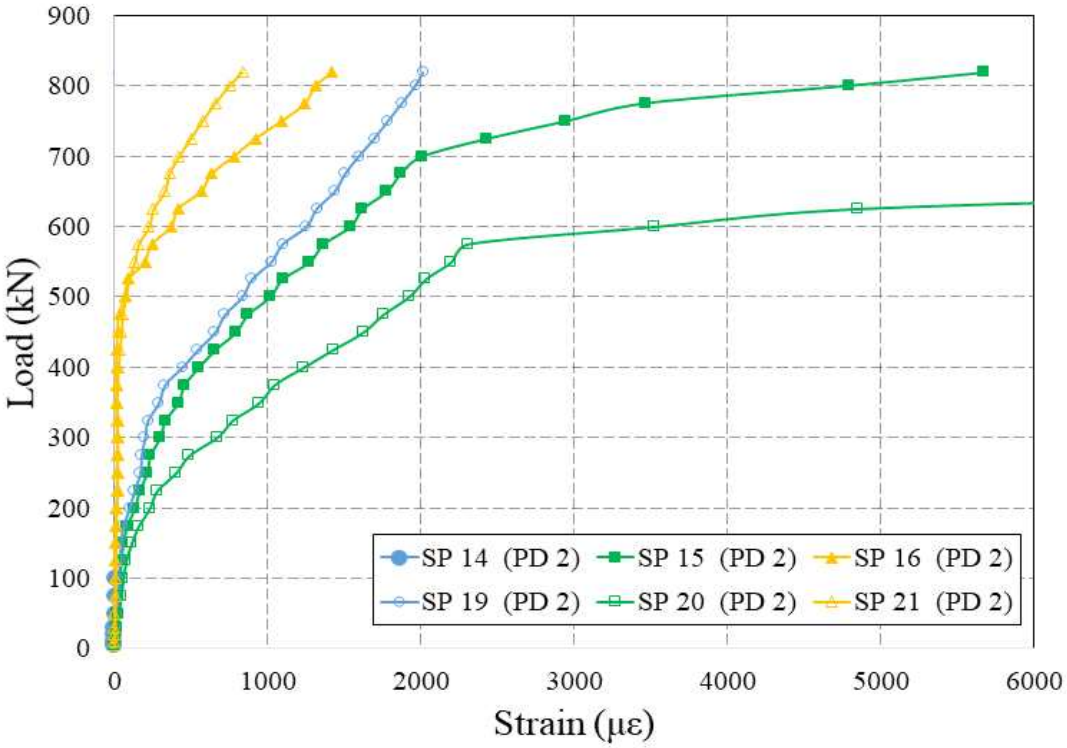


(a) 하중-철근변형률 곡선



(b) 위치별 하중-철근변형률 곡선(PD 1)

그림 3.49 위치별 하중-철근 변형률 곡선(계속)



(c) 위치별 하중-철근변형률 곡선(PD 2)

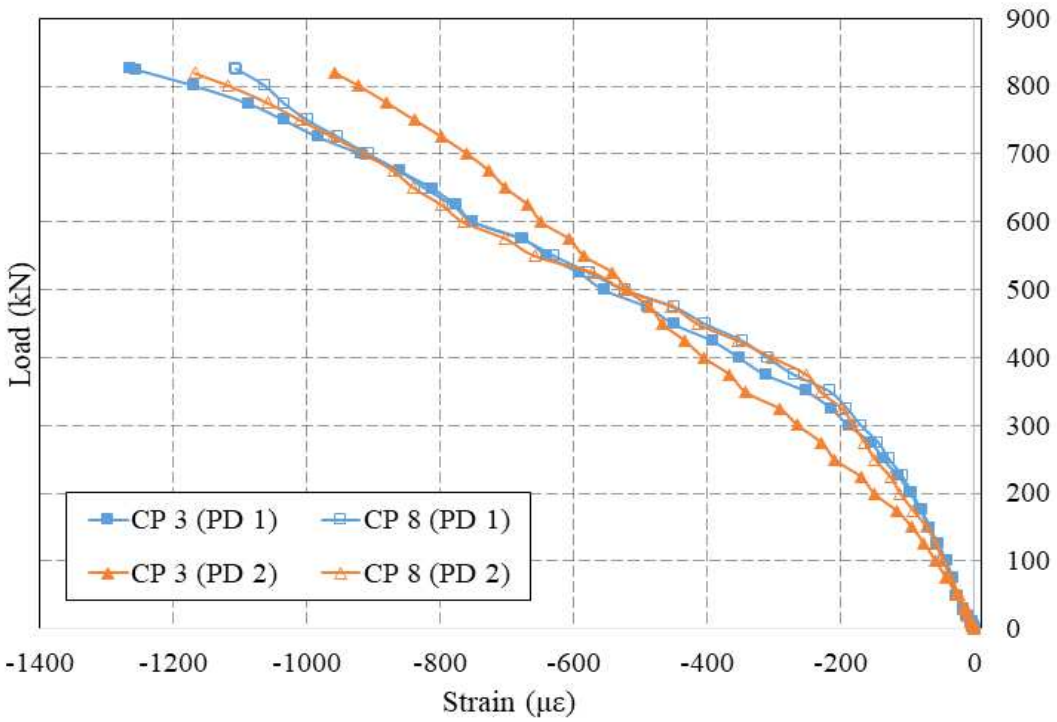
그림 3.49 위치별 하중-철근 변형률 곡선

표 3.25 철근의 하중-변형률 결과

구 분	하중 (kN)	Strain (με)		
		1/2 지점 SP 16 (PD 1)	1/2 지점 SP 15 (PD 2)	평균
펀칭전단 아치덱 실험체 (PD)	0	0	0	0
	300	202	298	250
	400	834	550	692
	500	1,338	1,014	1,176
	600	1,723	1,537	1,630
	700	2,002	2,006	2,004
	800	2,376	4,796	3,586
	최대하중	2405 (825.7 kN)	5674 (819.5 kN)	-

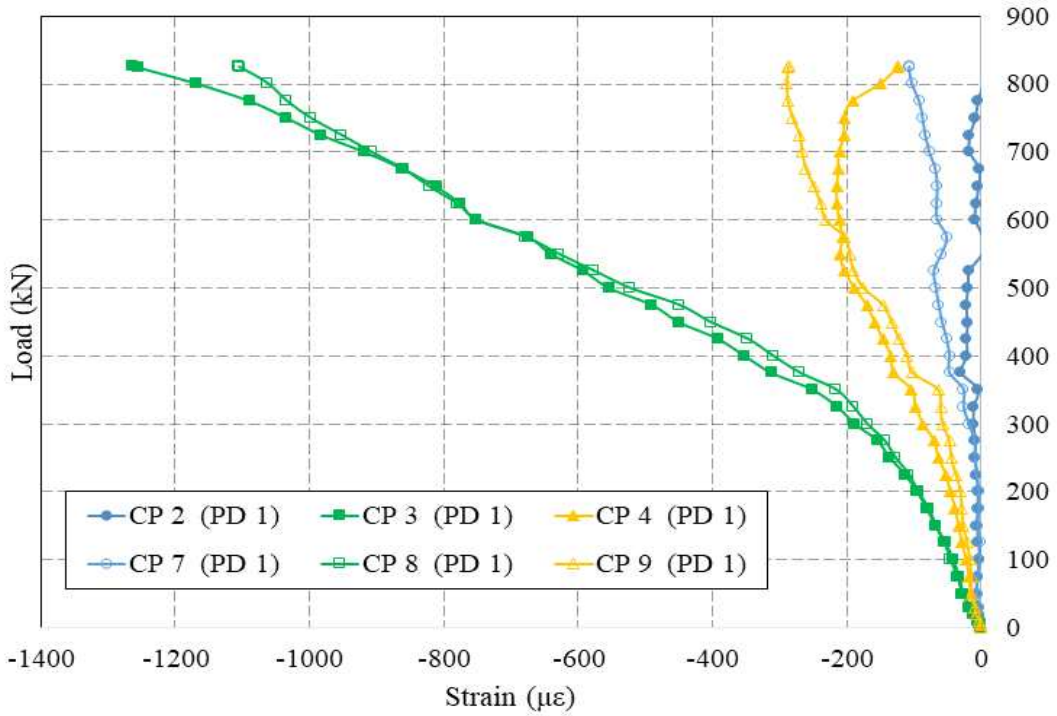
ii. 콘크리트의 하중-변형률 관계

실험체의 상부에 횡 방향 1/4 지점(0.25 L), 1/3 지점(0.33 L), 1/2 지점(0.5 L)에 콘크리트 게이지를 설치하였으며, 계측한 데이터를 바탕으로 아래의 그림 3.50에 하중-변형률 곡선을 나타내었다. 계측된 데이터는 압축변형률을 나타내었다. 콘크리트 변형률 또한 앞서 언급한 내용과 유사하게 300 kN 부근에서 기울기의 변화가 나타났으며 동일한 이유로 발생되는 현상이라고 사료된다. 콘크리트의 극한 변형률은 0.003인데, 측정된 데이터를 보면 최대하중에서 약 0.0013을 나타내고 있다. 이는 실험체가 최대하중상태에서도 압축연단에서의 저항성능을 확보하였다고 사료된다. 전반적인 변형률 결과가 철근과 동일하며, 구조물의 저항성능도 안정적인 것으로 평가되어 사용성에 지장이 없는 것을 확인할 수 있었다. 표 3.26에 변형률 데이터를 나타내었다.

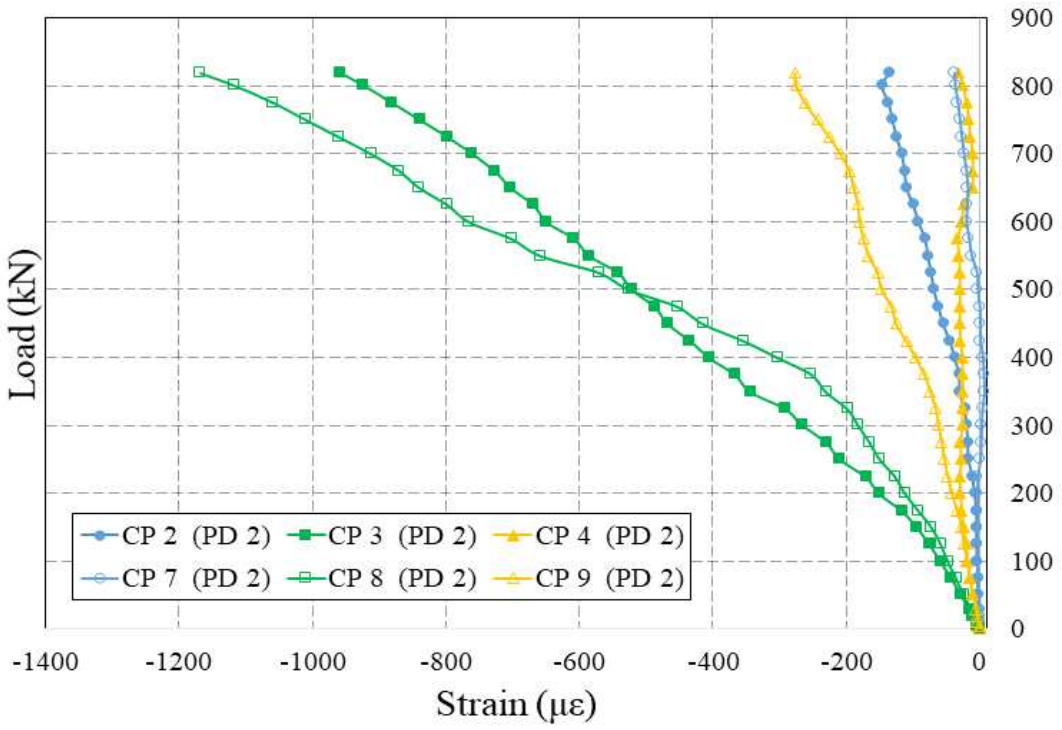


(a) 중앙부 콘크리트의 하중-변형률 곡선

그림 3.50 위치별 하중-콘크리트변형률 곡선(계속)



(b) 콘크리트 하중-변형률 곡선(PD 1)



(c) 콘크리트 하중-변형률 곡선(PD 2)

그림 3.50 위치별 하중-콘크리트변형률 곡선

표 3.26 콘크리트의 하중-변형률 결과

구 분	하중 (kN)	Strain (με)		
		1/2 지점 CP 3 (PD 1)	1/2 지점 CP 3 (PD 2)	평균
펀칭전단 아치덱 실험체 (PD)	0	0	0	0
	300	-188	-266	-227
	400	-352	-405	-379
	500	-554	-521	-538
	600	-751	-649	-700
	700	-918	-760	-839
	800	-1169	-923	-1,046
	최대하중	-1264 (825.7 kN)	-958 (819.5 kN)	-

㉰ 균열형상

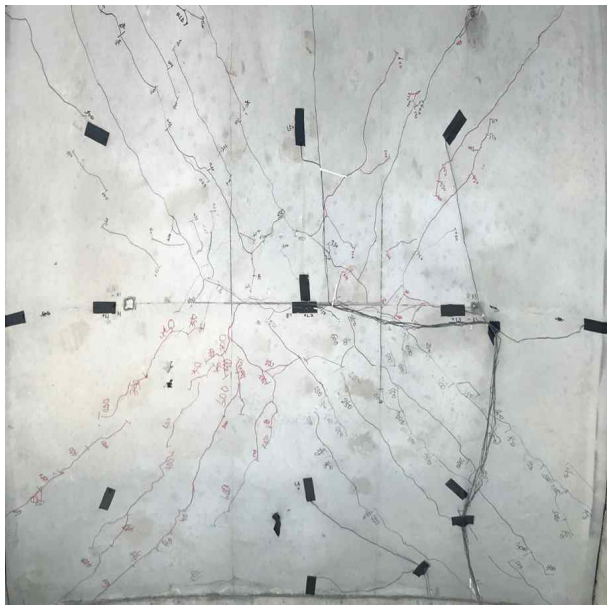
그림 3.51은 균열형상, 그림 3.52는 균열도이다. 균열은 중앙부를 기점으로 단부로 퍼져 나가는 방사형으로, 전단에 의한 사인장 균열이 발생하였다. 펀칭전단을 유도한 실험체의 목적대로 실험이 정상적으로 이루어진 것을 간접적으로 확인 할 수 있었다. PD 1과 PD 2 모두 유사한 양상의 균열형상을 보였으며, 초기균열은 PD 1 500 kN, PD 2 350 kN에서 발생하였다. 특히 PD 1의 경우, 설계펀칭전단강도(V_{cd})인 478.6 kN보다 큰 하중에서 초기 균열이 발생한 것으로 보아, 실제 구조물의 강성은 훨씬 더 높을 것으로 예상된다.

균열양상은 주로 대각선 방향으로 발생하였다. 이는 전단에 의한 사인장 균열이 발생한 것으로써, 펀칭전단을 유도한 실험체의 목적대로 실험이 정상적으로 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

또한 PD 1은 일반 아치덱(길이 1.2m)을 2개로 배치하여 하중재하에 따른 아치덱의 이격을 확인하기 위해 균열게이지로 측정한 데이터를 그림 3.53에 나타내었다. 아치덱의 이격을 확인하기 위해 균열게이지(CRP1, CRP3)를 이음부에 부착하였으며, 최대 이격거리는 약 1.9 mm인 것으로 나타났다. 또한 확대형 아치덱(길이 2.4m)를 적용한 PD 2의 중앙부 균열도 측정하였으며, 최대 균열폭은 약 1.5 mm인 것으로 나타났다. 일반형 AD가 적용된 PD 1의 경우, 이미 기제작된 부재에 상부 현장타설 바닥판을 합성하여 이격에 대한 우려가 있었지만 데이터를 분석한 결과, 그 수치는 미미한 것으로 판단되었다.

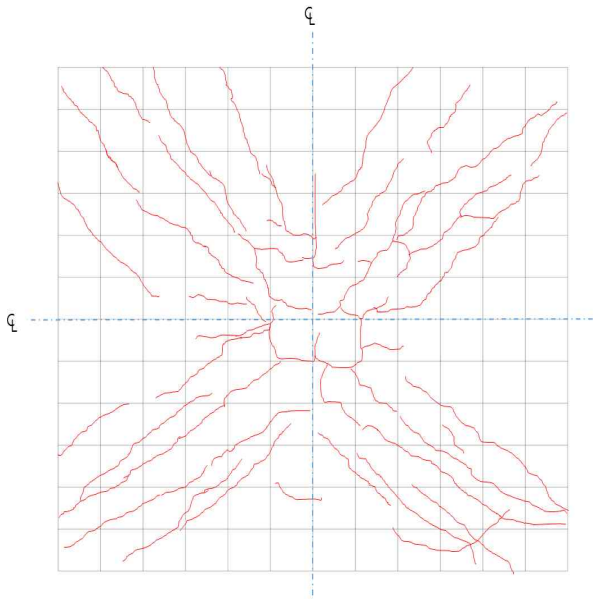


(a) 균열형상(PD 1)

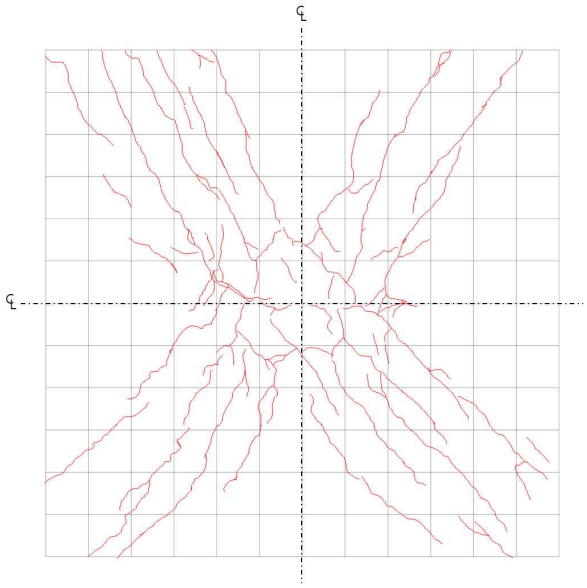


(b) 균열도(PD 2)

그림 3.51 균열형상



(a) 균열도(PD 1)



(b) 균열도(PD 2)

그림 3.52 균열도

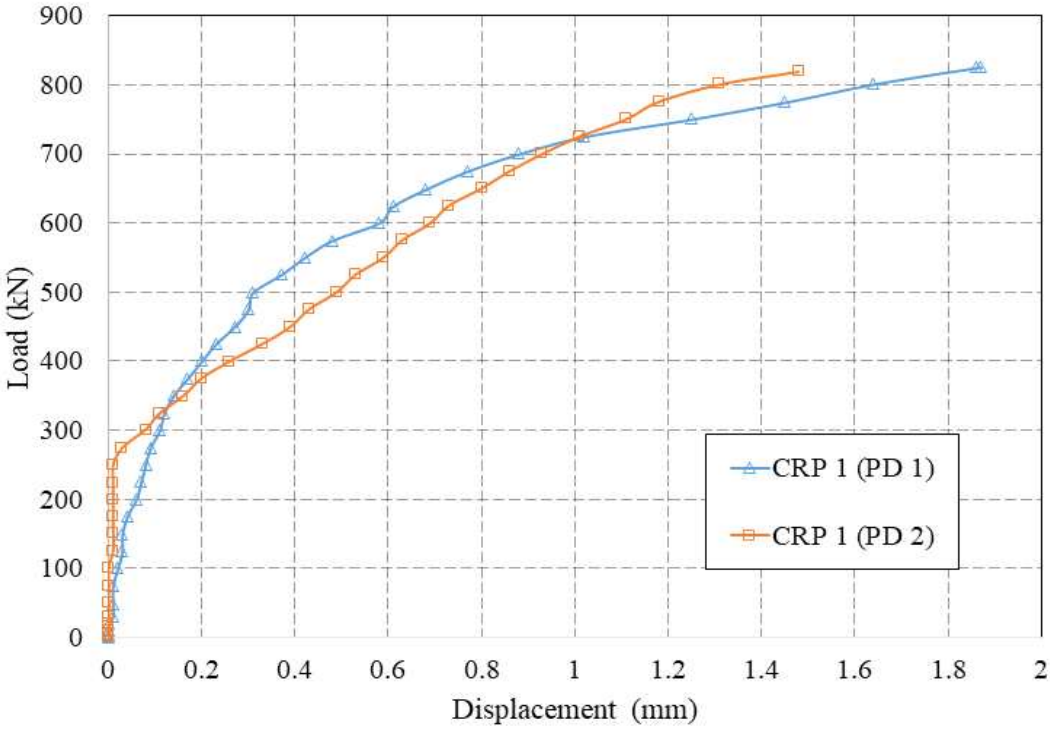


그림 3.53 이격 및 균열곡선

(7) 결 론

① 아치덱 정적재하 비합성 실험체(AD)의 휨 거동 실험

㉠ 아치덱의 정적재하 실험결과 최대하중은 약 64.48 kN으로, 설계극한하중(27.32 kN)에 비하여 약 2.36배의 구조성능을 보인다.

㉡ 실험에서의 균열은 약 12 kN에서 나타났으며, 설계균열하중인 7.56 kN 보다 큰 하중에서 측정되었다. 반면 횡방향 길이의 1/4 지점 이후에는 균열의 진전이 이뤄지지 않은 것으로 보아, 아치형상의 실험체가 수직 및 수평반력을 효과적으로 분산시키는 것으로 판단된다.

② 2경간 아치덱 합성 실험체(BD)의 휨 거동 실험

㉠ 2경간 아치덱 철근콘크리트 합성 실험체(BD)의 실험결과 최대하중은 약 922.80 kN으로, 설계극한하중(P_u)인 262.54 kN에 비하여 약 3.5배 우수한 구조성능을 보인다.

㉡ 설계극한하중(P_r)과 비교하였을 때, 철근과 콘크리트 변형률 모두 실험에서 안정적인 결과를 나타내었다. 철근은 약 900 kN부근에서 영구변형을 하였으며, 콘크리트는 최대하중상태에서도 압축부에서 안정적인 거동을 하였다. 이를 통해 2경간 아치덱 철근콘크리트 합성 실험체(BD)는 설계극한하중(P_r)에서 사용성 및 안전성이 확보되는 것으로 판단된다.

㉢ 초기균열은 약 250 kN에서 발생하였으며, 이는 설계균열하중(P_{cr})인 141.99 kN에 비해 약 1.8배 높은 성능이다. 이는 아치덱의 반력분산의 구조적 이점을 통해 나타난 결과로 판단된다.

③ 2경간 아치덱 피로 합성 실험체(FD)의 실험

200만회 피로 하중 재하 후 아치덱 바닥판의 잔류 처짐은 2.5mm가 발생하였다. 1회 재하 시와 200만회 피로하중 재하 시 결과를 분석하면, 설계 활하중인 125kN까지 유사한 거동을 보이고 있어 충분한 내구성을 확보한 것으로 사료된다.

④ 아치덱 합성 실험체(PD)의 펀칭전단 실험

㉠ 펀칭전단 아치덱 실험체(PD)의 실험결과 최대하중은 PD 1 825.7 kN, PD 2 819.5 kN 이며, 도로교설계기준(2015)에 의해 계산 된 설계펀칭전단강도(V_{cd}) 478.6 kN에 비하여 약 1.7배 우수한 구조성능을 보인다.

㉡ 철근과 콘크리트의 변형률 분석결과, 전반적으로 안정적인 거동을 하였으며 재하하중이 실험체의 설계펀칭전단강도(V_{cd})에서도 부재의 극한변형률에 도달하지 않았다.

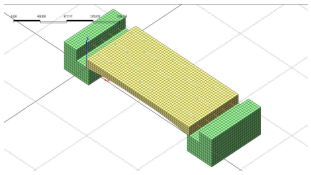
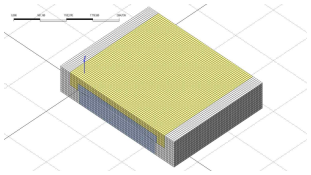
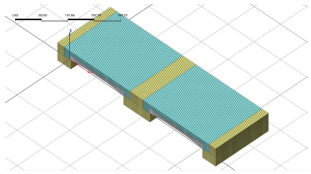
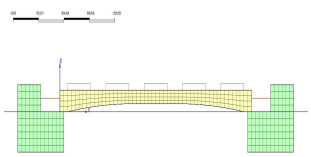
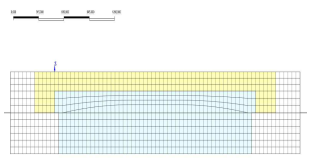
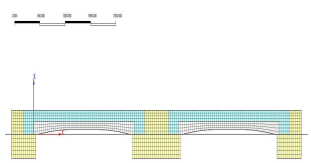
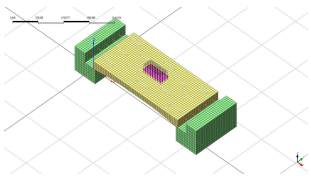
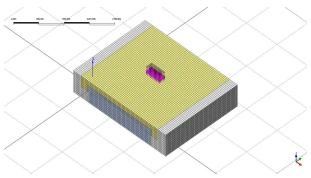
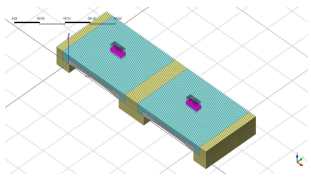
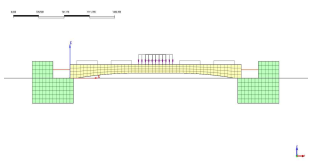
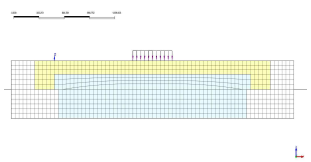
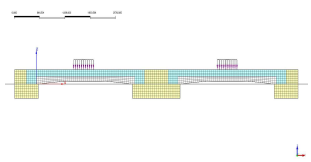
㉢ 초기균열은 각각 500 kN, 350 kN에서 발생하였으며, 설계기준에 비하여 높은 구조성능을 가지고 있음을 확인하였다. 특히 PD 1의 경우 설계펀칭전단강도에 근접한 하중에서 균열이 발생하여 실제 구조물의 내력은 설계기준보다 월등히 높은 것으로 판단된다.

3.2 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가

3.2.2 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 구조해석

아치덱을 활용한 바닥판의 정적재하 실험에 앞서, 아치덱을 활용한 바닥판의 실용화를 위한 구조성능을 파악하기 위해 비선형 구조해석을 수행하였다. 비선형 구조해석을 위한 프로그램은 Midas FEA를 사용하였으며, 합성 전 정재하, 합성 후 정재하, 펀칭전단의 성능을 파악하기 위하여 시험체를 모델링하여 비선형 해석을 수행하였다. 다음 표 3.27은 1차년도에 진행한 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 구조해석의 전체적인 개요를 도식화한 표이다.

표 3.27 아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 구조해석 개요

아치덱을 활용한 바닥판의 성능평가를 위한 구조해석			
	합성 전 정재하	합성 후 펀칭전단	합성 후 정적재하
Model(3D View)			
Model(2D View)			
Boundary Condition(3D View)			
Boundary Condition(2D View)			
해석프로그램	Midas FEA (V3.6.0 R2)		
콘크리트 및 철근 구성모델	콘크리트 구성모델 : Total strain crack 철근 구성모델 : Von Mises		
콘크리트 및 철근 재료특성	강도	$f_{ck} = 49.5\,MPa$ (아치덱), $f_{ck} = 38.5\,MPa$ (현장타설 콘크리트), $f_y = 400\,MPa$(SS400)	
	탄성계수	$31099\,MPa$(아치덱), $28628\,MPa$(현장타설 콘크리트), $2.0\times10^5\,MPa$(SS400)	

하중 크기 및 위치	최대하중은 약 $60kN$으로 아치댁 위 중심부에서 $500mm \times 200mm$의 크기로 작용	최대하중은 약 $850kN$으로 아치댁 위 중심부에서 $500mm \times 200mm$의 크기로 작용	최대하중은 약 $850kN$으로 아치댁 위 중심부에서 $500mm \times 200mm$의 크기로 좌우에 작용
비고	균열하중 ($P_{cr} = 7.56kN$) 설계극한하중 ($P_r = 27.32kN$)	펀칭전단강도 ($V_{cd} = 478.6kN$)	균열하중 ($P_{cr} = 141.99kN$) 극한하중 ($P_r = 262.54kN$)

(1) 해석 프로그램 Midas FEA 개요 (V3.6.0 R2)

Midas FEA(Advanced Nonlinear and Detail Analysis)는 비선형 상세해석 전용 시스템으로, 토목분야 범용 전/후처리 프로그램인 Midas FX+의 Geometry Modeling 및 Mesh Generation 기능을 기반으로 마이다스아이티의 선형 및 비선형 솔버의 축적된 기술과 안정성을 인정받은 TNO DIANA사의 기술력을 결합하여 만든 국내 토목분야 설계환경에 최적화한 상세 특화해석 전용 프로그램이다. Midas FEA(Advanced Nonlinear and Detail Analysis)는 공학분야에서 발생하는 다양하고 복잡한 문제들을 해석하는데 이용할 수 있으며, 콘크리트 구조물과 관련된 다음과 같은 문제들을 해결할 수 있다.

① 구조형식

- 라멘교
- Steel Girder
- PSC beam
- PSC box
- 아치교
- 지중구조물
- 하부구조
- 케이블교

② 해석형식

- 선형정적해석
- 철근 및 텐던 해석
- 모드해석 및 좌굴해석
- 시공단계해석
- 재료비선형 해석
- 동해석(응답스펙트럼/시간이력)
- 고유치해석
- 접촉해석
- 응담스펙트럼해석
- 시간이력해석
- 수화열 해석
- 부등건조수축 해석
- 균열해석
- 피로해석
- 계면요소 해석
- CFD 해석
- 재료비선형해석
- 이동하중해석
- 열전달 및 열응력 해석

③ 해석 Detail

- 철근 콘크리트 및 프리스트레스 콘크리트 구조물의 거동
- 콘크리트 구조물의 폭발에 의한 순간하중이나 화재에 따른 온도해석
- 하중에 의한 구조물의 철근응력 계산
- 콘크리트 타설 후 발생하는 수화열 해석
- 하중을 받는 콘크리트 구조물의 처짐 및 변형률

(2) 비선형 재료모델

비선형해석은 구조물의 비선형적 거동을 고려하는 해석으로, 재료적 비선형 해석과 기하학적 비선형 해석, 접촉 비선형 해석 등이 있다. 또한, 위의 비선형 해석을 2가지 또는 모두 고려하는 해석 등이 있다.

재료적 비선형 거동에 대한 설명은 다음과 같다. 하중을 받고 있는 구조물은 재하 초기에는 하중과 변형이 비례관계를 성립하는 탄성 영역에 존재한다. 하지만, 하중이 증가하여 특정 응력값(항복응력)에 도달하면 하중증가에 비해 변형의 증가가 더 커지는 소성영역으로 변하게 된다. 이 상태에서 하중이 더욱 증가하면 응력-변형률 관계를 갖지 않는 파괴단계에 이르게 된다. 이와 같이 하중 크기와 방향 변화에 따라 재료의 특성 값이 변화하여 구조물의 비선형적 거동을 유발시키는 것을 재료 비선형이라고 한다.

기하학적 비선형 거동이란, 상기에 설명한 재료적 비선형 거동과 달리 변위 또는 회전량이 증가하여 하중의 작용방향과 분포, 크기 등이 달라지는 것을 말한다.

접촉 비선형이란 재료나 변위, 회전량이 아닌 요소간의 경계부분의 비선형 또는 경계조건의 변화로 인한 접촉으로 발생하는 비선형 해석을 말한다.

아치덱을 활용한 바닥판의 구조해석의 경우, 하중이 증가함에 따라 발생하는 처짐 및 변형률을 기록하고, 선형구간을 포함한 비선형 구간까지 해석을 진행하여 아치덱을 활용한 바닥판의 전체적인 구조거동에 관하여 해석적 연구를 진행한 것이다.

① 콘크리트 구성모델

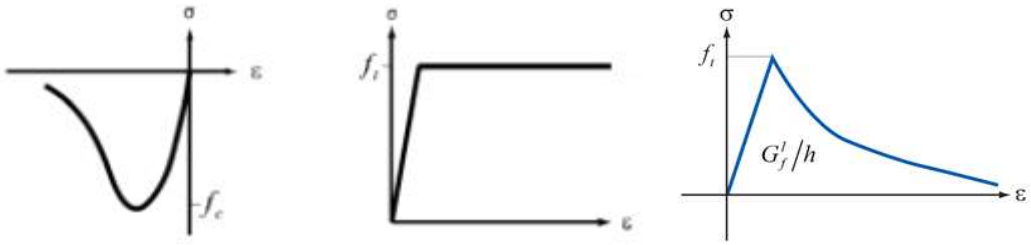
콘크리트의 재료적인 비선형 거동을 구현하기 위해서는 적합한 소성모델이 필요하다. 콘크리트의 재료적인 비선형 거동과 소형 또는 중형 콘크리트 구조물에 적합한 소성모델을 조사 후, 재료모델을 결정하였다. 특히, 본 해석에서는 아치덱을 활용한 바닥판의 해석에서 균열까지 고려할 수 있는 재료모델을 적용하였다.

콘크리트 균열에 대한 해석방법은 이산균열모델과 분산균열모델로 구분할 수 있다. 이산균열모델은 국부적으로 발생하는 균열이 넓은 면에 고르게 분산된 것으로 가정하는 방법을 사용한다. 일반적으로 철근이 많이 배근된 철근콘크리트 구조물의 해석에 적합하다고 알려져 있으며, 유한요소 모델링이 가능하다. 이산균열모델은 균열에 대한 수치적 해석방법에 따라 변형률 분해모델(Decomposed-strain model), 전변형률 균열모델(Total strain crack)로 구분된다.

소형 및 중형 콘크리트 구조물의 구조거동을 알 수 있으며, 균열형상의 모습까지 해석 가능한 전변형률 균열모델, Total strain crack을 콘크리트 구성모델로 적용하였다. 전변형률 균열모델(Total strain crack)은 균열 축에 따라 주변형률의 변화와 함께 균열방향이 계속 회전한다고 가정하며, 균열이 압축강도에 미치는 영향, 횡방향 구속효과 등도 고려할 수 있기 때문에 철근콘크리트 해석에 많이 사용된다.

Midas FEA에서 콘크리트 재료모델인 전변형률 균열모델(Total strain crack)을 적용하기 위해서는 콘크리트의 압축과 인장모델을 각각 설정해주어야 한다. 다음은 전변형률 균열모델(Total strain crack)의 압축 및 인장모델로 적용한 세부모델에 대한 설명이다.

압축 응력하의 콘크리트는 등방성 응력이 증가함에 따라 강도(Strength)와 연성(Ductility)이 증가하게 된다. 이러한 등방성 응력의 영향을 반영하기 위해 압축 응력-변형률의 관계는 이러한 함수인자들인 Peak Stress(f_{cf})와 Peak Strain(e_p)등은 파괴함수로부터 결정된다. 압축부의 기본함수는 f_p와 a_p로 표현되며, 본 해석에서는 기 정의된 곡선 중 Thorenfeldt 경화곡선을 적용하였다. 다음 그림 3.54 (a)는 Thorenfeldt 경화곡선이다.



(a) Thorenfeldt model (b) Constant model (c) Hordijk

그림 3.54 콘크리트 압축 및 인장 모델

전변형률 균열모델(Total Strain Crack)의 인장거동 모델인 Elastic, Ideal, Brittle, Linear, Exponential, Hordijk, Multi-linear는 파괴에너지(Fracture energy)에 근거한 연화함수로 구현된 모델과 파괴에너지와는 직접적인 상관이 없는 인장거동 모델로 구분할 수 있다. 본 해석에서는 인장응력이 인장강도를 초과할 때 인장응력이 서서히 감소하는 Hordijk model을 적용하였다. 그림 3.54 (c)는 Hordijk model 곡선이다.

② 철근 구성모델

철근의 거동을 구현하기 위해서 철근 Bar Section을 이용하였다. 이를 위해 재료의 물성치 및 단면적을 입력하였고, 그림 3.55와 같이 2절점 저차 Bar Section과 3절점 고차 Bar Section을 사용하였다.

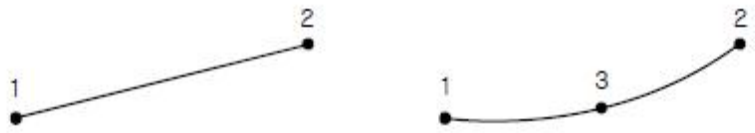


그림 3.55 Bar Section과 철근 절점

분할된 철근 바 세그먼트 강성은 모재요소의 강성에 더해지게 된다. 철근 바 세그 먼트의 적분점은 기본적으로 선 형상에 대해서 2점 적분을 사용하고 있으며, 점 형상에 대해서는 1점 적분을 수행한다. 적분점의 위치는 해석과정에서 요소의 등매개 좌표계(isoparametric coordinate)를 사용하여 자동적으로 계산된다. 그림 3.56의 왼쪽에 철근바의 세그먼트가 위치점을 사용하여 정의되는 것을 보여준다. 철근바의 응력은 축방향 성분만 존재하며, 적분점에서 철근바의 변형률 ε_{xx}와 응력 σ_{xx}는 적분점에서의 접선방향으로 구해

진다. 적분점에서 구해진 변형률과 응력은 외삽법(extrapolation)으로 처리되어 후처리에서 위치절점에서의 결과로 출력된다. 상기에 설명한 개념을 철근 요소에 적용하였으며, 철근 재료모델은 일반적으로 사용하는 Von Mises 재료모델을 선택하였다.

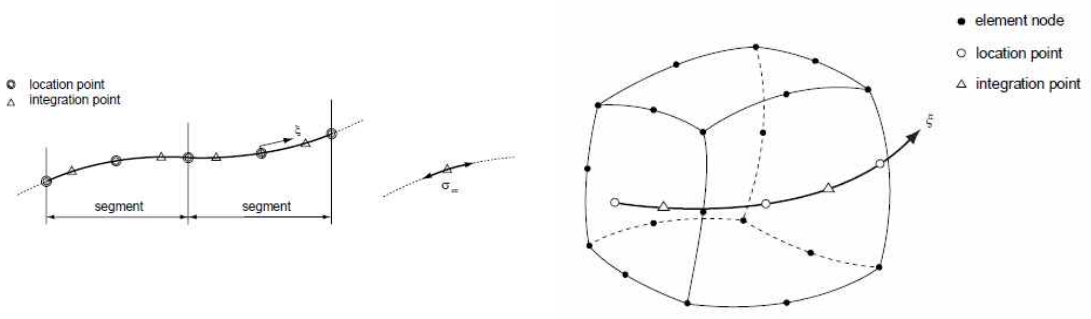
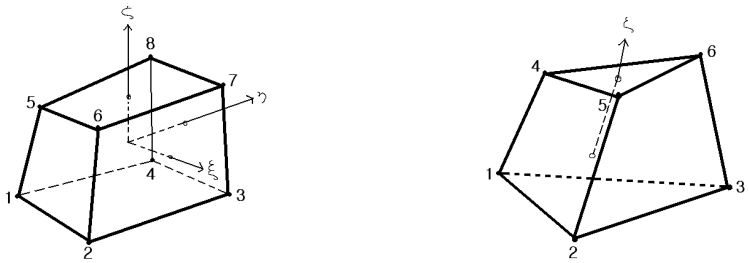


그림 3.56 철근 바 세그먼트 및 입체요소에 삽입되는 철근 바 세그먼트와 위치절점

③ 상세 해석모델

비선형 상세해석을 위해 Midas FEA 프로그램 내의 구조실험체 특성을 실제 조건과 동일하게 설정하였다. Solid element의 경우, 그림 3.57 (a)와 같은 8절점 Solid element를 적용하였다. 또한, 콘크리트는 전변형률 균열모델(Total strain crack)을 재료모델로 적용하였고, 철근은 Von mises 재료모델을 적용하였다.



(a) 8절점 solid element (b) 6절점 solid element

그림 3.57 해석에 사용된 Solid element 요소 형상

아치넥을 활용한 바닥판의 성능평가에 대한 정적재하 및 펀칭전단 해석을 위한 경계조건은 실제 시험과 동일한 힌지-롤러를 적용하였으며, 하중은 자중과 외력을 구분하여 적용하였다.

콘크리트의 탄성계수는 추정식으로 도출된 계산 값을 적용하였다. 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 아치넥의 경우, $40MPa$을 적용하였고 현장타설 콘크리트는 $30MPa$을 적용하였다. 철근은 SS400을 재료모델로 적용하였으며, 항복강도 $f_y = 400MPa$을 적용하였다. 또한, 도로교설계기준에 따른 차량의 후륜하중을 모사하기 위해 접지면적을 $200mm \times 500mm$으로 설정하여 하중을 재하하였다. 실험체의 제원은 실제 실험체와 동일하게 모델링하였으며 프로그램에 적용된 상세 재료특성은 표 3.28와 같다.

표 3.28 Midas FEA에 적용된 상세 재료특성

구 분	콘크리트	철근
재 료	-	SS400
강 도	$f_{ck} = 49.5MPa$ (아치넥) $f_{ck} = 38.5MPa$ (현장타설 콘크리트)	$f_y = 400MPa$
탄성계수	$31099MPa$(아치넥) $28628MPa$(현장타설 콘크리트)	2.0×10^5
포아송 비	0.18	0.3

콘크리트 구조물의 재료적 비선형 해석시, 올바른 해를 구하기 위해서는 반복법(Iteration method)이 필요하다. MIDAS FEA에서 사용가능한 반복법은 초기강성법(Initial stiffness method), 뉴튼-랩슨법(Newton-Raphson method), 수정 뉴튼-랩슨법(Modified Newton-Raphson method), 호장법(Arc-length method) 등이 있으며, 본 해석에서는 그림 3.58의 수정 뉴튼-랩슨법을 사용하였다. 수정 뉴튼-랩슨법은 기존 뉴튼-랩슨법과 비교하여 계산시간을 단축할 수 있으며, 정상적으로 수렴하지 않는 문제에 대해서도 유용하게 사용할 수 있다. 다음 그림 3.58은 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석에 관한 이론을 도식화한 그래프이다.

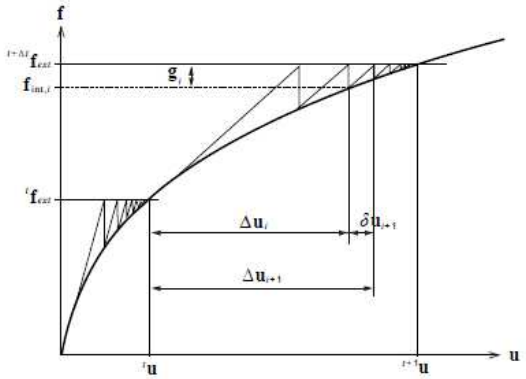


그림 3.58 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석

본 해석에서는 아치넥을 활용한 바닥판의 성능평가 실험을 위하여 합성 전 정재하, 합성 후 정재하, 합성후 펀칭전단 모델을 실제 적용모델과 똑같이 모델링하였다. 합성 전 정재하의 경우, 아치넥 단독부재에 대한 해석이며, 합성 후 펀칭전단 및 합성 후 정적재하는 아치넥 부재 위에 현장타설 콘크리트를 모사하여 해석하였다. 다음 그림 3.59~3.70은 아치넥 3가지 실험체의 모델링 모습과 하중 위치 모습이다.

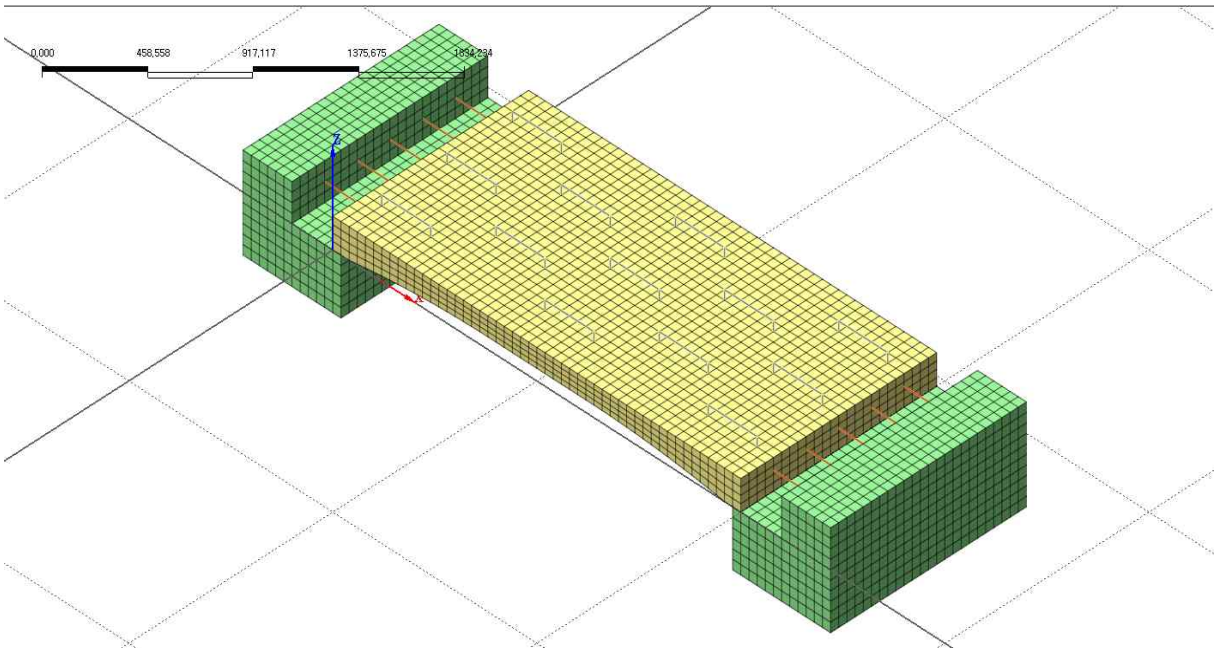


그림 3.59 아치덱 합성 전 정적재하 실험체(3D View)

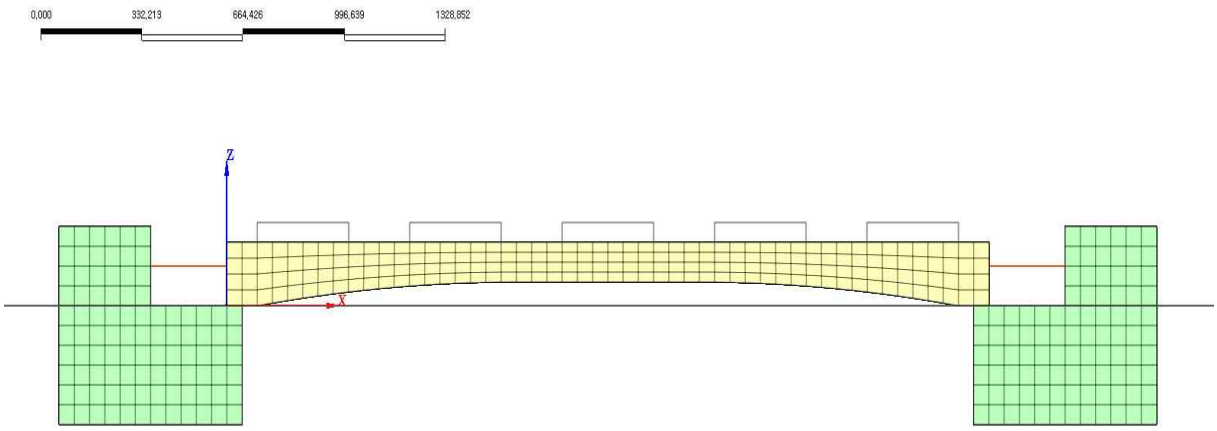


그림 3.60 아치덱 합성 전 정적재하 실험체(Side View)

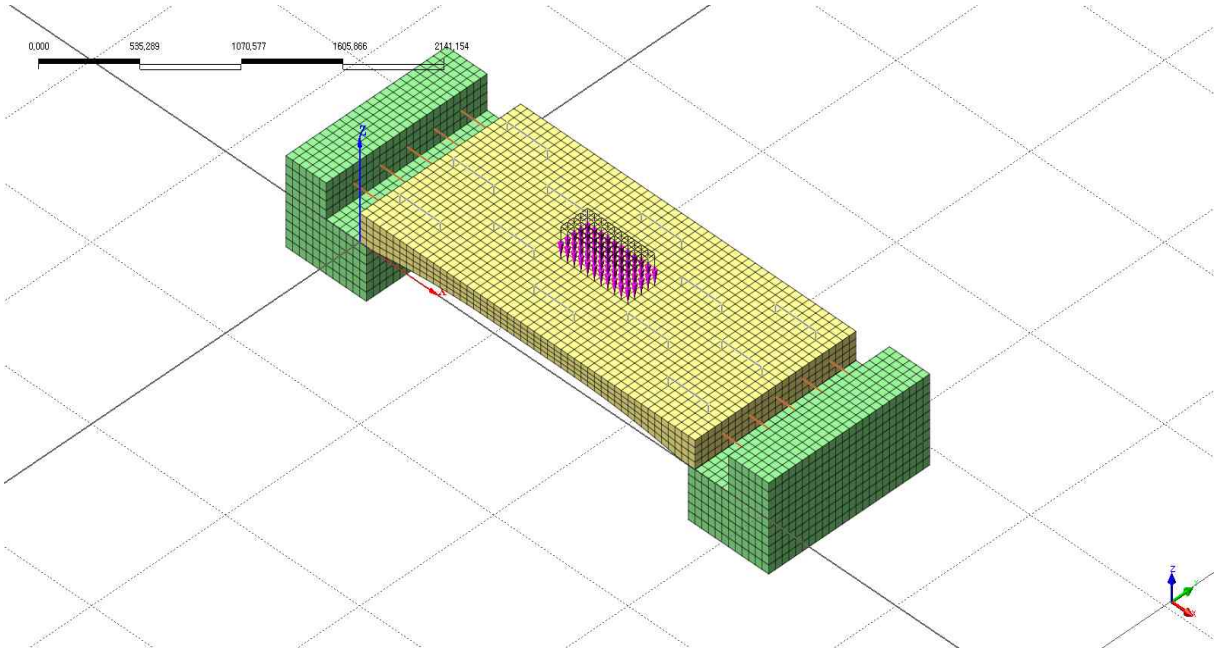


그림 3.61 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 하중 위치(3D View)

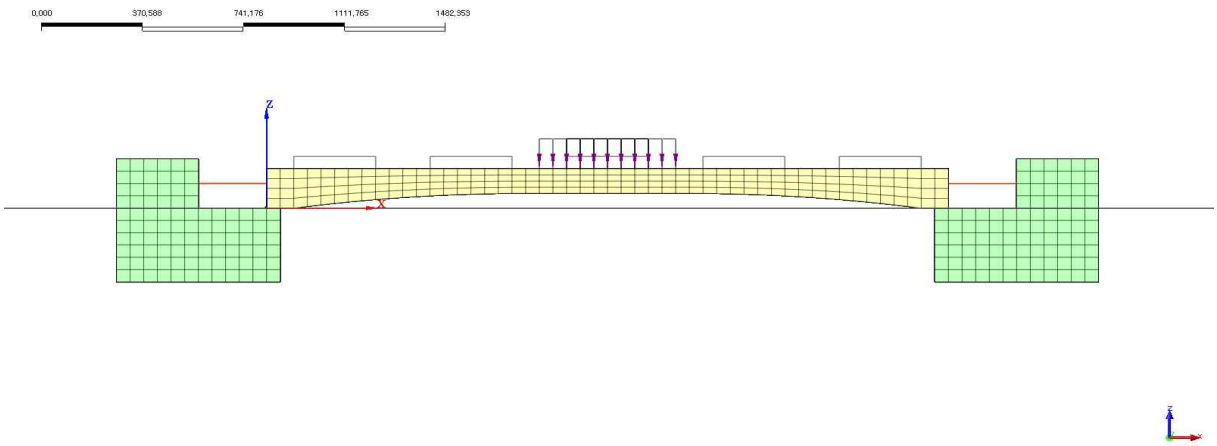


그림 3.62 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 하중위치(Side View)

그림 3.61 ~그림 3.62와 같이 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 모델의 하중 위치는 실제 수행한 실험과 동일하게 적용하였다. 하중 재하위치는 실험체의 중앙부에 $500mm \times 200mm$의 면적으로 등분포하중을 재하 하였으며 경계조건은 힌지와 롤러를 적용하였다. 최대 하중크기는 약 70 kN(약 7 tonf)이며, 하중 재하단계는 40 단계를 적용하였다.

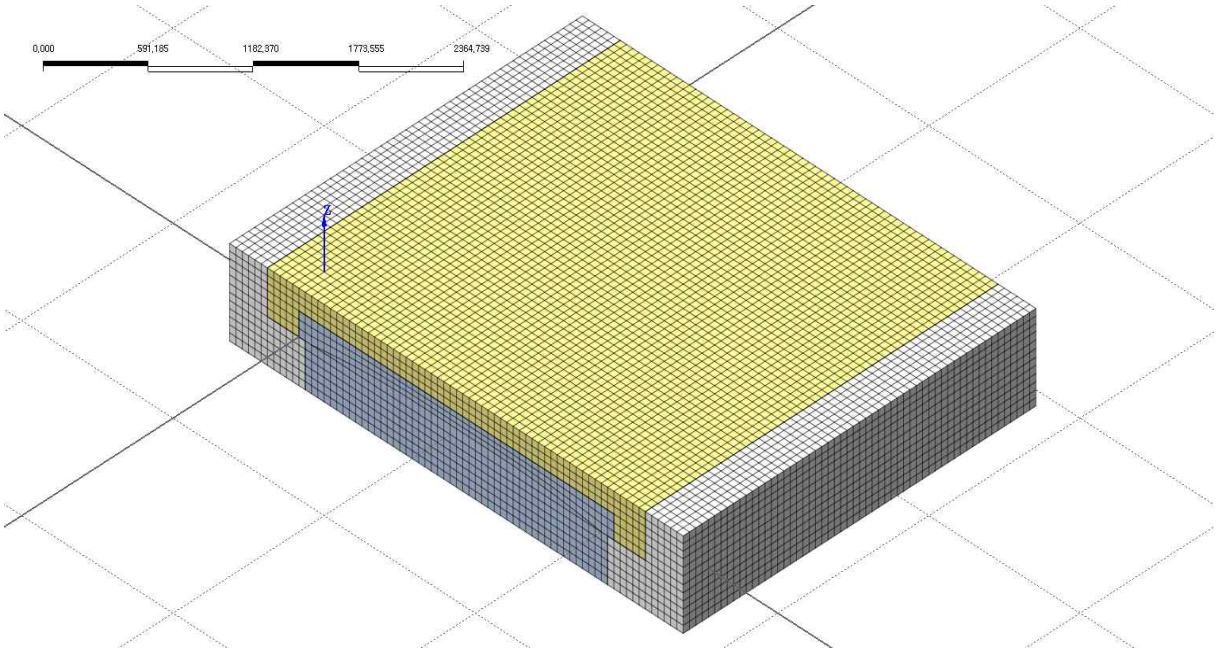


그림 3.63 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체(3D View)

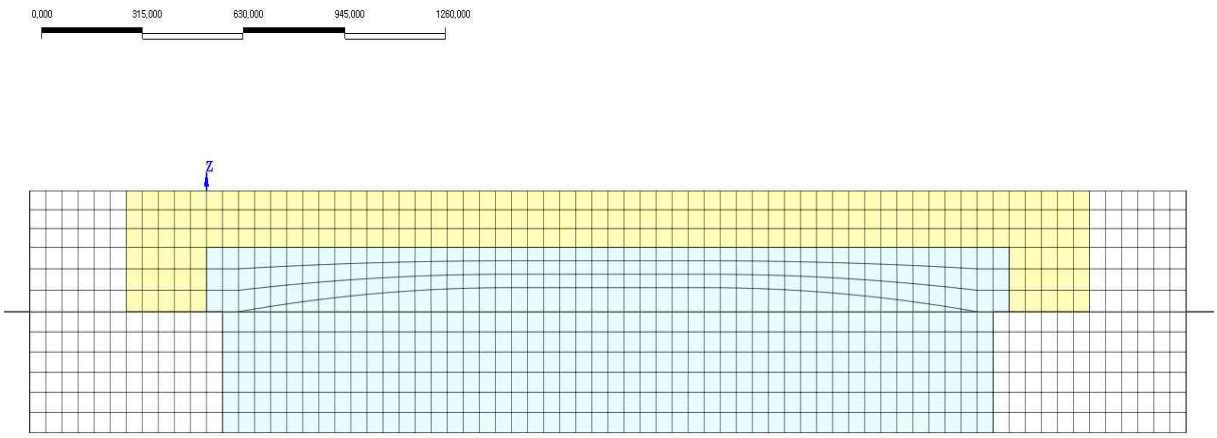


그림 3.64 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체(Side View)

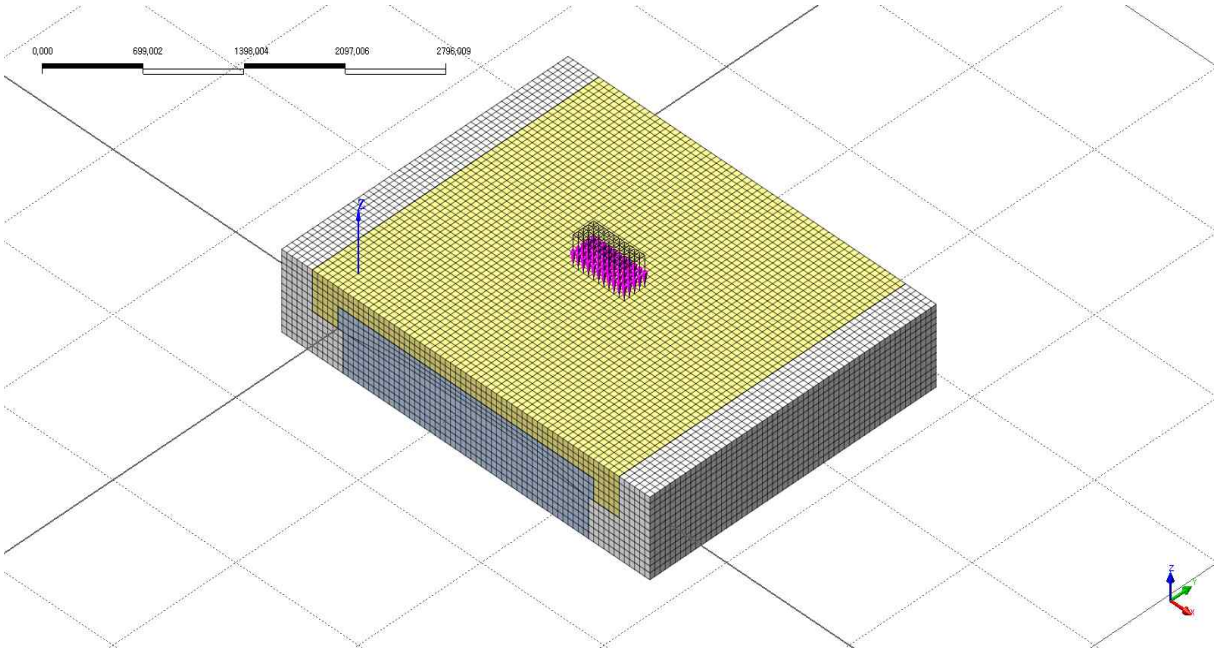


그림 3.65 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 하중 위치(3D View)

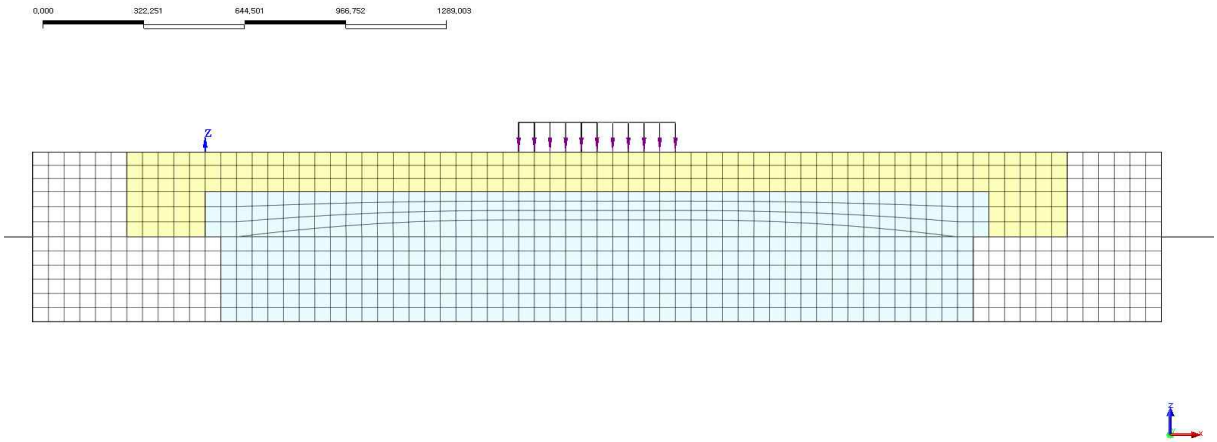


그림 3.66 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 하중 위치(Side View)

아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 모델의 하중 위치는 그림 3.65 ~그림 3.66과 같이 실제 수행한 실험과 동일하게 적용하였다. 하중 재하위치는 실험체의 중앙부에 $500mm \times 200mm$의 면적으로 등분포하중을 재하하였으며 경계조건은 힌지와 롤러를 적용하였다. 최대 하중 크기는 약 850 kN(약 85 tonf)이며, 하중 재하단계은 50 단계를 적용하였다.

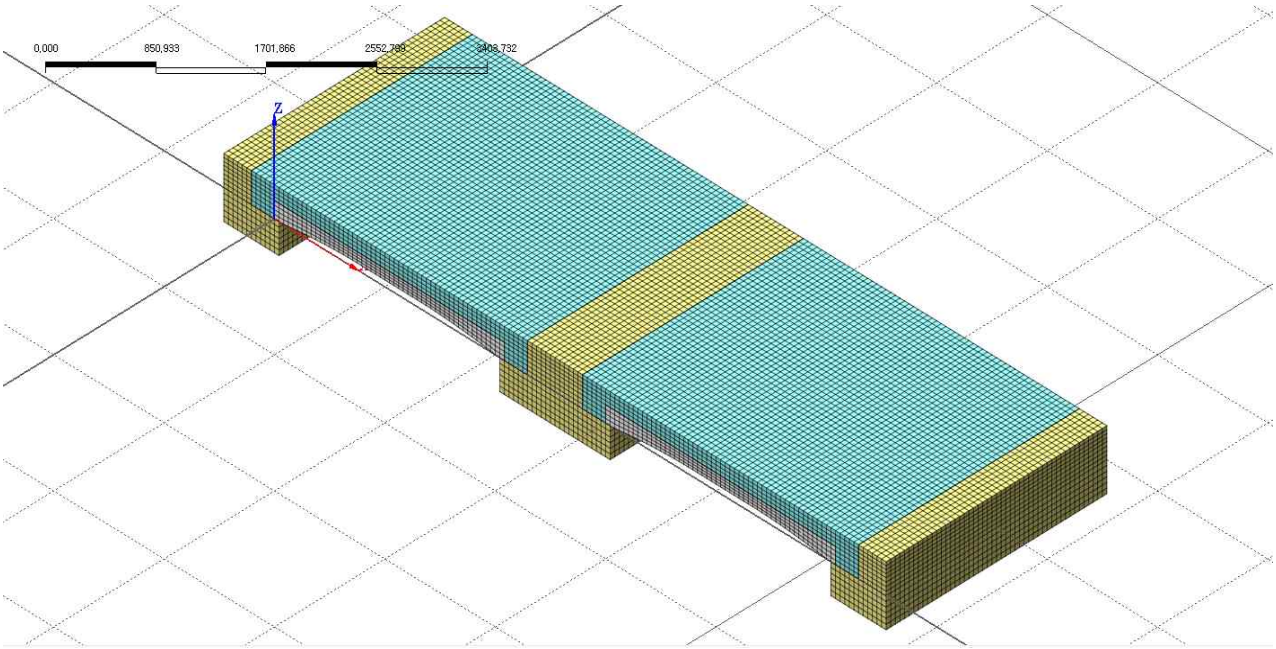


그림 3.67 아치덱 합성 후 정적재하 실험체(3D View)

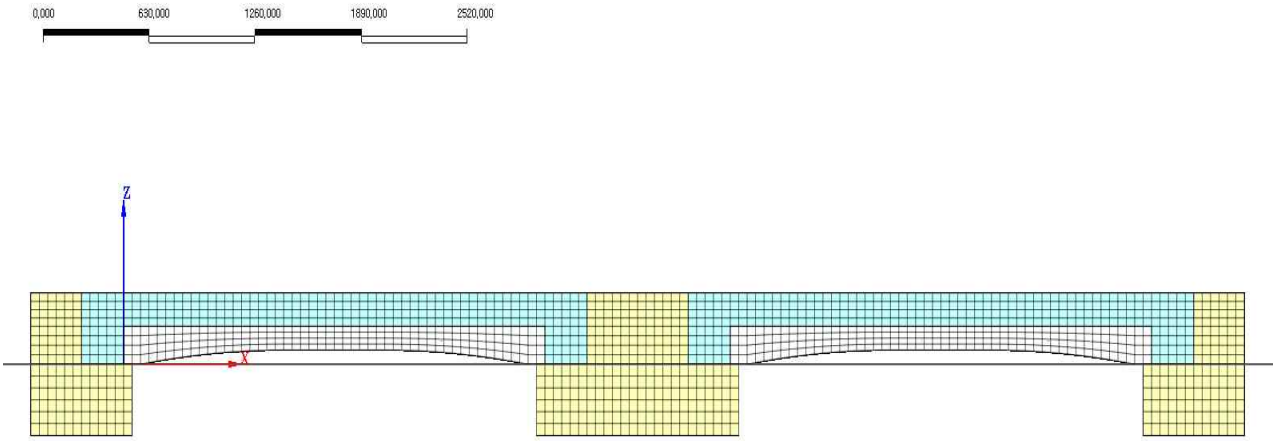


그림 3.68 아치덱 합성 후 정적재하 실험체(Side View)

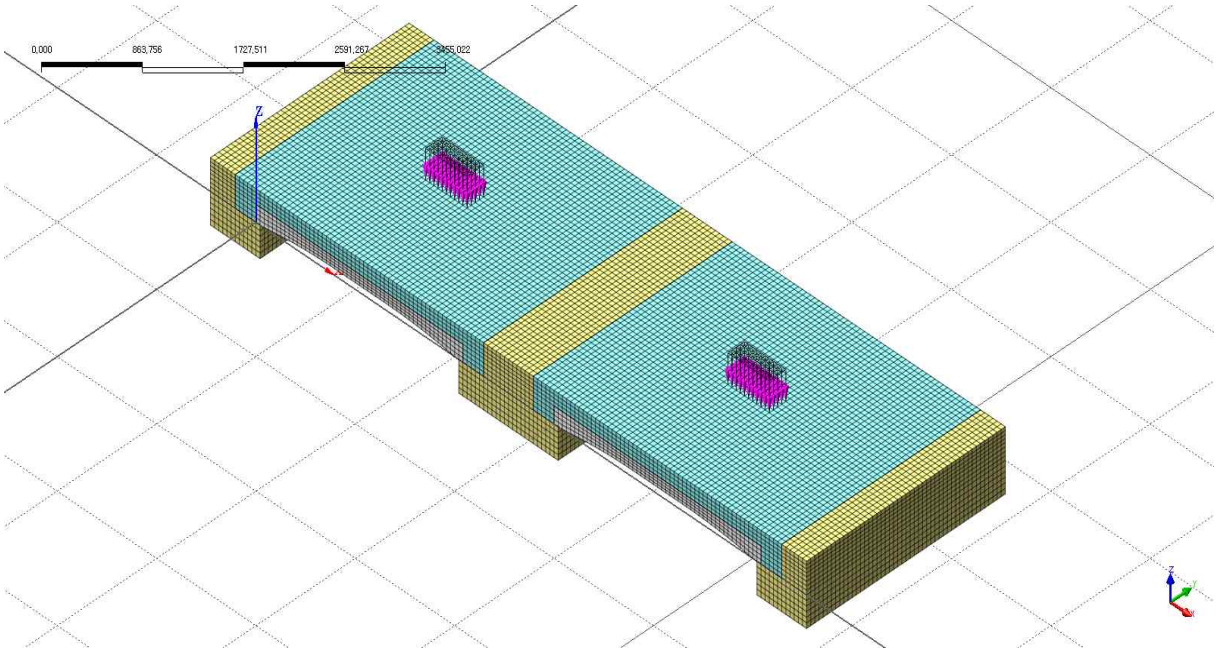


그림 3.69 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 하중 위치(3D View)

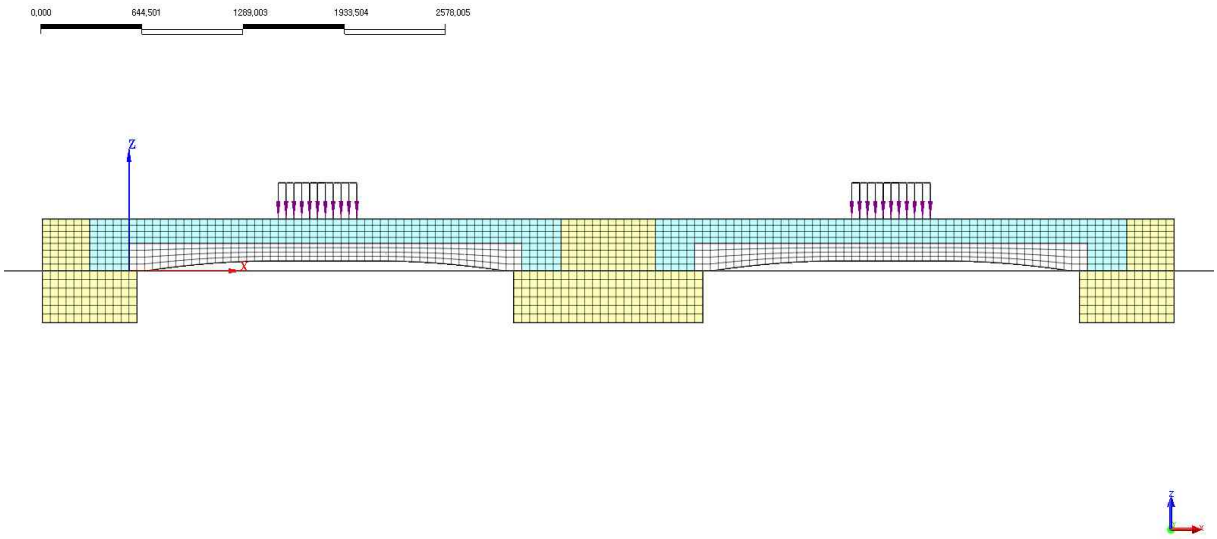


그림 3.70 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 하중 위치(Side View)

아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 모델의 하중 위치는 그림 3.69~그림 3.70과 같이 실제 수행한 실험과 동일하게 적용하였다. 하중 재하위치는 각 아치덱 위 Slab의 중앙부에 $500mm \times 200mm$의 면적으로 등분포하중을 좌우로 각각 적용하였으며 경계조건은 힌지와 롤러를 적용하였다. 최대 하중크기는 약 1000 kN(약 100 tonf)으로 각 아치덱 위 Slab의 중앙부에 적용하였으며, 하중 재하단계는 50 단계를 적용하였다.

(3) 해석결과

① 아치덱 합성 전 정적재하 해석

아치덱 합성 전 정적재하 실험체의 선형해석 및 비선형해석 결과, 약 40 kN 까지 하중의 증가에 따른 중심부 처짐은 거의 일정하게 증가하며 선형거동을 하였다. 약 40 kN 이상부터는 하중의 증가량에 따른 처짐의 증가량 또한 증가하였다. 약 45 kN 부터는 하중 증가에 따른 처짐의 증가량이 급격히 증가하여 구조물의 파괴가 발생하였으며, 이 때 아치덱 중심부 처짐은 약 30 mm 였다. 초기균열은 중심부 하면에서 30 kN에 발생하였으며, 중심부 주위로 종방향 균열이 발생하였다. 그림 3.71 ~그림 3.72는 아치덱 합성 전 정재하 해석모델의 처짐 및 균열형상이며, 그림 3.73은 하중에 따른 중심부 처짐을 도식화 한 그래프이다.

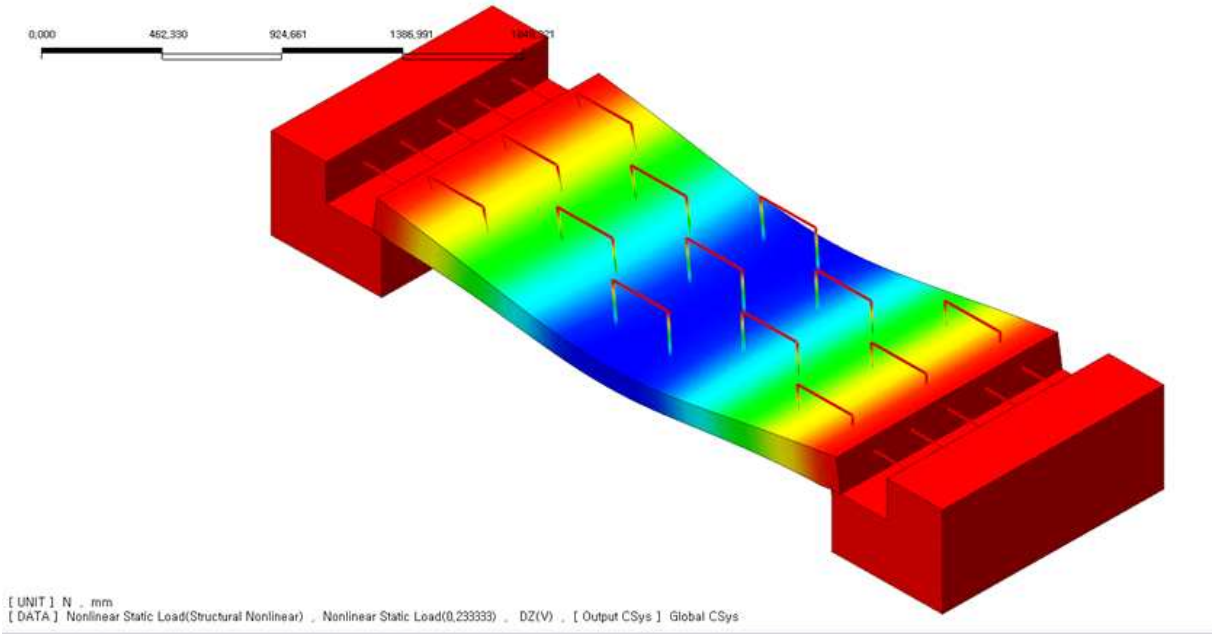


그림 3.71 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 처짐형상

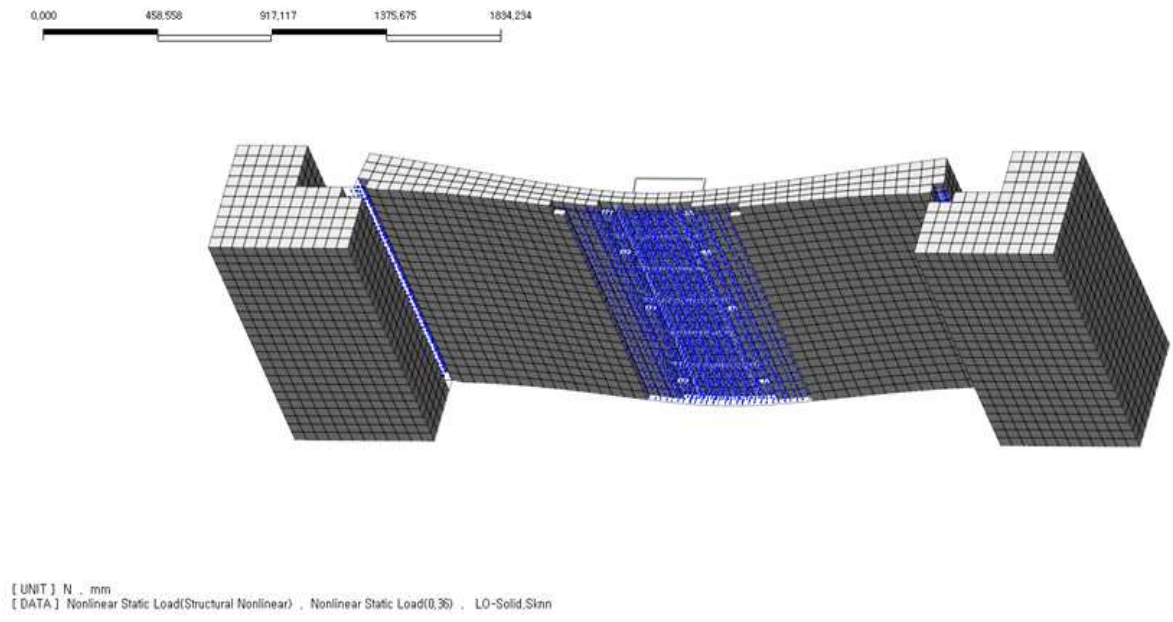


그림 3.72 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 균열형상

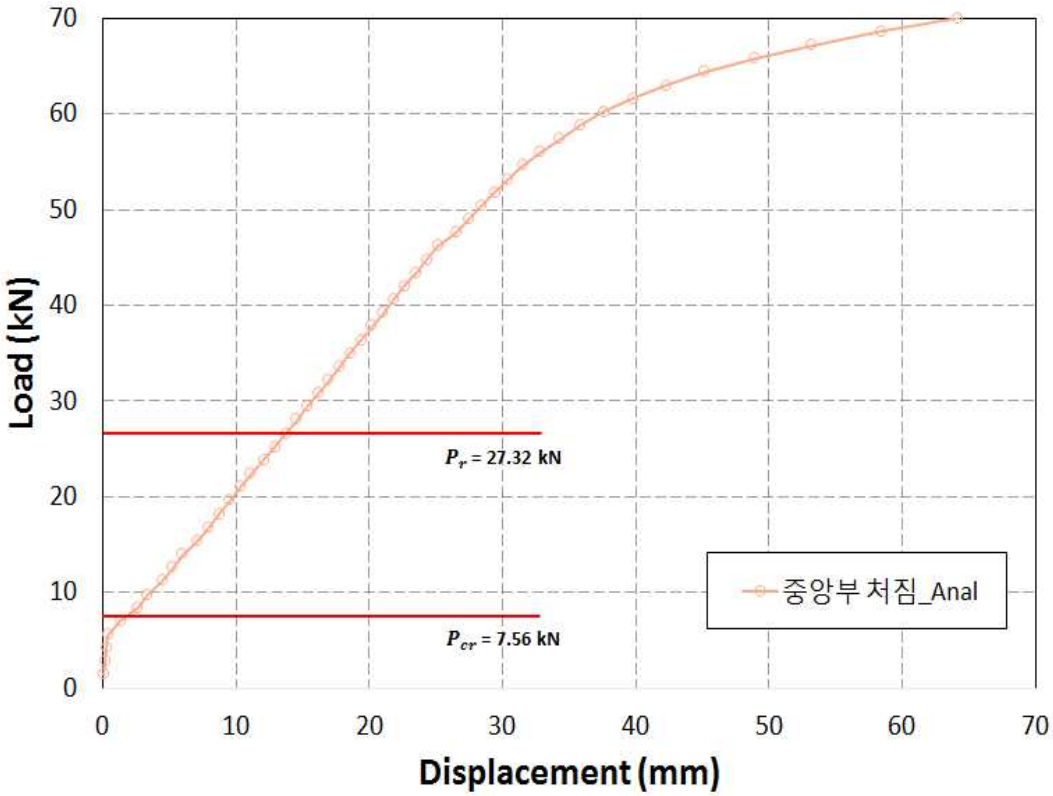


그림 3.73 아치덱 합성 전 정적재하 중앙부 하중-처짐

아치덱 합성 전 정적재하 실험체의 해석결과, 그림 3.75과 같이 P_{cr}과 P_r이 위치한 $5kN \sim 45\,kN$ 구간에서 아치덱 합성 전 정적재하 실험체 모델은 선형거동을 보이며, $P_r = 27.32kN$ 에서도 하중 증가에 따라 처짐이 균일하게 증가하는 안정적인 거동을 보인다. 이러한 결과로 아치덱 합성 전 정적재하 모델은 극한하중에서 중심부 하부에 약간의 균열이 발생하지만, 안정적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

② 아치덱 합성 후 펀칭전단 해석

아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체의 선형해석 및 비선형해석을 결과, 약 450 kN 까지 하중의 증가에 따른 중심부 처짐은 거의 일정하게 증가하며 선형거동을 하였다. 약 450 kN 이상부터는 하중의 증가량에 따른 처짐의 증가량 또한 증가하였다. 약 600 kN 부터는 하중 증가에 따른 처짐의 증가량이 급격히 증가하여 약 750 kN 에서 구조물의 파괴가 발생하였으며, 이 때 아치덱 중앙부 처짐은 약 11 mm 였다. 초기균열은 중앙부 하면에서 280 kN에 발생하였으며, 중심부에서 단부쪽으로 방사형 균열이 발생하였다. 다음 그림 3.74~그림 3.75는 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체의 처짐 및 균열형상이며, 그림 3.76는 하중에 따른 중심부 처짐을 도식화 한 그래프이다.

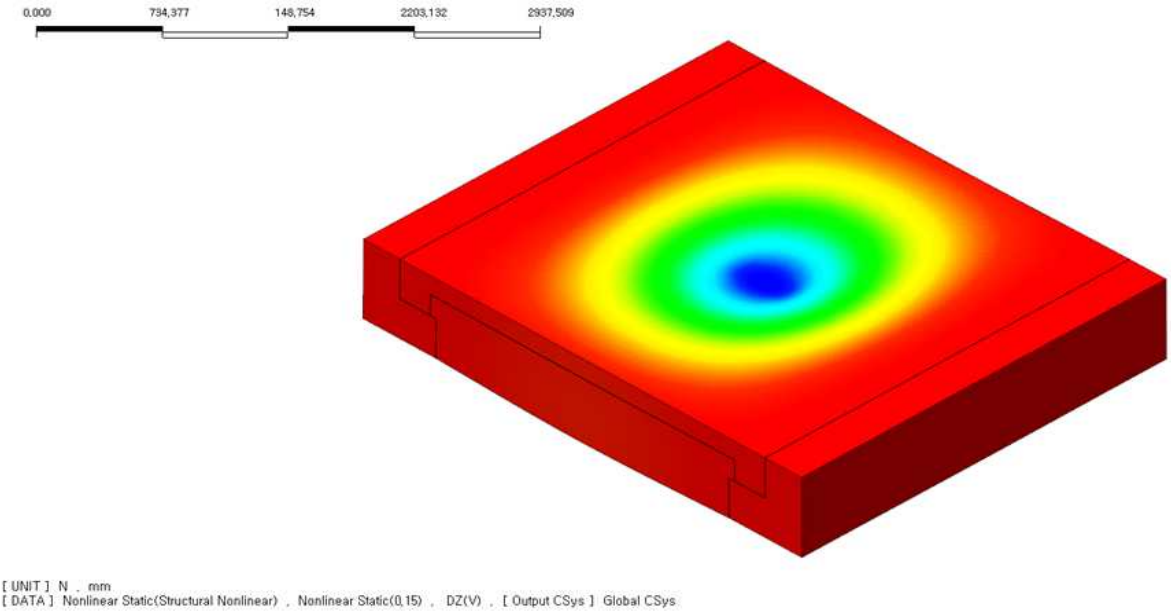


그림 3.74 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 처짐형상

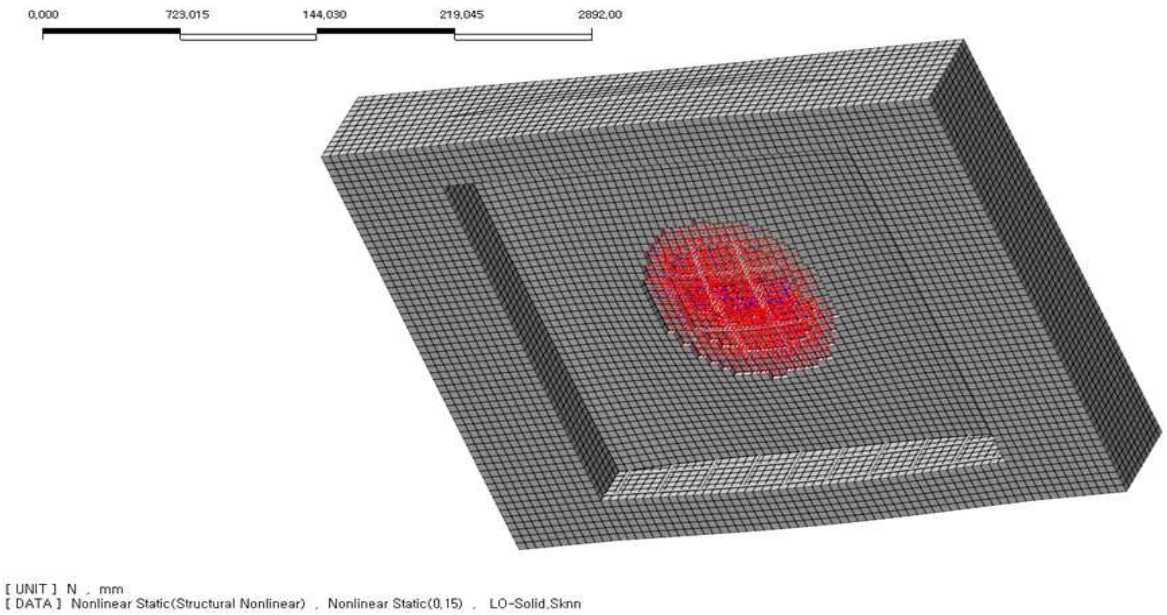


그림 3.75 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 균열형상

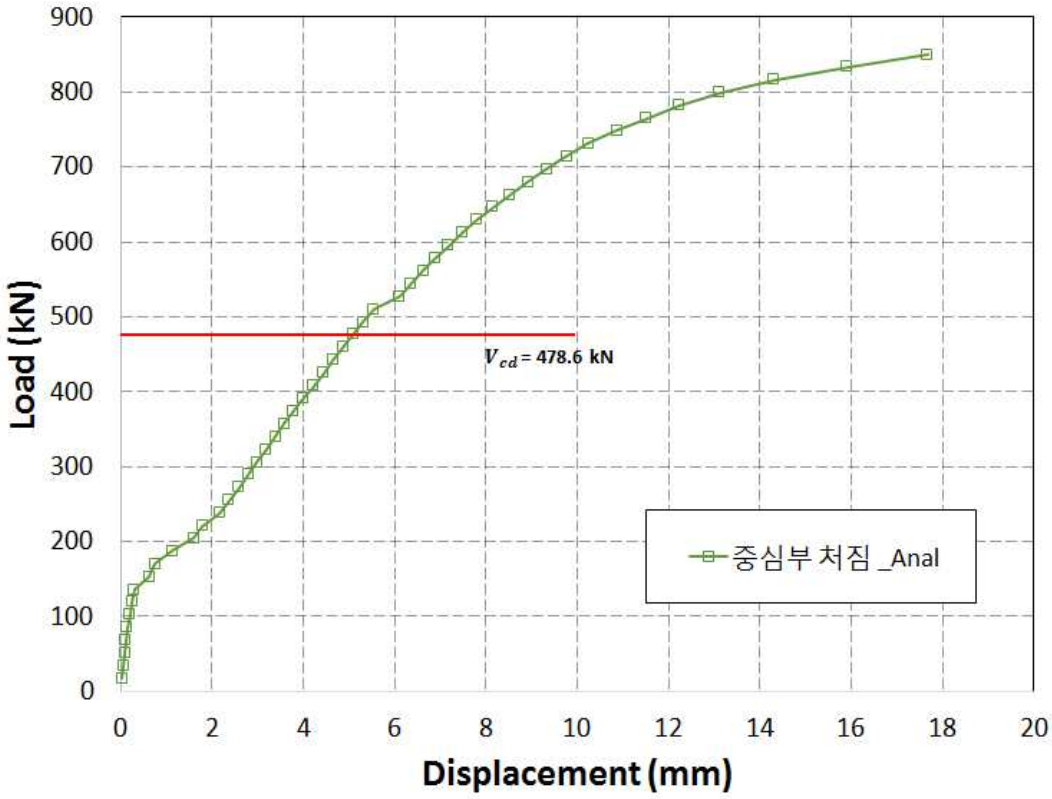


그림 3.76 아치덱 합성 후 펀칭전단 중앙부 하중-처짐

아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체의 해석결과, 그림 3.73과 같이 V_{cd}가 위치한 $478.6kN$에서 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 모델은 하중 증가에 따라 처짐이 균일하게 증가하는 구조거동을 하였다. 이러한 결과로 아치덱 합성 후 펀칭전단 실험체 모델이 중심부 하부에 균열은 발생하지만 안정적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

③ 아치덱 합성 후 정적재하 해석

아치덱 합성 후 정적재하 실험체의 선형해석 및 비선형해석을 진행한 결과, 약 400 kN까지 하중의 증가에 따른 중심부 처짐은 거의 일정하게 증가하며 선형거동을 하였다. 약 400 kN 이상부터는 하중 증가량에 따른 처짐의 증가량 또한 증가하였다. 약 800 kN 부터는 하중 증가량에 따른 처짐의 증가량이 급격히 증가하여 구조물의 파괴가 발생하였으며, 이 때 아치덱 중앙부의 처짐은 약 10 mm 였다. 초기균열은 중앙부 하면에서 220 kN에 발생하였으며, 펀칭전단 실험체 모델과 비슷한 양상으로 중앙부에서 단부쪽으로 방사형 균열이 발생하였다. 다음 그림 3.77~그림 3.78은 아치덱 합성 후 정적재하 해석모델의 처짐 및 균열형상이며, 그림 3.79는 하중에 따른 중앙부 처짐을 도식화 한 그래프이다.

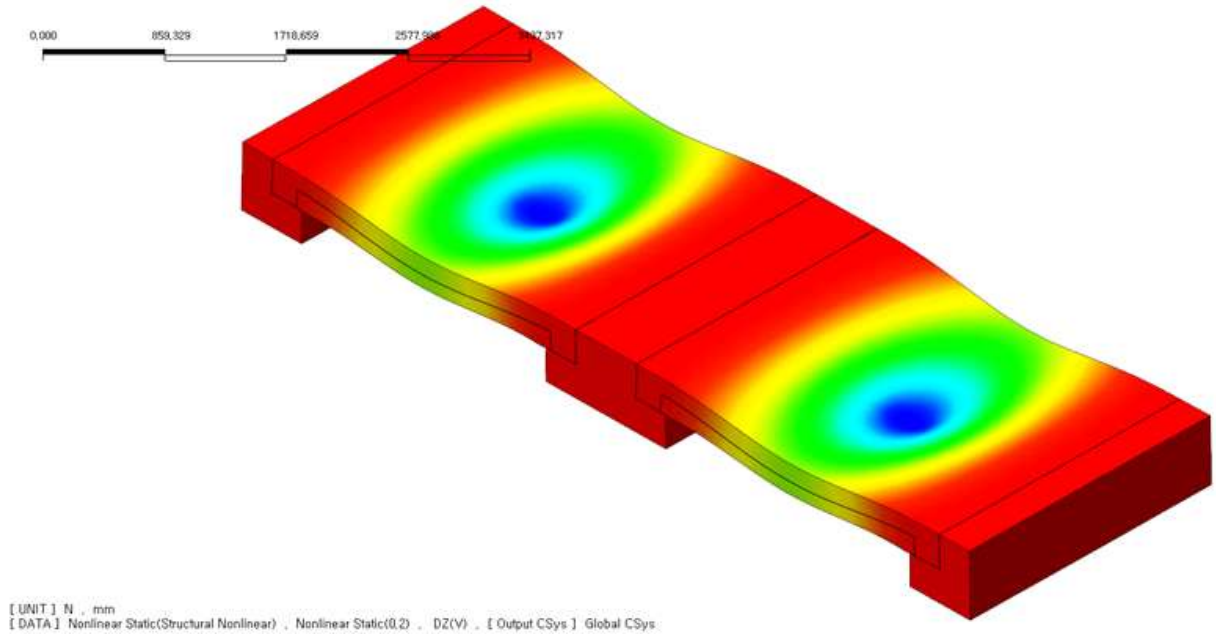


그림 3.77 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 처짐형상

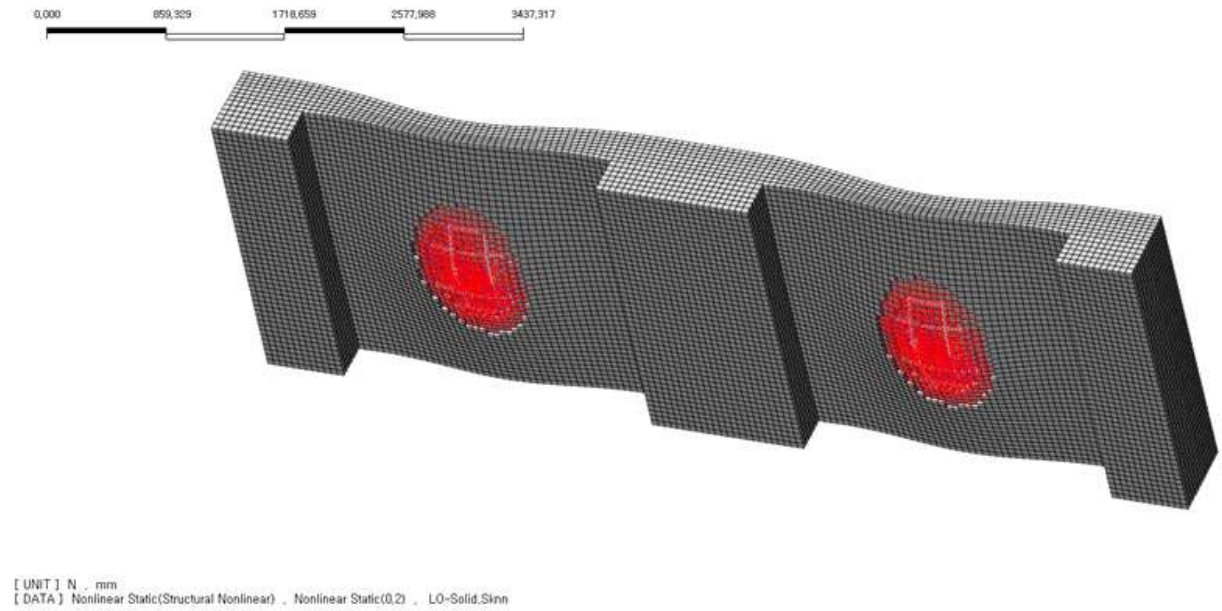


그림 3.78 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 균열형상

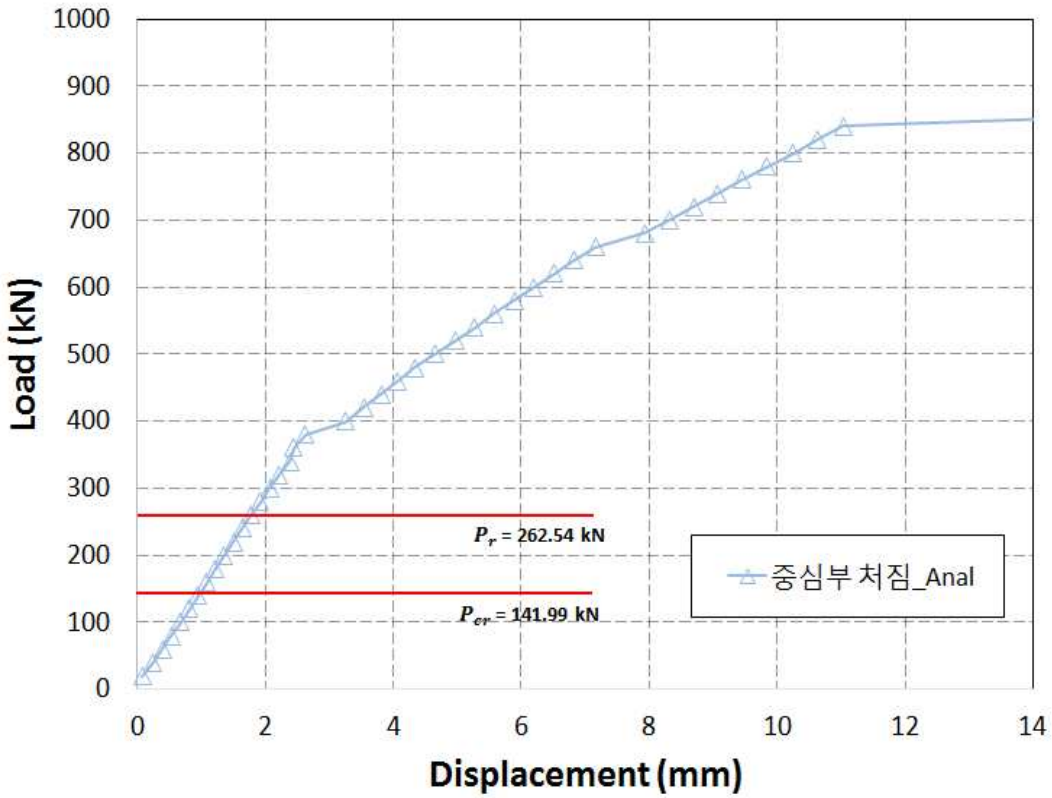


그림 3.79 아치덱 합성 후 정적재하 중앙부 하중-처짐

아치덱 합성 후 정적재하 실험체의 해석결과, 그림 3.76과 같이 균열하중 P_{cr}가 위치한 141.99 kN 지점에서 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 모델은 선형거동을 하인다. 또한 설계극한하중($P_r = 262.54kN$) 지점에서도 하중의 증가에 따라 처짐이 균일하게 증가하는 선형적이며 안정적인 거동을 보인다. 이러한 결과로 아치덱 합성 후 정적재하 실험체 모델이 극한하중에서도 중앙부 하부에서 콘크리트 단면의 인장항복에 의한 균열은 발생하지만 선형적이며 안정적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

(4) 해석결과와 실험결과 비교분석

① 아치덱 합성 전 정적재하 해석

상기의 (3) 해석결과에서 아치덱 합성 전 정적재하 모델의 선형 및 비선형해석 결과에 대한 분석을 해석 내에서만 진행하였다. 아치덱 합성 전 정적재하 모델의 선형 및 비선형 해석 후, 아치덱 합성 전 정적재하 실험체의 실제 실험을 수행하였으며, 해석결과와 비교 분석을 진행하였다. 그림 3.80~그림 3.81은 아치덱 합성 전 정적재하 모델 및 실험체의 중앙부 하중-처짐 그래프이다.

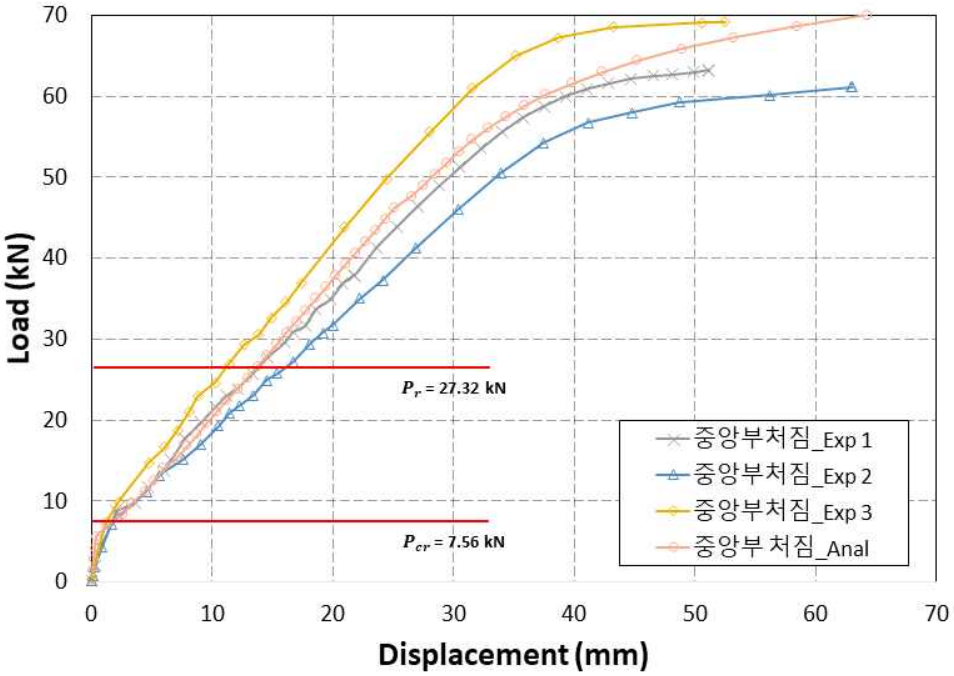


그림 3.80 아치덱 합성 전 정적재하 모델 및 모든 실험체의 중앙부 하중-처짐

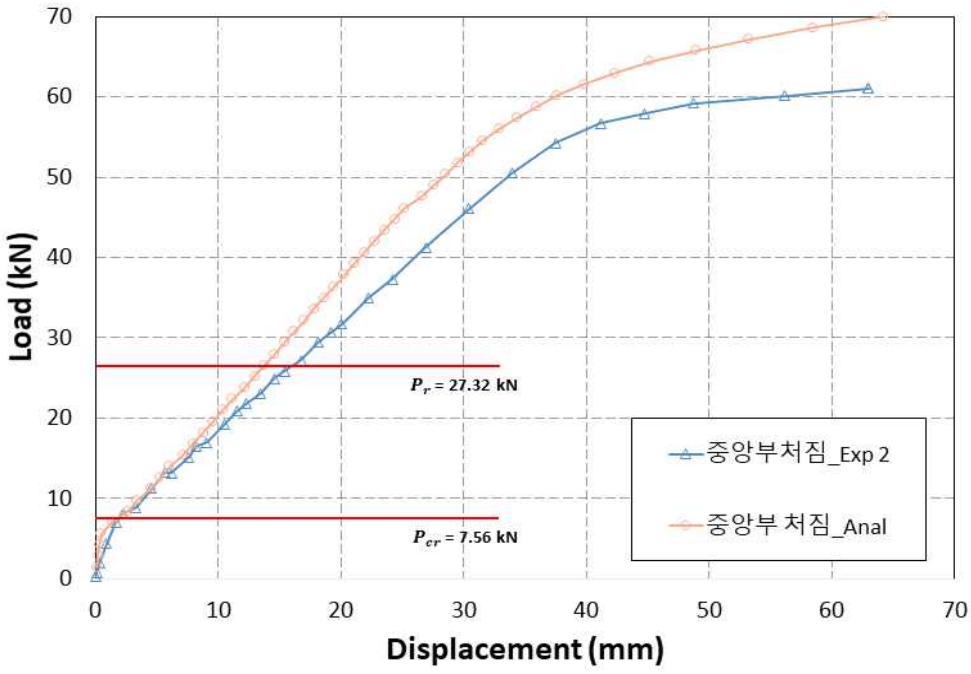


그림 3.81 아치덱 합성 전 정적재하 모델 및 실험체의 중앙부 하중-처짐

그림 3.81에서 보는 바와 같이, 실험결과와 해석결과 그래프는 일치하는 경향을 보이며, 균열하중($P_{cr} = 7.56\,kN$)과 설계극한하중($P_r = 27.32\,kN$)이 있는 5 kN~45 kN 구간에서 실험치와 해석치 모두 선형적이며 안정적인 거동을 보인다. 20 kN 이후 구간에서도 하중 증가에 따라 중심부 처짐도 일정하게 증가하는 선형적이며 안정적인 거동을 보인다. 실험체 및 해석모델의 선형적이며 안정적인 구조거동은 설계극한하중($P_r = 27.32\,kN$) 구간까지 유지된다.

약 45 kN 부터 하중 증가에 비해 처짐의 증가량이 더 커지는 비선형적인 거동을 보이나, 처짐의 증가량이 급격하게 증가하지는 않는다. 이로써 아치텍 합성 전 정적재하 모델이 설계극한하중($P_r = 27.32\,kN$) 이후에도 안정적인 거동을 한다고 판단되며 45 kN의 값은 한하중($P_r = 27.32\,kN$)을 약 40% 상회하는 하중이다. 실험의 경우, 모든 실험체(3개의 실험체)가 약 50 kN 부터 하중 증가에 비해 처짐의 증가량이 더 커지는 비선형 거동을 보인다. 실험결과로 아치텍 합성 전 정적재하 실험체가 해석결과와 비슷한 구조거동을 한다고 판단되며, 특히 그림 3.80에서 보는바와 같이 1번 실험체는 해석과 거의 동일시 되는 결과를 보인다. 3번 실험체의 경우 약 70 kN의 하중까지 버티며 해석보다 상향된 구조거동을 보인다. 이는 해석의 경우, 콘크리트, 인장철근. 전단철근 등 모델의 모든 물성치를 정확한 값으로 적용하지만, 실제 실험체의 물성치는 해석에서 적용한 설계강도와 달리, 안전측의 설계로 상향 적용되기 때문이라 판단된다.

② 아치텍 합성 후 펀칭전단 해석

상기의 (3) 해석결과에서 아치텍 합성 후 펀칭전단 모델의 선형 및 비선형 결과에 대한 분석을 해석 내에서만 진행하였다. 아치텍 합성 후 펀칭전단 모델의 선형 및 비선형 해석 후, 아치텍 합성 후 펀칭전단 실험체의 실제 실험을 수행하였으며, 해석결과와 비교 분석을 진행하였다. 그림 3.82는 아치텍 합성 후 펀칭전단 모델 및 실험체의 중앙부 하중-처짐 그래프이다.

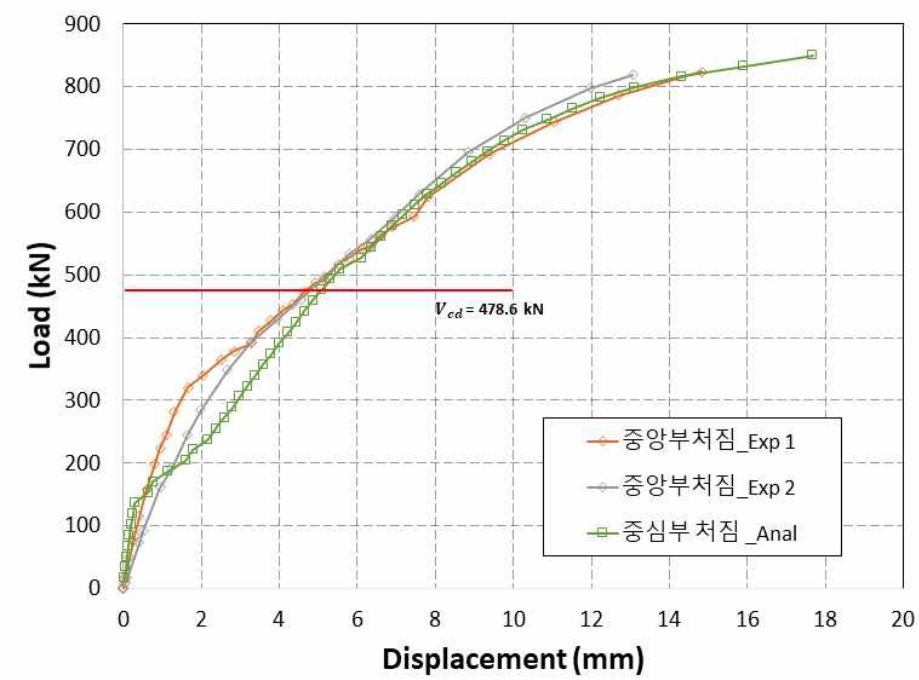


그림 3.82 아치텍 합성 후 펀칭전단 중앙부 하중-처짐

그림 3.82에서 보는 바와 같이, 실험결과와 해석결과 그래프의 형상은 일치하는 경향을 보였으며, $V_{cd} = 478.6\,kN$ 이 있는 구간에서 실험치와 해석치 모두 안정적인 거동을 보인다. 약 700 kN 이후, 하중의 증가에 비해 처짐의 증가량이 더 커졌으며, 이와 같은 비선형 거동은 800 kN까지 보인다. 이러한 해석 결과와 실험체의 실제 실험에서 확인할 수 있듯이, 해석모델과 실험체의 중앙부 하부에서 균열은 있지만 안정적인 거동을 하는 것이라 판단된다.

③ 아치덱 합성 후 정적재하 해석

상기의 (3) 해석결과에서 아치덱 합성 후 정적재하 모델의 선형 및 비선형 결과에 대한 분석을 해석 내에서만 진행하였다. 아치덱 합성 후 정적재하 모델의 선형 및 비선형 해석 후, 아치덱 합성 후 정적재하 실험체의 실제 실험을 수행하였으며, 해석결과와 비교 분석을 진행하였다. 그림 3.83은 아치덱 합성 후 정적재하 중앙부 하중-처짐 그래프이다.

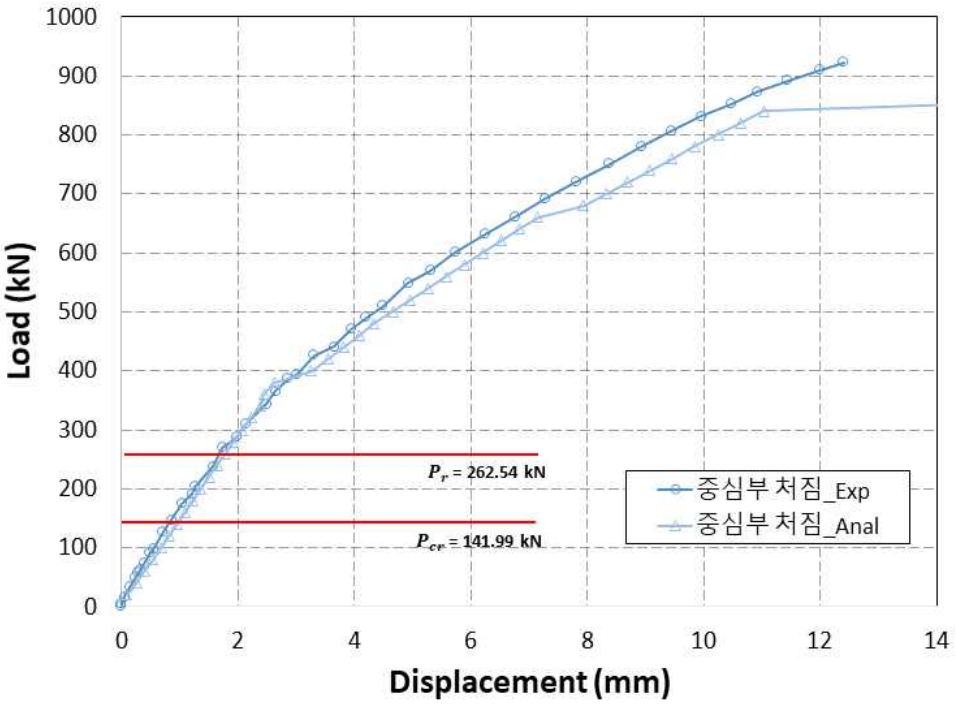


그림 3.83 아치덱 합성 후 정적재하 중심부 Load-Displacement

그림 3.83에서 보는 바와 같이 실험결과와 해석결과의 그래프 형상은 일치하는 경향을 보이며, 균열하중($P_{cr} = 141.99\,kN$)가 있는 지점에서 실험치와 해석치 모두 선형적이며 안정적인 거동을 보인다. 또한, 설계극한하중($P_r = 262.54\,kN$) 있는 200 kN~400 kN 구간에서도 하중의 증가에 따라 처짐도 일정하게 증가하는 안정적인 구조거동을 보인다.

실제 실험체와 해석모델의 구조거동 그래프 경향은 약 800 kN의 하중까지 그래프상에 동일시되는 모습을 보이며, 재하량이 약 800 kN 된 후, 해석 모델은 하중 증가에 비해 처짐의 증가량이 더 커지나, 실제 실험체는 약 900 kN의 하중까지 하중 증가에 따라 처짐의 증가도 일정한 안정적인 구조거동을 보였다. 이는 해석의 경우, 콘크리트, 인장철근. 전단철근 등 모델의 모든 물성치를 정확한 값으로 적용하지만, 실제 실험체의 물성치는 해석에서 적용한 설계강도와 달리, 안전측의 설계로 상향 적용되기 때문이라 판단된다.

(5) 결 론

아치덱 합성 전 정적재하, 아치덱 합성 후 펀칭전단, 아치덱 합성 후 정적재하 선형 및 비선형 해석을 통해 아치덱을 활용한 바다판의 구조 성능평가를 해석과 실험차원에서 진행하였다. 구조 성능평가에는 선형거동과 비선형거동 및 재하량에 따른 처짐과 균열을 비교 분석하였다. 상기의 3가지 해석모델 모두 실험과 동일한 조건 하에서 해석을 진행한 결과, 구조적으로 안정적인 거동을 한다는 것을 확인하였으며, 실험체 및 모델의 균열은 하중이 재하되는 위치의 하부에서 콘크리트 인장으로 인하여 발생하였다.

콘크리트의 인장으로 인하여 균열이 발생하고, 이후 추가적인 하중 재하가 있었음에도, 하중은 철근의 인장강도에 미치지 못하였다. 이로써, 아치덱 합성 전 정적재하, 아치덱 합성 후 펀칭전단, 아치덱 합성 후 정적재하 3가지, 모든 모델에서 구조적으로 안정적인 거동을 하는 것으로 판단하였다.

위 3가지 해석연구를 토대로 2차년도 해석연구에서는 PSC-I 단일거더와 거더 위에 Slab를 실제 실험과 동일하게 모델링하였다. 모델링이 완료된 후, 모델링한 Slab 위에 하중을 2 지점으로 등분포하중으로 재하하였으며, 해석모델의 선형 및 비선형해석을 진행하고 구조 성능평가를 수행하였다. PSC-I 단일거더의 구조 성능평가를 위한 선형 및 비선형해석은 실제 실험과 동일하게 적용 및 진행하였으며, 1차년도 아치덱 합성 전 정적재하, 아치덱 합성 후 펀칭전단, 아치덱 합성 후 정적재하 선형 및 비선형 해석과 2차년도 PSC-I 단일거더의 선형 및 비선형 해석의 데이터를 기반으로 추가해석을 진행하였다.

추가로 진행한 선형 및 비선형해석은 1차년도에 진행한 아치덱과 슬래브를 PSC-I 거더에 추가적으로 접목시켜 수행하였다. 추가로 진행한 해석은 PSC-I 단일거더 3개를 일렬로 놓은 3주형 거더 위에 2개의 데크와 슬래브를 적용시켜 하중에 따른 데크 및 거더의 구조거동에 관한 선형 및 비선형 해석을 수행하였다. 해석 수행 후, 아치덱 하부, 중심거더, 끝거더(제 1거더 또는 제 3거더)의 각 지점별 재하량에 따른 처짐과 구조적인 거동을 보고, 안정적인 거동을 하는지 판단하였다.

3.3 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가

3.3.1 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 실험

(1) 개 요

전 세계적으로 다양한 형식의 교량이 건설되어 공용되고 있으며, 현재도 보다 경제적이고, 효율적인 교량 건설을 위해 기존의 교량형식들을 개선, 발전시키려는 노력이 끊임없이 진행되고 있다. 특히 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 구조를 적용한 거더 형식의 교량은 경제성과 안전성이 우수한 형식으로 국내뿐 아니라 전 세계에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 교량 공법 중 하나이다. PSC 형식은 철근콘크리트와 강연선으로 구성되며 재료 특성상 강재(Steel)가 많이 소요되는 강교와 비교하여 우수한 경제성을 확보하고 있다. 또한 PSC-I 형의 거더는 단면형상이 동일재료 수량에서 하중에 저항하는 거더의 단면 2차 모멘트를 최대화 할 수 있는 우수한 형상이며 최근에는 기존의 PSC 거더에서 2차 긴장 및 강판보강 등의 공정을 통해 개량형 PSC 공법인 IPC 공법을 도입하는 등 장경간화를 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

기존 PSC 교량은 거더 상부에 동바리 및 거푸집을 현장에서 설치하여 바닥판을 시공하는 공법으로 진행되어 비교적 장기간의 시공시간이 소요됨에 따라 공사기간 단축에 어려움을 겪었으며, 시공과정에서 많은 작업자가 거더 상부에 올라가 직접 시공하는 방식으로 인하여 현장안전성 문제에 취약함을 보였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 거더 가설 후 공장에서 제작된 프리캐스트(Precast) 바닥판을 교량에 적용함으로써 급속시공, 인건비 절감효과와 품질확보 등 많은 장점을 확보할 수 있다. 이러한 기술의 개발 이후 여러 형식의 프리캐스트 관련 연구가 진행되고 있으며 현재 다양한 형태의 프리캐스트 바닥판이 개발되었다.

수많은 구조형태 중 하나인 아치(Arch)형상은 구조적 안전성을 바탕으로 고대 로마시대부터 수많은 건축물에 사용되어진 건축기법이다. 아치형상의 구조물은 일반적인 플랫(Flat)형상의 구조물에 비하여 하중의 균등한 분산으로 인해 휨모멘트 및 전단력의 부담이 적어 구조물의 내력을 획기적으로 증대시킬 수 있는 장점이 있으며, 이러한 구조적 장점을 바탕으로 전 세계적으로 장경간의 교량이나 고층 구조물 등의 건축기법으로 채택되어지고 있다. 연구결과를 토대로 프리캐스트 아치 데크와 PSC-I 거더를 접목시켜 개발한다면, 교량의 장경간화, 구조성능의 개선 등에 획기적인 발전을 기대할 수 있을 것이라고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 선행연구에서 검증된 철근콘크리트 아치 데크의 연구내용을 바탕으로 아치 데크를 접목시킬 수 있는 PSC-I형 거더의 연구를 수행하였다. 이를 위해 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 휨 거동 실험을 통해 구조적 성능평가를 수행 및 분석하였다.

(2) 실험체 제원

실험을 위해 아치덱 거더 실험체를 제작하였다. 거더 실험체는 철근콘크리트로 구성된 실험체로써, 제원은 길이 60m, 형고 2.5m, 폭 1m이다. 거더 실험체 제작 후, 상부에 총 길이 60m, 높이 240mm, 폭 2.7m의 현장타설 바닥판으로 구성되어 있다. 거더는 총 5개의 세그먼트를 일렬로 배열한 후에 각 세그먼트 분절부에 에폭시를 도포하고 긴장력을 도입하여 접합하였다. 세그먼트 접합 후에 바닥판 거푸집을 설치하고 바닥판 레미콘을 타설하여 실험체 제작을 완료하였다. 실험체의 재료 물성치는 거더 60MPa, 바닥판 30MPa의 설계강도를 가지는 콘크리트와 항복응력 400MPa을 가지는 SD400 철근과 SWPC7B등급의 강연선을 사용하였다. 아치덱 거더 실험체 상세를 다음의 그림 3.85~3.88에 상세히 나타내었다.

표 3.29 아치덱 거더 휨 거동 실험 개요

구 분	아치덱 거더 휨 거동 실험	
재료특성	거더 콘크리트	f_{ck} = 60MPa / f_{cu} = 64.9MPa
	상부 현장타설 콘크리트	f_{ck} = 30MPa / f_{cu} = 38.5MPa
	철근 (SD 400)	f_y = 400 MPa
	강연선 (SWPC7B)	f_{pu} = 2,400 MPa / 7연선 15.2 mm
제원	거더	길이 60m / 폭 1.0m / 형고 2.59m
	바닥판	길이 60m / 폭 2.7m / 높이 240mm
경계조건	힌지 - 롤러	
하중재하	정적재하실험 / 5000kN Actuator x 2 / 900 x 900 mm^2	

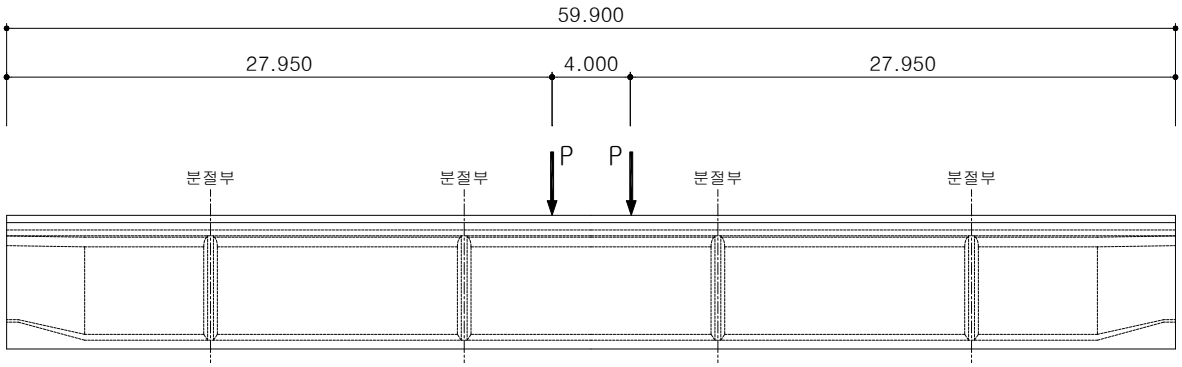


그림 3.84 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 하중재하도

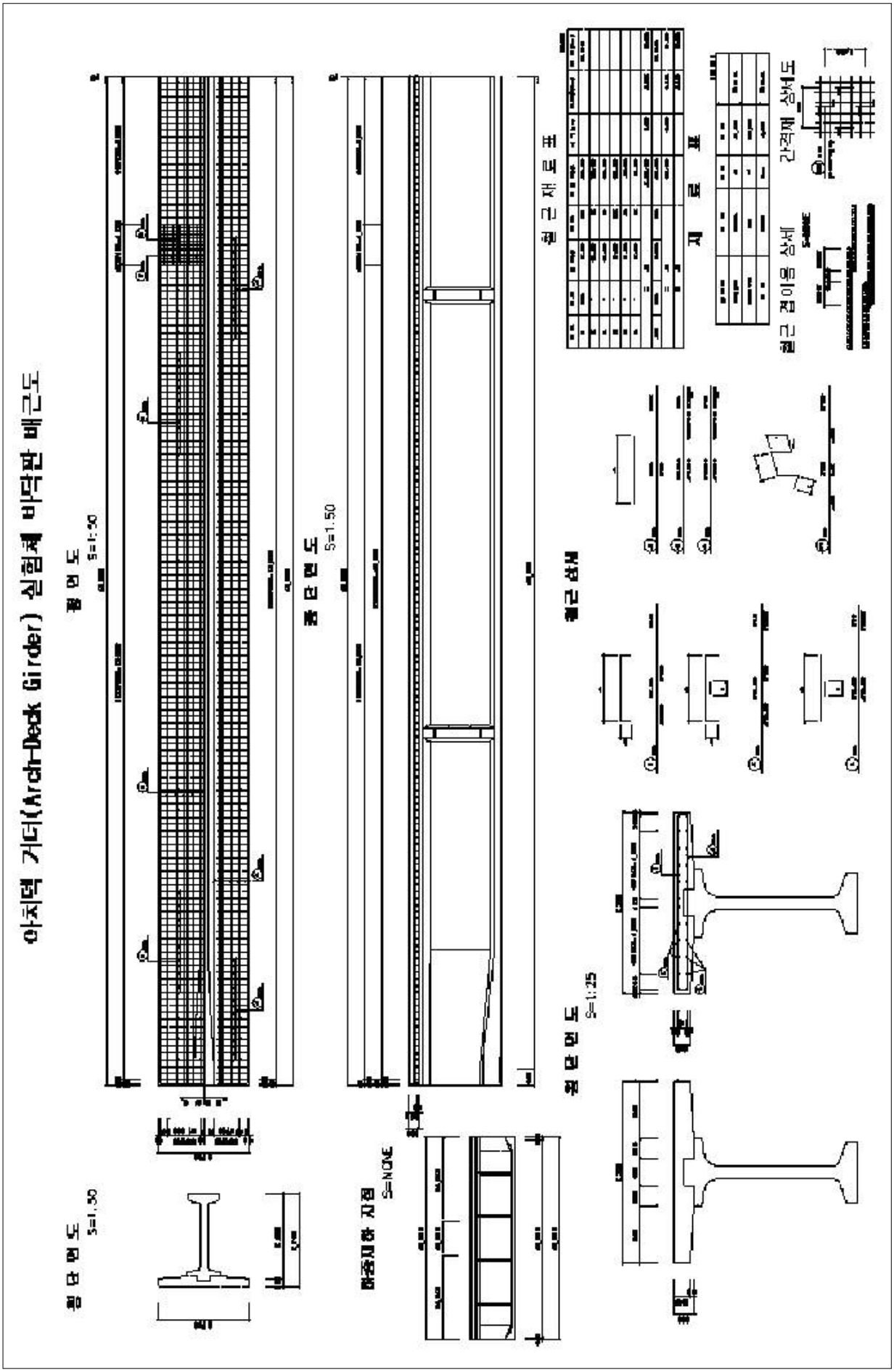


그림 3.85 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 바닥판도

그림 3.86 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 강연선 배치도 (1)

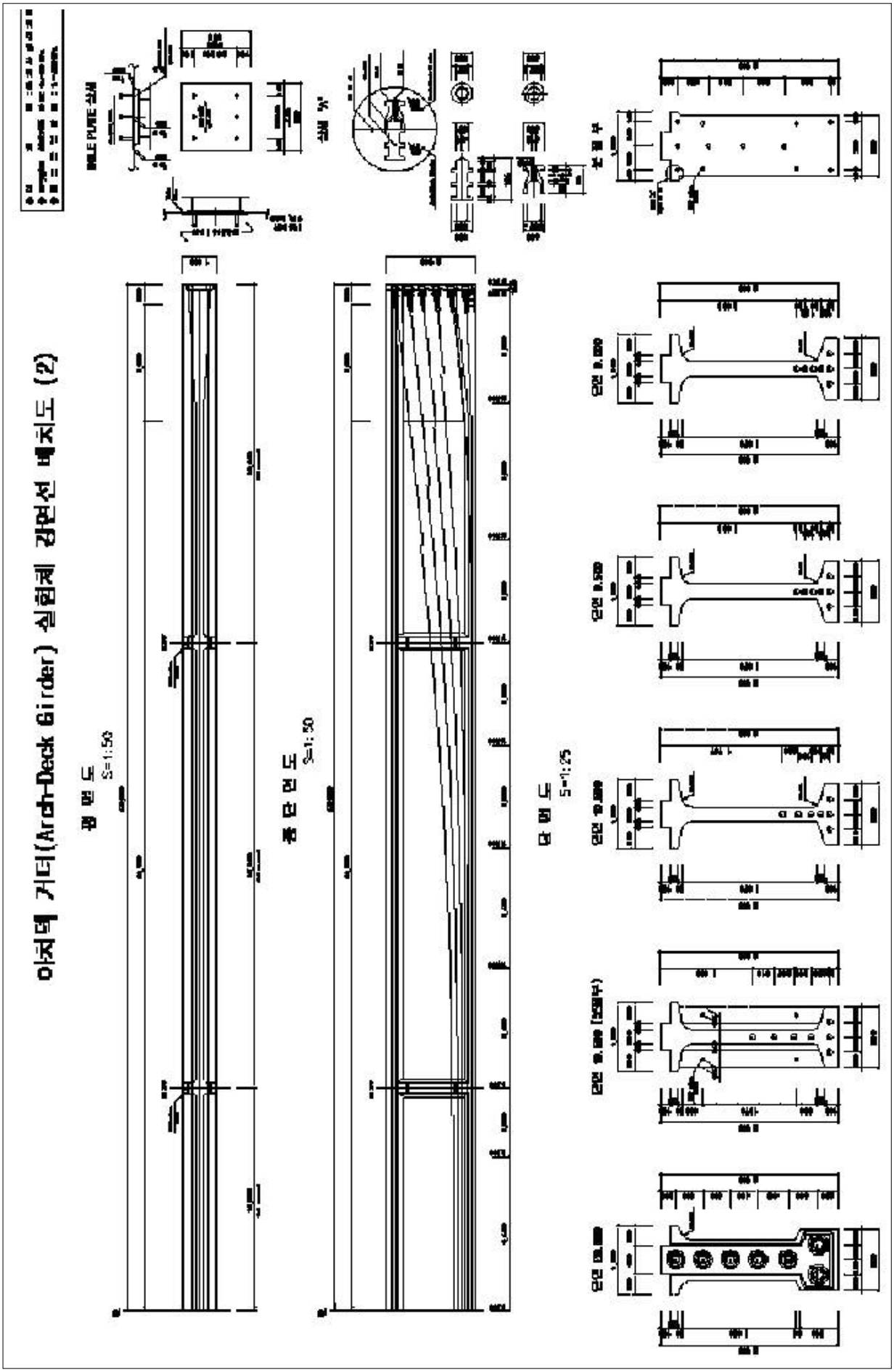


그림 3.87 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 강연선 배치도 (2)

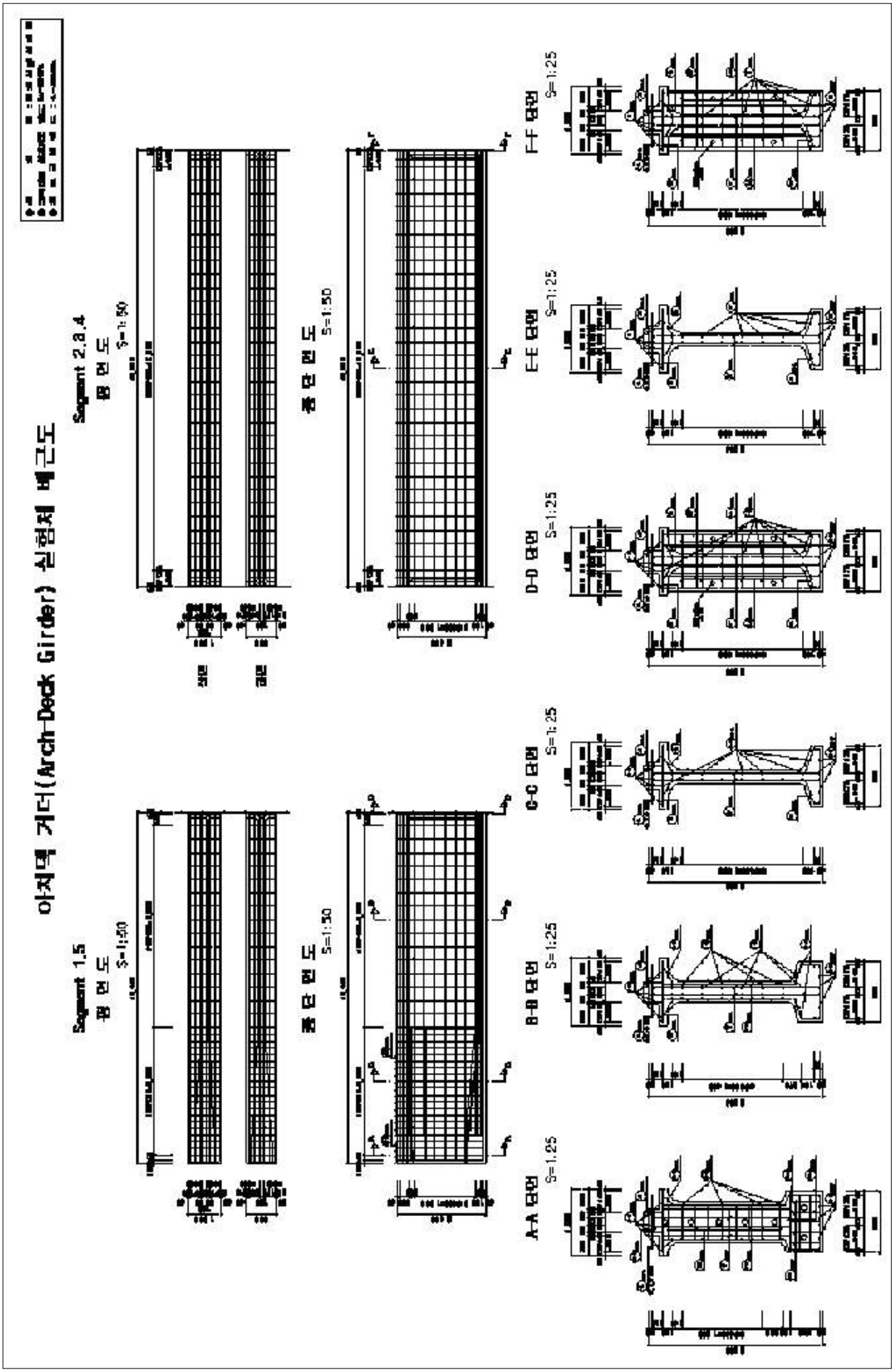


그림 3.88 아치덱 거더(Arch-Deck Girder) 실험체 배근도

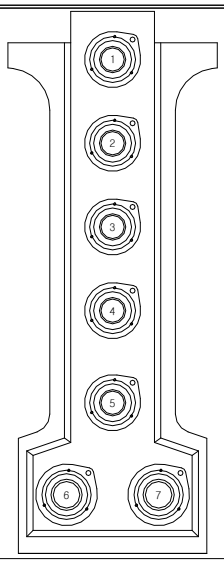
(3) 실험체 설계 및 제작

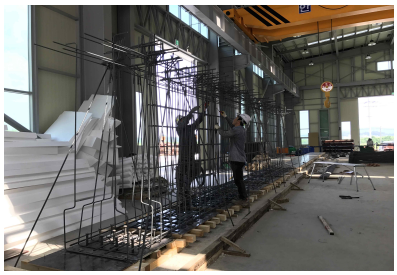
실험체의 제작은 일반적인 현장에서 제작하는 시공순서와 동일한 방식으로 제작하였다. 강재거푸집을 제작하여 철근 조립 후 콘크리트를 타설하였으며, 타설 이후 실험체의 조기 강도발현을 위해 증기양생을 실시하였다. 거더는 5개의 세그먼트를 제작한 후 각 세그먼트 분절부에 에폭시를 도포하고 긴장력을 도입하여 접합하였다. 거더 제작 후, 상부에 바닥판 레미콘을 타설하여 아치텍 거더 실험체 제작을 완료하였다. 실험체 제작과정에서 각각의 세그먼트로 조립된 아치텍 거더는 강연선의 PS 도입력에 의해 솟음이 발생하였다. 최대 솟음은 약 200 mm정도가 발생하였다. 이후 상부 바닥판 타설 후 아치텍 거더의 솟음량은 일정부분 상쇄되었다. 거더의 콘크리트 설계기준강도는 60 MPa, 바닥판은 30MPa로 제작되었으며, 실험체의 콘크리트 공시체 압축강도를 측정한 결과, 거더 67.3 MPa, 바닥판 38MPa로 나타나 타설된 콘크리트 모두 설계기준강도를 상회하는 결과를 나타내었다. 또한 사용된 철근은 KS D 3504 항복강도 400 MPa의 이형철근을 사용하였으며, KS D 7002 7연선의 인장강도 2,400MPa급 고강도 강연선을 사용하였다. 위의 실험체 제작과정과 사용된 재료의 특성과 긴장력 도입순서를 그림 3.89와 표 3.30~31에 각각 정리하였다.

표 3.30 재료 특성

구 분	콘크리트 압축강도 (MPa)		철근의 항복강도 (MPa) (KS D 3504)	강연선의 항복강도 (MPa) (KS D 7002)
	설계기준강도	실험압축강도		
거더	60	67.3	400	2,400
바닥판	30	38		

표 3.31 거더의 긴장력과 긴장순서

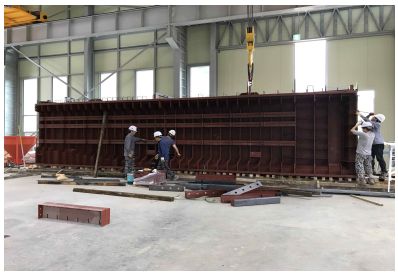
순서	긴장순서	정착구 유형	긴장력		긴장력 도입순서
			설계치 (kN)	실제긴장률 (%)	
STEP 1	2	15.2mm -10T	2,405	103.5	
STEP 2	3		2,405	103.5	
STEP 3	4		2,405	104.4	
STEP 4	5		2,405	104.4	
STEP 5	1	15.2mm -13T	3,127	102.3	
STEP 6	6		3,127	106.1	
STEP 7	7		3,127	106.4	



(a) 철근 조립



(b) 쉬스관 및 정착구 설치



(c) 거푸집 설치



(d) 콘크리트 타설



(e) 증기양생



(f) 세그먼트 완성



(g) 조립대 설치



(h) 세그먼트 거치

(i) 에폭시 도포

(j) 세그먼트 조립 및 강연선 긴장

(k) 그라우팅

(l) 거더 제작 완료

(m) 바닥판 철근 조립

(n) 콘크리트 타설

(o) 실험체 제작 완료

그림 3.89 실험체 제작 과정

(4) 실험 방법

정적 휨 거동 실험 하중재하면에 900 mm x 900 m 크기의 고무패드를 설치하였으며, 그 위에 강재프레임을 설치해 고무패드 위에 거치시켰다. 이후, 최대 용량 5,000 kN을 갖는 정적 유압가력기 (Static Actuators)로 실험체의 중앙부에서 2 m씩 이격하여 가력하였다. 실험의 안전을 위해 전도방지 강재프레임을 설치하였다. 실험체 설치과정과 이를 도식화한 그림을 그림 3.90~그림 3.91에 각각 나타내었다.

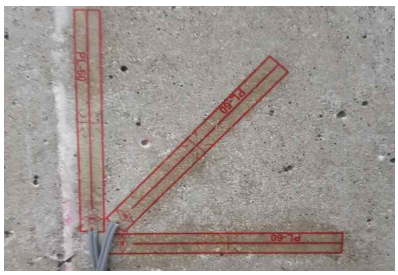
하중재하 방법은 총 3단계로 나누어 수행하였으며, 초기 미소변위 구간에서는 하중제어 방식을, 초기균열이 발생한 이후부터는 변위제어방식을 적용하여 수행하였다. 1단계 구간인 0 ~ 1200 kN에서는 20 kN/min의 속도로 하중재하를 실시하였고, 2단계 구간에서는 1200 ~ 0 kN까지 하중을 제거하였다. 3단계에서는 다시 0 ~ 1200 kN으로 동일한 속도로 하중을 재하하였고, 4단계에서는 1200 ~ 2100 kN까지는 2 mm/min의 속도로, 마지막 5단계에서는 2100 ~ 2500 kN 구간에서 4 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다. 실험에서는 가력장비의 유압이 급감하는 시기까지 정적하중을 재하하였으며, 실험상의 안전을 고려하여 실험체의 파괴단계까지 정적하중을 재하하지는 않았다. 또한 균열체크는 사용하중($P_{service}$) 724.87 kN 부근인 700 ~ 1500 kN구간에서 매 100 kN마다, 1500~ 2100 kN에서는 매 200 kN마다 균열체크를 수행하였으며, 마지막 5단계에서는 실험상 안전을 위해 균열체크를 중단하였다. 위의 단계별 하중재하 방법과 균열측정 단계를 표 3.32에 나타내었다.



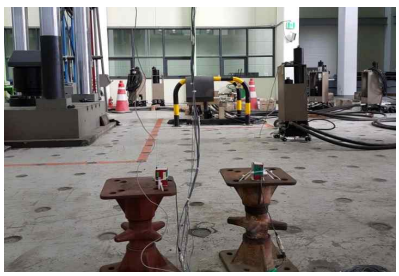
(a) 철근 게이지 설치



(b) 실험체 거치



(c) 콘크리트 게이지 설치



(d) 하부 LVDT 설치



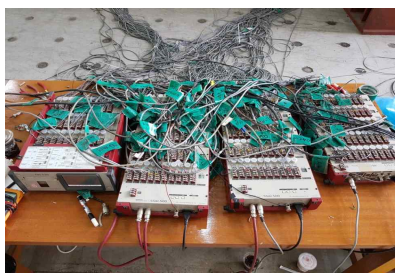
(e) 측면 LVDT 설치



(f) 가력 프레임 설치



(g) 하중 재하 전경



(h) 데이터 로거



(i) 데이터 수집 및 분석

그림 3.90 실험 전경

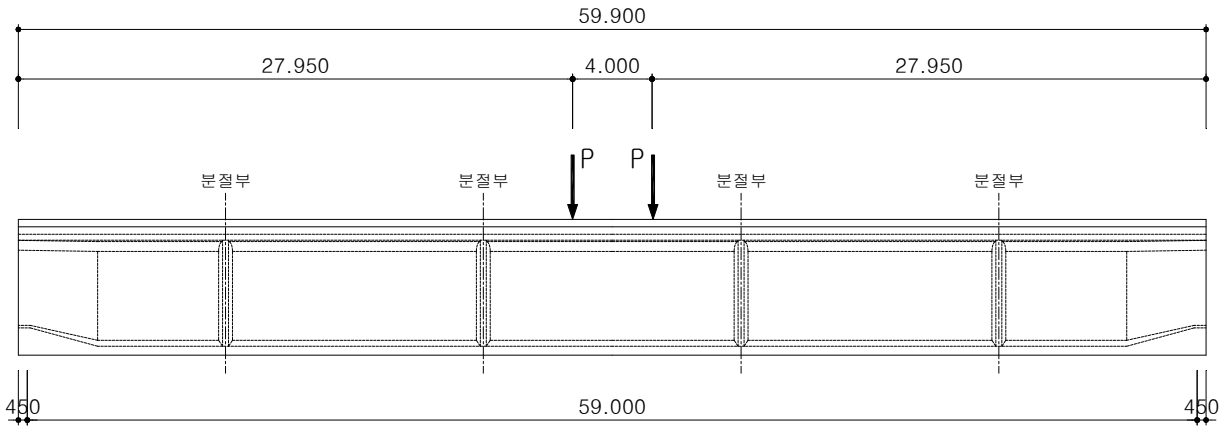


그림 3.91 실험 개념도

표 3.32 정적하중재하 실험방법

구 분	실험 단계 (kN)	제어방식	하중재하 속도	균열체크
1단계	0 ~ 1200	하중제어	20 kN/min	100 kN 마다 (700 kN 이후)
2단계	1200 ~ 0			
3단계	0 ~ 1200			
4단계	1200 ~ 1500	변위제어	2 mm/min	100 kN 마다
	1500 ~ 2100			200 kN 마다
5단계	1200 ~2500		4 mm/min	-

(5) 계측방법

① 계측장비

실험에 사용된 데이터 로거는 일본 Tokyo Sokki 제품의 계측 장비인 TDS-303(그림 3.92)을 사용하였다. TDS-303은 strain gauge를 비롯하여 직류전압이나 열전대, 백금측온저항체 등의 다점의 자동절환측정을 목적으로 한 data logger 이다. 측점점수는 본체만으로 최대 30점, 외부 스위치박스를 병용해서 최대 1000점까지의 측정을 할 수 있으며, 본 성능평가에서는 50채널의 연결채널 2개와 30채널의 연결채널 1개를 사용하여 총 170여 점의 측점을 수행하였다. 또한, TDS-303은 A/D 변환부의 새로운 삼중 적분방식을 한층 더 개량한 것으로 1점당 0.06초의 고속, 고정도, 고안정을 실현하고 있다. 조작방법은 터치 판넬에 의한 메뉴형식이기 때문에 누구라도 간단하게 사용할 수 있다. 측정한 data는 고속 print를 비롯하여, 데이터 메모리, 플로피디스크 등으로 기록하거나, GP-IB, RS-232C를 연결하여 외부 computer로 전송, 자유롭게 사용자가 필요한 데이터를 얻을 수 있다.

- 외형치수 : 320(W)×130(H)×440(D)mm
- 전원 : AC85-250V 50/60Hz 90VA MAX

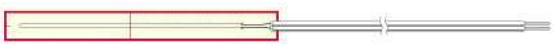


그림 3.92 정적 변형률 측정장비(TDS-303)

② 계측센서

㉮ P형 전기저항식 변형률게이지

P형 변형률게이지는 콘크리트, 모르타르 등의 표면 스트레인의 거동이나 정탄성계수의 측정에 사용된다. 게이지의 베이스가 견고하고 투명하기 때문에 접착위치의 좋고 나쁨을 판별하기 쉽고 야외에서의 계측에도 아주 편리하다.



PL-60-11-5L

그림 3.93 P형 전기저항식 변형률게이지

표 3.33 P형 변형률게이지의 제원

주된 대상재료	콘크리트, 몰탈	베이스재료	폴리에스텔
사용온도범위	-20～80℃	저항소자	Cu-Ni선
온도보상범위	10～80℃	실온에 있어서의 strain 한계	2% (20000×10-6)
주된 적용접착제	CN-E, RP-2	실온에 있어서의 피로한계	1×105 (±1000×10-6)

㉰ F형 전기저항식 변형률게이지

수 미크론의 합금박을 이용하여,베이스에는 두께 약 0.03mm의 절연성이 높은 에폭시 수지를 사용한 게이지로 비닐 리드선을 붙인 게이지이다. 게이지는 리드선 부착 폴리미드 피복선으로 이어져 있다. 게이지 단자의 부착이나 결선이 불필요하기 때문에 작업시간이 단축된다.



FLA-2-11-1L

그림 3.94 F형 전기저항식 변형률게이지

표 3.34 철근게이지의 제원

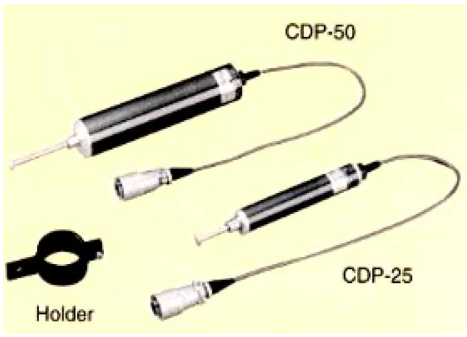
주된 대상재료	금속, 유리, 세라믹	베이스재료	에폭시
사용온도범위	-20～+80℃	저항소자	Cu-Ni박
온도보상범위	+20～+80℃	실온에 있어서의 strain 한계	3% (20000×10-6)
주된 적용접착제	CN, P-2, EB-2	실온에 있어서의 피로한계	1×106 (±1500×10-6)

㉱ CDP형 전기식 변위계 (LVDT : linear variational deformation transducer)

LVDT (linear variational deformation transducer)는 대상 구조물의 처짐, 솟음이나 회전 등의 변위를 측정하는 전기적 변환기 형태를 말하며 실험에 사용된 CDP형식의 LVDT는 취급이 용이하고 안정적인 변위계로서 고정도 측정, 고출력, 뛰어난 응답성으로 정·동적 계측에 널리 사용되고 있다.

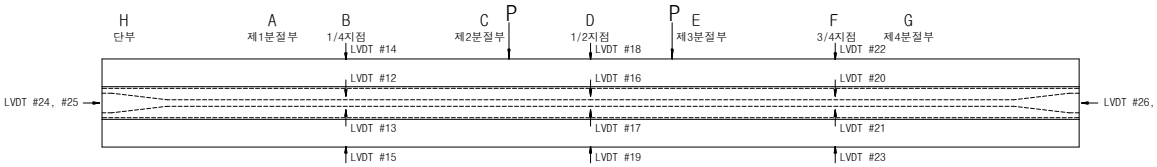
표 3.35 CDP형 전기식 변위계의 형상 및 제원

형식	CDP-50	CDP-100	
용량 (mm)	50	100	
정격출력	5mV/V±0.1%) (10000×10-6±0.1%)		
민감도(1×10-6/mm)	200	100	
비직선성	0.1%RO		
측정력	4.9N	5.4N	
응답주파수(Hz)	6Hz	3Hz	
영점의 온도영향	1×10-6/℃ (0~+40℃)		
허용온도범위	0~+60℃		
입출력 저항	350Ω		
허용인가전압	10V		

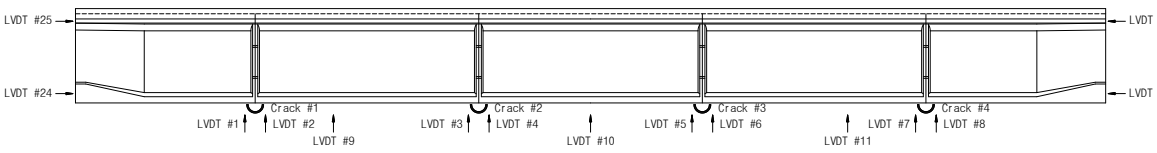


③ 계측 위치

집중하중 재하에 따른 실험체의 휨 거동을 확인하기 위해 실험체 종방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/2 지점(0.5 L)에 LVDT, 철근 및 콘크리트 게이지를 설치하였다. 수직변위를 측정하기 위해 실험체 하면에 와이어 방식의 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였으며, 철근과 콘크리트 변형률을 측정하기 위해 각각 5 mm, 60 mm 전기식 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 부착하였다. 또한 하중재하에 따른 각 분절부의 이격을 확인하기 위해 Ω형 균열 게이지를 분절부에 부착하였다. 추가적으로 실험체의 중요계측 부위 이외에도 실험체의 비틀림 등의 영향을 확인하기 위해 횡방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/2 지점(0.5 L)에 LVDT를 설치하여 휨 거동 이외의 거동을 확인하였다. 이를 나타낸 계측도를 그림 3.95~그림 3.97에 나타내었다.

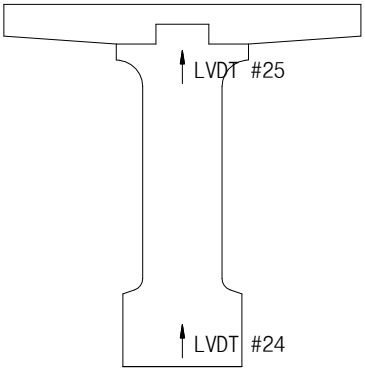


(a) 상부 종단면 변위&균열 계측도

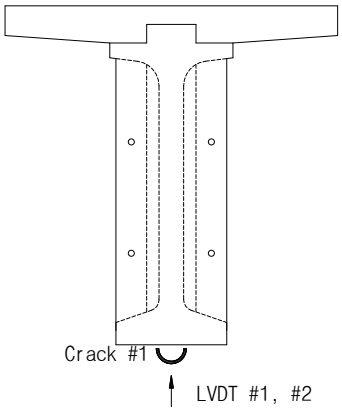


(b) 측면 종단면 변위&균열 계측도

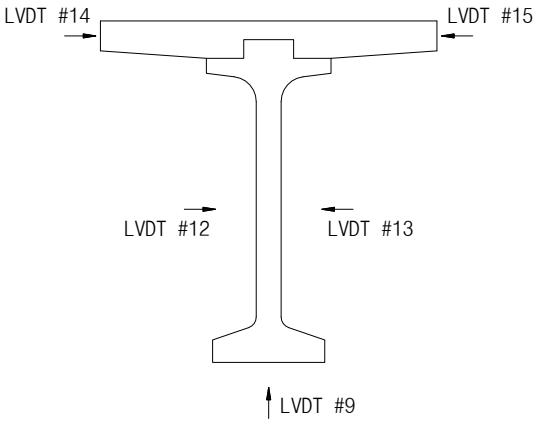
그림 3.95 변위&균열 계측도(계속)



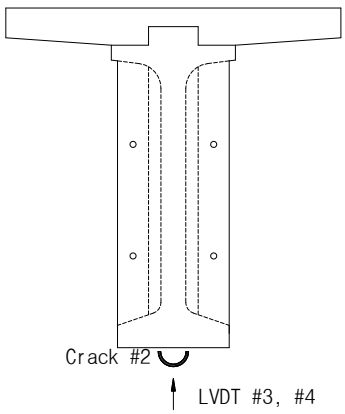
(c) H 단면 변위&균열 계측도



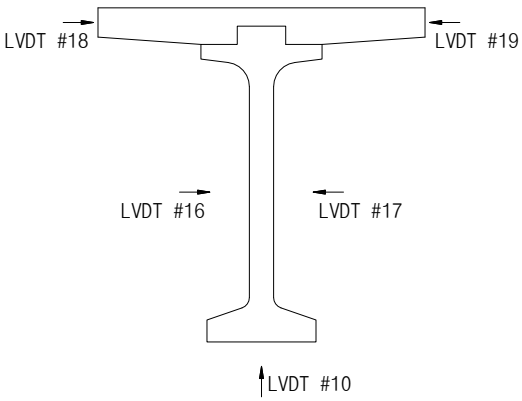
(d) A 단면 변위&균열 계측도



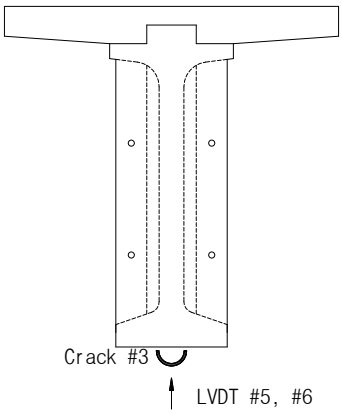
(e) B 단면 변위&균열 계측도



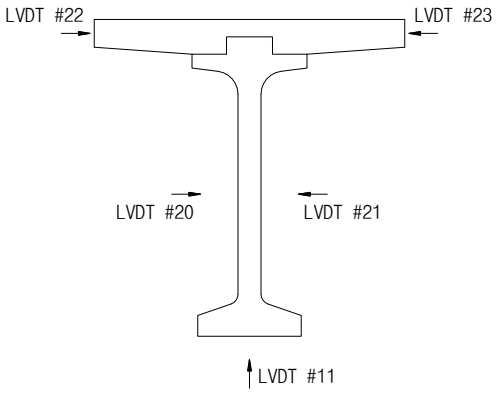
(f) C 단면 변위&균열 계측도



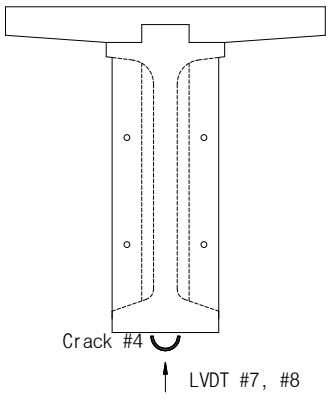
(g) D 단면 변위&균열 계측도



(h) E 단면 변위&균열 계측도

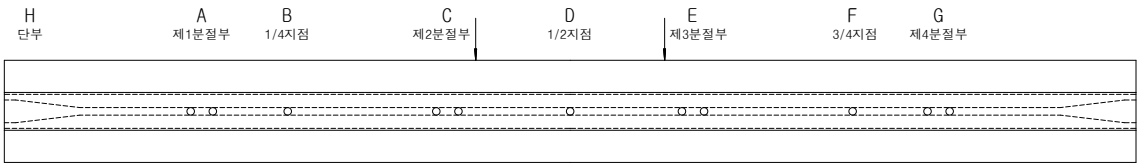


(i) F 단면 변위&균열 계측도

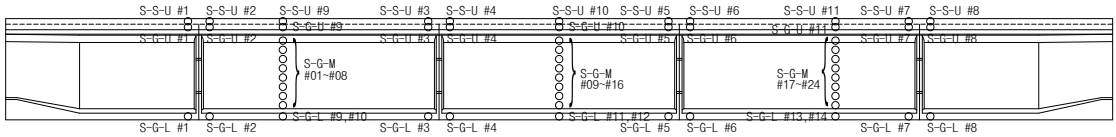


(j) G 단면 변위&균열 계측도

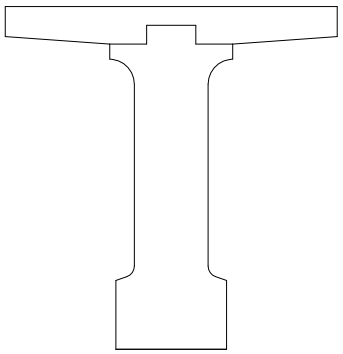
그림 3.95 변위&균열 계측도



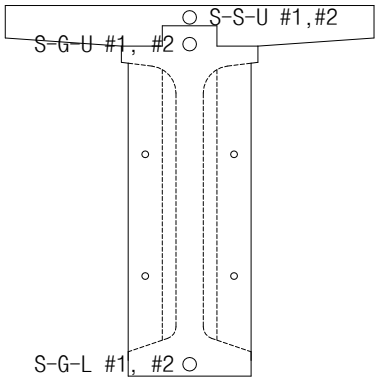
(a) 상부 종단면 철근 계측도



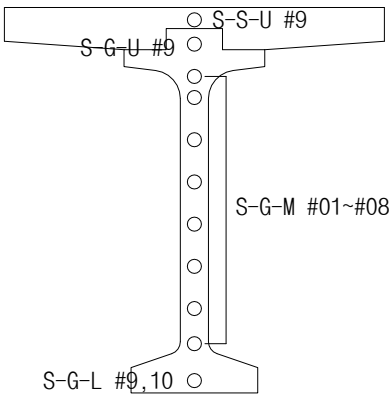
(b) 측면 종단면 철근 계측도



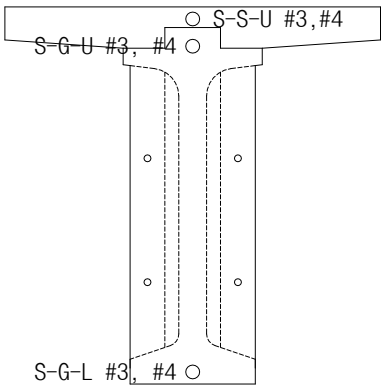
(c) H 단면 철근 계측도



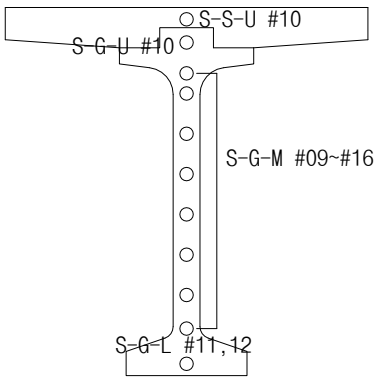
(d) A 단면 철근 계측도



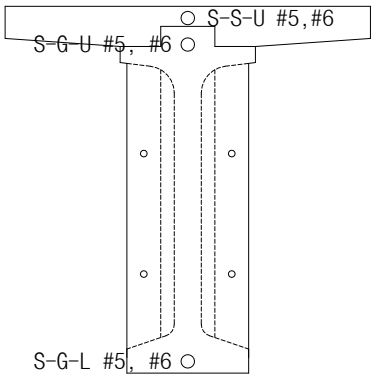
(e) B 단면 철근 계측도



(f) C 단면 철근 계측도

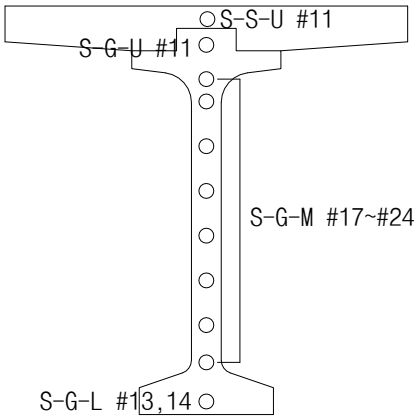


(g) D 단면 철근 계측도

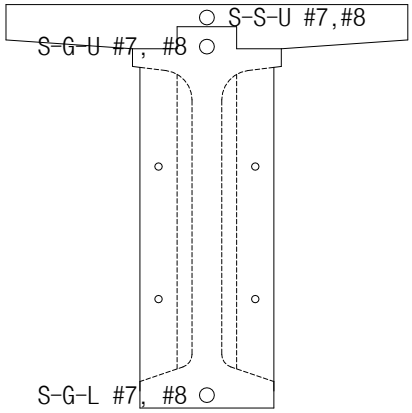


(h) E 단면 철근 계측도

그림 3.96 철근 계측도(계속)

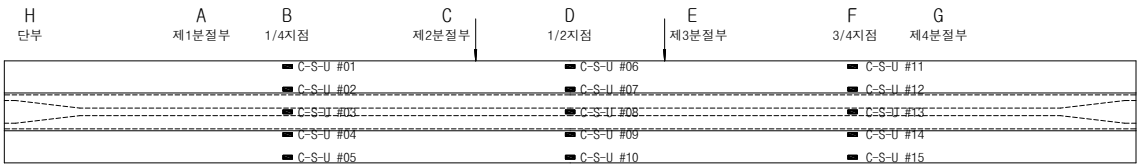


(i) F 단면 철근 계측도

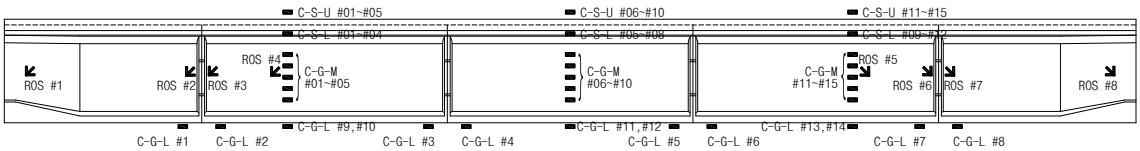


(j) G 단면 철근 계측도

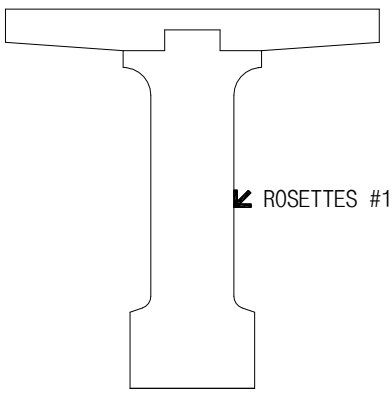
그림 3.96 철근 계측도



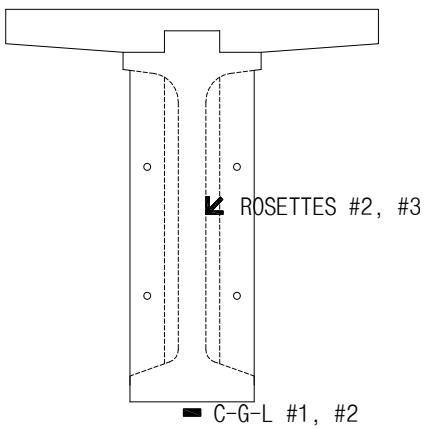
(a) 상부 종단면 콘크리트 계측도



(b) 측면 종단면 콘크리트 계측도

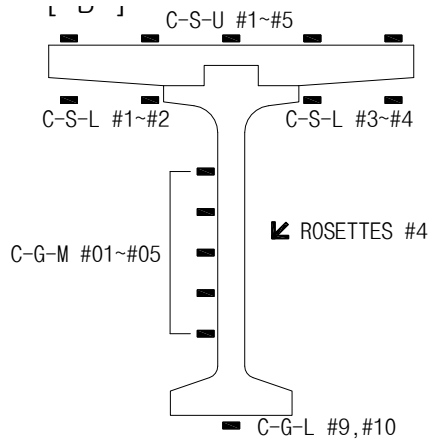


(c) H 단면 콘크리트 계측도

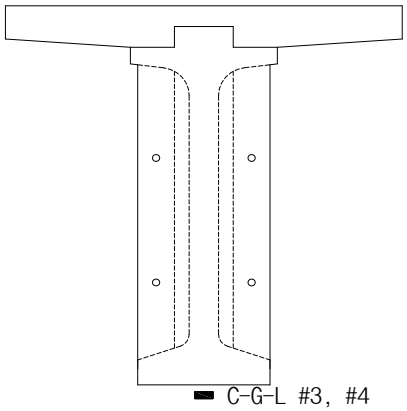


(d) A 단면 콘크리트 계측도

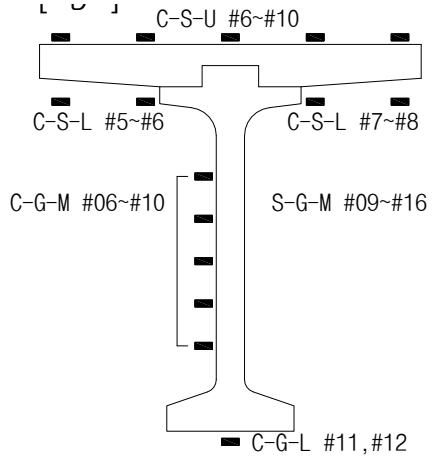
그림 3.97 콘크리트 계측도(계속)



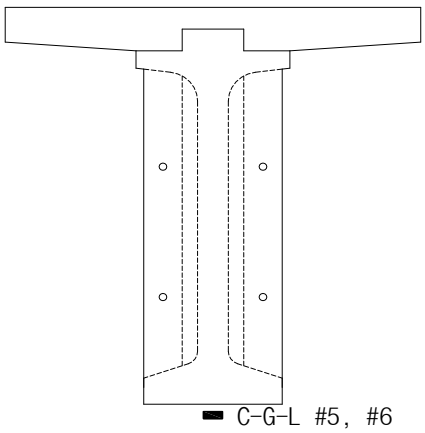
(e) B 단면 콘크리트 계측도



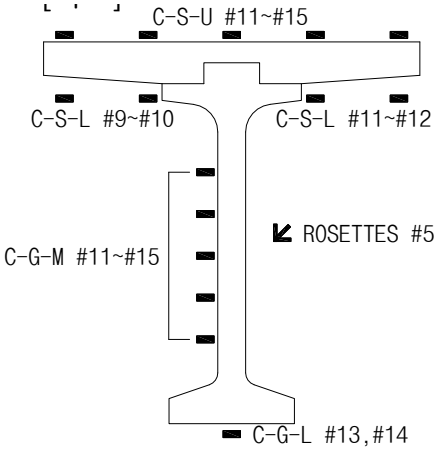
(f) C 단면 콘크리트 계측도



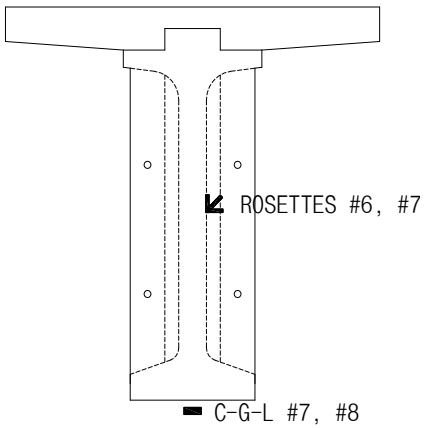
(g) D 단면 콘크리트 계측도



(h) E 단면 콘크리트 계측도



(i) F 단면 콘크리트 계측도



(j) G 단면 콘크리트 계측도

그림 3.97 콘크리트 계측도

(6) 실험 결과

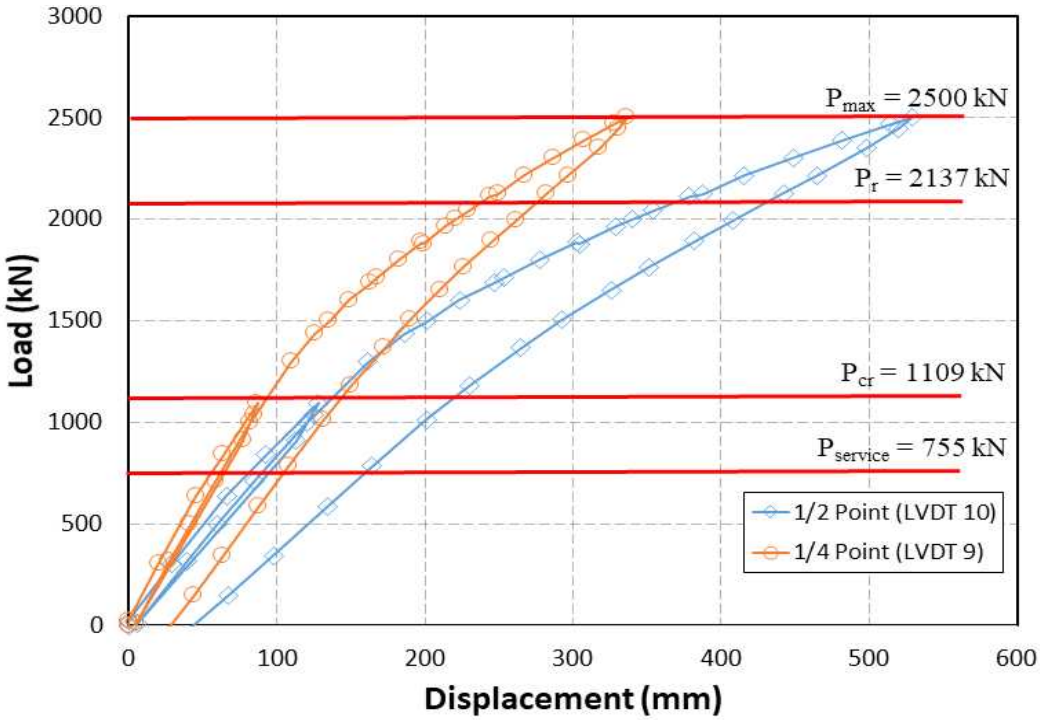
① 하중-변위 관계

실험체의 하중-변위 결과를 표 3.36에 정리하였으며, 1/4 지점(0.25 L), 1/2 지점(0.5 L)의 하중-변위 곡선을 사용하중($P_{service}$)과 설계균열하중(P_{cr}), 설계극한하중(P_r), 최대재하하중($P_{\max}$)과 비교하여 그림 3.98-(a)에 나타내었다. 실험체의 초기균열이 발생하였던 약 1200 kN까지는 선형거동을 보였으며, 하중제거 후에도 잔류처짐은 미미한 것으로 보여 탄성거동을 하는 것으로 나타났다. 1200 kN 이후의 하중단계에서는 처짐이 비교적 급격히 발생하며 비선형거동을 하는 것으로 나타났다. 균열이 발생한 이후, 실험체의 강성이 감소하여 나타나는 자연스러운 현상으로 분석된다. 또한 설계극한하중 이후에 하중을 제거하였을 때 잔류처짐이 최대 50 mm정도 발생하는 것으로 나타났다. 최대 하중인 2500 kN에서 처짐량을 비교하였을 때, 1/4 지점(0.25 L)에서는 약 336 mm, 1/2 지점(0.5 L)에서는 약 529 mm가 발생하으며, 1/4 지점의 처짐량은 최대 처짐인 529 mm에 비하여 약 63 %정도의 수준을 나타내었다. 사용하중($P_{service}$)과 비교하였을 때, 1200 kN까지 하중재하 후 하중제거를 하였음에도 잔류처짐량이 비교적 미미하였기 때문에 사용하중($P_{service}$)단계에서는 충분한 구조성능을 확보하였다고 판단된다. 또한 설계극한하중(P_r)단계에서는 구조물의 소성구간에 진입하였으나, 최대재하하중($P_{\max}$)에서의 처짐량인 529 mm 에 비해 약 70% 수준인 380mm 정도로 나타나 구조성능에는 큰 지장이 없는 것으로 판단되었다.

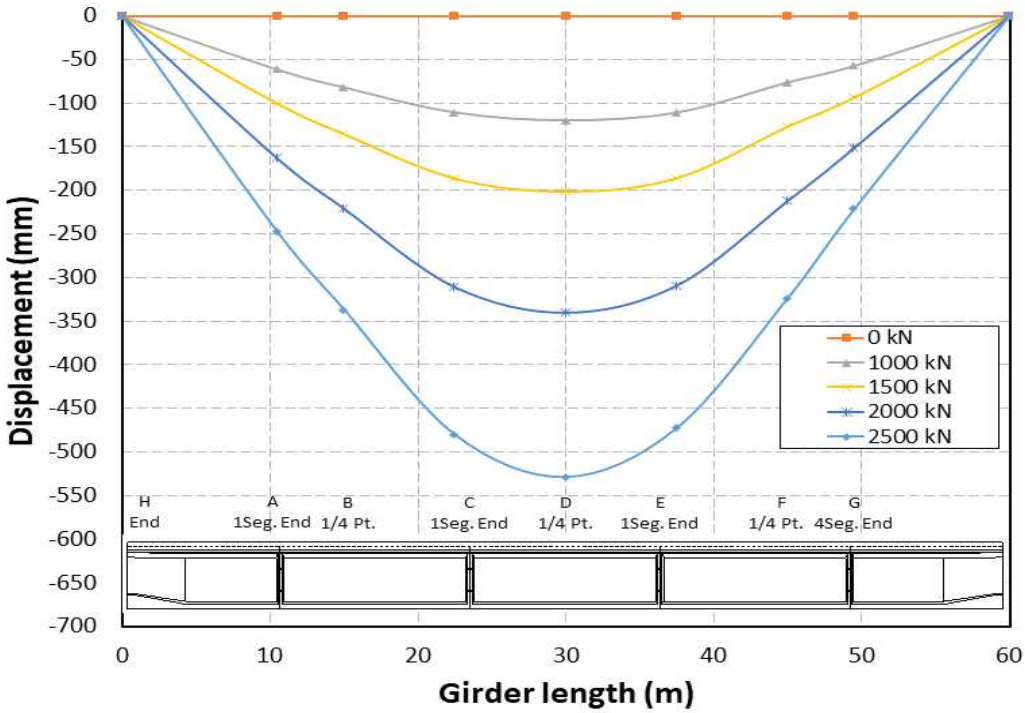
거더의 위치별 하중-변위 관계를 나타낸 그래프를 그림 3.98-(b)에 나타내었다. 거더의 전반적인 처짐현상을 나타내었으며, 중앙부를 기점으로 대칭되는 형상을 나타내는 것으로 보아 어느 한쪽의 치우침 없이 하중재하가 되었으며, 구조물의 반력도 적절히 분배되었다는 것을 알 수 있었다.

표 3.36 아치덱 거더 하중-변위 결과

구 분	하 중 (kN)	변 위 (mm)	
		1/4 지점(0.25 L)	1/2 지점(0.5 L)
아치덱 PSC 거더	0	0	0
	500	42.3	60.5
	1,000	82.1	120.1
	1,200	99.35	145.8
	1,400	120.5	177.5
	1,600	148.45	222.3
	1,800	182.35	277
	2,000	220.5	339.7
	2,200	263.75	410.2
	2,400	310.95	487.4
	2,500	336.7	529.1



(a) 중앙부 단면에서의 하중-변위 곡선



(b) 거더의 위치별 하중-변위 곡선

그림 3.98 하중-변위 곡선

표 3.37 아치덱 거더 설계-실험 데이터 비교

구 분	$P_{service}$ (kN)	P_{cr} (kN)	P_r (kN)	$P_{\max}$ (kN)
설계값	755	1,109	2,137	
실험값	-	1,200	-	2,500

② 하중-변형률 관계

㉮. 철근의 하중-변형률 관계

표 3.38는 변형률 데이터이며, 1/2 지점의 하부, 중앙, 상부 철근의 하중-변형률 곡선을 그림 3.99에 나타내었다. 전반적으로 변위곡선과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 초기균열이 발생한 1,200kN부근에서 기울기의 변화가 있는 것으로 관찰되었으며, 1200 kN에서 하중을 제거하였을 때에도 잔류 변형률이 미미한 것으로 보아 탄성거동을 하는 것으로 나타났다. 또한 상부철근의 경우, 중립축 상연에 위치하여 압축변형을 보였다. 또한 중앙부위 높이(130cm)의 철근은 인장변형을 보이는 것으로 보아, 중립축은 하연에서부터 130cm 위에 존재하는 것으로 판단되었다. 하부철근의 변형률을 분석한 결과, 사용하중($P_{service}$)단계인 724.87kN 부근에서의 변형률은 약 0.0007로 나타나 구조물의 안전성에는 큰 지장이 없는 것으로 판단되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 균열하중(P_{cr}) 이후에 기울기의 변화가 발생하는데, 이는 콘크리트의 균열이 진행되면서 하부의 인장응력을 철근이 대부분 부담하였기 때문인 것으로 분석된다. 사용된 철근은 400MPa의 항복강도를 가지므로, 이론상으로 0.002의 변형률 이상에서는 철근의 항복이 발생하였을 것이라고 판단된다. 0.002의 변형률에 해당하는 하중은 약 1650kN 부근인 것으로 확인되었다. 이는 사용하중에 비해 2배 이상 높은 하중으로써, 사용하중단계에서는 구조물의 안전성을 보장할 수 있는 수준으로 판단되었다. 최대하중에서의 변형률은 0.0037로 나타났으며 이미 철근의 영구변형이 발생하였지만, 구조물의 전체적인 거동은 강연선 및 상부 콘크리트의 저항성능으로 인해 더욱 높은 하중을 견딜 수 있을 것이라고 예상되었다.

그림 3.100～그림 3.101에 하부와 상부의 종방향 철근 위치별 하중-변형률 관계를 나타내었다. 변위의 위치별 그래프와 유사하게 나타났으며, 양쪽의 거동이 대칭되는 현상을 보였다. 편하중 또는 비틀림의 영향없이 하중재하가 적절히 이루어졌으며 반력 또한 적절히 분산된 것으로 판단된다.

그림 3.102에서는 거더의 중립축변화를 나타내었다. 그림에서 보이는 것과 같이 아치텍 거더 중앙부의 초기 중립축 위치는 하연에서부터 약 180cm 부근에 위치하고 있는 것으로 나타났다. 균열이 발생하면서 실험체의 휨 강성이 감소하여 최대 210cm까지 상승하는 것으로 관찰되었다. 이러한 중립축의 상승은 거더 하연에 균열이 발생하여 유효단면이 감소함에 따라 발생한 것으로 판단된다. 균열발생 하중인 1500kN 부근까지는 중립축의 변화가 거의 발생하지 않는 것으로 보아, 사용성에는 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

표 3.38 아치텍 거더 철근 하중-변형률 결과

구 분	하 중 (kN)	변형률 (με)			
		1/2 지점 Bottom	1/2 지점 Bottom	1/2 지점 Center	1/2 지점 Top
아치텍 PSC 거더	0	0	0	0	0
	500	308	305	256	-177
	1000	641	637	523	-339
	1200	800	803	645	-405
	1400	1236	1328	829	-490
	1600	1822	1921	1131	-606
	1800	2092	2117	1452	-730
	2000	2521	2541	1793	-856
	2200	3008	2995	2185	-1006
	2400	3528	3498	2626	-1158
	2500	3817	3751	2874	-1092

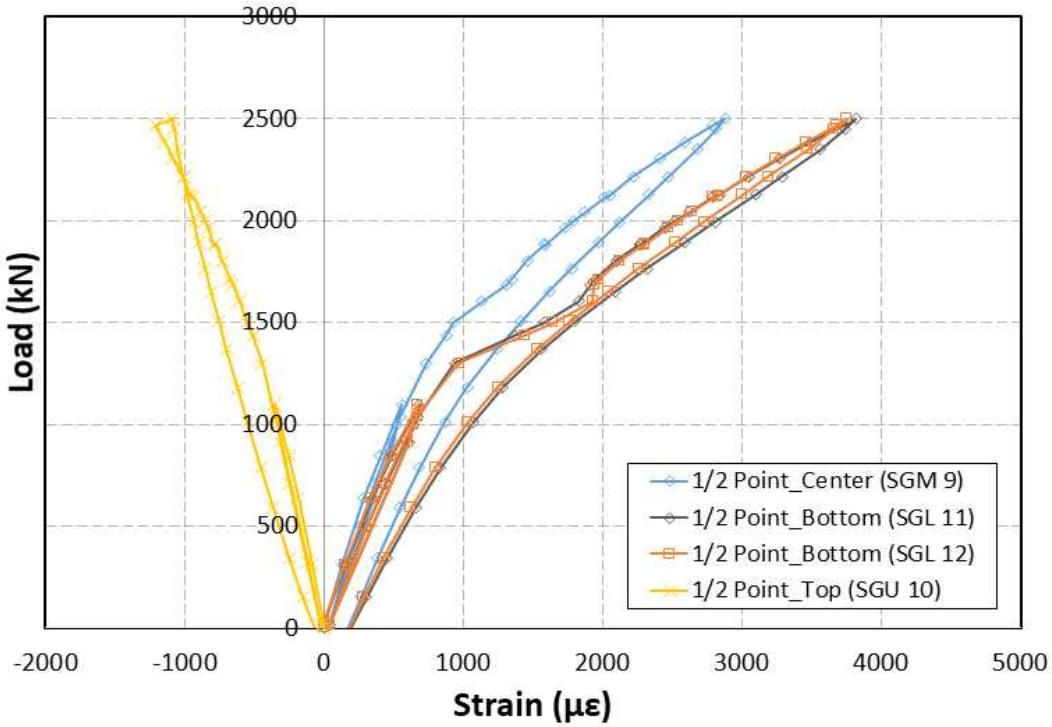


그림 3.99 중앙부 단면에서의 하중-변위 관계

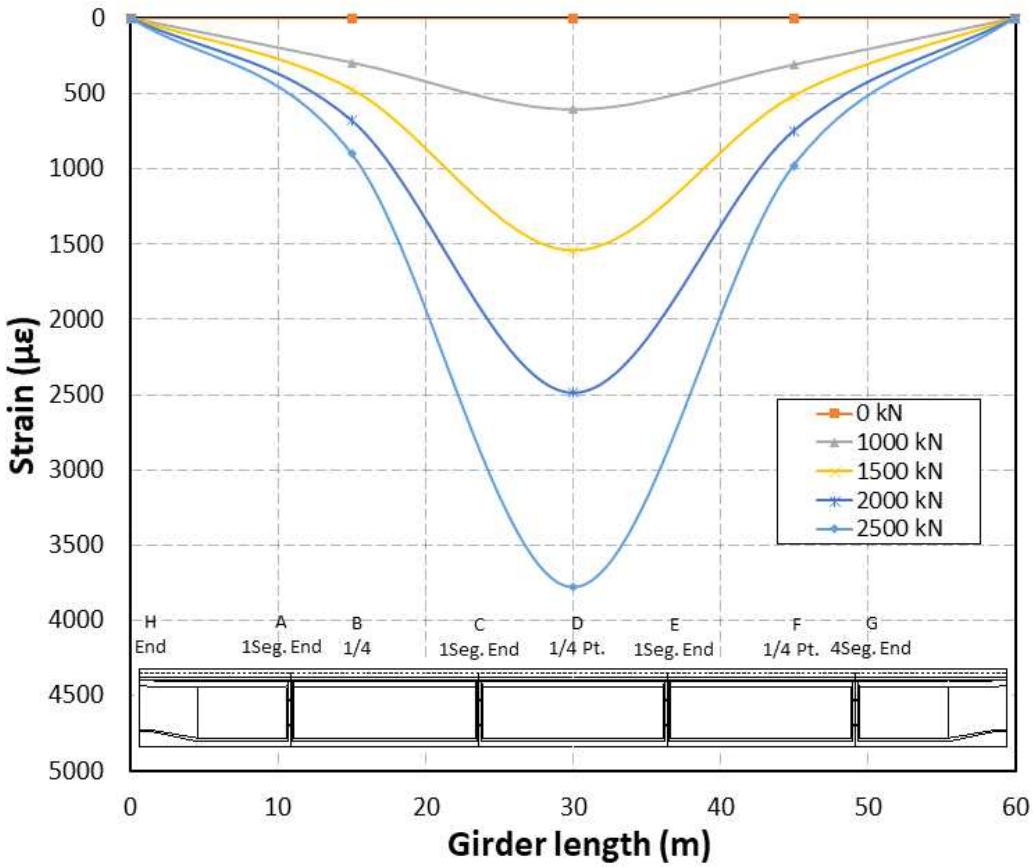


그림 3.100 하부 종방향 철근의 위치별 하중-변형률 관계

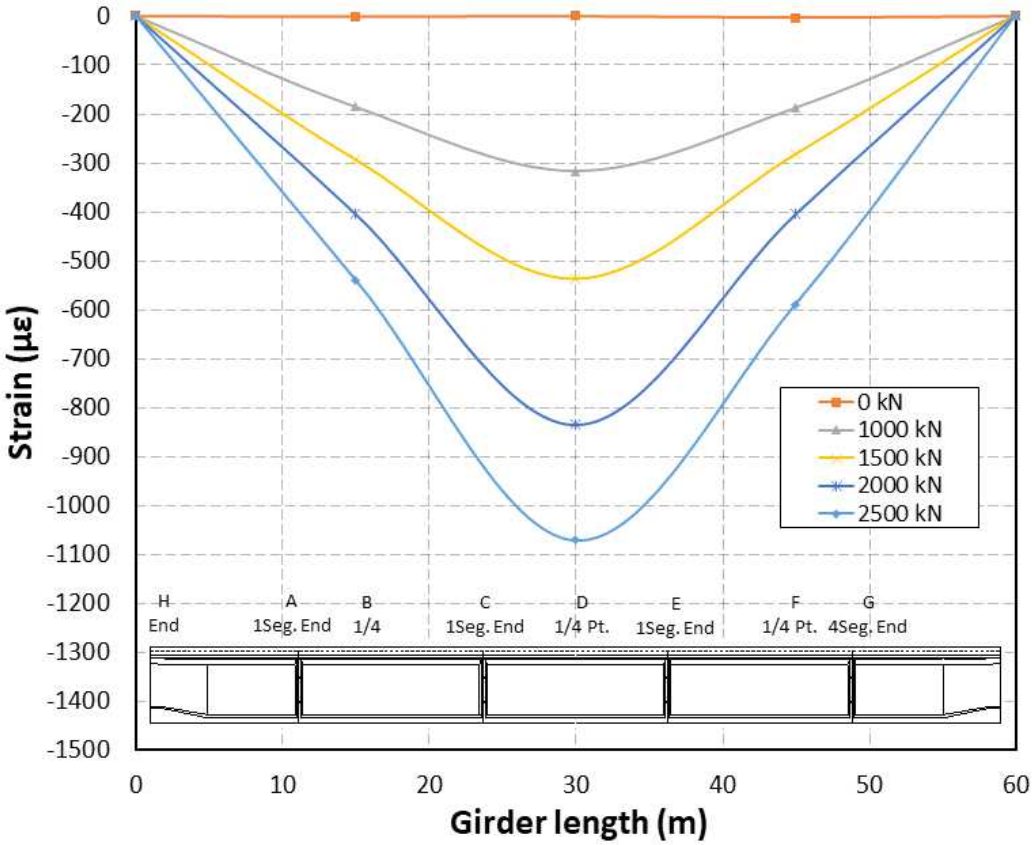


그림 3.101 상부 종방향 철근의 위치별 하중-변형률 관계

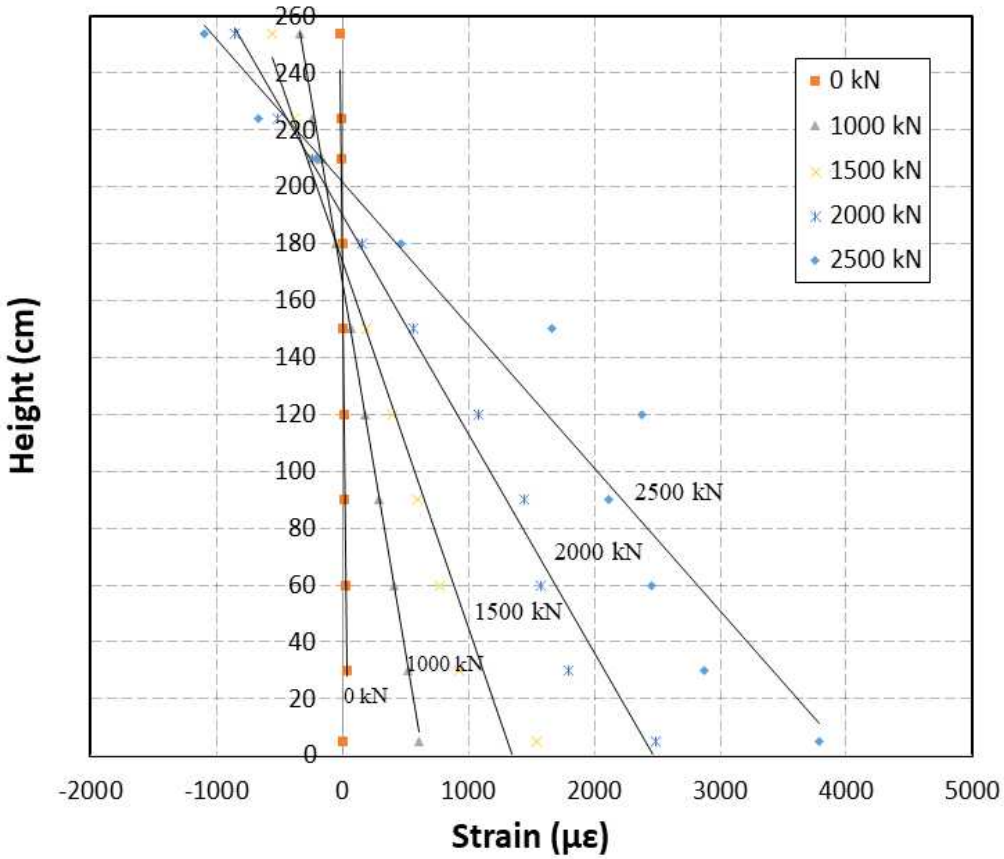


그림 3.102 하중에 따른 거더의 중립축

㈏ 콘크리트의 하중-변형률 관계

표 3.39에 콘크리트 변형률을 정리하였으며, 횡방향 중앙부 바닥판에 부착한 콘크리트 게이지의 변형률을 그림 3.103에 나타내었다. 철근과 동일하게 종 방향의 1/4 지점(0.25 L), 1/2 지점(0.5 L)에 부착하였다. 전반적으로 압축변형률을 나타내었으며, 압축파괴가 발생하는 기준인 변형률 0.003에는 도달하지 않은 것으로 나타났다. 1/2 지점(0.5 L)의 최대 변형률은 약 0.0019 정도로 나타났으며, 1/4 지점(0.25 L)의 최대 변형률은 약 0.0012로 나타나 압축연단에서 구조적 저항성능을 확보하였다고 판단되었다.

표 3.39 아치덱 거더 콘크리트 하중-변형률 결과

구 분	하 중 (kN)	변형률 (με)	
		1/4 지점 (0.25 L)	1/2 지점 (0.5 L)
아치덱 PSC 거더	0	0	0
	500	-508	-459
	1000	-695	-708
	1200	-760	-798
	1400	-842	-913
	1600	-924	-1065
	1800	-1002	-1228
	2000	-1068	-1397
	2200	-1148	-1600
	2400	-1223	-1816
	2500	-1256	-1931

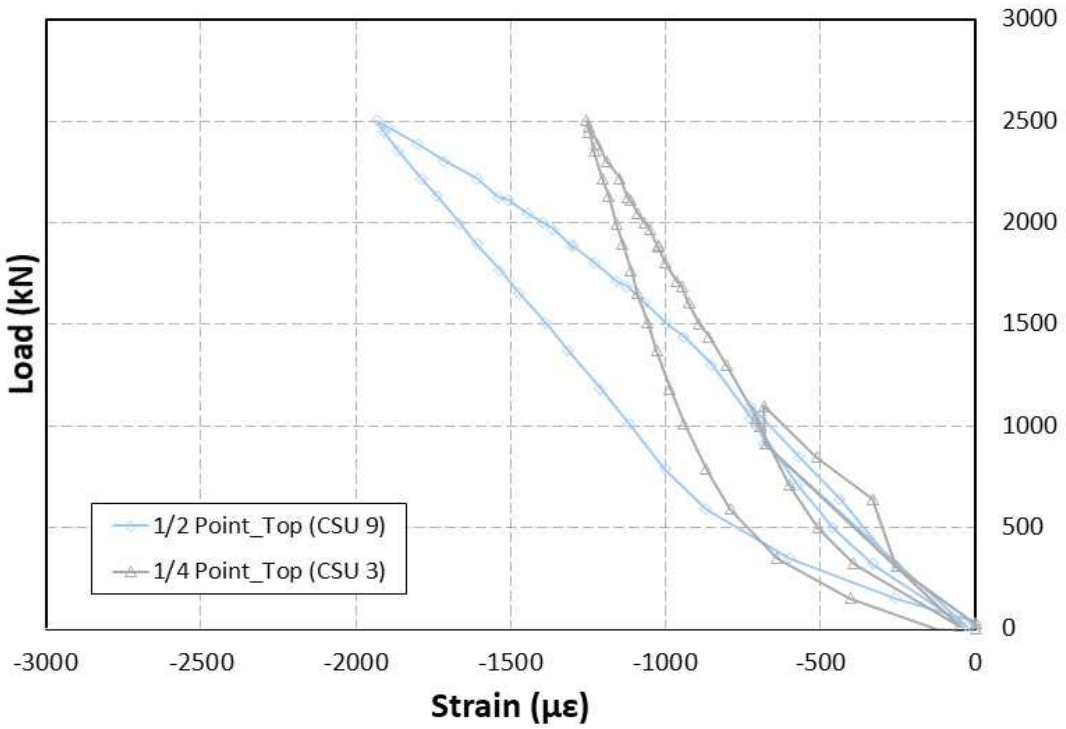


그림 3.103 콘크리트의 하중-변형률 곡선

③ 균열 형상

그림 3.105에 실험체의 균열형상을 나타내었다. 균열의 관측은 사용하중 부근인 700kN부터 매 100kN마다 확인하였으며, 초기균열은 1,200kN에서 발생하였다. 초기균열이 발생한 이후에는 매 200kN마다 균열체크를 진행하였다. 초기균열의 경우, 실험체의 하부 플랜지에서 발생하였으며 복부까지 균열의 진전이 발생하지는 않은 것으로 나타났다. 거더 복부의 균열이 본격적으로 진행된 시점은 약 1,500 kN부근으로 보이며 약 1,700 kN 이후에는 형고의 1/2 지점 이상으로 균열이 진전되는 것을 확인할 수 있었다. 하중재하점이 있는 중앙부를 기준으로 휨 거동의 영향을 받아 휨 균열이 발생하였으며, 총 5개의 세그먼트 중에서 단부를 제외한 세그먼트 2~세그먼트 4에서 균열이 발생하였다. 하중증가에 따라 중앙부에서 지점부로 균열이 확산되는 경향을 나타내었다. 균열이 가장 넓게 분산된 단면은 중앙부인 세그먼트 3으로서, 균열의 분포 및 개수가 많은 것으로 나타났다.

또한 각 세그먼트의 접합부에 균열게이지를 부착해 세그먼트간의 이격을 확인하였다. 확인 결과, C단면(세그먼트 2~3 분절부)와 E단면(세그먼트 3~4 분절부)의 이격이 표면상으로는 가장 크게 나타났지만 수치적으로 확인한 결과 최대 0.9mm 정도의 이격만 발생하는 것으로 나타났다. 강연선의 긴장력과 세그먼트 접합부의 에폭시 도포 등의 영향으로 인해 각 세그먼트의 접합부의 이격은 크지 않은 것으로 나타나 구조물의 안전성에는 큰 영향을 끼치지 않는다고 판단되었다. 균열 데이터를 분석한 결과를 그림 3.104에 나타내었다.

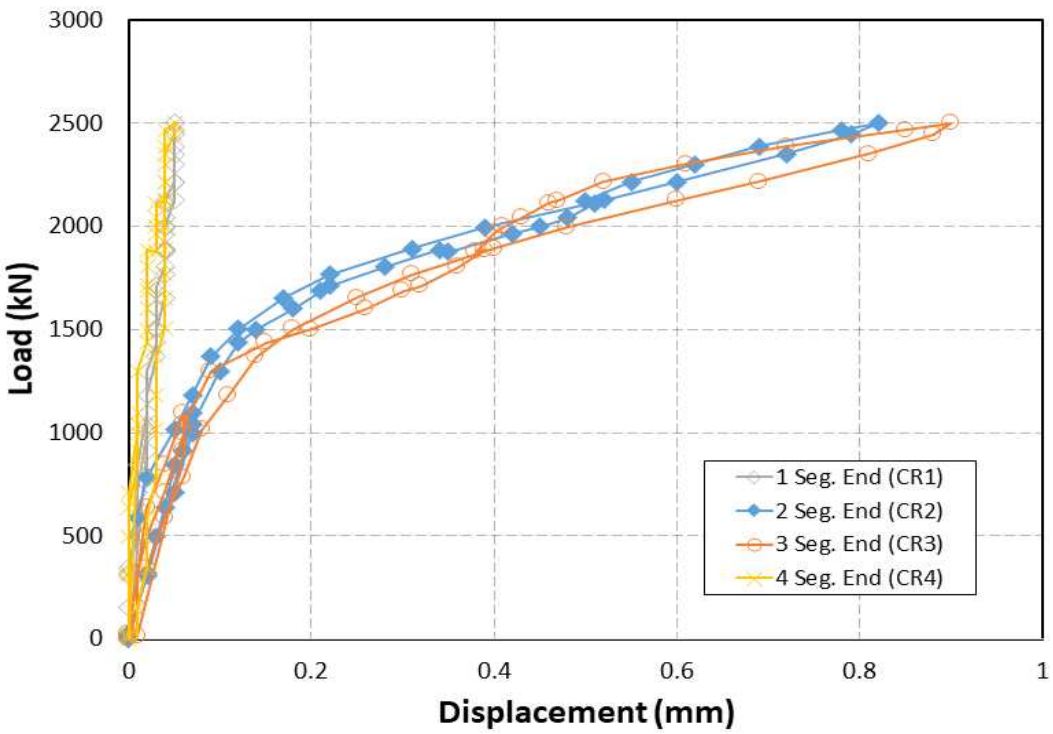
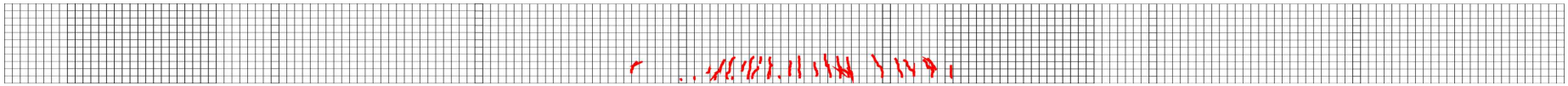
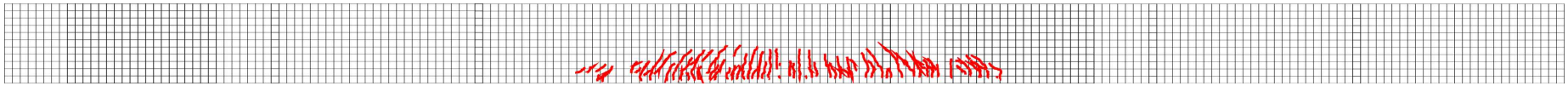


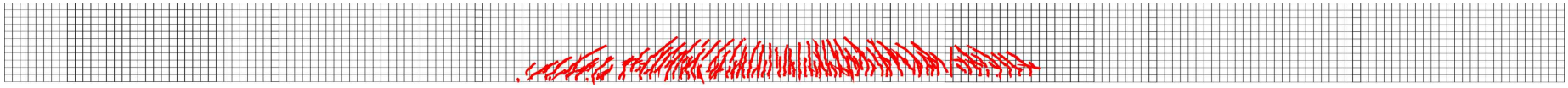
그림 3.104 분절부 이격 곡선



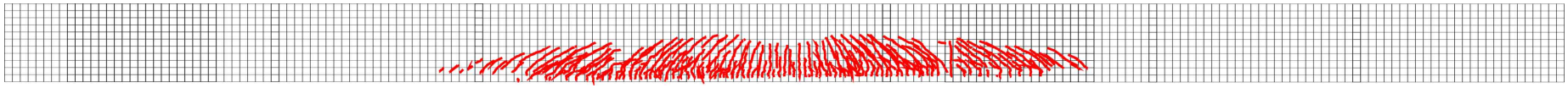
(a) 전면부 1700 kN



(b) 전면부 1900 kN

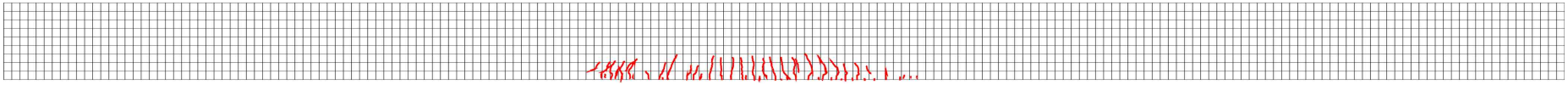


(c) 전면부 2150 kN

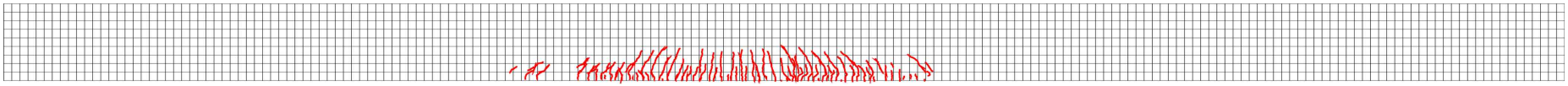


(d) 전면부 2500 kN

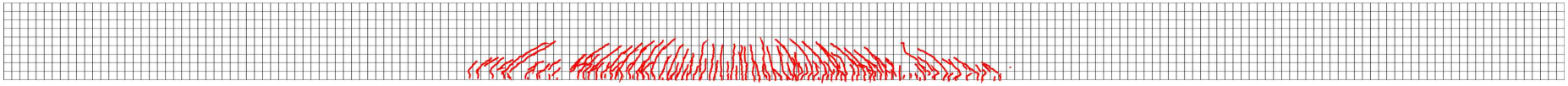
그림 3.105 아치덱 거더 균열형상 (계속)



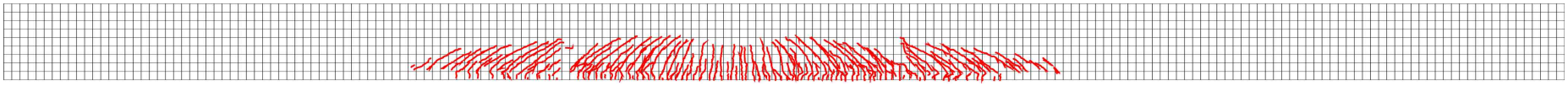
(e) 후면부 1700 kN



(f) 후면부 1900 kN



(g) 후면부 2150 kN



(h) 후면부 2500 kN

그림 3.105 아치덱 거더 균열형상

(7) 결 론

본 연구에서는 아치덱 거더의 구조성능을 확인하기 위해 정적 휨 거동 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

ⅰ) 아치덱 거더의 실험결과 최대하중은 약 2,500kN이며, 사용하중($P_{service}$) 755.3 kN의 약 3.3배, 설계극한하중(P_r) 2,137.0 kN의 약 1.2배 높은 값이다.

ⅱ) 철근과 콘크리트 변형률 검토 결과, 사용하중($P_{service}$)과 설계극한하중(P_r)에서 안정적인 거동을 하였다. 최대 하중이 작용 시 콘크리트 압축부 및 철근의 인장부 변형률이 극한 변형률까지 도달하지는 않은 것으로 보아 거더의 사용성과 안전성이 입증되었다고 판단된다.

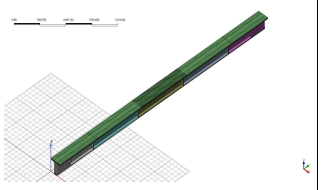
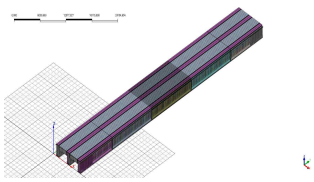
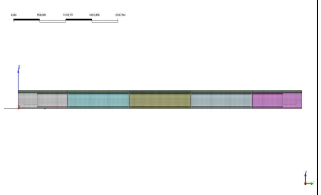
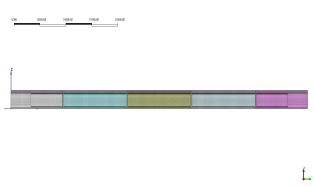
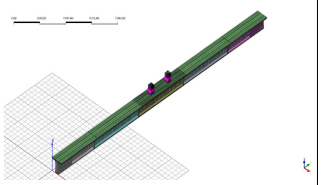
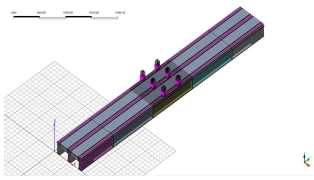
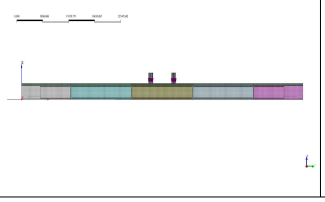
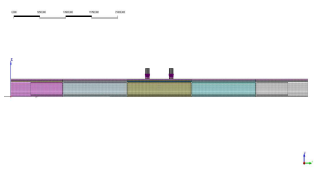
ⅲ) 초기균열은 약 1,200 kN에서 발생하였으며, 하부플랜지 균열 진전은 약 1,500 kN에서 발생하였다. 1,500 kN은 사용하중에 비하여 약 2배 높은 하중이며, 사용하중 시에는 사용성에 문제가 없다고 판단된다.

3.3 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가

3.3.2 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 구조해석

아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 실험에 앞서, 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 실용화를 위한 구조성능을 파악하기 위해 비선형 구조해석을 수행하였다. 비선형 구조해석을 위한 프로그램은 Midas FEA를 사용하였으며, 단일 PSC-I 거더의 해석과 실험 결과를 비교한 후, Full Scale 해석을 수행하였다. Full Scale 해석내용은 3주형 거더에 1차년도에서 진행한 데크 및 슬래브 모델을 적용시켰으며, Full Scale 모델의 구조 성능을 파악하기 위하여 선형 및 비선형 해석을 수행하였다. 표 3.40은 2차년도에 진행할 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 구조해석과 앞으로의 추가적으로 수행할 연구의 전체적인 개요를 도식화한 표이다.

표 3.40 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 구조해석 개요

아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가를 위한 구조해석			
	PSC-I 단일거더	아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더	아치덱 및 슬래브를 적용한 n주형 PSC-I 거더(매개변수 추가해석)
Model(3D View)			-
Model(2D View)			-
Load Condition(3D View)			-
Load Condition(2D View)			-
해석프로그램	Midas FEA (V3.6.0 R2)		
콘크리트 및	콘크리트 구성모델 : Drucker-Prager		

철근 구성모델	철근 구성모델 : Von Mises		
콘크리트 및 철근 재료특성	강도	$f_{ck} = 60\,MPa$(PSC-I Girder), $f_{ck} = 30\,MPa$(Slab), $f_y = 400\,MPa$(SS400), $f_y = 2400MPa$(강연선 : SWPC7B)	
	탄성계수	28383MPa(PSC-I Girder), 25978MPa(Slab), $2.0\times10^5\,MPa$(SS400, SWPC7B)	
하중 크기 및 위치	최대하중은 약 2500kN으로 슬래브 위 중심부에서 좌우로 2m 떨어진 지점에 900$mm\times900mm$의 면적으로 재하	최대하중은 약 8000kN으로 각 거더 및 슬래브 위 중심부에서 좌우로 2m 떨어진 지점에 900$mm\times900mm$의 면적으로 재하	-
비고	설계균열하중 ($P_{cr} = 1230\,kN$) 설계하중 ($P_r = 2105\,kN$) 최대재하하중 ($P_{\max} = 2500\,kN$)	-	연구목적에 따라 모델의 크기, 재료의 물성치, 거더 간격, PS량 등 많은 변수 중 하나를 선택 및 조정하여 매개변수 해석을 추가적으로 수행할 예정

(1) 해석 프로그램 Midas FEA 개요 (V3.6.0 R2)

Midas FEA(Advanced Nonlinear and Detail Analysis)는 비선형 상세해석 전용 시스템으로, 토목분야 범용 전/후처리 프로그램인 Midas FX+의 Geometry Modeling 및 Mesh Generation 기능을 기반으로 마이다스아이티의 선형 및 비선형 솔버의 축적된 기술과 안정성을 인정받은 TNO DIANA사의 기술력을 결합하여 만든 국내 토목분야 설계환경에 최적화한 상세 특화해석 전용 프로그램이다. Midas FEA(Advanced Nonlinear and Detail Analysis)는 공학분야에서 발생하는 다양하고 복잡한 문제들을 해석하는데 이용할 수 있으며, 콘크리트 구조물과 관련된 다음과 같은 문제들을 해결할 수 있다.

① 구조형식

- 라멘교
- Steel Girder
- PSC beam
- PSC box
- 아치교
- 지중구조물
- 하부구조
- 케이블교

② 해석형식

- 선형정적해석
- 철근 및 텐던 해석
- 모드해석 및 좌굴해석
- 시공단계해석
- 재료비선형 해석
- 동해석(응답스펙트럼/시간이력)
- 고유치해석
- 접촉해석
- 응담스펙트럼해석
- 시간이력해석
- 수화열 해석
- 부등건조수축 해석
- 균열해석
- 피로해석
- 계면요소 해석
- CFD 해석
- 재료비선형해석
- 이동하중해석
- 열전달 및 열응력 해석

③ 해석 Detail

- 철근 콘크리트 및 프리스트레스 콘크리트 구조물의 거동
- 콘크리트 구조물의 폭발에 의한 순간하중이나 화재에 따른 온도해석
- 하중에 의한 구조물의 철근응력 계산
- 콘크리트 타설 후 발생하는 수화열 해석
- 하중을 받는 콘크리트 구조물의 처짐 및 변형률

(2) 비선형 재료모델

비선형해석은 구조물의 비선형적 거동을 고려하는 해석으로, 재료적 비선형 해석과 기하학적 비선형 해석, 접촉 비선형 해석 등이 있다. 또한, 위의 비선형 해석을 2가지 또는 모두 고려하는 해석 등이 있다.

재료적 비선형 거동에 대한 설명은 다음과 같다. 하중을 받고 있는 구조물은 재하 초기에는 하중과 변형이 비례관계를 성립하는 탄성 영역에 존재한다. 하지만, 하중이 증가하여 특정 응력값(항복응력)에 도달하면 하중증가에 비해 변형의 증가가 더 커지는 소성영역으로 변하게 된다. 이 상태에서 하중이 더욱 증가하면 응력-변형률 관계를 갖지 않는 파괴단계에 이르게 된다. 이와 같이 하중 크기와 방향 변화에 따라 재료의 특성 값이 변화하여 구조물의 비선형적 거동을 유발시키는 것을 재료 비선형이라고 한다.

기하학적 비선형 거동이란, 상기에 설명한 재료적 비선형 거동과 달리 변위 또는 회전량이 증가하여 하중의 작용방향과 분포, 크기 등이 달라지는 것을 말한다.

접촉 비선형이란 재료나 변위, 회전량이 아닌 요소간의 경계부분의 비선형 또는 경계조건의 변화로 인한 접촉으로 발생하는 비선형 해석을 말한다.

아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 구조해석의 경우, 하중이 증가함에 따라 발생하는 처짐을 기록하고, 선형구간 및 비선형 구간까지 해석을 수행하여 PSC-I 거더의 구조거동에 관하여 해석적 연구를 진행한다.

① 콘크리트 구성모델

콘크리트의 재료적인 비선형 거동을 구현하기 위해서는 적합한 소성모델이 필요하다. 콘크리트의 재료적인 비선형 거동과 중형 또는 대형 콘크리트 구조물에 적합한 소성모델을

조사 후, 재료모델을 결정하였다.

본 해석에서는 중형 또는 대형 콘크리트 구조물에 사용되는 Drucker-Prager 항복기준을 적용하여 비선형 해석을 수행하였다. Drucker-Prager 항복기준은 주응력 공간에서 원뿔형의 면을 갖는 Mohr- Coulomb 항복기준을 근사화 시킨 것으로 Drucker-Prager의 항복함수는 식 (3.1)과 같다.

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\sigma},\kappa) = \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\sigma}} + \alpha_f \boldsymbol{\pi}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\sigma} - \beta \bar{c}(\kappa) \tag{3.1}$$

여기서, $\bar{\boldsymbol{c}}(\kappa)$ 는 내부상태변수 κ에 대한 등가 점착력 함수이고, $\boldsymbol{\pi}$는 식 (3.2)와 같고, 스칼라량 α_f 와 β는 식 (3.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\boldsymbol{\pi} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

$$\alpha_f = \frac{2\sin\phi(\kappa)}{3-\sin\phi(\kappa)} \qquad \text{and} \qquad \beta = \frac{6\cos\phi_0}{3-\sin\phi_0} \tag{3.3}$$

여기서, 내부마찰각 ø도 내부상태변수의 함수이고, ϕ_0는 초기 내부마찰각이다. 한편, 흐름법칙은 비연관 흐름법칙 $g \neq f$로 부터 주어지며 소성포텐셜은 식 (3.4)와 같다.

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\sigma},\kappa) = \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^{T}\boldsymbol{T}\boldsymbol{\sigma}} + \alpha_g \boldsymbol{\pi}^{T}\boldsymbol{\sigma} \tag{3.4}$$

여기서, 스칼라량 α_g는 식 (3.5)와 같이 팽창각 ψ에 의해 정의된다.

$$\alpha_g = \frac{2\sin\psi(\kappa)}{3-\sin\psi(\kappa)} \tag{3.5}$$

따라서, 소성변형률 rate 벡터는 식 (3.6)과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{\boldsymbol{p}} = \dot{\lambda}\left\{\frac{\boldsymbol{P}\boldsymbol{\sigma}}{2\boldsymbol{\psi}} + \alpha_g \boldsymbol{\pi}\right\} \tag{3.6}$$

여기서, 팽창각 ψ는 식 (3.7)과 같다.

$$\boldsymbol{\psi} = \sqrt{\frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^{T}\boldsymbol{P}\boldsymbol{\sigma}} \tag{3.7}$$

내부상태함수 κ와 소성과정의 관계는 경화이론에 의해 주어지며, Drucker- Prager 항복조건에서는 변형률 경화이론만을 고려한다. 변형률 경화의 경우 그 관계는 식 (3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\kappa} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_1^p\dot{\epsilon}_1^p + \dot{\epsilon}_2^p\dot{\epsilon}_2^p + \dot{\epsilon}_3^p\dot{\epsilon}_3^p)} \tag{3.8}$$

$$= \dot{\lambda}\sqrt{1+\alpha_g^2}$$

그림 3.106에 나타낸 바와 같이 일축 응력-변형률($\sigma_3 - \epsilon_3$)관계를 고려하면, 소성 변형률 ϵ_3^p는 $\epsilon_3 - \epsilon_3^e$로 가정할 수 있다. $\sigma_3 \leqq 0$이면 일축 소성 변형률 rate는 식 (3.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_3^p = -\dot{\lambda}(1-\alpha_g) \tag{3.9}$$

따라서, 일축 소성변형률과 변형률 경화에 대한 내부 상태함수와의 관계를 식 (3.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\kappa} = -\frac{\sqrt{1+2\alpha_g^2}}{1-\alpha_g}\dot{\epsilon}_3^p \tag{3.10}$$

또한, 마찰각이 일정하다면 일축응력($\sigma_3 = -f_c$)과 등가 점착력과의 관계는 식 (3.11)과 같이 나타난다.

$$\bar{c} = f_c\frac{1-\alpha_f}{\beta} = f_c\frac{1-\sin\phi_0}{\beta} \tag{3.11}$$

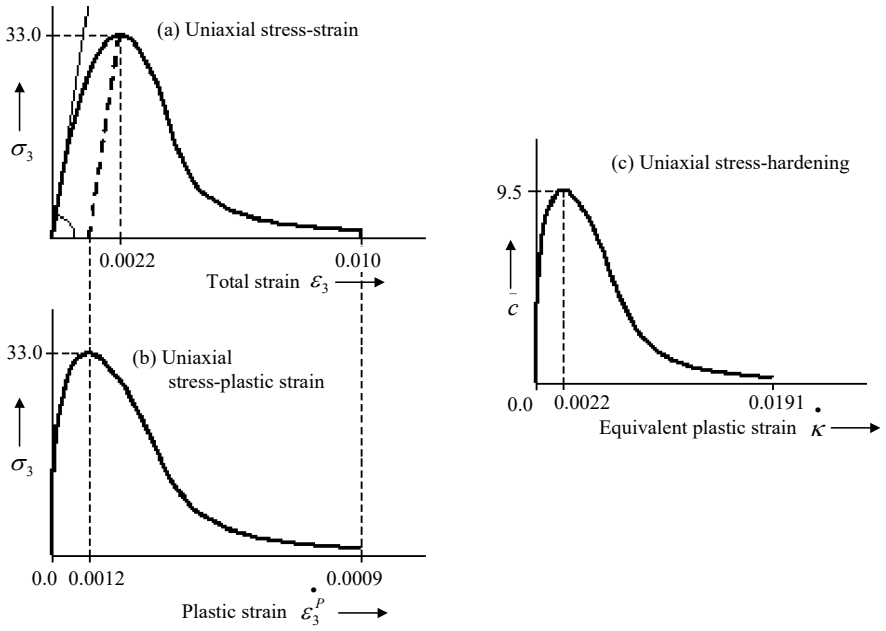


그림3.106 Druker-Prager 항복기준

② 철근 구성모델

철근의 거동을 구현하기 위해서 철근 Bar Section을 이용하였다. 이를 위해 재료의 물성치 및 단면적을 입력하였으며, 그림 3.107과 같이 2절점 저차 Bar Section과 3절점 고차 Bar Section을 사용하였다.



그림 3.107 Bar Section과 철근 절점

분할된 철근 바 세그먼트 강성은 모재요소의 강성에 더해지게 된다. 철근 바 세그 먼트의 적분점은 기본적으로 선 형상에 대해서는 2점 적분을 사용하고 있으며, 점 형상에 대해서는 1점 적분을 수행한다. 적분점의 위치는 해석과정에서 요소의 등매개 좌표계(isoparametric coordinate)를 사용하여 자동적으로 계산된다. 그림 3.108의 왼쪽에 철근바의 세그먼트가 위치점을 사용하여 정의되는 것을 보여준다. 철근바의 응력은 축방향 성분만 존재하며, 적분점에서 철근바의 변형률 ε_{xx}와 응력 σ_{xx}는 적분점에서의 접선방향으로 구해진다. 적분점에서 구해진 변형률과 응력은 외삽법(extrapolation)으로 처리되어 후처리에서 위치절점에서의 결과로 출력된다. 상기에 설명한 개념을 철근 요소에 적용하였으며, 철근 재료모델은 일반적으로 사용하는 Von Mises 재료모델을 선택하였다.

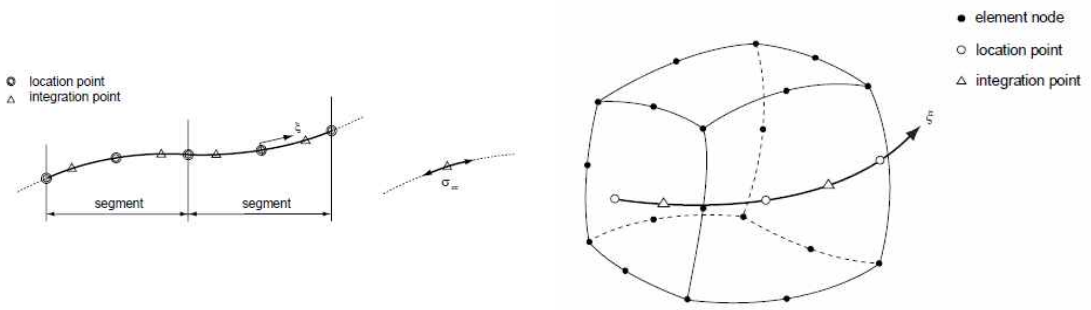
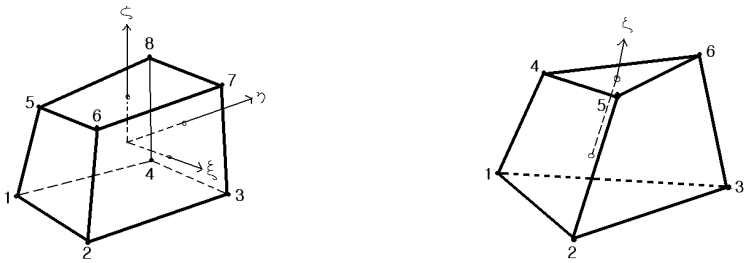


그림 3.108 철근 바 세그먼트 및 입체요소에 삽입되는
철근 바 세그먼트와 위치절점

③ 상세 해석모델

비선형 상세해석을 위해 Midas FEA 프로그램 내의 구조실험체 특성을 실제 조건과 동일하게 설정하였다. Solid element의 경우, 그림 3.109 (a)와 같은 8점점 Solid element를 적용하였다. 또한, 콘크리트는 Drucker Prager 재료모델을 적용하였고, 철근은 Von Mises 재료모델을 적용하였다.



(a) 8절점 solid element (b) 6절점 solid element

그림 3.109 해석에 사용된 Solid element 요소 형상

아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가에 대한 정적재하 및 펀칭전단 해석을 위한 경계조건은 실제 시험과 동일한 힌지-롤러를 적용하였으며, 하중은 자중과 외력을 구분하여 적용하였다.

콘크리트의 탄성계수는 추정식으로 도출된 계산 값을 적용하였다. 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 PSCI-I 거더는 $60MPa$을 적용하였고 슬래브 콘크리트는 $30MPa$을 적용하였다. 철근은 재료모델로 SS400을 적용하였으며, 항복강도 $f_y = 400MPa$을 적용하였다.

PS 강연선은 10T(1837mm) 4가닥과 13T(2388.1mm) 3가닥을 실행될 실험체와 동일한 위치에 적용하였으며, 도입 긴장력 또한, 실험체와 같은 각 2377 kN, 3091 kN을 적용하였다. 또한, PS 강연선의 항복강도 $f_y = 2400\,MPa$을 적용하였다. 프리스트레싱력의 손실은 곡률마찰, 파동마찰 등을 고려하였다.

PSC-I 단일거더 선형 및 비선형해석에서 하중 위치는 수행될 실험과 같은 중심부에서 양쪽으로 2 m씩 떨어진 지점에 $900mm \times 900mm$ 접지면적으로 등분포하중을 재하시켰다. 실험체의 제원은 실제 실험체와 동일하며 프로그램에 적용된 상세 재료특성은 표 3.41과 같다.

표 3.41 Midas FEA에 적용된 상세 재료특성

구 분	콘크리트	철근
재 료	-	SS400, SWPC7B
강 도	$f_{ck} = 60MPa$ (PSC-I 거더) $f_{ck} = 30MPa$ (슬래브)	$f_y = 400MPa$(SS400) $f_y = 2400MPa$(강연선 : SWPC7B)
탄성계수	$28383MPa$ (PSC-I 거더) $25978MPa$(슬래브)	2.0×10^5
포아송 비	0.18	0.3

콘크리트 구조물의 재료적 비선형해석시, 올바른 해를 구하기 위해서는 반복법(Iteration method)이 필요하다. MIDAS FEA에서 사용가능한 반복법은 초기강성법(Initial stiffness method), 뉴튼-랩슨법(Newton-Raphson method), 수정 뉴튼-랩슨법(Modified Newton-Raphson method), 호장법(Arc-length method) 등이 있으며, 본 해석에서는 그림 3.110의 수정 뉴튼-랩슨법을 사용하였다. 수정 뉴튼-랩슨법은 기존 뉴튼-랩슨법과 비교하여 계산시간을 단축 할 수 있으며, 정상적으로 수렴하지 않는 문제에 대해서도 유용하게 사용할 수 있다. 그림 3.112는 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석에 관한 이론을 도식화한 그래프이다.

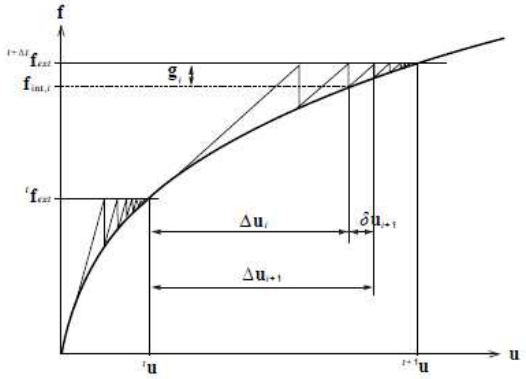


그림 3.110 수정 뉴튼-랩슨법의 반복해석

본 해석에서는 아치텍을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가 실험을 위하여 60 m 급 PSC-I 거더 및 슬래브를 실제 적용모델과 똑같이 모델링하였다. 그림 3.111~그림 3.112는 PSC-I 거더 및 슬래브 모델링이 완료된 실험체이다. 그림 3.113~그림 3.114는 해석상의 PSC-I 거더 실험체의 하중 위치, 등분포하중 면적을 시각화한 것이다. 그림 3.113은 PSC-I 거더 실험체의 하중 위치, 등분포하중 면적을 3D 시점에서 본 모습이며, 그림 3.114는 PSC-I 거더 실험체의 하중 위치, 등분포하중 면적을 측면에서 단편적으로 본 모습이다.

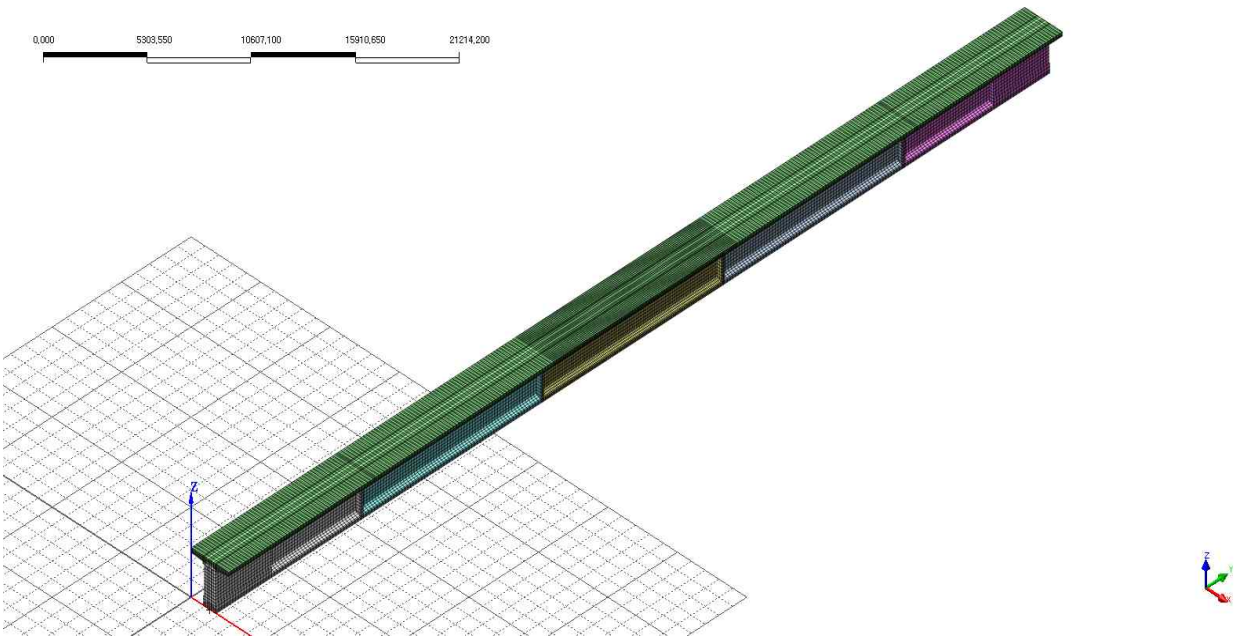


그림 3.111 PSC-I 거더 실험체(3D View)

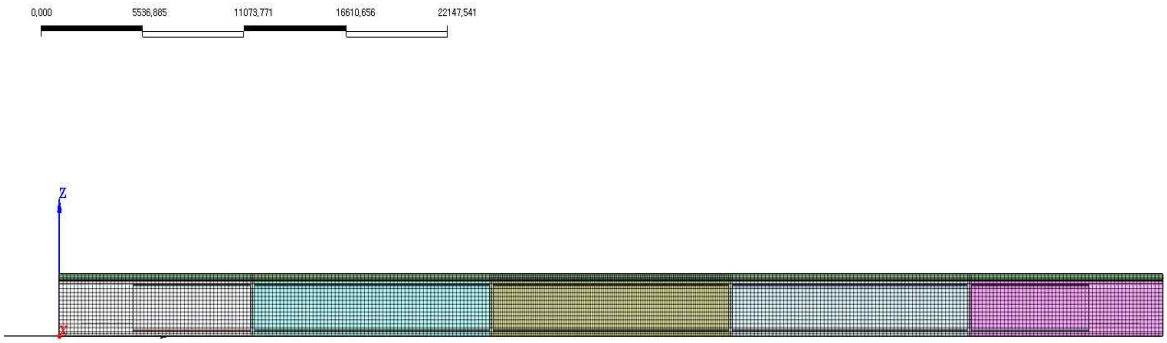


그림 3.112 PSC-I 거더 실험체(Side View)

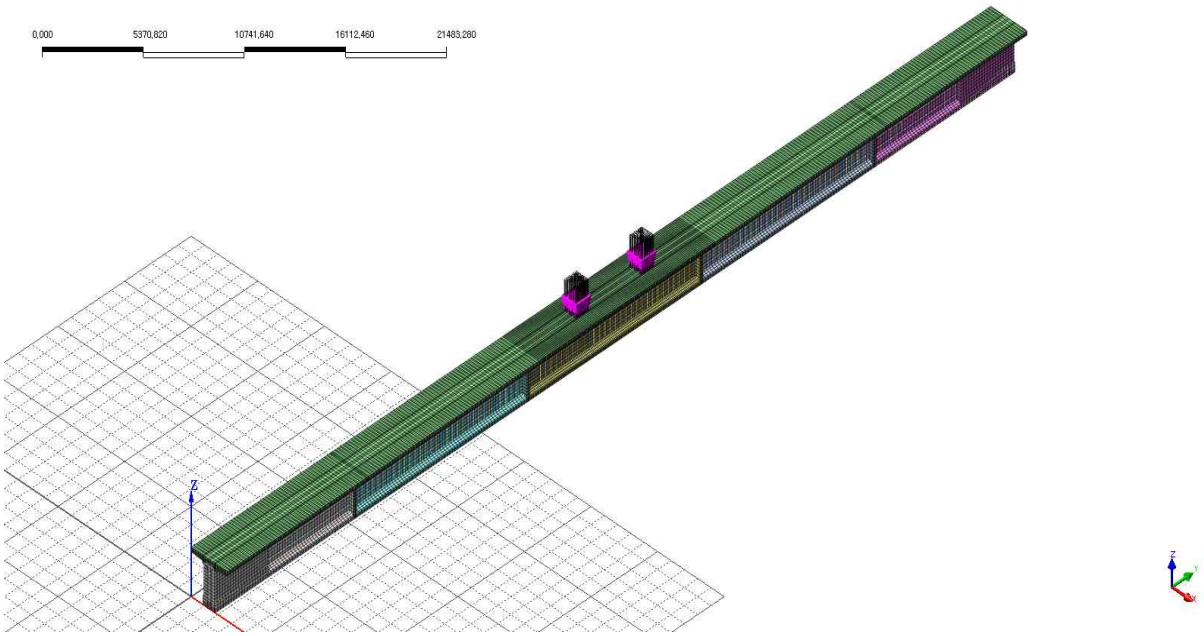


그림 3.113 PSC-I 거더 실험체 하중위치 및 하중면적(3D View)

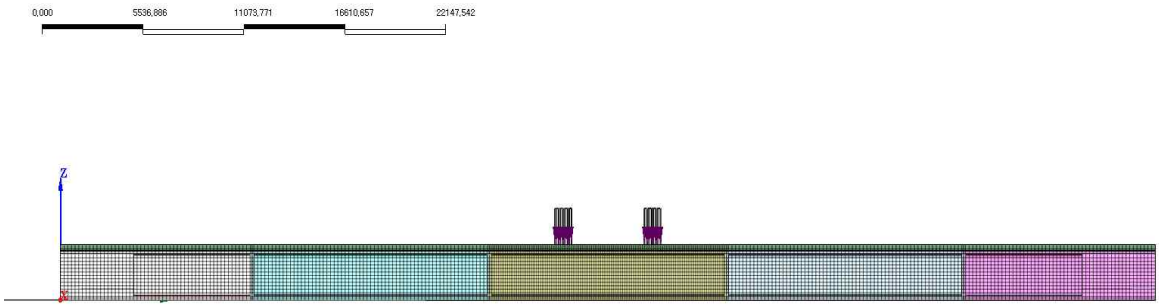


그림 3.114 PSC-I 거더 실험체 하중위치 및 하중면적(Side View)

그림 3.113~그림 3.114와 같이 PSC-I 거더 실험체 모델의 하중 위치는 실제 수행한 실험과 동일하게 적용하였다. 하중 재하 위치는 실험체의 슬래브 위 중앙부에서 2m 씩 떨어진 지점에 좌우로 등분포하중으로 재하 하였으며, 경계조건은 힌지와 롤러를 적용하였다. 최대하중은 약 2500 kN(약 250 tonf)이며, 하중 재하단계는 20단계를 적용하였다.

(3) 해석결과

PSC-I 거더 및 슬래브의 선형 및 비선형해석

본 해석에서는 실험체와 동일한 크기, 물성치, 프리스트레싱력, 하중 및 경계조건을 모사하여 선형 및 비선형해석을 수행하였다. PSC-I 단일거더 선형 및 비선형해석에서 하중의 정확한 위치는 실험과 동일하게 슬래브 위 중앙부에서 양쪽으로 2 m씩 떨어진 지점에 $900mm \times 900mm$ 접지면적으로 등분포하중을 재하하였다. 처짐은 중앙부에서 가장 크게 발생하였으며, 중앙부에서 거리가 멀어질수록 그 거리에 비례해 처짐은 작아졌다. 하중이 중앙부를 기준으로 좌우 대칭으로 재하되었기 때문에 처짐값은 중앙부를 기준으로 좌우가 일치하였다. 그림 3.115~그림 3.116은 PSC-I 거더의 해석 수행 후, 처짐을 시각화한 형상이다. 그림 3.115는 PSC-I 단일거더의 처짐형상을 3D 차원에서 전체적으로 본 모습이며, 그림 3.116은 PSC-I 단일거더의 처짐형상을 측면에서 단편적으로 본 모습이다.

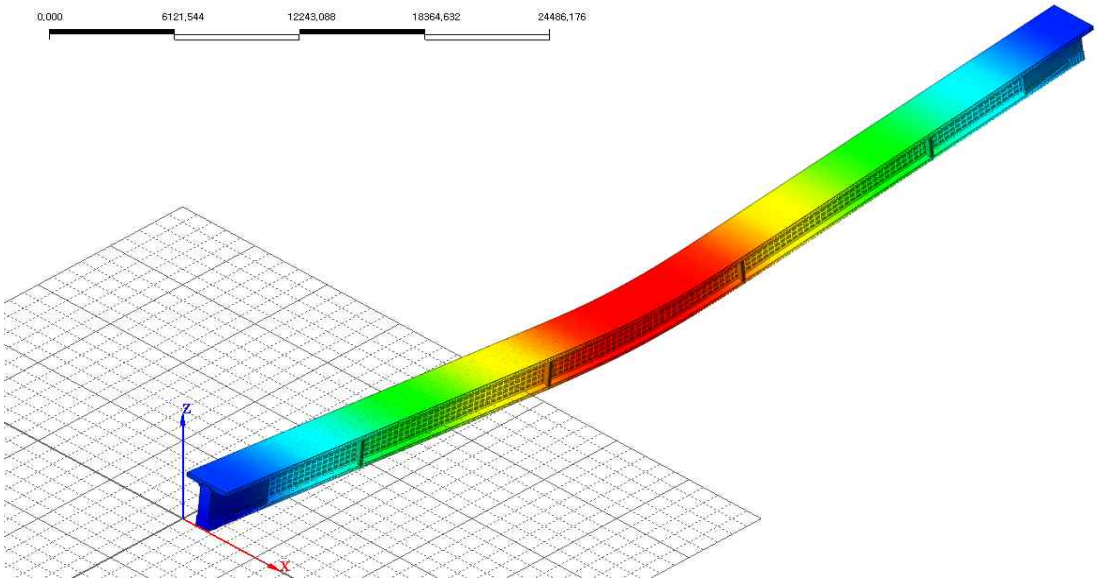


그림 3.115 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(3D View)

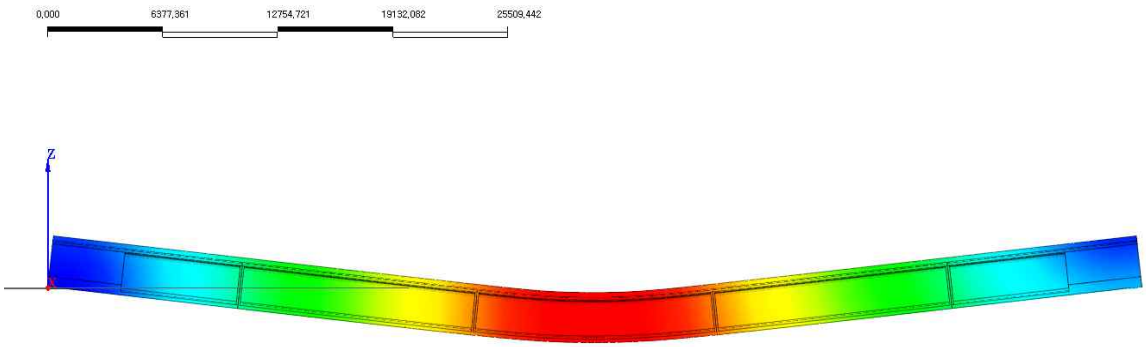


그림 3.116 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(Side View)

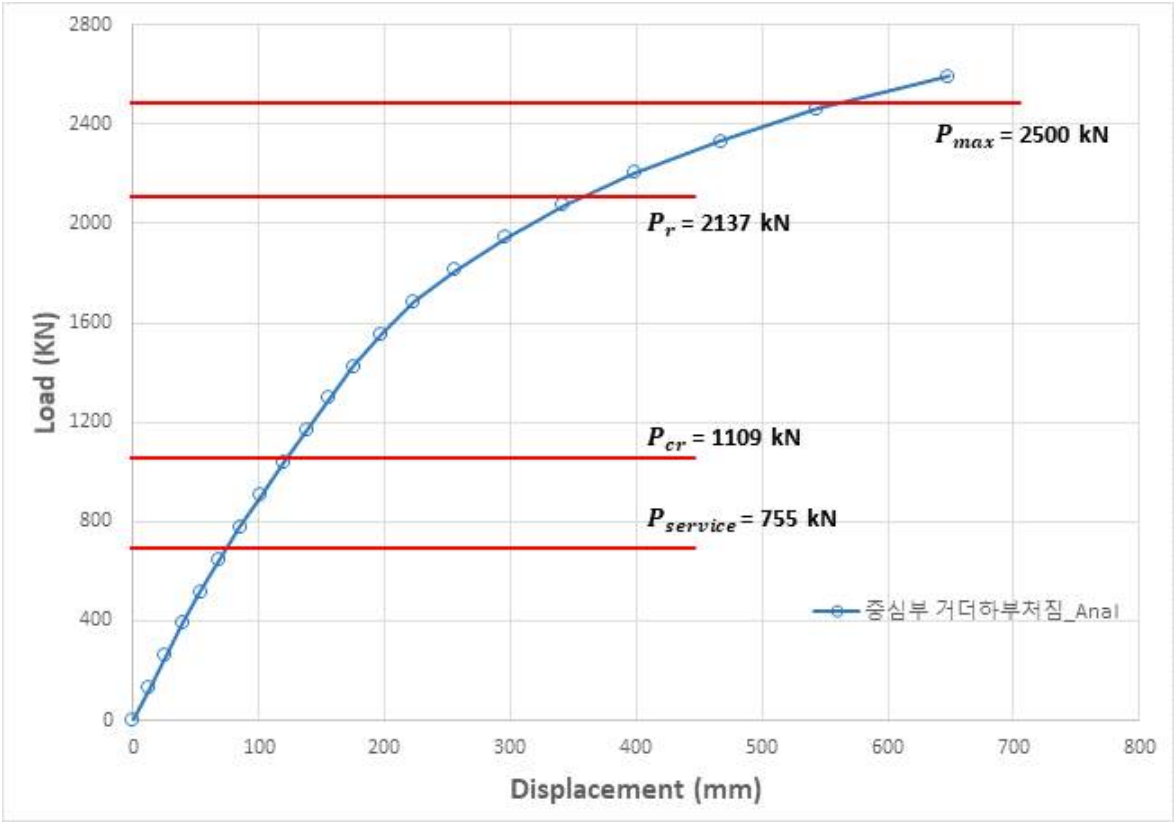


그림 3.117 PSC-I 거더 실험체의 중앙하부 하중-처짐

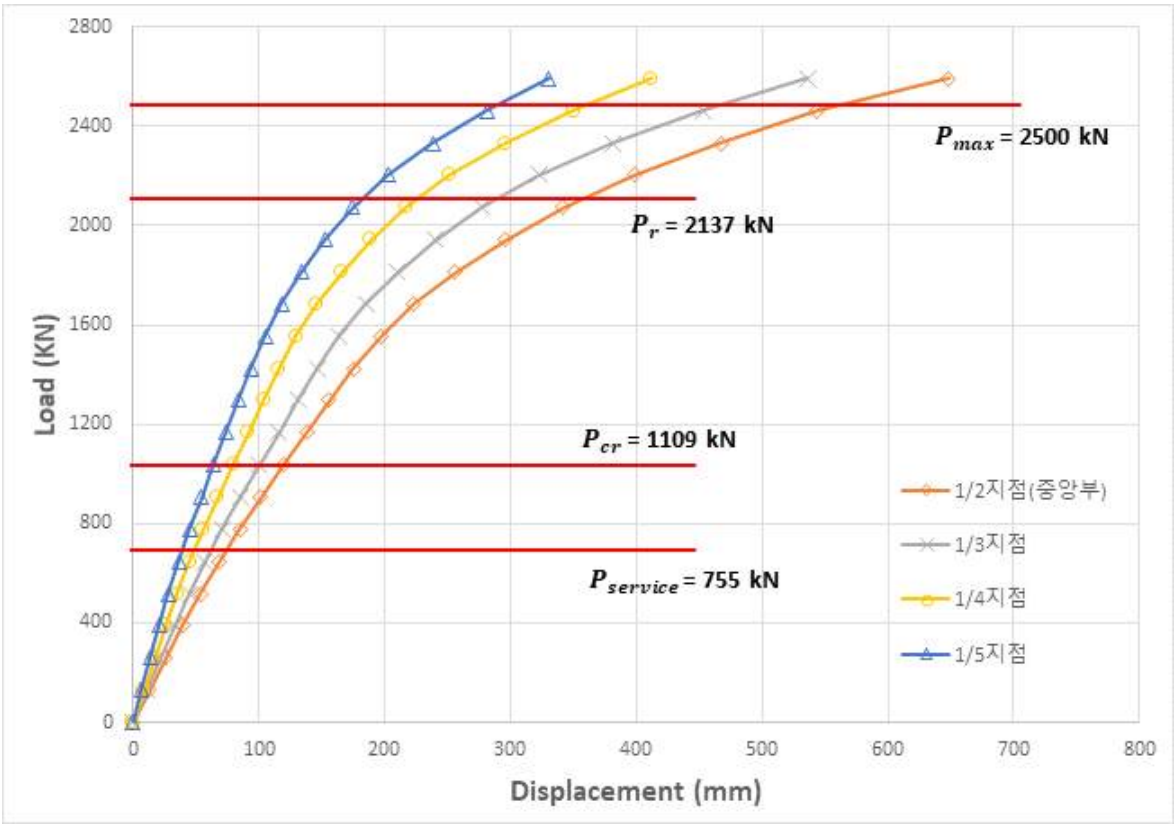


그림 3.118 PSC-I 거더 실험체의 지점별 하중-처짐

본 해석에서는 아치덱을 활용한 PSC-I 거더의 성능평가 실험을 위하여 60 m 급 PSC-I 거더 및 슬래브를 실제 적용모델과 똑같이 모델링 및 해석을 진행하였다. 최대하중은 약 2500 kN이며, 하중 재하단계는 20스텝을 적용하였다.

해석 결과, 처짐은 하중이 작용하는 중앙부에서 가장 크게 발생하며, 해석모델의 처짐형상으로 최대하중 2500 kN에서 콘크리트가 아닌 철근에 의해 구조물이 하중을 버티며 구조거동하는 것을 확인할 수 있다. 또한, PSC-I 거더가 인장지배를 받으며 구조거동을 한다고 판단된다. 그림 3.117에서 보이는 바와 같이 중앙부 처짐은 $P_{service} = 755kN$ 에서 약 76 mm의 작은 처짐량(1/2지점 기준)을 보이며 완전 탄성적인 구조거동을 한다. $P_{cr} = 1109kN$ 보다 높은 약 1400 kN 까지 재하량에 따라 처짐은 거의 일정하게 증가하며, 탄성적인 거동을 보인다. 약 1400 kN 이후 하중에서는 재하량에 따른 처짐이 거의 일정하게 증가하나, 그래프형상에서 알 수 있듯이 선형적인 거동에서 비선형적인 거동으로 변하는 경향을 보인다. 약 1700 kN 재하량부터 하중이 증가함에 따라 처짐의 증가량 또한 증가하는 비선형적인 구조거동을 보이나, 처짐값이 급격하게 증가하지 않아, 안정적인 구조거동을 한다고 판단된다. 최대하중($P_{\max} = 2500\,kN$)에서도 비선형 구조거동을 하는 구간이지만, 하중이 증가함에 따라 처짐량이 급격하게 증가하는 모습은 보이지 않는다. 이러한 결과로 아치덱을 활용한 PSC-I 거더가 극한하중($P_{\max} = 2500\,kN$)에서 실험체에 균열은 발생할 수 있지만, 실험체가 파괴되는 거동의 경향은 보이지 않으며 안정적인 구조거동을 한다고 판단된다.

그림 3.118에서 보는 바와 같이. 지점별 처짐은 1/2지점, 1/3지점, 1/4지점, 1/5지점 순서대로 하중에 따라 처짐이 작다. 또한 선형구간과 비선형구간 모두 그래프 형상의 전체적인 경향은 일치한다. 1/2지점과 1/4지점의 처짐을 비교해본 결과, 1/4지점의 처짐은 1/2지점의 약 64 % 정도로 파악되며, 1/3지점의 처짐은 1/2지점의 약 83 % 정도로 파악된다. 또한, 그래프의 형상을 비교해본 결과, 지점별 처짐의 간격은 거의 일치한다.

(4) 해석결과와 실험결과 비교분석

PSC-I 거더 및 슬래브의 선형 및 비선형해석과 실험결과 비교분석

상기의 (3) 해석결과에서 PSC-I 거더 및 슬래브의 선형 및 비선형해석 결과에 대한 분석을 해석 내에서 진행하였다. PSC-I 거더 모델의 선형 및 비선형 해석 후, PSC-I 거더 실험체의 실제 실험을 수행하였으며, 해석결과와 비교 분석을 진행하였다. 그림 3.119는 PSC-I 거더의 중심하부 하중-처짐 그래프이다.

그림 3.119에서 보는 바와 같이, 중심부 처짐은 $P_{service} = 755kN$에서 실제 실험체와 해석결과 모두 완전 탄성적인 구조거동을 보인다. 약 1300 kN까지 하중에 따라 처짐은 거의 일정하게 증가하였으며, 안정적이고 탄성적인 거동을 보인다. 해석모델의 구조거동은 실험에서의 구조거동과 일치하는 경향을 보이며, 처짐도 일치하는 경향을 보인다. 실험에서도 약 1300~1400 kN구간에서 초기균열이 발생하였으며, 이러한 실험결과는 PSC-I 거더의 실험체와 해석모델 모두, 약 1300~1400 kN까지 탄성적인 구조거동을 한다는 판단에 신뢰성을 더해준다. 약 1400 kN 보다 높은 하중에서는 해석과 실험 모두 하중 증가에 비해 처짐의 증가량이 더 커지기 시작하며, 실험결과와 해석결과의 경향도 거의 같다. 약 1300 kN

보다 높은 하중에서 실험상의 처짐이 해석결과의 처짐보다 커지기 시작하며, 이는 실제 해석에서 발생하는 PS손실량이 실험에서 발생하는 PS손실량보다 작았기 때문으로 판단되나, 그 차이는 미비하고 약 2300 kN에서 해석과 실험의 처짐은 다시 같아진다.

최대하중($P_{\max} = 2500kN$)에서는 비탄성 구조거동을 하는 구간이지만 실험과 해석에서 모두 급격하게 처짐이 발생하며 구조물이 파괴되는 그래프 형상은 보이지 않는다. 이러한 결과로 아치덱을 활용한 PSC-I 거더가 최대하중($P_{\max} = 2500kN$)에서 거더하부에 균열은 있지만, 구조물 전체적으로 판단할 때, 안정적인 구조거동을 보인다고 판단된다.

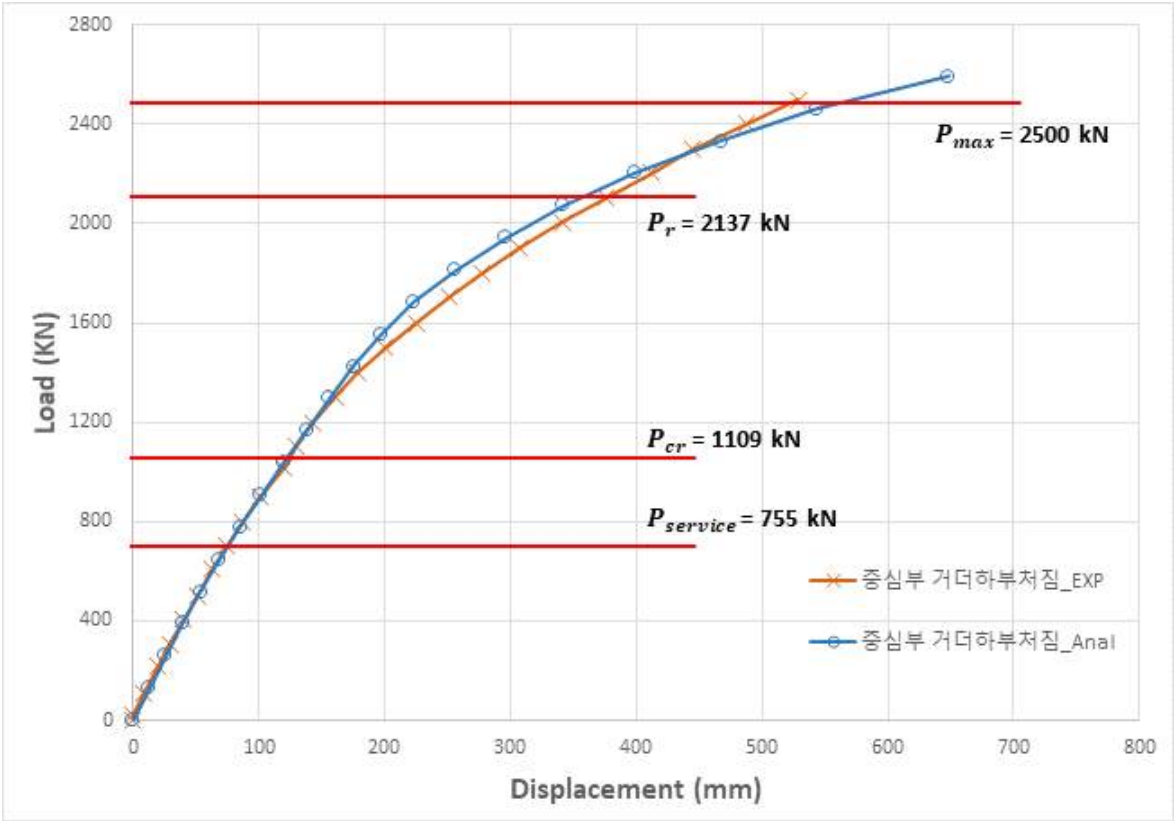


그림 3.119 PSC-I 거더의 중앙하부 하중-처짐

(5) 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 해석

① 재료구성 모델 및 상세해석 모델

본 해석에서는 1차년도 실험과 아치덱 및 슬래브의 선형 및 비선형해석 데이터에 2차년도 실험과 PSC-I 거더의 선형 및 비선형해석 데이터를 접목시켜 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더의 선형 및 비선형해석을 수행하였다.

아치덱 및 슬래브의 콘크리트 구성모델은 소형 또는 중형 콘크리트 구조물에 일반적으로 사용되는 Total strain crack 모델을 적용하였으며, PSC-I 거더의 콘크리트 구성모델은 대부분의 중형 또는 대형 콘크리트 구조물에 일반적으로 많이 사용되는 Drucker-Prager 모델과 항복기준을 적용하여 선형 및 비선형해석을 수행하였다.

철근 구성모델은 선형 및 비선형 해석에서 일반적으로 사용하는 Von Mises 재료모델을 적용하으며, Solid element는 8절점 Solid element를 적용하였다.

아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 해석을 위한 모델 형상은 3개의 PSC-I 거더 모델 사이에 아치넥 모델을 적용하고, 그 위에 슬래브 모델이 아치넥과 거더를 덮는 형상으로 일반 교량과 같이 적용하였다. 이렇게 적용한 아치넥, 슬래브, PSC-I 거더, 3개의 모델메쉬는 하나의 구조물처럼 일체거동하게 적용시켰다. 또한, 재료의 물성치의 경우, 기존 1차년도와 2차년도에서 실험과 함께 수행한 해석 모델 데이터를 기반으로 기존 해석에서 적용했던 물성치와 동일하게 적용하였다. 그림 3.120~그림 3.121은 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더의 모델을 다방면에서 본 것이다. 그림 3.120은 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체를 3D 차원에서 전체적으로 본 모습이며, 그림 3.121은 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체를 측면에서 단편적으로 본 모습이다.

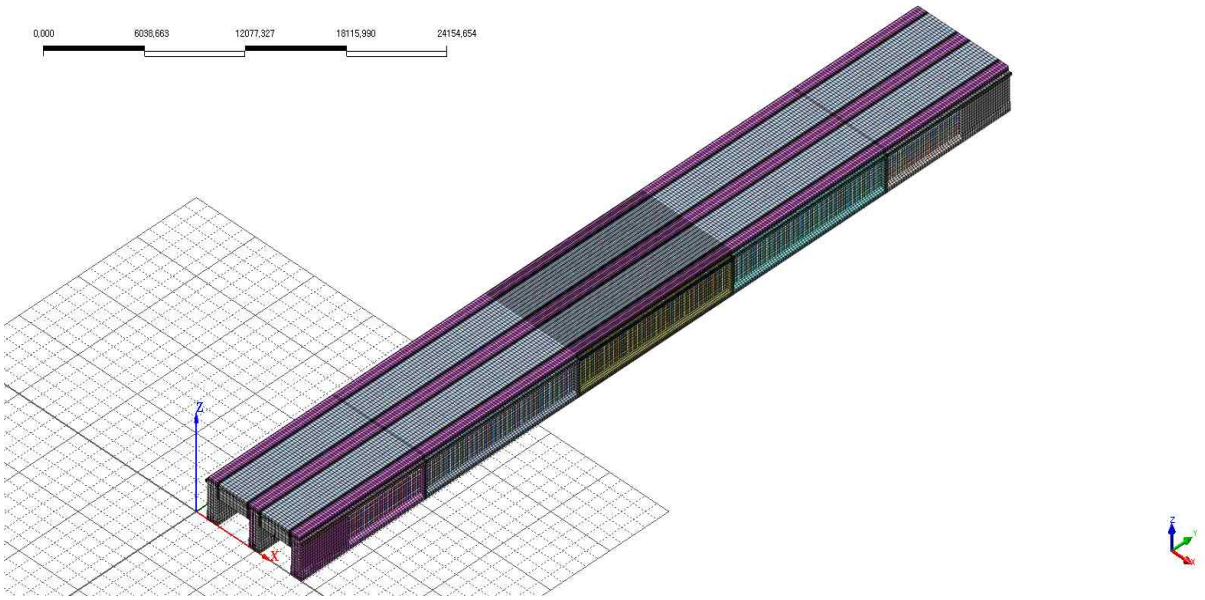


그림 3.120 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체(3D View)

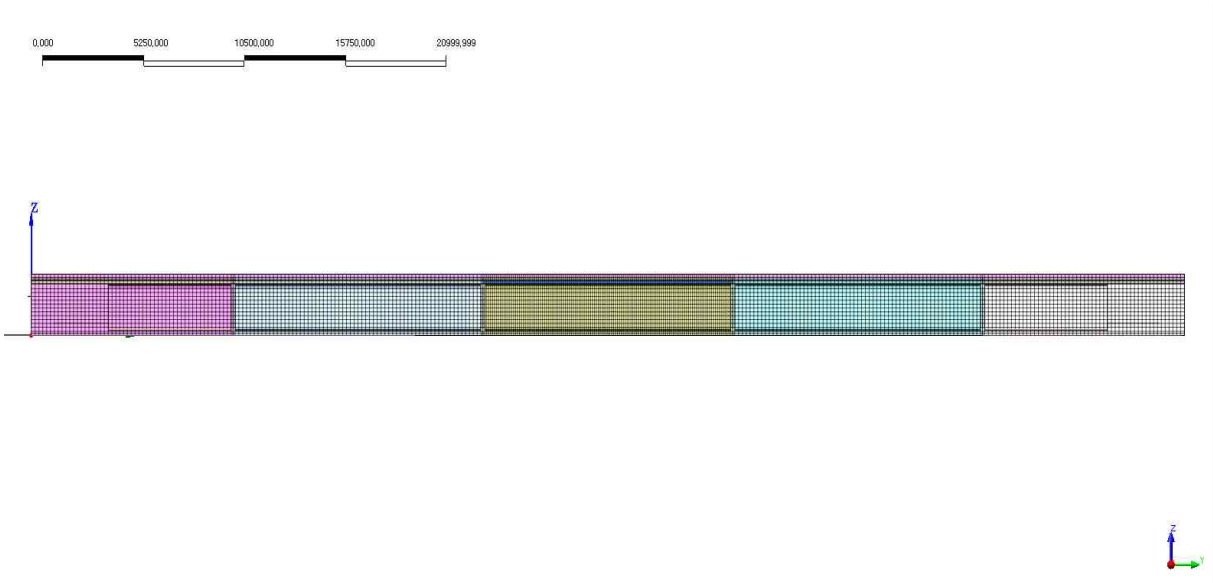


그림 3.121 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체(Side View)

② 해석 조건

본 해석에서는 하중 위치를 3개의 거더 위에 등분포하중으로 재하하였다. 최대하중은 단일거더 최대하중인 2500 kN(약 250 tonf)의 3배보다 조금 큰 값으로, 약 8000 kN(약 800 tonf)이며, 하중단계는 20스텝으로 적용하였다. 또한, 프리스트레싱력은 3개의 거더 모두, 2차년도 PSC-I 거더 해석과 동일하게 적용하였으며 경계조건도 기존 2차년도 해석과 동일하게 힌지-롤러를 적용하였다. 그림 3.122~ 그림 3.123은 하중위치 및 하중면적의 모습이다. 그림 3.122는 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치 및 면적을 3D 차원에서 전체적으로 본 모습이며, 그림 3.123은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치 및 하중면적을 측면에서 본 모습이다.

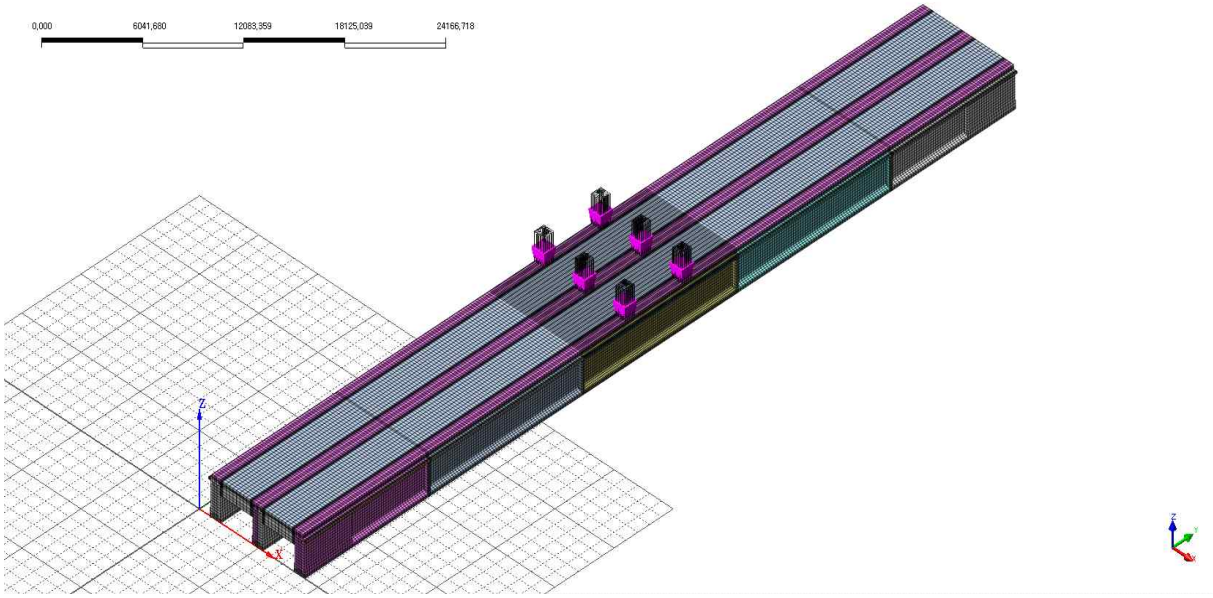


그림 3.122 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치 및 하중면적(3D View)

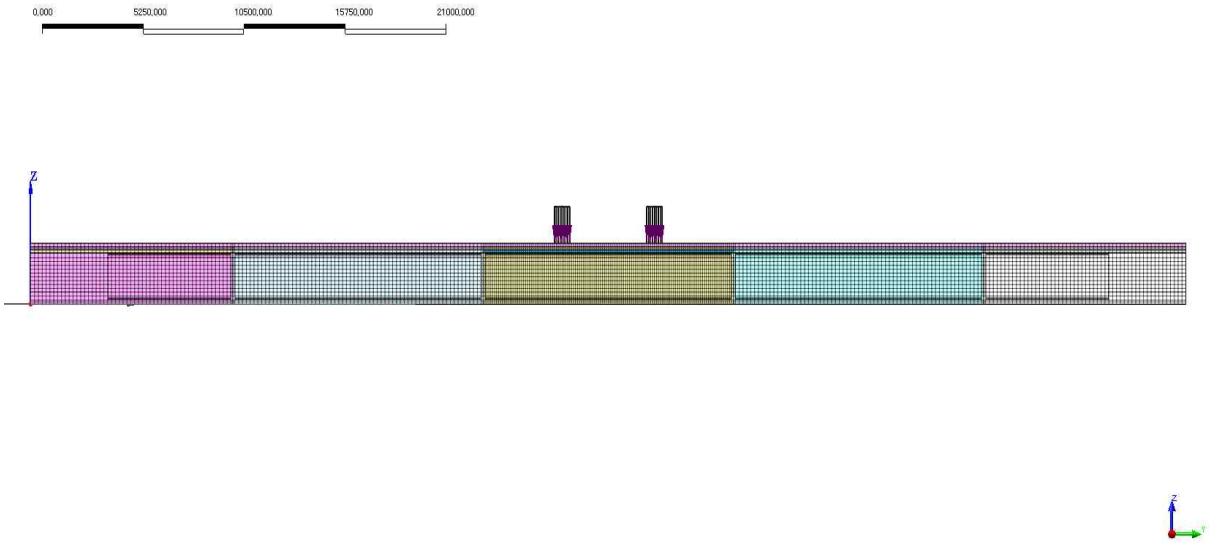


그림 3.123 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 하중위치 및 하중면적(Side View)

③ 해석결과

아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더의 선형 및 비선형해석

본 해석에서는 1차년도에 수행한 아치덱 및 슬래브 해석모델과 2차년도에 수행한 PSC-I 거더 해석모델을 접목시켜 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더의 선형 및 비선형해석을 수행하였다. 3주형 PSC-I 거더 실험체의 모델링 진행과정에서 거더사이의 측면처짐, 특히 거더 복부의 안정성을 위해 거더 단부, 1/4지점, 1/2지점에 가로보를 모델링하여 적용하였다.

2차년도에 수행한 PSC-I 거더 해석의 경우, 구조적인 안정성을 확인하기 위해 하중 재하점의 위치가 가장 구조적으로 가장 취약한 중앙부, 정확히는 중앙부 좌우로 2 지점이었다. 이와 같이 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 해석에서도 구조적으로 가장 취약한 중앙부, 정확히는 중앙부 좌우로 2 지점, 총 6 곳의 거더 위 슬래브에 등분포하중의 형식으로 하중을 재하하였다.

그림 3.124~그림 3.125는 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 처짐 형상이며, 그림 3.126~그림 3.128은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 데크하부, 중앙거더, 외부거더의 지점별 하중-처짐 그래프이다. 그림 3.124는 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 처짐 형상을 3D 시점에서 전체적으로 본 모습이며, 그림 3.125는 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 처짐 형상을 측면에서 단편적으로 본 모습이다.

그림 3.126~그림 3.128 3개의 하중-처짐 그래프 중, 그림 3.126은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체에서 가장 얇은 부분인 데크 하부의 하중-처짐 그래프이며, 그림 3.127과 그림 3.128은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체에서 가장 두꺼우며 강도가 높은 중앙거더와 외부거더(제 1거더 또는 제 3거더)의 처짐을 하중에 따라 도식화한 그래프이다.

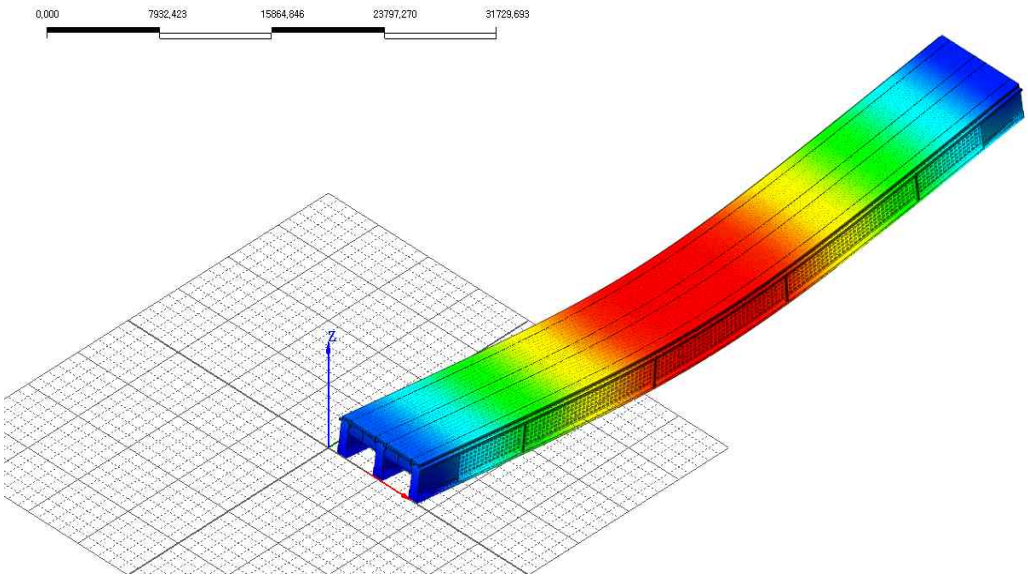


그림 3.124 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(3D View)

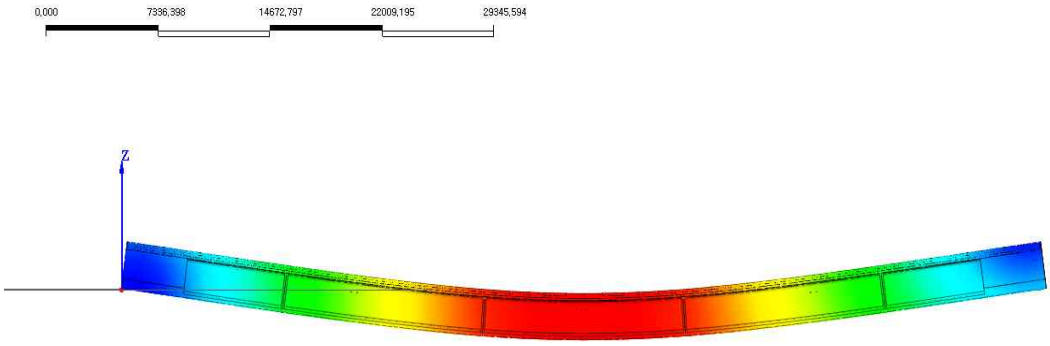


그림 3.125 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체 처짐형상(Side View)

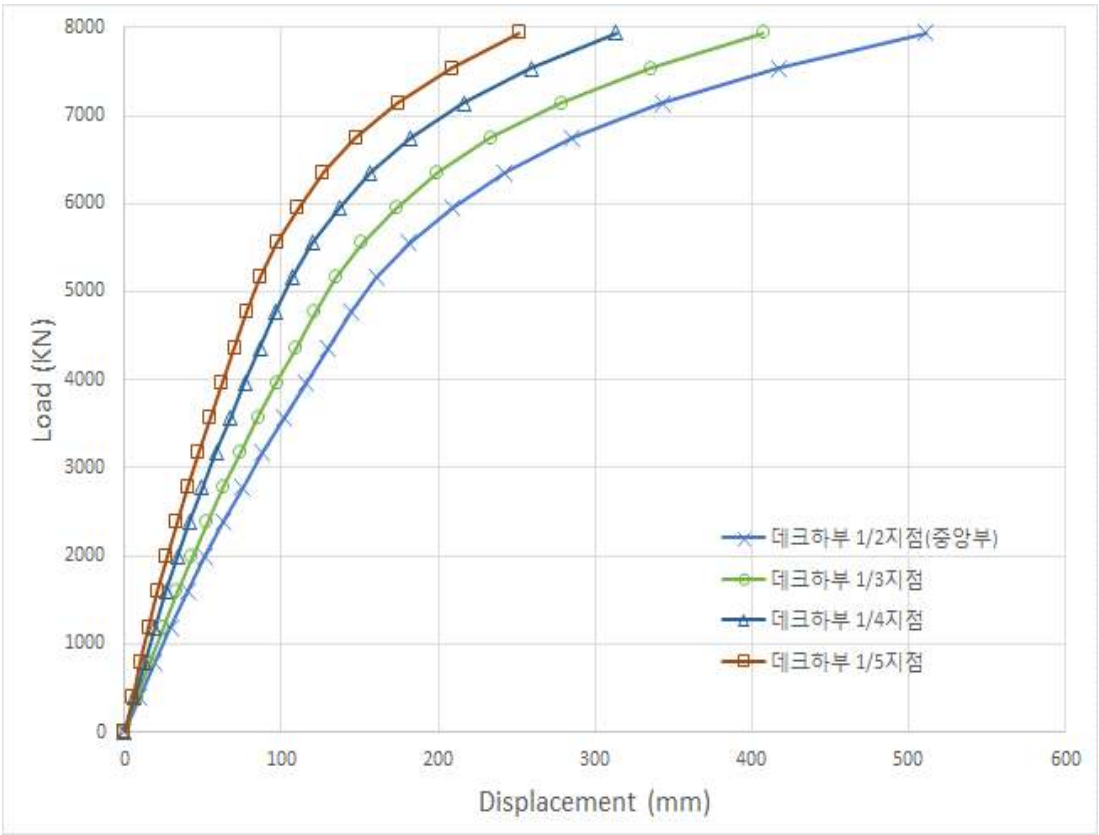


그림 3.126 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 데크하부 지점별 하중-처짐

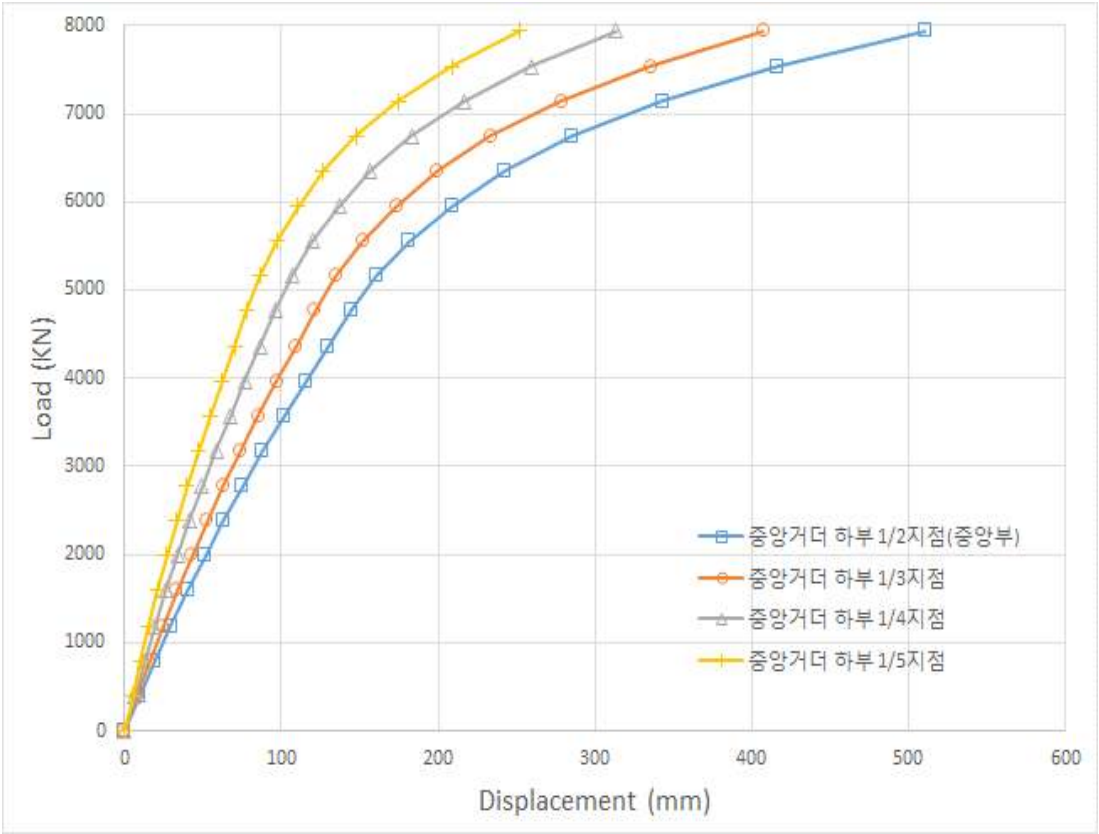


그림 3.127 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 중앙거더 하부 지점별 하주-처짐

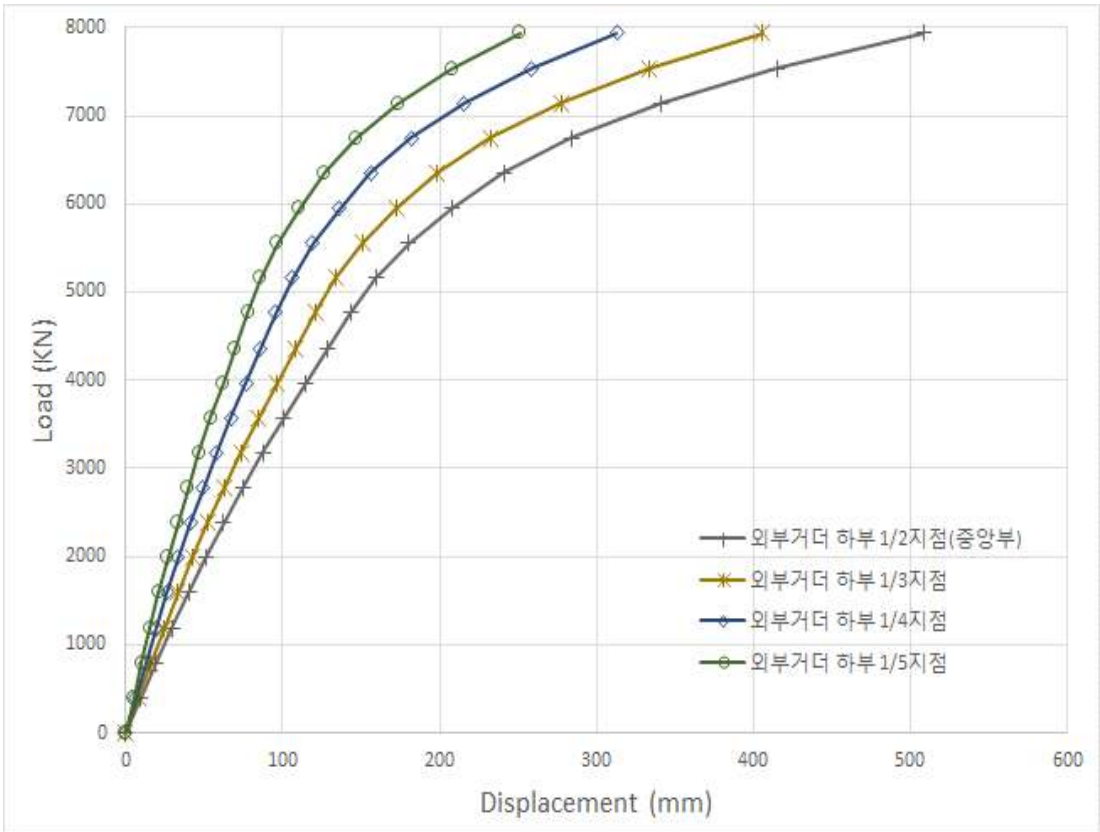


그림 3.128 아치넥 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 외부거더 하부 지점별 하중-처짐

본 해석에서는 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 구조 성능평가를 위한 선형 및 비선형해석을 수행하였다. 경계조건은 힌지와 롤러를 적용하였고 최대하중은 단일거더 최대하중인 2500 kN(약 250 tonf)의 3배보다 조금 큰 값으로, 약 8000 kN(약 800 tonf)이며, 하중단계는 20스텝을 적용하였다.

아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체의 선형 및 비선형해석 결과는 중앙거더를 중심으로 좌우대칭이므로 좌우 데크하부 2개 중 한곳과 중앙거더, 외부거더 한곳의 처짐을 하중에 따라 그래프로 도식화하였으며, 지점별 하중에 따른 처짐을 분석하였다.

그림 3.126에서 보는 바와 같이, 데크하부의 처짐은 1/2지점(중앙부)에서 최대처짐이 발생한다. 거더 전체에 작용한 하중의 영향을 받은 데크는 선형적이고 안정적인 거동을 하다가 약 5500 kN부터 비선형적인 거동을 보인다. 이 때 구조물 파괴가 발생하는 것은 아니지만 균열이 이미 발생하였다고 판단된다. 약 5500 kN 의 하중부터 최대하중 약 8000 kN (약 800 tonf) 까지 비선형적인 거동은 계속되지만 구조물의 급격한 처짐이 보이지는 않는 안정적인 거동을 한다.

데크하부의 처짐은 중앙부에서 멀어질수록 거리에 비례해서 작아진다. 비선형적인 거동은 1/2지점(중앙부)부터 1/3지점, 1/4지점, 1/5지점 순으로 발생하며, 하중이 증가함에 따라 이러한 비선형적인 거동은 점점 구조물 전체로 확대된다. 지점별 처짐의 전체적인 비율은 같은 하중에서 1/2지점의 처짐이 1/5지점의 처짐보다 약 2배 많으며, 지점별 하중-처짐 그래프의 기울기는 다르나 그래프의 경향은 같다. 또한, 그래프간 간격도 거의 일정한 경향을 보인다.

그림 3.127에서 보는 바와 같이, 중앙거더 하부의 처짐은 데크하부처럼 1/2지점(중앙부)에서 최대처짐이 발생한다. 처짐은 중앙부에서 멀어질수록 거리에 비례해 작아지며 최대처짐이 발생하는 1/2지점(중앙부)과 가장 작은 처짐이 발생하는 1/5지점의 처짐을 비교하면, 데크하부의 결과치와 같은 약 2배차이다. 또한, 지점별 하중-처짐 그래프의 기울기는 다르나 그래프의 전체적인 경향은 같으며, 같은 하중에서 중앙거더의 처짐은 데크하부나 외부거더와 비슷하지만, 가장 하중을 많이 받고 양쪽 거더에서 받는 하중의 영향 때문에 다른 위치보다 미세하게 처짐이 가장 크다.

거더 위 중앙부에 작용한 하중은 중앙거더의 수직처짐을 발생시키며, 이 과정에서 중앙거더는 선형적이고 안정적인 거동을 하다가 약 5500 kN부터 비선형적인 거동을 보인다. 이 때 구조물 파괴가 발생하는 것은 아니지만 균열이 이미 발생하였다고 판단된다. 약 5500 kN 의 하중부터 최대하중 약 8000 kN(약 800 tonf) 까지 비선형적인 거동은 계속되지만 구조물의 급격한 처짐이 보이지는 않는 안정적인 거동을 한다.

그림 3.128에서 보는 바와 같이, 외부거더(제 1거더 또는 제 3거더) 하부도 데크하부와 중앙거더의 거동과 비슷한 양상을 보인다. 중앙부에서 최대처짐이 발생하며 중앙부에서 멀어질수록 거리에 비례해 처짐이 작아진다. 최대처짐이 발생하는 1/2지점과 가장 작은 처짐이 발생하는 1/5지점의 처짐은 약 2배차이며, 지점별 하중-처짐 그래프의 기울기는 다르나 전체적인 경향은 같다.

결과치를 보면, 외부거더의 결과는 데크하부와 중앙거더와 크게 다르지 않다. 거더 위 중앙부에 작용한 하중은 외부거더의 수직처짐이 발생시키며, 이 과정에서 외부거더는 선형적이고 안정적인 거동을 하다가 약 5500 kN부터 비선형적인 거동을 보인다. 이 때 구조물이 파괴가 되는 것은 아니지만 균열이 이미 발생하였다고 판단된다. 약 5500 kN 의 하중부터 최대하중 약 8000 kN(약 800 tonf) 까지 비선형적인 거동은 계속되지만 구조물의 급

격한 처짐이 보이지는 않는 안정적인 거동을 한다. 또한, 중앙거더가 같은 하중에서 미세하게 가장 큰 처짐은 보이는 거와 달리, 외부거더는 같은 하중에서 미세하게 가장 작은 처짐을 보인다.

④ 해석결과 분석

아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 모델의 선형 및 비선형 해석 결과, 처짐 형상과 하중-처짐 그래프에서 보는 바와 같이, 단일 거더의 구조거동 비해 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체가 구조적으로 보다 안정적인 거동을 보였다. 이는, 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 모델의 선형 및 비선형 모델의 경우, 거더 사이에 위치한 5개의 가로보가 거더의 구조거동에서 비틀림 또는 측면처짐의 발생을 억제하고 거더 위의 하중을 수직측으로만 받게 해주기 때문이라 판단된다. 또한 거더 사이의 데크가 안정적인 구조거동에 영향을 끼쳤다고 판단된다. 마지막으로, 3개의 거더가 하중을 받으며 일체거동하기 때문에 이 하중에 반하기 위해 서로의 구조거동에 긍적적인 영향을 끼쳤다고 판단된다.

해석결과, 최대하중 약 8000 kN(약 800 tonf)의 하중에서 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체는 데크하부, 중앙거더, 외부거더에서 모두 안정적인 거동을 보였다. 이러한 구조거동은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 실험체가 8000 kN (약 800 tonf) 이상의 하중에서도 안정적인 구조거동을 보일 것이라고 판단하는 과정에 신뢰성을 더해준다. 또한, 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더가 아니라 4주형, 5주형, 6주형 또는 그 이상으로 거더와 데크의 수가 늘어난다면, 수가 늘어난 모델은 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더보다 구조적으로 안정적인 거동을 할 것이라 판단된다.

(6) 결 론

앞서, 1차년도에는 아치덱 합성 전 정적재하, 아치덱 합성 후 펀칭전단, 아치덱 합성후 정적재하 실험체의 선형 및 비선형해석과 실험을 수행하였다. 2차년도에는 PSC-I 단일거더 모델의 선형 및 비선형해석과 실험을 수행하였으며, 거기에 그치지 않고 아치덱 및 슬래브를 적용한 3주형 PSC-I 거더 모델의 선형 및 비선형 해석을 수행하였다. 그리고 해석결과, 정적재하 상에서 실험체 모두 안정적인 거동을 한다고 판단됐다.

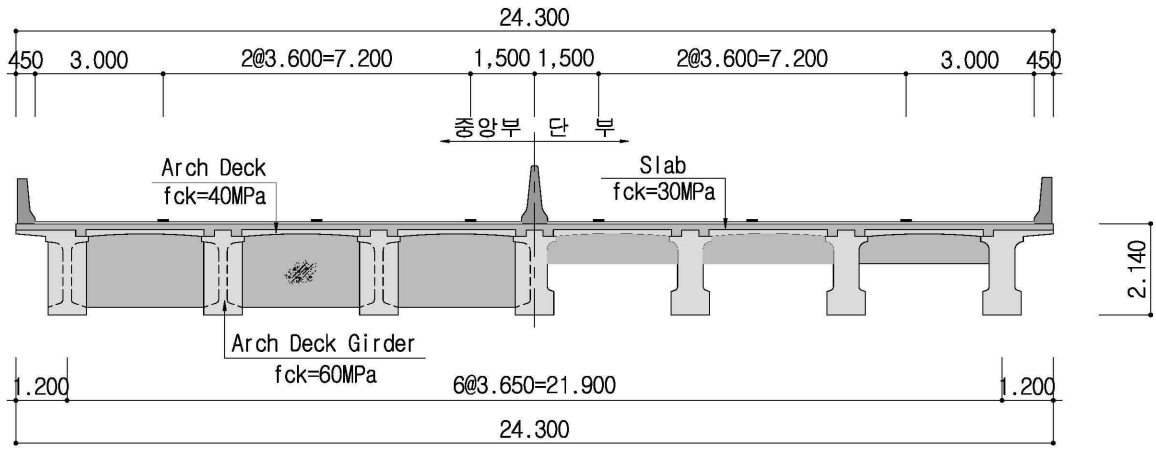
본 연구에서는 2년동안 수행해 온 해석과 실험의 결과물인 데이터를 기반으로 매개변수 해석을 추가적으로 계획하고 있다. 앞으로 진행될 매개변수 해석의 진행방식은 매우 다양할 수 있다. 추가적인 매개변수 해석의 방향은 어떤 결과물의 도출을 원하느냐에 따라 달라진다. 매개변수 해석방식은 거더 사이의 거리에 따른 아치덱 및 슬래브의 구조 성능평가를 위한 해석으로 진행될 수 있으며, 아치덱, 슬래브, PSC-I Girder의 물성치 및 크기 조정에 따른 해석으로 최적의 실험체 모델 크기 및 물성치를 도출하는 연구로 진행 될 수도 있다. 또한, 도입 프리스트레싱력에 따른 아치덱 또는 PSC-I Girder의 구조 성능평가를 위한 해석으로 최적의 도입 프리스트레싱력을 찾는 해석 및 연구가 진행될 수도 있다. 위의 3가지 경우의 수 뿐만 아니라, 그 외에도 다양한 매개변수 해석이 추가적으로 진행될 수 있다. 하지만 한가지 확실한 것은 어떠한 방향으로 매개변수 해석이 진행될지라도 이러한 추가적인 매개변수 해석으로 구조적 및 경제적으로 가장 합리적인 아치덱, PSC-I 거더를 도출해내는 것이 본 연구의 최종 목표라고 사료된다.

4. 경제성 분석

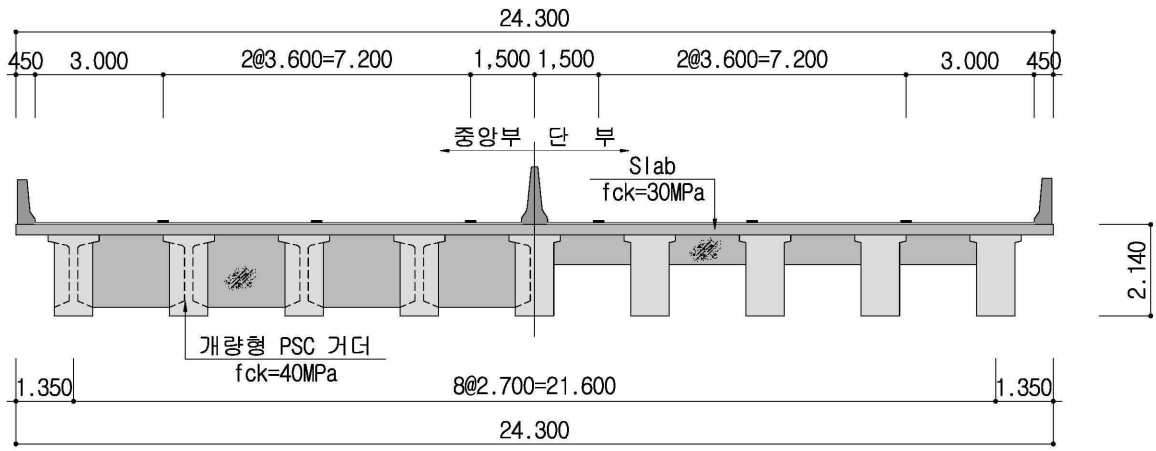
본 연구는 장지간 바닥판 아치덱을 활용한 바닥판 일체식 저형고 PSC-I 거더 교량 시스템 상부구조에 대한 내용으로 아치형상의 프리캐스트 하프덱 사용으로 바닥판의 내구성을 향상 시킬 수 있어 장지간 바닥판 적용이 가능하고, 일체형 캔틸레버 및 아치덱을 사용하여 시공 중 안전성 및 시공성을 향상 시킬 수 있는 공법이다. 또한 장지간 아치덱 바닥판을 적용하여 거더 본 수를 감소시킬 수 있으며, 상부 돌출플랜지 적용으로 단면 효율을 극대화 하였고, 2차 공정이 없는 일반 PSC 거더와 동일한 공정으로 시공성 및 경제성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4.1 공사비 분석

본 연구 성과물인 아치덱 거더의 공사비에 대한 절감효과를 비교 분석하기 위하여 동일한 제원의 개량형 PSC 거더를 선정하여 초기 공사비를 산출하였다. 대상교량의 제원은 B=24.3m, L=40.0m이며 그림 4.1은 대상교량의 횡단면도이다.



(a) 아치덱 거더 횡단면도



(b) 개량형 PSC 거더 횡단면도

그림 4.1 대상교량 횡단면도

표 4.1과 표 4.2는 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더를 동일한 조건으로 초기 공사비를 산정한 결과이다. 아치덱 거더 공사비 산정은 해석 및 실험으로 검증 된 아치덱 거더와 안전성 및 시공성이 확보된 아치덱을 적용하였고, 거더 배치 간격은 3.65m로 늘려 총 7본을 배치하였다. 개량형 PSC 거더 공사비 산정은 현장타설 바닥판을 적용하였고 거더 배치는 일반적으로 적용되는 거더 간격인 2.75m로 총 9본을 배치하였다.

초기공사비 산정결과 거더 공사비는 약 20% 절감되는 효과를 확인할 수 있으며 바닥판 공사비는 거의 유사한 값을 보였다. 폭 24.3m, 연장 40.0m의 교량 전체 공사비는 아치덱 거더 공사비가 개량형 PSC 거더에 비해 약 14%정도 절감효과가 있을 것으로 사료되며, 받침 개수 감소, 유지관리 비용 및 덱 적용으로 인한 공기단축 등을 고려해 볼 때 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더의 공사비 차이는 더욱 증가 할 것으로 예상된다.

표 4.1 아치덱 거더 공사비 (L=40.0m, B=24.3m)

구 분		수량	단위	단위공사비	전체공사비	
거더 공사비	내측거더	5	본	37,777,217 원	188,886,085 원	267,688,615 원
	외측거더	2	본	39,401,265 원	78,802,530 원	
바닥판 공사비	아치덱	192	ea	414,315 원	79,548,480 원	145,421,869 원
	현장타설	1	식	65,873,389 원	65,873,389 원	
합 계		1	span			413,110,484 원

표 4.2 개량형 PSC 거더 공사비 (L=40.0m, B=24.3m)

구 분	수량	단위	단위공사비	전체공사비
거더 공사비	9	본	37,301,988 원	335,717,892 원
바닥판 공사비	1	식	146,438,621 원	146,438,621 원
합 계	1	span		482,156,513 원

표 4.3 공사비 비교

구 분	아치덱 거더	개량형 PSC 거더	비 율
거더 공사비	267,688,615 원	335,717,892 원	79.7 %
바닥판 공사비	145,421,869 원	146,438,621 원	99.3 %
합 계	413,110,484 원	482,156,513 원	85.7 %

① 아치덱 거더교 내역서

내역서

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
Arch-Deck Girder 교	L40m B24.3m	1	SPAN		199,763,382		182,320,352		31,026,750		413,110,484	
. Arch-Deck Girder					136,738,762		121,989,204		8,960,649		267,688,615	
.. 거더 제작					62,651,999		118,948,011		3,236,356		184,836,366	
...거더제작 (내측)	40m	5	본	8,927,535	44,637,675	16,805,519	84,027,595	458,998	2,294,990	26,192,052	130,960,260	
...거더제작 (외측)	40m	2	본	9,007,162	18,014,324	17,460,208	34,920,416	470,683	941,366	26,938,053	53,876,106	
.. 운반 및 가설					2,022,056		3,041,193		5,724,293		10,787,542	
...거더 운반 및 가설(내측)	40m	5	본	283,908	1,419,540	423,063	2,115,315	796,863	3,984,315	1,503,834	7,519,170	
...거더 운반 및 가설(외측)	40m	2	본	301,258	602,516	462,939	925,878	869,989	1,739,978	1,634,186	3,268,372	
.. 자재비					72,064,707						72,064,707	
...자재비_거더제작 (내측)	40m	5	본	10,081,331	50,406,655					10,081,331	50,406,655	
...자재비_거더제작 (외측)	40m	2	본	10,829,026	21,658,052					10,829,026	21,658,052	
. 슬래브					63,024,620		60,331,148		22,066,101		145,421,869	
..데크제작	1.2m*2.77m	192	EA	12,643	2,427,456	106,573	20,462,016	4,255	816,960	123,471	23,706,432	
..자재비_데크제작	1.2m*2.77m	192	EA	74,058	14,219,136					74,058	14,219,136	
..아치덱 운반 및 가설	40m	192	EA	37,853	7,267,776	70,848	13,602,816	108,085	20,752,320	216,786	41,622,912	
..슬래브 제작	제작	1	식	12,748,899	12,748,899	26,266,316	26,266,316	496,821	496,821	39,512,036	39,512,036	
..슬래브 자재비	자재비	1	식	26,361,353	26,361,353					26,361,353	26,361,353	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.1 거더제작 (내측)	40m	1	본									
철근콘크리트타설/펌프카		32.194	m3	902	29,039	9,784	314,986	2,020	65,031	12,706	409,056	
강재거푸집(D=3m)	0-7m	264.751	m2	3,136	830,259	32,207	8,526,835	49	12,973	35,392	9,370,067	
PC강연선조립설치	D15.2mm	3.138	ton	1,200,000	3,765,600	175,009	549,178	12,250	38,440	1,387,259	4,353,218	
철근 현장가공 및 조립	복잡	3.62	TON	7,749	28,051	379,715	1,374,568			387,464	1,402,619	
쉬즈관및보호호스설치	Φ65/70mm	85.73	m	2,211	189,549	5,996	514,037	119	10,201	8,326	713,787	
쉬즈관및보호호스설치	Φ85/90mm	128.341	m	2,982	382,713	7,841	1,006,321	156	20,021	10,979	1,409,055	
긴장정착구설치	09φ15.2mm	4	개	92,800	371,200	24,303	97,212	1,215	4,860	118,318	473,272	
긴장정착구설치	16φ15.2mm	6	개	208,000	1,248,000	31,782	190,692	1,589	9,534	241,371	1,448,226	
강선인장작업	φ15.2m/m-09가닥	2	개소	2,923	5,846	58,518	117,036	17,427	34,854	78,868	157,736	
강선인장작업	φ15.2m/m-16가닥	3	개소	5,198	15,594	104,032	312,096	30,984	92,952	140,214	420,642	
거더 GROUTING	D65mm	85.73	m	607	52,038	1,719	147,370	127	10,887	2,453	210,295	
거더 GROUTING	D85mm	128.341	m	1,037	133,089	2,936	376,809	219	28,107	4,192	538,005	
AIR VENT 설치		10	개소	1,084	10,840	54	540			1,138	11,380	
모르터르	1:3	0.308	㎥	1,583	488	51,190	15,766			52,773	16,254	
스페이셔	벽체용	118.924	m2	278	33,061	15	1,783			293	34,844	
스페이셔	슬라브 및 기초	35.91	m2	140	5,027	7	251			147	5,278	
솔플레이트 제작 및 설치	800×800×22	2	ea	112,506	225,012	454,939	909,878	170	340	567,615	1,135,230	
인양와이어 설치	SWPC7B 15.2mm	0.059	ton	1,453,166	85,736	72,658	4,287			1,525,824	90,023	
PSC빔 제작부재	빔 제작대	40	m	22,313	892,520	45,303	1,812,120			67,616	2,704,640	
빔 증기양생	ℓ = 40m	1	본	623,873	623,873	533,754	533,754	130,798	130,798	1,288,425	1,288,425	
		0										
계					8,927,535		16,805,519		458,998		26,192,052	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.2 거더제작 (외측)	40m	1	본									
철근콘크리트타설/펌프카		37.614	m3	902	33,928	9,784	368,015	2,020	75,980	12,706	477,923	
강재거푸집(D=3m)	0-7m	279.776	m2	3,136	877,377	32,207	9,010,746	49	13,709	35,392	9,901,832	
PC강연선조립설치	D15.2mm	3.138	ton	1,200,000	3,765,600	175,009	549,178	12,250	38,440	1,387,259	4,353,218	
철근 현장가공 및 조립	복잡 (표준시장)	3.88	TON	7,749	30,066	379,715	1,473,294			387,464	1,503,360	
쉬즈관및쉬즈보호호스설치	Φ65/70mm	85.73	m	2,211	189,549	5,996	514,037	119	10,201	8,326	713,787	
쉬즈관및쉬즈보호호스설치	Φ85/90mm	128.341	m	2,982	382,713	7,841	1,006,321	156	20,021	10,979	1,409,055	
긴장정착구설치	09φ15.2mm	4	개	92,800	371,200	24,303	97,212	1,215	4,860	118,318	473,272	
긴장정착구설치	16φ15.2mm	6	개	208,000	1,248,000	31,782	190,692	1,589	9,534	241,371	1,448,226	
강선인장작업	φ15.2m/m-09가닥	2	개소	2,923	5,846	58,518	117,036	17,427	34,854	78,868	157,736	
강선인장작업	φ15.2m/m-16가닥	3	개소	5,198	15,594	104,032	312,096	30,984	92,952	140,214	420,642	
거더 GROUTING	D65mm	85.73	m	607	52,038	1,719	147,370	127	10,887	2,453	210,295	
거더 GROUTING	D85mm	128.341	m	1,037	133,089	2,936	376,809	219	28,107	4,192	538,005	
AIR VENT 설치		10	개소	1,084	10,840	54	540			1,138	11,380	
모르터르	1:3	0.308	㎥	1,583	488	51,190	15,766			52,773	16,254	
스페이셔	벽체용	127.635	m2	278	35,483	15	1,914			293	37,397	
스페이셔	슬라브 및 기초	35.91	m2	140	5,027	7	251			147	5,278	
솔플레이트 제작 및 설치	800×800×22	2	ea	112,506	225,012	454,939	909,878	170	340	567,615	1,135,230	
인양와이어 설치	SWPC7B 15.2mm	0.059	ton	1,453,166	85,736	72,658	4,287			1,525,824	90,023	
PSC빔 제작부재	빔 제작대	40	m	22,313	892,520	45,303	1,812,120			67,616	2,704,640	
빔 증기양생	ℓ = 40m	1	본	623,873	623,873	533,754	533,754	130,798	130,798	1,288,425	1,288,425	
전도방지공설치		1	본	23,183	23,183	12,593	12,593			35,776	35,776	
전도방지공철거		1	본			6,299	6,299			6,299	6,299	
		0										
계					9,007,162		17,460,208		470,683		26,938,053	
No.3 거더 운반 및 가설(내측)	40m	1	본									
아치멕거더 운반	40m	1	본	157,594	157,594	167,116	167,116	362,146	362,146	686,856	686,856	
아치멕거더 가설(내측)	40m	1	본	103,131	103,131	237,055	237,055	434,717	434,717	774,903	774,903	
전도방지공설치		1	본	23,183	23,183	12,593	12,593			35,776	35,776	
전도방지공철거		1	본			6,299	6,299			6,299	6,299	
계					283,908		423,063		796,863		1,503,834	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.4 거더 운반 및 가설(외측)	40m	1	본									
아치멕거더 운반	40m	1	본	157,594	157,594	167,116	167,116	362,146	362,146	686,856	686,856	
아치멕거더 가설(외측)	40m	1	본	120,481	120,481	276,931	276,931	507,843	507,843	905,255	905,255	
전도방지공설치		1	본	23,183	23,183	12,593	12,593			35,776	35,776	
전도방지공철거		1	본			6,299	6,299			6,299	6,299	
계					301,258		462,939		869,989		1,634,186	
No.5 자재비_거더제작 (내측)	40m	1	본									
레미콘	60MPa	33.414	㎥	130,000	4,343,820					130,000	4,343,820	
하이바(고장력철근)	D13M/M	2.362	M/T	572,636	1,352,567					572,636	1,352,567	
하이바(고장력철근)	D16-25M/M	1.367	M/T	567,845	776,244					567,845	776,244	
PC강연선(2종)	15.2M/M 7연선	3138	KG	1,150	3,608,700					1,150	3,608,700	
계					10,081,331						10,081,331	
No.6 자재비_거더제작 (외측)	40m	1	본									
레미콘	60MPa	37.99	㎥	130,000	4,938,700					130,000	4,938,700	
하이바(고장력철근)	D13M/M	2.494	M/T	572,636	1,428,155					572,636	1,428,155	
하이바(고장력철근)	D16-25M/M	1.503	M/T	567,845	853,471					567,845	853,471	
PC강연선(2종)	15.2M/M 7연선	3138	KG	1,150	3,608,700					1,150	3,608,700	
계					10,829,026						10,829,026	
No.7 데크제작	1.2m*2.77m	1	EA									
철근콘크리트타설/펌프카		0.3494	m3	902	315	9,784	3,418	2,020	706	12,706	4,439	
거푸집공	강재거푸집	4.992	㎡	948	4,732	14,996	74,860	8	40	15,952	79,632	
철근 현장가공 및 조립	간단 (표준시장)	0.076	TON	3,045	231	301,444	22,910			304,489	23,141	
스페이셔	벽체용	1.661	m2	278	461	15	25			293	486	
스페이셔	슬라브 및 기초	3.331	m2	140	466	7	23			147	489	
데크 증기양생	1.2m*2.77m	1	본	6,438	6,438	5,337	5,337	3,509	3,509	15,284	15,284	
계					12,643		106,573		4,255		123,471	
No.8 자재비_데크제작	1.2m*2.77m	1	EA									
레미콘	25-40-15(Mpa)	0.3529	M3	84,191	29,710					84,191	29,710	
하이바(고장력철근)	D13M/M	0.012	M/T	572,636	6,871					572,636	6,871	
하이바(고장력철근)	D16-25M/M	0.066	M/T	567,845	37,477					567,845	37,477	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.9 아치덱 운반 및 가설	1.2m*2.77m	1	EA									
아치덱 운반	1.2m*2.77m	1	EA	17,853	17,853	22,083	22,083	12,179	12,179	52,115	52,115	
아치덱 가설 및 설치		1	EA	20,000	20,000	48,765	48,765	95,906	95,906	164,671	164,671	
		0										
계					37,853		70,848		108,085		216,786	
No.10 슬래브 (ADG)	제작	1	식									
철근콘크리트타설/펌프카		182.47	m3	902	164,588	9,784	1,785,286	2,020	368,589	12,706	2,318,463	
무수축 콘크리트 타설		2.916	m3	15,555	45,358	295,538	861,789			311,093	907,147	
거푸집/매끈한마감	0-7m	136.122	m2	11,366	1,547,162	21,108	2,873,263			32,474	4,420,425	
스페이셔	슬라브 및 기초	110.682	m2	140	15,495	7	775			147	16,270	
스페이셔	벽체용	25.44	m2	278	7,072	15	381			293	7,453	
교량표면처리/면고르기	데크피니셔	936	m2	174	162,864	147	137,592	137	128,232	458	428,688	
교량표면처리/슬라브양생	피막양생	936	m2	281	263,016	151	141,336			432	404,352	
교면방수/도막방수		936	m2	10,417	9,750,312	11,746	10,994,256			22,163	20,744,568	
낙하물방지공	강관(12개월)	119.7	m2	5,099	610,350	4,343	519,857			9,442	1,130,207	
철근 현장가공 및 조립	복잡	23.575	TON	7,749	182,682	379,715	8,951,781			387,464	9,134,463	
		0										
계					12,748,899		26,266,316		496,821		39,512,036	
No.11 슬래브 (ADG)	자재비	1	식									
레미콘	25-30-15(Mpa)	183.901	M3	68,300	12,560,438					68,300	12,560,438	
하이바(고장력철근)	D16-29M/M	24.304	M/T	567,845	13,800,915					567,845	13,800,915	
계					26,361,353						26,361,353	

② 개량형 PSC 거더교 내역서

내역서

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
개량형 PSC Girder 교	L40m B24.3m	1	SPAN		229,331,324		239,285,913		13,539,276		482,156,513	
.개량형 PSC Girder					168,120,549		154,702,332		12,895,011		335,717,892	
.. 거더 제작					81,613,782		150,424,830		4,307,085		236,345,697	
...거더 제작	40m	9	본	9,068,198	81,613,782	16,713,870	150,424,830	478,565	4,307,085	26,260,633	236,345,697	
.. 운반 및 가설					2,942,154		4,277,502		8,587,926		15,807,582	
...거더 운반 및 가설	40m	9	본	326,906	2,942,154	475,278	4,277,502	954,214	8,587,926	1,756,398	15,807,582	
.. 자재비					83,564,613						83,564,613	
...거더 자재비	40m	9	본	9,284,957	83,564,613					9,284,957	83,564,613	
.슬래브					61,210,775		84,583,581		644,265		146,438,621	
..슬래브 제작	40m	1	식	22,452,540	22,452,540	84,583,581	84,583,581	644,265	644,265	107,680,386	107,680,386	
..슬래브 자재비	40m	1	식	38,758,235	38,758,235					38,758,235	38,758,235	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.1 개량형 PSC 거더 제작	40m	1	본									
철근콘크리트타설/펌프카		38.506	m3	902	34,732	9,784	376,743	2,020	77,782	12,706	489,257	
강재거푸집(D=3m)	0-7m	234.225	m2	3,136	734,530	32,207	7,543,684	49	11,477	35,392	8,289,691	
PC강연선조립설치	D15.2mm	2.748	ton	1,200,000	3,297,600	175,009	480,924	12,250	33,663	1,387,259	3,812,187	
철근 현장가공 및 조립	복잡	4.961	TON	7,749	38,442	379,715	1,883,766			387,464	1,922,208	
쉬즈관및보호호스설치(1차)	Φ75/80mm	118.952	m	2,562	304,755	6,918	822,910	138	16,415	9,618	1,144,080	
쉬즈관및보호호스설치(2차)	Φ75/80mm	72.003	m	2,562	184,471	6,918	498,117	138	9,936	9,618	692,524	
긴장정착구설치(1차)	15φ15.2mm	6	개	158,400	950,400	26,173	157,038	1,308	7,848	185,881	1,115,286	
긴장정착구설치(2차)	09φ15.2mm	4	개	92,800	371,200	24,303	97,212	1,215	4,860	118,318	473,272	
강선인장작업(1차)	φ15.2m/m-15가닥	3	개소	4,873	14,619	97,530	292,590	29,048	87,144	131,451	394,353	
강선인장작업(2차)	φ15.2m/m-09가닥	2	개소	2,923	5,846	372,608	745,216	32,920	65,840	408,451	816,902	
거더 GROUTING(1차)	D75mm	118.952	m	808	96,113	2,289	272,281	170	20,222	3,267	388,616	
거더 GROUTING(2차)	D75mm	72.003	m	808	58,178	2,289	164,815	170	12,240	3,267	235,233	
AIR VENT 설치		10	개소	1,084	10,840	54	540			1,138	11,380	
모르터르	1:3	0.261	㎥	1,583	413	51,190	13,360			52,773	13,773	
스페이셔	벽체용	198.225	m2	278	55,106	15	2,973			293	58,079	
스페이셔	슬라브 및 기초	36	m2	140	5,040	7	252			147	5,292	
솔플레이트 제작 및 설치	800×800×22	2	ea	112,506	225,012	454,939	909,878	170	340	567,615	1,135,230	
인양와이어 설치	SWPC7B 15.2mm	0.148	ton	1,453,166	215,068	72,658	10,753			1,525,824	225,821	
PSC빔 제작부재	빔 제작대	40	m	22,313	892,520	45,303	1,812,120			67,616	2,704,640	
빔 중기양생	ℓ = 40m	1	본	623,873	623,873	533,754	533,754	130,798	130,798	1,288,425	1,288,425	
보호캡 설치		4	EA	237,360	949,440	23,736	94,944			261,096	1,044,384	
계					9,068,198		16,713,870		478,565		26,260,633	
No.2 개량형 PSC 거더 운반 및	40m	1	본									
개량형 PSC 거더 운반	40m	1	본	181,599	181,599	175,677	175,677	439,443	439,443	796,719	796,719	
개량형 PSC 거더 가설	40m	1	본	122,124	122,124	280,709	280,709	514,771	514,771	917,604	917,604	
전도방지공설치		1	본	23,183	23,183	12,593	12,593			35,776	35,776	
전도방지공철거		1	본			6,299	6,299			6,299	6,299	
계					326,906		475,278		954,214		1,756,398	

일위대가_호표

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
No.3 개량형 PSC 거더 자재비	40m	1	본									
레미콘	25-40-15(Mpa)	38.125	M3	84,191	3,209,778					84,191	3,209,778	
하이바(고장력철근)	D13M/M	2.774	M/T	572,636	1,588,493					572,636	1,588,493	
하이바(고장력철근)	D16-25M/M	2.336	M/T	567,845	1,326,486					567,845	1,326,486	
PC강연선(2종)	15.2M/M 7연선	2748	KG	1,150	3,160,200					1,150	3,160,200	
계					9,284,957						9,284,957	
No.4 슬래브 (개량형 PSC 거더)	40m	1	식									
철근콘크리트타설/펌프카		255.462	m3	902	230,427	9,784	2,499,440	2,020	516,033	12,706	3,245,900	
무수축 콘크리트 타설		2.397	m3	15,555	37,285	295,538	708,404			311,093	745,689	
거푸집/매끈한마감	0-7m	717.596	m2	11,366	8,156,196	21,108	15,147,016			32,474	23,303,212	
스페이셔	슬라브 및 기초	544.929	m2	140	76,290	7	3,814			147	80,104	
스페이셔	벽체용	172.667	m2	278	48,001	15	2,590			293	50,591	
목재동바리	4회	927.792	공m3	735	681,927	36,037	33,434,840			36,772	34,116,767	
강관동바리	교량용(3개월)	100.98	공m3	612	61,799	12,454	1,257,605			13,066	1,319,404	
교량표면처리/슬라브면고르	데크피니셔	936	m2	174	162,864	147	137,592	137	128,232	458	428,688	
교량표면처리/슬라브양생	피막양생	936	m2	281	263,016	151	141,336			432	404,352	
교면방수/도막방수		936	m2	10,417	9,750,312	11,746	10,994,256			22,163	20,744,568	
낙하물방지공	강관(12개월)	513.143	m2	5,099	2,616,516	4,343	2,228,580			9,442	4,845,096	
철근 현장가공 및 조립	복잡	47.478	TON	7,749	367,907	379,715	18,028,108			387,464	18,396,015	
		0										
계					22,452,540		84,583,581		644,265		107,680,386	
No.5 슬래브 (개량형 PSC 거더)	40m	1	식									
레미콘	25-27-15(Mpa)	258.017	M3	65,673	16,944,680					65,673	16,944,680	
하이바(고장력철근)	D13M/M	3.153	M/T	572,636	1,805,522					572,636	1,805,522	
하이바(고장력철근)	D16M/M	26.545	M/T	567,845	15,073,457					567,845	15,073,457	
하이바(고장력철근)	D19M/M	6.796	M/T	567,845	3,859,077					567,845	3,859,077	
하이바(고장력철근)	D25M/M	1.894	M/T	567,845	1,075,499					567,845	1,075,499	
계					38,758,235						38,758,235	

4.2 공사기간 분석

기존 공법들은 그림 4.2와 같이 거더를 거치한 후 바닥판 타설을 위한 동바리 및 거푸집, 낙하물 방지시설 등의 설치공정이 필요하지만, 본 기술은 그림 4.3과 같이 아치텍 및 일체형 캔틸레버 거더를 적용하여 공사기간을 단축할 수 있고 시공성 및 작업자의 안전성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 기술은 장지간 아치텍 바닥판을 적용하여 거더 본수를 감소시켜 거더 제작 기간이 단축되고, 거더 가설 후 2차 긴장 공정이 없기 때문에 공사기간을 단축할 수 있다.



그림 4.2 기존 기술의 동바리 및 낙하물 방지시설 설치

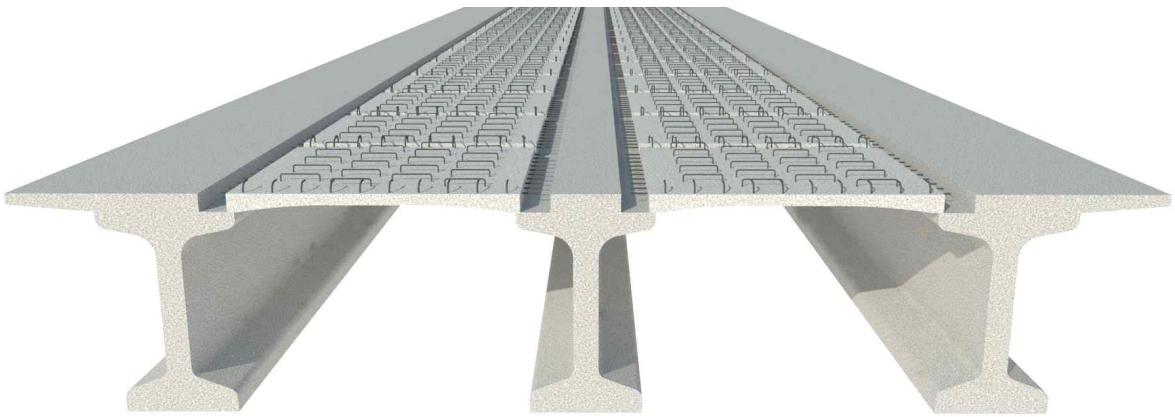


그림 4.3 아치텍 설치 및 일체형 캔틸레버 거더

본 기술의 공사기간 단축 및 그에 따른 효과를 분석하기 위하여, 공사비를 분석한 제원과 동일한 폭 24.3m, 연장 40.0m의 교량에 대한 거더 제작, 강연선 긴장, 가설 및 바닥판 설치까지 교량 상부공에 대한 공사기간을 표 4.4와 같이 산정하였다. 거더 제작 기간은 아치텍 거더와 개량형 PSC 거더 모두 거푸집 1조를 기준으로 하여 산정하였고, 바닥판 설치 기간은 아치텍 거더는 데크 설치에 대한 기준으로 개량형 PSC 거더는 현장타설 바닥판을 기준으로 산정하였다. 공사기간 산정 결과, 아치텍 거더는 57일의 공사기간이 소요되었으며 개량형 PSC 거더는 80일의 공사기간이 소요되는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 기술은 기존 개량형 PSC 거더 보다 약 23일의 공사기간 단축 효과가 있을 것으로 판단되며, 이에 따른 직접공사비 외에 간접공사비도 절감 할 수 있을 것으로 예상된다.

표 4.4 공사기간 비교

구 분	아치덱 거더	개량형 PSC 거더
거더 제작	21 일 (7본)	27일 (9본)
강연선 긴장 및 그라우팅	1일	1일
거더 운반 및 가설	1일	1일
바닥판 거푸집 및 동바리 설치	2일 (아치덱 설치)	10일
철근 배근	4일	5일
콘크리트 타설 및 양생	28일	28일
거푸집 및 동바리 해체	-	5일
2차 긴장 (작업대 설치)	-	3일
계	57일	80일

4.3 아치데크의 적용성 (사업성)

아치 데크의 적용성(사업성)을 평가하기 위하여 프리캐스트 데크와 데크 플레이트를 항목별로 비교·분석 하였다.

구 분	Arch Deck	Precast Deck	Deck Plate
공법특징	아치형상의 프리캐스트 데크 사용으로 아칭효과에 의한 바닥판의 내구성을 향상시키고 장지간 바닥판 적용이 가능한 공법	래티스바가 적용된 프리캐스트 데크를 이용하여 현장타설 콘크리트와 합성하여 외력에 저항하는 공법	파형으로 된 강판을 거푸집으로 사용하여 현장타설 콘크리트 타설하여 바닥판을 구성하는 공법
장단점	• 구조적 안전성 **우수** • 시공성 **우수** • 거푸집 및 동바리 설치 해체 **불필요** • 유지관리 **우수** • 운반 **안전성 확보** • **장지간** 바닥판 적용 **가능**	• 구조적 안전성 **보통** • 시공성 **우수** • 거푸집 및 동바리 설치 해체 **불필요** • 유지관리 **우수** • 운반 중 **균열 발생** • **장지간** 바닥판 적용 시 **프리스트레스 도입 필요**	• 구조적 안전성 **보통** • 시공성 **우수** • 거푸집 및 동바리 설치 해체 **불필요** • 유지관리 **불량** (내부 균열 확인 불가) • **장지간** 바닥판 적용 **불가**
비 고	아치데크는 아칭효과에 의하여 바닥판의 내구성을 향상 시킬 수 있고 장지간 바닥판 적용이 가능하고 구조 안전성, 시공성, 유지관리성 및 운반 시 안전성을 확보 하여 우수한 공법으로 사료 된다.		

4.4 결론

폭 24.3m, 연장 40.0m의 대상교량을 선정하여 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더의 경제성을 분석하였다.

① 초기 공사비 산정결과, 거더 공사비는 약 20%, 바닥판 공사비는 약 1% 감소하여, 전체 초기 공사비는 약 14% 절감 효과가 있을 것으로 예상된다.

② 또한, 아치덱 거더는 7본, 개량형 PSC 거더는 9본을 적용하여 교량 상부 공사비 외에 교량 받침 개수 및 유지관리 비용 감소 등으로 인하여 공사비 절감효과는 더욱 클 것으로 사료된다.

③ 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더의 공사기간을 비교 분석한 결과, 아치덱 거더교의 교량 상부 공사기간은 57일, 개량형 PSC 거더교의 상부 공사기간은 80일로 분석되어, 총 23일의 공사기간을 단축 할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 따른 간접공사비도 절감 할 수 있기 때문에 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더의 공사비 차이는 더욱 증가 할 것으로 사료된다.

5. 아치덱 및 아치덱 거더를 적용한 사업화

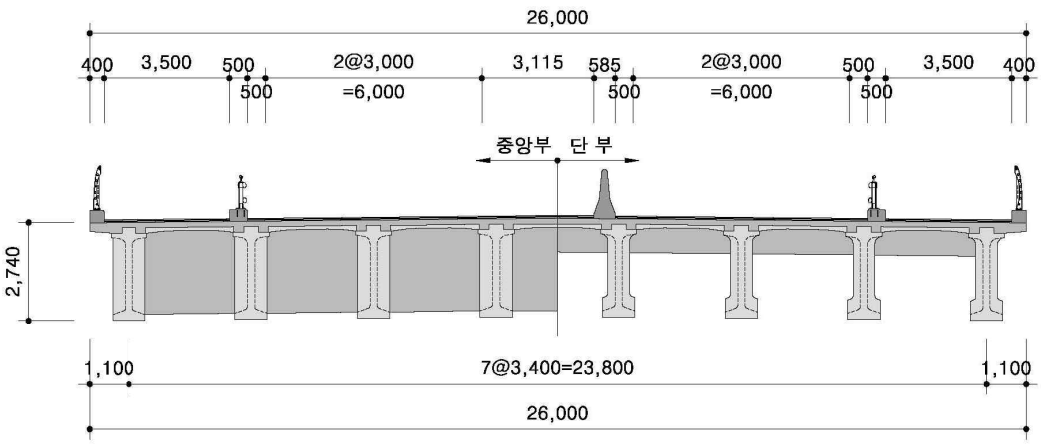
본 연구로 인한 현재 까지 사업화 실적은 다음과 같다.

① 아치덱 거더

순 번	과 업 명		교 량 제 원		비 고
			연 장	폭	
1	웅천 ~ 소호간 도로개설 공사		330.0 m	26.0 m	설계 검토 중
2	Hong Ha Bridge Project		1,800 m	18.0 m	기술 제안
3	경의·중아선 북아현 1-2 재정비촉진지구 횡단시설 기본 및 실시설계	아현고가교	49.0m	27.0m	설계 중
		복개교량	41.2m	26.0m	
4	대전 석봉동 지역주택조합 방음벽 설계		629.2 m	2.5 m~3.5 m	설계 반영

1. 웅천 ~ 소호간 도로개설 공사

- 교량 현황
  - 연장 : 30.0 m + 6@50.0 m = 330.0 m
  - 폭 : 1.1 m + 7@3.40 m + 1.1 m = 26.0 m
- 발주처 : 여수시
- 횡단면도

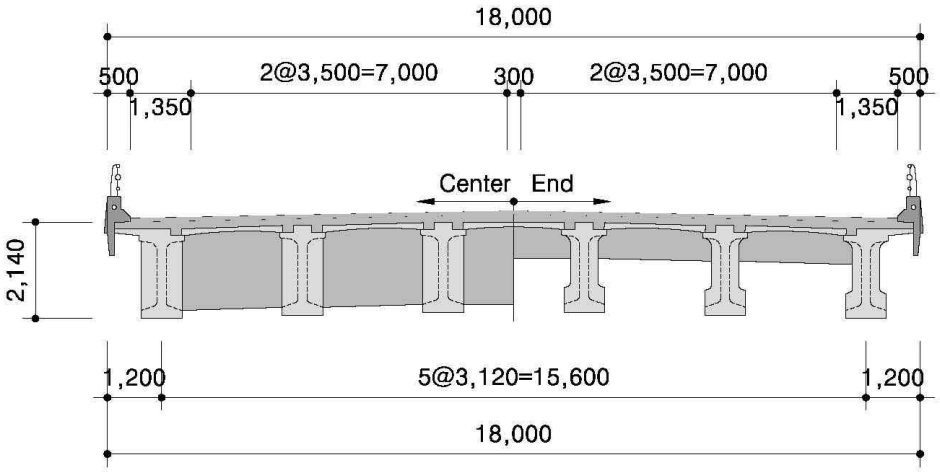


- 조감도



2. Hong Ha Bridge Project

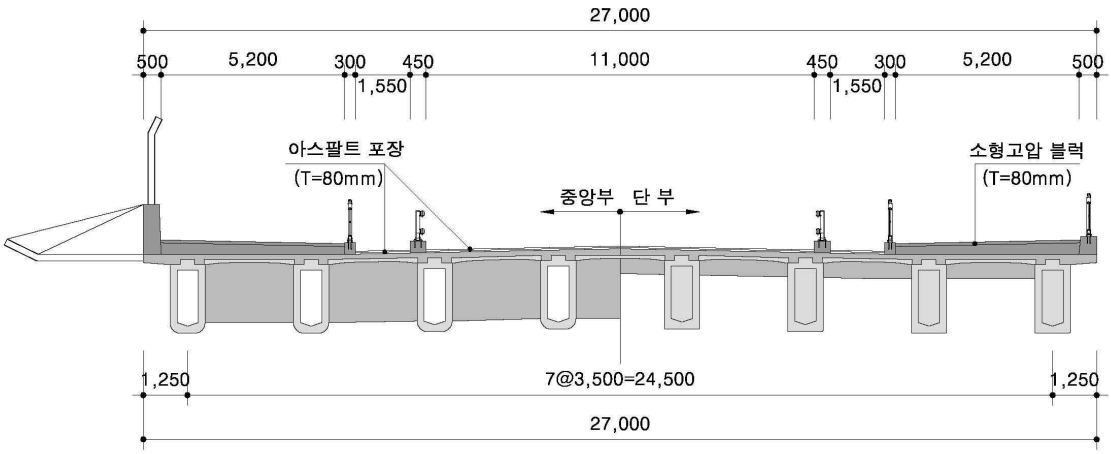
- 교량 현황
  - 연장 : 45@40.0 m = 1800.0 m
  - 폭 : 1.2 m + 5@3.12 m + 1.2 m = 18.0 m
- 발주처 : HPMU (Hanoi Urban Transport Development Project Management Unit)
- 횡단면도



3. 경의·중앙선 북아현 1-2 재정비촉진지구 횡단시설 기본 및 실시설계

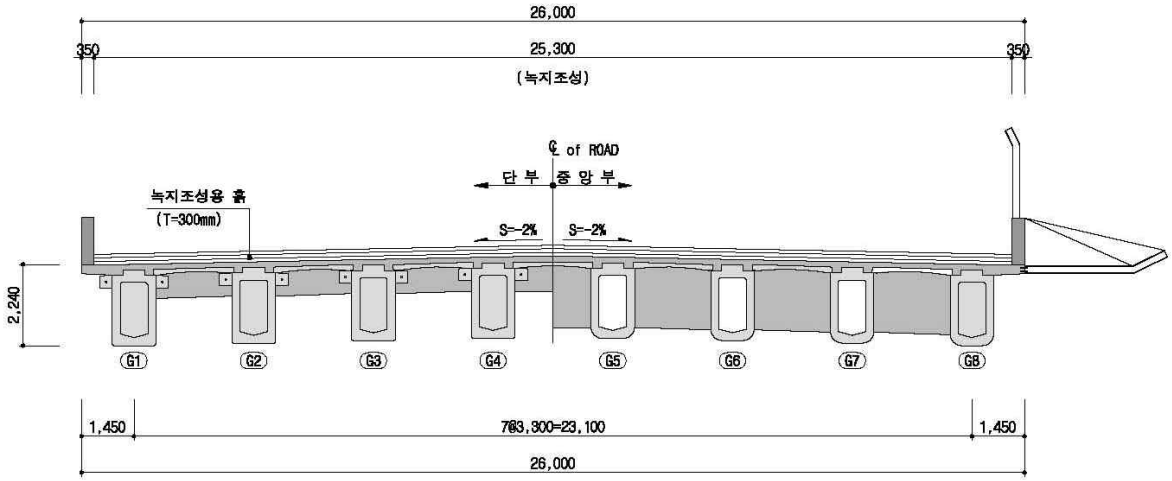
1) 아현고가교

- 교량 현황
  - 연장 : 49.0 m
  - 폭 : 1.25 m + 7@3.50 m + 1.25 m = 27.0 m
- 발주처 : 한국철도시설공단
- 횡단면도



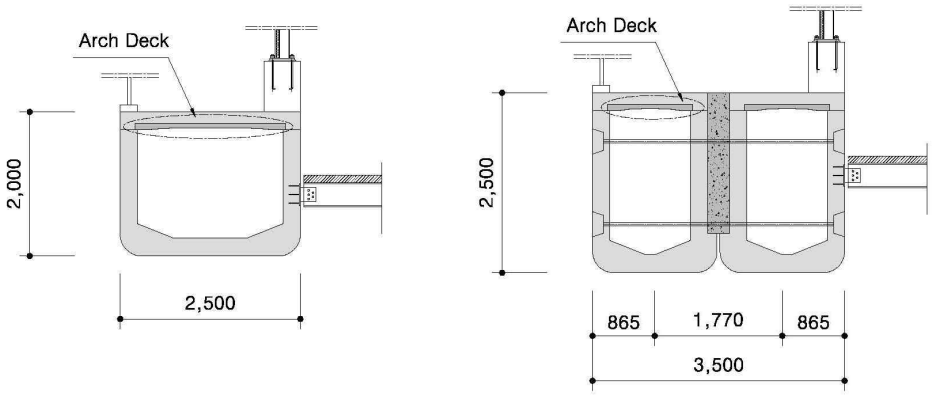
2) 복개교량

- 교량 현황
  - 연장 : 41.2 m
  - 폭 : 1.45 m + 7@3.30 m + 1.45 m = 26.0 m
- 발주처 : 한국철도시설공단
- 횡단면도



4. 대전 석봉동 지역주택조합 방음벽 설계

- 교량 현황
  - 연장 : 8@63.1 m + 43.2 m + 41.1 m + 40.1 m = 629.2 m
  - 폭 : 2.5 m ~ 3.5 m
- 발주처 : 대전 석봉동 지역주택조합
- 횡단면도



② 그립 커플러

순 번	과 업 명	적 용 내 용	공 사 비
1	에코장안 일반산업단지 조성사업	우각부 그립커플러 설치	20,911,150 원
2	구리~포천 고속도로 민간투자사업 (2공구)	우각부 그립커플러 설치	5,612,750 원
3	원주강릉 1공구 철도	우각부 그립커플러 설치	49,068,222 원
합 계			75,592,122 원



(a) 그립커플러 체결 작업



(b) 그립커플러 체결 완료

그림 4.4 에코장안 일반산업단지 조성사업 그립커플러 이음 적용



(a) 그립커플러 체결 작업



(b) 그립커플러 체결 완료

그림 4.5 구리-포천 고속도로 민간투자사업(2공구) 그립커플러 이음 적용



(a) 그립커플러 체결 작업



(b) 그립커플러 체결 완료

그림 4.6 원주강릉 1공구 철도 그립커플러 이음 적용

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

1.1 최종 성과 목표

구분		핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)		최종 성과점검기준				해당기관	양적 성과목표	양적 성과목표 달성치	목표 달성율
						질적 성과지표	목표치	달성치				
총괄	1차년도	A	A-1	거더 및 아치댁의 아칭 효과에 대한 상세해석	①	국내 논문 (아치댁 구조성능)	설계치의 1.3배	설계치의 1.6 ~ 1.9배	주관 공동2	논문 : 1 건	논문 : 2 건	100%
			A-2	아치댁과 거더의 연결상세 개발	①	특허출원 (공법개발)	1 건	1 건	주관	특허 : 출원 1 건	특허 : 출원 1 건	100%
		초과달성			①	학술발표	초과달성	초과달성	공동2	초과달성	학술발표 : 5 건	초과달성
					②	아치댁 시제품			주관		시제품 : 8 건	
					③	그립 커플러 시제품			주관		시제품 : 6 건	
					④	아치댁 구조성능			주관 공동1 공동2		실험성적서 : 8 건	
					⑤	그립 커플러 구조성능			주관		실험성적서 : 6 건	
					⑥	시공지침			공동1		시공지침 : 1 건	
	2차년도	A	A-2	아치댁과 거더의 연결상세 개발	②	특허등록 (공법개발)	1 건	1 건	주관	특허 : 등록 1 건	특허 : 등록 1 건	100%
		B	B-1	실물 실험을 통한 구조안정성 검증	①	SCI 논문 (합성구조체 구조성능)	설계치의 1.5배	설계치의 24배	주관 공동2	논문 : 1 건	논문 : 1 건	100%
					②	학위논문 (인력양성)	2 건	2 건	공동2	인력양성 : 2 건	인력양성 : 2 건	100%
					③	설계예제 및 시공지침 (아치댁 거더 시제품 / 경간별 설계예제 / 시공지침)	1건	1 건	주관	시제품 : 1 건	시제품 : 1 건	100%
					④		1 식	1건	공동1	설계예제 : 1 건	설계예제 : 8 건	100%
					⑤		1 건	1건	공동1	시공지침 : 1 건	시공지침 : 2 건	100%
		초과달성			①	학술발표	초과달성	초과달성	공동2	초과달성	학술발표 : 2 건	초과달성
					②	아치댁 거더 구조성능			주관 공동1 공동2		실험성적서 : 1 건	
					③	원가 계산서			주관		원가계산서 : 1 건	
					④	사업화			주관		사업화 : 7 건	
계										특허 : 출원 1 건 등록 1 건 논문 : 2 건 인력양성 : 2 건 시제품 : 1 건 설계예제 : 1 건 시공지침 : 1 건	특허 : 출원 1 건 등록 1 건 논문 : 3 건 인력양성 : 2 건 시제품 : 15 건 설계예제 : 8 건 시공지침 : 3 건 실험성적서 : 15 건 학술발표 : 7 건 원가계산서 : 1 건 사업화 : 7 건	

※ 주관 : 브릿지테크놀러지(주), 공동1 : (주)삼보기술단, 공동2 : 연세대학교

1.2 세부 연구 목표

세부 연구 목표	달성 내용	달성도
▪ 아치덱을 적용한 바닥판 일체식 거더의 설계 유효성 검토 (기술 정립, 설계 분석)	▪ 3차원 정밀 해석을 통한 아칭 효과 검증 완료 (비합성단계 단면력 41%감소) ▪ 아치덱의 3차원 정밀 해석 및 실험을 통한 성능검증 (경험적 설계법 적용 가능)	100 %
▪ 단면 최적화 및 표준단면 제시 (모델 정립)	▪ 아치덱의 아칭효과 발현을 위한 최적화 및 표준단면 제시 ▪ 아치덱 거더의 최적단면 산정을 위한 변수를 선정하여 단면 최적화 및 30m~60m표준단면 제시	100 %
▪ 아치덱의 정밀해석과 시공방안 확립 (기술 정립)	▪ 3차원 정밀 해석을 통한 아칭 효과 검증 완료 (비합성단계 단면력 41%감소) ▪ 아치덱의 3차원 정밀 해석 ▪ 아치덱의 아칭효과 발현을 위한 최적단면 산정 및 그립 커플러를 이용한 주철근 연결 방안 검증	100 %
▪ 아치덱의 아칭효과 검증을 위한 구조모형실험 수행 (시작품 제작, 지간 2.4m)	▪ 바닥판 지간 2.4m (거더간격 3.6m)의 아치덱 구조모형 실험 수행 - 비합성 아치덱 정재하 실험 - 합성 후 아치덱 바닥판 정재하 실험 - 경험적 설계법 적용을 위한 합성 후 아치덱 바닥판 펀칭전단 실험 - 합성 후 아치덱 바닥판 피로실험	100 %
▪ 바닥판 주철근 연결방안 개선 (자료 수집, 기술 정립)	▪ 그립커플러 시공성 검증 및 성능검증 시험 - H16~H32 일방향 인장시험 - H16~H32 저사이클 반복 시험 - H16~H32 잔류변형량 확인	100 %

세부 연구 목표	달성 내용	달성도
▪ 구조모형실험 수행 통한 바닥판 일체식 거더의 성능 검증 (시작품 제작, 60m 경간장)	▪ 연장 60.0m의 아치덱 거더 제작의 시공성 검증 - 아치덱 거더 시공성 검증 - 분절 거더 제작을 통한 공장제작 시공성 검증 ▪ 아치덱 거더의 성능검증 - 정재하 실험을 통한 아치덱 거더의 성능검증 - 분절부 접합성능 검증	100 %
▪ 정밀해석 및 구조상세 설계기법의 체계화	▪ 아치덱 및 아치덱 거더의 설계도서 작성을 통한 설계기법 체계화	100 %
▪ 체계화된 해석기법을 통한 구조모형 실험의 분석	▪ 체계화된 해석기법을 통한 구조모형 실험 예측 및 분석 ▪ 검증된 해석기법을 통한 다주형 거더의 거동 분석	100 %

2. 관련분야 기여도

(1) 아치덱 거더교는 아치형상의 프리캐스트 덱 사용으로 바닥판의 내구성을 향상 시킬 수 있어 장지간 바닥판 적용이 가능하고, 일체형 캔틸레버 거더 및 아치덱을 사용하여 시공 중 안전성 및 시공성을 향상 시킨 공법이다. 또한, 장지간 바닥판 적용으로 거더 본수를 감소 할 수 있으며, 상부 돌출플랜지 적용으로 단면효율이 증가하고 2차 긴장이 없어서 시공성 및 경제성이 우수한 공법이다. 본 연구에서 아치덱 거더와 개량형 PSC 거더의 경제성을 비교 분석한 결과, 약 15%의 직접공사비 절감이 가능하여 교량 건설 시 국가 예산 절감에 기여 할 것이다.

(2) 교량을 건설하는데 있어서 상부구조형식의 선정은 구조적 안전성 및 시공성, 경제성, 경관 등을 종합적으로 비교 검토하여 결정된다. 본 기술은 저형고 거더와 아치덱을 활용하여 2차 긴장이 없는 일반 PSC 거더와 동일한 공정으로 시공성과 경제성을 향상시켰으며, 아치형상 바닥판 하부로 미관까지 향상시켜 교량 건설 시장에 있어서 부가가치가 매우 높은 기술이다.

(3) 철근 이음 방법에는 겹이음, 용접이음, 기계식이음 등 다양한 방식이 있다. 겹이음은 이음장 확보가 불가능한 경우에는 적용이 불가능하며, 콘크리트가 경화된 후에 겹이음에 대한 인장력이 확보 되는 단점이 있다. 용접이음은 많은 시간이 소요되고 품질관리에 철저해야하며, 나사식 기계이음은 시공성이 우수한 반면 경제성이 불리하여 다량의 커플러 설치 시 공사비용이 증가한다. 아치덱 거더와 아치덱 연결 시 사용되는 압착식 커플러는 저비용으로 설치가 가능함에도 불구하고, 생산 업체의 부재로 인해 현재 국내에서는 사용하지 않는 방법이다. 본 연구에서 그립형 커플러의 성능을 검증하였으며, 아치덱을 비롯한 교각 기둥, LNG 탱크 등 다양한 분야에서 적용 가능 할 것이다.

(4) 아치덱은 기존 프리캐스트 덱에 비해 지간이 늘어났음에도 공사비 차이가 크지 않다. 본 기술 보급 시 프리캐스트 덱 관련 업체 간 경쟁에서 우위를 점할 것으로 보이며, 프리캐스트 덱 기술 개발 경쟁을 유도하여 관련 기술의 발전에 이바지 할 것이다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

(1) 본 연구개발은 아치덱을 활용한 장지간 바닥판 개발 및 아치덱을 적용한 장지간 바닥판에 적합한 거더를 개발하고 구조적 안전성 및 시공성, 경제성을 확보하여 '아치덱을 활용한 바닥판 일체식 PSC-I 거더 교량(아치덱 거더교)'의 상용화에 그 목적이 있다.

(2) 아치덱 거더교는 내구성이 향상 된 아치형상의 프리캐스트 덱 사용으로 장지간 바닥판 적용이 가능하고, 일체형 캔틸레버 거더와 아치덱을 사용하여 시공 중 안전성 및 시공성을 향상 시킨 공법이다. 또한, 장지간 바닥판 적용으로 거더 본수가 감소하고 상부 돌출플랜지 적용으로 단면효율이 증가하였으며, 2차 긴장이 없어 시공성 및 경제성이 우수한 공법이다.

(3) 구조적 안전성 및 시공성, 경제성이 확보 된 아치덱 거더 기술을 적용할 경우, 연간 교량 건설 예산을 상당히 절감 할 수 있을 것으로 예상된다. 점유율이 확대됨에 따라 예산 절감액은 더욱 크게 증가할 것이다. 따라서 사업화 계획 및 판매 전략에 따라 진행된다면 공법 적용과 활용은 긍정적으로 평가된다.

(4) 본 기술을 개발하는 연구진은 'R&D 정책·인프라사업 기술사업화 사업(Smart Mold 시스템을 이용한 프리캐스트 곡선 PSC보의 실용화 연구)'을 성공적으로 수행하여 '우수기술 20선'에 선정 되었으며, 도출된 기술에 대해서 '건설신기술 781호'를 인증 받아 사업수행 중에 있다. 위 기술은 곡선교에 대해서 강교보다 경제적인 PSC 거더를 적용시킨 공법으로, 현재 설계 및 시공 완료된 실적을 여러 건 보유중이다. 이러한 경험을 바탕으로 본 개발기술을 성공적으로 시장에 진입시켜 폭넓게 활용할 계획이다.

(5) 주관연구기관은 PSC 거더의 설계와 시공을 전문으로 하는 건설회사로서, 보유기술력을 바탕으로 본 과제 결과물인 아치덱 거더교를 실제 적용이 가능하도록 자체 영업망을 활용하여 수주활동을 진행하고 사업화 할 수 있는 최선의 조건을 갖추고 있다.

(6) 공동 연구기관인 삼보기술단은 토목분야 종합엔지니어링 업체로 현장 적용 및 설계 표준화 · 전문시방서 작성 등의 기술력을 보유하였으며, 개발 완료 후 신청기술을 설계에 적극 반영할 수 있어 성과활용을 위한 최적의 조건을 갖추고 있다.

(7) 아치덱 거더를 활용한 사업화 방안은 다음과 같다.

본 연구를 통해 개발 된 아치덱 거더는 표 5.1과 같은 단계를 거쳐 사업화 할 예정이다. 이번 과제를 통하여 현재 3단계까지 완료 하였고, 4단계를 진행 중에 있다. 이처럼 순차적으로 도로교, 철도교 등으로 시장을 확대 적용해 나갈 것이며, 과정 중에 건설신기술을 취득하여 기술 발전 및 사업화를 활성화 할 예정이다.

표 5.1 단계별 사업화 추진계획

단 계	내 용
1 단계	• 기술 개발 단계 • 관련 지적재산권 취득 및 검증시험
2 단계	• 시장 진입 단계 • 도로교 설계영업 및 설계 변경을 통한 실적 확보
3 단계	• 실용화 검증 단계 • 시제품 제작 및 설계 변경 프로젝트 현장 시공 단계 • 현장 시공에 따른 현장 적용성 및 검토 단계
4 단계	• 영업활성화 단계 • 실적을 바탕으로 영업 확대 및 매출 성장 단계 • 지방 협력업체 기술 공유 단계
5 단계	• 녹색기술 및 건설신기술 신청 단계 • 실적 및 연구 결과를 바탕으로 건설신기술 신청 예정
6 단계	• 철도교 적용관련 연구 단계 • 철도교 적용을 위한 철도교 적용성 연구 진행단계
7 단계	• 철도관련 영업 활성화 단계
8 단계	• 철도관련 매출 성장단계

1) 유형(Target)별 수주 활동 전개

① 발주처, 설계사

- 소규모 세미나, 제품설명회, 대면영업 등을 통한 제품인지도 제고 및 설계 반영.
- 진행 중인 SOC, BTL, T/K등 시공업체 및 설계사에 대한 추진과제 정보 입수와 기술영업 강화.

② 발주처, 1군도급사, 감리사

- 손익악화가 발생하는 현장 파악을 위해 꾸준한 대면 영업.
- 설계변경 유력 현장에 대한 집중적 영업 활동 전개.
- 기술사무소 운영을 통한 손익악화 현장에 대한 정보수집 및 홍보 강화.
- 비상주 감리단에 대한 제품 인지도 제고 및 기술영업 활용.

2) 다양한 형태의 사업화를 위한 홍보 활동

① 국토교통과학기술 진흥원, 한국도로공사 등에서 진행하는 신기술, 신공법을 소개하는 세미나 참여

② 전시회 및 학회 참가를 통한 홍보

3) 꾸준한 기술개발을 통한 생산원가 절감실현을 통한 가격 경쟁력 확보.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 해당사항 없음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 보안등급 : 일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
• 해당사항 없음.								

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 해당사항 없음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	철근콘크리트 아치 데크의 정적 휨 거동	연세대학교 산학협력단	-	한국콘크리트학회 논문집	-	2017.08.	중복사사	-
2	논문	2경간 아치 데크 철근콘크리트 합성 구조물의 실험적 평가	연세대학교 산학협력단	-	한국콘크리트학회 논문집	-	-	-	-
3	논문	RC Arch Deck Development and Performance Evaluation for Enhanced Deck Width	연세대학교 산학협력단	-	International Journal of Concrete Structures and Materials	2.031	-	-	SCI

제11장. 기타사항

- 해당사항 없음.

제12장. 참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 건설정보사, 2010
2. 사단법인 한국교량 및 구조공학회, 교량설계핵심기술연구단, 도로교 설계기준(한계상태설계법) 해설, 건설정보사, 2015
3. Han, M. Y., Hwang, E. S., and Lee, C., “Prestressed concrete girder with multistage prestressing concept”, Structural Journal, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 723-731.
4. Matta, F., Nanni, A., Ringelstetter, T. E., & Bank, L. C. (2006). Rapid construction of concrete bridge deck using prefabricated FRP reinforcement. In CICE 2006, Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 13-15.
5. Stamnas, P. E., & Whittemore, M. D. (2005). All-precast substructure accelerates construction of prestressed concrete bridge in New Hampshire. PCI journal, 50(3).
6. Cury, A., & Cremona, C. (2010, January). Long term dynamic monitoring of a PSC box girder bridge. In IABSE Symposium Report (Vol. 97, No. 19, pp. 22-29). International Association for Bridge and Structural Engineering.
7. Taylor, S. E., & Mullin, B. (2006). Arching action in FRP reinforced concrete slabs. Construction and building materials, 20(1-2), 71-80.
8. Precast/Prestressed Concrete Institute(PCI), Precast Prestressed Concrete BRIDGE DESIGN MANUAL, 2nd Ed, 2003, Vol. 2.
9. Youn, S. G. and Cho, G. D., “Experimental Study on the Cracking Loads of LB-DECKs with Varied Cross-Section Details”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 5, 2011, pp. 657-665.
10. Jeong, Y. J., Jung, K. H., Koo, H. B., and Kim, B. S., “An Experimental Static Behavior of Steel ・ Concrete Composite Deck for Bridges”, Vol. 24, No. 1, 2004, pp. 17-25.
11. Korean Society of Civil Engineers, Commentary of KoreanHighway Bridge Design Code, 2008.
12. Ryu, H. K, Chang, S. P., and Kim, Y. J., “Experimental Works on the Flexural Behavior of Precast Reinforced Concrete Decks with Loop Joints”, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 3, 2003, pp. 479-486.