

철도하부 통과 구간의 파형강판의 적용성 검토 연구

An Application study for corrugated structural plate under the railway

노병국* 김홍도** 오경준***
Roh, Byoung-Kuk, Kim, Hung-Do, Oh, Kyung-Jun

ABSTRACT

Corrugated structural plate is ductile structural member which has high sectional properties compared with same thickness of plate. Corrugated plate resists the external forces by the combined action of retained soils and structures. Since it is easy to transport and assemblage of in-situ, the duration and cost of construction can be reduced. Corrugated plate structures, therefore, are widely used in culverts, hydro passages and simple bridges. RC culvert with supported by unstable soil layers in railway construction project of pohang~samchuk has been replaced by corrugated plate culvert due to the reduction of construction duration and cost, especially the performance of behavior of settlement of ground. The structural analysis, design processes, and the economic advantages of the corrugated plate culvert are studied in this paper.

1. 서 론

파형강판 구조물은 파형강판을 이용하여 제작된 구조물로서 암거, 수로시설, 소규모 교량 등으로 많이 시공되고 있다. 이러한 파형강판 구조물은 파형단면의 적용으로 인해 동일한 두께의 강판에 비해 단면계수가 10~30배 정도가 크며, 연성구조물로서 외부하중에 대해 뒷채움 흙과 구조물이 동시에 저항하는 합성구조체의 특성을 갖는다. 또한 경량구조로서 재료의 용이한 운반과 현장에서의 간단한 볼트연결로 시공되므로 기존의 콘크리트 암거에 비해 공기단축과 공비를 절감할 수 있는 경제적인 구조물이다. 이는 1997년에 최초로 중앙고속도로의 통로암거에 적용된 이래 현재까지 그 활용실적이 계속적으로 증가하고 있다. 본 고에서는 철도구간을 통과하는 암거로서 철근콘크리트 대신 지중강판구조물을 적용한 현장을 소개하고자 한다.

본 현장은 포항~삼척간 철도건설공사 구간으로서 현장 지질조사결과 이 지역은 일부 연약지반이 철도노선을 횡단하는 RC암거가 계획된 구간에 분포되어있어 즉시 침하 및 비탈면 활동과 파괴가 예상되었다. 따라서 공사구간의 RC암거를 공기단축, 공사비절감, 지반침하 등의 측면에서 유리한 파형강판 암거로 대체 계획하였다. 본 고에서는 현장지반상황 및 파형강판 암거를 선정한 배경과 RC암거를 대체한 파형강판 암거의 특성, 설계방법, 해석, 경제성에 대하여 기술하였다.

* 한국철도시설공단 남북민자팀 부장, 정회원
E-mail : rohbk@hanmail.net
TEL : (042)607-4392, FAX : (042)607-4079
* 한국철도시설공단 기술본부 차장
* (주)신성엔지니어링 철도부 과장

2. 파형강판구조물의 특성,설계방법 및 적용사례

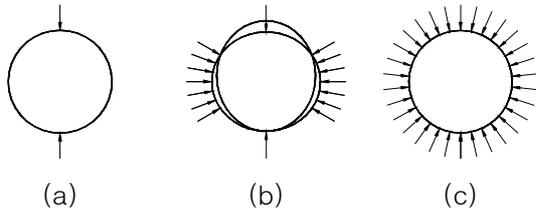


그림 1. 압축링 이론에 의한 토압분포그림

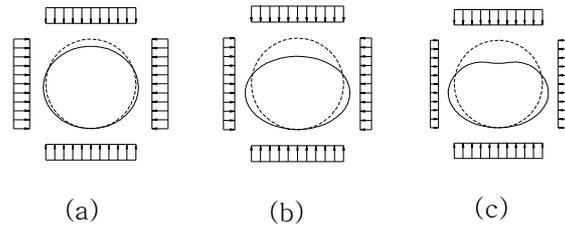


그림 2. 지중강판 구조물의 변형

파형강판(corrugated structural plate)은 2.7~7mm 두께의 강판을 파형단면으로 가공하여 휨강성 및 축강성을 증대시킨 구조물로서 외부하중에 대해 지반-구조물 합성 구조로 저항하는 시스템을 갖고 있으며 압축링 이론(White & Layer, 1960)에 의해 해석이 가능하다. 압축링 이론은 그림 1에서 보는 것과 같이 구조물에 연직토압이 가해지면(그림 1.(a)) 연직방향의 지름이 축소되고 수평방향의 지름이 확대되어 측면의 토사를 압축하여 저항 토압(수동토압)이 발생하여(그림 1.(b)) 결국 그림 1.(c)와 같이 구조물 주변의 토압이 거의 일정하게 된다. 이러한 하중분포 때문에 구조물이 압축링과 같이 거동하므로 휨 모멘트가 억제되고 축방향 압축력에 의해 거동이 지배된다. 양질의 뒷채움 재료로 규정에 따른 다짐을 시행하지 않을 경우 구조물이 압축링이론에 따라 거동하지 않고 그림 2와 같이 구조물이 측면으로 과도하게 변형하거나 국부적인 변형으로 파괴될 수 있다. 파형강판을 설계하는 방법은 AISI(2002), CHBDC(2001)설계법, AASHTO(2004)시방서, 하중저항계수 설계법, 일본 지반공학회 매뉴얼방법, Duncan방법과 유한요소해석에 의한 방법이 있다. AISI설계법은 비교적 지간이 작은 파형강판 구조물에 적용되어지며 장지간의 파형강판구조물은 CHBDC설계법을 적용한다. AASHTO설계방법은 단지간과 장지간의 파형강판 구조물에 적용한다. 유한요소해석법은 AISI설계법, AASHTO설계법, CHBDC 설계법에 의한 검토 후 검증을 위하여 주로 사용된다. 현재 한국철도시설공단에서 제정한 철도설계편람(2004)은 관형으로 이루어진 파형강판 구교에는 AISI설계법을 제시하고 있으며 관형으로 이루어진 파형강판 구교를 제외한 파형강판 구교에는 AASHTO시방서에 나와있는 방법을 제시하고 있다. 해외의 경우 오래전부터 파형강판을 시공해온 것에 비해 국내에서의 역사는 짧으나 1997년 국내에서 중앙고속도로의 통로암거로 최초 적용된 이래 현재까지 통로 및 수로암거등의 광범한 분야에서 성공적으로 시공되어 사용되고 있다.

3. 파형강판 적용구간에 대한 검토

본 과업구간중 파형강판암거를 계획하는 구간의 연약지반은 충적층, 퇴적암으로 구성되며, 충적층은 전 반적으로 사질토층으로 구성되어 있다. 과업구간내 느슨한 사질토 지반상에 철도노반 성토시 허용잔류 침하 이상의 즉시침하 및 비탈면 활동과괴가 예상된다. 이러한 연약지반의 특성상 통상적으로 적용하는 현장타설C함보다는 파형강판암거가 유리할 것으로 판단된다. 또한 파형강판구조물은 현장에서 단순볼트 연결로 구조물을 완성하므로 시공성이 우수하며, 양질의 용융아연도금으로 고 내후성 및 내식성 확보가 가능하며 균열 및 백화현상이 발생하지 않아 유지관리 비용이 절감되며 추후 확장시공이 용이하다. 해양지방에 위치한 구조물의 특성상 확보하여야 하는 내염해성은 용융아연도금만으로도 충분히 확보할 수 있다.

4. 파형강판구조물의 해석 및 경제성 분석

4.1 철도설계하중

AREMA(American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association,미국)에서 표준하중으로 제시하고 있는 Cooper E 80하중은 우리나라의 LS 하중과 비교할 때, 동륜축중의 축거(51ft≒ 1.5m)와 동일하여 토피고에 따른 활하중 효과가 같다고 판단된다. 다만, 동륜축중을 우리의 LS 하중으

로 환산하면 LS-36규모에 해당하므로, 그 크기를 우리나라 철도설계기준의 최대하중인 LS-22의 동등 하중으로 선정 감소시켜 적용한다.

토피고		활 하 중			비 고
		Cooper E 80 (Lb/ft2)	LS-36 (tonf/m2)	LS-22 (tonf/m2)	
ft	m				
2	0.6	3,800	18.554	11.339	LS-36하중은 우리나라 “철도 설계기준(철도교편) 에 제안되어 있지 않은 하중임
5	1.5	2,400	11.718	7.161	
8	2.4	1,600	7.812	4.774	
10	3.0	1,100	5.371	3.282	
12	3.7	800	3.906	2.387	
15	4.6	600	2.930	1.791	
20	6.1	300	1.465	0.895	
30	9.1	100	0.488	0.298	

표 1. 토피고에 따른 활하중 (AREMA, 미국)

4.2 파형강판구조물의 해석

적용된 대표단면에 대하여 국내기준 및 AREMA설계기준에 따라 2차원 관용계산 및 3차원 유한요소 해석을 실시하여 단면두께를 산정하고 각각의 결과를 비교 검토하였다. 3차원 유한요소 해석을 하기 위해 흙의 비선형거동과 응력의존적인 응력-변형을 관계를 갖는 Duncan-Chang의 쌍곡선모델(Hyperbolic model)의 고려가 가능한 지반전용 범용해석프로그램인 Pentagon 3D를 사용하였다. 해석에 사용된 구조물제원은 그림 3과 같다.

STA.60+ 424.00	STA.61+ 991.00
① 형상: 원형 ② 지간: 4.250m ③ 높이: 4.250m ④ 최대토피: 3.581m ⑤ 강판두께: 4.0mm , 4.5mm	① 형상: 원형 ② 지간: 5.750m ③ 높이: 5.750m ④ 최대토피: 5.231m ⑤ 강판두께: 4.5mm , 5.3mm
- 뒷채움 흙 ① 단위 중량: 1.9tf/m ³ ② 상대 다짐도: 90% ③ 흙의 내부 마찰각: 35° ④ 흙의 종류: SM90	

그림 3. 검토단면

철도 활하중에 대한 구조물의 안정성 검토를 위해 AREMA(미국)의 Coope E 80 하중을 국내시방기준의 LS하중으로 환산한 LS-36과 1급선 활하중 LS-22를 재하 하였으며 해석 CASE는 표 2와 같다.

해석CASE	적용활하중	강판두께(mm)	
		STA.60+ 424.00	STA.61+ 991.00
1	LS-22	4.0	4.5
2	LS-36	4.0	4.5
3	LS-36	4.5	5.3

표 2. 설계적용활하중

분류	허용하는 단면 변형량
표준형 강판 적용시	구조물 높이(rise, R)의 5% 이내 * 구조물 높이의 2%를 초과할 경우 ①모멘트 검토, ②세밀한 육안관찰을 통해 구조물 안정성 확인 후 시공 재개

표 3. 구조물허용변형량

유한요소해석 모델링의 좌,우측 범위는 구조물에 영향을 주지 않는 구조물 지간까지 모델링하여 실거동에 근접토록 이를 3차원으로 모델링하였다. AREMA 기준과 유한요소해석결과부터 단면의 두께를 산정하면 아래와 같다. 표 1과 같이 유한요소해석과 AREMA 관용식에 의한 단면두께는 4.0~5.3mm로 동일하나 AREMA Table에 의한 단면두께 6.0mm 보다는 다소 작게 산정되었다. 그러나 AREMA Table은 최소토피와 최대토피에 대하여 동일한 두께를 적용하고 있으므로 일괄 적용하기에 부적절하다고 판단되는바 당현장 구조물의 단면두께는 유한요소해석결과와 AREMA 관용식을 비교 검토한 결과 당 현장의 토피고(3.4m~6.4m)에 공통으로 적용가능하고 안전을 1.2이상을 확보할수 있는 t=5.3mm를 적용하는것이 타당하다고 판단된다. 파형강판의 수직방향 격임값이 0.00653rad이며 이는 철도설계기준(2004)에 나와있는 수직방향 격임값 허용치인 0.009rad을 만족하는 것으로 판단한다.

STATION		60+ 424.00 (토피H=3.58m)			61+ 991.00 (토피H=5.26m)			
적용활하중		LS-22	LS-36		LS-22	LS-36		
단 면 두 께 산 정	A R E M A 관 용 식	강판두께	4.0mm	4.0mm	4.5mm	4.5mm	4.5mm	5.3mm
		허용이음부강도 (tf/m)	36.10	36.1	42.12	42.12	42.12	51.75
		발생축력 (tf/m)	28.400	38.975	38.975	37.635	40.974	40.974
		이음부검토	1.10≥1	0.93≤1	1.08≥1	1.12≥1	1.03≥1	1.26≥1
		허용처짐 (mm)	237.5	237.5	237.5	287.5	287.5	287.5
	유 한 요 소 해 석	발생처짐 (mm)	-	-	-	-	-	-
		강판두께	4.0mm	4.0mm	4.5mm	4.5mm	4.5mm	5.3mm
		허용이음부강도 (tf/m)	36.10	36.10	42.12	42.12	42.12	51.75
		발생축력 (tf/m)	32.89	37.96	37.92	37.6	44.34	44.26
		이음부검토	1.098≥1	0.951≤1	1.11≥1	1.12≥1	0.95≤1	1.17≥1
AREMA Table		6.0mm						

표 4. AREMA기준과 유한요소해석결과에 따른 산정단면두께비교

4.3 파형강판구조물의 내진해석

적용된 파형강판 구조물에 대해 지반전용해석프로그램인 GTS를 사용하여 동적내진해석을 수행하였다. 지진해석을 위하여 대상 구조물보다 최소 2~3배 이상의 지반을 모델링하여야 하므로 모델링 범위를 암거 축방향으로 80m, 철도 선형방향으로 60m 및 수직방향으로 20m의 영역으로 설정하여 모델링을 수행하였다. 해석방법으로는 다중모드해석법을 적용하였다. 지반과 같은 무한한 매질의 정해석에서는 경계를 충분히 멀리 잡으면 적절한 경계조건이 되지만 동해석에서는 일반적인 경계를 잡을 경우 파가 반사되는 효과가 생기기 때문에 결과를 신뢰할 수 없게 되므로 경계조건의 할당이 중요하다. 본 해석에서는

해당 지반 물성치에 한 x, y, z 방향에 대하여 Damper값을 입력하여 점성경계(viscous Boundary)를 적용한다. 해석 모델은 세가지 재질로 구성되어 있으며 각 재질의 특성치는 다음과 같다.

구분	원지반	성토부	뒷채움흙	파형강판
요소형식	Solid	Solid	Solid	Plate
Material ID	Mat 지반	Mat 성토	Mat 성토	Mat 강판
Type	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Elastic
탄성계수(E)	250	2500	2500	210000
포아슨비(ν)	0.4	0.33	0.33	0.35
단위중량(W)	1.6	1.9	1.9	8.1
포화단위중량(W_s)	1.6	1.9	1.9	-
점착력(C)	2	0	0	-
마찰각(ϕ)	20	30	35	-
인장강도	2	0	0	-
정지토압계수	0.6	0.5	0.426	-

표 5. 재질의 특성치

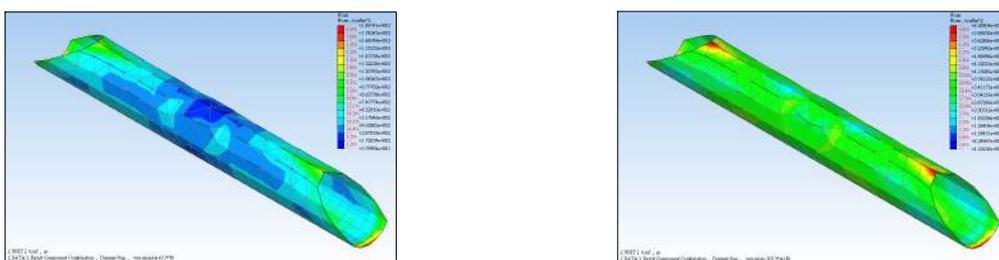
Property ID	type	명칭	Thickness(m)
1	Plane	Prop 파형강판	0.0053

표 6. 강판의 property

파형강판을 모델링하기위해 파형강판과 동일한 구조적 물성치를 확보할 수 있는 강판의 등가두께를 단위 폭당 단면이차모멘트를 이용하여 환산하였다. 사용된 파형강판의 두께는 5.3mm이며 이때 단위 폭당 단면이차모멘트는 195.62cm⁴이므로 동일한 단면이차모멘트를 확보할 수 있는 균질단면의 두께는 28.6mm로 계산되었다. 발생 가능한 하중 케이스를 검토한 결과 파형강판에 발생하는 응력은 다음과 같다.

하중경우	내용	최대응력 (MPa)	최소응력 (MPa)
하중경우 1	교축 + 교직*0.3	189.7	5.799
하중경우 2	교축*0.3 + 교직	63.68	4.554

표 7. 하중 케이스별 응력



하중경우 1 : 교축방향 + 교축직각방향 * 0.3 하중경우 2 : 교축직각방향 + 교축방향 * 0.3

그림 4. 응력분포 (von Mises stress)

구조물에 대한 다중 모드 스펙트럼 해석을 수행해본 결과, 발생가능한 최대 응력은 189.7MPa로 구조적으로 안정한 것으로 판단된다.

4.4 파형강판구조물의 경제성분석

본 과업구간에서 최적의 형식을 선정하기 위하여 사용목적, 시공성, 경제성, 유지관리성 등을 고려하여 2가지 형식에 대한 비교분석을 실시하였다. 평가항목 가중치 산정시 Caltrans 「Value Analysis Report Guide」 에서 추천하는 사용자 입장에서 고려한 선정기법인 Evaluative Criteria Matrix 평가법을 적용하였다.

구 분	대 안 1	대 안 2
	파형강관	R.C 암거
도 피	· H = 5.0 M	· H = 5.0 M
제 원	· SPAN : 5.75 m , · RISE : 5.75 m · t = 5.3mm	· B = 4.0 m · H = 3.5 m
특 성	<ul style="list-style-type: none"> · 경량 연성구조로 연약지반 대응성 우수 · 제작 및 품질관리 우수 · 공장제작 후 설치로 시공성 우수 · 구조물에 솟음을 주어 침하 대비 가능 · 상대적으로 최소토포 확보 불리 · 급속시공에 유리 (기초시공 불필요) · 뒷채움 다짐시 계측관리 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 자중이 커서 지반조건에 제약 · 제작 및 품질관리 불리 · 현장타설로 시공성 불리 · 국내 시공실적 다수 · 미관 보통 · 지속적 유지관리 필요 · 뒷채움에 의한 구조물의 영향이 상대적으로 작음
공사비	5,857,180/m	5,805,246/m

표 8. 비교대안선정

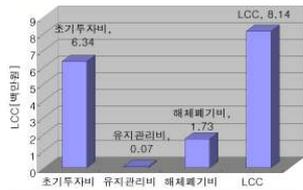
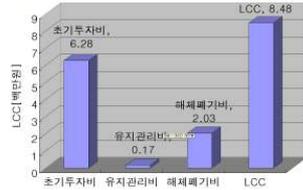
제 안 내 용		선정안(대안1) 파형강관	선정안(대안2) R.C 암거	
LCC 절 감 효 과 (대안2 대비)	L C C			
	절 감 효 과	비용 : 4.0% 절감		
기 능 개 선 효 과 (대안2 대비)	설계기능평가			
	개 선 효 과	기능 : 2.9% 향상		
가 치 개 선 효 과 (대안2 대비)	설계기능점수	84.2	81.3	
	LCC 상대점수	1.00	1.04	
	가치점수(V=F/C)	84.2	78.2	
	개 선 효 과	가치점수 : 6.0점 향상	-	
제안의 특징	장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 제작 및 품질관리 우수 · 공장제작후 거치시 시공성 우수 · 경제성 우수 · 미관 양호 	단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 자중이 커 지반조건 제약 · 절대공기 필요 · 지속적 유지관리 필요 · 미관 보통
	검 토 결 과	· 경제성 및 시공성이 유리하며 제작 및 품질관리가 우수하고 구조적으로 안전한 대안1을 선정함		

표 9. 최적(안) 선정

5. 결론 및 제언

5.1 철도건설공사현장의 침하가 예상되는 일부연약지반이 분포하는 구간을 횡단하는 현장타설C함 대신 파형강관 구조물을 적용할 경우 지반침하측면에서의 유리한 점 이외에도 시공성, 유지관리 비용절감 등에서도 유리한 점이 있는 것으로 판단되었다.

- 5.2 현장타설C함을 대체하는 파형강판 구조물에 대하여 관용식과 유한요소해석을 통하여 적절한 강판의 필요두께를 산정하였다. 유한요소해석결과와 관용식에 따른 축력을 비교하였을 때 축력의 오차가 크지 않으므로 관용식을 실제 설계에 적용함에 있어서 타당함을 알 수 있다. 그러나 현재 철도교설계편람에 제시된 관용식에서는 모멘트를 고려하지 않으므로 만일 구조물이 장시간일 경우 이에 대한 보완이 있어야 할 것으로 생각된다.
- 5.3 현장타설C함을 대체하는 파형강판 구조물에 대하여 동적내진해석을 실시하였다. 파형강판 구조물의 동적 내진해석 결과 발생 가능한 최대 응력이 허용응력보다 작으므로 구조적으로 안정한 것으로 판단되었다.
- 5.4 현장타설C함과 이를 대체하는 파형강판구조물을 경제성측면에서 비교분석하였다. 초기공사비만을 놓고 보았을 때는 현장타설C함이 파형강판 구조물보다 비용이 다소 낮은 것으로 나왔다. 그러나 LCC분석을 한 결과 파형강판 구조물의 소요되는 비용이 현장타설C함에 비해 낮았으며(96.2%) 설계기능점수는 파형강판 구조물이 현장타설C함에 비해 높았다.(103.6%) 최종적으로 파악된 가치점수는 파형강판 구조물이 현장타설C함에 비해 높았다.(107.7%)
- 5.5 기존의 구조물을 파형강판 구조물로 대체하였을 때 여러 가지 장점이 있는 것으로 파악되었다. 현재 우리나라에 적용되는 구조물중 파형강판이 차지하는 비중은 작으나 앞으로 철도구조물의 현장타설B형, 복개터널, 방음구조물 등에 확대하여 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. AASHTO(1996), Standard Specification of Highway Bridges
2. Abdel-Sayed, G., and Bakht, B.(1983) "Analysis of the load effects in soil-steel structures." Rep. No. 878, Transport Research Records, Washington D.C., 49-55
3. AISI(1994), Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products
4. ASTM(1999). "Standard practice for structural design of corrugated steel pipe, pipe arches, and arches for storm and sanitary sewers and other buried applications." ASTM-A796/A796M, West Conshohocken, Pa.
5. Canadian Standard Association(2001), Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC), CAN/CSA-S6-00, Rexdale, Ontario
6. "Corrugated Steel Pipe," National Corrugated Steel Pipe Association, Chicago, Ill., 1965.
7. Duncan, J. M. (1979), "Behaviour and Design of Metal Culvert Structures," ASCE Journal of Geotechnical Division, 105(GT3), pp. 399-417.
8. Duncan, J.M., and drawsky, R.H.(1983), "Design Procedures for Flexible Metal Culverts Structures", Report No. UCB/GT/83-02, Dept. of civil Eng., Univ. of California, Berkely
9. 한국도로공사(1997), 대형 파형강판을 이용한 지중구조물의 실험적 연구
10. 한국도로공사, 포항산업과학연구원(1998), 파형강판 지중 암거의 설계와 시공
11. 한국도로공사(2000), 파형강판 지중구조물 시공지침(안)
12. 서울대학교, 한국도로공사(2001), 지중강판 구조물 실용화 연구 보고서
13. 김낙영, 조성민, 황영철, 전병건, 이종화(2002), 터널 입·출구부 라이닝부에서 파형강판 적용성 분석, 2002년 한국터널공학회 정기학술발표회, pp.172 ~ 188
14. 동해선 포항~삼척간(7공구)철도건설 노반 실시설계 보고서(2005)
15. 한국철도도시시설공단 제정 철도설계편람(토목편,2004)
16. 건설교통부 제정 철도설계기준(철도교편,2004)
17. 건설교통부 제정 철도설계기준(노반편,2004)