

대형 파형강판을 이용한 지하통로 암거의 적용사례 Case Study of Culvert using Large Corrugated Steel Plates

김명모¹⁾, Myoung-Mo Kim, 황민오²⁾, Min-Oh Hwang, 박영호³⁾, Young-Ho Park,
김경석⁴⁾, Kyung-Suk Kim

- ¹⁾ 포항산업과학연구원 철강Eng.센터 선임연구원, Associate Researcher, Steel Engineering Center,
Research Institute of Industrial Science & Technology
- ²⁾ 포항산업과학연구원 철강Eng.센터 선임연구원, Associate Researcher, Steel Engineering Center,
Research Institute of Industrial Science & Technology
- ²⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Highway Research Center,
Korea Highway Corporation
- ³⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Highway Research Center,
Korea Highway Corporation

개요(SYNOPSIS) :

Corrugated steel plate(CSP) culverts utilize the flexibility of the corrugated steel plate and the soil-structure interactions in order to efficiently exhibit the structural performances of the structure. In foreign countries, due to the economical and construction merits, the CSP culverts have been used in place of concrete structures. However the CSP culvert has never been used domestically. In this study, the structural design and construction method of CSP have been presented for practical use domestically. Design and trial construction of the structure has been carried out and through live load test and measurement of the structure, the evaluation of the behavior and the structural performance were achieved.

주요어(Key Words) : Corrugated Steel Plate , Culvert, Soil-Structure Interaction

1. 서 론

파형강판 암거는 파형의 강판을 볼트로 조립하여 지중에 설치하며 강판과 지반의 합성작용에 의해 하중을 효율적으로 지지하는 구조물로 콘크리트암거에 비하여 경량구조물이고, 연성이 우수하며 공기를 단축시킬 수 있다는 장점이 있다. 국외에서는 북미를 중심으로 유럽과 일본, 동남아 등지에서 용·배수용 암거, 지하통로암거 등에 많이 사용되고 있으며 경제성도 우수한 것으로 평가되고 있다. 국내에서도 향후 소재인 용융 아연도금된 파형강판의 국산화가 이루어지고 국내 실정에 맞는 설계법이 정립된다면 국내에서도 널리 사용될 수 있을 것으로 기대되는 구조물이다.

본 연구에서는 파형강판 암거의 국내 적용을 목적으로 하여 신설 중앙고속도로 원주 인근에서 시범 설치되고 있는 통로용 파형강판 암거에 대한 설계와 시공 사례를 소개하였다. 각 국의 설계 기준에 따른 설계 결과를 비교하였으며 시범설치인 점을 고려하여 비교적 안전 측의 단면을 결정하였다. 그리고 국내 현장의 실정에 적합한 뒷채움재를 선택하여 다짐시공을 하였다. 시범 설치된 파형강판 암거의 거동 특성을 파악하고 구조적 성능 평가를 위하여 실 차량 재하시험을 수행하여 강판에 발생하는 응력과 변형특성을 분석하였다.

2. 파형강판 암거의 설계

2.1 압축링 이론에 의한 파형강판 암거의 설계

그림 1.과 같이 지하에 매립된 연성관에 연직토압이 작용하면 관의 단면은 연직방향으로는 직경이 감소하고 수평방향으로는 확대되는 링 변형을 일으킨다. 관이 수평방향으로 확대되게 되면 측면의 지반을 압축시키게 되고 측면지반에는 수동토압이 발생하게 된다. 또한 이 때 관의 상부의 지반은 측면지반에 의해 지지되고 있으므로 상부토 내에서는 아칭효과가 발생하여 연직압력의 일부를 지지하게 된다(그림 2). 작용하는 연직압력에 따라서 어느 정도의 변형이 발생한 후에는 연성 관에 작용하는 힘의 평형이 이루어져서 구조물이 안정화된다.

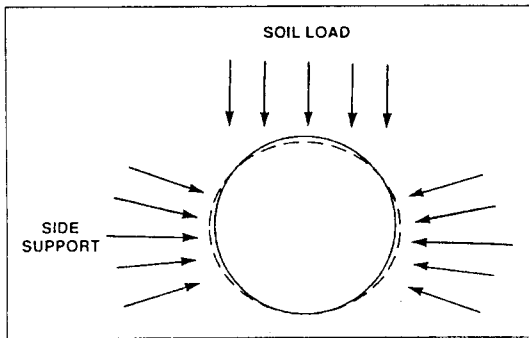


그림 1. 매립된 연성 관의 지지메커니즘

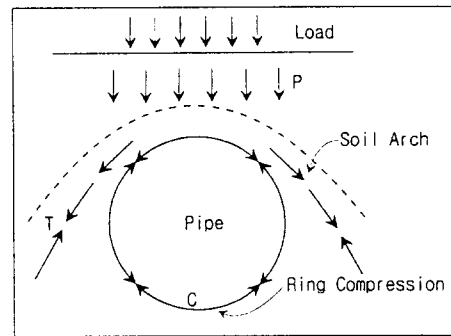


그림 2. Soil arch의 형성

파형강판 암거는 1960년에 White가 제창한 압축링법에 근거하여 구조설계가 수행되고 있다. 압축링법은 연성 암거에서 외압은 암거의 곡률 반경에 반비례한다고 가정하고 그 결과 벽체에는 균일한 압축력만이 가해진다고 보고 설계하는 방법으로 파형강판 암거 단위 길이에 대하여 벽체에 작용하는 압축력은 암거 정점부에서 작용하는 연직압력을 사용하여 (1)식과 같이 계산된다.

$$C = (p_D + p_L) \frac{D}{2} \quad (1)$$

여기서, C 는 벽체에 작용하는 압축력[kN/m]이며 p_D 는 사하중에 의한 암거 정점부에서의 연직압력[kN/m²], p_L 은 충격을 고려한 활하중에 의하여 암거 정점부에 작용하는 연직압력[kN/m²], 그리고 D 는 암거의 직경 또는 스패[m]을 의미한다. 암거 설계 시에 사용되는 연직압력은 Soil arch의 효과를 고려하지 않게 되어 안전 측으로 설계할 수 있도록 한다.

2.2 구조설계시의 검토항목

각 국에서 채택하고 있는 파형강판 암거의 설계법의 주요 항목을 표 1에 정리하였다. 파형강판 암거의 설계는 각 국의 규준에 따라 다소간의 차이는 있지만 일반적으로 다음과 같은 항목에 대한 검토를 수행해야 한다.

① 단면강성 검토 : 운반, 취급 또는 설치 시에 파형강판에 유해한 응력이 발생하지 않도록 하기 위한 최소한의 강성 확보를 위하여 유연도 계수(Flexibility Factor, F.F.)의 상한값을 제한하며 각 국에서는 경험에 의해 유연도 계수의 상한치를 0.11mm/N으로 정하고 있다. 대부분의 경우 필요한 강판 두께의 결정을 지배하는 조건이 된다. 단, 시공중 변형에 대한 제어하기 위한 기술이 도입되거나 경험 등에 의

해 입증된 경우에는 이 항목은 생략할 수 있다.

② 이음부 강도 검토 : 벽체에 작용하는 압축력은 이음부를 통하여 이웃 강관으로 전달되므로 이음부의 강도는 파형강관 자체의 강도보다 커야 하며 이음부에 대한 안전율은 2 이상이 되도록 하고 있다.

③ 벽체의 좌굴검토 : 벽체의 압축응력이 항복응력에 도달하여 발생하는 순수 압축 파괴모드와 항복 응력보다 낮은 응력상태에서 좌굴에 의해 파괴되는 좌굴파괴모드에 대한 검토를 해야 한다.

④ 암거 단면내의 변형 검토 : 설치된 파형강관 암거 단면의 허용 변위에 대해서는 일본의 경우에는 식 (2)와 같은 Spangler의 식(Iowa formula)에 의해 암거의 수평 변위를 계산하여 직경의 5% 이내가 되도록 규정하고 있다. 북미에서도 종전에는 (2)식에 의해 검토하도록 하였으나 최근에는 많은 실험 결과와 경험을 근거로 정점부의 수직 처짐이 직경의 5%이내가 되도록 하고 있다.

$$\eta = F_d \cdot F_k \frac{Wr^3}{EI + 0.061E' r^3} \leq \eta_a, \quad (2)$$

$$E' = \frac{E_s}{2(1-\nu^2)}$$

여기서, η 는 수평방향의 변형량[m]이며, η_a : 수평방향의 허용변형량[m], F_d 는 흙의 경시변화(크리프) 계수, F_k 는 bedding angle에 의한 정수, r 은 암거의 반경 또는 스팬의 1/2[m], E 는 강관의 탄성 계수 [kN/m²], W 는 암거 단위길이당의 연직하중 [kN/m], E_s 는 흙의 변형계수[kN/m²], 그리고 ν 는 흙의 포아손비를 의미한다.

표 1. 각국의 설계기준 비교

구 분	AASHTO(1992)		AISI(1993)	OHBDC (1992)	일본 지반공학회 (1997)
설계법	허용응력설계법	하중계수설계법	허용응력설계법	한계상태설계법	허용응력설계법
단면강성	$F.F. = D^2/EI < 0.11\text{mm/N}$				
이음부 강도	$F_a = 3.0$	강도감소계수:0.67	$F_a = 2.0$	저항계수:0.70	$F_a = 3.0$
벽체의 좌굴	$F_a = 2.0$	강도감소계수:0.67	$F_a = 2.0$	저항계수:0.80	$F_a = 2.0$
단면의 변형	정점부의 수직처짐을 경험적으로 직경(스팬)의 5% 이내로 제한				Iowa식으로 검토, 직경(스팬)의 5%

2.3 시범설치용 파형강관 암거의 설계결과

시범설치용 파형강관 암거의 단면 형태는 역학적 거동이 우수한 원형단면으로 하였으며 기존의 콘크리트 BOX암거의 내부 공간(4.5m×4.5m)을 확보하기 위하여 직경(스팬)을 6.0m로 하였다. 표 2는 각국의 기준에 따른 설계 결과를 보여주고 있다. 표 2에 나타난 강관 두께는 각 국에서 생산되는 제품의 단위별 두께이다. 시범설치용 파형강관은 특별한 변형의 제어 대책 없이 설치할 수 있도록 강관 두께를 결정하였으며 따라서 두께가 5.3mm의 일본 제품을 사용하였다.

단면의 변형을 검토하기 위하여 식(2)에 의해 토압에 의한 수평변위를 계산한 결과 수평변위는 뒷채움재의 종류에 따라 1.92cm ~ 6.18cm로 계산되어 직경의 1% 이내에 들것으로 예상되었다. 시범 설치된 파형강관 암거의 횡단면과 종단면은 그림 3과 같다. 한 개의 링은 8개의 강관으로 구성되며 암거의 총 길이는 29.3m이다.

표 2. 각국의 규준과 제품에 따른 설계결과 비교

구 분	미국(AISI)	일본지반공학회	캐나다(OHBDC)
강판의 항복응력(N/mm ²)	227	206	227
파형의 크기(피치×깊이,mm)	152×51	150×50	152×51
강도조건에 따른 두께(이음부, 좌굴)	2.7mm	2.7mm	3.0mm
강성 요구조건에 따른 두께	4.7mm	5.3mm	5.0mm

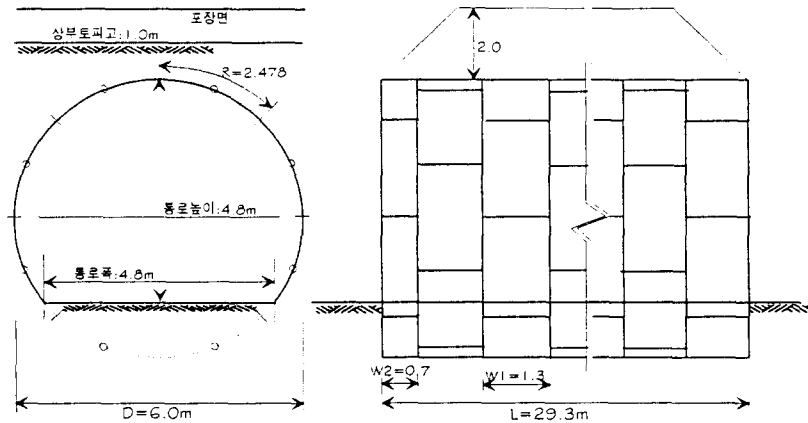
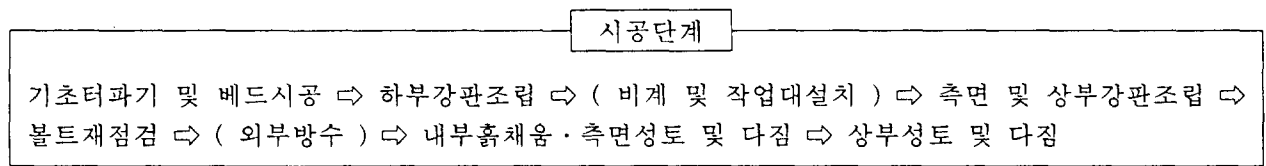


그림 3 시공된 파형강관 단면치수

3. 파형강관 암거의 시공

파형강관 암거의 시공단계는 측량후 정확한 구조물위치와 설치방향을 결정한 다음단계는 다음과 같이 진행된다.



()는 필요한 경우에만 시공

하부지반조건에 따라 적절한 처리를 해야하는데, 본 현장에서는 실트질 점토성질의 논흙이 나왔기 때문에 침하방지와 구조물하부로의 배수를 목적으로 설치레벨에서 110cm를 더 굴착한 후 50cm를 잡석을 채우고 잡석 위에는 현장에서 쉽게 구할 수 있는 마사토를 이용하여 60cm를 복토하여 기초지반을 형성하였다.

조립은 하부 판을 구조물의 skew를 고려하여 정확하게 위치를 잡은 후 상류 측에서 하류 측으로 진행하였고, 하부판조립이 완료된 후에는 1단면을 원형으로 완성시켜 다음에 진행되는 측면과 상부판 조립을 용이하게 하였다. 이후부터는 반복작업으로 측면판 조립을 먼저 진행시키고 동시에 상부판조립을 완성시켰다. 직경6.0m의 단면을 완성시킨 상태에서 구조물의 높이와 폭을 측정된 결과 높이는 590cm, 폭은 615cm인 것으로 나타났다 따라서 구조물 자중과 작업시의 활하중에 의해 변형되는 양은 직경의 2.5%이내가 되어 조립단계에서의 변형량은 양호한 것으로 평가되었다. 가조립 후에는 2회에 걸쳐 전체 볼트를 재점검하였다.

강판은 아연도금이 되어 있어 부식에 대한 염려는 없지만 판이 겹치는 부분과 볼트체결부분을 통하여 누수 되는 부분이 있을 것을 우려하여 외부에 아스팔트유지를 이용하여 방수를 하였다.

파형강판 구조물은 변형을 허용하는 연성구조물로서 상부하중에 대한 지지력은 구조물과 흙과의 상호작용으로 안정화되면서 점차적으로 발휘된다. 이러한 상호작용에서 강판외부의 성토와 다짐은 매우 중요한 부분이며 사용재료와 다짐도 및 다짐범위는 국외에서 사용되는 기준을 종합적으로 검토한 후에 결정하였다. 표 3에는 각국 시방규정에 제시된 재료와 다짐규정을 비교하였는데 국내에서는 구조물 뒷채움에 사용되는 모래자갈질의 선택재료가 적합하고 다짐도 규정에서도 국내적용기준인 한층20cm이하, 95%이상의 다짐규정이 적절하여 이를 그대로 적용하여 시공하였다.

표 3. 각 국 규준에 따른 뒷채움 재료 및 다짐도 비교

구 분	추천재료	사용가능재료	다짐도 기준
AASHTO	부순돌, 자갈, 모래	자갈, 모래, 실트, 점토	한층30cm, 90%이상다짐
OHBCD	자갈, 모래	자갈, 모래, 실트, 점토	헌치부: 15cm 이하, 측면: 30cm이하 90%이상다짐
AISI	자갈	자갈, 모래, 실트, 점토	90~95%이상다짐
일본	자갈, 모래	자갈, 모래, 현장유용토 입경10cm이하재료	95%이상다짐
국내적용	선택재료(SB-1)		한층20cm다짐, 95%이상다짐

시공중인 파형강판 암거의 시공도와 현재까지의 시공된 상태를 각각 그림 4와 그림 5에 소개하였다. 설계상의 토피고(암거 정점부터 포장층 상부까지)는 2.0m이지만 포장층은 아직 설치되어 있지 않고 토피고 1.0까지 시공된 상태이다. 또한 암거의 입구와 출구쪽에 날개벽을 설치하기 위하여 양쪽으로는 7~8m정도는 상부까지 뒷채움을 하지 않은 상태이다. 이 때 구조물 중앙부에서 측정한 단면의 좌우 폭은 602cm로서 설계단면에 비하여 2.0cm정도의 변형이 발생한 것으로 단면 형상이 매우 잘 유지되고 있음을 알 수 있다.

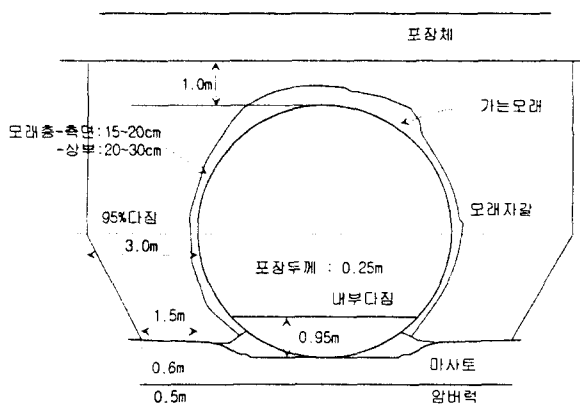


그림 4. 파형강판 암거의 시공도

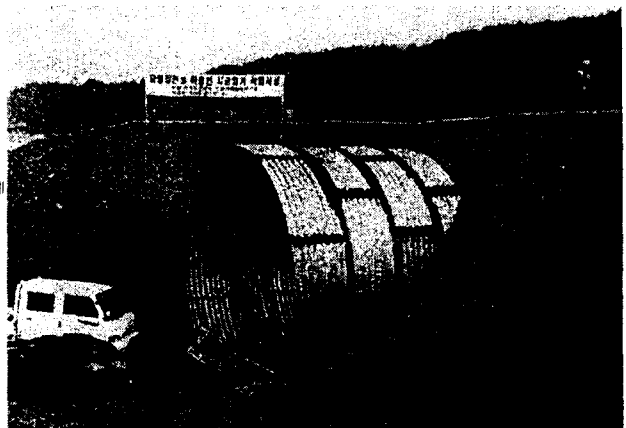


그림 5. 토피고 1.0m까지 시공된 모습

4. 재하시험

4.1 재하방법 및 재하위치

현상태에서의 파형강관 암거의 성능을 평가하기 위하여 현장의 덤프트럭을 만재하여 실 차량 정적 재하시험을 수행하였다. 사용된 재하차량에 의한 축하중은 표 1과 같으며 암거의 중앙부 위치에서 그림 6과 같이 3축 하중을 재하하였다. 도로교 시방서에 의한 DB-24의 후륜 축하중은 $2 \times T_1 = 188.4 \text{ kN}$ 이며 축간의 거리가 4.2m이므로 중륜축과 후륜축의 하중이 재하된 재하차량의 하중이 약간 더 크게 작용하는 것을 수 있다.

표 4. 재하차량 축하중

전륜축	중륜축	후륜축	총중량
66.2kN	116.0kN	97.8kN	280.0kN

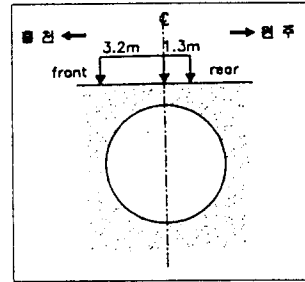


그림 6. 차량하중 재하위치

4.2 계측위치 및 계측방법

암거의 중앙부 단면에 대하여 수직, 수평 및 대각선 방향의 변형량을 측정하기 위하여 그림 7의 위치에 변위계 설치하였다. 또한 차량하중에 의한 파형강관의 응력을 측정하기 위해 원주방향으로 8개소에 변형률계를 설치하였으며 암거의 정점부에는 골과 마루 부분에 변형률계를 설치하였다. 파형강관 구조물의 특성상 일반 구조물과는 달리 지반의 거동특성에 따라 하중을 구조물에 전달하여 안정된 상태에 도달하기까지는 다소 시간이 소요되며 특히 뒷채움 후 초기 재하일 경우에는 더 많은 시간이 필요하며 처짐량도 더 커지게 된다. 시간에 따른 변위의 변화를 살펴보기 위하여 재하후 30초, 10분, 20분, 30분 경과시점에서의 변위를 계측하였으며 하중 제거 후에도 같은 시간간격으로 계측하였다.

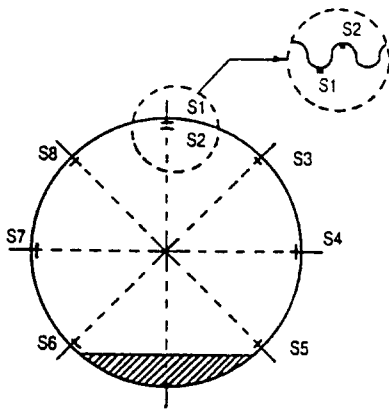


그림 7. 변형율계(S) 및 변위계(D) 설치위치

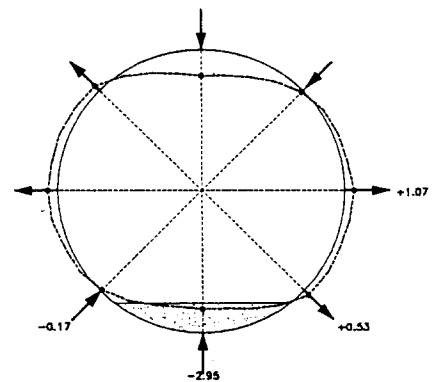


그림 8. 단면의 직경 변화

4.3 계측 결과 및 분석

계측된 결과로부터 재하후 30분 경과 시점에서의 암거 직경의 상대적인 변형 형상을 그림 8과 같이

도시하였으며, 시간의 경과에 따른 응답의 변화를 그림 9와 그림 10에 그래프로 도시하였다. 그림 10은 계속된 변형률로부터 산정된 응력을 나타낸다. 계속된 결과로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1) 그림 8은 본 구조물이 토피두께가 압거 스펠에 비하여 비교적 얇은 구조물이기 때문에 표면의 집중 활하중에 의한 단면의 변형은 상부에서 처짐이 측면이나 하부에 비하여 상대적으로 크게 발생하는 현상을 잘 나타내고 있다. 또한 재하차량의 중륵과 후륵의 합력점이 단면 우측으로 60cm정도 치우쳐서 작용하였으므로 우대각선 방향(D2)의 직경은 감소하고 좌대각선 방향(D4)의 직경은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 응력의 결과로부터 활하중에 의하여 상부에는 휨응력이 주류를 이루는 것으로 나타났다.

2) 그림 9와 그림 10의 그래프로부터 변위와 응력이 시간에 따라 점차적으로 증가하고 있었으며 그 증가율은 점점 둔화되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 지표면에 재하된 차량하중에 대한 지반-구조물 합성작용이 서서히 이루어지면서 안정된 상태로 진행되는 것을 나타낸다.

3) 그림 9와 그림 10으로부터 하중을 제거한 직후부터 일정한 크기의 잔류변형과 잔류응력이 존재하는 것으로 나타났으므로 활하중에 의한 처짐은 계속된 값보다 작을 것으로 여겨진다.

활하중에 의한 변위와 응력의 상태를 평가하기 위하여 하중 재하후 30분 경과시점 및 하중 제거 후 30분 경과시점에서의 계속된 변위와 변형률을 표 5에서 비교하였으며 잔류응답을 제거한 응답(ΔR)을 기록하였다. 압거 정점부의 최대 처짐은 2.95mm로 기록되었으나 잔류변형 1.82mm를 제외하면 정적 처짐은 1.13mm인 것으로 나타났다. 본 구조물의 경우 변위가 계속 증가하고 있었지만 증가율이 둔화되고 있는 점을 감안하고 성토 직후에 재하시험을 하였다는 점과 향후 추가 다짐 및 지반의 안정화가 이루어질 것이므로 활하중에 의한 정적 처짐의 상한치를 2.0mm로 가정할 수 있을 것이며 충격계수 0.3을 고려하면 활하중에 의한 최대 처짐은 2.6mm 정도로 평가할 수 있다.

활하중에 의한 파형강판 압거의 처짐 제한과 관련된 규정은 찾아볼 수 없지만 현행 도로교 시방서에 교량에 대한 규정을 참고하면 콘크리트교량에서는 충격을 포함한 활하중에 의한 처짐을 지간의 1/800으로 제한하고 있으며 이 경우 지간이 6.0m 이면 허용 최대처짐량은 7.5mm가 된다. 또한 강교의 경우 지간 10m미만의 콘크리트 슬래브가 있는 교량의 경우 지간의 1/2,000으로 처짐을 제한하고 있으며 이 경우 지간 6.0m이면 허용 최대 처짐은 3.0mm가 된다. 따라서 계속 결과로부터 본 구조물의 경우 활하중에 의한 처짐은 일반 교량에서의 처짐에 대한 조건을 만족할 것으로 평가할 수 있겠다.

재하 차량에 의하여 강판의 정점부에서 발생한 응력의 증가는 마루에서 인장응력 16,258kN/m²(S1), 골에서 압축응력 23,050kN/m²(S2)이었다. 잔류응력을 제외한 최대응력은 21,196kN/m²(압축)으로 평가되며 이 값은 강판의 허용응력(118,000kN/m²)의 18%수준이므로 충격효과를 고려하더라도 활하중에 의한 강판의 응력상태는 양호할 것으로 평가할 수 있다.

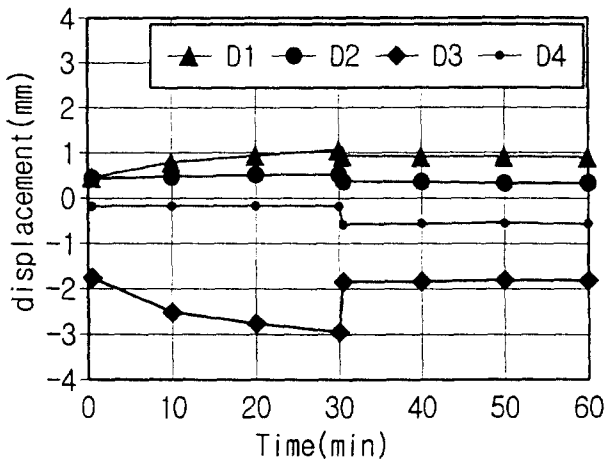


그림 9. 변위계측 결과

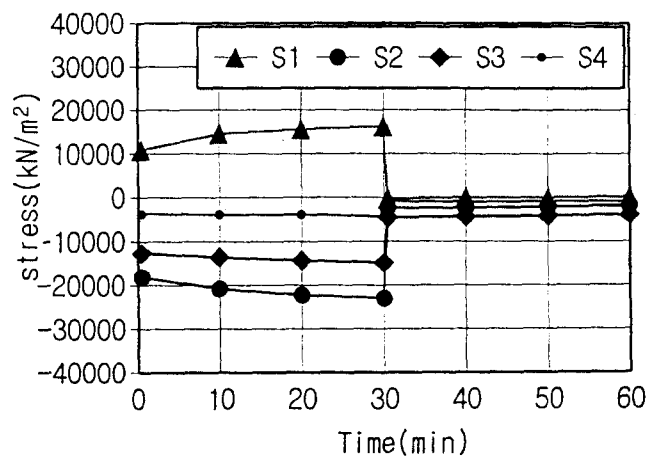


그림 10. 강판의 응력 변화

표 4. 변위 및 변형률 계측 결과(하중재하 후 30분 및 하중 제거 후 30분 경과시점)

응답구분	변위(mm)				변형률(μ)								
	Gage Id.	D1	D2	D3	D4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
하중재하 30분	1.07	0.53	-2.95	-0.17	79	-112	-73	-21	8	0	24	-21	
하중제거후 30분	0.91	0.34	-1.82	-0.56	1	-9	-19	-4	11	1	23	-11	
ΔR	0.16	0.19	-1.13	-0.39	78	-103	-54	-17	-3	-1	1	-10	

5. 결론

신설 중앙고속도로 원주 인근에 시범 설치되고 있는 고속도로 횡단 지하통로용 파형강판 암거에 대한 설계·시공과 실 차량 재하시험을 통한 응답을 분석한 결과 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

(1) 고속도로 통로용 암거는 토피의 두께가 암거 스펠에 비하여 상당히 작게 되므로 활하중에 의하여 상부 강판에 휨응력을 유발하게 된다. 따라서 이에 대한 평가가 이루어져야 하며 본 구조물의 경우 재하차량에 의하여 암거 상부에 발되는 최대정적 휨응력은 강판 허용응력의 18%수준이므로 충격효과를 고려하더라도 안전성을 확보한 것으로 평가할 수 있었다.

(2) 차량하중 재하후 시간에 따라 변위와 응력이 증가하고 있었으며 그 증가율은 점차 둔화되는 것으로 나타나 지반-구조물의 상호작용이 이루어지면서 안정된 상태로 진행되는 상태를 확인할 수 있었다. 또한 하중 제거 후의 계측결과에 따르면 시간의 경과에 무관하게 비교적 일정한 크기의 잔류변형이 발생하는 것으로 나타났는데 이는 성토 직후에 재하시험 수행하였기 때문에 발생한 초기재하 특성으로 판단되었다.

(3) 변위의 계측 결과로부터 시범설치된 파형강판 암거의 충격을 고려한 활하중에 의한 최대 처짐은 3.0mm(스펠의 1/2,000) 이내로 예측할 수 있었으며 콘크리트교량 및 강교량의 처짐 제한을 모두 만족할 수 있는 것으로 평가되었다.

(4) 파형강판암거의 구조설계 결과 강판의 필요 두께는 시공중 강판의 최소 강성확보 조건이 설계를 지배하였으며 강판의 두께가 크게 증가하게 되었다. 변위를 적절히 제어하면서 시공하는 경우에는 파형강판의 두께를 40% 이상까지도 줄일 수 있어 재료비의 절감을 기대할 수 있다.

6. 참고문헌

1. 포항산업과학연구원 (1997), 대형 파형강판을 이용한 지중구조물의 실용화 연구, 포항산업과학연구원 연구보고서
2. 社團法人 地盤工學會 (1997), コルグートメタルカルバート・マニュアル
3. AASHTO (1994), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications
4. AISI (1994), Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products
5. George Abdel-Sayed, Baider Barkht and Leslie G. Jaeger. (1993), "Soil-Steel Bridges : Design and Construction", McGraw-Hill
6. Reynold K. Watkins. (1993) "Structural Michanics of Buried Pipes", Utah State University, Logan, UT 84322
7. White, H.L. and Layer, J.P. (1960), "The corrugated Metal Conduit as a Compression Ring", Proceedings of the Highway Research Vol. 39, pp.389-397.