

GMR공사에 적용된 PCCP(ECP)의 설계

PCCP(ECP) Design of Great Man-made River Project

김 영 수^{*} 최 인 식^{**} 신 경 수^{***} 김 두 영^{****} 이 원 재^{*****}
Kim, Young Soo Choi, In Sik Shin, Kyoung Soo Kim, Doo Young Lee Won Jai

ABSTRACT

Prestressed Concrete Cylinder Pipe(PCCP) is used in water transmission pipeline of the Great Man-made River Project(GMR Project). In domestic area, PCCP is used for water cooling systems of Uljin and Youngkwang nuclear power plants. In abroad, especially in the United States and Canada PCCP supplies virtually every metropolitan area with raw and treated water. Compared with other pipe types, PCCP manufacturing cost is dear. But total cost can be considered as economical due to low installation and maintenance cost.

Previously, the designs of PCCP were generally determined from one of two appendices in American Water Works Association(AWWA) standard C301 which provided two design methods-cubic parabola design method and stress analysis design method. In 1992, the design procedure for PCCP expanded from two alternatives to the most huge and complex AWWA standard C304. Because C304 is so large, it takes too much time for the engineer to read and understand the design concepts and procedures.

In this paper, The AWWA C304 design procedures are segmented into simple, understandable sections and concepts and explained. Each section or concepts is compared to the previous design procedure to highlight the revisions and reasons for them. Also the PCCP design program was developed and the design program results are compared with the calculations of the GMR project design consultant.

1. 서론

미국의 경우 1992년 AWWA C304가 출간되기 이전에는 PCCP 설계는 일반적으로 AWWA C301의 부록에 나와있는 설계법 중 하나에 따라 결정되었다. 현재 AWWA C304에는 Unified Design Procedure(UDP)가 제시되어 있다. 1997년 American Concrete Pressure Pipe Association (ACPPA)에 의하면 약 50% 가량의 설계자들만이 개정된 설계법을 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 국내의 경우

-
- * 정회원. 동아건설산업(주) PCC관설계 T/F팀장, 공학박사
 - ** 동아건설산업(주) PCC관설계 T/F팀
 - *** 동아건설산업(주) 해외공사팀, 부장
 - **** 동아건설산업(주) 기술연구소장
 - ***** 동아건설산업(주) 기술담당, 상무

는 원자력 발전소의 냉각수용 배수관에 쓰이고 있는 PCCP에 대해 개정되기 이전의 설계법을 적용하고 있는 상태이다. 이는 새로운 설계법에 대한 정확한 이해가 부족한 상태임을 보여주고 있다.

본 논문에서는 PCCP의 종류 중에서 Embedded Cylinder Pipe(ECP)에 대한 설계개념을 1992년도 AWWA 설계기준의 개정 이전과 이후의 차이점을 중심으로 살펴보았으며, 새로운 설계법을 적용하여 자체 개발된 프로그램 결과와 GMR공사의 설계용역사인 Price Brothers(UK)사의 설계 결과를 비교하였다. 그림 1은 ECP의 단면이다.

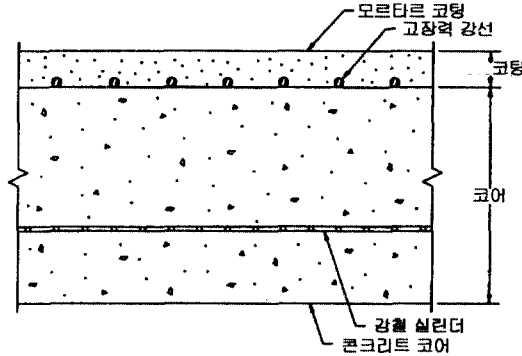


그림 1 Embedded Cylinder Pipe의 단면

2. 설계개념

2.1 설계법의 변화

AWWA C301의 부록 A는 반실험적 연구에 바탕을 둔 cubic parabola 설계법(그림 2)을, 부록 B는 정지상태의 내외압하에서 파이프 내의 조합된 최대 순 인장응력을 $7.5\sqrt{f'_c}$ 로 한정되는 응력설계법(그림 3)에 근거를 두었다. 여기서 f'_c 는 코어 콘크리트의 설계 28일 압축강도이다. 적절한 설계를 위한 두가지 방법의 적합 유무는 신중하게 검토된 적이 없었다. PCCP 설계과정과 설계개념의 변화를 살펴보면 세 가지가 이유가 있다. 첫째, 개정 이전 두 설계과정들은 매우 유사하지만 관설계 결과에는 차이가 있으며 이러한 차이는 혼동을 유발하기도 하였다. 둘째, 개정 이전의 설계과정들은 콘크리트 코어의 인장응력 한계에만 기준을 두고 있었지만, 이와는 다르게 UDP는 모든 관요소 재료에 대한 포괄적인 응력 해석을 한다. 마지막으로 기존의 설계과정들은 요소재료거동을 특성화하기 위해 고전적인 가정을 이용한 것과 달리 새로운 설계과정은 요소재료를 최신의 방법을 이용하여 모델링하며 각각의 관생산공장의 환경변화를 수용하도록 하고 있다.

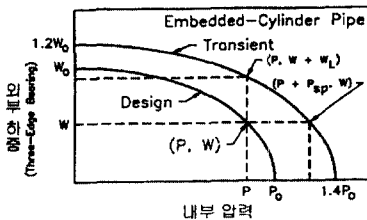


그림 2 cubic parabola 설계법

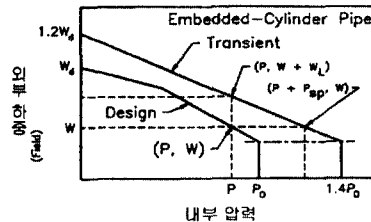


그림 3 응력설계법

2.2 기본 설계 개념

기존 설계 방법의 기본 개념은 콘크리트 코어의 인장을 압력관 매설에 대한 일반적인 제한 매개변수로 간주하므로 결과적으로 내부압력을 포함하는 관 벽의 인장은 외부하중과 자중을 지지하는 관 벽의 인장에 더해진다. 이에 따라 위와 같이 발생하게 될 인장력을 상쇄할 만큼 관의 콘크리트를 압축할 프리스트레싱 강선의 양을 결정하게 된다. 그러나, UDP는 균열이나 항복이 일어나지 않도록 콘크리트 코어뿐만 아니라 모든 요소재료의 응력과 변형률을 제한한다. 이것은 보 설계와 같은 방식으로 PCCP의 경우에도 적용되므로 응력 및 변형률도는 관 요소 재료의 사용 및 일시적인 응력 및 변형률을 계산하는데 사용된다(그림 4).

2.3 요소재료거동의 모델링 변화

새로운 설계방법은 기존의 가정을 더욱 정확한 최선의 이론으로 대체하였으며 모든 요소재료를 포괄적으로 평가하게 되었다. 예를 들면, 강선 또는 실린더의 구분 없이 관의 강철의 탄성계수는 193,050MPa(28,000,000psi)로 정의하였으나 UDP는 정확하게 계수들을 구분하여 정의한다. 즉, 강선의 탄성계수는 193,050MPa(28,000,000psi), 실린더는 206,850MPa(30,000,000psi)으로 정의하였다. 기존의 설계에서는, 수직으로 성형된 콘크리트의 탄성계수에 대한 강철의 탄성계수의 초기비율 n_i 를 7, 완전히 양생된 콘크리트에 대한 최종비율 n_r 은 6으로 정의하였다. UDP에서는 성형 콘크리트의 계수비를 콘크리트의 강도에 따른 공식으로 계산한다. 그리고 강선과 실린더에 대한 각각의 계수가 있기 때문에 콘크리트계수와 강선 또는 실린더계수사이의 비율을 나타내는 별도의 식이 있다. 새로운 실린더 강철과 타설 콘크리트의 초기 계수비 $n'_i = 117(f'_c)^{-0.3}$, 프리스트레싱 강선과의 비 $n_i = 109(f'_c)^{-0.3}$ 이다. 새로운 실린더 강철과 성형 콘크리트의 최종 계수비 $n'_r = 99(f'_c)^{-0.3}$, 프리스트레싱 강선과의 비 $n_r = 93(f'_c)^{-0.3}$ 이다.

강선의 이완에도 유사한 변화가 적용되었다. 강선의 이완은 기존에는 5%로 정했었지만, UDP에서는 콘크리트가 수직으로 성형되었는지 혹은 원심력을 이용하였는지에 따라 강선이완을 계산하는 공식이 다르다. 강선 이완손실계수 R 은 성형 콘크리트에 대하여 $R = 0.111 - 3.5(A_s/A_c)$, 원심력 콘크리트에 대하여는 $R = 0.132 - 3.1(A_s/A_c)$ 이다. 여기서, A_s/A_c 는 강선과 코어콘크리트의 단면적 비이다.

콘크리트 또는 모르타르의 응력/변형률 곡선은 파괴에 이르기까지 인장이 선형적으로 증가하는 형태에서 강철의 항복점과 유사한 최대 인장강도를 보이는 실제적인 형태로 개정되었다(그림 5). 최대 인장 응력을 일으키는 변형률 이후에서 콘크리트 또는 모르타르는 가시균열이 나타날 때까지 더 작은 크기의 인장강도를 나타낸다.

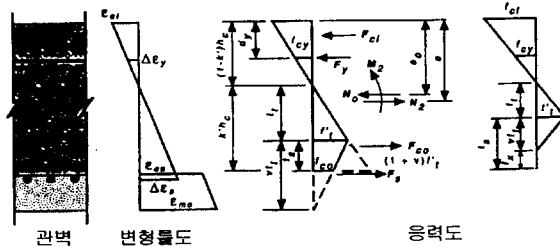


그림 4 관측면부 단면의 변형률 및 응력도

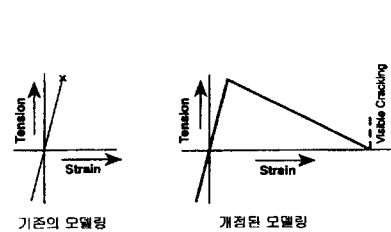


그림 5 콘크리트와 모르타르의 응력-변형률도

개정된 또 다른 설계변수들은 크리이프와 건조수축에 관한 것이다. 기존의 설계 과정은 크리이프와 건조수축을 성형 콘크리트에 대하여 2.0의 값을 가지는 하나의 계수로 일괄 처리하였다. 그리고 그 계수는 코팅, 내부 또는 외부 콘크리트 코어의 두께에 관계없이 사용되었다. 그러나, 크리이프와 건조수축은 일차적으로 콘크리트나 모르타르에서 물의 증발에 의한 것이므로 콘크리트의 두께에 영향을 받는다. 크리이프계수 ϕ 와 건조수축 변형률 s 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{(h_{co} + h_m)\phi_{com} - h_m\phi_m + h_{ci}\phi_{ci}}{h_{ci} + h_{co}} \quad s = \frac{(h_{co} + h_m)s_{com} - s_m\phi_m + s_{ci}\phi_{ci}}{h_{ci} + h_{co}}$$

여기서, h_{co} , h_m , 그리고 h_{ci} 는 외부코어콘크리트, 모르타르코팅, 내부코어콘크리트의 두께, ϕ_{ci} , ϕ_{com} , ϕ_m , s_{ci} , s_{com} , 그리고 s_m 은 내부코어, 외부코어와 코팅, 코팅의 크리이프계수와 건조수축 변형률이다. 관 생산 환경과 관벽 두께의 영향은 새로운 식들에 포함되었다. 관의 노출기간, 관이 노출되었던 주변 조건, 그리고 관벽 두께는 모두 최종 크리이프와 건조수축계수에 영향을 미친다.

PCCP 설계와 생산에서 관의 재료 거동은 기준을 만족 또는 초과하도록 시험을 통해 확인하여야 한다. 만약 기준과 같이 거동하지 않으면 실제 재료 거동 특성들을 관 설계에 사용하여야 한다.

2.4 코어 압축 응력

AWWA C301 부록 A와 B 설계 과정에 사용된 PCCP 콘크리트 코어 압축에 대한 기존의 식들은 hoop 응력 식을 유도하는 것과 유사하다(그림 6). 초기 콘크리트 코어 압축 응력 f_{ci} 는 다음과 같다.

$$f_{ci} = \frac{A_s(f_{sg})(1 - R_1 - R_2)}{A_c + n_i(A_s + A_y)}$$

여기서, A_s , A_c , 그리고 A_y 는 프리스트레싱 강선, 코어 콘크리트, 그리고 강판 실린더의 단면적이고 f_{sg} 는 강선의 총권선응력, R_1 과 R_2 는 강선 이완손실계수, 그리고 n_i 는 초기 계수비이다. 최종 코어 압축 응력 f_{cr} 은 다음과 같다.

$$f_{cr} = \frac{f_{ci}[A_c + n_r(A_s + A_y)]}{A_c + n_r(A_s + A_y)(1 + C_r)}$$

여기서, n_r 은 최종 계수비, C_r 은 크리이프계수이다.

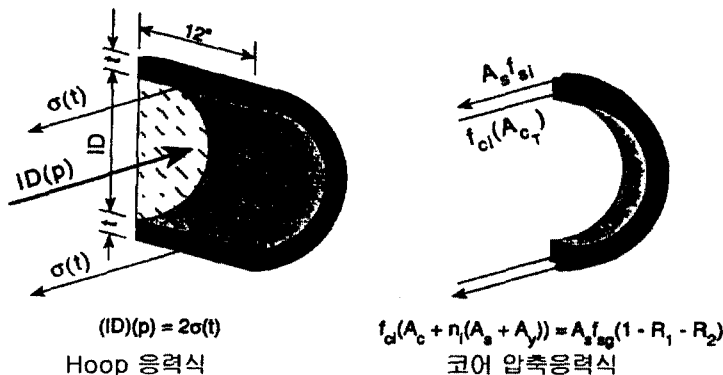


그림 6 관벽에 작용하는 힘의 평형도

UDP에서는 이러한 식들이 실제적인 재료 거동을 모델링하도록 개정되었으며, 식들은 다음과 같다.

$$f_{ci} = \frac{A_s(f_{sg})}{A_c + n_i A_s + n'_i A_y}$$

$$f_{cr} = \frac{f_{ci}(A_c + n_r A_s + n'_r A_y) - (A_s E_s + A_y E_y) s - A_s (R) f_{sg}}{A_c + (n_r A_s + n'_r A_y)(1 + \phi)}$$

여기서 E_s 와 E_y 는 프리스트레싱 강선과 강관 실린더의 탄성계수이다.

2.5 AWWA C304 설계과정요약

기존의 AWWA C301 부록 B 설계식은 관 내부 압력과 관에 작용하는 외부 하중 및 자중으로 인하여 발생하는 응력을 조합하여 유도되었다(그림 7). UDP는 기존의 AWWA C301 부록 B와 동일한 일반적인 설계 과정을 사용하지만 식에 사용되는 변수들을 개정하고 코어 콘크리트뿐만 아니라 실린더, 강선, 그리고 모르타르 코팅에 대한 유사한 식들을 포함하는 설계로 확장되었다.

새로운 설계 곡선을 도시하면, 콘크리트 코어와 모르타르 코팅 인장의 UDP 곡선은 일반적으로 그림 8과 같다. 그러나 UDP는 다른 관요소의 응력과 변형률을 제한하므로 외부곡선은 압축상태의 콘크리트, 그리고 인장상태의 실린더와 강선에 대한 거동한계를 나타낸다.

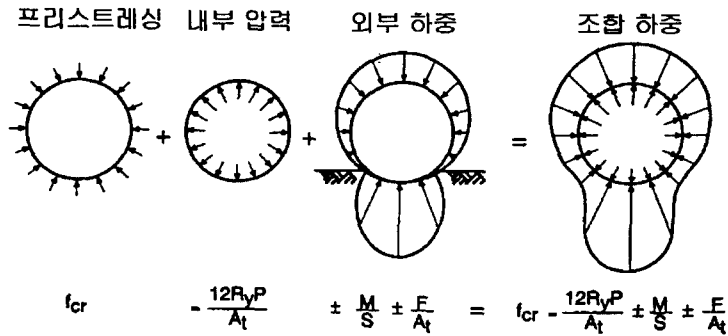


그림 7 AWWA C301-79 부록 B 설계식

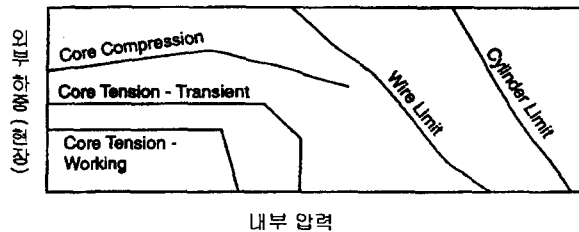


그림 8 AWWA C304의 설계곡선

3. 설계 프로그램 개발 및 적용

3.1 프로그램 개요

AWWA C304에 따른 PCCP 설계에는 많은 단계가 수반되므로 수작업으로 설계하는 것은 힘든 일이다. 따라서, 이론을 정확히 반영하고 설계과정을 반복 수행할 수 있는 새로운 프로그램이 개발되었다. 개발된 PCCP(ECP)설계 프로그램은 AWWA C304-92에 제시된 사용성(Serviceability), 탄성(Elastic), 강도(Strength) 한계상태의 기준을 만족하도록 작성되었다.

자체 개발된 프로그램은 약 2년간의 기간을 통해 Microsoft Fortran Powerstation 4.0을 이용해 개발되었다. 주어진 관경, 내압, 토피고 등의 자료를 입력하여 소요의 코어 두께, 강선량 등을 산정하는 절차로 이루어져 있으며, 흐름도는 그림 9와 같다.

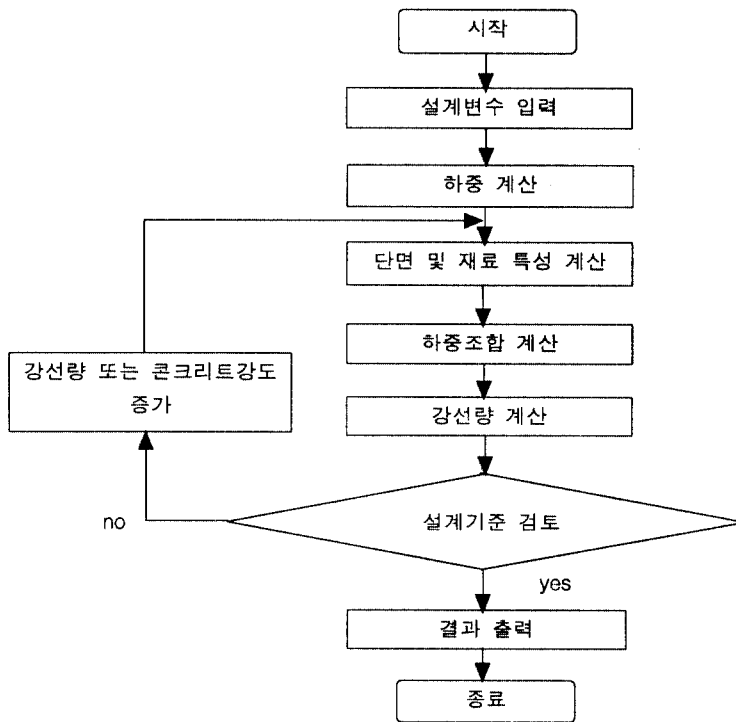


그림 9 프로그램 흐름도

3.2 프로그램 검증 및 적용

프로그램에 대한 검증을 위하여 리비아 대수로 공사에 적용된 설계결과를 이용하였다. 현재 GMR 2단계 공사에 사용되는 PCCP(ECP)는 영국의 Price Brothers사가 설계하고 있다. 검증을 위해 Price Brothers사가 GMR 공사에 제출한 전체 관경에 대한 계산서와 개발된 프로그램에 의해 산출된 결과를 비교하였다.

그림 10은 관경 4000mm, 내압 6bar, 토피고 3.5m에 대한 계산예로서 단면, 재료, 응력상태의 계산 결과를 보여준다. 사용성, 탄성, 강도한계상태를 만족하는가를 검토하도록 하고있다.

비교대상은 제출된 모든 계산서에 대해 강선량의 오차를 백분율 오차로 나타냈으며 비교결과는 표 1과 같다. 비교 결과에서 보듯이 최대 -0.68%의 오차를 나타내고 있다. 이는 설계시 필요한 입력변수 설정시의 오차, 단위변환시의 오차 등에 의해 발생한 것으로 사료된다. 발생한 오차범위로 볼 때 프로그램에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다. 개발된 프로그램은 1997년 11월 GMR 3단계 공사 입찰시 예비견적에 사용된 바 있다.

```

===== GEOMETRY =====
D1 = 4000.0 mm      Dy = 4154.0 mm      ty = 1.90 mm
bc = 250.0 mm      hb = 33.7 mm      db = 4.88 mm
As1 = 1230.4 mm2/m  As2 = 1230.4 mm2/m  As3 = .0 mm2/m

===== MATERIAL PROPERTIES =====
f'c = 493.0 kg/cm2  f't = 41.2 kg/cm2
f'm = 385.7 kg/cm2  f'ms = 36.5 kg/cm2
fs = 198860.0 kg/cm2  Ey = 210923.5 kg/cm2
fsg = 12388.0 kg/cm2  fyy = 2300.1 kg/cm2  fyyr = 3153.8 kg/cm2
r_c = 2322.8 kg/m3  r_m = 2242.7 kg/m3  r_s = 7833.5 kg/m3
n = 6.978          n = 7.262

===== DESIGN CONDITION =====
Pw = 6.0 bar      Pr = 2.4 bar      Pfr = 6.0 bar
Ww = 30472.0 kg/s  Wt = 946.5 kg/s   Cover = 3.5 m
Wp = 9160.5 kg/s  Wf = 12840.7 kg/s
t1 = 365.0 days   t2 = 1825.0 days

===== MOMENT & THRUST COEFFICIENT =====
CLAMBER ANGLE = 120.0 deg.  ANGLE (PIPE WEIGHT) = 15.0 deg.
Cwe  Csp  Cnf  Cse  Csp  Cnf
springline  5157  .3026  -.0645  .0912  .1016  .0770
invert       .3195  .1020  -.2326  .1089  .2157  .0911

===== INITIAL PRESTRESS =====
fic = 117.7 kg/cm2  fly = 966.7 kg/cm2  fic3 = 0 kg/cm2
fiol = 59.9 kg/cm2  fiol2 = 57.9 kg/cm2
fiol3 = -12387.4 kg/cm2  fiol4 = -12845.3 kg/cm2  fiol5 = 0 kg/cm2
ni = 7.850          ni' = 6.212

===== FINAL PRESTRESS =====
Po = 11.5 bar
fcr = 88.1 kg/cm2  fcr = 1990.4 kg/cm2
fcr1 = -10308.0 kg/cm2  fcr2 = -10227.2 kg/cm2  fcr3 = 0 kg/cm2
phi = 1.449        s = .000163        RN = 40. x
R1 = 0.64237       R2 = .102264        R3 = .000000
nr = 6.527         nr = 6.948

===== PI-% CHARACTERISTICS =====
P'x = 15.4 bar      Pb = 23.4 bar

```

```

compressive strength of concrete required at wrapping (1st wrap) = 210 kg/cm2
compressive strength of concrete required at wrapping (2nd wrap) = 214 kg/cm2

core decompression P = 6.0 bar      Po = 11.5 bar      RATIO = 1.92
confining wrapping P = 8.4 bar      Pmax = 15.4 bar   RATIO = 1.83
burst failure P = 14.4 bar          Pb = 23.4 bar    RATIO = 1.63

===== DESIGN RESULTS =====
As = 2461 mm2/m (As1=1230 As2=1230 As3= 0)

CRITERION  LOAD CASE  MOM. CAPACITY  APPLIED MOM  RATIO
              kg-m/s          kg-m/s
fyy         FW73    28748          16166(R,R)    1.65
            FW74    32976          15284          2.12
fsg         FW1    21104          12738          1.66
            FW2    25168          12641          1.95
            FT2    24214          14012          1.73
fyy         WT1    25140          15656          1.61
            WT2    30821          16877          1.94
            FT1    28612          17222          1.72
            WT3    30566          15877          2.22
MDE        W1     15656          15656          1.00
            WT1    20993          15656          1.34
            WT2    25804          15877          1.63
            FT1    24873          17222          1.44
MDE        W1     14724          11580          1.27
            WT1    27265          11580          2.35
            WT2    31256          11765          2.66
            FT1    35407          12738          2.39
MDE        W2     21753          11580          1.88
            WT3    26749          11765          2.27
R.T        FW1    22389          17900          1.25
            WT3    22221          15877          1.40
Wu1        FW75    46214          18698          2.45

```

그림 10 설계에 결과

표 1 개발된 프로그램과 Price Brothers사의 설계 비교

관경(mm)	Data 수(EA)	최대[양]오차(%)	최소[음]오차(%)
2000	49	0.38	-0.59
2200	54	0.39	-0.68
2400	81	0.43	-0.64
2800	94	0.40	-0.57
3600	452	0.40	-0.62
4000	218	0.44	-0.67
계	948	최대 0.44 %	최소 -0.68 %

4. 결론

본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 개정 이전의 설계과정들은 콘크리트 코어의 인장응력 한계에만 기준을 두고 있었지만, 이와는 다르게 UDP는 모든 관요소의 재료에 대한 포괄적인 응력 해석을 한다.
- (2) AWWA C304에 따른 UDP는 기존의 AWWA C301 부록 B와 동일한 일반 설계 과정을 사용하지만 식에 사용되는 변수들을 개정하고 코어 콘크리트뿐만 아니라 실린더, 강선, 그리고 모르타르 코팅에 대한 유사한 식들을 포함하는 설계로 확장되었다.
- (3) AWWA C304에 따른 PCCP 설계에는 많은 단계가 수반되며 수작업으로 PCCP를 설계하는 것은 힘든 일이다. 따라서, 이론을 정확히 이해하고 설계과정을 반복 수행할 수 있는 설계 프로그램의 개발이 필요하다.
- (4) AWWA C304-92에 제시된 사용성(Serviceability), 탄성(Elastic), 강도(Strength) 한계상태의 기준을 만족하도록 프로그램이 개발되었으며, 리비아 대수로 공사에 사용된 설계결과를 이용하여 개발된 프로그램을 검증할 수 있었다.
- (5) 개발된 프로그램의 검증을 위해 비교된 결과는 매우 작은 오차를 보이고 있으며, 실제 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. American Water Works Association, Standard for Prestressed Concrete Pressure Pipe, AWWA C301-79, (1979)
2. American Water Works Association, Standard for Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe, AWWA C304-92, (1992)
3. Mueller, I., Richard, "PCCP Design Concepts Made Simple", Advances in Underground Pipeline Engineering, II, pp.524-535(1990)