'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 이차배관의 프랑스 RCC-MR 설계지침을 따른 평가

Evaluation of KALIMER IHTS Piping per French RCC-MR design guideline

이형연, 김종범, 유 봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 액체금속로 KALIMER의 중간열전달계통(IHTS)내 이차 배관계통의 설계 건전성을 평가하기 위해 프랑스의 액체금속로 전용 설계지침인 RCC-MR RC-3600의 절차를 따라 이차배관 설계건전성을 검토하고 그 평가절차를 제시하였다. 평가결과 배관의 간편공식에 의한 설계(design by formula)인 RC-3600의 절차에 따른 평가결과가 미국의 일차계통 구조용기 설계지침인 ASME section III subsection NH의 해석에 의한 설계(design by analysis)결과보다 다소 보수적인 결과를 보여주었다.

Abstract

In the present paper, the evaluation of design integrity for the liquid metal reactor(LMR) of KALIMER IHTS(intermediate heat transport system) piping according to the French design guideline of RCC-MR RC3600 developed for secondary piping of LMR and the evaluation procedure was presented. The evaluation results showed that the results by the simple RC-3600 procedure of design by formula were more conservative than those of ASME section III subsection NH of the design by analysis for the class I structural components.

1. 서론

액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) [1]는 일차 열전달 계통(PHTS)에 배관을 사용하지 않는 풀형 원자로이지만 원자로 용기 내 열교환기(IHX)와 증기발생기(SG)는 이차측 배관계통인 중간열전달계통(intermediate heat transport system :IHTS) 배관에 의해 연결된다. 이 IHTS 배관은 기존의 경수로 대비 저압, 고온(정상상태 511°C)에서 운전되며 특히 이차측 열교환기의 입출구 온도차가 170°C 를 상회하는 등 비교적 큰 열하중을 받는다.

KALIMER IHTS의 주요 기기 및 배관계에 대한 배치설계와 이 배관계통에 대해 일차계통 설계지침인 ASME section III subsection NH[2]에 따라 설계건전성을 평가하는 연구는 이미 이미 수행된

바 있다[3]. 본 연구에서는 액체금속로 전용 코드로 개발된 프랑스의 RCC-MR[4] 코드의 이차배관 설계지침인 RC-3600[5]을 따라 크립-피로 손상평가를 포함하는 배관의 설계건전성을 검토하고 이 결과를 기 수행된 ASME NH 의 결과와 비교분석하였다. 또한 본 해석에서는 RC-3600 에서는 진행성 영구변형(progressive deformation) 및 크립-피로 평가를 수행하고 그 평가절차를 제시했다.

미국의 ASME section III subsection NH, 프랑스의 RCC-MR 및 일본의 BDS 를 따른 설계검토 절차는 참고문헌 [5]에 제시되어 있다. 배관 설계검토와 관련하여 AME NH-3600(일차배관)과 ASME N253[8](2 등급 부품), RCC-MR RB-3600(일차배관), RC-3600(이차배관) 및 BDS(일차배관) 등이 제시되어 있지만 NH-3600 과 N-253 및 BDS 의 지침은 아직 크립-피로 손상절차가 제시되어 있지 않은 상태이다. 반면 프랑스의 RB-3600 및 RC-3600 은 일차 및 이차배관에 대하여 공식에 기초한 설계절차를 제시하고 있다. 이 절차는 상세해석보다는 간편공식에 기초하고 있어 다소 보수적이기 때문에 관련지침이 바로 만족되지 않는다 하여도 배관이 아닌 일반 구조물에 대한 RB-3200 과 RC-3200 이 만족되면 설계는 만족되는 것으로 간주된다는 특징이 있다. 그런데 RC-3600 에는 배관에서 발생 가능한 탄성추종에 대한 평가 절차가 빠져 있기 때문에 국부 크립변형률 집중에 의한 탄성 추종평가를 위해서는 RB-3600 의 절차를 따라야 한다는 제약사항이 있다.

2. KALIMER 이차배관 계통 배치도

2.1 기기 및 배관계통의 배치

KALIMER IHTS 는 그림 1 및 2 에서와 같이 IHX 출구온도가 511°C 이고 입구온도는 339.7°C 로 IHX 의 출.입구 온도차가 171.3°C 에 이르는 고온구조물 계통이다. IHTS 배관의 제원은 표 1 에 제시되어 있으며 표 2 는 일반적인 고온 액체금속로 배관과 저온 경수로 배관의 설계특성을 비교한 것이다.

2.2 배관해석 모델링

그림 1의 IHTS 배관계에서 설계평가를 위한 ANSYS[9] 해석모델은 그림 4와 같으며 해석모델에는 지지구조물과 격리밸브, 냉각재 소듐의 자중 등도 고려되었다.

2.3 작용하중

IHTS 배관에 작용하는 하중으로서 본 해석에서 사용한 과도는 전체 배관이 511°C 를 유지하다가 311°C 로 냉각된 뒤 다시 511°C 로 올라가는 즉, 511°C ⇒ 311°C ⇒ 511°C 로 변한 후 511°C 에서 10,000 시간이 유지되는 과도가 10 회 반복되는 경우를 가정하여 크립-피로 손상평가를 위한 해석과도로 정했다. 따라서 511°C 에서 총 유지시간은 100,000 시간이다.

3. RCC-MR을 따른 평가

3.1 개요

RCC-MR 지침은 P 형 손상과 S 형 손상으로 구분하여 평가절차를 제시하고 있다. P 형 손상은 일정하게 유지되거나 단조증가하는 하중에 의해 발생하는 것으로 즉시(immediate) 또는 시간의존

과도변형, 즉시 또는 시간의존 소성 불안정성, 시간의존 파괴 등이 그 예이다. 반면 S 형 손상은 하중의 반복 작용에 의해 발생하는 것으로 진행성 변형(preogressive deformation), 피로손상 등이 그 예에 해당된다. P형 손상은 내압을 포함하는 하중제어에 따른 것으로 크립을 고려하거나 고려하지 않는 경우에 대해 평가하며 일반적으로 허용치에 비해 상당한 여유가 있게 계산된다. 본 해석에서도 이에 대한 평가결과는 모두 허용치 이내로 나타났다. 각국의 설계지침을 따른 하중제어 응력제한치 평가결과는 표 3 에서와 같이 모두 만족되는 것으로 나타났다. 여기서는 고온배관 설계에서 중요한 S 형 손상에 대해서만 다루기로 한다.

3.2 RC-3600 의 S 형 손상 평가지침

S 형 손상에는 크립을 무시할 수 없는 경우와 크립을 무시할 수 있는 경우로 분류되는데 여기서는 크립을 무시할 수 없는 경우에 대해서 고려한다.

3.2.1 진행성 변형 (progressive deformation)

$$q(j,j') = \langle C_2/Z, m(j,j') \rangle + E\alpha\theta_1 / 2(1-\nu) + C_3 \left| E_a\alpha_a\theta_m{}^a(j,j') - E_b\alpha_b\theta_m{}^b(j,j') \right|$$

여기서 각 상수 및 용어 정의는 참고문헌[5]에 제시되어 있다. 진행성 영구변형과 관련하여 유효 일차응력강도를 결정하기 위해 두 개의 이차비율(secondary ratio), SR1 및 SR3 를 다음과 같이 정의하고 계산하면

$$SR_1 = \frac{\text{Max } q(j, j')}{\text{Max } \overline{p_m}} = 8.46$$

$$SR_3 = \frac{\text{Max } q(j, j')}{\text{Max } (\overline{P_m + \Phi P_b})} = 1.95$$

RCC-MR 지침의 RB 3261.1.1.2.1 에 제시된 efficiency diagram 을 이용하여 SR1, SR3 에 대응하는 efficiency index 를 구하면 V_1=3.4, V_3=6.9 로 나타난다. 그러면 유효 일차응력강도는

$$P_1 = \frac{\text{Max } \overline{P_m}}{V_1} = 3.83$$

$$P_3 = \text{Max } (\overline{P_m + \Phi P_b}) = 56.46$$

점진적 변형이 일어나지 않기 위해서는 크립 사용계수(usage fraction)가 다음식을 만족해야 한다.

$$U_A = (P_1/1.2) \le 1$$

$$U_A = (P_3/1.2) \le 1$$

윗 식은 A3 에 나타난 물성치 데이터를 이용하면 다음과 같이 계산된다.

$$U_A = (3.18) << 1$$

$$U_A = (47.04) << 1$$

그러므로 칼리머 이차배관은 가정된 과도에 대해 진행성 영구변형이 발생하지 않는다.

3.2.2 크립-피로 손상평가

소성 및 크립에 의해 증가하는 변형률 범위는 탄성해석 결과를 이용하여 다음 절차를 따라 실제값에 근사시킨다.

$$\overline{\Delta e} = \overline{\Delta e_{el+pl}} + \overline{\Delta e_{fl}}$$

윗 식에서 우측 첫째 항은 소성변형에 의한 변형률 증가치로 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}\overline{\Delta e_{el+pl}} &= k\overline{\Delta e_1} + \overline{\Delta e_2} \\ &= \frac{2}{3}k\frac{1+n}{E_c}S_p(j,j') + \overline{\Delta e_2} \\ &= 0.00166\end{aligned}$$

그러면 RCC-MR 이 제시하는 설계지침에서 위의 변형률에 대한 응력범위는 다음과 같이 나타난다.

$$\overline{\Delta s^*} = 214.0 \quad \text{(MPa)}$$

크립손상이 변형률 증강에 기여하는 양은 대칭(symmetrization)계수가 관여하고 이는 A3 자료에서

$$\frac{\overline{\Delta s^*}}{2(R_{0.002}(q^*))\min} = 0.9345$$

데이터로부터 대칭계수는 0.68 로 계산된다. 이에 따른 변형률 변위는

$$\begin{aligned}\overline{\Delta e_{fl}} &= C_1 t^{c_2} s^{n1} \\ &= 0.4355\ (\%)\end{aligned}$$

따라서 크립손상을 일으키는 응력 σ_k는 RC-3600 을 따라 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}s_k &= Avg.\overline{P_m + P_b} + K_s\overline{s^*} \\ &= 201.97 \quad \text{(MPa)}\end{aligned}$$

그러면 A3 의 피로곡선으로부터 피로 수명 $N_f \approx 700$ 으로 계산된다. 따라서 피로손상계수는

$$V_A = \frac{ni}{N_f} = \frac{10}{700}$$
$$= 0.0143$$

크립 손상을 지침에 따라 계산하면 다음과 같다.

$$W_A\left(\frac{s_k}{0.9} : \Theta\right) = W_A\left(224.41 : 511^o C\right)$$
$$= \frac{100000}{210000}$$
$$0.476$$

따라서 크립-피로 손상은 선형합성에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$V_A + W_A = 0.0143 + 0.476$$
$$= 0.490$$

즉 크립-피로 손상은 그림 6 의 이직선 손상 허용치 이내로 평가되어 10,000 시간씩 10 회에 걸쳐 총 10 만시간의 유지시간이 주어질 때 칼리머 이차 배관은 크립-피로손상에 대한 건전성을 유지하는 것으로 나타났다.

이 평가결과를 표 4 및 그림 6 에서 보는 바와 같이 미국 ASME NH 의 절차를 따른 결과와 비교하였다. 표 4 에서 보는 바와 같이 RCC-MR 3600 을 따른 평가결과가 다소 보수적으로 나타났다. 이와 같은 차이가 발생한 것은 양 지침의 평가 절차상에 차이가 있는 것이 첫째 이유이고, 둘째는 RCC-MR RC-3600 은 간편 공식에 기초한 기초한 설계 지침(design by formula: 보수적)인 반면 ASME NH 는 일등급 부품에 대해 상세해석에 기초한 설계 지침(design by analysis)이기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결론

칼리머 이차배관에 관한 본 설계검토에서는 이미 수행한 바 있는 미국의 ASME section III subsection NH 를 따른 평가결과와 비교를 위해서 프랑스의 액체금속로 전용 이차배관 설계지침인 RCC-MR RC-3600 의 절차를 따라 평가를 수행하고 그 평가절차를 제시했다. 칼리머 IHTS 배관은 이차 배관이므로 2 등급 배관에 관한 지침을 적용해야 하지만 미국 및 일본 등의 고온구조 설계 지침에는 고온 이차배관에 대한 평가지침이 마련되어 있지 않다. 미국의 ASME NH 는 2 등급 배관이 아닌 일차 압력용기에 대한 지침이며 일본의 BDS 도 크립-피로에 관한 지침이 제시되어 있지 않은 일차배관에 관한 지침이다.

전체적으로 RCC-MR RC-3600 을 따라 평가를 수행한 결과 이 지침은 이차배관에 대한 크립-피로 손상 및 진행성 영구변형에 대해 적용이 용이하면서도 보수성이 다소 줄어든 평가결과를 내주는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, 1997.
2. ASME Section III Subsection NH, Class I components in elevated temperature service,1995.
3. 이형연, 김종범, 유봉," KALIMER IHTS 배관계의 배치 사례연구 및 설계평가,"한국원자력학회,' 98, 춘계학술대회, 2000. 한국원자력학회 추계학술대회, 2000.
4. RCC-MR Subsection B, Design and Construction Rule for FBR, AFCEN, 1985 version & 1987-,1993-addendum, 1985 .
5. RCC-MR RC-3600, Addendum No.2, part II, 1993.
6. 김종범, 이형연, 유봉, "미국, 프랑스, 일본의 액체금속로 구조물의 크립-피로 손상평가 방법 비교분석," 한국원자력학회,' 98 춘계학술대회, 1998.
7. Structural Design Guides for class 1 components for high temperature service, PNC, 1984
8. ASME Code Case N-253-6, Construction of class 2,3 components for elevated temp.1991.
9. ANSYS Version 5.6, Swanson, 1999.

Table 1. KALIMER 중간열전달계통 주요기기 제원

		Design feature of KALIMER
Large bored piping (Hot Leg/Cold Leg)	O.D Thickness Pipe spec. Radius of curvature	0.58 m 1.506 cm 20"SCH40 0.762 m
Small bored piping (Hot Leg/Cold Leg)	O.D Thickness Pipe spec. Radius of curvature	0.3556 m 1.113 cm 14"SCH40 0.5334 m
Horizontal distance of IHX-SG		11.5 m

Table 2. 고온 및 저온 배관 설계특성

	LMR 배관	LWR 배관
배관 운전조건	고온(>500°C), 저압 (3~8 bar)	저온 (<350°C), 고압(150 bar)
배관설계기준	열응력 >> 일차응력(내압) ⇒박육구조	열응력 ≈ 일차응력 (후육구조)
OD / t	60~80 (800mm / 11mm)*	~10 (700 mm / 70 mm)
지지구조물	Hanger / snubber(수직; 면진설계)**	Rigid /hanger/snubbers(수평,수직: 내진)
LBB 적용목적	안전성(심층방어 : 중 에너지배관)	경제성, 안전성(: 고 에너지 배관)
설계지침	ASME NH (미국), RCC-MR (프랑스)*** BDS(일본)	ASME NB 3600

* : Monju, EFR의 제원, CRBR : 610mm/12.7mm, KALIMER : 508 mm / 9.525mm

** : IHX support level 유지 목적(KALIMER)

*** : RB-3600 (일차배관), RC-3600 (이차배관)

Table 3. 각 설계지침에 따른 KALIMER IHTS 배관의 하중제어 응력제한치 검토결과

설계지침	events	관련코드 or equation	설계공식만족여부	적용범위
ASME NH-3200	Design Condition Level A,B Level D	Eqs. (1), (2) Eqs. (3),(4),(5) Eq.(12)	Yes Yes Yes	1 차 배관
ASME CC N-253	Design Condition Level A,B	Eq. (8) Eqs. (9),(10),(11)	Yes Yes	2 차 배관
BDS	Design Condition Level A,B	Eqs. (5.2.1), (5.2.2) Eqs. (5.2.3),(5.2.4)	Yes Yes	1 차 배관
RCC-MR RC-3600	Design Condition Level A,B	RC 3651.1.1 RC 3651.2	Yes Yes	2 차 배관

Table 4. KALIMER IHTS 배관의 크립-피로손상 평가결과 비교 (RCCC-MR / ASME NH)

	ASME NH-3200	RC-3600
e_t	0.006	0.00427
D_f	0.011	0.0033
D_c	0.131	0.500
$D_f + D_c$	0.142	0.5033

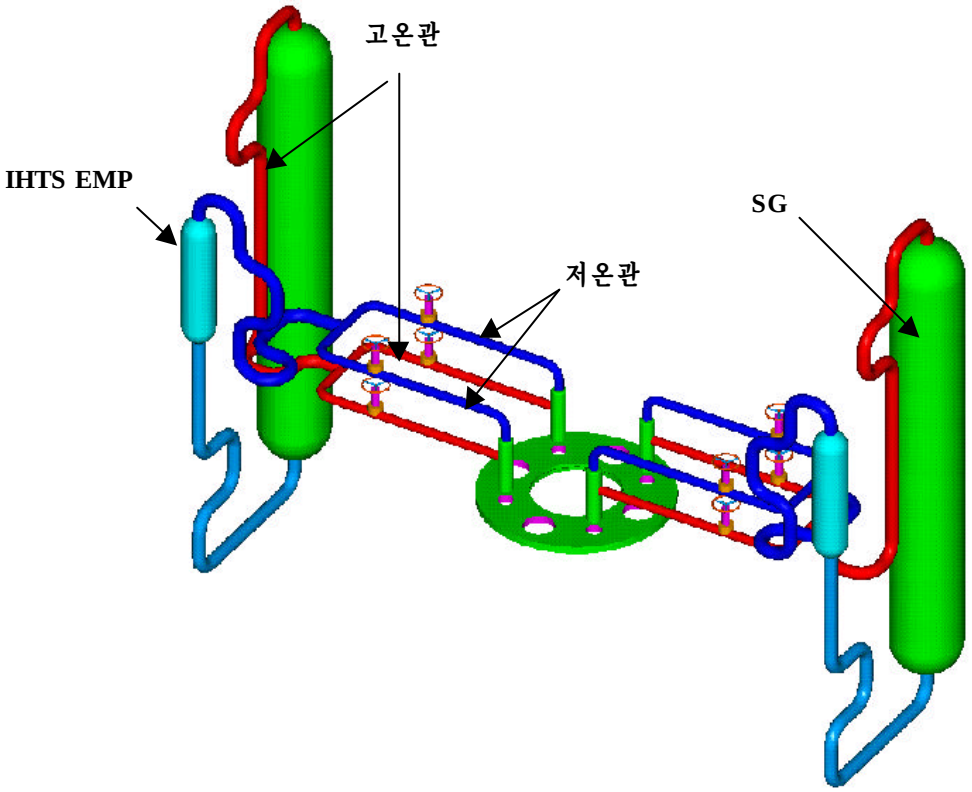

Fig. 1 KALIMER IHTS 배치도 (IHX-SG 중심거리 : 11.5m)

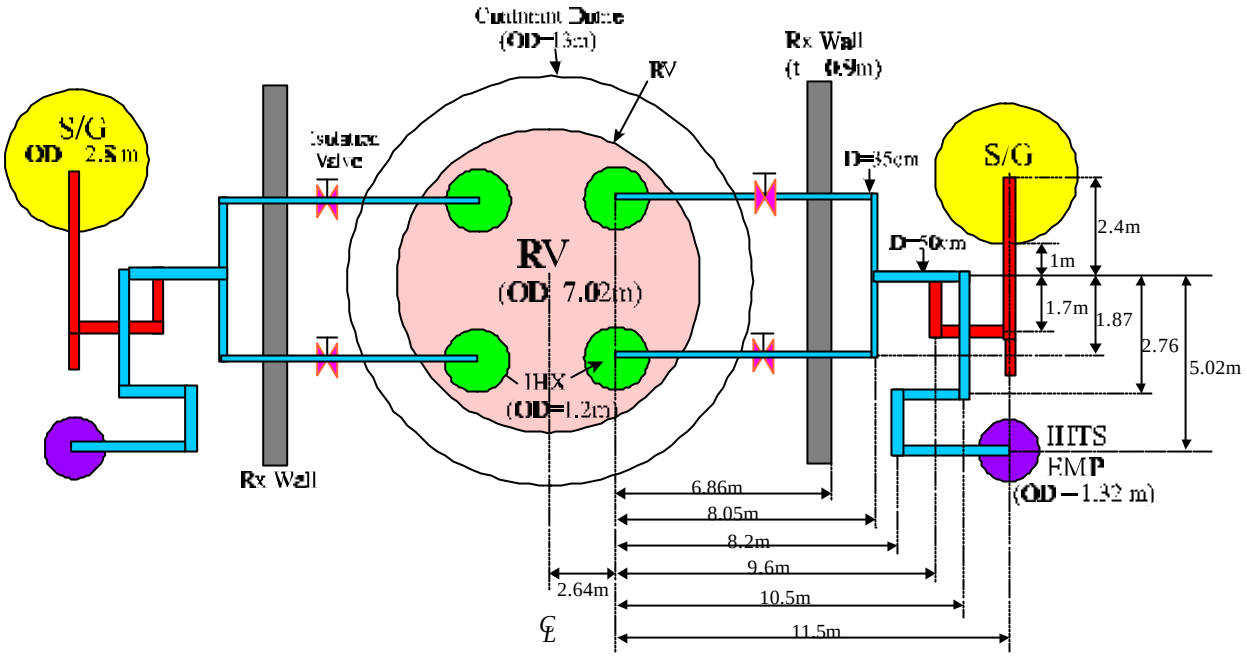

Fig. 3 KALIMER IHTS 배치도 (IHX-SG 중심거리 : 11.5m)

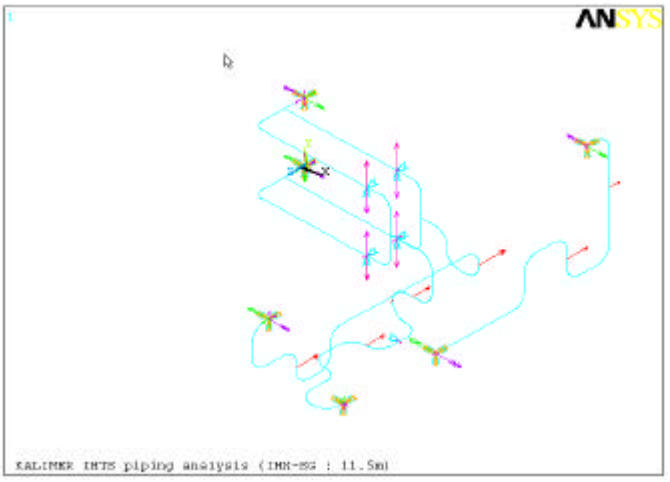

Fig. 4 탄성해석용 ANSYS 해석모델

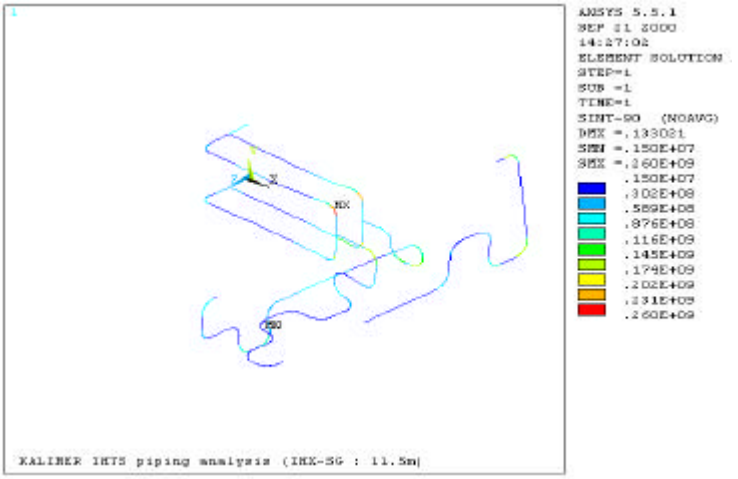

Fig. 5 팽창 응력해석결과

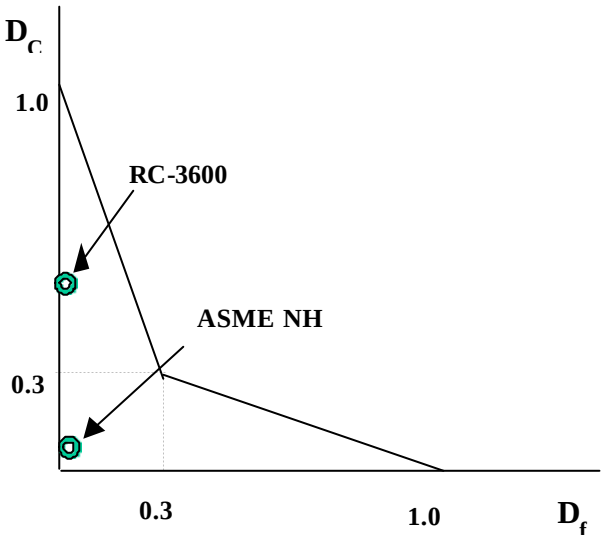

Fig. 6 설계지침에 따른 평가결과