



**2019 KEPIC-week (제17회)**

**2019. 8. 27(화)**

# **안전관련 열교환기 성능평가 개선 방안**



**한국수력원자력 중앙연구원**

**재료기술그룹 이호중 선임연구원**

**(leehojung@khnp.co.kr)**

1. 열교환기 성능시험 KEPIC 코드

2. 열교환기 성능관리 방법(EPRI TR-107397)

3. 열교환기 성능관리 개선 방안

---

1

# 열교환기 성능시험 KEPIC 코드

---

## ❖ 열교환기 성능평가 배경(미국)

1. **NRC Generic Letter 89-13** : 발전용원자로 운영자에게 기기냉각 해수가 공급되는 안전관련 열교환기에 대해 열제거 성능을 확인 할 수 있는 시험 프로그램 개발을 포함한 5가지 조치사항의 이행을 요구
2. **ASME OM-S/G Part 21** : 열교환기 가동중 성능시험 및 평가 방법 기술
3. **EPRI TR-107397** : 발전용원자로 운영자에게 열교환기 성능시험 및 감시를 위한 지침

## ❖ 국내 열교환기 성능평가

1. **고리1호기 계속운전 심사 및 가동원전 주기적안전성평가(PSR)** 심사시 안전성증진 사항으로 "**안전관련 열교환기 성능관리방안 수립**"을 요구
2. 보완조치 결과물로 국내 가동중 원전의 열교환기 성능관리를 위한 "**열교환기 통합관리 프로그램**"을 개발 및 적용중임

- KEPIC MG 일반기계 → MGC 열교환기
- KEPIC MO 원전가동중시험
  - MOF 냉각계통 성능시험
  - MOR 열교환기 가동중 성능시험  
(ASME OM Div. II Part 21 일치/IDT)

## ❖ MOR 열교환기 가동중 성능시험, 2015 Edi. (ASME OM Div. II Part 21 2012 Edi. 일치/IDT)

- MOR 1000 일반사항
- MOR 2000 용어정리
- MOR 3000 참고문헌
- MOR 4000 열교환기 선정 및 우선순위
- MOR 5000 기본요건
- MOR 6000 시험방법 선정
- MOR 7000 시험 및 감시조건
- MOR 8000 오차, 민감도, 및 불확도
- MOR 9000 허용기준
  
- MOR A000 시정조치
- MOR B000 기록 및 보관
  
- 부록 A : 진단
- 부록 B : 주의
- 부록 C : 예제

## ● MOR 1100 적용범위

- **열교환기 안전기능 수행능력을 평가**하기 위한 가동전 및 가동중 시험요건
- 원자로를 안전정지 상태로 정지, 안전정지 상태유지, 사고결과를 완화하는 안전기능 수행하는데 필요한 열교환기

## ● MOR 1200 제외사항

- 유동유발 진동, 구조 건전성, 내압력 능력, 부식 또는 침식, 기타 기계적 또는 구조적 성능 관련사항
- 열교환기에 대한 계통성능 영향, 관련 계통시험
- 증기발생기

## ● MOR 1300 발전사업자 책임

- 기술기준의 적용을 받을 열교환기를 명시
- 기술기준에 근거하여 열교환기에 **최고로 적절한 시험 또는 감시 방법 및 주기** 정함
- 프로그램 요건 수행 → 안전기능 수행능력을 책임져야 함

## ● MOR 5100 프로그램 요건

- 열교환기의 안전기능 수행능력을 보장하기 위해서 **프로그램을 제정**해야함
- 시험 또는 감시, 경향분석, 주기 및 허용기준 설정, 불확도 분석 및 시정조치 수행, 적절한 기록 등을 포함
- 시험이 선호되지만 시험을 할 수 없는 경우 기술적으로 충분히 증명되면 감시를 사용할 수 있음

## ● MOR 5200 가동전 요건\*

- 청정상태의 열교환기에서 수행
- 가동중시험 또는 감시 결과와 비교할 **기준선** 제공
- 가동전시험 또는 감시 방법은 가동중시험 또는 감시 방법과 같아야함

\* 기기와 관련한 건설 활동이 끝나고 핵 열에 의한 최초 전기 생산 이전 또는 운전 중인 발전소에서 기기의 초기운전 이전에 수행하는 시험



# MOR 5000 기본요건

## ● MOR 5300 가동중 요건

- 기존상태(as-found)를 결정하기 위하여 열교환기 열성능에 영향을 미치는 시정조치(예, 청소)를 하기 전에 수행 → 적절한 시험 또는 감시 주기를 설정하는 필수요소
- 열성능에 심각한 영구변화를 주는 구조적 변경을 하고 나서 가능하면 바로 기준선 가동중시험 또는 감시를 수행 → 기준선 설정, 추후 가동중시험 또는 감시 결과와 비교

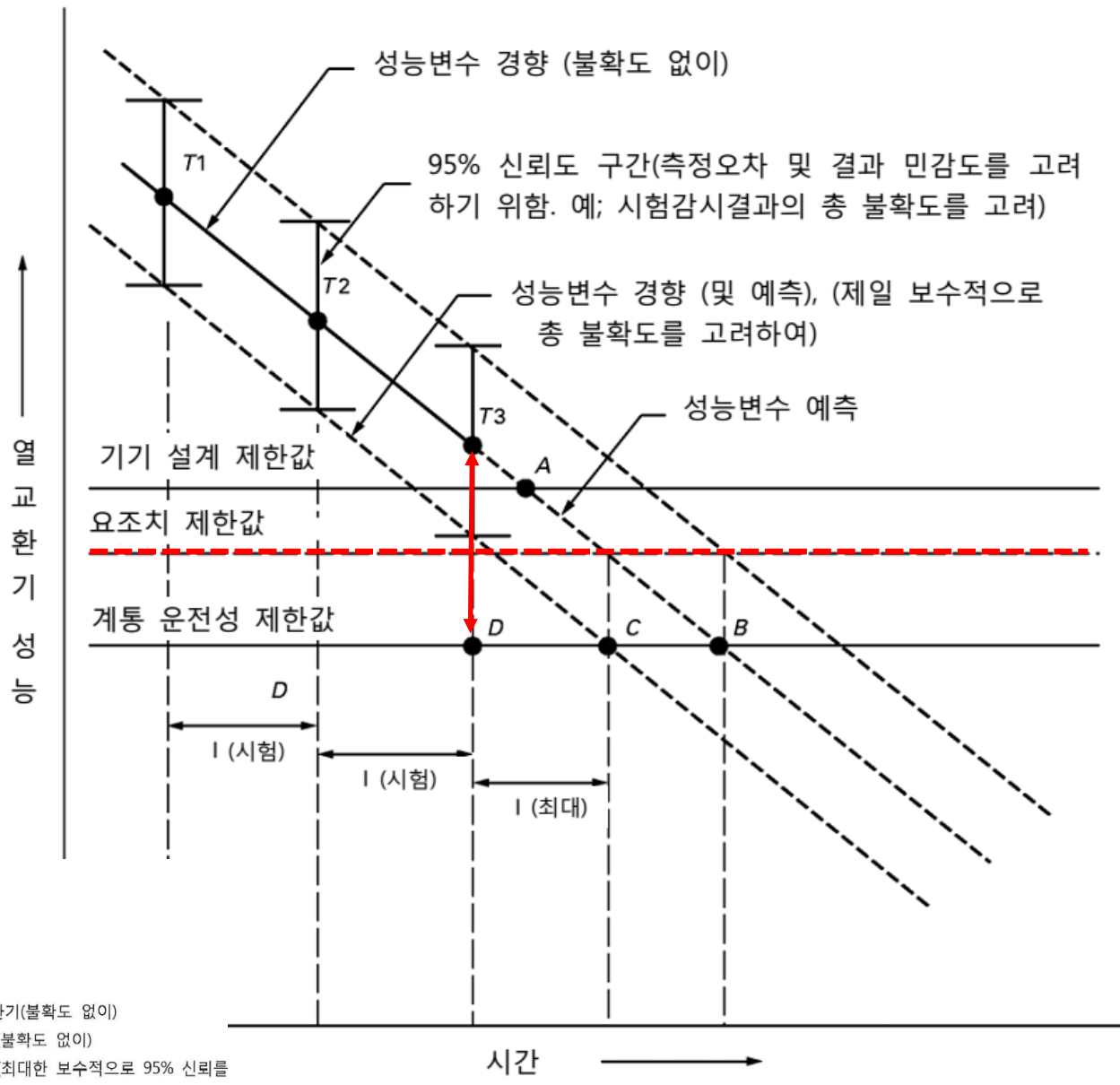
## ● MOR 5400 주기 요건

- 시험 또는 감시 주기는 **요조치 제한치(required action limit)\***를 넘지 않도록 설정
- 주기는 **10년**을 넘을 수 없음

\* 다음 계획된 시험 또는 감시 이전에 시정조치를 하지 않으면 계통 운전가능성 제한치를 넘게 될 열교환기 성능값

\*\* 계통 운전가능성 제한치 : 계통의 안전기능 수행능력을 보장하기 위해 열교환기가 필요로 하는 최소 열성능

# MOR 5000 기본요건



I(시험) = 시험 또는 감시 주기 이력

I(최대) = 시정조치가 없을 때 최대 시험 또는 감시 주기

I(최대) < I(시험)이면 시정조치를 해야한다.

T1, T2, T3 = 연속적인 시험 또는 감시 데이터 점

T3 = 최후 시험 또는 감시 데이터 점

A = 기기 데이터에 정해진 요건을 만족 못하는 열교환기(불확도 없이)

B = 안전기능 수행능력 요건을 만족 못하는 열교환기(불확도 없이)

C = 안전기능 수행능력 요건을 만족 못하는 열교환기(최대한 보수적으로 95% 신뢰를 적용하여 총불확도를 계산한 후)

T3-D = 현재 "절대" 운전여유도(불확도 없이)

<주기, 제한값 및 변수 경향>

# MOR 6000 방법 선정

- MOR 6100 성능 시험 방법
- MOR 6200 열전달계수 시험방법(상변화 없이)
- MOR 6300 열전달계수 시험방법(응축을 동반한)
- MOR 6400 과도상태 시험방법
- MOR 6500 온도유효성 시험방법
- MOR 6600 배치(Batch) 시험방법
- MOR 6700 온도차 감시방법
- MOR 6800 압력손실 감시방법
- MOR 6900 육안검사 감시방법

- **MOR 8100 측정오차** (측정오차 최소화 위한 고려사항)
  - 1) 계측기의 선정, 교정 및 배치(부록 C B000 항목 참조)
  - 2) 시험 및 감시 조건
  - 3) 계측기 응답시간, 수송지연 시간 및 기타 인자(부록 A 및 B 참조)
- **MOR 8400 계산 및 평가**
  - 시험 중 발생할 수 있는 시험조건의 변화 관련 오차를 줄이기 위해 **각 시험기간 마다 동시에 모든 측정 변수를 모아 표본추출**
  - 적정수의 데이터셀을 수집 하고(부록 C 의 C B120항 참조) 모순된 데이터를 버린 후에 **각 변수를 평균**

---

2

# 열교환기 성능평가 방법 (EPRI TR-107397)

---

## I. 열교환기 성능평가 방법론 개발

- 설계자료 및 운전특성 조사/분석
- 각종 기술문서, 최신 기법 적용

## II. 성능평가 프로그램 개발

- 불확실도 평가로 결과 신뢰성제고
- EPRI 프로그램 결과와 비교 검증

## III. 성능평가 판정기준 개발

- 설계성능 재평가
- 성능 여유도 분석 및 판정기준 개발

## IV. 성능평가 절차서 개발(76종)

- 시험조건 분석
- 성능평가 수행 및 결과 추이분석

## V. 건전성 유지관리 지침서 개발

- 열교환기 예방정비
- 열교환기 건전성평가
- 열교환기 정비검사
- 열교환기 와전류탐상검사
- 열교환기 누설검사

열교환기  
성능/건전성  
관리방안 수  
립

## 열교환기 통합관리 프로그램 개발

- 열교환기별 DB 구축 / 운용환경 및 구조설계
- 열교환기 성능/건전성관리(통합) 프로그램 개발

# 열교환기 성능평가 방법

열교환기 성능 평가 방법 및 제한요소(근거 : EPRI TR-107397)	
기능시험방법	시험조건의 온도, 유량은 제한조건의 온도, 유량과 일치
<b>열전달시험방법</b>	<b>상변화, 층/난류영역 변화가 없는 한 시험조건의 제한은 없음</b>
온도유효성시험방법	시험조건의 유량은 제한조건의 유량과 일치
온도차감시방법	<b>정성적인 평가방법으로 보조적인 방법임</b>
압력손실감시방법	
육안검사방법	

## ● 최적성능평가 방법 선정

- 성능시험이 발전소 운전에 영향 최소화
- 시험조건 임의 선정가능 방법
- 열전달시험방법론
  - 시험조건을 설정
  - 시험조건에서 열교환기의 **온도** 및 **유량**을 측정
  - 측정자료를 바탕으로 **오염저항**(Fouling Resistance)을 평가함
  - 오염저항값을 사용하여 **제한조건에서의 열교환기 열전달 성능 계산**

# 열교환기 통합관리 프로그램

위치 : KHNP 업무시스템/발전/열교환기 통합관리 프로그램



안국수력시험장

고리 원자력 제 1 발전소

HOME > 열교환기 > 열교환기계산

열교환기 (Heat Exchanger)

1호기 (Regenerative H/EX) | 2111-CS-AH00032 | 관리용계수: | 역설리압: | 찾아보기... | 불러오기

시행자 (종감형) | 계기 불확실도 (B3) | 공간편향 불확실도 (B2)

시행날짜 (2009.1.1)	관리번호	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도
시행날짜	관리번호	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도
공간편향	관리번호	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도

변수 입력 / 삭제

회수	시간 (10:00)	유량 (m³/hr)	입구온도 (°C)	출구온도 (°C)	유량 (m³/hr)	입구온도 (°C)	출구온도 (°C)	온도 (°C)	제거
1		5143	51.26	51.24	5143	51.27	51.26		<input type="checkbox"/>
2									<input type="checkbox"/>
3									<input type="checkbox"/>
4									<input type="checkbox"/>
5									<input type="checkbox"/>
6									<input type="checkbox"/>
7									<input type="checkbox"/>
8									<input type="checkbox"/>
9									<input type="checkbox"/>
10									<input type="checkbox"/>
11									<input type="checkbox"/>
12									<input type="checkbox"/>
13									<input type="checkbox"/>
14									<input type="checkbox"/>
15									<input type="checkbox"/>

평가



# 성능시험 대상 열교환기

□ 성능시험 대상기기 : 25개 호기 안전등급 열교환기 7종 290대(호기당 10~14대)

호기명	대상 열교환기
고리1 고리2~4	잔열제거, 재생, 유출수, 과잉(잉여)유출수, RCP 밀봉누출, CCW, SFP
신고리1,2 신고리3	정지냉각, 재생, 유출수, CCW, SFP
월성1,2 월성3,4	감속재, 감속재 정화, 냉각재 정화, 정지냉각, 탈기냉각기, CCW, SFB
신월성1,2	정지냉각 <sup>✓</sup> , 재생, 유출수, CCW <sup>✓</sup> , SFP
한빛1,2	잔열제거, 재생, 유출수, 잉여유출수, 밀봉수, CCW, SFP
한빛3,4 한빛5,6	정지냉각, 재생, 유출수, CCW, SFP
한울1,2	잔열제거, 재생, 유출수, 과잉유출수, 밀봉수, CCW, SFP
한울3,4 한울5,6	정지냉각, 재생, 유출수, CCW, SFP

# 열교환기 통합관리 프로그램

Microsoft Excel window: 열성1기기냉각수A데이터.xls [호환 모드]

Worksheet: 00 원자력발전소

1	00 원자력발전소															
2	호기	1	열교환기종류	8:감속재 (Moderator H/EX) 3:감속재정화 (Moderator Purification H/EX) 4:탈기냉각 (Degasser Cooler H/EX) 5:사용후연료저장조 (Spent Fuel Pool Storage Bay H/EX) 9:사용후연료보출조 (Spent Fuel Discharge & Reception Storage Bay H/EX) 6:냉각재정화 (Purification Cooler H/EX) 7:정지냉각 (Shutdown Cooler H/EX) 9:기타 냉각수(Recirculated Cooling Water H/EX)												
3	관악음것수	0	점검사유	1:주기점검 2:전열면적변동 3:기타												
4	측정일자	2008.11.03			날짜형식예: 2009.01.01											
5	측정간	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차	10차	11차	12차	13차	14차	15차
6	측정시간	11:20	11:21	11:22	11:23	11:24	11:25	11:26	11:27	11:28	11:29	11:30	11:31	11:32	11:33	11:34
7	중저주	유량														
8		입구온도														
9		출구온도														
10		온도														
11	전열관측	입구압력														
12		출구압력														
13		유량														
14		입구온도														
15	전열관측	출구온도														
16		입구압력														
17		출구압력														
18	유량과 온도계기의 불확실도(B1, %)						공간 방향 불확실도(B2, °C)									
19	중저주			전열관측			중저주			전열관측						
20	유량	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도	입구온도	출구온도	입구온도	출구온도	입구온도	출구온도				
21							°C 단위로 입력해 주십시오.									
23	0.1%에서 5.0%까지 0.1%단위로 입력해 주십시오.															
24	※ 사기 표에서 측정하지 않은 하루은 0으로 남겨 두시기 바랍니다.															

# 열교환기 통합관리 프로그램

열교환기 통합관리 프로그램 - Windows Internet Explorer

http://112.216.70.252/inputCalc.aspx

열교환기 통합관리 프로그램

한국수력원자력주 | 고리 원자력 제 1 발전소

HOME > 열교환기 > 성능평가 계산

안녕하세요!

종감동

로그인

성능평가

성능평가 계산

성능평가 기록

주기평가

추이분석

관리현황

PM Template

열교환기 DB

장비분석

장비이력

자료실

지침서

참고문헌

사용설명서

입력

결과

열교환기 (Heat Exchanger)

1호기 | 재생 (Regenerative H/EX) | 2111-CS-XHX0032 | 관막용겉수: | 역설파알: |

새로입력

시험자 (종감동)  기기 불확실도 (B1)  공간편향 불확실도 (B2)

관리번호	시험날짜 (2009.11)	점검사유	주기점검

전열관속	유량	입구온도	출구온도
	%	%	%
동체속	%	%	%

전열관속	입구온도	출구온도
	°C	°C
동체속	°C	°C

변수 입력 / 삭제

회수	시험시간 (10:00)	전열관속 입력변수			동체속 입력변수			온도 (°C)	제거
		유량 (m³/hr) R-125A	입구온도 (°C) T1-140	출구온도 (°C) T1-126	유량 (m³/hr) R-134	입구온도 (°C) T1-4508	출구온도 (°C) T1-127		
1									<input type="checkbox"/>
2									<input type="checkbox"/>
3									<input type="checkbox"/>
4									<input type="checkbox"/>
5									<input type="checkbox"/>
6									<input type="checkbox"/>
7									<input type="checkbox"/>
8									<input type="checkbox"/>
9									<input type="checkbox"/>
10									<input type="checkbox"/>
11									<input type="checkbox"/>
12									<input type="checkbox"/>
13									<input type="checkbox"/>
14									<input type="checkbox"/>
15									<input type="checkbox"/>

# 열교환기 통합관리 프로그램

열교환기 통합관리 프로그램 - Windows Internet Explorer

http://112.216.70.252/Record.aspx

영광원자력 제 1 발전소

성능평가기록

열교환기 번호: 1호기 재생 (Regenerative H/EX) 2311-8G-X001

관리번호: 23434342re

관리번호 목록

관리번호	측정일	점검사유	보기	삭제
23434342re	2011.04.13	주기점검		
2333223	2009.04.13	주기점검		
97986876546	2009.04.10	주기점검		
332132	2009.04.10	주기점검		
23332	2009.04.10	주기점검		

관리번호: 23434342re

기본정보 | 전열관속 측정값 | 동체속 측정값 | 결과

열교환기 (1호기)

열교환기 번호	2311-8G-X001	점검사유	주기점검
열교환기 형태	1	시험/입력자	홍길동(품질관리)
관막음 갯수	0	일력날짜	2011.04.13

관리

입력변수

전열관속		동체속	
입구온도(°C)	30.485	입구온도(°C)	286.369
출구온도(°C)	246.546	출구온도(°C)	100
질량유량(m <sup>3</sup> /hr)	21.4	질량유량(m <sup>3</sup> /hr)	24.177

요구열전달량(Kcal/hr) 2845080

계기 불확실도 (B1)

비고	전열관속	동체속
유량	2%	2%
입구온도	5%	5%
출구온도	5%	5%

공간편향 불확실도 (B2)

비고	전열관속	동체속
입구온도	0°C	0°C
출구온도	0°C	0°C

# 열교환기 통합관리 프로그램

열교환기 통합관리 프로그램 - Windows Internet Explorer

http://112.216.70.252/Period.aspx

한국수력원자력 고리 원자력 제 1 발전소

안녕하세요!  
로그아웃

성능평가

- > 성능평가 계산
- > 성능평가 기록
- ✓ 주기평가
- > 추이분석

관리현황

- > PM Template
- > 열교환기 DB
- > 정비분석
- > 정비이력

자료실

- > 지침서
- > 참고문헌
- > 사용설명서

주기평가

평가

열교환기 번호			
오염계수 (m <sup>2</sup> ·hr·°C/kal)		운전기간 (Day)	

관리번호	측정일	오염계수(m <sup>2</sup> ·hr·°C/kal)	운전기간(Day)	1회 이후의 평균과 최종값 중 큰 오염계수	오염률(m <sup>2</sup> ·°C/kal)	잔여시간(년)



# 열교환기 성능평가 방법

## ■ 오염계수 설정방법

- 열교환기 열전달량 계산

$$Q_P = W_P [C_P (T_1 - T_2)] = U \cdot A \cdot \text{LMTD}$$

Q : 열전달량(Cal/h), U : 총괄 열전달계수(Cal/h · cm<sup>2</sup> · C)

A : 열교환기 전열면적(cm<sup>2</sup>), LMTD : 대수평균온도차(C)

- 대수평균온도차(LMTD) 계산

$$\text{LMTD} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[ \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]}$$



**열전달량** : 전열관 벽으로 분리된 두 유체사이에 전달되는 열량

**총괄 열전달계수** : 단위 시간, 면적, 온도당 전달되는 열량, 내벽과 외벽의 열전달계수, 오염저항, 관벽저항 포함

**대수평균온도차** : 열교환기 동체측과 전열관측의 입출구 유체온도 차의 평균값

- LMTD 보정 : TEMA Figure T.3.2A ~ T3.2M 참조

$$F = \frac{\sqrt{(1+R^2)}}{R-1} \cdot \frac{\ln \left( \frac{1-PR}{1-P} \right)}{\ln \frac{2-P(1+R-\sqrt{1+R^2})}{2-P(1+R+\sqrt{1+R^2})}}$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

# 열교환기 성능평가 방법

## STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION



SEVENTH EDITION  
1988

TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC.  
25 North Broadway  
Tarrytown, New York 10591  
Richard C. Byrne, Secretary

Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association

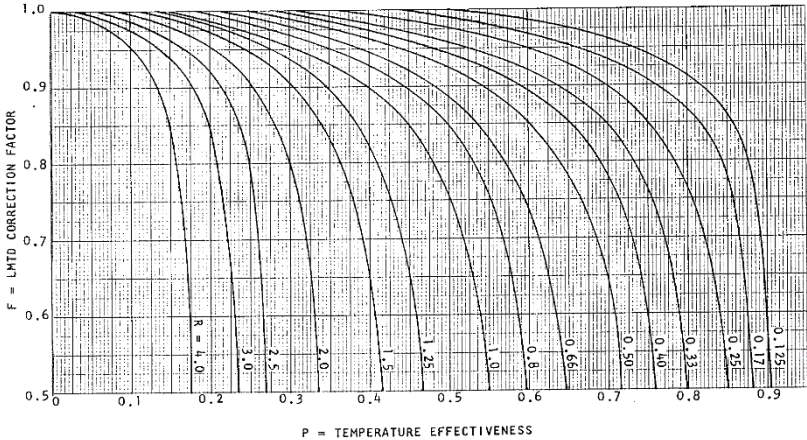
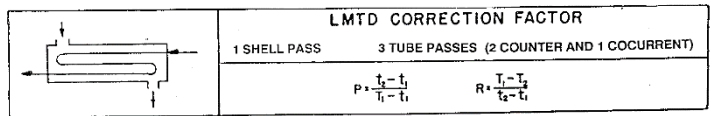


FIGURE T-3.26



**LMTD CORRECTION FACTOR**  
1 SHELL PASS      3 TUBE PASSES (2 COUNTER AND 1 COCURRENT)

$$P = \frac{t_2 - t_1}{t_1 - t_1}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association

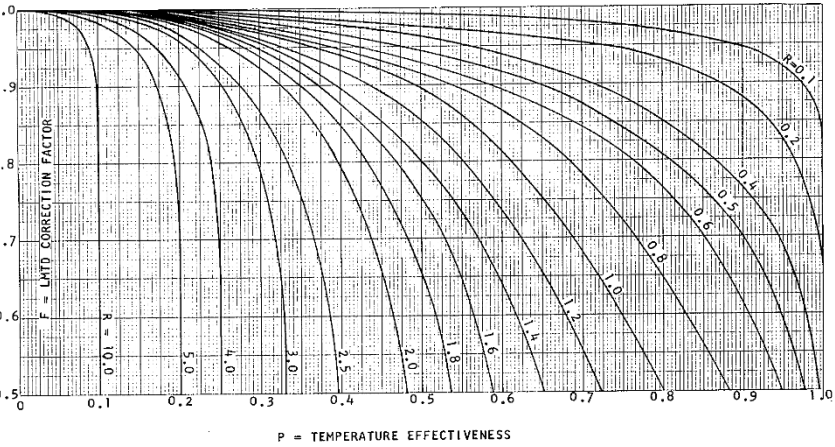
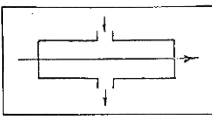


FIGURE T-3.24



**LMTD CORRECTION FACTOR**  
CROSS FLOW SHELL      1 TUBE PASS

$$P = \frac{t_2 - t_1}{t_1 - t_1}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

119

# 열교환기 성능평가 방법

## ■ 성능 주기시험 결정식

- 열전달량 기준값 설정 및 평가시점 열전달량 계산
- 3회 주기시험결과 분석
  - 초기값과 1회 이후 평균값과 최종값 중 큰 열전달량 비교
  - 운전기간 계산
- 주기시험 기간 계산

$$D_R = \frac{r_{t,C} - r_{t,A}}{R_t \times S.F. \times 365}$$

$$R_t = \frac{r_{t,1} - r_{t,2}}{D}$$

$r_{t,A}$ : 허용기준 열전달량,  $r_{t,C}$ : 평가시점 열전달량  
 $R_t$ : 단위시간당 열전달량 감소율, S.F.: 안전율  
 $r_{t,2}$ : 1회 평가시의 열전달량  
 $r_{t,1}$ : 1회 이후의 평균값과 최종값 중 큰 열전달량  
 $D_R$ : 시험주기,  $D$ : 운전기간



---

3

# 열교환기 성능관리 개선 방안

---

# 열교환기 성능평가 프로그램 유지/보수 관리 개선방안

## 개선방안

규제기관/발전소 현장의 요구사항을 빠르게 반영하며  
시스템 호환성을 유지할 수 있도록 **프로그램 보완**

### **판형 열교환기 관련 사항**

- 1) 성능평가 상관식 문헌 검토 및 보완
- 2) 제작사 프로그램과 비교 평가→ 열교환기 프로그램에 반영

주기 산정방법 및 측정 횟수 등 **규제기관 협의 결과를  
프로그램에 추가 반영**

각 열교환기별 성능평가 계산서 검토  
(반복계산 전 1회 수기계산)

The slide features a central white rectangular area containing the text. This area is framed by two horizontal bars, one above and one below, each composed of three segments: light blue, green, and dark blue. On either side of the central white area, there are vertical panels with a light blue diagonal hatching pattern.

**THANK  
YOU**