

技術資料

使用後 核燃料 運送 및 貯藏用器用 球狀黑鉛鑄鐵

柳 成 坤

Ductile Cast Iron as a Material for Spent-Nuclear Fuel Transport and Storage Casks

S. K. Yu

1. 序 論

原子力發電所가稼動을 한 後 1~2年 동안 使用 核燃料의 1/3~1/4 假量은 交替되어야 하며 그후 每年 同量의 核燃料를 補充해 주어야 한다. 이 使用後 核燃料는 再生工場으로 옮겨져 Pu, U 또는 放射能同位元素들을 다시 수거 하거나 아니면 땅 속에 묻게 된다. 이렇게 放射能을 가진 使用後 核燃料의 運送 및 貯藏用器(Cask, 그림 1)는 IAEA (International Atomic Energy Agency)規定에 明示된 通常運送條件과 假想事故條件에 견딜 수 있어야 한다. 이러한 目的을 위해 從來부터 Stainless Steel-Lead, 또는 鍛造鋼으로 만든 cask를 使用하여 왔고 이러한 cask들은 gamma 및 中性子放射,

그리고 核分裂時의 生成物放出遮斷에 상당한 效果를 나타내었다. 最近에는 經濟的 面에서 상당한 效果가 있는 球狀黑鉛鑄鐵을 cask製造에 利用하려는 움직임이 美國, 西獨, 日本 等地에서 活潑하게 進行되고 있는 실정이다.

本 技術資料는 球狀黑鉛鑄鐵로 cask를 製造할 때 鑄造上 고려하여야 할 점과 破壞力學적 觀點에 關해 다루고자 한다.

2. Cask의 標準具備條件

使用後 核燃料는 트럭이나 기차를 이용하여 運送한다(그림 2).

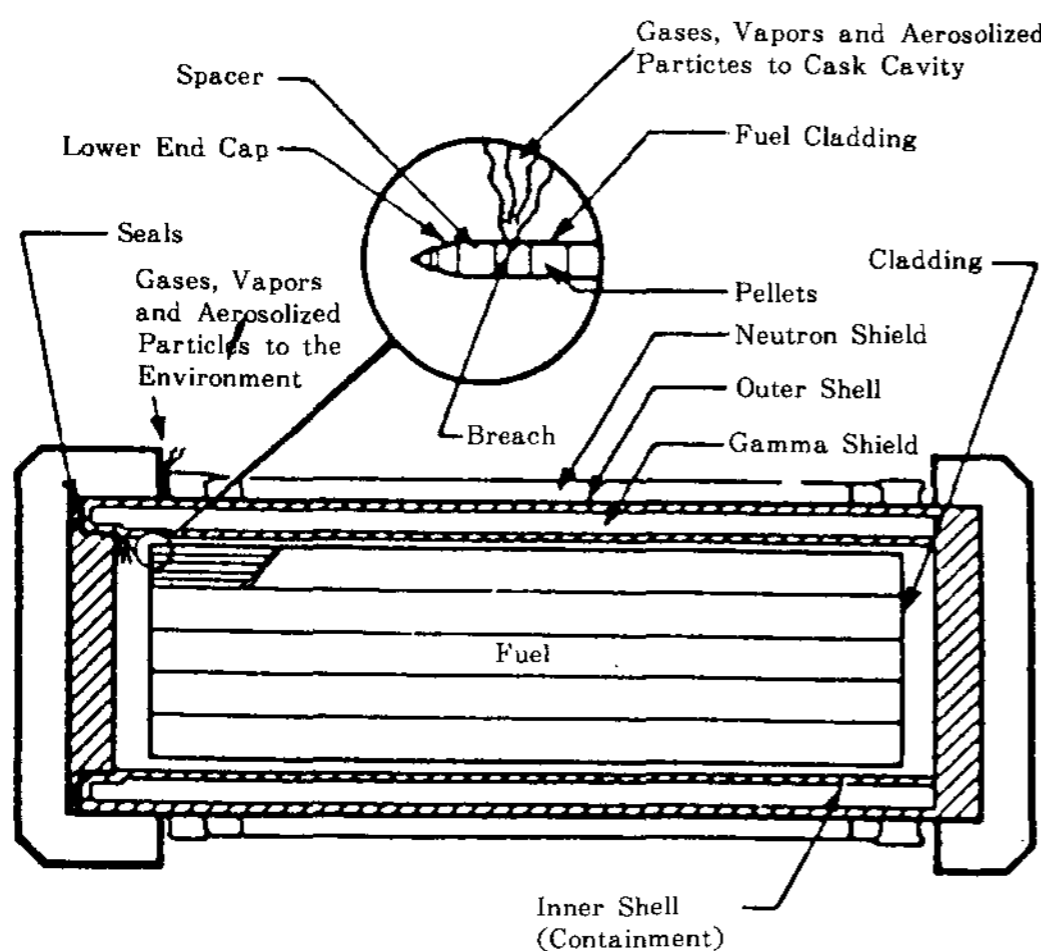


그림 1. Cutway diagram of a shipping cask showing the principal components.

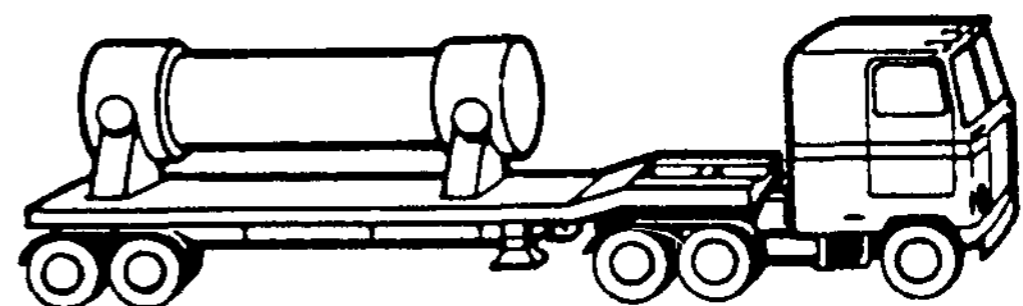


그림 2. Cask transportation truck.

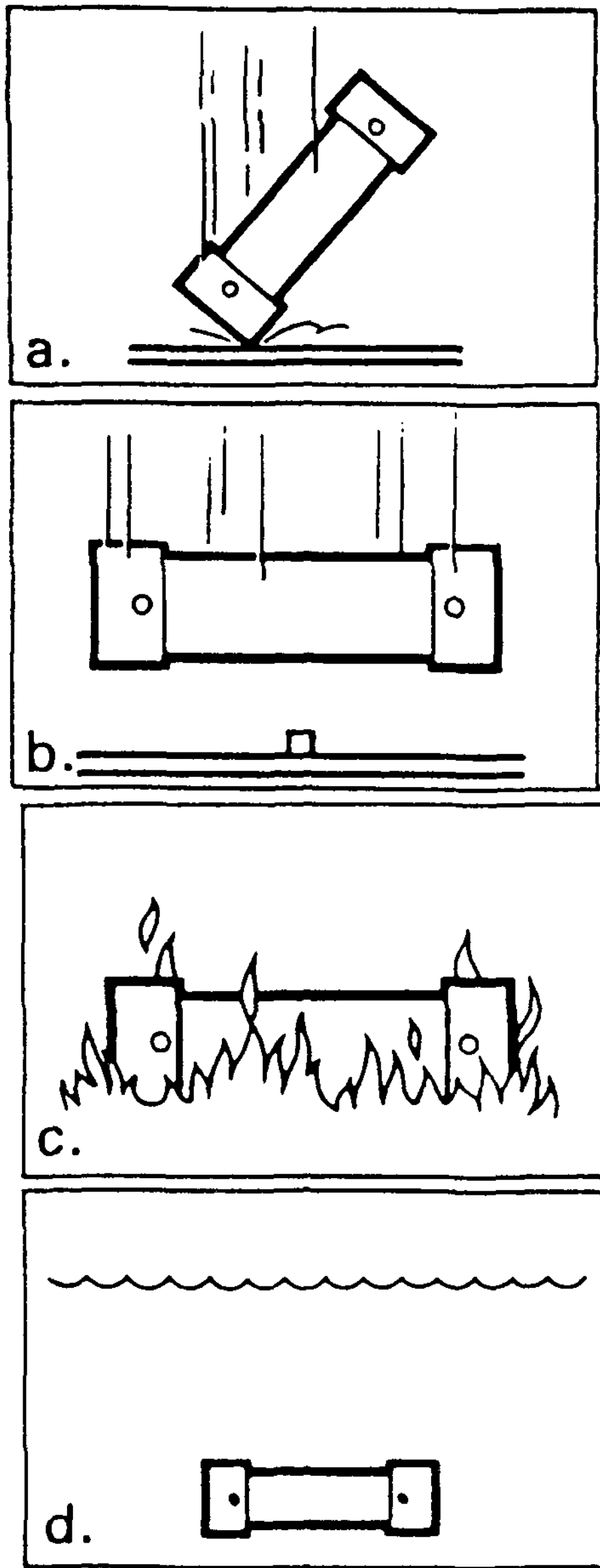
IAEA는 다음과 같이 cask의 通常運送條件과 假想事故條件을 明示하고 있다.

- 通常運送條件 -

- - 40 °F ~ 130 °F 溫度變化에 露出
- 1 atm에서 0.5 atm으로 氣壓變化
- 通常的震動
- 水分분사
- 外力의 作用

- 假想事故條件(그림 3) -

- 30 feet 落下試驗
- 6 inch 直徑을 가진 鋼棒突出部上의 40 inch 落



**Impact**

**Free Drop (a)** — The cask drops 30 feet onto a flat, horizontal, unyielding surface so that it strikes at its weakest point.

**Puncture (b)** — The cask drops 40 inches onto a 6-inch-diameter steel bar at least 8 inches long; the bar strikes the cask at its most vulnerable spot.

**Fire (c)**

After the impact tests, the cask is totally engulfed in a 1475°F thermal environment for 30 minutes.

**Water Immersion (d)**

The cask is completely submerged under at least 3 feet of water for 8 hours. A separate cask is completely immersed under 50 feet of water for 8 hours.

그림 3. Hypothetical-accident conditions of cask.

下試驗

- 1475 °F 火焰속의 30分間 露出試驗
- 3 feet 水深下의 潛水試驗

위의 條件下에서 放射能物質의 漏出, cask의 變形이 없어야 한다.

3. 球狀黑鉛鑄鐵로 cask 鑄造時 고려해야 할 점

最近 鑄造技術의 發達에 힘입어 벽두께가 200mm

以上이고 상당한 延性を 지닌 球狀黑鉛鑄鐵의 鑄造도 가능하게 되었다. 이 球狀黑鉛鑄鐵의 機械的 및 物理的性質은 주로 基地組織, 球狀黑鉛의 形態 및 分布에 영향을 받으며 化學組成 및 凝固速度가 基地組織, 球狀黑鉛의 形態를 結定한다. 따라서 cask 鑄造時 다음 사항에 대해서 반드시 고려하여야 한다.

1-1. 熔解 및 鑄造節次

- 使用되는 爐의 形態 및 容量

- Heat當 生産되는 cask數量
- 使用되는 鑄型의 形態, 押湯 및 湯口의 위치
- S, P, Mn 元素들을 조절하기 위한 方法
- 裝入原料種類 및 이들이 지녀야 할 條件
- 長期的으로 均質의 裝入原料가 공급될 수 있는 妥當性
- 接種-接種劑의 種類, 量, 接種時期
- 球狀黑鉛處理-球狀化劑의 種類, 球狀化劑 添加方法

1-2. 熱處理

- 적용되는 熱處理의 種類 및 各熱處理目的
- 熱處理後의 最終基地組織 및 이 基地組織이 채택된 이유
- 球狀黑鉛의 크기 및 分布

1-3. 顯微鏡組織과 實制品(cask)간의 均一性

- 試片이 cask特性을 대표한다는 확증
- Cask두께 위치에 따른 顯微鏡組織 및 諸性質의 變化測定

1-4. 化學, 物理, 機械的性質測定-各性質測定에

있어서 試片採取節次(試片의 形態, 試片採取위치, 試片數), 試片分析方法에 대한 사항

- 化學組成-分析되는 元素의 種類

- 여러가지 物理的性質
- 放射能분위기에서의 치수安定
- 大氣, 土壤, 염기성분위기에서의 腐蝕에 대한 저항-general corrosion, pitting, crevice corrosion, stress-corrosion cracking, hydrogen embrittlement, galvanic corrosion resistance
- 機械的性質-tensile, fatigue, thermal fatigue, dynamic loading
- 韌性-charpy V-notch impact property, fracture toughness, dynamic-tear property, crack-arrest behavior

4. 破壞力學的 觀點에서의 球狀黑鉛鑄鐵 cask

전술한 바와 같이 cask는 30 feet 落下試驗 및 40 inch 鋼棒突出部試驗을 거치는데 이로 말미암아 脆性破壞(brittle fracture)가 發生하지 않도록 하기위해 破壞力學的 觀點에서 設計해야 한다. 球狀黑鉛鑄鐵의 等級에 관해서는 美國의 ASTM A-536 과 西獨의 DIN-1693에 明示되어있다(표 1 및 2 참조).

球狀黑鉛鑄鐵의 주된 缺陷은 gas porosity, shrinkage cavity, retained carbide 等이며 이들은 일정한 크기를 가지고 있다. 30 feet 落下試驗時 cask

표 1 ASTM A-536 grades of nodular cast iron.

Grade	Ultimate Tensile Strength(S <sub>u</sub> ) (MPa)	Yield Strength (S <sub>y</sub> ) (MPa)	Elongation (ε) (%)	Matrix
60-40-18	414	276	18	Ferritic
65-45-12	448	310	12	Ferritic/Pearlitic
80-55-06	552	379	6	Pearlitic/Ferritic
100-70-03	689	683	3	Pearlitic
120-90-02	827	621	2	Tempered Martensitic

표 2 DIN-1693(federal republic of germany) grades of nodular cast iron

Grade	Ultimate Tensile Strength(S <sub>u</sub> ) (MPa)	Yield Strength (S <sub>y</sub> ) (MPa)	Elongation (ε) (%)	Matrix
GGG-40	400	250	15	Ferritic
GGG-40.3	400	250	18	Ferritic
GGG-50	500	320	7	Pearlitic/Ferritic
GGG-60	600	380	3	Pearlitic
GGG-70	700	440	2	Pearlitic
GGG-80	800	500	2	Tempered Martensitic

에서 가장 응력을 많이 받는 부분에 이들 缺陷이 존재하여 cask벽을 통하여 crack이 發生함은 결코 없어야 한다. Cask에 존재하는 이들 缺陷을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. 球狀黑鉛鑄鐵 cask의 材質은 주로 ASTM 60-40-18 또는 GGG 40 등이며 fracture toughness는 約  $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  ( $54 \text{ Ksi}\sqrt{\text{in}}$ )이고 yield strength는 約  $250\sim 276 \text{ MPa}$  ( $36\sim$

40 Ksi)이다. 30 feet 落下時 가장 충격을 받는 부분은 cask길이 中心部の 表面이며, 이때 충격에 의한 最高應力은  $42\sim 126 \text{ MPa}$  ( $6.1\sim 18.3 \text{ Ksi}$ )정도로 yield strength보다 훨씬 낮은 값을 가진다. 이 경우 crack tip에서의 stress intensity factor  $K_I$ 는 linear-elastic fracture mechanics(LEFM)에 의해

$$K_I = 1.12 S \sqrt{\pi a / Q}$$

where S : applied stress

a : crack depth

Q : shape factor

$$= \sqrt{\Phi^2 - 0.212(S^2/Sy^2)}$$

$$\Phi = \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \frac{a^2}{C^2}$$

Sy : yield strength

C : crack length

으로 나타내어 진다. 가해진 응력이 100 및 276MPa 일 때  $K_I$ -crack depth의 관계를 그림 5 및 6에 나타내고 있다. 破壞強度가  $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 球狀黑鉛鑄鐵 cask에 있어서 applied stress-aspect ratio (a/c)-critical crack depth(ccd)의 관계를 표 3에 나타내고 있다.

一般的으로 10 mm크기의 缺陷은 非破壞試驗으로 감지되므로 표 3에 나타난 cask 缺陷들은 모두 非破壞試驗을 통하여 사전에 감지할 수 있다. 最小破壞強度와 ccd와의 관계를 그림 7에 나타내고 있다. 따라서 비록 非破壞試驗을 통해 측정가능한 缺陷이 球狀黑鉛鑄鐵 cask에 존재하더라도 30 feet 落下試驗時 crack이 cask벽을 따라 전파되지 않음

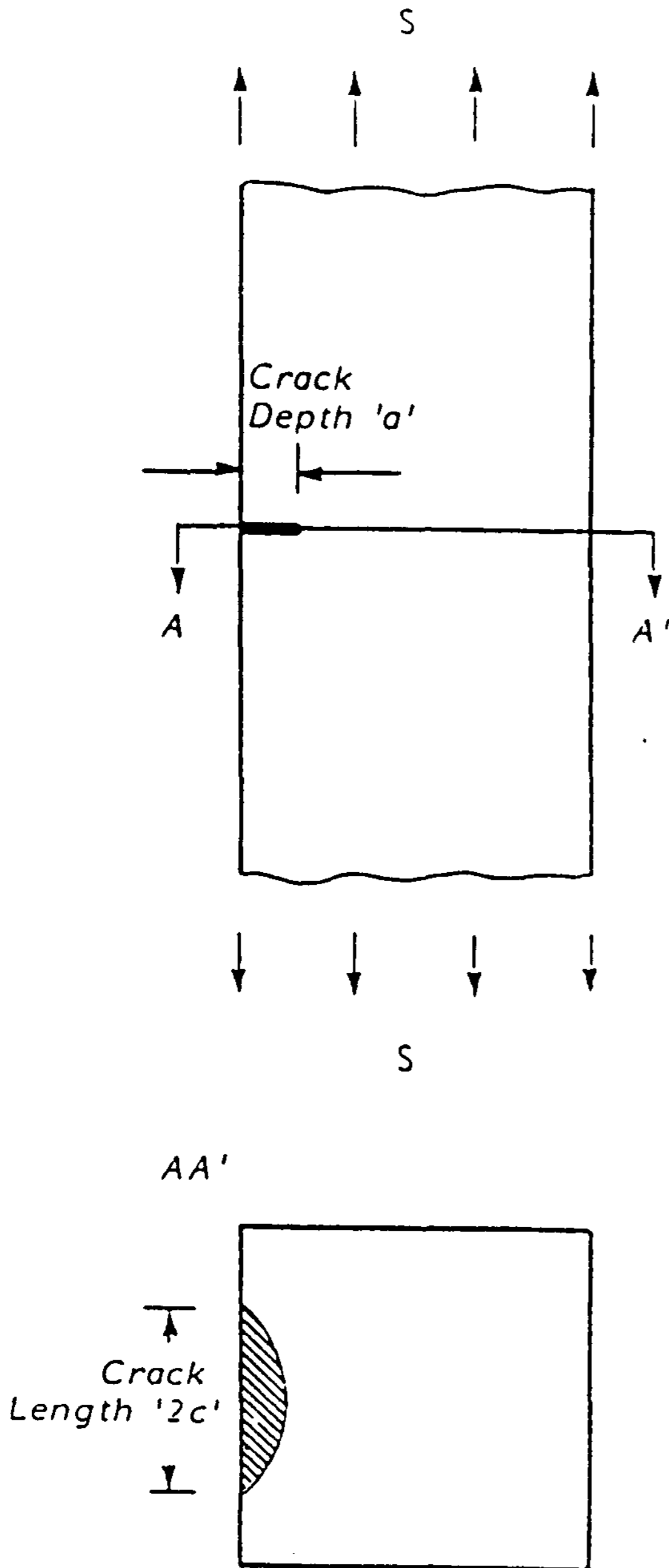


그림 4. Flaw evaluation model.

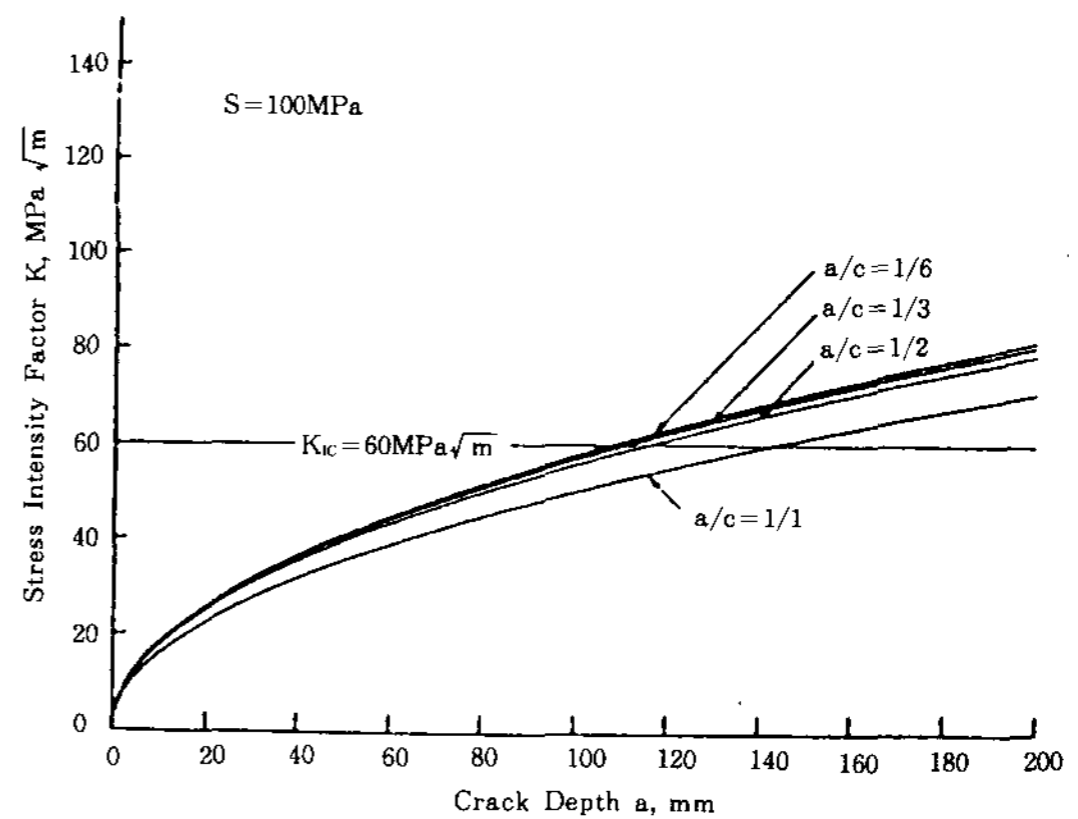


그림 5. Stress intensity VS crack depth : 100 MPa

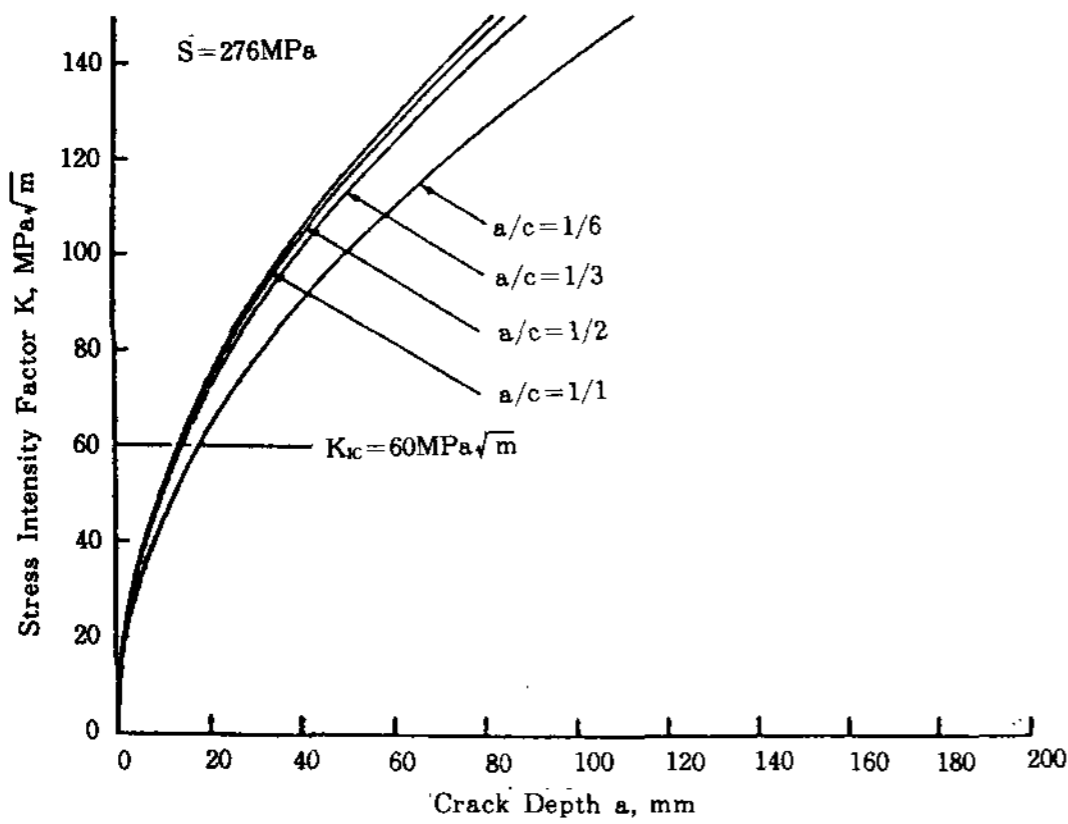


그림 6. Stress intensity VS crack depth : 276 MPa.

표 3 Predicted Critical Crack Depth for  $K_{IC} = 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Applied Stress	Aspect Ratio (a/c)			
	1/1	1/2	1/3	1/6
100 MPa	143 mm	115 mm	111 mm	107 mm
150 MPa	62 mm	50 mm	47 mm	46 mm
200 MPa	35 mm	28 mm	27 mm	26 mm
250 MPa	23 mm	18 mm	17 mm	17 mm
276 MPa	18 mm	14 mm	13 mm	13 mm

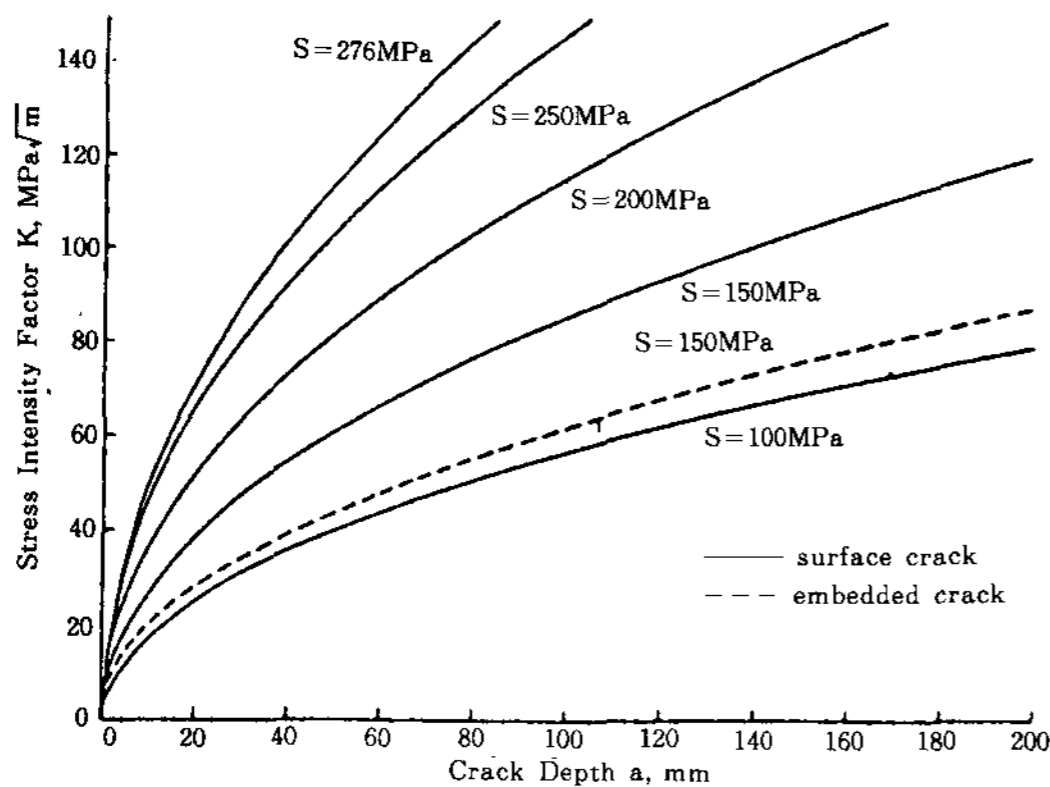


그림 7. Stress intensity VS crack depth : Summary.

을 알 수 있다.

### 5. 結 言

現在 西獨 Siempelkamp會社가 球狀黑鉛鑄鐵 cask를 生産해서 이미 西獨面許를 취득하고 있다. 西獨에서는 Department of Transportation에서 cask 面許를 취급하며 BAM(Federal Installation for Material Research and Testing)에서 cask材料 및 構造上의 安全問題를 전담한다. 美國에서는 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 球狀黑鉛鑄鐵 cask의 使用 妥當性を 담당하고 있으며 Oak Ridge National Lab.에서 이에 관한 研究를 수행하고 있다. 美國에서 cask面許取得要件은 西獨보다 까다로운 관계로 이 西獨産 球狀黑鉛鑄鐵 cask는 아직 美國面許를 取得하지 못하고 있는 실정이며 美國에서도 아직 球狀黑鉛鑄鐵 cask를 실제 使用하고 있지는 않다.

### 참 고 문 헌

1. R. D. Mindlin, "Dynamics of Package Cushioning," *The Bell System Technical Journal*, Vol. XXIV, 1945, pp. 353-467
2. N. Lazardis, R. K. Nanstad, F. J. Worzala, and C. R. Loper, Jr., "Determination of the Fracture Behavior of Ductile Cast Irons for Failure Analysis Purposes," *AFS Transactions*, pp. 277-288, 1977.
3. M. Huerta and H. R. Yoshimura, "A Crash Test of a Nuclear Spent-Fuel Cask and Truck Transport System," SAND77-0419, Sandia Laboratories, Albuquerque, NM, January 1978.
4. M. Huerta, "Analytical and Scale Modeling Techniques for Predicting the Response of Spent-Nuclear-Fuel-Shipping Systems Involved in Severe Transportation Accidents," in *Proc. of 5th Intern. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, pp. 454-462, Las Vegas, NV, May 7-12, 1978 (PATRAM 78).
5. A. W. Dennis, "Predicted Occurrence Rate of Severe Transportation Accidents Involving Large Casks," in *Proc. of the 5th Intern.*

- Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, Las Vegas, NV, May 7-12, 1978 (PATRAM 78).
6. J. M. Motz, "Fracture Mechanical Properties in Heavy Sections of Ferritic Nodular Iron Castings," *Proc. of the Sixth Intern. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, Berlin, November 1980.
  7. P. McConnell and R. A. Wullaert, "Fracture Toughness Evaluation of Nodular-Graphite cast Iron for Nuclear Shipping Cask Applications," FCC 10-2-2, Fracture Control Corporation, Goleta, CA, October 1982.
  8. J. Rollins, "Properties of Nodular Ductile Graphite Cast Iron Used in GNS-Manufactured Spent Fuel Casks," in *Proc. of Intern. symp. on Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, (PATRAM 83) New Orleans, LA, May 15-20, 1983.
  9. B. Mukherjee and Y. J. Kim, "Material Requirement and Design Criterial for Preventing Brittle Fracture in Nodular Cast Iron Spent Fuel Shipping Containers," Report No. 84-376-K, Ontario Hydro Research Division, Toronto, Canada, November 16, 1984
  10. P. McConnell and W. Sheckherd, "High-Loading Rate Fracture Toughness of Nodular Cost Iron," SAND85-7259, FCC 84-12-3R, Sandia Laboratories, Albuquerque, NM, December 1984
  11. K. E. Wieser, B. Droste, R. Helms, J. Ziebs, and J. M. Hemptenmacher, "Ductile Cast Iron With Nodular Graphite as a Material for Spent-Fuel Transport and Storage Casks," Bundesanstalt fur Materialprufung (BAM), Berlin, March 1985.
  12. H. Zakaku, "Review of Material Feasibility for Ductile Cast Iron Cask in Japan," Notes transmitted to Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, October 1985.
  13. R. J. Salzbrenner, J. A. Van Den Aryle, T. J. Lutz, and W. J. Bradley, "Fracture Toughness Testing of Ductile Cast Irons," pp. 328-345 in *Proc. Fracture Mechanics, Sixteenth Symposium, ASTM STP 868*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985
  14. M. W. Schwartz, "A Study on Ductile and Brittle Failure Design Criteria for Ductile Cast Iron Spent-Fuel Shipping Containers," NUREG/CR-3760, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, January 1986
  15. M. W. Schwartz, "A Study on Fabrication Criterial for Ductile Cast Iron Spent-Fuel Shipping Containers," NUREG/CR4363, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, February 1986.
  16. "NRC Concerns Regarding the Use of Nodular Cast Iron for Spent Fuel Shipping Casks," U. S. Nuclear Regulatroy Commission, Internal Notes, June 10, 1986.
  17. S. Mochizuki and H. Matsushita, "Physical Properties of Nodular Cast Iron for Shipping Containers and Safety Analysis by Fracture Mechanics," *Nuclear Engineering and Design*, **94** (3), pp. 309-316, 1986.
  18. W. L. Bradley, K. E. McKinney, and P. C. Gerhardt, Jr., "Fracture Toughness of Ductile Iron and Cast Steel," pp. 75-94 in *Fracture Mechanics: Seventeenth Symposium*, ASTM STP 905, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1986.
  19. P. McConnell and P. Lombrozo, "Ductile Iron Data Base: Correlations Between Microstructure and Fracture Toughness ;" (Background Document for Draft ASTM Ductile Iron Specification) SAND86-7163, TTC-0710, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, February 1987.
  20. Letter from C. E. Pugh, ORNL, to C. Z. Serpan, Jr., NRC, dated April 23, 1987, enclosing questions concerning nodular cast iron spent-fuel shipping casks formulated by ORNL and Battelle Columbus Division for transmittal to BAM, FRG, prior to seminar scheduled for June 1987.
  21. R. Helms and J. Ziebs, "Nodular Cast Iron

Containers-Results of Materials Evaluations," paper presented at the BAM Seminar on Containers for Radioactive Materials

Made From Nodular Cast Iron," June 9-10, 1987, Berlin, FRG, (Figures only).

## 國內外鑄物關係行事

### 1990

**3월 20일 ~ 3월 22일**

BCIRA International Conference  
on "Progress in Efficient Melting of  
Cast Irons  
University of Warwick,  
Conventry, England

**4월 2일 ~ 4월 6일**

METCUT 90  
National Exhibition Centre  
Birmingham, England

**4월 21일 ~ 4월 24일**

American Foundrymen's Society  
94th Casting Congress and  
CASTEXPO. 90  
Detoit, MI. U. S. A.

**5월 21일 ~ 5월 22일**

Foundry Asia 90. Conference and  
Exhibition  
Hilton International Hotel  
Hong Kong

**5월 23일 ~ 5월 24일**

日本鑄物協會  
第117回全國講演大會  
名古屋, 日本

**5월 27일 ~ 5월 30일**

European Investment Caster's  
Federation  
European Investment Casting  
Conference  
Lugano, Switzerland

**5월 29일 ~ 5월 31일**

European Lead Development  
Committee  
Tenth Internation Lead Conference  
Nice, France

**9월 23일 ~ 9월 26일**

CIATF  
57th World Foundry Congress  
Osaka, Japan